

自然浄化機能による水質改善に関する総合研究(I)

Comprehensive Studies on Effective Use of Natural Ecosystems
for Water Quality Management(I)

汚濁負荷の発生と流出・流達

Drainage and Flowing Down of pollutant Load

昭和58～59年度 特別研究報告

Research Report in 1983-1984

合田 健 編

Edited by Takeshi GODA

THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

環境庁 国立公害研究所

序

自然の浄化機能を応用した水質改善の特別研究は、いわゆる霞ヶ浦特別研究（2期）のあとを承けて、昭和58年度から発足し、昭和60年3月で中間点を迎えた。そこでこの2年間の研究成果を各個の研究報告にまとめることとし、その全体を4分冊構成とした。本冊はその第1分冊で、排水の水質原単位、渓流水質から見た森林の浄化機能、面源負荷における水文条件の意義、流達過程における負荷量変化などに関し5件の報文を収録している。全体を通じて汚濁負荷の発生・流出・流達と副題をつけている。

生活排水、小規模工場排水からの水質負荷原単位調査は、いくつかの地方都市について行ったが、例えば、従来の文献値に比し、生活排水のTN、TP原単位値が低く出たのに対し、BOD、SS原単位はより高い値が得られた。

森林の自然浄化機能と流出水質との関連については、筑波山南東斜面の67.5haの試験流域で林内雨、林外雨、リターフオール、渓流量・水質、斜面地下水質等を調べ、溶存物質の流出特性を種々の角度から検討し興味ある結果を得た。

一方、降雨の際の面源負荷についての現地観測では、懸濁性物質は降雨強度や降雨量により強い影響を受けるが、市街地にあっては、舗装面上の堆積物質量は先行晴天期間や先行降雨に支配される。中間流出や斜面地下水中の溶存物質においては、降雨量、降雨強度の影響が大きい。 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、等個別にみると、 NO_3^- や SO_4^{2-} は農耕地流域から多量に流出し、山地流域からは NO_3^- と溶存ケイ酸が高濃度で流出する。

以上のような成果をふまえ、後期段階の諸研究、解析が展開されている。

昭和61年3月

国立公害研究所 水質土壌環境部

部長 合 田 健

(プロジェクト・リーダー)

目 次

Abstract	1
I. 研究の概要	
海老瀬潜一	3
II. 報文	
1. 生活系排水の原単位	7
岡田光正・須藤隆一	
2. 渓流水質から見た森林の浄化機能に関する研究（第1報）筑波山試験流域の概要 と植生調査	21
村岡浩爾・平田健正	
3. 渓流水質から見た森林の浄化機能に関する研究（第2報）水文流出と水質調査	37
平田健正・村岡浩爾	
4. 面源負荷流出に及ぼす水文条件の影響	57
海老瀬潜一	
5. 流達過程における水質負荷量変化とその評価	71
海老瀬潜一	

CONTENTS

Abstract	1
I. Outline of the Studies	3
Senichi EBISE	
II. Papers	
1. Per Capita Loadings of Domestic Wastewater	7
Mitsumasa OKADA and Ryuichi SUDO	
2. Study on Water Purification of Forest from View of Streamwater Quality	
(I) Outline of Tsukuba Experimental Basin and Vegetation Survey	21
Kohji MURAOKA and Tatemasa HIRATA	
3. Study on Water Purification of Forest from View of Streamwater Quality	
(II) Hydrological Runoff and Streamwater Quality Survey	37
Tatemasa HIRATA and Kohji MURAOKA	
4. Effects of Hydrological Conditions on Runoff Load from Nonpoint Pollutant	
Sources	57
Senichi EBISE	
5. Estimation on Change of Pollutant Loading during Flowing down in Rivers	
Senichi EBISE	71

Abstract

In this report we include the following research topics, namely per capita loading of domestic wastewater, purification ability of forest, runoff loading of mountain, agricultural field and urban areas, and change of pollutant loading during flowing down in rivers. Also the research on fall-out load from atmosphere is belonged to this research group.

The surveys on effluent quantity and quality from residential area were carried out in Tsuchiura, Nagano and Ueda to estimate per capita loading and pattern of discharge for domestic wastewater, gray water and night soils. In order to estimate water purification of forest, we set a mountainous experimental watershed of 67.5 ha in the Tsukuba mountain area, and started to investigate precipitation, throughfall and litterfall, groundwater and streamwater quality since September 1984. Also the vegetation survey carried out to estimate the biomass in this area. The effects of hydrological conditions on runoff loading during direct runoff of a storm were discussed from many observation data in various land-use typed areas. Especially, the runoff behaviours of anion substance during a storm event are strongly influenced rain preceding rainfall and preceding dry weather period as well as rain intensity and rainfall of the concerned rain event, as the amount of storage and feeding rate of anion substances in surface soil layer are finite. Also, the change of pollutant loading during flow down in the reach of rivers without added input load became clear from many various observation data. The amount was governed by the input load from catchment area, current speed, flowing-down time and longitudinal shape of river bed. In two years hence we will continuously bend our energies to these researches.

I 研究の概要

Outline of the Studies

海老瀬潜一¹⁾

Senichi EBISE¹⁾

昭和58～61年度の特別研究「自然浄化機能による水質改善に関する総合研究」は、既に2年間の前半期を終え、後半期に入っている。本報告書は、この段階で、中間報告としてこれまでに得られた研究成果を取りまとめたものの第1分冊である。この特別研究は10の研究グループから構成されており、本報告書はそのうちの第1（汚濁負荷）グループと、第2（流出・流達）グループの研究成果として、5つの論文をまとめている。第1グループは、生活系排水や小規模工場排水など制御し難い汚濁負荷発生源の原単位の算定と、降水を含む大気降下物による負荷量の算定を目的としている。厨房排水と洗たく排水の生活雑排水及びし尿排水からなる生活系排水の発生原因別の負荷原単位の実態調査を行っている。とくに、生活系排水の排出原単位と排出特性の地域差を明らかにするため、土浦市、長野市及び上田市の団地を対象に排水量と排水濃度の調査が行われ、相互の比較さらに既往の従来からの値との比較が行われた。アンケート調査も併せて実施し、算定精度の向上をはかった。地域差は認められなかったが、従来からの値と比較してT-NとT-Pで低く、BODとSSなどでは高い値が得られている。また、降水を含む降下物量についてはその季節変化や経年変化等が明らかになりつつあり、降雨や降雪による負荷の構成内容についても研究が進められている。最終的には全降下物量と、降水と降下塵に分けた負荷の算定を目指している。

第2グループは、森林の自然浄化機能の解明、山地・農耕地・市街地等の面源負荷からの排出負荷量の算定、及び、河川での汚濁負荷の流出・流達過程の定量的な解析を目的としている。森林域の水質浄化機能を明らかにするため、筑波山の南東斜面に67.5haの森林試験流域を設定し、林内雨・林外雨、リターフォール、渓流水、斜面地下水の定期的調査を続けるとともに、調査期間の初期条件としての植生調査を実施してスギ・ヒノキ・マツの既存量を求めている。さらに、降雨流出に伴う渓流水量・水質濃度の短期流出変化調査を実施し、特徴ある溶存物質の流出挙動を指摘して

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.

いる。また、面源負荷の降雨時および晴天時の流出特性を数多くの観測調査によって明らかにしている。流域の土地利用形態の違いによって流出物質の存在量や供給速度に限界があるため、降雨強度や降雨量だけでなく、その降雨時流出の初期条件を左右する先行降雨や先行晴天期間の影響の大きいことが陰イオン物質の流出挙動から明らかとなった。さらに、途中からの流入が無視できるような河川や水路の流下区間の上下流端で物質収支をとり、流下に伴う流出負荷量の変化が種々の調査から検討される。流出負荷量の流下に伴う減少は、流入汚濁負荷量のレベル、流速と流下時間、及び、河川・水路の縦断方向形状の影響の大きさが指摘されている。水質の形態変化によるものの定量化は、さらに詳細な流出負荷量調査が必要となろう。

表 1 研究担当者所属・氏名

プロジェクトリーダー	水質土壌環境部長 合田 健
水質土壌環境部	
陸上環境研究室	須藤隆一, 矢木修身, 岡田光正, 稲森悠平, 細見正明, 稲垣典子, 故山根敦子
水質環境計画研究室	村岡浩爾, 海老瀬潜一, 平田健正
計測技術部	
大気計測研究室	安部喜也, 横内陽子
分析室	西川雅高

表 2 客員研究員所属・氏名

中沢 雄平	(長野県衛生公害研究所)
日野 幹雄	(東京工業大学工学部)
新藤 静夫	(筑波大学地球科学系)
田中 正	(筑波大学地球科学系)
中辻 啓二	(大阪大学工学部)
宗宮 功	(京都大学工学部)
津野 洋	(京都大学工学部)
國松 孝男	(滋賀県立短大農業部)
浮田 正夫	(山口大学工学部)
橘 治国	(北海道大学工学部)
山本 哲也	(茨城県公害技術センター)

表 3 成果発表リスト

口頭発表

- 安部喜也・西川雅高(1983)：降水中の粒子の元素組成について. 1983年度日本地球化学会年会, 八王子(58.10)
- 安部喜也(1983)：降水成分のデータ解析における二三の問題点, 第24回大気汚染学会, 四日市(58.11)
- 安部喜也・西川雅高(1983)：上越地域および最上川流域における降雪中の微量成分濃度とその分布. 第24回大気汚染学会, 四日市(58.11)
- 安部喜也(1984)：大気降下物中の栄養塩とその変動. 日本陸水学会第49回大会, 筑波(59.9)
- 安部喜也・西川雅高(1984)：降水中の粒子とその含有成分の変動. 日本地球化学会昭和59年度年会, 名古屋(59.10)
- 安部喜也・西川雅高(1984)：東京一筑波における積雪中の化学成分濃度の分布, 第25回大気汚染学会, 宇部, (59.11)
- 安部喜也・西川雅高(1984)：筑波地域における降水中の微量成分濃度の変動と降雨特性, 第25回大気汚染学会, 宇部(59.11)
- 安部喜也・西川雅高(1984)：筑波地域における降水の水質特性とその変動, 水文学研究会・陸水物理研究会第3回合同研究会, 東京(59.12)
- 安部喜也(1985)：湖沼の栄養塩収支における大気降下物の意義, 日本陸水学会第50回大会, 大津(60.10)
- Ambe Y. and M. Nishikawa(1984)：Variations of chemical constituents in particulate matter in rain water. The 1984 Int. Chem. Congr. Pac. Basin Soc., Honolulu(59.12)
- 稲森悠平・風見敏明・須藤隆一(1983)：回転円板法による生活排水の脱窒. 日本水処理生物学会第20回大会, 大阪(58.11)
- 海老瀬潜一(1983)：河川流出負荷量から見た土地利用形態別流出負荷原単位. 土木学会第38回年次学術講演会, 横浜(58.9)
- 海老瀬潜一(1984)：降雨流出による溶存物質負荷量の増加. 日本陸水学会第49回大会, 筑波(59.9)
- 海老瀬潜一(1984)：晴天時と降雨時の流下区間物質収支による河川自浄作用の評価. 土木学会第39回年次学術講演会, 京都(59.10)
- 海老瀬潜一(1985)：降雨時に流出する河床付着藻類・付着生物量の評価. 土木学会第40回年次学術講演会, 仙台(60.9)
- 鈴木基之・岡田光正・河田孝雄(1983)：酸化池による生活雑排水の処理. 化学工学協会第48年会, 京都(58.4)
- 合田 健(1984)：ノンポイントソースの制御, 第3回琵琶湖研究シンポジウム, 大津(59.12)
- 須藤隆一(1983)：これからの生活排水処理をめぐって. 化学工学協会第17回秋季大会, 仙台(58.9)
- 須藤隆一(1983)：生活雑排水処理における回転円板法. 第5回回転円板法研究シンポジウム, 東京(58.10)
- 須藤隆一(1983)：自然浄化機能を活用した雑排水対策. 日本水質汚濁研究協会, 雑排水対策セミナー, 東京(58.11)
- 平田健正・村岡浩爾(1985)：山地小流域の渓流水質について. 日本陸水学会第50回大会, 大津(60.10)
- 村岡浩爾・平田健正・岩田 敏(1984)：孤立林地の地下水水質の変化. 第18回水質汚濁学会, 東京(59.3)
- 山根敦子・岡田光正・須藤隆一(1983)：浅い汚濁都市河川の自浄作用. 日本陸水学会第48回大会, 松本(58.9)
- 山根敦子, 岡田光正・須藤隆一(1983)：生活雑排水の原単位. 日本水処理生物学会第20回大会, 大阪(58.11)
- 山根敦子・岡田光正・須藤隆一(1984)：汚濁都市河川の底泥における有機物の分解. 第18回水質汚濁学会, 東京(59.4)

印刷発表

- Ambe, Y. and M. Nishikawa(1983)：Measurements of fluctuations of the concentrations of trace elements in rain water. Proc. 6th World Congr. Air Qual., 1983, Paris, 97-99.
- 安部喜也・西川雅高(1985)：筑波地域における降水成分の特性について. ハイドロロジー, 15, 2-11.
- 稲森悠平・須藤隆一(1983)：生活排水中の窒素, リン対策について. 公害と対策, 19(7), 48-55.

- 稲森悠平 (1984) : 生活雑排水および尿尿浄化槽放流水による公共用水域の富栄養化とその対策. 建設設備と配管工事, 22(2), 39-46.
- 海老瀬潜一・相崎守弘・大坪国順・村岡浩爾 (1983) : 河川流出負荷量としての河床沈殿・堆積物量の評価. 水質汚濁研究, 6, 93-103.
- 海老瀬潜一 (1984) : 降雨時流出負荷量算定のための回帰モデル. 衛生工学研究論文集 (土木学会), 20, 27-38.
- 海老瀬潜一・村岡浩爾・佐藤達也 (1984) : 降雨流出解析における水質水文学的アプローチ. 土木学会第28回水理講演会論文集, 28, 547-552.
- 海老瀬潜一 (1984) : 土地利用形態別流出負荷量原単位とその特性. 第1回自然浄化シンポジウム—自然浄化機能による水質改善— (国立公害研究所), 21-28.
- Ebise, S. (1984) : Separation of runoff components by $\text{NO}_3\text{-N}$ loading and estimation of runoff loading by each component. In: Hydrochemical Balances of Freshwater Systems. (ed.) E. Eriksson, 1st. Assoc. Hydrol. Sci. 428p., 393-405.
- 海老瀬潜一 (1984) : 晴天時と降雨時流出を併せた土地利用形態別流出負荷量原単位. 京都大学環境衛生工学研究会第6回シンポジウム講演論文集, 6, 152-158.
- 海老瀬潜一 (1985) : 降雨による土壌層から河川への NO_3^- の排出. 衛生工学研究論文集 (土木学会), 21, 57-68.
- Ebise, S. and T. Goda (1985) : Regression models for estimating storm runoff load and its application to Lake Kasumigaura. Intern. Jour. of Envir. Studies, 25, B, 73-85.
- 海老瀬潜一 (1985) : 汚濁物質の降雨時流出特性と流出負荷量. 水質汚濁研究, 8(8), 31-36.
- 岡田光正・須藤隆一・江島玄泰・稲森悠平 (1984) : 水路浄化法による生活雑排水処理に関する基礎的研究. 用水と廃水, 26, 595-605.
- 岡田光正 (1985) : 生活系排水の原単位. 第2回自然浄化シンポジウム—自然浄化機能による水質改善— (国立公害研究所), 7-14.
- 合田 健 (1984) : 水質汚濁防止対策の将来像—雑排水問題を考える前に—, 用水と廃水, 26, 457-472.
- 須藤隆一 (1983) : 雑排水をどうするか, 用水と廃水, 25(4), 47-53.
- 須藤隆一 (1984) : これからの生活排水処理をめぐって, 化学工学シンポジウムシリーズ. 4, 1-10.
- 須藤隆一 (1984) : これからの生活排水処理技術. 化学装置, 26(1), 58-63.
- 須藤隆一 (1984) : 生活雑排水処理における回転円板法. 環境技術, 13, 435-438.
- 須藤隆一 (1984) : 小規模生活排水処理における将来の処理システム. 環境技術, 13, 734-740.
- 須藤隆一 (1984) : 生活雑排水の処理技術. 水質汚濁研究, 7, 146-153.
- 須藤隆一 (1984) : 生活雑排水対策—小型合併処理の処理技術. 生活と環境, 29(7), 16-24.
- 須藤隆一 (1985) : これからの生活排水の処理技術. 住宅設備, 6(1), 45-50.
- 山根敦子・岡田光正・須藤隆一 (1983) : 有リン洗剤の使用禁止に伴う生活排水の汚濁負荷単位の変化. 下水道協会誌, 7(1), 1-9.

II-1

生活系排水の原単位

Per Capita Loadings of Domestic Wastewater

岡田光正^{1,2}・須藤隆一²

Mitsumasa OKADA and Ryuichi SUDO

要 旨

生活雑排水及びし尿の排出原単位並びに排出特性を知るため、土浦市及び長野市と上田市内の団地を対象として排水量、水質調査を行った。同時に排出実態を知るためのアンケート調査も行った。

得られた結果は次の通りである。

- 1) 生活雑排水は朝と夕方の2回に主として排出された。これは洗濯や炊事の時間と一致していた。
- 2) 生活雑排水の原単位は水量 = $140 \sim 190 \text{ l cap}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, SS = $11 \sim 24 \text{ g} \cdot \text{cap}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, BOD = $13 \sim 35 \text{ g} \cdot \text{cap}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, T-N = $1.9 \sim 2.3 \text{ g} \cdot \text{cap}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, T-P = $0.22 \sim 0.40 \text{ g} \cdot \text{cap}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ の範囲にあり、土浦市と上田市の地域差は認められなかった。これらの値はほぼ既往の報告の範囲内であった。
- 3) 生活排水及び生活雑排水から推定したし尿の原単位は、すでに報告されている値と比較して N,P は低め、BOD, SS 等は高めであった。

Abstract

Surveys on effluent quantity and quality from small residential area were carried out in Tsuchiura, Nagano and Ueda to estimate per capita loading and pattern of discharge for domestic wastewater, gray water and night soils. Also inquiries were made simultaneously to estimate the sources of effluent discharge.

The following results were obtained:

- 1) Major parts of gray water was discharged twice in a day, i.e. morning and evening, and coincided with the time of washing and cooking.
- 2) Per capita loadings of gray water were $140 \sim 190 \text{ l/cap/d}$, $11 \sim 24 \text{ g SS/cap/d}$, $13 \sim 35 \text{ g}$

-
1. 現：東京農工大学工学部化学工学科 〒184 東京都小金井市中町2-24-16
(Present address) Department of Chemical Engineering Tokyo University of Agriculture and Technology, Naka-machi, Koganei, Tokyo 184, Japan.
 2. 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.

BOD/cap/d, 1.9-2.3g T-N/cap/d and 0.22-0.40g T-P/cap/d.

Little differences were noted between the loading in Tsuchiura and that of Ueda. These values were within the range of values ever reported.

3) Per capita loadings of night soils estimated from the difference between domestic wastewater and gray water were the smaller in N and P, and the larger in BOD and SS as compared with reported values.

1 はじめに

全国各地の水域において、生活排水は水質汚濁の主要な原因の一つになっている。例えば隅田川、江戸川、寝屋川などでは、河川に対する全 BOD 負荷に占る生活排水の割合が50%を超え、また東京湾、伊勢湾、瀬戸内海ではその全 COD 負荷に占る生活排水の割合が40%を超えている。さらに印幡沼のように70%に及ぶ水域もある。生活排水のうち、し尿は未処理のまま公共水域に放流することが禁止されている。しかし、生活雑排水（台所、浴室排水等、し尿以外の生活排水）の放流に関しては法的な規則がない¹⁾。このため下水道が敷設されておらず、また合併式浄化槽も設置されていない地域では、生活雑排水の多くが未処理のまま公共水域に放流されている現状にある。生活排水中の生活雑排水の割合は水量で約75%、BOD量で約67%と非常に大きく、工場排水の規制が進んだ現在では生活雑排水の公共水域への汚濁負荷量は各種排水のなかで最も大きいと言われている²⁾。

生活排水や生活雑排水のような生活系排水に由来する汚濁負荷量を削減するには、下水道や合併式浄化槽を普及させることが必要であり、かつそれが最も根本的な対策であろう。しかし現在その整備が進みつつあるものの、完全な普及にはさらに多額の投資を必要とするのみならず、かなり長時間を要する。例えば、我が国の下水道普及率は昭和57年末でわずか32%であり、第5次下水道整備計画が昭和60年に完成したとしても、下水道普及率は44%に過ぎない。また合併式浄化槽についても COD 総量規制を実施している東京湾、伊勢湾及び瀬戸内海流域関係20都府県（人口約6,200万人）で約7%であり、生活系排水を完全に処理している人口は極めて低いといえる。このため、我が国の全人口の70%近くが生活雑排水をたれ流ししていると推定されている³⁾。

したがって、現在問題となっている水質汚濁に対処するためには、下水道や合併式浄化槽による生活排水の処理を普及させるのみならず、生活雑排水単独の対策を行うことも必要となろう。しかも、その普及は緊急の課題であるため、従来の処理装置の設置は必ずしも経済的に容易でない。したがって、本特別研究のテーマである自然浄化機能をより活用したり、普及の容易な簡易処理装置を開発することも検討の必要があろう。

これら様々な浄化方法の検討を行うためには、まず生活系排水の排出実態を正確に把握する必要がある。そこで、本調査では生活排水とともに生活雑排水にも着目し、水量、水質などその排水実態の把握を試みた。

2 調査方法

2.1 調査対象

調査対象となった5地域を表1に示す。なるべく平均的な原単位を得るために数十戸以上の住宅地域を選んだ。生活排水を対象としては、土浦市、長野市内の1戸建住宅団地を選んだ。いずれもサラリーマン家庭が多く、昼間人口の少ない団地である。ここには合併式浄化槽が設置されており、その流入水はすべて対象地域内で排出された生活排水である。ただし、一部地下水が流入したり、降雨時に雨水の流入があるため、調査はなるべく降雨を避けて行った。

生活雑排水を対象としては、土浦市内2地区及び上田市内のK団地を選んだ。土浦市内では、し尿をくみ取りによって処理し、雑排水を側溝に放流している地区を選んだ。また、排水が1箇所に集中して流量測定や採水を行いやすいことも選定の条件である。新しい住宅地では、下水道や共同処理施設がなくても戸別浄化槽を設置している住宅の割合が多い。このため、選んだ地区は両者とも比較的古い住宅街である。上田市内のK団地は新しい低層集合住宅である。ここではし尿をくみ取りによって処理し、生活雑排水のみを管渠で集めて共同処理している。

表 1 生活系排水原単位調査の対象地域

Table 1 Survey area for the estimation of per capita loading of domestic wastewater

地 域	人 口	排 水	処 理 施 設
土浦市内K団地	1,000 ~ 1,800 人	生活排水	合併式浄化槽
長岡市内M団地	960 人	生活排水	合併式浄化槽
土浦市内M地区	290 人	生活雑排水	し尿くみ取り、側溝
土浦市内W地区	200 人	生活雑排水	し尿くみ取り 側溝
上田市内K団地	230 人	生活雑排水	し尿くみ取り、雑排水共同処理施設

2.2 調査方法

1) 排水量の推定

合併式浄化槽及び共同処理施設を対象とする場合、流入汚水ピットに設置された汚水ポンプの作動状態を自動記録し、その作動回数、作動時間から流入水量を求めた。なお推定精度を上げるため、調査期間中ポンプの作動、停止を決める水位レベルスイッチの間隔（水位差）を通常より小さくした。側溝を対象とする場合、その地区の排水が集中する側溝末端部にフリュームを設置し、その水位の変化を自動記録して流量を求めた。

2) 採水方法

汚水ピットもしくは側溝末端部に自動サンプラーを設置し、1時間に1回採水した。1日分のサンプルはその日の午前4:00から翌日の午前3:00までとし、翌日の午前中に回収した。それを各時刻の流量に比例して混合し、1日分の混合試料とした。

3) アンケート調査

調査対象地域の人口（昼間人口，夜間人口），炊事，洗濯，入浴などに伴う排水状況，洗剤使用状況等を知るため，アンケート調査を実施した（アンケートの内容については，資料1を参照のこと）。調査項目としては，家族構成及び在宅状況，洗濯回数，使用洗剤及びその量，入浴回数，炊事の時間帯等である。

3 調査結果

3.1 生活排水

図1，図2は，土浦市K団地合併式浄化槽の流入水量及びBODの経時的变化を示す。ここでは平日（月～土）と休日（日）のそれぞれについて示した。また，図3には長野市M団地の流入水量の変化を示す。両者ともに極めて類似の変動を示した。すなわち，平日の午前6時過ぎから11時頃まで（最大値は8時頃）の午前中のピークが現れた。午後は水量が減少するものの，17時過ぎから再び増加し，24時頃まで2回目のピークが認められた。午前のピークは午後より大きく，またその時間帯も短い。休日も，ほぼ同様な変化を示したが，午前中のピークが1～4時間遅れた。なお，両団地とも深夜（午前1：00～4：00）は，それぞれ， $3\text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ （M団地，図3参照）， $6 \sim 9\text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ （K団地）程度の流入水量があった。しかし，生活由来とは思われない（BOD，リン，窒素等

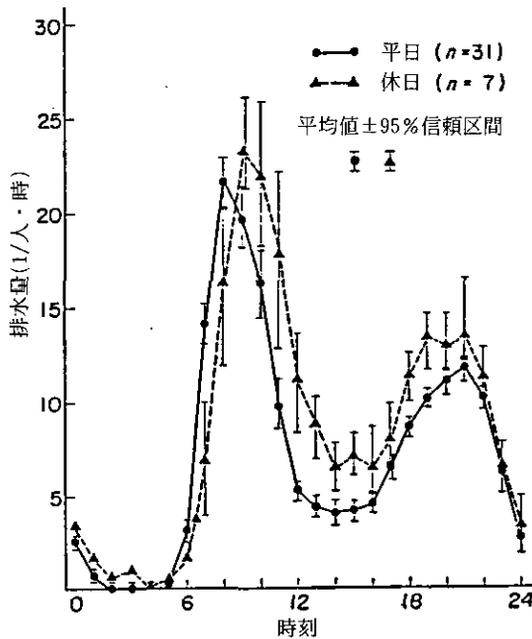


図 1 排水量の経時的变化（土浦市K団地）

Fig. 1 Discharge rate in a day (Tsuchiura)

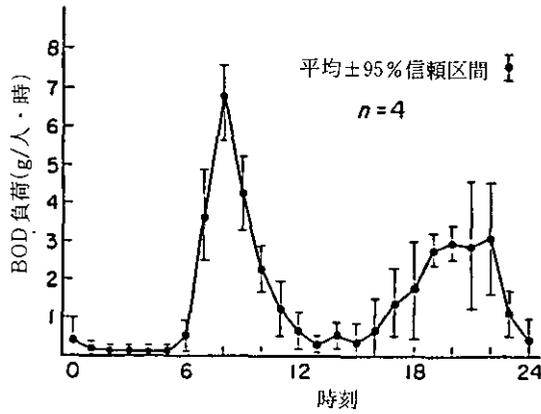


図 2 BOD 負荷の経時的変化 (土浦市K団地：平日)
Fig. 2 BOD loading in a day (Tsuchiura, weekdays)

