

国立公害研究所研究報告 第6号

Research Report from the National Institute for Environmental Studies No. 6, 1979.

R-6-'79

陸水域の富栄養化に関する 総合研究(Ⅱ)

—霞ヶ浦を中心として—

昭和53年度

Man Activity and Aquatic Environment
—with special references to Lake Kasumigaura
Progress Report in 1977—1978

THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

環境庁 国立公害研究所

序

このたび霞ヶ浦を中心とした“陸水域の富栄養化に関する総合研究”の第2集をとりまとめて刊行することとなった。これは、国立公害研究所が創設されていらい、超部的な研究プロジェクトとしてとりあげてきたテーマの一つで、所外の多くの研究者の御参加、御協力を仰ぎつゝ、当研究所としても少なくとも五つの研究部門に属するいろいろな分野の専門家が、それぞれの得意とする領域を分担して参画してきたものである。そこで、この報告集にもみられるように、従来のこの種の研究に比べてさらに広範囲に、総合的に企画され、しかも各領域についての基本的な掘り下げが実現されたことは喜ばしい。

いわゆる公害にもいろいろな起源により、いろいろなカテゴリーに属するものがあるが、陸水域や海域の富栄養化の現象は、人間が集まって生活し、活動をしている限りさけて通ることのできない重要な問題である。しかも、少数の専門家がその一面のみを調べただけではその実態も解決策もつかめない。有機化学、無機化学、物理学、生物学、生態学、動植物の分類学、水文学など、いろいろな分野の研究者が同時に同じ舟に乗り、あるいは空を飛び、そして富栄養化という巨象のいろんな部分をしらべて、その全容を組立てることを試みた。しかし、われわれの研究はまだ群盲が巨象の体のごく一部にふれているにすぎないものと思われる。

この報告書は1977年度の研究成果をまとめた第1集に次いで、主として1978年中に行われた研究を中間報告としてとりまとめ、今後の進展のための一つの基盤にしたいと考えたものである。各方面の専門家の方々から御批判を仰ぎ、さらに御協力をいたさいて将来への発展を期したい。

1979年1月

国立公害研究所長

佐々学

目 次

序 (佐々 学)

1. 実施研究のあらましと今後の展望…………… 1
合田 健 (プロジェクトリーダー)
2. 霞ヶ浦の湖底地形とその堆積速度について…………… 7
宇都宮陽二郎
3. 霞ヶ浦の湖面蒸発の算定について…………… 23
土屋 巖・白井邦彦
4. 霞ヶ浦の湖流特性…………… 33
村岡浩爾・福島武彦
5. 山王川流出汚濁負荷量に関する研究…………… 45
津野 洋・村岡浩爾・細見正明
6. 高浜入水域への栄養塩の河川からの流入量について…………… 55
津野 洋・相崎守弘・大槻 晃・村岡浩爾・楢戸良雄
7. 美浦村モデル地域における地下水の水質分布特性と地下水流に関する調査研究…………… 65
細見正明・津野 洋・村岡浩爾・合田 健
8. 大気降下物中の栄養塩量について…………… 79
安部喜也・横内陽子・大槻 晃
9. 遠隔計測による霞ヶ浦の定量的水質計測 (クロロフィル *a* の定量) …… 85
安岡善文・宮崎忠国
10. 栄養塩濃度の季節変動から見た霞ヶ浦の富栄養化現象の特徴…………… 95
大槻 晃・相崎守弘・河合崇欣
11. 底泥からの栄養塩類の回帰……………105
相崎守弘・大槻 晃・河合崇欣・福島武彦・細見正明・村岡浩爾
12. 藻類の増殖に及ぼす底泥の影響に関する研究——底泥の AGP ……115
細見正明・須藤隆一
13. 霞ヶ浦における細菌分布……………123
相崎守弘・近田俊文
14. ブルーム時の水草帯における溶存酸素量の日変動……………133
相崎守弘・福島武彦・大槻 晃・手塚和彦
15. 霞ヶ浦高浜入における一次生産の季節変動と夏期における日変動……………139
岩熊敏夫・相崎守弘

16. 霞ヶ浦高浜入における動物プランクトンの季節消長と水平分布	155
森下正彦・安野正之	
17. 霞ヶ浦高浜入の底生動物, 特にオオユスリカとアカムシユスリカの分布と季節変動	171
安野正之・菅谷芳雄・岩熊敏夫	
18. 霞ヶ浦における魚類個体群の生態学的研究 1. 張網採集による高浜入魚類相の 周年変動	185
春日清一・石居 進・山根爽一・松下誉久・高野 護・新井恵子・ 大貫芳哉・小川年以	
19. 情報エントロピーとAGPによる富栄養化の評価	203
田井慎吾・岡田光正・須藤隆一	
20. けい光分光光度計によるクロロフィルaの連続測定とその分布特性に関する一考察	213
津野 洋・細見正明	
21. 水の華および赤潮生物の培養について	223
矢木修身・岡田光正・須藤隆一	
22. 浅い湖の吹送流に関する実験的研究	231
村岡浩爾・福島武彦	
23. 感潮河川の水理・水質特性——涸沼および涸沼川について	245
村岡浩爾・津野 洋・相崎守弘・大坪国順・福島武彦	
24. 山王川の水文流出に関するシミュレーション	257
村岡浩爾・大坪国順	
25. 霞ヶ浦高浜入における藻類増殖のシミュレーションに関する研究	273
津野 洋・相崎守弘・合田 健	
26. 藻類の増殖過程における栄養塩の摂取ならびに代謝に関する動力学モデル	281
津野 洋・合田 健	
27. <i>Microcystis</i> の栄養塩吸収と増殖特性について	293
岡田光正・須藤隆一	
28. 富栄養化防止に関する総合解析フレームワーク	303
中杉修身・北畠能房・原科幸彦・内藤正明	
29. 霞ヶ浦周辺住民の水を中心とした環境に対する意識調査——地図調査の結果	311
青木陽二・原科幸彦	
30. 湖岸環境に関する臨場意識調査(その1)——第1回調査結果の解析	317
原科幸彦・青木陽二・中杉修身・丹羽富士雄	
31. 湖岸環境に関する臨場意識調査(その2)——第2回調査結果の解析	327
中杉修身・青木陽二・原沢英夫・原科幸彦・丹羽富士雄	

資料編

1. 霞ヶ浦全域調査データ.....	335
2. 高浜入調査データ.....	377
3. 地下水調査資料.....	391
4. 国立公害研究所と気象庁の大型蒸発計観測日表 (1977年7月~1978年8月)	405
5. 霞ヶ浦 (西浦) 流域の気象資料 (1977年1月~1978年8月)	409

CONTENTS

Preface

M. SASA

1. Outline of Performed Researches and Future Prospects 1
T. GODA, Project Leader
2. Geomorphological Study of the Subaquatic Topographies in Lake
Kasumigaura and the Accumulation Rate 7
Y. UTSUNOMIYA
3. An Estimation of the Evaporation from Lake Kasumigaura 23
I. TSUCHIYA and K. SHIRAI
4. Flow and Mixing Characteristics in Lake Kasumigaura 33
K. MURAOKA and T. FUKUSHIMA
5. A Study on Pollutant Load into the Sanno River 45
H. TSUNO, K. MURAOKA and M. HOSOMI
6. The Amount of Nutrient Infrow to Takahamairi Bay in Lake
Kasumigaura through Rivers 55
H. TSUNO, M. AIZAKI, A. OTSUKI, K. MURAOKA and
Y. NARATO
7. Field Studies on the Characterization of Ground Water Quality and
Flow Pattern in Miho Village Region 65
M. HOSOMI, H. TSUNO, K. MURAOKA and T. GODA
8. Estimation of the Amounts of Nutrients in the Fallout for Lake
Kasumigaura 79
Y. AMBE, Y. YOKOUCHI and A. OTSUKI
9. Quantitative Studies on Water Quality in Lake Kasumigaura by
Remote Sensing..... 85
Y. YASUOKA and T. MIYAZAKI
10. Characteristics of Eutrophication of Lake Kasumigaura in terms of
Seasonal Variations of Nutrient Concentrations in the Lake Water..... 95
A. OTSUKI, M. AIZAKI and T. KAWAI
11. Regeneration of Nutrients from the Mud of Takahamairi Bay in Lake
Kasumigaura 105
M. AIZAKI, A. OTSUKI, T. KAWAI, T. FUKUSHIMA,
M. HOSOMI and K. MURAOKA
12. Studies on the Effects of Sediments on Algal Growth — Algal Growth
Potential of Sediments 115
M. HOSOMI and R. SUDO
13. Distribution of Bacteria in Lake Kasumigaura 123
M. AIZAKI and T. KONDA
14. The Daily Change of Dissolved Oxygen Content in the Aquatic Plants
Zone in *Microcystis* Bloom 133
M. AIZAKI, T. FUKUSHIMA, A. OTSUKI and K. TEZUKA

15. Primary Production at Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura: Seasonal and Summer Diurnal Changes	139
T. IWAKUMA and M. AIZAKI	
16. Seasonal Change and Horizontal Distribution of Zooplankton at Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura	155
M. MORISHITA and M. YASUNO	
17. Distribution and Seasonal Trend of Benthos Population in Lake Kasumigaura, with Special Reference to <i>Chironomus plumosus</i> and <i>Tokunagayusurika akamusi</i> (Diptera: Chironomidae)	171
M. YASUNO, Y. SUGAYA and T. IWAKUMA	
18. Ecological Study on Fish in Lake Kasumigaura, an Eutrophicated Lake	185
S. KASUGA, S. ISHII, S. YAMANE, Y. MATSUSHITA, M. TAKANO, K. ARAI, Y. OHNUKI and T. OGAWA	
19. Evaluation of Eutrophication Using Entropy of Discrete Information and Algal Growth Potential	203
S. TAI, M. OKADA and R. SUDO	
20. Continuous Measurement of Chlorophyll- <i>a</i> by Spectro Fluorometry and Distribution in Lakewater	213
H. TSUNO and M. HOSOMI	
21. Cultivation of <i>Microcystis</i> and Red-tide-organisms	223
O. YAGI, M. OKADA and R. SUDO	
22. Experimental Study on Wind-Driven Current in a Shallow Lake	231
K. MURAOKA and T. FUKUSHIMA	
23. Water Quality and Hydraulic Properties in a Tidal River — The Case for Lake Hinuma and its Tributaries	245
K. MURAOKA, H. TSUNO, M. AIZAKI, K. OTSUBO and T. FUKUSHIMA	
24. Simulation of the Runoff for the Sanno River	257
K. MURAOKA and K. OTSUBO	
25. Preliminary Model of Phytoplankton Growth at Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura	273
H. TSUNO, M. AIZAKI and T. GODA	
26. Kinetic Model of Algal Growth Incorporating Intracellular Carbohydrate and Phosphorus Pools	281
H. TSUNO and T. GODA	
27. Nutrient Absorption and Growth Characteristics of <i>Microcystis aeruginosa</i>	293
M. OKADA and R. SUDO	
28. Integrative Model Framework for Prevention of Eutrophication	303
O. NAKASUGI, Y. KITABATAKE, S. HARASHINA and M. NAITO	
29. A Survey on the Residential Impression of the Lakeside Environment of Kasumigaura	311
Y. AOKI and S. HARASHINA	
30. A Field Survey for Evaluating a Lakeside Environment (No. 1) — Results of the First Survey of Lake Kasumigaura	317

S. HARASHINA, Y. AOKI, O. NAKASUGI and F. NIWA

31. A Field Survey for Evaluating a Lakeside Environment (No. 2) –
— Results of the Second Survey of Lake Kasumigaura 327
O. Nakasugi, Y. AOKI, H. HARASAWA, S. HARASHINA and
F. NIWA

Data

1. Limnological Data in Lake Kasumigaura 335
2. Limnological Data in Takahamairi Bay 377
3. Geophysical and Chemical Data on the Ground Water in Miho Village 391
4. Daily Evaporation Amount with Class A Pan at Yatabe (The National Institute for
Environmental Studies) and Tokyo (Japan Meteorological Agency) during the Period
from July 1977 to August 1978 405
5. Meteorological Data in the Lake Kasumigaura Area during the Period from January
1977 to August 1978 409

実施研究のあらましと今後の展望

合田 健¹(プロジェクトリーダー)

Outline of Performed Researches and Future Prospects

Takeshi GODA, Project Leader¹

1. はじめに

昭和51年度に所内プロジェクト「陸水域の汚濁防止に関する総合研究」(略称「霞ヶ浦プロジェクト」)として発足したこの総合研究は、昭和52年度から昭和54年度まで3か年継続の予算的裏付をもった特別研究「陸水域の富栄養化に関する総合研究」に発展した。3か年の研究計画の中間点である昭和53年10月までに得られた成果をひとつとおりまとめたうえで、今後の展望とくに3か年計画の終了以後における本研究の要請内容の予測について私見を述べてみたい。

本特別研究は、霞ヶ浦のような閉鎖性陸水域で顕在的、あるいは潜在的に進行している富栄養化現象を原因物質の流域での発生とその水域への流達過程、流達後における微生物を中心とする動植物による摂取などの生物過程、さらに底質への蓄積と回帰などの過程を網羅してフィールド調査と室内実験など現象究明をめざした自然科学的アプローチを行う一方、富栄養化原因物質の発生につながる諸活動の解析や汚濁影響の社会的、経済的予測と評価のための社会・人文科学的なアプローチも含め広い視野からの分析・総合を行おうとするものである。

2. 研究組織と研究課題

本研究では霞ヶ浦以外の多くの陸水域も調査研究の対象としているが、研究の密度において霞ヶ浦とは格段の差があり、霞ヶ浦以外の諸活動は、今のところそれだけで陸水域の富栄養化を論ずるよりは、霞ヶ浦の特性を際立たせ、その富栄養化現象を相対的に理解するのに役立っている。したがって、主体となる研究対象は、霞ヶ浦で、とくに富栄養化の著しい高浜入をフィールドとする自然科学的および人文科学的な野外調査研究とマイクロコズムを始めとするアクアトロン内の種々の実験施設を用いての実験的研究とに集約され、6研究部37名の研究者が参加するとともに、多数の客員研究員の協力を得て本研究を推進している。

1. 部長, 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町
Head, Water and Soil Environment Division, The National Institute for Environmental Studies, P. O.
Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.

研究担当者所属・氏名

総合解析部	第1グループ	内藤正明, 中杉修身
	第2グループ	後藤典弘, 北畠能房
	第3グループ	丹羽富士雄, 原科幸彦
	第4グループ	青木陽二, 原沢英夫
計測技術部	大気計測研究室	安部喜也
	水質計測研究室	大槻 晃, 河合崇欣
	生体化学計測研究室	佐竹研一
水質土壌環境部	陸水環境研究室	須藤隆一, 田井慎吾, 矢木修身, 岡田光正, 細見正明 内藤敦子
	土壌環境研究室	高松武次郎, 向井 哲
	水質環境計画研究室	村岡浩爾, 津野 洋, 相崎守弘, 福島武彦, 大坪国順
生物環境部	水生生物生態研究室	安野正之, 春日清一, 森下正彦
	生物環境管理研究室	岩熊敏夫
環境情報部	業務室	土屋 巖, 白井邦彦
	情報システム室	宮崎忠国, 安岡善文
	情報調査室	宇都宮陽二郎
技術部	技術室	松重一夫, 菅谷芳雄

客員研究員所属・氏名

大阪大学	合葉修一
早稲田大学	石居 進
筑波大学	市川正己
東京工業大学	熊田禎宜
信州大学	桜井善雄
京都大学	宗宮 功
筑波大学	高橋正征
茨城大学	高村義親
島根大学	伊達善雄
広島大学	永井史郎
一橋大学	宮川公一
大阪大学	室田 明
筑波大学	吉田富男
東京理科大学	吉野善弥

多くの研究者による「学際的総合研究」の成果をあげるために4グループに分けグループリーダー

を置くとともに次のようなサブテーマに分けている。

[1] 霞ヶ浦等のフィールドを対象とした研究グループとサブテーマ

●霞ヶ浦グループ（グループリーダー、安野正之）

第1グループ（グループリーダー、村岡浩爾）

- 1) 霞ヶ浦周辺の微地形変化に関する研究
- 2) 河川における汚濁物質の流達に関する研究
- 3) 霞ヶ浦湖面の蒸発量の算定
- 4) 湖内および流入河川の水利特性と物質挙動に関する調査と研究
- 5) 地下水の霞ヶ浦の富栄養化に及ぼす影響

第2グループ（グループリーダー、大槻 晃）

- 1) 湖生態系における物質循環過程の研究
 - a) 霞ヶ浦全域の現状調査
 - b) 高浜入生態系における物質循環過程の研究
- 2) 富栄養化状態評価指標に関する研究

第3グループ（グループリーダー、内藤正明）

- 1) 霞ヶ浦周辺住民の環境に対する意識調査
- 2) 環境評価に関する実験的研究
- 3) 水域環境指標の確立に関する研究

[2] アクアトロンの実験施設を利用したサブテーマ

●アクアトロングループ（グループリーダー、須藤隆一）

- 1) 水域での汚濁物質の物理、化学的挙動に関する研究
- 2) 微生物の増殖速度に関する研究
- 3) 藻類増殖機構の解析に関する研究
- 4) 単細胞藻類の増殖に及ぼす物理的要因に関する研究
- 5) 富栄養化の制御指標に関する研究
- 6) 富栄養化物質の処理に関する研究

3. 前半期に得られた成果と今後の展望

所内プロジェクト期間も含めると2か年余りで、この間霞ヶ浦を中心として種々の知見が得られつつある。本報告書に掲げる論文は31編にのぼるが、既に学会で発表し、また雑誌、論文集に掲載されたものはできるだけ重複しないよう執筆者間で申し合わせたため、既発表のものも含めると、特別研究全体としては相当の成果があげられたといつてよい。本報告書に盛られていない従前の成果については、各論文の引用文献を参照していただきたい。

広範囲にわたる研究成果を漏なく要約することは困難であるが、今後の展望につないでみたい。ま

ず、霞ヶ浦の富栄養化の観点からの流入負荷については、流入河川、地下水、底質、大気降下物について研究が行われているが、流入河川などの表流水由来とならんで地下水と大気降下物も富栄養化に相当寄与していることが逐次明らかにされつつある。とくに詳細に調べた流入河川として高浜入の山王川、恋瀬川、園部川の3者で窒素 500 ~ 1,500 kg/d、リン 50 ~ 140 kg/d の流入負荷があることが連続観測の結果として得られた(論文4, 5)。なお、河川の場合は降雨時における堆積物の流出が問題となるが、その水文流出特性について山王川のシミュレーションモデルが作製されている(論文23)。また、大気降下物は霞ヶ浦全域で窒素 430 kg/d、リン 20 kg/d の負荷にのぼり、これは上述の3河川の1本の流入負荷に相当することが明らかとなった(論文7)。この点については流域の非点源からの N、P 流出も加え、さらに詳細な検討が必要であろう。地下水については定量的な知見はまだ得られていないが、美浦村の115か所の井戸の調査から得られた窒素 2.6 ~ 3.3 mg/l、リン 0.16 ~ 0.21 mg/l という濃度(論文6)を考えると、既に昭和51年度の報告書(国立公害研究所特別研究成果報告、第1号)においても指摘したように霞ヶ浦への寄与はかなりのものとなることは間違いなく、今後、揚水量と直接流入流量の把握が課題である。湖への流入負荷ではないが、富栄養化の観点からは底質からの栄養塩の回帰が問題である(論文9, 24)が、嫌気条件下では、底泥からの回帰栄養塩は好気条件下の10倍ていど藻類生産力を高めることが明らかにされた(論文11)。また、霞ヶ浦は水深が3 ~ 4 m であるため、吹送流によって底泥が攪拌、浮上され、これもまた栄養塩の回帰に少なからぬ影響を与えることが予見される(論文3, 9, 10, 21)。底質については下水道などで流入負荷が削減されたとしても、それとは別個のパターンで富栄養化に寄与するため、その回帰の機構の解明が今後の課題である。

霞ヶ浦の物質収支を考えるうえで湖面からの蒸発量も注目すべき量であるが、class A pan による1か年余りの観測から、年間蒸発量は1.2 ~ 1.4億トンであり、従来いわれている2億トンよりはかなり少ないという結果が得られた(論文2)。一方、地形学的な調査研究の結果から最近の霞ヶ浦の堆積速度は5 mm/年ときわめて大きく、このままでは単純に計算して800年ていどで湿地帯と化すということになり、富栄養化の観点のほかに流入する土砂等についても留意すべきことが示唆された(論文1)。

さて、流入した栄養塩が藻類にどのように利用されるか、藻類と細菌、動物プランクトン、大型の動植物との相互依存関係の定性、定量的記述のための生態学的な研究が霞ヶ浦とアクアトロンの両者においてなされている。ともに多種類の微生物、動物に係わるこのprey-predatorの相互依存の様式の同定と代謝機構までも含めた定量的究明による霞ヶ浦生態系の記述は最も労力と時間を要する部分であり、その作業は進んでいるもののまだ総括的に要約するまでに至っていない。昭和52年度中霞ヶ浦全域にわたって定期、定点調査を行った結果、昭和51年度の報告書でも述べたように、霞ヶ浦の湖全体を均一な一つの系として取り扱うことは不適當で、高浜入、土浦入など幾つかのサブシステムの集合として調査研究すべきことが改めて確認されたが、昭和53年度からは最も富栄養化が進んでいる高浜入を重点として研究を集中した。高浜入における一次生産量(純生産)の年平均値は測点1で0.32 gO₂/(m² · d)、測点2'で0.7gO₂/(m² · d)でありクロロフィル a 当たりの総生産量の最大値は14.5mg

$O_2/(mgChl. a \cdot h)$ (75,000lx) であった(論文14)。動物プランクトンの研究では高浜入最奥部で個体数が最も多く湖心に近づくにつれて小さくなり、クロロフィル a, 水温, SS, T-P などの項目と相関が見られた(論文15)。霞ヶ浦における生菌数は湾奥で 1 ml 中 10^5 オーダ, 流出部で 10^3 オーダであるが全菌数は全域で 10^6 オーダであった(論文12)。底生動物の調査では *Chironomus plumosus* の幼虫の個体数のピークは 4~5 月, *Clinotanytus* sp. のピークは 7~8 月, *Limnodrilus* sp. のピークは夏期, *Tubifex* sp. のピークは冬期であることが観察された(論文16)。魚類については 19 回の張網採取によって魚類 20 種, 甲殻類 3 種, 両生類 1 種の存在が確認されたがその 98% はコイ, フナ, モツゴ, ハゼ, 食用ガエル, テナガエビで占められていた(論文17)。高浜入の水草帯は挺水植物群落(ヨシ, マコモなど), 浮葉植物群落(ヒシ) で形成されているが *Microcystis* は, ブルーム時にはこの水草帯(ヒシ) に吹き寄せられて集積し, その水域の底層の夜間における DO を 0.3~2 mg/l まで低下させ, これが魚類の斃死の原因となるものと予想される。また *Microcystis* の分解, 底泥からの回復によってこの水草帯が栄養塩の供給源となることも予想される(論文13)。この *Microcystis* は霞ヶ浦の富栄養化を代表する藍藻類であり, その異常増殖特性の解明が必要である。霞ヶ浦から *Microcystis aeruginosa* と *Microcystis flos-aquae* の 2 種の分離培養に成功し(論文20), 現在細菌との相互作用についての研究が進められている。一方, *Microcystis* の増殖は細菌内のリン濃度に左右され, リンの吸収速度はリンの履歴によって異なるが窒素の吸収速度はその履歴によらないことが明らかとなった(論文26)。また, 藻類の増殖過程に関する代謝機構の数値モデルも提案されている(論文24, 25)。

富栄養化の防止対策を考えるうえで藻類の現存量と潜在増殖能力の指標を開発する必要がある。藻類の現存量の測定にはクロロフィル a 量が用いられることが多いが, フィールドでの連続測定には連続式の蛍光分光光度計が有効であることがわかった(論文18)。また, リモートセンシングの結果, クロロフィル a 濃度と画像濃度(7チャンネル)に相関がみられた(論文8)。COD も環境基準項目のように現存量の測定に用いられるが, AGP 試験の結果から, 有機汚染物質の少ない場合は藻類量と相関があり有意義なことがわかった。また, 潜在力の測定についても AGP 試験が有効であることが明らかにされ(論文19), さらに霞ヶ浦の富栄養化あるいは汚濁に対して周辺住民の意識調査がなされた(論文28, 29, 30) が, この研究は霞ヶ浦のみにとどまらず環境に対する人間の心理的側面から将来の環境のあるべき姿を定量的に評価するうえで重要である。

以上のように各個の研究レベルで具体的な成果が得られつつあるが, 霞ヶ浦におけるように一つの水域の周辺で住民が一定の生活と産業活動を営み, さらにその活動が進歩拡大した場合にその水域はどのような姿になるか, あるいはどのような姿であるべきか, 逆に水域を一定の姿に保つためには住民は何をなすべきかを提案することは, 一霞ヶ浦の問題にとどまらず環境問題全般にわたる課題でもある。富栄養化現象に関する多くの既存データとこの総合研究で得られた成果を総合化し, 富栄養化防止施策の評価のための全体フレームワークを提案した(論文27) が, 最も困難な部分は人間活動が生態系に及ぼす影響の総合的かつ詳細な記述である。もっとも, 水系, 流域の都市, 産業, 住民の interrelationship をダイナミック・モデルとして表す SD モデルは, そほ構想が緒についたところで,

表1 霞ヶ浦のCOD分布
Table 1. COD in Lake Kasumigaura

水深 0.5m

Sample Site		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Date	1977 5/17	7.4	6.6	4.6	4.7	4.8	—	5.2	—	—	4.4	5.4	—	
	6/29	5.0	5.7	6.7	6.9	5.7	4.8	6.0	5.9	4.9	—	5.2	5.5	
	7/25	14.4	8.9	9.9	8.5	6.9	9.9	7.8	7.6	8.3	7.8	11.7	7.7	
	9/ 6	23.4	11.0	13.4	7.4	6.2	11.5	16.1	4.5	4.0	4.5	3.1	3.7	
	10/ 5	3.2	4.5	7.4	7.2	8.5	5.3	9.4	7.2	7.4	7.0	6.8	6.4	
	11/ 7	5.2	5.6	5.5	6.1	6.7	4.1	4.9	6.2	5.2	10.2	5.2	4.7	
	12/ 6	5.4	6.3	6.5	6.8	6.9	7.6	6.2	5.9	6.1	7.1	6.9	6.5	
	1978 1/20	4.1	4.2	4.1	3.8	4.6	4.6	2.2	3.3	4.2	3.4	3.5	4.3	
	2/ 7	4.6	4.9	6.1	3.7	4.1	3.9	3.6	4.1	4.8	3.3	3.1	4.2	
	3/ 7	8.3	5.1	3.4	2.6	2.7	4.1	1.4	1.4	2.6	2.4	1.9	2.0	
	Average		8.1	6.3	6.8	5.8	5.7	6.2	6.3	5.1	5.3	5.6	5.3	5.0

全面的な構築は昭和54年度になるものと考えられる。それにしても、生態系内の複雑な生物過程を明らかにするためには相当の期間が必要である。一つの方策として、たとえば湯ノ湖（栃木県）のような比較的小規模な湖で、しかも流入汚濁負荷が握し制御しやすい地域を研究対象として選んで、人間活動と生態系の相互作用を具体的にしかも定量的に実証することが必要であろう。

また、霞ヶ浦水域は環境基準湖沼A類型に指定されているが、広大なためにどの地点で、またどの時期にその基準を達成するかによって流入する負荷の削減量が異り、廃水の処理程度、規制をはじめその地域社会に大きな影響を与える。富栄養化では流入栄養塩による、COD指標に表れる内部生産を問題とすることが必須不可欠であり、下水道を整備することによって高浜入、土浦入のCODも表1の冬期（1978年1月20日）の湖心ていど（COD 3.5mg/l）までは低下させることは可能であるが、夏期において全域をCOD 3mg/lにするためにはリン、窒素の規制、除去まで行わなければならない。また、COD 3mg/lが達成されたとしてもサケ科、アユ科が生息するという水産2級を達成できるかどうかきわめて疑問である。これは国が設定した環境基準類型別自体の問題であるのか、あるいは霞ヶ浦の個有現象として促えねばならないことなのか、極めて重要な問題で、このためにも、より小さい湖と水域を対象として汚濁負荷、栄養塩の流入の削減とそれによる生態系や生物分布への影響、さらには地域社会への影響などを実証することが問題点解明にいとぐちを与えてくれるであろう。この辺のことは、本特別研究の第3年次研究終了時に十分考察すべきは当然として、今の時点で昭和54年度において検討されるべき本特別研究の目標と問題意識の変化とを予測しておく必要がある。

霞ヶ浦の湖底地形とその堆積速度について

宇都宮陽二郎¹

Geomorphological Study of the Subaquatic Topographies in Lake Kasumigaura and the Accumulation Rate

Yōjirō UTSUNOMIYA¹

Abstract

Geomorphological investigation of the subaquatic topographies of Lake Kasumigaura brought the following conclusions.

- 1) The subaquatic topographies in Lake Kasumigaura (north-eastern part of the Kanto Plain, Central Japan) can be divided into 9 geomorphic types; littoral shelves, tidal current ridges formed by sand accumulation or erosion, shallow troughs, spit-like topographies, sublacustrine hills, sublacustrine gentle slopes, Sohle, sublacustrine kettle holes, and artificial topographies.
- 2) The above mentioned geomorphic types are developing in each place as shown in figure 1.
- 3) Tidal current ridges, shallow troughs and spit-like topographies are mainly developing on the littoral shelves and represent the directions of littoral, longshore and coastal currents.
- 4) The directions of these currents estimated by micro-topographies are concordant with data investigated in the field and have characteristic features in each Gliederung.
- 5) Active erosion at the lake bottom of the sublacustrine kettle hole and accumulation on the Sohle are presently taking place and likely to continue in the future, but the latter is prevailing against the former, so that the accumulation rate (5.01mm/year) is calculated in this area and compared with those for different sedimentary environments.
- 6) If crustal movements and artificial deformations of the topographies are not taking place in this area, accumulation will be completed in a short time (about 800 years after) on the geological time scale and Lake Kasumigaura will be replaced by a swampy lowland.

1. はじめに

我々が環境の研究に着手するにあたり、まず、その地域の自然的・社会的およびその歴史的背景を

1. 国立公害研究所 環境情報部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Environmental Information Division, The National Institute for Environmental Studies, P.O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.

知らなければならない。幸いにして、本総合研究では、並列的ではあるが、これらの情報に関する調査活動も軽視されてはいないようである。

さて、霞ヶ浦に関しては田中阿歌磨の1907~1931年にわたる古典的な研究をはじめとし、茨城県水産試験場、内水面水産試験場、建設省霞ヶ浦工事事務所、茨城大学農学部などの各機関から多くの研究成果が出されている。しかし、こと湖底地形に関する調査・研究は数少なく、茨城県水産試験場(1912*)、桜井徳雄(1948)、国土地理院(1960, 1970)による深淺調査、藤下ら(1967)、茨城大学農学部霞ヶ浦研究会(1977)、外岡ら(1976)、池田ら(1976, 1977)による湖底地形および底質に関する研究以外には、あまり見るべきものはない。

もともと、地形学の分野においても、湖底地形そのものに関する詳細な研究は琵琶湖における小谷昌の研究を除き、あまり例がないようである(中野, 1967; 小谷, 1964, 1965, 1970, 1971)。

筆者は霞ヶ浦にかかわる自然的な基礎情報としての湖盆形態と湖沼周辺の特に低地の地形について調査を行っている。湖底地形とその変化から知られる堆積速度について若干の新しい知見が得られたので、中間報告として報告し、大方の御教示を得たいと思う。以下に、霞ヶ浦湖沼図(国土地理院, 1960, 1970**)をもとに作成された縮尺1/50000の地形学図による考察と、霞ヶ浦湖心部の沖積層下限等深図(藤下ら, 1967***), 桜井(1948)および国土地理院(1960, 1970)の湖底地形図による編集図から求めた体積変化(堆積速度)について記載することにした。

2. 霞ヶ浦の湖底地形

霞ヶ浦は琵琶湖に比べると極めて浅いため、崖線の比高なども小さく、作成された地形学図****は、いわば、湖沼の微地形分類図とも言えよう。以下に、これらの地形の分布とその特性を記載し、地形の発達から潮流などの一般的な流向も推定してみたい。

霞ヶ浦は面積167km²*****、平均深度3.9m*****、最大深度7mを有し、北方ならびに北西方に、それぞれ、高浜入、土浦入の2大肢節と小野川のestuaryを有し、浮島の東5km余で常陸利根川に流出する。一方、流入河川としては桜川、恋瀬川、園部川、小野川および新利根川などの比較的大きな河川とその間の中小河川がある。

* 茨城県水産試験場による測深成果は散逸しており、現在のところ筆者は入手していない。

** 西浦に関する湖沼図は10図葉からなり、大部分は1960年に測量されている。しかし、大山入図幅に関しては1970年の改測による湖沼図のみが市販されている。

*** 池田ら(1977)の地質横断面図によれば、浮島~今宿北方間には埋没した台地が認められ、藤下らの沖積層下限等深図は修正される必要があるが、現在の時点では唯一のデータであるため、本研究の資料として利用した。

**** 湖沼図の読図をもとに作成したものであり、今後、詳細な計測結果による分類が必要であろう。

***** 筆者の計測による。縮尺1/50000の編集図上で、プランメーターを用いて計測した。計測に際しては3回測定し、その平均値を採用している。湖岸線は1/50000地形図の水涯線とした。ただし、高浜入奥部の低湿地は湖水に含めたのに対し、新利根川のestuaryは河口付近の湿地帯をもって湖岸線としたため、湖沼に含めていない。それぞれの測定範囲は図2に示したとおりである。

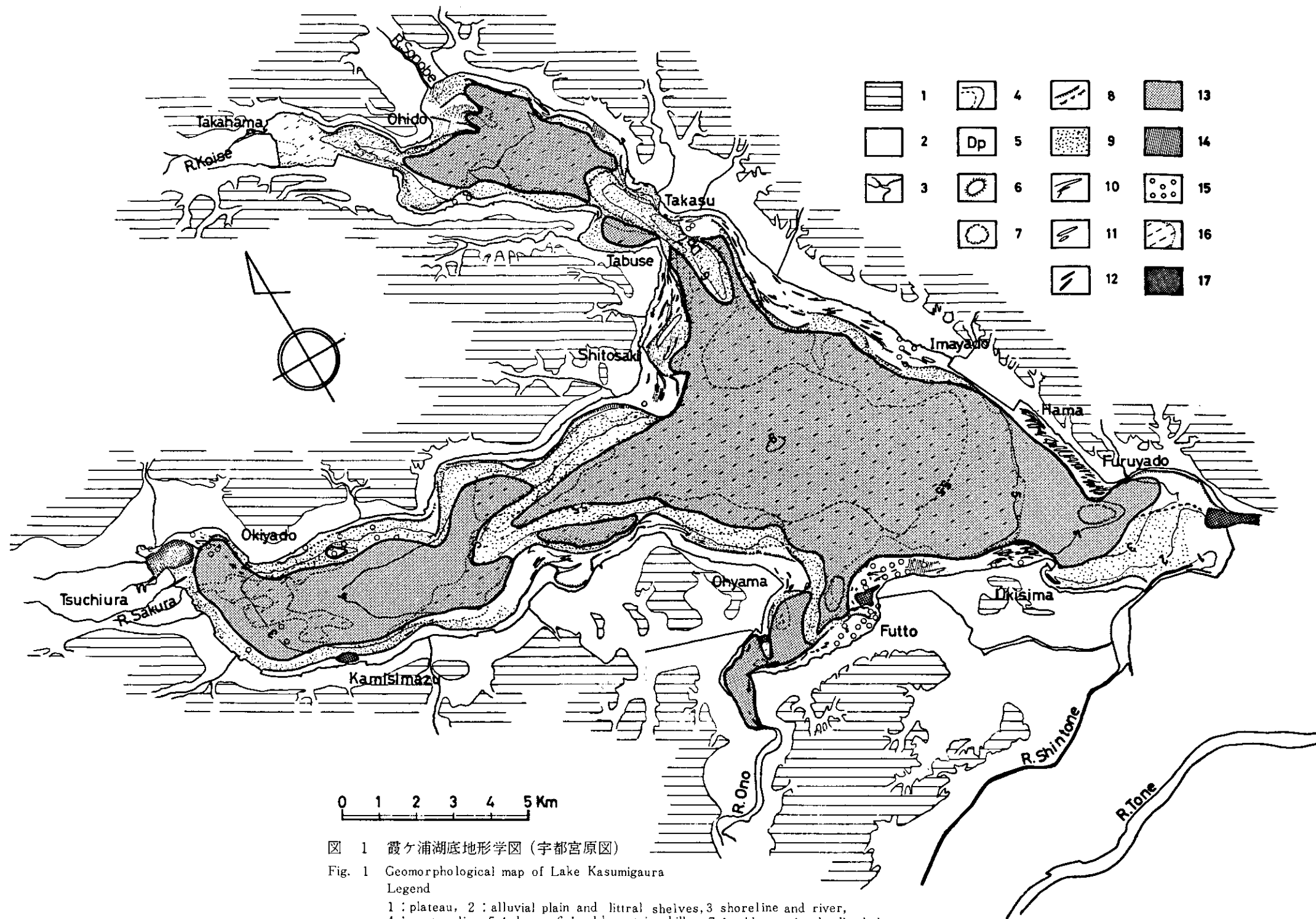


图 1 霞ヶ浦湖底地形学图 (宇都宫原图)

Fig. 1 Geomorphological map of Lake Kasumigaura

Legend

- 1 : plateau, 2 : alluvial plain and littoral shelves, 3 shoreline and river,
- 4 : contour line, 5 : deep, 6 : sublacustrine hills, 7 : sublacustrine kettle holes,
- 8 : scarp line, 9 : sublacustrine gentle slope, 10 : spit-like topographies,
- 11 : current ridges formed by sand accumulation or erosion, 12 : troughs and sublacustrine channels
- 13 : Sohle, 14 : Bed Rock, 15 : gravel, 16 : mud & mud line, 17 : artificial topographies

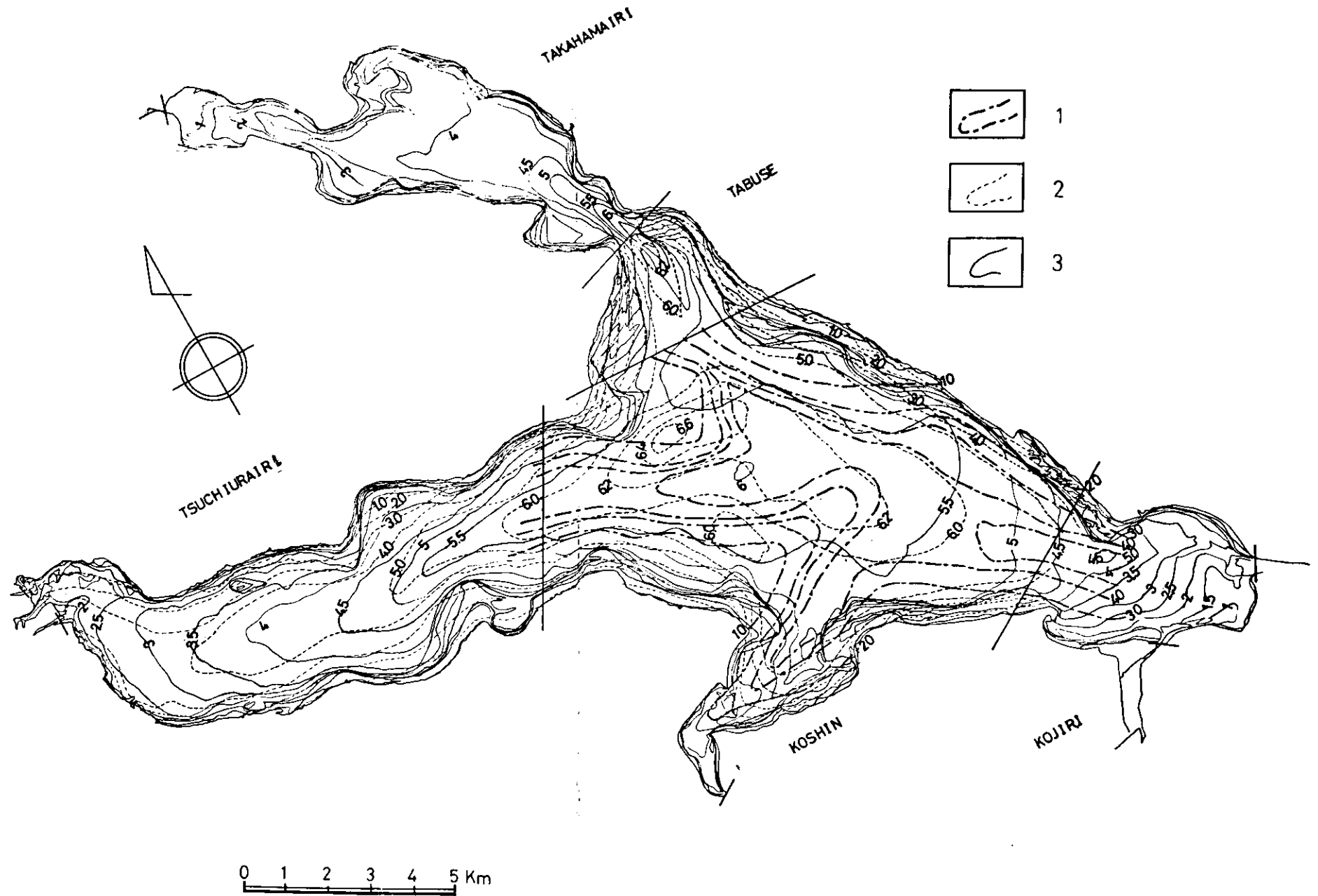


図 2 霞ヶ浦の湖底地形と計測地域区分図

Fig. 2 Map of the measured area and topographies of lake kasumigaura in 1948, 1960 and 10000 YBP
 Legend 1 : contourline of the depth of alluvium (contour interval: 10m)
 2 : contourline of the map in 1948 (contour interval: 1 m)
 3 : contourline of the map in 1960 (contour interval: 0.5m)

(1) 湖棚 (湖底段丘)

湖棚は土浦南東、高浜付近、小野川の estuary、新利根川河口～湖尻の各沿岸を除くほとんどの湖岸に沿って、深度0.5～4 mに発達する緩やかな斜面で、その前面は比高1～3 mの急崖で限られている。湖棚の幅は一般に200～1,000 m余で、沿岸の沖積低地の発達によいところで、大きくなる傾向を示す。

湖棚は高浜入では0.5～2 m、高須では0～1 m、2.5～4 m、高須～今宿にかけては0～2 m、2.5～4 mのそれぞれの深度にあり、高須～今宿間では上・下の2段の地形面が認められる。浜～古宿にかけては0～2.5 m、古宿西方では0～1 m、浮島の東～北、古渡の北方にかけては0.5～1.5 m、古渡の西では0.5～1 m、2～3.5 m、大山の東では0.5～2 m、2.5～4 m、大山北方では0.5～1 m、1.5～2.5 m、大山北方～上島津にかけては0.5～1 m、2～3 m、上島津付近では0.5～1 mの深度に発達し、上・下の2段の地形面が認められる。沖宿～志戸崎にかけては、沖宿東方4 kmおよび6 kmに各々2～3 m、2.5～3 mの深度に認められる下位の地形面を除き、一般に0.5～1 mの深度に上位の地形面が認められる。志戸崎～田伏にかけては各々0.5～3 m、0.5～2.5 m、および3～4.5 mの上・下位の2段の地形面が認められる。

これらの地形面は一般にsandないしfine sandから構成されるが、局地的に基盤または礫が認められるところもある。基盤は上位面では大井戸東方、園部川河口沖、高須北方、浮島北方に、下位面では志戸崎東方のいずれも幅の狭い沖積低地の沖合に、礫は大井戸の南方、今宿西方、浮島北西～古渡、沖宿、志戸崎の上位面および高須の下位面に認められる。以上のことから、湖棚は比高1～1.5 mの急崖により上・下の2段の地形面に区分され、その一部には波蝕台の発達することが知られる。

湖棚上には比高0.5～1 m、長さ2～300 m、幅50 m以下の微高地、溝状凹地およびspit状地形が認められる。特にspit状地形はいずれも現汀線に斜交ないし平行して発達し、一部では分岐している。これらの微地形は、高須北方4 km、高須～今宿、浜～古宿、浮島北方、古渡北方～西方、大山の東、大山北方～上島津東方5 km、志戸崎～田伏にかけて分布するが、特に高須～今宿、浜～古宿、浮島北方、志戸崎～田伏にかけてよく発達している。

これらの微地形は上・下位のいずれの地形面にも認められるが、一般に上位の地形面に、また、礫および基盤よりなる地形面より、sandまたはfine sandよりなる地形面上に発達がよく、微高地は、sandないしfine sandにより構成されている。さらに、これらの微高地、溝状凹地、spit状地形は各各別個に分布するのではなく、一連の地形群として分布している。ただし、古渡西方では溝状凹地のみが発達し、他の地区とは異なる。上記の微地形群の伸長方向から湖底堆積物の移動方向が推定される (J. J. H. C. Houbolt, 1968; Reineck & Singh, 1975)。

霞ヶ浦のような浅い湖沼においては、湖底堆積物の移動は表層の湖流および沿岸流と密接に関係するものと思われる。一方、地形から推定される流れの方向は、その地点における湖流または沿岸流の一般的な方向、いいかえれば卓越方向を示すものと考えられる。琵琶湖においては河口泥舌から湖流が推定されている (小谷, 1971) が、霞ヶ浦のこのような地形は、湖内の流れに関しては、泥舌と同

様の地形的意義を有するであろう。

以上の解析によって推定された流向を示すと図3のようである。本図によると、霞ヶ浦においては各枝節ごとに独自の流れが生じていることが知られ、佐々木 (1969) による模型実験の成果および茨城大学農学部霞ヶ浦研究会 (1977) の調査成果ともよく調和している。

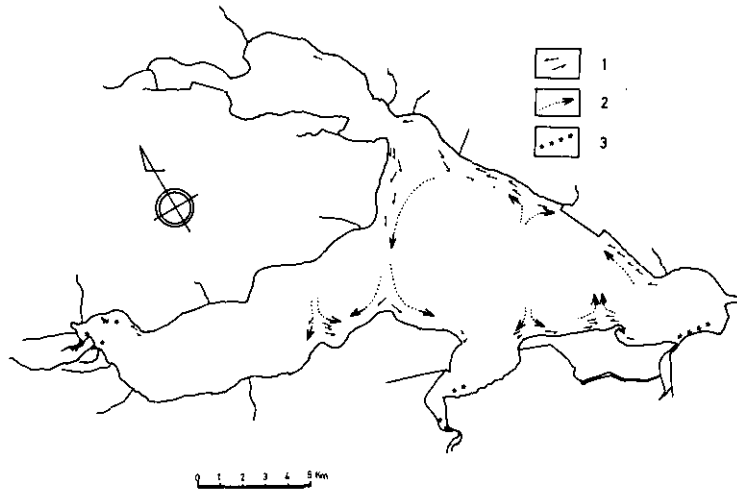


図3 湖底微地形から推定された湖水の流向および湖底流路分布図 (宇都宮原図)

Fig. 3 Direction of littoral, longshore, coastal current and sublacustrine channel deduced from the micro-topographies of Lake Kasumigaura

Legend 1 : Direction of current deduced from each topography, 2 : Direction of general current deduced from directions mentioned above, 3 : Direction of sublacustrine channel included in the shallow trough

溝状凹地は湖棚以外にも認められ、土浦港付近、桜川河口部、大山南方、estuaryに注ぐ小野川の河口部および湖丘の南、新利根川河口付近に分布する。これは Sublacustrine channel (J. J. H. C. Houbolt & J. B. M. Jonker, 1968) に相当すると思われる。この溝状凹地の沖には、新利根川河口付近で特徴的であるが、微凸地が発達している。これらは掃流力の大きな河川水による河口付近の侵蝕とその沖合の再堆積および、湖沼内における河川水の一般的な流入方向を示している。

(2) 湖丘

湖丘は沖宿南東2 km、大山南方の2か所に認められる。前者は2~2.5 mの深度にあり、深度3~3.5 mの湖底緩斜面との比高は1~1.5 mで、東南東方向に伸びる紡錘状の平面形をなし、礫によって構成される。後者は0.5~1.5 mの深度にあり、深度3.5~4 mの湖底平坦面との比高は2.5~3 mで、南に伸びる楕円状の平面形を有し、泥層より構成されている。大山南方の湖丘は、大山から南に延びる湖棚として発達した地形が人工的な掘削により分離されたものであろう。沖宿東方の湖丘の

成因については構成礫および湖盆底の下の地質構造が明らかになれば、おのずと解明されよう。

(3) 湖底緩斜面

傾斜 $2 \sim 5/1,000$ 以上の斜面をここでは湖底緩斜面と規定した。この斜面は湖棚外縁の急崖および斜面の沖、深度 $1 \sim 5$ m、高浜入の大井戸西方、深度 $2 \sim 3.5$ m、土浦入の志戸崎西方、深度 $5 \sim 5.5$ m 付近、田伏～高須、大山～古渡間の湖底凹地の周辺斜面および、浮島東方の湖尻に発達する。湖底凹地の周辺斜面を除くと、湖底緩斜面は一般に砂質泥によって構成されている。特に浮島東方では、等深線および堆積物の分布*から利根川の逆流により形成された逆デルタ（山本, 1934）の前置ないし頂置層をなす斜面と思われる。なお現在の霞ヶ浦の湖水の流出口は東に押しやられている。

(4) 湖底平坦面

傾斜 $2/1,000$ 以下の斜面を湖底平坦面と規定した。湖底平坦面は高浜入中央部の大井戸～田伏付近、深度 $3.5 \sim 4.5$ m、土浦入の沖宿～上島津付近、深度 $2.5 \sim 5$ m、大山付近の小野川の estuary、深度 $3 \sim 4.5$ m および湖心部の深度 $4 \sim 6$ m に非常に平坦な地形面として発達し、一般に泥によって構成されている。

小野川の estuary および土浦入では沖宿～上島津付近、深度 $2.5 \sim 3.5$ m を除き砂質泥が卓越する。さらに土浦入の奥部、沖宿の西方では本地形面上にも溝状凹地 (sublacustrine channel) および微凸地が発達し、付近には礫も認められる。これらの地形は、おそらく、江戸時代以前**の古い時代の旧桜川の侵蝕***または堆積作用によって形成されたものであろう。

(5) 湖底凹地

湖底斜面および湖底平坦面において、周辺地形面より相対的に深い地形を湖底凹地と規定した。この湖底凹地は田伏～高須間の高浜入と湖心を結ぶ狭さく部、深度 $5 \sim 7$ m、大山南の湖丘の南西、深度 $4 \sim 4.5$ m、古渡～大山間の深度 $5 \sim 5.5$ m および湖尻の古宿西方、深度 $4 \sim 4.5$ m 付近に発達する。この地形は泥より構成される高浜入狭さく部を除き、一般に砂質泥によって構成されている。しかし、周辺地形の構成物質との差はないようである。図1の地形学図からも明らかなように、この地形は狭さく部に発達しており、瀬戸内海または琵琶湖などにみられる海釜地形と同様の成因を有するものと思われる。

すでに外岡 (1971) が指摘しているように、高浜入の狭さく部の地形について1948、60年の各々の深淺図で比較すると1960年では深くなり、一方、志戸崎の1948年最深部 6.6 m 付近をみると1960年では逆に浅くなったことが知られる。志戸崎～今宿間の1960年の等深線 5.5 m が示すように、湖底凹地の南（湖心側）の湖底平坦面は緩やかな凸地形をなす。

以上のことから、高須～田伏間の湖底凹地では侵蝕が、その南方の湖底平坦面上では湖底堆積物の

* 深度 5 m 以深は泥、深度 $5 \sim 3.5$ m は砂質泥、それ以浅は fine sand および sand が分布する。

** 土浦歴史地図（土浦市史編さん委員会、1974）によると江戸時代の桜川は今の土浦市街地の南を流れていたことが知られる。

*** 溝状凹地の規模は桜川河口部より大で、溝の走向から推定される流出河川は土浦市街の北部を東流する河川に求められる。

再堆積が認められる。規模こそ違うが、溝状地形で述べた現象はここでも認められ、現在における活発な侵蝕・堆積作用が知られる。

(6) 人工地形

湖沼図の記載、幾何学的な平面形を有する地形および若干の野外調査によって人工地形をは握した。本図によると人工地形は土浦入の土浦沖、上島津沖、大山南方、古渡および湖尻の常陸利根川への流出口付近に認められる。湖沼図によれば土浦沖では、円または楕円状の凹地が散在するが、作図の都合上、まとめたため、実際より広い範囲を図示している。これらの人工地形は、湖底の浄化、干拓または砂礫採取などを目的としたしゅんせつ（浚渫）のため形成された。本図によるとしゅんせつは現在のところ、湖岸近くに限られているようであるが、今後の湖沼の利用を考えると、正確な分布をは握することが必要で、そのためには、本湖沼の改測が望ましい。

(7) 泥線について

湖底泥の分布は一般には湖底平坦面の分布と協和的である。高浜入と土浦入の2大肢節を比較すると、湖底泥は高浜入では湾奥部の恋瀬川河口付近まで分布するが土浦入では上島津より奥では不連続になり、上島津～沖宿～土浦沖で分断シアメーバ状に分布する。土浦沖では、現在の桜川の南の桜川のかつての1分岐河川と思われる小河川に連続している。以上のことから、現在の桜川が砂質泥および泥を供給するに対し、過去のある時代の桜川は主に泥の供給を行ったことが知られる。しかし、上島津北～北東部および、志戸崎南西方に分布する砂質泥がどのような営力により堆積したか不明である。

3. 霞ヶ浦の堆積速度

図2は1960年、1948年、10,000YBPの地形を現在の霞ヶ浦の範囲内で示したものである。本地域は主に、データの有無関係から、土浦入、高浜入、田伏、湖心、湖尻に区分された。表1はそれぞれの地区の面積、体積、期間堆積量、年間堆積速度を示したものである。本表中の3地区とは土浦入、湖心、田伏の各地区を合わせたものである。

本表の(1)は面積、(2)～(4)は1960年を基準とした各時期の体積、(5)は10,000年間の堆積量、(6)は1948～60の12年間の堆積量を、(7)は10,000年間の年平均堆積速度を、(8)は1948～60年の12年間の年平均堆積速度を示す。

本表によると、湖心部における10,000年間および1948～60年の年平均堆積速度は、各々、1.96mm/y、19.19mm/yであり、単純に比較すれば、近年の年堆積速度は過去10,000年のその10倍に達する。しかし、湖心部が浅くなったのに反し土浦入、田伏ではいずれも1948～60年にかけて、湖盆の容積が増加し、年平均16mmの速度で深くなっている。これらの容積変化の一部分は1948年の測深図の不完全さによると思われるが、田伏についてはすでに述べたように湖底部の侵蝕による変化を示すものと思われる。さらに、湖心部の浅化にはこれらの地区から侵蝕された湖底堆積物の再堆積が寄与しているであろう。

表1 霞ヶ浦の地区別面積、体積および年堆積速度

Table 1. Area, volume and annual accumulation rate of each locality of Lake Kasumigaura

locality name		Tsuchiurairi	Takahamairi	Tabuse	Koshin	Kojiri	3 sections	total
area (1)		42.599	23.82	8.9	78.12	14.12	129.62	167.56 (km ²)
volume	measured on the contourline of the depth of alluvium (2)	—	—	—	1896.46	—	—	— (10 ⁶ m ³)
	measured on the contourline of the map in 1948 (3)	137.29	—	34.31	381.48	—	553.09	— (10 ⁶ m ³)
	measured on the contourlines of the map in 1960 (4)	145.78	74.31	36.01	363.49*	37.31	545.29	656.91 (10 ⁶ m ³)
	volume of the alluvium for 10,000 years (5)	—	—	—	1532.97	—	—	— (10 ⁶ m ³)
	volume of the alluvium for 12 years (1948~60) (6)	-8.49	—	-1.7	17.99	—	7.8	— (10 ⁶ m ³)
annual accumulation rate	average rate of the accumulation for 10,000 years (7)	—	—	—	1.96	—	—	— (mm/y)
	average rate of the accumulation for 12 years (1948~60) (8)	-16.61	—	-15.92	19.19	—	5.01	— (mm/y)

* 湖沼図霞ヶ浦、大山人図幅については、1960年測量の湖沼図が手に入らなかったため、1970年改測図による。

** 3 sections は土浦入、田伏および湖心を合わせた地域である。

そこで、土浦入、田伏、湖心の各地区を合わせた3地区の1948~60年12年間の年平均堆積速度を求めると5.01mm/yが得られる。この値と10,000年間の年平均堆積速度を比較すると、最近の堆積速度は少なくとも過去10,000年のその2.5倍を示す。

以上のことから、最近の堆積速度は過去10,000年より大きいことが知られる*。この傾向は1960年以降の経済成長および、研究学園都市の開発などによる諸工事による土地の裸地化などで、より加速度的に進行していることであろう。

湖沼の堆積速度に関する資料は、数時期の正確な湖沼図がないこと及び、湖底堆積物の層理が明瞭でないことから、必ずしも多くはないようである。そこで、筆者の算定した霞ヶ浦の年平均堆積速度と沖積世における泥炭地、海岸平野、谷底平野および、2、3の湖沼の年堆積速度と比較することにより、堆積速度からみた霞ヶ浦の特性が明らかになるとと思われる。表2は以上の目的のために作成されたが、堆積環境別の堆積速度をも示している。

本表によると、年平均堆積速度は、それぞれの単純平均と比較すると、一般に、泥炭地では0.95mm/y、海岸平野では3.57~3.70mm/y、谷底平野では2.13mm/y、沖積低地に位置する湖沼では7.31mm/y、

* 外岡 (1976) らの資料でも堆積速度の増大が示されている。

表2 堆積環境別の年堆積速度

Table 2. Annual accumulation rates in different sedimentary environments

堆積環境	年堆積速度		資 料			
	(mm)		深 度 (m)	年 代 Y B P	地 名	報 告 者
泥炭地	1.02	平均 0.95	1.15	1120±90	大峰沼湿原	阪口(1974)
〃 (沖積平野)	1.14		3.5	3075±180	検見川	〃 (1974)
〃 (〃)	1.10		3.5	3195±110	〃	〃 (1974)
泥炭地	0.48		3.1	6500±110	福島県赤井谷地	折笠・鈴木(1971)
〃	1.03		1.15	1120±90	福島県葦沼の浮島	大竹(1971)
海岸平野	3.57~3.60	3.57 3.70	43.95~44.25	12300±230	東京都砂町	阪口(1974)
	3.61~3.70		41.57~42.27	11500±230	〃	〃 (〃)
	3.46~3.49		40.65~40.95	11750±150	〃	〃 (〃)
	2.58~2.65		40.40~41.50	15670±740	〃	〃 (〃)
	2.49~2.52		22.23~22.51	8930±230	千葉県五井地先	〃 (〃)
	3.51~3.54		33.17~33.47	9450±350	〃	〃 (〃)
	4.18~4.20		43.43~43.73	10400±40	〃	〃 (〃)
	4.59		37.0	8060±300	秋田県八郎潟	〃 (〃)
	6.71~6.78		27.1 ~27.4	4040±180	十三湖	〃 (〃)
	4.31		39.0	9050±250	〃	〃 (〃)
	8.06~9.21		112~128	13900±200	新潟県白根	〃 (〃)
	1.58~1.60		22.9 ~23.20	14500±600	徳島県阿南市答島	須鎗(1971)
	0.95		5.0	5280±100	八戸市頼家	大池・松山(1971)
	0.34		2.0	5850±210	石狩川河口	北川・赤松(1971)
谷底平野	2.60	2.13	2.0	770±140	宮城県角田市横倉	竹内・奥津(1971)
〃	1.72		8.5	4930±160	〃	〃
〃	1.38		7.0	5090±100	札幌市厚別泥炭地	熊野(1971)
〃	2.8		11.70	4120±100	埼玉県幸手市下野	阪口(1968)
	5.01	7.31	0.06*	12(1948~1960)	霞ヶ浦(3地区)	宇都宮(1978)
	19.19		0.23*	12(1948~1960)	〃 (湖心)	〃 (〃)
	1.96		19.62*	(10000)**	〃 湖心	〃 (〃)
	(10)		0.06	6(1969~1975)	〃 (出島~玉造間)	外岡ら(1976)
	(6)		0.12	20(1955~1975)	〃 (〃)	〃 (〃)
	(5)		0.22	46(1909~1955)	〃 (〃)	〃 (〃)
	(4)		0.46	96(1813~1909)	〃 (〃)	〃 (〃)
	(2)		30~40	20000	霞ヶ浦	茨城大学農学部 霞ヶ浦研究会 (1977)
湖沼	(0.20)	2.63 3.07	0.01	53(1902~1955)	中禪寺湖	西条(1956)
	(0.17)		0.05	303(1649~1952)	〃	〃
	(0.23)		0.23	1000YBP	〃	〃
	(0.19)		0.19	1000YBP	尾瀬沼	〃
	(0.25)		0.25	1000YBP	赤城大沼	〃
	(9.5)		0.22	23(1929~1952)	渡島大沼	〃
	(10.5)		0.34	32(1923~1955)	震生湖	〃
	(0.5)			6600YBP	Upper water foul delta	Smith N. D. (1975)
	(1.2)			2000(6600~8800YBP)	〃	〃
	(4~8)			—	Katanuma	Satake & Saijo(1978)

上記の堆積速度は地殻変動を考慮していない。なお、データの取捨については現沖積面下より産出した試料を利用した。堆積環境の判定は地形図による判読および資料の記載によった。阪口(1974)の資料についてはすべて原著論文について検討していないため、海岸平野と判断した堆積環境には著干の誤りがあるかも知れない。

霞ヶ浦の堆積速度は筆者および外岡らのいずれのデータでも近年、増大する傾向を示す。

* 湖沼の堆積量から求めた。*印以外は柱状図の深度/年代または層理の厚さから算出されている。()を付した数値は原著者の報告した数値である。** 沖積層基底の年代を10000YBPと仮定した。

山岳に位置する湖沼では2.63~3.07mm/yを示すことが知られる。土砂流入の多い沖積低地に位置する湖沼の堆積速度が大きいのは当然であるが、これらの算定には地殻変動および土砂流入量の地域差などを除外しており、今後は、それを考慮した速度を求める必要がある。しかし、その前に、より多くのデータを収集し、堆積速度について整理するのも無意味ではないであろう。

さらに筆者の算定した堆積速度は同じ霞ヶ浦における外岡ら(1976)の値と比べてみても異常な数値ではないようである。そこで、この堆積速度をもとに、本地域の地形変化を予測すると、およそ次のようである。地殻変動および、人工による地形改変がないと仮定すると、霞ヶ浦の平均深度(3.92m)/年平均堆積速度(5.01mm/y)から、およそ783年後には霞ヶ浦はほぼ埋積され、本地域は低温な沖積低地に変ぼうするであろう。

4. まとめ

霞ヶ浦の湖底地形について地形学図等を作成して検討を加えた結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 霞ヶ浦の湖底地形は湖棚、微高地、溝状凹地、spit状地形、湖丘、湖底緩斜面、湖底平坦面、湖底凹地および人工地形に区分される。
- (2) 湖棚は本地域の大部分の湖岸に沿って、幅200~1,000m、深度0.5~4mに分布し、比高1~2mの急崖により、上・下の2段の地形面に区分される。その幅は幅の広い沖積低地および流入河川、おそらくはdeltaの沖合などに大である。はた、特に上位の地形面には現汀線と斜交または平行する比高0.5~1m、長さ2~300m、幅50m以下の微高地、溝状凹地およびspit状地形が発達し、湖流または沿岸流の一般走向が推定される。
- (3) 湖丘地形は沖宿、大山南方の2か所に限られるが、それぞれの構成物質も異なり成因的には同一ではない。
- (4) 湖底緩斜面は湖棚外縁に発達するもの、湖底平坦面を2分するもの、および湖底凹地の周辺斜面をなすものに区分される。特に湖尻に発達する緩斜面は利根川の逆流による逆デルタの前置ないし頂置層をなす斜面と思われる。
- (5) 湖底平坦面は高浜入、土浦入、大山南方の小野川のestuaryおよび湖心に認められ、土浦入および湖心のそれは上述の湖底緩斜面によって、少なくとも2分されている。
- (6) 湖底凹地は一般に湖棚、湖丘などにより狭められた狭さく部に発達し、その最も大きなものは高浜入と湖心をつなぐ狭さく部に認められ、現在の最深部はここに位置する。ここでは1948~60の12年間の地形変化が明瞭で、現在も侵蝕作用が働いており、この南に位置する湖底平坦面上では湖底堆積物の再堆積が認められる。
- (7) 霞ヶ浦の堆積速度は1948~60の12年間で5.01mm/y、19.19mm/y(湖心部)、10,000年間の平均は1.96mm/yを示し、最近の堆積速度は増大する傾向を有する。霞ヶ浦流入河川の流域では最近10数年において開発が激しく、多量の流出土砂量が予想されることから、堆積速度はさらに加速度的に増大するものと思われる。

(8) 人工による地形改変および、地殻変動等がないと仮定した上で、霞ヶ浦の平均堆積速度5.01mm/yをもって、本地域の地形変化を予測すると、霞ヶ浦が埋積され、極めて低湿な沖低地に変ぼうするの、そう遠くはない(約800年後)と推定される。

謝 辞

資料の収集に際し、環境庁自然保護局 森近和男氏、国立公害研究所計測技術部 佐竹研一氏、同環境情報部 白井邦彦氏に、プログラム作成に際しては同環境情報部 大島高志、松戸修の両氏のお世話になった。飯野理子、品田啓子の両氏には地形計測作業等を手伝っていただいた。記して謝意を表する次第である。なお、数値計算には当所の電算機、HITAC 8450を利用した。

引 用 文 献

- 藤下利男・松本一郎・堀江宏保・小川富美子(1967):霞ヶ浦の土質調査および湖底土の土性について。港湾技研資料,27, 2~66.
- H. E. Reineck & I. B. Singh(1975):Depositional Sedimentary Environments. Springer-Verlag, 439pp.
- 茨城大学農学部霞ヶ浦研究会(1977):霞ヶ浦。三共出版, 202pp.
- 茨城県水産試験場(1912):霞ヶ浦北浦漁業学術調査報告書, 1, 1~12.
- 池田宏・小野有五・佐倉保夫・増田富士雄・松本英次(1976):鬼怒川の流路変更と筑波研究学園都市周辺の地形発達。日本地理学会子稿集, (10), 83~84.
- 池田宏・小野有五・佐倉保夫・増田富士雄・松本英次(1977):筑波台地周辺低地の地形発達—鬼怒川の流路変更と霞ヶ浦の成因—。筑波の環境研究 2, 筑波大学 筑波環境研究グループ, 129pp, 104~113.
- J. J. H. C. Houbolt & J. B. M. Jonker (1968):Recent Sediments in the eastern part of the Lake of Geneva (Lac. Lemán). Geol. en Mijnbouw, 47, 131~148.
- J. J. H. C. Houbolt (1968):Recent Sediments in the Southeastern Bight of the Northsca. Geol. en Mijndouw, 47, 245~273.
- 加瀬林成夫(1959):霞ヶ浦北浦における水産の現況。茨城県, 84pp.
- 北川芳男・赤松守雄(1976):石狩川河口近付の自然貝層の¹⁴C年代。日本の第四紀層の¹⁴C年代,第四紀総研¹⁴C年代測定小委, 163~164.
- 国土地理院(1960):湖沼図, 霞ヶ浦。
- 国土地理院(1970):湖沼図, 霞ヶ浦。
- 小谷昌(1964):琵琶湖の湖底段丘について。地理学評論, 37, 671.
- 小谷昌(1965):湖底地形の区分について。地理学評論, 38, 374.
- 小谷昌(1970):食糧の水中貯蔵と湖底環境。地理学評論, 43, 420.
- 小谷昌(1971):琵琶湖の湖底地形およびその環境。琵琶湖国定公園学術調査報告書, 滋賀県, 125~175.
- 熊野純男(1976):札幌市厚別町の泥炭層直下の¹⁴C年代。日本の第四紀層の¹⁴C年代, 第四紀総研¹⁴C年代測定小委, 188~189.
- 中野尊正(1967):日本の地形。築地書館, 362pp.
- 大池昭二・松山力(1976):八戸市の沖積層から産出した貝殻の¹⁴C年代。日本の第四紀層の¹⁴C年代, 第四紀総研¹⁴C年代測定小委, 177~138.
- 大竹亮作(1976):福島県「蓋沼の浮島」の絶対年代。日本の第四紀層の¹⁴C年代, 第四紀総研¹⁴C年代測定小委,93~94.
- 折笠常弘・鈴木敬治(1976):福島県赤井谷地泥炭層の¹⁴C年代。日本の第四紀層の¹⁴C年代, 第四紀総研¹⁴C年代測定

- 小委, 67~68.
- 西条八束(1956): 湖沼の堆積速度について. 日本化学雑誌, 77, 1192~1196.
- 西条八束(1956): 木崎湖, 中綱湖, 青木湖の沈澱現象に関する二, 三の考察. 日本化学雑誌, 77, 930~936.
- 西条八束(1956): 湖底堆積物の研究(第3報) — 中禪寺湖の湖底堆積物中に見いだされた層理について —. 地理学評論, 29, 253~258.
- 阪口豊(1968): 沖積世における関東平野中央部の陸化期の年代. 第四紀研究, 7, 57~58.
- 阪口豊(1968): 泥炭地の地学—環境の変化を探る—. 東京大学出版会, 329pp.
- 桜井徳雄(1950): 霞ヶ浦湖沼観測報告. 東京管区気象研究会誌, (7), 97~129.
- 佐々木道也(1969): 霞ヶ浦の水塊構成について—I. 模型実験による水塊の形成. 茨城県内水面水産試験場調査研究報告, (10), 57~60.
- Smith, N. D. (1975): Sedimentary Environments and late Quaternary history of a 'Low-Energy' Mountain Delta. Can. J. Earth Sci., 12, 2004~2013.
- Satake, K. & Y. Saijo (1978): Mechanism of lamination in bottom sediment of the strongly acid Lake Katsuma. Arch. Hydrobiol., 83, 429~442.
- 外岡健夫・熊丸敦郎・浜田篤信・津田勉(1976): 霞ヶ浦の富栄養化に関する研究—I. —堆積に関する考察—. 茨城県内水面水産試験場調査研究報告, (13), 1~17.
- 須鎗和巳(1976): 徳島層中部の泥炭の絶対年代. 日本の第四紀層の¹⁴C年代, 第四紀総研¹⁴C年代測定小委, 20.
- 多田文男(1964): 自然環境の変貌—平野を中心として—. 東京大学出版会, 282pp.
- 高橋裕・阪口豊(1976): 日本の川. 科学, 46, 488~499.
- 竹内貞子・奥津春生(1976): 宮城県角田市横倉における沖積層の¹⁴C年代. 日本の第四紀層の¹⁴C年代, 第四紀総研¹⁴C年代測定小委, 186.
- 土浦市史編さん委員会(1974): 土浦歴史地図, 土浦市教育委員会, 188pp.
- 山本幸雄(1934): 本邦の逆デルタの研究. 大塚地理学会論文集, 2, 163~176.
- V. P. Zenkovich (1971): A Theory of the Development of Accumulation Forms in the Coastal Zone. Introduction to Coastline Development, (J. A. Steers), Macmillan, 225pp, 94~116.

霞ヶ浦の湖面蒸発の算定について

土屋 巖¹・白井邦彦¹

An Estimation of the Evaporation from Lake Kasumigaura

Iwao TSUCHIYA¹ and Kunihiko SHIRAI¹

Abstract

The evaporation pan (class A pan) factor method based on the observation near a lake is the most suitable method for estimation of evaporation from Lake Kasumigaura a typical shallow lake.

The estimated evaporation amount during the period from July 1977 to August 1978 is lower than several estimations by ordinary empirical formulae for the normal year, and the our result shows a very low evaporation in the cool and rainy 1977 summer and it shows also a lower amount in the extremely hot and dry 1978 summer.

It is suggested that eutrophication of the lake which was accelerated in the summer drought and decelerated in the cool and rainy summer was influenced by the evaporation which depended on the seasonal climate.

As a countermeasure against lake eutrophication, it is first necessary to consider the effect of the rather large year to year variation in the lake evaporation.

1. はじめに

湖の富栄養化現象の検討には、基礎資料となる湖の水収支の各項目、すなわち降水・蒸発・流入・流出などの精度の良い測定値が必要である。これら測定項目のうち、霞ヶ浦について最も不足していたのが、蒸発量測定値であった。

湖のような広い水面からの蒸発量は、実測値またはそれに相当する算定値を得るために種々の方法が提唱されてきた。その主要なものとして、1) 水収支法 (water balance method), 2) 熱収支法 (heat budget method), 3) 空気力学的傾度法 (aerodynamic profile method), 4) 経験式 (empirical evaporation formulae), 5) 計器観測 (evaporation pan observation) などがある。

1)は“降水量-蒸発量=流入量-流出量+貯溜量変化”の各項目のうち、蒸発以外の実測値からの残差として求めるもので、人工湖のようにそれら各項の測定値が可能な場合にしか実用性のないのが普通である。

1. 国立公害研究所 環境情報部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Environmental Information Division, The National Institute for Environmental Studies,
P.O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.

2)は蒸発に関連するエネルギーを理論式にまとめたもので、原理的に正確ではあっても、その原理に相当する実測値を広い水面について入手することが実際には不可能であるため、ごく短時間の推定値または計器観測の不適な深い湖や海洋について適用されることが多い。

3)は傾度法とも略称され、ThornthwaiteおよびHoltzman (1942)の方式や、KEYPS法と呼ばれるもの(Lumley and Panofsky, 1964)が知られているが、信頼性のある関係観測資料を得ることが困難である。

4)はダルトン型の実験式として古くから用いられ、“ $E=f(u)(e_w-e_a)$ ”の形で表現され、蒸発量(E)は水面上の蒸気圧(e_w)と一定高度の空気の蒸気圧(e_a)との差に風速(u)の関数を乗じたもので、Penman (1948, 1963)の改善によってペンマン法とも、バルク法(bulk aerodynamic method)あるいは質量輸送法(mass transfer method)とも呼ばれる。いずれもダルトン型の改善またはそれに熱収支法その他の手法を組合せたもので、気候学的観測統計資料を利用する実用的なものであって、広く用いられるようになったが、真の蒸発量との違いについての検証はまだ十分でない。

5)の蒸発計を用いる方法は、観測技術の上では最も簡単であるが、広い水面についての代表性に問題があり、現在ではWMO(世界気象機構)の提唱によって、class A panと呼ばれる直径4フィートのものが標準測器として用いられるようになり、浅い湖に対しての対応性がある範囲の係数(0.6~0.8)を測定値に乗ずることによって信頼度の高い算定値が得られるようになった。日本でも、1965年まで従来直径20cmの小型蒸発計は廃止され、現在14地点で直径120cm規格のものをclass A panとして使用している。WMOにおいても、class A pan以上の大型蒸発計と湖からの蒸発の比較、各種大型蒸発計相互比較が国際協力業務として進められ(Hounam, 1973; WMO, 1976)、少なくとも浅い湖についての蒸発量算定にはclass A panの使用が実測手段としては最も根拠のあるものとなった。

霞ヶ浦湖面からの蒸発の算定には、前述のような事情を考慮し、かつ霞ヶ浦が平均水深4mの典型的浅水湖であるため、湖岸近くに何か所かのclass A panを設置して通年観測を継続して湖面蒸発算定資料とし、あわせて他の手法と比較することを計画した。

2. 蒸発量観測の経過と測定結果

図1に示したように、1977年7月に公害研実験池ほとりでの継続観測を開始し、1978年6月からは県内水面試験場と江戸崎中学校の御協力によって、それぞれの構内に設置した。いずれも雨量その他の気象観測が継続的に行われている場所である。蒸発計は気象庁検定の大型蒸発計(竹田計器製で前述のclass A panの気象庁表示名である。以後大型蒸発計と表現する)を気象庁の観測法に準じて使用した。ただし、冬季の結氷時には気象庁観測法では欠測として、月合計値からはずしたままになっているが、当所の観測では氷が解けた日に積算測定をした。これは、霞ヶ浦での結氷現象がほとんどなく、蒸発計の日中の解氷時の蒸発量が湖面蒸発に近いものとみなしたためである。

1977年7月から1978年8月まで観測結果は、資料編に示したが(p. 405)、比較参考資料として、

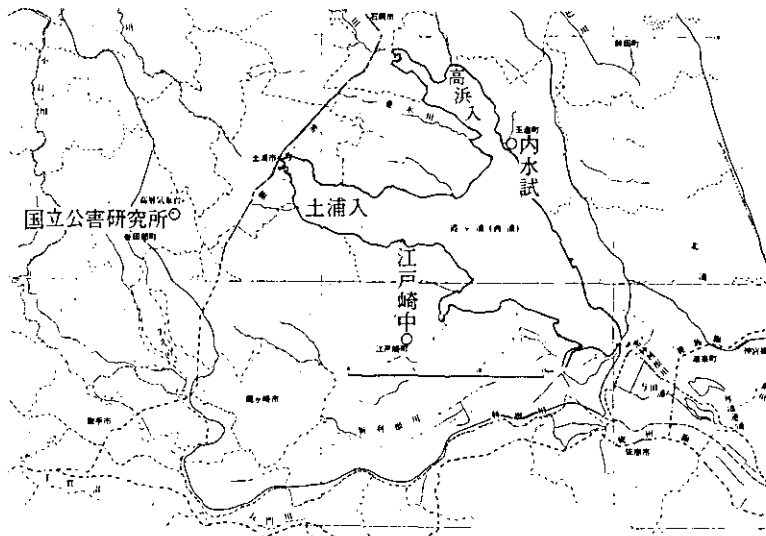


図1 霞ヶ浦周辺の大型蒸発計 (○印)

Fig. 1 Class A pan stations in the Lake Kasumigaura area

気象庁露場（東京都千代田区大手町）における同期間の観測記録を示した。表1はそれに基づいた月および年合計である。

3. 湖面蒸発量の算定

大型蒸発計による測定値から浅い湖の蒸発量を算定するための実験観測では、測定値に対して0.6～0.8の係数を乗ずるといふ例が多い。たとえば表2はWMO報告（Hounam, 1973）に紹介されたものの一部であるが、比較対象となる実際の湖については研究者によって異なる算定方式が使われ、真の蒸発量についての信頼性は限定されると見るべきである。これは広い湖についての蒸発に関連する項目の観測内容によっては精度の保証が困難な場合が多いからである。他方、実測的に精度を保証する手段を考案する例もあり、オーストリアとハンガリーの境にある平均水深の最大と面積がそれぞれ2mと320km²のノイジードル湖（Neusiedl）では、湖中央にGG 1-3000（直径61.8cm、深さ60-68.5cm）をいかだを組んで浮かべた場合の比較が報告されている（Neuwirth, 1973）。

表3にその結果を示したが、GG 1-3000蒸発計の表面水温の日変動が周辺湖水面温度とほぼ一致しているので、この蒸発計の測定結果をほぼ湖の代表値とみなすと、class A panの湖への換算係数は0.64となる。

表1 大型蒸発計による観測と霞ヶ浦湖面蒸発量の算定

Table 1. Evaporations(mm) from class A pan(observed) and Lake Kasumigaura (estimated)

	JMA, Tokyo (CLINO* 1931-60)	NIES, Tsukuba (CLINO, Mito 1931-60)	Lake Kasumigaura Daily mean
1977, 7	119.4 (131.9)	97.0 (133.9)	77.6 2.5
8	77.3 (141.5)	59.2 (144.6)	47.4 1.5
9	89.0 (94.2)	67.6 (97.4)	54.1 1.8
10	64.4 (68.9)	40.0 (71.9)	32.0 1.0
11	50.8 (53.6)	33.4 (53.7)	26.7 0.9
12	37.5 (46.8)	17.6 (49.4)	14.1 0.5
1978, 1	6.8 (51.3)	25.4 (53.6)	20.3 0.7
2	4.1 (58.5)	30.0 (57.4)	24.0 0.9
3	45.5 (82.4)	59.2 (79.6)	47.4 1.5
4	74.4 (104.1)	63.2 (105.2)	50.6 1.7
5	101.8 (120.7)	86.2 (121.7)	69.0 2.2
6	115.1 (108.9)	112.8 (112.6)	90.2 3.0
7	132.1 (131.9)	132.0 (133.9)	105.6 3.4
8	169.2 (141.5)	130.0 (144.6)	104.0 3.4
July 1977 —June 1978	786.1	691.6	553.3
Sept. 1977 —Aug. 1978	890.7	797.4	637.9
CLINO, year	1062.8	1081.0	

*CLINO: Climatic Normals の略で、原則として30年間の平均値を用いそれを気候
 平年値として使う。とくに1931-60をStandard Climatic Normals と
 し、30年ごとに更新する。

精度の高い水収支法による蒸発量算定が可能になったオランダのゾイデル海干拓予定地のフレボ
 (Flevo) 湖での測定では、湖水に浮かべた蒸発計 (Urk型直径50cm, 深さ20~25cm) に対して、0.82
 ±0.06の係数を与えている (Keijman and Koopmans, 1973)。フレボ湖は460km²で平均水深は3mであ
 り、堤防閉め切りによって、水位換算測定誤差を0.05mm/dの程度にすることができたものである。

オランダのUrk型とオーストリアのGGI-3000とでは、同じ使用状態であっても、前者のほうが夏
 季の表面水温が上昇しやすいので、実際の湖面蒸発量より多めになったものといえる。日本の場合、
 大型蒸発計の湖水に浮かべた観測例がないので、係数の決定は不精確になるが、暫定的に大きめの係
 数を与えることとして、0.8を用いた結果を表1に示した。すなわち、真の蒸発量よりやや大きめに表
 現される。前述2例の観測値によると、夏季と乾燥型の天候の卓越するときに係数は小さく、気温の
 低い時と曇天型天候の季節に係数は大きくなるので、霞ヶ浦の場合はオーストリアのノイジードル湖
 よりも大きめの係数になると考えられる。

霞ヶ浦は平均水深4m, 面積は約220km² (西浦167.7km², 北浦38.7km², 外浪逆浦7.3km², 理科年表1976)
 であり、表1の湖面蒸発量算定値を求めると、1977年7月~1978年6月の1年間で、湖面全体では約

表2 湖と蒸発計 (class A pan) の比較 (月別) (Hounam, 1973より)

Table 2. Monthly values of various lake to pan coefficients
Lake relative to class A pan: E_L/E_P

LOCATION	YEARS	JAN.	FEB.	MAR.	APRIL	MAY	JUNE	JULY	AUG.	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.	REFERENCE
Lake Hefner	1950					0.35	0.60	0.71	0.82	0.93	0.90	1.32	1.06	Sellers(1965)
	1951	0.76	0.13	0.51	0.39	0.52	0.65	0.64	0.72					
Lake Elsinore	3 year means	0.82	0.63	0.68	0.66	0.68	0.77	0.74	0.78	0.87	0.93	0.97	0.95	
Lake Okeechobee	7 year means	0.77	0.69	0.73	0.84	0.82	0.85	0.91	0.91	0.85	0.76	0.71	0.83	Kohler(1954)
Fort Collins	2 year means				0.60	0.63	0.69	0.69	0.71					
Kempton Park	1959			0.53	0.53	0.55	0.56	0.64	0.70	0.68	0.93	0.80		Lapworth (1965)
	1960			0.60	0.50	0.46	0.72	0.69	0.77	0.91	0.94	0.43		
	1961			0.54	0.46	0.63	0.49	0.71	0.66	0.90	1.42	1.15		
	1962			1.18	0.47	0.67	0.83	0.71	0.80	0.82	1.18	1.63		
Silver Lake	1938					0.60	0.59	0.52	0.58	0.59	0.73	0.63	0.68	
	1939	0.66	0.76	0.68	0.60									
Salton Sea*	2 year means 1961-62	0.53	0.46	0.37	0.40	0.47	0.39	0.46	0.47	0.56	0.70	0.77	0.57	
Lake Eucumbene**	1961												0.68	SMHEA (unpublished report)
	1962	0.73	0.81	0.86	1.17	2.04	1.49	1.15	1.20	0.61	0.69	0.48	0.72	
	1963	0.77	0.91	1.00	0.95	2.04	2.37	2.53	0.95	0.62	0.31	0.66	0.73	
	1964	0.63	0.84											

* Approximate calendar months

** Average of two pans located at Eucumbene Dam and Wambrook were used to obtain Class A pan evaporation (E_P)

表3 湖面のGGI-3000蒸発計と陸上 class A pan 蒸発計の比較
(Neuwirth, 1973より)

Table 3. Evaporation totals (mm) from the GGI-3000 pan and from the class A pan during undisturbed days; their ratio; midlake-station 1969

Month	No. of useful days	GGI-3000	Class A	Ratio
May	5	25.1	33.3	0.75
June	13	50.2	93.6	0.53
July	17	79.3	119.7	0.66
August	13	61.5	88.3	0.69
September	18	46.3	77.3	0.59
October	12	16.3	22.0	0.73
Totals	78	278.7	434.2	0.64

1億2千万トン、1977年9月～1978年8月の場合約1億4千万トンになり、いずれも従来より平年値として使われることの多かった約2億トン（たとえば、茨城大、1977）に比べかなり少ない。1977年7～8月は典型的多雨低温型、1978年7～8月は逆に極端な少雨高温の干ばつ型であるが、従来の算

定値がかなりの過大数値であったことが考えられる。

図2に従来の算定値（平年値）と今回の観測期間の算定値を示した。

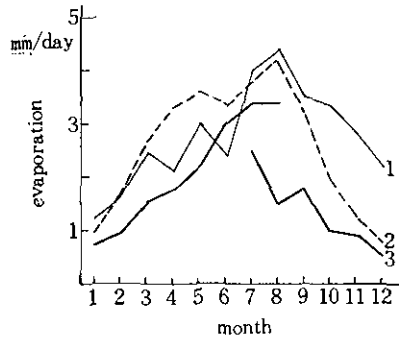


図2 霞ヶ浦湖面蒸発量(mm/d)の算定
1. 茨城大(1977), 2. 近藤(未発表), 3. 1977年7月~1978年8月

Fig 2 Estimated monthly evaporation (mm/d) from Lake Kasumigaura
1. Univ. Ibaraki (1977), 2. Kondo (unpublished), 3. July 1977—August 1978

4. 湖面蒸発問題の検討と今後の計画

国際的な標準測器として class A pan が使用されるためには、現実に各国で使用している各種の大型蒸発計との比較検定が必要である。また、蒸発計の直径を大きくすれば、浅い湖の蒸発とかなり近似してくるので、そのような大型蒸発計との比較ができていれば、湖面蒸発量の算定に有用である。

WMO (1976) はそのような比較資料として、USSR20m² タンク（直径5m、深さ2m、縁の高さ7.5cm以内で土中に埋める）とGGI-3000蒸発計と class A pan との相互比較測定の結果を発表している。それによると、表4のようになっており、もし20m² タンクが浅い湖とほぼ一致したとすると、霞ヶ浦の気候から見て、USAのDavis(38.3°N, 121.5°W, 18m)の係数0.74に近いものを想定することが適していることが考えられる。

他方、同じ表の改善したダルトン型の計算式による結果が湖面蒸発量算定に適しているとする、係数は0.78程度が良いことになる。この計算式は熱収支値を含んでおり、次の形となる。

$$LE = \frac{D}{L} [K\downarrow(1-\alpha) - \delta T_a^4 (0.56 - 0.078\sqrt{e_a}) (0.1 + 1.73 \frac{K\downarrow}{K\downarrow\downarrow} - 0.50\cos\phi)] + 0.35(1-D) \\ (e_s - 0.75e_a)(0.537u_2 + 0.5)$$

ここで、 L は水の蒸発潜熱、 E は蒸発率、 D は蒸気圧傾度 Δ と蒸発定数 γ' によって $\Delta/(\Delta + \gamma')$ と表現され、 $K\downarrow$ は地表において測定された短波長全天放射（日射）、 α は水面反射率、 δ はStefan-Boltzmanの定数、 T_a は気温（絶対温度°K）、 e_a はその気温での水蒸気張力、 $K\downarrow\downarrow$ は大気上限における日射、 ϕ は緯度、 e_s は水面の水蒸気張力、 u_2 は地上高2mで測定された平均風速でm/sで表現される。単位につ

表4 各種大型蒸発計の比較

Table 4 Mean evaporimeter ratios
 20m²=20m² tank, GGI = GGI 3000 pan, Class A pan, EO = Combination estimate

Evaporimeter Ratios	Individual Stations													All Stations		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	All Rain Conditions	Negligible Rainfall	Significant Rainfall
20m ² GGI	—	0.77	1.07	0.71	0.96	0.80	0.88	0.84	—	0.96	0.82	0.77	0.79	0.85	0.82	0.87
20m ² Class A	0.73	0.70	0.67	0.65	0.74	0.77	0.71	0.76	—	0.73	0.63	0.70	—	0.67	0.68	0.67
EO	0.89	0.94	1.33	0.75	1.05	1.11	0.86	1.16	—	1.13	0.94	0.98	1.20	0.99	0.89	1.13
20m ² EO	—	0.72	1.43	0.54	1.00	0.89	0.76	0.97	0.97	1.08	0.77	0.76	0.95	0.84	0.73	0.99
GGI	—	0.72	1.43	0.54	1.00	0.89	0.76	0.97	0.97	1.08	0.77	0.76	0.95	0.84	0.73	0.99
EO	0.65	0.66	0.89	0.49	0.78	0.85	0.61	0.88	0.87	0.82	0.59	0.68	—	0.66	0.61	0.76
Class A	0.65	0.66	0.89	0.49	0.78	0.85	0.61	0.88	0.87	0.82	0.59	0.68	—	0.66	0.61	0.76

No.	Name	Station Coordinates	No. of months of data	No. of months with negligible rain
1	GRIFFITH, AUSTRALIA	34° 2' S, 146° 2' E 131m M. S. L.	32	15
2	NEW DELHI, INDIA	28° 4' N, 77° 1' E 216m M. S. L.	24	17
3	STERLING, U. S. A.	38° 6' N, 77° 3' W 85m M. S. L.	27	9
4	LAKE MEAD, U. S. A.	36° 0' N, 114° 5' W 521m M. S. L.	40	35
5	DAVIS, U. S. A.	38° 3' N, 121° 5' W 18m M. S. L.	32	20
6	ENTEbbe, UGANDA	00° 0' N, 32° 3' E 1147m M. S. L.	15	0
7	TISICE, CZECHOSLOVAKIA	50° 2' N, 14° 3' E 163m M. S. L.	35	3
8	WARSAWA, POLAND	52° 2' N, 20° 6' E 98m M. S. L.	41	7
9	SZARVAS, HUNGARY	46° 5' N, 20° 3' E 83m M. S. L.	56	22
10	VALDAI, USSR	57° 4' N, 33° 2' E 146m M. S. L.	71	40
11	DUBOVKA, USSR	47° 2' N, 42° 4' E 91m M. S. L.	27	22
12	POONA, INDIA	18° 3' N, 73° 5' E 559m M. S. L.	37	28
13	KEW, ENGLAND	51° 3' N, 00° 2' W 2m M. S. L.	48	11

いて補足すると、 $K\downarrow$ と $K\downarrow\downarrow$ はcal/cm²·d、 LE はmm/d、 e_s は水銀柱のmm、 e_a はmbである。なお、 $K\downarrow/K\downarrow\downarrow$ は $0.29\cos\phi+0.52(n/N)$ で置きかえることもできる。この場合、 n は実際の日照時間であり、 N は可照時間である。

一般にこの種の経験式では、係数の決定と必要な観測値の精度と代表性によって、実用上の価値が

判定される。この点については、大型蒸発計の観測内容を吟味できるだけの関係気象要素の湖周辺での良い観測資料は、日本ではほとんどなかったといえる。

気象庁における10年間の比較観測を小型蒸発計（径20cm）との間に続けて、1966年以後の小型蒸発計の使用を停止したという事情があり、その際の資料と外国の調査事例を参考にしたうえで、観測指針には0.72を大型蒸発計の測定値に乗ずれば湖面から蒸発量が推定されるとしている。

深い湖については、湖水の熱貯溜の季節変化が気温とかなりずれるため、大型蒸発計によっても、なお、推定の物理的根拠があいまいになるため、前述のダルトン型経験式やその改良型が適していると考えられる。しかし、霞ヶ浦は浅い湖であり、オランダやオーストリアで同じ規模の浅い湖について実用化を検討した蒸発計測定値を利用する方法が優れているといえる。逆に、ダルトン型による計算値が、蒸発計に係数を乗じたものとよく一致するならば、その経験式を深い湖に適用できると考えたほうが良いともいえる。

図2と表1に示した算定値の比較では、ダルトン型による値が、1978年7～8月のようなかなり極端な干ばつ天候においても、蒸発計による算定値を上回った。これは、ダルトン型の計算式が正しかったとしても、観測値として入れなければならない風速と湖の水面温度が実質的には測定不能かあるいは不完全な推定をすることで、実際の蒸発量とかなり違う値を算定してしまう可能性があるためといえる。一般に風の観測値は通常の気象観測施設では、地上から10mあるいはそれ以上であり、ダルトン型の式で用いられる水面から2mの高さの風より強いことが考えられる。したがって、平年値として気象台の風資料を使う場合は過大な蒸発量になる可能性が高い。

表1の湖面蒸発推定では、大型蒸発計の測定値に0.8を乗じたが、これは従来の算定値との違いを過大に見積らないための暫定的係数を採用したためである。

浅い湖の特徴として、霞ヶ浦では年間の最大蒸発季節は7～8月である。しかし、1977年のような冷夏多雨の場合、8月でも4～5月のみであり、逆に典型的干ばつ猛暑型の1978年8月には前年の倍以上が蒸発している。このことは、湖の富栄養化現象には二重に影響する。すなわち、冷夏多雨では降水量が多くて蒸発が少ないので湖水の収支残が大きく、かつ低温によってアオコのようなプランクトンの発生が少なく、干ばつ猛暑では湖水収支残が二重に少なくなって、さらに氷温上昇によるアオコ発生の増加は、湖水の水量に対する濃度を極端に増加させることになる。

なお、表1に東京の観測値を併記し、また資料編に観測比較日表を示したのは、同じような天気のときの、東京と霞ヶ浦付近の違いを見るためでもある。一般に公害研の値が低い、夏の場合、しばしば東京のほうが高温でかつ低湿度になることが多いので、都市気候の特色が蒸発にも現れた例である。曇天型の天候では両者の差は小さい。

わずか1年2か月の観測では、十分な精度で霞ヶ浦湖面の蒸発を検討するのに不完全であるため、さらに同じ規格の大型蒸発計による観測点を1978年度から2点湖岸に増設し（図1参照）、さらに短期間の実験観測を湖上および湖岸で実施し、また、前述した種々の理論式の検討も同時に進める予定である。

なお、未発表資料を提供して下さった東北大学近藤純正助教授、気象庁観測部、および東京管区気象台の御好意に感謝する次第である。

5. まとめ

典型的な浅い湖である霞ヶ浦の湖面からの蒸発量の算定は、各種の経験式や理論式よりも、大型蒸発計による湖岸近くの測定値から求めることが適している。1977年7月から1978年8月にかけての観測結果による算定では、極端な干ばつ猛暑を含んだ場合でも従来の経験式等による算定値より少なく、冷夏多雨の年の場合にはきわめて少ないことがわかった。蒸発現象の介在によって、富栄養化現象は干ばつ年に加速され冷夏多雨年には減速するものと見られる。富栄養化対策では蒸発量の年々変動はかなり大きいことを考慮する必要がある。

引用文献

- Hounam, C.E. (1973) : Comparison between pan and lake evaporation. WMO Tech. Note, No.126, 52p.
茨城大学農学部霞ヶ浦研究会編(1977) : 霞ヶ浦. 三共出版, 11~13.
Keijman, J.Q. and R.W.R. Koopmans(1973) : A comparison of several methods of estimating the evaporation of Lake Flevo. IAHS Pub., No.109, 225-232.
気象庁(1965) : 観測課長会議資料(未発表).
近藤純正(1978) : 未発表計算資料.
Lumby, J.L. and H.A.Panofsky(1964) : The structure of atmospheric turbulence. Wiley, N.Y., 239p.
Neuwirth, F. (1973) : Experiences with evaporation pans at a shallow steppe-lake in Austria. IAHS Pub., No.109, 290-297.
Penman, H.L. (1948) : Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. Proc.Roy. Soc. Ser. A, 193, 108-120.
Penman, H.L. (1963) : Vegetation and hydrology. Commonwealth Agri. Bureaux, 124p.
Thornthwaite, C.W. and B.Holtzman(1942) : Measurement of evaporation from land and water surface. USDA Tech. Bull., No.817, 75p.
WMO(1976) : The CIMO international evaporimeter comparisons. Final Report, WMO-No.449, 38p.

霞ヶ浦の湖流特性

村岡浩爾¹・福島武彦¹

Flow and Mixing Characteristics in Lake Kasumigaura

Kohji MURAOKA¹ and Takehiko FUKUSHIMA¹

Abstract

Two types of field surveys were carried out during the summer of 1977 by collecting the lake current and water quality data at ten sampling stations at Takahahairi Bay in Lake Kasumigaura. The effect of ordinary inflow from several rivers may be negligible in comparison to the lake current which seems to be mainly governed by wind and seiche of period 150 minutes. From the distribution of Cl^- , the dispersion coefficient was calculated to be $6.3-26.0 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$. Furthermore, from the time-varied characteristics of the vertical distribution of the water temperature, the vertical diffusion coefficient was estimated to be $3-10 \text{ cm}^2/\text{s}$ for the upper layers of water, and $0.2-2.0 \text{ cm}^2/\text{s}$ for water near the lake bottom. These values indicate that mixing due to the wind driven current may be predominant in Lake Kasumigaura.

In another field survey which was concerned with float movements at four points distributed on the same bay in October 1978, the current in the morning with little wind was $1-2 \text{ cm/s}$ for any water depth, while a considerably fast current of $4-10 \text{ cm/s}$ was observed in the upper sections in the afternoon when the mean wind velocity was 4 m/s .

1. はじめに

湖において水の流動は、微弱ではあるが、水域内での混合、あるいは水域と水域との間の交換を左右するものとして水質量の値、分布に影響を与えている。霞ヶ浦における流動の特性を考えてみると、水の収支より滞留時間が数か月のオーダーであると報告されているが(茨大農学部, 1977)、湖岸形も複雑であり湖心域、土浦入、高浜入という三つの水域は流動状況や水質に関して独立性が高い。また水深が極めて浅いため(最大水深7.3m, 平均水深4m)、夏期においても水温躍層は安定に存在しえず、流れによる鉛直混合は相当大きいものと予想される。さらに、流速が早くなると底泥のまき上げ、浮上が生ずることもあり、流れは栄養塩の収支など物質循環のサイクルへも影響を与える可能性をもっている。

このように湖流およびそれに起因する水平・鉛直方向の混合現象は、水質量の予測問題などに対し

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Water and Soil Environment Division, The National Institute for Environmental Studies, P. O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.

では欠くことのできない因子であるが、実際に霞ヶ浦を対象に行われた現地観測は少なく、信頼できる実験・数値計算の報告はほとんどない。流速を鉛直方向に積分した二次元吹送流モデルを数値解析によりもとめた南部ら（1974）の結果においても、湖流の全体的特性は不明な所が多い。

ここでは1977.7.4~6, 8.18~20の二回にわたり行った高浜入を中心とした流動・水質調査、および、1978.10.12に行ったフロートによる湖流調査の結果を水理量を中心に報告するとともに、水質との関連性を論じる。

2. 水理・水質調査 1977.7.4~6, 8.18~20

2.1 調査地点および項目

図1に示す通り、高浜入と湖心域を接続する狭さく部における流向・流速の測定を中心に、高浜入・

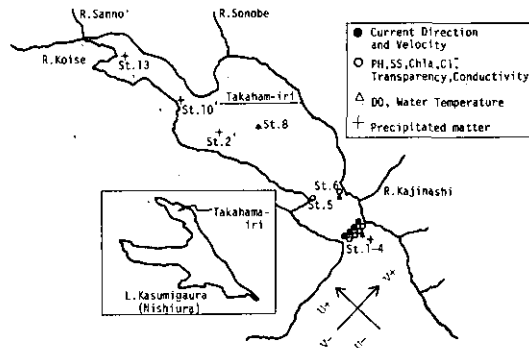


図1 測定地点及び項目

Fig.1 Surveying stations and observed parameters in Takahamairi Bay

十数地点での水質観測および高浜入流入河川（恋瀬川・山王川・園部川）の流量・水質の測定を行った。St.1~4の流向・流速および水質測定と、St.6, 8の水質測定は7.5, 8.19の9:00~16:00の間、ほぼ一時間間隔で行った。同地点のそれ以外の日および他の St. での測定は一日一回である。流向・流速の測定は高須一田伏間 1 km の断面を、4 等分した領域のほぼ中央において、鉛直方向 1 m 間隔で行った。（St.ごとの水深は図3.3に記す。）

2.2 気象量

1977. 6月~8月の日平均気温、降雨量（筑波、高層气象台）、高浜入での水位（八木蒔）の変化を図2に示す。特に注目することは、8月中旬の大雨で、8月の降雨量は平年の2倍となり、水位も平常時より80cm程度も高くなったことである。2回目の調査はこの直後に行われた。

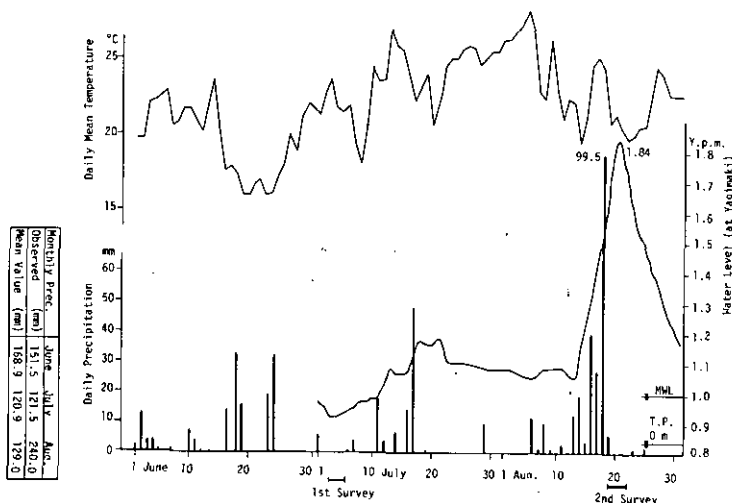


図2 高浜入における気温、降雨量、水位の変化 (1977, 6月～8月)

Fig. 2 Daily variations of atmospheric temperature, precipitation, and water level at Takahamairi Bay (June 1-Aug 31, 1977)

2.3 流向・流速測定結果

高浜入と湖心を結んだ方向の流速を u (高浜入流入を正とする), その直角方向流速を v として (図1に図示) u , v の個々の値としては非常にばらつきが大きかったので, 経時特性, 横断面特性, 鉛直特性を明白にするため, 感潮河川などで用いられている次式を用いて整理を行った (上嶋ら, 1975)。

$$u = u_0 + u_t(t) + u_y(y) + u_z(z) + u_s(t, y, z) \quad (1)$$

u_0 ; 全平均, $u_t(t)$; 断面平均の u_0 よりの偏差, $u_y(y)$; 周期・水深平均の u_0 よりの偏差, $u_z(z)$; 周期・地点平均の u_0 よりの偏差, u_s ; 残差

v についても同じく整理して, その結果を図3.1～3.6に示す (図3.1～3.6の値にはそれぞれ u_0 , v_0 の値が加えてある)。

2.4 河川固有流, セイシュ, 吹送流

図3に示したものより, 流れの特性から分類を行う。まず u_0 は9:00～16:00の間, 平均的に断面を通過した流速を示し, 流入河川流量と関係が深いものと考えられる。しかしながら河川流量 (7/5; 3河川合計4.5 m^3/s , 8/19; 測定は不可能であったが100 m^3/s 程度) と測定断面積 (ほぼ4000 m^2) より計算した値に比べ2オーダーも大きい値となっている。これは微流速のための測定誤差と考えられ, また2回目の調査の時には, 降雨の地域的な偏差に起因している可能性も考えられる。次に図3.1の $u_t(t)$ ($+u_0$) の変化より, ほぼ150分程度の往復流の存在がみとめられる。Neumannの方法 (堀川, 1973) により, 霞ヶ浦を湖心, 土浦入, 高浜入の三領域の結合と考え, 形状を与えて計算を行った結

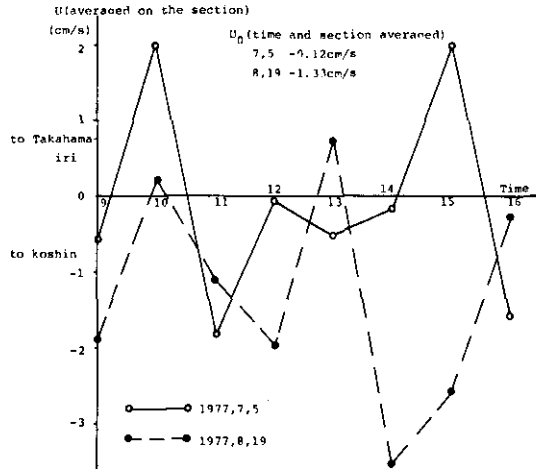


図3.1 高浜入出口断面における断面平均流速成分 $u_t(t) + u_0$ の時間変化

Fig. 3.1 Hourly variation of current $u_t(t) + u_0$ averaged on the cross section at downstream end of Takahamairi Bay

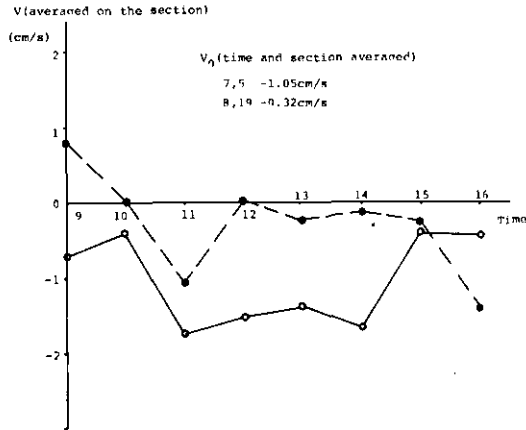


図3.2 同断面での断面平均流速成分 $v_t(t) + v_0$ の時間変化

Fig. 3.2 Hourly variation of current $v_t(t) + v_0$ averaged on the cross section at downstream end of Takahamairi Bay

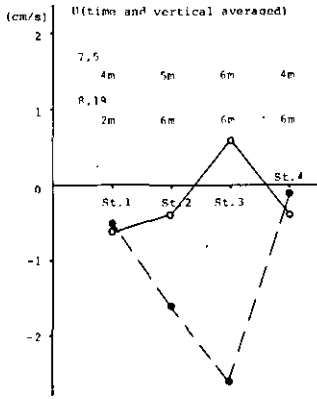


図3.3 同断面での時間・鉛直平均流速成分 $u_y(y) + u_0$ の接点変化

Fig. 3.3 Spatial variation of current $u_y(y) + u_0$ averaged in time and on the depth line at downstream end of Takahamairi Bay

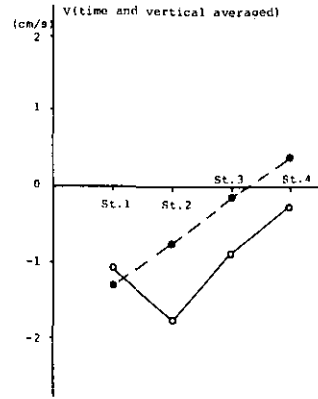


図3.4 同断面での時間・鉛直平均流速成分 $v_y(y) + v_0$ の接点変化

Fig. 3.4 Spatial variation of current $v_y(y) + v_0$ averaged in time and on the depth line at downstream end of Takahamairi Bay

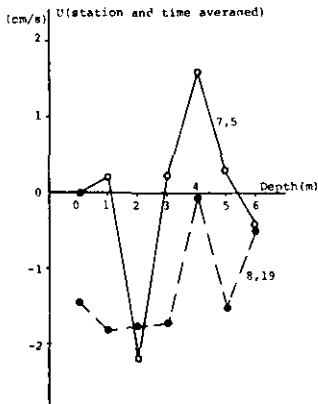


図3.5 同断面での時間・地点平均流速成分 $u_z(z) + u_0$ の鉛直方向変化

Fig. 3.5 Vertical variation of current $u_z(z) + u_0$ averaged in time and space at downstream end of Takahamairi Bay

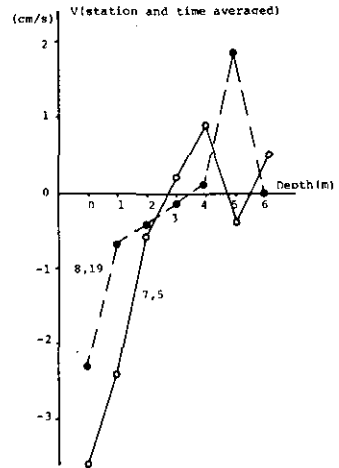


図3.6 同断面での時間・地点平均流速成分 $v_z(z) + v_0$ の鉛直方向変化

Fig. 3.6 Vertical variation of current $v_z(z) + v_0$ averaged in time and space at downstream end of Takahamairi Bay

果では、固有周期として141分、101分、63分、47分……などの数値を得たが、最長周期141分とほぼ一致し、セイシュの流れが生じていることがわかる。振幅の大きさは2回の調査とも2cm/s程度であったが、セイシュの原因を風による吹き寄せと考えると計算を行ってみた。高浜入の長軸方向に5~6m/sの風が吹き寄せが十分に達成される時間（1時間程度）以上吹いたとすると、それにより生ずるセイシュの振幅は、

$$u = \frac{\pi}{8} \Delta h L \alpha / \bar{h} T, \quad \Delta h = 3 L \tau / 4 \rho g \bar{h} \quad (2)$$

$$L = 30 \text{ km}, \quad \bar{h} = 4 \text{ m}, \quad T = 141 \text{ min}, \quad \tau = 0.5 \text{ dyn/cm}^2, \quad \alpha \text{ (湾口補正係数)} = 2.5$$

よりほぼ2.5cm/sとなるが、この概算値とほぼ一致することにより、風によりセイシュが発生する可能性が示せた。また1回のセイシュにより水の移動する距離は50m程度と考えられる。

最後に調査日の風向・風速は第1回でENE3~5m/s、第2回でENE4~7m/sであったが、ほぼ v の方向への風であった。図3.6の $v_z(z)$ ($+v_0$)を見るとこの影響を受けて表層で v 、底層で $v+$ に流れている。流速の鉛直分布は吹送流で鉛直循環する時の分布にほぼ一致して、表面流速は風速の1%前後となっている。2~3%の報告値が多いが（日高、1955）、狭さく部であるための複雑な地形的要素を考えあわせれば、妥当な数値といえる。以上により高浜入出口においては、平常時ではセイシュによる流れと、特に表層では吹送流が卓越していると結論される。

2.5 電気伝導度の解析

図4.1および4.2にSt.1~6での電導度の変化を示す（水深0~2mの平均）。霞ヶ浦では海水の進入があったために入域から湖心に向けて Cl^- 濃度、電導度は上昇している。湾口では交換率（流出した水量のうち、湾内へ再びもどらないものの比率、Parker et al, 1972）といった概念が存在し、水質を評価する上では重要なパラメータであるが、この地点ではセイシュ周期が140分と短いなど測定上難しいこともあり、今回は湾口で交換率・分散係数を求める解析は行わなかった。図4より以下のことが考えられる。まず7/5に比べ8/19に低いレベルとなっているのは大雨による河川水量増加のためである。次に7/5のデータで10時ごろに存在していた横断方向の電導度の違いが、13時ごろには均一化している。2.4で吹送流が横断方向に卓越していたことを示したが、この流れにより混合が生じたものと考えられる。ここでは示さないが電導度の鉛直分布、特に5~6mでの高濃度（310~320 $\mu\Omega/\text{cm}$ ）は7時間の測定で変化していなかった。これは霞ヶ浦が後で示すように鉛直拡散係数が大きいとはいえず、1~5cm/s程度で、この運動による混合時間のオーダーが数十時間であるためと考えられる。さらに7/5ではSt.4側、8/19ではSt.1側で高濃度となっているが、これは図3.3 $u_y(y)$ ($+w_0$)のSt.3で7/5流入、8/19流出の傾向があるためと考えられる。このように狭さく部においては地形的に水の動きが特に激しい所が存在し、交換率・分散係数といった数値に大きく影響すると考えられる。

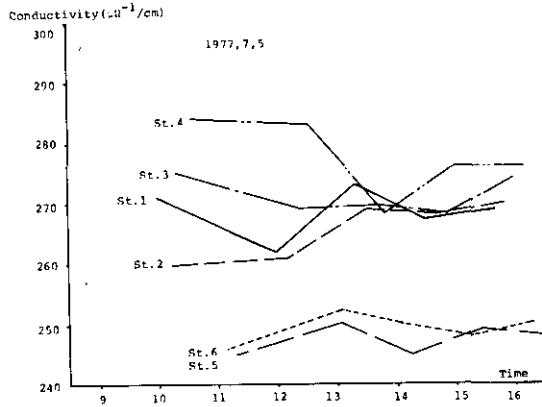


図4.1 St.1~6における電気伝導度の時間変化 (1977, 7, 5)

Fig. 4.1 Hourly variation of conductivity at stations St.1-St.6 on 5 July 1977

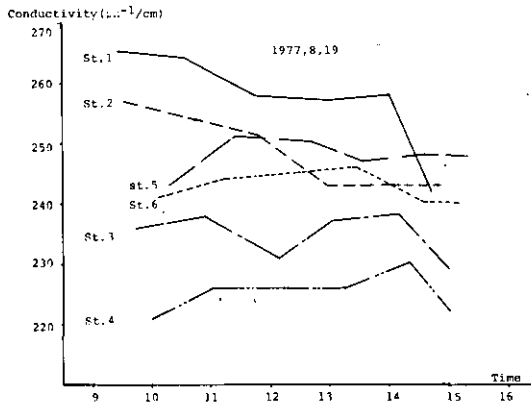


図4.2 St.1~6における電気伝導度の時間変化 (1977, 8, 18)

Fig. 4.2 Hourly variation of conductivity at stations St.1-St.6 on 19 August 1977

2.6 Cl⁻濃度を用いた混合率の推定

図5に高浜入最奥部よりの距離を横軸としてCl⁻濃度の変化を記した。8/19の場合大雨の影響で高浜入中央部で傾きが大きくなっている。平常時の7/5では湖の幅の狭い所で傾きが大きく、広い領域に比較して流れ方向の混合が弱いことがわかる。ここでは広がり部（八木蒔地点）での分散係数を推

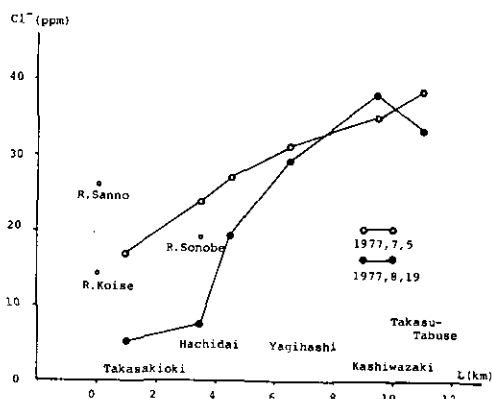


図5 高浜入の長軸方向へのCl⁻濃度の変化

Fig. 5 Horizontal distribution of Cl⁻ along the longitudinal line of Takahamairi Bay

定してみた。式としては一次元分散方程式より次のように分散係数 D_x を決定した。

$$Q \frac{\partial C}{\partial x} = D_{xx} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} A \quad \text{B.C. at } x=0, D_x=0, C=C_0 \quad (3)$$

$$D_{xx} = Q(C - C_0) / A \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_{x=x} \quad (3')$$

Q : 固有流量, C : Cl⁻濃度, A : 断面積

Q としては河川流量を用いて、 D_x を概算してみると、7/5; $6.3 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$, 8/19; $2.6 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ を得た。これを分散係数の理論・実験値と比較してみる。

潮せき注復流については(速水, 1956) $D_x = \alpha/4 u^2 T$ ($\alpha=0.1$)の式に u を 2 cm/s と見積ってみると $1 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ と小さい値を示す。これは混合がセイシュより吹送流が中心となって生じているのではないかと推定される。次に玉井による循環モデル(1976) $D_x = 0.03 uL$ において、 L 渦の大きさを 2.5 km , u に吹送流の流速 4 cm/s を選んでみると $3 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ と(3')の結果に近い値が求まる。最後にRichardsonの4/3乗則で $L=2.5 \text{ km}$ とすると $K_x (\text{cm}^2/\text{s}) = 0.01 \sim 0.09 L^3 (\text{cm})$ より $1.5 \times 10^5 \sim 1.4 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ と相当大きな値を示す。4/3乗則とは乱流における慣性領域の-5/3乗則の別表現であり、吹送流・潮せき流などすべての流れの複合として最終的にある領域に生じうる混合の程度を表現しているもので、0.01-0.09の係数値は従来海域つまり潮せき流の大きな所で得られた数値であるので、このような結果が得られた可能性がある。

2.7 鉛直混合

St. 3, 6, 8で得られた水温の鉛直分布の経時変化を利用して (図6に St. 3での結果を示す), 鉛直拡散係数 $K_z(Z)$ のオーダーを求めた。

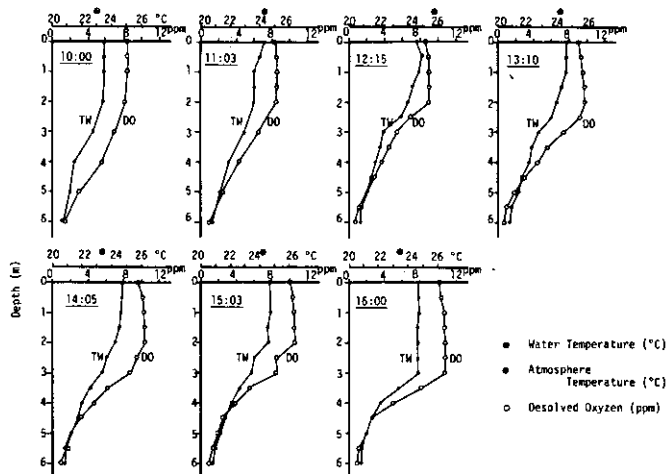


図6 St. 3における水温, DOの経時変化 (1977, 7, 5)

Fig. 6 Hourly variations of water temperature and dissolved oxygen at St. 3

$$K_{z1,z,t} = \left\{ \int_t^{t+\Delta t} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} dt - \int_0^z (T(t+\Delta t) - T(t)) dz \right\} / \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=z} \quad (4)$$

$\int_t^{t+\Delta t} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} dt$ としては, 底泥への熱移動がないとして, 全水深でのある時間ステップ間の水温上昇量とした。これにより得られた数値は, St. 3, 6, 8とも上層 (1, 2m) で $3 \sim 10 \text{ cm}^2/\text{s}$, 下層 (3 ~ 5m) で $0.2 \sim 2.0 \text{ cm}^2/\text{s}$ であった。温度躍層は上層では存在していなかったことと, 水深が浅いので, 相当大きな鉛直混合が生じていたものと考えられる。海洋などの表層値は $1 \sim 100 \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度で躍層が存在する場合には $0.01 \sim 1 \text{ cm}^2/\text{s}$ と急激に減少することが報告されている (大久保, 1970)。

2.8 その他の水質量

詳しい報告は村岡ら (1978a)が行っているので省略するが, 特に7/5の平常時においては, DOは0 ~ 3mで $8 \sim 10 \text{ ppm}$ と過飽和となり, 底層で2 ppm前後の成層状態を示しているが, 0 ~ 3mの層では午前より午後にかけて2 ppm程度増加している。これは霞ヶ浦での植物プランクトンの生産量の大きさを示すとともに, 流れがあまり大きくないときには, 生物的増殖の速さが鉛直混合速度に勝っていることを表し, 以後の水質予測の際には十分考慮しなければならない問題点である。

3. フロートを用いた流動調査 1978. 10. 12

3.1 測定方法

湖での流速は一般に非常に緩やかであるため、流速計では測定できないことが多い。このため板に取り付けたポールの移動を湖岸7点よりトランシットで求める方法(余越・富所, 1978)や直交羽板付きのびんの移動で測定された例(Bhowmik and Stall, 1978)が報告されているだけである。ここでは図7に示すようなフロートを用いて所定の水深での流動の方向と速さを、水面上に浮いたベニヤ

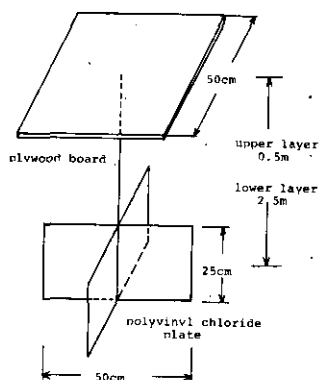


図7 測定に用いたフロート

Fig.7 Sketch of float and cross vane used in field survey

板の移動としてセスナ機による航空写真により10分間隔に撮影することより測定した。測定は1978. 10. 12の午前と午後に1時間半ずつ、図9に示す高浜入のひろがり部4地点で行った。4地点とも水深は4m前後であり、上層フロートは水面より0.5m、下層フロートは2.5mの位置に選んだ。フロート数は各地点、各層ごとに5枚ずつである。移動距離の測定は前もって、あるいはフロートの移動に伴い、距離計を用いて測定された位置におもり付き固定フロートを投入することにより、スライド上から計算を行った。同時に高崎沖の湖岸で水面高4mの位置で風向・風速の測定を行った。水面上に出ているベニヤ板に対する風の影響を考えると、ある深度における流速が u とすると直交塩ビ板に与える慣性力 F_1 は $F_1 = 1/2 \rho C_D u^2 A_1$ (A_1 :塩ビ板横面積)で $C_D = 1$ としてほぼ推定でき、ベニヤ板への風の摩擦力 F_2 は $F_2 = \tau_w A_2$ (A_2 :ベニヤ板面積)で与えられる。 τ_w についてWu' J. (1973)の実験値を用いて F_1 、 F_2 を評価すると、午後の下層以外は10%以下の寄与となり無視した。午後の下層については τ_w を 0.2 dyn/cm^2 としてフロートの移動を補正した。

3.2 測定結果および考察

図8に風向・風速の測定結果を示す。午前中は 0.52 m/s と低風速で、午後になると 4 m/s と風が出てくるのは霞ヶ浦では一般的なパターンである。各地点での流向・流速を図9.1, 9.2に示す。午前中に

おいては流れはほぼ2cm/s程度までであり、流速としては上層も下層も違いは少ないが、流向は各地点ごと、また上層下層によって複雑に変化している。風速が0.52m/sと小さかったため上層でも吹送方向と異なっている。反時計回りの渦が生じているようにも見えるが、地点数が少ないため断定はで

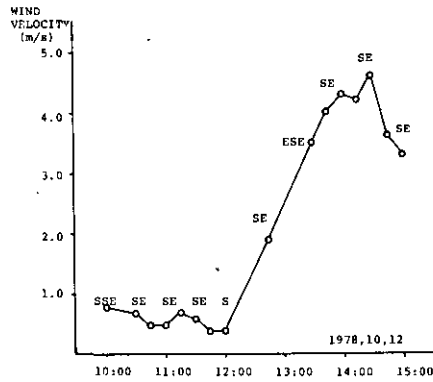


図8 風向・風速の時間変化(1978.10.12)

Fig. 8 Time variation of wind direction and velocity on 12 October 1978

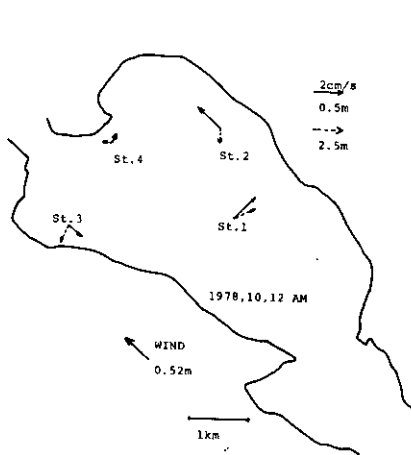


図9.1 午前における流向・流速測定結果 (1978.10.12)

Fig. 9.1 Observed results of current direction and velocity in the morning on 12 October 1978

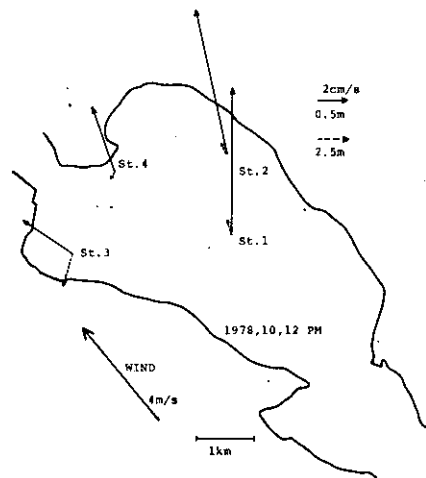


図9.2 午後における流向・流速測定結果 (1978.10.12)

Fig. 9.2 Observed results of current direction and velocity in the afternoon on 12 October 1978

きない。午後になると上層では4~10cm/sと早い吹送方向の流れが生じている。下層では1cm/s程度と午前中と同程度で流向も複雑であり、コリオリ力の効果とも考えられない。上層流速について吹送流について報告されている数値と比較を行ってみる。村岡・福島(1978b)で吹送流の鉛直流速分布より0.5m水深の流速を表面流速に変換すると20~40cm/sと考えられ、風速の5~10%の大きさとなる。これは Shemdin (1973) に示された数値に比較して大きい。余越・富所(1978, 諏訪湖), Bhowmik and Stall(1978, Fox Chain of Lakes) の実測値もこの程度の値を示すことから、浅い湖の場合地形性の流れを生じている可能性がある。上下層の流向・流速の違いは水平方向の物質の混合上大きな作用をもつと考えられるので、実測の回数を増すことによって、この分散の効果を評価してゆきたい。

4. まとめ

2回にわたる高浜入出口での水理・水質調査の結果、流れとしては河川固有流、セイシュ(140分周期)、吹送流が存在するが、河川固有流が小さいことおよび表層では吹送流が卓越することを示した。またCl⁻濃度の水平分布を利用して、水域としての混合度を評価した結果、高浜入ひろがり部で6.3~26.0×10⁵cm²/s程度の分散係数を有することがわかった。また水温の鉛直分布の経時変化より、鉛直拡散係数を算定して上層で3~10cm²/s、下層で0.2~2.0cm²/sといった割合に大きい値を得たが、これは吹送流による混合が大きいことを示している。次にフロートを用いた流向・流速測定を行ったが、この結果風の弱かった午前中には1~2cm/sの複雑な流況を示し、風速4m/sとなった午後には表層で吹送方向に4~10cm/sという早い流速が生じたことを示した。

引用文献

- Bhowmik G.N. and Stall J.B. (1978) : Circulation Pattern in the Fox Chain of Lakes in Illinois. WRR, 14 (4), 633-642.
- 速水・福尾・依田(1956) : 明石海峡による播磨灘と大阪湾との海水交流について、海岸工学講演会, 49~54.
- 日高孝次(1955) : 海流. 岩波, 148~154.
- 堀川清司(1973) : 海岸工学. 東大出版, 121~128.
- 茨城大学農学部(1977) : 霞ヶ浦. 三共出版, 18~19.
- 村岡浩爾ら (1978a) : 霞ヶ浦とその周辺水圏における水理と水質の関連について. 国立公害研究所研究発表会予稿集 SS/OT-1-78, 74~78.
- 村岡浩爾・福島武彦 (1978b) : 浅い湖における吹送流に関する実験的研究. 国立公害研究所
- 南部・真柄・国包・田畑(1974) : 霞ヶ浦の水質におよぼす吹送流の底質の影響. 用水と廃水, 16(2).
- 大久保明(1970) : 海洋乱流. 海洋科学基礎講座 I, 海洋物理 I, 東海大出版, 372~373.
- Parker D.S. Norris D.P. and Nelson A.W. (1972) : Tidal exchange at Golden Gate. ASCE. SA. 98, 305-323.
- Shemdin, O.H. (1973) : Modelling of wind induced current. Journal of Hydraulic Research, No. 3, 281-297.
- 玉井信行(1976) : 水域における混合問題への水理学的アプローチ(Ⅲ). 水利科学, No. 108, 60~87.
- 上嶋・藤原・早川(1975) : 感潮河川における物質輸送の機構について(第1報). 海岸工学講演会, 239~247.
- Wu J. (1973) : Prediction of Near-Surface Drift Currents from Wind Velocity. ASCE, HY, 99, 1291~1302.
- 余越正一郎・富所五郎(1978) : 風による諏訪湖の流動特性. 土木工学会論文報告集, No. 276, 53~63.

山王川流出汚濁負荷量に関する研究

津野 洋¹・村岡浩爾¹・細見正明¹

A Study on Pollutant Load into the Sanno River

Hiroshi Tsuno¹ Kohji Muraoka¹ and Masaaki Hosomi¹

Abstract

A computation on the load of pollutants such as nitrogen, phosphorus and COD brought to the Sanno River was performed on the basis of discharge rate and water quality survey. It was shown that the concentrations of nutrients are high enough to cause eutrophication, and that the most of pollutant load came from the urban area of Ishioka City.

It is planned to relate the water quality of the Sanno River to the amount of pollutants occurring in the basin of the Sanno River.

1. はじめに

湖沼の富栄養化を考察する際には、対象湖沼に流入する水量および汚濁物量は最も重要な因子である。

発生した汚濁物は、表流水あるいは地下水によって運ばれ、あるいは直接に湖沼に流入する。汚濁発生源および流達過程の主な経路を図1に示す。なお、流達過程の一部あるいは全部を経ずに湖沼に流入する経路もこの図は含んでいるとして考える。

湖沼の富栄養化の制御の問題を、都市計画や土地利用までフィードバックさせるためには、発生源における汚濁物量の算定、および発生汚濁物の各流達過程における低減率あるいは流達率の考察が必要である。

本研究は、霞ヶ浦への流入水量および汚濁物量を考える際のモデル流域として、石岡市の都市下水の大半が流入している山王川流域を対象として、図1に示される各項目のうち、まず第一歩として山王川に流入する水量および汚濁物量をは握する目的で行ったものである。すなわち、まず第一歩として山王川の水量および水質量の測定により、流域から発生する汚濁物量のは握を試みるものである。

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Water and Soil Environment Division, The National Institute for Environmental Studies, P. O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.

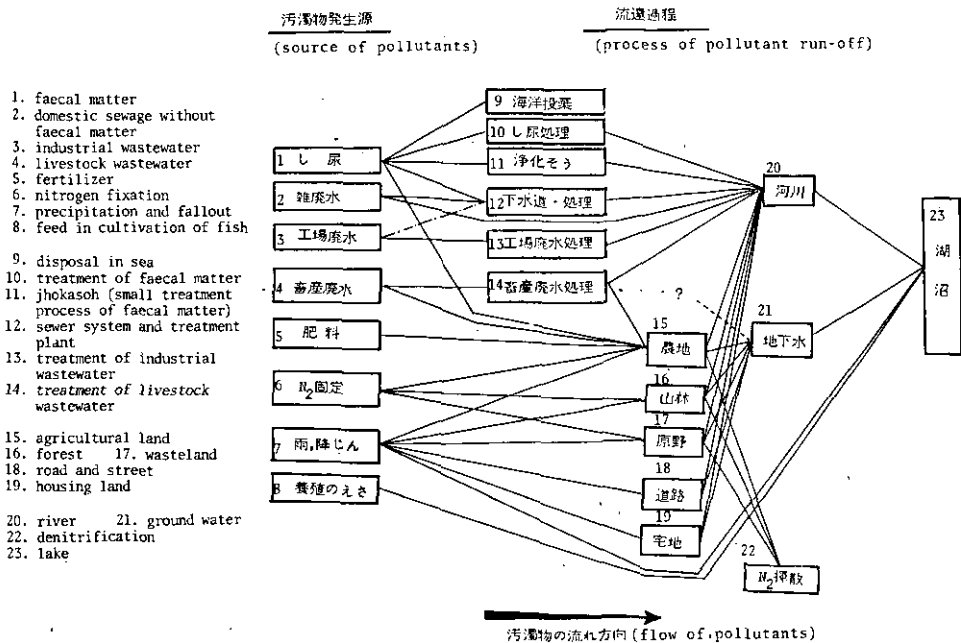


図1 汚濁物の流れ
Fig.1 Flow of Pollutant

2. 調査概要

山王川の概要および流域概要は、本報告書の「山王川の水文流出に関するシミュレーション」に示すが、流域の特色としては、水源である柏原池の近くの石岡工業団地、中流部での石岡市市街、および上・下流部の田畑・山林等に大きく分けることができる。

水源近くの石岡工業団地からの廃水量および汚濁物量は、および石岡市市街地等からの廃水量および汚濁物量は、握する目的で、1977年度の8月、10月および2月における水源近くの鹿の子（あるいは国府）地先および霞ヶ浦流入地点付近の高浜地先の両地点にての24時間調査（1時間ごとのサンプリングおよび水量等測定）、ならびに1978年の6月から10月まで（現在継続中）の週1回の上記両地点における調査（10時～12時の間での1回のサンプリングおよび水量等の測定）を行った。

また、山王川流域からの山王川への流入水の水質特性および汚濁物負荷量の算定の目的で、1978年3月14日に、各支流の流入点直前でのサンプリング、ならびに恋瀬川合流点より1kmごとの山王川でのサンプリングおよび水量測定を行った。

いずれの調査においても、サンプリング試料は、国立公害研究所に持ち帰り直ちに表1に示す項目について分析を行った。なお、分析項目としては、富栄養化関連項目としてリンおよび窒素を中心に選定した。

表1 測定項目および測定方法

Table 1. Parameters of water quality and analytical methods

item	method
discharge	propeller-typed current meter
NH ₃ -N	Phenol-hypochlorite or modified Nessler's reagent method
NO ₂ -N	N-1-Naphthylethylenediamine-Sulfanilamide method
NO ₃ -N	reduction with Hydrazine Sulfate and method for NO ₂ -N, or Phenoldisulfonic acid method
T-N	Kjeldahl method, or nitrification by oxidation with Potassiumperoxodisulfate and method for NO ₂ -N
PO ₄ -P	Molybdate-blue method, or mixed reagent method proposed by EPA
T-P	decomposition to PO ₄ -P with Perchloric acid or Potassiumperoxodisulfate and method for PO ₄ -P
DIP	decomposition with Sulfuric acid and method for PO ₄ -P
Cl ⁻	Mercuric thiocyanate or Silver nitrate method
COD	Alkali-potassium-permanganate method
DOC	DOC analyzer
CO ₂ -C	CO ₂ analyzer
TOD	TOD analyzer
pH	pH meter
water temperature	thermometer

3. 調査結果および考察

3.1 日変動特性

水量および水質の日変動特性を図2および3に示す。また、水量および水質の日平均値、ならびに負荷量を表2に示す。石岡工業団地の廃水が大半を占める鹿の子地先では、水量変動は比較的少なく平均に対し10~20%程度である。各水質項目は平均に対し20~30%程度であり、朝9時ころから昼間にかけて高い傾向がみられる。家庭廃水もかなり流入している国分地先においては、水量および水質とも平均に対して30~50%程度変動し、朝方および夜間に高く、昼間および早朝に低くなる傾向が示されている。

高浜地先では、水量については平均に対して30%程度の変動を示し、10~18時にかけて比較的多く、2~6時かけて少なくなるという傾向が示されている。T-N、T-PおよびTODあるいはCODは、平均に対して50%前後の変動を示しており、その変動特性は季節により若干は異なっているが、9~13時ころおよび24時前後に高く、4~6時ころおよび20時前後に低く、都市下水処理場流入水の変動パターンとよく似た変動を示している。

なお、いずれの地点においても、富栄養化関連項目である窒素やリンの濃度が高いことは注目される。11月29~30日(1977年)の水質の1日変動を例として、図4および5に示す。鹿の子地先において

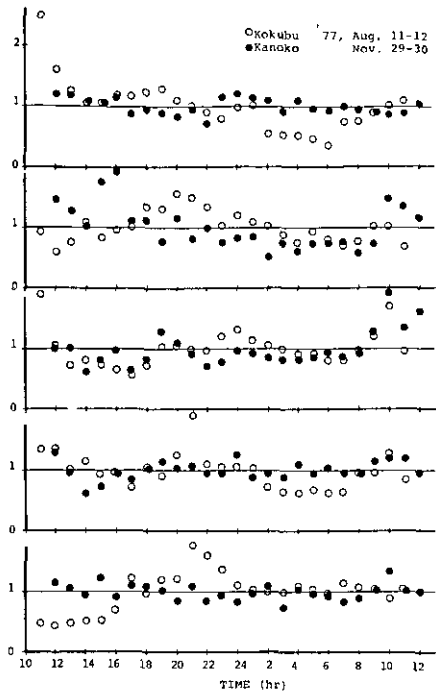


図2 水量・水質の日変動特性 (鹿の子あるいは国分地先)

Fig.2 Diurnal Variation of Water Quality at Kanoko or Kokubu

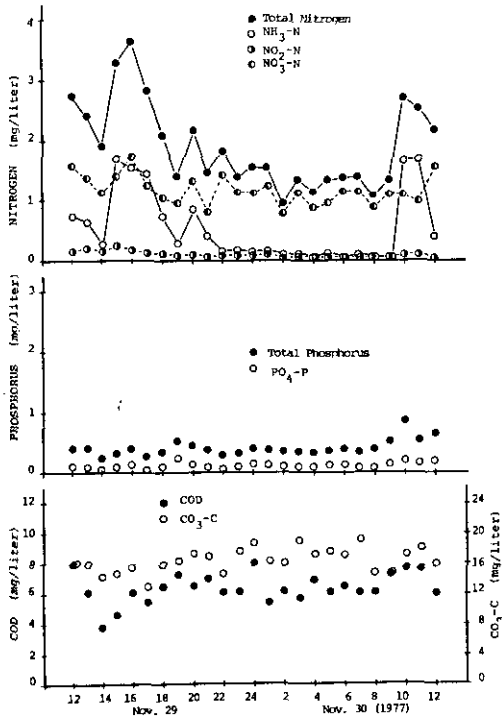


図4 水質の濃度の日変動特性 (鹿の子地先)
Fig.4 Diurnal Change in the Concentration of Water Quality parameters at Kanoko

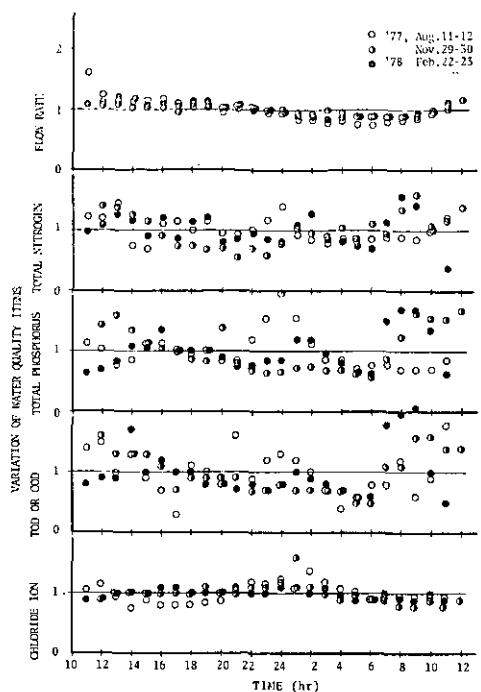


図3 水量・水質の日変動特性 (高浜地先)

Fig.3 Diurnal Variation of Water Quality at Takahama

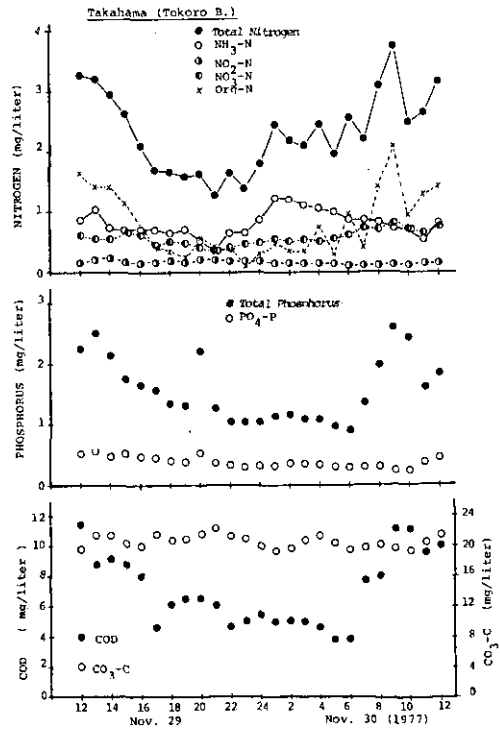


図5 水質の濃度の日変動特性 (高浜地先)

Fig.5 Diurnal Change in the Concentration of Water Quality parameters at Takahama

表2 山王川の水質（日平均濃度と負荷）

Table 2. Daily Mean and Load of Water Quality parameters of the Sanno River

station		Kanoko	Kokubu	Takahama		
date		77, Nov. 29-30	77, Aug. 11-12	77, Aug. 11-12	77, Nov. 29-30	78, Feb. 22-23
flowrate(m ³ /day)		3630	8290	43400	28700	29400
NH ₃ -N	mg/liter	0.55	1.06	1.15	0.79	1.30
	gr/d	2000	8790	49900	22700	38200
NO ₂ -N	mg/liter	0.093	0.12	0.066	0.15	0.032
	gr/d	338	995	2860	4310	941
NO ₃ -N	mg/liter	1.17	0.68	0.20	0.56	0.060
	gr/d	4250	5640	8680	16100	1764
T-N	mg/liter	1.89	2.66	2.30	2.31	3.83
	gr/d	6860	22100	99800	66300	113000
PO ₄ -P	mg/liter	0.11	0.61	0.48	0.39	0.61
	gr/d	399	5060	20800	11200	17900
T-P	mg/liter	0.41	0.62	0.58	1.57	1.99
	gr/d	1490	5140	25200	45100	58500
DOC	mg/liter	4.2			6.2	
	gr/d	15200			178000	
TOD*	mg/liter	6.4	11.0*	20.3*	7.0	12.1
	gr/d	23200	91200*	88100*	201000	336000
carbonate-C	mg/liter	16.4			20.6	
Cl-	mg/liter	94.4	47.0	25.7	34.7	37.3
water Temp. °C		15.2	22.8	22.6	13.9	
pH		7.1-7.3	6.9-7.3	7.0-7.4	7.1-7.3	

は、朝方および夕方のNH₃-NおよびT-Pの増加が注目される。高浜地先においては、昼間のOrg.-N、T-PおよびCODの有機性汚濁を示す水質項目の増加が注目される。この時間帯は水量が増加する時でもあり、流下してくる河床付着菌類（*Sphaerotilus*等）の影響も大きいと考えられる。また、NH₃-Nは朝方および夜間に高くなる傾向も示されている。

3.2 流域から流入する汚濁物量

3月14日（1977）に、山王川に流入する各支流および廃水溝よりサンプリングし分析した結果を図6に示す。この図より、山王川中流部から上流部にかけての石岡市街地より高濃度の廃水が流入していることがわかる。

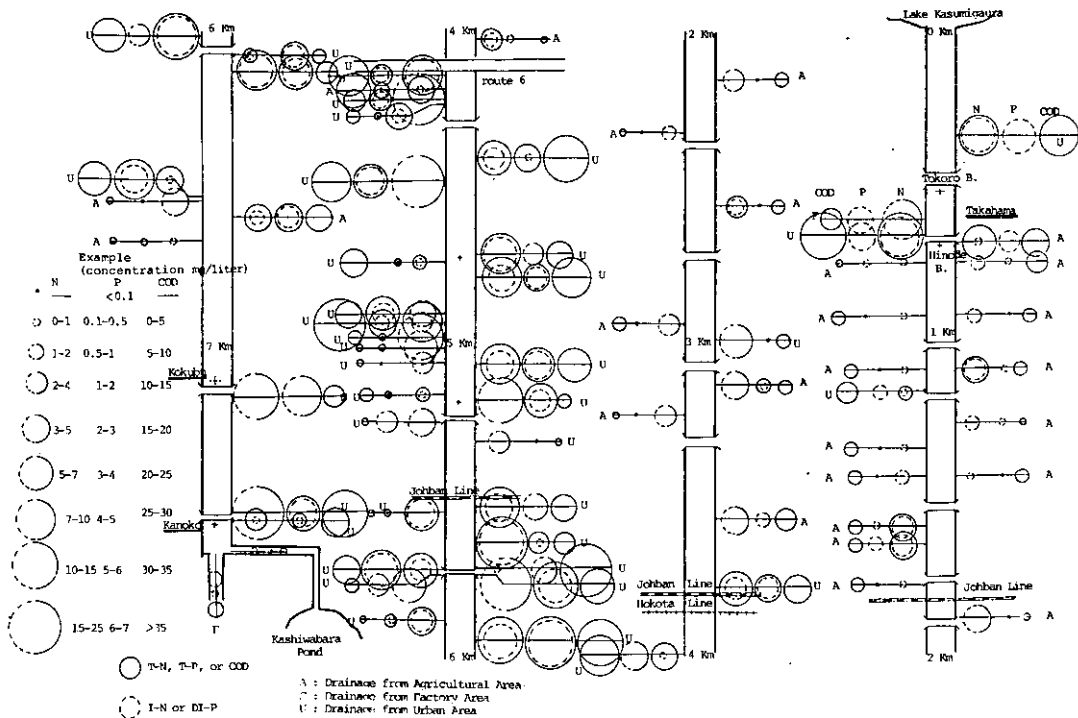
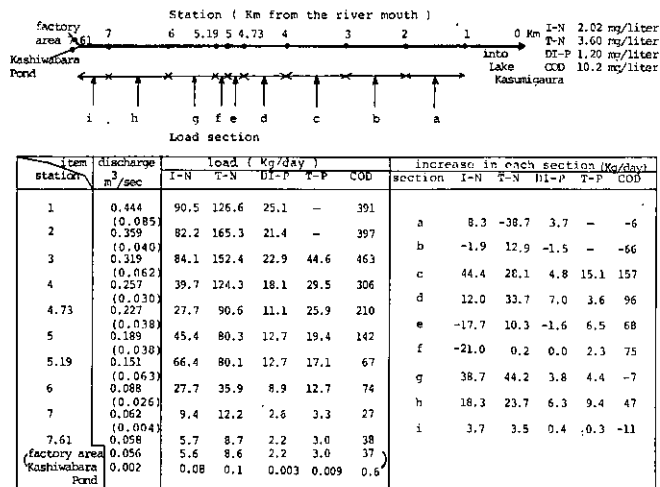


図6 山王川流入排水中の汚濁物濃度

Fig. 6 Concentration of Pollutants in Drains into the Sanno River



(1) Increase of discharge

図7 流域からの山王川流入汚濁物負荷量

Fig. 7 Load of Pollutants into the Sanno River from its Basin

上記と同じ日に、山王川河口より1kmごとに山王川の流量および水質測定を行った。その各々の地点における流量および流下汚濁負荷量、ならびに各測定区間でのそれらの増加量をまとめて図7に示

す。下流より上流にかけて1日ばかりで測定を行ったための時間的ずれ、付着菌類等の生物による摂取や変換、および沈殿等のために、各区分での増加量は、各区分への流入負荷量のおおよその値ではないが、山王川河口より3kmから7km付近までの区間で汚濁負荷量の大半が流入することが示されている。

鹿の子地先付近および高浜地先での流下汚濁物量を、現在までに得られているデータをもとに計算し、まとめたものが表3である。1日1回サンプリングの場合は、水量および水質の時間変動パターンによると過大評価している可能性が考えられるが、高浜地先での測定では、あまり差異のないことが示されている。水質汚濁および富栄養化関連では、山王川から霞ヶ浦への流入T-Nは90kg/d程度、

表3 山王川流下負荷量
Table 3. Pollutant Load from the Sanno River

station \ item	discharge m ³ /sec	load (kg/d)					note
		I-N	T-N	DI-P	T-P	COD	
Kanoko (Nov. 29-30, 1977)	0.042	6.6	6.7	0.4*	1.5	23.2	daily mean of hourly sample
Kanoko (June)	0.067						monthly mean of weekly sample at 10:00-11:00 on Wednesday
(1978) (July)	0.055	16.8	20.8	5.3	5.8		
(Aug.)	0.044	7.4	9.8	3.8	3.9		
(Sept.)	0.059	13.4	19.3	4.7	5.2		
(Oct.)	0.034	9.2	14.7	1.2	1.5		
Kokubu (Aug. 11-12, 1977)	0.096	15.4	22.1	5.1*	5.1	91.2**	daily mean
Takahama, Hinode B. (1978) (June)	0.434						monthly mean of weekly sample at 11:00-12:00 on Wednesday
(July)	0.420	56.5	96.4	18.4	26.0		
(Aug.)	0.291	39.5	64.9	11.0	13.4		
(Sept.)	0.386	64.5	108.8	15.0	16.0		
(Oct.)	0.320	33.7	71.7	19.5	21.8		
Takahama, Tokoro B. (Aug. 11-12, 1977)	0.502	61.5	99.8	20.8	25.2	88.1**	daily mean of hourly sample
(Nov. 29-30, 1977)	0.332	43.1	66.3	11.2	45.1	201	
(Feb. 22-23, 1978)	0.340	40.9	113.0	17.9	58.5	336	

* PO₄-P ** TOD

T-Pでは30kg/d程度、およびCODでは200~300kg/d程度であることが示されている。また、石岡市街地での山王川への流入負荷量は、T-Nで80kg/d程度、T-Pで20kg/d程度、およびCODで200kg/d程度であることが示されている。

3.3 山王川の霞ヶ浦富栄養化に及ぼす影響

表4には、夏期みのデータではあるが、高浜入に流入する恋瀬川および園部川での1日平均の水量および水質の濃度ならびに負荷量をまとめて示してある。また、表2および表4に示す数値を用いて、これら河川による高浜入への寄与状態をまとめて図8に示す。これから、山王川は、高崎入の富栄養化に30~50%程度寄与、および高浜入のそれに10~30%程度寄与していることが示されている。

表4 恋瀬川、園部川の水質（日平均濃度と負荷）

Table 4. Daily Mean and Load of Water Quality parameters of the Koise River and the Sonobe River

river		Koise (kokudo)	Sonobe (ogawa)
date	item	77, Aug. 11-12	77, Aug. 11-12
flow rate	m ³ /d	231000	96800
NH ₃ -N	mg/liter	0.58	2.72
	gr/d	134000	263000
NO ₂ -N	mg/liter	0.040	0.32
	gr/d	9240	31000
NO ₃ -N	mg/liter	0.41	0.94
	gr/d	94700	91000
T-N	mg/liter	1.31	4.03
	gr/d	303000	390000
PO ₄ -P	mg/liter	0.08	0.49
	gr/d	18500	47400
T-P	mg/liter	0.13	0.56
	gr/d	30000	54200
TOD	mg/liter	11.0	18.4
	gr/d	2540000	1780000
Cl-	mg/liter	11.2	19.6

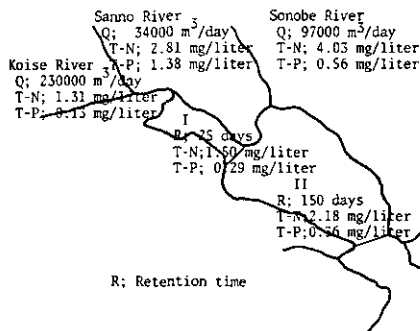


図8 霞ヶ浦高浜入の水質への河川の寄与（区画IおよびIIにおいて完全混合を仮定）

Fig. 8 Contribution of the nutrients from the Rivers to the Water Quality of Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura assuming a complete mixing of materials each area of the Bay, I and II

4. まとめ

河川水量・水質調査より流域での河川流達汚濁負荷量の算定を、山王川を対象にして試みた。その結果、山王川水質は、富栄養化を生じさせるに十分な窒素およびリン濃度であり、山王川から霞ヶ浦へ流入する汚濁負荷量の大半は石岡市街地より発生・流入することが示された。今後、河川流達負荷量と、流域での土地利用や人口・産業等より算出される発生負荷量との関係を検討していく計画である。

引用文献

- D'Elia C. F., et al. (1977): Determination of total nitrogen in aqueous samples using persulfate digestion, *Limnology*, 760~764.
- EPA(1974): Methods for Chemical Analysis of Water and Waste Water.
- 日本下水道協会 (1974): 下水試験方法.
- 日本水道協会(1970): 上水試験方法.
- Technicon, Technicon Auto Analyger

高浜入水域への栄養塩の河川からの流入量について

津野 洋¹・相崎守弘¹・大槻 晃²・村岡浩爾¹・橋戸良雄³

The Amount of Nutrient Inflow to Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura through Rivers

Hiroshi TSUNO¹, Morihiro AIZAKI, Akira OTSUKI²,

Kohji MURAOKA¹ and Yoshio NARATO³

Abstract

In order to obtain the loads of nutrients flowing into Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura from the tributaries, the discharge rate and water quality in the Koise, Sanno and Sonobe River have been measured.

