

# 中禅寺湖の富栄養化現象に関する基礎的研究

*Fundamental Studies on the Eutrophication of Lake Chuzenji*

水質土壌環境部水質環境計画研究室

*Hydrospheric Water Management Section*

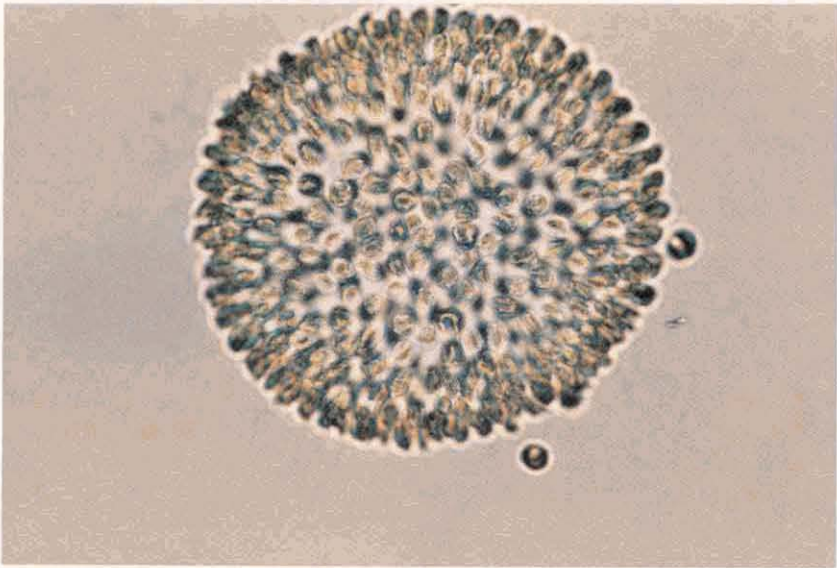
*Water and Soil Environment Division*

環境庁 国立公害研究所

THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES



千手ヶ浜から中禅寺湖を臨む。風光めいびな湖として親しまれているが、近年、富栄養化の兆候がみられるようになった。



中禅寺湖で採取した *Uroglena americana* のコロニー（昭和57年6月撮影）  
通常、400~900の個体が集まって径50~300 $\mu\text{m}$ のコロニーを作る。1 ml  
中に10,000個体程度集積すると赤潮状態となる。

## 序

日光国立公園の中禅寺湖は男体山の噴火によって大谷川がせき止められてできたものである。この湖は標高が1268 m、面積は12.1 km<sup>2</sup>で、霞ヶ浦の15分の1程度である。一番深い所は163 mで、中禅寺湖の碧い水に映った男体山の姿が特に美しい。菖蒲ヶ浜では、夏期にはキャンプや水泳を楽しむことができる。我々は特に水のある風景を美しいと思うので、山でも海岸でも景勝地には水辺が必要な条件である。

この湖に1981年、淡水赤潮が現れ、また日光市の水道水に異臭がして水質の悪化が問題となった。美しい国立公園の湖の水質が変化しているとなると、これは由々しき問題である。この湖の湖底は4度で、夏には昼間の表層の温度は20度を超える。水深10 m付近で温度が急に变化する躍層が存在し、上下の水温が逆転する厳寒時を除いては表層と深部の水は交じわらない。流入する主な河川は湯川、地獄川及び千手5河川であるが、冬期を除きこれらの河川水は底まで混合することはなく、表層流となって流れ出る。私は1982年6月17日、表層の水を採取して顕微鏡で調べてみたところ、赤潮現象の原因であるウログレナというペン毛藻が群体となってクラゲのように動いているのがみえた。

中禅寺湖の水質汚濁に関しては奥日光の湯ノ湖から流入する湯川が問題である。湯ノ湖には温泉街があり、最盛期には500人以上の宿泊者が毎日ここを訪れる。大勢の人が美しい自然を楽しむのは良いことであるが、自然環境を保全することも気を配らなければならない。

国立公害研究所では陸水域の富栄養化による水質悪化の機構解明とその防止対策について1977年より特別研究を行っているが、たまたま中禅寺湖を水源とする水道水の悪臭問題が発生したため、上記の特別研究に併行して、1981年秋から2年計画で経常研究を実施した。

本報告はこの研究成果をまとめたものである。この研究は中禅寺湖の水利、物質収支、生態などの研究を含んでいる。これらの成果は水質の維持に役立つのみでなく、湖沼学の観点からも寄与するものと期待している。

この研究所の水質土壌環境部の水質環境計画研究室が中心となって実施したので小回りが利く組織で短期間に成果をあげることができたが、他方栃木県の全面的な協力を負うところが少なくない。所外からの御協力に関して衷心より謝意を表する次第である。

本報告をもってこの経常研究は終了するが、国立公園の美しい水質を保全するためには今後も調査や研究が続けられなければならない。そのための基盤としてこの研究が役立つならば甚だ光栄である。

1984年3月

国立公害研究所

所長 近藤次郎

# 目 次

I. 研究の意義と概要	1
村岡浩爾	
II. 報 文	
1. 中禪寺湖の水溫成層と内部波	5
平田健正・村岡浩爾	
2. 中禪寺湖の水質特性	37
相崎守弘・大槻 晃	
3. 中禪寺湖における懸濁態物質の沈殿量とその特性	53
福島武彦	
4. 中禪寺湖における植物プランクトン及び動物プランクトンの季節変化	69
小山次朗・福田訓真	
5. 日光湖沼群の底生動物	77
安野正之・岩熊敏夫・菅谷芳雄・佐々 学	
6. 湯川の自浄作用	89
相崎守弘	
7. 中禪寺湖における栄養塩収支	99
相崎守弘・村岡浩爾・平田健正・福島武彦・岩田 敏 海老瀬潜一・大坪国順・大槻 晃	
III. まとめ	113
村岡浩爾	
IV. 資 料	119
i. 気象資料	120
ii. 水溫鉛直分布	121
iii. 中禪寺湖及び流出入河川の水質	123
iv. 沈殿量	135
v. 湯川の水質	138
vi. 中禪寺湖の植物プランクトン及び動物プランクトン	141

## Contents

I . Outline and Significance of the Study .....	1
K. MURAOKA	
II . Papers	
1 . Thermal Stratification and Internal Wave in Lake Chuzenji .....	5
T. HIRATA and K. MURAOKA	
2 . Characteristics of Water Quality in Lake Chuzenji .....	37
M. AIZAKI and A. OTSUKI	
3 . Sedimentation of Particulate Matter and its Characteristics in Lake Chuzenji .....	53
T. FUKUSHIMA	
4 . Seasonal Succession of Phytoplankton and Zooplankton in Lake Chuzenji .....	69
J. KOYAMA and K. FUKUDA	
5 . Zoobenthos in the Lakes in Nikko District .....	77
M. YASUNO, T. IWAKUMA, Y. SUGAYA, and M. SASA	
6 . Study on the Stream-purification in the Yukawa River .....	89
M. AIZAKI	
7 . Nutrients Budget in Lake Chuzenji .....	99
M. AIZAKI, K. MURAOKA, T. HIRATA, T. FUKUSHIMA, T. IWATA, S. EBISE, K. OTSUBO and A. OTSUKI	
III . Summary .....	113
K. MURAOKA	
IV . Limnological Data in Lake Chuzenji .....	119
i . Meteorological Data .....	120
ii . Vertical Profile of Water Temperature .....	121
iii . Water Quality of Lake Chuzenji and Inflow Rivers .....	123
iv . Data of Sedimentation .....	135
v . Water Quality of Yukawa River .....	138
vi . Phytoplankton and Zooplankton in Lake Chuzenji .....	141

I

## 研究の意義と概要

### Outline and Significance of the Study

村岡浩爾<sup>1</sup>

Kohji MURAOKA<sup>1</sup>

#### 1. 研究の意義

全国の自然湖沼 485 の中で、調和型に属し、かつ貧栄養型湖沼と分類されるのは 26.3%とみられている<sup>1)</sup>。その多くは山岳地帯にあって清澄な水を豊富に湛えており、それゆえに貴重な水資源として湖沼保全の意味が重要となっている。中禅寺湖も典型的な貧栄養湖として存在してきたが、近來になってその水質に異変が見られるようになった。発見の端緒は、1981年6月にこの水を水源とする地域の水道水に異臭が発生したことであった。この“異臭騒ぎ”の直後の調査によって、後になって同定された *Uroglena americana* の大増殖があったことが確認された(口絵参照)。このプランクトンは、琵琶湖において最初に異臭が問題となった1976年7月のものと同種で、琵琶湖ではその後毎年のように発生し、いわゆる淡水赤潮として飲料水に“なまぐさ臭”を発生させるという社会的問題に発展している<sup>2)</sup>。

調和型湖沼では、地学的、地理的、化学的、生物的の性状の時間的变化の結果、水域への流入物質に変化をもたらし、貧栄養状態から富栄養状態に移行する富栄養化現象が存在する。自然状態ではこの変化速度は非常に遅く、数百年から数万年を要すると言われている<sup>3)</sup>。このような長い時間スケールの過程でみれば、ほとんど同時期と見なせる琵琶湖と中禅寺湖の初期の富栄養化現象の現れが、果たして偶然の一致なのかどうか、この点は興味のあることである。しかし近年の産業発展と物質消費の著しい社会活動によってもたらされる各種の汚濁物質の発生のため、自然状態での富栄養化に加えて人為的な原因で多くの湖沼が加速的に富栄養化していることが認められている。この観点に立てば、中禅寺湖においても上流域の戦場ヶ原や湯ノ湖、沿岸や湖域の観光やレクリエーションの諸施設、さらには養鱒事業など、人為的汚染の要因となる事業や行為が存在するが、これらと富栄養化の兆候の関連についても正しく取り扱わなければならないだろう。

---

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川 16 番 2  
Water and Soil Environment Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

一方、国立公害研究所では、陸水域の富栄養化現象の機構解明とその防止対策について、昭和52年度から6年間の特別研究を持った。主として過栄養と言われる霞ヶ浦を研究舞台とし、加えて全国の主要湖沼の調査研究も進めてきた。この期間の途中で中禅寺湖の事態に遭遇したため、特別研究と平行して、水質土壌環境部水質環境計画研究室が中心となって独自の調査組織を組み、1981年秋から2年にわたる調査を遂行してきたのである。調査の内容は、*Uroglena americana* の異常増殖を確認した後の富栄養化現象を、水質・生物調査等によって追跡調査するのはもちろんであるが、このような現象を取り巻く湖環境を量的に把握するために、水収支、物質収支の算出、及び湖内の水理と沈降の動態現象を解明するための調査も行ってきた。これらの資料解析及び総合的検討によって、中禅寺湖が今、どのような状態におかれているか、富栄養化の進行速度はどの程度かを考察するとともに、中禅寺湖のこれからの環境保全において、とるべき施策を検討するための基礎資料を提供できると考えている。

## 2. 中禅寺湖の諸元と水質概況

中禅寺湖は、今から数万年から数十万年前に起こったと考えられる男体山から南東部に溶出した華巖溶岩によってせき止められた堰止湖である。流域や湖内の諸元は表1に示すとおりであるが、湖面積では日本で第17位、湖容量では第9位の湖である。常時流量の測定可能な規模を持つ流入河川は7河川で、その最大は湯川である。湯川の流域は戦場ヶ原を含む北部一帯を占め、約8 km上流に湯ノ湖がある。湯川の下流部は地獄川と合流し、それより河口まで約500 mの区間は地獄川と呼ぶのが正しいが、通常は湯川の水が大半を占めるので、ここではこの部分も湯川としておく。すなわち、地獄川は湯川との合流点から上流約800 mの湧水を水源とし、通常は発電所、養魚場を経て独自に河口を持つほか、その一部は別の養魚施設を経て湯川の最下流部に合流している。他の5河川は湖西の千手ヶ原から流入し、その流域は西部一帯を占める。流域の北東部は男体山、南部は杜山、半月山となるが、流域面積としては小さく、いずれも沢水以外の流入河川はない。流出河川は大尻川のみである。

表1 中禅寺湖の諸元

項 目	諸 元 値
湖心(最深部)の位置	北緯 36°43'46" 東経 139°28'41"
湖面の標高	1,268 m
流域の面積	132.3 km <sup>2</sup>
湖面積	12.1 km <sup>2</sup>
湖周長	23.6 km <sup>2</sup>
最大水深	163 m
平均水深	94.7 m
湖容積	11.4 億m <sup>3</sup>
滞留時間	6.5 年



湖水の循環パターンから分類すれば、中禅寺湖は複循環湖と見られる。すなわち、1月上旬あるいは中旬頃に冬期大循環を完了させた後に逆列成層期に入り、4月頃の春期大循環によって水質が一様になる。これらの循環を説明する水温特性については後の報文で詳述されている。

水質の概況を図1の透明度の経年変化から見てみよう。1981年以降、概して透明度が15mを超える機会はなくなっているとみられる。また1981年6月に見られる透明度の低下は既述の水道水悪臭の発生時に対応しているが、聞き取り調査によると、場所によっては透明度が1m以下となり帯状に赤潮現象が発生したといわれる。このような異常状態がこの年に初めて確認されたとしても、水質悪化がこの年から始まったとは限らず、それ以前にも1977、1978、1979年の6月から7月にかけて透明度の低下が見られ、富栄養化の兆しは既に存在していたと判断される<sup>4)</sup>。また、湯ノ湖の水質悪化が10数年前から顕在化していたことを考えると、中禅寺湖の富栄養化現象もこれと関係があるかも知れない。なお、1982年9月に見られる透明度の低下は、台風襲来に伴う濁水の流入によるものであるが、この場合も単なる濁質の流入だけでなく、大量の栄養塩の流入があったことが後の報文に詳述されている。

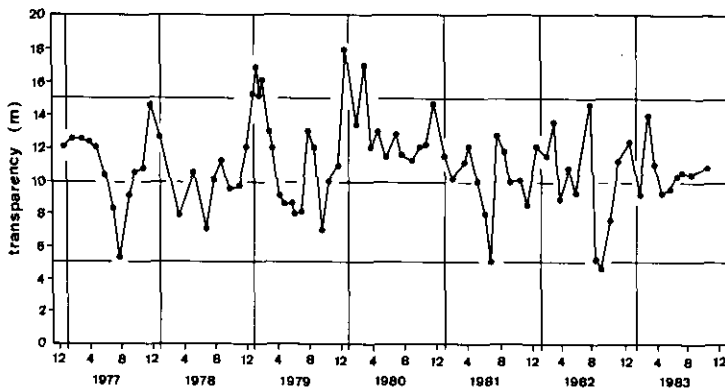


図1 中禅寺湖における透明度の経年変化

### 3. 調査方法と成果の取りまとめ方

調査はまず、中禅寺湖の水収支、物質収支を明らかにするため、毎月一回の調査が実施された。これを基本調査と称し、中禅寺湖の全容を把握し得る湖沼調査項目を調査対象とした。しかしここの研究組織は湖沼学の中でも分化された専門分野で構成しているため、その専門知識を生かして基本調査をバックボーンとしながら独自性のある調査や実験を平行して遂行した。すなわち、流体力学的見地から、深い湖に特徴のある内部波の実態を数度にわたる水温連続調査から極めて明確に把握し、湖流の特徴を水理模型実験によってとらえた。また水質及びプランクトンについては調査の頻度を上げ、従来知見を一步前進させることができたが、特に物質循環の一過程である湖内物

村岡浩爾

質の沈殿特性についての調査を継続させ、この湖で新しい情報を加えることができた。さらに流入河川で最も重要な湯川についての自浄作用、及び汚濁指標とも関連のある底生動物についても調査された。

以上のように、それぞれの専門を生かした研究組織であるため、富栄養化現象を網羅的に取り上げた総合研究とは言い難い。したがって研究成果も初めに独自性のある内容についてそれぞれにまとめ、終わりに中禅寺湖の栄養塩収支として全体をとりまとめている。

なお、基本調査は必ずしも月1回の調査頻度で十分でないため、地元栃木県の衛生環境部及び公害研究所、水産庁養殖研究所日光支所、中禅寺湖漁業協同組合で行われている調査や情報集蒐をもとに、関係者が集まって話し合い、多面的に中禅寺湖をとらえる努力もなされてきた。

この報告書を取りまとめるに当たって直接に調査や研究に携わった研究者は次のとおりである。

#### 国立公害研究所

水質土壌環境部 水質環境計画研究室 村岡浩爾・海老瀬潜一・相崎守弘  
平田健正・大坪国順・福島武彦

地盤沈下研究室 岩田 敏

計測技術部 水質計測研究室 大槻 晃

生物環境部 水生生物生態研究室 安野正之

生物環境管理研究室 岩熊敏夫

技術部 水生生物施設係 菅谷芳雄

#### 栃木県公害研究所

水質部 福田訓真（昭和57年度 共同研究員）

小山次郎（昭和57年度 共同研究員）

#### 引用文献

- 1) 日本水質汚濁研究協会（1982）：湖沼環境調査指針。公害対策技術同好会，7。
- 2) 淀川水質汚濁防止連絡協議会（1977）：琵琶湖における *Uroglena* の「水の華」発生について，第1報，（及びその続報）。
- 3) 日本水質汚濁研究協会（1982）：湖沼環境調査指針。公害対策技術同好会，11—13。
- 4) 相崎守弘他（1983）：中禅寺湖の栄養塩収支。水質汚濁研究会講演要旨，No.17，219—224。

II-1

中禅寺湖の水温成層と内部波

Thermal Stratification and Internal Wave in Lake Chuzenji

平田健正<sup>1</sup>・村岡浩爾<sup>1</sup>

Tatemasa HIRATA<sup>1</sup> and Kohji MURAOKA<sup>1</sup>

**Abstract**

In this paper we are concerned with exploring the influence of the wind action upon the vertical thermal profile and the attendant inner motions. In order to reveal the response of the thermally stratified medium to the wind forcing, the field experiments were performed in Lake Chuzenji in 1982 and 1983, which is a representative deep lake in Japan.

Main results obtained in this paper are summarized as follows.

1) When the wind blows continuously for a long time, surface mixing layer deepens eventually toward the leeward area. However, the wind action could be effective only to break the isotherms near surface and of little importance to erode the thermocline. Moreover, the model of the hydrostatic pressure balance in this paper can provide a reasonable estimation for the increase of the surface mixing layer over the thermocline.

2) When the wind stops, the internal seiche is generated. In temperature time series measured at the thermocline, we can see about 12 hours period induced by the uninodal internal seiche. This period can be estimated with high accuracy by simplified two-layered model and Holmboe's density model. Especially the wave height of internal seiche just after the occurrence becomes to be about 5 m and the internal seiche can be detected as long as 4-5 days after its generation.

3) Isothermal lines show clearly another internal wave which has the spatial structure of both 3rd mode in the horizontal direction and 2nd mode in the vertical one. The period of this wave could be calculated to be 14.7 hours from Holmboe's density model and be confirmed in the temperature time series which was displayed in the vertical thermal profiles measured at the same station every 2 hours for 26 hours.

4) Temperature variations associated with the shorter period waves were also

---

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2  
Water and Soil Environment Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi,  
Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

examined at the thermocline. In temperature spectra for these time series, energy peaks of 303, 455 and 481 seconds are easily recognized. The component of 303 seconds is 1.5 times of the Brunt-Väisälä period in the thermocline and may be implied to be a typical internal wave with a wavelength scale of the same order of the thermocline thickness.

## 1. はじめに

霞ヶ浦や琵琶湖南湖に代表される浅い湖はもちろんのこと、貧栄養湖と考えられる深い湖にまで、最近水質の悪化が進んでいる。1981年6月に発生した中禅寺湖の淡水赤潮もその一例であろう。深い湖の水理学的な特徴は、夏季に水温躍層が発達することであり、この水温躍層の形成により深い湖の流動や混合形態は均質な流体場と著しく異なる。すなわち、水温差に基づく密度差により、表層水と底層水との間の水質交換が抑制され、したがって夏季の一時期を見れば、底層水での溶存酸素の減少、あるいは河川流入により負荷された栄養塩類が表層付近に滞留する等、深い湖と言っても富栄養化する要因が存在する。もちろん水温は富栄養化現象の中で重要な要素であるが、水温成層場での内部流動や水質混合過程も、富栄養化現象を究明する際に基本的な情報の一つと考えられる。

温帯域の深い湖であれば、1年を通して受熱期、放熱期、循環期と大別されるが、混合現象一つを取っても、各季節において特徴的な現象が存在する。そして、それらの支配的な要因を把握した上で、湖の規模に見合ったスケールで混合現象を論じる必要がある。例えば、水温躍層が自由表面下数mに位置する受熱期初期には風波や吹送流による水温躍層の侵食効果<sup>1)</sup>も十分期待できようし、受熱期末期から放熱期にかけては内部静振や躍層規模の内部波による密度界面のoscillation<sup>2)</sup>、循環期には表面冷却による対流混合<sup>3)</sup>、等が挙げられる。中でも、密度中間層に生起する内部波は、主流あるいは系外から付加されたエネルギーを授受するエネルギー伝達媒体として、また波動として保持し得ない過剰なエネルギーがあれば、碎波・混合という形で放出する緩衝効果も合わせ持っており、系全体のエネルギー収支には重要な役割を演じている。そうした視点から、海洋では早くから注目され、内部波についての観測資料が数多く集積されている<sup>4,5)</sup>。一方、陸水域では、内部波の重要性が指摘されてはいるが、観測例は琵琶湖などに見るにとどまっている<sup>6)</sup>。加えて、計測機器や観測時間の制約もあつて定点観測が中心であり、内部波の空間的な波数構造についてはほとんど知られていないのが実情と言える<sup>7)</sup>。

内部波を生起させる外力としては、地形性貯熱効果による地衡流<sup>8)</sup>、河川流入<sup>9)</sup>、風<sup>10)</sup>等様々であるが、後述する中禅寺湖規模では、日常的な風により自由表面に与えられるせん断力が卓越すると考えられる。現地観測は月1回の定期調査の他に、1982年には6月と9月に湖水温の鉛直分布に重点を置いた1週間程度の連続観測を、1983年には7月~10月にかけて水温躍層付近での湖水温の長期定点観測を行った。本研究は、これらの観測資料を基に、風外力に対する水温成層場の応答特性

を明らかにする。続いて、内部静振やモード構造を有する内部波等、中禅寺湖における内部波の実態について報告する。また、風起因の湖内流動については、短時日に現地観測を実施するには種々の面で難しい。そこで、中禅寺湖の水理模型を用いて吹送流水理模型実験を行い、定性的ではあるがその水平流動パターンについて考察する。

## 2. 中禅寺湖と現地観測の概要

### 2.1 湖水温の年変化

中禅寺湖は東西 6.54 km, 南北 1.85 km, 湖表面 12.1 km<sup>2</sup>, 平均水深 94.7 m, 総貯水量 11.4 億 m<sup>3</sup> の堰止湖である<sup>1)</sup>。中禅寺湖の湖地形を図 1 に示す。

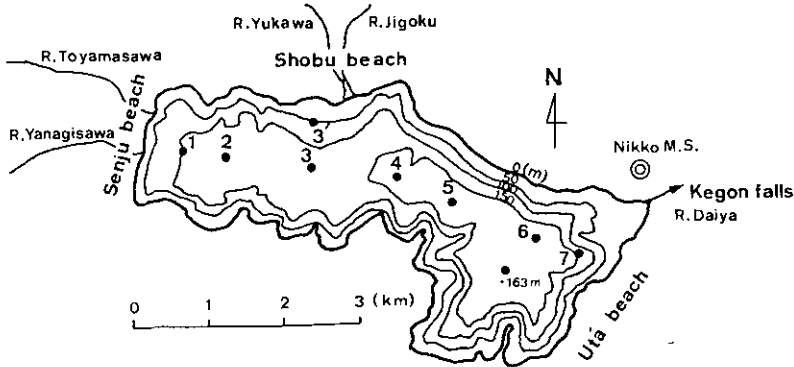


図 1 中禅寺湖の湖地形と観測地点

Fig. 1 Topographical image of Lake Chuzenji and measurement stations

図 2 は観測期間中の水深 1 m (表層), 水深 100 m (底層), 及び表層と底層の中間密度で定義される密度界面の水温の年変化を整理したものである。同図から, 1982, 83 年とも 4 月下旬~5 月上旬頃から表層水温と底層水温の差が大きくなり, 水温躍層の形成が始まっている。この水温躍層は 8 月上旬~中旬にかけて完成する。その後, 放熱期の表面冷却により表層水温は徐々に低下する。1 月初旬~中旬には, 同図にある 3 本の水温の経時曲線はほぼ 4°C で交差し, 循環期を迎えていることが知れる。そして, 2 月には底層水温が表層水温より高くなり, 逆列の水温成層を作る。ただし, 水温は 4°C より小さいため, 密度分布は安定である。受熱量の増加とともに, 3 月中旬~4 月中旬に再度湖水温が全水深にわたり一様となる。以上のように, 中禅寺湖は正列から逆列への, あるいは逆列から正列への過渡期に, 年 2 回の循環期を有する深い温帯湖特有の性質を示している。

図 3 は 1982 年の循環期から 1983 年の循環期まで, 1 サイクルの湖水温のイソプレットを示す。前述したように, 受熱期における水温躍層の形成, 放熱期の表面冷却による表層混合層厚の増加や

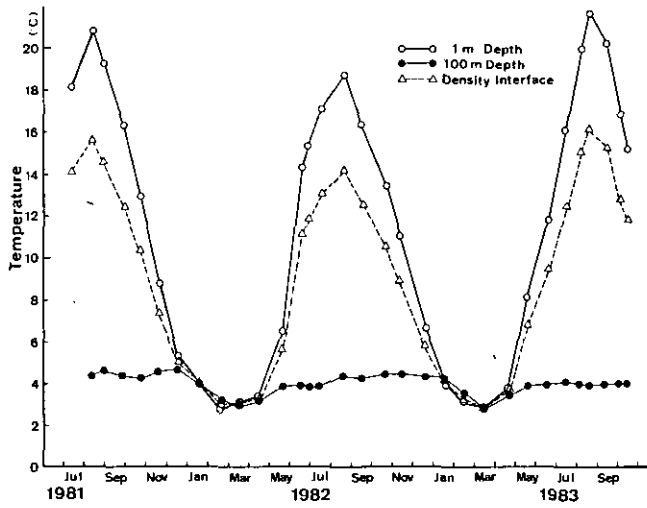


図 2 湖水温の経時変化

Fig. 2 Temporal variation of water temperature

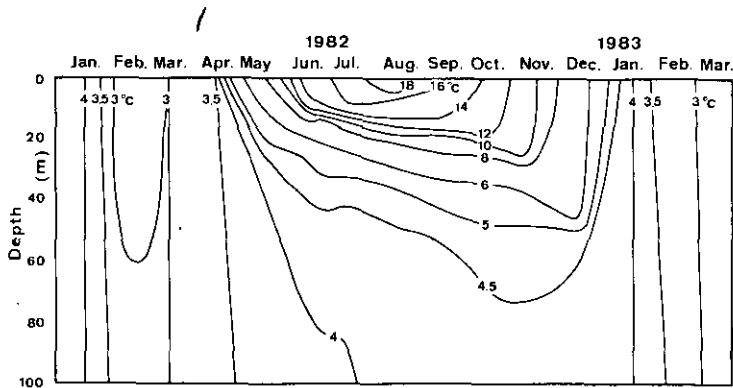


図 3 湖水温のイソプレット

Fig. 3 Isopleth of water temperature

冬季の逆列成層等、湖水温の季節変化が明りように認められる。

## 2.2 現地観測

風外力に対する水温成層場の応答特性及び内部静振や躍層規模の内部波をとらえるため、1982年6月下旬と9月中旬にそれぞれ1週間程度の湖水温の連続観測を、また1983年7月～10月にかけては湖水温の長期定点観測を実施した。測定項目は水温鉛直分布と水温躍層付近での水温の時間変

化である。

本観測では観測資料の精度向上と観測時間の短縮を図るため、B.T.(Bathy Thermograph, 鶴見精機製マイコン BT-2 型)による水温鉛直分布の測定を行った。この BT は直径 12.5 cm, 長さ 76.0 cm の円柱形 (水中重量約 5 kg) で、その先端部に圧力センサーと水温センサー (白金抵抗式) が取り付けられている。そして、圧力センサーで水圧を感知し、ただ機器を下すだけで鉛直方向に 10 cm 間隔の水温分布を得ることができる。BT の水中落下速度は表層と底層で 1 m/s, 水温躍層付近で 0.5 m/s となる様調節する。また、圧力センサーと水温センサーの時定数はそれぞれ 0.01, 0.2 秒であり、水中の速度が 1 m/s を超えないことから、動水圧による水深の検出誤差は 0.2 m 以内と推定される。なお、BT の水温測定範囲は -2 ~ 38°C, 測定精度は ±0.05°C で、水深 200 m まで観測できるよう設計されている。

BT を用いた水温鉛直分布の測定地点は図 1 中の湖長手方向に沿った St-1 ~ 7 までの 7 地点で、全測点の 1 回の走査に要する時間は約 60 分である。また、1982 年 6 月と 9 月の観測では観測期間中ほぼ 2 時間ごとに 24 時間の水温鉛直分布も計測しており、St-3' は夜間に行った観測地点を示している。

地方、水温の時間変化は St-2 の位置で、1982 年には時軸センサータイプの水時計 (鶴見精機製マイコン BT) 1 基を用いて、1983 年にはハイドロラブ・モデル-2001 2 基を用いて観測した。前者は 2048 個のデータを収録することができ、測定時間間隔も 0.1 ~ 99.9 秒まで 0.1 秒きざみで任意の値に設定可能である。この機器は測定間隔が短く、したがって短周期の水温変動に対しては有効であるが、バッテリー容量に制約があり、24 時間程度の観測しかできない。これに対して、後者は 3704 個のデータを収録することができ、測定間隔は 1 ~ 60 分まで 1 分きざみで設定可能である。1 回の最長測定時間は約 6 か月であるが、本観測では測定間隔を 5 分としたため、12.8 日間水温の経時変化を追跡することになる。したがって、約 2 週間に 1 度の割合でデータの回収を行い、新たに所定の水深に設置する。この操作を 1983 年 7 月 ~ 10 月にかけて繰り返した。いずれの場合も、観測手法は湖底のコンクリートアンカーに係留されたパイロットブイに水温センサーをつり下げ、所定の水深で水温を検出する。

表 1 観測地点の水深と距離

Table 1 Depths of measurement stations and intervals

Station	West End	1	2	3	4	5	6	7	East End	
Depth (m)	0	104	115	128	152	158	160	140	0	Mean Depth 131.2(m)
Length (m)	546	534	1246	1074	762	1292	534	550		Total Length 6538(m)

観測点の水深と観測点間距離を表1にまとめている。先述したように、湖の平均水深は94.7mであるが、内部静振の解析には、表1にある観測点に沿った平均水深131.2mを用いることにする。

### 3. 風外力に対する水温成層場の応答特性

中禅寺湖の内部波について考察する前に、まず湖面上を吹く風により水温成層場がどのように変化するのか、風外力に対する水温成層場の応答特性を明らかにしておく。

図4は日光測候所で記録された1982年6月23日9時から26日9時までの平均風速と風向を示している。中禅寺湖は北側に男体山、南側にも斜面が走り、したがって中禅寺湖の風向は湖長手方向に沿った東あるいは西向きが卓越する。そのため、同図においても風向は東及び西向きの2方向

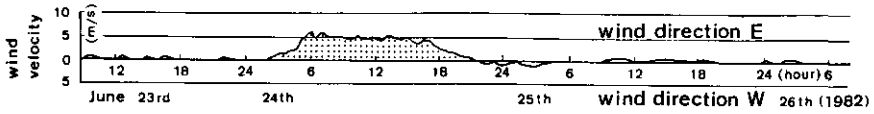


図 4 観測期間中の平均風速と風向

Fig. 4 Mean wind velocity and wind direction during observed term

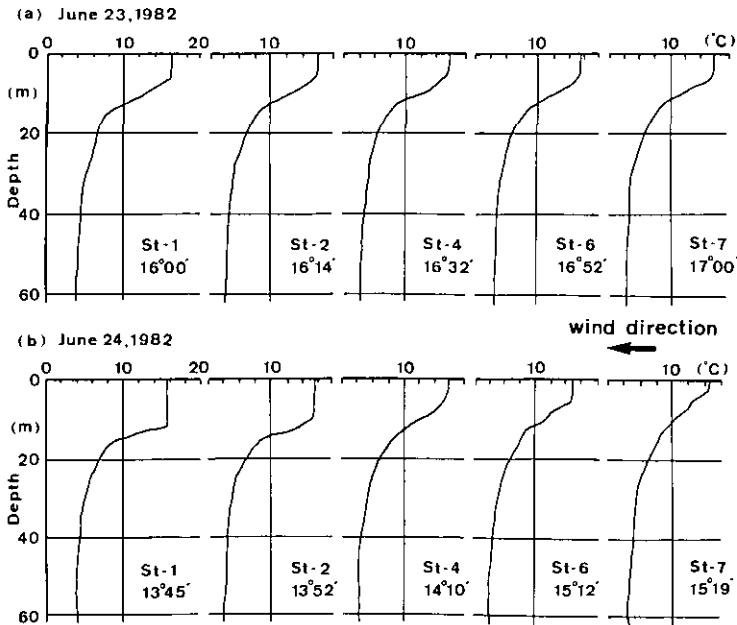


図 5 風による水温鉛直分布の変化

Fig. 5 Deformation of vertical thermal profile due to wind stress



のみ記している。同図より、23日は日中ほぼ無風状態に近い。そして、24日午前5時頃からかなり強い東風が吹き始めている。実際に現地菖蒲ヶ浜から見る限り、湖面全域に白波が立ち船上からの観測は見合わざるを得なかった。一般に、海上の風速は岸側で観測されたその1.3倍程度となっていることから、湖面上では7~8 m/sの東風が吹き続けていたと推定される。この風も19時にはほぼ停止し、翌25日と26日は23日と同様穏やかである。

24日午後、風の弱まるのを待って水温の鉛直分布を測定し、この資料と23日日没直前の資料を図5に対比している。同図は、湖内7地点の内5地点を選び描いた結果であり、観測地点名と観測時間も併せて記している。また、24日の風向は東であり、したがって風は図中右から左に向って吹いていることになる。同図から、23日の各測定地点での水温鉛直分布に大きな差異は認められないものの、24日の観測資料からは風下側に向って著しく表層の混合層厚が増加しているようにも見受けられる。これらの資料を基に、水温の等値線を描いた結果が図6である。両者を比較すると、図6(a)では自由表面付近に16°Cの等温度線が存在するのに対し、図6(b)では混合拡散されて消えている。そこで、表層と底層の中間密度で定義される密度界面の位置を求めてみた。これらの資料を通

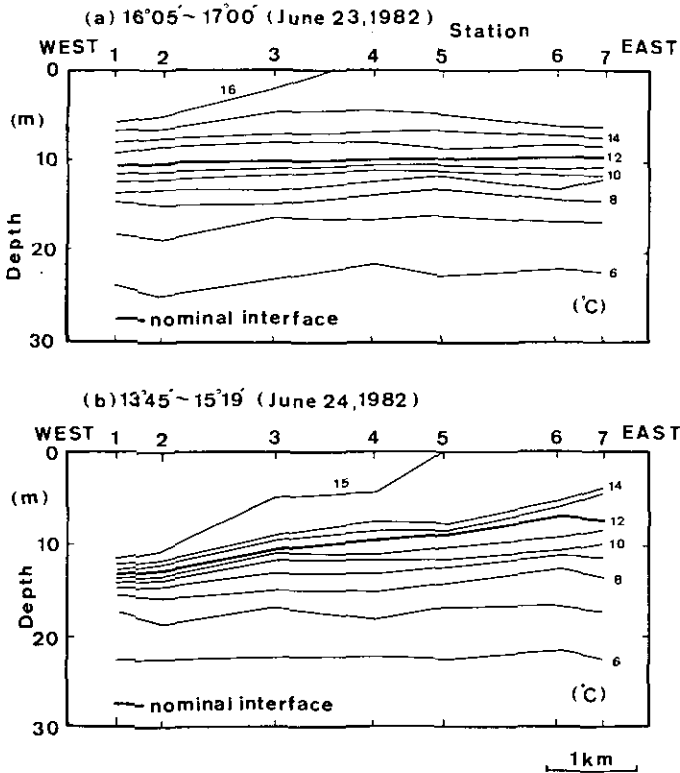


図 6 風による等温度線の変化

Fig. 6 Deformation of isotherm due to wind stress

して表層水温は15.3°C、底層水温は4.0°Cであり、その中間密度は11.9°Cに相当する。同図から、図6(a)では平均界面は水深10.2mに位置し、図6(b)ではSt-1で13.4m、St-7で7.3mとなり、その差は6.1m、こう配にすると $1.12 \times 10^{-3}$ 傾いていることになる。ところが、後にあるように25日早朝の資料では界面の位置は10.1mと計算され、風による混合が期待されたのに反し、風による水温躍層の侵食効果は界面までには及んでいないことがうかがわれる。すなわち、表層の混合層厚が10mにも発達すると、長時間風が吹き続けてもごく表層の等温度線を破壊するにとどまり、風によるシアエネルギーのかなりの部分がwind set-upを介して界面の傾きによるポテンシャルエネルギーに変換されていると言える。

一定の風が継続して吹いても、風の吹き寄せ効果に対して密度界面は緩慢に応答し、定常状態に到達するまでにはかなりの時間を必要とする。その目安の一つとして、内部静振の周期の1/4が考えられる<sup>12)</sup>。その意味では、図6(b)は東風が約7時間連吹した後の観測資料であり、後述するように内部静振の周期は約12時間であることから、このケースではほぼ準定常状態に達していたと見なすことができる。そこで、湖面上を吹く風による密度界面の傾きを求めてみよう。

いま、現象を理想化するために、湖を2次元の長方形断面と考える。そして、密度界面での流速のずべりを許し、上・下層の密度 $\rho_1, \rho_2$ を一定とした二層系を想定すると、定常状態における風による自由表面の上昇量 $\eta$  (平均水面からの変位)は梶浦<sup>13)</sup>により

$$\eta = -\frac{a}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{a^2 + 4(bx + A)} \quad (1)$$

ここに、

$$a = 2 \varepsilon h_1, \quad b = \frac{2 \varepsilon \tau_a}{\rho_1 g}$$

で与えられる。ここに、 $x$ は上流端から風下側に測定した距離、 $\varepsilon$ は上・下層の相対密度差 $(\rho_2 - \rho_1) / \rho_1$ 、 $h_1$ は上層の平均水深、 $g$ は重力加速度、 $\tau_a$ は風によるせん断力で、 $A$ は質量保存の式

$$\int_0^l \eta dx = 0$$

より決まる定数である。ここに、 $l$ は湖の長さである。

また、 $\eta$ を用いて自由表面から測定した界面位置 $\bar{h}_1$ は

$$\bar{h}_1 = h_1 + \eta / \varepsilon \quad (2)$$

となる。計算条件は先述した上層平均水深 $h_1 = 10.2$  m、密度 $\rho_1, \rho_2$ はそれぞれ水温15.3, 4.0°Cに対応する0.99908, 1.000 t/m<sup>3</sup>を与える。また、風によるせん断力 $\tau_a$ は風摩擦係数 $\gamma = 1.20 \times 10^{-3}$ 、空気密度 $\rho_a = 1.21 \times 10^{-3}$  t/m<sup>3</sup>、風速 $W = 8$  m/sとすると

$$\tau_a = \gamma \cdot \rho_a \cdot W^2 \tag{3}$$

から、 $\tau_a = 0.093 \text{ N/m}^2$ が得られる<sup>14)</sup>。これらの諸量から式(1)中のパラメーターは

$$a = 1.8 \text{ cm}, \quad b = 1.75 \times 10^{-6} \text{ cm}, \quad A = -0.54 \text{ cm}^2$$

と決定される。その結果式(1)から、St-1及びSt-7の自由表面の上昇量  $\eta$  は  $\eta_1 = 0.24 \text{ cm}$ ,  $\eta_7 = -0.28 \text{ cm}$  と求まる。式(2)を使用して、界面位置の水深に換算するとそれぞれ 12.8, 7.2 m となる。したがって、界面の傾きは  $1.03 \times 10^{-3}$  となり、先述の観測値とほぼ合致することが知れる。このように、せん断力  $\tau_a$  の計算にあいまいさは残るものの、風下側に向かっての上層水深の増加は、風の吹き寄せ効果による圧力上昇が界面位置の低下で調節される静水圧バランスで説明することができる<sup>15)</sup>。

#### 4. 中禅寺湖の内部波

##### 4.1 内部波の基礎理論

ここでは、湖水温の観測結果から、内部波の周期あるいは波長を計算するのに必要な内部波の基礎理論について簡単に触れておく。

成層化した密度場に生起する内部波を解析的に解く場合、一般には密度場全体を一つの系と考え、渦度方程式と質量保存の式を基礎式として、特定の境界条件の下で解を求める。ただ、躍層厚さに比べて内部波の波長が十分に大きいときには、躍層付近の密度分布形が無視でき、二層界面波としての取り扱いが許される。そこで、まず最初に二層界面波としての内部波の特性を記述する。もちろん躍層付近の密度分布形を考慮した方がより現実的であり、二層界面波モデルに続いて、連続成層場として取り扱った Holmboe モデルについて紹介する。

##### 4.1.1 二層界面波モデル

二層界面波モデルは、上層及び下層を独立した均質流体の系と見なし、各層の基礎式（ラプラス

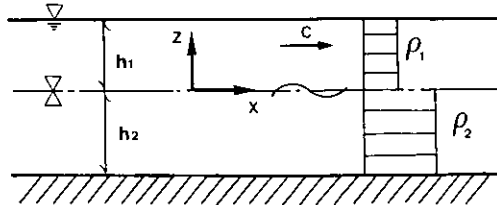


図 7 二層界面波モデルの座標系

Fig. 7 Coordinate system in two-layered model

方程式) をそれぞれの境界条件の下に解く手法である。

図7のような二層系を考える。図中の諸量は既に説明しているが、改めて記すと  $h_1, h_2$  は上・下層水深,  $\rho_1, \rho_2$  は上・下層密度である。非粘性・非回転とすると上・下層にそれぞれ速度ポテンシャルが仮定でき、基礎式はラプラス方程式となる。この基礎式を自由表面と底面の境界条件及び界面での運動学的条件の下に解くと速度ポテンシャルの形が決定される。また、内部波の波速と波長の関係を規定する分散関係式は界面の直上と直下での圧力の連続条件式から導かれる。詳細な式の誘導は密度流の教科書<sup>16)</sup>に譲るとして、後の観測資料の解析に必要なのは内部波の波速であり、したがって分散関係式が分かれば十分である。結果のみ記すと

$$C_2^2 = \frac{\varepsilon \cdot g}{k} \frac{1}{\coth kh_1 + \coth kh_2} \quad (4)$$

となる。ここに、 $C_2$  は波速で  $C_2 = \sigma/k$ ,  $\sigma$  は周波数,  $k$  は波数,  $\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1)/\rho_1$ ,  $g$  は重力加速度を表す。

また、内部波の波長  $L (L = 2\pi/k)$  が水深に比べ十分に大きい場合には  $kh_1 \rightarrow 0$ ,  $kh_2 \rightarrow 0$  であり (長波近似), 式(4)は近似的に

$$C_2^2 = \varepsilon g \frac{h_1 \cdot h_2}{h_1 + h_2} \quad (5)$$

となる。上式は内部長波の波速を表す。中禅寺湖を例にとると、鉛直及び水平方向に1次モードを構成する基本モードの内部静振の波長  $L$  は湖の長さ  $l$  の2倍であり、したがって  $L = 13.1$  km, 観測地点に沿った平均水深  $\bar{h}$  は 131.2 m であるから  $L \approx 100 \bar{h} \gg \bar{h}$  となり、十分に上記の関係を満たしている。

式(5)から分かるように、上・下層の密度と水深が既知であれば内部波の波速が計算でき、内部静振の解析でよく見なれた形となっている。また、内部波の周期  $T$  は  $T = L/C_2$  で与えられる。

#### 4.1.2 Holmboe モデル

河川河口部の淡塩二成層流れや深い湖の水温成層場の密度分布形は深さとともに密度が急に増加し、界面付近に有限厚さの躍層を有する。Holmboe はこうした密度変化が、自由表面や底面付近では非常に小さいことに着目し、より現実的な密度分布形を次式で表現している<sup>17)</sup>。

$$\rho_0 = \bar{\rho} \exp \{-\alpha \tanh (z/h)\} \quad (6)$$

ここに、 $\bar{\rho}$  は上・下層密度  $\rho_1, \rho_2$  の相乗平均値,  $\alpha$  は上・下層間の密度差を表す無次元パラメーターであり、先述した相対密度差  $\varepsilon$  との間には  $\alpha \approx \varepsilon/2$  の関係がある。 $h$  は密度分布形から決まる特性躍層厚さで、全躍層厚さの1/2に相当する。なお、座標系は  $z$  軸の原点を上・下層密度の相乗平均

値の位置に取っている以外は図7と同様である。

密度分布形が式(6)のように、連続関数として表現されているため、均質流体としての取り扱いができず、基礎式は渦度方程式となる。流れ場も流れ関数を設定して、基礎式を自由表面と底面での境界条件の下で解くことになる。解は既に富永<sup>17)</sup>により求められており、分散関係式について結果を示すと

$$\frac{\Gamma(1+m)}{\Gamma(1-m)} e^{2kh_1} = \frac{P_+ + Q_- e^{-2kh_2}}{Q_+ + P_- e^{-2kh_2}} \quad (7)$$

となる。ここに、 $\Gamma(x)$ はガンマ関数、 $m = kh$ で

$$P_{\pm} = \frac{\Gamma(\pm m)}{\Gamma(1+n)\Gamma(-n)}, \quad Q_{\pm} = \frac{\Gamma(\pm m)}{\Gamma(\pm m - n)\Gamma(1 \pm m + n)}$$

$$n = (-1 + \sqrt{1 + 4g h \alpha / (\sigma/k)^2}) / 2 \quad (8)$$

である。一般には、与えられた計算条件の下で式(7)の逐次計算を行い、固有値  $n$  を求める。そして、式(8)から波速を算出することになる。ただ波長が躍層厚さに比べ十分大きい基本モードの内部波に対しては  $m \ll 1$ ,  $n \ll 1$  となり、この場合には式(7)は近似的に次式で表現することができる。

$$C_h^2 = \frac{2\alpha g}{k} \frac{1}{(\coth kh_1 + \coth kh_2) \{1 + m(\coth kh_1 + \coth kh_2)/2\}} \quad (9)$$

ここに、 $C_h$ は Holmboe モデルによる波速である。

上式右辺  $\{ \}$  内第2項が躍層付近の密度分布形を考慮したことによる補正項であり、特性躍層厚さ  $h = 0$ 、すなわち  $m = 0$  とすれば、式(9)は二層界面波モデルの波速式(4)と一致する。また、補正項が入っている分、Holmboeモデルの波速は二層界面波のそれより小さくなることも分かる。

二層界面波モデルと同様、式(9)についても長波近似を行えば

$$C_h^2 = 2\alpha g \cdot \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2} / \left\{ 1 + \frac{h}{2} (h_1 + h_2) / h_1 h_2 \right\} \quad (10)$$

となる。

#### 4.2 内部静振

風の吹いている間は風から自由表面に与えられるせん断力に対応して、密度界面は傾いている。しかし風の弱まり、あるいは風の停止に伴い、それまで傾いていた密度界面は重力の復元力により

振動を開始する。すなわち、内部静振が生起することになる。この内部静振の挙動は水温躍層付近のある定点で湖水温の時間変化を追跡すれば、比較的容易にとらえることができる。図8は6月25日16時から6月26日8時までの約16時間、St-2の平均的な界面位置に相当する水深11.0mで30秒間隔で水温の時間変化を測定した結果である。同図から水温差にして約3°C(この水温差を水温躍層付近の水温こう配で除した鉛直変位に換算すると3.4m)、周期にして12~13時間程度の水温変動を読み取ることができる。この長周期成分に20~60分の短周期成分が重畳していることも分かる。

同図にある12~13時間の長周期成分は内部静振に起因すると考えられるが、まず二層界面波モデルを用いて周期を求めてみよう。計算条件は、3.で述べたように $h_1=10.2\text{ m}$ 、 $h_2=121.0\text{ m}$ 、 $\rho_1=0.99908\text{ t/m}^3$ 、 $\rho_2=1.00\text{ t/m}^3$ である。これらの諸量を式(5)に代入すると、 $C_2=0.29\text{ m/s}$ と計算される。基本モードの内部静振の波長は13.1kmとなることから、周期は直ちに12.5時間と得られる。

次に、界面付近の密度分布形を考慮したHolmboeモデルから周期を見積もってみよう。図9は湖のほぼ中央に位置し、内部静振のnode部に相当する観測期間中のSt-4(25日8時)の密度分布である。St-4を選んだ理由は、node部では基本モードの内部静振の界面変位は理論上0となり、内部静振による水温変動の影響が少ないためである。図中式(6)の密度分布形も載せているが、観測値は式(6)で十分に近似され、Holmboeモデルが実水域の密度分布形にも適用し得ることが理解できる。図中に式(6)中のパラメーターも記しているが、これらのパラメーターを使用すると、式(10)からHolmboeモデルの波速 $C_h$ は $C_h=0.26\text{ m/s}$ 、周期は13.8時間と求まる。二層界面波モデルと比較して、Holmboeモデルでは周期は若干長くなり、密度分布形を考慮した効果が現れている。

以上の結果から、図8に見られる12~13時間の水温の長周期変動は基本モードの内部静振に励起されていると結論できる。ちなみに、水深131.2mとして、中禅寺湖の表面静振の周期を計算すると6.1分となり、内部静振の周期の1/120程度となる。この様に、内部静振の周期が極めて長くなるのは、水温成層化した場合上・下層の相対密度差 $\epsilon$ は $10^{-3}$ のオーダーとなり、この浮力効果により界面に働く有効重力が自由表面のその $10^{-3}$ 倍程度と小さくなるからである。

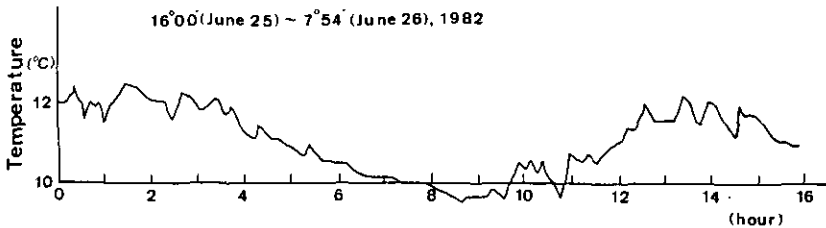


図 8 内部静振に起因する水温変動

Fig. 8 Temperature time series induced by internal seiche

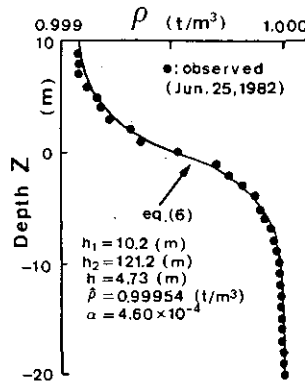


図 9 St-4 の密度分布  
 Fig. 9 Vertical density profile at St-4

4.3 モード構造を有する内部波

図 10(a)は図 6 (b)から約 2 時間後の、図 10(b)は翌 25 日早朝の等温度線を描いた結果である。図 6 (b)と比較すると図 10(a)の等温度線の傾きは幾分か小さくなっている。さらに、水平方向に等温度線が収束あるいは発散する極めて特徴的なパターンを呈している。この様子を模式的に描いたのが図 11 である。もちろん、St-1 から St-7 までの間に約 1 時間の時間遅れはあるが、この時間遅れを別にすると図 10(a)は図 11 にあるとおりの水平方向に 3 個の node すなわち 3 次モード、鉛直方向にも 2 次モードを構成する内部波の存在を強く示唆している。図 10(b)にもこの内部波の存在がうかがわれる。

ここで、Holmboe モデルからこの内部波の特性を調べてみよう。鉛直方向に 2 次モードを構成することからもはや  $n \ll 1$  ではなく、式(10)は使えない。そこで、図 9 中の諸量と水平方向に 3 次モード、すなわち水平方向波長 4359 m を与え、式(7)の分散関係式から固有値  $n$  を数値的に求めることになる。結果は、 $n=0.247, 1.346, 2.422\cdots$ と計算される。これらの  $n$  値は順次鉛直方向の 1, 2, 3 ……次モードの内部波に対応する。したがって、水平方向に 3 次、鉛直方向に 2 次モードを構成する内部波の波速  $C_n$  は、 $n=1.346$  とすると式(8)から  $C_n=0.082$  m/s, 周期は 14.7 時間と推定できる。

この周期にして 15 時間にもなる内部波の存在を確認するため、6 月 25 日 8 時から 26 日 10 時まで 26 時間ほぼ 2 時間ごとに測定した水温の鉛直分布から、各水深位置での水温の経時変化を連ねたのが図 12 である。先述したように、夜間の 25 日 18 時~26 日 4 時までは St-3'の、それ以外は St-3 での観測資料を用いている。鉛直方向に 2 次モードを有する内部波の振幅は、図 11 にもあるとおり、界面では理論上 0 となり、事実水深 10 m の水温変動には基本モードの内部静振による 12 時間の変動成分が顕著に現れている。そして、界面より深層側の水深 12~15 m 層には 14~16 時間の水