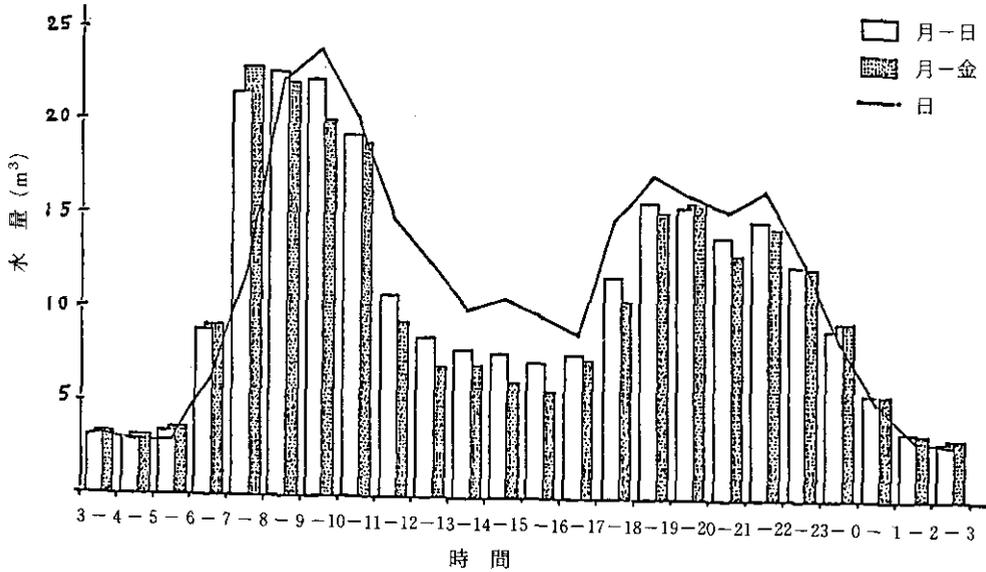


図 3 排水量の経時的変化 (長野市M団地：1983年10月)
Fig. 3 Discharge rate in a day (Nagano : Oct.1983)

の濃度が低い) ため、これを差し引いて排出原単位とした。

土浦市K団地で行ったアンケート調査結果を表2にまとめた。入居世帯数とアンケートで得られた平均家族数より対象地域の人口を推定し、一人当たりの原単位を求めた。平日の負荷原単位は、F検定(危険率5%)の結果、曜日間の差が認められなかった。しかし、表3に示すように(土浦市K団地)、平日と休日とでは水量、MBAS、T-P、T-N等の各項目で有意な差があった。NO₂+NO₃-Nを除き、休日は平日の1.2~1.3倍の負荷となった。長野市M団地でも同様であり、水量

を含むほとんどの項目で4～20%の増加が認められた。これは表2に示したように昼間人口が平日では30～40%であるのに対し、休日には90%程度が在宅しているためと考えられる。また、平日の負荷原単位を用いて各季節ごとその変動についても検討を加えた(土浦市K団地)。F検定(危険率5%)の結果、水量、SS、MBAS等に有意な差が認められた。

表 2 アンケート調査結果(土浦市K団地)
Table 2 Results of a questionnaire in Tsuchiura

調査期間	入居世帯数(世帯)	平均家族数(人/世帯)	推定常住人口(人)	昼間人口			洗たく回数(回/人・日)	洗剤使用量(回分/人・日)	洗剤種類別使用率*1			
				月-金	土(%)	日			有リン	無リン	粉石けん	
条例施行前	1980年7月	268	3.7	1,000	-	-	-	0.44	0.39	57.2	13.8	29.3
	10月	375	3.8	1,400	35	48	92	0.48	0.41	58.3	19.4	22.1
	12月	376	3.8	1,400	36	68	93	0.47	0.38	53.3	17.5	29.5
	平均		3.8		36	58	93	0.46	0.39	56.3	16.9	27.0
条例施行後	1982年10月	475	3.8	1,800	28	46	80	0.44	-	1.6	68.8	29.6**
	1983年1月	479	3.8	1,800	33	54	95	0.46	0.32	2.4	70.1	27.5
	平均		3.8		31	50	88	0.45	0.32	2.0	69.5	28.6

*1 各家庭の使用洗剤並びに洗剤使用量より推定
*2 各家庭の使用洗剤並びに洗たく回数より推定

表 3 平日と休日の負荷原単位の比較
Table 3 Per capita loadings for holidays and weekdays

	水量	SS	MBAS	COD	BOD	T-P	PO ₄ -P	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N NO ₂	TOC	
平日(月~土)	\bar{x}	171	48	1.98	22	48	1.16	0.67	7.8	5.6	0.07	35
	C	6	7	0.16	2	5	0.10	0.04	0.3	0.4	0.03	6
	n	(13)	(11)	(13)	(14)	(14)	(13)	(13)	(12)	(13)	(13)	(6)
休日(日)	\bar{x}	218	64	2.61	26	56	1.53	0.89	10.0	7.1	0.02	45
	C	95	241	0.89	47	178	0.89	0.64	4.8	7.0	0.19	-
	n	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(1)
週間平均	\bar{x}	177	50	2.06	22	49	1.21	0.70	8.1	5.8	0.06	36
	C	10	8	0.18	2	6	0.11	0.06	0.6	0.5	0.02	6
	n	(15)	(13)	(15)	(16)	(16)	(15)	(15)	(14)	(15)	(15)	(7)
F検定	F値	36.8	2.8	10.3	2.3	1.1	9.4	16.1	16.9	10.1	2.2	3.9
	有意差(5%危険率)	有	無	有	無	無	有	有	有	有	無	無
	休日の負荷 平日の負荷	1.27	1.33	1.32	1.18	1.16	1.32	1.33	1.28	1.28	0.29	1.29

単位:水量は l/人・日, それ以外は g/人・日
 \bar{x} : 平均値
C: 土 95%信頼区間
n: サンプル数

各地域における一人当たりの水量及び汚濁負荷原単位を表4に示す。調査時期(1980年～1983年)もまた地域も異なるがBODを除いて比較的良好な値が得られた。なお、1982年9月より「茨城県霞ケ浦の富栄養化の防止に関する条例」が施行されたため、以降土浦市ではリンを含む家庭用合成洗剤の使用が禁止されている。アンケート結果でも有リン洗剤の使用割合が56%から2%に減少したことが明らかとなった。ただし、有リン洗剤が減少した分だけ無リン合成洗剤が増加し、せっけんの使用割合はほとんど増加しなかった。表に示す条例施行前後における負荷原単位の差について統計的検定を行った結果、リン、MBAS、BODには有意な差が認められた。リンの減少量は13%であったが、規制の効果があったと考えられる。

表 4 生活排水の負荷原単位

Table 4 Per capita loadings for domestic wastewater

地 域	期 間	水 量	SS	BOD	COD	T-N	T-P	MBAS
土浦市内K団地 (洗剤規制施行前)	年 平 均	180	43	46	21	8.2	1.2	2.1
土浦市内K団地 (洗剤規制施行後)	秋～冬平均	180	56	68	25	8.1	1.1	1.6
	夏	180	46	44	22	8.5	1.1	2.2
長野市内M団地	秋	190	49	49	26	8.3	1.4	2.6

(注1) 単位：水量は $l \cdot \text{cap}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 、汚濁負荷は $g \cdot \text{cap}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

(注2) 水量は、実測値のうち地下水起源と思われる水量を差し引いて補正した。

3.2 生活雑排水

図4は上田市K団地の雑排水共同処理施設の流入排水量の経時的变化を示す。図1、図2に示した生活排水と同様に、午前、午後2回のピークが認められた。また、ピークの時間帯も同様であった。土浦市のM地区、W地区においてもほぼ同様な傾向が認められた。

表5には、土浦市M地区で行ったアンケート調査の結果の一部をまとめた。9%の住宅で既に戸別浄化槽を設置していた。このうち半数は宅地内処理(土壌浸透)、半数は処理水を側溝に放流していた。この分は雑排水原単位算定の誤差となる。洗濯状況については表2に示した他の団地の結果とほとんど同じであった。ただし、粉せっけんの使用割合が9%と極めて少ないのが特色である。図5にはアンケート結果に基づく1日の各時間帯の排水状況を示す。炊事の排水については、多くの家庭が午前(6:00～10:00)と午後(18:00～20:00)の1日2回排水するのに対し、洗濯、ふろの水の排水はほとんど午前中に集中することがわかった。これは、図1に示した1日の排水量の経時变化を十分に裏付ける結果と考えられる。

調査対象となった3地域における生活雑排水の原単位を表6に示す。また、他の機関によって調査された原単位も同表に示した。水量の原単位は140～340 $l \cdot \text{cap}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ の範囲であった。ただし、先に述べた生活排水と同様に、どの地域も深夜1:00～3:00の間にながりの水量があった。最も

多かったのは土浦市W地区の7月の調査で、一人当たり換算して $180\text{l}\cdot\text{d}^{-1}$ に相当した。この水量も地下水、漏水に由来すると考えられるため、実測値よりこれを差し引いた値を表に示した。

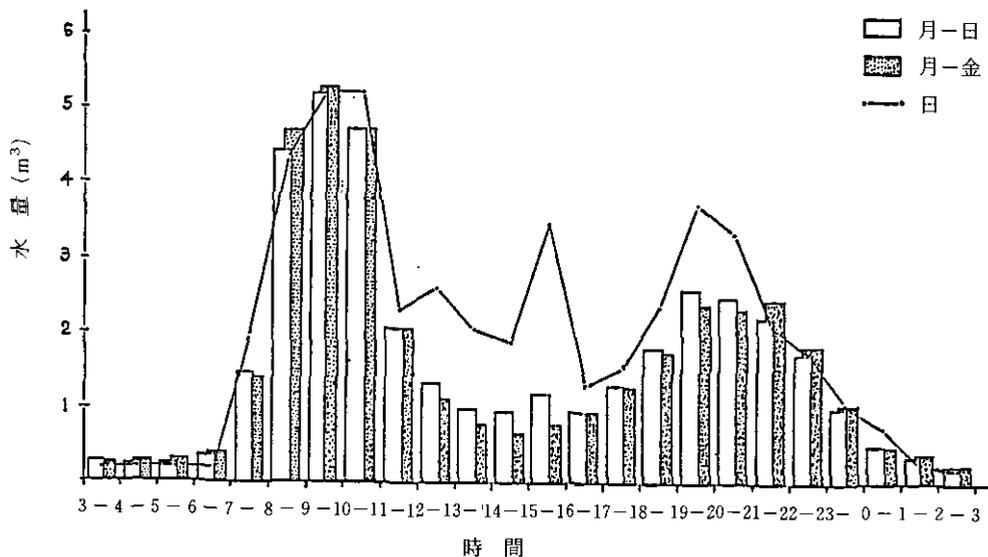


図 4 排水量の経時的变化 (上田市K団地: 1983年10月)

Fig. 4 Discharge rate in a day (Ueda: Oct. 1983)

表 5 アンケート調査結果 (土浦市M地区)

Table 5 Results of a questionnaire in Tsuchiura

調査期間	1983年8月
配布世帯数	80戸
回答数	67件
平均家族数	3.7人/世帯
推定人口	290人
水洗化率	9%
(浄化槽排水のうち50%は宅地内処理)	
洗濯回数	0.42回/人/日
洗剤使用量	0.31回分/人/日
洗剤の種類別使用頻度	
粉せっけん	9%
無リン合成洗剤	89%
有リン合成洗剤	2%

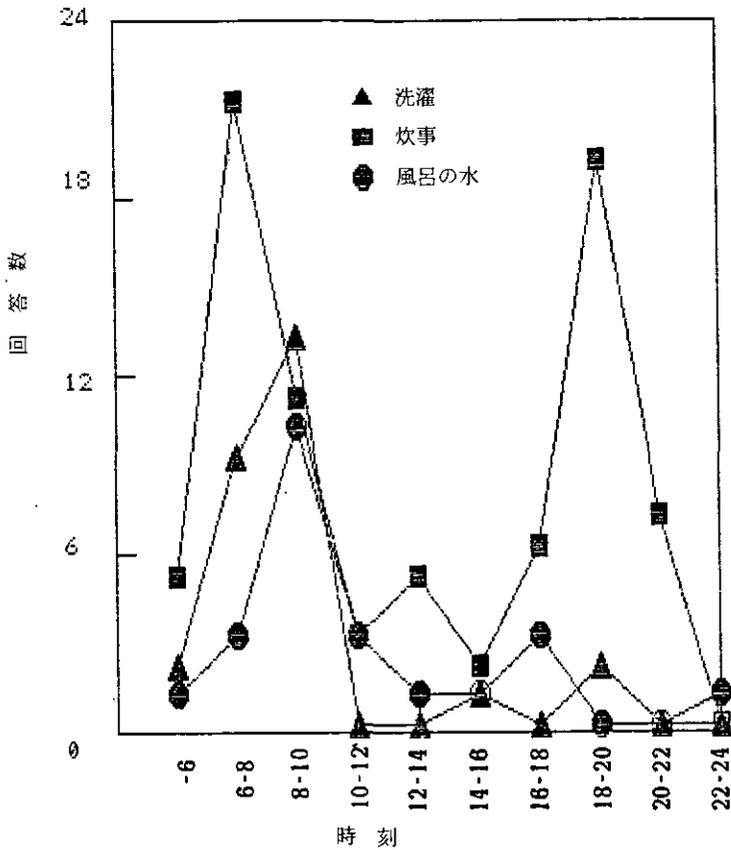


図 5 排水状況に関するアンケート結果 (土浦市W地区)

Fig. 5 Time of wastewater discharge from home (a questionnaire in Tsuchiura)

表 6 生活雑排水の原単位

Table 6 Per capita loadings for gray water

地 域	期 間	水 量	SS	BOD	COD	T-N	T-P	MBAS
土 浦 市 K 団 地	7 月	140	11	21	8.5	1.5	0.22	2.3
	10 月	150	13	27	12	1.3	0.28	2.6
土 浦 市 M 地 区	8 月	190	24	35	12	2.3	0.40	4.2
土 浦 市 W 地 区	7 月	340	11	13	6.6	1.9	0.21	3.0
	11 月	160	3.3	6.2	2.7	0.6	0.08	1.7
	平 均	160	17	37	16	2.2	0.6	2.5
文 献 ¹⁻⁴⁾ (範 圍)	最 大	260	28	74	21	3.6	0.9	3.2
	最 小	100	10	25	11	1.2	0.4	2.4

(注1) 単位：水量は $l \cdot cap^{-1} \cdot d^{-1}$ 、汚濁負荷は $g \cdot cap^{-1} \cdot d^{-1}$ 。

(注2) 水量は、実測値のうち地下水起源と思われる水量を差し引いて補正した。

土浦市W地区の7月の値は地下水、漏水の量が極めて多いため、信頼性は低いとみなされる。この値を除くと(140~190 $l \cdot cap^{-1} \cdot d^{-1}$)既往の調査結果の平均値¹⁻³⁾にかなり近い値といえよう。しかし、実際に雑排水を対象とした処理を行う場合には、地下水、漏水による水量負荷も考慮しなければならない。また、側溝がある場合、降雨に伴って濁水が流下する。これらは、処理方法を検討する際には考慮しなければならない要因といえよう。

汚濁負荷原単位は、土浦市W地区を除いていずれも既往の調査結果の範囲内であった。しかし、土浦市W地区は、特に水量が少ない11月においてその汚濁負荷が少なかった。これは側溝内にSSが沈降したり、側溝内の付着生物によってかなり浄化が進んだためと推定された。

3.3 し尿の原単位

本調査では、比較的近接した地域における生活排水及び生活雑排水のそれぞれの原単位を推定した。したがって、類似の生活を営んでいると仮定すると、両者の差はし尿の原単位に相当する。表7には、長野県、土浦市それぞれの調査から推定したし尿の原単位、及びすでに報告されている値をまとめた¹⁻³⁾。SS、BOD、CODはすでに報告されている値よりやや高めの、またT-N、T-Pはやや低い値となった。

なお、本報告は長野県衛生公害研究所との共同研究成果の一部をまとめたものである⁴⁾。

表 7 し尿の原単位の推定値

Table 7 Estimated per capita loading for night soils

地 域	期 間	水 量	SS	BOD	COD	T-N	T-P
長 野 県	夏	40	35	23	13	7.0	0.83
	秋	40	36	22	15	7.0	1.1
土 浦 市	-	-	32	33	13	5.8	0.7
文 献 ¹⁻⁴⁾	-	-	20	15	11	10	1.1

引 用 文 献

- 1) 武藤暢夫(1977)：生活排水をめぐる諸問題。用水と廃水，19，583~588。
- 2) 須藤隆一(1982)：生活雑排水からの負荷とその処理対策。用水と廃水，24，397~407。
- 3) 須藤隆一(1983)：雑排水をどうするか。用水と廃水，25，365~371。
- 4) 長野県生活環境部，長野県衛生公害研究所(1984)：家庭雑排水の処理に関する調査研究。75pp。

回 答 用 紙

1. お 名 前
お と ころ
電 話 番 号

1	
2	
3	

2. あなたのお宅の家族構成について伺います。同居なさっている方のみ（家族以外の方も含めて）全員の人数をご記入下さい。

		人 数 (人)	
		1 男	2 女
1	乳児（おむつあり）		
2	乳幼児（おむつなし）		
3	保育園児，幼稚園児		
4	小学生	1 人	
5	中学生		
6	高校生		
7	大学生，各種学校		
8	買物などを除くと1日中家にいることが多い。 （おとなの方）		2 人
9	お勤めなどで家をあける。 （おとなの方）	週 1 日 週 2 日 週 3 日 週 4 日 週 5 日 週 6 日 週 7 日	1 人
10	合 計		4 人

3. あなたのお宅の便所の形式は次のうちのどれでしょうか。あてはまるものに○をおつけ下さい。

①	くみとり式
2	水 洗 式
3	くみとり水洗式

4. あなたのお宅では、どれぐらい洗濯をなさっていらっしゃるでしょうか。右の(A)にご回答下さい。ただし、ここで洗濯1回とは、洗濯機で洗濯からすすぎまでをあわせて1回と数えます。

(A)

1	1週間あたりの洗濯日数	7 日
2	1日あたりの洗濯回数	3 回
3	1週間あたりの延洗濯回数	21 回

7, 8月の場合をご記入下さい。

- (イ) 洗剤を変えずに洗濯をすることがありますか。

①	は い
2	い い え

（上の質問に「はい」と答えた方）その場合、1回分の洗剤で何回洗濯をしますか。

1	2 回することが多い。
2	回することがたまにある。

（資料1）

5. 現在、お宅でお使いになっている洗濯用の洗剤（商品名）は何でしょうか。次の中から選んで○をおつけ下さい。2種類以上お使いの場合には、その全部に○を、また現在、主としてお使いのものに◎をおつけ下さい。

1	石 け ん	1	生協粉石けん	
		2	ニッサン粉石けん	
		3	花王粉石けん	
		4	ライオン粉石けん	
		5	()	
2	無リン合成 洗 剤 (粉末)	1	無リン全温度チアー	
		2	無リントップ	○
		3	無リンザブ	
		4	無リンニュービーズ	
		5	無リンブルーダイヤ	◎
		6	無リンワンダフル	
		7	粉末ジャスト	
		8	サード	
		9	()	
3	無リン合成 洗 剤 (液体)	1	液体ジャスト	
		2	液体ダッシュ	
		3	液体ボーナス	
		4	コープセフター	
		5	()	
4	無リン合成 洗 剤	1	全温度チアー	
		2	トップ	
		3	ザブ	
		4	ニュービーズ	
		5	ブルーダイヤ	
		6	ワンダフル	
		7	()	

6. あなたのお宅では、洗濯の水に何をお使いになっていますか。あてはまるものに○をおつけ下さい。

1	風呂の残り湯	
2	水道の水	
3	風呂の残り湯と水道の水	○

7. あなたのお宅でお使いになっている洗濯機の、タイプ、容量（〇〇kg用、〇〇リットル）メーカー名と型番号がわかりましたら、次の欄にご記入下さい。

1	タイプ	全自動（1槽式）		2槽式	
（あてはまるものに○をつけてください。）					
2	容量	1	洗濯物	2	kg用
		2	水槽の大きさ		リットル
		3	標準使用水量	146	リットル
3	メーカー名	東芝電気			
4	型番号	自動電気洗たく機 AW-1800			

8. あなたのお宅の入浴（風呂またはシャワー使用）の回数はどのくらいでしょうか。1週間あたりの回数をご記入下さい。

1	風呂	1週間あたり		7	回
2	シャワー	1	1人1週間あたり		回
		2	1週間あたりのべ		回

ただし、ここで風呂1回とは湯舟に1回、湯をはることとします。

9. あなたのお宅では、次のことを主にどの時間帯にしていますか。あてはまる欄に○をおつけ下さい。なお、1日に2回以上しているものについて必ずご記入下さい。

		洗濯	食事の準備	食事のたけ	風呂の水落とし
1	6時前				
2	6時～8時		○		
3	8時～10時	○		○	○
4	10時～12時				
5	12時～14時		○	○	
6	14時～16時				
7	16時～18時		○		
8	18時～20時			○	
9	20時～22時				
10	22時以後				

10. あなたのお宅でお使いになった水道使用料（最近お支払いになった金額あるいは量）をご記入下さい。

1	水道料金	円
2	使用量	m ³
3	該当月分	月分
4	わからない （井戸水使用） （その他）	井戸水使用

11. あなたのお宅では、自宅で車の洗車をなさいますか。

1	はい	
2	いいえ	○

(上の質問に「はい」と答えた方)

その場合、どの位の頻度で洗車しますか。当てはまる欄に回数をご記入下さい。

1	週に	回
2	月に	回
3	年に	回

12. あなたのお宅では、庭や植木に水道の水を散水しますか。

1	はい	○
2	いいえ	

(上の質問に「はい」と答えた方)

その場合、どの位の頻度で散水しますか。当てはまる欄に回数と散水時間(分)をご記入下さい。

(7, 8月の場合をご記入下さい)

1	1日に	2回	合計約	10分位
2	週に	14回	合計約	70分位
3	月に	63回	合計約	310分位

13. あなたのご家族は次の期間にどのくらい家にいらっしゃいましたでしょうか。あてはまる欄に人数をご記入下さい。また、洗濯をした回数とお風呂を使用した人数についてもご記入下さい。

	7月 24日 (火)	25日 (水)	26日 (木)	27日 (金)	28日 (土)	29日 (日)	30日 (月)	31日 (火)		
21～24時間 (ほとんど家にいる)	2	2	1	2	2	2	2	2		
18～21時間	1	1	2	1	1	2		1		
12～18時間	1	1	1	1	1		2	1		
6～12時間										
0～6時間 (ほとんど家にいない)										
洗濯をした回数	2	3	3	3	3	3	3	3		
風呂を使用した人数	4	4	4	4	4	4	4	4		
	8月 2日 (木)	3日 (金)	4日 (土)	5日 (日)	6日 (月)	7日 (火)	8日 (水)	9日 (木)	10日 (金)	11日 (土)
21～24時間 (ほとんど家にいる)	2	2	1	3	2	2	2	2	2	2
18～21時間	1	1	2			1	1	1	1	1
12～18時間	1	1	1		1	1	1	1	1	1
6～12時間						1				
0～6時間 (ほとんど家にいない)				1	1					
洗濯をした回数	3	3	3	2	2	3				
風呂を使用した人数	4	4	4	3	3	4				

II-2 渓流水質から見た森林の浄化機能に関する研究 (第1報) 筑波山試験流域の概要と植生調査

Study on Water Purification of Forest from View of Streamwater Quality (I) Outline of Tsukuba Experimental Basin and Vegetation Survey

村岡浩爾¹・平田健正¹

Kohji MURAOKA¹ and Tatemasa HIRATA¹

要 旨

森林域の持つ水質浄化機能の基本構造を調べるため、筑波山南東斜面に森林試験流域(67.5ha)を設け、1984年9月から観測を開始した。本報告は試験流域の観測施設の概要と植生調査結果についてまとめている。

- 1) 観測項目は林外雨、林内雨・リターフォール、渓流水、森林地下水である。林内雨・リターフォールは3ヶ所のプロット内で採取し、また地下水は新たに建設した2本の観測井で調べる。
- 2) 試験地内の優占植物体はヒノキ、スギ、アカマツであり、これら3種で全流域の85%を占める。
- 3) ヒノキ、スギ、アカマツ、落葉広葉樹、ヒノキ幼齢林地内で毎木調査と林床植物刈取り調査を行い、現存量を推定した。乾重でヒノキ1,150t、スギ7,380t、アカマツ490tとなり、これら3種で全現存量の92%を占める。

Abstract

In order to estimate water purification of forest, we set a mountainous experimental watershed of 67.5 ha in the Tsukuba mountain area, and started to investigate precipitation, throughfall and litterfall, groundwater and streamwater qualities since September in 1984. This paper describes outline of Tsukuba experimental basin and the result of vegetation survey in this area as follows.

Tsukuba study area is classified into three subbasins of A, B and C of which catchment areas are 31.5, 19.3 and 16.7 ha. Northern part from stream B is covered by granite rock and southern part by gneiss rock.

Fifteen sampling sites for streamwater were provided along three streams. Furthermore two test wells were constructed to study groundwater quality and response of groundwater to the rainfall precipitation. Groundwater and streamwater are collected every two weeks, and groundwater 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.

and streamwater depth are recorded by the float type level gauges. Precipitation is also continuously detected in the study area.

Dominant plants are Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*), Sugi (*Cryptomeria japonica*) and Pine (*Pinus densiflora*) of which stand areas cover 85% in the whole basin. Biweek samples of throughfall and litterfall are collected in the Hinoki, Sugi and broadleaved plots.

Allometric relationships between tree height and stem diameter at 1.3m height from floor are empirically determined in the Hinoki, Sugi, Pine and broadleaved stand. On the basis of these relationships, dry biomasses (ton/ha) of the Hinoki, Sugi, Pine and broadleaved stand are estimated as 201.5, 208.5, 54.8 and 84.2, respectively.