From the data measured in June 1977 to November 1978, the following results were obtained.

1) In the Koise River, the discharge rate was about 3 m³/s, and the loads of nitrogen and phosphorus were usually 200–600 kg/d and 20–40 kg/d, respectively. Both loads and nitrogen concentration changed with discharge rate, but the phosphorus concentration was relatively constant or changed conversely with discharge rate.

2) In the Sanno River, the discharge rate was about 0.5 m³/s. The nitrogen load was usually 50–200 kg/d, and both the load and concentration changed with discharge rate. The phosphorus load was mostly in the range from 15 to 30 kg/d, and its change with discharge rate was comparatively small.

3) In the Sonobe River, the discharge rate was about 0.8–1 m³/s. The nitrogen load was usually 300–600 kg/d, and changed with discharge rate. But the nitrogen concentration changed conversely with discharge rate. The phosphorus load was usually in the range from 15 to 70 kg/d.

1. はじめに

霞ヶ浦の中でも、最も富栄養化が著しく、夏期には *Microcystis* による水の華現象が生じている高浜入を対象にして、富栄養化に関する種々の研究を行っている。湖内での富栄養化現象の解明のため

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Water and Soil Environment Division, The National Institute for Environmental Studies, P. O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.

2. 国立公害研究所 計測技術部

Chemistry and Physics Division, The National Institute for Environmental Studies.

3. 東京電機大学 応用理科学科 〒101 東京都千代田区神田錦町

Applied Science Division, Tokyo Denki University, Nishiki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 101, Japan.

には、その原因となる栄養塩の対象水域への流入量は握が重要である。

本研究では、高浜入に流入する河川(恋瀬川, 山王川, 園部川)の水量・水質調査に基づいて、これらの河川による高浜入への栄養塩(窒素およびリン)の流入量および流入特性に関する考察を試みる。

なお、恋瀬川は比較的人為的汚濁物発生量の少ない流域を有し、山王川は石岡市の都市廃水の大半が流入しており、そして園部川は養豚等の畜産廃水が流入しているといったようにこれら三河川は各々の特性を有している。

2. 調査概要

調査河川の測定位置を図1に示す。各位置とも湖水位の影響を受けず、また河川からの流入汚濁

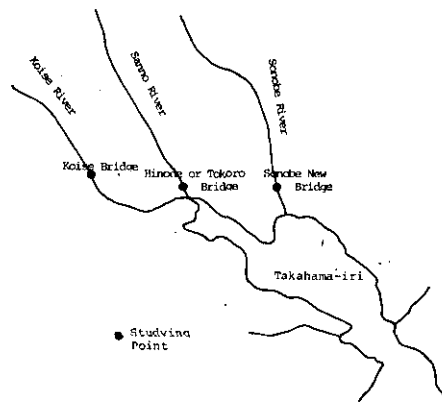


図1 調査地点

Fig. 1 Map showing study sites

物量をできるだけ正確には握できる地点を選定した。流量等は現地で測定し、水質項目については、採水後直ちに国立公害研究所に持ち帰り分析に供した。分析項目は、富栄養化の観点より、主に窒素およびリンに関するものである。測定方法は本報告書の「山王川流出汚濁負荷量に関する研究」と同様である。

調査は、恋瀬川および山王川については、1977年6月1日より開始し、また園部川については1978年6月7日より開始し、各河川とも現在も継続中である。

3. 調査結果および考察

3.1 水量および水質の変動特性

恋瀬川の水量および栄養塩(窒素およびリン)濃度の季節的変動状態を図2に示す。水量は、通常 $3 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度であるが、1977年度では冬期に少なくなる傾向にある。1978年夏期は異常渇水のために水量は極端に少なくなり $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下となる時期も存在したが、秋期になると降雨もあり回復する傾向

にある。溶解性の無機性窒素 (I-N) および全窒素 (T-N) は、 2mg/l 程度の濃度で存在するが、それらの濃度は水量が多いときは高く、少ないときは低いといったように水量変動に追従する傾向にある。リン酸塩 ($\text{PO}_4\text{-P}$) および全リン (T-P) は各々 0.05mg/l および 0.15mg/l 程度の濃度で存在するが、それらの濃度は、水量の変動に追従せずに変化が少ないか、あるいはそれと逆に変動する傾向にある。

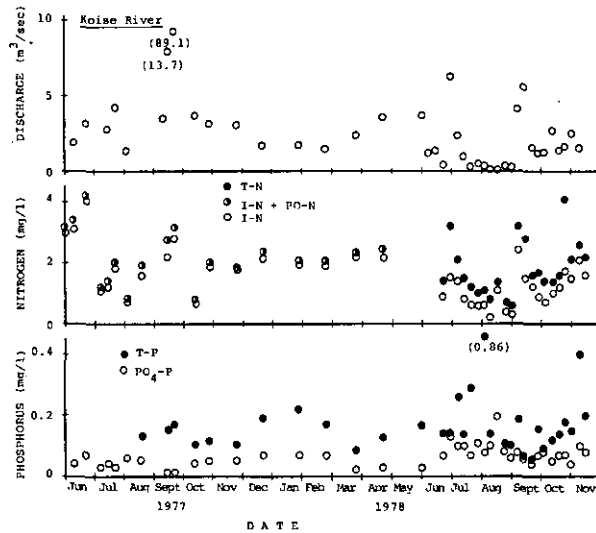


図2 恋瀬川の水量および栄養塩濃度の変動

Fig. 2 Change in the discharge and concentrations of nutrients in the Koise River

山王川の水量および栄養塩濃度の季節的変動状態を図3に示す。水量は、 $0.5\text{m}^3/\text{s}$ 程度であるが、1977年の冬期および1978年の夏期に低下する傾向にある。しかしながら、山王川は固有水量が比較的少なく、大半が都市下水等の流域からの廃水であるために、1978年夏期の異常渇水時でも、水量の減少はあまり顕著ではない。I-N および T-N の濃度は、各々 $1\sim 2$ および $2\sim 3\text{mg/l}$ 程度であるが、水量の増加に伴って高くなる傾向にある。また、両者の差は、水量の多いときに大きくなる傾向にあるが、これは河床等の付着菌類等の流失も一因であろうと考えられる。 $\text{PO}_4\text{-P}$ および T-P の濃度は、各々 0.4 および 0.5mg/l 程度であるが、水量が増加すると低くなるといったように水量の変動と逆の変動を示す傾向にある。

図4には、恋瀬川と山王川が合流点で完全に混合した場合の水量および栄養塩濃度の季節的変動状態の計算値を示す。これは、高浜入の最奥部における河川の寄与を示しているであろう。これによると、水量は $3\sim 4\text{m}^3/\text{s}$ 程度であり、また窒素は 2mg/l 程度およびリンは $\text{PO}_4\text{-P}$ で $0.1\sim 0.2\text{mg/l}$ 程度の濃度となることが示されている。

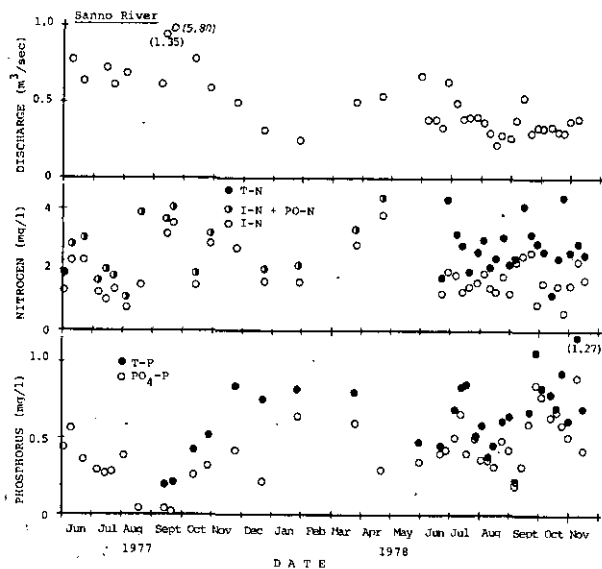


図3 山王川の水量および栄養塩濃度の変動

Fig. 3 Change in the discharge and concentrations of nutrients in the Sanno River

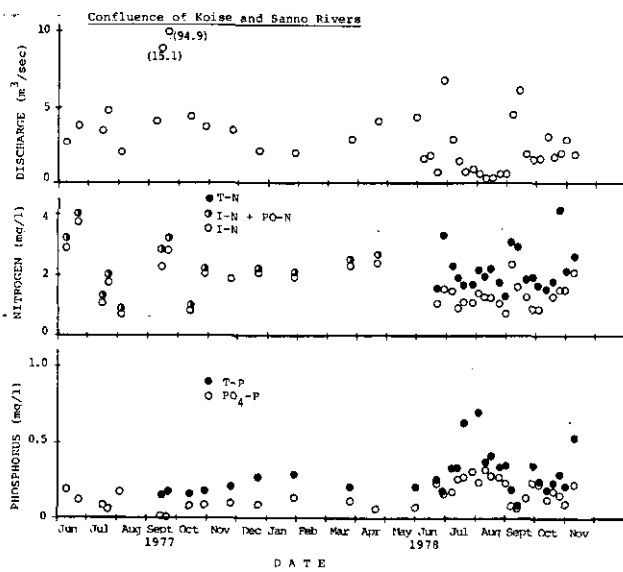


図4 恋瀬川および山王川の合流点における水量および栄養塩濃度の変動の計算値

Fig. 4 Change in the discharge and concentrations of nutrients at the confluence of the Koise and Sanno River

園部川における水量および栄養塩濃度の変動状態を図5に示す。この川については、1978年6月より11月までの短い期間のデータしかないが、この期間では水量は $0.8 \sim 1 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度であり、渇水時の7月後半より8月で極端に減少している。窒素およびリンは、各々 $5 \sim 6 \text{ mg/l}$ および 0.5 mg/l 程度の濃度である。両者の濃度とも、水量とは逆の変動傾向が示されているものばらつきが大きいことも示されている。

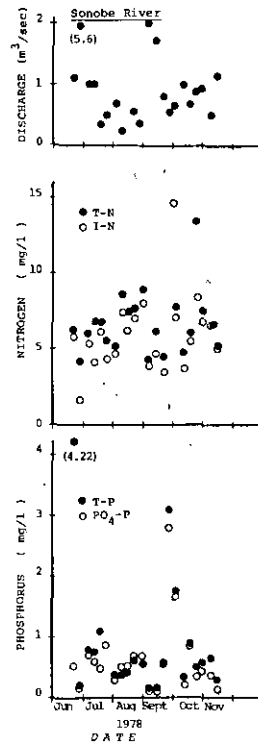


図5 園部川の水量および栄養塩濃度の変動

Fig. 5 Change in the discharge and nutrients concentrations of in the Sonobe River

3.2 河川からの栄養塩の負荷量の特性

水量と栄養塩の流下負荷量との関係を、恋瀬川、山王川および園部川について、各々図6、7および8に示す。

恋瀬川では、窒素負荷量は $200 \sim 600 \text{ kg/d}$ 程度である傾向が多く、また水量の増減とともに増減することが示されている。リン負荷量は、T-Pでは $20 \sim 40 \text{ kg/d}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ では 10 kg/d 程度であることが多く、水量の増減とともに増減する傾向が示されている。

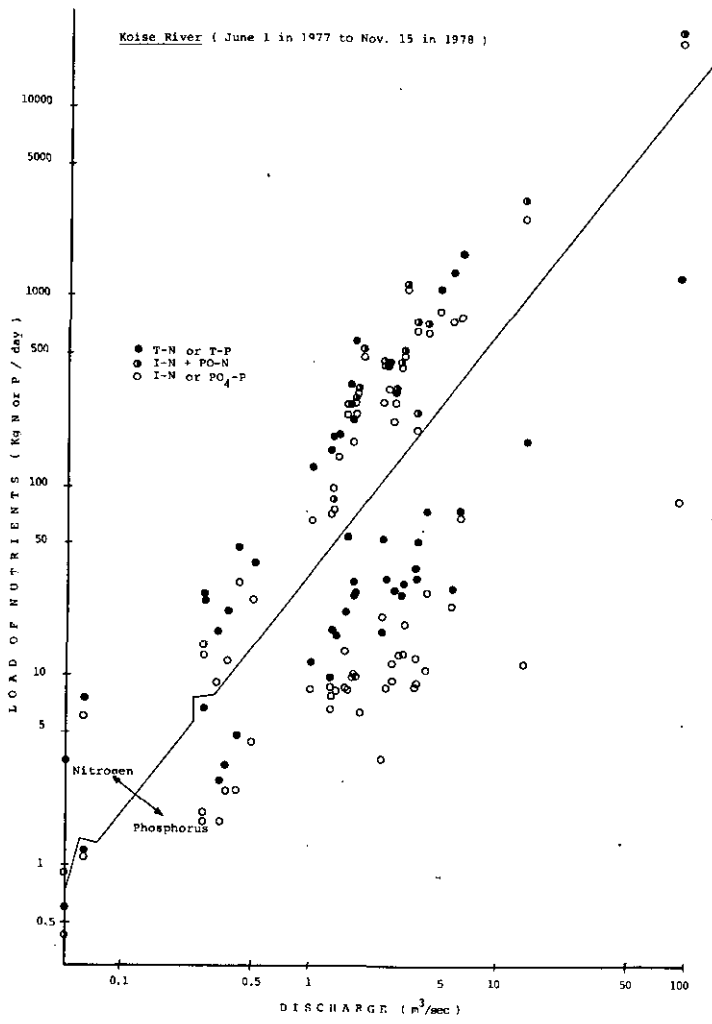


図6 恋瀬川における水量と栄養塩負荷量との関係

Fig. 6 Correlation between discharge and nutrient load in the Koise River

山王川では、窒素負荷量は、T-Nで50~200kg/dおよびI-Nで40~150kg/d程度であることが多く、水量の増減とともに増減する傾向が示されている。リン負荷量は、T-Pでは15~30kg/dおよびPO₄-Pでは10~25kg/dの範囲にあることが大半であり、水量による変化は少ない傾向が示されている。なお、以上より高浜入最奥部への栄養塩の負荷量は、窒素では山王川のそれは恋瀬川のその1/5程度であり、リンでは両河川で同量程度であることも示されている。

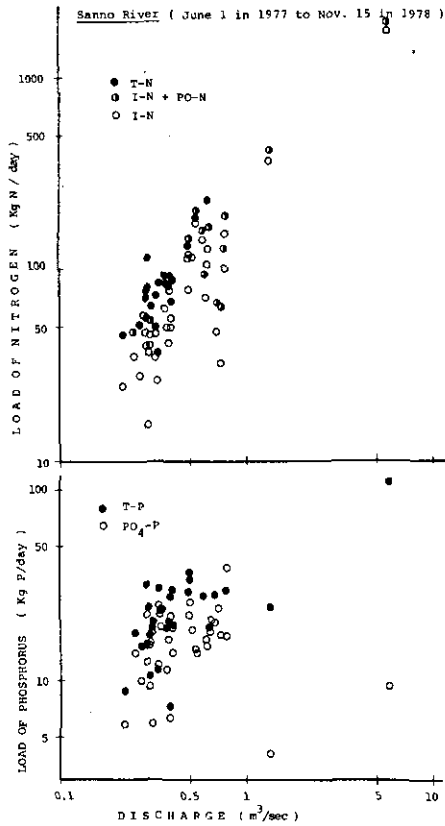


図7 山王川における水量と栄養塩負荷量との関係

Fig. 7 Correlation between discharge and nutrient load in the Sanno River

園部川では、窒素負荷量は 300 ~ 600 kg/d 程度であることが多く、また水量の増減とともに増減する傾向が示されている。リン負荷量は 15 ~ 70 kg/d 程度の範囲でばらついており、水量との関係は明確には示されていない。

流量 (Q) と流下水質負荷量 (L) との関係は、一般に次式で示されることが多い (山口, 1978; 羽田, 1978);

$$L = aQ^b \quad (a, b \text{ は定数})$$

図6 ~ 8において、流下負荷量と水量との関係が存在する場合について、 a および b の値を求めたものを表1に示す。 a の値は栄養塩濃度の高さの程度を示すと考えられるが、窒素濃度は、園部川、山王川および恋瀬川の順に高いことが示されている。 b の値は、水質濃度の水量への追従性の程度を示す ($b > 1$; 追従性, $b = 1$; 濃度一定, $0 \leq b < 1$; 水量とは逆の変動) と考えられるが、恋瀬川および山王川では窒素の場合は 1.3 程度であり、追従性が示されている。恋瀬川の T-P の場合は、 b

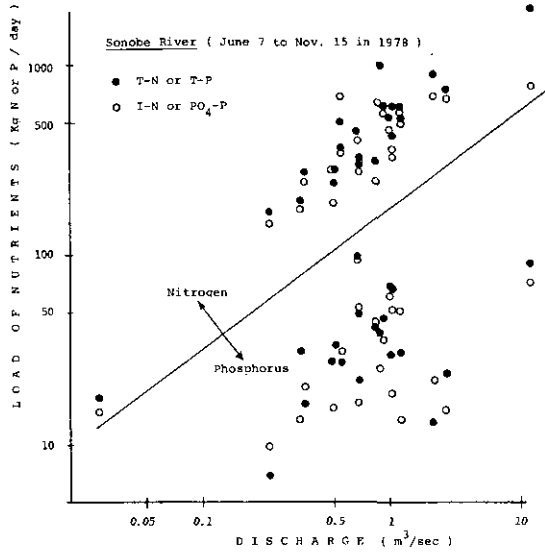


図8 園部川における水量と栄養塩負荷量との関係

Fig. 8 Correlation between discharge and nutrient load in the Sonobe River

表1 aおよびbの値 ($L = aQ^b$)

Table 1. Values of constant a and b in equation for the relation between pollutant load and discharge rate ($L = aQ^b$)

item		a	b
Koise River	T-N	135	1.28
	I-N	82.0	1.35
	T-P	11.8	1.03
	PO ₄ -P	5.40	0.78
Sanno River	T-N	345	1.29
	I-N	203	1.33
	T-P	35.8	0.44
	PO ₄ -P	23.0	0.42
Sonobe River	T-N	510	0.82
	I-N	440	0.87
	T-P	—	—
	PO ₄ -P	—	—

L: Load (kg/day), Q: Discharge (m³/sec)

の値は1.0近くであり、追従性は少なく、T-P濃度の変動割合は水量の変動割合に比し小さいことが示されている。恋瀬川のPO₄-P、山王川のリンおよび園部川の窒素の場合のbの値は1.0以下であり、

これらの水質の濃度は水量が増加すると低下することが示されている。恋瀬川ではT-Pの方が $\text{PO}_4\text{-P}$ の方より b の値は大きい、これは水量増加による濁質中のリンによるものであろう。なお、 b の値が0に近くなるにつれて、水量の変動に関係なく水質負荷量が一定であるか、あるいは両者はばらばらで全く関係がないということを意味してくる。山王川のリンの場合は前者のケースに近いと考えられる。後者のケースは、本研究では園部川のリンの場合であり、強いて両対数での直線を引いても、 b の値が0に近く、またその直線のデータに対する相関係数は低い値となる。

4. まとめ

河川からの高浜入への栄養塩の流入量をは握するために、恋瀬川、山王川および園部川において、水量および水質測定を行っている。

1977年6月から1978年11月のデータより以下のような結果が得られた。

1) 恋瀬川では、水量は $3\text{ m}^3/\text{s}$ 程度であり、窒素負荷量は $200\sim 600\text{ kg/d}$ およびリン負荷量は $20\sim 40\text{ kg/d}$ 程度であることが多かった。両栄養塩の負荷量とも水量の増減に追従するが、濃度では、窒素の場合は水量の変動に追従するが、リンの場合は水量の変動にあまり関係しないか逆の変動をすることが示された。

2) 山王川では、水量は $0.5\text{ m}^3/\text{s}$ 程度であった。窒素負荷量は $50\sim 200\text{ kg/d}$ であることが多く、その負荷量および濃度とも水量の増減に追従する傾向にあった。リン負荷量は $15\sim 30\text{ kg/d}$ の範囲にあることが大半であり、水量による変化は比較的少なかった。すなわち、リン濃度は水量変動と逆の変動をする傾向にあった。

3) 園部川では、水量は $0.8\sim 1\text{ m}^3/\text{s}$ 程度であった。窒素負荷量は $300\sim 600\text{ kg/d}$ 程度であることが多く、そしてその負荷量は水量の増減に追従するが、その濃度は水量の変動と逆の変動をする傾向にあった。リン負荷量は $15\sim 70\text{ kg/d}$ の間で変化した。

引用文献

- 羽田守夫(1978)：水文因子による河川の水質変動の評価について、土木学会第6回環境問題シンポジウム講演論文集、71～77。
山口高志(1978)：都市河川の動態、水工学のための夏期研修会(土木学会)、A-5-1～A-5-17。

美浦村モデル地域における地下水の水質分布特性と地下水流に関する調査研究

細見正明¹・津野 洋¹・村岡浩爾¹・合田 健¹

Field Studies on the Characterization of Ground Water Quality and Flow Pattern in Miho Village Region

Masaaki HOSOMI,¹ Hiroshi TSUNO,¹ Kohji MURAOKA¹
and Takeshi GODA¹

Abstract

From the viewpoint of the effects of ground water on lake eutrophication, the characterization of ground water quality and its flow pattern have been discussed on the basis of a field survey in the Miho region on the shore of Lake Kasumigaura. The number of objective wells was 115 which were randomly located in the model region of area 14km².

The following results were obtained:

- 1) The mean values of Dissolved Total Nitrogen (2.60--3.30ppm) and Dissolved Total Phosphorus (0.16--0.21ppm) from January to August in 1978 were high enough to stimulate lake eutrophication.
- 2) The ground water quality in each shallow well varied widely, and it is difficult to interpret the distribution solely on a geological classification.
- 3) The range for nutrient concentrations and COD values decreased with depth. NO₃-N and COD values were extremely low in the water below a depth of 10m, and they were suitable for differentiating shallow from deep ground water.
- 4) Judging from the equipotential line of ground water level and the water level in the lake, the ground water is considered to flow from the Johso Plateau into Lake Kasumigaura.

1. はじめに

陸水域の中で地下水の占める割合は大きく、水資源の観点からも重要であるが、地下水中の栄養塩物質、特に窒素、リンの挙動とそれらの湖沼の富栄養化に及ぼす影響について検討した例 (Paul D. Uttormark et al. 1974) は少ない。地下水が湖に影響を与えるプロセスは、図1に示したように地下水が工業用水・生活用水として汲み上げられ、利用された後、表流水として湖へ流入するもの、さらに地下水が直接湖盆を通して湖水と交換するものと考えられる。前者は、

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町
Water and Soil Environment Division, The National Institute for Environmental Studies, P. O. Yatabe,
Ibaraki 300-21, Japan.

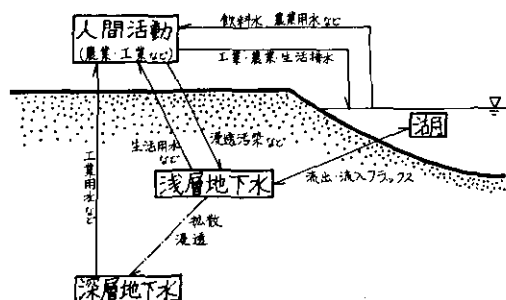


図1 地下水と湖との関連図

Fig. 1 Schematic relationship of ground water and lake

$$\sum_{i=1}^n (\text{地下水揚水量})_i \times (\text{地下水中のN, P濃度})_i \times a_i \quad (\text{湖までの到達率})$$

後者は、

$\sum_{i=1}^m (\text{湖盆を通じて流入する地下水量})_i \times (\text{地下水中のN, P濃度})_i \times d_i$ (湖盆を通過する際の物質変化率、例えば底質での脱窒、吸着現象など)

で、地下水起源の湖に対する負荷量が求められる。したがって、まず地下水の水質分布特性を知る必要がある。

本研究は、霞ヶ浦沿岸に位置する美浦村の一部(約14km²)をモデル地域(図2)として、地下水の水質分布特性をは握するために、1978年1月、2月、3月、5月、8月に、既存の井戸115か所、表流水20か所の水質、測水調査を行った結果およびモデル地域の地形地質調査結果をまとめたものである(村岡・津野・細見, 1978)。さらに常総台地から湖岸に至る約0.7kmの直線上に5か所の観測井を設置し、地下水の水位変動についても検討を加えた。

2. 調査項目および分析方法

調査対象とした既存の井戸に関して、井戸種類、井戸深(ストレーナーの位置も含めて)(図3)およびその使用状況についてヒアリング、現地調査を行った。水質調査項目は、水温、pH、電気伝導度、濁度、アルカリ度、NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N、溶存態T-N、PO₄-P、溶存態T-P、Cl⁻、CO₂Dで、一部T-N、T-Pも含む。各栄養塩類およびCl⁻は、Technicon社のAuto Analyzer GSM 6で、D-T-N、D-T-Pは、過硫酸カリウムで分解後、Auto Analyzerで(細見・津野、未発表)、またCODは、アルカリ性過マンガン酸カリウム法で分析した。

3. モデル地域の概要

(1) 地形地質

霞ヶ浦流域には、山地・台地・沖積低地に大きく分かれるが、モデル地域を含む霞ヶ浦南岸一帯に

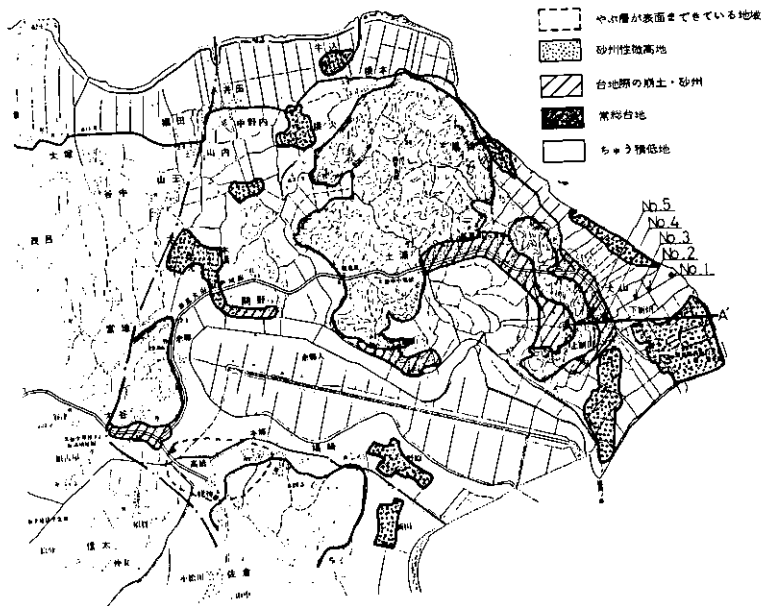


図2 モデル地域における地形地質図

Fig.2 Geological map of Miho village selected as a model region

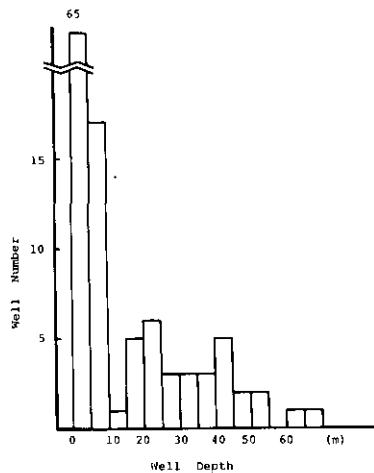


図3 調査対象の井戸深分布

Fig.3 Distribution of wells in the model region

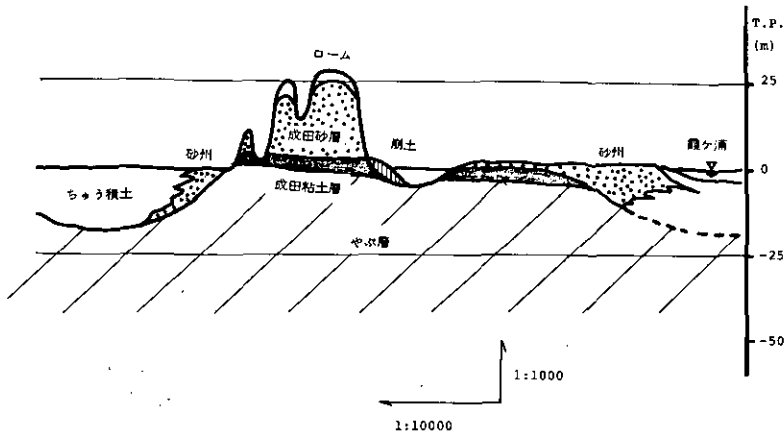


図4 地質断面図 (A—A')

Fig.4 Geological profile (A—A')

は、図2で示したように海拔30m程度の常総台地が広がっており、台地下部が沖積平野に埋積されている。また沖積平野部には砂州性の微高地が点在している。地質構造は、最下位にある蕨層が姥神・石灘付近で高く、他地域では平地下に埋没している。また蕨層は沖積土壌と比較するとより均質な地層である。その上部にある成田層の下部泥岩は沖積平野よりわずかに高く、北部では層厚が大きく、中部～南部では層厚が薄い。地質断面構造の例として、図4に、図2のA—A'の地質断面図を示す。

(2) 土地利用および水利用

モデル地域は、霞ヶ浦(西浦)流域の土地利用と比較すると、水田の占める割合がかなり大きく、稲作中心である。また家庭用水源は、すべて地下水で、かんがい用水は湖水と一部地下水でまかなわれている。

4. 水質調査結果

(1) 各水質項目の平均値

1月～8月の水質調査項目の平均値を表1に示す。水温を除けば、各水質項目ともほぼ同様の値を示しており、季節変化がないと言えるが、8月の調査結果では特に $\text{NH}_4\text{-N}$ が著しく、また $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ も高い値を示した。これは調査時期が異常渇水期であったことと関係しているかも知れない。調査時期全般にわたってD-T-NおよびD-T-Pの濃度がそれぞれ2.6～3.3ppmおよび0.15～0.20ppmと霞ヶ浦(湖心)のT-NおよびT-P濃度より2～3倍高いことが注目される。またD-T-N、D-T-PとT-N、T-Pとの差はほとんどないが、ただリンについては、1けた近くT-Pの方が高くなる資料もごく一部ではあるが存在した。これは鉄とともにリンが沈降したためだと考えられる。

(2) 水質項目間の相関

すべての資料について水質項目間の相関をとると、Clと電気伝導度、 $\text{NO}_3\text{-N}$ とD-T-N、 $\text{PO}_4\text{-P}$ とD-T-Pの他は、顕著な相関関係が認められなかった。またすべての試料について主成分分析を行

表1 地下水水質の平均値

Table 1. Mean values of chemical components in ground water

1978	Jan.	Feb.	Mar.	May	Aug.
Water Temp.(°C)	10.7	11.2	11.6	13.3	18.3
P H	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1
Turbidity (ppm)	—	—	3.6	3.7	12.2
Alkalinity (ppm)	—	130	127	130	137
NH ₄ -N (ppm)	0.05	0.07	0.04	0.05	0.24
NO ₂ -N (ppm)	0.003	0.003	0.018	0.009	0.024
NO ₃ -N (ppm)	1.98	2.10	2.77	2.82	2.10
D-T-N (ppm)	2.89	2.60	3.20	3.30	2.79
Total-N (ppm)	—	—	—	3.40	—
PO ₄ -P (ppm)	0.12	0.11	0.16	0.14	0.20
D-T-P (ppm)	0.19	0.15	0.17	0.16	0.21
Total-P (ppm)	—	—	—	0.19	—
Chloride (ppm)	50	49	49	49	49
COD (ppm)	2.6	2.3	2.4	2.7	2.5

ってみたが、第1・第2固有値で寄与率が50%弱であり、各井戸の水質を代表する共通の説明変量がないと言える。このことは、各井戸の水質に対して、いろいろな因子が独立に影響を及ぼしている結果であると考えられる。

(3) 浅層地下水の水平分布

井戸深が10m未満の井戸水を浅層地下水、10m以深のものを深層地下水とする。図5に浅層地下水および表流水中のD-T-Nの分布を示す(1978年1月)。全体として湖側の方が低くなっているように思われるが、井戸による差異が大きい。こうしたバラツキは、他の水質項目についても言える。そこで、地下水の水質に影響を及ぼしているひとつの要因として、地質構造が考えられ、ここでは、先に示したモデル地域の地形地質図より、台地際の崩土・砂州にある井戸群(Aグループ)、礫層が地表面に近い井戸群(Bグループ)、沖積平野部で砂州性の微高地にある井戸群(Cグループ)とに分け、各水質項目の平均値および標準偏差を求めた。その結果を表2に示す。電気伝導度、濁度、各態窒素化合物、Cl⁻については、各井戸群の差が明確である。D-T-Nは、台地際の井戸群が高い値を示し、またCl⁻は、砂州性の微高地が高くなっているが、依然標準偏差からみてバラツキが大きい。このことから地質構造だけでなく、各井戸の周辺環境条件についてもさらに調べていく必要がある。

(4) 井戸深ごとの分布

測定した水質項目に関して浅層の地下水ではバラツキが大きいのが、深くなるにつれて一様の水質を示す傾向があり、その一例としてD-T-Nの井戸深ごとの分布(1978年3月)を図6に示す。10m以浅

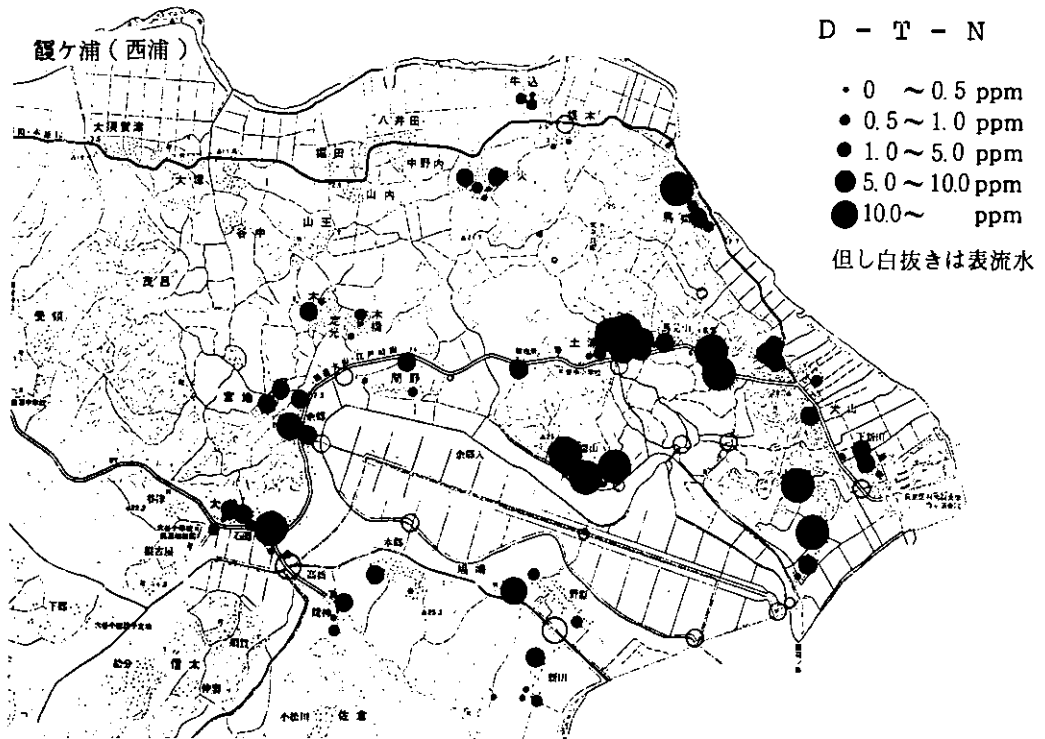


図5 浅井戸（井戸深が10m未満）におけるD-T-Nの分布

Fig. 5 Distribution of shallow wells less than 10m deep with different concentration of Dissolved-Total-Nitrogen in the model region

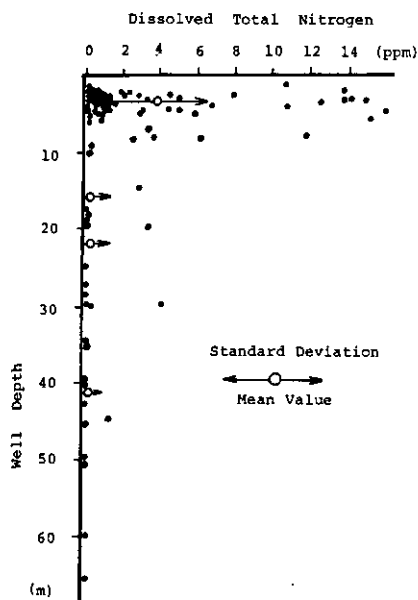


図6 D-T-Nの井戸深ごとの分布

Fig. 6 Dissolved-Total-Nitrogen concentration in the wells with different depth

表2 浅井戸における地質構造別の地下水水質

Table 2. Ground water quality in shallow wells classified by geological features

1978. 3.	A Group (33)		B Group (12)		C Group (40)	
	M. V.*	S. D.**	M. V.*	S. V.**	M. V.*	S. V.**
W. Temp. (°C)	11.0	1.7	11.0	1.7	10.9	1.6
P H	7.0	0.5	7.1	0.7	7.1	0.5
E. C. (u/cm)	540	160	360	190	620	220
Turb. (ppm)	3.7	11.7	1.9	3.6	6.6	17.7
Alkali. (ppm)	119	67	104	58	132	68
NH ₄ -N (ppm)	0.06	0.22	0.01	0.02	0.05	0.19
NO ₂ -N (ppm)	0.003	0.004	0.002	0.005	0.047	0.235
NO ₃ -N (ppm)	5.73	6.67	2.27	3.68	2.31	4.64
D-T-N (ppm)	6.54	7.23	2.58	4.11	2.71	4.90
PO ₄ -P (ppm)	0.18	0.28	0.17	0.14	0.13	0.17
D-T-P (ppm)	0.18	0.31	0.17	0.13	0.13	0.17
Cl ⁻ (ppm)	49	25	21	16	64	46
COD (ppm)	2.8	1.7	3.2	4.5	2.8	2.1

* Mean Value

** Standard Deviation

では、非常にバラツキが大きく、平均濃度も高いが、10m以深では、急激に減少し、バラツキも小さくなっている。表3～8にNO₃-N、NH₄-N、NO₂-N、D-T-P、Cl⁻、CODの井戸深ごとの平均値および標準偏差(1978年1月～8月)を示す。NO₃-Nは、D-T-Nの大部分を占めているので、D-T-Nと同様の分布であるが、NH₄-Nは、平均値で見るとほとんど変化しないが、標準偏差をみると、0～10mの井戸深で非常に大きく、深くなるにつれて、小さくなっていることがわかる。またNH₄-Nの検出される割合は、10m以深で小さく、20m以深で高くなっている。8月の結果では、浅層の地下水のみが、増加していることがわかる。NO₂-Nは、はっきりとした傾向がない。一般的な窒素化合物の変化は、浅層で硝化反応が、深層では脱窒反応あるいはNH₄-Nへの還元反応が生じるが、上述の傾向は、これらの生物化学的反応によるものか、あるいは深層水が全く別個の水塊であることによるものとも考えられ、今後、窒素化合物の挙動をは握していく必要がある。

またD-T-Pは深くなるにつれて若干高くなる傾向があるが、10m以浅と30m以深の標準偏差が大きくなっている。NH₄-Nと同様、8月には浅層地下水のみが増加している。Cl⁻は深くなるにつれて、減少する傾向がある。CODは、10m以深で急激に減少し、バラツキも小さくなる。またCl⁻、CODとも、季節変化は、あまり見られない。

表9は、現在使用されていない浅井戸(井戸深が10m未満)と、使用されている浅井戸、使用されている深井戸(10m以深)との3グループに分けて、各水質項目の平均値を示し、表10は、判別分析の結果を示している。第1グループと第2グループとは、平均値で見れば、濁度とCOD以外は大き

表3 井戸深ごとのNO₃-N濃度 (ppm)

Table 3. NO₃-N concentration (ppm) in the wells with different depth

Well depth	(1978)	JAN.	FEB.	MAR.	MAY	AUG.
0~10m	M. V.	2.46	2.63	3.45	3.37	2.67
	S. D.	(3.85)	(3.95)	(5.31)	(5.47)	(4.64)
10~20m	M. V.	0.40	0.41	0.48	0.30	0.34
	S. D.	(0.94)	(1.00)	(1.18)	(0.73)	(0.78)
20~30m	M. V.	0.63	0.60	0.46	0.60	0.23
	S. D.	(1.32)	(1.35)	(1.11)	(1.47)	(0.53)
30m~	M. V.	0.36	0.39	0.33	0.32	0.32
	S. D.	(0.97)	(0.97)	(0.90)	(0.88)	(0.77)

表4 井戸深ごとのNH₄-N濃度 (ppm)

Table 4. NH₄-N concentration (ppm) in the wells with different depth

Well Depth	(1978)	JAN.	FEB.	MAR.	MAY	AUG.
0~10m	M. V.	0.05	0.06	0.05	0.05	0.33
	S. D.	(0.24)	(0.30)	(0.20)	(0.20)	(0.90)
10~20m	M. V.	0.07	0.08	0.05	0.07	0.06
	S. D.	(0.12)	(0.10)	(0.09)	(0.09)	(0.10)
20~30m	M. V.	0.01	0.04	0.01	0.02	0.02
	S. D.	(0.03)	(0.05)	(0.02)	(0.03)	(0.05)
30m~	M. V.	0.07	0.06	0.04	0.04	0.06
	S. D.	(0.06)	(0.06)	(0.05)	(0.04)	(0.05)

表5 井戸深ごとのNO₂-N濃度 (ppm)

Table 5. NO₂-N concentration (ppm) in the wells with different depth

Well Depth	(1978)	JAN.	FEB.	MAR.	MAY	AUG.
0~10m	M. V.	0.002	0.003	0.024	0.011	0.041
	S. D.	(0.010)	(0.004)	(0.165)	(0.027)	(0.131)
10~20m	M. V.	trace	0.002	0.001	0.002	0.002
	S. D.	(-)	(0.003)	(0.001)	(0.002)	(0.003)
20~30m	M. V.	0.006	0.002	0.001	0.005	0.002
	S. D.	(0.014)	(0.001)	(0.001)	(0.013)	(0.011)
30m~	M. V.	0.004	0.003	0.004	0.004	0.011
	S. D.	(0.009)	(0.002)	(0.011)	(0.010)	(0.030)

表6 井戸深ごとのD-T-P濃度 (ppm)

Table 6. Dissolved-Total-Phosphorus concentration (ppm) in the wells with different depth

Well Depth	(1978)	JAN.	FEB.	MAR.	MAY.	AUG.
0~10m	M. V.	0.17	0.14	0.16	0.16	0.22
	S. D.	(0.25)	(0.20)	(0.23)	(0.27)	(0.32)
10~20m	M. V.	0.10	0.08	0.10	0.09	0.09
	S. D.	(0.05)	(0.06)	(0.07)	(0.07)	(0.06)
20~30m	M. V.	0.23	0.24	0.15	0.16	0.24
	S. D.	(0.15)	(0.31)	(0.11)	(0.13)	(0.20)
30m~	M. V.	0.24	0.20	0.21	0.19	0.22
	S. D.	(0.32)	(0.25)	(0.27)	(0.2.)	(0.31)

表7 井戸深ごとのCl⁻濃度 (ppm)

Table 7. Cl⁻ concentration (ppm) in the wells with different depth

Well Depth	(1978)	JAN.	FEB.	MAR.	MAY	AUG.
0~10m	M. V.	52	53	51	52	45
	S. D.	(37)	(39)	(38)	(46)	(32)
10~20m	M. V.	55	41	51	49	53
	S. D.	(48)	(26)	(43)	(39)	(51)
20~30m	M. V.	40	34	40	39	38
	S. D.	(33)	(28)	(35)	(31)	(29)
30m~	M. V.	41	37	39	36	44
	S. D.	(38)	(38)	(38)	(33)	(55)

表8 井戸深ごとのCOD濃度 (ppm)

Table 8. COD concentration (ppm) in the wells with different depth

Well Depth	(1978)	JAN.	FEB.	MAR.	MAY	AUG.
0~10m	M. V.	3.3	2.9	2.9	3.3	3.4
	S. D.	(3.3)	(2.9)	(2.4)	(2.6)	(3.5)
10~20m	M. V.	0.9	0.9	1.0	1.3	0.7
	S. D.	(0.2)	(0.7)	(0.4)	(0.6)	(0.4)
20~30m	M. V.	0.7	1.1	1.2	0.9	0.5
	S. D.	(0.5)	(1.7)	(0.6)	(0.4)	(0.5)
30m~	M. V.	1.1	0.7	0.9	1.2	1.0
	S. D.	(1.3)	(1.3)	(1.4)	(1.2)	(1.0)

表9 判別される3グループの地下水水質の平均値

Table 9. Mean values of chemical components in ground water of the three groups for discriminant analysis

	1 Group (63)* Shallow G. W. Unused	2 Group (15)* Shallow G. W. Used	3 Group (27)* Shallow G. W. Used
Turb. (ppm)	6.1	1.1	0.1
Allkali. (ppm)	128	113	123
NH ₄ -N (ppm)	0.05	0.02	0.04
NO ₃ -N (ppm)	3.5	5.6	0.35
PO ₄ -P (ppm)	0.16	0.13	0.14
Cl ⁻ (ppm)	57	49	31
COD (ppm)	3.1	1.8	0.7

* sample number

表10 判別分析の結果

Table 10. Results of discriminant analysis

	Mahalanobis Distance	Significant factor for discrimination
1 Group - 2 Group	0.54	—
1 Group - 3 Group	2.34*	NO ₃ -N*, COD*
2 Group - 3 Group	5.57*	NO ₃ -N*, COD*

* significant 95%

な差がなく、判別分析の結果でも、マハラノビスの距離も小さく、明確に判別できない。ところが、深井戸と浅井戸とはマハラノビスの距離も大きく、明確に判別でき、その判別に主要な因子は、NO₃-N、CODである。濁度は平均値からみれば大きな差があるが、判別の決め手にはならない。

5. 地下水流について

(1) 地下水の水位

5月と8月の調査時における水位等高線図を図7および図8に示す。8月は渇水期にあたり、水位が一部低下していることがわかる。一部湖水位よりも低いところがあるものの、おおむね台地側から湖の方へ向かって流れていると言える。

(2) 観測井における水位変動

地下水流の解析および湖水と地下水との交換量を求める基礎とするために、図2に示した観測井No. 1～No. 5において、1978年9月より自記水位計を設置し、地下水の水位変動の追跡を開始した。その一例を図9に示す。観測井No. 5は常総台地下部にある成田砂層の下部にストレーナーを設けたもので、降雨の地下水位への応答は鈍く、変化の度合いが小さい。一方、粘土層の下部にある礫層 (T.P

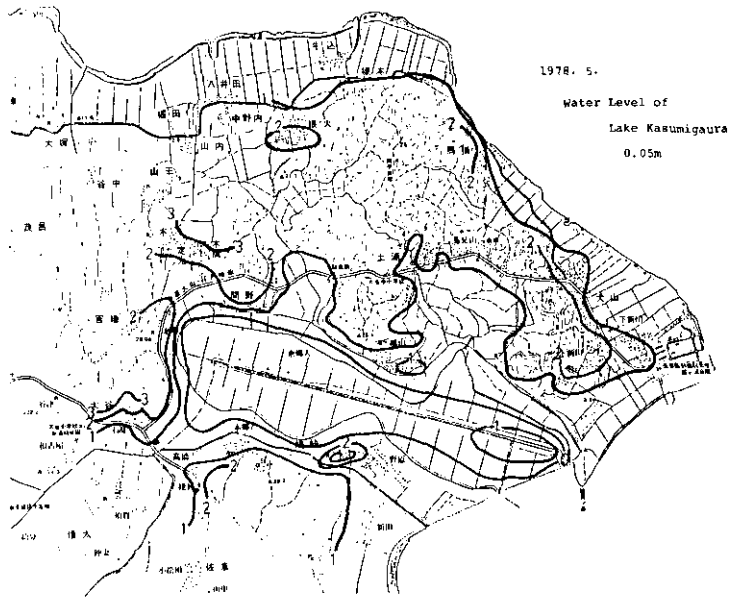


図7 地下水位等高線図 (1978年5月)

Fig. 7 Equipotential line of ground water level in May 1978

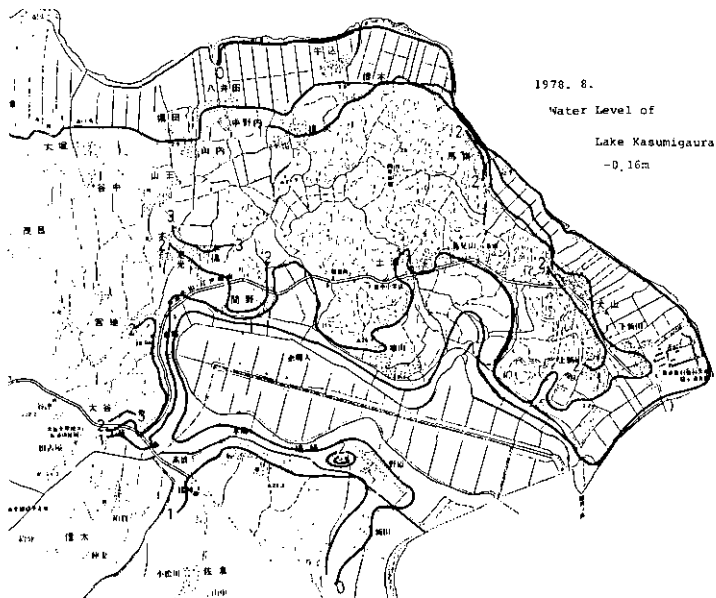


図8 地下水位等高線図 (1978年8月)

Fig. 8 Equipotential line of ground water level in August 1978.

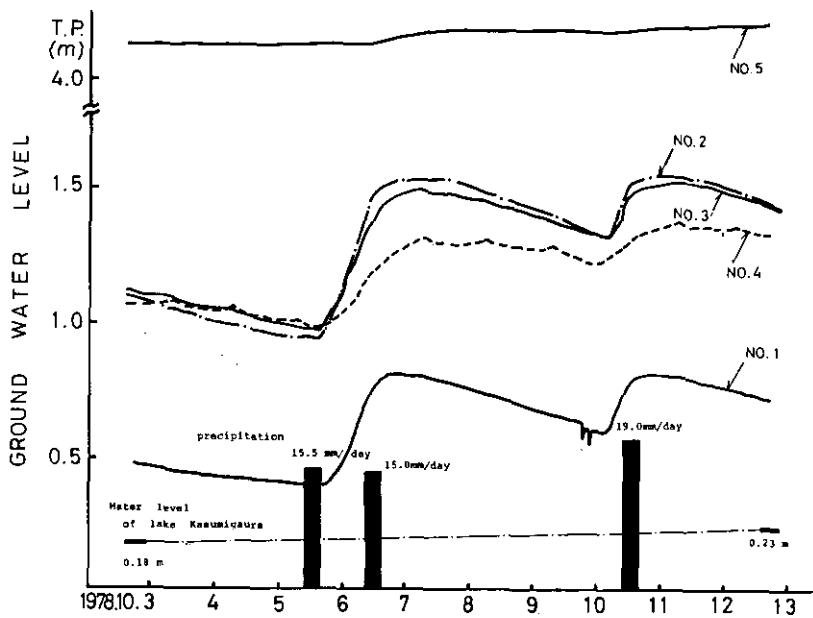


図9 観測井における地下水位変化

Fig. 9 Variation of ground water level in the selected wells

—10~15m) にストレーナーを設けた観測井No. 1~No. 4は、降雨に敏感に反応することがわかった。またNo. 2~No. 4は、ほとんど同じ地下水位を示し、湖岸にあるNo. 1は、それらよりも低くなっている。湖水位がT. P. 0.18~0.23mであるので湖の方へ向かう流れが考えられる。今後、数層にある帯水層の透水係数等の諸係数を求めるばかりでなく、地下水のかんよう(涵養)機構も含めて検討していく必要がある。

6. まとめ

本研究は、霞ヶ浦沿岸に位置する美浦村をモデル地域として、地下水中の栄養塩類を中心とした水質の分布特性のは握、および地下水流の解析の基礎とするために行った現地調査の結果をまとめたものである。

1月~8月における水質項目の平均値からみると季節変化はほとんどないが、D-T-N, D-T-Pの濃度が高いことが示され、富栄養化の中で注目すべきことである。

浅層地下水の水質は、井戸の差異によって大きく変化し、地質構造による違いだけでは十分説明できなかった。また井戸深ごとの水質分布は、深くなるにつれて一様になる傾向がある。NO₃-NとCODは、10m以深で減少し、バラツキも小さくなる。また浅層地下水と深層地下水との判別には、NO₃-NとCODが最も重要な因子となる。

地下水の水位等高線からみれば、台地側から、湖の方へ向かって流れている傾向にあった。

引用文献

- 合田 健・村岡浩爾・津野 洋・相崎守弘・福島武彦・細見正明・土屋 巖・白井邦彦(1978)：霞ヶ浦とその周辺水圏における水理と水質の関連について，国立公害研究所研究発表会予稿集，SS/OT-1-78， 74～84.
- 合田 健・村岡浩爾・津野 洋・細見正明(1978)：霞ヶ浦周辺の地下水の水質について(第1報)，第43回日本陸水学会講演要集，175.
- 細見正明・津野 洋(未発表)：水中の全窒素，全磷の同時分析について.
- 村岡浩爾・津野 洋・細見正明(1978)：湖の富栄養化に及ぼす沿岸地下水の挙動について(第1報)，土木学会第33回年次学術講演概要集第2部，291～292.
- Paul D. Uttormark, John D. Chapin and Kenneth M. Green(1974)： Estimating Nutrient Loading of Lakes from Non-Point Sources. EPA-660/3-74-020 August, 112.

大気降下物中の栄養塩量について

安部喜也¹・横内陽子¹・大槻 晃¹

Estimation of the Amounts of Nutrients in the Fallout for Lake Kasumigaura

Yoshinari AMBE¹, Yoko YOKOUCHI¹ and Akira OTSUKI¹

Abstract

To estimate the amounts of nutrients entering the lake water directly from the atmosphere, the concentrations of total P, NH₄-N, NO₂-N and NO₃-N were determined for the fallout samples collected at NIES monthly in the period from June 1977 to June 1978.

The amounts of fallout nutrients per area per month were calculated as shown in Table 1 from the amount of monthly precipitation and the concentration of the nutrients.

Assuming that these values can be applied for the whole area of Lake Kasumigaura (Nishiura), the amounts of total phosphate and total inorganic nitrogen were estimated as 7ton/year and 156ton/year respectively. These values are nearly comparable to those for the major river which flows into the lake.

1. まえがき

霞ヶ浦の湖水中に、リンや窒素といった栄養塩が入ってくるコースとして、河川からの流入のほか、大気中から降水や降下物とともに入りこむものがあげられる。降下栄養塩としては、大気中から水面に直接降下するものもあれば、流域の地表に落下して、他の供給源による栄養塩とともに河川を通して流入するものもある。こうした栄養塩の量を見積っておくことは、水域の栄養塩収支を論ずる際に基本的な項目の一つとなる。霞ヶ浦周辺の降水中のN、Pについては茨城大学霞ヶ浦研究会(1977)による測定例があり、降水の寄与について推定を試みているが、流域の降下量全体についての収支を論ずるためにはさらに多くの測定データを集積する必要がある。

本研究では降水といわゆるdry fallout に伴って、栄養塩が全体としてどれだけ、地表面あるいは水面上に供給されるのか、水域の富栄養化問題において大気圏のもつ意義を評価することを目標として、さしあたり、リンおよび各態の窒素の月別の降下量の測定を始めたので、現在までの測定値について整理したものである。

1. 国立公害研究所 計測技術部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町
Chemistry and Physics Division, the National Institute for Environmental Studies, P. O. Yatabe,
Ibaraki 300-21, Japan.

こうしたリンや窒素の起源がいずこに由来するものか、また、大気中から降水に移行する過程等々についても解明すべき問題は数多いが今回は測定結果だけを示すにとどめた。

2. サンプルング

国立公害研究所研究棟屋上(地上約10m)に直径23cmのガラス製ロートとガラスビン(10 l)を組合せた採取装置を設置した。1977年6月より毎月(1日~30日まで)降水および降下物を一緒にして採取した。サンプルング期間は時によって、若干の長短がある。

ロートには中央部に昆虫や大形の固形物の混入を防ぐため、磁製ルツボのフタを置き、フタとロートの壁面とのすき間から水が流れる様にした。またロートの壁面に付着した降下物は採水時に30~50 mlほどの蒸溜水で洗浄して、採水ビンに流し込んだ。

採水装置は2個を並置し、試水の変質および損失を防ぐため、サンプルングに先立って一方のビンには1 N硫酸20mlをいれて、 $\text{PO}_4\text{-P}$ および $\text{NH}_4\text{-N}$ の分析に用い、他のビンには1 N水酸化ナトリウム溶液20mlを加えておき、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の測定に用いた。採取した試料は、良くふりませた後、それぞれその一部をとり、Whatman GFC フィルターを用いて濾過したものを窒素の測定に、そのままのものを用いてリンを測定した。

またサンプル量とロートの面積とから月間の降水量を求めたが、この値は、蒸発による誤差と、洗浄水による誤差とを含むものである。

3. 分析操作

分析項目は、Total $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の4種であり、それぞれ以下の方法により、いずれもオートアナライザー(Technicon社製)を用いて定量した。

i) Total $\text{PO}_4\text{-P}$

1200Wの紫外線を3時間照射して分解した後、Murphy, J & Riley, J. P. の方法を用いた。

ii) $\text{NH}_4\text{-N}$

Solorzano, L. の方法でフェノールの代わりにサリチル酸ナトリウムを用いた改良法によった。

iii) $\text{NO}_2\text{-N}$

Bendschneider, K. & Robinson, R. J. の方法を用いた。

iv) $\text{NO}_3\text{-N}$

銅-カドミウムカラムを用いて還元する、E. D. Woodらの方法の改良法を用いた。

v) Total N

$(\text{NH}_4\text{-N}) + (\text{NO}_2\text{-N}) + (\text{NO}_3\text{-N})$ をここではTotal Nと表したが、有機態のNは含んでない。

(以上の分析法の詳細については本報告書 336 ページを参照)

4. 結果と考察

4.1 降下物中の栄養塩濃度と月変動

表1に1977年6月から1978年6月までの1か年間の各月の雨量と、採取した試料水中の各成分の濃度を示す。これは降水とドライフォールアウトを合わせた溶液の濃度であり、1か月に降下したリンと無機態のNの平均値に相当する。

表1 降下物中の栄養塩濃度

Table 1. Concentration of fallout nutrients at NIES, Tsukuba

		Days	(mm)		(mg/l)			
			Precip.	Total P	PO ₄ -P	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N
1977	June 1 - June 30	30	30	160	0.019	0.487	0.004	0.085
	July 1 - July 31	31	31	123	0.012	0.539	0.009	0.220
	Aug. 1 - Aug. 31	31	31	297	0.011	0.261	0.004	0.063
	Sept. 1 - Sept. 30	30	30	238	0.002	0.165	0.012	0.074
	Oct. 1 - Nov. 1	32	32	49	0.018	0.330	0.030	0.165
	Nov. 2 - Nov. 30	29	29	76	0.057	0.507	0.011	0.192
	Dec. 1 - Dec. 28	28	28	16	0.077	1.25	0.009	0.571
1978	Dec. 29 - Jan. 31	34	34	45	0.050	0.682	0.025	0.314
	Feb. 1 - March 1	29	29	37	0.092	0.677	0.609	0.494
	March 2 - March 31	30	30	115	0.041	0.489	0.010	0.224
	Apr. 1 - May 1	31	31	141	0.049	0.432	0.006	0.188
	May 2 - May 31	30	30	100	0.043	0.659	0.008	0.334
	June 1 - July 1	31	31	80	0.043	0.545	0.009	0.370

NO₂-Nが異常に高い一つの例外を別にすると、Nについてはtotal N量の約70%がNH₄-Nであり、NH₄-N>NO₃-N>NO₂-Nの順となる。NO₂-NはNO₃-Nの1/10~1/50程度である。

季節的にみると濃度については、Total-P、各態のN、いずれも降水量の少ない冬季に高く、降水量の多い夏から秋にかけて低く、降水量とは、ほぼ逆の関係を示している。

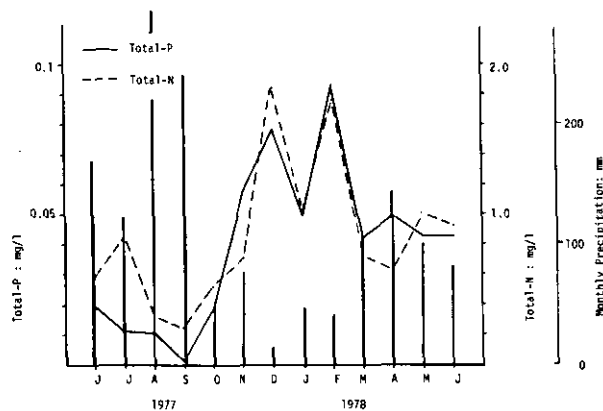


図1 降下物中の栄養塩濃度の変動

Fig. 1 Seasonal variation of the concentration of fallout nutrients

4.2 単位面積あたりの栄養塩の総降下量

試料水の栄養塩濃度に降水量を乗ずることにより、単位面積あたりの月間降下量が得られる。結果を表2に示す。カッコの中はサンプリング日数を30日とした場合の数値である。

表2 単位面積あたり月間栄養塩降下量

Table 2. Monthly amounts of fallout nutrients at NIES, Tsukuba

		(normalized value)				
		Total P ₄ -P	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	Total-N
1977	June	3.04 (3.04)	77.9 (77.9)	0.64 (0.64)	13.6 (13.6)	92.1 (92.1)
	July	1.48 (1.43)	66.3 (64.2)	1.11 (1.07)	27.1 (26.2)	94.5 (91.5)
	Aug.	3.27 (3.16)	77.5 (75.0)	1.19 (1.15)	18.7 (18.1)	97.4 (94.3)
	Sept.	0.48 (0.48)	39.3 (39.3)	2.86 (2.86)	17.6 (17.6)	59.8 (59.8)
	Oct.	0.88 (0.83)	16.2 (15.2)	1.47 (1.38)	8.1 (7.6)	25.8 (24.2)
	Nov.	4.33 (4.48)	38.5 (39.8)	0.84 (0.87)	14.6 (15.1)	53.9 (55.8)
1978	Dec.	1.23 (1.32)	20.0 (21.4)	0.14 (0.15)	9.1 (9.8)	29.2 (31.3)
	Jan.	2.25 (1.99)	30.7 (27.1)	1.13 (1.10)	14.1 (12.4)	45.9 (40.5)
	Feb.	3.40 (3.52)	25.0 (25.9)	22.53 (23.31)	18.3 (18.9)	65.8 (68.1)
	March	4.72 (4.72)	56.2 (56.2)	1.15 (1.15)	25.8 (25.8)	83.2 (83.2)
	April	6.91 (6.69)	60.9 (58.9)	0.85 (0.82)	25.5 (25.7)	88.3 (85.5)
	May	4.30 (4.30)	65.9 (65.9)	0.80 (0.80)	33.4 (33.4)	100.1 (100.1)
	June	3.44 (3.33)	43.6 (42.2)	0.72 (0.70)	29.6 (28.7)	73.9 (71.5)
	Total	39.73	618.0	35.43	256.5	909.9 (mg/m ² .y = Kg/km ² .y)

面積あたりの降下量は月によってかなりの変動を示す。Total Pの場合秋季に少なく春から夏にかけて高い傾向をもつ。雨量との関連は必ずしも明確でない。NH₄-Nは秋から冬にかけて低く、春から夏に高い。NO₂-Nについてはそれほど明確でないが夏と冬に多少高い傾向があり、NO₃-Nは春から夏にかけて高く他の季節には低い。無機態のN全体についてはPと同様に春から夏にかけて高いが夏の高い時期がより長い。全体的にはTotal PとTotal Nはほぼ並行した変化を示す。平均のN/P比は約22で夏に高く、冬に低い傾向を示す。、河川水における値と比べて、Pが少ないことが特徴的である。

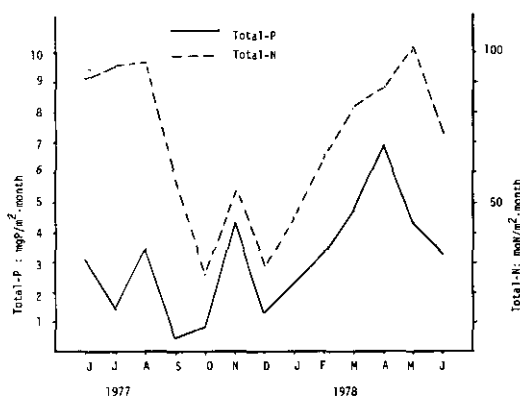


図2 単位面積あたり月間栄養塩降下量の変動

Fig. 2 Seasonal variation of the amount of fallout nutrients

このことは降水ひいては大気中のP, Nそれぞれの起源の問題と関連するがこの点は、季節変動の要因とともに今後の課題である。

4.3 霞ヶ浦水面および流域全体への降下量の推定

今回の測定は一地点のみの値であり、降下栄養塩量についても当然地域的差異のあることが考えられるが、第一近似として、仮にこの値をもって、流域全体(2169.3km²)および湖水面全体(西浦 171 km², 北浦34km²)に一様に降下したものとすると、今回の測定期間における年間の総降下量はそれぞれ、全流域でPが86ton/y, Nが1974ton/y, 西浦の水面にPが6.8ton/y, Nが156ton/y, 北浦でPが1.3ton/y, Nが31ton/y 降下した計算になる。西浦の場合、この値は流入する主要な河川の、園部川や恋瀬川からの流入量にほぼ相当するので、大気からの栄養塩の降下は、今後この流域の物質収支を論ずる際の主要な項目の一つであろう。

5. むすび

今回は一地点のみの測定であったが、湖面あるいは流域全体への栄養塩降下量について、より精度の高い推定をするには、さらに測定地点をふやす必要がある。

また、降水とdry fallout とを区別して採取することが、栄養塩の起源について解析を進めてゆくためには必要であり、そのためのサンプリング装置を目下試作中である。

引用文献

茨城大学霞ヶ浦研究会(1977): 霞ヶ浦, 三共出版, 203pp. および私信による.

津野 洋他: 高浜入水域への栄養塩の河川からの流入量について. 本報告書, 55~63.

遠隔計測による霞ヶ浦の定量的水質計測(クロロフィル a の定量)

安岡善文¹・安崎忠国¹

Quantitative Studies on Water Quality in Lake Kasumigaura by Remote Sensing

Yoshifumi YASUOKA¹ and Tadakuni MIYAZAKI¹

Abstract

A quantitative method is devised for measuring water quality distribution from remotely sensed multi-spectral images. First, the water area is extracted from the images by utilizing spatial and spectral characteristics in order to define strictly the water area. Next, water quality is estimated quantitatively for the extracted area using a regression model which correlates image densities of the multi-spectral data with the ground truth data. The proposed method was applied to the measurement of the chlorophyll- a concentration of Lake Kasumigaura where there has been serious water pollution caused by eutrophication processes. Chlorophyll- a was shown to correlate highly with the image densities of the 7-th channel in the multi-spectral data and the distribution pattern was estimated.

1. はじめに

閉鎖性水域における富栄養化現象は、海域において赤潮、湖沼においてアオコの発生を引き起こし、生活環境に大きな打撃を与えている。これらの現象を解明し、水質の予測、制御さらには浄化を行っていくためには、その第一歩として広域にわたる水質汚濁の現況を定量的に計測することが必要である。赤潮、アオコの発生分布の広域的把握には、その主成分である植物プランクトン中のクロロフィル a を遠隔計測することが有効であるが、実際の遠隔計測データにおいては、水面や大気による複雑な影響のため、必ずしも満足な結果は得られていない。

本研究では、霞ヶ浦における遠隔計測画像データおよび湖上実測データの相関解析により、クロロフィル a の分布状況の定量的計測を試みた。特に、クロロフィル a の定量に有効な波長(チャンネル)の選択、さらに大気(ヘイズ)の影響について検討を行った。なお本研究は一部53年度文部省環境科学特別研究「遠隔計測による環境情報の収集に関する基礎研究」班(研究代表者 土井康弘東京大学教授)と協同で行われたものである。また航空機によるデータ収集に関しては、日本造船振興財団の

1. 国立公害研究所 環境情報部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町
Environmental Information Division, The National Institute for Environmental Studies, P.O. Yatabe,
Ibaraki 300-21, Japan.

御助力を賜った。関係各位に厚く感謝する次第である。

2. データの収集

昭和53年8月23日、霞ヶ浦（高浜入江地区）を対象として遠隔計測実験を実施し、航空機によるマルチスペクトル画像データの収集、湖上におけるグランドトゥルスデータ（水質実測データ）の収集を行った。データ処理の流れを図1に、データ収集の概要を表1に示す。

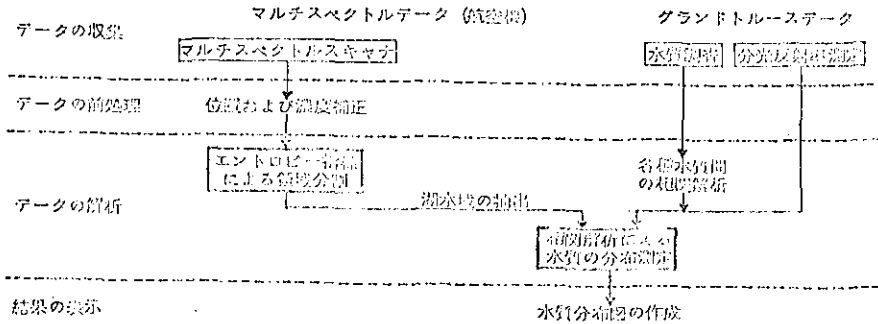


図1 遠隔計測による水質分布図作成処理の流れ図

表1 遠隔計測データ収集の概要

(1978年8月23日 9時、霞ヶ浦高浜入江地区)

	観測項目および方法
画像データ	センサー：マルチスペクトルスキャナ MSS-BG-IB 高 度：6800ft. (コースM-02) 3400ft. (コースM-03, 04, 05)
湖 上 観測データ (湖上16点)	湖 象：水温、透明度、照度、水深 水 質：クロロフィルa, b, c, T-P, T-N, SS, COD, pH, DO 分光反射率：ISCO社製ラジオスペクトルメータ使用

(1) 航空機によるマルチスペクトル画像の撮影

マルチスペクトルスキャナ（日本造船振興財団 所有 MSS-BG-1B）により高浜入江地区を撮影した。撮影は6800ft(コース名 M-02), 3400ft(コース名 M-03, M-04, M-05) の計4コースで行った。表2にスキャナの仕様を示す。

(2) グランドトゥルス（湖上実測）データの収集

航空機による画像データ撮影と同時刻に湖上観測を行った。各観測地点（16か所）には発泡スチロール製白色フロート（6m×6m）を設置し、画像データ中における湖上観測地点の位置づけが正確に行えるよう配慮した。これは画像データと湖上水質データの相関解析を行う際、位置ずれによる誤差を少なくするために重要な意味を有するものである。図2には湖上観測地点配置図、表3には観測結果を示す。

表2 撮影装置の仕様

項目	装置	マチスペクトルスキヤナ MSS-BG-1 B
チャンネル数		12
チャンネル波長帯 (μm)		1. 0.35 - 0.40 (PM)
および検出器		2. 0.433 - 0.453 (PM)
		3. 0.470 - 0.490 (PM)
		4. 0.510 - 0.530 (PM)
		5. 0.540 - 0.560 (PM)
		6. 0.60 - 0.65 (PM)
		7. 0.660 - 0.680 (PM)
		8. 0.70 - 0.80 (PM)
		9. 0.80 - 0.90 (Si Cell)
		11. 10.5 - 12.5 (Hg Cd Td)
		12. 4.30 - 5.50 (In Sb)
		13. 2.10 - 2.40 (In Sb)
	走査本数	
走査角度		90°
瞬間視野角		2.5m rad

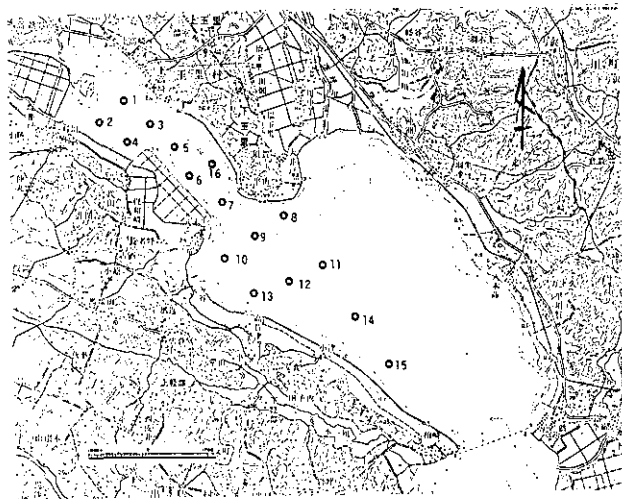


図2 実験フィールドおよび湖上観測点配置図

3. クロロフィル a の定量

海水中におけるクロロフィル a 濃度の遠隔計測には、そのスペクトル吸収帯域 ($440\mu\text{m}$ および $670\mu\text{m}$ 附近) での反射スペクトル計測が有効であることが知られている (Clarke, 1974; 岡見, 1977)。霞ヶ浦湖面上で計測された反射スペクトルにおいてもクロロフィル a の吸収帯においてその反射エネルギー

表3 霞ヶ浦水質調査結果

昭和53年8月23日

項目	地点No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
時刻		10:40 ~50	10:25 ~33	10:05 ~10	10:15 ~20	9:36 ~45	9:25 ~32	8:45 ~9:00	8:45 ~50	8:55 ~9:05	9:15 ~25	10:00 ~10	9:45 ~55	9:30 ~40	10:15 ~22	10:30 ~40	9:10 ~20
天候		快晴	快晴	快晴	快晴	快晴	快晴	快晴	快晴	快晴	快晴	快晴	快晴	快晴	快晴	快晴	快晴
気温(℃)		33.1	32.7	32.0	32.0	31.6	30.8	29.2	31.6	30.0	30.8	31.4	32.0	30.9	31.6	31.7	30.2
風向		S	S	S	—	S	S	S									S
風速(m/s)		2.0	1.5	0.5	0.0	3.3	1.8	1.8									0.0
水深(m)		1.67	1.65	2.10	1.55	2.04	2.12	3.02	3.22	3.34	2.23	3.52	3.54	3.01	3.74	3.84	2.75
採水水深		表面	表面	表面	表面	表面	表面	表面	表面	表面	表面	表面	表面	表面	表面	表面	表面
透明度(m)	上	0.20	0.22	0.18	0.25	0.20	0.21	0.12	0.38	0.32	0.36	0.33	0.35	0.49	0.33	0.32	0.21
	下	0.25	0.24	0.15	0.25	0.21	0.19	0.13	0.29	0.29	0.43	0.33	0.31	0.43	0.29	0.32	0.18
外観		緑	緑	緑	緑	緑	緑	緑	緑	緑	緑	緑	緑	緑	緑	緑	緑
水温	0m	31.8	31.8	31.9	31.8	31.4	31.1	30.6	30.6	30.9	30.6	31.3	31.4	31.2	31.3	31.0	30.4
	1m	28.9	29.2	29.4	29.1	29.6	29.7	29.9	29.8	29.8	30.4	29.9	30.1	30.3	29.5	29.6	29.6
	3m	(28.4)	(28.4)	(28.8)	(28.6)	(29.2)	(29.3)	29.4	29.1	29.4	(29.6)	29.2	29.2	29.4	29.4	29.4	(29.2)
照度lx	0m	22,000	15,000	10,000	20,000	18,000	19,000	200									13,000
	1m	0	0	100	0	0	0	0									0
	3m	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	0									(0)
pH		9.33	9.05	9.44	8.78	9.42	9.20	9.17	10.00	10.03	9.61	10.17	10.11	9.69	10.11	9.89	8.09
DO	mg/l	11.6	11.2	14.7	10.5	12.7	9.9	6.2	10.3	7.9	11.2	11.2	8.3	12.8	11.3	7.8	11.3
COD	〃	35.8	55.2	113	54.0	70.7	52.5	110	48.4	29.0	23.5	24.0	25.2	17.8	25.7	29.3	86.7
SS	〃	68	106	240	91	142	106	247	72	57	38	43	50	28	43	48	80
T-N	〃	3.75	6.03	13.1	5.48	8.04	5.53	11.45	3.61	1.85	1.50	1.66	1.99	1.18	1.87	2.29	
NO ₂ -N	〃	0.017	0.028	0.020	0.086	0.031	0.023	0.020	0.006	0.005	0.006	0.005	0.005	0.002	0.006	0.007	0.051
NO ₃ -N	〃	0.14	0.14	0.22	0.26	0.21	0.10	0.22	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.07	0.05
T-P	〃	0.55	0.82	1.16	0.69	0.83	0.71	1.22	0.52	0.47	0.37	0.39	0.30	0.23	0.40	0.38	0.80
クロロフィル	a μg/l	210.2	315.7	564.2	285.7	345.9	254.9	507.2	108.2	135.2	72.8	68.0	76.1	51.2	58.1	62.8	153.5
	b 〃	23.2	19.8	27.3	17.6	19.9	23.8	37.4	14.2	17.4	10.5	13.2	16.0	13.9	12.2	10.4	14.4
	c 〃	0	0	24.0	0	0	0	17.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

備考 透明度の上下は、標識の上流側及び下流側5mの地点で測定
水深及び照明()内は底の測定値

ギー強度が弱くなることが示されている(図3)。しかしながら実際の遠隔計測データにおいては、大

SPECTRAL ENERGY MEASUREMENT
 BY ISCO SPECTRORADIO METER
 PLACE : TAKAHAMA YEAR : 1978
 DATE : 0823 TIME : 0911
 POINT : X NOTE : HOOD NO.2

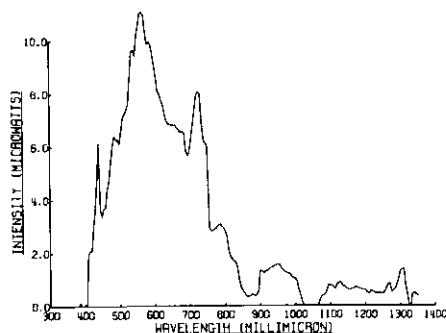


図3 湖上において測定された湖水の分光反射スペクトル

気の影響、水面の状況などが複雑であり、クロロフィル *a* の定量は必ずしも良好な結果を得ていない。ここでは、遠隔計測データと湖上実測データの相関解析よりクロロフィル *a* の定量を行うことを試みた。

湖上観測地点 i ($i=1, \dots, 16$) におけるクロロフィル *a* の濃度を y_i , i 点に対応するマルチスペクトル画像 (j チャンネル) 中の画素の濃度レベルを x_i^j とする。ここで画像濃度は、画素中に示された白色フロート (画像中において高濃度を示す) の近傍 9 画素の平均値を用いた, y_i および $\{x_i^j\}$ に対し,

$$y_i = f(x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^m) \text{ および} \quad (1)$$

$$\log_e(y_i) = f(x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^m)$$

なる形の推形モデルを構成し, f として 114 種の関数形 (安岡・宮崎; 1977, 1978) をとりあげ, 回帰式, 相関係数を算出した。

(1) 有効波長 (チャンネル) の選択

全コース (M-02, 03, 04, 05) の画像データ濃度 (ここでは 1, 2, 5, 7 および 9 チャンネルのデータのみを使用した) とクロロフィル *a* 濃度 ($\mu\text{g}/\text{l}$) の対数, $\log_e(y)$ の単相関係数を表 4 に示す。高々度データ (M-02, 6800ft) を除いて, クロロフィル *a* 濃度はそのスペクトル吸収帯 ($440 \mu\text{m}$ および $670 \mu\text{m}$) に対応する 2 および 7 チャンネルの画像データと高い相関を示し, 既に指摘されている結果 (Clarke, 1974; 岡見, 1977) とも一致した。高々度データは長波長域 (チャンネル 7) では同様に高い相関を示したが低波長域 (チャンネル 2) では相関値が低下した。これは大気中のヘイズによる影響と考えられるため, 高々度および低高度の画像データ間の濃度相関を求め, 大気の影響を検討した。

(2) 高度差による大気の影響

各コース画像中における白色フロート近傍の画像濃度 x_i^j 間の相関係数を表 5 に示す。3400ft と 6800ft の高度の間で大気の影響が全く無いとすれば, その相関係数は 1.0 となるはずである。事実, 長波

表4 クロロフィル a 濃度の対数 ($\log_e(y)$) と画像データ濃度間の単相関係数

飛行コース チャンネル	M-02 (6800 ft)	M-03	M-04 (3400 ft)	M-05
	1 (0.35 μ m ~0.40 μ m)	0.57	0.25	0.61
2 (0.433 ~0.453)	-0.33	-0.78	-0.66	
5 (0.540 ~0.560)	0.48	0.24	-0.12	-0.13
7 (0.660 ~0.680)	-0.78	-0.86	-0.70	-0.79
9 (0.80 ~0.90)	0.71	0.68	0.67	0.52

(注) 表中太字は t 検定により相関有り認められたことを示す。

表5 異なった高度で得られた画像データにおける濃度間の相関係数

飛行コース チャンネル	M-02			M-03
	M-03	M-04	M-05	M-04
1	0.86	0.67	0.48	0.70
2	0.61	0.39		0.53
5	0.90	0.57	0.54	0.83
7	0.96	0.87	0.85	0.82
9	0.95	0.88	0.81	0.94

(注) 表中太字は t 検定により相関有り認められたことを示す。

長域 (7, 9 チャンネル) では M-02 と M-03, 04, 05 の間でその画像濃度は高い相関を示している。しかしながら低波長域では高度の違いによる濃度間の相関値の低下がみられる。これは H₂O が短波長の光をより強く散乱することから、大気中のヘイズが短いチャンネルに対して大きく影響するためと考えられる。すなわち、短波長のチャンネルの画像においては、高度が高くなるほど大気の影響を強く受けるため、水面上での情報が失われ、定量的解析が困難となる。

以上の結果、遠隔計測画像データによるクロロフィル a の定量には、

- (i) クロロフィル a の吸収帯 (マルチスペクトルスキャナの 2, 7 チャンネル) が有効であるが、
 - (ii) 特に大気の影響を考慮する必要がある場合は長波長域 (7 チャンネル) が望ましい。
- ことが示された。

4. 水質分布図の作成

相関解析の結果を用いてクロロフィル a の推定分布図を作成した。図 4 にコース M-02 におけるチャンネル 7 の画像濃度とクロロフィル a 濃度 (μ g/l) との回帰式を示し、この回帰式をもとに画像デー

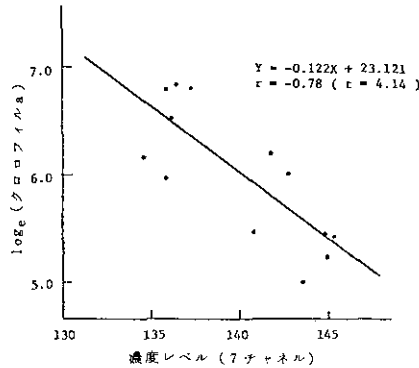


図4 クロロフィルaとMSS画像濃度(チャンネル7)の相関(コースM-02)

タ(7チャンネル)から推定された、高浜入江地区のクロロフィルaの分布図を図5に示す。図5において、(a)は同地区の自然色合成図であり、(b)はクロロフィルa濃度200 $\mu\text{g}/\text{l}$ ~700 $\mu\text{g}/\text{l}$ を10レベルでカラー表示したものである。上部高浜入湾内にクロロフィルaが集中しているのがわかる。

分布図作成に先立ち、画像データに対しては領域分類手法を適用し、画像中から湖水域のみを抽出し、陸域、水草域、イネス等を除去するよう配慮した。領域分類は、エントロピー指標による領域抽出および最尤法分類により行った(安岡・宮崎, 1977)。図5(b)において緑色で示されている部分が湖水域外として除去された部分である。しかしながら湾内においてアオコが集中している部分では、その分光スペクトルが陸域(草地)と区別できなかったため、湖水域であるにもかかわらず除外された。これは、それらの領域ではアオコが水面上でマット状となり、表面で光が直接反射されるためと考えられ、クロロフィルa濃度とチャンネル7の相関も低下した。

マット状となったアオコのクロロフィルaを定量することは、その複雑な反射条件のため困難であり、ここではアオコ自身が浮遊物としての性質を有することを利用し、SS量として推定することを試みた。SSと相関の高いチャンネル9(相関係数は $r=0.69$ であった)の画像から推定したSSの分布図を図6に示す。図6において、SS濃度は50 mg/l ~150 mg/l を10段階でカラー表示した。

5. まとめ

遠隔計測手法によりクロロフィルaの定量的分布図を作成するための第一歩として、クロロフィルa濃度と画像濃度の相関解析を行い、その定量を試みた。この結果、クロロフィルaの定量にはそのスペクトル吸収帯に対応する2および7チャンネルの画像データが有効であるが、チャンネル2は大気による影響を受けやすいことが示された。また高濃度域(アオコ、赤潮が大発生し、マット状となった状態)では、表面による乱反射等の影響で定量が難しいことが判明した。

さらにクロロフィルaの濃度が低い場合(通常の湖水、海域)、海水による光の吸収の影響などにより検出感度が低下することが考えられ、低濃度から高濃度までのクロロフィルaを定量するためには、レーザーダ、マイクロ波レーダ等の能動型計測装置を含む、新しいセンサーの開発が必要となるで

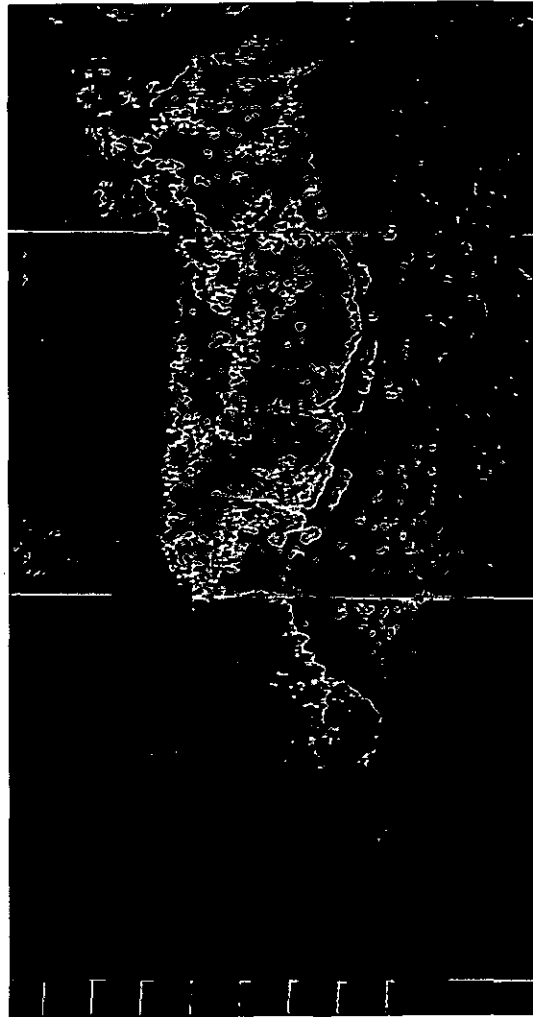
あろう。

引用文献

- C. C. Clarke, et al. (1974) : Remote Spectroscopy of the Sea for Biological Production Studies. Optical aspects of oceanography, Academic Press N. Y., 456—468.
- 岡見 登(1977) : 海の色のスペクトルについて. 沿岸海洋研究ノート, 15, 56~66.
- 安岡善文・宮崎忠国(1977) : 遠隔計測による霞ヶ浦地域の現況解析. 国立公害研究所特別研究成果報告, 第1号, 48~66.
- Y. Yasuoka, et al. (1978) : Quantitative Description and Analysis of Remotely Sensed Water Quality Distribution. Proceedings of 12 th international symposium on remote sensing of environment, 1309—1318.



(a) 自然色合成図



(b) 推定分布図

($200\mu\text{g}/\text{l}$ ~ $700\mu\text{g}/\text{l}$ を10段階で表示)

図5 クロロフィル a の推定分布図

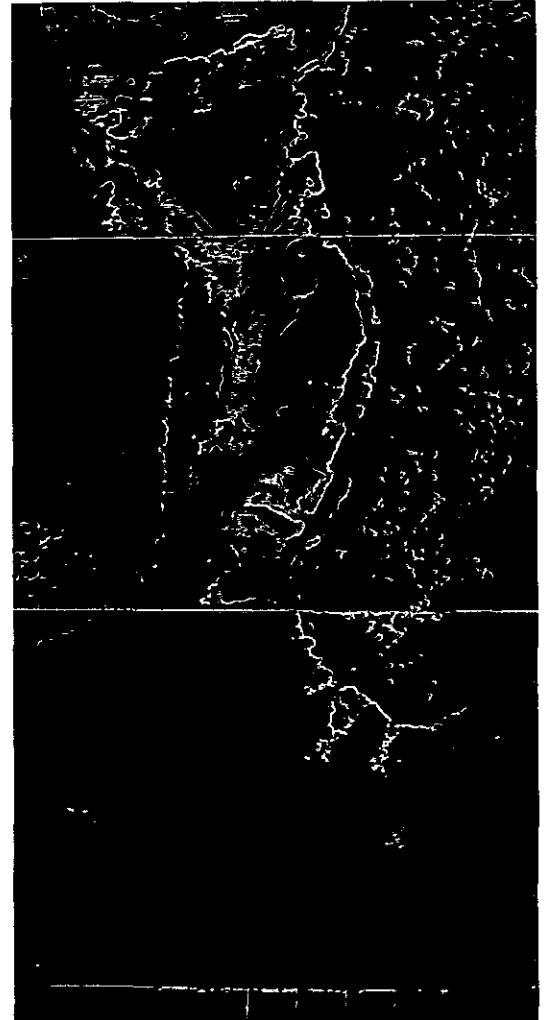


図6 SSの推定分布図

($50\text{mg}/\text{l}$ ~ $150\text{mg}/\text{l}$ を10段階で表示)

栄養塩類濃度の季節変動から見た霞ヶ浦の富栄養化現象の特徴

大概 晃¹・相崎守弘²・河合崇欣¹

Characteristics of Eutrophication of Lake Kasumigaura in terms of Seasonal Variations of Nutrient Concentrations in the Lake Water

Akira OTSUKI¹, Morihiko AIZAKI² and Takayoshi KAWAI¹

Abstract

The characteristics of the eutrophication of Lake Kasumigaura, which is well known as a hyper-eutrophic lake, have been described in terms of seasonal variations of the nutrient concentrations in the lake.

At Station(St) 1 and 2 which were influenced by input of nutrients from polluted streams, the major component of total inorganic nitrogen was nitrate-nitrogen during the autumn to late spring, but during early summer to mid-autumn ammonium-nitrogen was predominant. At St-3 and 4, ammonium-nitrogen was the major component during summer to early winter whereas nitrate-nitrogen was the major one during late winter to mid-spring. At St-9, the lake centre, nitrate-nitrogen was the major component during winter to spring, but this changed to ammonium-nitrogen during summer to autumn.

Reactive phosphate was determined at each station throughout the year. During August, the reactive phosphate concentration was from 0.1 to 0.25 mg P/l in surface water at St-1 to 4 where there was a massive growth of *Microcystis*, while nitrate-nitrogen was absent in spite of the presence of ammonium-nitrogen. This fact suggested that the growth of *Microcystis* might become nitrate-nitrogen limiting.

Since considerably high concentrations of total phosphorus (0.06–0.60 mg/l) and total inorganic nitrogen (0.04–2.60 mg/l) were observed at St-1 to 4 throughout the year, it seems that the massive growth of *Microcystis* (*Chlorophyll-a* 200–800 mg/m³), leading to the death of carp in culture nets in the lake, depends upon climatological conditions such as the continuation of clear days for more than two weeks during the summer.

1. はじめに

霞ヶ浦(西浦)の顕著な富栄養化現象は既に知られて久しい。特に夏期における *Microcystis* の異常発生は、我が国における他の富栄養湖においてもその例を見ない。

1973年の大量の養殖ゴイヘイ死問題以後、各種機関により系統的な調査研究が行われるようになり

1. 国立公害研究所 計測技術部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Chemistry and Physics Division, The National Institute for Environmental Studies, P.O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.

2. 国立公害研究所 水質土壌環境部

Water and Soil Environment Division, The National Institute for Environmental Studies.

栄養塩類濃度の季節的変動データも蓄積されてきているが、それらのデータに対しほとんど考察が加えられていない。この報告では1977年9月から1978年10月までに得られた高浜入および湖心部の調査結果を中心に定性的な若干の考察を加えたい。その主な理由は1978年の夏期は好天候が続き7月中旬から約1か月以上ほとんど雨天がなかったこと、そのため植物プランクトン特に *Microcystis* の増殖にとって極めて好条件が続いた年であったからであり、1973年の気象条件と類似していたからである。その結果として8月初旬から養殖ゴイの一部へい死も観察された。

2. 調査地点および方法

採水地点を図1に示す。採水は3lバンドン採水器を用い、採水深度は各地点の表層水として0.5m

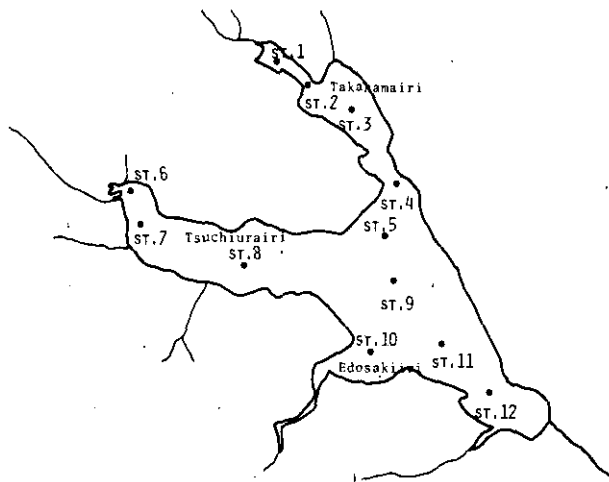


図1 試料採取地点

Fig.1 Study area and sampling sites

および St.4, 9ではさらに2.5~3m, 5~6mを中層水、底層水として採取した。調査は毎月1回、さらに St.1 および2ではさらに1~2回調査を加えた。採水後アイスボックス中に入れ、研究所に持ち帰り全リン測定用試料を分取した後、ガラスファイバーフィルター(whatman GF/c, 47mm, 450℃で3時間加熱処理)で濾過した。濾液は5℃の低温室保存し、すべて48時間以内に分析を完了した。

全リン測定はペルオキシ二硫酸カリウムを酸化剤とした Menzel and Cowin 法(1965)の一部改良法または Armstrong ら(1966)の開発した1200W紫外線照射分解法の一部改良法(両者の相関係数は0.996)を用て前処理後、オルソリン酸と同様に測定した。

測定にはテクニコンオートアナライザーⅡ型を用いた。オルソリン酸イオンは Murphy & Riley 法(1962)、亜硝酸イオンは Bendschneider & Robinson 法(1952)、硝酸イオンは銅-カドミウムカラムを用いる Wood ら(1967)の方法を、アンモニアイオンはフェノールの代わりにサルチル酸ナトリウムを用いる方法を自動分析化したものである。各栄養塩類の定量限界は0.003mg/lである。ここでは0.003mg/l以下の濃度は検出できなかったものとして扱った。各栄養塩類のくり返し精度は0.050mg/lでその変動係数は±2%以下であった。

3. 結果および考察

図2～6は各地点の表層水中における全無機態窒素およびオルソリン酸態リン（反応性リン酸）濃度および全無機態窒素中の構成成分の存在割合の季節的変動を示す。

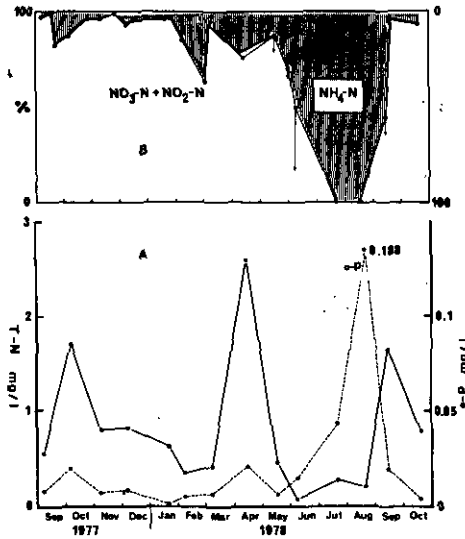


図2 St.1における表層水中の全無機態窒素、オルソリン酸態リン濃度の季節変動(A)と各無機態窒素の存在割合(B)

→：亜硝酸態窒素の存在割合

Fig.2 Seasonal variations of concentrations of total inorganic nitrogen and reactive phosphate-phosphorus in surface water at St-1 (A) and proportion of change in ammonium-, nitrite-, and nitrate-nitrogen (B)

→：Proportion of nitrite-nitrogen

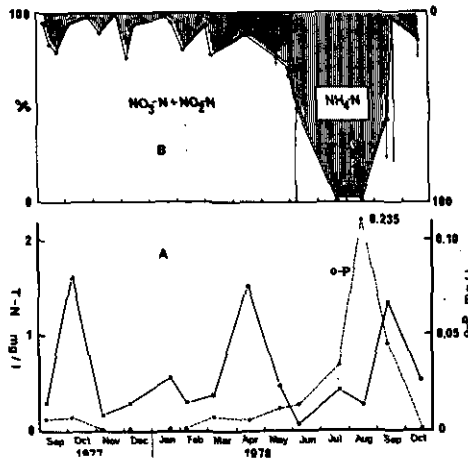


図3 St.2における表層水中の全無機態窒素、オルソリン酸態リン濃度の季節変動(A)と各無機態窒素の存在割合(B)

→：亜硝酸態窒素の存在割合

Fig.3 Seasonal variations of concentrations of total inorganic nitrogen and reactive phosphate-phosphorus in surface water at St-2 (A) and proportion of change in ammonium-, nitrite-, and nitrate-nitrogen (B)

→：Proportion of nitrite-nitrogen

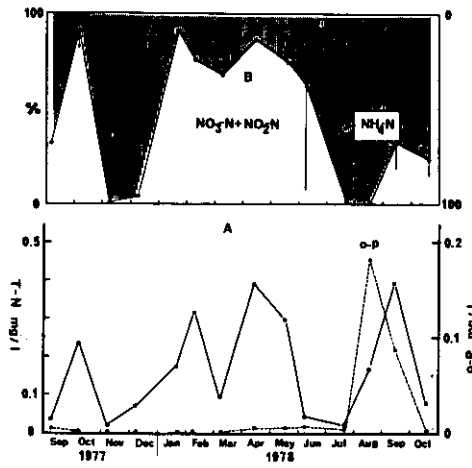


図4 St.3における表層水中の全無機態窒素, オルソリン酸態リン濃度の季節変動(A)と各無機態窒素の存在割合(B)
 →: 亜硝酸態窒素の存在割合

Fig. 4 Seasonal variations of concentrations of total inorganic nitrogen and reactive phosphate-phosphorus in surface water at St-3 (A) and proportion of change in ammonium-, nitrite-, and nitrate-nitrogen (B)
 →: Proportion of nitrite-nitrogen

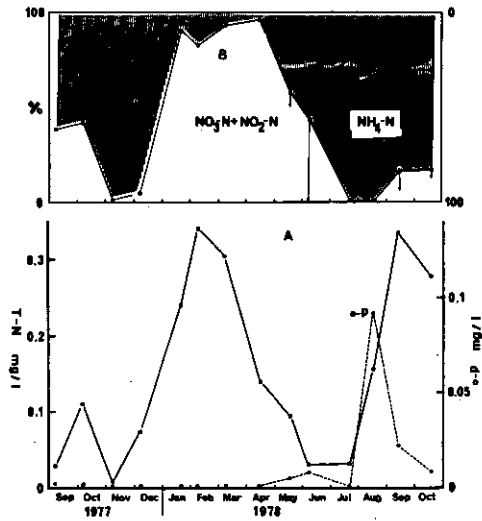


図5 St.4における表層水中の全無機態窒素, オルソリン酸態リン濃度の季節変動(A)と各無機態窒素の存在割合(B)
 →: 亜硝酸態窒素の存在割合

Fig. 5 Seasonal variations of concentrations of total inorganic nitrogen and reactive phosphate-phosphorus in surface water at St-4 (A) and proportion of change in ammonium-, nitrite-, and nitrate-nitrogen (B)
 →: Proportion of nitrite-nitrogen

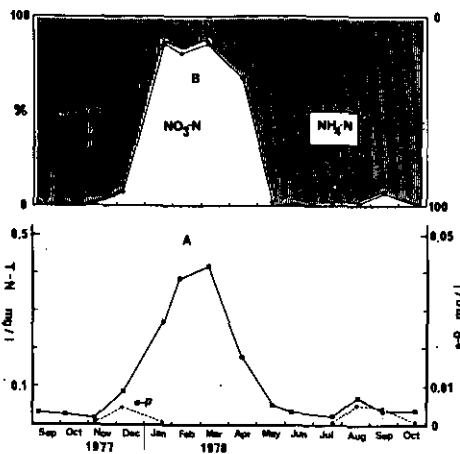


図6 St.9における表層水中の全無機態窒素、オルソリン酸態リン濃度の季節変動(A)と各無機態窒素の存在割合(B)
 →: 亜硝酸態窒素の存在割合

Fig.6 Seasonal variations of concentrations of total inorganic nitrogen and reactive phosphate-phosphorus in surface water at St-9 (A) and proportion of change in ammonium-, nitrite-, and nitrate-nitrogen (B)
 →: Proportion of nitrite-nitrogen

夏期には部分的に数日間、無酸素層が底層水に現れることは知られているが、全体的には溶存酸素は一年を通じて表層から底層まで一様に分布していることが多い。それゆえ、湖水中の有機態窒素の主要な変化経路は図7の通りと考えて良いと思われる。底泥中では脱窒作用がかなり活発に行われていることが吉田らによって報告されている。

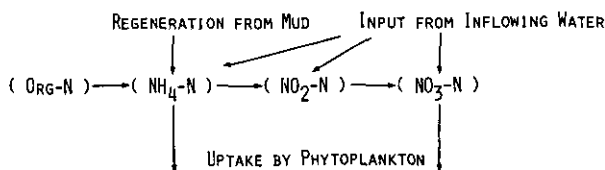


図7 霞ヶ浦湖水中での窒素化合物の主要な変化経路
 Fig.7 Major nitrogen pathways in the Kasumigaura lake water

図2, 3に見られるように, St.1および2では極めて類似した変化パターンを示している。6~8月の間を除けば全無機態窒素の主成分は硝酸態窒素であり, 恋瀬川および山王川からの流入成分と濃度を考慮すると(津野ら), アンモニア態窒素は流入後, かなりの部分は硝化作用により硝酸態窒素に変化したと考えるよりも, 植物プランクトンに取り込まれたと考えた方が妥当である。しかし, 6~8月にかけて全無機態窒素濃度が減少するにすれ, すなわち Microcystis の目に見えた出現と, それ

が異常増殖するにつれ、その主成分はアンモニア態窒素となり7月中旬より8月中旬まで硝酸態窒素は完全に植物プランクトンにより消費されてしまう。またオルソリン酸は硝酸態窒素が減少するにつれ、湖水中に現れ、完全に無機態窒素がアンモニア態窒素だけになった時点で、1~6月までの濃度の10倍以上になる。このような全無機態窒素のすべてがアンモニア態になった時点で、溶存のオルソリン酸の出現は極めて珍しい現象であり、これは高浜入全域で同様に起こっている。Keating (1978) はラン藻類の異常増殖時の湖水中には明らかに他の藻類の増殖を妨げる物質が存在するとして、陸上の高等植物間に見られるような水圏でのアレロパシー (allelopathy) の可能性を指摘した。もし水圏でもそのアレロパシーが存在するとすれば、Microcystis の無機態窒素における硝酸態窒素の選択的取り込み (Preferential utilization) を仮定すればそれらの現象の説明が可能である。すなわち Microcystis の異常増殖により硝酸態窒素は完全に消費され、すなわち、取り込み速度が生成速度をうわまわるため、オルソリン酸の高濃度の出現にもかかわらず異常増殖が停止されることになる。明らかに広義の窒素が制限因子となるといふより、硝酸態窒素が制限因子となったことになる。この高濃度のオルソリン酸の出現は、アレロパシーの結果他の藻類が増殖できないために観察されたと解釈することもできる。その後、Microcystis の活性が落ちたために取り込み速度が減少し硝酸態窒素の出現により、再度オルソリン酸は利用され消費されたと考えられる。ただし、懸濁性リン濃度 (全リン-溶存性オルソリン酸態リン) から計算されるクロロフィル a 濃度 (津野ら, 1977) は St.1 で $360 \mu\text{g/l}$, St.2 で $220 \mu\text{g/l}$ に達している。この高濃度のオルソリン酸態リンの供給源は不明であるが、河川からの流入量の減少、極めて少ない雨量およびそれ程高くない雨水中の全リン濃度 (安部ら, 1979) を考えると底泥からの供給を考えるしかない。

また興味あるのは、Microcystis の異常増殖が始まった時点 (6月) で、かなり高濃度の亜硝酸態窒素が測定されたことである。これはアンモニア態窒素の亜硝酸態窒素への変化速度が水温の上昇と共に増加し、また亜硝酸態窒素の硝酸態窒素への変化速度をうわまわる速度で Microcystis により硝酸態窒素が消費されたためと考えられる。

St.1 および St.2 においては一年を通じてオルソリン酸が湖水中に低濃度であるが存在していたことから、リン酸が制限因子であったとは考えにくい。

図4、5に見られるように、St.3 と4では非常に類似した変化のパターンを示す。しかし St.1、2とは少し異なっている。冬期から春期にかけては、全無機態窒素濃度が増加するとその主成分は硝酸態窒素となり、夏期から秋期における増加ではアンモニア態窒素が主成分となる。このような季節変動は、冬期から春期ではアンモニア態窒素の亜硝酸態窒素を経て硝酸態窒素への変化速度が、植物プランクトンによるアンモニア態および硝酸態窒素の取り込み速度より速いためと考えられ、夏期から秋期にかけては水温が上昇するにつれ、アンモニア態窒素の回帰速度が増加すると共に、先に述べたように Microcystis による硝酸態窒素の取り込み速度の増加によっていると思われる。

図6に見られるように、St.9 (湖心部) では高浜入における季節変動と少し異なっていた。秋期から冬期にかけて全無機態窒素濃度が増加するがその主成分は硝酸態窒素であり、春期から夏期にかけ

て全無機態窒素濃度の減少と共に主成分はアンモニア態窒素に変わる。オルソリン酸はわずかに夏期に現れるがその濃度は0.005mg/l以下であった。

St.1 および St.9 における中層水、底層水中の栄養塩類濃度の季節変動は表層水中のそれらとほとんど同じであった。

図8に St.1, 3 および 9 における表層水中の全リン濃度の季節変動を示す。St.1 および 3 における

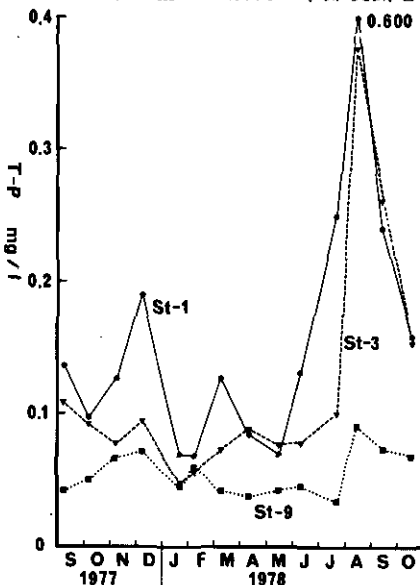


図8 表層水中の全リン濃度の季節変動

Fig. 8 Seasonal variations of concentrations of total phosphorus in surface water

6～9月にかけての全リン濃度の増加は明らかにMicrocystisの異常増殖の結果である。St.9における全リン濃度の季節変動は、他の採水地点における変動と比べて極めて少ない。このことと他の結果を考慮すると、St.9は高浜入と同一の水塊と見るべきでないことを示しているようである。高浜入全域を平均的に見ると、全リン濃度は恋瀬川および山王川流入附近のSt.1で最も高い濃度を示し、St.9(湖心)に向かって徐々に減少する傾向にある。St.9ではSt.1の約1/2～1/3の濃度を示す。同様な傾向は全無機態窒素濃度についてもいえる。

以上の結果と我々のフィールドでの観察結果を総合的に考えると、汚濁河川の流入する附近は栄養塩類濃度が高くMicrocystisの発生には最も好条件であるように見える。このことはMicrocystisの初夏における発生は主として高浜入最奥部および土浦港附近でおこり、その水塊が時間と共に湖心部に向かって広がり移動してゆくのが観察されているからである。またSt.1附近では流入河川水の増加により、Microcystisの大量に存在する水塊が押し出され、さらに数日後、再び大量に発生する現象を見ることができる。更に重要な点はMicrocystisの異常増殖を維持する条件として気象条件と共に霞ヶ浦の特殊性を考慮しなければならないように思える。すなわち、水深が浅く吹送流に基づく湖水の鉛直混合、更にイサザゴロヒキ網魚による底泥のかくはんは6月から12月まで続いたため、他の湖沼に例を見ないほど栄養塩類の回帰が促進される(相崎ら, 1979)。このことが異常増殖を維持するため

の好条件を与えているように見える。

1975~1977年の少ない栄養塩類濃度データ(外岡, 1976; 大槻, 1977)とここで扱ったデータを比較して, St.1から4の間で8月に高濃度のオルソリン酸の出現を除けば, 全体的に特別に大きく変わった季節変動パターンは見られなかった。このことは, 高村(1977)が指摘しているように霞ヶ浦においては *Microcystis* の夏期における異常増殖に必要な栄養塩類はすでに湖内に十分蓄積されており, 夏期において好天候がある期間続けば, 水温の上昇と共に栄養塩類の回帰速度が増加し, 光と共に *Microcystis* の異常増殖に必要な好条件が長い期間維持されると考えるべきである。ここ数年, *Microcystis* の発生から消失までの期間が徐々に長くなっているように思われ, 常陸利根川水門の完成後流入した栄養塩類が徐々に蓄積されている結果とも考えられる。

4. まとめ

霞ヶ浦高浜入および湖心部における栄養塩類濃度の季節変動を, 1977年9月から1978年10月までのデータを中心に若干の考察を加えた。その主な理由は養殖ゴイの大量へい死した1973年の気象条件が1978年のそれと極めて類似していたからである。

全無機態窒素に関しては, 1~6月で硝酸態窒素が主成分となる。一般的には全無機態窒素濃度が増加するにつれ, その硝酸態窒素が主成分となる傾向がある。溶存オルソリン酸濃度は7~9月を除き汚濁河川水流入口附近で観測されたが, その濃度は低く0.020mg/l以下であった。7~8月にかけて *Microcystis* の異常増殖と共に硝酸態窒素が完全に消失した直後に, 溶存オルソリン酸が高浜入全域にわたって0.08~0.23mg/lの高濃度観測された。それらの結果は, 夏期において *Microcystis* の異常増殖時には硝酸態窒素が制限因子となることを示唆した。

全リン濃度および全無機態窒素濃度から判断して, 湖内にはすでに植物プランクトンの異常増殖に十分な栄養塩類は蓄積されており, 夏期に好天候が続けば, 水深が浅く表面積が大きいことによる水の混合, 更に6月~12月にかけての「イサザゴロヒキ」網漁による湖底表層のかくらは栄養塩類の回帰速度を促進するため *Microcystis* の異常増殖維持に役立っているように思われた。

引用文献

- 相崎守弘・大槻 晃・河合崇欣・福島武彦・細見正明・村岡浩爾(1979):底泥からの栄養塩類の回帰。本報告書, 105~114。
安部喜也・横内陽子・大槻 晃(1969):大気降下物中の栄養塩量について。本報告書, 79~83。
Armstrong, F.A.J., Williams, P.M and Strickland, J.D.H. (1966): Photo-oxidation of organic matter in sea water by ultra-violet radiation, analytical and other applications. *Nature*, 211, 481~483。
Bendschneider, K. and Robinson, R.J. (1952): A new spectrophotometric determination of nitrate in sea water. *J. mar. Res.*, 11, 87~96。
大槻英明(1977):霞ヶ浦。三共出版, 88~89。
Keating, K.I.(1978): Blue-green algal inhibition of diatom growth. *Science*, 199, 98 971~973。
Menzel, D.W. and Corwin, N.(1965): The measurement of total phosphorus in sea water based on the

- liberation of organically bound fraction by persulfate oxidation. *Limnol. Oceanogr.*, **10**, 280~282.
- Murphy, J. and Riley, J.P. (1962) : A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem. Acta*, **27**, 31~36.
- 高村義親(1977) : 霞ヶ浦. 三共出版. 155~156.
- 外岡健夫(1976) : 昭和50年度霞ヶ浦北浦湖沼観測報告. 茨城県内水面水産試験場調査研究報告, No. 13, 67~101.
- 津野 洋・相崎守弘・須藤隆一・合田健(1977) : 霞ヶ浦高浜入の夏期における水質, 生物変動-II. 国立公害研究所特別研究成果報告第1号, 80~94.
- 津野洋・相崎守弘・大槻 晃・村岡浩爾・楢戸良雄 (1979) : 高浜入水域への栄養塩の河川からの流入量について. 本報告書, 55~63.
- 吉田富男・相崎守弘・浅見輝男・植島直樹(1978) : 霞ヶ浦における生物的窒素固定と脱窒. 日本陸水誌, 投稿中.
- Wood, E.D, Armstrong, F.A.J. and Richards, F.A. (1967) : Determination of nitrate in sea water by cadmium-copper reduction to nitrite. *J. mar. biol. Ass. U.K.*, **47**, 23~31.

底泥からの栄養塩類の回帰

相崎守弘¹・大槻 晃²・河合崇欣²・福島武彦¹
・細見正明¹・村岡浩爾¹

Regeneration of Nutrients from the Mud of Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura

Morihiro AIZAKI¹, Akira OTSUKI², Takayoshi KAWAI²,
Takehiko FUKUSHIMA¹, Masaaki HOSOMI¹ and Koji MURAOKA¹

Abstract

The regeneration of nutrients from the mud of Takahamairi Bay, Lake Kasumigaura was studied and the results obtained from this study are as follows:

1. The oxidation-reduction potential (ORP) for water near the mud's surface was 300–400mv vs NHE throughout the year. The minimum ORP was 0mv in summer and +100mv in winter in the deep part of the mud. The ORP values from the mud's surface to a depth of 3–8cm were similar after strong winds. The effect of wind on agitation of the mud seems to occur to at least a depth of 8cm.

2. The mud at st.1 at the bottom of the bay contained 4.4–4.6% carbon, 0.5% nitrogen and 0.26–0.28% phosphorus. On the other hand, the mud at st.2' near the center of the bay contained 5.2–5.4% carbon, 0.7% nitrogen and 0.18–0.19% phosphorus. These values showed little seasonal change.

3. Considerable amounts of ammonium nitrogen were eluted from mud during the summer period. The amounts were 80–85 $\mu\text{g N/g}$ dry mud at st.1 and 76–658 $\mu\text{g N/g}$ dry mud at st.2'. Nitrate nitrogen concentration for the lake water sometimes decreased after treatment of the extraction, but the reason for this was not clear.

4. The agitation from trawlnets which were frequently used by fishermen, resulted in a high regeneration rate of nutrients from the mud of Takahamairi Bay.

1. はじめに

霞ヶ浦のように浅く大きな湖では水質に与える底泥の影響はかなり大きなものと考えられる。津野ら (1977) はシミュレーション計算により底泥からかなりの量の栄養塩の溶出が夏期に起きているこ

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Water and Soil Environmental Division, The National Institute for Environmental Studies, P.O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.

2. 国立公害研究所 計測技術部

Chemistry and Physics Division, The National Institute for Environmental Studies.

とを示唆している。また浜田および津田 (1976) は水中の全窒素負荷量の約60%が底泥から回帰していると推定している。しかしながら実際にどの程度の栄養塩類が底泥から回帰しているかを測定することは難しく実際に使用できるデータはなかなか得難い。底泥から栄養塩類が回帰してくる方法としては濃度こう配による拡散によるものとなんらかの外乱による泥の直接的かくらんによるものと考えられる。霞ヶ浦は浅いため風などの影響で泥がかくらんされる可能性が強く、また漁業が盛んなところから底引き網によっても直接かくらんされる機会が多い。そのため泥の直接的なかくらんによる栄養塩類の回帰はかなり多いものと考えられる。

我々は、今回、底泥に蓄積された栄養塩類が風などの外乱で水中へ回帰することを想定し、その潜在的な量を知る目的で底泥表層2 cmを霞ヶ浦表層水で振とうし、抽出される各種栄養塩量を求めた。また同時に底引き網漁業による栄養塩類の回帰量を現場測定によって求めたのでそれらの結果について報告する。

2. 実験方法

調査はst. 1 およびst. 2' (図1) において1977年10月より1978年10月まで行った。

試料の採取には投込式コアサンプラー (離合社製) を使用した。表層20cmの底泥を表面を乱すことなく採取し、内径約3 cmのアクリル樹脂管中に得られた試料について、直ちに泥状の観察を行った。採取した試料はなるべく表面を乱さないようにして実験室へ持ち帰り、1本は酸化還元電位の測定を行い別の1本は栄養塩類の抽出実験に用いた。

栄養塩の抽出は採取したコアサンプルの表層2 cmを葉さじですくい取り、11のエーレンマイヤーガラスコウ中に濾過した表層水500 mlとともに入れて懸濁させ、時々手でかくはんしながら、20℃で1時間行った。抽出量は温度や抽出時間によって変化すると考えられるところから、季節変化を比較するため抽出条件を一定にした。抽出の終わった試料は3000回転、15分間の遠心分離で上澄液と泥とに分離し、上澄液の各種栄養塩類を分析した。栄養塩類の抽出量は抽出前と抽出後の栄養塩濃度の違いから単位乾燥重量当りに換算して求めた。栄養塩類の分析にはオートアナライザー (テクニコン社製) を用いた。

一方、抽出後の泥は全量を乾燥し、乾燥重量、炭素含量、窒素含量およびリン含量を求めた。炭素および窒素はCHNコーダー (柳本社製) により、リン含量はStandard Methods (1971) を改良して測定した。また、1978年4月に採取した試料に関しては、粒度分布および各粒度分画ごとの炭素含量と窒素含量も求めた。

底泥の酸化還元電位は針状の金電極を指示電極として、飽和カロメル電極 (SCE) を参照電極として測定し (河合・佐竹, 1977) SCEの標準水素電極に対する電位を補正して得た。指示電極は毎時1 cmの速度で連続的に泥中に押し込んだ。

底引き網による底泥の舞上がりの調査は1978年4月25日と6月12日の2回行った。調査地点は図1に示すとおりで、矢印の方向に網を引いた。この底引き網は通称「イサザゴロヒキ」と呼ばれている

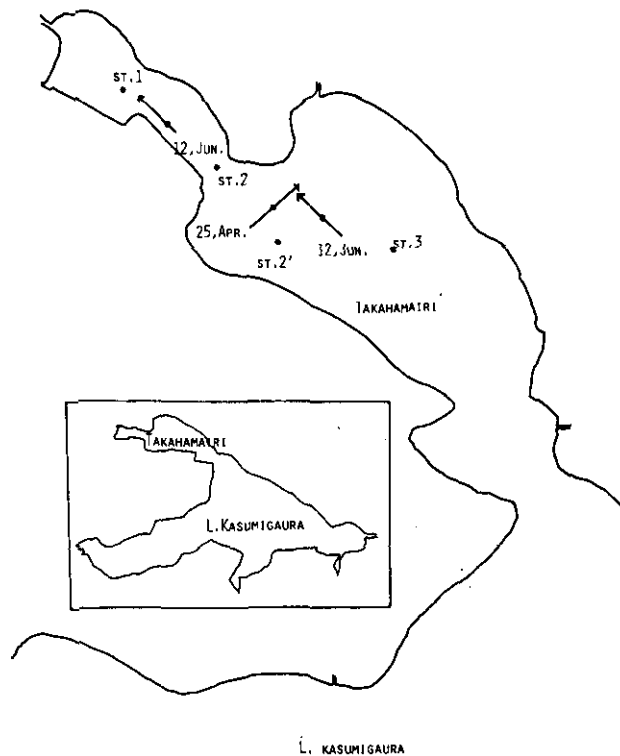


図1 霞ヶ浦高浜入における底泥の採取地点 (St. 1, St. 2') および底引き網調査地点
網は矢印の方向に約600m引いた。

Fig. 1 Sampling sites of muds in Takahamairi Bay (St. 1 and St. 2') and experimental sites for the trawlnettig. The net was drawn along the arrow.

もので、主としてテナガエビ、ハゼ類等を漁獲するために行っている。4月の調査では網を引いた90分後に1mごとの水深別に試料を採取し各種栄養塩濃度の測定を行った。また6月の調査では引き網30分後に採水して、試水中の栄養塩濃度を測定した。

3. 結果および考察

3.1 底泥の一般性状

3.1.1 酸化還元電位

霞ヶ浦の底泥は他の湖沼の底泥に比べて風や漁業等によって直接的なかくらんを受ける機会の多いことが予想されるが表面何センチメートルぐらいをどのくらいのひん度でかくらんされているのかを知ることはなかなか困難である。我々は泥の酸化還元電位から何らかの知見が得られるものと考え測定を行ってきた。底泥の酸化還元電位は易分解性有機物の供給、酸素その他の酸化剤の供給と、それらの反応を媒介して生活のエネルギーを得ている細菌類の活性によって主に支配されている。図2に1977年10月30日から1978年10月23日の間にSt. 1とSt. 2'で採取した底泥の酸化還元電位を示す。図か

ら測定地点付近では泥の表面に近い水層の電位は年間を通じて300~400mV vs. NHEにあり、酸素の供給が欠乏することはない (Kessel, 1978) ことがわかった。また夏季は易分解性有機物、細菌類の活性から冬季に比べて電位が低くなる。特に表面付近の比較的浅いところ (0~1 cm) で電位は急激に低下した。泥中深部の電位は夏の高温時でも0 mV程度までしか下がらず、冬期では+100mV程度まで

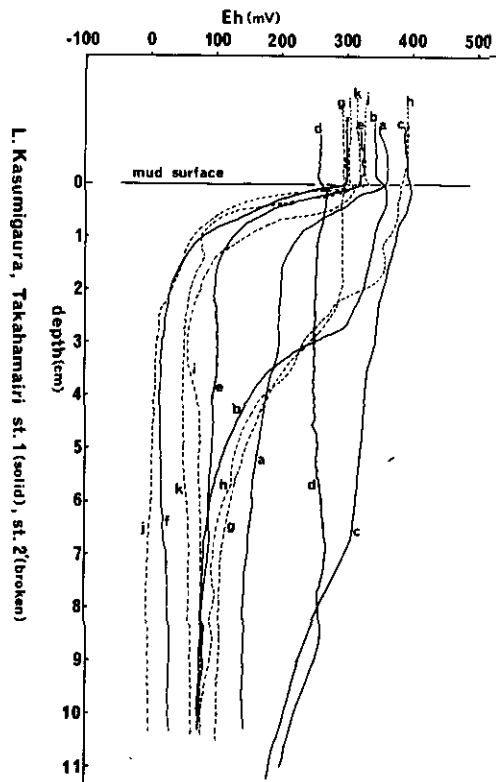


図2 底泥の酸化還元電位

St. 1 (実線); A: 1977.12. 6, B: 1977.12.22, C: 1978. 2.23, D: 1978. 3.23, E: 1978. 7.13, F: 1978.10.23.

St. 2' (破線); G: 1977.10.30, H: 1978. 1.26, I: 1978. 7.30, J: 1978. 8.16, K: 1978. 9.20.

Fig. 2 ORP of the mud at Sts 1&2' at Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura

St. 1 (solid); A: '77, 12, 6, B: '77, 12, 22, C: '78, 2, 23, D: '78, 3, 23, E: '78, 7, 13, F: '78, 10, 23
St. 2' (broken); G: '77, 10, 30, H: '78, 1, 26, I: '78, 7, 30, J: '78, 8, 16, K: '78, 9, 20

しか低下しなかった。夏季のこの電位は硝酸還元が主に起っている電位であり、冬季の+100mV程度の電位は酸素がほぼなくなり硝酸の還元が起り始まる場所である (Kessel, 1978)。このような電位は霞ヶ浦で脱窒作用がかなり活発に起きていることを示唆するものである。風による底泥の舞上がりは1977年12月6日と22日のSt. 1における比較から推察される。すなわち12月6日の測定では泥の表面

からすぐ電位の低下がみられたが22日の測定では約3 cmまでは表面と同じ電位を保っており、この部分がかくらんされたことを示唆している。また1978年2月23日と3月23日の結果は共に前日まで強風が吹き荒れていたが電位は表面から7~8 cmまであまり変化がなく、風波の影響がこのような深部まで及ぶ可能性があることを示している。

3.1.2 化学的性状

底泥中の炭素含量、窒素含量、リン含量を表1に示す。St. 1の底泥は4.4~4.6%の炭素、0.5%の窒素および0.26~0.28%のリンを含み、その組成は季節的な変動をほとんど示さない。また、St. 2'の底泥は5.2~5.4%の炭素、0.6~0.7%の窒素および、0.18~0.19%のリンを含み、St. 1と同様にほとんど季節変化を示さなかった。St. 1とSt. 2'の底泥を比較すると、St. 2'の方が炭素含量で約1%、窒素含量で0.2%程度高い値を示した。リン含量は炭素や窒素とは逆にSt. 1の方が0.08~0.09%高い値であった。このような違いはSt. 1が恋瀬川の河口に近く流入河川の影響を受けやすい地点であったのに対して、St. 2'はかなり湾の中央に近く比較的流入河川の影響を受けにくいために生ずるものと考えられる。リンの含量が河口に近いSt. 1の方が高いことは河川によって運ばれたリンが河口近くで沈降しやすい事実を示すものと思われる。また炭素および窒素含量がSt. 2'で高いことはアオコ等の植物プランクトンがSt. 2'の方で沈降する量が多く、St. 1では河川由来の懸濁物が多く沈降しているのではないかと想像される。事実、夏にSt. 1で非常に激しいブルームが起きてもそのほとんどは、初秋の台風等の雨によって押し流されてしまい、湾奥にはほとんど残留しない。このように比較的近

表1 St. 1およびSt. 2'における底泥中の炭素、窒素およびリン含量

Table 1. Carbon, nitrogen and phosphorus contents in muds which were collected at St. 1 and St. 2' in Takahamairi Bay

Date	St. 1				St. 2'			
	Carbon (%)	Nitrogen (%)	C/N	phosphorus (‰)	Carbon (%)	Nitrogen (%)	C/N	phosphorus (‰)
1977								
26, Oct.	4.5	0.5	8.5	2.7	5.4	0.7	8.3	1.9
24, Nov.	4.5	0.5	9.2	2.7	5.5	0.7	8.4	1.8
21, Dec.	4.6	0.5	9.2	2.6	5.5	0.7	8.2	1.8
1978								
26, Jan.	4.6	0.5	9.2	2.8	5.4	0.7	8.2	1.8
22, Feb.	4.5	0.5	8.9	2.7	5.5	0.7	8.4	1.9
23, Mar.	4.6	0.5	8.8	2.6	5.5	0.7	8.2	1.9
19, Apr.	4.5	0.5	9.2	2.7	5.5	0.7	8.4	1.8
31, May	4.4	0.5	8.8	2.5	5.3	0.7	8.1	1.8
12, Jul.	4.3	0.5	8.9	2.6	5.3	0.7	8.0	1.8
14, Aug.	4.4	0.5	9.3	2.7	5.2	0.6	8.3	—
20, Sep.	4.6	0.5	8.7	2.6	5.4	0.7	8.3	—

距離であるにもかかわらず底泥の性状がかなり異なっていることは興味深いことである。

3.1.3 粒度分布

風等による底泥の巻上げを考える場合、底泥の粒度が大きな問題となる。St. 2'付近で4月に採取した試料につき粒度分布を測定してみた。その結果を表2に示す。全般に細かい粒子が多いが特に表

表2 底泥の粒度分布。試料はSt. 2'付近で採取した。

Table 2. Particle size of mud collected near St. 2'

	>2mm	2mm-1mm	1mm-500 μ	500 μ -250 μ	250 μ -110 μ	110 μ -40 μ	40 μ >
cm			%	%	%	%	%
0-1			0.4	5.3	3.0	22.5	68.9
1-3		%	2.0	9.2	3.2	16.6	68.6
3-5	0.9	2.0	3.3	12.0	2.0	30.9	48.8
5-9	0.7	3.1	2.6	5.2	5.4	35.6	47.8
9-13		0.5	0.7	6.4	2.5	17.2	72.7

層の0~3cmでは、約90%が110 μ 以下の粒子であり、特に40 μ 以下の細かい粒子が約70%を占めていた。このことは表層がかなりひんぱんにかくらんされていることを裏付けることと思われた。表層の40 μ 以下の粒子の炭素含量は約5.4%であり、泥全体の炭素量とほとんど同じであった。3cmより深い泥の部分には植物遺体と思われる比較的大きな粒子が存在したが炭素含量、窒素含量ともそれほど高くなかった。全般に110~250 μ の粒度の部分に有機物が多く含まれる傾向があり、この部分の炭素含量は6.3~9.9%と他と比べて、1~数パーセント高い値を示した。

3.2 底泥からの栄養塩の回帰

3.2.1 季節変化

表3、表4にSt. 1およびSt. 2'における底泥からの栄養塩類の抽出量の季節変化を示す。抽出に用いた泥量はSt. 1が約5g前後、St. 2'が3~4gと同じ表面から2cmまでの深さでもかなり重量が異なっていた。両地点で共通して言えることは、アンモニア態窒素の溶出がかなりみられることである。特にSt. 2'においては年間を通じてアンモニア態窒素の溶出がみられ、夏場には658 μ g/gという非常に高い溶出が観測された。St. 1ではSt. 2'に比べて溶出量は少なく、季節によっては逆に吸着して湖水の濃度が低下する場合もみられたが、夏季にはSt. 2'と同様に大量のアンモニア態窒素の溶出がみられ8月、9月には80~85 μ g/gの溶出が測定された。亜硝酸態窒素は現存量も溶出量も少ないので議論を省略するが、硝酸態窒素は抽出操作を行うことによって、逆に湖水中から減少する場合が多かった。特にこの傾向はSt. 1において顕著であった。硝酸態窒素は抽出作用中に泥に吸着するとは考えづらく、おそらく脱窒作用等によって系外へ除去されているのではないかと想像される。吉田ら(1978)の調査によれば、高浜入での脱窒活性はかなり高く、特に湾奥で高い活性が観測されている。St. 1におけ

表3 St. 1における底泥からの無機栄養塩類の溶出量の季節変化

Table 3. Elution amount of nutrients from muds of St. 1

Date	Dry wt. (g)	NH ₄ -N			NO ₂ -N			NO ₃ -N			PO ₄ -P		
		before (mg/l)	after (mg/l)	elution (μg/g)	before (mg/l)	after (mg/l)	elution (μg/g)	before (mg/l)	after (mg/l)	elution (μg/g)	before (mg/l)	after (mg/l)	elution (μg/g)
1977													
26, Oct.	5.71	—	—	—	0.032	0.038	0.5	1.17	0.51	-58	—	—	—
25, Nov.	3.36	0.007	0.070	9	0.031	0.019	-2	1.09	1.06	-4	0.003	0.021	3
21, Dec.	4.24	0.032	0.028	-0.5	0.014	0.004	-1	0.67	0.51	-19	0.004	0.015	1
1978													
25, Jan.	5.00	0.014	0.056	4	0.005	0.008	3	0.46	0.41	-5	0.006	0.011	0.5
22, Feb.	4.38	0.257	0.464	24	0.007	0.003	-0.5	0.40	0.39	-1	0.003	0.031	3
24, Mar.	5.26	0.342	0.235	-10	0.014	0.015	0.1	0.572	0.699	12	0.013	0.039	2
20, Apr.	5.78	0.214	0.314	9	0.024	0.029	0.4	2.00	1.14	-74	0.013	0.013	0
31, May	4.88	0.280	0.210	-7	0.028	0.022	-0.6	0.636	0.676	4	0.024	0.036	1
12, Jul.	5.00	0.291	0.480	19	0.002	0.002	0	0.011	0.004	-0.7	—	—	—
15, Aug.	7.20	0.176	1.40	85	0.002	0.002	0	0.005	0.004	-0.1	0.216	0.069	-10
20, Sep.	4.90	0.074	0.875	82	0.460	0.372	-9	0.68	0.578	-10	0.006	0.030	2
27, Oct.	5.38	0.905	0.267	59	0.063	0.048	1	0.014	0.060	-4	0.013	0.002>	1

表4 St. 2'における底泥からの無機栄養塩類の溶出量の季節変化

Table 4. Elution amount of nutrients from muds of St. 2'

Date	Dry wt. (g)	NH ₄ -N			NO ₂ -N			NO ₃ -N			PO ₄ -P		
		before (mg/l)	after (mg/l)	elution (μg/g)	before (mg/l)	after (mg/l)	elution (μg/g)	before (mg/l)	after (mg/l)	elution (μg/g)	before (mg/l)	after (mg/l)	elution (μg/g)
1977													
26, Oct.	3.52	—	—	—	0.022	0.025	4	0.007	0.14	19	—	—	—
25, Nov.	3.84	0.010	0.420	53	0.005	0.006	1	0.03	0.02	-1	0.003	0.015	1.6
21, Dec.	3.37	0.017	0.081	9	0.002	0.006	0.6	0.003	0.16	23	0.004	0.008	0.6
1978													
25, Jan.	3.40	0.028	0.070	6	0.005	0.020	2	0.20	0.24	6	0.004	0.007	0.4
22, Feb.	3.25	0.628	0.857	35	0.006	0.007	0.2	0.18	0.21	5	nd.	0.011	1
24, Mar.	2.65	0.044	0.075	6	0.007	0.009	0.4	0.086	0.127	8	0.005	0.020	3
20, Apr.	3.70	0.343	0.443	14	0.013	0.027	2	1.40	1.33	-9	0.007	0.032	3
31, May	4.22	0.143	0.833	82	0.029	0.032	0.4	0.399	0.339	-7	0.009	0.015	0.7
12, Jul.	6.08	0.103	1.027	76	0.006	0.002	-0.3	0.023	0.003	-2	—	—	—
15, Aug.	3.86	0.181	5.26	658	0.002	0.002	0	0.001	0.004	0.4	0.245	0.055	-25
20, Sep.	3.80	0.054	1.08	135	0.167	0.119	-6	0.033	0.031	-0.3	0.017	0.027	1
27, Oct.	3.68	0.028	1.053	140	0.018	0.015	0.4	0.00	0.004	-0.5	0.010	0.002>	1

る脱窒活性は30℃での測定であるが2.8~104.3μg/g・dという非常に高い値であった。しかしながら一番高い値でも単位時間当りに換算すると約4μg/g・hという値になり、今回観測された最高値74μg/g・hに比べると著しく低い。したがって今回の硝酸態窒素の減少は本当に脱窒作用によるものか、もしくは他の原因によるものであるかははっきりとしない。今後更に研究する必要があるものと思われる。

栄養塩類の溶出のうち興味深いのはオルソリン酸の溶出で、溶出量は少ないが年間を通じて少しづ

つ溶出している様子が明らかになった。一般にリン化合物は底泥が嫌氣的な状態になると溶出が起るが、好氣的条件下ではほとんど溶出しないと考えられてきている。しかしわずかずつでも溶出しているということは、夏季を除いてリンが制限因子となることが多い現状では重要な意味を持つものと思われる。今後、好氣的条件下での底泥からのリンの溶出機構の解明を急ぐ必要があるものと思われる。

3.2.2 底引き網による栄養塩類の回帰

霞ヶ浦は内水面漁業が非常に盛んであり、漁獲高は全国第一位となっている。霞ヶ浦で使用されている漁法は種々あるが、このうち底泥を直接かくらんし、底泥からの栄養塩の溶出に大きな影響をもつものとしては小型機船底引き網漁業がある。この中でもテナガエビ、イサザアミ、ハゼ等を漁獲対象とするイサザゴロヒキ網漁業、通称トロール漁法といわれるワカサギ、シラウオ引き網漁業が重要である。霞ヶ浦では昭和40年代の初めを境として、ワカサギ、シラウオの漁獲が減り、それとは反対に、底生のエビ、ハゼ、アミの漁獲が急激に増加している(浜田・津田, 1976)。昭和46年~50年の統計では、イサザゴロヒキ網漁業による漁獲量は7,255tに達し、全漁獲高の14.5%を占めている。霞ヶ浦水産事務所資料によると昭和51年4月現在で許可された船舶数はイサザゴロヒキ網漁業が593件、トロール漁業が456件となっている。このうち今回はイサザゴロヒキ網漁業による底泥からの栄養塩類の溶出について報告する。イサザゴロヒキ網漁業は毎年5月中旬ころより開始され、12月一杯まで行われる。1回の引き網で約600mの距離を引き、最盛期では1日に20数回の引き網を行う。網の幅は約10m程度で、網の底におもりがついており、引き網の時には網は約5cm程度泥に潜りながら引かれる。許可された船舶がすべて同時に操業することはまず考えられないが、たとえば高浜入で操業している船舶数を20隻と仮定しても、最盛期には1日に約2.4km²の範囲の底泥がかきまわされることになり、約27km²の面積をもつ高浜入は約11日間に1度耕される計算となる。

調査はこの漁業が開始される前の4月25日と最盛期と思われる6月12日の2回行った。4月に行った調査は、St. 2'付近のみで行ったが6月の調査ではSt. 1'付近でも行った。調査を行ったSt. 2'付近はひんぱんに操業の行われる水域であり何隻もの船が毎日何回も網を引いていた。一方St. 1'付近の水域はほとんど引き網されることなく、また漁獲物中にもテナガエビ等は少なかった。表5に調査結果を示す。操業の行われていなかった4月では引き網後に底層から上層へ向けて窒素関係の栄養塩類に明確な濃度こう配がみられた。特に顕著だったのはアンモニア態窒素で引き網前に比べて低層では約10倍の濃度になっていた。硝酸態窒素もかなり増加しており、2~3倍の濃度になった。オルソリン酸は引き網前後で大きな変化はみられなかった。6月に行った調査では、St. 2'付近で4月に観測されたような劇的な溶出は観測されなかったが、St. 1'付近でアンモニア態窒素と硝酸態窒素が引き網後に約2倍に増加していた。St. 2'付近では6月の調査ではほとんど栄養塩の溶出が観測されなかったが、この水域では非常にひんぱんに操業が行われていたことから、底泥に蓄積していた栄養塩類はすでに溶出してしまった後であったものと思われる。そこで4月に得られた観測データから大ざっぱに底泥1g当りのアンモニア態窒素の溶出量を計算してみた。網は底泥5cmをかくらんするものと仮定し、底

表5 底引き網による底泥からの栄養塩類の回帰量
採水は4月25日は90分後、6月12日は30分後に行った。

Table 5. Changes in nutrients after a draw of trawl net
25 April, after 90 min. ; 12 June, after 30 min.