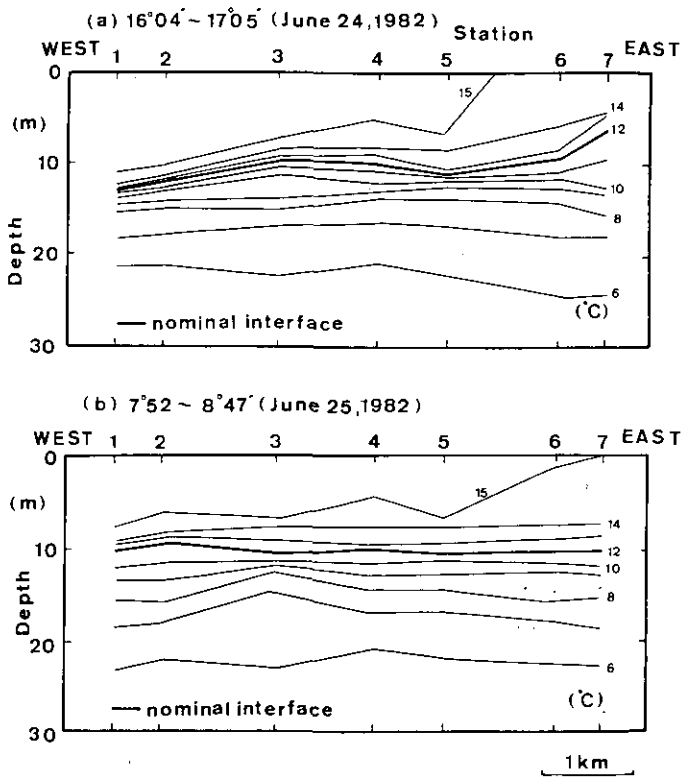


図 10 等温度線図

Fig. 10 Isothermal lines

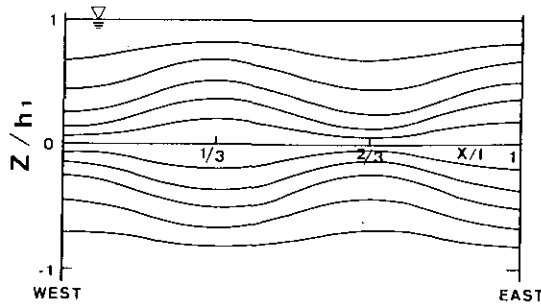


図 11 モード構造を有する内部波の等温度線の模式図

Fig. 11 Schematic image of isotherms of internal wave with modal structure

温度変動を見ることが出来る。観測点が昼間と夜間で湖南北方向に異なっているものの、モード構造を有する内部波の水平方向波長は 4359 m と長く、界面振動には湖南北方向にほとんど位相差は



ないと考えられることから、図 12 にある 14~16 時間の変動成分はモード構造を有する内部波に起因していると判断される。

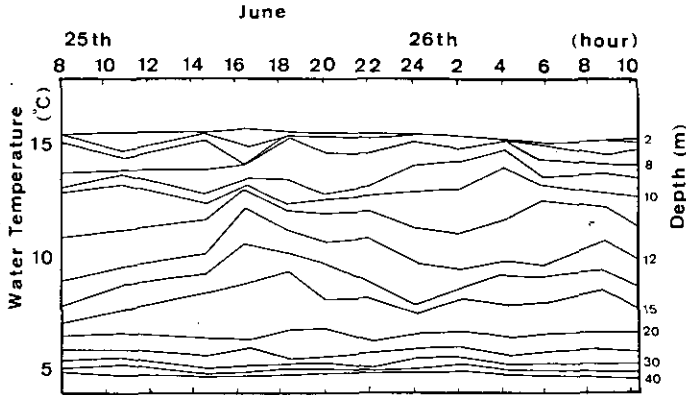


図 12 St-3 及び 3' で得られた水温の経時変化

Fig. 12 Temporal variation of water temperature observed at St-3 and 3'

#### 4.4 躍層規模の内部波

前節までは長周期性の内部波について考察を行ってきたが、現地観測あるいは実験結果から<sup>18)</sup>、波長が躍層厚さ規模の内部波の存在も指摘されている。この種の比較的小規模な内部波はどの程度の波長や波高規模を有するのか調べるため、放熱期の水温躍層付近でも水温の定点観測を実施した。

観測は 1982 年 9 月 16 日、St-2 の水深 20.0 m で行い、サンプリング間隔は 4.0 秒、観測時間は 2.3 時間である。図 13 はその結果の一部を例示したものであり、図 14 は観測当日の St-2 の密度分布である。図 13 から、内部静振によると思われる平均水温の上昇 (図 13(a))、あるいは低下 (図 13(b)) といったトレンドに周期にして 200~1000 秒の、水温差にして 0.6~1.1°C の変動成分が重なっていることが知れる。図 15 はこれらの資料を基に平均的なトレンドを除去した後に、FFT 法による水温変動スペクトルを求めた結果であり、水温はケルビン単位  $K$  で示している。図中横軸に示した  $N$  値は界面付近の密度分布を直線近似して得られたブルント・バイサラ振動数 (周期にして 241 秒) を示している。ブルント・バイサラ振動数  $N$  は

$$N^2 = -\frac{g}{\rho_0} \frac{d\rho_0}{dz} \quad (11)$$

で定義され、 $\rho_0$  は鉛直方向の密度分布である。このブルント・バイサラ振動数は密度場固有の振動数を表し、その密度場に生じ得る内部波の最大の振動数を意味している。図 15 には矢印で示された 303, 455, 481 秒の卓越周波数成分が見られ、中でも 303 秒の成分はブルント・バイサラ周期の 1.3

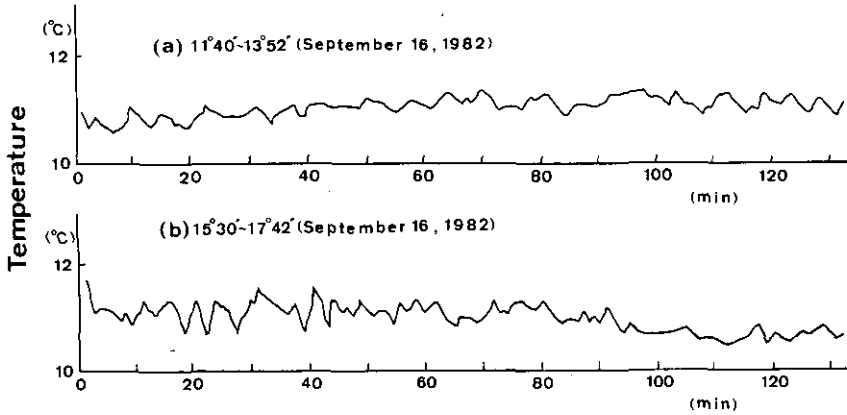


図 13 躍層規模の内部波による水温変動

Fig. 13 Temperature time series induced by small internal wave of thermocline scale

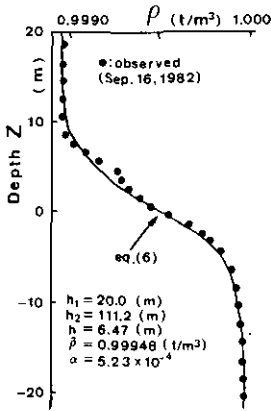


図 14 St-2 の密度分布

Fig. 14 Vertical density profile at St-2

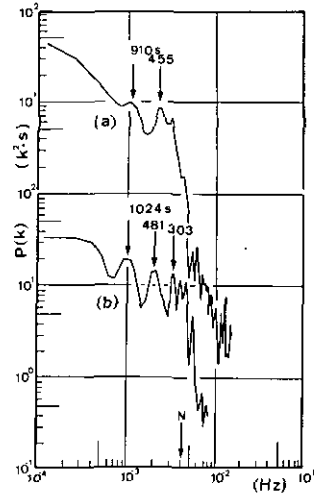


図 15 水温変動スペクトル

Fig. 15 Spectra of temperature time series

倍程度となっており、典型的な躍層規模の内部波と考えられる。

次に、これらの内部波についてモード構造に関する情報は全く欠如しているが、鉛直方向には1次モードと考える。そして、図14中の諸量を使って式(7)、(8)から内部波波長を推算する。内部波の振幅については、卓越周波数成分に相当する水温変動幅を図13の水温時系列から求め、概略値ではあるがこの水温変動振幅を界面付近の水温こう配で除して算出した。これらの諸量と波形こう配を表2に整理している。

表 2 内部波の諸量

Table 2 Characteristics of internal wave

Wave period (s)	Wave amplitude (m)	Wave length (m)	Wave slope	$\sigma/N$
303	0.58	40.0	0.091	0.80
455	0.35	105.0	0.021	0.53
481	0.63	116.0	0.031	0.50

波長については数 10 m から 100 m 程度、振幅については高々 0.6 m であり、内部静振の振幅に比べてかなり小さい。また、Holmboe モデルでは全躍層厚は特性躍層厚  $h$  の 2 倍で与えられることから、このケースでは約 13 m となる。したがって、周期 303 秒の内部波について言えば、その波長は全躍層厚のほぼ 3 倍となっている。

### 5. 湖水温の長期連続観測

1982 年の現地観測では比較的短時間の内に、湖内 7 点での水温鉛直分布の測定に重点を置き、その水温分布の時間変化を追跡することによって、1) 風による密度界面の傾き、2) モード構造を有する内部波、等空間的な水温構造がかなり明らかにできたと考えている。一方、日常的な風により生起する内部静振については、1 周期程度の観測しかできておらず、この内部静振の挙動をさらに詳しく調べるため、1983 年 7 月～10 月にかけて躍層付近での水温の長期定点観測を実施した。

観測はすべて St-2 における平均界面位置と平均界面下 5～8 m の 2 地点で行った。計測機器はハイドロラブ・モデル-2001 で、5 分間隔で水温を検出している。観測例は図 16, 17, 18 に示す。図 16～18 はそれぞれ 7 月 8 日 12 時～7 月 20 日 12 時、10 月 1 日 12 時～10 月 12 日 12 時、10 月 12 日 15 時～10 月 19 日 12 時の観測記録である。同図において、平均界面位置で検出された水温変動を時系列(a)、界面下のそれを(b)として区別し、また日光測候所で得られた平均風速・風向も併せて記している。図 16～18 の観測期間中を代表する St-4 の密度分布はそれぞれ図 19(a), (b), (c) のとおりであり、図中にある矢印(a), (b) は前述した界面及び界面下の水温の測定位置を表している。具体的な測定水深は図 16～18 でそれぞれ 11.0 m と 16.0 m, 17.5 m と 25.5 m, 21.0 m と 27.0 m である。図 19 から分かるように、界面付近の密度分布形は直線近似が可能であり、界面付近での水温変動は水温こう配で除することにより鉛直方向の変位に換算することができる。図 16～18 に対応する St-2 の水温躍層内の水温こう配を求めると、それぞれ 0.704, 0.793, 0.712°C/m となり、したがって 1°C の変動はそれぞれ 1.42, 1.26, 1.40 m となる。この換算スケールは各図中に記している。ただし、界面下で観測した時系列(b)はいずれの場合も水温躍層のほぼ下端に位置し、その付近では水温こう配が鉛直方向にかなり変化するため、水温変動を鉛直変位に換算することは難しい。

図 16~18 を通してまず気付くことは、水温成層場は静止することなく常に変動していることである。時には、急激に  $5^{\circ}\text{C}$  近くも変動し (図 17 の 10 月 7 日午前 4 時頃から 8 時頃までの資料(a)), 鉛直変位にすると 6 m も変化することがある。3. で述べたように St-2 は西岸よりに位置するため、東風に対しては wind set-up による界面位置の低下を (水温躍層付近で定点観測した場合は水温の上昇), また西風に対しては界面位置の上昇を (水温の低下) 意味しており, この結果を念頭におき, 風と St-2 の位置でとらえた水温変動の関係を調べてみよう。なお, St-2 は 4.3 で述べたモード構造を有する内部波の node 部に相当するため, この内部波に引き起こされる水温変動をと

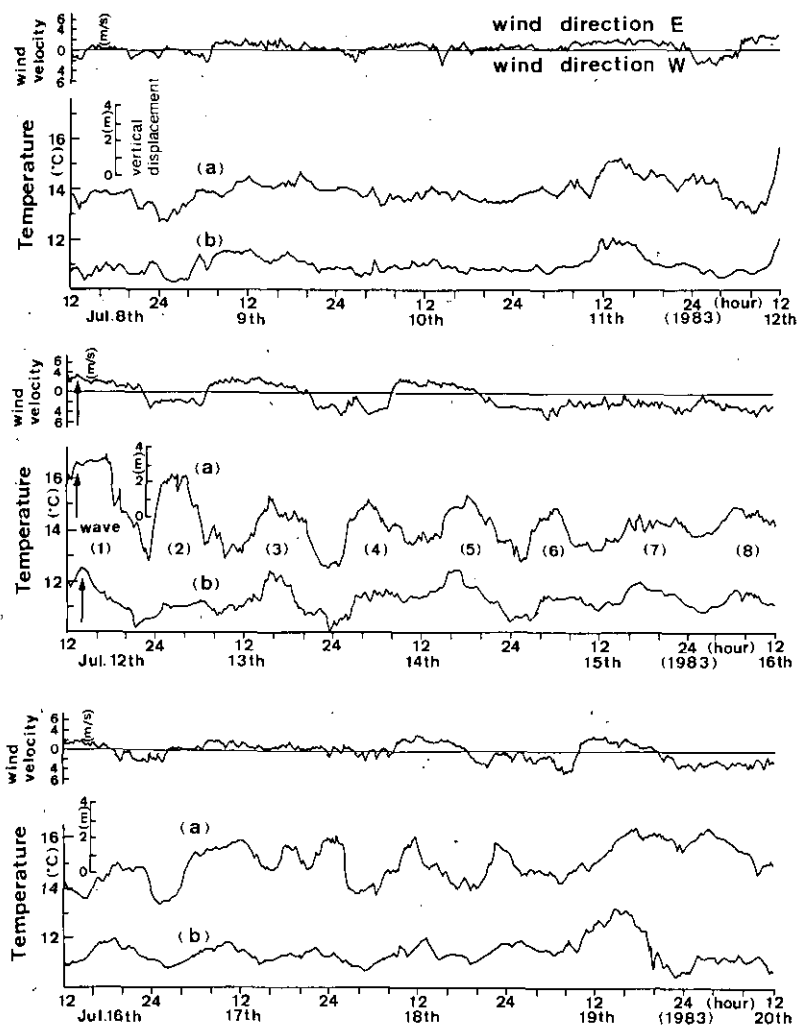


図 16 St-2 で観測された水温変動

Fig. 16 Temperature time series observed at St-2

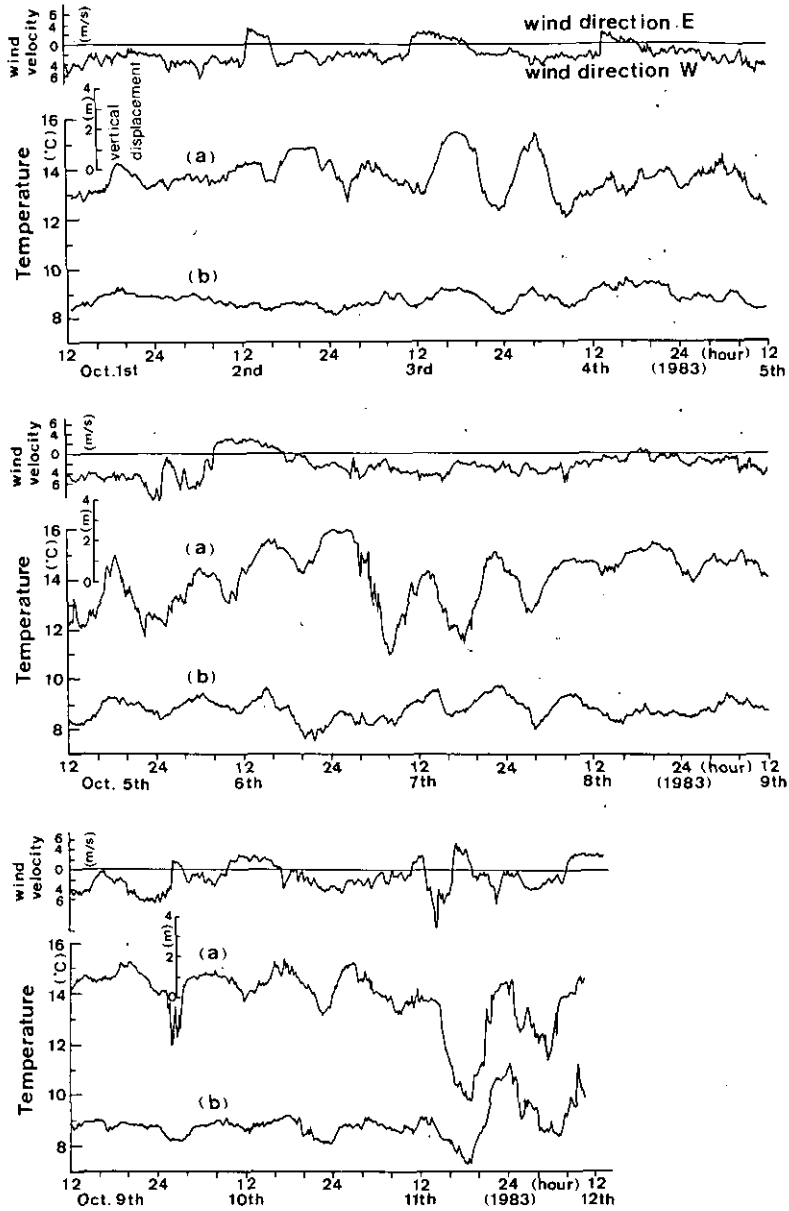


図 17 St-2 で観測された水温変動

Fig. 17 Temperature time series observed at St-2

らえることができず、ここでは内部静振の特性についてのみ考察することにする。

最初に、図 16 の 7 月 12 日午前 0 時頃から 3 m/s 程度の西風が吹き始め、その後午前 6 時頃に反転し、3~4 m/s の東風が 22 時頃まで継続している。平均界面位置で検出された時系列(a)を見る

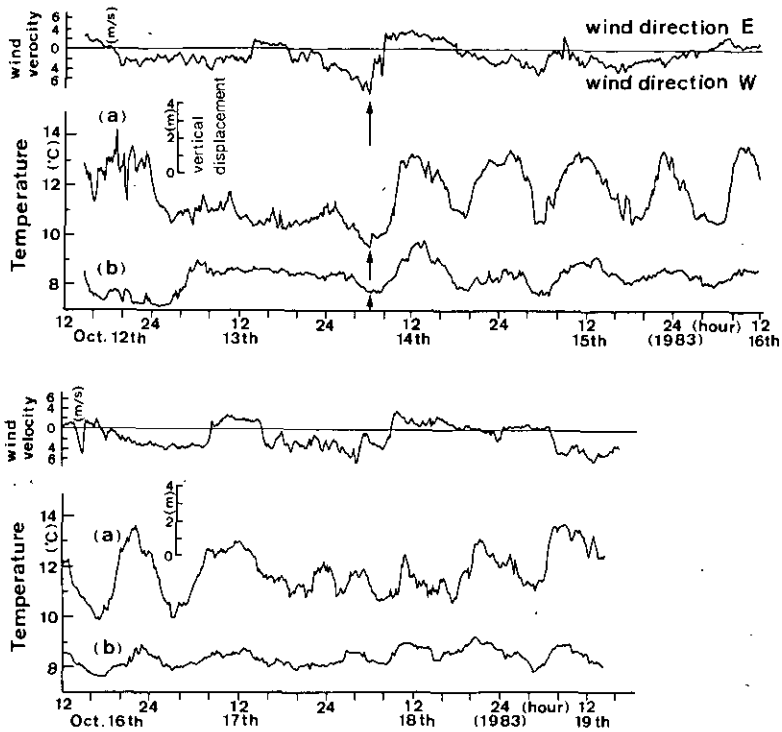


図 18 St-2 で観測された水温変動

Fig. 18 Temperature time series observed at St-2

と西風に対して水温が低下し、東向きに反転するとかなり急激に水温は上昇している。そして、13時～18時にかけては $16.8^{\circ}\text{C}$ 程度の一定値を取っている。このことは風によるwind set-up量が大きく、水温測定位置が水温がほぼ一定な表層混合層内に入ったことを表している。一方、平均界面下5 mの位置で測定された時系列(b)は、13時30分頃に最大値を取る。この時刻を図中の矢印で示しているが、水温ピーク時刻は東風最強時とほぼ合致していることが分かる。そして、風の弱まりとともに水温は低下し始め、その後数日間にわたって内部静振による周期的な水温変動を観測することができる。図中に記したwave(1)～(8)について、水温時系列(a)を基に内部静振の周期、水温変動幅、内部静振の波高を求め表3に整理している。

周期についてはゼロアップクロス法<sup>19)</sup>、水温変動幅は水温時系列における波峰と波峰を挟む二つの波谷との差の平均値、波高は水温変動幅を躍層付近の水温こう配 $0.704^{\circ}\text{C}/\text{m}$ で除して計算している。なお、wave(1)の波高は欠如しているが、これは時系列(a)の観測位置が表層混合層内に入っており、ここで用いた手法では波高を正確に算出できないためである。

まず周期について、wave(1)～(8)までの平均値は12.7時間であるが、wave(1)から(8)に向って

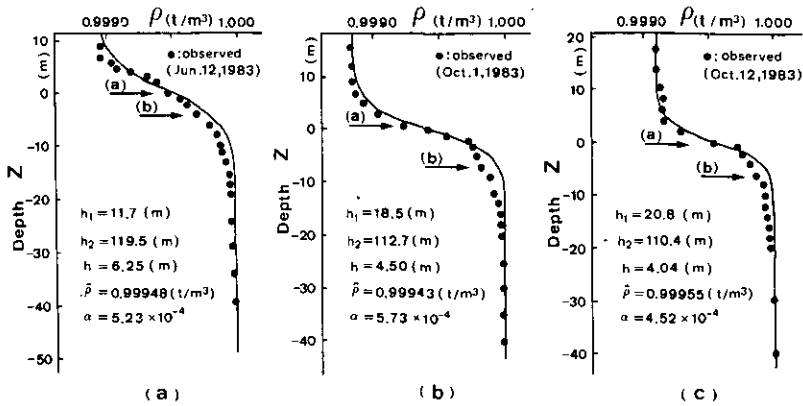


図 19 観測期間中の St-4 の密度分布

Fig. 19 Vertical density profile at St-4 during observed term

表 3 内部静振の特性

Table 3 Characteristics of internal seiche

Wave		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	Average value
Wave period	(h)	13.0	13.7	12.7	12.7	12.0	12.8	12.4	12.4	12.7
Temperature variation	(°C)	4.0	3.5	3.0	2.5	2.3	2.0	1.3	1.4	2.5
Wave height	(m)		4.9	4.2	3.5	3.3	2.8	1.8	1.9	3.2

変動はあるものの、徐々に周期は短くなっている。これは観測期間中が受熱期に相当するため、時間の経過とともに表層付近の水温が上昇し、上・下層間の相対密度がごくわずかではあるが大きくなったためと解される。また、図 19(a)にある諸量を用いて、式(10)から Holmboe モデルによる基本モードの内部静振の周期を見積もると 12.5 時間となり、上記の平均周期とほぼ合致する。一方、二層界面波モデルから得られる周期は 11.0 時間と小さい。

次に、内部静振の波高について、発生直後の wave(2)では 5 m にもなるが、内部静振のエネルギー減衰のため、順次波高は小さくなっていく。このエネルギー減衰は基本的には内部粘性や底面及び界面等の境界摩擦に起因すると考えられるが、図 16 にもある様に内部静振発生後も風が吹いており、これらの風の影響も受けているため厳密な解析は難しい。いずれにしても、一度内部静振が生起すると少なくとも数日間はその振動が残存することになる。このことは 1 日 1 回、あるいは湖内数点での水温鉛直分布資料から、水温躍層の低下量や混合量を推定した場合、多大の誤差を伴うことを示唆している<sup>20)</sup>。

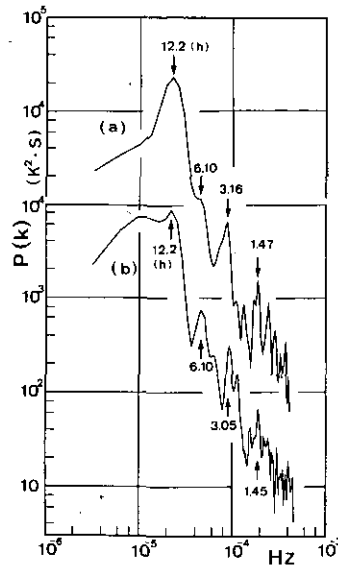


図 20 水温時系列(a)と(b)のスペクトル

Fig. 20 Spectra of temperature time series (a) and (b)

図 20 は wave(2)から(8)まで水温時系列から、FFT 法による水温変動スペクトルを求めた結果である。同図には時系列(a)と(b)の 2 種類プロットしているが、いずれの場合も内部静振の周期に相当する12.2時間に最大のピークが現れており、内部静振による水温変動が卓越していることが分かる。さらに、図中の矢印で示されるように、基本周波数成分の2倍及び4倍周波数成分まで明りょうに認められる。

続いて、時系列(a)と(b)の位相関係を調べるため、図 20 と同じ水温時系列を用いて両者の相互相関係数  $C(\tau)$  を計算し、図 21 に描いている。同図は平均界面位置で検出した時系列(a)に lag time  $\tau$  を与えて得られた結果であり、最初のピークは lag time 30 分で現れていることから、時系列(b)は(a)に比較してわずかに位相が先行していると推察される。lag time の増加とともに、相互相関係数は極めて周期的な挙動を呈し、第2及び第3のピーク値も0.6程度と大きい。この結果は、一度生じた内部静振はかなり長期間自己の性質を保存することを示しており、先述したスペクトルピークの卓越にも反映されている。そして、相互相関係数のピークから次のピークまでの平均 lag time は12.5時間であり、言うまでもなくこの値は基本モードの内部静振の周期と合致する。

以上のような事例は、図 18 の10月14日～17日までの水温変動にも見いだすことができる。この場合には、10月14日午前0時頃からの5～10 m/sの強い西風に対して水温成層場が傾き、西風の弱まりとともに内部静振が生起している。西風最強時の時刻を図 16 に倣って矢印で示しているが、ほぼ同時刻に水温時系列(a)及び(b)とも最小値を取り、かなり忠実に水温成層場は風外力に対応し



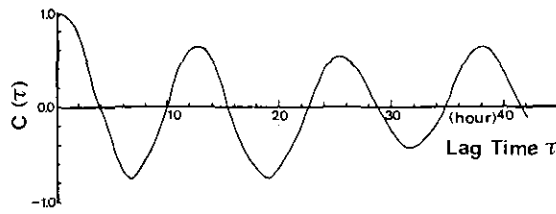


図 21 水温時系列(a)と(b)の相互相関係数

Fig. 21 Cross correlation coefficient between temperature time series (a) and (b)

ていることが再確認できる。

## 6. 中禅寺湖の吹送流水理模型実験

湖内での物質の水平混合や拡散は、風起因の湖内流動に負うところが大きい。この湖内流動について現地観測を行った場合、現地での空間的な広がりや、時間的な制約も加わって、その情報は局所的なものに限られてしまう。これに対して、水理模型実験では定性的であるが、全体的な流動パターンをとらえることができ、ここでは中禅寺湖の水理模型を用いて、湖内の水平流動について考察する。

### 6.1 実験装置と実験方法

模型については、現地の乱流状態が再現でき、かつ水平及び鉛直縮尺にひずみのない等方模型が最も望ましい。しかし、湖地形や吹送実験装置との関連で、鉛直方向を誇張したひずみ模型とする場合が多い。本研究でも、水平縮尺 1/2000、鉛直縮尺 1/600 とした。

夏季の水温成層化した密度場と、冬季～春季に見られる循環期の均質流体場とでは、その流動現象に著しい差異がある。前者については、厳密には水溫成層場まで再現する必要がある。受熱期の水溫分布を見ると表層水溫は最大で 21°C 程度、底層水溫を 4°C とするとその差は 17°C である。この値は密度差にすると  $2.0 \times 10^{-3} \text{ t/m}^3$  と極く小さいものとなる。こうした水溫成層場を水理模型内に作り、実験中この水溫分布を制御することは極めて難しい。また、ここで問題としているのは密度成層場と均質流体場における水平流動パターンの違いであって、熱固有の問題、例えば熱拡散や熱対流ではない。そうした観点から、水溫差に基づく密度差を塩分濃度差による密度差に置き換えて実験を行った。密度差については実験の容易さを考慮して上・下層の相対密度差  $\epsilon = 0.028$  とした。

実験はターンテーブル付風洞中に中禅寺湖水理模型を設置して行った。実験ケースは、風向について東及び西向き の 2 種類、流体場について密度成層場と均質流体場の 2 種類の合計 4 種類である。これらの 4 ケースについて、表層と底層付近の水平流動パターンを測定した。測定方法は流水抵抗板付フロートを 20 個程度水理模型中に浮かべ、フロートの動きを 35 mm カメラで連写した。フ

ロートはフロート上端が水面に位置する様重さを調節し、また抵抗板とフロート上端との長さを変えることにより測定水深を変化させた。測定水深は 4 cm と 14 cm であり、以後前者を上層、後者を下層と呼ぶことにする。撮影間隔は上層で 3 秒、下層で 5 秒である。本実験に用いた風洞水槽やフロートは村岡・福島の報告<sup>21)</sup>に詳しい。

風速は 1 種類であり、風速分布は図 1 にある St-2, 4, 6 の 3 地点でピトー管を用いて測定した。結果は東及び西風を E 及び W として、図 22 に示している。同図から、風速の値に違いはあっても、各測定地点の風速分布は対数速度分布に従っているようである。この風速分布から水面付近の鉛直方向速度こう配を求め、風から水面に与えられるせん断力  $\tau_a$  を計算した。風に関する諸量は東及び西風とも 3 地点の平均値として、平均風速  $U_a$  は前者で 5.53 m/s、後者で 5.13 m/s、摩擦速度  $u_*$  は 17.5 cm/s と 19.8 cm/s、せん断力  $\tau_a$  は  $3.72 \times 10^{-2} \text{N/m}^2$  と  $4.80 \times 10^{-2} \text{N/m}^2$ 、式(3)から得られる風摩擦係数  $\gamma$  は  $1.00 \times 10^{-3}$  と  $1.49 \times 10^{-3}$  である。これらの水理条件を表 4 に整理している。

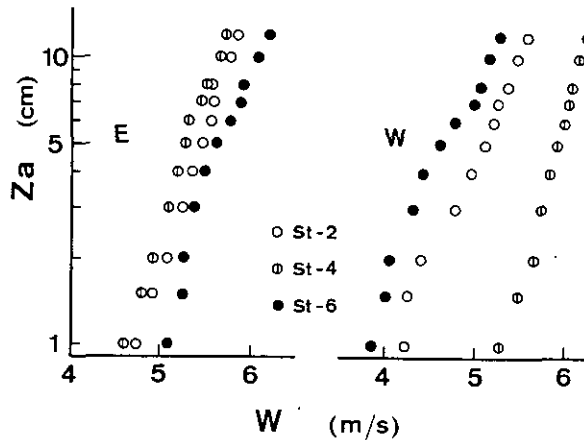


図 22 風速の鉛直分布

Fig. 22 Vertical profile of wind velocity

表 4 吹送流の実験条件

Table 4 Hydraulic conditions in model testing for wind-induced current

Case	Density field	Wind direction	Mean depth (cm)		$U_a$ (cm/s)	$u_*$ (cm/s)	$\tau_a$ ( $\times 10^{-2} \text{N/m}^2$ )	$\gamma$ ( $\times 10^{-3}$ )
1	Uniform	E	15.8		5.53	17.5	3.72	1.00
2	Uniform	W	15.8		5.13	19.8	4.80	1.49
3	Two-layer	E	9.2	6.6	5.53	17.5	3.72	1.00
4	Two-layer	W	7.5	8.3	5.13	19.8	4.80	1.49

Case 1 と 2 は均質流体場, Case 3 と 4 は二成層密度場の実験である。Case 3 と 4 の平均水深の項で 2 種類記しているが, 左側が上層, 右側が下層の初期に設定した平均水深である。

二成層密度場の実験は 3. で述べたように, 風外力に対して密度界面は傾いている。表 4 にある計算条件で, 式(1)と(2)からwind set-upによるSt-1とSt-7の上層水深を求めると, Case 3 で  $\bar{h}_1 = 9.4 \text{ cm}$  と  $\bar{h}_7 = 9.0 \text{ cm}$ , Case 4 で  $\bar{h}_1 = 7.2 \text{ cm}$  と  $\bar{h}_7 = 7.8 \text{ cm}$  となる。その差は前者で 0.4 cm, 後者で 0.6 cm となるが, いずれも上層平均水深に比べて小さく, 本研究では実験中の上層水深を一定として扱うことにする。

## 6.2 吹送流の水平流動パターン

Case 1 ~ 4 について, 上層と下層の水平流動パターンをフロート追跡により求めた。まず, 有限水域に風を吹かせたとき, 風起因の流速鉛直分布を模式的に示せば図 23(a), (b)となる。図 23(a), (b)はそれぞれ均質流体場と二成層密度場に対応する。均質流体場では表層付近で風向と同じ方向に流れる順流が, 底層付近では表層の順流を補償する逆流が現れる。これに対し二成層密度場では密度差により上・下層間の水質混合が抑制されるため, 上層内に順流と逆流が現れ, 両者の流量は均衡している。そして, 下層上部には上層の流れに引きずられた逆流が, これを補償するために底部付近に順流が存在する。こうした平均的な流速分布形に留意しながら, 図 24(a)~(d)に示された水平流動パターンを整理すると次のとおりである。

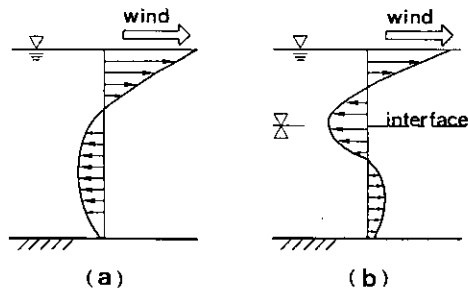


図 23 風起因の流速の鉛直分布, (a)均質流体場, (b)二成層密度場

Fig. 23 Vertical velocity profile of wind-induced current, (a) uniform system, (b) two-layered system

1) 均質流体の上層では東及び西風とも, 湖長手方向に沿った順流が卓越し, 吹送流端で循環流が現れる。東風に対しては千手ヶ浜沖の反時計回りの, 西風に対しては歌ヶ浜沖の時計回りの流れである。一方, 下層流れは上層に比較してかなり複雑な流況を呈し, 2 個あるいは 3 個程度の流れに分かれているようである。

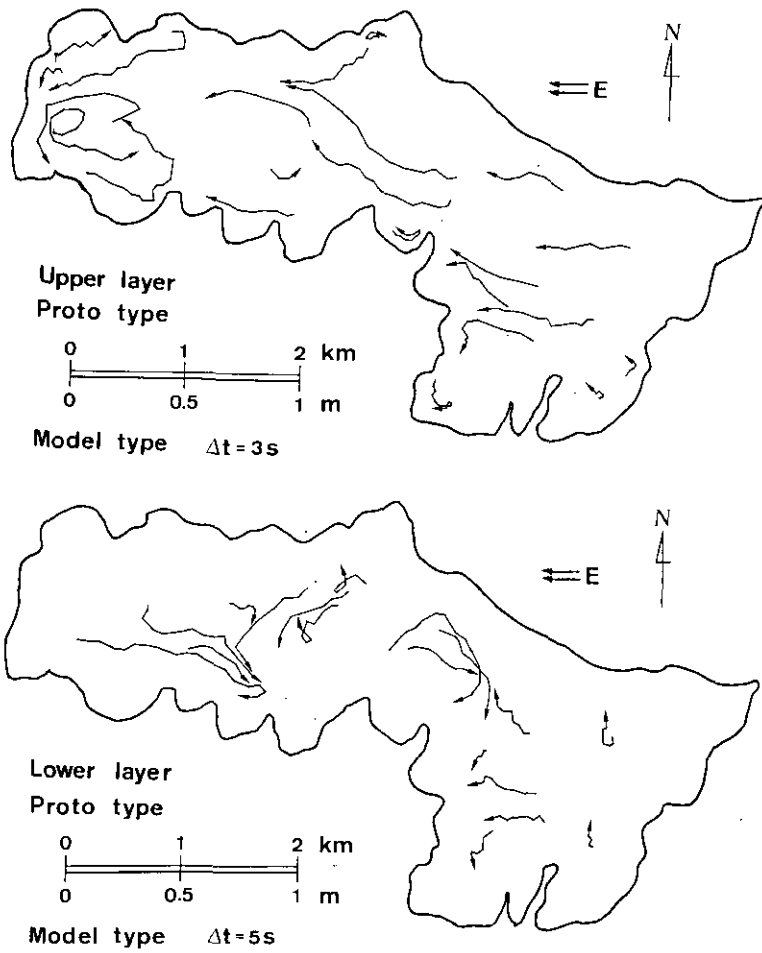


図 24 水理模型実験による水平流動パターン, (a) Case 1

Fig. 24 Horizontal flow pattern in hydraulic model testing, (a) Case 1

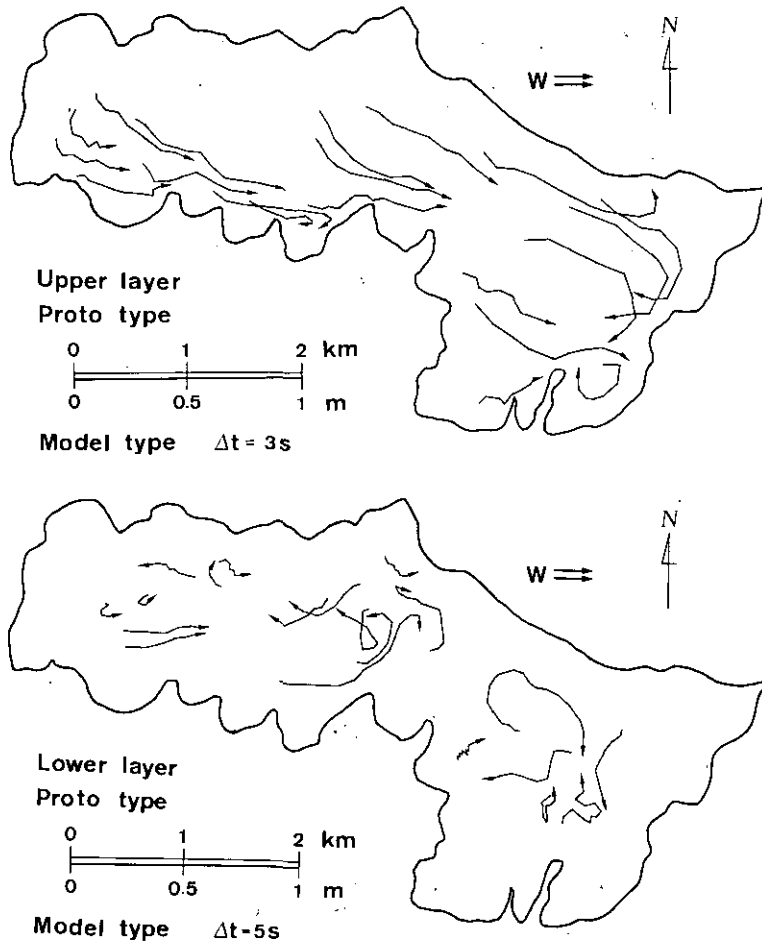


図 24 (つづき), (b) Case 2

Fig 24 (Continued), (b) Case 2

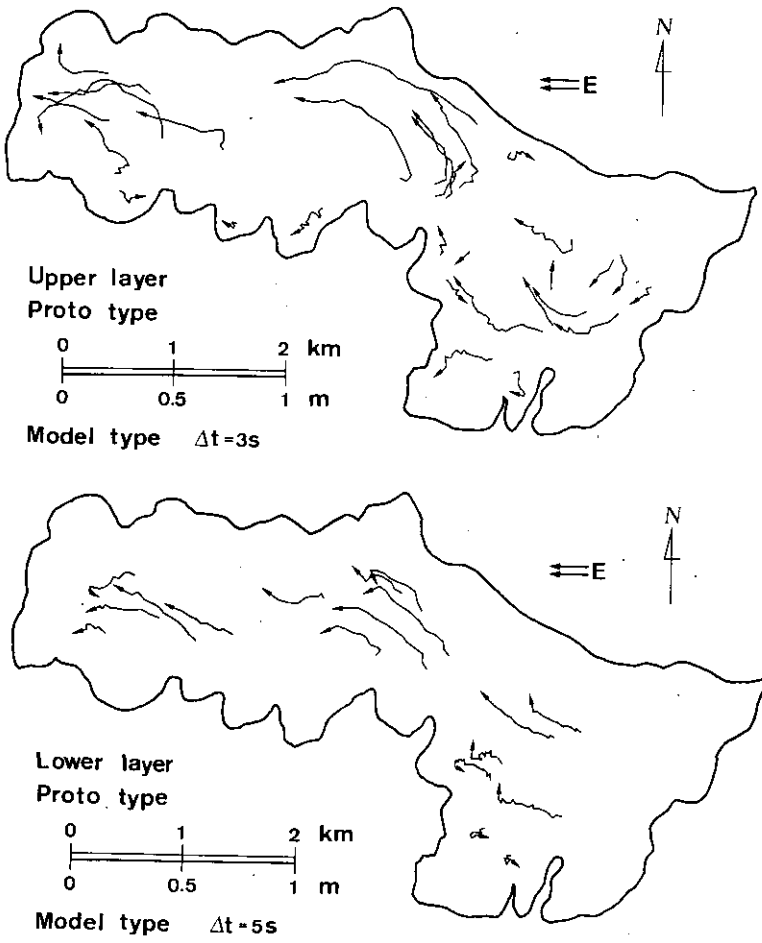
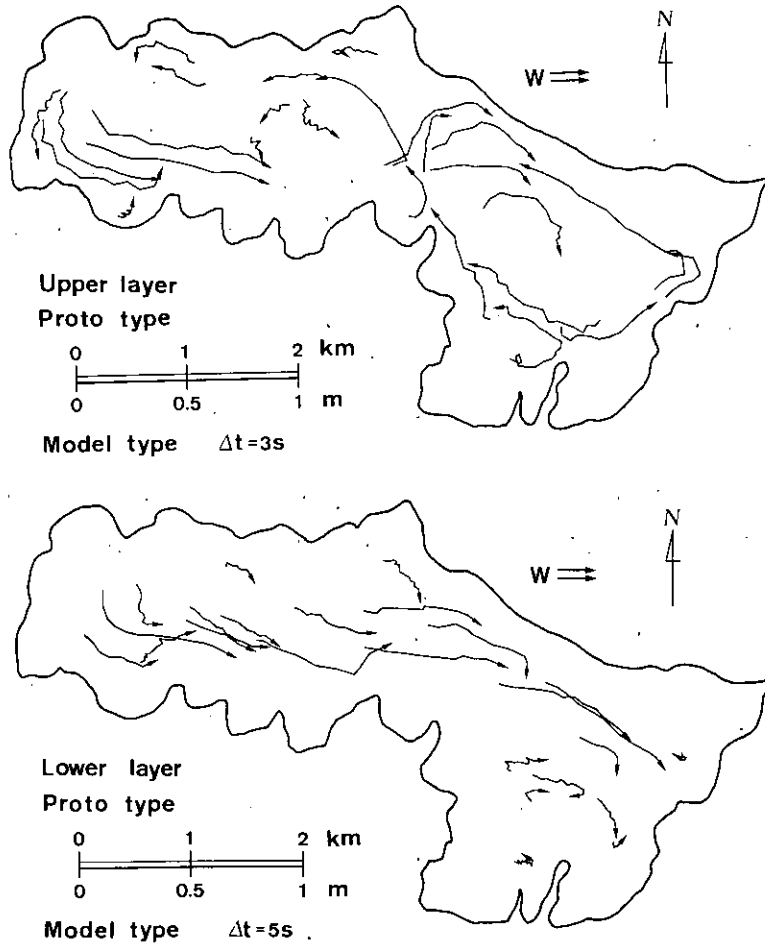


図 24 (つづき), (c) Case 3

Fig 24 (Continued), (c) Case 3



☒ 24 (つづき), (d) Case 4

Fig. 24 (Continued), (d) Case 4

2)成層化した場合、特に上層流れに顕著なパターンが現れる。すなわち、西風に対して時計及び反時計回りの2個の循環流が形成されている。東風に対しても、西風の場合程明りょうではないが、湖の東及び西半分で時計・反時計回りの流れが存在するようである。下層流れについてはいずれの場合も単純なパターンを示し、図 23(b)にあるように風向と同一方向に流れる順流が卓越している。

## 7. 結 論

本研究は深い湖の水理現象、例えば風外力に対する水温成層場の応答特性や水温躍層部に生長する内部波の特性を調べるため、水温躍層の発達した夏季の中禅寺湖において湖水温の観測を行った。1982年には湖内7点の水温鉛直分布の測定に重点を置き、続いて1983年には躍層付近の水温の長期定点観測を実施した。一方、風起因の湖内流動については中禅寺湖水理模型を用いた吹送流水理模型実験を行い、均質流体場と二成層密度場の水平流動パターンについて検討している。

本研究で得られた主要な結果は、以下のようにまとめられる。

1)中禅寺湖では4月下旬～5月上旬頃から表層水温と底層水温の差が大きくなり、水温躍層の形成が始まる。この水温躍層は8月上旬～中旬に完成する。

2)水温の1年サイクルにおいて、正列成層から逆列成層への、あるいは逆列成層から正列成層への過渡期に年2回の循環期が存在する。

3)表層の混合層厚が10 mにも発達した夏季の水温成層場では、かなり長時間風が吹いてもごく表層の等温度線が破壊されるにとどまり、風あるいは吹送流の混合効果は密度界面までには及んでいない。

4)湖面上を吹く風により密度界面が傾き、風下側に向かって表層の混合層厚が発達しているようにも見受けられる。しかし、この風下側に向かう上層水深の増加は、風の吹き寄せ効果による圧力上昇が密度界面位置の低下で調節される静水圧バランスで説明することができ、計算結果からも裏付けられた。

5)風の吹いている間は、風から自由表面に与えられるせん断力に対応して密度界面は傾いているが、風の弱まり、あるいは停止に伴って重力の復元力による内部静振が生じる。この内部静振の周期は二層界面波モデルや Holmboe モデルから推定できる。また、躍層付近の水温の長期定点観測結果から、一度内部静振が生起すると少なくとも数日間はその振動が残存することも明らかにされた。特に発生直後の内部静振の波高は5 mにもなる場合があり、このことは1日1回あるいは湖内数点での水温鉛直分布資料から混合量等を計算した場合、多大の誤差を伴うことを示唆している。

6)空間的な等温度線図から水平方向に3次、鉛直方向に2次モードを構成する内部波も見いだされた。Holmboe モデルを適用するとその周期は14.7時間と推定される。そして、約2時間ごとに観測した26時間の水温鉛直分布資料から、各水深位置での水温の経時変化を描いた結果、水深12～15 m層に上記の内部波に起因すると思われる14～16時間の水温変動を確認することができた。

7)前述した長周期性内部波以外にも、周期がほぼブルント・パイサラ振動数に見合った躍層規模



の内部波も見いだすことができました。これらの内部波は、波長にして数 10~100 m 程度、振幅については高々 0.6 m と小さい。

8) 風起因の湖内流動について吹送流水理模型実験を行い、循環期を想定した均質流体場と夏季の水温成層場に対応する二成層密度場での水平流動パターンを検討した。その結果、特に上層の流動パターンに顕著な差異が認められた。すなわち、均質流体場では湖長手方向に沿った順流が卓越するのに対し、二成層密度場では東及び西風いずれの場合にも、二つの循環流が形成されている。

### 引用文献

- 1) Niiler, P.P. (1975) : Deepening of the wind mixed layer. *Water Resour. Res.*, 5(2), 484-495.
- 2) Thorpe, S.A. (1974) : Near resonant forcing in a shallow two-layer fluid, a model for the internal surge in Loch Ness ?. *J. Fluid Mech.*, 63, 509-527.
- 3) 大谷守正・八嶽 功 (1983) : 自然湖水の表層混合層における熱対流と風によるシア。第 27 回水理講演会論文集, 171-178.
- 4) Cairns, J.L. (1975) : Internal wave measurements from a midwater float. *J. Geophys. Res.*, 80, 299-306.
- 5) Osborn, T.R. and L.E. Bilodeau (1980) : Temperature microstructure in the equatorial Atlantic. *J. Phys. Oceanogr.*, 10, 66-82.
- 6) 金成誠一 (1968) : びわ湖の内部波の研究 (I)。京都大学防災研究所年報, 第 11 号 B, 179-189.
- 7) 遠藤修一・今脇資郎・國司秀明 (1978) : 水温変動からみたびわ湖の内部波の研究。京都大学防災研究所年報, 第 22 号 B-2, 601-609.
- 8) 大久保賢治・村本嘉雄 (1983) : 湖の加熱成層過程と環流。第 27 回水理講演会論文集, 185-190.
- 9) 角田 学・福岡捷二・稲葉清美 (1983) : 三次元貯水池における内部段波の形成に及ぼす放水の効果。第 38 回土木学会年次学術講演会概要集, 417-418.
- 10) Kraus, W. (1981) : The erosion of a thermocline. *J. Phys. Oceanogr.*, 11, 415-433.
- 11) 相崎守弘他 (1983) : 中禅寺湖における栄養塩収支。第 17 回日本水質汚濁学会講演要旨集, 219-224.
- 12) Spiegel, R.H. and J. Imberger (1980) : The classification of mixed-layer dynamics in lakes of small to medium size. *J. Phys. Oceanogr.*, 10, 1104-1121.
- 13) Kajiura, K. (1952) : The effects of winds on the stratified lake water. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, 2, 67-71.
- 14) 土木学会編 (1971) : 水理公式集 (昭和 46 年度改訂版), 技報堂, 577-578.
- 15) 村岡浩爾・平田健正 (1983) : 中禅寺湖の内部波。第 27 回水理講演会論文集, 179-184.
- 16) Phillips, O.M. (1977) : *The dynamics of the upper ocean*, 2nd ed.. Cambridge Univ. Press, 199-255.
- 17) 富永政英著 (1976) : 海洋波動。共立出版, 536-543.
- 18) Woods, J.D. (1968) : Wave-induced shear instability in the summer thermocline. *J. Fluid Mech.*, 32, 791-800.
- 19) 土木学会編 (1971) : 水理公式集 (昭和 46 年度改訂版), 技報堂, 457-476.
- 20) 村岡浩爾・平田健正 (1984) : 中禅寺湖の内部波(2)。第 28 回水理講演会論文集, 327-332.
- 21) 村岡浩爾・福島武彦 (1981) : 靉ヶ浦 (西浦) の湖流。国立公害研究所研究報告, 第 19 号, 93-110.

II-2

中禅寺湖の水質特性

Characteristics of Water Quality in Lake Chuzenji

相崎守弘<sup>1</sup>・大槻 晃<sup>2</sup>

Morihiro AIZAKI<sup>1</sup> and Akira OTSUKI<sup>2</sup>

**Abstract**

Seasonal changes in standing crops of nutrients, chlorophyll-*a*, seston dry weight and POC were investigated at the station of the central part of Lake Chuzenji during two years from 1981 to 1983. Mean standing crops (mg/m<sup>3</sup>) of NO<sub>3</sub>-N, TIN, PON, T-N, T-P, chlorophyll-*a*, seston dry weight and POC in whole layer (0-150m) at this station were estimated as 20.0, 21.9, 2.86, 24.7, 1.10, 0.247, 157.4 and 23, respectively. Mean concentrations of these substances were also estimated as follows; NO<sub>3</sub>-N 0.133mg/l, TIN 0.146 mg/l, PON 0.019 mg/l, T-N 0.16 mg/l, T-P 0.007 mg/l, chlorophyll-*a* 1.6 μg/l, seston 1.1 mg/l and POC 0.15 mg/l. Mean concentrations (mg/l) of Na, K, Ca, Mg and Si were estimated as about 8, 1.6, 11.4, 2.0 and 9.8, respectively.

Concentrations and standing crops of particulate materials, such as seston, total phosphorus POC and PON in lake water were significantly affected by inflows at the large amount of precipitation such as rainfall of a typhoon. High concentrations of chlorophyll-*a* were observed in the period of spring circulations and these estimated as 4.2 and 5.6 μg/l in mean values of whole layer in 1982 and 1983, respectively. NO<sub>3</sub>-N concentration showed high values of about 200 μg/l in hypolimnetic water during the stratified period, but this was homogenized in the period of spring circulation. *Uroglena americana*, one of the freshwater red tide species of phytoplankton, dominated in early summer in Lake Chuzenji. Maximums of chlorophyll-*a* concentrations in this period were observed in the thermocline and was 4 μg/l in 1982 and 7.9 μg/l in 1983, respectively. Trophic level of Lake Chuzenji was judged from these results to be in oligotrophic level.