1 研究目的と意義

自然の森林域では水分や養分は植物体を介して常に循環している。降雨や大気降水でもたらされた水分と養分は林内雨や樹幹流となって土壌表面に到達し、さらにリターフォールとして林床に養分が還元される。図1にある様にこれらの物質の一部は植物体に再度吸収され、一部は渓流水と共に系外へ流亡する。中でも窒素やリンは森林生態系内を循環する可能性が高いとされており¹⁾、自己施肥系と呼ばれる森林生態系の生産活動を支えている。

自己施肥系とは言っても系内・外で物質の授受はあり、森林生態系の物質循環も基本的には開放系に属する²⁾。無施肥の状態であれば、系内にインプットされる窒素やリンは大気からの降水物や

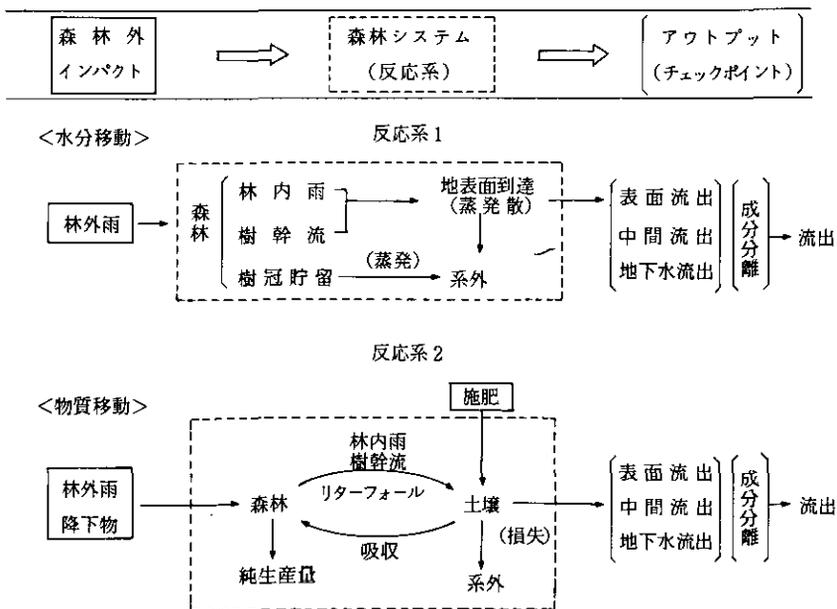


図 1 森林生態系の水分と物質の移動システム

Fig. 1 Flow of water and nutrient matters in forest ecosystem

降雨に依存し、この系外からの流入負荷量が渓流水で系外に搬出される流出負荷量より大きい時には、森林は水質浄化に役立ち、逆の場合には森林と言っても汚濁負荷源となる。

森林は集水域の中で最も面積が大きく、その浄化能力は評価されているが、定量評価には至っていない。その理由として、森林の立地する水文・気象・地質・植生状態で物質の動態は大きく異なり、理想的な試験地が得難いこと、加えて水文現象としての森林小流域の水収支に関する研究はあっても³⁾、物質収支まで含んだ研究例は極めて少ないこと、が挙げられる。後者の事例として、我が国ではヒノキ・広葉樹林地の岩坪・堤の研究⁴⁾、アカマツ・ヒノキ林地の西村の研究¹⁾に散見されるにすぎない。

森林小流域の物質収支を調べるには、図1に示した様な生態系内の水分と物質の降雨から溪流に至るまでの動態を明らかにする必要がある。それには系外から森林にインプットされる林外雨、循環系としての林内雨・樹幹流・リターフォール、森林から系外へ流出する地下水・渓流水の水量と物質量を長期にわたって観測しなければならない。そこで、著者らは筑波山系に森林小流域を設け、1984年9月より観測を開始した。もちろん一試験地の成果で流域全体を捉えるには困難な点もあるが、本来森林域のもつ水質浄化機能の基本構造について知見が得られるものと期待される。観測についての詳細は第2報⁵⁾に譲り、本報告では筑波山森林試験流域の概略と、観測に先立って行った植生調査について記述する。

2 筑波山森林試験流域の概要

2.1 試験流域の選定

植生によって降雨流出や物質の動態は大きく異なり、したがって植生については単純な程良い。また自然状態の森林の物質収支を調べるのであるから、無施肥の人為汚染のない森林が好ましい。こうした条件を満たす適地があっても、交通の便が悪く、林外雨や渓流水量の連続観測、あるいは森林地下水観測用井戸の掘削が難しいことが多い。さらに、本研究では隔週に行う定期観測に加えて、降雨時の渓流水や地下水の連続採取も予定しており、降雨流出現象に迅速に対処できる試験地が望まれる。

以上の条件を満たす試験地を筑波山系に求め、当研究所北方約17kmの茨城県新治郡八郷町中山地先に試験地を選定した。試験地は筑波山南東斜面に位置し、流域面積は67.5haである。

流域の大部分は国有林であり、一部分林と民有林から成っている。下流から流域終端部まで林道が整備され、溪流河道も一部改修済みであることから、建設資材の搬入や渓流水の水位観測には好都合である。

2.2 地形・地質

試験地の地形図を図2に示す。標高はおよそ200mから380mの範囲にあり、流域の平均斜度は15度である。標高200mの合流地点より北、西、南西に3本の溪流(A, B, C沢)が流れ、これ

らの溪流の森林からの出口に当る標高250mから300mの範囲には小扇状地が広がっている。図3は各溪流の流域区分を表し、それぞれの流域面積は表1にまとめている。

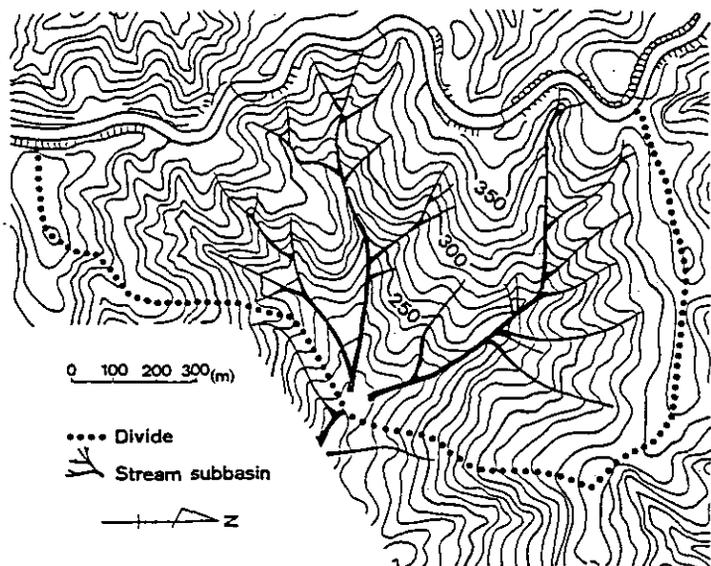


図 2 森林試験流域の地形図

Fig. 2 Topographical feature of Tsukuba experimental forested land

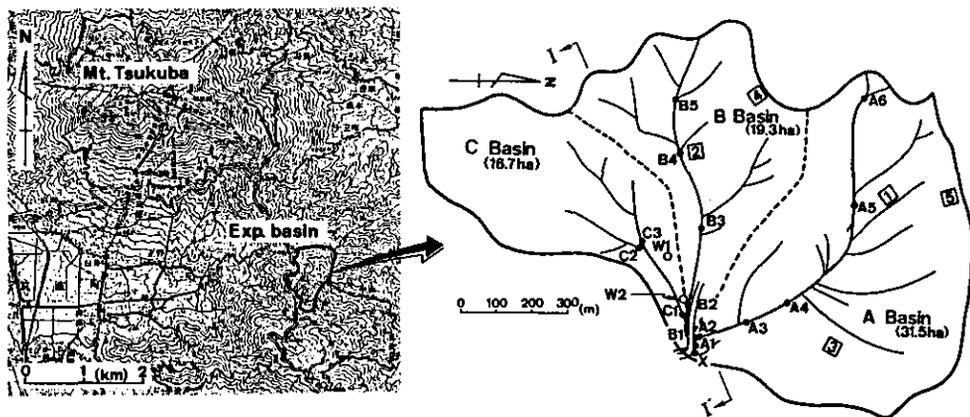


図 3 森林試験流域の流域区分と観測地点

Fig. 3 Stream subbasins and measurement sites in experimental forested land

表 1 森林試験流域の流域面積

Table 1 Area of stream subbasin in experimental forested land

Basin	A	B	C	Total
Area (ha)	31.5	19.3	16.7	67.5
(%)	46.7	28.6	24.7	(100)

図4は観測井掘削時に得られた地質柱状図であり、観測井の位置は図3中に記されている。扇状地肩頂部に当る観測井W1地点の地質柱状図を見ると、表層付近にはローム質粘土を主体とした崖錐が、それ以深には扇状地堆積物、風化花崗岩が分布し、GL-10m付近に基岩の花崗岩が現れる。一方、観測井W2はC沢に沿ってW1から下流77.2mに掘削された。両者の標高差は10.5m、両井間の平均斜度は7.7度である。W2地点では表層部から礫混り崖錐が分布し、この下位には風化花崗岩が続き、GL-10m付近に基岩の黒雲母片麻岩が現れる。

筑波地方の地質については茨城県農業試験場から出された「茨城県地質図」⁶⁾、柴田⁷⁾、高橋⁸⁾の地質図、等比較的多く記載されている。これらの文献や現地踏査、先述した地質柱状図から判断して、試験地の地質は次の様にまとめられる。

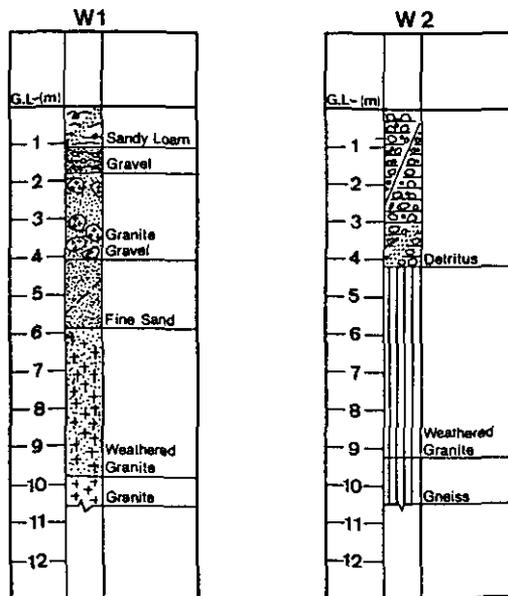


図 4 観測井W1とW2地点の地形柱状図

Fig. 4 Vertical geological profile at well station W1 and W2

試験地域は古生代末期から中生代初期にかけて堆積した泥岩を中心とする堆積岩から成り、部分的に花崗岩が侵入している。花崗岩の侵入に伴い、泥岩は強い熱変作用を受け筑波型変成岩（黒雲母片麻岩）が形成されたと推察される。

以上の結果を地質平面図として図化したのが図5であり、B沢に沿って顕著な境界が走っていることが分かる。さらにW1及びW2地点の地質柱状図から観測井に沿った測線I-I'の地質断面図を描くと図6となる。同図は、二つの柱状図間で崖錐下部と風化花崗岩下部を結び、流域終端

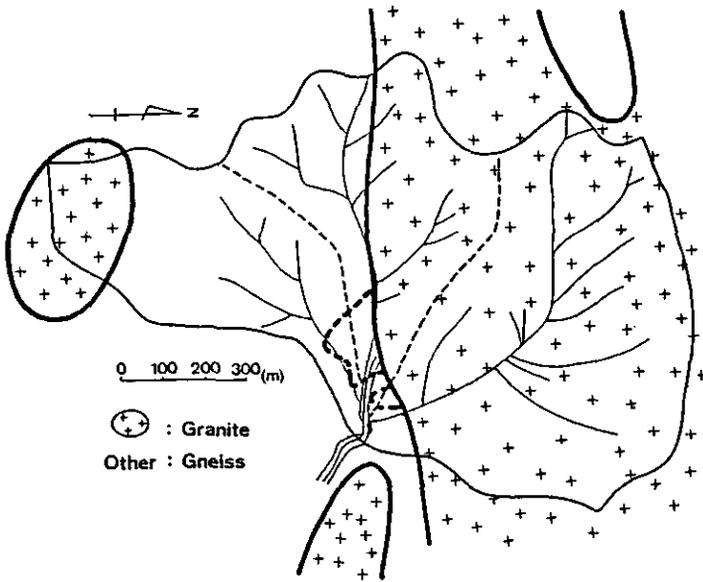


図 5 森林試験流域の地形平面図

Fig. 5 Horizontal geological profile in experimental forested land

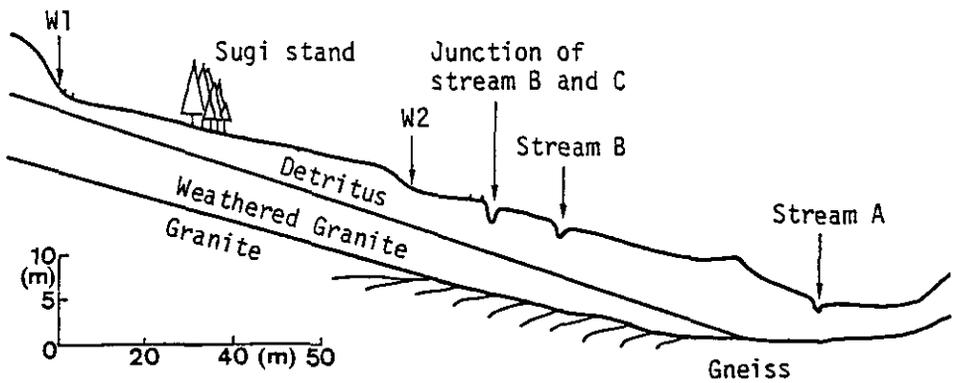


図 6 測線 I-I' に沿った地質断面図

Fig. 6 Geological profile along section I-I' as in Fig. 3

部で片麻岩が露出していることを考慮して描いた結果である。ところで、渓流水は森林域から流出する全ての地下水を集めているとは限らない。伏流水として地中深くもぐり、系外に流出する場合があるからである。本試験地では地下水は崖水と風化花崗岩、あるいは風化花崗岩と基岩との境界付近を中心に流動していると考えられ、ほぼA沢終端部に集水されると言える。

2.3 気 候

森林などの緑色植物の群落分布は、気象要因の中で主に温度と水分に支配される。この内、水分について、わが国の年降水量は地域的なばらつきもあるが、概ね1,000mm以上であり、降雨には恵まれている。一方温度は、南西諸島や小笠原諸島は亜熱帯、北海道中部以北は亜寒帯に属し、その差は大きい。従って我が国の森林は温度変化で大よそその群落分布が決まると考えられる¹⁰⁾。

表2は館野(試験地より南17km)の最近5年間の月平均気温と月別降水量⁹⁾を整理している。年平均降水量は1,189mmと全国平均値に比べてかなり少ない。この資料には1984年の極端に少ない719mmを含んでおり、これを別にすると1,307mmとなる。依然として全国平均値より少ないが、著しい寡雨地帯ではない。

表 2 最近5年間の館野の月平均気温と月平均降水量

Table 2 Mean temperature and rainfall in month at Tateno M.S. during latest 5 years

Month	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Mean Value
Temperature (°C)	1.8	2.7	6.1	11.3	16.6	20.4	23.0	24.5	20.8	15.5	9.7	4.8	13.1
Rainfall (mm)	38.9	40.9	78.9	91.1	115.7	133.2	115.4	88.2	160.7	192.6	103.8	30.0	1,189

次に、森林の分布限界を表す指標として吉良らの用いた積算温度がある¹⁰⁾。これは日平均気温が10°Cになると生育が始まり、10°C以下になると休止することを基にして、生育期間の日数を合計したものである。それによると日平均気温日数が121~180日：冷温帯、181~240日：暖温帯、241~300日：亜熱帯とされている。筑波地方では4月上旬に10°Cとなり、11月中旬に終る。最近5年間の館野の資料によると226日となり、調査地域は暖温帯に属することがわかる。

なお、渓流水温は気温と位相遅れを持って変動すると思われるが、7月下旬で約19°Cである。

2.4 観測施設

本観測は林外雨、林内雨・リターフォール、地下水・渓流水の採取から成り、1984年9月より観測を開始した。試験地内の観測施設は次の通りである。

(a) 林外雨

森林にとって系外からの収入となる林外雨は、流域終端部の裸地(図3中のA1地点)に転倒マス型雨量計(池田計器製LRT-100)を設置し、雨量計からの転倒パルスメモリーバックに記

録する。そうすることによって、10分降雨量を得ることができる。また林外雨は直径21cm、深さ30cmのパイレックス製ポット型雨量マスで集水し、1雨ごと、もしくは1週1度回収する。

(b) 林内雨・リターフォール

ヒノキ林、スギ林、落葉広葉樹林内にプロットを設け、林内雨とリターフォールを観測する。林内雨については林外雨と同様のポット型雨量マス、リターフォールは直径1m、深さ1mの円筒マス(2mmメッシュ)をそれぞれ各プロット内に3箇所ずつ配置し、隔週に資料を回収する。樹幹流は林内雨に比べて水量は少ないが、生態系内を循環する物質量としては無視できず⁴⁾、今後観測を予定している。

(c) 地下水・溪流水

林床に到達した降雨は最終的に地下水となって森林域から流出するが、この地下水の挙動を調べるため、森林域から小扇状地への出口W1地点とW1からC沢に沿って下流77.2m地点W2の2箇所に観測井を建設した。一方溪流水の採水地点はA、B、C沢沿いに14点と残流域からの流出地点Xの合計15地点を設定した。地下水・溪流水とも隔週ごとに採水する。地下水位は観測井W1とW2、溪流水は3溪流合流地点A1にそれぞれ自記水位計(池田計器製LR-100WP)を設け連続観測を行う。溪流量はA1地点の水位-流量に関する水理模型実験も行っており、A1地点で観測された水位記録から流量に換算する。

3 植生調査

3.1 調査の概要

試験地内の植物体優占種を知り、現存量推定に必要な毎木調査地点を選定するためにも植生調査は不可欠である。そこで、営林署事業基本図、既存の植生図、空中写真から試験地内の植生を概観し、現地踏査を行って優占種を中心とした植生の相観区分図を作成した。この結果から、図3中に示すようなヒノキ、スギ、落葉広葉、アカマツ、ヒノキ幼齢林の毎木調査地点を選び、1984年2月にヒノキ、スギ林の毎木調査、同10月に落葉広葉樹、アカマツ、ヒノキ幼齢林の毎木調査と各植生の林床植物刈取り調査を実施した。同様な現存量調査を1986年にも予定しており、わずか2年間であるが、その間の植物体成長量が推定できると考えられる。なお、毎木調査のために設定したコドロードの内、ヒノキ、スギ、落葉広葉樹林については先述した林内雨・リターフォール観測用プロットとして使用している。

3.2 現存植生

植生区分を図7に、各植生の占める面積を表3に示す。調査地域はほぼ全域にわたって植林が施されている。沢沿いを中心にスギ植林が広がり、尾根部周辺にはアカマツ植林とヒノキ植林が見られる。表3にあるとおり、スギ植林53%、ヒノキ植林18%(ヒノキ幼齢林も含む)、アカマツ植林14%となっており、これら3種で全流域の85%を占める。一般にスギは水分条件の良い場所を好み、ヒ

ノキはスギほど水分を欲しないほか、アカマツは尾根部などの表層土が薄く、貧養地でも生育できることが知られている。本流域内でもそうした生育条件に従った植林事業が実施されてきたことがうかがわれる。

スギ、アカマツの植林に囲まれて局在するクヌギ—コナラを中心とした落葉広葉樹林は、おそらく当初アカマツが植林されていたところに侵入してきたものと推測される。また、3溪流が合流する小扇状地付近にはわずかではあるが畑地雑草群落と水田雑草群落が散在している。

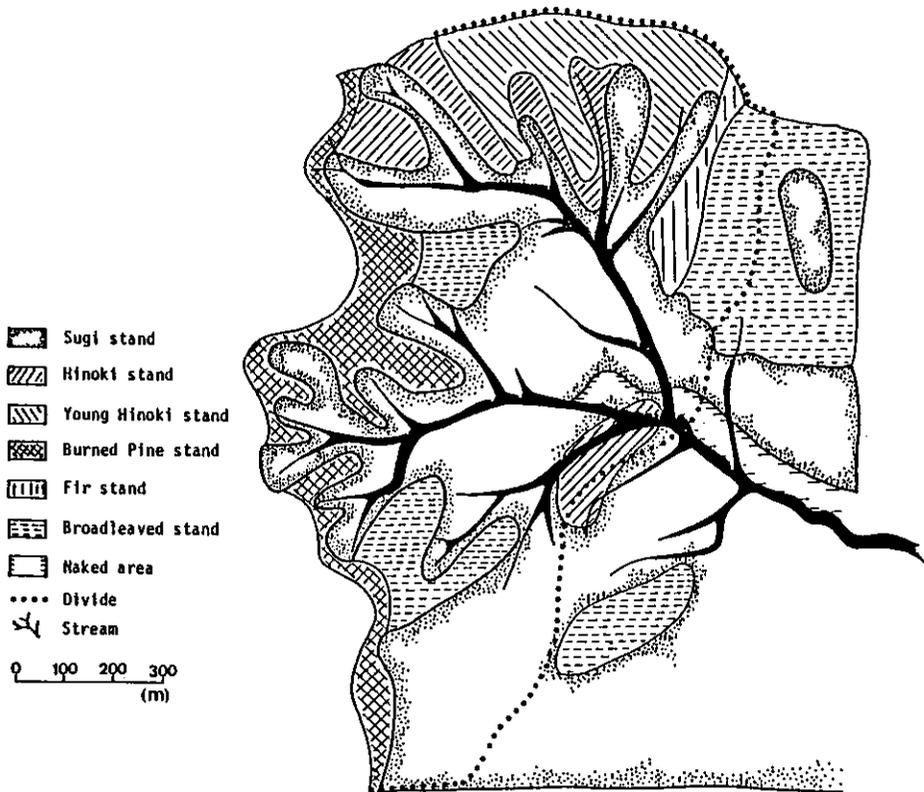


図 7 森林試験流域の植生相観図

Fig. 7 Vegetation map in experimental forested land

表 3 森林試験流域の植生面積

Table 3 Area occupied by vegetation in experimental forested land

Vegetation	<i>Chamaecyparis obtusa</i>	<i>Cryptomeria japonica</i>	<i>Young Chamaecyparis O.</i>	<i>Pinus densiflora</i>	<i>Abies firma</i>	Broadleave	Open area	Others
Area (ha)	35.4	5.7	6.3	8.9	1.7	7.3	0.6	1.7
(%)	52.5	8.4	9.3	13.2	2.5	10.8	0.9	2.5

3.3 毎木調査

森林の現存量や生長量を正確に求めるには、調査区内の各直径階から試料木を選び伐倒する。伐倒した資料を2m間隔に切り分け、各部分からの資料を完全乾燥した後、乾重を測定する。しかし伐倒による調査は膨大な労力と費用を要し、現実には困難な場合が多い。そのため、一定面積内の全立木の種類、胸高直径（地上1.3mの直径）、樹高を計り、相対成長係数を用いて現存量を推定する手法が考案されている¹¹⁾。本調査でもこの方法にならない、既存の経験式を用いて現存量を推定した。

毎木調査はヒノキ、スギ、落葉広葉樹、アカマツ、ヒノキ幼齢林を対象とし、まず設定したコドラード内の全立木に番号を付し、胸高直径を測定する。ただし、樹高1.3m未満の立木については、林床植物として刈取り調査を行うため除外している。樹高は各植生とも先端部の確認できる立木のみ測定した。測定方法は対象木までの距離と付角・仰角を計り、樹高を求めた。コドラードはヒノキ、スギ、落葉広葉樹林で20m×20m、アカマツ、ヒノキ幼齢林で15m×15mである。

一般に、樹高Hと胸高直径Dの間には小川の拡張相対成長式¹²⁾

$$\frac{1}{H} = \frac{1}{A \cdot D^h} + \frac{1}{H_{\max}} \quad (1)$$

の成立することが知られている。ここに、A、h、H_{max}は森林ごとに決まる定数で、hは相対成長係数と呼ばれる。そして胸高直径にそれほど差がなく、成長条件がほぼ一定に保たれている場合にはh=1と見なすことができる¹¹⁾。ヒノキ、スギ林はh=1とし、(1)式からH~Dの回帰式を求めた。他の落葉広葉樹、アカマツ、ヒノキ幼齢林についてはhの変化も考慮して回帰式を求めた。これらの樹高と胸高直径の関係をそれぞれの回帰式とともに図8に描いている。資料にばらつきは認められるが、概して(1)式は観測資料を良く表現することが分かる。

さらに、D²hと各部（幹、葉、枝、地下部）乾重の間にも相対成長係数が成立し、胸高直径から立木の現存量を推定することができる。計算に用いた各植生の相対成長関係式は次のとおりである。

(a) ヒノキ林

調査区内（400m²）のヒノキ立木数は108本であり、1haにすると2,700本となる。調査したヒノキの林齢は27年であることから、各部の現存量は次の山倉らの関係式¹³⁾を用いる。

$$\left. \begin{aligned} \log W_S &= 0.976 \log(D^2 H) - 1.6503 \\ \log W_B &= 1.33 \log W_S - 1.5093 \\ W_L &= 0.125 W_S \\ W_R &= 0.339 W_S \end{aligned} \right\} (2)$$

ここに、W_S：幹乾重、W_B：枝乾重、W_L：葉乾重、W_R：地下部乾重である。

(b) スギ林

調査地域のスギ林齢は24年であり、立木密度は2,500本/haであった。林齢・胸高直径の範囲を

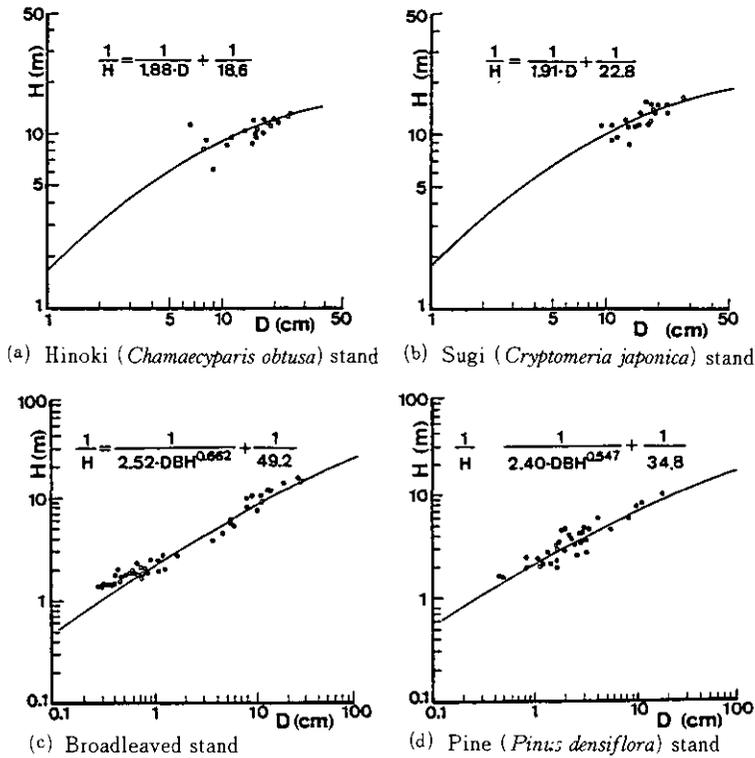


図 8 樹高Hと胸高直径Dの相対成長関係

Fig. 8 Allometric relationship between tree height H and stem diameter D at 1.3 m height from floor

考慮して、山田・四手井の関係式¹⁴⁾を用いる。

$$\log W_S = 0.7855 \log(D^2 H) + 0.18455$$

$$\log W_B = 0.8485 \log(D^2 H) + 0.7194$$

$$W_L = 0.27 W_S$$

$$W_R = 42.0 D^2$$

(3)

(c) 落葉広葉樹林

この地域は1951年に皆伐されており、それ以降にコナラ・クヌギが侵入したものである。胸高直径5 cm以上の個体は1,600本/ha、それ未満は6,100本/haであった。この様に胸高直径5 cmで区分したのは、5 cm以下の個体について現存量の実測例が乏しいからである。いずれの資料についても地上部現存量は瀬川・加藤の関係式¹⁵⁾

$$W_S = 0.0152(D^2 H)^{1.045}$$

$$W_B = 0.0000141(D^2 H)^{1.654}$$

$$W_L = 0.00000710(D^2 H)^{1.531}$$

(4)

を、地下部については Kimura らの調査結果¹⁶⁾

$$W_R = 0.0429(D^2)^{1.170} \quad (5)$$

を用いた。

(d) アカマツ林

アカマツの林齢は23年であるが、マツ枯れに起因し、落葉広葉樹の侵入を許している。立木密度は前者で840本/ha、後者で5,800本/haであった。アカマツの地上部現存量は中越らの結果¹⁷⁾

$$\left. \begin{aligned} W_S &= 0.210(D^2H)^{0.964} \\ W_B &= 0.0000196(D^2H)^{1.625} \\ W_L &= 0.0013(D^2H)^{1.015} \end{aligned} \right\} (6)$$

を、地下部については蜂屋ら¹⁸⁾の用いた

$$W_R = W_T/3.5$$

とした。ここに、 W_T は地上部乾重の合計 $W_T = W_S + W_B + W_L$ である。アカマツ以外の落葉広葉樹は(4), (5)式に依った。

(e) ヒノキ幼齢林

ヒノキ幼齢林の林齢は5年であり、樹高3m以下の個体が大部分であった。地上部については川那辺らの結果¹⁹⁾

$$\left. \begin{aligned} W_S &= 16.7(D^2H) \\ W_B &= 0.052(D^2H)^{1.435} \\ W_L &= 0.401(D^2H)^{1.155} \end{aligned} \right\} (7)$$

を、地下部については山倉ら²⁰⁾の得た

$$W_R = 0.339W_S \quad (8)$$

を用いた。

以上の方法で得られた現存量を t/ha 単位で表4に整理している。

3.4 林床植物の刈取り調査

毎木調査地点の林床植物は、ヒノキ植林、スギ植林地では林齢が25年前後であることから極めて貧弱であったのに対し、うっぺい度が低いこともあって落葉広葉樹林やアカマツ植林地では豊富であった。ヒノキ幼齢林は樹高が3m未満の個体が大部分を占め、そのため林床植物もかなり発達していた。これらの林床植物の現存量を調べるため、毎木調査地点で刈取り調査を行った。方法は1m×1mの小さなコドラードをそれぞれ任意に5箇所ずつ設置し、樹高1.3m未満の樹木と草本をすべて刈取る。現地でコドラードごとの生重量を測定し、その内の1コドラード分を各調査地域から持ち帰り、葉面積を測定した後完全乾燥させて秤量した。

葉と枝(幹も含む)の現存量は生産量と乾燥重量の比を求め、サンプル以外のコドラードについても考慮して算出した。一方地下部乾重は通常 $W_R : W_S = 1 : 3 \sim 3.5$ とされているため、本調