Date	site	Depth(m)	NO ₃ -N (mg/l)		NO ₂ -N (mg/l)		NH ₄ -N (mg/l)		o-PO ₄ -P(mg/l)	
			before	after	before	after	before	after	before	after
25. April	St. 2'	0	0.068	(0.151)	0.009	0.010	0.041	0.046	0.013	0.015
		1	0.059	(0.149)	0.009	0.012	0.043	0.041	0.014	0.013
		2	—	0.164	—	0.013	—	0.163	—	0.009
		3	0.114	0.279	0.009	0.021	0.078	0.448	0.003	0.005
		3.5	0.096	0.285	0.009	0.022	0.048	0.483	0.003	0.004
12. June	St. 1	0.5	0.038	0.065	0.012	0.014	0.016	0.027	0.002>	0.002>
		1	0.035	0.062	0.012	0.014	0.024	0.030	0.002>	0.002>
		1.5	0.055	0.078	0.012	0.014	0.026	0.042	0.004	0.002>
12. June	St. 2'	0.5	0.014	0.006	0.014	0.014	0.021	0.015	0.017	0.013
		2	0.064	0.021	0.016	0.014	0.033	0.023	0.006	0.009
		2.5	0.064	0.082	0.016	0.017	0.068	0.064	0.004	0.004

泥1mlの乾重量を前に記した溶出実験から0.25gとし、観測データから1㎡当りのアンモニア態窒素の溶出量を約0.8gとすると、底泥1gから約64μgのアンモニア態窒素が溶出したことになる。この値は別に抽出実験から求めた4月の値、14μgに比べれば、かなり高い値であるが5月以後に得られた82~658μgという値に比べれば、決して高い値ではない。これらの事実から底引き網漁業の操業水域内の底泥に蓄積している栄養塩類は、その大部分が漁業を通して水中へ回帰してくるものと推定された。

4. 今後の課題

以上述べてきたごとく、霞ヶ浦底泥ではかなり活発な有機物分解が行われ、藻類の増殖に有効な有機および無機栄養塩類が大量に生産蓄積されている現状がある程度明らかになった。底泥で生産蓄積された栄養塩類は風などによる底泥のかくらんや底引き網漁業等の人間活動を通して、そのほとんどが水中へ回帰してくるものと考えられる。今回の調査から底引き網漁業による底泥からの栄養塩類の回帰の様子はかなり明らかにされたが、風による底泥のかくらんおよびそれに伴う栄養塩類の回帰についてはまだ十分なデータが得られていない。強風時に調査を行うことは非常に困難ではあるが、今後この面での調査も合わせて行っていかなければならないと思われる。また底泥からの栄養塩類の回帰量を求めるためには、今回行ったような調査では不十分であり、今後底泥での栄養塩類の生成速度を正確に測定してゆく必要があるものと考えられる。すなわち底泥で生成された栄養塩類はすべて水中へ回帰してゆくという仮定が正しいとすれば、現場での溶出量は泥の前歴によって大きな誤差が生じる可能性が強く、正確な回帰量の推定は困難と考えられる。そこで正確な回帰量を求めるためにはなんらかの方法によって、底泥中での有機物分解および栄養塩類の生成速度を測定してゆかなければ

ならないものと思われる。今後この面からの研究を進める予定である。

5. まとめ

霞ヶ浦高浜入湾奥の底泥からの栄養塩類の溶出についていろいろな面から検討を加えた。その結果以下のことが明らかになった。

- 1) 酸化還元電位は泥表面近くの水層で年間を通じて300~400mv vs.NHEであり、泥中深部では夏季で0mv、冬季で+100mv程度であった。また強風が吹き荒れた後の電位は表面から3~8cmの深さまでほとんど一様になっており、風によって泥がこのような深さまでかくらんされる可能性を示した。
- 2) 底泥中の炭素、窒素およびリン含量は水域によってかなり大きな変化を示し、湾奥のSt. 1と湾の中央部に近いSt. 2'ではSt. 2'の方が炭素含量で約1%、窒素含量で約0.2%程度高い値を示した。リン含量は逆にSt. 1の方が0.08~0.09%高かった。これらの値は季節が変わってもほとんど変動しなかった。また底泥は非常に細かい粒子が中心となっており、表層から3cm程度までの深さではその約90%が110 μ 以下の粒子であり、約70%が40 μ 以下の粒子であった。
- 3) 表面水による底泥からの栄養塩類の抽出実験ではSt. 1の底泥とSt. 2'の底泥で抽出量にかなりの差がみられ、また季節的変動も大きかった。しかしながら夏季におけるアンモニア態窒素の底泥からの溶出は顕著であり、その量はSt. 1で80~85 $\mu\text{g} \cdot \text{N/g dry mud}$ 、St. 2'で76~658 $\mu\text{g} \cdot \text{N/g dry mud}$ であった。硝酸態窒素は抽出操作によって減少することが多かったが、その原因は明らかではなかった。オルソリン酸は年間を通じてごくわずかではあったが溶出していた。
- 4) 底引き網漁業により底泥がかくらんされ、それに伴って栄養塩類が回帰してくることが明らかになった。

引用文献

- 浜田篤信・津田勉(1976)：霞ヶ浦の富栄養化に関する研究Ⅲ、窒素収支について。茨城県内水面水産試験場調査研究報告、第13号、29~43。
- 河合崇欣・佐竹研一(1977)：底泥の酸化還元電位の微細構造の測定について。日本地球化学討論会講演要旨集、125。
- Kessel, J. F. van (1978) : The relation between redox potential and denitrification in a water-sediment system. Water Research, 12, 285-290.
- Standard Methods (1971) : Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water, 13th edition. 1-874, New York.
- 津野洋・相崎守弘・須藤隆一・合田健(1977)：霞ヶ浦高浜入の夏期における水質、生物変動-I。国立公害研究所特別研究成果報告、第1号、80~94。
- 吉田富男・相崎守弘・浅見輝男・楨島直樹(1978)：霞ヶ浦における生物的窒素固定と脱窒。日本陸水学会誌、投稿中。

藻類の増殖に及ぼす底泥の影響に関する研究

—底泥のAGP—

細見正明¹・須藤隆一¹

Studies on the Effects of Sediments on Algal Growth

—Algal Growth Potential of Sediments—

Masaaki HOSOMI¹ and Ryuichi SUDO¹

Abstract

The effects of sediments on algal growth were studied using the algal assay procedure. For the alga assay, a sediment-lakewater mixture was incubated under aerobic or anaerobic conditions for 7 days. In eutrophic lakes, the algal growth potential (AGP) of sediments under anaerobic conditions was ten times as high as under aerobic conditions. This results from the phosphorus released from sediments under anaerobic conditions. In oligotrophic lakes, the AGP of sediments both under aerobic and anaerobic conditions were small. A nutrient spike test showed that phosphorus was the limiting nutrient.

1. はじめに

閉鎖水域において富栄養化現象が進行する中で、底泥の果たす役割が注目されている。特に水の華や赤潮に底泥から回帰した栄養塩類が寄与していると考えられている(村上, 1976)。また富栄養化対策においても、底泥の影響を十分検討しておかないと、diversion(流路変更)を実施しても予期した湖の回復が得られないことがある(Engene B. Welch, 1977)。以上のように、富栄養化現象の機構を解明する上でも、また富栄養化を制御していく上でも、底泥の影響度を評価していく必要がある。

富栄養化度を示す指標のひとつとして藻類量を取りあげると、底泥が藻類生産に与える影響度の評価は、次の二つに分けられよう。

- 1) 底泥から回帰した栄養塩により藻類の増殖が刺激されたり、逆に水中の溶存物質が底泥に吸着されて増殖を抑制したり、あるいは有害物質が底泥から溶出して増殖を阻害することが考えられる。このような物質の挙動からみた底泥と上層水との相互作用の評価。
- 2) 赤潮生物のひとつである *Gonyanlax* は、水-底泥境界層付近でシストとして存在して、生育条件

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Water and Soil Environment Division, The National Institute for Environmental Studies, P. O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.

が整えば増殖していく (Donald Mark Anderson, 1978)。こうしたシストを含む付着藻類 (benthic algae) が水圏の生態系構成に影響を与えるような生物の生息場所からみた底泥の評価。

水と底泥との交互作用は、複雑な物理化学的、生物化学的な現象を含んでおり、そのひとつひとつを解明して、それぞれの影響度について評価していくことは困難と考えられる。そこで、本文では、1) についてある一定の条件下における水と底泥との交互作用の結果が総合的に積分されて、藻類の増殖に影響すると考え、湖水と底泥とを好気あるいは嫌気条件下で放置して、その滷水を試水として、藻類培養試験法 (National Eutrophication Research Program, EPA, 1971) に準拠して、藻類の増殖量でもって、底泥の評価を試みたものである (細見ら, 1977)。

2. 実験方法

- 1) 供試藻類: *Selenastrum capricornutum* および *Microcystis aeruginosa* を用いた。
- 2) 試料: 富栄養湖である霞ヶ浦, 湯ノ湖, 菅生沼, および貧栄養湖である中禅寺湖, 本栖湖から湖水と底泥を採取し, これらを試料とした。なお, 中禅寺湖は, 二荒山神社沖で深さ25mの地点で, 他の湖は, すべて湖心で採取した。
- 3) 試料の処理: S S で3000~4000mg/lになるように, 底泥を湖水に加え, これを20°C, 3~7日間好気的および嫌气的条件で放置した。ここでいう好气的条件とは, エアレーションを行い, 嫌气的条件とは, 窒素ガスを注入している状態である。その後, これを0.45 μ のミリポアフィルターで滷過した。湖水のみについても同様に処理し, 対照とした。
- 4) 藻類の培養: 滷水に *S. capricornutum*, あるいは, *M. aeruginosa* を接種し, 前者は20°C, 4000 lx, 後者は25°C, 500 lx で藻類が定常期に達するまで培養した。
- 5) 藻類量の測定: 藻類量はコールターカウンターによって測定した平均細胞容量と細胞数から乾燥重量 (mg/l) を算定し, AGP (Algal Growth Potential) として示した。
- 6) 栄養塩添加試験 (spike test): NaNO_3 をNとして1 mg/l, KH_2PO_4 をPとして0.1mg/lになるように添加した。なお *M. aeruginosa* には, さらにEDTAが1 mg/lになるように添加した。

3. 実験結果

好气的条件では, DOが10mg/l前後, 嫌气的条件では, 0.2~1 mg/lで窒素ガスを注入しても完全な嫌気状態には至らなかった。なおpHは, 6.8~8.4で変化した, 藻類を接種する際にpHを7.5に調整した。

図1に霞ヶ浦の結果を示す。湖水と底泥とを混合して, 一定条件下で放置し, その滷水についてのAGPを底泥のAGPと呼ぶことにする。底泥のAGPは, 好気条件で処理したものより, 嫌気条件で処理したものの方がはるかに高いAGPを示している。対照とした湖水のみのAGPについても同様のことが言える。嫌気条件では底泥のAGPが対照のAGPよりも高く, 栄養塩添加試験から窒素が制限要因に, また対照のAGPはリンが制限要因になっている。したがって嫌気条件下では底泥から

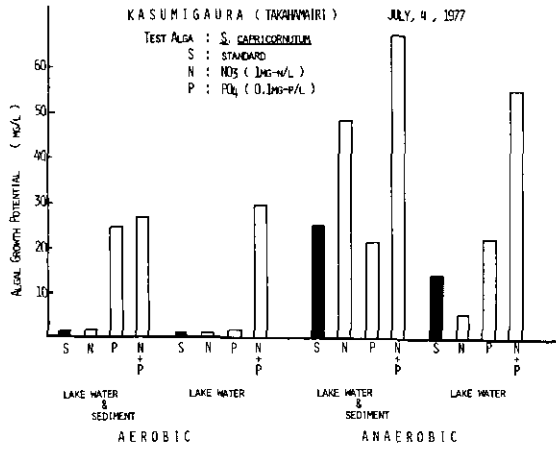


図1 霞ヶ浦における底泥のAGP (*S. capricornutum*)

Fig.1 Algal Growth Potential of sediments in Lake Kasumigaura using *S. capricornutum*

磷が溶出し、底泥の藻類生産に及ぼす影響が大きくなるのがわかる。好気条件では底泥のAGPが対照のAGPと同程度であるが、磷を添加したAGPは底泥を入れたものの方が高くなっており、底泥から窒素の供給があったものと考えられる。また、好気条件では、底泥のAGPも対照のAGPも、磷が制限要因になっている。

図2に湯ノ湖の結果を示す。霞ヶ浦と同様に、底泥のAGPは嫌気条件の方が、好気条件で処理したものより10倍高い値になっている。好気条件では磷が制限要因になっているが、対照のAGPは窒素が制限要因でしかも対照のAGPの方が高い。これは湯ノ湖で試料を採取した時が、夏期の成層期にあたり、水中に磷濃度が0.1mg/l程度あって、好気条件で底泥と湖水とを混合した結果、水中の磷

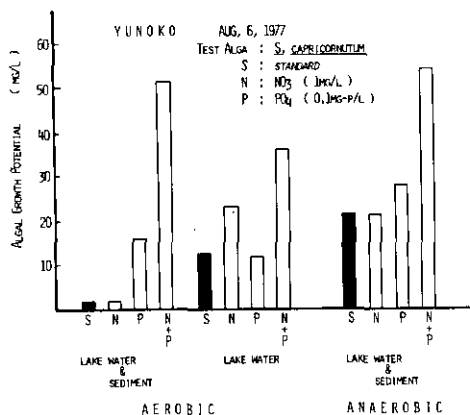


図2 湯ノ湖における底泥のAGP (*S. capricornutum*)

Fig.2 Algal Growth Potential of sediments in Lake Yunoko using *S. capricornutum*

が底泥に吸着されたものと考えられる。

図3に接種藻類を *M. aeruginosa* としたときの湯ノ湖の結果を示す。好気条件において *S. capricornutum* の結果と同様に対照のAGPはかなり高い値を示しているにもかかわらず、底泥のAGPは、N、Pを入れても増殖が認められず、EDTAを1mg/lになるように添加したもののだけがわずかに増殖が認められた。このことは、*M. aeruginosa* の増殖を阻害する物質が、底泥から放出されたことによると考えられる。

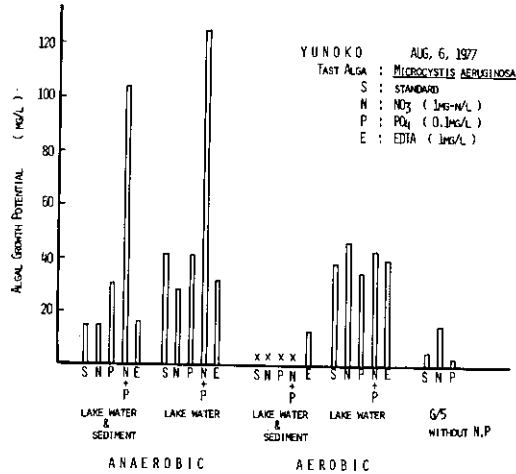


図3 湯ノ湖における底泥のAGP (*M. aeruginosa*)

Fig.3 Algal Growth Potential of sediments in Lake Yunoko using *M. aeruginosa*

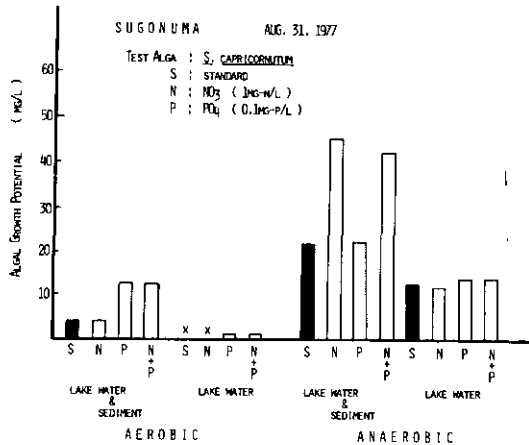


図4 菅生沼における底泥のAGP (*S. capricornutum*)

Fig.4 Algal Growth Potential of sediments in Lake Sugonuma using *S. capricornutum*

図4に菅生沼の結果を示す。菅生沼は深さが1 mもなく、水生植物が繁茂しており、富栄養化の進んだ沼である。霞ヶ浦の結果と同様に、底泥のAGP、対照のAGPはいずれも嫌気条件で処理したものの方が高くなっている。嫌気・好気条件のいずれにおいても対照のAGPよりも高くなっていることから底泥が藻類の増殖を刺激しているといえる。好気条件での底泥のAGPは、磷が制限要因となるが、好気条件では窒素が制限要因になっている。なお、対照のAGPは、窒素、磷を添加しても藻類の増殖がわずかに認められるだけで、窒素・磷以外の物質が制限になっているか、あるいは*S. capricornutum*の増殖を阻害する物質が湖水中に存在しているとも考えられる。

図5に富士五湖のひとつで代表的な貧栄養湖である本栖湖の結果を示す。底泥のAGPは、嫌気条件の方が好気条件で処理したものより若干高くなっている。また対照のAGPよりも底泥のAGPの方が嫌気・好気条件のいずれにおいても増加していることから、底泥が藻類の増殖を刺激すると言える。底泥のAGPは、嫌気・好気条件いずれも磷が制限要因になっている。

図6に貧栄養湖である日光の中禅寺湖の結果を示す。底泥のAGPは、わずかに嫌気条件で処理した方が高くなっているが、対照のAGPとともに小さい値である。しかしすべて磷が制限要因になっている。このことから底泥の藻類増殖に与える影響はほとんどないと言える。

図7は、各湖の底泥中の磷含有量と、好気・嫌気条件下での底泥のAGPをプロットしたものである。底泥中の磷含有量と底泥のAGPとは、おおむね比例していると言える。なお Total-P の分析は、乾燥した底泥試料を550°Cで1時間灼熱した後、1 N HClで抽出して、 PO_4 -Pとして定量する方法を用いた (J. M. Andersen, 1976)。

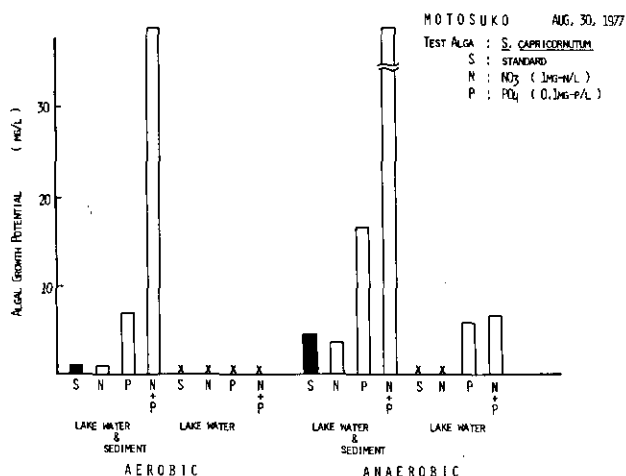


図5 本栖湖における底泥のAGP (*S. capricornutum*)

Fig.5 Algal Growth Potential of sediments in Lake Motosukô using *S. capricornutum*

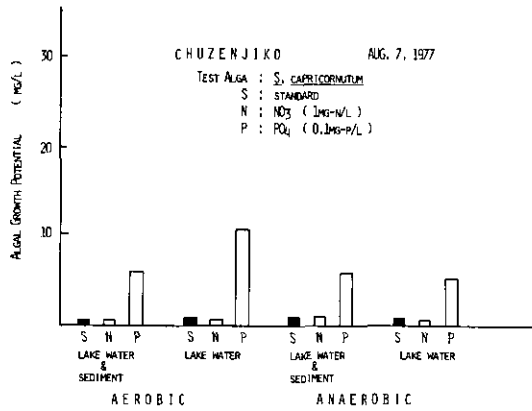


図6 中禅寺湖における底泥のAGP (*S. capricornutum*)

Fig.6 Algal Growth Potential of sediments in Lake Chuzenjiko using *S. capricornutum*

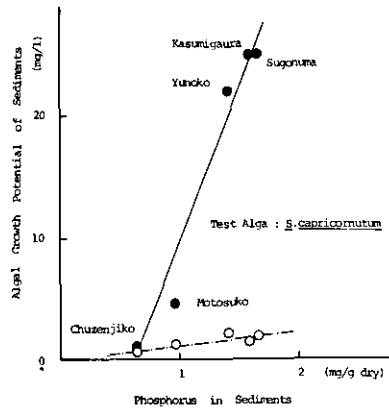


図7 底泥中の全磷と底泥のAGPとの関係

Fig.7 Arelation between total phosphorus in lake sediments and AGP of sediments

4. まとめ

底泥と湖水とを一定条件（本実験では、好氣的条件および嫌氣的条件下、20℃）で放置し、その滷水を試料とし、藻類培養試験法に準拠して、AGP（乾燥重量mg/l）を求め、藻類の増殖に及ぼす底泥の影響について評価した。その結果、霞ヶ浦、湯ノ湖、菅生沼のような富栄養湖では、好気条件より嫌気条件で放置した底泥のAGPが10倍程度高くなった。好気条件では、磷の溶出が抑制され藻類の増殖にほとんど影響を与えなかった。しかし、嫌気条件では底泥から磷が溶出して、藻類の増殖を刺激した。貧栄養湖では嫌気・好気条件いかにかわらず、AGPが小さく、底泥の藻類の増殖に対する影響も小さい。また底泥のAGPはすべて磷が制限要因であった。

引用文献

- Engene B. Welch(1977) : Nutrient Diversion : Resulting Lake Trophic State and Phosphorus Dynamics, EPA-600/3-77-003 January, 91 pp.
- Domald Mark Anderson(1978) : Potential Importance of Benthic cysts of *Gonyaulax tamarensis* and *G. excavata* in Initiating Toxic Dinoflagellate Blooms. J. Phycol, 14(2), 224-234.
- J. M. Andersen(1976) : An Ignition Method for Determination of Total Phosphorus in Lake Sediments. Water Research, 10, 329-331.
- National Eutrophication Research Program, Environmental Protection Agency (1971) : Algal Assay Procedure Bottle Test, 82pp.
- 細見正明・岡田光正・須藤隆一 (1977) : 藻類の増殖に及ぼす底泥の影響に関する研究 (第1報) -底泥のAGP-。昭和52年度 日本発酵工学大会 講演要旨集 184.
- 村上彰男(1976) : 赤潮と富栄養化, 公害対策技術同友会, 207pp.

霞ヶ浦における細菌分布

相崎守弘¹・近田俊文²

Distribution of Bacteria in Lake Kasumigaura

Morihiro AIZAKI¹ and Toshifumi KONDA²

Abstract

The seasonal change and distribution of total and aerobic total heterotrophic bacteria (viable bacteria) were studied in Lake Kasumigaura. The results obtained from this study were as follows:

1. The number of viable bacteria decreased from the bay bottom to the lake center. The average number of viable bacteria during May 1977 to April 1978 was $0.95-1.7 \times 10^5$ cells/ml for the stations at the bay bottom and $4-6 \times 10^3$ cells/ml at the stations in the central part of the lake.

2. The total number of bacteria was similar for each station, and average number during the year was $3.7-5.3 \times 10^6$ cells/ml.

3. The vertical distribution of total and viable bacteria were relatively constant.

4. The number of total and viable bacteria decreased in early summer for the growth of *Microcystis* sp., but the number increased in late summer and autumn when decomposition of the algae occurred.

5. From the above data, the factors responsible for the number variation of viable bacteria at the bay bottom and the central part of the lake seemed to be different.

1. はじめに

霞ヶ浦の富栄養化に関してはすでに多くの調査研究が行われてきている(土屋・白井, 1977)。しかしながら、はらわれてわけてきた努力にもかかわらず、まだ解明できない多くの問題をかかえている。富栄養化と細菌との関係もその一つである。細菌類は、外来性の有機物や湖内生産された有機物の分解者として湖内生態系で大きなウエイトを占めていると想像される。細菌類によって分解・生産される無機栄養塩類や微量のビタミン類その他の物質が藻類の増殖を促進していることも間違いない事実であろう。しかしながら湖内におけるこれら細菌群の様子はまだ明らかにされていない。湖内にお

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Water and Soil Environment Division, The National Institute for Environmental Studies, P. O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.

2. 東京都立大学理学部生物学教室 東京都世田谷区深沢2-1-1

Department of Biology, Faculty of Science, Tokyo Metropolitan University, Setagaya-ku, Tokyo 1, Japan.

ける細菌の役割を明らかにするためには細菌のもつ種々の活性の測定とそれに関与する細菌の個体数の変動を明らかにする必要がある。本報告では、そのうち、霞ヶ浦における細菌数の分布および季節変動について述べ、その原因を考察する。

2. 方法および材料

調査は、1976年7月より開始し、1977年3月までは霞ヶ浦高浜入の5～10地点、1977年5月から1978年4月までは霞ヶ浦全域の12地点、それ以後は高浜入を中心に湖心・土浦沖を含めた6地点で調査を行った(図1)。調査はほぼ毎月1度行い、好気性従属栄養細菌数(以下、生菌数と呼ぶ)および全菌数を計算した。調査日時等については、資料を参照していただきたい。

生菌数は混釈法で測定を行った。培地は%普通寒天培地(oxid社)を用い、20℃、2週間培養後に常法に従って計数した。全菌数はアクリジンオレンジ染色後けい光顕微鏡を用いて計数を行った。すなわち、試水1mlを無菌濾過水10mlと共に、25mmφ・0.40μニュクレオポアフィルターで濾化し、そのフィルターを0.01%アクリジンオレンジで約10～12時間染色した。染色はアクリジンオレンジの水濁をスライドガラス上に作り、その上に菌を濾別したフィルターをのせるという方法で行った。アクリジンオレンジは、生菌の場合、青いけい光を示すことが知られているが、死菌の場合でも染色液の濃度や染色時間によっては青いけい光を示す場合もあり、また、今回は全菌数の計数を目的としたために、比較的長い染色時間を選んだ。この方法では、すべての菌がオレンジ色のけい光を示した。染色を終えたフィルターは、濾紙で過剰の染色液を吸い取り風乾させた。乾燥させた試料は暗所に保存し、適時落射式けい光顕微鏡(オリンパス社)を用い、1500倍の倍率で計数した。試料は暗所に保存することによって数か月間安定であった。全菌数は8.8μ×8.8μの方眼20～100個をランダムに計数し、それをフィルターの各所で5～7回繰り返す、その平均値から求めた。

3. 結果

3.1 水平分布

霞ヶ浦は本邦第2の表面積を有する非常に大きな湖であるため、各水域によって水の流れや水質がかなり異なっている。霞ヶ浦は大きく分けて高浜入、土浦入、江戸崎入、湖心部、および流出部の5地域に分けることができる(図1)。このうち、高浜入は湖の北部に位置し、恋瀬川、山王川、園部川などの河川が流入している。大きな汚濁源としては、山王川上流に石岡市があり、その都市廃水が湾奥に流入している。また、霞ヶ浦に流入している各河川に共通していることであるが、茨城県は農業や養豚業がさかんであり、その排水もかなり流入してきている。高浜入では、流入河川の影響の強い湾奥から湖心へ向けてSt. 1, 2, 3, 4の地点で測定を行った。土浦入は湖の西部に位置し、湾奥に桜川、新川、花室川等の流入河川がある。大きな汚濁源としては土浦市がある。土浦入には湾奥から湖心へ向けてSt. 6, 7, 8, の地点で測定を行った。江戸崎入はそのかなりの部分が干拓され農地となっている。江戸崎入では湾の出口にSt.10を設けた。湖心部はSt.9の湖心とその周辺のSt.5で測定を

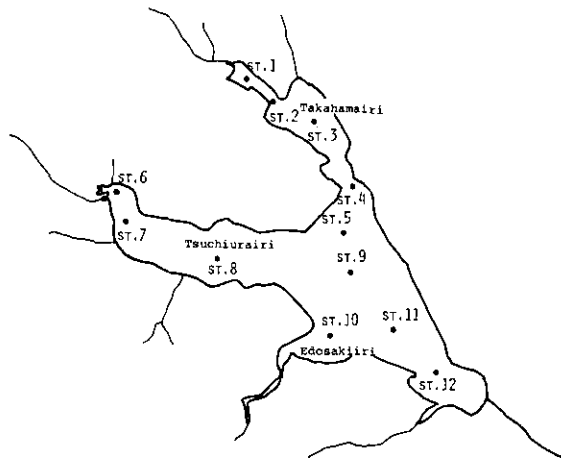


図1 霞ヶ浦調査地点分布図
Fig.1 Study site in Lake Kasumigaura

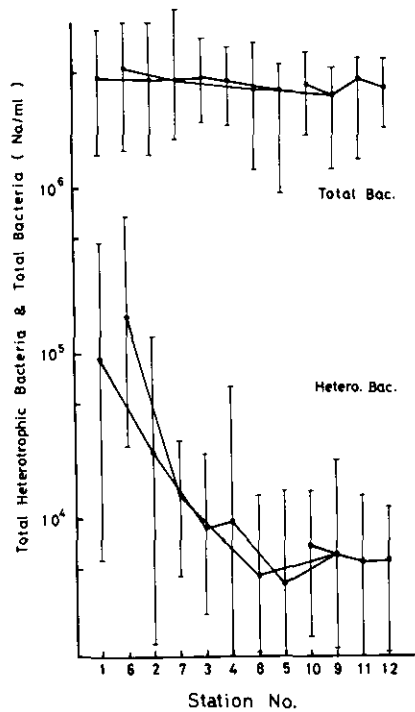


図2 霞ヶ浦における全菌数および生菌数の水平分布、プロット
は1977年5月から1978年4月までの平均値および変動幅
Fig.2 Horizontal distribution of total and viable bacteria. Plots were average value and the variation range during the periodic from May 1977 to April 1978

行った。湖心から流出部へ向けてSt.11, 12, の2地点で測定を行った。図2にそれぞれの地点での1977年5月から1978年4月までの1年間の全菌数および生菌数の平均値および変動幅を示す。流入河川の影響の強い湾奥部のSt.1および6では、 $0.95\sim 1.8\times 10^5$ cell/mlという大きな生菌数を示した。生菌数は湾奥から湖心に近づくに従って高浜入でも土浦入でも減少し、St. 5, St.8で最小値約 $4\sim 4.6\times 10^3$ cells/mlという値を示した。湖心から流出部にかけてはあまり大きな変動はみられず、 $5\sim 6\times 10^3$ cells/mlの生菌数であった。一方、全菌数は湾奥部が少し高く湖心に近づくに従って多少減少する傾向を示すが、全水域で大きな変化がなく $3.6\sim 5.3\times 10^6$ cells/mlの範囲であった。従って生菌数と全菌数の比も湾奥で高く2.2~3.2%、湖心に近づくに従って減少し、最小値はSt.5の0.1%であった。また後述するように季節変動も激しく、特に湾奥部の生菌数は大きな変動を示した。

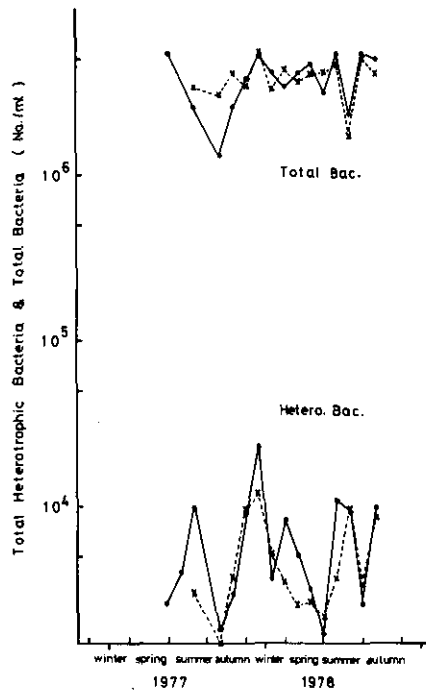


図3 St.9における上層および低層水中の全菌数および生菌数の季節変化。-●-, 0.5^m;--X--, 5^m
 Fig.3 Seasonal changes of total and viable bacteria in epilimnion and hypolimnion water at St.9. -●-, 0.5^m;--X--, 5^m

3.2 垂直分布

霞ヶ浦の最深部St. 4と湖心のSt. 9で垂直分布を調べた。図3にSt.9における0.5mと5mの水深での生菌数および全菌数の季節変動を示す。図から明らかなごとく全菌数にはあまり顕著な違いは見られないが深い部分の方が変動が少ないようであった。生菌数は水深の深い方が若干低い値を示す傾向がみられた。この傾向はSt.4においても同様であった。St.4の0.5m, 2 m, 6 mでの1977年5月から

1978年5月までの生菌数および全菌数の平均値はそれぞれ 9.8×10^3 , 8.3×10^3 , 6.6×10^3 および 4.5×10^6 , 3.5×10^6 , 4.0×10^6 cells/mlであった。霞ヶ浦は浅く、また、年間を通じてかなり風の強い日が多いため、上下混合はかなり激しく行われている。このことは、水温や他の無機および有機成分の分布からも推測されているが、細菌の分布からも同様な結論が得られた。

3.3 季節変動

図4、図5に湾奥部のSt.1と高浜入の中心にあたるSt.3における生菌数および全菌数の季節変動を示す。湾奥部のSt.1では、夏期のミクロキスティスの増殖期に生菌数および全菌数とも著しく低下したが、夏の終わりから秋にかけてかなり増加し、冬期でも比較的高い値を維持した。最高値は生菌数が1977年10月に得られた 4.7×10^5 cells/ml、全菌数が1978年8月に得られた 9.4×10^6 cells/mlであった。また、最低値は生菌数が1977年7月に得られた 5.7×10^3 cells/ml、全菌数が1977年9月に得られた 1.6×10^6 cells/mlであった。一方、流入河川の影響の比較的小さいSt.3ではSt.1と同様に夏期のミクロキスティスのブルーム発生時には生菌数も全菌数も低下する傾向を示したが、分解の始まる秋期から冬期の初めではかなり回復を示した。しかしSt.1とは異なって、変動幅がかなり少なく、また、プラン

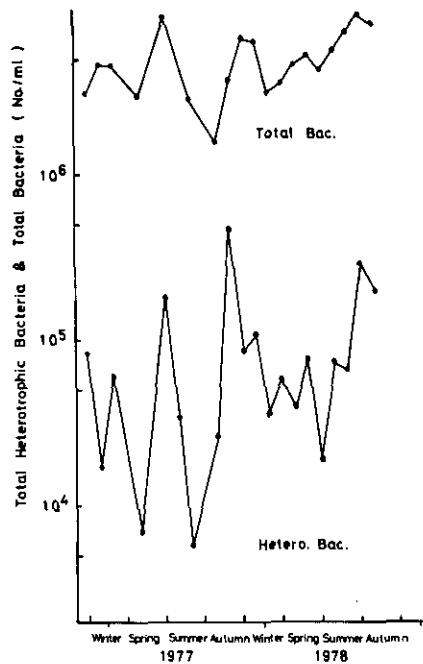


図4 St.1における全菌数および生菌数の季節変化

Fig.4 Seasonal change of total and viable bacteria in epilimion water at St.1

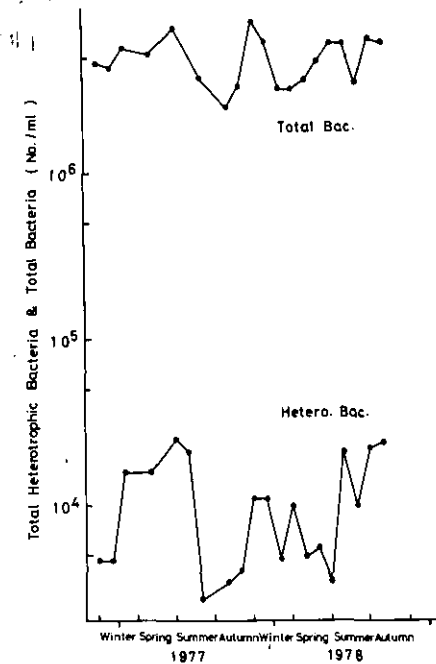


図5 St. 3における全菌数および生菌数の季節変化

Fig. 5 Seasonal change of the numbers of total and viable bacteria in surface water at St. 3

クトン類の減少する冬期には菌数もかなり低下した。最高値は生菌数が1977年5月に得られた 2.5×10^4 cells/ml, 全菌数が1977年11月の 8.1×10^6 cells/mlであった。また、最低値は生菌数が1977年7月の 2.7×10^3 , 全菌数が1977年9月の 2.5×10^6 cells/mlであった。1977年と1978年とでは夏期の菌数の移動の様子かなり異なっているが、1977年は夏期に非常に雨の多い年であり、一方、1978年はほとんど降雨のない年であったのでこのような違いが生じたものと思われる。霞ヶ浦の他の水域における細菌の季節変動は流入河川の影響の強い所でSt. 1と類似した変動を示し、また、その他の部分はSt. 3やSt. 9と似かよった変動を示した(資料参照)。

4. 考察

霞ヶ浦は非常に広い表面積をもつため、それぞれの水域で、生菌数に関してはかなり異なった細菌分布および季節変動を示した。特に流入河川の影響の強い湾奥部と影響の少ない湖心部とでは、その変動要因が全く異なるように思われた。図6, 7に湾奥部のSt. 1および湖心部のSt. 5におけるクロロフィル量と生菌数, 全菌数の関係を示す。全菌数に関しては特別な関係は見つげたいが、生菌数に関してはSt. 1, St. 5とで全く関係を示すことが明らかになった。すなわち、St. 1ではクロロフィル量の増加に伴い生菌数の値は減少する傾向を示すのに対してSt. 5では逆にクロロフィル量の増加と共に

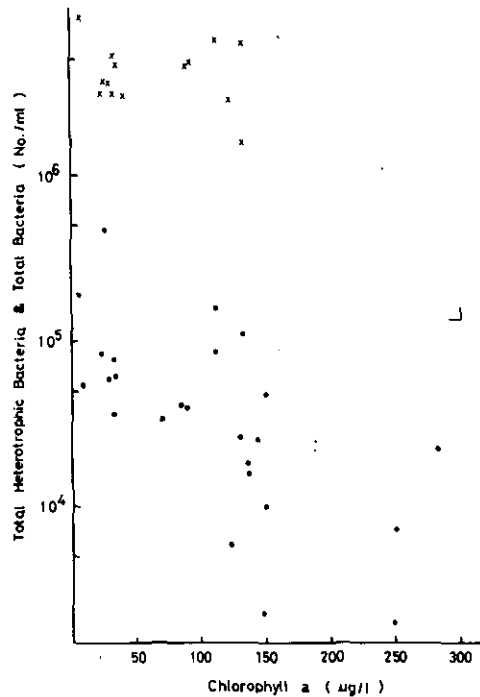


図6 St.1における全菌数および生菌数とクロロフィル量の関係。(●), 生菌数; (X), 全菌数

Fig.6 Correlation between total and viable number of bacteria and the concentration of chlorophyll-a at St.1 (●), viable bacteria; (X), total bacteria

菌数が増加する傾向を示した。しかも、面白いことには、クロロフィル量が100~200 $\mu\text{g/l}$ 以上というかなり高い値になると両地点とも $1\sim 2 \times 10^4$ cells/mlという値に収束してくることである。これらのことは、湾奥部のSt.1では、藻類の少ない時期には流入河川によってもたらされる外来性の有機物を利用して高い菌数を維持するが、藻類が増加してくるとなんらかの栄養物について藻類と競争関係が生じるか、または藻類によってpH等の生育環境を著しく変化させられるために菌数が減少してくるものと考えられる。藻類がなんらかの抗菌物質を排出している可能性も同時に考慮しなければならないことの一つであろう。一方、流入河川による有機物の供給がほとんどないと考えられる湖心部では藻類によって生産された有機物が細菌類の唯一の基質となるため藻類の増加に伴って生菌数が増加してくるものと考えられる。生菌数とクロロフィルとの関係はかなり多くの研究者が調べているが、まだ明確な関係は明らかになっていない。Jones (1977) は英国のいくつかの湖について関係を調べているが、湖や季節によっては、クロロフィルの増加と生菌数の増加に正の関係を認めている。このような藻類と細菌数との関係を調べる場合にはできるだけ外来性の有機物の供給の少ない水域を選ぶ必要がある。霞ヶ浦は表面積が非常に広いため、湖心部では比較的外来性有機物の供給が少なく、このような関係を調べるには適した水域と考えられる。霞ヶ浦の場合、湖心部での観測データから藻類に

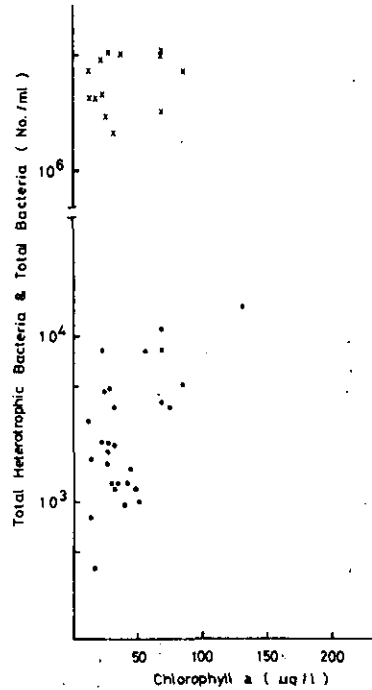


図7 St.5における全菌数および生菌数とクロロフィル量の関係
 (●), 生菌数; (X), 全菌数

Fig.7 Correlation between total and viable number of bacteria and the concentration of chlorophyll-a at St.5
 (●), viable bacteria ; (X), total bacteria

よって維持しうる細菌数は $1 \sim 2 \times 10^4$ cells/ml 程度になるものと予想される。

一方全菌数は霞ヶ浦の各水域でそれほど異なった分布や季節変動を示さない。このように全菌数と生菌数とで異なった挙動を示す原因はなんだろうか。桜井 (1975) がまとめたデータによれば、生菌数と全菌数との割合は富栄養湖ほど高く貧栄養湖ではかなり低い値を示す。Jones は前述した湖沼において 0.25% という値を報告している。貧栄養湖ではしばしば 0.1~0.01% 以下という低い値を示すことが知られている。霞ヶ浦の場合、湾奥で年平均 2.2~3.2%、湖心部で 0.1% という値であった。このように生菌数と全菌数を比較する場合、生菌数が本当に生きている菌すべてを計数しているのかが常に問題となる。生菌数を計数する場合、培地や培養条件によって生育してくる菌の種類が制約されるため、試水中の全生細胞を計数しているとは考えづらい。今後、生菌数の計数法になにか工夫を加える必要があるものと思われる。一方全菌数であるが、細菌細胞は平均 1μ 以下と非常に小さいためあまり沈降しないことが考えられ、分解速度が遅い場合にはかなり保存性の物質となる可能性が強い。すなわち湖内で常に増殖していなくても、外から運ばれたり、また湖内でも一時的に増殖する機会があった場合には、その最高値がかなり長い間維持される可能性が高いわけである。特に貧

栄養湖で生菌数と全菌数の差が非常に大きいことは、外来性の細菌が死滅後もかなり長期間計数されている可能性を示唆するものと思われる。今後この面からの研究が必要であろう。

5. まとめ

霞ヶ浦における全菌数および好気性従属栄養細菌（生菌数）の水平分布、垂直分布および季節変動を1976年秋期より1978年秋期まで調べた。その結果以下のようなことが明らかになった。

1) 生菌数は霞ヶ浦の各水域で大きく異なり、湾奥から湖心部へ向けて顕著な減少傾向がみられた。1977年5月から1978年4月までの生菌数の年間平均値は、湾奥では $0.95\sim 1.7\times 10^5$ cells/mlであったのに対し、湖心部、流出部では $4\sim 6\times 10^3$ cells/mlであった。

2) 全菌数は霞ヶ浦の各水域であまり大きな変化は観察されず、年間平均値は $3.7\sim 5.3\times 10^6$ cells/mlであった。

3) 生菌数、全菌数とも垂直分布にはあまり変化がみられず、ほとんど均一の分布をしていた。

4) 生菌数および全菌数は夏期のアオコの増殖期に著しい低下を示したが、分解の始まる夏の終りから秋にかけてかなり増加した。湾奥部では冬期にかなり高い菌数を維持したが、湖心部ではプランクトンの減少とともに生菌数の減少がみられた。

5) これらのデータから湾奥と湖心部とでは生菌数の変動要因がまったく異なっているものと推察された。すなわち湾奥部では、流入河川によってもたらされる外来性の有機物が細菌類の主な基質源となっているのに対し、湖心部では藻類によって生産される有機物が唯一の基質となっているものと考えられた。

引用文献

Jones, J. G. (1977) : The effect of environmental factors on estimated viable and total populations of planktonic bacteria in lake and experimental enclosures, *Freshwater Biology*, 7, 67-91.

桜井善雄(1975) : 湖沼における細菌と藻類の量的関係、微生物の生態2—相互作用をめぐって—、微生物生態研究会編、東大出版会、35—50.

土屋巖・白井邦彦(1977) : 霞ヶ浦に関する解説分類誌目録(1)、国立公害研究所特別研究成果報告、第1号、資料篇、65—138.

ブルーム時の水草帯における溶存酸素量の日変動

相崎守弘¹・福島武彦¹・大槻 晃²・手塚和彦³

The Daily Change of Dissolved Oxygen Content in the
Aquatic Plants Zone in *Microcystis* Bloom

Morihiro AIZAKI¹, Takehiko FUKUSHIMA¹,
Akira OTSUKI² and Kazuhiko TEZUKA³

Abstract

A daily change of dissolved oxygen was observed at two stations at Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura during the 27th to 31th July 1978. One of the stations was located at the floating leaf plant (*Trapa* sp.) zone and the other was at the pelagic zone. Dissolved oxygen concentration greatly fluctuated at both stations, especially at the floating leaf plant zone. The maximum values of dissolved oxygen were 13 mg/l at the station in the pelagic zone and 15–21 mg/l at the station in the floating leaf plant zone. The minimum values were 6 mg/l at the former and 0.3–2 mg/l at the latter. Such large fluctuations of dissolved oxygen at the station in the floating leaf plant zone seems to be caused by the respiration and decomposition of accumulated *Microcystis* spp. in the area. The results suggest that the ecosystem of the littoral zone having floating leaf plants might have been destroyed by decomposition of *Microcystis* spp. which accumulated by wind during the summer period.

1. はじめに

霞ヶ浦のように、平野部に位置し、遠浅な沿岸帯をもつ湖では、水生植物群落がよく発達し、湖内の物質循環や内水面漁業に重要な役割を果たしている。自然湖岸における水生植物群落は一般に岸より挺水植物、浮葉植物、沈水植物の順に分布する。霞ヶ浦における水生植物の研究は古くからしばしば行われて来たが、最近では、桜井等(1973)による詳細な調査研究がある。水生植物群落は、湖に生活する魚族の産卵場、および孵化した仔・稚魚の発育の場として極めて重要な役割を果たしている他、

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町
Water and Soil Environment Division, The National Institute for Environmental Studies, P. O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.
2. 国立公害研究所 計測技術部
Chemistry and Physics Division, The National Institute for Environmental Studies.
3. 筑波大学 環境科学科 〒300-31 茨城県新治郡桜村
Environmental Science Division, Tsukuba Univ., P. O. Sakuramura, Ibaraki 300-31, Japan.

外来の汚染物質を接触濾床の機能によって除去し、直接湖内へ進入するのを防ぐ役割を果たすなど湖内生態系で重要な地位を占めている。ところが霞ヶ浦の最近の水質の悪化は、このような水生植物群落の機能を破壊するような異常な事態をもたらしている。我々はその点に目を向け、夏期のいわゆる“アオコ”のブルーム時に、高浜入湾奥において、約一週間の連続観察を試みた。その結果、浮葉植物群落（ヒシ群落）内における異常な溶存酸素量の日変動特性が明らかになったので、得られた成果を報告する。

2. 調査地点

高浜入湾奥部は、霞ヶ浦でも代表的な水生植物群落が構成されている水域で、最盛期には水深 1.5 m 程度までのほとんど全水面が水生植物群落で覆われてしまう。挺水植物群落（ヨシ、マコモ等）もよく発達しているが、特に目立つのは浮葉植物群落である。夏期にはそのほとんどが「ヒシ」によって占められており、9月28日に測定した単位面積当たりの現存量は乾燥重量で約180g/m²という高い値であった。調査は1978年7月27日より8月3日まで行ったが、そのうち連続したデータのある7月31日までの結果を示す。調査は高浜入湾奥の水深約2 mのst. 1（資料参照p. ）の付近と下高崎沖の水深約1 mのヒシ群落の中で行った。以後、ヒシ帯のことを水草帯、沖帯調査地点を固定ステーションと呼ぶことにする。

3. 結果および考察

図1に溶存酸素量の日変動を示す。溶存酸素量は日の出前後に最低値を示し昼間の12時～18時の間に最高値を示した。固定ステーションでは最低値はほぼ6 mg/l、最高値は約13mg/lであった。また、上層と下層で溶存酸素濃度にあまり大きな違いはなかった。一方、水草帯においては最低値は上層で2～4 mg/l、下層で0.3～2mg/lという非常に低い値が観測された。最高値は上層では15～21mg/lという非常に高い値を示した。下層においては上層に比べると最高値はかなり低く7～12mg/lという値であった。この期間の水温は固定ステーションでは約30℃から32℃の間を変動し、水草帯ではおおよそ30℃から34℃の間を変動した（図2）。この水温における溶存酸素の飽和値は約7.5mg/l程度であるので、固定ステーションでは昼間には飽和値の約170%という高い溶存酸素濃度になり、夜間には約80%程度まで減少するというパターンを繰り返していることが分かった。また、水草帯表層では昼間に飽和値の200～280%という非常に高い値になり、夜間には3～25%という非常に低い溶存酸素量になることが明らかになった。

以上のように、水草帯における溶存酸素の日変動が開水面におけるそれに比べて非常に激しかったが、その原因としては、水草帯に吹き寄せられた大量のアオコの光合成による酸素発生と呼吸や分解による酸素消費が考えられる。この期間のクロロフィルa量は固定ステーションでは240～780mg/l程度の値を変動し水草帯では830～2,200mg/lという非常に高い値を変動した。また、連続観測を行った時期と若干ずれるが8月14日に行った *in situ*での光合成速度の測定では、固定ステーションの表層の

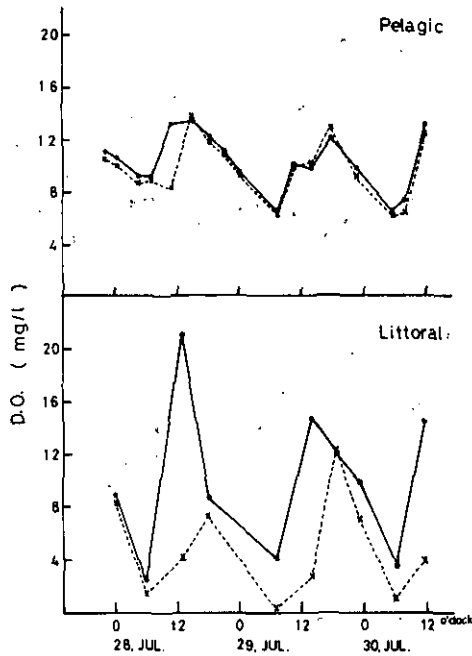


図1 水草帯及び沖帯における溶存酸素濃度の日変動
 -●-, 表層; ---X---, 下層(水草帯-1m, 沖帯-1.5m)

Fig. 1 Daily change of dissolved oxygen at the two stations of littoral zone (floating leaf plants zone) and pelagic zone -●-, epilimion; ---X---, hypolimion (littoral zone-1m, pelagic zone -1.5m)

総生産量は午後12:40から4:20までの間で $2.9\text{mgO}_2/\text{l}\cdot\text{hr}$, 1mの水深では $0.25\text{mgO}_2/\text{l}\cdot\text{hr}$, 呼吸量は表層で $0.44\text{mgO}_2/\text{l}\cdot\text{hr}$, 1mで $0.61\text{mgO}_2/\text{l}\cdot\text{hr}$ であった。一方, 水草帯の表層では, 総生産量が $2.9\text{mgO}_2/\text{l}\cdot\text{hr}$ と固定ステーションと同程度の値であったが, 呼吸量は $1.8\text{mgO}_2/\text{l}\cdot\text{hr}$ という非常に高い値であった。この値から単純に計算してみると, 夜間の酸素消費量は, 夜間を10時間として, 固定ステーションで約 $5\text{mgO}_2/\text{l}$, 水草帯では約 $18\text{mgO}_2/\text{l}$ になる。すなわち, 昼間かなり過飽和な状態でも, 水草帯では夜間にその大部分の酸素が消費されてしまうことを示している。図2に測定期間中の水温の変化と風力および風向を示すが, この図から霞ヶ浦では水温躍層がほとんど形成されていないことが分かる。調査中は典型的な夏型の日々であったが, 午後になると必ず数mの風が吹き, 水の混合を起こした。そのため, 溶存酸素量も上層と下層で大きな違いはみられなかった。しかしながら, もし風が一日吹かないと仮定すると開水面でも1m以深は純生産量がマイナスになるところから, 下層では溶存酸素濃度がほとんど零になるものと思われる。また, 風によって攪乱されることにより表層の過飽和の酸素は, かなりの部分が空中へ放出されるものと考えられるところから, 夜間の大量の酸素

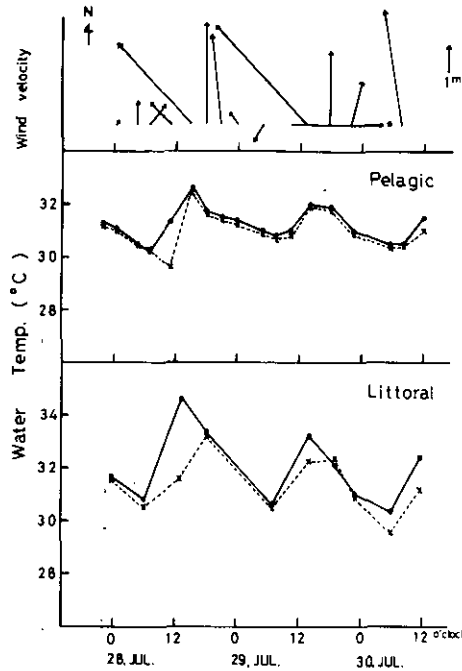


図2 水草帯及び沖帯における水温及び風方、風向の日変動
 —●—, 表層; --×--, 下層(水草帯-1m, 沖帯-1.5m)

Fig.2 Daily change of water temperature, wind velocity and wind direction —●—, epilimnion; --×--, hypolimnion (littoral zone -1m, pelagic zone -1.5m)

消費によって一層溶存酸素濃度が低下してくるものと思われる。この連続測定の期間に網イケス養殖の鯉が大量にヘイ死する事件が起きたが、水草帯における夜間の低酸素水がなんらかの原因となっているのかも知れない。

表1に水草帯と固定ステーションにおける各種栄養塩濃度を示すが、ほとんどの場合水草帯の方が高い値を示している。おそらく大量に集積したアオコの分解と無酸素水の出現による底泥からの栄養塩の回帰などによってこのような状態になっているものと思われるが、この水塊が開水面に移動することによって、アオコに対する新たな栄養物の供給源となっている可能性も大きい。

以上述べてきたことを要約すれば、高浜入湾奥の水草帯は夏期のアオコのブルーム時には、アオコの吹溜り場所となり、水草帯本来のもつ機能がほとんど破壊されてしまう。更に、アオコの分解や底泥からの栄養塩回帰により、新たな栄養塩類の供給源となる可能性が大きい。今後、このような事態を防ぐために何らかの措置が至急とられなければならないと思われる。

表1 水草帯及び沖帯における各種栄養濃度の比較

Table 1. Comparison of the concentrations of mineral nutrients at the stations of pelagic and littoral floating leaf plants zone

Item	27, July		28, July		29, July		31, July		
	L Littoral (23:50)	Pelagic (22:10)	Littoral (18:00)	Pelagic (18:25)	Littoral (7:00)	Pelagic (7:30)	Littoral (12:30)	Pelagic (11:00)	
Epi. *									
T-P (mg/l)	0.556	0.337	0.720	0.373	-	-	2.20	0.606	
TD-P (mg/l)	0.133	0.093	0.168	0.136	0.182	0.141	0.102	-	
orth-PO ₄ -P (mg/l)	0.085	0.056	0.126	0.095	0.157	0.082	0.073	0.193	
NH ₄ -N (mg/l)	0.049	0.037	0.049	0.045	0.460	0.032	0.056	0.106	
NO ₃ +NO ₂ (mg/l)	0.013	0.004	0.024	0.005	0.018	0.003	0.003	0.003	
Hypo. **									
T-P (mg/l)	0.636	0.337	0.932	0.385	-	-	1.46	0.466	
TD-P (mg/l)	0.134	0.103	0.112	0.140	0.193	0.126	0.281	-	
orth-PO ₄ -P (mg/l)	0.095	0.064	0.081	0.096	0.174	0.097	0.188	0.188	
NH ₄ -N (mg/l)	0.054	0.058	0.086	0.072	0.470	0.181	0.047	0.308	
NO ₃ +NO ₂ (mg/l)	0.024	0.003	0.025	0.004	0.026	0.003	0.003	0.009	

* 0^m

** Littoral zone -1^m, Pelagic zone -1.5^m.

4. まとめ

高浜入湾奥部の水草帯（ヒシ帯）と沖帯において溶存酸素量の日変動を1978年7月27日から31日にかけて測定した。溶存酸素量は両地点とも激しく変動したが、特に水草帯において著しかった。最高値は沖帯では約13、水草帯では15~21mg/lであった。また最低値は沖帯で6、水草帯で0.3~2 mg/lであった。水草帯におけるこのような激しい溶存酸素の変動は、水草帯に吹寄せられ蓄積したマイクロキスティスの光合成と呼吸及び分解によるものと推察された。

謝辞

この調査に参加し協力して下さいました村岡浩爾博士、大坪国順氏、細見正明氏、河合崇欣博士、岩熊敏夫氏および森下正彦氏に感謝いたします。

引用文献

桜井善雄・林一六・渡辺義人・天白精子・大橋通成 (1973) : 水生植物・霞ヶ浦生物調査報告IX, 建設省霞ヶ浦工事事務所, 78~148.

霞ヶ浦高浜入における一次生産の季節変動と夏期における日変動

岩熊敏夫¹・相崎守弘²

Primary Production at Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura:
Seasonal and Summer Diurnal Changes

Toshio IWAKUMA¹ and Morihiro AIZAKI²

Abstract

Primary production was observed *in situ* monthly at Stations 1 and 2' at Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura from October 1977 to October 1978. The average net production rate for one year was $0.32 \text{ gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ for Station 1 and 0.70 for Station 2' respectively. The primary production rate changed from month to month, it was lowest in February for both Stations 1 and 2' and highest in July and August for Stations 1 and 2' respectively. Gross production at the surface layer was lower than that at one meter depth from January to March at Station 1 and from December to March at Station 2', although it was highest at the surface layer in other months. These results seemed to be caused by light inhibition or photoinhibition.

Primary production was observed at Station 1' on the 28th and 29th July 1978. The observation was made every two hours during the daytime, and every six hours at night. The maximum gross production rate per unit weight of chlorophyll *a* observed during this period, when blue-green algae, especially *Anabaena* sp. and *Microcystis* sp., were dominant, was $14.5 \text{ mgO}_2/(\text{mgChl.}a \cdot \text{h})$ at the surface layer under an illumination of 75 klux, suggesting that the light inhibition for phytoplankton did not occur. Also, photosynthesis could be detected in the aphotic zone.

It was found from the observations made every two hours or every six hours, that the oxygen consumption in the dark bottles changed significantly depending on whether it was day or night. The remarkably high consumption in the daytime was considered to be caused by the sudden change from light to dark during the dark bottle preparation stage.

Samples were taken monthly from Stations 1, 2, 4, 6 and 9 from October 1977 to October 1978 and transported to the institute and the primary productivity was measured. The gross production rate per unit weight of chlorophyll *a* was not significantly different among the stations ranging from 14 to $50 \text{ mgO}_2/(\text{mgChl.}a \cdot \text{d})$ in winter and from 50 to $100 \text{ mgO}_2/(\text{mgChl.}a \cdot \text{d})$ in other seasons.

1. 国立公害研究所 生物環境部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Environmental Biology Division, The National Institute for Environmental Studies, P. O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.

2. 国立公害研究所 水質土壌部

Water and Soil Environment Division, The National Institute for Environmental Studies.

1. はじめに

霞ヶ浦の富栄養化については、近年上水利用上の有機汚濁の問題に加えて、その生態系に及ぼす異変に大きく目が向けられている。すなわち藻類の大量発生と悪臭のまんえん、魚類相の変化、さらには養殖ゴイの大量へい死などである。藻類による栄養塩類の有機化が富栄養化の大きな柱であることには異論はないであろうが実際に湖の中でどれだけの栄養塩類が固定され、また分解によって供給されているかはこれから解明されなければならない課題である。霞ヶ浦の一次生産の研究には一地点の周年変動を追跡したものとして北浦または西浦湖心部での現場法(手塚他, 1973), クロロフィル法(手塚他, 1975)が報告されている。また特定の時期の横断的な調査としては8月の西浦(前田他, 1974) 2月と9月の西浦と北浦(手塚他, 1975)の報告があるが、特に後二者はクロロフィル法を用いたため、どうしても推測の域を出ていない。また富栄養の象徴ともいえる“水の華”は湾奥部の比較的流入河川の影響を受けやすい水域で発生しやすく、そのような水域の特性は当然湖心や北浦の水域特性とは異なっている。本調査は湾奥部での一次生産の周年変動を明らかにし、かつ“水の華”の発生時期に焦点を絞って一次生産の日変動を明らかにすることを目的としており、調査水域を高浜入湾奥部に設定して現場法を用いて測定を行ったものである。さらに西浦全域から代表水域を選び一次生産力の周年にわたっての比較を試みたものである。

2. 調査水域および方法

本報告は三つの調査より成る。一つは高浜入での一次生産の周年変動の現場法を用いての調査、一つは夏期の一次生産の日変動特性の現場法を用いての調査、一つは湖心を含めた全域の一次生産力の周年変動の調査である。調査水域の概略を図1に示した。

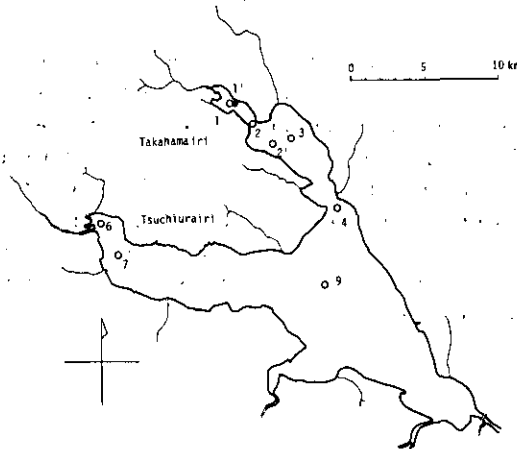


図1 霞ヶ浦調査地点図

Fig. 1 Map of Lake Kasumigaura showing the sampling stations

高浜入奥部の St. 1 (水深約 2 m) ならびに St. 2' (水深約 3.8 m) で、酸素法＝明暗ビン現場垂下法により水深 1 m ごとの一次生産量を測定した。調査期間は 1977 年 10 月より 1978 年 10 月までである。78 年 4 月までは St. 1 で 1.5 m 水深での測定も行った。垂下時間は原則として 24 時間としたが夏期には激しい光合成により気泡が発生してしまうため 8 月には日中 4 時間とし、7 月、9 月には 4 時間と 24 時間を並行した。明暗ビン中の溶存酸素はウィンクラー法により求めた。一方、表層の試水を国立公害研究所に持ち帰り、所内の池 (水深約 50 cm) に明暗ビンを浮かべて 1 日の一次生産量を求めた。クロロフィル a 量は、GF/C フィルター上の残存試料について UNESCO / SCOR 法により定量した。調査は各月下旬に行ったが、7 月 1 日の測定分については 6 月のデータとして扱った。事故等で欠測を生じたため、7 月の St. 1 でのデータには次に述べる St. 1' の夏期連続測定の結果を充てた。

日変動特性の調査は 78 年 7 月 28、29 日の両日にわたって St. 1 付近のコイいけすのわきに設けられた固定点 (これを仮に St. 1' とする) において行われた。水深 0、0.5 および 1.5 m での生産量を日中は 2 時間ごとに、夜間は 6 時間ごとに測定した。さらに正午を基点または終点とする 4、6、12 および 24 時間の生産量も参考のために求めた。照度、温度、溶存酸素等の計測は 3 時間ごとに行った。クロロフィル a 量は試水を直接 TURNER 社製ケイ光光度計 10005 型により測定し、別に UNESCO / SCOR 法で求めたクロロフィル a 値で補正を行った。

高浜入における現場法での調査とは別に、霞ヶ浦全域での一次生産特性をは握するために月 1 回の定期調査ごとに St. 1、2、3、4、7 および 9 (1977 年 10 月から 1978 年 4 月まで) または St. 1、2、4、6 および 9 (1978 年 5 月から 10 月まで) から 0.5 m 水深の試水を持ち帰り、高浜入調査の時と同様に研究所の池に 1 日浮かべて一次生産量の測定を行った。

3. 結果

3.1 高浜入での一次生産量の季節変動

一次生産量の季節変動を St. 2' については図 2 に、St. 1 については図 3 に示した。また現場での一次生産量と持ち帰って研究所で測定した一次生産量との比較を表 1 に示した。5 月の測定開始日が雨であった以外は天候はおおむね晴天であった。

両地点とも 2 月と 7 月 (St. 1) または 8 月 (St. 2') を最小、最大とする変動様式を示したが、その変動幅は St. 1 でより大きな値を示した。すなわち総生産量、呼吸量の変動量は St. 2' ではそれぞれ 6.5 倍、9.7 倍であったのに対し St. 1 ではそれぞれ 22 倍、約 30 倍であった。

純生産量は St. 1 で 8 月に $6.2 \text{ gO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ を示した他は 2.1 から $3 \text{ gO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ の間の値を示し、8 月を除く 1 年間の平均は $-0.22 \text{ gO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ で 8 月を含めての平均は $0.32 \text{ gO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ となった。特に 1 月から 3 月にかけて高い純生産量を示していた (平均値 $1.4 \text{ gO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$) 点が注目される。St. 2' では 4 月に $-3 \text{ gO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ であった他は 2.1 から $0.5 \text{ gO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ の間の値を示し 1 年間の平均は $0.70 \text{ gO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ となり St. 1 よりも高い値を示した。また春夏の純生産よりも秋冬の純生産が高い傾向がみられた。

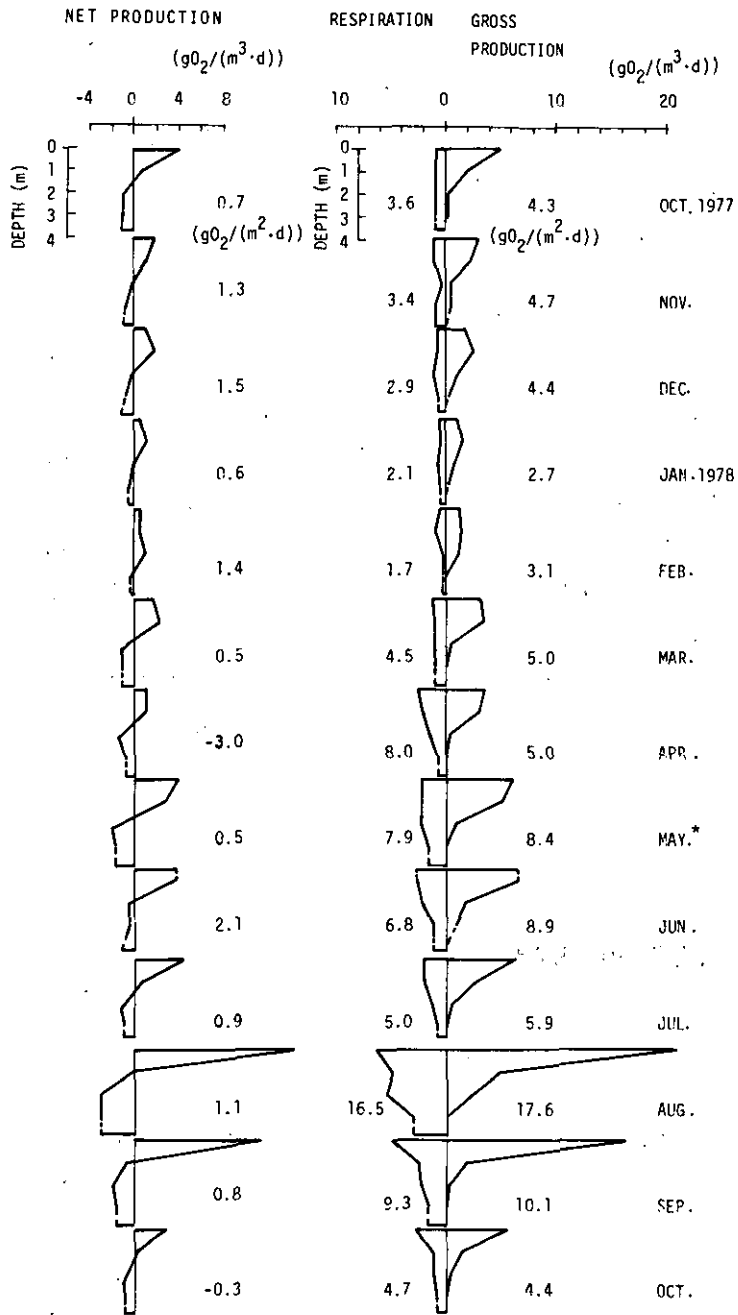


図2 St. 2' における純生産量, 総生産量および呼吸量の季節変動
星印は調査第1日目が雨であったことを示す

Fig. 2 Seasonal change in net production, gross production and respiration at St. 2' Asterisk shows the weather on the first day was rain

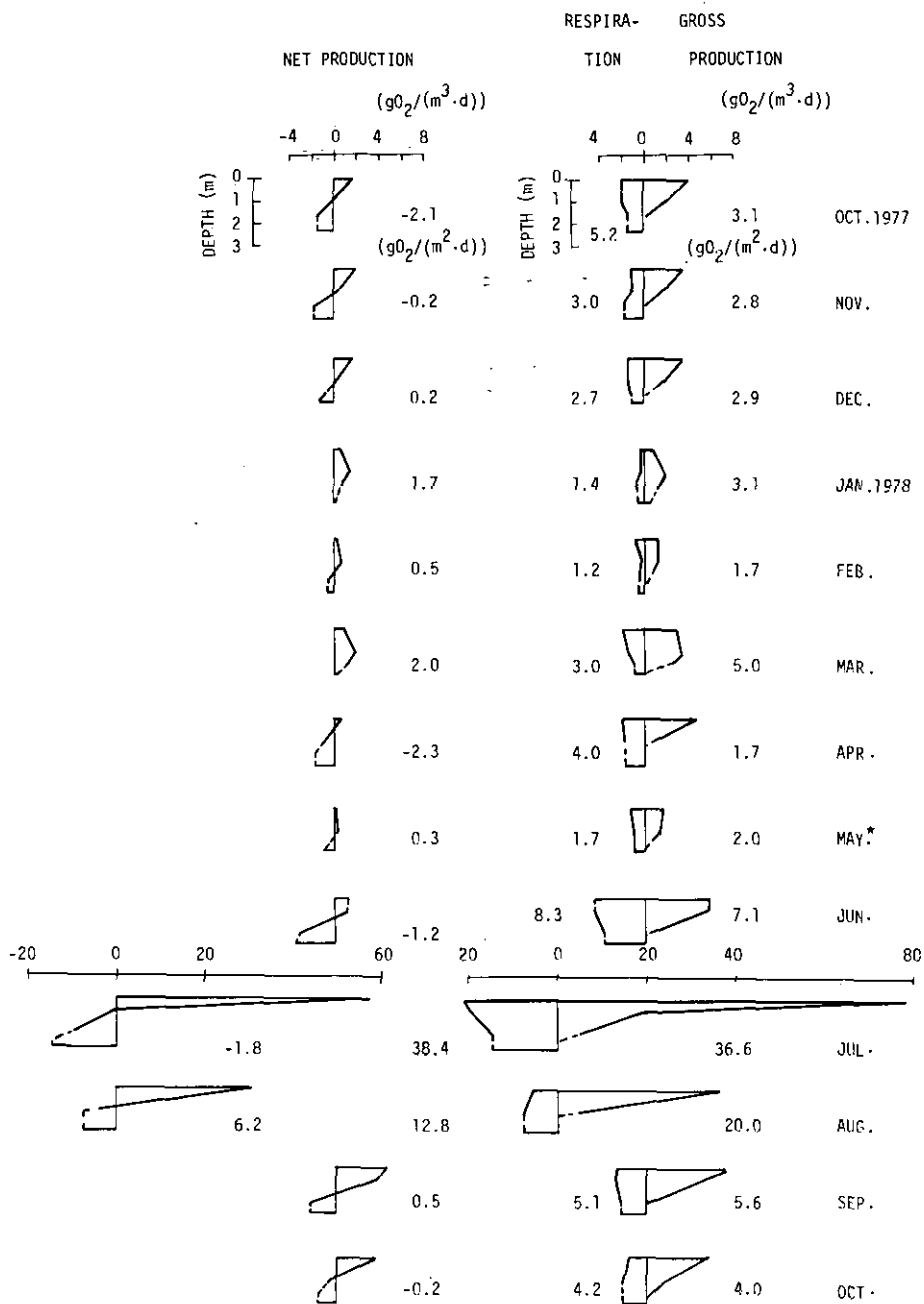


図3 St. 1 における純生産量、総生産量および呼吸量の季節変動
星印は調査第1日目が雨であったことを示す

Fig. 3 Seasonal change in net production, gross production and respiration at St. 1
Asterisk shows the weather on the first day was rain

表1 表層水の現場における一次生産力と表層水を研究所の池に運び、そこで測定された一次生産力との比較

Table 1. Comparison of primary productivity of sample taken from surface water measured *in situ* with that measured at an outdoor pond in the institute after transportation

Date	Station 1						Station 2'					
	Takahama-iri			Institute			Takahama-iri			Institute		
	Water temperature* (°C)	Chlorophyll a (mg/m ³)	Gross production (gO ₂ /m ³ ·d)	Respiration (gO ₂ /m ³ ·d)	Gross production (gO ₂ /m ³ ·d)	Respiration (gO ₂ /m ³ ·d)	Water temperature (°C)	Chlorophyll a (g/m ³)	Gross production (gO ₂ /m ³ ·d)	Respiration (gO ₂ /m ³ ·d)	Gross production (gO ₂ /m ³ ·d)	Respiration (gO ₂ /m ³ ·d)
October 12-13	18.2	23	—	—	3.3	1.1	18.9	148	5.0	0.9	4.4	0.8
October 26-27	17.2	62	3.7	2.1	6.4	2.0	18.6	61	1.4	0.5	3.9	1.1
November 24-25	13.4	81	3.3	1.4	3.0	0.7	13.2	86	2.9	1.1	2.0	0.4
December 21-22	8.5	129	3.1	1.6	1.7	0.6	9.0	99	1.4	0.7	1.6	0.7
January 26-27	3.3	29	0.9	0.3	0.9	0.6	3.9	34	1.0	0.5	0.5	0.3
February 22-23	4.9	40	1.0	0.7	1.9	0.8	4.1	35	1.1	0.6	1.0	0.3
March 23-24	9.3	88	3.0	2.1	4.1	1.5	8.8	84	3.0	1.4	3.4	1.3
April 19-20	15.8	87	4.8	2.0	7.4	2.0	15.1	130	3.5	2.6	6.7	2.3
May 30-31	20.0	17(0 m) 22(1 m)	1.5	1.4	1.2	1.2	22.0	29(0 m) 90(1 m) 83(2 m) 76(3 m)	6.0	2.2	5.0	1.8
July 12-13	29.8	193	9.9	3.2	7.2	3.7	29.3	111	6.2	2.0	6.8	3.2

* Water temperature was measured at 0.5m deep between 11:00 and 13:00.

** The weather on the first day was rain.

同様に総生産と呼吸の年平均を求めてみると、St. 1 ではそれぞれ $7.5 \text{ gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ と $7.4 \text{ gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、St. 2' ではそれぞれ $7.0 \text{ gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ と $6.0 \text{ gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ になった。

クロロフィル a 量は St. 2' に比べて St. 1 でより大きく変動した。すなわち生産量の変動に対応する月で比較すると、St. 2' で 1月に 34 mg/m^3 、2月に 35 mg/m^3 であったものが 8月には表層で 357 mg/m^3 への約10倍の変動を示したのに対し、St. 1 では 2月に 40 mg/m^3 から 7月には日中の表層で、 600 ないし 900 mg/m^3 へと15ないし20倍の変動を示していた。またクロロフィル a 量の最低値は5月の雨の日に得られた。St. 1 では表層、1 m 水深でそれぞれ17および 22 mg/m^3 、St. 2' では表層では 29 mg/m^3 と少ないものの1 m 深くなるごとに90、83および73の値を示した。このとき一次生産量については St. 1 では他の月に比べて低かったが、St. 2' では特に低くなる傾向はみられなかった。

3.2 夏期における一次生産量の日変動

3.2.1 測定日の天候、物理環境

天候は測定両日とも快晴で、水温は水深方向に変化は少なく、29日の10時半に 1.3°C の上下差を見たのが最大で、 30.5°C (29日7時30分、水深2 m) から 32.6°C (28日15時、水深0 から1 m) の間を変動したのみであった。風速は28日の15時から21時までは 3.4 から 4.2 m/s 、29日の0時から7時までは 0.7 m/s そして10時から14時までは 3.5 から 5.2 m/s であった。

水中照度の経時変化を図4に示した。本調査に並行して行われた連続調査の期間中(7月27日より8月6日まで)に得られた照度の測定データから、日中10時から14時までの間で風速が 1 m/s 以上の場合の水面での照度の減衰は36% (標準偏差4%) であることが分かったので10時から14時までの表層

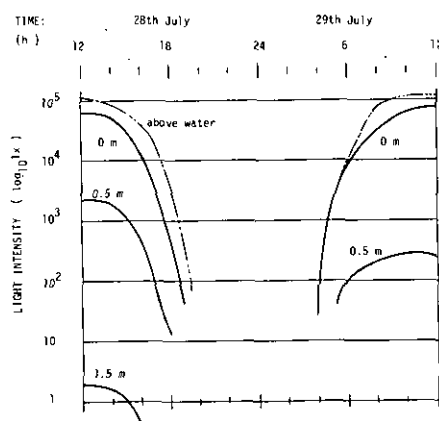


図4 1978年7月28日および29日のSt. 1'における各水深での水中照度の時間変化

Fig. 4 Change in light intensity with time at various depth at St. 1' on 28th and 29th July 1978

照度についてはこの値を用いて補間を行った。他の時間については実測値から補間を行った。また、

$$I_{x_2} = I_{x_1} e^{-k(x_2 - x_1)}$$

ただし

I_{x_i} : 水深 x_i における水中照度

で定義される消散係数 k の値は水中照度の実測値より28日に 6.7 m^{-1} から 8.3 m^{-1} 29日に 8.1 m^{-1} から、 11.3 m^{-1} となった。ただし水深 1 m までの 25 cm 間隔の係数の平均値として求めた。1% 照度の深さを有光層とすれば有光層深さ D_0 は28日の午後に 0.69 m から 0.56 m 、29日の午前中に 0.57 m から 0.41 m となり、1.5 m の水深では表層の 10^{-6} から 10^{-4} の光量しか到達していないことになる。

3.2.2 クロロフィルおよび生産諸量

図5にクロロフィル a 量の深度分布と経時変化を示した。夜間は約 350 mg/m^3 の均一な上下分布を

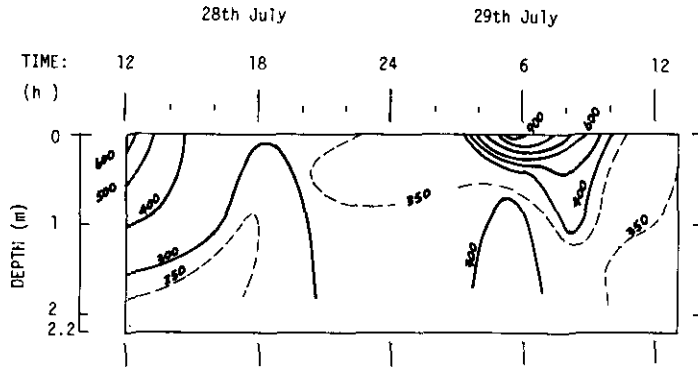


図5 St. 1'におけるクロロフィル a 量の垂直分布の時間変化。(mg/m³)

Fig. 5 Change in the vertical distribution of chlorophyll a with time at St. 1'. (mg/m³)

示したが、29日の5時半に 970 mg/m^3 の最大値を表層で示したのち、12時ごろには再び約 350 mg/m^3 の均一な上下分布を示した。単位水柱内のクロロフィル a 量を求めてみると、均一分布時に約 750 mg/m^3 、表層に藻類の集積した29日の5時半および28日の日中に約 850 mg/m^3 となった。クロロフィル a 量の分布の経時変化は風速に対応しており、風によるかくはんがクロロフィル a 量の深度差を少なくしたと考えられる。

図6に各水深での生産量の日変動を示した。総生産力は表層に集中し（総生産量で $78.5 \text{ gO}_2/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ）、特に29日の午前中に高い値（総生産量で $45.6 \text{ gO}_2/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ）を示した。一方呼吸量は午前中に少なく、結果として純生産量は午後より午前中の方がより高い値を示すこととなった（表層で2.8倍）。水深 0.5 m のところで純生産量が $-0.2 \text{ gO}_2/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ であったのでこの深さがほぼ補償深度に対応して

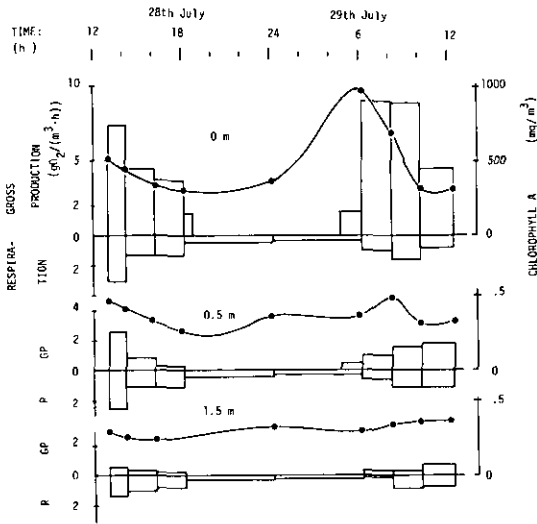


図6 St. 1'における各水深での総生産量, 呼吸量およびクロロフィル a 濃度の日変動

Fig. 6 Diurnal change in gross production, respiration and chlorophyll a concentration at various depth at St. 1'

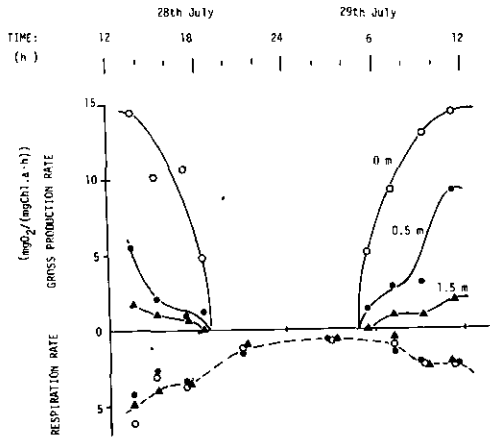


図7 St. 1'における各水深でのクロロフィル a 量あたり 1 時間あたりの総生産量および呼吸量の日変動

Fig. 7 Diurnal change in gross production and respiration per mg chlorophyll a per hour at various depth at St. 1'

いたことになる。これは有光層深さともほぼ一致した。

クロロフィル a 量あたりの総生産量, 呼吸量を求めた結果を図7に示した。クロロフィル a 量あたりの総生産量の最大値は28日の13時から14時10分までの間の表層での $14.5 \text{ mgO}_2 / (\text{mg chl. } a \cdot \text{h})$ (平均照度 50 klx) および29日の10時10分から12時20分までの表層で $14.5 \text{ mgO}_2 / (\text{mg chl. } a \cdot \text{h})$ (平均照度 75 klx) であった。29日の午前中に 1.5 m の深さでの照度は $3.2.1$ の計算によれば 1 lx 以下であったがクロロフィル a 量あたりの総生産量は $2 \text{ mgO}_2 / (\text{mg chl. } a \cdot \text{h})$ であった。

3.3 全域の一次生産特性

図8に研究所に持ち帰った試水を酸素ビンに入れ実験池に浮かべて測定した一次生産特性の推移を示した。8月と9月の試水は揺れ翌日に日中4時間放置して測定した。

概して総生産量と呼吸量の変動はクロロフィル a 量の変動と良い一致を示した。総生産量をクロロフィル a で除した値を比較すると同一月内では地点間に顕著な差異がみられなかった。特に異なった値を示したのは、St. 1 で77年10月に他の2倍以上の一次生産量を示したこと、St. 9 で12月と7月に他水域の2倍近い一次生産量を示したことが挙げられる。年間を通じて高浜入から湖心へ、土浦入から湖心へと向かう一次生産量のこう配がみられた。St. 1 は変動が激しく、8月に最大の $27 \text{ gO}_2 / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$ の総生産量を示し、7月、8月、9月、11月および12月にはSt. 2 での総生産量を上回っていた。他の月はSt. 2 での総生産が最大となることが多かった。St. 9 は年間を通してクロロフィル a 量と総生産量が少なく、 0.5 から $5.9 \text{ gO}_2 / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$ の間を変動していた。St. 6 またはSt. 7 とSt. 4 は水域を異にするものの、類似した生産特性を示した。クロロフィル a 量あたりの総生産量は12月から2月にかけては 14 から $50 \text{ mgO}_2 / (\text{mg chl. } a \cdot \text{h})$ また他の月は 50 から $100 \text{ mgO}_2 / (\text{mg chl. } a \cdot \text{h})$ の値を示し、特に夏だから高いということはなかった。

4. 考察

高浜入湾奥部での一次生産量の調査の結果、純生産の年平均値としてSt. 1 について $0.32 \text{ gO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、またSt. 2' について $0.70 \text{ gO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ が得られた。前田ら (1974) は ^{14}C を用いてクロロフィル法により7、8月の生産量として $2.2 \text{ gC} / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (O_2 に換算して $5.9 \text{ gO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$) を求めた。本調査ではこの値より小さく、St. 1 の8月の生産量 $6.2 \text{ gO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ が唯一近い値となった。そのときのクロロフィル a 濃度は 390 mg/m^3 で、前田らの観察した値の倍以上を示している。一方手塚ら (1975) はクロロフィル法により湖心部で夏に $5.8 \text{ gO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ の純生産値を求めているが、1972年8月には酸素法で総生産 $6.59 \text{ gO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、呼吸 $6.17 \text{ gO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ および純生産 $0.42 \text{ gO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ という値を得ている(手塚ら, 1973)。少なくとも同じ酸素法で比較する限り、高浜入での平均総生産 7.0 ないし $7.5 \text{ gO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、平均呼吸 6.0 ないし $7.2 \text{ gO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ および平均純生産 0.3 ないし $0.7 \text{ gO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ という値は妥当な値であるといえよう。

冬期に水深 1 m での総生産量が表層での総生産量を上回っていた(図2, 図3)。この期間はSt. 1

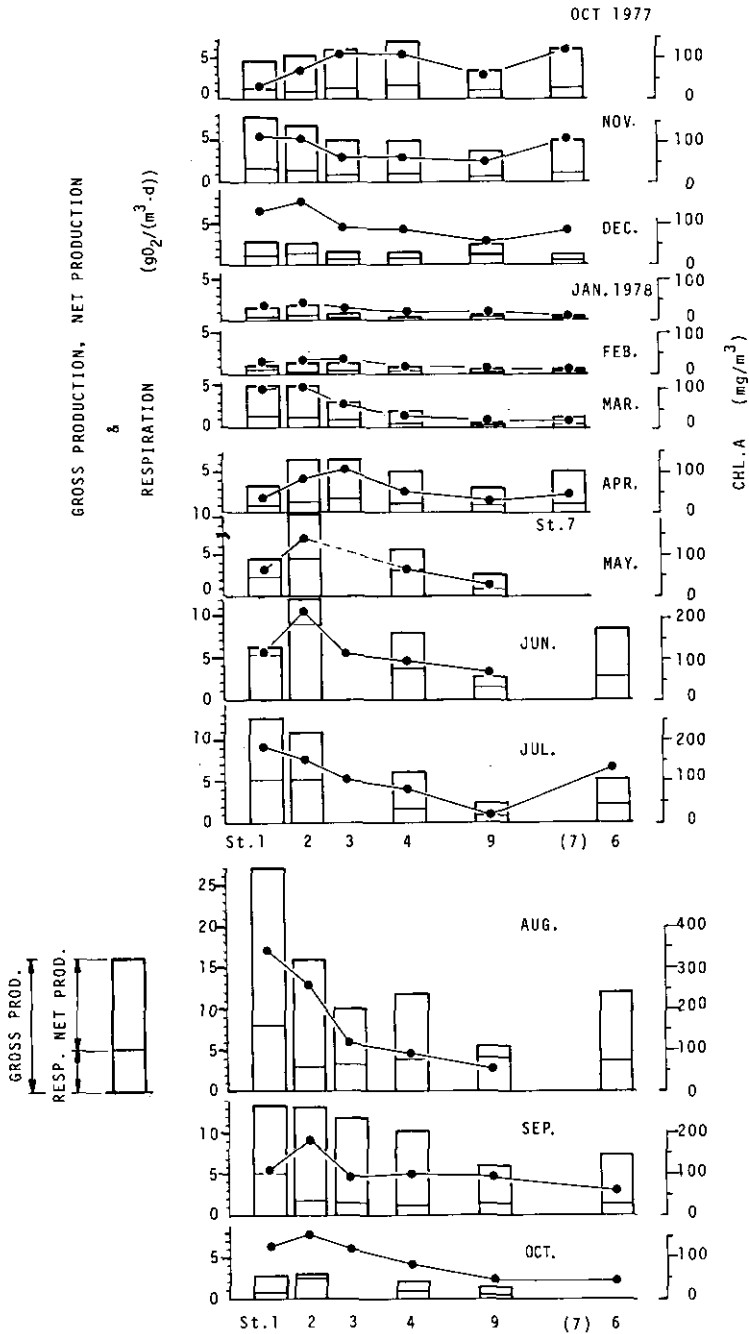


図8 湖の表層から採取し持ち帰った試料の研究所の池に置いて測定した場合の一次生産力

Fig. 8 Primary productivity of the samples taken from the surface of the lake and measured at an outdoor pond in the institute after transportation

では1月から3月まで、St. 2' では12月から3月までで特にSt. 2' では2月に水深2mのところ純生産量の極大がみられた。高浜入では表層のプランクトン群集はこの時期に強光阻害を受けていることが推測される。例えば2月22日の昼の水中照度はSt. 1で表層55klx、1m水深で12klxまたはSt. 2'では表層で60klx、1m水深で16klx、2m水深で6klxであった。すでに湖心部の試水については、光一光合成曲線より20klxを超えると阻害を受けることが報告されている(前田ら, 1974; 手塚ら, 1975; 相崎, 1977)。手塚ら(1975)によれば、2月から6月にわたって強光阻害がみられ、特に2月、3月に阻害が大きいという。また生産量の深度分布については5月、8月、11月および2月でのいずれの調査とも水深1mでの総生産が表層でのそれを上回っていた(手塚ら, 1975)。一方高浜入では6月から10月までは表層に総生産の最適域が集中し、特にSt. 1で顕著であった。今後は藻類の種組成の季節変動を量的には握し、また種別の光合成活性を求めておくことが必要であろう。

夏期の高浜入の藻類は*Anabaena* sp.と*Microcystis* sp.が優占しており、強光阻害は全く認められなかった。St. 1'での7月末の有光層は約0.5mであったが、1.5m水深の無光層においては表層光の 10^{-6} ~ 10^{-4} の光量しか到達していなかったはずなのに、 $2\text{ mgO}_2/(\text{mg chl. a} \cdot \text{h})$ の光合成を認めることができた。弱光下でのラン藻類の光合成活性と、藻類密度の高い時点での透過光の波長特性および光合成に寄与する波長域等を調べていくことが今後必要と考えられる。

採水して持ち帰った試水で測定された一次生産量にどれだけの信頼性が置けるかは検討の余地がある。全域調査の場合St. 9, 1および2の試水は午前中に採水され、持ち帰って測定を開始するまでに少なくとも8時間、翌日開始の場合24時間経過することになる。生産力活性の低下に地点間の差異が無いという保証は無いので、その補正のためには、各試水の藻類の種組成と種ごとの活性、生理条件による活性の違いを調べておく必要がある。

表1の高浜入の結果からは、現場での測定と持ち帰ったのちの測定とでは10月と4月に持ち帰った試水に総生産の減少がみられた他は大きな違いを示していなかった。また呼吸量には大きな差異が認められなかった。したがって、試水を持ち帰って一次生産力を調べる方法は、地点間の活性の差を見つけ出すためには有効な方法であるといえよう。

1974年の2月と9月の調査から、霞ヶ浦の植物プランクトンの光合成活性には地点間の差が認められないことが既に報告されている(手塚ら, 1975)。今回の調査から全域の一次生産特性には大きな地点差がみられず、4月、7月および12月にある地点で特性に違いがみられただけであった。また前田(1974)によれば、霞ヶ浦の表層と深層の植物プランクトンはほぼ同じ光合成活性を持つという。クロロフィル量として定量される植物プランクトンの現存量と水中照度のデータから生産量を求めるクロロフィル法は、一般に一次生産を推定するには良い方法ではない(Hall et al., 1975)。しかし霞ヶ浦のような上下層の良く混合された水界では、植物プランクトンの水域分布をは握し、水域別の特性をは握するならば使用可能であると考えられる。もちろん代表水域のいくつかについて一次生産量の測定データの積み上げから評価をし直していくことが肝要である。

明暗ピンの溶存酸素の一昼夜連続測定を行った結果、酸素法の問題点が見いだされた。図7より、

明所から採った試水ほど高い呼吸速度を示し、夜間の呼吸速度 $0.7 \text{ mgO}_2/(\text{mg chl. } a \cdot \text{h})$ に比べて昼間は約 $5 \text{ mgO}_2/(\text{mg chl. } a \cdot \text{h})$ と高い値を示していたことが分る。28日の13時と、24時に採水、垂下した一連の暗ビン内の一定時間後の溶存酸素量の減少を図9に示した。これによると明所で調製した暗ビンは1時間経過後には約 $0.7 \text{ mgO}_2/(\text{mg chl. } a \cdot \text{h})$ の呼吸速度を保っていることが分り、これは夜間に採水、垂下した暗ビン内の呼吸速度にほぼ等しい値である。そして、昼間の暗ビン調製後1時間の間に5ないし $6.5 \text{ mgO}_2/(\text{mg chl. } a \cdot \text{h})$ だけ余分に酸素が消費されている。明暗の切り換えから1時間の間に起る現象としては、光呼吸の中断後一定時間酸素の消費が継続すること、基質の代謝が一定時間継続することなどが考えられる。光呼吸は酸素分圧が高く、二酸化炭素分圧が低く、照度が高く、温度が高かつpHが高くなると促進されるという(Parsons et al., 1977)。昼の暗ビン調製時にはこのすべての条件が満たされていたわけだが、果たして光呼吸がラン藻において行われており、またもし存在していたとしてどれくらいの大きさであるかは現時点では不明である。また基質の代謝についても可能性があるというだけである。1回の暗ビン調製時に暗呼吸の7ないし9倍もの酸素消

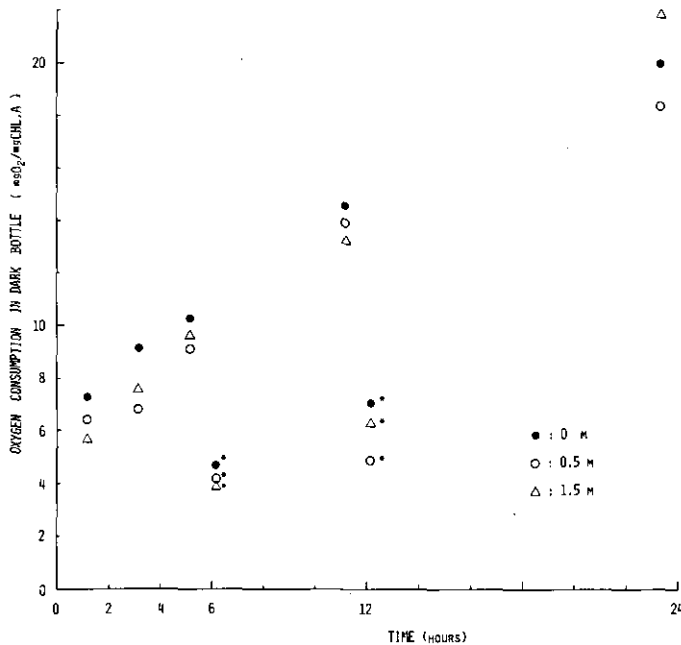


図9 各水深につき、異なる時間を経たのちの暗ビン内で測定された酸素消費量。一連のビン(昼のシリーズ)は7月28日の午後1時につき、他の一連のビン(夜のシリーズ)は同じ日の真夜中につきした。黒丸は0m水深、中ぬき丸は0.5m水深および三角は1.5m水深を示す。星印は夜のシリーズを示す。

Fig. 9 Oxygen consumption in dark bottles measured at different times after suspending at various depth. A series of bottles (day series) was suspended at 1 p.m. on 28th July and another series (night series) was suspended at midnight on the same day. Solid circle indicates 0 meter deep, open circle indicates 0.5 meters deep and triangle indicates 1.5 meters deep. Asterisk shows the night series of the experiment.

費が起っていたとするならば、夏期の St. 1' での呼吸量、総生産量は再検討を要する。3.2 で求めた呼吸量は昼は 2 時間ごとに調製した暗ピンの酸素消費量を集計したものであるからである。呼吸速度を $0.7 \text{ mgO}_2/(\text{mg chl} \cdot \text{a} \cdot \text{h})$ として 7 月 28, 29 日の 1 日の呼吸量を求め直すと $12.2 \text{ gO}_2/\text{m}^2$ となり、図 3 に示した値 $38.4 \text{ gO}_2/\text{m}^2$ の $1/3$ 以下となる。

光呼吸を総生産に含めるか否かについては現在まだ議論があるが、もし含めないとしたならば、暗ピンを基にした呼吸量、総生産量は光呼吸の分だけ過大に見積られることになるはずで、この点については今後の検討課題である。

5. 今後の課題

高浜入湾奥部の純生産が年間を通じて正であった。この結果の解釈法はいろいろある。まず第一に生産量の過大評価ではないかということ。一連の測定はおおむね晴天時に行われた。全天日射量で曇天、雨天時に対する年間の補正を要するし、場合によっては悪天候時の生産量調査を要するであろう。第二に測定の精度である。底質部分でどれだけ的一次生産が、そして呼吸が行われているかは本調査から欠落している。この部分を調べるにより植物プランクトン—細菌群集の生産をは握できる。第三に生産された有機物はどこに行くかということ。高浜入の系外に流出する量と系内でどれだけ量が動物プランクトン群集により摂取、分解されていくか、また底生動物群集により摂取、分解されていくかを調べなくてはならない。

霞ヶ浦の一次生産量をマクロにとらえるためには、クロロフィル法を便利である。いかに精度良く活用していくかは今後の課題の一つである。

6. まとめ

霞ヶ浦高浜入で 1977 年 10 月より 1978 年 10 月まで St. 1 および St. 2' において一次生産量を調査した。純生産の年平均は St. 1 で $0.32 \text{ gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、St. 2' で $0.70 \text{ gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ であった。一次生産量は 2 月に最低で、St. 1 では 7 月に、St. 2' では 8 月に最高となる変動を示した。St. 1 では 1 月から 3 月まで、St. 2' では 12 月から 3 月までの間は表層での総生産が 1 m 水深でのそれより少なかった。これは強光阻害の結果と考えられ、他の月では表層の総生産は最も大であった。

1978 年 7 月 28, 29 日に St. 1' で一次生産量を調査した。調査は日中 2 時間ごとに、夜間は 6 時間ごとに行った。ラン藻類とくに *Anabaena* sp. と *Microcystis* sp. が優占していたこの期間でのクロロフィル *a* 量あたりの総生産量の最大値は 75 klx の照度の表層で $14.5 \text{ mgO}_2/(\text{mg chl} \cdot \text{a} \cdot \text{h})$ であった。このことはこの植物プランクトンに対して強光阻害がなかったことを示唆している。また無光層において光合成が認められた。

2 時間ごとまたは 6 時間ごとの調査から、暗ピン内の酸素消費量は一定ではなく、昼と夜とで顕著に異なることが見いだされた。日中の暗ピン内の著しい酸素の消費は、暗ピン調製時の明から暗への急激な変化によりもたらされたと考えられた。

1977年10月より1978年10月までの間, St. 1, 2, 4, 6 および9 から試水を採取し研究所に持ち帰り一次生産力を測定した。クロロフィル a 量あたりの総生産量は地点間に差異は認められず, 冬には14から50mgO₂/(mg chl. a · h), 他の季節には50から100 mgO₂/(mg chl. a · h) の値を示した。

引用文献

- 相崎守弘(1977): 水質・生物調査資料. 国立公害研究所特別研究成果報告第1号, 資料篇, 1-28.
- HALL, C. A. S. and R. MOLL (1975): Methods of assessing aquatic primary productivity. in LIETH, H. and R. H. WHITTAKER(eds.) Primary Productivity of the Biosphere. Springer-Verlag, New York. 19-53.
- 前田修・岩本伸一・山口征矢(1974): 霞ヶ浦の富栄養化に関する二三の考察. 日本陸水学雑誌, 35, 53-59.
- PARSONS, T. R., M. TAKAHASHI and B. HARGRAVE (1977): Biological Oceanographic Processes, 2nd ed. Pergamon Press, Oxford. 322.
- 手塚泰彦・渡辺義人・林秀剛・相崎守弘・丸山正(1973): 水質と細菌の分布および一次生産, 昭和47年度霞ヶ浦生物調査報告書. 建設省霞ヶ浦工事事務下・水資源開発公団霞ヶ浦開発建設所, 171-191.
- 手塚泰彦・林秀剛・相崎守弘・中島拓男・落合正宏・中本信忠・河野哲郎(1975): 細菌および一次生産. 昭和49年度霞ヶ浦生物調査報告書, 建設省関東地方建設局霞ヶ浦工事事務所, 79-117.

霞ヶ浦高浜入における動物プランクトンの季節消長と水平分布*

森下正彦¹・安野正之¹

Seasonal Change and Horizontal Distribution of Zooplankton
at Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura

Masahiko MORISHITA¹ and Masayuki YASUNO¹

Abstract

1) The following features regarding the zooplankton distribution were reviewed: the horizontal distribution of zooplankton and its seasonal change were studied at Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura from May 1977 to April 1978. In general, zooplankton was most abundant at the innermost part of the bay and decreased gradually toward the center of the lake. This tendency was recognized more clearly for Rotifera. However, the highest density area of zooplankton shifted from the innermost part of the bay to the outermost areas in September in a manner similar to that found for phytoplankton.

2) There was a seasonal prevalence of Rotifera: *Asplanchna* spp. and *Brachionus calyciflorus* exhibited two peaks, one in June and the other in October. Other species of Rotifera, such as *Filinia longiseta* and *Conochiloides coenobasis* showed only one peak in June or July.

3) *Bosmina fatalis* was predominant in August and September when the standing crop of zooplankton reached a maximum. Almost all zooplankton tended to decrease from the autumn and only Copepoda could be found at a low density level in winter.

4) The standing crop of Cladocera correlated with water temperature, chlorophyll-*a*, suspended solids, and total phosphorus. There were also significant positive correlations between the standing crop of Copepoda and these factors except for total phosphorus, whereas no significant correlations were found for the standing crop of Rotifera and these factors.

5) The horizontal distribution of zooplankton was studied in detail by taking samples from gridpoint areas separately 1km. There was a clear difference of density for almost all species between the inner and outer areas of the bay. *Keratella valga* and *Bosmina fatalis* showed an identical mosaic pattern in the distribution, suggesting that specific environmental factors control the formation of the mosaic pattern.

6) The ratio of the carbon content of the zooplankton to that of phytoplankton was approximately 0.1 at St.1, but was exceptionally high (0.3-0.5) at St.3 in July 1977.

* 本論文の一部は第43回日本陸水学会 (1978年7月, 奈良) にて発表した。

1. 国立公害研究所 生物環境部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Environmental Biology Division, The National Institute for Environmental Studies, P.O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.

7) The species of zooplankton in 1976 and 1977 were almost the same. One exception was *Conochiloides coenobasis*, which was rare in 1976, but predominant in the summer of 1977.

1. はじめに

湖沼の富栄養化に伴い水質悪化のために、湖水が上水として利用できなくなったり、水の華が発生して魚の養殖に被害が出るなど、様々な問題が生じている。これに対処するために、湖沼の富栄養化について多くの研究がなされてきたが、研究の焦点は主に栄養塩と植物プランクトンの関係にあり、詳しい議論は (Likens 1971) などで行われている。しかし、水質の変化や植物プランクトンの増加は当然動物プランクトン、さらにはその上の食物連鎖の点で上位にある動物群集にも影響を与えているはずである。

霞ヶ浦においては、夏に *Microcystis* が水の華を形成し、特異な環境を作り出しているが、水の華の形成と動物プランクトンの関係は明らかではない。水質の変化やアオコの出現による植物プランクトン相の変化が、動物プランクトンの種類組成にどのように影響しているか、また、一次生産の増加に対し、動物プランクトンの生産量や現存量は、どの程度増加するかが問題となる。

動物プランクトンの季節消長については数多くの研究がなされているが (Goulden, 1971, Elliott, 1977 など) 植物プランクトンと関連づけて調べたものは Straskraba (1966) など比較的少ない。また Hall et al. (1970) や Shindler (1971) は実験的に実験池や湖に栄養塩を投入してプランクトンや底生生物の変化を調べたが、あまり解析は進んでいないようである。

霞ヶ浦における動物プランクトンの変遷は安野ほか (1978) で述べた。ここでは、まず *Microcystis* が水の華をつくる前期、最盛期、後期における動物プランクトン相を知るために、その季節消長を調べ、次いで植物プランクトンと動物プランクトンの現存量の関係について言及する。

輪虫の同定は日本大学の鈴木実博士に、枝角類の同定は愛知県公害調査センターの田中正明氏にお願いした。調査にあたっては、国立公害研究所水質土壌環境部の相崎守弘博士に御協力いただき、ここで各位に御礼申し上げる。

2. 方法

調査は1977年5月から1978年4月まで行われ、調査地点は高浜入から湖心にかけて、St. 1, St. 2, St. 3, St. 4, St. 5, St. 9の6定点を設けた(図1)。St. 4, St. 5とSt. 9は月に1回、St. 1, St. 2とSt. 3では月に4回(1977年11月以降は月に2回)調査を行った。動物プランクトンは61のバンドーン型採水器を用い水深0.5mで30l採水し、現場にてNXX 13 (94 μ m)のプランクトンネットで濾過した。これにホルマリン原液を5%程度になるように添加し、1日以上自然沈殿させた後に試料の $\frac{1}{10}$ (標本数にして300から600個体)を検鏡した。環境要因の測定値の一部は相崎ほか (1977) を用いた。

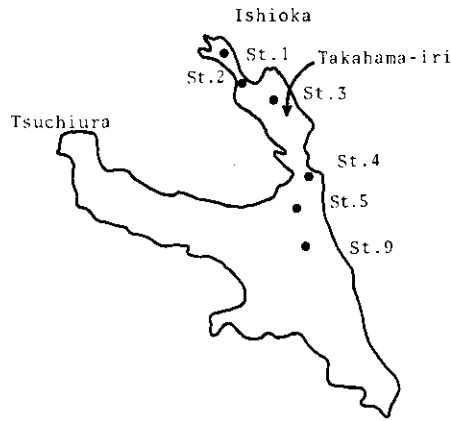


図1 霞ヶ浦と調査地点

Fig.1 Map of Lake Kasumigaura showing sampling stations

動物プランクトンの水平分布の調査は、1977年6月28日に、湾内中央部のSt.3とSt.4を中心として格子状に21地点で行った。調査方法は上と同じである。

3. 輪虫類の季節消長

1976年と1977年における水温とクロロフィル a 量の季節変化を図2と図3に示す。

*Conochiloides coenobasis*は7月にSt.1で209万個体/ m^3 St.4で54万個体に達しているが、多い期間はわずかに20日程度である。同じころに*Synchaeta stylata*が出現する。St.4で一番多く、*Conochiloides*の多いSt.1では全く見つからなかった。

*Conochilus sp.*はほとんど動物プランクトンのいない4月に出現し、St.1で32万個体/ m^3 になる(図4)。

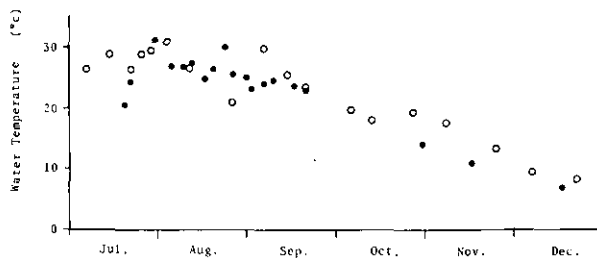


図2 1976年と1977年におけるSt.1の水温の季節変動

Fig.2 Seasonal change of water temperature(°C) at St.1 in 1976(●) and 1977(○)

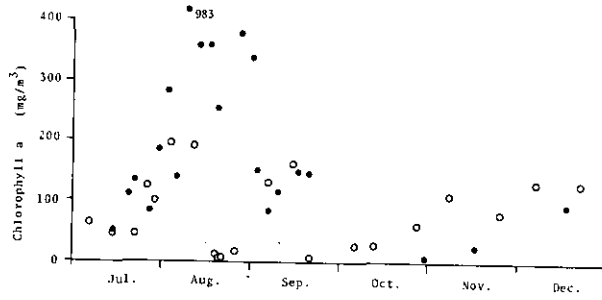


図3 1976年と1977年におけるSt.1のクロロフィルa量の季節変動
 Fig.3 Seasonal change of chlorophyll-a(mg/m³) at St.1 in 1976(●) and 1977(○)

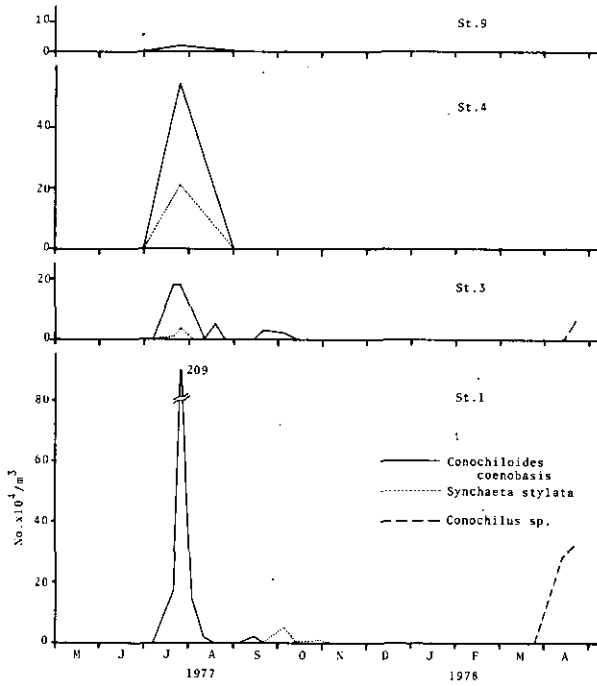


図4 四つの地点における *Conochiloides coenobasis*, *Synchaeta stylata*, *Conochilus sp.* の季節消長

Fig.4 Seasonal change in the abundance of *Conochiloides coenobasis*, *Synchaeta stylata* and *Conochilus sp.* at four stations

*Asplanchna*は、夏には*A. brightwelli*. 春と秋に*A. priodonta*が多いが、同時に出現する場合もあるので*Asplanchna spp.*とした。St.1で6月と10月に多く、夏の間は小さな変動を繰り返す。St.3では6月に増加するが、秋のピークは見られない。St.4とSt.9では出現が遅れ、7月に多くなる。

*Brachionus calyciflorus*も *Asplanchna*と同様で、St.1では春と秋に個体数のピークがあり、St.3, St.4, St.9は7月に多い(図5)。

*Filinia longiseta*はSt.1で6月に13万個体/m³に達し、春に多い種類といえる。他の輪虫が春や秋に多いのに対し、*Keratella valga*は夏に個体数のピークをもつ(図6)。

4. 枝角類の季節消長

夏季の優先種が *Bosmina fatalis*でSt.1では8月に100万個体/m³、9月には80万個体/m³に達する(図7)。St.3ではSt.1と同じように増減し、7月から9月のピークをもつ。図7や他の動物プランクトンのグラフにおいても8月下旬に個体数が減少するのが見られるが、これは雨が長く続き河川から多量の水が流入したためと思われる。*Bosmina longirostris*は春と秋に少数個体が見られた。*Dia-phanosoma brachyurum*はSt.3では6月に多く、出現時期は *Bosmina*に先行する傾向がある。

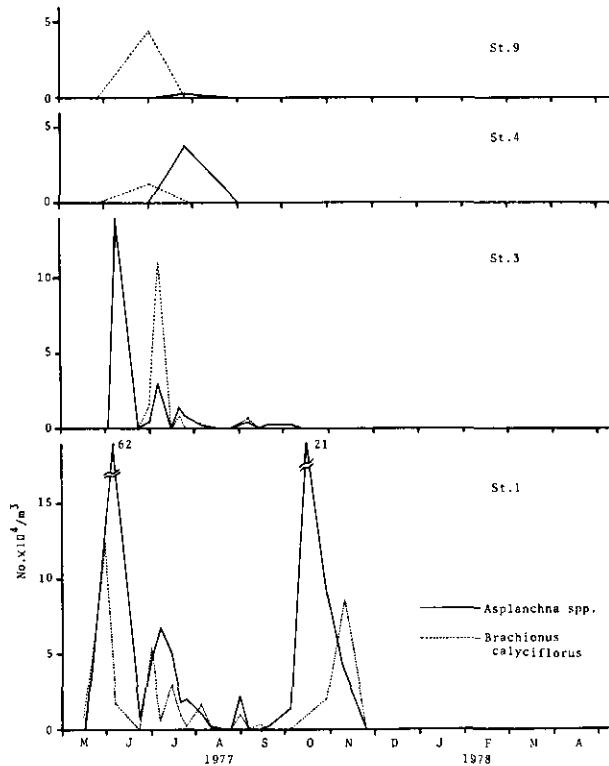


図5 四つの地点における *Asplanchna* spp. と *Brachionus calyciflorus* の個体数の季節消長

Fig. 5 Seasonal change in the abundance of *Asplanchna* spp. and *Brachionus calyciflorus* at four stations

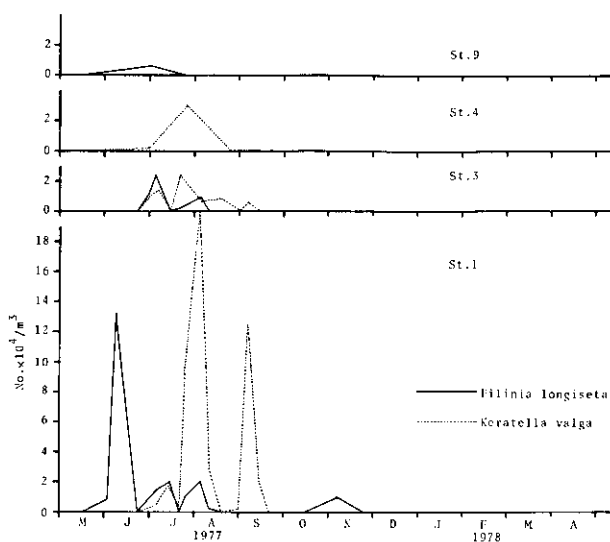


図6 四つの地点における *Filinia longiseta*, *Keratella valga*. の個体数の季節消長
 Fig.6 Seasonal change in the abundance of *Filinia longiseta* and *Keratella valga* at four stations

5. 橈脚類の季節消長

naupliusは通年見られるが、夏季に多く、St.1ではピークが6回あり、St.3では5回（7月のピークを2つの山が重なったものと考えれば6回）ある。copepodidはnaupliusの個体数のほぼ5分の1が存在する。夏のCalanoida copepodidは *Eodiaptomus japonicus* の copepodid と考えられ、図8によると、St.1では4回、St.3で3回ピークが見られる。また、図9で成体の消長が4回あるため、*Eodiaptomus* はSt.1やSt.3で年4世代を繰り返している。6月から11月の6か月間に4世代を送ると考えると、一世代は平均45日になる。図8のCyclopidaeは主に *Mesocyclops leuckarti*, *Thermocyclops hyalinus* と *T. taikokuensis* である。冬の優先種は *Cyclops vicinus* で、他に *Pseudodiaptomus inopinatus* が少数個体見られ、冬期はこの2種に限られる。

6. 動物プランクトンの季節消長と環境要因との関係

倉沢 (1971) に従い、動物プランクトンのデータを 1 m^3 あたりの乾重量に換算し、これで示された現存量と水温、クロロフィルa量 (Chl. a), 浮遊懸濁物量 (SS), 硝酸態窒素量 ($\text{NO}_3\text{-N}$), 全リン量 (T-P) との相関関係を調べた。結果は表1に示す。重相関係数は、枝角類で $R=0.765$ 橈脚類 $R=0.666$, 全動物プランクトン $R=0.783$ で有意な関係が認められたが、輪虫類では、 $R=0.333$ で有意な関係が認められなかった。

これは水温が高く、クロロフィルa量やSS量の多い夏に枝角類や橈脚類が増加することを反映して

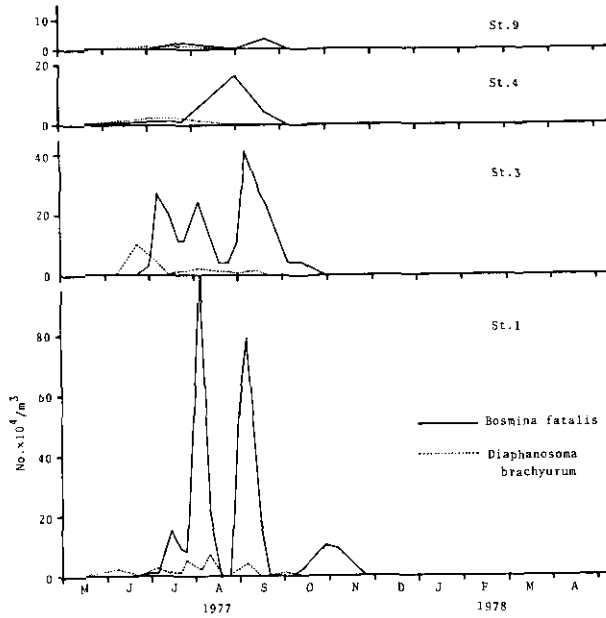


図7 四つの地点における *Bosmina fatalis* と *Diaphanosoma brachyurum* の
個体数の季節消長

Fig. 7. Seasonal change in the abundance of *Bosmina fatalis* and *Diaphanosoma brachyurum* at four stations

表1 水温, クロロフィル a 量, 浮遊懸濁物量, 硝酸塩, 全リンと輪虫類,
枝角類, 橈脚類, 全動物プランクトンの単相関係数

Table 1. Correlation coefficients for water temperature (Temp., °C), chlorophyll-a
(Chl. a, µg/l), suspended solids (SS, mg/l), nitrate nitrogen (NO₃-N, mg/
l) and total phosphorus (T-P, mg/l) with Rotifera, Cladocera, Copepoda
and total zooplankton (mg/m³)

	Chl. a	SS	NO ₃ -N	T-P	Rotifera	Cladocera	Copepoda	Total Zooplankton
Temp.	0.333*	0.343*	-0.030	0.401**	0.059	0.616**	0.616**	0.678**
Chl. a		0.793**	-0.006	0.840**	0.260	0.507**	0.391**	0.579**
SS			0.158	0.745**	0.168	0.567**	0.282	0.512**
NO ₃ -N				0.010	0.090	-0.159	-0.151	-0.112
T-P					0.169	0.582**	0.375	0.580**

** p < 0.01

* p < 0.05

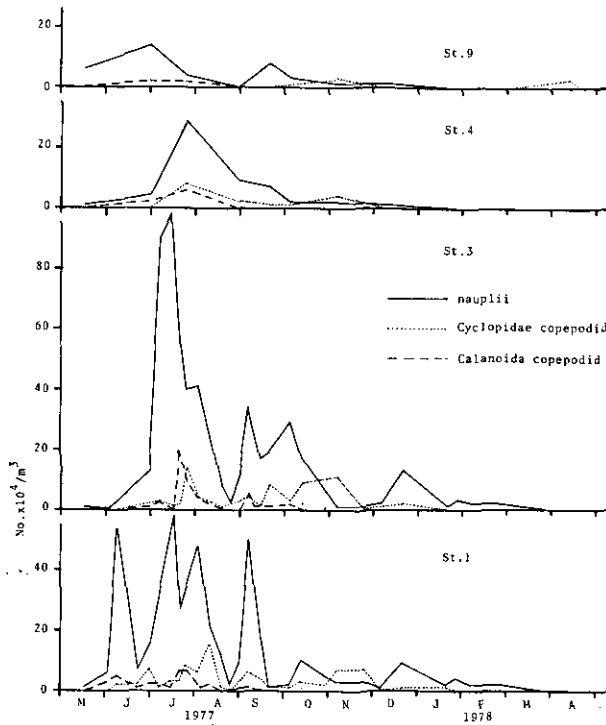


図8 四つの地点におけるnauplii と Cyclopidae copepodid と Calanoida copepodid の個体数の季節消長

Fig.8. Seasonal change in the abundance of nauplii, Cyclopidae copepodid and Calanoida copepodid at four stations

表2 水温、クロロフィル量、浮遊懸濁物量、硝酸塩、全リンと輪虫類、橈脚類、全動物プランクトンの偏相関係数

Table 2. Partial correlation coefficients for water temperature (Temp., °C), chlorophyll-a (Chl.a, µg/l), suspended solids (SS, mg/l), nitrate nitrogen (NO₃-N, mg/l) and total phosphorus (T-P, mg/l) with Rotifera, Cladocera, Copepoda and total zooplankton (mg/m³)

	Rotifera	Cladocera	Copepoda	Total Zooplankton
Temp.	-0.008	0.516**	0.564**	0.609**
Chl.a	0.277	-0.119	0.212	0.210
SS	-0.151	0.326*	-0.106	0.051
NO ₃ -N	0.150	-0.300	-0.140	-0.158
T-P	-0.052	0.202	-0.021	0.076

** p < 0.01

* p < 0.05

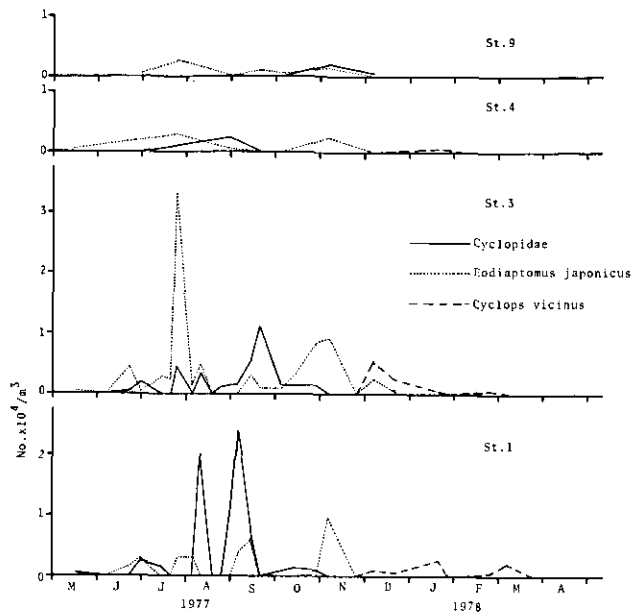


図9 四つの地点における Cyclopidae, *Eodiaptomus japonicus*, *Cyclops vicinus* の個体数の季節消長

Fig. 9. Seasonal change in the abundance Cyclopidae, *Eodiaptomus japonicus* and *Cyclops vicinus* at four stations

いる。逆に輪虫類は春秋に多く、水温が高いことやクロロフィル a 量が多いことは必ずしも対応しないためにRの値が小さいのであろう。単相関でみると、クロロフィル a 量、SS、T-Pの間に高い相関があり、これら三つと水温の間にも相関があるので、結局、全動物プランクトンと枝角類は水温、クロロフィル a 量、SS、T-Pと相関があり、橈脚類は水温、クロロフィル a 量、T-Pと相関があった。全動物プランクトンとクロロフィル a 量、水温の相関図は図10、11に示す。そして偏相関をとると、枝角類と有意な関係にあるのは水温とSSで、橈脚類と全動物プランクトンは水温とだけ有意な関係があった(表2)。

7. 動物プランクトンの水平分布

Asplanchna spp. は分布が高浜入の奥に限られ、湾内中央部ではほとんど見いだせない。図12-Aのように最奥部にいたものが出口に向かう水の流れて押し出されたように見える。*Brachionus calyciflorus* は北岸に少ないところもあるが湾内では一様に分布している(図12-B)。*Keratella valga* と *Bosmina fatalis* は奥部から北岸にかけて多いが、図12-C, Dに示すようにかなり入り組んだ分布をするにもかかわらず、そのパターンにはよく一致している。ここに掲げなかったが、*Filinia longisetata* や *Keratella cochlearis* もこれと同じような分布を示した。*Diaphanosoma brachyurum* は奥部

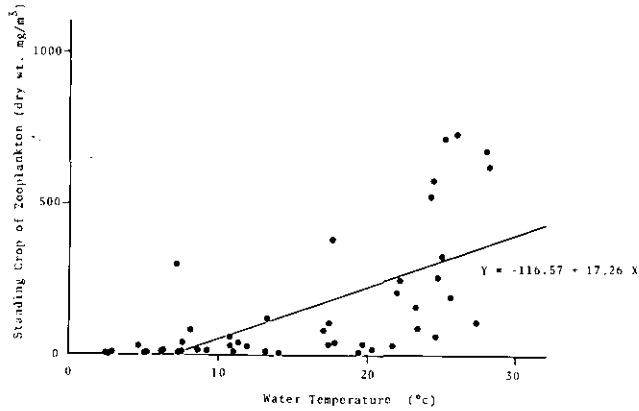


図10 水温と動物プランクトン現存量との相関図

Fig. 10. Relation of water temperature (°C) to the standing crop of zooplankton (dry wt. mg/m³)

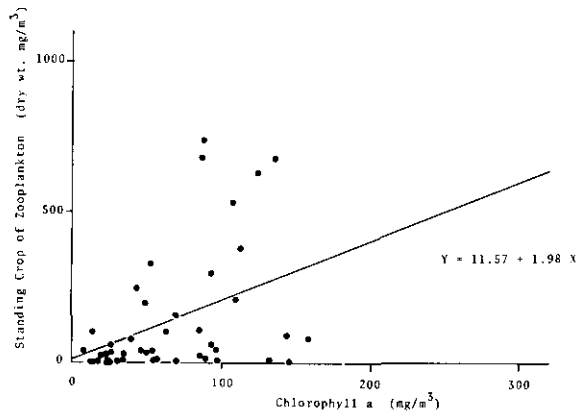


図11 クロロフィル a 量と動物プランクトン現存量との相関図

Fig. 11. Relation of chlorophyll-a (mg/m³) to the standing crop of zooplankton (dry wt. mg/m³)

と出口に多く、湾内中央部で少ない(図12-E)。北岸と出口のところはそれぞれ河川が流入しており、その影響があるのかも知れない。naupliusはこの時期に個体数が一番多いが、湾の外では減少する(図12-F) これと同じような分布の仕方をする種類に *Brachionus diversicornis* があった。以上の結果から分布様式をまとめてみると、高浜入の奥から出口に向って個体数の減少するもので、密度分布の大きな差が湾内にある種類は、*Asplanchna spp.*, *Keratella cochlearis*, *K. valga*, *Filinia longiseta*, *Bosmina fatalis* で、密度分布が湾の出口を境にして大きく違う種類は *Brachionus diversicornis* と nauplius であった。これに対し、高浜入の奥から出口に向かって個体数の増加する種は認められなかった。

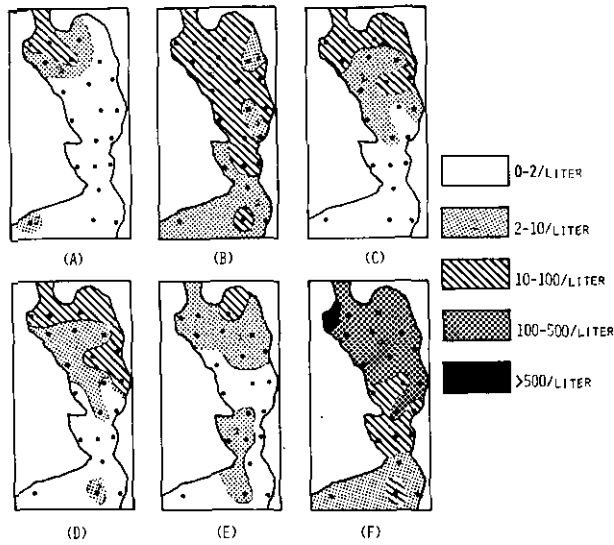


図12 1977年6月28日の高浜入における動物プランクトンの水平分布
 A) *Asplanchna* spp. B) *Brachionus calyciflorus* C) *Keratella valga*
 D) *Bosmina fatalis* E) *Diaphanosoma brachyurum* F) *nauplius*
 Fig. 12. Distribution of zooplankton in Takahamairi Bay on 28th Jun. 1977 A) *Asplanchna* spp.
 B) *Brachionus calyciflorus* C) *Keratella valga* D) *Bosmina fatalis* E) *Diaphanosoma*
brachyurum F) *nauplius*

8. 動物プランクトンの現存量と植物プランクトンの現存量との関係

動物プランクトンは、先に述べたように一般的には高浜入の最奥部から出口に向って個体数が減少するが、1976年9月には密度の高い部分が中央部に移り、10月には出口で一番多かった。また1977年は9月と10月ともに中央部で密度が高かった。クロロフィル a 量は9月、10月に中央部や出口で多く、動物プランクトンの変動とよく一致した(図13)。

また採集地点別に見ると、St.1では動物プランクトン量の変化が大きいSt.4やSt.5では変動幅は小さい。クロロフィル a も同様にSt.1では変動が大きいSt.4とSt.5では小さく、変動の大きさも動物プランクトンと植物プランクトンで似ていた。

*Microcystis*による水の華の出現によって、植物プランクトン量は激増するが、動物プランクトンの現存量はこれにどのように対応するか問題である。動物プランクトンは乾重量に0.5をかけて炭素量を求め(Waters 1977)、植物プランクトンはクロロフィル a 量に45.3をかけて炭素量に換算し(Mori 1975)、炭素量で動物プランクトンと植物プランクトンの現存量を比較した(図14)。動物プランクトンと植物プランクトンの現存量の比(以下Z/P比とする)は、St.1においてはおよそ0.1で、植物プランクトンの現存量に連動して変化した。これは、植物プランクトンに増減があると動物プランク

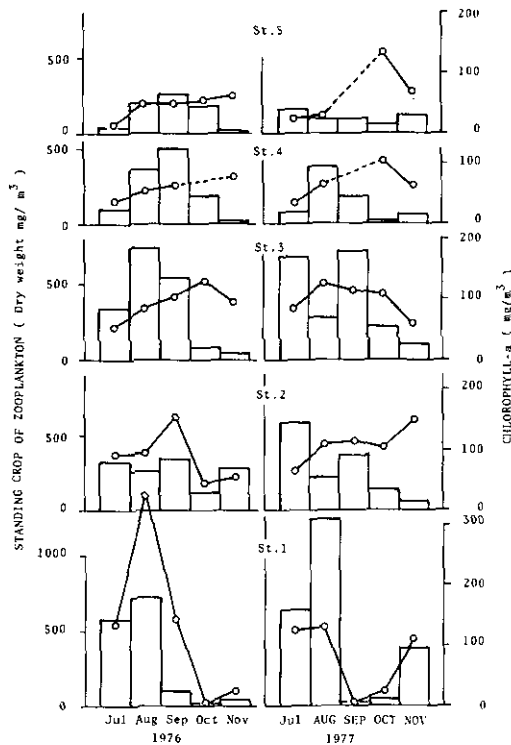


図13 五つの地点における1976年と1977年の夏から秋にかけての動物プランクトン現存量とクロロフィルa量の変化

棒図表は動物プランクトン現存量を示し、白丸はクロロフィルa量を示す

Fig. 13. Change in standing crop of zooplankton and chlorophyll-a at five stations from the summer to the autumn both in 1976 and 1977. Histogram shows standing crop of zooplankton(dry wt. mg/m³)

Open circles indicate chlorophyll-a(mg/m³)

トンの現存量は増幅されて変化することを示している。

St.3ではアオコの出現以前の7月にZ/P比が0.37から0.49と高い値を示し、アオコの出現する7月の終わりには0.1以下に減少したがSt.3で得られた高い値のはっきりした原因は不明である。Mori (1975) は琵琶湖において窒素量で現存量を算定し、Z/P比は1970年7月は0.333で、12月は0.740の値を得ている。また諏訪湖では炭素量で算定するとZ/P比は0.073で、窒素量では0.105 (Sakamoto et al., 1975) で、霞ヶ浦に似ている。

9. 考察

霞ヶ浦高浜入は湖心から奥部にかけて栄養塩の濃度が高くなり、植物プランクトン量も増加する(相崎ほか, 1977)。このように同じ湖の中で富栄養化の状態が異なっているの、それぞれの場所におけ

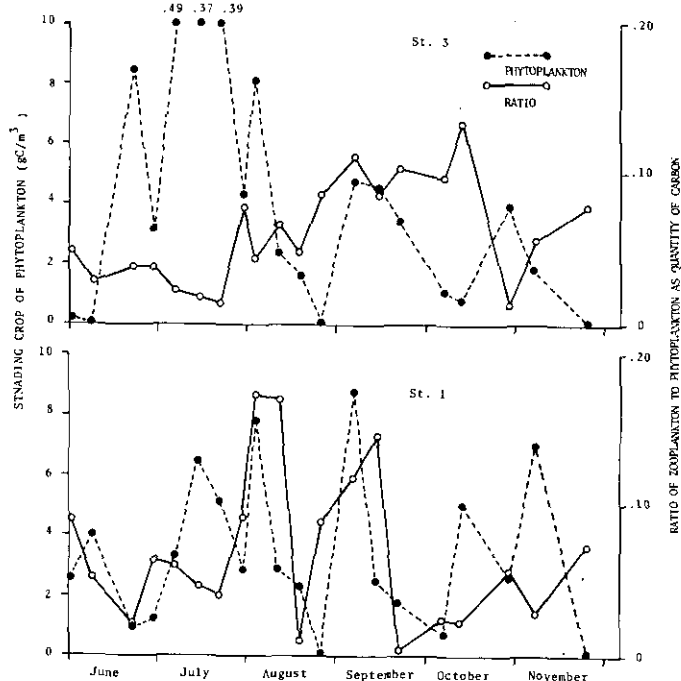


図14 St.1とSt.3における植物プランクトン現存量と動物プランクトンの現存量比の季節変動

Fig 14 Seasonal change in standing crop of phytoplankton and ratio of zooplankton to phytoplankton as quantity of carbon at St. 1 and St. 3

る動物プランクトンや環境要因の比較によって、富栄養化が動物プランクトンにどのような影響を与えているか調べるのに有効であると考えられる。

1976年の動物プランクトンの季節消長(安野ほか, 1977)と1977年のデータを比較してみると表3では1976年7月は *Brachionus calyciflorus* が多いのに比べ、1977年は *Conochiloides coenobasis* と *Bosmina fatalis* が多い。8月の *Bosmina* の密度は変わらない。1976年12月に *Polyarthra trigla* と *Asplanchna spp.* *Brachionus calyciflorus* がそれぞれ、71万、9万、116万個体/m³に達したが、1977年は10月に *Asplanchna spp.* が8.9万個体/m³、11月に *Brachionus calyciflorus* が8.6万個体/m³に増加しただけで大きな増加は見られなかった。1976年と1977年のクロロフィルa量と水温を比較すると(図-2,3)、7月のクロロフィルa量は変わりなく、温度は、1976年7月19日以前のデータはないが、この図からは1977年の方が7月の温度が高いと予想できる。このために1977年では高い水温に適しているといわれる *Bosmina fatalis* が7月から増加したと考えられる。10月から12月までは水温とクロロフィルa量はともに1977年の方が高い。このことから1977年の環境要因は動物プランクトンの生産に好適と考えられるが、むしろ逆に1976年の方が輪虫は多かった。*Asplanchna spp.* と *Brachi-*

*onus calyciflorus*はよく同じ時期に出現しているが、これは環境要求が似ているためか、捕食者—被捕食者の関係が密接であるかどちらかであろう。その他の種類の季節消長は1976年と1977年はほぼ同じであった。

また動物プランクトンの水平分布の調査で明らかになったことで、共通していることは高浜入の奥から出口に向かって個体数が減少していることである。この翌日にあたる6月29日に行われた調査では3地点の環境要因は下記のとおりであった。

	高浜入奥部	中央部	出口
水 温(℃)	23.4	22.2	21.9
溶存酸素(ppm)	9.2	8.4	7.8
pH	7.9	8.1	8.0
全リン(mg/l)	0.087	0.063	0.059
硝酸態窒素(mg/l)	0.355	0.013	0.003>
クロロフィルa量(μg/l)	62	43	35
浮遊懸濁物(mg/l)	12.0	10.9	10.7

これからクロロフィルa量や環境要因が高浜入の奥部から出口に向かって減少する傾斜のあることが認められる。この傾斜は季節的な違いはあるにせよ、年間を通じてみられ、相崎ほか(1977)にも報告されている。動物プランクトンは、おおまかに見ればこれらの傾斜に対応して減少している。しかしながら、個々の種類についてみると、種ごとに特異なモザイクパターンを示しているので、測定された環境要因以外に動物プランクトンの分布に影響を与える要因が考えられる。特に*Keratella v-alga*と*Bosmina fatalis*に見られたように分布のパターンが一致しているのは、二種が何らかの関係をもち同時に出現するのか、あるいは環境自体にそのようなモザイクパターンが存在するのかどちらかであると考えられる。この場合、後者である可能性が大きく、詳細な場の特性について明らかにすることが今後の課題であろう。

霞ヶ浦と同じような富栄養湖である諏訪湖の動物プランクトンの種類組成と比較してみる。霞ヶ浦では*Microcystis*の多い8月、9月には*Bosmina fatalis*が優占し、6月、10月は*Brachionus calyciflorus*と*Asplanchna spp.*が多く見られ、7月には*Conochiloides coenobasis*が優先した。諏訪湖では、8、9月は*Bosmina fatalis*、*Diaphanosoma brachyurum*が優先し、他の月は輪虫類が優占する状況は霞ヶ浦によく似ている。しかし、霞ヶ浦では、*Keratella cochlearis*や*Polyantra frigla*は優先種にはなっていないが、倉沢ほか(1971)は諏訪湖では通年出現し、8、9月を除いて高い密度で生息すると報告した。概して言えば*Bosmina*の個体数は二つの湖で同じくらいであるが、霞ヶ浦の方が輪虫類は少ない。

10. まとめ

1) 霞ヶ浦高浜入において1977年5月から1978年4月までの間に動物プランクトンの季節消長と水平分布の調査を行った。一般に動物プランクトンは、植物プランクトンの分布と平行して高浜入最奥部で個体数が多く、湖心に向かって減少する傾向を示し、特に輪虫類でその傾向は著しかった。しかしながら9月と10月には湾の中央部や出口の方が多くなった。クロロフィル a 量も同様に変化していることから、動物プランクトンの分布が植物プランクトンの分布に依存している好例と考えられた。

2) 輪虫類では、*Asplanchna* spp. と *Brachionus calyciflorus* は6月と10月に多く、*Filinia longiseta* は6月に *Conochiloides coenobasis* は7月にそれぞれピークがあった。

3) *Bosmina fatalis* は8月から9月にかけて優占し、動物プランクトンの現存量は8月に最大になる。

4) 枝角類の現存量は、水温、クロロフィル a 量、浮遊懸濁物量、全リンと相関があり、橈脚類は、水温、クロロフィル a 量、浮遊懸濁物量と相関があった。輪虫類は、これらのうちどれとも相関は認められなかった。

5) 高浜入湾内において1km間隔で格子状にサンプルをとり、動物プランクトンの水平分布をみると、湾内で個体数が大きく変化するものと、湾の出口を境に内と外で変化する種類に類別された。また *Keratella valga* と *Bosmina fatalis* は密度分布のパターンが一致しており、環境そのものにモザイクパターンがあることを示唆した。

6) 炭素量としての動物プランクトンと植物プランクトンの比を一週間ごとのデータを基にその変動を調べた。St.1でその比はおよそ0.1を中心に変動し、最高は0.18であった。St.3では7月に0.3-0.5を示し、水の華の形成される8月には0.1以下であった。

7) 1976年に少数個体しか見られなかった *Conochiloides coenobasis* が1977年の夏に多数見られた。また1976年に月に *Polyantra trigla* と *Brachionus calyciflorus* が大増殖したが、1977年の冬には、増えなかった。しかし、その他の主な種類については両年で大きな違いはなかった。

表3 St. 1における1976年と1977年の主な動物プランクトンの密度の比較
Table 3. Comparison of the density of the main species of zooplankton at St. 1 in 1976 and 1977

		Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
<i>Conochiloides coenobasis</i>	1976	0	0	0	0	0	0
	1977	166000	18300	17800	2120	0	0
<i>Polyantra trigra</i>	1976	0	3540	0	1740	55100	1160000
	1977	2860	1830	0	26500	3130	0
<i>Asplanchna</i> spp.	1976	85600	3540	1070	2900	23400	88500
	1977	17200	1830	0	89000	41500	0
<i>Brachionus calyciflorus</i>	1976	302000	156000	0	0	73500	713000
	1977	8600	0	2900	19100	86100	0
<i>Bosmina fatalis</i>	1976	0	174000	19300	0	0	0
	1977	97200	223000	178000	99600	86900	0

Number per m³

引用文献

- 相崎守弘ほか(1977) : 霞ヶ浦高浜入の夏期における水質, 生物変動 I. 国立公害研究所特別研究成果報告, 第1号, 67-80.
- Elliott, J. I. (1977) : Seasonal changes in the abundance and distribution of planktonic rotifers in Grasmere (English Lake District). *Freshwat. biol.*, **7**, 147-166.
- Goulden, C. E. (1971) : Environmental control of the abundance and distribution of the Chydorid Cladocera. *Limnol. Oceanogr.*, **16**, 320-331.
- Hall, D. J., et al. (1970) : An experimental approach to the production dynamics and structure of freshwater animal communities. *Limnol. Oceanogr.*, **15**, 839-928.
- 倉沢秀夫ほか(1971) : 諏訪湖のプランクトンの季節変化(1970) I. プランクトンの数と量との優占種の比較. JIBP-PF 諏訪湖生物群集の生産力に関する研究, 経過報告, **3**, 41-53.
- Narita, T. and Mori, S. (1975) : Secondary production of zooplankton. JIBP Synthesis Vol. 10 Productivity of communities in Japanese inland waters. Mori, S. and Yamamoto, G. (ed), 22-25.
- Shindler, D. W. and Novén, B. (1971) : Vertical distribution and seasonal abundance of zooplankton in two shallow lakes of the experimental lake area, North. Ontario. *J. Fish. Res. Bd. Canada*, **28**, 245-256.
- Mori, S. (1975) : Nitrogen metabolism in pelagic ecosystem. JIBP Synthesis, **10**, Mori, S. and Yamamoto, G. (ed), 25-28.
- Sakamoto, M., et al. (1975) : Productivity and nutrient metabolism of communities in Lake Suwa. JIBP Synthesis, **10**, 107-147.
- Tanner, H. A., et al. (1972) : Nutrients and eutrophication-prospects and options for the future. Nutrients and Eutrophication; The limiting-Nutrient controversy. Special symposia, **1**, 297-310.
- Waters, T. S. (1977) : Secondary production in inland waters. *Advances in ecological research*, **10**, MacFadyen, A. (ed) Academic press, 91-164.
- 安野正之ほか(1977) : 霞ヶ浦高浜入における動物プランクトンと底生動物, 国立公害研究所特別研究成果報告, 第1号, 94-107.
- 安野正之ほか(1978) : 霞ヶ浦の動物プランクトンおよび底生動物. 「環境科学」研究報告集 B3-R12-1, 霞ヶ浦とその周辺の自然と人間活動, 129-136.