- 
1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2  
Water and Soil Environment Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
  2. 国立公害研究所 計測技術部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2  
Chemistry and Physics Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

## 1. はじめに

*Uroglena americana* による淡水赤潮は貧栄養から中栄養段階の湖に発生することが知られており、水利用に種々の障害を与えている。琵琶湖では1976年に大規模な *U. americana* の淡水赤潮が発生し、その年以後毎年のように赤潮が発生している。ウログレナ赤潮の発生機構は琵琶湖プランクトン異常発生調査団(1981)、吉田ら(1983 a, b)によって詳細な調査が行われたが、不明な点が多く残されている。中禅寺湖においても1981年に *U. americana* の異常増殖が確認され、取水している水道水に異臭味がつくなどの問題を引き起こした。中禅寺湖はその上部に位置する湯ノ湖の富栄養化が著しいことから、その影響が懸念されていたが、継続的な調査は行われておらず(徳井, 1982) その水質特性も不明な点が多い。ウログレナ赤潮の発生には種々の要因が組み合わさった複雑な機構が考えられるが、その機構を解明するためには、基礎的な湖の水質特性を把握しておく必要がある。本研究では中禅寺湖における栄養塩類等の現存量、鉛直分布特性、*U. americana* が優占種となる初夏のクロロフィル分布特性等について調査し、それらについての知見を得た。

## 2. 調査方法

調査は1981年8月から1983年6月までほぼ毎月1度の頻度で行った。*U. americana* の優占する6月にはさらに頻度を高くした。調査地点を図1に示す。湖内3地点で調査を行ったが、1981年11月以後は湖の中心地点である st. 2 を中心に行った。採水は6 l バンドン採水器を用い、上層から下層まで7水深で行った。採水後直ちに、あらかじめ450°C、3時間以上加熱処理をしたグラスファイバーフィルター(ミリポアー社 AP 40, 又はワットマン社 GF/C)を用いてろ過し、ろ紙上の試料について乾燥重量、懸濁態有機炭素(POC)及び窒素(PON)、クロロフィル a 濃度の分析を行い、

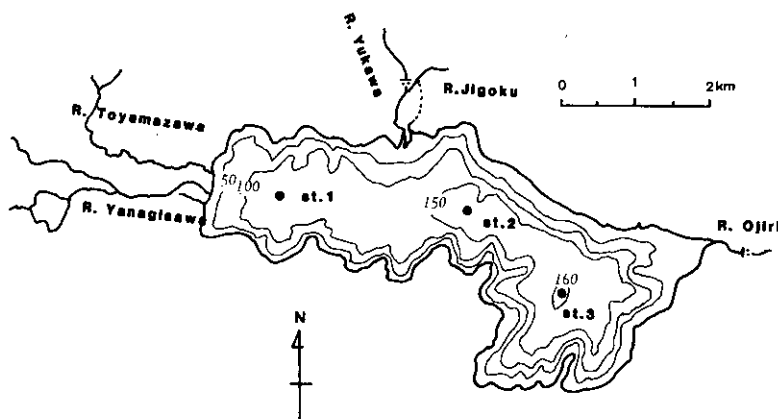


図 1 中禅寺湖の概念図及び調査地点  
Fig. 1 Lake Chuzenji and study sites

ろ液については分析時まで凍結保存した。クロロフィル *a* 濃度は SCOR/UNESCO 法で、POC 及び PON 濃度は CHN コーダ (柳本社, MT 3 型) で分析した。アンモニア態窒素 ( $\text{NH}_4\text{-N}$ )、亜硝酸態窒素 ( $\text{NO}_2\text{-N}$ )、硝酸態窒素 ( $\text{NO}_3\text{-N}$ )、無機態リン ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ) 濃度はろ液についてオートアナライザー (テクニコン社, AA II 型) を用いて分析した (大槻ら, 1981)。全リン (TP) 濃度は過硫酸カリウムによる加熱分解後  $\text{PO}_4\text{-P}$  と同様に測定した (Menzel & Corwin, 1965)。ナトリウム (Na), カリウム (K), カルシウム (Ca), マグネシウム (Mg) 及び水溶性ケイ素 (Si) は ICP 発光分光分析機 (ジャーレルアッシュ社) を用いて測定した。生菌数は 1/10 濃度の Nutrient Broth (Difco 社) 培地を用い, MPN 法で  $20^\circ\text{C}$ , 2 週間培養後計数した。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した (相崎, 1982)。

### 3. 結果

#### 3.1 現存量

中禅寺湖における各種現存量の季節変化を調べるために st. 2 における上層 (0—50 m) 及び全層 (0—150 m) の単位面積当たりの現存量を求めた。図 2 に各態窒素の全層での現存量の季節変化を示す。 $\text{NH}_4\text{-N}$  は 5 月～7 月頃に増加する傾向がみられ, 冬期に減少した。しかし平均現存量は  $1.6 \text{ g/m}^2$  と少なく, 全層平均濃度は  $0.01 \text{ mg/l}$  であった。それに比較し,  $\text{NO}_3\text{-N}$  は平均現存量  $20.0 \text{ g/m}^2$ , 最高値  $25.8 \text{ g/m}^2$ , 最少値  $17.0 \text{ g/m}^2$  と非常に高く, 中禅寺湖における全窒素現存量の約 80% を占めていた。季節的には冬期に高く夏期に低下した。 $\text{NO}_2\text{-N}$  は平均現存量が  $0.2 \text{ g/m}^2$  以下と非常に少なかった。PON 現存量は冬期に減少し, 循環期の 3 月, 4 月及び秋期に増加する傾向がみられた。平均現存量は  $2.86 \text{ g/m}^2$  であった。無機態全窒素と懸濁態窒素を合計した全窒素現存量は約  $22 \text{ g/m}^2$  から  $30 \text{ g/m}^2$  を変動し, その平均値は  $24.7 \text{ g/m}^2$  であった。全窒素現存量の変動は  $\text{NO}_3\text{-N}$  現存量の変動と類似した季節変化を示したが, その変動範囲は狭かった。調査期間を通した全層の平均濃度は  $0.16 \text{ mg/l}$  であった。図 3 に上層での各態窒素現存量の季節変化を示す。 $\text{NH}_4\text{-N}$  は全層での変化と類似していたが,  $\text{NO}_3\text{-N}$  は全層に比べ顕著な季節変動がみられた。上層での  $\text{NO}_3\text{-N}$  現存量は循環期の 1 月及び 2 月に高くなり, 温度成層期の 5 月から 11 月にかけて低下した。上層での平均現存量は  $5.6 \text{ g/m}^2$ , 平均濃度は  $0.11 \text{ mg/l}$  と全層の平均濃度  $0.13 \text{ mg/l}$  より低かった。上層での PON 現存量は 12 月及び 1 月頃に減少し, 循環期の 3 月頃より再び増え始め, 夏期はほぼ同水準を維持した。上層の平均全窒素現存量は  $7.4 \text{ g/m}^2$  であり, 平均濃度は  $0.15 \text{ mg/l}$  と全層平均濃度とほぼ等しい値になった。

図 4 に全層での全リン現存量及び  $\text{PO}_4\text{-P}$  現存量の季節変化を示す。 $\text{PO}_4\text{-P}$  現存量は調査した 23 回の平均値で  $0.33 \text{ g/m}^2$  以下と少なく, 1983 年 4 月に  $0.84 \text{ g/m}^2$  という比較的高い値が測定された以外は  $0.5 \text{ g/m}^2$  以下のことが多かった。平均濃度は  $2 \mu\text{g/l}$  とほぼ検出限界濃度であった。全リン濃度は台風による大雨の影響のあった 1982 年 8 月及び 9 月と比較的降雨量の多かった 1983 年 4 月及び 5 月に高い値を示したが, それ以外の平常時には比較的変動が少なかった。最高値は 1983 年 4 月

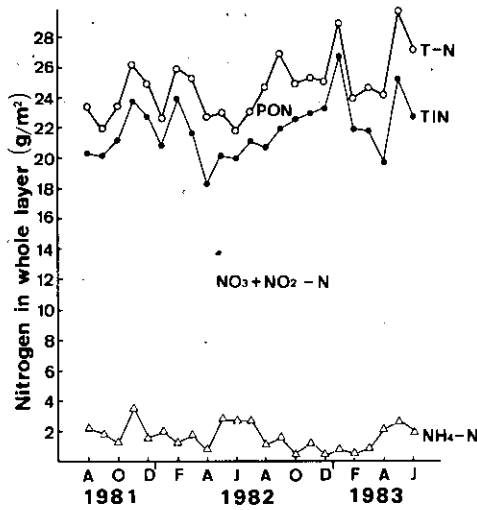


図 2 st. 2 の全層 (0-150 m) における各態窒素現存量の季節変化  
 Fig. 2 Seasonal changes in standing crop of nitrogen in whole layer (0-150m) at st. 2

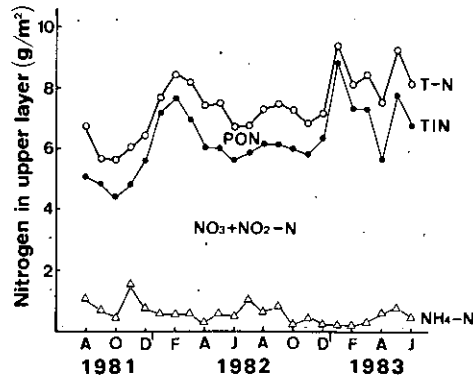


図 3 st. 2 の上層 (0-50 m) における各態窒素現存量の季節変化  
 Fig. 3 Seasonal changes in standing crop of nitrogen in upper layer (0-50m) at st. 2

の  $1.89 \text{ g/m}^2$ であった。平均現存量は  $1.1 \text{ g/m}^2$ 、平均濃度は  $7 \mu\text{g/l}$ であった。図5に上層での全リン及び  $\text{PO}_4\text{-P}$  現存量の季節変化を示す。上層での  $\text{PO}_4\text{-P}$  現存量は1983年4月及び5月に多少増加した以外はほとんど大きな変化を示さず、平均現存量は  $0.09 \text{ g/m}^2$ 、平均濃度は  $1.8 \mu\text{g/l}$ と低かった。全リン現存量は全層の場合と同様に1982年8月、9月及び1983年4月、5月に高い値を示した。その平均濃度は  $7 \mu\text{g/l}$ と全層平均濃度と一致した。

図6に上層及び全層でのクロロフィル a 現存量の季節変化を示す。季節変動のパターンは全層で

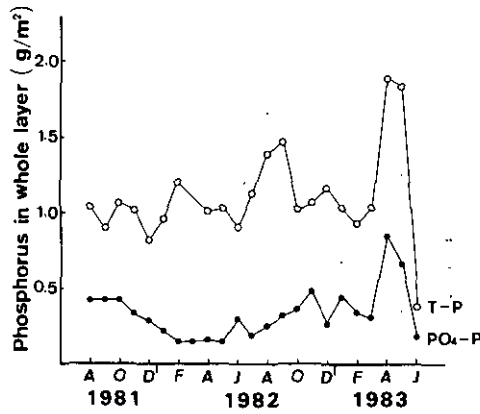


図 4 st. 2 の全層 (0-150 m) における全リン及び PO<sub>4</sub>-P 現存量の季節変化  
 Fig. 4 Seasonal changes in standing crops of total phosphorus (○) and PO<sub>4</sub>-P (●) in whole layer (0-150m) at st. 2

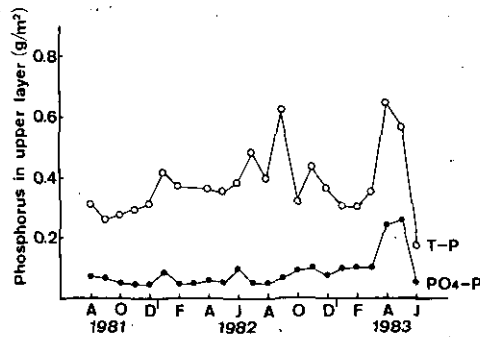


図 5 st. 2 の上層 (0-50 m) における全リン及び PO<sub>4</sub>-P 現存量の季節変化  
 Fig. 5 Seasonal changes in standing crops of total phosphorus (○) and PO<sub>4</sub>-P (●) in upper layer (0-50m) at st. 2

も上層でも類似していたが、現存量の増加する循環期以外は上層に多く分布する傾向を示した。循環期には全層で1982年4月に0.63 g/m<sup>2</sup>、1983年5月に0.84 g/m<sup>2</sup>という高い値を示した。この値は平均濃度で、それぞれ4.2 μg/l及び5.6 μg/lに相当し、中禅寺湖で観測された値としては非常に高い値である。このときの上層の平均濃度は、それぞれ4.2 μg/l及び4.1 μg/lであり全層平均濃度とほぼ等しいか、むしろそれより低かった。このことは、この時期に深水層でも高いクロロフィル a 濃度を維持していることを示しており、植物プランクトンの生産が活発に行われたことを示唆していた。クロロフィル a の平均現存量は上層で99 mg/m<sup>2</sup>であり、全層で247 mg/m<sup>2</sup>であった。平均

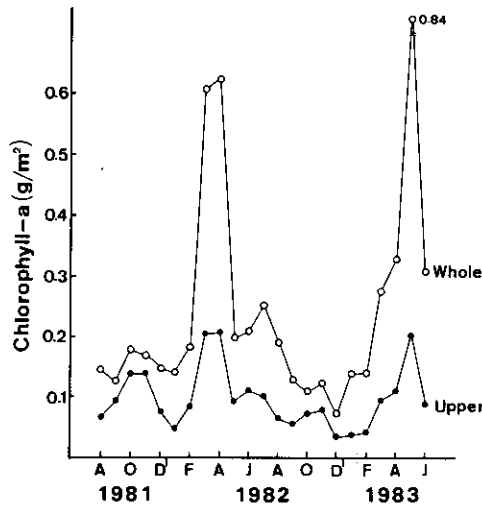


図 6 st. 2 の全層 (0-150 m) 及び上層 (0-50 m) におけるクロロフィル a 現存量の季節変化

Fig. 6 Seasonal changes in standing crop of chlorophyll-a at st. 2

(○) whole layer (0-150m), (●) upper layer (0-50m).

濃度に換算するとそれぞれ約  $2 \mu\text{g/l}$  と  $1.6 \mu\text{g/l}$  であった, ウログレナ赤潮が発生する可能性の高い 6 月は循環期に比較するとクロロフィル a 現存量はかなり低下していた。

図 7 にセストン現存量の季節変化を示す。全層でのセストン現存量は循環期の 3 月～5 月に高くなる傾向がみられたが, それよりも台風等による大雨の影響が強かった。1982 年 8 月の台風時には約 500 mm, 9 月初めには約 300 mm, 1983 年 4 月初旬には約 100 mm の降雨が観測され, また 1983 年 5 月には観測日に約 40 mm の降雨が観測された (日光測候所資料)。これらの降雨のあった月にセストン現存量は異常に増加した。全層での最高値は台風のあった 1982 年 8 月の  $556 \text{ g/m}^2$  であり, 全平均現存量は  $157 \text{ g/m}^2$ , 降雨時の異常値を除く平均現存量は  $102 \text{ g/m}^2$  で大雨の影響の強さが明らかであった。上層も全層と類似した季節変動を示したが, 全層に比べるとその変動範囲は狭かった。表層の平均現存量は  $44 \text{ g/m}^2$  であり, 平均濃度は  $0.88 \text{ mg/l}$  であった。

図 8 に POC 現存量の季節変化を示す。循環期の 3 月～5 月にかけて現存量が増加する傾向がみられた。最高値はセストンの場合と同様に大量の降雨があった 1982 年 9 月にみられ, その値は全層で  $45.2 \text{ g/m}^2$ , 上層で  $14.9 \text{ g/m}^2$  であった。全層の平均現存量は  $23.0 \text{ g/m}^2$ , 平均濃度は  $0.15 \text{ mg/l}$  であった。上層の平均現存量及び平均濃度はそれぞれ  $8.8 \text{ g/m}^2$ ,  $0.18 \text{ mg/l}$  であった。

### 3.2 鉛直分布

前述したごとく全層 (0-150 m) の平均濃度と上層 (0-50 cm) の平均濃度と比較すると, 測

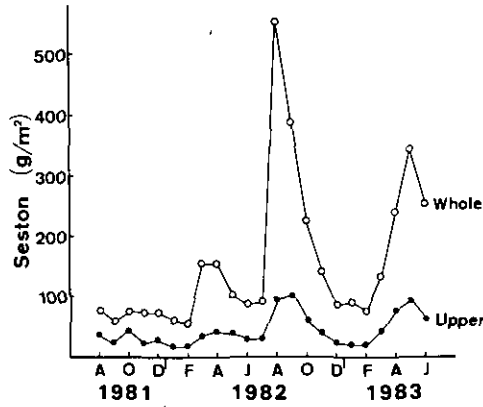


図 7 st. 2の全層（0—150 m）及び上層（0—50 m）におけるセストン現存量の季節変化

Fig. 7 Seasonal changes in standing crop of seston dry weight at st. 2  
 (○) whole layer (0—150m), (●) upper layer (0—50m).

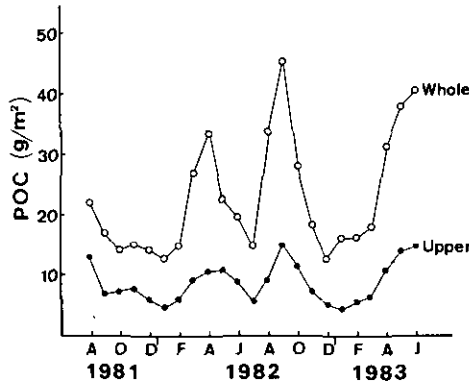


図 8 st 2の全層（0—150 m）及び上層（0—50 m）における POC 現存量の季節変化

Fig. 8 Seasonal changes in standing crop of POC at st. 2  
 (○) whole layer (0—150m), (●) upper layer (0—50m).

定項目によって分布の形態が異なっていた。そこで以下に測定したそれぞれの項目についての鉛直分布特性を述べる。

図 9 に懸濁態物質であるセストン、クロロフィル a、POC 及び PON の平均濃度の鉛直分布を示



す。セストンは20 m層と底層に二つのピークがみられた。平均濃度は20 m層で1.0 mg/l, 150 m層で1.6 mg/lであり、表層0 mが最も濃度が低く0.8 mg/lであった。深層水での濃度変動が激しかった。クロロフィル *a* 濃度はセストンと同様に20 m層にピークがみられ、その平均濃度は2.2  $\mu\text{g/l}$ であった。150 m層での濃度が最も低く1.3  $\mu\text{g/l}$ であり、表層0 mは1.9  $\mu\text{g/l}$ と20 m層に比べて若干低い値となった。POC及びPON濃度は10 m層にピークがみられ、その平均濃度はそれぞれ0.20 mg/l及び25  $\mu\text{g/l}$ であった。深層水に比べ上層水の方が濃度が高く、また濃度変動範囲も狭かった。

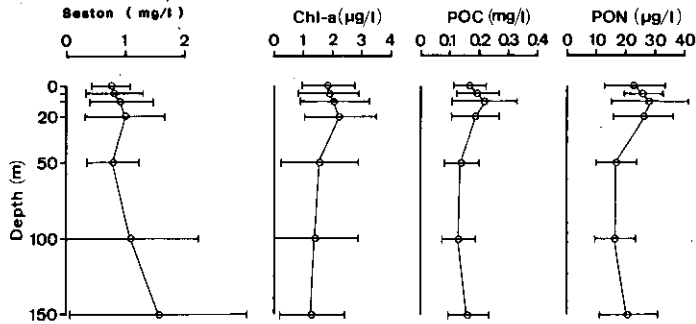


図 9 セストン、クロロフィル *a*、POC 及び PON 平均濃度の st. 2 における鉛直分布特性

Fig. 9 Vertical distributions of the mean concentrations of seston dry weight, chlorophyll-*a*, POC and PON at st. 2

図 10 に富栄養化に関連する栄養塩類、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$  及び T-P の鉛直分布を示す。 $\text{NO}_3\text{-N}$  の平均濃度は明らかに下層で高く上層で低かった。ピークは150 m層にみられ、その平均値は156  $\mu\text{g/l}$ であった。表層0 mから20 mまでは約100  $\mu\text{g/l}$ の濃度で大きな変化はみられなかった。 $\text{NO}_3\text{-N}$  の鉛直分布の季節変化については後述する。 $\text{NH}_4\text{-N}$  は中層水で若干濃度が低下したが、全水深を通して大きな変化はなく、平均濃度は9~12  $\mu\text{g/l}$ であった。全リン濃度も鉛直変動は少なく、また変動範囲も狭かった。その平均濃度は全水深を通して7~9  $\mu\text{g/l}$ であった。

図 11 に、1981年7月から1982年7月にかけて6回測定した Na, K, Ca, Mg 及び Si の平均濃度の鉛直分布を示す。これらのイオンは鉛直的に濃度がほぼ変わらず、また濃度変動範囲もそれぞれの平均濃度の10%以下と非常に少なかった。それぞれのイオンの各水深での平均濃度は Na: 7.8~8.1 mg/l, K: 1.5~1.7 mg/l, Ca: 11.1~11.7 mg/l, Mg: 1.9~2.2 mg/l, Si: 9.7~10.0 mg/lであった。

表 1 に従属栄養細菌数及び全細菌数の測定結果を示す。従属栄養細菌数は1983年に3回測定した

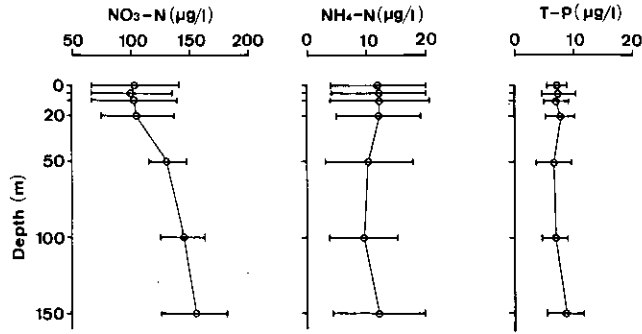


図 10 硝酸態窒素、アンモニア態窒素及び全リン平均濃度の st. 2 における鉛直分布特性  
 Fig. 10 Vertical distributions of the mean concentrations of  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$  and total phosphorus at st. 2

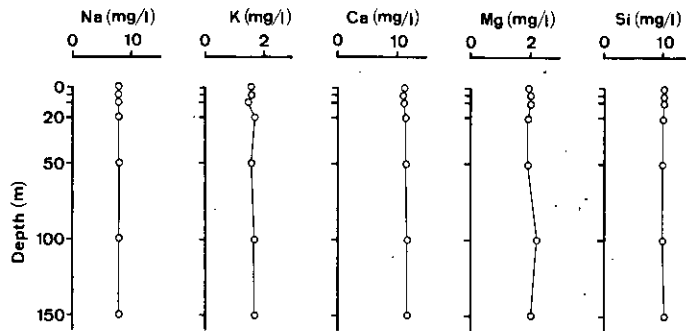


図 11 Na, K, Ca, Mg 及び Si 平均濃度の st. 2 における鉛直分布特性  
 Fig. 11 Vertical distributions of the mean concentration of Na, K, Ca, Mg and Si at st. 2

結果では 6 月, 8 月, 10 月の順に数が増加しており, 鉛直的には 10~20 m 層に  $1.7\sim 13 \times 10^2 \text{ cells/ml}$  と表層や中層に比べて約 2~3 倍高い値となった。全菌数は季節的にはあまり変化がなく, 鉛直的には従属栄養細菌数と同様に 10~20 m 層に  $4.5\sim 5.0 \times 10^5 \text{ cells/ml}$  と表層や中層に比べて 1.3~1.5 倍高い値となった。

鉛直分布の季節変化は測定項目によって異なっており, 前述したごとく, Na, K, Ca, Mg, Si, T-P,  $\text{NH}_4\text{-N}$  及び全菌数ではほとんど季節的な変化はなかった。一方, セストン, POC, PON 濃度は降雨の影響が強く, クロロフィル a 濃度は循環期に全層にわたって高くなることが判明した。鉛直分布の季節変動で特徴的であったのは溶存酸素と  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度であった。溶存酸素に関しては福島 (1984) が記載しているので, ここでは  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度の鉛直分布について述べる。図 12 に示す

表 1 中禅寺湖における生菌数及び全菌数の鉛直分布

Table 1 Vertical distributions of viable and total numbers of bacteria in Lake Chuzenji

	(cell s/ml)						
	16, May, '83	7, Jun.		3, Aug.		18, Oct.	
	Total Bac.	Hetero. Bac.	Total Bac.	Hetero. Bac.	Total Bac.	Hetero. Bac.	Total Bac.
0 m	$4.6 \times 10^5$	$7.9 \times 10^1$	$3.6 \times 10^5$	$1.7 \times 10^2$	$3.5 \times 10^5$	$4.9 \times 10^2$	$5.4 \times 10^5$
5	$3.4 \times 10^5$	$4.9 \times 10^1$	$5.3 \times 10^5$	$2.2 \times 10^2$	$3.0 \times 10^5$	$4.9 \times 10^2$	$6.2 \times 10^5$
10	$4.3 \times 10^5$	$7.0 \times 10^2$	$6.3 \times 10^5$	$2.8 \times 10^2$	$4.5 \times 10^5$	$1.3 \times 10^3$	$5.8 \times 10^5$
20	$4.4 \times 10^5$	$1.7 \times 10^2$	$6.2 \times 10^5$	$2.8 \times 10^2$	$2.8 \times 10^5$	$1.1 \times 10^3$	$4.6 \times 10^5$
30	—	$7.9 \times 10^1$	$4.6 \times 10^5$	—	—	$3.3 \times 10^2$	$5.5 \times 10^5$
50	$2.1 \times 10^5$	$7.9 \times 10^1$	$4.8 \times 10^5$	$1.7 \times 10^2$	$2.0 \times 10^5$	$3.3 \times 10^2$	$4.5 \times 10^5$
100	$2.4 \times 10^5$	$3.3 \times 10^1$	$4.5 \times 10^5$	$1.4 \times 10^2$	$2.9 \times 10^5$	$4.9 \times 10^2$	$3.1 \times 10^5$
150	$3.3 \times 10^5$	$4.9 \times 10^2$	$4.4 \times 10^5$	$1.7 \times 10^2$	$4.6 \times 10^5$	$7.9 \times 10^2$	$5.6 \times 10^5$

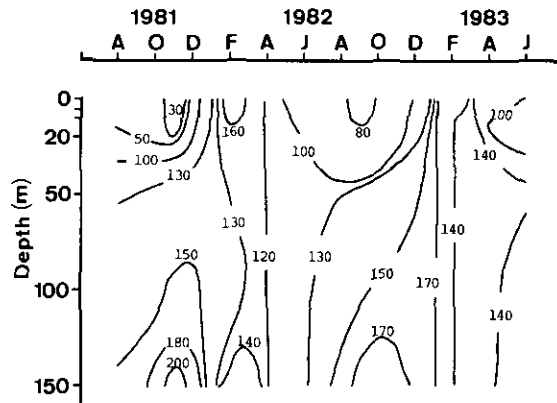


図 12 硝酸態窒素濃度 ( $\mu\text{g/l}$ ) の st. 2 における鉛直分布の季節変化

Fig. 12 Seasonal changes in the vertical distribution of  $\text{NO}_3\text{-N}$  ( $\mu\text{g/l}$ ) concentration at st. 2

ごとく  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度は温度成層の形成とともに底層水で濃度が高くなる底成層構造(吉村, 1937)をしており、循環期には上下混合が起きて全層均一になる季節変化を示した。底層水の  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度の増加はその濃度分布から底泥での有機物分解によって供給されている可能性が高く、このことは溶存酸素の濃度分布からも同様に推測できた。また温度成層の形成とともに上層 20 m 以浅とそれ以深の水深ではほとんど水の混合は起こらず、そのため夏期には上層の  $\text{NO}_3\text{-N}$  が減少した。循環期には再び全層にわたって均一な濃度になっており、湖水の大循環が起こっていることが明らかになった。

### 3.3 *U. americana* 優占期のクロロフィル *a* 分布特性

小山・福田 (1984) によれば、中禅寺湖における *U. americana* の優占時期は5月から7月にかけてであり、1982年にも占有率が50%を超え優占種になったことが確認されている。この時期の表層におけるクロロフィル *a* 分布を1982年 (図13) 及び1983年 (図14) に調べた。1982年は6月25日に5~10 m 層に4  $\mu\text{g/l}$  という濃度が観測されたが、表層で3  $\mu\text{g/l}$  以上の濃度を示した時期は短く6月下旬の約1週間だけであった。1983年は7月10日に7.5 m 層で7.9  $\mu\text{g/l}$  という高い濃度を観測し、3  $\mu\text{g/l}$  以上の濃度を示す時期も10 m 層を中心に6月下旬から7月中旬まで続いた。これらのピークを示す水深での植物プランクトン優占種は *U. americana* であった。温度成層は兩年とも5月下旬より10 m 層を中心に形成され始め、クロロフィル濃度のピークを示す水深では14~16°Cの水温であった。表層での *U. americana* の集積は両調査を通じて観測されず、したがって赤潮状態も観察されなかった。そのため、透明度の低下もみられず、この期間10~11 m 程度の透明度を維持した。

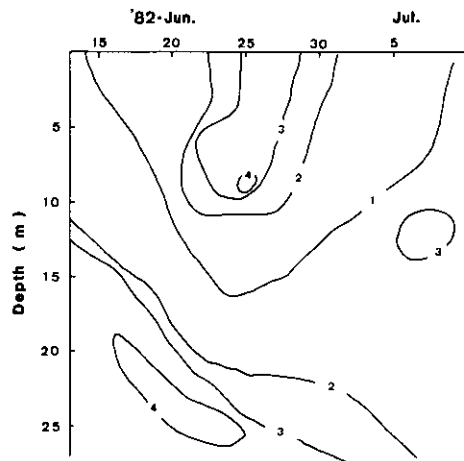


図 13 *Uroglena americana* の優占する6月から7月にかけての st. 2 の表層でのクロロフィル *a* 濃度 ( $\mu\text{g/l}$ ) 分布 (1982年)

Fig. 13 Distribution of chlorophyll-*a* concentration in upper layer at st. 2 during the early summer period in 1982

## 4. 考 察

### 4.1 中禅寺湖の水質

中禅寺湖の st. 2 における1981年8月から1983年6月までの全窒素、全リン及びクロロフィル *a* の平均現存量はそれぞれ、24.7  $\text{g/m}^2$ 、0.33  $\text{g/m}^2$  及び247  $\text{mg/m}^2$  であった。これらの値を平均濃度に換算すると全窒素0.16  $\text{mg/l}$ 、全リン0.007  $\text{mg/l}$ 、クロロフィル *a* 1.6  $\mu\text{g/l}$  であった。また透明

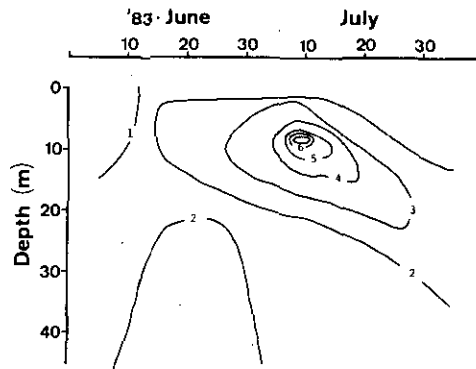


図 14 *Uroglena americana* の優占する 6 月から 7 月にかけての st. 2 の表層でのクロロフィル *a* 濃度 ( $\mu\text{g/l}$ ) 分布 (1983 年)

Fig. 14 Distribution of chlorophyll-*a* concentration in upper layer at st. 2 during the early summer period in 1983

度の平均値は 9.9 m であった (村岡, 1984)。これらの値を窒素及びリンにかかわる環境基準に当てはめると、窒素及びリン濃度とも類型 II に相当した。また参考項目であるクロロフィル *a* 濃度も類型 II に相当し、透明度は類型 I に相当した。湖沼を栄養段階で分類する試みは Thienemann 以来 (吉村, 1937) 数多く行われてきたが、その基準値にはかなりバラツキがみられる (Sakamoto, 1966; Forsberg & Ryding 1980; OECD, 1982)。中禅寺湖の栄養段階を OECD の基準で判断すると貧栄養湖に属する。また修正カルソン指標 (Aizaki *et al.*, 1981) で表すと TSI (Chl) 30, TSI (S. D.) 27, TSI (TP) 36 となり、やはり貧栄養湖となった。この値は相崎ら (1981) が測定した 1977 年夏期の値と TSI (TP) を除きほぼ等しかった。また全窒素濃度と全リン濃度の比は 23 となり、植物プランクトンにとってリンが制限因子になっていることが判明した (Forsberg & Ryding, 1980)。

*U. americana* の赤潮が毎年のように発生する琵琶湖の北湖 (水深 30 m の地点) での水質は、吉田ら (1983 a) の 1978 年 5 ~ 6 月の調査では、平均値で  $\text{NH}_4\text{-N}$  0.023 mg/l,  $\text{NO}_3\text{-N}$  0.119 mg/l,  $\text{PO}_4\text{-P}$  0.006 mg/l, Si 0.145 mg/l 及び chl-*a* 4.0  $\mu\text{g/l}$  であった。また 1978 年 4 月 ~ 1980 年 12 月の期間の平均 K 濃度は 3.3 mg/l, Mg 濃度は 1.4 mg/l, Ca 濃度は 10.3 mg/l であった (倉田, 1981)。これらの値と中禅寺湖の値を比較すると、 $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ , クロロフィル *a*, 及び K は琵琶湖の方が 2 ~ 3 倍濃度が高く、Si は中禅寺湖のが約 70 倍濃度が高かった。藻類の制限因子となっている  $\text{PO}_4\text{-P}$  濃度は琵琶湖の方が約 3 倍高かったが、その値は 0.006 mg/l と低い濃度であり、リンの増加をより一層制限しなければ中禅寺湖においても赤潮状態が頻発する危険性がある。

#### 4.2 *Uroglena americana* の異常増殖

琵琶湖における吉田ら (1983 a, b) の研究では, *U. americana* の淡水赤潮は発生前後においてカラム当たりのクロロフィル *a* 現存量に大きな違いはみられず, 表層付近に集積することによって赤潮状態になると考えられている。赤潮状態でのクロロフィル *a* 濃度は  $20 \mu\text{g/l}$  程度と報告されており, またこの時期の水深 30 m までのカラム当たりの平均クロロフィル *a* 濃度は  $4.0 \mu\text{g/l}$  と報告されている。赤潮の発生は表面水温と密接な関係があり, 表面水温が極大値に近い値を示す時期に赤潮の発生がみられている。したがって, 風の穏やかな晴天が数日続くと発生する場合が多い。また水温は  $10^\circ\text{C}$  を超えた時点で起こり始め, 赤潮最盛期の水温は  $16\sim 18^\circ\text{C}$  であったと報告されている。

中禅寺湖における *U. americana* の増殖も琵琶湖と同様に表面水温が  $10^\circ\text{C}$  を超える頃より活発化し,  $14\sim 16^\circ\text{C}$  の水温で最盛期になった。また表面水温が  $20^\circ\text{C}$  を超えると急激に減少した。中禅寺湖における 6 月～7 月の表層 50 m までのカラム当たりの平均クロロフィル *a* 濃度は  $2.0\sim 2.7 \mu\text{g/l}$  と琵琶湖の場合の約 50% 程度の値であった。しかし, 循環期の 1982 年 3 月及び 4 月, 1983 年 5 月には  $4.1 \mu\text{g/l}$  というカラム当たりの平均クロロフィル *a* 濃度を観測しており, この値は琵琶湖の赤潮時のカラム当たりの平均濃度に匹敵していた。これらのことから, 中禅寺湖においても潜在的には十分に赤潮状態になりうる栄養状態であることが推測された。

*U. americana* の増殖に適する水温である  $10\sim 18^\circ\text{C}$  の水温は, 中禅寺湖の場合 5 月下旬から 7 月初旬にかけて測定されており, そのため *U. americana* の増殖期間は  $30\sim 40$  日間程度と推測される。今ここで, *U. americana* の比増殖速度を  $0.8/\text{d}$  と仮定し (石田, 1981) 赤潮状態でのプランクトン数を  $10,000 \text{ cells/ml}$  (吉田ら, 1983 a) と仮定すると,  $1 \text{ cell/ml}$  の *U. americana* が存在すると約 12 日間後には赤潮状態になると計算される。 $0.8/\text{d}$  という比増殖速度は培養実験で得られた値なので, 自然界では仮にその  $1/4$  の増殖速度  $0.2/\text{d}$  であると仮定すると,  $1 \text{ cell/ml}$  の *U. americana* が赤潮状態になるためには 46 日間かかる。1982 年 4 月初めの中禅寺湖で測定した *U. americana* の個体数は  $14 \text{ cells/ml}$  であった (小山・福田, 1984) のでこの値を基準に考えると赤潮状態になるまで 33 日間要することになる。もしここで外部から *U. americana* の供給があったとするとまた状況が異なる。中禅寺湖の上流にある湯ノ湖では 5 月下旬に *U. americana* の大増殖がみられ,  $10,000\sim 100,000 \text{ cells/ml}$  の濃度が測定されている。この *U. americana* は湯川を通して中禅寺湖に流入しており, 湯川河口で  $4,000\sim 25,000 \text{ cells/ml}$  の値が測定されている (小山, 私信)。湯川の流量は約  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  であるので 10 日間には約  $1.7 \times 10^6 \text{ m}^3$  の水が流入したことになる。そのため湯川を通して中禅寺湖に流入した *U. americana* の細胞数は  $7\sim 42 \times 10^{15} \text{ cells}$  と推定される。この細胞が中禅寺湖表層 10 m に均一に分散したと仮定すると  $0.6\sim 3.5 \times 10^2 \text{ cells/ml}$  となる。ここで湯川を通して流入し, 中禅寺湖の表層に分布した *U. americana* の細胞数を  $200 \text{ cells/ml}$  と仮定し, その濃度から増殖がスタートしたとする約 20 日間で赤潮状態になると推定される。湯川からの *U. americana* の供給がある場合と無い場合を比較すると, 赤潮状態になるまでの期間に約 2 週間の

違いがみられる。以上述べてきたごとく、中禅寺湖のように *U. americana* の増殖期間の短い湖では、増殖を開始する時期の細胞数が赤潮状態を引き起こすかどうかの重要なファクターになると考えられ、供給源である湯ノ湖での挙動も合わせて理解しておく必要であろう。

## 5. まとめ

中禅寺湖の中心部（水深 150 m）における平均栄養塩現存量は  $\text{NO}_3\text{-N}$  20.0 g/m<sup>2</sup>, TIN 21.9 g/m<sup>2</sup>, PON 2.86 g/m<sup>2</sup>, T-N 24.7 g/m<sup>2</sup>, T-P 1.10 g/m<sup>2</sup> と推定された。また平均クロロフィル *a* 現存量は 0.247 g/m<sup>2</sup>, セストン現存量は 157.4 g/m<sup>2</sup>, POC 現存量は 23 g/m<sup>2</sup> と推定された。これらの値を平均濃度で表すと,  $\text{NO}_3\text{-N}$  0.133 mg/l, TIN 0.146 mg/l, PON 0.019 mg/l, T-N 0.16 mg/l, T-P 0.007 mg/l, クロロフィル *a* 1.6  $\mu\text{g/l}$ , セストン 1.1 mg/l, POC 0.15 mg/l であった。Na, K, Ca, Mg, Si 濃度はそれぞれ約 8 mg/l, 1.6 mg/l, 11.4 mg/l, 2.0 mg/l 及び 9.8 mg/l であった。

セストン及び T-P 現存量は大雨による流域からの流入によって大きく影響された。クロロフィル *a* 濃度は循環期に全層にわたって高い濃度が観測された。*U. americana* の優占した初夏には最大値で 4~7.9  $\mu\text{g/l}$  の濃度が観測されたが赤潮状態にはならなかった。 $\text{NO}_3\text{-N}$  は夏期に底成層構造がみられたが循環期には完全に全層で均一の濃度になった。これらの水質から中禅寺湖は貧栄養段階にあると判断された。また *U. americana* の異常増殖には湯川を通して湯ノ湖の影響が大きいと判断された。

最後に、ICP 発光分光分析及び植物プランクトンの同定を担当していただいた国立公害研究所西川雅高氏及び渡辺信博士に記して感謝いたします。

## 引用文献

- 相崎守弘 (1982): 細菌数, 「湖沼環境調査指針」日本水質汚濁研究会編, 公害対策技術同友会, 東京。
- 相崎守弘・大槻晃・福島武彦・河合崇欣・細見正明・村岡浩爾 (1981): 修正カルソン富栄養化状態指標の日本湖沼への適用と他の水質項目との関連, 国立公害研究所研究報告, 第 23 号, 13-32。
- Aizaki, M., A. Otsuki, T. Fukushima, M. Hosomi and M. Muraoka (1981): Application of Carlson's trophic state index to Japanese lakes and relationships between the index and other parameters. Verh. Internat. Verein. Limnol., 21, 675-681.
- びわ湖プランクトン異常発生調査団 (1981): びわ湖におけるプランクトンの異常発生機構に関する調査研究報告, 滋賀県。
- Forsberg, C. and S. Rydning (1980): Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish water-receiving lakes. Arch. Hydrobiol., 89, 189-207.
- 福島武彦 (1984): 中禅寺湖における懸濁態物質の沈殿量とその特性, 国立公害研究所研究報告, 第 69 号, 53-67。

- 石田祐三郎 (1981) : 物理的環境要因の影響, 「びわ湖におけるプランクトンの異常発生機構に関する調査研究報告」, p. 124-131, 滋賀県.
- 小山次朗・福田訓真 (1984) : 中禅寺湖における植物プランクトン及び動物プランクトンの季節変化, 国立公害研究所研究報告, 第 69 号, 69-76.
- 倉田亮 (1981) : 金属類, 「びわ湖におけるプランクトンの異常発生機構に関する調査研究報告」, p. 51-58, 滋賀県.
- 村岡浩爾 (1984) : 研究の意義と概要, 中禅寺湖における富栄養化現象に関する基礎的研究, 国立公害研究所研究報告, 第 69 号, 1-4.
- 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.*, **11**, 280-282.
- OECD (1982) : *Eutrophication on Waters*. OECD, Paris.
- 大槻晃・河合崇欣・相崎守弘 (1981) : 霞ヶ浦高浜入におけるリン及び溶存無機態窒素の動態, 国立公害研究所研究報告, 第 22 号, 3-22.
- Sakamoto, M. (1966) : Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth. *Arch. Hydrobiol.*, **62**, 1-28.
- 徳井利信 (1982) : 日光国立公園陸水学文献目録 (1885-1980). *陸水学雑誌*, **43**, 48-60.
- 吉田陽一・三田村緒佐武・田中信彦・門田元 (1983 a) : びわ湖“淡水赤潮”に関する研究-I. 植物プランクトンおよび栄養塩類の分布変化. *陸水学雑誌*, **44**, 21-27.
- 吉田陽一・松本孝・門田元 (1983 b) : びわ湖の“淡水赤潮”に関する研究-II. 赤潮の発生と環境諸要因との関係. *陸水学雑誌*, **44**, 28-35.
- 吉村信吉 (1937) : 湖沼学 (増補版, 1976 年). 生産技術センター, 東京.



## II-3

# 中禅寺湖における懸濁態物質の沈殿量とその特性 Sedimentation of Particulate Matter and its Characteristics in Lake Chuzenji

福島武彦<sup>1</sup>

Takehiko FUKUSHIMA

### Abstract

Sedimentations of seston, chlorophyll-*a*, and nutrients in Lake Chuzenji, which is oligotrophic lake with 163 m maximum depth, were observed every one month for two years. The annual amounts of sedimentation at 110 m depth were obtained to be 1241, 0.583, 52.6, 5.83, 1.27 g/m<sup>2</sup>y for seston, chlorophyll-*a*, carbon, nitrogen, and phosphorus, respectively. The comparison of sedimentation fluxes at 30 m and 110 m depth indicated that insignificant decomposition had occurred during sedimentation of allochthonous materials. The decomposition rates at sediments estimated from the difference of the contents between sediments and deposited matter were 27.1, 5.4, 0 mg/m<sup>2</sup> d for carbon, nitrogen, and phosphorus, respectively. This phenomenon explained the low value of dissolved oxygen near sediments and the increase of NO<sub>3</sub>-N in lower layer in stratified period. The average values of sinking rate were calculated to be 2.5 m/d for seston, and 0.67, 1.19 m/d for chlorophyll-*a* at the depths of 30 m and 110m, respectively. In addition to the cross correlation of those rates for each sampling period at each depth, the content of chlorophyll-*a* in seston effects the sinking rates of seston and chlorophyll-*a*.

### 1. 緒 論

湖沼における懸濁物質の挙動の理解,あるいは物質収支の評価に当たり,沈降現象の解明は重要な課題といえる。湖沼の沈降現象に関しては数々の報告があり,測定方法の問題<sup>1,2)</sup>,生産あるいは沈降過程での分解といった物質循環機構の解析<sup>3)</sup>,堆積速度推定の一方法<sup>4)</sup>等といった観点より論じられているが,水深50m以上の貧栄養湖に対してはWastwater<sup>5)</sup>等2,3の報告があるのみである。中禅寺湖は最大水深162mを有している。*Uroglena americana*の大増殖による赤潮現象も報告

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2  
Water and Soil Environment Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

されているが、透明度は10 mより下がることは少なく、貧栄養湖の代表的存在といえる。本報告では水深が大きい貧栄養湖における物質循環機構の解明を目的に、2か年にわたり沈降物質に関する調査を行った結果をまとめる。特に炭素、窒素、リンといった栄養塩の各深度別の沈殿量、沈降過程、底泥での分解量、並びに流入河川より運ばれる土砂等を主成分とした懸濁物質と内部生産された植物プランクトンの沈降特性の差異等に重点を置いた解析を行った。

## 2. 観測並びに分析方法

中禅寺湖の形状並びにセジメントトラップを設置した地点を図1に示す。底泥採取地点並びに気象観測資料を得た中禅寺湖候所の位置も図中に示す。流入流出河川水量等の詳細は相崎他<sup>9)</sup>を参照されたい。次に観測方法は図2に示すように底面に固定したアンカーと水面ウキの間のロープにガラス製の円筒型容器をとめ、セジメントトラップとした。観測期間は1981年8月から1983年8月の約2か年で、沈殿物の引き上げは約1か月間隔で行った。1981年8月から1982年5月の期間には水深15, 30, 100 mの3水深で、その後は図2に示すような10水深で沈殿物を得た。ロープの切断等により若干の欠測期間が存在した。なお沈殿びんの長さ/直径比は5程度で、補集効率が1に近いと報告されているものを用いたり。また表層水温は20°Cを超えず、底層水は年間を通して4°C前後であることと、沈殿物は沈殿びん中で静置状態であることから、1か月の測定期間中の分解量は無視しうるものと考えられる。しかし表層10 m程度までは有先層にはいり、付着性藻類が付く時期もあり、その精度は水深の大きいものに比べ若干下がる。

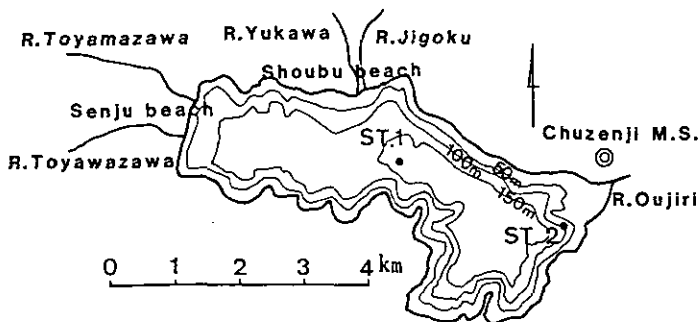


図 1 中禅寺湖の湖地形と観測地点

Fig. 1 Lake Chuzenji and sampling stations

沈殿物は回収後、その定量並びに一部について80°C乾燥重量、クロロフィルa(SCOR/UNESCO法。Lorenzen法によるフェオフィチンaの測定も同時に行う)用いる過を行ひ、残りを凍結乾燥した。そのサンプルに対し有機炭素、有機窒素をCHNコーダー(柳本製)で、全リンを過硫酸カリウ

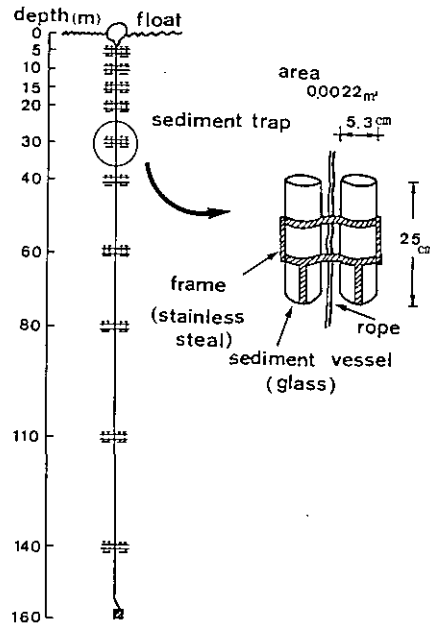


図 2 沈降物の観測方法

Fig. 2 Arrangement of sediment traps

ムで分解後オートアナライザー（テクニコン製）で分析した。底泥はコアサンプラーで採取し（1982年9月）、2 cm ごとに 20 cm までの 10 サンプルを作成し、無機炭酸を 1 N 塩酸でとばす以外は上述の沈殿物分析と同じ方法で分析した。底泥については特に、ミル粉碎後けい光 X 線測定器（ORTEC 社製）でチタン含量を求めた。

### 3. 結果

#### (1) セストン量とその沈殿量

図 3 には各水深の沈殿物の乾燥重量の沈降フラックス（以降セストンの沈降フラックスと呼ぶ）、5, 10, 20, 50, 100 m のセストン量（50 m, 100 m のセストン量は 40, 110 m のセストン沈降フラックスの位置に書く）、並びに中禅寺湖候所での各測定期間の降雨強度を示す。降雨強度、セストン量とセストンの沈降フラックスの相関は高く、降雨時に流入河川より運ばれる懸濁物質質量が大きいことを示す。特に 1982 年 8・9 月には合計 1574 mm もの降雨があり、その影響は 3 か月程度もセストン量、セストンの沈降フラックスに明白に表れている。またこのときセストン量のピークが下層に比べ上層で遅れて見えるのは降雨と沈殿びん引き上げの時間間隔が関係していると考えられる。すなわち 1982 年 8 月では測定日の 16 日前に約 500 mm の降雨が、9 月では 2 日前に約 300 mm の大降雨があり、前者では流入懸濁物の相当部分が沈降し表層のセストン量が少なくなっていて、後

者では表層にその影響が残ったものと考えられる。この時期でセストンの沈降フラックスは15~80 mでほぼ一定、それ以深で増加しているのに対し、セストン量は躍層近傍の20 mと底面近くの100 mで高い。流入した懸濁物が表層と底面近くに侵入したことを想像させる。セストン量のもう一つのピークである1983年4~6月期には、セストンの沈降フラックスの増加の割合は大降雨時に比べかなり少なく、深層ほどそのピークが遅れている。この時期はクロロフィルaも多いことから藻体の割合が大きいことが推定され、藻体の沈降速度が河川より流入する土砂を多く含む懸濁物のそれより小さいことを示しているといえよう。

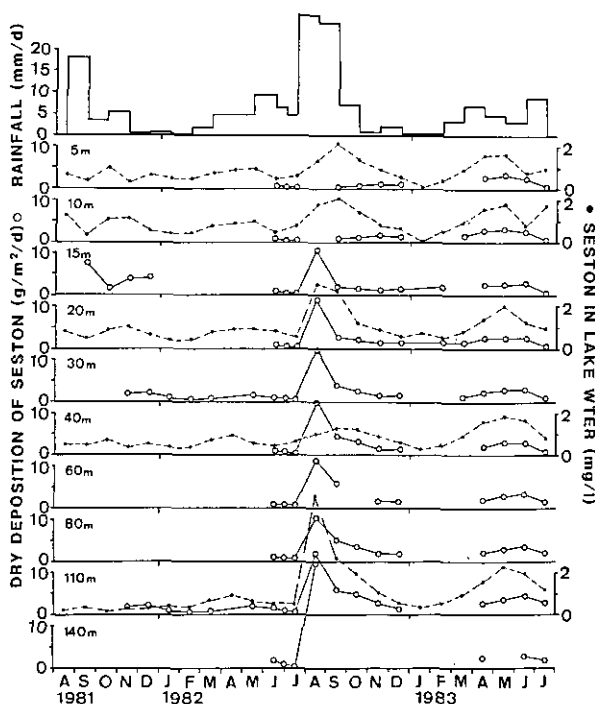


図 3 セストンの沈降フラックス○, 湖水中のセストン量●と降雨強度の変化

Fig. 3 Sedimentation flux for seston ○, amount of seston in lake water ●, and Rainfall intensity

(2) クロロフィルa量とその沈殿量

図4には各水深のクロロフィルa量(SCOR/UNESCO法)とその沈降フラックスの変化を示す。クロロフィルa量は春と秋にピークを有しているが、春、冬の循環期には全層ほぼ均一から下層で高く、夏、秋の成層期には表層で高いことがわかる。またその沈降フラックスはクロロフィルa量のピークより1~2か月遅れてピークを有している。セストンの沈降フラックスがほぼ全期間にわ

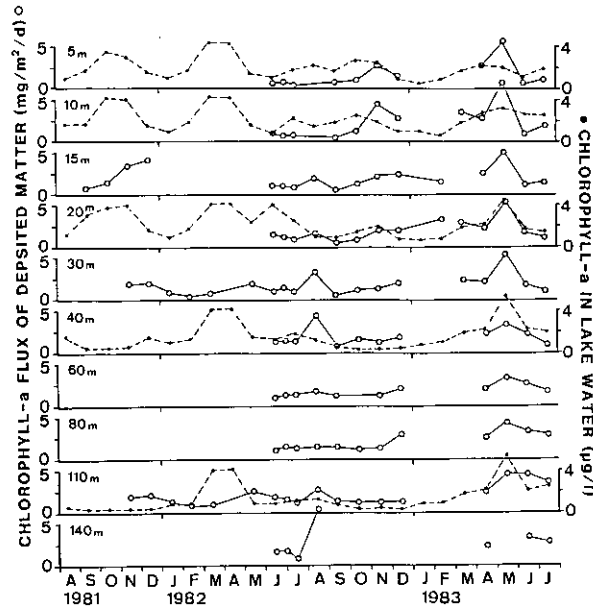


図 4 クロロフィルaの沈降フラックス○と湖水中のクロロフィルaの変化●  
 Fig. 4 sedimentation flux for chlorophyll-a ○ and amount of chlorophyll-a in lake water ●

たり下層で下層より大きいものに対し、クロロフィルaの沈降フラックスでは上層で下層を上回る時期も存在し、全期間としては全水深あまり変わらない結果に見える。植物プランクトンが有光層内で生産されることに関係している。1982年8、9月の大降雨時には沈降フラックスは30、40mと底層で高く、この時期クロロフィルa量は少ないことから沈降速度が大きくなったことがわかる。大降雨の影響、各水深の年間沈殿量、沈降速度の定量的議論は他の沈降フラックスとあわせて考察の所で論ずる。最後に Lorenzen の方法で沈殿物のフェオフィチンaを測定した結果を述べる。この値はSCR/UNESCO法のクロロフィルaと比較すると、上層で25~50%、下層では100%となった。SCOR/UNESCO法ではフェオフィチンaもクロロフィルaとして測定されるため、上述のような割合でクロロフィルaが分解されていることを表していると考えられる。

(3) 沈殿物の炭素、窒素、リン含量とそれらの沈降フラックス

図5には15、30、110m水深での沈殿物の炭素、窒素、リン含量の変化を示す。クロロフィルa量と同じく春、秋に高く、また6、7月にも高いが、大降雨時に極めて小さくなる。セストンの沈降フラックスと同じく、1982年8、9月の大降雨の影響は3か月程度見られる。各時期のピークの高さはリンでは炭素、窒素と異なっていて春先のピークが大きい。特に1982年1~5月で0.2%を上

回っているが、このときセストン中のリン含量も1%を超えていて他の時期に比べ高い。詳しい原因については不明であるが、藻体の組成等が影響している可能性がある。また水深の増加とともに炭素、窒素含量が減少するが、リンではその傾向が見られない。さらに大降雨時の含量減少の割合がリンでは炭素、窒素に比べ少ない。このことは考察で論ずる。

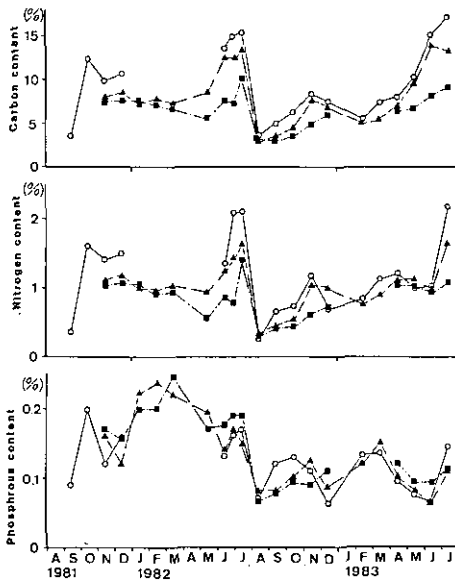


図 5 沈降物の炭素、窒素、リン含量の変化

Fig. 5 Carbon, nitrogen, phosphorus content of deposited matter

○ traps at 15m, ▲ at 30m,  
■ at 110m.

