

汚泥の土壤還元とその環境影響に関する研究

*Studies on the Environmental Effects of the Application of
Sewage Sludge to Soil*

昭和56/57年度 特別研究報告

Research Report in 1981-1982

藤井國博・広木幹也・服部浩之・向井 哲・久保井 徹・稲森悠平
袴田共之・山口武則・矢木修身・須藤隆一・松坂泰明・石井修司

K. FUJII, M. HIROKI, H. HATTORI, S. MUKAI,
T. KUBOI, Y. INAMORI, T. HAKAMATA, T. YAMAGUCHI,
O. YAGI, R. SUDO, Y. MATSUZAKA, S. ISHII

環境庁 国立公害研究所

THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

序

我が国では米の生産調整が続き、店頭には食品が山積みされ、飽食の時代といわれている。一方、発展途上国の中には飢餓が慢性化している地域もある。世界的な食糧の偏在のなかで人口は依然として増加しつつあり、食糧生産のための化学肥料も毎年確実に増加している。このまま人口増加が続けば、21世紀にはまづリン資源が枯渇するものと予想されている。

このような事態に対処するために国連食糧農業機関（FAO）は、化学肥料に代わる肥料資源として各種の有機物を可能な限り食糧及び植物生産に利用することを提唱している。これには肥料成分を含む廃棄物も対象とされ、なかでも、下水汚泥は、比較的多量の肥料成分を含むことから食糧・植物生産への利用が、その処分問題とからんで注目されている。

当然のことながら、下水汚泥の肥料としての有効性や、含有される有害金属元素の影響については活発な研究が進められてきたが、農業利用に伴う環境への影響については、FAOの指摘にもかかわらず世界的に関心がうすかった。

昭和56年度より開始した特別研究「汚泥の土壌還元とその環境影響に関する研究」では、下水汚泥を肥料資源として農耕地に長期に連用した場合における土壌とそれをとりまく大気並びに陸水域に与える影響を解明し、環境に負荷を与えない方策を探ることを目的とし、4年継続で各種のサブテーマ研究を展開した。本報告書は中間報告であり、昭和56及び57年度における研究の成果をとりまとめたものである。

昭和59年8月

国立公害研究所 水質土壌環境部
部長 合田 健

目 次

I. 研究の概要	1
藤井國博	
II. 報 文	
1. 下水汚泥施用土壌における水稻の生育及び植物体成分	17
広木幹也・藤井國博	
2. 土壌による下水汚泥の分解——連用の影響——	31
服部浩之・藤井國博	
3. 下水汚泥を連用した淡色黒ボク土における無機態窒素の経時変化——ほ場実験——	43
服部浩之・藤井國博	
4. 下水汚泥の連用が土壌の全炭素, 腐植酸及びフルボ酸に及ぼす影響	55
向井 哲・服部浩之	
5. 下水汚泥の施用が土壌空気の組成に与える影響	67
久保井 徹・広木幹也・藤井國博	
6. 下水汚泥施用土壌における土壌空気組成と土壌微生物数との関係	83
久保井 徹・広木幹也・服部浩之・藤井國博	
7. 下水汚泥施用土壌浸透水の AGP (藻類増殖の潜在能力)	93
稻森悠平・石井修司・矢木修身・須藤隆一	
8. ライシメーター浸透水の分析値についての統計的解析——各種土壌における化学 肥料と下水汚泥の比較——	105
袴田共之・藤井國博	
9. 屋内ライシメーターにおける水稻の均一栽培	117
広木幹也・藤井國博	
III. 資 料	
1. 降 水 量	129
山口武則・藤井國博	
2. 屋外ライシメーターの浸透水量	133
藤井國博・山口武則	
3. 屋外ライシメーター浸透水試料の成分分析結果	169
藤井國博・広木幹也・山口武則・松坂泰明	

CONTENTS

I.	Outline of Performed Researches	1
	K. FUJII	
II.	Articles	
1.	<i>Growth and Element Contents of Rice Plant Cultivated on Paddy Soil with Application of Sewage Sludge</i>	17
	M. HIROKI and K. FUJII	
2.	Decomposition of Sewage Sludge in Soils—Effect of Repeated Applications of Sewage Sludge—	31
	H. HATTORI and K. FUJII	
3.	Changes in Inorganic Nitrogen Contents in Light Colored Andosol with Repeated Applications of Sewage Sludge—Field Experiment—	43
	H. HATTORI and K. FUJII	
4.	Effect of Repeated Applications of Limed Sewage Sludge on the Contents of Total C and Humic and Fulvic Acids in Soil	55
	S. MUKAI and H. HATTORI	
5.	Changes in Soil Air Composition at Various Depths in a Light Colored Andosol to which Sewage sludge had been Applied	67
	T. KUBOI, M. HIROKI and K. FUJII	
6.	Relationship between Soil Air Composition and Microbial Populations in a Soil Amended with Sewage Sludge	83
	T. KUBOI, M. HIROKI, H. HATTORI and K. FUJII	
7.	Algal Growth Potential of Leachate from Various Soils Amended with Sewage Sludge	93
	Y. INAMORI, S. ISHII, O. YAGI and R. SUDO	
8.	Statistical Analysis of Element Concentration in Percolating Water of Lysimeter —Comparison of Sewage Sludge and Chemical Fertilizers in the Four Soil Types—	105
	T. HAKAMATA and K. FUJII	
9.	A Preliminary Studies on Cultivation of Rice in Lysimeters in a Greenhouse	117
	M. HIROKI and K. FUJII	

III. Appendix

- 1. Precipitation 129
 T. YAMAGUCHI and K. FUJII
- 2. Amount of Percolating Water from Outdoor Lysimeters 133
 K. FUJII and T. YAMAGUCHI
- 3. Results of Analyses of Substances in Percolate Samples from Outdoor Lysimeters ... 169
 K. FUJII, M. HIROKI, T. YAMAGUCHI and Y. MATSUZAKA

I. 研究の概要

I

研究の概要

Outline of Performed Researches

藤井 國博¹

Kunihiro FUJII¹

1 研究の目的

下水汚泥は、下水道の終末処理場における汚水の処理に伴って発生し、汚水に含まれる固形物や汚水の浄化に働いた生物体などから成り、有機物はその主体をなしている。

近年における下水道の普及や汚水処理の高度化によってその発生量は年々増加している。従来、下水汚泥は、主として埋立てによって処分されてきたが、規制の強化と埋立地そのものの確保が次第に困難となりつつあり、埋立てに代わる安定した処分方法の確立が急務となっている。

農耕地や緑地の土壌を利用した下水汚泥の処分（土壌還元）は、土壌のもつ有機物の分解力を利用するものであり、安定した処分方法と見られている。同時に、これは、下水汚泥が植物の生育に必要な諸養分や土壌条件の改善に役立つ成分を含むことから廃棄物の有効利用と廃棄物の処分という一石二鳥の効果をもつ方法として注目を集めている。

植物生産に廃棄物を利用するに当たっては、それが植物生産や土壌条件の改善に有効であることが必須条件であると、同時に、重金属等有害金属元素や有害微生物による人間や動物の健康への影響、土壌や植物への悪影響のみならず利用に伴う環境影響に対しても十分な検討と配慮が必要なことが指摘されている。

下水汚泥の植物生産に対する有効性とその発現機構、含有される有機物の土壌中における分解、含有される重金属等有害金属元素の土壌への蓄積と植物生育に対する影響並びに植物による吸収などに関しては、近年における活発な研究活動によって次第に明らかにされつつあるが、環境影響については、ほとんど研究が実施されておらず、その解明とその成果に基づく適正な利用方法の確立が要望されている。

本特別研究は、下水汚泥の緑農地利用（土壌還元）を環境保全の立場から評価しようとするものであり、農耕地土壌を対象として下水汚泥の長期連続還元（連用）が土壌とそこに生育する植物に与える影響、下水汚泥に含まれる成分の土壌環境における挙動と大気及び水域への移動並び

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.

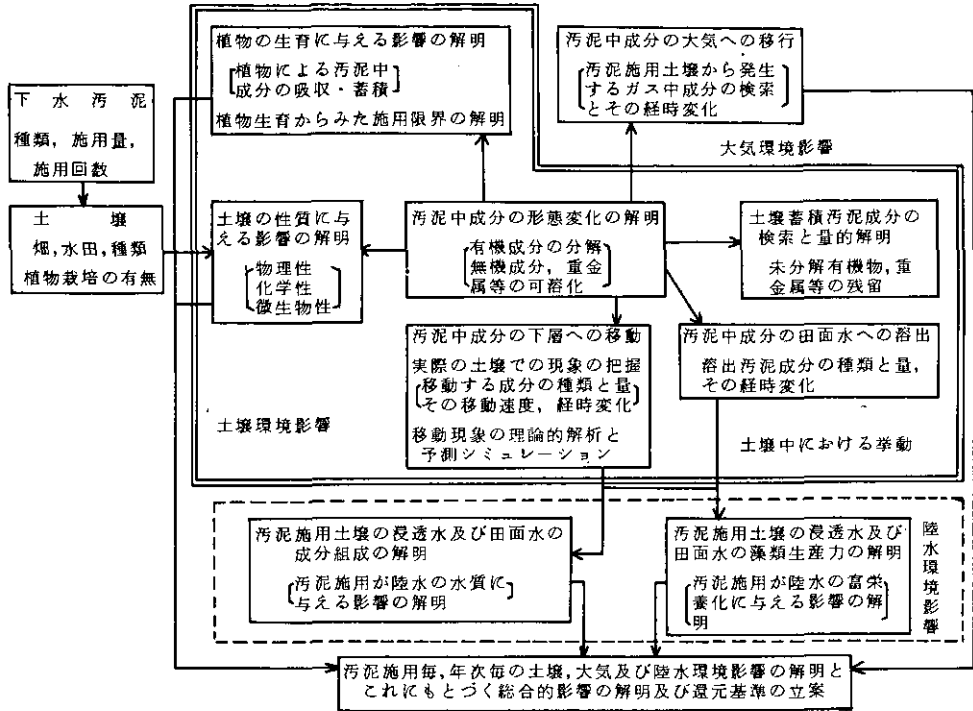


図1 全体計画の概念図

に水域に移動した下水汚泥中成分が水域の富栄養化に与える影響を明らかにするとともに、これらの研究で得られた成果をもとに環境影響を考慮した下水汚泥の農耕地における利用基準を検討することを目的としている。図1に全体計画の概念図を示した。

2 研究課題

本特別研究では、前記の研究目的を達成するために四つの課題（サブテーマ）が設定されている。それぞれの課題名とその内容を以下に述べる。

〔課題1〕 汚泥の連用が土壌の性質及び植物生育に与える影響について

土壌の性質は、基本的には物理的性質、化学的性質及び微生物的性質の三つに大別され、これが複合して土壌の性質（地力と呼ばれる）が現れる。また、土壌の性質は、そこに生育する植物に反映する。土壌の性質と植物の生育は、課題2で検討する土壌中における物質の挙動に対して影響を与える重要な要因である。

この課題においては、下水汚泥の長期連用に伴う土壌の性質の変化と土壌の性質を反映する植物生育の変化を追跡し、下水汚泥の連用を土壌-植物生態系への影響（土壌環境影響）の面から評

価することを目的としている。このために以下の事項について検討する。

(1) 汚泥の連用に伴う土壌の性質の変化

土壌の基本的性質である物理的、化学的及び微生物的性質とこれらが複合して発現する諸性質の経時変化を明らかにするとともに土壌の性質を反映する植物の生育を下水汚泥の連用土壌について追跡する。特に、これまでほとんど研究されていない物理性に与える影響について重点的に検討する。

(2) 植物生育を指標とする下水汚泥の施用限界の解明

畑及び水田土壌への下水汚泥の限界施用量を植物の生育を指標として明らかにする。水田土壌については汚泥の施用時期と限界施用量との関係についても検討する。

〔課題2〕汚泥成分の土壌環境中での挙動について

土壌はその表面で大気に接している。また、畑では地下水を通じて、水田では地下水と表層水（田面水）を通じて、それぞれ水域と結びついている。汚泥を土壌に施用することによって大気や水域が受ける影響を解明することは環境影響を評価する上で欠かせない要因であると考えられる。このためには、汚泥に含まれる成分が土壌中において、土壌から大気へ、また、土壌から水域へどのように移動するか、すなわち、挙動を解明する必要がある（図2）。この課題では、これらの点を解明することを目的としており、以下の事項について検討する。

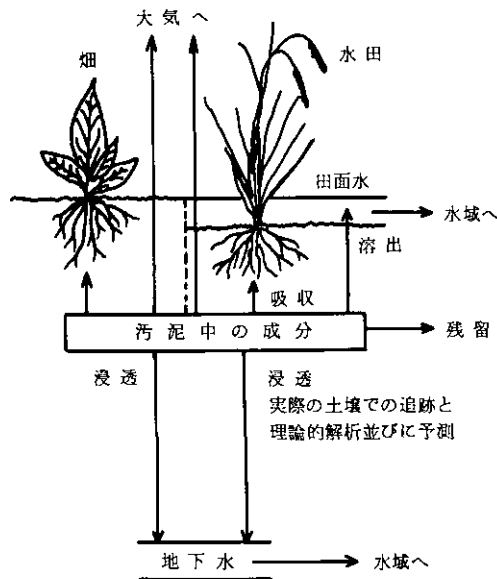


図2 〔課題2〕(汚泥成分の土壌環境中での挙動について) の概念図

(1) 土壤中における汚泥成分の形態変化と植物による吸収

下水汚泥連用土壌における汚泥中の有機、無機成分、付随する重金属等有害金属元素、界面活性剤等合成有機化合物の形態変化と土壌への蓄積について検討するとともに、これらの成分の植物による吸収、植物体内での移動と蓄積部位を明らかにする。

(2) 汚泥中成分の地下浸透、表層水（田面水）への溶出及び大気への移行

下水汚泥連用土壌における汚泥中成分の下層土への浸透と水田土壌での表層水（田面水）への溶出と大気への移行を明らかにするために浸透水、表層水、土壌の気相中及び土壌から揮散する気体中に含まれる物質の検索を行う。汚泥の施用量、施用回数、植物栽培の有無などが汚泥中成分の浸透、溶出及び揮散量に与える影響も明らかにする。また、汚泥に含有される重金属や合成有機化合物の浸透と溶出についても検討し、あわせて汚泥の還元に伴い陸水水質が受ける影響を明らかにする。

(3) 土壌中の浸透流に伴う物質の移動に関する理論的解析

畑地土壌では降雨によって、水田土壌では湛水によって土壌中の水の移動が起こり、これに伴って物質の移動が起こる。この土壌中での水の動きと物質の移動に関する基礎的研究を行い、物質の浸透流出機構及び移動特性に関する理論を確立するとともに実際の土壌における浸透現象の解析と水域に対する汚染の予測シミュレーションを行う。

〔課題3〕汚泥の土壌還元と陸水環境影響について

畑地では地下水を通じて、水田では表層水と地下水を通じて、土壌は陸水域と密接な関係を有している。したがって、土壌への下水汚泥の還元当たっては、陸水域に及ぼす影響をも考慮に入れた還元方策が確立されなければならない。陸水域への影響、特に富栄養化に与える影響に関しては、藻類の生育を指標として評価する必要がある。この課題では、下水汚泥施用土壌の浸透水及び表層水について藻類の生産力を明らかにすることによって下水汚泥の土壌還元に伴い陸水環境が受ける影響を富栄養化の側面から評価する。そのために以下の事項を検討する。

(1) 汚泥施用土壌の浸透水が藻類の生育に与える影響

下水汚泥を施用した畑地土壌からの浸透水で藻類を培養し、汚泥の種類、施用量と施用回数、植物栽培の有無と藻類の生産力との関係を明らかにする。また、汚泥の陸上埋立地からの浸出水を採取し、その藻類生産力を測定して汚泥の土壌施用の場合との比較を行う。

(2) 汚泥施用水田土壌の表層水が藻類の生育に与える影響

汚泥を施用した水田土壌の表層水で藻類を培養し、汚泥の種類、施用量と施用回数、植物栽培の有無と藻類の生産力との関係を明らかにする。また、水田土壌の浸透水についても同様の検討を行い、水田土壌における汚泥施用と陸水環境影響について明らかにする。

〔課題4〕汚泥の土壌還元が環境に与える影響の総合的解析と還元基準に関する検討

課題1~3で得られた結果から下水汚泥の土壤還元が土壤環境と土壤をとりまく大気及び陸水環境に与える影響を総合的に把握する。これにモデル実験の結果を加え総合的見地から下水汚泥の農耕地への還元基準を立案する。

3 研究期間

本特別研究の研究期間は、昭和56年度から昭和59年度までの4年間である。なお、長期連用試験の一部は、昭和54年度から開始されている。

4 研究組織

本特別研究は、水質土壤環境部長をプロジェクトリーダーとして表1に示す3部5研究室の18名の研究者と表2に示す所外客員研究員(56年度15名、57年度16名)及び共同研究員から成る研究組織によって実施されている。

表1 研究担当者所属・氏名

所 属		氏 名	
部	室	昭和56年度	昭和57年度
水質土壤環境部	部 長	合 田 健	合 田 健
	土 壌 環 境 研 究 室	藤 井 國 博 高 松 武 次 郎 向 井 哲 久 保 井 徹 服 部 浩 之 広 木 幹 也	藤 井 國 博 高 松 武 次 郎 向 井 哲 久 保 井 徹 服 部 浩 之 広 木 幹 也
	陸 水 環 境 研 究 室	須 藤 隆 一 田 井 慎 吾 矢 木 修 身 稻 森 悠 平 岡 田 光 正 細 見 正 明 山 根 敦 子	須 藤 隆 一 田 井 慎 吾 矢 木 修 身 稻 森 悠 平 岡 田 光 正 細 見 正 明 山 根 敦 子
	水 質 環 境 計 画 研 究 室	村 岡 浩 爾 大 坪 国 順 岩 田 敏	村 岡 浩 爾 大 坪 国 順 岩 田 敏
環 境 情 報 部	情 報 調 査 室	袴 田 共 之	袴 田 共 之
技 術 部	生 物 施 設 管 理 室	山 口 武 則	山 口 武 則

表2 客員研究員所属・氏名

所 属	氏 名	
	昭和56年度	昭和57年度
大阪大学工学部	合 葉 修 一	合 葉 修 一
東京農業大学農学部	麻 生 末 雄	麻 生 末 雄
筑波大学応用生物化学系	大 羽 裕	大 羽 裕
東北大学理学部	栗 原 康	栗 原 康
東北大学工学部	佐 藤 敦 久	佐 藤 敦 久
埼玉大学工学部	佐 藤 邦 明	佐 藤 邦 明
東京大学生産技術研究所	鈴 木 基 之	鈴 木 基 之
京都大学農学部	高 橋 英 一	高 橋 英 一
茨城大学農学部	高 村 義 親	高 村 義 親
京都大学工学部	辻 本 哲 郎	辻 本 哲 郎
東京工業大学工学部	陶 野 郁 雄	陶 野 郁 雄
農林水産省農業技術研究所*		福 士 定 雄
日本大学農獣医学部	松 坂 泰 明	松 坂 泰 明
日本大学農獣医学部	矢 崎 仁 也	矢 崎 仁 也
筑波大学応用生物化学系	吉 田 富 男	吉 田 富 男
東京大学農学部	和 田 秀 徳	和 田 秀 徳

* 現 同省農業環境技術研究所

5 我が国における下水汚泥の緑農地利用

5.1 歴 史

松崎・和地¹⁾は、我が国における下水汚泥の緑農地利用について次のように述べている。

我が国ではじめて散水ろ床法による本格的な下水道終末処理場が東京都三河島に建設され、運転が開始されたのは1922年である。その2年後の1924年には、下水汚泥の農業利用の可能性に関する調査研究の結果が報告されており、主要成分の形態と含有量、水稻、陸稻、大麦、小麦などの農作物に対する汚泥施用の有効性が確認されていた。

この散水ろ床法に代わって1930年には活性汚泥法による污水处理法が導入され、これによって名古屋市の堀留と熱田の両処理場が建設された。この処理法によって発生する汚泥の農業利用が直ちに着目され、1930年には都市污水及び食品工場排水の活性汚泥処理によって発生する汚泥の主要成分とその肥効について報告が出されている。その後、汚泥の肥料的価値に着目して農作物に対する合理的な施肥法の確立を要請され、汚泥中の窒素の肥効（無機化）についての詳細な検討と魚粉や大豆粕の窒素の無機化との比較が行われた。

名古屋市ではその当時汚泥の肥料成分量を明記した汚泥肥料が、農協や農業団体を通じて販売されており、この方式は、1950年代まで続いた。これが豊橋、岐阜、熱海の各市における汚泥の緑農地利用のきっかけをつくったとされている。

しかしながら、その後の経済の高度成長と農村人口の都市への流出及び化学肥料の普及によって汚泥の利用はほとんど行われなくなった。

その後再び汚泥の農業利用が注目されるようになり、東京都農試(1959~1961)、神奈川県農総研(1961~1962)、愛知県農総試で農作物に対する汚泥の施用効果試験が開始された。続いて建設省は、土木学会に委託して「下水汚泥の処理、処分及び利用に関する調査研究」を1968~1973年に実施している。土木学会は、1969~1971年に川崎市、豊橋市など全国10市に試験を依頼し、栽培試験を各地域の県農業試験場が担当した。ここに至ってはじめて各種の農作物に対する汚泥の施用効果についての全国的な規模での組織的研究が開始された。この調査研究の過程で汚泥に含有される重金属等の有害金属元素の危険性が問題となり、1972年~1974年にはこの重金属を中心とした研究が実施された。ここではじめて汚泥のもつ有効性の検討よりも安全性の確認に重点を置いた研究が活発に行われるようになった。そして、建設省、日本下水道事業団及び日本土壌協会などによる組織的な土壌還元に関する調査研究が実施された。

1976年には肥料取締法が改正され、ヒ素、カドミウム及び水銀について乾物当たりそれぞれ50、5及び2ppmを限度とする規制値と総理府令による溶出法による規制値が定められた。以後、安全性と有効性を考慮した本格的な調査研究が開始され、1978年には日本土壌肥料学会の主催による下水汚泥の農地還元に関するシンポジウムが開催された。

以上が松崎・和地がまとめた汚泥の農地利用の歴史である。その後も下水道関係、環境庁、各県の農業試験場、農林水産省、建設省などや試験研究機関で調査研究が続けられている。1981年には環境庁に「汚泥の農用地還元問題検討会」が設置され、農用地還元に伴う問題点が検討された。1983年には同検討会の報告書²⁾が出された。また、1982年10月には、下水汚泥資源利用協議会の主催による「下水汚泥の緑農地利用に関する国際シンポジウム」が開催され、米国、英国、西ドイツにおける下水汚泥の農耕地利用の現況が紹介された³⁾。

5.2 背景

一時期途絶えていた下水汚泥の農耕地利用が再び注目されるようになったことについては、いくつかの理由があげられる。

第一は我が国の下水処理場が置かれている状況である。下水汚泥は、下水道の終末処理場における汚水の生物処理に伴って発生する。我が国では、昭和56年現在で約500か所の終末処理場が稼働中であり、年間約65億 m^3 の下水が処理されている。昭和55年度(55年11月1日~56年10月31日)に発生した下水汚泥の最終処分量は、約240万 m^3 であった²⁾。その処分形態は、表3に示したように陸上埋立てが42%、海面埋立てが36%、有効利用が15%(このうち93%が緑地や農地における利用)となっている²⁾。このように約80%が埋立てによって処分されているが、次第に埋立地の確保が困難になっている。表4は、昭和54年に発表された全国157都市における下水汚泥の処分可能年数調査(建設省)の結果である⁴⁾。これに示されているように70%近くの都市が

表3 下水汚泥の処分状況³⁾ (昭和55年11月1～56年10月31日)

陸上埋立	海面埋立	有効利用	その他	合計
999 (42)	868 (36)	353 (15)	177 (7)	2,397 (100)

(単位：1000m³)

表4 下水汚泥の処分可能年数⁴⁾

処分可能年数	0-5	5-10	10-15	15-20	20-	計
都市数	104	22	15	2	14	157
(%)	(66)	(14)	(10)	(1)	(9)	(100)

5年以内に埋立地が確保できなくなり、下水汚泥の処分が不能になることが判明し、埋立てに代わる処分方法の確立が緊急の課題となっている。

現在、埋立てに代わる安定した処分方法として下水道関係者から注目されているのが緑農地を利用した処分方法である。これは土壤の有機物分解能を利用しようとするものである。すなわち、下水汚泥は、下水中の固形物や汚水の浄化に働いた生物体からなり、有機物が主体である。土壤中には多数の生物が生息し、有機物を分解している。下水汚泥の有機物も土壤生物の働きによって分解されることが広く知られている。これが下水汚泥の緑農地利用が注目されている一つの理由である。

第二の理由は、我が国の農業がかかえている問題にある。我が国の農耕地は、長年にわたる化学肥料の連用によって土壤の有機物が減耗し、地力の低下が指摘されていた。下水汚泥の処分が問題視されはじめた時期と時を同じくして有機物の補給によって地力を回復しようとする運動（土づくり運動）が提唱されはじめた。この土づくりのための有機物として下水汚泥を利用しようとする考え方が起こってきた。

第三の理由としては、世界的な資源問題があげられている。現在の食糧生産は、化学肥料によって支えられているといっても過言ではない。しかし、化学肥料は、資源の枯渇が憂慮されるような状況にある。なかでもリン酸肥料の原料となるリン鉱石については次のように見通されている⁵⁾。

全世界の可採埋蔵量（現在の技術で経済的に採掘できる量）は、250～350億tとされている。1977年の世界のリン鉱石生産量は、1.3億tであり、生産量は毎年約5%の伸びを示している。この比率で生産量の伸びが続くとすれば40～50年でリン鉱石は消費されてしまう計算となる⁵⁾。

このような事態に対応するために国連食糧農業機関（FAO）は、1974年に「有機物資源の利用に関する会議」を開催した。この会議は、化学肥料に代わる肥料資源として各種の有機物を可能な限り植物生産・食糧生産に利用しようという提言を出した⁶⁾。この有機物にはこれまで植物生産

に利用されてきた堆肥、家畜や人間のし尿、魚粉などが含まれるが、この他に生活や都市あるいは産業活動によって生じた廃棄物についても利用可能なものはこれに含まれている。利用可能な廃棄物の一つとして下水汚泥が考えられている。それは、下水汚泥が単独で施用された場合でも施用量によっては化学肥料と同等の植物生産力を示し、優れた肥料としての効果（肥効）をもつからである（図3）⁷⁾。ただし、下水汚泥に含まれる肥料成分のうち、カリウムの含有量は、窒素やリンに比べて著しく低く、下水汚泥の単独施用ではカリウムが不足するために、カリウム肥料の施用が不可欠である。

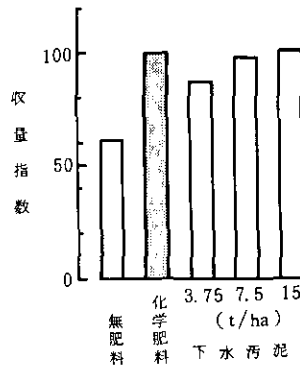


図3 下水汚泥を施用した淡色黒ボク土におけるナスの収量（果実部）⁷⁾

このように下水汚泥の緑農地利用は、ただ単に廃棄物の処分ということだけではなく、省資源、省エネルギーにも結びつく重要な課題となっている。

5.3 課題

前述のようにFAOは、植物生産に有機物を可能な限り利用することを提言しているが、廃棄物については、植物生産に有効ならば何でも使用して良いとしているわけではない。廃棄物の利用に当たっては、

- (1) 重金属や有害菌類などを含み人間や動物の健康に害を与えたり、
- (2) 植物生産や環境などに悪い影響を与えるもの

には注意する必要があることを指摘している。この指摘は、廃棄物の利用に当たっては、これらの留意点を十分に検討した上で適正な利用の指針を確立する必要があることを示している。

下水汚泥についてみると、含有される重金属等有害金属元素の問題については、それが植物の生育を阻害する因子であると同時に植物に吸収されたものが人間や家畜の健康に影響を与える可能性があることから欧米における下水汚泥の緑農地利用の先進国では、重金属についてのガイドラインや一部の国では法律に基づく規制^{2,3)}が設けられている。我が国においては前述の肥料取締

法による規制がある他に北海道、群馬県、東京都、佐賀県及び大分県において利用の指針が出されている²⁾。また、環境庁においても近く出される予定である。しかし、有害菌類による人間や動物の健康への影響や利用に伴う環境影響に関する研究は、ほとんど行われていない。

下水汚泥の緑農地利用を安定した処分方法とし、また、下水汚泥を化学肥料に代わる肥料資源とするならば、同一の土地に長期にわたって施用されるはずである。したがって、長期にわたる利用がもたらす影響を把握する必要がある。しかし、この点に関する研究も不足している。

本特別研究では、1 研究の目的の項で述べたように長期にわたる下水汚泥の緑農地利用が土壌環境と土壌をとりまく大気及び陸水環境に与える影響を総合的に把握し、これらの成果に基づいて適正な利用の指針を立案することを目的として昭和 56 年度より研究を開始した。

6 研究成果の概要

本特別研究は、昭和 56～59 年度の 4 年間にわたって行われるが、56～57 年度における研究によって得られた成果の概要を以下に述べる。

本特別研究において供試されている下水汚泥は、生活廃水处理場から発生した未消化の脱水ケーキ（脱水助剤として消石灰と塩化第二鉄を使用）の天日乾燥物である（以下生活廃水汚泥と略記）。この汚泥を施用した畑土壌に関して次の実験が実施されている。

① 制御環境下の畑地用地温制御大型ライシメーター実験：供試汚泥の粉砕物を多量（乾物として 50 t/ha/回）に連用（年 2 回、6 か月間隔）した淡色黒ボク土における実験

② ほ場実験：供試汚泥を有姿のまま連用（乾物として最大 15 t/ha/回）した淡色黒ボク土における実験

③ 有底枠（屋外ライシメーター）実験：供試汚泥を有姿のまま連用（乾物として 7.5 t/ha/回）した砂質土（川砂で代用）、淡色黒ボク下層土、沖積水田下層土及び黒ボク表層土における実験

以上は、いずれも汚泥の単独施用実験である。汚泥と化学肥料の組み合わせ施用土壌については、④ 現地調査（北海道、神奈川、兵庫、山口、大分）が実施されている。

6.1〔課題 1〕汚泥の連用が土壌の性質及び植物生育に与える影響について

(1) 汚泥連用土壌の物理性の解明

下水汚泥連用土壌の物理的特徴を明らかにするために公害研内の畑ほ場（実験②）の無肥料、化学肥料及び生活廃水汚泥（施用量と施用回数の違う 3 処理区）施用土壌について土質試験（土粒子比重、含水量、粒度、コンシステンシー、単位体積重量、透水及び締固め試験）が行われたが、5 処理区とも各土質試験項目において差が認められていない。

(2) 汚泥連用土壌の物理性の変化と水分の動き

下水汚泥連用ほ場の表層土が乾燥する現象の機構を解明するために地温制御大型ライシメーター（実験①）を用いて、土壌の物理性の変化及び土壌水分の動きについて調査されている。汚

泥連用土壌では団粒の形成が顕著であり、粗孔げきの割合が増加すること、毛管水の動きが減少するため土壌表面のみが乾燥し、土面からの蒸発量が減少する結果、浸透水量が増加することが明らかにされている。

(3) 汚泥連用土壌の化学性

実験①～④においてカルシウム含有量の多い汚泥の連用は、土壌 pH (H₂O) を上昇させるのに対して高分子凝集剤を使った汚泥の連用は、土壌 pH を低下させることが明らかにされている。特に、後者の場合には、亜硝酸酸化細菌の生育を抑制するレベル (5 以下) となり、同菌数は、石灰汚泥を施用した場合より著しく低い菌数を示すことが明らかにされている。

(4) 汚泥連用土壌の微生物性

畑地用地温制御大型ライシメーターを用いた生活廃水汚泥の多量連用試験 (実験①) において汚泥施用 4 回目以降は汚泥の施用に伴う微生物数の増加が限界に達し、糸状菌と放線菌数はむしろ減少する傾向にあることが明らかにされている。

ほ場実験及び現地調査においては汚泥の連用回数の違いによる微生物数の差は認められていない。

また、多量連用土壌 (7 回目の施用後) の嫌気性微生物数 (硝酸還元菌及び脱窒菌) が測定され、汚泥施用後 3 日目に施用前の 10 倍以上に増加し、その後も長期間にわたって高菌数が維持されることが明らかにされている。

(5) 植物の生育

実験①の汚泥多量連用淡色黒ボク土に栽培されたコマツナの地上部収量は、夏期に高く、冬期に低いという変動を示しつつ汚泥施用回数の増加に伴って低下した。夏期には、若葉の先端が壊死する現象が認められた。

生活廃水汚泥施用土壌 (ポット試験) に栽培されたコカブについて、施用量が乾物として 50 t/ha までは、生育障害が認められないが、100 t/ha になると葉の縮れと葉緑の壊死現象が発現することが認められた。

生活廃水汚泥を単独で施用した水田土壌 (小型ライシメーター実験) における水稻の生育は、施用量の増加に伴って移植後初期の伸長と分けつが抑制されるが、生育後期には回復し、分けつ数、もみ重とも施用量に応じて増加すること及び生活廃水汚泥の単独施用でも化学肥料とほぼ同等の玄米収量が得られることが明らかにされている (本報告書 報文 1)。

水田用地温制御大型ライシメーターの土壌充てんが完了し、昭和 57 年度には水稻の均一栽培が行われた (報文 9)。ライシメーターの周縁部の株については水稻収量にライシメーター間に差が認められるが、中央部の株については水稻収量にライシメーター間差がほとんど認められないことが明らかにされた。

6.2〔課題2〕汚泥成分の土壤環境中での挙動について

(1) 畑土壤における汚泥の分解性

汚泥連用土壤における汚泥の分解特性を明らかにするために汚泥施用歴の異なる土壤(実験③)に新しく生活廃水汚泥を添加して汚泥炭素の分解と窒素の分解(無機化)がビン培養法によって比較されている(報文2)。汚泥炭素及び窒素の分解速度と分解量は、過去における汚泥の施用歴に関係なくほぼ一定であること、硝酸化成だけは連用を重ねた土壤ほど早めに起こる傾向にあると、石灰凝集汚泥の連用によってpHが8.5を越えた土壤では、硝酸化成が遅れ、大気中にアンモニアが揮散することが明らかにされている。

畑地用地温制御大型ライシメーター(実験①)を用いて、土壤層位別(10~105cm)に土壤空気が経時的に採取され分析され(報文5)、汚泥施用区の上層(10~55cm)では無施用区の当該層位よりも酸素(O_2)濃度が低く、二酸化炭素(CO_2)濃度が高いこと、汚泥施用区の10~30cm層では、汚泥の施用後 O_2 濃度が急減し、同時に CO_2 濃度が著しく高まること、植物根圏では CO_2 濃度が高いが、それ以下の層では裸地の当該層位より好氣的に保たれていることが明らかにされた。

上記ライシメーターでは、汚泥施用層(0~10cm)におけるガス組成(N_2 , O_2 , CO_2)と土壤微生物数(7種)との関連が調べられ(報文6)、汚泥施用直後の CO_2 濃度の上昇と O_2 濃度の減少は、有機栄養細菌群の変動とほぼ一致すること、土壤中の CO_2 濃度と微生物数との関係の解析結果から好気性細菌と亜硝酸酸化細菌数の変化から土壤空気中の CO_2 濃度を予測できることが明らかにされている。さらに、この成果を応用して、土壤微生物数のみが測定されている場合の汚泥中炭素の分解についての予測が試みられている。

(2) 土壤残留有機物の形態

下水汚泥の施用は、土壤中の各種形態の有機物を増加させるが、水溶性有機物は汚泥施用3か月後以降に減少し、1年後には無施用土壤とほぼ同量となるのに対して脂質及び腐植物質は1年後も無施用土壤より多量に存在することが認められている(報文4)。

(3) 汚泥中重金属の形態

汚泥に含まれる重金属の存在形態を明らかにするために各種の抽出溶媒を用いて生活廃水汚泥中の重金属が抽出された。亜鉛の形態は、不溶態>置換態>有機態>キレート態>希酸可溶態=水溶態の順であることが明らかにされたほかクロムとマンガンの存在形態についても検討されている。

(4) 畑土壤における汚泥成分の地下浸透

実験①において表層土に施用された生活廃水汚泥中の成分について地下への浸透状況が追跡されている。汚泥の施用によって下層土の土壤溶液中の各種物質濃度は上昇する。特に硝酸(NO_3^-)や塩素(Cl^-)など陰イオンの濃度の上昇が著しく、陽イオンではナトリウム(Na^+)やカリウム(K^+)などの1価イオンよりカルシウム(Ca^{2+})やマグネシウム(Mg^{2+})などの2価イオンの濃度の上昇が大きいことが明らかにされている。また、ライシメーター底部(深さ230cm)から採

取した浸透水中の硝酸濃度は、汚泥を初めて施用してから22か月目に上昇し始めた。

自然条件下における汚泥中成分の地下浸透を把握するために実験②の各処理区から層位別に土壤溶液が採取され、分析されている。汚泥成分の地下浸透速度は降雨と、土壤溶液中の成分濃度は汚泥の施用量と植物栽培の有無と、土壤溶液中の成分組成はほ場の施肥来歴とそれぞれ密接な関係があることが明らかにされた。

化学肥料と生活廃水汚泥がそれぞれ単独で連用されている有底枠（実験③）の浸透水が経時的に分析され、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、Cl、Ca、Mg、K、Na、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 PO_4 及び $\text{NO}_2\text{-N}$ の濃度と前6成分の溶出パターンが明らかにされている（資料3）。

(5) 生活廃水汚泥中成分の大気への揮散

汚泥連用土壤から大気への炭素(CO_2)と窒素(NH_3 、 N_2O)の揮散が畑地用地温制御大型ライシメーターを用いて測定されている。これら3種のガスともその発生量は汚泥施用直後から翌日にかけて最大になり、その後低下していくこと、かん水（土壤水分の増加）によって急増すること、夜間は昼間に比べて低下することが明らかにされている。また、汚泥施用後1か月間の積算発生量($\text{CO}_2\text{-C}$ 、 $\text{N}_2\text{O-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$)が施用全炭素及び窒素に占める割合が計算されている。

(6) 土壤中の浸透流に伴う物質の移動に関する理論的解析

汚泥の施用が実際に広域的に適用される場合を想定して選定されたモデル畑地（長野県諏訪郡原村）において物質移動の基本となる地下水位と水質の現地観測が行われているとともにボーリングによる土質調査によって透水層、透水係数等が明らかにされた。これらに基づいて数理モデルが組み込まれ浸透流のシミュレーションが可能となっている。

地表から地下水に至る鉛直不飽和浸透は、汚泥成分の移動に対して重要な役目を担うが、これを詳細に解明するために畑地用地温制御大型ライシメーターに降雨発生装置を設置し、設定降雨パターンの発生テストが行われた。

6.3【課題3】汚泥の土壤還元と陸水環境影響について

(1) 汚泥施用畑土壤の浸透水が藻類の生育に与える影響

実験③の有底枠試験地（土層厚1.2m）において自然の降雨によって枠底部から浸出した浸透水が採取され、その下水汚泥の潜在生産能（AGP）が測定されている。化学肥料あるいは汚泥を連用した土壤の浸透水を無添加、リン添加、リンとEDTA添加の3培養系において *Selenastrum capricornatum* を供試藻類としてAGP試験が行われた。各土壤の浸透水のAGPは、土壤の種類によって異なったが、化学肥料区と汚泥区間の差はほとんど認められないこと、無添加系では砂質土を除いて藻類は増殖しないのに対してリンとEDTAを添加した場合にのみ高いAGPが得られることが明らかにされた。これらの結果は、汚泥あるいは化学肥料が施用された土壤の浸透水のみでは藻類は増殖できず陸水域の富栄養化に及ぼす影響は少ないことを示唆しているものと考えられている（報文7）。

(2) 汚泥施用水田土壌の田面水が藻類の生育に与える影響

生活廃水汚泥を乾物として 2.5~20 t/ha の割合で施用した水田土壌と水稻に対する標準施肥量の化学肥料を施用した水田土壌（小型ライシメーター実験）から得られた浸透水と田面水について AGP が測定されている（供試藻類 *Selenastrum capricornatum*）。その結果、両土壌の浸透水、田面水ともリン、窒素、EDTA の添加がなければ藻類は生育しないことが明らかにされている。

6.4 [課題 4] 汚泥の土壌還元が環境に与える影響の総合的解析と還元基準に関する検討

実験③で得られた汚泥あるいは化学肥料を連用した 4 種の土壌から浸出した浸透水中成分の分析データについて本格的な解析に先立ってデータの統計的特徴を抽出するためのデータモニタリングが行われている。対象データは、経時的に得られた 10 分析項目（pH, NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N, PO₄, Cl, K, Na, Ca, Mg）の各 816 個のデータである。

これらのデータについて土壌の種類 4×処理（汚泥/化学肥料）2 の 8 層に層別し、各層ごとに対数変換処理及びスミルノフ・グラブス検定による異常値探索と異常値削除処理を行った結果、各層ごとの各分析項目のデータの歪度・尖度は、これらの処理前に比較して小さく、正規分布に近似することができた。それらのデータを用いて、汚泥区と化学肥料区の各データに対する主成分分析を施した結果、沖積水田下層土と黒ボク土では両区の違いが著しく、砂質土と淡色黒ボク土では顕著な違いが見られず、10 分析項目を総合的に評価した場合、前二土壌における汚泥の影響が大きいことがうかがわれた。

以上が 2 年間に得られた研究成果の概要である。本報告書には、これらの成果のうちこれまでにとりまとめられたものを集録した。集録論文の概要は、前記研究成果の概要の中に記述し、カッコ内に目次に示した報文番号を示した。また、本特別研究にかかわるデータを資料編に集録した。表 5 には学会等における成果発表の状況を示した。

表5 発表リスト

(講演)					
番号	発表者	題 目	学会等名称	開催都市名	年月
1	広木幹也・久保井徹・服部浩之・藤井國博	下水汚泥の土壌施用が土壌環境に及ぼす影響 (第17報) 土壌水分の挙動	日本土壌肥料学会昭和57年度福岡大会	福岡	57.4
2	服部浩之・久保井徹・広木幹也・藤井國博	下水汚泥の土壌施用が土壌環境に及ぼす影響 (第18報) 連用土壌における汚泥の分解	日本土壌肥料学会昭和57年度福岡大会	福岡	57.4
3	藤井國博・山口武則・久保井徹・広木幹也・服部浩之	下水汚泥の土壌施用が土壌環境に及ぼす影響 (第19報) 下水汚泥施用砂質土の浸透水中硝酸態窒素の経時変化	日本土壌肥料学会関東支部大会	水戸	57.9
4	広木幹也・服部浩之・藤井國博・久保井徹	下水汚泥の土壌施用が土壌環境に及ぼす影響 (第20報) 各種土壌における微生物フロアの季節変動	日本土壌肥料学会関東支部大会	水戸	57.9
5	山口武則・高木嘉明・藤井國博・麻生末雄	下水汚泥の土壌施用が土壌環境に及ぼす影響 (第21報) 下水汚泥のZn, Mn, Cuの形態と植物による吸収	日本土壌肥料学会昭和58年度京都大会	京都	58.4
6	K. Fujii, M. Hiroki	Microflora in soils amended with sewage sludge	Int. Symp. Land Appl. Sewage Sludge	Tokyo	57.10
7	服部浩之・向井 哲・藤井國博	下水汚泥の土壌施用が土壌環境に及ぼす影響 (第22報) 土壌有機物の量と質に及ぼす影響—水溶性有機物及び脂質について—	日本土壌肥料学会昭和58年度京都大会	京都	58.4
8	向井 哲・服部浩之・藤井國博	下水汚泥の土壌施用が土壌環境に及ぼす影響 (第23報) 土壌有機物の量と質に及ぼす影響—腐植酸, フルボ酸について—	日本土壌肥料学会昭和58年度京都大会	京都	58.4
9	広木幹也・久保井徹・鷺沢清司・豊田敏治・服部浩之・藤井國博・松坂泰明	下水汚泥の土壌施用が土壌環境に及ぼす影響 (第24報) 汚泥成分の地下浸透(その2) 長期的観測	日本土壌肥料学会昭和58年度京都大会	京都	58.4
10	藤井國博・山口武則・袴田共之・久保井徹・広木幹也・服部浩之	下水汚泥の土壌施用が土壌環境に及ぼす影響 (第25報) 下水汚泥連用土壌からの硝酸態窒素の溶脱	日本土壌肥料学会昭和58年度京都大会	京都	58.4
11	袴田共之・藤井國博・廣嶋昭太	下水汚泥の土壌施用が土壌環境に及ぼす影響 (第26報) 会話型プログラム(CDA1)による浸透水データの解析	日本土壌肥料学会昭和58年度京都大会	京都	58.4
12	久保井徹・陽 捷行・広木幹也・服部浩之・藤井國博・福士定雄	下水汚泥の土壌施用が土壌環境に及ぼす影響 (第27報) 連用土壌からの窒素と炭素の揮散—ライシメーター試験—	日本土壌肥料学会昭和58年度京都大会	京都	58.4

(印刷)

番号	発表者	題 目	掲載誌	巻(号)	ページ	刊 年
1	藤 井 國 博	「汚泥の土壌還元とその環境影響に関する研究」の概要について	再生と利用	5(16)	30-33	1982
2	藤 井 國 博	汚泥の土壌還元とその環境影響に関する研究	再生と利用	6(21)	43-48	1983

7 今後の展望

本特別研究の研究期間は、昭和56～59年度の4年間である。本報告書には57年度までの成果を収録したが研究は59年度まで継続される予定である。

〔課題1〕においては、下水汚泥を連用した各種の土壌の物理的、化学的性質と土壌微生物フロアの長期にわたる継続的な調査が行われており、これによって下水汚泥の連用に伴う土壌環境と土壌生態系の変化並びにこれを反映する植物の生育の変化が解明されるものと期待される。さら

にこれらの研究を通じて土壌-植物系からみた下水汚泥の施用限界も解明しうるものと考えている。

〔課題2〕については、本特別研究の主要テーマであり、今後も活発な研究が展開されるものと予想される。それによって下水汚泥に含まれる諸物質の土壌環境中における挙動(土壌から植物、地下水、大気あるいは水域への移動と土壌残留)と物質収支が解明されると同時に得られた成果の解析とモデル実験の成果から土壌環境における物質の挙動についてのモデルが構築され、それに基づく水域や大気への負荷の予測シミュレーションが可能となるものと期待している。

〔課題3〕では、水域の富栄養化の面からみた下水汚泥施用土壌の浸透水に関する評価に加えて下水汚泥の水田土壌への施用と水域の富栄養化の関係について田面水及び浸透水を対象に評価されるものと予想される。これらの研究によって下水汚泥の土壌施用が土壌をとりまく陸水域に与える汚濁負荷が解明しうるものと考えられる。

〔課題4〕では、課題1~3で得られた個々のデータの解析に基づき本報告書の報文6におけるような課題相互間の関連性についての解析が進められ、それに基づいて下水汚泥の土壌施用に伴う環境影響が多角的・総合的に評価されるものと予想している。さらに、これらの検討に基づいて下水汚泥の農耕地利用の基準が提案できれば本特別研究は、その目的をすべて達成したことになる。現段階ではそれを期待している。

本特別研究を実施するに当たっては、環境庁はじめ関連する分野の多数の方々のご協力のご助言を頂いている。関係各位に深謝の意を表するとともに今後のご協力、ご助言をお願い申し上げます。

引用文献

- 1) 松崎敏英・和地 清(1983): わが国における下水汚泥の農地還元, 下水汚泥の緑農地利用—国際シンポジウム会議録, 下水汚泥資源利用協議会, 26-42.
- 2) 汚泥の農用地等還元問題研究会(1983): 汚泥の農用地等への還元問題について, 1-43.
- 3) Association for Utilization of Sewage Sludge (1982): International Symposium on Land Application of Sewage Sludge, 1-352.
- 4) 遠山 啓(1979): 下水汚泥の資源利用—その将来方向と課題, 日本下水道新聞, 昭和54年10月29日.
- 5) 安藤純平(1983): リン資源の将来とわが国の進むべき方向, 日本土壤肥料学雑誌, 54, 164-169.
- 6) 熊沢喜久雄(1976): 環境・資源・地力問題としての汚泥の緑農地還元の意義, 汚泥の緑農地還元肥料化対策資料集, フジ・テクノシステム, 3-11.
- 7) 久保井徹・服部浩之・藤井國博(1980): 下水汚泥の施用によるほ場環境の変化(I), 下水汚泥の施用がナスの生育に与える影響, 国立公害研究所研究報告, 第14号, 159-175.

II. 報 文

II-1

下水汚泥施用土壌における水稻の生育及び植物体成分
**Growth and Element Contents of Rice Plant Cultivated on Paddy
Soil with Application of Sewage Sludge**

広木幹也¹・藤井國博¹

Mikiya HIROKI¹ and Kunihiro FUJII¹

Abstract

Effect of sludge application to paddy soil on the growth of rice plant was studied. Limed domestic sewage sludge (2.5, 5, 10 and 20 t/ha) and chemical fertilizers were applied to alluvial soil contained in five lysimeters. Sewage sludge and chemical fertilizers were not applied to soil in one lysimeter used as a control. Sludge and fertilizers were applied to soil two weeks before transplanting of rice plant, which was grown under paddy field conditions. Growth, yield and element concentration of rice plant in each lysimeter were determined and the following results were obtained.

1. Initial growth of rice was slower in the lysimeters to which sewage sludge had been applied than in that which received chemical fertilizers and in the control. In latter period, however, growth was more satisfactory in the lysimeters to which sewage sludge had been applied than in the control.
2. Sludge application increased the number of panicles in one plant, and glumous flowers in a panicle. Thus the ratio of panicle weight to straw weight (P/S ratio) in lysimeters to which sewage sludge had been applied was larger than that in the lysimeter where chemical fertilizers had been applied and in the control.
3. Sludge application at the rate of 10 and 20 tons/ha resulted in lodging of rice plant due to the excess of nitrogen.
4. Sludge application decreased P and Mn concentrations in rice plant. Plant uptake of Mn also decreased with sludge application.
5. Copper and Cd concentrations in rice plant were lower in the lysimeters to which sewage sludge had been applied than in those without application of sludge.

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 はじめに

下水汚泥の緑農地への施用が作物の生育に及ぼす影響に関する試験は、既に数多く行われている。しかし、畑作物への影響に関する試験¹⁻⁴⁾に比較して、我が国の農地の多くを占める水田と主要作物である水稲に関する試験は少なく、十分な成果が蓄積されているとはいえない。一方、土壌中での有機物の分解の様相は畑条件下と湛水条件下では大きく異なり、特に、下水汚泥のように易分解性の物質を多く含んだ有機物を水田に施用した場合については、その分解過程に不明な点も多い。また、水田における高度な稲作技術はち密な肥培管理によって成り立っていることから、畑作物において得られた知見から水稲の生育、収量への影響を推し測ることは無理がある。そこで本研究では、水田土壌を充てんした小型ライシメーターに、石灰凝集剤を使用した下水汚泥を水稲の移植直前に施用し、水稲の生育過程、収量及び植物体成分に及ぼす影響について調査した。

2 実験方法

2.1 実験装置

ステンレス製の小型ライシメーター（小糸工業製 SR-280 LH 型）を用いた。これは一辺 75 cm の方形のライシメーターで深さは 60 cm である。各ライシメーターごとにマリOTT式の定水位装置が付属し、タンクより水を一定水位に供給できる。田面水中での藻類の発生及び株間での雑草の繁殖を抑えるため、ライシメーター上面を、水稲の植栽位置のみ孔をあけた 5 mm 厚の塩ビ板でおおった。ライシメーター及び遮光板の概要を図 1 に示した。ライシメーター及び田面水供給タンクは自然光温室内に設置した。温室内の環境条件は温度 25°C、湿度 60% に設定した。

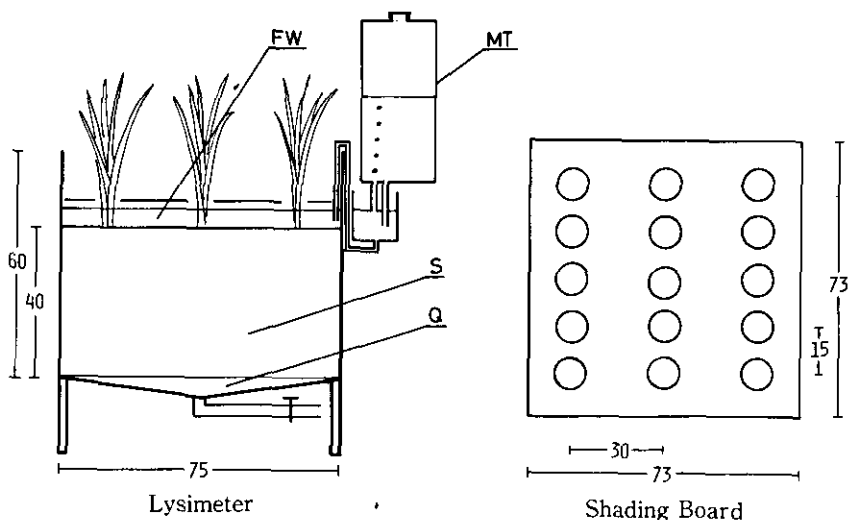


図 1 実験装置概略図 (単位cm)

Fig. 1 Experimental apparatus (cm)

S; soil, Q; quartz sand, FW; flooded water, MT; mariotte tank

2.2 供試土壌及び供試汚泥

供試土壌は、茨城県筑波郡筑波町より採取した水田作土を用いた。ライシメーター底部に石英砂を水平に敷きつめ、その上に 40 cm の厚さに土壌を充てんした。汚泥は、取手市内住宅団地の廃水処理場より分与された未消化の脱水ケーキ³⁾を供試した。この汚泥は脱水助剤として消石灰と塩化第二鉄を用いている。汚泥は昭和 55 年 10 月 21 日に採取後、風乾し、ウイレイ式粉碎機にて粉碎して使用した。汚泥中の成分含量を表 1 に示した(一部、山口ら³⁾より引用)。

表 1 供試汚泥の成分組成
Table 1 Properties and chemical composition of sludge used in the experiment

pH (H ₂ O)	T-C (KCl) (%)	T-N (%)	T-P (%)	T-K (%)	T-Mg (%)	T-Ca (%)	T-Mn (%)	T-Fe (%)	T-Cu (%)	T-Zn (%)	
11.9	11.8	28.6	3.60	0.083	0.066	1.33	10.40	0.08	5.0	0.015	0.053

2.3 試験設計

汚泥の施用量は 1 ha 当たり乾物で 2.5 t, 5 t, 10 t 及び 20 t の 4 段階とし、対照として無肥料区と化学肥料区を設けた。六つの処理区は各 1 連で実験を行った。化学肥料区には硫酸アンモニウム、過リン酸石灰、塩化カリウムをそれぞれ 1 ha 当たり 855 kg, 300 kg, 346 kg 相当量を試験開始前に施用した。これらは肥料成分として窒素 (N) 105 kg, リン (P) 50 kg (過リン酸石灰中の可溶性リン酸を 17% として算出⁵⁾), カリウム (K) 100 kg に相当する。汚泥及び化学肥料は表層 10 cm の土壌に施用した。

2.4 試験日程

昭和 57 年 6 月 1 日に汚泥及び化学肥料を土壌に施用した。6 月 8 日に湛水し、6 月 16 日にシロカキ、6 月 17 日に水稻稚苗 (品種: 日本晴, 6 月 1 日に苗箱に播種, 育苗) を移植した。10 月 3 日以降は畑状態とし、11 月 12 日に収穫するまでの間、稲が枯れない程度に適時かん水した。湛水期間中は、ライシメーター底部の排水口より 1 日最高 200 ml の浸透水を採取した。200 ml の浸透水が得られない場合は、底部の排水口を開放し、可能な限り多量の浸透水を採取した。

2.5 植栽位置

南北方向 15cm, 東西方向 30cm 間隔で、1 ライシメーターにつき 15 株を 2 本立てで植えた (図 1)。

2.6 生育調査

7 月 1 日 (移植後 2 週目), 7 月 15 日 (同 4 週目), 7 月 30 日 (同 6 週目), 8 月 12 日 (同 8 週目), 8 月 26 日 (同 10 週目) に草丈及び分けつ数を測定した。7 月 5 日, 16 日, 31 日及び 8 月 18 日に葉齢を測定した。

2.7 収量調査

収穫時に草丈、穂数、穂部重量及び茎葉部重量を測定した。穂部は室温で風乾し、茎葉部は 80°C で乾燥した後、乾物重を測定した。穂部については、1 穂えい花数、登熟歩合、千粒重を測定した。

2.8 植物体成分の分析

元素分析は、茎葉部、穂部及び玄米のそれぞれについて行った。茎葉部については、ライシメーター中央の 3 株の乾燥物を粉碎して分析用試料とした。穂及び玄米については、全株 (15 株) の穂を合わせ、その一部を乾燥、粉碎して分析用試料とした。分析した元素は、炭素、窒素、リン、カリウム、マグネシウム、カルシウム、マンガン、鉄、アルミニウム、銅、カドミウム及びホウ素の 12 元素である。炭素及び窒素は元素分析計 (Carlo Erba 社 Model 1106) によって定量した。カドミウムは、硝酸一過塩素酸で湿式分解後、フレイムレス原子吸光光度計 (島津 AA-640 型、GFA-2 型) によって定量した。他の元素は、硝酸一過塩素酸で湿式分解後、プラズマ発光分光光度計 (Jarrel-Ash Atomcomp., Model 975) によって定量した。なお、プラズマ発光分光光度計による測定は、当研究所計測技術部分析室に依頼した。

3 結果

3.1 生育経過

3.1.1 草丈の推移

各処理区における草丈の推移を表 2 に示した。

表 2 下水汚泥施用土壌における水稲草丈の増加
Table 2 Plant height of rice cultivated in soil with application of sewage sludge

treatment	weeks after transplanting (date)					
	2 (7/1)	4 (7/15)	6 (7/30)	8 (8/12)	10 (8/26)	21 (11/11)
Control*	46.1 (1.00)**	58.6 (1.00)	78.5 (1.00)	96.9 (1.00)	102.8 (1.00)	104.6 (1.00)
Chemical fertilizers	48.2 (1.04)	75.4 (1.29)	100.6 (1.28)	116.5 (1.20)	121.5 (1.18)	130.3 (1.25)
Sludge 2.5 t/ha	43.5 (0.94)	65.6 (1.12)	84.0 (1.07)	101.2 (1.04)	109.5 (1.06)	114.7 (1.10)
Sludge 5.0 t/ha	36.6 (0.79)	56.6 (0.97)	84.2 (1.07)	104.7 (1.08)	108.5 (1.05)	118.0 (1.13)
Sludge 10.0 t/ha	32.6 (0.71)	55.3 (0.94)	78.7 (1.00)	102.1 (1.05)	108.2 (1.05)	126.4 (1.21)
Sludge 20.0 t/ha	30.2 (0.65)	55.1 (0.94)	75.9 (0.97)	98.9 (1.02)	104.9 (1.02)	128.0 (1.22)

*; without any fertilizer and sludge

**; growth index based on the growth of the control

移植2週後(7月1日)には汚泥区の草丈はいずれも無肥料区より低かった。しかし、2.5 t区は移植4週後(7月15日)、5 t、10 t区は移植6週後(7月30日)、20 t区は移植8週後(8月12日)に無肥料区より高くなり、以降は汚泥区の草丈はいずれも無肥料区より高かった。

汚泥区の草丈を化学肥料区のそれと比較すると、化学肥料区は全生育期間を通じて汚泥区より高かった。

汚泥施用量と草丈の関係をみると、移植4週後までは施用量の少ない順(2.5 t、5 t、10 t、20 t区の順)に草丈は高かったが、収穫前(11月11日)には順位は全く逆転した。

3.1.2 分けつ数の推移

各処理区における分けつ数の推移を表3に示した。

移植2週後には汚泥施用区の分けつ数はいずれも無肥料区のそれより少なかった。しかし、2.5 t区では移植4週後、5 t、10 t区では移植6週後、20 t区では移植8週後には無肥料区より分けつ数は多くなった。

化学肥料区と汚泥区を比較すると、移植10週後に汚泥20 t区の分けつ数が化学肥料区より多くなったほかは、常に化学肥料区は汚泥区より多いか同程度であった。

汚泥施用量の多少と分けつ数を比較すると、移植2週後では施用量の増加に伴って分けつ数は少なく、特に20 t区では、移植時と比べて分けつの増加は認められなかった。しかし、8週後には施用量の増加に伴って分けつ数が多くなった。

各処理区において分けつが最も活発に行われた時期は、無肥料区、化学肥料区、汚泥2.5 t及び

表 3 下水汚泥施用土壌における水稻の分けつ

Table 3 Tillering of rice plant cultivated in soil with application of sewage sludge

treatment	weeks after transplanting (date)				
	2 (7/1)	4 (7/15)	6 (7/30)	8 (8/12)	10 (8/26)
Control*	3.7 (1.00)**	11.7 (1.00)	14.9 (1.00)	15.1 (1.00)	14.7 (1.00)
Chemical fertilizer	4.6 (1.23)	17.6 (1.50)	23.5 (1.58)	23.3 (1.54)	22.7 (1.55)
Sludge 2.5 t/ha	2.3 (0.61)	13.0 (1.11)	17.9 (1.21)	17.4 (1.15)	16.9 (1.15)
Sludge 5.0 t/ha	2.2 (0.59)	10.5 (0.89)	17.3 (1.17)	18.3 (1.21)	17.4 (1.19)
Sludge 10.0 t/ha	2.1 (0.55)	8.7 (0.74)	16.8 (1.13)	19.9 (1.32)	19.6 (1.34)
Sludge 20.0 t/ha	2.0 (0.54)	6.9 (0.59)	14.1 (0.95)	23.0 (1.52)	23.6 (1.61)

* ; without any fertilizer and sludge

** ; growth index based on the growth of the control

5 t区では移植2週後から4週後の間であり、汚泥10 t区は移植4週後から6週後の間、汚泥20 t区では6週後から8週後の間であった。すなわち、分けつが最も活発に行われる時期は、無肥料区、化学肥料区及び汚泥少量区で早く、汚泥施用量の増加に伴って遅くなる傾向がみられた。

3.1.3 葉齢の推移

各処理区における主稈の出葉数（葉齢）の推移を表4に示した。

移植18日後（7月5日）には汚泥区の葉齢はいずれも無肥料区より少なかったが、汚泥2.5 t及び5 t区では、移植29日後、10 t区では44日後、20 t区では62日後に、それぞれ無肥料区より多くなった。

化学肥料区と汚泥区を比べると、移植29日後までは、各汚泥区は化学肥料区より少なかったが、62日後には汚泥5 t区が化学肥料区より多くなった。

汚泥施用量の多少と葉齢を比較すると、18日後には2.5 t区が最も葉令が多く、施用量の増加に伴って葉齢は少なくなった。しかし、2.5 t区では、以後の葉齢の増加は他区に比べて小さく、移植44日後には5 t区より、移植62日後には10 t及び20 t区よりも葉齢は少なくなった。

表 4 下水汚泥施用土壌における葉齢の増加
Table 4 Leaf development of rice in cultivated soil with sewage sludge application

treatment	days after transplanting (date)			
	18 (7/5)	29 (7/16)	44 (7/31)	62 (8/18)
Control*	7.05 (1.00)**	8.87 (1.00)	10.76 (1.00)	12.30 (1.00)
Chemical fertilizer	7.34 (1.04)	9.37 (1.06)	11.26 (1.05)	12.90 (1.05)
Sludge 2.5 t/ha	7.02 (1.00)	9.08 (1.02)	10.99 (1.02)	12.57 (1.02)
Sludge 5.0 t/ha	6.95 (0.99)	9.10 (1.03)	11.27 (1.05)	13.15 (1.07)
Sludge 10.0 t/ha	6.54 (0.93)	8.63 (0.97)	10.96 (1.02)	12.90 (1.05)
Sludge 20.0 t/ha	6.47 (0.92)	8.35 (0.94)	10.61 (0.99)	12.81 (1.04)

*; without any fertilizer and sludge

**; growth index based on the growth of the control

以上の結果より、水稻の生育過程に及ぼす汚泥施用の影響を、草丈、分けつ数及び葉齢を指標としてみると、次のように要約される。

① 汚泥施用区では無肥料区に比べ水稻の初期生育は遅れた。施用量が増加するに伴い、影響は甚だしく、また長期に及んだ。

② 汚泥施用区では、初期生育が遅れたにもかかわらず、後期の生育は施用量の多い区ほど良

かった。

③ 化学肥料区は、初期の生育が良好であり、また全生育期間を通じて無肥料区、汚泥施用区より高い生育量を示した。

④ 水稲が最も旺盛に生育する時期は、無肥料区、化学肥料区と比べて、汚泥区では施用量の増加に伴って遅くなった。

3.2 収量調査

収量調査の結果を表5に示した。

草丈、茎葉部重量、穂数、穂重及び地上部重量（茎葉部重量+穂重）はいずれも、化学肥料区及び汚泥区では無肥料区のそれより高く、また汚泥施用区間で比較すると、汚泥施用量の増加に伴って増加した。

化学肥料区と汚泥区を比較すると、草丈、茎葉部重量及び地上部重量は、化学肥料区が汚泥区を上回ったが、穂数、穂重では化学肥料区は汚泥10t区と20t区の間であった。

表 5 下水汚泥施用土壌における水稲の収量
Table 5 Yield of rice cultivated in soil with sewage sludge application

	Control*	Chemical fertilizers	Sludge (t/ha)			
			2.5	5.0	10.0	20.0
plant height (cm)	104.6 (1.00)**	130.3 (1.25)	114.7 (1.10)	118.0 (1.13)	126.4 (1.21)	128.0 (1.22)
dry weight of straws (g/plant)	33.0 (1.00)	60.0 (1.84)	38.5 (1.27)	41.7 (1.43)	43.2 (1.48)	44.8 (1.53)
number of panicles per plant	11.7 (1.00)	19.5 (1.67)	14.1 (1.21)	14.9 (1.27)	17.4 (1.49)	21.5 (1.85)
dry weight of panicles (g/plant)	23.5 (1.00)	48.4 (2.06)	29.7 (1.26)	36.9 (1.57)	47.0 (2.00)	58.8 (2.50)
dry weight of straws and panicles (g/plant)	56.5 (1.00)	108.4 (1.92)	68.2 (1.21)	78.7 (1.39)	90.2 (1.60)	103.6 (1.84)
dry weight of panicles/ dry weight of straws	0.71 (1.00)	0.81 (1.13)	0.77 (1.08)	0.89 (1.24)	1.09 (1.53)	1.31 (1.84)
percentage of bearing tillers	77.1 (1.00)	83.0 (1.08)	78.5 (1.02)	81.4 (1.06)	87.3 (1.13)	91.2 (1.18)
dry weight of one panicle (g)	2.07 (1.00)	2.56 (1.24)	2.15 (1.04)	2.57 (1.24)	2.79 (1.35)	3.06 (1.48)
number of glumous flowers per panicle	76.4 (1.00)	106.7 (1.40)	81.0 (1.06)	96.6 (1.26)	118.2 (1.55)	121.3 (1.59)
Percentage of ripened grains	93.3 (1.00)	90.5 (0.97)	95.2 (1.02)	93.9 (1.01)	90.6 (0.97)	85.2 (0.91)
weight of thousand grains (g)	25.6 (1.00)	24.1 (0.94)	25.4 (0.99)	25.5 (1.00)	25.3 (0.99)	24.6 (0.96)

* : without any fertilizer and sludge

** : index value based on the control

地上部重量のうち穂の占める割合を比較するために、穂/わら比（穂部と茎葉部の重量比）を各処理区ごとに求めると、汚泥施用量の増加に応じて穂の占める割合が増し、10 t 及び 20 t 区では穂重が茎葉部重量を上回った。化学肥料区の穂/わら比は汚泥 2.5 t 区と 5 t 区の間であった。

表 3 における最高分けつ数と収穫時の穂数から求めた有効茎歩合は、無肥料区が最も低く、汚泥施用量の増加に伴って高くなった。化学肥料区は汚泥 5 t 区と 10 t 区の間であった。