査では $W_R = W_S/3$ として推定した。これらの結果を表4に示している。

3.5 植生現存量

表4から、ヒノキ林、スギ林の現存量はそれぞれ201.5, 208.5t/haであり、林齢からすると妥当な値である²¹⁾。落葉広葉樹林については胸高直径5cm未満の調査結果が乏しいため、胸高直径5cmで区分して算出したが、総量として5cm未満の現存量は誤差の範囲と思われる。またアカマツ林は、マツ枯れのため現存量は小さいが、各個体の値は妥当なものであった。林床植物は各調査地域の繁茂状態を反映して、アカマツ植林地で最も大きく、落葉広葉樹林、ヒノキ幼齢林と続き、ヒノキ林とスギ林では無視できる程度に小さい。

表 4 森林試験流域の推定現存量

Table 4 Estimation of stand dry biomass in experimental forested land

Vegetation	Age (year)	Trees/ha	Stem wood	Branches	Foliage	Root	Total
Hinoki (<i>Chamaecyparis obtusa</i>) stand	27	2,700	126.9	15.7	15.9	43.0	201.5
Floor vegetation			0.0199	0.0081	0.009	0.028	0.037
Total biomass			126.9	15.720	15.908	43.009	201.537
Sugi (<i>Cryptomeria japonica</i>) stand	24	2,500	125.6	15.8	33.9	33.2	208.5
Floor vegetation			0.00039	0.00039	0.00015	0.00018	0.00075
Total biomass			125.6	15.8004	33.9002	33.2002	208.5008
Broadleaved stand D ≥ 5cm D < 5cm		1,600 6,100	50.0 0.085	6.75 0.00012	1.2 0.000055	22.0 0.100	80.0 0.185
Floor vegetation				1.23	0.476	0.57	3.986
Total biomass			50.085	7.98012	1.67606	22.67	84.171
Pine (<i>Pinus densiflora</i>) stand	23	840	14.8	1.82	1.33	5.33	23.1
Broadleaved stand D ≥ 5cm D < 5cm		5,800	9.77 0.90	0.755 0.075	0.155 0.0024	5.77 0.75	16.5 1.7
Floor vegetation				5.00	0.78	1.93	13.5
Total biomass			25.47	7.65	2.2674	13.78	54.80
Young Hinoki (<i>Chamaecyparis o.</i>) stand	5		0.222	0.00209	0.00756	0.0756	0.307
Floor vegetation				2.22	1.33	1.183	8.283
Total biomass			0.222	2.22209	1.33756	1.2856	8.59

以上の調査結果から、林床植物も含めた試験地全体の現存量を推定すると、ヒノキ林1,150t、スギ林7,380t、落葉広葉樹林はモミ林も含めて760t、アカマツ林490t、ヒノキ幼齡林54t、裸地・畑地には落葉広葉樹の林床植物現存量を適用すると2.4tとなる。その結果、スギ林は流域全現存量の75%、ヒノキ林12%、アカマツ林5%となり、これら3種で92%を占めることになる。

しかしながら、この現存量は調査地域の結果を全流域に拡張して計算されており、流域内全て同一の成長段階にあるとは限らない。林齢一つを取っても、例えばスギ林では22年から27年、ヒノキ林で5年から55年とかなり広い範囲にわたっており、ここで求めた流域内全現存量は粗雑に過ぎよう。本報告では表4に示した各コドラード内の調査結果に留め、流域内全現存量は1986年に行う植生調査を待って検討する必要がある。

4 まとめ

本調査の主たる目的は、系外から森林にインプットされる林外雨、森林内循環系としての林内雨・リターフォール、森林からアウトプットされる地下水・渓流水を調べ、森林小流域の物質収支をとることによって、本来森林の持つ水質浄化機能の基本構造を明らかにすることにある。そのために筑波山南東斜面に森林試験流域を設け、1984年9月から現地観測を開始した。本報告は、森林試験流域の概要と観測施設及び現地調査に先立って実施した植生調査についてまとめたものである。

1) 試験地の流域面積は67.5ha、標高200mから380mの範囲にあり、平均斜度は15度である。試験地の地質は泥岩を中心とする堆積岩（黒雲母片麻岩）から成り、部分的に花崗岩の侵入を受けている。

2) 本試験地内に林外雨、林内雨・リターフォール、地下水・渓流水の観測施設を整備した。林外雨は流域終端部の裸地に雨量計を設置し、林内雨・リターフォールはヒノキ林・スギ林・落葉広葉樹林地のプロット内で観測する。地下水は山地溪流に沿って建設した2本の井戸で観測し、その水位は溪流水位とともに連続記録する。

3) 試験地内の優占植物体はヒノキ、スギ、アカマツであり、これら3種で全流域の85%を占める。

4) 試験地内の植物体現存量を求めるため、ヒノキ、スギ、落葉広葉樹、アカマツ、ヒノキ幼齡林地にコドラードを設け、毎木調査と林床植物刈取り調査を実施した。大雑把には全流域でヒノキ林1,150t、スギ林7,380t、アカマツ林490tとなり、これら3種で全現存量の92%を占める。ただし、これらの値は限られたコドラード内の調査資料を単純に全流域に拡張した結果であり、正確な現存量は今後の調査資料を待って検討する必要がある。

謝辞

琵琶湖研究所長 吉良竜夫先生には直接現地を見ていただき、リターフォール・樹幹流の測定方法について御教示賜った。また試験流域の大部分は国有林であり、植生調査や毎木調査に際して笠

間営林署の方々並びに同柿岡支所 山内 正氏には多大の協力をいただいた。地下水及び渓流水の水位観測に当たって八郷町公衆衛生課並びに中山地区森林組合 神谷昌蔵氏には便宜を計っていたが、寺田正善氏からは観測井建設用地を提供していただいた。記して謝意を表します。

引用文献

- 1) 西村武二 (1973) : 山地小流域における養分物質の動き. 日林誌, 55 (11), 323-333.
- 2) 田淵俊雄・高村義親共著 (1985) : 集水域からの窒素・リンの流出. 東京大学出版会, 38-47.
- 3) 例えば岡本芳美 (1982) : 山地河川流域を対象とした長期流出計算法の開発について. 土木学会水理講演会論文集, 26, 211-216.
- 4) 岩坪五郎・堤 利夫 (1968) : 森林内外の降水中の養分量について (Ⅲ) 一流亡水中の養分量について. 京都大学演習林報, 40, 140-156.
- 5) 平田健正・村岡浩爾 (1986) : 渓流水質から見た森林の浄化機能に関する研究 (第2報) 一水文流出と水質調査. 国立公害研究所研究報告, 第95号, 37-55.
- 6) 大森昌衛・野村 哲 (1962) : 茨城県地質図 (20万分の1). 茨城県農業試験場.
- 7) 柴田秀賢著 (1967) : 日本岩石誌Ⅱ. 朝倉書店, 104-111.
- 8) 高橋裕平 (1982) : 筑波地方のカコウ質岩類の地質. 地質学雑誌, 88 (3), 177-184.
- 9) 水戸地方気象台 (1980-1984) : 茨城県気象月報.
- 10) 四手井綱英著 (1976) : 森の生態学. 講談社, 32-72.
- 11) 依田恭二著 (1971) : 森林の生態学. 築地書館, 22-46.
- 12) 小川房人著 (1980) : 個体群の構造と機能. 朝倉書店, 1-221.
- 13) 山倉拓夫・斎藤秀樹・四手井綱英 (1972) : ヒノキ人工林の物質生産の検討. 京都大学演習林報, 43, 106-123.
- 14) 山田 勇・四手井綱英 (1968) : スギ林の根の現存量について. 京都大学演習林報, 40, 67-80.
- 15) 瀬川幸三・加藤亮助 (1970) : 好摩実験林におけるコナラ萌芽林の成長. 林業試験場東北支場年報, 11, 188-198.
- 16) Kimura, M., M.Funakoshi, S.Sudo, T.Masuzawa, T.Nakamura and K.Matsuda (1982) : Productivity and mineral cycling in an oak coppice forest I. Structure and phytomass of the forest. Bot. Mag., 95, 19-33.
- 17) 中越信和・中根周歩・今出秀樹・根平邦人 (1980) : アカマツ林の山火跡地における植生回復Ⅰ一初期段階の種組成, 構造及び現存量. 広島大学総合科学部紀要Ⅳ, 6, 69-113.
- 18) 蜂屋欣二・土井恭次・小林玲爾 (1965) : アカマツ林の林分成長の解析一岩手地方壮齢人工林の一例. 林業試験場研究報告, 176, 75-88.
- 19) 川那辺三郎・玉井重信・堤 利夫 (1975) : ヒノキ人工林の間伐前後の現存量と林内の光環境について. 京都大学演習林報, 47, 26-33.
- 20) 山倉拓夫・斎藤秀樹・四手井綱英 (1972) : ヒノキ林地下部の生産と構造. 日本林業学雑誌, 54 (4), 118-125.
- 21) Cannell, M.G.R. (1982) : World forest biomass and primary production date. Academic Press, 134-167.

II-3 渓流水質から見た森林の浄化機能に関する研究 (第2報) 水文流出と水質調査

Study on Water Purification of Forest from View of Streamwater Quality

(II) Hydrological Runoff and Streamwater Quality Survey

平田健正¹・村岡浩爾¹

Tatemasa HIRATA¹ and Kohji MURAOKA¹

要 旨

本報告では、これまでに筑波山森林試験流域で得られた渓流水質の季節変化と降雨時の渓流水質について、NO₃-N, SiO₂, Cl, EC を中心にまとめている。

1) 秋季から冬季にかけて Cl 濃度が高まりが見られるものの、NO₃-N, SiO₂, EC は安定している。春季以降については、降雨流出の影響を受けいずれの値も変動幅は大きくなる。

2) 降雨流出に伴う水量増加時には、大略これらの濃度は減少し、通減時に増加する。降雨に対する各物質の応答特性の違いは、降雨終了後の濃度に現れる。NO₃-N 濃度は降雨前の値より高まるのに対し、SiO₂, Cl, EC はほぼ降雨前のレベルに回復する。

3) 降雨終了後の NO₃-N 濃度の高まりは、土壌水に由来すると考えられるが、今後詳細な流出モデルの設定と観測資料の集積が望まれる。

Abstract

Seasonal variation of streamwater quality was observed every two weeks since September in 1984. Besides, temporal variation of streamwater quality and discharge were examined during rainfall-runoff event. Based on these data, we discuss the possibility of separation of runoff components in small mountainous watershed. Main results obtained in this paper are as follows.

Two rainfall-runoff events were observed during June 13-14 and June 30-July 1 in 1985 of which total rainfall amounts are 48.0mm and 136.5mm. NO₃-N concentration in both two cases took the minimum value at the peak discharge, and exceeded the baseflow one prior to the runoff event after the rainfall stopped. SiO₂, Cl and specific conductance depicted roughly the same pattern as seen in NO₃-N behavior. However, their values after the rainfall recovered the levels approximately equal to the baseflow ones.

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.

These results during rainfall-runoff event may suggest that SiO_2 , Cl and specific conductance have roughly same values in both soilwater and groundwater, while the increase of $\text{NO}_3\text{-N}$ after the rainfall is induced by the soilwater component. By using the properties of SiO_2 etc., we can separate the rainfall-runoff components into surface and subsurface waters. If it is possible, however, this model is unable to give a satisfactory explanation to the mechanism of $\text{NO}_3\text{-N}$ increase after the rainfall. To do so, we should investigate soilwater behavior and classify subsurface runoff component into soilwater and groundwater.

1 はじめに

一般に森林域は水質の浄化能力を持つと言われているが、水質浄化機構や浄化能については不明な点が多い¹⁾。そして森林域は集水域の中で最大の面積を占め、森林域からの物質の流出は河川水質のベースを構成しているにもかかわらず、降雨流出の基本構造や定量化には多くの課題が残されている。そこで森林域の水質浄化能の把握を最終目標に、筑波山系に森林試験流域を設け、1984年9月から降雨—流出系における水量と水質の観測を開始した。

地表面に到達した降雨はいくつかの異なった経路を経て溪流に集水され、その移動経路によって流水に含まれる水質も異なる。したがって降雨に対する森林域の応答特性は、水量と水質の変化をもたらす。降雨流出成分の分離は水文学の基本的課題であると共に、物質の流出機構を知る上で重要となる。特に、森林域は河川流域の最上流部に位置し、降雨流出の基本構造を調べるには適している。最近流水の起源によって水質は異なり、その特性を利用して逆に水分の移動経路を同定する試みがなされている。トレーサとして電気伝導度^{2,3)}、 $\text{NO}_3\text{-N}$ ^{4,5)}、水温⁶⁾、環境同位体⁷⁾等が用いられており、これらのトレーサと数値フィルターを併用した詳細な分離手法も提案されている⁸⁾。

ただ単に森林域から流出する物質質量を知るだけであれば、渓流水の水量と物質濃度を調べれば良い。しかし森林域からの降雨流出機構は立地する水文・気象・地形・地質・植生状態で大きく異なり、より汎用性のある流出モデルを作るには降雨から溪流に至るまでの水分と物質の移動経路を明らかにする必要がある。本報告では筑波山森林試験流域内の水文観測施設の概要と、これまでに得られた降雨に対する森林域の応答特性としての渓流水と森林地下水の水質特性について述べる。

2 観測施設

2.1 観測位置

試験流域は筑波山南東斜面に選定された。流域面積は67.5haであり、標高はおよそ200mから380mの範囲にある。この試験地内に3本の溪流(A, B, C沢)が流れており、流域面積はそれぞれ31.5, 19.3, 16.7haである。図1に流域区分と観測地点を示す。

試験地全域にわたって植林事業が実施されており、スギ、ヒノキ、アカマツ植林で全流域の85%を占める。一方地質についてはB沢に沿って顕著な境界が走っており、基岩はB沢より北側では花コウ岩、南側では片麻岩となっている。流域内の植生・地形・地質特性は第1報⁹⁾に詳述している。

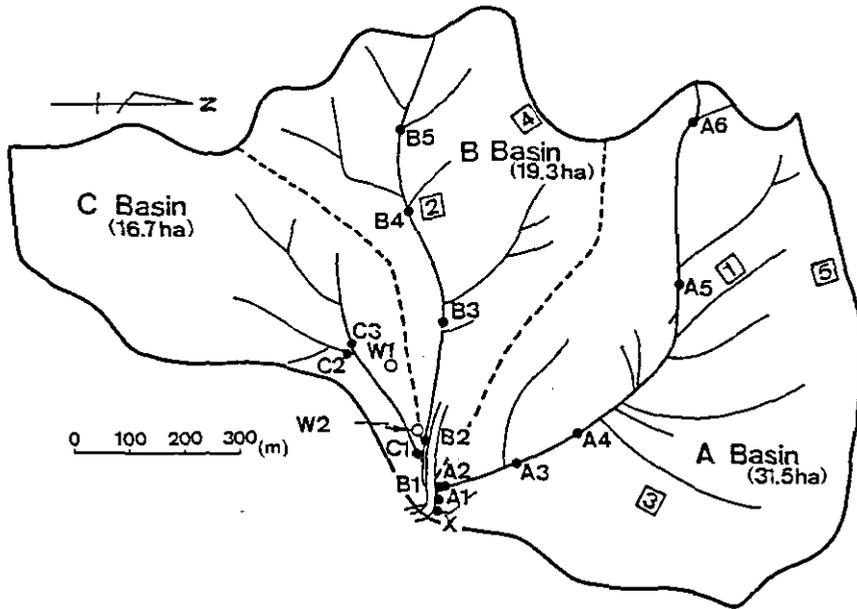


図 1 森林試験流域の流域区分と観測地点

Fig. 1 Stream subbasins and measurement sites in experimental forested land

2.2 渓流水採水地点

渓流水は3溪流合流地点A1及びA, B, C沢に沿って13地点とA1直下流の残流域からの流出地点Xの計15地点で隔週に採水する。この様に溪流に沿って多点で観測するのは流程方向の水質変化と植生による流出水質の違いを調べるためである。渓流水量はA1地点にフロート式自記水位計(池田計器製LR-100WP)を設置しており、観測水位から流量に換算する。水位-流量曲線を求めるため、縮尺1/10の水理模型実験も行った。図2は水位-流量曲線の模型実験値と現地観測値を比較した結果である。模型値は実物値に換算して描いているが、両者は良く合致していると言える。

一方降雨は転倒マス型雨量計(池田計器製LRT-100)をA1地点近くの裸地に設け、雨量計からの転倒パルスメモリーパック(東洋電子工業製)に記録する。この装置を用いると10分単位の降雨量を得ることができる。降雨は直径21cmのパイレックス製のポット型雨量マスで集水し、1雨毎、もしくは1週に1度回収する。

こうした定期観測と並行して、降雨時にA1とX地点で水量と水質の連続調査も行った。降雨時の水量と水質の時系列資料は、森林域の降雨に対する応答特性を知り、降雨流出成分を分離するためにも是非必要である。

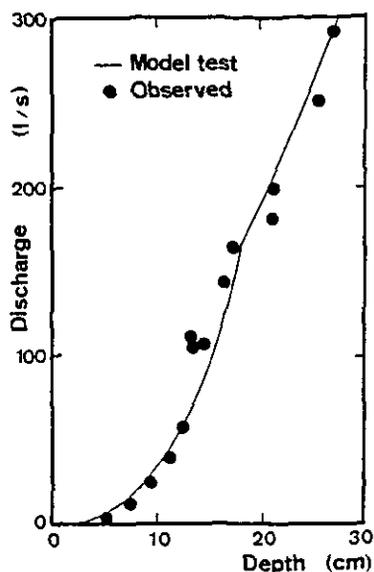


図 2 A1地点の水位—流量曲線

Fig. 2 Calibration curve between water depth and discharge at A1

2.3 森林地下水

地表面に到達した降雨は最終的には地下水となって流出する。この地下水は基底流出を支配しており、長期流出成分を調べるには地下水の水位と水質をモニターする必要がある。そこで、C沢に沿った2地点W1とW2に地下水観測井を掘削した。図3はボーリング時に得られた地質柱状図と観測井の構造を示している。

まずW1地点の地質について、表層付近にはローム質粘土を主体とした崖錐が、それ以深には風化花コウ岩が現れ、GL-10m付近に基岩の花コウ岩が見られる。現場電気検層結果からGL-4~5m付近とGL-9~10m付近の2箇所に帯水層が確認された。観測井W1についてはGL-3~10mの全断面にストレーナを設け、地下水水質の鉛直方向変化が調べられるよう工夫した。一方W2はC沢に沿ってW1から下流77.2m地点に建設された。両井間の標高差は10.5m、平均斜度は7.7度である。W2地点では表層から礫混り崖錐が分布し、この下層には風化花コウ岩が続き、GL-10m付近に基岩の黒雲母片麻岩が現れる。電気検層結果からGL-4~5mとGL-8~9mの2地点に帯水層が見られたが、W2ではGL-8~9mにストレーナーを設け、地表面下8.5mで採水することとした。また地下水位はフロート式自記水位計（池田計器製LR-100WP）で連続観測を行い、地下水は2週に1度、W1については鉛直方向に2m間隔で採水した。

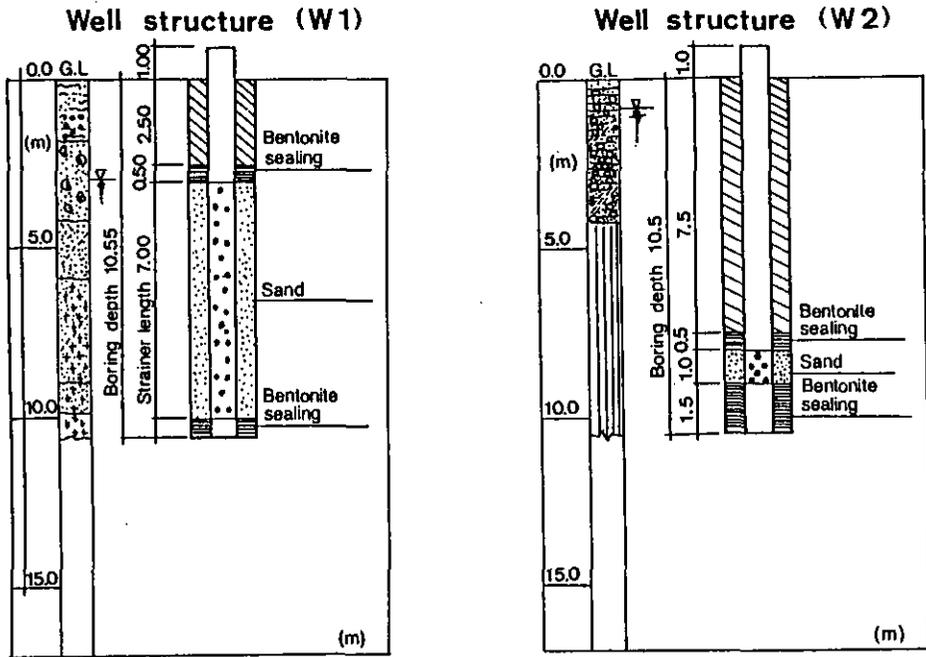


図 3 観測井 W1 と W2 の構造と地質柱状図

Fig. 3 Well structure of W1 and W2 and vertical geological profile

2.4 水質分析

水質の分析項目は $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, SiO_2 , Cl , SO_4 , Na , K , Mg , Ca , Sr と pH, 電気伝導度 EC (25°C換算) と SS である。 $\text{NH}_4\text{-N}$ から SO_4 までオートアナライザー (テクニコン製 SWA), Na から Sr までは ICP, pH はガラス電極法に依った。

本試験地は、無施肥の人為汚染のない自然状態にある。渓流水や地下水の $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_2\text{-N}$ はそれぞれ 0.04, 0.02mg/l 以下にあり, Inorg-N の大部分は $\text{NO}_3\text{-N}$ が占める。また $\text{PO}_4\text{-P}$ も 0.02mg/l 以下である。そこで本報告では $\text{NO}_3\text{-N}$, SiO_2 , Cl , EC を中心に考察する。金属元素については整理中であり, 別の機会に報告する。

3 観測結果と検討

3.1 森林地下水

日降水量と観測井 W1 及び W2 の地下水水位変動を図 4 に示す。1984年9月から1985年4月までの雨量は試験地より北東7kmの柿岡の観測記録¹⁰⁾を用いており, それ以降は試験地内 A1 地点で得られた資料である。1984年の年降水量は少なく, 柿岡の観測資料によると734mm, 9月以降は192mmとなっている。

一般の地下水水位変動に見られる様に, 筑波山森林地下水も降雨に対してある時間遅れを持って変

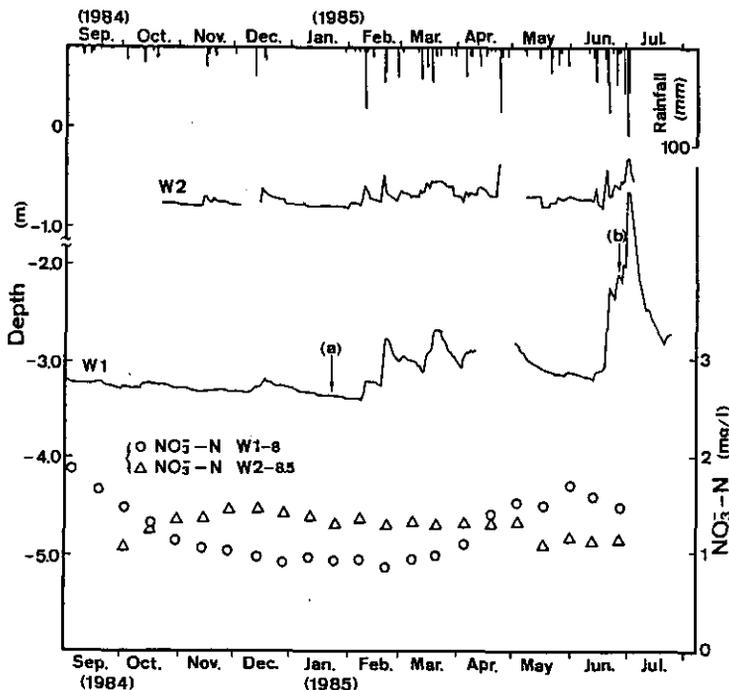


図 4 日降水量と森林地下水の水位変動

Fig. 4 Relationship between total amount of daily rainfall and variation of groundwater level

動している。観測開始から冬季にかけて少雨であり、W1の地下水位は漸減している。その間の地下水位はW1でGL-3.2~-3.4m、W2でGL-1.0m付近にある。1985年2月以降の降雨についてもW2の水位変動幅はせいぜい25cm程度であるのに比べ、6月の降雨に対してW1では100cmにも達している。

概してW2の地下水位の上昇と下降はW1に比較して速やかである。これは観測井W2はC沢の北6.7mに建設されており、C沢の水位と地下水位がほぼ同じレベルにあるためと考えられる。

観測井W1はGL-3~-10mにわたってストレーナが切られており、ここで観測井内の水質鉛直分布を調べてみよう。図5は(a)1985年1月23日と(b)同6月25日の資料を示している。いずれも地下水深2m毎に採取した結果であり、これらの観測日は図4中にも記されている。降雨の少ない冬季安定期の資料(a)では鉛直方向に有意な水質変化は認められない。一方資料(b)は梅雨期の地下水位上昇時に相当し、1週間以内の先行降雨も193mmと多い。Cl、SO₄、ECについては(a)と同様鉛直方向に変化は見られない。これに対し、SiO₂は水深2mから4mにかけて濃度は少し増加し、特にNO₃-Nは表面付近で高くなっている。NO₃-Nの増加はこの資料以外にも地下水位上昇期に数回観測されており、土壌水の浸透によってもたらされたものと考えられる。

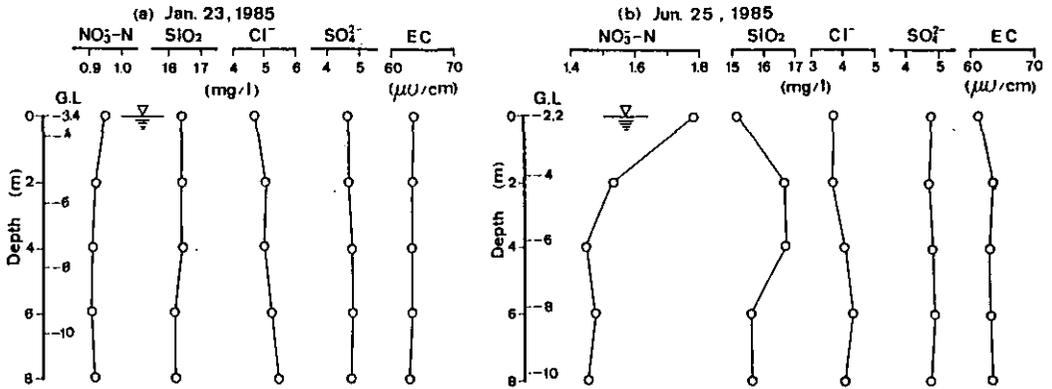


図 5 観測井W1における水質鉛直分布

Fig. 5 Vertical profile of waterquality at W1

水質が鉛直方向に変化しないからと言って、地下水層内の濃度が一定であるとは限らない。W1地点ではGL -5~-7mとGL -9~-10m付近に帯水層が確認されているが、二つの帯水層の地下水が観測井内で混合する可能性もあるからである。ここでは水面下8mの水質でW1を代表することにする。

観測井W1とW2の水質の経時変化を図6に描いている。同図からECが最も安定している。目立った季節変化はなく、観測期間を通してW1で68~61μU/cmの範囲にある。Clも比較的変動幅が小さく、降雨の少ない1985年4月まではW1で5.6~4.3mg/l、W2で6.1~5.2mg/lの範囲にある。ただ4月以降、雨量の増加に伴って二つの資料共減少傾向にある。SiO₂もW1については変動は少なく、16mg/lと安定しているが、W2は観測開始から一貫して増加の傾向にある。これらの水質の中でNO₃-Nが最も明瞭な季節変化を呈している。W1は観測開始から冬季の安定期に向って濃度は減少し、春季からの降雨の増加に伴い上昇している。一方W2のNO₃-NはW1と比べて逆位相の関係にある様にも見受けられる。こうした違いは、W2は第2帯水層のみ対象としているのに比して、W1では第1及び第2帯水層と土壌水の浸透の影響が含まれていると見なければならぬ。