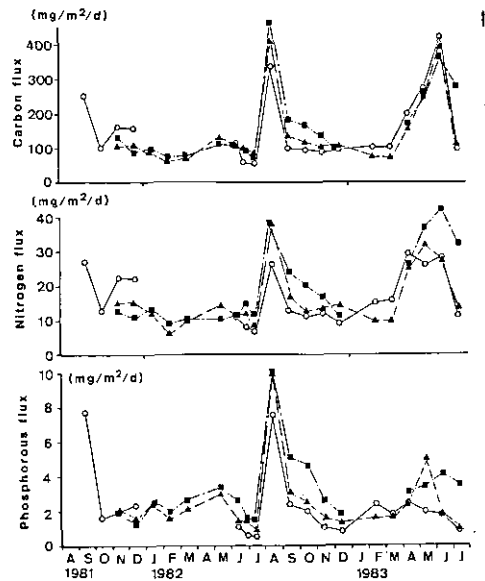


図 6 炭素、窒素、リンの沈降フラックスの変化

Fig. 6 Sedimentation fluxes for carbon, nitrogen, and phosphorus

○ traps at 15m, ▲ at 30m,  
■ at 110m.

次に図6には含量とセストンの沈降フラックスを乗ずることにより得られる炭素、窒素、リンの沈降フラックスを示す。ともに大降雨時の影響が大きいがリンで特に大きいことがわかる。炭素、窒素では1983年春のピークも大きく、1982年春に比べ2、3倍大きい。この直接的な原因はセストン、クロロフィルaの沈降フラックスが増加したことであるが、同一季節にクロロフィルaの現存量がほぼ同程度でセストン量が数倍異なり、さらに沈降フラックスが2、3倍変化することは興味深い。また炭素、窒素の沈降フラックスは水深によりあまり変化せず、リンでは下層の方が高い。

(4) 底泥の組成

図7にSt.1での底泥の炭素、窒素、リン、チタン含量の鉛直分布を示す。St.2では水深80mと浅く、また干手ヶ浜、菖蒲ヶ浜の流入河川と離れているせいもあってか、炭素、窒素、リン含量は1~5割程度St.1でのそれに比べ高く、チタン含量は少ないが、鉛直分布の傾向は似通っているため図示は行わない。図7によれば炭素、窒素、リン含量は10~12cm層まで減少して、それ以深で若干増加している。チタンでは逆の傾向が見られる。沈殿物の炭素、窒素、リン含量の最小である大降雨時の3%、0.3%、0.1%という数値より10cm以深では含量が少なくなっている。底泥中での分解なのかどうかは考察で論じる。

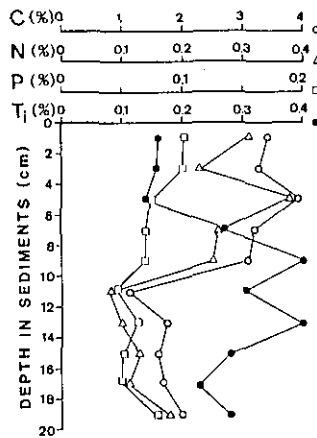


図 7 底泥での炭素、窒素、リン、チタンの鉛直分布

Fig. 7 Vertical profile of the contents of carbon, nitrogen, phosphorus, and titanium in sediments

4. 考 察

(1) 沈降フラックスと底泥での分解

表1(1)には欠測値の存在しない1982年1年間でのセストン、クロロフィルa、炭素、窒素、リンの30m、110mでの沈殿量をまとめる。またこの年の8、9月に大降雨が存在してその影響が大きいため、その影響の少ない7月と12月の各沈降フラックスの平均値より大きい部分をその影響と仮定して、大降雨時分(表中のB)と平常時分(表中のC)それぞれの沈殿量を示す。表1(2)には若干時期が異なるが、1982年6月から1983年5月における15m、30m水深での上述の値をまとめる。なお、中禅寺湖は平均水深が94.7mと深く、また沈殿物の内容のうち底泥巻き上げ物を分離同定することが困難なため以降の議論は底泥よりの巻き上げが無視しうるという仮定のもとに行う。表1によればまず大降雨の影響に関し以下のことがわかる。大降雨の影響が大きいものより並べれ

ばセストン、リン、炭素、窒素、クロロフィル *a* となり、セストンでは平常時分と同程度かそれ以上、クロロフィル *a* でも数%の影響を有している。クロロフィル *a* で大降雨の影響がでているのは 3.(2) に述べたように、この時期のその沈降速度が大きくなったことが原因している。炭素、窒素、リンの挙動の差については、3.(3) に述べたような大降雨時でもリン含量が他のものに比べ減少の度合いが少ないことが原因している。観測期間中の流入河川懸濁物の炭素、窒素、リン含量最小値は 130 mm の降雨中の 1982 年 4 月 15 日に生じ、湯川で SS-192 mg/l、炭素含量 6.6%、窒素含量 0.58%、リン含量 0.22%、外山沢川でそれぞれ 33.6 mg/l、0.52%、0.11%、0.08% であった。両河川の平均値が大降雨時の沈殿物の含量 3%、0.3%、0.1% と近い。すなわちリンでは土砂等に付着した成分が多く、降雨時の含量低下が少ないため大降雨の影響が大きくてたものと考えられる。また表 1 より大降雨の影響は下層ほど大きい。濁度の密度への影響は濁質の比重を砂等の 2.7 と見積もれば、1000 mg/l で 1.00063 程度となり 4°C と 13°C の密度差にほぼ等しい。1982 年 8、9 月の大降雨時の気温は 13°~17°C 程度であり、流入河川水温も同程度と見れば、躍層下の 4°C の水塊へ直接流入する濁水は初期混合を無視しても 1000 mg/l 以上の高濃度を有していたと考えられる。すなわち大降雨時分の 30 m と 110 m 水深でのセストン沈殿量の差は、このような高濃度濁水によるものと考えられるが、この差は大降雨時分全量の 1/3 程度である。残りのものは 0~30 m 層中に流入後、懸濁物質が沈降したのものと考えられる。なお中禅寺湖の表層での水平混合時間のスケールは、長さスケールを 5 km として水平拡散係数を  $4/3$  乗則<sup>7)</sup> ( $K_L = (0.01 \sim 0.09) L^{4/3}$ ,  $K_L$ : 水平拡散係数 (cm<sup>2</sup>/s),  $L$ : 長さスケール (cm)) より予測して計算すれば、0.8~7 日程度と求まる。このため平均水深が 94.7 m であるので、表層にはいった流入懸濁物の内で、沈降速度が 10 m/d 以上の成分は流入河川河口よりの距離によりその沈殿量が異なることが予想される。St. 1 と St. 2 での底泥組成の差は主にこうしたことが原因していると考えられる。

次に平常時分での各水深の沈殿量の差について論じる。平常時分とはいえ降雨の影響は当然のことながら入っている。15 m と 30 m 水深ではほとんど差がなく、30 m と 110 m 水深ではセストンで 1.23 倍、リンで 1.33 倍下層が大きくなっている以外は差は少ない。まず内部生産の指標であるクロロフィル *a* について考える。すなわち有先層は透明度の 2 倍として 20~25 m 程度であるため 30 m 以深での生産量は極めて小さいことが予想される。またクロロフィル *a* 負荷の大きい河川としては湯川があげられるが、この平均濃度は  $7.25 \pm 6.53 \mu\text{g/l}$  (土の値は標準偏差) であり、流量を  $48.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ <sup>6)</sup> とすれば単位面積当たりの供給量は  $0.029 \text{ g/m}^2\text{y}$  と計算され、平常時のクロロフィル *a* 沈殿量の 1/10 以下である。このため沈殿物として得られたクロロフィル *a* の大部分は中禅寺湖の表層で生産されたものといえよう。30 m 水深と 110 m 水深でほとんど沈殿量に変化しないことは、この間の沈降過程でクロロフィル *a* はフェオフィチン *a* に分解されるがそれ以上には分解が進まないことを示しているといえる。図 4 によれば 4、5 月という成層初期並びに 11 月に上層での沈殿量が極めて大きくなるが、他の時期では下層の方が若干多く、年間を通しては同程度になっている。

次に炭素、窒素の沈降過程での分解について考えてみる。生産量には 1982 年 6 月に  $25 \text{ mgC/m}^2 \cdot$



表 1 セストン, クロロフィル $a$ , 炭素, 窒素, リンの年間沈降水量

Table 1 The annual amounts of sedimentation for seston, chlorophyll- $a$ , carbon, nitrogen, phosphorus

(1) 30 m水深と 110 m水深の比較 (1982 年)

(1) Comparison of deposited matter at 30m and 110m depth

Sedimentation flux (g/m <sup>2</sup> y)	A. Total (Jan.-Dec., 1982)			B. Amount effected by rainfall of Aug. and Sep., 1982		C. Residual (A-B)		D. B/C	
	30 m	110 m	110 m/30 m	30 m	110 m	30 m	110 m	30 m	110 m
Seston	917	1241	1.35	522	756	395	485	1.32	1.56
Chlorophyll- $a$	0.543	0.583	1.08	0.062	0.050	0.481	0.533	0.13	0.09
Carbon	47.6	52.6	1.11	13.9	19.3	33.7	33.3	0.41	0.58
Nitrogen	5.37	5.82	1.08	1.17	1.75	4.20	4.07	0.28	0.43
Phosphorous	1.03	1.31	1.27	0.43	0.51	0.60	0.80	0.72	0.64

(2) 15 m水深と 30 m水深の比較 (1982 年 7 月~1983 年 6 月)

(2) Comparison of deposited matter at 15m and 30m depth

Sedimentation flux (g/m <sup>2</sup> y)	A. Total (Jul., 1982-Jun., 1983)			B. Amount effected by rainfall of Aug. and Sep., 1982		C. Residual (A-B)		D. B/C	
	15 m	30 m	30 m/15 m	15 m	30 m	15 m	30 m	15 m	30 m
Seston	925	1062	1.14	394	522	541	540	0.73	0.97
Chlorophyll- $a$	0.851	0.927	1.09	0.017	0.062	0.834	0.865	0.02	0.07
Carbon	60.7	60.9	1.00	10.6	13.9	50.1	47.0	0.21	0.30
Nitrogen	6.37	6.79	1.07	0.99	1.17	5.38	5.62	0.18	0.21
Phosphorous	0.851	1.03	1.21	0.34	0.43	0.51	0.60	0.67	0.72

h の測定値があるが<sup>9)</sup>, 藻類の組成, 現存量, 水温等の影響があるため年間値としては参考にならない。表 1 (1) より平常時分の炭素, 窒素の沈殿量は 30 m と 110 m でほぼ等しいか若干下層で少なくなっている。大降雨時分では 110 m の方が 30 m より 1.5 倍以上も多い。平常時にも降雨による流入懸濁物の影響が存在するため, 内部生産された物質に限れば下層の沈殿量がさらに小さく, すなわち沈降過程での分解が予想される。なお 1982 年 1 か年でのセストンの 110 m/30 m 沈殿量比は 1.35 であるのに対し炭素, 窒素のそれは 1.11, 1.08 である。炭素, 窒素もセストンと同じく 1.35 倍だけ下層に多く供給されると仮定しても, 沈降過程での分解量の予想最大量は供給量の  $\frac{1}{4}$  程度である。湖水中セストンの炭素/クロロフィル  $a$  比が平均として 80~116 と高く, またクロロフィル  $a$ /SS 比 (SS はセストンの乾燥重量) が  $0.5 \times 10^{-3}$  程度と植物プランクトンのそれに比べ低いことより, セストンに占める流入懸濁物の割合が大きいたことが予想されるが<sup>9)</sup>, このことが上下層で炭素, 窒素沈

殿量あまり変化しない原因を生じていると考えられる。

最後に底泥での分解の問題を考える。1982年1年間で110 m水深の沈殿物の平均含量は炭素4.2%、窒素0.47%、リン0.11%であるのに対し、St. 1の底泥0~2 cmではそれぞれ3.4%、0.31%、0.11%である。リンでは同程度で炭素で約20%、窒素で約34%減少している。また図7に示されるように炭素、窒素で特に0~10 cm間で含量が低下している。以上のような事実が底泥での分解を示すものかを検討する。まずセストン、沈殿物、底泥表層の炭素/窒素比(C/N比)を考える。セストンのC/N比は観測期間中の全平均として20 m水深で $7.4 \pm 1.5$ 、100 m水深で $7.8 \pm 1.1$ となる。沈殿物のC/N比は30 m水深で1982年1年間の平均として8.86、大降雨時11.8、平常時8.02、110 m水深でそれぞれ9.04、11.0、8.20となる。底泥の0~2 cm層では11.1、0~10 cmの平均として12.2が得られる。C/N比がセストン、沈殿物、底泥の順番で増加することは多くの湖沼で報告されていて<sup>5,10)</sup>、沈降過程あるいは底泥上での有機物の分解現象として説明されている。中禅寺湖でも同様な傾向を有するが、沈殿物の30 m、110 m水深での差が少なく、また変化が沈殿物と底泥間で大きい点が注目される。大降雨時に下層にC/N比の高い流入河川懸濁物が流入することを考慮しても底泥のC/N比はさらに高いため、底泥上で有機物の分解が生じていることは間違いないと考えられる。次に図8には成層期におけるDOの鉛直分布を示す。表層で低く、躍層下で最大を有し、150 m水深で若干減少する傾向が見られる。躍層下から表層へのフラックスが存在するため、沈降過程で一様な分解が生じることと底泥で分解が生じないことを仮定すると、150 m水深でDOは50、100 m水深に比べ増加しなければならない。このため150 m水深でのDO低下には底泥での分解が必要となる。また $\text{NO}_3^- - \text{N}$ は成層期に下層で高く、時間とともに増加している<sup>6)</sup>。DO、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ の鉛直濃度分布の時間的変化より底泥での分解速度を推定するためには、躍層面及びその下層での鉛直拡散係数、流入河川の流入位置等の情報が必要となり現状ではその推定が行えないが、しかしこれらの事実は底泥での分解を示す傍証といえる。このため最初に述べた沈殿物と底泥の含量差より分解量の概算を行う。110 mの年間沈殿量 $1241 \text{ g/m}^2 \cdot \text{y}$ は底泥の比重を1.02、含水率を80%として、年間堆積量に変換すると $0.61 \text{ cm/y}$ となる。木崎湖では窒素含量の底泥表層(0~12 cm)での鉛直分布をもとに長期的な分解量を算出しているが<sup>10)</sup>、中禅寺湖においては近年における水質悪化が問題となっていて、10~20年以前から沈殿物の組成が一定である保証はない。この点を考慮して底泥0~2 cmと沈殿物の組成差より、堆積初期(約3年間)での分解量を求めてみると、炭素 $9.9 \text{ g/m}^2 \cdot \text{y}$  ( $27.1 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ )、窒素 $2.0 \text{ g/m}^2 \cdot \text{y}$  ( $5.4 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ )、リンはゼロとなる。中栄養湖で水深30 mの木崎湖では湖底堆積後1年数か月間で炭素 $65 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ 、窒素 $26 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ と報告されているが<sup>10)</sup>、先の値はその数分の1の大きさである。また水深42 mのEnnerdale Water、水深76 mのWastwaterという二つの貧栄養湖における底層での炭素沈殿量と底泥の炭素堆積量(底泥の堆積速度は<sup>13</sup>Csの分布より推定)より、それぞれ $27.9 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ 、 $35.9 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ の炭素の分解回帰量が推定されているが<sup>9)</sup>、この値は先の値とほぼ等しい。底泥表層での炭素、窒素含量はそれぞれ木崎湖5.0%、0.48%、Ennerdale Water 8.7%、0.6%、Wastwater 8.93%、0.55%と中禅寺湖に

比べ高く内部生産された有機物の割合が高いことを示すが、分解量のオーダーとしては先の値程度の値を有するのではないかと考えられる。なお炭素  $27.1 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ 、窒素  $5.4 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$  という値は  $\text{CO}_2$ 、 $\text{NO}_3^-$  までの酸化を考えると酸素要求量として約  $0.1 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$  となり、50 m 以深 100 m の水塊に成層期間 250 日間で消費される DO の量は  $0.25 \text{ mg/l}$  と予測される。同様に  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  の増加予測量は約  $13 \mu\text{g/l}$  となり、両者とも DO、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  の鉛直分布の変化とほぼ対応した数値であることがわかる<sup>9)</sup>。

(2) 沈降速度

沈降フラックスを現存量で割り沈降速度を算出した。現存量の変動は特に大降雨時等に大きいことが予想されるため以降の図では 1982 年 8、9 月の値を分けて示す。まず図 9 にはセストン、クロロフィル a の 30 m、110 m 水深での沈降速度の頻度分布を示す(現存量としてはそれぞれ 20 m、100 m 水深での値を用いた)。1982 年 1 年間の全沈殿量を現存量年平均値で割ることにより得られる年平均の沈降速度としてはセストンで 30 m、 $2.32 \text{ m/d}$ 、110 m、 $2.56 \text{ m/d}$  となり、クロロフィル a で 30 m、 $0.67 \text{ m/d}$ 、110 m、 $1.19 \text{ m/d}$  となっている。水深の増加とともに沈降速度は増加するが、特にクロロフィル a では沈降フラックスが同程度なのに対し、観測全期間の平均現存量が 20 m で

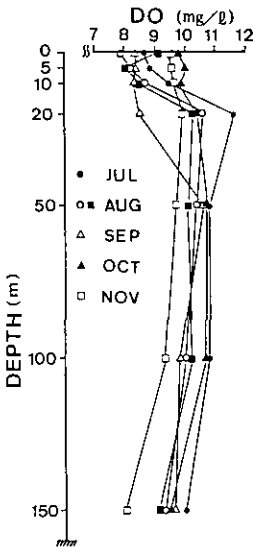


図 8 成層期の DO の鉛直分布  
Fig. 8 Vertical profile of dissolved oxygen in lake water for stratified period

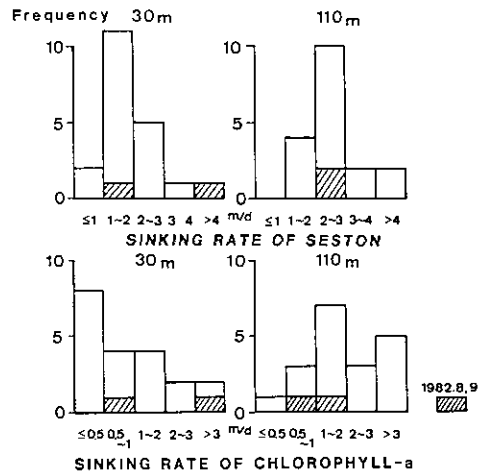


図 9 セストン、クロロフィル a の沈降速度の頻度分布  
Fig. 9 Frequency distribution of sinking rates for seston and chlorophyll-a

2.05±1.10 μg/l, 100 mで1.41±1.36 μg/lであることが原因している。同一物質で水深により沈降速度が異なること、図9に見られるように同一水深、同一物質でも数倍も沈降速度が変化すること、同一季節でも年較差を有していること等が興味深い。

ここでは以上の問題点を考察するために、以下のような関係を調べた。図10にはセストンの沈降速度 ( $U_{ss}$ ) とクロロフィル a の沈降速度 ( $U_{Chla}$ ) の相関を示す。図11にはセストンのクロロフィル a/SS比 (Chla/SS) と  $U_{ss}$  の相関を、図12には Chla/SS と  $U_{Chla}$  の相関を示す。図10によれば  $U_{ss}$  と  $U_{Chla}$  の相関がかなりよいことがわかる。また図11, 12より Chla/SS の増加とともに  $U_{ss}$ ,  $U_{Chla}$  が減少する傾向が見られ、特に  $U_{Chla}$  ではその傾向が明白である。Chla/SS の増加により  $U_{ss}$  が増加するのは、内部生産された藻体等に比べ早い沈降速度を有する流入懸濁物の影響と考えられる。 $U_{ss}$  と  $U_{Chla}$  の相関, Chla/SS と  $U_{Chla}$  の逆相関には、凝集化による共沈あるいはクロロフィル a 含量低下によって活性が低下し沈降速度が増加する等のメカニズムが考えられる。後者に関して Smayda は淡水性のケイ藻である *Asterionella formosa* と *Tabellaria flocculosa* の沈降速度を報告しているが、*Asterionella formosa* は増殖期に 0.3 m/d 程度、定常期に 0.5 m/d 程度を有し、また生きた細胞と熱処理等で死んだ細胞では *Asterionella formosa* で 1.3 倍、*Tabellaria flocculosa* で 3 倍も死んだ細胞の方が沈降速度が大きく、生理的条件の影響を論じている<sup>11)</sup>。同様な報告は Titman and Kilham も行っていて、*Asterionella formosa* で増殖期に 0.20±0.06 m/d、定常期に 1.48±1.05 m/d、*Melosia aqassizii* で増殖期に 0.67±0.48 m/d、定常期に 1.87±0.38 m/d を示している<sup>12)</sup>。中禅寺湖でも上述のようなケイ藻が卓越する期間が多いため、上層では活性が高く沈降速度が遅く、下層で活性が下がり沈降速度が早くなる現象が存在する可能性が強い。また同一水深でも藻類の活性に Chla/SS 比が関係していることが考えられる。

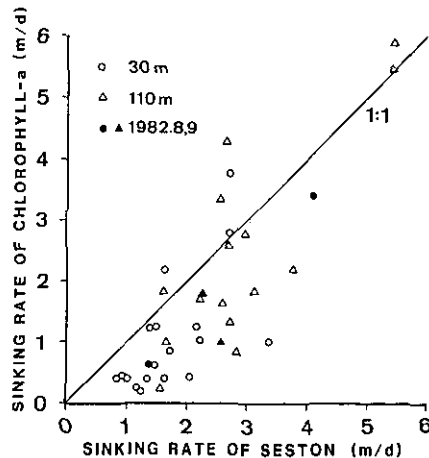


図 10 セストンとクロロフィル a の沈降速度の関係

Fig. 10 Relation between sinking rate of seston and sinking rate of chlorophyll-a

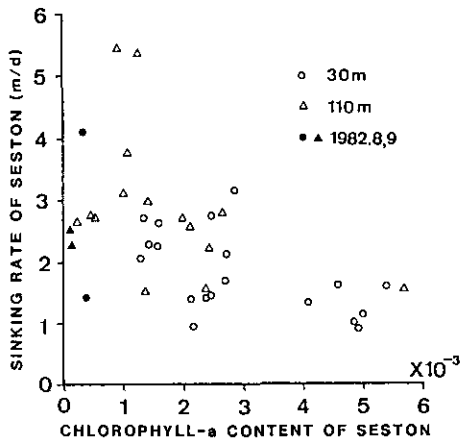


図 11 クロロフィルa/SS比とセストンの沈降速度の関係

Fig. 11 Relation between chlorophyll-a content of seston and sinking rate of seston

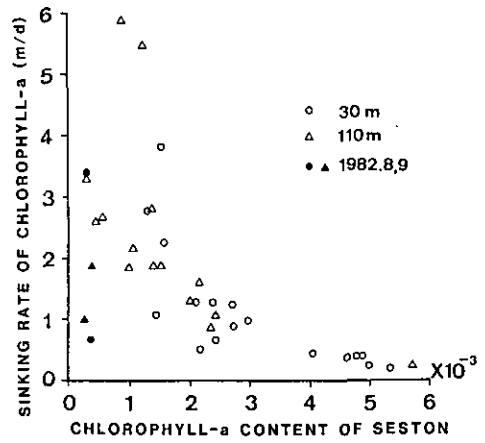


図 12 クロロフィルa/SS比とクロロフィルaの沈降速度の関係

Fig. 12 Relation between chlorophyll-a content of seston and sinking rate of chlorophyll-a

最後に図 13 には炭素、窒素、クロロフィル a のセストン中の含量と沈殿物中の含量の関係を示す。この比はセストンの沈降速度とそれぞれの物質の沈降速度の比にもなっている。この図よりセストンより沈殿物の方がこれらの含量が少なく、炭素、窒素では 1/3~1/2 程度、クロロフィル a ではセストン中の含量が低いときに同程度であったものが、それが高くなっても沈殿物の含量はあまり増加しないなどの特性を有することがわかる。このような現象を説明するものとしては炭素、窒素、クロロフィル a 含量の大きいものほど沈降速度が小さい、沈殿びん中での分解等があげられる。しかし後者に関しては、(1)の考察より 1 か月の期間に沈殿びん中の炭素、窒素の半分以上が分解されるとは考えられない。このため前者の説明が適当と考えられ、有機物を多く含むセストンのほうが、流入河川により流入する有機物含量の少ない懸濁物質よりゆっくりと沈降するといえよう。なお水表面から底泥に到達するまでの時間は水深を 163 m として、全セストンで約 2 か月、藻体で約 4 か月となる。藻体では沈降過程での分解が存在する可能性が大きいといえよう。

## 5. 結論

最大水深が 162 m であり貧栄養湖の代表的存在といえる中禅寺湖で、約 2 か年にわたり沈降物質に関する調査を行った結果を報告した。得られた成果をまとめれば以下になる。

1) 中禅寺湖下層(110 m 水深)での年間沈殿量はセストン 1241 g/m<sup>2</sup>・y, クロロフィル a 0.583 g/m<sup>2</sup>・y, 炭素 52.6 g/m<sup>2</sup>・y, 窒素 5.82 g/m<sup>2</sup>・y, リン 1.27 g/m<sup>2</sup>・y であった。

2) 大降雨時(2 か月で 1500 mm 以上)の沈殿量の増加は極めて大きく、年間沈殿量の平常時分

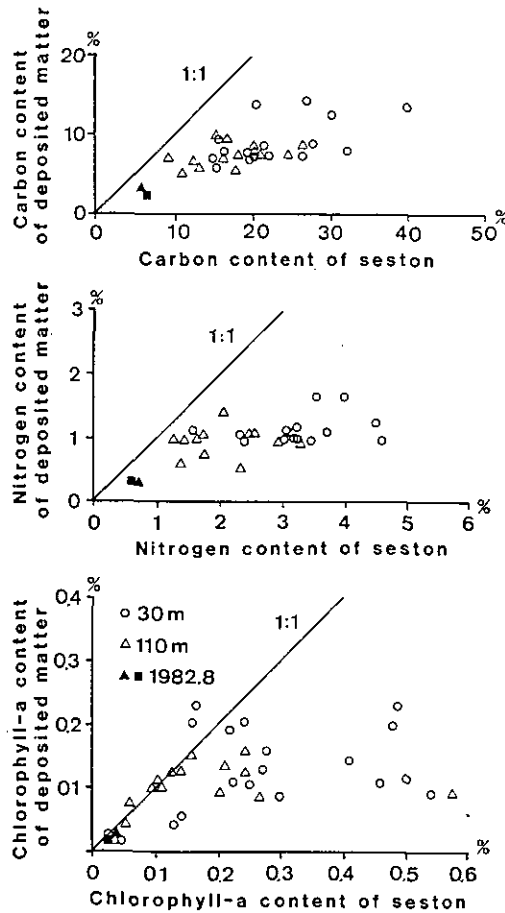


図 13 炭素、窒素、クロロフィルaのセストン中の含量と沈降物中の含量の関係

Fig. 13 Relation between the contents in seston and the contents in deposited matter for carbon, nitrogen, and chlorophyll-a

と比較してセストンでは1.5倍、リンでは7割、炭素、窒素では5割、クロロフィルaでも沈降速度の増加により1割程度の割合を有することがわかった。

3) 30 m水深と110 m水深での沈殿量の比較より、クロロフィルaは分解されてもフェオ色素の段階まで、炭素、窒素では最大に見積もっても全沈殿物の1/4以下しか沈降過程で分解されることがわかった。これは中禅寺湖における流入懸濁物の比率が高いことに起因していて、内部生産された藻体については分解の可能性が存在する。また底泥組成と沈殿物組成の差より底泥上での数年での分解速度を推定し、炭素  $27.1 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ 、窒素  $5.4 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ 、リンゼロの結果を得た。底泥での分解は成層期における底泥近くでのDOの低下、下層での  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  増加の特性を説明する。

4) セストンの沈降速度は  $2.5 \text{ m/d}$  程度、クロロフィルaの沈降速度は30 mで  $0.67 \text{ m/d}$ 、110 m

で 1.19 m/d と下層の方が大きいことを示した。また両者の間には相関があること、Chl $a$ /SS 比とセストン、クロロフィル  $a$  の沈降速度には逆相関の関係があることを明らかにした。最後に炭素、窒素、クロロフィル  $a$  含量の大きい懸濁物は小さいものに比べ沈降速度が小さいことを示した。

#### 引用文献

- 1) Gardner, W. D. (1980) : Sediment trap dynamics and calibration; a laboratory evaluation. *J. Marine Res.*, **38**, 17-39.
- 2) Blomqvist, S. and L. Hankanson (1981) : A review on sediment traps in aquatic Environments. *Arch. Hydrobiol.*, **91**, 101-132.
- 3) Bloesch, J. *et al.* (1977) : Primary production, mineralization, and sedimentation in the euphotic zone of two Swiss Lakes. *Limnol. Oceanogr.*, **22**, 511-526.
- 4) Bloesch, J. and R.D. Evans (1982) : Lead-210 dating of sediments compared with accumulation rates estimated by natural markers and measured with sediment traps. *Hydrobiologia*, **92**, 579-586.
- 5) Pennington, W. (1974) : Seston and sediment formation in five lake district lakes. *J. Ecol.*, **62**, 215-251.
- 6) 相崎他 (1983) : 中禅寺湖における栄養塩の収支, 第 17 回水質汚濁学会講演集, 219-224.
- 7) 首藤伸夫 (1970) : 湾内拡散, 土木学会水理委員会, 水工学シリーズ, 70-03, 1-26.
- 8) 相崎守弘 (私信)
- 9) Strickland, J.D.H. (1965) : Production of organic matter in the primary stages of the marine food chain. in *Chemical Oceanography 1*, Academic press, 477-619.
- 10) Koyama, T., K. Matsunaga and T. Tomino (1975) : Geochemical studies on the cycle of carbon and nitrogen in a mesotrophic lake. *JIBP Synthesis*, **12**, 115-123.
- 11) Smayda T. J. (1974) : Some experiments on the sinking characteristics of two freshwater diatoms. *Limnol. Oceanogr.*, **19**, 628-635.
- 12) Titman, D. and P. Kilham (1976) : Sinking in freshwater phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.*, **21**, 409-417.

## II-4

# 中禅寺湖における植物プランクトン及び動物プランクトンの季節変化 Seasonal Successions of Phytoplankton and Zooplankton in Lake Chuzenji

小山次朗<sup>1</sup>・福田訓真<sup>1</sup>

Jiro KOYAMA<sup>1</sup> and Kunimasa FUKUDA<sup>1</sup>

### Abstract

The Seasonal succession of phytoplankton and zooplankton were studied in Lake Chuzenji from April to December 1982 in the former and from October 1981 to December 1982 in the latter.

The dominant species of the phytoplankton were *Cyclotella* sp. in spring, *Uroglena americana* in early summer, *Spherozystis sphroteri* and *Schroederia judyi* in summer and *Asterionella formosa* and *Fragilaria crotonensis* in autumn.

For the zooplankton, the dominant species were *Kellicottira longispina* from autumn 1981 to spring 1982, *Acanthodiptomus pacificus* and *Daphnia longispina* in early summer 1982 and *Ceratium hirundenella* in summer 1982.

### 1. はじめに

中禅寺湖は1930年7月に透明度18.5mを記録しており、かつては代表的な貧栄養湖であった。しかし近年(1972~1982年)その値は各年平均値で7~10mと著しく低下しており、1972年9月には3.3mという値が記録されている。また、1981年6月には中禅寺湖の湖水を取水している中宮祠地区上水道で異臭が発生したこと等により、中禅寺湖の富栄養化が懸念される場所である。

富栄養化で常に問題となるプランクトンについての資料は中禅寺湖に関して少なく、さらに継続的に実施した調査はごくわずかである<sup>1-6)</sup>。本調査結果は1981年10月から1982年12月のデータである。

### 2. 調査方法

#### (1) 植物プランクトン

---

1. 昭和57年度 国立公害研究所共同研究員(栃木県公害研究所 〒320 宇都宮市桜2丁目2-28)  
Research Collaborator of the National Institute for Environmental Studies, Present Address: The  
Tochigi Prefectural Institute for Environmental Pollution, Sakura 2-2-28, Utsunomiya City, Tochigi  
320, Japan.



植物プランクトンは1982年4月から12月まで毎月1回1地点(図1 St.2, ただし1982年6月15日はSt.1)の水深5 mで採水し, ルゴール液又はホルマリンで固定した。この試水100 mlをメスシリンダーにとり, 半日から1日放置してプランクトンを沈殿させて5倍濃縮し, そのうちの10 mlを分離円筒型沈殿スライドグラス<sup>7)</sup>にとり, これをさらに半日から1日静置し, その底面に沈殿したプランクトンについて倒立型顕微鏡で同定及び計数を行い, 1 ml当たりの個体数を算出した。結果のとりまとめに際して, St.1とSt.2を同一に扱った。

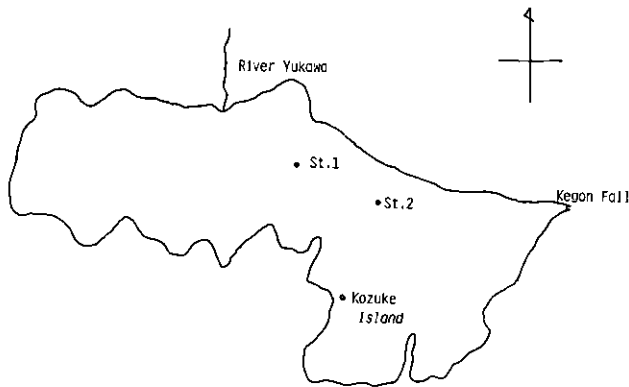


図 1 調査地点

Fig. 1 Map of Lake Chuzenji and Location of Stations

## (2) 動物プランクトン

動物プランクトンは1981年10月から1982年12月まで毎月1~2回1地点(図1 St.1)でNXX13のプランクトンネットを用い水深0~30 mの垂直引きして得られたものをホルマリン固定した。さらにこれを静置沈殿させた後10~50 mlに濃縮し, このうち1 ml分取し顕微鏡下で同定及び計数を行い1 m<sup>3</sup>当たりの個体数を算出した。

## 3. 結果及び考察

### (1) 植物プランクトン

植物プランクトンは, 春季の4月及び秋季の10, 11月にケイ藻が優占し, 5月から7月に黄色ペン毛藻が, 夏季の8, 9月に緑藻が優占していた。植物プランクトンの出現種類数及び出現個体数の変化は図2に示すとおりである。出現種類数は6~12種類で, 夏季に少なく, 春季及び秋季に多くなっており, 全出現種は22種類であった。出現種類の内訳はケイ藻が15種を占め, 緑藻が5種, 黄色ペン毛藻2種で, ラン藻は出現しなかった。個体数は290~2800個体/mlと大きく変化し, 4月, 9月に多く, 9月に最多値を示した。

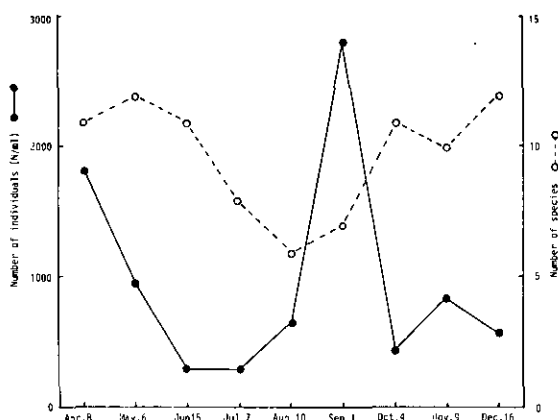


図 2 中禅寺湖における植物プランクトンの季節変動  
 Fig. 2 Seasonal changes of phytoplankton in Lake Chuzenji

植物プランクトンの優占種の変化は表 1 に示すとおりである。4 月は *Cyclotella* sp., 5～7 月は *Uroglena americana*, 8 月は *Sphroederia judayi* が優占し, 9 月は *Sphaerocystis schroteri* が出現個体の 92% を占め, 調査期間中の最多個体数を示した。10 月は *Asterionella formosa*, 11 月は *Fragilaria crotonensis* が優占した。12 月は再び *U. americana* が優占した。

表 1 中禅寺湖における植物プランクトン優占種の季節変化  
 Table 1 Seasonal changes of the dominant species of the phytoplankton in Lake Chuzenji

		dominant species	(%)	Number of individuals (N/ml)
1982	Apr. 8	<i>Cyclotella</i> sp.	77.0	1400
	May 6	<i>Uroglena americana</i>	50.8	480
	Jun. 15	<i>Uroglena americana</i>	71.4	210
	Jul. 7	<i>Uroglena americana</i>	62.4	190
	Aug. 10	<i>Schroederia Judayi</i>	44.3	330
	Sep. 1	<i>Sphaerocystis schroteri</i>	92.0	2600
	Oct. 4	<i>Asterionella formosa</i>	44.9	190
	Nov. 9	<i>Fragilaria crotonensis</i>	63.8	540
	Dec. 16	<i>Uroglena americana</i>	59.0	350

主な植物プランクトンの季節変化は図 3 に示すとおりである。ケイ藻のうち, *Cyclotella* sp. は 4 月に, *Cyclotella meneghiniana* は 4, 5 月に, *Nitzschia* sp. は 4～6 月の春季に多く出現している。これらのプランクトンは秋季には出現しないか, 出現してもごくわずかである。*Asterionella*

*formosa* は7月を除いて出現しているが、8月及び10月に多い。また *Fragilaria crotonensis* は9月及び11月の秋季に多く出現している。緑藻の *Sphaerocystis schroteri* は夏季出現し、特に9月には2600個体/mlと植物プランクトン中最多の出現数及び占有率(92%)を示した。*Schroederia judayi* は夏季8月に多く出現し、10月にも少量出現している。

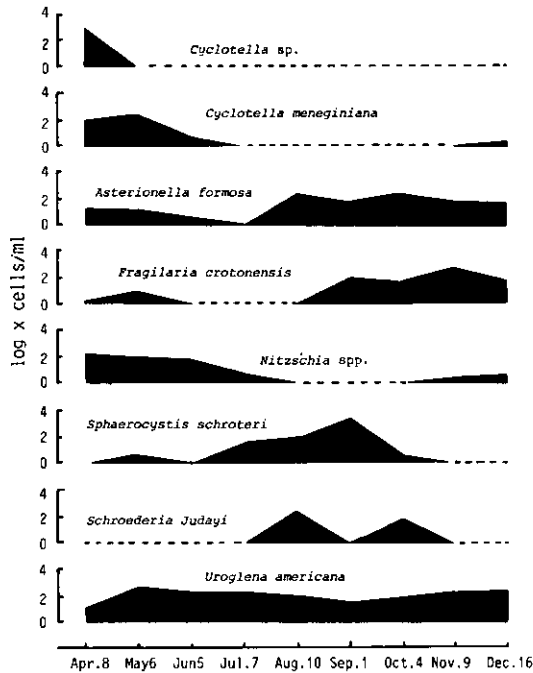


図 3 中禅寺湖における主な植物プランクトンの季節変動

Fig. 3 Seasonal succession of the dominant members of the phytoplankton in Lake Chuzenji

黄色ペン毛藻の *Uroglena americana* は、近年琵琶湖の淡水赤潮プランクトンとして話題になっているプランクトンであるが、中禅寺湖でも出現しており5～7月に占有率が50%を超え優占種になっている。この時期は春季出現したケイ藻の *Cyclotella* sp.等が減少し、夏季の緑藻 *Sphaerocystis schroteri* 等の増加の端境期に当たり、また水温の上昇等 *U. americana* の発生条件が満たされるため、増加するものと考えられる。ところで1981年6月、相崎らは *U. americana* の淡水赤潮状態を確認しており<sup>9)</sup>、またこの時期水道水の異臭が発生している。今後も環境条件が整えば同様な状態が再発する可能性がある。また、琵琶湖でも同様な水道水の異臭の報告があり、小清水らはウログレナ赤潮の臭気の主成分としてトリメチルアミン、メチルメルカプタンとジメチルサルファイドを検

出している<sup>9)</sup>。中禅寺湖の水道水の異臭の原因も *U. americana* によるのではないかと考えられる。*U. americana* は調査期間中、個体数が著しく減少する時期はあるものの4~12月のすべての時期出現しており、周年中禅寺湖に出現する可能性がある。

1931年及び1932年上野が行った中禅寺湖植物プランクトン調査<sup>9)</sup> (Nannoplanktonを除いてあると考えられる) では6, 7, 10月とも *A. formosa* が多く、6月には *Melosira granulata* が多く認められた。また1971年橋爪が行った調査<sup>2)</sup> によると5月に *Ankistrodesmus convolata* が優占し、7月には目立った種がなく、10, 12月には *F. crotonensis* 及び *A. formosa* が優占しており、個体数は17~2030個体/mlと著しく変化した。本報の1982年の結果では *Ankistrodesmus* 属は年間を通じて数個体しか認められず、また夏季の総個体数は *S. schroteri* 及び *S. judayi* の出現により300~2800個体/mlで変化し、橋爪の報告<sup>2)</sup> している7月の総個体数17個体/mlより著しく多い値となっている。

## (2) 動物プランクトン

動物プランクトンの優占種の変化は表2に示すとおりである。動物プランクトンは秋季から春季にかけてわむし類の *Kellicottia longispina* が優占し、初夏に枝角類の *Daphnia longispina* 及びかいあし類の *Acanthodiptomus pacificus* が優占し、夏季から秋季に原生動物の *Ceratium hirundenella* が多数出現した。

動物プランクトンの出現種類数及び出現個体数の変化は図4に示すとおりである。全出現種類数は26種類であった。個体数は2,400~290,000個体/m<sup>3</sup>と大きく変動し、夏季9月に *Ceratium hirundenella* が出現し最多値を示し、秋季から春季に出現した *Kellicottia longispina* が減少した5月に最少値を示した。

主な動物プランクトンの季節変化は図5に示すとおりである。わむし類の *Kellicottia longispina* は秋季から翌年の春季にかけて多数出現し、最多数は1981年10月の7,400個体/m<sup>3</sup>であった。この時期は *Ceratium hirundenella* が減少する時期であり、約50%の占有率を占めたが、夏季は激減した。

枝角類の *Daphnia longispina* は夏季増加し8月に最多の18000個体/m<sup>3</sup>を示し、秋季から冬季に減少し、湖の循環期4月に最少値を示した。

かいあし類の *Acanthodiptomus pacificus* も *Daphnia longispina* とほぼ同様な年変化を示すが、増加し始めるのが *D. longispina* よりやや早く、5, 6月に優占種となっており、Copepodid及びNaupliusを含めると *D. longispina* とほぼ同数出現している。

わむし類の *Keratella quadrata* は1981年10月から1982年4月まで、ほとんど出現していなかったが、5月以後増加し9月から12月にかけて4,500~5,500個体/m<sup>3</sup>が出現しており、1981年10月~12月と1982年の同月とでは様相を異にしていた。

渦ベン毛藻の *Ceratium hirundenella* は夏季に増加し始め9月に260,000個体/m<sup>3</sup>と最多になり、

表 2 中禅寺湖における動物プランクトン優占種の季節変化

Table 2 Seasonal changes of the dominant species of the zooplankton in Lake Chuzenji

		dominant species	(%)	number of individuals (O/m <sup>3</sup> )
1981	Oct. 20	<i>Ceratium hirundenella</i>	45.1	67000
	Nov. 18	<i>kellicottia longispina</i>	93.4	74000
	Dec. 15	<i>kellicottia longispina</i>	97.4	72000
1982	Jan. 18	<i>Kellicottia longispina</i>	94.5	49000
	Feb. 18	<i>Kellicottia longispina</i>	95.6	64000
	Mar. 16	<i>Kellicottia longispina</i>	94.9	33000
	Apr. 8	<i>Kellicottia longispina</i>	91.4	2600
	May 6	<i>Nauplius</i>	31.6	760
	Jun. 2	<i>Acanthodiptomus pacificus</i>	50.6	1400
	15	<i>Daphnia longispina</i>	53.0	2100
	Jul. 7	<i>Daphnia longispina</i>	34.5	7500
	Aug. 19	<i>Ceratium hirundenella</i>	46.3	27000
	Sep. 1	<i>Ceratium hirundenella</i>	85.1	140000
	16	<i>Ceratium hirundenella</i>	90.9	270000
	Oct. 20	<i>Kellicottia longispina</i>	54.4	31000
	Nov. 11	<i>Kellicottia longispina</i>	68.4	29000
	Dec. 16	<i>Kellicottia longispina</i>	81.5	67000

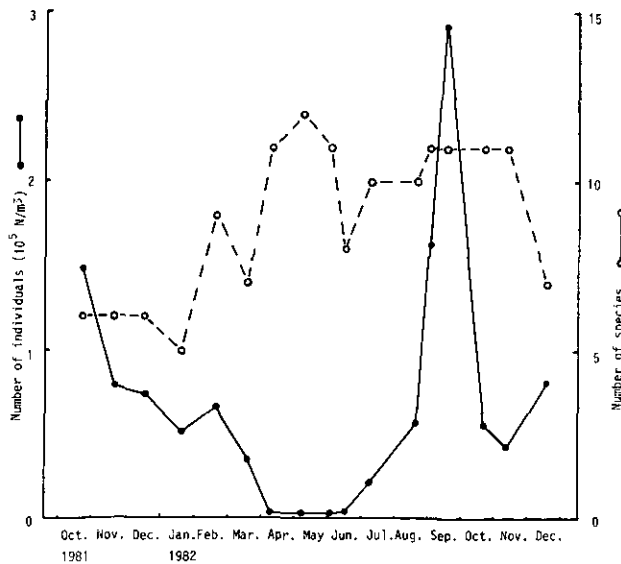


図 4 中禅寺湖における動物プランクトンの季節変動

Fig. 4 Seasonal changes of zooplankton in Lake Chuzenji

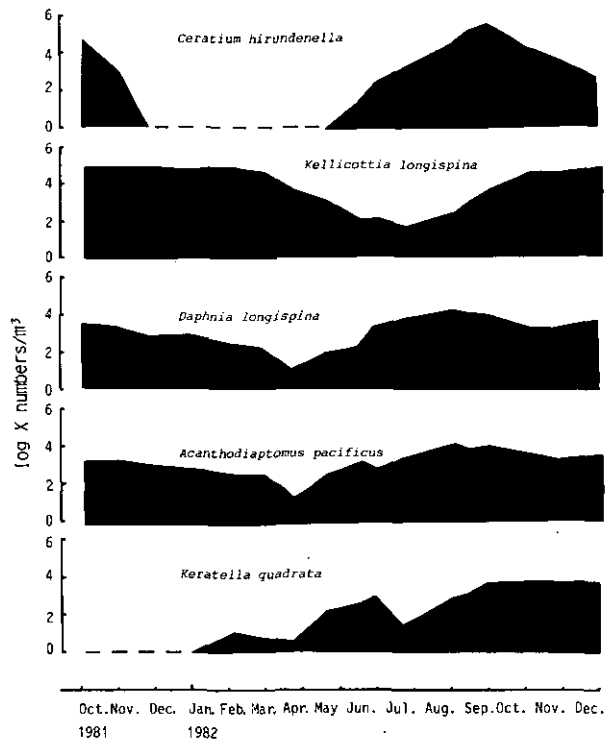


図 5 中禅寺湖における主な動物プランクトンの季節変動

Fig. 5 Seasonal succession of the dominant members of the zooplankton in Lake Chuzenji

90%以上の高い占有率を示した。冬季から春季は激減し、1981年12月から1982年5月の期間は出現しなかった。他の種類の出現数は、ごく少なかった。

優占した動物プランクトンのいずれも汚染されていない水域の代表種であり<sup>10)</sup>、中禅寺湖は貧栄養ないし中栄養の段階にあると考えられた。

#### 4. まとめ

中禅寺湖において、植物プランクトンについては1982年4月から12月まで、動物プランクトンについては1981年10月から1982年12月まで季節変動の調査を行った。

植物プランクトンの優占種は春季がケイ藻の *Cyclotella* sp., 初夏が黄色ペン毛藻の *Uroglena americana*, 夏季が *Sphaerocystis schroteri* 及び *Schroederia judayi*, 秋季が *Asterionella formosa* 及び *Fragilaria crotonensis* であった。

動物プランクトンの優占種は秋季から春季にわむし類の *Kellicottia longispina* が優占し、初夏に

かいあし類の *Acanthodiptomus pacificus* 及び枝角類の *Daphnia longispina* が優占し、夏季に *Ceratium hirundenella* が優占した。

最後に、この研究を進めるに当たって、プランクトンの同定、計数に際しては、国立公害研究所生物環境部水生生物生態研究室 高村典子先生、花里孝幸先生及び同所水質土壌環境部水質環境計画研究室 相崎守弘先生に御指導いただいた。また試料の採取に当たっては国立公害研究所水質環境計画研究室の方々の協力を得た。記して謝意を表する。

## 引用文献

- 1) 生田美和子 (1975) : 関東地方の湖沼, 「日本湖沼の診断」(津田松苗編), p.95—97, 共立出版, 東京.
- 2) 橋爪健一郎 (1975) : 国立公園内湖沼の植物プランクトン調査結果 (I) 関東近縁 10 湖沼 (その 1), 用水と廃水, **17**, 736—753.
- 3) 橋爪健一郎 (1975) : 国立公園内湖沼の植物プランクトン調査結果 (I) 関東近縁 10 湖沼 (その 2), 用水と廃水, **17**, 879—885.
- 4) 上野益三 (1936) : 日光の湖沼のプランクトン, 「日光の植物と動物」(東照宮編) p.577—620, 養賢堂, 東京.
- 5) 田中正明 (1977) : プランクトンからみた本邦湖沼の富栄養化の現状(7)関東地方の湖沼(3), 水, **19**, 74—81.
- 6) 金子光美・国包章一・橋爪健一郎 (1981) : 国立公園内湖沼の水質汚濁の現況(2), 用水と廃水, **23**, 665—673.
- 7) 小島貞男 (1982) : 生物調査, 「湖沼環境調査指針」(日本水質汚濁研究協会編), p.168—171, 公害対策技術同好会, 東京.
- 8) 相崎守弘・村岡浩爾・平田健正・福島武彦・岩田敏・大坪国順・海老瀬潜一 (1983) : 中禅寺湖における栄養塩収支, 第 17 回水質汚濁学会講演集, 219—224.
- 9) 石田祐三郎・門田元 (1983) : 琵琶湖のウログレナ赤潮をめぐって, 生活衛生, **27**, 236—248.
- 10) 日本生態学会環境問題専門委員会編 (1975) : 環境と生物指標 2—水界編一, 共立出版社.

II-5

日光湖沼群の底生動物\*

Zoobenthos in Lakes in the Nikko District\*

安野正之<sup>1</sup>・岩熊敏夫<sup>1</sup>・菅谷芳雄<sup>2</sup>・佐々学<sup>3</sup>

Masayuki YASUNO<sup>1</sup>, Toshio IWAKUMA<sup>1</sup>, Yoshio SUGAYA<sup>2</sup>  
and Manabu SASA<sup>3</sup>

Abstract

Biomasses and species compositions of benthos in Lakes Yunoko, Chuzenji, Sainoko, Marunuma, and Sugenuma were studied during 1979-1981.

The maximum biomasses of chironomids in Lakes Yunoko, Sainoko, Marunuma, and Sugenuma were 10.2, 3.5, 1.9, and 3.6g wet weight m<sup>-2</sup>, respectively. Those of oligochaetes in Lakes Yunoko, Sainoko, Marunuma, and Sugenuma were 117.7, 12.9, 10.2, and 39.0g wet weight m<sup>-2</sup>, respectively. The biomass of oligochaetes was higher than that of chironomids in these four lakes. Also, oligochaetes were distributed abundantly in deeper parts of these lakes than chironomids which were less tolerable to oxygen depletion than the former.

*Chironomus nipponensis* (formerly misidentified as *Chironomus plumosus*) was the common species in these five lakes, and was distributed in the shallower parts in Lakes Yunoko and Sugenuma but was distributed in profundal regions in Lakes Chuzenji, Sainoko, and Marunuma. *Stictochironomus akizukii* was also the common species and was distributed in more shallower regions than *C. nipponensis*.

In Lake Chuzenji, the number of chironomid species was largest among the five lakes: 19 species were identified.

---

\* 安野・岩熊・菅谷・佐々: 日本の各種栄養段階にある湖沼の底生動物, 環境科学研究報告集 B 182-R 12-17, 21-48, (1983) より日光湖沼群について再構成したものである。  
Modified from Yasuno, M., T. Iwakuma, Y. Sugaya and M. Sasa: Zoobenthos in Japanese lakes of different trophic status, with special reference to Chironomidae, Environ. Sci. Res. Rep., B182-R12-17, 21-48, 1983.

1. 国立公害研究所 生物環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川 16 番 2  
Environmental Biology Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
2. 国立公害研究所 技術部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川 16 番 2  
Engineering Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
3. 昭和 55~58 年度国立公害研究所客員研究員 (富山医科薬科大学 〒930-01 富山県富山市)  
Visiting Fellow of the National Institute for Environmental Studies. Present Address: Toyama Medical and Pharmaceutical University, Toyama-shi, Toyama 930-01, Japan.