霞ヶ浦高浜入の底生動物, 特にオオユスリカとアカムシユスリカの分布と季節変動
安野正之¹・菅谷芳雄²・岩熊敏夫¹

Distribution and Seasonal Trend of benthos Population in Lake Kasumigaura,
with special reference to *Chironomus plumosus* and *Tokunagayusurika*
akamusi (Diptera: Chironomidae)

Masayuki YASUNO¹, Yoshio SUGAYA² and Toshio IWAKUMA¹

Abstract

The distribution pattern of benthos, particularly the vertical distribution and life histories of *Tokunagayusurika akamusi* and *Chironomus plumosus* were studied at Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura from November 1976 to October 1978.

The survey based on sampling points of a grid pattern showed an uneven distribution of *C. plumosus*. The density of larvae had a negative correlation with dissolved oxygen content at the lake bottom and a high positive correlation with water depth. However, a clearer relationship was recognized between the larval density and the topography; the dense larval population of *C. plumosus* was found at channels of the bay. Ekman-grab samplings at five stations in Takahamairi Bay over a period of one year also indicated that the channels (St.2 and St.4) were a favorable habitat for almost all benthos, e.g., *C. plumosus*, *Clinotanypus* sp. and *Limnodrilus* sp. In general, the density of benthos was relatively low at St.1 and St.5, the innermost and the outermost of the bay respectively. *Branchiura sowerbyi* was predominant at St.1.

C. plumosus showed a marked peak in the number of larvae in April and May at Sts. 1,2,3 and 4 and a second peak in August only at Sts. 4 and 5. *Clinotanypus* sp. which was an inhabitant of the surface layers of the bottom sediment, increased in July, August and September. *Limnodrilus* sp. increased in the summer, while *Tubifex* sp. was more numerous in the winter.

The emergence of adult *Tokunagayusurika akamusi* was restricted to a one month period from late October to late November. The eggs hatched soon and immature stages developed quickly, reaching 3rd instar larvae in early December and 4th instar larvae at the end of December. Thereafter they began to burrow into deeper layers of the bottom sediment. In March, four months later, all of the larvae became mature and moved below a depth of 20cm.

1. 国立公害研究所 生物環境部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町
Environmental Biology Division, The National Institute for Environmental Studies, P.O. Yatabe,
Ibaraki 300-21, Japan.
2. 国立公害研究所 技術部
Engineering Division, The National Institute for Environmental Studies.

1. はじめに

霞ヶ浦の底生動物については Miyadi (1932) 以来多くの調査がなされてきた。これら最近までの調査は安野他 (1978) に要約されているが、おおまかにいえば、現存量として大きなオオユスリカ (*Chironomus plumosus*) とアカムシユスリカ (*Tokunagayusurika akamusi*) の二種のユスリカに代表される点で諏訪湖 (Yamagishi and Fukuhara, 1971) に類似している。この点富栄養湖の特徴と考えられるが、後者は Yamagishi (1972) が明らかにしたように夏期泥中深く潜って休眠することから散発的な調査では記録されることはない。この研究においても1977年度は普通の湖沼調査に用いられるエックマンバージ採泥器によって調査が行われたためアカムシユスリカは一時期にしか採集されていないが、1978年度の調査は改良を加えた採泥器により行われ、それらの採集効率については別に発表される (菅谷・安野, 未発表)。しかし十分深い泥を採取する点でまだ十分とはいえない。

アカムシユスリカは Tokunaga (1938) によって *Orthocladius* 属に入れられて記載されたが、この属は通常富栄養湖にいないことと、形態から見てもまったく独特であることから Sasa (1978) によって新属 *Tokunagayusurika* が作られた。日本各地にいて富栄養化の進んだ湖沼に多産すると考えられているが、詳細な研究は Yamagishi and Fukuhara (1971) 以外になく、その特殊な生態からも、これから研究されてしかるべきである。

湖沼におけるユスリカおよびイトミミズはその現存量の大きいことから底泥中の有機物の分解、水中への栄養塩の回帰等に直接または泥をほぐすことによる間接的関与など役割は大きいと考えられているが、そのような見地からの研究は以外と少ない。

この研究は、特別研究の一部として霞ヶ浦の一つの入江の部分、高浜入に限って行われ、同入江の物質収支を推しはかることを最終目標としている。

2. 高浜入におけるオオユスリカの分布

高浜入の底生生物からみた特性を明らかにする目的で1977年6月に約1kmの間隔で底泥の採取を行った。通常の15cm×15cmのエックマンバージ採泥器で1採取点四つのサンプルを取った。更に7月に同入江の最奥部14地点で同様の採取を行った。この調査に基づくオオユスリカの分布は図1に示される。高密度の部分3か所で認められる。最も顕著なものは入江の出口のところで狭くなった部分にみられる。更に最奥部からの出口のところでも同じように高密度の部分3か所がみられ、入江の中心部分のやや北側のところにも高密度な分布がみられる。地形に起因する何らかの要因に左右されていると推察することができる。一方密度の低い部分は沿岸に限られている。これらの部分の多くは底は砂質である。

このオオユスリカの分布と各種の要因との相関を調べると、上記のことからうかがえるように水深と高い相関があることがわかった (図2-a)。また底の部分の溶存酸素量とは負の相関が認められる (図2-b)。このことから有機物の堆積量が多い地点との相関が考えられるが、この時の試料については灼熱減量との間であまり明確な関係がみられない (図2-c)。透明度との関係はまったくない。同じ

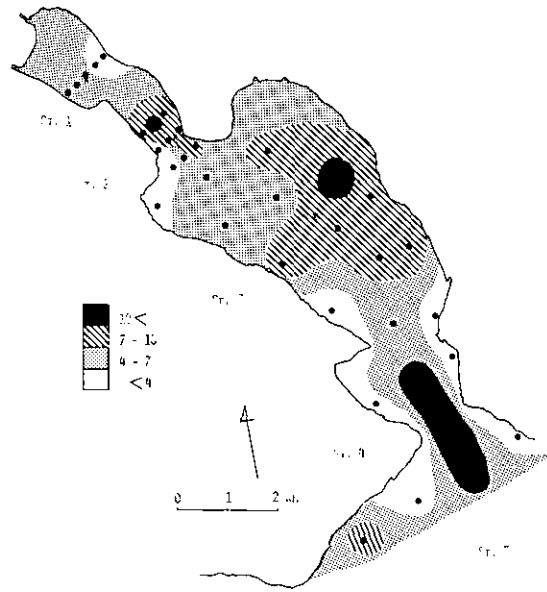


図1 霞ヶ浦高浜入における1977年6月のオオユスリカの分布，点は採集地点を示す

Fig.1 Distribution of *Chironomus plumosus* at Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura in June 1977
Small dots indicate the sampling point

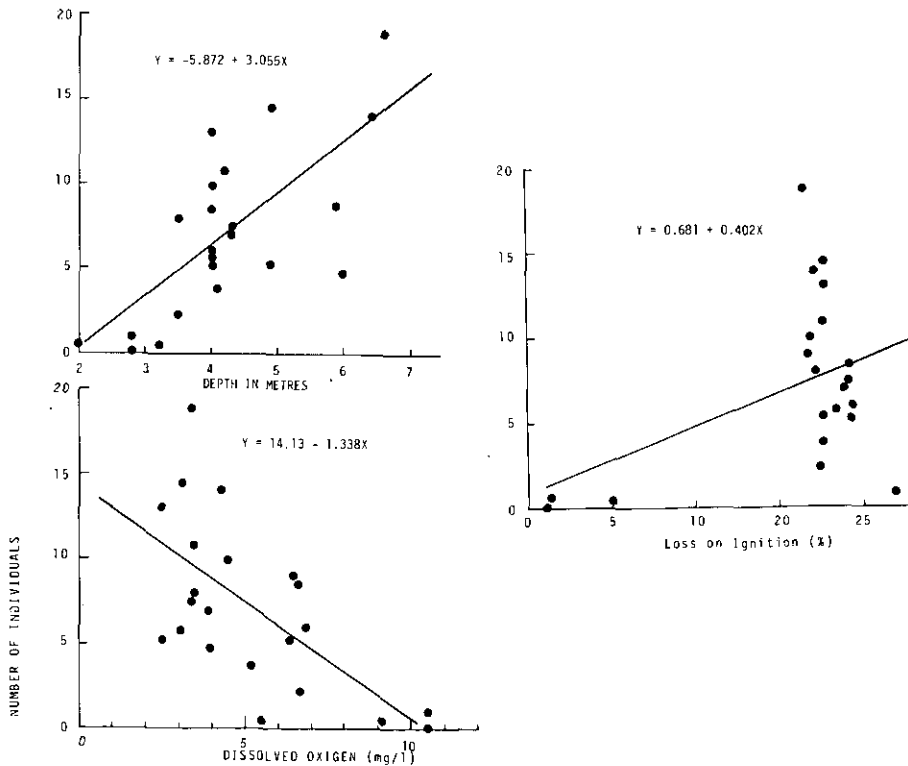


図2 オオユスリカの密度と水深，湖底溶存酸素，灼熱減量との関係

Fig.2 Relations of density of *C. plumosus* to depth of water, dissolved oxygen at bottom and ignition loss of mud

ように表層部分の溶存酸素も地点間の差がないのでここでは計算を行っていない。上記の相関係数は偏相関係数ともども表1に示される。

表1 オオユスリカの密度と各種要因との相関関係
Table 1. Correlation between the densities of *Chironomus plumosus* and various factors
Coefficient of correlation (and partial correlation)

	Dissolved oxygen	Ignition loss	Depth	Transparency
No. of <i>C. plumosus</i>	-.645** (-.446*)	.454* (.049)	.715** (.573**)	-.0013 (-.136)
D.O.		-.456* (-.237)	-.504** (-.011)	-.037 (-.071)
Ignition loss			.462* (.237)	-.087 (-.160)
Depth				.141 (.230)

* P<0.05, ** P<0.01

3. 高浜入におけるオオユスリカの季節変動

1976年11月から図1に示されている入江内の4か点とそのすぐ外1か点でエックマンバージによって採集したオオユスリカ幼虫の数の変動が図3に示されている。非常に顕著なピークが4月ないし5月にどの場所でもみられる。明らかに3月から4月に羽化期がありその次世代の幼虫が多数出現したことを意味する。6月と7月にかけて数が減少するが8月にはSt.4とSt.5の2地点で増加が認められる。特にSt.5では最初のピークが欠けていることは興味深い。高い密度のみられるはSt.2, 3, 4で前記の分布図における高密度区と一致する。最奥部のSt.1および入江の外のSt.5の密度は低い。St.2とSt.4では一年を通して少数個体ながら出現している。

4. *Clinotanypus* sp. の季節消長

この種類のユスリカは個体数もまたバイオマスも大きくはないが少数個体ながらよく出現する。採集される場合も一回のサンプルに多数入ることはない。底泥中では常にごく浅い層のみに見られ、後述するようなオオユスリカ程にも潜ることはない。図4に示されるように概して冬期に少なく、夏期7月から9月にかけて幼虫数は増加する。場所による相違は明確で高浜入最奥部のSt.1では高い密度にならない。最も高い密度はSt.4, 次いでSt.3でSt.2とSt.5はややこれよりも低い。この分布はオオユスリカの分布とよく似ているところがある。

5. イトミミズの季節消長

イトミミズもアカムシユスリカ程でないがかなり深いところまで分布しているため通常のエックマンバージ採泥器では不向きな面もあるが、五つのstationで毎月採取したサンプルから興味ある結果

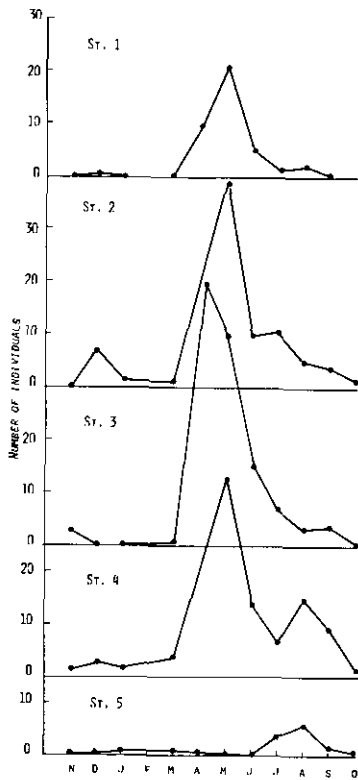


図3 霞ヶ浦高浜入の5地点における採泥器(15cm×15cm)あたりのオオユスリカ幼虫個体数の季節変動

Fig. 3 Seasonal change in the number of larvae of *Chironomus plumosus* per sampler (15cm×15cm) at five different places at Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura

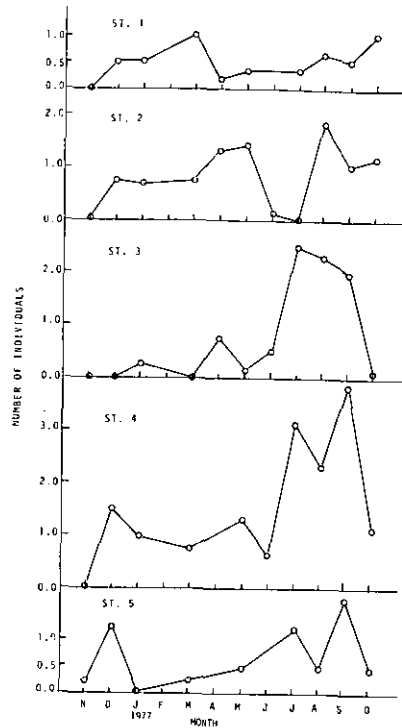


図4 霞ヶ浦高浜入の5地点における採泥量(15cm×15cm)あたりのClinotanypus sp.幼虫個体数の季節変動

Fig. 4 Seasonal change in the number of larvae of *Clinotanypus* sp. per sampler (15cm×15cm) at five different places at Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura

が得られている(図5)。どの場所でも *Limnodrilus* sp. が優先する。この種類はSt. 2 とSt. 4 に多いことはオオユスリカの場合と類似していて興味深い。夏から秋にかけて増加する傾向が認められる。*Tubifex* sp. は冬の時期12月から出現し、どの場所でもほぼ同じ位の密度である。これと違ってエラムミズ、*Branchiura sowerbyi* は高浜入最奥部に偏在し、他では極めて少数見られるにすぎない。*Rhizodrilus* sp. はSt. 2 とSt. 4 に特徴的に出現する。このようにイトミミズの分布もユスリカの分布とほぼ同じような傾向で高浜入内の環境の相違を示している。ただし *Limnodrilus* sp. と *Tubifex* sp. についてはSt. 5、つまり入江のすぐ外の部分は、オオユスリカや *Tanypodinae* にみられる程低密度にはならない。

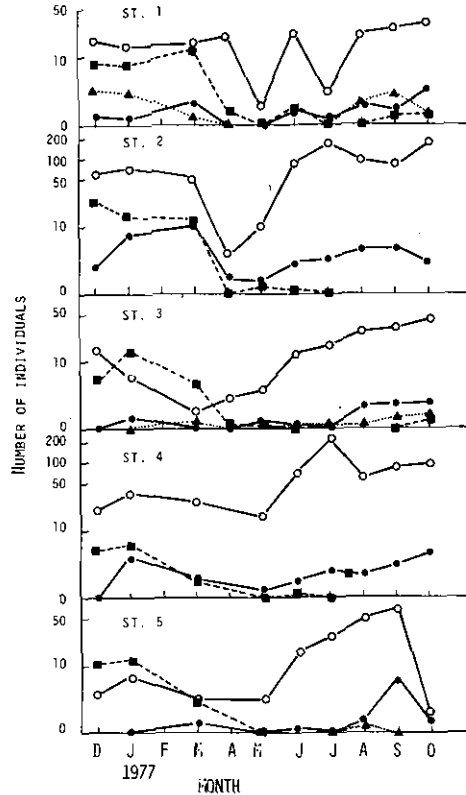


図5 霞ヶ浦高浜入の5地点における採泥器(15cm×15cm)あたりの貧毛類4種の個体数の季節変動

Fig. 5. Seasonal change in the number of four species of Oligochaetae per sampler (15cm×15cm) at five different places at Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura
 Solid line and open circle: *Limnodrilus* sp., Solid line and solid circle: *Rhizodrilus* sp., Broken line: *Tubifex* sp., Dotted line: *Branchiura sowerbyi*

表2 アカムシユスリカ雌雄幼虫の平均湿重量

Table 2. Average fresh weight of larvae of male and female of Tokunagayusurika akamusi

Date	Male	Female
18 May	17.74mg ± 1.06	26.48mg ± 0.97
13 July	17.18 ± 1.20	25.77 ± 1.26
13 Sep.	18.59 ± 0.40	27.89 ± 1.07
9 Oct.	18.44 ± 0.62	26.45 ± 0.68
27 Oct.	18.76 ± 0.69	26.60 ± 0.73

6. オオユスリカとアカムシユスリカの底泥下垂直分布

通常使用されるエックマンバージ採泥器によるとアカムシユスリカは霞ヶ浦では10月から3月までしか採集することがない。Yamagishi (1972) が報告したように泥中に潜るからである。1977年12月から高さ20cmの改良型エックマンバージを、更に1978年5月から高さ40cmのものを用いて採泥を行った。前者は3.2cmごとに層別化し、後者は5cmごとに層別化することができる。

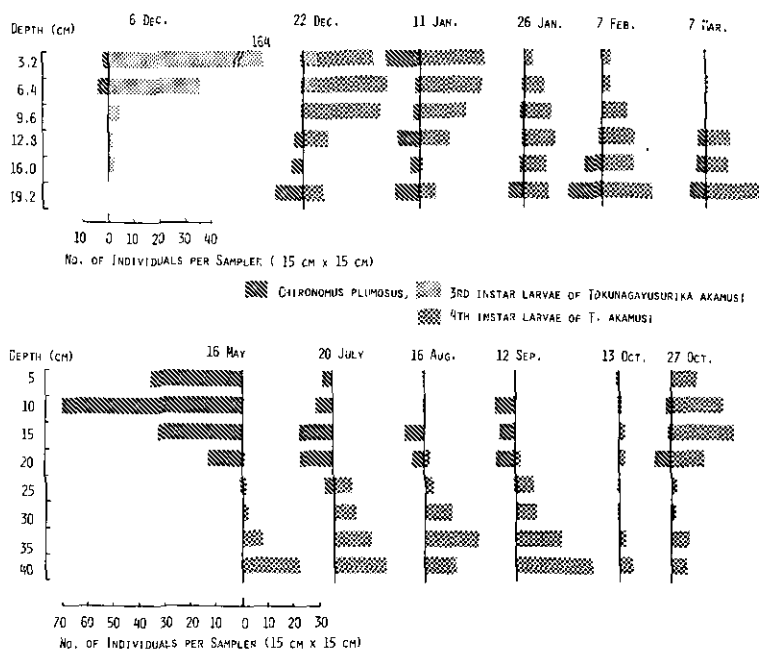


図6 霞ヶ浦高浜入におけるオオユスリカ、アカムシユスリカ幼虫の底泥中の垂直分布の季節変動

Fig. 6 Seasonal change in the vertical distribution of *Chironomus plumosus* and *Tokunagayusurika akamusi* in the bottom sediments of Takahamairi Bay, Lake Kasumigaura

図6にはこれらの採泥器によって採集したアカムシユスリカとオオユスリカの垂直分布が示されている。使用したふるいの大きさ (Mesh 60, フレイ目0.25mm) のため1令幼虫と2令幼虫の大部分はこの標本から抜けてしまっている。12月6日にはアカムシユスリカは大多数は3令幼虫でまだ4令幼虫が出現していない。12月22日には大部分が4令幼虫になっており3令幼虫は少数となる。成虫の羽化のピークが11月中旬であるから1か月余りで終齢に達するわけである。後でのべるようにその後成長が続き体重は増加するが令は変らない。1月中旬まではアカムシユスリカの大部分が底泥の浅い部分にいたが、1月下旬には下層へ潜り始め2月に入ると浅い部分には少なくなってしまう。3月に入るとごく浅い部分にはアカムシユスリカは見られなくなり3月下旬にはエックマンバージ採泥器ではここで使われた改良型も含めて採集不可能になる。5月には底泥中20cmより深い層に分布していて40cm以上深い層に最も多く、この分布は9月中旬まで変わらない。10月13日のサンプル中のユスリカが異常に少なかったが、このころから上層への移行が始まり10月下旬には幼虫の大多数が上層に移り羽化が始まる。

オオユスリカはアカムシユスリカ程深く潜ることはないまでも詳しくみれば垂直方向へ移動することが認められる。5月新しい世代の3令、4令幼虫は浅い層に多いが7月から9月にかけて15cmおよび20cmの深さにみられる。アカムシユスリカはこの時期これよりすぐ下の層にいて明らかに上下層に

分かれている。1月から3月の時期は両種がほぼ同じ層に混在してみられ20cmの層はかなり集中している。

7. アカムシユスリカ幼中の成長と雌雄の分化

12月において2週間の間に1㎡当たりの個体数にすると約8,900の3令幼虫が4令幼虫になると約4,500匹、つまり約50パーセントの個体数の減少がみられるが、4令に達した後は数の上で大きな減少はみられない。Yamagishi (1972) がいうように深い層への移行によって捕食から免れているためと思われる。図7に4令幼虫の体重の変化と深さとの関係が示されている。12月22日体重がより重い幼虫は既により下の層へ移行している。1月26日には第1層と第2層では体重の分布は散らばっているが第4層から第6層目にはほぼ成長しつくした大きさの幼虫が分布している。3月7日には第4層から第6層にしかみられない。そしてその幼虫の大きさは1月26日の同じ層から見出されるものと変わらない。つまり一部の幼虫は1月下旬には既に成熟幼虫に近いまでに成長していることを意味する。

図8はアカムシ幼虫の平均体重の一年間の変化を示している。これからは2月初旬にはほとんどす

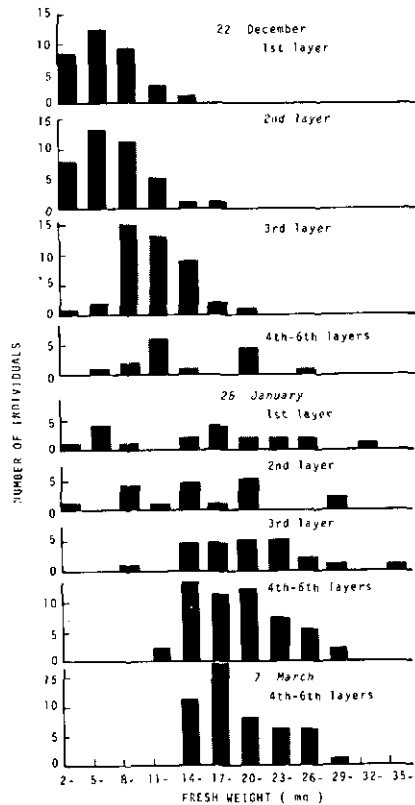


図7 アカムシユスリカ4令幼虫の底泥中での移動

Fig.7 Vertical distribution of 4th instar larvae of *Tokunagayusurika akamusi* in the bottom sediments

すべての幼虫が成熟することがわかる。その後羽化までほとんど重さに変化はない。ちなみに幼虫の頭幅は3月には $0.799\text{mm} \pm 0.074\text{mm}$ 、7月は $0.802\text{mm} \pm 0.0137\text{mm}$ 、10月も $0.798\text{mm} \pm 0.0064\text{mm}$ でまったく同じである。また幼虫期における雌雄の分化も早くから起っていると考えられる。図9に示されるよ

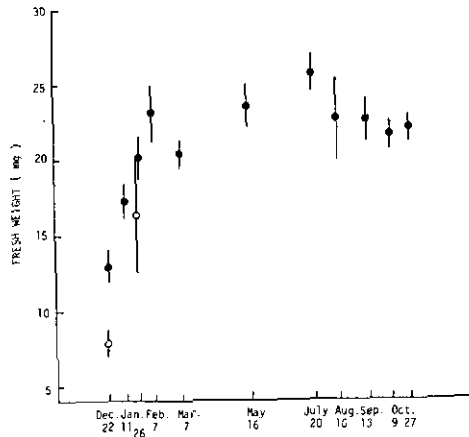


図8 アカムシユスリカ4令幼虫の体重の変化

Fig. 8 Change in the body weight of 4th instar larvae of *Tokunagayusurika akamusi*. Open circle indicates the samples from upper layer of the bottom sediment. Bar indicates the confidence limit of 95 percent.

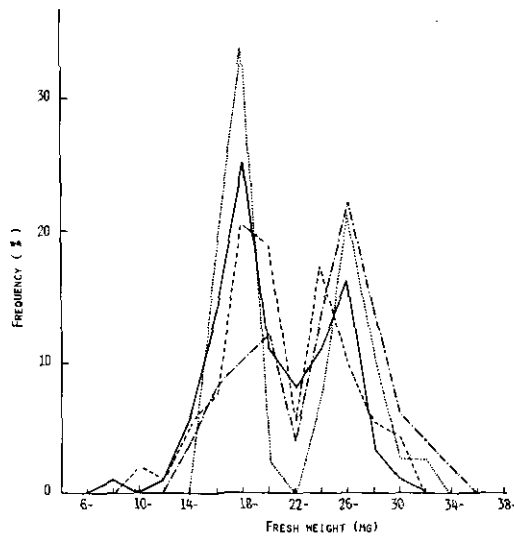


図9 アカムシユスリカ4令幼虫の各月の湿重量の頻度分布

Fig. 9 Frequency distribution of fresh weight of 4th instar larvae of *Tokunagayusurika akamusi* in various months
Chain line: May, Dotted line: September,
Solid line: Early October, Broken line: Late October

うに5月のサンプルで既に体重の分布が二つの山に分かれる。その後のサンプルでも常に二峰性の分布を示すことからこれは明らかに雌雄の差と考えることができる。3月には明確な山がみられないが4令幼虫の成熟の終わった時期に雌雄の分化が起きているわけである。雌雄の体重の平均値は表2に示されるように雄は18mg、雌は26mg程である。この体重の雌雄差は乾燥重量をとると更に明確である。図10は羽化直前の10月のサンプルに基づく幼虫の湿重量と乾重量の相関図である。大変きれいな直線が二本ひけることから雌雄を分けることができる。乾燥重量にした時のこの差はアカムシユスリカの雌が羽化後すぐ産卵するための貯えの差と考えることができる。直線の傾きは両者でほとんど変わらない。湿重量と乾重量の関係としてはおおよそ雄は15%、雌は19%である。

8. 考 察

高浜入は石岡市をひかえ恋瀬川、山王川、園部川からの流入負荷量が大きく霞ヶ浦の中でも富栄養化の程度が高いことが知られている（栢崎他, 1977・栢崎, 1977）。また流入した有機物量あるいは栄養塩類は恋瀬川の流入部分からこの入江の出口へ向かって傾斜をなしていることが報告されている（津野他, 1977）。このことは底生動物の分布にも反映していると考えられるが、必ずしも入江の奥からその出口へかけての方向でみられない。入江の最奥部であるSt. 1にのみ出現する種類はないがエラミミズが他では少ないことからエラミミズによって特徴づけることができる。St. 1はむしろ底生動物の密度がSt. 2, 3, 4と比較して低いという点に特色がある。イトミミズ、ユスリカとも富栄養湖の指標生物と考えられているが、最も水質の汚れているSt. 1では逆に少なくなっている点は興味深い。

この研究で明らかになった点はイトミミズもユスリカも入江の狭さく部であるSt. 2とSt. 4に多いことで、この地形が底質の環境形成に大きく影響しているのであろう。1977年6月における格子状に

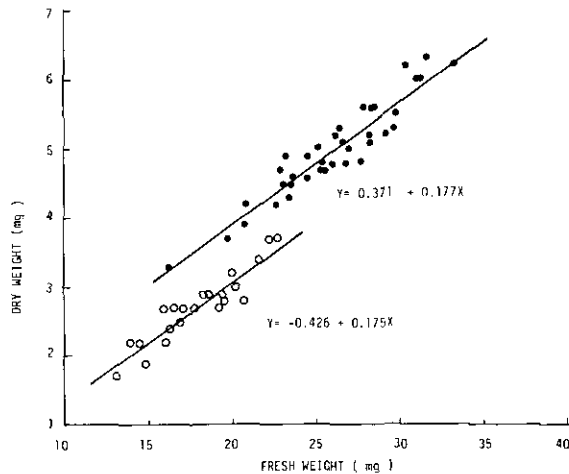


図10 アカムシユスリカ成熟幼虫の湿重量と乾重量の関係。黒点：雌，白点：雄

Fig. 10 Relationship between fresh weight and dry weight of 4th instar larvae of *T. akamusi* collected from the bottom sediment in October at Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura
Solid circle: Female, Open circle: Male

選んだ点での調査によっても、五つの station による周年の調査によっても同じ結論が得られた。

アカムシユスリカ幼虫は3月以降深く潜ってしまうため station 間の比較をするに十分なサンプルがとれていない。この研究の後半で使われたサンプラーは40cmの深さまで採泥できるが、アカムシユスリカ幼虫はその下の層にもいることから、これによって得られる密度は依然過小推定値となる。ユスリカ幼虫が令の進行に伴って深さを変えることは他にも知られている (Lenz, 1931・Berg, 1938)。Shiozawa and Barnes (1977) によると *Chironomus frommeri* は3令までは表層で4令になると下層20cm位の深さに多くなる。越冬は4令で行われその間生長がみられない。しかし夏の4令幼虫個体群と分布の違いがあるかどうか論じていない。アカムシユスリカ幼虫も3令までは表層近くにおいて4令になると次第に下層に移行していくことが明らかとなった。Yamagishi (1972) の諏訪湖における観察と異なる点は霞ヶ浦ではアカムシの潜り始めるのが4令幼虫が現れる12月から始まっていること、そして1月下旬には諏訪湖の4月の観察と同じ程度に移行していることである。Yamagishi (1972) は深い層への移行と4月下旬の水温の上昇18℃と結びつけているが、霞ヶ浦の1月および2月の水温は3℃ないし4℃と低いことから深い層への移行へのきっかけに温度が働いているとは考えにくい。また2月には既に成熟して生長が止まってしまうことも諏訪湖の場合の4月に比較すると2ヵ月も早いことになる。その後まったく餌を取らないで休眠に入ると考えられているが、今回の研究に示されるようにその後体重の増加が認められないことは少なくとも積極的な摂食はしないものと思われる。これを休眠とするとおよそ8か月の休眠となる。この長い休眠の意味は不明であるが、溪流の底生動物群集が秋の落葉に依存しているという考え方と同じように、夏の間湖で増殖した植物プランクトンが秋になって底に堆積したものを利用するような適応形態と見ることもできる。Jónasson (1965) は湖のユスリカ生産が夏期の植物プランクトン量と関係があることを報告している。

アカムシの生息密度は St. 1 において 1 m² 当たり 2,000 匹を超えると考えられる。高浜入においては夏期、植物プランクトンのみならず、高等植物のヒシが大量に繁茂しており、第一次生産者として大きく寄与していると考えられる。底泥のサンプル中にこの遺片が多く見られる。コアサンプラーによる底泥中の植物遺体片は10cmから40cmの深さに分布していることを先に報告した (安野他, 1978)。図 11 は St. 2 における 1977 年 10 月の四つのコアサンプル試料の各層の灼熱含量 (a) と植物遺体片の乾燥重量 (b) を示している。植物遺体片は浅い層には少ない。しかしそれにもかかわらず灼熱減量は上層ほど高いということは植物遺体以外の有機物が多く存在することを示している。図 11 の (c) は植物遺体だけを取り出して灼熱減量をみた結果であるが、20% から 40% の間に入り、深さによる差は明確ではない。植物プランクトン由来の有機物量がどの位の割合を占めるか、更に 11 月以降アカムシユスリカが生長するに従い底質中の有機物量がどのように変化するのか、その量的な関係は今後研究していかねばならない。

アカムシの生息密度は 1 m² 当り St. 1 において 2,000 匹を超えられる。サンプル間の出現個体数のバラツキが大きいので精度の高い推定は困難であるが、以下の通りである。2 月から 10 月初めまでは深いところの個体が含まれていない。他の湖沼と比較することは場所、時期更にお互いのデータ

の精度の違いもあって容易でないが諏訪湖の1969年10月の1,889個体はこの高浜入の同時期の密度に匹敵する。

1977	6 December	9279	(3rd instar larvae)
	12 December	3640	(4th instar larvae)
		6038	(4th instar larvae)
1978	11 January	3862	(4th instar larvae)
	26 January	2841	(4th instar larvae)
		2131	(4th instar larvae)
	26 February	3191 <	(4th instar larvae)
		2841 <	(4th instar larvae)
		2708 <	(4th instar larvae)
	27 October	2020	(4th instar larvae)

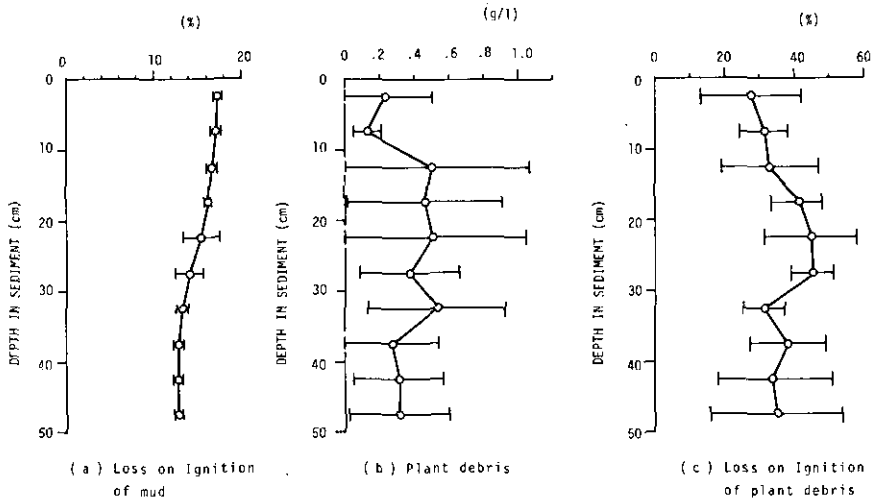


図11 霞ヶ浦高浜入 St.2 における底泥中の有機物量の垂直分布

Fig. 11 Vertical distribution of organic matter in the bottom sediment at Station 2 at Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura in October 1977. Bar indicates 95% confidence limit

1令および2令幼虫のデータは欠けているが3令から4令の移行するまでの死亡率に比べて深く泥の下層へ潜ってからの死亡率が低いことが推測される。

オオユスリカの密度はアカムシのように一年一世代でないので他の湖沼との比較は更に困難である。諏訪湖では7月ころ幼虫の密度が最も高い (Yamagishi and Fukuhara, 1971)。一方高浜入では1977年は2か月程早い4月から5月にかけてピークが現れている。

アカムシユスリカとオオユスリカの分布の1月と2月になって前者が潜り始める時期が重複するが他の時期は層をわけて分布している。後者はもともと深く潜るとは考えられていなかったが、12月アカムシの成育の最も盛んで上層部分に多い時はそのすぐ下の層へ移行していることは今回初めてわかったことである。オオユスリカの密度が高い時期はアカムシユスリカは下層にいるが、その層別分布

において境界が接しているのは大変興味深い(図4の5月から9月)。少なくとも両種は競争することなく成育できるようになっている。

9. まとめ

霞ヶ浦の高浜入において1 km間隔で格子状にサンプルポイントを選びエックマンバージ採泥器で底泥の採取を行った。オオユスリカ幼虫の分布は一様でなく斑状であった。この分布は水深と高い相関があり、更に溶存酸素とも負の相関が認められた。また砂質の部分には少なく、入江の狭さく部に高密度区がみられた。

高浜入に選んだ5つのstation (st. 5は入江の外) における周年観測から次の事が明らかになった。(1)流入負荷物質の多い入江の最奥部はイトミミズを含めて意外と底生動物は少なく、むしろ入江の中心あたりに常に高い密度で存在した。(2)入江の外のSt. 5も比較的低密度であった。(3)エラミミズだけは最奥部に特徴的に出現した。(4)オオユスリカ幼虫の個体数のピークが4月、5月にみられた。(5) *Clinotanypus* sp. のピークは7月から9月。(6) *Limnodrilus* sp. のピークは夏期。一方 *Tubifex* sp. のそれは冬期であった。

アカムシユスリカはふ化後1ヵ月余りの12月末に終令に達し2月には成熟幼虫となり底泥深く潜り始める。3月末には20cmから50cm下層に移行し通常のエックマンバージ採泥器では採集されなくなる。5月には体重の分布が二山となり雌雄を識別できる。多くの場合、オオユスリカの分布する層と層を異にしている。12月アカムシが上層部で高い密度で成育盛んな時期には、むしろオオユスリカが下の層に潜ることがわかった。

引用文献

- 相崎守弘・津野 洋・須藤隆一・合田 健 (1977): 霞ヶ浦高浜入の夏期における水質、生物変動-I。国立公害研究所特別研究成果報告, 第1号, 67-80.
- Berg, K. (1938): Studies on the bottom animals of Esrom Lake. D.Kgl. Danske Vidensk Selsk. Skrifter Naturv og Math Afd, 9(8), 1-225.
- Jonasson, P.M. (1965): Factors determining population size of *Chironomus anthracinus* in Lake Esrom. Mitt. Internat. Verein. Limnol., 13, 139-162.
- Lenz, F. (1931): Untersuchungen über die Vertikalverteilung der bodenfauna in Tiefensediment von Seen. Verh. Int Ver. Limnol., 5, 232-261.
- Miyadi, D (1932): Studies on the bottomfauna of Japanese lakes III. Lakes of the Kwanto Plain. Jap. J. Zool., 4,
- Sasa, M. (1978): Taxonomic and biological notes on *Tokunagayusurika akamusi* (Tokunaga), with description of immature stages (Diptera, Chironomidae). Jap. J. Sanit. Zool., 29, 93-101.
- Shiozawa, D.K and J.R. Barnes (1977): The microdistribution and population trends of larval *Tanypus stellatus* Coquillett and *Chironomus frommeri* Atchley and Martin (Diptera; Chironomidae) in Utah Lake, Utah. Ecology., 58, 610-618.
- Tokunaga, M. (1938): Chironomidae from Japan, X. New or, little known midge, with description of the

metamorphoses of several species, Philip. J. Sci., **65**, 313-383.

津野 洋・相崎守弘・須藤隆一・合田 健 (1977): 霞ヶ浦高浜入の夏期における水質, 生物変動-II. 国立公害研究所特別研究成果報告, 第1号, 80-94.

Yamagishi, H. and H. Fukuhara (1971): Ecological Studies on Chironomids in Lake Suwa. I. Population dynamics of two large Chironomids, *Chironomus plumosus* L. and *Spaniotoma akamusi* Tokunaga. *Oecologia*, **7**, 309-327.

Yamagishi, H (1972): Vertical migration of *Spaniotoma akamusi* larvae (Diptera:Chironomidae) through the bottom deposits of Lake Suwa. *Jap. J. Ecology*, **22**, 226-227.

安野正之・森下正彦・菅谷芳雄 (1978): 霞ヶ浦の動物プランクトンおよび底生動物. 環境科学研究報告集, B3-R12-1, 霞ヶ浦とその周辺の自然と人間活動, 129-136.

霞ヶ浦における魚類個体群の生態学的研究

1. 張網採集による高浜入魚類相の周年変動

春日清一¹・石居進²・山根爽一³・松下誉久²・
高野護²・新井恵子³・大貫芳哉³・小川年以³

Ecological Study on Fish in Lake Kasumigaura, an Eutrophicated Lake
Seiich KASUGA¹, Susumu ISHII², Soichi YAMANE³, Yoshihisa MATSUSHITA²,
Mamoru TAKANO², Keiko ARAI³, Yoshiya OHNUKI³ and Toshii OGAWA³

Abstract

For elucidating fauna in Takahamairi Bay, one of the most eutrophicated areas in Lake Kasumigaura, collection of fish was carried out by the Hariami trapnet biweekly or monthly over a period of one year from May 1977 to May 1978. The collection included 20 species of Pisces, three species of Crustacea and one species of Amphibia. KOI (*Cyprinus carpio*), FUNA (*Carassius auratus* spp.), MOTUGO (*Pseudorasbora parva*), five species of Gobiidae, tadpole of bullfrog and TENAGAEBI (*Macroblichium nipponense*) accounted for about 93% of the haul. Seasonal changes in the haul and the size composition of each species were studied. A large proportion of the fish had been caught by the Hariami trapnet in the spring and the summer when the fish had migrated to the littoral zone of the bay for spawning or when the larvae had grown to catch size in the area. It was found that the TENAGAEBI population was damaged seriously by insecticide which had been sprayed on rice fields around the bay in June 1977.

1. はじめに

近年内水面における富栄養化は急速に進行しており、その影響は時には水産業や飲料水にまで深刻な問題を与えている。本邦で2番目に大きな湖である霞ヶ浦も例外ではなく富栄養化が進み、昭和48年には藍藻等の大量発生による養殖コイの大量へい死を起こした(赤野誠之ほか, 1975)。このような富栄養化が魚類に対しどのような影響を与え、また富栄養化した湖沼の生態系の中で魚類がどのよう

1. 国立公害研究所 生物環境部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町
Environmental Ecology Division, The National Institute for Environmental Studies, P.O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.
2. 早稲田大学教育学部生物学教室 〒160 東京都新宿区西早稲田1-6-1
Faculty of Education, Waseda University, Nisuwaseda, Shinjuku, Tokyo 160, Japan.
3. 茨城大学教育学部 〒310 茨城県水戸市文京2-1-1
Faculty of Education, Ibaraki University, Mito, Ibaraki 310, Japan.

な役割を負っているかを知る目的でこの研究が始められた。霞ヶ浦の魚類については中村ほか(1971)の詳しい研究があるがここでは霞ヶ浦で最も富栄養化が進んでいる(渡辺, 1973)高浜入が選ばれた。当水域は比較的狭く調査が容易であろうと思われる。まず高浜入に生息する魚類相を明らかにするため最も普通に行われている魚法である張網による採集を1年間を通して行ったのでこの結果を報告する。

2. 採集場所と方法

高浜入は霞ヶ浦の北方に張り出した湾で、さらに奥部は入江となり、この入江には恋瀬川が流入する。最奥部入江の面積は約3.14km²で水深は3m以浅である(図1)。この入江には150以上の張網が設置されている。実験に用いられた張網は高浜入最奥部入江の東岸ほぼ中央に岸から約50m離れた場所



図1 霞ヶ浦高浜入における張網による採集地点 (St.)

Fig. 1 Location of the Hariami trapnet set up at Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura (St.)

から岸に直角に沖に向って張り出された垣網約40mのもの(図2)を一つ決め1回分の漁獲物をすべて買い上げた。使用した張網の垣網部の網目は約10mmで魚取り部は約4mmであり袋網の途中の部分は約6mmであった。網の設置された場所の水深は1~1.5mである。採集は1977年5月27日から10月14日まで2週間隔で行い、その後はほぼ1か月に1回、合計19回行われた。張網の取り上げは多くは2日に1度行われるが漁獲の多い時は毎日、また漁獲の少ない冬期などは1週間以上になることもある。今回の採集は漁師の都合により前の網の取り上げから買い上げを行った日までの日数(1網の漁業期間と呼ぶことにする)には変動があり夏期にはほぼ2日、冬期は35日となる場合があった(Table 2)。漁獲された魚類はその場でホルマリン固定し研究所へ持ち帰り、魚種ごとに分類し個体数および重量を計測した。さらに個体数の少ない種は全個体の、また個体数の多い種ではおおむね200または300個体を無作為抽出し体長および体重、または体重のみを計測し体長または体重組成を調べた。

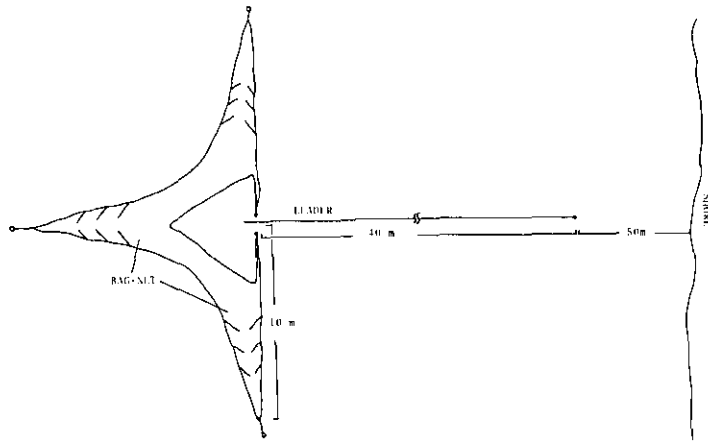


図2 張網の鳥瞰図

Fig.2 Aeroview of the Hariami trapnet

3. 結果と考察

3.1 総漁獲量と漁獲高の季節変動

1977年5月から1978年5月までに19回行われた漁獲で得られた魚類の総漁獲量，魚種別漁獲量，および魚種別漁獲割合を表1に示した。また採集日ごとの漁獲高を魚種別に表2に示した。漁獲物は魚類20種，両生類1種，甲殻類3種であった。またこの後1978年8月までにこの水域で張網によりニジマス，ハス，ハクレン，ゼニタナゴ，ゴクラクハゼ，ウナギ，スジエビが採集されたがその数は極めて少ない。このような魚種は漁具が張網である性質上沿岸性の魚種が多いが高浜入の漁業生産の84.9%が張網で漁獲されており(春日ほか，1978)，張網による調査が高浜入の魚類相をかなり良く反映していると考えてよいであろう。結局高浜入最奥部の魚類等は魚類26種，甲殻類4種，両生類1種が最近採集されている。この魚種組成は加瀬林・浜田(1977)により発表された霞ヶ浦の魚類目録と比較するとマハゼ，シラウオ，スズキなど汽水性魚を欠き淡水性のほとんどの部分が出現しており，この水域が海水の影響を受けていないであろうと思われる。

漁獲高が最も高いものはテナガエビで27.83%を占め，次にコイ22.66%，キンブナ14.64%，ジュズカケハゼ6.20%，ウキゴリ5.23%，モツゴ4.86%，シヨクヨウガエルのオタマジャクシ4.80%の順となっている。またコイ・フナ類は合計41.70%と大きな値を示し，ウキゴリ，ジュズハゼ，チチブ，アシシロハゼ，ヨシノボリの5種のハゼの合計は13.51%を占めており，コイ・フナ，ハゼ類，テナガエビで全体の83.04%となりこれら魚種が高浜入における主要種といえよう。

次に漁獲高の季節的変動を知るために1回の漁獲量を1網の漁業期間で割った値，すなわち張網1日当たりの漁獲量の季節的変動を図3に示した。張網1日当たりの漁獲量は1977年5月から6月初旬

表1 霞ヶ浦高浜入における張網による漁獲生物 (昭和52年5月~昭和53年5月)

Table 1. List of fishes caught at Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura by the Hariami trapnet

Fish Name	Species Name	Number	Weight (g)	Percentage
WAKASAGI	<i>Hypomesus transpacificus nipponensis</i>	24	87.1	0.10
KOI	<i>Cyprinus carpio</i>	104	18,960	22.66
KINBUNA	<i>Carassius auratus</i> subsp.	281	12,251	14.64
GINBUNA	<i>C. a. langsdorfi</i>	55	2,018	2.41
GENGOROBUNA	<i>C. a. cuvieri</i>	9	1,182	1.41
FUNA JUVENILE	<i>C. a. spp.</i>	310	512.2	0.61
MOTUGO	<i>Pseudorasbora parva</i>	2,910	4,063	4.86
OIKAWA	<i>Zacco platypus</i>	7	11.7	0.01
TAMOROKO	<i>Gnathopogon elongatus</i>	5	4.6	0.01
TANAGO	<i>Acheilognathus moriokae</i>	56	180.2	0.22
AKAHIRETABIRA	<i>Acheilognathus tabira</i> subsp.	121	229.2	0.27
TAIRIKUBARATANAGO	<i>Rhodeus ocellatus ocellatus</i>	196	296.2	0.35
DOJO	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	291	1,720.7	2.06
UKIGORI	<i>Chaenogobius annularis</i>	8,148	4,373	5.23
JUZUKAKEHAZE	<i>Rhodoniichthys laevis</i>	9,446	5,148	6.20
TITIBU	<i>Trigentiger obscurus</i>	1,680	1,416	1.69
ASISIROHAZE	<i>Aboma lactipes</i>	203	274.2	0.33
YOSINBORI	<i>Rhinogobius brunneus</i>	139	46.8	0.06
BORA	<i>Mugil cephalus</i>	1	229	0.27
RAIGYO	<i>Channa argus</i>	1	48	0.06
KURUMESAYORI	<i>Hemiramphus kurumeus</i>	7	90.2	0.11
BULLFROG TADPOLE	<i>Rana catesbeiana</i>	772	4,015	4.80
TENAGAEBI	<i>Macrobrachium nipponense</i>	74,082	23,287	27.83
ISAZAAMI	<i>Neomysis intermedia</i>	80,091	1,743.2	2.08
CRAYFISH	<i>Procambarus clarkii</i>	68	1,450	1.73
TOTAL			83,672.3	100.00

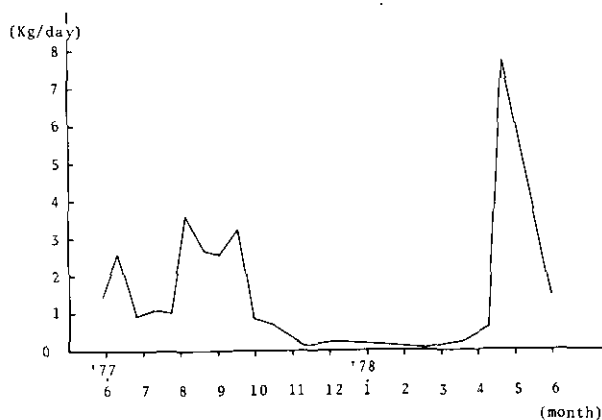


図3 霞ヶ浦高浜入における張網による1日当たりの漁獲高の季節変動

Fig.3 Seasonal change in the haul caught by the Hariami trapnet per day at Takahamairi Bay

表2 霞ヶ浦高浜入における張網による漁獲の季節変動(昭和52年5月~昭和53年5月)
()内は個体数を示す。

Table 2. Data of the haul of fishes caught by the Hariami trapnet at Takahamairi Bay from May 1977 to May 1978
Individual number of animals are indicated in parentheses.

Date	Fishing period	unit : g												
		WAKASAGI	KOI	KINBUNA	GINBUNA	GENGORO BUNA	FUNA JUVENILE	MOTUGO	OIKAWA	TAMOROKO	TANAGO	AKAHIRE TABIRA	TAIRIKU BARA TANAGO	DOJO
'77 V-27	2 days	0	330(3)	25(1)	0	0	0	70 (32)	0	0	0	1.7(1)	6.6(3)	35 (6)
VI-10	2	0	1589(11)	181(9)	109(12)	0	0	99 (40)	0	0	10.3(5)	19.4(11)	27.4(13)	8 (2)
VI-24	3	0	6(1)	322(9)	39(2)	0	0	69 (24)	1.4(5)	0	50.5(7)	0	2.1(1)	64 (7)
VII- 8	2	0	975(15)	0	0	0	0	47 (13)	0	4.6(5)	70.1(17)	1.1(1)	27.6(15)	120 (23)
VII-22	2	0	290(6)	580(13)	575(8)	0	8.9(12)	37 (73)	0	0	0	0	1.9(1)	29 (4)
VIII- 5	2	25.7(8)	1710(17)	1280(48)	40(1)	120(2)	80.0(64)	220 (152)	0	0	9.4(13)	9.3(5)	114.8(50)	93 (11)
VIII-19	6	25.6(9)	5489(22)	590(9)	188(10)	251(2)	54.0(38)	1225(1327)	0	0	13.1(5)	0	23.2(12)	1055(178)
IX- 2	2	10.3(3)	2835(9)	453(24)	247(11)	0	115.0(66)	175 (172)	0	0	3.8(2)	76.0(41)	2.2(3)	0.7 (1)
IX-16	2	0	0	1240(41)	12(1)	475(3)	27.0(25)	298 (240)	0	0	0	53.0(37)	10.9(17)	40 (5)
IX-30	3	0	78(1)	0	0	0	22.2(13)	47 (35)	0	0	0	1.6(1)	6.0(9)	6 (3)
X-14	3	0	43(1)	15(1)	210(1)	0	7.5(2)	31 (21)	0	0	0	6.2(6)	0	0
XI-11	10	0	26(1)	32(2)	10(1)	0	7.0(5)	37 (18)	0	0	0	0	0.3(1)	0
XII- 9	5	0	105(1)	0	0	0	21.3(17)	71 (36)	0	0	0	0	0	11 (2)
'78 I-13	35	0	825(1)	390(6)	0	0	24.7(16)	612 (331)	0	0	0	1.7(1)	66.0(64)	32 (7)
II-17	35	0	0	217(4)	0	0	0	28 (15)	0	0	0	0	2.4(3)	15 (3)
III-17	28	3.2(1)	2576(7)	1570(25)	26(1)	0	47.7(12)	252 (126)	0	0	0	0	0	47 (11)
IV- 7	7	0	1731(4)	76(5)	185(3)	0	15.0(8)	293 (116)	0	0	0	0	3.7(3)	88 (14)
IV-20	1	22.3(3)	21(2)	5165(82)	380(4)	336(2)	81.8(31)	420 (129)	0.9(1)	0	33.3(7)	59.2(17)	1.1(1)	71 (13)
V-29	2	0	331(2)	115(2)	0	0	0.1(1)	32 (10)	9.3(1)	0	0	0	0	6 (1)

表2 (つづき)

Table 2. (continue)

Date	Fishing period	UKIGORI	JUZUKAKE HAZE	TITIBU	ASISIRO HAZE	YOSI NOBORI	BORA	RAIGYO	KURUME SAYORI	BULLFROG TADPOLE	TENAGA EBI	ISAZA AMI	CRAYFISH
'77 V-27	2 days	1910(4254)	5 (3)	13(16)	91(56)	2.6(3)	0	0	0	18 (1)	290 (521)	0	90(6)
VI-10	2	240(463)	152(604)	105(66)	18(14)	0.7(1)	0	0	22.5(2)	42 (2)	2450(4250)	0	100(8)
VI-24	3	47 (59)	373(1107)	57(22)	42(23)	0	0	0	43.7(3)	0	1316(1236)	0	320(9)
VII- 8	2	88 (89)	130(291)	46(23)	5(4)	0.6(2)	0	0	14.3(1)	40 (2)	415 (310)	0	205(15)
VII-22	2	23 (20)	65(148)	75(233)	9(6)	15.5(73)	0	0	0	0	155 (354)	0	145(6)
VIII- 5	2	406(298)	665(1220)	73(139)	3(3)	4.5(15)	0	0	0	1176(397)	1105(5163)	0	38(2)
VIII-19	6	88 (63)	1050(3171)	103(185)	0.9(1)	1.4(5)	0	0	0	770(195)	5140(21320)	0	14(1)
IX- 2	2	30 (13)	68(115)	19(42)	0	0.4(3)	0	0	9.7(1)	250(39)	769(2720)	0	36(1)
IX-16	2	85 (34)	1130(1839)	13(29)	0	0.1(1)	0	0	0	101(10)	3065(11360)	0	14(1)
IX-30	3	0	30 (42)	3 (9)	0	0.1(1)	229(1)	0	0	375(30)	1623(4114)	0	132(9)
X-14	3	0	14 (13)	8(31)	0	0.4(2)	0	0	0	175(14)	1565(6738)	0	0
XI-11	10	25 (6)	60 (47)	24(76)	0	0.5(2)	0	0	0	34 (2)	781(1736)	1.6(106)	45(1)
XII- 9	5	46 (10)	184 (106)	43(73)	0	0.1(1)	0	0	0	122(10)	517(1687)	17.9(1098)	17(1)
'78 I-13	35	90 (16)	328(153)	118(138)	1.1(1)	1.3(5)	0	0	0	753(58)	1320(4400)	545(24700)	40(1)
II-17	35	56 (7)	46 (27)	42(65)	0.4(1)	0.9(3)	0	48(1)	0	24 (1)	325(1128)	475(16325)	43(1)
III-17	28	82 (11)	481(281)	65(82)	5.3(9)	0.4(2)	0	0	0	44 (5)	265 (925)	84(5421)	143(4)
IV- 7	7	79 (11)	260(142)	135(148)	0.4(2)	0	0	0	0	60 (4)	561(1750)	607(32000)	68(2)
IV-20	1	19 (3)	128 (93)	370(422)	1.1(2)	7.4(5)	0	0	0	31 (2)	465(1750)	13 (441)	0
V-29	2	1056(2791)	15 (44)	104(61)	97(81)	9.9(15)	0	0	0	0	1160(2620)	0	0

に1.4~2.5kg/日であるが6月24日から7月22日までの間やや落ち込み、8月初旬には再び回復する。この落ち込みは6月13日に高浜入周辺の水田に殺虫剤スミチオンの空中散布が行われ大量のテナガエビがへい死し漁獲高が減少したためである。8月から9月16日までは1日当たりの漁獲量はあまり大きな変動を示さず2.5~3.5kg/日の値を示し、9月下旬から漁獲量は急速に減少した。11月以降、翌年3月までの1日当たりの漁獲高0.5kg/日を下回ることが多い。4月20日には1日当たり漁獲高は7kg/日を超え年間で最も高い値を示した。この高い値は産卵のために接岸したフナ類が大量に採集されたもので、この日の漁獲量の78.2%をフナが占めた。1978年5月には前年の値とほぼ同じ値を示した。

3.2 魚種別漁獲量の季節変動

今回の調査の魚種別漁獲率を1971~1975年の5か年間の霞ヶ浦全体の魚種別漁獲率(春日ほか,1978)と比較しながら高浜入における各魚種の生態学的な特異性に触れてみたい。また図4に主要魚種であるキンブナ、モツゴ、ウキゴリ、ジュズカケハゼ、チチブ、テナガエビの1日当たりの漁獲尾数の季節的変動を示した。さらに図5~9にこれら魚種の体長または体重組成の季節的变化を示した。漁獲量の少ない魚種は表2の原表のまま検討した。

ワカサギ：ワカサギは1977年8月5日から9月2日までの夏期に合計20尾が採集され、さらに1978年3月に1尾、4月20日に3尾採集されたのみで、漁獲割合も0.1%にすぎない。このことはこの水域に回遊するものは少なく、また産卵期である1、2月に全く採集されず当水域で産卵が行われていないものと思われる。ワカサギがこの水域に少ない原因を説明することは困難であるが冬期におけるイサザアミや夏期における仔稚魚、エビの幼生など餌生物は決して少なくない。また主な産卵場所となり得る砂質底の部分(矢口,1956)も存在する。最近常陸川、外浪逆浦、北利根、横利根などの湾入部にワカサギの高密度に分布する水域が存在することが報告されており(浜田,1978a)当水域がワカサギに回避される原因は明らかでない。

コイ：コイは漁獲量で22.66%と高い値を示すが尾数は合計104尾と少なく体長組成や漁獲量の季節変化を十分議論できる数に達していない。しかし傾向としては夏期に漁獲高が高く9月下旬から2月までの冬期間は少ない。3月には産卵群と思われる個体も採集されているが1日当たりの漁獲量としては少ない。これらのことは産卵回遊群が意外に少なく、夏期にはかなり高い密度で生息しているものと思われる。当水域で小割生簀によるコイ養殖が多く行われており張網で緋ゴイがしばしば採集されることから網から逃げ出したコイが捕えられる可能性もある。いずれにしても今回のコイの漁獲率は霞ヶ浦全体の漁獲率と比べ著しく高く特徴的である。

フナ類：フナ類ではキンブナが主体を占めフナ類の80%を占めている。キンブナは底生性であるが霞ヶ浦全体では中層性でプランクトン食性のゲンゴロウブナが多いことが報告されており(浜田,1978a)この差異は興味深い。キンブナの1日当たりの漁獲量は5月から9月中旬までバラツキはみられるが良く漁獲され、特に夏期には当才魚が多く含まれた。産卵期の4月には産卵回遊群の大型のものが大

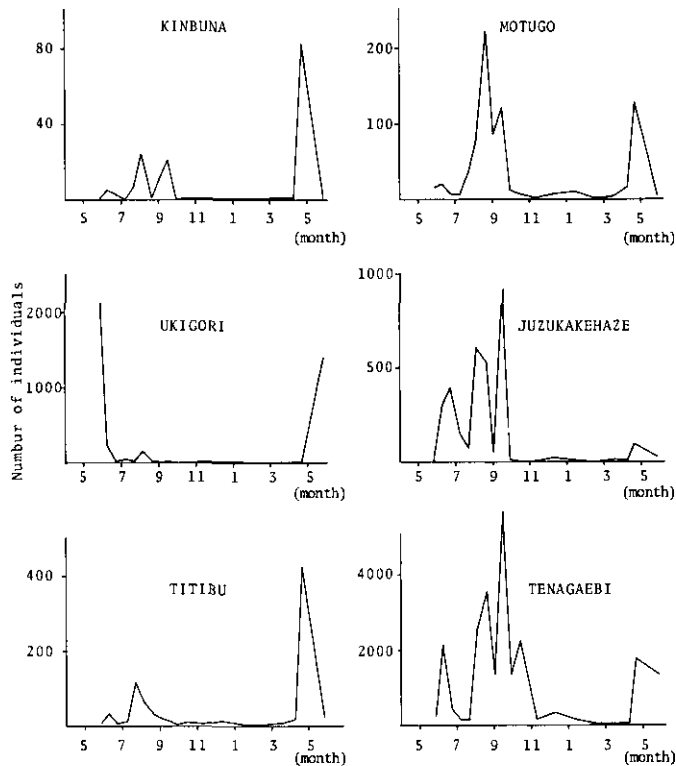


図4 霞ヶ浦高浜入における張網により得られた各魚種の1日当たり漁獲尾数の季節変動
 Fig.4 Seasonal change in the number of fishes caught by the Hariami trapnet per day at Takahamairi Bay

量に採集された。このことは当水域がフナ類の産卵場所として利用されていることを示している。

モツゴ：モツゴは年間採集されるが特に親魚が採集される4月および未成魚が採集される7月から9月にかけて特に大量に採集された。4月には雄は追星を生じ雌は腹部が肥大し産卵が行われることを示している。特に4月20日には大型化しほとんどの個体が成熟していた。モツゴの産卵は雄が杭、貝殻、空カン、ハスの茎、張網などにテリトリーを作りこれに雌が卵を産みつけ雄が卵を保護する。このような産卵の対象となる物体は湖岸帯に多く、張網の設置場所となっており、産卵のため移動し、また活動が活発化した親魚が4月に多数採集されたものと思われる。5月には成魚の採集数は減少し6、7月とさらに少なくなり7月末には成魚は極めて少なくなった。6月下旬には体長2.5cm以下の小型個体が出現し採集数は8月19日まで増加した。これら新生個体群の体長組成は7、8月と大型個体が増加し、8月には体長分布の幅が広がり体長4cm以上の個体が多数出現した。しかしこれらの中には成熟個体はみられていない。9月中旬には体長2.5cm以下の個体は極めて少なくなり体長分布の幅は

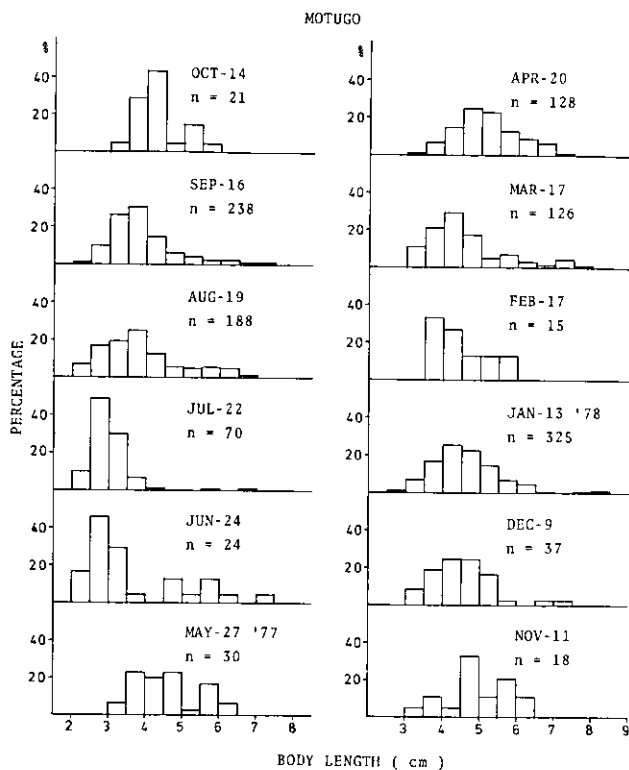


図5 モツゴの体長組成の季節変化
n: 個体数

Fig.5 Seasonal change in the size distribution of MOTUGO, *Pseudorasbora parva*
n: number of fish examined

8月よりさらに広がる。小型群の減少に伴い9月下旬には採集数は急激に減少する。このような急速な減少は他の水域への移動など考えられるが夏期にモツゴの仔稚魚が沿岸の藻場で多数みられここが生活場所となっていることから採捕率が極めて高いことが主因になっているものと思われる。10月以降3月まで採集数は少なく、体長組成の顕著な変化はみられない。体長のモードは4.0~4.5cmの間にあり3cm以下の小型魚はほとんどみられない。

タナゴ類：タナゴ類ではタナゴ、アカヒレタビラ、タイリクバラタナゴが採集され、これらの漁獲量は全漁獲量の0.84%にすぎない。タナゴは9月中旬以降4月まで全く採集されず、アカヒレタビラ、タイリクバラタナゴは夏期にやや多めに採集されるが1年を通じて採集された。比較的良く採集されるアカヒレタビラとタイリクバラタナゴは産卵期が長く産卵場所として利用される二枚貝の減少によっても生き残る可能性の大きな種であろう。

ドジョウ：ドジョウは全漁獲高の2.06%を占めた。1977年8月19日にやや大量に採集され10月14日、11月11日に採集されなかったが年間を通じてわずかず採集された。高浜入ではドジョウは霞ヶ浦の他の水域に比べ漁獲が多くこの水域の特徴でもある（春日ほか、1978）。

ウキゴリ：ウキゴリは1977年5月27日に未成魚が大量に採集され、その後採集数は急減した。8月5日に小さなピークがみられるがその後再び減少し9月30日、10月14日には全く採集されていない。また冬期間は採集尾数が極めて少なく翌年の5月29日まで採集数は増加していない（図4）。ウキゴリの漁獲量は全漁獲量の5.23%と高い値を示すにもかかわらず採集される期間は5月後半に大きなピークを持ち夏期に多少採集されるといった特徴的な様相を示している（図4）。ウキゴリの体長分布はあまり広がりを見せず年間を通じてほぼ一つのピークを持つのみであった（図6）。未成魚が大量に採集される5月末には大型のウキゴリは採集されず、1978年には1尾のみが採集された。このようにこの時期に完全に世代が入れ替わっている。

ウキゴリの産卵は河川や沿岸帯で行われ（竹内、1971：春日、未発表）、これらのものが当水域で成長したものであろうと考えられる。これらの未成魚は高浜入の湖心部ではあまり採集されず湖岸帯を生活場所とするものと思われる（春日、未発表）。このため漁獲サイズに成長したウキゴリが張網により大量に漁獲され、その後の漁獲高が急速に減少するものであろう。またウキゴリは体長5cm以上に成長すると游泳生活から底生生活に移行するものと思われ、7、8月に採集される個体の体長分布は5cm以上のものが極端に少ない片寄った分布を示す。9月30日および10月14日にはウキゴリは全く採集されていないがこの時期に同水域で塩ビ管トラップを用いた採集により多数採集されており（春日ほか、1978）、移動の少ない底生生活に入っていることを示している。ウキゴリは竹内（1971）が報告しているように12月には婚姻色が明瞭となり外部形態から雌雄判別が要易となる。産卵は3月から観察された。また体長組成の変化から寿命は満1年であろう。霞ヶ浦のウキゴリでは成長が早く成熟もすべて1年で到達し、また寿命も短いことは竹内（1971）も指摘しているが函館で寿命が最高5年（中村、1944）や福岡で3年（道津、1955）と比較し特徴的である。この原因には張網による採捕率が高く間引かれて残ったウキゴリが十分な餌の存在により良い成長を示したであろうことや、湖内で体長9.0cm以上の大型個体がみられないのは成魚も漁獲されたり、年によっては夏期に生息場所である沿岸地帯がアオコの異常増殖などにより腐敗し無酸素状態になる（加瀬林ほか、1972）ことにより死滅するか逃避することにもよるであろう。この入江に流入する恋瀬川の調査により体長9cm以上の2年魚以上と思われる個体が得られていることと比べると対照的である。

ジュズカケハゼ：ジュズカケハゼの未成魚は1977年にはウキゴリよりやや遅れて6月に出現し9月まで大量に採集された。これはウキゴリに比べ大量に漁獲される期間が極めて長い。これまでの調査でジュズカケハゼの産卵場所は確認されておらず正確な産卵期間は明らかでないが体長分布の幅が狭く、未成魚が採集され始めてから1か月後の7月には体長2.3cm以下の小型魚が採集されなくなること、また成魚が6月以降採集されない（図7）ことなどから産卵は5月以前の比較的短期間に行われるものであろう。それにもかかわらずジュズカケハゼの漁期が短期に集中しないのはウキゴリと違い

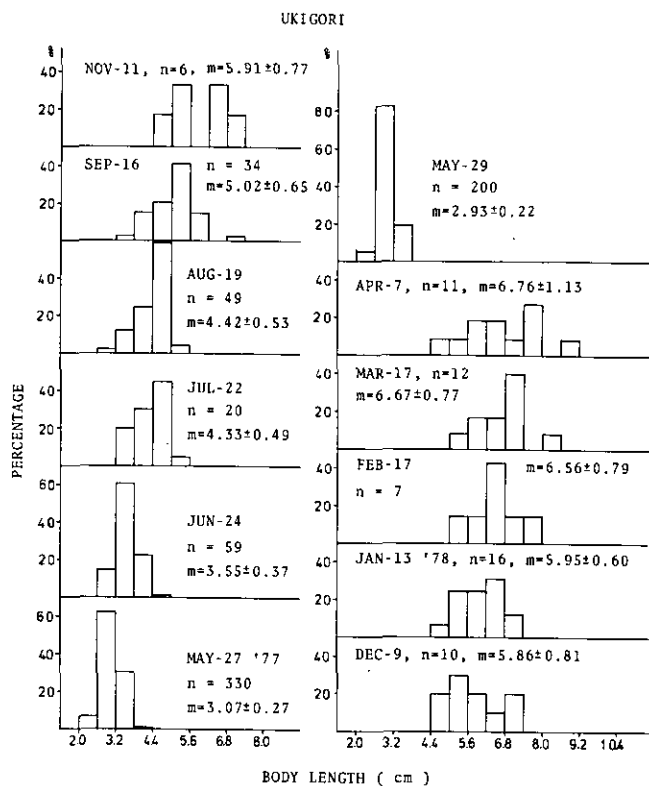


図 6 ウキゴリの体長組成の季節変化
 n : 個体数, m : 平均値±標準偏差

Fig. 6 Seasonal change in the the size distribution of UKIGORI, *Chaenogobius annularis*
 n : number of fish examined, m : mean \pm Sd

湖心から沿岸にかけて広く分布し(春日, 未発表), 沿岸域の張網で乱獲されないためであろう。10月以降採集数は減少するが年間を通じて採集される。12月には雌に第2次性徴であるヒレの黒化と腹部の黄色化が明瞭にみとめられる。ジュズカケハゼでは雌が雄より大型で, 雌雄比が12月には80:26, 1月には130:23と雌個体が極端に多く2月には8:19と雄が多かったが3月には140:140とほぼ同数となり4月20日には35:58, 5月29日には成体で1:7と雌の割合が低下した。5月下旬にはこの水域でジュズカケハゼの極めてやせた個体や死体をしばしば観察することができることから漁獲により減少するのみでなく寿命は満1年で産卵を終り死亡するものと思われる。

チチブ: チチブの採集数は全漁獲量の1.69%と少ないが年間を通じて常に採集された。1978年4月20日には大型成体群が大量に採集された。これは産卵のため沿岸に回遊したものと思われる。5月から7月にかけて成体群は採集されるがその数は少ない。7月22日には新生小型未成魚が採集され始め

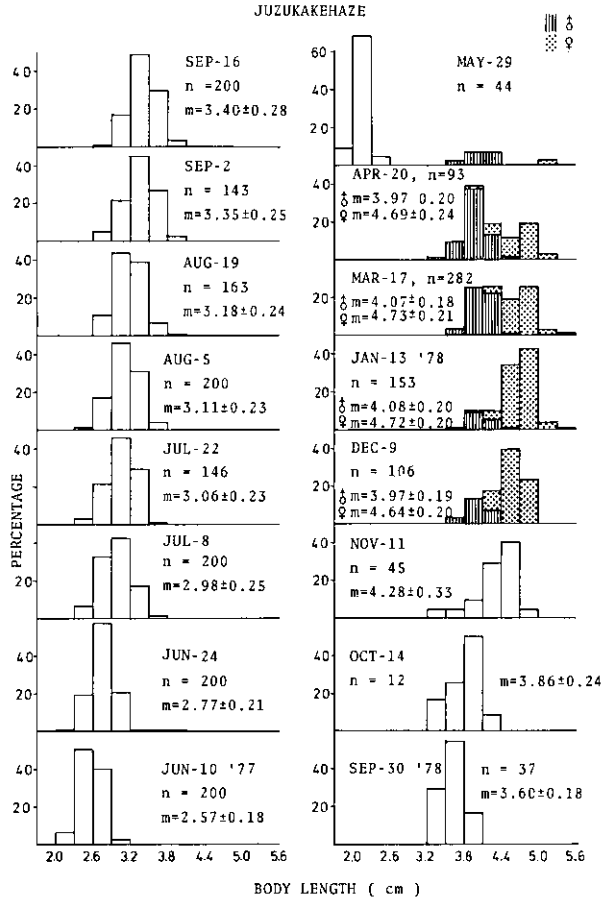


図7 ジュズカケハゼの体長組成の季節変化
n: 個体数, m: 平均値±標準偏差

Fig. 7 Seasonal change in the size distribution of JUZUKAKEHAZE, *Rhinogobius brunneus*
n: number of fish examined, m: mean ± Sd

採集個体数が最も高い値を示す(図4)その後採集数は漸減し3月まで採集数は少ない。チチブの体長分布の季節変化をみると7月から翌年3月まで、9か月間にわたって体長2cm以下の小型魚が採集され、この間平均体長も常に3cm未満で月ごとに大型化する傾向がみられない(図8)。これらのことはこの水域がチチブの産卵場所として利用されているが未成年魚は他の水域へ移動し成長するものと思われる。チチブの仔稚魚は夏期湖心にも広く分布する。産卵期は中村ほか(1971)が霞ヶ浦のチチブで5月から9月の長期にわたることを述べているが当水域においても小型魚の出現が長期にわたることから比較的長期間であろう。

アシシロハゼ: アシシロハゼは1977年5月27日から6月24までかなり採集されたがその後採集数は

TITIBU

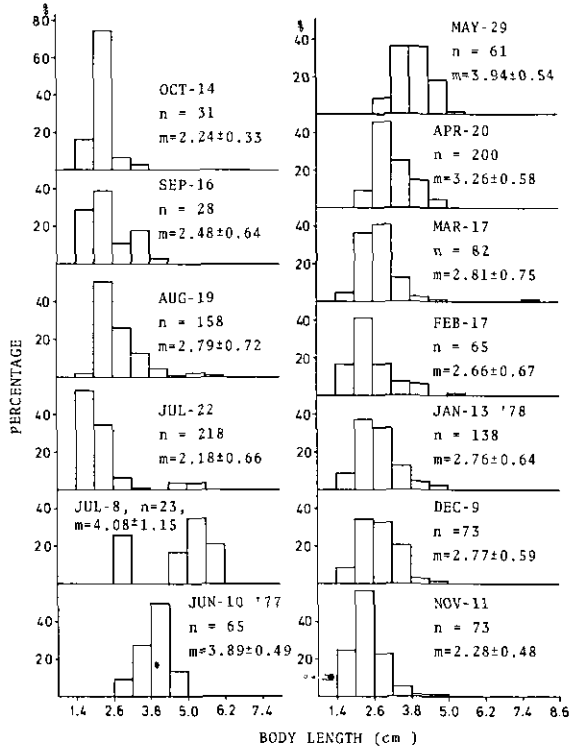


図8 チチブの体長組成の季節変化

n : 個体数, m : 平均値 ± 標準偏差

Fig. 8 Seasonal change in the size distribution of TITIBU, *Trigentiger obscurus*

n : number of fish examined, m : mean ± Sd

少なくなり9月から12月まで全く採集されなかった。採集されたこれらのアシシロハゼは産卵のためこの水域へ回游してきたものであろう。産卵は当水域でもカラスガイの貝殻の下面などに確認されたが小型未成魚は張網によって全く採集されていない。これは捕獲されるサイズに達する前に他の水域へ移動したものであろう。1月から小型の個体が採集されるがその数は少ない。中村ほか(1971)によれば霞ヶ浦でアシシロハゼは周年採集されるが未成魚が大量に採集されることがなく成長については不明のままである。

ヨシノボリ: ヨシノボリは年間を通じて採集されるがその数は少なく、特に成体はほとんどみられない。しかし夏期には沿岸の藻場に多数の小型未成魚が観察される。我々の別の調査によって恋瀬川やその支流の中流域で多数の産卵が確認されている。また7月下旬には恋瀬川を溯上する多数のヨシノボリが観察される。この時期に張網にも多数のヨシノボリが採集された。これらのヨシノボリは稚

魚期から未成魚期を高浜入で過ごした後大部分は河川に溯上するが一部は湖に留まるものと思われる。

食用ガエルの幼生：食用ガエルのオタマジャクシはほぼ周年にわたって採集されたが8月5日には体重約3gのものが大量に採集された。その後採集数は減少し、個体の大きさは次第に大型化する。漁獲数の減少をみると8月には特に急激で張網による採捕率がかなり高いものと思われる。多くは秋に変態するものと思われるが越冬個体もかなりみられこれらは体重15gにも達した。

テナガエビ：テナガエビは高浜入で最も漁獲高の高い種類で年間を通じて漁獲率は高い。1日当たりの採集数では6月から10月まで特に高い値を示した。ただし今回の調査では6月13日に周辺の水田に空中散布されたスミチオンによって多数のエビが死滅し6月24日から7月22日までの採集では小型個体の消滅と採集数の激減となった(図4)。6月24日に採集された個体のうち約45%は死んで採集された。この6月24日と7月8日に採集された大型群は農薬散布の影響から生き残った個体とすることは多少困難があり、薬物の影響の少なかった水域から産卵のため回游したものと考えた方がよいように思われる。すなわち5月27日から6月10日に採捕数が増加すると共にテナガエビが大型化しており、このころより産卵群の移動の兆しがみられ抱卵個体の割合も漁獲エビの3.0%から8.2%に増加している。さらに6月24日と7月8日の抱卵エビの割合はそれぞれ43%と69.6%を占めた。これらのことから農薬散布によりこの水域のテナガエビはほとんどが殺され、その後産卵回游群が移動したものと推測される。上田(1961)は六道湖のテナガエビを調べ産卵期には雌雄が住み場所を異にするであろうと述べており、また霞ヶ浦では岡田・久保(1950)や加瀬林・芹田(1956)が産卵期に雌が増加することを報告しており、雌が主体となって沿岸の藻場に産卵のため移動するものと思われる。テナガエビの産卵期に関しては霞ヶ浦では5月から9月まで続くことが報告されており(岡田・久保, 1950)、今回の観察においてもほぼ同様であった。また加瀬林ほか(1972)は6月から9月の間に1か月の間隔をおき3回産卵を行い産卵後数日してZoeaの出現がみられ、その1か月後に稚エビの出現のピークがあるという。またZoeaは約1か月後に変態して体長5~6mmの稚エビとなり体長13mm程度まで藻場で生活し、その後底生生活に入り沖合へ分散してゆくと報告している。今回の観察では7月22日には0.75g以上の大型個体が減少し、0.25g以下の新生個体が出現している。8月に入ると大型個体はさらに減少し8月19日には大型個体や抱卵個体がみられなくなった。このような大型個体の急速な減少は岡田・久保(1950)の報告と比べ極めて速い。これは当水域におけるテナガエビの採捕率の高いことによる可能性が大きい。最近の報告では霞ヶ浦のテナガエビの70~90%が漁獲されているという(浜田, 1978b)。9月2日には抱卵個体が全体の2.3%のエビにみられた。これらは体重0.5g以下の小型個体に多くみられ、当才で成長の良い個体であろう。抱卵個体は9月16日以降はみられなくなる。夏期長期間にわたって稚エビが多数採集されるのはテナガエビの産卵期間が長く、漁獲や移動によって減少する分が産卵により補充されるためであろう。産卵期が終了2か月後の11月には漁獲高は極端に減少する。体長分布をみると7月22日以降翌年4月まで小型個体が多数採集され、平均体重は8月5日以降、9月30日に0.41g、11月11日に0.45gとやや高い値を示す以外翌年4月20日まで0.3g以下の低い値を示し大型個体が極めて少ない(図9)。これは大型個体が他の水域へ移動した可能性がある。

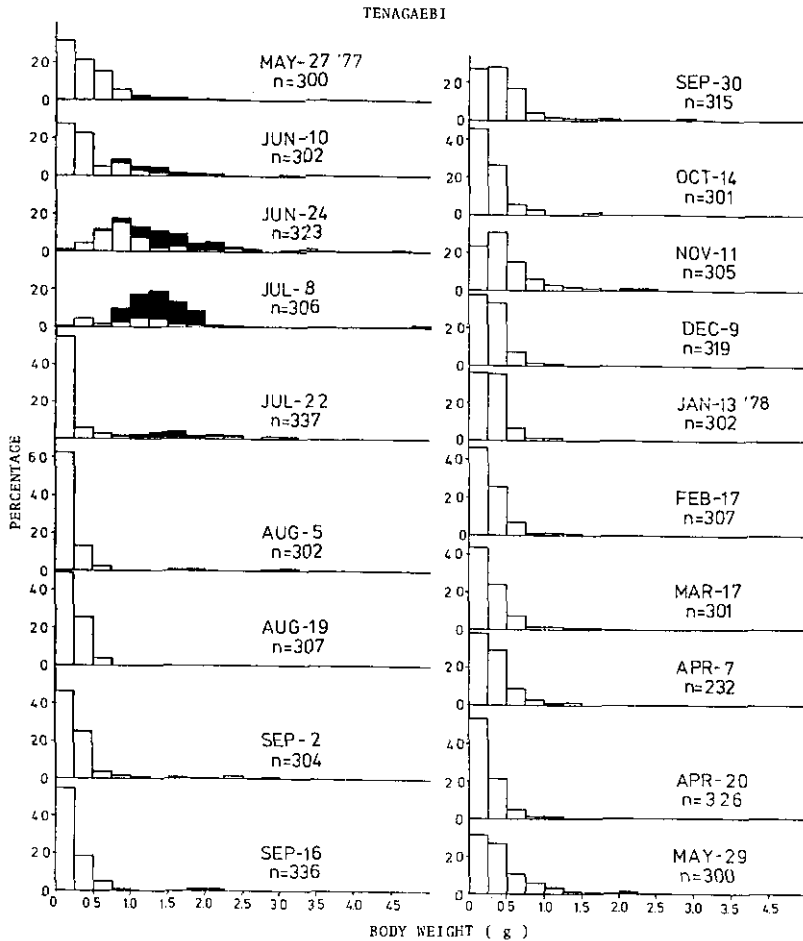


図9 テナガエビの体重組成の季節変化
n: 個体数

Fig.9 Seasonal change in the body weight distribution of TENAGAEBI, *Macrobanchium nipponense*
n: number of animals examined

イサザアミ：イサザアミは5月から10月までに採集された。特に1, 2月には採集数は多く、また4月7日にも大量に採集されている。このようにイサザアミの漁獲が冬期のみに限られることはこの水域の著しい特徴のように思われる。霞ヶ浦でイサザアミの漁獲量が多いのは5月および11月にピークがあり、夏期と冬期には少ない(加瀬林ら, 1972)。また産卵期は3月中旬から10月までが主体であるという(村野, 1963)。このことから冬期に高浜入奥部水域に出現したイサザアミは当水域で繁殖したのではなく霞ヶ浦湖央部などから移動したものである可能性が強いがさらに検討を必要とする。

アメリカザリガニ：アメリカザリガニは採集個体数は少ないがほぼ周年にわたり採集された。6, 7月に採集個体数がやや多い傾向にある。

その他の魚類：これまで述べてきた魚類等の他にボラ、カムルチー各1尾、クルマサヨリ7尾が採集された。ボラは9月22日に229gと比較的大型のもので、カムルチーは48gで未成魚である。クルマサヨリは6、7月に6尾採集されたがこの時期の雌魚は大形の卵を持ち産卵のため接岸したものと思われる。

4. おわりに

湖沼の富栄養化によりそこに生息する魚類相がいかなる影響を受けるかといった研究はあまりみられないが過去の漁獲統計などにより経年的な魚類相の変遷を調べ富栄養化の過程と対比させたものがみられる(手塚, 1972参照)。また河川や湖沼の汚染段階によりそこに生息する魚類が異なっていることが知られている(水野, 1975)。貧栄養湖が富栄養化に伴って魚類の生産力が高まることは当然考え得ることであり、時には養殖池で施肥を行い生産力を高めることもある(ニコルスキー, 1963)。また魚類相も富栄養化に伴い冷水性魚から温水性魚へと組成が変わることが知られている(Lagler ほか, 1962)。さらに極端な水質の悪化は魚の種類数や個体数の減少を引き起こす(水野, 1975)。

霞ヶ浦は1960年代後半よりコイ・フナ・ハゼ・エビ・アミの漁獲量の増加が起こり、ワカサギ・シラウオの減少がみられるなど、総漁獲量の増加と魚類組成の変化が起こっていることが知られている(津田・浜田, 1973; 浜田・津田, 1976; 浜田, 1978)。またこれとほぼ並行して霞ヶ浦の透明度が低下する傾向にあるという(外岡・浜田, 1975; 浜田・津田, 1976)。一方高浜入の漁業生産をみると1959年から1963年までの5年間の総漁獲量および1971年から5年間のそれと比較するとやや減少の傾向さえみられ、高浜入の漁業生産は既に1960年代に限界に達していることが推測されている(春日ほか, 1978)。このような魚類相の変遷は湖の富栄養化の進行に伴って変わるようにもみえるが、漁業強度の変化による魚類組成の変化(浜田・津田, 1976)や霞ヶ浦の流出口における水門建設による湖水の淡水化など富栄養化以外の人為的な影響もあり、これらの解析には非常な困難が予想される。

結局霞ヶ浦高浜入奥部入江に生息する大型水生動物は魚類26種、甲殻類4種、両生類1種にのぼる。これらの動物は一生をこの水域で送るものや産卵場所として仔稚魚期をこの水域で過したり、索餌などのためある時期のみこの水域を利用するものなど様々な生活様式がみられる。この水域は水産業面からみるとほぼ漁業生産の限界に達しており、さらに富栄養化の進行など環境変化の影響がこれら動物達に敏感に現れる状態にあるといえる。様々な環境変化がこれら動物の生活環のどの部分に影響を与えるかという分析はさらに継続されなくてはならない。

この研究を進めるにあたり茨城県内水面水産試験場の浜田篤信氏には多大な助言を載き、霞ヶ浦北浦水産事務所からは採集に際し便宜を図られた。玉里村大槻依氏には1年間快く採集を手助けいただいた。また国立公害研究所生物環境部水生生物生態研究室、安野正之室長には助言と共に本報の原稿の校閲をいただいた。これらの方々に深く感謝申し上げる。

5. まとめ

霞ヶ浦高浜入最奥部の入江において張網による漁獲を1977年5月より1978年5月までの1年間に19回行い、漁獲された動物の漁獲高と体長組成などの周年変化を調べた。漁獲された動物は魚類20種、甲殻類3種、両生類1種であった。またその後の採集で新たに魚類6種、甲殻類1種がこの水域に生息することが確認された。これらのうちコイ・フナ類・モツゴ・ハゼ類5種・シヨクヨウガエルの幼生・テナガエビが約93%を占め、これらがこの水域における主要種といえる。漁獲高は各魚種の産卵移動が行われる際や稚魚などが漁獲サイズに達した時期が著しく高い。各魚種の漁獲の減衰率からみて当水域における採捕率は極めて高いことが予想される。6月には周辺の水田に散布された殺虫剤により多くのテナガエビが被害を受けた。

引用文献

- 赤野誠之・佐々木道也・山崎耿二郎・浜田篤信(1975): 霞ヶ浦における養殖ゴイのへい死について——I. 茨城県内水試報告, 12, 25~48.
- 道津善衛 (1955): ウキゴリの生活史. 九大農, 学芸雑誌, 15, 367~374.
- 浜田篤信 (1978a): 霞ヶ浦の魚類. 「環境科学」研究報告集B3-R12-1, 143~150.
- 浜田篤信 (1978b): 霞ヶ浦における漁業. 「環境科学」研究報告集B3-R12-1, 151~156.
- 浜田篤信・津田勉 (1976): 霞ヶ浦の富栄養化に関する研究. III. 窒素収支について. 茨城県内水試報告, 13, 29~43.
- 春日清一・石居進・山根爽一・高野護・松下登久・新井恵子・大貫芳哉 (1978): 霞ヶ浦高浜入における魚類の季節的変動. 国公研 研究発表会予稿集SS/OT-1-78, 95~104.
- 加瀬林成夫・芹田茂 (1956): Shelterの効果に関する基礎的研究. 茨城県水産振興所報告, 1, 11~18.
- 加瀬林成夫・浜田篤信 (1977): 霞ヶ浦北浦産魚類目録. 茨城県内水試報告, 4, 59~64.
- 加瀬林成夫・浜田篤信・熊丸敦郎 (1972): 藻場の造成基準に関する調査. 霞ヶ浦北浦漁業調査報告書, 1~52.
- Lagler, K. F., J. E. Bardach and R. R. Miller (1962): Ichthyology: The Study of Fishes. John Wiley and Sons, Inc., New York, London, Toppan Company Ltd., Tokyo, 545.
- 水野信彦 (1975): 生物指標としての魚類. 「環境と生物指標2—水界編」, 189~196. 共立出版, 東京.
- 村野正昭 (1963): イサザアミ, *Neomysis intermedia* CZERNIAWSKYの漁業生物学的研究. III. 生活史, 特に生殖について. 水産増殖, 12, 135~146.
- 中村一雄 (1944): 沙魚科魚類の生態. 第1報. ウキゴリの成長と年令. 水産学雑誌, 52, 23~30.
- 中村守純・竹内直政・一升輝吉・川合春子・樋口洋子・木村忠亮・松島四郎・日置勝三・秋山哲雄・栢口実 (1971): 霞ヶ浦・北浦水産生物調査報告書. 第1編. 魚介類調査. 資源科学研究所. 65pp.
- ニコルスキー (1963): 魚類生態学. 亀井健三訳. 新科学文献刊行会, 315pp. 米子.
- 岡田称一郎・久保伊津男 (1950): 霞ヶ浦産テナガエビの生態学的研究. 水産動物の研究, 30, 125~139.
- 外岡健夫・浜田篤信 (1975): 霞ヶ浦北浦湖沼観測結果について. 茨城県内水試報告, 12, 65~71.
- 竹内直政 (1971): 霞ヶ浦および北浦におけるウキゴリの生態. 資源科学研究所彙報, 75, 16~24.
- 手塚泰彦 (1972): 環境汚染と生物II. 一水質汚濁と生態系一. 共立出版, 310pp. 東京.
- 津田勉・浜田篤信 (1973): 漁場設計に関する研究—I. 区画の役割について. 茨城県内水面水誌報告, 11, 35~43.
- 上田常一 (1961): 日本淡水エビ類の研究. 園山書店, 186pp. 松江.
- 渡辺仁治 (1973): 霞ヶ浦北浦の付着生物による水質判定. 霞ヶ浦生物調査報告書, 63~74. 建設省霞ヶ浦工事事務所・水資源開発公団霞ヶ浦開発建設所.
- 矢口正直 (1956): 霞ヶ浦におけるワカサギの漁業生物学的研究II. ワカサギの産卵場について. 茨城県水産振興所調査報告, 1, 29~32.

情報エントロピーとAGPによる富栄養化の評価

田井慎吾¹・岡田光正¹・須藤隆一¹

Evaluation of Eutrophication Using Entropy of Discrete Information and Algal Growth Potential

Shingo TAI¹, Mitsumasa OKADA¹ and Ryuich SUDO¹

Abstract

The propriety of using entropy of discrete information, that is, the diversity index (DI) as a measure of eutrophication was examined. The DI for phytoplankton in some lakes was calculated by Shannon's equation. The results showed that the value of DI decreases when there is a massive growth of specific phytoplankton such as *Microcystis*, a blue green algae. The DI for phytoplankton was correlated with biomass which was expected from the COD values. Mixed cultured algal growth potential (AGPM) and DI for phytoplankton in the samples after culture were also observed to assure the effects of the secondary effluent on the diversity. The maximum DI value occurred for phosphorus and nitrogen concentrations of 0.5mg/l and 3mg/l respectively, and for both lower and higher concentrations of P and N the DI value was smaller. It is showed that the COD, AGP, AGPM and DI values for phytoplankton are of significance as an index of the eutrophic state and also for control of eutrophication.

1. はじめに

生態系における生物種の多様性について Odum (水野訳, 1974) は, 海の底生貝類の種類と塩分濃度との関係から, 高塩分および低塩分濃度では種類が少なく, 通常塩分濃度で多いことから“無機環境の中程度の範囲で最大となる”と述べている。“水清ければ魚すまず”の文字通りの意味のように, あまり清浄であれば生物種と個体数は減少するし, 逆に著しく汚染が進んだ場合も同様に生物の多様性は減少する。そして, 生物種が多様であることは動物の餌と植物の栄養に対する嗜好性が異なるため, エネルギー経路が複雑となってその群集のシステムの安定性に通ずる。すなわち生態系の多様性は, そのシステムの安定性と表裏一体のものであり, 安定性を乱す外因としては, 水系では温度, 塩分濃度, 毒物の流入あるいは有機物質の流入などが考えられる。この外乱によって種類組成, 個体数, 種類に鋭敏な変化が表れ, 多様性の変化となって表れる。ここに, 生物種の多様性を汚染の尺度として

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Water and Soil Environment Division, The National Institute for Environmental Studies, P.O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.

利用する意義がある。

水系の場合、第1次生産者である藻類は、水中の無機塩類を利用するため、その濃度、組成などの化学的变化に敏感に反応する。このことから、藻類種の多様性を栄養塩濃度と結びつけることによって富栄養化の指標として利用できることが予見される。河川や湖沼などで物質の計測が古くからなされているが、その膨大な情報と努力がその水域の状態を客観的に表現するのに十分に役立っていない。ここでは湖沼の藻類の計測データを用いて多様性指数（情報エントロピー）

$$DI = -\sum P_i \log P_i \quad (1)$$

を求め、これによって富栄養化を評価することの意義を検討する。また、藻類の混合培養によるAGP (Algal Growth Potential, 藻類潜在生産力) 試験を行い藻類の多様性指数と栄養塩濃度との関係についても検討を加えた。

2. 情報エントロピーによる富栄養化状態の評価

霞ヶ浦水道事務所沖の0.5kmの地点における、表層から1.6mの中層において1972年4月以来調査した藻類観測資料から多様性指数を計算し図1に示した(杉浦ほか, 1978)。霞ヶ浦は夏期から初冬にかけて *Microcystis* が増殖するが、とくに夏期(7~9月)は水の華が形成される典型的な富栄養湖である。また冬期から初夏にかけても *Cyclotella*, *Synedra*, *Merosira* などが優占する。図2には同一資料から個体数を硅藻、緑藻、藍藻に分けて示したが、*Microcystis*, *Cyclotella*, *Chlamydomonas* などの特定の藻類が異常増殖した場合には多様性指数は0.1~0.2に低下していることがわかる。しかし、この多様性指数の変動は水温、日射量などの気象条件によるもので、汚染あるいは富栄養化の指標として用いる場合には同一気象条件によるもので、たとえば夏期の値と比較するなどの配慮が必要である。図3に同一地点における1977年6月~1978年3月における観測データからの、多様性指数と水温の関係を示した。図3でも明らかなように多様性指数は水温の変化に左右され、水温の上昇とと

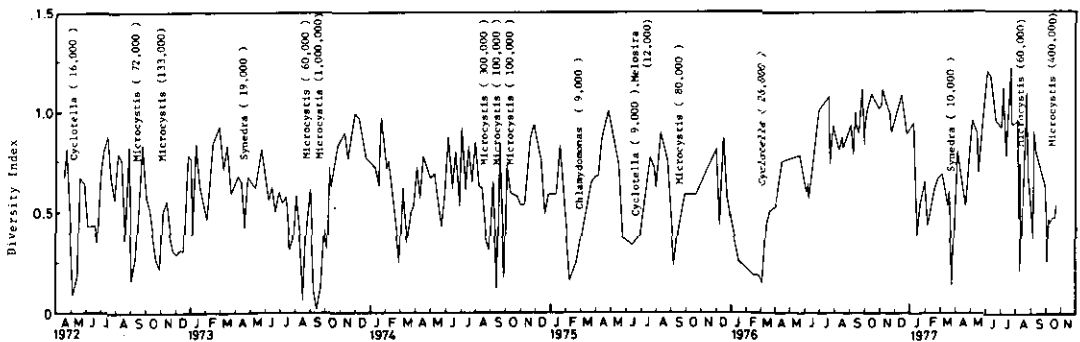


図1 霞ヶ浦における多様性指数の変化

Fig.1 Variation of Diversity Index for Phytoplankton in Lake Kaske Kasumigaura

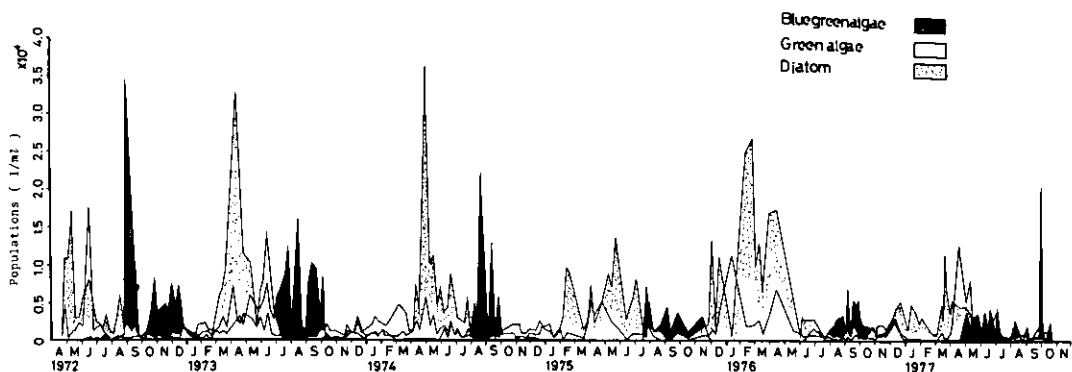


図2 霞ヶ浦における藻類個体数の変化
 Fig.2 Variation of Phytoplankton in Lake Kasumigaura

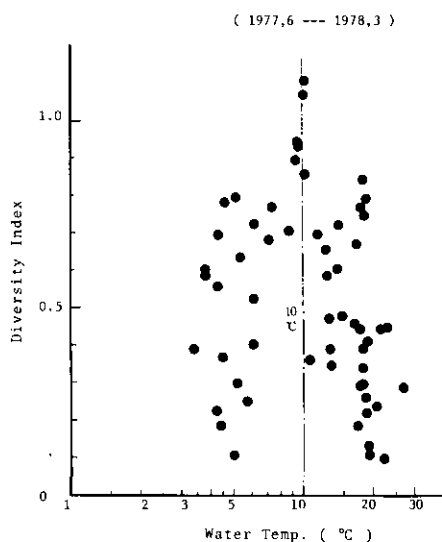


図3 霞ヶ浦における水温と多様性指数の関係
 Fig.3 Relation between Water Temp. and Diversity Index for Phytoplankton in Lake Kasumigaura

もに多様性指数は大きくなり、水温が10℃程度となる12月において最大となり（1978年12月7日においては水温10.1℃、多様性指数1.068、総個体数3,420cells/ml、種数29、優占種は *Cosinodiscus lacustris* 1,200cells/ml、*Microcystis aeruginosa* で820cells/ml）水温が上昇した夏期に多様性指数は0.1（1977年10月3日においては水温22.2℃、多様指数0.095、総個体数410,000 cells/ml、種数2、最優占種 *Microcystis aeruginosa* 404,000cells/ml）に低下している。

さらに、図4には多様性指数と藻類のCODの関係を示したが、水温 10°C 以上の場合はCODが増加すると、すなわち藻類の個体数が増大すると多様性指数が低下していることを示している。気象条件も合せて考えれば湖沼のCODの増大は藻類の多様性の低下、すなわち安定性の低下を表現することを示唆している。図5には1977年夏期における本栖湖、中禅寺湖、湯の湖、霞ヶ浦、1978年夏期の支笏湖の多様性指数とCODの関係を示した。データが不足しているが、それぞれの湖沼ではほぼ藻類は最も増殖した時期と思われるため、CODと同様に多様性指数によってもその湖の富栄養化の状態をほぼ表現しうることが示唆される。

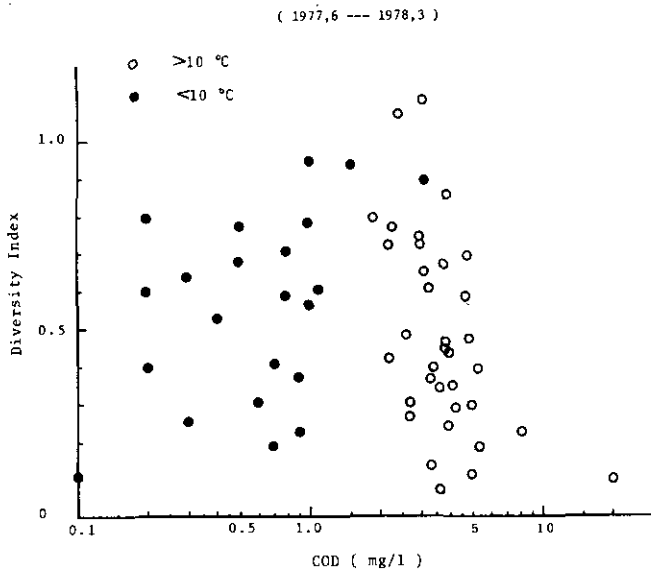


図4 霞ヶ浦におけるCODと多様性指数の関係

Fig.4 Relation between COD and Diversity Index for Phytoplankton in Lake Kasumigaura

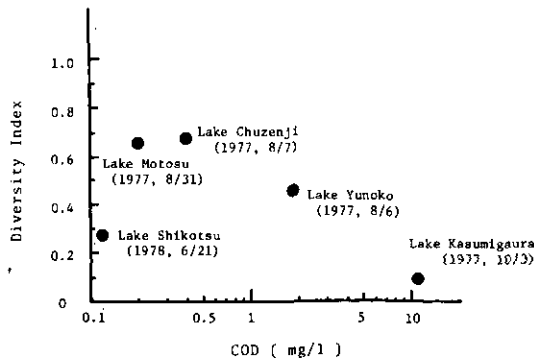


図5 湖沼における藻類の多様性指数とCODの関係

Fig.5 Relation between COD and Diversity Index for Phytoplankton in Several Lakes

3. AGPと多様性指数の関係

AGP試験は検水を蒸気滅菌して生物体および有機化合物中に含まれる栄養塩等を溶出させ、これを 1.2μ の孔径のメンブランフィルタ_ニで濾過し、その濾液に対し*Chlorella* sp.あるいは*Selenastrum capricornutum*を植種して純粋培養によって行われる。しかし湖水、池水などを植種した混合培養によってAGPを求める場合は培養後の検体を顕鏡し藻類の種と個体数を計測して多様性指数を求めることができる。

混合培養によるAGP(田井ほか, 1978)(AGP^Mと呼ぶこととする)の意義は、

- ① 検水に適応した藻類種が優占的に増殖するため純粋培養の場合よりも、より正確なAGPを示す。
- ② 藻類の増殖には細菌との相互作用が考えられるが、混合培養においてはこれも考慮しており、より正確なAGPを示す。
- ③ 有機化合物による細菌等の増殖も、その細菌量を重量で測定するため有機汚染指標としての意味も含まれる。
- ④ 培養後の検水の藻類の種と個体数を計測することによって、多様性指数に制御指標としての意義付けを行うことができる。なお、この場合の多様性指数はAGP^Mと同様に、潜在多様性指数といえるものであり、廃水、あるいは処理水の流入による放流先の湖沼等の藻類種と個体数の変化を予測することが可能となる。

などが考えられる。

3.1 AGPとAGP^Mの関係

霞ヶ浦(1976~1977)、菅生沼(1975~1977)、廃水処理施設の原水および処理水等について、AGPとAGP^Mを測定し、その結果を図6に示した。AGP^M > AGPであり、両者の間には

$$AGP^M = 1.65AGP^{0.939} \quad (r=0.8674) \quad (\text{mg/l}) \quad (2)$$

の関係がある。なお、純粋培養において湖沼水には*S. capricornutum*、廃水および処理水には*Chlorella* sp.を用いた。生活廃水の活性汚泥法処理、脱窒処理、脱リン処理におけるAGPとAGP^Mの測定結果を表1に示したが、生下水と2次処理水はAGPに比べてAGP^Mの方が大きい値を示している。

ところで、湖沼の環境基準はCODで設定されている。湖水、廃水、2次処理水などについてAGP^M試験を行い、培養後の藻類の重量濃度(mg/l)とCODを測定して両者の関係を求め、図7に示した。AGP^MとCODの間には

$$COD = 0.493AGP^M^{0.880} \quad (r=0.9372) \quad (3)$$

の関係が得られた。

さらに、同じ検体について、T-P、T-Nを測定しAGPとT-P、AGPとT-N、AGPとN×Pの関

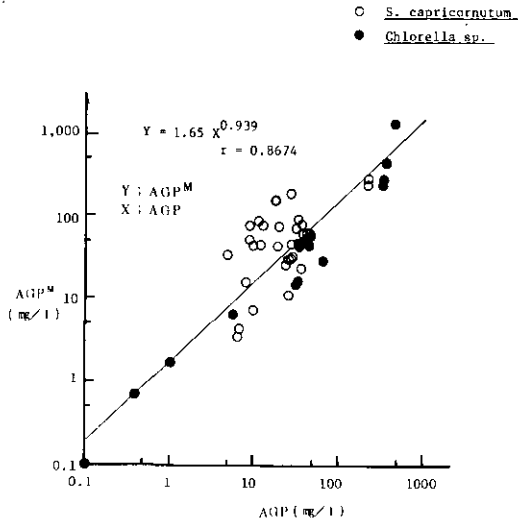


図6 湖沼水、廃水、処理水のAGPとAGP^Mの関係

Fig. 6 Relation between AGP and AGP^M in Lake Water, Waste Water and 2nd Effluent

表1 生活廃水および活性汚泥法、脱窒法、脱リン法処理水のAGP、AGP^M

Table 1. AGP and AGP^M in Domestic Sewage, 2nd Effluent and Some Tertiary Treatment Effluent

Item	mg/l				
	Domestic Sewage	2nd Effluent	Denitrification Effluent	Precipitation Effluent	Sand Filter Effluent
Water Temp. (°C)	25.0	26.0	26.0	26.5	25.5
pH	7.5	7.2	6.8	6.4	6.4
SS	185	8	22	9	0
BOD	92	16	9	2	2
TOD	575 (405)	120 (14)	25 (17)	9 (4)	8 (4)
TOC	70 (49)	15.5 (0.3)	7.0 (3.2)	3.5 (2.5)	2.5 (1.5)
COD	53 (40)	10 (2)	9 (5)	3 (0)	2 (0)
T-P	2.10	1.46	1.40	0.18	0.08
NH ₃ -N	11.4	8.3	0.0	1.1	0.4
NO ₂ -N	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00
NO ₃ -N	2.6	3.6	2.4	2.2	2.3
AGP (S)	478	384	27	33	63
AGP ^M	1272	440	11	15	28

Sample ; Sewage Treatment Plant in Hondagiken Co., Ltd. (Kumamoto) 1977, 7, 7

() ; Particulate TOD, TOC, COD

AGP (S); *Selenastrum capricornutum* AGP

AGP^M ; Mixed Culture AGP

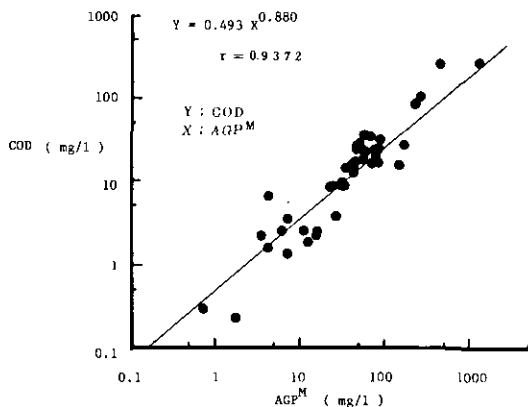


図7 AGP 試験における藻類のCODと藻類量の関係
 Fig.7 Relation between COD and Biomass for Phytoplankton after AGP Test

係を求めた。T-Nとの相関は低いが、T-Pとの間には

$$AGP = 390 (T-P)^{1.527} \quad (r=0.807) \quad (4)$$

ただし、AGP、T-Pはmg/lで表される濃度である。
 N×Pとの間には、

$$AGP = 46 (N \times P)^{0.81} \quad (r=0.8551) \quad (5)$$

の関係が得られた。なお、(2)式と(5)式から

$$AGP^M = 60 (N \times P)^{0.76} \quad (6)$$

が、また(3)式と、(6)式から

$$COD = 27 (N \times P)^{0.67} \quad (7)$$

の関係が得られる。

3.2 AGP^Mと多様性指数

湖沼に対して廃水やその処理水などが流入し、栄養塩濃度が上昇することによって湖沼の生態系が影響を受ける。2で実際の湖沼において廃水、処理水の流入によって藻類の多様性指数が低下することを定性的にはあるが示した。Mitchelら(1971)は91のガラス容器に湖水(71)と底泥(11)を入れ、さらに肥料、下水、2次処理水などを添加し半回分式の藻類培養実験を行い、廃水の添加で

多様性指数が低下することを示している。

霞ヶ浦の湖水に対して団地下水処理場の2次処理水を添加し、500mlを20℃、3,000lxで20日間培養しAGP^Mを測定するほか、顕微鏡によって藻類の種と個体数を計測した。その結果は表2に示した。この結果による廃水の2次処理水の添加率が20%、栄養塩濃度はN=2.4mg/l、P=0.58mg/lと実際の湖沼よりも高濃度で高い多様性を示している。

表2 湖水への2次処理水添加によるAGP^Mと多様性指数の変化

Table 2. AGP^M and Diversity Index in Water of Lake Kasumigaura added 2nd Effluent,

(1978, 4/9)

Adding Rate of 2nd Effluent	0%	1%	3%	5%	10%	15%	20%	50%	100%
Inorg.-N (mg/l)	0.40	0.48	0.63	0.79	1.18	1.57	1.96	4.30	8.20
PO ₄ -P (mg/l)	0.14	0.16	0.19	0.22	0.30	0.38	0.49	0.93	1.72
AGP ^M (mg/l)	10.0	20.2	30.7	40.5	69.4	88.9	111.5	140.2	168.1
COD(T) (mg/l)	5.0	11.0	20.2	22.8	26.5	33.3	39.4	74.8	84.3
COD(P) (mg/l)	1.1	7.3	15.1	15.9	18.3	26.8	31.0	51.5	61.0
Population (x10 ⁶ , 1/ml)	2.49	4.38	10.97	6.17	5.41	9.62	12.07	8.82	9.01
Species	3	4	4	6	6	6	3	3	2
DI (decit)	0.010	0.067	0.038	0.084	0.103	0.110	0.116	0.020	0.000

2nd Effluent; Obori Domestic Sewage Treatment Plant (Tsuchiura, Ibaraki)
 Inoculum ; Water of Lake Kasumigaura
 Volume ; 500ml
 Culture Condition; 14 days, 20℃, 3000lx

また、栄養塩を含んだ地下水 (inorg-N 0.4mg/l, PO₄-P 0.14mg/l) に対して廃水の2次処理水を添加した同様な実験の結果を表3に示したが、この場合も添加率15%程度が最大の多様性指数を

表3 地下水への2次処理水添加によるAGP^Mと多様性指数の変化

Table 3. AGP^M and Diversity Index in Ground Water added 2nd Effluent

(1978, 3/7)

Adding Rate of 2nd Effluent	0%	5%	10%	20%	100%
NH ₃ -N (mg/l)	0.00	0.30	0.60	1.20	6.00
NO ₃ -N (mg/l)	0.80	0.90	1.00	1.20	2.80
T-P (mg/l)	0.12	0.23	0.35	0.58	2.40
PO ₄ -P (mg/l)	0.00	0.11	0.22	0.44	2.30
SS (mg/l)	10.2	9.7	9.6	8.2	0.0
AGP ^M (mg/l)	24.4	74.6	134.0	169.4	193.8
DI (decit)	0.133	0.200	0.270	0.457	0.056
Population (x10 ⁶ , 1/ml)	46.8	225.4	439.2	616.3	1015.7
Species	4	10	13	9	3

2nd Effluent; Obori Domestic Sewage Treatment Plant
 Inoculum ; Water of Lake Kasumigaura
 Culture Condition; 20 days, 20℃, 3000lx

示している。

いずれの実験においても、さらに添加率を上げ、2次処理水のみとした場合は種数も減少し多様性指数は著しく低下している。

図8に両者の実験におけるAGP^Mと多様性指数の関係を示したが、霞ヶ浦湖水に2次処理水を添加した場合はAGP^Mが上昇するにつれて多様性指数が大きくなり、170mg/l程度のところで多様性指数が最大値を示し、その後急激に多様性指数が低下し、200mg/lでDI=0に近づいている。地下水に2

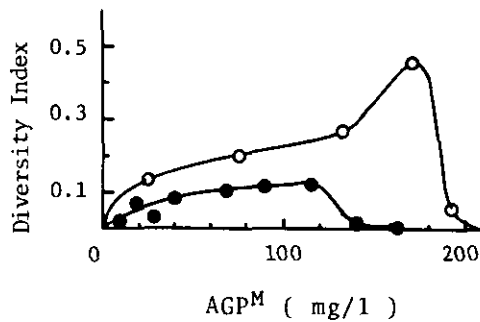


図8 AGP^Mと多様性指数の関係

Fig. 8 Relation between AGP^M and Diversity Index for Phytoplankton after AGP Test

次処理水を添加した場合も、添加率の上昇に伴ってAGP^Mが増加し、同時に多様性指数も徐々に上昇してAGP^M120mg/l程度で最大となり、160mg/lで多様性指数は0すなわち *Chlorella* sp. 1種のみとなった。湖水中に2次処理水を添加した場合に比べて、地下水に添加し、湖水を植種した場合の多様性指数が小さいのは、植種の藻類種にかたよりがあったものと思われる。多様性指数の最大値の栄養塩濃度はN約2mg/l程度、Pは0.5mg/l程度であって、3における実際の湖沼の栄養塩濃度（中禅寺湖 N=0.08mg/l, P=0.013mg/l, 湯の湖 N=0.3mg/l, P=0.05mg/l, 霞ヶ浦 N=0.5mg/l, P=0.05mg/l程度）よりも高い値となっている。

藻類の多様性指数は栄養塩濃度によるほか、図3に示したように気象条件（温度、照度）に大きく左右され、AGP^M試験によるAGP^Mすなわち栄養塩濃度と多様性指数は、その培養条件固有のものであって、湖沼の多様性指数と廃水の栄養塩濃度とを結びつけるにはさらに多くの検討すべき事項がある。

4. まとめ

Shannonの式による多様性指数の式によって湖沼の藻類の多様性指数を求め、その値が低下するのは *Microcystis* などの一種の藻類の異常増殖を表現していることを示した。また、湖沼の多様性指数と藻類のCODのデータから、藻類の個体数あるいは総重量と多様性指数には一定の関係が見られるこ

とを示すとともに、AGP試験を混合培養によって行い、AGP^M試験による藻類重量 (AGP^M) と培養後の多様性指数の関係から生活廃水の2次処理水の添加率が15~20% (N-3mg/l, P-0.5mg/l程度)程度で多様性指数が最大となることを示した。

AGP^Mと多様性指数との関係については、さらにデータの蓄積が必要であるが、多様性指数を富栄養化物質の処理の制御指標としての利用と、栄養塩濃度と湖沼の生態系との関係の定量的な把握とに利用できるという意義を有する。

引用文献

- Odum, E.P., 水野寿彦訳 (1974): オダム生態学. 築地書館, 47.
- Mitchel, D., J.C. Buzzell Jr. (1971): Estimating Eutrophic Potential of Pollution. ASCE, 97, No. SA4, 453~465.
- 杉浦則夫・宮原怜二・岡田光正・須藤隆一 (1978): 霞ヶ浦における植物性プランクトンの経年変動. 第12回水質汚濁研究に関するシンポジウム講演集, 73~77.
- 田井慎吾・針生晋・岡田光正・須藤隆一 (1978): 富栄養化の評価ならびに制御指標の検討——COD^Mについて. 水処理技術, 19(5), 29~43.

けい光分光光度計によるクロロフィル *a* の連
続測定とその分布特性に関する一考察

津野 洋¹・細見正明¹

Continuous Measurement of Chlorophyll-*a* by Spectro
Fluorometry and Distribution in Lakewater

Hiroshi TSUNO¹ and Masaaki HOSOMI¹

Abstract

The applicability of fluorometer for continuous measurement of chlorophyll-*a* is discussed. It is shown that this may be accomplished by comparison and calibration with the acetone-extract spectrophotometric method.

By continuous measurement of chlorophyll-*a* with fluorometer, the horizontal and vertical concentration distribution were determined in Lakes Kasumigaura, Yunoko, and Hinuma. It was observed that the horizontal distribution was considerably affected by lake currents as well as by inflow of nutrients from tributaries. For the vertical profile, the maximum chlorophyll-*a* concentration was found at the thermocline and below the eutrophic depth the concentration was very low during the stagnation period, and its distribution during the circulation period become uniform in lakes of about 10 meters depth.

1. はじめに

現在、日本の各地の湖沼においては富栄養化問題が顕在化し、その現象のは握および対策等が必要となってきている。富栄養化問題の主役である藻類量の指標としては一般にクロロフィル *a* 量で取り扱われることが多い。クロロフィル *a* 量の測定法としては、フィルターによる濾過捕集後アセトンにより抽出して、その抽出液の吸光度を測定し計算する方法 (Strickland and Parsons (1965)) が一般に用いられている。この方法では、比較的時間を要し、湖内でのクロロフィル *a* の水平および垂直分布特性等のは握は困難である。本研究では、試水中のクロロフィル *a* の直接かつ連続的な測定へのけい光分光光度計の適用性について検討を試みる。

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Water and Soil Environment Division, The National Institute for Environmental Studies, P.O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.

2. 実験方法

実験装置およびそのフローシートを図1に示す。図1(1)は実験室での検討の場合であり、図1(2)は船上等現場での測定の場合である。けい光分光光度計はM社製(クロロフィルa測定用キット;ブルーランプ、Excitationフィルター(特性波長420nm前後)、Emissionフィルター(特性波長660nm前後)、6mlフローセルのものを用いた。図1(1)の場合の装置の応答特性を図2に示す。これより、実験室内での測定は通水流量56ml/minで2分間に測定した。

比較検討あるいは検量線作成のためのクロロフィルaの濃度は、アセトン抽出-吸光光度法のUNESCO/SCOR法(Strickland and Parsons (1965))により測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 けい光分光光度計のクロロフィルa連続測定への適用性

養魚池および霞ヶ浦の試水を直接にけい光分光光度計で測定した場合のクロロフィルaとけい光単

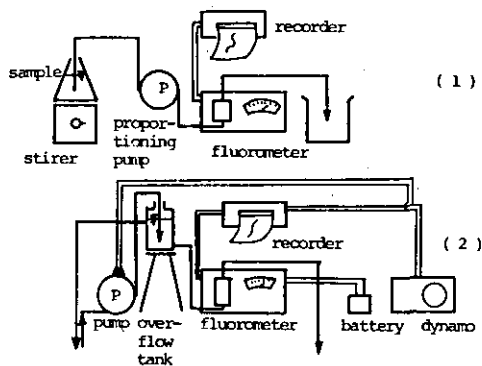


図1 測定装置

Fig. 1 Apparatus for measurement of chlorophyll-a
(1) Apparatus in laboratory, (2) Apparatus for field survey

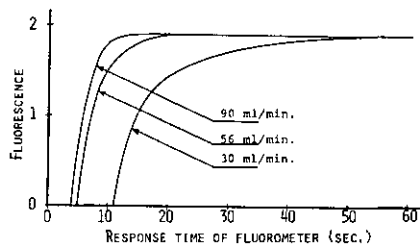


図2 測定装置(1)の応答特性

Fig. 2 Response characteristics of the apparatus for the measurement of chlorophyll-a (1)

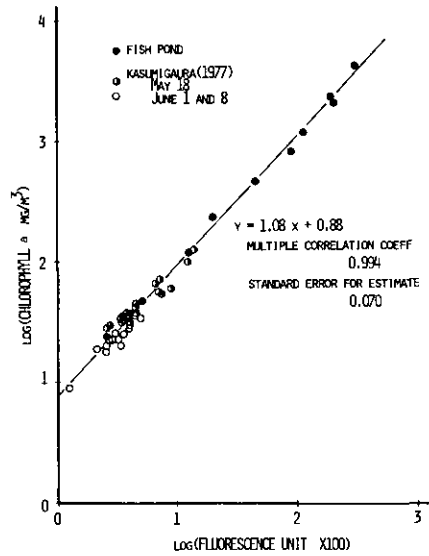


図3 けい光単位とクロロフィル *a* との関係

Fig.3 Correlation between intensity of fluorescence and chlorophyll-*a* concentration

位との関係を図3に示す。これより、クロロフィル *a* は、けい光単位の1.08乗に比例することが示されているが、2オーダー程度の範囲の分布のクロロフィル *a* 濃度の測定の場合は、両者の関係を直線表示しても十分であると判断できよう。両者を直線関係で示した一例を図4に示す。これより、対象試水の濃度範囲に適した検量線を作成することにより、十分に両者を直線表示できることが示されている。特に、5月18日のデータは、降雨後で濁質が湖内に流入した場合であるが、土砂による濁質（赤色発光ダイオードあるいは1/透明度）の影響をほとんど受けずにクロロフィル *a* の濃度を表示していることが図5に示されている。

種々の試水についてのクロロフィル *a* とけい光単位との関係を表1にまとめて示す。いずれの試水についても両者は良好な直線関係にあることが示されている。しかしながら、*Microcystis* sp. のようなフロックを生ずる藻類の場合は直線関係の傾きが大きくなる（けい光単位が小さく表れる）ことが示されている。したがって、けい光分光光度計は、自然水域の試水に対してもクロロフィル *a* の直接連続測定に十分に用いることができるが、これだけに頼ることなくアセトン抽出法も併用して対象水域に適した検量線を作成することが重要であろう。

3.2 クロロフィル *a* の現場での連続測定と分布特性

図1(2)に示す実験装置を船に積み込んで、クロロフィル *a* の水平および垂直方向の分布特性について測定した。

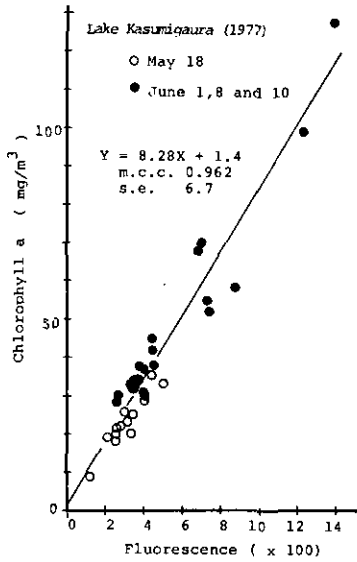


図4 けい光単位とクロロフィルaの直線関係

Fig. 4 Linear Regression between intensity of Fluorescence and Chlorophyll-a concentration

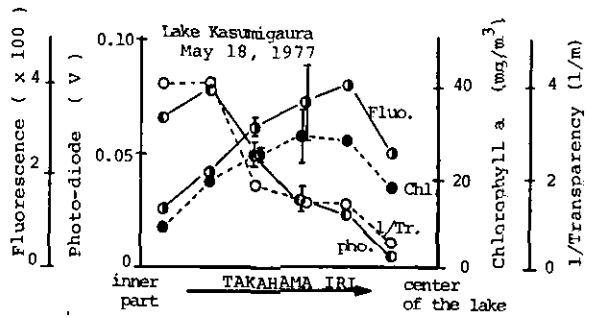


図5 けい光単位と濁質物質

Fig. 5 Response of fluorometer to turbid material

表1 クロロフィルaとけい光単位との関係

Table 1. Correlation between chlorophyll-a concentration and fluorescence

sample	regression linear curve		multiple correlation coefficient	standard error for estimate (chl. mg/l)	note
	slope (chl. mg/l/fluo.)	constant (chl. mg/l)			
fish ponds	1.340	-0.1270	0.987	0.2332	dominant; <i>Chlorella</i> sp. chl.; from 0.024 to 4.3
	0.961	0.0417	0.997	0.0273	chl.; from 0.024 to 0.86
Kasumigaura					
May 18, 1977	0.673	0.0033	0.936	0.0025	! turbid after rain chl.; from 0.0087 to 0.037
June 1, 8, 10	0.792	0.0053	0.963	0.0072	chl.; from 0.028 to 0.128
June 22, 29, and July 6	0.933	0.0020	0.957	0.0044	chl.; from 0.017 to 0.070
Aug 20	2.070	-0.0049	0.973	0.0049	chl.; from 0.004 to 0.067
Aug 25, and Sept, 6	1.270	-0.0029	0.949	0.0110	chl.; from 0.015 to 0.103
"	4.100	-0.027	0.990	0.0230	dominant; <i>Microcystis</i> sp. chl.; from 0.111 to 0.474
Oct, 5	2.473	-0.0193	0.917	0.0319	chl.; from 0.026 to 0.131
"	1.646	0.0014	0.925	0.0057	except for the station with much <i>Microcystis</i> floc chl.; from 0.026 to 0.069
Yunoko (Aug, 6) and Chuzenjiko (Aug, 6)	0.780	0.0009	0.970	0.0030	dominant; <i>Asterionella</i> sp. chl.; from 0.0006 to 0.0313
Hinuma (Sept, 27, 28)	0.670	0.0067	0.914	0.0072	chl.; from 0.057 to 0.105
Yunoko (Nov, 20) and Chuzenjiko	1.023	0.0006	0.954	0.0030	chl.; from 0.0008 to 0.0279

霞ヶ浦高浜入で水平方向連続測定した記録の一例を図6に示す。最奥部である高崎入の水が流れる出島寄り(津田ほか(1968))でクロロフィルaが高いことが示されている。このときの高崎入のクロロフィルaの水平分布を図7に示す。これは、けい光分光光度計の連続トラバース測定をもとに補完作図したものであるが、水の滞留しやすい位置(安岡・宮崎(1977))のクロロフィルaの濃度が高い傾向が示されている。

高浜入入口(田伏-高須間)における夏期(7月5日, 1977年)のクロロフィルaの垂直分布を図8に示す。この日は一日中微風の日であったために、日中2~3mで温度成層が形成されるにつれて、クロロフィルaは2~3mを境にして上部で多く下部で少なくなる傾向にあることが示されている。

奥日光湯ノ湖における夏期と秋期のクロロフィルaの水平分布の例(各々8月6日および10月20日, 1977年)を図9, 10に示す。湯ノ湖では淡水研事務所前付近より、藻類の増殖を阻害する物質を含む温泉水が流入し、一方湯元の町の下水はすべて下水処理場に集められ処理後に湯ノ湖に放流されている。また、湖からの流出はほとんどが湯滝からである。これらを念頭に入れて考えると、クロロフィルaは、滞水域で濃度が高く、またその水面面での水平分布は、風等によって起こされるであろう

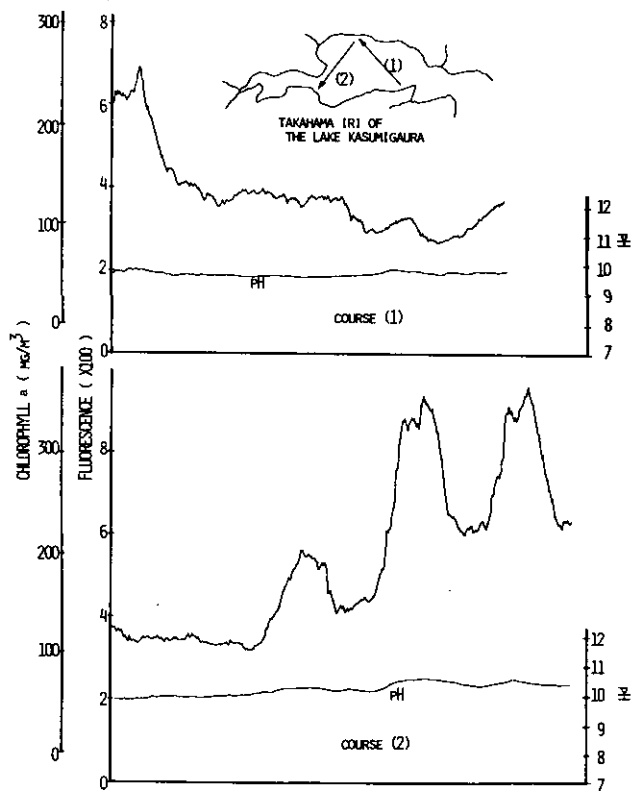


図6 高浜入における水表面でのクロロフィルaとpHの水平変動の例
(9月6日12:00~13:0, 1977)

Fig. 6 An example of horizontal variation of chlorophyll-a and at pH surface in Takahamairi Bay at 12:00-13:00 on Sept. 6 in 1977

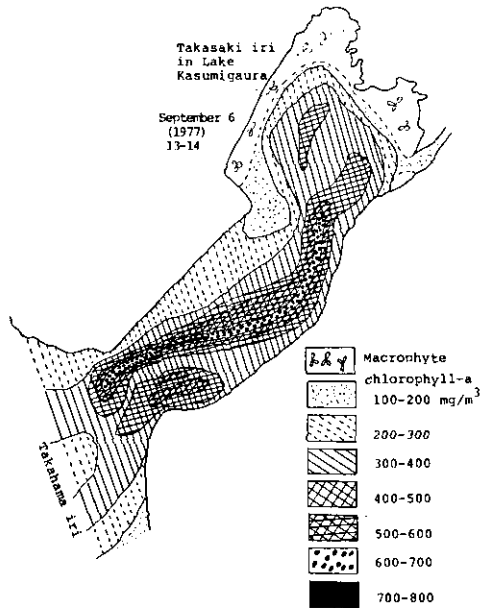


図7 高浜入における水表面でのクロロフィルaの水平分布の例 (9月6日13:00~1400, 1977)
 Fig.7 Horizontal distribution of chlorophyll-a at surface in Takasakiri Bay on Sept. 6, 1977

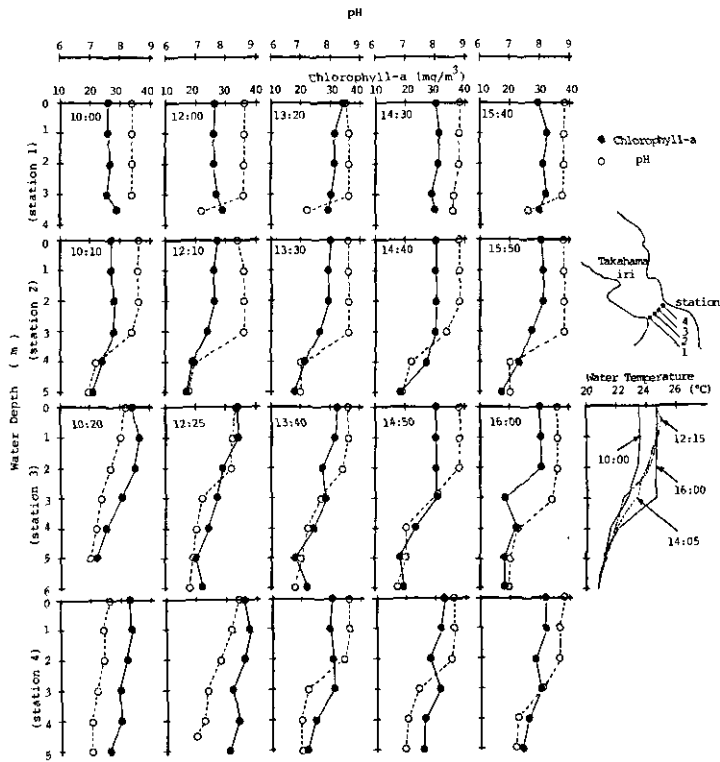


図8 高浜入におけるクロロフィルa, pHおよび水温の垂直分布の例 (7月7日, 1977)
 Fig.8 Vertical distribution of chlorophyll-a, pH and water temperature in Takahamairi Bay on July 7, 1977

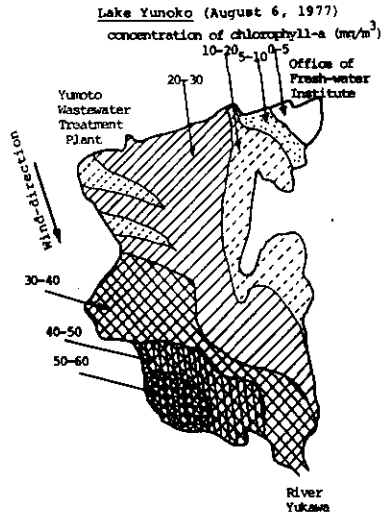


図9 夏期の湯ノ湖におけるクロロフィルaの水表面での水平分布の例
 Fig. 9 Horizontal distribution of chlorophyll-a at surface in Lake Yunoko in summer

湖流による影響を大きく受けていることが推察される。

同じ時期の湯ノ湖におけるクロロフィルaの垂直分布特性を図11に示す。夏期の成層期では、クロロフィルaは水温躍層付近で最大濃度となり、それ以深ではいくらか低下し、この時期の成層層の深さである3~4m以深では急激に低くなることが示されている。循環期である秋期では、クロロフィルaの垂直分布は夏期のそれと比して、均一にはなっているが、太陽光の強い水面より1m程度の所までは濃度が高い傾向が示されている。

4. 検 討

表1に示されるようにフロックを生ずる藻類の場合は、けい光単位が小さく表れる傾向にある。そこで、霞ヶ浦高浜入より採取したフロック状 *Microcystis* sp. を種々の時間超音波モテジナイズ（位相2，出力5）した場合の吸光単位の変化を図12に示す。長時間ホモジナイズするにつれて、けい光単位は大きくなり、300秒でも安定しない。したがって、ホモジナイズ処理をせずに直接測定し、各々の対象試水にあった検量線を測定の度に作成することが望ましいと考えられる。

直接試水をセルに入れ、A社製のけい光分光光度計にて、ExcitationおよびEmission波長をスキャニング測定した結果を図13に示す。本研究で用いた連続分光光度計のクロロフィルa測定用キットの選択フィルターでは、Emission側では660nm付近の波長特性を有し図13のピークと一致するが、Excitation側では波長特性420nm付近であり（図14）（Turner Designs(1976)）図13のピークと一致しなくて、わずかに340~350nm付近で交差する程度である。藻類中のクロロフィルを90%アセトンで抽出後、A社製のけい光分光光度計によりスキャニング測定を行った。Emission側では直接測定と同様に波長660nm付近でピークが存在したが、図15に示すように、Excitation側では図13に示される波

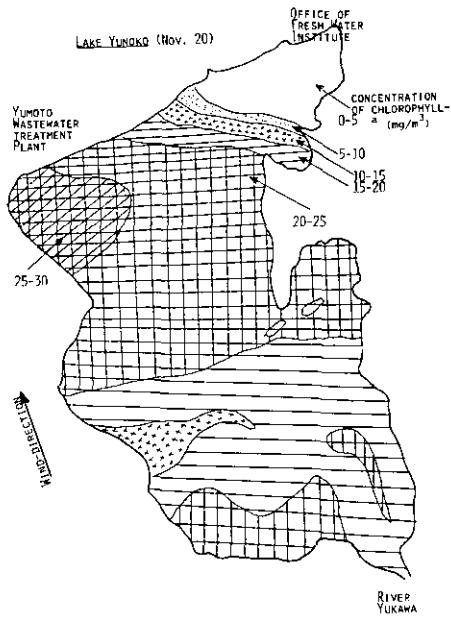


図10 秋期の湯ノ湖におけるクロロフィルa
の水表面での水平分布の例

Fig. 10 Horizontal distribution of chlorophyll-a
at surface in Lake Yunoko in autumn

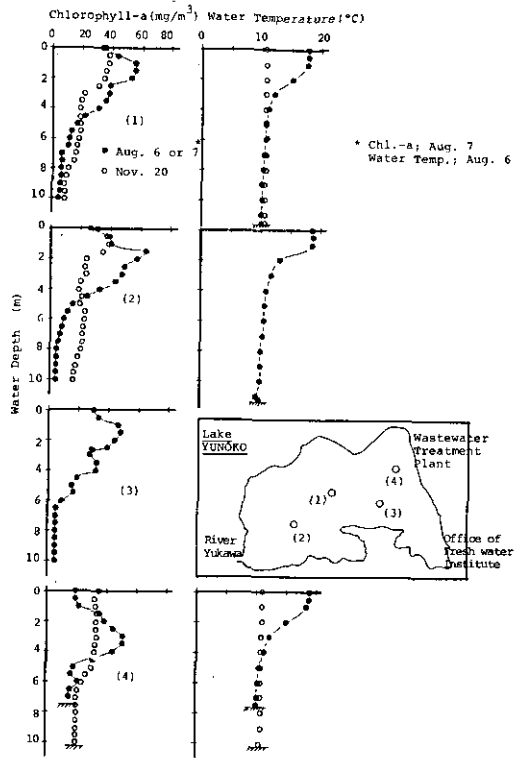


図11 湯ノ湖における夏期および秋期でのクロロ
フィルaおよび水温の垂直分布の例

Fig. 11 Vertical distribution of chlorophyll-a and
water temperature in Lake Yunoko in
summer and autumn 1977

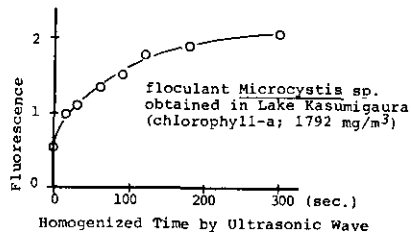


図12 超音波ホモジナイズによる
けい光の差異

Fig. 12 Effectiveness of ultrasonic treatment
agai the measurement of fluorescence
in the water sample containing large
colonies of *Microcystis*

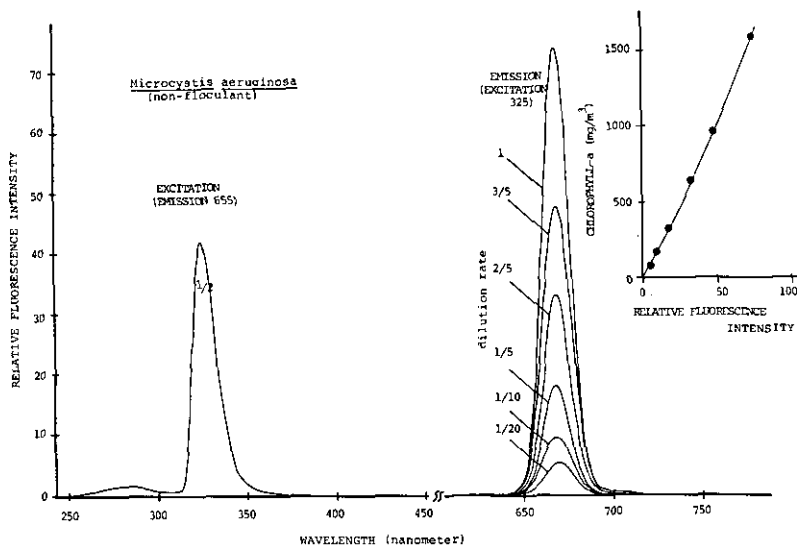


図13 直接試水測定の際の Excitation と Emission のスペクトル特性

Fig. 13 Excitation and Emission spectra for direct measurement of water samples

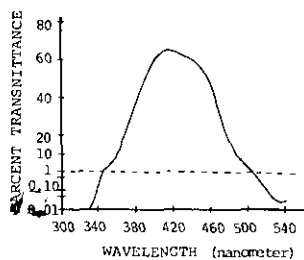


図14 Excitationフィルターの光の透過の特性波長

Fig. 14 Percent transmittance of the Excitation-filter versus wavelength

形と異なり、325nm 付近のピークの他に 420nm 付近でもピークをもつ波形が示された。図13および図15に示される波形の差異の検討をも含めて、クロロフィル a の直接測定の際のより選択性および感度の得られる Excitation 側のフィルターの選択の検討が必要であろう。

5. まとめ

湖水のクロロフィル a の直接連続測定への連続式けい光分光光度計の適用性について検討を試みた。その結果、常にアセトン抽出方法と比較し適切な検量を作成することにより、十分に適用できることを示した。

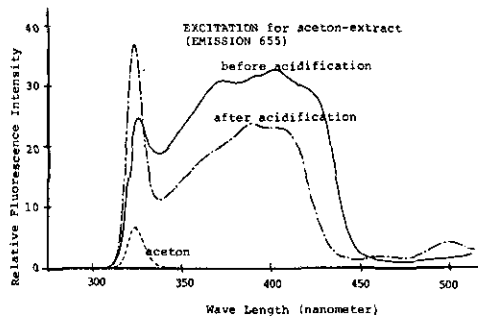


図15 アセトン抽出サンプルのExcitationのスペクトル特性

Fig. 15 Excitation spectra for acetone-extracted sample

クロロフィル *a* の直接連続測定により、湖沼でのその水平および垂直分布特性の検討を試みた。その結果、クロロフィル *a* の水平分布は栄養塩の流入箇所や湖流により大きく影響を受けること、そしてその垂直分布では水温躍層付近で最大となり、生産層の深さ以深では急激に低下すること、および10m程度の湖では循環期は成層期よりも均一になること等が示された。

引用文献

- Lorenzen C.J. (1966) : A Method for the Continuous Measurement of in vivo Chlorophyll Concentration. *Deep-Sea Research*, 13, 223-227.
- Strickland J.D.H. (1968) : Continuous Measurement of in vivo Chlorophyll. *Deep-Sea Research*, 15, 225-227.
- Strickland J.D.H. and Parsons T.R. (1965) : A Manual of Sea Water Analysis. 2nd Edition, Fish. Res. Board Canada Bulletin, 125.
- Turner Designs (1976) : Operating and Service Manual, Model 10 Series Fluorometers.
- 安岡善文・宮崎忠国 (1977) : 遠隔計測による湖水域の定量的水質計測. 第3回リモートセンシングシンポジウム.
- Yentsh C.S. and Menzel D.W. (1973) : A Method for the Determination of Phytoplankton Chlorophyll and Phaeophytin by Fluorescence. *Deep-Sea Research*, 10, 221-231.