1 穂えい花数は、無肥料区が最も少なく、汚泥施用量の増加につれて増加した。化学肥料区は 5 t 区と 10 t 区の間であった。

登熟歩合は、汚泥区では汚泥施用量の増加に伴って低くなった。無肥料区は 5 t 区と 10 t 区の間、化学肥料区は 10 t 区と 20 t 区の間であった。

千粒重は無肥料区が最も高く、汚泥施用量の増加に対して低くなる傾向にあった。化学肥料区は汚泥区よりも低かった。

以上の結果は次のように要約される。

- ① 汚泥の施用によって地上部重量は増加した。特に穂重の増加が著しかった。
- ② 穂重の増加を収量構成要素の点から見ると、有効茎歩合の増加に伴う穂数の増加が大きく寄与し、次いで 1 穂えい花数の増加も寄与しているが、登熟歩合及び千粒重は汚泥施用量の増加に伴って減少した。
- ③ 化学肥料区の地上部重量は汚泥施用区のそれより高かったが、穂重では化学肥料区は汚泥 20 t 区より低く、穂/わら比では汚泥 5 t 区より小さかった。

3.3 植物体成分の分析

水稻茎葉部、穂及び玄米のそれぞれ乾物 1 g 中の元素含量を表 6 に示した。

これらの元素含量を部位別にみると、C, N, P は茎葉部よりも穂、特に玄米中の含量が高かったが、他の元素はいずれも茎葉部の含量が穂及び玄米中の含量より高かった。また、各元素とも茎葉部含量の処理区間差に比較して、穂及び玄米中の含量の処理区間差の方が小さい傾向にあった。

これら元素のうち、処理の相違が含有量に明確な差をもたらしたものは以下の元素であった。

- ① 汚泥区のいずれもが無肥料区より高い元素；N（茎葉部、穂）、K（穂）、B（穂）
- ② 汚泥区のいずれもが無肥料区より低い元素；C（穂）、P（穂）、Mg（玄米）、Fe（穂）、Al（茎葉部、穂）、Cu（茎葉部、穂）、Ca（茎葉部、穂、玄米）、B（茎葉部）
- ③ 汚泥区のいずれもが化学肥料区よりも高い元素；K（穂）
- ④ 汚泥区のいずれもが化学肥料区よりも低い元素；N（茎葉部）、P（穂）、Mn（茎葉部）、Fe（穂）、Al（茎葉部、穂）、Cu（茎葉部、穂）、Cd（玄米）
- ⑤ 汚泥施用量の増加に伴い、含量が増加する元素；C（穂）、N（茎葉部、穂、玄米）、K（茎葉部）、Mg（穂）、Ca（茎葉部）、Fe（玄米）

表 6 下水汚泥施用土壌にて栽培した水稻各部の元素含量

Table 6 Element contents of rice grown in soil with sewage sludge application

treatment		C*	N*	P*	K*	Mg*	Ca*	Mn**	Fe**	Al**	Cu**	B**	Cd**
Straw	Control***	28.7	0.26	0.074	2.69	0.19	0.349	2800	243	605	105	52	0.48
	Chemical fertilizer	29.3	0.92	0.045	3.16	0.22	0.382	3040	198	586	83	41	0.48
	Sludge 2.5 t/ha	28.6	0.29	0.065	2.43	0.21	0.308	2940	182	476	65	44	0.49
	Sludge 5.0 t/ha	30.0	0.49	0.082	2.77	0.20	0.322	1980	178	420	59	40	0.36
	Sludge 10.0 t/ha	28.3	0.48	0.042	2.89	0.20	0.344	1790	183	336	59	35	0.38
	Sludge 20.0 t/ha	30.2	0.80	0.047	3.51	0.25	0.439	1310	244	448	67	38	0.43
Panicle	Control***	36.1	0.84	0.304	0.63	0.12	0.026	239	260	785	76	15	0.37
	Chemical fertilizer	35.6	1.02	0.304	0.60	0.12	0.025	225	193	706	70	17	0.38
	Sludge 2.5 t/ha	34.9	0.86	0.300	0.69	0.11	0.025	261	168	681	66	17	0.34
	Sludge 5.0 t/ha	35.5	0.99	0.287	0.64	0.11	0.022	206	170	590	56	16	0.29
	Sludge 10.0 t/ha	35.7	1.03	0.300	0.67	0.12	0.026	190	164	667	59	17	0.28
	Sludge 20.0 t/ha	36.0	1.26	0.267	0.66	0.12	0.027	156	155	674	61	17	0.32
Brown Rice	Control***	41.7	1.25	0.361	0.37	0.13	0.017	66	31	0	15	0	0.26
	Chemical fertilizer	42.4	1.58	0.349	0.35	0.13	0.018	73	21	0	9	0	0.19
	Sludge 2.5 t/ha	40.8	1.19	0.372	0.37	0.14	0.018	74	17	0	7	0	0.15
	Sludge 5.0 t/ha	42.5	1.52	0.343	0.36	0.13	0.017	57	20	0	11	0	0.19
	Sludge 10.0 t/ha	42.2	1.67	0.328	0.36	0.12	0.021	61	21	0	8	0	0.16
	Sludge 20.0 t/ha	42.1	1.68	0.314	0.31	0.13	0.020	53	22	0	8	0	0.10

* : % dry matter

** : $\mu\text{g/g}$ dry matter

*** : without any fertilizer and sludge

⑥ 汚泥施用量の増加に伴い、含量が減少する元素：P（玄米）、Mn（茎葉部、穂）

上記以外の元素は、含量に処理区間差が認められたものの、一定の傾向は認められなかった。

次に、各部位の元素含量（表6）と乾物生産量（表5）から、水稻による各元素の株当たり吸収量を求め、表7に示した。

これらの元素のうち、Mnは、汚泥区はいずれも化学肥料区より吸収量が少なく、特に汚泥5t以上施用区はいずれも、無肥料区よりも吸収量が少なかった。また、汚泥区間を比較すると、施用量の増加に対して吸収量は減少した。

Fe及びCuは、汚泥区の総吸収量はいずれも化学肥料区より低いが、無肥料区と比較すると、5t以下施用区は無肥料区より少なく、10t以上施用区は無肥料区より多かった。また、汚泥区間を比較すると、施用量の増加に伴って吸収量も増加した。

これら3元素以外の元素は、いずれも汚泥施用区は化学肥料区より少なく（ただし、汚泥20t区ではN、Pは化学肥料区と同程度の吸収量であった）、無肥料区より多かった。汚泥区間を比較すると、施用量の増加に伴って吸収量も増加した。

表 7 下水汚泥施用土壌における水稲による元素吸収量
Table 7 Absorption of elements by rice from soil with sewage sludge application

		(mg/plant)										
	treatment	N	P	K	Mg	Ca	Mn	Fe	Al	Cu	B	Cd
Straw	Control*	86	25	886	62	115	92	8.0	20.0	3.45	1.71	0.016
	Chemical fertilizer	550	27	1900	132	229	183	11.9	35.2	4.98	2.48	0.029
	Sludge 2.5t/ha	113	25	935	81	119	113	7.0	18.4	2.50	1.69	0.019
	Sludge 5.0t/ha	203	34	1150	83	135	83	7.4	17.5	2.44	1.66	0.015
	Sludge 10.0t/ha	208	18	1250	86	148	77	7.9	14.5	2.56	1.52	0.016
	Sludge 20.0t/ha	360	21	1570	110	197	59	10.9	20.1	3.00	1.70	0.019
Panicle	Control*	198	72	149	28	6	6	6.1	18.4	1.79	0.35	0.009
	Chemical fertilizer	493	147	291	55	12	11	9.3	34.2	3.38	0.82	0.018
	Sludge 2.5t/ha	255	89	204	33	7	8	5.0	20.2	1.96	0.49	0.010
	Sludge 5.0t/ha	364	106	236	41	8	8	6.3	21.8	2.05	0.57	0.011
	Sludge 10.0t/ha	485	141	316	55	12	9	7.7	31.4	2.77	0.79	0.013
	Sludge 20.0t/ha	741	157	386	70	16	9	9.1	39.6	3.59	0.98	0.019
Whole	Control*	284	96	1030	90	121	98	14.1	38.4	5.24	2.65	0.025
	Chemical fertilizer	1043	174	2190	188	241	193	21.2	69.3	8.36	3.30	0.047
	Sludge 2.5t/ha	368	114	1140	114	126	121	12.0	38.6	4.46	2.18	0.029
	Sludge 5.0t/ha	567	140	1390	125	143	90	13.7	39.3	4.49	2.23	0.026
	Sludge 10.0t/ha	693	159	1560	142	161	86	15.6	45.9	5.33	2.31	0.030
	Sludge 20.0t/ha	1100	178	1960	180	213	68	20.0	59.7	6.59	2.68	0.038

*; without any fertilizer and sludge

4 考察

3.1で述べたように、汚泥施用量の増加に伴い、水稲の初期生育は無肥料区と比較して抑制された。この抑制効果は、数週間で促進効果に変わることから、汚泥施用直後にのみ認められる現象であるといえる。

今回の試験に用いた下水汚泥は未消化の脱水ケーキであり、含まれる有機物は、堆肥と異なり、土壌中で分解されやすい有機物を多量に含むと考えられる。このような易分解性部分を多量に含む有機物が土壌に施用されると、急激にその分解が進むことが知られている⁶⁾。また、湛水条件下における分解の過程では、種々の分解生成物が土壌中に蓄積することが知られている⁷⁾。これらの生成物のうち植物の生育を阻害することが予想されるものには、酢酸や酪酸などの有機酸、硫化水素、アンモニアなどがある^{8,9)}。

有機酸類は有機物分解が急速に進んだときに中間生成物として集積する物質で、分解がさらに進行すると二酸化炭素あるいはメタンに分解する物質であることから、本試験のように、易分解性部分を多量に含む有機物を多量に施用したときに、初期にのみ認められる害作用の原因物質の一つである可能性がある。

硫化水素は還元が極度に進んだときに生成する物質であり、硫化水素による水稲への害は通常、生育中～後期に発生すると考えられる。しかし、今回の実験においては初期生育に影響が大きく、

次第に生育が回復したことから、害作用の原因物質としての可能性は小さい。

アンモニアは、湛水条件下で有機物の分解に伴い多量に集積する物質であり、また、水稻の生育とともに吸収されるため、土壌中の濃度は生育初期に高く、後期に低い。そのため、アンモニアが初期の生育の抑制に何らかの影響を及ぼしている可能性はある。

生育が抑えられた汚泥多量区の水稲は、旧葉の先端から褐変し、枯れてきており、その症状はリン酸過剰症と類似していた¹⁰⁾。リン酸は湛水条件下で可給化しやすいことが知られており、その原因として Eh の低下、有機酸によるリン酸の可溶化などが考えられている¹¹⁾。また、リン酸は土壌の pH の高い条件において植物に吸収されやすいことも知られている¹²⁾。易分解性有機物を多量に含む汚泥が施用され、湛水条件下で Eh の低下、有機酸の生成、汚泥中に含まれる石灰及び生成したアンモニアによる pH の上昇などの諸条件が重なったとき、土壌中のリン酸が可溶化し、リン酸の吸収量が増す可能性はある。しかし、表 1 に示したように実験に用いた汚泥中のリン酸含有量は低く (P_2O_5 として 0.19%)、また、汚泥区のみで異常が認められ過リン酸石灰を施用した化学肥料区では初期生育に異常が認められなかったこと、さらに、汚泥区においても生育後期には回復し、収穫時には植物体中のリン酸含量が対照区、化学肥料区と比較して特に高くなかったことは、生育抑制がリン酸過剰によると考えた場合、更に説明を要する点である。汚泥施用による水稻の初期生育に対する抑制効果の原因については、植物体のリン含量及び土壌中の可給態リン酸をはじめ各種物質の集積量について調べ、検討していく必要がある。

汚泥区においては、初期生育の遅れから回復した後の水稻の生育速度は、草丈、分けつ数とも、無肥料区より大きかった。無肥料区では生育初期には汚泥区に比較して良好な生育を示しながら、後期には土壌中の可給態窒素量が制限因子となり生長速度が衰えたのに対し、汚泥多量区では初期生育が悪いために土壌中に窒素が残り、それが生育後期に吸収されたことが後期の生育速度を大きくした一因と思われる。

このように、生育過程において主として養分を吸収した時期が処理区間で異なることは、水稻の部位別乾物生産量の比に処理区間差をもたらす。すなわち、化学肥料区では生育初期の養分吸収と乾物生産が活発であったため茎葉部の重量を増加させたのに対し、汚泥区では幼穂形成期以後も養分吸収が活発に行われたために、穂数、えい花数が増し、穂重の増加をもたらした。しかし、穂重の増加を収量構成要素の点から観ると、穂数、えい花数は汚泥の施用により増加したが、登熟歩合、千粒重は施用量の増加に対して減少している。このことは、開花、登熟期に穂数、えい花数に見合うだけの乾物生産がなされなかったことを示している。化学肥料区及び汚泥多量区 (10 t 及び 20 t 区) では、生育後期には窒素過剰による過繁茂の状態であり、収穫時には倒伏した。そのため、登熟期に十分な光合成が行えず¹³⁾、登熟歩合、及び千粒重を低下させたと考えられる。

窒素、カリウム、マグネシウム、カルシウムなど主要な元素の茎葉部含量が汚泥施用量の増加に伴って増加する傾向にあったのに対し、リン及びマンガンの含量は減少した。リンの株当たり

の吸収量は、他の主要な元素と同様に、汚泥施用により増加しており、リンの含量の低下は吸収量の増加率より乾物生産量の増加率が上回ったため生じたと考えられる。特に、リンを多量に蓄積する穂部の乾物生産量の増加が著しいため、多量のリンが茎葉部から玄米へ移行し、茎葉部においてリン含量が顕著に低下した。

マンガンは必須元素の一つであるが、その要求量は窒素、リン、カリウム、カルシウム、マグネシウムなどの多量要素と比較して微量である¹⁴⁾。今回の実験においては、マンガンの吸収量はリン、マグネシウム、カルシウムに匹敵する量であり、要求量と比較して多量のマンガンが吸収されたと考えられる。しかし、通常の栽培においても茎葉部のマンガン含量がリン及びカリウムより高くなることもあり¹⁵⁾、今回の実験結果は必ずしも異常ではない。無肥料区においてマンガンの吸収量が汚泥区より高く、施用量の増加に対して吸収量が減少したことは、供試土壌からのマンガン供給量が大いにもかかわらず汚泥の施用によってマンガンの吸収が抑えられたことを示す。マンガンは、土壌 pH の上昇、Eh の増加などによって吸収が抑えられることが知られており¹²⁾、本実験においては、汚泥中に多量に含まれる石灰により土壌 pH が上昇したことが、マンガンの吸収を抑えた要因と考えられる。

重金属類（カドミウム、銅）については、水稻各部の含量とも汚泥区は無肥料区より低く、本実験の結果からは、これらの元素による障害あるいは汚染の可能性は認められなかった。

5 まとめ

下水汚泥施用土壌における水稻の生育の特徴を明らかにするため、無肥料区、化学肥料区及び石灰凝集下水汚泥を施用した水田用小型ライシメーターにて水稻を栽培した。下水汚泥の施用量は、1 ha 当たり 2.5 t, 5 t, 10 t, 及び 20 t 相当量とし、汚泥及び化学肥料は水稻の移植直前に施用した。水稻の生育、収量及び植物体成分の分析を行い、次の結果を得た。

1. 汚泥施用区における水稻の初期生育は、無肥料及び化学肥料区より遅れるが、後期には回復した。
2. 汚泥施用区では、茎葉部収量の増加に比較して穂部の収量が大きく増加した。これは、穂数及びえい花数の増加によるものであった。
3. 汚泥 10 t/ha 及び 20 t/ha 区では、収穫前に窒素過多のため倒伏した。
4. 汚泥施用量の増加に対し、植物体中のリン及びマンガンの含量は低下した。マンガンは株当たりの吸収量も減少した。
5. 汚泥施用区においては、銅、カドミウムの含量は、無肥料区におけるそれより低かった。

謝 辞

本研究を行うに当たって、植物体成分の分析は、当研究所水質土壌環境部土壌環境研究室 久保井 徹氏、計測技術部分析室 西川雅高氏にお願いした。水稻稚苗は、当研究所技術部ほ場係

長 山口武則氏に御提供頂いた。また、沼尻栄子、中村てる子、沼尻裕子の各氏には水稻の栽培と、生育及び収量調査をお手伝い頂いた。各氏に深く感謝する。

引用文献

- 1) 久保井徹・服部浩之・藤井國博(1980): 下水汚泥の施用によるほ場環境の変化(I), 下水汚泥の施用がナスの生育に与える影響. 国立公害研究所研究報告, 第14号, 159-175.
- 2) 久保井徹・藤井國博・服部浩之(1983): 下水汚泥の土壌施用がコマツナの生育と成分組成に及ぼす影響——小型ライシメーター試験. 国立公害研究所研究報告, 第46号, 133-146.
- 3) 山口武則・久保井徹・服部浩之・広木幹也・藤井國博・小林峰雄・矢崎仁也(1983): 下水汚泥連用淡色黒ボク土における植物の生育——ほ場試験. 国立公害研究所研究報告, 第46号, 147-174.
- 4) 山口武則・久保井徹・服部浩之・広木幹也・藤井國博(1983): 各種土壌における下水汚泥の施用が植物の生育及び体内成分に及ぼす影響——有底粹試験. 国立公害研究所研究報告, 第46号, 175-188.
- 5) 三井進午(1971): リン酸質肥料の性質と使い方. 新版土と肥料, 博友社, 146-156.
- 6) 香川尚徳・白石忠男・栗原 廉(1978): 水田土壌中における下水汚泥の分解. 用水と廃水, **20**, 1435-1438.
- 7) 山根一郎(1982): たん水後の有機化合物の変化. 水田土壌学, 山根一郎編, 農文協, 164-175.
- 8) 山根一郎(1978): 水田における有機酸とガスの生成. 水田土壌学, 川口桂三郎編, 講談社, 361-322.
- 9) 柳沢宗男(1978): 硫黄の還元と水稻の生育障害. 水田土壌学, 川口桂三郎編, 講談社, 309-316.
- 10) 渡辺和彦(1983): リンサンの欠乏と過剰症. 野菜の要素欠乏と過剰症. タキイ種苗(株), 7-10, 57-62.
- 11) 古川秀頭(1978): 湛水化における酸の形態変化と移動. 水田土壌学, 川口桂三郎編, 講談社, 264-274.
- 12) 渡辺和彦(1983): マンガンの欠乏と過剰症. 野菜の要素欠乏と過剰症, タキイ種苗(株), 93-98.
- 13) 星川清親(1975): 葉の形態形成と環境条件. 解剖図説イネの生長, 農文協, 122-129.
- 14) 熊沢喜久雄(1974): 植物体の組成と必須元素. 植物栄養学大要, 養賢堂, 9-15.
- 15) 大川金作(1936): 珪酸の植物に対する生理的機能に関する研究. 日本土壌肥料学雑誌, **10**, 95-110.

II-2

土壤による下水汚泥の分解——連用の影響——

Decomposition of Sewage Sludge in Soils
——Effect of Repeated Applications of Sewage Sludge——

服部浩之¹・藤井國博¹

Hiroyuki HATTORI¹ and Kunihiro FUJII¹

Abstract

To evaluate the effect of repeated applications of sewage sludge on the decomposition of freshly applied sludge, laboratory incubation experiments were conducted. Twelve kinds of soils were used in the experiments, i. e. sandy soils, light colored Andosols, Alluvial soils and humic Andosols which had received sludge in the past at the rate of 0, 15 dry metric ton/ha for one year and 30 dry metric ton/ha for two years respectively. Sludge was mixed with each soil at the rate of 2 % on a dry weight basis. The mixtures were incubated for 4 weeks at 28°C, and the amounts of CO₂ evolved from soils, ammonia nitrogen volatilized and inorganic nitrogen in the soils were periodically determined.

The results were as follows.

- 1) The mineralization rates of organic carbon and nitrogen of freshly applied were not appreciably affected by the rate or frequency of sludge in the past.
- 2) The decomposition rate of organic carbon of sludge was about twice as high as the mineralization rate of organic nitrogen of sludge.
- 3) The nitrification rates tended to be higher in soils with frequent and repeated applications of sludge. However in the sandy soil subjected to repeated applications of sludge the nitrification rate was lower than in the sandy soil to which sludge had not been applied previously.
- 4) The rate of ammonia nitrogen volatilization from the sandy soils was high unlike in the other soils.

1 はじめに

下水汚泥の農業利用は、欧米では古くから行われており、我が国においても本格的な下水道終末処理場が建設されたときから農業利用を目的にした研究が開始されるとともに、一部地域では1950年代まで汚泥肥料として販売されていた¹⁾。しかし、その後の経済の高度成長と農業人口の都市への流出及び化学肥料の普及によって汚泥の農業利用はほとんど行われなくなった¹⁾。

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.

近年、再び下水汚泥の農業利用が注目されるようになったが、それは農業利用が最も安定した処分方法であるとみなされること、下水汚泥が植物生産に有効な肥料成分や有機物を含むことから利用が省資源につながるという考え方などが理由となっている。このような情況のもとに、我が国においても各地で農業利用が増えつつあり、それに伴って土壤中における下水汚泥成分の分解に関する研究も活発に展開され、成果も公表されつつある²⁻⁴⁾。

しかしながら、これらの研究は、いずれも汚泥が初めて添加された土壤における分解に関するものであり、汚泥が連続的に添加された場合（連用）における汚泥の分解に関する研究はごく少ない。前述のように農業利用が下水汚泥の最も安定した処分法であるという見方からすれば、同一の農地に連続的に施用されることは当然予想されることであり、現に農業利用が行われている地域では連用が行われている。

著者らは、既に消石灰と塩化第二鉄を脱水助剤とする生活廃水処理場の未消化汚泥を連用した淡色黒ボク土において、連用を重ねるに従って硝酸化成が早く起こることを認めている^{5,6)}。このことは、汚泥の連用によって土壤中での分解に何らかの変化が生じることを示唆しているものと考えられる。この点を解明することは、下水汚泥の安定した処分法としての農業利用を考える上で、極めて重要であると考えられる。

本研究は、過去に汚泥が施用された土壤へ新たに負荷された汚泥の分解特性を明らかにするため、過去における汚泥の施用歴が異なる土壤に新たに汚泥を添加し、汚泥中炭素、窒素の分解及び窒素の無機化により生成された無機態窒素の形態変化をビン培養法によって追跡したものである。

2 実験方法

2.1 供試土壤及び供試汚泥

実験に用いた土壤は、1979年以來汚泥の施用試験を行っている屋外ライシメーター⁷⁾の4種類の土壤—砂質土(川砂で代用)、淡色黒ボク下層土、沖積水田下層土、黒ボク表層土—である。これらの土壤の表層土(0~5 cm、汚泥混合層位0~15 cm)を採取し、風乾して土壤試料とした。屋外ライシメーター試験の詳細は既に報告した⁷⁾。土壤試料の採取時期は、汚泥施用前の1979年7月、汚泥を1年間に計2回連用(乾物として7.5 t/ha/回施用)した後の1980年4月及び2年間に計4回連用した後の1981年4月であった。

また、供試汚泥は、1979年4月に取手市内住宅団地廃水処理場(活性汚泥法)から分与された未消化脱水ケーキ(脱水助剤:消石灰と塩化第二鉄)を風乾後粉碎したものである。

各土壤試料及び汚泥試料のpH(H₂O)、全炭素、有機態炭素、全窒素、アンモニア態窒素及び硝酸態窒素量を表1に示した。全炭素及び全窒素量は、柳本製CNコーダーを用いて測定した。また、有機態炭素は、試料に6%亜硫酸水を数滴添加し、試料中の無機炭酸を炭酸ガスとして揮散させた後⁸⁾、同CNコーダーを用いて測定した。

表 1 供試土壌と供試汚泥の性質
Table 1 Properties of soils and sludge used in the experiment

	Rates and frequency of application of sludge in the past	pH (H ₂ O)	T-C (%)	Organic-C (%)	T-N (%)	NH ₄ -N (μg/g)	NO ₃ -N (μg/g)
Sandy Soil	0	7.7	0.25	0.25	0.016	4.3	1.8
	7.5 t/ha×2	8.2	0.28	0.28	0.021	2.1	1.1
	7.5 t/ha×4	8.7	0.41	0.41	0.035	2.3	3.5
Light Colored Andosol	0	6.3	1.68	1.68	0.15	40.1	7.8
	7.5 t/ha×2	6.9	1.88	1.88	0.18	9.4	11.6
	7.5 t/ha×4	7.1	1.89	1.89	0.18	6.9	16.0
Alluvial Soil	0	6.9	0.60	0.60	0.059	3.0	0.9
	7.5 t/ha×2	8.0	0.92	0.92	0.093	3.5	7.9
	7.5 t/ha×4	8.1	0.82	0.82	0.089	3.8	21.5
Humic Andosol	0	6.6	5.45	5.45	0.37	13.3	11.1
	7.5 t/ha×2	7.0	5.47	5.47	0.39	11.1	11.8
	7.5 t/ha×4	7.3	5.64	5.64	0.41	9.0	17.8
Sludge		10.1	28.9	26.4	3.58	1250	32.4

2.2 土壌中における汚泥中炭素の分解量及び土壌からの揮散アンモニア量の測定

汚泥中炭素の分解量の測定は、田辺の簡便法⁹⁾に準じて行った。すなわち、土壌 25 g (乾土)と汚泥 0.5 g (乾物)を 300 ml 容スチロール棒びんに詰め、混合後、水を最大容水量の 60%になるように添加し、28°C、暗所下で 4 週間培養した。その間、発生する炭酸ガスを 0.5 規定水酸化ナトリウム液に吸収させ、その吸収量を 0.2 規定塩酸で滴定することにより算出した。汚泥混合土壌から発生する CO₂量から、汚泥無添加土壌から発生する CO₂量を差し引いた値を、汚泥中炭素の分解によって発生する CO₂量とした。また、土壌から揮散するアンモニアを 0.5 規定硫酸液に吸収させ、その液を希釈後、インドフェノール法を利用した自動分析法¹⁰⁾により定量した。

2.3 汚泥中窒素の無機化量の測定

2.2 の炭酸ガス発生量測定の場合と同様、土壌に汚泥を 2%量と、水を最大容水量の 60%になるように添加後、28°C、暗所下で一定期間培養した。3 日後及び 1, 2, 3, 4 週目に土壌を取り出し、アンモニア態窒素量、亜硝酸態窒素量及び硝酸態窒素量を測定した。また、土壌に水のみを添加した場合の無機態窒素量は、4 週目のみに測定した。これらの測定法は既報のとおり¹¹⁾であった。

3 結果及び考察

3.1 汚泥中炭素の分解

各土壌試料に蒸留水だけを最大容水量の 60%になるように加え、28°Cで培養した場合の各土壌

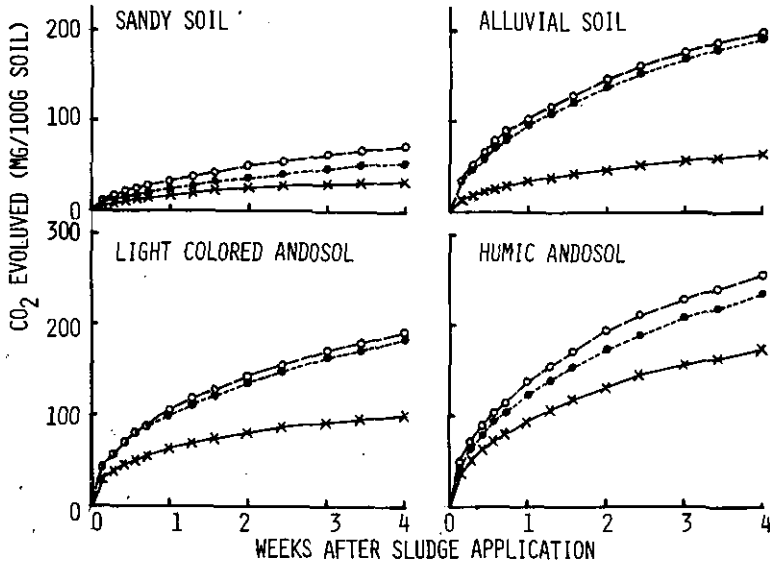


図 1 過去の汚泥施用歴が異なる土壤を 28°C で保温した際の CO₂ 発生量

Fig. 1 Cumulative plot of CO₂ evolution from soils incubated at 28°C as affected by repeated applications of sludge in the past

(×), (O) and (●) rates and frequency of sludge application in the past are 0, 7.5 dry metric t/ha×2 and 7.5 dry metric t/ha×4, respectively.

からの CO₂ の発生パターンを図 1 に示した。これは、土壤に残存する有機物中炭素の分解に当たる。

供試した 4 種類の土壤とも、下水汚泥の施用歴のある土壤から発生した CO₂ 量が、施用歴のない土壤からのそれを上回った。この差は、汚泥施用歴のある土壤中に残存している未分解の汚泥有機物が分解したために生じたと推定される。しかし、1 年間連用土壤からの CO₂ 発生量と 2 年間連用土壤からのそれとの差は小さく、いずれの土壤でも前者が後者をわずかに上回った。一方、土壤中の有機態炭素量は、連用回数が多い土壤ほど多い傾向にある (表 1)。これらの結果は、汚泥施用後 1 年以上経過した場合は、土壤中に汚泥由来の分解されうる有機物はほとんどなく、かなり難分解性の有機物だけが蓄積してくることを示唆しているものと考えられる。

また、土壤の種類別では、黒ボク土、淡色黒ボク土、沖積土、砂質上の順に CO₂ の発生量が少なくなり、有機物の多い土壤ほど発生量が多かった。

各土壤に汚泥を土壤の 2% 量添加したときに発生する炭酸ガス量から、汚泥無添加の場合に発生した炭酸ガス量 (図 1) を差し引いた値を、汚泥の分解に伴って発生した炭酸ガス量とし、その発生量を図 2 に示した。

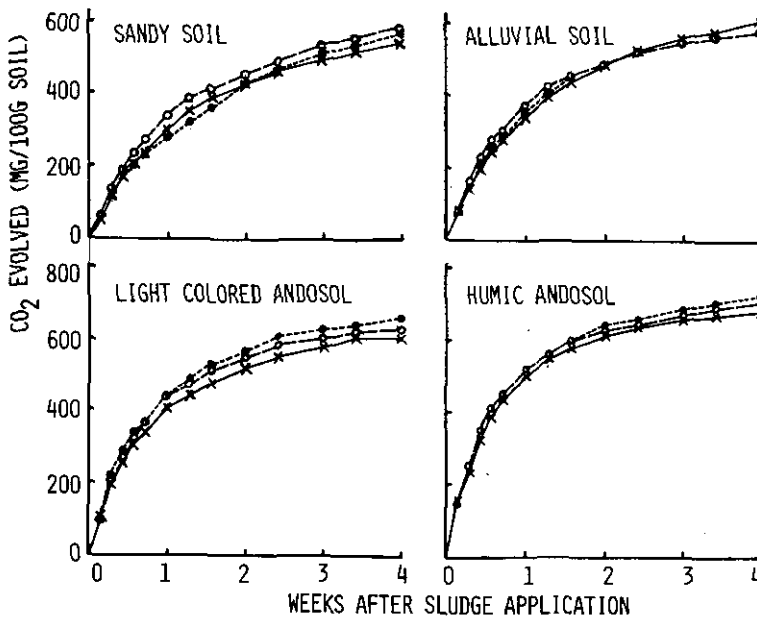


図 2 過去の汚泥施用歴が新たに添加した汚泥中炭素の分解に及ぼす影響

Fig. 2 Effect of the repeated times of sludge application in the past on the decomposition of freshly added sludge

For legend, see Fig. 1.

各土壤とも添加後1日間の発生量が多く、以後徐々に減少する傾向にあった。全培養期間(4週間)に発生したCO₂量の80%以上が添加後2週間で発生した。このことは、汚泥中炭素の急激な分解が、添加後2週間で行われていることを示している。また、4種類の土壤とも、過去に汚泥施用歴のない土壤も連用歴のある土壤もほぼ同じCO₂発生量の経時変化を示し、差はほとんどみられなかった。したがって、表3に示したように新たに加えた汚泥に含有される炭素は、過去の汚泥施用歴に関係なく、ほぼ同じ量だけ分解されることが明らかにされた。

土壤の種類別では、黒ボク土からのCO₂発生量が最も多く、以下、淡色黒ボク土、沖積土、砂質土と続き、有機物含量の多い土壤ほど汚泥分解能が高い傾向がみられた。しかし、有機物含量の多い土壤では、汚泥の添加により、これら土壤中の有機物の分解が促進される起爆効果が起こっていると考えられる¹²⁾ので、実際には、図2に示されたほどの汚泥の分解量の土壤間差はないと推定される。

このように、汚泥中炭素の分解量は、過去の汚泥施用歴あるいは土壤の種類によって大きく左右されないと考えられる。

3.2 汚泥中窒素の無機化と形態変化

3.2.1 汚泥中窒素の無機化

汚泥添加土壌中における全無機態窒素量の経時変化を図3に示した。

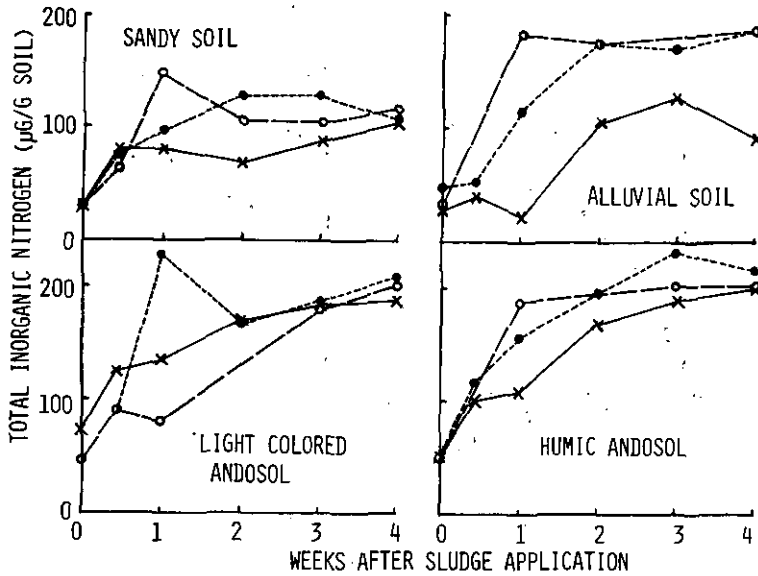


図 3 過去の汚泥施用歴の異なる土壌に汚泥を添加した際の無機態窒素の生成量

Fig. 3 Effect of the repeated times of sludge application in the past on the quantities of inorganic nitrogen in soils with fresh application of sludge

For legend, see Fig. 1.

各土壌とも無機態窒素量は、汚泥添加直後から4週目まで増加する傾向にあった。特に2週目までの増加量が多く、CO₂の発生パターンと類似していた。このことから、汚泥中の炭素と窒素の分解は、同時に起こっているものと推定される。沖積土では、汚泥施用歴のない土壌より施用歴のある土壌での無機化量が多かったが、他の土壌では施用歴の有無による差は少なかった。また、土壌間差をみると、黒ボク土、淡色黒ボク土の無機化量が多く、以下、沖積土、砂質土の順になり、これもCO₂発生量の場合と同じ傾向であった。

3.2.2 無機態窒素の経時変化

図4~7は、各土壌におけるアンモニア態窒素量（以下NH₄-Nと記す）、亜硝酸態窒素量（以下NO₂-Nと記す）及び硝酸態窒素量（以下NO₃-Nと記す）の経時変化を示したものである。また、表2には各土壌から揮散したNH₃-N量及び培養終了時の土壌pH（H₂O）を示した。

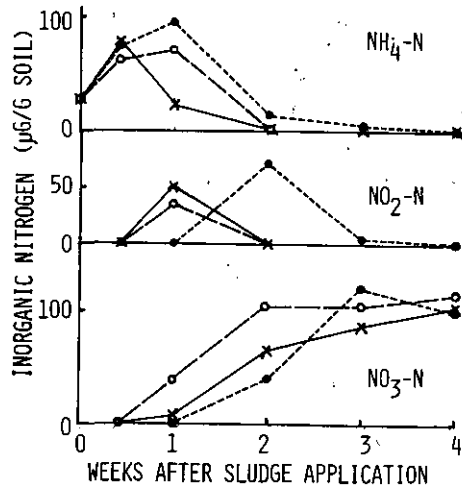


図 4 過去の汚泥施用歴の異なる砂質土に汚泥を添加した際の無機態窒素の消長
 Fig. 4 Changes in inorganic nitrogen content in sandy soils with fresh application of sludge, as affected by repeated applications of sludge in the past
 For legend, see Fig. 1.

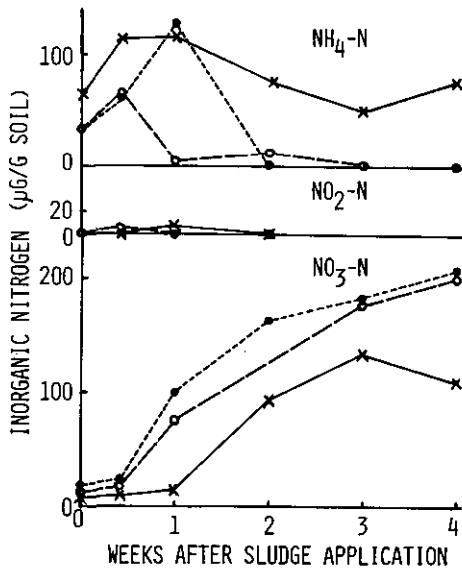


図 5 過去の汚泥施用歴の異なる淡色黒ボク土に汚泥を添加した際の無機態窒素の消長
 Fig. 5 Changes in inorganic nitrogen content in light colored Andosols with fresh application of sludge, as affected by repeated applications of sludge in the past
 For legend, see Fig. 1.

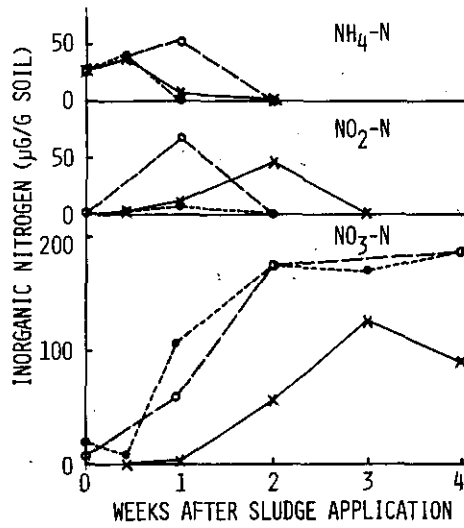


図 6 過去の汚泥施用歴の異なる沖積土に汚泥を添加した際の無機態窒素の消長
 Fig. 6 Changes in inorganic nitrogen content in Alluvial soils with fresh application of sludge, as affected by repeated applications of sludge in the past

For legend, see Fig. 1.

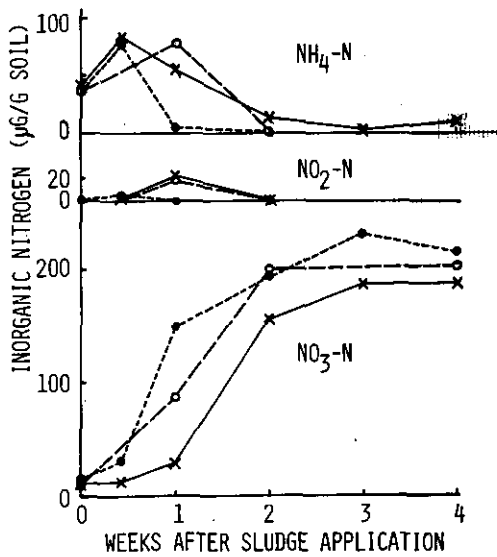


図 7 過去の汚泥施用歴の異なる黒ボク土に汚泥を添加した際の無機態窒素の消長
 Fig. 7 Changes in inorganic nitrogen content in humic Andosols with fresh application of sludge, as affected by repeated applications of sludge in the past

For legend, see Fig. 1.

表 2 各土壌からの揮散アンモニア量と汚泥添加4週後の土壌 pH
 Table 2 The quantities of ammonia nitrogen volatilized from soils applied with sludge and the pH values of soils after 4 weeks incubation

	Rates and frequency of application of sludge in the past	Volatilized NH ₃ -N (μg/g)	pH (H ₂ O)
Sandy Soil	0	10.2	8.4
	7.5 t/ha×2	5.3	8.3
	7.5 t/ha×4	17.5	8.6
Light Colored Andosol	0	0.2	6.9
	7.5 t/ha×2	0.3	7.2
	7.5 t/ha×4	0.5	7.4
Alluvial Soil	0	1.4	8.2
	7.5 t/ha×2	0.9	8.3
	7.5 t/ha×4	1.0	8.3
Humic Andosol	0	0.5	6.8
	7.5 t/ha×2	0.3	7.2
	7.5 t/ha×4	0.3	7.4

無機態窒素は、砂質土及び沖積土では NH₄-N → NO₂-N → NO₃-N の順に増加がみられ、淡色黒ボク土及び黒ボク土では NH₄-N → NO₃-N の順に増加がみられた。NH₄-N は、ほとんどの土壌で2週目には0近くまで減少しているが、淡色黒ボク土の汚泥施用歴のない土壌では4週目でも高い値を維持していた。これは、この土壌の硝化能が弱いためと考えられる⁷⁾。しかし、汚泥の連用を重ねた場合は、他の土壌と同様2週目には減少し、さらに NO₃-N も早めに増加しており、汚泥の連用によって硝化能が高まることを示している。

NO₂-N は、砂質土及び沖積土では多量に集積したが、淡色黒ボク土及び黒ボク土での集積量は少なかった。これは、砂質土及び沖積土の pH が8以上の高い値になっている(表2)ことに原因があると考えられる。このようなアルカリ性土壌では、NH₄-N が共存した場合、亜硝酸が集積することが知られている¹³⁾。また、砂質土以外の土壌では、連用土壌ほど NO₂-N の集積が早め起こりかつ集積量が少なくなる傾向にあった。しかし、砂質土の2年間連用土壌では、逆に集積時期が遅れ、しかも多量に集積した。この原因として、この土壌の pH が8.6と最も高く(表2)、かつ NH₄-N の生成量も多かったことが上げられる。

NO₃-N は、各土壌とも1週目から2週目にかけて急増したが、汚泥施用歴のある土壌ほど増加が早め起こる傾向にあった。しかし、砂質土の場合は、1年間連用土壌では施用歴のない土壌より早めに増加したが、2年間連用土壌では増加が最も遅れ、NO₂-N の集積が遅れたのに対応している。また、砂質土では、表2に示したように、揮散 NH₃-N 量も多く、NH₄-N の一部は、大気

中に揮散したことを示している。揮散量は、硝化が遅れた土壤ほど多くなっている。砂質土以外の土壤では、揮散 NH₃-N 量はごくわずかであった。砂質土で揮散 NH₃-N 量が多いのは、土壤 pH が高いこと及び NH₄-N を吸着できる粘土が少ないことが原因と考えられる。

以上の結果から、砂質土のように汚泥の連用によって pH が異常に高くなった場合を除いて、その他の土壤では汚泥連用歴のある土壤ほど硝酸化成作用が早めに起こることが認められた。これは、淡色黒ボク土を用いて環境制御下で行ったライシメーター実験の結果⁵⁾と一致している。今回の結果は、もともと硝化能の低い淡色黒ボク土に限らず、その他の土壤でも汚泥の連用によって硝化能が高まることを示している。

3.3 汚泥中炭素の分解率と窒素の無機化率

これまでの結果から、4週間での汚泥中の有機態炭素の分解率及び有機態窒素の無機化率を、次式によって算出し、表3にまとめた。

有機態炭素の分解率

$$= \frac{(\text{汚泥添加土壤から発生した CO}_2\text{-C 量}) - (\text{対照土壤から発生した CO}_2\text{-C 量})}{\text{添加汚泥中の有機態炭素量}} \times 100$$

有機態窒素の無機化率

$$= \frac{(\text{汚泥添加土壤中の無機態窒素量}) + (\text{揮散 NH}_3\text{-N 量}) - (\text{対照土壤中の無機態窒素量}) - (\text{添加汚泥中の無機態窒素量})}{\text{添加汚泥中の有機態窒素量}} \times 100$$

表 3 汚泥添加4週後の汚泥中炭素の分解率と窒素の無機化率
Table 3 Percentages of carbon decomposed and nitrogen mineralized in sludge during 4 weeks incubation period

	Rates and frequency of application of sludge in the past	C decomposed (%)	N mineralized (%)
Sandy Soil	0	27.9	12.0
	7.5 t/ha×2	29.6	11.6
	7.5 t/ha×4	29.4	11.8
Light Colored Andosol	0	31.4	15.8
	7.5 t/ha×2	32.5	18.5
	7.5 t/ha×4	33.8	21.1
Alluvial Soil	0	31.4	8.5
	7.5 t/ha×2	29.8	15.5
	7.5 t/ha×4	30.1	12.9
Humic Andosol	0	35.0	16.2
	7.5 t/ha×2	36.6	12.8
	7.5 t/ha×4	37.5	15.2

各土壌における汚泥中炭素の分解率は、約 30 %であったのに対して、窒素の無機化率は 10%台と、窒素の無機化率は炭素の分解率の約半分であった。同様の結果は、Quan-Lu⁴⁾も報告している。これには、この汚泥がかなりの無機態炭素を含んでおり、汚泥を施用した場合、この無機態炭素が CO₂として発生することが考えられるがこの点を考慮しなかったこと、また窒素の場合、いったん無機化されても微生物に取り込まれて再有機化するものが多分にあることなどの原因が考えられる。

汚泥中炭素の分解率は、各土壌とも過去の汚泥施用の有無による差はほとんどみられなかった。窒素の無機化率は、淡色黒ボク土、沖積土では過去に汚泥施用歴のある土壌で高くなる傾向がみられたが、砂質土、黒ボク土では影響はみられなかった。これらの結果は、汚泥を連用した場合でも、新たに加えた汚泥の分解量は、大きく変わらないことを示すものとする。

4 まとめ

汚泥を連用した土壌中での汚泥の分解特性を明らかにするため、過去の汚泥施用歴の異なる土壌を用いビン培養試験を行った。使用した土壌は、砂質土、淡色黒ボク土、沖積土及び黒ボク土の 4 種類で、それぞれ過去に汚泥施用歴のないもの、1 年間 2 回乾物として計 15 t/ha 施用歴のあるもの、2 年間に 4 回乾物として計 30 t/ha 施用歴のあるものの計 12 種類であった。汚泥を各土壌に 2%添加後、28°Cで 4 週間培養し、その間発生する CO₂量、土壌中の無機態窒素量及び土壌から揮散するアンモニア態窒素量を経時的に測定し次の結果を得た。

- (1) 過去の汚泥施用歴は、新たに添加した汚泥中炭素の分解量、窒素の無機化量に大きな影響を与えない。
- (2) 汚泥中炭素の分解量は、窒素の無機化量の約 2 倍であった。
- (3) 硝酸化成作用は、連用回数が多い土壌ほど早まる傾向にあった。しかし、砂質土では、連用により硝酸化成作用は遅れた。
- (4) 土壌から揮散するアンモニア量は、砂質土で多く、他の土壌ではごくわずかだった。

引用文献

- 1) 松崎敏英・和地 清(1983): わが国における下水汚泥の農地還元。下水汚泥の緑農地利用—国際シンポジウム会議録, 下水汚泥資源利用協議会, 26-42.
- 2) 河野通佳・山添文雄(1983): 下水汚泥の土壌中での分解と挙動。下水汚泥の緑農地利用—国際シンポジウム会議事録, 下水汚泥資源利用協議会, 59-75.
- 3) 大羽 裕・N. Quan-Lu(1981): 二酸化炭素量からみた畑条件下の下水汚泥の分解。日本土壌肥科学雑誌, **52**, 219-224.
- 4) Quan-Lu, N.・大羽 裕(1981): 下水汚泥の有機態窒素の無機化。日本土壌肥科学雑誌, **52**, 219-224.
- 5) 服部浩之・豊田敏治・久保井徹・広木幹也・藤井國博・松坂泰明(1983): 下水汚泥連用土壌における全炭素、全窒素及び無機態窒素量の変化。国立公害研究所研究報告, 第 47 号, 27-35.

- 6) 服部浩之・藤井國博・久保井徹・広木幹也・小林峰雄・矢崎仁也・大羽 裕(1983): 下水汚泥施用淡色黒ボク畑土壤における無機態窒素の経時変化. 国立公害研究所研究報告, 第 47 号, 45-62.
- 7) 服部浩之・藤井國博・久保井徹・広木幹也(1983): 下水汚泥施用各種土壤における無機態窒素の経時変化. 国立公害研究所研究報告, 第 47 号, 37-44.
- 8) Allison, L. E. (1965): Organic carbon. *Methods of Soil Analysis, Part 2*, ed. C. A. Black *et al.*, American Society of Agronomy, Inc., Publisher, Madison, Wisconsin, USA., 1367-1378.
- 9) 田辺市郎(1975): 土壤呼吸. 土壤微生物実験法, 養賢堂, 270-278.
- 10) Technicon Instruments Corp. (1973): Ammonia in water and seawater. *Technicon industrial method*, 154-71 W/Tentative.
- 11) 服部浩之・鷲沢清司・久保井徹・藤井國博・松坂泰明・大羽 裕(1983): 下水汚泥施用土壤の理化学性. 国立公害研究所研究報告, 第 47 号, 13-26.
- 12) Terry, R. E., D. W. Nelson and L. E. Sommers (1979): Carbon cycling during sewage sludge decomposition in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **43**, 494-499.
- 13) 甲斐秀昭(1981): 土壤中における窒素の動態. 土の微生物, 土壤微生物研究会編, 博友社, 352-372.

II-3

下水汚泥を連用した淡色黒ボク土における 無機態窒素の経時変化——ほ場実験——

Changes in Inorganic Nitrogen Contents in Light Colored Andosol with Repeated Applications of Sewage Sludge —Field Experiment—

服部浩之¹・藤井國博¹

Hiroyuki HATTORI¹ and Kunihiro FUJII¹

Abstract

Sewage sludge was applied repeatedly to light colored Andosol in an experimental field for 4 years, and changes in inorganic nitrogen contents after the third and fourth year of application were investigated. Sludge application rates were 0, 3.75, 7.5 and 15.0 dry metric t/ha.

The results were as follows.

- 1) The nitrification rates were accelerated by repeated applications of sludge.
- 2) The amount of nitrate nitrogen mineralized from sludge was correlated with the application rate of the sludge in the year when the investigation was performed irrespective of the frequency and rates of sludge application in the past.
- 3) Changes in the amount of nitrate nitrogen in soil varied with the year and depended on the amount of precipitation in that year.
- 4) The pH values of soils with sludge application increased with the decrease of the nitrate nitrogen content.

1 はじめに

著者らは、これまで下水汚泥を施用した淡色黒ボク土における無機態窒素の経時変化を環境制御下及び自然条件下で追跡してきた¹⁻³⁾。

その結果、下水汚泥中の有機態窒素は、施用後急速に無機化されること、下水汚泥を連用すると硝化作用が早まること、自然条件下では、降雨などの影響で変動が大きく、急激に無機態窒素が表層土から消失する可能性があることなどを明らかにした。

これらは2年間連用実験によって得られた結果であり、さらに長期に連用を続けた場合における無機態窒素の変化については、これまでに報告例がない。

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.

現在行われている下水汚泥の農業利用においては、同一のほ場に長期にわたって施用されている例が多く、この傾向は今後とも続くと予想される。したがって、長期連用土壌における無機態窒素の変化を把握することは、植物への養分の供給や溶脱による地下水汚染など環境への影響を予測するうえでも解明すべき重要な課題であると考えられる。

著者らは、淡色黒ボク土の実験ほ場に生活廃水処理場から発生した汚泥（脱水助剤：消石灰と塩化第二鉄）の施用量、施用回数、植栽の有無を異にした処理区を設け、1979年より連用試験を開始した。

本報告は、そのうち連用3年目及び4年目に当たる1981年と1982年の表層土壌中の無機態窒素の変化についてまとめたものである。

2 実験方法

2.1 使用ほ場

実験に使用したほ場は、当研究所別圃地畑ほ場(II-1ほ場)であり、その詳細は既に報告した⁴⁾。土壌は、淡色黒ボク土壌(丸山統)であり、造成後試験開始まで均一栽培試験のために一度だけ化学肥料が施用された生産力の低いほ場である。

2.2 試験区の構成

試験区の構成については、既に報告したが⁵⁾、次の12処理区である。すなわち、汚泥施用量が乾物として1回3.75 t/ha(年2回；以下S区と記す)、7.5 t/ha(年1回；以下M1区と記す、年2回；以下M2区と記す)、15 t/ha(年1回、以下L区と記す)の計4処理区、さらに無処理区(以下C区と記す)、化学肥料単独施用区(以下FC区と記す：8-8-5化成肥料1.05 t/ha、熔成リン肥1.4 t/ha、苦土石灰1.4 t/ha)を設けた。これらの試験区では、1979年から試験を開始したが、連用年数の影響をみるため、1年遅らせて1980年より試験を開始した区も設けた。すなわち、汚泥施用量が3.75 t/ha(年2回；以下S'区と記す)、7.5 t/ha(年2回；以下M'区と記す)、15 t/ha(年1回；以下L'区と記す)の3処理区である。

さらに、裸地における変化を追跡するために、1980年から裸地区を設けた。すなわち、裸地無処理区(以下Cb区と記す)、裸地化学肥料区(以下Fb区と記す)、裸地汚泥施用区(15 t/ha、年1回、以下Lb区と記す)である。

以上の計12処理区の内容を表1にまとめた。なお、汚泥及び化学肥料は、ロータリー耕うん機によって表層0～15 cmの土壌に混合した。

表 1 処理区とその内容³⁾Table 1 Composition of treatments applied in the experiment³⁾

Name of Treatment	Planting	Fertilizer*	Sludge**	Application			
				Summer (1979)	Autumn	Spring (1980-1982)	Autumn
C	+	-	-	-	-	-	-
FC	+	+	-	+	+	+	+
S	+	-	small	+	+	+	+
M1	+	-	middle	+	-	+	-
M2	+	-	middle	+	+	+	+
L	+	-	large	+	-	+	-
S'	+	-	small	-	-	+	+
M'	+	-	middle	-	-	+	+
L'	+	-	large	-	-	+	-
Cb	-	-	-	-	-	-	-
Fb	-	+	-	-	-	+	+
Lb	-	-	large	-	-	+	-

* Compound fertilizer (8-8-5) ; 1t/ha
Ground dolomitic lime stone; 1t/ha
Fused phosphate ; 0.6t/ha

**Amount of application
small 3.75t/ha
middle 7.5 t/ha as dry matter
large 15.0 t/ha

2.3 供試汚泥

汚泥は、取手市内の住宅団地内の廃水処理場（活性汚泥方式）より分与されたものであり含水率70%の未消化の脱水ケーキである。脱水助剤には消石灰と塩化第二鉄が使用されており、いわゆる石灰汚泥である。これを風乾した後有姿のまま施用した。

1981年（運用開始後3年目）に施用した汚泥は、前年10月に発生したものであり、1982年（運用4年目）に施用した汚泥は同年4月に発生したものであった。

供試汚泥のpH (H₂O) と主要成分含有量は、表2に示した。

表 2 供試汚泥の性質
Table 2 Properties of sludges used in the experiment

	Sludge*	Sludge**
pH (H ₂ O)	10.1	8.7
T-C (%)	21.2	24.5
T-N (%)	2.7	2.7
C/N	7.9	9.1
T-P (%)	0.46	0.66

values based on dry weight

*used in 1981, **used in 1982, T-total

2.4 試験日程

2.4.1 1981年（連用3年目）

夏作への汚泥の施用は、6月12に行い同日耕うん混合後、6月19日にナスを移植した。ナスの収穫を8月18日に行った。

ナス収穫後全処理区を耕起し、8月27日にソルガムを播種し10月23日に収穫した。この際は汚泥も化学肥料も施用しなかった。

冬作への汚泥施用は、年2回施用区について11月9日に実施した。同時に化学肥料区には化学肥料を施肥し、全処理区について耕起後11月16日に小麦を播種した。小麦の収穫は、1982年6月7日に行った。

2.4.2 1982年（連用4年目）

前年と同様であるが、夏作ナスへの施用は6月11日、ナスの移植は6月19日、収穫は9月2日であった。ソルガムの播種は9月9日、収穫は10月25日であった。

冬作小麦への施用は11月9日、播種は11月15日、収穫は1983年6月4日であった。

2.5 土壌試料の採取と分析

両年とも6月の汚泥施用後から約5か月間（夏作期間）にわたって、経時的に土壌試料を採取した。採取は、株間について1処理区6～9か所から行った。採取層位は0～5cmである。3反復の処理区（S、M1、M2、L、C及びFC区）の場合、一括して2mmのふるいで篩別後、既に報告した方法¹⁾に従って混合し分析用試料とした。

土壌分析項目は、アンモニア態窒素（以下 $\text{NH}_4\text{-N}$ と記す）、亜硝酸態窒素（以下 $\text{NO}_2\text{-N}$ と記す）、硝酸態窒素（以下 $\text{NO}_3\text{-N}$ と記す）及び土壌pH（ H_2O ）であり、分析・測定法については既に報告した¹⁾。分析はいずれも2連で行い、結果は平均値で表示した。

3 結果及び考察

3.1 汚泥連用3年目における土壌中の無機態窒素及び土壌pHの変化

表3に1981年6月の下水汚泥（以下汚泥と記す）施用後の各処理区の測定結果を示した。

3.1.1 アンモニア態窒素

$\text{NH}_4\text{-N}$ は、汚泥施用区ではいずれも1週目に最も多く、2週目には大きく減少した。1週目の $\text{NH}_4\text{-N}$ 量は、連用2年目の区（S、M、L、Lb区）が連用3年目の区より多かった。連用3年目の区ではM1区の $\text{NH}_4\text{-N}$ 量が多かったが、この区は年1回施用区であり、S、M2区よりこれまでの施用回数が少ない。

これらの結果は連用回数の多い区で1週目の $\text{NH}_4\text{-N}$ が少ないことを示している。これは、1週

表 3 汚泥施用後の無機態窒素及び土壌pH (1981年夏作期間中)
Table 3 Inorganic nitrogen contents and pH values in surface soil after sludge application in June, 1981

Treatment	Date								
	5/27	6/18 (1)*	6/25 (2)*	7/2 (3)*	7/9 (4)*	7/23 (6)*	8/20 (10)*	10/13 (18)*	
NH ₄ -N (μg/g)**	C	2.62	1.06	1.06	0.92	0.44	0.50	2.59	0.86
	FC	2.06	0.63	0.88	0.52	0.27	0.00	1.42	0.77
	S	2.40	5.50	0.85	0.71	0.70	1.10	3.04	0.64
	M1	2.31	16.70	2.70	0.74	0.63	2.06	3.04	0.74
	M2	2.30	5.30	0.65	0.72	0.46	3.06	4.33	0.65
	L	2.10	6.90	0.57	0.67	0.65	4.20	2.42	0.66
	S'	2.90	10.30	4.00	2.00	0.60	4.50	3.61	0.73
	M'	3.10	23.70	2.10	1.73	1.42	6.60	3.27	0.81
	L'	2.50	34.00	9.10	3.00	0.98	6.20	10.70	0.87
	Cb	5.10	1.40	0.97	1.33	1.19	2.30	1.55	1.01
	Fb	3.80	28.80	3.70	0.87	0.81	1.22	1.48	0.83
Lb	3.20	56.90	22.60	2.30	1.25	5.90	1.21	0.75	
NO ₂ -N (μg/g)**	C	0.04	0.01	0.01	0.10	0.01	0.03	0.16	0.15
	FC	0.06	0.04	0.06	0.14	0.03	0.06	0.33	0.12
	S	0.03	0.08	0.05	0.11	0.02	0.06	0.64	0.13
	M1	0.03	0.14	0.07	0.13	0.02	0.06	0.38	0.15
	M2	0.07	0.13	0.05	0.15	0.03	0.12	0.98	0.12
	L	0.09	0.18	0.05	0.14	0.03	0.15	0.43	0.91
	S'	0.10	0.07	0.06	0.14	0.01	0.06	0.40	0.08
	M'	0.12	0.23	0.04	0.18	0.02	0.09	0.22	0.10
	L'	0.12	1.35	0.17	0.29	0.05	0.10	0.88	0.77
	Cb	0.12	0.22	0.03	0.13	0.01	0.03	0.15	0.06
	Fb	0.14	0.55	0.12	0.17	0.03	0.06	0.38	0.04
Lb	0.13	1.31	1.06	0.18	0.05	0.14	0.25	0.08	
NO ₃ -N (μg/g)**	C	0.5	3.1	5.0	6.0	9.0	14.6	4.9	0.8
	FC	0.5	83.3	106.1	81.1	90.4	157.3	45.9	1.0
	S	0.5	14.1	30.6	29.7	41.3	47.7	34.3	1.4
	M1	0.6	18.7	36.6	51.8	54.1	74.2	60.4	1.8
	M2	0.5	31.1	47.5	53.1	56.9	106.6	84.4	2.7
	L	0.3	40.2	69.0	81.8	88.2	152.0	137.5	3.5
	S'	1.4	10.8	32.3	42.3	31.4	67.4	28.6	1.7
	M'	3.0	31.1	49.0	62.2	76.3	77.7	69.7	2.6
	L'	0.9	30.8	72.5	117.5	110.2	136.4	142.7	2.7
	Cb	3.1	2.9	4.3	4.8	5.4	14.1	11.6	1.0
	Fb	2.5	59.3	102.2	80.3	98.2	152.4	147.4	0.8
Lb	6.0	32.1	110.1	138.4	96.7	181.5	134.8	2.5	
pH	C	6.64	6.49	6.77	6.70	6.90	6.59	6.86	7.06
	FC	7.19	6.84	6.75	6.88	7.04	6.79	6.87	6.87
	S	7.21	7.00	6.95	6.89	7.13	7.01	7.00	7.47
	M1	7.27	7.08	7.09	6.99	7.07	6.93	6.92	7.52
	M2	7.46	7.24	7.15	7.28	7.26	7.16	7.09	7.73
	L	7.58	7.48	7.30	7.26	7.20	7.15	7.11	7.84
	S'	7.13	7.03	7.04	7.00	6.97	6.87	6.79	7.48
	M'	7.21	7.29	6.96	6.99	7.03	7.05	6.79	7.23
	L'	7.28	7.17	6.90	6.96	6.92	6.89	6.70	7.25
	Cb	7.00	6.53	6.87	6.76	6.88	6.79	6.62	6.84
	Fb	7.12	6.94	6.75	6.90	6.88	6.83	6.71	6.81
Lb	7.15	7.12	7.01	6.98	6.91	6.81	6.90	6.97	

*weeks after sludge application

**dry weight basis

目の $\text{NO}_3\text{-N}$ 量が連用回数の多い区で多くなっていることから考えて、これらの区で硝化作用が早めに起こるためと考えられる。また、前年（1980年）の同時期の $\text{NH}_4\text{-N}$ 量と比較しても、前年は、汚泥施用後2～4週目頃まで $\text{NH}_4\text{-N}$ 量が多かった³⁾のに対して、今回は施用後2週目にはほとんどの区で $10\mu\text{g/g}$ 以下に減少している。したがって、連用3年目では、2年目よりさらに硝化作用が早まると考えられる。

3.1.2 亜硝酸態窒素

$\text{NO}_2\text{-N}$ は、乾土 1g 当たり $1\mu\text{g}$ 以上になったのは L' と Lb 区の 1, 2 週目のみで、他の区、他の時期は $0.1\mu\text{g}$ 前後と蓄積量は少なかった。 $\text{NO}_2\text{-N}$ 量は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量の多い時期に多い傾向にあり³⁾、今回は $\text{NH}_4\text{-N}$ 量が少なかったため $\text{NO}_2\text{-N}$ 量も少なく、硝化作用が速やかに進んだものと思われる。

3.1.3 硝酸態窒素

$\text{NO}_3\text{-N}$ 量は、各汚泥施用区とも汚泥の施用によって施用前より増加し、その後も6週目まで増加を続けた。その後、10週目に若干減少し、18週目には大きく減少して $10\mu\text{g/g}$ 以下の値になった。

全期間を通して、汚泥の施用量が多い区ほど $\text{NO}_3\text{-N}$ 量も多かった。また、今回の施用量が同じ M1 区と M2 区を比べると、常に M2 区の $\text{NO}_3\text{-N}$ 量が多くなっているが、これは M2 区では前年の11月にも汚泥を施用しており、その汚泥が冬期間に十分に分解されず、この時期に分解されたためと考えられる。

連用3年目区 (S, M2 及び L 区) とそれに施用量、年間施用回数に対応する連用2年目区 (S', M' 及び L' 区) の $\text{NO}_3\text{-N}$ 量を比較すると、1週目には3年目区が上回ったが、他の時期には2年目区が上回る傾向にあり、過去の連用年数による $\text{NO}_3\text{-N}$ 蓄積量の差は、明確でなかった。したがって、連用3年目と2年目の窒素の無機化量には大きな差はないと考えられる。

前年(1981年)の $\text{NO}_3\text{-N}$ 量の変化と比較すると、前年は、3週目に $\text{NO}_3\text{-N}$ が各区とも $10\mu\text{g/g}$ 以下に減少した³⁾のに対して、今回は長期間 $\text{NO}_3\text{-N}$ 量が多く保持されていたのが特徴的であった。

3.1.4 土壌 pH

汚泥施用区の pH は、汚泥の施用によって低下する傾向を示した。その後も10週目まで低下を続ける傾向が認められ、10週目における汚泥施用区間の pH の差は、施用1週目より小さくなっていた。汚泥多量施用区 (L 及び L' 区) においては、特に大きな pH の低下が認められた。しかし18週目には各処理区とも pH が上昇し、汚泥施用前より高い pH を示す区が多くなった。また、この18週目の pH は、汚泥施用量の多い区ほど高くなる傾向を示した。

pHがこのような変動をする一つの原因として、前述の硝酸態窒素の変動が考えられる。すなわち、汚泥施用区における硝酸態窒素は10週目まで増加する傾向にあり、pHが上昇する18週目には急減している。したがって、pHの変化と硝酸態窒素量の変化はよく対応している。しかし、18週目には、硝酸態窒素量の変化が少ない無処理区(C, C'区)でもpHが上昇しているので、他にもpH変化の原因があるものと考えられる。

3.2 汚泥連用4年目における土壤中の無機態窒素及び土壌pHの変化

表4に1982年6月の汚泥施用後の各処理区における無機態窒素及びpHの測定結果を示した。S, M1, M2及びL区は連用4年目、S', M', L'及びLb区は連用3年目になる。

3.2.1 アンモニア態窒素

$\text{NH}_4\text{-N}$ 量は、連用4年目区では1週目に最大になり、M1区以外の区では2週目に大きく減少した。連用3年目区では1~2週目に最大になって、3週目に減少しており、4年目区より減少が遅れた。しかし、前年(1981年)の結果(表3)と比較すると、今回は1週目の蓄積量が多く、また減少も遅れる傾向にあった。これは、前年と今回用いた汚泥が異なるためと考えられる。両汚泥とも同じ処理場の汚泥であるが、採取期が異なり表2に示したように今回施用した汚泥は有機物量が多く、そのため初期に分解量が多くなり $\text{NH}_4\text{-N}$ も多く生成することは考えられる。しかし、化学肥料区も同様に今回の $\text{NH}_4\text{-N}$ 量が多くなっていることから、両年の気象条件の違いによる影響も考えられる。ただし、この時期の平均気温はともに 20°C 前後で差がなかった⁹⁾。このように、汚泥の種類が異なるため、前年の結果と単純には比較できないが、今回の結果でみる限り、連用年数の多い区で硝化作用が早まる現象は、連用4年目でもまだ認められた。

3.2.2 亜硝酸態窒素

$\text{NO}_2\text{-N}$ は、各区とも1週目に多く、以後減少したが、1週目の量は連用年数が多く、施用量が多い区ほど多くなっている。2週目以降は、連用年数が少ないL'及びLb区で他の区より多い傾向にあった。前年の結果(表3)に比べると、今回は各区とも $\text{NO}_2\text{-N}$ が多くなっているが、これは今回 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量が多かったため、それに対応して $\text{NO}_2\text{-N}$ も蓄積してきたためと考えられる。

3.2.3 硝酸態窒素

$\text{NO}_3\text{-N}$ は、汚泥施用区では3週目まで増加を続け、4週目にわずかに減少し、8週目には大きく減少した。その後、13週目に増加がみられたが、18週目には $10\mu\text{g/g}$ 以下に減少した。 $\text{NO}_3\text{-N}$ の生成量は、施用量の多い区ほど多かった。また、施用4年目区と3年目区を比較してみると、1週目は4年目区の $\text{NO}_3\text{-N}$ 量が多かったが、2週目以降は両者間の差は明確でなかった。これは、前年も同じ傾向であり、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の生成量は、その年の汚泥の施用量に関係があり、過去の汚泥施