## 1. はじめに

日本の湖沼の底生動物は Miyadi (1933 他) によって、また北川 (1978 他) によって調べられた。この二つの研究は基本的には同じである。今回ここに報告する研究はこれらと根本において異なる。すなわちユスリカの幼虫によって行われているからである。ユスリカの幼虫で種を同定することはほとんど不可能である (Cranston, 1982)。属についても全て決定できる段階ではないが、以前に比べれば間違いを少なくすることができるようになった。したがって、本報告におけるユスリカは少数の例外を除いて属までで分けられている。種を区別しうる場合には記号で分けられている。種名についてはその多くがまだ付いていないと考えられる。採取した幼虫の一部は実験室に持ち帰り、羽化させて成虫を得ているのでいずれ種名が付けられよう。

本報告には日光湖沼群を中心に日本各地の湖沼の調査結果をまとめている。採取はほとんどがこれまでと同じエックマンバージ採泥器により、霞ヶ浦や諏訪湖では押込型の採泥器が用いられた。底泥サンプルは研究所に持ち帰り、メッシュ60のフルイで洗ってユスリカ幼虫を拾った。幼虫はすべて秤量後5% KOH で処理されスライドグラスにガムクロラル液で封入された。繰り返し調査を行った湖については必ずしもスライド標本にしていな

## 2. 調査結果

### 2.1 湯ノ湖

表1に日光湖沼群の底生動物現存量の調査報告を示す。湯ノ湖のユスリカについては比較的よく調べられている。Miyadi (1932) による調査以来、白石 (1964) 北川 (1974, 1978) らが報告している。しかしながら種類についてはかなり混乱しており、しかも5ないし7種類しか報告されていなかった。種の同定は全て幼虫で行われていたため種名を決定すること自体無理なことであった。しかし幼虫をもってしても13種を識別することができた。*Tanytarsus* が複数種からなっていることから16種類位にはなると思われる。

この湖沼調査により、これまで *Chironomus plumosus* とされていた種類が *Chironomus nipponensis* であることがわかり、湖の類型化において *plumosus* 湖とされていた数多くの湖が同一のものでないことが理解されるわけである。

ユスリカ幼虫の湖内の分布は表2に見られるように最深部は溶存酸素も少ないため、わずかに *C. nipponensis* が見られるのみである。4月には種類数は深さが増すにつれて減少している。2m付近は種類数も個体数も多い。*Psectrocladius yunoquartus* がこの地点で特に多いのは、オオカナダモがこの部分に繁茂していて、それに付着しているからである (表2a)。

*Stictochironomus akizukii* と *Chironomus nipponensis* の分布域は広いが、この湖では前者は岸よりに、後者は水深6m付近に分布の中心がある。このことは11月の調査においても認められた (表2b)。

湯ノ湖の底生動物は既に白石 (1964) も報告しているが、ユスリカの現存量も大変高いが、それ

に対してイトミミズの量ははるかに大きいことが注目される。11月におけるデータ(図1)に示されるように、水深8 m地点ではユスリカは減少するのに、イトミミズは減少せず、その湿重量は前者は $1.7 \text{ gm}^{-2}$ に対し後者は $118 \text{ gm}^{-2}$ で約70倍である。イトミミズは2 m付近から多く分布している。

表 1 日光湖沼群の底生動物現存量 (g 湿重  $\text{m}^{-2}$ )Table 1 Biomass of zoobenthos in Lakes in the Nikko District (g wet weight  $\text{m}^{-2}$ )

Lake	Date	Depth (m)	Oligochaetae	Chironomidae
Yunoko	800903	0.3	4.5± 3.0	3.9± 1.7
		0.7	4.1	—
		2	70.4±47.4	10.2± 8.4
		4	69.0±45.1	6.2± 2.4
		8	118 ±79	1.7± 1.3
Marunuma	800903	0.3	0.4	0.9± 0.5
		10	2.7	1.2± 0.3
		20	4.3± 2.9	1.9± 0.7
		30	10.2± 4.2	1.4± 1.8
		40	3.4± 2.2	0
Sugenuma	800903	5	8.9± 9.0	3.6± 2.4
		10	39.0±27.5	0.3
		20	5.7	0
Sainoko	800905	5	0	0.5± 0.5
		10	12.9± 9.7	3.5± 2.4

表 2 a 湯ノ湖のユスリカ幼虫の深度分布 (1979年4月27日, 個体数  $\text{m}^{-2}$ )Table 2a Number of chironomid larvae in Lake Yunoko on 27 April 1979 (number  $\text{m}^{-2}$ )

	Station	A 1	A 2	A 3	A 4	A 5	A 6	A 7	A 8
	depth(m)	0.3	0.7	2	4	6	8	10	11.5
<i>Cricotopus yunoquintus</i>	—	10	—	—	—	—	—	—	—
<i>Ablabesmyia</i> sp.	10	—	10	—	—	—	—	—	—
<i>Psectrocladius yunoquartus</i>	80	330	14400	—	—	—	—	—	—
<i>Procladius</i> sp.	—	—	20	—	—	—	—	—	—
<i>Polypedilum nubeculosum</i>	140	680	520	60	—	—	—	—	—
<i>Dicrotendipes lobiger</i>	—	270	3400	10	70	10	—	—	—
<i>Stictochironomus akizukii</i>	340	860	130	90	40	30	10	—	—
<i>Tanytarsus yunosecundus</i>	—	180	370	100	520	10	10	—	—
<i>Chironomus nipponensis</i>	—	1630	1700	2360	3640	1280	280	10	10
Pupae (not identified)	—	—	—	—	—	—	—	10	10

表 2b 湯ノ湖のユスリカ幼虫の深度分布 (1979年11月5日, 個体数  $m^{-2}$ )

Table 2b Number of chironomid larvae in Lake Yunoko on 5 November 1979 (number  $m^{-2}$ )

Station	A 1	A 2	A 3	A 4	A 5	A 6
depth(m)	0.3	0.7	2	4	6	8
<i>Cryptochironomus</i> sp.	10	—	—	—	—	—
<i>Procladius</i> sp.	10	—	—	—	—	—
<i>Ablabesmyia</i> sp.	—	—	1330	—	—	—
<i>Psectrocladius yunoquartus</i>	—	—	170	—	40	—
<i>Procladius</i> sp.	—	—	—	180	—	—
<i>Polypedilum nubeculosum</i>	180	80	800	90	40	—
<i>Dicrotendipes lobiger</i>	—	10	1380	—	—	—
<i>Stictochironomus akizukii</i>	320	10	360	360	90	—
<i>Phaenopsectra kizakiensis</i>	—	—	220	90	—	—
<i>Tanytarsus</i> spp.	—	—	—	—	40	—
<i>Chironomus nipponensis</i>	—	—	1730	5780	3160	1070

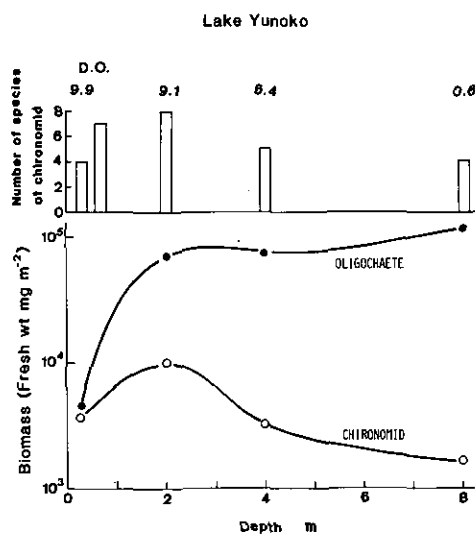


図 1 湯ノ湖におけるユスリカとイトミミズの深度分布

Fig. 1 Depth distribution of chironomid larvae and oligochaetes in relation to dissolved oxygen at bottom in Lake Yunoko

## 2.2 中禅寺湖 (表3)

採取地点は5月は菖生ヶ浜で、8月は千手ヶ浜から湖心に向けて水深80mまで4地点であった。80m地点からはユスリカを得ることができなかった。日光湖沼群の中ではこの湖が種類数において最も多いことは、貧栄養湖であることと関係があると思われる。(幼虫において19種)。他の湖と同じく沿岸帯において、種類数が多い。優占種は *Prodiamesa* sp.である。

*Tanytarsus* spp.も多数の種類が区別できるが、そのうち *T. chuzesecundus* は沿岸域に多い。他の共通している *Stictochironomus* は佐々ら (1984) によれば、2種が混じっている。この種と *Chironomus nipponensis* は生息域が広く、30mまで採集することができる。興味あることは *Phaenopsectra kizakiensis* が湯ノ湖では沿岸域かそれに近い部分に分布しているのが普通であったが、5月と8月では分布が異なり、8月では30m地点でのみ採集された。

表 3 中禅寺湖のユスリカ幼虫の深度分布 (1981年, 個体数  $m^{-2}$ )Table 3 Number of chironomid larvae in Lake Chuzenji in 1981 (number  $m^{-2}$ )

Depth (m)	May 1981		August 1981		
	1	13	1	10	30
<i>Prodiamesa</i> sp.	1240	20	400	—	—
<i>Orthocladus</i> spp. <sup>1</sup>	800	—	—	—	—
<i>Cricotopus</i> sp.	—	—	110	—	—
Orthoclaadiinae genus sp.	—	20	20	—	—
<i>Stictochironomus</i> spp. <sup>2</sup>	560	310	360	40	80
<i>Chironomus nipponensis</i>	—	380	—	130	270
<i>Phaenopsectra kizakiensis</i>	360	—	—	—	230
<i>Polypedilum</i> sp. A <sup>3</sup>	—	—	90	—	—
<i>Polypedilum</i> sp. B <sup>4</sup>	20	70	110	—	10
<i>Cryptochironomus</i> sp. A	70	—	—	—	—
<i>Cryptochironomus</i> sp. B	—	—	20	—	—
<i>Tanytarsus chuzesecundus</i>	1820	—	—	—	—
<i>Tanytarsus</i> sp. A	—	—	580	—	—
<i>Tanytarsus</i> sp. B	—	—	20	—	—
<i>Tanytarsus</i> sp. C	—	—	—	—	10
<i>Micropsectra chuzeprima</i>	40	—	—	—	—
<i>Micropsectra</i> sp.	—	—	—	—	20
<i>Procladius</i> sp.	—	—	—	40	—
Pentaneurini genus sp.	—	—	—	—	10

1. Including *Orthocladus chuzesextus* and *O. chuzeseptimus* which could not be distinguished at larval stage

2. Including both *Stictochironomus akizukii* and *S. multannulatus*

3. Larva of this species could be distinguished from the latter by the shorter antennal segments

4. This could be *Polypedilum asakawaense* or *P. nubeculosum*

### 2.3 西湖 (表4)

西湖はかつて中禅寺湖の一部であったと考えられ、現在もその上流に位置し中禅寺湖に流れ込んでいる。水位変動が激しく、春は水域面積が広がるが夏から秋にかけてかなり狭くなる。深さは最大 12 m であるが調査を行った 9 月では 10 m 程度であった。5 m と 10 m の 2 点の調査での現存量は *Chironomus nipponensis* の分布する地点がはるかに大きく、またイトミミズが多いことに特徴がみられる。

5 m 地点ではイトミミズはわずかであり、*C. nipponensis* は全く見ることができない。しかしユスリカの種類数は 7 種類と多くなっている。そこでの特徴種は *Tanytarsus* sp. と *Stictochironomus akizukii* である。後者は湯ノ湖と共通しているが、*Tanytarsus* はさなぎから識別される限り別である。湖の富栄養化段階としては、透明度が 7 月は 2.5 m、9 月は 6 m であり、湯ノ湖ほど進行していない。汚染源が特にないにもかかわらず、貧栄養湖ではない。

表 4 西湖のユスリカ幼虫の深度分布 (1980 年 9 月 3 日, 個体数  $m^{-2}$ )

Table 4 Number of chironomid larvae in Lake Sainoko on 3 September 1980 (number  $m^{-2}$ )

	Depth (m)	
	5	10
<i>Tanytarsus</i> sp.	210	—
<i>Stictochironomus akizukii</i>	320	—
<i>Chironomus nipponensis</i>	—	1330
<i>Phaenopsectra</i> sp.	10	90
<i>Synchironomus</i> sp.	10	—
<i>Cryptochironomus</i> sp.	30	—
Pentaneurini genus sp.	10	—
<i>Procladius</i> sp.	10	60

### 2.4 丸沼 (表5)

Miyadi (1932) の報告においても最深部からユスリカを採集していない。今回の調査においても 40 m のところからはユスリカを採集することができなかった。しかしイトミミズは分布しており、低酸素層における両者の差が認められる。イトミミズは逆に浅い部分では大変少ないことは、前記の湯ノ湖や西湖と同じである。もっとも湯ノ湖のイトミミズの現存量に比較するとその 10 分の 1 以下である。ユスリカは *Chironomus nipponensis* が奥日光湖沼群の共通種として見られるが、ここでは深いところより最も浅い部分に最も多かった。その理由は明らかでない。どちらかというとなら若令が多かった。10 m 付近がもっとも種類数が多いが、それから深い部分では減少するのに対し、現存量は 20 m 地点が高かった。ここで見られる *Tanytarsus* sp. は湯ノ湖とちがっている。

表 5 丸沼のユスリカ幼虫の深度分布 (1980年9月3日, 個体数  $m^{-2}$ )Table 5 Number of chironomid larvae in Lake Marunuma on 3 September 1980 (number  $m^{-2}$ )

	Depth (m)					
	0.5	5	10	20	30	40
<i>Tanytarsus</i> sp.	360	130	810	—	—	—
<i>Stictochironomus akizukii</i>	130	330	120	60	20	—
<i>Chironomus nipponensis</i>	1230	90	120	190	80	—
<i>Polypedilum</i> sp.	1390	—	—	—	—	—
<i>Synchironomus</i> sp.	—	200	30	—	—	—
<i>Cryptochironomus</i> sp.	—	20	30	—	—	—
Pentaneurini genus sp.	—	—	10	—	—	—
<i>Procladius</i> sp.	10	—	10	40	—	—
<i>Psectrocladius</i> sp.	10	—	—	—	—	—

## 2.5 菅沼 (表6)

この湖も中栄養段階にランクされている。深い部分の採集が行われているが、5 m 付近において6種のユスリカ幼虫を採集しえた。それに加えるのに2種の *Tanytarsus* のさなぎを採集している。しかし10 m 地点では2種類、20 m では1種しか採集されていない。したがって、この湖の場合は現存量も5 m 地点が最大であった。これに比してイトミミズは10 m 地点で多かった。丸沼と同じように *Chironomus nipponensis* は5 m 地点に多く深い方には少なかった。*Phaenopsectra* sp. がここに多いことは湯ノ湖とよく似ている。*Stictochironomus akizukii* も10 m 以深に見られないことは、この湖にだけ見られる現象である。

表 6 清水沼 (菅沼) のユスリカ幼虫の深度分布 (1980年9月3日, 個体数  $m^{-2}$ )Table 6 Number of chironomid larvae in Lake Shimizunuma (Sugenuma) on 3 September 1980 (number  $m^{-2}$ )

	Depth (m)		
	5	10	20
<i>Stictochironomus akizukii</i>	160	—	—
<i>Chironomus nipponensis</i>	240	10	—
<i>Polypedilum</i> sp.	360	—	—
<i>Phaenopsectra</i> sp.	2380	—	—
<i>Chironomus</i> sp.	40	—	—
<i>Procladius</i> sp.	470	80	40

### 3. 湖沼の栄養段階と底生動物

#### 3.1 湖沼の栄養段階とユスリカ現存量

湖の富栄養化の段階を示す指標として、透明度やクロロフィル量が用いられてきた。大槻ら(1981)は Carlson(1977)の提唱した栄養状態指標を日本各地の湖について当てはめ満足すべき結果を得ている。図2はそこで得られた指数に対しユスリカの現存量の対数値との関係を示す。ユスリカの現存量も Carlson 指数の元となるクロロフィル量も季節で変わることから多少のふれはやむをえないが比較的よく直線に乗っている。つまり、富栄養化が進むとユスリカの現存量は増加する。あるいは逆にユスリカの多い少ないは富栄養化の状態を示していると考えてさしつかえない。

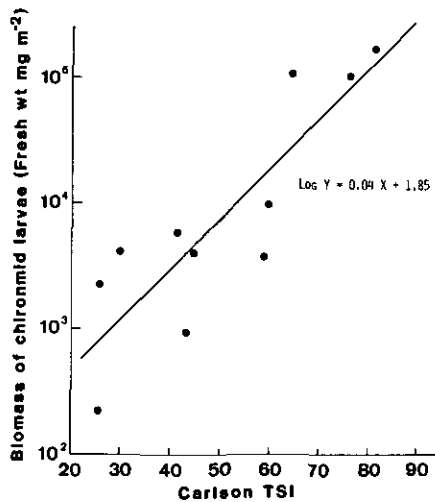


図 2 日本の湖におけるカールソン栄養段階指数と現存量の関係

Fig. 2 Relationship between biomass of chironomid larvae and Carlson's trophic state index in Japanese lakes

#### 3.2 ユスリカとイトミミズ

ユスリカとイトミミズは湖の底生動物の代表として扱われる。日本の湖沼を全般的に見たとき両者の関係はどうなっているかを図3に示す。両者には明確な関係は見られない。極端な場合はユスリカが多くてイトミミズのいない湖、またその逆もありうるわけである。図に見られるように牛久沼、精進湖、河口湖はユスリカ型の湖である。一方湯ノ湖、菅沼、丸沼はイトミミズの多い湖である。牛久沼はともかくとして、地理的にそれぞれ片寄っていることは何らかの意味があると思われる。これらを例外とするとユスリカの多い湖は概しくイトミミズも多いようである。諏訪湖はユスリカもイトミミズも最も多く、両者の現存量はほぼ等しい。霞ヶ浦はユスリカの量に比してイトミミズの量は少ない。これらの湖ではユスリカの現存量は湿重で平方米当たり 100 g を超える。ユスリカもイトミミズも低溶存酸素に耐えることで知られているがその耐性に多少のずれが存在する。

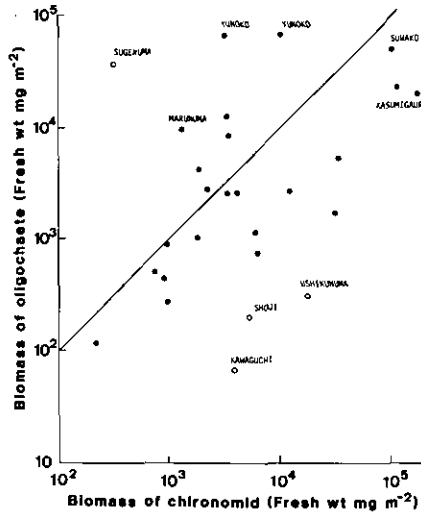


図 3 日本の湖におけるユスリカ現存量とイトミミズ現存量との相関図  
実線は両者の現存量が1:1である場合を示す。

Fig. 3 Relationship between biomasses of chironomid larvae and oligochaetes  
in Japanese lakes

### 3.3 ユスリカあるいはイトミミズの湖内の分布

湯ノ湖の場合(1980年9月), 8 mでは酸素は非常に少なくなる(図1)。有機物の分解が盛んなためであるとすると,それを担うバクテリアはイトミミズのえさとなることから,イトミミズにとってはえさが十分にあることになる。ユスリカの現存量は2 mをピークとして減少する。恐らく溶存酸素量が制限要因になっていると考えられる。種類数も現存量と同じように減少する。もちろん種の交代があり, *Chironomus nipponensis* のような種が残ることがわかっている(表2b)。

同様のことが日光丸沼でも見ることができる(図4)。ユスリカの現存量は水深40 mの酸素がかなり減少するところでほとんどいなくなる。種類数についても似たような傾向がみられるが,どちらも10 m地点で最大であるのはまた別の要因が関与していると考えねばならない。イトミミズはこれと違って現存量のピークは4.5 mのところであり,40 m地点でもかなり生息している。イトミミズの分布は低溶存酸素帯によく適応していることが理解される。霞ヶ浦においては川の流入する部分で高い密度を示した(安野他,1977)。その入江が富栄養化の最も進んだ部分であるとともに,川から流入する有機物も多いためである。その後霞ヶ浦全域にわたる調査においてはイトミミズはむしろ湖心に多く,ユスリカは沿岸帯により多いことが明らかとなった(岩熊・安野,1982)。霞ヶ浦は全体に浅いことから両者の分布が必ずしも溶存酸素量によって決まっているのではない場合であることが明らかにされた。



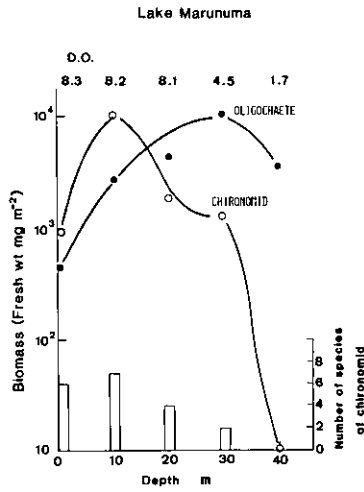


図 4 丸沼におけるユスリカとイトミミズの深度分布  
 Fig. 4 Depth distribution of chironomid larvae and oligochaetes in relation to dissolved oxygen at bottom in Lake Marunuma in Nikko district

沿岸帯は水草が生育したり、礫や砂などからなり、概して生息場所としても変化に富み、より多くの種が生息する。したがって水深と種類数の関係をとると図5中の例の4から8までに見られるように深くなるに従い次第に種類数は減少してくる。

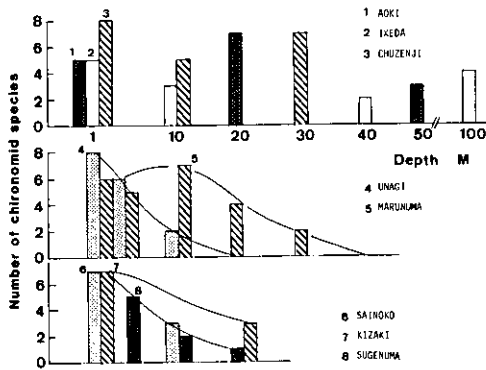


図 5 日本のいくつかの湖における水深別のユスリカの種数  
 Fig. 5 The number of chironomid species in relation to depth in several Japanese lakes

この減少のカーブはそれぞれの湖で違っている。恐らく、溶存酸素量の減少と対応しているであろう。湯ノ湖(図1)の場合のように水深8mで酸素は急に減少している場合もある。種類数と水深の関係はこのような例が一般的であると考えられるが、青木湖、池田湖、中禅寺湖のように深い部分でも種類数の減少の顕著でない湖がある。これらはいずれも貧栄養湖で深い部分でもかなり溶存酸素があることから、生息可能な種の容量も大きいものと考えられる。

### 引用文献

- Carlson, R. E. (1977): A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.*, 22, 361—369.
- Cranston, P. S. (1982): A key to the larvae of the British Orthocladinae. *Freshwat. Biol. Assoc. Sci. Pub.*, 45, 152.
- 岩熊敏夫・安野正之(1982): 霞ヶ浦の底生動物の生産と物質移行—特に底生魚類, 甲殻類による捕食について. 国立公害研究所調査報告, 第22号, 157—172.
- 北川礼澄(1974): 中禅寺湖, 湯ノ湖, 菅沼および丸沼の底生動物相の研究. *陸水学雑誌*, 35, 32—41.
- 北川礼澄(1978): 底生動物相および底層水の溶存酸素飽和度からみたわが国の湖沼の分類. *陸水学雑誌*, 39, 1—8.
- Miyadi, D. (1932): Studies on the bottom fauna of Japanese lakes. III. Lakes of the Kwanto plain. *Jpn. J. Zool.*, 4, 1—18.
- Miyadi, D. (1933): Studies on the bottom fauna of Japanese lakes. X. Regional characteristics and a system of Japanese lake based on the bottom fauna. *Jpn. J. Zool.*, 4, 417—437.
- 大槻 晃・相崎守弘・河合崇欣・福島武彦(1981): カールソン富栄養化状態指標の我国調和型湖沼群への適応性の検討とその問題点. 国立公害研究所研究報告, 第23号, 3—12.
- Sasa, M., T. Iwakuma, M. Yasuno and Y. Sugaya (1984): Studies on chironomid midges in lakes of the Nikko National Park. Part 2. Taxonomical and morphological studies on the chironomid species collected from lakes in the Nikko National Park. *Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud.*, No.70.
- 白石芳一(1964): 日光湯ノ湖における水産開発のための基礎研究. 第四報 秋季における湯ノ湖の底生動物の垂直分布について. *淡水区水産研究所報告*, 14, 67—76.
- 安野正之・森下正彦・菅谷芳雄(1977): 霞ヶ浦高浜入における底生生物と動物プランクトン. 国立公害研究所特別研究成果報告, 第1号, 94—107.

II-6

湯川の自浄作用

Study on the Stream-purification in the Yukawa River

相崎守弘<sup>1</sup>

Morihiro AIZAKI<sup>1</sup>

Abstract

Yukawa River is a small-size stream (ca. 8km length) located in the Nikko National Park region. This river flows from an eutrophic lake, Lake Yunoko, to a oligotrophic lake, Lake Chuzenji through Senjogahara region where is one of the famous highland swamp in Japan. Travelling times of this river between these two lakes were estimated as about 5-8 hours. Changes in concentrations of BOD, chlorophyll-*a*, POC, DOC, phosphorus and nitrogen along the water course of this river were surveyed four times in a year from August 1981 to August 1982. BOD, Chlorophyll-*a* and POC concentrations decreased from upstream to downstream and the concentrations changed from 2.2-4.6 mg/l, 9-29  $\mu$ g/l and 0.7-1.8 mg/l to 0.8-1.9 mg/l, 2.2-6.4  $\mu$ g/l and 0.2-0.7 mg/l, respectively. On the other hand DOC, PO<sub>4</sub>-P and TIN concentrations increased slightly along the water course. The mechanism of stream-purification in this river seemed to depend on the sedimentation of particulate materials in the Senjogahara region.

1. はじめに

湯川は栃木県北部、奥日光は湯ノ湖に源を発し、中禅寺湖に注ぐ流程約8 kmの河川である。近年の湯ノ湖の富栄養化の進行は著しく、その影響は湯川を通して中禅寺湖にも及び始めている。1981年6月には中禅寺湖に *Uroglena americana* の異常増殖がみられ、中禅寺湖から取水している水道水に異臭味がつくなどの問題を引き起こした。

河川には自浄作用と総称される自然浄化機能があり、一般的には上流から下流に流下するに従い水質の回復がみられる。自浄作用に関する研究は1920年代の Streeter と Phelps の研究以来数多くなされている。最近では文部省科学研究費の「河川の自浄作用」のグループによる研究報告がある

---

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2  
Water and Soil Environment Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi,  
Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

〔河川の自浄作用〕検討班, 1981)。しかしながら河川の自浄作用には分解による真の自浄作用以外に沈殿, 希釈, 吸着等の複雑なメカニズムが存在し, 河川によつてその特徴が異なっている。湯川においても浄化機能が期待されるが, その定量的な研究は現在まで行われていない。本研究では, 富栄養化した湖に源を発し, 途中で人為汚染のほとんどない河川での自浄作用の機構について解明を試みると同時に, 湯ノ湖の富栄養化が湯川を通してどのように中禅寺湖に影響を与えているのかについて検討を行った。

## 2. 調査地点

図1に調査地点及び河川こう配を示す。湯川は湯ノ湖に源を発しすぐ湯滝となって落下する。湯滝の上部を St. 1, 下部を St. 2 とした。その後渓谷となって約 2 km 程度流下し戦場ヶ原に入る。戦場ヶ原に入る直前を St. 3, 戦場ヶ原の青木橋を St. 4 とした。St. 3 と St. 4 の間に逆川が流入す

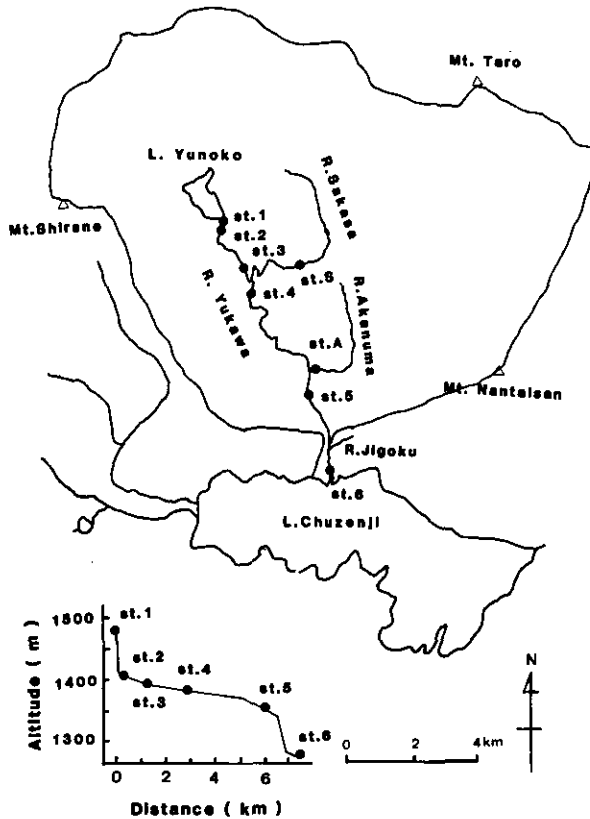


図 1 湯川の概念図と調査地点及び河川こう配

Fig. 1 Drainage diagram and slope of R. Yukawa and sampling sites

る。竜頭の滝の上部を St. 5、河口部を St. 6 とした。湯ノ湖と中禪寺湖の高度差は 207 m である。

### 3. 調査方法

調査は 1981 年 8 月から 1982 年 8 月にかけて行い、その間 1981 年 8 月、10 月及び 1982 年 6 月、8 月の合計 4 回は流下に伴う水質変動について調査を行った。流速は東邦電探 CM1S 型流速計を用いて測定した。流量は流速と横断面の水深から求めた。生物学的酸素要求量 (BOD) は 20°C、5 日間法で測定した。溶存有機炭素 (DOC) は Menzel と Vaccaro (1964) の方法で、クロロフィル-*a* 濃度は SCOR/UNESCO 法で測定した。懸濁態有機炭素 (POC) 及び窒素 (PON) はあらかじめ 450°C で 3 時間以上加熱処理したグラスファイバーフィルター (ミリポアー社 AP 40) に懸濁物を捕集し、80°C 2 日間以上乾燥後 CHN コーダ (柳本社 MT 3 型) で測定した。硝酸態窒素 ( $\text{NO}_3\text{-N}$ )、亜硝酸態窒素 ( $\text{NO}_2\text{-N}$ )、アンモニア態窒素 ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) 及びオルソリン酸 ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ) 濃度はグラスファイバーフィルター (ワットマン社 GF/C) でろ過後、ろ液についてオートアナライザー (テクニコン社 AA II 型) を用いて測定した。全リン (TP) 濃度はペルオキシニ硫酸カリウムで酸化分解後生成した  $\text{PO}_4\text{-P}$  を測定した (大槻ら, 1981)、生菌数は  $\frac{1}{10}$  濃度の普通ブイヨン培地を用いた MPN 法又は混釈法によって、20°C 2 週間培養後に測定した。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測定した (相崎, 1982)。

## 4. 結果及び考察

### 4.1 河口部における水質の季節変動

図 2 に河口部 (St. 6) における水温と水量の季節変化を示す。水温は夏期に約 20°C まで上昇し、冬期には約 3°C まで低下した。平常時の流量は約 1.5 m<sup>3</sup>/s 程度で冬期には流量の低下がみられた。

図 3 及び図 4 に各態窒素及びリン濃度の季節変化を示す。無機態窒素の大部分は硝酸態であり、春期に PON の増加がみられた。全リン中に無機態リンの占める割合は冬期で高く夏期で低下する傾向がみられた。春期は採水日が降雨の日に重なった影響もあってか懸濁態リンの増加が顕著であった。

図 5 にクロロフィル *a* 濃度の季節変化を示す。おおよそ 5 µg/l 程度の濃度のことが多かったが春期には 20~30 µg/l という高い濃度が観察された。春期に高いクロロフィル *a* 濃度がみられることはかなり一般的な傾向のようで、栃木県の調査結果 (栃木県衛生環境部, 1983) によれば、河川部でのクロロフィル *a* 濃度の増加は湯ノ湖での植物プランクトン増殖によるクロロフィル *a* 濃度の増加に対応していた。

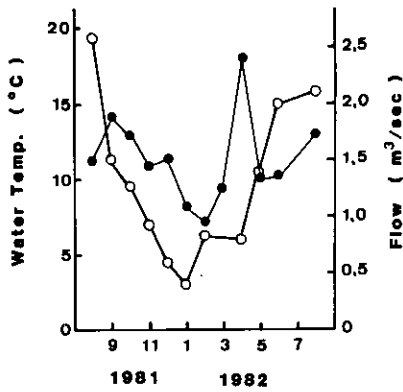


図 2 湯川河口部 (St. 6) における水温と水量の季節変化  
Fig. 2 Seasonal changes in water temperature (○) and water flow (●) at the river mouth

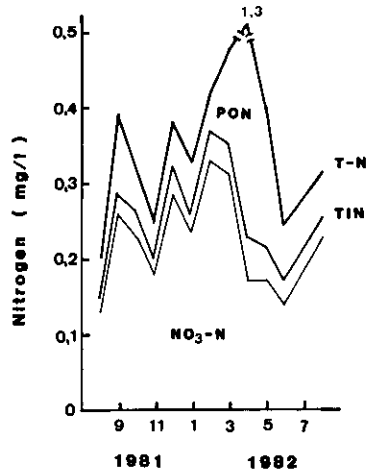


図 3 湯川河口部 (St. 6) における各態窒素濃度の季節変化  
Fig. 3 Seasonal changes in concentrations of  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$  and T-N at the river mouth

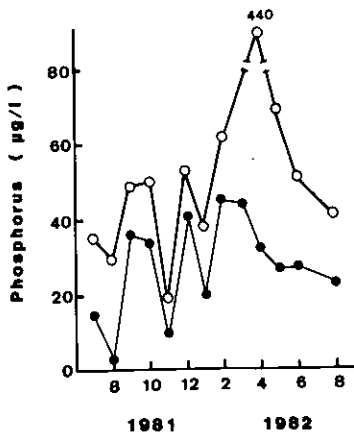


図 4 湯川河口部 (St. 6) における  $\text{PO}_4\text{-P}$  (●) と T-P (○) 濃度の季節変化  
Fig. 4 Seasonal changes in concentrations of  $\text{PO}_4\text{-P}$  (●) and T-P (○) at the river mouth

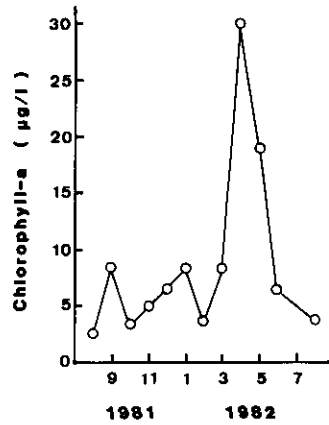


図 5 湯川河口部 (St. 6) におけるクロロフィル a 濃度の季節変化  
Fig. 5 Seasonal changes in chlorophyll-a concentration at the river mouth

#### 4.2 流下に伴う有機物濃度の変化

流下に伴う流量の変化を図6に示す。St.4で増加する傾向を示したが、St.4は水深が深く橋の上からの測定であったため過大に測定している可能性がある。St.1,2に比べSt.4,6で流量が若干増加していたが、測定誤差を考え、以後では流下に伴う流量変化はないものとして取り扱った。流量は調査時期によってかなり異なっており、1.0~2.4 m<sup>3</sup>/sの範囲であった。水温は1981年8月で全区間17.7°C、1982年6月で13.0~16.5°C、1982年8月で14.5~17.9°Cであった。1981年10月の調査では水温及び流量の測定は行わなかった。

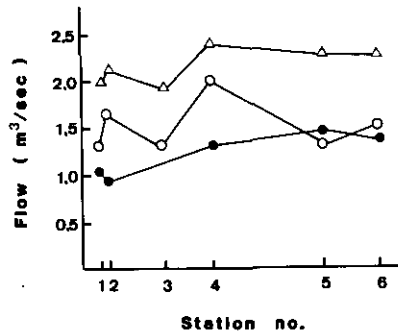


図 6 流下に伴う流量変化

Fig. 6 Changes in river flow along the water course of the river

(○) Aug. 1981, (●) Jun. 1982, (△) Aug. 1982.

図7にBOD濃度の変化を示す。BOD濃度はSt.3までは比較的变化が少なかったが、St.3から4の間で急激に減少する傾向を示した。St.3からSt.4の間は図1に示したごとく戦場ヶ原の平坦部に入るため河川こう配が緩くなり流速が低下する。また戦場ヶ原の河床部にはオランダガラシ等の水草類が繁茂しており、さらに流速の低下を促進させる効果を果たしているものと想像された。そのため懸濁物質の沈殿が促進されたものと考えられた。図8にクロロフィルa濃度の変化を、図9にPOC濃度の変化を示すが、植物プランクトンに由来すると考えられる両成分ともSt.3からSt.4にかけてBOD濃度の変化と同様に急激に減少した。これに対し、溶存態のBOD及びDOC濃度はSt.1,2から3にかけて増加する傾向を示し、その後の変化は少なかった(図10)。水中の生菌数は10<sup>3</sup>~10<sup>4</sup>/mlのオーグ存在しており、全菌数も10<sup>5</sup>~10<sup>6</sup>/mlとかなり高い値であったが、流下に伴って減少する傾向を示した(資料参照)。

これらの結果から、湯川における自浄作用の機構としてSt.2からSt.3にかけては後述する窒素化合物の変化と考え合わせ、懸濁態有機物の分解がその中心と考えられた。St.3からSt.4にかけては懸濁態有機物の沈殿が中心となり、それより下流では顕著な自浄作用はみられないと推測され

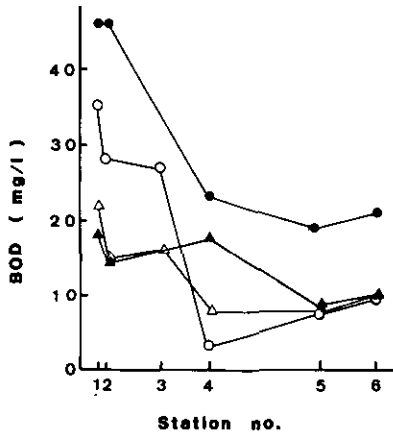


図 7 流下に伴う BOD 濃度の変化  
 Fig. 7 Changes in BOD concentration along the water course of the river  
 (○) Aug. 1981, (▲) Oct. 1981,  
 (●) Jun. 1982, (△) Aug. 1982.

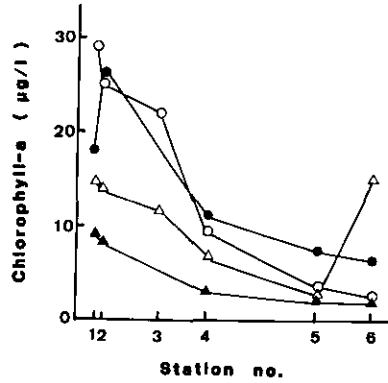


図 8 流下に伴うクロロフィル a 濃度の変化  
 Fig. 8 Changes in chlorophyll-a concentration along the water course of the river  
 (○) Aug. 1981, (▲) Oct. 1981,  
 (●) Jun. 1982, (△) Aug. 1982.

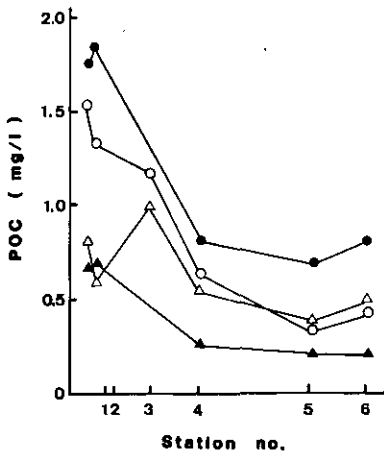


図 9 流下に伴う POC 濃度の変化  
 Fig. 9 Changes in POC concentration along the water course of the river  
 (○) Aug. 1981, (▲) Oct. 1981,  
 (●) Jun. 1982, (△) Aug. 1982.

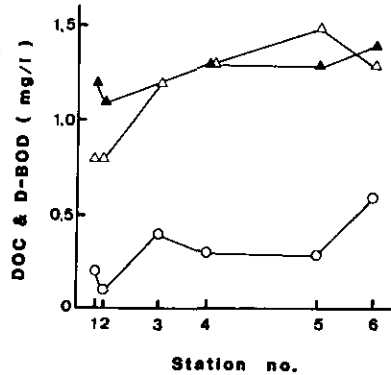


図 10 流下に伴う溶存態 BOD と DOC 濃度の変化  
 Fig. 10 Changes in dissolved BOD and DOC concentrations along the water course of the river  
 (○) D-BOD, Aug. 1982,  
 (▲) DOC, Oct. 1981,  
 (△) DOC, Aug. 1982.



表1 湯川の自浄係数

Table 1 Rates of BOD degradation along the water course of the river

$$C_T = C_0 \cdot 10^{-kt}$$

Date	BOD (St. 2) (mg/l)	BOD (St. 5) (mg/l)	Time (St. 2-5) (day)	k (/day)
'81, 8, 13	2.8	0.8	0.25	2.1
'82, 6, 16	4.6	1.9	0.34	1.1
'82, 8, 26	2.2	0.8	0.21	1.3

た。また湯川全体を通してみると St. 3 から St. 4 にかけての懸濁態有機物の沈殿による浄化が卓越していた。表1に St. 2 から St. 5 の区間における自浄係数を示す。湯滝下の St. 2 から竜頭の滝上の St. 5 までの流達時間は各測定地点における流速から計算しておよそ5時間から8時間程度と考えられ、この値と BOD 濃度の測定値から求められる自浄係数としては 1.3~2.1/d の値が得られた。この値は欧米大陸の河川で得られた値(約 0.1/d)よりははるかに大きく、また我が国の河川で得られた値 0.3~0.6 に比べても非常に大きい(手塚, 1974)。しかしながら、この値は上述したごとく見かけの自浄係数であり、無機化速度を表す値ではないことに留意する必要がある。

#### 4.3 流下に伴う栄養塩類の濃度変化

図11に全リン濃度の変化を、図12に無機態リン濃度の変化を示す。全リン濃度は戦場ヶ原に入つて懸濁物の沈殿による減少がみられたが、河口の St. 6 では地獄川及び養鱒場の排水の影響で濃度の増加がみられた。これに対して無機態リン濃度は St. 4 から St. 5 の戦場ヶ原地域で増加する傾向がみられ、湿原である戦場ヶ原からリンが溶出していることが推察された。湯川におけるリンの物質収支は栃木県(栃木県衛生環境部, 1983)において詳細な研究がなされており、今回の結果と類似した結果が得られている。

無機態全窒素濃度は St. 2 から St. 4 にかけて増加する傾向がみられたが、無機態リンとは異なって St. 4 から St. 5 の戦場ヶ原地域では変化がみられなかった(図13)。無機態全窒素のうち顕著な増加は硝酸態窒素濃度にみられた(資料参照)。これに対して PON を含めた全窒素濃度は St. 2 から St. 4 にかけてあまり大きな変化はみられなかった(図14)。このことは無機態全窒素濃度の増加に見合う PON の無機化がこの区間で生じていたことを示唆している。ICP 発光分光分析による無機イオン濃度も戦場ヶ原を流下するときに増加する傾向がみられた(資料参照)。

#### 5. まとめ

奥日光を流れる湯川の自浄能力の調査を行った。湯滝下の St. 2 から竜頭の滝上の St. 5 までの BOD 濃度変化から求めた自浄係数は 1.3~2.1/d であった。浄化機構は主として懸濁態有機物(植

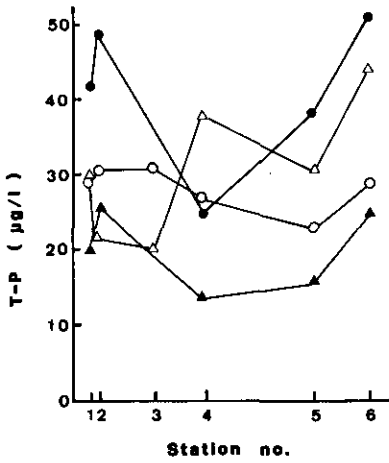


図 11 流下に伴う T-P 濃度の変化  
 Fig. 11 Changes in total phosphorus concentration along the water course of the river  
 (○) Aug. 1981, (▲) Oct. 1981, (●) Jun. 1982, (△) Aug. 1982.

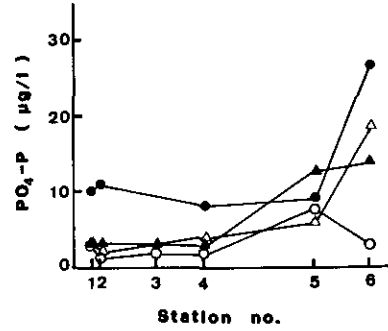


図 12 流下に伴う PO<sub>4</sub>-P 濃度の変化  
 Fig. 12 Changes in PO<sub>4</sub>-P concentration along the water course of the river  
 (○) Aug. 1981, (▲) Oct. 1981, (●) Jun. 1982, (△) Aug. 1982.

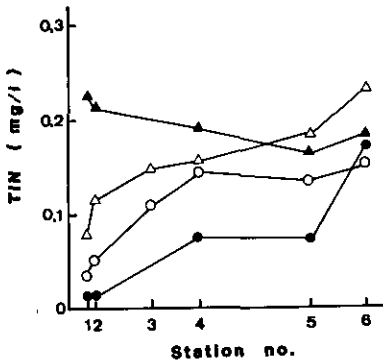


図 13 流下に伴う無機態全窒素濃度の変化  
 Fig. 13 Changes in TIN concentration along the water course of the river  
 (○) Aug. 1981, (▲) Oct. 1981, (●) Jun. 1982, (△) Aug. 1982.

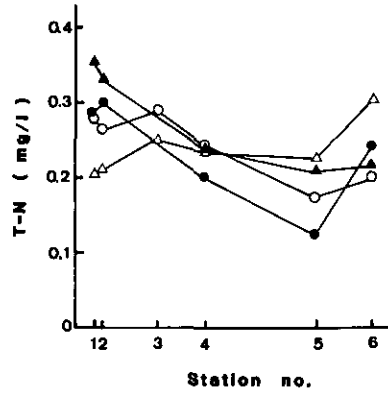


図 14 流下に伴う全窒素濃度の変化  
 Fig. 14 Changes in total nitrogen concentration along the water course of the river  
 (○) Aug. 1981, (▲) Oct. 1981, (●) Jun. 1982, (△) Aug. 1982.

物プランクトン)の沈殿作用によるものと考えられた。中禅寺湖の水質保全を考える場合、湯川の自浄係数として日本の平均的な河川の自浄係数よりかなり高い値が得られたが、主として懸濁物の沈殿を中心とした浄化作用のため、降雨時等の洗い出しを考慮すると湯川での水質浄化はあまり期待できず、また栄養塩類に関しては流下に伴って濃度の増加もみられることから、湯ノ湖の富栄養化防止を急ぐ必要があると考えられた。また自浄能力の表現方法として、自浄係数で議論する機会が多いが、その内容には希釈、沈殿及び分解等の物理的、化学的また生物学的機構が考えられ、その内容が異なることから、今後それらの点を整理する必要があると考えられた。

最後に、各種栄養塩類の分析を行っていただいた国立公害研究所大槻晃博士に記して感謝する。

### 引用文献

- 相崎守弘 (1982) : 細菌数. 「湖沼環境調査指針」(日本水質汚濁研究協会編), 公害対策技術同友会, 東京.  
「河川の自浄作用」検討班(1981) : 河川の自浄作用—研究の現状と課題—. 「環境科学」研究報告集, B 75—S 504.
- Menzel, D. W. and R. F. Vaccaro (1964) : The measurment of dissolved organic and particulate carbon in sea water. *Limnol. Oceanogr.*, 9, 138-142.
- 大槻晃・河合崇欣・相崎守弘 (1981) : 霞ヶ浦高浜入におけるリンおよび溶存無機態窒素の動態, 国立公害研究所研究報告, 第 22 号, 3—21.
- 手塚泰彦 (1974) : 河川の汚染. 築地書館.
- 栃木県衛生環境部 (1983) : 中禅寺湖・湯の湖水質調査報告書(1), 栃木県.

II-7

中禅寺湖における栄養塩収支

Nutrient Budget in Lake Chuzenji

相崎守弘<sup>1</sup>・村岡浩爾<sup>1</sup>・平田健正<sup>1</sup>・福島武彦<sup>1</sup>・  
岩田 敏<sup>1</sup>・海老瀬潜一<sup>1</sup>・大坪国順<sup>1</sup>・大槻 晃<sup>2</sup>

Morihiro AIZAKI<sup>1</sup>, Kohji MURAOKA<sup>1</sup>, Tatemasa HIRATA<sup>1</sup>,  
Takehiko FUKUSHIMA<sup>1</sup>, Toshio IWATA<sup>1</sup>, Senichi EBISE<sup>1</sup>,  
Kuninori OTSUBO<sup>1</sup> and Akira OTSUKI<sup>2</sup>

Abstract

Phosphorus and nitrogen budget in Lake Chuzenji was investigated in a year from August 1981 to July 1982. The main sources of nutrients are seven inflowing rivers, atmospheric fallout and inflows from residual regions excluding each river basin. The total water loading of the year was estimated as  $175.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ . The water loading in August showed very high value due to the rainfall of the typhoon. The R. Yukawa and R. Jigoku were the main source of the water loading and estimated as 28% and 24% of whole water loading, respectively. The water loading from precipitation, residual regions and five rivers flowing in the Senju beach region were estimated as 14%, 15% and 19%, respectively. Outflows of lake water were mainly the R. Ojiri and underground leakage of water and were estimated as 25% in the former and 73% in the latter.

The total nitrogen income and outgo in the year were estimated as 65.5 ton and 79.8 ton, respectively. The difference probably occurred due to the error of the estimation of nitrogen income and/or sedimentation amount. The R. Yukawa and R. Jigoku were the main source of the nitrogen loading and estimated as 35% and 28% of the total loading, respectively. The nitrogen loadings from precipitation, residual regions and the five rivers flowing the Senju beach region were estimated as 13%, 11%,

- 
1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2  
Water and soil Environment Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan
  2. 国立公害研究所 計測技術部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2  
Chemistry and physics Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

and 13%, respectively. Main outgo of nitrogen from lake water was the sedimentation of particulate nitrogen. It was estimated as 75% of the total outgo.

The total phosphorus income and outgo in the year were estimated as 9.6 ton and 14.5 ton, respectively. The reason of this difference seems to be same as the nitrogen. The R. Yukawa and R. Jigoku were main source of phosphorus loading as well as nitrogen and water loading and estimated as 56.5% and 29.5% of the total amount. The phosphorus loadings from precipitation, residual regions and five rivers flowing the Senju beach region were relatively low and estimated as 7%, 3% and 4% of total amount, respectively. Main outgo of phosphorus from lake water was the sedimentation of particulate phosphorus as well as nitrogen. It was estimated as 88% of the total outgo.