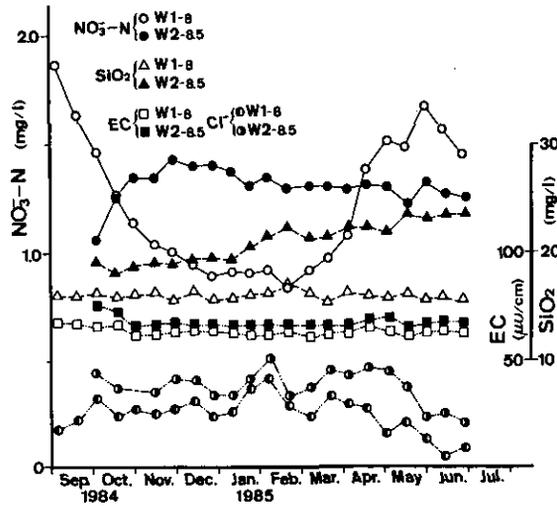


図 6 観測井 W1 と W2 の地下水水質の比較
 Fig. 6 Comparison of waterquality at W1 and W2

3.2 渓流水質

図 7 は渓流水質の流程方向の変化を描いている。本試験地の流域面積は67.5haであり、降雨流出も速い。そこで2週間以内に先行降雨のない冬季安定期の観測資料を用いることにする。また同図は3渓流合流地点A1を基準にし、各採水地点までの距離に対して水質をプロットした結果である。

まず $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度について、C沢の値は他の2渓流に比較して際立って大きい。B沢の値は最上流地点B5を別にすれば上流に向かって減少する傾向がある。A沢もB沢程明瞭ではないが減少する様である。 SiO_2 はA, B, C沢の順に大きく、各渓流で流程方向変化は見られない。Clは最も明瞭な変化を示し、上流方向に濃度は減少する。こうしたCl濃度の減少にもかかわらず、ECに目立った変化はなく、むしろ最上流地点A6とB5で上昇している。

続いて図8に試験地内5地点の渓流水質の経時変化を示している。同図は1984年9月から1985年6月まで22回の観測資料を描いているが、この内観測当日に総雨量10mm以上のケースは1984年10月3日(12mm)、1985年2月20日(24mm)、同5月29日(19mm)、同6月25日(24mm)の4回である。これらの降雨に注意して水質の変動特性をまとめると次のとおりである。

観測開始から冬季安定期にかけて $\text{NO}_3\text{-N}$ は安定している。しかし、2月以降その変動幅は大きくなり、特に降雨時の2月20日、6月25日の濃度は安定期のそれに比べて2~3倍の値を取る。一方 SiO_2 は降雨時の2月20日、5月29日、6月25日の資料で減少し、その後の無降雨時にはほぼ冬季の値に回復している。Clは1984年11月に濃度の高まりが見られるが、 SiO_2 と同様降雨時に濃度

は減少する。特にB沢の資料に顕著に現れている。ECは2月20日と5月29日の資料でB沢の濃度は減少するが、他の地点については降雨に対して明瞭な対応は確認できない。

しかし、これらの資料から直ちに降雨流出の水質に及ぼす影響を論ずることはできない。降雨があったとしても水量増加時と減減時では水質も異なり、降雨に対して各水質固有の応答特性を有するからである。渓流水質の降雨流出特性については次節で考察することにする。

ここで渓流水と地下水の水質を比較する。図9は試験値を代表するA1と観測井W2の資料を示している。W2を選んだ理由は採水位置が第2帯水層に限られ、採水位置が明瞭であるからである。また春季以降の渓流水質には降雨流出の影響が含まれているため、冬季安定期の資料について考察する。ECは両者共ほぼ同程度の値を取る。SiO₂も渓流水の方が高いものの、冬季安定期に向ってその差は縮小する。Clも渓流水の11月の特異的な値を別にすればSiO₂と同様の傾向にあると言える。一方NO₃-Nについては、いずれの資料も季節変化をするためか、両者は逆位相にある様に見受けられる。

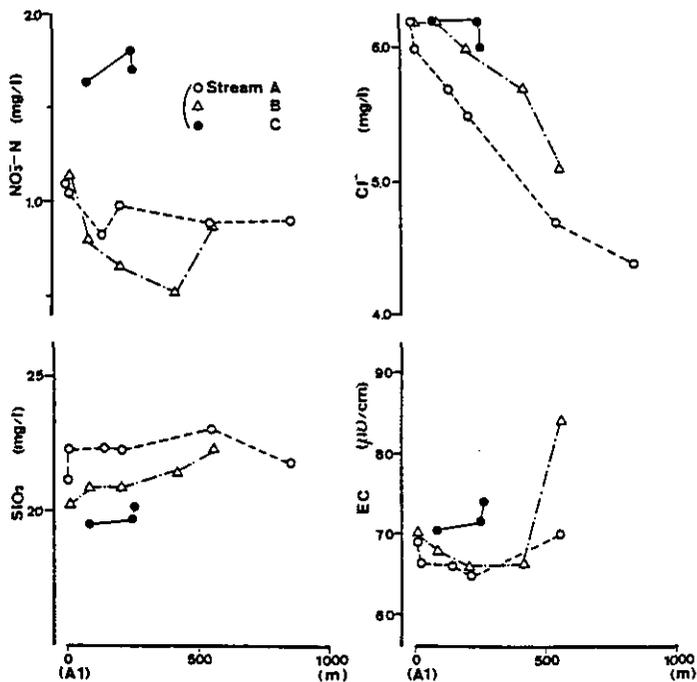


図 7 渓流水質の流程方向変化 (1985年1月9日)

Fig. 7 Streamwise variation of water quality in three subbasins (Jan. 9, 1985)

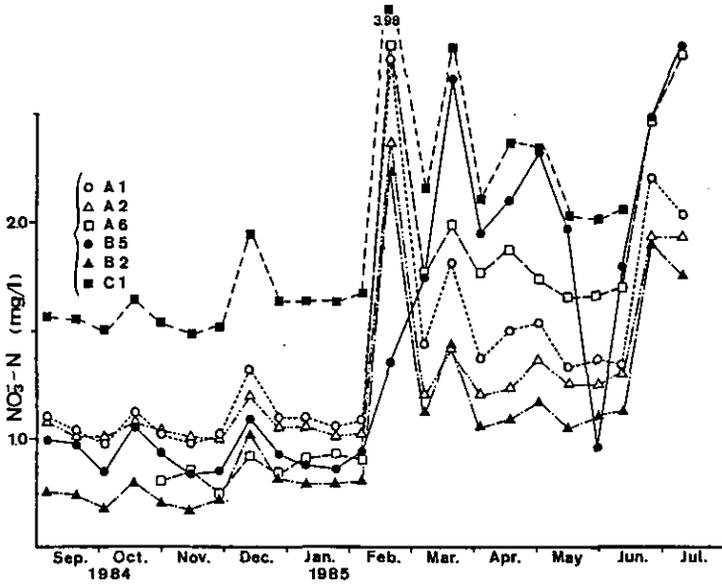


図 8 渓流水質の季節変化, (a)NO₃-N

Fig. 8 Seasonal variation of waterquality in mountainous stream, (a)NO₃-N

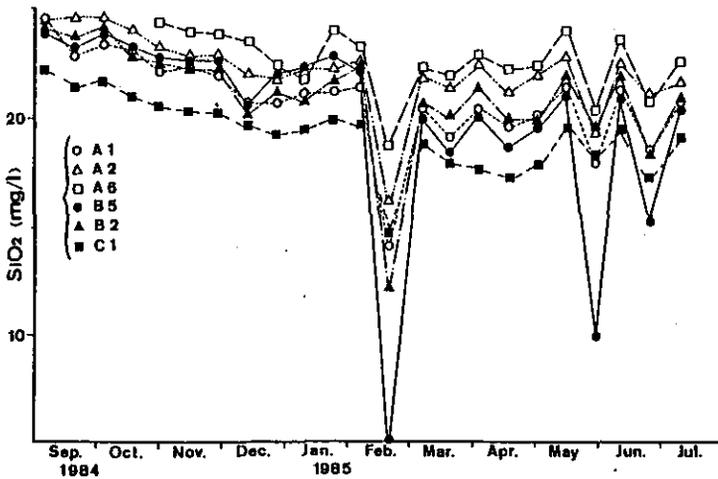


図 8 (つづき), (b)SiO₂

Fig. 8 Continued, (b)SiO₂

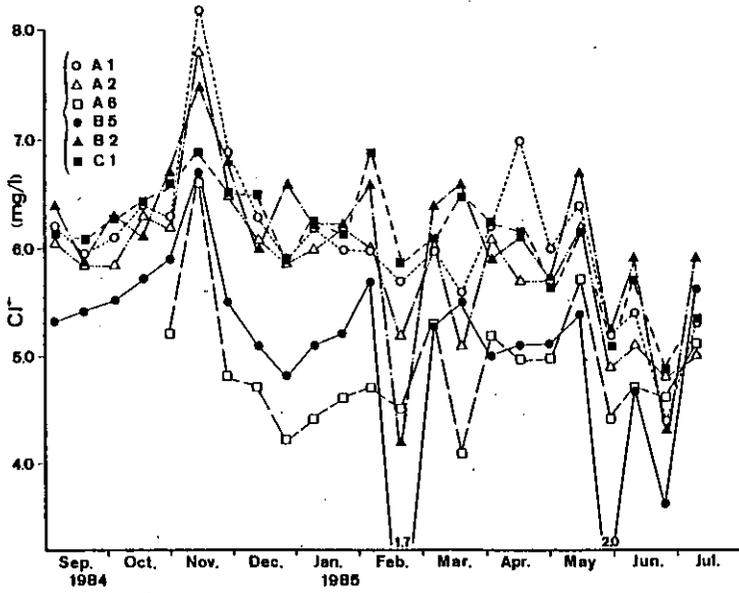


図 8 (つづき), (c)Cl

Fig.8 Continued, (c)Cl

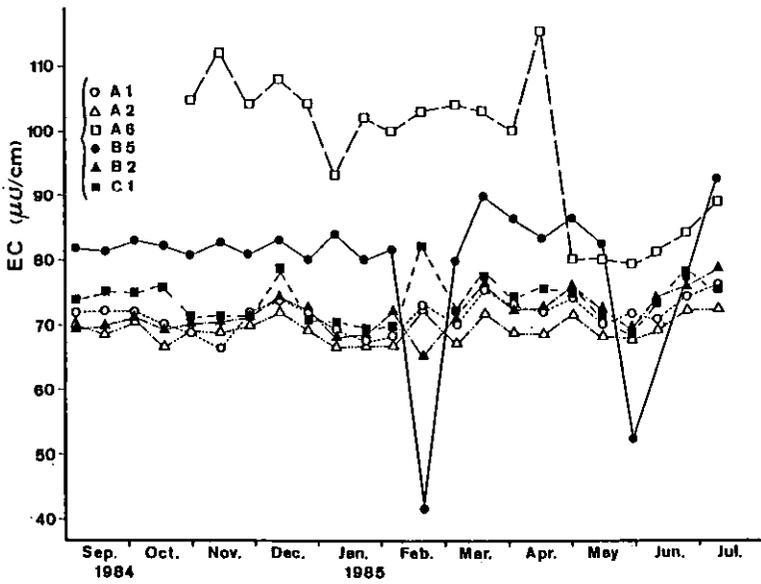


図 8 (つづき), (d)EC

Fig.8 Continued, (d)EC

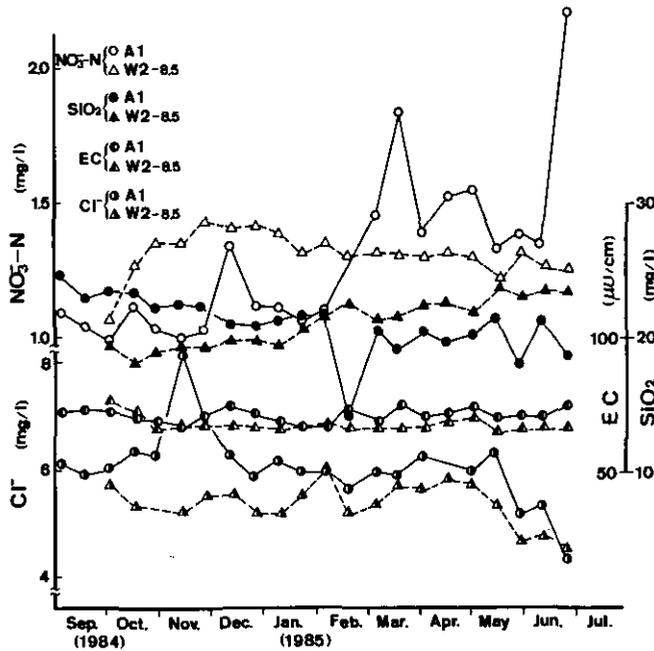


図 9 渓流水質(A1)と地下水水質(W2)の比較

Fig. 9 Comparison of waterqualities in streamwater(A1)and groundwater(W2)

地下水は長期的な基底流出成分を支配しており、そのバックグラウンド値を知るためにも季節変化、中でも冬季安定期の資料は重要である。ここで用いたのはW2の第2帯水層の値であり、第2帯水層からの流出が地下水成分を代表すると言う保証はない。また、これらの資料は10か月間の観測結果であり、渓流水と地下水の水質関係を明らかにするには、さらに長期間の観測資料が必要とされる。

3.3 降雨流出特性

前節で述べたように、渓流水質は降雨流出の影響を強く受ける。森林域からの物質流出機構を知り、降雨流出成分の分離の可能性を探るためにも、降雨時の水量と水質の時系列資料は重要である。ここでは1985年6月に得られた観測資料について考察する。結果は図10から図15に示されている。図中に用いた降雨及び水量と水質はA1地点での実測値である。残流域からの水量と水質(X地点)も観測しているが、水量にして平常時にはA1の2%、降雨流出時には1%程度であるため考察資料から割愛している。

図10は6月13日から14日にかけて得られたNO₃-N濃度と負荷量及び渓流水量の経時変化であり、降雨に含まれるNO₃-N濃度も併せて記されている。水量と水質の観測は流量ピーク付近では15分間隔、上昇時と遡減時には流量変化に合わせて30-60分間隔で行った。このケースでは降雨継

続時間が31時間と長い割には総雨量は48mmであり、時間雨量も最大で4.5mmと小さい。6月11日22時から12日6時にかけて11.5mmの先行降雨はあるものの、先行降雨終了から13日の降雨開始までに21時間経過しており、水量から見ればほぼ平常時に戻った状態から観測が始まっている。同

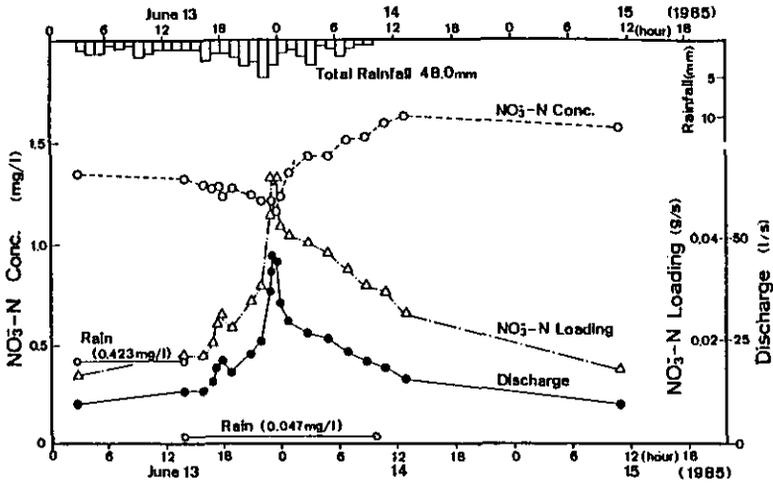


図 10 NO₃-N の降雨流出特性 (1985年 6月13日～14日)

Fig.10 Characteristics of rainfall runoff of NO₃-N (June 13-14, 1985)

図から、NO₃-N 濃度は流量の増加に伴って減少し、ピーク流量時に最小となる。負荷量は流量増加が寄与し、ピーク流量時に最大となる。そして流量減速時に濃度は増加し、その後最大値を取るが、この値 (1.63mg/l) は降雨前 (1.32mg/l) の1.2倍となっている。同じ降雨に対し、ECとSiO₂を図11に、ClとSO₄を図12に整理している。ECとSiO₂は流量増加時に減少し、概してNO₃-Nと同様のパターンを描くが、降雨終了後ほぼ降雨前の値に回復する点でNO₃-Nの挙動と異なる。特にSiO₂は降雨中に含まれないため、ECに比べて変動幅は大きく、その特徴は良く表れている。ClとSO₄は降雨流出初期に若干濃度は高まるものの、全体としての時系列はECやSiO₂に近い。

次に、6月30日から7月1日にかけて関東地方を通過した台風8506号時の観測結果を図13, 14, 15に示す。総雨量は136.5mmである。降雨パターンは四つの山に分かれ、最大時間雨量は時間経過の順にそれぞれ6.5, 12.0, 10.5, 12.5mm, 先行雨量は6月28日に48mm, 29日に1mmである。また観測は第1番目の降雨終了時から始まっており、そのため降雨前の値として6月29日の資料を載せている。

NO₃-Nについて、各降雨パターンに対応したピーク流量時に濃度は最小となり、濃度レベルは異なるが定性的には図10と同様のパターンを描いている。すなわち、各降雨に対応した流量減速時

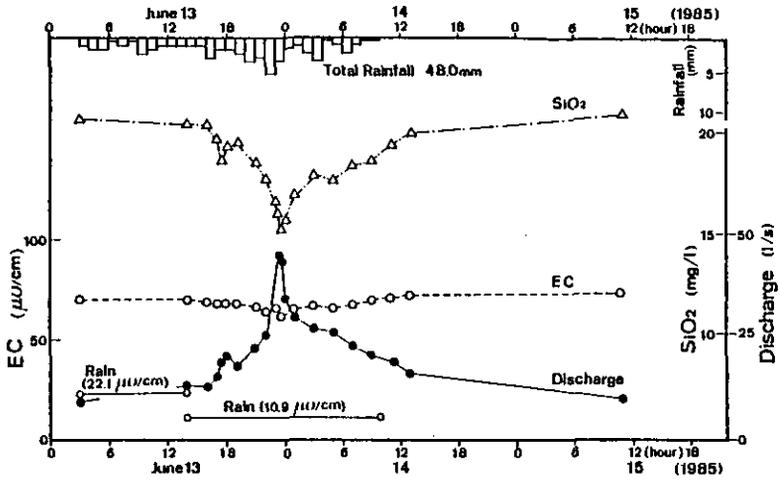


図 11 SiO_2 と EC の降雨流出特性 (1985年 6 月13日~14日)

Fig.11 Characteristics of rainfall runoff of SiO_2 and EC (June 13-14, 1985)

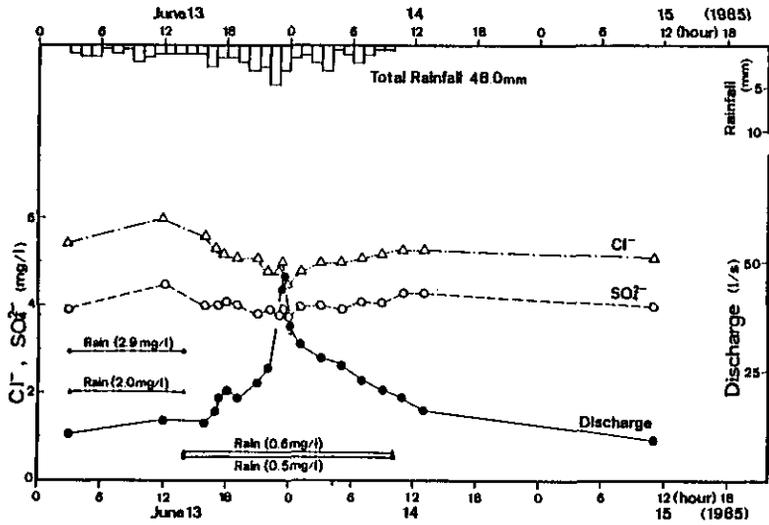


図 12 Cl と SO_4 の降雨流出特性 (1985年 6 月13日~14日)

Fig.12 Characteristics of rainfall runoff of Cl and SO_4 (June 13-14, 1985)

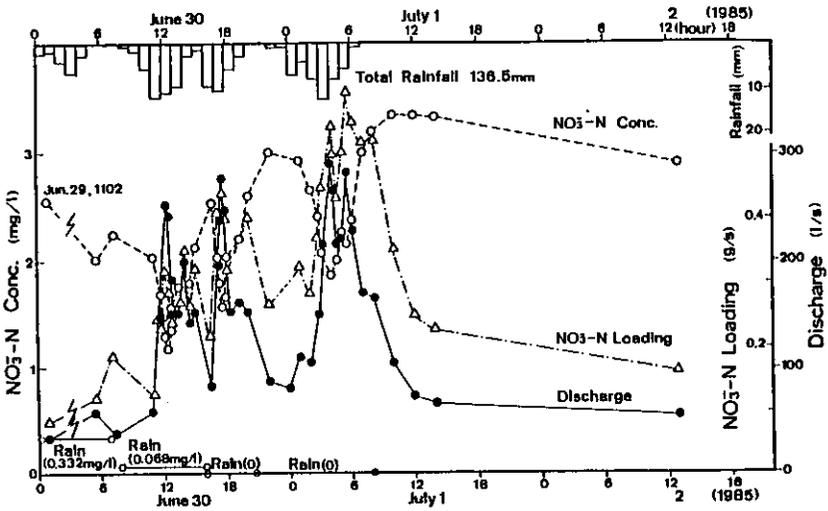


図 13 NO₃-N の降雨流出特性 (1985年 6月30日～7月1日)

Fig.13 Characteristics of rainfall runoff of NO₃-N (June 30–July 1, 1985)

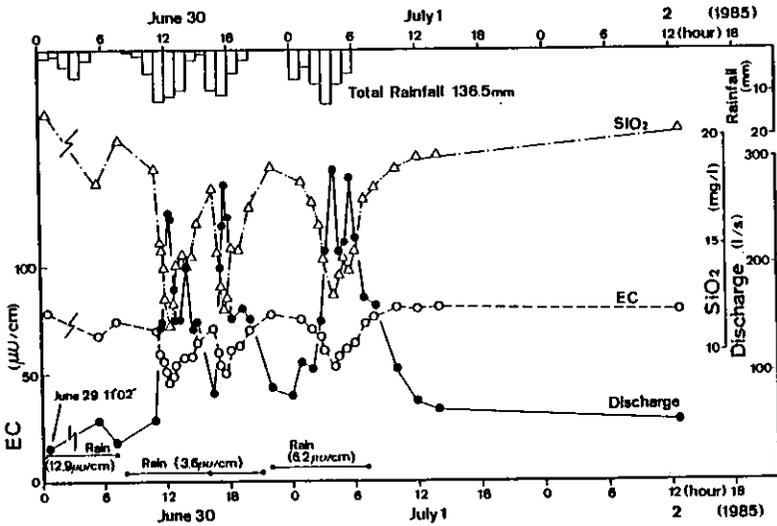


図 14 SiO₂ と EC の降雨流出特性 (1985年 6月30日～7月1日)

Fig.14 Characteristics of rainfall runoff of SiO₂ and EC (June 30–July 1, 1985)

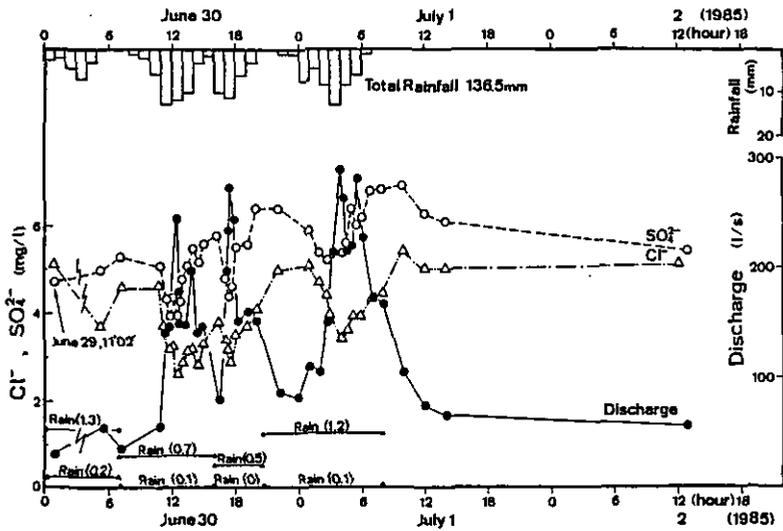


図 15 Cl と SO₄ の降雨流出特性 (1985年6月30日-7月1日)

Fig.15 Characteristics of rainfall runoff of Cl and SO₄ (June 30-July 1, 1985)

の最大濃度は時間の経過と共に増加し、降雨終了後濃度 (3.02mg/l) は降雨前 (2.55mg/l) の1.2倍となっている。この結果は図8に見られた降雨時の濃度の上昇を説明している。

このケースでは最初の降雨流出の影響が残っている状態から観測が始まっており、そのため観測開始時の SiO₂, EC, Cl の値は降雨前のそれより小さくなっている。そして流量時系列とは逆位相のパターンを呈し、図11, 12と同様に降雨終了後には降雨前の値に回復している。一方、SO₄ の流出特性はこのケースでは NO₃-N の挙動に近い様である。

以上をまとめると、NO₃-N の流出特性は降雨流出の終りの部分で降雨前の濃度より高まることに特徴付けられる。一方、SiO₂, Cl, EC について、全体としてのパターンは NO₃-N と似ているが、降雨終了後、降雨前の値に回復する点で異なる。また SO₄ の流出特性は総雨量や降雨強度によって左右される様である。

図10から図15にある様に、降雨に含まれる物質濃度は渓流水よりかなり低く、したがって流量増加時の濃度の減少は降雨表面流出の希釈効果によると考えられる。そして、SiO₂, Cl, EC は降雨終了後、降雨前の値に回復する特性を利用し、地中水 (地下水と地下水面上の土壌水) におけるこれらの濃度値が一定であると仮定すれば、既往の手法²⁾ になって渓流水を構成する表面流出成分と地中水成分を分離することができる。しかし、表面流出成分と地中水成分の構成比が分かっても、これだけでは降雨後の NO₃-N 濃度の高まりは説明できない。一般論として、流量増加時は (地下水+表面流出)、ピーク流量時から降雨終了時までは (地下水+表面流出+土壌水)、それ以降は (地下水+土壌水) から成る、と言われている。この説明によれば、土壌水分すなわち土壌表面付近にかなり高濃度の NO₃-N が存在することになり、土壌水についての情報も必要となる。

こうした各流出成分の発現の場で物質濃度が異なれば、渓流水に含まれる物質の濃度あるいはその負荷量は、降雨パターンに対応した流量について同一の経路をたどらず、ヒステリシスを持つことになる。図16は先述した2ケースについて、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と SiO_2 の負荷量及びECを流量に対してプロットした結果であり、流量増加時と通減時を区別して描いている。なお台風8506号については、通減特性の明瞭な第4番目の降雨流出資料を用いた。 $\text{NO}_3\text{-N}$ は2つの資料共に反時計回りのループを描き、特に台風8506号時の資料で、同一流量に対する流量増加時と通減時の負荷量の差は大きく現れている。 SiO_2 の負荷量とECは、総雨量48mmの場合顕著なヒステリシスは認められず、一方台風8506号時には半時計回りのループを描いている。