表 4 汚泥施用後の無機態窒素及び土壌 pH (1982 年夏作期間中)

Table 4 Inorganic nitrogen contents and pH values in surface soil after sludge application in June, 1982

Treatment	Date										
	5/27	6/18 (1)*	6/25 (2)*	7/2 (3)*	7/9 (4)*	7/23 (6)*	8/6 (8)*	8/20 (10)*	9/9 (13)*	10/15 (18)*	
NH ₄ -N (μg/g)**	C	0.42	0.57	0.66	0.53	0.35	0.58	0.53	0.60	0.36	—
	FC	0.21	29.19	0.22	0.14	0.42	0.65	0.40	0.48	0.31	—
	S	0.31	9.56	1.43	6.93	0.70	0.70	0.56	0.54	0.50	—
	M1	0.26	46.67	31.51	12.13	1.06	0.78	0.54	0.66	0.37	—
	M2	0.28	13.12	3.56	1.84	0.44	0.68	0.61	0.51	0.38	—
	L	0.20	66.46	5.46	1.44	1.01	0.83	0.36	0.70	0.40	—
	S'	0.48	10.09	1.56	1.32	1.02	0.89	0.44	0.45	0.52	—
	M'	0.29	29.03	39.10	0.46	3.37	1.44	0.48	0.43	0.43	—
	L'	0.34	43.45	54.91	9.58	5.99	2.59	0.51	0.57	0.46	—
	Cb	1.65	0.55	0.98	0.24	0.65	0.80	0.36	0.39	0.36	—
	Fb	0.32	68.24	7.29	1.50	0.64	0.67	0.24	0.34	0.49	—
	Lb	0.60	74.16	79.03	7.98	7.54	1.11	0.55	0.68	0.55	—
	NO ₂ -N (μg/g)**	C	0.04	0.06	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.04
FC		0.04	1.05	0.02	0.05	0.04	0.04	0.02	0.07	0.04	—
S		0.04	0.52	0.04	0.48	0.07	0.04	0.01	0.07	0.04	—
M1		0.03	1.78	0.60	2.41	0.13	0.06	0.01	0.04	0.04	—
M2		0.04	2.59	0.30	0.35	0.06	0.04	0.02	0.06	0.03	—
L		0.03	8.60	0.54	0.66	0.16	0.10	0.04	0.05	0.04	—
S'		0.04	0.23	0.00	0.09	0.06	0.06	0.02	0.04	0.02	—
M'		0.06	0.94	0.54	0.07	0.30	0.14	0.01	0.07	0.03	—
L'		0.05	2.54	1.83	1.06	0.69	0.32	0.02	0.15	0.04	—
Cb		0.04	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.18	0.01	—
Fb		0.06	2.21	0.30	0.18	0.09	0.05	0.05	0.18	0.01	—
Lb		0.07	1.50	1.13	0.85	0.88	0.34	0.03	0.21	0.03	—
NO ₃ -N (μg/g)**		C	1.8	3.5	1.0	3.2	2.4	4.3	1.2	4.7	2.8
	FC	0.6	63.2	26.9	19.6	7.3	7.6	1.3	3.3	2.6	1.2
	S	2.1	12.3	7.0	29.0	35.3	33.3	3.5	7.0	10.6	2.5
	M1	1.4	19.1	55.4	143.2	63.1	51.1	5.4	10.1	14.5	2.2
	M2	1.7	31.5	43.9	56.7	31.1	37.5	8.3	13.7	24.8	3.0
	L	1.4	59.7	91.1	116.7	59.8	68.9	14.2	13.7	38.0	4.8
	S'	2.9	9.9	10.8	44.8	24.3	45.6	3.9	7.5	15.6	2.0
	M'	4.0	20.6	59.6	38.3	66.9	101.1	6.3	12.4	29.8	2.9
	L'	2.2	29.1	87.6	115.0	102.4	100.6	13.3	5.4	48.3	4.4
	Cb	6.2	3.2	1.1	4.1	2.8	5.5	1.7	3.3	5.0	1.0
	Fb	6.4	41.4	52.0	41.0	16.1	22.3	1.5	20.4	4.2	0.7
	Lb	18.6	23.4	87.3	109.2	107.9	96.1	12.2	18.0	51.1	3.6
	pH	C	6.61	6.94	6.98	7.03	6.99	6.89	6.91	6.93	6.88
FC		7.01	7.00	7.16	7.25	7.15	7.21	7.31	7.30	7.06	7.56
S		7.37	7.35	7.33	7.30	7.35	7.16	7.24	7.27	7.07	7.59
M1		7.37	7.34	7.36	7.12	7.25	7.18	7.22	7.35	7.15	7.60
M2		7.74	7.56	7.49	7.58	7.44	7.47	7.54	7.51	7.48	7.88
L		7.77	7.53	7.60	7.47	7.59	7.33	7.56	7.55	7.50	8.06
S'		7.20	7.16	7.13	7.05	7.01	6.94	7.17	7.26	7.06	7.06
M'		7.69	7.28	7.29	7.23	7.12	7.18	7.35	7.47	7.37	7.72
L'		7.31	7.44	7.40	7.12	7.17	7.07	7.34	7.31	7.32	7.68
Cb		6.70	7.04	7.01	6.85	7.02	6.86	6.92	6.94	6.92	7.15
Fb		6.73	7.09	7.06	7.17	7.03	6.99	7.19	7.27	7.10	7.30
Lb		7.24	7.38	7.28	7.18	7.17	7.13	7.16	7.30	7.30	7.77

*weeks after sludge application

**dry weight basis

— not measured

用年数はほとんど影響しないことを示している。また、化学肥料区 (FC 区) の $\text{NO}_3\text{-N}$ 量は、1 週目以降減少の一途にあり、3 週目以降は汚泥少量施用区 (S 区) より少ない値になった。このことから、汚泥は化学肥料よりも遅効性の窒素肥料としての価値をもっていると考えられる。

3.2.4 土壌 pH

土壌 pH は、汚泥施用区では前年と同様、汚泥の施用によって低下する傾向にあり、その後も 6 週目までわずかながら低下する傾向にあった。8 週目にわずかに上昇、18 週目に大きく上昇したが、この時期には $\text{NO}_3\text{-N}$ 量が減少しており、pH と $\text{NO}_3\text{-N}$ 量に対応がみられた。18 週目の pH は、各区とも施用前より高く、特に汚泥施用量が最も多い L 区では 8 以上の高い値になった。

3.3 硝酸態窒素量の変化と降雨パターン

これまでの結果から、汚泥の連用を続けた場合、連用 4 年目でも硝化作用が早まること、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は過去の施用年数と関係なく、その年の汚泥の施用量にほぼ比例して生成することが明らかにされた。しかし、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 量の変動は年によって異なり、例えば 1981 年は施用後 10 週目まで高い値を保持したが、1982 年は 8 週目にいったん減少し、その後増加、減少を繰り返した。土壌中の $\text{NO}_3\text{-N}$ が減少する原因としては、植物による吸収と降雨による下層への溶脱が考えられる。しかし、表 3 と表 4 に示したように、裸地区と植栽区の $\text{NO}_3\text{-N}$ は同じ時期に減少していることから、植物の影響は小さいとみられ、変動の主因は降雨によるものと考えられる。

1981 年と 1982 年の試験期間中の当ほ場における降雨量を図 1 に示したが、降雨量の多い時期と $\text{NO}_3\text{-N}$ の減少期はよく一致した。すなわち、1981 年は $\text{NO}_3\text{-N}$ が減少しない 10 週目 (8/20) までは降雨量が非常に少なく、その後 $\text{NO}_3\text{-N}$ が大きく減少した 18 週目 (10/13) までの間には 1 日 20 mm 以上の降雨が数回あった。また、1982 年も $\text{NO}_3\text{-N}$ がわずかに減少した 4 週目 (7/9) には 2 日前に 20 mm の降雨であり、大きく減少した 6 週目 (7/23) から 8 週目 (8/6) にかけては、1 日 20 mm 以上の降雨が 3 回あった。さらに再減少した 18 週目 (10/15) までには 1 日 89 mm の降雨をはじめかなりの降雨があった。このように、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 量の変動は降雨量に左右されて、降雨量の多い時期に減少した。したがって、汚泥の施用量を多くすれば、生成される $\text{NO}_3\text{-N}$ は多くなるが、それだけ降雨によって溶脱される量も多くなる可能性がある。汚泥の場合、少量の施用 (3.75 t/ha) でも施用後半には、化学肥料区よりも $\text{NO}_3\text{-N}$ 量が多く、肥効が長いと考えられるので、その特性を生かした施用法を検討する必要があると思う。すなわち、栽培期間の比較的長い植物の肥料として用いること、施用量は少なめにし不足分は化学肥料で補うこと、降雨期の施用はできるだけ避けることなどの利用法である。

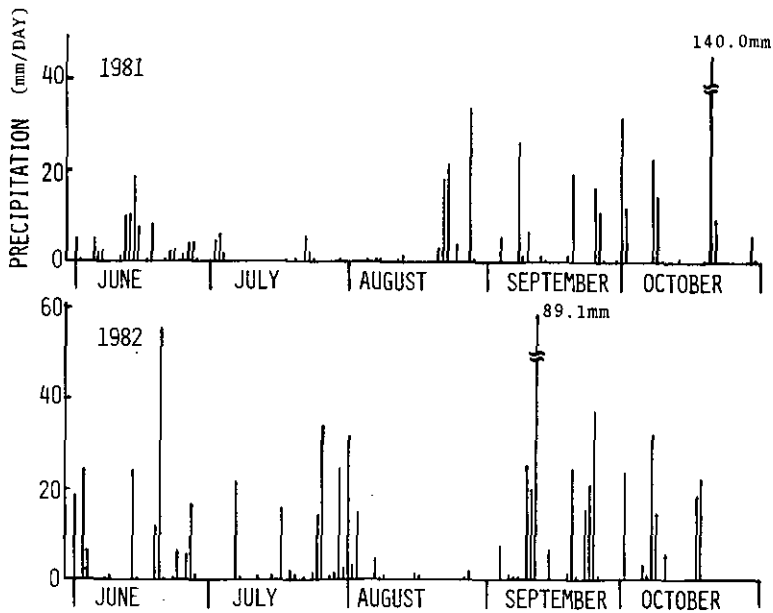


図 1 実験期間中の降雨量⁵⁾

Fig. 1 Record of precipitation during the experiment⁵⁾

4 まとめ

汚泥を長期間連用した土壤中の無機態窒素量の変化を明らかにするため、約 5 a の淡色黒ボク土のほ場を用いて、汚泥の連用試験を行った。汚泥の施用量は、乾物として 3.75 t/ha/回(年 2 回), 7.5 t/ha/回(年 1 回及び年 2 回), 15 t/ha/回(年 1 回)であり、連用 3 年目と 4 年目の変化を追跡し、次の結果を得た。

- (i) 連用回数が多い土壌ほど、硝酸化成が早めに起こる。
- (ii) $\text{NO}_3\text{-N}$ は過去の汚泥施用年数や施用量に関係なく、その年の施用量にほぼ比例して生成する。
- (iii) 生成後の $\text{NO}_3\text{-N}$ 量の変動は年によって異なり、これには降雨パターンの違いが反映している。
- (iv) $\text{NO}_3\text{-N}$ の減少時に土壌 pH が上昇する。

謝 辞

本研究の実験に御協力して頂いた水質土壌環境部 久保井 徹研究員、また、実験ほ場の降雨量及び気温のデータを提供して頂いた技術部ほ場係長 山口武則氏に心より感謝する。

引用文献

- 1) 服部浩之・鷺沢清司・久保井徹・藤井國博・松坂泰明・大羽 裕(1983): 下水汚泥施用土壌の理化学性. 国立公害研究所研究報告, 第 47 号, 13-26.
- 2) 服部浩之・豊田敏治・久保井徹・広木幹也・藤井國博・松坂泰明(1983): 下水汚泥連用土壌における全炭素, 全窒素及び無機態窒素量の変化. 国立公害研究所研究報告, 第 47 号, 27-35.
- 3) 服部浩之・藤井國博・久保井徹・広木幹也・小林峰雄・矢崎仁也・大羽 裕 (1983): 下水汚泥施用淡色黒ボク畑土壌における無機態窒素の経時変化. 国立公害研究所研究報告, 第 47 号, 45-62.
- 4) 久保井徹・藤井國博(1980): ほ場および有底枠ほ場の均一栽培試験成績, 国立公害研究所研究報告, 第 14 号, 213-231.
- 5) 山口武則・藤沼康実(1984): 国立公害研究所実験ほ場の土壌及び気象に関する調査資料集. 国立公害研究所研究資料, 第 26 号, 84p.

II-4

下水汚泥の連用が土壤の全炭素、
腐植酸及びフルボ酸に及ぼす影響

**Effect of Repeated Applications of Limed Sewage Sludge on
the Contents of Total C and Humic and Fulvic Acids in Soil**

向井 哲¹・服部浩之¹

Satoshi MUKAI¹ and Hiroyuki HATTORI¹

Abstract

In a field experiment conducted on a light colored Kuroboku soil (Ochric Andosol), limed sewage sludge was applied annually at the rates of 7.5 and 15 dry tonnes/ha for 4 and 3 years, respectively. Soil samples were taken at specific intervals from treated and control plots and were analyzed for total C content and for the content in humic acid (HA) and fulvic acid (FA) extracted sequentially with 0.1 N NaOH and 0.1 M Na₄P₂O₇. Total soil C content increased gradually by annual sludge application at both rates during the first 3 or 2 years of application and then remained almost constant or increased only slightly. Both treated plots showed a gradual increase in the amount (difference in relation to the amount in the control) of NaOH-extractable HA every year until the period immediately preceding the last year of application, from which time a marked decrease had been observed. However, the amount (difference in relation to the amount in the control) of Na₄P₂O₇-extractable HA increased with the increase in the number of years of application. Repeated sludge applications at both rates lowered gradually the degree of humification of NaOH-extractable HA, whereas that of Na₄P₂O₇-extractable HA did not exhibit significant variations throughout the study. These findings suggest that when limed sludge is added repeatedly to an aerobic soil, the strongly humified portions of NaOH-extractable HA in the treated soil can be incorporated into the Na₄P₂O₇-extractable HA, possibly via linkages with Ca present in the sludge. Amounts of FA, both NaOH- and Na₄P₂O₇-extractable, increased more than the amounts of NaOH- and Na₄P₂O₇-extractable HAs by both sludge treatments. Sludge applications caused a small increase in the HA/FA ratios in the NaOH and Na₄P₂O₇ extracts.

1 はじめに

近年、下水道の普及に伴って下水汚泥の発生量が年々増加する傾向にあり、その処理が社会的問題となりつつある。この状況にあって、下水汚泥は一般に、有機質に富み、肥効成分を多く含

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.

有していることから、他方、堆きゅう肥などの有機物の施用量が激減している農業体系にいわゆる地力の低下の懸念があることから、最近、この有機廃棄物を肥料、有機資材として農地に還元利用し、同時に土壤の物質分解機能により処理しようとする傾向が強くなってきている。

下水汚泥の農地利用の方策に際し、これまでに、肥効試験、土壤中での分解試験が数多くなされてきている。後者に関する既往の報告によれば、消化下水汚泥の畑地条件下での分解率は6か月間で20%¹⁾、約1年間で12~25%²⁾、19~29%³⁾、46%⁴⁾となっている。一方、消化下水汚泥の有機物が、土壤施用14か月後に、腐植酸画分中に回収されたとの報告⁵⁾がある。これらの結果は、下水汚泥有機物のかなりの部分は分解し難く、1年を越える期間土壤中に残留するであろうことを示唆している。そこで、下水汚泥有機物の土壤中での残留形態、及びそれが土壤の有機物に及ぼす影響を明らかにすることは、土壤中における下水汚泥の有機物の動態を明らかにし、また有機資材としてそれを評価する上で、有用な情報を提供するものと考えられる。

本報告では、下水汚泥の連用が土壤の有機物に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、畑地ほ場に石灰処理下水汚泥を数年間施用しつつ、土壤の全炭素含量、及び土壤から抽出される各種の腐植物質画分の量と性質を経時的に調べた結果について述べる。

2 材料及び方法

2.1 供試汚泥

同一の団地下水処理場から、1979~1982年の間毎年、石灰・塩化鉄で凝集処理した脱水ケーキの汚泥（以下、石灰汚泥、又は汚泥と略記する）を採取し、天日乾燥後、フレークの形状で後述のほ場試験に供した。これらの石灰汚泥のうち、1981、1982年の順に採取したT-1、T-2汚泥の化学的性質を表1に示した。両汚泥はいずれも、石灰処理のために高いアルカリ性を示している。T-2汚泥はT-1汚泥に比べて、有機物含量が高い。しかし、両汚泥のC/N比は大差ない。また、後述した供試土壤の分析法に準じて行った両汚泥の有機物の分析の結果（表2）によると、両汚泥ともに、腐植として抽出される有機物を比較的多く（乾燥汚泥の15~19%）含有しており、その中ではフルボ酸、特にNaOH抽出部のそれが著しく多いことが注目される。

供試汚泥の分析に当たり、灰分は550°C、1時間の条件で測定した。全炭素・全窒素はC、Nコーダで分析し、有機及び無機の炭素量は、5% H₂SO₃処理⁶⁾前後の試料の炭素量から求めた。

表 1 供試石灰汚泥の性質
Table 1 Properties of limed sewage sludges used

Sludge ¹	pH (H ₂ O)	Ash	Organic C	Inorganic C ²	Total N	Total C/N
% dry wt						
T-1	10.1	67.4	16.7	4.5	2.71	7.8
T-2	8.9	51.3	22.8	5.4	3.43	8.2

¹ Sludges, T-1 and T-2, were samples from the same treatment plant but in different years.

² Inorganic C refers to carbon in the form of carbonate.

表 2 供試石灰汚泥の有機物の分析結果

Table 2 Analysis of organic matter of limed sewage sludges used

Sludge ¹	Water-soluble organic substances	Lipids	0.1 N NaOH extractable		0.1 M Na ₄ P ₂ O ₇ extractable	
			Humic acid	Fulvic acid	Humic acid	Fulvic acid
% dry wt						
T-1	2.7	3.9	1.3	8.0	1.1	4.7
T-2	4.2	6.2	2.9	10.6	1.0	4.6

¹See footnote in Table 1.

2.2 ほ場試験の方法

本試験は、国立公害研究所の別団地（筑波郡谷田部町小白裕）にある淡色黒ボク土の畑地ほ場内に次の3種類の試験区（各区の面積、2×2 m²）を設定して行った。なお、本土壌は全炭素：1.83～1.90%，全窒素：0.14～0.16%，pH(H₂O)：6.54～6.94であった。

(1) 対照区：1979年7月～1983年6月の期間、汚泥、化学肥料を施用しない区、(2) 汚泥少量区：1979年7月～1982年6月の期間、毎年6月(1979年は7月)に、7.5 t 乾物/haの汚泥を表層土15 cmに混入する区、(3) 汚泥多量区：1980年6月～1982年6月の期間、毎年6月に、15 t 乾物/haの汚泥を表層土15 cmに混入する区。

なお、前述したT-1汚泥は1981年に、T-2汚泥は1982年に施用した。また、1979年7月～1980年4月の期間は、3試験区のすべてにナス・コムギを栽培したが、それ以後は、汚泥少量区のみになす・ソルガム・コムギを輪作した。栽培作物は、収穫時に地上部と根部を取り去り、作物残渣が土壌中に残留しないようにした。

土壌試料の採取は、1980年6月の汚泥施用後1年目、その後は各年の汚泥施用直後、及び施用後1, 3, 6, 9, 12か月目に相当する時期に行った。土壌は、各試験区につき、直径5 cm、深さ15 cmの採土円筒を用いて表層土を無作為的に4地点から採取し、混合均一化した後、風乾、粉碎して2 mmの篩を通過させたものを以下の分析に供した。

2.3 供試土壌の分析法

1) 全炭素：C、N コーダ（柳本、MT 500 型）を用いて測定した。

2) 腐植の逐次抽出：全炭素100 mg以下となる量の土壌（又は汚泥）に対し、あらかじめ、弘法・和田の方法⁷⁾により水溶性有機物を、次いでメタノール・ベンゼン等量混液を用いて脂質を抽出除去（連続48時間ソックスレー抽出）した後、熊田、太田の方法⁸⁾に準じ、0.1 N NaOH (30 ml)、次いで0.1 M Na₄P₂O₇ (30 ml)を用いて、沸騰湯浴中で腐植の逐次抽出を行った。NaOHとNa₄P₂O₇による腐植抽出液は各々、蒸留水を加えて100 mlとした。

3) 腐植酸とフルボ酸の分別定量：腐植抽出液の70 mlに希硫酸を加えてpH 3とし、一昼夜放置（ただし、Na₄P₂O₇による腐植抽出液の場合は、フロックの形成が極めて遅いため、5°Cで12

日間放置した)後、遠心分離(9,500 rpm, 20分)して沈殿部(腐植酸)と溶液部(フルボ酸)に分別した。沈殿部は希硫酸2mlと蒸留水10mlで順次洗浄し、洗液は溶液部と合した。

腐植酸は、0.1 N NaOHに溶解して50mlに定容し、溶解後2時間以内に、ベックマン分光光度計(34型)を用いて、波長220~700nmの領域の吸収曲線を測定した。

腐植酸とフルボ酸の各抽出量は、重クロム酸化法⁹⁾によって測定し、ショ糖mg/100g乾土で表示した。

上記の方法によって得られた結果から、以下の方法により、腐植酸の $\Delta \log K$ と RF の値を求めた。

$\Delta \log K$: 色調係数、波長400と600nmの吸光度の対数の差。

RF : 相対色度、〔波長600nmの吸光度の値/吸光度の測定に用いた腐植酸溶液30ml中の有機物量mg〕 $\times 1000$ 。

3 結果及び考察

3.1 石灰汚泥の連用が土壌の全炭素含量に及ぼす影響

石灰汚泥の連用に伴う土壌の全炭素含量の推移を表3に示した。まず対照区についてみると、その含量は本調査期間(1981年5月~1983年6月)中特に大きい変化はなく、ほぼ一定した値(平均値 $1.86 \pm 0.020\%$)であることが認められる。他方、両汚泥区的全炭素含量はいずれも、過去の汚泥施用により1981年5月の時点で既に対照区よりも高い値を示しており、また、その含量はいずれの年においても、施用直後増大し、その後1~3か月間の夏期に大きく減少して、それから施用1年後までは比較的緩慢に減少しつつ、ほぼ一定した値を示した。この場合、1981年の汚泥多量区と1982年の汚泥少量区において、全炭素含量が施用直後よりも施用1か月後で高くなっているが、この原因は、汚泥のフレークが施用後1か月の期間ではほとんど細片化しないため、土壌試料のサンプリングに誤差が生じたことにあると思われる。また、汚泥区と対照区間の全炭素含量の差を各年の汚泥施用1年後ごとにみると、汚泥少量区の場合は1981, 1982, 1983年の順にそれぞれ、0.32, 0.46, 0.43%, 汚泥多量区では0.39, 0.61, 0.73%であった。これらの結果から、いずれの汚泥区においても汚泥の施用年数が増すと、この差が漸次増大する、しかし、その増大の程度は次第に低下する傾向が認められる。なお、結果は示さなかったが、全窒素含量についても、以上に述べた全炭素含量の場合と同様の結果が得られた。ところで、本実験では全炭素量を測定したが、供試汚泥中には比較的少量の無機炭素(炭酸塩の炭素)が含まれている(表1参照)ため、汚泥施用土壌にはそれが少なからず存在していると考えられる。そこで、汚泥施用直後の土壌につき、無機炭素が全炭素中に占める割合を調べたところ、この割合は1981年の土壌で0~6%, 1982年の土壌では2.3~2.7%であった。また、この無機炭素の量が1年後も変化しないと仮定すると、施用1年後の土壌におけるこの割合は、1982年で0~7.3%, 1983年で2.6~3.5%となる。いずれにしても、この割合は非常に低く、表3に示した全炭素含量はおおむね有機炭素

含量に相当すると考えられる。したがって、これまでに述べた実験結果は、1) 石灰汚泥の土壤中での分解が主として施用後3か月間で起こり、その後は比較的緩慢であること、2) 石灰汚泥は、その連用によって土壤の全有機物含量を漸次増大する。しかし、その増大効果は次第に低下すること、そして土壤の全有機物含量が新たなレベルで維持される可能性があることを示していると考えられる。

表 3 石灰汚泥の連用が淡色黒ボク土の全炭素含量に及ぼす影響
Table 3 Effect of repeated applications of limed sludge on total C content in a Kuroboku soil

Percentage of total C in the top 15 cm layers into which limed sludge was incorporated.

Date of soil sampling			Limed sludge treatment (tonnes/ha/y)		
			Control	7.5	15
% dry wt					
1981	May	27 [†]	1.90	2.22	2.29
	June	13 [*]	1.83	2.79	2.54
	July	9	1.87	2.45	2.67
	Sept.	9	1.86	2.45	2.69
	Dec.	11	1.86	2.31	2.47
1982	June	11	1.86	2.32	2.47
		11 [*]	1.86	2.54	3.24
	July	9	1.85	2.75	3.05
	Sept.	9	1.88	2.59	2.69
	Dec.	11	1.83	2.42	2.59
1983	Mar.	18	1.87	2.29	2.53
	June	15	1.86	2.29	2.59

Remark: The symbols, "†", and "*" in 1981 and 1982, indicate the time corresponding to about one-year after limed sludge application in 1980, and the time that immediately followed the application of limed sludges T-1 and T-2, respectively.

なお、前述したように汚泥の連用に伴って土壤の全炭素含量が増大するが、その増大の程度は次第に低下する現象は、石灰処理をしない下水汚泥を毎年 40 t/ha、4 年間施用した赤黄色土のほ場試験の結果¹⁰⁾と同様であり、本実験の結果はこれを支持していると思われる。また、この現象が発現する原因の一つは、正の起爆作用 (positive priming action)¹¹⁾によって、新たに施用される汚泥が土壤固有の有機物 (native soil organic matter) の分解を促進することにあると推定される。事実、炭素 14 で標識した人工汚泥の添加が土壤固有の有機物の分解を 1.4~2.2 倍高めたことが報告されている¹²⁾。さらに他の原因として、新たに施用される汚泥が過去に施用された汚泥の分解を促進する作用を想定することができると考えられる。

3.2 石灰汚泥の連用が土壤から抽出される腐植酸及びフルボ酸の量と性質に及ぼす影響

石灰汚泥の連用が、NaOH, $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ の各抽出剤によって土壤から抽出される腐植酸、フルボ酸の量と性質に及ぼす影響を経時的に調べた結果を表4~7に示した。以下、用いた抽出剤の種類別に、得られた結果について述べる。

3.2.1 NaOH 抽出腐植酸及びフルボ酸

まず、表4に示した腐植酸抽出量をみると、両汚泥区はともに、いずれの時期においても、対照区よりも高い値を与えている。この汚泥施用による腐植酸の増大量（カッコ内に示した）は、いずれの汚泥区においても、1981年の場合には施用後初期に上昇し、施用3か月後さらに若干上昇して、その後は低下し、1982年では施用後初期で最も多く、その後は次第に低下する傾向を示した。また、この増大量を各年の汚泥施用1年後ごとにみると、両汚泥区は、いずれの年においても、ほぼ同じ値を与えており、その量は1982年の施用前までは施用年数が増すとともに上昇するが、その後は逆に著しく低下することが認められた。他方、汚泥施用に伴う腐植酸の質的变化を各年の汚泥施用1年後ごとにおけるその $\Delta \log K$ と RF （表5）からみると、まず、両汚泥区の場合の $\Delta \log K$ はいずれも、対照区のそれと比べて、1981年5月の時点で既に高い値を示してお

表 4 石灰汚泥の連用が淡色黒ボク土の0.1N NaOH抽出腐植酸及びフルボ酸の量に及ぼす影響

Table 4 Effect of repeated applications of limed sludge on the amounts of 0.1N NaOH-extractable humic acid and fulvic acid in a Kuroboku soil

Date of soil sampling			Humic acid			Fulvic acid		
			Limed sludge treatment (tonnes/ha/y)			Limed sludge treatment (tonnes/ha/y)		
			Control	7.5	15	Control	7.5	15
mg/100 g dry soil								
1981	May	27 [*]	74	135 (61) ^a	135 (61) ^a	594	774 (180) ^a	835 (241) ^a
	June	13 [*]	74	161 (87)	176 (102)	549	968 (419)	906 (357)
	July	9	64	176 (112)	166 (102)	517	912 (395)	929 (412)
	Sept.	9	88	211 (123)	205 (117)	745	1273 (528)	1159 (414)
	Dec.	11	101	189 (88)	202 (101)	772	1075 (303)	1083 (311)
1982	June	11	129	209 (80)	204 (75)	704	938 (234)	922 (218)
		11 [*]	129	235 (106)	369 (240)	704	963 (259)	1337 (633)
	July	9	119	255 (136)	319 (200)	685	1061 (376)	1261 (576)
	Sept.	9	115	225 (110)	210 (95)	609	899 (290)	935 (326)
	Dec.	11	129	244 (115)	231 (102)	628	885 (257)	951 (323)
1983	Mar.	18	76	146 (70)	155 (79)	657	852 (195)	954 (297)
	June	15	85	134 (49)	136 (51)	697	879 (182)	970 (273)

^{*} See footnote in Table 3.

^a Figures in brackets indicate the difference between treated and control plots.

表 5 石灰汚泥の連用が淡色黒ボク土の 0.1N NaOH 抽出腐植酸の $\Delta \log K$ 及び RF に及ぼす影響Table 5 Values of $\Delta \log K^a$ and RF^b of 0.1 N NaOH-extractable humic acid in a Kuroboku soil, as affected by repeated applications of limed sludge

Date of soil sampling	Limed sludge treatment (tonnes/ha/y)						
	Control		7.5		15		
	$\Delta \log K$	RF	$\Delta \log K$	RF	$\Delta \log K$	RF	
1981	May 27 [*]	0.624	85	0.644	69	0.637	77
	June 13 [*]	0.632	95	0.686	48	0.667	55
	July 9	0.622	105	0.654	58	0.678	46
	Sept. 9	0.636	78	0.682	47	0.689	40
	Dec. 11	0.634	70	0.663	54	0.668	51
1982	June 11	0.637	53	0.665	42	0.668	38
	11 [*]	0.637	53	0.678	36	0.700	26
	July 9	0.627	57	0.678	35	0.700	28
	Sept. 9	0.619	79	0.695	42	0.675	43
	Dec. 11	0.604	85	0.670	51	0.686	40
1983	Mar. 18	0.643	80	0.693	47	0.692	39
	June 15	0.630	80	0.685	51	0.729	34

^a $\Delta \log K (= \log K_{400} - \log K_{600})$: The difference of log absorbances of dilute alkaline solution of humic acid at 400 and 600 nm.

^b RF : (K_{600} value/mg organic matter in 30 ml of the dilute alkaline humic acid solution used for determining light absorption) $\times 1000$.

^{*} See footnote in Table 3.

り、その後さらに上昇していることが認められる。これに対して両汚泥区の場合の RF はいずれも、 $\Delta \log K$ の場合とは反対の傾向を示した。これらの傾向は、汚泥多量区の方で顕著であった。以上に述べた事実は、石灰汚泥の連用が NaOH で抽出される腐植酸の量をいったんは累増するが、その後はこの増大量を著しく減少し、一方においてはこの腐植酸の腐植化度を次第に低下させることを示していると言えよう。

また、以上に述べた実験結果は、表 3 に示した両汚泥区における全炭素含量の推移を考慮すると、いずれの汚泥施用土壌においても、少なくとも NaOH 抽出腐植酸の増大量が著しく減少した時点においては、この腐植酸中の腐植化度の高い部分が、一部は分解あるいは他の有機物画分に移行し、それと並行して恐らくは汚泥由来の有機物が新たに、NaOH で抽出される腐植酸部に加わったことを意味していると考えられる。この点については後で再び触れることにする。

汚泥の施用によって増大する NaOH 抽出腐植酸の実体については、現在までのところ十分には研究されていないが、下水汚泥の施用がこの腐植酸中にタンパク様物質を富化することが報告されており⁹⁾、また、著者らは、供試汚泥の NaOH 抽出腐植酸画分が白色(ただし、pH 3 の酸性下でしばらく放置すると褐変した)であり、かつその紫外・可視部の吸収曲線が、一般にタンパク質溶液でみられる¹³⁾ ように 280 nm 付近のみに吸光係数が非常に高い吸収の肩を示すこと、及

びこの波長付近の吸光度が対照区土壌よりも汚泥施用土壌の NaOH 抽出腐植酸で常に高いことを認めた。したがって、本実験において汚泥施用によって増大した NaOH 抽出腐植酸の少なくとも一部は、汚泥由来のタンパク様物質であると推察される。また、この推察が正しいとすると、このタンパク様物質の一部は元来土壌中に存在している腐植酸と吸着して安定化する¹⁴⁾ ことによって、土壌中に長期間残留するものと思われる。

他方、フルボ酸の抽出量(表4)をみると、両汚泥区はともに、いずれの年においても、対照区よりも高い値を示しており、かつ汚泥施用後初期の方が施用6か月以後よりも高い値を示している。しかし、各年の汚泥施用1年後ごとにみたこのフルボ酸の増大量(カッコ内に示した)の変化には、いずれの汚泥区においても、一定の傾向を認め難かった。ただし、この増大量の程度は概して汚泥多量区の方が大であった。また、この増大量は腐植酸のそれよりも著しく大であった。これらの事実は、石灰汚泥が NaOH で抽出される腐植酸よりもフルボ酸の量をより一層増大する効果があること、及びこの効果には、その汚泥自体において NaOH で抽出されるフルボ酸部の方が腐植酸部よりも著しく多い(表2参照)ことが反映していることを示していると思われる。

次に、表4の結果から、各年の汚泥施用1年後における腐植酸抽出量/フルボ酸抽出量比を算出すると、この比は、1981年の場合、対照区、汚泥少量区、汚泥多量区の順にそれぞれ、0.12, 0.17, 0.16, 1982年では0.18, 0.22, 0.22, 1983年においては0.12, 0.15, 0.14であった。いずれの年においても、この比は両汚泥区の方が対照区よりも多少高いことが認められ、石灰汚泥は、いずれの施用量においても、この比を若干高める効果があることが指摘される。

ここで、対照区土壌における腐植酸について述べると、1981年5月におけるその抽出量(表4)は、その約1年後に著しく増大するが、さらに1年を経過すると再び1981年5月のレベルに近い量に減少している。また、この抽出量の場合と同様の傾向が $\Delta \log K$ (表5)において認められる。さらに RF (表5)の場合には、 $\Delta \log K$ の場合とは反対の傾向を示していることが指摘される。これらの現象は、その解析にはさらに長期にわたる調査が必要ではあるが、NaOH で抽出される腐植酸が量と性質ともに、土壌中において動的な平衡状態にあることを推測させる点において注目される。

3.2.2 $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 抽出腐植酸及びフルボ酸

石灰汚泥の施用は、NaOH 抽出腐植酸の場合と同様に、 $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 抽出腐植酸の量をも増大した(表6)。しかし、その運用に伴う後者の増大量(カッコ内に示した)の推移は、前者の場合とは異なっていた。すなわち、各年の汚泥施用1年後ごとにみた $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 抽出腐植酸の増大量は、いずれの汚泥区の場合にも、施用年数の初期には少ないが、その年数が増すに伴って著しく上昇した。この傾向は汚泥多量区で顕著であった。その結果、この腐植酸の増大量は、1981年5月には NaOH 抽出腐植酸の増大量の約半分であったが、1982年6月には後者と同程度となり、1983年6月では後者の1.9あるいは3倍となった。他方、 $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 抽出腐植酸の $\Delta \log K$ と RF (表7)を

表 6 石灰汚泥の連用が淡色黒ボク土の $0.1M Na_4P_2O_7$ 抽出腐植酸及びフルボ酸の量に及ぼす影響Table 6 Effect of repeated applications of limed sludge on the amounts of $0.1 M Na_4P_2O_7$ -extractable humic acid and fulvic acid in a Kuroboku soil

Date of soil sampling			Humic acid			Fulvic acid		
			Limed sludge treatment (tonnes/ha/y)			Limed sludge treatment (tonnes/ha/y)		
			Control	7.5	15	Control	7.5	15
			mg/100 g dry soil					
1981	May	27*	161	188 (27) ^a	192 (31) ^a	673	674 (1) ^a	735 (62) ^a
	June	13*	140	250 (110)	214 (74)	676	742 (66)	707 (31)
	July	9	150	195 (45)	219 (69)	694	700 (6)	765 (71)
	Sept.	9	165	259 (94)	290 (125)	896	1011 (115)	1057 (161)
	Dec.	11	189	266 (77)	272 (83)	853	1040 (187)	986 (133)
1982	June	11	154	223 (69)	232 (78)	772	911 (139)	902 (130)
		11*	154	251 (97)	369 (215)	772	916 (144)	912 (140)
	July	9	143	265 (122)	337 (194)	733	993 (260)	1043 (310)
	Sept.	9	154	273 (119)	278 (124)	732	850 (118)	917 (185)
	Dec.	11	133	231 (98)	250 (117)	706	822 (116)	856 (150)
1983	Mar.	18	161	272 (111)	305 (144)	738	860 (122)	928 (190)
	June	15	161	253 (92)	313 (152)	749	876 (127)	941 (192)

** See footnote in Table 3.

^a Figures in brackets indicate the difference between treated and control plots.

各年の汚泥施用1年後ごとにみると、まず、 $\Delta \log K$ の場合には、両汚泥区はともに、いずれの年においても、対照区と大差ないことが認められ、この点においても NaOH 抽出腐植酸の場合とは異なっていた。 RF の場合には、いずれの年においても、両汚泥区はいずれも、対照区よりも低い値を示す傾向が認められた。しかし、この RF の低下の程度は NaOH 抽出腐植酸の場合にみられたよりもかなり小さかった。これらの事実から、石灰汚泥は、その連用の初期には $Na_4P_2O_7$ で抽出される腐植酸を多量には増大しないが、連用年数が増すに伴いその量を著しく累増すること、及びこの腐植酸の腐植化度は、その連用によって大きくは変化しないことが示唆されると考える。

また、以上に述べた実験結果と、3.2.1で述べた実験結果、すなわち、石灰汚泥の連用に伴って、NaOH 抽出腐植酸の量がいったん累増した後、著しく減少することとこの腐植酸の腐植化度が次第に低下することを併せて考慮するならば、石灰汚泥施用土壤において少なくとも NaOH 抽出腐植酸の増大量が著しく減少した時点においては、この腐植酸中の腐植化度の高い部分が、一部は他の有機物画分に移行したとする前述の推定は、次のように説明できると思われる。すなわち、石灰汚泥の連用に伴ってその中に含まれている Ca が土壤中に次第に集積し、この土壤の CEC に相当する量以上に達すると、NaOH で抽出される腐植酸中の腐植化度の高い部分が、この過剰の

表 7 石灰汚泥の連用が淡色黒ボク土の 0.1 M Na₄P₂O₇抽出腐植酸の Δlog K 及び RF に及ぼす影響
 Table 7 Values of Δlog K^a and RF^b of 0.1 M Na₄P₂O₇-extractable humic acid in a Kuroboku soil, as affected by repeated applications of limed sludge

Date of soil sampling	Limed sludge treatment (tonnes/ha/y)							
	Control		7.5		15			
	Δlog K	RF	Δlog K	RF	Δlog K	RF		
1981	May	27*	0.599	72	0.601	64	0.591	72
	June	13*	0.608	72	0.602	63	0.586	69
	July	9	0.605	73	0.591	68	0.602	62
	Sept.	9	0.580	79	0.586	62	0.574	63
	Dec.	11	0.579	77	0.582	67	0.587	62
1982	June	11	0.593	66	0.585	66	0.585	63
		11*	0.593	66	0.585	61	0.570	53
	July	9	0.574	74	0.563	63	0.576	54
	Sept.	9	0.587	76	0.596	59	0.577	58
	Dec.	11	0.593	72	0.589	63	0.597	57
1983	Mar.	18	0.604	71	0.609	62	0.604	56
	June	15	0.595	69	0.601	62	0.609	54

^{a, b} See footnote in Table 5.

* See footnote in Table 3.

Ca と結合し、Na₄P₂O₇によって初めて抽出が可能となる形態に移行したと考えられる。また、その形態に移行したとする NaOH 抽出腐植酸は、元来土壤中に存在していたものであった可能性が高いと思われる。これらの点に関して、熊田ら¹⁵⁾は、室内実験の結果から、土壤の CEC に相当する量以上の Ca を含む石灰をその土壤に添加すると、NaOH 抽出腐植酸中の腐植化度の高い部分が、Na₄P₂O₇によって抽出される形態に移行することを推定している。なお、石灰汚泥の連用に伴って増大する Na₄P₂O₇抽出腐植酸の起源については、ここで考察した物質のほかに、汚泥由来の有機物(表 2 参照)、Ca あるいは Fe との錯体形成能を有した元来土壤中に存在している非腐植物質を指摘することができると考えられる。

汚泥の施用は、フルボ酸の抽出量をも増大した(表 6)。この増大量(カッコ内に示した)は、いずれの汚泥区においても、1981 年では施用後初期よりも後期の方が大きく、1982 年の場合には 1981 年の場合とは反対の傾向を示した。また、この増大量を各年の汚泥施用一年後ごとにみると、汚泥多量区の場合には、その連用に伴って次第に上昇することが認められた。さらに、この増大量の程度は、概して汚泥多量区の方が大きく、また、NaOH 抽出腐植酸、Na₄P₂O₇抽出腐植酸のいずれの場合よりも大きい。NaOH 抽出フルボ酸の場合と比べると小さいことが認められた。これらの事実は、石灰汚泥が Na₄P₂O₇で抽出されるフルボ酸の量をも増大する効果があること、及びこの効果は、NaOH で抽出されるフルボ酸の量を増大する効果に次いで大きいことを意味していると考えられる。

次に、表6の結果から、各年の汚泥施用1年後における腐植酸抽出量/フルボ酸抽出量比を算出すると、この比は、1981年の場合、対照区、汚泥少量区、汚泥多量区の順にそれぞれ、0.24、0.28、0.26、1982年では0.20、0.24、0.26、1983年においては0.21、0.29、0.33であった。したがって、この場合にも、NaOH抽出腐植の場合と同様に、石灰汚泥はこの比を若干高める効果があると言える。

なお、対照区の土壤において、各年の汚泥施用1年後に相当する時期ごとに腐植酸の抽出量(表6)、 $\Delta \log K$ 及び RF (表7)をみると、これらはいずれもがそれぞれ、NaOHで抽出される腐植酸の場合とは異なり、本調査期間中はほぼ同程度の値を示していることが認められた。このことは、 $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ で抽出される腐植酸が量的、質的に、NaOHで抽出される腐植酸と比べると、土壤中においてより静的な平衡状態にあることを示唆していると考えられる。

4 まとめ

下水汚泥の連用が土壤の有機物に及ぼす影響を明らかにするため、淡色黒ボク土の畑地ほ場に石灰処理下水汚泥を毎年7.5t乾物/ha 4年間施用する区と毎年15t乾物/ha 3年間施用する区、及び無施用区を設定し、各区の土壤につき、全炭素含量、及び0.1N NaOH次いで0.1M $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ によって逐次抽出される腐植酸、フルボ酸の量と性質を経時的に調べた。得られた結果を要約すれば、次のとおりである。

- 1) 汚泥の連用は、土壤の全炭素含量を漸次増大する。しかし、その増大効果は次第に低下する。
- 2) NaOH抽出腐植酸の量は、汚泥の連用によって、いったんは累増するが、その後はこの増大量が著しく減少する。また、汚泥の連用によって、その腐植化度が次第に低下する。他方、汚泥の施用によって増大する $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 抽出腐植酸の量は、その連用の初期においてはNaOH抽出腐植酸の増大量の約半分であるが、その後著しく上昇し、後者の1.9又は3倍の値を示す。また、 $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 抽出腐植酸の腐植化度は、汚泥の連用によって、大きくは変化しない。
- 3) 汚泥を施用すると、NaOH抽出フルボ酸、 $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 抽出フルボ酸の量がいずれも増大する。前者の増大量は後者のそれよりも大きく、また、後者は概して、いずれの腐植酸の場合よりも増大量が大である。
- 4) 腐植酸抽出量/フルボ酸抽出量比は、いずれの抽出剤を用いた場合にも、汚泥の施用によって若干上昇する。

謝 辞

本研究を行うに当たり、試験ほ場の管理にお世話になった国立公害研究所技術部ほ場係の皆様
に感謝の意を表します。

引用文献

- 1) Miller, R. H. (1974): Factors affecting the decomposition of an anaerobically digested sewage sludge in soil. *J. Environ. Qual.*, **3**, 376-380.
- 2) Sommers, L. E., D. W. Nelson and D. J. Silveira (1979): Transformations of carbon, nitrogen, and metals in soils treated with waste materials. *J. Environ. Qual.*, **8**, 287-294.
- 3) Agbim, N. N., B. R. Sabey and D. C. Markstrom (1977): Land application of sewage sludge: V. Carbon dioxide production as influenced by sewage sludge and wood waste mixtures. *J. Environ. Qual.*, **6**, 446-451.
- 4) Terry, R. E., D. W. Nelson and L. E. Sommers (1979): Decomposition of anaerobically digested sewage sludge as affected by soil environmental conditions. *J. Environ. Qual.*, **8**, 342-347.
- 5) Boyd, S. A., L. E., Sommers and D. W. Nelson (1980): Changes in the humic acid fraction of soil resulting from sludge application. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44**, 1179-1186.
- 6) Allison, L. E. (1965): Organic carbon. *In Methods of soil analysis* (C. A. Black, ed.). Part 2. *Agronomy* **9**: 1367-1378, Am. Soc. Agron., Madison, Wis.
- 7) 弘法健三・和田秀徳 (1969): 土壤の水溶性有機物について (第1報). *日本土壤肥科学雑誌*, **40**, 288-292.
- 8) 熊田恭一 (1977): 土壤有機物の化学. 東京大学出版会, 92-94.
- 9) 立川 涼 (1966): 土壤および液体試料中の有機物の迅速定量法ならびに糖類に関する二, 三の定量法. *日本土壤肥科学雑誌*, **37**, 28-33.
- 10) 愛知県農業総合試験場 (1973): 基盤造成畑地に対する有機物施用試験—都市廃棄物の農業利用に関する試験, 指定試験(土壤肥料) 第20号, (日本土壤肥科学会(1979): 下水汚泥. 博友社, 113-117. から引用).
- 11) Campbell, C. A. (1978): Soil organic carbon, nitrogen and fertility. *In Soil organic matter* (M. Schnitzer and S. U. Khan, eds.). 173-271, Elsevier, New York.
- 12) Terry, R. E., D. W. Nelson and L. E. Sommers (1979): Carbon cycling during sewage sludge decomposition in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **43**, 494-499.
- 13) 菅原 潔・副島正美 (1981): 蛋白質の定量法, 第2版, 学会出版センター, 133-138.
- 14) Paul, E. A. and J. A. Van Veen (1978): The use of tracers to determine the dynamic nature of organic matter. 11th Intr. Congr. Soil Sci. (Edmonton, Can.), **3**, 61-102.
- 15) 熊田恭一 (1977): 土壤有機物の化学. 東京大学出版会, 70-73.

II-5

下水汚泥の施用が土壤空気の組成に与える影響*

Changes in Soil Air Composition at Various Depths in a Light
Colored Andosol to Which Sewage Sludge had been Applied*

久保井徹¹・広木幹也¹・藤井國博¹

Toru KUBOI¹, Mikiya HIROKI¹ and Kunihiro FUJII¹

Abstract

A lysimeter experiment was conducted to evaluate the effect of repeated applications of domestic sewage sludge (50 metric tons/ha/half a year) and rape cultivation on soil air composition (N_2 , O_2 and CO_2) at various depths in a light colored Andosol. Throughout the experiment, environmental conditions remained constantly as follows: Atmospheric temperature, 25 °C (day)-20 °C (night); relative humidity, 60 %; wind speed, 0.5-1 m/sec; amount of irrigation water, 31mm/week; soil temperature, 18°C.

Results obtained at the 3rd and 4th applications showed that: 1) Carbon dioxide and O_2 concentrations increased and decreased, respectively, with increasing soil depth, although all the samplings were performed at depths (10-105 cm) where aerobic conditions still prevailed. 2) In the upper layers (10-55 cm), lower O_2 and higher CO_2 concentrations were observed in the sludge applied plots as compared to the concentrations in the check plots. 3) At 10 and 30 cm depths, drastic increase and decrease in CO_2 and O_2 concentrations, respectively, occurred within a week of sludge application. 4) Carbon dioxide concentration was higher in the rhizosphere of cultivated plots than at the corresponding depth in bare plots.

1 はじめに

気体は土壤の重要な構成要素となっている。通常の表層土壤では、その一定容積中に占める固体の割合（固相率）は20～60%であり、残りのすきま（孔げき）は液体（土壤溶液：液相）と気体（土壤空気：気相）で満たされている。

土壤空気は狭い孔げき中に存在しているので、大気と違ってその成分の拡散が妨げられる。自然土層中では層位によって上述の三相分布が異なるため、ガス拡散速度も一様ではない。さらに

* 本論文の一部は日本土壤肥料学会関東支部会（昭和56年9月30日 松戸市）において発表した。

1. 国立公害研究所 水質土壤環境部 〒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.

土壌の水分や栄養塩の状態によってガスの発生速度も異なっている。そのため、土壌空気の組成は大気と異なっているのはもちろん、土壌中でも局所ごとに違っている¹⁾。土壌空気も窒素と酸素が通常は大半を占め、その他に水蒸気、アルゴン、炭酸ガスなどを含む。土壌空気中では大気中より水蒸気と炭酸ガスがかなり多く、酸素は少ない。炭酸ガスの発生と酸素の消費は主として植物根や土壌微生物等の生物活性に依存するといわれている。また有機物の存在下で土壌が嫌気状態にあるような場合には、窒素、メタン、亜酸化窒素、水素や含硫ガスが発生することがある。

それゆえ、下水汚泥等の未熟な有機廃棄物を土壌に施用した場合には、その分解過程で土壌空気の組成が著しく変化することが予想される。逆に土壌空気組成の変化を追跡することによって、分解の質的な相違（好氣的、もしくは嫌氣的分解の程度）や分解速度を推定することも可能となる。

しかしながら、自然条件下では気温、降雨、風速などの変化が不規則であるので、土壌中のガス拡散や有機物の分解速度も一定ではない。そのため、土壌空気の組成から有機物の分解の質的、速度的特徴を推定することは困難である。一方、制御環境下でも規模の小さいインキュベーション試験（ピーカー試験）では土壌各層の状態を必ずしも再現できず、また、得られた結果がどの程度、自然条件下での現象と関連しているかが不明である。両者の欠点を補完するには、自然環境に近い土層が制御環境下にあることが望ましい。

本研究所には、環境条件が制御下にあり、かつ規模も大きいライシメーターが設置されており²⁾、ここに下水汚泥を連用している。そこで、この施設を用いて、下水汚泥を施用した土壌の土壌空気組成の変化を層位別に追跡した。本報告では、下水汚泥の分解の質的な特徴と、汚泥の表層施用が土壌環境に与える影響とを、土壌空気組成の面から考察する。

2 実験方法

2.1 試験設計と環境条件

試験には、本研究所の土壌環境実験棟内に設置されている環境制御ライシメーター²⁾（畑地用、直径 1.7 m、有効土層 2.3 m、淡色黒ボク土壌を充てん）4 基を用いた。処理区は下水汚泥施用の有無、及び植栽（コマツナ）の有無を組み合わせた 4 種類を設けた。下水汚泥（生活廃水系、石灰凝集剤を使用）は、1979 年 9 月以降、半年ごとに乾物 5 t/10 a を施用した。またコマツナは 2 回目の汚泥施用時（1980 年 5 月）から、汚泥施用区と無施用区それぞれ 2 基のうちの一方に栽培した（1 施用当たり 3 作、1 作期 45 日）。

土壌空気組成の測定は、土壌充てん後 31 か月、初回の施用後 13 か月を経過した 1980 年 10 月から翌年 6 月まで（3 回目と 4 回目の汚泥施用時）に、計 22 回実施した。

試験期間中の環境条件は以下のとおりである：気温、25°C（昼）～20°C（夜）；湿度、60%；地温、18°C（地下 55 cm より上層では気温の影響を受け、表層 10 cm では日周変動を示す²⁾）；かん水、31 mm 相当を週 1 回；風速、0.5～1 m/s。

試験内容及び供試した土壤と汚泥の性質の詳細は既報^{3,4)}に示した。

2.2 気相率の測定

土壤三相は、100 ccの採土円筒で採取した土壤について、実容積法⁵⁾によって測定した。土壤水分吸引圧 (pF) と気相率との関係は、吸引法と遠心法によって求めた pF～水分曲線⁵⁾から換算した。これらの値は、裸地の汚泥施用区及び無施用区については0～30 cm層まで5 cmごと、またその他については0～5 cm層のみについて求めた。

2.3 土壤空気の採取方法

土壤空気は、4基のライシメーターのそれぞれ地下10, 30, 55, 80及び105 cmの層位に挿入したガス採取管から注射筒(200 ml容, NO_x用)によって採取した。採取管は毛細管式のものである⁵⁾が、10 cm層層は自作し、他はウイジン工業製のものをを用いた。10 cm層についてはこれを地表面から垂直に挿入したが、他はライシメーターの側面から水平に中心部まで打ち込んだ。ガス採取に当たっては、はじめに吸引した100 mlを捨て、2回目に吸引した100 mlを分析用試料とした。

2.4 土壤空気の分析方法

土壤空気中の各種成分は、熱伝導度検出器(TCD)付のガスクロマトグラフ(島津GC7AG型)によって分離定量した。空気試料はマニュアルガスサンプラー(島津MGS5型)を用いて5 ml注入した。

分析条件は以下のとおりである。

カラム及び充てん剤: BeardとGuenzi⁶⁾の方法を改変して、モレキュラーシーブ5A (MS5A)とポラパックQ (PQ)をそれぞれ充てんしたステンレスカラム(3 mmφ, 3 m及び2 m)を並列に接続し、各種のガスを同時に分離できるようにした(図1)。なお両カラムによって分離された成分(MS5A, O₂とN₂; PQ, H₂, CH₄, CO₂, N₂O, とH₂O)の重なりを防ぐため、MS5Aカラムの後に0.5 mの抵抗管(PQ)を設けた。カラム温度は45°Cとした。

検出部: TCDの電流値は75mA, 温度は140°Cとした。

キャリアーガス: Heを約30 ml/minの速度で流した。

保持時間: 測定日ごとにわずかに変動したが、一例を示せば次のとおりである。H₂ 0.78分, CH₄ 1.25分, CO₂ 2.40分, N₂O 3.05分, O₂ 4.35分, N₂ 6.55分及びH₂O 8.80分であった。

定量法: 標準ガス(O₂ 20.3%, CO₂ 2.01%, CH₄ 942 ppm, N₂O 1.05%それぞれ別個, N₂ バランス)を数段階に希釈後、上述のとおりに分離して面積値(島津クロマトパック4Bを使用)から検量線を作成した。なお測定日ごとに感度がわずかに変化するため、実試料の分析前に検量線を毎回作成した。実試料中の各種ガス成分量は絶対検量線法によって決定し、体積百分率とし

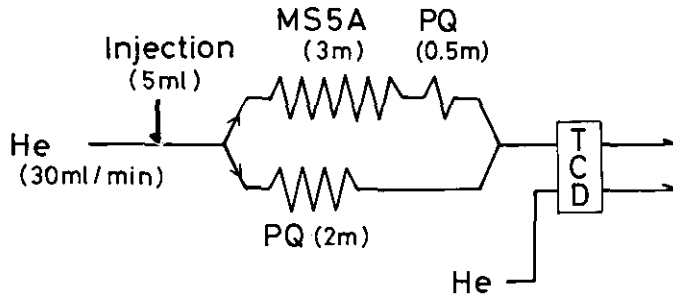


図 1 ガス成分の同時分析系

Fig. 1 Parallel column system for gas chromatographic analysis of soil air
 MS5A; Molecular sieve 5A
 PQ; Porapak, type Q
 TCD; Thermal conductivity detector

て表示した。

上記条件下では O_2 は Ar (大気中には通常 0.93 % 存在) と分離できないため、 O_2 の分析値は真値より高めになる。しかし Ar は不活性ガスであり、かつ濃度も O_2 よりはるかに低いため、本実験では O_2 濃度は $O_2 + Ar$ 濃度とほぼ比例関係にあるとみなせよう。それゆえ、分析値は O_2 濃度の相対値としてそのまま使用できると考える。また N_2 の検量線は直線にならなかったため、70% ~ 90% の範囲を直線とみなして計算した。 H_2 はキャリアーガスを He とした場合には定量性が無いといわれているため、検出の有無のみを目的にした。

3 結果と考察

3.1 気相率の変化

土層中の孔げき率と水分状態は土壤空気の組成⁷⁾ とガス拡散速度⁸⁾ に影響を与える。そこで 0-20 cm の土壌についてかん水前後の気相率の変化を調べた (表 1)。

表 1 かん水後の気相率の変化
 Table 1 Changes in soil gas phase percentage after irrigation

Treatment	+				-		
Sludge	+	+	+	+	+	-	-
Rape	-	-	-	-	+	-	+
Depth (cm)	0-5	5-10	10-15	15-20	0-5	0-5	0-5
Solid Phase (%)	20.9	20.8	22.2	23.9	21.4	21.2	22.5
Gas Phase (%) (Time after Irrigation)							
2 hr	32.9	32.8	31.1	29.6	35.2	-	36.9
1 day	39.9	37.7	32.9	31.3	40.7	44.0	40.9
7 days	51.8	44.3	39.4	33.9	52.5	49.5	49.4
$\Delta V_A(7d-1d)$	11.9	6.6	6.5	2.6	11.8	5.5	8.2
$\Delta V_A(7d-2h)$	18.9	11.5	8.3	4.3	17.3	-	12.5

V_A : gas phase (%)

裸地の汚泥施用区では0-10 cm層（汚泥施用層）の孔げき率が大きく、深くなるにつれて小さくなっていった。この傾向は裸地の無施用区でも同じであった。(0-10 cm, 78.6%, 10-20 cm, 76.2%, 20-30 cm, 74.6%)。図2は汚泥を施用した2区の表層(0-5 cm)における気相率の経時変化の一例である。気相率はかん水によって急激に低下し、その後の乾燥に伴って再び増加していたが、植栽区の方が常に裸地区より気相率が大きかった(図2)。0~5 cm層におけるかん水後7日目と1日目の気相率の差は汚泥施用裸地区で11.9%, 同植栽区で11.8%と大きく、これらに比べて汚泥無施用区では裸地区で5.5%, 植栽区で8.2%と小さかった。またかん水前後の気相率差は土壌下層ほど小さく、15~20 cm層では2.6% (汚泥施用裸地区) にすぎなかった(表1)。

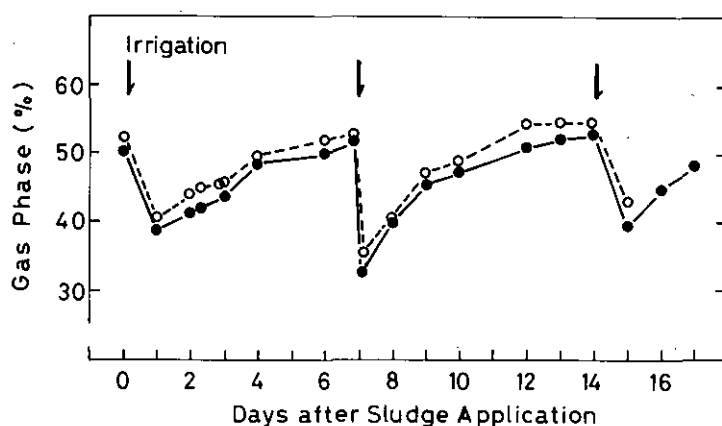


図 2 かん水による汚泥施用区表層土(0-5 cm)の気相率の変化

Fig. 2 Changes in gas phase percentage of surface soil (0-5 cm) as affected by 31 mm of irrigation

● and ○ are bare and cultivated soils with sewage sludge application, respectively.

本実験ではかん水の量と間隔が一定(31 mm, 7日間)であるため、実験期間中の気相率はほぼ上述のとおり、処理区と層位ごとに一定の変動を繰り返していると考えられる。

図3には土壌水分吸引圧(pF)と気相率との関係を裸地の汚泥施用区(図3-A)と無施用区(図3-B)について示した。表1の値と対照すると、かん水直後から1日後のpF値は1.75~1.9の間にあることがわかる。これはかん水後、ごく短期間に粗孔げき(pF1.8以下)の水は下層に流去してしまうことを意味し、粗孔げきはほとんど常に気体で占められていることを示している。ただし、本試験では約40~50分の間に31 mm降雨相当量をかん水しているため、かん水中に表層部の土壤空気の一部は大気中に追い出され、また一部は土壌下層へ押しやられている可能性がある。降雨に伴う土壤空気の下層移動は佐倉と開発⁹⁾も示唆している。

降雨後1週間たつと表層のpF値は0-5 cm層で3.8, 5-10 cm層で3.2に上がっていた(裸地の施用区)ので、細毛管孔げき(pF2.7以上)の一部までが気相で置換されてしまっていると考えら

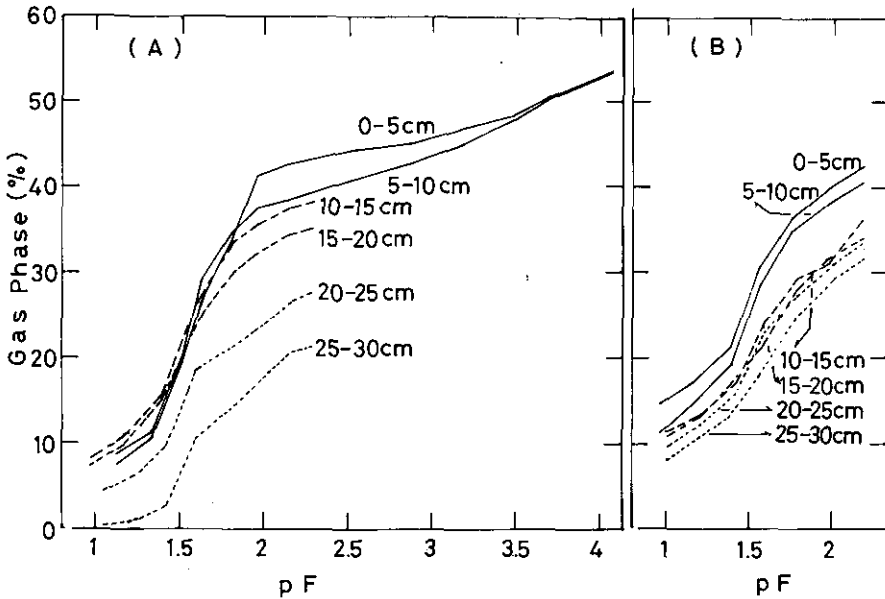


図 3 裸地の汚泥施用区 (A) と無施用区 (B) 各層位における pF と気相率の関係

Fig. 3 Relation of pF to gas phase percentage at various depths
Bare soils with (A) and without (B) sludge application

れる (表 1, 図 2)。このことは、表層部の毛管孔げき中で発生する CO_2 などのガス成分が、乾燥時に大気へ拡散しやすくなっていることを示唆する。

しかし 10-30 cm 層では 0-10 cm 層に比べて気相率と pF 値の変化が小さく (表 1, 図 2), また大気と接していないためにガスの移動速度が遅いと考えられる。そのために、10-30 cm 層のガス組成は極表層部より安定しているであろう。30 cm 以深の層位の物理性は、試料の採取を行うと土層がかく乱されるために、測定していない。しかし、一般に土壤深層の水分状態は安定している⁹⁾ので、気相率も安定状態にあると思う。

なお、上記のデータに加え、土壤中のガス拡散速度を実測しておけば、各層位のガス発生量及び土壤と大気とのガス交換速度が理論上計算できる⁹⁾。本ライシメーター実験の終了時には全層位にわたってこれらの物理性を測定し、ガス濃度のデータとあわせて検討したい。

3.2 土壤空気組成の変化

3.2.1 水素, メタン, 亜酸化窒素

今回の分析系では、全試料においてこれらのガスは検出されなかった。TCD 検出器ではメタン (CH_4) と亜酸化窒素 (N_2O) の感度が悪いので、これらのガスが土壤中に存在していないとは断言できない。実際、7 回目の汚泥施用時に電子捕獲検出器 (ECD) 付のガスクロマトグラフで N_2O

を測定した結果、このガスは汚泥施用後に地表面から大気に揮散していること、及び地下 80 cm 層では経時変化は認められないものの常時数 ppm (V/V) 存在していることが明らかになっている。このことについては稿を改めて述べる予定である。

3.2.2 窒素

4 処理区の平均値は 10 cm 層 76.9 %, 30 cm 層 77.2 %, 55 cm 層 77.0 %, 80 cm 層 77.1 %, 105 cm 層 77.4 % であり、層位の違いによる大きな変化はなかったが、表層部より下層部で高い傾向にあった (5% 最小有意差 0.29 %)。

図 4 に実験期間中 17~22 回にわたる N_2 濃度のデータを層位別、処理区別に平均して示した。10 cm 層と 30 cm 層では、汚泥施用区の方が無施用区より平均濃度が高くなっていたが、その差は有意ではなかった。一方汚泥施用の有無にかかわらず、すべての層位で植栽区の方が裸地区より N_2 濃度が低かった。55 cm 層と 80 cm 層では汚泥施用区内で、また 105 cm 層では無施用区内で植栽の影響が有意であった。 N_2 濃度に関しては、その経時的な変動に汚泥施用の影響は認められなかった。

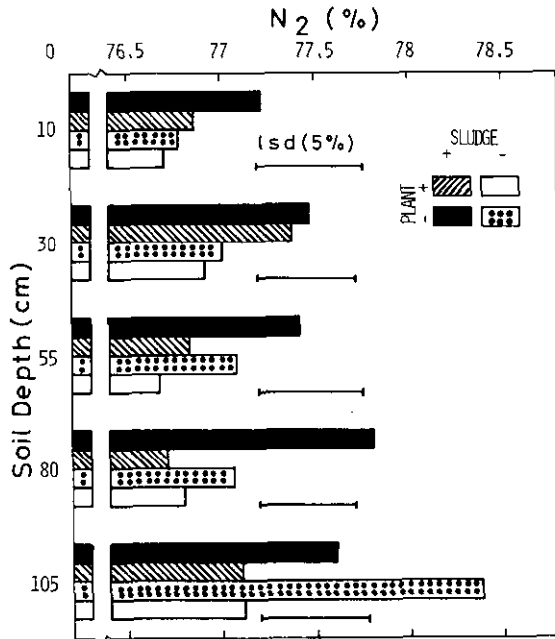


図 4 処理区別及び層位別の N_2 濃度の平均値

Fig. 4 Effect of treatments combining sludge application and plant cultivation on N_2 concentration of soil air at various depths of soil
Each value is the mean of 17-22 determinations during the experimental period.

図4に示したN₂濃度は通常の大気中濃度(78.06%といわれている)より低くなっていた。その原因は、主に土壤空気中の水蒸気(20°Cの飽和水蒸気圧=17.5 mm Hg=0.023 気圧=2.3%)のためであろうが、分析上の誤差の可能性もある。

3.2.3 酸素

4処理区の平均値は10 cm層21.2%, 30と55 cm層21.3%, 80 cm層21.0%, 105 cm層20.6%であり、80 cm層以深では明らかに濃度が低下していた(5%最小有意差0.14%)。

各層位におけるO₂濃度の処理区別の平均値を図5に示した。10, 30, 55及び80 cm層では汚泥施用区の濃度が無施用区のそれより低くなっていたが、下層ほど両区の濃度差は小さくなり、38 cm層では有意差がなかった。105 cm層では、汚泥施用の有無にかかわらず裸地区の濃度が植栽区より0.6~0.7%も低く、明らかな差がみられた。

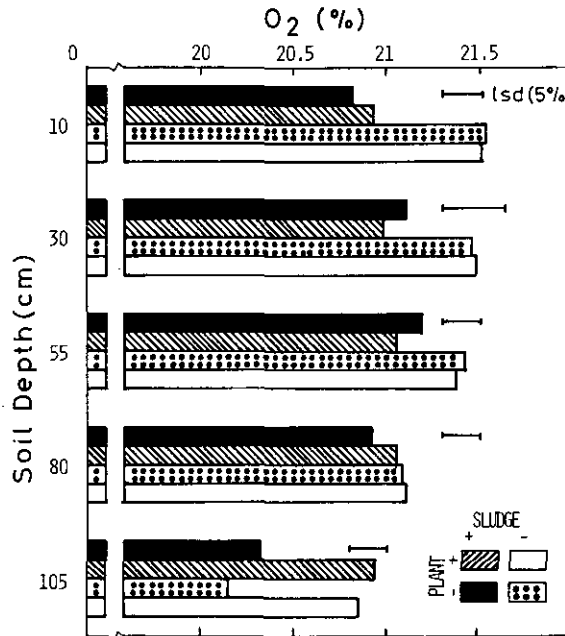


図5 処理区別、層位別のO₂濃度の平均値

Fig. 5 Effect of treatments combining sludge application and plant cultivation on O₂ concentration of soil air at various depths of soil
For legend, see Fig.4.