## 1. はじめに

湖沼における物質収支の研究は、湖内の物質循環の研究及び水質予測の研究等にとってその基礎となるものである。日本の湖沼では、IBP 研究 (1968—1972) の成果として児島湖、諏訪湖、湯ノ湖等に関して報告があり (Mori & Yamamoto, 1975), 最近では霞ヶ浦において相崎ら (1981), 安野・大槻 (1981), 合田ら (1984) によって発表されている。中禅寺湖は従来貧栄養湖として知られ、多くの人々に親しまれてきた。しかしながら、近年富栄養化の兆しが見え始め、1981年6月には *Uroglana americana* の大増殖による赤潮現象が見られている。このような富栄養化の進行に対処するためには流入負荷量の推定及び汚濁源の検索等を行う必要がある。また流入栄養塩の湖内での挙動を把握する必要がある。中禅寺湖の調査は栃木県において近年活発に行われ始めてきた (栃木県衛生環境部, 1983) が、我々は独自の立場から中禅寺湖の富栄養化を防止するための基礎資料を得る目的で調査を行い、1981年8月から1982年7月までの栄養塩収支を明らかにすることができた。本論文では得られた成果を報告する。

## 2. 調査方法

図1に調査地点を示す。湖内は3地点で、流入河川は地獄川 (St. J), 湯川 (St. Yu) 及び千手ヶ浜に流入する、外山沢川 (St. T), 柳沢川 (St. Ya), 清水 (St. S), 横川 (St. Yo), 観音水 (St. K) で、流出河川は大尻川 (St. O) でそれぞれほぼ毎月1度の頻度で測定を行った。湖内の St. 2 では垂直分布を調べるために7水深で採水を行った。流入河川調査は流入端付近で行い流量測定と採水を行った。千手ヶ浜に流入する清水、横川及び観音水は流入水量がわずかであったことから水収支、栄養塩収支では一本の河川として取り扱った。水収支に用いた河川流入量は11月から3月までの期間は降雨量が少なかったことからすべての河川で実測値を使用した。地獄川はその起源が地下水であることと一度発電用水として取り入れられ流程が短いことからすべて実測値を用いた。その他の河川については、上記期間以外は降雨量と調査時の流量の直線回帰から、降雨量をベースとして算定した。残留域からの流入量は流出率を湯川流域に準じて求めた。蒸発量は  $E = N \cdot U (ew -$

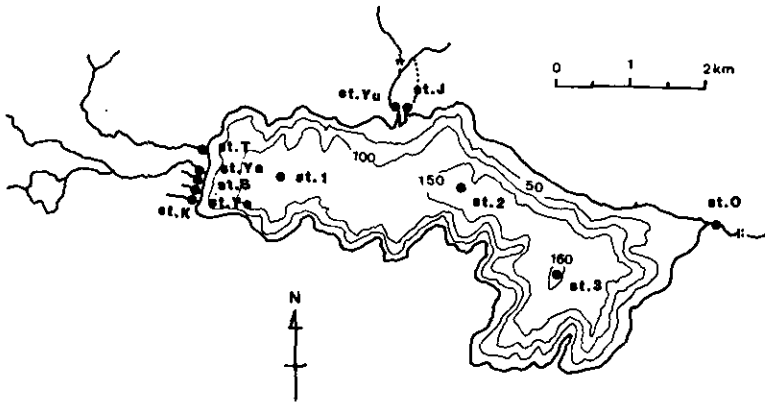


図 1 中禅寺湖の概念図及び調査地点

Fig. 1 Lake Chuzenji and study sites

ea) の式から求めた (片野, 1977)。ここで,  $E$ : 蒸発量 (mm/d),  $N$ : 係数 ( $N=0.08$  とした),  $U$ : 風速,  $ew$ : 水温に対する飽和蒸気圧で水温は表層の月平均値を用いた。ea: 気温に対する水蒸気圧で中禅寺測候所の資料をもとに半月平均値を用いた。放流量は栃木県中禅寺湖ダム管理センターの資料を用いた。栄養塩収支はこれらの水量に測定した栄養塩濃度を剰じて求めた。残留域からの流入水の栄養塩濃度は千手ヶ浜に流入する 5 河川の平均値で代用した。調査期間中に 100 mm を超える降雨が 1981 年 8 月, 11 月及び 1982 年 4 月に観測されたが, 1982 年 4 月の実測データから, 大量の降雨に伴う流域からの流出が平常時より多くなると判断されたので, この 3 回については流出量に 1982 年 4 月の実測値を剰じて補正を行った。沈殿量は開口部 22 cm<sup>2</sup> の円筒形の捕集ビンを用い, ほぼ毎月 1 度の頻度で測定した。8 月, 9 月の値は水深 15 m で採取した沈殿量を用い, それ以後は 110 m の水深で採取した沈殿量を使用した (福島, 1984), 栄養塩類の測定はオートアナライザー AA II 型を用いて行い, 沈殿物中の炭素含量, 窒素含量の測定には CHN コーダ (柳本社 MT 3 型) を使用した。総窒素量は無機態窒素量と懸濁態窒素量の和で表した。降雨による負荷は調査期間中の調査ができなかったため, 1983 年 1 月～6 月の期間に採取した 5 回の平均濃度に降雨量を剰じて求めた。なお 1 月及び 2 月の試料としては千手ヶ浜の積雪を用いた。

### 3. 結果

#### 3.1 中禅寺湖流入河川の水質概況

中禅寺湖に流入する河川は葛蒲ヶ浜に 2 河川, 千手ヶ浜に 5 河川の計 7 河川である。このうち流量的にみると葛蒲ヶ浜に流入する湯川及び地獄川が大きい (図 2)。湯川は奥日光湯ノ湖に源を発し, 戦場ヶ原を通って中禅寺湖に流入する河川で, 近年の湯ノ湖の富栄養化に伴い水質の悪化がみられる。地獄川はその源がわき水で約 2 km 程度の流程しかないが, その水質は非常に栄養塩に富

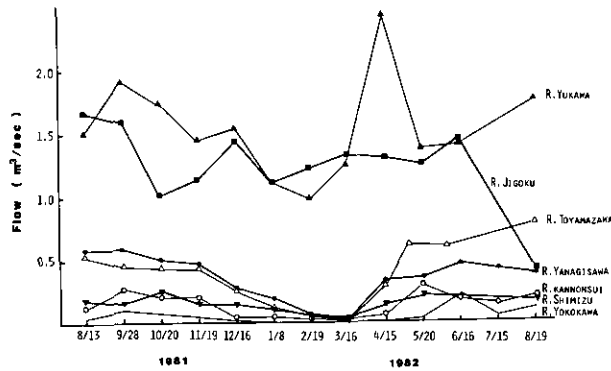


図 2 各河川からの流入水量の季節変化

Fig. 2 Seasonal changes in flows of the inflowing rivers

んでいる。千手ヶ浜に流入する河川は一部を除き流域に人為的な汚染源がない。図2に流入水量の季節変化を示すが湯川と地獄川はほぼ等しく1~2 m³/sであった。千手ヶ浜に流入する河川は冬期に流量の低下がみられた。

図3に水温の変化を示す。地獄川はほとんど水温の変化がなく約10°C程度であったが、他の河川は著しく季節変化を示した。湖水表層の水温と比較すると冬期の12月より5月下旬までは流入河川水の水温が湖水より高く、流入する河川水は湖の表層に拡散すると考えられるのに対し、夏期では水温躍層付近に拡散するものと予想された(市川・田瀬, 1982)。

図4及び5に流入河川水、湖水及び大尻川の窒素、リン濃度の季節変化を示す。地獄川、湯川の濃

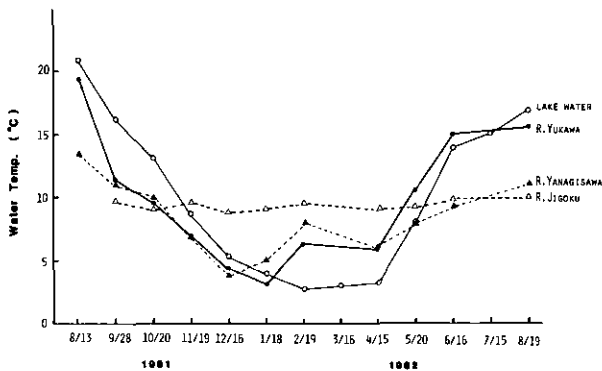


図 3 各河川の水温の季節変化

Fig. 3 Seasonal changes in water temperatures of the R. Yukawa, R. Jigoku, R. Yanagisawa and lake surface water

度が千手ヶ浜に流入する河川に比べて高い。特にリン濃度は顕著であった。季節変動は、地獄川においては水源がわき水であるためか非常に少なかったが、湯川は4月及び5月に濃度の増加がみられた。地獄川のリン測定に当ってはヒ素の妨害が考えられたが、ヒ素はほとんど含まれておらず、全リンの大部分は無機態のリンであることを確認した。千手ヶ浜に流入する河川のうち、清水は河口近くにマスの養殖場が建設され、その影響のためか、1982年夏期には栄養塩濃度が高くなる傾向がみられた。千手ヶ浜に流入する他の河川の水質は、1981年の清水の水質に類似していた。また唯一の流出河川である大尻川の水質は湖の表層水の濃度とほぼ等しかった。

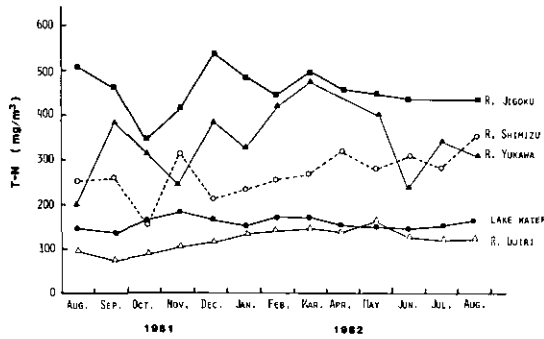


図 4 各河川の全窒素濃度の季節変化

Fig. 4 Seasonal changes in total nitrogen concentrations of the R. Yukawa, R. Jigoku, R. Shimizu, R. Ojiri and lake surface water

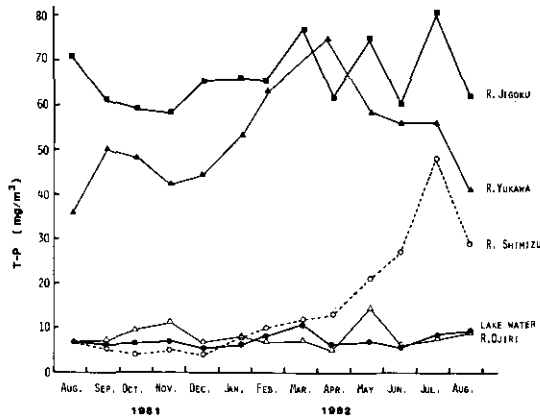


図 5 各河川の全リン濃度の季節変化

Fig. 5 Seasonal changes in total phosphorus concentrations of the R. Yukawa, R. Jigoku, R. Shimizu, R. Ojiri and lake surface water



## 3.2 水収支

表1に水収支を示す。1981年8月22～23日には台風のため約580mmの豪雨があった。この直後の流入量は計算値のみでは過少評価になったので湖水位の変化から補正した。この豪雨により8月の流入及び流出水量は他の月に比べて2～3倍高い値となった。8月を除く各月の流入水量は秋期及び春期では $12\sim 16\times 10^6\text{m}^3/\text{月}$ 、冬期は減少して $6.4\sim 8.4\times 10^6\text{m}^3/\text{月}$ であった。流出水量もほぼ流入水量に見合っていたが冬期にも流出量はあまり減少せず、そのため湖水位の低下がみられた。各流入河川の水量負荷を計算すると、湯川が最も高く全体の28%、次に地獄川で24%、残留域及び降雨からがそれぞれ15%及び14%、千手ヶ浜から流入する5河川から19%の割合になった。一方、流出先は蒸発量で2.7%、大尻川からの表面流出が25%で残り73%が地下水による漏水と考えられた。

図6に循環期の4月における流入河川水及び湖水のアルカリ度と電気伝導度の分布を示す。千手ヶ浜に流入する5河川はアルカリ度、電気伝導度とも低く一つの集団を形作っていた。一方、地獄川及び湯川はアルカリ度、電気伝導度とも高く水質がかなり類似していた。湖水のアルカリ度、電気伝導度は千手ヶ浜に流入する河川と地獄川及び湯川の値のほぼ中間の値であった。水収支をみると、湯川及び地獄川から全流入水量の52%が、その他から48%が流入している。流入河川水及び湖水のアルカリ度と電気伝導度の分布の様子はこの水収支が妥当であることを裏付けた。

表 1 中禅寺湖における水収支

Table 1 Water budget in lake Chuzenji

Income	(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /month)													
	'81/Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	'82/Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Total	
Fallout	8.3	1.8	2.2	0.7	0.006	0.3	0.2	0.9	2.6	1.5	3.2	3.0	24.7	14 %
R. Yukawa	7.8	3.3	4.0	3.8	4.1	3.0	2.4	3.3	4.0	3.8	4.2	5.0	48.7	28 %
R. Jigoku	5.9	4.1	2.9	2.9	3.9	3.0	3.0	3.5	3.3	3.3	3.7	3.2	42.7	24 %
R. Toyamazawa	3.2	0.9	0.9	1.1	0.7	0.3	0.1	0.04	1.0	0.8	1.2	1.7	12.0	6.8%
R. Yanagisawa	2.4	0.8	0.9	1.2	0.8	0.5	0.2	0.05	0.9	0.8	1.0	1.4	10.8	6.1%
R. Shimizu	2.4	0.8	0.8	1.0	0.5	0.4	0.2	0.2	0.9	0.7	1.0	1.5	10.6	6.0%
R. Yokokawa														
R. Kannonshi														
Others	6.4	2.0	2.1	2.6	1.6	0.9	0.4	0.2	2.3	1.8	2.5	3.7	26.4	15 %
Total	36.4	13.7	13.8	13.3	11.5	8.4	6.4	8.2	15.0	12.7	16.7	19.5	175.7	
Outgo														
Evaporation	0.4	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.2	0.1	0.3	0.3	5.0	3 %
Outflow	22.3	6.7	2.4	1.3	1.0	0.9	0.6	0.7	0.7	0.9	2.6	4.0	44.1	25 %
Others	12.6	5.7	8.6	12.2	13.6	11.5	9.7	10.2	11.9	8.3	11.5	13.7	129.5	72 %
Total	35.3	12.7	11.6	14.1	15.2	13.0	10.8	11.4	12.8	9.3	14.4	18.0	178.6	
Accumulation in lake	1.0	1.0	2.3	-0.9	-3.7	-4.6	-4.4	-3.1	2.4	3.4	2.4	1.5	-2.7	

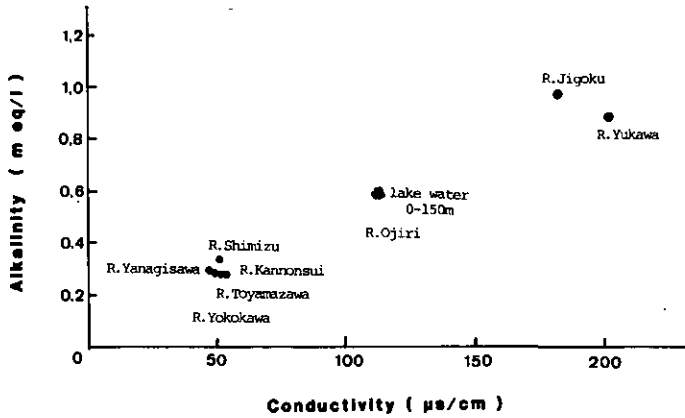


図 6 各河川及び中禅寺湖湖水の電気伝導度，アルカリ度の分布

Fig. 6 Distribution of the alkalinity and conductivity in the inflow and outflow rivers and lake water of Lake Chuzenji

### 3.3 栄養塩収支

降雨水質を表 2 に示す。降水中の窒素成分は硝酸態が主であったがアンモニア態もかなり含まれていた。懸濁態窒素の測定は行わなかったため、栄養塩収支には全溶存無機態窒素濃度を使用した。全リン濃度は 5 月の試料で高い値が測定されたが、それ以外は 10~30 µg/l 程度の濃度であった。収支計算にはそれぞれの平均濃度、窒素 369 µg/l、リン 28 µg/l を使用した。この値は平地にある国立公害研究所屋上で測定した 1977 年から 1980 年の平均値、全窒素 900 µg/l、全リン 52 µg/l に比べて窒素で 41%、リンで 54% の値であった (安部, 1981)。

前述したごとく、1981 年 8 月下旬には台風により約 580 mm の豪雨が観測されている。その他、10 月 22 日には 98 mm、1982 年 4 月 14~15 日には 127 mm の降雨が記録されている (日光測候所資料)。4 月 15 日は観測日と一致したため河川水質に対する降雨の影響を調べることができた。降雨

表 2 中禅寺湖周辺の降雨中の窒素及びリン濃度

Table 2 Nitrogen and phosphorus concentrations in snow or rain collected around Lake Chuzenji

	'83/Jan.	Feb.	Apr.	May	Jun.	Mean
Sample	Snow	Snow	Rain	Rain	Rain	
NO <sub>3</sub> -N	228	182	192	65	—	
NH <sub>4</sub> -N	129	230	61	13	—	
TIN	357	412	235	78	743(TN)	369
PO <sub>4</sub> -P	6	9	12	19	—	
T-P	12	15	22	61	31	28

表 3 中禅寺湖における窒素収支

Table 3 Budget of nitrogen in Lake Chuzenji

Income	(t/month)													
	'81/Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	'82/Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Total	
Fallout	3.1	0.7	0.8	0.3	0.002	0.1	0.1	0.3	0.9	0.6	1.2	1.1	9.2	13%
R. Yukawa	8.2	1.3	2.0	0.9	1.6	1.0	1.0	1.6	2.4	1.5	1.0	1.7	24.2	35%
R. Jigoku	3.0	1.9	1.1	1.3	2.1	1.4	1.3	1.7	1.5	1.5	1.6	1.4	19.8	28%
R. Toyamazawa	1.0	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	0.03	0.01	0.4	0.2	0.3	0.3	3.2	5%
R. Yanagisawa	0.8	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	0.04	0.01	0.3	0.2	0.2	0.3	2.9	4%
R. Shimizu	0.7	0.2	0.1	0.3	0.1	0.1	0.05	0.05	0.3	0.2	0.3	0.5	2.9	4%
R. Yokokawa														
R. Kannonsui														
Others	1.9	0.5	0.4	0.7	0.3	0.2	0.01	0.06	0.8	0.5	0.7	1.2	7.3	11%
Total	18.7	5.0	4.8	4.1	4.5	3.0	2.5	3.7	6.6	4.7	5.3	6.5	69.5	
Outgo														
Outflow	2.1	0.5	0.2	0.1	0.1	0.1	0.8	0.1	0.09	0.2	0.3	0.5	5.1	
Sedimentation	10.1	8.9	4.7	4.3	4.5	4.1	3.1	3.7	3.7	4.0	4.7	4.3	60.1	
Accumulation in lake water														-3.6
Others	1.7	0.8	1.2	1.9	2.1	1.6	1.5	1.5	1.4	1.1	1.5	1.9	18.2	
Total	13.9	10.2	6.1	6.3	6.7	5.8	5.4	5.3	5.2	5.3	6.5	6.7	79.8	

の影響を最も強く受けた河川は湯川で、平常時の全リン濃度が  $75 \mu\text{g/l}$  程度であったのが  $440 \mu\text{g/l}$  の濃度まで増加した。全窒素濃度も平常時  $450 \mu\text{g/l}$  程度の濃度が  $1350 \mu\text{g/l}$  まで上昇しており、リン及び窒素とも懸濁態の増加が著しかった。地獄川はわき水が起源で流程も短いため水質に大きな変化はみられなかった。千手ヶ浜に流入する河川では外山沢川に影響がみられたが湯川に比較すると濃度変化の割合は少なかった(資料参照)。4月15日以外にも50mm程度の降水量のときに調査を行ったが、このときには影響は顕著には表れなかった。そのため、100mm程度以上の降雨について、降雨に伴う流出量の増加分に、各河川とも4月15日に実測した全窒素及び全リン濃度を剰じて補正を行った。

表3に窒素収支を示す。1981年8月は台風による豪雨のため、他の月の3~5倍程度の流入負荷がみられた。豪雨の影響の少ない月では秋期、春期に4~6 ton/月、冬期に2.5~4 t/月程度の流入負荷が観測された。豪雨の影響は湯川で最も強く表れ8月の流入負荷の44%が湯川起源と推定された。各流入河川の年間窒素負荷量を求めると湯川が24.2 t/yと最も高く全体の35%の割合になっていた。以下、地獄川28%、降雨による直接的な負荷13%、残留域から11%、外山沢川から5%、柳沢及び他の千手3河川からそれぞれ4%の割合で窒素負荷があった。一方、流出としては大尻川からの表面流出が5.1 t/y、漏水による流出が18.2 t/yと推定され、残りは湖内に推積すると考えられた。湖内 St. 2 での沈殿量の実測値は60.1 t/yと推定され、流入負荷と流出負荷及び湖水上に蓄積された窒素量との差、49.8 t/yより約10 t多かった。流入総窒素量と流出総窒素量を比較すると前

者が 69.5 t/y, 後者が 79.8 t/y と推定され, 流出量が流入量の約 1.1 倍の値になった。

表 4 にリン収支を示す。8 月の豪雨による湯川からのリンの流入が 2,644 kg/月と圧倒的に高く, そのため 8 月の流入負荷量及び湯川の年間負荷量が高い値となった。豪雨の影響の少ない月では 350~700 kg/月程度の流入負荷量であった。湯川の 8 月の負荷量は地獄川の年間負荷量にほぼ匹敵すると推定された。各流入河川の年間リン負荷割合を求めると湯川が 56.5%と最も高く, 次に地獄川が 29.5%, 降雨からの直接負荷が 7%, 残留域から 3%, 外山沢川から 2%, 柳沢及び他の千手 3 河川からそれぞれ 1%と推定され, 湯川及び地獄川で全流入負荷の 86%を占めていた。一方流出は, 大尻川からの表面流出が 331 kg/y, 漏水による流出が 223 kg/y, 年間の湖水内蓄積量が 1089 kg と推定され, 残りは湖内に推積すると考えられた。湖内 St. 2 での実測値から推定した沈殿量は 12,894 kg/y であり, 流入及び流出量等から推定された湖内推積量 8,040 kg/y より 4,854 kg 多かった。流入総リン量と流出総リン量を比較すると, 前者が約 9.7 t/y, 後者が約 14.5 t/y で流出量が流入量の 1.5 倍の値になった。

表 4 中禅寺湖におけるリン収支

Table 4 Budget of phosphorus in Lake Chuzenji

Income	(kg/month)														
	'81/Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	'82/Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Total		
Fallout	232	50	61	20	0.2	8	6	25	73	42	90	84	691	7 %	
R. Yukawa	2644	165	482	160	180	157	148	228	570	220	235	281	5470	56.5%	
R. Jigoku	420	251	172	170	251	196	192	273	204	247	221	258	2855	29.5%	
R. Toyamazawa	91	7	10	11	5	2	1	0.3	22	10	14	17	143	2 %	
R. Yanagisawa	29	6	4	7	5	4	1	0.3	6	5	3	3	73	1 %	
R. Shimizu	}	26	5	4	6	3	3	2	2	12	8	12	31	114	1 %
R. Yokokawa															
R. Kannonsui															
Others	91	14	15	18	9	8	3	2	30	20	25	55	290	3 %	
Total	3533	498	748	392	453	378	353	531	917	552	600	729	9683		
Outgo															
Outflow	156	47	21	14	7	7	4	5	3	14	21	32	331		
Sedimentation	2517	2125	638	599	696	834	743	1112	1189	1102	762	577	12894		
Accumulation in lake water													1089		
others	35	16	25	27	25	16	10	10	12	8	23	16	223		
Total	2708	2188	684	640	728	857	757	1127	1204	1124	806	625	14537		

#### 4. 考 察

中禅寺湖における物質収支を調べた結果水収支は流入及び流出がよく一致した。窒素収支は流出が流入の約 1.1 倍の値になったがよく一致した部類に属すると考えられる。リン収支は流出が流入

の約1.5倍の値になり、窒素収支に比較してその精度は悪かった。栄養塩収支で流入と流出が釣り合わない原因は実測した沈殿量が非常に多かったためである。図7に窒素及びリンの沈殿量の実測値と、流入負荷から流出負荷を差し引いて求めた推定沈殿量とを比較して示す。1981年8月及び9月は沈殿量の測定が両月にまたがって行われたため実測値は両月で高くなっていた。それに対して、推定沈殿量は8月に高い値となった。豪雨の影響をみるため両月を足し合わせて比較すると、実測値は窒素19t、リン4,642kg、推定値は窒素18.6t、リン3,777kgとなり、窒素は両者でほぼ釣り合っており、リンは実測値が約1.2倍高い値となった。豪雨の影響の少ない他の月では、窒素の場合実測値が年間を通じてほぼ4t/月程度と変化が少なかったのに対し、推定値では秋期および冬期に低い値となった。リンでは変動パターンは類似していたが、11月から6月の冬期を中心とした期間で推定値が実測値をかなり下まわった。このような相違が生じた原因はいくつか考えられるが、その一つには流入負荷量の推定値が低すぎたことが考えられる。特にリンの場合、降雨時には土砂

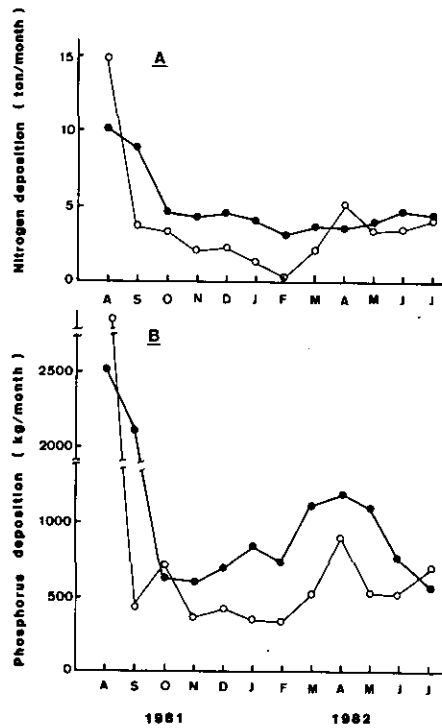


図 7 流入負荷量から湖水の流出に伴う流出負荷量を差し引いた推定沈降量と実測した沈降量との比較

Fig. 7 Nitrogen and phosphorus deposition amounts in Lake Chuzenji

(●) observed at the lake center, (○) estimated from income and outgo amount.  
A, nitrogen deposition. B, phosphorus deposition.

等に吸着したリンが平常時に比べ高濃度で流入することが知られており(海老瀬, 1981), 降雨の影響は窒素より大きい。8月及び9月の実測値と推定値のリン沈殿量に約1000 kgの差が生じた原因としてはこのような理由が考えられる。しかしながら, 流入水量の少ない冬期で実測値と推定値に大きな違いがみられたことは, 流入負荷量の推定誤差と同時に, 沈殿量の測定にも誤差が生じた可能性がある。沈殿量の測定は St. 2 を中心とした湖内1水域でしか行っておらず, また調査地点は湯川や地獄川の河口に比較的近い地点であったことから, 湖の全平均沈殿量より大きな値が得られた可能性がある。今後地点数を増した調査が必要となろう。また冬期に大きな違いがみられることから, 循環期での湖水の大循環に伴う湖流が沈殿物に影響を及ぼしている可能性もある。同時に湖岸帯での底泥の巻き上げも無視できない可能性もあり, それらの影響が複合した結果, 実測値と推定値に相違が生じたものと考えられる。

中禅寺湖の栄養塩収支を他の湖沼と比較すると, 中禅寺湖の流入負荷が窒素  $5.7 \text{ g/m}^2 \cdot \text{y}$ , リン  $0.8 \text{ g/m}^2 \cdot \text{y}$  であるのに対し, 既に富栄養化の著しい諏訪湖, 霞ヶ浦ではそれぞれが, 窒素  $126.7 \text{ g/m}^2 \cdot \text{y}$  と  $18.8 \text{ g/m}^2 \cdot \text{y}$ , リン  $9.1 \text{ g/m}^2 \cdot \text{y}$  と  $2.7 \text{ g/m}^2 \cdot \text{y}$  となり, 中禅寺湖への負荷が少ないことがわかる(表5)。またこれらの湖沼と比較すると流入負荷と流出負荷の差が大きく, 窒素で67%, リンで94%が湖内に推積していると考えられる。このような湖の特徴は今後の水質保全を考える上で十分に留意する必要がある。

湖に対するリン流入負荷量から湖水中のリン, 窒素, クロロフィル  $a$  濃度及び透明度等を推定しようとする試みは Vollenweiden (1968) 以来数多くなされている。湖水中の全リン濃度 ( $TP$ ) は水の滞留時間 ( $R_w$ ) と全リンの滞留時間 ( $R_p$ ) との比,  $\pi r$ , が明らかになれば流入全リン負荷 ( $L_p$ ) と水量負荷 ( $qs$ ) とから次式によって求めることができる (Vollenweider, 1976)。

$$TP = (L_p / qs) \times \pi r = (L_p / qs) \times (R_p / R_w) \quad (1)$$

Vollenweiden は  $\pi r$  が  $1 / (1 + \sqrt{z/qs})$  又は  $1 / (1 + \sqrt{R_w})$  と等しいと仮定して種々の湖で解析を行っている。中禅寺湖の水収支から水の滞留時間 ( $R_w$ ) を求めると約6.5年となる。また全リンの滞留時間は湖内平均現存量が8.4 tであるので(相崎・大概, 1984), 流入負荷量  $9.4 \text{ t/y}$  で割って,

表 5 諏訪湖, 霞ヶ浦及び中禅寺湖での栄養塩収支

Table 5 Nutrient budget in Lakes Suwa, Kasumigaura and chuzenji

	N ( $\text{g/m}^2 \cdot \text{y}$ )			P ( $\text{g/m}^2 \cdot \text{y}$ )			Source	
	Income	Outgo	Residual(%)	Income	Outgo	Residual(%)		
L. Suwa	14.45 $\text{km}^2$	126.7	95.1	25	9.1	7.3	20	Okino(1982)
L. Kasumigaura	171 $\text{km}^2$	18.8	6.8	64	2.7	0.7	74	Goda et al.(1984)
L. Chuzenji	12.1 $\text{km}^2$	5.7	1.9	67	0.8	0.05	94	This study

0.87年が得られる。したがって  $\pi r$  の値として 0.13 が得られる。一方、 $1/(1 + \sqrt{R_w})$  の値としては 0.28 が得られる。この値を利用して湖水中の TP 濃度を求めると、 $(L_p/q_s)$  が  $55 \text{ mg/m}^3$  であるので、 $\pi r$  0.13 の場合  $7 \text{ } \mu\text{g/l}$ 、0.28 の場合  $15 \text{ } \mu\text{g/l}$  となり、前者では湖内全リン平均濃度と一致し、後者は約 2 倍高い値となった。

湖内クロロフィル  $a$  濃度を全リン流入負荷量から推定するモデルもいく通りか経験的に得られている。ここでは OECD (1982) が世界各国の湖沼の調査結果から推定した式を用いて検討を行う。OECD の報告によれば、表層の平均クロロフィル  $a$  濃度 ( $\overline{\text{chl}}$ ) と全リン流入負荷量の間には次式のような関係がある。

$$\begin{aligned} \log(\overline{\text{chl}}) &= 0.96 \log \left( \frac{L_p \cdot \pi r}{q_s} \right) - 0.553 \\ &= 0.96 \log \left( \frac{L_p}{q_s (1 + \sqrt{R_w})} \right) - 0.553 \end{aligned} \quad (2)$$

また年間のクロロフィル  $a$  最高値とは次式のような関係がある。

$$\begin{aligned} \log(\text{chl}_{\text{max}}) &= 1.05 \log \left( \frac{L_p \cdot \pi r}{q_s} \right) - 0.194 \\ &= 1.05 \log \left( \frac{L_p}{q_s (1 + \sqrt{R_w})} \right) - 0.194 \end{aligned} \quad (3)$$

これらの関係式に今回の調査で得られた値、 $\pi r$  0.13 と  $(1/\sqrt{R_w})$  0.28 を代入して計算すると、 $\pi r$  0.13 では、平均クロロフィル  $a$  濃度として  $1.9 \text{ } \mu\text{g/l}$ 、最高クロロフィル  $a$  濃度として  $5.0 \text{ } \mu\text{g/l}$  の値が得られた。この値は中禅寺湖における表層の平均クロロフィル  $a$  濃度  $2.0 \text{ } \mu\text{g/l}$  及び循環期に得られたカラム当たりの平均最高濃度  $4.1 \text{ } \mu\text{g/l}$  とほぼ一致した(相崎・大槻, 1984)。一方、0.28 を代入した場合には平均クロロフィル  $a$  濃度  $3.9 \text{ } \mu\text{g/l}$ 、最高クロロフィル  $a$  濃度  $11.3 \text{ } \mu\text{g/l}$  となり 2 倍程度高い値となった。したがって中禅寺においては Vollenweider が想定した湖に比べてリンの沈降速度が速いため、 $\pi r = 1/(1 + \sqrt{R_w})$  と仮定するのは危険であり、実測値から推定した  $\pi r = 0.13$  の値を使うのが妥当と考えられる。

次に今回の測定では台風の豪雨の影響が強かったので、豪雨の影響のない状態を仮定して計算を行った。その結果、水の滞留時間は約 8 年となり、 $L_p$  としては  $6.6 \text{ t/y}$ 、 $\pi r$  の値としては 0.16 を得た。また全リンの流入負荷濃度は  $46 \text{ mg/m}^3$  となった。これらの値を用いて平均クロロフィル  $a$  濃度及び最高クロロフィル  $a$  濃度を計算すると  $1.9 \text{ } \mu\text{g/l}$  及び  $5.2 \text{ } \mu\text{g/l}$  となり、降雨負荷を考慮した場合とほぼ同じ値となった。このときの  $1/(1 + \sqrt{R_w})$  の値としては 0.26 が得られた。

以上述べてきたごとく流入リン負荷量から湖内のクロロフィル  $a$  濃度、全リン濃度を推定することは  $\pi r$  の値が求められるば可能であるが、赤潮状態のような特殊な状態の推定は困難である。我々

が調査を継続した 1983 年 7 月には局所的に  $7.9 \mu\text{g/l}$  という高いクロロフィル *a* 濃度を測定しており、また吉田ら (1983) によれば琵琶湖の赤潮時にはカラム当たりの平均クロロフィル *a* 濃度が約  $4 \mu\text{g/l}$  のときに表層に  $16.7 \mu\text{g/l}$  の集積を観測している。今後これらの点を考え合わせ、より一層詳細な物質収支、物質循環の研究が必要とならう。

## 5. まとめ

中禅寺湖における 1981 年 8 月から 1982 年 7 月までの水収支、窒素収支及びリン収支を測定した。各流入河川の水量負荷を計算すると、湯川が最も高く全体の 28%、次に地獄川で 24%、残留域及び降雨からがそれぞれ 15% 及び 14%、千手ヶ浜から流入する 5 河川から 19% の割合になっていた。一方、流出先は蒸発量で 3%、大尻川からの表面流出が 25% で残り 72% が地下水による漏水と考えられた。年間の水量負荷量は  $175.7 \times 10^6 \text{m}^3$  と計算され、季節的には台風による豪雨の影響で 8 月が多かった。各流入河川からの窒素負荷は湯川が最も高く全体の 35%、次に地獄川で 28%、降雨から 13%、残留域から 11%、外山沢から 5%、柳沢及び他の千手 3 河川からそれぞれ 4% の割合になっていた。一方、流出としては大尻川からの表面流出が 6%、漏水による流出が 23%、湖内現存量の減少が 4%、沈殿が 75% と推定された。年間の総流入負荷量は 69.5 t と見積もられ、流出量は 79.8 t と見積もられた。流入量と流出量には約 1.1 倍の違いがみられた。

各流入河川からのリン負荷は湯川が全体の 56.5% で最も高く、次に地獄川の 29.5% で両河川で全流入負荷の 86% を占めた。その他、降雨から 7%、残留域から 3%、千手ヶ浜に流入する 5 河川から 4% と推定された。一方、流出は大尻川からの表面流出が 2%、漏水による流出が 2%、湖内現存量の増加が 8%、沈殿が 88% と推定された。年間の総流入負荷量は 9.7 t、総流出負荷量は 14.5 t と推定され、流出負荷が流入負荷の約 1.5 倍の値になった。この原因としては降雨時の流入負荷量の過少評価、池殿量の測定誤差等が考えられた。

これらの結果から、中禅寺湖における水の滞留時間は約 6.5 年、リンの滞留時間は 0.87 年、リンの滞留時間と水の滞留時間の比、 $\tau_r$  は 0.13 と推定され、この値を用いることにより OECD モデルから湖水の全リン濃度、クロロフィル *a* 濃度をリン負荷量から推定することが可能と判断された。

最後に、国立公害研究所野尻幸宏博士及び木幡邦男博士には地獄川のリンの同定及びアルカリ度の測定を担当していただいた。記して感謝いたします。

## 引用文献

相崎守弘・大槻晃・海老瀬潜一・安部喜也・岩熊敏夫・福島武彦 (1981)：霞ヶ浦高浜入における栄養塩収支。国立公害研究所研究報告、第 22 号、281—308。



相崎守弘ら

- 相崎守弘・大槻晃 (1984) : 中禅寺湖の水質特性. 国立公害研究所研究報告, 第 69 号, 37—52.
- 安部喜也 (1981) : 霞ヶ浦流域の降水特性および大気中からの栄養塩の供給について. 国立公害研究所研究報告, 第 20 号, 27—42.
- 海老瀬潜一 (1981) : 霞ヶ浦流入河川の流出負荷量変化とその評価. 国立公害研究所研究報告, 第 21 号, 130p.
- 福島武彦 (1984) : 中禅寺湖における懸濁態物質の沈殿量とその特性. 国立公害研究所研究報告, 第 69 号, 53—67.
- 合田健・村岡浩爾・福島武彦 (1984) : 霞ヶ浦の栄養塩の物質収支について. 国立公害研究所研究報告, 第 54 号.
- 市川当・田瀬則雄 (1982) : 中禅寺湖における流入河川湯川の影響範囲 I. 水温分布による考察. 水温の研究, 25, 5641—5646.
- 片野尚明 (1977) : 海面からの蒸発と熱交換係数に関する検討と新しい熱交換計算図表の提案. 電力中央研究所研究報告, 376008, 1—53.
- Mori, S. and G. Yamamoto (ed.) (1975) : Productivity of Communities in Japanese Inland Waters. JIBP Synthesis, Vol. 10, Tokyo Univ. press, Tokyo.
- OECD (1982) : Eutrophication of Waters. OECD, Paris.
- 沖野外輝夫 (1982) : 諏訪湖における炭素・窒素およびリンの収支と湖内での循環の現状. 国立公害研究所調査報告, 第 22 号, 35—42.
- 栃木県衛生環境部 (1983) : 中禅寺湖・湯の湖水質調査報告書. 栃木県.
- 安野正之・大槻晃 (1981) : 霞ヶ浦沖帯の生態系の構造. 国立公害研究所研究報告, 第 22 号, 309—318.
- 吉田陽一・三田村緒佐武・田中信彦・門田元 (1983) : びわ湖の“淡水赤潮”に関する研究—I. 植物プランクトンおよび栄養塩類の分布変化. 陸水学雑誌, 44, 21—27.
- Vollenweider, R. A. (1968) : Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to phosphorus and nitrogen as factors in eutrophication. OECD, Paris. Tech. Rep. DA5/CSI/68.27.
- Vollenweider, R. A. (1976) : Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. Mem. Ist. Ital. Idrobiol., 33, 53—83.

III

ま と め

Summary

村岡浩爾

Kohji MURAOKA

中禅寺湖に *Uroglena americana* の異常増殖による水道水異臭味の実害が発生したのをきっかけに、この初期の富栄養化状態を刻明に解明するためにこの研究を実施したものであるが、2年間という短期間でこの現象のどこに着目すべきか、それが問題であった。湖の富栄養化現象は極めて緩慢に進行するため、この現象の現状を把握するだけでも、気象の経年変化を考えれば数年から10年位は調査を継続したいところである。しかし中禅寺湖にいったん赤潮症状が発生したとなると、本調査期間中にはそれが幸いにも見られなかったが、いつ再び発生するかわからないし、その流入負荷には観光や養殖漁業といった人為的な起源による要素も多い。したがって多少研究陣容は不十分でもとに角短期間で湖沼調査を行い、その実態を明らかにするとともに少しでも富栄養化の進行程度を緩和する施策検討に必要な資料を整える必要があったわけである。

種々の湖沼調査の中でも、水温成層や鉛直循環の現象にかかわる流体力学的検討は比較的短期間で成果が期待できるものである。その背景には、最近迅速かつ精巧な現地観測用の水温測定器が用いられるようになったことがあり、従来の湖沼観測用の水温計では探知困難な現象及び予想はされていたが確認できなかった現象を測定することができた。湖沼環境の面でのこの成果は報文II-1に詳述されているが、その重要な点は中禅寺湖における内部セイシュの解明である。すなわち、風の吹送に起因するシア作用と重力平衡によって水温の変温層 (thermocline) で14~16時間の長周期振動の内部波が生ずることである。中禅寺湖で卓越する東西方向の風によって生ずるこの1次モードの内部セイシュは、その最大規模において波高が5 mにも達し、更にはそれがあまり減衰することなく数日間は振動が続く。この状態では東西の湖岸近傍で、水粒子の5 mの鉛直往復流、湖心部では500 mの水平往復流が発生することになり、また変温層付近では同じ周期で水温が5~6°C変わることにもなる。

この現象によって今後の湖沼環境を把握する上で留意すべきことは、第一に水質観測などの測点が固定されてもそこでの現象はセイシュ規模の周期性があることである。第二にプランクトンや魚類がこの現象に対し、どんな生態的応答を示しているかであるが、これに関しては全く未知とは言

え、留意すべき事項である。例えば赤潮べん毛藻 (*Uroglena americana* もその一種) は走光性により毎時数 10 cm の遊泳力をもつと言われるが、これはセイシュの鉛直流速と同程度であるため、条件によっては藻類の集積機構にかかわることも考えられる。しかしこのことは現段階では憶測の域を出ていない。

中禅寺湖に流入する水量は年間 1.76 億 $\text{m}^3$ で、湖面降水と河川等流域から供給される。流出する水量で算定可能なのは蒸発量と湖尻から出る河川流出でこれらを合わせると流入水量の 28% となり、残りの 72% は漏水 (河川流としてでなく、地中間げきをぬって下流河川に浸透流出したり、地下水流出で失われるもの) と推定される。このように山岳湖沼ではしばしば大量の漏水が見られるが、これは水収支による残量として推定する以外にない。

流入水量と湖容量とで決まる平均滞留時間は 6.5 年であるが、常に一様に水が交換されているのではなく、水温成層の形成や鉛直循環による水の部分的な滞留や流動がある。このことによって湖内の溶存及び懸濁物質の量と質が局所性を帯び、湖水の環境状態を形作る。春期循環期 (3 月～5 月) に濃度が高まるセストンの特性から分かるごとく、湖の 1 年間の life work はこの時期に始まると見てよいが、季節変化は単調なものではなく、それゆえに湖環境の把握も難しい。殊に台風など異常気象に伴う大量の降水量は、流入水及び流入物質の増加と相まって、湖内の状態を一転させてしまう起動力を持っている。1982 年 8 月及び 9 月の豪雨に際し、我々はこのことをつぶさに観測した。年間の沈殿量のうち、この豪雨に起因する量は、セストンで約 60%、窒素で約 30%、リンで約 40%、クロロフィル *a* で約 10% という大きさである。比較的湖内状態が動的に安定する冬から初夏にかけての生態学的な湖内活動の根底には、前年の異常気象に伴う要素の変動が潜在するとみてよいであろう。

当面問題としている *U. americana* は、5～7 月に植物プランクトンの 50% 程度を優占する増殖期をもつ。1983 年この時期のクロロフィル *a* の鉛直分布調査から、湖面から 10 m までの層の濃度が高く、そこで約 6  $\mu\text{g}/\text{l}$  の高濃度が 7 月上旬の 1 週間程度継続した。また表層での高濃度は約 3  $\mu\text{g}/\text{l}$  で、6 月下旬に約 1 週間続いた。琵琶湖で生ずる同じべん毛藻による赤潮状態は、表層におけるクロロフィル *a* 濃度が約 20  $\mu\text{g}/\text{l}$ 、水温が 16～18°C の条件で生ずると言われるが、中禅寺湖のこの時期の調査状態ではそれに至らず、現に赤潮状態は見られなかった。問題は、中禅寺湖でこの状態から更に進んで赤潮状態になる可能性があるかどうかである。

平常時には少々の強風が吹いても表層の水混合は極く限られていて、深さ 10 m 付近に見られるやや密度の高いウログレナの集団がそのまま表層に持ち上げられるような混合力はないと見られる。一方、ウログレナの走光性による表層への移動は日常的に可能な状態であるはずであるが、実際には表層で異常増殖は見られていない。この原因の一つに考えられるのは表層の水温であり、この時期の表層水温は 16°C 前後で、琵琶湖の例に照らして微妙な所で条件が合わなかったという見方もある。また、増殖に必要な栄養塩の濃度であるが、琵琶湖に比べおおむね 1/2～1/3 程度に低かつ

た。

仮に条件が整っているとすれば、中禅寺湖で赤潮状態のウログレナ個体数約1万 cells/mlに増殖するための必要な増殖期間と初期個体数が具備されているかどうか、この点について考える。この検討は報文II-2に詳しいが、現地で予想される比増殖速度0.2/dを用いて計算すると、1982年4月に観測された *U. americana* の密度14 cells/mlを初期個体数にとると、33日で赤潮状態になり、200 cells/mlを初期値とすれば約2週間で同じ状態になることとなる。*U. americana* の優占期に相当する水温10~18°Cの期間は30~40日であるため、中禅寺湖は増殖に対して好条件のもとで赤潮が発生する十分の潜在力を有するとみられる。

以上の検討に加えて、無視できないのが湯ノ湖を起源とする湯川の流入である。すなわち、湯川の流入水は水量においても物質においても中禅寺湖に対する最大の供給源であることである。特に水質面では、湯ノ湖周辺に集中する宿泊施設からの排水による湖水水質汚濁が顕著であり、排水処理施設や湯川の自浄作用もあるとは言え、現状ではかなりの栄養塩その他の物質流入をもたらしている。この点について述べる前に、湯川の水量と水温について付言しておこう。その特徴は湯川から流入する河川水の水温が、一般に冬期から5月下旬にかけて中禅寺湖の湖水温より高いことである。このためこの時期の河川水はおおむね湖内表層に広がると見られる。しかしながら、この高温水の流入によって湖水の表層水温を高めるには熱源として微々たるもので、水温成層の形成には太陽熱が支配的と考えるべきである。とは言え、湯川の河川水に含まれる種々の物質が湖水表面に広がれば、その濃度が高いだけに、表層に特異な濃度分布を与える可能性はある。また6月以降は逆に湖水温が上がるため、河川水は中層へ浸入することが考えられる。これらの浸入水が湖域の全域にどのように、またどんな速さで水平拡散するか、この評価も検討の余地があるが、ちょうどこの時期がウログレナの増殖期に当たっていることから、湯川からの物質流入が湖内の鉛直物質濃度分布機構に何らかの影響を及ぼしていると考えてよい。この推論を背景として湯ノ湖の水質、特にウログレナの発生量をみると、5月下旬に1万~10万 cells/mlの *U. americana* の大発生が観測されている。これが流下して、湯川の河口部では4,000~2万5,000 cells/mlとなるが、10日間流入量が中禅寺湖の表層10mに一樣に拡散したとすれば、60~350 cells/mlとなる。これを初期個体数とすれば、前の試算でも分かる通り、湯ノ湖から運ばれるウログレナによって一層赤潮状態の発生が助成される可能性のあることが知られる。

いずれの湖においても、湖内での物質循環や生態系から湖の環境を論ずるためには、物質収支を明らかにしておく必要がある。その作業は河川、降水等による流入物質質量、湖尻からの河川、漏水等による流出物質質量をきめ細かく測定することである。1981年8月から1982年7月までの1年間の観測結果をまとめると、全窒素について年間流入量は約70t、年間流出量は約20t、また全リンについては、それぞれ、約9.7t、約1.6tとなる。したがってその差引として、全窒素約50t、全リン約8tが湖底に堆積することになる。従来からこのような方法で堆積量を求めるのだが、流入出力の

調査頻度の不足や異常気象時の状態を的確に捕らえ得ないことによる誤差が含まれているはずである。我々は、深い湖では特に鉛直方向の物質移動現象が重要であることから、湖水中の沈降物質を各水深で捕らえる調査を試みたが、この最深部(110 m)での沈降量から求めた堆積量は、全窒素約60 t、全リン約13 tとなった。収支計算から求めた値と若干の相異があるが、むしろ沈降過程から見た物質の湖底蓄積について報文II-3に詳述された現象把握の重要性により、沈降量調査に意義を感ずるものである。

物質収支の資料をもとに、対象とする湖が富栄養化段階のどの位置にあるか、種々の考察が検討されてきている。中禅寺湖は流入栄養塩の湖内単位面積当たりのコラムに対する負荷量でみると、富栄養化した諏訪湖や霞ヶ浦に比べ非常に小さいし、流入負荷量に対する流出負荷量の比が小さい(したがって沈降量の比率が大きい)ことも貧栄養湖の一般的特徴の一つである。しかしこのことによって、中禅寺湖が貧栄養湖として格付けられたとしても、この湖の赤潮状態がどうして生ずるのか、どういう因果関係で今後どうなっていくのかについては依然として不明である。また、中禅寺湖の水の平均滞留時間が6.5年、リンについては0.87年と計算され、OECDモデルによって湖水の全リン濃度、クロロフィル *a* 濃度をリン負荷量から推定し得ることが報文II-7に詳述されているが、単なる状態設定に終わらず、この知見から今後なすべき調査の視点を確立する重要性を示唆している点に意義があると解している。

以上のような成果を背景として、今後中禅寺湖をどのような視点から調査し、初期の富栄養化現象がみられる湖としてどういう対策を講ずるべきと判断したらいいのだろうか。2年間行ってきた我々の調査を経験して第一に思うのは、気象変化などの微妙な外的条件によって湖内でウログレナの増殖が活発になる可能性のある状態で、その実態を短期的な時間スケールで追跡したいことである。そのためにはバックグラウンド調査として長期的な調査体制を組んでおく必要があるが、この点については幸いにも地元栃木県公害研究所が既に定期調査を実施しており、当面必要な監視がなされていると見られる。しかしウログレナの増殖期間では、当然調査頻度の少ない定期調査だけでは不十分で、予想される湯ノ湖の湖環境との相関を、実態として把握し得る程度にきめの細かい調査が必要である。一応の調査計画を遂行し終えた我々としても、4月から7月の増殖期間については今後も注目するつもりである。

中禅寺湖は湖畔及び下流の一部の地域の上水供給源となっている。1981年6月の異臭味事件も、湖尻に近い位置で取水された水道水について発生したものである。今後万一同様の赤潮状態が発生したとして、その場合でも上水に異常がみられないように取水口高さなど取水施設を改良することは、富栄養化防止の抜本的な対策ではないにしても必要なことであろう。琵琶湖の例から赤潮状態では表層でのクロロフィル *a* 濃度が20  $\mu\text{g}/\text{l}$ 程度になると言われているため、当然表層からの取水は好ましくない。我々の調査期間では、既に述べたように、水深8 m付近にピークを持つ10 m以浅でのクロロフィル *a* 濃度分布が注目された。取水口高さはこれらの事実を勘案して決定されるべ

きだらう。

貧栄養湖、富栄養湖を問わず、調和型湖沼で富栄養化過程による社会的影響を防止する対策では、栄養塩の流入負荷を可能な限り軽減することが第一の基本対策である。中禅寺湖においては、我々の調査で確認したように、現状では湯ノ湖からの流入水が短期的な赤潮現象、長期的な富栄養化現象の両面で、最も大きな影響力を持っていると考えられる。この意味で湯ノ湖の浄化の促進を何よりも優先させる必要がある。湯ノ湖から中禅寺湖までの平均流達時間は1日のオーダーであるため、短期的な現象にも当然効果があると思われる。

養殖漁業にかかわる汚濁負荷については、湖内での漁業やレクリエーションとしての釣産業と、養魚池等を利用する養殖産業との二つに分けて考えるべきである。湖内に放ち、かつ漁獲される魚量は、周辺のキャンプ場、観光船等の産業も合わせ、湖沼の水質環境の維持保全に対して許容される負荷量からみた観光資源容量を政策的にも検討した上で決定されるべきである。特に湖内魚類の生態からみた魚の内部負荷の検討は、それ程困難なことではない。一方、養魚池等を利用した養殖産業は、将来の食糧資源として中禅寺湖にかかわらず重要な産業となろう。養殖漁業ではその漁獲高を効率的に確保かつ増大させる必要性から、その排水が湖内に流入する場合には、負荷量として無視し得ない量となろう。少なくとも今後の養殖産業においては、沿岸の下水道施設と同様、排水の処理及び系外放流の方式を養魚場の配置も含めて慎重に検討されるべきである。

人為的な汚染にかかわる問題だけでなく、地獄川の源流に異常なリン酸態リンが含まれているごとく、中禅寺湖に流入する各種の栄養塩については、自然現象に起因すると見られるものも多い。地獄川源流の湧水の恐らく供給源と考えられる戦場ヶ原においても、その湿原の変ほうは著しく、湿原生態学、地球化学、土壌学と言った面からの学術的な検討も必要である。湖沼を取りまく環境の変ほうが自然的にも人為的にも著しい中禅寺湖が、今後どのように変わり、そのためにどのような対策を講ずるべきか、中禅寺湖の調査や研究が他の貧栄養湖の環境保全にも役立つ形で今後も進行して行くことを望んでいる。

この調査を行うに当たって、栃木県衛生環境部、栃木県公害研究所、水産庁養殖研究所日光支所の御関係者には、この問題についての有益な情報の交換と調査に関する多大の便宜を受けた。厚く謝意を表する次第である。また中禅寺湖漁業協同組合の各位には、我々の調査活動に深い理解を示され、数々の協力を賜わった。感謝する次第である。また栃木県中禅寺湖ダム管理事務所には流出水量の資料提供を受け、気象庁日光測候所には調査資料の解析に必要な気象資料の提供を受けた。合わせてお礼申し上げる次第である。

最後に、水質土壌環境部合田健部長には、この研究の意義に理解を頂いた上、研究成果について種々の有益な検討を加えて頂いた。ここに厚く感謝する次第である。

## IV

### 資 料

#### Limnological Data in Lake Chuzenji

1981年7月から1983年6月にかけて行った中禅寺湖及び中禅寺湖流入出河川の調査データを示す。収録したデータは以下のとおりである。

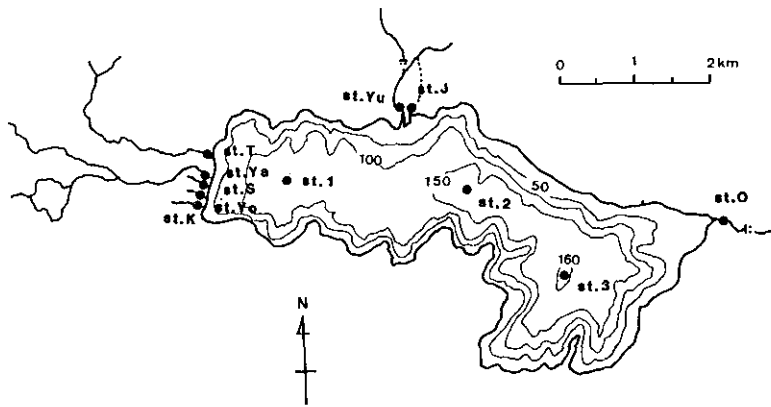


図 1 中禅寺湖及び調査地点

Fig. 1 Lake Chuzenji and study sites

資料 i : 気象。気象庁日光測候所 (緯度  $36^{\circ}44'$ , 経度  $139^{\circ}30'$ , 高度 1291.9 m) 観測データ。

資料 ii : 水温。図 1 に示す st. 2 の地点における水温の鉛直分布。測定方法等に関しては平田・村岡 (1984) を参照。

資料 iii : 中禅寺湖及び流入出河川の水質。図 1 に示す湖内 3 地点, 流入出河川 8 河川において測定したデータ。st. J, 地獄川; st. Yu, 湯川; st. T, 外山沢川; st. Ya, 柳沢川; st. S, 清水; st. Yo, 横川; st. K, 観音水; st. O, 大尻川。分析方法等に関しては相崎・大槻 (1984), 相崎ら (1984) を参照。

資料 iv : 沈降量。図 1 に示す st. 2 の地点において測定。測定方法等に関しては福島 (1984) を参照。

資料 v : 湯川の水質。湯川の自浄作用に関する測定データ。測定地点, 測定方法に関しては相崎

資料

(1984) を参照。

資料vi：中禅寺湖に出現する植物プランクトン及び動物プランクトン。測定地点、測定方法に関しては小山・福田(1984)を参照。

引用文献

- 相崎守弘(1984)：湯川の自浄作用。国立公害研究所研究報告，第69号，89—98。  
 相崎守弘・大槻 晃(1984)：中禅寺湖の水質特性。国立公害研究所研究報告，第69号，37—52。  
 相崎守弘他(1984)：中禅寺湖における栄養塩収支。国立公害研究所研究報告，第69号，99—112。  
 福島武彦(1984)：中禅寺湖における懸濁態物質の沈殿量とその特性。国立公害研究所研究報告，第69号，53—68。  
 平田健正・村岡浩爾(1984)：中禅寺湖の水温成層と内部波。国立公害研究所研究報告，第69号，5—36。  
 小山次朗・福田訓真(1984)：中禅寺湖における植物プランクトン及び動物プランクトンの季節変動。国立公害研究所研究報告，第69号，69—76。

資料 i 気象資料 Meteorological Data

i-1 Monthly average of air temperature (°C)