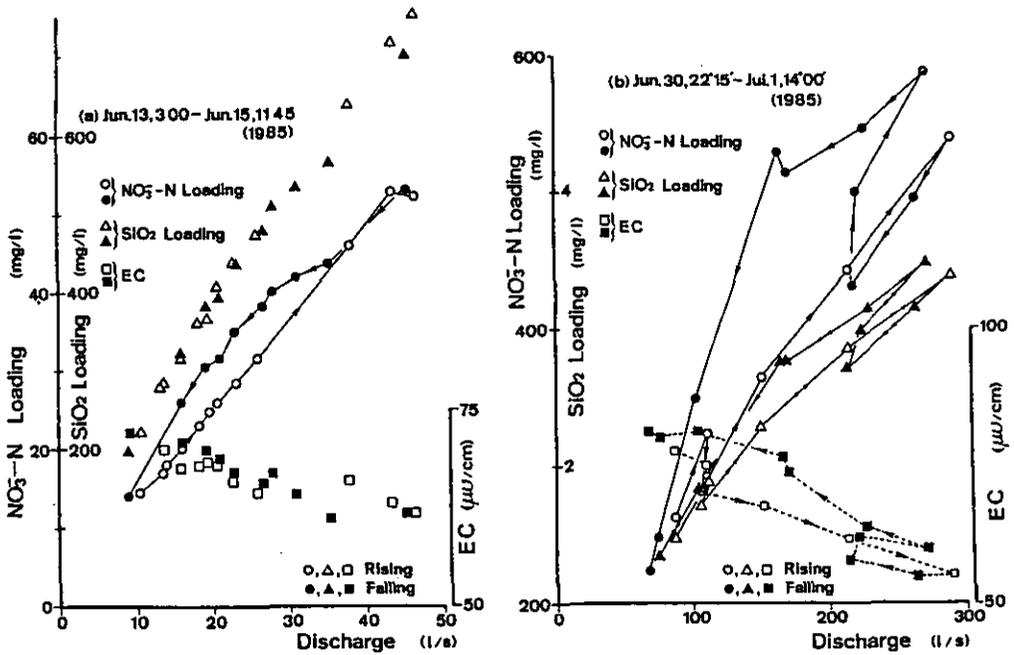


図 16 降雨流出時の流量変化に対する $\text{NO}_3\text{-N}$ 及び SiO_2 の負荷量変化とECの変化
Fig.16 Variations of $\text{NO}_3\text{-N}$ and SiO_2 loadings and EC to stream discharge in rainfall runoff process

以上述べた様に、各水質は降雨に対して固有の応答特性を持ち、その流出特性は総雨量や降雨強度、先行降雨の有無等に大きく影響される。これまでに得られた降雨流出資料は2ケースであり、森林域からの物質の流出機構を知るには今後さらに観測資料の集積を図る必要がある。

4 まとめ

森林域の持つ水質浄化能の評価を最終目標に筑波山系に森林試験流域を設け、1984年9月から降

雨、地下水及び渓流水の観測を開始した。本報告ではこれまでに得られた地下水と渓流水の水質特性及び降雨時の渓流水質について $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 SiO_2 、 Cl 、 EC を中心にまとめている。

1) 地下水は森林域からの長期流出成分の水質を知る上で重要であり、本試験地内にも2本の観測井 W1 と W2 を建設した。2本の観測井は77.2m はなれて建設されており、W1 は $\text{GL}-3\sim-10\text{m}$ に、W2 については第2帯水層に相当する $\text{GL}-8\sim-9\text{m}$ にストレーナを設けている。

2) 渓流水質について、 Cl は上流に向って濃度は減少している。変化の程度は小さいが、 $\text{NO}_3\text{-N}$ も Cl と同様の傾向にある。これに対し、 SiO_2 と EC には明瞭な変化は認められず、むしろ EC は最上流端で増加している。

季節変化を見ると、 Cl は秋季に濃度の高まりが認められる。一方、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 SiO_2 、 EC は秋季から冬季にかけて変動は少なく、安定している。そして春季以降、降雨流出の影響を受け水質の変動幅は大きくなる。観測当日に10mm以上の降雨のあった資料を対象にすると、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は増加する一方、 SiO_2 と Cl は減少している。しかし、これだけでは降雨流出の影響を評価することはできない。降雨に対し、水質固有の応答特性があるからで、降雨時の水量と水質の時系列資料から判断する必要がある。

3) 降雨に対する水量と水質の応答特性は森林域からの物質の流出機構を調べるために重要であり、降雨時の連続観測も行った。その結果、流量増加時には $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 SiO_2 、 Cl 、 EC 共に減少し、ピーク流量時に最小値を取る。そして降雨終了後、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は降雨前の値より高まるのに対し、 SiO_2 、 Cl 、 EC はほぼ降雨前の値に戻る。こうした SiO_2 、 Cl 、 EC の流出特性は、従来から指摘されている様な渓流水を構成する表面流出成分と地中水成分の分離の可能性を示唆している。ただし、表面流出成分と地中水成分が分離されたとしても、降雨終了後の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の高まりは説明できず、より詳細なモデルの設定と観測資料の集積が望まれる。

引用文献

- 1) 田淵俊雄・高村義親共著(1985)：集水域からの窒素・リンの流出。東京大学出版会、38-47。
- 2) 田中 正・安原正也・丸井敦尚(1983)：丘陵地源流域における流出機構。文部省科研費研究成果報告書。一般研究(B)、50-62。
- 3) Pilgrim, D.H., D.D. Huff and T.D. Steele (1979)：Use of specific conductance and contact time relations for separating flow components in storm runoff. *Water Resour. Res.*, **15**, 329-339。
- 4) 海老瀬潜一・宗宮 功・平野良雄(1979)：タンクモデルを用いた降雨時流出負荷量解析。用水と廃水, **12**, 1422-1432。
- 5) 竹内邦良・坂本 康・本郷善彦(1984)： NO_3^- を用いた流出成分の分離と他の方法による分離結果の比較。第28回土木学会水理講演会論文集、557-565。
- 6) Kobayashi, D.(1981)：Separation of runoff components by stream temperature. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, **21**, 150-154。
- 7) Sklash, M.G. and R.N. Farvolden(1979)：The role of groundwater in storm runoff. *J. Hydrology*, **43**, 45-65。
- 8) 日野幹雄・長谷部正彦(1984)：地球化学的データ($\delta^{18}\text{O}$)とフィルター分離 AR 法による流出成分分離に

ついて. 第28回土木学会水理講演会論文集, 553-556.

- 9) 村岡浩爾・平田健正(1986): 溪流水質から見た森林の浄化機能に関する研究(第1報)—筑波山試験流域の概要と植生調査. 国立公害研究所研究報告, 第95号, 21-35.
- 10) 水戸地方気象台(1984-1985): 茨城県気象月報.

II—4

面源負荷の流出に及ぼす水文条件の影響

Effects of Hydrological Conditions on Runoff Load from
Nonpoint Pollutant Sources

海老瀬潜¹

Senchi EBISE¹

要 旨

降雨を介して流出する特性を持つ面源負荷の流出負荷量は、水文条件の影響を大きく受ける。流出物質の存在位置での水質形態によって影響の大きな水文条件の内容は異なる。降雨の表面流出によって流出する懸濁態物質は、降雨強度や降雨量の影響が大きいが、市街地の不浸透性地表面上の堆積物質の現存量の大きさは先行晴天期間や先行降雨に左右される。すなわち、当該降雨の流出の初期条件を規定する先行降雨と先行晴天期間の影響は大きい。地表面を浸透した中間流出や地下水流出によって流出する溶存態物質も、降雨量や降雨強度の影響が大きい。特に、負荷排出源として重要な土壌層からの流出負荷量は、供給速度と土壌粒子との吸着特性等の関係から水質項目と土地利用形態による差違が明らかとなった。陰イオン物質のうち、 NO_3^- と SO_4^{2-} は農耕地流域で、 NO_3^- と溶性ケイ酸は山地流域で高流量時の高濃度現象が見られた。これらの流出負荷量は回帰式により推定できるが、先行降雨と先行晴天期間の影響も大きい。

Abstract

Amount of runoff load from nonpoint pollutant sources is influenced by various hydrological conditions. Most of particulate matter loading is drained out from ground surface of a river basin by surface runoff almost during stormy weather days. A most important factor is the period of preceding dry weather day for the deposit in urban areas. In river bed many particulate matters settle during dry and stormy weather days and are washed out in flooding periods. To estimate the share of sources of runoff particulate matters during a storm event, the approach using the runoff load of attached algae in a river bed is proposed as an example for an urban river. Most of dissolved matter is drained out from surface soil layer by subsurface and groundwater runoffs during both periods of dry and stormy weather days. Nitrate, sulfate and silica show the lag phenomena of runoff and increasing concentration by subsurface runoff during direct runoff of a storm due to the storage of these anions in surface soil layer. Especially the behaviors of these three

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.

anions in various land-use type areas differ from one another. However, the regression equations which are proposed by the author could be used to estimate to amounts of runoff loadings during storm runoff and base runoff.

1 はじめに

面源負荷は、降雨そのものによる負荷も含めて、降雨を介して流出する特性を有している。降雨によって流域から河川に排出される負荷の流出は、主として水文条件と流域の土地利用形態とによって支配される。水文条件とは、当該降雨の総降雨量や降雨強度の時間変化、降雨継続時間などの降雨条件と先行降雨についての同様の降雨条件と先行晴天期間などである。流域の土地利用形態とは、山地、畑地、水田、市街地等の大別も含めて、負荷発生源としての負荷の存在位置、存在形態、存在量をも意味している。両者のかかわりは、流域から河川への負荷の排出過程であり、河川へ流入後の負荷の流出・流達過程は、流出する物質の形態・粒径・比重などの水質特性と河川の流路形状や水理条件とのかかわりとなる。

特に、水文条件と土地利用形態とによって規定される地表面での浸透能に基づいた雨水の分離過程は、表面流出の発生とその規模を左右し、水文学的に重要である。これには、当該降雨の降雨条件だけでなく、その地表面及び土壌層の降雨直前の水分状態が初期条件として強く関与する。これは何も水量的な現象だけにとどまらない。流域の土地利用形態に基づいた負荷の存在形態と存在量も、その降雨直前の初期条件として水質的には重要な因子である。この降雨を入力とする流域の応答としての流出負荷量の大きさは、降雨直前の初期条件や当該降雨の降雨条件等の水文条件に支配される。そして、流域への入力であり、物質の輸送媒体となる降水は、当該降雨の出力としての降雨時流出の流量や負荷量の顕在的な結果だけでなく、その後の基底流出や次回の降雨時流出の移行過程としても潜在的な作用をしている。すなわち、先行降雨とその後の先行晴天期間における流域内の負荷発生源の履歴（ヒステリシス）を含めた状態変化は、次回(以降)の降雨流出の初期条件を規定することになる。

したがって、降雨流出期間とその後の晴天期間を併せた連続的な過程として、流域内の負荷発生源の顕在的かつ潜在的な動態変化を明らかにする必要がある。降雨流出の初期条件としての負荷発生源の状態は、流出負荷のポテンシャルとして、負荷排出の推進力 (driving force) としての降雨条件に対応する存在である。これを明らかにすることは、降雨流出の結果としての流出水量や流出負荷量を、降雨条件以外の因子を加えた流出構造解析につながるものである。それゆえ、流域の次回降雨の初期条件として、流出する物質の先行降雨期間とその後の先行晴天期間における量的かつ質的な動態変化を取り扱うことにする。この動態変化は、流出する物質が粒状態か溶存態かなどの水質特性や、流域が山地か農耕地か市街地かなどの土地利用形態によって異なってくる。

2 流域の土地利用形態と水質形態

先行晴天期間の降雨時流出負荷量への影響は、一般に、汚濁程度の高い流域で大きく、汚濁程度の低い流域で小さい。すなわち、市街地流域で大きく、山地流域や農耕地流域では小さく、人為的な負荷の大きさに左右されることが多い。流出する物質が粒状態か溶存態かの水質形態にも、流域の土地利用形態が影響する。市街地のような不浸透性地表面、水田・畑地の農耕地や山地の植生状態によって、地表面上での汚濁負荷の貯留・堆積効果が異なる。先行晴天期間に新しく地表面上に付加された汚濁物質は、市街地流域では次回降雨で流出可能な物質として顕在するが、山地や農耕地流域の場合には、降雨によって植生面から洗い流されるが、流域で固有に存在する負荷発生源との区別が容易でない。この地表面上への堆積負荷よりも、潜在的な性格も有する裸地の侵食に伴う流出負荷量のはるかに大きな量となることが多い。

したがって、流域の土地利用形態を考慮しながら、粒状態か溶存態かの水質形態によって分け、以下の検討を進めることにする。

3 粒状態物質の堆積量・流出量の推定

3.1 堆積量の推定

市街地の路面や屋根に先行晴天期間中に堆積する粒状態物質は、代表的な地点の限定された区画で掃き集められたり、散水して捕集された後に定量されている。また、降下物はデポジットゲージやダストジャーなどのばい塵計で測定されるが、降水による寄与分を差し引く必要がある。通常の大気汚染物質としての降下塵の測定は1か月間隔である。農耕地や山地でも、降下物量は地表面への入力として降水も含めて測定されている場合があり、花粉のような有機物質も含まれ、風や降水量以外の季節変化要因も考えられる。

市街地の路面では、物質輸送あるいは交通に原因する付着物や固着物が多く、下水道の分野で雨水流出水の排除や処理の問題として研究されてきた。路面堆積物量は、Satorの研究¹⁾で明らかにされたように、商業・工業・住宅地域での地域差が大きく、有機態成分については、先行晴天期間内の分解による減少も考慮する必要がある。中村らは、市街地での路面堆積負荷量 (S) の堆積モデルとして、 a を定数、 t を経過時間 (日)、 S の最大値 S_{max} を用い、次式で表現した²⁾。

$$S = S_{max} \cdot (1 - e^{-\frac{a}{S_{max}} \cdot t}) \quad (1)$$

このように、路面堆積負荷量が経過日数に対して増加が鈍化したり、ある上限値に漸近するようなモデル式がほとんどであり、堆積物の観測結果に適合するように数式化がなされている。

これに対して、屋根排水のように、降雨時に一定の区画から排出される水を一箇所に集めて水質・水量の定量を行い、同時に測定した雨水のみの寄与分を差し引いて、排出負荷量として算定する方法がある³⁾。しかし、これはあくまで排出負荷量であり、堆積負荷量より小さいか等しい量である。

すなわち、地表面上の堆積負荷量には次回以降の降雨にまたがって排出される残存負荷量となるものが存在することがほとんどである。したがって、地表面上に顕在する堆積負荷量は、排出可能な最大値であるため、流出負荷量の算定には、排出負荷量あるいは排出率の測定や推定が必要となる。

3.2 流出量の推定

河川で観測される降雨時流出負荷量は、河道内の貯留・堆積物に由来するものと、当該降雨によって新たに流域から河川に排出されて流下してきたもの及び河道降雨によるもので構成されている。流出物質にラベルづけができないため、河川の流出負荷量の観測結果のみからはこれらの正確な分離が不可能である。しかし、河道降雨によるものは無視できたり、降雨量と雨水の水質分析及び河道面積から算定が可能である。流出物質の中には水路や河道内にのみ存在するとほぼ断定できる付着微生物群などがあり、新たに流域から河川に排出されて流下してきた物質と、当該降雨以前から水路や河道内に貯留・堆積されていて流下してきた物質の由来の推定は不可能ではない。河床の付着藻類・糸状菌・原生動物等で構成される付着微生物量の河道内の貯留・堆積物全体に対する比率が、降雨時に河道内から流出する物質においても同一である仮定する方法がある⁴⁾。実際は、付着藻類の Chl-*a* 量から河道内の貯留・堆積物由来の流出分を推定し、残りが当該降雨によって新たに流域から河川に排出され物質の流出分であるとする。この手法では、人工付着板等による河道内での貯留・堆積物の現存量とその構成内容の継続的な観測がなければ、その分離の推定精度は低下する。ただ、河床付着微生物の現存量の他の河道内貯留・堆積物の現存量に対する比率は小さく、大きな降雨時流出の場合には河床付着微生物がほぼ流出しつくしてから、他の河道内貯留・堆積物の流出は続くことが推察される。特に、大きな降雨時流出後の河床付着微生物の現存量の増加には時間を要することが多い。以下にその算定例を示す。

霞ヶ浦高浜入に流入する市街地小河川の山王川について、1984年4月19～20日の23mmの降雨時流出の観測結果からの推定である。河床付着微生物の現存量は有限であるが、図1と図2のようにこの23mm程度の降雨時流出ではその現存量一部が流出したにとどまり、その後の晴天時流出にも剥離に伴う Chl-*a* の流出が降雨流出前と同様に続いた。したがって、流出負荷量の構成内容からの流出由来の分離推定が可能である。降雨時流出による Chl-*a* の総流出負荷量は2.21kgである。1979年6月～1980年5月の1年間に実施した河床底面での人工付着板上の堆積物・微生物現存量変化調査によって、この3～5月の春季における POC/Chl-*a* の比は、流下方向3地点での平均で224であった^{5),6)}。この値を用いると、POCで495kgとなる。これは、表1に示すPOCの降雨時流出負荷量670kgの74%に当り、残りの26%の175kgのPOCが当該降雨によって新たに流域から河川に排出されて流出負荷量になったものと推定できる。この23mmの降雨時流出は丁度24時間であり、その流域面積12.8km²であるため、単位面積、単位時間当りの流出負荷量はPOCで13.7kg/km²・dとなる。この値は、市街地路面の堆積負荷量などと比べてはるかに小さいが、降雨強度も高くない総降雨量23mmであり、表面流出が出現したのは全流域面積のうちの約38%の市

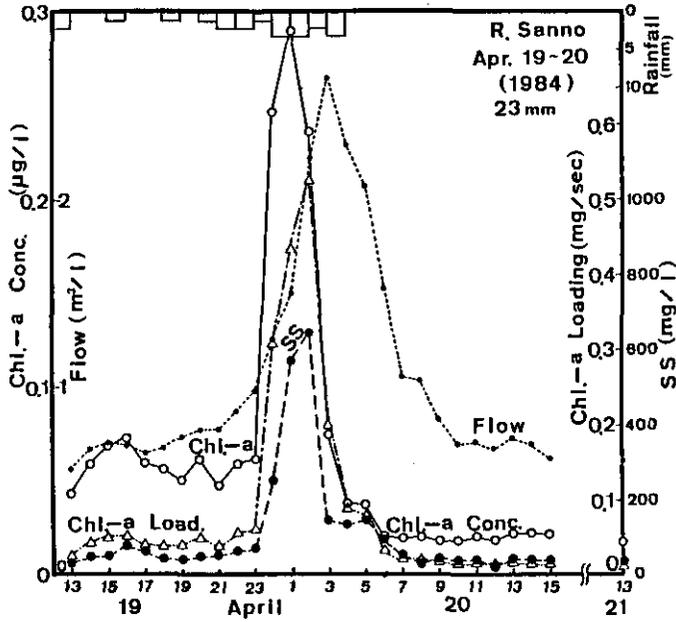


図 1 降雨時流出における Chl-a 濃度及び負荷量の経時変化

Fig. 1 Changes of concentration and loading of Chl-a during storm runoff

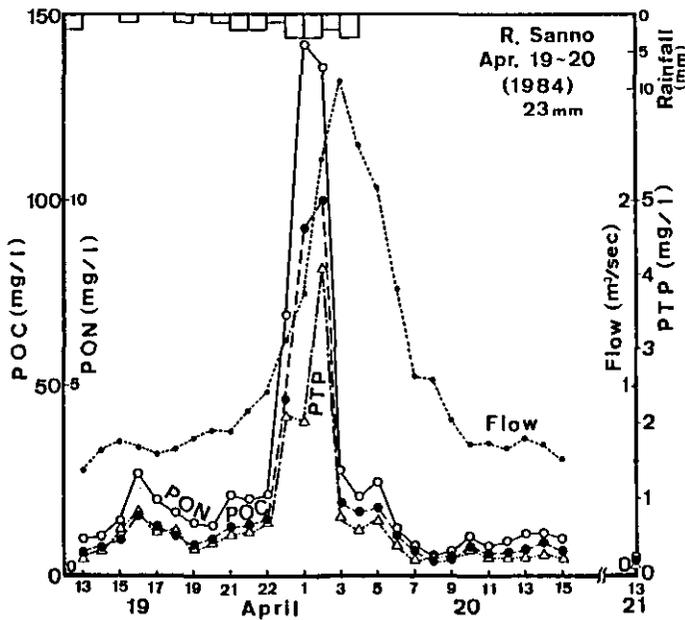


図 2 降雨時流出における C, N, P 懸濁態成分濃度の経時変化

Fig. 2 Changes of concentration of C, N and P particulate components during storm runoff

表 1 降雨時・晴天時流出負荷量の比較

Table 1 Comparison between storm runoff loading and dry-weather day loading

	Flow ×10 ³ m ³	SS kg	T-COD kg	P-COD kg	T-N kg	PTN kg	T-P kg	PTP kg	POC kg	PON kg	Chl-a kg
wet day	95.4	15,500	2,909	2,435	730	501	100	91	670	96	2.21
dry day	45.9	1,314	421	196	134	32	11	8	63	8	0.22
$\frac{\text{wet day}}{\text{dry day}}$	2.1	11.8	6.9	12.4	5.4	15.7	9.1	11.4	10.6	12.0	10.0

街地部に限定できることから、実質的にはその2.6倍の大きさとなる。さらに、この値が流出負荷量であり、堆積負荷量はそれ以上となり、当該降雨による地表面上の堆積物の一部は「積み残し」として残留し、次回以降の降雨時流出の先行晴天期間を含めた初期条件となる。実際に、この4月19～20日の降雨の先行降雨は、4月16日の2mm、4月5日の17mmの降雨があり、3月中は20mmを超える降雨はなく、2月26日に27mmの降雨があった。市街地小河川の山王川では経験的に10mmを超えれば降雨時流出と考えられるため、先行晴天期間は4月6日からの13日間と判断される。したがって、流出負荷量から推定される地表面上の堆積負荷量は、その由来を市街地のみに限定すると、POCで2.8kg/km²・d以上という算定となる。同様に、PON/Chl-a、P-COD_{Mn}/Chl-a、PTP/Chl-aなどの比によって、他の水質項目についての算定も可能である。

一般に、降雨量が多く降雨強度の高い降雨流出の場合、直接流出の流出率が高く、浸透性地表面の土地利用形態や水みち・河道などでの侵食も生ずる。この侵食によって生じた粒状態物質の流域から河川への排出については、地形や植生の条件に加えて、水理・水文条件が大きく影響するが、ここでは、結果としての流出負荷量の構成内容の由来別の推定にとどめることにする。

4 溶存態物質の流域内での動態

溶存態物質については、流域内での凹地貯留や水路等での滞留はあるものの、土地利用形態では山地や農耕地など地表面が浸透性流域を対象とし、土壌層での動態が問題となる。市街地のように地表面の不浸透性流域では、先述の粒状態物質の堆積と流出が主要な問題と思われる。ここでは、降雨時流出によって、また、その後の晴天期間において、溶存態物質の流出がどのように変化するかを、その流出挙動の特性から陽イオン物質と陰イオン物質とに分けて考察する。

4.1 陽イオン物質

一般に、河川水中に多量に存在する物質としては、Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺に、FeとMn、及び、NH₄⁺-Nであろう。Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺のアルカリ土類金属イオン、Fe、Mnの金属イオンは、土壌も含めた地質に左右されており、個々の河川でかなり安定した濃度変化を呈する

が、NaとKは他に比べて人為的な負荷の排出の影響が大きい。通常、表面流出成分の出現しないような降雨では流量増加に対してあまり大きな濃度低下はせず、表面流出成分の出現による大流出時にはかなり大きな濃度低下を示す⁷⁾。しかし、図3に示すように、降雨時流出の流量増加に見合うほどの濃度希釈とはならず、流量負荷量としては流量増加に伴って増加する。降雨時流出の流量逓減期には、流出負荷量は降雨時流出前のレベルに比較的早く復帰する特性がある。これらの現象から、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、Fe、Mnは、その大部分が地下水流出成分によって流出し、降雨時流出の増加分は早い中間流出成分によって流出すると推定される。とくに、流量逓減期に比較的早く降雨時流出前の流出負荷量や濃度レベルに復帰することから、先行降雨後の先行晴天期間における土壌層での大量の貯留は考えられず、早い中間流出成分によって、土壌水や土粒子に吸着されていたものが流出すると考えられる。

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ は、人為的な汚濁程度の高い流域では常に高い流出負荷量レベルを有しており、降雨時流出のファーストフラッシュ時に濃度ピークが見られることが多い。また、降雨時流出の前半部には高濃度を維持するが、流量の最大ピーク時前後から後半部の高流量時には低濃度となる傾向が見られる。したがって先行晴天期間における水路での滞留や凹地貯留のように、非常に流出し易い場所に貯留されている量かなりのウエイトを占め、その貯留量には限度があることがわかる。実際、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ は土粒子に吸着され易いが、好気的な状態下では $\text{NO}_2^-\text{-N}$ から $\text{NO}_3^-\text{-N}$ へとスムーズに変化することが知られており、土壌層内での $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の大量の貯留は考えられない。地表面近くでの有機態窒素の分解生成の他は、施肥も含めた人為的な負荷の排出によると思われる。

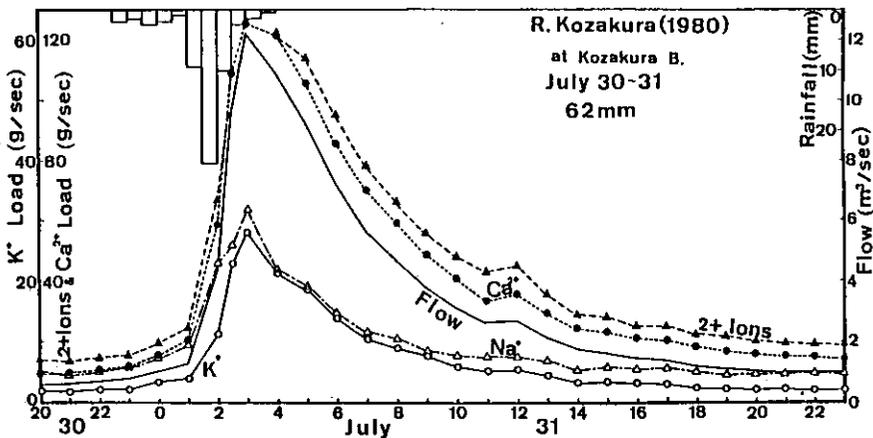


図 3 降雨時流出における陽イオン物質負荷量の経時変化

Fig. 3 Changes of loading of cation substances during storm runoff

4.2 陰イオン物質

陰イオン物質としては、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、溶性ケイ酸、 PO_4^{3-} -P 及び炭酸があり、それぞれの負荷発生源での構成比率の違いや、土壌層中の流出挙動の相違のため、降雨時流出期間やその後の晴天期間の流出濃度や負荷量の変化がかなり異なっている。

Cl^- は、人為的な汚濁負荷排出の影響を受けて変動し易い水質因子であるが、土粒子には吸着され難く、土壌層内に大量に貯留されることはないため、山地流域や農耕地流域での濃度変化は安定している。したがって、他の陰イオン物質の挙動の比較に Cl^- が選ばれることが多い。人為的な汚濁負荷の大きい場合、図4のように降雨時流出のファーストフラッシュ時に濃度ピークが見られることもあり、先行晴天期間の水路での滞留や凹地貯留など流出し易い位置での貯留が考えられる。降雨時流出においては、流量の増加に伴い濃度減少を呈するが、流量増加に見合うほどの濃度希釈とはならず、流出負荷量としては増加となる。

SO_4^{2-} は、土壌粒子には吸着され難い陰イオン物質のグループにありながら、反応や吸着など複雑な挙動もあり、 Cl^- や NO_3^- -N と異なった流出変化を見せる。図5のように、降雨時流出の最大の流量ピーク時から流出後半部の高流量に対して高濃度を示すことが多く、その後の晴天期間に徐々に通常の濃度レベルまで減少する。図5では、大作沢が山地流域を、寺山沢が農耕地流域を代表している。この流出挙動の特徴は NO_3^- -N で顕著に見られることが多い。この現象は、地表面が浸透性の農耕地や山地の流域で見られるものの、山地流域では SO_4^{2-} の濃度増加が明りように認められることは少なく、農耕地流域では施肥の影響によって明りように認められる。したがって、先行降雨による浸透雨水によって土壌層中を移動し、先行晴天期間には土壌層中に保持や貯留され、次の降雨の中間流出成分によって流出し、晴天時流出の地下水流出成分に加わって高濃度、高負荷量を呈すると考えられる。