また処理区別にO₂濃度と層位との関係を見ると、汚泥無施用区では表層から下層に向かって順次濃度が低下しているのに対し、汚泥施用区では55 cm層の濃度が最大になっていた。

汚泥施用区10 cm層と30 cm層ではO₂濃度が顕著に変化した(図6)。特に測定間隔を短くとした4回目施用時には、施用の翌日にO₂濃度が最低になり、以後4日の間に回復した。表層土壤に

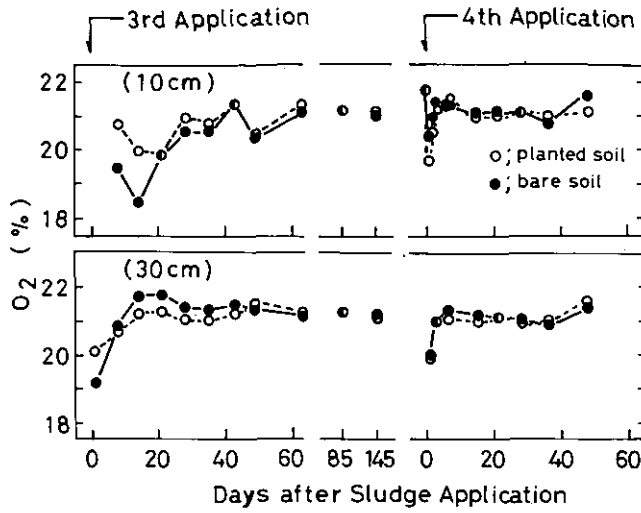


図 6 汚泥施用区の表層部における O_2 濃度の経時変化
 Fig. 6 Changes in O_2 concentration of soil air at 10 and 30 cm depths of soil to which sewage sludge had been applied

おけるこのような O_2 濃度の変化は明らかに汚泥施用に伴う微生物呼吸の活発化を示している。この点は次項に述べる CO_2 濃度の変化からも裏付けられる。

以上に示したように、本実験条件（火山灰土壌、畑状態、地下水位 2.3 m）では、土層全体が好気的な状態にあった。絶対好気性菌が優占するのは酸素分圧が 16 mmHg (2.1%) 以上の場合と言われている¹⁰⁾。それゆえ、土壤下層においてすら好気性菌が多く、好気的呼吸 (O_2 の消費と CO_2 の発生) が主として行われているとみなすことができよう。

3.2.4 炭酸ガス

4 処理区の平均値は 10 cm 層と 30 cm 層で 0.203%，55 cm 層で 0.286%，80 cm 層で 0.588%，105 cm 層で 0.999% であり、土壤下層では急激に CO_2 濃度が高まっていた (5% 最小有意差 0.063%)。この変化は特に汚泥無施用区で顕著であった (図 7)。また 10~55 cm 層では下水汚泥を施用した 2 区が無施用の 2 区より明らかに濃度が高くなっていたが、80 cm 層では特に明確な特徴がなくなっていた。105 cm 層では汚泥施用の有無にかかわらず、コマツナを栽培した 2 区の方が裸地の 2 区より CO_2 濃度が低下していた。

図 8 は汚泥施用区について CO_2 濃度の経時変化を層位別に示したものである。 O_2 濃度の場合と同じく、汚泥施用直後の変化は 10 cm 層で最大であったが、変化の方向は逆であった。10 cm 層の濃度変化を 4 回目の施用時でみると、施用 1~2 日後には施用直前の 7~14 倍に達し、1 週目にかけて急減した。15 日目の濃度は 0.4~0.5% であり、7 日目とほぼ同じであったが、29 日目には 0.15% に急減して、以後はほぼこのレベルを保ったまま推移した。30 cm 層における濃度変化も

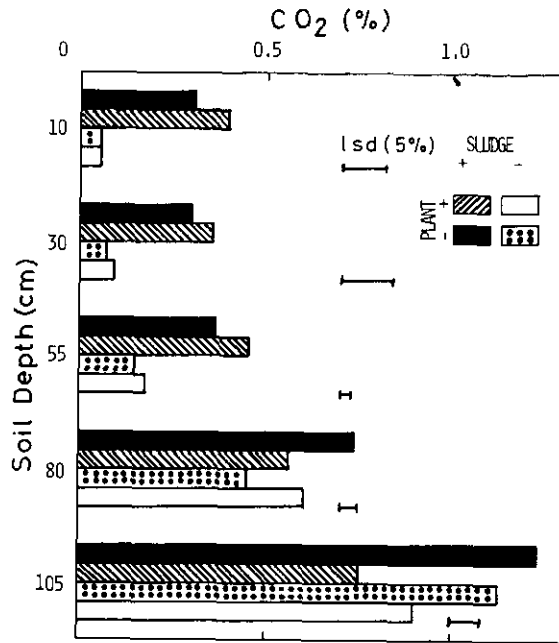


図 7 処理区別、層位別の CO₂濃度の平均値

Fig. 7 Effect of treatments combining sludge application and plant cultivation on CO₂ concentration of soil air at various depths of soil

For legend, see Fig. 4.

10 cm層と類似していたが、変動幅は小さくなった。55 cm層以下では応答が遅く、かつ緩やかになっていた。

3回目の施用時における CO₂濃度の変化は、測定間隔が広いために4回目のときほど明確ではなかったが、10 cm層と30 cm層では4回目の変化と類似していた。

なお、汚泥無施用区では、10 cm層で耕起後にわずかに濃度が増加したほかは、ほとんど変化がなかった。Seto¹¹⁾も耕うんによる CO₂発生を増加を報告しているの、この現象は一般的にみられるものであろう。汚泥の施用は耕起を伴っていることから、施用直後の変化の一部にはこの現象が含まれていよう。

また CO₂は土壤溶液に溶解して陽イオンの溶解度に影響を与えるので、土壤中の物質移動を考慮する上でも重要である¹²⁾。しかし、土壤溶液中の炭酸塩平衡状態は、各土層における土壤空気の CO₂分圧及び土壤溶液の pH とイオン組成によって変化するので複雑である。この点については土壤溶液の分析結果とあわせ、別の機会に解析したい。

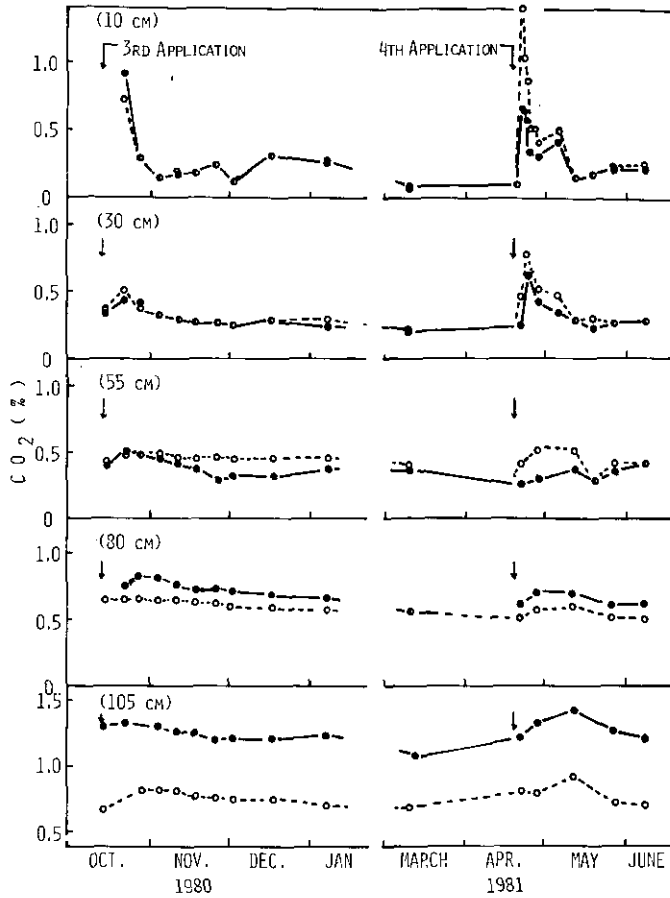


図 8 汚泥施用区の各層位における CO₂濃度の経時変化
 Fig. 8 Changes in CO₂ concentrations at various depths of soil to which sewage sludge had been applied

● and ○ are bare and cultivated soils, respectively.

3.2.5 ガス組成相互の関係

N₂, O₂, CO₂及び層位の相互間にはすべて相関関係が認められた(表2)。このうちでは O₂と CO₂が特に明確な負の相関関係にあること、及びこの関係が両ガスの層位別の濃度分布に関連していることがわかる。また各層位それぞれにおいても、CO₂と O₂はすべて負の相関関係(1%水準で有意)にあった。この現象は広く認められており¹⁾、好気性の従属栄養微生物が O₂を消費し、同時に有機炭素を分解して CO₂を発生することが主な理由とされている。

しかし、汚泥施用に伴う CO₂濃度の増加と O₂の減少は 10 cm 層で最も顕著であり、30 cm 層では変化幅が小さく、また 55 cm 層以下では両ガスの濃度の経時的変化に明りょうな関係が失われていた。これらのことからみて、O₂の消費と CO₂の生成は 10 cm 層(汚泥施用層)で最も活発に

表 2 土壤空気中の N_2 , O_2 , CO_2 濃度及び層位の相互関係

Table 2 Correlation coefficients between soil gas constituents and soil depth obtained from whole data

	N_2	O_2	CO_2
O_2	-0.140**	—	
CO_2	0.189***	-0.636***	—
Depth	0.153**	-0.393***	0.784***

Sample size: 374

** and *** are significant at the 1 and 0.1 % levels, respectively.

行われ、そこで発生した CO_2 が下層へ拡散していくとともに、下層へ浸透した易分解性の水溶性有機物がそこで分解されて CO_2 を発生したと考えるのが妥当であろう。

植物根による呼吸と残根の微生物による分解のために、根圏では CO_2 濃度が裸地の場合より高くなっていることが多い。本実験において植栽区の CO_2 濃度は、汚泥区で 55 cm 層まで、また無施用区で 80 cm 層まで裸地区より高くなっていた (図 7)。このことはコマツナの根圏が汚泥区で 50 cm 程度、また無施用区で 80~90 cm 程度であったこと (観測窓による観察結果) と一致している。しかし、汚泥区の 80 cm 層以深、及び無施用区の 105 cm 層で植栽区の方が裸地区より CO_2 濃度が低下していたことは、上述の理由では説明がつかない。おそらく、植物による土壤水の吸収と蒸散のために土層全体の気相率が増加し、通気性が良くなったことによるのであろう。植栽区における気相率の増大は、かん水量に対する浸透水量の比が植栽区で小さいこと (広木ら、未発表) からも支持される。

菅原¹³⁾ は土壤空気中の O_2 濃度が 10 % 前後、及び CO_2 濃度が 6 % 前後になると植物 (バレイショ) の生育が著しく低下することを報告している。これらのガス組成が植物の生育に与える影響には種間差がある¹⁾ ことを考慮しても、本実験条件下では土壤空気組成が植物の生育に直接影響していることはないであろう。

裸地の汚泥施用区の 80 cm 層では N_2 濃度が高かったが、同区と同層位では 7 回目の施用時に N_2O 濃度も高かった¹⁴⁾。脱窒の過程で N_2O が発生すること¹⁵⁾、及びこの層位の土壤溶液には脱窒の基質となる硝酸態窒素と水溶性有機物が多いこと (広木ら、未発表) から、この層位で脱窒が起こっている可能性がある。ただし、この層位は土壤空気組成からみる限り好氣的であるので断定はできない。この点に関しては、本ライシメーター試験を終了する時点で各層位の脱窒能を実測することによって明らかにしたい。

3.3 土壤空気組成からみた下水汚泥の土壤施用

下水汚泥の施用が土壤の物理的、化学的及び微生物的な環境を大きく変化させることは、内外の多数の研究をはじめ、本研究所における特別研究(国立公害研究所報告, 第14号, 第45-47号, 及び第68号)から明らかである。

しかしながら、下水汚泥の施用に伴う土壤空気組成の変化を追跡した例は、少なくとも1976年以降にはない。このことは土壤のガス発生能(及び吸収能)が一般に軽視されていることを意味するのではない。実際、汚泥等の分解性はビン培養法によるCO₂発生能を指標としてなされている¹⁶⁾し、自然条件でも各種の窒素化合物の土壤からの発生に関してデータが集積しつつある^{17,18)}。ただ前者は必ずしも自然状態を反映せず、また後者は測定に労力を要し、かつガスの発生部位を特定できないのが難点であった。

土壤各層のガス組成の測定はガス発生を定量的にとらえることには難があるが、測定に手間がかからないこと、及び自然条件でも簡単に採取を行える利点がある。先にも述べたとおり、土壤のガス組成はその土壤の物理的及び化学的な状態を反映するとともに、土層中の物質移動にも影響を与える。この意味で、土壤空気組成は土壤環境全般を映す鏡であるといえよう。

本実験は、石灰で凝集させた下水汚泥を淡色黒ボク土壤(畑状態)に施用したときの土壤空気組成の変化を、制御環境下のライシメーターで測定したものである。制御環境下の大型装置による実験であるため、気象要因の変化が土壤空気組成に与える影響を解析しやすく、汚泥施用の影響を評価しやすい点、及びビン培養試験でしばしば問題となるスケール効果を無視できる点で特徴がある。

また本実験は風乾土壤をライシメーターに充てんしたため、必ずしも自然の不かく乱土層ではない。しかし、充てん後1年半以上経過してから測定を開始したこと、ガス濃度や気相率の層別分布が自然状態の傾向と一致していること、及び溶質の地下浸透過程が特に土壤のき裂に支配されている様子がないこと¹⁹⁾などから、かなり不かく乱状態に近いと考えられる。

本実験の結果明らかになったことは以下のとおりである。1) 乾燥汚泥の多量施用(乾物5t/10a)を繰り返しても、汚泥の分解過程は好氣的に進行すること。2) 汚泥施用層内でのCO₂の発生とO₂の消費を明確にとらえることができたこと。この事実は3) 汚泥成分の分解が施用層で著しいことを示している。また4) 植栽は根圏のCO₂濃度を高めるが、根圏以深ではむしろ裸地区より好氣的状態を促進すること、などである。

このように、土壤空気組成からみる限り、下水汚泥の畑地施用は土壤環境を特に悪化させる要因とはならないと考える。

今回の実験の結果はまた、1) 表層土壤における土壤空気組成と土壤微生物の関係、及び2) 土壤と大気とのかわりあい(ガスの発生と吸収)を明らかにする必要がある。前者については続報²⁰⁾に記載した。また後者については最終報告書で述べる予定である。

4 まとめ

石灰を凝集剤とする生活廃水系の下水汚泥を淡色黒ボク土壤に施用（乾物 5 t/10 a/半年）し、土壤空気組成の変化を層位別（10-105 cm）に追跡した。実験は環境制御下（気温 25°C（昼）-20°C（夜）、湿度 60 %、風速 0.5-1 m/s）、かん水 31 mm/週、地温 18°C）のライシメーター（直径 1.7 m、深さ 2.3 m）4 基を用いて行った。処理区は汚泥施用の有無、及び植栽（コマツナ）の有無を組み合わせた 4 種類である。

得られた知見は以下のとおりである。

- 1) どの処理区でも、全層位にわたって好氣的ではあるが、全般的に下層ほど O₂濃度が低く、CO₂濃度が高かった。
- 2) 汚泥施用区の上層（10-55 cm）では無施用区の当該層位よりも O₂濃度が低く、CO₂濃度が高かった。
- 3) 汚泥施用区の表層（10-30 cm）では、施用後 O₂濃度が急激に低下し、同時に CO₂濃度が著しく高まった。
- 4) 植物根圏では CO₂濃度が高かったが、それより下層では、むしろ裸地の場合より好氣的になっていた。

謝 辞

本研究を行うに当たり、農業技術研究所化学部土壤立地第 2 研究室（現農業環境技術研究所土壤生化学研究室）室長 福士定雄博士（客員研究員）、並びに同研究室、主任研究官（現農林水産技術会議調査官）陽 捷行博士には多くの御助言を賜わった。ここに深く感謝します。

引 用 文 献

- 1) Brady, N. C. (1974): The nature and properties of soils. 8th ed., Macmillan Pub. Co. Inc., New York, 253-276.
- 2) 久保井徹・藤井國博・広木幹也・服部浩之・松坂泰明・吉田富男(1983): 環境制御ライシメーターの概略と運転上の留意点. 国立公害研究所研究報告, 第 47 号, 211-227.
- 3) 服部浩之・鷲沢清司・久保井徹・藤井國博・松坂泰明・大羽 裕(1983): 下水汚泥施用土壤の理化学性. 国立公害研究所研究報告, 第 47 号, 13-26.
- 4) 服部浩之・豊田敏治・久保井徹・広木幹也・藤井國博・松坂泰明(1983): 下水汚泥連用土壤における全炭素, 全窒素及び無機態窒素量の変化. 国立公害研究所研究報告, 第 47 号, 27-35.
- 5) 土壤物理性測定法委員会 (編) (1972): 土壤物理性測定法. 養賢堂, 505 p.
- 6) Beard, W. E. and W. D. Guenzi (1976): Separation of soil atmospheric gases by gas chromatography with parallel columns. Soil Sci. Soc. Am. J., 40, 319-321.
- 7) 木下 彰(1985): 土壤構造の相違と土壤空気の組成及び作物の生育. 日本土壤肥科学雑誌, 29, 19-22.
- 8) De Jong, E. and H. J. V. Schappert (1972): Calculation of soil respiration and activity from CO₂

- profiles in the soil. *Soil Sci.*, **113**, 328-333.
- 9) 佐倉保夫・開発一郎(1980): 野外土槽における雨水の鉛直移動観測. 筑波大学水理実験センター報告, No. 4, 25-29.
 - 10) Nagatsuka, T. and C. Furusaka (1976): Effect of oxygen tension on bacterial number in a soil suspension. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **22**, 287-294.
 - 11) Seto, M. (1982): A preliminary observation on CO₂ evolution from soil *in situ* measured by an air current method—An example in rainfall and plowing sequences—. *Jpn. J. Ecol.*, **32**, 535-538.
 - 12) Novozamsky, I. and J. Beek (1980): 土壤中の溶液平衡. 土壤の化学(Bolt, G. H. and Bruggenwert eds., *Soil Chemistry* (1978), Elsevier Sci. Pub. Co., Amsterdam, 岩田進午・三輪睿太郎, 井上隆弘, 陽 捷行訳), 学会出版センター, 107-138.
 - 13) 菅原友太(1944): 作物の生育に対する土壤通気の影響(第一報), 土壤空気中に於ける酸素及び炭酸瓦斯濃度と馬鈴薯の生育・収量との関係に就て. *日本土壤肥料学雑誌*, **18**, 185-190.
 - 14) 久保井徹・陽 捷行・広木幹也・服部浩之・藤井國博・福士定雄(1983): 下水汚泥の土壤施用が土壤環境に及ぼす影響(第27報), 連用土壌からの窒素と炭素の揮散. *日本土壤肥料学会講演要旨集*, 第29集, 176p.
 - 15) Hahn, J. and C. Junge (1977): Atmospheric nitrous oxide: A critical review. *Z. Naturforsch.*, **32a**, 190-214.
 - 16) 田辺一郎(1979): 土壤呼吸, 土壤微生物実験法. 養賢堂, 270-278.
 - 17) Hutchinson, G. L. and A. R. Mosier (1979): Nitrous oxide emissions from an irrigated corn field. *Sci.*, **205**, 1125-1127.
 - 18) Beauchamp, E. G., G. W. Kidd and G. Thurtell (1978): Ammonia volatilization from sewage sludge applied in the field. *J. Environ. Qual.*, **7**, 141-146.
 - 19) 広木幹也・久保井徹・鷺沢清司・豊田敏治・服部浩之・藤井國博・松坂泰明(1983): 下水汚泥施用土壌における物質の移動に関する研究, 下水汚泥成分の地下浸透. 国立公害研究所研究報告, 第47号, 107-118.
 - 20) 久保井徹・広木幹也・服部浩之・藤井國博(1984): 下水汚泥施用土壌における土壤空気組成と土壤微生物数との関係. 国立公害研究所研究報告, 第68号, 83-91.

II-6

下水汚泥施用土壌における土壌空気組成と
土壌微生物数との関係*

Relationship between Soil Air Composition and Microbial
Populations in a Soil Amended with Sewage Sludge*

久保井徹¹・広木幹也¹・服部浩之¹・藤井國博¹

Toru KUBOI¹, Mikiya HIROKI¹, Hiroyuki HATTORI¹ and Kunihiro FUJII¹

Abstract

Relationships between soil air composition (N₂, O₂ and CO₂) and microbial populations (aerobic bacteria, dye resistant bacteria, actinomycetes, fungi, protein degraders, ammonium oxidizing bacteria and nitrite oxidizing bacteria) were studied in a light colored Andosol to which sewage sludge had been applied. The experiment was conducted under controlled environmental conditions. The application of sludge caused remarkable increase in CO₂ concentration and decrease in O₂ concentration with a concomitant (or slightly delayed) increase in the populations of heterotrophic microbes. A multiple regression analysis showed that the populations of aerobic bacteria (AB) and nitrite oxidizing bacteria (NOB) were the most suitable independent variables to predict CO₂ concentration of soil air. The equation was:

$$\log \text{CO}_2 (\%) = 0.863 \log \text{AB} - 0.095 \log \text{NOB} - 6.991$$

Application of the equation to the microbial data which were not followed by gas analyses suggests that repeated amendments accelerate the time when sludge decomposition occurs.

I はじめに

下水汚泥が土壌に施用されると、汚泥中の有機化合物を基質として各種の従属栄養微生物が急速に増殖する¹⁾。これに伴って汚泥中の炭素はCO₂として発生するため、CO₂の発生量は汚泥炭素の土壌中における分解率の指標として用いられている²⁾。

10 cm 層までの表層土壌は孔げき率が大きく、また地表面で大気と接触しているために、表土と大気とのガス交換速度は下層土に比べて非常に大きい。そのため、表層部の土壌空気組成は大気

* 本論文の一部は日本土壌肥料学会関東支部会（昭和56年9月30日、松戸市）において発表した。

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.

環境の変化と土壌の微生物活動の変化とを鋭敏に反映するはずである。自然条件下では、前者の変化によって、土壌空気組成に与える後者の変動はかなり不明確になってしまうであろう。しかし、環境制御下では土壌微生物の活性が、かなり忠実に土壌中の CO_2 濃度に影響を与えるはずである。

著者らは環境制御ライシメーター試験において、石灰凝集剤系の生活廃水汚泥を淡色黒ボク土壌に施用し、3回目と4回目の運用時に土壌空気組成の変化を追跡してきた。その結果、汚泥施用層では施用直後に CO_2 濃度の増加と O_2 濃度の減少が急激に起こることが判明し、土壌微生物の活性がこの時期に著しく高いことが示唆された³⁾。

本報告では、下水汚泥の施用に伴う各種の土壌微生物数の変化が土壌空気組成に与える影響を解析する。また微生物数のデータはあるが土壌空気を分析しなかった初回及び2回目の汚泥施用時について、微生物数から土壌中の CO_2 濃度の予測を試みる。

2 実験方法

2.1 試験設計と環境条件

淡色黒ボク土壌を充てんした4基の環境制御ライシメーターそれぞれを1区として、下水汚泥施用(乾物5 t/10 a/半年)の有無とコマツナ植栽の有無を組み合わせた4処理区を設けた。詳しくは前報³⁾を参照されたい。

2.2 土壌空気の採取と分析

上記ライシメーターの地下10 cmからガス採取管を通じて注射筒により土壌空気を採取し、これを熱伝導度検出器付きのガスクロマトグラフで分析した³⁾。

2.3 土壌微生物の分離と計数

表層0-5 cmの土壌について好気性細菌、色素耐性細菌、放線菌、糸状菌、タンパク質分解菌、アンモニア酸化細菌及び亜硝酸酸化細菌の7菌群を既報⁴⁾に従って分離計数した。

2.4 統計計算と重回帰分析

測定項目間の相関係数等の計算と重回帰分析には本研究所の大型電子計算機(HITAC M-180)を使用した。重回帰分析には予測平方和から最適な独立変数(群)を選択するために開発された廣崎と小林のプログラム⁵⁾を使用した。

3 結果と考察

3.1 土壌空気組成の変化と土壌微生物数との関連

下水汚泥を施用した土壌の表層0-5 cmにおける好気性細菌数、色素耐性細菌数、タンパク質分

解菌数, 放線菌数, 糸状菌数, アンモニア酸化細菌 (AOB) 数, 及び亜硝酸酸化細菌 (NOB) 数の経時変化を図 1 に示した。なお AOB と NOB の菌数はその変動幅が非常に大きいため, 対数値で表示してある。また汚泥無施用土壌中の菌数は, 常に施用区の数分の 1 から数百分の 1 であった。

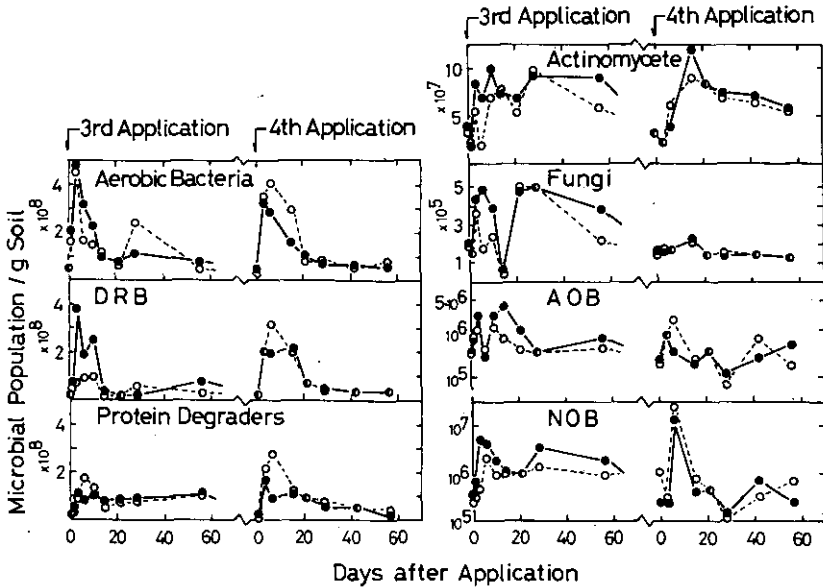


図 1 下水汚泥施用土壌における土壌微生物数の変化

Fig. 1 Changes in microbial populations in the surface soil to which sewage sludge had been applied

○ and ● are the soils with and without cultivation, respectively. DRB, AOB and NOB: Dye resistant bacteria, Ammonium oxidizing bacteria and Nitrite oxidizing bacteria, respectively.

1 回目と 2 回目の汚泥施用時における菌数変化は広木ら⁹が既に報告しており, ここに示した 3, 4 回目についても詳細な検討と解釈は別途行う予定であるので, 本報告ではこれらの菌数の変化と土壌空気組成との関連に限って検討する。

図 2 は汚泥施用区の 10 cm 層における土壌空気中の CO_2 と O_2 濃度の経時変化を示したものである。汚泥施用直後には CO_2 の増加と O_2 濃度の減少の傾向がみられ, 特に 4 回目の施用時に顕著であった。このようなガス組成の変化は大多数の菌群の菌数変化 (図 1) と対応していた。

そこで, 土壌空気の分析と微生物の計数を同時 (もしくはほぼ同時) に行っているものについて, 各項目間の相関係数を求めた (表 1, 2)。表 1 は 4 処理区全部のデータ ($n=60$) について, また表 2 は汚泥を施用した 2 区の 30 データについての結果である。

汚泥施用区と無施用区とでは, CO_2 濃度もどの菌群数も明らかに前者の値が大きかったため, CO_2 濃度と各菌群数との間の相関係数は全処理区に対してはすべて正の大きな値 (1%水準以上

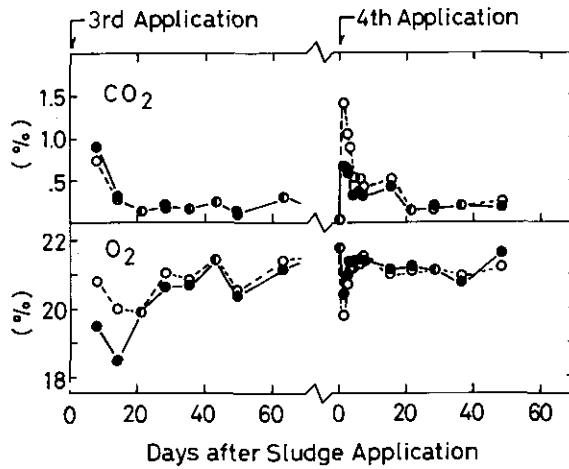


図 2 下水汚泥施用土壌の 10 cm 層における CO₂ と O₂ 濃度の変化
 Fig. 2 Changes in CO₂ and O₂ concentrations of soil air at 10 cm depth of soil with sewage sludge application
 ○ and ● are the soils with and without cultivation, respectively.

表 1 下水汚泥施用及び無施用土壌中の土壌空気成分と土壌微生物数相互間の相関係数行列

Table 1 Correlations between concentrations of soil air constituents and microbial populations in surface soils with or without application of sewage sludge

	CO ₂	O ₂	N ₂	Aerobic Bacteria	Actino-mycetes	Fungi	DRB*	Protein Degraders	AOB**
O ₂	-0.388**								
N ₂	-0.077	-0.462***							
Aerobic Bacteria	0.864***	-0.307*	-0.066						
Actinomycetes	0.481***	-0.615***	0.252*	0.556***					
Fungi	0.375**	-0.578***	0.329*	0.432***	0.656***				
DRB*	0.830***	-0.242*	-0.143	0.932***	0.531***	0.333**			
Protein Degraders	0.820***	-0.387***	0.012	0.933***	0.613***	0.457***	0.908***		
AOB**	0.343**	-0.602***	0.450***	0.345**	0.421***	0.104	0.215*	0.350**	
NOB***	0.346**	-0.074	-0.081	0.604***	0.217*	0.139	0.639***	0.616***	0.215*

* , Dye resistant bacteria ; ** , Ammonium oxidizing bacteria ; *** , Nitrite oxidizing bacteria , * , ** , and *** are significant at the 10 , 5 , 1 and 0.1 % levels, respectively. Sample size is 60.

で有意) になった (表 1)。これに対して汚泥施用区内では、従属栄養菌のうちの好気性細菌、色素耐性細菌及びタンパク質分解菌の 3 群だけが CO₂ 濃度と正の相関をもっていた (表 2)。この中で、CO₂ 濃度と特に相関の高かった好気性細菌数について、汚泥施用区における両者の関係を示したのが図 3 である。なお、菌数と CO₂ 濃度が広範囲に分布しているため、図 3 では両対数で表示

表 2 下水汚泥施用土壌における土壌空気成分と土壌微生物数相互間の相関係数行列

Table 2 Correlations between concentrations of soil air constituents and microbial populations in surface soil amended with sewage sludge

	CO ₂	O ₂	N ₂	Aerobic Bacteria	Actinomyces	Fungi	DRB*	Protein Degraders	AOB**
O ₂	-0.100								
N ₂	-0.301	-0.587*							
Aerobic Bacteria	0.779***	0.075	-0.316*						
Actinomyces	-0.085	-0.375*	0.165	-0.013					
Fungi	0.029	-0.401*	0.301	0.075	0.367*				
DRB*	0.737***	0.115	-0.388*	0.895***	0.064	-0.023			
Protein Degraders	0.699***	-0.014	-0.222	0.879***	0.030	0.073	0.860***		
AOB**	0.119	-0.511**	0.468**	0.097	0.119	-0.205	-0.050	0.077	
NOD***	0.229	0.102	-0.171	0.577***	-0.052	-0.037	0.609***	0.611***	0.109

*Dye resistant bacteria; **, Ammonium oxidizing bacteria; ***, Nitrite oxidizing bacteria. Sample size=30
 *, **, and *** are significant at the 10, 5, 1 and 0.1 % levels, respectively.

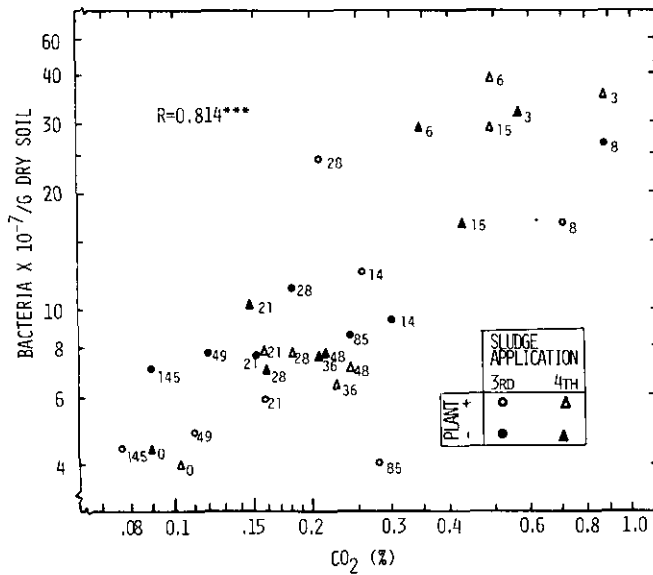


図 3 下水汚泥施用土壌における好気性細菌数と土壌空気中の CO₂濃度との関係
 Fig. 3 Relationship between bacterial populations and CO₂ concentration of soil air in the surface of soil amended with sewage sludge
 Figures on the right hand side of the symbols refer to the number of days after sludge application.

した。この場合の回帰式は $\log \text{CO}_2 (\%) = 0.791 \log (\text{好気性細菌数}) - 6.982$ であった。

O_2 濃度との間の相関係数が有意であった菌群は、全処理区に対しては色素耐性細菌と NOB を除く 5 菌群 (表 1) であり、また汚泥施用区に対して放線菌、糸状菌及び AOB の 3 種 (表 2) であった。これらはいずれも O_2 濃度の高いときに菌数が少ない傾向にあった。この結果は 4 回目の施用後の従属栄養菌群の急激な増加 (図 1) と O_2 濃度の急激な減少 (図 2) を反映していないようにみえる。しかし、 O_2 濃度が最も大きく変化した施用後 1, 2 日目に菌数測定を行っていないため、むしろ長期的な変動の特徴をとらえたものといえよう。

N_2 との相関係数が 1%水準以上で有意であった菌群は AOB のみであった (表 1, 2)。このことは、ある種の AOB が酸化的に脱窒を行う (N_2O を生成すること⁶⁾と関連があるかもしれない。しかし N_2O が感度よく測定できず、すべてのデータが検出限界以下であったため、これ以上の推論はさし控えたい。

3.2 微生物数による土壤中 CO_2 濃度の予測

前項で示したように、微生物数と最も関連の深いガスは CO_2 であった。 CO_2 は好氣的呼吸における炭素化合物の唯一の最終産物であること、及び空気中の濃度が O_2 に比べて非常に低い (0.03%) ことからみて、上記の結果は当然と言える。 CO_2 濃度は好気性細菌 (図 3) をはじめとする多くの菌群の数と関連があるため、単独菌群の活動度の指標にはならない。また土壤中には CO_2 を発生する従属栄養微生物だけでなく、硝化菌 (AOB, NOB) のような独立栄養微生物も存在している。さらに、菌数と活性 (CO_2 の生成と消費能) は必ずしも並行関係にはない。

そこで、土壤空気中の CO_2 濃度を菌群数から予測するために重回帰分析を試みた。最終的に CO_2 濃度を最もよく予測できる菌群の組み合わせは、予測平方和が最小になるように選択した。その結果、全データ ($n=60$) を用いた場合も汚泥施用区のみ、もしくは無施用区をみのデータ (それぞれ $n=30$) を用いた場合もすべて、好気性細菌と NOB の 2 菌群が独立変数として選択された。この組み合わせはデータをすべて対数変換した場合でも同じであった。広範囲にわたるデータを同じ誤差率で評価するために、今、対数変換したデータについて重回帰式を求めると、全データを用いた場合、

$$\log \text{CO}_2 (\%) = 0.650 \log \text{Bacteria} - 0.059 \log \text{NOB} - 5.493 \quad (1)$$

汚泥施用区のみの場合

$$\log \text{CO}_2 (\%) = 0.863 \log \text{Bacteria} - 0.095 \log \text{NOB} - 6.991 \quad (2)$$

汚泥無施用区のみの場合

$$\log \text{CO}_2 (\%) = 0.168 \log \text{Bacteria} - 0.025 \log \text{NOB} - 2.330 \quad (3)$$

になった。

(1)~(3)式における重相関係数はそれぞれ 0.933, 0.826, 0.521 であり, 寄与率は 87.1 %, 68.3 %, 27.2 %であった。寄与率からみると(1)式が最も適当であるが, 今回の目的は汚泥施用に伴う菌数変化と CO₂濃度との関係を明らかにすることにあるので, (2)式がこの場合には適当であると考えた。ただし, 回帰に用いたデータには施用後1及び2回目のものが含まれていないことから, これらの施用時の CO₂濃度と菌数との関係に(2)式を適用するのが妥当かどうかは検討の余地がある。

上記の重回帰式は土壌中の CO₂濃度が好気性細菌と NOB だけに支配されていることを意味するのではない。好気性細菌数と非常に相関の高かった菌種は式の中に導入しなくても好気性細菌で代表でき, またこれで説明しきれない部分(施用直後の CO₂濃度と好気性細菌数との位相のずれと, 施用2週目以降のわずかな CO₂濃度の変化など)を NOB が補ったと考えるべきである。ただし, NOB は独立栄養細菌(CO₂の消費者)であることから, 実質的な意味をもっている可能性もある。

本ライシメーター試験において, 1回目と2回目の汚泥施用時には微生物の計数は行っているが, 土壌中の CO₂濃度は測定していない。また3, 4回目においても菌数測定と土壌空気の分析を同時に行っていない場合がある。そこで, これらの分を含めて, 菌数から CO₂濃度の予測を試みた。計算には(2)式を用いた。図4は汚泥施用区における変化を示したものである。3, 4回目の施用時における予測値はほぼ実測値と一致している。一部のデータにおける予測値とのずれは, 回帰の不安定性のほかに土壌水分の違い(通常はかん水直前に分析しているが, 一部, 菌数をかん水前に, ガス分析をかん水後に行ったものがある)が原因となっているであろう。

このような問題点はあるが, 実測値と予測値を相補的に考慮すると, 2-4回目の施用時における CO₂の発生ピークは施用後1-3日目にあるのに対して, 1回目の施用時のパターンは明らかに異なり, 予測値のピークは7-14日目にあった。またピークに達した後の濃度の減少も1回目は特に緩慢であった。これは, 土壌中のアンモニア態窒素含量の消長が初回施用時には緩慢であったこと⁷⁾と一致している。

服部らは, 本ライシメーター試験に用いたものと同じ土壌に同じ下水汚泥を添加してビン培養試験を行い, CO₂の発生を測定している⁸⁾。その結果は, 本試験の初回施用時における CO₂濃度の予測値に比べて, CO₂の発生ピークが早くなっている。図4の予測値が実際の傾向を反映しているとする, ライシメーター試験における土壌水分環境の急激な変化と, それに伴う微生物活動の変動が, おそらくピーカー試験と異なっていた主要原因であろう。

気温や土壌水分の変動幅が大きい野外条件では微生物数の変動が激しく, かつ最大菌数に達する時期も遅れる⁹⁾ので, CO₂の発生も不規則になり, かつその最大時期も遅れることが予想される。この意味で環境制御ライシメーターにおける微生物数と CO₂の測定は, ピーカー試験レベルの結果と野外試験の結果をつなぐ上で重要であると考えられる。

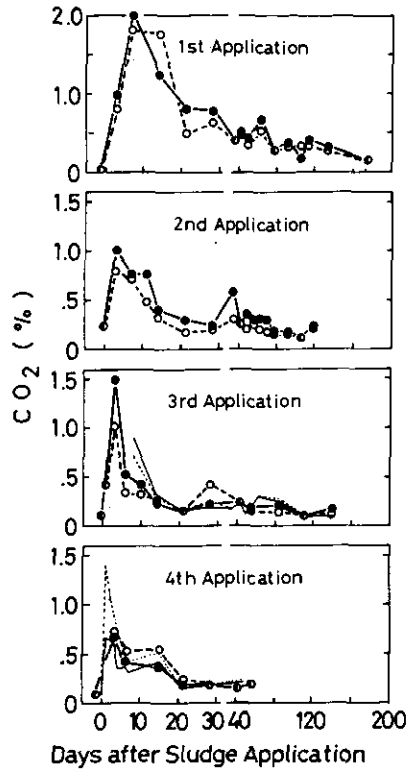


図 4 下水汚泥施用後の土壤中 CO₂濃度の予測値の変化
 Fig. 4 Changes in estimated concentration of CO₂ in soil air at 10 cm depth as affected by sludge application

—●— and ---○--- estimated concentrations in bare and cultivated soils, respectively, except for the 1st application, where ---●--- soil was not cultivated.
 — and --- observed concentrations in bare and cultivated soils, respectively.
 The equation for estimation is : $\log [CO_2 (\%)] = 0.863 \log [Bacteria] - 0.095 \log [NOB] - 6.991$

4 まとめ

淡色黒ボク土壤に生活廃水汚泥を施用した環境制御ライシメーター試験において、汚泥施用層における組成 (N₂, O₂, CO₂) と土壤微生物数 (好気性細菌, 色素耐性菌, 放線菌, 糸状菌, タンパク質分解菌, アンモニア酸化細菌, 亜硝酸酸化細菌) との関連を調べた。その結果, 汚泥施用直後に CO₂濃度の上昇と O₂濃度の減少が認められ, これらは従属栄養細菌群の変動とほぼ一致することが判明した。

土壤空気中の CO₂濃度と7種の菌群数との関係を重回帰分析によって調べた結果, 好気性細菌と亜硝酸酸化細菌の2種で各菌群数の変化を代表させて, 土壤空気中の CO₂濃度を予測できるこ

とが明らかになった。得られた重回帰式は、

$$\log \text{CO}_2(\%) = 0.863 \log (\text{好気性細菌数}) - 0.095 \log (\text{亜硝酸酸化細菌数}) - 6.991$$

であった。

菌数のみを測定し、CO₂濃度を分析していないデータにこの式を当てはめた結果、下水汚泥を連用すると、初回施用時に比べて土壌中のCO₂濃度の高まりが早まり、汚泥炭素の分解が急激に起こることが示唆された。

謝 辞

本研究を行うに当たり、日本大学農獣医学部の豊田敏治氏には土壌微生物の分離と計数にお手伝いをしていただいた。ここに厚く御礼申し上げます。

引 用 文 献

- 1) 藤井國博(1983): 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. 国立公害研究所研究報告, 第45号, 15-73.
- 2) 大羽 裕・Nguyen Quan-Lu (1981): 二酸化炭素発生量からみた畑条件下の下水汚泥の分解. 日本土壌肥科学雑誌, 52, 132-140.
- 3) 久保井徹・広木幹也・藤井國博(1984): 下水汚泥の施用が土壌空気組成に与える影響. 国立公害研究所研究報告, 第68号, 67-81.
- 4) 広木幹也・藤井國博・服部浩之・久保井徹・豊田敏治・松坂泰明・和田秀徳 (1983): 下水汚泥施用土壌の微生物フロラに関する研究(I), 石灰凝集下水汚泥の多量連用が淡色黒ボク土の微生物数に与える影響. 国立公害研究所研究報告, 第46号, 1-16.
- 5) 廣崎昭太・小林藤雄(1979): 予測平方和(PSS)による重回帰式の変数選択. 農林計算センター報告, A15号, 45-104.
- 6) Yoshida, T. and M. Alexander (1970): Nitrous oxide formation by *Nitrosomonas europaea* and heterotrophic microorganisms. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 34, 880-882.
- 7) 服部浩之・豊田敏治・久保井徹・広木幹也・藤井國博・松坂泰明(1983): 下水汚泥連用土壌における全炭素・全窒素及び無機態窒素量の変化. 国立公害研究所研究報告, 第47号, 27-35.
- 8) 服部浩之・山口浩一・久保井徹・藤井國博・矢崎仁也(1983): 土壌中における各種汚泥の分解と分解に及ぼす合成高分子凝集剤の影響. 国立公害研究所研究報告, 第47号, 1-11.
- 9) 広木幹也・藤井國博・服部浩之・久保井徹・小林峰雄・矢崎仁也・和田秀徳(1983): 下水汚泥施用土壌の微生物フロラに関する研究(II), 石灰凝集下水汚泥連用淡色黒ボク土における土壌微生物フロラの季節変動. 国立公害研究所研究報告, 第46号, 17-38.

II-7

下水汚泥施用土壌浸透水の AGP (藻類増殖の潜在能力)

**Algal Growth Potential of Leachate from Various Soils
Amended with Sewage Sludge**

稲森悠平¹・石井修司²・矢木修身¹・須藤隆一¹

Yuhei INAMORI¹, Shyuji ISHII², Osami YAGI¹ and Ryuichi SUDO¹

Abstract

To evaluate the effect of leachate from various soils amended with sewage sludge on the fresh water environment, algal growth potential (AGP) was determined. In this study, sewage sludge or chemical fertilizers were applied to sandy soil, light colored Andosol, Alluvial soil and humic Andosol in lysimeters, and leachate from lysimeters was used for the determination of AGP.

The results obtained are summarized as follows.

- 1) The AGP values of the leachate from each soil amended with sewage sludge were similar to those of the leachate from soils to which chemical fertilizers had been applied.
- 2) The AGP values depended upon the kinds of soil to which sewage sludge or chemical fertilizers had been applied. Particularly, the highest value of AGP was obtained in the sandy soil.
- 3) The addition of phosphorus and EDTA to lysimeter leachate stimulated the growth of algae, but no stimulation was obtained by the addition of nitrogen.

1 はじめに

我が国の下水道普及率は昭和 53 年で約 26% であったが、第 4 次下水道整備 5 年計画終了時の昭和 55 年においては、その普及率が約 30% にまで高まった。将来さらに普及率は高くなると考えられるが、これに伴い発生する汚泥も増加するものと予想される。すなわち昭和 51 年度実績で、240 万 m³/y (水分 70%) であったが、昭和 55 年には約 3 倍の 676 万 m³/y となり、さらに昭和 60 年には約 1,170 万 m³/y になることが予想されている¹⁾。したがってこの汚泥の処理処分

-
1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川 16 番 2
Water and Soil Environment Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
 2. 昭和 56 年度 国立公害研究所共同研究員 (東京理科大学工学部 〒162 東京都新宿区神楽坂 1-3)
Research Collaborator of the National Institute for Environmental Studies. Present Address: Department of Industrial Chemistry, Faculty of Engineering, Science University of Tokyo, Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo, Japan.

は従来にも増して今後は大きな社会問題の一つになるものと考えられる。

汚泥の処理分は従来から様々の方法で行われてきたが陸上処分法には、埋立処分と緑農地を利用したことがある。埋立処分はそれに要する経費が低廉なことや土地造成にも使えるなどの理由で広く行われてきている。しかし、大量の下水汚泥を投棄し埋立てた後に発生する浸透水は、河川の汚濁や湖沼の富栄養化あるいは地下水の汚染等の原因になる恐れを有している。また汚泥を土壤に施用して作物の肥料とすることを目的としたいわゆる緑農地還元の場合にも、上記と同様その浸透水の富栄養化及び地下水に及ぼす影響が問題となってくる。

なお、富栄養化は1次生産力を著しく増大させる現象、すなわち藻類や水生植物を異常に増殖させる現象を意味するが²⁾、上記の浸透水の陸水環境に及ぼす影響を評価する上で、富栄養化の程度を知るための一つの指標である藻類増殖の潜在能力 (Algal Growth Potential, 以下においては AGP と称す) は重要な因子の一つになる。陸水域の富栄養化の現状は、透視度、溶存酸素、窒素やリンなどの測定結果を組み合わせることによっても十分評価できるが、水域に負荷される各種の排水が富栄養化にどの程度の影響を及ぼすのか、あるいは藻類増殖の制限物質が何であるかを検討するためには、藻類増殖の潜在能力を包括的に表現しようとする指標である AGP が適している。また AGP は富栄養化の現状の把握のみにとどまらず、富栄養化の予測及び制御に必要な知見を得るのにも役立つと考えられている。AGP は、排水に特定の藻類を接種して一定条件下で培養を行い、最大増殖量を培養液 1 l 当たりの乾燥重量 (mg) として表したものである²⁾。このような特性を有する AGP による富栄養化の評価方法は、排水に対しては積極的に活用されているが土壤浸透水に対しても十分適用できるものと考えられる。

本研究は、汚泥を施用した土壤を通過した浸透水が陸水環境にいかなる影響を及ぼすかを、浸透水の化学成分の分析及び AGP の測定によって明らかにすることを目的として実験的に検討を行ったものである。ここでは特に汚泥を畑地に還元した場合の実験について報告することにする。

2 実験方法

2.1 実験装置の構造

実験に使用したライシメーターは、図 1 に示したとおりの構造をしており、実際の畑地環境をシミュレートした装置である。このライシメーターは幅 4 m、奥行 4 m、深さ 1.5 m のコンクリート枠内に土壤を充てんしたもの (土層の厚さ 1.2 m) であり、屋外に設置され、かん水は自然降雨により行っている。土壤表面下 1.5 m の位置に浸透水採水口が設けられている。本実験ではこのライシメーターを 8 基使用した。

2.2 ライシメーター充てん土壤及び処理区の種類

ライシメーターに充てんした供試土壤及び処理区は、表 1 に示したとおりである。本研究では各実験系を記号 A1~D2 で表すことにした。A1, B1, C1, D1 は化学肥料施用区, A2, B2,

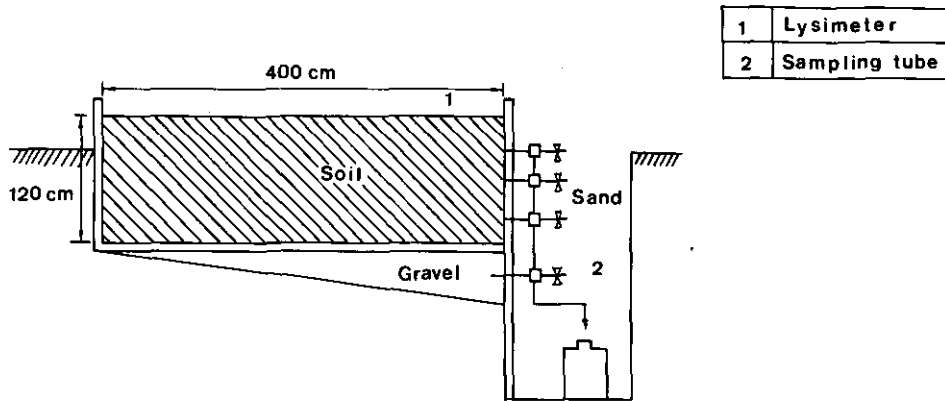


図 1 ライシメーターの構造
Fig. 1 Outdoor lysimeter

表 1 ライシメーター充てん土壌の種類と特徴及び施用物
Table 1 Properties of soils used in this experiment

Lysimeter	Soil	Amendment
A	Sandy Soil	Chemical fertilizers ¹⁾
		Sewage sludge ²⁾
B	Light colored Andosol	Chemical fertilizers
		Sewage sludge
C	Alluvial soil	Chemical fertilizers
		Sewage sludge
D	Humic Andosol	Chemical fertilizers
		Sewage sludge

1) Compound fertilizers ; 1 t/ha
Fused phosphate ; 600 kg/ha
2) Domestic sewage sludge ; 7.5 t/ha (dry weight)

C2, D2 は下水汚泥施用区である。ここで A は砂質土, B は淡色黒ボク下層土, C は沖積水田下層土, D は黒ボク表層土を意味する。なお, 化学肥料施用区は下水汚泥施用区の対照系に相当する。これらの供試土壌の性質については服部ら³⁾により報告されている。

下水汚泥は, 茨城県取手市にある住宅団地の下水処理場から採取したものである。同処理場では生活排水を活性汚泥法により処理しているが, 採取した汚泥はそこから排出された余剰汚泥と初沈汚泥を濃縮後石灰及び塩化第 2 鉄を添加し凝集させ加圧脱水して得られたものを天日乾燥したものである。なお, 汚泥は夏季と冬季に 2 回供試したがその成分組成は pH (H₂O) で両季とも 10.1, T-C, T-N, T-Ca で乾燥物重量当たり各々 27.3, 3.65, 15.2 % 及び 21.2, 2.71, 8.4 %, T-P で各々 P₂O₅ として 19.7 及び 10.4 mg/g 乾重, T-K で各々 3,038 及び 910 µg/g 乾重, C/N で

各々7.49, 7.82であった⁴⁾。

汚泥の採取は昭和54年6月と昭和55年10月に行った。この汚泥の施用量は、乾物として7.5 t/ha 相当量である。その主成分組成及び微量元素濃度は広木ら⁴⁾により報告されている。

化学肥料には、窒素(N) 8%, リン酸(P₂O₅) 8%及びカリウム(K₂O) 5%を含む化成肥料を1.0 t/ha, 熔成リン肥を600 kg/ha 施用した。下水汚泥あるいは化学肥料の施用は、昭和54年度から開始されており、春と秋の年2回行われている。本実験を行った昭和56年度は6月15日及び11月13日に施用した。下水汚泥は有姿で土壌表面に散布した後、ロータリー耕うん機によって0~15 cm までの土層に混入した。化学肥料も同様に0~15 cm までの土層に混入した。なお両区とも植物を栽培しない裸地とし、生育した雑草は抜きとった。

2.3 浸透水の採水方法

ライシメーターからの浸透水は毎回21ずつ採水した。採水の回数は、施用直前に1回、施用から次の施用までの期間に表2のように6回、合計7回行った。本研究ではそれぞれの浸透水の採水日を記号I~VIIで表すことにした。Iは施用前、IIは施用2週間後、IIIは施用4週間後、IVは施用6週間後、Vは施用10週間後、VIは施用14週間後、VIIは施用16週間後を意味する。

表 2 ライシメーター浸透水の採水日
Table 2 Sampling time of lysimeter leachate

I		II	III	IV	V	VI	VII	
←	Sludge or Fertilizer Application	after						→
before		2	4	6	10	14	16	
		weeks	weeks	weeks	weeks	weeks	weeks	
(June15)	(June15)	(June29)	(July14)	(July28)	(Aug.24)	(Sept.21)	(Oct.4)	

2.4 水質分析の方法

ライシメーター浸透水については、pH, COD, NH₄-N, NO₃-N, NO₂-N, PO₄-Pの測定以外にNa, Ca, K, Mg及び重金属の分析を行った。pHは採水した浸透水について直接pHメーターにより測定した。NH₄-N, NO₃-N, NO₂-N, PO₄-Pはいずれもテクニコン製オートアナライザーII型を使用して以下の方法で分析した。すなわち、NH₄-Nはインドフェノール法を利用した自動分析法⁵⁾、NO₂-Nはスルファニルアミドと反応させ生成したジアゾ化合物を測定する自動分析法⁶⁾、NO₃-NはヒドラジンでNO₂に還元後NO₂-Nと同様に自動分析法⁷⁾により測定した。PO₄-Pはモリブデンブルーの生成を利用した自動分析法⁸⁾により測定した。またCODは下水試験方法⁹⁾に従い、100°CにおけるKMnO₄酸性法による方法で測定した。Ca, Mg, K, Naは原子

吸光光度法により測定した。Cr, Mn, Fe, Ni, Zn, Cu, Cd等の重金属はプラズマ発光分光分析装置(Model 975 Plasma Atom Comp (JARRELAsh))を用いて測定した。

2.5 AGP の測定方法

AGP 試験は、国立公害研究所標準法¹⁰⁾に従った。前処理として孔径 0.45 μ m のミリポア HA フィルターでろ過した試水を、500 ml容の三角フラスコに100 mlずつ分注しAGP試験に供した。なおライシメーター浸透水については、浸透水中のリン濃度が低かったことと重金属の存在が予想されたため、栄養塩等の添加試験を行った。添加試験においては無添加をコントロールとし、リン添加、リンとEDTA添加について行った。リンはPとして0.1 mg/lとなるようにK₂HPO₄水溶液を、またEDTAは1.0 mg/lとなるようにNa₂EDTA・2H₂O水溶液を添加した。供試藻類としては、ノルウェーのSkulbergが藻類増殖能をはかる場合の標準法として採用している緑藻類の*Selenastrum capricornutum*及び、霞ヶ浦で水の華を形成するラン藻類の一種である*Microcystis flos-aquae*を用いて、前者では25°C, 4,000lx, 90rpm, 後者では25°C, 1,500lx, 90rpmの振とう培養を行った。なお増殖のモニターにはコールターカウンターを使用し、増殖が最大に達したのを確認したのちに、Whatmanのガラスフィルターで培養液をろ過して乾燥重量を求めた。AGP 試験は*S. capricornutum*については浸透水 I, II, III, V, VII, *M. flos-aquae*についてはI, II, III (図2, 3ではI~VIIを1~7で表す)について行った。

3 結果及び考察

3.1 ライシメーター浸透水の性状

ライシメーター浸透水の水質分析の結果は表3に示すとおりである。ライシメーター浸透水は

表 3 ライシメーター浸透水の水質
Table 3 Water quality of lysimeter leachate

Parameter	A		B		C		D	
	1	2	1	2	1	2	1	2
COD [ppm]	1.5-2.0 1.8	1.4-1.9 1.7	1.3-1.8 1.6	1.4-1.7 1.6	1.4-1.8 1.6	1.5-1.9 1.7	1.4-2.0 1.7	1.6-1.8 1.7
NO ₃ -N [ppm]	2.7-29 16	8.9-39 24	22-28 25	17-27 22	14-29 22	24-33 29	38-55 47	35-62 49
NO ₂ -N [ppb]	0-5 3	1-3 3	1-8 5	2-6 4	1-14 8	1-12 7	2-27 15	2-16 9
NH ₄ -N [ppb]	0-12 6	0-10 5	0-12 6	0-18 9	0-7 4	0-10 5	0-13 7	0-11 6
PO ₄ -P [ppb]	10-28 17	11-63 21	5-17 11	4-14 9	6-19 13	7-19 13	5-16 11	6-15 11

Note: Above numerals represent maximum and minimum value and below numerals represent mean value.

無色透明であり、COD はいずれの浸透水でも 2.0 mg/l 以下であった。無機性窒素のうちアンモニア性窒素及び亜硝酸性窒素はそれぞれ 3~15 μ g/l, 4~9 μ g/l の低濃度であったのに対して、硝酸性窒素は 16~49 mg/l と両二者に比べて極めて高い濃度を示し、浸透水中の無機性窒素のほとんどを硝酸性窒素が占めていることが判明した。PO₄-P としてのリンはいずれの浸透水中にも 9~19 μ g/l 存在した。また金属についても、Fe, Ni, Mn, Cr, Cu, Cd, Zn を対象にして分析を行ったが、結果は表 4 a), b) に示すとおりであった。金属濃度は土壌の種類、施用物の違いにより値に多少のひらきはあったが、Fe で 0.014~0.125 mg/l, Ni で 0.016~0.055 mg/l, Mn で 0.002~0.013 mg/l, Cr で 0.006~0.012 mg/l, Cu で 0.013~0.029 mg/l, Cd で 0.002~0.004mg/l, Zn で 0.025~0.204 mg/l の極めて低い濃度範囲にあった。

表 4 ライシメーター浸透水の金属濃度
Table 4 Metal concentration of lysimeter leachate

a)

	(mg/l)							
	A		B		C		D	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Fe	0.014-0.128 0.071	0.027-0.226 0.125	0.009-0.036 0.023	0.011-0.016 0.014	0.013-0.078 0.046	0.012-0.063 0.038	0.017-0.038 0.028	0.011-0.026 0.019
Ni	0.016-0.030 0.023	0.010-0.021 0.016	0.010-0.075 0.043	0.008-0.098 0.053	0.018-0.091 0.055	0.011-0.053 0.032	0.008-0.057 0.033	0.009-0.041 0.025
Mn	0.000-0.017 0.009	0.002-0.006 0.004	0.001-0.003 0.002	0.002-0.004 0.003	0.001-0.009 0.005	0.003-0.009 0.006	0.009-0.017 0.013	0.002-0.013 0.008
Cr	0.001-0.011 0.006	0.003-0.009 0.006	0.003-0.014 0.009	0.005-0.010 0.008	0.009-0.015 0.012	0.006-0.016 0.011	0.006-0.014 0.010	0.007-0.016 0.012
Cu	0.010-0.040 0.025	0.010-0.015 0.013	0.012-0.017 0.015	0.013-0.022 0.018	0.015-0.023 0.019	0.012-0.023 0.023	0.024-0.034 0.029	0.015-0.027 0.021
Cd	0.001-0.006 0.004	0.001-0.004 0.003	0.000-0.004 0.002	0.001-0.003 0.002	0.001-0.005 0.003	0.002-0.006 0.004	0.002-0.004 0.003	0.001-0.003 0.002
Zn	0.012-0.073 0.043	0.011-0.039 0.025	0.015-0.218 0.117	0.015-0.146 0.081	0.019-0.388 0.204	0.022-0.116 0.069	0.056-0.205 0.131	0.032-0.364 0.198

Note: Above numerals represent maximum and minimum value and below numerals represent mean value.

b)

	(mg/l)							
	A		B		C		D	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Na	20	18	26	35	47	38	46	42
Ca	37	28	57	56	76	85	90	81
K	11	8	9	9	16	14	18	15
Mg	13	7	11	11	23	22	17	15

Note: Mean value.

3.2 ライシメーター浸透水の AGP

砂質土、淡色黒ボク下層土、沖積水田下層土、黒ボク表層土の4種類の土壌に各々下水汚泥及び化学肥料を施用した場合における各処理区の浸透水 AGP を *Selenastrum capricornutum* を供試藻類として測定した結果は表5と図2に示した。なお各測定試料中の成分濃度の詳細は本報告書資料編の「屋外ライシメーター浸透水中の成分濃度」に記してある。下水汚泥施用区と化学肥料施用区のいずれにおいても同一の土壌においては無添加系、リン添加系、リン・EDTA 添加系ともに AGP に大きな差は認められず、砂質土とそれ以外の土壌との比較において AGP に差が認められた。しかし、いずれにおいても下水汚泥、化学肥料を問わずその浸透水の AGP は無添加系では小さく、リンと EDTA 添加系では高いことがわかった。

なお、砂質土浸透水のみはリンが添加されただけでも高い AGP 値の得られることがわかった。

表 5 ライシメーター浸透水の AGP (供試藻類：
Selenastrum capricornutum)
Table 5 AGP of lysimeter leachate (Test Algae：
Selenastrum capricornutum)

Preparation		[mg/l]				
		I	II	III	IV	VII
A	standard	10	8	11	8	13
	1 P	66	85	62	55	49
	P+EDTA	100	125	110	53	49
	standard	50	6	9	7	13
	2 P	130	75	70	43	29
	P+EDTA	105	74	77	100	49
B	standard	0	0	0	0	0
	1 P	0	0	0	0	16
	P+EDTA	0	46	56	71	44
	standard	0	0	0	0	0
	2 P	0	0	0	0	95
	P+EDTA	52	62	75	23	27
C	standard	0	0	0	0	0
	1 P	0	16	0	0	10
	P+EDTA	17	41	82	35	19
	standard	0	0	0	0	0
	2 P	0	14	29	0	6
	P+EDTA	68	47	86	19	16
D	standard	0	0	0	0	0
	1 P	0	0	0	0	0
	P+EDTA	79	46	120	34	13
	standard	0	0	0	0	0
	2 P	9	15	0	0	4
	P+EDTA	73	68	93	22	16

Note; Standard: Lysimeter leachate without addition of P or EDTA, P: Lysimeter leachate with addition of 0.1 mg P/l, P+EDTA: Lysimeter leachate with addition of 0.1 mg P/l and 1 mg EDTA/l.

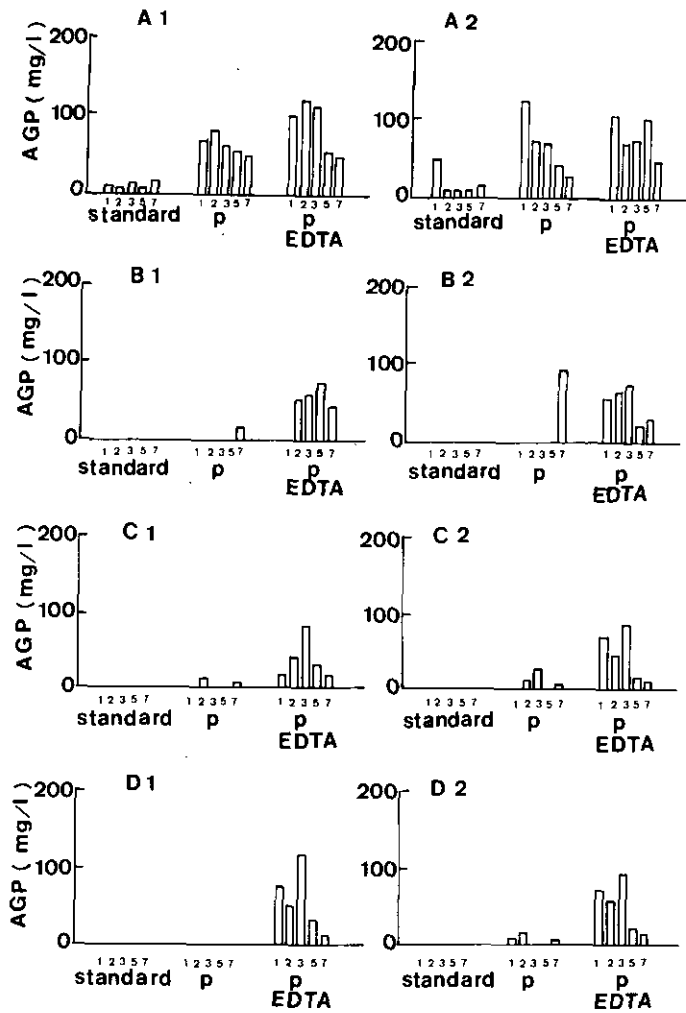


図 2 ライシメーター浸透水の AGP (供試藻類 *Selenastrum capricornutum*)

Fig. 2 AGP of lysimeter leachate (Test Algae: *Selenastrum capricornutum*)

このように砂質土浸透水と淡色黒ボク下層土、沖積水田下層土、黒ボク表層土の浸透水とは藻類の増殖に及ぼす影響が異なることが判明した。なお、通常 EDTA の添加された系で高い AGP が得られた理由として、ひとつには EDTA が浸透水中の重金属を錯化して毒性を弱めたか、あるいは EDTA が金属を藻類が吸収しやすい形に変化させることによって藻類の増殖能力を高めたかのいずれかで説明されるがここでは浸透水中の重金属濃度が低かったことから後者の理由によるものと考えられる。また砂質土浸透水ではリンのみ添加した系でも藻類の増殖が認められたが、これは EDTA 様の物質が他の土壤に比べて砂質土浸透水に多く含まれていたか、あるいは砂質土と他の土壤では土壤表面の性状が異なることが原因ではないかという、少なくとも二つの可能

性が考えられる。

無添加系において砂質土では AGP が高く、淡色黒ボク下層土、黒ボク表層土、沖積水田下層土では AGP は検出されなかったが、緑農地はほとんどの場合後者の 3 種のいずれかの土壌で構成されていることから、化学肥料あるいは下水汚泥のいずれを施用しても浸透水のみで藻類生産に及ぼす影響は極めて小さいものと考えられる。なお、浸透水は藻類増殖能を有さなくても湖沼、河川に浸透水が流下した場合、そこに存在する化学物質により藻類増殖が刺激される場合のあることは十分注意しておく必要がある。

このように、*S. capricornutum* を供試藻類とした上記の結果から汚泥が緑農地を構成している一般的な土壌に施用された場合、その浸透水のみでは藻類はほとんど増殖しないこと、汚泥が砂質の土壌に施用された場合には浸透水にリンが陸上環境から負荷されただけで藻類の増殖能力が高まる可能性があること、またいずれの土壌の浸透水でもその浸透水にリンと EDTA 様の錯化物質が陸水環境から負荷されれば、藻類の増殖能力は著しく刺激されることが判明した。また、*Microcystis flos-aquae* を供試藻類とした場合の各浸透水の AGP は表 6、図 3 に示すとおりである。*S. capricornutum* の場合と若干傾向は異なるが、P と EDTA の両者が存在した場合に増殖が刺激されること及び無添加系では増殖が認められないことなどはおおむね一致している。

以上の 2 種類の藻類を用いた実験結果より、いずれの土壌においても同一土壌で比較すると下水汚泥施用区と化学肥料施用区では浸透水の藻類生産能にはほとんど差の認められないことがわかった。これは浸透水の COD、N、P、Fe、Ni 及び Cu、Cr などの重金属濃度も化学肥料区と汚泥施用区で大きな差がなかったからではないかと考えられる。なお、P 添加のみでは通常の緑農地を構成している土壌の浸透水では藻類増殖が刺激されず EDTA を添加してはじめて刺激されたことは藻類の増殖は浸透水の P 濃度のみから推定できず AGP 添加試験が極めて重要なことを意味している。また、表 4 a), b) に示した浸透水の化学成分は藻類の増殖に影響を及ぼす濃度が検出されるには至っていないことまた、これらは自然水中にも多くは検出されないこと、さらに N、P、EDTA 以外は過剰に存在すれば藻類増殖を阻害する機会が多いことから、浸透水の藻類増殖に最も密接な関係のあるのは EDTA 様物質であろうと推定できる。したがって下水汚泥を緑農地還元する場合、本実験で検討した汚泥施用量の範囲においては、従来より行われている化学肥料施用を下水汚泥施用に置き換えても、その浸透水の陸水環境に及ぼす影響は AGP から評価しても化学成分から評価しても化学肥料施用の場合とほとんど変わらないであろうと推定される。すなわち、下水汚泥の処理処分が社会問題となっている今日において、化学肥料施用を下水汚泥施用に切り換えても陸水環境に及ぼす影響に変化がないという結果は、下水汚泥を積極的に緑農地還元する施策を推進することが可能であることを意味している。しかしながら下水汚泥の緑農地還元は浸透水の AGP のみで決められているものではない。下水汚泥を緑農地に還元する場合には、浸透水中の AGP、重金属濃度及びその他の微量成分濃度などの知見と、作物に移行する重金属含量などの知見とを総合した上で判断しなければならない。なお、本研究は下水汚泥及びび化

表 6 ライシメーター浸透水のAGP (供試藻類：
Microcystis flos-aquae)
Table 6 AGP of lysimeter leachate (Test Algae：
Microcystis flos-aquae)

		(mg/l)			
Preparation		I	II	III	
A	1	standard	0	0	0
		P	0	0	0
		P+EDTA	120	48	100
	2	standard	0	0	0
		P	0	0	0
		P+EDTA	5	45	37
B	1	standard	0	0	0
		P	0	0	0
		P+EDTA	0	18	17
	2	standard	0	0	0
		P	0	0	0
		P+EDTA	0	24	5
C	1	standard	0	0	0
		P	0	0	0
		P+EDTA	0	0	0
	2	standard	0	0	0
		P	0	0	0
		P+EDTA	0	0	16
D	1	standard	0	0	0
		P	0	0	0
		P+EDTA	0	100	12
	2	standard	0	0	0
		P	0	0	0
		P+EDTA	55	18	6

Note: Standard: Lysimeter leachate without addition of P or EDTA, P: Lysimeter leachate with addition of 0.1 mg P/l, P+EDTA: Lysimeter leachate with addition of 0.1 mg P/l and 1 mg EDTA/l.