水の華および赤潮生物の培養について

矢木修身¹ 岡田光正¹ 須藤隆一¹

Cultivation of *Microcystis* and Red-tide-organisms Osami YAGI¹, Mitsumasa OKADA¹ and Ryuichi SUDO¹

Abstract

Three strains of *Microcystis*, KM-1, KM-2 and KM-3, were isolated from the algal bloom in Lake Kasumigaura. Two strains, KM-1 and KM-2, were identified as *M. aeruginosa* and the KM-3 strain was identified as *M. flos-aquae*. For the growth of *M. aeruginosa*, KM-1, optical light intensity and temperature were 1000 lx and 30°C, respectively. A small amount of Fe-citrate and EDTA highly accelerated the growth of *M. aeruginosa*.

Moreover, two strains of red tide fragellates, *Exuviaella* sp. and *Heterosigma* sp., were isolated from Tokyo Bay and *Skeletonema costatum* was isolated from Seto Inland Sea. The growth curves of the two fragellates were studied. The doubling times for *Exuviaella* sp. and *Heterosigma* sp. were 0.86 and 1.2 days, respectively. The growth rate of the two fragellates were appreciably accelerated by the addition of FeCl₃.

1. はじめに

湖沼および内湾などの閉鎖水域における富栄養化現象は、今日直面している水質汚濁の最も大きな問題の一つとなっている。この富栄養化現象の一つが水の華であるが、とくに“アオコ”と呼ばれる *Microcystis* などの藍藻類による水の華は霞ヶ浦、諏訪湖等各地の富栄養化の進んだ湖沼で大発生を続けている。この水の華は湖沼の美観を損なうことはもとより、悪臭の発生、上水道の異臭味および水処理障害、魚類のへい死等多くの被害をもたらしている。しかしながらこの水の華の発生機構に関して、栄養塩類とくに窒素とリンが重要な因子であるといわれているが(村上, 1976, 柳田, 1976), 必ずしも窒素とリンだけでは説明できず不明の点が多いのが現状である。この問題を解明するためには、フィールド調査をすると同時に実験室内で水の華現象を再現ならしめることが必要である。そこで霞ヶ浦に大発生する水の華より *Microcystis* の分離を行うと同時にその培養特性について検討を行った。さらに同様の観点から赤潮生物の分離培養を行った。

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Water and Soil Environment Division, The National Institute for Environmental Studies, P.O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.

2. *Microcystis*の分離培養

(1) 分離方法

1977年9月と10月、水の華の発生している霞ヶ浦の水より *Microcystis* の分離を行った。すなわち試験管に10mlの培地を加え、これに水の華の発生している霞ヶ浦の水0.1mlを添加し、光を照射して静置集積培養を行った。培養10日後、*Microcystis* の増殖の認められたものについて無菌水で希釈し寒天様被膜で包まれた2~10個程度の小さな *Microcystis* のコロニーを、キャピラリーを用いて顕微鏡下で分離し、培養を行った。培養2週間ごとに、*Microcystis* が単藻培養できるまで同様の操作をくり返した。表1に分離用培地を示した。培養条件は、照度は500~2000lxとし、温度は30℃で行った。

表 1 ミクロシステイス用分離培地
Table 1. Media for *Microcystis*

NaNO ₃	0.50 g
K ₂ HPO ₄	0.04
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.08
CaCl ₂ ·2H ₂ O	0.04
Fe-citrate	0.006
Na ₂ SiO ₃	0.06
Citrate	0.006
Na ₂ CO ₃	0.02
Na ₂ ·EDTA·2H ₂ O	0.001
Deionized water	11

(2) 分離結果

その結果 KM-1, KM-2, KM-3, の3株の群体を形成する *Microcystis* の分離に成功した。顕微鏡観察の結果, KM-1株は細胞の直径が6~7μ, gas vacuoleを有し, 寒天様被膜が明瞭なことから *M. aeruginosa* と同定した。KM-2株は常にひも状を呈するものであるが, 細胞の直径が6~7μ, gas vacuoleを有することからこれも *M. aeruginosa* に属するものと考えられる。KM-3株は, 直径が4μとやや小さく, gas vacuoleは有しているが, 寒天様被膜があまり明瞭でないことから *M. flos-aquae* と同定した。

3. *Microcystis*の増殖特性

(1) 実験方法

KM-1株の *M. aeruginosa* を用いて増殖特性について検討を加えた。培養方法は, 50mlの3角フ

ラスコに20mlの培地を加え、連続照射の条件下で静置培養を行った。藻体量の測定は、一定期間培養した藻体を、50W、30秒間、超音波処理を行い細胞をばらばらにした後、コールターカウンターを用いて、細胞数と平均藻体容量を測定し、この値から乾燥藻体重量を算出した。また使用した培地組成は以下に示すとおりである。すなわち、 NaNO_3 100mg、 K_2HPO_4 10mg、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 75mg、 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 40mg、 Na_2CO_3 20mg、Fe-citrate 6mg、citrate 6mg、 $\text{Na}_2\text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 1mgを純水 1lに溶かしたものである。なお無機塩類の添加効果試験においては、対象とする無機塩類の濃度のみを変化させ使用した。培養温度は30℃とした。

(2) 照度の効果

*M. aeruginosa*の増殖に及ぼす照度の影響について検討した結果を図1に示した。500~4000lxの条件下で培養を行ったが、培養4日目までは照度によりそれほど増殖速度に変化は認められないが、6日目になると2000lxでは増殖が停止し、3000lx以上の場合は高照度による阻害が認められ、藻体の分解が認められた。増殖には1000lxが最適であったが、500lxでもかなり高い増殖速度を示した。以後の実験では、照度を1000lxの条件下で行った。

(3) 温度の効果

増殖に及ぼす温度の影響を図2に示した。25℃~35℃において増殖が非常に良く、中でも30℃が最適であった。また20℃では増殖が非常に遅く、40℃ではほとんど増殖が認められなかった。この結果から *Microcystis*の増殖速度は温度により著しい影響を受け、特に水温の高くなる夏期が増殖に適していることが判明した。

(4) リンの効果

図3は増殖に及ぼすリンの効果について示したものである。リンとして K_2HPO_4 を用いているが、 K_2HPO_4 が1mg/l以上添加すると増殖は非常に良いのに対し、1mg/l以下では増殖がかなり抑制された。なおリン酸塩無添加でも、14日間で、藻体が約12mg/l生産されたが、これは前培養からのリンのもちこみによるものと考えられる。

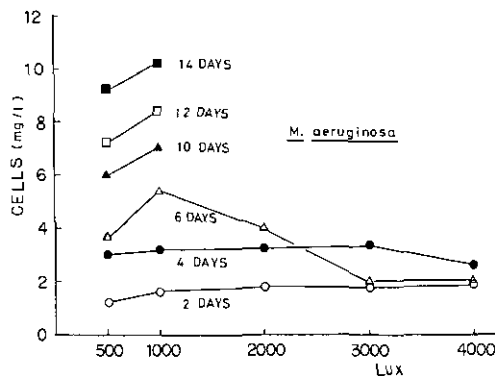


図1 増殖に及ぼす照度の効果

Fig.1 Effect of light intensity on the growth of *Microcystis aeruginosa*

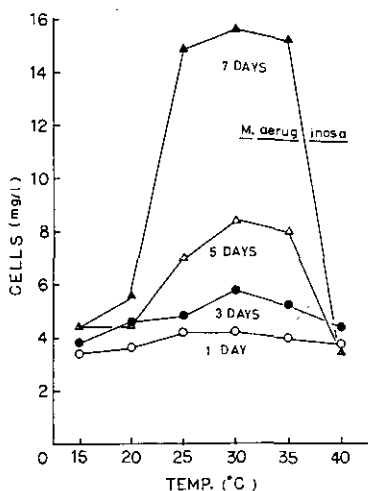


図2 増殖に及ぼす温度の効果

Fig.2 Effect of temperature on the growth of *M. aeruginosa*

(5) クエン酸鉄の効果

図4にクエン酸鉄の増殖に及ぼす効果を示した。1mg/l添加すれば、増殖は十分に認められるが、10mg/lと多量に添加すると増殖が抑制された。また無添加すると増殖が抑制された。また無添加の場合は、約10日ほどで *Microcystis* の増殖は停止し、分解が始まる現象が認められた。

(6) クエン酸の効果

図5にクエン酸の増殖に及ぼす効果を示した。無添加で良好な増殖が認められ、この培地においてはクエン酸は必要ないことが判明した。

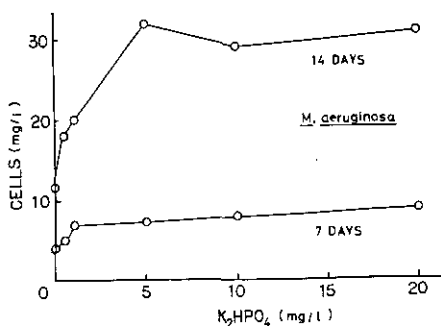


図3 増殖に及ぼすリンの効果

Fig.3 Effect of phosphate on the growth of *M. aeruginosa*

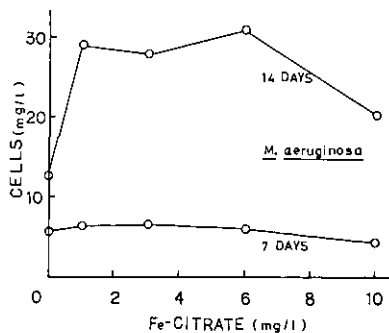


図4 増殖に及ぼすクエン酸鉄の効果

Fig.4 Effect of Fe-citrate on the growth of *M. aeruginosa*

(7) EDTAの効果

EDTAの増殖に及ぼす影響を図6に示した。*Microcystis*の増殖にはEDTAが1mg/l以上存在する必要があることが判明した。

1mg/l以下では増殖が著しく阻害された。

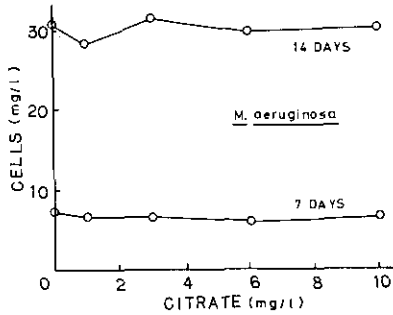


図5 増殖に及ぼすクエン酸の効果

Fig. 5 Effect of citrate on the growth of *M. aeruginosa*

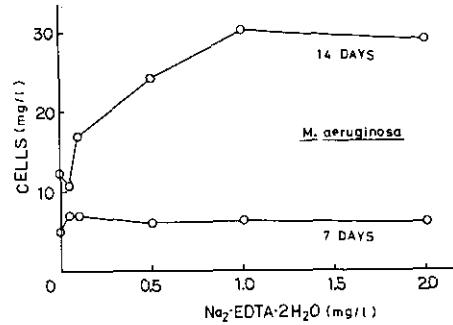


図6 増殖に及ぼすEDTAの効果

Fig. 6 Effect of EDTA on the growth of *M. aeruginosa*

4. 赤潮生物の分離培養

(1) 分離方法

1977年10月の播磨灘の海水ならびに1977年11月の東京湾の海水を用いて赤潮生物の分離を行った。赤潮生物の中で漁業被害を伴うものはほとんどがべん毛藻であることから、主にべん毛藻の分離を目的として実験を行った。べん毛藻は一般に増殖にビタミン、塩基等の増殖促進物質を要求することから、分離用培地としてビタミンを添加したS-1, S-2の2種を用いた。その組成を表2に示した。S

表2 赤潮生物用培地

Table 2. Media for Red Tide Organisms

COMPONENT	S-1	S-2
NaNO ₃	0.1 g	0.1 g
K ₂ HPO ₄	0.01	0.01
FeCl ₃	0.001	0.001
Thiamine-HCl	0.001	0.001
Biotin	1 μg	1 μg
Vitamin B ₁₂	1 μg	1 μg
Sea water	1000ml	500ml
Deionized water		500ml

S-1培地は海水を0.45 μ のフィルターで濾過したものに各種の無機塩類ならびにビタミンを添加したものである。S-2培地とは海水を等量の脱イオン水で希釈して調製したもので、いずれにも使用前に無菌の0.45 μ のフィルターで濾過し、除菌したのち培養に供した。培養方法は試験管に10mlの培地を加え、温度を10 $^{\circ}$ 、20 $^{\circ}$ 、30 $^{\circ}$ Cとし、照度は500、2000、4000lxで行った。分離方法は *Microcystis* と同様の方法を用いた。すなわち集積培養後顕微鏡下でキャピラリーを用いて単藻化を実施した。

(2) 分離結果

東京湾の海水より *Exuviaella* sp., *Heterosigma* sp. を分離した。20 $^{\circ}$ C, 4000lx, S-2培地が分離に適していた。また播磨灘の海水より *Skeletonema costatum* を分離した。

5. 赤潮生物の増殖特性

(1) 培養方法

分離したべん毛藻である *Heterosigma* sp. と *Exuviaella* sp. を用いて増殖試験を行った。すなわち100mlの三角フラスコに50mlの培地を加え、これに0.5ml植菌し培養を行いコールターカウンターを用いて数の増加を調べた。培地は東京湾の海水で調製したS-1培地を用い、さらにS-1培地からビタミン3種および塩化鉄を除いた培地でも培養を行った。培養温度は20 $^{\circ}$ Cとし、照度は4000lxで行った。

(2) 培養結果

Exuviaella sp. ならびに *Heterosigma* sp. の増殖特性を図7、図8に示した。*Exuviaella* sp. ならびに *Heterosigma* sp. の倍加時間はそれぞれ0.86、1.2dayであり、*Exuviaella* sp. のほうが速い増殖速度を示した。また *Exuviaella* sp., *Heterosigma* sp. いずれも増殖に鉄を要求し、塩化第2鉄の存在により増殖速度が著しく増大した。

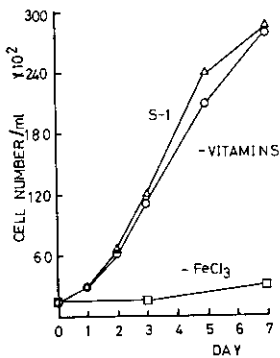


図7 *Exuviaella* sp. の増殖曲線
Fig. 7 Growth curve of *Exuviaella* sp.

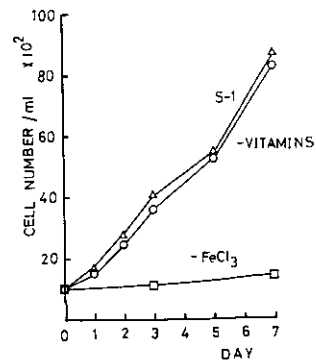


図8 *Heterosigma* sp. の増殖曲線
Fig. 8 Growth curve of *Heterosigma* sp.

6. まとめ

- 1) 霞ヶ浦の水の華より、群体を形成するKM-1, KM-2, KM-3の3株の *Microcystis* の単藻培養に成功した。形態的観察の結果KM-1, KM-2株を *M. aeruginosa* と、KM-3株を *M. flos-aquae* と同定した。KM-1株の増殖特性について検討を加えた結果、増殖に対する最適照度は1000lx, 最適温度は30℃であった。またクエン酸鉄とEDTAを添加することにより増殖が著しく増加する現象が認められた。
- 2) 東京湾の海水より赤潮生物である *Exuviaella* sp. と *Heterosigma* sp. をまた播磨灘の海水より *Skeletomena costatum* を分離した。*Exuviaella* sp., *Heterosigma* sp. の倍加時間はそれぞれ0.86, 1.2dayであった。いずれも塩化第二鉄の存在により増殖速度が著しく増加した。

引用文献

- 村上彰男(1976)：赤潮と富栄養化。公害対策技術同友会, pp. 207.
柳田友道(1976)：赤潮。講談社, pp. 198.

浅い湖の吹送流に関する実験的研究

村岡浩爾¹・福島武彦¹

Experimental Study on Wind-Driven Current in a Shallow Lake

Kohji MURAOKA¹ and Takehiko FUKUSHIMA¹

Abstract

The flow characteristics and water quality in shallow lakes seem to be significantly affected by the wind driven current. It is important to devise a model to simulate natural phenomena occurring in lakes.

First, the similarity of the flow and the mixing process was discussed for the hydraulic experiment and numerical simulation. Second, two basic flow patterns for typical geometrical characteristics of a lake are proposed. One pattern is the vertical circulation when a vertical section normal to the wind direction has a constant water depth. The other flow pattern is the horizontal circulation when a cross section normal to the wind direction has a linear variation in water depth. Both were theoretically investigated and experimentally confirmed in a wind tunnel using a rectangular lake model, 3m long and 2m wide. The mixing length theory was applied to the former flow and was in good agreement with the experiment data. For the latter one, downward flow of the wind direction in the shallow region occurred and flow in the opposite direction was generated in the other region. The Ekman type theory explained that the velocity of the horizontal circulation is in proportion to the wind stress and the water depth gradient in laminar flow while it is in proportion to the half power of those parameters for turbulent flow.

1. はじめに

近年、霞ヶ浦・琵琶湖南湖・諏訪湖など水深の浅い湖において水質汚濁が進み、ラン藻類の大発生や貧酸素水の浮上による魚類の大量へい死などが生じるようになった。浅い湖について水理・水質的な特徴をあげると次の通りであろう。

- 1) 水平距離・水深比が大きいので風の影響を受けやすく、吹送流が一般に卓越する。
- 2) 鉛直混合が激しく、安定な水温躍層が存在しえない。
- 3) 一般に負荷率（負荷/湖容積）が大きく、富栄養化しやすい。
- 4) 底質のまき上げが生じることもあり、底質が物質循環のサイクルへ入る。

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Water and Soil Environment Division, The National Institute for Environmental Studies, P. O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.

以上のように、浅い湖においては風による流れが湖全体の混合に大きく寄与している。ここで従来の吹送流の研究をまとめてみると、

- 1) 風の応力係数についての研究 Wu (1973), Shemdin (1973)
- 2) 理論的解析 Ekman V.W.
- 3) 直線水路における実験的研究 Baines, et. al. (1965)
- 4) 水理模型を用いた実験的研究 Li, et. al. (1975)
- 5) 数値計算 Csanady G. T., Liggett J. A. らの研究をまとめて Cheng (1976), 余越ら (1978), 和田ら (1976), Imasato, et. al (1975)
- 6) 現地調査 Simons (1974), Bhowmik, et. al. (1978), 余越ら (1978)
- 7) 水質を含めたもの Banks (1975), Lam (1978)

以上のように数々の成果は報告されているが、特に水理模型の場合、風洞装置が必要なこと、実測においては微流速で測定が難しいなどのことを考えあわせて実際の湖沼の解析にあたっては数値計算手法が用いられることが多い。ここでは実験的解析を目的として、そのために必要な相似則についての考え方を議論し、また簡単な底部模型を有する水理模型を製作して、吹送流の基本的な流動特性について解析を行ったので報告する。

2. 吹送流実験の相似性について

流れおよび混合のシミュレーションの方法としては水理模型と数値計算が考えられるが、ここでは湖の吹送流を対象に両者を相似則の点より比較を行い、問題点をあげてみることにする。従来潮せき流などについては首藤 (1970)、樋口 (1974) が検討を行っているが、特に湖沼の場合には風の応力、温度成層、全体的混合が大きな比重を占めると考えられるので再整理を行う。基本方程式は鉛直流速を無視し非成層の場合には次のように書ける。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} + (\nu + K_n) \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \bar{f}_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} = (D_m + D_n) \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3)$$

$i = 1, 2$, $\bar{f}_i = (f\bar{u}_2, -f\bar{u}_1)$; ζ : 水位変化, u_i : 流速, c : 濃度, f : コリオリ係数, ν, K_n ; 分子および渦動粘性係数, D_m, D_n ; 分子および渦動拡散係数

流れについては圧力項、混合については時間項との比較により、各項の相似性の条件を水理実験・数値計算についてまとめ、さらに両者による取り扱いやすさおよびモデル(4.以下の模型)・原型(霞ヶ浦規模)での項のオーダーの比較を表1、表2に示す。水理模型は移流項が容易に再現できるが、

表1 流れの相似則

Table 1. Criteria for flow similarity

項	模型実験(圧力項との比較より)	f	数値計算	容易さ		オーダー	
				実験	計算	モデル	原型
1.移流項	$h_r = x_r h_r^{-1}$ (Froud則), $u_r = x_r / t_r$ (ひずみ模型の場合側壁の影響)		非線型方程式	容易	難	大	大
2.底面摩擦項	* 1層流 $K_{2r} = g r^3 h_r^3 / x_r$ (Proudman則) (原型での K_{2r} の実験, 決定難しい) * 2乱流 粗面乱流が原則 ($f = c / Re^3$ 滑面, $f = \text{const.}$ (Re) 粗面) 鉛直平均流速の一致→ $f_r = h_r / x_r$ ($n_r = x_r^{-1} h_r^3$) 鉛直流速分布の一致→ $f_r = 1 = h_r / x_r$		fの信頼できる数値少ない。 1.移流項を省略したエクマンモデルでは、流速分布を簡単に記述できるが、三次元モデルは、大容量計算機必要			中	中
3.風応力項	$\tau_{wind} = h_r^2 x_r^{-1}$, $\tau_{wind} = \rho_{air} f_{wind} W_s^2$ f_{wind} ($Fr = W_s / \sqrt{gy}$, gz_0 / u_{*d}^2) の形が理論・実験的に決定できれば相似性保てる。		実験と同じ	容易	容易	大	大
4.コリオリ項	$\omega_r = t_r^{-1}$			難	容易	小	大
5.水平粘性項	$K_{hr} = x_r^2 / t_r$ モデルが Re 数の大きい乱流ならば、レイノルズ相似則 $Re = ux / \epsilon_m = \text{const.}$ より自動的に満足される。			容易	容易	小	小
6.熱成層	$\Delta \rho_r = 1$			容易	容易	大	大
	$f_{ir} = h_r / x_r$			難	難	大	大

r : モデルと原型の比, f : 底面摩擦係数, n : マニング定数, ω : 回転角速度, $\Delta\rho$: 上層と下層の密度差, f_i : 界面摩擦係数, u_* : 摩擦速度

表2 混合現象の相似則

Table 2. Criteria for mixing process similarity

項	模型実験(時間項に対して)	数値計算	容易さ		オーダー	
			実験	計算	モデル	原型
1.移流項	$u_r = x_r / t_r$	線型方程式	容易	容易	大	大
2.水平拡散項	$D_t = \epsilon_r x_r^3 = K_{hr} = x_r^2 / t_r$ → $h_r = x_r^3$ (4/3 乗則より)	実験と同じ	難	容易	大	大
3.分散項	一次元モデル化したときに生じる。鉛直、水平流速分布より決定されるので $D_r = u_{*r} h_r = x_r^2 / t_r$ → $x_r = h_r$	三次元的に混合を評価するときは不要	難	難	流れにより 大	大

コリオリ力の表現が不可能である。また水理模型ではひずませること (x_r キ h_r) が多いが、この場合鉛直流速分布は相似できず、混合において分散現象が卓越する場合、混合の時間スケールに問題が生じる。しかし吹送流の場合の底面摩擦項は4節に記すように風の応力に比べオーダーが下がるので、潮流解析のように厳しく相似性を保たせなくてもよいと考えられるが、この点については今後さらに検討すべき事項である。数値解析ではすべての項を満足させることも理論的には可能ではあるが、大容量のメモリーが必要となり現実的ではない。現在の時点では各項の取り扱いの容易さより判断して、水理模型、数値計算を組み合わせ、実際の流れの像へ近づけてゆくことが最短の道であると思われる。

3. 鉛直、水平循環流の理論

実際の湖沼に吹送流が生じた場合、湖岸線の形状や水深の場所的变化により複雑な流況を呈するが、ここでは簡単な湖の形状および水深変化の場合に、流体の粘性力により生ずる基本的な流れのパターンとその大きさを予測してみた。まず水深変化のない場合には吹送方向に直角には流れず上層で順流、下層で逆流となるような鉛直循環流となる。流れの諸元を図1に示すように定義すると、粘性係数 K_z

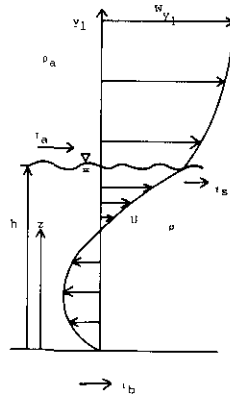


図1 鉛直循環流の模式図

Fig. 1 Schematic view of wind-driven vertical circulation

が全水深で一定である場合、流速 u は次の式で表わす。

$$u = \frac{\tau_s h}{\rho K_z} \left[\zeta - \frac{1}{2} (1+n) \zeta (2-\zeta) \right] \quad (4)$$

$$n = -\tau_b / \tau_s, \quad \zeta = z/h$$

n の値は連続の式より $n = 1/2$ である。次に粘性係数が水深により変化する場合(乱流)、混合長の概念を利用すれば

$$\mu \frac{du}{dz} + \rho l^2 \left| \frac{du}{dz} \right| \left| \frac{du}{dz} \right| = \tau \quad (5)$$

$$\tau = \tau_s \{ (1+n) \zeta - n \} \quad (6)$$

$$\text{B.C. } \zeta=0 \text{ で } u=0 \text{ および } \int_0^l u d\zeta=0$$

と表現でき、混合長 l に次のような式を与えれば (Ueda, 1977)

$$l = \kappa z(1 - \zeta) \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{26} \frac{z u_{*b}}{\nu}\right) \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{30.4} \frac{h(1 - \zeta) u_{*s}}{\nu}\right) \right] \quad (7)$$

$$\kappa = 0.41, \quad u_{*b} = \sqrt{|\tau_b|/\rho}, \quad u_{*s} = \sqrt{\tau_s/\rho}$$

また乱流で底面が粗となった場合には、円管路の理論と同じく次のように底面位置を変化させれば予測ができる。(k_s ; 相当粗度)

$$z = k_s e^{-A_r \cdot x} = k_s \times 0.033 \text{ で } u=0, \quad (A_r = 8.5) \quad (8)$$

4 節において以上の式を用いての流速分布の予測結果を示す。

次に水深変化のある場合として、吹送方向の直角方向にのみ連続的に水深が変化するとき (図 3 Type-4) には鉛直だけではなく水平の循環流が発生する。(Imasato, 1975) この流れの大きさは次のように推定できる。まず(1), (2)を鉛直方向に積分するとともに層流 $\tau_{bx} = \rho k U/h$, $\tau_{by} = \rho k V/h$, 乱流 $\tau_{bx} = \rho f U |U|/h^2$, $\tau_{by} = \rho f V |V|/h^2$ (k, f ; 定数, U, V ; 積分流量) とおき, $V = \partial\psi/\partial y$, $U = \partial\psi/\partial x$ と流れ関係 ψ を用いると,

$$\text{層流 } V^2\psi = -\frac{\tau_s}{k\rho} \frac{\partial h}{\partial y} + 2 \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial\psi}{\partial y} / h \quad (9)$$

$$\text{乱流 } \left| \frac{\partial\psi}{\partial x} \right| \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \left| \frac{\partial\psi}{\partial y} \right| \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} = -\frac{\tau_s h}{2f\rho} \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{3}{2} \left| \frac{\partial\psi}{\partial y} \right| \frac{\partial\psi}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y} / h \quad (10)$$

(9)は左辺の循環が $(\tau_s/k) \frac{\partial h}{\partial y}$ に比例して存在することを意味し、同様に(10)では $(\tau_s \frac{\partial h}{\partial y} / f)^{1/2}$ に比例することを表している。流れの方向は浅い領域で吹送方向となる順流、深い領域で逆流となる。

4. 実験および数値解析の結果

4.1 実験装置および測定法

装置の概略を図 2 に示す。まず鉛直循環流については図 3 の Type 1 の一様水深のモデル湖で底面に粗度をつけないもの(生地塩ビ製)、粗度 I, 粗度 II で実験を行った。(吹送方向に直角に幅 1 cm のものを 5 cm 間隔で置いた。粗度高は I - 5 mm, II - 1 cm) 次に水平循環流の観察にはモデル湖の横断面の水深変化を図 3 に示すような Type-1 ~ 4 の 4 種として、粗度をつけずに実験を行った。風速は水面上 20 cm で 3.92 m/s で水面への風の応力は風速の鉛直分布の測定より 0.225 dyn/cm² であった。($f_{wind} = 1.26 \times 10^{-3}$, 波によるエネルギー消費は少なく, $\tau_a = \tau_s$) 流速の測定は二次元超音波流速計と直コニカル型ホットフィルムセンサーによる熱線流速計を併用した。なお後者の場合に流向は針金で作った所定の高さのしよく(燭)台にメチレンブルーをのり付けして、溶け出す方向を写真撮影により求めた。

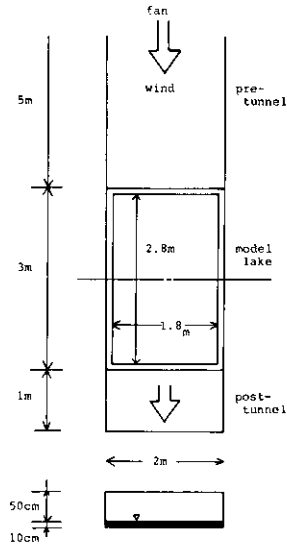


図2 モデル湖実験装置

Fig. 2 Experimental apparatus of model lake

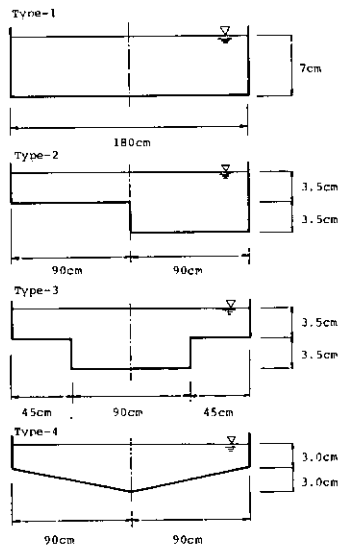


図3 モデル湖の底部地形模型

Fig. 3 Types of bottom shapes of model lake

4.2 鉛直循環流の測定結果および数値計算

図4にモデル湖中央での鉛直流速分布 u を示す。後に図9.1(粗度なし)に示すように、風上風下の壁付近では中央部に比べ流速が小さい。これは連続の式または移流項で u が鉛直流速 w に変化するためと考えられるが、 $u \approx w$ としてこの影響の範囲は h 程度と推定されるのに対し、もっと長い区間にわたって u を減じている。図5には乱流特性として $\sqrt{\bar{u}'^2}$ の結果を示す ($u, \sqrt{\bar{u}'^2}$ とも0.1秒間隔250個のデータによる)。図4、図5より粗度の影響はほとんど見られない。足立(1964)の実験結果

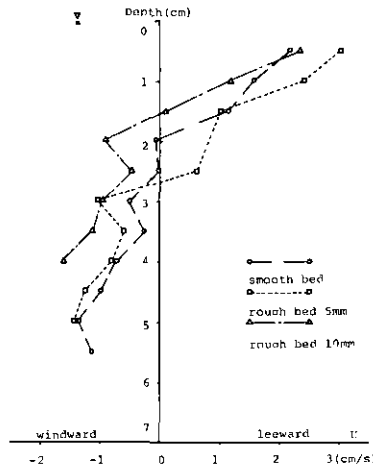


図4 モデル湖中央における流速の鉛直分布の測定結果

Fig. 4. Distribution of measured velocities along the depth line at the center of model lake

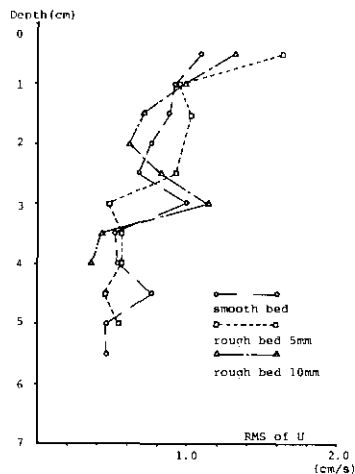


図5 モデル湖中央における乱流変動の測定結果

Fig. 5. Variations of root-mean-square of turbulent fluctuations along the depth line at the center of model lake

より粗度 I, II を有効粗度に換算してみると 5 cm, 10cm と水深程度に大きく、開水路としては摩擦係数が 1 のオーダーに近いにもかかわらず違いの生じなかったことは、 Re 数 ($= \frac{uh}{\nu} \approx 4 \times 10^3$) が小さかったこともあるが吹送流の場合水深のほとんどで風の応力が支配的であるためとも考えられる。次に(5)~(7)を用いてこの流れを計算したものが図6であるが実験値と非常によい一致を示している ($n = \tau_0/\tau_s = 0.15$, 図中の○印は(8)を用いて粗度のある場合を計算したもので $n = 0.21$)。さらに(5)~(7)を用いて水深を 7 cm~50m まで変化させたときの表面流速 u_{sur} と n の値を示したものが図7, 8である。 u_{sur} は h , τ_s の増加により大きくなるが増加率は h に対しては非常に小さく、また τ に対してはほぼ $\frac{1}{2}$ 乗である。これは(4)で $K_2 \propto u_* h$ と置くと $u \propto u_*$ となることと同じ表現である。また n の値

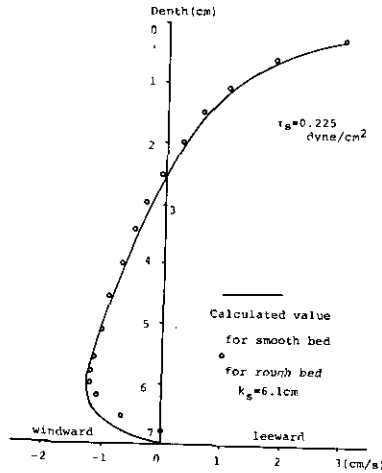


図6 混合長理論を用いた流速の鉛直分布計算結果

Fig. 6 Distribution of calculated velocity using mixing length theory

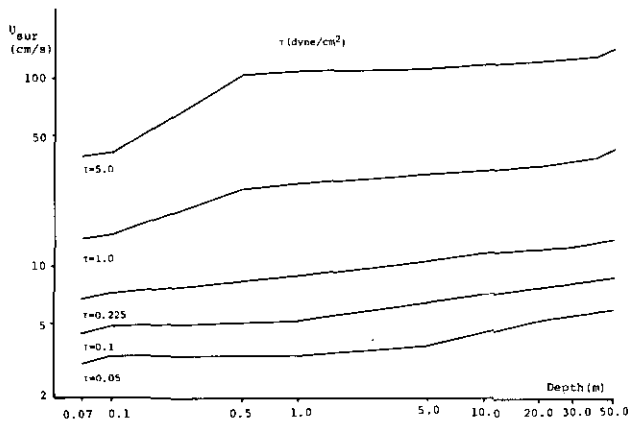


図7 水深の変化に対する表面流速の変化

Fig. 7 Change of surface velocity according to the variation of water depth

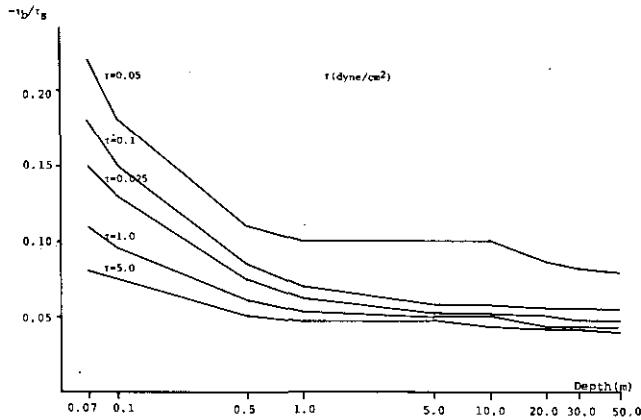


図8 水深の変化に対する n の変化

Fig. 8 Change of parameter $n = -\tau_b/\tau_s$ according to the variation of water depth

は h , τ の増加により減少する。そして $h = 1 \text{ m}$, $\tau = 0.1 \text{ dyn/cm}^2$ 以上では $n = 0.1$ 以下となり底面摩擦応力の相対的な減少が予測できた。

4.3 水平循環流の実測

図3のType-1~4の横断面底部模型に対する流向・流速の測定結果を図9. 1~4に示す(上層は水面下1cm, 下層は底面より0.8~1.0cmの位置)。全体的な流況の特徴を述べてみると, Type-1の場合4.2節で示したように鉛直循環流が卓越している。次にType-2~4の場合3節で理論的に予測されたように浅い領域で順流, 深い領域特に底層で逆流となる水平の渦が生じていることがわかる。また流速の大きさは浅い領域でType-1の中央部表層の1.5倍程度の大きさとなっている。

4.4 エクマンタイプによる数値計算

水平流動をシミュレーションする数値モデルには(i)エクマンタイプ(ii)層モデル(iii)三次元モデルが存在するが, (i)は移流項を省略し, また層流的な流れに近いが($K_z = \text{const.}(z)$)鉛直流速分布が簡単に与えられるメリットをもつ。ここでは模型実験(Type-4)に対して計算を行った。計算手法はLiggett et. al. (1969)と同じである。特に積分した流速について流れ関数表示したものの式を示すと(記号は(9)と同じ),

$$V^2\psi = -\frac{\tau_s h}{2K_z \rho} \frac{\partial h}{\partial y} + 3 \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y} / h \quad (11)$$

となり(9)とほとんど同じ形となるが, 違いは $h = \tau_{bx} h / U\rho$ が一意的に決まるとしたことから, K_z により流れを表現したことにより生じた。(9)と同様に循環 $\propto \tau_s h / K_z$ が示せる。図10に結果を示す(流れが

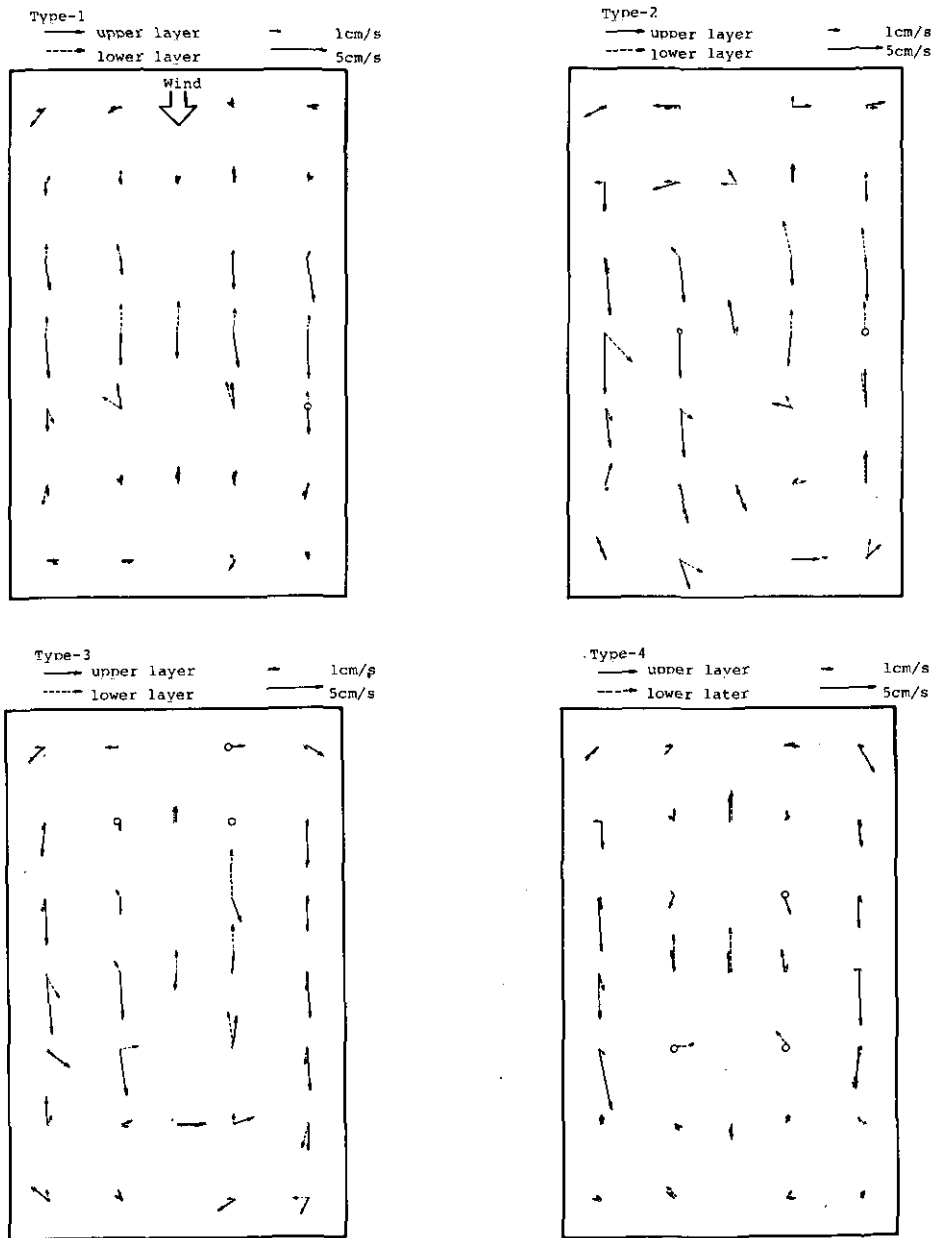


図9 Type-1~4に対する水平循環流の測定結果

Fig. 9 Observed results of horizontal circulation for Type 1~4 of lake models

左右対称のため左半分のみを記す)。 K_2 には $0.05\text{cm}^2/\text{s}$ を与えたがこれは実験値の流速に合わせるために選んだもので、エクマンタイプの場合には K_2 の決定が重要になる欠点を有している。今後(5)~(7)の混合長モデルを組み合わせるにより改良を行いたい。

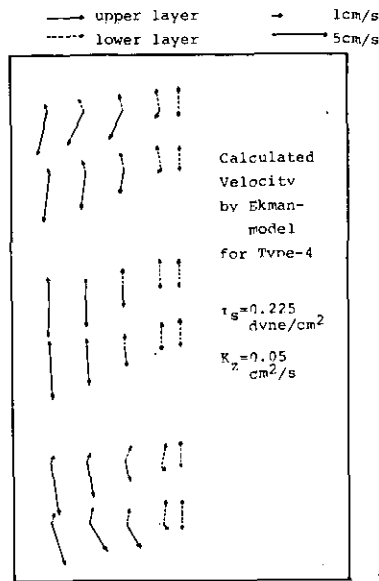


図10 Type-4 に対するエクマンモデルを用いた水平循環流の計算結果
 Fig. 10 Theoretical results of horizontal circulation for Type 4 of lake model

4.5 鉛直・水平循環流の関係

3節においては吹送流の流れを鉛直・水平方向に分離することによりモデル化したが、実際に水深変化の存在する場合には図9に示すように両者の複合した流れとなる。ここで層流と乱流の場合の鉛直、水平循環流の関係を調べてみる。層流の時は(4)より水表面の最大流速は $u_{sur} = \tau_s h / 4\rho K_z$ 、循環速度は領域幅を L として外縁において $u_{rot} = V^2 \psi \times \frac{L}{2} / h = (\tau_s h / 4\rho K_z) \frac{L}{h} \frac{\partial h}{\partial y}$ となる。湖においては $\frac{\partial h}{\partial y} \approx 2h/L$ となるので結局、 $u_{sur} \approx u_{rot}$ が予測される。つまり水深変化が存在する場合に発生する水平循環流は鉛直最大流速とほぼ同じ大きさとなり、鉛直循環流だけの流れに循環が加算した流れと考えることができる。以上のことは風による水への運動エネルギーの伝達量が水深変化にもかかわらずほぼ一定であることから予想できることである。乱流の場合には $u_{sur} \propto \tau_s^{1/2}$ 、 $u_{rot} \propto \tau_s^{1/2} L/h \frac{\partial h}{\partial y}$ となる。

5. 吹送流による混合現象

水平拡散係数および中心点源よりの染料拡散実験による染料塊の中心位置、分散、エントロピーを用いた解析は合田・村岡・福島(1978)に詳しく書いたので、ここでは鉛直循環流による吹送方向の分散モデルを考えてみることにする。分散係数は次の式により計算されるので(日野, 1974)、 $K_z = 0.068 u_* h = \text{const.}(z)$ とし(4)式の流速分布を用いると (u'' ; 断面平均より偏差),

$$E = - \left[\frac{1}{h} \int_0^y u'' \left\{ \frac{1}{K_z} \left(\int_0^y u'' dy \right) dy \right\} dy \right] = \frac{\tau_s^2 h^4}{1680 \rho^2 K_z^3} = 1.9 u_* h \quad (12)$$

となる。これより Type-1 の場合について計算を行うと、 $E = 6.3 \text{ cm}^2/\text{s}$ を得て染料の吹送方向の混合時間スケール T が $T = 207$ 分のオーダーと予測することになり、実験の場合の15分程度と異なる。これは $K_z = 0.068 u_* h = 0.22 \text{ cm}^2/\text{s}$ と大きく見積った影響と考えられる。このため K_z の測定および (12) の u'' を乱流速度分布に変更することにより改善をはかりたい。

6. まとめ

水質汚濁の観点から特に風の影響をうけやすい浅い湖での吹送流について論じた。まず流れおよび混合現象の水理模型実験、数値解析上の相似則を検討し、項により取り扱いやすきの点より両者を組み合わせる解析を進めなければならないことを示した。次に基本的な吹送流のパターンとして水深変化のない場合の鉛直循環流、線形に水深の変化する場合の水平循環流を取り上げて、二つの流れの流速、流向について理論・実験的な検討を加えた。この結果鉛直循環流については混合長モデルを用いることにより十分に流速分布が予測できること。および水深変化の存在する時には、浅い領域で順流、深い領域で逆流となる水平循環流が生じることを理論、実験的に示し、この大きさが層流で風の応力と水深こう配に比例し、乱流でこれらの $1/2$ 乗に比例することを理論的に予測した。さらに鉛直・水平の循環流オーダーが等しいことを示した。

引用文献

- 足立昭平(1964)：土木学会論文集, No. 104, 33-44.
- Baines W. D and Knapp D. J. (1965) : Wind driven water currents. ASCE. HY., 91, 225-221.
- Banks R. B. (1975) : Some features of wind action on shallow lakes. ASCE. EE., 101, 813-827.
- Bhowmik G. N. and Stall J. B. (1978) : Circulation Pattern in the Fox Chain of Lakes in Illinois. WRR, 14, (4), 633-642.
- Cheng R. T. (1976) : Numerical models of wind driven circulation in lakes. Appl. Math. Modelling., 1, 141-159.
- 合田健・村岡浩爾・福島武彦(1978)：浅い湖における吹送流と拡散に関する実験的研究。水理講演会, 81-86.
- 樋口明生(1974)：潮流水理模型実験。土木学会水工学シリーズ, B-8, 1-25.
- 日野幹雄(1974)：流体力学。朝倉書店, 248-250.
- Imasato N, Kanari S. and Kunishi H. (1975) : Study on the Currents in Lake Biwa (1), (2). J. Oceanogr. Soc. Jpn., 31, 15-24, 31-53.
- Lam D. C. L. and Halfon E. (1978) : Model of primary production, including circulation influences, in Lake Superior. Appl. Math. Modelling., 2, 30-40.
- Li C., Kiser K. M. and Rumer R. R. (1975) : Physical model study of circulation patterns in Lake Ontario. Limnol. Oceanogr., 20, 323-337.
- Liggett J. A. and Hadjithodorou C (1969) : Circulation in shallow homogeneous Lakes. ASCE. HY. 95, 609-620.

- Shemdin O. H. (1973) : Modelling of wind induced current. *J. Hydraul. Res.*, No. 3, 281-297.
- 首藤伸夫(1970) : 湾内拡散. 土木学会 水工学シリーズ, 70~30, 1~26.
- Simons, T. J. (1974) : Verification of numerical Models of Lake Ontario Part-1. *J. Phys. Oceanogr.*, 4, 507-523.
- Ueda H. et al. (1977) : Eddy diffusivity near the free surface of open channel flow, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 20, 1127-1136.
- 和田明・宮地克人(1976) : 吹送流による湾内水の循環特性. 海岸工学講演会, 534~538.
- Wu J. (1973) : Prediction of Near-Surface Drift Currents from Wind Velocity. *ASCE, HY*, 99, 1291-1302.
- 余越正一郎・富所五郎(1978) : 風による諏訪湖の流動特性. 土木学会論文報告集, No. 276, 53~63.

感潮河川の水理・水質特性

——酒沼および酒沼川について——

村岡浩爾¹・津野 洋¹・相崎守弘¹・大坪国順¹・福島武彦¹

Water Quality and Hydraulic Properties in a Tidal River

—The Case for Lake Hinuma and its Tributaries—

Kohji MURAOKA¹, Hiroshi TSUNO¹, Morihiro AIZAKI¹, Kunihiro OTSUBO¹
and Takehiko FUKUSHIMA¹

Abstract

The Hinuma River is a medium size river (45km length) in Japan, and originates from the mountainous area of Ibaraki Prefecture. The tidal portion covers 22km from the river mouth and the narrow lake, Lake Hinuma, 8km long and 4m in average depth, lies 9km upstream from the river mouth.

In order to gain fundamental data for the discussion about the mixing process of water quality in the tidal river, a field survey of hydraulic properties and water quality distribution was done at eight observation stations along the tidal portion of the Hinuma River for a 48 hour period towards the end of September, 1978. The items observed were water level, velocity, water temperature, conductivity, suspended solids, and nutrients such as $\text{NH}_3\text{-N}$, $(\text{NO}_2+\text{NO}_3)\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ and DIP; many of the items were measured at 0.5m intervals along the depth line.

The conclusions are as follows;

- (1) The hydraulic properties and water quality are delicately distributed both in time and in space under the effect of tidal oscillation. In general, strong mixing is observed in downstream of the Hinuma River but on the contrary upstream the water is stratified.
- (2) Water quality is uniform for most of Lake Hinuma and the full mixing process, except near the discharge point, depends on wind strength and direction rather than on tidal motion.
- (3) The inflow concentration of nutrients from the upstream was relatively high, but inorganic nitrogen could not be determined in the lake water. This fact suggests that nitrogen limitation was occurring in the lake.
- (4) The flow path due to the tidal cycle can cover the whole length of the lower section of the Hinuma River. In this case, the Naka River, which joins the Hinuma River close to the river mouth, contributes its fresh water to the upstream flow, so the lake receives a supply of nutrients from this fresh water source as well as sea water during flooding.

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Water and Soil Environment Division, The National Institute for Environmental Studies, P. O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.

1. はじめに

河川は国土の幹線と言われている。降水を集めて流送するだけでなく、各種の物質を運搬し国土をより安定な方向に導く。そのような作用を終えた最後の姿が河口である。河口は陸水と海岸の接点で、相互の干渉がある部分が感潮域である。従ってそこでは国土形成過程と人間活動の遺物が集積し、それが海洋という新しい水圏に受諾伝達されるべく交渉を行う場として独自の水環境を有することになる。また、水質や水理現象が複雑であるばかりか、生態系も一つの姿をもつことになる。

この報告では単に感潮域の富栄養化現象を究明するという目的だけでなく、流域の自然と人間活動の因果を含めた水環境の実態を観察するために、涸沼と涸沼川の感潮部を対象として基礎事項の調査結果をまとめたものである。

2. 調査の概要

涸沼川は全長約45kmの中河川で太平洋に注いでいる。河口の上流約1km地点で那珂川と合流し、それより約8kmの河道区間（これを下流涸沼川と呼ぶ）を経て涸沼に入る。涸沼の形状は細長く、平均水深は4m、延長約8kmでそれより再び河道（これを上流涸沼川と呼ぶ）を形成する。潮汐振動が及ぶのは河口から22km程度とみられ、これは上流涸沼川の約5km区間を含んでいる。

調査地点は下流涸沼川で3か所、涸沼で4か所、上流涸沼川で1か所で、その位置は図1に示す。調査期間は昭和53年9月27日14時から29日14時までの48時間である。調査項目と調査時刻は表1に示す通りである。

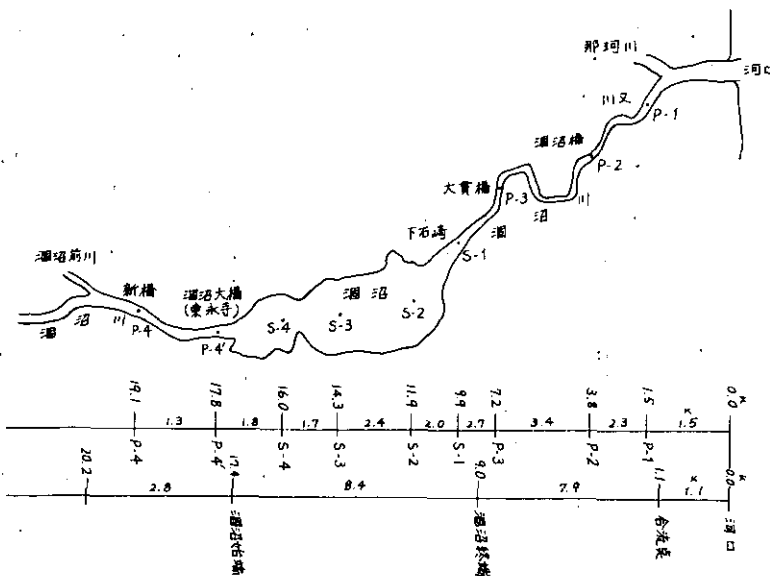


図1 涸沼、涸沼川調査地点概略図 (昭和53年9月27, 28, 29日)

Fig.1 Sketch of the Hinuma River and Location of Observing Stations

表1 観測項目など

観測項目	観測地点	観測時刻	観測測点
水位	S-1, S-2を除く全地点	期間中2時間ごと	——
流速	河道部のみ全地点	期間中2時間ごと	水深方向50cmごと (河心部)
水温, 電気伝導度	全地点	期間中2時間ごと*	水深方向50cmごと (河心部**)
栄養塩, SS	P-2を除く全地点	27日16時より2時間ごと 28日16時まで。*	水深方向1mごと (河心部**)

* 湖沼部は昼間のみ ** 河道部

3. 水位, 流速, および流量

水位および流量の変化を図2に示す。観測期間中、大潮時に対応する各地点の水位差は、P-1において0.6m, P-2において0.45mで、これらは那河湊における推算潮差の75%, 56%に当たる。しかしP-3においては0.2m, 25%となり、その上流の湖沼部の各地点、および上流湖沼川のP-4においては水位差はそれ程変わっていない。すなわち、潮汐振動はP-2, P-3の区間で減衰が著しく、その上流ではP-4に至るまでほぼ一様の水位伝播が存在する。減衰の機構は河道の縦横断形状、流速と摩擦損失等に関係するが、今回の調査はそれが主目的でないためここでは触れない。

流速分布はその一部を後述の図5に示す通り、順流逆流が交錯し、かつ表層底層で流向が異なる二層流が生ずる場合もある感潮河川特有の複雑な流れである。流速を水深方向に平均し、流水断面積と乗じて得た流量の変化は、図2に示すように、下流湖沼川でほぼ同程度に生じている。また順流逆流

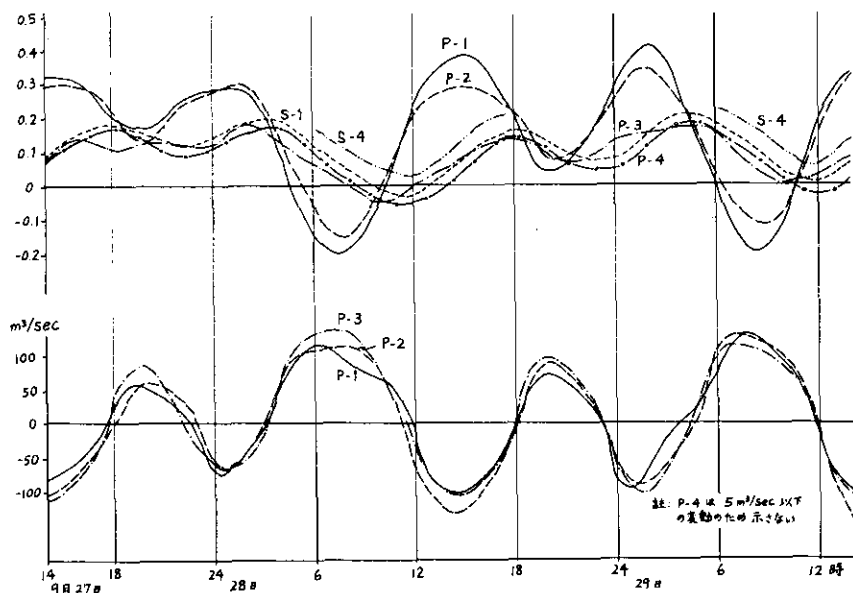


図2 水位および流量の変動

Fig.2 Time Variation of Water Level and Discharge at Observing Stations

が同程度であることから、河川固有流による流量成分は小さく、ほとんど潮汐の影響で流れが生じているとみられる。なお、P-4においても流量変動がみられるが、常に順流で流量は $5 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下と小さいため、図には示していない。

4. 水質の平均量に関する特性

各地点の水質は、特に河道部で水深方向に微妙に変動する。これについては後述するものとして、ここでは水深方向に平均した平均量に着目する。図3はこの平均量を更に観測期間中で平均した量の河道に沿う分布を示したものである。電気伝導度（以下 E と記す）は河口から上流に向かって減少する妥当な特性を示すが、湖沼部で一様となる点に特徴がある。 E は保存量であって、下流湖沼川では往復流による混合が支配的であるが、湖沼では停滞水域で往復流は下流河道部の $1/20$ 程度と考えられるため、その他の要因、たとえば吹送流による水平混合が卓越するものとみられる。水温（以下 T と記す）は湖沼部でやや高い。栄養塩のうち N は上流からの流入濃度は高いが、湖沼部ではほとんど観測されない。これに対し P は湖沼部でも存在する。この特徴は湖沼の富栄養化現象に興味ある問題を提示している。 SS は湖沼部がやや高い。

図4 (a), (b) は水質の平均量の時間的変化を示したものである。 E については、28日06時~10時、29日08時~12時で下流河道部において値の接近がみられる。この時間帯は順流の最も卓越した時刻からの数時間に対応し、河道沿いに混合が激しいことを示す。この傾向は PO_4-P 、 SS においてもみられる。

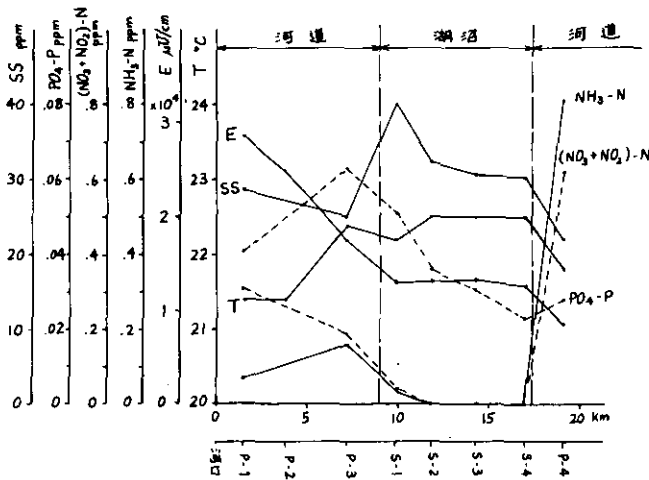
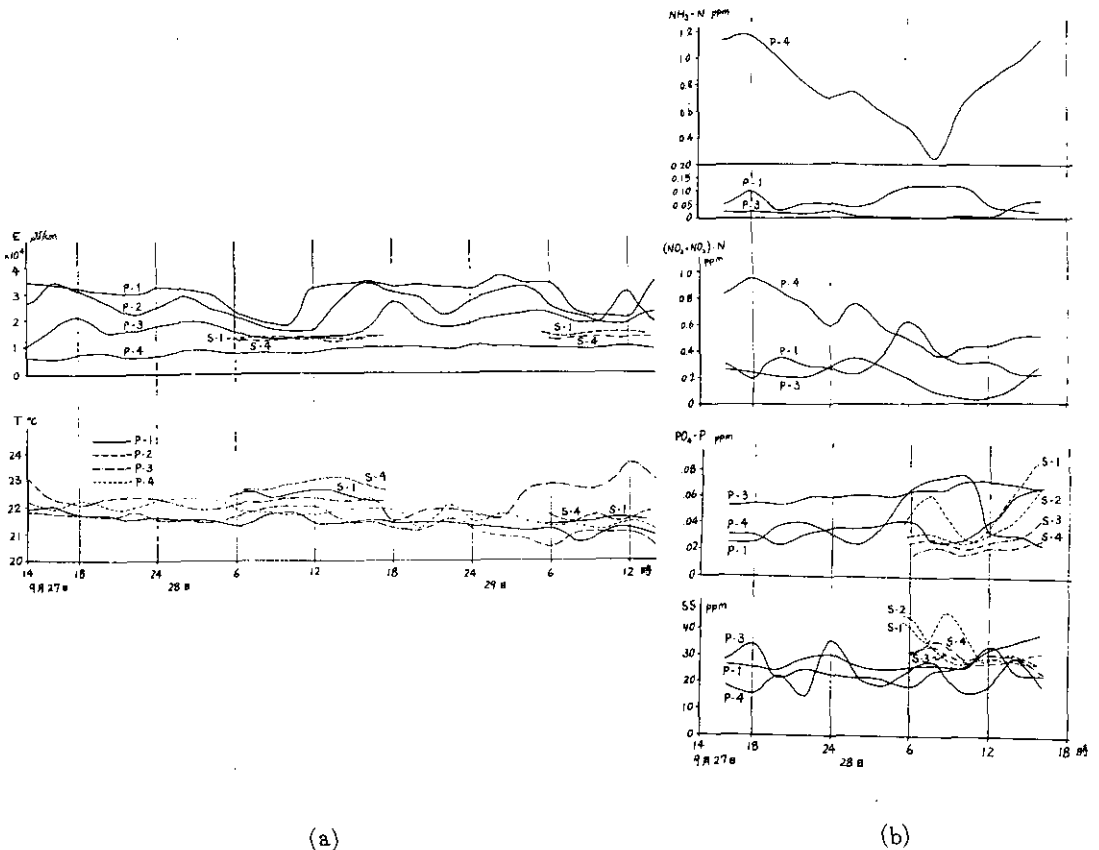


図3 水質（調査期間中平均値）の河道に沿う分布

Fig.3 Distribution of Water Quality (Time-averaged Values during Field Survey) along River Line



(a)

(b)

図4 水質（水深方向平均値）の時間変化

Fig.4 Time Variation of Water Quality (Mean Values on Depth Line) at each Station

5. 水質の鉛直分布に関する特性

涸沼の水は、下流から海水および那河川の河川水、上流涸沼川の河川水の三者による混合系を形成している。従ってそれらの混合過程をみるには多くの地点の水深方向分布を時間的に調べることが必要である。この調査でもそれを遂行したが、全ての結果を図示することは紙面の都合上できないので、代表的にP-1における28日00時から12時までの結果を図5に示す。流れの逆流時から順流時にかけてEが明確に成層化する。上層1~1.5mの水は那河川の水が流入しているとみられる。また那河川河口に近い大竹海岸の海水電気伝導度が47,300 μ ひであったことから、2.5m以深では海水がほぼそのまま流入しているとみられる。順流に移った後数時間で、これらの水は鉛直方向に完全に混合し流下している。栄養塩についても成層時の上層水は那河川の河川水によるものである。下層水については、既に図3に示した通り、涸沼のNは下流部を除き存在しないことから、NH₃-N、(NO₂+NO₃)-Nについては那河川の水に起因する混合量を示すが、PO₄-Pについては那河川と涸沼の混合量を示している

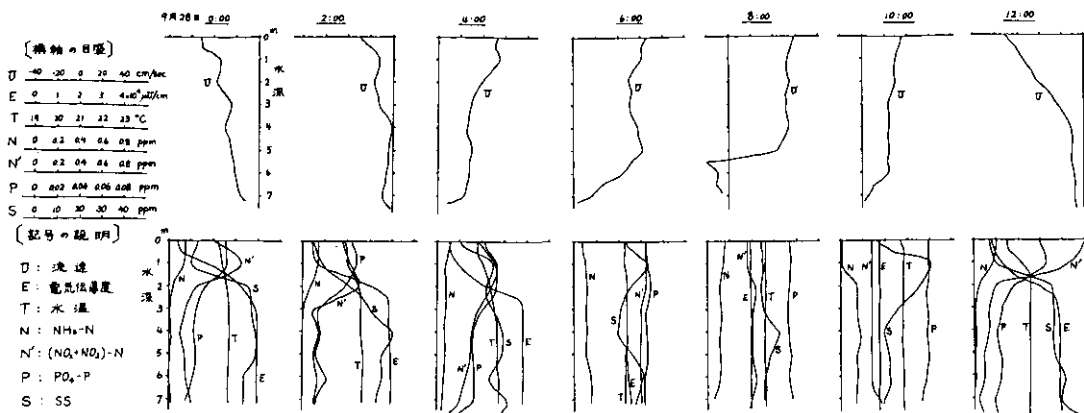


図5 P-1における流速，水質の鉛直分布

Fig.5 Vertical Distribution of Velocity and Water Quality at Station P-1

と考えられる。SSについてはそれらはさほど明確でない。

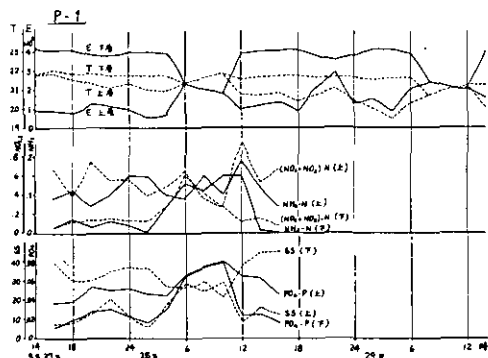
P-2においてはP-1に比べ成層の度合いが低く上層下層の値は接近している。P-3においては成層が明確でなく概して強混合的である。従って、海水と那河川の水による成層化の及ぶ範囲はP-2, P-3の中間あたりまでであろう。このように下流涸沼川では一日のうちで強混合と弱混合とが存在することがわかる。以上に反し、上流涸沼川のP-4では、流量水位に変動はあるものの、水質は常時成層化している。従ってこの河道では湖沼との関連で弱混合とみられる。

表2 上層下層を代表する層厚

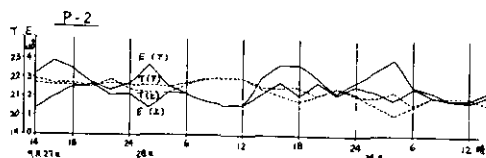
地 点	平均水深 (流心部)	上 層	下 層
P-1	7.3m	0~1m	4~6m
P-2	2.8m	0~0.5m	2~2.5(または3)m
P-3	6.6m	0~1m	3~4m
P-4	2.4m	0~0.5m(0m)*	1.5~2m(2m)*

* () 内は栄養塩，SSにのみ適用

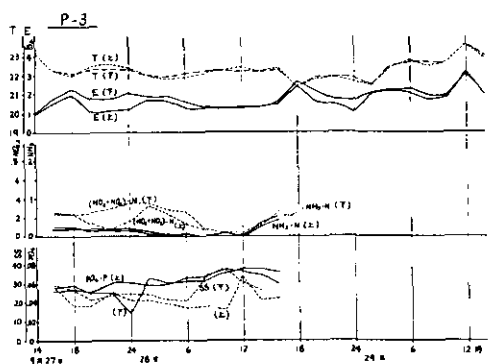
成層時の水質分布の量的把握，および混合の状態を巨視的にみるため，表2に示すような上層下層の層厚で平均した値について，各地点の時間変化を図6(a)(b)(c)(d)に示す。P-1においてはE, Tは完全に上下方向に混合する時間帯がある。栄養塩，SSについても値が交錯するものもあるがおおむね同様である。P-2においては完全混合期間が長くなり，それ以外の所で上下層の値は接近する。P-3では，Eについてみればごく一部を除いて完全混合とみられ，栄養塩についても(NO₂+NO₃)-N, PO₄-Pはそれに対応しているとみられる。しかしNH₃-N, SSは必ずしもそうでない。P-4にお



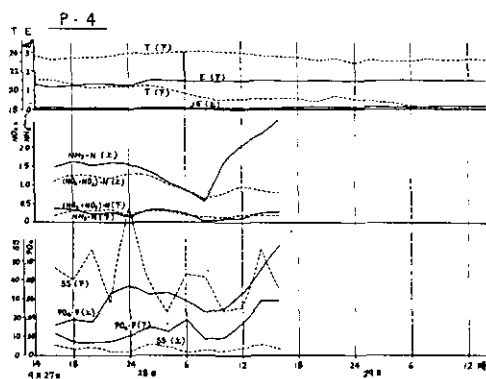
(a)



(b)



(c)



(d)

図6 上層, 下層水質の時間変化

Fig.6 Time Variation of Water Quality in Upper Layer and Lower Layer

いては前述の通り全ての水質について成層化している。Tが低下の傾向を示すのは、観測開始後小雨が降ったり止んだりする天候となったためであろう。流入量もそのため若干増加し、栄養塩濃度も大きくなっている。

6. 栄養塩濃度と富栄養化現象との関連

上層下層の水質の位置的分布を整理した図7. a, 7. bにおいて、P-3より上流では上流澗沼川に至るまでEが一様である点は前にも述べた通りである。ここでは栄養塩に着目すると、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は一時期澗沼の下流部に存在する以外はほとんど0であることから、澗沼の富栄養関連微生物は溶解性窒素が律

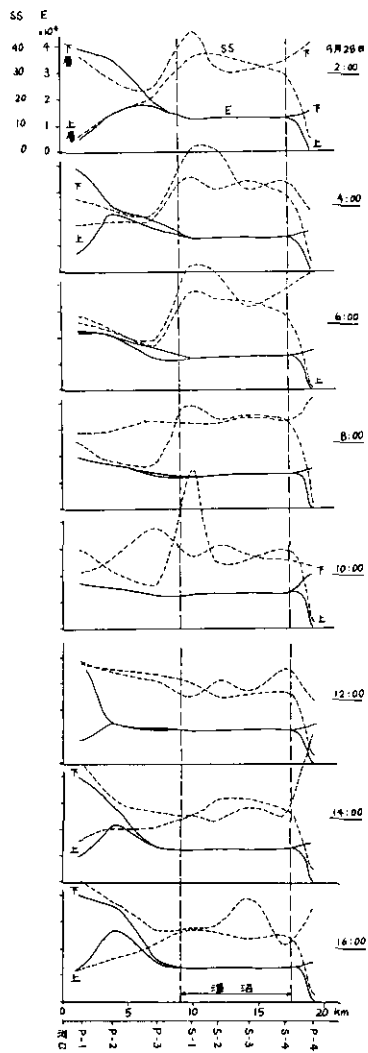


図7.a 電気伝導度, SSの河道に沿う分布
 Fig.7.a Distribution of Conductivity and Suspended Solids along River Line

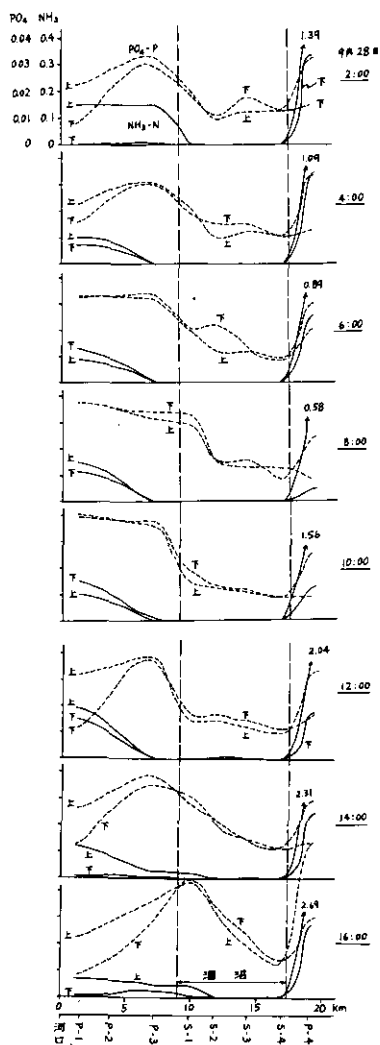


図7.b NH₃-N, PO₄-Pの河道に沿う分布
 Fig.7.b Distribution of NH₃-N and PO₄-P along River Line

速条件になっている可能性がある。PO₄-Pは潟沼内でも存続しており、28日12, 14, 16時には下流潟沼からの逆流入があるため濃度は高い。これらのことは調査時点の結果からのみ判断できることであるが、調査前における状態も考慮に入れなければならない。一般にわかっていることは、今夏は降雨が少なく、潟沼に海水が流入して滞流したため、8月中旬より藻類の大発生をみた。その後9月に入って気温が下がってもそれが存続し、9月中旬ころの雨より徐々に減少に向かったと言われている。

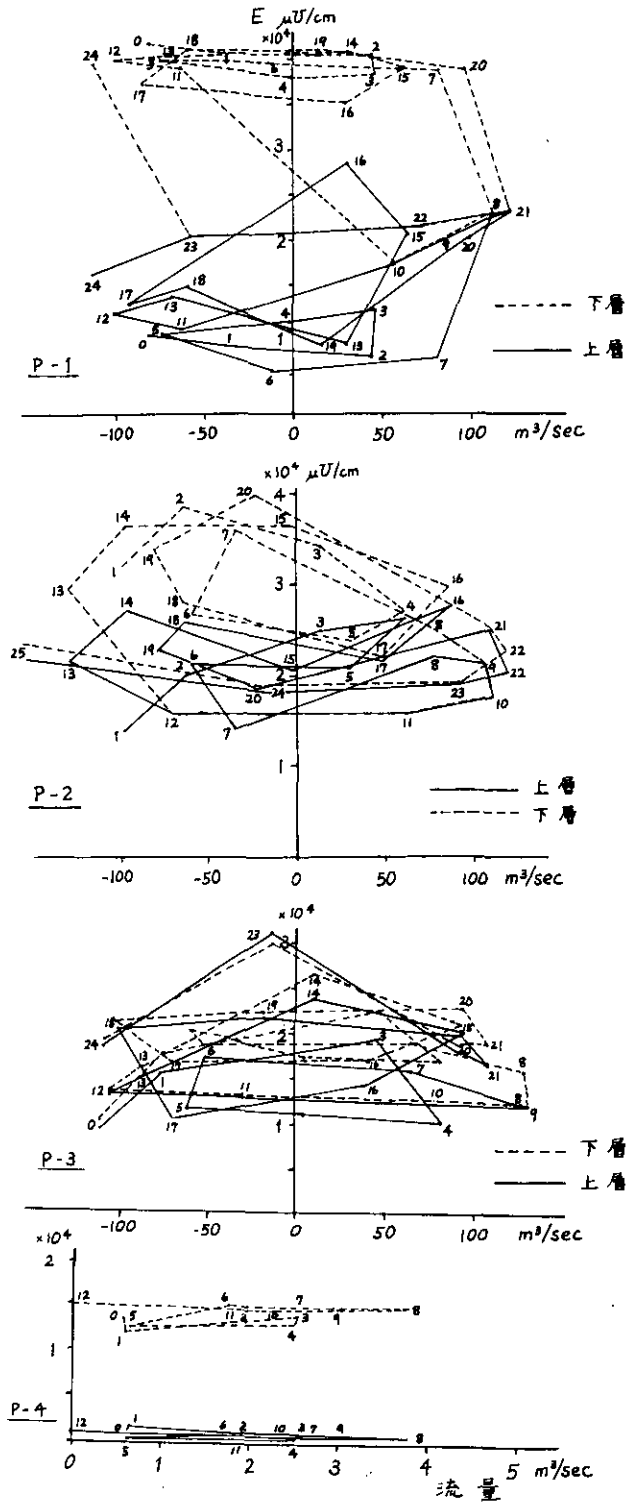


図8 電気伝導度と流量との関係

Fig.8 Relation between Conductivity and Discharge

この調査の行った9月下旬においても微生物はまだ存在していたが、末期的状態であったとみられる。

7. 水質の混合に関する考察

涸沼川感潮部の混合過程は既にして示した図からもその概要は知れるが、別の観点からそれを検討する。図8は流量と上下層のEとの関係を示したものである。図中の番号は27日14時を0として以後観測時(2時間ごと)の順に記したものである。一般に1日2回潮では流程と流量(または流速)の関係はtidal cycleに応じてループを描く。この図では、混合の過程を最もよく説明すると考えられる電気伝導度の変化と対応させたのであるが、P-1からP-3にかけてそのループが扁平になって行く。また上層下層がそれぞれ独立にループを描く部分と、同じ軌道をとる部分とがある。後者は言うまでもなく強混合を示す部分である。そして上流に行くに従って上下層のループ接近することは、下流涸沼川は概して混合現象が激しい河道であることを示している。一般に一河道の感潮河川ではその河川水と海水との混合のみであるが、涸沼川はその最下流で那河川と合流するため、那河川河川水の涸沼川への遡上が混合過程を調べる上でのトレーサーの役目をしている点は注目すべきである。

なお、P-4における上層下層の変化が完全に独立であり、しかもほぼ水平に移動していることから、ここでは典型的な弱混合であり、下流涸沼川とは極めて対照的である。

図9は下流涸沼川における24時間の流程を上層下層について調べたものである。示された移動距離は物質の移動を正しく表すものではないが、少なくとも一潮時の間に下流涸沼川の全河道区間を往復しうる流れがあることがわかる。また上層下層の流程にさほどの差異がないことから、この河道が混合が著しいことがわかる。

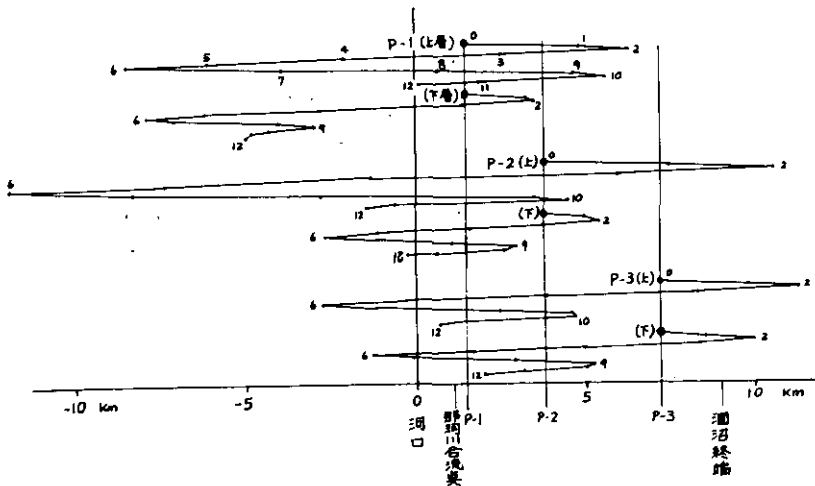


図9 下流涸沼川における流程図

Fig.9 Flow Path in the downstream of Hinuma River

8. まとめ

涸沼、涸沼川の水質・水理に関する48時間観測より、水質の分布特性とその混合現象について以下のような結果を得た。

- (1) 河道部の水理量、水質濃度の変化は潮汐振動の影響を受けて複雑な挙動を示す。下流涸沼川は強混合河道であるが、上流涸沼川は弱混合河道である。
- (2) 湖沼部は概して鉛直方向にも水平方向にも水質が一様である。湖沼部での感潮往復流は微少であるため、涸沼の物質混合は吹送流に起因することが十分考えられる。
- (3) 上流涸沼川からの栄養塩流入濃度は高いが、涸沼内では溶解性窒素濃度はほとんどない。従って観測時点において涸沼の富栄養化関係の微生物に対し、窒素が律速因子になっている可能性が高い。
- (4) 下流涸沼川では一潮時に全河道を往復する流程がある。この時、那河川の河川水の遡上がみられ、那河川の栄養塩が涸沼に流入している。

以上の結果は観測資料の一次整理から判断したものである。混合の機構の洋細な解明は、物質収支と水理量との関連において検討する必要がある、これによって涸沼の水質交換ひいては微生物生態解明に有益な資料を提供しうると考える。

謝 辞

今回の調査のうち、水位変動の整理に当たって、建設省関東地方建設局常陸工事事務所より観測期間中の涸沼川数地点の水位変動記録の提供を受けそれを参考にした。ここに謝意を表する次第である。

山王川の水文流出に関するシミュレーション

村岡浩爾¹・大坪国順¹

Simulation of the Runoff for the Sanno River

Kohji MURAOKA¹ and Kuninori OTSUBO¹

Abstract

The Sanno River is one of the tributaries of the Koise River which flows into Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura.

Although the Sanno River is very small and its discharge is small, the water pollution of this river is remarkable. When it rains heavily and the discharge is increased, loading from the river bed occurs, and the pollutants, which have been deposited, are carried in bulk into Takahamairi Bay. As a result the water quality of Lake Kasumigaura is seriously degraded year by year.

It is important to arrest the inflow of pollutants after a heavy rainfall, so that a numerical simulation model for the Sanno River was made in order to estimate the time variation of the discharge for any available rainfall pattern on the watershed.

From the results of the numerical simulation, it was found that the maximum flux is mainly dependent on the rainfall pattern on the condition that the total amount of the precipitation in the basin is equivalent.

For practical application of the runoff simulation model to the Sanno River it is necessary to discuss more precise characteristics of the hydrograph and the runoff coefficients each tributary of the Sanno River.

1. はじめに

山王川は恋瀬川の最下流端の支流であり、その河口部は霞ヶ浦の高浜入の北端にある。山王川は小規模の河川で、平常流量も非常に小さい。しかしその流域は石岡市街を含み、上流付近には柏原工業団地もあって都市河川としての要素が多い。山王川に流入している流水には、山腹からの表流水の他に、石岡市の都市廃水、家庭排水、工場からの工場排水、処理場からの処理水などがあり、水溶性、不溶性を問わずかなりの汚濁物質を含んでいる。このように山王川は、かなり汚染の進んだ河川であり、霞ヶ浦の水質汚濁、富栄養化に及ぼす影響は少なくないと考えられる。低水時においては汚濁物質は一部はそのまま霞ヶ浦に流入し、一部は河道の床面に堆積する。流域に大雨が降った後のような、

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Water and Soil Environment Division, The National Institute for Environmental Studies,
P.O. Yatabe, Ibaraki, 300-21, Japan.

高水時になると、流量の増加と共に、流速が増大し、底部に堆積していた汚濁物質が流送されるようになり、流域からの汚濁物質とともに河道内からも大量の汚濁物質が霞ヶ浦へ流入することになる。そのため霞ヶ浦の水質汚濁や富栄養化を考えるにあたり、高水時に流入してくる汚濁物質を定量的に把握することは重要な課題と考えられる。そのための第一段階として流域に降雨があった場合、山王川の流量や水位がどのように時間的に変化してゆくかを推定するために、山王川の流量一時間曲線を求める数値シミュレーションモデルを作製した。

本題に移る前に対象とする山王川の概要について簡単に述べる。山王川の河道は河口から400m付近と600m付近の2か所で直角に近い角度で湾曲している以外は急激な湾曲部がきわめて少ない。

図1に山王川の縦断面図を示す。また、山王川に設置されている河川構造物の名称と位置も併記している。川幅は上流では1.5m～2.0m、石岡市街の山王橋付近から下流で 4.2 ± 0.1 mである。河道の河口から0.6kmより上流では、改修断面となっており、0.6kmから4.0km区間では図2(a)のような複合断面を有している。また4.0kmから上流では図2(b)のようなコンクリート製長方形断面である。河道には数か所に段落ちが設置されている。山王川に流入している支流の数は大小あわせると107本の数になり、その他に水田からの余水を吐きだすためのパイプ排水が数多くある。しかし、山王川の洪水の時の流量の時間変化を解析する場合には流域面積の大きな支川からの流出を考慮すれば十分であると考えられる。

2. 洪水追跡の手法

河川の流域の降雨を設定して、これから下流の各地点における流量曲線を推定するためには、まず単位図や流出関数などを利用して上流での流量曲線をつくり、これらの流量曲線が洪水の伝播と共にどのように変形していくか調べなければならない。洪水の伝播に伴い流量曲線の変形を求めていくことを洪水追跡という。

洪水追跡法は大別すれば次の通りである。

- 1) 不定流に関する運動方程式と連続方程式より逐次計算する方法
- 2) 連続方程式と流出量と貯留量の関係式とにより逐次計算する方法

2)の方が簡便であり、一般によく使われているが、実測の流量曲線により、流出量と貯留量の関係式を求める必要がある。山王川に関しては、現在までのところ各地点の流量曲線の実測データがないので、1)の方法によって洪水追跡をすることとなる。逐次計算には現在では電子計算機が用いられることが多い。

山王川の流域を概略的に示したものが図3である。山王川を本川として、本川に流入する支川の数に33本に分けた。流域に降雨があると、各支川流域の面積、勾配、流域形状、土地利用等を反映した流量-時間曲線のパターンで、本川に雨水が流入してくるわけである。1)の方法によって本川の流量曲線を推定するには、支川からの流入を本川への横流入と考えて、つぎの二つの基礎方程式を境界条件に応じて連立に解けばよい。

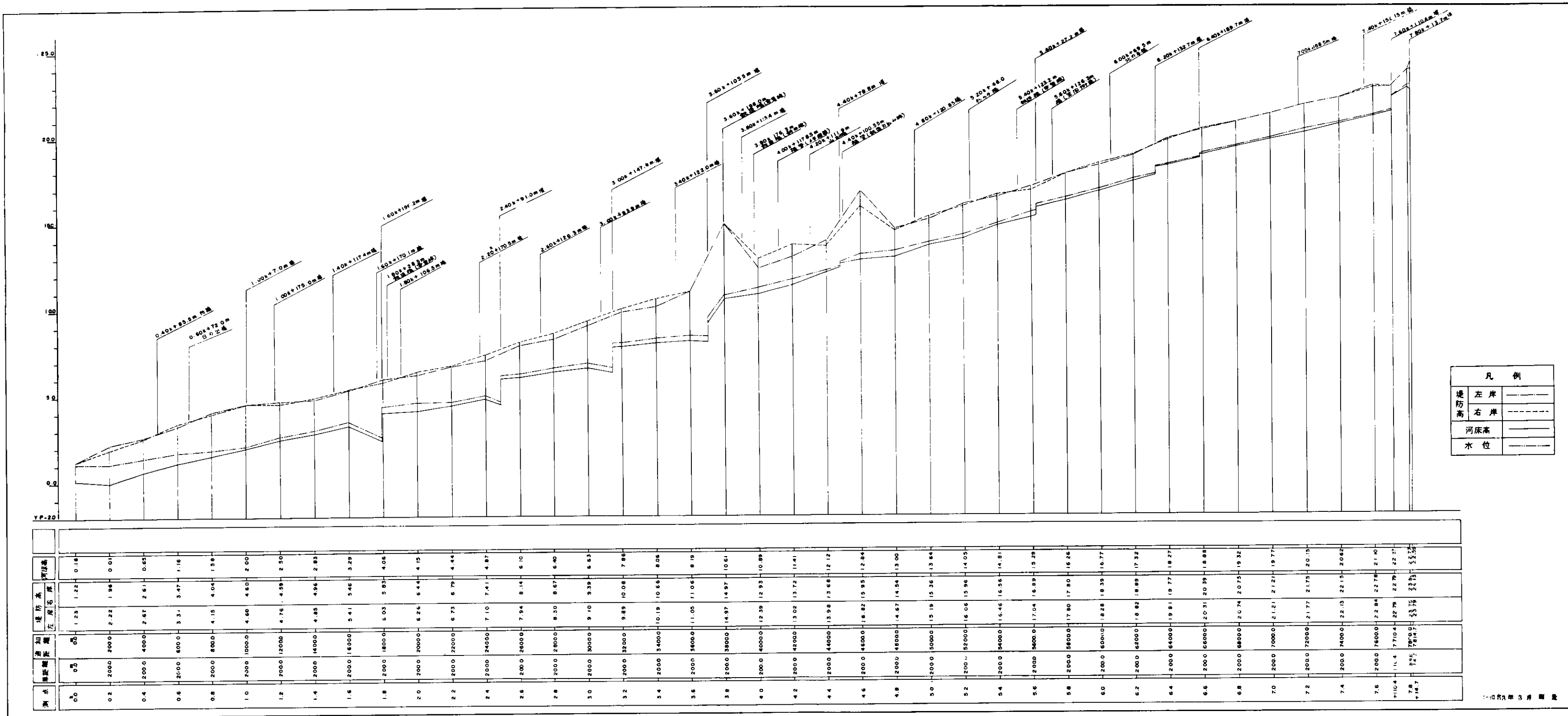


図1 山王川の縦断面図
Fig. 1 Longitudinal profile of the Sanno River

連続式
$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

連続方程式
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\frac{P}{\rho} \right)_b + \frac{Q^2}{A} \right\} = gA \left(i + \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}} \right) \quad (2)$$

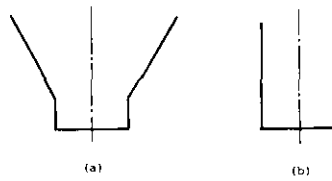


図2 山王川の河道の断面の模式図

Fig. 2 Schematic profiles of cross section of the Sanno River

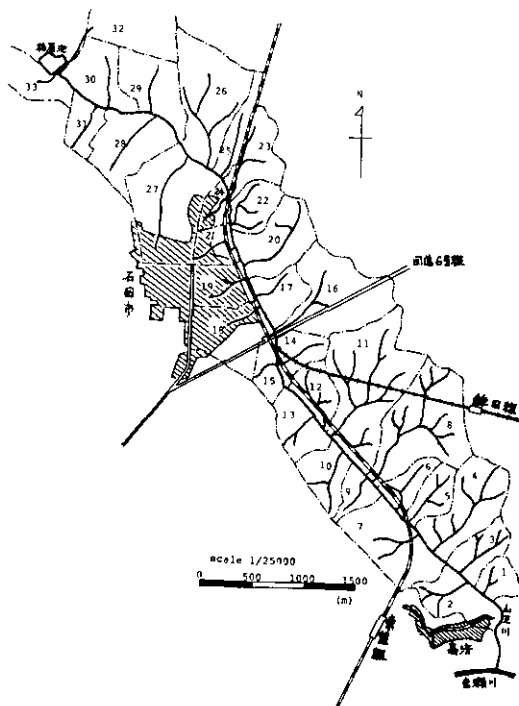


図3 山王川流域の概要

Fig. 3 Schematic representation of the basin of the Sanno River

A :水路断面積, Q :流量, q :単位長さ当りの支流合流量, ρ :水の密度, g :重力加速度, i :河床こう配, n :粗度係数, R :径深, P :断面に働く静圧の合計

(2)式中の $-\frac{\partial}{\partial x}(\frac{P}{\rho})_b$ とは, 水路幅 b を一定に保ちつつ x で偏微分するという意味である。解析解は一般に求められないので, 基礎式を差分化して数値計算を行う。(1)式, (2)式の連立微分方程式を数値解析法で解くには, いろいろな方法があるが, 今回は陽(explicit)な方法の1つである, two-steps-Lax-Wendrooff法による差分スキームを採用した(土木学会, 1974)。この方法は二つのステップからなっている。

(i) 第1ステップ式

$$\frac{A_{j\pm 1/2}^{n+1/2} - \frac{A_j^n + A_{j+1}^n}{2}}{\frac{\Delta t}{2}} + \frac{\pm(Q_{j\pm 1}^n - Q_j^n)}{\Delta x} = \frac{Q_{sj}^n}{\Delta x} \quad (\text{複合同順}) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{Q_{j\pm 1/2}^{n+1/2} - \frac{Q_j^n + Q_{j+1}^n}{2}}{\frac{\Delta t}{2}} + \frac{\pm \left\{ (\frac{P}{\rho})_{j\pm 1}^n - (\frac{P}{\rho})_j^n + (\frac{Q^2}{A})_{j\pm 1}^n - (\frac{Q^2}{A})_j^n \right\}}{\Delta x} \\ & = gA_{j\pm 1/2}^n \left\{ i_j - \frac{n_j^2 U_{j\pm 1}^n |U_{j\pm 1/2}^n|}{(R_{j\pm 1/2}^n)^{4/3}} \right\} \quad (\text{複合同順}) \quad (4) \end{aligned}$$

(ii) 第2ステップ式

$$\frac{A_j^{n+1} - A_j^n}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta x} (Q_{j+1/2} - Q_{j-1/2}) = \frac{Q_{sj}^n}{\Delta x} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{Q_j^{n+1} - Q_j^n}{\Delta t} + \frac{(\frac{P}{\rho})_{j+1/2} - (\frac{P}{\rho})_{j-1/2} + (\frac{Q^2}{A})_{j+1/2} - (\frac{Q^2}{A})_{j-1/2}}{\Delta x} \\ & = gA_j^{n+1/2} \left\{ i_j - \frac{n_j^2 u_j^{n+1/2} |u_j^{n+1/2}|}{(R_j^{n+1/2})^{4/3}} \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

上の四つの式において u は断面平均流速であり, $u_j^{n+1/2}$ とは u の $j\Delta x$ 地点, $(n+1/2)\Delta t$ 時刻の値を示し, 他の諸量についているサフィックスも全て同じ意味を表す。two-steps-Lax-Wendrooff型のスキームは図4に示すように三角形のスキームであるから, 両端の値は計算できない。その値は図5に示すようなボックス形のスキームで計算しなければならない。ボックス形のスキームとしては次のような差分式を用いた。

i) 上流端の場合

$$\frac{A_1^{n+1} - A_1^n}{\Delta t} + \frac{A_2^{n+1} - A_2^n}{\Delta t} + \frac{Q_2^{n+1} - Q_1^{n+1}}{\Delta x} + \frac{Q_2^{n+1} - Q_1^n}{\Delta x} = \frac{2Q_{s1}^n}{\Delta x} \quad (7)$$

上流端においては, 境界条件として Q_1^{n+1} を与えて A_1^{n+1} を計算する。

下流端においても, $(n+1)\Delta t$ 時刻の A もしくは Q が与えられれば(7)式と同様な差分式から残りの未知数が決まる。しかし, A もしくは Q の与えかたによっては解が不安定となり, 現実の水理現象では起こりえない結果となることがある。そのため今回は下流端と一つ手前の地点において, ボックス形ス

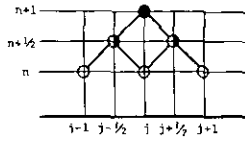


図4 三角形の差分スキーム

Fig. 4 Difference scheme of triangle type

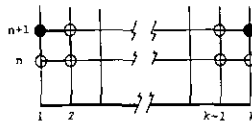


図5 ボックス形の差分スキーム

Fig. 5 Difference scheme of box type

スキームで連続の式と運動方程式の差分式を連立させ、第1近似として $Q_{k+1}^{n+1} = Q_k^{n+1}$ (k : 下流端) を与え、この値を二つの式へ代入して Q_k^{n+1} を求め直す。この値を再び二つの式へ代入して Q_{k+1}^{n+1} を計算する。この手順をくり返して Q_k^{n+1} の値を一定値に収束させることによって下流端の値を求めた(伊藤, 1974)。以上に述べた方法で洪水解析を行うわけであるが、解析にあたっては、ある降雨パターンで雨が降ったとき各支川から本川に流入してくる流量の時間的変化の情報が必要となる。

3. 支川の流量 - 時間曲線

ここでは、支川から本川へ流れ込む流出量について考える。表1は図6のように分けられた各支川の位置、長さ、流域面積等を示したものである。流域に降った雨は支川に集められて本川に流入してゆくわけであるが、降った雨はすべて支川を通じて本川に流入するわけではなく、一部は地中へ浸透し、またある一部は蒸発、蒸散することが知られている。図7に降水の流出の過程と成分を模式的に示した。今回の流出解析で対象とするのは、直接流出であり、短期流出ともいわれているものである。流域に降雨があった場合、全降水のうちで直接流出となる割合がどれだけを示す指標として流出係数 f が定義されている。支川の流域面積を A (ha) とし、雨量強度 γ (mm/h) の降雨が Δt 時間あったとすれば、直接流出として本川に流入する雨量の総量 V (m³) は

$$V = 10 \cdot f \cdot \gamma \cdot A \cdot \Delta t \quad (9)$$

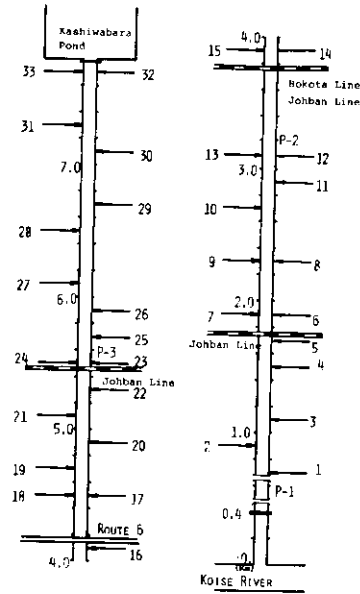


図6 山王川に流入する支川
Fig. 6 Tributaries of the Sanno River

表1 山王川の支川の特性量

Table 1. Characters of the tributaries of the Sanno River

支川番号	位 置 (km) (河口地点 0.0)	長 さ (m)		流域面積 (ha)	流出係数
		支 川	支川+支々川		
1	0.6 - 0.8	250	400	7.32	0.67
2	0.8 - 1.0	600	1000	31.31	0.67
3	1.0 - 1.2	525	1100	18.62	0.65
4	1.4 - 1.6	1000	2125	43.25	0.64
5	1.6 - 1.8	600	815	16.38	0.62
6	1.8 - 2.0	500	700	14.40	0.65
7	1.8 - 2.0	550	800	44.55	0.63
8	2.2 - 2.4	1350	3300	73.93	0.63
9	2.2 - 2.4	400	400	13.43	0.65
10	2.6 - 2.8	600	800	23.38	0.60
11	2.8 - 3.0	1375	4050	81.50	0.67
12	3.0 - 3.2	550	800	18.05	0.64
13	3.0 - 3.2	400	500	21.38	0.63
14	3.8 - 4.0	500	500	16.05	0.70
15	3.8 - 4.0	230	230	12.30	0.69
16	4.0 - 4.2	775	1100	57.23	0.63
17	4.4 - 4.6	350	350	17.15	0.61
18	4.4 - 4.6	700	700	15.10	0.71
19	4.6 - 4.8	525	675	20.93	0.75
20	4.8 - 5.0	825	975	39.10	0.64
21	5.0 - 5.2	500	500	12.38	0.64
22	5.2 - 5.4	525	1100	14.65	0.65
23	5.4 - 5.6	700	1025	28.65	0.59
24	5.4 - 5.6	375	375	10.05	0.69
25	5.6 - 5.8	500	500	15.15	0.62
26	5.8 - 6.0	1200	2175	62.60	0.62
27	6.0 - 6.2	1000	1000	67.45	0.67
28	6.4 - 6.6	800	800	40.18	0.62
29	6.6 - 6.8	525	525	32.55	0.62
30	7.0 - 7.2	650	650	15.60	0.64
31	7.2 - 7.4	425	425	32.18	0.65
32	7.6 - 7.8	1650	1650	36.50	0.50
33	7.6 - 7.8	600	600	17.73	0.62

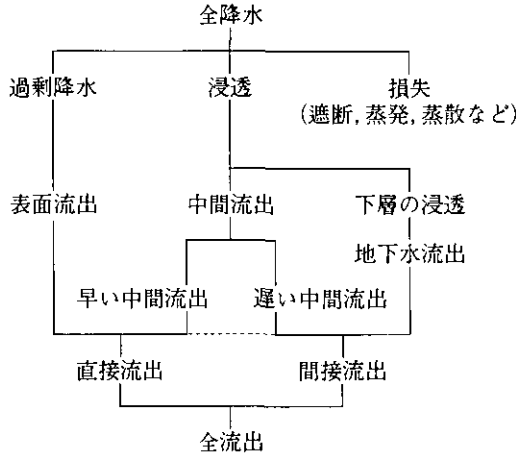


図7 降水の流出の過程と成分の構図

Fig. 7 Schematic figure of the runoff processes and components of precipitation

となる。しかし V の量が一度に本川に流入するのではなく、流出流量を Q_s (m³/s) とすると V と Q_s との間には次なる関係がある。

$$V = \int_0^{\infty} Q_s dt \quad (10)$$

Q_s の値は一定ではなく時間的に変化するものであり、流出量 Q_s の時間変化を求める必要がある。流量 - 時間曲線を求める方法は種々のものが提案されており、代表的なものに、単位図法、流出関数法、貯留関数法がある。

どの方法においても、実測データをもとにして流量 - 時間曲線を求めるわけであるが、山王川については実測データがないので、流出関数法を採用することにし、流出関数としては流量 - 時間曲線を二つのパラメータで表現できるガンマ分布型関数を用いることにした。

単位強さの雨が短時間 Δt の間降った場合の流出を比流量 (単位面積あたりの流量) で表したときに、比流量の時間的な変化を次の式で表す。

$$q(t) = \Delta t \frac{\alpha (\alpha t)^{n-1}}{n!} \exp(-\alpha t) \quad (11)$$

このとき $q(t)$ は次の関係式を満たす

$$\int_0^{\infty} q dt = 1 \cdot f \cdot dt \quad (12)$$

いま、強度 $\gamma(t)$ (mm/h) の雨が t_0 時間降ったとすると、この雨による直接比流量 q' は、比流量に m³/s/m² の単位を用いると次式で与えられる。

$$q'(t) = \frac{f}{3.6 \times 10^6} \cdot \int_0^{t_0} \gamma(\tau) \cdot \frac{\alpha^{n+1} (t-\tau)^n}{n!} \exp \{-\alpha(t-\tau)\} d\tau \quad (13)$$

(13)式を離散的に表現すると

$$q'(j\Delta t) = \frac{f}{3.6 \times 10^6} \sum_{i=1}^k \gamma(i\Delta t) \cdot \frac{\alpha^{n+1} \{(j-i)\Delta t\}^n}{n!} \cdot \exp \{-\alpha(j-i)\Delta t\} \cdot \Delta t \quad (14)$$

(j = 1, 2, 3, ……)

となる。数値計算には(14)式を求めればよい。 $q'(j\Delta t)$ の関数形は、 α , n , の二つのパラメータに種々に変化させることができる。

降雨強度 $\gamma(t)$ (mm/h) が与えられたときの流量 - 時間曲線は式(14)によって与えられるわけであるが、その関数形は各支川の f , n , α , によって異なってくる。ある流域の f の値を決めるのは、地質、地中の湿潤状態、土地利用形態等の様々な影響のため非常に難しい問題であるが今回は水理公式集（土木学会、1971）を参照にして、土地利用別に f_i の値を表2のごとく決めた。流域全体としての流出係数とし

表2 土地利用地別の流出係数

Table 2. Coefficients of runoff in the areas of different land use

土地利用状態	流出係数 f_i
市街地	0.80
山林	0.62
畑地	0.55
水田	0.75
工場地（舗装なし）	0.50
学校（裸地）	0.52

しては各土地利用の面積の重みを考慮して次式で求めた。

$$f = \frac{\sum_{i=1}^m f_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^m A_i} \quad (15)$$

ここに f_i : 各土地利用の流出係数, A_i : 各土地利用の面積, 表3は各流域の土地利用の状況を市街地、学校、工場地、山林、畑地、田地、に類別し各土地利用別の面積を示したものである。表2、表3を用いて(15)式から求めた各支川流域の流出係数 f の値を表1に示した。

4. 山王川の洪水追跡の数値シミュレーション

数値計算にあたって河床こう配 i と粗度係数 n_0 を与える必要がある。山王川の河道には、図1に示すように数か所に段落ち部が存在しているが、河床こう配 i としては、上流端と下流端の河床の標高差を水平距離で除した値を用い各断面で一定した。 i の値は1/350である。また粗度係数 n_0 の値も各断面で一定とし、 n_0 の値として0.054を採用した。

この値は水路幅2m、こう配1/350のとき水深0.3m、平均流速0.3cm/sを満足するという条件でマニ

表3 山王川各支川の土地利用地別面積

Table 3. Areas of different land use in each tributary of the Sanno River

支川番号	市街地	山林	畑地	水田	工場地	学校	総計
1	1.15	2.82	1.40	1.95			7.32
2	4.58	4.22	11.93	10.58			31.31
3	3.50	8.32	4.65	2.15			18.62
4	3.63	18.20	13.00	8.42			43.25
5		7.55	5.45	3.38			16.38
6	0.20	4.82	4.30	5.08			14.40
7	0.98	8.02	17.50	13.90	1.75	2.4	44.55
8	7.23	27.57	21.15	12.13		5.85	73.93
9	0.58	0.65	6.70	5.50			13.43
10	1.00		17.65	4.73			23.38
11	22.03	24.27	18.75	13.35		3.10	81.50
12	1.05	3.65	7.80	5.55			18.05
13	2.55	2.48	11.35	5.00			21.38
14	7.15	1.50	5.00	2.40			16.05
15	2.80		4.13	5.37			12.30
16	15.93	2.02	35.75	2.25	1.28		57.23
17	4.28	0.10	6.42	1.00		5.35	17.15
18	9.93		3.25		1.92		15.10
19	16.78			0.63	3.52		20.93
20	12.76		14.65	2.50	9.20		39.11
21	9.03		1.50	1.85			12.38
22	5.30		8.22	1.13			14.65
23	0.35		22.15	5.20	0.95		28.65
24	5.05	0.05	1.53	2.52	1.35		10.05
25	3.85		5.50	0.4	5.3		15.15
26	11.35		42.60	8.42	0.23		62.60
27	28.90	1.30	20.05	5.85	5.03	6.32	67.45
28	7.23		27.15	5.75			40.18
29	1.78	12.7	12.62	5.45			32.55
30	2.33		9.37	3.90			15.60
31	8.25	4.25	14.95	4.73			32.18
32					36.50		36.50
33	2.63	2.32	10.73	2.05			17.73

単位：ha

ングの平均流速公式(土木学会, 1971)から逆算したものである。流出関数としては、図8に示す二つのガンマ分布型関数を用いた。曲線(1)のパラメータの値は $n=6$, $\alpha=0.02$ であり、曲線(2)の場合は $n=10$, $\alpha=0.0083$ である。降雨の時間単位は差分の時間間隔 Δt と同じとして30秒、距離間隔 Δx としては、200mを採用した。下流端の位置は山王川河口から400m上流とした。その理由は河口付近は低湿地帯で大流量に対して河道から越水し、付近が氾濫原となることが予想され、河道を対象とした不定流解析は無意味となる。そのため最下流の支川のある地点より Δx だけ下流の断面を下流端とした。

次に数値計算結果の例を示す。図9は各流域の流出関数が図8の曲線(1)で与えられているとした場合に強度10mm/hの雨が1時間降った時のP-1, P-2, P-3, の3地点の流量-時間曲線を示したものである。

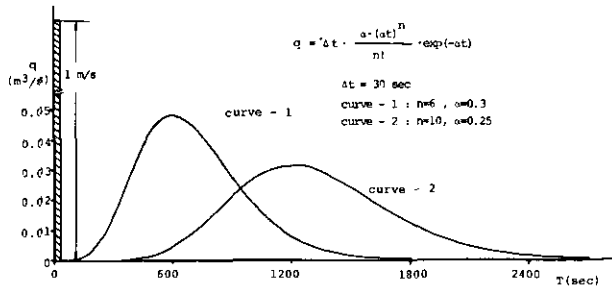


図8 流出関数

Fig. 8 Runoff functions for the simulation

P-1 地点は山王川河口から0.6km地点で、所橋と日の出橋の中間点にあたり、P-2 は河口から3.2 km上流で茨城団地付近であり、この地点から上流600mには支川がない。P-3 は河口から5.6km上流の地点で石岡市街の北はずれに位置する。図9 からいえることとしては、流量のピーク値は下流の地点ほど大きい。

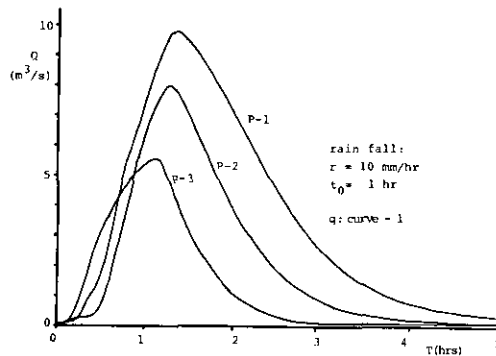


図9 時間 - 流量曲線 ($\gamma=10\text{mm/h}$ $t_0=1\text{h}$)

Fig. 9 Results of simulated Hydrographs

流量の立ち上がりに関しては5.6kmより3.2km地点の場合が遅れているが、これは3.2km地点より上流600mに支川の流入がないことによるためと考えられる。しかし、最大流出量の出現時刻は、下流の地点ほど遅くなっている。基底流量に戻るまでの時刻も下流の地点ほど遅い。図10は、流出関数は図9の場合と同じとして、強度20mmの雨が0.5時間降ったとした場合の計算結果である。流量曲線の傾向としては図9の場合とほぼ同じであるが、最大流出量の出現時刻が5.6km地点より3.2km地点のほうが遅くなっている。

図11は流出関数は同一として、降雨パターンを変化させた場合の流量曲線を示した。流出関数形は図8の曲線(1)を用い、降雨パターンとしては雨量強度を $\gamma(\text{mm/h})$ 、降雨継続時間を $t_0(\text{h})$ とすると、

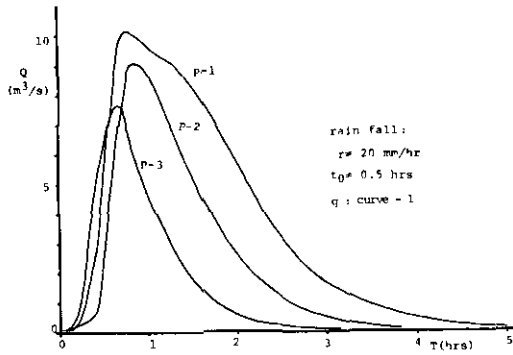


図10 時間 - 流量曲線 ($\gamma=20\text{mm/h}$, $t_0=0.5\text{h}$)
 Fig. 10 Results of simulated Hydrographs ($\gamma=20\text{mm/h}$, $t_0=0.5\text{h}$)

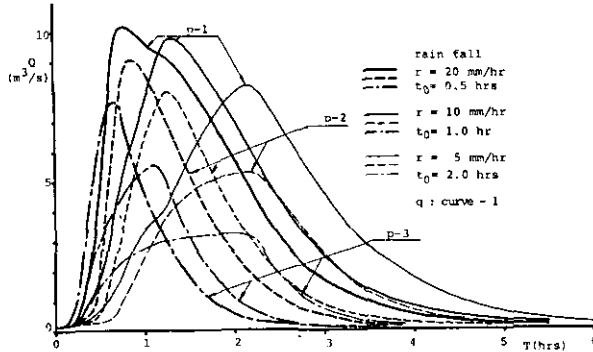


図11 時間 - 流量曲線 (降雨パターンの影響)
 Fig. 11 Results of simulated Hydrograph (the influences of difference of rainfall)

① $\gamma=20$, $t_0=0.5$, ② $\gamma=10$, $t_0=1$, ③ $\gamma=5$, $t_0=2$ の3種類を考えた。①, ②, ③, とも降雨の総量は等しくなっている。実線はP1地点, 破線はP-2地点, 一点鎖線はP-3地点に対応している。各地点とも, 降雨継続時間が長いほど, 最大流出量の出現時刻が遅くなり, 最大流出量の値は小さくなる。

図12は降雨パターンが同一で, 流出関数が異なる場合の流量曲線を示した。降雨パターンは $\gamma=10$, $t_0=1$ で流出関数は図8の曲線(1)と曲線(2)である。実線が流出関数が(1)の場合, 破線が(2)の場合である。最大流出量の出現時間には流出関数の違いが現れており, その時間差は800秒程度で流出関数のピーク値の出現時間の差600秒に近い。一方最大流出量の値そのものには両者で大きな差がないことがわかる。最大流出量には支川の流出関数の影響より, 降雨パターンの影響の方が大きいと考えられる。

図13は, 降雨の継続時間が長い場合のシミュレーション結果で雨量強度は $\gamma=2.5\text{mm/h}$ で継続時間は

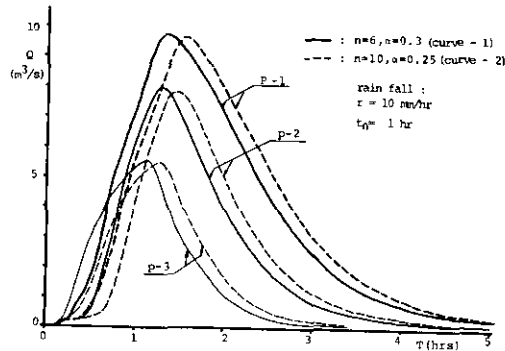


図12 時間-流量曲線 (流出関数の比較)

Fig. 12 Results of simulated Hydrograph (the influences of difference of runoff function)

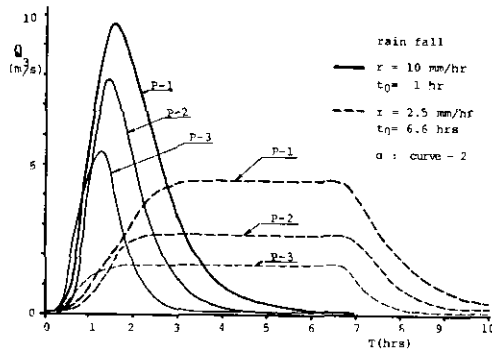


図13 時間-流量曲線 (長時間降雨の場合)

Fig. 13 Results of simulated Hydrographs in the case of prolong rainfall

$t_0=6.6$ 時間(19460秒)の場合である。比較のため $\gamma=10\text{mm/h}$ 、 $t_0=1$ 時間の結果も示してある。両者とも流出関数としては図8の曲線(2)を用いた。破線が $\gamma=2.5\text{mm/h}$ 、 $t_0=6.6$ 時間の結果であるが、雨量総量は前者のほうが多いにもかかわらず最大流出量は $\gamma=1\text{mm/h}$ 、 $t_0=1\text{h}$ の場合より小さい。流量曲線は最大流出量に到着したのち一定値が続くが、これは雨が降り続けている間は流出量は定常状態になっていることを示している。定常状態における流量は下流側の地点ほど大きいことがわかる。

以上、数値シミュレーションモデルの計算例を示したわけであるが、山王川の流出に関するデータがないために、流出係数 f や流出関数を便宜的に与えている。

今後の課題としては、雨量と流出量の実測を行い、その結果をもとに各流域ごとに、流出係数 f と流出関数のパラメータ n 、 a を求めることが残されている。流量-時間曲線の推定が可能となった後に、水

質変動の推定や底面からの物質の流送量の推定に問題を進めてゆく方針である。

5. むすび

山王川は霞ヶ浦高浜入に流入している恋瀬川の一支流であり、その規模は小さく平常時の流量も少ないが、汚染がかなり進んでいる。流域に大雨が降って河道の流量が増加すると床面に堆積していた汚濁物質が洗掘され、その汚濁物質が大量に高浜入に流入し、霞ヶ浦の水質に大きな影響を及ぼす。そのため高水時の場合に、山王川から流出する汚濁物質を定量的には握することは重要な課題である。今回はその第一段階として、降雨に伴う山王川の流量の時間的変化を推定する数値シミュレーションモデルを作製した。

計算の結果、最大流出量は降雨パターンによって支配されていることがわかった。

今回作製したモデルを山王川に実際に適用するためには、各支川ごとの流量曲線と流出係数を実測によって求めなければならない。

引用文献

- 伊藤剛(1974)：非定常運動の境界条件について。第18回水理講演会講演集，13—17。
土木学会編(1971)：水理公式集。技報堂，616pp。
土木学会編(1974)：土木工学における数値解析／流体解析編。サイエンス社，150pp。

霞ヶ浦高浜入における藻類増殖のシミュレーションに関する研究

津野 洋¹・相崎守弘¹・合田 健¹

Preliminary Model of Phytoplankton Growth at Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura

Hiroshi TSUNO¹, Morihiko AIZAKI¹ and Takeshi GODA¹

Abstract

In order to understand the essential factors which affect eutrophication at Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura, a preliminary model of phytoplankton growth is developed. Some of the model parameters are estimated on the basis of the results of a survey, whose values are among those commonly used in simulation studies.

The model is demonstrated to be able to simulate the change of chlorophyll-a and nutrients (dissolved phosphorus and nitrogen). The simulation results show that, in this area, the release of nutrients from sediment is one of the most important factors, and that the flow pattern in the lake is also important.

1. はじめに

湖沼における適切な水質管理のためには、湖沼へのBODやCODの負荷量の他に、窒素やリン等の栄養塩の負荷に伴う藻類量の増加も重要であり、富栄養現象に関与する重要な環境因子のは握を行う上でも、湖沼における藻類量や栄養塩等の変動特性をシミュレートしうる動力学モデル式の展開が望まれる。本研究は、霞ヶ浦高浜入での水質調査(国立公害研究所(1977))をもとに、この地域における藻類量および栄養塩の変動特性のシミュレーションモデルの検討を試みる。

2. シミュレーションモデル式(土木学会, 1975; Larsen et al., ; Patten et al., 1975; 津野ほか, 1977)

藻類の増殖に影響を及ぼす重要な因子として日射量、水温および栄養塩等が考えられる。日射量の一次生産速度に及ぼす影響についてはいくつかの関数形が使われているが、全日射量で取り扱うこととするといずれの場合も300~350(cal/cm²/day)前後までは全日射量に比例する形で近似しうる。光は水中で減衰するので、完全に混合している水深Zまでの水塊を取り扱う場合にはZまでの平均影響

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Water and Soil Environment Division, The National Institute for Environmental Studies, P.O. Yatabe, Ibaraki, 300-21, Japan.

因子の形で取り扱う必要があるが、その場合、水中での光の減衰は Lambert-Beer の法則に従うとする。また水中での光の減衰係数は藻類量の影響を受け、一次生産は生産層で行われることを考慮に入れる。水温の各速度定数に及ぼす影響についても水温に関する比例式で表示する。そして栄養塩濃度の藻類増殖に及ぼす影響については Monod 型で表示する。

湖沼への栄養塩の供給については、流入河川等の表流水の他に、高浜入のように富栄養化し水深の浅い湖においては特に底泥からの供給の影響は大きいことが考えられる。

藻類現存量が多くなると藻類の増殖速度が遅くなること（スペース効果）が知られている。ここでは、一次生産速度はクロロフィル a の増加とともに対数的に減少する（津野ほか, 1977, 1978）として表示する。

藻類の沈降については、水塊カラム中での沈降を模擬して、 $dM_i/dt = -(S_i/z_{hi}) M_i$ で示す。

藻類の呼吸、死亡および捕食による減少の効果については、藻類を中心として考える場合、動物プランクトンの増減による捕食効果の増減を加味することもあるが、全部をまとめて藻類濃度に関する一次式で示されることも多い。ここでも、最も初歩的なモデルとして同様の取り扱いをする。ただし呼吸の場合は、栄養塩は水塊に回帰するものとする。

以上の考察をもとに、高浜入を図 1 に示す区画に分割し、任意の区画 i での溶解性のリンおよび窒素の濃度、ならびに藻類濃度に関するシミュレーションモデルの式を試みると次のようになる。この場合、各区画は完全混合していると考え、系外からの入力条件は全日射量、水温、栄養塩（窒素およびリン）の供給濃度ならびに流入水量である。

環境因子

$$\left. \begin{aligned} F_{Ri} &= R_0 \{1 - \exp(-\epsilon_i Z_i)\} / (R_b \epsilon_i Z_i) \\ Z_i &= \min(Z_{hi}, Z_{ei}), \quad Z_{ei} = 4.6 / \epsilon_i \\ \epsilon_i &= m M_i + n \\ F_{Ti} &= T_i / T_b \\ \beta_i &= \exp(-\gamma M_i) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

系内の変数

$$\left. \begin{aligned} V_i(dM_i/dt) &= \Sigma Q'_i M'_i - (\Sigma Q'_i + Q_{Ri}) M_i + A_i + A_i Z_i G_i M_i \\ &\quad - V_i \{ (Cr + Cd) F_{Ti} + (S_i / Z_{hi}) \} M_i \\ V_i(dN_i/dt) &= Q_{Ri} N_{Ri} + \Sigma Q'_i N'_i - (\Sigma Q'_i + Q_{Ri}) N_i \\ &\quad - a_N A_i Z_i G_i M_i + a_N V_i Cr F_{Ti} M_i + S_{Ni} A_i F_{Ti} \\ V_i(dP_i/dt) &= Q_{Ri} P_{Ri} + \Sigma Q'_i P'_i - (\Sigma Q'_i + Q_{Ri}) P_i \\ &\quad - a_P A_i Z_i G_i M_i + a_P V_i Cr F_{Ti} M_i + S_{Pi} A_i F_{Ti} \\ &\quad - (S'_i / Z_{hi}) P_i \\ G_i &= K F_{Ri} F_{Ti} \{ P_i / (K_P + P_i) \} \{ N_i / (K_N + N_i) \} \beta_i \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

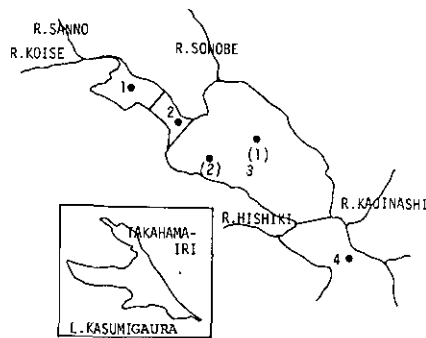


図1 調査地点およびシミュレーションのための区画割

Fig. 1. Sampling point and areas divided for simulation in Takahamairi Bay

なお、リンに関する収支式においては、リンは無機性の浮遊物とともに共沈しやすいので、霞ヶ浦高浜入でのシミュレーションの際の特性として右辺第7項に沈殿項を付加した。

使用記号

F_{ri} ; 全日射量影響因子, R_0 ; 水表面での全日射量, ϵ_i ; 光の水中減衰係数, Z_i ; 光合成有効水深, R_b ; 基準全日射量, Z_{hi} ; 平均水深, Z_{ei} ; 生産層の深さ, m ; クロロフィル a の変化による光の水中減衰係数への影響比, n ; 湖水自体のもつ光の水中減衰係数, F_{Ti} ; 水温影響因子, T_i ; 水温, T_b ; 基準水温, β_i ; スペース効果因子, γ ; スペース効果の程度を示す係数, M_i ; 藻類濃度, V_i ; 区画容積, t ; 時間, Q'_i ; 他区画からの流入水量, Q_{ri} ; 区画への河川流入水量, N_i ; 溶解性窒素濃度, P_i ; 溶解性リン濃度, M'_i , N'_i , P'_i ; 各々他区画からの流入する藻類, 溶解性窒素および溶解性リンの濃度, A_i ; 区画水表面積, G_i ; 藻類増殖速度, C_r ; 呼吸速度定数, C_d ; 捕食および死亡速度定数, K ; 増殖速度定数, S_t ; 藻類沈降速度, N_{ri} , P_{ri} ; 河川からの流入窒素およびリン濃度, a_N ; 窒素からの藻類への生産係数, a_P ; リンから藻類への生産係数, S_{Ni} , S_{Pi} ; 底泥からの窒素およびリンの溶出速度, F'_{ri} ; 栄養塩の溶出パターンを規定する因子, S'_i ; 共沈物質による溶解性リンの沈降速度

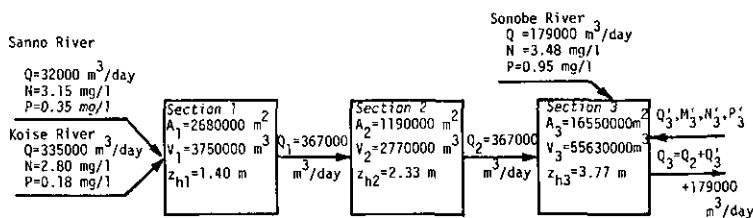


図2 シミュレーション計算の際の地理的因子等

Fig. 2 Geographical factors and boundary conditions of Takahamairi Bay for simulation

3. シミュレーションの計算

外部環境としての物理的因子等は図2に(建設省, 1975; 茨城県, 1973, 1974, 1975), 気象条件等は表1に(気象庁, 1973, 1974, 1975, 1976; 茨城県, 1973, 1974, 1975; 津野ほか, 1977, 環境因子に関するパラメータは実測データより算出して表2に(津野ほか, 1977)それぞれ示す。なお, 底泥からの栄養塩の溶出速度は, 高浜入区画1および2における1976年7月~9月での栄養塩収支より

表1 気象条件等

Table 1. Environmental condition for simulation

simulation for summer in 1976 (timely expression by polynomial)	annual simulation (timely expression by harmonic series)
$T_1 = -40.7D^4 + 200.7D^3 - 209.5D^2 + 63.6D + 22.6^*$	$T = 16.17 + 12.63\sin(2\pi t/360 - 2.11)$
$T_2 = -112.5D^4 + 269.4D^3 - 223.5D^2 + 64.4D + 22.9^*$	$+ 0.77\sin(4\pi t/360) + \sin(8\pi t/360 - 6.30)^{***}$
$T_3 = -157.6D^4 + 344.3D^3 - 256.9D^2 + 67.1D + 23.0^*$	$T_1 = T_2 = T_3 = T$
$R_0 = -21462.3D^4 + 36631.0D^3 - 20855.1D^2 + 4212.4D$ $+ 149.5^{**}$	$R_0 = 247.3 + 79.3\sin(2\pi t/360 - 1.25) + 27.2$ $\sin(4\pi t/360 - 0.64) + 26.2\sin(8\pi t/360$ $- 1.53)^{****}$
$M'_3 = 8.2231D^4 - 10.9263D^3 + 4.8176D^2 - 0.7261D + 0.0628^*$	$M'_3 = 0, Q'_3 = 0, N'_3 = 0, P'_3 = 0$
$Q'_3 = 604800$ (from survey on lake current in summer in 1977)	$t = 0$ on January 1
$N'_3 = 0.09^*, P'_3 = 0.045^*, D = t/100, t = 0$ on July 14 initial condition; data at $t = 0$	

* 津野ほか (1977), **気象庁 (1976)

茨城県 (1973, 1974, 1975), *気象庁 (1973, 1974, 1975)

表2 環境因子に関するパラメータ

Table 2. Values of Environmental Parameters for simulation

parameter	value	parameter	value
Rb	356cal/cm ² /day	F' _{T1}	case 1; F' _{T1} = F _{T1}
Tb	27°C		case 2;
γ	3.85Ch-a mg/liter		aerobic: F' _{T1} = 0
m	16.2m ⁻¹ (Chl-a mg/liter) ⁻¹		anaerobic: **
n	1.3m ⁻¹		F' _{T1} = 1
S _{Ni} (gN/m ² /day)	case 1*	case 2*	case 3;
	S _{N1} = 0.024	0.147	F' _{T1} = 0
	S _{N2} = 0.0	0.0	
S _{Pi} (gP/m ² /day)	S _{N3} = 0.0	0.0	
	S _{P1} = 0.086	0.100	
	S _{P2} = 0.055	0.055	
	S _{P3} = 0.029		

*calculated with the data from July 14 to September 20 for case 1, and only in August for case 2 (1976)

**supposed that upper layer of lake sediment becomes anaerobic when water temperature becomes 20°C and more.

推定した。モデル式に含まれるパラメータの値は実測データより算出して表3に示す。

表3 モデルのパラメータの値
Table 3. Values of Model Parameters for simulation

parameter	value
K	1.20 l/day
Cr	0.05 or 0.11 l/day
Cd	0.01 l/day
S _i	0 or 0.05m/day
S _i '	0.5m/day
a _N	9.0mg N/mg Chl-a
a _P	1.94mg P/mg Chl-a
K _N	0.1mg/liter
K _P	0.02mg/liter

以上の計算条件のもとでシミュレーション計算した結果を、観測データ（プロット点）とともに図3、4に示す。図3は、1976年夏期におけるデータに関するシミュレーションであるが、底泥からの栄養塩の溶出がないとした場合（case 3）には、いずれの地点においてもクロロフィル a 濃度は50 μ g/l前後で維持される傾向が示され、8月ごろにおけるクロロフィル a の増加はシミュレートしえていない。またこの条件下では、計算開始後より溶解性リンの濃度が低下し、0.005mg/l以下となり、リンが制限栄養塩となることが示されている。底泥からの栄養塩の溶出があるとして計算を行った場合（case 1, 2）は、調査地点1および2における7月から8月にかけてのクロロフィル a の増加および栄養塩の減少、8月の中旬から下旬にかけてのクロロフィル a の現在量および栄養塩の増加、そして9月以降のクロロフィル a の減少、溶解性窒素の増加および溶解性リンの低下等の変動パターン、ならびに調査地点3での調査期間中のクロロフィル a の増加傾向および栄養塩濃度の変動パターンをかなりよくシミュレートしている。ただ、底泥からの栄養塩の溶出パターンの差異により9月以降のクロロフィル a の減少、溶解性窒素の増加および溶解性リンの減少パターンが異なり、底泥の上層部が嫌気性のときに栄養塩の溶出が生ずるとした場合（case 2）の方が、温度に比例して栄養塩が溶出するとした場合（case 1）より変動程度が大きい。クロロフィル a や栄養塩の変動は、調査地点2では調査地点1よりも緩やかとなる傾向はシミュレートされているが、調査地点1および2を含む両区画を隣接させたために、変動の時間遅れは顕著に表れていない。この点に関しては、今後潮流の調査解析をもとに区画割の検討が必要であろう。以上、これらのシミュレート計算で示されるように、夏期における湖への栄養塩の負荷の増加、特に底泥からの溶出等の効果が大きいことが考えられる。

1年間のクロロフィル a および栄養塩濃度の変動のシミュレート曲線を図4に示す。このシミュレート計算においては、外部環境因子としての水温は調査地点2付近の昭和48年～50年の測定値（茨城県、1973, 1974, 1975）に対しての時系列解析による調和級数を用い、全日射量は東京での気象記録に

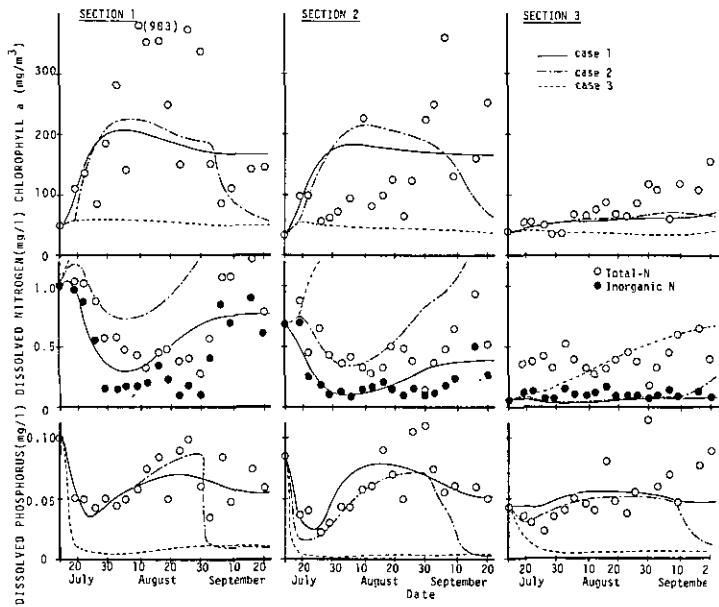


図3 1976年夏期のシミュレーション

Fig. 3 Simulation results for the phytoplankton growth and concentration of nutrients in the summer 1976

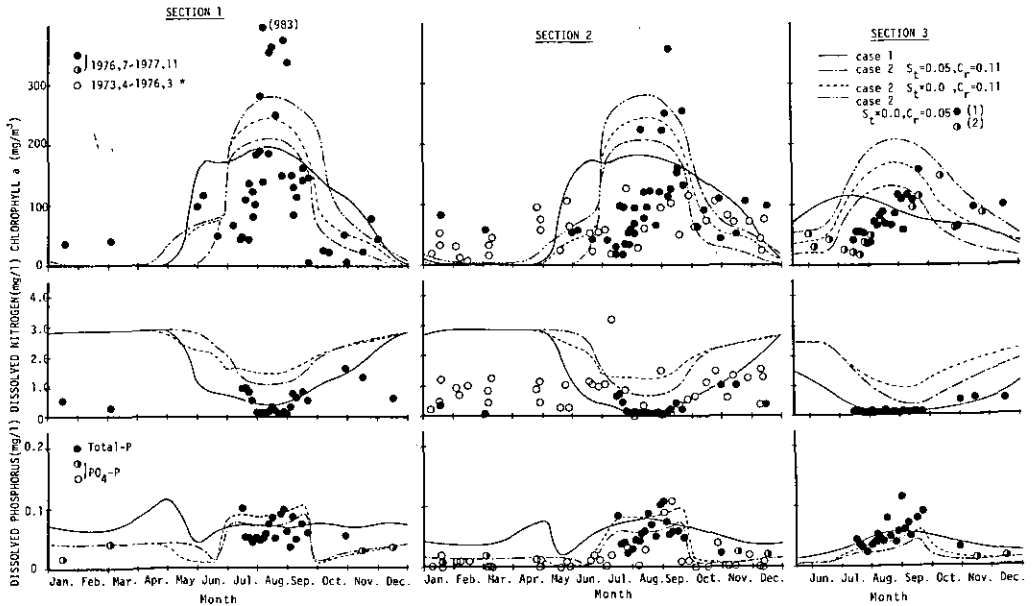


図4 1年間のシミュレーション (*茨城県, 1973, 1974, 1975)

Fig. 4 Simulation results for the phytoplankton growth and concentration of nutrients through an year

対しての同様の解析の級数を用いて行った。これらのシミュレート曲線によると、クロロフィル a は4月の初めより急激に増加し始め、6月の初に一応増加は緩やかとなるが、梅雨明けの7月初めころから再び増加し8月の中旬に最高値となり、その後減少を始め9月の下旬より急激に低下し3月に最低値を示す。調査地点1から3へと沖合に行くにしたがって、クロロフィル a の冬期の現存量が多くなる傾向、夏期の現存量は少なくなる傾向、および年間の変化が緩やかとなり4~6月にかけての春期の増加は顕著には表れなくなる傾向が示されている。溶解性の窒素はクロロフィル a の増加に伴って減少し8月に最低となり、その後クロロフィル a の減少に伴って増加する傾向が示されている。溶解性のリンは、共沈等による減少の項を付加したために、クロロフィル a の現在量の少ない冬期でも0.05~0.005mg/lと低い値を示し、底泥からの溶出に伴って増加し、8月中旬~9月中旬に最高値を示し、その後低下する傾向が示されている。これらのシミュレートの曲線の変動パターンは、クロロフィル a 、溶解性窒素および溶解性リンに関する観測データの年間変動パターンをかなりよくシミュレートしていると考えられる。クロロフィル a に関するシミュレート曲線の年間変動パターンは、底泥からの栄養塩の溶出パターンの差異により多少異なり、case 1の場合は5~6月にかけての増加がcase 2の場合より大きく一度平衡値になる傾向があるが、case 2では7月~8月にかけての増加が急激であり、また9月~10月にかけての減少はcase 2の方がcase 1に比較して急激である傾向が示されている。また沈降速度や呼吸速度等の減衰係数の値により、クロロフィル a の現存量はかなりの影響を受けることも示されている。

4. まとめ

霞ヶ浦高浜入での富栄養化現象に関与する因子のは握を目的として、藻類増殖に関する最も初歩的なモデルを展開した。モデルに含まれる各パラメータの値は、調査結果をもとに算出を試みた。その結果、モデルにより、クロロフィル a の現存量および栄養塩（窒素ならびにリン）の変動特性をかなり良くシミュレートしうること、この地域においては特に底泥からの栄養塩の供給の影響が大きいこと等の知見が得られた。また、同時にクロロフィル a の地域的な差異には、湖流の影響の大きいことも示された。今後は、ここでのモデルのより合理的な改善とともに、底泥からの栄養塩の溶出を含む栄養塩負荷の年間変動パターン、湖流および梅雨等による流入水量の変動パターンのは握、ならびにこれらの因子のシミュレート計算への反映について考察する必要がある。

引用文献

- 土木学会(1975)：琵琶湖の将来水質に関する調査報告書。
- 茨城県(1973, 1974, 1975)：公共用水域の水質測定結果。
- 建設省(1975)：霞ヶ浦・常陸利根川管内図。1/50,000。
- 気象庁(1973, 1974, 1975)：気象庁月報(1973. 1~1975. 12) 全国気象表。

気象庁高層気象台(1976)：地上気象観測日原簿，7月，8月，9月。

国立公害研究所(1977)：陸水域の富栄養化に関する総合研究 昭和51年度。

Larsen D.P., et al. : Modeling the Eutrophication Process, ann arbor science.