NO_3^- -N は、その負荷発生源として降水を含む降下物、農耕地への施肥、有機物質の地表面近くでの分解のように、起源は地表面近くである。一般に、土壌層内の好気的な状態下では安定な無機態窒素化合物として存在し、土粒子に吸着されることも少なく、地表面を浸透した雨水の中間流出成分として河川へ流出する^{7,8)}。晴天時流出を構成する地下水流出成分や、降雨強度の大きい場合には雨水に近い濃度で流出する表面流出成分も存在するため、降雨時流出では卓越した表面流出成分が生じれば希釈による濃度低下を示すものの、流量の最大ピーク時からその後の晴天期間にかけて高濃度、高負荷量を示し、徐々に濃度減少を呈する^{9,10)}。一般に、一回の降雨量が大きいほど、短期間に大きな降雨が集中するほど、中間流出成分によって流出する濃度や負荷量レベルが高く、その後の晴天期間にも長期間高濃度が維持される¹¹⁾。この現象は、山地や農耕地の流域で見られるが、高濃度の持続期間が山地流域では短く、農耕地流域では長い。これは、筑波山系に源を発する恋瀬川支流の小桜川の流下方向3地点での同一降雨についての観測結果から、図6のように、ほとんど山地流域の中山地点から、水田・畑地のウエイトが下流に向かって順次増加する朝日橋地点、小桜橋地点と、高濃度の持続傾向が下流側ほど強いことがわかる。この原因は農耕地への施肥と考

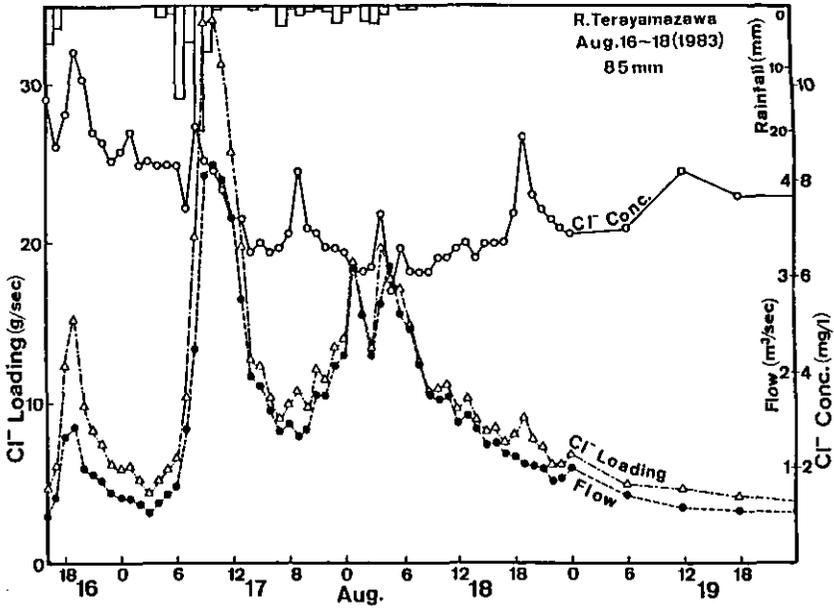


図 4 降雨時流出における Cl⁻濃度及び負荷量の経時変化

Fig. 4 Changes of concentration and loading of Cl⁻ during storm runoff

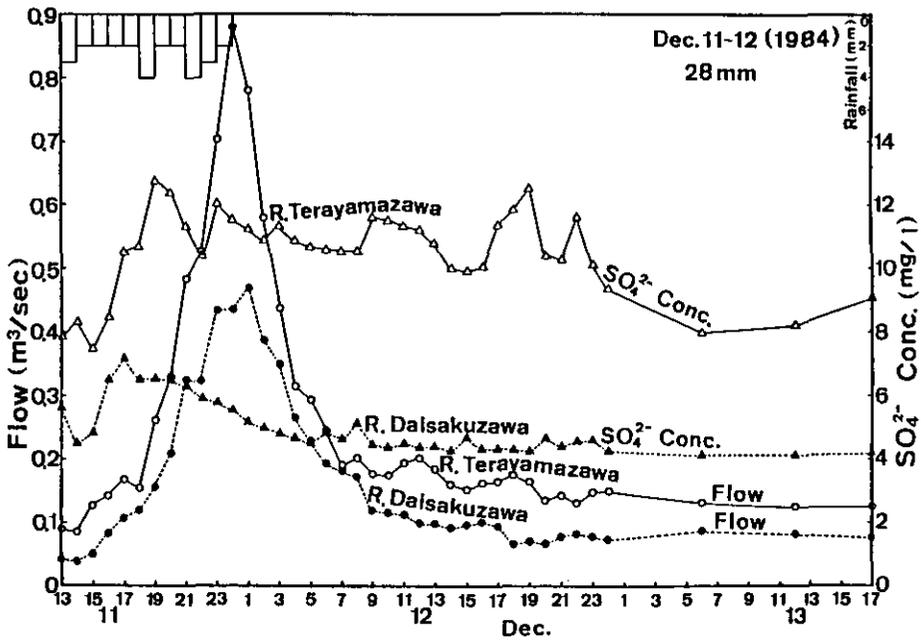


図 5 降雨時流出における SO₄²⁻濃度の経時変化

Fig. 5 Changes of SO₄²⁻ concentration during storm runoff

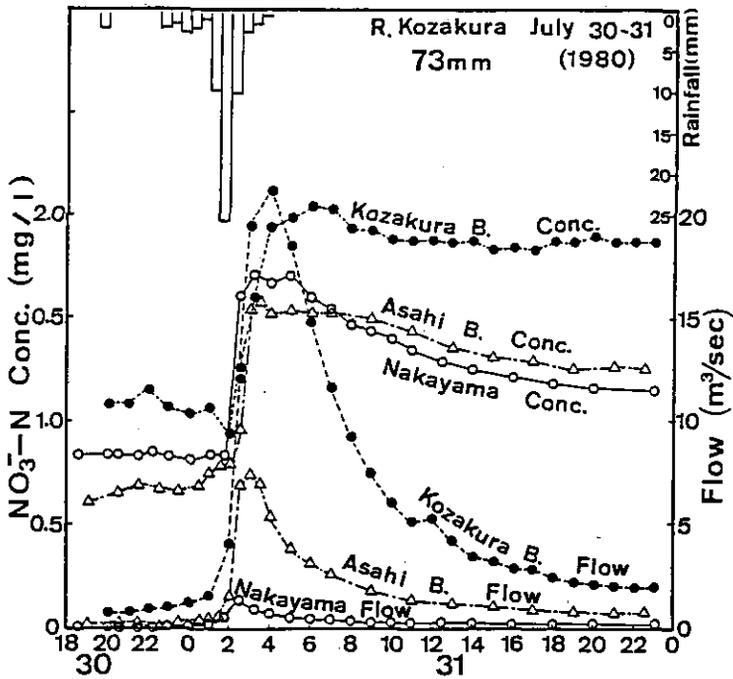


図 6 流下方向3地点における NO_3^- -N 濃度の降雨時流出変化
 Fig. 6 Changes of NO_3^- -N concentration at three points in flowing down direction

えられ、山地と農耕地における NO_3^- -N の土壌層内での保持・貯留量の相違、さらに遡れば、負荷発生量の相違となろう。同一降雨の隣接河川での流出負荷量観測結果において、その流域面積に占める農耕地のウエイトと流出負荷量との対応関係からも支持される現象である。

溶性ケイ酸は、流域の地質や土壌に由来するものがほとんどあり、負荷発生源としては無限の存在であるが排出速度は有限と考えられる。水中では陰イオンの電荷を帯び、晴天時流出では安定な変化を示す。降雨時流出では、図7のように流量増加に対して濃度上昇を示す場合もあり、濃度減少を示す場合も流量の増加に見合うほどの希釈はなく、流出負荷量は結果的にかはりの増加を示すことになる。図7では、大作沢は山地流域を、寺山沢は農耕地流域を代表している。流量増加に対する濃度増加現象は、山地流域で認められるが、農耕地流域では濃度増加は認めることが少いため、地質的な要因の寄与も大きいように考えられる。

SO_4^{2-} 、 NO_3^- -N、溶性ケイ酸の三つの陰イオン物質は、山地や農耕地流域で多少の挙動の相違はあるものの、降雨時流出の降雨条件によって流量増加に対して濃度上昇を呈することが多く、その濃度レベルは先行降雨と先行晴天期間によって少しずつ異なっている。すなわち、先行降雨とその後の晴天期間も併せて累加流出流量と累加流出負荷量の間に関係が図8のような一定の直線的な関係が

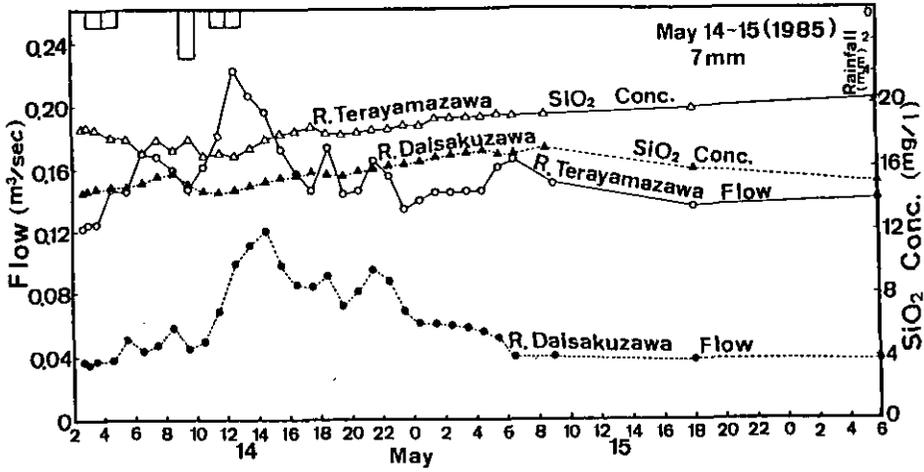


図 7 降雨時流出における溶性ケイ酸濃度の経時変化

Fig. 7 Changes of concentration of dissolved silica during storm runoff

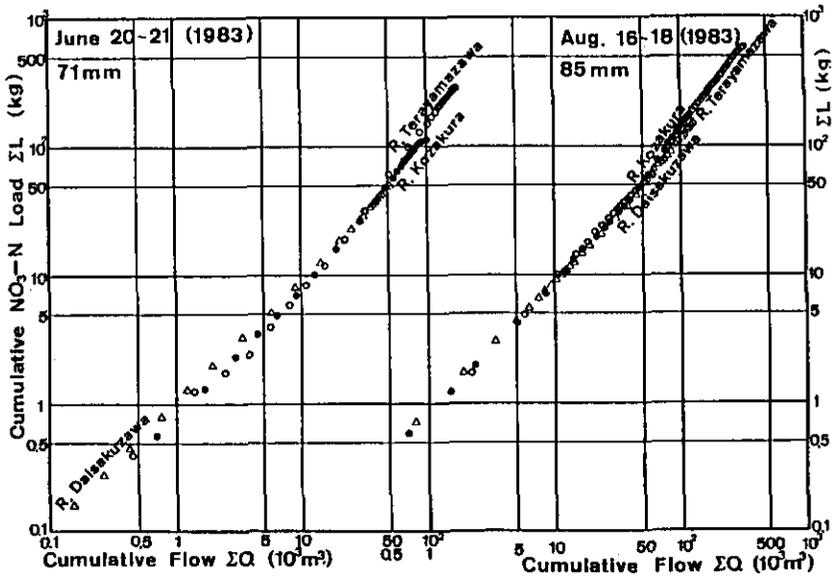


図 8 NO_3^- -N の累加流出負荷量と累加流出流量の関係

Fig. 8 Relationship between cumulative NO_3^- -N loading and cumulative flow during storm runoff

見られる。これは、水質因子それぞれと流域の土地利用などとの関係で規定されていると考えられ、降雨時流出に加えてその後の晴天時流出における累加流出流量と累加流出負荷量の関係を明らかにした観測結果に基づいている。

他の陰イオン物質については、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ は土粒子と特異的な吸着があり、降雨時流出の流量増加に対して濃度減少が見られるのが通常であるが、人為的な汚濁負荷の大きな流域では $\text{NH}_4^+\text{-N}$ によく似た挙動を示す。 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ は通常濃度が低く、好氣的な状態下では安定な $\text{NO}_3^-\text{-N}$ に変化するが、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ が高濃度の場合に $\text{NO}_2^-\text{-N}$ もかなり高濃度となり、その流出変化は $\text{NH}_4^+\text{-N}$ に近いと考えられる。炭酸イオンは、pH によって存在量に変化する性質がある他、その発生源は主として地質に左右され、地下水中の濃度が高いことが知られている。表流水としての河川水としては、直接測定されることは少なく、水中の全イオンの収支から逆算されたり、pH とアルカリ度の関係から推定されるが、その降雨時流出前後の挙動はよくわかっていない。これらの流出負荷量の推定は、先述の $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 SO_4^{2-} 、溶性ケイ酸と同様の回帰式が利用できるが、降雨時流出によって、流出負荷量の増加が著しくない場合に相当する。

すなわち、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 SO_4^{2-} 、溶性ケイ酸には山地や農耕地によって土壌層内での貯留・抑留に起因する物質の、降雨流出期間に多量の流出が認められる。その量には、それぞれの土地利用形態の差異が反映される。一降雨による総流出負荷量が、同じ流出時間の晴天時流出の場合と比べて大きくなければ、降雨時流出期間の累加流出流量 ($\sum_{i=0}^T Q$) と累加流出負荷量 ($\sum_{i=0}^T L$) の両対数紙上のほぼ直線関係を示す次の回帰式より、総流出流量が既知となれば推定できる。

$$\sum_{i=0}^T L = b \cdot \left(\sum_{i=0}^T Q \right)^m \quad \text{あるいは} \quad \sum_{i=0}^T L/A = a \cdot \left(\sum_{i=0}^T Q/A \right)^n \quad (2)$$

ここで、 T は直接流出時間であり、 a 、 b は係数、 m 、 n は指数、 A は流域面積である。 m や n は 1 に近い一定値であり、 a や b は初期条件で先行降雨や先行晴天期間によって異なることが多い。

もし、一降雨による総流出負荷量が同じ流出期間の晴天時流出の場合と比べて大きければ、すでに著者の提案した累加流出負荷量の累加流出流量に対する両対数紙上での頭打ち現象を利用した降雨時流出期間の総流出負荷量と総流出流量の多くの観測データについての次の回帰式が利用できる¹⁰⁾。

$$\sum L/A = a' \cdot \left(\sum Q/A \right)^{n'} \quad (3)$$

ここで、 a' は係数、 n' は指数である。

5 結 語

これまでの降雨時流出と晴天時流出の負荷量観測により、降雨時流出による総流出負荷量は総流出流量の関係であり、ほとんどの水質項目でその流出期間に相当した晴天時流出負荷量を上回る大きさであることが明らかとなっている。しかし、流域の土地利用と負荷発生源、さらにその負荷排

出速度を考慮すれば、当該降雨の降雨条件だけでその総流出負荷量が規定されるわけではなく、先行降雨や先行晴天期間の影響も大きい。市街地のような不浸透性地表面の流域への堆積負荷量は、粒状態物質を中心として、先行降雨の大きさやその後の晴天期間の長さに左右される。山地や農耕地のような浸透性地表面の流域では、溶存態物質を中心とした土壌層内での流出挙動が重要である。

粒状態物質については、降雨時流出負荷量の観測結果から当該降雨によって新たに流域から河川に排出されて流下してきたものと、降雨以前から河床に貯留・堆積していて当該降雨によって流下してきたものとの比率の推定を試みた。河床に付着して存在し、増殖・剝離流出する付着藻類に注目し、河床に存在する貯留・堆積物と付着藻類がその現存量の構成比率と同じ割合で流下するという仮定の下で推定が可能となった。

溶存態物質については、降雨時流出の高流量時に高負荷量は無論のこと、高濃度を呈することの多い陰イオン物質に注目し、 NO_3^- -N、 SO_4^{2-} 、溶性ケイ酸の挙動と土地利用形態や水文条件との関係を検討した。山地流域では NO_3^- -Nと溶性ケイ酸、農耕地流域では NO_3^- -Nと SO_4^{2-} が降雨による直接流出の流量ピーク以降の高濃度現象が顕著に見られたが、降雨により、先行降雨や先行晴天期間によって濃度レベルとその維持期間が異なった。また、その供給源の土壌層での貯留量や供給速度に限度があることも、降雨時流出やその後の晴天時流出の濃度変化に大きく影響していると考えられる。

引用文献

- 1) Sartor, J.D., G.B. Boyd and F.J. Agardy (1974) : Water pollution aspect of street surface contaminants. J. Water Pollut. Control Federation, 46, 458-467.
- 2) 中村栄一(1980) : 合流式下水道対策の検討(第II報). 第16回衛生工学研究討論会講演論文集(土木学会), 154-159.
- 3) 環境庁水質保全局(1982) : 非特定汚染源による汚染防止対策調査検討会中間報告書. 201p.
- 4) 海老瀬潜一(1985) : 降雨時に流出する河床付着藻類・付着生物量の評価. 土木学会第40回年次学術講演会講演概要集, 第2部, 787-788
- 5) 海老瀬潜一・相崎守弘・大坪國順・村岡浩爾(1983) : 河川流出負荷量としての河床沈殿・堆積物量の評価. 水質汚濁研究, 6(2), 93-103.
- 6) 相崎守弘(1982) : 有機汚濁河川における付着微生物群集の季節変化. 第16回水質汚濁学会講演集, 258-259.
- 7) 海老瀬潜一・村岡浩爾・大坪國順(1982) : 降雨流出成分の水質による分離. 第26回水理講演会論文集, 279-284.
- 8) 海老瀬潜一・村岡浩爾・佐藤達也(1984) : 降雨流出解析における水質水文学的アプローチ・水理講演会論文集, 547-552.
- 9) Ebise, S. (1984) : Separation of runoff components by NO_3^- -N loading and estimation of runoff loading by each component. In: Hydrochemical Balances of Freshwater Systems, (ed.) E. Eriksson, IAHS Publication, 150, 393-405.
- 10) 海老瀬潜一(1985) : 降雨による土壌層から河川への NO_3^- の排出. 衛生工学研究論文集, 21, 57-68.

海老瀬潜一

- 11) Ebise, S. (1985) : Estimation on drainage of nitrate from surface soil layer to river by storms. Nitrates in Water, (in press) .

II-5 流達過程における水質負荷量変化とその評価

Estimation on Change of Pollutant Loading during Flowing down in Rivers

海老瀬 潜一¹

Senich EBISE¹

要 旨

河川や水路での流達過程においては、沈殿・吸着や水質の形態変化に伴う流出負荷量変化が見られる。途中からの流出入の影響が無視できる市街地河川と農業用水路において、上下流端で物質収支によって流下に伴う流出負荷量変化を、毎週一回定時の定期負荷量調査、毎日定時の経日負荷量調査、流下時間を考慮した24時間負荷量調査結果から検討した。その結果、流下に伴う流出負荷量の減少は、流入負荷量の大きさ、流路形態と流下時間、流速等の影響が大きかった。BODやCODの有機物指標の減少は確認されたが、SSは流速が大きく流路形態の変化の小さな農業用水路での減少はほとんど見られなかった。農業用水路の取水先の河川下流部で大発生した浮遊藻類によるChl-*a*の減少量はかなり大きな量であった。有機懸濁態成分のPOCやPONの減少も明らかであった。また、 PO_4^{3-} や無機態窒素の流下に伴う水質形態の変化は一部の調査結果では確認されたが、その他の溶存態物質の流出負荷量の変化は認められなかった。

Abstract

During flowing down in rivers the particulate and dissolved matter loadings change by various causes without influx and exflux. With the results of many diurnal loading observations, daily loading observations and weekly observations in an urban river and an irrigation canal, the amount of the loading changes was influenced mainly by input load level to river, longitudinal shape of river bed and water current. In the irrigation canal where water current is greater, the amount of SS loading didn't decrease during flowing down. But, in the urban river where the input load level to river is higher, SS loading decreased in large quantities by sedimentation. From mass balances in flowing down reach, the loading of organic matter surely decreases for about two hours of detention time. The changes of water quality component is shown as the phenomena of organic component to inorganic component by decomposition, ammonium salts to nitrate by nitrification, and phosphorus to particulate component by adsorption. The amount of Chl-*a* loading due to suspended algae decreased by sedimentation and decomposition.

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.

1 緒言

流域から河川に排出された物質は、河川の流下過程において物理的・化学的及び生物的な作用を受け、水質として変化する。一般に、日本の河川は河川長が小さくて急流河川が多いため、流下時間したがって滞留時間が短いのが特徴であり、河川の水質が一過性と言われるゆえんでもある。しかし、反応や変化速度が小さな現象でも、河川へ大量の排出負荷がある場合には、物質収支的に見て流下方向の水質変化量がかなりの量に達することがある。特に、河床に沈殿・堆積する懸濁物質の流出挙動は、流水より流下時間が長くなり、その有機態成分は河床における高密度の微生物群との接触時間の長さや分解し易さに応じた変化を受けるため、流下に伴う量的な水質変化の著しいものとして注目される。ただ、底質として河床に存在しているものは、そこでの滞留時間の大きさと、どの程度物質変化したかの定量的な推定が困難である。

この流下過程における物質の滞留に伴う変化には二つの場合が考えられる。一つは、通常の晴天時流出の場合の沈殿・堆積であり、もう一つは、降雨時流出の場合の沈殿・堆積である。後者の場合は、流域から河川に排出された物質が、流量したがって流速の減少に伴って下流まで運搬されずにとどまっている場合であり、必ずしも晴天時に水の流れる流路のみならず、高水敷も含めた河道内に堆積する。この堆積量を正確に推定することは困難であり、ここでは前者の場合を中心に議論を進めることにする。

流下距離したがって流下時間が長ければ、BOD や COD で測定される有機物質の分解に伴う減少を捉えることができるが、流下時間が短かければ沈殿による減少が中心と考えられる。また、有機物質だけでなく、 NH_4^+-N は硝化に伴って NO_2^--N や NO_3^--N への形態変化も生ずるが、これらは DO とのかかわりが重要である。 PO_4^{3-} は、土粒子をはじめ多くの物質との特異的な吸着現象があり、吸着に伴う溶存態から懸濁態への形態変化、さらに懸濁物質としての沈殿減少も見られる。

この河川や水路での流下に伴う水質変化を、途中からの流出入がないか無視できる一定の流下区間の物質収支をとることによって、定量的に明らかにする。

2 調査河川及び水路

調査は市街地河川と農業用水路で行った。山王川は、中流部で石岡市の市街地を貫流し、霞ヶ浦高浜入に流入する市街地小河川である。流域面積13.7km²、河川長7.8kmの小河川ながら、霞ヶ浦流入河川の中でも最も汚濁程度の高い河川である。この市街地部から大量の生活排水と工場・事業所排水が河川に排出され、下流の田園地区間の河床に沈殿・堆積すると推定されている^{1,2)}。農業用灌漑水路の土浦用水は、霞ヶ浦土浦入に流入する桜川の学園大橋下流で取水され、ポンプで揚水後、一部トンネル区間を経て、土浦市、桜村、谷田部町を流下する。桜川は流域面積340km²、河川長54kmと霞ヶ浦流入河川の中で最も流域規模が大きく、汚濁程度の低い河川である。この水路は、他からの排水の流入がないのが特徴である。山王川の下流区間には、市街地の中流区間と比べ

て無視できるほどの生活排水と農耕地排水による汚濁負荷がある。この負荷状態や水路形態の異なる両所の同じ長さの流下区間での水質変化を比較検討する。なお、表1に測定水質項目とその分析方法を示す。

表 1 測定水質項目と分析方法
Table 1 Water quality indicators and their analytical method

Item	Method
Flow	propeller-typed current meter
NH ₄ ⁺ -N	phenol-hypochlorite method
NO ₂ ⁻ -N	N-1-Naphthylethylenediamine-sulfanilamide method
NO ₃ ⁻ -N	reduction with hydrazine sulfate and phenoldisulfate acid method
T-N, DTN	nitrification by oxidation with potassiumperoxodisulfate and method for NO ₃ ⁻ -N
PO ₄ ³⁻ -P	molybdate-blue method
T-P, DTP	decomposition to PO ₄ ³⁻ -P with potassiumperoxodisulfate and method for PO ₄ ³⁻ -P
Cl ⁻	mercuric thiocyanate method
T-COD, D-COD	alkali-potassiumpermanganate method
SS	glassfiber filter method
Inorg-N	NH ₄ ⁺ -N+NO ₂ ⁻ -N+NO ₃ ⁻ -N
Org-N	T-N-Inorg-N
Org-P	T-P-PO ₄ ³⁻ -P
P-COD	T-COD-D-COD
PTN	T-N-DTN
PTP	T-P-DTP
POC, PON	CHN corder
Na, K	flame photometer
DO, BOD ₅	Winkler method
Chl-a	UNESCO/SCOR method

3 市街地河川の例——山王川——

山王川においては、1979年6月から1980年5月までの一年間に流下方向4地点で毎週一回定時の水質負荷量観測(水質濃度と流量測定)と、隔週ごとの人工付着板による河床堆積物量調査と底質調査を行っている²⁾。さらに、晴天時の24時間負荷量調査を8回、降雨時流出負荷量調査を4回実施しているほか、上流部と最下流の2地点では1978年6月～1979年5月の1年間に毎週1回定時の水質負荷量観測も行っている。図1に山王川の流域と縦断方向形状を示す。地点②と③の間の市街地部から大量の汚濁負荷が排出され、地点③と④の間の下流区間に沈殿・堆積し、降雨流出時に掃流されるというパターンが繰り返されている。毎週一回定時の負荷量観測結果の年間平均値と、その期間に行われた晴天時24時間負荷量観測の4回の平均値を表2に示す。表2より、市街地下流端の地点③から最下流端近くの地点④にかけて、流量は増加しているにもかかわらず、SSをはじめT-COD, T-N, T-Pなど、懸濁物質、懸濁態成分及び懸濁態成分を含むTotalの項目での流出

負荷量の減少が見られる。毎週調査の場合、地点③と④の間の観測時間は30分程度の違いであるが、両地点間の2.85kmを約 $0.4\text{m}^3/\text{sec}$ の河川水は2時間強で流下する。水質負荷量の日周変化を考慮すると、毎週定時観測の場合は平均流下時間より少ない時間間隔で観測したため推定にとどまるが、24時間観測（25サンプル）は流出負荷量の日周変化もとらえているため、流下に伴う流出負荷量減少を断定できる。晴天時24時間流出負荷量観測は、一年間の各季節に分かれており、流量も多い場合から少ない場合まで広い範囲をカバーしているため、年間の平均値としての性格も有している。

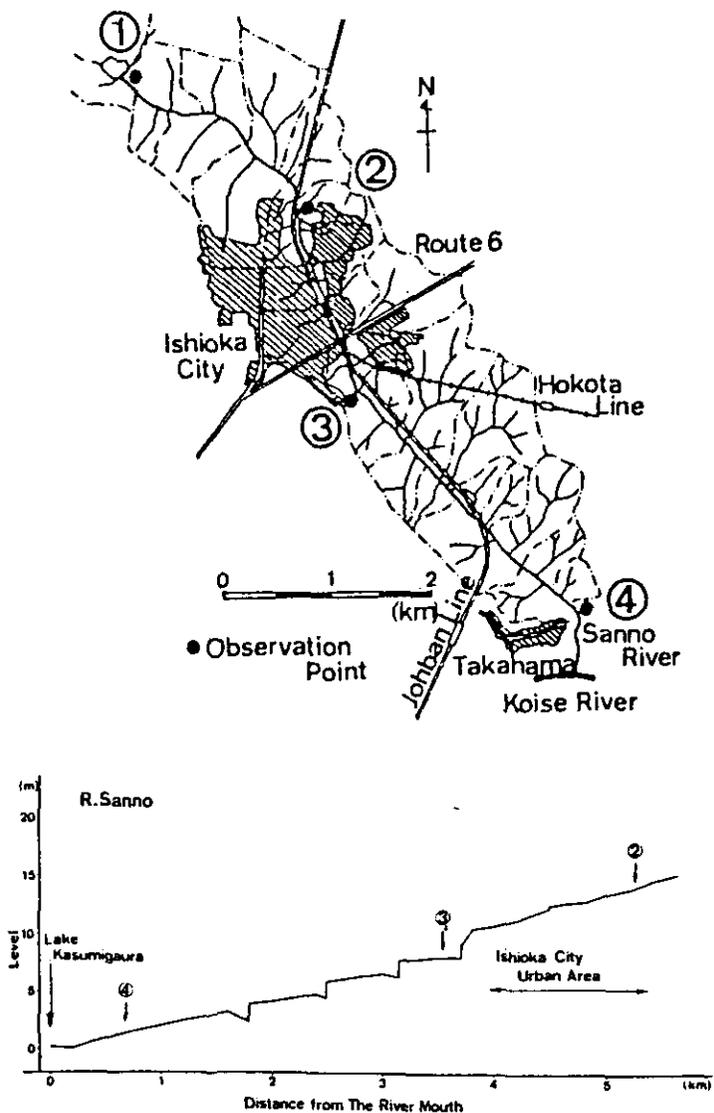


図 1 山王川概略図と観測地点
Fig. 1 Observation points in R. Sanno

表 2 流下に伴う水質負荷量変化 (山王川)