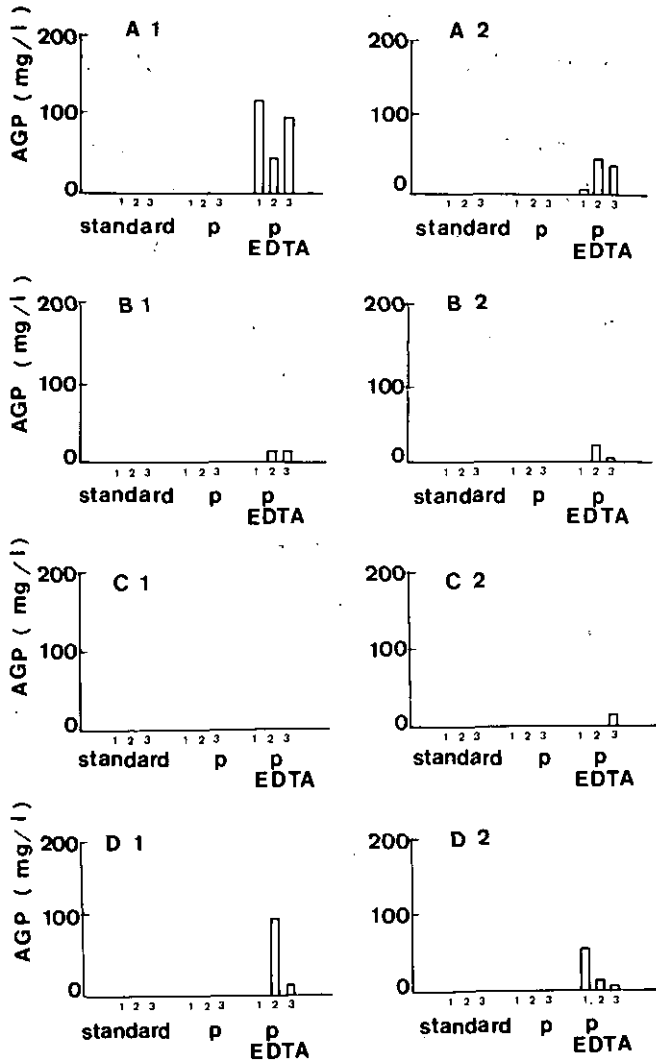


図 3 ライシメーター浸透水の AGP (供試藻類 *Microcystis flos-aquae*)
 Fig. 3 AGP of lysimeter leachate (Test Algae: *Microcystis flos-aquae*)

学肥料を作物の栽培されていない裸地に施用した場合の結果であったが、作物の栽培されている畑地では下水汚泥、化学肥料中の成分が作物に吸収されるので土壌浸透水の陸水環境に及ぼす影響は更に小さくなるものと考えられる。

4 まとめ

本研究は下水汚泥を緑農地すなわち畑に還元した場合の浸透水が陸水環境に及ぼす影響を及ぼすかについて藻類増殖の潜在能力 (AGP) から評価したものである。得られた知見は以下のよ

うにまとめられる。

1) 下水汚泥施用区浸透水, 化学肥料施用区浸透水ともに AGP はおおむね同様の傾向が認められた。

2) 砂質土と淡色黒ボク下層土, 沖積水田下層土, 黒ボク表層土とでは浸透水の AGP は異なった。すなわち, *S. capricornutum* を供試藻類とした無添加系では砂質土浸透水の AGP は 10 mg/l 程度であったが, 他の浸透水では 0.1 mg/l 以下であった。また砂質土浸透水のみリン添加だけで藻類増殖が著しく刺激された。

3) *S. capricornutum* と *M. flos-aquae* を供試藻類とした場合, リンと EDTA 添加系はいずれの土壤浸透水においても無添加系よりも高い AGP を示した。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり懇切なる御指導を賜った水質土壤環境部土壤環境研究室藤井國博室長, 貴重な御助言を賜った同久保井徹研究員, 広木幹也研究員, ライシメーターの管理及び採水に御尽力をはかられた技術部生物施設管理室山口武則係長並びに浸透水の金属分析を快くお引き受けいただいた計測技術部分析室溝口次夫室長, 西川雅高係長に対し深く感謝いたします。

引 用 文 献

- 1) 橋本 奨(1980): 汚泥処分の環境工学的位置づけ。環境技術, 9 (6) 7.
- 2) 須藤隆一(1979): 廃水処理の生物学。産業用水調査会。
- 3) 服部浩之・藤井國博・久保井徹・広木幹也(1983): 下水汚泥施用各種土壌における無機態窒素の経時変化。国立公害研究所研究報告, 第 47 号 45-62.
- 4) 広木幹也・藤井國博・服部浩之・久保井徹・小林峰雄・矢崎仁也・和田秀徳(1983): 下水汚泥施用土壌の微生物フロラに関する研究(II), 石灰凝集下水汚泥連用淡色黒ボク土における土壌微生物フロラの季節変動。国立公害研究所研究報告, 第 46 号, 17-38.
- 5) Technicon Instruments Corp (1973): Ammonia in water and sea water. Technicon industrial method, 154-71w/ Tentative.
- 6) Technicon Instruments Corp (1977): Nitrite in water and waste-water. Technicon industrial method, 102~70w/c.
- 7) Technicon Instruments Corp (1975): T. O. N./nitrite in water and waste-water. Technicon industrial method, 186-75 E/Provisional.
- 8) Technicon Instruments Corp (1973): Ortho phosphate in water. Technicon industrial method, 94-70 W/Tentative.
- 9) 日本下水道協会(1974): 下水試験方法。
- 10) 国立公害研究所(1981): 藻類の培養試験法による AGP の測定(陸水域の富栄養化に関する総合研究 (X)). 国立公害研究所研究報告, 第 26 号, 3-14.

II-8

ライシメーター浸透水の分析値
についての統計的解析
—— 各種土壌における化学肥料と下水汚泥の比較* ——

Statistical Analysis of Element Concentration in Percolating Water of Lysimeter
—— Comparison of Sewage Sludge and Chemical
Fertilizers in the Four Soil Types* ——

袴田共之¹・藤井國博²

Tomoyuki HAKAMATA¹ and Kunihiro FUJII²

Abstract

In this report attempts were made to determine which characteristics are useful in studies on the effects of chemical fertilizers and sewage sludge on several soil types. A lysimeter experiment was conducted with 8 treatments (4 soil types (sandy soil, Gray Lowland soil, light colored Andosol, and humic Andosol) × 2 kinds of fertilizers (sewage sludge, chemical fertilizers)). Data on the concentration of Cl, NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N, PO₄, K, Na, Ca and Mg, and pH in percolating water were obtained for each of the 8 treatments on 102 determinations over a period of two years. The data were statistically analyzed by using computer programs, CDA 1 (Conversational Data Analysis Program, Version 1) and MAP (Multivariates Analysis Program Package), detecting outliers, adjusting distributions to Gaussian distribution, condensing the factors to fewer characteristics by principal components analysis, and characterizing the fertilizer treatments (sludge and chemical fertilizers) by application of discriminant functions. The results obtained were as follows: The first component (also the second component in some treatments) was useful for summing up changing patterns of some elements. Sewage sludge effect could be differentiated from that of chemical fertilizers on the basis of determinations of the concentration of NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N and PO₄ in the Gray Lowland soil, unlike in the sandy soil. It was shown that the changes of the first principal component scores and of the concentration of some elements enabled to distinguish the effect of the sludge and/or chemical fertilizers in every soil type except in the sandy soil.

*本論文の概要は、昭和 58 年日本土壌肥料学会京都大会(1983 年 3 月)及び同関東支部大会(1983 年 9 月, 東京)において発表した。

1. 国立公害研究所 環境情報部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川 16 番 2
Environmental Information Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, 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.

1 はじめに

下水汚泥（以下、汚泥と略す）を農耕地等の土壤に多量に連用した場合の影響については、近年多方面から明らかにされつつある。しかし、施用した汚泥中の無機成分等が土壤浸透水に伴って、下層へ移行して地下水、河川、湖沼へ与える影響についてはより定量的な解析と予測が要求されている。本報では、このような課題に関し、ライシメーター実験における浸透水の測定結果から、土壤ごとに、汚泥施用の影響が現れ易い元素等を明らかにする目的でデータ解析を行った。

近年、自動計測技術の進歩に伴い、多量のデータが得られるようになり、それらのデータを蓄積し解析するための方法論的検討がすすめられている。解析法については各種の統計的手法が用いられることが多いが、従来、異常値の検出、正規分布への変数変換などに十分な考慮を払うことなく解析を実施しているケースが多かった。目的に合致した方法を正しく適用するためには、このような点を克服する必要性が指摘されていたが、最近、データ解析用の会話型コンピュータプログラム（CDA 1）が開発され、従来に比べ極めて効率的に対応できるようになった。本報では、主としてCDA 1を使用してデータの特徴を明らかにした結果について報告する。

2 データ処理方法

解析の対象データは、汚泥連用試験¹⁻⁷⁾を行っている国立公害研究所の大型ライシメーター（コンクリート製、野外、4 m×4 m×1.2 m 深）の底部から採取した浸透水の10測定項目（Cl, pH, NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N[以上3項目は本報では、それぞれ、NH₄, NO₂, NO₃と記す], PO₄, K, Na, Ca, Mg）のデータ群（本報では、ある実験処理において得られたある測定項目のデータの集まりをデータ群と呼ぶ）である。反復なしの8処理（土壤4[砂質土、灰色低地土、淡色黒ボク土、黒ボク土]×施肥2[汚泥、化学肥料]）の実験によって、2年間にわたり102回の測定を行って得られた8データ群である。なお、解析の対象とした分析値は、本報告書資料編III-3に示されている。

それぞれのデータ群につき、CDA 1により、欠測値除去、異常値検出、変数変換、基本統計量の算出などによるデータの吟味（データモニタリング）を行った。異常値の検出法としては、各種の方法が提案されているが、本報においては以下のように⁸⁾取り扱った。各項目のデータ群は、各処理区ごとに同一分布をすると仮定し、正規分布に従わないと考えられたデータ群に対しては対数変換を施して正規分布に近似した。その分布から外れるデータを異常値とし、以後のデータ解析から除外した。あるデータについて分布から外れたかどうかの判定は、そのデータと平均値との差を標準偏差で除した値の絶対値が2.5より大きいこと、正規プロットが直線から外れていることを基準にして行った。また、正規性の検定は、歪度及び尖度の絶対値がそれぞれ0及び3であるかどうかによった。なお、これらの検討に当たって欠測値はすべて除外した。

以上のデータモニタリングを施したデータ群につき、主成分分析^{8,9)}を施し、各土壤、各施肥処理ごとの特徴を抽出することを試みた。計算はCDA 1により相関係数行列に対し実施した。

また、判別分析⁹⁾により、化学肥料区と汚泥区の判別を試みた。計算に当たっては、土壌ごとに、化学肥料区と汚泥区を込みにして扱った。その際、データモニタリングにおいて、両区とも変数変換を行わなかった場合はそのまま供試し、どちらかで変換した場合は、変換した区と同じ変換を他区でも行い、両区とも変換した場合は、変換式 $\log_e(x+\alpha)$ における小さい方の α を使用して変換を行った。計算は多変量解析用プログラムパッケージ (MAP)¹⁰⁾ を使用して行った。

3 結果及び考察

3.1 データモニタリング

多変量解析などの統計的解析を行う際、正しいデータ群を対象とすることが重要である。異種データの混入、あるいは、測定各ステップで混入する各種の誤りや、コンピュータへの入力ミス (パンチミスなど) などは、解析結果に大きな影響を与えることがある。また、頻度分布の型が、扱う手法の前提としている分布や、予想される分布 (例えば正規分布) と異なることも多い。そこで、対象とすべきデータ群の中から異常値を検出し、分布型を検討することが必要となる⁸⁾。

表 1 に異常値処理及び対数変換の前後 (以下、それぞれ「前」、「後」と略記する) の基本統計量を砂質土の化学肥料区について示した。「前」のサンプル数が 102 に満たない項目は、欠測値の存在を示し、「後」で更に減っているのは、異常値処理の結果である。「前」の変動係数は、pH が 4%、K、Na、Ca が 20~40% であったほかは、概して大きく、Cl、NO₂、NO₃ は 100% 以上であった。同じく、歪度、尖度で正規性を検討すると、それぞれ 0、3 より掛け離れる項目が見られた。正規分布から外れる原因としては、主に異常値の存在と分布のヒズミが考えられる。そこで、この両面から検討した結果、pH については、異常値が認められず、分布も正規分布とみなし得た

表 1 異常値処理及び対数変換の前後における基本統計量 (砂質土、化学肥料区)

Table 1 Fundamental statistics before and after outlier removal and/or logarithmic transformation in sandy soil plots amended with chemical fertilizers

Items	Unit	Before							After				
		Sample number	Mean	Min.	Max.	CV%	Skewness	Kurtosis	Sample number	Mean	Skewness	Kurtosis	α^*
Cl	ppm	100	8.6	0.0	43.6	131	1.72	4.77	94	1.35	0.09	2.24	0.05
pH		101	7.29	6.58	7.83	4	-0.05	2.11	101	7.29	-0.05	2.11	
NH ₄	ppb	67	5.2	0.4	30.2	81	3.23	19.20	66	4.86	0.68	2.82	-
NO ₂	ppb	70	2.7	0.0	21.0	167	2.45	8.83	70	-0.29	0.11	1.58	0.10
NO ₃	ppm	101	14.1	0.0	73.2	130	1.54	4.19	101	1.82	-0.05	2.53	0.20
PO ₄	ppb	69	49.1	7.3	118.0	51	0.38	2.49	68	48.07	0.22	2.11	-
K	ppm	102	6.7	3.1	13.6	33	0.73	3.49	101	6.60	0.58	3.11	-
Na	ppm	102	14.6	7.8	25.7	21	0.90	4.27	99	14.28	0.38	2.94	-
Ca	ppm	102	52.2	5.1	113.3	39	0.60	3.67	99	3.92	0.23	2.35	0.00
Mg	ppm	98	12.0	2.50	35.3	77	1.06	2.93	98	2.20	0.24	1.75	0.00

* α -value in $\log_e(x+\alpha)$ transformation. - : outlier removed and absence of transformation, and blank : absence of outlier removal and logarithmic transformation.

が、NO₂、NO₃、Mg は、分布のヒズミにより、また、NH₄、PO₄、K、Na は異常値の存在により、Cl、Ca は両者により正規分布から外れたと考えられる。「後」の歪度、尖度によれば、すべてがそれぞれ0、3とみなせるわけではないが、正規プロット、頻度分布型などと併せて、「前」に比べ以下の解析に供し得る程度の改善が見られると判断される。

他の処理区について同様の検討を行い、最終的に付表 A～D のような結果が得られたので、それらを供試して以下の解析を行った。

3.2 相関係数による解析

土壌浸透水に溶存する元素のうち、常に同じ行動をする元素があれば、それらの相互間の相関係数は大きく、独自の行動をしていれば小さくなる。また、汚泥施用区の相関係数が化学肥料のみ施用した場合に比べて異なれば、それは汚泥の効果ということができる。以下、土壌ごとに、各測定項目間の相関係数を検討する。この検討は、後述する主成分分析を相関係数行列から計算しているので、主成分分析の結果の理解をも助けるものである。

砂質土(表 2)……全般に、相関係数の絶対値が 0.5 以上の組が多かった。特に、Cl、NO₃、K、Na、Ca、Mg の相互間に正の高い相関が認められた。また、NO₂ とカチオン(特に 2価)、NO₃ との相関係数も中位～高い値を示した。しかし、NH₄ は他のどの項目とも相関が低かった。PO₄ は、一般に他の項目と負の相関を示すが、Cl と NO₃ でその傾向が強い。これらの傾向は、化学肥料区、汚泥区にかかわらず認められた。

他方、化学肥料区と汚泥区で傾向の異なる場合も認められた。化学肥料区で pH が Mg との間に絶対値が最大の負の相関を示したのに対し、汚泥区の pH は NO₂ との間で絶対値が最大の負の相関を示した。また、化学肥料区で NO₂ と Cl の高い相関が認められたのに対し、汚泥区におけるそれらの間の相関係数は小さかった。

表 2 砂質土における相関係数行列(左下:汚泥区, 右上:化学肥料区)
Table 2 Correlation coefficient matrix in sandy soil. Sewage sludge (left, below) and chemical fertilizers (right, above)

	Cl	pH	NH ₄	NO ₂	NO ₃	PO ₄	K	Na	Ca	Mg
Cl	1.0	-0.160	-0.196	0.577	0.791	-0.789	0.514	0.616	0.566	0.643
pH	-0.226	1.0	-0.009	-0.442	-0.392	-0.039	-0.348	-0.128	-0.420	-0.541
NH ₄	-0.337	0.112	1.0	-0.020	-0.030	0.237	0.220	0.158	0.135	0.059
NO ₂	0.299	-0.623	-0.095	1.0	0.787	-0.387	0.580	0.505	0.697	0.787
NO ₃	0.862	-0.465	-0.159	0.542	1.0	-0.575	0.783	0.734	0.885	0.935
PO ₄	-0.822	-0.114	0.167	-0.119	-0.629	1.0	-0.200	-0.389	-0.298	-0.412
K	0.419	-0.285	0.158	0.491	0.665	-0.266	1.0	0.851	0.952	0.813
Na	0.651	-0.122	0.032	0.380	0.744	-0.528	0.889	1.0	0.826	0.736
Ca	0.561	-0.316	0.149	0.571	0.789	-0.412	0.915	0.828	1.0	0.908
Mg	0.773	-0.345	-0.059	0.516	0.897	-0.543	0.652	0.700	0.761	1.0

しかし、砂質土においては、汚泥区と化学肥料区が類似した傾向を示すケースが著しく多かった。

灰色低地土 (表3) ……相関係数の大きな (>0.5) 組が化学肥料区で13組、汚泥区で4組存在し、その組み合わせは両区で著しく異なり K-Ca が両区に共通するのみであった。

淡色黒ボク土 (表4) ……相関係数の大きな組は、化学肥料区で2組、汚泥区で6組であり、両区に共通する組み合わせはNH₄-pH、及びK-Caであった。汚泥区ではその他にpH-PO₄、pH-Na、NH₄-PO₄、NO₂-NO₃の組に0.5~0.6の相関係数が認められた。

黒ボク土 (表5) ……相関係数の大きな組のうち、化学肥料区と汚泥区で共通する組は K-Ca のみであり、他は各区まちまちであった。化学肥料区では、Na、K、Caの相互間、Cl-pH及びCl

表 3 灰色低地土における相関係数行列(左下: 汚泥区, 右上: 化学肥料区)

Table 3 Correlation coefficient matrix in Gray Lowland soils. Sewage sludge (left, below) and chemical fertilizers (right, above)

	Cl	pH	NH ₄	NO ₂	NO ₃	PO ₄	K	Na	Ca	Mg
Cl	1.0	-0.357	-0.615	-0.009	0.617	0.204	-0.046	-0.459	-0.085	0.643
pH	0.105	1.0	0.625	0.033	-0.747	-0.082	-0.245	0.281	-0.326	-0.569
NH ₄	-0.157	0.254	1.0	0.246	-0.582	-0.382	-0.023	0.510	-0.034	-0.487
NO ₂	0.016	-0.024	0.187	1.0	0.081	0.006	0.386	0.400	0.428	0.120
NO ₃	0.283	0.419	-0.198	-0.292	1.0	0.300	0.183	-0.358	0.250	0.738
PO ₄	0.416	-0.164	-0.033	-0.145	-0.243	1.0	-0.060	-0.240	-0.041	0.290
K	0.215	-0.480	-0.095	0.277	-0.610	0.582	1.0	0.627	0.907	-0.096
Na	0.335	0.286	-0.104	0.214	-0.064	0.022	0.161	1.0	0.548	-0.538
Ca	0.253	-0.250	-0.125	0.228	-0.594	0.556	0.883	0.445	1.0	-0.041
Mg	0.445	0.383	-0.105	0.027	0.393	0.083	-0.208	0.413	-0.070	1.0

表 4 淡色黒ボク土における相関係数行列(左下: 汚泥区, 右上: 化学肥料区)

Table 4 Correlation coefficient matrix in light colored Andosol. Sewage sludge (left, below) and chemical fertilizers (right, above)

	Cl	pH	NH ₄	NO ₂	NO ₃	PO ₄	K	Na	Ca	Mg
Cl	1.0	-0.309	-0.331	-0.120	0.113	-0.112	0.374	-0.265	0.321	0.469
pH	-0.321	1.0	0.542	0.120	0.345	0.242	0.218	0.331	0.179	0.002
NH ₄	-0.050	0.546	1.0	-0.012	0.110	0.388	0.241	0.252	0.327	0.103
NO ₂	0.248	0.125	-0.072	1.0	-0.064	-0.402	0.264	0.143	0.100	-0.146
NO ₃	0.306	0.084	0.076	0.590	1.0	0.031	-0.082	0.013	-0.151	0.319
PO ₄	-0.056	0.569	0.514	0.085	0.088	1.0	0.186	-0.082	0.297	0.047
K	0.282	0.304	0.303	0.485	0.371	0.238	1.0	-0.026	0.883	0.195
Na	-0.168	0.626	0.489	0.173	0.153	0.390	0.358	1.0	0.064	0.074
Ca	0.330	0.306	0.393	0.442	0.354	0.276	0.920	0.466	1.0	0.107
Mg	0.311	-0.043	-0.168	0.029	0.367	-0.110	0.063	0.133	0.049	1.0

表 5 黒ボク土における相関係数行列 (左下: 汚泥区, 右上: 化学肥料区)

Table 5 Correlation coefficient matrix in humic Andosol Sewage sludge (left, below) and chemical fertilizers (right, above)

	Cl	pH	NH ₄	NO ₂	NO ₃	PO ₄	K	Na	Ca	Mg
Cl	1.0	0.561	0.397	-0.066	0.577	-0.152	-0.432	0.021	-0.460	0.363
pH	0.110	1.0	0.717	0.131	0.086	0.301	-0.163	0.360	-0.056	-0.155
NH ₄	-0.144	0.441	1.0	0.195	-0.001	0.032	-0.004	0.543	0.124	-0.019
NO ₂	0.034	0.388	-0.082	1.0	-0.021	0.453	0.259	0.027	0.260	-0.103
NO ₃	0.126	-0.125	-0.230	-0.031	1.0	-0.025	-0.426	-0.241	-0.528	0.428
PO ₄	-0.272	0.182	0.528	-0.111	0.000	1.0	0.252	-0.015	0.300	-0.270
K	-0.163	0.049	-0.288	0.547	0.257	0.013	1.0	0.636	0.952	-0.129
Na	0.172	0.218	-0.380	0.724	-0.298	-0.377	0.439	1.0	0.667	-0.037
Ca	-0.148	0.018	-0.309	0.568	0.208	0.101	0.931	0.459	1.0	-0.249
Mg	0.046	-0.231	-0.334	-0.035	0.396	-0.004	0.313	-0.004	0.269	1.0

-NO₃, NH₄-pH 及び NH₄-Na の組に正の相関が, また, Ca-NO₃には負の相関が認められた。汚泥区では NH₄-PO₄, NO₂ と K, Na, Ca との間の相関係数が大であった。

以上, 相関係数を概観して次のことが分かる。① 砂質土を除いて化学肥料区と汚泥区との違いは概して大きい, ② 土壤の違いにかかわらず常に高い相関係数を示す組は K-Ca のみである, ③ したがって, 浸透水に及ぼす汚泥の影響は, 土壤によりかなり異なると言える。

3.3 主成分分析による解析

本実験の各測定項目を, 102 回にわたり得られたデータ群をもとに, より少数のグループにまとめることができれば, 土壤ごとの汚泥の影響の特徴を理解するのに役立つ。主成分分析は, 変数(測定項目)の個数に相当する次元数の多次元空間に散在するデータを, 互いに無相関なより少数次元の主成分に要約する手法^{8,9)}であり, 各座標軸に対し実験に関係する意味付けがなされれば, 上記の理解に有効である。以下, 各土壤ごとに化学肥料区と汚泥区を比較検討する。表 6~7 に, 主成分分析で得られた因子負荷量(主成分スコアと元の測定項目のデータとの相関係数)を掲げた。

砂質土……相互に相関の高い項目が多かったことに対応して, 因子負荷量の高い項目が第 1 主成分に多く集まった。また, この土壤の場合, 第 1~3 主成分まで, 化学肥料区と汚泥区は極めて類似した結果であった。第 1 主成分の固有値は大であり, 寄与率は 56 又は 59 %を示し, 10 項目からなる情報のうち半分以上の情報がこの主成分に集約されていることを示す。第 1 主成分では, NH₄や PO₄の因子負荷量が小さく, 第 2 (汚泥区の NH₄は第 3) 主成分において大きい。一般に NH₄は有機物の分解, PO₄は土壤固定, つまり土壤粒子との物理化学的な多様な反応と関係している (NH₄と PO₄を併せて「素材依存性元素」を示すと言えよう)。他方, 因子負荷量の大きい他の元素等は, NH₄や PO₄に比べ可動性が大きい。すなわち, 第 1 主成分は「可動性の大きな元素等」

表 6 主成分分析の結果：砂質土及び灰色低地土における化学肥料区と汚泥区の因子負荷量による比較

Table 6 Results of principal components analysis: Comparison between effect of chemical fertilizers and sewage sludge by factor loading* in sandy soil and Gray Lowland soil

Principal components Eigen value Fertilizers**	Sandy soil						Gray Lowland soil							
	1		2		3		1		2		3		4	
	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S
Cl	.78	.82	-.51	-.49	.10	-.16	.77	.20	.01	.77	.15	-.22	-.18	.15
pH	-.44	-.41	-.35	-.54	.74	.61	-.72	-.52	-.39	.47	.37	.40	.10	.28
NH ₄	.04	-.09	.70	.46	.47	.72	-.82	-.09	-.05	-.22	.25	.60	-.28	.70
NO ₂	.80	.62	-.01	.48	-.26	-.39	-.14	.29	.58	.01	.67	.70	-.29	-.27
NO ₃	.97	.95	-.10	-.09	-.04	-.13	.84	-.74	.35	.41	.02	-.30	-.09	-.03
PO ₄	-.54	-.62	.72	.66	-.17	-.09	.42	.62	-.03	.29	.47	-.37	.76	.51
K	.87	.82	.33	.33	.17	.33	-.11	.95	.93	.01	-.15	-.04	.14	.01
Na	.83	.87	.09	-.02	.39	.33	-.69	.24	.60	.67	.02	.40	.07	-.30
Ca	.94	.90	.24	.24	.05	.24	-.07	.92	.94	.22	-.13	.07	.11	-.03
Mg	.95	.90	.12	-.05	-.14	-.03	.84	-.23	.07	.80	.27	.07	-.27	-.02

* : Factor loading ≥ 0.7; : 0.5~0.69

** C: Chemical fertilizers, S: Sewage sludge

表 7 主成分分析の結果：淡色黒ボク土及び黒ボク土における化学肥料区と汚泥区の因子負荷量による比較

Table 7 Results of principal components analysis: Comparison between effect of chemical fertilizers and sewage sludge by factor loading* in light colored Andosol and humic Andosol

Principal components Eigen value Fertilizers**	Light colored Andosol								Humic Andosol							
	1		2		3		4		1		2		3		4	
	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S
Cl	.11	.17	.88	.70	-.18	-.01	-.20	-.52	-.60	.04	.66	-.12	-.11	-.53	.12	.71
pH	.60	.65	-.57	-.55	-.10	.22	-.23	.17	-.03	.06	.90	.75	.19	.03	-.27	.48
NH ₄	.68	.61	-.48	-.49	-.12	-.04	.09	-.33	.12	-.53	.87	.62	-.12	.37	-.17	.18
NO ₂	.08	.51	-.07	.51	.72	-.16	-.49	.57	.33	.75	.24	.49	.58	-.08	.43	.10
NO ₃	.14	.49	-.11	.56	-.60	.29	-.55	.30	-.68	.19	.23	-.55	.08	.37	.48	.53
PO ₄	.49	.57	-.14	-.44	-.41	.05	.61	-.09	.37	-.26	.20	.31	.74	.77	.21	.06
K	.79	.81	.44	.29	.33	-.31	-.00	-.09	.89	.87	-.03	.02	-.21	.37	.33	-.05
Na	.24	.70	-.47	-.33	.15	.32	-.39	.05	.60	.74	.54	.33	-.51	-.47	.04	-.10
Ca	.81	.84	.37	.24	.29	-.29	.17	-.18	.94	.87	.05	.05	-.16	.38	.17	-.09
Mg	.29	.09	.39	.46	-.52	.80	-.44	-.23	-.43	.34	.05	-.58	-.43	.29	.66	.22

* : Factor loading ≥ 0.7; : 0.5~0.69

** C: Chemical fertilizers, S: Sewage sludge

を示すと言える。

したがって、砂質土においては、化学肥料と汚泥の影響を比較するより、むしろ、それらを含みにして、第1主成分すなわち「可動性の大きな元素等」と個々の「素材依存性元素」の動きを検討することが有意義であろう。

灰色低地土……各主成分において高い因子負荷量を示す項目が、化学肥料区と汚泥区とで著しく異なる。化学肥料区において第1主成分はCl, NO₃, MgのグループとNH₄, Na, pHのグループとの差を表し、それぞれのグループは類似した行動をすると考えられる。第2主成分は、KとCaの行動を表す。これらの2主成分が全体の3分の2の情報を含んでおり（固有値の合計が6.6）、これ以下の主成分が含む情報はあまり多くない。したがって、化学肥料区の変化を検討する場合、NO₃, Mg, Clの濃度が高く（又は低く）、NH₄の濃度（NO₃とともに浸透水のpHに関与している）が低い（又は高い）関係を維持しつつ変化する様子と、K（及びCa）の動きに留意する必要がある。

他方、汚泥区においては、第1主成分はK, CaとNO₃の差、第2主成分はCl, Mg, Na, 第3主成分はNO₂の特徴を表す。したがって、汚泥区の場合は、これらの各主成分ごとの変化を検討する必要がある。

淡色黒ボク土……化学肥料区と汚泥区との因子負荷量は、砂質土ほどでないがよく類似している。第1主成分は、いずれの項目の因子負荷量も正であり、特にKとCa, NH₄, pHの因子負荷量が多い。ただし、汚泥区は、さらにNaの因子負荷量の大きい点がやや異なる。第2主成分には両区ともClに関する情報が多い。第3主成分に関しては、化学肥料区でNO₂, 汚泥区でMgの因子負荷量が多い。したがって、この土壤の場合は、第1主成分スコアあるいはK（又はCa）、Clの変化を検討し、また、汚泥区の場合はNO₂, 化学肥料区の場合はMgの変化を検討することも有用であろう。

黒ボク土……化学肥料区と汚泥区とでは、若干の項目において相違が見られる。化学肥料区の場合、第1主成分がK, CaとNO₃（及びCl）との差、第2主成分がpH, NH₄（及びCl）、第3主成分がPO₄の変化を表しているが、汚泥は、第1主成分がK, Ca及びNO₃, 第2主成分がpH（及びNH₄）、第3主成分がPO₄の変化を表すと言える。したがって、それぞれの主成分スコア又はそれらと関係の深い項目の変化を検討することが有用であろう。

3.4 判別分析による解析

前項では、各処理ごとに各測定項目のデータから主成分を求め、その内容を検討して、各処理の特徴をよく表すと考えられる項目を指摘した。本項では、砂質土と灰色低地土につき、前項の結果が、化学肥料区と汚泥区とを区別する上での基準となることを、2群の判別分析によって示す。2群の判別分析は、両群からのマハラノビス汎距離の等しい点の軌跡を境界線として求め、各サンプルがそのどちら側にあるかによって各群への所属を判定する^{9,10}。したがって、主成分分析

が、各処理区の総合特性値を求めることに目的があり、その結果を利用して、化学肥料区と汚泥区の違いを解釈したのに対し、判別分析は、両区の違いを明らかにすること自体に目的がある。

表 8 に、判別分析の結果を誤判別率により示した。

表 8 灰色低地土と砂質土における化学肥料区と汚泥区との判別分析の結果
Table 8 Discriminant analysis between effect of chemical fertilizers and sewage sludge in Gray Lowland soil and sandy soil

	Variables used	Missclassification ratio
Gray Lowland soil	NH ₄ , NO ₂ , NO ₃ , PO ₄	1.1%
"	NH ₄ , NO ₂ , NO ₃ , PO ₄ , pH	1.1
"	All variables	0.0
Sandy soil	NH ₄ , pH	46.6%
"	NH ₄ , NO ₂ , NO ₃ , PO ₄ , pH	29.3
"	All variables	2.1

Note) $\ln(x + a)$ was used for transformation of x .

全項目を使用した場合は、両土壌ともほぼ完全に判別が行われたが、化学肥料区と汚泥区の違いを検討するには、各区の特徴を表すより少数個の項目を使用することが望ましい。

そこで、主成分分析の結果を見て、各主成分における高い因子負荷量の表れ方が異なる項目を取りあげ、それらを使用して判別分析を行った。すなわち、砂質土では、NH₄及びpH、灰色低地土では、NH₄、NO₂、NO₃、PO₄を使用した。その結果、砂質土では誤判別率47%を示したのに対し、灰色低地土では1%であった。また、使用する項目を両土壌に共通として判別を行った結果は、砂質土で29%、灰色低地土で1%の誤判別率を示した。

なお、本報では灰色低地土と砂質土のそれぞれにつき化学肥料区と汚泥区とを2群に判別することにより解析を行ったが、次元の減少を伴う判別関数によって全土壌についての解析を行うことも有効である。その結果については機を改めて報告する。

以上のことは、灰色低地土では、両区の特徴が、少数の測定項目で判定できるのに対し、砂質土ではより多くの項目を注意深く検討しなければ両区の違いが識別できないことを示している。換言すれば、化学肥料のみ施用した場合に比べ汚泥施用の影響が大きなのは灰色低地土であり、砂質土においては化学肥料と汚泥の違いが少なく、既往の化学肥料施用による知見をそのまま利用できることを示すと考えられる。

なお、本報では、8処理区の比較を行うために10元素等の測定項目について102回にわたって得られたデータ群を使い要約を試みたのであるが、他方では、102回のデータを要約する課題、すなわち、浸透水中の各元素等の経時変化の特徴の解析が残されている。それが解決されると、4土壌×2施肥の2元表としての解析が可能となる。それらについては改めて報告する予定である。

本項までの検討結果をまとめて、汚泥施用の影響を考察する際に注目すべき測定項目を土壤ごとに示すと表9のとおりである。

表 9 汚泥施用の影響を考察する際に注目すべき測定項目
Table 9 Useful factors for analyzing the successive changes in element concentration in each treatment

Soil	Chemical fertilizers	Sewage sludge
Sandy soil	Z ₁ ["The mobile elements"*], NH ₄ , PO ₄	
Gray Lowland soil	z ₁ [Difference between (Cl, NO ₃ , Mg) & (NH ₄ , Na, pH)], K/Ca	z ₁ [Difference between (K, Ca) & NO ₃], z ₂ [Cl, Mg Na], NO ₂
Light colored Andosol	(z ₁ [K, Ca, NH ₄ , pH] or K/Ca), Cl, Mg	(z ₁ [K, Ca, NH ₄ , pH, Na], or K/Ca), Cl, NO ₂
Humic Andosol	z ₁ [Difference between (K, Ca) & (NO ₃ , Cl)], z ₂ [pH, NH ₄ , Cl], PO ₄	z ₁ [K, Ca, NO ₃], z ₂ [pH, NH ₄], PO ₄

Notes) z₁, z₂: first and second principal component score, respectively. Meaning of the principal component is shown in [] .

* Cl, NO₂, NO₃, K, Na, Ca and Mg

引用文献

- 1) 服部浩之・藤井國博・久保井徹・広木幹也(1983): 下水汚泥施用各種土壤における無機態窒素の経時変化。国立公害研究所研究報告, 第47号, 37-44.
- 2) 広木幹也・藤井國博・服部浩之・久保井徹(1983): 下水汚泥施用土壤の微生物フロラに関する研究(III), 土壤の違いと微生物性の差異。国立公害研究所研究報告, 第46号, 39-56.
- 3) 藤井國博・久保井徹・服部浩之(1980): 有機廃棄物施用土壤に関する研究(II), 有機廃棄物施用土壤の微生物フロラおよび土壤酵素活性。国立公害研究所研究報告, 第14号, 185-202.
- 4) 藤井國博(1983): 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。国立公害研究所研究報告, 第45号, 113p.
- 5) 久保井徹・藤井國博(1980): ほ場および有底枠ほ場の均一栽培試験成績。国立公害研究所研究報告, 第14号, 213-232.
- 6) 山口武則・久保井徹・服部浩之・広木幹也・藤井國博(1983 a): 下水汚泥の土壤施用が土壤の三相分布に及ぼす影響。国立公害研究所研究報告, 第46号, 125-132.
- 7) 山口武則・久保井徹・服部浩之・広木幹也・藤井國博(1983 b): 各種土壤における下水汚泥の施用が植物の生育及び体内成分に及ぼす影響, 有底枠試験。国立公害研究所研究報告, 第46号, 175-118.
- 8) 芳賀敏郎・橋本茂司(1980): 回帰分析と主成分分析。日科技連, 228p.
- 9) 奥野忠一・久米 均・芳賀敏郎・吉澤 正(1981): 多変量解析法, 改訂版。日科技連, 430p.
- 10) 奥野忠一・芳賀敏郎・矢島敬二・奥野千恵子・橋本茂司・古河陽子(1980): 続多変量解析法。日科技連, 299p.

付表 A 砂質土についての基本統計量
Table A Fundamental statistics on sandy soil

Items	Unit	Chemical fertilizers						Sewage sludge					
		Sample number*	Mean*	Standard deviation	Skewness	Kurtosis	α^{**}	Sample number*	Mean*	Standard deviation	Skewness	Kurtosis	α^{**}
Cl	ppm	94/100	1.35/8.6	1.33	0.09	2.24	0.05	96/100	1.02/5.1	1.31	-0.42	2.15	0.05
pH		/101	/7.29	0.29	-0.05	2.11		100/101	7.36/7.35	0.30	-0.20	1.89	-
NH ₄	ppb	66/67	4.86/5.2	2.86	0.68	2.82	-	62/67	3.60/4.2	1.93	0.17	2.13	-
NO ₂	ppb	70/70	-0.29/2.7	1.79	0.11	1.58	0.10	47/69	0.87/2.1	0.69	0.24	2.11	0.20
NO ₃	ppm	101/101	1.82/14.1	1.38	-0.05	2.53	0.20	97/101	2.52/16.5	0.92	-0.39	1.60	0.50
PO ₄	ppb	68/69	48.07/49.1	23.83	0.22	2.11	-	66/68	47.77/50.9	16.82	-0.10	2.42	-
K	ppm	101/102	6.60/6.7	2.08	0.58	3.11	-	101/102	5.53/5.6	1.89	0.54	3.12	-
Na	ppm	99/102	14.28/14.6	2.64	0.38	2.94	-	101/102	2.67/14.8	0.17	0.61	3.19	0.00
Ca	ppm	99/102	3.92/52.2	0.34	0.23	2.35	0.00	101/102	42.95/43.4	15.19	0.09	3.29	-
Mg	ppm	98/98	2.20/12.0	0.75	0.24	1.75	0.00	/98	/7.54	4.14	0.55	2.25	

* Digit/digit : after/before outlier removal and variable transformation. Other fundamental statistics were obtained after the treatments.
** α -value in $\log_e(x + \alpha)$ transformation. - : with outlier removal and absence transformation, and blank : no outlier removal and transformation.

付表 B 灰色低地土についての基本統計量
Table B Fundamental statistics on Gray Lowland soil

Items	Unit	Chemical fertilizers						Sewage sludge					
		Sample number*	Mean*	Standard deviation	Skewness	Kurtosis	α^{**}	Sample number*	Mean*	Standard deviation	Skewness	Kurtosis	α^{**}
Cl	ppm	74/84	17.56/16.7	1.27	0.10	2.94	-	80/87	9.27/9.3	0.72	-0.30	2.92	-
pH		81/84	7.59/7.59	0.22	-0.23	2.54	-	/87	/7.72	0.27	-0.09	2.89	
NH ₄	ppb	47/48	2.17/14.5	0.81	0.66	2.64	0.00	52/52	1.90/9.1	0.76	0.31	3.73	0.00
NO ₂	ppb	51/53	1.44/20.5	1.06	0.28	2.68	0.00	54/57	1.71/17.7	0.85	0.30	3.00	0.00
NO ₃	ppm	72/84	3.23/23.4	0.09	-0.58	2.67	0.00	87/87	3.59/36.9	0.19	-0.93	2.96	0.00
PO ₄	ppb	47/53	21.39/22.7	5.99	0.07	2.71	-	51/57	17.58/20.0	5.71	0.02	2.88	1.00
K	ppm	/85	2.21/9.6	0.33	0.06	2.43	0.00	84/88	7.83/8.15	1.63	0.45	3.08	0.00
Na	ppm	82/84	3.44/33.3	0.26	0.93	2.91	0.00	84/88	25.45/26.6	4.19	0.29	2.67	-
Ca	ppm	83/85	5.43/88.5	0.25	0.11	1.94	0.00	83/88	73.42/76.4	13.61	0.11	2.52	-
Mg	ppm	75/81	31.05/30.3	2.24	-0.50	3.30	-	81/85	24.93/24.5	1.93	-0.35	2.57	-

* Digit/digit : after/before outlier removal and variable transformation. Other fundamental statistics were obtained after the treatments.
** α -value in $\log_e(x + \alpha)$ transformation. - : with outlier removal and without transformation, blank : no outlier removal and transformation.

付表 C 淡色黒ボク土についての基本統計量
Table C Fundamental statistics on light colored Andosol

Items	Unit	Chemical fertilizers						Sewage sludge					
		Sample number*	Mean*	Standard deviation	Skewness	Kurtosis	α^{**}	Sample number*	Mean*	Standard deviation	Skewness	Kurtosis	α^{**}
Cl	ppm	/99	/11.1	1.97	0.53	2.79		100/101	1.94/7.0	0.15	0.59	3.57	0.00
pH		98/99	7.46/7.47	0.24	0.27	2.29	-	/101	/7.53	0.26	0.59	2.55	
NH ₄	ppb	59/66	1.83/9.1	0.74	-0.25	2.25	0.50	66/66	1.81/7.6	0.78	-0.52	4.08	0.40
NO ₂	ppb	67/70	1.63/8.8	0.89	0.45	3.10	0.30	70/70	1.52/6.5	0.88	0.15	3.72	0.45
NO ₃	ppm	98/99	24.12/24.0	2.99	-0.38	2.94	0.00	/101	/24.5	3.08	-1.12	3.50	
PO ₄	ppb	47/70	2.57/15.6	0.49	-0.44	2.60	0.00	70/70	2.65/16.4	0.57	-0.62	3.07	0.00
K	ppm	97/99	5.51/5.6	1.04	-0.30	3.65	0.00	98/102	5.53/5.7	1.23	0.31	2.74	-
Na	ppm	89/99	20.70/20.8	2.10	0.12	3.15	-	99/102	3.15/24.2	0.15	0.69	3.96	0.00
Ca	ppm	97/99	50.68/51.3	7.14	-0.37	3.61	-	99/102	3.91/51.8	0.17	0.01	2.55	0.00
Mg	ppm	96/98	11.75/11.7	1.24	0.51	1.96	-	94/98	11.96/12.0	1.12	0.63	2.80	-

* Digit/digit: after/before outlier removal and variable transformation. Other fundamental statistics were obtained after the treatments.
** α -value in $\log_e(x+\alpha)$ transformation. -: with outlier removal and without transformation, blank: no outlier removal and transformation.

付表 D 黒ボク土についての基本統計量
Table D Fundamental statistics on humic Andosol

Items	Unit	Chemical fertilizers						Sewage sludge					
		Sample number*	Mean*	Standard deviation	Skewness	Kurtosis	α^{**}	Sample number*	Mean*	Standard deviation	Skewness	Kurtosis	α^{**}
Cl	ppm	77/82	15.26/14.8	1.97	-0.54	2.24		74/89	8.46/8.1	0.39	-0.51	2.63	-
pH		79/82	7.65/7.64	0.24	-0.05	2.57		/90	/7.70	0.22	0.17	2.44	
NH ₄	ppb	47/47	2.85/33.7	1.09	0.54	3.00	0.00	51/54	2.05/12.3	0.76	0.14	2.85	0.50
NO ₂	ppb	50/52	11.80/17.0	7.39	0.80	2.66	-	59/59	2.34/17.2	0.94	0.55	2.93	0.00
NO ₃	ppm	70/82	57.06/53.8	3.29	-0.14	2.42	-	81/89	59.74/57.8	3.72	-0.44	3.31	-
PO ₄	ppb	52/52	2.85/19.9	0.51	0.40	3.21	0.00	56/59	17.20/18.6	7.11	0.28	2.43	-
K	ppm	83/83	2.29/10.3	0.29	0.30	2.67	0.00	88/90	2.15/8.9	0.21	0.35	2.40	0.00
Na	ppm	81/83	3.24/27.5	0.29	0.56	2.48	0.00	88/90	3.12/23.8	0.20	0.24	2.57	0.00
Ca	ppm	83/83	4.51/93.6	0.26	0.23	2.70	0.00	89/90	82.51/83.3	15.95	0.34	3.04	-
Mg	ppm	80/81	20.52/20.4	2.61	0.21	1.72	-	/87	/19.3	2.45	-0.49	3.16	

* Digit/digit: after/before outlier removal and variable transformation. Other fundamental statistics were obtained after the treatments.
** α -value in $\log_e(x+\alpha)$ transformation. -: with outlier removal and without transformation, blank: no outlier removal and transformation.

II-9

屋内ライシメーターにおける水稻の均一栽培

A Preliminary Studies on Cultivation of Rice in Lysimeters in a Greenhouse

広木幹也¹・藤井國博¹

Mikiya HIROKI¹ and Kunihiro FUJII¹

Abstract

Four lysimeters which can control environmental conditions were set in a greenhouse, and filled with alluvial soil for experiments under paddy field condition.

Prior to the experiments, rice was planted in lysimeters and pots without any fertilizer application to reveal differences in growth and yield of rice between the conditions inside and outside of the greenhouse, and between lysimeters.

Temperature of the greenhouse was 20°C(night)-25°C (daytime), moisture was 60 % RH, and the soil temperature was 18°C. Two pots were placed outside of the greenhouse and the other two pots were placed inside of the greenhouse.

The results were as follows.

1. In the pot experiment, plant height of rice was larger in pots inside of the greenhouse than outside of the greenhouse. Number of tillers was larger in plants outside of the greenhouse than inside of the greenhouse.
2. There were no significant differences in plant height and straw weight between the lysimeters. But the fresh weight of panicles varied with the lysimeters.
3. The differences in panicle weight were attributed to differences in the percentage of ripened grains. Under the current experimental conditions, the percentage of ripened grains of plant in each lysimeter was low, ranging from 25 % to 48 %.

1 はじめに

国立公害研究所土壌環境実験棟内には8基の地温制御大型ライシメーターが設けられている。うち4基には、淡色黒ボク土を充てんし、昭和54年7月より畑状態で実験が開始されて、既に多くの成果を挙げている¹⁻⁴⁾。残りの4基のライシメーターは、水田状態での実験に用いるため、水田土壌を充てんし、土層が締め水田として使用できる状態となったのは昭和57年4月であった。しかし、先に土壌の充てんが完了した4基の畑地用ライシメーターについては、実験を行うに当たって留意すべき点として、生育分布が不均一であることが指摘されていた⁵⁾。また、一般に

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.

この種の植物栽培用実験装置では本格的な実験を行う前に栽培試験を行い、ライシメーター間及びライシメーター内の生育分布を把握するのが通例である。そこで、水田ライシメーターにおいても、本格的試験を開始するに先立って57年5月より水稲の均一栽培を行い、屋内制御環境下と自然条件下での水稲生育の差、ライシメーター内での生育分布など当該ライシメーターにおける水稲生育の特徴を把握するとともに各ライシメーター間の水稲生育の差異を把握することとした。本報告は、その結果に関するものである。

2 実験方法

2.1 ライシメーターの概要と土壤の充てん

試験を行った水田用ライシメーターは、内径 1.7 m、直胴部 2.3 m の円筒型で、その仕様の詳細は久保井ら⁵⁾が報告した畑地用ライシメーターと同一であるが、水田用ライシメーターには田面水位を一定に保つ装置(フロートの低下に伴いかん水が行われる方式)が設置されている。4基の水田用ライシメーターは、畑地用ライシメーターの東側に東西方向に並んで設置されている(図1)。その地上部(植物生育域)の自然光温室(温室II)は他の二つの温室の間に位置し、西側は畑地用ライシメーターの植物生育域(温室I)、東側は別の自然光温室(温室III)に接している。それぞれの温室の間は2重のガラス板で仕切られている。

水田ライシメーターには、茨城県筑波郡筑波町より採取した水田の下層土と表土を充てんした。土壤の充てんは以下のように行った。

① ライシメーターの底部に磁性ボールミル及び石英砂を敷きつめ、② 次に、水田下層土を水道水で練って流し込み、ライシメーター底部から水を抜きながら、土層の厚さが 210 cm となるまで充てんした。③ その後、充てんした土の表面にビニールシートをかぶせ、土が乾燥するのを防

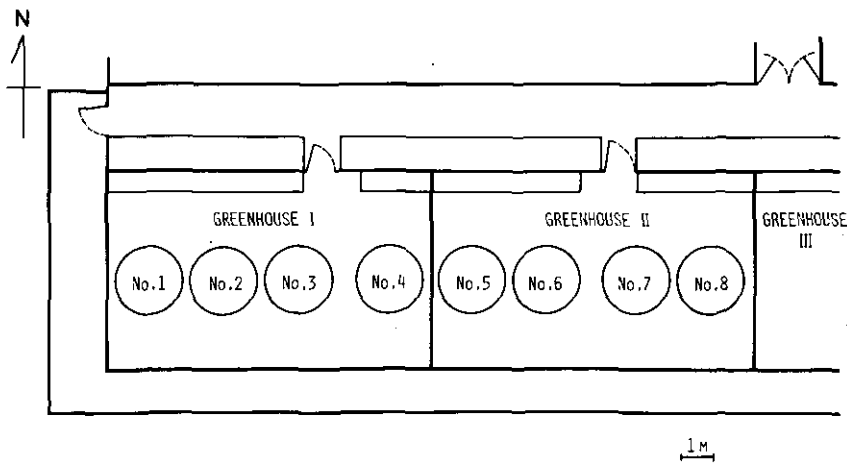


図 1 各ライシメーターの温室内の配置
Fig. 1 Location of lysimeters in greenhouses

ぎながら、シートの上におもしとして表層土(作土)をのせ、下層土を圧密沈降させた。その間、時折ライシメーター底部より余剰水を排出した。下層土の充てんを終えた55年5月より約22か月後の昭和57年3月に下層土の沈降がおおむね収まったので、④ おもし及びビニールシートを取り除き、下層土の厚みが196 cmとなるように土壌を削り取った後、⑤ 下層土の上に作土をのせ、水を少量含ませながら踏み固めつつ、10 cmの厚さに作土を充てんし、⑥ さらに作土を10 cm上のせした。

2.2 均一栽培試験

土壌の充てんがすべて完了したのは昭和57年3月であった。その後、1日当たり20~30 lの蒸留水でかん水を繰り返しながら、湛水状態とした。

昭和57年5月26日に表層10 cmの土壌を掘り返してシロカキを行った。5月27日に水稻(品種ニホンバレ)の稚苗(播種21日後)を東西30 cm、南北15 cm間隔の43か所(図2)に2本ずつ移植した。湛水は、当初は約1 cmの深さで、6月30日以降は常に2~3 cmの深さとし、9月26日に落水した。落水後は、稲が枯れたり、土層にキレツが生じたりしない程度に適時かん水し、11月5日に収穫した。

土壌充てん後、水稻収穫までの間、施肥は行わなかった。

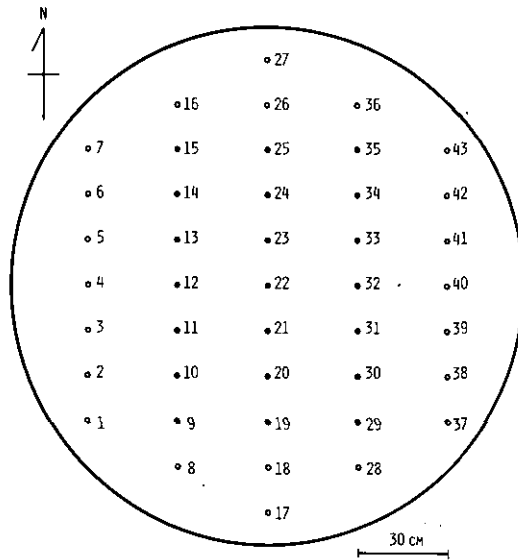


図 2 水稻の植栽位置

Fig. 2 Location of rice plants in lysimeter

● ; plants in the center of the lysimeter

○ ; plants at the periphery of the lysimeter

2.3 生育及び収量調査

2.3.1 生育調査

水稻移植6週後(7月7日), 8週後(7月22日), 10週後(8月5日), 12週後(8月19日)に草丈と分けつ数を, 各ライシメーター中央付近の21株(図2においてNo.9~15, 19~25, 29~35の21株)について測定した。

2.3.2 収量調査

各株ごとに草丈を測定した後, 地上部を穂実部と茎葉部に分けてそれぞれ新鮮物重と乾物重を測定した。乾物重は, 茎葉部は80°Cで乾燥し, 穂実部は室温で風乾して求めた。乾燥した穂実部は, 各ライシメーターごとに40本の穂を任意に抜き取り, 各穂の穂重, えい花数, 精もみ数及び千粒重を測定した。精もみ数は, 比重1.06の塩水中で沈んだもみを精もみとして測定した。

2.4 ポット試験

温室内制御環境下と屋外自然境下での水稻の生育の差を調べるために, ポット試験を行った。1/5000 aのポットに茨城県筑波郡筑波町の水田作土(ライシメーターと同一の土壌)を充てんし, 湛水状態とし, 中央に水稻稚苗を2本植えた。このようなポット2個を温室内で, 2個を温室外において栽培した。供試した水稻及び栽培日程はライシメーター試験と同一とした。

3 結果及び考察

3.1 ライシメーター間的水稻生育の差

3.1.1 生育調査

各ライシメーター(L5~L8, 以後番号で示す)における水稻の生育を表1(草丈)及び表2(分けつ数)に示した。表には, ライシメーター中央の21株(図2において9~15, 19~25, 29~35の株)についての平均値, 標準偏差及びライシメーター間の最少有意差を示した。

表 1 各ライシメーターにおける草丈の変化
Table 1 Plant height of rice in each lysimeter

DATE	No. 5 Lys.		No. 6 Lys.		No. 7 Lys.		No. 8 Lys.		l. s. d.*
	mean	(S. D.)	mean	(S. D.)	mean	(S. D.)	mean	(S. D.)	
7/ 7	68.93	(2.02)	63.56	(2.80)	61.90	(3.43)	64.88	(2.32)	2.18
7/22	71.58	(2.87)	65.64	(2.99)	64.42	(2.73)	66.41	(2.27)	2.21
8/ 5	77.33	(2.80)	80.28	(2.73)	80.92	(3.88)	76.41	(5.58)	3.17
8/19	89.41	(3.12)	93.31	(2.31)	93.54	(3.82)	89.42	(3.91)	2.71
11/ 5	109.05	(3.64)	109.62	(3.51)	109.67	(3.79)	107.62	(3.79)	2.98

*; least significant difference at the 5% level

表 2 各ライシメーターにおける分けつ数の変化
Table 2 Number of rice tillers in each lysimeter

DATE	No. 5 Lys.		No. 6 Lys.		No. 7 Lys.		No. 8 Lys.		l. s. d.*
	mean	(S. D.)	mean	(S. D.)	mean	(S. D.)	mean	(S. D.)	
7/ 7	11.52	(2.27)	10.29	(2.05)	9.67	(2.01)	10.19	(1.57)	1.61
7/22	12.76	(2.41)	11.24	(1.81)	10.19	(2.27)	10.81	(1.72)	1.68
8/ 5	12.57	(2.44)	11.33	(1.93)	10.00	(2.00)	11.10	(1.92)	1.69
8/19	12.33	(2.22)	11.00	(1.64)	10.14	(2.33)	10.90	(1.76)	1.63
11/ 5	11.29	(2.28)	11.10	(1.89)	10.05	(2.31)	10.57	(1.54)	1.64

*; least significant difference at the 5% level

草丈(表1)は、7月22日までは西寄りのL5がL6、7及び8より明らかに高かった。しかし8月5日から19日までは中央のL6及び7が両端のL5及び8より高くなった。収穫直前の11月5日にはL8のみがL5~7より若干低かったが、これらのライシメーター間に有意差はなかった。

分けつ数(表2)は、5月27日に移植(2本植え)した後、7月7日までの間に5倍近く増加した。この時点ではL5とL7の間に有意差があり、L5>L7の関係が認められた。7月7日以降は分けつ数の変化は小さく、L5とL7の差は8月19日まで認められたが、収穫時(11月5日)には、ライシメーター間に有意差は認められなくなった。

出穂は、各ライシメーターとも8月30日頃で、ライシメーター間で、差は認められなかった。

栄養生長期の水稻では、草丈の伸長、葉数、分けつ数の増加などが起こるが、これには光、温度、養水分条件などが影響を及ぼす。特に、光不足、高温、窒素過多などの条件下では徒長する⁶⁾。両端のライシメーター(L5及び8)において生育初期(7月22日まで)に草丈が他より勝った理由の一つとして、これらのライシメーターの置かれている温室は両側面が別の温室と2重ガラスを介して接しているため、両端のライシメーターでは1日の日射量が少ないことが考えられる。しかし、7月22日以降、L5及びL8では草丈の伸びがL6及びL7より衰え、8月5日にはL5、8<L6、7となったことは、温室内の位置の違いによる日射量の多寡のみでは説明されない。また、両端のライシメーターにおいて日射量が弱かったことから、L5において生育初期に分けつが活発に行われ、草丈と同様にL5>L7の関係が認められたことは、説明されない。水稻の生育に影響を及ぼす他の要因として、風当たり、温室内の気温分布、地水温のライシメーター間差なども考えられ、これらの点については今後検討する必要がある。

今回の試験は肥料を一切施用せずに行ったため、養分は土壌からの供給のみであった。ライシメーターへ充てんしたときの土壌の状態により、土壌からの養分の供給量は異なることも予想されるが、それが各ライシメーターにおける生育経過の違いにどのようにかかわっているのかは、不明である。

3.1.2 収量調査

表 3 に、各ライシメーターの中央 21 株についての収量調査の結果を示した。ただし、一穂重量、一穂えい花数、一穂精もみ数、登熟歩合及び千粒重はライシメーター全体 43 株についての結果を示した。

草丈、茎葉部重量及び穂数ではライシメーター間に有意差は認められなかった。しかし、穂重(株当たり)では L5 と L6, 7, 8 の間に有意差が認められ、L5 < L6, 7, 8 であった。一穂重量、一穂精もみ数及び登熟歩合は、L5, 6 と L7, 8 の間に有意差が認められ、L5, 6 < L7, 8 であった。しかし 1 穂当たりのえい花数及び千粒重はライシメーター間に差は認められなかった。

3.1.1 で述べたように、ライシメーター間で水稻の生育経過が異なったにもかかわらず、収穫時には草丈、分けつ数(穂数)及び茎葉部重量に差は認められず、穂重においてのみライシメーター間の差が認められた。これを収量構成要素の点からみると、一穂えい花数、千粒重に差はなく、穂重の差はもっぱら登熟歩合の差に起因するものであるといえる。

非登熟米は、登熟期の栄養条件などで登熟が遅れたり停止した不完全米と、非受精による不稔米(しいな)に分けることができるが、今回の試験において発生した非登熟米の大部分は不稔米であった。不稔米の発生の原因としては、減数分裂期から開花期にかけての温度条件が影響を及ぼすことが知られており、気温あるいは水温を 20°C 以下としたときに登熟歩合が著しく低下したことが報告されている^{7,8)}。今回の試験は気温を昼間 25°C、夜間 20°C とし、水温は制御しなかったが、地温を 18°C に設定したため、水温は 20°C 前後であったと推定される。このような温度条件は、水稻が正常な生育をし得る最低温度に近い。

表 3 各ライシメーターにおける水稻収量調査結果
Table 3 Growth and yield of rice plants in each lysimeter

	No. 5 Lys.		No. 6 Lys.		No. 7 Lys.		No. 8 Lys.		l. s. d.*
	mean	(S. D.)	mean	(S. D.)	mean	(S. D.)	mean	(S. D.)	
Plant height (cm)	109.1	(3.6)	109.6	(3.5)	109.7	(3.8)	107.6	(3.8)	3.0
Dry weight of straws (g)	42.2	(9.8)	39.1	(7.4)	38.2	(11.0)	37.8	(8.0)	8.9
Number of panicles	11.3	(2.3)	11.1	(1.9)	10.1	(2.3)	10.6	(1.5)	1.6
Panicle weight of a plant (g)	15.7	(3.4)	18.7	(3.5)	20.0	(2.7)	18.8	(2.8)	2.5
Dry weight of a panicle (g)	1.04	(0.42)	1.02	(0.29)	1.40	(0.41)	1.45	(0.46)	0.23
Number of glumous flowers per panicle	97.0	(18.4)	95.7	(20.4)	94.5	(23.1)	94.4	(18.5)	11.8
Number of winnowed grains per panicle	24.9	(16.0)	25.7	(11.9)	42.4	(15.1)	45.7	(17.7)	9.0
Percentage of ripened grains	25.2	(14.1)	27.7	(14.1)	45.5	(15.1)	48.4	(15.8)	8.6
Dry weight of winnowed grains per panicle (g)	0.63		0.65		1.07		1.16		
Thousand-grain-weight (g)	25.38		25.19		25.19		25.32		

*; least significant difference at 5% level

別報⁹⁾にて報告するように、気温を25°C一定とし、地温及び水温が気温と同一である温室内小型ライシメーター実験では、本試験と同様の温室内において栽培したにもかかわらず90%以上の登熟歩合であった。このことは、温度条件を適当に設定することにより大型ライシメーターにおいても登熟歩合を高め得ることを示唆する。

いずれのライシメーターにおいても登熟歩合が50%以下であったことは、通常的水稻の栽培と比較して異常であり、本格的な実験を行うに当たっては登熟歩合を高めるよう条件を設定する必要がある。さらに、各ライシメーターの登熟歩合を100%に近づけることにより、ライシメーター間差は小さくなり、穂部の収量のライシメーター間差が小さくなることも期待されよう。

3.2 ライシメーター内水稻生育分布

水田など植物が比較的密に生育する群落では、光強度、風当たり、根や葉の伸長範囲の相違などにより、群落の中央部と周縁部で生育が異なることが予想される(周辺効果)。また、今回実験を行ったような環境制御温室では、日射及び風向きが片寄るなどの理由から、植物の生育量にこう配が生じることも指摘されている⁵⁾。そこで、各ライシメーターの中央部の株と周縁部の株それぞれの収量を調べ、ライシメーター内での水稻収量のバラツキを検討した。

表4に、中央21株(図2において9~15, 19~25, 29~35の株)及び周縁部22株(同じく1~8, 16~18, 26~28, 36~43の株)のそれぞれの収量調査の結果(草丈、穂数、茎葉部新鮮重及び穂新鮮重)について平均値及び標準偏差を示した。

このうち、中央部と周縁部の間に1%水準で有意差が認められたのは、L5, 6, 7の草丈及びL5

表 4 ライシメーター中央部、及び周縁部における水稻の生育
Table 4 Growth of rice plants in the central part and at the periphery

	No. 5 Lys.	No. 6 Lys.	No. 7 Lys.	No. 8 Lys.	l. s. d.*
	mean (S. D.)	mean (S. D.)	mean (S. D.)	mean (S. D.)	
Plant height (cm)					
plants at the periphery (n=22)	104.2(5.9)	104.4(6.8)	104.5(4.2)	104.8(6.6)	4.7
plants in the center (n=21)	109.1(3.6)	109.6(3.5)	109.7(3.8)	107.6(3.8)	3.0
Fresh weight of straws (g)					
plants at the periphery (n=22)	131.4(30.8)	117.6(21.2)	101.9(24.9)	107.1(26.0)	20.5
plants in the center (n=21)	117.9(26.1)	115.2(19.9)	115.3(23.8)	110.2(21.0)	18.5
Number of ears					
plants at the periphery (n=22)	12.0(2.3)	10.6(1.6)	9.8(2.2)	10.3(2.5)	1.7
plants in the center (n=21)	11.3(2.3)	11.1(1.9)	10.1(2.3)	10.6(1.5)	1.6
Fresh weight of ears (g)					
plants at the periphery (n=22)	19.5(4.5)	20.0(3.9)	19.9(5.4)	19.8(4.9)	3.7
plants in the center (n=21)	15.7(3.4)	18.7(3.5)	20.0(2.7)	18.8(2.8)	2.5

*least significant difference at 5% level

の穂重で、草丈では周縁部<中央部、穂重では周縁部>中央部であった。その他は、5%水準においても有意差は認められなかった。

測定値のバラツキ(標準偏差)は、L6及びL7における穂数では、中央部が周縁部より大きかったが、その他はいずれも、中央部は周縁部よりも小さかった。

周縁部より中央部において草丈が高い傾向にあったのは、周縁部の株は中央部の株より受光量が多く、また、風当たりも強いことなどが理由として考えられる。このように、水稻生育に周辺効果が認められたことは、本実験において水稻の生育を考察する際に、周縁部の株を除外する必要があることを示す。また、中央部においては周縁部より株間のバラツキが小さいことから、調査を行う上では中央部の株のみを対象とする方がライシメーター全体の株を対象とする場合より精度の高いデータが得られると考えられる。

穂重は、L5において有意差が認められたが、これはL5においては中央部の株の穂重が特に低いことによる。3.1.2で述べたように株当たり穂数及び一穂えい花数に差がないとき、株当たり穂重は登熟歩合の多少によってほぼ決まる。そのため、L5の中央部において穂重が低かったのは登熟歩合が低かったためと推定される。この原因については、今後更に検討してゆく必要があるが、ライシメーター全体の登熟歩合を高めることにより、ライシメーター内の穂重の不均一性は改善されるであろう。

3.3 ポット試験

実験を行った4個のポットのうち、No1ポット(P1、以下番号で示す)は実験途中で漏水が甚だしくなったため、P2(温室内にて栽培)及びP3、4(屋外について栽培)の結果についてのみを述べる。

3.3.1 温室内におけるポット栽培とライシメーター栽培の差

図3に、ポット(P2)とライシメーター(L5~8までの平均)における草丈及び穂数の変化を示した。

ポット栽培とライシメーター栽培の水稻の草丈を比較すると、ポット栽培はライシメーター栽培より常に低く、また、ポットでは出穂前後の草丈の変化(7月23日から9月1日にかけて)がライシメーターに比較して小さかった。分げつ数の変化を比較すると、ポット栽培ではライシメーター栽培より最高分げつ数は若干高く、また、早く最高分げつに達したが、ライシメーターでは分げつのほとんどが有効分げつとなったのに対し、ポット栽培では最高分げつ期以後の分げつ数の減少が著しかった。

以上の結果は、ポット栽培とライシメーター栽培の差が中後期の生育において、より顕著となり、前者が後者より劣ることを示している。これは、試験を無肥料で行い、かつ、ポットはライシメーターよりも土壌の量のはるかに少ないため、早く養分が欠乏したためと考えられる。

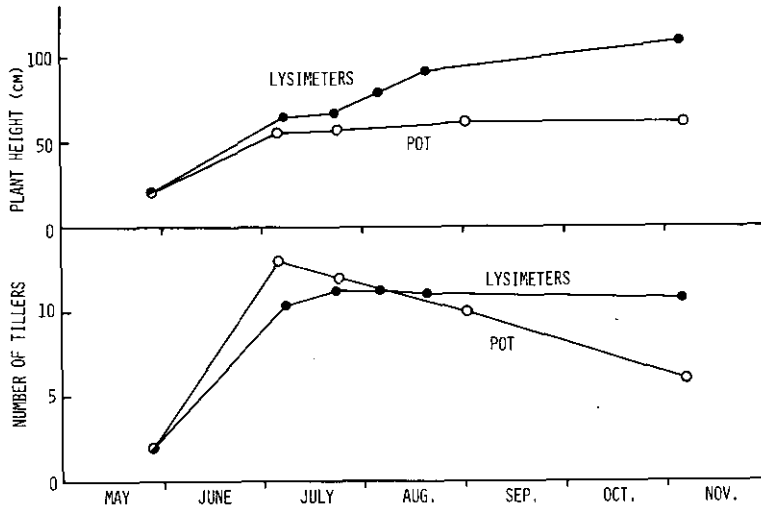


図 3 温室内ポット及びライシメーターにおける水稻の生育
Fig. 3 Growth of rice plants in pots and lysimeters in the greenhouse

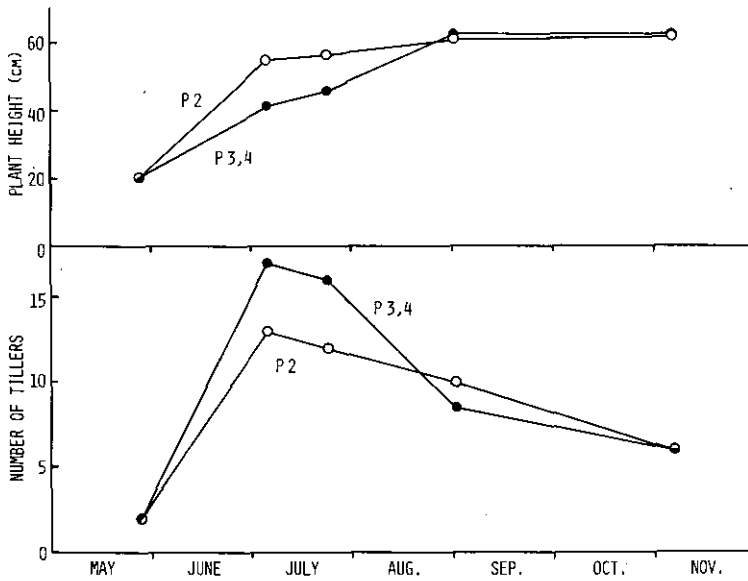


図 4 温室内外における水稻の生育
Fig. 4 Growth of rice plants in the greenhouse and outside of the greenhouse
P2; in the greenhouse
P3, 4; outside of the greenhouse

3.3.2 温室内外の差

図4に、温室内(P2)外(P3, 4)における水稻の草丈及び分けつ数の変化を示した。

草丈は、移植後57日目(7月23日)までは温室内のポットが屋外のポットより高かったが、8月27, 28日に各ポットが出穂、開花した後は温室内外で差がなくなった。分けつ数は、7月5日に最高分けつ数となり、屋外では16~18本に達したが、温室内では13本であり、屋外より少なかった。いずれのポットも7月5日以後、分けつ数は減少し、出穂したのは温室内外とも同数で6本であった。

表5に収量調査の結果を示した。穂数、草丈、地上部(茎葉部+穂部)重量は温室内外のポットで差異がなかったが、穂部重量は屋外のポットで高く、茎葉部重量は温室内のポットでそれぞれ高かったが、えい花数及び登熟歩合は屋外のポットが高いため、精もみ数は屋外のポットで多かった。千粒重は屋内のポットの方が高かった。

表 5 温室内外における水稻の収量
Table 5 Yield of rice in the greenhouse and outside of the greenhouse

	No. 1 Pot	No. 2 Pot	No. 3 Pot	No. 4 Pot
DW of straws (g)	1.35	9.25	7.79	7.45
DW of ears (g)	0.66	3.46	5.31	4.40
DW of straws and ears (g)	2.01	12.71	13.10	11.85
number of glumous flowers	31	144	212	176
number of ripened grains	24	122	197	164
DW of ripened grains (g)	0.59	3.17	4.94	4.07
thousand-kernel-weight (g)	24.58	25.98	25.08	24.82
percentage of ripened grains	0.774	0.847	0.929	0.932

No. 1 and No. 2 pot were laid in the greenhouse, and No. 3 and No. 4 pot were laid outside the greenhouse.