Patten B.C., et al. (1975) : Systems Analysis and Simulation in Ecology, Vol. III.

津野洋・相崎守弘・須藤隆一・合田健(1977)：霞ヶ浦高浜入の夏期における水質特性—I，II，第11回水質汚濁研究に関するシンポジウム講演集，7～18。

津野洋・相崎守弘・須藤隆一・合田健(1977)：霞ヶ浦高浜入の夏期における水質生物変動，陸水域の富栄養化に関する総合研究 昭和51年度。国立公害研究所，80～94。

藻類の増殖過程における栄養塩の摂取ならびに代謝に関する動力学モデル

津野 洋¹・合田 健¹

Kinetic Model of Algal Growth Incorporating Intracellular Carbohydrate and Phosphorus Pools

Hiroshi TSUNO¹ and Takeshi GODA¹

Abstract

A series of studies on a kinetic model for photosynthesis, nutrients ingestion, and metabolism for algal growth were conducted. Coefficients included in the proposed model were examined by considering experimental data on the growth of *Chlorella* sp. It was shown that the proposed model can simulate the mechanism of algal growth, the change of intracellular phosphorus content, the change of intracellular carbohydrate content, the change of concentrations of dissolved nutrients and chlorophyll-a and the effects of nutrients on algal growth.

1. はじめに

藻類はその増殖過程において細胞外のリンを細胞中に蓄積し、細胞外のリンが枯渇した後も蓄積のリンにより増殖でき、その蓄積量は最少必要量の数倍に達することが知られている (Kuenzler and Ketchum, 1962; Keenan and Auer, 1974; Fogg, 1975)。また、ある種の藻類は無機体の窒素も蓄積することが知られている (Fogg, 1975)。栄養塩が十分にあり対数増殖相にある藻類は、乾燥重量の70%以上タンパク質を含有し、クロロフィル *a* や核酸を多く含有しているが、一方、窒素欠乏条件下の藻類ではタンパク質の含有率は10%以下となり、脂質や炭水化物が多量に蓄積されることが知られており、またリン欠乏条件下でも同様の状態が生ずることも知られている (Fogg, 1975)。したがって、藻類増殖過程におけるこれらの現象を経時的には握するとともにそれらの現象をも表示しうる動力学モデルの展開が、藻類の増殖特性、窒素およびリンの摂取特性ならびに窒素およびリン濃度の影響等を考察する上で重要であると考えられる。

藻類増殖と栄養塩濃度との関係を表示する動力学モデル式として、Monod の式が一般に用いられている (Fogg, 1975; Middlebrooks, et al; Patten, 1975)。しかしながら、このモデル式は上述のよ

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Water and Soil Environment Division, The National Institute for Environmental Studies, P.O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.

うな細胞内蓄積物含有量の変動現象を表しえない。近年、細胞内の栄養塩量の変動を表示しうる動力学モデルが Caperon (1969), Bierman, Grenney (1974) 等によっていくつか示されているが、実験結果の解析に基づいて栄養塩摂取、細胞内蓄積物の挙動および藻類増殖を考慮しての総合的なモデルの展開は十分になされていない。

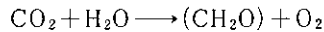
本研究は、*Chlorella* sp. を対象として、藻類の増殖特性、これに伴う窒素およびリンの摂取特性、および藻類の増殖特性に及ぼす窒素ならびにリン濃度の影響を、とくに藻類中の化学的組成の変動に注目しては握する目的で行った実験的検討 (Tsuno and Goda, 1978) に基づいて、これらの現象特性を表示しうる栄養塩の摂取、光合成ならびに代謝に関するモデルの展開を試みるものである。

2. 栄養塩の摂取ならびに藻類の増殖に関する動力学モデルの展開

2.1 モデルの概要

藻類の増殖過程に関する動力学モデルの模式図を図1に示す。本モデルは主に光合成過程、リンおよび窒素の摂取過程、および新陳代謝過程により構成される。

藻類は次式に示すように光のエネルギーによって水中の二酸化炭素より炭水化物を合成し細胞内に貯蔵する (経路1, 光合成過程)。



そして、この炭水化物が有機基質として新陳代謝 (経路4) され、藻類のエネルギー獲得のための呼吸に (経路7)、一部は得られたエネルギーを用いての細胞合成 (経路6) に使われる。

栄養塩のリンおよび窒素については、実験結果 (Tsuno and Goda, 1978) に基づいて、リンについては細胞内での蓄積を考え、窒素については細胞 (タンパク質) 合成に従って摂取されると考える。すなわち、媒体中の無機態のリンは細胞内に一度蓄積され (経路2)、そしてこの蓄積されたリンは光リン酸化反応にも用いられるが、主として炭水化物を用いての新陳代謝経路 (経路5) にまわされ、

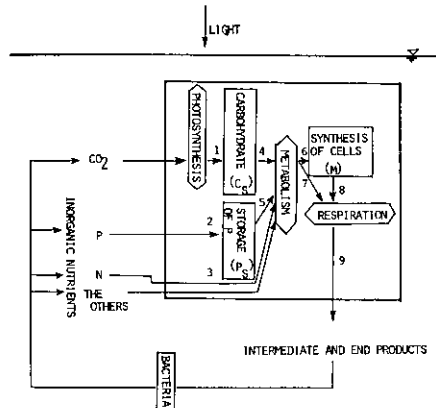


図1 動力学モデルの概念図

Fig.1 Schematic diagram of the kinetic model

細胞構成因子あるいは微生物増殖のためのエネルギー源としての高エネルギー化合物であるATP等の合成のために用いられている（経路6）。

また媒体中の無機態の窒素は細胞合成経路（経路6）におけるタンパク質の合成の原料として必要量のみ摂取される（経路3）。

細胞の一部は自家呼吸により自己分解する（経路8）。呼吸により生成した中間生成物の不要物、最終生成物、 H_2O あるいは CO_2 などは細胞外の媒体中に放出され（経路9）、バクテリアの分解等を経て再び藻類に摂取される。

なお、本解析においては、窒素およびリン以外の栄養塩（ CO_2 を含む）は十分に存在し、必要に応じて摂取されるものとする。

2.2 モデルの定式化

(1) 光合成過程（経路1）

光合成速度は光、温度、pH等の外部環境因子により大きく影響を受けるが、図2(Tsuno and Goda, 1978) に示されるように藻類中のリン含有率にも刺激されるので比例型で示し、次式で表す。

$$R_{ph} = f_{ph}(\text{光, 温度, } \dots) \times \frac{P_s/M + P_o/M}{P_{ST}/M + P_o/M} \times M \times \beta \quad (1)$$

ここで、 R_{ph} ; 光合成速度（炭水化物 mg/l/d）

f_{ph} ; 光、温度等により影響を受ける光合成速度関数（mg 炭水化物/mg クロロフィル a /d）

P_s ; 系の中に存在する全細胞中の蓄積リン濃度（mg/l）

P_{ST} ; 系の中に存在する全細胞中の蓄積リンの最大可能蓄積容量（飽和蓄積リン濃度）(mg/l)

P_o ; 系の中に存在する全細胞の構成成分としての有機態リン濃度（mg/l）

M ; 藻類細胞濃度（クロロフィル a）(mg/l)

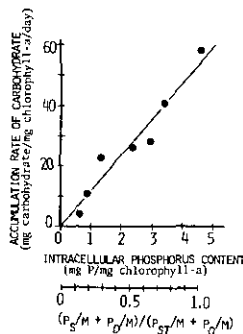


図2 細胞内蓄積リン含有率と炭水化物蓄積速度との関係

Fig. 2 Relationship between accumulation rate of carbohydrate and intracellular phosphorus content

β ; 藻類が増殖するにつれて表れてくるスペース効果, 光の透過率およびpH等による影響を示す因子

なお, この式ではリン含有率を最大リン含有率で割算をして無次元表示をした。本式で, P_{ST} および P_0 は藻類量 (M) の変化に伴って変化する変数であるが, P_{ST}/M および P_0/M という形で表示すると, 単位細胞内の飽和蓄積リン量および単位細胞内の構成リン量となり, 同じ藻類種については一定値であると考えることができる。

(2) リンの摂取過程 (経路 2)

本研究のモデルにおいては, 細胞内にリンが蓄積され始めると同時に, この蓄積リンが新陳代謝経路で使われ始めると考え, 細胞内でのリンの蓄積含有率は種類特有の上限があるとして飽和蓄積リン含有率 (P_{ST}/M) を仮定し, そして媒体中のリンの摂取速度は蓄積リンの不飽和量に支配されると考えると, 次式が得られる (Goda et al, 1973; Tsuno et al, 1978)。なお, 栄養塩摂取速度は媒体中の栄養塩の濃度に関する Monod 型で表されることが多く (Fogg, 1975; Patten, 1975; Middle brooks et al.), 本モデルでもその型での表示を行う。

$$R_p = k_2 \frac{P}{K_p + P} \left(\frac{P_{ST}}{M} - \frac{P_s}{M} \right) \times M \quad (2)$$

ここで, R_p ; リン摂取速度 (リン mg/l/d)

P ; 媒体中のリン濃度 (mg/l)

k_2 ; リン摂取速度定数 (1/d)

K_p ; 媒体中のリンに関する半飽和定数 (mg/l)

(3) 窒素の摂取過程 (経路 3)

本モデルでは, 窒素に関しては細胞中での過剰蓄積は生じなくて細胞合成経路での必要量に応じて摂取されると考えており, 媒体中の窒素摂取速度は次式で示される。

$$R_N = \alpha a_{NAC} \cdot R_m \quad (3)$$

ここで, R_N ; 窒素摂取速度 (窒素 mg/l/d)

R_m ; 新陳代謝速度 (炭水化物 mg/l/d)

α ; 細胞内炭水化物のうち細胞合成のために使われる割合

a_N ; 換算係数 (mg 窒素/mg クロロフィル a)

a_C ; 換算係数 (mg クロロフィル a /mg 炭水化物)

(4) 新陳代謝過程 (経路 4)

細胞内炭水化物の新陳代謝によるエネルギー獲得および細胞合成の速度であるが, その原料の一部として使われる細胞内蓄積リンおよび媒体中の窒素の濃度にも関係している。したがって, 新陳代謝速度を細胞内炭水化物の含有率および細胞内蓄積リンの含有率 (飽和蓄積リン含有率で除して無次元

化する)の一次の項,ならびに媒体中の窒素濃度に関する項(Monod型)によって表すと,次式となる。

$$R_m = k_4 \frac{C_s}{M} \frac{P_s/M}{P_{sT}/M} \frac{N}{K_N + N} M \times \beta \quad (4)$$

ここで, k_4 ; 新陳代謝速度定数 (1/d)

C_s ; 細胞内炭水化物濃度 (mg/l)

N ; 媒体中窒素濃度 (mg/l)

K_N ; 媒体中窒素濃度に関する半飽和定数 (mg/l)

(5) 細胞合成過程 (経路6)

細胞合成速度 R_a は, 新陳代謝速度を用いてつぎのように示すことができる。

$$R_a = \alpha_{ac} \cdot R_m \quad (5)$$

(6) 自己分解過程 (経路8)

自己分解速度は一般に細胞量に関する一次式で表される (Greeney, 1974; Wiegert, 1975; Bierman)。すなわち,

$$\frac{dM}{dt} = k_6 M \quad (6)$$

ここで, k_6 ; 自己分解速度定数 (1/d)

そして, 細胞を構成するリンおよび窒素はこの速度に比例した速度で細胞外に溶出する。

(7) スペース効果等を示す因子, β

藻類の増殖に伴って生じてくる密度効果, 光の透過率, pHの影響等を示す阻害項であり, 本モデルでは光合成の項および新陳代謝の項に関与すると考えている。例えば光の透過率はクロロフィルが $200 \mu\text{g/l}$ 前後になると影響を及ぼす程度に減少する (Tominaga and Ichimura, 1966) というように, ある藻類濃度以上になると影響が生じてくるという Wiegert (1975) の示したと同じ型の式を用いる。

$$\beta = 1 - \left[\left[\frac{M - M_c}{M_{\max} - M_c} \right] \right]_+ \quad (7)$$

ただし,

$$[[*]]_+ = \begin{cases} *, & [[*]] > 0 \\ 0, & [[*]] \leq 0 \end{cases}$$

ここで, M_{\max} ; 最大可能藻類濃度 (mg/l)

M_c ; スペース効果が効き始めるときの藻類濃度 (mg/l)

(8) 各状態変数の変動

以上の速度式を用いて, 各状態変数は次のように示される。

光合成産物としての細胞内炭水化物

$$\frac{dC_s}{dt} = f_{ph} \times \frac{P_s/M + P_0/M}{P_{ST}/M + P_0/M} \times M \times \beta - k_4 \frac{C_s}{M} \times \frac{P_s/M}{P_{ST}/M} \frac{N}{K_N + N} \times M \times \beta \quad (8)$$

媒体中のリン

$$-\frac{dP}{dt} = k_2 \frac{P}{K_P + P} \left(\frac{P_{ST}}{M} - \frac{P_s}{M} \right) M - a_p k_6 M \quad (9)$$

媒体中の窒素

$$-\frac{dN}{dt} = a_{vac} k_4 \frac{C_s}{M} \frac{P_s/M}{P_{ST}/M} \frac{N}{K_N + N} \times M \times \beta - a_N k_6 M \quad (10)$$

細胞内蓄積リンおよび細胞内全リン

$$\frac{dP_s}{dt} = k_2 \frac{P}{K_P + P} \left(\frac{P_{ST}}{M} - \frac{P_s}{M} \right) M - a_p a_c k_4 \times \frac{C_s}{M} \frac{P_s/M}{P_{ST}/M} \frac{N}{K_N + N} \times M \times \beta \quad (11)$$

$$P_{ceu} = P_s + P_0 \quad (12)$$

藻類細胞 (クロロフィル *a*)

$$\frac{dM}{dt} = a_{ac} k_4 \frac{C_s}{M} \frac{P_s/M}{P_{ST}/M} \frac{N}{K_N + N} \times M \times \beta - k_6 M \quad (13)$$

ここで, a_p ; 換算係数 (mg リン/mg クロロフィル *a*)

P_{ceu} ; 細胞中全リン濃度

3. モデル式による藻類増殖および栄養塩摂取のシミュレーション

前章で提示した動力学モデルに基づいて実験結果を整理し、各々のモデル式の係数を近似的に求めた結果 (Tsunno and Goda, 1978) を表1に示す。

本研究では光合成速度 $f_{ph} = 53$ (mg 炭水化物/mg クロロフィル *a*) が得られたが、この値を炭素量および時間あたりに直すと、0.88 (mg C/mg クロロフィル *a*/h) となり、Aruga (1973) が *Chlorella ellipsoidea* を用いて同様の温度および照度の条件下で得た約3 (mg C/mg クロロフィル *a*/h) と比較して低い値である。これは本研究での f_{ph} の近似的な算出法に問題があろう (Tsunno and Goda, 1978)。

クロロフィル *a* に対する窒素およびリンに関する換算係数 a_N , a_P については、従来から用いられている値の範囲である (Thoman et al, 1973; Patten, 1975; Fogg, 1975; Middlebrooks et al)。

本研究で、各栄養塩の摂取速度より得た半飽和定数 K_N および K_P については、藻類の増殖に影響を及ぼす各栄養塩濃度の観点から従来より用いられている (Thoman et al, 1973; Patten, 1975; Middlebrooks et al) より 10^1 のオーダー程度大きい値であった。これについて今後更に詳細な検討が必要であろう。

表1に示されている係数の値と実験No.2, 3(1), 4(1)および4(2)の初期値 (Tsunno and Goda, 1978を参照) を用いて、モデル式(8)~(13)によって表されている M , P , P_{ceu}/M および C_s/M の変化をデジタル計算機 (HITAC 800) で計算したものが図3および4である。これらの図に示されるプロット点はシミュレート曲線に対応する実験データである。図3には、リン制限条件下での実験に関

表1 動力学モデル含まれる係数の値

Table 1. Values of coefficients in the kinetic model

coefficient	value	note
f_{ph}	$53.0 \frac{\text{mg carbohydrate}}{\text{mg chl.-a} \times \text{d}}$	rate constant
k_2	2.95 1/d	
k_4	1.02 1/d	
k_6	0.084 1/d	
K_s	0.80 mg/l	saturation constant
K_p	0.45 mg/l	
a_x	7.2 mg N/mg chl.-a	conversion coefficient
a_r	0.7 mg P/mg chl.-a	
a_{ac}	$0.066 \frac{\text{mg chl.-a}}{\text{mg carbohydrate}}$	
P_{ST}/M	3.8 mg P/mg chl.-a	saturation storage content of phosphorus
P_0/M	0.7 mg P/mg chl.-a	absolute necessary content of phosphorus
M_c	0.2 mg/l	coefficients concerning space effect
M_{max}	1.2 mg/l	

するシミュレートを示してあるが、すでに議論したように光合成速度定数 f_{ph} を過小評価したために藻類中炭水化物含有率 C_s/M が実験値より低い値となっている。そしてこのために実験初期におけるクロロフィル a の増殖速度、窒素摂取速度およびリン摂取速度の値が幾分か小さくなっている。しかしながら、藻類中のリンの含有率 P_{cell}/M および炭水化物含有率 C_s/M をも含めて現象の特性を良くシミュレートしていると判断できよう。図4には、窒素制限条件下での実験に関するシミュレートを示す。藻類中のリン含有率は、pH 上昇によるリンの凝集現象も加わって実験後期のデータでは本研究で仮定した最大のリン含有率 (4.5mg リン/mg クロロフィル a) 以上の値を示す場合もある。しかしながら、媒体中の窒素が無くなり、クロロフィル a の増殖が停止した後の炭水化物の藻類中への蓄積現象等、現象の特性は良くシミュレートしていると判断できよう。

400 foot-candle および20℃での条件下での *Phaeodactylum tricornutum* を用いての Kuenzler 等 (1962) による実験データを用いて、 $P_{sb}/M - P_s/M$ に対してリン摂取速度をプロットしたものが図5である。ここで、 P_{sb}/M とは、リン含有率が最大で平衡となったときでリン摂取速度が新陳代謝による利用速度に等しいときの蓄積リン含有率である。式(9)および式(11)より、この図における傾きおよび y 軸切片はそれぞれ K_2 および $P_s/M = P_{sb}/M$ のときの $\alpha a_p a_c k_4 (C_s/M) (P_{sb}/M) (P_{ST}/M)$ の値である (Goda et al, 1973; Tsuno et al, 1978)。したがって、 $k_2 = 3.9(1/d)$ 、および仮に a_p と $a_c (C_s/M)$ が本研究での *Chlorella sp.* のと同じとすると $k_4 = 2.3(1/d)$ が得られる。これらの値は表1に示される値と同程度である。図6には、Kuenzler 等 (1962) の実験データに対するシミュレート結果

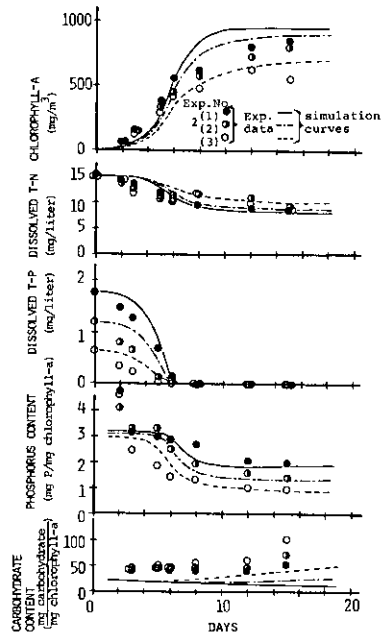


図3 栄養塩の摂取および藻類増殖のシミュレーション(リン制限条件下)
 Fig.3 Simulation for algal growth and nutrient ingestion under phosphorus limitation

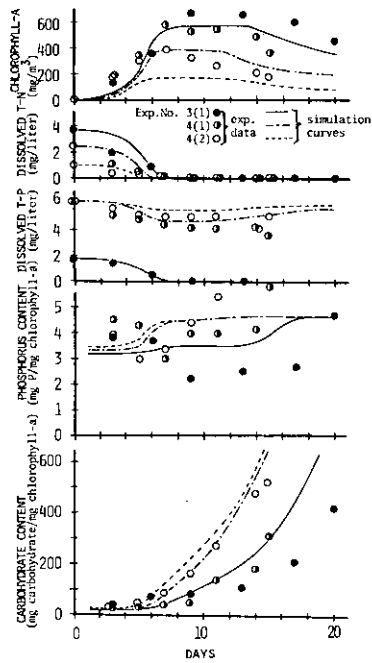


図4 栄養塩の摂取および藻類増殖のシミュレーション(窒素制限条件下)
 Fig. 4 Simulation for algal growth and nutrient ingestion under nitrogen limitation

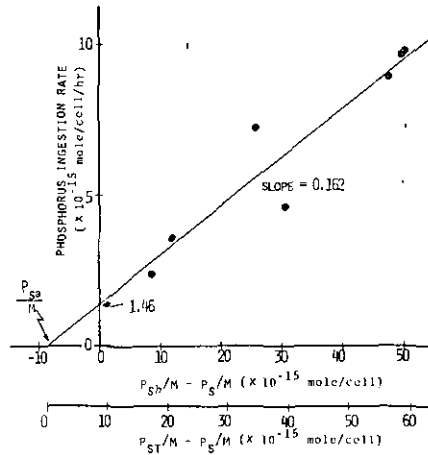


図5 リン摂取速度と $P_{Sb}/M - P_s/M$ あるいは $P_{Sr}/M - P_s/M$ との関係
 $(P_{Sr}/M = P_{Sb}/M + P_{Sa}/M = 70 \times 10^{-15} \text{ mole P/cell})$

Fig. 5 Relationship between phosphorus ingestion rate and $P_{Sb}/M - P_s/M$ or $P_{Sr}/M - P_s/M$ ($P_{Sr}/M = P_{Sb}/M + P_{Sa}/M = 70 \times 10^{-15} \text{ mole P/cell}$)

を示す。このシミュレーションにおいては、モデルに含まれるすべての係数の値を得ることができないので、実験データおよび実験条件より推察される $P_{Sr}/M = 9.6$ (mg リン/mg クロロフィル *a*) および $M_{max} = 3.2$ (mg クロロフィル *a*/l) 以外の係数については、仮に表1に示される値と同じものを用いた。そのために、リンの摂取速度はいくらか異なっているが、シミュレート結果はリンの過剰摂取・蓄積の特性をよくシミュレートしていると考えられる。

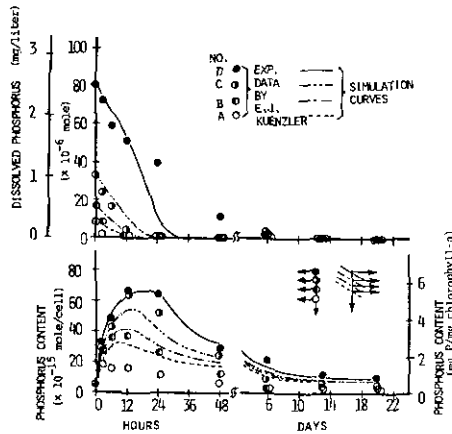


図6 リンの細胞内への蓄積のシミュレーション (Kuenzler による実験データに対して)

Fig. 6 Simulation for intracellular storage of phosphorus using the experimental data by Kuenzler

4. まとめ

リンあるいは窒素の制限条件下での藻類の増殖に関する一連の動力学モデル式を提示した。このモデルは、細胞内での炭水化物およびリンの蓄積が考慮されて、光合成過程、栄養塩摂取過程、新陳代謝過程および内生呼吸過程より構成されている。

提示モデル式に含まれる各係数は *Chlorella* sp. の増殖に関する実験結果に基づいて算出した。その結果、提示モデルにより、細胞外栄養塩の減少パターン、細胞内栄養塩含有率の変動（特に細胞内でのリンの蓄積）、細胞内炭水化物含有率の変動（特に窒素欠乏下での蓄積傾向）、クロロフィル *a* の増加、および藻類増殖に及ぼす栄養塩の影響等の機構をシミュレートできることが示された。

引用文献

- Aruga, Y. (1973) : Production of the Aquatic Plant Community phytoplankton. Seitai-gaku-koza 8, Kyoritsu-shuppan Co., Tokyo (In Japan).
- Bierman, V. J., et al. : Multi-nutrient Dynamic Models of Algal Growth and Species Competition in Eutrophic Lakes. Modeling the Eutrophication Process, Ann Arbor Science, 80-109.
- Caperon, J. (1969) : Time Lag in Population Growth Response of *Isochrysis galbana* to Variable Nitrate Environment. Ecology, 50, 188.
- Fogg, G.E. (1975) : Algal Cultures and Phytoplankton Ecology. The University of Wisconsin Press, 12-67.
- Gaudy, A.F. (1962) : Colorimetric Determination of Protein and Carbohydrate, Ind. Water Wastes, 1, 17-22.
- Goda, T., I. Somiya and H. Tsuno (1973) : Kinetic Model of Substrate Removal and Metabolism. Proc. Jpn. Soc. Civil Eng., 213, 17-28.
- Grenney, W.J. (1974) : Effect of Intracellular Nutrient Pools on Growth Dynamics of Phytoplankton. WPCF, 46, 1751-1760.
- Keenan, J.D. and M.T. Aucr (1974) : The Influence of phosphorus Luxury Uptake on Algal Bioassays. WPCF, 9, 437-445.
- Kramer, T.R. (1972) : Chapter II, Phosphorus: Analysis of Water, Biomass and Sediments; Composition of Biomass. Allen, H.F. and J.R. Kramer : Nutrients in Natural Waters, Environmental Science and Technology Series, 55-68.
- Kuenzler, E.J. and B.H. Ketchum (1962) : Rate of Phosphorus Uptake by *Phaeodactylum Tricornutum*. Biol. Bull., 123, 134.
- Middlebrooks, E.J., et al. : Modeling the Eutrophication Process, Ann Arbor Science.
- Patten B.C. (1975) : Systems Analysis and Simulation in Ecology, III, Academic press.
- Standard Methods (1971) : 13th Edition, APHA, AWWA, WPCF.
- Strickland, J.D.H. and T.R. Parsons (1965) : A Manual of Sea Water Analysis. 2nd Edition, Fish. Res. Board Canada Bulletin, 125.
- Thoman, R.V., et al. (1973) : Preliminary Model of Potomac Estuary Phytoplankton. ASCE, EE3, 699-715.
- Tominaga, H. and S. Ichimura (1966) : Ecological Studies of the Organic Matter Production in Mountain

River Ecosystem. Bot. Mag., 79, 815-829.

Tsuno, H., T. Goda and I. Somiya (1978) : Kinetic Model of Activated Sludge Metabolism and Its Application to the Response of Qualitative Shock Load. Water Res., 12, 513-522.

Tsuno, H. and T. Goda (1978) : Kinetic Model of Algal growth Incorporating Intracellular Carbohydrate and Phosphorus Pools. Jpn. J. Water Pollut. Res., 1, 49~62.

Wiegert R.G. (1975) : Part III, 8, Simulation Modeling of the Algal-Fly Components of a Thermal Ecosystem: Effects of Spatial Heterogeneity, Time Delays, and Model Condensation. Boling, R.H., et al. : Systems Analysis and Simulation in Ecology, III, 157-182.

Microcystis の栄養塩吸収と増殖特性について

岡田光正¹, 須藤隆一¹

**Nutrient Absorption and Growth Characteristics
of *Microcystis aeruginosa***

Mitsumasa OKADA¹ and Ryuichi SUDO¹

Abstract

Unialgal cultivation of *Microcystis aeruginosa* were conducted under phosphate(P) and Nitrate(N) limiting conditions. Intracellular P or N concentration changed during batch culture, and especially large variations were observed in the case of P. The growth rate of this alga depended on the P concentration in the cells and not on the P concentration in the medium.

P-starved cells absorbed large amounts of P, up to 2%, within 2 to 3 hours. The P absorption rate depended only on the intracellular P concentration for those cases where the concentration in the medium was greater than 0.05mg/l, and the absorption rate was greater than 10 μ g/(mg.h) if the intracellular P concentration was less than 1%. The P absorption rate also depended on cell conditions, and in the case of exponentially growing cells, the rate was less than 0.5 μ g/(mg.h). The N absorption rate was less than that of P and less dependent on cell conditions.

1. はじめに

らん藻類の一種 *Microcystis* はアオコとも呼ばれ、霞ヶ浦、諏訪湖等多くの富栄養化した湖沼において大量の水の華を形成する藻類の一つである (Okino, 1973)。*Microcystis* を主体とする水の華は、非常に高濃度に出現すること、水面化に集積して特有の臭気を放つことなどから他の藻類による水の華と比較して種々の被害をもたらしやすい。したがって富栄養化の問題を解決するにあたってまず明らかにしなければならないことは、*Microcystis* のような障害藻類の発生機構であると考えられる (Skapiro, 1973)。

周知のようにリン、窒素は富栄養化、すなわち藻類の増殖を促す物質として最も重要である。したがってこのような栄養塩類が藻類の増殖に与える影響を定量的に評価することは、水質規制はもとよ

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Water and Soil Environment Division, The National Institute for Environmental Studies, P. O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.

り、湖沼の浄化対策を検討するうえで不可欠のものである。近年主として藻類の増殖に着目して栄養塩類との関連を論ずる研究が多く行われてきたが、そのほとんどは緑藻類の *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Chlamydomonas* 等を材料として取扱っているため *Microcystis* のような藻類の水の華について議論するには困難があった。また *Microcystis* 自身の単藻培養によるその栄養要求性の検討はすでに1950年代より行われていたが (Gerloff et al, 1952; Gerloff and Skoog, 1954, 1957a, 1957b) これらの研究は定量的かつ動的な把握を目的とするものではない。近年 Reynolds (1972, 1973) の研究によって *Microcystis* の生態学的な特性が明らかになるにつれ、単に増殖量だけではなく、増殖速度、栄養塩吸収速度、吸収量等の定量的な情報が、水の華発生機構の解明のうえで重要であると認識されるようになった。

筆者らは *Microcystis* の単藻培養により、その栄養塩類に対する種々の応答を定量化し、水の華発生機構解明、また予測のためのシミュレーションモデルの開発を試みている。ここではその回分培養におけるリンおよび窒素の吸収と増殖との関係、またリンもしくは窒素に対する飢餓状態の *Microcystis* の栄養塩吸収特性について検討した結果を報告する。

2. 実験方法

供試藻種は米国環境保護庁 (U. S. Environmental Protection Agency, 1971) 保存の *Microcystis aeruginosa* である。500mlの三角フラスコに培地100mlを入れ、上部より常時けい光灯で照明したロータリーシェーカー (100rpm) で培養を行った。照度は培養液表面の位置でフラスコの外測で測定し、通常50ft-cd (540lx) とした。温度は培養期間中24℃±2℃に保った。培地は表1に示したように EDTA を除いては Gorham の $\frac{1}{2}$ の濃度を基本とした。また、リン、窒素については $K_2HPO_4 + KHCO_3$ と、 $NaNO_3 + NaHCO_3$ とを用いた。これは Na イオン濃度を 30mg/l、K イオン濃度を 3.5mg/l と一定に保つため、リン、窒素濃度を変更する際の Na、K イオン濃度の変化の影響を防止した。また条件を自然条件に近くするため制限栄養塩濃度を可能な限り低く設定し、リン制限では $P=0.1-0.5mg/l$ とし、窒素制限では $N=0.1-8.0mg/l$ とした。制限とならない方の窒素もしくはリン濃度は $N=15.0mg/l$, $P=1.2mg/l$ とし、この濃度を組み合わせた培地を標準とし、保存等にも使用した。

培地は滅菌済みのミリポアフィルター (0.45 μ) により濾過滅菌した。培養容器の滅菌はオートクレーブ (121℃, 15min) を用い、十分に乾燥した後、濾過後の培地を無菌的に移しかえた。接種する *Microcystis* はあらかじめ一定条件で培養したものを遠沈により細胞を集め、15mg/l $NaHCO_3$ 溶液で洗浄し、同じ溶液に所定の濃度になるように懸濁させたものを用いた。また接種液の一部はリン、窒素の分析に供し、接種時の細胞が含有しているリン、および窒素量を定量した。

細胞の濃度は平均細胞容積付きのコールターカウンターで、0.5ml中の細胞数およびその平均の細胞容積を計算した後、あらかじめ求めた検量線により乾燥重量 (mg/l) に換算した。培養液中のリン、窒素濃度はミリポアフィルター (0.45 μ) を用いた濾過により細胞を分離した後、その濾液の PO_4-P , NO_3-N をオートアナライザーにより測定した。この場合のサンプル量は 2~3ml であるため、100

表1 改良Gorham 1/8培地の培地組成
Table 1. Modified 1/8 Gorham's Medium

NaNO ₃ +NaHCO ₃	—
K ₂ HPO ₄ +KHCO ₃	—
MgSO ₄ ·7H ₂ O	7.8
CaCl ₂ ·2H ₂ O	7.2
Na ₂ SiO ₃ ·9H ₂ O	11.6
NaCO ₃	4.0
Fe citrate	1.2
Citric	1.2
Na ₂ EDTA·2H ₂ O	1.0

(mg/l)

mlという少量の培養液にもかかわらず、サンプリングによる培養液量の変化は多くとも30%程度であった。また必要に応じて全リン、全窒素量も測定した。

栄養塩の吸収速度は、*Microcystis* を接種した後所定の条件で振とうしつつその着目栄養塩の変化を一定時間ごとに測定した。この場合はその変化が激しいため30分～2時間ごとにサンプリングを行った。一方増殖実験においては0.5～2日ごとに栄養塩、細胞重量等の測定を行った。

細胞内の着目栄養塩濃度はすべて吸収されて減少した栄養塩量とのバランスから計算された。したがってある時刻 t における細胞内栄養塩量 $C_c(t)$ [%] は次式で与えられる。

$$C_c(t) = \frac{W(0) \times C_c(0) + S(0) - S(t)}{W(t)} \times 100 \quad (1)$$

ただし、 $W(t)$: 時刻 t における乾燥重量、 $S(t)$: 時刻 t における培養液中の着目栄養塩濃度である。また、栄養塩の吸収速度 $U(\mu\text{g-P}/(\text{mg-cell}\cdot\text{h}))$ もしくは $\mu\text{g-N}/(\text{mg-cell}\cdot\text{h})$ は次のように計算した。

$$U(t) = \frac{S(t-\Delta t_1) - S(t+\Delta t_2)}{\Delta t_1 + \Delta t_2} \cdot \frac{1000}{W(t)} \quad (2)$$

3. 結果および考察

3.1 栄養塩類の吸収と増殖

図1、図2は種々の初期リン濃度の培地を用いて *Microcystis* の回分培養を行った場合の細胞重量の変化、細胞内外のリン濃度の変化を測定したものの一例である。図1は標準培地で8日間培養した細胞を用い、初期に全くリンを添加しなかった場合の結果である。この場合、初期の細胞内リン量は、0.61%であったが、それを使いつくして最小量になるまで増殖を続けた。図2は13日間の培養により、

0.31%までリン濃度を下げた細胞を接種しているが、ここではリンを0.1mg/lだけ添加してその増殖量等を測定している。この場合、液中のリン酸イオンの減少はかなり早く、4日目を過ぎた時点で完全に吸収しつくされている。また、細胞内のリン含有量は1~2日で2.1%まで増加し、その後次第に減少していく傾向にある。したがって培養初期にはリン吸収速度が増殖速度を上まわり、リン含有量が増加するが、残存栄養塩類の減少、細胞内リン濃度の増加に伴って、次第に吸収速度が増殖速度より小さくなり、その含有量が低下したと考えられる。4日目以降の増殖は図1の場合と同様に細胞内蓄積のみによっている。これらの事実より、*Microcystis*の増殖は一般にMonod型で表現されるような外部基質濃度に依存するものではなく、むしろ細胞内の基質濃度に大きく依存することが明らかとなった。したがってこのようなリンの吸収速度の定量的な把握が藻類増殖を論ずる上で非常に重要であると考えられる。

図3は初期NO₃-N濃度を2mg/l程度とした時の回分培養における、細胞内外の窒素濃度、細胞濃度を測定したものの一例である。窒素についてもリンと同様な傾向がみられるが、その細胞内含有量の変化は少ない。したがって細胞外の窒素が0となった場合、すみやかに増殖を停止する傾向がみられた。なお、*Microcystis*の増殖が停止する細胞内のリン、窒素濃度はそれぞれ約0.8~1.2%、2.0~3.2%であり、これ以上のリン、窒素を含有する細胞は潜在増殖能力があると考えられる。

3.2 *Microcystis*によるPO₄-Pの吸収

PO₄-Pの吸収：図4および図5はリン欠乏にした*Microcystis*のリン吸収曲線の一例である。リン

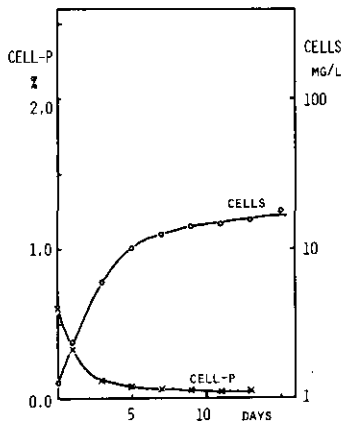


図1 リンのない培地における*M. aeruginosa*の増殖と細胞内リン濃度の変化

Fig.1 The changes of intracellular phosphate concentration during growth of *M. aeruginosa* in phosphate free medium

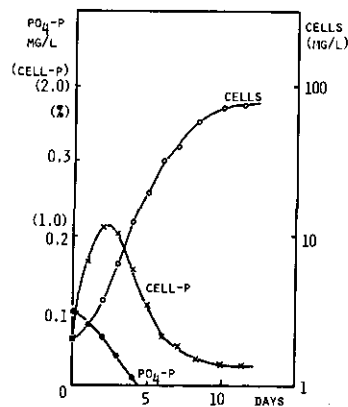


図2 リンを0.1mg/l含んだ培地における*M. aeruginosa*の増殖と細胞内外のリン濃度変化

Fig.2 Growth of *M. aeruginosa* in the medium with 0.1mg-P/l and the changes of phosphorus concentration in the medium and the cells

欠乏の細胞は、*Microcystis*の細胞を洗浄した後リンを全く含まないか、ごくわずか含む培地に移しかえ、培養を続行したものである。したがって培地からのリンの供給がほとんどないため細胞中のリン含量は細胞の乾燥重量の0.1~0.2%に低下した。このような細胞のリンの吸収速度はその増殖速度に比較して著しく速い。したがってわずか2~3時間で図4のように2%を超えるリン含有量となってその吸収を停止するか、図5のように外界のリンをほとんど吸収しつくすことが明らかとなった。

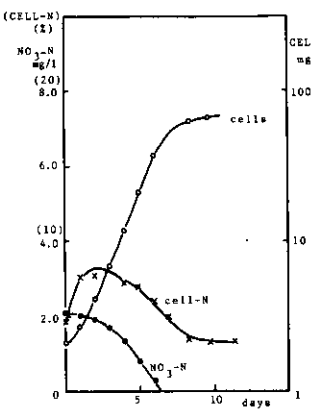


図3 硝酸性窒素 2mg/l 含んだ培地における *M. aeruginosa* の増殖と細胞内外の窒素濃度変化
 Fig.3 Growth of *M. aeruginosa* in the medium with 2mg-N/l as nitrate and the changes of nitrogen concentration in the medium and the cells

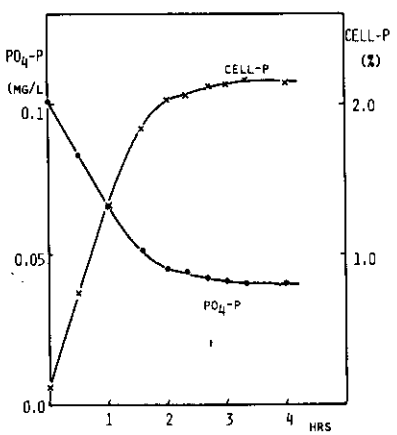


図4 リン餓状態にした細胞のリン吸収 (細胞内リン濃度：最大)
 Fig.4 Phosphate absorption by P-starved cells under excess P concentration in the medium

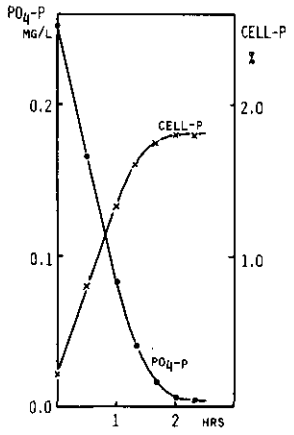


図5 リン餓状態にした細胞のリン吸収 (細胞外リン濃度：最小)
 Fig.5 Phosphate absorption by P-starved cells under P limiting conditions

このように最少必要量の20倍 (0.1%→2%) ものリンを吸収した場合、以後外界に全くリン中にほとんどリンがなくても *Microcystis* の水の華が増殖を続けるという事実を裏付けるものであると考えられる。外界にリンが残っている場合の最大のリン吸収量は約2.3%であった。この値は外界のリン濃度が0.3mg/l程度のかかなり高い値であっても変わらないことから、約2%内外が、*Microcystis* の最大の吸収量であると推定される。

PO₄-Pの吸収速度：図4、5の吸収曲線より、その吸収速度は細胞内のリン濃度と、細胞外のリン濃度とに依存することが推定される。この点を明らかにするために吸収速度Uを(2)式により計算し、細胞内リン濃度と細胞外のリン濃度との関数として表したのが図6である。実験したリン酸イオンの濃度範囲は0.5mg-P/l以下とかなり低い、細胞外のリン濃度が0.05mg/l以上ではその吸収速度

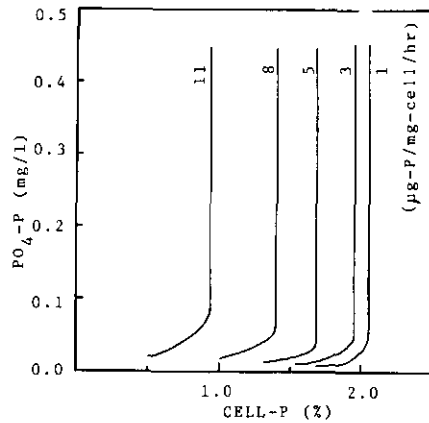


図6 リンに対してstarveした細胞のリン吸収速度に及ぼす細胞内外のリン濃度の影響

Fig.6 Effects of intracellular phosphorus concentration and phosphate concentration in the medium on the phosphate absorption rate of P-starved cells

はほぼ細胞内のリン濃度のみ依存するといつてよい。しかし、0.05mg/l以下においてはその速度は細胞外のリン濃度に依存する傾向が見られる。また最大の吸収速度はこれ以外の実験を含めても約11~14μg/(mg·h)程度であった。なおこの間 *Microcystis* の増殖量はほぼ無視しうるほどに小さいため、リンの吸収に関しては増殖とは別に細胞内外のリン濃度を考慮した新たな動力学モデルが必要であると考えられる。

さらに、リンの吸収速度に及ぼす照度の影響について検討を加えた。図7は異なる照度において培地中のリン濃度が0.05mg/l以上の場合における吸収速度を表したものである。暗条件においては細胞内リン濃度の変化に対する吸収速度の変化が少ないのが著しい特色である。また照度が上がるにつれて最大吸収量はむしろ減少している。

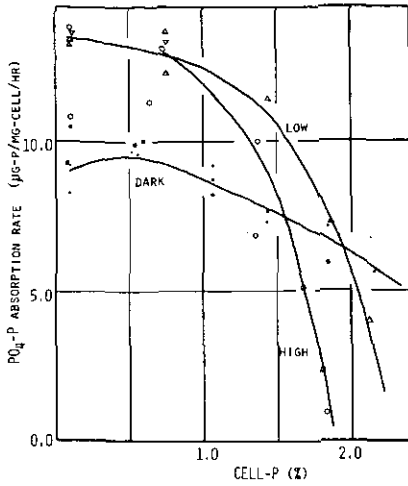


図7 リン吸収速度に対する照度の効果
 Fig.7 Effects of light intensity on the phosphate absorption rate by P-starved cells

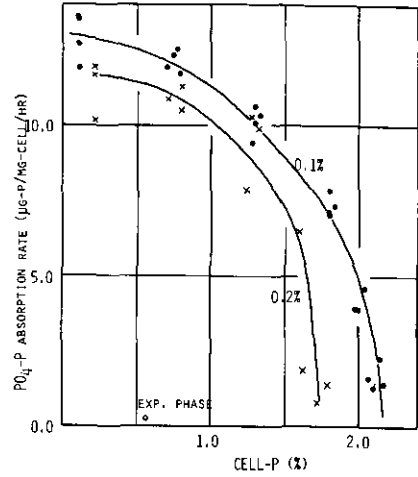


図8 細胞の状態によるリン吸収速度の差
 Fig.8 The phosphate absorption rate by differently conditioned cells

以上の検討はすべて同一条件の細胞についての検討であるが、細胞の状態によりリン吸収速度が変化することも明らかとなった。図8はその一例であるが、0.1%まで細胞内のリン濃度と減少させた場合と0.2%まで下げた場合では吸収速度が異なる。さらに特にリン欠乏状態で培養していない細胞（標準培養液において8日間培養したもの）については細胞内リン濃度が0.61%程度であっても吸収速度が $0.5\mu\text{g}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ 以下であることも観察された。したがってリンの吸収速度を論ずるには、その細胞の履歴も重要であるといえる。

3.3 *Microcystis*による $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸収

$\text{NO}_3\text{-N}$ の吸収: 筆者らによって既に報告されたように *Microcystis* の窒素、リンの要求量の比は、 $\text{N/P}\approx 18$ である。このため窒素の吸収速度はリンに比してかなり速やかでない細胞内の N/P 比は大きく変化してしまうことになる。したがって最初は $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度を $\text{PO}_4\text{-P}$ の場合の10倍程度となるように $2\sim 8\text{mg/l}$ で吸収速度を測定したが、その速度が著しく低いため $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度変化が顕著でなかった。実際に吸収による窒素濃度の差が顕著に現れたのは *Microcystis* の濃度が $15\sim 30\text{mg/l}$ の場合、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が 0.5mg/l 程度であった。図9は窒素吸収曲線の一例である。細胞内の窒素含有量が6.14%であったため、4時間後でも7.0%程度の含有量にしか増加していない。またこの間の吸収速度にも顕著な時間変化は認められず、平均で $1.5\mu\text{g-N}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ であった。種々の条件においてその吸収速度を比較したのが、図10, 11である。図10は同一の細胞（標準培養液で14日培養したもの）を0.0, 3.0, 8.0

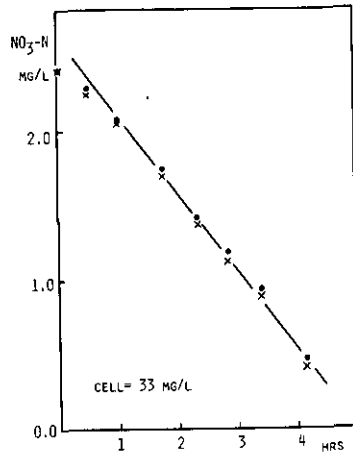


図9 *M. aeruginosa*の硝酸性窒素の吸収
 Fig.9 NO₃-N absorption by *M. aeruginosa*

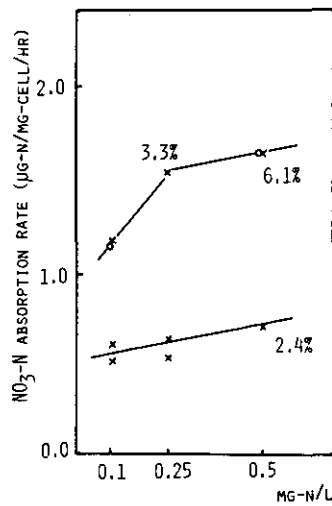


図10 細胞の状態による窒素吸収速度の差
 Fig.10 The nitrogen absorption rate by differently conditioned cells

mg/lのNO₃-Nを含む培地に懸濁させ3日間前培養した後の窒素吸収速度を比較したものである。図から明らかなように窒素濃度が高い方がやや吸収速度が速くなる傾向がみられた。また、細胞内の窒素濃度は前培養時における窒素添加量の少ない方からそれぞれ2.4%, 3.3%, 6.1%であったが、2.4%程度にまで窒素含有量を低下させたものはむしろその窒素吸収速度が低下した。これはリンの場合にはリン欠乏になればなるほどむしろ吸収速度が上昇したのと比較して著しい差異である。図11に標準培養液において10日間培養した対数増殖期末期の細胞の吸収速度を示す。この場合照度の影響も検討した。その結果リンの場合には暗条件ではやや吸収速度が低下したのみであるが、NO₃-Nでは、0.1 μg/(mg·h)と大幅な低下が観察された。また窒素の場合、このような対数増殖期末期の細胞にもかかわらず、窒素欠乏させた細胞とその吸収速度に大きな差がないことも明らかとなった。

NH₄-Nの吸収：比較のために、NH₄-Nについてもその吸収速度を測定した。NH₄-NについてはNO₃-Nよりかなり速い4~7 μg/(mg·h)という速度が観察され、また暗所がむしろ吸収が速いという結果が得られた。

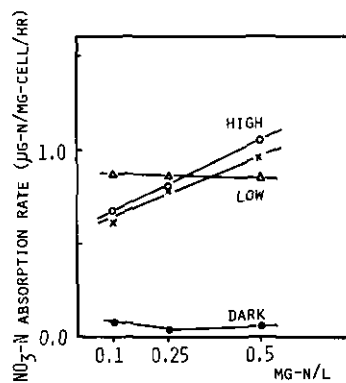


図11 対数増殖期の細胞の窒素吸収速度と光の影響

Fig.11 Effects of light intensity on the nitrogen absorption rate by exponentially growing cells

3.4 PO₄-P, NO₃-Nの吸収速度と増殖

以上の検討により得られた最大の吸収速度はPO₄-P, NO₃-N, NH₄-Nに対してそれぞれ約14.0, 1.6, 7.0 μg/(mg·h)である。この速度のみを比較すると単にPO₄-Pの吸収速度が他と比較して2~10倍速いことになるが、細胞に対する必要量を基準として比較すると次のようになる。まず細胞内の栄養塩類の含有量をα(%), 最大比増殖速度をμ(d⁻¹)とした場合、細胞内の栄養塩含量が変化しないような吸収速度U_cは次式で与えられる。

$$U_c = \frac{\alpha}{100} \cdot \mu \cdot \frac{1000}{24} [\mu\text{g-Nut}/(\text{mg-cell} \cdot \text{h})] \quad (3)$$

ここで、 $\mu=0.6$ (最大値)と仮定し、さらにリン、窒素の含有量をそれぞれ最少値の0.1%、2.0%とした。この場合の U_c は以下の値となる。

$$U_c(\text{PO}_4\text{-P})=0.025, \quad U_c(\text{NO}_3\text{-N})=0.5 (\mu\text{g}/\text{mg} \cdot \text{h})$$

したがって、これを基準として吸収速度を比較すると、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の場合には560倍もの吸収速度を示したのに対し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ では3.2、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は14倍であった。したがって窒素よりもリンの方がはるかに速く、さらに蓄積量も多い。よって窒素の不足は、リンの不足に比較して発生しやすいと考えられる。

4. まとめ

*Microcystis aeruginosa*をリン制限および窒素制限の条件下で単藻培養した結果、これらの栄養塩の細胞内含有量は増殖の時期によって変化し、とくにリンの場合に著しかった。また増殖速度は明らかに細胞外のリン濃度ではなく、細胞内のリン濃度に依存することが明らかとなった。リン欠乏にした細胞のリン吸収量は著しく大きく、2-3時間で細胞内リン濃度が2%程度に達するまで吸収した。その速度は、細胞外のリン濃度が0.05mg/l以上では細胞内のリン濃度のみ依存し、細胞内リン濃度が1%以下では $10\mu\text{g-P}/(\text{mg} \cdot \text{h})$ 以上となった。しかし、リン欠乏でない対数増殖期の細胞のリン吸収速度は $0.5\mu\text{g-P}/(\text{mg} \cdot \text{h})$ 以下であり、細胞の履歴によることが判明した。

窒素吸収速度はリンに比較して著しく遅く、細胞の履歴による差が少なかった。

引用文献

- U. S. Environmental Protection Agency (1971) : Algal Assay Procedure Bottole Test.
- Gerloff, G. C., G. P. Fitzgerald and F. Skoog (1952) : The mineral nutrition of *Microcystis aeruginosa*. Am. J. Bot., **39**, 26-32.
- Gerloff, G. C. and F. Skoog (1954) : Cell contents of nitrogen and phosphorus as a measure of their availability for growth of *Microcystis aeruginosa*. Ecology, **35**, 348-353.
- Gerloff, G. C. and F. Skoog (1957a) : Availability of iron and manganese in southern Wisconsin lakes for the growth of *Microcystis aeruginosa*. Ecology, **38**, 551-556.
- Gerloff, G. C. and F. Skoog (1957b) : Nitrogen as a limiting factor for growth of *Microcystis aeruginosa* in southern Wisconsin lakes. Ecology, **38**, 556-561.
- Okino, T. (1973) : Studies on the blooming of *Microcystis aeruginosa*. Jap. J. Bot., **20**, 381-402.
- Reynolds, C. S. (1972) : Growth, gas vacuolation and buoyancy in a natural population of a planktonic bluegreen alga. Freshwater Biol., **2**, 87-106.
- Reynolds, C. S. (1973) : Growth and buoyancy of *Microcystis aeruginosa* kiitz. emend, Elenkin in a shallow eutrophic lake. Proc. R. Soc. Lond. B, **184**, 29-50.
- Shapiro, J. (1973) : Blue-green algae : Why they become dominant. Science, **179**, 382-384.

富栄養化防止に関する総合解析フレームワーク

中杉修身¹・北島能房¹・原科幸彦¹・内藤正明¹

Integrative Model Framework for Prevention of Eutrophication

Osami NAKASUGI¹, Yoshifusa KITABATAKE¹,

Sachihiko HARASHINA¹ and Masaaki NAITO¹

Abstract

This paper summarizes the conceptual framework of a model which is to be developed during the fiscal year of 1979, and which regards Lake Kasumigaura as a system of interrelated components: human, biological, chemical, and physical.

The model consists of two submodels. One is an ecosystem model which simulates the biological, chemical, and physical interrelations taking place in Lake Kasumigaura. The other is model of social systems which is composed of a micro-part submodel and macro-part submodel. The micro-part explores the behavior of micro-social units (consuming households and productive firms) when the production and the consumption of commodities are subjected to environmental quality levels of Lake Kasumigaura, where commodities consist of private goods such as fish products and drinking water, and public goods such as various amenity resources. The macro-part describes the economic, social, and demographic variations resulting from the causal effects of interacting social units residing in the surrounding regions of Lake Kasumigaura.

Design goals for the model are 1) to predict the secondary effects and reactions which might result from the impact of various human activities on the ecosystem of Lake Kasumigaura, and 2) to investigate the different combinations of control instruments in search for effective and integrated measures for the conservation of Lake Kasumigaura.

1. はじめに

特別研究「陸水域の富栄養化に関する総合研究」は発足以来今日までの2年余の間、その活動の重点が湖生態系や周辺地域社会に関する調査・分析データの収集に置かれてきたこともあって、富栄養化現象に関する基礎情報の蓄積が相当程度なされてきた。それゆえ、これまで一応個別に行われてきた対象とする霞ヶ浦水域の富栄養化およびその関連現象に関する知見やデータを総合化することにより、富栄養化防止に関しての対策案を逐次検討し、望ましい総合的施策がどうあるべきかを予測、解

1. 国立公害研究所 総合解析部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Systems Analysis and Planning Division, The National Institute for Environmental Studies, P. O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.

析, 提言することが必要となってくる。

そのために, 本論ではまず, 総合化にあたってのフレームワークを明らかにし, この中で個々の現象解析グループによって収集されたデータがどう位置づけられるかを示す。次いで全体フレームを形成する各サブシステムのモデル (広い意味での数式記述) と, このモデルを構成する変数の体系を整理して要約する。

以上の結果は, 次年度以降に実施する予定の湖および周辺地域社会の総合解析モデル構築の基礎フレームを与えると同時に, まだデータの欠けている部分や今後考察を深めることが必要な部分についての示唆を与えるものである。

2. 全体フレームワーク

富栄養化防止施策を選定するシステムのフレームワークを図1のように設定した。ここではまず当該地域社会の人間活動 (立案された富栄養化防止施策の実施をも含む) の結果としてもたらされる湖環境 (湖とその周辺自然環境全体) の種々の変化が推定される。続いてこの湖環境の変化が地域社会に及ぼすフィード・バック効果が推定される。この効果を検討することによって富栄養化の評価がなされ, 望ましい施策を選定するための情報の提供が可能となろう。

図1のフレームワークにおける情報の流れを上述したが, このフレームは大きく二つの部分に分けることができる。一つは富栄養化防止施策を含む地域社会の人間活動を記述する部分 (人間社会

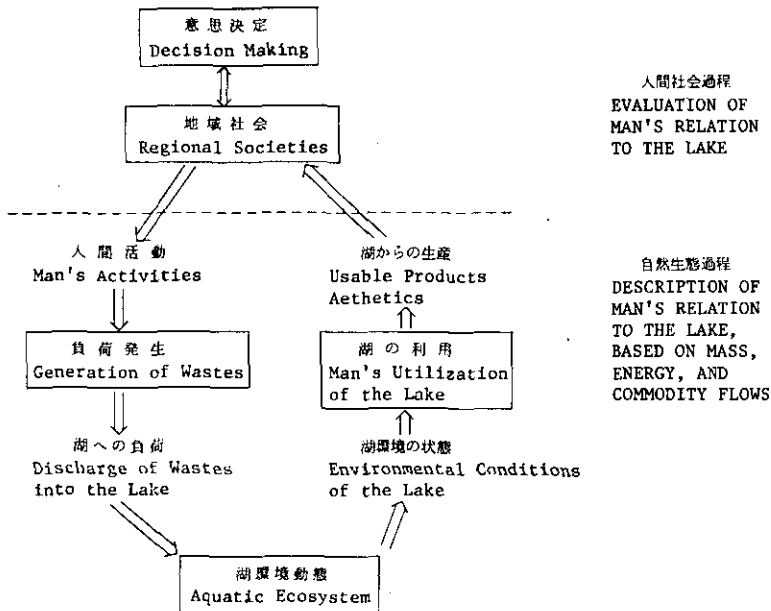


図1 総合解析フレームワーク

Fig. 1 Conceptual framework of the analysis

過程)であり、図1では破線より上に示される。もう一つは破線より下に示される、人間活動による湖環境の変化を推定し、さらにその湖環境の状態に基づく湖利用可能性を推定する過程(自然生態過程)である。

人間社会過程の記述には地域社会システムモデル(以下「地域モデル」)が用いられる。このモデルによってある富栄養化防止施策が実施された場合の種々の人間活動が推定されると同時に、この人間活動が湖環境を通じて地域社会に及ぼすフィード・バック効果が推定される。一方、地域社会を構成する種々の活動水準が地域モデルから推定され、環境評価指標が作成される。

この環境評価指標が富栄養化防止施策選定のための重要な情報となる。なお評価の手順には大きく分けて二つの考え方がある。一つは種々の情報を単一の指標にまとめて、総合指標として評価するものである。富栄養化防止施策実施のための費用とそれに基づく便益を金額に換算して比較する方法、あるいは多次元の情報がある基準で規格化し、重みをかけ、加え合わせて評価する方法などが考えられる。しかし富栄養化防止施策の実施に係る活動は広範囲に及び、単一指標で表すのは難しい。また重みのつけ方あるいは貨幣換算における恣意性など指標の作り方自体にも客観性が乏しい。このため考えられるのが、多次元指標である。これは多次元の情報をそのままあるいは等質のものだけをまとめて評価指標として用いるものである。これら二つの方法の検討を今後並行的に行う予定である。

自然生態過程では地域モデルで記述される人間活動が湖環境を変化させ、さらにその変化が逆に地域社会へ及ぼす影響が推定される。この過程は三つの部分より構成される。第1は地域モデルからの出力、すなわち人間活動に伴う負荷の発生(以下負荷発生)を推定する部分である。2番目は人間活動の結果として発生した負荷が湖へ流入して引き起こす湖環境の変化(以下湖動態)を推定する部分である。3番目はこのような変化が人間(地域社会)の湖利用可能性に及ぼす影響(以下湖利用)を推定する部分である。すなわち自然生態過程は、人間社会過程から富栄養化防止施策を含む地域社会の人間活動を受け取り、科学的な知見をもとにして湖の利用可能性を出力して人間社会過程へ渡す働きをする。

このフレームワークの特徴は、地域社会の人間活動に係る部分(人間社会過程)と湖環境の動態に係る部分(自然生態過程)を同じレベルで連動させていることである。地域社会の人間活動を記述するモデルと自然環境動態を記述するモデルを連動させるにはいくつかの問題点がある。例えば、両者の活動の時間スケールがかけ離れていることおよび両者の活動項目間の整合性が取りにくいことなどがあげられる。このフレームワークでは、この両モデル間のインターフェースとして負荷発生、湖利用の二過程を考え、これらの項目を整合的に選定することにより上記の問題点を解決しようとするものである。

3. 地域社会システムモデル

3.1 地域社会システムモデルの全体構造

地域モデルは地域社会の人間活動を記述するものであるが、図2に示すようにマクロパートとミク

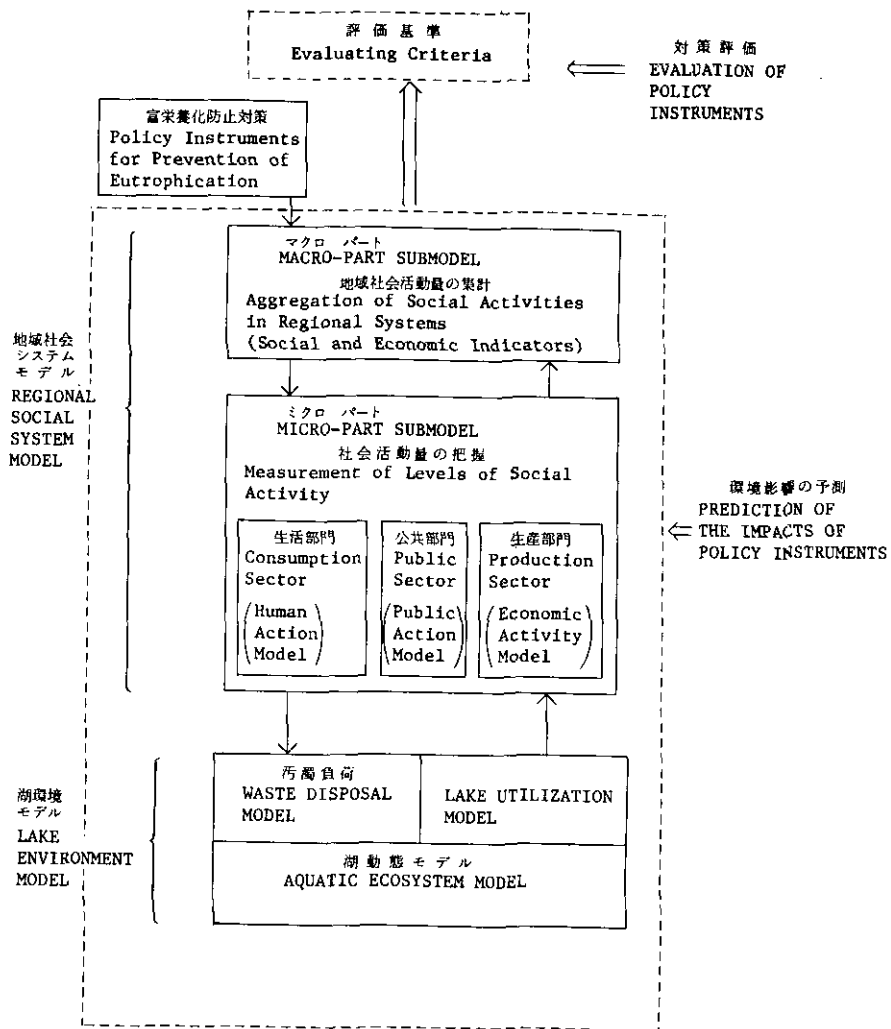


図2 モデルの全体構成
Fig. 2 Structure of the Model

ロパートの二つの部分から構成される。マクロパートは地域社会の活動動態を総合的立場からとらえるものであり、ここから富栄養化防止施策選定のための環境評価指標が出力される。また、マクロパートへは富栄養化防止施策が入力として外生的に与えられる。またマクロパートではこの他に人口や土地利用等の基本データが用いられる。マイクロパートでは個々の人間活動が個別の立場からとらえられ、自然生態過程との情報のやりとりはこの部分で行われる。地域モデルはこのような二段構成とな

* マクロパート、マイクロパートという用語は次で、モデル構造の記述に用いたものに従う。
原科彦彦、「都市における移動時間特性にもとづく都市空間評価に関する研究」東京工業大学博士論文、1975。

っており、これが本モデルの特徴である。

3.2 マクロパート

マクロパートでは地域社会システム全体の動きが記述される。一般の社会システムモデルでは対象地域全体を一つにまとめては握られることが多いが、環境評価に用いる場合には地域分割して地域内の空間的変動をは握ることが必要となる。そこで本モデルでは市町村単位に地域分割して地域社会システムの動きを記述することを考えている。また、モデルの構造はいわゆる記述モデルとする。これにはシステム・ダイナミックス (S.Dモデル) あるいは計量経済モデルが考えられる。

マクロパートで計算された人口指標、土地利用データ、交通条件データおよびマクロ経済指標の4種のデータが入力情報としてマイクロパートへ与えられる。またマクロパートでは、マイクロパートでの生活、公共体、生産という三つの部分モデルによって計算される種々の活動水準が地域別に集約される。このようにして集計された種々の活動水準と、人口、土地利用、交通、マクロ経済という4種のデータとの内生的な関係を記述するのが、マクロパートの主要な役割である。

3.3 ミクロパート

マイクロパートでは社会システムを形成する個々の人間活動に着目して種々の活動が記述される。人間活動は大きく分けて生活、生産・流通、公共の3部門においてなされる。各部門での活動の水準を推定する方法には、1) 経験的事実や観察データ等を用いて活動水準を統計的に推定するモデルによる方法と、2) 個々の人間行動を規範的に規定することによって活動水準を推定する規範モデルによる方法の二つが考えられる。

家庭における上水使用量を地域特性や所得水準等の関数として推定したり、公共投資の水準を自治体財政、産業構造、雇用水準の関数として推定するのは前者の例である。一方、マイクロ経済学で通常なされる仮定を用いて漁業者の漁獲高を推定したり、種々の公害規制策との関連で生産者個々の公害処理の水準を推定するのは後者の例である。いずれの方法を採用するかは、利用可能データの性質、精度等に応じて決定されるが、結果として、マイクロパートでは生活、公共体、生産の3部門における活動水準が推定される。

4. 湖環境モデル

4.1 負荷発生

湖環境モデルの最初の部分は負荷発生量算定ルーチンである。ここでは地域モデルからの出力、すなわち富栄養化防止施策の実施を含む地域社会の人間活動から発生、排出される湖環境への負荷が推定される。人間活動からは大きく分けて2種類の環境負荷が発生する。一つは環境への汚濁物質の排出であり、もう一つは場の物理的な改変である。

工業、農業、畜産など産業活動および家庭生活からの排水に伴って、また養殖における投餌によっ

て、汚濁物質が湖環境へ排出される。排水に伴う汚濁物質の発生量は、個々の発生源における排水量と水質の調査、あるいは人間活動の水準と汚濁負荷発生原単位および使用される排水処理技術から推定される。一方、養殖における汚濁負荷の発生量は飼料の種類および量、魚の排泄量から推定される。

一方、築堤、干拓、しゅんせつ、砂利採取などは、その作業期間中に環境に対し種々の負荷を加えるとともに、作業が終了した後も、その場に半永久的な場の変化を残すことになる。

これら負荷発生量算定ルーチンで推定された環境負荷の水準が次の湖内環境動態サブモデルへの入力となる。

4.2 湖内環境動態モデル

この湖内環境動態モデルでは、負荷発生ルーチンで推定された、2種類の環境負荷の水準に応じて、湖環境がどのように変化するかが推定される。

湖内環境動態モデルには、さらにいくつかの部分モデルが含まれる。まず、流達モデルでは排出された汚濁が湖へ流入するまでに受ける変化が推定され、湖へ流入する汚濁負荷量が推定される。次に、湖内物質循環モデルで湖へ流入した汚濁負荷が湖内でどのように循環するかが推定される。これによって湖内の水質が汚濁負荷の流入によってどのように変化するかが推定される。また、湖内物質循環モデルは次の湖内生態系モデルと相互作用を持つ。すなわち水質が生物（魚類あるいは藻類など）に及ぼす影響が湖内生態系モデルで推定される一方、生物の活動が湖内物質循環に影響を与える。•それ故、できれば湖内物質循環と湖内生態系は一つのモデルとして考えるのが望ましい。

一方、湖の物理的な場の改変による影響として、まず地形変化モデルによって地形変化が推定される。また地形変化の影響も考慮に入れねばならないが、その一例として、水収支モデルによって湖の貯水量が推定される。

このように湖内環境動態モデルからは、湖水量、水質、地形変化および生物などの湖の状態についての情報が得られる。この湖の状態に関する情報が次の湖利用可能性算定ルーチンへの入力となる。

4.3 湖利用可能性

この湖利用可能性算定ルーチンでは、湖内環境動態モデルの出力である湖の状態を基礎として人間と湖のかかわりが定量的には握られる。人間が湖とかかわる項目は、大きく分けて、1)人間にとって収奪あるいは生産の対象となるものと、2)ある特定の人々のみに利用が独占されたり、対象物が個々の人で分割されて利用されにくいものに分けられる。前者の例としては養殖や一般漁業による漁獲物、種々の利水、砂利採取などがあげられる。後者の例としては景観、レクリエーションの場といったものがあげられるが、ここには逆に湖から人間が受ける負の影響、たとえば洪水、悪臭などの項目も含まれる。ここではこれらの項目と湖の状態との関係が定量的に記述されるが、一例をあげると、湖における魚種別魚存在量から、投下労働力、エネルギー等の努力量をもとに魚獲高を推定する関係式などである。このような湖の状態と利用項目間の関連を示したのが表1である。

表1 湖利用モデルの変数体系

Table 1. Illustrative example of variables used in the Lake Utilization Model

Man's Active and Passive Uses	Sports and Commercial Fish Catches (common carp) (shrimp)	Water Supply (municipal industrial agricultural)	Acquisition of new land (agricultural residential municipal)	Mineral Resources (gravel and sand)	Floods	Amenity and Recreation (swimming beach picknng esthetic enjoyment)
Resource Inputs to the Man's Utilization Processes	Labour Fuel Energy Fishing gear and boat Feeds	Labour Energy (power fuel) Waste Treatment Chemicals (aluminum sulfate liquid chlorine)	Labour Energy Drege	Labour Energy Workboat		Labour Energy Party Boat
Environmental Conditions of the Lake	Distribution of fish populations Distribution of bottom deposits Distribution of Underwater Grass	Storage of Water Depth Water Level Water Quality	Area of Shallow Water Depth Water Level	Resource Reserves Condition of Mudge Deposits	Area of Floodplains Depth Water Level	Area of Open Shore Vegetation Map Scarification of the land Water Quality

5. おわりに

本論での検討結果を要約すると以下の通りである。1) 富栄養化現象に関する既存データの総合化および富栄養化防止施策案評価のための全体フレームワークを構成したこと。2) 湖水域周辺地域社会における人間活動記述のためのシステムモデルの概要を示し、これと湖環境に関する調査データとの接合を明確にしたこと。3) 上記2)の地域モデルの形成に当って、周辺地域社会が湖(霞ヶ浦)とかわりをもつ項目を網羅し、これを整理したこと。こうすることによって、周辺地域社会と湖が有機的に関連し合うモデルを形成することが可能となる。

以上の成果は次年度に実施することを予定している“湖およびその周辺地域社会の動態予測”に関するモデルの骨格を与えるものとなる。なお、このモデルは周辺地域社会における人間活動と湖(霞ヶ浦)状態の変動との相互関連を与えるものである。そしてこの結果に立ってはいじめて、周辺地域社会にとって望ましい富栄養化防止施策のあり方が総合的な立場から導かれることになる。

霞ヶ浦周辺住民の水を中心とした環境に対する意識調査

— 地図調査の結果 —

青木陽二¹・原科幸彦¹

A Survey on the Residential Impressions of the Lakeside Environment of Kasumigaura

Yoji AOKI¹ and Sachihiko HARASHINA¹

Abstract

A method whereby residents point out places on a map, is an approach for evaluating the environment. This method enables us to find locations of particular places which are considered by residents to be pleasant or undesirable. This type of information is useful for environmental planning purpose.

A survey, which employed 1000 residents was executed at 50 areas on May 1977. The result showed that about a half of the residents recognized the presence of undesirable places within each area. These places included dirty watersides, which are mainly located on coves and creeks, and those with offensive odor, most of which are located on inland canals and near piggeries. On the other hand, a few areas for swimming which are located on the south part of the lake and quite a few places where carp and cruian fishing takes place were considered to be favourable to most residents. Beside the recreational values, residents pointed out scenic areas, which are located on the lakeside banks, and hills from where Mt. Tsukuba can be seen in the distance through Lake Kasumigaura.

This method has, however, two problems. First, most of the places pointed out by residents were located near their residences. This suggests that the results are prone to the bias of the living conditions of the residents. Second, in some areas people did not satisfactorily respond to the method. It is suspected that is mainly due to the method's inability to take into consideration the personality differences of the residents.

In summary, the current method seems to be useful to indicate the locations of particular places but is inadequate for inter-region environmental evaluations.

1. はじめに

富栄養化防止施策を立案するための基礎資料を得るために、1977年5月に2種類の調査を行った。一つはアンケート票(A票)による調査で、その結果は既に前報で報告した(原科ら、1977)。もう一

1. 国立公害研究所 総合解析部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Systems Analysis and Planning Division, The National Institute for Environmental Studies, P. O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.

つは地図（B票）を用いて居住地周辺の環境を点検評価をしてもらう調査であった。今回は前報では報告できなかったB票についての集計解析結果を報告する。

この調査の意義は先の調査（A票）では得られなかった空間的な情報を得ることにある。A票によるアンケート調査では、水が汚れたと判断する答が多く得られたが、それはどこであるのか明らかにされなかった。このことは環境計画において改善すべき場所の位置についての重要な情報が不足することになる。これを調べるには大縮尺の地図上に該当する地点をプロットしてもらう方法が有効である。これによって、人々の主観的意識と物的な環境状態の対応づけを行うことが出来る。本調査はそのようなデータを得る一方法である。

2. 調査の方法

(1) 調査項目の設定

調査対象者によって地図上にプロットしてもらった項目は次の5項目である。まず現状の環境悪化を知るために、

- ① 河や湖などで水の汚れのひどい場所
- ② 悪臭のする場所

の2項目を設定した。また住民が湖を利用する項目として、

- ③ 泳げる場所（なければ何年くらいまで泳げたか、泳げなくなった理由）
- ④ 河や湖など釣りや投網のできる場所（そこでとれる魚の種類）
- ⑤ 景色の良い場所と見ている方向

の3項目を設定した。

(2) 調査方法

調査対象者の住居から半径1km内外の範囲について縮尺1:5000の地図を用意して留め置き法により、書き込みを依頼した。調査対象地区は湖岸150km²集落に及ぶので、各地区ごとに地図を作成し、5項目別々に記入してもらった。なお調査実施の詳細は前報（原科ら、1977）を参照されたい。

(3) 回収結果

回収票は738票で、各項目に対して回答が得られなかった割合は、①では40.4%、②では58.4%、③では7.7%、④では24.1%、⑤では22.2%であった。①、②に関してはあまり良いとは言えない結果であった。この理由はこの調査の集計結果から見ると明らかなように、①では汚れは湖全体に及んでいて地点を特定化することがむずかしかったためであろう。またA票の結果では悪臭はひどくなくなっていないと答えた人が46%もあったので、②の結果はほぼ妥当であろう。③で回答率が高いのは、実態としてほとんど泳げないので、泳げないという回答が多かったためで、泳げる地点の指摘は少なかった。

3. 調査結果

3.1 地区レベルでの集計

各調査対象者が指摘した地点を地区単位で図1、2のように一枚の地図上に集計した。図1は和田勝木地区の人々によって水が汚れていると指摘された場所である。図右の入江に多くの人の指摘が集まっている。図2は景色の良いところが示されていて、湖岸や高台に印は多い。また見ている方向は湖上を通して筑波山、対岸の麻生や潮来を指摘した人が多くあった。なおこの集計においては1人につき2地点以上の指摘を許している。

他の項目に関しては紙面の都合上、図は省略するが、この地区では次のような特徴が見られた。悪

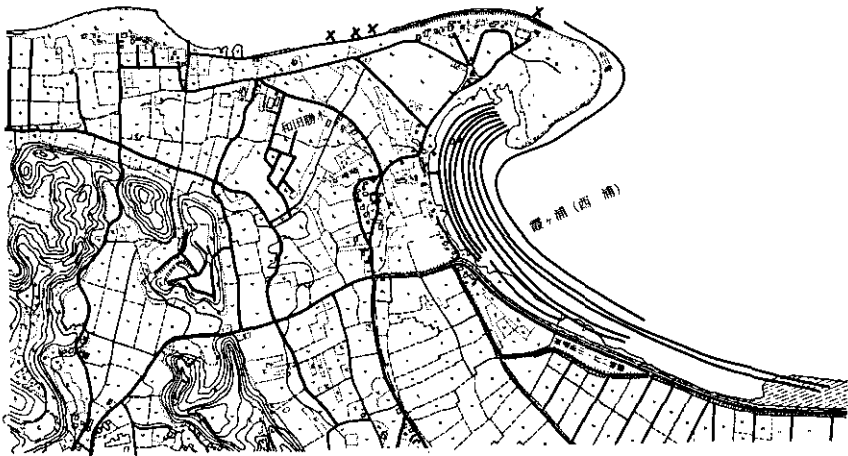


図1 和田勝木地区における水の汚れのひどいところ

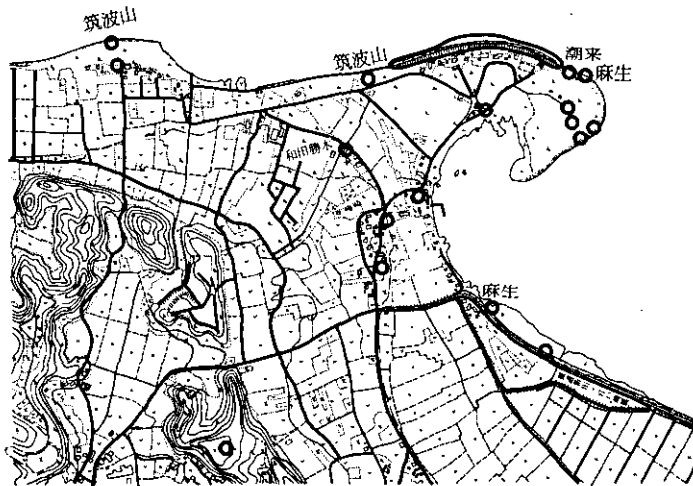


図2 和田勝木地区における景色のよいところ
(地名は見ている方向を示す)

臭に関しては陸上で豚舎の付近に見られたが地点の指摘数は少ない。水泳が可能な場所は図1のさん橋の1地点だけであった。釣りの場の指摘は数多く、汚れていると指摘された地点と重なる部分が多くあり、釣れる魚の種類はコイ、フナが大部分であった。

以上が和田勝木地区の例であるが、これと同様の方法で各地点について項目別に集計図を作成した。

3.2 霞ヶ浦全体での集計

① 水の汚れのひどい場所

地区レベルの集計において、北区の全回答者の半数以上の人汚れていると指摘した場所を図3のように霞ヶ浦全体でまとめた。その結果、指摘された地点は内陸水路や入江が多かったことと、調査

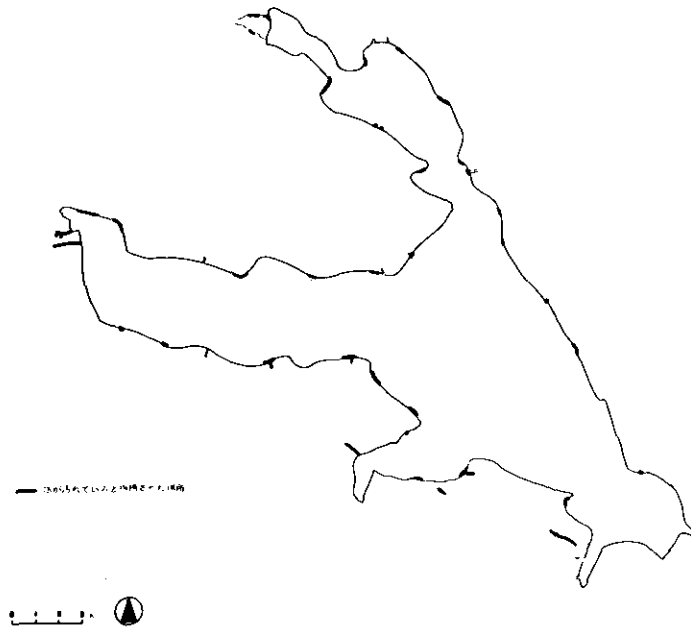


図3 居住地の周辺で水が汚れている場所

対象集落のそばに必ず指摘された場所があることがわかった。この結果から、湖全体が汚れていると周辺住民が考えていると推定され、このことはA票の結果と一致する。また人々の指摘が重なった場所はいずれも調査集落の近くの行きやすい場所であることから、集落からある程度離れた場所は住民にとって生活環境としての意識が十分及ばない場所であると思われる。

② 悪臭のする場所

これは地区ごとの集計結果をそのまま霞ヶ浦全体で集計した。悪臭のする場所は内陸水路に多く、上部にも見られ、地域的には全域に広がっている。

③ 水泳が可能な場所

これも地区ごとの集計結果をそのまま霞ヶ浦全体で集計した。その結果図4のように、現在泳げる場所は少なく、湖南部に数か所に現れた。また何年前から泳げなくなったかを集計したところ、10年

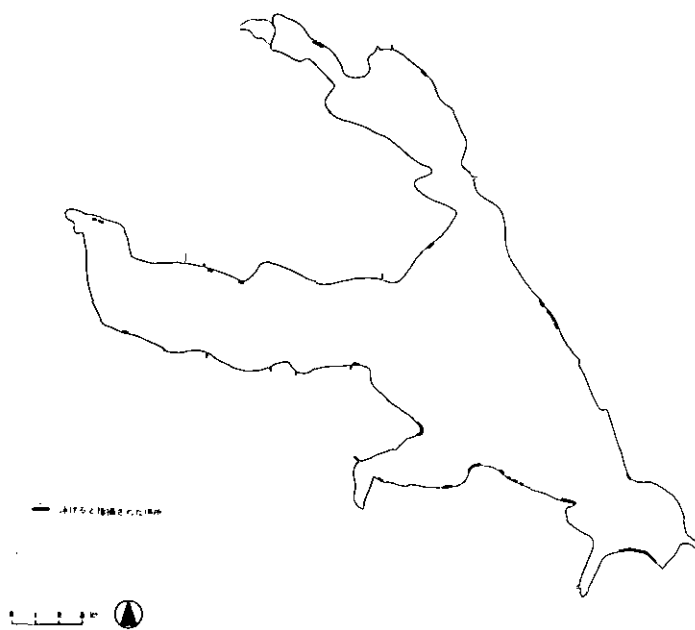


図4 居住地の周辺で泳げる場所

前から泳げなくなった地区が一番多く、ずっと以前から泳げないという地区が次に多かった。泳げなくなった理由は多い順にあげると、大腸菌の増加、アオコの発生、プールの建設の結果、水草の増加、水深の変化（深くなった）などであった。

④ 釣りや投網のできる場所

この項目は全体として指摘場所が多かったが、わかさぎのとれる場所だけをプロットすると、霞ヶ浦全体で数か所指摘されただけであった。

⑤ 景色の良い場所

これも地区ごとの集計結果をそのまま霞ヶ浦全体で集計した。多くの人が指摘した場所は湖岸の堤防、後背の丘などであった。見ている方向は湖が多く、その背後には筑波山が良く記入してあった。これは広い水面によって視界が開け、高台によってふかん（俯瞰）を得るからである。このような地点からの眺めの対象としては、筑波山、遠く富士山まで選ばれている。このように景色の良いところは馬掛、歩崎など社が多く、住民の信仰とも結びついていると思われる。

3.3 地点指摘の有無に関する考察

項目1の水の汚れに対する回答状況を見ると、地図の指摘者は60%でA票による水質の汚れの回答者の95%に比べて大きな差がある。この原因は水が流動拡散することもあって汚れが全体として感じられたことも考えられる。しかし、地区ごとに回答率は大きく変動しており、回答率の低さも考え合わせると地図指摘法自体に問題点があるのではないかと思われる。そこで回答の有無と回答者の属性について数量化Ⅱ類によって分析した。説明要因をA票で得られた性別、年齢、職業、居住年数、定住志向の5項目とし、回答の有無を外的基準とした。その結果相関比は0.14~0.17と低く十分説明で

きなかった。ただ景色の良いところの指摘において居住年数が少し影響していた。この結果から地図による調査は、地図に対する慣れなどのほかに、理解力、回答意欲など個人差によって、回答の得られ方の差についても考察すべきであろう。

4. まとめ

以上の結果から次の3点が要約される。

第1は項目ごとの集計結果として次のことが明らかとなった。環境悪化の現状としての水の汚れと悪臭は全域で指摘されておりその傾向はA票の結果とほぼ一致した。また住民の約半数はその悪化を身近なものとして場所を明確に意識していた。湖利用の項目として水泳の項目では可能な場所は非常に少なかった。釣りや投網の項目では湖のどこでも可能で汚れとは関連が得られなかった。景色の項目では、水面によって前が開けた堤防や高台が多く選ばれていた。

第2は指摘地点の分布において、その位置が住民のアプローチしやすい集落周辺に集中することから住民による環境として意識の及ぶ範囲はそれほど広くないことが示された。

第3は地点指摘者数が十分でない項目があり、地区によつての変化も大きく、この方法だけでは各地点の環境評価が同じ水準では得られないことが示された。

上の第2、3点から地点ごとの環境を比較するためには同一の人による統一的な評価を各地点について得る方法の開発が必要といえよう。

最後に、本調査に御回答いただいた霞ヶ浦周辺地域の方々に記して感謝の意を表するものである。

引用文献

原科幸彦・青木陽二・森田恒幸・丹羽富士雄(1977)：霞ヶ浦周辺住民の水を中心とした環境に対する意識調査。国立公害研究所特別研究成果報告，第1号，19～48。

湖岸環境に関する臨場意識調査 (その1)

——第1回調査結果の解析——

原科幸彦¹・青木陽二¹・中杉修身¹・丹羽富士雄¹

A Field Survey for Evaluating a Lakeside Environment (No. 1)

— Results of the First Survey of Lake Kasumigaura —

Sachihiko HARASHINA¹, Yoji AOKI¹, Osami NAKASUGI¹ and Fujio NIWA¹

Abstract

The purpose of the study is to find out the relationships between human environmental evaluations and the physical conditions of lakeside areas. In the survey of this kind, due to the difficulties of quantifying the physical environmental conditions comprehensively by observable indicators only, human perception is utilized. The survey was conducted in the early winter of 1977, at 20 survey points within the Kasumigaura lakeside area. The respondents were composed of two groups, the residents of the lakeside and the students of the University of Tsukuba.

The following three points were observed from the survey: (1) the lakeside environment was negatively evaluated, whose intensity varying among different survey points; (2) there was no difference in the evaluation and perception of the lakeside environment between the residents and the university students, though the latter group is less familiar with the lakeside area than the former. Small differences have, however, been observed in some perception items. For example, in the case of *aoko*, a type of phyto-plankton the residents were more sensitive than the students at 14 survey points; and (3) the most dominant factor which is related to the evaluation of environment was the turbidity of the lake water, which was followed by litter, deserted vessels, water plants and *aoko* for both groups.

A difference between the two groups in the evaluation of the lakeside environment may not have been observed because man's utilizing processes of the lakeside such as swimming, fishing, and boating were disregarded. However, the differences between these two groups have become significant by taking man's utilizing processes into account. In this connection, another survey was conducted and the results are presented elsewhere in this same report.

1. 国立公害研究所 総合解析部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Systems Analysis and Planning Division, The National Institute for Environmental Studies,
P.O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.

1. はじめに

従来、環境質は主として汚染質を計測することによっては握されてきた。しかし、OECDレポート(OECD, 1978)でも指摘されたように、アメニティのような快適な環境という側面にも着目することが今日、強く要請されるようになってきた。この側面からの環境評価のためには人間の感覚と物的環境状態との関連をは握する必要がある。これによって人々の意識面まで考慮した上で、望ましい環境を計画することができる。

昨年度実施した「霞ヶ浦周辺住民環境意識調査」(原科ら, 1977)においても、我々はこの主旨から地図指摘法による調査〔以下地図調査(青木ら, 1979)〕を行った。その結果、水の汚れ等いくつかの項目については環境が悪化している地点がほぼ明らかにされた。しかし、この調査では各住民の居住地周辺のみについての指摘であったため、統一的な地域環境評価にはなり得ず、定量化もされなかった。また、地図指摘法では回答者の意欲や能力といった個人差がかなり大きく影響すると考えられ、この方法自体に限界があった。これらの点を克服するためには、同一個人が湖岸の各地点に実際に臨み、その場で評価するという調査方法が有効であろうと考えられる。今回、我々は霞ヶ浦湖岸の全域から20地点を選びこの方式により調査を実施した。ここではこれを「臨場意識調査」と名づけることとする。本報はこの第一回調査の解析結果を報告するものである。

2. 調査の概要

2.1 調査項目

霞ヶ浦湖岸の環境評価項目として「湖岸の汚れ」を聞いた。汚れに対する判断は評価地点の物的環境状態をどのように認知するかにより左右されると考えられる。そこで汚れの判断に影響すると思われる認知項目を設定し各項目に対する認知を聞いた。これらは表1~3の表側に示したように廃船の有無から、水へのアプローチの良し悪しまでの9項目である。さらにこれらの認知項目がその地点の環境評価項目である汚れとどの程度関係していると思うかを質問した。調査対象者の属性項目は性別、年齢、職業、住民から湖までの距離、湖との接触度の五つである。

2.2 調査の実施

調査対象者は湖岸住民と筑波大学の学生の2グループである。それぞれの人数は22名、20名で、いずれも男女構成比は50%ずつとした。両グループにマイクロバス2台に分乗してもらい、互いに影響を及ぼさないように配慮しながら調査地点に誘導した。その場で、配布した調査票に回答を求め、地点ごとに調査票を回収した(写真1, 2)。調査地点は前回の地図調査結果を参考に、図1の20地点を選定した。地点番号順に回ったが、第1地点の土浦港については回答の安定性チェックのため最後に再度調査を行った。このため、2度目を地点番号21とした。調査実施日は1977年11月27日で、当日の天候は曇りのち晴であった。実査作業は株式会社社会調査研究所に委託して行われ、筆者らも同行した。



写真1 現場で回答中の回答者



写真2 回答者の現場への誘導

3. 調査結果

3.1 環境評価項目の「湖岸の汚れ」

湖岸の汚れについては、「かなり汚れている」、「少し汚れている」、「汚れていない」の3段階で聞い

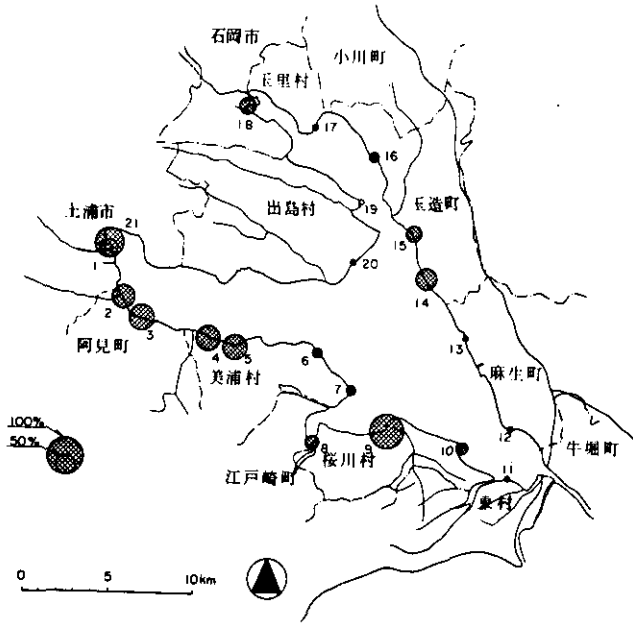


図1 湖岸が汚れていると答えた人の比率

た。このうち「かなり汚れている」と回答した人の比率を地点ごとに示すと図1のようになる。その結果、最も比率の高いのは地点9で、95%に達する。逆に最も比率の低いのは地点15で、2%にしかならない。このように霞ヶ浦全体としては汚れているとはいえ地点により汚れの状況は大きく変動していることが示された。

回答の安定性チェックのために行った土浦港での2度の回答結果を見ると、50%から60%へと10%増えている。これは各地点を見て来たという新しい情報の付加のためとも考えられるし、当日の天候の変化（曇りから晴れへ）や時刻の違い（朝から夕刻へ）も影響したものと考えられる。しかし、この値は地点間の回答の変動に比べればそれ程大きな値ではない。地点番号の若い地点の調査時刻には天候が悪く、その影響も少しは考えられるが、この結果はほぼ妥当なものといえよう。

3.2 認知項目

次に各地点の物的環境状態がどのように認知されたかを概観しよう。認知項目の中には存在を問う項目が六つある。廃船や土木工事・土砂採取は有無がはっきりわかるものであるため、図2のように地域差が明確である。しかし、50%前後の地点もいくつかあるのは地点によっては認知の個人差が以外と大きいことを示している。他の4項目は個人の観察力の差の影響が大きいと考えられ、有ると回答した人の比率はその存在量の程度を示すと考えられる。これらの結果を見ると流木などの自然ごみと水草は全域にわたって存在しているが、あきカンなどの人工ごみ(図3)とアオコは霞ヶ浦の南岸地帯一帯に多いことがわかる。人工ごみやアオコは北風に吹かれてこの南岸一帯に集まったのではない

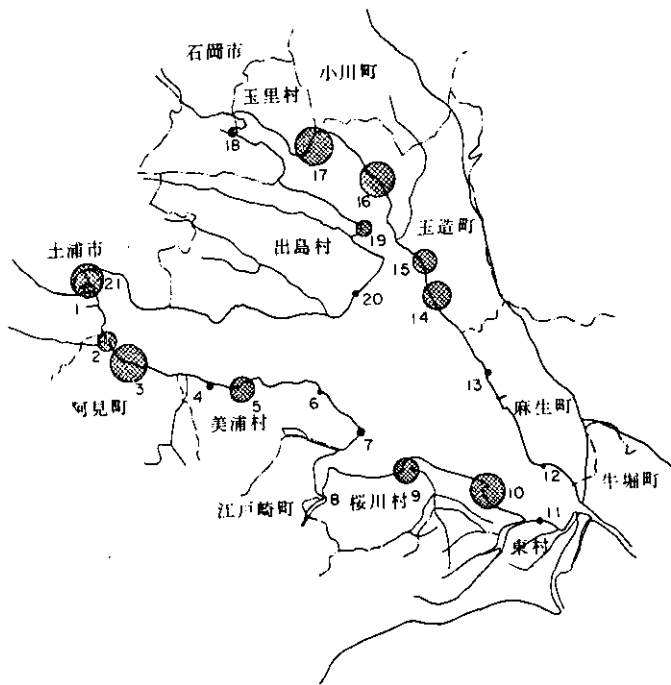


図2 廃船が有ると答えた人の比率

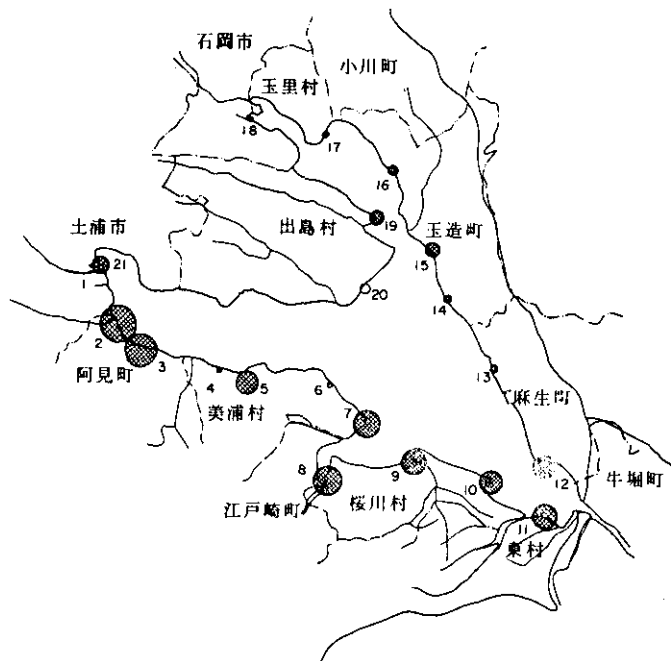


図3 あきカンなどのごみが有ると答えた人の比率

かとも思われる。残りの3項目は有無でなく程度や分類を聞いている。その中で、水の濁りは図4に見るように汚れの評価とよく似た地点分布パターンをしている。水の色では、青と判断された地域もほとんどなく、アオコが多いと認知された地点では緑、その他の地点は茶か黒であった。水へのアブ

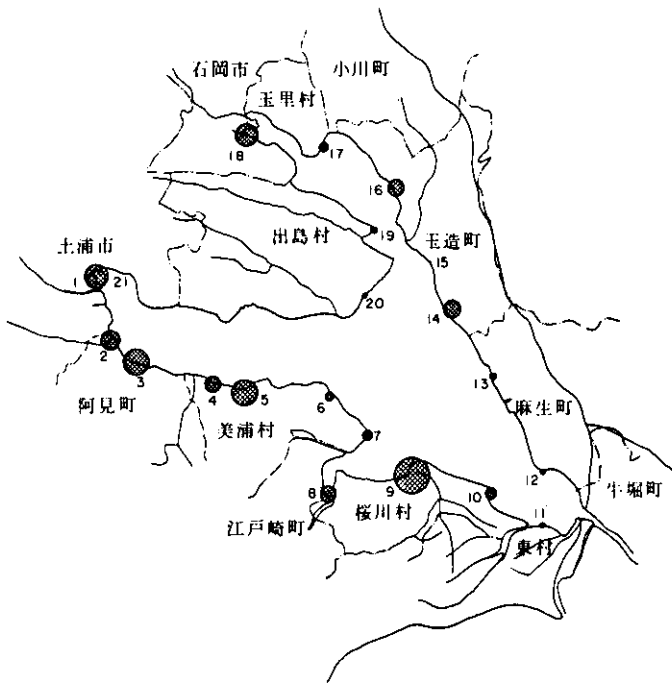


図4 水が濁っていると答えた人の比率

ローチの良し悪しは各地点まちまちである。

4. 住民と学生の差違

住民と学生では霞ヶ浦に接する度合は大きく異なると思われるが、調査結果を見ると月1回以上湖に接触する人は住民の40%、学生の10%である。このような湖接触頻度の差は湖岸環境の評価や認知にかなりの差を生ずると考えられる。住民と学生の2グループに分け、この点について見た。

4.1 評価

汚れという点での評価に関しては予想に反して両者の間にはそれ程大きな差は見られなかった。5%の有意水準で両者に差があると判断できたのは地点3、4だけであり、いずれの地点も住民の方が汚れを強く意識していた。いずれにしても汚れに関しては両者には大きな差はなかった。

4.2 認知

上と同じ基準で両者に有意な差があるかを各認知項目について見た。廃船、水の濁り、土木工事・土砂採取の3項目は各地点でほとんど差が見られなかった。わずかに土木工事・土砂採取が1地点だけ差があったのみである。また、あきカンなどのごみと流木などのごみ、水草、水の色も3から8の地点で差が見られただけである。半分以上の地点で差が見られたのはアオコだけで、14の地点で差が見られた。このように両グループの差は全体的には少なかったが、差のあった項目ではほとんど住民の方が学生よりも認知が高かった。これは住民の日常生活での湖への接触経験が効いて観察力に差が

出たためと考えられる。また、水へのアプローチに関しては七つの地点で差が見られ、学生の方が「悪い」と認知する人が多かった。これも学生と住民の生活体験の差が反映したものと考えられる。

5. 湖岸の汚れの評価を規定する要因

我々は物的環境状態がどのように認知されたかによって各地点の湖岸の汚れの程度の評価が左右されると仮定した。上述のように認知項目のうち水の濁りだけは汚れとよく一致した回答分布パターンをしており、水の濁りは汚れを規定する主要因ではないかと予想される。単純集計の結果をさらに見ると、最も汚れていると評価された地点9では水の濁りの他にアオコ、水草の認知が極めて高く、水へのアプローチも極めて悪いとされている。各地点の認知項目ごとの認知度を比較するため、各項目の認知の高いカテゴリーから順に、2カテゴリーの場合は100, 0, 3カテゴリーの場合は100, 50, 0の値を与えて地点別の平均値を求めたのが表1である。これを見ると水の濁りの認知は各地点とも

表1 地点別認知度

地点 認知項目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	土浦市 土浦港	阿見町 精進川 河口	阿見町 大室	美浦村 水原	美浦村 大須賀 津	美浦村 馬掛	美浦村 医科漁 科大	桜川村 古瀬	桜川村 東三次	桜川村 和田 勝木	東 村 本	麻生町 天王崎	麻生町 今宿	玉造町 新田	玉造町 高須	玉造町 八木崎	玉里村 大井戸	石岡市 坂井戸	出島村 柏	出島村 歩崎	出島村 観音
1. 廃 船	86	57	98	14	64	0	19	5	74	98	0	2	7	76	60	95	98	26	38	0	74
2. あきカンな どのごみ	25	67	58	5	35	7	37	38	36	33	39	29	8	10	19	14	52	54	19	14	25
3. 流木などの 自然ごみ	18	43	51	31	56	12	52	55	57	51	42	46	8	27	37	39	60	41	29	11	13
4. 土木工事 土砂採取	81	7	0	38	21	19	55	71	12	2	0	0	69	2	2	0	2	12	69	2	76
5. ア オ コ	14	14	86	42	77	12	12	18	87	60	5	1	10	39	6	11	14	14	4	16	14
6. 水の濁り	93	81	85	83	86	64	60	62	98	68	45	55	56	81	26	66	55	76	57	44	75
7. 水 草	11	33	64	47	68	32	16	100	91	86	16	6	14	51	29	61	44	67	10	41	14
8. 水 の 色	76	55	19	33	33	71	86	67	38	19	29	93	64	48	33	74	60	90	64	19	67
9. 水への アプローチ	45	45	62	55	50	50	19	57	83	43	45	12	69	62	2	71	52	69	36	14	55
評 価 項 目 「かなり汚れて いる」の%	50	48	71	41	62	17	24	43	95	36	10	12	14	52	2	45	24	60	19	7	60

認知度 (0~100の値に変換)

高く、他の項目は地点により差がある。この認知度と水の汚れの評価度(かなり汚れているという回答の比率)との相関を見ると表3のように水の濁り、アオコ、水へのアプローチが高い相関を示しており、これに水草、廃船が続いている(表2)。

しかし、相関係数だけを見たのでは汚れに対する規定力を論ずることはできない。汚れをY、項目での認知度を X_i とすれば、我々の仮説は次式で表される。

$$Y=f(X_i)$$

(1)

ここで、線型仮説を用い、重回帰モデル

$$Y = \sum_{i=1}^9 W_i X_i \quad (2)$$

を構成すれば、汚れに対する各認知項目の規定力は、偏相関係数で表されよう。計算結果が表2に示してあるが、水の濁りの他に、あきカンなどのごみ、廃船、水草、アオコが高い値を示している。これらが湖岸の汚れの評価において強い規定力を有していると言えよう。

表2 認知度による重回帰分析

説明変数	被説明変数：湖岸の汚れ			認知項目別 関連度との 単相関係数	
	重回帰分析 諸係数	単相関係数	偏回帰係数		偏相関係数
1. 廃 船		.541	.092	.369	.807
2. あきカンなどのごみ		.354	.244	.371	.990
3. 流木などの自然ごみ		.324	.153	.178	.964
4. 土木工事・土砂採取		.032	.041	.137	.981
5. ア オ コ		.724	.277	.350	.991
6. 水の濁り		.885	.607	.555	.989
7. 水 草		.581	.162	.354	.957
8. 水 の 色		.078	.166	.279	.120
9. 水へのアプローチ		.706	.142	.255	.553

重相関係数：.954 (自由度調整後 .914), サンプル数：21

ところで、この調査では上で推定した規定力を直接調べる意図から汚れとの関係がどの程度あると思うかを各認知項目ごとに聞いた。この結果から表1と同様にして地点別平均を求め関連度とした。この値は全員が「かなりある」と回答すれば100, 全員がないと回答すれば0となる。これを見ると各地点を通じて高いのは水の濁りで、他は地点によりまちまちであるが、そのパターンは表1と似ている。項目別に認知度と関連度の相関を調べると表2の右列のように水の色、水へのアプローチ以外はいずれも高い。したがって、この質問により求めた関連度は(2)式の偏相関係数に相当するというよりも、 $g(W_i X_i)$ のような値が回答されたと見るべきであろう。したがって、この関連度を規定力の指標と見ることはできないと思われる。ちなみに、関連度を用いて重回帰式を得ても認知度による場合と同様に0.95という高い重相関係数が得られる。

以上の分析では住民と学生の主体差は考えずまとめて扱った。これは、上述の単純集計の結果から両者の間に汚れの評価の差は見られなかったこと。さらに認知項目に関してもわずかにアオコで差が見られた程度で、両者の間にはほとんど差がなかったことから両者の間には評価構造の差がないと仮定したためである。この点のチェックのため、地点ごとに九つの認知項目と主体差(住民か学生か)を説明要因とし、汚れを外基準として数量化Ⅱ類による分析を行った。紙面の都合上、詳細は省略するが、要因の説明力を示すレンジは主体差の項目ではどの地点も低くほとんど説明力はなかった。全域をまとめて、説明要因に地点番号を加えて分析した結果を表3に示す。これを見てわかるように主体のレンジは極めて小さい。この結果から、学生か住民かという主体差はこと湖岸の汚れの評価に関してはほとんど影響しないと言えよう

表3 数量化Ⅱ類による分析(全域)
(レンジおよび相関比)

説明要因	レンジ
1. 廃船	.00
2. あきカンなどのごみ	.04
3. 流木などの自然ごみ	.08
4. 土木工事・土砂採取	.02
5. アオコ	.02
6. 水の濁り	.66
7. 水草	.05
8. 水の色	.07
9. 水へのアプローチ	.04
10. 主体差	.03
11. 地点	.21

相関比：.75
サンプル数：882

6. まとめ

本調査は霞ヶ浦湖岸の20地点を選び、各地点の湖岸の汚れの評価と、物的環境状態との関係のは握を目的として、1977年初冬に実施した。人間の感知する物的環境状態を物理量によりトータルに計量することは困難であるため、この調査では人間をセンサーと見なした。すなわち人々の環境認知から定量化を試みた。環境認知は個人間では変動しても集団としては握することによって客観的な環境状態は記述されうると仮定したのである。

この調査から得られた結果は次の4点に要約される。第1に、霞ヶ浦の場合、湖岸の汚れに関する評価は、住民と学生という湖岸接触頻度の差にもかかわらず変わらないということである。第2に、物的環境状態の認知も両者の間に大きな差は見られないが、アオコ等のように若干の項目では住民の方が学生よりもセンサーとしての感度がやや高い。第3に、湖岸の汚れの評価構造に関しても両者に差はみられない。第4に、湖岸の汚れの評価の規定要因は水の濁りが圧倒的に大きく、他にはあきカンなどのごみ、廃船、水草、アオコがあげられる。

7. おわりに

このように湖岸の汚れの評価に関して住民と学生の間には差が見られなかったのは、湖岸をどう利用するかという観点が入らなかったためと考えられる。利用の観点からの評価であれば両者に差が出ると予想され、この点に関する調査が必要であろう。また、本調査で聞いた汚れとの関係の質問は分析の結果適切な回答は得られておらず今後は省いた方がよさそうである。

最後に、現場に向くという面倒な調査にもかかわらず積極的な御協力をいただいた地元および筑波大学生の方々に感謝の意を表する次第である。また、調査票の設計段階では総合解析部の内藤正明主任研究官の御助言をいただいた。

引用文献

- 青木陽二・原科幸彦(1979)：霞ヶ浦周辺住民の水を中心とした環境に対する意識調査——地図調査の結果。前出(pp. 311～316)。
- 原科幸彦・青木陽二・森田恒幸・丹羽富士雄(1977)：霞ヶ浦周辺住民の水を中心とした環境に対する意識調査。国立公害研究所特別研究成果報告，第1号，19—48。
- OECD，環境庁国際課監修，国際環境問題研究会訳(1978)：OECDレポート，日本の経験，環境政策は成功したか。日本環境協会，113～115。

湖岸環境に関する臨場意識調査 (その2)

— 第2回調査結果の解析 —

中杉修身¹・青木陽二¹・原沢英夫¹・原科幸彦¹・丹羽富士雄¹

A Field Survey for Evaluating a Lakeside Environment (No. 2)

— Results of the Second Survey of Lake Kasumigaura —

Osami NAKASUGI¹, Yoji AOKI¹, Hideo HARASAWA¹,

Sachihiko HARASHINA¹ and Fujio NIWA¹

Abstract

The goal of this research was to recognize and assess the environmental condition of surrounding regions of Lake Kasumigaura not by instrumental measuring techniques but by people's perceptions. The research was different from the first research done in 1977 in terms of the items to be assessed. In this research, the places were chosen and assessed mainly from the viewpoint of recreation activities. The places were characterized based on peoples' assessments. People assigned a good mark to Ayumizaki, which was recognized to have easy access to the lakeside and where the water was clear. On the other hand, people assigned a bad mark to Shimotakasaki, where much litter was seen and where the water was muddy.

It was revealed that 1) people who lived near the lake recognized particularly the existence of *aoko* (a species of blue algae) was comparison to people who live far from the lake, 2) generally speaking, men were apt to give a more critical evaluation than women and 3) people's experience in recreation activities had a minor effect on the evaluations.

In summary, the easy access to the lakeside and the presence of free space are seen to be the dominant factors in the people's evaluations for many recreational activities.

1. はじめに

本調査は前報*で述べたように、人間をセンサーとして環境評価を行う方法を模索する過程で、環境状態に対する認知と環境評価との関係を明らかにしようと試みるものである。第1回臨場意識調査では湖岸環境全体についての評価を聞いたが、そこでは湖岸環境というばく然とした項目について「汚れ」という形での評価を聞いた。そのため、湖岸住民と一般学生とは湖接触頻度が異なるにもかかわらず評価に差は見られなかった。そこで、湖岸接触頻度が影響すると思われる具体的な湖岸の利

1. 国立公害研究所 総合解析部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Systems Analysis and Planning Division, The National Institute for Environmental Studies,
P. O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.

* 本報告書 (pp. 317~326)

用行動をあげて、これに関する評価を聞いたのが今回の調査である。

2. 調査の実施

第2回調査も基本的には第1回調査と同様の方法を採用し、標本抽出、実査、単純集計までの作業は株式会社社会調査研究所に委託して行われた。調査対象者も前回同様、霞ヶ浦湖岸住民と筑波大学の学生とし、人数はそれぞれ22名、20名で、男女構成比は50%ずつとした。

しかし、今回の調査対象地域は、土浦市、出島村、石岡市、玉里村、玉造町に含まれる霞ヶ浦北岸10地点に絞った。なお、回答の安定性をチェックするために、今回も第1地点の土浦港については最後に再度調査を行った。土浦港の2度目の調査は地点番号11である。

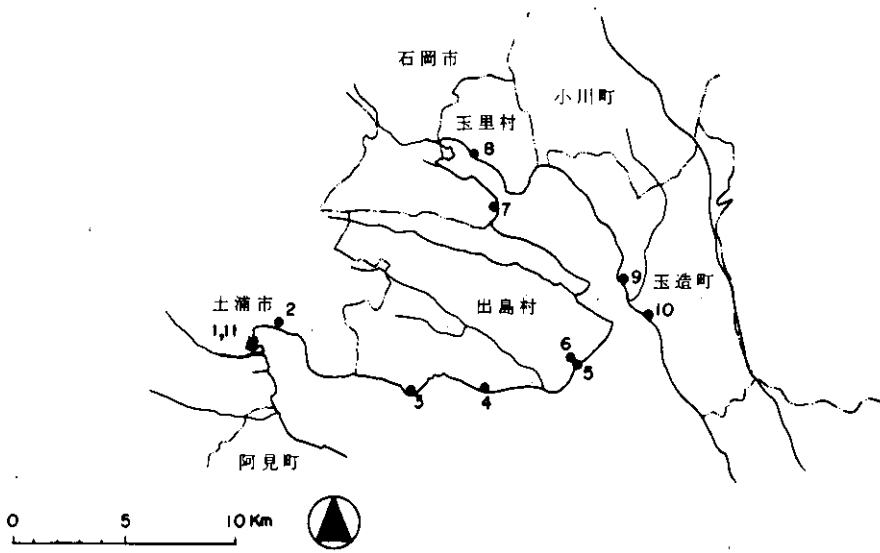


図1 第2回調査対象地域

調査は1978年3月1日に実施した。当日は晴天であったが、筑波おろし（季節風、北風もしくは北西風）が強く、よいコンディションではなかった。

3. 調査結果からみた地点の特性

ここではまず、回答者の環境認知および評価から各調査地点の地域特性を見てみる。

3.1 評価項目からみた地点特性

評価項目としては、水遊び、ヨット・ボート遊び、釣り、散歩および景色を見るの5つの活動について、それぞれの活動にその場が適しているかどうかを4段階の評価で聞いた。また住む場所として適しているかどうかについても評価を聞いた。適、やや適、やや不適、不適の4段階の評価に対し、それぞれ+3、+1、-1、-3の点数を与え、それぞれに評価したものの比率を乗じ、加え合わせ

て表1に示すように各地点の各項目の評価ポイントを求めた。

表1 各調査地点に対する各評価項目のポイント

	水遊び	ボートヨット	釣	散歩	景色	住む
1. 土浦市 土浦港	-0.84	0.10	0.09	0.33	-0.24	0.00
2. 土浦市 石田	-0.84	-0.68	-0.07	0.16	0.13	-0.37
3. 出島村 崎浜	-0.73	0.14	0.15	0.21	0.29	-0.29
4. 出島村 八田	-0.67	-0.02	0.19	-0.37	-0.06	-0.13
5. 出島村 歩崎	-0.29	0.71	0.48	0.45	0.63	0.41
7. 石岡市 八木	-0.62	-0.27	0.20	0.17	0.29	-0.21
8. 玉里村 下高崎	-0.87	-0.49	-0.37	-0.62	-0.22	-0.38
9. 玉造町 浜	-0.90	-0.24	-0.32	-0.70	-0.22	-0.35
10. 玉造町 高須	-0.17	0.13	-0.17	0.05	0.19	-0.08
11. 土浦市 土浦港	-0.76	0.35	0.19	0.52	-0.19	-0.02
6. 出島村歩崎観音	—	—	—	0.81	0.98	0.08

この結果を回答者全体について見ると、歩崎がどの項目についても適しているとの評価が得られた。ただし水遊びについては他の地点と比べてはよいが、それでも不適との評価を得ている。また歩崎観音は水辺から離れているため、景色を見る、と散歩についての評価しか意味を持たないが、両項目とも歩崎より適しているとの評価が多かった。

逆にどの項目についても不適であるとの評価を受けたのは下高崎および浜である。このうちでは下高崎の方が全般により悪い評価を受けている。その他の地点については活動項目ごとに評価がまちまちであるが、土浦港でボート遊びおよび散歩が比較的よい評価を得ている。また全体に評価の悪い水遊びの場としては調査地点の中では高須が最もよい評価を得ている。

3.2 認知項目からみた地点特性

一方、その場の状態の認知に関しては廃船、あきカン、流木などのごみ、アオコ、水の濁り、水草、水辺までの行きやすさ、堤防、子供の走り回る程度の場所および水鳥の9項目について調べた。評価項目の場合と同様に各々の認知に対し、それぞれ点数を与えて表2に示すような各地点における各項目の認知度を求めた。下段には各認知項目に対する点数の与え方を示している。

この結果を見ると、どの評価項目についてもよい評価を得た歩崎に対しては、大部分の人が水辺へ行きやすく、子供の走り回る場所があると認知している。また水の濁りについても調査した10地点の

表2 各調査地点に対する各認知項目のポイント

	廃船	ごみ	アオコ	濁り	水草	水辺への行き易さ	堤防	走り回る場	水鳥
1. 土浦市 土浦港	-0.43	0.31	0.71	-0.71	0.81	0.67	0.02	0.71	0.00
2. 土浦市 石田	-0.76	0.48	0.67	-0.90	0.21	-0.14	0.24	-0.24	-0.90
3. 出島村 崎浜	-0.24	0.19	0.66	-0.74	0.14	0.57	-0.71	-0.48	-0.46
4. 出島村 八田	-0.43	0.33	0.74	-0.86	0.07	0.52	-0.10	-0.10	-0.19
5. 出島村 歩崎	0.56	0.36	0.71	-0.45	0.37	0.90	0.00	1.00	-0.14
7. 石岡市 八木	0.52	0.10	0.64	-0.74	-0.26	0.24	-0.55	-0.57	-0.90
8. 玉里村 下高崎	-0.67	-0.45	0.40	-0.81	-0.44	-0.33	0.81	-0.57	-0.95
9. 玉造町 浜	-0.71	-0.26	0.55	-0.76	-0.14	-0.10	0.90	-0.95	-1.00
10. 玉造町 高須	-0.52	-0.05	0.64	-0.67	-0.19	0.71	0.69	0.38	-0.52
11. 土浦市 土浦港	-0.14	0.31	0.71	-0.69	0.81	0.71	-0.17	0.86	-0.81
6. 出島村 歩崎観音	—	0.67	—	—	—	—	—	0.90	—
+1	ない	ない	ない	きれい	ない	よい	ない	ある	いる
0	—	少ない	少ない	少し濁っている	少ない	—	低い	—	—
-1	ある	多い	多い	濁っている	多い	悪い	高い	ない	いない

中ではきれいであると認知している比率が相対的に高い。土浦港も歩崎と同様、水辺へ行きやすく、子供の走り回る場所があるとの認知を受けている。土浦港はこの他に水草がないという点で他の地点と比べ、際立った認知を受けている。歩崎観音はごみが少なく、走り回る場所もあるとの認知を受けている。

逆に下高崎に対しては廃船、ごみ、水草が多く、水辺へ行きにくく、水も濁っていると認知しているものが多い。また、調査時期が冬の終りであるためアオコに対する認知は全体的に低い、下高崎では相対的に高い認知がされている。また浜は、廃船、ごみが多く、走り回る場所がないとの認知を受けている。石田は廃船が多く、水が濁っていると認知しているものが最も多いのが特徴となっている。

3.3 調査方法の安定性

最初と最後の土浦港での2回で評価あるいは認知が大きく変動した項目は、水鳥、ボート遊びおよび散歩である。水鳥の認知は水鳥の移動によって当然、変化するものであり、認知項目については学習の効果はないと言えるだろう。一方、ボート遊び、散歩は2回目の方がよい評価を受けている。認

知による差がほとんどないことから考えて、これは学習効果が出たとも考えられる。

4. 属性による認知および評価の違い

3節では人間による環境の認知および評価から調査地点の特性は握を試みたが、それではこのような認知および評価は属性によって変わるものであろうか。本節では住居の所在地、性別、年齢、霞ヶ浦との接触頻度、活動経験の五つの属性による認知および評価の違いに検討を加えた。

4.1 霞ヶ浦とのかかわりによる違い

まず、調査対象地域とのかかわり方が評価および認知に及ぼす影響を見るために、沿岸住民と筑波大学生間での認知および評価結果の比較を試みる。まず評価項目では、土浦港に対し沿岸住民がいずれの項目に対しても学生よりもよい評価を与えている。逆に、学生は石田、八木、浜、高須などでは水遊び、散歩、ボート遊びあるいは住む場所として沿岸住民に比べて相対的によい評価を与えている。このことから学生はより田園的な場所を好み、逆に沿岸住民は都会的な場所を好むとも言えるかも知れない。

一方、認知項目の中で顕著な差を示すものはアオコである。どの地点についても沿岸住民は約半数が少しあると認知しているのに対し、筑波大学生の方ではないと認知しているものが大部分である。これは学生がアオコを見たことがないことによるものか、あるいは沿岸住民が霞ヶ浦にはアオコが多いとの固定観念を持っているためではないかと考えられる。また、水草についても全体に住民の方が多いと認知する比率が高い。逆に水辺までの行きやすさは学生の方が行きやすいと認知するものが多い。堤防については崎浜を除いて学生の方がないと認知する傾向が強い。

4.2 男女の違い

次に男女による違いを見ると、評価項目では水遊びを除いて他の項目はいずれも男性の方が女性に比べて悪い評価を与える傾向にあり、特に八田および高須でその差が顕著である。

一方、認知項目では廃船および堤防の認知に差が見られる。廃船については男性の方が認知の度合いが高い。また堤防については女性の方が男性に比べて、堤防が低いあるいはないと認知する傾向が強い。

4.3 年齢による違い

沿岸住民と学生との差の原因がその年齢の差にあるのではないかという疑問に答えるために、沿岸住民を対象として25才を境にして年齢による差を見た。評価項目ではボート遊びを除く他の項目について、25才以上の人が若い人に比べて相対的によい評価を与えている。場所的にみると浜についての25才以上の人の評価が悪い。

認知項目ではアオコ、水草および水鳥については25才未満の人はないあるいは少ないと認知する傾向にある。また堤防についても堤防が低いあるいはないと認知しているものが多い。水の濁りにつ

ては25才以上の人が濁っていないと認知する傾向にある。その他の項目については系統だった傾向は見られなかった。この年齢による違いは、上述した住民と学生との差とは一致する点が多いが、いくらか違いも見られる。それゆえ、先の住民と学生との差は年齢差によるものだけではないと言えるであろう。

4.4 霞ヶ浦との接触頻度による違い

次に霞ヶ浦との接触頻度の違いの影響は、アオコの認知に顕著に現れている。接触頻度が高いほどアオコおよび水草を認知するものの比率が高くなる。この傾向は上述した沿岸住民と学生間の認知の差と同じ傾向にある。またこれほど顕著ではないが水辺までの行きやすさ、堤防および水草についても住民と学生の比較と同じ傾向を示している。沿岸住民と学生間の認知の差は霞ヶ浦との接触の差がその大きな要因となっているものと考えてよいだろう。一方、評価項目については接触頻度と顕著な関係を持つものは見られなかった。

4.5 活動経験による違い

次に各活動の経験の有無と評価との関連を検討した。今回は釣りと散歩について経験の有無を調べたが、釣り、散歩ともにそれぞれの経験を有するものが、それぞれの活動に対して各地点が適しているとの評価を下す傾向が強いようである。しかし大きな差は見られない。

5. 評価と認知の関連

人間が具体的な活動を念頭において環境を評価する場合に、環境の状態に対する認知がどのようにその評価に影響を及ぼすかを知ることが、人間をセンサーとして環境の評価を行う上で重要である。ここでは表1および表2に示した各地点に対する各評価および認知項目のポイントを用いて、10地点をサンプルとして各項目間の相関係数を求めた。その結果を表3に示す。各認知および評価に点数を与えた時に、各認知および評価の間の距離を等距離に仮定した影響が出る可能性があるため、属性によって分けたグループについても同様の相関係数を求め、各グループで共通して相関の高いものを拾い出すことにした。

評価項目間の相関係数は全体に高い値を示している。住む環境として適していると評価されている地点は景色を見る以外のどの活動にも適しているとの評価が与えられている。しかし景色をみるや散歩など住む環境と関連の深そうに思える項目よりもボート遊びおよび釣りの方が住む環境と特に高い相関を示している。その他の活動に関する評価項目間で相関の特に高いものとして、水遊び—景色を見る、釣り—散歩の組合せがあげられる。

認知項目間では、走り回る場所がいくつかの項目とよい相関を示している。水草がなければ、走り回る場所があり、水辺へ行きやすいのは当然であるが、走り回る場所と濁りの間の相関の高いことは直接的な意味はないと思われる。その他に相関の高い組合せとしては、アオコ—ごみ、水草—ごみ、ア

表3 認知、評価項目ポイント間の相関

	廃船	ごみ	アオコ	濁り	水草	水辺への行き易さ	堤防	走り回る場所	水鳥	水遊び	ボート・ヨット	釣り	散歩	景観	住む
廃船	1.00	0.32	0.37	0.68	0.15	0.53	-0.62	0.36	0.25	0.48	0.58	0.80	0.57	0.69	0.65
ごみ	0.32	1.00	0.91	0.11	0.71	0.55	-0.63	0.56	0.51	0.14	0.34	0.77	0.74	0.36	0.46
アオコ	0.37	0.91	1.00	0.25	0.69	0.76	-0.61	0.60	0.63	0.31	0.54	0.79	0.70	0.33	0.57
濁り	0.68	0.11	0.25	1.00	0.30	0.68	-0.11	0.64	0.42	0.65	0.85	0.54	0.51	0.56	0.86
水草	0.15	0.71	0.69	0.30	1.00	0.60	-0.38	0.75	0.50	-0.11	0.53	0.55	0.71	-0.10	0.53
水辺への行き易さ	0.53	0.55	0.76	0.68	0.60	1.00	-0.48	0.79	0.75	0.63	0.91	0.75	0.70	0.41	0.82
堤防	-0.62	-0.63	-0.61	-0.11	-0.38	-0.48	1.00	-0.17	-0.32	-0.03	-0.33	-0.79	-0.64	-0.42	-0.23
走り回る場所	0.35	0.56	0.60	0.64	0.75	0.79	-0.17	1.00	0.62	0.48	0.75	0.59	0.74	0.20	0.86
水鳥	0.25	0.51	0.63	0.42	0.50	0.75	-0.32	0.62	1.00	0.38	0.65	0.60	0.39	0.25	0.69
水遊び	0.48	0.14	0.31	0.65	-0.11	0.63	-0.03	0.48	0.38	1.00	0.58	0.38	0.36	0.70	0.64
ボート・ヨット	0.58	0.34	0.54	0.85	0.53	0.91	-0.33	0.75	0.65	0.58	1.00	0.69	0.57	0.40	0.88
釣り	0.80	0.77	0.79	0.54	0.55	0.75	-0.79	0.59	0.60	0.38	0.69	1.00	0.74	0.60	0.74
散歩	0.57	0.74	0.70	0.51	0.71	0.70	-0.64	0.74	0.39	0.36	0.57	0.74	1.00	0.48	0.61
景観	0.69	0.36	0.33	0.56	-0.10	0.41	-0.42	0.20	0.25	0.70	0.40	0.60	0.48	1.00	0.48
住む	0.65	0.46	0.57	0.86	0.53	0.82	-0.23	0.86	0.69	0.64	0.88	0.74	0.61	0.48	1.00

オコ-水辺の行きやすさ、廃船-濁りがあげられる。

次に評価項目に対する認知項目の影響を見ると、まず住む環境としての評価は走り回る場所および水辺への行きやすさとの相関が高い。これは住む場所としては周囲がいくらか開けているのを望んでいることを示すものと考えられる。

次にボート遊びの場としての評価は、水辺へ行きやすく、走り回る場所があるほどよくなっている。水辺まで行くことがボート遊びにとって必須の条件である以上、当然の結果と考えられる。また、ボート遊びをする時の水の状態、すなわち濁りも評価に効いているようである。

釣りの場合には堤防との相関が高い。釣りをを行う場として堤防が重要な意味を持つのであろう。この他には、廃船あるいはごみとの相関が比較的高い。

散歩には、散歩する場所としての子供の走り回る場所、それとの関連での水草、およびごみが効いている。

景色を見る場としての評価とは廃船および濁りが相関が高いが、景色を見る場合に水の濁りが大きな意味を持っているのであろうか。

水遊びの場としては全体に評価が悪いために相関の高い項目は少ないが、水の濁りと相関が高い。この他、水辺への行きやすさともいくらか相関を持っている。

6. まとめ

本調査は計測機器によってではなく、人間によって環境の状態を認知し、さらに評価しようとした

ものである。第1回調査とは異なり、具体的な活動項目についてその場の評価を行った。

その結果に基づいて調査対象地点の特性づけができた。すなわち、水辺へ行きやすく、水もきれいであると認知された歩崎がほとどの活動についてもよい評価を得た。逆にごみが多く、水が濁っていると認知された下高崎は悪い評価を得た。

また、属性による認知および評価の変化について検討を加えた結果、1)アオコについて住民と霞ヶ浦から離れた地区に住む学生の間では認知の差が大きいこと、2)男性の方が女性と比べて活動の場として考えた場合、概して悪い評価を与える傾向にあること、3)活動経験の有無は評価に大きな影響は与えないことなどが明らかになった。

さらに認知と評価の関連では、水辺への行きやすさ、走り回る場所の存在が多くの活動の評価と関連が深いことが明らかにされた。

7. おわりに

具体的な活動を評価項目として調査を行い、上に述べたような知見が得られたが、調査当日は冷たい季節風が強かったため、十分な認知および評価がなされたかどうか疑問がある。そこで本調査で得られた結果の確認、季節の差による影響の把握、あるいはさらに多くの認知項目と評価との関連分析を目的として、第3回臨場意識調査を実施した。その結果については次の機会に報告することとする。

資 料 編

Data

霞ヶ浦全域調査データ
(研究代表者) 合田 健¹

Limnological Data in Lake Kasumigaura

Takeshi GODA, project coordinator¹

1. 測定地点

本プロジェクト研究の一環として、1976年7月以後、霞ヶ浦の調査研究を行ってきているが、1977年3月までの調査結果についてはすでに報告(相崎, 1977)したので、それ以後の調査結果を報告する。調査は1977年5月から1978年4月までは霞ヶ浦全域の12地点、それ以後は高浜入を中心として、湖心、土浦沖を含む6地点で行った(図1)。調査水域の概要はすでに報告(合田, 1977)してあるの

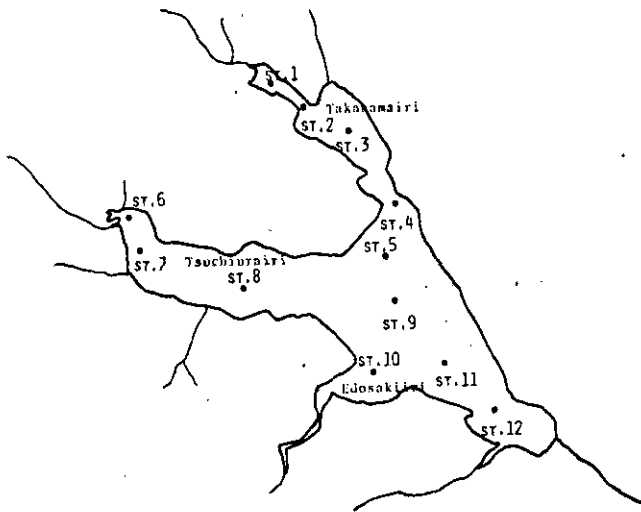


図1 調査地点

Fig.1 Sampling site in Lake Kasumigaura

で、調査地点の説明のみを以下に述べる。

高浜入には4地点を設け、湾奥からSt. 1, 2, 3, 4とした。この調査地点は前報で報告した調査

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 300-21 茨城県筑波郡谷田部町
Water and Soil Environment Division, The National Institute for Environmental studies, P.O. Yatabe,
Ibaraki 300-21, Japan.

地点のSt. 5, 6, 8, 9に相当する。この4地点は1978年4月以後も引続き調査を行っている。土浦入には3地点を設け、湾奥からそれぞれSt. 6, 7, 8,とした。このうちSt. 6は土浦港沖にあり1978年4月以後も引続き調査を行っている。この水域は砂利採取のためのしゅんせつ(浚渫)が非常に盛んであり、通常の水深は2m程度であるが、時折水深10~12mに及ぶ穴が観測された。そのような場所で観測を行った場合には7mまでのデータを記載し、それ以深のデータはあまり変化がみられなかったので省略した。St. 7は土浦水道の取水口の近くに、またSt. 8は木原沖に設けた。江戸崎入には湾口にSt. 10を設けた。湖心部は、志戸崎沖にSt. 5を、湖心にSt. 9を、西の州沖にSt. 11を設けた。なおSt. 5は前報のSt. 10に相当する。流出部には麻生沖にSt. 12を設けた。湖心部のSt. 9は1978年4月以後も引続き調査を行っている。

2. 調査方法

調査方法は各種栄養塩類の分析方法が大きく変わった他は前報に報告した方法(相崎, 1977)と同様である。各種栄養塩類のうち PO_4 -P(無機態リン)(Murphy and Riley, 1962), T. P.(全リン酸)(Armstrong, et al., 1966; Menzel and Corwin, 1965), NH_4 -N(アンモニア態窒素)(Technicon Method, 1977), NO_2 -N(亜硝酸態窒素)(Bendschneider and Robinson, 1952), NO_3 -N(硝酸態窒素)(Bendschneider and Robinson, 1952; Otsuki, 1978; Technicon Method, 1977)についてはオートアナライザー(Technicon社)を用いて測定した。測定方法の概要については図2に示す。

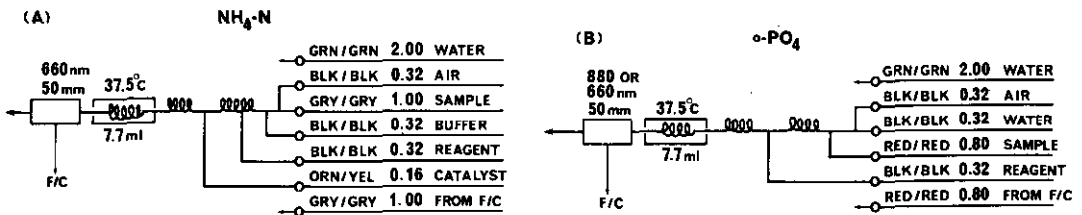


図2 アンモニア(A)およびオルソリン酸(B)の分析システム
(数字はml/minの流量を示す。)

Fig. 2. Manifolds of ammonia (A) and orthophosphate (B)
(Figures signify flow rates in ml/min)

3. 作業分担

採水および現地調査項目は須藤, 相崎, 津野, 岡田, 細見, 福島, 矢木, 内藤(以上水質土壌環境部), 大槻, 河合(以上計測技術部), 安野, 森下, 岩熊(以上生物環境部), 白井(環境情報部), 北島, (総合解析部)および菅谷(技術部)の16名が主に担当した。

採取した試水の分析は以下のごとく分担して行った。

PO_4 -P, T. P., NH_4 -N, NO_2 -N, NO_3 -N: 大槻

CO₂: 河合

DOC: 横内, 安部, 河合 (以上計測技術部)

COD: 田井, 福島 (以上水質土壤環境部)

クロロフィル_a, フェオフィチン_a: 相崎, 岩熊

S. S., POC, PON: 相崎, 福島

生菌数, 全菌数: 相崎

一次生産量, 呼吸量: 相崎, 岩熊

データの整理および保管: 白井

4. 結果

得られた結果を以下の表に示す。

引用文献

- 相崎守弘 (1977): 水質・生物調査資料. 国立公害研究所 特別研究成果報告, 第1号, 資料篇, 1~28.
- Armstrong, F. A. J., P. M. Williams and J. D. H. Strickland (1966): Photo-oxidation of organic matter in sea water by ultra-violet radiation, analytical and other applications. *Nature*, **211**, 481-483.
- Bendschneider, K. and R. J. Robinson (1952): A new spectrophotometric determination of nitrate in sea water. *J. Mar. Res.*, **11**, 87-96.
- 合田健 (1977): 昭和51年度研究を終って今後の展望など. 国立公害研究所 特別研究成果報告, 第1号, 139-147.
- Menzel, D. W. and N. Corwin (1965): The measurement of total phosphorus in sea water based on the liberation of organically bound fraction by persulfate oxidation. *Limnol. Oceanogr.*, **10**, 280-282.
- Murphy, J. and J. P. Riley (1962): A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem. Acta*, **27**, 31-36.
- Otsuki, A (1978): A reactivation solution for a copperized cadmium column in the automatic determination of nitrate in natural waters. *Anal. Chem. Acta*, **99**, 375-377.
- Technicon Method (1977): No. 337-74W/B* modified by A. Otsuki.
- Wood, E. D., F. A. J. Armstrong and F. A. Richards (1967): Determination of nitrate in sea water by Cadmium-Copper reduction to nitrite. *J. Mar. Biol. Ass. U. K.*, **47**, 23-31.