Table 2 Change of pollutant loading during flowing down in R. Sanno

調査種目	観測地点	流 (10 ³ m ³ /d)	量 (kg/d)	NH ₄ -N (kg/d)	NO ₂ -N (kg/d)	NO ₃ -N (kg/d)	Inorg-N (kg/d)	Org-N (kg/d)	T-N (kg/d)	DTN (kg/d)	PTN (kg/d)	PO ₄ ³⁻ -P (kg/d)
毎週調査	③	37.6	41.6	13.1	54.0	109.5	68.3	177.7	(154)	(36)	18.6	
	④	40.5	37.3	12.4	51.4	101.2	53.3	154.6	(136)	(18)	13.1	
24時間調査	③	36.6	35.7	10.6	36.8	82.5	83.6	166.1	(143)	(30)	21.8	
	④	40.5	37.3	9.2	53.7	103.4	49.9	153.4	(159)	(23)	20.4	
調査種目	観測地点	DIP (kg/d)	Org-P (kg/d)	T-P (kg/d)	DTP (kg/d)	PTP (kg/d)	Cl ⁻ (kg/d)	SS (kg/d)	T-COD (kg/d)	D-COD (kg/d)	P-COD (kg/d)	
毎週調査	③	21.0	18.1	38.8	(25.5)	(13.2)	1,045	1,280	469	-	-	
	④	14.3	11.1	25.1	(16.3)	(9.2)	1,003	1,009	359	-	-	
24時間調査	③	22.4	12.9	35.3	(18.5)	(10.2)	1,134	920	378	228	155	
	④	21.1	9.2	30.3	(17.0)	(9.8)	1,167	672	326	227	99	

() の値は欠測値あり。

河道内に貯留・堆積される懸濁物質と河道内で増殖した付着微生物群の現存量の変化は、河床に敷設した人工付着板による堆積物現存量変化観測によって、その構成内容のチェックも行っている^{2,3)}。しかし、河道内に貯留・堆積される懸濁物質の有機態成分の滞留時間内の分解減少を考慮に入れねばならない。山王川の市街地下流端の地点③での流出負荷量は、長さ2.85km 流下時間2時間強の流下に伴い、わずかながら流入負荷が加わるにもかかわらず T-N で8~13%、T-P で14~35%、T-COD で14~23%、SS で21~27%の減少をしている。有機態成分の流水中での分解による減少は考えられるものの、流下時間の短かさからその量的なウエイトは小さい。減少した懸濁物質の大半は河道内に貯留・堆積されるため、次回の降雨流出までの晴天期間における河道内での分解減少量の定量的把握も必要である⁴⁾。これには、人工付着板上の付着微生物群の増殖とは別に、現存量変化から有機物質の堆積量と分解減少量の定量化がいる。

溶存態成分では、24時間調査において NO₃⁻-N の流下に伴う増加が無機態窒素の増加をもたらしている。これは、10月22~23日の調査が10月18~19日の105mm という豪雨の3日後であったため、市街地下流区間の農耕地からの雨水浸透水の排出が続き、NO₃⁻-N の排出負荷量が異常に高かったことによっている。しかし、PO₄³⁻-P は流下に伴い減少しており、PO₄³⁻-P がその9割以上を占める DIP や9割に近い DTP の同様の減少からも支持される。いずれも、4回の平均値だけでなく、豪雨後の1回を除いて各回の調査結果とも同様の傾向が見られた。これは次節の農業用水路で観測された DTP から PTP への変化、さらに懸濁態成分としての沈殿による減少とも関連した現象で、PO₄³⁻-P と SS がある濃度レベル以上存在した場合に初めて確認できるのではないかと考えられる。さらに、図1に示した山王川の縦断形状が小さいながら3箇所の上り形状となっている点も、流出負荷量の沈殿・堆積による減少の大きな要因と考えられる。

4 農業用水路の例——土浦用水——

桜川下流部から揚水され、一部トンネル区間を経て流下する土浦用水は、筑波学園都市を通過する。途中からの流入はないが、桜村並木地区で二方向に分岐され、一方の分流が谷田部町へと流下する。調査区間は、図2に示す分流直後から谷田部町館野地区までのほぼ直線区間の2.90kmで、幅1.5~1.9mの三面コンクリート張りの矩形水路である。この調査区間上流端から0.95km、流下時間31分の地点で、別の地域へ一部の水量を分水しており、この地点を中流点と名づける。中流点から約0.5km下流の公園内を約0.2kmトンネルで通過する。流下区間の上流点と下流点では、採水の際に常に水位と流速を測定し、流量を算定する。水深は1m弱であり、流量は一定値(約 $1\text{ m}^3/\text{s}$)近くで変動するが、かなり安定した変化を呈する。流下時間は、上・下流点の流速からも推定できるが、各回の調査とも高濃度の食塩水を注入してその濃度ピークの通過時間から推定した。

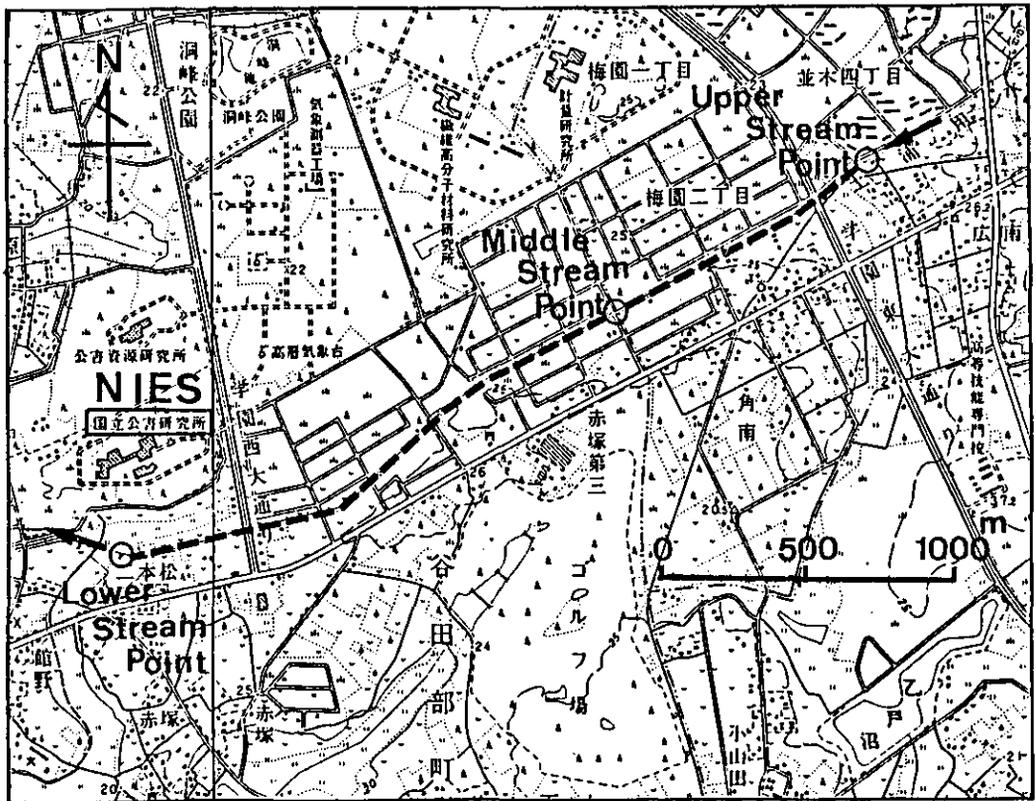


図 2 土浦用水概略図と観測地点

Fig. 2 Observation points in Tsuchiura Irrigation Channel

第1回の調査は、1983年8月5日～6日の24時間（毎時間25サンプル）調査を、中流点から下流点までの長さ1.95km 流下時間45～48分区間で行った。第2回目は、1984年7月23日～8月15日の日曜日を除く毎日定時の調査で、上下流点と中流点の3地点について行った。第3回目は、1985年7月29日～30日の24時間（毎時間25サンプル）調査を3地点について行った。二回の24時間調査は、いずれも各流下時間だけ下流側観測時刻をずらせて行っているが、毎日調査では、上流側から下流側へと観測を進めたが、流下時間に比べると短い観測時刻のずれとなっている。しかし、用水の取水源の桜川が霞ヶ浦流入河川の中で最大の流域面積、最長の河川延長を有しており、流域の多くが農耕地と山地に占められるため、水質濃度の変化は安定している。したがって、土浦用水でも急激な水質変化が生ずることは少ないと考えられる。この用水では、途中からの流入がないため、上下流点の水質濃度変化のみからでも、流下に伴う負荷量の増減は推定できる利点がある。

上流点、中流点、下流点の3地点の24時間調査を行った1985年7月29～30日の上流、中流、下流の濃度の平均値と、各流下区間の濃度の増減を表3に示す。取水源の桜川の水質変化が比較的安定していることもあって、24時間の水質変動は小さく、2.90kmの流下区間での水質濃度の増減量は上下流点の平均濃度と比較して小さかった。短い流下区間ながら、COD、BOD、POC、PONなどの有機汚濁に関する水質項目で流下に伴う減少が中でも著しかった。これに伴い、DOの減少が認められた。流速が0.60～0.80m/sとかはり速く、三面コンクリート張り水路のため沈殿によるSSの減少は認められなかった。しかし、用水中に高濃度で含まれていた浮遊性藻類のアオコによるChl.-aの流下に伴う減少が明らかとなった。これは、群体を形成して水表面近くに団粒状で浮遊するアオコが、流下区間の水路側面に付着して滞留したり、分解されたりして減少すると考えられる。このほか、T-Nの増加や、DTPの減少とPTPの増加、PTNとDTNの大小逆転など、別の調査結果との比較検討や、分析方法や分析精度からの考察も必要であろう。

1985年の24時間調査による流下に伴う流出負荷量としての増減を表4の中央に、1983年の24時間調査による増減値を左側に、1984年の毎日調査による増減値を右側にして列記した。中流点では、1985年の24時間調査の場合は全流量の4.2%が、1984年の毎日調査の場合は全流量の14.2%が分水されたため、その流量減少によって上流点と下流点間でほとんどの水質項目で流出負荷量の減少が見られるのは当然である。したがって、上流—中流、中流—下流の区間での増減と、この両者の合計値に意味がある。POC、PON及びChl.-aはすべての場合に減少となっている。この調査を実施した3年の夏とも桜川でアオコの発生があり、土浦用水にも多量のアオコが含まれていたことが大きな特徴であった。T-CODで6%、BODで9%、POCで7%、PONで8%の流下に伴う減少が見られたものの、SSの減少は認められなかった。Chl.-aの減少は11%であった。用水路の平均流速は0.60～0.80m/secと早く、沈殿し易い粒子は用水へ流入以前に除去されていて、用水路での沈殿はほとんどなかったと考えられる。1984年の毎日調査の場合は、経日変化も大きく、流下時間と観測時刻のずれはあるものの、水質濃度や負荷量変化の傾向は2回の24時間調査とほぼ同じである。

表 3 流下に伴う水質濃度変化 (土浦用水)

Table 3 Change of pollutant concentration during flowing down in Tsuchiura Irrigation Channel

水 質 項 目	上 流 点	中 流 点	下 流 端	(単位: mg/l)		
				流 下 に よ る 増 減		
				上流-中流	中流-下流	上流-下流
NO ₄ ⁺ -N	0.116	0.130	0.120	0.014	- 0.010	0.004
NO ₂ ⁻ -N	0.033	0.033	0.034	0.0	0.001	0.001
NO ₃ ⁻ -N	0.584	0.613	0.631	0.029	0.018	0.047
Inorg-N	0.732	0.776	0.786	0.044	0.010	0.054
Org-N	0.990	1.020	1.031	0.030	0.011	0.041
T-N	1.722	1.797	1.817	0.075	0.020	0.095
DTN	0.940	0.931	0.949	- 0.009	0.018	0.009
PTN	0.782	0.865	0.868	0.083	0.003	0.086
PO ₄ ³⁻ -P	0.025	0.031	0.031	0.006	0.0	0.006
Org-P	0.165	0.191	0.181	0.026	- 0.010	0.016
T-P	0.190	0.221	0.212	0.031	- 0.009	0.022
DTP	0.052	0.036	0.034	- 0.016	- 0.002	- 0.018
PTP	0.138	0.186	0.178	0.048	- 0.008	0.040
Cl ⁻	28.1	27.9	27.9	- 0.2	0.0	- 0.2
SS	42.1	43.3	42.3	1.1	- 1.0	0.1
SiO ₂	14.3	14.4	14.2	0.1	- 0.2	- 0.1
T-SiO ₂	21.1	21.4	21.1	0.3	- 0.3	0.0
D-SiO ₂	14.4	14.5	14.5	0.1	0.0	0.1
P-SiO ₂	6.8	6.9	6.6	0.1	- 0.3	- 0.2
SO ₄ ²⁻	31.3	31.4	31.1	0.1	- 0.3	- 0.2
Ca	14.8	14.8	15.5	0.0	0.7	0.7
Mg	7.8	7.9	7.7	0.1	- 0.2	- 0.1
Na	15.2	15.0	15.4	- 0.2	0.4	0.2
K	4.7	4.7	4.7	0.0	0.0	0.0
Chl- <i>a</i>	0.976	0.947	0.868	- 0.029	- 0.079	- 0.107
T-COD	8.92	8.60	8.42	- 0.32	- 0.18	- 0.50
D-COD	5.10	5.35	5.25	0.25	- 0.10	0.15
P-COD	3.82	3.26	3.17	- 0.56	- 0.09	- 0.65
POC	4.97	4.79	4.59	- 0.18	- 0.20	- 0.38
PON	1.03	0.96	0.94	- 0.07	- 0.02	- 0.09
BOD	4.23	-	3.83	-	-	- 0.40
DO	8.22	-	6.90	-	-	- 1.32

表 4 流下に伴う水質負荷量変化 (土浦用水)

Table 4 Change of pollutant loading during flowing down in Tsuchiura Irrigation Channel

(単位: g / sec)

水質項目	1983年	1985年24時間調査				1984年毎日調査		
	中流-下流	上流-中流	中流-下流	上流-下流	上流-中流	中流-下流	上流-下流	
NO ₄ ⁺ -N	0.007	0.018	0.010	0.001	0.030	1.381	2.991	
NO ₂ ⁻ -N	0.001	0.001	0.001	0.0	0.004	0.633	0.250	
NO ₃ ⁻ -N	0.056	0.036	0.018	0.019	0.051	3.541	2.623	
Inorg-N	0.065	0.056	0.010	0.021	0.025	2.792	0.118	
Org-N	0.009	0.031	0.012	0.005	0.016	2.144	6.662	
T-N	0.056	0.086	0.023	0.015	0.041	0.648	6.780	
DTN	0.096	0.009	0.019	0.042	0.018	1.833	3.330	
PTN	0.041	0.096	0.004	0.058	0.059	1.186	4.450	
PO ₄ ³⁻ -P	0.002	0.006	0.0	0.004	0.003	0.001	0.001	
Org-P	0.020	0.032	0.011	0.011	0.026	0.006	0.025	
T-P	0.018	0.038	0.011	0.015	0.029	0.007	0.026	
DTP	0.014	0.019	0.002	0.024	0.004	0.001	0.003	
PTP	0.032	0.057	0.009	0.039	0.025	0.007	0.023	
Cl ⁻	0.2	0.3	0.0	1.8	0.5	0.7	7.1	
SS	2.3	1.5	2.5	2.1	2.3	3.9	12.8	
SiO ₂	0.4	0.1	0.2	0.9	0.0	0.5	1.9	
T-SiO ₂	—	0.4	0.3	1.1	0.2	1.9	1.8	
D-SiO ₂	—	0.2	0.0	0.6	0.1	0.8	1.8	
P-SiO ₂	—	0.2	0.3	0.5	0.1	0.5	0.1	
SO ₄ ²⁻	1.8	0.8	0.0	1.6	0.5	0.2	4.7	
Ca	1.4	0.0	0.9	0.0	0.3	0.1	3.0	
Mg	0.2	0.1	0.2	0.5	0.1	0.1	1.4	
Na	0.3	0.2	0.4	0.5	0.2	0.9	4.9	
K	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.1	1.0	
Chi-a	0.001	0.003	0.009	0.017	0.004	0.007	0.029	
T-COD	0.20	0.40	0.20	1.04	0.21	0.28	1.34	
D-COD	0.14	0.28	0.06	0.09	0.23	0.04	1.43	
P-COD	0.07	0.67	0.12	0.95	0.44	0.33	0.09	
POC	0.065	0.215	0.221	0.670	0.469	0.240	1.695	
PON	0.003	0.084	0.017	0.147	0.088	0.256	0.344	
BOD	—	—	—	0.70	—	—	—	
DO	—	—	—	1.89	—	—	—	
平均流量	0.983m ³ /sec	1.213m ³ /sec	1.162m ³ /sec	—	1.164m ³ /sec	0.999m ³ /sec	—	

長さ2.90km、流下時間80分弱の流下に伴い、有機物質の懸濁態成分を中心としての減少は明らかであり、その溶存態成分にも一部の減少が認められた。その他の物質の増減は分析や測定精度を考慮すると、予測通りほとんど変化がなかったが、DTPの減少だけは今後さらに詳しく検討が必要である。しかし、一定こう配で三面コンクリート張りの直線水路では、形状・こう配とも変化に富んでいる自然河川のような物質の貯留・抑留効果は小さい。一般の河川では、淵と瀬が交互に存在したり、蛇行して流水断面が広がったり狭まったりするため、流下と共に流速や水深がかなり変化し、懸濁物質が貯留・堆積される機会も多い。土浦用水の場合、桜川からポンプで取水後、トンネルや分水で何回か流路の縦断面形状は変化するものの、流速の変化は小さく、平均流速0.7m/s程度とかなり高い流速で流下する。したがって、SS濃度は決して低くなかったけれども、その中で浮遊性藻類のアオコが大きなウエイトを占めており、沈降し易い物質が少なかったことと、水質濃度が全般に山王川に比べて低かったことも、土浦用水での流出負荷量の流下に伴う減少が小さかった要因と考えられる。

5 結論

汚濁負荷の程度と流路形態の異なる小河川と農業用水路において、途中からの流入負荷がないか無視できる程度の同じ長さの流下区間で流出負荷量の減少量を比較検討した。流路の縦断面形状は、流速や水深を左右し、流出負荷量の貯留・堆積への影響が大きい。汚濁負荷の程度の高い市街地小河川では、市街地から排出された負荷が、市街地下流区間で懸濁物質を中心にT-Nで8~13%、T-Pで14~35%、T-CODで14~23%の流出負荷量の減少となった。これに対して人工水路である土浦用水においては、汚濁負荷の程度が低く、流速や水深の変化も少なく、一定の速い流速で流下するため、貯留・堆積による流出負荷量はほとんど認められなかった。流下に伴う有機物質のT-CODで6%、BODで9%、POCで7%、PONで8%の減少があり、主として分解による流出負荷量の減少と考えられる。PO₄³⁻や無機態窒素の流下に伴う水質形態の変化は、一部の調査結果では確認された。

流水中での有機物質の分解による減少は、理論式によって推定も可能であるが、河床に沈殿・堆積した懸濁物質の有機態成分の分解減少についての定量的な検討が必要と考えられる。河床内では、付着性の微生物群が存在し、自栄養の付着藻類、他栄養の糸状菌や原生動物等が流水中や河床内の水質と相互に関係し合っている。したがって、流出負荷量として、由来別の現存量変化をモデル化して、晴天時流出と降雨時流出を併せた流出負荷量解析へのサブモデルとして組み込むことが重要と考えられる。

引用文献

- 1) 海老瀬渚一(1981):霞ヶ浦流入河川の流出負荷量変化とその評価. 陸水域の富栄養化に関する総合研究(V), 国立公害研究所研究報告, 第21号, 130p.

- 2) 海老瀬潜一・相崎守弘・大坪國順・村岡浩爾(1983)：河川流出負荷量としての河床沈殿・堆積物量の評価. 水質汚濁研究, 6(2), 93-103.
- 3) 相崎守弘(1982)：有機汚濁河川における付着微生物群集の季節変化. 第16回水質汚濁学会講演集, 258-259.
- 4) 海老瀬潜一(1984)：晴天時と降雨時の流下区間物質収支による河川自浄作用の評価. 土木学会第39回年次学術講演会講演概要集, 第2部, 877-878.

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ー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 distribution 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 特別研究中間報告。(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年度 特別研究報告。(1983)
- ※第 41 号 土壤環境の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 Orthocladiinae 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 スモッグチャンパーによる炭化水素—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 中間報告。(1983)
- 第 45 号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壤生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究 ——昭和53~55年度 特別研究報告。(1983)
- 第 46 号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壤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, 重金属等の土壤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かく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) ——湯ノ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影響に関する研究——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)
- 第 72 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55～57年度 特別研究報告 (第4分冊)。(1985)
- ※第 73 号 炭化水素—窒素酸化物—硫黄酸化物系光化学反応の研究——昭和55～57年度 特別研究総合報告。(1985)
- ※第 74 号 都市域及びその周辺の自然環境に係る環境指標の開発に関する研究。環境指標——その考え方と作成方法——昭和59年度 特別研究報告。(1984)
- 第 75 号 Limnological and environmental studies of elements in the sediment of Lake Biwa. (1985)
(琵琶湖底泥中の元素に関する陸水学及び環境化学的研究)

- 第 76 号 Study on the behavior of monoterpenes in the atmosphere. (1985)
(大気中モノテルペンの挙動に関する研究)
- 第 77 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58年度 特別研究報告。(1985)
- 第 78 号 生活環境保全に果たす生活者の役割の解明。(1985)
- 第 79 号 Studies on the method for long term environmental monitoring —— Research report in 1980-1982. (1985)
(環境汚染による汚染の長期的モニタリング手法に関する研究)
- 第 80 号 海域における赤潮発生のモデル化に関する研究——昭和57/58年度 特別研究報告。(1985)
- 第 81 号 環境影響評価制度の政策効果に関する研究——地方公共団体の制度運用を中心として。(1985)
- 第 82 号 植物の大気環境浄化機能に関する研究——昭和57～58年度 特別研究報告。(1985)
- 第 83 号 Studies on chironomid midges of some lakes in Japan. (1985)
(日本の湖沼に発生するユスリカ類の研究)
- 第 84 号 重金属環境汚染による健康影響評価手法の開発に関する研究——昭和57～59年度 特別研究総合報告。(1985)
- 第 85 号 Studies on the rate constants of free radical reactions and related spectroscopic and thermochemical parameters. (1985)
(フリーラジカルの反応速度と分光学的及び熱力学的パラメーターに関する研究)
- 第 86 号 GC/MSスペクトルの検索システムに関する研究。(1986)
- 第 87 号 光化学二次汚染物質の分析とその細胞毒性に関する基本的研究——昭和53～58年度 総合報告。(1986)
- 第 88 号 都市域及びその周辺の自然環境等に係る環境指標の開発に関する研究Ⅱ。環境指標——応用例とシステム。(1986)
- 第 89 号 Measuring the water quality of Lake Kasumigaura by LANDSAT remote sensing. (1986)
(LANDSAT リモートセンシングによる霞ヶ浦の水質計測)
- 第 90 号 ナショナルトラスト運動にみる自然保護運動にむけての住民意識と行動——知床国立公園内100平方メートル運動と天神崎市民地主運動への参加者の分析を中心として。(1986)
- 第 91 号 Economic analysis of man's utilization of environmental resources in aquatic environments and national park regions. (1986)
(人間による環境資源利用の経済分析——水環境と国立公園地域を対象にして)
- 第 92 号 アオコの増殖及び分解に関する研究。(1986)
- 第 93 号 汚泥の土壌還元とその環境影響に関する研究(Ⅰ)——昭和58～59年度 特別研究総合報告(第1分冊)。(1986)
- 第 94 号 汚泥の土壌還元とその環境影響に関する研究(Ⅱ)——昭和58～59年度 特別研究総合報告(第2分冊)。(1986)
- 第 95 号 自然浄化機能による水質改善に関する総合研究(Ⅰ)——汚濁負荷の発生と流出・流達—昭和58～59年度 特別研究報告。(1986)

※残部なし

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 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 argal 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 Orthoclaudiinae 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 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 significance of sediment in nutrient 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 fishes and crustacea in Lake Kasumigaura. — 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 oxides-sulfur oxides system —Photochemical ozone formation studies 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 oxides-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 oxides-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 1981-1982. (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)
- No.72* Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides-sulfur oxides system—Research on the photochemical secondary pollutants formation mechanism in the environmental atmosphere. —Research report in 1980-1982. (1985)
- *No.73* Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides-sulfur oxides system—Final report in 1980-1982. (1985)
- *No.74* A comprehensive study on the development of indices system for urban and suburban environmental quality—Environmental indices-Basic notion and formation (1984)
- No.75 Limnological and environmental studies of elements in the sediment of Lake Biwa. (1985)
- No.76 A Study on the behavior of monoterpenes in the atmosphere. (1985)
- No.77* The development and evaluation of remote measurement methods for environmental pollution—Research report in 1983 (1985)
- No.78* Study on residents' role in conserving the living environment. (1985)

- No.79 Studies on the method for long term environmental monitoring—Research report in 1980-1982. (1985)
- No.80* Modeling of red tide blooms in the coastal sea—Research report 1982-1983. (1985)
- No.81* A study on effects of implementing environmental impact assessment procedure—With particular reference to implementation by local governments. (1985)
- No.82* Studies on the role of vegetation as a sink of air pollutants —Research report in 1982-1983. (1985)
- No.83 Studies on chironomid midges of some lakes in Japan. (1985)
- No.84* A comprehensive study on the development of assessment techniques for health effects due to environmental heavy metal exposure —Final report in 1982-1984. (1985)
- No.85 Studies on the rate constants of free radical reactions and related spectroscopic and thermochemical parameters. (1985)
- No.86* A novel retrieval system for identifications of unknown mass spectra. (1986)
- No.87* Analysis of the photochemical secondary pollutants and their toxicity on cultured cells —Research report in 1978-1983. (1986)
- No.88* A comprehensive study on the development of indices system for urban and suburban environmental quality II—Environmental indices—Applications and systems. (1986)
- No.89 Measuring the water quality of Lake Kasumigaura by LANDSAT remote sensing. (1986)
- No.90* National trust movement in Japanese nature conservation —Trustworthy or illusion? (1986)
- No.91 Economic analysis of man's utilization of environmental resources in aquatic environments and national park regions. (1986)
- No.92* Studies on the growth and decomposition of water-bloom of *Microcystis*. (1986)
- No. 93* Studies on the environmental effects of the application of sewage sludge to soil (I) — Research report and papers (Part 1) in 1983-1984. (1986)
- No. 94* Studies on the environmental effects of the application of sewage sludge to soil (II)— Research report and papers (Part 2) in 1983-1984. (1986)
- No. 95* Comprehensive studies on effective use of natural ecosystems for water quality management (I) — Drainage and flowing down of pollutant load — Research report in 1983-1984. (1986)

* in Japanese

※ out of stock

[昭和60年11月27日受領]

**RESEARCH REPORT FROM
THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES, JAPAN**

No. 95

国立公害研究所研究報告 第95号
(R-95-'86)

昭和61年3月15日発行

発行 環境庁 国立公害研究所
〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2

印刷 谷田部印刷株式会社
茨城県新治郡桜村天久保2-11-20

Published by the National Institute for Environmental Studies
Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan
March 1986