温室内のポットと屋外のポットを比較したとき、初期の生育において特徴的であったのは温室内では分けつ数が少なく、徒長しやすいことであった。日照が弱いときに徒長することは、植物一般に認められることである。しかし、収穫時には温室内外で草丈及び穂数に差は認められなかった。3.3.1で述べたようにポット栽培では後期の生育には何らかの制限要因があるため、屋外においては分けつ数が減少し、温室内においては草丈の伸長が停滞している可能性もある。そのため、施肥を行い、十分な栄養条件の元で栽培した場合において、収穫時の草丈及び穂数に温室内外で差が生じる可能性はある。また、今回の試験において一穂当たりのえい花数及び穂重では、屋外は温室内栽培より大きかったことから、一般に、温室内で栽培した場合には、屋外より収量が劣ることが予想される。

3.4 水稲栽培試験を行う上での問題点

以上の結果より、屋内ライシメーターにおける水稲栽培上の問題点として以下の点があげられる。

① 屋外自然環境下と温室内制御環境下の水稲の生育を比較すると、屋内では温室外と比較して徒長しやすく、また、分けつ数が少ない傾向にある。

② 生育経過及び穂部収量にライシメーター間差が認められる。

③ ライシメーター内生育分布では周辺効果が認められ、草丈において最も影響が顕著であった。

④ 各ライシメーターとも、登熟歩合が著しく低かった。

本格的な実験に使用するに当たっては、補助光を使用するなど改善の余地はあるものの、実験結果の解析において①、②及び③について配慮する必要がある。

今回の試験の結果、最も問題があると思われたのは、④で指摘したように、不稔米が非常に多く発生する点であった。不稔米の発生は、登熟時の枯れ上がりを遅らせ、遅れ穂の発生など、生育異常をもたらすため、水稲の生育、収量、養分吸収などを正當に評価できなくなる。

先に述べたように、不稔米の発生は温度条件によって大きく影響を受ける。本格的な試験を行うに当たっては、気温、水温等の条件を改善することによって不稔米の発生を抑える必要がある。

4. まとめ

温室内ライシメーターにおいて水稲の均一栽培を行い、水稲生育の特徴及び実験を行っていく上での問題点を明らかにした。

その結果、地温 18°C、気温 20-25°C の条件下では登熟歩合が著しく悪く、本格的な実験を行うに当たっては改善する必要があると認められた。

謝 辞

試験を行うに当たって、水稲稚苗は技術部ほ場係長 山口武則氏に提供頂いた。また、調査を行う上で、水質土壌環境部土壌環境研究室 久保井 徹氏、生物環境部陸生生物研究室 岡野邦夫氏には数々の御教示を頂いた。栽培管理から収量調査に至るまで、沼尻栄子、中村てる子、沼尻裕子の各氏にお手伝い頂いた。各氏に深く感謝致します。

引用文献

- 1) 広木幹也・藤井國博・服部浩之・久保井徹・豊田敏治・松坂泰明・和田秀徳(1983): 下水汚泥施用土壌の微生物フロラに関する研究(I), 石灰凝集下水汚泥の多量連用が淡色黒ボク土の微生物数に与える影響. 国立公害研究所研究報告, 第46号, 1-16.
- 2) 服部浩之・豊田敏治・鷺沢清司・久保井徹・藤井國博・松坂泰明・大羽 裕(1983): 下水汚泥施用土壌の理化学性. 国立公害研究所研究報告, 第47号, 13-26.
- 3) 服部浩之・久保井徹・広木幹也・藤井國博・松坂泰明(1983): 下水汚泥連用土壌における全炭素, 全窒素及び無機態窒素量の変化. 国立公害研究所研究報告, 第47号, 27-35.
- 4) 広木幹也・久保井徹・鷺沢清司・豊田敏治・服部浩之・藤井國博・松坂泰明(1983): 下水汚泥施用土壌における物質の移動に関する研究—下水汚泥成分の地下浸透. 国立公害研究所研究報告, 第47号, 107-118.
- 5) 久保井徹・藤井國博・広木幹也・服部浩之・松坂泰明・吉田富男(1983): 環境制御ライシメーターの概略と運転上の留意点. 国立公害研究所研究報告, 第47号, 211-227.
- 6) 星川清親(1975): 苗の生長と苗質. 解剖図説イネの生長, 農山漁村文化協会, 58-79.
- 7) 星川清親(1975): 穂の分化と発達. 解剖図説イネの生長, 農山漁村文化協会, 216-243.
- 8) 角田公正(1964): 水温と稲の生育・収量との関係に関する実験的研究. 農業技術研究所報告, A-11号, 75-174.
- 9) 広木幹也・藤井國博(1984): 下水汚泥施用土壌における水稻の生育及び植物体成分. 国立公害研究所研究報告, 第68号, 17-29.

III. 資 料

III-1

降 水 量

Precipitation

山口武則¹・藤井國博²

Takenori YAMAGUCHI¹ and Kunihiro FUJII²

国立公害研究所実験ほ場では昭和 55 年より降水量の計測が行われている。屋外のライシメーターを用いた実験においては降水量の把握が欠かせない実験項目である。ここでは、屋外ライシメーター（有底枠）の浸透水量の測定が開始された昭和 55 年 5 月から昭和 58 年 3 月までの降水量を示した（表 1～表 3）。日降水量は、24 時間（9 時～9 時）値であり、ライシメーター当たりの降水量は、計算で求めた。なお、ライシメーター内の土壌の表面積は、16 m²である。

-
1. 国立公害研究所 技術部 〒 305 茨城県筑波郡谷田部町小野川 16 番 2
Engineering Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
 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.

表 1 昭和55年5月~昭和56年3月
Table 1 May, 1980-March, 1981

Date	Precipitation		Date	Precipitation		Date	Precipitation	
	mm/d	l/Lysimeter		mm/d	l/Lysimeter		mm/d	l/Lysimeter
1980			Aug. 2	11.9	190.4	Dec. 2	10.8	172.8
May	1	2.8	3	25.4	406.4	9	0.1	1.6
	2	35.5	6	0.1	1.6	12	1.9	30.4
	6	0.1	16	0.9	14.4	20	0.2	3.2
	7	0.7	17	1.9	30.4	21	0.4	6.4
	9	6.0	18	0.7	11.2	23	17.0	272
	10	20.0	20	5.9	94.4	24	9.8	156.8
	11	12.5	21	0.5	8.0	1981		
	16	10.8	23	0.1	1.6	Jan. 1	2.8	44.8
	17	0.8	25	0.1	1.6	16	0.9	14.4
	18	0.1	26	12.1	193.6	Feb. 1	3.1	49.6
	20	2.5	30	0.1	1.6	13	0.4	6.4
	21	22.4	Sep. 1	1.4	22.4	16	7.5	120.0
	25	9.5	3	0.4	6.4	17	4.0	64.0
	26	7.0	6	1.0	16.0	18	0.8	12.8
	30	0.1	8	5.9	94.4	23	7.3	116.8
	31	0.6	9	2.8	44.8	24	2.0	32.0
June	2	17.2	10	11.6	185.6	Mar. 3	5.9	94.4
	7	0.1	11	2.6	41.6	4	4.8	76.8
	8	6.4	17	1.5	24.0	8	0.2	3.2
	9	7.5	21	1.2	19.2	9	4.9	78.4
	17	0.1	24	1.9	30.4	10	0.1	1.6
	19	0.1	25	7.1	113.6	11	0.1	1.6
	20	7.4	26	25.5	408	13	1.0	16.0
	21	0.4	27	21.1	337.6	14	24.1	385.6
	23	1.1	Oct. 6	0.4	6.4	19	13.2	211.2
	26	1.5	7	0.1	1.6	21	24.0	384
	28	10.1	11	1.6	25.6			
	29	91.5	14	38.1	609.6			
July	1	3.9	16	11.0	176			
	2	16.3	18	5.1	81.6			
	4	0.2	19	7.5	120			
	6	3.2	20	20.2	323.2			
	7	31.6	21	3.8	60.8			
	8	19.3	24	9.6	153.6			
	9	6.9	25	3.4	54.4			
	10	1.5	28	1.0	16.0			
	11	3.6	Nov. 12	8.2	131.2			
	15	6.4	21	47.1	753.6			
	17	0.1	22	1.5	24.0			
	18	1.3	23	1.3	20.8			
	24	1.7	24	7.6	121.6			
	26	0.9	25	18.0	288			
	28	0.1	28	17.0	272			
	30	30.2	29	0.2	3.2			
	31	0.6						

表 2 昭和56年4月~昭和57年3月
Table 2 April, 1981-March, 1982

Date	Precipitation		Date	Precipitation		Date	Precipitation			
	mm/d	l/Lysimeter		mm/d	l/Lysimeter		mm/d	l/Lysimeter		
1981			July	1	7.1	113.6	Nov.	2	26.9	430.4
Apr.	1	3.6	57.6	2	11.6	185.6	5	18.8	300.8	
	2	13.7	219.2	3	2.3	36.8	6	6.6	105.6	
	4	0.9	14.4	4	0.1	1.6	15	0.2	3.2	
	5	1.2	19.2	18	1.4	22.4	25	11.7	187.2	
	6	1.2	19.2	20	1.7	27.2	26	1.1	17.6	
	10	19.7	315.2	21	18.0	288	27	1.2	19.2	
	13	11.0	176	22	9.8	156.8	30	1.1	17.6	
	16	15.6	249.6	23	8.1	129.6	Dec.	19	3.3	52.8
	19	10.0	160	24	0.1	1.6	20	0.1	1.6	
	20	27.0	432	29	1.0	16	25	0.4	6.4	
	25	14.0	224	30	1.5	24	30	1.0	16	
	26	0.1	1.6	Aug.	5	2.1	33.6	1982		
	29	5.1	81.6	7	2.3	36.8	Jan.	4	32.3	516.8
	30	6.2	99.2	8	0.6	9.6	5	0.2	3.2	
May	3	9.0	144	11	0.1	1.6	11	0.1	1.6	
	6	2.6	41.6	12	2.6	41.6	16	0.4	6.4	
	7	48.5	776	19	0.1	1.6	18	3.3	52.8	
	11	0.9	14.4	20	0.4	6.4	29	2.0	32	
	12	15.7	251.2	21	8.1	129.6	Feb.	4	9.0	144
	13	0.2	3.2	22	72.1	1153.6	5	5.2	83.2	
	15	0.6	9.6	23	1.2	19.2	17	14.7	235.2	
	16	32.0	512	25	7.0	112	19	2.5	40	
	17	57.0	912	27	46.6	745.6	20	1.4	22.4	
	24	15.4	246.4	28	30.0	480	21	5.0	80	
	28	1.9	30.4	Sep.	4	7.1	113.6	24	0.6	9.6
	31	0.1	1.6	8	50.3	804.8	28	11.4	182.4	
June	1	5.8	92.8	10	13.5	216	Mar.	1	15.8	252.8
	4	0.9	14.4	11	37.6	601.6	2	0.2	3.2	
	5	5.9	94.4	12	3.6	57.6	4	1.6	25.6	
	6	0.2	3.2	19	35.8	572.8	5	0.8	12.8	
	7	3.5	56	20	0.9	14.4	6	1.7	27.2	
	11	0.9	14.4	24	0.3	4.8	12	9.5	152	
	12	1.0	16	25	36.9	590.4	15	4.8	76.8	
	14	3.0	48	26	11.1	177.6	17	0.9	14.4	
	15	10.0	160	30	24.8	396.8	19	0.1	1.6	
	17	0.6	9.6	Oct.	1	44.1	705.6	20	17.5	280
	18	13.5	216	8	43.6	697.6	21	13.9	222.4	
	21	3.3	52.8	9	32.2	515.2	31	7.6	121.6	
	22	5.0	80	13	0.3	4.8				
	23	4.3	68.8	14	1.0	16				
	25	12.7	203.2	18	0.1	1.6				
	26	6.8	108.8	21	3.0	48				
	27	0.9	14.4	22	331	5296				
	28	0.9	14.4	29	13	208				

表 3 昭和 57 年 4 月～昭和 58 年 3 月
Table 3 April, 1982-March, 1983 . .

Date	Precipitation		Date	Precipitation		Date	Precipitation			
	mm/d	l/Lysimeter		mm/d	l/Lysimeter		mm/d	l/Lysimeter		
1982			Aug.	1	55.2	883.2	Dec.	5	10.6	169.6
Apr.	2	0.5	8	2	10.5	168	12	0.1	1.6	
	3	2.5	40	3	1.2	19.2	22	12.4	198.4	
	7	11.1	177.6	7	8.9	142.4	25	0.3	4.8	
	8	0.4	6.4	8	0.3	4.8	26	7.1	113.6	
	9	2.7	43.2	9	0.1	1.6	28	0.1	1.6	
	14	12.9	206.4	16	4.2	67.2	30	0.1	1.6	
	15	86.5	1384	17	16.1	257.6	1983			
	21	47.3	756.8	18	0.4	6.4	Jan.	5	8.2	131.2
	27	0.1	1.6	20	0.4	6.4	7	3.9	62.4	
	28	0.2	3.2	26	37.4	598.4	8	0.2	3.2	
	30	7.0	112	27	6.7	107.2	17	3.9	62.4	
May	1	0.1	1.6	30	0.7	11.2	18	12.6	201.6	
	2	1.0	16	Sep.	3	12.3	196.8	19	0.1	1.6
	3	28.0	448	4	1.2	19.2	30	3.4	54.4	
	5	0.7	11.2	6	3.1	49.6	Feb.	1	1.3	20.8
	6	27.4	438.4	8	2.7	43.2	2	7.1	113.6	
	19	7.3	116.8	10	39.1	625.6	6	3.4	54.4	
	20	12.3	196.8	11	77.6	1241.6	16	5.2	83.2	
	30	1.2	19.2	12	200.7	3211.2	17	56.6	905.6	
	31	52.2	835.2	14	9.8	156.8	18	1.9	30.4	
June	1	0.5	8	15	4.9	78.4	23	11.9	190.4	
	2	24.4	390.4	19	41.8	668.8	24	12.0	192	
	3	27.0	432	20	7.7	123.2	Mar.	1	1.3	20.8
	7	0.4	6.4	22	1.7	27.2	2	7.5	120	
	9	2.0	32	23	16.6	265.6	4	0.2	3.2	
	13	15.2	243.2	24	5.4	86.4	6	0.2	3.2	
	14	28.9	462.4	25	53.6	857.6	9	0.1	1.6	
	17	0.2	3.2	Oct.	2	45.5	728	10	26.7	427.2
	19	22.8	364.8	5	5.3	84.8	12	16.6	265.6	
	20	25.2	403.2	6	3.9	62.4	13	47.8	764.8	
	23	6.3	100.8	7	12.5	200	16	22.4	358.4	
	24	6.8	108.8	8	57.9	926.4	17	11.0	176	
	26	42.6	681.6	9	4.9	78.4	21	18.0	288	
	27	0.9	14.4	10	1.0	16	23	24.7	395.2	
July	6	3.2	51.2	19	79.2	1267.2	24	6.5	104	
	7	47.2	755.2	20	0.2	3.2	26	6.6	105.6	
	8	0.4	6.4	31	0.2	3.2	27	6.8	108.8	
	11	1.3	20.8	NOV.	3	0.6	9.6	29	1.6	25.6
	16	10.6	169.6	4	22.3	356.8				
	17	15.2	243.2	5	19.1	305.6				
	19	18.1	289.6	7	54.0	864				
	21	0.6	9.6	8	1.1	17.6				
	24	6.8	108.8	9	10.2	163.2				
	25	87.0	1392	10	34.8	556.8				
	26	10.4	166.4	11	2.0	32				
	28	1.2	19.2	15	0.4	6.4				
	29	3.4	54.4	16	6.9	110.4				
	30	37.2	595.2	22	1.2	19.2				
	31	24.1	385.6	29	51.9	830.4				
				30	14.2	227.2				

III-2

屋外ライシメーターの浸透水量

Amount of Percolating Water from Outdoor Lysimeters

藤井國博¹・山口武則²

Kunihiro FUJII¹ and Takenori YAMAGUCHI²

ライシメーターを用いた土壌-植物系における物質の挙動に関する実験においては、浸透水量の計測が不可欠である。国立公害研究所実験ほ場には 24 基の畑地用屋外ライシメーターが設置されており、すべてに転倒マス雨量計を利用した浸透水量の自動記録装置が備えられている。第 I 期に建設された 16 基（昭和 52 年完成）には昭和 55 年に上記装置が設置され、同年 5 月 14 日から連続計測が開始されている。

本特別研究では、下水汚泥成分の土壌環境中での挙動を追跡するために上記ライシメーターのうち 4 種の土壌（砂質土、淡色黒ボク土、沖積土、黒ボク土）を充てんした 8 基が用いられている。これら 8 基のライシメーターにおける浸透水量（昭和 55 年 5 月～昭和 58 年 3 月まで）は、以下に示すとおりである。なお、55 及び 56 年度は裸地であり、57 年度は植物が栽培された。

ライシメーター実験の内容は既報¹⁾を参照されたい。

引用文献

- 1) 広木幹也・藤井國博・服部浩之・久保井徹 (1983): 下水汚泥施用土壌の微生物フロラに関する研究 (III). 土壌の違いと微生物性の差異. 国立公害研究所研究報告, 第 46 号, 39-55.

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

1. May, 1980

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
14	0	0	9.6	9.6	2.0	1.6	0	0
15	20.4	0.1	97.8	103.8	24.4	25.0	7.6	16.3
16	0	0	98.4	99.2	21.1	8.6	0	0
17	0.2	2.0	73.6	126.9	33.9	0.2	0.2	0.4
18	39.4	57.8	70.2	69.8	25.4	52.5	65.3	64.7
19	51.2	44.9	51.9	53.2	43.2	45.9	49.8	50.2
20	37.2	32.6	36.5	37.4	33.9	35.6	36.0	36.4
21	22.0	19.6	18.2	20.7	69.0	34.1	18.5	18.6
22	136.3	127.2	97.9	92.9	63.6	70.9	46.8	53.0
23	120.6	83.1	96.9	96.6	57.0	67.1	75.9	76.4
24	76.3	58.6	58.7	59.5	43.9	50.0	54.3	54.7
25	53.4	37.5	40.1	40.9	33.8	38.0	38.7	39.0
26	7.6	5.1	10.7	12.3	20.5	25.8	9.3	31.7
27	0.1	0.3	0.1	2.1	8.7	5.6	0	21.5
28	9.1	2.4	0	2.1	7.4	0.2	3.6	9.2
29	5.8	0	0.1	0.2	6.4	0	0.9	9.2
30	3.5	0	0	0	6.3	0	0.1	10.8
31	1.8	0	0	3.0	6.3	0	0.1	13.2
Total	585	471	761	830	507	461	407	505

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

2. June, 1980

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	0.6	0	0	5.6	7.4	0	0	12.7
2	1.9	0	0	3.6	7.4	0	0	12.4
3	1.0	0	0	2.6	7.8	0	0	11.1
4	0.3	0	0	1.6	8.3	0	0	12.5
5	0.1	0	0	0.4	7.1	0	0	10.2
6	0.1	0.2	0	0	6.5	0	0	8.7
7	0	0	0	0	6.9	0	0	7.5
8	327.5	239.3	261.7	260.8	91.7	196.0	152.9	11.3
9	169.1	90.7	10.8	10.7	5.2	6.3	3.3	4.1
10	24.1	19.1	8.6	9.5	4.1	5.4	2.3	3.4
11	-21.6	17.8	8.6	10.3	3.5	3.0	2.1	3.1
12	20.0	16.8	8.8	10.5	3.0	3.1	1.4	2.7
13	19.7	15.9	8.6	10.0	2.6	2.4	1.7	2.5
14	19.4	15.3	7.6	9.3	2.2	2.0	1.4	2.4
15	19.5	12.2	7.1	8.5	1.9	2.0	1.2	2.3
16	19.0	11.4	6.7	7.5	1.5	1.7	1.0	2.0
17	18.4	18.3	6.0	6.8	1.2	2.0	1.5	1.7
18	17.8	9.2	4.8	5.8	1.0	1.0	0.7	1.5
19	16.6	11.7	3.8	5.1	0.8	0.6	0.8	1.1
20	15.2	9.7	3.8	4.5	0.8	0.3	0.7	0.9
21	14.3	9.9	3.7	3.7	0.6	0.8	0.9	0.9
22	12.9	6.9	3.1	3.5	0.6	0.9	0.3	0.7
23	12.1	7.0	2.9	3.3	0.5	1.1	0.6	0.6
24	11.4	12.8	2.9	3.2	0.3	0.8	0.7	0.5
25	11.0	7.1	2.2	3.1	0.4	0.2	0	0.4
26	10.7	6.4	2.5	3.1	0.3	0	0	0.5
27	10.8	5.4	2.6	3.0	0.4	0.8	0.7	0.4
28	11.2	6.7	1.4	2.7	0.2	0.4	0.5	0.3
29	302.7	288.3	237.9	350.7	469.2	104.0	199.3	445.8
30	451.3	416.2	496.4	642.9	265.0	339.6	568.9	319.9
Total	1560	1254	1058	1392	908	674	943	884

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

3. July, 1980

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	391.5	328.4	363.0	265.6	56.7	279.6	180.2	100.0
2	320.2	234.9	205.4	61.9	69.6	161.3	57.6	57.5
3	210.0	56.0	101.5	87.6	123.5	101.3	92.7	95.5
4	133.2	51.9	98.7	86.4	68.6	80.2	90.9	92.0
5	92.8	48.1	61.3	54.9	45.0	68.8	56.2	56.6
6	64.1	34.7	38.5	38.4	33.8	37.4	38.6	38.9
7	44.7	32.2	28.5	28.3	60.8	49.5	27.6	27.6
8	203.1	259.8	102.2	152.6	601.3	336.0	581.7	581.9
9	219.2	265.9	—	—	266.5	347.0	213.5	201.8
10	196.2	188.2	—	—	65.3	278.6	127.7	134.6
11	159.6	138.4	—	—	58.7	165.2	72.0	73.9
12	128.6	64.7	—	—	45.4	50.0	48.6	51.4
13	99.0	35.2	—	—	41.4	37.0	44.4	44.7
14	72.7	27.2	—	—	36.1	21.9	36.8	36.8
15	55.5	23.4	—	—	30.1	23.6	28.3	28.3
16	39.8	21.2	—	—	24.2	43.8	21.4	20.6
17	30.8	21.4	—	—	19.4	35.1	16.3	16.1
18	26.6	20.9	—	—	16.0	17.0	12.4	12.4
19	21.1	18.7	—	—	13.8	14.6	10.3	10.2
20	18.4	18.1	—	—	12.1	14.8	8.4	8.9
21	16.3	16.2	—	—	11.3	9.5	7.5	7.8
22	16.2	16.8	—	—	10.0	6.9	6.6	6.8
23	15.0	17.5	—	—	9.2	6.0	6.0	6.1
24	13.5	15.1	—	—	8.4	7.6	4.8	5.2
25	11.9	14.0	—	—	7.2	7.7	4.0	4.4
26	28.9	14.6	—	—	6.0	9.4	3.0	3.7
27	33.4	13.2	—	—	4.9	10.2	2.5	2.9
28	31.3	11.7	5.1	4.8	3.8	3.7	1.8	2.3
29	28.7	9.5	3.9	4.0	2.8	2.4	1.5	1.9
30	24.6	14.1	3.3	5.1	54.5	23.8	1.3	1.5
31	31.3	121.6	49.6	82.7	25.7	44.2	2.9	13.4
Total	2778	2154	1061	872	1809	2294	1808	1746

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

— Not measured

4. August, 1980

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	79.2	101.0	120.0	99.3	11.9	6.0	16.1	31.8
2	65.4	50.4	57.8	59.2	11.8	12.1	25.8	41.2
3	58.1	36.8	70.4	97.2	123.2	108.2	130.6	143.3
4	45.4	82.8	303.5	313.5	219.5	265.7	273.1	272.7
5	37.8	55.2	122.4	113.6	73.7	115.3	95.5	96.1
6	277.7	99.9	56.2	61.6	48.0	53.6	57.1	56.6
7	259.7	43.8	37.4	41.0	36.0	40.2	38.2	38.1
8	150.9	28.0	26.0	29.4	28.0	31.2	27.9	27.2
9	106.0	21.4	19.0	22.1	22.2	24.1	20.6	20.1
10	66.3	17.1	14.7	16.9	17.6	19.6	15.4	14.8
11	12.9	3.8	11.6	13.5	14.3	15.8	11.9	11.5
12	23.8	9.2	9.2	11.1	11.9	12.8	9.4	9.3
13	23.8	10.7	7.6	9.1	9.7	11.2	7.1	7.3
14	16.6	9.1	6.6	7.2	7.9	7.7	5.5	5.8
15	12.2	6.8	5.1	6.4	6.3	4.6	3.7	4.6
16	9.1	8.5	4.6	5.3	4.8	4.3	3.0	3.5
17	8.5	7.5	3.9	4.1	3.6	3.3	2.0	2.6
18	7.2	5.2	3.3	3.6	2.5	2.3	1.7	2.1
19	6.9	5.9	2.7	3.2	1.8	1.6	1.2	1.7
20	8.0	4.8	2.3	2.6	1.4	1.4	1.1	1.3
21	8.6	5.0	2.0	2.1	0.9	1.0	0.8	1.0
22	8.9	5.6	1.6	1.5	0.8	0.8	0.8	0.8
23	8.2	4.7	1.5	1.5	0.6	1.5	0.6	0.7
24	8.9	4.7	2.1	1.5	0.6	0.7	0.5	0.6
25	8.8	4.4	1.2	1.4	0.4	0	0.4	0.5
26	9.6	4.7	1.2	1.4	0.5	0.5	0.3	0.5
27	10.0	6.6	1.4	1.8	0.3	0.2	0.3	0.4
28	9.9	9.4	4.5	6.9	0.4	1.1	0.5	0.5
29	10.7	4.2	11.8	12.5	0.3	0.6	0.3	1.2
30	10.1	3.8	0	0	0.4	0.2	0.3	2.0
31	9.8	2.2	0	0	0.3	0.1	0.5	3.1
Total	1379	572	912	951	662	748	752	803

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

屋外ライシメーターの浸透水量

5. September, 1980

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	9.6	3.6	10.6	10.8	0.3	0.2	0.5	4.0
2	8.4	2.7	13.3	12.6	0.4	1.0	0.8	4.4
3	10.5	1.8	7.8	7.9	0.5	0.8	0.9	4.6
4	10.0	4.3	6.6	8.6	0.7	0.8	1.3	4.8
5	9.5	4.7	4.3	7.5	0.7	1.3	1.1	4.3
6	9.2	4.6	3.7	6.4	0.8	1.2	1.1	3.7
7	8.9	5.4	3.2	5.4	0.7	2.0	1.2	3.0
8	8.6	2.9	2.4	4.5	0.7	1.9	1.1	3.2
9	8.7	2.1	2.2	3.9	0.7	1.3	0.8	2.1
10	8.6	3.0	2.4	3.0	0.6	1.3	1.0	1.5
11	8.8	3.0	2.3	3.1	0.5	1.7	0.5	1.1
12	8.6	3.0	4.0	5.4	0.5	0.5	0.5	1.0
13	8.7	1.4	6.7	8.9	0.5	1.2	0.3	1.1
14	8.6	3.0	9.4	10.4	0.4	0.7	0.6	1.1
15	8.7	3.4	7.6	10.0	0.4	1.1	0.4	1.3
16	8.5	2.8	6.8	9.1	0.5	1.1	0.4	1.3
17	8.6	4.6	6.2	7.2	0.4	2.0	0.3	1.2
18	8.6	4.4	4.8	5.9	0.2	1.2	0.4	1.1
19	8.6	3.6	4.7	5.3	0.4	1.5	0.2	0.8
20	8.3	3.8	3.4	3.9	0.4	1.5	0.4	0.8
21	8.2	1.8	3.3	3.7	0.4	1.3	0.4	0.6
22	8.2	1.8	3.1	3.0	0.8	1.2	0.5	0.7
23	7.7	3.4	2.2	1.8	0.4	0.9	0.6	0.9
24	6.2	2.1	2.6	1.6	0.3	0.4	0	0.4
25	7.8	1.7	2.6	2.0	0.2	0.3	0	0.3
26	5.7	2.0	1.9	1.7	0.2	0.7	0.2	0.3
27	6.2	2.4	131.6	175.1	63.4	126.6	11.6	45.5
28	5.8	1.4	146.4	169.0	92.6	115.1	70.0	142.4
29	4.9	2.2	80.3	78.9	53.9	63.6	75.7	78.6
30	7.7	4.0	44.7	50.2	38.4	42.9	49.4	49.4
Total	246	91	531	627	261	376	222	366

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

6. October, 1980

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	15.3	3.8	33.5	30.1	29.3	33.6	34.8	34.5
2	15.1	6.0	22.9	20.9	22.9	26.3	25.8	25.5
3	13.7	6.0	11.3	10.4	18.6	21.8	19.7	19.2
4	13.6	5.3	13.0	12.6	15.8	17.7	15.4	15.1
5	14.2	4.1	11.2	12.1	13.5	15.4	12.1	11.9
6	12.2	4.0	8.0	9.8	11.3	13.4	9.7	9.6
7	7.8	4.2	7.0	8.0	9.8	9.6	7.5	7.8
8	6.4	3.0	6.0	6.4	8.1	8.5	5.8	6.1
9	6.8	3.2	5.7	4.4	6.6	6.5	4.4	4.9
10	—	—	—	—	—	—	—	—
11	10.0	3.6	4.2	3.4	4.4	4.4	2.6	3.3
12	—	—	—	—	—	—	—	—
13	10.0	3.1	3.2	2.9	2.8	2.6	1.6	2.3
14	9.4	3.3	2.7	3.9	46.1	17.0	1.1	2.3
15	430.7	142.4	89.9	66.9	14.9	8.4	12.9	40.9
16	468.5	83.0	109.3	85.4	14.9	24.6	42.1	74.1
17	402.3	51.9	67.2	56.5	27.4	50.7	57.0	61.3
18	327.6	36.8	67.1	64.3	40.0	53.3	65.5	65.4
19	246.4	37.7	55.9	49.4	47.6	43.5	50.5	50.6
20	173.3	86.6	169.0	157.0	253.9	278.3	216.5	214.5
21	213.9	158.9	271.7	252.8	265.1	273.7	287.2	286.2
22	208.7	122.5	146.6	53.3	96.2	95.3	125.6	124.0
23	164.7	70.3	74.0	56.5	58.2	57.0	68.9	68.3
24	81.7	42.6	46.2	27.8	42.1	44.4	44.7	44.5
25	53.8	42.5	35.7	19.3	34.4	40.6	31.9	32.0
26	34.1	33.8	44.1	23.6	31.5	26.5	30.5	31.1
27	33.6	33.9	44.8	24.6	33.4	27.0	34.8	34.9
28	41.9	43.4	33.3	19.5	30.4	30.6	31.2	31.0
29	37.1	41.6	27.3	15.3	26.0	25.9	25.4	24.8
30	39.0	36.5	21.6	12.1	22.5	23.1	20.1	19.8
31	31.0	31.3	17.4	9.7	18.7	19.7	15.9	15.7
Total	3133	1371	1450	1119	1246	1299	1301	1362

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

— Not measured

屋外ライシメーターの浸透水量

7. November, 1980

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	26.3	26.4	13.9	7.9	15.4	16.6	12.0	12.1
2	23.3	23.3	11.6	6.5	13.2	14.2	9.8	9.9
3	20.8	20.8	9.2	5.4	11.1	11.8	7.1	7.7
4	19.6	19.0	8.1	4.4	9.5	10.6	5.8	6.2
5	16.8	16.2	6.7	3.8	8.1	8.9	4.5	5.1
6	13.9	13.9	5.7	3.2	6.9	7.5	3.2	4.1
7	9.6	12.2	4.9	2.8	5.9	6.6	2.6	3.3
8	9.4	10.9	4.0	2.3	5.0	4.9	1.6	2.5
9	9.6	9.9	3.5	1.9	4.0	3.5	1.0	2.0
10	9.1	9.1	3.0	1.7	3.3	3.3	0.8	1.6
11	8.8	8.8	2.7	1.5	2.7	2.5	0.6	1.3
12	8.6	8.2	2.5	1.3	2.1	2.3	0.2	0.8
13	7.5	7.3	2.0	1.2	1.7	1.4	0.2	0.8
14	7.5	6.9	1.5	1.0	1.3	1.0	0.2	0.6
15	6.8	6.6	1.8	0.9	1.0	1.0	0.3	0.4
16	6.1	6.1	1.5	0.9	0.7	0.9	0	0.4
17	5.5	5.8	1.2	0.8	0.5	0.6	0	0.3
18	5.4	5.5	1.2	0.7	0.5	0.6	0	0.2
19	5.2	5.2	1.1	0.7	0.3	0.5	0.5	0.2
20	4.9	4.9	1.0	0.6	0.3	0.5	0	0.2
21	5.4	16.8	1.0	0.6	3.4	26.2	0	0.2
22	32.9	382.8	106.7	55.2	30.7	18.5	0	6.5
23	39.6	113.2	158.8	80.1	24.5	25.6	10.6	45.5
24	39.2	68.0	92.4	46.4	30.5	41.6	35.5	64.1
25	38.9	83.8	83.5	48.9	220.9	237.9	110.1	117.8
26	398.3	273.6	222.7	236.6	22.0	16.4	227.9	235.6
27	150.6	105.8	118.1	124.6	72.2	73.3	97.4	98.4
28	97.5	46.5	62.5	62.5	46.1	71.3	51.1	59.1
29	83.3	37.7	60.3	67.3	128.1	103.6	58.4	66.3
30	51.5	74.8	98.5	97.5	70.2	56.1	95.7	101.4
Total	1152	1430	1092	869	742	770	737	855

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

8. December, 1980

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	44.8	55.4	68.4	67.0	47.5	44.7	63.5	67.3
2	40.0	41.3	47.0	47.0	42.7	48.3	43.2	48.5
3	36.2	30.1	36.3	36.3	43.6	41.1	33.1	37.8
4	26.2	25.4	41.2	41.2	41.3	34.5	34.7	41.1
5	20.5	23.1	39.5	38.7	34.8	33.5	35.4	41.1
6	16.6	23.3	31.2	30.6	28.0	28.9	29.2	34.6
7	13.4	24.0	24.7	24.2	23.1	23.4	23.4	27.9
8	9.8	20.7	19.2	20.4	19.2	19.5	18.5	22.6
9	6.5	16.5	15.5	18.8	16.6	17.9	14.6	18.4
10	4.4	13.1	12.8	13.8	14.2	14.5	11.9	15.1
11	1.3	7.5	10.6	11.8	12.5	15.4	10.0	12.8
12	0	0	9.1	10.1	11.2	12.9	8.5	10.6
13	9.5	10.9	7.6	8.6	9.8	11.2	6.8	9.0
14	7.5	9.0	6.6	7.3	8.8	10.0	5.9	7.5
15	2.6	6.3	5.6	6.3	7.8	7.5	4.8	6.5
16	1.5	3.6	4.9	5.5	7.0	7.5	3.9	5.3
17	6.5	6.8	4.4	4.8	6.2	6.6	3.4	5.1
18	1.1	3.1	3.7	4.3	5.8	6.1	2.9	4.2
19	0	0	3.5	3.7	5.1	4.7	2.3	3.7
20	10.3	4.6	2.1	2.7	3.8	3.1	1.2	2.0
21	0.9	0.6	4.2	3.5	4.8	5.0	1.0	3.1
22	2.8	4.1	2.4	2.6	3.5	3.2	0	3.2
23	1.2	3.0	2.2	2.4	3.2	2.9	0	2.2
24	6.9	4.9	1.9	2.3	3.7	4.0	0	1.9
25	5.0	7.7	6.3	7.4	3.8	3.2	0	1.7
26	3.0	15.4	22.6	19.8	3.9	3.5	0	3.3
27	531.3	39.6	29.0	27.8	5.4	6.2	0	7.8
28	43.9	33.4	27.0	26.2	6.7	7.2	1.0	12.0
29	35.5	27.2	22.5	22.8	8.0	9.1	5.1	13.9
30	28.9	22.3	18.3	18.0	8.5	9.8	5.4	14.5
31	24.3	18.6	13.0	14.8	8.4	7.8	4.6	13.2
Total	942	502	552	551	449	453	374	498

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

9. January, 1981

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	20.8	15.5	14.5	12.8	8.6	11.5	2.4	12.4
2	18.3	14.2	10.5	11.9	8.3	9.0	0	10.8
3	16.2	13.0	9.2	9.5	7.6	8.4	0	9.5
4	14.2	10.2	6.8	0.9	7.0	6.7	0.4	7.7
5	10.7	5.6	5.7	6.2	5.3	6.1	1.2	6.4
6	13.7	8.0	7.8	6.8	7.2	6.4	0	7.9
7	11.0	9.7	5.4	6.0	5.9	8.6	0	5.7
8	10.0	8.3	4.9	5.5	5.2	5.6	2.3	5.0
9	7.8	8.6	4.0	4.1	4.0	4.8	2.9	4.4
10	7.9	7.6	4.3	4.4	3.7	4.6	3.4	4.1
11	7.5	6.0	3.3	3.6	3.6	3.6	2.0	3.1
12	6.2	3.8	3.0	3.0	3.0	3.6	2.0	2.6
13	6.1	2.8	2.6	2.8	2.6	2.5	1.5	2.1
14	7.1	0.7	2.7	3.1	1.4	2.4	1.5	2.5
15	8.7	0	3.3	3.7	3.7	4.2	0.5	3.4
16	4.4	2.4	1.5	1.8	1.5	1.5	0.4	1.4
17	3.4	2.8	1.9	1.9	1.8	1.4	0.9	1.4
18	6.0	4.1	2.1	2.2	1.8	1.5	0.2	1.7
19	6.1	4.4	1.9	2.0	1.5	1.7	0.1	1.6
20	3.3	2.7	1.1	1.1	0.7	0.8	0.2	0.8
21	5.7	3.4	1.7	1.8	1.1	1.0	0.2	0.8
22	5.1	2.8	1.4	1.6	0.7	0.7	0.2	1.1
23	4.1	3.9	1.1	1.1	0.5	0.5	0.2	0.7
24	4.4	3.3	1.3	1.2	0.2	0.7	0	0.6
25	4.0	3.4	1.1	1.2	0	0.3	0	0.5
26	2.9	2.6	0.7	0.7	0	0.2	0	0.3
27	1.8	1.8	1.1	0.8	0	0.2	0	0.4
28	1.8	1.7	0.8	1.0	0	0.2	0	0.3
29	1.7	1.6	0.8	0.8	0.2	0.2	0	0.2
30	1.7	1.5	0.7	0.7	0.1	0.2	0	0.3
31	1.5	1.1	0.7	0.8	0.1	0.1	0	0.2
Total	224	158	108	105	87	99	23	100

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

10. February, 1981

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	2.6	1.1	0.2	0.5	0.1	0.1	0	0.2
2	2.5	2.5	0.9	0.8	0.1	0.1	0.3	0.1
3	2.7	2.7	0.3	0.6	0	0.1	0	0.2
4	2.4	2.2	0.9	0.6	0	0.1	0	0.1
5	3.2	3.2	0	0.6	0.1	0.1	0	0.1
6	2.8	2.7	0	0.5	0	0	0	0.1
7	2.4	2.0	0	0.5	0	0.1	0	0.1
8	2.9	2.5	0	0.5	0.1	0	0	0.1
9	2.7	1.5	1.5	0.5	0	0.1	0	0.1
10	2.6	1.8	1.0	0.4	0	0	0	0.1
11	2.2	1.4	0.4	0.4	0.1	0	0	0
12	2.8	1.8	0.3	0.4	0	0	0	0
13	2.4	1.6	0	0.4	0	0	0	0
14	2.4	1.6	0	0.4	0	0	0	0.1
15	2.4	1.4	0.1	0.3	0.1	0.1	0	0
16	2.3	1.5	0.4	0.3	0	0	0	0
17	1.4	0.8	0	0.2	0	0	0	0
18	2.9	2.1	0	0.4	0	0	0	0
19	2.4	3.0	0	0.3	0	0	0	0
20	2.6	3.4	0	0.3	0	0	0	0
21	2.8	3.2	0	0.5	0	0	0	0
22	3.1	3.4	0	0.9	0	0	0	0
23	3.4	3.6	0	1.6	0	0	0	0
24	4.0	3.9	0	2.2	0	0	0	0
25	4.4	4.5	4.7	2.8	0.2	0.1	0	0
26	3.7	3.3	1.6	3.0	1.6	0	0	0
27	6.9	2.9	5.5	5.9	0.1	0	0	0
28	13.1	12.8	11.2	10.2	0	0	0	0
Total	92	78	29	36	2.5	0.9	0.3	1.2

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

11. March, 1981

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	12.2	13.5	9.9	9.0	0	0	0	0
2	13.9	13.1	7.3	8.3	0.1	0	0	0
3	16.3	16.1	11.3	8.2	0	0	0	0
4	16.4	15.6	8.3	8.0	0	0	0	0
5	18.2	16.2	8.0	8.2	0	0	0	0
6	19.8	17.5	10.3	9.7	0.2	0.2	0	0
7	22.2	19.9	12.8	11.1	0	0	0	0
8	25.1	23.3	13.6	11.4	0	0	0	0
9	25.8	23.6	13.6	12.5	0	0	0	0
10	24.4	23.2	11.6	11.1	0	0	0	0.6
11	21.7	20.4	12.2	10.3	0	0	0	0.7
12	20.2	18.4	10.7	10.3	0	0	0	0.7
13	18.4	16.8	10.1	9.6	0	0	0	0.9
14	16.9	13.7	9.8	9.5	0	0	0	1.0
15	89.2	40.7	40.9	37.3	0.3	0.3	0	2.6
16	22.6	12.4	98.5	93.8	0	0	0	22.8
17	—	—	64.8	64.4	0	1.3	0	40.6
18	—	—	43.5	42.2	0	9.4	5.7	39.5
19	—	—	32.0	30.8	0	3.2	10.4	31.2
20	—	—	24.5	25.6	0	0	10.9	25.0
21	—	—	25.1	26.4	0	3.0	10.9	20.4
22	—	—	—	—	—	—	—	—
23	—	—	—	—	—	—	—	—
24	—	—	—	—	—	—	—	—
25	—	—	—	—	—	—	—	—
26	—	—	—	—	—	—	—	—
27	—	—	—	—	—	—	—	—
28	—	—	—	—	—	—	—	—
29	—	—	—	—	—	—	—	—
30	—	—	—	—	—	—	—	—
31	—	—	—	—	—	—	—	—
Total	383	304	479	458	0.5	17.4	37.9	186

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

— Not measured

12. April, 1981

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	—	—	—	—	—	—	—	—
2	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	47.6	41.7	17.6	17.8	23.5	32.9
5	—	—	38.4	34.6	19.0	17.6	26.8	34.3
6	—	—	30.3	26.5	18.3	17.3	25.6	29.7
7	—	—	23.9	21.5	16.4	15.2	21.9	24.8
8	18.8	9.1	19.7	16.7	15.0	14.1	18.9	21.1
9	21.6	15.4	16.5	14.7	13.7	13.9	16.3	17.7
10	20.4	20.9	15.0	9.6	16.6	30.7	14.7	15.2
11	31.4	28.0	28.2	18.4	15.8	18.2	14.1	17.0
12	47.5	50.5	40.5	21.8	17.2	17.9	20.3	25.1
13	9.6	10.4	35.3	19.6	16.6	20.2	24.6	28.6
14	—	—	31.4	15.9	16.4	17.3	24.0	27.8
15	—	—	35.1	17.9	18.7	16.8	24.5	29.4
16	—	—	33.5	16.3	28.6	37.8	25.7	29.8
17	42.4	48.4	60.4	27.1	49.3	28.9	38.6	49.5
18	1.3	28.2	62.2	33.9	40.5	31.7	53.2	62.8
19	—	—	44.0	23.3	78.6	134.7	44.2	47.9
20	13.1	13.0	196.0	72.5	170.6	115.3	204.9	222.3
21	—	—	105.9	44.2	64.5	59.7	106.9	111.5
22	—	—	56.8	24.2	43.2	42.4	60.9	64.6
23	—	—	38.2	23.9	32.1	31.7	41.4	44.4
24	—	—	28.2	18.2	25.1	25.5	30.2	32.9
25	18.8	18.2	22.5	13.2	20.0	21.8	23.7	25.1
26	18.6	18.0	19.7	12.1	16.5	16.9	18.2	19.6
27	18.4	17.7	23.5	14.4	13.9	14.2	14.9	16.8
28	20.8	18.6	23.1	11.1	12.1	12.8	13.0	15.5
29	22.1	22.2	20.0	12.1	10.8	11.4	11.6	14.4
30	22.7	22.8	17.4	7.5	9.9	9.8	11.1	13.2
Total	328	341	1113	613	817	812	954	1074

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

— Not measured

13. May, 1981

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	23.2	23.1	14.4	9.0	8.8	8.9	9.5	11.8
2	22.7	22.3	13.7	9.0	7.8	8.1	7.9	10.4
3	21.7	21.9	13.1	8.3	7.0	7.2	7.1	9.3
4	30.6	23.4	14.4	11.4	6.5	7.2	6.7	8.6
5	66.8	62.8	26.5	17.4	5.7	6.1	5.5	9.8
6	59.5	59.6	35.0	19.2	5.5	6.1	6.1	12.1
7	114.1	118.6	87.0	45.6	82.8	88.5	32.3	50.3
8	—	—	190.6	86.2	76.3	70.7	131.4	170.9
9	—	—	86.5	52.2	42.6	47.4	84.0	88.3
10	—	—	50.6	25.9	29.9	35.9	51.1	55.5
11	—	—	33.8	17.5	23.3	28.6	35.4	39.5
12	—	—	24.7	12.1	19.0	23.5	26.5	29.4
13	—	—	19.4	10.0	16.4	18.5	21.2	22.2
14	13.3	13.4	17.3	9.4	14.9	16.4	17.0	18.2
15	14.8	15.4	16.5	11.3	13.4	14.3	15.2	16.1
16	14.1	14.1	14.9	9.7	12.5	12.9	13.3	14.3
17	31.1	18.7	14.0	8.5	40.7	49.1	13.2	12.5
18	14.7	4.6	122.5	49.4	44.8	60.0	77.2	78.8
19	—	—	96.1	39.0	35.0	47.6	59.5	81.2
20	—	—	56.0	28.4	29.5	37.7	45.4	54.1
21	—	—	36.9	13.6	25.8	28.4	34.2	38.6
22	—	—	26.7	11.6	21.2	22.7	26.6	29.4
23	—	—	20.0	11.2	17.8	10.3	20.9	23.2
24	—	—	16.4	9.2	13.0	16.6	17.6	18.5
25	2.4	1.8	13.5	9.1	12.4	14.1	14.4	14.9
26	4.4	1.4	12.8	8.0	11.6	12.2	11.6	12.4
27	—	—	12.7	7.7	10.1	10.5	9.5	16.7
28	0.7	0.6	12.5	7.6	9.1	9.5	9.0	9.6
29	12.8	11.0	11.0	7.1	8.2	7.9	7.5	8.5
30	2.3	1.8	9.1	5.1	9.6	6.8	6.0	7.4
31	—	—	8.5	5.8	6.0	6.2	5.5	6.4
Total	449	415	1127	576	667	740	828	979

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

— Not measured

14. June, 1981

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	—	—	7.4	4.9	5.3	5.6	4.7	5.6
2	14.2	13.5	6.5	4.4	4.4	4.3	3.8	4.7
3	15.5	14.7	5.3	3.3	3.6	3.8	2.5	3.9
4	14.9	13.5	4.9	3.6	3.0	2.9	2.5	3.3
5	14.5	13.3	4.1	2.7	2.4	2.2	1.4	2.7
6	13.5	12.7	3.6	2.5	1.9	1.9	1.3	2.2
7	11.7	12.1	3.4	2.4	1.5	1.5	1.1	1.8
8	5.2	11.4	2.9	1.9	1.0	1.2	1.0	1.5
9	11.6	10.5	2.7	1.7	0.9	1.1	0.8	1.2
10	11.2	10.5	2.3	1.6	0.6	0.7	0.6	1.0
11	10.3	9.4	2.2	1.5	0.6	0.7	0.5	0.9
12	9.9	8.9	2.0	1.4	0.5	0.5	0.5	0.7
13	—	—	1.7	1.3	0.4	0.6	0.3	0.7
14	—	0.6	102.1	49.2	0.7	4.1	0.7	12.0
15	112.4	101.4	164.9	146.1	0.8	7.9	32.8	81.1
16	15.4	13.7	121.5	122.9	6.7	19.5	108.9	114.3
17	8.2	7.6	71.3	75.8	2.1	7.6	71.2	74.2
18	51.7	53.9	46.1	49.3	20.6	31.5	46.8	49.6
19	31.9	41.7	31.7	35.6	21.3	27.3	33.5	35.3
20	32.8	31.8	25.4	27.1	23.0	23.4	26.6	27.2
21	25.9	25.6	21.0	21.3	20.4	20.6	22.1	22.3
22	16.8	21.6	17.5	17.4	18.0	18.8	18.2	18.4
23	16.0	18.7	13.9	14.9	15.5	16.3	14.9	15.2
24	15.6	16.7	11.5	12.3	13.6	14.3	12.3	12.8
25	11.5	15.7	10.4	11.0	12.5	12.8	11.0	11.2
26	2.4	15.4	9.4	9.3	11.4	11.6	9.8	9.9
27	1.9	15.4	8.8	8.8	11.0	11.3	8.8	9.0
28	12.6	16.6	9.0	8.9	10.0	10.2	8.4	8.7
29	16.5	17.6	11.3	9.2	10.1	9.8	9.4	9.7
30	18.2	19.3	12.9	12.1	9.9	9.7	9.6	10.7
Total	522	564	738	664	234	284	466	552

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

— Not measured

15. July, 1981

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	20.1	22.1	13.7	12.4	10.1	10.3	10.4	11.0
2	21.7	23.9	12.1	11.7	10.1	10.1	10.1	10.4
3	23.2	25.6	10.5	10.3	9.8	9.8	8.9	9.1
4	26.7	27.1	10.9	11.0	9.1	9.1	8.9	8.4
5	29.8	29.8	14.7	14.0	9.0	8.9	8.0	9.2
6	32.2	33.5	18.2	15.9	9.4	11.4	9.4	10.6
7	34.0	36.5	17.9	16.1	9.6	9.5	10.3	11.1
8	34.2	34.9	15.6	14.7	9.8	9.5	9.9	10.9
9	32.7	32.8	13.4	13.0	9.7	9.7	9.3	10.0
10	30.3	30.3	11.4	10.5	9.2	8.8	7.9	8.8
11	27.3	27.5	9.7	9.2	8.5	8.0	6.7	7.6
12	24.7	25.4	8.6	6.2	7.7	7.1	5.6	6.3
13	23.3	23.6	7.2	7.2	7.0	6.3	3.9	5.4
14	20.5	21.2	6.3	5.9	5.6	5.0	3.1	4.2
15	6.1	5.9	4.7	5.1	4.1	4.3	4.8	4.9
16	16.8	17.6	4.7	3.3	3.5	2.9	1.6	2.6
17	15.2	16.0	4.1	3.9	2.5	2.2	1.3	2.1
18	14.1	14.4	3.6	2.5	1.9	1.6	1.0	1.7
19	12.7	13.1	3.0	2.8	1.3	1.3	0.7	1.3
20	11.6	12.0	2.7	2.6	1.1	1.1	0.7	1.1
21	10.7	10.9	2.3	2.3	0.9	0.7	0.5	0.8
22	9.9	10.1	2.1	2.1	0.8	0.7	0.8	0.8
23	9.1	9.4	2.1	1.9	0.7	0.6	0.8	0.7
24	8.3	8.9	1.7	1.8	0.7	0.6	0.1	0.6
25	8.0	8.6	1.7	1.0	0.6	0.6	0.6	0.5
26	7.6	8.0	1.3	1.6	0.5	0.6	0.3	0.6
27	7.4	7.6	1.3	0.8	0.4	0.2	0	0.4
28	7.2	7.3	1.4	1.2	0.3	0.3	0.3	0.4
29	6.9	6.9	1.2	0.8	0.3	0.2	0.5	0.4
30	6.7	6.8	1.1	1.2	0.2	0.1	0	0.4
31	6.6	6.6	1.1	1.0	0.2	0.2	0	0.3
Total	546	564	210	194	145	142	126	143

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

16. August, 1981

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	6.5	6.7	0.9	0.8	0.2	0.2	0	0.2
2	6.5	6.8	1.0	0.5	0.2	0.1	0	0.3
3	6.3	6.8	1.0	0.7	0.1	0	0	0.2
4	6.4	7.0	1.1	0.4	0.2	0	0	0.2
5	6.4	7.1	0.3	0.1	0.1	0	0	0.2
6	6.3	7.0	0	0.4	0.1	0	0	0.2
7	6.2	7.2	0	0.4	0.1	0	0	0.1
8	6.0	7.1	0	0.6	0.1	0	0	0.1
9	5.8	7.1	0	0.6	0.1	0	0	0.2
10	5.8	6.9	2.3	0.1	0.1	0	0	0
11	5.6	6.9	0.6	0.7	0	0	0	0.1
12	5.5	6.8	0.2	0.5	0.1	0	0	0.1
13	5.4	6.7	0.4	0.5	0	0	0	0.1
14	5.4	6.5	0	0.3	0	0	0	0
15	5.2	6.5	0	0.2	0.1	0	0	0
16	4.8	6.4	0	0.1	0	0	0	0.1
17	4.8	6.2	0	0.2	0	0	0	0
18	5.0	6.2	0	0	0	0	0	0
19	4.7	6.0	0	0.2	0	0	0	0
20	4.8	5.9	0	0.1	0.1	0	0	0.1
21	4.7	5.8	0	0.1	0	0	0	0.1
22	6.7	7.7	0	0.2	0	0	0	0
23	183.6	180.9	0	0.4	0	0	0	0
24	117.9	113.6	0.1	3.0	0.2	0.1	0	0.3
25	65.7	64.4	12.9	7.1	0	0	0	0
26	44.4	43.5	24.3	13.9	0.1	0	0	0
27	33.3	33.2	23.0	15.5	0	0	0	0
28	360.9	358.6	173.6	150.8	21.4	4.1	0	0.8
29	152.4	147.7	165.6	165.5	5.9	1.6	0.1	22.9
30	71.5	67.9	86.8	84.5	5.2	0.9	2.6	37.8
31	44.8	45.2	54.0	36.3	4.6	0.6	8.7	40.5
Total	1199	1202	548	485	39.0	7.6	11.4	105

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

屋外ライシメーターの浸透水量

17. September, 1981

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	35.5	35.5	36.2	26.6	4.1	0.4	12.6	33.5
2	28.4	28.8	25.8	25.1	3.6	0.4	12.0	24.6
3	24.1	24.2	19.7	21.3	3.0	0.4	10.3	18.0
4	20.2	20.6	14.9	16.2	2.6	0.4	8.1	13.1
5	18.0	18.0	11.6	11.7	2.1	0.2	6.0	9.3
6	15.8	15.6	8.9	5.4	1.6	0.4	4.3	6.7
7	13.9	13.8	7.2	1.6	1.3	0.3	2.9	4.7
8	14.5	14.7	5.8	1.1	1.0	0.4	2.1	3.6
9	54.5	42.7	12.3	8.0	1.0	0.5	1.6	2.8
10	89.1	94.3	40.2	17.5	1.3	0.4	1.2	3.7
11	69.7	69.5	48.7	14.5	6.9	0.5	1.1	6.1
12	231.5	220.3	153.2	105.5	69.1	32.1	28.5	78.8
13	137.6	151.7	138.3	135.5	31.8	51.0	98.4	117.7
14	60.7	83.5	81.9	80.9	23.1	48.4	68.4	74.9
15	53.2	57.0	52.5	49.6	19.0	38.8	45.2	50.8
16	42.6	42.6	35.9	19.5	16.3	30.5	32.5	35.9
17	31.4	33.4	25.8	20.2	14.3	24.6	24.2	26.3
18	27.3	27.3	19.5	13.8	12.3	20.2	18.0	19.5
19	22.8	22.9	15.0	13.0	10.2	16.0	13.6	14.6
20	30.0	23.7	13.9	16.5	12.8	15.2	10.0	10.8
21	52.8	52.5	37.5	36.5	15.2	14.0	8.4	11.5
22	73.0	73.0	47.5	46.2	15.7	16.2	10.2	17.3
23	55.4	56.1	37.9	38.6	16.1	17.9	12.4	20.4
24	29.1	43.8	28.2	28.5	14.1	17.4	12.7	19.8
25	37.5	36.9	21.6	24.2	10.9	18.3	11.9	17.0
26	65.0	60.0	55.3	53.4	40.6	47.9	18.8	33.1
27	125.0	132.8	114.2	82.5	26.1	66.8	74.0	88.8
28	86.9	89.1	74.2	39.6	5.6	51.3	62.1	69.6
29	63.7	63.7	48.4	44.3	23.6	38.7	41.6	47.5
30	49.2	48.8	33.7	35.2	15.5	31.1	30.6	34.0
Total	1638	1697	1266	1033	421	601	684	914

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

18. October, 1981

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	205.9	187.3	97.6	77.8	109.0	303.0	126.2	139.3
2	466.9	146.3	381.3	378.8	15.7	179.4	314.5	326.5
3	124.7	112.5	120.5	109.0	0.3	78.4	94.8	104.6
4	64.3	61.1	64.4	50.2	2.6	51.1	53.8	60.3
5	42.3	40.1	41.3	30.4	0.2	36.5	36.0	39.9
6	31.4	30.8	28.9	30.8	0	28.3	25.8	28.2
7	24.5	24.3	21.2	23.0	0	21.9	18.9	20.3
8	23.1	22.2	16.6	19.2	0	27.9	14.2	15.4
9	493.9	328.2	304.3	289.3	288.6	298.3	234.4	259.0
10	140.3	140.9	164.3	112.0	86.0	92.9	135.9	138.1
11	68.7	67.2	85.6	39.1	55.2	60.2	73.5	77.6
12	43.2	43.4	51.5	18.1	39.9	42.5	45.5	50.1
13	31.8	32.6	35.2	23.6	30.9	33.3	31.9	35.2
14	25.9	26.1	25.3	27.3	25.1	26.1	23.4	25.7
15	21.1	20.7	19.7	20.8	20.4	21.4	18.0	19.6
16	18.1	16.1	15.0	16.3	16.9	17.6	14.0	15.3
17	14.8	15.9	12.0	13.3	14.2	15.0	10.9	11.6
18	12.9	14.0	9.8	10.9	12.1	12.7	8.6	9.2
19	10.2	12.5	7.6	8.8	10.4	10.7	6.6	7.1
20	10.0	11.4	6.3	4.7	8.9	8.7	5.0	5.6
21	10.4	10.6	5.2	5.3	7.6	7.4	3.9	4.5
22	1984.5	1310.3	200.1	1034.6	934.6	972.3	500.6	332.7
23	264.3	135.3	317.8	221.0	344.4	160.0	269.4	298.2
24	87.9	87.6	105.3	85.6	73.5	72.7	87.8	100.6
25	51.3	35.4	58.1	41.6	46.8	46.5	50.9	59.2
26	35.7	30.6	37.8	35.0	33.9	34.5	34.3	31.8
27	27.1	23.3	27.1	28.0	26.7	27.3	24.5	22.3
28	22.1	18.9	20.4	21.3	22.2	22.7	18.6	16.8
29	18.4	16.0	15.9	17.1	18.0	18.5	14.4	13.1
30	16.0	13.7	12.3	13.0	14.9	15.3	11.1	10.1
31	10.9	12.1	10.1	6.3	12.9	13.2	8.8	8.8
Total	4403	3047	2319	2812	2272	2757	2316	2287

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

19. November, 1981

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1		10.7	8.5	7.5	11.4	11.4	7.0	8.2
2	7.2	9.7	7.3	6.8	10.4	10.6	5.8	6.9
3	6.1	10.0	6.7	8.3	9.3	9.3	4.8	5.9
4	7.8	9.9	8.9	11.2	9.1	8.1	4.9	6.0
5	8.6	10.1	12.5	13.3	9.1	8.1	5.3	6.7
6	11.9	12.3	15.6	15.6	11.5	11.0	6.7	8.7
7	15.2	22.3	36.7	31.0	30.2	19.1	13.9	18.4
8	27.7	51.6	53.4	45.0	42.4	28.6	27.5	32.8
9	29.5	51.5	45.2	44.0	37.0	33.9	34.6	37.6
10	29.0	41.1	33.9	30.3	31.1	31.6	30.2	31.8
11	23.6	33.8	26.0	25.1	26.4	21.8	24.3	25.4
12	17.5	28.4	20.4	21.2	22.0	22.5	20.1	21.2
13	14.5	24.8	15.4	16.5	18.6	19.6	16.1	16.8
14	13.8	21.6	13.4	13.9	15.9	16.9	13.4	13.8
15	10.5	19.3	11.3	11.9	13.9	15.2	11.0	11.5
16	9.2	17.5	9.4	5.4	12.8	13.3	9.9	9.5
17	8.5	16.3	7.8	4.2	11.2	11.4	7.7	7.8
18	8.2	14.4	6.5	1.2	9.9	10.1	6.2	6.5
19	7.4	13.2	5.9	1.6	9.0	9.5	5.4	5.7
20	8.0	12.4	5.3	1.1	8.4	8.7	4.9	5.4
21	6.9	11.4	4.3	2.1	7.5	7.5	3.6	5.1
22	5.7	10.5	3.8	0.7	6.6	6.3	3.0	3.5
23	5.3	9.8	3.6	0	6.0	6.3	2.5	2.7
24	6.0	9.3	3.3	0.1	5.5	5.7	2.3	2.4
25	6.5	8.8	2.7	0.1	4.9	4.4	1.6	2.0
26	5.7	8.2	2.4	4.2	4.4	4.3	1.4	2.0
27	6.2	8.2	2.1	2.2	3.8	3.6	1.1	1.7
28	8.0	12.4	2.3	3.3	3.7	3.2	1.0	1.4
29	11.5	15.1	9.8	9.8	3.6	3.2	0.7	1.8
30	19.9	20.2	20.4	15.8	4.0	4.1	1.4	3.0
Total	346	545	405	353	400	369	278	312