Limnological Data in Kasumigaura 1

Date 1977. 4. 18

Item	Station No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Sampling Time (J.S.T.)	1140 - 1215 -											
Weather	薄曇り 薄曇り												
Wind (direct., force)	W, 4 W, 5												
Air Temp. (°C)	21.5 20.9												
Air Humid. (R.H.%)	67 67												
Depth (m)	2.5 3.2												
Transparency (cm)													
Transparency * (cm)	0.5m												
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
Water Temp. (°C)	0 m	19.3	17.8										
	0.5	19.3	17.8										
	1	19.2	17.8										
	2	19.1	17.8										
	3		17.2										
	4												
	5												
	7												
Bottom	18.2												
D.O. (mg/l)	0 m	11.0	9.4										
	0.5	11.2	9.6										
	1	10.3	9.5										
	2	11.0	9.7										
	3		3.5										
	4												
	5												
	7												
Bottom	10.0												
Light Intensity (lx)	0 m	60,000	80,000										
	0.5	10,000	18,000										
	1	2,500	6,000										
	2	100	700										
	3												
	4												
	5												
	7												
Bottom		0											
Conductivity (μS/cm)	0 m												
	0.5												
	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
Bottom													
pH	0.5m												
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												

Limnological Data in Kasumigaura 2

Date 1977.4.18

Item	Station No.		3		4			5	6	7	
	1	2	0.5	3	0.5	2	6	0.5	0.5	0.5	2
Sampling Depth (m)	0.5	0.5	0.5	3	0.5	2	6	0.5	0.5	0.5	2
PO ₄ -P (mg/l)											
T.P (mg/l)											
NH ₄ -N (mg/l)											
NO ₂ -N (mg/l)											
NO ₃ -N (mg/l)											
CO ₂ -C (mg/l)											
DOC (mg/l)	3.3	3.9									
COD (mg/l)											
Chlorophyll a (μg/l)											
Pheophytin a (μg/l)											
S.S.(dry weight) (mg/l)	11.2	13.1									
POC (mg/l)	3.0	4.1									
PON (mg/l)	0.56	0.64									
Total Hetero. Bac. (No./ml)											
Total Bac. (No./ml)											
Gross Production (mgO ₂ /l/d)											
Net Production (mgO ₂ /l/d)											
Respiration (mgO ₂ /l/d)											

Item	Station No.		9			10		11		12
	8	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5
Sampling Depth (m)	0.5	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5
PO ₄ -P (mg/l)										
T.P (mg/l)										
NH ₄ -N (mg/l)										
NO ₂ -N (mg/l)										
NO ₃ -N (mg/l)										
CO ₂ -C (mg/l)										
DOC (mg/l)						3.1				
COD (mg/l)										
Chlorophyll a (μg/l)										
Pheophytin a (μg/l)										
S.S.(dry weight) (mg/l)						23.1				
POC (mg/l)						2.7				
PON (mg/l)						0.40				
Total Hetero. Bac. (No./ml)										
Total Bac. (No./ml)										
Gross Production (mgO ₂ /l/d)										
Net Production (mgO ₂ /l/d)										
Respiration (mgO ₂ /l/d)										

Limnological Data in Kasumigaura 1

Date 1977.5.17

Item \ Station No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Sampling Time (J.S.T.)	1000-	1040-	1105-	1145-	1245-	1325-	1300-	1225-	1125-	0947-	1017-	1047-	
Weather	快晴	快晴	快晴	快晴	快晴	晴	快晴	快晴	快晴	快晴	快晴	快晴	
Wind (direct., force)	N, 1	N, 2	NNW, 2	NNW, 2	SW, 1								
Air Temp. (°C)	17.2	18.9	19.7	20.3	20.2	25	23.5	21.5	22.5	23.8		24	
Air Humid. (R.H. %)	45	37	44	37	40								
Depth (m)	2.3	3.7	4.0	6.8	6.2	9.3	3	5	6	5	5.5	4.5	
Transparency (cm)	25	25	55	70	80	37	55	110	160	80	85	80	
Transparency* (cm)	0.5m	9.5	8	19	30	29	13.8	14.4	24.5	35.8	16.5	25.5	25.7
	2				25			12.2		30.5			
	3			21									
	4								27.8		17.0	20.9	
	5												
	6				25								
	Bottom												
Water Temp. (°C)	0 m	17.9	18.1	19.4	20.1	20.3	20.3	21.7	20.2	20.4	19.3	20.0	20.8
	0.5	17.8	18.1	19.4	20.1	20.2	20.3	21.1	20.2	20.4	18.9	19.7	19.0
	1	17.7	18.0	19.2	20.0	20.1	20.2	18.7	20.0	20.1	18.7	18.9	18.4
	2	17.2	17.7	18.6	19.8	19.9	18.8	18.1	19.4	18.7	18.6	18.4	18.1
	3		17.1	18.4	19.0	18.8	18.6	17.7	19.3	18.6	18.5	18.3	17.8
	4			18.4	19.0	18.6	18.4		19.1	18.5	18.3	18.3	17.4
	5				19.0	18.5	18.2		18.9	18.4	17.5	18.3	
	6				18.8	18.5	18.1		17.9	18.4			
Bottom	17.3	17.1		18.6	18.5		17.7	18.8	18.4	18	18.3	17.4	
D.O. (mg/l)	0 m						6.4	8.5	8.5	8.3	8.0	8.1	7.7
	0.5							8.4		7.4			
	1												
	2												
	3								8.2		8.0	7.7	
	4												
	5									8.8			
	6												
Bottom													
Light Intensity (lx)	0 m	80,000	75,000	80,000	70,000	80,000							
	0.5	7,000	3,500	30,000	40,000	45,000							
	1	160	100	7,500	15,000	20,000							
	2	2	10	550	4,000	7,000							
	3			30	700	2,000							
	4			5	160	750							
	5				35	300							
	6				9	90							
Bottom				3									
Conductivity (μS/cm)	0 m												
	0.5												
	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
Bottom													
pH	0.5m	6.6	6.6	7.0	7.2	7.2	7.5	8.4	8.0	8.0	8.0	8.0	8.1
	2				7.0			7.7		7.9			
	3			7.0									
	4								7.7				
	5												
	6				6.9								
	Bottom												

Limnological Data in Kasumigaura 2

Date 1977.5.17

Item	Station No.	1		2		3		4		5	6	7	
	(m)	0.5	0.5	0.5	0.5	3	0.5	2	6	0.5	0.5	0.5	2
PO ₄ -P (mg/l)		0.029	0.025	0.025	0.025	0.025	0.038	0.019	0.017	0.018	0.030	0.023	
T.P (mg/l)		0.083	0.093	0.053	0.072	0.091	0.063	0.059	0.056	0.094	0.083		
NH ₄ -N (mg/l)		0.08	0.09	0.02	0.03	0.01>	0.02	0.01>	0.01>	0.08	0.03		
NO ₂ -N (mg/l)		0.030	0.026	0.013	0.013	0.004	0.005	0.002>	0.002>	0.031	0.016		
NO ₃ -N (mg/l)		2.84	1.05	0.252	0.946	0.054	0.073	0.046	0.010	0.669	0.257		
CO ₂ -C (mg/l)		4.1	5.3	8.4		9.2	8.9	9.8	9.0	8.8	8.5		
DOC (mg/l)		4.5	3.3	3.5		3.8	3.3	3.6	4.1	4.1	3.6		
COD (mg/l)		7.4	6.6	4.6	4.6	4.7	5.0	3.4	4.8		5.2		
Chlorophyll a (μg/l)		9	19	26	23	35	25	22	28	30	33		
Pheophytin a (μg/l)		14.0	6.3	5.6	3.9	6.3	3.0	5.3	2.3	9.8	3.3		
S.S.(dry weight) (mg/l)		22.9	27.7	8.2	7.3	7.1	6.6	5.2	5.4	30.9	28.3		
POC (mg/l)		1.5	1.9	1.3	1.3	2.0	1.4	1.3	1.9	2.4	3.2		
PON (mg/l)		0.24	0.31	0.26	0.26	0.35	0.29	0.24	0.30	0.36	0.47		
Total Hetero. Bac.(No./ml)		1.8×10 ⁵	1.3×10 ⁵	2.5×10 ⁴		6.4×10 ⁴	1.6×10 ⁴	4.8×10 ⁵	2.3×10 ⁵	7.6×10 ⁴	3.0×10 ⁴		
Total Bac. (No./ml)		9.0×10 ⁶	1.0×10 ⁷	7.5×10 ⁶	7.7×10 ⁶	6.3×10 ⁶	5.6×10 ⁶	6.5×10 ⁶	5.0×10 ⁶	1.0×10 ⁷	1.3×10 ⁷		
Gross Production (mgO ₂ /l/d)		2.5	4.3	4.6		4.6					6.0		
Net Production (mgO ₂ /l/d)		1.6	3.8	3.5		3.4					4.5		
Respiration (mgO ₂ /l/d)		0.9	0.6	1.0		1.2					1.5		

Item	Station No.	8		9			10		11		12
	(m)	0.5	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5
PO ₄ -P (mg/l)		0.015		0.010			0.021		0.011		0.011
T.P (mg/l)		0.047		0.041							
NH ₄ -N (mg/l)		0.01>		0.01>			0.01>		0.01>	0.01>	0.01>
NO ₂ -N (mg/l)		0.002>		0.002>			0.002>		0.002>	0.002>	0.002>
NO ₃ -N (mg/l)		0.042		0.002			0.024		0.010	0.021	0.009
CO ₂ -C (mg/l)		9.2		9.3	9.2	9.8	9.8	9.7	9.4		9.6
DOC (mg/l)		4.2		4.3			3.4		3.6		
COD (mg/l)		4.4					4.4		5.4	4.2	
Chlorophyll a (μg/l)		20.0		12.0			20.0		22.0	22.0	18.0
Pheophytin a (μg/l)		13.0		0			3.4		3.8	1.1	1.8
S.S.(dry weight) (mg/l)		12.0		7.4			12.0		9.9	10.5	11.4
POC (mg/l)		2.0		1.6			1.8		1.6	1.6	1.6
PON (mg/l)		0.33		0.24			0.31		0.27	0.29	0.28
Total Hetero. Bac.(No./ml)		3.8×10 ³		2.6×10 ³					6.9×10 ³		2.1×10 ³
Total Bac. (No./ml)		7.5×10 ⁶		5.3×10 ⁶			5.6×10 ⁶		5.8×10 ⁶		6.0×10 ⁶
Gross Production (mgO ₂ /l/d)				1.3							2.1
Net Production (mgO ₂ /l/d)				0.9							1.6
Respiration (mgO ₂ /l/d)				0.4							0.5

Limnological Data in Kasumigaura 1

Date 1977.6.29

Item \ Station No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sampling Time (J.S.T.)	1015-	1100-	1140-	1230-	1330-							
Weather	くもり	くもり	晴	くもり	晴							
Wind (direct., force)	ESE,2	E, 3	E, 2	ESE,2	E, 3							
Air Temp. (°C)	23.4	24.1	23.9	24.7	23.6							
Air Humid. (R.H. %)	81	77	85	76	82							
Depth (m)	2	3.2	3.8	6.9	5.2							
Transparency (cm)	100	100	110	110	150							
Transparency* (cm)	0.5m											
	2											
	3											
	4											
	5											
	6											
Water Temp. (°C)	0 m	23.4	23.4	22.2	21.9	21.8						
	0.5	23.3	23.4	22.2	21.9	21.8						
	1	23.3	23.4	22.2	21.9	21.8						
	2	22.6	23.4	22.0	21.8	21.8						
	3		21.4	22.0	21.8	21.7						
	4				21.0	21.7						
	5				20.4	21.4						
	6				19.8							
7												
Bottom		21.0	20.0	19.6	21.2							
D.O. (mg/l)	0 m	9.2	9.2	8.4	7.8	7.8						
	0.5	9.2	9.1	8.4	7.8	7.8	9.0	10.6	9.8	9.6		9.4
	1	9.2	9.3	8.4	7.8	8.0						
	2	6.9	9.6	8.6	7.8	8.0		10.9		9.6		
	3		6.7	8.6	7.6	7.9						
	4				5.4	7.8			8.8			
	5				4.4	7.8				8.0		
	6				2.9							
7												
Bottom		3.4	1.6	1.9	7.4							
Light Intensity (lx)	0 m	40,000	20,000	65,000	135,000	84,000						
	0.5	7,500	6,500	36,000	16,000	41,000						
	1	2,200	2,500	12,000	6,600	12,000						
	2	280	450	2,600	1,800	5,300						
	3		45	750	510	3,100						
	4				140							
	5				28							
	6											
7												
Bottom		10	0									
Conductivity (μS/cm)	0 m	17.5	17.3	25.1	31.0	33.8						
	0.5	17.7	20.3	25.1	31.0	33.8						
	1	17.9	20.6	25.1	31.0	33.8						
	2	17.9	20.6	25.3	30.8	33.8						
	3		18.5	25.1	30.8							
	4				31.3							
	5				31.3							
	6				32.0							
7				32.0								
Bottom			28.7	33.2	33.8							
pH	0.5m	7.5	7.9	8.1	8.0	8.0						
	2				7.8							
	3			8.1								
	4											
	5											
	6				7.0							

Limnological Data in Kasumigaura 2

Date 1977. 6. 29

Station No.		1		2		3		4		5	6	7	
Item	(m)	0.5	0.5	0.5	3	0.5	2	6	0.5	0.5	0.5	2	
PO ₄ -P	(mg/l)	0.023	0.023	0.013	0.018	0.013	0.016	0.023	0.011	0.027	0.014	0.022	
T.P	(mg/l)	0.087	0.087	0.066	0.068	0.059	0.061	0.074	0.047	0.080	0.072	0.073	
NH ₄ -N	(mg/l)	0.01>	0.01>	0.01>	0.01>	0.01>	0.01>	0.02	0.01>	0.05	0.01>	0.01>	
NO ₂ -N	(mg/l)	0.037	0.030	0.002>	0.003	0.002>	0.002>	0.002>	0.002>	0.058	0.009	0.017	
NO ₃ -N	(mg/l)	0.558	0.355	0.013	0.022	0.003>	0.003>	0.003>	0.003>	0.502	1.20	0.218	
CO ₂ -C	(mg/l)	7.2	7.5	7.9		8.7	9.1	11.4	9.4	10.8	8.8		
DOC	(mg/l)	3.9	4.4	4.1		4.0	4.0	4.0	3.8	3.8	4.6		
COD	(mg/l)	5.0	5.7	6.7	6.3	6.9	6.8	5.3	5.7	4.8	6.0		
Chlorophyll a	(μg/l)	70	62	43	45	35	35	36	22	48	48	59	
Pheophytin a	(μg/l)	7.8	7.6	0.6	0.1	4.9	6.4	7.6	7.5	9.0	6.3	8.5	
S.S.(dry weight)	(mg/l)	13.6	12.0	10.9	10.7	10.7	10.5	9.7	8.5	18.8	20.0	20.0	
POC	(mg/l)	3.2	3.4	3.5	3.5	3.6	3.5	2.8	3.1	1.9	3.4	3.2	
PON	(mg/l)	0.52	0.57	0.51	0.52	0.43	0.40	0.44	0.33	0.32	0.48	0.52	
Total Hetero. Bac.	(No./ml)	3.4×10 ⁴	2.5×10 ⁴	2.1×10 ⁴	1.2×10 ⁴	1.5×10 ⁴	1.0×10 ⁴	5.4×10 ³	8.3×10 ³	1.1×10 ⁵	1.5×10 ⁴		
Total Bac.	(No./ml)												
Gross Production	(mgO ₂ /l/d)	6.9	5.9	4.7		3.3					5.3		
Net Production	(mgO ₂ /l/d)	4.7	4.3	3.6		1.9					4.3		
Respiration	(mgO ₂ /l/d)	2.3	1.6	1.1		1.4					1.0		

Station No.		8		9			10		11		12
Item	(m)	0.5	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5
PO ₄ -P	(mg/l)	0.013	0.020	0.009	0.013	0.014			0.014		0.012
T.P	(mg/l)	0.055	0.060	0.048	0.046	0.051			0.048		0.055
NH ₄ -N	(mg/l)	0.01>	0.01>	0.01>	0.01>	0.01>			0.01>		0.01>
NO ₂ -N	(mg/l)	0.002>	0.002>	0.002>	0.002>	0.002>			0.002>		0.002>
NO ₃ -N	(mg/l)	0.013	0.025	0.003>	0.003>	0.003>			0.003>		0.003>
CO ₂ -C	(mg/l)	9.7	10.3	9.6	9.7	10.0			9.9		10.1
DOC	(mg/l)	4.2		4.1					4.3		
COD	(mg/l)	5.9	5.8	4.9	5.3	5.2			5.2		5.5
Chlorophyll a	(μg/l)	27	26	18	17	21			21		24
Pheophytin a	(μg/l)	5.0	0	1.3	0.1	1.1			9.2		38.0
S.S.(dry weight)	(mg/l)	12.6	17.7	9.1	8.4	8.6			9.5		11.3
POC	(mg/l)	3.1	3.3	2.8	2.6	2.6			2.9		3.2
PON	(mg/l)	0.37	0.40	0.29	0.29	0.30			0.43		0.37
Total Hetero. Bac.	(No./ml)	5.7×10 ⁵		4.0×10 ⁵					3.8×10 ⁵		7.7×10 ⁵
Total Bac.	(No./ml)										
Gross Production	(mgO ₂ /l/d)			1.4							1.4
Net Production	(mgO ₂ /l/d)			0.6							0.8
Respiration	(mgO ₂ /l/d)			0.8							0.6

Limnological Data in Kasumigaura 1

Date 1977.7.25

Item	Station No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sampling Time (J.S.T.)		1015-	1040-	1107-	1148-	1237-	1315-	1250-	1210-	1100-	0940-	1000-	1030-
Weather		晴	快晴	晴	晴	晴	晴	曇り	晴	晴	曇り	晴	晴
Wind (direct., force)							SSW,2	S, 2	SSW,2	SSE,1	S, 2	SSW,2	SSE,2
Air Temp. (°C)		29.2	29	29	29	29.5	29.7	29.0	28.6	27.5	26.6	27.7	27.2
Air Humid. (R.H.%)							70	75	70	75	82	75	75
Depth (m)			3.6	4	7	6	2.1	3.2	4.5	6.0	4.9	5.9	4.6
Transparency (cm)		50	75	100	80	100	30	40	50	70	60	80	70
Transparency* (cm)	0.5m	26	31	31	26	30.5	20	19	31	37	29	30	31
	2							16		30			
	3												
	4								27		34	31	
	5									33			
	6												
	Bottom												
Water Temp. (°C)	0 m	28.8	29.2	28.1	28.8	28.4	29.4	29.2	27.7	27.3	26.1	26.6	26.1
	0.5	28.2	29	28.1	28.3	28.2	29.4	29.2	27.7	27.3	26.1	26.6	26.1
	1	28.1	28.8	27.9	28.4	28.1	29.2	28.8	27.5	27.2	25.9	26.4	26.0
	2	27.2	28.5	27.7	28.0	27.6	28.9	28.2	27.0	26.8	25.8	26.3	25.7
	3		28.3	27.5	27.8	27.6		27.9	26.5	26.6	25.8	26.3	25.7
	4				27.7	27.4			26.2	26.6	25.8	26.3	25.6
	5				27.3	27.3				26.6		26.2	
	6				27.1					26.0			
Bottom	26.6	27.6	27.4	26.3	27.1	28.8	27.5	25.9		25.4	25.6	25.1	
D.O. (mg/l)	0 m	11.7	11.3	9.8	11.2	10.9							
	0.5												
	1	12.1	11.6	9.5	11.3	10.1							
	2	4.9	9.8	8.5	10.4	8.0							
	3		8.4	7.6	9.3	7.4							
	4				8.6	7.2							
	5				5.8	6.0							
	6				4.1								
Bottom				0.4	3.9								
Light Intensity (lx)	0 m	20,000	70,000	78,000	72,000	76,000							
	0.5	1,500	22,000	25,000	22,000	20,000							
	1	200	5,500	6,000	7,000	5,500							
	2		500	820	700	800							
	3			150	130	200							
	4				16								
	5												
	6												
Bottom													
Conductivity (μΩ/cm)	0 m												
	0.5												
	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
Bottom													
pH	0.5m	9.2	8.3	7.8	8.1	7.9	8.2	7.6	7.5	7.4	7.4	7.4	7.4
	2				8.0			7.5		7.4			
	3												
	4								7.3		7.2	7.3	
	5									7.3			
	6					7.8							

Limnological Data in Kasumigaura 2

Date 1977.7.25

Item	Station No.	3			4			5	6	7		
		1	2	3	0.5	2	6	0.5	0.5	0.5	2	
Sampling Depth (m)		0.5	0.5	0.5	3	0.5	2	6	0.5	0.5	2	
PO ₄ -P (mg/l)		0.006	0.005	0.017	0.028	0.014	0.016	0.035	0.023	0.010	0.015	0.018
T.P (mg/l)		0.117	0.084	0.127	0.055	0.068	0.062	0.063	0.070	0.101	0.070	0.063
NH ₄ -N (mg/l)		0.01>	0.01>	0.02	0.03	0.02	0.02	0.05	0.02	0.01>	0.02	0.03
NO ₂ -N (mg/l)		0.015	0.024	0.022	0.024	0.015	0.014	0.014	0.008	0.082	0.081	0.084
NO ₃ -N (mg/l)		0.299	0.521	0.160	0.193	0.022	0.019	0.021	0.005	0.290	0.748	0.814
CO ₂ -C (mg/l)		8.4	10.3	11.6		11.3	11.2	12.2	11.3	9.0	10.3	
DOC (mg/l)		5.0	5.9	4.4		5.0	4.5	5.3	4.9	4.7	4.4	
COD (mg/l)		14.4	8.9	9.9	6.3	8.5	8.3	6.3	6.9	9.9	7.8	8.5
Chlorophyll a (μg/l)		124	61	86	29	35	32	22	27	75	25	19
Pheophytin a (μg/l)		3.8	41.5	27.7	26.4	45.0	23.3	12.3	27.3	31.1	25.1	16.4
S.S. (dry weight) (mg/l)		19.7	7.9	14.7	8.2	9.1	8.3	8.0	7.5	21.4	15.3	19.8
POC (mg/l)		7.1	2.7	5.7	2.1	2.7	2.5	2.1	2.5	5.3	2.0	1.8
PON (mg/l)		1.35	0.49	1.04	0.36	0.44	0.41	0.34	0.38	0.95	0.30	0.26
Total Hetero. Bac. (No./ml)		5.7×10 ⁵	1.8×10 ⁵	2.7×10 ⁵		2.7×10 ⁵	3.8×10 ⁵	3.2×10 ⁵	2.0×10 ⁵		8.8×10 ⁵	1.5×10 ⁶
Total Bac. (No./ml)		2.9×10 ⁶	3.0×10 ⁶	3.7×10 ⁶		2.4×10 ⁶	1.6×10 ⁶	2.4×10 ⁶	2.1×10 ⁶		4.3×10 ⁶	4.9×10 ⁶
Gross Production (mgO ₂ /l/d)		11.4	9.6	11.5		8.4					6.2	
Net Production (mgO ₂ /l/d)		8.8	8.1	7.7		6.5					5.2	
Respiration (mgO ₂ /l/d)		2.6	1.5	3.8		2.0					1.0	

Item	Station No.	8			9			10		11		12
		0.5	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5	
Sampling Depth (m)		0.5	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5	
PO ₄ -P (mg/l)		0.012	0.019	0.030	0.029	0.031	0.024		0.025		0.005	
T.P (mg/l)		0.044	0.058	0.049	0.057	0.087	0.067		0.071		0.043	
NH ₄ -N (mg/l)		0.02	0.02	0.04	0.03	0.04	0.033		0.03		0.02	
NO ₂ -N (mg/l)		0.093	0.123	0.017	0.012	0.017	0.014		0.012		0.005	
NO ₃ -N (mg/l)		0.279	0.441	0.009	0.023	0.011	0.011		0.025		0.005	
CO ₂ -C (mg/l)		11.2		12.0	12.2	12.4	12.1		12.0		12.3	
DOC (mg/l)		5.4		4.4			4.0		4.1			
COD (mg/l)		7.6	7.8	8.3	7.6	6.8	7.8	7.9	11.7	11.7	7.7	
Chlorophyll a (μg/l)		14	10	14	17	11	26	12	16	25	12	
Pheophytin a (μg/l)						14.2		10.1				
S.S. (dry weight) (mg/l)		7.3	9.3	7.4	6.3	6.1	8.8	7.0	7.7	7.4	9.0	
POC (mg/l)		1.5	1.3	2.1	1.8	1.5	1.9	1.8	2.2	1.9	2.1	
PON (mg/l)		0.23	0.17	0.30	0.27	0.21	0.22	0.24	0.27	0.26	0.24	
Total Hetero. Bac. (No./ml)				9.8×10 ⁵	3.9×10 ⁵	3.0×10 ⁵	8.9×10 ⁵					
Total Bac. (No./ml)				2.5×10 ⁶	3.7×10 ⁶	3.4×10 ⁶	2.5×10 ⁶					
Gross Production (mgO ₂ /l/d)				6.1								
Net Production (mgO ₂ /l/d)				4.6								
Respiration (mgO ₂ /l/d)				1.5								

Limnological Data in Kasumigaura 1

Date 1977. 8. 25

Item	Station No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	1306-	1245-	1135-	1105-	1030-								
Sampling Time (J.S.T.)													
Weather		<曇り雨	<曇り雨	<曇り雨	<曇り雨	<曇り雨							
Wind (direct., force)													
Air Temp. (°C)		22.0	22.8	21.4	21.4	21.2							
Air Humid. (R.H.%)													
Depth (m)		2.6	4.0	4.8	7.5	6.0							
Transparency (cm)		125	80	80	110	100							
Transparency* (cm)	0.5m												
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
Water Temp. (°C)	0 m	21.2	21.8	22.1	22.3	22.3							
	0.5	21.2	21.8	22.1	22.3	22.3							
	1	21.1	21.8	22.1	22.3	22.3							
	2	21.1	21.6	22.1	22.3	22.3							
	3		21.6	22.1	22.3	22.3							
	4		21.5	22.05	22.3	22.3							
	5				22.4	22.3							
	6				22.4	22.3							
7				22.3									
Bottom	20.9		22.1	22.2									
D.O. (mg/l)	0 m			9.3	8.7								
	0.5			9.3	9.0								
	1			9.5	9.0								
	2			9.5	9.0								
	3			9.3	9.0								
	4			9.2	8.8								
	5				8.7								
	6				8.2								
7				7.7									
Bottom			1.5	0.2									
Light Intensity (lx)	0 m												
	0.5												
	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
7													
Bottom													
Conductivity (μS/cm)	0 m												
	0.5												
	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
6													
Bottom													
pH	0.5m	7.7	8.2	8.6	8.5	8.7							
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												

Limnological Data in Kasumigaura 2

Date 1977.8.25

Station No.		1		2		3		4		5		6		7	
Item	Depth (m)	0.5	0.5	0.5	3	0.5	2	6	0.5	0.5	0.5	2			
PO ₄ -P	(mg/l)														
T.P	(mg/l)														
NH ₄ -N	(mg/l)														
NO ₂ -N	(mg/l)														
NO ₃ -N	(mg/l)														
CO ₂ -C	(mg/l)														
DOC	(mg/l)														
COD	(mg/l)														
Chlorophyll a	(μg/l)	17	55	103		85			58						
Pheophytin a	(μg/l)		15.9	10.9		10.9			9.5						
S.S.(dry weight)	(mg/l)	8.8	16.4	33.7		32.2			28.7						
POC	(mg/l)														
PON	(mg/l)														
Total Hetero. Bac.	(No./ml)														
Total Bac.	(No./ml)														
Gross Production	(mgO ₂ /l/d)														
Net Production	(mgO ₂ /l/d)														
Respiration	(mgO ₂ /l/d)														

Station No.		8		9			10		11		12	
Item	Depth (m)	0.5	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5	
PO ₄ -P	(mg/l)											
T.P	(mg/l)											
NH ₄ -N	(mg/l)											
NO ₂ -N	(mg/l)											
NO ₃ -N	(mg/l)											
CO ₂ -C	(mg/l)											
DOC	(mg/l)											
COD	(mg/l)											
Chlorophyll a	(μg/l)											
Pheophytin a	(μg/l)											
S.S.(dry weight)	(mg/l)											
POC	(mg/l)											
PON	(mg/l)											
Total Hetero. Bac.	(No./ml)											
Total Bac.	(No./ml)											
Gross Production	(mgO ₂ /l/d)											
Net Production	(mgO ₂ /l/d)											
Respiration	(mgO ₂ /l/d)											

Limnological Data in Kasumigaura 1

Date 1977.9.6

Item \ Station No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Sampling Time (J.S.T.)	1030-	1110-	1140-	1225-	1320-	1330-	1305-	1240-	0945-	1140-	1110-	1045-	
Weather	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴	快晴	晴	晴	晴	
Wind (direct., force)						SSW,1	calm	N, 1	calm	calm	calm	calm	
Air Temp. (°C)	29.2	29.3	29.5	30.5	32.5	28.8	28.1	28.0	25.9	26.8	26.8	26.9	
Air Humid. (R.H.%)						66	72	70	80	73	72	71	
Depth (m)	2.0	3.5	4<	6.5	5.8	5.5	3.0	5.5	6.0	5.1	5.2	4.2	
Transparency (cm)	20	30	45	80	100	40	50	85	130	100	160	160	
Transparency* (cm)	0.5m	8	16	22.5	30	36	11	22	33.5	50<	34	50<	50<
	2							14					
	3												
	4												
	5								50				
	6												
	Bottom												
Water Temp. (°C)	0 m	29.8	28.2	27.9	29.6	29.1	28.2	29.6	28.5	27.4	27.9	28.3	27.7
	0.5	26.3	27.4	27.8	28.3	28.8	28.2	29.6	28.4	26.4	27.3	26.7	26.2
	1	25.7	26.5	26.5	26.2	26.9	27.7	27.9	27.1	26.0	26.6	25.0	25.7
	2	24.2	26.1	26.0	25.8	26.4	26.6	26.3	26.2	25.8	26.2	25.7	25.4
	3		25.4	26.0	25.8	26.0	26.1	25.8	26.1	25.7	26.2	25.6	25.2
	4			26.6	26.7	26.9	26.9		26.0	25.7	26.0	25.5	25.0
	5				26.7	26.8	26.3		25.9	25.6	25.3	25.1	
	6				26.6					25.3			
Bottom		23.7	25.5	25.4	25.6	22.6		25.5			25.0	25.0	
D.O. (mg/l)	0 m	15	11	11	9.5	8.6	10<	10<	10<	7.4	10<	8.9	9.4
	0.5	12.3	11	11.3	9.5	8.6	10<	10<	10<	7.4	10<	10<	9.2
	1	8.2	7.5	9.3	7.8	8.5	10<	10<	10<	7.6	10<	10<	8.9
	2	2.4	6.3	7.5	6.7	7.8	8.4	10<	10<	7.9	10<	10<	8.0
	3		3.6	6.4	4.8	6.8	9.4	10<	10<	7.6	10<	9.6	7.9
	4			3.3	4.6	5.8	6.8		10<	7.2	10<	9.1	7.8
	5				4.0	5.0	1.0		9.8	6.8	5.9	6.0	
	6				3.4					4.3			
Bottom		1.8	2.1	0.2	0.5	0.1		7.9				6.7	
Light Intensity (lx)	0 m	70,000	88,000	71,000	86,000	83,000							
	0.5	230	5,000	5,600	16,000	22,000							
	1	5	130	1,300	6,000	11,000							
	2		6	12	85	2,500							
	3				25	800							
	4				5	200							
	5					43							
	Bottom					23							
Conductivity (μΩ/cm)	0 m												
	0.5												
	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
	Bottom												
pH	0.5m	9.6	9.9	9.9	9.7	9.2	9.1	9.8	9.2	8.8	9.1	8.7	8.6
	2							9.5		8.6			
	3				7.6								
	4								8.9			8.3	
	5				7.6					8.5			
	6												

Limnological Data in Kasumigaura 2

Date 1977.9.6

Item	Station No.		3		4			5	6		7	
	1	2	0.5	3	0.5	2	6	0.5	0.5	0.5	2	
Sampling Depth (m)	0.5	0.5	0.5	3	0.5	2	6	0.5	0.5	0.5	2	
PO ₄ -P (mg/l)	0.008	0.006	0.004		0.002	0.002	0.002	0.002	0.016	0.002	0.006	
T.P (mg/l)	0.136	0.130	0.108		0.072			0.042	0.113	0.155		
NH ₄ -N (mg/l)	0.016	0.014	0.023		0.018	0.082	0.102	0.024	0.023	0.034	0.024	
NO ₂ -N (mg/l)	0.018	0.010	0.002		0.002	0.002	0.003	0.003	0.066	0.009	0.020	
NO ₃ -N (mg/l)	0.538	0.257	0.011		0.011	0.011	0.013		0.601	0.058	0.158	
CO ₂ -C (mg/l)	5.2	6.7	5.9		8.3	9.7	11.3	10.5	8.6	6.9	8.5	
DOC (mg/l)	4.7	4.6	4.3		4.2	4.3	4.1	4.0	3.9	4.0		
COD (mg/l)	23.4	11.0	13.4		7.4	5.0	6.5	6.2	11.5	16.1		
Chlorophyll a (μg/l)	131	114	124		67	62	62	33	31	290		
Pheophytin a (μg/l)	10.1				3.4		49.1			49.1		
S.S.(dry weight) (mg/l)	33.7	27.6	29.9		16.1	12.1	14.8	8.1	34.9	49.7		
POC (mg/l)	10.5	9.0	10.4		4.5	2.5	2.8	2.4	8.4	18.2		
PON (mg/l)	1.59	1.42	1.30		0.63	0.44	0.47	0.30	1.39	2.74		
Total Hetero. Bac. (No./ml)	2.6×10 ⁶	8.3×10 ⁵	3.4×10 ⁵		6.6×10 ⁵	3.8×10 ⁵	3.6×10 ⁵	2.4×10 ⁵	2.8×10 ⁵	7.7×10 ⁵	8.4×10 ⁵	
Total Bac. (No./ml)	1.6×10 ⁶	1.6×10 ⁶	2.5×10 ⁶		2.4×10 ⁶	1.4×10 ⁶	1.6×10 ⁶	9.3×10 ⁵	1.7×10 ⁶	2.0×10 ⁶		
Gross Production (mgO ₂ /l/d)	5.9	5.2	8.4		5.3					7.4		
Net Production (mgO ₂ /l/d)	3.2	3.7	5.5		3.4					4.9		
Respiration (mgO ₂ /l/d)	2.7	1.5	2.9		1.9					2.5		

Item	Station No.		9			10		11		12
	8	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5
Sampling Depth (m)	0.5	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5
PO ₄ -P (mg/l)	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002		0.002		0.002
T.P (mg/l)	0.043		0.042			0.038		0.028		0.032
NH ₄ -N (mg/l)	0.036	0.036	0.030	0.030	0.047	0.044		0.036	0.028	0.040
NO ₂ -N (mg/l)	0.002	0.003	0.002	0.003	0.003	0.010		0.003		0.003
NO ₃ -N (mg/l)		0.004				0.112				
CO ₂ -C (mg/l)	9.0		10.8			9.9		10.8		11.4
DOC (mg/l)	3.9		4.1			3.7		3.9		
COD (mg/l)	4.5		4.0	4.6	5.1	4.5		3.1	4.1	3.7
Chlorophyll a (μg/l)	29		22	47	47	47		15	37	15
Pheophytin a (μg/l)	23.2		14.8					4.2		0.7
S.S.(dry weight) (mg/l)	10.6		5.6	9.7	8.7	9.5		5.8	8.8	5.2
POC (mg/l)	2.7		1.8	2.7	2.0	2.3		1.5	1.7	1.2
PON (mg/l)	0.38		0.25	0.36	0.31	0.31		0.19	0.20	0.13
Total Hetero. Bac. (No./ml)	2 × 10 ⁵		1.8×10 ⁵	2.4×10 ⁵	1.1×10 ⁵	2.0×10 ⁵		6 × 10 ²		1.6×10 ⁵
Total Bac. (No./ml)	1.3×10 ⁶		1.3×10 ⁶	2.1×10 ⁶	3.2×10 ⁶	2.1×10 ⁶		1.5×10 ⁶		2.3×10 ⁶
Gross Production (mgO ₂ /l/d)			2.8							1.6
Net Production (mgO ₂ /l/d)			1.8							0.6
Respiration (mgO ₂ /l/d)			1.0							1.0

Limnological Data in Kasumigaura 1

Date 1977.10.5

Item	Station No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sampling Time (J.S.T.)		1030 -	1100 -	1130 -	1220 -	1330 -	1250 -	1230 -	1158 -	1101 -	0945 -	1005 -	1034 -
Weather		晴	晴	晴	晴	晴	快晴	快晴	快晴	快晴	快晴	快晴	快晴
Wind (direct., force)							NNW, 1	NW, 2	NW, 2	NW, 1	N, 1	NW, 1	NW, 2
Air Temp. (°C)		23.7	25.5	25.5	26.5	27.8	23.9	23.8	22.8	21.2	20.9	21.8	21.8
Air Humid. (R.H.%)											65	66	67
Depth (m)		2.0	3.6	4.1	6.8	5.9	8.5	2.9	4.9	6.0	5.0	5.3	4.2
Transparency (cm)		60	80	60	90	70	90	60	90	125	75	110	110
Transparency * (cm)	0.5m	28.5	31	29	33	36							
	2				30								
	3												
	4												
	5												
	6					22.5							
	Bottom												
Water Temp. (°C)	0 m	19.8	21.0	22.0	21.5	23.7	21.4	22.1	22.0	21.7	21.4	21.5	21.4
	0.5	19.7	20.8	21.9	21.4	23.2	21.3	22.1	22.0	21.7	21.3	21.5	21.4
	1	19.2	20.7	21.4	21.4	22.5	21.2	20.9	22.0	21.7	20.8	21.3	21.5
	2	18.1	20.2	21.0	21.1	21.1	20.7	20.7	21.2	21.1	20.7	21.1	21.0
	3		20.0	20.8	20.9	20.8	20.3		20.9	21.1	20.6	21.0	20.6
	4			20.7	20.9	20.7	19.9		20.8	21.1	20.5	21.0	20.4
	5				20.8	20.7	19.4			21.0	20.5	21.0	
	6				20.8		19.2						
7						19.1							
Bottom		20.1	20.7	20.8	21.1		20.7	20.8	21.0		21.0	20.4	
D.O. (mg/l)	0 m	8.0	8.8	10.05	8.8	13.5	5.9	10.1	8.6	8.5	8.3	8.0	7.9
	0.5	7.5	8.8	10.05	9.0	14.0	5.9	10.1	8.6	8.4	8.2	8.0	7.9
	1	7.5	8.7	10.05	8.9	14.0	5.8	8.7	8.6	8.4	7.7	7.9	7.9
	2	7.1	8.4	10.05	8.2	10.5	5.6	7.5	8.3	7.8	7.2	7.6	7.5
	3		7.8	7.8	7.3	10.0	5.4	7.0	7.5	7.4	7.0	7.4	7.5
	4			7.5	7.1	9.3	5.4		7.2	7.3	6.8	7.2	7.1
	5				6.8	8.4	5.3			7.1	6.5	6.9	6.7
	6				6.6		5.4						
7						5.4							
Bottom		7.1	5.1	3.5	7.5			6.8	6.9		6.6	6.7	
Light Intensity (lx)	0 m	80,000	74,000	80,000	70,000	52,000							
	0.5	15,000	3,200	7,500	15,000	7,200							
	1	3,000	1,100	1,100	3,500	1,300							
	2	200	160	110	350	150							
	3		90	25	120	100							
	4				70								
	5												
	6												
7													
Bottom													
Conductivity (μS/cm)	0 m												
	0.5												
	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
6													
Bottom													
pH	0.5m	7.6	7.7	8.9	8.6	9.0	7.3	9.8	9.4	8.8	8.4	8.3	8.0
	2				8.4			9.5		8.6			
	3												
	4								8.9			8.2	
	5									8.3			
	6				8.1								

Limnological Data in Kasumigaura 2

Date 1977. 10. 5

Item	Station No.		1		2		3		4		5		6		7	
	Sampling	Depth (m)	0.5	0.5	0.5	3	0.5	2	6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	2	
PO ₄ -P (mg/l)			0.020	0.007	0.003	0.003	0.002	>0.002	>0.002	>0.002	>0.002	0.039	0.004	0.002		
T.P (mg/l)			0.097	0.084	0.091		0.094			0.094	0.109	0.091				
NH ₄ -N (mg/l)			0.229	0.091	0.020	0.029	0.065	0.070	0.115	0.019	0.730	0.020	0.015			
NO ₂ -N (mg/l)			0.026	0.027	0.020	0.022	0.009	0.008	0.008	0.011	0.135	0.005	0.002			
NO ₃ -N (mg/l)			1.47	1.50	0.193	0.235	0.038	0.032	0.021	0.054	0.98	0.004				
CO ₂ -C (mg/l)			7.9	8.0	7.8		9.5	9.7	10.3	8.3	10.8	6.4	7.8			
DOC (mg/l)			3.2	2.6	3.9		4.2	4.2	4.0	4.1	2.9	3.9				
COD (mg/l)			3.2	4.5	7.4		7.2	8.3	8.1	8.5	5.3	9.4				
Chlorophyll a (μg/l)			26	64	109	100	108	119	129	131	28	122	90			
Pheophytin a (μg/l)																
S.S.(dry weight) (mg/l)			14	12	33	32	22	25	28	28	15	37	29			
POC (mg/l)																
PON (mg/l)																
Total Hetero. Bac. (No./ml)			4.7×10 ⁵	2.6×10 ⁴	4.0×10 ⁵		2.4×10 ⁴	1.7×10 ⁴	2.2×10 ⁴	1.5×10 ⁴	6.8×10 ⁵	4.6×10 ⁵	5.0×10 ⁵			
Total Bac. (No./ml)			3.7×10 ⁶	2.7×10 ⁶	3.3×10 ⁶		5.5×10 ⁶	4.1×10 ⁶	3.2×10 ⁶	5.6×10 ⁶	5.2×10 ⁶	4.8×10 ⁶				
Gross Production (mgO ₂ /l/d)			4.5	5.2	5.9		6.9					5.8				
Net Production (mgO ₂ /l/d)			3.4	4.5	4.7		5.4					4.4				
Respiration (mgO ₂ /l/d)			1.1	0.7	1.2		1.5					1.4				

Item	Station No.		8		9			10		11		12
	Sampling	Depth (m)	0.5	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5
PO ₄ -P (mg/l)			0.002		0.002	>0.002	>0.002	>0.002		0.002	>0.002	>0.002
T.P (mg/l)			0.055		0.050			0.055		0.045		0.047
NH ₄ -N (mg/l)			0.024		0.025	0.025	0.025	0.030		0.024	0.026	0.029
NO ₂ -N (mg/l)			0.002		0.002	>0.002	>0.002	>0.009		0.002	>0.002	>0.002
NO ₃ -N (mg/l)								0.053				
CO ₂ -C (mg/l)			8.5		9.2		9.5	8.7		8.6		9.8
DOC (mg/l)			3.7		3.9			3.7		3.7		
COD (mg/l)			7.2		7.4			7.0		6.8		6.4
Chlorophyll a (μg/l)			51	69	54	52	51	69		52	61	34
Pheophytin a (μg/l)												
S.S.(dry weight) (mg/l)			18	24	15	14	14	22		16	17	17
POC (mg/l)												
PON (mg/l)												
Total Hetero. Bac. (No./ml)			2.1×10 ⁵		3.0×10 ⁵	1.9×10 ⁵	3.8×10 ⁵	7.8×10 ⁵		1.4×10 ⁶		4.2×10 ⁵
Total Bac. (No./ml)			4.3×10 ⁶		2.6×10 ⁶	3.6×10 ⁶	4.1×10 ⁶	6.6×10 ⁶		6.0×10 ⁶		3.4×10 ⁶
Gross Production (mgO ₂ /l/d)					3.3							2.4
Net Production (mgO ₂ /l/d)					2.3							1.5
Respiration (mgO ₂ /l/d)					1.0							0.9

Limnological Data in Kasumigaura 1

Date 1977. 11. 7

Item \ Station No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Sampling Time (J.S.T.)	1013 -	1039 -	1058 -	1135 -	1205 -		1450 -	1415 -	1100 -	1220 -	1250 -	1325 -	
Weather	<もり	<もり	<もり	<もり	<もり	<もり	<もり	<もり	<もり 曇り 時々雨	<もり	<もり	<もり 曇り 時々雨	
Wind (direct., force)	E, 2	E, 1	ENE, 2	ENE, 2	ENE, 2								
Air Temp. (°C)	18.0	18.3	18.6	18.5	18.6	19.2	19.7	20.0	19.5			19.5	
Air Humid. (R.H.%)	92	91	87	91	90								
Depth (m)	2.0	3.5	3.7	7.0	5.7	2.2	2.8	5.0	6.5	4.8	5.8	4.2	
Transparency (cm)	75	80	100	110	120	40	60	60	100	60	120	75	
Transparency* (cm)	0.5m					16	24	28	38	34	35	28.5	
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
Water Temp. (°C)	0 m	17.6	18.0	17.4	17.7	17.4	17.6	17.2	17.1	17.3	17.5	17.3	17.3
	0.5	17.6	17.9	17.4	17.7	17.4	17.6	17.2	17.0	17.3	17.5	17.3	17.2
	1	17.6	18.0	17.4	17.7	17.4	17.6	17.2	17.0	17.3	17.4	17.3	17.2
	2	16.9	17.6	17.4	17.7	17.4	17.1	17.2	17.0	17.4	17.3	17.2	17.2
	3		17.4	17.4	17.3	17.3		17.1	17.0	17.0	17.3	17.3	17.2
	4				17.2	17.3			16.7	17.2	16.8	17.2	17.2
	5				17.0	17.3			16.5	17.2		17.1	
	6				17.0				17.0				
	7				16.9								
Bottom		16.9	17.3		17.1				17.1	16.8	17.1	17.2	
D.O. (mg/l)	0 m	9.0	9.6	8.7	9.2	9.5	7.8	10.7	8.9	8.7	9.6	8.1	8.0
	0.5	9.2	9.6	8.9	9.3							8.3	
	1	9.2	9.7	8.9	9.3	9.3	7.6	10.8	8.9	9.0	9.7	8.4	8.1
	2	6.9	9.4	8.9	9.3	9.3	7.5	10.8	8.8	8.9	9.4	8.3	8.1
	3		8.4	8.8	8.1	9.1			8.7	8.8	9.1	8.2	7.9
	4				7.4	8.8			8.0	8.7	7.5	7.8	7.8
	5				6.9	8.6			5.5	8.3		7.6	
	6				6.7					6.9			
	7				5.3								
Bottom		5.8	5.2		6.9								
Light Intensity (lx)	0 m												
	0.5												
	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
	7												
Bottom													
Conductivity (μS/cm)	0 m												
	0.5												
	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
	Bottom												
pH	0.5m	7.6	9.1	9.0	8.7	8.7	7.4	9.2	8.4	7.6	8.4	8.2	8.2
	2				8.7			9.0		8.4			
	3			8.9									
	4								8.2		7.4	8.2	
	5								8.2				
	6				7.7								

Limnological Data in Kasumigaura 2

Date 1977. 11. 7

Item	Station No.	1		2		3		4		5	6		7	
	(m)	0.5	0.5	0.5	3	0.5	2	6	0.5	0.5	0.5	2		
PO ₄ -P (mg/l)		0.007	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.010	0.002			
T.P (mg/l)		0.127	0.101	0.078		0.077			0.075	0.098	0.090			
NH ₄ -N (mg/l)		0.033	0.018	0.020	0.012	0.008	0.010	0.049	0.010	0.568	0.14			
NO ₂ -N (mg/l)		0.045	0.013	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.135	0.023			
NO ₃ -N (mg/l)		0.735	0.131					0.045		1.38	0.151			
CO ₂ -C (mg/l)		9.4	9.0	9.7		10.6	10.8	11.0	10.7	12.9	10.1			
DOC (mg/l)		2.9	3.4	3.7		3.8	3.7	3.9	3.7	3.1	3.4			
COD (mg/l)		5.2	5.6	5.5		6.1	6.3	7.2	6.7	4.1	4.9			
Chlorophyll a (μg/l)		112	107	62	77	63	74	77	69	42	104	101		
Pheophytin a (μg/l)		32.3	26.9	10.4	6.7	10.4	10.8	16.7	12.2	9.6	12.7			
S.S. (dry weight) (mg/l)		30.4	17.7	14.0	18.8	13.1	14.1	17.6	12.4	30.0	23.6	23.3		
POC (mg/l)		6.2	5.0	3.6	4.3	4.3	4.5	3.9	4.1	2.1	5.7	5.2		
PON (mg/l)		1.05	0.87	0.58	0.68	0.70	0.72	0.65	0.68	0.35	1.00	0.95		
Total Hetero. Bac. (No./ml)		8.6×10 ⁴	1.6×10 ⁴	1.1×10 ⁴	1.0×10 ⁴	2.0×10 ⁴	1.7×10 ⁴	1.3×10 ⁴	1.1×10 ⁴	5.4×10 ⁴	9.4×10 ³			
Total Bac. (No./ml)		6.7×10 ⁶	4.4×10 ⁶	8.1×10 ⁶		3.3×10 ⁶	3.3×10 ⁶	6.0×10 ⁶	5.2×10 ⁶	5.4×10 ⁶	4.1×10 ⁶			
Gross Production (mgO ₂ /l/d)		7.7	6.6	4.9		5.0					4.9			
Net Production (mgO ₂ /l/d)		6.0	5.0	4.0		4.0					3.9			
Respiration (mgO ₂ /l/d)		1.7	1.6	0.9		1.0					1.0			

Item	Station No.	8		9			10		11		12
	(m)	0.5	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5
PO ₄ -P (mg/l)		0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002		0.002	0.002	0.002
T.P (mg/l)		0.078		0.066			0.089		0.072		0.073
NH ₄ -N (mg/l)		0.011	0.027	0.014	0.019	0.017	0.015		0.027	0.027	0.027
NO ₂ -N (mg/l)		0.005	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005		0.005	0.005	0.005
NO ₃ -N (mg/l)			0.034		0.01						
CO ₂ -C (mg/l)		10.3		11.1	11.3	11.2	10.5		10.9		11.3
DOC (mg/l)		4.0		4.1			3.6		3.7		
COD (mg/l)		6.2		5.2			10.2		5.2		4.7
Chlorophyll a (μg/l)		95	78	50	58	57	160	97	67	69	59
Pheophytin a (μg/l)		8.8	8.5	7.0	7.8	8.1	20.8	12.5	5.6	5.9	6.0
S.S. (dry weight) (mg/l)		20.0	18.2	8.5	10.5	10.4	26.6	26.1	11.0	11.4	17.1
POC (mg/l)		5.6	4.0	3.0	3.4	3.2	9.7	4.0	3.5	3.2	4.0
PON (mg/l)		0.97	0.72	0.55	0.55	0.53	1.72	0.67	0.60	0.57	0.63
Total Hetero. Bac. (No./ml)		1.4×10 ⁴		9.1×10 ³	1.5×10 ⁴	9.9×10 ³	9.3×10 ³		7.9×10 ³		8.1×10 ³
Total Bac. (No./ml)		4.6×10 ⁶		3.8×10 ⁶	4.7×10 ⁶	3.5×10 ⁶	6.4×10 ⁶		5.6×10 ⁶		4.4×10 ⁶
Gross Production (mgO ₂ /l/d)				3.6							
Net Production (mgO ₂ /l/d)				3.0							
Respiration (mgO ₂ /l/d)				0.6							0.9

Limnological Data in Kasumigaura 1

Date 1977. 12. 6

Item \ Station No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Sampling Time (J.S.T.)	1020-	1100-	1155-	1245-	1332-	1345-	1330-	1300-	0857-	1050-	1120-	1146-	
Weather	晴	快晴	快晴	快晴	快晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴	
Wind (direct., force)	NE, 2	calm	calm	WSW, 1	WSW, 1								
Air Temp. (°C)	12.0	14.7	15.1	12.8	13.2	15.0	15.0	15.0	14.0	15.0	15.5	16.0	
Air Humid. (R.H.%)	62	52	46	66	57								
Depth (m)	2.0	3.8	3.8	6.3	5.5	1.9	3.0	5.2	5.9	5.0	5.5	4.2	
Transparency (cm)	60	80	90	100	100	35	90	100	90	60	90	90	
Transparency* (cm)	0.5m	23.5	24	31	31	34.5							
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
	Bottom												
Water Temp. (°C)	0 m	9.4	9.9	10.9	11.6	12.2	11.0	10.7	11.7	11.1	10.7	11.1	10.8
	0.5	9.3	10.0	10.8	11.5	11.2	10.8	10.5	11.7	11.0	10.6	11.1	10.7
	1	9.2	9.7	10.6	11.2	11.1	10.8	10.0	10.8	11.0	10.3	11.0	10.6
	2	9.0	9.8	10.6	10.9	11.0		10.0	10.5	10.9	10.2	10.8	10.4
	3		9.7	10.5	10.9	10.9		9.7	10.3	10.9	10.1	10.6	10.3
	4				10.9	10.9			10.3	10.9	10.1	10.6	10.2
	5				10.8	10.8			10.3	10.8	10.2	10.6	
	Bottom		9.9	10.5	10.9	11.0	10.1			10.9		10.6	10.2
D. O. (mg/l)	0 m	11.7	10.4	10.2	10.3	9.6	10.4	10.2	10.2	9.6	10.6	10.4	10.6
	0.5	11.7	10.0	10.2	10.3	9.7	10.3	10.1	10.0	9.6	10.6	10.3	10.5
	1	11.7	9.2	10.2	10.3	9.7	10.0	9.7	9.6	9.6	10.4	10.0	10.4
	2	8.5	9.1	9.8	10.3	9.5		8.7	9.4	9.4	9.8	9.7	10.0
	3		9.0	9.3	9.7	8.3		8.3	8.7	9.3	9.8	9.3	9.8
	4				9.3	8.2			8.5	9.0	9.7	9.3	9.6
	5				9.0	7.9			8.4	8.9	9.6	9.1	
	Bottom		5.0	3.8									9.4
Light Intensity (lx)	0 m												
	0.5												
	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
	Bottom												
Conductivity (μS/cm)	0 m	51.6	49.0	66.0	69.5	79.0							
	0.5	51.5	50.2	67.0	70.0	79.0							
	1	51.8	52.0	67.0	70.0	78.0							
	2	51.6	51.0	68.0	70.0	79.0							
	3		51.0	68.0	72.0	80.0							
	4				73.0	80.0							
	Bottom			68.0	75.0								
pH	0.5m	8.4	8.7	8.8	8.2	7.7	7.5	8.4	8.0	7.5	8.4	8.0	7.8
	2				8.1			8.4		7.5			
	3												
	4								7.6		7.7	7.6	
	5									7.4			
	6					7.7							

Limnological Data in Kasumigaura 2

Date 1977.12.6

Item	Station No.		3		4			5		6		7	
	1	2	1	2	1	2	3	1	2	1	2	1	2
Sampling Depth (m)	0.5	0.5	0.5	3	0.5	2	6	0.5	0.5	0.5	2		
PO ₄ -P (mg/l)	0.009	0.004	0.004		0.004	0.004	0.004	0.004	0.006	0.004			
T.P (mg/l)	0.189	0.120	0.095		0.085			0.075	0.136	0.067			
NH ₄ -N (mg/l)	0.060	0.066	0.070		0.070	0.071	0.069	0.062	0.400	0.069			
NO ₂ -N (mg/l)	0.020	0.012	0.003		0.003	0.003	0.003	0.003	0.428	0.059			
NO ₃ -N (mg/l)	0.760	0.198	0.003		0.004	0.004	0.004	0.004	1.13	0.451			
CO ₂ -C (mg/l)	8.6	7.4	9.3		10.0	10.0	10.4	10.5	11.4	9.9			
DOC (mg/l)	2.3	2.9	3.4		4.0	3.6	3.5	3.9	2.8	3.1			
COD (mg/l)	5.4	6.3	6.5		6.8	6.8	6.3	6.9	7.6	6.2			
Chlorophyll a (μg/l)	132	149	93		87	81	71	69	82	81	69		
Pheophytin a (μg/l)	11.6	11.2	9.6		4.6	2.0	11.0	11.4	9.5	6.8	0		
S.S. (dry weight) (mg/l)	21.2	15.6	16.0		9.9	12.6	10.8	12.5	32.6	14.6	14.4		
POC (mg/l)	4.9	4.8	4.7		4.2	4.5	3.9	4.2	3.4	3.9	3.4		
PON (mg/l)	0.65	0.75	0.65		0.60	0.65	0.60	0.60	0.65	0.55	0.47		
Total Hetero. Bac (No./ml)	1.1×10 ⁸	2.0×10 ⁸	1.1×10 ⁸		7.6×10 ⁸	1.0×10 ⁸	9.2×10 ⁸	8.3×10 ⁸	2.7×10 ⁸	2.7×10 ⁸	2.5×10 ⁸		
Total Bac. (No./ml)	6.4×10 ⁸	6.1×10 ⁸	6.1×10 ⁸		7.1×10 ⁸	5.6×10 ⁸	5.2×10 ⁸	5.3×10 ⁸	7.4×10 ⁸	5.1×10 ⁸			
Gross Production (mgO ₂ /l/d)	2.8	2.5	1.5		1.6					1.1			
Net Production (mgO ₂ /l/d)	1.7	1.2	0.9		0.9					0.6			
Respiration (mgO ₂ /l/d)	1.1	1.3	0.6		0.7					0.5			

Item	Station No.		9			10		11		12
	8	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5
Sampling Depth (m)	0.5	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5
PO ₄ -P (mg/l)	0.004		0.004			0.010	0.004	0.004		0.004
T.P (mg/l)	0.069		0.072			0.079		0.073		0.072
NH ₄ -N (mg/l)	0.071	0.071	0.079	0.077	0.073	0.093		0.078	0.078	0.079
NO ₂ -N (mg/l)	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.005	0.008	0.003		0.003
NO ₃ -N (mg/l)	0.004	0.004	2.17	0.006	0.009	0.044	0.184	0.004		0.003
CO ₂ -C (mg/l)	10.2		10.8	10.9	11.0	10.4		10.6		11.1
DOC (mg/l)	3.6		3.6			3.3		3.3		
COD (mg/l)	5.9		6.1			7.1		6.9		6.5
Chlorophyll a (μg/l)	53	54	57	59	58	60	52	63	59	50
Pheophytin a (μg/l)	3.6	0	1.5	4.9	6.6	6.6	0	0	0.6	0
S.S. (dry weight) (mg/l)	11.8	14.1	12.9	12.8	12.9	15.8	17.4	12.4	13.8	11.6
POC (mg/l)	3.8	3.6	4.3	4.2	4.2	4.9	4.1	4.6	4.1	3.6
PON (mg/l)	0.55	0.55	0.55	0.50	0.55	0.65	0.55	0.70	0.65	0.55
Total Hetero. Bac (No./ml)	9.0×10 ⁸	9.4×10 ⁸	2.3×10 ⁸	6.0×10 ⁸	1.2×10 ⁸	1.5×10 ⁸	1.8×10 ⁸	9.3×10 ⁸	8.3×10 ⁸	9.2×10 ⁸
Total Bac. (No./ml)	5.9×10 ⁸		5.2×10 ⁸	5.5×10 ⁸	5.6×10 ⁸	5.3×10 ⁸		6.1×10 ⁸		5.7×10 ⁸
Gross Production (mgO ₂ /l/d)			2.2							0.9
Net Production (mgO ₂ /l/d)			1.1							0.4
Respiration (mgO ₂ /l/d)			1.1							0.5

Limnological Data in Kasumigaura 1

Date 1978.1.20

Item \ Station No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Sampling Time (J.S.T.)	1020 -	1045 -	1145 -	1150 -	1250 -	1330 -	1310 -	1235 -	1000 -	1045 -	1100 -	1145 -	
Weather	快晴		快晴	快晴	快晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴	
Wind (direct., force)													
Air Temp. (°C)	5.5		6.6		6.8	8.8	9.6	10.8	8.0	8.2	9.2	6.2	
Air Humid. (R.H.%)													
Depth (m)		4.4	4.2	6.5	5.6		2.8		6.0	4.1	5.5		
Transparency (cm)	140	160	170	210	210	40	250	220	140	125	220	140	
Transparency* (cm)	0.5m					15	50<	50<	35	32.5	50<	47	
	2						50<		35				
	3												
	4									30			
	5								28				
	6												
	Bottom												
Water Temp. (°C)	0 m	4.6	4.9	5.2	5.3	5.5	5.1	4.9	5.7	5.2	5.3	5.3	5.0
	0.5	4.6	4.9	5.1	5.2	5.3	5.1	4.9	5.5	5.1	5.0	5.2	5.0
	1	4.5	4.9	4.9	5.1	5.2	5.1	4.8	5.3	5.1	4.9	5.1	4.9
	2	4.5	4.7	4.9	5.1	5.4	5.1	4.8	5.0	5.1	4.7	5.0	4.9
	3		4.7	4.9	5.0	5.2	5.1		5.0	5.0	4.6	4.9	4.7
	4		4.7	5.0	5.0	5.2	4.7		5.0	5.0	4.7	4.8	4.8
	5				5.0	5.1	4.6		5.0	5.0		4.8	
	7				5.2								
Bottom				5.0	5.3	4.6	4.7	5.0	5.0	4.8	5.0	4.7	
D.O. (mg/l)	0 m	7.2	9.0	9.6	9.6		9.5	10.3	10.5	11.2	10.3	10.4	10.2
	0.5	7.2	8.4	9.3	9.3		9.0	9.9	9.8	10.7	9.7	9.7	9.9
	1	6.9	8.4	9.0	9.3		8.4	9.4	9.3	10.3	9.4	9.3	9.7
	2	6.9	8.4	9.0	9.3		8.0	8.9	8.8	10.1	9.2	9.2	9.6
	3		8.1	9.0	9.3		7.7		8.6	9.9	9.0	9.0	9.5
	4		7.8	8.7	9.3		7.4		8.4	9.8	8.8	8.9	
	5				9.0		7.3			9.7		8.7	
	7				9.0								
Bottom				7.5		7.2	8.7	8.3	9.4	8.5	8.2	9.3	
Light Intensity (lx)	0 m												
	0.5												
	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
	7												
Bottom													
Conductivity (μS/cm)	0 m												
	0.5												
	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
Bottom													
pH	0.5m	7.3	7.3	7.2	7.3	7.2	7.2	7.2	7.3	7.4	7.2	7.3	7.5
	2				7.3			7.3		7.4			
	3			7.3									
	4							7.3		7.2	7.4		
	5								7.4				
	6				7.3								
	Bottom												

Limnological Data in Kasumigaura 2

Date 1978.1.20

Item	Station No.		1		2		3		4		5		6		7	
	Sampling Depth (m)		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
PO ₄ -P (mg/l)			0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.039	0.004	0.004	0.004
T.P (mg/l)			0.069	0.064	0.048				0.041			0.042	0.127	0.041		
NH ₄ -N (mg/l)			0.028	0.012	0.015				0.025	0.024	0.028	0.033	0.914	0.026	0.020	
NO ₂ -N (mg/l)			0.009	0.012	0.006				0.006	0.006	0.006	0.007	0.026	0.010	0.009	
NO ₃ -N (mg/l)			0.593	0.528	0.153				0.210	0.273	0.264	0.272	1.360			
CO ₂ -C (mg/l)			8.8	9.0	8.8				9.8	9.4	10.0	9.4	13.7	9.9		
DOC (mg/l)			2.3	2.7	3.0				3.3	3.3	3.3	3.3	2.7	2.6		
COD (mg/l)			4.1	4.2	4.1				3.8	4.1	4.4	4.6	4.6	2.2		
Chlorophyll a (μg/l)			34	38	24	22			13	15	14	12	11	7	7	
Pheophytin a (μg/l)			11.3	23.5	13.1	20.5			9.0	5.9	9.3	6.0	0.9	5.5	8.6	
S.S.(dry weight) (mg/l)			8.2	8.4	6.5	6.9			3.4	4.1	4.2	4.4	14.1	2.7	2.6	
POC (mg/l)			2.2	2.3	1.7	1.7			1.0	1.1	1.1	1.1	0.8	0.6	0.6	
PON (mg/l)			0.32	0.36	0.25	0.25			0.16	0.17	0.17	0.17	0.13	0.10	0.11	
Total Hetero. Bac. (No./ml)			3.6×10 ⁴	2.6×10 ⁴	4.7×10 ³				3.1×10 ³	2.9×10 ³	3.2×10 ³	3.1×10 ³	2.6×10 ³	1.3×10 ⁴	1.2×10 ⁴	
Total Bac. (No./ml)			3.1×10 ⁶	5.0×10 ⁶	3.2×10 ⁶				4.1×10 ⁶	2.5×10 ⁶	2.7×10 ⁶		4.6×10 ⁶	2.5×10 ⁶	2.4×10 ⁶	
Gross Production (mgO ₂ /l/d)			1.5	1.7	0.8				0.3						0.4	
Net Production (mgO ₂ /l/d)			1.1	1.3	0.7				0.3						0.2	
Respiration (mgO ₂ /l/d)			0.3	0.5	0.2				0.04						0.1	

Item	Station No.		8		9			10		11		12
	Sampling Depth (m)		0.5	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5
PO ₄ -P (mg/l)			0.004	0.004	0.004	0.004		0.004		0.004		0.004
T.P (mg/l)			0.036		0.047			0.040		0.036		0.046
NH ₄ -N (mg/l)			0.043	0.043	0.037	0.035	0.036	0.055		0.035		0.034
NO ₂ -N (mg/l)			0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.005		0.006		0.006
NO ₃ -N (mg/l)			0.235	0.235	0.226	0.271	0.235	0.418		0.318		0.309
CO ₂ -C (mg/l)			9.2		10.3	9.9	9.7	10.1		9.3		10.0
DOC (mg/l)			3.3		3.3			3.0		3.2		
COD (mg/l)			3.3		4.2			3.4		3.5		4.3
Chlorophyll a (μg/l)			8	8	13	13	17	7	9	8	9	10
Pheophytin a (μg/l)			6.1					4.6	6.2	5.0	3.4	2.3
S.S.(dry weight) (mg/l)			2.4	3.1	7.0	7.3	16.7	5.3	6.1	2.0	2.5	5.4
POC (mg/l)			0.7	0.9	1.2	1.2	1.8	0.8	0.9	0.7	0.8	1.0
PON (mg/l)			0.11	0.13	0.19	0.20	0.26	0.11	0.14	0.11	0.12	0.15
Total Hetero. Bac. (No./ml)			2.7×10 ³		3.7×10 ³	3.3×10 ³	5.1×10 ³	5.9×10 ³				
Total Bac. (No./ml)			2.6×10 ⁶		4.3×10 ⁶	4.4×10 ⁶	3.3×10 ⁶	4.1×10 ⁶				
Gross Production (mgO ₂ /l/d)					0.5							0.5
Net Production (mgO ₂ /l/d)					0.2							0.3
Respiration (mgO ₂ /l/d)					0.3							0.2

Limnological Data in Kasumigaura 1

Date 1978.2.7

Item	Station No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	(J.S.T.)	1023-	1055-	1210-	1255-	1235-	1410-	1330-	1258-	1015-	1110-	1140-	1202-
Weather		晴	快晴	快晴	快晴	快晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴
Wind (direct., force)													
Air Temp. (°C)		7.6	4.3	6.5	6.0	5.0	12	10	13	6	7.7	6	10
Air Humid. (R.H.%)													
Depth (m)		1.9	3.5	4.0	6.5	5.5	6.0	2.7	5.3	5.7	4.5	5.3	4.0
Transparency (cm)		105	110	115	190	150	75	95	120	120	200	160	110
Transparency * (cm)	0.5m	30	45	48	50<	50<							
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
	Bottom												
Water Temp. (°C)	0 m	2.6	2.7	2.9	3.1	3.1	2.9	2.8	3.0	2.8	2.7	2.8	2.7
	0.5	2.5	2.6	2.9	3.1	3.1	2.9	2.8	2.9	2.7	2.7	2.9	2.8
	1	2.5	2.6	2.9	3.0	3.1	2.9	2.9	2.8	2.7	2.7	2.8	2.7
	2		2.6	2.9	3.0	3.1	2.9	2.9	2.8	2.7	2.7	2.8	2.8
	3		2.5	2.8	3.0	3.1	2.9		2.9	2.8	2.7	2.7	2.7
	4				3.0	3.0	2.9		2.9	2.8	2.7	2.8	2.7
	5				3.0	3.0	2.9		2.9	2.8	2.8	2.8	2.8
	6				3.0			3.1					
Bottom	2.5	2.8	2.9	3.0	3.0		2.9	3.1	2.9	2.8	3.0		
D.O. (mg/l)	0 m	13.2	12.8	15.0	14.8	16.2	10.1	10.2	10.5	11.3	10.5	10.5	10.7
	0.5	13.5	12.8	17.5	14.8	16.0	9.7	9.8	10.1	11.1	10.2	10.2	10.6
	1	13.2	12.8	17.3	14.7	16.0	9.4	9.6	9.9	11.0	10.0	10.0	10.4
	2		12.7	17.0	14.6	15.9	9.2	9.6	9.8	10.9	9.9	9.9	10.4
	3		12.7	16.8	14.6	15.8	9.1		9.7	10.8	9.9	9.8	10.3
	4				14.6	15.7	9.0		9.6	10.4	9.8	9.7	10.3
	5				14.6	15.6	8.9		9.6	10.3		9.7	
	6				14.5		8.7						
Bottom	12.8	12.0	16.2	13.0	11.5		9.5	8.7	9.8		8.8		
Light Intensity (lx)	0 m	62,000	68,000	65,000	62,000	52,000							
	0.5	21,000	23,000	25,000	30,000	21,500							
	1	10,000	10,500	13,000	21,000	14,000							
	2		2,200	3,000	9,100	5,500							
	3		640	1,110	4,100	2,300							
	4				2,150	1,000							
	5				1,060	440							
	6				550								
Bottom	1,900	370	455	330	260								
Conductivity (μS/cm)	0 m												
	0.5												
	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
Bottom													
pH	0.5m	7.3	7.3	7.3	7.3	7.5	7.4	7.4	7.3	7.5	7.2	7.2	7.4
	2				7.3			7.4		7.4			
	3												
	4								7.3		7.3	7.2	
	5									7.5			
	6					7.2							
	Bottom												

Limnological Data in Kasumigaura 2

Date 1978.2.7

Item	Station No.										
	1	2	3	4		5	6	7			
Sampling Depth (m)	0.5	0.5	0.5	3	0.5	2	6	0.5	0.5	0.5	2
PO ₄ -P (mg/l)	0.005	0.003	0.003		0.003	0.003	0.003	0.003	0.032	0.009	0.009
T.P (mg/l)	0.069	0.060	0.055		0.034			0.033	0.096	0.042	
NH ₄ -N (mg/l)	0.054	0.060	0.073		0.061	0.054	0.065	0.066	0.388	0.206	0.225
NO ₂ -N (mg/l)	0.004	0.004	0.005		0.003	0.003	0.003	0.003	0.012	0.006	0.006
NO ₃ -N (mg/l)	0.294	0.229	0.228		0.278	0.273	0.280	0.316	0.917	0.708	0.780
CO ₂ -C (mg/l)	8.7	8.4	9.3		9.0	8.6	9.3	8.7	11.2	9.5	
DOC (mg/l)	2.7	2.6	2.8		2.9	2.8	2.8	2.8	2.4	2.5	
COD (mg/l)	4.6	4.9	6.1		3.7	3.7	4.1	4.1	3.9	3.6	
Chlorophyll a (μg/l)	30	33	34		17	16	15	13	13	12	12
Pheophytin a (μg/l)	19.9	23.6	51.7							3.0	
S.S.(dry weight) (mg/l)	9.3	10.5	8.9		4.3	4.5	4.5	6.0	12.8		10.0
POC (mg/l)	2.2	2.2	2.1		1.3	1.2	1.2	1.1	1.1		1.0
PON (mg/l)	0.37	0.37	0.35		0.20	0.22	0.22	0.19	0.19		0.17
Total Hetero. Bac. (No./ml)	5.9×10 ⁴	1.6×10 ⁴	9.9×10 ⁴		6.0×10 ³	3.3×10 ³	2.7×10 ³	1.8×10 ³	1.2×10 ³	2.0×10 ³	2.2×10 ⁴
Total Bac. (No./ml)	3.6×10 ⁶	3.1×10 ⁶	3.2×10 ⁶		3.4×10 ⁶	2.6×10 ⁶	3.3×10 ⁶	2.7×10 ⁶	5.1×10 ⁶	3.0×10 ⁶	3.2×10 ⁶
Gross Production (mgO ₂ /l/d)	1.1	1.3	1.3		0.8					0.5	
Net Production (mgO ₂ /l/d)	0.6	1.1	1.0		0.4					0.2	
Respiration (mgO ₂ /l/d)	0.5	0.2	0.3		0.4					0.3	

Item	Station No.									
	8		9			10		11		12
Sampling Depth (m)	0.5	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5
PO ₄ -P (mg/l)	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003		0.003		0.003
T.P (mg/l)	0.032		0.058			0.044		0.029		0.043
NH ₄ -N (mg/l)	0.083	0.083	0.076	0.065	0.075	0.103		0.078		0.076
NO ₂ -N (mg/l)	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004	0.005		0.003		0.005
NO ₃ -N (mg/l)	0.499	0.403	0.303	0.306	0.303	0.590		0.347		0.347
CO ₂ -C (mg/l)	8.3		8.3	9.1	8.7	8.4		9.0		9.6
DOC (mg/l)	2.7		2.9			2.6		2.7		
COD (mg/l)	4.1		4.8			3.3		3.1		4.2
Chlorophyll a (μg/l)	12	12	14	17	17	10	11	12	12	16
Pheophytin a (μg/l)										
S.S.(dry weight) (mg/l)	8.0	7.8	8.7	11.2	13.9	4.1	4.8	5.4	6.3	10.7
POC (mg/l)	1.0	1.1	1.3	1.5	1.7	0.8	0.9	1.0	1.0	1.4
PON (mg/l)	0.16	0.16	0.19	0.22	0.25	0.12	0.13	0.16	0.16	0.22
Total Hetero. Ba (No./ml)	3.4×10 ³	4.5×10 ³	8.4×10 ³	3.0×10 ³	3.6×10 ³	6.5×10 ³		2.9×10 ³		1.2×10 ⁴
Total Bac. (No./ml)	3.2×10 ⁶		3.4×10 ⁶	3.5×10 ⁶	4.4×10 ⁶	2.7×10 ⁶		2.9×10 ⁶		3.0×10 ⁶
Gross Production (mgO ₂ /l/d)			0.5							0.7
Net Production (mgO ₂ /l/d)			0.4							0.5
Respiration (mgO ₂ /l/d)			0.1							0.2

Limnological Data in Kasumigaura 1

Date 1978.3.7

Item \ Station No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Sampling Time (J.S.T.)	1005-	1032-	1140-	1200-	1258-	1255-	1235-	1210-	0950-	1040-	1105-	1120-	
Weather	くもり	くもり	くもり	晴	晴	晴	晴	晴	くもり	くもり	くもり	くもり	
Wind (direct., force)	SE, 1	ESE, 1	calm	calm	calm								
Air Temp. (°C)	8.9	9.6	12.6	12.8	13.1			13.5	10.2				
Air Humid. (R.H.%)	64	68	54	58	56								
Depth (m)	2.0	3.4	4.1	6.6	5.5	7.5	2.8	5.0	5.5	4.5	5.2		
Transparency (cm)	80	90	110	120	110	60	100	110	100	90	125	125	
Transparency* (cm)	0.5m	22.5	23	34.5	39	48.5	23	42	43.5	28	35	46	40
	2							(2.8m)		29.5			
	3							39.5					
	4								33		26	38	
	5												
	6												
	Bottom												
Water Temp. (°C)	0 m	8.7	8.2	7.7	8.3	8.2			6.2		6.2		
	0.5	8.6	8.1	7.4	7.6	7.5	8.3	7.8	7.4		6.9	7.9	
	1	8.6	8.1	7.0	7.3	6.7							
	2	8.6	7.9	6.8	7.2	6.8				5.8			
	3		7.6	6.6	7.0	6.7							
	4			6.5	6.9	6.7			6.5		6.5	6.0	
	5				6.8	6.6				5.7			
	6				6.7								
Bottom		7.6	6.7					7.5					
D.O. (mg/l)	0 m	11.9	11.5	10.4	9.5	7.5	10.4	11.4	11.4	9.4	10.9	10.5	11.7
	0.5	12.3	12.3	10.3	9.4	7.3	10.3	11.3	11.3	9.4	10.8	10.0	11.9
	1	12.2	12.4	10.3	9.3	7.1	10.0	11.1	10.8	9.6	10.8	9.9	11.8
	2	12.3	12.4	10.3	9.3	7.0	9.7	10.8	10.5	9.5	10.7	9.8	11.7
	3		11.8	10.3	9.1	6.9	9.4		10.4	9.5	10.7	9.8	11.5
	4			10.2	8.9	6.7	9.3		10.3	9.5	10.6	9.8	11.1
	5				8.7	6.6	9.3		10.2	9.3		9.7	
	6				8.4		9.2						
Bottom		11.2	8.6				10.4		9.0				
Light Intensity (lx)	0 m	19,000	20,000	49,000	56,000	45,000							
	0.5	6,800	6,500	25,500	25,000	25,000							
	1	1,500	2,100	13,000	15,000	13,000							
	2	200	750	2,700	3,000	2,100							
	3		30	560	720	760							
	4			105	210	265							
	5				65	100							
	6				18								
Bottom													
Conductivity (μS/cm)	0 m												
	0.5												
	1												
	2												
	3												
	4												
	Bottom												
pH	0.5m	7.5	7.7	7.7	7.4	7.4	7.2	7.2	7.3	7.3	7.3	7.2	7.4
	2				7.4					7.2			
	3							(2.8m)					
	4							7.3			7.3	7.2	
	5									7.2			
	6				7.3								

Limnological Data in Kasumigaura 2

Date 1978.3.7

Item	Station No.											
	1	2	3		4			5	6		7	
Sampling Depth (m)	0.5	0.5	0.5	3	0.5	2	6	0.5	0.5	0.5	2	
PO ₄ -P (mg/l)	0.006	0.007	0.003		0.003	0.003	0.003	0.003	0.028	0.003	0.003	
T.P (mg/l)	0.127	0.112	0.073		0.052			0.042	0.144	0.036		
NH ₄ -N (mg/l)	0.031	0.081	0.029		0.021	0.010	0.031	0.040	1.825	0.071	0.121	
NO ₂ -N (mg/l)	0.009	0.011	0.004		0.003	0.003	0.003	0.003	0.019	0.007	0.009	
NO ₃ -N (mg/l)	0.380	0.274	0.059		0.282	0.282	0.310	0.347	1.11	0.896	0.935	
CO ₂ -C (mg/l)	7.4	6.9	6.5		7.5	6.8	6.8	8.9	12.9	8.2		
DOC (mg/l)	2.9	3.1	3.0		2.7	2.8	2.8	2.8	3.0	2.7		
COD (mg/l)	8.3	5.1	3.4		2.6	3.5	2.8	2.7	4.1	1.4		
Chlorophyll a (μg/l)	90	96	54		29	35	21	12	29	18	19	
Pheophytin a (μg/l)	2.4	7.4	5.0		1.9		4.7	5.0	4.0	1.7	5.1	
S.S.(dry weight) (mg/l)	20.2	17.2	12.2		10.2	12.4	11.5	8.4	7.3	9.8	19.5	
POC (mg/l)	4.9	4.5	2.8		1.9	2.2	1.6	1.1	1.1	1.1	1.9	
PON (mg/l)	0.79	0.76	0.45		0.29	0.36	0.25	0.17	0.17	0.16	0.31	
Total Hetero. Bac.(No./ml)	4.0×10 ⁴	2.7×10 ⁴	4.8×10 ³		3.0×10 ³	3.8×10 ³	2.6×10 ³	8×10 ²	9.0×10 ⁴	6.2×10 ³	7.9×10 ³	
Total Bac. (No./ml)	4.7×10 ⁶	3.5×10 ⁶	3.6×10 ⁶		4.8×10 ⁶	4.2×10 ⁶	4.1×10 ⁶	4.0×10 ⁶	4.5×10 ⁶	3.0×10 ⁶	3.1×10 ⁶	
Gross Production (mgO ₂ /l/d)*	(5.0)	(5.0)	(3.0)		(2.0)						(1.3)	
Net Production (mgO ₂ /l/d)*	(3.6)	(3.8)	(2.2)		(1.5)						(0.8)	
Respiration (mgO ₂ /l/d)*	(1.4)	(1.2)	(0.8)		(0.5)						(0.5)	

Item	Station No.									
	8		9			10		11		12
Sampling Depth (m)	0.5	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5
PO ₄ -P (mg/l)	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003		0.003		0.003
T.P (mg/l)	0.035		0.042			0.042		0.039		0.036
NH ₄ -N (mg/l)	0.037	0.044	0.057	0.058	0.070	0.040		0.060		0.068
NO ₂ -N (mg/l)	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.005		0.003		0.005
NO ₃ -N (mg/l)	0.440	0.427	0.357	0.357	0.364	0.530		0.379		0.363
CO ₂ -C (mg/l)	8.9		8.3	8.0	9.2	8.1		8.9		8.7
DOC (mg/l)	2.7		2.9			2.7		2.6		
COD (mg/l)	1.4		2.6			2.4		1.9		2.0
Chlorophyll a (μg/l)	13	17	19	19	17	21	20	16	17	13
Pheophytin a (μg/l)	6.2	9.2	7.2	5.7	3.3	3.2	4.1	5.7	5.0	1.7
S.S.(dry weight) (mg/l)	9.6	11.4	11.6	11.9	13.7	10.3	17.5	7.1	12.0	5.3
POC (mg/l)	1.3	1.3	1.5	1.5	1.6	1.5	1.7	1.2	1.2	1.1
PON (mg/l)	0.19	0.18	0.21	0.22	0.25	0.23	0.28	0.19	0.20	0.15
Total Hetero. Bac.(No./ml)	1.6×10 ³		5.1×10 ³	1.2×10 ⁴	2.6×10 ³	2.6×10 ³		2.1×10 ³		4.9×10 ³
Total Bac. (No./ml)	2.8×10 ⁶	3.4×10 ⁶	4.2×10 ⁶	2.9×10 ⁶	3.7×10 ⁶	3.7×10 ⁶		4.1×10 ⁶		3.7×10 ⁶
Gross Production (mgO ₂ /l/d)*			(0.6)							(1.3)
Net Production (mgO ₂ /l/d)*			(0.3)							(0.8)
Respiration (mgO ₂ /l/d)*			(0.3)							(0.5)

* 48時間のデータから24時間に換算

Limnological Data in Kasumigaura 1

Date 1978.4.13

Item	Station No.												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Sampling Time (J.S.T.)	1015-	1032-	1136-	1204-	1240-	1440-	1355-	1320-	1300-	1020-	1050-	1125-	
Weather	雨	雨	雨断続	雨	雨	雨	雨	雨	雨	雨断続	雨	雨	
Wind (direct., force)	E, 1	E, 1	calm	NE, 1	NE, 1							calm	
Air Temp. (°C)	11.0	11.6	10.8	10.9	10.9	12.0	11.1	11.4	11.4	12.5	12.3	11.5	
Air Humid. (R.H.%)	97	93	96	98	99								
Depth (m)	1.9	3.9	4.0	6.2	5.7	5.0	2.8	4.6	5.9	4.5	5.7	4.2	
Transparency (cm)	75	80	90	130	150	50	80	125	130	95	130	125	
Transparency* (cm)	0.5m	26.3	25	25.5	32	40							
	2				29.5								
	3												
	4												
	5												
	6				21.5								
	Bottom												
Water Temp. (°C)	0 m	11.7	11.9	11.9	11.6	11.3	12.3	11.7	11.5	11.4	11.2	11.4	11.5
	0.5	11.7	11.9	11.9	11.6	11.3	12.3	11.7	11.5	11.4	11.2	11.4	11.5
	1	11.6	11.9	11.8	11.6	11.3	12.3	11.7	11.5	11.4	11.2	11.4	11.5
	2		11.8	11.8	11.5	11.3	12.3	11.7	11.5	11.4	11.2	11.4	11.3
	3		11.6	11.8	11.5	11.3	12.3		11.5	11.4	11.3	11.4	11.2
	4				11.4	11.3	12.3		11.4	11.4	11.2	11.3	11.2
	5				11.3	11.2	12.3			11.4		11.3	
	7				11.2								
Bottom	11.4	11.6	11.7	11.3	11.2		11.7	11.4	11.4	11.2	11.3	11.2	
D.O. (mg/l)	0 m	10.6	11.4	12.0	10.8	10.9							
	0.5	10.2	11.5	12.1	10.8	10.8							
	1	10.0	11.3	12.2	10.7	10.8							
	2		11.2	12.1	10.6	10.7							
	3		10.7	12.0	10.5	10.7							
	4				10.4	10.6							
	5				10.3	10.5							
	7				10.2								
Bottom	8.5	9.8	10.0	9.6	9.2								
Light Intensity (lx)	0 m												
	0.5												
	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
	7												
Bottom													
Conductivity (μS/cm)	0 m												
	0.5												
	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
Bottom													
pH	0.5m	7.2	7.5	8.0	7.5	7.5	7.3	7.6	7.5	7.4	7.3	7.4	7.4
	2				7.4			7.6		7.6			
	3												
	4								7.4				
	5									7.4			
	6				7.4								

Limnological Data in Kasumigaura 2

Date 1978 . 4 . 13

Item	Station No.		3		4			5	6	7	
	1	2	1	2	0.5	2	6	0.5	0.5	0.5	2
Sampling Depth (m)	0.5	0.5	0.5	3	0.5	2	6	0.5	0.5	0.5	2
PO ₄ -P (mg/l)	0.021	0.005	0.005		0.003	0.014	0.003	0.003	0.022	0.005	0.005
T.P (mg/l)	0.084	0.092	0.086		0.053			0.038	0.098	0.051	
NH ₄ -N (mg/l)	0.631	0.551	0.051		0.053	0.057	0.086	0.068	1.114	0.500	0.386
NO ₂ -N (mg/l)	0.028	0.018	0.008		0.005	0.005	0.006	0.007	0.034	0.017	0.018
NO ₃ -N (mg/l)	0.94	0.933	0.331		0.087	0.102	0.115	0.140	0.779	0.853	0.860
CO ₂ -C (mg/l)	6.3	5.1	5.6		7.6	6.9	6.4	7.3	7.8	5.6	
DOC (mg/l)	2.5	3.6	4.2		3.7	3.7	3.7	3.9	2.6	3.1	
COD (mg/l)											
Chlorophyll a (μg/l)	33	79	104		51	54	46	32	33	44	44
Pheophytin a (μg/l)	5.2	10.7	22.8		9.8	12.1	16.0	9.9	3.0	10.2	12.2
S.S.(dry weight) (mg/l)	22.5	16.5	14.6		9.3	10.0	13.2	6.8	22.0	14.1	14.7
POC (mg/l)	2.6	3.7	4.3		2.7	2.7	2.6	2.1	1.9	2.4	2.4
PON (mg/l)	0.41	0.63	0.77		0.47	0.46	0.43	0.33	0.34	0.38	0.36
Total Hetero. Bac.(No./ml)	7.8×10 ⁸	1.1×10 ⁸	5.5×10 ⁸		3.4×10 ⁸	3.7×10 ⁸	5.6×10 ⁸	3.7×10 ⁸	7.9×10 ⁸	1.3×10 ⁹	
Total Bac. (No./ml)	5.3×10 ⁸	4.4×10 ⁸	4.7×10 ⁸		4.4×10 ⁸	4.4×10 ⁸	4.1×10 ⁸	4.7×10 ⁸	3.9×10 ⁸	3.4×10 ⁸	
Gross Production (mgO ₂ /l/d)	3.3	6.3	6.4		4.9					5.0	
Net Production (mgO ₂ /l/d)	2.4	5.0	4.7		3.9					4.0	
Respiration (mgO ₂ /l/d)	0.9	1.3	1.7		1.0					1.0	

Item	Station No.		9			10		11		12
	8	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5
Sampling Depth (m)	0.5	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5
PO ₄ -P (mg/l)	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003		0.003		0.003
T.P (mg/l)	0.039		0.038			0.041		0.035		0.035
NH ₄ -N (mg/l)	0.089	0.239	0.057	0.082	0.091	0.082		0.082		0.057
NO ₂ -N (mg/l)	0.007	0.007	0.006	0.007	0.007	0.008		0.007		0.006
NO ₃ -N (mg/l)	0.157	0.154	0.113	0.075	0.075	0.212		0.214		0.173
CO ₂ -C (mg/l)	7.0		6.2	4.2	7.2	6.2		5.9		7.1
DOC (mg/l)	3.5		3.5			3.4		3.5		
COD (mg/l)										
Chlorophyll a (μg/l)	39	37	30	33	33	32	30	26		26
Pheophytin a (μg/l)	8.8	4.8	11.5	2.2	11.9	5.1	5.8	8.0		8.8
S.S.(dry weight) (mg/l)	9.1		6.6	7.3	6.2	12.2	14.4	6.9		6.4
POC (mg/l)	2.5	2.5	2.3	2.4	2.1	2.7	2.5	2.1		2.1
PON (mg/l)	0.39	0.39	0.33	0.37	0.33	0.36	0.37	0.30		0.30
Total Hetero. Bac.(No./ml)	2.1×10 ⁸		3.2×10 ⁸	1.7×10 ⁸	2.7×10 ⁸	4.6×10 ⁸		3.2×10 ⁸		2.6×10 ⁸
Total Bac. (No./ml)	3.4×10 ⁸		4.7×10 ⁸	4.9×10 ⁸	4.1×10 ⁸	3.4×10 ⁸		4.4×10 ⁸		4.2×10 ⁸
Gross Production (mgO ₂ /l/d)			3.0							2.5
Net Production (mgO ₂ /l/d)			2.2							1.6
Respiration (mgO ₂ /l/d)			0.8							0.9

Limnological Data in Kasumigaura 1

Date 1978.5.16

Item	Station No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Sampling Time (J.S.T.)	1120 -	1220 -	1240 -	1315 -						0955 -		
Weather		晴	晴	晴	晴					晴			
Wind (direct., force)													
Air Temp. (°C)													
Air Humid. (R.H. %)													
Depth (m)		1.9	3.5	3.9	6.3					5.8			
Transparency (cm)		90	75	85	100					140			
Transparency * (cm)	0.5m												
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
	Bottom												
Water Temp. (°C)	0 m	22.2		20.8	20.6					20.2			
	0.5	20.2		20.7	20.6					19.2			
	1	20.5		20.6	20.5					18.9			
	2			19.2	19.9					18.6			
	3			19.0	18.6					18.5			
	4				18.4					18.5			
	5				18.2					18.4			
	6				18.0								
	7												
Bottom	19.8		18.8							18.0			
D.O. (mg/l)	0 m												
	0.5												
	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
	7												
Bottom													
Light Intensity (lx)	0 m	68,000	38,000	57,000	64,000					68,000			
	0.5	21,000	4,500	13,000	26,000					36,000			
	1	4,100	1,100	4,500	9,500					19,000			
	2		250	1,100	1,400					5,500			
	3		41	160	370					1,700			
	4				100					570			
	5									180			
	6									72			
	7												
Bottom	1,400												
Conductivity (μS/cm)	0 m	210	235	237	276					232			
	0.5	197	232	232	272					278			
	1	200	228	230	270					273			
	2		218	223	262					271			
	3		202	236	262					270			
	4				272					268			
	5				267					270			
	6				266								
	Bottom	194		229									
pH	0.5m	8.8	9.0	8.9	8.9					8.0			
	2				8.7					8.0			
	3												
	4												
	5												
	6				(5.5 m)					7.7			
					7.4								

Limnological Data in Kasumigaura 2

Date 1978 . 5 . 16

Item	Station No.											
	1		2		3		4			5	6	7
Sampling Depth (m)	0.5	0.5	0.5	3	0.5	2	6	0.5	0.5	0.5	2	
PO ₄ -P (mg/l)	0.006	0.011	0.005		0.004	0.002	>0.002					0.027
T.P (mg/l)	0.070	0.111	0.007		0.065	0.068	0.056					0.080
NH ₄ -N (mg/l)	0.055	0.107	0.076		0.040	0.035	0.122					0.051
NO ₂ -N (mg/l)	0.036	0.020	0.012		0.007	0.007	0.005					0.058
NO ₃ -N (mg/l)	0.378	0.328	0.211		0.048	0.061	0.041					0.502
CO ₂ -C (mg/l)												
DOC (mg/l)	4.3	5.5	5.0		4.6	4.6	4.3					
COD (mg/l)												
Chlorophyll a (μg/l)	30	69			32	31	18					
Pheophytin a (μg/l)	12	16			18	10	8					
S.S. (dry weight) (mg/l)	13.4	19.0	13.5		12.4	11.3	12.5					
POC (mg/l)	3.4	6.6	4.2		3.9	3.7	2.4					
PON (mg/l)	0.53	0.95	0.66		0.56	0.55	0.37					
Total Hetero. Bac. (No./ml)	1.9×10 ⁶	7.5×10 ⁶	3.4×10 ⁶		1.2×10 ⁶		3.3×10 ⁶					
Total Bac. (No./ml)	4.3×10 ⁶	6.4×10 ⁶	6.0×10 ⁶		5.7×10 ⁶		6.1×10 ⁶					
Gross Production (mgO ₂ /l/d)	4.4	10.3			5.6							
Net Production (mgO ₂ /l/d)	2.2	5.5			2.5							
Respiration (mgO ₂ /l/d)	2.2	4.8			3.1							

Item	Station No.									
	8		9			10		11		12
Sampling Depth (m)	0.5	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5
PO ₄ -P (mg/l)			0.002	>0.002	>0.002					
T.P (mg/l)			0.042	0.047	0.042					
NH ₄ -N (mg/l)			0.047	0.038	0.047					
NO ₂ -N (mg/l)			0.002	>0.002	>0.002					
NO ₃ -N (mg/l)			0.004	0.003	0.004					
CO ₂ -C (mg/l)										
DOC (mg/l)			4.2	4.4	4.1					
COD (mg/l)										
Chlorophyll a (μg/l)			13	19						
Pheophytin a (μg/l)			8	6						
S.S. (dry weight) (mg/l)			7.8	8.9	8.6					
POC (mg/l)			2.2	2.6	2.2					
PON (mg/l)			0.31	0.33	0.31					
Total Hetero. Bac. (No./ml)			1.7×10 ⁵		2.2×10 ⁵					
Total Bac. (No./ml)			3.1×10 ⁶		4.1×10 ⁶					
Gross Production (mgO ₂ /l/d)			2.4							
Net Production (mgO ₂ /l/d)			1.6							
Respiration (mgO ₂ /l/d)			0.8							

Limnological Data in Kasumigaura 1

Date 1978.6.7

Item	Station No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	(J.S.T.)	1156 -	1217 -	1250 -	1325 -		1444 -			1002 -			
Weather		快晴	快晴	快晴	快晴		晴			晴			
Wind (direct., force)		SE,1	SE,1	SE,1	SSE,1		SE,2			calm			
Air Temp. (°C)		23.6	23.3	23.2	25.4		24.1			21.4			
Air Humid. (R.H.%)		57	57	56	52		62			58			
Depth (m)		1.9	3.4	4.1	6.0		6.5			5.8			
Transparency (cm)		75	70	90	100		50			96			
Transparency* (cm)	0.5m												
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
	Bottom												
Water Temp. (°C)	0 m	23.5	23.3	23.4	23.3		23.2			23.3			
	0.5	23.0	23.0	23.4	23.2		23.2			21.7			
	1	23.0	23.1	22.5	22.5		23.0			21.4			
	2		22.0	21.5	21.4		22.8			21.2			
	3		21.5	21.4	21.2		22.2			21.2			
	4			21.3	21.2		21.7			21.2			
	5				21.2		21.2			21.2			
	6				20.8		20.4						
	Bottom	22.0	21.2				20.3			21.1			
D.O. (mg/l)	0 m												
	0.5												
	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
	Bottom												
Light Intensity (lx)	0 m	75,000	82,000	75,000	65,000		46,000			80,000			
	0.5	22,000	17,000	26,000	26,000		7,000			40,000			
	1	6,500	2,500	9,000	8,800		1,100			21,000			
	2		280	1,500	1,700		20			3,900			
	3		65	380	320					760			
	4			110	70					150			
	5									34			
	6												
	Bottom	560											
Conductivity (μS/cm)	0 m	173	210	236	263		274			300			
	0.5	170	207	233	262		273			294			
	1	171	206	233	256		271			292			
	2		182	223	253		270			292			
	3		180	222	256		262			291			
	4			221	258		256			291			
	5				258		258			291			
	6						262						
	Bottom	168	175				262			291			
pH	0.5m	8.2	9.3	9.2	9.2		8.4			7.7			
	2				9.0					7.8			
	3												
	4												
	5									7.8			
	6				7.7								
	Bottom												

Limnological Data in Kasumigaura 2

Date 1978 . 6 . 7

Item	Station No.		3		4			5	6		7	
	1	2	0.5	3	0.5	2	6	0.5	0.5	0.5	2	
Sampling Depth (m)	0.5	0.5	0.5	3	0.5	2	6	0.5	0.5	0.5	2	
PO ₄ -P (mg/l)	0.015	0.013	0.007		0.008	0.007	0.004		0.006			
T.P (mg/l)	0.132	0.121	0.079		0.081	0.078	0.065		0.086			
NH ₄ -N (mg/l)	0.044	0.022	0.015		0.017	0.020	0.059		0.083			
NO ₂ -N (mg/l)	0.029	0.025	0.023		0.013	0.013	0.010		0.031			
NO ₃ -N (mg/l)	0.014		0.003				0.006		0.002			
CO ₂ -C (mg/l)												
DOC (mg/l)	5.5	5.5	5.1		5.2	5.0	4.4					
COD (mg/l)												
Chlorophyll a (μg/l)	115	211	111	69	92	111	63					
Pheophytin a (μg/l)												
S.S.(dry weight) (mg/l)	17.7	18.5	9.4	5.8	11.9	10.4	7.2					
POC (mg/l)	6.0	9.5	5.1	3.0	5.5	5.1	3.1					
PON (mg/l)	0.95	1.45	0.76	0.47	0.80	0.75	0.54					
Total Hetero. Bac. (No./ml)	7.4×10 ⁴	3.4×10 ⁴	2.1×10 ⁴		8.4×10 ³		9.0×10 ³		8.1×10 ⁴			
Total Bac. (No./ml)	5.7×10 ⁶	5.0×10 ⁶	6.0×10 ⁶		4.8×10 ⁶		6.5×10 ⁶		4.8×10 ⁶			
Gross Production (mgO ₂ /l/d)	6.4	12.1			8.1				8.5			
Net Production (mgO ₂ /l/d)	0.6	3.1			4.2				5.7			
Respiration (mgO ₂ /l/d)	5.7	9.0			3.9				2.8			

Item	Station No.		9			10		11		12
	8	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5
Sampling Depth (m)	0.5	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5
PO ₄ -P (mg/l)			0.003	0.003	0.003					
T.P (mg/l)			0.046	0.047	0.047					
NH ₄ -N (mg/l)			0.031	0.050	0.050					
NO ₂ -N (mg/l)			0.002	0.002	0.002					
NO ₃ -N (mg/l)										
CO ₂ -C (mg/l)										
DOC (mg/l)			4.5	4.2	4.1					
COD (mg/l)										
Chlorophyll a (μg/l)			34	32	33					
Pheophytin a (μg/l)										
S.S.(dry weight) (mg/l)			9.3	7.2	8.9					
POC (mg/l)			3.8	3.4	3.3					
PON (mg/l)			0.45	0.47	0.43					
Total Hetero. Bac. (No./ml)			1.1×10 ⁴		3.7×10 ³					
Total Bac. (No./ml)			5.4×10 ⁶		4.8×10 ⁶					
Gross Production (mgO ₂ /l/d)			2.7							
Net Production (mgO ₂ /l/d)			1.1							
Respiration (mgO ₂ /l/d)			1.6							

Limnological Data in Kasumigaura 1

Date 1978.7.20

Item \ Station No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sampling Time (J.S.T.)	1125 -	1310 -	1335 -	1410 -		1550 -			1000 -			
Weather	うすくもり	快晴	晴	晴		快晴			晴			
Wind (direct., force)												
Air Temp. (°C)	28.5	30.2		28.7		27.8			27.2			
Air Humid. (R.H.%)												
Depth (m)	2.0	3.4	3.9	5.9		6.6			5.9			
Transparency (cm)	50	60	60	70		40			125			
Transparency* (cm)	0.5m											
	2											
	3											
	4											
	5											
	6											
Water Temp. (°C)	0 m	29.6	29.9	29.3	28.8		29.2		28.4			
	0.5	29.6	29.8	29.3	28.8		29.2		29.4			
	1	29.6	29.7	29.2	28.8		29.3		28.4			
	2	29.6	29.7	29.2	28.8		29.3		28.4			
	3		29.6	29.2	28.7		29.2		28.4			
	4				28.7		29.0		28.4			
	5				28.6		28.8		28.3			
	6						24.3					
Bottom		29.4	29.0	27.7		23.6		28.3				
D. O. (mg/l)	0 m	7.8	8.4	10.2	8.9		11.2		8.3			
	0.5	7.9	8.4	10.3	8.9		11.3		8.3			
	1	7.9	8.4	10.6	8.9		11.3		8.2			
	2	7.7	8.4	10.5	8.9		11.2		8.2			
	3		7.6	10.2	8.9		11.2		8.2			
	4				8.7		11.0		8.1			
	5				8.6		9.3		8.0			
	6						1.2					
Bottom		5.9	9.4	2.7				7.7				
Light Intensity (lx)	0 m	35,000	75,000	75,000	70,000		35,000		100,000			
	0.5	1,500	11,000	10,000	17,000		2,000		45,000			
	1	50	1,300	2,500	4,700		150		20,000			
	2	2	35	200	750		0		7,500			
	3		1		105				2,000			
	4								600			
	5								150			
	6											
Bottom												
Conductivity (μS/cm)	0 m	280	300	318	332		360		353			
	0.5	279	300	317	334		355		353			
	1	278	298	317	334		350		353			
	2		296	317	334		350		353			
	3		297	312	333		347		354			
	4				334		346		355			
	5				336		343		355			
Bottom		298	310	341		348		460				
pH	0.5m	9.2	9.8	9.8	9.8		9.8		8.4			
	2				9.7				8.2			
	3			9.8								
	4											
	5								8.2			
	6				9.6							

Limnological Data in Kasumigaura 2

Date 1978.7.20

Item	Station No.											
	1	2	3		4			5	6	7		
Sampling Depth (m)	0.5	0.5	0.5	3	0.5	2	6	0.5	0.5	0.5	2	
PO ₄ -P (mg/l)	0.044	0.034	0.004		0.003	0.003	0.003		0.003			
T.P (mg/l)	0.251	0.214	0.101		0.079	0.075	0.074		0.123			
NH ₄ -N (mg/l)	0.287	0.413	0.016		0.030	0.020	0.054		0.023			
NO ₂ -N (mg/l)	0.003	0.003	0.003		0.003	0.003	0.003		0.003			
NO ₃ -N (mg/l)												
CO ₂ -C (mg/l)												
DOC (mg/l)	9.9	9.3	8.0		8.0	7.8	7.4		8.0			
COD (mg/l)												
Chlorophyll a (μg/l)	184	156	104	94	81	79	76		135			
Pheophytin a (μg/l)												
S.S.(dry weight) (mg/l)	54.2	31.5	23.9	21.7	16.1	15.5	15.1		35.8			
POC (mg/l)	15.9	13.0	8.9	8.0	5.5	6.6	5.5		7.8			
PON (mg/l)	2.28	2.22	1.23	1.19	0.85	0.69	0.96		1.43			
Total Hetero. Bac. (No./ml)	6.7×10 ⁴	1.2×10 ⁵	9.9×10 ³		4.2×10 ³		1.2×10 ⁴		2.5×10 ⁴			
Total Bac. (No./ml)	7.3×10 ⁶	5.3×10 ⁶	3.4×10 ⁶		3.2×10 ⁶		3.8×10 ⁶		4.8×10 ⁶			
Gross Production (mgO ₂ /l/d)	12.6	10.9			6.2				5.4			
Net Production (mgO ₂ /l/d)	7.5	5.8			4.4				2.9			
Respiration (mgO ₂ /l/d)	5.1	5.1			1.7				2.4			

Item	Station No.									
	8		9			10		11		12
Sampling Depth (m)	0.5	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5
PO ₄ -P (mg/l)			0.003	0.003	0.003					
T.P (mg/l)			0.034	0.031	0.033					
NH ₄ -N (mg/l)			0.021	0.017	0.023					
NO ₂ -N (mg/l)			0.003	0.003	0.003					
NO ₃ -N (mg/l)										
CO ₂ -C (mg/l)										
DOC (mg/l)			7.3	7.6	6.7					
COD (mg/l)										
Chlorophyll a (μg/l)			17	20	17					
Pheophytin a (μg/l)										
S.S.(dry weight) (mg/l)			7.5	7.0	7.5					
POC (mg/l)			2.3	2.5						
PON (mg/l)			0.37	0.29						
Total Hetero. Bac. (No./ml)			9.4×10 ³		9.5×10 ³					
Total Bac. (No./ml)			2.3×10 ⁶		1.7×10 ⁶					
Gross Production (mgO ₂ /l/d)			2.3							
Net Production (mgO ₂ /l/d)			1.4							
Respiration (mgO ₂ /l/d)			0.9							

Limnological Data in Kasumigaura 1

Date 1978. 8. 16

Item	Station No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sampling Time (J.S.T.)		1045-	1115-	1150-	1230-		1355-			0940-			
Weather		晴	晴	<もり			うすくもり			<もり			
Wind (direct., force)		S, 2	SSW, 2	S, 2	SSW, 2		SW, 3			WSW, 3			
Air Temp. (°C)		32.5	33.0	32.5	33.1		33.0			29.2			
Air Humid. (R.H.%)													
Depth (m)		1.9	3.4	3.9	6.0		7.1			5.8			
Transparency (cm)		25	25	40	70		30			100			
Transparency* (cm)	0.5m												
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
Water Temp. (°C)	0 m	30.2	30.7	30.5	30.0		30.3			29.8			
	0.5	30.0	30.5	30.3	29.9		30.3			29.6			
	1	29.9	30.4	30.3	29.9		30.2			29.5			
	2	29.6	29.9	29.8	29.9		30.2			29.4			
	3		29.6	29.4	29.9		30.1			29.3			
	4				29.8		29.6			29.3			
	5				29.4		29.6			29.3			
	6						29.5						
Bottom						29.1							
D. O. (mg/l)	0 m	9.6	8.6	12.1	9.9		8.1			7.3			
	0.5	9.0	7.7	12.0	10.0		8.1			7.4			
	1	7.2	7.1	11.9	10.0		8.1			7.3			
	2		5.4	8.7	9.9		8.1			6.6			
	3		3.9	4.1	9.9		7.5			6.2			
	4				9.9		6.1			6.2			
	5				6.5		6.0			6.0			
	6						5.2						
Bottom						4.6							
Light Intensity(1x)	0 m	20,000	47,000	19,000	65,000		40,000			30,000			
	0.5	20	600	2,000	6,000		1,500			6,500			
	1		2	120	500		50			2,900			
	2									550			
	3									120			
	4												
	5												
	6												
Bottom													
Conductivity (μS/cm)	0 m	317	320	342	337		366			385			
	0.5	315	314	330	335		362			385			
	1	310	312	329	335		350			382			
	2	307	308	316	334		358			381			
	3		311	314	333		357			380			
	4				332		352			380			
	5				328		351			379			
	6						352						
Bottom						(7m)370							
pH	0.5m	8.5	9.1	9.3	8.8		9.0			7.8			
	2				8.7					7.7			
	3			8.9									
	4												
	5									7.3			
	6				8.1								

Limnological Data in Kasumigaura 2

Date 1978. 8. 16

Item	Station No.		1		2		3		4			5		6		7	
	Sampling	Depth (m)	0.5	0.5	0.5	3	0.5	3	0.5	2	6	0.5	0.5	0.5	2		
PO ₄ -P (mg/l)			0.188	0.235	0.184		0.092	0.032	0.138				0.026				
T.P (mg/l)			0.600	0.580	0.374		0.240	0.236	0.230				0.164				
NH ₄ -N (mg/l)			0.193	0.267	0.167		0.157	0.293	0.291				0.243				
NO ₂ -N (mg/l)			0.002	0.002	0.002		0.002	0.002	0.002				0.002				
NO ₃ -N (mg/l)			0.002	0.002	0.002		0.002	0.002	0.005				0.011				
CO ₂ -C (mg/l)																	
DOC (mg/l)																	
COD (mg/l)																	
Chlorophyll a (μg/l)			340	253	117	105	90	92					87				
Pheophytin a (μg/l)																	
S.S.(dry weight) (mg/l)			85.6	74.2	38.8	33.8	31.5	25.9	19.2				28.0				
POC (mg/l)																	
PON (mg/l)																	
Total Hetero. Bac. (No./ml)			2.9×10 ⁸	8.3×10 ⁸	2.2×10 ⁸		1.4×10 ⁸		1.1×10 ⁸				3.3×10 ⁸				
Total Bac. (No./ml)			9.4×10 ⁸	8.7×10 ⁸	6.4×10 ⁸		7.9×10 ⁸		7.6×10 ⁸				3.2×10 ⁸				
Gross Production (mgO ₂ /l/d)*			27.1	15.9	10.0		11.7						12.0				
Net Production (mgO ₂ /l/d)*			19.2	13.0	6.8		7.9						8.3				
Respiration (mgO ₂ /l/d)*			7.9	2.9	3.2		3.8						3.7				

Item	Station No.		8		9			10		11		12
	Sampling	Depth (m)	0.5	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5
PO ₄ -P (mg/l)					0.005	0.003	0.007					
T.P (mg/l)					0.090	0.080	0.066					
NH ₄ -N (mg/l)					0.070	0.095	0.333					
NO ₂ -N (mg/l)					0.002	0.002	0.002					
NO ₃ -N (mg/l)												
CO ₂ -C (mg/l)												
DOC (mg/l)												
COD (mg/l)												
Chlorophyll a (μg/l)					54	45	32					
Pheophytin a (μg/l)												
S.S.(dry weight) (mg/l)					19.3	14.1	9.1					
POC (mg/l)												
PON (mg/l)												
Total Hetero. Bac. (No./ml)					2.6×10 ⁹		3.4×10 ⁸					
Total Bac. (No./ml)					5.4×10 ⁸		5.2×10 ⁸					
Gross Production (mgO ₂ /l/d)*					5.4							
Net Production (mgO ₂ /l/d)*					1.3							
Respiration (mgO ₂ /l/d)*					4.1							

* 日中12時から16時の測定データから24時間に換算

Limnological Data in Kasumigaura 1

Date 1978.9.13

Item	Station No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sampling Time (J.S.T.)		1355 -	1445 -	1500 -	1215 -		1630 -			1015 -			
Weather		<もり	<もり	<もり	<もり		<もり			小雨			
Wind (direct., force)													
Air Temp. (°C)		21.2			21.8					20.8			
Air Humid. (R.H.%)													
Depth (m)		1.9	3.1	4.0	7.0		6.8						
Transparency (cm)		30	40	40	70		40			90			
Transparency * (cm)	0.5m												
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
Water Temp. (°C)	0 m	21.6	22.6	22.6	22.8		22.4			22.7			
	0.5	21.6	22.6	22.6	22.9		22.5			22.7			
	1	21.6	22.6	22.6	22.8		22.5			22.7			
	2		22.5	22.7	22.9		22.5			22.6			
	3		22.5	22.6	22.9		22.5			22.6			
	4			22.7	22.8		22.5			22.7			
	5				22.8		22.6			22.7			
	6				22.7		22.6						
	7												
Bottom	21.6	22.8					22.6			27.2			
D.O. (mg/l)	0 m	7.9	6.8	8.4	6.6		8.3			9.2			
	0.5	7.9	6.8	8.2	6.6		8.1			8.8			
	1	7.8	6.7	8.2	6.5		8.0			8.8			
	2		6.7	8.1	6.5		7.9			8.7			
	3		6.5	8.1	6.6		7.9			8.7			
	4			8.0	6.5		7.9			8.7			
	5				6.5		7.8			8.6			
	6				6.2		7.8						
	7				6.0								
Bottom	6.8								(3~6)				
Light Intensity (lx)	0 m	10,500	7,600	10,000	15,500		20,000			16,000			
	0.5	500	90	700	1,500		120			2,300			
	1	37	1	30	200		8			400			
	2			1	15					40			
	3												
	4												
	5												
	6												
	7												
Bottom													
Conductivity (μS/cm)	0 m	222	275	315	341		313			338			
	0.5	220	276	314	341		312			340			
	1	218	274	315	342		312			340			
	2		272	310	342		310			340			
	3		272	310	357		310			342			
	4			322	358		315			342			
	5				357		316			342			
	6				357		315						
	Bottom	290	331		410		318			450			
pH	0.5m	(0m)7.7	(0m)7.6	(0m)7.55	(0m)7.8		(0m)7.7			(0m)8.0			
	2				7.5					7.6			
	3			7.7									
	4												
	5									7.5			
	6				7.5								

Limnological Data in Kasumigaura 2

Date 1978.9.13

Item	Station No.													
	1		2		3		4			5		6		7
Sampling Depth (m)	0.5	0.5	0.5	3	0.5	2	6	0.5	0.5	0.5	2	0.5	2	
PO ₄ -P (mg/l)	0.020	0.045	0.088		0.022	0.022	0.039					0.021		
T.P (mg/l)	0.241	0.380	0.262		0.155	0.164	0.184					0.150		
NH ₄ -N (mg/l)	0.919	0.768	0.268		0.282	0.276	0.290					0.571		
NO ₂ -N (mg/l)	0.143	0.286	0.056		0.034	0.033	0.086					0.064		
NO ₃ -N (mg/l)	0.603	0.285	0.068		0.019	0.024	0.046					0.388		
CO ₂ -C (mg/l)	12.6	14.2	17.3		17.8		18.8					16.5		
DOC (mg/l)	5.8	8.1	8.5		7.4	7.5	7.4					5.4		
COD (mg/l)														
Chlorophyll a (μg/l)	107	180	93	95	99	69	41					59		
Pheophytin a (μg/l)														
S.S.(dry weight) (mg/l)	30.8	54.7	42.0	38.4	16.3	25.4	13.2					37.0		
POC (mg/l)	6.5	12.8	7.3	7.8	4.0	5.3	2.7					3.5		
PON (mg/l)	1.18	2.41	1.21	1.35	0.68	0.88	0.49					0.67		
Total Hetero. Bac. (No./ml)	2.0×10 ⁵	1.1×10 ⁵	2.4×10 ⁴		2.3×10 ⁴		4.3×10 ⁴					1.7×10 ⁵		
Total Bac. (No./ml)	8.2×10 ⁶	7.5×10 ⁶	6.2×10 ⁶		3.6×10 ⁶		6.0×10 ⁶					4.1×10 ⁶		
Gross Production (mgO ₂ /l/d)*	13.4	13.2	11.8		10.2							7.3		
Net Production (mgO ₂ /l/d)*	8.4	11.5	10.4		9.1							6.1		
Respiration (mgO ₂ /l/d)*	5.0	1.7	1.4		1.1							1.2		

Item	Station No.									
	8		9			10		11		12
Sampling Depth (m)	0.5	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5
PO ₄ -P (mg/l)			0.004	0.004	0.004					
T.P (mg/l)			0.074	0.110	0.116					
NH ₄ -N (mg/l)			0.030	0.036	0.063					
NO ₂ -N (mg/l)			0.003	>0.003	>0.003					
NO ₃ -N (mg/l)			0.006	0.006	0.004					
CO ₂ -C (mg/l)			16.5	16.9	17.0					
DOC (mg/l)			7.0	7.1	6.9					
COD (mg/l)										
Chlorophyll a (μg/l)			90	77	70					
Pheophytin a (μg/l)										
S.S.(dry weight) (mg/l)			25.1	13.8	16.6					
POC (mg/l)			4.8	3.4	3.9					
PON (mg/l)			0.80	0.61	0.67					
Total Hetero. Bac. (No./ml)			9.9×10 ³		8.6×10 ³					
Total Bac. (No./ml)			5.0×10 ⁶		4.1×10 ⁶					
Gross Production (mgO ₂ /l/d)*			5.9							
Net Production (mgO ₂ /l/d)*			4.6							
Respiration (mgO ₂ /l/d)*			1.3							

* 日中12時から16時までの測定データから24時間に換算

Limnological Data in Kasumigaura 1

Date 1978, 10. 18

Item	Station No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sampling Time (J.S.T.)		1120-	1145-	1212-	1242-		1430-			0855-			
Weather		晴	晴	晴	快晴		快晴			快晴			
Wind (direct., force)													
Air Temp. (°C)										19.5			
Air Humid. (R.H. %)													
Depth (m)		2.1	3.8	4.3	7.0		7.0			5.8			
Transparency (cm)		40	50	50	80		35			90			
Transparency* (cm)	0.5m												
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
	Bottom												
Water Temp. (°C)	0 m	18.8	18.8	19.2	20.0		19.1			18.3			
	0.5	18.1	18.8	19.0	20.0		19.0			18.3			
	1	17.5	18.7	18.8	18.7		19.0			18.2			
	2	17.5	18.6	17.8	18.2		18.9			18.1			
	3		18.7	17.7	18.0		18.8			18.0			
	4			17.6	17.8		18.4			18.0			
	5				17.8		18.3			17.9			
	6				17.8		18.3						
Bottom		18.7	18.3	18.8					18.2				
D.O. (mg/l)	0 m	11.0	8.7	10.3	9.5		7.8			10.2			
	0.5	10.8	8.7	10.1	9.4		7.9			10.2			
	1	8.8	8.7	9.8	8.4		7.9			10.2			
	2		8.7	7.8	5.4		7.8			10.2			
	3		8.0	7.8	5.5		7.1			10.1			
	4				5.5		7.1			9.9			
	5				5.8		6.9			9.9			
	6				5.8		6.7						
Bottom	0.9	0.8	0.8	4.8					0.9				
Light Intensity (lx)	0 m	48,000	49,000	49,000	44,000		33,000			5,000			
	0.5	7,400	5,600	5,800	13,000		1,500			17,000			
	1	1,100	670	1,100	4,900		220			7,300			
	2				580					900			
	3												
	4												
	5												
	Bottom												
Conductivity (μS/cm)	0 m	202	238	290	332		284			331			
	0.5	198	237	288	335		283			332			
	1	191	236	285	316		283			332			
	2	195	240	278	318		283			331			
	3		235	277	315		289			331			
	4			276	305		278			331			
	5				290		277			331			
	6				290		276						
Bottom			278	450					335				
pH	0.5m	7.8	8.2	8.5	8.2		7.3			8.1			
	2				8.0					7.8			
	3			8.5									
	4												
	5									7.5			
	6				7.8								

Limnological Data in Kasumigaura 2

Date 1978.10.18

Item	Station No.		3		4			5	6	7	
	1	2	1	2	1	2	3	1	2	3	
Sampling Depth (m)	0.5	0.5	0.5	3	0.5	2	6	0.5	0.5	0.5	2
PO ₄ -P (mg/l)	0.004	0.003	>0.003		0.008	0.007	0.003		0.004		
T.P (mg/l)	0.159	0.168	0.155		0.130	0.140	0.136		0.106		
NH ₄ -N (mg/l)	0.076	0.076	0.059		0.227	0.291	0.491		0.318		
NO ₂ -N (mg/l)	0.053	0.043	0.006		0.013	0.013	0.012		0.118		
NO ₃ -N (mg/l)	0.674	0.383	0.012		0.035	0.033	0.024		0.726		
CO ₂ -C (mg/l)	12.4	14.3	12.7		14.3	13.8	13.9		12.9		
DOC (mg/l)	4.2	7.1	7.1		6.4	6.3	6.5		4.4		
COD (mg/l)											
Chlorophyll a (μg/l)	127	152	118	74	78	77	91		41		
Pheophytin a (μg/l)											
S.S.(dry weight) (mg/l)	34.8	30.5	26.7	21.0	16.6	11.5	22.4		15.3		
POC (mg/l)	7.4	7.4	7.4	5.4	5.9	3.9	5.1		1.3		
PON (mg/l)	0.99	1.03	1.00	0.78	0.73	0.49	0.77		0.19		
Total Hetero. Bac (No./ml)	5.5×10 ⁴	2.0×10 ⁴	1.1×10 ⁴		6.9×10 ⁴				3.4×10 ⁴		
Total Bac. (No./ml)	6.9×10 ⁴	7.9×10 ⁴	5.3×10 ⁴		3.7×10 ⁴				4.6×10 ⁴		
Gross Production (mgO ₂ /l/d)	2.7	2.9			2.0						
Net Production (mgO ₂ /l/d)	2.0	0.8			1.1						
Respiration (mgO ₂ /l/d)	0.7	2.0			0.9						

Item	Station No.		9			10		11		12
	8	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5
Sampling Depth (m)	0.5	4	0.5	2	5	0.5	4	0.5	4	0.5
PO ₄ -P (mg/l)			0.003	>0.003	>0.003					
T.P (mg/l)			0.068	0.076	0.067					
NH ₄ -N (mg/l)			0.035	0.025	0.038					
NO ₂ -N (mg/l)			0.003	>0.003	>0.003					
NO ₃ -N (mg/l)										
CO ₂ -C (mg/l)			12.2	12.0	12.3					
DOC (mg/l)			6.2	6.1	5.9					
COD (mg/l)										
Chlorophyll a (μg/l)			44	44	42					
Pheophytin a (μg/l)										
S.S.(dry weight) (mg/l)			15.5	12.7	14.3					
POC (mg/l)			4.4	3.7	4.0					
PON (mg/l)			0.52	0.36	0.33					
Total Hetero. Bac. (No./ml)			2.1×10 ³		9.3×10 ⁴					
Total Bac. (No./ml)			4.9×10 ⁴		4.5×10 ⁴					
Gross Production (mgO ₂ /l/d)			1.4							
Net Production (mgO ₂ /l/d)			0.9							
Respiration (mgO ₂ /l/d)			0.5							

高浜入調査データ

相崎守弘¹・大槻 晃²・森下正彦³・岩熊敏夫³・手塚和彦⁴

Limnological Data in Takahamairi Bay

Morihiro AIZAKI¹, Akira OTSUKI², Masahiko MORISHITA³,
Toshio IWAKUMA³ and Kazuhiko TEZUKA⁴

1. 調査地点

調査地点を図1に示す。St. 1およびSt. 2は全域調査での調査地点と同一地点、St. 2'はSt. 2とSt. 3の間に設けた本調査固有の調査地点である。この調査は、高浜入湾奥部における水質および生物変動特性は握のために始められたもので、従って調査地点と湾奥のみに限られた。

2. 調査期間

調査は1976年7月以降継続しているが、1977年4月以前の調査結果は既に報告（相崎，1977年）したので、今回はそれ以降の結果を報告する。なお前回の報告におけるSt. 5は今回のSt. 1に、同様にSt. 6はSt. 2にSt. 7はSt. 2'に対応するものである。調査は1977年9月までは、ほぼ毎週一回、それ以降は毎月1度2日間連続して行った。

3. 調査方法

調査に用いた方法は、すべて全域調査（本誌p. 335）で使用した方法と同様である。

4. 結果

結果を以下の表に示す。

-
1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町
Water and Soil Environment Division, The National Institute for Environmental studies, P. O. Yatabe Ibaraki 300-21, Japan.
 2. 国立公害研究所 計測技術部
Chemistry and Physics Division, The National Institute for Environmental Studies.
 3. 国立公害研究所 生物環境部
Environmental Biology Division, The National Institute for Environmental Studies.
 4. 筑波大学 環境科学科
Environmental Science Division, Tsukuba Univ., P. O. Sakuramura, Ibaraki 300-31, Japan.

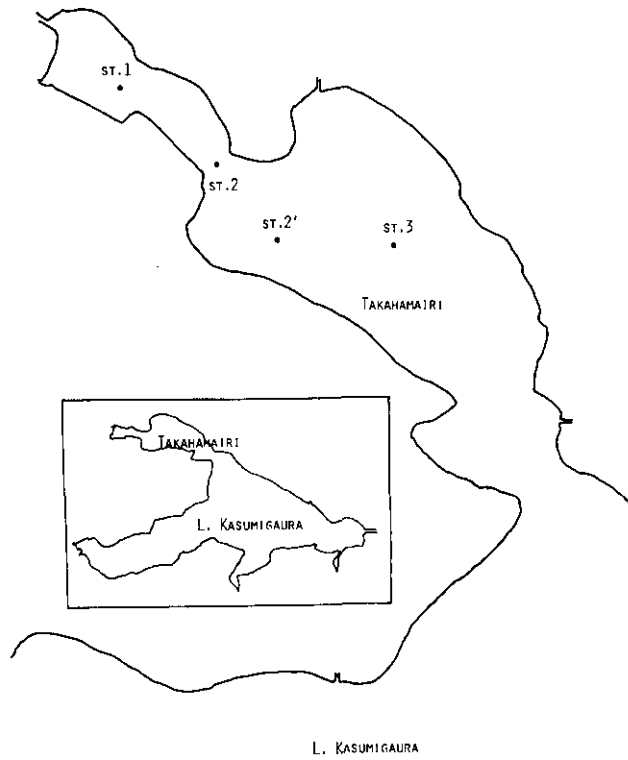


図1 調査地点

引用文献

相崎守弘(1977)：水質・生物調査資料，国立公害研究所特別研究調査報告，第1号，資料篇，1～28。

Limnological Data in Takahamairi Bay

Item	Station No.			Station No.			Station No.			
	1	2	2'	1	2	2'	1	2	2'	
Date	1977年6月1日			1977年6月8日			1977年6月22日			
Sampling Depth (m)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Sampling Time	13:05		12:30	12:30	12:10	11:30	13:35	13:10	12:15	
Weather			曇り	晴れ	晴れ	晴れ	曇り	曇り	曇り	
Air Temp. (°C)			23.9		23.7	27.3			18.2	
Depth (m)	2.2	3.3	3.9	2.0	3.5	3.8	2.0	3.5	4.2	
Transparency (cm)		75	75	75	95	125	60	60	90	
pH	7.6	7.6	7.8	7.6	7.4	7.4	7.3	7.5	7.7	
Water Temp. (°C)	0 m	22.0	22.0	21.8	25.6	25.4	20.2	19.3	20.1	20.2
	0.5	22.0	22.0	21.6	25.6	25.4	20.1	19.1	20.3	19.2
	1	21.5	21.8	21.1	24.0	25.3	20.0	19.1	20.3	19.3
	2		21.3	21.1	23.9	24.4	19.8	19.1	20.3	20.4
	3		21.2	21.1		24.3	19.5		20.3	20.1
	4									20.2
Bottom									20.3	
D. O. (mg/l)	0 m	10.0	8.8	8.9	8.5	6.0	6.5	10.0	9.8	9.5
	0.5	10.0	8.8	9.0	8.0	5.8	6.0	9.5	9.8	9.8
	1	8.7	8.6	7.5	2.0	5.3	5.7	9.3	9.5	9.8
	2	5.8	4.4	5.8	1.0	1.5	5.7	8.3	9.3	9.9
	3		1.4	4.8		1.0	3.7		9.1	10.0
	4									9.8
Bottom										
Light Intensity (lx)	0 m	26,000	60,000	45,000	30,000	29,000	29,000	32,000	26,000	17,000
	0.25									
	0.5	7,400	13,000	14,000	4,500	8,500	15,000	5,500	6,000	5,000
	1	1,500	6,000	6,000	1,000	9,000	5,500	1,000	1,500	1,700
	2	200	1,700	1,600	250	2,000	2,300		200	270
	3		300	700		60	950			
4			500							
Bottom										
Conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	0 m									
	0.5									
	1									
	2									
	3									
	4									
Bottom										
PO ₄ -P (mg/l)	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	ND	0.03	0.01	0.02	
T. P. (mg/l)	0.128	0.095	0.078							
NH ₄ -N (mg/l)	0.17	0.08	0.07	0.02	0.03	ND	0.04	0.01	ND	
NO ₂ -N (mg/l)	0.02	ND	ND	0.02	0.01	ND	0.06	0.01	ND	
NO ₃ -N (mg/l)	0.28	ND	ND	2.53	(34.6)	ND	2.67	(44.6)	ND	
Chlorophyll a ($\mu\text{g}/\text{l}$)	99	55	52	118	59	31	25	45	41	
Pheophytine a ($\mu\text{g}/\text{l}$)	22	11	9	13	14	9	2	5	3	
S, S (dry weight) (mg/l)	12.0	8.5	7.9	13.9	10.0	4.6	22.0	14.8	12.4	
POC (mg/l)	4.0	3.1	2.9	3.7	2.8	2.5	2.0	2.5	3.1	
PON (mg/l)	0.76	0.53	0.44	0.65	0.50	0.38	0.27	0.43	0.50	
C/N	5.3	5.9	6.5	5.6	5.5	6.4	7.3	5.9	6.3	

Limnological Data in Takahamairi Bay

Item	Station No.									
	1	2	2'	1	2	2'	1	2	2'	
Date	1977年7月6日			1977年7月14日			1977年7月21日			
Sampling Depth(m)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Sampling Time	12:30	12:00	11:30	12:40	12:40	12:05	13:10	12:50	12:20	
Weather	曇り	曇り	曇り	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	
Air Temp.(°C)			26.2			31.6	27.0	27.5	26.9	
Depth(m)	2.0	3.4	3.6		3.5	3.8	2.2	3.8	3.8	
Transparency(cm)				70.	55	60	70	65	90	
pH	8.5	9.1	9.0	7.7	7.4	7.4	7.6	7.3	7.2	
Water Temp.(°C)	0 m	26.7	26.6	26.4	28.9	28.2	28.0	26.5	27.8	27.4
	0.5	26.7	26.6	26.4	28.8	27.9	27.8	26.4	27.7	27.4
	1	26.7	26.5	26.2	28.4	27.5	27.3	26.0	27.5	26.6
	2	24.7	25.8	25.6	26.1	27.0	26.8	22.6	25.7	25.6
	3		25.3	25.2		26.3	26.5		25.5	25.5
	4									
Bottom	24.9	24.9	24.8				23.0	25.5	25.4	
D. O. (mg/l)	0 m	10.5	10.3	9.8			9.5	7.7	7.5	
	0.5	10.8	10.4	10.1			9.7	7.5	7.4	
	1	11.0	10.4	10.1			9.9	7.4	7.2	
	2	5.0	8.2	10.1			5.6	7.0	6.6	
	3		4.7	9.1				6.0	6.2	
	4									
Bottom			3.5					4.0	5.4	
Light Intensity (lx)	0 m				93,000	95,000	85,000	65,000	77,000	72,000
	0.25									
	0.5				17,000	16,000	15,000	18,000	18,000	23,000
	1				4,700	2,400	1,700	5,300	5,500	6,000
	2				600		100	1,200	1,800	550
	3						5		450	
4										
Bottom										
Conductivity ($\mu\text{V}/\text{cm}$)	0 m									
	0.5									
	1									
	2									
	3									
	4									
Bottom										
PO ₄ -P(mg/l)	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0.01	0.04	0.05	
T. P. (mg/l)							0.07	0.11	0.10	
NH ₄ -N(mg/l)	ND	ND	ND	0.01	0.04	0.04	0.01	0.05	0.05	
NO ₂ -N(mg/l)	0.03	0.02	ND	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02	
NO ₃ -N(mg/l)	0.47	0.14	ND	0.37	0.21	0.08	0.71	0.36	0.29	
Chlorophyll a($\mu\text{g}/\text{l}$)	67	43	25	50	21	21	45	18	16	
Pheophytine a($\mu\text{g}/\text{l}$)										
S. S(dry weight)(mg/l)	16.9	13.2	12.9	15.3	11.1	12.1	10.4	8.5	6.9	
POC(mg/l)	3.6	3.6	3.5	3.0	1.8	2.0	2.6	1.6	1.5	
PON(mg/l)	0.60	0.60	0.44	0.61	0.26	0.30	0.44	0.24	0.21	
C/N	6.1	6.1	8.0	5.0	6.9	6.8	6.0	6.8	7.1	

Limnological Data in Takahamairi Bay

Item	Station No.			Station No.			Station No.		
	1	2	2'	1	2	2'	1	2	2'
Date	1977年7月25日			1977年7月28日			1977年8月3日		
Sampling Depth(m)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sampling Time	10:15	10:45		14:45	14:35	14:20	13:20	13:05	12:35
Weather	晴れ	快晴				薄曇り	晴れ	快晴	快晴
Air Temp.(°C)	29.2	29.0							
Depth(m)	2.0	3.6		2.1	3.8	4.2	2.5	3.5	4.0
Transparency (cm)	50	75		60	85	85		70	85
pH	9.2	8.3					9.8	9.7	9.1
Water Temp. (°C)	0 m	28.8	29.2	29.4	29.4	29.1	31.3	32.1	31.7
	0.5			29.4	29.4	29.1	31.2	32.1	31.4
	1	28.1	28.8	29.4	29.4	29.0	30.9	30.6	30.0
	2	27.15	28.45	27.4	29.1	28.4	28.3	29.7	29.3
	3		28.3		28.3	28.1		29.2	29.2
	4					27.7			28.5
	Bottom					27.7			28.2
D. O. (mg/l)	0 m	11.7	11.3	8.2	6.8	6.5			8.4
	0.5				6.9	6.4			
	1	12.1	11.6	8.1	6.9	6.4			8.7
	2	4.9	9.8	2.6	6.6	5.4			6.6
	3		8.4		3.5	3.5			6.0
	4					2.0			3.0
	Bottom					0.6			
Light Intensity (lx)	0 m	22,000	70,000				69,000	80,000	97,000
	0.25								
	0.5	1,500	22,000				3,000	17,000	31,000
	1	230	5,500				130	3,000	11,000
	2		500					630	1,400
	3								280
	4								
Bottom									
Conductivity (μS/cm)	0 m								
	0.5								
	1								
	2								
	3								
	4								
	Bottom								
PO ₄ -P (mg/l)							0.02	0.03	0.02
T. P. (mg/l)									
NH ₄ -N (mg/l)							ND	ND	ND
NO ₂ -N (mg/l)							ND	ND	ND
NO ₃ -N (mg/l)							ND	ND	ND
Chlorophyll a (μg/l)	124	61		101	61	38	194	56	50
Pheophytine a (μg/l)	4	42		9	30	24		3	2
S. S (dry weight) (mg/l)	19.7	7.9		19.5	12.8	9.7	37.0	16.9	8.7
POC (mg/l)	7.1	2.7		7.0	3.9	3.4	13.0	5.2	2.9
PON (mg/l)	1.35	0.49		1.15	0.61	0.50	1.95	0.63	0.31
C/N	5.3	5.4		5.8	6.4	6.8	6.7	8.2	9.1

Limnological Data in Takahamairi Bay

Item	Station No.								
	1	2	2'	1	2	2'	1	2	2'
Date	1977年8月11日			1977年8月18日			1977年8月19日		
Sampling Depth(m)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sampling Time	13:00	12:45	12:10	13:00	12:30	12:00	13:00	12:30	12:00
Weather	曇り	雨	小雨	豪雨	豪雨	豪雨	小雨	小雨	小雨
Air Temp.(°C)		22.7	24.9						
Depth(m)	2.1								
Transparency (cm)	30	60	65						
pH									
Water Temp. (°C)	0 m	26.7	27.4	27.3					
	0.5	26.6	27.4	27.3					
	1	26.5	27.2	27.3					
	2	26.1	27.0	27.3					
	3		26.9	27.3					
	4								
Bottom									
D.O. (mg/l)	0 m								
	0.5								
	1								
	2								
	3								
	4								
Bottom									
Light Intensity (lx)	0 m	16,000	15,000	8,000					
	0.25								
	0.5	270	2,000	1,500					
	1		160	420					
	2			4					
	3								
Bottom									
Conductivity (μS/cm)	0 m								
	0.5								
	1								
	2								
	3								
	4								
Bottom									
PO ₄ -P(mg/l)				0.04	0.01	0.01			
T. P. (mg/l)				0.12	0.28	0.09			
NH ₄ -N(mg/l)	ND	ND	ND	0.02	ND	ND			
NO ₂ -N(mg/l)	ND	ND	ND	0.03	0.01	0.01			
NO ₃ -N(mg/l)	0.03	0.02	0.01	1.56	0.21	0.37			
Chlorophyll a(μg/l)	187	122	73	10	365	55	3	15	93
Pheophytine a(μg/l)	15			14	57	16	4	3	4
S. S(dry weight)(mg/l)	47.5	22.7	20.7	12.3		14.3	39.5	19.9	20.8
POC(mg/l)	7.8	6.0	4.5	3.6		3.4	1.9	1.7	5.0
PON(mg/l)	1.41	1.09	0.63	0.65		0.61	0.24	0.27	0.95
C/N	5.5	5.5	7.1	5.5		5.6	7.8	6.3	5.2

Limnological Data in Takahamairi Bay

Station No.	1			2			2'		
	1	2	2'	1	2	2'	1	2	2'
Date	1977年8月20日			1977年8月25日			1977年9月6日		
Sampling Depth(m)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sampling Time	13:00	12:30	12:00	13:05	12:45	12:05	10:30	11:10	
Weather				曇り	曇り	曇り	晴れ	晴れ	
Air Temp.(°C)				22.0	22.8	21.2	29.2	29.3	
Depth(m)				2.6	4.0	4.4	2.0	3.5	
Transparency(cm)				125	80	75	20	30	
pH				7.7	8.2	8.6	9.6	9.9	
Water Temp.(°C)	0 m			21.2	21.8	22.1	29.8	28.2	
	0.5			21.2	21.8	22.1	26.3	27.4	
	1			21.1	21.8	22.1	25.7	26.5	
	2			21.1	21.6	22.1	24.2	26.1	
	3				21.6	22.1		25.4	
	4				21.5	22.1			
	Bottom				20.9		22.1	24.2	23.7
D.O.(mg/l)	0 m						15.0	11.0	
	0.5						12.3	11.0	
	1						8.2	7.5	
	2						2.4	6.3	
	3							3.6	
	4								
	Bottom								
Light Intensity (lx)	0 m						70,000	88,000	
	0.25								
	0.5						230	5,000	
	1						5	130	
	2							6	
	3								
	4								
Bottom									
Conductivity (μm/cm)	0 m								
	0.5								
	1								
	2								
	3								
	4								
	Bottom								
PO ₄ -P(mg/l)									
T.P.(mg/l)									
NH ₄ -N(mg/l)									
NO ₂ -N(mg/l)									
NO ₃ -N(mg/l)									
Chlorophyll a(μg/l)	4	11	42	17	56	96	131	114	
Pheophytine a(μg/l)	15	10	42		16	6	10		
S.S(dry weight)(mg/l)	14.2	22.2	18.0	8.8	16.4	28.9	33.7	27.6	
POC(mg/l)	0.9	1.6	3.2	1.3	2.9	4.9	10.5	9.0	
PON(mg/l)	0.12	0.23	0.60	0.19	0.45	0.79	1.59	1.42	
C/N	7.8	6.7	5.3	6.6	6.4	6.2	6.6	6.4	

Limnological Data in Takahamairi Bay

Item	Station No.			Station No.			Station No.			
	1	2	2'	1	2	2'	1	2	2'	
Date	1977年9月14日			1977年9月20日			1977年10月12日			
Sampling Depth(m)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Sampling Time	13:20	13:00	12:05	12:15	11:55	11:35	13:50	13:40	12:35	
Weather	曇り	曇り	曇り	快晴	快晴	快晴	晴れ	晴れ	晴れ	
Air Temp.(°C)	28.5	26.0	25.0			27.7			20.6	
Depth(m)	2.1	3.4	3.9	2.5	3.6	4.1	2.1	3.2	3.6	
Transparency(㎝)	30	35	50	20	30	35	60	55	60	
pH	8.6	8.1	8.5	6.3	8.2		7.3	7.5	8.8	
Water Temp.(°C)	0 m	25.5	26.9	26.8	23.1	26.2	24.4	18.2	19.2	19.1
	0.5	25.2	26.9	26.7	22.4	22.9	23.9	18.2	19.1	19.1
	1	23.4	26.8	26.7	22.1	22.6	23.4	18.2	19.1	19.1
	2	22.6	26.7	26.6	21.8	22.2	22.9	18.2	19.1	19.0
	3		26.6	26.3		22.1	22.9		19.0	19.0
	4						22.9			
	Bottom	22.9	26.3	26.3	21.9	22.2	23.1	18.2	18.9	19.0
D.O.(mg/l)	0 m	11.1	8.2	7.9	5.0	8.5	6.7	7.8	8.8	9.2
	0.5	10.8	7.9	7.8	4.6	5.6	6.5		8.9	9.3
	1	5.0	7.2	7.6	4.5	5.0	6.3	7.9	8.9	9.4
	2	4.9	7.2	7.4	4.4	4.6	5.2	7.8	8.8	9.3
	3		7.5	6.2			5.1		8.8	9.3
	4						2.0			
	Bottom	0.3	0.4	0.4	4.3	4.0	0.5		7.5	8.6
Light Intensity (lx)	0 m			75,000	74,000	75,000				
	0.25									
	0.5			600	5,000	5,500				
	1			30	150	450				
	2									
	3									
	4									
Bottom										
Conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	0 m									
	0.5									
	1									
	2									
	3									
	4									
Bottom										
PO ₄ -P(mg/l)	0.011	0.013	0.015	0.013	0.013	0.010	0.015	0.004	0.003	
T.P.(mg/l)	0.177	0.164	0.138	0.158	0.197	0.178	0.102	0.090	0.107	
NH ₄ -N(mg/l)				0.358	0.053	0.148	0.422	0.040	0.005	
NO ₂ -N(mg/l)				0.013	0.014	0.023	0.039	0.030	0.024	
NO ₃ -N(mg/l)				1.59	0.211	0.827	0.371	0.186	0.052	
Chlorophyll a($\mu\text{g}/\text{l}$)	163	154	95	4	136	115	23	93	148	
Pheophytine a($\mu\text{g}/\text{l}$)	10	6	5	7	10	5	13	15	5	
S.S(dry weight)(mg/l)	36.7	27.9	22.7	55.6	34.4	34.4	17.0	20.6	34.4	
POC(mg/l)	13.9	10.0	6.0	2.6	8.7	7.1	2.3	2.3	5.1	
PON(mg/l)	2.42	1.74	1.12	0.33	1.58	1.19	0.30	0.57	0.88	
C/N	5.8	5.7	5.4	7.8	5.5	6.0	7.5	4.0	5.9	

Limnological Data in Takahamairi Bay

Item	Station No.									
	1	2	2'	1	2	2'	1	2	2'	
Date	1977年10月26日			1977年11月24日			1977年12月21日			
Sampling Depth(m)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Sampling Time	12:25	12:15	10:50	12:20	11:50	10:40	13:10	13:50	14:15	
Weather		晴れ	晴れ	曇り	曇り	快晴	晴れ	快晴	晴れ	
Air Temp.(°C)		23.5	22.5	12.4		13.1	9.2	7.7		
Depth(m)	2.3	3.6		2.2	3.6	3.9	1.9	3.3	3.7	
Transparency(cm)	110	90	85	75	74	75	60	80	90	
pH	8.8	9.2	9.2	8.6	9.3	9.1	7.7		9.1	
Water Temp.(°C)	0 m	19.5	20.4	20.1	13.4	13.6	13.7	8.5	8.6	9.0
	0.5	17.2	18.4	18.6	13.4	13.5	13.2	8.5	8.6	9.0
	1	16.7	17.6	17.8	12.6	13.2	13.1	8.5	8.6	9.0
	2	16.3	17.3	17.5	11.7	13.0	13.0		8.6	9.0
	3		17.2	17.4		12.7	12.9		8.6	8.9
	4									
	Bottom	16.3	17.2	17.6	11.6	12.8	12.9	8.4	8.3	8.9
D.O.(mg/l)	0 m			11.5	11.4	11.8	11.0	9.5	10.6	
	0.5			11.8	11.5	12.3	11.3	9.3	11.0	
	1			11.3	11.7	12.7	11.4	9.2	11.0	
	2			9.7	11.5	12.5		9.2	11.1	
	3				10.8	12.0		9.2	11.0	
	4									
	Bottom				8.4	9.0	8.6	11.3	9.1	10.5
Light Intensity (lx)	0 m						45,000	25,000	25,000	
	0.25									
	0.5						9,000	8,000	6,000	
	1						1,700	3,000	2,000	
	2						400	1,000	750	
	3							330	280	
	4									
Bottom										
Conductivity (μS/cm)	0 m									
	0.5									
	1									
	2									
	3									
	4									
Bottom										
PO ₄ -P(mg/l)	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004	
T.P.(mg/l)	0.107	0.100	0.078	0.063	0.070	0.066	0.128	0.093	0.079	
NH ₄ -N(mg/l)	0.055	0.013	0.007	0.007	0.005	0.010	0.032	0.032	0.017	
NO ₂ -N(mg/l)	0.032	0.022	0.016	0.031	0.018	0.005	0.014	0.011	0.002	
NO ₃ -N(mg/l)	1.17	0.49	0.007	1.09	0.37	0.03	0.67	0.45	0.003	
Chlorophyll a(μg/l)	62	110	61	81	107	86	129	117	99	
Pheophytine a(μg/l)	15	12	13	18	21	18	11	53	29	
S.S(dry weight)(mg/l)	13.5	18.3	8.4	18.6	17.3	16.1	22.0	13.8	12.7	
POC(mg/l)	3.8	5.4	3.1	4.1	4.6	4.5	4.0	3.7	3.8	
PON(mg/l)	0.72	0.91	0.66	0.60	0.75	0.70	0.70	0.65	0.60	
C/N	5.3	5.9	4.7	6.8	6.1	6.4	5.7	5.6	6.3	

Limnological Data in Takahamairi Bay

Item \ Station No.	1			2			2'			
	1	2	2'	1	2	2'	1	2	2'	
Date	1978年1月26日			1978年2月22日			1978年3月23日			
Sampling Depth(m)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Sampling Time	12:45	12:00	10:40	13:00	12:35	11:20	12:20	11:50	11:20	
Weather	曇り	曇り	曇り	晴れ	晴れ	快晴	曇り	曇り	曇り	
Air Temp.(°C)			4.0			9.5			9.4	
Depth(m)	2.4	3.6	3.8	2.0	3.4	3.8	1.9	3.5	3.9	
Transparency(cm)	110	110	130	115	125	140	55	70	70	
pH	7.2	7.2	7.4	7.4	7.4	7.6	8.0	8.2	7.8	
Water Temp. (°C)	0 m	3.2	3.3	3.9	5.0	4.3	4.2	9.3	9.1	8.8
	0.5	3.0	3.4	3.9	4.9	4.3	4.1	9.3	9.1	8.8
	1	3.3	3.4	3.8	4.9	4.3	4.1	9.2	9.1	8.8
	2	3.3	3.4	3.7	4.9	4.3	4.1	8.3	8.9	8.6
	3		3.6	3.7		4.3	4.1		8.6	8.5
	4									
	Bottom		3.8	4.1		4.3	4.1		8.6	8.5
D. O. (mg/l)	0 m	9.9	10.8	11.6	8.9	9.2	9.9	11.6	11.6	11.1
	0.5	9.9	10.7	11.4	9.0	9.2	10.2	11.6	11.6	11.1
	1	9.8	10.6	11.3	9.1	9.2	10.2	11.7	11.7	11.1
	2	9.8	10.4	11.2	9.1	9.1	10.2	8.6	11.7	10.9
	3		10.2	11.1		9.1	10.2		11.3	10.7
	4									
	Bottom		9.4	9.6		9.0	9.3		10.0	7.7
Light Intensity (lx)	0 m	3,500	4,200	10,000	55,000	60,000	60,000	73,000	76,000	35,000
	0.25									
	0.5	1,700	1,800	4,000	30,000	35,000	35,000	15,000	24,000	7,000
	1	900	900	2,500	12,000	18,000	16,000	2,200	6,000	1,700
	2	200	370	750	4,000	6,000	6,000	150	400	200
	3		150	250		2,000	2,500			25
	4					1,200	1,200			5
Bottom										
Conductivity (μV/cm)	0 m									
	0.5									
	1									
	2									
	3									
	4									
Bottom										
PO ₄ -P(mg/l)	0.006	0.005	0.004	0.003	0.003	N D	0.013	0.005	0.005	
T. P. (mg/l)	0.058	0.054	0.055	0.075	0.059	0.051	0.117	0.084	0.082	
NH ₄ -N(mg/l)	0.014	0.015	0.028	0.257	0.557	0.628	0.342	0.020	0.044	
NO ₂ -N(mg/l)	0.005	0.005	0.005	0.007	0.008	0.006	0.014	0.008	0.007	
NO ₃ -N(mg/l)	0.46	0.31	0.20	0.40	0.21	0.18	0.572	0.278	0.086	
Chlorophyll a(μg/l)	29	33	34	40	36	35	88	91	84	
Pheophytine a(μg/l)	4	9	5	9	31	6	21	55	28	
S. S(dry weight)(mg/l)	6.2	6.1	7.0	9.8	7.9	7.4	22.7	16.9	17.3	
POC(mg/l)	1.9	1.9	2.1	2.7	2.3	2.3	4.3	4.2	4.1	
PON(mg/l)	0.30	0.32	0.32	0.45	0.39	0.38	0.47	0.70	0.72	
C/N	6.0	6.0	6.5	6.2	5.8	5.6	9.1	5.9	5.7	

Limnological Data in Takahamairi Bay

Item	Station No.			Station No.			Station No.			
	1	2	2'	1	2	2'	1	2	2'	
Date	1978年4月19日			1978年5月31日			1978年7月12日			
Sampling Depth(m)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Sampling Time	12:00	13:00	11:00	13:00	12:30	12:00	13:40		11:25	
Weather	晴れ	快晴	快晴	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ		晴れ・曇り	
Air Temp.(°C)			18.4			22			31.8	
Depth(m)	2.1	3.4	3.9				2.0	3.5	3.7	
Transparency(cm)	50	75	90	90	80	120	60	70	75	
pH	7.8	7.5	8.4	7.0	7.2	7.8	9.0	9.0	8.8	
Water Temp. (°C)	0 m	15.9	15.3	15.9	20.0	21.3	22.0	29.8	29.9	29.4
	0.5	15.8	15.3	15.1			22.0	29.8	29.9	29.3
	1	15.3	15.2	14.3			22.0	29.8	29.9	29.3
	2	11.9	15.2	14.1			22.0	29.6	29.9	29.3
	3		14.6	13.9			22.0		29.7	29.0
	4									
	Bottom	12.7	14.2	13.8					29.6	29.0
D. O. (mg/l)	0 m	10.4	9.6	9.6	5.7	5.4	8.2	9.8	8.3	7.2
	0.5	10.3	9.6	9.4				10.0	8.6	7.2
	1	9.8	9.6	8.6				9.9	8.6	7.3
	2		9.6	8.5				9.9	8.5	7.0
	3		9.4	8.3					8.0	6.5
	4									
	Bottom	6.4	8.2	7.5					6.1	5.5
Light Intensity (lx)	0 m			90,000		65,000	100,000	70,000	100,000	
	0.25									
	0.5			1,500		30,000	1,500	8,000	25,000	
	1			500		10,000	500	1,300	5,000	
	2					800	5	20	500	
	3					100			30	
	4									
Bottom										
Conductivity (μV/cm)	0 m									
	0.5									
	1									
	2									
	3									
	4									
	Bottom									
PO ₄ -P(mg/l)	0.013	0.007	0.007	0.024	0.015	0.009				
T. P. (mg/l)	0.132	0.106	0.084	0.123	0.094	0.082	0.012	0.018	0.035	
NH ₄ -N(mg/l)	0.214	0.186	0.343	0.280	0.188	0.143	0.291	0.202	0.103	
NO ₂ -N(mg/l)	0.024	0.017	0.013	0.028	0.024	0.029	0.002	0.004	0.006	
NO ₃ -N(mg/l)	2.00	1.34	1.40	0.636	0.407	0.399	0.011	0.017	0.023	
Chlorophyll a(μg/l)	87	78	130	17		29	193	183	111	
Pheophytine a(μg/l)	30	20	23	10		21		5	10	
S. S(dry weight)(mg/l)	24.7	19.2	9.0	20.4	18.8		46.7	36.6	24.1	
POC(mg/l)	3.7	3.2	3.3	2.2	2.3		11.5	11.0	7.6	
PON(mg/l)	0.57	0.54	0.61	0.34	0.35		1.76	1.76	1.10	
C/N	6.5	5.9	5.4	6.6	6.6		6.5	6.2	6.9	

Limnological Data in Takahamairi Bay

Item	Station No.			Station No.			Station No.			
	1	2	2'	1	2	2'	1	2	2'	
Date	1977年7月13日			1978年8月14日			1978年8月16日			
Sampling Depth(m)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Sampling Time	14:35	12:20	11:00	12:30	12:10	11:20	10:45	11:15	11:30	
Weather		晴れ~曇り	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	
Air Temp.(°C)			29.8	30.0	30.0	32.0	32.5	33.0	34.0	
Depth(m)	2.1	3.4				3.8	1.9	3.4	3.6	
Transparency(cm)				25	20	25	25	25	30	
pH			9.3	8.4	8.3	8.7	8.6	8.8	9.6	
Water Temp.(°C)	0 m	29.5	29.7	29.5	30.8	31.0	30.2	30.2	30.7	30.3
	0.5	29.5	29.5	29.5	30.7	31.1	30.1	30.0	30.5	30.2
	1	29.4	29.4	29.3	30.7	31.1	30.1	29.9	30.4	30.0
	2	27.3	28.8	28.6	30.6	30.8	30.2		29.9	29.3
	3		28.3	28.4		30.8	30.0			29.0
	4			28.3						
	Bottom	22.4	28.3	28.2			29.3	29.6		29.0
D.O.(mg/l)	0 m			7.8	7.4	8.6	9.6	8.6	12.3	
	0.5			7.7	6.9	8.7	9.0	7.7	12.0	
	1			7.5	6.7	8.5	7.2	7.1	10.7	
	2			7.2	6.5	8.1		5.4	7.8	
	3				6.1	8.0		3.9	4.7	
	4									
	Bottom				6.2	5.4	7.2	5.1		3.9
Light Intensity (lx)	0 m			80,000	78,000	70,000	20,000	47,000	45,000	
	0.25			5,000	420	7,500	3,000	7,400	15,000	
	0.5			70	0	500	20	600	4,500	
	1			1		45		2	210	
	2									
	3									
	4									
Bottom										
Conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	0 m	258	291	308	322	327	339	317	320	340
	0.5	252	289	308	319	327	337	315	314	332
	1	247	283	307	319	327	335	310	312	325
	2	229	278	307	316	327	332		308	310
	3			306		324	332		311	310
	4			306						315
	Bottom	245	315	500				307		
PO ₄ -P(mg/l)				0.216		0.245	0.188	0.235	0.208	
T.P.(mg/l)							0.600	0.580	0.402	
NH ₄ -N(mg/l)				0.176		0.181	0.193	0.267	0.173	
NO ₂ -N(mg/l)				0.002		0.002	0.002	0.002	0.002	
NO ₃ -N(mg/l)				0.005		0.001	0.002	0.002	0.002	
Chlorophyll a($\mu\text{g}/\text{l}$)				420		1353	340	253	110	
Pheophytine a($\mu\text{g}/\text{l}$)							13	23	14	
S.S(dry weight)(mg/l)				26.6		35.3				
POC(mg/l)				9.1		15.3				
PON(mg/l)				1.44		2.28				
C/N				6.4		6.7				

Limnological Data in Takahamairi Bay

Item	Station No.								
	1	2	2'	1	2	2'	1	2	2'
Date	1978年9月20日			1978年9月21日			1978年10月26日		
Sampling Depth(m)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sampling Time	12:00	11:43	10:38	12:30		11:40	11:45		10:45
Weather	晴れ	晴れ	曇り	曇り		曇り	曇り		曇り
Air Temp.(°C)	27.2	27.5	27.7						21.5
Depth(m)	2.0	3.5	3.8	2.0			2.0		3.7
Transparency(cm)	60	35	40	60		50	70		55
pH	8.6	9.7	9.4				7.9		8.8
Water Temp.(°C)	0 m	25.6	25.2	24.6	23.7		23.4	18.3	18.5
	0.5	24.7	24.0	23.7	23.7		23.4	18.1	18.4
	1	23.6	23.3	23.2	23.6		23.4	17.9	18.0
	2		23.1	23.1	23.6		23.4	17.5	17.8
	3		22.8	22.9			23.2		17.6
	4								
	Bottom	22.9	22.8	22.6					
D.O.(mg/l)	0 m	12.7	14.4	10.6	9.0		8.4	7.6	11.2
	0.5	12.6	13.3	10.7	9.0		8.4	7.6	11.2
	1	8.4	8.4	8.5	9.0		8.5	7.4	11.0
	2	7.8	4.7	7.7	8.6		8.5	6.6	9.6
	3		3.6	5.3			8.5		8.0
	4								
	Bottom								
Light Intensity (lx)	0 m	55,000	60,000	13,000	20,000		11,500	27,000	15,000
	0.25	25,000	10,000	4,000			2,300	10,000	5,200
	0.5	10,000	1,500	1,200	2,500		1,100	3,500	1,700
	1	2,000	100	200	370		110	700	400
	2	30		40	70			170	70
	3			5					
	4								
Bottom									
Conductivity ($\mu S/cm$)	0 m	224	303	322	220		300	200	280
	0.5	219	296	314	218		300	200	279
	1	217	283	308	218		300	196	277
	2	212	254	303	215		300	196	271
	3		238	329			298		264
	4								
Bottom									
PO ₄ -P(mg/l)	0.006	0.013	0.017						
T.P.(mg/l)	0.145	0.382	0.298						
NH ₄ -N(mg/l)	0.074	0.024	0.054						
NO ₂ -N(mg/l)	0.460	0.405	0.167						
NO ₃ -N(mg/l)	0.68	0.108	0.033						
Chlorophyll a($\mu g/l$)	114	360	260			137			
Pheophytine a($\mu g/l$)	9	7	6						
S.S(dry weight)(mg/l)	18.0	55.8	43.8			30.2			
POC(mg/l)	5.6	19.7	14.6			6.4			
PON(mg/l)	0.95	3.38	2.40			1.03			
C/N	5.9	5.8	6.1			6.2			

Limnological Data in Takahamairi Bay

Item	Station No.	1	2	2'	1	2	2'	1	2	2'
	Date	1978年10月27日								
Sampling Depth(m)	0	0	0							
Sampling Time	12:30	13:30	11:50							
Weather	雨	雨~曇り	曇り							
Air Temp.(°C)	20.5		20.5							
Depth(m)	2.1	3.7	3.7							
Transparency(cm)	80	70	75							
pH	7.6	7.9	8.3							
Water Temp.(°C)	0 m	18.4	18.5	18.5						
	0.5	18.4	18.5	18.5						
	1	18.3	18.4	18.5						
	2	17.8	18.4	18.5						
	3		18.0	18.5						
	4									
	Bottom	17.6	18.1	18.2						
D. O. (mg/l)	0 m	7.2	5.8	10.4						
	0.5	7.2	5.8	10.4						
	1	7.2	5.8	10.4						
	2		5.7	10.4						
	3			10.3						
	4									
	Bottom	3.5	3.0	6.5						
Light Intensity (lx)	0 m	7,600	8,500	15,000						
	0.25	6,300	5,200	11,000						
	0.5	1,600	690	1,200						
	1	370	130	220						
	2	12	2	4						
	3									
	4									
Bottom										
Conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	0 m		241	276						
	0.5		240	275						
	1		238	275						
	2		238	275						
	3		226	275						
	4									
	Bottom									
PO ₄ -P(mg/l)	0.002>	0.002>	0.002>							
T. P. (mg/l)	0.107	0.132	0.164							
NH ₄ -N(mg/l)	0.267	0.156	0.028							
NO ₂ -N(mg/l)	0.048	0.036	0.015							
NO ₃ -N(mg/l)	0.060	0.011	0.004							
Chlorophyll a($\mu\text{g}/\text{l}$)	105	126	157							
Pheophytine a($\mu\text{g}/\text{l}$)	3	1	2							
S. S(dry weight)(mg/l)	16.8	24.7	28.3							
POC(mg/l)	4.8	6.9	8.7							
PON(mg/l)	0.72	1.12	1.50							
C/N	6.7	6.2	5.9							

地下水調査資料

村岡浩爾¹・津野 洋¹・細見正明¹

Geophysical and chemical data on the ground water in Miho village

Kohji MURAOKA¹, Hiroshi TSUNO¹ and Masaaki HOSOMI¹

1. 測定地点および調査期間

霞ヶ浦東部沿岸域に位置する美浦村を中心とするモデル地域を設定し、既存の井戸115か所を調査対象の井戸とした(図1)。地下水調査は、1978年1月下旬、2月下旬、3月下旬、5月中旬、8月下旬に行った。

2. 調査方法

水温：現場にて棒状温度計で測定した。

PH：比色により現場で測定した。

電気伝導度：実験室に持ち帰った試料について電気伝導度計(東亜電波Co.)を用いて測定した。

濁度：実験室に持ち帰った試料について濁度計(野田通信Co.)を用いて測定した。

アルカリ度：実験室に持ち帰った試料について、上水試験法(1970)に準拠して測定した。

以下の分析に際しては、実験室に持ち帰った試水を、グラスファイバーフィルター(MilliporeAP)で濾過後、濾過水について測定した。

アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素、リン酸態リン、塩素イオン：アンモニア態窒素は、インドフェノール法、亜硝酸態窒素は、N-(1-ナフチル)エチレンジアミン・スルファニル酸法、硝酸態窒素は、硫酸ヒド Juzin で亜硝酸に環元し、N-(1-ナフチル)エチレンジアミン・スルファニル酸法、リン酸態リンは、アスコルビン酸で環元し、モリブデン酸ブルー法、また塩素イオンは、チオシアン酸第二水銀比色法に基づいて、テクニコン社自動分析装置(GSM-6)により測定した。

溶存全リン酸、溶存全窒素：過硫酸カリウムで分解後、溶存全窒素は硝酸態窒素として、溶存全リン酸はリン酸態リンとして、自動分析装置を用いて測定した(細見・津野、未発表)。

アルカリ性過マンガン酸カリウム消費量：下水試験法(1974)のアルカリ性過マンガン酸カリウム

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町

Water and Soil Environment Division, The National Institute for Environmental Studies, P. O. Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.