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
1981	-6.4	-5.0	-0.6	4.8	9.1	13.2	18.1	17.9	12.9	8.1	3.0	-1.8
1982	-4.0	-5.0	0.0	4.4	11.6	12.7	15.0	18.0	13.6	7.8	5.2	0.4
1983	-3.8	-4.9	-1.3	7.5	10.3	11.9						

i-2 Monthly amount of rainfall (mm)

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
1981	29.0	51.5	48.5	177.0	197.5	198.0	206.5	683.0	144.5	184.0	58.0	0.5
1982	25.0	17.0	71.5	214.5	125.5	260.5	248.0	1068.5	505.5	174.5	88.5	12.0
1983	6.0	56.0	96.0	245.0	116.5	215.0						



## 資料 ii 水温鉛直分布 Vertical Profile of Water Temperature

(°C)

Year	1981					1982									
	Date	Aug. 12	Sep. 28	Oct. 21	Nov. 18	Dec. 15	Jan. 18	Feb. 18	Mar. 16	Apr. 14	May. 19	Jun. 16	Jul. 14	Aug. 16	Sep. 14
0		20.9	16.2	12.9	8.8	5.3	4.0	2.8	3.1	3.4	7.8	14.3	17.1	19.4	16.3
2		20.8	16.2	12.9	8.8	5.3	4.0	2.8	3.0	3.3	7.8	13.7	17.0	19.4	16.2
4		20.3	16.2	12.9	8.7	5.3	4.0	2.8	3.0	3.3	7.8	13.6	17.0	19.2	15.8
6		20.1	16.2	12.9	8.6	5.3	4.0	2.8	3.0	3.3	7.5	13.4	16.8	16.1	15.7
8		18.0	16.2	12.9	8.6	5.2	4.0	2.8	3.0	3.3	6.9	13.2	16.3	15.3	15.5
10		15.9	16.2	12.9	8.6	5.2	4.0	2.8	3.0	3.2	6.5	11.9	14.8	14.6	15.3
12		12.4	16.2	12.9	8.6	5.2	4.0	2.8	3.0	3.3	5.9	8.8	12.8	14.2	14.5
14		9.8	15.6	12.9	8.6	5.2	4.0	2.8	3.0	3.3	5.6	8.4	10.5	13.2	13.7
16		8.7	14.0	12.9	8.6	5.2	4.0	2.8	3.0	3.3	5.4	7.5	9.5	11.9	12.9
18		7.9	12.4	12.9	8.6	5.1	4.0	2.8	3.0	3.3	5.2	6.9	7.5	10.5	10.2
20		7.1	10.5	12.6	8.6	5.1	4.0	2.8	3.0	3.3	5.1	6.3	6.6	9.2	9.2
22		6.7	9.3	10.0	8.6	5.1	4.0	2.8	3.0	3.3	4.8	5.8	6.2	7.6	8.9
24		6.4	8.2	8.8	8.6	5.1	4.0	2.8	3.0	3.3	4.7	5.6	6.1	7.1	8.0
26		6.1	7.4	7.7	8.6	5.0	4.0	2.7	3.0	3.3	4.5	5.4	5.6	6.6	7.4
28		5.8	6.9	7.2	8.6	5.0	4.0	2.7	3.0	3.3	4.4	5.2	5.4	6.3	6.9
30		5.6	6.5	6.8	8.6	5.0	4.0	2.7	3.0	3.3	4.3	5.1	5.3	5.9	6.4
32		5.4	6.2	6.5	7.4	5.0	4.0	2.7	3.0	3.3	4.3	5.0	5.1	5.6	6.2
34		5.3	5.9	6.1	6.3	4.9	4.0	2.7	3.0	3.3	4.3	4.8	4.9	5.4	5.8
36		5.2	5.7	5.8	5.7	4.9	4.0	2.8	3.0	3.2	4.2	4.8	4.8	5.1	5.6
38		5.1	5.6	5.6	5.6	4.9	4.0	2.8	3.0	3.2	4.1	4.7	4.8	4.9	5.5
40		5.1	5.5	5.3	5.5	4.9	4.0	2.8	3.0	3.2	4.1	4.7	4.6	4.7	5.2
45		4.8	5.1	5.1	5.2	4.9	4.0	2.9	3.0	3.2	4.0	4.5	4.4	4.6	4.8
50		4.7	5.0	4.9	5.0	4.9	4.0	3.0	3.0	3.2	4.0	4.4	4.3	4.5	4.7
55		4.7	4.9	4.8	4.9	4.8	4.0	3.0	3.0	3.2	3.9	4.3	4.3	4.3	4.4
60		4.5	4.7	4.6	4.8	4.8	4.0	3.0	3.0	3.2	3.9	4.2	4.2	4.2	4.3
65		4.5	4.7	4.6	4.8	4.8	4.0	3.0	3.0	3.2	3.9	4.2	4.2	4.2	4.2
70		4.4	4.6	4.6	4.7	4.8	4.0	3.1	3.0	3.2	3.8	4.1	4.1	4.1	4.2
75		4.4	4.5	4.5	4.7	4.8	4.0		3.0	3.2	3.8	4.0	4.1	4.2	4.2
80		4.3	4.4	4.4	4.6	4.7	4.0	3.2	3.0	3.2	3.9	4.0	3.1	4.2	4.2
85		4.3	4.4	4.4	4.6	4.7	4.0		3.0	3.2	3.9	3.9	4.0	4.3	4.2
90		4.3	4.4	4.4	4.5	4.6	4.0	3.2	3.0	3.2	3.9	3.9	3.9	4.3	4.2
95		4.3	4.4	4.4	4.5	4.6	4.0		3.0	3.2	3.9	3.9	3.9	4.4	4.2
100		4.3	4.4	4.4	4.5	4.6	4.0	3.2	3.0	3.2	3.9	3.9	3.9	4.4	4.2

## 資料

## 資料 ii (つづき continued)

(°C)

Year	1982			1983										
	Date	Oct. 22	Nov. 11	Dec. 16	Jan. 20	Feb. 15	Mar. 15	Apr. 19	May 16	Jun. 16	Jul. 12	Aug. 13	Sep. 10	Oct. 12
0		13.4	11.0	6.6	4.0	3.2	2.9	3.7	8.1	11.8	16.1	21.8	20.3	15.2
2		13.4	11.0	6.6	4.1	3.2	2.9	3.7	8.1	11.8	16.1	21.3	20.3	15.2
4		13.4	11.0	6.6	4.0	3.2	2.9	3.7	8.1	11.8	16.1	21.2	20.1	15.2
6		13.4	11.0	6.6	4.1	3.2	2.9	3.7	8.1	11.7	15.5	19.9	19.5	15.1
8		13.3	11.0	6.6	4.1	3.2	2.9	3.6	7.8	11.6	14.2	18.5	18.8	15.0
10		13.3	11.0	6.5	4.1	3.2	2.9	3.6	6.7	11.4	13.1	16.3	17.9	15.0
12		13.3	11.0	6.6	4.1	3.2	2.9	3.6	6.5	11.0	12.2	14.5	17.2	14.9
14		13.3	11.0	6.5	4.1	3.2	2.9	3.6	6.3	10.6	11.1	12.6	16.1	14.9
16		13.3	11.0	6.5	4.1	3.2	2.9	3.6	5.9	10.1	10.3	11.2	13.9	14.8
18		13.0	11.0	6.5	4.1	3.3	2.9	3.6	5.7	9.3	9.1	10.1	11.8	14.2
20		12.0	10.9	6.5	4.1	3.4	2.9	3.6	5.5	7.4	8.4	9.8	10.0	13.6
22		10.0	10.9	6.5	4.1	3.4	2.9	3.6	5.3	6.9	7.9	9.3	9.3	10.1
24		9.1	10.7	6.5	4.1	3.5	2.9	3.6	5.1	6.7	7.4	8.2	8.4	9.2
26		7.9	9.9	6.5	4.1	3.5	2.9	3.6	4.8	6.5	6.8	7.4	7.6	8.5
28		7.0	8.3	6.5	4.1	3.5	2.9	3.6	4.7	6.2	6.5	7.0	7.2	7.6
30		6.7	7.6	6.5	4.1	3.5	2.9	3.6	4.6	6.0	6.2	6.6	6.9	7.2
32		6.4	6.9	6.5	4.1	3.5	2.9	3.6	4.6	5.9	6.0	6.2	6.5	6.6
34		6.1	6.3	6.5	4.1	3.5	2.9	3.6	4.6	5.9	6.0	6.2	6.5	6.6
36		5.8	6.1	6.5	4.1	3.5	2.9	3.6	4.6	5.2	5.3	5.7	5.8	6.0
38		5.7	5.9	6.5	4.1	3.5	2.9	3.6	4.5	5.0	5.1	5.3	5.5	5.6
40		5.6	5.7	6.5	4.1	3.5	2.9	3.6	4.5	4.7	4.9	5.0	5.0	5.0
45		5.1	5.2	6.2	4.1	3.5	2.9	3.6	4.2	4.5	4.6	4.7	4.6	4.6
50		4.9	4.9	5.1	4.1	3.5	2.9	3.6	4.2	4.3	4.4	4.4	4.4	4.4
55		4.9	4.8	4.7	4.1	3.5	2.9	3.6	4.1	4.2	4.3	4.3	4.3	4.3
60		4.8	4.6	4.5	4.1	3.5	2.9	3.6	4.0	4.1	4.2	4.3	4.2	4.2
65		4.7	4.6	4.5	4.1	3.5	2.9	3.6	3.9	4.1	4.1	4.2	4.2	4.2
70		4.5	4.6	4.4	4.1	3.5	2.9	3.6	3.9	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
75		4.5	4.4	4.4	4.1	3.5	2.9	3.6	3.9	4.0	4.1	4.1	4.1	4.1
80		4.4	4.4	4.3	4.1	3.5	2.9	3.6	3.9	4.0	4.0	4.1	4.1	4.1
85		4.4	4.4	4.3	4.1	3.5	2.9	3.6	3.8	4.0	4.0	4.0	4.0	4.1
90		4.4	4.4	4.3	4.1	3.5	2.9	3.6	3.9	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
95		4.4	4.4	4.3	4.1	3.5	2.9	3.6	3.9	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
100		4.4	4.4	4.3	4.1	3.5	2.9	3.6	3.9	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0

資料iii 中禅寺湖及び流入河川の水質 Water Quality of Lake Chuzenji and Inflow and Outflow Rivers

iii-1 Water quality of Lake Chuzenji

Sample	Tr. (m)	D.O. (mg/l)	Seston (mg/l)	POC ( $\mu$ g/l)	PON ( $\mu$ g/l)	Chl.-a ( $\mu$ g/l)	NO <sub>3</sub> -N ( $\mu$ g/l)	NO <sub>2</sub> -N ( $\mu$ g/l)	NH <sub>4</sub> -N ( $\mu$ g/l)	O-PO <sub>4</sub> -P ( $\mu$ g/l)	T-P ( $\mu$ g/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Si (mg/l)	
1981. 7. 10																	
St.1	0 m	13.0	—	—	—	1.0	70	2	16	—	8	8.0	1.6	10.8	1.8	9.8	
	5	—	—	—	—	1.1	86	2	28	1	8	7.6	1.4	10.0	1.6	9.5	
	10	—	—	—	—	1.1	86	1	21	2	17	7.8	1.6	10.7	1.8	9.8	
	20	—	—	—	—	0.9	86	1	14	1	5	7.9	1.6	10.9	1.8	9.3	
	30	—	—	—	—	0.6	114	1	29	3	7	8.1	1.6	11.0	1.8	9.3	
St.2	0	13.0	—	—	—	1.4	61	1	24	1>	6	7.5	1.5	10.0	1.7	9.6	
	5	—	—	—	—	1.1	62	1	21	1	6	7.7	1.5	10.0	1.7	9.6	
	10	—	—	—	—	1.1	64	1	20	1>	6	8.3	1.5	10.4	1.7	9.9	
	20	—	—	—	—	1.3	96	1	19	2	7	7.8	1.5	9.9	1.7	8.9	
	30	—	—	—	—	2.8	99	1	20	1>	5	7.8	1.6	10.8	1.8	9.1	
St.3	0	10.5	—	—	—	2.2	56	1	31	1>	6	7.5	1.6	9.4	1.6	9.3	
	5	—	—	—	—	2.5	55	1	29	1>	6	7.2	1.5	9.0	1.6	9.1	
	10	—	—	—	—	1.4	64	1	35	1>	7	7.5	1.5	8.9	1.6	9.2	
	20	—	—	—	—	1.4	86	1	19	1>	15	8.0	1.6	10.1	1.7	9.1	
	30	—	—	—	—	3.0	95	1	32	1	6	8.2	1.7	10.4	1.8	9.1	
1981. 8. 12																	
St.1	0	11.0	—	0.43	179	16	1.3	50	2	16	1	7	—	—	—	—	
	5	—	—	0.82	166	22	1.6	45	2	16	1	7	—	—	—	—	
	10	—	—	0.97	337	37	1.9	54	2	17	1	6	—	—	—	—	
	20	—	—	0.43	168	49	1.2	75	2	17	1	5	—	—	—	—	
	50	—	10.0	0.38	146	20	2.5	128	2	7	1	6	—	—	—	—	
St.2	0	12.0	—	0.32	140	11	1.1	43	2	22	1	6	—	—	—	—	
	5	—	—	0.62	308	34	0.8	43	2	28	1	6	—	—	—	—	
	10	—	—	1.24	516	69	1.6	47	2	25	1	7	—	—	—	—	
	20	—	—	0.80	276	37	1.2	72	2	19	1	7	—	—	—	—	
	50	—	10.0	0.46	111	15	1.5	123	2	17	2	5	—	—	—	—	
St.3	0	11.0	7.9	0.30	145	14	1.0	43	1	17	2	6	7.2	1.4	10.6	1.8	10.9
	5	—	8.2	0.34	191	18	1.2	45	1	18	2	5	7.5	1.4	10.8	1.8	11.0
	10	—	8.7	0.35	220	21	1.6	48	1	21	1	6	7.2	1.4	10.9	1.9	10.8
	20	—	10.6	0.64	209	29	1.6	71	1	13	1	9	7.2	1.5	11.1	1.9	9.9
	50	—	10.4	0.22	86	11	1.0	129	1	5	2	5	7.4	1.5	11.4	1.9	9.9
	100	—	10.0	0.21	64	11	0.5	136	1	10	3	5	7.5	1.5	11.2	1.9	10.2
	150	—	9.3	0.44	114	13	0.6	167	2	11	6	14	7.8	1.6	11.7	2.0	10.2
1981. 9. 29																	
St.1	1	9.0	8.5	0.32	169	16	1.5	54	2	8	1>	5	—	—	—	—	
	5	—	8.6	0.67	162	22	1.7	55	2	11	1>	7	—	—	—	—	
	10	—	8.6	0.36	163	21	2.1	58	2	10	1>	7	—	—	—	—	
	20	—	9.4	0.46	155	22	2.2	57	2	13	1>	6	—	—	—	—	
	50	—	9.9	0.80	77	9	0.4	132	1	8	1	5	—	—	—	—	
St.2	0	10.0	8.4	0.32	118	17	2.1	58	1	12	1>	5	—	—	—	—	
	5	—	8.4	0.35	165	21	1.6	57	2	10	1>	6	—	—	—	—	
	10	—	8.5	0.29	160	20	1.6	57	2	13	1>	6	—	—	—	—	
	20	—	9.5	0.44	146	21	3.1	61	2	15	1	5	—	—	—	—	
	50	—	9.8	0.46	106	7	0.4	130	2	16	2	5	—	—	—	—	
St.3	0	10.0	8.4	0.27	107	14	1.2	61	2	8	1	5	—	—	—	—	
	5	—	8.4	0.44	155	21	1.3	57	2	12	1>	5	—	—	—	—	
	10	—	8.4	0.37	136	19	1.5	57	2	11	1>	5	—	—	—	—	
	30	—	8.5	0.38	149	20	1.3	57	2	10	1>	5	—	—	—	—	
	50	—	10.5	0.36	115	16	1.4	101	2	6	1>	4	—	—	—	—	
	100	—	9.8	0.32	99	11	0.3	137	3	9	4	6	—	—	—	—	
	150	—	9.6	0.42	113	11	0.3	150	3	10	5	8	—	—	—	—	

## 資料

## iii-1 (つづき continued)

Sample	Tr. (m)	D.O. (mg/l)	Seston (mg/l)	POC ( $\mu$ g/l)	PON ( $\mu$ g/l)	Chl.-a ( $\mu$ g/l)	NO <sub>3</sub> -N ( $\mu$ g/l)	NO <sub>2</sub> -N ( $\mu$ g/l)	NH <sub>3</sub> -N ( $\mu$ g/l)	O-PO <sub>4</sub> -P ( $\mu$ g/l)	T-P ( $\mu$ g/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Si (mg/l)	
1981.10.20																	
St.1	0 m	11.4	10.4	0.95	218	38	2.6	44	2	7	1>	8	7.7	1.4	11.1	2.1	9.7
	5	—	9.9	1.02	257	38	3.0	44	2	7	1>	11	7.6	1.3	10.2	1.8	9.5
	10	—	10.1	1.00	221	33	3.9	43	2	7	1>	6	8.6	1.8	11.2	1.8	9.5
	20	—	9.9	0.71	191	30	3.3	62	2	11	2	—	8.6	1.8	12.2	2.1	10.2
	50	—	10.3	0.77	96	14	1.1	138	2	6	1>	5	7.8	1.7	11.8	2.0	9.3
St.2	0	10.3	10.1	0.94	204	31	3.4	56	2	11	2	8	8.2	1.8	11.0	2.2	9.8
	5	—	9.9	0.96	222	33	3.4	43	2	8	1>	7	8.0	1.6	10.7	1.8	9.7
	10	—	10.0	1.07	242	36	4.1	43	2	9	1>	5	7.4	1.6	10.8	2.1	9.6
	20	—	10.0	0.86	183	28	3.8	56	2	11	1>	3	7.5	2.2	10.7	2.3	9.9
	50	—	10.8	0.70	79	10	0.5	138	2	7	1>	8	7.9	1.6	11.6	2.0	9.4
St.3	0	10.3	9.8	0.74	151	24	2.1	49	2	10	1>	5	7.7	1.8	10.8	2.5	9.5
	5	—	10.0	0.99	233	34	3.0	47	2	10	1>	4	7.5	1.6	10.7	1.8	9.6
	10	—	9.9	0.97	246	38	2.4	43	2	12	1>	5	7.7	1.8	10.9	1.9	9.6
	20	—	10.5	0.59	150	25	2.2	74	2	14	1	8	8.1	1.9	11.7	2.1	9.6
	50	—	10.7	0.35	66	21	0.7	137	3	7	1>	3	8.3	2.0	12.5	2.3	9.2
	100	—	10.7	0.14	64	9	0.4	149	3	7	4	6	9.1	2.4	11.9	3.6	9.3
	150	—	9.4	0.30	66	9	0.3	190	3	14	6	12	8.4	2.0	12.4	2.3	9.4
1981.11.18																	
St.1	0	8.0	—	1.18	220	32	3.8	39	1	29	1	5	—	—	—	—	—
St.3	0	8.0	—	1.05	207	30	3.5	45	1	41	1>	6	—	—	—	—	—
St.2	0	7.7	9.6	1.02	192	29	2.7	25	1	32	1>	7	—	—	—	—	—
	5	—	9.6	0.27	192	31	2.9	39	1	33	1>	6	—	—	—	—	—
	10	—	9.7	1.10	207	35	3.9	29	2	36	1>	6	—	—	—	—	—
	20	—	9.9	0.99	195	31	4.0	37	1	35	1>	6	—	—	—	—	—
	50	—	9.7	0.33	61	9	0.6	134	1>	20	1>	5	—	—	—	—	—
	100	—	9.3	0.32	59	8	0.3	166	1>	16	3	7	—	—	—	—	—
	150	—	8.0	0.57	120	19	3.0	206	1>	30	4	10	—	—	—	—	—
1981.12.15																	
St.1	0	12.5	—	0.49	99	14	1.2	95	1>	11	1>	4	7.3	1.9	11.7	2.5	8.9
St.3	0	11.5	—	0.54	114	18	1.8	88	1>	15	1>	5	7.6	1.8	12.3	2.8	9.2
St.2	0	12.0	—	0.69	112	15	1.6	89	1>	13	1>	4	7.6	1.9	12.4	2.5	9.1
	5	—	—	0.61	119	18	1.5	88	1>	15	1>	5	7.5	1.9	12.6	3.4	9.1
	10	—	—	0.53	124	18	1.5	95	1>	16	1>	10	8.1	1.9	12.9	3.2	9.6
	20	—	—	0.59	129	19	1.6	95	1>	16	1>	7	7.8	2.0	12.4	2.4	9.3
	50	—	—	0.54	110	14	1.5	101	1>	12	1>	4	8.3	2.0	12.7	2.1	9.4
	100	—	—	0.32	65	8	0.4	174	1>	7	2	4	7.8	1.8	12.4	2.2	9.2
	150	—	—	0.66	91	19	0.6	199	1>	7	4	8	8.2	2.0	12.9	2.7	9.6
1982.1.18																	
St.1	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
St.3	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
St.2	0	11.5	—	0.58	95	13	0.8	132	1>	12	2	8	—	—	—	—	—
	5	—	—	0.42	85	11	1.0	130	1>	11	2	9	—	—	—	—	—
	10	—	—	0.34	78	11	0.9	131	1>	12	2	6	—	—	—	—	—
	20	—	—	0.34	75	11	1.0	130	1>	12	2	11	—	—	—	—	—
	50	—	—	0.34	82	11	1.0	130	1>	10	1	5	—	—	—	—	—
	100	—	—	0.45	73	14	0.9	130	1>	3	1	6	—	—	—	—	—
	150	—	—	0.55	97	11	1.0	131	1>	5	2	5	—	—	—	—	—
1982.2.18																	
St.1	0	12.1	—	0.53	118	16	1.9	136	1>	11	1>	7	—	—	—	—	—
St.3	0	12.0	—	0.39	133	18	1.9	162	1>	7	1>	6	—	—	—	—	—
St.2	0	13.8	—	0.63	228	18	1.8	158	1>	14	1>	7	—	—	—	—	—
	5	—	—	0.45	128	18	1.8	138	1>	14	1>	7	—	—	—	—	—
	10	—	—	0.43	125	17	1.8	168	1>	16	1>	7	—	—	—	—	—
	20	—	—	0.39	125	18	1.8	135	1>	14	1>	8	—	—	—	—	—
	50	—	—	0.35	100	14	1.4	130	1>	5	1>	7	—	—	—	—	—
	100	—	—	0.34	83	11	0.9	173	1>	7	1>	8	—	—	—	—	—
	150	—	—	0.48	85	11	0.9	144	1>	7	1>	10	—	—	—	—	—

## iii-1 (つづき continued)

Sample	Tr. (m)	D.O. (mg/l)	Seston (mg/l)	POC ( $\mu\text{g/l}$ )	PON ( $\mu\text{g/l}$ )	Chl.- <i>a</i> ( $\mu\text{g/l}$ )	NO <sub>2</sub> -N ( $\mu\text{g/l}$ )	NO <sub>3</sub> -N ( $\mu\text{g/l}$ )	NH <sub>4</sub> -N ( $\mu\text{g/l}$ )	O-PO <sub>4</sub> -P ( $\mu\text{g/l}$ )	T-P ( $\mu\text{g/l}$ )	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Si (mg/l)	
1982. 3. 16																	
St.1	0 m	8.5	—	0.88	213	26	4.2	129	1>	11	1>	9	—	—	—	—	
St.3	0	8.0	—	0.71	189	26	4.2	126	1>	14	1>	—	—	—	—	—	
St.4	0	—	—	1.15	303	27	3.8	127	1>	12	1>	—	—	—	—	—	
	5	—	—	0.76	179	22	4.3	126	1>	9	1>	9	—	—	—	—	
	10	—	—	0.77	178	24	4.2	125	1>	12	1>	9	—	—	—	—	
	20	—	—	0.76	196	25	4.1	126	1>	13	1>	—	—	—	—	—	
	50	—	—	0.74	163	24	4.1	127	1>	11	1>	—	—	—	—	—	
	100	—	—	0.70	147	21	4.0	135	1>	12	1>	—	—	—	—	—	
	150	—	—	2.63	256	31	3.9	140	1>	12	1>	—	—	—	—	—	
1982. 4. 15																	
St.1	0	9.7	—	0.93	202	28	4.0	111	1>	5	2	10	9.0	1.6	11.9	1.7	9.9
St.3	0	9.8	—	0.63	172	24	3.4	114	1>	8	2	4	8.2	1.4	9.4	1.5	8.7
St.2	0	10.7	11.6	0.85	212	28	3.9	115	1>	20	2	9	9.0	1.6	12.1	1.6	9.9
	5	—	11.6	0.87	198	28	4.2	112	1>	2	1	6	8.7	1.6	11.2	1.6	9.9
	10	—	12.3	0.87	208	27	4.1	115	1>	4	2	6	8.5	1.5	11.0	1.6	9.7
	20	—	11.7	0.90	211	30	4.2	114	1>	4	1	7	8.8	1.6	13.3	1.8	9.9
	50	—	11.1	0.93	239	26	4.2	116	1>	4	1>	8	8.6	1.6	10.9	1.6	9.6
	100	—	11.8	0.92	208	29	4.1	115	1>	6	1>	7	8.5	1.6	12.1	1.7	9.9
	150	—	11.4	1.69	249	34	4.4	115	1>	6	1>	4	8.7	1.6	11.2	1.6	10.0
1982. 5. 19																	
St.1	0	6.9	10.9	0.68	215	29	1.1	110	1	8	1	7	8.3	1.5	10.8	1.7	10.0
St.3	0	7.6	11.2	0.84	229	31	1.0	100	1>	14	1>	6	8.4	1.5	10.6	1.7	9.5
St.2	0	8.3	11.3	0.80	222	31	1.2	101	1>	8	1	7	8.6	1.5	10.9	1.8	9.6
	5	—	11.3	0.92	275	37	1.4	102	1>	6	1	7	8.5	1.5	10.7	1.7	9.7
	10	—	11.6	0.99	274	36	1.6	101	1>	6	1	7	8.5	1.5	10.6	1.7	9.6
	20	—	11.3	0.89	246	31	2.4	110	1>	13	1	7	7.7	1.4	10.6	1.7	9.5
	50	—	11.3	0.57	131	17	1.5	116	1>	15	1	7	8.1	1.4	11.1	1.8	9.5
	100	—	11.0	0.65	119	15	0.9	116	1>	24	1	7	8.0	1.5	11.1	1.8	9.6
	150	—	10.9	0.65	106	14	1.0	116	1>	26	1	6	8.0	1.5	11.1	1.8	9.6
1982. 6. 17																	
St.1	0	—	—	0.31	117	6	0.7	94	2	9	1	5	7.6	1.4	11.1	1.7	10.1
St.3	0	—	—	0.26	180	2	0.8	97	2	90	1>	5	7.7	1.3	11.2	1.8	10.3
St.2	0	8.5	10.5	0.26	107	23	0.7	94	2	10	1>	7	7.4	1.4	11.3	1.8	10.1
	5	—	10.5	0.40	143	18	1.0	95	2	10	2	5	7.4	1.3	10.6	1.7	9.9
	10	—	10.4	0.45	146	14	0.8	91	1	8	2	5	7.7	1.4	11.2	1.7	10.1
	20	—	—	0.82	248	37	4.1	96	1>	4	2	11	7.3	1.3	10.7	1.7	9.4
	50	—	—	0.44	128	6	1.2	117	1>	18	2	5	7.4	1.4	11.1	1.8	9.7
	100	—	—	0.47	95	4	0.9	119	1	21	2	5	7.5	1.4	11.2	1.8	9.8
	150	—	—	1.01	116	14	1.0	121	5	24	2	6	7.4	1.4	11.8	1.9	10.1
1982. 7. 14																	
St.1	0	—	—	0.69	166	23	1.3	87	1	6	2	4	7.6	1.3	10.4	1.8	10.3
St.3	0	—	—	0.56	140	6	1.7	87	1	13	2	4	7.6	1.3	10.1	1.8	10.4
St.2	0	13.0	8.7	0.55	135	14	1.4	87	1	7	1>	6	7.8	1.3	10.7	1.8	10.8
	5	—	8.8	0.64	210	17	1.7	87	1	8	1	12	7.6	1.3	10.6	1.8	10.4
	10	—	9.5	0.78	234	27	2.2	92	1	11	1>	7	7.8	1.3	10.8	1.8	11.1
	20	—	11.6	0.54	113	19	2.6	89	1>	20	1	13	7.7	1.3	10.3	1.7	9.8
	50	—	10.6	0.67	102	12	1.9	112	3	32	1>	6	7.7	1.3	11.2	1.9	10.1
	100	—	10.7	0.49	77	10	1.2	131	3	13	1	6	7.7	1.4	11.1	1.8	10.2
	150	—	10.0	0.78	113	14	1.5	153	1>	10	2	8	7.6	1.3	10.9	1.8	10.0
1982. 8. 18																	
St.1	0	5.3	—	0.78	262	39	1.8	74	1	9	1>	9	—	—	—	—	—
St.3	0	4.8	—	0.84	187	—	2.0	89	2	13	1	8	—	—	—	—	—
St.2	0	5.2	10.0	0.84	153	20	2.0	92	1	9	1>	9	—	—	—	—	—
	5	—	8.2	1.31	261	39	2.2	93	1	10	1	12	—	—	—	—	—
	10	—	8.6	1.79	188	21	1.4	94	1	16	1	8	—	—	—	—	—
	20	—	10.3	3.03	182	21	1.0	97	1	20	1	8	—	—	—	—	—
	50	—	10.1	0.99	158	21	1.2	144	1>	2	1	6	—	—	—	—	—
	100	—	10.1	5.64	287	30	1.3	122	1>	5	2	10	—	—	—	—	—
	150	—	—	6.06	249	32	1.3	169	1	6	3	14	—	—	—	—	—

## 資料

## iii-1 (つづき continued)

Sample	Tr. (m)	D.O. (mg/l)	Seston (mg/l)	POC ( $\mu$ g/l)	PON ( $\mu$ g/l)	Chl.- <i>a</i> ( $\mu$ g/l)	NO <sub>2</sub> -N ( $\mu$ g/l)	NO <sub>3</sub> -N ( $\mu$ g/l)	NH <sub>4</sub> -N ( $\mu$ g/l)	O-PO <sub>4</sub> -P ( $\mu$ g/l)	T-P ( $\mu$ g/l)	
1982.9.16												
St.1	0 m	3.9	—	1.91	214	35	1.0	64	1>	25	1>	7
St.3	0	4.5	—	1.10	295	21	0.9	55	1>	21	1>	5
St.2	0	5.1	8.2	1.42	326	31	1.9	67	1>	34	1>	7
	5	—	8.0	2.11	456	60	1.6	61	1>	25	1>	7
	10	—	7.9	2.04	397	34	1.9	88	1	31	1>	41
	20	—	8.8	2.69	293	25	1.0	106	1	11	1>	7
	50	—	10.0	1.26	195	10	0.6	140	1>	9	2	8
	100	—	9.7	2.68	308	—	0.7	140	1>	8	3	8
	150	—	9.3	4.96	401	45	0.9	171	1>	8	2	10
1982.10.20												
St.1	0	—	—	1.04	231	26	2.5	85	1	6	2	6
St.3	0	—	—	1.22	245	32	2.5	84	2	10	1>	6
St.2	0	—	8.9	1.01	287	33	2.5	85	1	6	2	6
	5	—	8.9	1.35	329	35	2.7	86	1	6	1	6
	10	—	8.8	1.40	282	44	2.5	87	1	?	1>	8
	20	—	8.7	1.17	208	23	1.5	112	1	4	2	6
	50	—	9.9	1.19	189	17	0.3	149	1>	1	2	6
	100	—	9.7	1.95	166	15	0.4	161	1>	2	3	7
	150	—	9.0	1.43	146	22	0.4	180	1>	3	3	8
1982.11.10												
St.1	0	11.2	—	0.67	132	19	2.5	90	1	8	3	—
St.3	0	11.7	—	0.58	64	8	1.9	90	1	10	2	—
St.2	0	10.8	—	0.82	179	28	2.1	84	1	7	1>	6
	5	—	—	0.90	202	31	2.5	87	1	8	1>	8
	10	—	—	0.77	180	26	1.9	89	1	8	1>	6
	20	—	—	0.86	140	20	2.1	93	1	10	2	12
	50	—	—	0.84	98	11	0.4	148	1>	6	3	6
	100	—	—	1.04	115	14	0.5	159	1>	8	3	6
	150	—	—	1.04	123	17	0.4	178	1>	11	6	7
1982.12.16												
St.1	0	12.1	—	0.12	99	13	1.2	110	1>	4	1	5
St.3	0	13.1	—	0.58	100	13	1.1	108	1>	5	2	7
St.2	0	11.7	—	0.49	95	12	—	112	1>	4	1	6
	5	—	—	0.53	125	19	0.9	112	1>	5	2	5
	10	—	—	0.64	150	23	0.9	112	1>	5	3	8
	20	—	—	0.54	110	17	0.7	112	1>	6	1>	9
	50	—	—	0.60	71	9	0.5	147	1>	1	1	5
	100	—	—	0.58	78	10	0.3	167	1>	2	2	10
	150	—	—	0.67	78	10	0.4	181	1>	4	2	8
1983.1.20												
St.1	0	9.3	—	0.15	90	13	0.7	158	1>	3	2	9
St.3	0	10.1	—	—	143	15	0.7	154	1>	6	2	6
St.2	0	8.0	—	0.25	91	11	0.6	165	1>	3	2	6
	5	—	—	—	99	11	0.5	154	1>	7	2	6
	10	—	—	—	114	13	0.9	169	1>	4	2	6
	20	—	—	0.71	87	12	0.7	171	1>	5	2	6
	50	—	—	0.23	89	11	0.9	176	1>	4	2	6
	100	—	—	0.35	103	15	0.9	172	1>	5	3	6
	150	—	—	1.77	180	23	1.3	171	1>	8	5	11
1983.2.15												
St.1	0	14.0	—	0.54	96	17	0.8	155	1>	4	3	7
St.3	0	13.8	—	0.96	223	29	3.0	127	1>	3	2	6
St.2	0	13.6	—	0.46	95	11	1.2	156	1>	2	2	6
	5	—	—	0.36	104	16	0.9	147	1>	3	2	6
	10	—	—	0.50	196	26	0.6	145	1>	3	2	6
	20	—	—	0.50	106	14	0.8	142	1>	3	2	6
	50	—	—	0.47	96	11	1.0	138	1>	2	2	6
	100	—	—	0.53	108	13	0.9	145	1>	4	2	6
	150	—	—	0.53	115	13	1.2	138	1>	4	3	7

iii-1 (つづき continued)

Sample	Tr. (m)	D.O. (mg/l)	Seston (mg/l)	POC ( $\mu$ g/l)	PON ( $\mu$ g/l)	Chl.-a ( $\mu$ g/l)	NO <sub>3</sub> -N ( $\mu$ g/l)	NO <sub>2</sub> -N ( $\mu$ g/l)	NH <sub>4</sub> -N ( $\mu$ g/l)	O-PO <sub>4</sub> -P ( $\mu$ g/l)	T-P ( $\mu$ g/l)	
1983. 3. 15												
St.1	0 m	—	—	0.99	—	—	1.3	141	1>	5	2	8
St.3	0	—	—	1.03	—	—	1.3	138	1>	9	1	6
St.2	0	11.0	11.1	0.87	126	57	1.8	140	1>	4	2	7
	5	—	11.0	0.92	168	21	1.7	140	1>	7	2	7
	10	—	11.2	0.93	148	21	1.9	140	1>	6	2	7
	20	—	11.5	0.80	125	—	1.9	140	1>	6	2	7
	50	—	11.0	0.91	120	20	2.0	138	1>	6	2	7
	100	—	11.0	0.92	113	15	1.8	138	1>	5	2	7
	150	—	11.0	0.87	114	24	1.7	141	1>	7	2	6
1983. 4. 19												
St.1	0	9.0	—	1.43	167	23	2.0	130	1>	10	6	8
St.3	0	9.0	—	1.30	167	30	2.4	231	1>	18	6	12
St.2	0	9.2	10.7	1.50	222	24	2.0	132	1>	9	6	10
	5	—	10.9	1.59	231	27	2.2	112	1>	11	5	13
	10	—	10.7	1.59	221	29	2.7	111	1>	14	3	14
	20	—	10.8	1.42	212	53	2.2	80	1>	12	5	10
	50	—	10.6	1.69	220	29	2.2	107	1>	12	5	16
	100	—	10.6	1.59	198	26	2.2	129	1>	15	6	11
	150	—	10.8	1.74	202	25	2.1	135	1>	16	7	12
1983. 5. 16												
St.1	0	9.8	—	1.46	245	30	1.6	133	2	8	6	13
St.3	0	9.0	—	1.61	280	29	2.2	136	1>	13	3	10
St.2	0	9.5	10.5	1.37	235	24	1.9	135	2	13	7	11
	5	—	10.5	1.61	315	36	2.0	135	1	15	6	15
	10	—	10.7	1.81	296	32	3.2	135	1>	11	4	9
	20	—	11.2	2.01	316	31	4.3	138	1>	18	6	9
	50	—	10.8	1.87	228	28	5.4	142	1>	15	4	14
	100	—	10.7	2.29	206	29	5.4	163	1	15	4	11
	150	—	10.7	3.64	315	41	9.2	151	1	26	4	23
1983. 6. 16												
St.1	0	10.5	—	0.43	155	21	1.2	112	1	4	1	2
St.3	0	10.3	—	0.51	179	27	1.0	112	1	7	1>	1
St.2	0	9.7	10.0	0.55	225	29	1.1	114	1	8	1	8
	5	—	9.6	0.69	283	38	1.1	113	1	5	1>	4
	10	—	10.1	0.82	288	37	1.6	110	1	6	1>	3
	20	—	10.8	1.22	308	29	1.7	116	1>	7	1>	4
	50	—	10.2	1.66	309	29	2.2	139	2	13	1>	2
	100	—	10.2	1.97	235	28	2.1	142	5	13	1	2
	150	—	9.9	2.09	248	31	2.6	146	5	20	2	2

## 資料

## iii-2 Water qualities of inflow and outflow rivers

Sample	Flow (m <sup>3</sup> /s)	W. T. (°C)	NO <sub>3</sub> -N (μg/l)	NO <sub>2</sub> -N (μg/l)	NH <sub>4</sub> -N (μg/l)	O-PO <sub>4</sub> -P (μg/l)	T-P (μg/l)	Seston (mg/l)	POC (μg/l)	PON (μg/l)	Chl- <i>a</i> (μg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Si (mg/l)	
												* 1981・7・10の Sample					
1981・8・13																	
R. Ojiri 大尻川	—	—	49	1	19	1	8	0.62	227	24	1.8	8.0*	1.7*	10.7*	1.8*	9.8*	
R. Yukawa 湯川	1.5	19.4	129	5	19	3	29	2.6	411	47	2.6	14.1*	2.2*	14.1*	2.0*	15.8*	
R. Jigoku ① 地獄川(河口)	1.66	—	386	5	68	70	—	1.6	537	46	1.0	11.6*	2.9*	17.6*	3.9*	25.1*	
R. Jigoku ② 地獄川(上流)	—	10.3	431	5	6	53	57	0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	
R. Toyamazawa 外山沢	0.532	13.5	135	3	8	5	9	0.97	160	13	1.2	3.7*	0.8*	4.7*	0.4*	9.4*	
R. Yanagisawa 柳沢	0.585	12.9	220	5	12	2	6	0.35	80	5	0.4	3.1*	0.7*	6.1*	0.6*	8.8*	
R. Shimizu 清水	0.182	9.8	233	2	10	4	3	0.33	200	9	0.6	—	—	—	—	—	
R. Yokokawa 横川	0.038	10.0	190	4	9	2	—	2.4	810	34	0.6	—	—	—	—	—	
R. Kannonsui 観音水	0.126	9.8	236	2	15	3	5	0.77	251	14	0.8	2.5*	0.6*	6.1*	0.5*	6.5*	
Well 井水(大学村)	—	—	294	2	5	5	—	0.01	128	2	—	—	—	—	—	—	
1981・9・28																	
R. Ojiri 大尻川	—	14.5	55	2	3	1>	6	0.32	120	14	1.3	—	—	—	—	—	
R. Yukawa 湯川	1.91	11.4	261	5	26	36	49	5.3	847	95	8.5	—	—	—	—	—	
R. Jigoku ① 地獄川(河口)	1.59	9.7	417	3	28	63	—	0.52	121	13	0.8	—	—	—	—	—	
R. Jigoku ② 地獄川(上流)	—	—	417	3	5	57	59	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
R. Toyamazawa 外山沢	0.438	11.0	220	3	4	3	5	1.47	97	12	1.1	—	—	—	—	—	
R. Yanagisawa 柳沢	0.592	9.8	255	3	3	1	3	0.31	50	6	1.0	—	—	—	—	—	
R. Shimizu 清水	0.158	9.7	247	3	3	2	4	0.18	96	8	0.3	—	—	—	—	—	
R. Yokokawa 横川	0.107	9.2	199	3	4	1	5	0.43	123	8	0.4	—	—	—	—	—	
R. Kannonsui 観音水	0.269	7.4	253	3	4	3	5	0.53	143	8	0.4	—	—	—	—	—	
Well 井水(大学村)	—	—	260	3	3	1	9	1.69	41	3	0.3	—	—	—	—	—	
1981・10・20																	
R. Ojiri 大尻川	—	13.8	40	1	15	3	5	1.02	208	32	2.6	8.0	2.0	11.9	2.4	9.5	
R. Yukawa 湯川	1.73	9.5	229	3	35	34	50	1.88	308	46	3.5	12.6	2.6	16.4	3.1	19.8	
R. Jigoku ① 地獄川(河口)	1.09	9.0	324	2	32	58	63	0.18	49	6	—	14.5	3.6	20.3	5.6	25.0	
R. Jigoku ② 地獄川(上流)	—	9.6	354	2	8	57	60	—	—	—	—	12.7	3.0	19.6	4.7	25.4	
R. Toyamazawa 外山沢	0.433	10.0	162	1	8	4	5	0.83	86	12	—	4.6	1.1	6.4	0.8	9.7	
R. Yanagisawa 柳沢	0.505	9.0	206	1	11	3	3	0.07	49	6	—	3.7	0.9	7.8	1.0	9.7	
R. Shimizu 清水	0.245	9.6	138	1>	11	3	3	0.10	55	5	—	3.5	0.9	7.3	1.0	8.1	
R. Yokokawa 横川	0.075	9.3	140	1>	9	2	2	0.11	47	5	—	2.6	0.8	6.2	0.6	6.8	
R. Kannonsui 観音水	0.205	7.9	180	1>	11	4	4	0.11	50	6	—	2.6	0.8	6.9	1.0	6.6	
Well 井水(大学村)	—	—	207	1>	7	4	6	0.37	12	1	—	9.0	1.3	12.5	0.9	10.5	



## iii-2 (つづき continued)

Sample	Flow (m <sup>3</sup> /s)	W. T. (°C)	NO <sub>2</sub> -N (μg/l)	NO <sub>3</sub> -N (μg/l)	NH <sub>4</sub> -N (μg/l)	O-PO <sub>4</sub> -P (μg/l)	T-P (μg/l)	Seston (mg/l)	POC (μg/l)	PON (μg/l)	Chl-a (μg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Si (mg/l)
1981-11-19																
R. Ojiri 大尻川	—	8.4	27	1	42	1>	6	0.98	193	31	3.0	—	—	—	—	—
R. Yukawa 湯川	1.44	7.0	180	2	21	10	19	1.18	260	41	5.0	—	—	—	—	—
R. Jigoku① 地獄川(河口)	1.13	9.6	404	2	27	59	63	0.47	59	8	—	—	—	—	—	—
R. Jigoku② 地獄川(上流)	—	8.1	437	2	22	55	61	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R. Toyamazawa 外山沢	0.425	7.0	275	1	17	3	7	1.31	101	12	—	—	—	—	—	—
R. Yanagisawa 柳沢	0.470	8.9	219	1	19	1	3	0.36	46	6	—	—	—	—	—	—
R. Shimizu 清水	0.149	9.0	195	1>	21	1	15	13.4	806	99	—	—	—	—	—	—
R. Yokokawa 横川	0.043	7.9	159	2	19	1	3	0.06	79	5	—	—	—	—	—	—
R. Kannonsui 観音水	0.200	7.0	215	1>	23	2	6	0.46	86	9	—	—	—	—	—	—
Well 井水(大学村)	—	—	283	1>	15	1	7	0.32	28	3	—	—	—	—	—	—
1981-12-16																
R. Ojiri 大尻川	—	3.5	83	1>	15	1>	3	0.52	111	18	2.1	6.6	1.8	11.5	2.3	8.2
R. Yukawa 湯川	1.53	4.6	291	2	33	41	53	2.61	450	57	6.5	10.1	2.3	17.0	3.5	17.9
R. Jigoku① 地獄川(河口)	1.44	8.8	462	1>	24	57	69	0.44	139	48	—	10.4	2.9	19.2	4.4	22.5
R. Jigoku② 地獄川(上流)	—	8.9	502	1>	9	52	58	—	—	—	—	10.7	2.9	19.6	5.1	22.5
R. Toyamazawa 外山沢	0.256	3.8	230	1>	9	3	6	0.54	72	8	—	3.8	0.9	6.3	1.1	8.8
R. Yanagisawa 柳沢	0.281	7.0	211	1>	9	1	3	0.51	59	7	—	3.5	0.9	7.2	1.1	9.0
R. Shimizu 清水	0.148	7.6	194	1>	9	1>	3	0.64	87	7	—	2.7	0.8	6.8	1.1	7.2
R. Yokokawa 横川	0.014	5.2	176	1>	10	1	2	0.64	97	9	—	2.2	1.5	6.1	1.7	6.0
R. Kannonsui 観音水	0.041	6.0	217	1>	10	2	3	0.35	81	6	—	2.1	0.6	6.4	2.1	5.7
Well 井水(大学村)	—	—	282	1>	10	4	8	—	—	—	—	7.3	1.3	11.1	1.1	9.7
1982-1-18																
R. Ojiri 大尻川	—	—	115	1>	4	1	7	0.64	141	16	—	—	—	—	—	—
R. Yukawa 湯川	1.11	3.1	233	2	26	20	38	3.58	449	65	—	—	—	—	—	—
R. Jigoku① 地獄川(河口)	1.11	9.1	469	1>	9	56	59	0.35	59	5	—	—	—	—	—	—
R. Jigoku② 地獄川(上流)	—	10.0	532	1>	3	57	61	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R. Toyamazawa 外山沢	0.111	5.0	275	1>	9	3	7	0.50	—	—	—	—	—	—	—	—
R. Yanagisawa 柳沢	0.191	6.1	241	1>	6	1	8	0.45	53	14	—	—	—	—	—	—
R. Shimizu 清水	0.096	6.9	212	1>	5	1	6	0.44	74	18	—	—	—	—	—	—
R. Yokokawa 横川	凍結	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R. Kannonsui 観音水	0.043	5.0	238	1>	7	2	6	0.38	82	24	—	—	—	—	—	—
Well 井水(大学村)	—	—	262	1>	4	6	16	0.15	18	3	—	—	—	—	—	—

## 資料

## iii-2 (つづき continued)

Sample	Flow (m <sup>3</sup> /s)	W. T. (°C)	NO <sub>3</sub> -N (μg/l)	NO <sub>2</sub> -N (μg/l)	NH <sub>4</sub> -N (μg/l)	O-PO <sub>4</sub> -P (μg/l)	T-P (μg/l)	Seston (mg/l)	POC (μg/l)	PON (μg/l)	Chl- <i>a</i> (μg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Si (mg/l)
1982・2・19																
R. Ojiri 大尻川	—	2.0	108	1>	6	1>	7	0.53	163	24	2.2	—	—	—	—	—
R. Yukawa 湯川	0.97	6.3	335	2	36	45	62	2.40	360	45	3.7	—	—	—	—	—
R. Jigoku① 地獄川(河口)	1.22	9.5	423	1>	13	57	67	0.43	54	6	—	—	—	—	—	—
R. Jigoku② 地獄川(上流)	—	—	482	1>	5	56	67	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R. Toyamazawa 外山沢	0.048	8.0	268	1>	9	2	8	0.25	83	11	—	—	—	—	—	—
R. Yanagisawa 柳沢	0.061	8.0	221	1>	10	1	8	0.50	59	7	—	—	—	—	—	—
R. Shimizu 清水	0.070	8.0	231	1>	11	1>	7	0.57	118	13	—	—	—	—	—	—
R. Yokokawa 横川	凍結	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R. Kannonsui 観音水	0.020	5.5	203	1>	9	2	6	0.22	52	6	—	—	—	—	—	—
Well 井水(大学村)	—	—	279	1>	7	5	17	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1982・3・16																
R. Ojiri 大尻川	—	3.0	104	1>	10	1>	7	0.85	235	29	4.5	—	—	—	—	—
R. Yukawa 湯川	1.24	—	316	3	39	44	—	12.0	1256	124	8.2	—	—	—	—	—
R. Jigoku① 地獄川(河口)	1.32	—	453	1>	32	61	77	0.40	97	9	—	—	—	—	—	—
R. Jigoku② 地獄川(上流)	—	—	505	1>	13	60	107	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R. Toyamazawa 外山沢	0.014	—	261	1>	9	2	7	0.91	231	30	—	—	—	—	—	—
R. Yanagisawa 柳沢	0.017	—	244	1>	11	2	6	0.64	101	11	—	—	—	—	—	—
R. Shimizu 清水	0.045	—	226	1>	33	4	12	0.56	107	11	—	—	—	—	—	—
R. Yokokawa 横川	凍結	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R. Kannonsui 観音水	0.021	—	224	1>	12	6	13	0.34	77	6	—	—	—	—	—	—
Well 井水(大学村)	—	—	274	1>	12	7	11	0.18	21	1	—	—	—	—	—	—
1982・4・15																
R. Ojiri 大尻川	—	3.3	111	1>	7	2	4	0.74	227	21	3.4	8.6	1.6	11.3	1.6	9.6
R. Yukawa 湯川	2.42	5.9	171	3	57	32	440	191.7	12,735	1115	30	8.5	1.9	9.5	1.5	10.9
R. Jigoku① 地獄川(河口)	1.29	9.0	442	1>	9	60	58	0.40	75	6	—	11.9	2.6	17.1	3.5	25.0
R. Jigoku② 地獄川(上流)	—	9.0	480	1>	5	64	60	—	—	—	—	12.8	2.7	17.9	3.7	25.8
R. Toyamazawa 外山沢	0.278	6.0	281	1>	24	5	33	33.6	174	38	—	3.8	0.7	5.2	0.4	8.0
R. Yanagisawa 柳沢	0.324	6.9	319	1>	7	3	8	5.42	331	28	—	3.6	0.6	6.4	0.6	9.1
R. Shimizu 清水	0.127	7.6	277	1>	22	6	9	0.92	223	19	—	3.0	0.5	6.4	0.6	8.1
R. Yokokawa 横川	伏流	6.2	224	1>	40	5	13	2.15	475	36	—	2.0	0.5	4.4	0.4	4.8
R. Kannonsui 観音水	0.051	5.6	186	1>	18	7	15	5.24	807	61	—	2.1	0.6	4.6	0.3	4.7
Well 井水(大学村)	—	—	284	1>	8	7	13	—	—	—	—	7.7	1.0	9.1	0.6	11.6

## iii-2 (つづき continued)

Sample.	Flow (m <sup>3</sup> /s)	W. T. (°C)	NO <sub>3</sub> -N (μg/l)	NO <sub>2</sub> -N (μg/l)	NH <sub>4</sub> -N (μg/l)	O-PO <sub>4</sub> -P (μg/l)	T-P (μg/l)	Seston (mg/l)	POC (μg/l)	PON (μg/l)	Chl- <i>a</i> (μg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Si (mg/l)
1982・5・20																
R. Ojiri 大尻川	—	8.0	93	1>	10	1	23	2.16	589	62	1.7	8.2	1.5	11.1	1.8	9.3
R. Yukawa 湯川	1.36	10.5	173	3	42	27	69	11.94	1660	184	19	13.5	2.3	15.6	2.3	15.5
R. Jigoku ① 地獄川(河口)	1.23	9.3	427	1>	15	58	65	0.28	80	6	—	11.9	2.6	18.1	3.9	25.2
R. Jigoku ② 地獄川(上流)	—	—	463	1>	7	61	63	—	—	—	—	12.1	2.5	17.2	3.8	24.9
R. Toyamazawa 外山沢	0.602	8.0	247	1>	6	7	15	8.97	483	46	—	3.7	0.6	4.9	0.4	9.1
R. Yanagisawa 柳沢	0.345	8.0	242	1>	9	2	6	1.08	134	10	—	3.5	0.5	6.4	0.6	9.3
R. Shimizu 清水	0.213	8.6	222	1>	43	15	22	0.71	173	17	—	2.7	0.5	5.9	0.6	7.9
R. Yokokawa 横川	0.026	9.0	247	1>	8	2	6	0.63	169	13	—	2.5	0.5	5.8	0.5	6.4
R. Kannonsui 観音水	0.290	8.2	261	1>	6	3	9	0.70	118	9	—	2.7	0.5	6.4	0.5	6.6
Well 井水(大学村)	—	—	337	1>	3	2	8	—	—	—	—	7.1	0.9	9.0	0.5	11.0
1982・6・16																
R. Ojiri 大尻川	—	14.2	88	2	11	1>	5	0.48	185	26	1.0	7.4	1.3	10.9	1.7	10.8
R. Yukawa 湯川	1.39	15.0	142	4	29	27	51	5.01	812	64	6.4	12.4	2.0	16.1	2.4	18.2
R. Jigoku ① 地獄川(河口)	1.42	9.8	433	1>	3	57	57	0.10	—	—	—	11.3	2.5	18.5	3.9	26.2
R. Jigoku ② 地獄川(上流)	—	10.0	477	1>	2	62	61	—	—	—	—	10.8	2.4	19.3	4.4	25.8
R. Toyamazawa 外山沢	0.594	9.3	208	1>	5	4	12	3.48	238	21	—	3.6	0.5	5.2	0.4	10.4
R. Yanagisawa 柳沢	0.452	8.7	208	1>	2	2	3	0.28	40	7	—	3.1	0.6	6.9	0.7	10.6
R. Shimizu 清水	0.191	9.1	210	1	55	20	28	0.39	97	43	—	2.7	0.4	5.9	0.6	8.3
R. Yokokawa 横川	0.217	9.3	254	1>	5	2	3	0.35	105	6	—	2.5	0.4	5.7	0.5	7.3
R. Kannonsui 観音水	0.181	8.6	284	1>	3	3	5	0.19	169	7	—	2.5	0.4	6.5	0.5	7.8
Well 井水(大学村)	—	—	380	1>	3	4	8	—	—	—	—	6.4	0.9	9.5	0.7	12.0
1982・7・15																
R. Ojiri 大尻川	—	—	79	1	18	3	9	0.84	178	19	2.1	7.5	1.3	10.2	1.7	10.0
R. Yukawa (湯川)	2.30	11.9	302	3	24	45	59	1.68	189	15	1.6	12.1	2.3	17.2	3.4	22.2
R. Jigoku ① 地獄川(河口)	発電所点検のため湯川と合流															
R. Jigoku ② 地獄川(上流)	—	10.1	435	1>	1	61	67	—	—	—	—	9.8	2.2	18.0	3.7	24.5
R. Toyamazawa 外山沢	—	—	171	1	8	5	9	2.41	250	20	—	3.8	0.5	5.2	0.5	10.2
R. Yanagisawa 柳沢	0.417	11.1	184	1>	5	2	3	0.52	56	45	—	3.5	0.5	6.0	0.6	9.7
R. Shimizu 清水	—	—	179	2	93	39	55	0.94	112	11	—	2.8	0.5	6.2	0.7	8.6
R. Yokokawa 横川	0.035	10.6	164	1>	10	3	7	0.86	232	12	—	2.6	0.4	5.6	0.5	7.2
R. Kannonsui 観音水	0.134	9.3	249	1>	3	3	5	0.35	166	13	—	2.5	0.4	6.4	0.5	7.0
Well 井水(大学村)	—	—	282	1>	5	4	7	—	—	—	—	6.7	0.9	9.1	0.7	11.8