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

20. December, 1981

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	21.9	26.8	23.1	18.8	4.9	5.3	3.5	6.0
2	20.9	27.5	21.1	18.7	5.3	6.3	5.2	8.2
3	17.1	25.4	18.6	16.3	5.9	7.7	6.3	9.5
4	13.6	22.5	16.2	14.9	6.5	8.8	6.8	10.2
5	11.6	19.6	14.0	12.8	6.9	9.3	7.0	10.4
6	11.7	17.6	12.0	11.1	6.9	9.0	6.8	9.6
7	10.4	16.1	10.3	9.6	6.8	8.5	6.2	8.2
8	9.1	14.7	8.9	8.3	6.5	8.0	5.5	7.5
9	6.1	13.4	7.9	7.4	6.3	7.4	4.9	6.5
10	7.3	12.3	6.8	6.6	5.7	6.6	4.1	5.0
11	7.0	11.3	6.0	5.8	5.4	6.2	3.7	4.7
12	1.6	10.5	5.3	5.1	9.5	5.8	3.2	4.2
13	4.3	9.8	4.5	4.5	4.0	4.8	2.6	3.6
14	2.0	9.4	4.1	4.1	3.8	4.3	2.2	3.3
15	2.7	8.1	3.6	3.5	3.2	3.0	1.4	2.9
16	4.3	8.6	3.1	3.0	2.8	4.8	0.9	2.5
17	4.2	7.6	2.8	2.8	2.6	2.9	0.4	2.2
18	4.0	7.2	2.3	2.5	2.3	2.5	0	2.0
19	3.6	6.8	2.4	2.3	2.0	2.5	0.8	1.7
20	5.0	6.7	2.1	2.3	1.9	2.0	1.0	1.5
21	4.7	6.3	1.7	1.9	1.6	1.6	1.1	1.3
22	4.2	6.1	1.6	1.7	1.3	1.4	0.6	1.0
23	4.2	5.7	1.4	1.6	1.1	1.3	0.5	0.9
24	3.9	5.6	1.4	1.4	0.9	1.1	1.0	0.8
25	3.8	5.2	1.2	1.2	0.7	0.9	0.1	0.7
26	4.1	5.1	1.1	1.2	0.7	0.7	0.7	0.5
27	3.9	4.8	1.0	1.1	0.4	0.7	0.3	0.5
28	2.8	4.7	1.0	1.1	0.4	0.8	0.4	0.4
29	3.4	4.5	0.8	1.0	0.4	0.7	0.2	0.3
30	2.8	4.4	1.1	1.1	0.4	0.7	0.3	0.3
31	2.6	4.2	0.6	0.9	0.3	0.4	0.1	0.4
Total	209	339	188	175	107	126	77.8	117

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

屋外ライシメーターの浸透水量

21. January, 1982

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	2.1	4.0	0.6	0.8	0.3	0.4	0.4	0.2
2	2.9	3.8	0.6	0.7	0.2	0.3	0	0.2
3	3.3	3.8	0.5	1.0	0.6	0.3	0.1	0.2
4	3.1	3.6	0.7	0.7	0.2	0.4	0.1	0.2
5	6.4	5.8	0.4	0.7	0.1	0.3	0	0.1
6	9.5	7.2	0.4	1.4	0	0.1	0	0.1
7	8.8	7.1	1.5	4.3	0.2	0.1	0.1	0.1
8	9.1	18.1	9.6	9.2	0.1	0.1	0.2	0.1
9	5.0	20.8	11.9	10.5	0.1	0.1	0	0.1
10	0	21.4	13.1	11.3	0	0	0	0
11	12.9	20.5	12.7	11.3	0	0.1	0	0.2
12	13.6	18.8	11.8	10.8	0.1	0.1	0	0.3
13	11.3	17.0	10.5	10.0	0	0.1	0	0.5
14	11.0	15.5	9.0	8.8	0.1	0.2	0	0.7
15	11.7	14.3	8.3	7.9	0	0.2	0	0.8
16	13.7	13.0	7.2	7.0	0.2	0.4	0	0.8
17	8.0	8.6	4.5	6.1	0	0.4	0.1	0.5
18	14.0	14.3	7.4	5.5	0.2	1.5	0.2	1.2
19	9.7	10.2	5.1	5.0	0.2	1.3	0.2	0.8
20	6.5	7.6	3.6	3.9	0.2	1.4	0	0.7
21	9.0	10.8	4.5	4.3	0.3	1.9	0.1	1.0
22	5.8	8.6	3.5	3.5	0.2	2.6	0	0.8
23	8.1	8.2	2.9	3.3	0.5	1.8	0	0.8
24	8.3	7.6	2.9	3.2	0.3	1.4	0	0.8
25	8.1	7.2	2.5	2.7	0.2	1.2	0	0.7
26	7.6	6.8	2.4	2.4	0.1	1.6	0	0.6
27	6.8	6.4	2.1	2.2	0.7	1.3	0	0.8
28	5.4	5.3	1.6	1.8	0.1	0.8	0	0.4
29	5.3	5.0	1.4	1.6	0.1	0.4	0	0.4
30	6.0	5.7	1.7	1.6	0.1	0.7	0.6	0.6
31	6.1	5.7	2.2	1.9	0.4	1.3	0.5	0.7
Total	239	313	147	145	5.8	22.8	2.6	15.4

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

22. February, 1982

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	5.5	5.2	0.8	1.3	0.1	0.6	0	0.3
2	1.6	3.3	1.3	0.9	0	0.4	0	0.2
3	7.5	3.7	1.3	1.4	0.1	0.4	0	0.4
4	5.0	4.1	1.0	1.1	0.1	0.5	0.2	0.3
5	3.8	4.1	1.0	1.0	0.2	0.4	0.1	0.2
6	2.9	5.3	1.2	1.2	0.1	0.4	0	0.2
7	3.0	3.6	0.7	1.0	0.1	0.3	0	0.7
8	4.4	4.0	1.3	0.7	0.2	0.3	0.2	0.2
9	5.6	3.9	1.2	1.1	0.1	0.2	0	0.2
10	4.1	3.9	0.5	0.8	0	0.1	0	0.1
11	4.6	4.0	0.6	0.8	0	0.3	0	0
12	4.4	3.9	0.8	0.8	0.1	0.2	0	0.2
13	4.3	3.6	0.5	0.8	0	0.3	0	0.1
14	4.2	3.6	0.7	0.7	0	0	0	0
15	2.9	3.6	0.8	0.8	0	0.1	0	0.1
16	2.1	3.4	0.6	0.7	0	0	0	0
17	2.0	3.4	0.4	0.7	0	0	0	0.1
18	2.1	3.3	0.8	0.6	0	0	0	0
19	1.7	3.4	0.2	0.7	0	0	0	0
20	2.0	3.4	0.5	0.7	0	0	0	0.1
21	2.0	3.4	0.8	0.6	0	0	0	0
22	2.0	3.9	0.6	0.6	0	0	0	0
23	2.7	4.4	0.4	0.7	0	0	0	0.1
24	3.3	4.9	0.8	1.5	0.1	0	0	0.1
25	3.8	5.4	1.1	2.2	0	0	0	0
26	4.1	6.1	1.8	3.2	0.1	0	0	0
27	5.3	7.0	2.9	3.9	0	0	0	0
28	6.9	8.4	3.8	4.3	0	0	0	0.1
Total	104	120	28.4	34.8	1.3	4.5	0.5	3.7

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

23. March, 1982

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	6.8	10.1	4.1	4.6	0	0	0	0
2	38.4	33.3	7.0	8.7	0	0	0	0
3	79.7	89.2	27.3	21.8	0	0	0	0
4	52.6	68.4	37.9	30.9	0	0	0	0
5	54.7	49.8	36.2	31.5	0	0	0	0.3
6	38.1	32.6	24.9	23.9	0	0	0	1.2
7	35.7	30.9	27.9	26.5	0	0	0	2.2
8	28.8	26.6	32.7	30.5	0	0	0	3.9
9	25.2	23.6	32.5	30.0	0	0	0	7.1
10	24.6	22.2	27.8	26.2	0	0	0	10.8
11	25.2	22.0	23.8	22.4	0	0	0	13.4
12	7.9	22.0	20.1	19.4	0	0	0	14.6
13	23.5	21.3	16.8	16.3	0	0	0	13.6
14	23.4	20.6	14.4	14.4	0	0.2	0	12.0
15	22.4	19.5	13.7	13.3	0	3.3	0	10.7
16	8.3	18.6	12.6	12.7	0	6.6	0	9.7
17	0.6	17.4	11.9	11.7	0	7.3	0	8.7
18	6.7	16.7	11.2	11.0	0.2	7.5	2.4	8.1
19	12.9	15.9	10.6	10.3	0	7.4	1.7	7.4
20	16.5	15.2	10.0	9.6	0	6.8	1.7	7.0
21	19.0	16.4	9.7	9.6	0	7.6	2.1	6.5
22	41.3	34.3	20.0	17.5	0.1	7.2	2.0	7.2
23	56.3	62.3	35.2	28.4	0.7	7.6	2.8	11.4
24	44.1	54.0	35.3	30.9	1.1	8.3	4.1	15.7
25	30.2	42.7	29.6	27.4	1.5	9.4	5.6	18.0
26	21.7	34.1	23.8	23.0	2.2	10.6	6.5	17.7
27	19.0	28.5	19.4	19.3	2.8	11.1	6.7	15.8
28	19.6	24.1	15.9	16.1	3.3	11.0	6.7	13.5
29	15.2	20.8	13.4	13.5	3.4	10.3	6.1	11.4
30	10.9	18.5	11.5	11.5	3.6	10.2	5.7	9.7
31	12.2	16.4	9.4	9.8	3.6	8.3	4.9	8.1
Total	822	928	627	583	22.5	141	59.0	266

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

24. April, 1982

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	10.6	14.8	8.0	8.4	3.4	7.2	4.2	6.8
2	12.7	12.3	8.3	9.9	2.8	6.2	3.3	5.3
3	9.1	12.2	6.1	6.5	2.9	5.3	2.9	4.8
4	9.5	11.0	5.2	5.6	2.5	4.3	2.4	4.0
5	2.0	10.2	5.1	5.2	2.5	4.1	1.9	3.4
6	1.3	9.4	4.6	4.7	1.9	3.6	1.6	3.0
7	5.5	8.8	4.0	4.4	1.7	3.0	1.4	2.7
8	6.9	8.3	3.7	4.0	1.6	2.3	1.2	2.4
9	1.7	8.1	3.6	3.9	1.6	4.2	1.0	2.1
10	6.3	7.6	3.3	3.8	1.3	2.1	0.9	1.8
11	2.0	7.2	3.8	4.2	0.9	1.4	0.8	1.6
12	5.5	7.0	4.2	4.6	0.8	1.7	0.9	1.6
13	4.9	7.0	4.5	4.6	0.7	1.3	0.7	1.5
14	1.1	6.7	4.5	4.7	0.7	1.2	0.7	1.4
15	235.9	443.9	220.3	177.6	109.5	144.9	38.6	110.6
16	37.9	187.1	253.0	236.3	75.4	91.3	179.4	205.1
17	0	71.7	103.1	95.0	43.7	54.0	86.7	92.3
18	0	45.8	60.5	57.7	31.5	39.5	51.3	57.8
19	0	32.9	40.9	39.7	24.4	30.9	36.5	40.5
20	0.1	25.7	29.7	30.5	19.9	25.4	27.2	29.9
21	0	20.9	22.7	23.4	16.6	20.3	20.7	22.9
22	0	24.8	26.5	25.8	14.9	20.7	16.3	18.4
23	0	62.9	60.7	52.9	15.1	19.7	14.6	23.7
24	5.3	68.1	59.0	52.5	16.5	21.4	19.7	32.3
25	34.8	50.7	43.1	40.8	17.4	23.0	21.7	32.3
26	33.5	39.6	31.6	31.7	17.0	22.3	20.3	27.4
27	36.4	32.5	24.5	24.8	15.7	20.2	17.7	22.4
28	30.2	27.3	19.9	19.8	14.3	18.4	15.1	18.3
29	25.8	23.5	16.6	16.3	12.7	16.0	12.9	14.8
30	17.4	20.5	13.0	13.9	11.1	13.7	10.2	12.8
Total	536	1309	1094	1013	481	630	613	804

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

25. May, 1982

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	19.0	18.0	11.4	11.7	9.9	11.9	8.4	10.1
2	16.3	15.9	9.7	10.0	8.7	10.3	7.0	8.2
3	8.5	14.3	8.4	8.7	7.6	8.5	5.4	6.8
4	—	13.8	7.3	8.3	6.6	6.7	4.5	5.7
5	—	13.1	9.7	10.9	5.8	6.2	3.3	4.9
6	—	13.5	13.1	13.3	5.3	5.9	2.9	4.6
7	—	16.9	15.7	15.2	5.0	5.9	3.4	4.6
8	—	30.8	23.5	22.8	8.0	5.7	2.5	4.8
9	—	52.3	31.6	28.6	4.4	5.6	3.3	5.9
10	—	49.3	28.7	27.8	4.5	6.1	3.4	7.4
11	—	40.2	24.1	24.4	4.4	6.4	4.0	8.2
12	—	33.5	19.7	20.3	4.6	6.8	4.6	8.4
13	—	28.9	15.8	17.3	4.5	7.1	3.9	7.9
14	27.1	25.4	12.7	13.5	4.1	5.4	3.3	6.7
15	25.6	24.2	10.8	12.7	3.8	5.3	2.6	5.5
16	24.3	24.8	12.3	14.4	3.4	5.0	2.3	4.6
17	22.7	26.5	14.0	15.4	3.0	4.4	1.6	4.1
18	22.3	27.2	13.5	14.8	2.8	3.8	1.6	3.7
19	23.6	26.3	11.1	13.4	2.4	3.0	1.0	3.3
20	50.5	37.0	11.2	12.9	2.0	3.0	1.5	2.9
21	7.6	105.3	88.6	29.8	4.8	3.2	0.9	2.6
22	88.2	78.6	43.4	43.5	1.7	2.5	1.0	2.6
23	50.3	54.7	36.5	39.4	1.5	2.8	0.6	3.2
24	37.6	41.1	27.8	31.1	1.6	3.0	0.6	4.0
25	26.3	32.9	21.3	24.9	1.6	3.3	0.4	4.1
26	24.2	27.5	16.9	19.8	1.8	3.7	0.6	4.2
27	23.3	23.6	13.1	15.8	1.5	3.4	0.5	3.6
28	19.5	21.2	10.8	13.1	1.3	2.9	0.2	3.0
29	17.4	18.8	8.5	10.9	1.1	2.4	0.4	2.6
30	15.8	16.7	7.3	9.1	1.0	1.8	0.1	2.2
31	14.8	15.1	6.0	7.7	0.7	1.3	0	1.7
Total	565	967	585	562	119	153	75.8	152

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

— Not measured

26. June, 1982

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	26.5	21.7	6.5	10.1	0.7	1.8	0	1.4
2	67.3	62.6	23.4	26.9	0.7	1.1	0.4	1.2
3	91.2	82.9	78.5	79.1	0.5	5.4	0.2	6.3
4	242.2	217.9	224.0	220.8	9.7	18.7	0.9	146.8
5	125.0	113.5	111.1	110.8	30.0	24.0	17.9	97.6
6	78.9	71.8	67.8	68.0	32.0	28.3	47.2	63.7
7	57.0	51.6	46.0	46.1	27.6	28.5	39.9	44.6
8	43.5	39.8	32.1	34.0	22.7	25.3	29.6	32.6
9	34.7	32.0	24.2	25.9	18.8	21.7	22.8	24.4
10	28.4	26.4	18.3	20.3	16.1	18.8	17.7	18.9
11	21.5	22.8	15.2	16.6	13.8	15.9	14.4	14.8
12	19.3	19.5	11.9	13.8	11.8	13.7	10.9	11.7
13	18.1	17.1	9.5	11.4	10.2	11.0	8.3	9.2
14	20.1	19.2	9.1	11.4	8.5	10.3	6.9	7.0
15	58.0	47.7	28.2	33.0	7.5	8.7	4.8	6.7
16	86.6	79.2	50.1	49.5	7.4	8.2	5.2	10.5
17	62.9	59.4	43.1	42.5	7.4	8.9	7.5	14.0
18	49.4	43.7	31.9	32.4	7.9	9.9	8.9	15.2
19	38.6	34.6	24.4	25.2	8.2	10.4	9.6	14.4
20	27.6	30.2	20.0	21.2	8.2	12.6	8.7	12.7
21	112.9	94.5	56.0	45.2	10.9	15.0	10.8	17.1
22	113.1	104.1	76.6	66.7	18.1	20.9	22.4	33.3
23	72.1	65.4	52.6	51.9	21.0	24.4	30.9	38.3
24	52.2	46.1	37.0	37.4	19.8	24.5	28.3	31.3
25	39.3	35.9	28.1	30.3	17.2	20.6	21.6	24.0
26	31.6	29.1	27.6	28.0	23.5	41.0	18.5	20.8
27	157.4	139.5	97.8	81.6	117.3	113.3	65.0	79.6
28	156.8	133.3	118.1	113.6	64.7	72.4	103.4	106.2
29	86.0	77.1	66.5	19.4	42.0	50.0	62.1	84.2
30	55.2	52.3	45.7	47.0	31.5	37.5	41.9	43.5
Total	2073	1871	1481	1420	616	703	667	1032

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

27. July, 1982

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	40.0	38.9	31.5	34.0	24.4	29.4	29.1	31.1
2	33.1	30.8	23.8	25.5	19.2	22.9	21.6	22.6
3	26.6	25.3	17.4	19.6	15.3	18.7	15.5	16.7
4	26.6	25.5	17.4	19.6	15.3	18.7	15.5	16.7
5	19.2	18.5	10.4	12.4	10.1	11.9	8.1	9.1
6	16.6	16.5	8.7	10.1	8.4	9.5	5.3	6.8
7	31.0	24.0	8.4	11.1	7.3	22.2	4.1	5.0
8	124.8	96.1	45.0	40.4	6.4	15.6	2.6	4.4
9	93.2	80.0	66.1	59.7	6.5	12.3	2.4	7.4
10	1.4	54.2	47.5	48.5	6.8	11.3	3.9	11.8
11	45.5	40.7	34.0	36.3	6.7	10.5	5.5	14.3
12	35.6	32.5	24.6	27.7	6.5	9.8	6.5	14.3
13	29.2	26.7	18.9	21.5	6.1	8.7	6.7	12.7
14	24.7	22.6	13.8	17.0	5.5	7.8	5.8	10.7
15	21.0	19.6	18.9	13.6	4.7	6.5	4.5	8.5
16	18.0	17.2	8.3	11.0	3.9	5.0	3.2	6.8
17	16.6	15.8	6.8	8.9	5.0	4.6	2.5	5.2
18	15.9	15.1	5.9	9.7	2.2	3.3	1.8	4.2
19	17.9	13.7	8.4	13.3	1.8	2.4	1.4	3.5
20	21.1	14.8	12.6	18.7	1.2	2.0	1.2	3.6
21	30.3	16.8	23.4	27.9	1.0	1.6	1.1	5.1
22	43.8	21.2	26.2	29.8	0.9	1.8	1.0	8.9
23	44.9	25.4	22.0	26.1	0.7	1.7	1.1	12.2
24	39.2	26.2	16.2	21.3	0.5	1.5	0.8	12.5
25	40.1	26.9	12.4	17.1	10.5	51.7	1.0	11.3
26	695.0	556.8	464.4	450.3	266.1	311.7	281.3	120.3
27	139.4	126.1	154.1	160.9	68.9	81.8	—	137.1
28	67.5	58.5	74.6	82.1	38.0	46.7	—	72.8
29	44.0	37.7	45.7	51.8	27.5	34.1	—	46.2
30	35.0	29.3	31.4	36.6	43.7	71.7	—	32.1
31	83.9	39.3	80.3	72.4	89.1	88.1	—	60.1
Total	1921	1593	1379	1435	710	926	434	734

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

— Not measured

28. August, 1982

(l/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	360.1	316.3	330.5	293.9	305.3	174.5	—	374.2
2	371.6	315.2	307.4	319.6	144.0	101.3	—	252.3
3	67.5	58.5	74.6	82.1	38.0	46.7	—	72.8
4	100.2	73.1	131.1	135.0	106.1	114.5	—	123.6
5	3.3	76.8	7.3	77.3	61.6	76.0	—	60.2
6	74.2	55.6	36.0	46.6	41.3	45.2	—	43.5
7	52.5	39.2	21.5	29.8	30.0	33.5	—	30.4
8	38.0	27.9	13.9	20.1	22.8	25.7	—	22.4
9	28.7	20.9	7.8	13.1	17.5	10.8	—	16.8
10	22.8	16.0	5.0	8.0	13.4	13.7	—	12.9
11	19.1	12.4	2.9	4.4	10.3	10.1	—	9.8
12	16.4	9.9	1.5	2.8	7.6	6.6	—	7.4
13	14.5	8.2	1.2	2.0	5.7	4.3	—	5.5
14	13.0	6.5	1.1	1.8	3.8	2.8	—	4.0
15	11.5	5.4	8.5	1.4	2.5	1.7	7.7	2.6
16	10.8	4.7	0.6	1.2	1.5	1.0	1.5	1.7
17	9.9	4.0	0.5	1.1	1.0	0.9	0.9	1.2
18	9.1	3.4	0.5	1.0	0.7	0.6	0.8	0.9
19	8.4	3.1	0	0.8	0.4	0.5	0.7	0.6
20	7.9	3.0	0	0.8	0.1	0.3	0.3	0.4
21	7.5	2.8	0.1	0.7	0.2	0.3	0.3	0.4
22	7.1	2.8	0	0.5	0.1	0.1	0.3	0.2
23	6.7	2.7	0.1	0.5	0.3	0.1	0	0.2
24	6.4	2.6	0	0.4	0.1	0	0	0.1
25	6.2	2.5	0	0.3	0.1	0	0	0
26	7.1	2.6	0	0.2	1.7	1.5	0	0
27	20.7	4.0	0	0.3	0.5	0.8	0.1	0.1
28	38.0	4.8	0	0.1	0.2	0.4	0	0
29	47.7	4.7	0	0.2	0.1	0	0	0.7
30	42.9	5.1	0	0.1	0.1	0	0	0.1
31	34.9	5.7	0	0.1	0.2	0.1	0	0
Total	1465	1145	952	1046	817	674	13.1	1045

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

— Not measured

29. September, 1982

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	28.4	5.9	0	0.1	0.1	0	0	0
2	23.8	6.2	0	0.1	0.1	0	0	0
3	20.4	6.3	0	0	0	0	0	0
4	17.8	6.4	0	0.1	0.1	0	0	0
5	15.5	6.0	0.1	0	0.2	0	0	0
6	13.8	5.8	0	0	0	0	0	0
7	12.6	5.6	0	0	0.1	0	0	0
8	11.5	5.3	0	0.1	0	0	0	0.1
9	10.5	4.8	0	0	0	0	0	0
10	10.9	5.6	0	0	0	0	0	0
11	243.6	159.3	0	0	41.0	32.0	0	0
12	2249.8	1363.3	1490.7	1725.8	615.4	1211.5	1526.1	1491.8
13	161.2	130.4	201.9	6.7	521.7	105.3	179.7	179.7
14	70.3	54.8	85.7	—	78.7	49.1	81.7	81.9
15	45.1	35.5	49.9	—	45.4	33.7	49.2	49.1
16	34.1	25.2	37.1	—	42.4	25.6	33.3	33.8
17	27.4	18.8	31.6	—	36.4	20.9	26.6	27.0
18	22.4	14.7	25.9	—	28.6	18.0	22.2	22.6
19	19.7	12.3	21.7	—	31.1	33.6	18.3	18.7
20	116.1	50.6	72.2	1.5	149.9	130.5	45.8	56.4
21	163.5	120.7	129.5	4.7	79.3	79.8	112.7	116.1
22	88.3	71.2	76.5	8.7	48.3	49.4	71.2	71.4
23	60.7	49.4	49.6	3.7	60.8	65.8	48.3	48.3
24	96.2	74.3	125.4	10.8	128.6	133.8	119.5	120.2
25	987.7	709.9	788.7	—	746.7	676.1	772.2	744.4
26	134.7	113.3	187.1	—	125.5	111.5	163.8	155.4
27	69.0	58.1	88.1	0.9	60.7	60.7	78.9	79.0
28	48.1	38.5	51.4	53.6	40.1	40.4	47.0	47.0
29	35.2	27.1	33.4	34.5	29.4	29.3	30.2	30.0
30	27.2	20.7	23.3	26.2	22.4	21.6	21.1	20.6
Total	4866	3206	3570	1878	2935	2929	3448	3394

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

— Not measured

30. October, 1982

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	21.8	16.1	16.9	19.7	17.8	16.2	15.4	11.9
2	19.3	14.0	12.5	15.5	37.2	40.2	10.8	9.2
3	50.9	19.5	33.9	32.7	44.5	39.9	10.5	14.1
4	94.4	27.6	57.5	49.3	40.4	39.6	30.0	28.4
5	69.0	38.8	43.2	42.2	31.8	32.0	33.8	31.4
6	50.0	35.3	31.1	10.0	26.0	26.1	27.2	21.4
7	38.1	27.1	22.9	11.8	21.4	21.7	22.1	18.5
8	214.6	180.6	172.7	45.4	359.3	463.7	120.4	226.6
9	556.3	468.9	491.3	—	324.3	274.5	289.9	395.8
10	155.3	131.3	142.1	—	84.3	86.3	87.6	115.9
11	70.9	62.2	75.9	1.4	18.2	19.8	15.3	8.9
12	44.4	38.1	53.5	—	38.4	39.4	44.0	44.1
13	32.7	27.1	45.7	19.5	33.6	33.1	39.7	32.7
14	26.1	20.9	35.7	35.6	29.8	28.6	32.7	24.8
15	22.2	47.2	27.6	27.5	25.5	25.1	25.9	19.2
16	16.7	12.4	17.1	17.9	18.2	17.9	17.0	11.9
17	18.4	13.3	15.8	15.8	18.2	19.8	15.3	8.9
18	17.6	12.5	12.4	12.7	15.6	16.8	11.9	6.8
19	35.6	18.6	10.0	10.8	116.7	136.0	9.8	5.8
20	380.9	281.7	196.9	160.3	140.2	144.9	180.3	130.9
21	118.5	105.4	121.5	16.4	60.4	69.7	108.3	94.6
22	58.0	56.2	67.6	31.8	40.9	46.9	63.0	57.6
23	37.8	37.0	43.6	31.3	31.2	36.2	43.5	39.9
24	28.4	28.3	30.4	33.3	25.2	29.1	30.3	28.0
25	22.4	22.4	22.4	25.1	21.0	24.3	16.5	21.2
26	18.4	18.2	17.3	19.5	17.6	20.2	13.3	16.5
27	15.5	15.5	13.9	15.6	15.1	17.4	12.3	13.4
28	13.6	13.6	11.3	12.9	13.0	15.2	12.8	11.3
29	11.9	11.8	9.3	10.8	11.6	13.0	10.4	10.2
30	11.1	10.9	7.9	9.1	10.3	11.5	8.9	8.5
31	9.8	9.7	6.6	7.7	9.1	10.0	7.1	6.2
Total	2281	1822	1867	742	1697	1815	1366	1475

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

— Not measured

31. November, 1982

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	9.1	9.1	5.7	6.6	8.1	8.6	5.9	5.3
2	8.8	8.4	4.6	5.6	7.1	6.7	3.6	3.9
3	8.1	7.6	4.3	4.9	6.3	6.7	3.8	3.5
4	7.4	7.2	3.7	4.2	5.6	5.9	3.3	3.3
5	8.7	8.2	3.2	4.0	7.5	10.3	2.7	2.7
6	12.0	9.3	4.3	6.6	5.7	6.7	2.1	2.6
7	127.5	121.5	69.4	48.8	146.0	147.7	15.4	22.3
8	230.7	213.1	206.9	180.0	49.7	76.1	143.4	130.2
9	99.2	93.4	99.8	71.7	36.7	51.5	89.1	74.6
10	61.3	62.2	91.4	87.1	208.8	228.4	88.0	76.5
11	210.4	198.8	272.2	142.5	161.2	172.9	224.4	196.8
12	141.2	130.4	128.2	—	67.9	78.1	30.1	95.9
13	81.4	77.2	73.6	—	43.9	31.2	11.8	58.3
14	54.1	53.5	48.0	—	33.6	38.4	4.8	38.4
15	39.0	38.9	34.3	—	27.4	31.3	1.1	28.9
16	29.9	29.9	25.6	20.7	22.9	26.7	4.9	24.1
17	23.5	23.5	19.8	17.0	19.6	22.3	0.7	17.4
18	19.5	19.6	16.2	14.0	16.9	19.5	1.2	14.1
19	16.5	16.5	14.3	11.3	15.1	17.2	1.7	12.0
20	14.4	14.4	13.0	10.0	13.8	15.4	2.4	4.4
21	12.9	12.9	11.9	9.9	12.9	13.9	2.8	0.3
22	11.6	11.6	11.0	8.4	12.0	13.4	3.1	0.3
23	10.7	10.7	9.9	8.0	11.4	12.3	1.6	0.1
24	9.7	9.8	8.4	6.5	10.3	11.0	2.6	6.2
25	9.0	9.1	7.3	5.6	9.2	10.1	0.9	5.9
26	8.8	8.5	6.3	4.7	8.5	9.5	0.8	5.4
27	8.7	7.9	5.4	4.1	7.7	8.8	0.9	4.5
28	7.6	7.4	4.7	3.4	6.9	7.7	0.5	3.9
29	6.9	7.1	4.5	3.1	6.6	9.9	1.4	3.4
30	49.5	148.1	13.5	11.5	71.4	78.6	1.1	3.9
Total	1338	1376	1221	700	1061	1177	656	849

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

— Not measured

32. December, 1982

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	122.8	120.2	89.8	57.2	25.8	28.8	1.1	1.1
2	63.0	62.0	75.2	56.7	21.2	24.7	5.2	31.6
3	41.3	41.3	50.8	39.6	17.9	20.8	7.0	41.1
4	30.1	30.1	36.5	24.8	15.8	19.5	4.7	32.6
5	23.9	23.9	27.9	18.0	14.1	18.0	23.8	25.1
6	19.7	19.7	21.3	11.0	12.4	15.6	6.5	20.9
7	16.8	16.8	17.5	8.3	11.7	14.7	2.9	17.6
8	14.5	14.5	15.0	7.5	10.7	13.7	2.2	15.0
9	12.8	12.8	13.2	5.9	10.3	12.4	12.6	14.1
10	11.2	11.2	11.6	5.2	9.6	11.9	12.5	11.8
11	10.4	10.4	10.7	5.2	9.6	11.8	11.9	10.4
12	9.4	9.5	8.8	5.0	9.1	10.0	10.1	9.2
13	8.7	8.7	7.7	4.3	8.2	9.0	9.0	8.8
14	8.1	8.1	6.7	4.3	7.7	8.9	8.0	7.7
15	7.6	7.6	6.0	3.5	7.4	8.4	7.1	6.2
16	7.3	7.3	5.3	2.9	7.0	8.4	6.4	6.0
17	6.9	6.9	4.8	3.0	6.8	7.4	5.8	5.5
18	6.7	6.7	4.3	1.7	6.1	7.1	4.9	3.5
19	6.2	6.4	3.5	1.0	5.7	6.2	4.2	3.6
20	6.1	6.2	3.3	1.2	5.4	6.0	3.8	3.4
21	5.9	6.1	3.0	0.6	5.4	6.2	3.5	3.5
22	5.6	5.9	2.6	1.6	5.1	5.1	3.2	3.2
23	5.3	5.7	2.3	0.7	4.7	4.8	2.5	2.8
24	5.2	5.5	2.2	0.3	4.2	4.5	2.4	2.5
25	5.0	5.4	2.1	0.5	4.1	4.4	2.0	2.2
26	5.0	5.2	2.0	0.4	3.8	3.8	1.8	2.1
27	4.9	5.1	2.0	0.2	3.6	3.7	1.7	1.9
28	4.7	4.9	2.2	0.9	3.5	3.6	1.6	1.2
29	4.8	5.0	2.5	0.4	3.4	3.4	1.7	1.1
30	4.6	4.8	3.1	0.8	3.5	3.5	1.6	0.3
31	4.6	4.7	3.5	0.3	3.6	3.7	1.6	1.4
Total	489	489	447	273	267	310	173	297

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

屋外ライシメーターの浸透水量

33. January, 1983

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	4.2	4.3	3.3	0.6	3.4	3.1	1.8	1.8
2	4.3	4.6	6.7	1.5	3.5	7.1	1.8	2.0
3	3.9	3.5	3.3	1.0	2.8	5.8	1.4	1.8
4	5.6	5.5	4.6	1.0	4.3	8.4	2.7	2.0
5	4.5	4.5	3.6	0.4	3.6	4.5	1.8	2.1
6	4.5	4.5	3.1	2.0	3.5	4.0	1.7	2.0
7	4.6	4.6	2.9	0.5	3.5	3.7	1.6	1.8
8	4.8	4.8	2.6	0.7	3.5	3.6	1.4	1.3
9	5.0	5.0	2.5	0.5	3.1	3.2	1.2	1.6
10	4.9	5.1	2.6	1.5	3.1	3.1	1.2	1.7
11	4.2	4.5	2.0	0.4	2.5	2.4	0.9	1.3
12	6.0	6.1	4.4	2.1	3.1	3.6	1.3	1.7
13	5.3	5.5	3.6	0.4	3.0	3.5	1.3	1.6
14	3.9	4.3	2.7	1.8	2.2	2.3	0.6	1.1
15	6.9	7.0	4.4	0.9	3.3	1.7	1.4	1.7
16	5.7	5.5	3.2	0.2	2.6	1.5	0.8	0.7
17	6.2	6.0	3.2	0.9	2.6	5.6	1.4	0.3
18	6.1	6.0	2.3	1.1	2.7	2.8	0.9	1.0
19	6.0	6.3	2.9	0.2	2.4	2.7	1.0	0.6
20	6.5	6.6	2.2	0	2.3	2.3	0.7	1.2
21	5.7	6.0	2.1	0	2.1	1.9	0.4	0.8
22	4.6	5.0	2.1	0.4	1.4	1.1	0.7	0.5
23	4.8	1.1	3.0	0.4	1.6	0.5	0.6	0.2
24	9.4	1.2	5.3	0.7	2.5	1.2	0.6	0.4
25	10.0	8.0	4.8	0.9	2.6	2.4	0.7	0.6
26	10.0	9.9	4.0	0.1	2.0	1.5	0.8	0.6
27	11.1	10.6	3.8	1.7	1.9	1.6	0.8	0.6
28	12.0	10.9	3.5	0.2	1.8	1.2	0.7	0.9
29	12.0	10.8	3.4	0.8	1.7	1.4	0.5	0.9
30	12.5	10.9	3.0	1.8	1.9	1.3	0.6	0.5
31	12.2	10.5	2.6	1.0	1.5	1.1	0.5	0.7
Total	207	189	104	26.6	82.0	90.1	33.8	36.0

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

34. February, 1983

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	11.9	10.2	2.5	0.4	1.5	1.1	0.4	0.3
2	11.4	9.8	2.2	0.6	1.4	0.9	0.4	0.7
3	10.4	9.1	1.6	1.0	1.2	0.9	0.5	0.5
4	10.3	9.2	3.3	1.0	1.3	6.3	0.6	0.6
5	9.5	8.6	1.8	1.1	1.1	1.8	0.4	0
6	9.4	8.3	2.0	2.4	1.0	1.2	0.4	0.4
7	9.0	8.0	1.4	0.9	0.8	0.8	0.1	0.3
8	8.4	7.4	1.2	1.0	0.7	0.6	0.3	0.3
9	8.8	7.4	2.1	1.1	0.8	0.7	0.4	0.4
10	8.2	7.0	1.3	0.4	0.7	0.7	0.2	0.2
11	7.6	5.8	1.5	1.0	0.6	0.5	0.2	0.3
12	6.1	5.4	1.1	0.6	0.4	0.4	0.1	0.2
13	8.0	0.6	1.3	1.1	0.5	0.4	0.3	0.4
14	7.8	0.3	1.8	0.8	0.5	0.5	0.2	0.2
15	7.0	0.1	1.2	0.8	0.4	0.5	0.1	0.2
16	6.8	5.8	1.2	4.0	0.3	0.3	0.3	0.2
17	18.9	19.6	0.9	1.2	11.9	6.7	0	0.1
18	234.2	186.9	36.2	18.5	6.7	5.2	0	0.4
19	128.4	107.7	80.1	48.5	4.9	4.6	0.6	5.3
20	71.6	62.5	69.0	24.4	4.6	6.2	3.9	10.1
21	46.7	42.8	47.5	19.0	4.6	8.4	9.6	16.2
22	34.0	32.0	34.7	12.0	5.0	9.9	12.7	17.5
23	26.6	26.1	26.8	3.3	5.2	10.9	14.1	16.5
24	22.1	21.9	21.5	0.8	6.7	11.8	14.0	14.8
25	19.6	19.6	22.1	23.6	6.4	11.7	13.2	10.7
26	19.0	17.7	28.3	23.8	6.4	11.2	13.7	13.3
27	20.2	18.2	10.0	24.1	6.6	11.0	14.7	14.2
28	23.7	20.6	15.8	21.4	6.6	10.6	14.8	14.1
Total	806	679	420	239	88.8	126	116	138

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

35. March, 1983

(1/Lysimeter)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1	26.4	22.9	3.7	6.8	6.8	10.6	14.2	12.8
2	26.3	22.7	0	0	6.9	10.1	13.3	11.4
3	25.0	21.6	4.9	6.4	6.8	9.6	12.1	10.7
4	22.3	19.9	6.0	3.0	6.6	9.1	10.7	9.2
5	20.3	18.6	2.0	2.1	6.3	8.4	9.4	8.2
6	18.7	17.3	0	0	6.0	8.0	8.4	7.1
7	17.7	16.1	2.8	3.6	5.7	7.4	7.7	6.8
8	16.3	14.9	9.7	10.3	5.2	5.6	6.6	6.0
9	15.3	14.0	7.4	5.5	4.9	8.3	6.4	5.2
10	14.4	13.2	6.6	3.5	4.9	6.1	5.6	4.9
11	14.5	14.1	6.4	5.4	4.8	5.9	5.0	3.7
12	20.0	16.7	10.0	6.3	4.5	5.5	4.4	4.0
13	144.5	128.9	41.8	15.4	104.7	102.0	16.1	17.7
14	323.1	265.8	209.0	152.4	68.0	84.8	152.3	153.2
15	137.1	111.3	97.6	59.4	41.5	51.6	90.4	81.8
16	78.7	65.8	38.2	31.0	31.1	38.5	54.8	53.2
17	52.3	44.3	27.2	0.8	46.5	50.3	39.8	39.8
18	55.3	49.9	8.0	4.9	44.5	50.2	49.0	48.6
19	80.3	73.0	3.6	2.1	35.5	42.6	52.9	52.0
20	68.5	58.1	34.9	27.7	25.4	33.9	42.1	41.3
21	54.0	44.7	35.6	25.8	3.8	28.8	32.6	32.5
22	43.9	36.2	29.5	20.9	24.5	24.4	25.6	24.8
23	36.8	31.3	30.1	18.9	23.9	25.7	21.5	19.3
24	42.1	34.9	35.8	24.2	37.8	35.3	20.2	19.2
25	111.4	95.6	77.8	51.4	51.6	48.3	37.9	34.9
26	97.9	80.6	68.7	46.6	45.2	44.6	52.8	41.6
27	68.5	57.0	48.9	36.0	36.1	36.3	43.9	32.6
28	51.8	43.7	41.6	31.5	32.3	32.4	35.1	26.0
29	41.5	35.5	42.0	26.0	31.8	31.5	34.6	24.6
30	36.1	31.3	36.5	11.9	29.9	31.3	32.6	21.8
31	32.9	30.5	30.6	18.7	27.7	27.4	27.9	18.6
Total	1794	1530	997	659	811	915	966	873

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

III-3

屋外ライシメーター浸透水試料の成分分析結果

Results of Analyses of Substances in Percolate Samples
from Outdoor Lysimeters

藤井國博¹・広木幹也¹・山口武則²・松坂泰明³

Kunihiro FUJII¹, Mikiya HIROKI¹, Takenori YAMAGUCHI²
and Yasuaki MATSUZAKA³

ライシメーター実験では浸透水量の計測と並んで浸透水中成分の分析も土壤に施用された物質の挙動や土壤-植物系における収支の解明, 土壤環境から他環境への物質の移動の解明などのために不可欠の実験項目となっている。

本特別研究においては, 8基の屋外ライシメーターを用いて下水汚泥あるいは化学肥料を施用した土壤における物質の挙動を追跡する実験を行っている(本報告書資料III-2参照)。これら8基のライシメーターから得られた浸透水試料の分析結果(昭和56年5月~昭和58年2月採取分)を以下に示した。測定項目は, (1)pH, (2)アンモニウム態窒素(NH₄-N), (3)亜硝酸態窒素(NO₂-N) (4)硝酸態窒素(NO₃-N), (5)リン酸(PO₄), (6)塩素(Cl), (7)カリウム(K), (8)ナトリウム(Na), (9)カルシウム(Ca), (10)マグネシウム(Mg)である。(2)~(6)は, 既報^{1,2)}のテクニコン社製オートアナライザーAA II型による自動分析法により分析し, (1)pHは, オートアナライザーのサンプラーとベックマン社製 Expandomatic SS-2型 pHメーターを組み合わせた自動分析法によって測定した。(10)Mgは, 島津製作所製 AA-640型原子吸光光度計によって, (7)~(9)は, 東京光電(株)製炎光光度計(ANA-10AL)によって測定した。

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2
Water and Soil Environment Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
2. 国立公害研究所 技術部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2
Engineering Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
3. 昭和56, 57年度 国立公害研究所客員研究員(日本大学農獣医学部農芸化学科 〒154 東京都世田谷区下馬3-34-1)
Visiting Fellow of the National Institute for Environmental Studies. Present Address: College of Agriculture and Veterinary Medicine, Nihon Univ., Shimouma, Setagaya-ku, Tokyo 154, Japan.

引用文献

- 1) 藤井國博・久保井徹・服部浩之(1980): 下水汚泥の土壌施用が土壌環境に及ぼす影響—ライシメーター実験(II)—. 国立公害研究所研究報告, 第14号, 111-157.
- 2) 広木幹也・久保井徹・鷺沢清司・豊田敏治・服部浩之・藤井國博・松坂泰明(1983): 下水汚泥施用土壌における物質の移動に関する研究—下水汚泥成分の地下浸透—. 国立公害研究所研究報告, 第47号, 107-118.

1. pH(1)

		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1981									
May	26	6.90	7.10	7.29	7.37	7.33	7.50	7.43	7.49
June	15	7.40	7.80	7.80	8.00	8.00	8.10	7.80	7.80
	29	6.58	6.98	7.21	7.33	7.36	7.52	7.42	7.52
July	14	7.17	7.27	7.80	7.85	7.85	8.07	8.00	8.10
	28	7.44	7.62	8.01	8.11	8.39	8.43	8.28	8.30
Aug.	24	7.41	7.55	7.88	7.73	7.92	8.22	8.15	8.06
Sep.	5	7.18	7.32	7.48	7.52	7.65	8.18	7.97	7.86
	10	7.38	7.45	7.63	7.54	7.90	8.27	8.25	8.03
	12	7.60	7.63	7.32	7.32	7.34	7.35	7.63	7.68
	17	7.20	7.32	7.50	7.55	7.50	7.55	7.42	7.47
	18	7.08	7.17	7.39	7.40	7.40	7.45	7.47	7.56
	19	7.21	7.26	7.45	7.52	7.49	7.53	7.56	7.68
	21	7.36	7.39	7.47	7.47	7.46	7.69	7.74	7.75
	28	7.32	7.35	7.50	7.53	7.29	7.38	7.42	7.47
	30	7.11	7.20	7.24	7.31	7.37	7.43	7.47	7.52
Oct.	2	6.68	6.84	7.09	7.14	7.07	7.06	7.14	7.21
	4	6.95	7.04	6.99	7.14	7.20	7.17	7.24	7.27
	6	7.01	7.06	7.12	7.19	7.24	7.19	7.22	7.32
	8	6.85	7.07	7.20	7.23	7.27	7.31	7.42	7.47
	10	6.75	6.87	6.98	7.07	7.21	7.20	7.28	7.36
	13	7.01	7.09	7.12	7.17	7.23	7.25	7.29	7.32
	16	7.10	7.09	7.24	7.28	7.29	7.30	7.40	7.46
	19	7.03	7.25	7.41	7.50	7.50	7.57	7.63	7.74
	22	7.54	7.60	7.69	7.75	7.71	7.79	7.85	7.93
	25	7.81	7.77	7.56	7.62	7.68	7.64	7.66	7.62
	28	6.93	7.02	7.14	7.26	7.33	7.48	7.45	7.56
	31	7.46	7.51	7.57	7.57	7.52	7.66	7.61	7.72
Nov.	4	7.65	7.65	7.64	7.71	7.67	7.74	7.80	7.83
	7	7.72	7.71	7.68	7.66	7.68	7.83	7.78	7.86
	12	7.67	7.64	7.58	7.62	7.57	7.72	7.66	7.73
	16	7.63	7.64	7.58	7.66	7.60	7.75	7.70	7.79
	20	7.69	7.72	7.67	7.72	7.63	7.69	7.74	7.82
	24	7.73	7.74	7.74	7.82	7.70	7.87	7.86	7.95
	28	7.32	7.53	7.77	7.83	7.73	7.97	7.95	8.01
Dec.	2	7.58	7.68	7.77	7.68	7.70	7.96	7.96	7.85
	6	7.68	7.70	7.74	7.71	7.69	7.91	7.73	7.83
	10	7.59	7.68	7.75	7.74	7.68	7.88	7.79	7.86
	14	7.65	7.74	7.79	7.81	7.76	7.92	7.91	7.84
	20	7.15	7.36	7.55	7.69	7.65	7.90	7.82	7.91
	22	7.56	7.60	7.68	7.75	7.70	7.96	7.87	7.95
	30	7.63	7.71	7.78	7.87	7.86	8.06	7.93	8.09
1982									
Jan.	3	7.69	7.74	7.81	7.93	7.92	8.13	—	8.14
	7	7.83	7.84	7.43	7.89	—	—	—	—
	11	7.37	7.55	7.62	7.53	—	—	—	—
	15	7.43	7.57	7.60	7.58	—	—	—	—
	19	7.47	7.61	7.67	7.67	—	—	—	—
	23	7.28	7.45	7.57	7.66	—	—	—	—
	27	7.49	7.55	7.63	7.72	—	8.02	—	8.01
	31	7.58	7.63	8.19	8.27	7.75	7.92	7.84	8.00

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

1. pH(2)

		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1982									
Feb.	4	7.61	7.66	7.69	7.82	7.71	8.03	—	8.03
	8	7.70	7.71	7.70	7.82	—	7.87	—	7.98
	12	7.65	7.69	7.75	7.87	—	—	—	—
	16	7.65	7.72	7.78	7.88	—	—	—	—
	20	7.62	7.72	7.71	7.86	—	—	—	—
	24	7.70	7.82	7.78	7.93	—	—	—	—
	28	7.65	7.71	7.79	7.90	—	—	—	—
Mar.	4	7.50	7.56	7.57	7.54	—	—	—	—
	8	7.45	7.58	7.47	7.50	—	—	—	7.91
	12	7.10	7.30	7.25	7.27	—	—	—	7.41
	16	7.19	7.36	7.30	7.36	—	7.90	—	7.63
	20	7.29	7.41	7.36	7.40	—	7.88	7.79	7.68
	24	7.28	7.41	7.38	7.34	7.78	7.89	7.81	7.66
	28	7.28	7.43	7.33	7.39	7.61	7.72	7.58	7.61
Apr.	1	7.28	7.40	7.40	7.45	7.67	7.75	7.66	7.68
	5	7.29	7.45	7.43	7.53	7.67	7.74	7.73	7.78
	9	7.41	7.51	7.51	7.62	7.77	7.82	7.79	7.86
	13	7.05	7.45	7.39	7.55	7.77	7.77	7.78	7.87
	16	7.00	7.32	7.22	7.34	7.55	7.63	7.52	7.61
	17	7.10	7.40	7.24	7.34	7.51	7.61	7.47	7.56
	21	7.17	7.43	7.32	7.37	7.49	7.61	7.40	7.55
May	25	6.75	6.49	7.08	7.36	6.92	7.67	6.85	7.50
	29	6.79	6.64	7.11	7.36	6.98	7.57	6.88	7.47
	3	6.87	6.82	7.16	7.38	7.11	7.54	7.08	7.56
	7	6.98	6.94	7.22	7.37	7.25	7.59	7.31	7.65
	11	6.99	6.95	7.23	7.34	7.36	7.65	7.43	7.62
	15	7.03	6.98	7.23	7.32	7.39	7.69	7.52	7.58
	19	7.05	6.99	7.28	7.34	7.51	7.72	7.64	7.72
	23	7.06	6.97	7.29	7.30	7.65	7.80	7.78	7.85
	27	7.09	6.99	7.31	7.35	7.76	7.84	7.86	7.83
	31	7.16	7.11	7.39	7.45	7.96	7.91	7.95	7.94
June	4	7.04	6.91	7.20	7.23	7.76	7.80	7.84	7.63
	8	7.05	6.89	7.20	7.25	7.60	7.60	7.53	7.51
	12	7.07	7.03	7.28	7.31	7.55	7.64	7.56	7.56
	16	7.12	7.07	7.35	7.28	7.58	7.75	7.74	7.66
	20	7.16	7.06	7.33	7.31	7.58	7.70	7.65	7.62
	24	7.07	6.97	7.21	7.23	7.49	7.65	7.48	7.51
	28	7.10	7.02	7.22	7.23	7.46	7.50	7.41	7.45
July	2	7.10	7.08	7.21	7.23	7.78	7.30	7.39	7.47
	6	7.11	7.09	7.32	7.37	7.54	7.57	7.55	7.60
	10	7.14	7.06	7.33	7.31	7.59	7.72	7.76	7.66
	14	6.92	7.06	7.29	7.31	7.59	7.84	7.68	7.56
	18	7.14	7.19	7.41	7.47	7.81	7.98	7.95	7.70
	22	7.21	7.20	7.46	7.35	8.05	8.08	8.06	7.75
	26	7.49	7.47	7.42	7.28	7.63	7.82	7.86	7.58
Aug.	30	7.31	7.19	7.41	7.28	7.62	7.60	7.54	7.48
	3	7.18	7.24	7.21	7.17	7.36	7.29	7.45	7.30
	7	7.21	7.16	7.41	7.31	7.72	7.44	7.52	7.46
	11	7.39	7.26	7.72	7.66	7.62	7.59	7.57	7.58
	15	7.59	7.39	8.11	7.96	7.71	7.94	7.76	7.91
	19	7.76	7.51	—	8.16	7.93	8.00	8.04	8.05
	23	7.74	7.91	—	8.12	7.96	—	—	7.95
	27	7.17	7.66	—	7.50	8.00	7.63	—	7.95
	31	7.18	7.68	—	7.23	7.87	—	—	7.73

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

1. pH(3)

		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1982									
Sep.	4	7.59	7.89	—	—	—	—	—	—
	8	7.24	7.72	—	7.80	—	—	—	—
	12	7.13	7.48	6.98	6.82	7.35	6.98	6.88	6.93
	16	7.16	7.45	7.28	7.29	7.48	7.20	7.33	7.37
	20	7.14	7.40	7.29	7.35	7.28	7.06	7.29	7.34
	24	7.12	7.47	7.30	7.40	7.36	7.17	7.38	7.50
	28	7.14	7.48	7.38	7.38	7.48	7.34	7.45	7.48
Oct.	2	7.21	7.50	7.46	7.54	7.59	7.53	7.53	7.75
	6	7.16	7.47	7.50	7.51	7.50	7.43	7.50	7.96
	10	7.09	7.39	7.38	7.42	7.46	7.23	7.46	7.61
	14	7.11	7.37	7.48	7.46	7.54	7.37	7.51	7.66
	18	7.19	7.44	7.60	7.59	7.58	7.39	7.66	7.81
	22	7.03	7.42	7.42	7.47	7.53	7.68	7.58	7.82
	26	7.11	7.42	7.50	7.52	7.57	7.45	7.57	7.74
	30	7.05	7.33	7.55	7.52	7.66	7.53	7.61	7.76
Nov.	3	7.17	7.43	7.36	7.46	7.88	7.77	7.82	7.28
	7	7.52	7.44	7.51	7.57	7.48	6.74	7.60	7.17
	11	7.35	7.45	7.37	7.33	7.47	6.78	7.41	7.12
	15	7.31	7.44	7.32	7.35	7.60	6.93	7.39	7.22
	19	7.31	7.45	7.42	7.41	7.64	7.09	7.45	7.37
	23	7.36	7.48	7.55	7.49	7.74	7.34	7.51	7.41
	27	7.38	7.50	7.66	7.55	7.78	7.34	7.58	7.57
Dec.	1	7.29	7.39	7.51	7.32	7.64	7.30	7.50	7.54
	5	7.28	7.44	7.46	7.37	7.69	7.32	7.46	7.45
	9	7.26	7.44	7.51	7.41	7.73	7.34	7.42	7.45
	13	7.33	7.48	7.57	7.45	7.75	7.45	7.47	7.50
	17	7.36	7.50	7.67	7.51	7.78	7.47	7.53	7.65
	21	7.37	7.53	7.67	7.61	7.81	7.51	7.54	7.65
	25	7.40	7.56	7.79	7.67	7.96	7.62	7.60	7.69
	29	7.39	7.59	7.81	7.71	7.94	7.94	7.65	7.75
1983									
Jan.	2	7.33	7.59	7.73	7.63	7.82	7.53	7.57	7.61
	6	7.33	7.62	7.75	7.66	7.88	7.68	7.61	7.70
	10	7.29	7.64	7.78	7.67	7.82	7.77	7.65	7.78
	14	7.30	7.67	7.77	7.64	7.80	7.74	7.67	7.80
	18	7.30	7.68	7.78	7.68	7.84	7.76	7.67	7.75
	22	7.27	7.69	7.77	7.66	7.85	7.75	7.68	7.76
	26	6.97	7.70	7.72	7.65	7.98	7.90	7.71	7.84
	30	7.10	7.72	7.74	7.65	7.89	7.84	7.72	7.86
Feb.	3	7.12	7.67	7.66	7.59	7.83	7.66	7.67	7.77
	7	7.15	7.72	7.70	7.66	7.92	7.87	7.70	7.86
	11	7.26	7.70	7.72	7.71	7.95	7.97	7.68	7.89
	15	7.23	7.73	7.75	7.73	8.03	8.00	7.69	7.94
	19	7.14	7.72	7.65	7.55	7.90	7.88	7.73	7.93
	23	7.04	7.76	7.46	7.44	7.78	7.76	7.57	7.70
	27	7.14	7.77	7.44	7.39	7.80	7.76	7.51	7.62

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

2. NH₄-N(1)

(μg/ml)

		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1981									
May	26	30	16	—	—	—	—	—	—
June	15	—	—	—	—	—	—	—	—
	29	—	—	—	—	—	—	—	—
July	14	12	10	12	18	5	3	13	11
	28	2	1	3	2	—	—	—	—
Aug.	24	—	—	—	—	—	—	—	—
Sep.	5	12	6	8	12	38	53	56	19
	10	7	6	7	4	13	19	20	8
	12	7	4	8	4	5	6	11	9
	17	6	4	4	6	4	4	7	6
	18	7	6	7	6	6	6	13	10
	19	11	7	7	7	7	10	13	9
	21	4	2	4	6	7	10	14	9
	28	8	5	7	7	12	8	8	5
	30	8	9	8	9	10	9	12	12
Oct.	2	5	5	7	5	3	4	4	5
	4	3	3	3	4	5	5	6	4
	6	4	2	3	3	4	4	6	5
	8	6	—	6	2	2	4	5	1
	10	1	1	1	3	3	4	3	3
	13	3	2	1	3	4	5	3	—
	16	1	1	—	1	7	6	9	3
	19	4	4	7	5	5	7	16	10
	22	7	7	6	9	6	9	14	11
	25	9	7	6	4	6	9	10	11
	28	7	6	3	5	7	10	8	6
	31	5	5	6	3	9	4	8	9
Nov.	4	9	11	12	13	6	6	18	8
	7	6	6	12	6	5	5	9	8
	12	8	7	8	9	9	8	14	10
	16	7	6	8	8	9	10	15	12
	20	8	6	9	9	10	10	21	12
	24	12	14	13	16	12	12	24	20
	28	1	1	5	10	5	3	23	23

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

2. NH₄-N(2)

(μg/ml)

		Sandy soil							
		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1981									
Dec.	2	4	2	4	4	9	8	17	16
	6	3	3	10	9	11	9	19	21
	10	3	3	11	9	5	5	19	13
	14	3	4	10	12	7	7	38	31
	20	8	3	15	7	15	14	102	19
	22	5	2	24	27	26	23	228	58
	30	4	3	18	22	54	24	258	61
1982									
Jan.	3	7	7	47	31	101	42	—	100
	7	4	7	12	14	—	—	—	—
	11	7	3	15	10	—	—	—	—
	15	7	4	13	12	—	—	—	—
	19	4	4	33	23	—	—	—	—
	23	2	5	6	3	—	—	—	—
	27	3	4	2	3	—	1	—	2
	31	3	3	2	4	10	3	127	5
Feb.	4	8	3	11	11	40	3	—	3
	8	4	3	13	10	—	4	—	1
	12	1	1	40	10	—	—	—	—
	16	3	4	16	6	—	—	—	—
	20	3	3	35	13	—	—	—	—
	24	1	3	29	11	—	—	—	—
	28	5	5	10	6	—	—	—	—
Mar.	4	4	4	6	7	—	—	—	—
	8	4	4	4	4	—	—	—	27
	12	0	1	1	1	—	—	—	5
	16	3	3	3	4	—	5	—	3
	20	1	0	2	1	—	1	29	2
	24	3	3	3	3	49	3	33	3
	28	3	2	4	3	18	5	21	6
Apr.	1	3	4	2	3	17	3	72	3
	5	2	0	0	0	19	7	71	1
	9	2	2	2	2	38	16	92	4
	13	4	2	2	4	41	19	50	6
	16	4	4	1	6	4	7	2	3
	17	2	2	0	2	3	4	6	4
	21	4	3	1	3	5	7	14	5

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

3. NO₂-N(1)

(μg/ml)

		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1981									
May	26	6	7	10	6	13	6	13	8
June	15	1	0	8	6	14	9	14	6
	29	5	5	7	46	9	8	13	12
July	14	1	1	1	2	1	1	2	2
	28	0	0	1	1	1	1	26	16
Aug.	24	3	2	4	4	1	12	14	12
	Sep.	5	8	5	6	5	3	7	9
		10	3	3	3	2	42	43	111
	12	1	3	3	3	3	4	6	6
	17	1	5	7	7	14	12	21	18
	18	10	10	12	12	18	14	26	17
	19	12	11	11	10	13	11	29	14
	21	4	4	5	5	7	6	27	12
	28	1	3	3	3	3	3	6	4
Oct.	30	2	3	2	2	4	4	8	5
	2	1	6	7	8	5	6	8	8
	4	2	4	5	5	6	8	10	6
	6	3	6	5	5	6	7	10	6
	8	5	10	14	17	11	16	26	17
	10	0	3	4	5	3	5	7	6
	13	1	3	4	5	4	5	8	6
	16	1	3	4	5	4	7	11	6
	19	0	2	2	15	3	4	12	6
	22	1	1	2	2	3	6	13	5
	25	0	1	3	3	2	2	3	4
	28	1	2	4	5	1	4	5	4
Nov.	31	0	0	4	4	2	4	14	8
	4	0	1	4	3	1	3	8	4
	7	0	0	1	1	1	2	4	3
	12	0	1	3	3	1	2	4	2
	16	0	1	4	4	3	4	12	8
	20	0	0	2	2	2	3	7	5
	24	1	1	7	7	4	4	19	11
	28	1	2	6	6	2	4	16	20

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

3. NO₂-N(2)

(μg/ml)

	Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol		
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**	
1981									
Dec.	2	0	0	2	2	3	3	7	6
	6	1	1	2	2	2	2	5	5
	10	0	0	2	2	1	2	15	5
	14	0	0	2	2	2	2	19	12
	20	0	0	5	3	5	6	10	22
	22	0	0	6	5	9	12	5	30
	30	0	0	6	5	23	15	21	55
1982									
Jan.	3	0	0	10	4	29	21	—	55
	7	0	0	1	0	—	—	—	—
	11	0	0	0	0	—	—	—	—
	15	0	0	1	1	—	—	—	—
	19	0	0	1	3	—	—	—	—
	23	0	1	17	8	—	—	—	—
	27	2	2	35	12	—	28	—	45
	31	0	0	18	11	266	37	17	35
Feb.	4	1	1	38	18	429	147	—	72
	8	0	0	47	28	—	343	—	160
	12	0	0	33	17	—	—	—	—
	16	1	0	37	41	—	—	—	—
	20	0	1	105	19	—	—	—	—
	24	0	0	12	5	—	—	—	—
	28	2	1	7	5	—	—	—	—
Mar.	4	0	0	0	1	—	—	—	—
	8	1	0	1	1	—	—	—	3
	12	0	1	1	1	—	—	—	5
	16	5	2	4	3	—	5	—	13
	20	4	2	4	2	—	3	12	12
	24	3	1	3	2	6	3	5	18
	28	9	3	4	3	3	3	6	12
Apr.	1	12	2	9	6	5	6	7	35
	5	18	3	6	5	6	9	11	16
	9	19	5	8	6	20	26	27	38
	13	21	5	6	4	64	82	183	37
	16	2	1	2	1	2	3	1	2
	17	4	1	3	2	4	4	3	6
	21	6	2	5	3	7	9	9	5

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

4. NO₃-N(1)

(μg/ml)

		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1981									
May	26	2.5	13.2	26.7	25.8	22.0	25.0	53.7	54.9
June	15	2.7	8.9	28.4	27.1	18.4	26.5	49.5	40.5
	29	4.9	16.3	25.3	25.5	21.6	27.1	51.3	53.4
July	14	6.2	19.3	24.6	25.4	20.5	25.4	44.6	49.6
	28	6.5	20.0	23.0	25.1	13.7	23.9	44.1	46.3
Aug.	24	26.3	26.1	21.5	16.8	16.7	24.1	37.6	35.3
Sep.	5	73.2	40.0	23.2	27.9	25.1	23.1	42.8	52.8
	10	60.8	45.2	24.7	24.0	23.0	23.5	42.0	50.8
	12	38.9	35.3	24.8	24.1	27.2	22.7	44.3	46.1
	17	45.4	41.9	24.7	27.7	27.5	31.0	53.2	61.1
	18	44.5	40.8	21.4	28.0	27.5	30.4	55.2	61.5
	19	40.7	41.1	22.3	28.3	27.8	30.8	57.4	61.5
	21	29.3	39.3	24.2	25.7	28.4	31.9	54.7	61.3
	28	22.2	37.2	18.4	26.0	26.8	31.6	53.8	56.2
	30	18.9	36.4	23.1	26.6	26.9	32.2	52.6	57.9
Oct.	2	10.9	30.7	17.5	23.6	28.5	35.5	53.6	54.6
	4	7.7	29.1	21.7	27.4	29.1	32.5	54.5	61.6
	6	7.6	28.8	24.1	27.5	28.9	30.7	54.6	62.0
	8	7.7	28.9	24.0	27.7	28.9	36.9	56.1	63.2
	10	4.6	20.9	20.3	24.8	27.4	37.1	60.2	62.1
	13	4.2	19.8	22.7	26.1	28.3	38.6	60.0	67.5
	16	4.0	19.3	21.5	26.3	28.0	38.6	62.5	67.1
	19	4.4	18.6	20.2	25.5	27.5	36.2	56.1	58.5
	22	4.5	19.7	21.8	25.7	28.1	38.0	56.3	60.2
	25	1.2	3.3	21.7	22.6	21.7	28.9	58.8	56.7
	28	1.0	3.7	27.8	26.9	25.7	39.1	60.8	62.3
	31	1.9	4.6	26.9	26.8	25.7	36.4	58.5	60.8
Nov.	4	2.1	4.4	26.8	26.6	25.3	37.5	60.6	60.4
	7	1.7	3.7	26.7	24.0	23.7	38.4	57.4	58.5
	12	1.9	3.6	26.9	26.8	26.2	40.3	60.6	61.5
	16	2.1	3.7	27.1	26.9	26.8	40.7	59.6	61.9
	20	2.5	3.1	26.2	26.7	26.7	39.5	61.9	62.7
	24	1.8	3.3	26.3	27.5	26.7	39.9	61.0	63.7
	28	1.0	2.5	24.8	25.9	24.9	36.5	58.3	59.7
Dec.	2	1.1	2.6	26.0	23.8	25.8	37.2	54.0	53.7
	6	1.0	2.5	26.5	25.1	25.3	37.6	56.3	56.9
	10	1.1	2.6	27.0	25.9	25.2	38.7	57.5	58.5
	14	1.1	2.5	26.1	25.7	25.1	39.7	58.2	59.3
	20	1.1	2.7	24.9	25.6	24.3	35.1	55.9	38.1
	22	1.1	2.6	25.1	25.8	23.9	34.2	56.1	55.8
	30	1.1	2.6	24.3	26.1	23.5	35.6	56.1	57.8
1982									
Jan.	3	1.0	2.6	24.9	26.3	23.3	36.3	—	58.5
	7	1.1	2.2	24.0	25.3	—	—	—	—
	11	1.7	3.1	25.1	23.2	—	—	—	—
	15	1.7	3.3	26.4	24.4	—	—	—	—
	19	1.7	3.3	25.9	24.7	—	—	—	—
	23	2.3	3.9	25.6	25.4	—	—	—	—
	27	2.5	4.0	26.0	25.5	—	40.4	—	61.4
	31	2.5	4.0	23.4	25.7	19.5	29.0	49.6	61.1

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

4. NO₃-N(2)

(μg/ml)