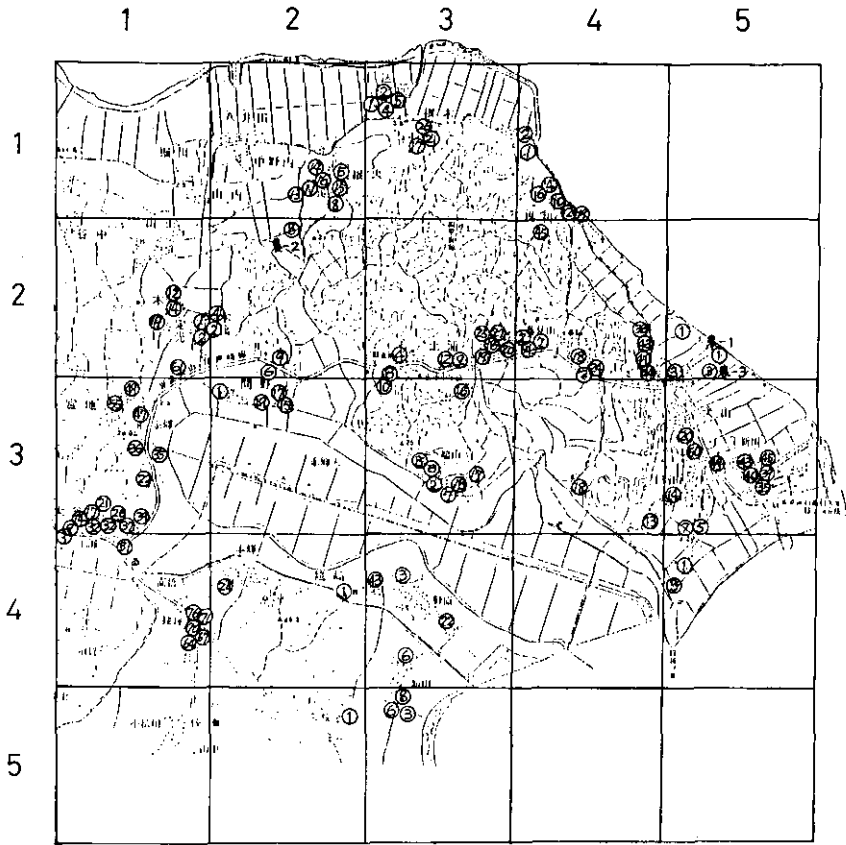


図1 美浦村モデル地域の地下水調査に関して測定した井戸分布

Fig.1 Location of wells for sampling in Miho village

法により測定した。

3. 結 果

得られた結果を以下の表に示す。なお、表の見方は、

- (1) “ST. NO.” の左側の数字は、第1回（1978年1月）～第5回（1978年8月）の調査結果を示す。
“ST. NO.” は、測定した井戸の地点を示す。例えば、“1201”とあるのは、図-1の座標系で第1列の第2行目のメッシュにある①という井戸を示す。ただし、“6001”～“6003”は、農業用井戸1～3を示す。
- (2) WELL : 井戸種類 1 : 打込井戸
 0 : 掘抜井戸
- USAGE : 井戸の使用状況 1 : 使用
 0 : 不使用
- DEPTH : 井戸の深さ (m)
- W. TEMP 水温 (℃)

E. C. : 電気伝導度 ($\times 100 \mu \text{S/cm}$)
TURB : 濁度 (ppm)
ALKALI. : アルカリ度 (ppm)
G. W. L. : 地下水位 (T. P. m)

(3) 空白箇所は、井戸涸れのため採水不能などにより分析できなかったことを示す。

引用文献

細見・津野：T-N, T-Pの同時測定について（未発表）.
日本下水道協会(1974)：下水試験法.
日本水道協会(1970)：上水試験法.

MIMOMURA GROUNDWATER QUALITY 1978, JAN, FEB, MAR, MAY, AUG

ST. NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W. TEMP (C)	PH	E. C.	TURB. (PPH)	ALKALI (PPH)	NH4-N (PPH)	NO2-N (PPH)	NO3-N (PPH)	T-N (PPH)	PO4-P (PPH)	T-P (PPH)	CL- (PPH)	COD (PPH)	G.W.L (M)
1	1201	1	1	18.00	13.0	7.4	3.50										
2	1201	1	1	18.00	12.5	7.3	4.31										
3	1201	1	1	18.00	15.0	7.4	4.86	0.4	141.0	0.00	0.001	0.00	0.00	0.10	0.15	36.9	0.5
4	1201	1	1	18.00	15.0	7.5	4.80	0.4	142.5	0.00	0.000	0.00	0.05	0.09	0.09	34.8	1.0
5	1201	1	1	18.00	16.5	7.2	4.40	0.0	140.0	0.01	0.000	0.00	0.01	0.09	0.09	35.5	0.8
1	1202	0	0	3.50	11.0	>7.4	7.10										
2	1202	0	0	3.50	11.0	7.5	9.00										
3	1202	0	0	3.50	10.0	7.5	10.20	5.5	220.5	0.00	0.001	0.04	0.17	0.09	0.11	115.5	2.5
4	1202	0	0	3.50	11.9	7.6	8.70	1.2	232.5	0.00	0.003	0.00	0.10	0.10	0.10	113.0	3.6
5	1202	0	0	3.50	16.0	7.3	7.30	116.0	205.0	0.17	0.004	0.10	0.60	0.01	0.02	70.7	2.1
1	1212	0	1	3.41	10.0	>7.4	6.00										
2	1212	0	1	3.41	13.0	7.3	5.60		192.6	0.04	0.005	0.00	0.09	0.23	0.34	54.5	1.1
3	1212	0	1	3.41	12.7	7.7	6.55	1.0	190.7	0.00	0.003	0.00	0.00	0.33	0.32	53.8	1.2
4	1212	0	1	3.41	15.0	7.3	6.10	0.4	190.0	0.04	0.004	0.00	0.10	0.29	0.31	51.1	1.6
5	1212	0	1	3.41	15.5	7.5	6.30	1.0	186.0	0.06	0.002	0.00	1.09	0.36	0.36	52.9	1.6
1	1214	1	1	40.00	6.0	7.4	5.30										
2	1214	1	1	40.00	8.0	7.2	5.30		163.8	0.00	0.000	0.00	0.00	0.06	0.06	74.5	0.8
3	1214	1	1	40.00	15.5	7.2	6.26	0.1	165.9	0.00	0.000	0.00	0.00	0.05	0.06	78.5	0.7
4	1214	1	1	40.00	16.0	7.4	4.80	0.0	147.5	0.00	0.000	0.00	0.00	0.05	0.05	57.2	0.9
5	1214	1	1	40.00	19.0	7.4	3.45	0.0	120.0	0.00	0.002	0.00	0.00	0.07	0.08	30.2	0.3
1	1219	0	1	3.55	4.0	6.4	4.30										
2	1219	0	1	2.39	11.5	6.2	5.10		94.3	0.22	0.007	2.08	2.21	0.02	0.02	65.3	1.1
3	1219	0	1	2.39	10.8	6.1	5.62	0.4	96.1	0.23	0.014	1.83	2.31	0.06	0.04	60.7	1.1
4	1219	0	1	2.39	15.2	6.1	5.00	0.1	97.5	0.15	0.004	2.16	2.73	0.01	0.01	66.3	1.3
5	1219	0	1	2.39	16.5	6.4	5.10	2.5	108.0	0.14	0.007	9.1	1.03	0.02	0.03	59.3	1.5
1	1322	1	1	36.00	12.7	7.2	2.32										
2	1322	1	1	36.00	15.3	7.2	2.30		116.7	0.00	0.001	0.00	0.00	0.06	0.09	8.0	0.1
3	1322	1	1	36.00	15.2	7.3	2.58	0.0	115.2	0.00	0.000	0.00	0.00	0.10	0.08	8.7	0.0
4	1322	1	1	36.00	15.2	7.2	3.00	0.0	122.5	0.00	0.000	0.06	0.06	0.06	0.06	10.0	0.3
5	1322	1	1	36.00	17.0	7.0	2.95	0.0	123.0	0.00	0.029	0.24	0.27	0.03	0.04	13.4	0.8
1	1335	0	0	2.76	9.0	7.0	4.42										
2	1335	0	0	2.76	9.8	6.8	4.00		167.8	1.42	0.001	0.08	1.93	0.02	0.01	39.5	3.8
3	1335	0	0	2.76	9.8	7.0	4.72	5.7	162.9	1.15	0.005	0.10	1.86	0.03	0.01	34.4	3.4
4	1335	0	0	2.76	13.0	7.0	5.65	10.3	172.5	1.68	0.008	0.10	2.43	0.05	0.05	33.0	4.1
5	1335	0	0	2.76	18.5	6.9	5.00	22.0	173.0	2.29	0.000	0.00	2.72	0.07	0.06	37.2	4.0
1	1336	0	1	2.94	11.9	6.4	3.50										
2	1336	0	1	2.94	11.2	6.3	3.10		77.0	0.00	0.002	6.58	10.26	0.04	0.03	25.0	1.0
3	1336	0	1	2.94	10.9	6.4	3.48	0.4	85.4	0.01	0.002	5.27	7.59	0.07	0.05	19.4	0.7
4	1336	0	1	2.94	11.8	6.4	3.85	0.4	87.5	0.05	0.000	6.79	7.39	0.06	0.06	18.9	1.1
5	1366	0	1	2.94	16.2	6.4	3.85	0.0	98.0	0.07	0.000	6.12	8.35	0.07	0.07	25.5	0.7
1	1347	0	1	4.80	12.0	6.4	3.29										
2	1347	0	1	4.80	13.0	6.4	3.40		80.9	0.00	0.001	4.95	4.98	0.03	0.02	18.2	0.3
3	1347	0	1	4.80	12.0	6.4	4.00	0.3	83.4	0.00	0.002	4.19	5.79	0.04	0.02	19.0	0.4
4	1347	0	1	4.80	13.0	6.4	3.80	0.8	82.5	0.00	0.000	3.85	4.65	0.01	0.01	15.6	0.8
5	1347	0	1	4.80	16.2	6.4	3.35	0.0	83.0	0.07	0.000	3.63	4.01	0.02	0.03	15.4	0.5
1	1349	0	0	3.70	9.5	7.4	6.78										
2	1349	0	0	3.70	10.3	7.4	6.80		228.4	0.12	0.017	0.05	1.57	0.02	0.04	93.5	3.7
3	1349	0	0	3.70	9.6	7.4	6.78	7.1	218.5	0.62	0.009	0.04	1.01	0.03	0.01	98.1	3.6
4	1349	0	0	3.70	12.0	7.4	7.60	7.6	205.0	0.46	0.005	0.01	0.86	0.02	0.02	90.7	3.2
5	1349	0	0	3.70	19.5	7.1	3.15	4.3	115.0	0.35	0.007	0.00	0.80	0.10	0.11	27.1	6.7
1	1355	0	0	3.41	8.5	7.4	5.28										
2	1355	0	0	3.41	8.9	7.4	5.00		213.0	0.00	0.001	0.75	1.05	0.02	0.01	51.8	4.0
3	1355	0	0	3.41	8.0	7.3	6.06	0.0	214.5	0.03	0.016	0.90	1.41	0.03	0.02	46.3	4.3
4	1355	0	0	3.41	11.0	7.4	6.55	20.0	242.5	0.00	0.007	0.00	0.56	0.09	0.09	61.0	7.1
5	1355	0	0	3.41	18.0	7.1	5.80	23.0	218.0	3.41	0.000	0.00	4.41	0.07	0.07	47.2	7.8
1	1361	1	1	28.00	14.0	7.4	1.73										
2	1361	1	1	28.00	15.4	7.4	1.80		81.9	0.00	0.002	0.98	1.20	0.03	0.03	48.0	4.3
3	1361	1	1	28.00	15.2	7.4	1.91	0.0	82.2	0.00	0.001	0.00	0.00	0.12	0.12	7.5	0.1
4	1361	1	1	28.00	15.0	7.6	2.00	0.0	85.0	0.00	0.000	0.00	0.00	0.10	0.10	7.2	0.4
5	1361	1	1	28.00	19.0	7.4	1.90	0.0	85.0	0.00	0.004	0.00	0.00	0.12	0.12	8.0	0.2

ST.NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	1403	0	0	2.90	12.0	>7.4	4.49		0.00	0.000	0.52	0.70	0.03	0.04	39.5	2.8	2.89	
2	1403	0	0	2.90	10.5	7.6	4.66	172.8	0.00	0.001	0.55	0.85	0.04	0.03	36.9	2.7	2.88	
3	1403	0	0	2.90	10.8	7.6	4.86	0.5	170.0	0.00	0.000	0.50	0.05	0.04	36.4	2.2	2.95	
4	1403	0	0	2.90	12.6	7.4	5.05	0.3	170.0	0.00	0.000	0.43	0.51	0.03	30.9	3.0	2.51	
5	1403	0	0	2.90	20.0	7.4	4.80	49.0	180.0	0.29	0.152	0.30	1.19	0.03	0.04	33.5	3.5	1.11
ST.NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	1409	0	0	3.70	12.5	7.1	2.13		0.00	0.000	0.05	0.18	0.08	0.12	9.8	4.7	2.73	
2	1409	0	0	3.70	9.8	7.3	2.48	92.8	0.00	0.002	0.06	0.18	0.07	0.10	8.8	4.3	2.73	
3	1409	0	0	3.70	10.9	7.1	2.46	1.2	81.4	0.00	0.000	0.31	0.39	0.12	0.15	8.8	3.1	2.73
4	1409	0	0	3.70	12.4	7.2	2.40	0.6	82.5	0.00	0.003	0.21	0.30	0.12	0.12	7.6	3.7	2.27
5	1409	0	0	3.70	20.5	7.2	2.70	44.0	115.0	1.81	0.075	0.01	2.92	0.38	0.43	9.0	7.4	1.90
ST.NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	1414	0	0	2.18	10.1	6.5	2.17		0.00	0.000	0.92	0.96	0.09	0.08	17.0	1.1	6.36	
2	1414	0	0	2.18	6.7	7.0	2.50	66.5	0.00	0.001	1.07	1.01	0.08	0.10	16.4	0.1	6.61	
3	1414	0	0	2.18	8.0	7.1	2.60	0.4	63.6	0.00	0.000	1.05	0.90	0.12	0.15	15.6	0.5	6.57
4	1414	0	0	2.18	12.0	7.3	2.50	0.6	65.0	0.00	0.000	0.99	1.01	0.11	0.11	14.2	1.4	5.78
5	1414	0	0	2.18	20.0	7.4	2.60	1.0	80.0	0.01	0.018	1.57	1.64	0.22	0.22	14.7	0.8	6.29
ST.NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	1417	0	1	3.90	11.7	6.8	4.52		0.00	0.004	3.26	4.56	0.31	0.48	34.5	4.2	3.00	
2	1417	0	1	3.90	10.5	6.9	4.83	109.2	0.00	0.003	4.57	4.79	0.29	0.44	33.4	5.0	3.00	
3	1417	0	1	3.90	11.6	6.2	5.38	4.9	86.6	0.00	0.004	9.26	10.52	0.37	0.36	37.5	1.6	3.00
4	1417	0	1	3.90	13.0	6.5	4.50	0.7	67.5	0.00	0.009	7.22	8.75	0.13	0.13	20.3	2.0	2.32
5	1417	0	1	3.90	16.0	6.6	4.20	3.2	75.0	0.03	0.093	6.15	6.68	0.13	0.14	27.8	2.3	2.23
ST.NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	1421	1	1	6.19	13.0	7.4	1.58		0.05	0.000	0.00	0.08	0.10	0.20	6.5	0.4		
2	1421	1	1	6.19	13.5	7.6	1.81	79.4	0.03	0.001	0.00	0.09	0.10	0.16	6.4	0.2		
3	1421	1	1	6.19	11.8	7.8	1.68	0.0	79.4	0.04	0.000	0.00	0.14	0.17	6.1	0.0		
4	1421	1	1	6.19	15.0	7.6	1.85	0.0	80.0	0.00	0.003	0.03	0.03	0.12	0.12	5.3	0.6	
5	1421	1	1	6.19	21.0	7.8	1.80	0.0	80.0	0.02	0.004	0.00	0.17	0.13	0.14	6.0	0.4	
ST.NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	1426	1	1	43.00	14.5	>7.4	2.24		0.10	0.000	0.00	0.09	0.10	0.12	10.8	0.4		
2	1426	1	1	43.00	13.8	7.7	2.37	101.8	0.09	0.000	0.00	0.09	0.09	0.11	10.0	0.5		
3	1426	1	1	43.00	15.1	7.7	2.49	0.0	99.3	0.08	0.000	0.00	0.14	0.17	10.0	0.2		
4	1426	1	1	43.00	15.9	7.7	2.40	0.0	97.5	0.08	0.000	0.00	0.10	0.11	12.2	8.3	0.6	
5	1426	1	1	43.00	21.5	7.8	1.90	0.0	88.0	0.08	0.002	0.00	0.08	0.14	0.14	6.0	0.3	
ST.NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	1427	0	1	7.96	13.5	6.5	1.35		0.00	0.000	8.62	12.63	0.03	0.02	63.2	0.9	2.04	
2	1427	0	1	7.96	12.2	6.0	5.97	79.9	0.20	0.001	9.60	11.43	0.03	0.03	59.7	0.8	2.00	
3	1427	0	1	7.96	13.0	6.6	5.90	0.1	77.5	0.00	0.000	10.53	11.76	0.05	0.06	57.2	1.1	2.11
4	1427	0	1	7.96	14.8	6.6	6.55	0.0	80.0	0.00	0.000	9.74	11.08	0.02	0.02	60.4	1.3	1.31
5	1427	0	0															
ST.NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	1432	0	0	2.98	9.4	7.3	3.93		0.00	0.001	0.04	0.53	0.06	0.08	26.7	19.8	2.93	
2	1432	0	0	2.98	8.5	7.3	4.24	129.1	0.00	0.003	0.16	0.65	0.09	0.04	26.4	17.6	2.89	
3	1432	0	0	2.98	9.8	7.1	4.95	3.3	124.7	0.00	0.008	0.42	1.01	0.06	0.04	26.9	14.1	3.12
4	1432	0	0	2.98	12.0	7.2	4.70	0.8	125.0	0.08	0.025	0.18	0.76	0.05	0.05	23.5	13.6	1.12
5	1432	0	0	2.98	19.5	7.0	4.35	94.0	130.0	0.24	0.054	0.04	1.39	0.18	0.21	25.5	22.6	2.07
ST.NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	1439	1	1	50.00	9.0	>7.4	1.76		0.00	0.000	0.08	0.09	0.09	0.11	7.0	6.5		
2	1439	1	1	50.00	13.2	7.8	1.80	87.4	0.05	0.001	0.03	0.09	0.09	0.15	8.4	0.2		
3	1439	1	1	50.00	12.5	7.8	1.88	0.0	85.4	0.01	0.002	0.04	0.06	0.14	8.3	0.1		
4	1439	1	1	50.00	15.0	7.8	2.10	0.0	87.5	0.04	0.003	0.04	0.10	0.09	0.09	5.8	0.4	
5	1439	1	1	50.00	21.0	7.8	1.90	0.0	93.0	0.07	0.000	0.00	0.13	0.11	0.11	6.0	0.4	
ST.NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	1451	0	1	1.78	14.8	7.4	1.70		0.05	0.001	0.01	0.09	0.10	0.12	6.0	0.5		
2	1451	0	1	1.78	13.0	7.8	1.88	84.4	0.04	0.003	0.06	0.09	0.09	0.12	5.3	0.1		
3	1451	0	1	1.78	13.9	7.9	1.95	0.0	82.6	0.05	0.003	0.08	0.11	0.13	0.15	6.8	0.2	
4	1451	0	1	1.78	15.8	7.8	1.95	0.0	85.0	0.06	0.000	0.00	0.16	0.11	0.12	4.7	0.5	
5	1451	0	1	1.78	16.5	7.9	1.95	0.0	103.0	0.09	0.000	0.00	0.05	0.11	0.12	6.0	0.3	
ST.NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	1464	0	0	4.37	12.0	6.0	3.15		0.00	0.000	0.75	0.88	0.05	0.04	19.8	0.8	2.63	
2	1464	0	0	4.37	10.7	5.9	3.27	132.1	0.00	0.001	1.04	0.92	0.04	0.03	19.3	0.1	2.46	
3	1464	0	0	4.37	10.8	5.9	3.66	0.1	133.4	0.00	0.000	0.80	0.84	0.05	0.09	18.3	0.1	2.46
4	1464	0	0	4.37	12.0	5.9	3.30	0.0	127.5	0.00	0.000	0.54	0.61	0.02	0.03	14.2	1.3	1.34
5	1464	0	0															
ST.NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	1467	1	1	40.00	12.0	>7.4	1.71		0.09	0.000	0.00	0.00	0.08	0.09	6.5	0.7		
2	1467	1	1	40.00	11.5	7.8	1.86	83.9	0.07	0.001	0.55	0.69	0.07	0.08	6.4	0.2		
3	1467	1	1	40.00	12.8	7.7	1.92	0.0	83.4	0.07	0.000	0.00	0.00	0.10	0.12	5.8	0.2	
4	1467	1	1	40.00	16.0	7.9	2.00	0.0	85.0	0.05	0.000	0.00	0.19	0.08	0.09	5.7	0.9	
5	1467	1	1	40.00	22.0	7.9	2.10	0.0	90.0	0.08	0.000	0.00	0.13	0.10	0.11	6.4	0.2	

ST. NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W. TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	1470	0	0	3.49	11.0	>7.4	5.72		0.00	0.000	2.76	3.59	0.21	0.32	30.5	3.6	2.72	
2	1470	0	0	3.49	9.4	8.1	6.00	251.7	0.00	0.001	3.26	3.41	0.20	0.31	28.7	3.8	2.72	
3	1470	0	0	3.49	10.4	8.2	6.52	0.4	250.2	0.00	0.000	3.32	3.38	0.29	0.30	28.1	3.3	2.70
4	1470	0	0	3.49	11.9	8.2	6.65	0.0	250.0	0.00	0.002	2.48	3.29	0.26	0.31	29.3	4.5	2.42
5	1470	0	0	3.49	19.0	8.2	6.30	0.0	250.0	0.00	0.006	2.95	3.25	0.28	0.28	26.5	4.0	2.39
ST. NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W. TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	1471	1	1	40.00	13.5	7.4	1.62		0.07	0.000	0.00	0.09	0.88	0.10	7.0	0.1		
2	1471	1	1	40.00	14.5	7.8	1.87	82.9	0.06	0.000	0.00	0.04	0.87	0.10	6.4	0.1		
3	1471	1	1	40.00	13.0	7.8	1.98	0.0	79.4	0.05	0.000	0.00	0.11	0.16	5.6	0.1		
4	1471	1	1	40.00	15.2	8.0	2.35	0.0	85.0	0.06	0.000	0.00	0.10	0.08	7.2	0.7		
5	1471	1	1	40.00	20.5	7.8	2.10	0.0	93.0	0.05	0.000	0.00	0.09	0.09	7.0	0.2		
ST. NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W. TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	1476	0	0	2.60	12.0	7.4	1.45		0.02	0.000	0.02	0.09	0.09	0.13	5.5	0.5	1.28	
2	1476	0	0	2.60	11.4	7.5	1.62	71.5	0.02	0.001	0.08	0.09	0.09	0.13	5.3	0.1	1.21	
3	1476	0	0	2.60	10.9	7.6	1.71	0.0	71.5	0.01	0.000	0.08	0.11	0.14	4.7	1.5	1.25	
4	1476	1	1	2.60	12.6	7.0	6.60	26.4	100.0	0.31	0.006	0.83	0.91	0.00	0.00	45.6	1.7	
5	1476	1	0	2.60	21.5	7.8	6.40	24.0	165.0	0.25	0.027	0.89	1.58	0.09	0.10	51.6	2.9	
ST. NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W. TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	2106	0	0	4.02	9.5	7.5	5.90		0.00	0.000	0.65	1.05	0.17	0.23	62.0	3.7	1.17	
2	2106	0	0	4.02	9.0	7.5	6.95	228.4	0.00	0.000	0.78	1.01	0.14	0.23	63.8	3.1	1.04	
3	2106	0	0	4.02	9.5	7.3	7.18	5.2	208.5	0.13	1.486	2.01	2.64	0.14	0.21	60.6	5.4	1.42
4	2106	0	0	4.02	12.0	7.3	6.40	3.4	180.0	0.00	0.024	0.84	8.35	0.24	0.29	58.6	4.7	1.39
5	2106	1	0	4.02	19.5	6.8	6.30	27.0	145.0	0.16	0.166	1.93	2.65	0.01	0.01	60.3	10.3	
ST. NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W. TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	2108	0	0	3.38	11.0	7.1	3.80		0.00	0.000	0.02	0.09	0.02	0.01	35.8	1.6	2.49	
2	2108	0	0	3.38	10.5	7.0	4.20	151.4	0.00	0.001	0.06	0.09	0.03	0.02	33.4	1.4	2.28	
3	2108	0	0	3.38	10.5	7.1	4.88	2.3	152.9	0.00	0.000	0.08	0.11	0.04	0.08	32.1	1.6	2.59
4	2108	0	0	3.38	11.5	7.2	4.90	1.6	167.5	0.07	0.004	0.00	0.16	0.03	0.03	28.4	2.5	2.50
5	2108	0	0	3.38	16.0	7.0	4.55	5.8	160.0	0.21	0.004	0.10	0.44	0.10	0.11	32.2	2.0	1.81
ST. NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W. TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	2111	0	1	4.99	5.5	6.4	2.80		0.00	0.000	1.20	1.40	0.03	0.01	42.8	1.2		
2	2111	0	1	4.99	11.0	6.6	3.50	126.1	0.00	0.000	0.99	1.11	0.02	0.04	41.6	0.8		
3	2111	0	1	4.99	10.0	6.4	4.42	0.0	99.3	0.00	0.001	3.26	3.66	0.06	0.04	43.6	1.3	
4	2111	0	1	4.99	14.1	6.3	4.60	0.0	107.5	0.00	0.000	3.57	4.00	0.04	0.04	37.8	0.9	
5	2111	0	1	4.99	19.0	6.8	4.00	1.2	160.0	0.01	0.004	0.36	0.45	0.09	0.09	18.4	1.1	
ST. NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W. TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	2113	1	1	35.00	13.0	7.5	2.81		0.04	0.000	0.00	0.08	0.12	0.19	9.0	0.5		
2	2113	1	1	35.00	12.5	7.5	2.80	141.5	0.04	0.002	0.00	0.00	0.11	0.17	9.4	0.1		
3	2113	1	1	35.00	14.0	7.6	3.28	0.0	150.9	0.01	0.000	0.00	0.00	0.20	0.19	10.9	0.1	
4	2113	1	1	35.00	16.0	7.6	2.90	0.0	147.5	0.01	0.003	0.00	0.00	0.16	0.18	8.8	0.9	
5	2113	1	1	35.00	24.0	7.5	3.35	0.0	158.0	0.01	0.001	0.00	0.05	0.18	0.18	9.7	0.1	
ST. NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W. TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	2114	0	0	4.67	11.0	7.2	7.60		0.08	0.000	0.55	0.96	0.06	0.05	92.0	2.6	1.17	
2	2114	0	0	4.67	11.0	7.1	7.80	188.7	0.00	0.002	0.91	0.92	0.00	0.07	91.5	1.9	0.99	
3	2114	0	0	4.67	10.7	7.3	8.91	0.5	181.5	0.00	0.002	0.06	0.96	0.06	0.04	94.2	2.0	1.44
4	2114	0	0	4.67	11.9	7.0	8.10	0.2	185.0	0.00	0.000	0.64	0.94	0.00	0.06	92.1	2.7	1.39
5	2114	0	0	4.67	17.0	7.1	8.10	5.8	183.0	0.39	0.013	0.01	0.76	0.06	0.07	79.1	2.5	1.03
ST. NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W. TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	2115	0	0	5.00	11.0	7.7	3.90		0.00	0.000	0.00	0.00	0.16	0.22	17.0	1.4	1.00	
2	2115	0	0	3.96	10.5	7.7	4.50	209.5	0.00	0.000	0.00	0.09	0.10	0.23	19.6	1.5	0.87	
3	2115	0	0	3.96	11.0	7.6	4.49	7.0	192.6	0.00	0.001	0.08	0.17	0.36	0.37	13.6	1.2	1.14
4	2115	0	0	3.96	11.8	7.6	4.10	2.4	197.5	0.00	0.002	0.04	0.10	0.53	0.55	12.1	2.1	1.11
5	2115	0	0	3.96	16.5	7.5	3.95	69.0	178.0	0.08	0.004	0.02	0.30	0.40	0.43	11.7	1.6	0.76
ST. NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W. TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	2116	1	1	18.00	5.5	7.4	3.00		0.00	0.000	0.05	0.09	0.11	0.15	12.8	0.7		
2	2116	1	1	18.00	6.5	7.4	3.60	181.2	0.06	0.009	0.00	0.09	0.11	0.15	12.3	0.4		
3	2116	1	1	18.00	11.0	7.4	3.85	0.0	176.0	0.05	0.001	0.00	0.11	0.16	0.18	11.9	0.5	
4	2116	1	1	18.00	8.4	7.5	4.10	0.1	180.0	0.09	0.002	0.00	0.10	0.16	0.18	10.6	0.8	
5	2116	1	1	18.00	25.5	7.2	3.95	0.0	175.0	0.00	0.004	0.10	0.22	0.16	0.15	11.7	0.5	
ST. NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W. TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	2202	0	0	3.95	10.0	8.0	7.20		0.00	0.000	0.00	0.18	0.07	0.09	75.0	8.2	2.76	
2	2202	0	0	3.95	10.0	7.7	8.00	361.5	0.00	0.002	0.00	0.18	0.06	0.09	72.5	4.5	2.61	
3	2202	0	0	3.95	10.5	7.7	9.31	0.9	355.5	0.00	0.000	0.00	0.17	0.08	0.14	72.3	6.1	2.62
4	2202	0	0	3.95	12.0	7.7	8.70	1.3	362.5	0.00	0.005	0.00	0.20	0.08	0.08	71.1	5.5	2.86
5	2202	0	0	3.95	20.5	7.8	9.45	1.3	365.0	0.11	0.044	0.00	0.50	0.20	0.27	71.0	6.4	2.60
ST. NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W. TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	2204	0	0	2.58	9.0	7.8	3.50		0.00	0.000	0.40	0.70	0.15	0.22	20.2	9.4	3.16	
2	2204	0	0	2.58	8.0	7.8	3.70	181.7	0.00	0.001	0.33	0.65	0.12	0.21	19.4	8.6	3.01	
3	2204	0	0	2.58	9.0	7.7	4.74	2.4	186.7	0.00	0.000	0.27	0.56	0.18	0.26	18.8	8.6	2.86
4	2204	0	0	2.58	11.0	7.6	3.30	2.0	132.5	0.00	0.035	0.17	0.56	0.13	0.18	14.3	8.8	3.50
5	2204	0	0	2.58	19.0	8.3	3.60	6.1	130.0	0.00	0.009	0.83	1.26	0.22	0.22	17.4	5.0	3.50

ST.NO.	WELL USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.M.L (M)		
1	3105	0	0	2.50	3.0	6.9	5.28			0.00	0.009	0.15	0.25	0.02	0.10	70.5	1.7	
2	3105	0	1	2.50	13.0	6.7	5.50		111.7	0.00	0.009	0.12	0.05	0.02	0.02	64.4	0.7	
3	3105	0	1	2.50	14.0	6.6	5.80		115.2	0.00	0.005	0.12	0.17	0.04	0.12	65.2	1.1	
4	3105	0	1	2.50	14.5	6.6	6.00		112.5	0.00	0.011	0.22	0.35	0.01	0.18	64.0	2.1	
5	3105	0	1	2.50	17.0	6.6	5.30		108.0	0.00	0.022	0.12	0.33	0.02	0.02	66.3	0.9	
ST.NO.	WELL USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.M.L (M)		
1	3117	0	0	3.59	11.0	7.2	3.80			0.00	0.000	0.13	0.35	0.04	0.01	45.0	3.2	0.83
2	3117	0	0	3.59	10.5	7.2	4.40		54.6	0.00	0.001	0.13	0.28	0.04	0.03	43.9	3.1	0.74
3	3117	0	0	3.59	10.0	7.2	4.82	2.3	67.5	0.00	0.002	0.20	0.20	0.03	0.08	38.8	2.0	0.97
4	3117	0	0	3.59	11.0	7.8	5.15	2.3	77.5	0.00	0.006	0.36	0.61	0.03	0.03	38.2	3.6	0.87
5	3117	0	0	3.59	16.5	7.4	4.20	107.0	118.0	0.21	0.038	0.15	0.86	0.13	0.14	28.5	4.8	0.57
ST.NO.	WELL USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.M.L (M)		
1	3121	0	0	4.00	11.0	6.9	4.80			0.00	0.001	0.20	0.26	0.08	0.10	78.5	1.0	0.75
2	3121	0	0	4.00	10.5	6.8	5.40		80.4	0.00	0.001	0.19	0.22	0.04	0.08	72.0	0.6	0.78
3	3121	0	0	4.00	10.0	6.8	5.65	0.0	75.5	0.00	0.001	0.12	0.11	0.10	0.08	77.7	0.9	0.92
4	3121	0	0	4.00	11.0	6.5	6.20	0.8	75.0	0.00	0.000	0.16	0.15	0.08	0.09	71.8	1.1	0.83
5	3121	0	0	4.00	15.5	6.8	5.40	0.0	88.0	0.04	0.003	0.06	0.20	0.10	0.10	64.7	0.9	0.52
ST.NO.	WELL USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.M.L (M)		
1	3126	1	1	3.00	9.5	6.9	4.10			0.05	0.000	2.95	5.09	0.15	0.19	34.2	1.0	
2	3126	1	1	3.00	8.7	7.0	6.40		150.4	0.00	0.030	1.60	1.85	0.03	0.03	90.1	2.4	
3	3126	1	1	3.00	14.0	6.8	4.88	0.1	112.4	0.02	0.000	3.47	4.67	0.20	0.27	30.8	0.3	
4	3126	1	1	3.00	14.5	6.9	5.40	1.0	115.0	0.04	0.000	3.84	4.35	0.17	0.19	32.4	0.9	
5	3126	1	1	3.00	19.0	6.9	4.70	0.0	115.0	0.05	0.002	4.43	5.17	0.19	0.19	31.5	0.5	
ST.NO.	WELL USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.M.L (M)		
1	3204	0	0	9.23	10.9	7.2	3.93			0.00	0.000	0.25	0.76	0.03	0.07	78.2	9.8	1.27
2	3204	0	0	9.23	13.5	7.2	4.50		68.0	0.07	0.002	0.23	0.37	0.02	0.01	75.0	8.6	1.42
3	3204	0	0	9.23	12.0	7.1	4.60	9.2	63.6	0.00	0.002	0.25	0.34	0.05	0.03	78.2	5.1	1.14
4	3204	0	0	9.23	13.0	7.0	5.00	21.4	60.0	0.00	0.003	1.34	1.42	0.01	0.01	75.1	5.3	1.52
5	3204	0	0	9.23	14.1	6.9	4.40	18.8	78.0	0.04	0.016	0.27	0.43	0.02	0.02	80.6	5.2	1.34
ST.NO.	WELL USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.M.L (M)		
1	3209	0	0	5.20	10.6	7.7	5.12			0.00	0.000	0.35	0.59	0.14	0.24	71.0	4.5	1.58
2	3209	0	0	5.20	10.9	7.6	5.70		155.9	0.00	0.001	0.44	0.95	0.14	0.23	71.0	3.6	1.49
3	3209	0	0	5.20	10.0	7.6	5.80	0.1	137.0	0.00	0.002	0.59	0.90	0.20	0.19	72.8	4.6	1.93
4	3209	0	0	5.20	11.2	7.2	5.40	0.0	115.0	0.00	0.000	0.69	0.96	0.18	0.18	66.5	3.3	1.91
5	3209	0	0	5.20	19.5	6.8	6.00	1.0	163.0	0.06	0.010	0.17	0.43	0.33	0.33	76.4	3.3	2.80
ST.NO.	WELL USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.M.L (M)		
1	3212	0	0	4.68	9.0	6.9	1.72			0.02	0.000	0.21	0.70	0.02	0.01	17.1	5.8	1.23
2	3212	0	0	4.68	10.6	6.9	2.11		64.5	0.00	0.009	0.12	0.37	0.04	0.05	19.4	5.0	1.17
3	3212	0	0	4.68	10.0	7.1	2.09	64.0	59.6	0.01	0.013	0.69	1.01	0.23	0.12	15.9	5.9	1.10
4	3212	0	0	4.68	12.0	6.8	2.05	10.4	70.0	0.04	0.009	0.55	0.91	0.13	0.13	12.2	6.7	1.29
5	3212	0	0	4.68	16.5	6.6	2.20	8.1	90.0	1.09	0.014	0.00	1.82	0.36	0.36	14.4	9.7	1.33
ST.NO.	WELL USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.M.L (M)		
1	3218	1	1	60.00	13.2	7.7	4.41			0.19	0.000	0.00	0.25	0.08	0.17	41.0	1.4	
2	3218	1	1	60.00	13.2	7.8	4.85		192.6	0.18	0.001	0.00	0.14	0.08	0.10	37.6	0.7	
3	3218	1	1	60.00	15.0	7.8	5.54	0.0	192.6	0.11	0.000	0.00	0.06	0.12	0.09	38.0	1.0	
4	3218	1	1	60.00	12.0	8.0	5.60	0.2	200.0	0.12	0.008	0.00	0.10	0.09	0.09	41.1	1.4	
5	3218	1	1	60.00	16.9	7.8	4.90	0.0	200.0	0.16	0.000	0.00	0.16	0.10	0.10	42.2	0.8	
ST.NO.	WELL USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.M.L (M)		
1	3219	0	0	4.28	9.0	8.1	5.96			0.00	0.000	4.47	5.08	0.18	0.26	53.3	2.9	1.13
2	3219	0	0	4.28	10.0	8.2	6.45		218.5	0.00	0.003	4.56	5.07	0.16	0.29	49.0	3.3	1.04
3	3219	0	0	4.28	9.2	8.2	7.00	0.0	212.5	0.00	0.004	3.77	4.39	0.23	0.21	48.4	2.7	1.24
4	3219	0	0	4.28	11.0	8.0	7.00	0.6	215.0	0.00	0.003	3.16	3.74	0.10	0.21	47.1	3.1	0.79
5	3219	0	0	4.28	17.5	8.2	5.80	0.0	205.0	0.00	0.014	3.17	3.31	0.22	0.23	44.6	2.5	1.35
ST.NO.	WELL USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.M.L (M)		
1	3220	0	1	3.59	8.1	6.5	5.78			0.00	0.001	10.75	16.19	0.02	0.06	70.5	1.6	
2	3220	0	1	3.59	9.1	6.4	5.70		86.9	0.00	0.003	10.38	11.89	0.01	0.01	57.6	0.7	
3	3220	0	1	3.59	9.1	6.3	6.50	0.0	85.4	0.00	0.001	13.09	14.34	0.03	0.01	57.6	1.3	
4	3220	0	1	3.59	12.0	6.3	4.50	0.9	80.0	0.00	0.009	8.15	9.56	0.01	0.01	36.1	2.6	
5	3220	0	1	3.59	18.0	6.2	7.80	0.0	93.0	0.00	0.006	18.76	19.35	0.01	0.01	89.8	1.1	
ST.NO.	WELL USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.M.L (M)		
1	3225	0	0	3.80	10.0	7.1	4.42			0.00	0.003	9.75	11.36	0.47	0.72	46.0	1.9	1.02
2	3225	0	0	3.80	10.6	7.0	6.00		59.6	0.00	0.003	12.00	17.66	0.36	0.57	70.1	1.0	0.98
3	3225	0	0	3.80	10.0	7.0	7.00	0.5	63.6	0.00	0.000	17.52	18.60	0.51	0.54	73.5	1.5	1.02
4	3225	0	0	3.80	12.0	7.0	6.00	1.0	85.0	0.00	0.003	12.49	12.65	0.56	0.60	60.4	2.2	1.22
5	3225	0	0	3.80	17.0	6.7	5.10	0.0	80.0	0.00	0.190	13.53	13.65	0.69	0.69	34.5	1.6	1.11
ST.NO.	WELL USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.M.L (M)		
1	3226	0	0	3.05	9.5	7.1	3.48			0.00	0.000	4.04	4.66	0.26	0.48	55.5	2.4	0.98
2	3226	0	0	3.05	9.4	7.1	3.43		73.0	0.00	0.004	3.43	3.40	0.25	0.41	47.9	1.8	0.96
3	3226	0	0	3.05	9.5	7.1	6.89	0.0	84.4	0.00	0.002	2.66	2.81	0.37	0.36	42.4	2.1	1.08
4	3226	0	0	3.05	12.0	7.0	3.45	3.4	87.5	0.00	0.003	1.47	1.57	0.35	0.36	34.6	2.5	1.28
5	3226	0	0	3.05	20.5	7.1	3.30	0.0	118.0	0.06	0.000	0.00	0.27	0.34	0.36	32.2	2.1	1.09

ST.NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	3227	0	0	4.60	9.8	7.3	4.72		0.00	0.001	1.52	1.86	0.05	0.11	49.5	3.0	0.86	
2	3227	0	0	4.60	11.2	7.3	4.85	149.4	0.00	0.002	1.19	1.46	0.03	0.08	45.2	1.9	0.97	
3	3227	0	0	4.60	10.8	7.3	3.88	2.1	148.9	0.00	0.000	0.92	1.13	0.09	0.07	44.9	2.2	1.06
4	3227	0	0	4.60	12.0	7.3	5.30	1.2	147.5	0.00	0.003	0.85	0.86	0.05	0.05	47.7	2.2	1.21
5	3227	0	0	4.60	15.5	6.7	4.70	0.0	150.0	0.01	0.043	1.10	1.26	0.08	0.11	45.6	1.9	1.11
1	3302	1	1	30.00	13.2	7.3	4.11		0.04	0.000	0.00	0.17	0.24	0.41	40.6	1.1		
2	3302	1	1	30.00	13.0	7.4	4.49	184.7	0.04	0.001	0.00	0.09	0.23	0.37	38.8	0.9		
3	3302	1	1	30.00	11.2	7.4	4.78	0.0	182.7	0.01	0.002	0.00	0.11	0.33	38.4	1.1		
4	3302	1	1	30.00	15.9	7.4	5.05	1.2	185.0	0.03	0.000	0.00	0.05	0.29	33.4	1.4		
5	3302	1	1	30.00	16.9	7.2	4.30	0.0	185.0	0.01	0.003	0.00	0.00	0.34	0.37	37.5	1.0	
1	3303	0	0	6.10	12.3	7.5	5.40		0.00	0.002	9.85	11.36	0.15	0.27	66.3	2.1	0.33	
2	3303	0	0	6.10	12.7	7.6	5.99		0.00	0.003	10.50	12.93	0.15	0.22	65.0	1.4	0.46	
3	3303	0	0	6.10	12.5	7.7	6.92	0.2	129.1	0.00	0.002	13.48	15.36	0.21	0.19	63.7	2.2	0.55
4	3303	0	0	6.10	13.0	7.6	6.85	0.6	135.0	0.00	0.010	14.86	15.08	0.19	0.22	65.0	0.0	0.48
5	3303	0	0	6.10	15.4	7.2	5.80	0.0	145.0	0.00	0.007	15.09	14.85	0.21	0.22	52.3	1.8	0.86
1	3306	0	0	4.09	10.5	6.6	1.02		0.00	0.000	0.05	0.25	0.01	0.02	9.6	1.9	0.32	
2	3306	0	0	4.09	10.5	6.5	1.30	16.9	0.00	0.001	0.12	0.18	0.01	0.01	11.9	1.3	0.34	
3	3306	0	0	4.09	10.0	6.6	1.51	0.2	25.8	0.00	0.001	0.23	0.34	0.02	0.02	14.1	1.8	0.47
4	3306	0	0	4.09	12.7	6.6	1.75	2.4	32.5	0.00	0.002	0.24	0.30	0.01	0.01	14.0	2.6	0.35
5	3306	0	0	4.09	16.0	7.0	1.80	2.2	70.0	0.40	0.007	0.00	0.86	0.07	0.10	12.1	4.2	0.70
1	3307	0	0	3.61	11.5	6.9	3.32		0.00	0.000	11.40	13.90	0.03	0.07	38.0	1.5	0.37	
2	3307	0	0	3.61	11.9	6.9	3.45	30.8	0.00	0.002	11.60	13.73	0.03	0.03	34.8	1.1	0.30	
3	3307	0	0	3.61	11.0	6.9	3.90	0.1	35.8	0.00	0.002	13.86	14.79	0.05	0.04	34.4	2.2	0.50
4	3307	0	0	3.61	13.8	6.8	3.70	1.5	37.5	0.00	0.000	14.16	14.47	0.02	0.02	30.4	1.5	0.54
5	3307	0	0	3.61	17.6	6.4	3.00	0.0	40.0	0.00	0.004	11.62	11.82	0.02	0.02	31.9	1.0	0.74
1	3308	0	0	5.20	10.5	7.4	5.31		0.00	0.000	1.86	2.12	0.02	0.07	51.4	2.2	1.40	
2	3308	0	0	5.20	12.3	7.5	5.40		0.00	0.001	1.56	1.46	0.02	0.02	44.9	1.5	1.30	
3	3308	0	0	5.20	11.2	7.4	6.05	0.8	178.7	0.00	0.002	0.86	1.07	0.03	0.01	41.8	1.2	0.39
4	3308	0	0	5.20	12.0	7.4	6.65	0.6	170.0	0.00	0.007	2.86	3.19	0.01	0.01	38.4	1.1	1.74
5	3308	0	0	5.20	15.8	7.2	5.80	0.0	183.0	0.00	0.000	2.57	2.82	0.01	0.02	41.2	1.4	1.67
1	3310	1	1	30.00	7.4	6.8	4.08		0.03	0.008	0.71	0.93	0.06	0.15	54.0	1.1		
2	3310	1	1	30.00	10.5	6.8	3.90	134.1	0.02	0.005	0.84	0.83	0.02	0.09	50.4	0.2		
3	3310	1	1	30.00	8.0	6.8	4.76	0.0	131.1	0.00	0.005	0.66	0.79	0.06	0.06	49.1	0.3	
4	3310	1	1	30.00	15.0	7.0	5.10	0.0	135.0	0.03	0.000	0.63	0.66	0.06	0.06	47.0	0.7	
5	3310	1	1	30.00	20.0	6.8	4.90	0.0	130.0	0.05	0.027	0.87	1.08	0.06	0.06	54.9	0.6	
1	3316	1	1	30.00	12.0	6.8	2.91		0.06	0.011	3.75	4.32	0.08	0.13	26.8	0.5		
2	3316	1	1	30.00	13.5	6.8	3.17	54.6	0.00	0.008	3.87	4.36	0.08	0.10	24.2	0.1		
3	3316	1	1	30.00	13.0	6.8	3.40	0.0	53.6	0.00	0.007	3.51	4.28	0.05	0.10	24.7	0.2	
4	3316	1	1	30.00	16.2	7.0	3.55	2.4	57.5	0.00	0.001	3.45	3.39	0.04	0.04	27.9	0.8	
5	3316	1	1	30.00	18.0	6.8	3.50	0.0	63.0	0.00	0.011	2.68	2.85	0.10	0.10	37.9	0.2	
1	3317	0	0	2.72	8.8	7.4	5.00		0.00	0.002	12.40	17.54	0.17	0.28	38.4	3.2	0.27	
2	3317	0	0	2.72	9.7	7.4	5.35	107.2	0.00	0.002	12.00	17.86	0.17	0.26	34.8	3.1	0.23	
3	3317	0	0	2.72	9.0	7.5	5.10	0.0	97.3	0.00	0.001	12.22	13.78	0.24	0.23	31.9	3.0	0.46
4	3317	0	0	2.72	11.5	7.4	4.55	0.6	90.0	0.00	0.004	6.68	8.20	0.20	0.22	32.0	3.4	1.11
5	3317	0	0	2.72	19.2	7.4	4.30	0.0	88.0	0.00	0.004	6.68	9.81	0.23	0.23	32.8	1.7	0.93
1	3318	0	0	3.84	9.5	6.8	4.88		0.00	0.002	13.05	26.30	0.03	0.08	24.0	2.9	0.25	
2	3318	0	0	3.84	9.9	6.7	5.31	52.1	0.00	0.003	12.90	16.74	0.03	0.04	23.9	3.8	0.21	
3	3318	0	0	3.84	10.0	6.7	4.60	0.0	48.5	0.00	0.000	21.15	26.10	0.05	0.05	22.9	2.5	0.48
4	3318	0	0	3.84	12.4	6.4	4.40	0.0	52.5	0.00	0.003	14.00	14.82	0.03	0.04	33.0	2.9	1.80
5	3318	0	0	3.84	18.0	6.6	3.10	0.0	53.0	0.00	0.004	10.81	10.87	0.04	0.04	16.1	2.2	0.62
1	3403	0	0	4.44	11.3	7.3	3.70		0.00	0.000	0.95	1.14	0.08	0.10	38.4	2.5	0.13	
2	3403	0	0	4.44	10.0	7.4	3.63	100.3	0.00	0.002	0.62	0.78	0.07	0.08	34.8	2.6	0.06	
3	3403	0	0	4.44	10.7	7.1	4.20	0.0	103.3	0.00	0.000	0.66	0.73	0.09	0.11	34.8	1.8	0.29
4	3403	0	0	4.44	12.8	6.8	4.60	0.0	112.5	0.00	0.000	0.78	1.01	0.07	0.08	32.0	2.4	0.28
5	3403	0	0	4.44	17.5	6.8	4.20	1.0	103.0	0.00	0.002	2.04	2.49	0.11	0.17	34.8	2.4	0.08
1	3406	0	0	3.63	10.5	7.2	9.78		0.00	0.028	1.72	2.37	0.03	0.07	144.0	7.1	0.55	
2	3406	0	0	3.63	9.5	7.3	10.20	206.0	0.00	0.003	1.66	1.94	0.04	0.03	150.6	6.3	0.44	
3	3406	0	0	3.63	10.7	7.1	11.10	8.8	226.4	0.00	0.052	1.86	2.88	0.05	0.09	153.1	5.8	0.62
4	3406	0	0	3.63	12.5	7.1	11.80	34.4	227.5	0.00	0.013	1.56	1.57	0.06	0.07	201.3	7.3	0.15
5	3406	0	0	3.63	18.0	7.1	9.80	14.0	165.0	0.23	0.134	2.84	3.97	0.11	0.12	149.1	9.0	0.46

ST.NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	3422	0	1	3.59	11.8	6.1	5.90		0.00	0.002	0.30	0.53	0.01	0.01	77.0	2.8		
2	3422	0	1	3.59	10.8	6.3	6.00	111.7	0.00	0.003	1.00	0.83	0.19	0.01	72.9	3.0		
3	3422	0	1	3.59	11.7	6.6	5.02	120.0	0.00	0.002	3.18	3.21	0.08	0.09	48.8	5.0		
4	3422	0	1	3.59	12.2	6.5	5.85	117.5	0.00	0.004	1.69	2.23	0.02	0.03	58.0	5.0		
5	3422	0	1	3.59	17.8	6.4	5.70	103.0	0.00	0.000	0.00	0.33	0.01	0.04	61.6	2.0		
1	3443	0	0	4.60	11.7	6.0	6.11		0.00	0.000	5.35	7.98	0.04	0.04	94.9	3.2	1.85	
2	3443	0	0	4.60	10.5	6.0	6.48	100.0	0.00	0.001	8.02	9.31	0.04	0.04	99.3	3.5	1.80	
3	3443	0	0	4.60	11.0	6.0	5.99	87.4	0.00	0.003	14.62	15.81	0.08	0.11	95.1	4.2	2.41	
4	3443	0	0	4.60	12.4	5.9	10.50	67.5	0.00	0.025	33.77	41.74	0.04	0.00	178.1	5.1	1.63	
5	3443	0	0	4.60	17.0	6.2	6.90	2.1	88.0	0.35	0.066	18.09	18.56	0.15	0.16	73.0	4.1	1.35
1	3503	0	0	2.90	11.7	7.4	7.20		0.00	0.000	0.71	1.02	0.02	0.06	54.0	2.7	0.43	
2	3503	0	0	2.90	10.8	7.8	7.65	152.9	0.00	0.001	0.85	0.92	0.02	0.02	51.5	2.1	0.42	
3	3503	0	0	2.90	11.0	7.0	7.51	7.6	153.7	0.00	0.000	0.94	1.01	0.04	0.05	49.3	2.2	0.67
4	3503	0	0	2.90	12.8	7.6	8.00	0.7	180.0	0.00	0.005	0.67	2.88	0.02	0.07	44.8	3.2	0.36
5	3503	0	0	2.90	19.0	7.5	7.50	24.0	188.0	0.00	0.009	0.32	0.89	0.02	0.13	47.6	2.6	-0.01
1	3506	0	0	3.24	10.0	7.4	5.58		0.00	0.000	0.02	0.34	0.01	0.03	77.0	2.1	0.56	
2	3506	0	0	3.24	9.3	7.4	6.20	72.0	0.00	0.002	0.06	0.28	0.01	0.01	70.3	1.9	0.53	
3	3506	0	0	3.24	10.6	7.2	5.45	6.0	105.7	0.00	0.000	0.14	0.34	0.02	0.04	68.0	2.2	0.79
4	3506	0	0	3.24	13.0	7.4	5.70	2.5	120.0	0.00	0.003	0.17	0.40	0.01	0.01	60.4	3.0	-0.05
5	3506	0	0	3.24	20.0	7.4	4.10	108.0	125.0	0.20	0.009	0.00	0.83	0.04	0.07	41.5	4.0	0.36
1	3508	0	0	3.02	10.4	7.3	12.50		0.01	0.004	0.00	0.42	0.02	0.07	38.5	6.8	0.51	
2	3508	0	0	3.02	10.0	7.4	12.80		0.05	0.005	0.00	0.38	0.03	0.05	262.2	7.0	0.47	
3	3508	0	0	3.02	11.0	7.3	12.80	8.0	200.0	0.01	0.007	0.07	0.39	0.06	0.06	234.4	7.0	0.72
4	3508	0	0	3.02	12.8	7.4	12.50	4.8	220.0	0.20	0.013	0.26	1.06	0.11	0.15	298.7	9.3	0.47
5	3508	0	0															
1	4101	1	1	20.00	8.0	7.3	2.85		0.00	0.039	0.17	0.16	0.13	0.21	12.8	0.6		
2	4101	1	1	20.00	13.0	7.0	2.91	150.4	0.14	0.003	0.00	0.17	0.14	0.19	12.5	0.5		
3	4101	1	1	20.00	10.6	7.1	3.02	0.0	148.9	0.07	0.001	0.00	0.06	0.22	0.18	12.5	0.7	
4	4101	1	1	20.00	14.3	7.1	3.50	0.3	155.0	0.08	0.038	0.01	0.10	0.18	0.19	12.6	0.8	
5	4101	1	1	20.00	19.5	7.2	3.20	0.0	155.0	0.13	0.002	0.00	0.27	0.19	0.25	12.4	0.5	
1	4102	0	0	3.39	9.5	7.2	9.46		0.00	0.000	0.00	0.25	0.01	0.03	260.0	2.5	1.59	
2	4102	0	0	3.39	9.5	7.0	8.90	114.2	0.02	0.003	0.12	0.33	0.02	0.01	158.8	1.7	1.60	
3	4102	0	0	3.39	9.8	7.2	9.45	3.5	107.6	0.00	0.002	0.19	0.28	0.03	0.01	190.0	2.9	1.81
4	4102	0	0	3.39	12.0	7.0	11.50	26.0	222.5	0.00	0.005	0.00	0.25	0.02	0.02	216.1	5.2	1.86
5	4102	0	0	3.39	18.0	6.8	18.00	18.8	280.0	1.11	0.004	0.00	1.72	0.03	0.07	222.8	4.4	1.55
1	4104	1	1	17.80	5.5	7.4	4.12		0.09	0.002	0.00	0.17	0.11	0.17	14.0	0.7		
2	4104	1	1	17.80	8.0	7.4	4.20	224.4	0.09	0.001	0.00	0.11	0.12	0.15	12.5	0.7		
3	4104	1	1	17.80	14.2	7.4	4.80	0.4	221.2	0.04	0.000	0.00	0.03	0.21	0.19	12.5	1.6	
4	4104	1	1	17.80	14.9	7.4	4.95	0.7	230.0	0.10	0.000	0.00	0.10	0.17	0.18	12.9	0.8	
5	4104	1	1	17.80	19.0	7.3	4.20	0.0	225.0	0.07	0.000	0.00	0.27	0.16	0.17	12.4	0.3	
1	4110	0	0	4.54	10.0	7.2	5.52		0.00	0.000	0.71	1.02	0.29	0.46	58.2	3.2	2.26	
2	4110	0	0	4.54	9.8	6.8	5.43	198.6	0.00	0.002	0.37	0.56	0.23	0.35	49.8	4.2	2.40	
3	4110	0	0	4.54	10.3	6.9	6.15	1.0	179.9	0.00	0.002	2.93	3.21	0.50	0.47	58.7	1.3	2.27
4	4110	0	0	4.54	13.0	7.0	6.95	2.2	170.0	0.00	0.004	4.09	4.71	0.74	0.81	67.9	4.1	2.35
5	4110	0	0	4.54	22.0	7.0	4.30	0.0	183.0	0.00	0.002	0.57	1.03	0.72	0.72	24.8	2.1	1.79
1	4112	0	0	3.74	11.0	6.8	5.50		0.00	0.000	3.45	4.24	0.75	1.09	47.0	1.7	0.79	
2	4112	0	0	3.74	10.0	7.0	5.12	173.8	0.00	0.000	3.19	3.53	0.63	0.95	41.6	2.0	0.74	
3	4112	0	0	3.74	10.0	6.8	5.98	164.8	0.00	0.000	4.27	5.18	1.00	1.05	42.4	2.9	1.53	
4	4112	0	0	3.74	12.0	6.6	6.20	0.3	170.0	0.00	0.000	4.24	4.96	0.85	0.98	44.1	2.6	1.37
5	4112	0	0	3.74	18.0	6.8	5.50	0.0	188.0	0.00	0.004	3.02	3.81	0.89	0.29	39.9	2.3	0.32
1	4116	0	0	1.89	10.0	6.0	2.78		0.00	0.000	9.22	11.10	0.02	0.03	32.0	0.5	15.81	
2	4116	0	0	1.89	10.0	6.1	2.91	42.7	0.00	0.000	8.30	11.70	0.03	0.01	30.2	1.4	15.83	
3	4116	0	0	1.89	10.5	6.2	2.98	39.3	0.00	0.003	10.40	10.74	0.05	0.02	28.0	0.2	15.85	
4	4116	0	0	1.89	13.2	6.0	3.20	1.2	45.0	0.00	0.004	10.45	10.87	0.02	0.02	30.7	0.5	15.78
5	4116	0	0	1.89	20.0	6.0	2.80	0.0	48.0	0.00	0.003	6.65	10.87	0.02	0.04	28.1	0.1	15.86
1	4117	0	1	4.72	12.0	7.0	6.92		0.16	0.006	0.55	0.85	0.13	0.21	54.5	1.4		
2	4117	0	1	4.72	13.0	7.0	7.08	289.1	0.22	0.008	0.37	0.67	0.08	0.14	50.2	1.0		
3	4117	0	1	4.72	12.0	7.1	7.20	0.4	239.1	0.00	0.004	1.37	1.46	0.36	0.33	40.5	5.2	
4	4117	0	1	4.72	13.0	6.8	8.20	2.3	275.0	0.17	0.008	0.98	1.42	0.11	0.12	47.9	1.6	
5	4117	0	1	4.72	16.0	7.0	7.20	3.2	275.0	0.24	0.013	0.15	0.73	0.04	0.04	53.6	1.4	

ST.NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W.TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	4202	1	1	40.00	11.0	7.8	4.88											
2	4202	1	1	40.00	11.0	7.8	5.24	233.4	0.22	0.000	0.00	0.25	0.10	0.16	41.0	1.5	0.4	
3	4202	1	1	40.00	11.9	7.5	5.86	0.0	0.21	0.000	0.00	0.17	0.10	0.14	38.2	0.4		
4	4202	1	1	40.00	16.0	8.0	6.00	0.0	230.4	0.16	0.000	0.00	0.28	0.15	0.15	38.0	1.0	
5	4202	1	1	40.00	21.5	7.9	5.30	0.0	235.0	0.14	0.003	0.00	0.20	0.11	0.12	41.1	1.3	
								228.0	0.20	0.000	0.00	0.33	0.12	0.14	40.9	0.8		
1	4204	0	0	6.73	10.5	8.1	6.74											
2	4204	0	0	6.73	11.8	8.0	7.16	266.6	0.00	0.000	0.15	0.35	0.07	0.09	62.5	3.2	1.25	
3	4204	0	0	6.73	11.2	7.9	7.31	0.0	0.02	0.004	0.19	0.29	0.06	0.09	58.5	3.0	1.14	
4	4204	0	0	6.73	12.5	7.8	8.45	266.1	0.00	0.000	0.15	0.28	0.09	0.08	56.1	3.8	1.41	
5	4204	0	0	6.73	17.0	8.1	4.80	0.0	0.00	0.004	0.18	0.30	0.04	0.07	59.3	3.9	1.52	
								143.0	0.14	0.027	3.38	4.31	2.10	2.15	37.2	8.4	1.28	
1	4207	0	0	3.72	9.2	7.4	4.66											
2	4207	0	0	3.72	10.0	7.4	5.00	158.9	0.01	0.002	0.45	1.02	0.90	1.39	40.7	7.4	1.00	
3	4207	0	0	3.72	9.1	7.0	5.68	0.0	81.4	0.00	0.001	10.59	12.04	1.37	1.50	45.5	6.7	0.93
4	4207	0	0	3.72	12.0	6.8	5.05	1.5	90.0	0.00	0.002	0.81	8.85	1.56	1.92	36.8	8.0	1.03
5	4207	0	0	3.72	16.5	7.2	7.40	0.0	273.0	0.19	0.090	0.00	0.33	0.06	0.06	57.0	3.3	1.20
1	4218	1	1	45.00	11.2	7.1	4.53											
2	4218	1	1	45.00	15.0	7.1	4.77	47.2	0.02	0.004	1.71	1.96	0.03	0.05	20.2	0.2		
3	4218	1	1	45.00	15.5	7.1	5.20	0.1	43.7	0.03	0.047	1.64	1.63	0.05	0.02	71.0	0.6	
4	4218	1	1	45.00	16.0	7.2	5.45	0.3	45.0	0.02	0.040	1.61	1.07	0.02	0.02	71.1	0.6	
5	4218	1	1	45.00	17.0	7.2	5.10	0.0	58.0	0.04	0.126	1.96	2.05	0.02	0.02	80.4	0.4	
1	4224	0	1	5.10	13.0	6.5	4.58											
2	4224	0	1	5.10	13.5	6.4	5.92	44.2	0.00	0.000	12.60	19.24	0.02	0.05	54.7	0.7	0.73	
3	4224	0	1	5.10	14.0	6.3	5.58	0.0	0.00	0.000	12.40	20.32	0.03	0.02	50.7	0.2	0.72	
4	4224	0	1	5.10	14.5	6.5	5.40	0.6	45.0	0.00	0.000	17.13	18.45	0.04	0.02	52.0	0.8	0.69
5	4224	0	1	5.10	17.0	6.4	4.90	0.0	55.0	0.00	0.000	17.34	17.50	0.02	0.02	55.7	1.0	1.11
													0.01	0.02	59.0	0.6	1.26	
1	4238	0	1	15.00	6.0	6.8	3.92											
2	4238	0	1	15.00	15.0	6.4	4.28	96.8	0.00	0.000	2.32	2.71	0.04	0.05	45.9	0.8		
3	4238	0	1	15.00	15.0	6.4	4.95	0.0	103.3	0.00	0.002	2.89	3.09	0.03	0.02	41.6	2.2	
4	4238	0	1	15.00	14.8	6.2	5.05	1.0	105.0	0.00	0.005	1.60	1.92	0.03	0.07	51.4	1.1	
5	4238	0	1	15.00	17.0	6.2	3.70	0.0	103.0	0.01	0.000	1.94	2.25	0.03	0.04	33.8	0.2	
1	4241	0	0	3.66	10.0	7.5	2.90											
2	4241	0	0	3.66	10.0	7.4	3.05	101.8	0.00	0.002	1.52	2.03	0.10	0.19	28.0	4.0	0.73	
3	4241	0	0	3.66	10.5	7.4	3.42	23.0	0.00	0.004	1.75	2.13	0.10	0.15	27.4	0.0	0.67	
4	4241	0	0	3.66	11.7	7.4	3.45	3.8	110.0	0.00	0.024	1.51	1.82	0.11	0.14	22.1	3.4	0.85
5	4241	0	0	3.66	17.0	7.2	2.00	80.0	0.30	0.007	0.87	1.82	0.28	0.30	12.4	2.5	1.07	
1	4243	1	1	10.00	9.0	6.9	6.78											
2	4243	1	1	10.00	13.0	6.5	5.41	119.2	0.00	0.003	0.00	0.00	0.04	0.04	72.0	0.7		
3	4243	1	1	10.00	14.0	6.4	6.00	0.0	119.2	0.00	0.003	0.00	0.00	0.07	0.03	125.4	1.2	
4	4243	1	1	10.00	14.0	6.4	6.40	0.5	122.5	0.00	0.002	0.00	0.00	0.02	0.02	112.6	1.4	
5	4243	1	1	10.00	16.0	6.5	7.10	0.0	125.0	0.00	0.009	0.00	0.60	0.03	0.07	145.7	0.9	
1	4244	0	0	4.46	9.0	6.0	3.72											
2	4244	0	0	4.46	8.5	6.2	3.49	27.3	0.00	0.003	1.87	2.13	0.04	0.04	41.6	3.7	3.18	
3	4244	0	0	4.46	9.0	6.3	3.82	0.4	29.8	0.00	0.003	4.00	4.78	0.09	0.08	38.6	3.4	3.89
4	4244	0	0	4.46	10.7	6.0	4.00	1.9	42.5	0.00	0.018	2.68	2.93	0.05	0.07	45.6	5.6	2.52
5	4244	0	0	4.46	15.0	6.0	2.90	6.0	58.0	0.16	0.006	0.93	2.39	0.21	0.32	32.8	8.4	1.09
1	4246	1	1	25.00	9.0	7.0	3.98											
2	4246	1	1	25.00	11.0	6.9	4.17	211.5	0.00	0.000	0.00	0.00	0.15	0.24	15.0	0.9		
3	4246	1	1	25.00	12.0	7.0	4.48	0.0	211.7	0.00	0.000	0.00	0.00	0.15	0.20	14.3	0.4	
4	4246	1	1	25.00	15.5	7.0	4.85	0.2	217.5	0.00	0.000	0.00	0.05	0.23	0.20	13.7	1.5	
5	4246	1	1	25.00	19.5	6.8	4.10	0.0	210.0	0.00	0.000	0.00	0.00	0.18	0.20	14.1	1.0	
1	4302	0	1	3.89	11.3	6.3	3.59											
2	4302	0	1	3.89	13.5	6.4	3.90	47.2	0.00	0.003	9.70	12.26	0.07	0.08	33.6	0.3	0.70	
3	4302	0	1	3.89	14.0	6.4	4.35	0.0	45.7	0.01	0.002	11.94	12.86	0.11	0.08	34.9	0.9	0.75
4	4302	0	1	3.89	14.0	6.4	4.55	0.2	47.5	0.00	0.004	13.13	12.80	0.03	0.04	37.4	0.9	1.16
5	4302	0	1	3.89	17.5	6.4	4.10	0.0	50.0	0.00	0.004	14.58	14.85	0.03	0.03	37.5	0.5	1.16
1	4313	1	1	20.00	13.4	6.2	3.30											
2	4313	1	1	20.00	13.0	6.2	3.80	62.1	0.00	0.000	3.75	4.32	0.04	0.14	36.3	0.4		
3	4313	1	1	20.00	14.7	6.2	3.88	0.0	62.5	0.00	0.002	3.85	4.06	0.03	0.02	35.1	0.4	
4	4313	1	1	20.00	15.3	6.3	5.26	0.1	63.6	0.00	0.002	3.16	3.69	0.05	0.03	35.5	1.8	
5	4313	1	1	20.00	17.0	6.2	4.90	0.0	62.5	0.00	0.000	4.19	4.65	0.02	0.02	41.6	0.8	
								83.0	0.00	0.002	0.22	0.83	0.03	0.09	50.3	0.5		

ST.NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W,TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPH)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	4318	1	1	35.00	13.5	6.8	5.39		0.09	0.000	0.00	0.34	0.07	0.13	88.8	0.4		
2	4318	1	1	35.00	12.5	6.9	5.28	57.6	0.08	0.003	0.00	0.09	0.07	0.09	84.0	0.2		
3	4318	1	1	35.00	19.5	4.8	6.12	0.0	55.6	0.06	0.000	0.00	0.11	0.08	83.3	0.5		
4	4318	1	1	35.00	16.0	6.8	6.00	0.0	60.0	0.04	0.000	0.00	0.07	0.07	79.7	0.8		
5	4318	1	1	35.00	19.8	6.6	9.10	0.0	118.0	0.12	0.000	0.00	0.07	0.08	214.4	0.4		
1	5201	1	1	20.00	6.2	6.8	6.05		0.08	0.001	0.00	0.25	0.02	0.08	93.5	0.5		
2	5201	1	1	20.00	11.0	6.8	5.65	123.1	0.10	0.003	0.00	0.11	0.03	0.01	95.1	0.7		
3	5201	1	1	20.00	12.0	6.8	7.20	119.2	0.01	0.002	0.00	0.03	0.05	0.03	96.0	1.9		
4	5201	1	1	20.00	15.8	6.8	7.30	1.5	120.0	0.07	0.000	0.00	0.15	0.03	89.9	0.9		
5	5201	1	1	20.00	20.5	6.8	6.20	1.0	115.0	0.05	0.004	0.08	0.17	0.03	89.1	0.2		
1	5203	0	0	3.49	10.0	7.3	4.85		0.00	0.000	1.01	1.27	0.10	0.17	80.2	2.9	0.72	
2	5203	0	0	3.49	9.5	7.2	4.82	84.4	0.00	0.001	0.81	0.95	0.10	0.13	78.1	2.8	0.68	
3	5203	0	0	3.49	18.0	7.2	5.10	32.0	85.4	0.00	0.001	0.58	0.76	0.18	0.15	74.4	3.4	0.66
4	5203	0	0	3.49	12.0	7.0	6.55	1.0	127.5	0.00	0.009	0.60	0.61	0.13	0.16	79.5	3.3	1.39
5	5203	0	0	3.49	20.0	6.9	6.00	0.0	126.0	0.00	0.007	0.52	0.90	0.17	0.22	80.7	1.8	1.21
1	5314	0	0	4.06	11.7	7.0	5.81		0.00	0.004	10.50	17.96	0.13	0.23	70.0	3.4	2.91	
2	5314	0	0	4.06	11.4	7.0	5.50	79.4	0.00	0.004	11.90	16.78	0.10	0.14	58.0	1.7	2.73	
3	5314	0	0	4.06	12.2	6.9	6.50	0.0	85.4	0.00	0.003	19.74	18.79	0.13	0.10	55.4	3.3	2.77
4	5314	0	0	4.06	12.8	7.0	5.10	0.9	100.0	0.09	0.048	7.39	9.06	0.17	0.19	48.2	2.2	2.52
5	5314	0	0	4.06	17.0	6.9	3.80	0.0	93.0	0.00	0.007	6.44	8.88	0.16	0.18	35.2	1.1	1.94
1	5320	0	1	5.98	11.2	7.4	7.05		0.00	0.000	0.62	0.93	0.18	0.29	99.0	3.4	0.68	
2	5320	0	1	5.98	9.8	7.8	6.30	219.5	0.00	0.000	1.00	1.12	0.19	0.29	98.5	3.5	0.64	
3	5320	0	1	5.98	11.6	8.0	7.41	8.5	220.5	0.00	0.002	0.91	1.18	0.24	0.21	98.9	4.5	0.94
4	5320	0	1	5.98	11.8	7.8	8.20	7.3	230.0	0.00	0.004	0.85	0.96	0.17	0.20	91.3	3.4	0.50
5	5320	0	1	5.98	15.0	7.6	6.50	9.7	215.0	0.00	0.011	1.27	1.42	0.28	0.34	75.0	2.3	0.91
1	5335	0	0	2.30	9.3	7.0	4.98		0.00	0.002	0.31	0.51	0.01	0.05	58.2	2.5	1.27	
2	5335	0	0	2.30	8.0	7.0	4.88	77.0	0.11	0.003	0.12	0.34	0.02	0.02	52.4	1.9	1.39	
3	5335	0	0	2.30	9.0	6.6	5.21	105.0	71.1	0.00	0.003	0.85	0.90	0.03	0.01	50.8	2.9	1.68
4	5335	0	0	2.30	11.7	6.6	5.45	3.1	77.5	0.04	0.007	0.71	0.91	0.01	0.02	50.9	2.5	1.13
5	5335	0	0	2.30	19.5	6.9	4.50	64.0	93.0	0.12	0.009	1.11	1.86	0.01	0.01	47.2	2.6	1.93
1	5339	1	1	25.00	11.9	7.0	4.38		0.00	0.000	0.00	0.08	0.29	0.52	38.0	0.3		
2	5339	1	1	25.00	12.8	7.0	4.11	93.8	0.02	0.003	0.00	0.11	0.29	0.39	39.9	0.9		
3	5339	1	1	25.00	14.0	6.9	4.78	0.0	93.3	0.00	0.000	0.00	0.08	0.40	37.7	30.1	0.7	
4	5339	1	1	25.00	14.9	6.9	4.90	0.1	95.0	0.00	0.000	0.00	0.08	0.32	36.6	39.5	0.4	
5	5339	1	1	25.00	18.0	7.0	4.40	0.0	98.0	0.00	0.000	0.00	0.00	0.39	39.7	39.5	0.4	
1	5340	0	0	5.48	13.0	6.6	4.66		0.18	0.076	6.95	1.44	0.02	0.04	42.8	2.8	0.85	
2	5340	0	0	5.48	11.0	6.7	4.30	81.9	0.00	0.007	9.93	1.04	0.05	0.02	37.1	1.4	0.84	
3	5340	0	0	5.48	11.6	6.4	4.78	11.6	87.4	0.23	0.134	0.81	1.26	0.05	0.03	34.3	2.7	1.17
4	5340	0	0	5.48	12.6	6.5	4.30	21.0	92.5	0.09	0.090	0.17	1.62	0.06	0.07	29.4	2.2	0.58
5	5340	0	0	5.48	18.0	6.6	2.90	2.2	88.0	0.00	1.130	0.00	1.13	0.04	0.06	22.1	2.5	1.82
1	5343	0	0	4.40	11.6	6.8	7.34		0.00	0.014	3.13	4.83	0.67	1.14	85.0	4.9	1.20	
2	5343	0	0	4.40	9.5	6.9	6.75	169.8	0.00	0.003	3.60	4.14	0.31	0.95	86.0	4.3	1.16	
3	5343	0	0	4.40	10.8	6.8	8.08	4.9	182.9	0.00	0.143	3.35	4.05	0.95	9.1	83.3	9.0	1.60
4	5343	0	0	4.40	11.6	6.6	8.20	3.3	132.5	0.07	0.227	7.91	9.71	0.85	0.92	79.3	4.0	0.94
5	5343	0	0	4.40	17.5	6.7	7.20	0.0	128.0	0.00	0.057	6.59	9.01	1.08	1.04	70.7	2.8	1.05
1	5345	0	0	3.10	9.0	7.3	6.81		0.00	0.002	0.12	0.51	0.01	0.07	122.0	6.2	0.78	
2	5345	0	0	3.10	7.7	7.4	6.39	89.9	0.00	0.001	0.00	0.39	0.02	0.02	111.5	6.0	0.70	
3	5345	0	0	3.10	10.0	7.0	6.94	35.0	94.5	0.00	0.006	0.27	0.51	0.03	0.02	108.7	6.2	1.15
4	5345	0	0	3.10	12.2	6.8	7.30	93.0	60.0	0.00	0.000	0.28	0.51	0.02	0.03	96.7	5.6	0.88
5	5345	0	0	3.10	19.0	7.2	6.10	76.0	113.0	0.76	0.057	0.00	1.09	0.12	0.12	85.8	6.1	0.84
1	5349	0	0	3.55	10.7	7.4	5.08		0.00	0.000	0.35	0.42	0.02	0.05	54.0	1.9	2.17	
2	5349	0	0	3.55	8.9	7.3	5.07	189.2	0.00	0.000	0.25	0.22	0.02	0.02	58.5	5.8	2.25	
3	5349	0	0	3.55	10.0	7.1	6.38	0.0	196.6	0.00	0.000	0.15	0.23	0.03	0.02	62.7	2.7	2.20
4	5349	0	0	3.55	11.9	7.2	6.05	6.4	217.5	0.00	0.000	0.37	0.40	0.02	0.02	67.1	1.8	1.97
5	5349	0	0	3.55	20.0	7.3	6.00	0.0	213.0	0.00	0.000	0.20	0.23	0.01	0.02	70.7	1.4	2.08
1	5350	1	1	66.00	15.5	8.4	9.42		0.11	0.003	0.00	0.25	0.80	1.38	140.0	3.6		
2	5350	1	1	66.00	15.0	8.3	8.87	243.3	0.10	0.004	0.00	0.22	0.76	1.01	148.2	3.3		
3	5350	1	1	66.00	15.5	8.4	11.50	0.7	241.5	0.13	0.002	0.00	0.17	1.14	1.15	141.7	3.8	
4	5350	1	1	66.00	16.0	8.4	10.50	0.4	242.5	0.07	0.008	0.00	0.20	1.03	1.08	122.4	3.6	
5	5350	1	1	66.00	18.0	8.4	9.30	0.0	240.0	0.08	0.000	0.00	0.10	1.22	1.30	147.4	3.1	

ST. NO.	WELL	USAGE	DEPTH (M)	W. TEMP (C)	PH	E.C.	TURB. (PPM)	ALKALI (PPM)	NH4-N (PPM)	NO2-N (PPM)	NO3-N (PPM)	T-N (PPM)	PO4-P (PPM)	T-P (PPM)	CL- (PPM)	COD (PPM)	G.W.L (M)	
1	5401	0	0	4.70	10.5	7.0	3.08		0.10	0.002	0.00	2.29	0.01	0.05	15.5	3.0	0.24	
2	5401	0	0	4.70	9.6	7.0	3.39	66.5	2.23	0.004	0.00	2.46	0.03	0.03	14.8	3.1	0.23	
3	5401	0	0	4.70	11.0	6.9	4.18	4.4	63.1	1.14	0.004	0.00	2.06	0.03	0.03	13.7	3.8	0.35
4	5401	0	0	4.70	12.5	7.0	4.30	6.2	72.5	0.54	0.025	0.07	1.06	0.02	0.03	13.4	2.6	-0.01
5	5401	0	0	4.70	16.5	7.0	3.20	21.0	145.0	1.78	0.097	0.03	2.86	0.36	0.06	11.4	5.9	0.09
1	5403	0	0	3.54	12.0	7.4	5.75		0.00	0.002	0.72	0.93	0.09	0.19	64.2	2.6	0.15	
2	5403	0	0	3.54	11.0	7.4	5.39	91.0	0.00	0.001	0.81	0.90	0.10	0.15	54.5	2.7	0.18	
3	5403	0	0	3.54	12.0	7.4	6.12	0.0	84.2	0.00	0.001	0.58	0.82	0.15	0.14	50.5	3.0	0.38
4	5403	0	0	3.54	13.2	7.2	5.90	4.1	65.0	0.00	0.007	3.80	6.06	0.11	0.15	44.8	3.0	0.21
5	5403	0	0	3.54	18.0	6.9	4.90	0.0	73.0	0.00	0.221	4.72	5.43	0.22	0.23	44.9	1.5	0.05
1	5405	0	0	5.17	13.0	6.8	4.75		0.00	0.000	12.15	15.76	0.01	0.03	56.0	2.1	0.98	
2	5405	0	0	5.17	12.0	6.8	4.70	27.3	0.00	0.002	11.95	14.86	0.01	0.01	44.4	1.1	0.79	
3	5405	0	0	5.17	12.3	6.8	4.82	0.0	25.8	0.01	0.000	12.32	12.77	0.02	0.01	43.5	3.0	0.91
4	5405	0	0	5.17	12.8	6.6	4.05	2.8	30.0	0.00	0.003	6.20	7.18	0.01	0.01	40.9	2.1	0.54
5	5405	0	0	5.17	16.0	6.8	4.10	0.0	48.0	0.00	0.012	1.78	2.45	0.02	0.03	48.2	2.4	-0.01
1	5407	1	1	22.00	14.0	6.2	3.80		0.00	0.009	1.12	1.27	0.07	0.16	30.5	0.4		
2	5407	1	1	22.00	13.8	6.2	3.32	72.0	0.00	0.003	0.94	0.90	0.06	0.05	27.9	0.7		
3	5407	1	1	22.00	14.8	6.6	3.72	0.0	77.9	0.00	0.002	0.54	0.56	0.12	0.10	26.2	1.5	
4	5407	1	1	22.00	15.5	6.4	3.60	0.1	75.0	0.00	0.002	0.60	0.51	0.08	0.08	26.4	0.8	
5	5407	1	1	22.00	17.5	6.2	3.30	0.0	75.0	0.00	0.000	1.55	2.12	0.12	0.14	26.5	0.3	
1	6001	1	1	20.00	13.0	6.8	6.15		0.03	0.000	0.00	0.08	0.20	0.39	85.8	1.9		
2	6001	1	1	20.00	15.0	7.0	5.08	166.8	0.05	0.002	0.00	0.22	0.75	0.95	45.6	5.2		
3	6001	1	1	20.00	14.8	6.7	6.80	0.1	115.9	0.01	0.000	0.00	0.00	0.19	0.18	92.1	1.3	
4	6001	1	1	20.00	15.0	6.8	6.70	1.0	117.5	0.00	0.000	0.00	0.20	0.32	0.35	80.9	1.8	
5	6001	1	1	20.00	16.0	6.8	5.30	0.0	133.0	0.01	0.007	0.00	0.20	0.62	0.65	67.3	1.7	
1	6002	1	1	8.00	15.0	7.4	7.78	13.0	79.4	0.06	0.003	3.94	6.02	0.04	0.02	42.5	0.5	
2	6002	1	1	8.00	14.0	7.3	8.05	28.0	67.5	0.03	0.014	8.16	11.28	0.02	0.02	41.6	1.0	
3	6002	1	1	8.00	17.5	7.2	7.10	6.2	80.0	0.07	0.009	1.62	2.05	0.14	0.13	44.9	0.8	
1	6003	1	1	20.00	15.5	6.8	7.39		0.00	0.007	12.60	20.00	0.02	0.05	86.8	0.6		
2	6003	1	1	20.00	16.0	6.6	6.95	47.2	0.76	0.010	11.89	18.19	0.04	0.09	80.0	0.7		
3	6003	1	1	20.00	15.8	6.6	7.85	0.0	40.5	0.00	0.010	22.33	23.73	0.04	0.02	81.3	1.8	
4	6003	1	1	20.00	15.5	6.7	9.60	0.0	32.5	0.00	0.014	34.79	37.94	0.01	0.01	74.2	0.7	
5	6003	1	1	20.00	22.0	6.2	6.20	0.0	23.0	0.00	0.004	27.23	28.37	0.01	0.06	59.0	0.4	

国立公害研究所と気象庁の大型蒸発計観測日表 (1977年7月～1978年8月)

土屋 巖¹・白井邦彦¹

Daily Evaporation Amount with Class A Pan at Yatabe (The National Institute for Environmental Studies) and Tokyo (Japan Meteorological Agency) during the Period from July 1977 to August 1978

Iwao TSUCHIYA¹ and Kunihiko SHIRAI

報告書に記した蒸発観測結果 (土屋・白井, 1979) の基になった観測を日表にまとめたものである。現在, 大型蒸発計 (class A pan) による気象庁の観測日表は印刷物としての発表はなされていない。ここに示した気象庁の観測日表は, 東京管区気象台が, 千代田区大手町の気象庁露場において観測した日原簿の記録を転載したものである。気象庁観測法では, 冬季に蒸発計内水面の凍結があると欠測となり, その場合の蒸発はなかったものとして集計される (表の中の×印)。また, 大雨等による測定不能の場合も同様である。公害研の場合, 実験池のほとりの芝生上に, 気象庁の設置基準に合わせて設置したが, 冬季の凍結時には氷が解けた日に測定して, 数日分の積算蒸発量として表示した。また, 日曜日等にも観測を休み, 出勤時に積算蒸発量として表示した。数日分を積算したのは, 水位観測方式であるため湖面蒸発量算定資料として十分に役立つとみなしたからである。なお, 降雨があった場合の測定値には () をつけた。測定時刻は09時, その他の事項もすべて気象庁の地上気象観測法に基づいた。しかし, 温度補正は降雨の場合の誤差に比べてはるかに小さいので省略した。降雨量の記録は1977年8月～1978年5月までは, 公害研に隣接の高層気象台の観測値を, それ以後は所内大気モニター施設の自記雨量計 (気象庁規格に相当するもの) の記録を用いた。公害研では測定不能またはそれに近い場合で, 誤差が大きいと考えられる推定値には*印をさらに追加した。

1. 国立公害研究所 環境情報部 〒300-21 茨城県筑波郡谷田部町
Environmental Information Division, The National Institute for Environmental Studies, P.O. Yatabe,
Ibaraki 300-21, Japan.

気象庁（左）と国立公害研（右）の大型蒸発計観測日表（1977年7月～1978年8月）

日	7		8		9		10		11		12		1	
1	(0.7)	*(0.5)	5.8	4.8	4.4	1.5	3.1		3.9	(2.6)	0.9	(0.4)	(0.5)	
2	2.9	*2.5	4.9	2.1	3.1	1.4	3.4	5.4	1.8		1.9	1.3	×	
3	5.1	*4.5	4.4	3.9	3.9		(1.3)		2.9	(3.7)	1.9		×	
4	4.4	*4.0	5.5	3.9	3.5	*6.8	(0.9)	(1.5)	(0.0)	(0.9)	0.7	1.4	×	
5	2.7	2.5	4.1	4.2	2.8	2.2	2.5	2.0	1.3		1.1	0.6	×	
6	(3.5)		(4.9)	*(0.5)	(1.7)	3.6	2.2	1.5	(1.5)	(0.8)	1.6	0.5	1.5	
7	(3.3)	(4.9)	5.0	*(1.7)	(4.6)	*(3.5)	2.8	(3.2)	1.0	(0.0)	(1.4)	(0.7)	0.5	
8	3.8	3.6	(0.1)	*(0.5)	(3.1)	*(2.5)	(2.0)		2.6	2.1	1.3	0.5	1.0	
9	4.2		6.3	*4.0	(0.0)	(1.1)	0.0		3.0	2.4	1.7	0.6	×	*(9.0)
10	(0.9)	(6.4)	(3.9)	*(1.7)	2.7		0.3	(0.9)	1.7		0.9		×	
11	×	(2.1)	1.7	*(1.7)	3.5	(5.6)	1.8	1.9	2.7		1.8	(1.0)	×	
12	3.0	3.1	(1.6)	*(1.7)	3.5	2.3	2.6		2.8		(0.4)	(0.0)	×	
13	5.5	(4.5)	×	*(0.5)	(4.8)	(2.6)	1.9	(1.6)	0.7		0.9	0.4	(0.9)	(2.8)
14	(6.1)	(4.0)	(0.0)	*(1.7)	2.3		(0.3)		0.3	(4.6)	0.8	0.2	(0.8)	
15	6.2	4.8	(0.0)	(0.0)	(4.2)		2.3		1.6	1.1	1.2	0.2	1.0	
16	(4.9)	*(4.0) ×	(1.6)	(2.1)	4.1	(7.1)	4.7	(2.7)	(0.0)	*(0.0)	(2.1)		×	(1.6)
17	(1.7)		(0.6)	(0.0)	4.8		0.8	0.8	(2.6)	*(1.0)	1.7		×	
18	(1.7)		(1.3)	*(1.7)	(1.4)	(2.8)	2.4	1.5	1.6		1.3	(0.6)	×	
19	(4.2)	(4.0)	(0.4)	(0.0)	(2.8)	*(1.7)	5.8	2.6	1.9		2.1	1.0	×	
20	3.3	(1.8)	2.2		4.3	3.5	2.1	1.6	2.1	4.5	1.8	0.3	0.6	(2.4)
21	5.1	3.3	(1.7)	(4.4)	4.6		2.4	1.5	2.0	0.5	2.4	0.9	×	
22	5.0	3.8	(0.2)	(1.9)	3.2		2.8		2.5		0.8	0.6	×	2.2
23	6.1		(0.7)	(1.3)	0.8	7.1	1.2	2.4	1.5	2.4	×	0.1	×	
24	5.5	8.6	(0.9)	(1.9)	1.7		2.1	1.3	1.5	0.5	×		×	2.2
25	4.4	3.2	(0.4)	(0.7)	2.2	3.8	2.2	1.5	0.9	0.5	×	0.7	×	
26	2.8	(2.9)	(0.7)		(3.3)	(0.9)	2.0	1.0	(0.8)		×	1.4	×	1.5
27	(4.6)	(4.1)	3.6		2.7	3.3	2.7	1.1	1.1	(2.6)	×		×	0.7
28	4.4	(3.5)	4.2		2.2	(2.5)	0.9		1.3	(1.1)	×		×	
29	3.8	3.4	3.9	(7.4)	1.9	(0.8)	1.3		1.2	0.6	×		×	
30	5.1		2.6	2.9	0.9	(1.0)	1.5	(3.1)	2.0	1.5	(1.6)		×	
31	4.5	(7.0)	4.1	2.0			2.1	0.9			(0.2)	*(4.2)	×	*3.0
合計 (mm)	119.4	97.0	77.3	59.2	89.0	67.6	64.4	40.0	50.8	33.4	37.5	17.6	6.8	25.4

日	2	3	4	5	6	7	8							
1	×	×	3.1	1.7	(1.2)	0.7	7.8	4.7	(0.1)	(2.9)	(2.9)			
2	×	×	1.7	(3.1)	(0.0)	2.9	6.4	4.7	(8.2)	7.6				
3	×	2.0	1.0	0.0	(4.3)	3.9	(7.0)	3.6	(8.1)	4.9	4.9			
4	×	(1.9)	3.3	2.6	4.6	(0.0)	(6.2)	4.3	(4.6)	4.7	3.1			
5	×	2.4	(4.4)	2.5	3.9	2.3	4.2	4.2	3.5	(5.5)	4.7			
6	×	×	2.2	(3.5)	(0.0)	(2.8)	3.0	4.7	5.7	(5.5)	5.4			
7	×	×	1.6	(3.8)	5.0	(0.0)	(12.7)	4.1	3.9	4.6	5.0	5.9	13.4	
8	×	*10.3	×	2.4	3.7	(0.0)	(0.0)	4.9	4.3	(3.4)	5.3	3.4		
9	×	×	(1.5)	6.1	7.8	(2.6)	(0.0)	5.2	5.6	3.1	(4.9)	4.4	6.6	
10	(0.4)	×	(0.0)	3.1	3.1	(0.0)	(1.9)	6.1	(3.0)	(3.4)	3.1	2.7		
11	0.5	2.6	(2.1)	(0.0)	(0.6)	(3.5)	(4.8)	9.7	2.8	(3.7)	3.8	5.0		
12	(0.0)	(0.4)	×	4.3	(0.0)	3.0	4.5	(2.4)	4.4	(2.7)	5.4			
13	×	1.2	×	(2.2)	(0.6)	(0.0)	3.9	(3.8)	13.8	4.0	4.2	6.6	7.4	
14	×	×	3.1	1.4	2.1	4.0	8.6	2.4	(4.5)	4.2	5.3	6.8	7.5	
15	×	×	3.0	1.0	3.5	4.3	(2.2)	6.1	2.6	7.4	3.5			
16	×	2.7	1.9	2.0	(6.1)	4.4	3.2	4.3	(3.9)	6.0	12.7	9.4		
17	×	3.6	(3.0)	1.6	1.6	(5.8)	(3.3)	6.9	3.8	4.7	(1.2)	(5.3)		
18	×	(2.1)	0.0	(0.0)	(3.6)	(0.0)	6.8	13.6	4.0	5.3	3.2	3.1		
19	×	1.9	(2.4)	×	(4.5)	(0.0)	4.0	(5.9)	1.1	*5.0	(3.2)			
20	×	(6.1)	3.1	3.3	7.8	(2.1)	(3.0)	(4.9)	4.7	(1.4)	(6.0)	9.6		
21	×	1.9	1.6	(0.0)	1.1	2.2	6.0	6.7	(7.6)	(4.9)	(2.4)	(1.0)	6.9	5.4
22	×	1.7	(0.0)	(2.0)	3.9	3.8	3.5	(6.4)	(0.7)	5.9	7.1	5.7		
23	×	1.9	2.6	(1.5)	4.8	4.9	4.5	(0.4)	(0.0)	5.5	10.0	8.1	5.5	
24	×	1.0	2.9	2.7	2.2	(5.8)	4.4	4.4	(0.2)	3.9	4.8	7.4	5.0	
25	×	2.4	3.3	1.2	3.3	3.7	(2.0)	(1.8)	5.9	5.1	4.6	4.1		
26	×	2.3	3.6	5.1	5.2	3.4	4.9	2.5	(0.0)	6.1	5.3	4.4		
27	×	2.2	3.4	(1.1)	5.5	4.3	4.6	(0.2)	(1.9)	6.4	4.4	5.8	6.0	
28	(3.2)	1.0	1.2	(0.9)	3.0	4.8	7.2	(0.3)	(1.0)	5.4	4.1	4.7	2.4	
29		1.3	2.8	2.2	(3.0)	3.2	4.3	5.8	6.0	2.3				
30		3.3	3.7	0.4	(2.0)	(1.3)	(6.1)	(5.5)	(2.2)	7.0	10.6	7.0	3.3	
31		0.9	1.6	5.8	4.9	(4.2)	(4.7)	(4.7)	4.3					
合計 (mm)	4.1	30.0	45.5	59.2	74.4	63.2	101.8	86.2	115.1	112.8	132.1	132.0	169.2	130.0

霞ヶ浦(西浦)流域の気象資料 (1977年1月~1978年8月)

Meteorological Data in the Lake Kasumigaura Area during the Period
from January 1977 to August 1978

水資源開発計画で扱う霞ヶ浦は西浦(狭義の霞ヶ浦)と北浦および外浪逆浦を合わせたものであるが、研究所の調査は西浦に重点を置いているので、ここには西浦流域内の気象庁管理の観測所についての公刊資料(茨城県気象月報)からの抜粋編集結果を示す。有線ロボット気象計による地域気象観測所については、毎正時の観測記録が磁気テープに収められて統計されているが、統計方法も変わった。たとえば降水量は1978年2月から24時が日界になった。観測地点は表1に示し、その配置図は図1に、そして観測結果は表2~4に示した。

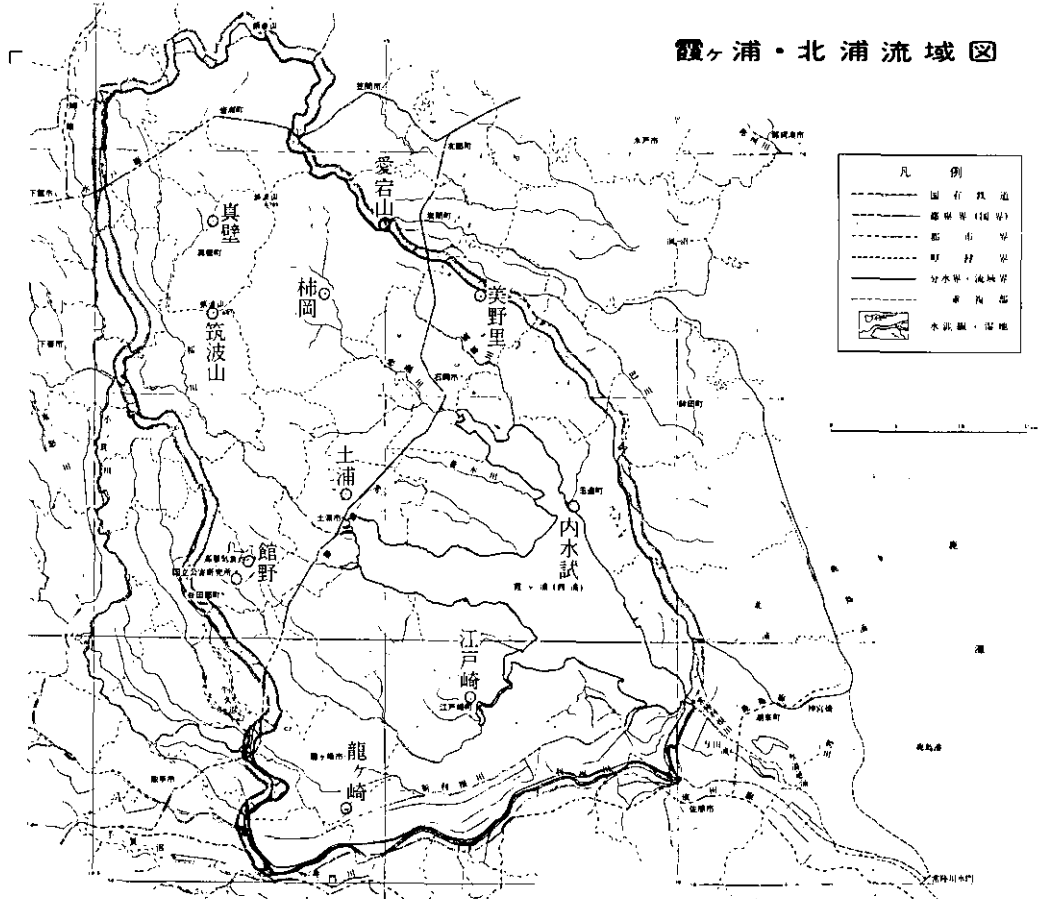


図1 霞ヶ浦・北浦流域図
(○印は観測地点)

表1 霞ヶ浦(西浦)流域の気象観測所

地域気象観測所

昭和53年2月1日現在

観測所名	観測種目					所在地	設置個所	緯度	経度	高さ m
	気温	降水量	風向、風速	日照時間	積雪の深さ					
柿岡	○	○			○	新治郡八郷町柿岡595	地磁気観測所	36.14	140.12	27
筑波山	○	○	○	○		筑波郡筑波町筑波1	筑波山測候所	36.13	140.06	869
愛宕山		○				西茨城郡岩間町大字泉100-2	無線ロボット雨量計	36.17	140.15	280
美野里		○			○	東茨城郡美野里町部室	美野里中学校	36.14	140.20	25
土浦	○	○	○	○	○	土浦市東真鍋町21番7号	土浦第二中学校	36.06	140.13	26
江戸崎		○			○	稲敷郡江戸崎町江戸崎甲2595	江戸崎中学校	35.58	140.19	25
龍ヶ崎		○			○	龍ヶ崎市大徳町3974	県農業試験場龍ヶ崎試験地	35.53	140.13	4

観測所

昭和53年2月1日現在

館野	○	○			○	筑波郡谷田部町館野	高層気象台	36.03	140.13	25
真壁*	○	○			○	真壁郡真壁町飯塚210	県立真壁農業高校	36.17	140.06	40

*：昭53年1月まで

表2 霞ヶ浦流域降水量 (mm)

昭和52年1月(09時~09時)									昭和52年2月(09時~09時)									昭和52年3月(09時~09時)											
地名	美野里	真壁	柿岡	筑波山	土浦	館野	竜ヶ崎	江戸崎	愛宕山	地名	美野里	真壁	柿岡	筑波山	土浦	館野	竜ヶ崎	江戸崎	愛宕山	地名	美野里	真壁	柿岡	筑波山	土浦	館野	竜ヶ崎	江戸崎	愛宕山
日										日										日									
1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	11	6	7	×	5	6	6	9	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	—	—	0	—	—	0	1	1	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	1	—	0	—	—	1	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	0	4	2	—	1	2	0	—	—	9	0	0	0	—	0	0	0	1	—	9	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	1	—	1	—	—	2	—	—	—	10	3	1	1	—	3	5	7	6	—	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—
上旬	1	4	3	—	1	2	0	—	—	上旬	3	1	1	—	3	5	7	7	—	上旬	12	6	7	×	6	7	7	10	—
11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11	—	—	—	—	—	0	2	1	—
12	—	—	0	—	—	0	—	—	—	12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13	—	—	—	—	—	—	1	1	—	13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	13	1	1	0	—	—	0	0	—	—
14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14	1	5	1	×	1	1	—	0	—	14	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15	—	—	0	—	—	—	—	—	—	15	0	0	3	×	1	2	1	—	—	15	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16	8	13	8	8	14	17	14	15	—
17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	17	6	4	5	3	3	5	6	6	—
18	0	—	—	—	—	—	—	—	—	18	—	—	0	—	—	—	—	—	—	18	5	3	1	2	3	3	4	5	—
19	0	—	0	—	—	0	—	—	—	19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19	—	—	—	—	—	0	0	—	—
20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20	0	0	0	×	0	0	0	—	—	20	—	—	—	—	—	—	—	—	—
中旬	0	—	0	—	—	0	1	1	—	中旬	1	5	4	×	2	3	1	0	—	中旬	20	21	14	13	20	25	26	28	—
21	—	—	—	—	—	0	—	—	—	21	10	8	6	×	8	11	14	13	—	21	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22	0	—	0	—	0	0	1	×	—	22	—	—	—	—	—	—	1	—	—	22	0	2	0	1	1	2	2	2	—
23	2	—	0	—	3	3	1	×	—	23	—	—	—	—	—	—	—	—	—	23	15	13	15	8	13	15	16	19	—
24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	24	1	1	1	1	1	1	0	1	—
25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25	—	—	0	—	—	0	0	—	—	25	—	—	—	—	—	—	—	—	—
26	13	9	6	×	11	15	16	17	—	26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	26	2	4	1	1	1	5	6	5	—
27	—	—	1	—	—	—	—	—	—	27	—	—	—	—	—	—	—	—	—	27	10	4	7	5	10	10	8	9	—
28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	28	—	—	—	—	—	—	—	—	—
29	—	—	—	—	—	—	—	—	—	29	—	—	—	—	—	—	—	—	—	29	7	10	9	3	7	10	11	9	—
30	—	—	—	—	0	0	0	0	—	30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	30	64	55	66	12	50	63	78	79	—
31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	31	4	1	3	3	4	4	3	5	—
下旬	15	9	7	×	14	18	18	×	—	下旬	10	8	6	×	8	11	15	13	—	下旬	103	90	102	34	87	110	124	129	—
月	16	13	10	×	15	20	19	×	—	月	14	14	11	×	13	19	23	20	—	月	135	117	123	×	113	142	157	167	—

表2 (つづき)

昭和52年4月(09時~09時)

昭和52年5月(09時~09時)

昭和52年6月(09時~09時)

地名 日	美野里	真壁	柿岡	筑波山	土浦	館野	竜ヶ崎	江戸崎	愛宕山	地名 日	美野里	真壁	柿岡	筑波山	土浦	館野	竜ヶ崎	江戸崎	愛宕山	地名 日	美野里	真壁	柿岡	筑波山	土浦	館野	竜ヶ崎	江戸崎	愛宕山	
																														日
1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	0	—	0	—	0	1	2	1	—	—	1	3	0	2	1	1	3	0	—	5
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	—	—	—	—	0	—	—	—	—	—	2	27	16	24	21	18	17	11	11	24
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	—	—	—	—	—	2	0	1	—	—	3	1	—	—	—	1	—	—	—	
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	11	16	11	7	12	15	17	18	8	—	4	—	—	3	—	1	5	0	—	7
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5	11	4	11	10	9	10	9	12	11	—	5	—	—	—	—	—	—	—	—	
6	9	6	11	3	5	7	6	8	—	6	—	—	—	—	—	0	—	—	1	—	6	—	—	—	—	—	0	—	—	
7	6	2	5	1	4	4	6	5	—	7	4	—	1	—	—	1	—	—	—	—	7	0	1	0	2	5	2	10	7	—
8	7	7	7	5	5	9	9	9	—	8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8	—	—	—	—	0	—	—	—	
9	21	22	26	7	15	20	18	20	—	9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9	—	—	0	—	—	—	—	—	
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10	9	10	12	12	15	12	7	10	9
上旬	43	37	49	16	29	40	39	42	—	上旬	26	20	23	17	21	29	28	32	20	—	上旬	40	26	41	36	41	39	28	28	45
11	—	—	—	—	—	0	—	—	14	11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11	0	—	0	—	1	1	1	—	1
12	16	21	19	18	13	15	9	10	日開始	12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12	—	—	1	—	—	0	0	—	2
13	9	5	9	9	11	14	13	17	—	13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	13	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14	1	—	0	—	—	0	—	—	—	14	5	5	4	3	3	5	3	3	3	—	14	17	16	19	16	—	1	9	13	9
15	1	3	2	1	2	3	7	5	2	15	110	85	121	70	68	77	42	57	136	—	15	—	—	—	1	—	0	—	—	
16	1	3	2	4	—	1	0	—	2	16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16	10	12	16	6	6	10	3	7	12
17	10	15	9	8	7	7	5	5	11	17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	17	19	18	20	9	15	18	14	19	24
18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18	22	14	16	12	15	33	4	10	19
19	—	—	—	—	—	0	—	—	—	19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19	6	3	2	2	1	3	5	3	5
20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20	—	—	—	1	—	—	—	—	—
中旬	38	47	41	40	33	40	34	37	×	中旬	115	90	125	73	71	82	45	60	139	—	中旬	74	63	74	47	38	66	36	52	72
21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	22	0	—	0	—	—	0	—	—	—
23	—	—	—	—	—	—	—	—	—	23	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	23	5	5	5	3	4	5	9	8	7
24	0	4	1	1	1	3	2	3	—	24	3	3	1	3	0	1	—	—	2	—	24	54	49	52	22	38	44	38	48	55
25	—	0	0	1	1	0	2	2	—	25	4	3	4	3	4	2	2	—	6	—	25	3	1	1	—	2	3	8	12	6
26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	26	3	1	3	2	9	2	0	1	2	—	26	—	—	—	—	—	—	—	—	—
27	14	10	12	7	6	7	6	6	10	27	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	27	—	—	—	—	—	—	—	—	—
28	—	0	—	—	—	0	—	—	1	28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	28	—	—	—	—	—	0	—	—	—
29	15	17	14	13	14	16	14	14	13	29	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	29	—	—	—	1	—	—	—	—	—
30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	30	—	—	0	1	—	—	0	—	—	—	30	0	2	0	2	—	1	0	—	—
下旬	29	31	27	22	22	26	24	25	24	下旬	12	7	8	10	14	5	2	3	10	—	下旬	62	57	58	28	44	53	55	68	68
月	110	115	117	78	84	106	97	104	×	月	153	117	156	100	106	116	75	95	169	—	月	176	146	173	111	123	158	119	148	185

表2 (つづき)

昭和52年7月(09時~09時)										昭和52年8月(09時~09時)										昭和52年9月(09時~09時)												
地名	美野	真	柿	筑波	土	館	竜ヶ	江戸	愛宕	地名	美野	真	柿	筑波	土	館	竜ヶ	江戸	愛宕	地名	美野	真	柿	筑波	土	館	竜ヶ	江戸	愛宕			
日	里	壁	岡	山	浦	野	崎	崎	山	日	里	壁	岡	山	浦	野	崎	崎	山	日	里	壁	岡	山	浦	野	崎	崎	山			
1	3	2	2	2	4	5	2	2	2	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
2	—	—	—	—	—	0	—	—	1	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
3	0	10	2	12	2	10	2	—	1	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	0	—	—	—	0	—	—	—	—			
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	2	—	—	—	—	24	74	19	7	7		
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
6	19	6	42	×	12	3	4	5	13	6	18	35	24	29	10	14	3	7	×	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
7	4	4	4	×	1	2	2	1	4	7	—	—	1	—	—	1	—	—	×	7	—	—	—	—	—	1	1	2	1	—		
8	—	—	—	×	—	—	—	—	—	8	8	11	9	8	9	11	8	9	×	8	42	26	31	21	55	40	58	58	40			
9	—	—	—	×	—	—	—	—	—	9	—	—	—	—	—	—	—	—	×	9	25	35	13	36	11	20	16	28	22			
10	0	1	0	×	—	0	—	—	—	10	9	10	6	6	4	3	5	8	×	10	0	—	—	—	—	—	0	—	—	—		
上旬	26	23	50	×	19	20	10	8	21	上旬	35	56	40	43	23	29	16	24	×	上旬	69	61	47	57	91	135	95	94	70			
11	26	46	17	—	24	22	33	23	22	11	1	—	0	—	—	1	—	2	×	11	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—		
12	—	—	—	欠	—	—	—	—	1	12	—	3	0	—	—	0	—	—	×	12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
13	—	—	0	—	—	0	—	—	—	13	87	85	103	44	48	30	51	62	×	13	5	24	20	18	2	0	—	—	—	33		
14	0	—	0	—	1	7	0	1	—	14	20	12	15	8	19	2	31	28	×	14	—	—	0	1	—	—	0	—	—	—		
15	1	15	9	—	11	—	—	—	2	15	23	11	11	5	15	13	18	37	×	15	—	—	0	—	—	0	1	—	—	—		
16	30	37	35	—	55	62	46	53	31	16	29	45	49	39	35	40	33	29	×	16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
17	0	1	1	—	1	1	0	—	1	17	56	63	31	40	31	27	26	24	×	17	—	—	—	—	—	0	—	—	—	—		
18	—	2	0	—	1	1	—	—	1	18	79	28	69	48	63	90	51	70	×	18	18	14	15	9	18	24	29	38	11			
19	—	—	0	測	—	0	0	—	—	19	8	2	6	2	4	6	5	11	×	19	180	97	104	45	76	88	97	135	116	—		
20	3	2	1	—	—	0	—	—	4	20	2	—	0	1	—	0	—	—	×	20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
中旬	60	103	63	—	92	93	79	87	62	中旬	305	249	284	187	215	209	215	263	×	中旬	203	135	139	74	96	112	127	173	160			
21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21	—	—	—	2	—	0	—	—	×	21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	22	0	—	0	1	4	2	2	3	×	22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
23	—	—	—	—	—	—	—	—	—	23	0	—	—	1	—	0	—	2	×	23	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	24	0	—	1	1	—	1	1	1	×	24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25	0	3	0	1	—	3	1	—	×	25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
26	0	—	0	—	—	0	—	—	—	26	—	—	0	1	—	0	1	—	×	26	—	3	2	3	1	2	7	7	2	—		
27	—	—	0	—	—	0	—	—	—	27	—	—	0	1	—	—	—	—	×	27	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
28	—	10	5	—	8	10	8	—	4	28	—	—	—	—	—	—	—	—	×	28	—	—	0	—	—	0	—	—	—	—	—	
29	—	—	—	—	—	—	—	—	—	29	—	—	—	—	—	—	—	—	×	29	6	6	4	5	6	7	7	6	3	—	—	
30	—	—	—	—	—	0	—	—	—	30	—	—	—	—	—	—	—	—	×	30	1	2	1	—	—	0	—	—	—	—	—	
31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	31	—	—	0	—	—	—	—	—	×	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
下旬	0	10	5	×	8	10	8	—	4	下旬	0	3	1	8	4	6	5	6	×	下旬	7	11	7	8	7	9	14	13	6	—	—	
月	86	136	118	×	119	123	97	95	87	月	340	308	325	238	242	244	236	293	327	月	279	207	193	139	194	256	236	280	236	—	—	

表2 (つづき)

昭和52年10月(09時~09時)									昭和52年11月(09時~09時)									昭和52年12月(09時~09時)												
地名	美野	真壁	柿岡	筑波山	土浦	館野	竜ヶ崎	江戸崎	愛宕山	地名	美野	真壁	柿岡	筑波山	土浦	館野	竜ヶ崎	江戸崎	愛宕山	地名	美野	真壁	柿岡	筑波山	土浦	館野	竜ヶ崎	江戸崎	愛宕山	
日										日										日										
1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	0	—	—	0	—	—	—	1	—	—	—	—	—	0	—	—	—	
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	0	—	0	—	1	1	—	—	—	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
3	17	32	22	18	23	25	34	33	20	3	—	—	—	—	—	—	—	—	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
4	10	9	12	9	10	12	8	9	13	4	0	8	3	4	6	5	2	×	2	4	—	—	—	—	—	—	—	—		
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5	4	—	1	—	—	—	—	—	—	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6	0	—	0	1	1	1	2	—	—	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
7	—	—	—	—	—	0	—	—	—	7	0	—	0	—	—	0	0	1	—	7	—	—	—	—	—	0	0	—	—	
8	6	8	4	4	5	4	5	6	4	8	—	—	—	—	—	—	—	—	8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	休	
9	1	0	0	1	1	1	0	—	1	9	—	—	—	—	—	—	—	—	9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	—	—	—	0	—	—	—	10	—	—	—	—	—	—	—	—	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
上旬	34	49	38	32	39	42	47	48	38	上旬	4	8	4	5	8	7	4	×	2	上旬	—	—	—	—	—	—	0	0	—	
11	—	—	0	—	—	0	2	—	—	11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12	3	—	1	—	3	3	3	—	—	
13	—	—	0	—	—	0	0	—	—	13	0	5	0	—	—	0	0	—	—	13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
14	13	5	12	2	4	3	2	×	7	14	1	—	0	—	—	1	—	—	14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15	—	—	—	—	—	—	—	—	15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
16	—	—	—	—	—	0	—	—	—	16	71	35	48	14	37	41	39	49	43	16	7	17	11	8	6	10	11	7	—	
17	—	—	—	—	—	0	—	—	—	17	22	15	19	11	12	15	20	20	21	17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18	0	—	—	—	—	—	—	—	—	18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
中旬	13	5	12	2	4	3	4	×	7	中旬	94	55	67	25	49	57	59	69	64	中旬	10	17	12	8	9	13	14	10	—	
21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	止
22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	22	—	2	—	—	—	—	—	—	—	22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
23	—	—	—	—	—	—	—	—	—	23	—	—	—	—	—	—	—	—	—	23	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	26	6	7	6	3	6	8	12	11	5	26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
27	—	—	—	—	—	—	—	—	—	27	—	—	—	—	—	—	—	—	1	27	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
28	—	—	—	—	—	0	—	—	—	28	—	—	—	—	—	0	—	—	—	28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
29	—	—	—	—	—	—	—	—	—	29	—	—	—	—	—	—	—	—	—	29	—	—	—	—	—	0	—	—	—	
30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	30	0	0	1	—	—	0	1	—	—	
31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	31	14	11	8	2	8	9	12	12	—	
下旬	—	—	—	—	—	0	—	—	—	下旬	6	9	6	3	6	8	12	11	6	下旬	14	11	9	2	8	9	13	12	—	
月	47	54	50	34	43	45	51	×	45	月	104	72	77	33	63	72	75	×	72	月	24	28	21	10	17	22	27	22	—	

表 2 (つづき)

昭和 53 年 1 月 (09 時 ~ 09 時)

地名 日	美 野 里	真 壁	柿 岡	筑 波 山	土 浦	館 野	竜 ヶ 崎	江 戸 崎	愛 宕 山
1	12	2	6	1	6	8	2	3	休
2	6	20	8	1	9	8	11	8	
3	1	3	0	—	0	0	—	—	
4	—	—	—	—	—	—	—	—	
5	—	—	—	—	—	—	—	—	
6	—	—	—	—	—	—	—	—	
7	—	—	—	—	—	—	—	—	
8	—	—	—	—	—	—	—	—	
9	—	—	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	—	—	—	—	—	—	
上旬	19	25	14	2	15	16	13	11	
11	—	—	—	—	—	—	—	—	止
12	—	—	—	—	—	—	—	—	
13	2	2	2	—	1	3	6	5	
14	—	0	0	—	—	1	0	—	
15	—	—	—	—	—	—	—	—	
16	—	—	—	—	—	—	—	—	
17	0	2	1	—	1	0	0	0	
18	5	7	8	1	3	7	9	9	
19	—	—	—	—	—	—	—	—	
20	—	—	—	—	—	—	—	—	
中旬	7	11	11	1	5	11	15	14	
21	—	—	0	—	—	0	1	—	
22	—	—	—	—	—	—	—	—	
23	—	—	—	—	—	—	—	—	
24	—	—	—	—	—	—	—	—	
25	—	—	—	—	—	—	—	—	
26	1	4	2	—	1	1	2	1	
27	—	—	—	—	—	—	—	—	
28	—	—	—	—	—	—	—	—	
29	—	—	0	—	—	0	0	—	
30	—	—	0	—	—	0	0	—	
31	—	—	—	—	—	—	—	—	
下旬	1	4	2	—	1	1	3	1	
月	27	40	27	3	21	28	31	26	

表3 地域気象観測降水量(霞ヶ浦流域)

1978年2月

3月

4月

地点名	柿岡	筑波山	愛宕山	美野里	土浦	江戸崎	竜ヶ崎	柿岡	筑波山	愛宕山	美野里	土浦	江戸崎	竜ヶ崎	柿岡	筑波山	愛宕山	美野里	土浦	江戸崎	竜ヶ崎																
日付	1	(計画 休止)														6	3	1	8	5	8	7															
	2															51	×	64	64	36	56	43															
	3																×																				
	4															6	2	///	5	5	8	6															
	5																	///			1																
	6															49	×	53	48	21	18	19															
	7																×																				
	8																×																				
	9	3	1		9	4	5	5																													
	10				3	1	4	3	53	16	///	51	29	23	22																						
	11																																				
	12	4	1		8	3	9	8								1																					
	13															14	7	15	19	18	21	18															
	14															3	3	2	2	5	12	12															
	15																						1														
	16																																				
	17																																				
	18																																				
	19															×																					
	20															14	11	///	22	22	26	26	24	6	22	36	20	24	21								
	21																						4	1	10	6	1	4	4								
	22																								1												
	23																						10	2	///	10	7	9	8								
	24																						16	3	///	8	9	16	16								
	25																															1					
	26																															2		16	1	16	10
	27																																				
	28																																				
	29																																				
	30																																				
	31																													1							
(旬計)																																					
上旬	3	1		12	5	9	8	59	18	///	56	34	31	29	106	×	118	120	62	82	69																
中旬	4	1		8	3	10	9	14	11	///	22	22	27	26	45	17	51	64	44	61	55																
下旬		4		23	17	12	11	49	20	///	59	34	41	41	4	7	3	24	6	16	11																
月計	7	6		43	25	31	28	122	49	///	137	90	99	96	155	27	172	208	112	159	135																
(日数)																																					
1MM以上	2	3		4	4	5	5	6	6	///	6	6	7	7	8	8	10	10	10	8	9																
10MM以上	0	0		1	1	1	1	5	3	///	4	3	4	4	4	0	5	5	4	6	6																
30MM以上	0	0		0	0	0	0	1	0	///	2	0	0	0	2	0	2	3	1	1	1																

表3 (つづき)

5 月

6 月

7 月

地点名	柿	岡	筑波山	愛宕山	美野里	土浦	江戸崎	竜ヶ崎	柿	岡	筑波山	愛宕山	美野里	土浦	江戸崎	竜ヶ崎	柿	岡	筑波山	愛宕山	美野里	土浦	江戸崎	竜ヶ崎
日付	1	8	7	4	9	3											17	9	16	16)	14	14	23	
	2			1		2	3	10											1					
	3			1					37	16	37	57	28	36	34									
	4																		1					
	5																							
	6																							
	7	12	10	16	21	7	7	6											2		1			
	8		1																					
	9	4	8	3	1	1	1	1											4		11			
	10	3	3	4	7	4	3	3																
	11	16	11	15	26	20	24	18											2	2	1	1	1	3
	12																		2	1				
	13								11	4	8	2												
	14																							
	15																							
	16								2															
	17								1	1														
	18	18	14	21	24	11	1	2																
	19	68	55	78	89	42	56	42																
	20		1			1																		
	21	37	19	30	11	16				1										3		3	3	
	22	1							1	1	3	2	2	4	1				2	1				
	23								24	15	25	38	22	34	29		20	×	19		1			
	24								6	3	7	16	5	15	14		1	×	1					
	25								3	4	2	7	4	1	7									
	26								4	2	6	7	3	1	1				1					
	27								11	7	24	31	6	8	3									
	28								7	7	39	50	18	25	28									
	29																							
	30	11	13	15	14	8	6	8																
	31																		1					
(旬計)																								
上旬		27	29	29	38	17	14	20	37	16	37	57	28	36	34		17	16	17	28	14	14	23	
中旬		102	81	114	139	74	81	62		14	5	8	2			2	3	1	1		1	1	3	
下旬		49	32	45	25	24	6	8	55	40	106	151	56	91	83	21	7)	21		4		3		
月計		178	142	188	202	115	101	90	93	70	148	216	85	127	117	40	26)	39	29	18	15	29		
(日数)																								
1MM以上		10	11	11	9	11	8	8	8	12	10	9	9	8	8	4	10)	6	4	3	2	2	3	
10MM以上		6	6	6	6	4	2	3	3	3	4	5	3	4	4	2	0)	2	2	1	1	1	1	
30MM以上		2	1	2	1	1	1	1	1	0	2	4	0	2	1	0	0)	0	0	0	0	0	0	

表3 (つづき)

8 月

地点名	柿	岡	筑波山	愛宕山	美野里	土 浦	江戸崎	竜ヶ崎
日付	1	5	8	6	8	9	5	9
2				1				
3			1					
4			1					
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16	10	4	10	23				
17	5	4	8	4	5			
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								
31	1	3					6	
(旬計)								
上旬	5	10	7	8	9	5	9	
中旬	15	8	18	27	5			
下旬	1	3				6		
月 計	21	21	25	35	14	11	9	
(日数)								
1mm以上	4	6	4	3	2	2	1	
10mm以上	1	0	1	1	0	0	0	
30mm以上	0	0	0	0	0	0	0	

表4 高層气象台(館野)氣象表

1978年

種別 日	2月			3月			4月			5月			6月			7月		
	最高氣温 ℃	最低氣温 ℃	降水量 mm	最高氣温 ℃	最低氣温 ℃	降水量 mm	最高氣温 ℃	最低氣温 ℃	降水量 mm	最高氣温 ℃	最低氣温 ℃	降水量 mm	最高氣温 ℃	最低氣温 ℃	降水量 mm	最高氣温 ℃	最低氣温 ℃	降水量 mm
1	7.2	-7.3	—	8.3	3.8	—	11.5	-2.6	—	22.9	17.5	1.0	27.5	9.3	—	21.9	19.2	11.5
2	6.8	-6.1	—	12.4	-4.0	—	10.4	-0.2	27	24.4	8.5	1.0	27.8	8.4	—	29.0	20.3	0.0
3	5.8	-7.8	—	12.0	-4.5	—	9.3	5.3	20	21.6	4.9	—	26.7	10.6	—	30.5	20.8	0.0
4	7.6	-4.5	—	18.9	-0.3	7	13.8	-0.9	—	23.6	11.9	—	18.2	16.6	25.5	33.2	22.6	—
5	11.1	-6.7	—	11.6	2.1	—	15.4	4.6	—	24.3	10.6	—	27.5	12.0	—	29.9	23.9	—
6	6.6	-3.1	—	12.7	2.0	—	15.2	5.7	30	14.4	8.6	—	25.8	14.2	—	31.3	22.5	2.0
7	10.7	-7.9	—	12.6	2.3	—	15.6	5.7	—	12.8	7.4	7.0	24.6	15.7	0.0	32.6	21.6	—
8	10.5	-4.3	—	12.8	1.6	—	22.7	2.5	—	19.4	10.9	0.0	27.2	13.2	—	32.1	21.9	7.5
9	8.2	-4.0	8	9.9	3.8	4	24.1	1.7	—	21.1	14.8	1.5	28.1	15.7	—	30.8	21.2	—
10	7.9	1.8	1	13.1	4.3	32	18.5	6.0	—	19.5	16.8	1.0	27.6	16.2	—	30.8	22.0	0.0
上旬	8.2	-5.0	9	12.4	1.1	43	15.7	2.8	77	20.4	11.2	11.5	26.1	13.2	25.5	30.2	21.6	21.0
11	7.4	2.8	0	13.7	3.1	—	12.5	5.7	13	17.5	12.0	16.0	26.6	18.1	0.0	29.8	23.1	0.0
12	4.3	-1.5	4	8.3	-2.2	0	12.6	6.7	4	24.0	10.8	—	26.6	19.1	0.0	31.6	22.8	4.0
13	10.9	-1.8	—	9.7	-5.1	0	11.2	3.6	4	21.1	12.3	—	26.6	19.7	0.0	30.5	20.4	—
14	4.8	-4.5	1	11.1	-5.7	—	15.9	0.1	—	20.5	13.1	—	24.8	17.5	0.0	29.7	21.3	—
15	2.8	-1.9	0	11.7	-3.0	—	21.6	6.1	—	21.9	10.4	—	30.1	17.2	—	28.7	21.5	—
16	5.4	-8.7	0	10.3	1.5	—	21.0	12.4	0	25.6	8.2	—	28.8	23.8	0.0	29.1	20.5	—
17	4.7	-3.5	—	14.1	-1.6	0	15.0	14.7	0	25.4	12.1	0.0	30.2	23.4	—	29.5	20.6	—
18	8.2	-5.7	—	11.5	0.3	21	14.1	9.7	24	21.9	16.7	8.0	30.1	22.8	—	28.8	19.6	—
19	4.7	-8.1	—	12.9	6.0	0	19.5	7.9	—	21.9	18.3	34.5	30.3	23.5	0.0	30.5	19.8	—
20	10.1	-7.5	—	14.3	1.6	—	23.0	9.6	—	19.9	14.6	0.5	31.2	23.1	0.0	28.9	21.1	—
中旬	6.3	-4.0	5	11.8	-0.5	21	16.6	7.7	45	22.0	12.9	59.0	28.5	20.8	0.0	29.7	21.1	4.0
21	12.2	-4.6	—	8.7	-1.0	16	14.1	10.0	0	25.6	13.0	0.0	30.9	23.8	0.0	26.8	21.0	4.5
22	9.8	-3.2	—	7.9	3.1	6	19.3	5.2	—	21.2	13.3	—	29.4	17.8	1.0	32.0	24.1	0.0
23	8.8	-5.7	0	10.5	-1.2	0	20.0	5.5	—	24.3	9.6	—	19.2	17.6	18.0	34.3	22.0	—
24	7.6	-6.6	—	14.2	-3.6	—	18.1	12.0	0	24.5	12.7	—	23.2	18.4	4.0	34.5	24.6	—
25	7.6	-5.2	0	15.7	-2.3	—	20.6	10.0	0	22.8	14.0	—	26.9	20.3	2.5	34.5	23.6	—
26	9.4	-9.1	—	18.3	0.6	—	20.5	1.1	—	25.8	13.6	—	26.3	21.6	1.0	32.5	21.5	—
27	15.5	-5.2	—	18.6	-1.3	1	20.6	6.1	—	27.5	12.2	—	23.0	18.2	2.5	33.4	21.3	—
28	14.1	-0.8	20	12.4	4.7	16	22.3	7.6	—	24.8	14.1	—	20.8	17.8	0.5	33.8	22.0	—
29				16.5	1.7	—	16.6	11.8	3	22.5	14.0	—	25.9	18.0	—	33.5	22.0	—
30				17.1	2.8	—	19.5	13.2	0	14.7	11.5	7.5	27.8	18.0	—	33.1	21.3	—
31				8.3	3.1	—				21.7	8.3	—				31.7	20.6	—
下旬	10.6	-5.0	20	13.5	0.6	39	19.2	8.3	3	23.2	12.4	7.5	25.3	19.2	29.5	32.7	22.2	4.5
月	8.2	-4.7	34	12.6	0.4	103	17.2	6.2	125	21.9	12.2	78.0	26.7	17.7	55.0	30.9	21.6	29.5

表4 (つづき)

種別 日	8 月		
	最高気温 ℃	最低気温 ℃	降水量 mm
1	29.5	24.7	8.5
2	32.9	24.0	—
3	31.3	27.2	0.0
4	30.6	24.9	0.0
5	34.3	21.8	—
6	34.0	20.9	—
7	33.3	23.2	—
8	32.4	22.6	—
9	32.3	23.2	—
10	30.6	22.9	—
上旬	32.1	23.5	8.5
11	34.5	22.0	—
12	33.9	22.8	—
13	34.2	22.6	—
14	32.6	21.9	—
15	33.4	21.3	—
16	33.6	23.8	—
17	31.4	22.3	2.5
18	27.2	22.6	0.0
19	33.0	22.4	—
20	33.2	22.3	—
中旬	32.7	22.4	2.5
21	33.8	24.3	—
22	36.8	21.4	—
23	35.1	18.8	—
24	34.2	19.0	—
25	28.4	17.2	—
26	29.8	17.6	—
27	30.4	18.6	—
28	31.3	19.9	—
29	33.3	19.1	—
30	32.8	20.7	—
31	29.4	22.0	0.5
下旬	32.3	19.9	0.5
月	32.4	21.9	11.5

国立公害研究所特別研究成果報告

- 第1号 陸水域の富栄養化に関する総合研究——霞ヶ浦を対象として。(1977)
第2号 陸上植物による大気汚染環境の評価と改善に関する基礎的研究
——昭和51/52年度 研究報告。(1978)

(改 称)

国立公害研究所研究報告

- 第3号 A comparative study of adults and immature stages of nine Japanese species of the genus *Chironomus* (Diptera, Chironomidae). (1978)
第4号 スモッグチャンバーによる炭化水素—窒素酸化物系化学反応の研究
——昭和52年度中間報告。(1978)
第5号 芳香族炭化水素—窒素酸化物系の光酸化反応機構と光酸化二次生成物の培養細胞に及ぼす影響に関する研究——昭和51/52年度研究報告。(1978)
第6号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅱ)——霞ヶ浦を中心として。(1979)

RESEARCH REPORT FROM
THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES
No. 6

国立公害研究所研究報告第6号
(R-6-'79)

昭和54年3月31日発行

編集・発行 国立公害研究所

茨城県筑波郡谷田部町大字館野

印刷 大日本印刷株式会社
東京都新宿区椋町7番地

Published by the National Institute for Environmental Studies
Tukuba, Yamae, Ibaraki 300-21, Japan.

March 1979