## 資料

## iii-2 (つづき continued)

Sample	NO <sub>x</sub> -N ( $\mu\text{g/l}$ )	NO <sub>3</sub> -N ( $\mu\text{g/l}$ )	NH <sub>4</sub> -N ( $\mu\text{g/l}$ )	O-PO <sub>4</sub> -P ( $\mu\text{g/l}$ )	T-P ( $\mu\text{g/l}$ )	Seston (mg/l)	POC ( $\mu\text{g/l}$ )	PON ( $\mu\text{g/l}$ )	Chl- <i>a</i> ( $\mu\text{g/l}$ )
1982・8・18									
R. Ojiri 大尻川	92	2	10	1	9	0.96	153	20	2.1
R. Yukawa 湯川	231	3	25	23	41	2.60	308	53	3.8
R. Jigoku① 地獄川(河口)	407	1>	23	61	68	—	61	7	—
R. Toyamazawa 外山沢	264	1>	6	7	21	28.2	938	75	—
R. Yanagisawa 柳沢	266	1>	8	2	4	1.59	112	12	—
R. Shimizu 清水	275	1>	66	19	29	0.51	141	14	—
R. Yokokawa 横川	250	1>	7	3	10	0.54	129	11	—
R. Kannonsui 観音水	349	1>	3	3	4	0.42	79	7	—
1982・9・16									
R. Ojiri 大尻川	61	1	22	1>	6	1.0	371	31	1.3
R. Yukawa 湯川	261	3	17	10	26	3.9	615	52	2.6
R. Jigoku① 地獄川(河口)	408	1>	8	57	61	0.2	138	40	—
R. Toyamazawa 外山沢	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R. Yanagisawa 柳沢	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R. Shimizu 清水	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R. Yokokawa 横川	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R. Kannonsui 観音水	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1982・10・20									
R. Ojiri 大尻川	77	2	6	1	7	2.20	387	43	4.1
R. Yukawa 湯川	139	1	6	7	17	2.42	289	—	1.6
R. Jigoku① 地獄川(河口)	453	1>	4	60	62	—	—	—	—
R. Toyamazawa 外山沢	193	1>	2	9	15	28.7	415	62	—
R. Yanagisawa 柳沢	193	1>	1>	2	3	—	—	—	—
R. Shimizu 清水	220	1>	29	14	19	—	—	—	—
R. Yokokawa 横川	180	1>	1	2	4	—	—	—	—
R. Kannonsui 観音水	208	1>	4	3	4	—	—	—	—
1982・11・10									
R. Ojiri 大尻川	84	1	11	2	8	2.64	191	23	2.6
R. Yukawa 湯川	184	2	23	19	41	1.69	277	35	3.1
R. Jigoku① 地獄川	442	1>	19	62	67	—	—	—	—
R. Toyamazawa 外山沢	177	1>	10	5	10	—	—	—	—
R. Yanagisawa 柳沢	201	1>	9	2	5	—	—	—	—
R. Shimizu 清水	174	1>	33	13	16	—	—	—	—
R. Yokokawa 横川	165	1>	11	5	22	—	—	—	—
R. Kannonsui 観音水	174	1>	7	6	6	—	—	—	—

## iii-2 (つづき continued)

Sample	NO <sub>3</sub> -N ( $\mu\text{g/l}$ )	NO <sub>2</sub> -N ( $\mu\text{g/l}$ )	NH <sub>4</sub> -N ( $\mu\text{g/l}$ )	O-PO <sub>4</sub> -P ( $\mu\text{g/l}$ )	T-P ( $\mu\text{g/l}$ )	Seston (mg/l)	POC ( $\mu\text{g/l}$ )	PON ( $\mu\text{g/l}$ )	Chl- <i>a</i> ( $\mu\text{g/l}$ )
1982・12・16									
R. Ojiri 大尻川	105	1>	6	1>	7	0.61	150	19	1.4
R. Yukawa 湯川	227	1>	4	26	40	2.19	307	48	6.8
R. Jigoku① 地獄川(河口)	460	1>	10	58	61	0.23	61	7	—
R. Toyamazawa 外山沢	230	1>	3	4	7	—	—	—	—
R. Yanagisawa 柳沢	211	1>	3	2	3	—	—	—	—
R. Shimizu 清水	201	1>	13	8	13	—	—	—	—
R. Yokokawa 横川	195	1>	3	2	4	—	—	—	—
R. Kannonsui 観音水	206	1>	3	3	5	—	—	—	—
1983・1・20									
R. Ojiri 大尻川	137	1>	6	1	15	0.33	107	14	1.1
R. Yukawa 湯川	288	1	35	28	47	2.79	389	57	8.9
R. Jigoku① 地獄川(河口)	—	1>	10	60	65	—	—	—	—
R. Toyamazawa 外山沢	260	1>	6	3	7	—	—	—	—
R. Yanagisawa 柳沢	219	1>	5	2	6	—	—	—	—
R. Shimizu 清水	196	1>	13	6	14	—	—	—	—
R. Yokokawa 横川	198	1>	11	2	6	—	—	—	—
R. Kannonsui 観音水	205	1>	3	3	9	—	—	—	—
1983・2・15									
Ojiri 大尻川	109	1>	5	2	7	1.49	213	20	1.7
R. Yukawa 湯川	223	3	42	27	46	4.36	493	50	3.2
R. Jigoku① 地獄川(河口)	—	—	—	—	—	0.43	81	8	—
R. Toyamazawa 外山沢	210	1>	4	3	6	—	—	—	—
R. Yanagisawa 柳沢	171	1>	3	1	3	—	—	—	—
R. Shimizu 清水	156	1>	20	7	17	—	—	—	—
R. Yokokawa 横川	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R. Kannonsui 観音水	167	1>	3	3	10	—	—	—	—
1983・3・15									
R. Ojiri 大尻川	121	1>	8	2	8	2.89	142	25	3.1
R. Yukawa 湯川	265	3	41	34	61	7.34	703	220	6.4
R. Jigoku① 地獄川	457	1>	21	59	63	—	—	—	—
R. Toyamazawa 外山沢	225	1>	3	2	6	—	—	—	—
R. Yanagisawa 柳沢	186	1>	3	2	4	—	—	—	—
R. Shimizu 清水	176	1	41	17	24	—	—	—	—
R. Yokokawa 横川	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R. Kannonsui 観音水	172	1>	3	3	6	—	—	—	—

## 資料

## iii-2 (つづき continued)

Sample	NO <sub>3</sub> -N (μg/l)	NO <sub>2</sub> -N (μg/l)	NH <sub>4</sub> -N (μg/l)	O-PO <sub>4</sub> -P (μg/l)	T-P (μg/l)	Seston (mg/l)	POC (μg/l)	PON (μg/l)	Chl- <i>a</i> (μg/l)
1983・4・19									
R. Ojiri 大尻川	124	1>	16	7	7	2.74	251	31	2.1
R. Yukawa 湯川	211	3	38	22	50	8.55	810	51	5.3
R. Jigoku ① 地獄川(河口)	414	1>	20	54	—	—	—	—	—
R. Toyamazawa 外山沢	218	1>	14	8	13	—	—	—	—
R. Yanagisawa 柳沢	245	1>	11	6	7	—	—	—	—
R. Shimizu 清水	245	1>	32	8	13	—	—	—	—
R. Yokokawa 横川	395	1>	17	6	6	—	—	—	—
R. Kannonsui 観音水	230	1>	19	6	10	—	—	—	—
1983・5・16									
R. Ojiri 大尻川	133	1>	15	5	10	2.43	342	37	3.8
R. Yukawa 湯川	179	1>	25	29	76	12.87	1039	146	9.7
R. Jigoku ① 地獄川(河口)	518	1>	16	71	79	—	—	—	—
R. Toyamazawa 外山沢	262	1>	14	7	18	—	—	—	—
R. Yanagisawa 柳沢	246	3	49	6	10	—	—	—	—
R. Shimizu 清水	262	1>	38	16	26	—	—	—	—
R. Yokokawa 横川	239	1>	16	4	9	—	—	—	—
R. Kannonsui 観音水	297	1>	16	8	11	—	—	—	—
1983・6・16									
R. Ojiri 大尻川	102	1	6	1>	4	1.71	212	26	1.1
R. Yukawa 湯川	203	5	40	22	49	6.19	878	122	10.9
R. Jigoku ① 地獄川(河口)	450	1	37	58	57	—	—	—	—
R. Toyamazawa 外山沢	200	1	10	3	8	—	—	—	—
R. Yanagisawa 柳沢	213	1>	7	2	3	—	—	—	—
R. Shimizu 清水	208	1	63	16	19	—	—	—	—
R. Yokokawa 横川	187	1	12	2	1	—	—	—	—
R. Kannonsui 観音水	243	1>	8	2	1	—	—	—	—

## 資料 iv 沈殿量 Data of sedimentation

## Notation and Unit;

Depth; Sampling depth of deposited matter (m)

 $q_{ss}$ ; Depositing flux of seston ( $g/m^2d$ ) $q_{chl a}$ ; Depositing flux of chlorophyll-*a* ( $mg/m^2d$ )

C; Carbon content of deposited matter (%)

N; Nitrogen content of deposited matter (%)

P; Phosphorous content of deposited matter (%)

1981. 8. 14—9. 29 46 days

Depth	$q_{ss}$	$q_{chl a}$	C	N	P
15 m	7.44	0.69	3.37	0.36	0.09

1981. 9. 29—10. 20 25 days

Depth	$q_{ss}$	$q_{chl a}$	C	N	P
15 m	0.79	1.34	12.3	1.61	0.20

1981. 10. 20—11. 18 30 days

Depth	$q_{ss}$	$q_{chl a}$	C	N	P
15 m	1.65	3.74	9.82	1.38	0.12
30 m	1.30	1.88	7.96	1.12	0.16
100 m	1.76	1.78	7.87	1.04	0.17

1981. 11. 18—12. 15 27 days

Depth	$q_{ss}$	$q_{chl a}$	C	N	P
15 m	1.47	4.19	10.8	1.52	0.16
30 m	1.27	2.00	8.52	1.18	0.12
100 m	1.73	2.19	7.72	1.07	0.16

1981. 12. 15—1982. 1. 18 34 days

Depth	$q_{ss}$	$q_{chl a}$	C	N	P
30 m	1.15	0.98	7.24	0.98	0.22
100 m	1.22	1.19	7.34	1.05	0.20

1982. 1. 18—2. 18 31 days

Depth	$q_{ss}$	$q_{chl a}$	C	N	P
30 m	0.65	0.67	7.83	0.95	0.24
100 m	0.97	0.75	7.11	0.90	0.20

1982. 2. 18—3. 16 26 days

Depth	$q_{ss}$	$q_{chl a}$	C	N	P
30 m	0.95	0.83	7.30	0.97	0.22
100 m	1.10	0.99	6.79	0.92	0.25

1982. 3. 16—5. 19 64 days

Depth	$q_{ss}$	$q_{chl a}$	C	N	P
30 m	1.54	2.00	8.56	0.93	0.20
100 m	1.93	2.50	5.56	0.53	0.17

1982. 5. 19—6. 14 26 days

Depth	$q_{ss}$	$q_{chl a}$	C	N	P
5 m	0.49	0.58	16.0	1.72	—
10 m	0.83	0.99	16.0	1.63	0.14
15 m	0.81	1.09	13.7	1.35	0.13
20 m	0.86	1.68	12.3	1.29	0.13
30 m	0.95	1.09	12.5	1.22	0.14
40 m	1.02	1.33	10.5	1.18	0.14
60 m	0.97	0.94	7.32	0.76	0.13
80 m	1.06	0.99	7.28	0.91	0.13
110 m	1.46	1.63	7.78	0.84	0.18
140 m	1.74	1.66	7.35	0.94	0.16

資料

1982. 6. 14—6. 25 11 days

Depth	q <sub>ss</sub>	q <sub>chia</sub>	C	N	P
5 m	0.26	0.84	—	—	0.14
10 m	0.25	0.84	—	—	0.18
15 m	0.38	1.08	15.0	2.08	0.16
20 m	0.53	1.19	12.9	1.47	0.15
30 m	0.82	1.64	12.5	1.44	0.17
40 m	0.81	1.44	14.0	1.70	0.18
60 m	0.86	1.43	11.1	1.38	0.16
80 m	0.95	1.40	10.7	1.28	0.16
110 m	1.06	1.62	7.09	0.77	0.19
140 m	1.20	1.72	9.61	1.39	0.16

1982. 6. 25—7. 15 20 days

Depth	q <sub>ss</sub>	q <sub>chia</sub>	C	N	P
5 m	0.15	0.29	15.3	1.83	—
10 m	0.40	0.80	17.8	2.47	0.12
15 m	0.32	0.83	15.7	2.09	0.17
20 m	0.32	0.86	15.5	2.24	0.18
30 m	0.48	1.09	13.7	1.67	0.15
40 m	0.67	1.38	14.6	1.65	0.16
60 m	0.76	1.35	12.9	1.70	—
80 m	0.82	1.28	11.8	1.60	—
110 m	0.81	1.27	10.2	1.42	0.19

1982. 7. 15—8. 18 34 days

Depth	q <sub>ss</sub>	q <sub>chia</sub>	C	N	P
15 m	10.5	1.91	3.17	0.25	0.072
20 m	11.6	1.73	3.13	0.27	0.065
30 m	12.4	3.37	3.34	0.31	0.080
40 m	12.1	4.36	3.76	0.34	0.073
60 m	11.1	1.77	3.89	0.28	0.079
80 m	10.4	1.48	3.93	0.34	0.080
110 m	14.5	2.65	3.20	0.30	0.068
140 m	29.8	6.47	3.22	0.27	0.070

1982. 8. 18—9. 15 28 days

Depth	q <sub>ss</sub>	q <sub>chia</sub>	C	N	P
5 m	0.39	0.71	—	—	0.087
10 m	0.91	0.49	7.11	1.08	0.14
15 m	1.95	0.61	4.99	0.65	0.12
20 m	2.52	0.67	4.30	0.53	0.081
30 m	3.70	0.64	3.53	0.45	0.083
40 m	4.31	0.80	3.33	0.41	0.083
60 m	5.11	1.13	3.28	0.43	—
80 m	4.91	1.36	3.27	0.41	0.090
110 m	6.01	1.32	3.03	0.40	0.083

1982. 9. 15—10. 21 36 days

Depth	q <sub>ss</sub>	q <sub>chia</sub>	C	N	P
5 m	0.67	1.00	11.1	1.32	0.090
10 m	0.95	1.42	8.66	1.07	0.094
15 m	1.54	1.20	6.04	0.72	0.13
20 m	1.89	0.80	4.94	0.57	0.11
30 m	2.40	1.05	4.65	0.53	0.10
40 m	3.03	1.35	4.38	0.53	0.12
60 m	—	—	—	—	0.10
80 m	3.53	1.06	3.80	0.48	0.096
110 m	4.91	1.33	3.42	0.42	0.096

1982. 10. 21—11. 10 20 days

Depth	q <sub>ss</sub>	q <sub>chia</sub>	C	N	P
5 m	1.19	2.83	11.1	1.41	0.087
10 m	1.31	4.39	11.2	1.39	0.087
15 m	1.04	2.01	8.57	1.18	0.11
20 m	1.19	1.97	8.95	1.17	0.11
30 m	1.25	1.35	7.83	1.07	0.13
40 m	1.34	1.29	7.24	0.93	0.12
60 m	1.58	1.26	6.49	0.82	0.12
80 m	1.99	1.36	5.79	0.92	0.11
110 m	2.82	1.29	4.89	0.60	0.089

1982. 11. 10—12. 17 37 days

Depth	q <sub>ss</sub>	q <sub>chia</sub>	C	N	P
5 m	1.20	1.62	8.57	0.97	0.051
10 m	1.32	2.73	8.74	1.08	0.052
15 m	1.26	2.45	7.53	0.68	0.063
20 m	1.14	1.91	6.83	0.97	0.060
30 m	1.46	1.99	6.91	0.99	0.085
40 m	1.51	1.94	6.26	0.77	0.096
60 m	1.60	2.06	6.04	0.80	0.098
80 m	1.69	2.92	3.38	0.38	0.099
110 m	1.54	1.29	6.00	0.72	0.11

1982. 12. 17—1983. 2. 15 60 days

Depth	q <sub>ss</sub>	q <sub>chia</sub>	C	N	P
15 m	1.82	1.52	5.56	0.82	0.13
20 m	1.32	3.07	5.29	0.75	0.12

1983. 2. 15—3. 15 28 days

Depth	q <sub>ss</sub>	q <sub>chia</sub>	C	N	P
10 m	1.37	3.69	7.97	1.26	0.14
20 m	1.32	3.05	7.07	1.08	0.14
30 m	1.17	2.40	5.51	0.84	0.15



1983. 3. 15—4. 19 35 days

Depth	q <sub>ss</sub>	q <sub>chia</sub>	C	N	P
5 m	2.84	6.75	8.49	1.18	0.091
10 m	2.75	6.60	8.42	1.19	0.093
15 m	2.44	5.99	8.05	1.20	0.095
20 m	2.31	5.30	7.81	1.16	0.099
30 m	2.25	4.73	7.01	1.11	0.10
40 m	2.25	4.47	6.74	1.08	0.11
60 m	2.29	4.63	6.66	1.07	0.11
80 m	2.33	3.79	6.73	1.05	0.11
110 m	2.56	4.06	6.53	1.04	0.12
140 m	2.32	3.15	6.19	0.91	0.11

1983. 4. 19—5. 16 27 days

Depth	q <sub>ss</sub>	q <sub>chia</sub>	C	N	P
5 m	3.20	5.71	11.3	0.98	0.061
10 m	3.12	7.13	11.4	0.99	0.068
15 m	2.65	5.03	10.4	0.98	0.075
20 m	2.53	5.54	10.2	1.04	0.076
30 m	2.79	5.42	9.71	1.16	0.18
40 m	2.85	3.35	7.76	0.94	0.080
60 m	3.02	3.44	6.39	0.91	0.074
80 m	3.11	4.08	7.17	0.94	0.083
110 m	3.67	4.60	6.81	1.01	0.091

1983. 5. 16—6. 16 31 days

Depth	q <sub>ss</sub>	q <sub>chia</sub>	C	N	P
5 m	2.49	0.60	17.1	1.10	0.052
10 m	2.54	1.09	16.4	1.10	0.060
15 m	2.76	1.21	15.4	1.03	0.065
20 m	2.66	1.89	13.3	1.03	0.066
30 m	2.79	1.72	14.1	0.98	0.064
40 m	2.85	2.17	13.1	1.05	0.072
60 m	3.39	2.64	10.4	1.07	0.084
80 m	3.66	3.30	9.02	1.04	0.096
110 m	4.40	4.52	8.26	0.98	0.094
140 m	2.84	3.34	7.37	0.95	0.088

1983. 6. 16—8. 4 49 days

Depth	q <sub>ss</sub>	q <sub>chia</sub>	C	N	P
5 m	0.47	1.09	19.4	1.85	0.086
10 m	0.57	1.94	19.1	2.15	0.15
15 m	0.54	1.64	17.6	2.17	0.15
20 m	0.53	1.06	15.4	1.87	0.16
30 m	0.83	0.96	13.6	1.64	0.11
40 m	0.94	1.10	13.7	1.07	0.076
60 m	1.50	1.99	12.7	1.04	0.080
80 m	2.04	2.94	11.6	1.10	0.087
110 m	3.01	3.95	9.27	1.07	0.12
140 m	1.76	2.75	7.53	0.99	0.12

## 資料

## 資料 v 湯川の水質 Water Quality of Yukawa River

Sample	W.V. (m <sup>3</sup> /s)	W.T. (°C)	pH	BOD (mg/l)	DOC (mg/l)	Chl-a (μg/l)	SS (mg/l)	POC (mg/l)	PON (ug/l)
1981・8・13									
st. 1	1.34	17.6	—	3.5	—	29	8.4	1.53	242
2	1.66	17.7	—	2.8	—	25	7.6	1.33	216
3	1.32	17.7	—	2.7	—	22	7.3	1.18	180
4	2.00	—	—	0.3	—	9.3	3.8	0.64	101
5	1.31	—	—	0.8	—	3.7	2.7	0.33	37
6	1.50	—	—	—	—	2.6	2.6	0.41	47
Akanumagawa	0.10	—	—	1.3	—	—	7.9	1.04	249
1981・10・30									
st. 1	—	—	—	1.8	1.2	9.1	2.5	0.68	127
2	—	—	—	1.4	1.1	8.4	2.4	0.70	118
4	—	—	—	1.8	1.3	3.4	0.9	0.27	48
5	—	—	—	0.9	1.3	2.3	1.1	0.21	34
6	—	—	—	1.0	1.4	2.2	0.9	0.21	33
Sakasagawa	—	—	—	0.8	1.3	1.1	2.7	0.31	36
Akanumagawa	—	—	—	0.9	1.5	2.9	18.3	1.52	159
1982・6・16									
St. 1	1.04	12.7	8.0	4.6	—	18	4.6	1.77	278
2	0.93	13.0	8.0	4.6	—	26	4.7	1.85	292
4	1.31	15.0	7.7	2.3	—	11	3.4	0.82	124
5	1.47	16.5	8.0	1.9	—	7.8	4.3	0.70	58
6	1.39	15.0	8.0	2.1	—	6.4	5.0	0.81	64
Akanumagawa	—	16.6	8.1	—	—	5.5	17.2	1.42	102
1982・8・26									
st. 1	1.99	15.0	9.6	2.2(0.2)*	0.8	15	3.8	0.81	126
2	2.15	15.7	8.7	1.5(0.1)	0.8	14	2.9	0.60	102
3	1.93	15.6	8.0	1.6(0.4)	1.2	12	6.3	1.06	96
4	2.42	16.6	7.8	0.8(0.3)	1.3	6.9	4.1	0.56	82
5	2.30	17.9	8.1	0.8(0.3)	1.5	3.4	2.9	0.38	45
6	2.27	14.5	8.0	1.0(0.6)	1.3	15	3.5	0.50	68
Akanumagawa	0.07	13.0	8.5	0.1(0.1)	0.6	1.9	3.3	0.28	34

\* ( ) dissolved

## 資料 v (つづき continued)

Sample	NO <sub>3</sub> -N (μg/l)	NO <sub>2</sub> -N (μg/l)	NH <sub>4</sub> -N (μg/l)	PO <sub>4</sub> -P (μg/l)	T-P (μg/l)	V-Bac. (No./ml)	T-Bac. (No./ml)
1981・8・13							
st. 1	10	7	16	3	29	—	—
2	25	6	17	1	31	3.2×10 <sup>4</sup>	2.8×10 <sup>6</sup>
3	67	6	35	2	31	2.6×10 <sup>4</sup>	2.5×10 <sup>6</sup>
4	101	5	35	2	27	6.6×10 <sup>3</sup>	1.6×10 <sup>6</sup>
5	113	4	14	8	23	8.3×10 <sup>3</sup>	4.6×10 <sup>5</sup>
6	129	5	19	3	29	1.3×10 <sup>4</sup>	5.1×10 <sup>5</sup>
Akanumagawa	195	6	45	52	101	3.9×10 <sup>4</sup>	1.4×10 <sup>5</sup>
1981・10・30							
st. 1	178	9	41	3	20	1.1×10 <sup>4</sup>	1.5×10 <sup>6</sup>
2	170	10	32	3	26	1.3×10 <sup>4</sup>	1.3×10 <sup>6</sup>
4	166	6	20	3	14	4.9×10 <sup>3</sup>	3.4×10 <sup>5</sup>
5	147	5	11	13	16	4.8×10 <sup>3</sup>	6.5×10 <sup>5</sup>
6	159	4	21	14	25	3.2×10 <sup>3</sup>	2.8×10 <sup>5</sup>
Sakasagawa	128	3	39	32	50	5.1×10 <sup>3</sup>	3.0×10 <sup>5</sup>
Akanumagawa	95	3	14	36	84	2.0×10 <sup>4</sup>	2.0×10 <sup>5</sup>
1982・6・16							
st. 1	1>	1>	5	10	42	—	—
2	1>	1>	5	11	49	—	—
4	58	3	14	8	25	—	—
5	58	3	11	9	37	—	—
6	142	4	29	27	51	—	—
Akanumagawa	126	3	11	46	82	—	—
1982・8・26							
st. 1	64	3	12	3	30	2.2×10 <sup>2</sup>	1.2×10 <sup>6</sup>
2	87	3	19	2	22	2.2×10 <sup>3</sup>	1.4×10 <sup>6</sup>
3	122	3	24	3	20	2.2×10 <sup>3</sup>	1.3×10 <sup>6</sup>
4	122	4	30	4	38	1.1×10 <sup>3</sup>	1.3×10 <sup>6</sup>
5	165	3	14	6	31	7.2×10 <sup>3</sup>	1.8×10 <sup>6</sup>
6	210	3	24	19	44	4.9×10 <sup>3</sup>	1.5×10 <sup>6</sup>
Akanumagawa	123	1	6	42	71	3.3×10 <sup>3</sup>	1.6×10 <sup>6</sup>

## 資料

## 資料 v (つづき continued)

Sample	Na	K	Ca	Mg	Fe	Si	B	Al	Zn
1981・8・13									
st. 1	10.0	1.8	13.3	1.0	0.06	10.9	0.22	0.19	—
2	9.9	1.8	13.7	2.0	0.03	11.2	0.23	0.19	—
3	11.5	2.0	13.8	1.9	0.05	11.9	0.25	0.19	—
4	13.9	2.0	15.8	2.0	0.10	13.6	0.27	0.13	—
5	14.0	1.9	14.4	1.9	0.14	13.9	0.26	0.14	—
Akanumagawa	6.4	1.8	6.8	2.5	0.06	17.4	0.17	0.21	—
1981・10・30									
st. 1	10.8	2.2	13.2	2.2	0.02	12.8	0.19	—	0.05
2	13.2	2.4	14.1	2.5	0.03	13.2	0.20	—	0.05
4	14.8	2.5	14.8	3.7	0.06	14.6	0.24	—	0.07
5	17.9	2.7	15.4	2.7	0.07	14.8	0.23	—	0.07
6	14.0	2.4	14.7	2.3	0.05	16.0	0.22	—	0.02
Sakasagawa	7.4	2.2	7.9	2.7	0.03	15.2	0.11	—	0.07
Akanumagawa	5.6	1.9	6.2	2.1	0.04	14.7	0.11	—	0.01
1982・6・17									
st. 1	10.1	2.2	13.8	1.8	0.07	13.3	0.29	0.10	0.01
2	10.5	2.2	14.3	1.8	0.06	13.6	0.29	0.07	0.02
4	14.1	2.4	15.5	1.8	0.15	15.0	0.33	0.11	0.01
5	13.6	2.2	14.7	1.8	0.16	15.2	0.31	0.11	0.01
6	12.4	2.0	16.1	2.4	0.10	18.2	0.31	0.15	0.01
Akanumagawa	5.2	1.7	5.8	1.9	0.11	14.9	0.19	0.16	0.01
1982・8・26									
st. 1	9.5	1.7	10.9	1.7	0.06	13.4	0.32	0.38	0.06
2	10.5	1.8	11.6	1.7	0.06	13.5	0.38	0.44	0.02
3	13.0	2.0	12.5	1.7	0.05	14.1	0.33	0.33	0.05
4	15.2	2.2	13.7	1.8	0.12	14.7	0.34	0.25	0.01
5	15.6	2.1	14.0	1.8	0.19	14.7	0.44	0.43	0.02
6	13.8	2.3	14.3	2.3	0.15	17.2	0.35	0.35	0.04
Akanumagawa	6.8	1.7	6.1	2.2	0.04	16.0	0.28	0.37	0.05

資料 vi 中禅寺湖の植物プランクトン及び動物プランクトン      Phytoplankton and  
zooplankton of Lake Chuzenji

vi-1 Phytoplankton of Lake Chuzenji (N/ml)

	St-2 Apr.8	St-2 May 6	St-1 Jun.15	St-2 Jul.7	St-2 Aug.10	St-2 Sep.1	St-2 Oct.4	St-2 Nov.9	St-2 Dec.16
BACILLARIOPHYTA									
<i>Melosira granulata</i> <i>var. angustissima fo.</i> <i>spiralis</i>							1		11
<i>Melosira</i> sp.		15							1
<i>Cyclotella</i> sp.	1,400								
<i>C. meneghniana</i>	140	310	7					1	3
<i>Asterionella formosa</i>	18	17	4		190	50	190	52	69
<i>Fragilaria</i> sp.									
<i>F. crotonensis</i>	2	14				110	50	53	62
<i>Synedra acus</i>		1	2			1		3	2
<i>Nitzschia</i> spp.	220	94	61	7					5
<i>N. acicularis</i>	18	7							
<i>Navicula</i> sp.	2	2	1	1	6	1	1		
<i>Cymbella</i> sp.		1	1				1		
<i>Cocconeis</i> sp.					25		1	1	
<i>Eunotia</i> sp.	5		2	1			2	2	1
<i>Amphora</i> sp.			1						
CHLOROPHYTA									
<i>Ankistrodesmus</i> <i>falcatus var. mirabilis</i>	1	1	2	1					1
<i>Oocystis parva</i>				59		31		8	36
<i>Sphaerocystis Schroteri</i>		4		41	95	2,600	4		
<i>Quadrigula Chodatii</i>	1		2	2			6	2	
<i>Schroederia Judayi</i>					340		87		
CYANOPHYTA and Others									
<i>Dinobryon cylindrica</i>								24	49
<i>Uroglena americana</i>	14	480	210	190	110	36	81	210	350
Number of species	11	12	11	8	6	7	11	10	12
Number of individuals(N/ml)	1,800	950	290	300	760	2,800	430	840	590

## 資料

vi-2 Zooplankton of Lake Chuzenji (N/m<sup>3</sup>)

	1981 Oct.20	Nov.18	Dec.15	1982 Jan.18	Feb.18	Mar.16	Apr.8	May 6	Jun.2
PROTOZOA									
<i>Ceratium hirundenella</i>	67,000	1,300							22
<i>Diffugia</i> sp.					6				
<i>Dileptus</i> spz.								42	510
Ciliatea			70					20	ili
TROCHELMINTHES									
<i>Polyarthra trigla</i>						37	3		
<i>Trichocera cylindrica</i>							3		
<i>Brachionus</i> sp.									
<i>Keratella cochlearis</i> var. <i>macrocantha</i>							2		
<i>Keratella quadrata</i> <i>divergens</i>					13	5	3	150	300
<i>Notholca</i> sp.								2	
<i>Kelvicottia longispina</i>	74,000	74,000	72,000	49,000	64,000	33,000	2,600	720	71
<i>Euchlanis</i> sp.								2	
<i>Filinia longiseta</i>							11		12
<i>Asplanchna</i> sp.					6				
<i>Lepadella</i> sp.									
<i>Chonochilus</i> sp.									
Roatoria									
ARTHROPODA									
<i>Daphnia longispina</i>	3,200	2,200	730	750	280	160	14	86	200
<i>Chydorus</i> sp.								15	2
<i>Alona</i> sp.			10				2		
<i>Polyphemus pediculus</i>									
<i>Acanthodiptomus</i> <i>pacificus</i>	1,800	1,700	1,000	680	350	290	24	280	1,400
Copepodid						66	17	340	160
Nauplius	1,400	32	120	1,400	2,200	1,200	170	760	71
<i>Canthocamptus</i> <i>stymphlinus</i>					6			2	
<i>Cyclops</i> sp.	460	8		24	51				5
Number of species	6	6	6	5	9	7	11	12	11
Number of individuals(N/m <sup>3</sup> )	150,000	79,000	74,000	52,000	67,000	35,000	2,900	2,400	2,700

## vi-2 (つづき continued)

	1982 Jun.15	Jul.7	Aug.19	Sep.1	Sep.16	Oct.20	Nov.11	Dec.16
<b>PROTOZOA</b>								
<i>Ceratium hirundenella</i>	240	990	27,000	140,000	265,000	14,000	3,900	430
<i>Diffugia</i> sp.								
<i>Dileptus</i> spp.		7				8		
Ciliatea								
<b>TROCHELMINTHES</b>								
<i>Polyarthra trigla</i>				10	16		140	
<i>Trichocera cylindrica</i>								
<i>Brachionus</i> sp.								
<i>Keratella cochlearis</i> var. <i>macrocantha</i>	17					8		
<i>Keratella quadrata</i> <i>divergens</i>	870	88	630	1,100	4,500	5,400	4,700	5,500
<i>Notholca</i> sp.								
<i>Kellicottia longispina</i>	100	29	230	810	3,600	31,000	29,000	67,000
<i>Euchlanis</i> sp.								
<i>Filinia longiseta</i>					24	8		
<i>Asplanchna</i> sp.				59		24	59	
<i>Lepadella</i> sp.							140	
<i>Chonochilus</i> sp.							670	
Roatoria							250	
<b>ARTHROPODA</b>								
<i>Daphnia longispina</i>	2,100	7,500	18,000	14,000	9,400	2,200	1,800	5,400
<i>Chydorus</i> sp.	14	59	16	10	8			
<i>Alona</i> sp.								
<i>Polyphemus pediculus</i>			48		8			
<i>Acanthodiptomus</i> <i>pacificus</i>	550	830	11,000	6,200	7,700	3,600	1,800	3,600
Copepodid		5,100	550	1,000	1,100	150	88	8
Nauplius	120	7,200	720	1,200	320	230		140
<i>Canthocamptus</i> <i>stypthlinus</i>								
<i>Cyclops</i> sp.		7	24	10				
Number of species	8	10	10	11	11	11	11	7
Number of individuals(N/m <sup>3</sup> )	4,100	22,000	58,000	163,000	292,000	56,000	43,000	82,000

## 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——霞ヶ浦を対象域として——昭和51年度。(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)  
(日本産ユスリカ科 *Chironomus* 属9種の成虫, サナギ, 幼虫の形態の比較)
- 第 4 号 スモッグチャンバーによる炭化水素—窒素酸化物系光化学反応の研究——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。——昭和53年度。(1979)
- 第 7 号 A morphological study of adults and immature stages of 20 Japanese species of the family Chironomidae (Diptera). (1979)  
(日本産ユスリカ科20種の成虫, サナギ, 幼虫の形態学的研究)
- 第 8 号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究——昭和52, 53年度 研究報告。(1979)
- 第 9 号 スモッグチャンバーによる炭化水素—窒素酸化物系光化学反応の研究——昭和53年度 中間報告。(1979)
- 第 10 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51~53年度 特別研究報告。(1979)
- 第 11 号 Studies on the effects of air pollutants on plants and mechanisms of phytotoxicity. (1980)  
(大気汚染物質の植物影響およびその植物毒性の機構に関する研究)
- 第 12 号 Multielement analysis studies by flame and inductively coupled plasma spectroscopy utilizing computer-controlled instrumentation. (1980)  
(コンピュータ制御装置を利用したフレイムおよび誘導結合プラズマ分光法による多元素同時分析)
- 第 13 号 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1980)  
Part 1. The distribution of chironomid species in a tributary in relation to the degree of pollution with sewage water.  
Part 2. Description of 20 species of Chironominae recovered from a tributary.  
(多摩川に発生するユスリカの研究  
— 第1報 その一支流に見出されたユスリカ各種の分布と下水による汚染度との関係 —  
— 第2報 その一支流に見出された Chironominae 亜科の20種について —)
- 第 14 号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壌生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究——昭和53, 54年度 特別研究報告。(1980)
- 第 15 号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究——昭和54年度 特別研究報告。(1980)
- 第 16 号 計測車レーザーレーダーによる大気汚染遠隔計測。(1980)
- 第 17 号 流体の運動および輸送過程に及ぼす浮力効果——臨海地域の気象特性と大気拡散現象の研究——昭和53, 54年度 特別研究報告。(1980)



- 第 18 号 Preparation, analysis and certification of PEPPERBUSH standard reference material. (1980)  
(環境標準試料「リョウブ」の調製, 分析および保証値)
- 第 19 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究 (Ⅲ) — 霞ヶ浦 (西浦) の湖流 — 昭和53, 54年度.  
(1981)
- 第 20 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究 (Ⅳ) — 霞ヶ浦流域の地形, 気象水文特性およびその湖  
水環境に及ぼす影響 — 昭和53, 54年度. (1981)
- 第 21 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究 (Ⅴ) — 霞ヶ浦流入河川の流出負荷量変化とその評価 —  
昭和53, 54年度. (1981)
- 第 22 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究 (Ⅵ) — 霞ヶ浦の生態系の構造と生物現存量 — 昭和53,  
54年度. (1981)
- 第 23 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究 (Ⅶ) — 湖沼の富栄養化状態指標に関する基礎的研究 —  
昭和53, 54年度. (1981)
- 第 24 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究 (Ⅷ) — 富栄養化が湖利用に及ぼす影響の定量化に関す  
る研究 — 昭和53, 54年度. (1981)
- 第 25 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究 (Ⅸ) — [*Microcystis*] (藍藻類) の増殖特性 — 昭和53,  
54年度. (1981)
- 第 26 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究 (Ⅹ) — 藻類培養試験法による A G P の測定 — 昭和53,  
54年度. (1981)
- 第 27 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究 (Ⅺ) — 研究総括 — 昭和53, 54年度. (1981)
- 第 28 号 複合大気汚染の植物影響に関する研究 — 昭和54, 55年度 特別研究報告. (1981)
- 第 29 号 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1981)  
Part 3. Species of the subfamily Orthoclaadiinae recorded at the summer survey and their distri-  
bution in relation to the pollution with sewage waters.  
Part 4. Chironomidae recorded at a winter survey.  
(多摩川に発生するユスリカ類の研究  
— 第3報 夏期の調査で見出されたエリユスリカ亜科 Orthoclaadiinae 各種の記載と, その分  
布の下水汚染度との関係について —  
— 第4報 南浅川の冬期の調査で見出された各種の分布と記載 —)
- 第 30 号 海域における富栄養化と赤潮の発生機構に関する基礎的研究 — 昭和54, 55年度 特別研究報  
告. (1982)
- 第 31 号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究 — 昭和55年度  
特別研究報告. (1981)
- 第 32 号 スモッグチャンバーによる炭化水素-窒素酸化物系光化学反応の研究 — 環境大気中における  
光化学二次汚染物質生成機構の研究 (フィールド研究1) — 昭和54年度 特別研究報告. (1982)
- 第 33 号 臨海地域の気象特性と大気拡散現象の研究 — 大気運動と大気拡散過程のシミュレーション  
— 昭和55年度 特別研究報告. (1982)
- 第 34 号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究 — 昭和55年度 特別研究報告. (1982)
- 第 35 号 環境面よりみた地域交通体系の評価に関する総合解析研究. (1982)
- 第 36 号 環境試料による汚染の長期モニタリング手法に関する研究 — 昭和55, 56年度 特別研究報告.  
(1982)
- 第 37 号 環境施策のシステム分析支援技術の開発に関する研究. (1982)
- 第 38 号 Preparation, analysis and certification of POND SEDIMENT certified reference material. (1982)  
(環境標準試料「池底質」の調製, 分析及び保証値)
- 第 39 号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究 — 昭和56年度 特別研究報告. (1982)

- 第 40 号 大気汚染物質の単一及び複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究 — 昭和56年  
別研究報告。(1983)
- 第 41 号 土壌環境の遠隔計測と評価に関する統計学的研究。(1983)
- 第 42 号 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究。(1983)
- 第 43 号 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1983)  
Part 5. An observation on the distribution of Chironominae along the main stream in June with  
description of 15 new species.  
Part 6. Description of species of the subfamily Orthoclaadiinae recovered from the main stream  
in the June survey.  
Part 7. Additional species collected in winter from the main stream.  
(多摩川に発生するユスリカ類の研究  
— 第 5 報 本流に発生するユスリカ類の分布に関する 6 月の調査成績とユスリカ亜科に属す  
る 15 新種等の記録 —  
— 第 6 報 多摩本流より 6 月に採集されたエリユスリカ亜科の各種について —  
— 第 7 報 多摩本流より 3 月に採集されたユスリカ科の各種について —)
- 第 44 号 スモッグチャンバーによる炭化水素-窒素酸化物系光化学反応の研究。 — 環境大気中におけ  
る光化学二次汚染物質生成機構の研究 (フィールド研究 2) — 昭和54年度 特別研究中報告。  
(1983)
- 第 45 号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壌生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究 — 昭  
和53年~55年度 特別研究報告。(1983)
- 第 46 号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壌生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究 — 昭  
和54, 55年度 特別研究報告 第 1 分冊。(1983)
- 第 47 号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壌生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究 — 昭  
和54, 55年度 特別研究報告 第 2 分冊。(1983)
- 第 48 号 水質観測点の適正配置に関するシステム解析。(1983)
- 第 49 号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究 — 昭和57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 50 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (I) — 霞ヶ浦の流入負荷量の算定と評価 — 昭和  
55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 51 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (II) — 霞ヶ浦の湖内物質循環とそれを支配する因  
子 — 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 52 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (III) — 霞ヶ浦高浜入における隔離水界を利用した  
富栄養化防止手法の研究 — 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 53 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (IV) — 霞ヶ浦の魚類及び甲殻類現存量の季節変化  
と富栄養化 — 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 54 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (V) — 霞ヶ浦の富栄養化現象のモデル化 — 昭和  
55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 55 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (VI) — 富栄養化防止対策 — 昭和55~57年度 特  
別研究報告。(1984)
- 第 56 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (VII) — 湯の湖における富栄養化とその防止対策 —  
昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 57 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (VIII) — 総括報告 — 昭和55~57年度 特別研究報  
告。(1984)
- 第 58 号 環境試料による汚染の長期的モニタリング手法に関する研究 — 昭和55~57年度 特別研究総  
合報告。(1984)

- 第 59 号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄酸化物系光化学反応の研究 — 光化学スモッグチャンバーによるオゾン生成機構の研究 — 大気における有機化合物の光酸化反応機構の研究 — 昭和55~57年度 特別研究報告(第1分冊). (1984)
- 第 60 号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄酸化物系光化学反応の研究 — 光化学エアロゾル生成機構の研究 — 昭和55~57年度 特別研究報告(第2分冊). (1984)
- 第 61 号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄酸化物系光化学反応の研究 — 環境大気における光化学二次汚染物質生成機構の研究(フィールド研究1) — 昭和55~57年度 特別研究報告(第3分冊). (1984)
- 第 62 号 有害汚染物質による水界生態系のかく乱と回復過程に関する研究 — 昭和56~58年度 特別研究中間報告. (1984)
- 第 63 号 海域における富栄養化と赤潮の発生機構に関する基礎的研究 — 昭和56年度 特別研究報告. (1984)
- 第 64 号 複合大気汚染の植物影響に関する研究 — 昭和54~56年度 特別研究総合報告. (1984)
- 第 65 号 Studies on effects of air pollutant mixtures on plants—Part 1. (1984)  
(複合大気汚染の植物に及ぼす影響 — 第1分冊)
- 第 66 号 Studies on effects of air pollutant mixtures on plants—Part 2. (1984)  
(複合大気汚染の植物に及ぼす影響 — 第2分冊)
- 第 67 号 環境中の有害物質による人の慢性影響に関する基礎的研究 — 昭和54~56年度 特別研究総合報告. (1984)
- 第 68 号 汚泥の土壤還元とその環境に関する研究 — 昭和56~57年度 特別研究総合報告. (1984)
- 第 69 号 中禅寺湖の富栄養化現象に関する基礎的研究. (1984)
- 第 70 号 Studies on chironomid midges in lakes of the Nikko National Park (1984)  
Part I. Ecological studies on chironomids in lakes of the Nikko National Park.  
Part II. Taxonomical and morphological studies on the chironomid species collected from lakes in the Nikko National Park.  
(日光国立公園の湖沼のユスリカに関する研究  
— 第1部 日光国立公園の湖のユスリカの生態学的研究 —  
— 第2部 日光国立公園の湖沼に生息するユスリカ類の分類学的, 形態学的研究 —)
- 第 71 号 リモートセンシングによる残雪及び雪田植生の分布解析. (1984)

## Report of Special Research Project the National Institute for Environmental Studies

- No. 1\* Man activity and aquatic environment – with special references to Lake Kasumigaura – Progress report in 1976. (1977)
- No. 2\* Studies on evaluation and amelioration of air pollution by plants – Progress report in 1976-1977. (1978)

[Starting with Report No. 3, the new title for NIES Reports was changed to:]

## Research Report from the National Institute for Environmental Studies

- No. 3 A comparative study of adults and immature stages of nine Japanese species of the genus *Chironomus* (Diptera, Chironomidae). (1978)
- No. 4\* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system – Progress report in 1977. (1978)
- No. 5\* Studies on the photooxidation products of the alkylbenzene-nitrogen oxides system, and on their effects on Cultured Cells – Research report in 1976-1977. (1978)
- No. 6\* Man activity and aquatic environment – with special references to Lake Kasumigaura – Progress report in 1977-1978. (1979)
- No. 7 A morphological study of adults and immature stages of 20 Japanese species of the family Chironomidae (Diptera). (1979)
- No. 8\* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants – Research report in 1977-1978. (1979)
- No. 9\* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system – Progress report in 1978. (1979)
- No.10\* Studies on evaluation and amelioration of air pollution by plants – Progress report in 1976-1978. (1979)
- No.11 Studies on the effects of air pollutants on plants and mechanisms of phytotoxicity. (1980)
- No.12 Multielement analysis studies by flame and inductively coupled plasma spectroscopy utilizing computer-controlled instrumentation. (1980)
- No.13 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1980)
- Part 1. The distribution of chironomid species in a tributary in relation to the degree of pollution with sewage water.
- Part 2. Description of 20 species of Chironominae recovered from a tributary.
- No.14\* Studies on the effects of organic wastes on the soil ecosystem – Progress report in 1978-1979. (1980)
- No.15\* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants – Research report in 1977-1978. (1980)
- No.16\* Remote measurement of air pollution by a mobile laser radar. (1980)
- No.17\* Influence of buoyancy on fluid motions and transport processes – Meteorological characteristics and atmospheric diffusion phenomena in the coastal region – Progress report in 1978-1979. (1980)
- No.18 Preparation, analysis and certification of PEPPERBUSH standard reference material. (1980)
- No.19\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Lake current of Kasumigaura (Nishiura) – 1978-1979. (1981)
- No.20\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Geomorphological and hydrometeorological characteristics of Kasumigaura watershed as related to the lake environment – 1978-1979. (1981)

- No.21\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Variation of pollutant load by influent rivers to Lake Kasumigaura – 1978-1979. (1981)
- No.22\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Structure of ecosystem and standing crops in Lake Kasumigaura – 1978-1979. (1981)
- No.23\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Applicability of trophic state indices for lakes – 1978-1979. (1981)
- No.24\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Quantitative analysis of eutrophication effects on main utilization of lake water resources – 1978-1979. (1981)
- No.25\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Growth characteristics of Blue-Green Algae, *Mycrocystis* – 1978-1979. (1981)
- No.26\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Determination of algal growth potential by algal assay procedure – 1978-1979. (1981)
- No.27\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Summary of researches – 1978-1979. (1981)
- No.28\* Studies on effects of air pollutant mixtures on plants – Progress report in 1979-1980. (1981)
- No.29 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1981)  
 Part 3. Species of the subfamily Orthoclaadiinae recorded at the summer survey and their distribution in relation to the pollution with sewage waters.  
 Part 4. Chironomidae recorded at a winter survey.
- No.30\* *Eutrophication and red tides in the coastal marine environment – Progress report in 1979-1980.* (1982)
- No.31\* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants – Research report in 1980. (1981)
- No.32\* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system – Progress report in 1979 – Research on the photochemical secondary pollutants formation mechanism in the environmental atmosphere (Part 1). (1982)
- No.33\* Meteorological characteristics and atmospheric diffusion phenomena in the coastal region – Simulation of atmospheric motions and diffusion processes – Progress report in 1980. (1982)
- No.34\* The development and evaluation of remote measurement methods for environmental pollution – Research report in 1980. (1982)
- No.35\* Comprehensive evaluation of environmental impacts of road and traffic. (1982)
- No.36\* Studies on the method for long term environmental monitoring – Progress report in 1980-1981. (1982)
- No.37\* Study on supporting technology for systems analysis of environmental policy – The evaluation laboratory of Man-environment Systems. (1982)
- No.38 Preparation, analysis and certification of POND SEDIMENT certified reference material. (1982)
- No.39\* The development and evaluation of remote measurement methods for environmental pollution – Research report in 1981. (1983)
- No.40\* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants – Research report in 1981. (1983)
- No.41\* Statistical studies on methods of measurement and evaluation of chemical condition of soil. (1983)
- No.42\* Experimental studies on the physical properties of mud and the characteristics of mud transportation. (1983)
- No.43 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1983)

Part 5. An observation on the distribution of Chironominae along the main stream in June, with description of 15 new species.

Part 6. Description of species of the subfamily Orthoclaadiinae recovered from the main stream in the June survey.

Part 7. Additional species collected in winter from the main stream.

- No.44\* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system – Progress report in 1979 – Research on the photochemical secondary pollutants formation mechanism in the environmental atmosphere (Part 2). (1983)
- No.45\* Studies on the effect of organic wastes on the soil ecosystem – Outlines of special research project – 1978-1980. (1983)
- No.46\* Studies on the effect of organic wastes on the soil ecosystem – Research report in 1979-1980, Part 1. (1983)
- No.47\* Studies on the effect of organic wastes on the soil ecosystem – Research report in 1979-1980, Part 2. (1983)
- No.48\* Study on optimal allocation of water quality monitoring points. (1983)
- No.49\* The development and evaluation of remote measurement method for environmental pollution – Research report in 1982. (1984)
- No.50\* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Estimation of input loading of Lake Kasumigaura. – 1980-1982. (1984)
- No.51\* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – The function of the ecosystem and the importance of sediment in national cycle in Lake Kasumigaura. – 1980-1982. (1984)
- No.52\* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Enclosure experiments for restoration of highly eutrophic shallow Lake Kasumigaura. – 1980-1982. (1984)
- No.53\* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Seasonal changes of the biomass of fish and crustacia in Lake Kasumigaura and its relation to the eutrophication. – 1980-1982. (1984)
- No.54\* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Modeling the eutrophication of Lake Kasumigaura. – 1980-1982. (1984)
- No.55\* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Measures for eutrophication control. – 1980-1982. (1984)
- No.56\* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Eutrophication in Lake Yunoko. – 1980-1982. (1984)
- No.57\* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Summary of researches. – 1980-1982. (1984)
- No.58\* Studies on the method for long term environmental monitoring – Outlines of special research project in 1980-1982. (1984)
- No.59\* Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen-sulfur oxides system – Photochemical ozone formation studied by the evacuable smog chamber – Atmospheric photooxidation mechanisms of selected organic compounds – Research report in 1980-1982, Part 1. (1984)
- No.60\* Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen-sulfur oxides system – Formation mechanisms of photochemical aerosol – Research report in 1980-1982, Part 2. (1984)
- No.61\* Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen-sulfur oxides system – Research on the photochemical secondary pollutants formation mechanism in the environmental atmosphere (Part 1) – Research report in 1980-1982, Part 3. (1984)

- No.62\* Effects of toxic substances on aquatic ecosystems – Progress report in 1980-1983. (1984)
- No.63\* Eutrophication and red tides in the coastal marine environment – Progress report in 1981. (1984)
- No.64\* Studies on effects of air pollutant mixtures on plants – Final report in 1979-1981. (1984)
- No.65 Studies on effects of air pollutant mixtures on plants – Part 1. (1984)
- No.66 Studies on effects of air pollutant mixtures on plants – Part 2. (1984)
- No.67\* Studies on unfavourable effects on human body regarding to several toxic materials in the environment, using epidemiological and analytical techniques – Project research report in 1979-1981. (1984)
- No.68\* Studies on the environmental effects of the application of sewage sludge to soil – Research report in 1981-1983. (1984)
- No.69\* Fundamental studies on the eutrophication of Lake Chuzenji – Basic research report. (1984)
- No.70 Studies on chironomid midges in lakes of the Nikko National Park – Part I. Ecological studies on chironomids in lakes of the Nikko National Park. – Part II. Taxonomical and morphological studies on the chironomid species collected from lakes in the Nikko National Park. (1984)
- No.71\* Analysis on distributions of remnant snowpack and snow patch vegetation by remote sensing. (1984)

\* in japanese

RESEARCH REPORT FROM  
THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

No. 69

国立公害研究所研究報告 第69号

(R - 69 - '84)

---

昭和59年3月31日発行

編集 国立公害研究所編集委員会

発行 環境庁 国立公害研究所

茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2

---

印刷 勝美印刷株式会社

文京区小石川1-3-7

Published by the National Institute for Environmental Studies

Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

March 1984