		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
		1*	2**	1*	2**	1*)	2**	1*	2**
1982									
Feb.	4	3.0	4.3	24.5	27.6	22.9	36.8	—	65.0
	8	3.4	5.0	23.7	27.8	—	24.3	—	65.0
	12	3.9	4.8	27.0	28.6	—	—	—	—
	16	3.9	4.8	27.1	28.7	—	—	—	—
	20	4.1	5.1	27.7	28.6	—	—	—	—
	24	4.1	4.6	26.9	27.5	—	—	—	—
Mar.	28	5.3	5.3	26.3	23.3	—	—	—	—
	4	10.1	7.5	23.6	21.8	—	—	—	—
	8	18.5	10.8	27.3	25.9	—	—	—	—
	12	21.0	12.0	23.4	24.8	—	—	—	53.9
	16	25.8	14.2	24.4	25.3	—	39.2	—	59.0
	20	30.5	16.4	29.1	25.6	—	37.3	55.0	58.7
Apr.	24	41.4	22.3	23.5	24.4	22.8	40.4	51.4	57.7
	28	53.6	25.6	27.7	26.1	23.8	38.7	55.2	59.4
	1	59.0	27.8	24.2	26.5	24.8	39.1	56.7	60.0
	5	61.6	29.1	27.4	26.5	24.7	38.3	59.2	59.6
	9	62.4	29.9	26.2	26.5	24.5	38.0	62.4	59.2
	13	61.4	28.6	25.6	25.3	23.4	36.9	62.5	58.9
May	16	55.2	36.0	25.5	26.0	26.0	47.8	57.7	60.2
	17	44.6	36.8	26.6	26.5	26.0	46.3	58.6	64.8
	21	49.1	37.6	26.8	27.5	26.6	46.0	60.2	65.7
	25	34.1	32.1	26.2	18.4	25.8	45.0	61.0	60.0
	29	30.6	32.4	25.7	18.9	26.7	43.8	64.5	61.7
	3	29.6	32.5	31.1	19.3	26.8	44.3	59.7	61.2
	7	24.7	29.6	28.4	18.5	26.3	43.2	60.2	61.2
	11	19.3	25.7	31.1	18.9	25.6	43.2	59.7	60.1
	15	15.3	24.3	26.3	19.0	24.4	43.1	58.4	58.8
	19	13.8	23.1	25.4	18.9	24.4	43.6	56.5	58.8
	23	9.4	18.2	23.5	19.6	23.3	42.0	56.8	58.5
June	27	8.9	18.9	21.4	20.4	23.1	43.2	53.4	57.4
	31	7.9	19.0	20.6	20.5	20.8	40.2	52.7	55.1
	4	6.4	17.1	18.3	20.7	20.7	38.8	52.1	50.0
	8	6.5	19.2	21.0	21.7	25.6	38.8	57.4	64.0
	12	6.5	19.9	22.5	22.2	26.1	40.1	59.0	66.5
	16	5.8	19.0	20.7	20.6	26.7	40.6	54.7	61.9
July	20	5.9	19.3	22.0	22.5	26.7	41.7	58.1	61.8
	24	4.9	19.2	22.4	22.2	25.2	43.8	52.4	59.7
	28	4.4	19.4	19.8	23.6	25.9	44.5	57.3	58.4
	2	4.4	20.4	20.6	24.8	27.7	46.1	61.8	65.3
	6	4.6	20.7	21.2	24.8	27.7	45.9	60.8	65.8
	10	4.3	19.9	21.1	24.2	27.7	46.4	58.7	60.5
	14	4.4	19.9	22.0	24.9	24.4	43.8	58.4	58.9
	18	4.3	19.2	21.7	25.6	23.7	44.8	56.3	63.1
	22	4.1	18.0	22.5	24.8	22.4	44.1	55.2	59.5
	26	2.7	11.2	17.4	17.3	1.2	29.1	41.0	31.6
Aug.	30	3.5	12.6	20.9	27.0	18.0	40.2	54.0	62.9
	3	18.6	4.2	20.0	26.1	12.2	35.1	36.0	61.0
	7	1.2	1.3	17.5	25.7	12.4	40.2	31.6	59.0
	11	0.4	0.1	15.7	20.7	9.4	37.9	29.4	57.6
	15	N.D.	N.D.	11.7	15.2	5.3	31.8	17.1	54.0
	19	//	//	—	15.6	3.5	25.6	4.7	40.7
	23	//	0.3	—	20.5	1.1	—	—	24.5
	27	//	0.1	—	18.6	0.8	11.4	—	16.4
31	//	N.D.	—	7.6	1.6	—	—	12.2	

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

4. NO₃-N(3)

(μg/ml)

		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1982									
Sep.	4	—	—	—	—	—	—	—	—
	8	—	N.D.	—	1.4	—	—	—	—
	12	N.D.	0.2	3.9	14.2	0.6	0.8	2.0	19.5
	16	0.3	0.2	2.4	12.7	N.D.	0.2	1.4	17.8
	20	N.D.	N.D.	2.0	9.4	∥	0.2	0.9	10.8
	24	∥	∥	1.7	10.2	∥	0.1	0.5	10.1
	28	∥	∥	0.9	8.0	∥	0.2	0.1	6.3
Oct.	2	∥	∥	1.3	7.2	∥	N.D.	N.D.	0.8
	6	∥	∥	0.1	5.4	∥	0.1	∥	0.1
	10	0.1	∥	N.D.	3.5	∥	N.D.	∥	N.D.
	14	0.1	∥	∥	2.1	∥	0.1	∥	∥
	18	N.D.	∥	∥	0.9	∥	N.D.	∥	0.1
	22	0.3	∥	∥	1.1	∥	∥	∥	0.3
	26	0.3	∥	∥	1.5	∥	0.1	∥	N.D.
	30	0.3	∥	∥	1.5	∥	N.D.	∥	∥
Nov.	3	0.3	∥	∥	1.7	∥	∥	∥	0.6
	7	0.3	∥	∥	1.6	1.0	0.9	0.3	0.8
	11	0.6	0.1	∥	0.9	0.3	0.5	0.8	0.9
	15	0.8	0.3	∥	1.1	N.D.	0.2	1.0	1.1
	19	0.9	0.4	∥	1.2	∥	0.2	1.1	1.1
	23	0.9	0.4	0.1	1.4	∥	0.2	1.2	1.2
	27	0.9	0.5	0.1	1.4	0.1	0.3	1.3	1.3
Dec.	1	1.1	0.9	0.1	1.1	0.4	0.6	1.1	1.3
	5	1.1	1.1	0.1	1.2	0.2	0.5	1.5	1.4
	9	1.1	1.3	0.2	1.2	0.2	0.6	1.6	1.5
	12	1.1	1.3	0.2	1.5	0.2	0.6	1.6	1.5
	17	1.1	1.4	0.3	1.5	0.3	0.5	1.7	1.5
	21	1.2	1.4	0.3	1.6	0.3	0.5	1.7	1.5
	25	1.2	1.4	0.3	1.7	0.3	0.5	1.7	1.5
	29	1.2	1.4	0.3	1.7	0.3	0.6	1.7	1.5
1983									
Jan.	2	1.2	1.4	0.3	1.8	0.3	0.5	1.6	1.5
	6	1.2	1.5	0.3	1.7	0.3	0.6	1.6	1.5
	10	1.2	1.5	0.4	1.8	0.3	0.6	1.6	1.5
	14	1.2	1.5	0.4	1.8	0.3	0.6	1.6	1.5
	18	1.2	1.6	0.4	1.8	0.4	0.6	1.6	1.5
	22	1.1	1.6	0.4	1.8	0.4	0.5	1.6	1.5
	26	1.1	1.8	0.4	1.7	0.4	0.6	1.6	1.5
	30	1.2	1.8	0.4	1.8	0.4	0.6	1.6	1.5
Feb.	3	1.2	1.3	0.4	1.9	0.4	0.7	1.5	1.5
	7	1.3	1.3	0.4	2.0	0.4	0.7	1.5	1.5
	11	1.3	1.3	0.4	2.1	0.5	0.6	1.5	1.5
	15	1.3	1.4	0.5	2.1	0.5	0.7	1.5	1.5
	19	1.3	1.3	0.5	1.4	0.7	1.0	1.5	1.5
	23	1.4	1.4	0.4	1.6	0.6	0.9	1.6	1.5
	27	1.4	1.4	0.4	1.5	0.6	0.9	1.6	1.5

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

5. PO₄(1)

		(μg/ml)							
		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1981									
May	26	52	50	25	23	29	29	29	27
June	15	85	193	52	44	50	57	48	46
	29	31	32	21	17	19	20	16	17
July	14	55	50	37	35	43	44	47	45
	28	35	33	21	26	44	26	49	34
Aug.	24	35	37	44	44	59	47	49	44
Sep.	5	7	9	7	7	12	6	8	8
	10	12	12	5	4	14	6	9	8
	12	94	112	33	28	34	60	36	34
	17	42	33	10	10	33	35	26	27
	18	45	41	21	20	33	27	21	25
	19	44	36	16	18	31	24	17	23
	21	64	46	17	15	27	32	28	26
	28	32	23	17	12	14	20	14	14
	30	43	38	13	11	16	18	14	14
Oct.	2	70	61	9	5	14	14	15	13
	4	70	54	16	13	22	22	15	15
	6	70	54	15	15	22	16	15	18
	8	60	46	8	8	27	22	23	26
	10	72	56	15	14	23	18	17	17
	13	66	50	9	9	22	19	17	18
	16	68	54	17	17	23	17	17	18
	19	62	49	16	15	19	16	13	18
	22	62	53	24	24	31	26	62	28
	25	118	78	14	13	25	13	15	14
	28	91	68	9	8	21	11	9	12
	31	90	71	13	15	21	13	8	13
Nov.	4	89	78	18	19	23	15	23	22
	7	101	80	19	16	27	18	16	19
	12	76	69	17	14	22	19	16	18
	16	75	69	22	18	21	17	15	21
	20	70	68	20	20	19	18	19	21
	24	71	67	23	24	23	21	25	28
	28	83	79	25	26	25	20	25	22

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

5. PO₄(2)

(μg/ml)

		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1981									
Dec.	2	68	71	18	15	26	24	24	20
	6	66	67	18	17	23	22	18	22
	10	—	—	20	20	23	20	20	22
	14	61	65	24	25	25	22	23	22
	20	48	48	7	12	17	10	9	16
	22	45	51	14	17	18	12	14	19
	30	47	50	19	22	14	12	15	15
1982									
Jan.	3	52	51	17	23	9	10	—	8
	7	76	69	12	31	—	—	—	—
	11	41	42	20	16	—	—	—	—
	15	48	52	18	17	—	—	—	—
	19	44	49	18	17	—	—	—	—
	19	44	49	18	17	—	—	—	—
	23	45	57	20	23	—	—	—	—
	27	45	53	11	16	—	10	—	11
	31	38	40	5	9	N.D.	5	5	9
Feb.	4	38	40	5	9	//	N.D.	—	4
	8	29	48	6	20	—	16	—	8
	12	29	43	5	17	—	—	—	—
	16	31	43	9	18	—	—	—	—
	20	30	43	8	19	—	—	—	—
	24	39	56	16	26	—	—	—	—
	28	45	53	14	26	—	—	—	—
Mar.	4	37	54	11	15	—	—	—	—
	8	35	55	14	11	—	—	—	26
	12	22	34	8	3	—	—	—	5
	16	17	28	9	5	—	13	—	13
	20	13	26	9	9	—	19	13	8
	24	14	23	11	5	8	19	13	9
	28	15	25	9	7	20	19	12	10
Apr.	1	13	20	14	10	19	19	13	14
	5	10	21	11	11	21	17	17	18
	9	15	23	14	14	23	23	19	19
	13	17	23	11	11	18	19	15	19
	16	22	27	4	4	17	13	10	9
	17	24	33	5	5	16	13	10	9
	21	28	40	8	6	17	16	10	10

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

6. Cl(1)

($\mu\text{g/ml}$)

		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1981									
May	26	1.7	2.6	12.7	9.3	16.6	8.8	15.1	8.9
June	15	—	—	6.3	3.5	8.1	2.7	6.1	—
	29	22.2	4.4	13.7	9.8	17.8	9.1	15.2	7.6
July	14	39.5	9.3	13.0	9.7	19.0	10.0	12.6	8.3
	28	43.6	10.1	13.5	9.4	16.1	9.2	13.3	7.6
Aug.	24	36.7	14.2	11.9	5.7	11.0	8.9	9.3	5.6
Sep.	5	16.1	14.6	13.0	10.1	16.4	8.9	14.6	12.0
	10	16.0	16.6	16.0	10.0	17.5	11.3	13.0	10.0
	12	7.0	10.7	14.2	8.2	18.2	8.3	10.0	5.9
	17	8.0	10.3	14.5	9.7	18.6	10.3	13.3	8.4
	18	7.9	10.3	11.7	9.6	18.4	9.5	14.8	8.1
	19	7.7	10.2	11.8	9.4	18.5	9.4	15.6	7.6
	21	5.4	9.2	13.9	9.0	18.3	10.8	13.5	7.8
	28	3.3	6.0	8.2	7.3	17.2	7.8	10.7	5.7
	30	3.0	5.7	11.6	7.5	17.8	8.0	11.3	6.3
Oct.	2	2.1	4.6	7.8	6.7	18.6	9.2	10.8	6.0
	4	1.6	3.9	9.7	7.6	18.3	8.6	11.7	6.7
	6	1.6	3.8	12.4	7.9	19.1	8.6	12.3	6.5
	8	1.8	4.2	12.2	8.2	18.8	9.2	11.3	6.5
	10	2.6	4.3	9.6	7.7	19.5	9.7	12.9	8.1
	13	1.6	3.7	12.6	8.4	20.6	10.4	13.4	7.9
	16	1.9	3.4	11.6	8.2	22.2	10.0	13.2	7.9
	19	1.4	2.9	10.7	7.8	19.8	9.1	13.0	7.2
	22	1.2	2.6	10.4	7.5	19.8	9.0	12.5	7.3
	25	N.D.	N.D.	9.1	6.6	18.2	7.6	17.6	8.1
	28	0.7	0.7	10.6	7.1	16.7	8.3	14.7	8.3
	31	0.4	0.1	9.5	6.8	17.9	8.3	15.3	7.9
Nov.	4	0.1	0.1	9.4	6.3	18.5	8.3	15.3	7.9
	7	N.D.	0.1	10.1	6.0	17.0	9.0	15.3	8.1
	12	//	0.1	9.8	6.4	18.4	9.3	16.6	8.5
	16	//	N.D.	9.6	6.4	18.9	9.4	16.1	8.5
	20	//	//	9.5	6.5	19.7	9.3	17.3	8.7
	24	//	//	9.7	6.6	20.3	9.4	17.7	8.9
	28	0.4	0.6	9.3	6.7	17.6	9.0	15.5	8.4
Dec.	2	0.8	0.6	9.7	6.0	17.4	9.3	14.8	8.2
	6	0.8	0.6	9.9	6.4	17.4	9.4	15.6	8.4
	10	0.7	0.6	9.9	6.5	17.3	9.4	15.6	8.5
	14	0.7	0.7	9.7	6.5	17.5	9.5	15.8	8.5
	20	0.8	0.6	9.5	6.6	17.1	9.0	16.1	8.3
	22	0.8	0.7	9.4	6.6	17.0	9.1	15.5	8.3
	30	0.6	0.4	9.4	6.4	17.0	9.0	15.6	8.9
1982									
Jan.	3	1.2	0.5	9.4	6.8	16.9	8.8	—	8.8
	7	1.2	0.6	9.8	6.2	—	—	—	—
	11	3.0	0.4	9.0	6.0	—	—	—	—
	15	2.4	0.6	9.8	5.8	—	—	—	—
	19	2.7	0.6	10.0	5.9	—	—	—	—
	23	3.4	1.0	9.8	6.3	—	—	—	—
	27	3.9	0.5	9.8	6.5	—	9.1	—	8.3
	31	3.8	1.0	9.0	6.3	14.3	7.3	12.9	8.3

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

6. Cl(2)

		($\mu\text{g}/\text{ml}$)							
		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1982									
Feb.	4	4.5	1.1	9.1	6.5	16.0	8.3	—	8.6
	8	5.5	1.3	8.7	6.4	—	5.8	—	8.9
	12	5.1	1.5	9.6	6.4	—	—	—	—
	16	5.3	1.4	9.5	6.4	—	—	—	—
	20	5.4	1.6	9.5	6.7	—	—	—	—
	24	6.1	1.7	9.6	6.1	—	—	—	—
Mar.	28	7.7	2.0	9.4	5.5	—	—	—	—
	4	14.0	4.3	9.2	5.4	—	—	—	—
	8	21.2	5.8	9.7	5.9	—	—	—	7.8
	12	24.1	7.9	9.4	6.5	—	—	—	8.3
	16	27.6	8.7	9.3	6.5	—	9.7	—	8.9
	20	29.6	9.7	11.4	6.4	—	9.8	14.6	8.8
Apr.	24	32.9	13.0	8.5	6.3	15.4	10.0	14.2	8.6
	28	37.0	13.8	10.5	6.5	15.7	9.4	14.3	8.5
	1	37.9	14.5	8.4	6.6	16.6	9.4	15.1	8.5
	5	37.9	14.9	10.2	6.5	17.2	9.3	15.7	8.6
	9	36.9	14.8	9.4	6.4	17.1	9.6	16.3	8.4
	13	36.0	15.8	15.9	6.4	19.1	9.8	17.2	8.4
May	16	22.2	17.0	15.5	6.0	19.5	14.5	16.2	8.4
	17	19.9	16.2	15.4	6.2	19.1	13.2	16.9	9.1
	21	18.7	16.0	16.1	6.3	19.5	12.1	17.3	8.8
	25	12.2	13.9	9.8	6.2	17.7	10.2	17.5	8.6
	29	11.5	13.9	9.8	6.7	17.9	9.5	18.0	9.1
	3	10.8	13.9	12.4	6.8	17.7	9.7	17.1	8.8
June	7	9.8	12.7	10.9	6.6	17.5	9.7	17.1	8.7
	11	8.1	10.6	11.5	6.8	17.5	9.5	17.0	8.6
	15	7.2	9.1	10.6	6.6	16.9	9.2	16.5	8.5
	19	6.4	9.0	11.2	6.9	16.9	9.4	16.2	8.5
	23	6.5	6.7	10.6	6.8	16.6	9.3	15.6	8.5
	27	4.3	6.5	12.2	7.0	16.3	9.3	15.5	8.0
July	31	4.5	6.4	11.9	7.1	15.8	9.3	15.4	8.1
	4	3.5	3.9	10.5	6.7	15.6	8.7	15.7	8.0
	8	3.1	4.0	12.3	7.4	17.0	9.5	17.0	8.9
	12	2.8	3.6	12.9	7.2	17.0	9.0	17.7	8.9
	16	2.8	3.1	11.9	6.7	17.5	9.4	16.8	8.8
	20	2.4	2.9	12.9	7.3	17.1	10.0	17.2	8.7
August	24	2.2	2.6	13.0	7.3	16.7	9.9	16.7	8.7
	28	1.9	2.6	11.7	7.6	17.3	10.0	17.2	8.7
	2	2.0	2.8	12.7	7.5	17.3	10.3	18.2	9.1
	6	2.1	2.7	12.6	7.4	17.2	10.5	17.8	9.0
	10	2.0	2.5	12.5	7.3	16.9	10.5	17.6	8.9
	14	1.9	2.5	13.1	7.3	16.7	10.4	17.7	8.7
Aug.	18	1.9	2.6	12.6	7.7	16.6	10.4	17.4	8.8
	22	1.7	2.2	12.8	7.2	16.2	10.5	16.8	8.9
	26	1.5	1.9	11.5	6.9	2.5	7.5	12.6	6.3
	30	1.1	1.6	13.3	7.8	14.6	9.1	17.2	9.0
	3	2.0	0.6	13.5	8.1	11.5	8.2	13.7	8.3
	7	0.8	1.0	13.2	8.2	11.8	9.4	12.8	8.4
Aug.	11	0.4	0.3	13.2	6.8	11.4	9.0	12.4	8.3
	15	0.3	0.3	12.0	5.4	8.9	8.2	9.4	7.5
	19	0.4	0.3	—	5.5	7.7	7.6	5.9	4.9
	23	0.4	0.3	—	4.5	7.8	—	—	2.1
	27	0.5	0.1	—	4.5	2.5	5.1	—	2.3
	31	0.6	N.D.	—	3.3	3.8	—	—	4.2

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

6. Cl(3)

($\mu\text{g/ml}$)

		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1982									
Sep.	4	0.5	0.2	—	—	—	—	—	—
	8	0.5	N.D.	—	4.4	—	—	—	—
	12	1.0	0.2	6.6	3.7	1.4	0.9	0.7	1.2
	16	0.5	N.D.	6.8	4.1	0.4	0.9	0.8	1.3
	20	0.5	//	6.5	3.3	0.3	0.7	0.6	1.1
	24	0.7	//	6.1	3.5	0.3	0.5	0.3	0.6
	28	0.9	//	4.7	3.5	N.D.	0.5	N.D.	0.4
Oct.	2	0.9	//	3.8	2.6	//	0.4	//	N.D.
	6	0.9	//	2.3	2.8	0.2	0.5	//	//
	10	1.2	//	1.2	2.0	N.D.	0.4	//	//
	14	1.2	//	0.8	1.3	0.3	0.4	//	//
	18	0.9	//	0.8	0.8	0.4	0.4	//	//
	22	0.9	//	0.7	0.7	N.D.	0.3	//	//
	26	1.1	//	0.8	1.0	0.3	0.7	0.2	//
	30	1.4	//	1.2	1.0	0.4	0.4	0.1	//
Nov.	3	1.7	//	1.6	2.1	0.4	0.4	0.7	1.1
	7	1.6	1.3	1.9	2.1	1.2	0.9	0.7	0.9
	11	1.7	1.0	1.5	1.4	0.8	0.9	0.6	0.6
	15	2.1	1.1	1.3	1.4	0.6	0.9	0.6	0.8
	19	2.4	1.2	1.2	1.3	0.6	1.0	0.5	—
	23	2.5	1.8	1.4	1.4	0.5	0.9	0.6	0.8
	27	2.6	1.4	1.5	1.2	0.7	0.8	0.6	0.7
Dec.	1	2.3	1.9	1.0	1.1	0.7	0.9	0.5	0.8
	5	2.4	1.9	0.9	1.1	0.6	0.9	0.5	0.6
	9	2.4	2.2	1.0	1.1	0.6	0.9	0.5	0.8
	13	2.6	2.2	1.1	1.1	0.5	0.9	0.6	0.7
	17	2.4	2.2	1.1	1.2	0.5	0.8	0.6	0.7
	21	2.4	2.1	1.1	1.0	0.5	0.8	0.5	0.8
	25	2.5	2.1	1.3	1.1	0.5	0.9	0.7	0.9
	29	2.3	2.2	1.4	0.9	0.4	0.9	0.7	1.0
1983									
Jan.	2	2.3	2.3	0.9	0.9	0.4	0.7	0.6	0.8
	6	2.4	2.4	1.1	0.7	0.4	0.7	0.6	0.8
	10	2.3	2.3	1.1	0.9	0.5	0.8	0.7	0.9
	14	2.3	2.2	1.1	0.8	0.6	0.8	0.6	0.9
	18	2.1	2.4	1.0	0.7	0.5	0.8	0.6	0.9
	22	2.0	2.6	0.9	0.8	0.6	0.8	0.6	0.9
	26	2.3	2.5	1.0	0.8	0.5	0.8	0.6	1.0
Feb.	30	2.3	2.6	0.8	0.7	0.6	0.8	0.6	0.9
	3	2.4	2.2	0.9	0.7	0.6	0.7	0.6	1.0
	7	2.3	2.5	0.9	0.8	0.5	0.8	0.6	1.0
	11	1.9	2.9	0.7	0.8	0.5	0.9	0.6	1.0
	15	2.1	2.6	0.9	0.8	0.7	0.9	0.7	1.0
	19	2.0	2.8	0.8	0.6	1.6	1.2	0.6	1.0
	23	2.9	3.1	0.7	0.6	1.1	1.0	0.6	0.9
	27	3.0	2.9	0.6	0.6	1.0	1.1	0.6	0.8

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

7. K(1)

		(μg/ml)							
		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1981									
May	26	5.5	5.1	5.3	4.8	7.0	6.0	6.1	6.6
June	15	7.6	6.9	7.5	8.0	13.2	9.3	12.0	8.7
	29	6.9	6.0	5.8	5.6	8.9	7.5	8.3	7.6
	July	14	8.5	7.4	7.2	7.6	8.2	8.9	11.1
July	28	9.5	8.8	9.0	10.4	17.2	12.3	17.2	15.7
	Aug.	24	12.1	10.3	9.9	11.5	14.1	14.5	20.2
Sep.	5	13.6	9.9	8.4	7.9	13.4	15.0	14.3	12.4
	10	12.5	11.1	8.0	6.6	14.7	15.4	17.3	13.3
	12	11.9	10.1	6.8	6.5	14.3	14.6	13.6	11.8
	17	10.8	8.5	6.6	6.3	9.8	10.7	11.5	10.0
	18	10.8	8.4	6.4	6.1	9.8	9.1	9.5	9.8
	19	11.0	8.6	6.2	6.6	10.3	9.1	9.3	10.0
	21	9.9	8.9	6.3	5.4	9.8	10.7	11.5	10.0
	28	9.5	8.5	5.6	6.6	12.7	8.9	11.2	11.2
	30	9.4	8.1	5.7	6.2	11.2	9.0	10.4	10.0
	Oct.	2	9.6	8.5	7.0	8.0	11.9	9.2	13.9
4		7.2	6.6	4.6	5.6	5.5	7.6	8.6	8.7
6		7.5	6.9	5.5	5.6	8.9	7.5	8.3	8.3
8		7.4	6.6	6.1	5.5	8.5	8.5	9.4	8.4
10		6.4	5.6	4.8	6.2	9.6	7.4	10.0	10.1
13		5.6	5.5	4.5	4.3	7.6	7.4	8.0	7.3
16		6.0	5.3	5.3	4.5	7.3	7.6	7.9	7.0
19		6.4	5.6	5.1	4.9	7.8	7.0	7.0	7.4
22		5.9	5.0	5.4	5.0	7.0	7.1	9.2	7.7
25		3.1	3.2	2.8	3.6	5.7	3.8	6.0	6.4
Nov.	28	3.3	3.2	4.2	3.4	5.0	5.3	6.1	5.8
	31	3.9	3.6	4.9	4.2	5.2	5.4	5.2	6.2
	4	4.4	3.8	5.4	4.6	5.4	6.2	7.9	6.7
	7	4.0	3.4	5.2	3.4	6.9	6.0	6.8	6.0
	12	4.6	4.4	5.4	4.8	6.7	6.5	7.0	6.8
	16	4.6	4.1	5.7	4.9	6.3	6.2	6.4	6.8
	20	4.8	4.2	6.0	5.3	6.0	6.4	7.7	6.9
	24	4.9	4.3	6.4	5.7	6.0	6.7	8.3	7.5
	28	4.7	4.2	6.2	6.0	6.0	7.3	9.3	7.8
	Dec.	2	4.5	4.5	5.5	4.6	6.0	7.0	9.0
6		4.4	4.0	5.2	4.6	5.8	6.6	7.0	6.1
10		4.4	4.0	5.2	4.9	5.9	6.5	6.9	6.5
14		4.4	4.0	5.4	5.2	5.9	6.5	7.3	7.1
20		3.1	2.3	4.2	4.5	4.8	5.7	7.8	6.8
22		3.2	2.7	4.4	4.6	4.5	5.9	7.4	7.0
30	3.4	2.7	4.8	5.5	5.8	6.3	8.9	9.2	
1982									
Jan.	3	3.8	3.0	4.9	6.0	6.6	6.6	10.1	9.4
	7	4.3	2.8	—	5.5	—	—	—	—
	11	3.8	3.3	4.2	4.0	—	—	—	—
	15	4.1	3.9	4.1	3.9	—	—	—	—
	19	3.2	2.7	4.9	4.4	—	—	—	—
	23	4.9	4.1	5.6	6.2	—	—	—	—
	27	5.2	4.4	5.8	6.3	—	7.4	—	9.9
	31	5.6	4.4	5.6	6.6	7.9	7.0	9.5	9.8

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

7 K(2)

		(μg/ml)							
		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1982									
Feb.	4	5.2	4.5	5.7	7.4	9.0	7.2	—	10.7
	8	5.2	4.5	5.5	7.0	—	5.1	—	10.9
	12	5.5	4.5	6.2	7.4	—	—	—	—
	16	5.6	4.8	6.4	8.0	—	—	—	—
	20	5.9	4.8	6.3	8.1	—	—	—	—
	24	6.2	4.9	6.6	7.9	—	—	—	—
Mar.	28	6.0	4.6	5.9	6.8	—	—	—	—
	4	6.3	5.6	4.1	4.8	—	—	—	—
	8	5.9	4.8	4.1	4.8	—	—	—	9.2
	12	5.1	3.6	3.2	4.0	—	—	—	7.2
	16	5.0	2.8	3.0	3.1	—	6.4	—	7.3
	20	5.7	3.6	4.6	3.5	—	7.8	11.5	7.2
Apr.	24	6.3	4.7	3.1	2.9	13.5	6.9	11.1	6.9
	28	7.3	4.5	2.8	3.2	10.8	6.2	9.2	7.2
	1	7.8	5.1	4.3	4.1	10.5	6.0	9.4	7.3
	5	7.2	4.4	4.5	4.0	10.4	5.8	11.4	8.0
	9	8.5	6.0	6.0	6.2	11.7	8.1	12.4	9.8
	13	8.5	6.2	6.4	6.2	12.6	7.9	13.8	10.4
May	16	8.3	6.3	5.8	6.9	11.2	7.2	10.9	10.2
	17	7.7	6.0	5.1	5.2	9.1	6.7	8.4	7.8
	21	7.9	6.2	5.4	4.8	7.9	6.9	7.3	7.1
	25	7.3	6.1	5.0	4.6	7.4	6.6	7.5	6.5
	29	7.3	5.9	5.1	4.7	7.3	6.5	6.9	7.0
	3	7.9	6.4	5.8	5.4	8.0	7.1	9.4	8.0
June	7	8.6	6.6	5.6	4.9	8.4	8.0	10.2	8.9
	11	8.4	6.6	5.8	4.8	9.1	8.3	8.2	8.6
	15	8.4	6.5	6.3	5.4	9.6	8.8	12.0	9.2
	19	8.3	6.3	6.4	5.3	10.5	9.2	12.7	10.1
	23	7.5	6.0	5.9	4.9	11.6	9.7	13.4	13.6
	27	7.7	6.0	6.3	5.6	12.5	9.8	14.7	11.1
July	31	8.4	6.4	7.3	6.6	14.1	10.8	15.6	12.5
	4	8.1	6.5	5.9	7.3	15.0	10.0	14.4	11.8
	8	6.7	5.8	5.6	5.2	14.8	8.0	10.3	8.8
	12	7.3	6.1	6.2	5.6	10.6	8.6	10.6	9.1
	16	7.1	6.5	6.2	4.7	10.6	9.0	12.7	9.3
	20	6.9	6.1	6.2	5.4	10.3	9.4	11.0	8.6
Aug.	24	6.5	6.1	5.5	5.4	10.1	10.0	10.4	8.6
	28	6.6	6.3	4.8	5.7	12.0	7.6	14.2	10.7
	2	6.3	6.0	5.3	5.4	8.9	7.5	11.6	8.7
	6	6.7	6.1	6.0	5.9	8.3	8.3	9.5	8.9
	10	6.4	6.3	5.6	5.2	9.2	8.7	12.2	9.3
	14	6.7	6.4	6.1	5.8	9.5	9.3	11.7	9.3
Sept.	18	7.1	6.5	6.7	6.5	10.9	9.8	13.4	10.8
	22	6.7	6.6	6.5	5.2	12.6	10.4	15.0	10.3
	26	9.7	11.4	6.4	5.9	7.2	9.3	20.8	14.3
	30	6.0	6.0	5.6	5.2	9.2	8.6	8.8	8.1
	3	5.3	5.1	5.4	5.6	9.0	7.5	8.3	7.9
	7	5.2	4.1	4.6	4.9	7.8	7.4	7.2	7.6
Oct.	11	5.4	2.6	5.1	5.8	8.1	8.2	7.7	7.7
	15	5.6	1.7	6.5	7.5	10.3	9.0	8.4	8.6
	19	6.0	3.3	—	8.6	14.1	10.2	8.9	8.1
	23	7.1	8.4	—	9.8	19.0	—	—	6.6
	27	7.8	7.6	—	10.8	20.6	12.5	—	5.7
	31	7.5	5.8	—	10.6	23.2	13.1	—	5.7

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

7. K(3)

($\mu\text{g/ml}$)

		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1982									
Sep.	4	7.4	3.2	—	—	24.9	—	—	—
	8	7.8	6.2	—	—	—	—	—	—
	12	7.6	6.9	4.0	5.5	9.7	3.7	6.6	6.9
	16	4.9	7.2	2.9	4.5	6.6	5.8	5.8	5.7
	20	5.5	5.6	4.0	4.4	8.2	7.1	6.6	6.6
	24	4.7	4.1	3.5	4.5	8.9	6.9	5.9	8.9
Oct.	28	4.1	3.8	4.1	4.2	6.0	6.6	4.9	6.6
	2	4.7	3.8	3.9	4.2	5.8	6.3	6.2	5.0
	6	4.2	4.2	4.2	3.9	6.0	6.5	5.7	3.7
	10	3.5	3.3	3.7	4.3	6.2	5.1	5.9	6.7
	14	3.8	3.5	3.1	3.4	4.9	5.1	5.9	4.2
	18	4.1	3.5	3.1	3.2	5.5	4.6	6.0	7.9
	22	3.6	3.5	3.5	4.0	6.0	5.3	5.8	6.2
	26	3.6	3.4	3.0	3.8	5.6	4.9	4.9	4.8
Nov.	30	3.9	3.5	4.2	4.1	5.6	5.7	6.0	5.1
	3	4.3	3.5	5.1	4.6	6.0	6.0	5.7	4.7
	7	4.8	3.9	5.2	4.4	6.0	3.8	6.1	4.8
	11	4.1	3.7	4.3	4.3	7.0	4.6	5.3	4.6
	15	3.3	3.3	3.2	3.5	5.2	3.6	3.7	3.4
	19	2.5	3.2	3.3	3.6	5.1	3.6	3.5	3.2
	23	3.8	3.4	4.3	3.7	5.1	3.7	4.0	3.3
Dec.	27	3.9	3.4	4.9	3.9	5.1	3.9	3.9	3.3
	1	3.6	3.3	3.5	3.3	4.8	4.3	3.8	3.2
	5	3.3	3.2	3.1	3.5	4.8	3.9	3.4	3.1
	9	3.3	3.0	3.7	3.3	4.7	3.5	3.3	2.8
	13	3.5	3.1	3.9	3.5	4.7	4.1	3.5	2.9
	17	3.5	3.1	4.3	3.7	4.7	3.7	3.6	3.0
	21	3.5	3.1	4.3	4.0	4.6	3.5	3.8	3.1
	25	3.6	3.1	4.7	4.3	4.7	3.7	4.2	3.3
29	3.6	3.2	4.8	4.4	4.8	4.0	4.4	3.5	
1983									
Jan.	2	3.6	3.0	4.1	4.2	4.8	3.5	4.1	3.3
	6	3.6	3.1	4.1	4.2	4.7	3.9	4.2	3.4
	10	3.6	3.1	4.5	4.4	4.8	4.3	4.3	3.5
	14	3.7	3.1	4.0	4.3	4.8	3.9	4.5	3.6
	18	3.6	3.0	4.2	4.4	4.8	4.1	4.5	3.6
	22	3.4	3.0	3.8	4.3	4.9	3.6	4.4	3.6
	26	3.5	2.9	3.6	4.1	4.7	3.8	4.8	3.8
	30	3.5	3.0	3.6	4.3	4.8	3.6	4.7	3.9
Feb.	3	3.6	3.0	3.6	4.6	5.1	4.1	4.7	4.0
	7	3.6	3.0	3.7	4.9	5.2	4.1	4.7	4.3
	11	3.1	3.6	3.6	5.1	5.3	3.5	4.7	4.4
	15	3.7	3.1	3.8	5.2	5.6	4.1	5.1	4.7
	19	3.7	3.2	3.5	3.5	5.5	4.7	5.2	4.5
	23	3.2	2.9	2.8	3.6	5.3	4.5	3.1	2.8
	27	3.2	2.8	2.8	3.2	5.0	4.4	3.5	2.9

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

8. Na(1)

		(μg/ml)								
		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol		
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**	
1981										
May	26	9.6	10.2	15.0	15.2	26.6	18.2	13.8	13.1	
June	15	17.6	21.2	21.4	29.0	51.2	29.4	33.6	25.2	
	29	15.2	15.2	19.2	22.8	32.8	25.6	19.6	19.2	
	14	16.4	17.3	22.5	25.5	38.1	31.9	30.0	25.2	
July	28	21.0	20.5	26.8	36.2	67.2	35.7	47.9	45.1	
	24	22.8	21.0	34.1	53.0	55.0	50.3	64.0	62.8	
Aug.	5	25.7	21.8	24.5	26.6	45.5	53.8	37.2	32.7	
	10	21.0	20.7	24.2	21.6	47.0	47.8	46.0	29.7	
Sep.	12	20.4	21.9	18.6	21.4	29.1	46.7	30.5	27.5	
	17	17.7	17.0	17.8	20.3	28.3	28.3	23.3	20.3	
	18	18.3	17.2	19.3	20.7	29.1	24.9	20.3	20.0	
	19	18.6	17.5	19.5	22.0	30.8	25.3	20.0	21.4	
	21	17.5	18.1	18.5	20.7	28.5	29.1	25.0	21.7	
	28	17.0	16.9	20.4	22.0	29.8	26.5	24.0	24.2	
	30	17.1	16.8	18.0	21.7	28.2	26.2	22.6	21.0	
	Oct.	2	16.8	16.6	20.2	23.2	25.5	23.0	24.4	22.2
		4	13.2	14.0	16.8	19.2	24.8	21.9	19.4	18.5
		6	14.0	14.5	16.8	19.7	25.1	21.7	19.2	18.1
	Nov.	8	14.3	13.9	16.6	18.8	23.9	21.6	20.0	17.2
10		13.3	14.2	19.4	22.2	28.7	24.8	22.1	21.7	
13		13.2	14.6	16.8	20.4	26.9	23.7	21.0	18.2	
16		13.9	13.9	19.9	22.3	27.6	25.1	22.0	19.2	
19		13.7	14.3	20.2	22.5	28.7	28.2	20.6	19.7	
22		15.3	15.2	20.9	25.9	30.0	25.0	24.5	22.1	
25		7.8	10.7	19.3	20.4	24.6	16.1	19.4	18.1	
28		9.5	10.7	19.1	21.2	23.1	19.5	18.6	18.0	
31		11.4	12.2	21.1	23.0	24.8	20.7	17.5	19.0	
Dec.		4	12.7	13.0	21.9	25.0	25.1	22.8	22.7	19.8
		7	11.6	12.5	19.9	20.8	28.8	21.3	21.1	19.4
	12	10.3	10.9	18.0	20.7	22.8	19.8	18.2	18.4	
	16	10.9	10.8	18.6	20.3	22.1	19.3	16.7	17.6	
	20	11.2	11.2	19.3	21.8	21.9	19.9	19.7	18.1	
	24	11.7	11.7	20.4	20.6	22.4	21.4	21.2	19.7	
	28	11.8	12.1	21.0	25.2	22.9	22.3	24.2	22.1	
1982	2	10.8	12.5	18.4	19.5	22.3	23.0	26.2	18.7	
	6	10.9	11.4	18.4	20.9	22.3	22.3	20.1	21.1	
	10	11.2	11.5	18.9	21.8	23.1	22.6	21.0	21.3	
	14	11.5	11.5	19.6	22.7	23.7	23.3	22.6	21.8	
	20	12.8	11.5	23.3	28.3	27.8	25.7	28.0	25.8	
	22	12.1	12.3	22.3	27.5	26.4	25.5	26.8	25.9	
	30	13.4	12.6	24.6	32.7	33.3	27.5	32.5	32.6	
1982	Jan.	3	14.3	13.5	25.0	34.7	36.0	28.6	35.6	
		7	15.7	14.5	—	33.8	—	—	—	
		11	13.1	13.6	21.7	23.5	—	—	—	
		15	13.7	14.6	21.3	25.0	—	—	—	
		19	13.6	13.1	23.5	28.0	—	—	—	
		23	12.2	11.8	20.0	23.5	—	—	—	
		27	12.8	—	20.9	24.4	—	—	—	
		31	14.5	12.2	21.0	25.4	29.6	20.8	25.5	

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

8. Na(2)

($\mu\text{g/ml}$)

		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1982									
Feb.	4	13.3	13.0	19.9	26.6	32.3	22.8	—	28.7
	8	13.1	12.8	20.2	27.2	—	16.6	—	29.4
	12	13.7	12.8	23.0	27.7	—	—	—	—
	16	14.1	13.4	23.1	28.7	—	—	—	—
	20	14.8	13.7	23.4	29.8	—	—	—	—
	24	16.3	13.8	23.9	29.3	—	—	—	—
Mar.	28	14.5	13.5	21.8	25.8	—	—	—	—
	4	13.5	12.5	17.7	18.4	—	—	—	—
	8	12.6	11.6	16.9	19.0	—	—	—	25.3
	12	14.4	12.6	22.7	22.6	—	—	—	27.0
	16	13.3	11.8	23.8	22.2	—	34.1	—	30.6
	20	13.0	11.8	19.3	20.4	—	33.2	46.0	25.7
Apr.	24	15.9	13.6	22.6	21.9	67.8	32.3	39.1	25.6
	28	16.6	14.1	19.0	21.9	51.8	28.6	29.6	27.1
	1	17.7	14.9	25.0	23.9	52.9	29.8	34.4	27.6
	5	17.1	14.5	22.0	24.8	47.0	28.9	46.3	28.3
	9	19.0	16.6	22.2	24.3	38.9	29.7	38.2	28.4
	13	20.2	17.2	22.5	24.4	—	29.6	41.7	30.2
May	16	16.0	14.7	19.3	21.6	30.3	26.0	28.4	23.1
	17	15.6	15.0	19.2	19.2	27.5	23.5	21.6	18.8
	21	16.4	15.8	19.7	19.2	25.9	22.6	19.5	17.8
	25	14.9	14.9	19.6	19.7	26.1	21.6	19.2	18.3
	29	15.0	14.6	19.8	20.3	26.3	21.0	17.8	18.5
	3	16.2	15.4	19.3	21.6	27.4	22.2	23.4	19.8
June	7	16.8	16.4	20.3	21.2	30.0	24.3	27.0	21.8
	11	15.6	15.2	19.9	22.6	31.7	24.9	27.4	20.7
	15	15.7	15.1	20.6	22.6	33.4	26.2	31.6	22.9
	19	15.7	15.3	20.8	22.5	37.2	27.1	34.1	25.5
	23	13.9	13.6	21.3	22.1	42.8	28.0	27.9	28.6
	27	14.5	14.3	20.6	22.9	49.9	30.3	42.4	27.0
July	31	15.8	15.6	22.0	24.6	53.9	32.4	46.1	32.4
	4	14.9	14.9	21.4	23.7	62.8	30.7	45.1	31.7
	8	12.7	13.8	20.2	21.1	34.3	23.7	25.0	20.1
	12	13.7	14.4	20.5	22.3	31.2	25.5	23.4	21.4
	16	13.2	15.1	21.5	21.2	31.8	27.5	30.2	21.4
	20	13.5	14.7	20.9	22.7	31.5	27.6	24.7	21.6
Aug.	24	12.4	14.1	19.2	22.2	32.9	28.4	25.7	22.4
	28	12.2	13.8	20.8	22.7	30.2	24.9	25.1	23.2
	2	12.0	13.6	20.8	22.6	26.7	24.1	20.1	20.2
	6	13.2	14.4	21.7	24.1	27.8	24.4	21.8	20.9
	10	11.8	14.0	21.0	23.0	29.0	24.7	26.9	21.4
	14	12.7	15.0	21.3	24.0	30.0	26.9	24.6	22.0
Sept.	18	13.9	15.8	22.1	26.3	36.4	30.2	29.9	24.7
	22	13.0	17.5	22.0	23.7	43.9	31.5	35.9	24.2
	26	23.1	34.4	22.8	27.4	26.3	29.2	59.0	35.9
	30	11.8	15.1	21.1	23.2	28.1	22.3	21.6	18.8
	3	9.8	12.6	19.7	22.7	27.0	21.9	18.9	18.0
	7	10.4	13.1	20.8	23.2	25.7	21.3	18.1	17.4
Oct.	11	12.4	14.3	21.9	25.3	28.1	22.6	18.8	18.5
	15	14.4	15.7	22.5	30.5	33.5	26.0	22.4	21.6
	19	16.5	18.8	—	34.8	44.6	31.1	26.9	25.1
	23	18.9	21.4	—	39.3	52.4	—	—	28.6
	27	18.2	23.0	—	43.4	57.3	35.6	—	25.5
	31	14.6	21.4	—	—	55.7	35.9	—	25.2

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

8. Na (3)

($\mu\text{g/ml}$)

		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1982									
Sep.	4	14.9	17.0	—	—	60.9	—	—	—
	8	15.6	20.7	—	—	—	—	—	—
	12	13.8	15.7	20.7	22.5	25.8	10.7	15.7	15.0
	16	10.5	12.5	20.1	21.9	22.7	17.2	15.4	14.5
	20	10.1	15.8	22.2	21.5	24.9	19.5	17.2	16.7
	24	10.0	11.9	20.9	21.3	26.3	20.1	16.3	14.6
Oct.	28	9.2	10.8	21.1	19.8	21.7	17.6	14.4	13.4
	2	10.5	11.3	19.4	21.0	22.8	18.5	15.2	13.2
	6	8.8	11.8	20.8	20.7	23.3	19.5	16.5	14.0
	10	7.1	8.3	19.1	18.6	21.8	17.3	14.6	13.7
	14	8.6	10.1	20.1	18.9	21.9	16.4	14.8	12.4
	18	9.7	10.6	19.8	20.0	23.0	16.7	15.4	14.4
Nov.	22	7.4	9.0	19.9	19.0	21.9	18.2	14.8	13.1
	26	8.5	9.8	19.6	19.8	21.8	16.8	14.2	12.7
	30	9.4	10.0	21.0	21.3	22.3	18.9	15.9	13.5
	3	10.5	10.9	19.9	21.8	23.8	19.7	17.6	16.4
	7	10.5	10.7	19.7	21.8	21.4	15.9	20.8	17.3
	11	8.5	10.1	17.6	18.0	20.3	17.4	14.7	11.4
Dec.	15	7.1	8.4	16.7	17.5	20.0	15.8	13.3	10.5
	19	8.0	8.9	17.2	18.2	19.2	15.6	13.3	10.8
	23	8.7	9.4	18.0	19.0	20.1	16.0	14.8	11.3
	27	9.0	9.7	18.6	19.7	20.4	17.5	14.8	11.5
	1	7.1	7.9	17.6	17.9	19.3	17.2	14.8	12.0
	5	7.4	8.4	17.1	18.0	19.8	16.9	14.0	11.6
1983	9	7.4	8.6	17.5	17.8	19.8	16.2	13.9	10.9
	13	8.3	8.9	18.0	18.6	19.9	18.0	14.7	11.3
	17	8.7	9.1	18.7	19.6	20.2	16.8	14.7	11.8
	21	8.9	9.1	19.1	20.8	20.2	16.4	15.8	12.4
	25	9.3	9.5	20.0	22.4	20.4	17.9	17.0	13.5
	29	9.5	9.7	20.4	23.2	20.6	18.9	17.6	14.2
Jan.	2	9.5	9.4	19.0	22.5	20.4	17.1	16.8	13.6
	6	9.8	9.9	18.8	22.0	20.3	18.9	17.4	13.8
	10	10.0	10.1	19.7	22.6	20.8	20.3	18.1	15.0
	14	10.2	10.1	19.2	22.5	21.2	19.0	19.0	15.3
	18	10.7	10.1	19.4	22.8	20.9	19.8	19.1	15.8
	22	9.3	10.1	18.6	22.2	21.5	18.3	19.2	16.3
Feb.	26	9.2	9.9	19.0	21.8	21.3	19.5	21.0	17.0
	30	9.3	10.0	19.0	22.0	21.8	19.0	20.7	17.6
	3	9.4	9.8	18.8	23.3	22.6	20.8	21.5	18.3
	7	9.4	9.8	18.9	24.8	23.7	20.8	22.1	19.5
	11	9.9	9.5	19.0	25.8	24.9	19.2	22.3	20.7
	15	9.8	9.9	19.7	26.5	26.5	21.5	24.3	21.8
	19	7.7	8.4	19.1	18.6	25.5	23.0	25.2	21.2
	23	7.3	8.2	16.8	18.0	23.5	22.0	15.2	13.0
	27	7.7	8.6	16.8	17.0	22.2	20.8	16.2	14.3

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

9. Ca(1)

($\mu\text{g/ml}$)

		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1981									
May	26	7.8	3.9	37.6	34.7	63.5	45.0	53.5	50.5
June	15	5.1	4.5	38.8	34.8	56.8	47.6	53.3	43.0
	29	8.0	5.1	38.0	36.0	64.0	49.5	55.0	52.0
July	14	50.6	42.8	61.0	57.1	92.9	77.6	88.6	81.1
	28	59.1	52.6	66.5	75.6	132.0	99.4	129.0	120.8
Aug.	24	88.1	76.1	86.7	91.4	116.1	130.4	167.1	154.8
Sep.	5	113.3	74.0	66.4	64.6	119.0	122.6	118.5	105.3
	10	108.7	90.2	71.3	60.0	133.6	135.1	150.9	121.1
	12	100.0	83.0	63.4	57.0	127.9	129.1	118.5	106.0
	17	97.7	73.8	64.8	61.7	94.5	102.4	111.7	100.8
	18	94.0	70.9	58.1	57.0	93.6	83.0	88.7	90.6
	19	96.2	69.6	56.2	59.2	95.8	82.3	86.2	91.9
	21	83.4	71.3	56.6	51.7	90.9	97.4	105.7	92.8
	28	79.2	70.9	52.5	59.6	115.8	80.0	105.3	97.7
	30	75.3	66.3	54.1	58.8	105.5	83.1	99.6	98.0
Oct.	2	77.7	68.5	63.9	70.8	107.7	81.2	120.0	115.4
	4	61.2	56.5	46.2	54.2	89.2	73.9	83.9	84.6
	6	62.3	56.9	51.9	53.1	84.2	70.0	77.7	80.8
	8	60.0	51.9	53.1	49.6	81.5	76.9	86.9	79.2
	10	47.7	43.2	44.7	54.7	86.4	64.4	87.7	88.5
	13	41.5	37.2	38.5	38.8	69.7	64.1	68.9	67.6
	16	48.0	42.4	49.6	41.6	70.0	65.7	73.2	66.3
	19	52.3	47.7	52.7	49.4	74.0	67.3	71.4	73.0
	22	53.7	48.1	57.3	53.5	76.3	73.4	93.7	81.2
	25	26.7	28.6	33.5	40.3	62.2	44.9	64.1	65.2
	28	27.4	25.7	44.0	38.0	55.3	54.4	65.9	63.4
	31	31.4	29.0	47.2	42.1	57.4	53.7	54.4	62.9
Nov.	4	34.3	29.8	50.6	44.1	57.5	59.6	77.5	67.9
	7	33.3	30.4	50.9	37.1	66.9	61.8	68.8	65.3
	12	34.6	32.5	49.8	43.8	66.0	61.8	68.5	65.8
	16	34.8	30.8	53.4	46.6	63.5	61.3	64.0	66.2
	20	34.8	30.8	53.8	49.2	61.5	62.2	74.2	67.3
	24	37.5	30.8	53.8	49.2	61.3	65.0	79.6	73.1
	28	37.3	34.2	59.6	57.3	63.4	72.1	89.0	76.9
Dec.	2	36.1	35.3	52.2	43.5	60.3	68.4	84.8	64.9
	6	31.9	30.7	48.3	43.5	60.0	65.0	68.0	61.0
	10	32.8	30.0	48.8	46.4	60.0	63.0	68.5	64.0
	14	33.6	29.3	48.8	48.0	61.2	65.3	71.4	69.4
	20	31.5	25.8	48.9	52.2	58.7	65.2	79.8	69.2
	22	30.4	28.7	50.4	50.8	56.1	63.5	79.5	74.2
	30	29.8	26.9	48.8	58.2	63.2	65.6	87.1	85.4
	30	29.8	26.9	48.8	58.2	63.2	65.6	87.1	85.4
1982									
Jan.	3	31.7	25.5	49.9	56.6	65.2	65.2	94.6	89.2
	7	38.1	28.2	48.0	58.3	—	—	—	—
	11	31.9	28.6	41.7	40.9	—	—	—	—
	15	33.5	35.2	45.0	42.9	—	—	—	—
	19	31.9	28.2	50.2	47.0	—	—	—	—
	23	36.5	30.4	49.6	52.3	—	—	—	—
	27	36.9	30.8	48.8	53.8	—	67.7	—	85.0
	31	40.4	30.4	49.2	54.6	68.8	61.2	80.4	88.1

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

9. Ca (2)

($\mu\text{g}/\text{ml}$)

		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1982									
Feb.	4	38.5	45.0	46.9	61.2	76.5	63.1	—	91.9
	8	37.7	32.7	46.2	58.1	—	44.6	—	94.2
	12	38.8	33.5	53.5	61.9	—	—	—	—
	16	41.9	35.8	55.8	65.4	—	—	—	—
	20	38.8	35.4	53.8	67.3	—	—	—	—
	24	44.2	35.4	55.4	65.0	—	—	—	—
Mar.	28	43.8	34.2	50.4	56.5	—	—	—	—
	4	46.1	40.4	37.3	42.3	—	—	—	—
	8	45.8	36.2	38.5	42.7	—	—	—	80.0
	12	41.6	29.7	29.7	37.1	—	—	—	65.4
	16	50.1	37.0	43.2	41.1	—	74.4	—	80.9
	20	56.1	39.7	50.8	44.2	—	81.0	111.2	75.7
Apr.	24	64.0	48.0	40.6	39.4	123.9	75.5	107.1	72.2
	28	61.0	41.4	31.5	35.6	97.6	61.9	79.5	69.2
	1	75.0	46.0	48.5	42.0	99.4	64.8	90.0	75.0
	5	72.9	45.4	52.8	42.3	62.2	68.8	113.5	85.6
	9	69.4	49.0	51.0	52.0	93.5	71.0	98.0	81.5
	13	71.3	51.0	55.1	52.5	99.5	70.5	128.4	90.4
May	16	71.1	53.1	49.5	56.0	90.2	64.7	84.7	86.4
	17	64.1	50.5	44.9	44.5	75.8	61.6	74.8	72.7
	21	65.2	51.5	47.5	42.5	68.6	62.1	67.4	67.9
	25	63.1	48.7	44.8	41.2	73.6	64.0	70.8	63.5
	29	64.4	48.3	45.9	42.7	73.0	63.5	67.6	68.1
	3	64.7	51.1	51.8	47.2	77.6	68.7	88.3	75.6
June	7	69.1	51.7	51.8	45.3	79.5	75.3	97.4	85.1
	11	66.4	52.1	53.0	43.7	85.5	77.9	104.2	81.6
	15	67.4	52.0	57.2	48.2	88.0	83.1	112.4	86.3
	19	64.9	50.6	56.3	48.2	96.8	86.3	118.9	98.7
	23	59.2	48.0	52.7	44.8	105.3	89.4	126.5	103.3
	27	59.9	48.4	54.4	50.3	113.8	92.4	136.4	105.9
July	31	65.1	51.7	64.4	58.6	125.1	100.0	141.5	117.4
	4	61.1	51.7	52.2	63.0	133.0	94.1	130.2	107.3
	8	51.1	46.8	49.6	49.0	109.0	77.1	94.0	86.8
	12	55.3	48.8	55.0	52.0	97.9	81.8	96.2	86.5
	16	54.5	52.0	55.1	45.5	97.1	85.3	114.6	89.4
	20	51.7	48.8	55.4	50.4	96.2	88.2	101.9	86.5
Aug.	24	49.1	48.2	51.0	50.6	93.7	92.4	94.3	82.8
	28	51.6	48.3	45.4	52.5	109.0	74.1	102.7	100.1
	2	48.7	46.8	49.3	51.3	84.9	74.4	82.1	86.0
	6	52.4	47.4	53.9	55.4	84.9	81.8	90.3	87.1
	10	49.6	48.4	51.2	49.4	87.5	84.4	113.2	90.6
	14	52.6	49.1	56.4	53.6	89.2	87.9	108.1	89.4
Sept.	18	56.8	51.1	60.6	58.9	101.3	93.8	120.0	99.5
	22	51.8	51.0	58.6	48.6	116.0	97.1	134.7	96.1
	26	73.7	51.0	56.7	52.2	65.1	85.3	179.4	121.7
	30	46.4	47.2	51.0	50.0	89.7	82.7	84.3	80.2
	3	42.6	41.7	49.7	52.0	89.4	75.9	79.8	77.3
	7	41.5	34.0	45.0	46.9	80.2	72.9	70.2	75.3
Oct.	11	42.7	21.2	48.1	53.8	83.7	80.0	76.4	77.9
	15	43.2	14.5	59.8	66.4	103.6	88.8	80.7	87.4
	19	46.4	27.3	—	74.3	138.2	100.6	84.9	82.2
	23	53.4	65.7	—	83.3	175.0	—	—	66.4
	27	58.2	59.4	—	87.9	181.9	115.9	—	55.4
	31	54.9	44.0	—	80.9	197.4	104.7	—	55.6

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

9. Ca (3)

($\mu\text{g/ml}$)

		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol		
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**	
1982										
Sep.	4	57.2	44.4	—	—	206.6	—	—	—	
	8	58.1	47.8	—	—	—	—	—	—	
	12	56.1	53.0	38.4	50.1	91.5	33.7	59.7	60.0	
	16	38.7	35.2	34.3	45.3	72.0	54.2	58.0	54.1	
	20	39.0	44.2	40.8	42.1	84.8	62.7	61.4	51.5	
	24	39.0	34.1	36.3	44.8	91.1	62.4	56.6	43.9	
Oct.	28	33.4	31.1	40.0	43.0	67.5	62.4	52.6	41.9	
	2	37.9	31.2	38.9	42.7	69.6	59.9	55.4	39.1	
	6	34.2	34.1	42.0	41.5	70.6	61.7	59.1	33.4	
	10	29.1	27.9	37.8	42.5	71.6	50.4	59.1	41.6	
	14	31.0	28.8	33.9	36.5	64.3	49.8	50.7	37.4	
	18	33.4	29.8	33.9	35.8	69.9	46.1	56.0	43.0	
Nov.	22	28.8	29.1	36.2	41.2	60.3	51.2	57.2	48.1	
	26	30.2	28.0	32.9	40.5	60.3	48.1	51.5	45.8	
	30	32.0	29.0	42.9	42.4	61.3	57.4	57.5	49.0	
	3	34.7	31.2	49.4	43.8	65.3	59.4	62.9	53.5	
	7	38.2	30.4	49.2	41.5	56.6	44.9	65.5	51.6	
	11	32.1	28.8	40.6	39.6	66.4	49.6	57.0	49.9	
Dec.	15	26.3	25.3	31.1	34.0	52.1	42.8	45.2	39.7	
	19	28.3	25.1	32.5	34.2	52.0	42.8	44.0	39.2	
	23	30.1	26.2	41.1	35.5	52.8	44.3	47.4	40.0	
	27	29.9	26.6	46.1	38.1	53.2	46.9	46.5	41.3	
	1	27.9	25.8	33.9	31.8	48.5	48.3	46.2	39.8	
	5	25.8	24.3	30.4	34.0	49.3	45.5	42.6	37.2	
1983	9	25.3	23.4	35.2	33.0	49.2	41.7	41.5	35.2	
	13	26.7	23.8	37.0	34.6	49.0	47.6	43.1	36.1	
	17	27.7	24.2	40.6	36.3	49.0	44.0	44.1	37.3	
	21	27.8	23.8	40.8	38.7	49.6	42.3	45.7	38.5	
	25	28.2	24.2	45.2	41.8	49.8	44.5	49.2	39.6	
	29	28.9	25.1	45.9	42.9	50.2	46.9	50.2	42.2	
1983	Jan.	2	29.3	24.4	39.4	39.5	49.8	43.6	48.7	40.1
		6	29.5	25.2	39.3	39.4	49.0	46.6	49.0	40.7
		10	29.7	24.8	42.3	40.6	49.3	49.9	49.5	42.1
		14	30.3	24.9	38.2	39.6	50.0	46.6	51.6	43.1
		18	29.7	24.2	39.8	40.7	49.4	47.4	51.5	43.0
		22	27.5	23.9	36.1	39.6	50.6	43.2	50.9	44.1
	Feb.	26	27.9	23.0	34.9	37.8	48.7	45.8	54.7	44.7
		30	28.6	23.5	35.0	39.8	49.5	43.8	53.9	45.4
		3	28.8	24.0	34.3	42.4	51.0	47.8	54.1	46.8
		7	29.3	24.6	35.3	45.0	52.3	47.6	54.4	49.2
		11	25.3	24.7	34.5	46.3	52.7	42.2	52.9	49.7
		15	29.7	29.2	36.6	47.4	55.6	47.0	56.9	53.3
	19	28.8	24.9	32.8	31.6	51.4	50.9	58.4	51.6	
	23	24.9	26.1	27.1	32.6	50.4	48.9	38.3	34.0	
	27	25.7	24.3	27.4	29.5	48.3	48.3	42.0	35.5	

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

10. Mg (1)

($\mu\text{g/ml}$)

		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1981									
May	26	5.8	4.5	11.5	11.1	39.2	21.1	18.2	16.9
June	15	3.5	3.3	13.0	13.0	31.0	23.0	19.2	14.5
	29	5.5	6.0	12.0	12.0	32.7	23.0	18.0	18.0
July	14	11.0	7.0	12.5	12.0	34.0	25.0	18.5	18.0
	28	10.0	6.7	13.0	13.5	28.0	25.0	19.7	20.0
Aug.	24	16.5	8.0	14.0	11.0	15.0	23.0	16.3	15.2
Sep.	5	33.0	14.0	11.5	12.5	26.0	22.3	17.0	18.3
	10	27.5	14.0	12.0	12.5	26.0	25.0	15.5	18.0
	12	21.3	11.5	13.0	11.5	33.0	25.0	17.0	16.0
	17	27.0	13.5	10.5	11.3	30.7	21.0	17.3	18.5
	18	28.5	15.2	10.5	12.0	32.0	22.0	19.0	19.0
	19	27.5	13.5	10.3	11.5	31.0	21.3	18.7	18.8
	21	23.0	13.5	11.5	11.5	33.7	25.0	20.0	22.2
	28	19.8	12.3	10.5	11.5	32.0	23.5	18.0	18.5
	30	19.0	12.5	10.2	11.0	32.0	22.0	18.5	18.5
Oct.	2	13.0	9.5	9.8	9.8	31.0	20.0	17.5	17.0
	4	13.7	10.0	10.7	11.0	32.0	23.0	18.7	19.0
	6	13.8	11.0	10.7	12.0	34.0	25.0	19.0	19.5
	8	13.5	10.0	10.5	11.0	32.7	24.7	18.5	18.8
	10	9.8	8.8	10.5	10.8	32.0	23.0	19.5	18.5
	13	10.5	8.7	10.8	11.7	34.0	26.0	19.5	19.5
	16	10.5	8.5	10.5	11.8	35.0	26.0	19.5	19.5
	19	9.5	7.5	10.5	11.5	33.0	24.0	18.7	19.0
	22	9.7	8.0	10.5	12.0	33.0	25.0	19.0	19.5
	25	4.5	4.5	10.8	11.5	28.7	18.7	19.5	18.5
	28	4.0	3.8	11.5	11.5	29.7	22.0	19.5	18.0
	31	4.0	3.5	11.0	11.5	30.0	21.0	19.2	18.5
Nov.	4	4.0	3.5	11.2	11.5	31.0	24.0	20.5	18.5
	7	3.7	3.0	11.0	11.0	26.0	23.0	18.7	17.5
	12	3.5	3.0	10.8	11.0	29.3	24.0	19.0	17.7
	16	4.5	3.5	11.0	11.2	29.3	24.0	19.0	17.3
	20	3.5	2.5	11.0	10.5	30.0	23.0	19.0	17.8
	24	4.0	3.0	11.0	11.5	31.0	23.3	18.5	18.0
	28	2.5	2.5	7.5	8.5	23.0	17.0	13.2	12.3
Dec.	2	3.5	3.0	10.8	10.5	30.0	25.0	18.8	16.7
	6	4.0	3.0	11.0	11.0	30.7	25.0	19.0	17.5
	10	4.0	3.0	11.3	11.2	30.0	25.5	19.0	18.2
	14	4.0	3.0	11.0	11.0	30.0	25.0	18.8	17.8
	20	4.0	3.0	11.2	11.0	31.0	24.0	19.5	18.5
	22	3.5	2.5	10.7	11.0	30.3	24.0	19.5	18.3
	30	4.5	3.5	12.0	12.0	30.7	24.0	19.7	18.5
1982									
Jan.	3	4.0	3.0	11.5	11.5	30.3	25.0	21.5	19.5
	7	3.5	3.5	11.0	11.8	—	—	—	—
	11	4.2	3.5	11.5	11.5	—	—	—	—
	15	4.0	4.0	11.0	11.5	—	—	—	—
	19	4.3	3.5	11.2	11.0	—	—	—	—
	23	4.0	2.5	10.8	10.8	—	—	—	—
	27	4.0	3.5	11.3	11.2	—	25.0	—	17.5
	31	4.0	3.0	10.0	11.0	14.0	17.3	22.8	17.0

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

10. Mg(2)

($\mu\text{g/ml}$)

		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1982									
Feb.	4	4.5	3.5	11.5	11.8	26.3	23.0	—	18.5
	8	4.5	3.5	10.2	11.3	—	14.0	—	18.0
	12	4.5	3.0	11.0	11.2	—	—	—	—
	16	4.5	3.0	11.0	11.2	—	—	—	—
	20	4.5	3.3	11.2	11.5	—	—	—	—
Mar.	24	4.3	3.0	11.5	11.5	—	—	—	—
	28	4.5	3.5	10.8	10.5	—	—	—	—
	4	5.4	3.0	10.2	9.5	—	—	—	—
	8	9.0	4.3	10.5	10.7	—	—	—	14.0
	12	10.0	4.5	10.0	11.0	—	—	—	15.5
Apr.	16	12.0	5.5	10.5	11.0	—	26.0	—	17.0
	20	13.0	6.5	11.0	11.5	—	25.0	17.0	17.0
	24	16.5	7.5	10.0	11.0	24.0	25.0	16.0	16.5
	28	21.5	8.5	10.5	11.0	25.0	24.0	17.0	17.5
	1	29.7	12.4	10.7	12.6	26.9	26.6	20.0	20.7
May	5	30.7	12.9	11.7	12.6	28.5	26.1	21.1	21.3
	9	30.8	12.7	11.1	12.7	29.4	24.8	22.2	21.4
	13	30.6	13.0	11.3	12.6	29.9	25.1	22.1	21.5
	16	35.2	16.9	12.4	11.9	30.1	27.0	22.4	21.2
	17	35.3	17.2	12.3	12.7	30.9	27.2	23.8	22.7
June	21	33.7	17.3	12.3	13.2	31.7	28.1	24.2	23.0
	25	27.6	15.2	12.7	13.1	31.7	28.2	24.7	22.0
	29	27.0	15.2	12.5	13.4	32.0	27.6	25.2	23.0
	3	25.4	14.9	13.8	13.5	31.9	28.3	24.7	23.3
	7	20.1	12.8	12.5	12.3	31.1	25.2	24.0	21.2
July	11	19.1	11.3	12.8	13.4	32.2	25.6	23.7	19.6
	15	17.5	10.8	12.7	12.3	31.8	26.1	23.9	21.1
	19	17.0	10.1	12.9	12.6	30.5	26.4	24.1	21.7
	23	14.4	8.3	12.3	12.6	30.1	25.7	22.8	22.0
	27	14.4	8.5	13.0	12.3	30.1	26.4	23.1	22.0
August	31	13.8	8.3	13.1	13.1	30.5	26.9	23.7	22.0
	4	10.9	6.9	12.6	12.5	27.6	25.8	22.7	17.9
	8	11.6	8.4	13.3	13.6	30.8	25.9	23.1	22.7
	12	11.3	8.4	13.9	12.9	31.3	25.8	24.0	22.7
	16	10.6	7.8	13.7	12.7	32.6	26.1	23.3	21.8
September	20	11.1	8.3	13.8	13.6	32.6	26.6	22.6	21.2
	24	10.1	8.3	13.7	13.7	31.7	28.2	21.8	20.5
	28	8.7	7.9	13.0	13.5	32.0	25.5	23.1	20.6
	2	9.3	8.7	13.6	14.2	33.3	26.6	23.8	23.0
	6	9.2	8.7	13.8	14.4	34.0	27.2	24.4	22.4
October	10	8.3	8.5	13.5	13.9	33.8	25.6	24.6	21.2
	14	8.5	8.7	14.0	14.4	33.9	27.0	24.0	20.9
	18	8.3	8.5	14.2	14.6	34.7	27.7	24.0	22.0
	22	7.6	8.4	14.2	14.0	36.2	27.9	24.4	20.8
	26	3.1	5.5	12.4	10.8	14.0	22.0	17.0	11.8
November	30	7.3	8.6	13.8	15.4	33.4	26.2	23.5	22.7
	3	6.0	6.2	14.1	15.0	29.6	25.2	20.2	21.8
	7	6.1	5.8	13.9	15.3	30.7	27.0	18.4	21.5
	11	6.4	7.1	15.9	15.4	33.1	28.3	18.5	21.9
	15	—	—	—	—	—	—	—	—
December	19	5.9	9.0	—	14.4	38.2	—	—	21.4
	23	5.8	7.3	—	14.9	39.9	—	—	20.1
	27	4.5	5.5	—	15.0	37.6	—	—	21.3
	31	5.8	5.4	—	6.2	39.0	31.6	21.3	20.1

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

10. Mg (3)

($\mu\text{g/ml}$)

		Sandy soil		Light colored Andosol		Alluvial soil		Humic Andosol	
		1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
1982									
Sep.	4	5.8	5.9	—	—	39.2	—	—	—
	8	5.8	5.7	—	—	—	—	—	—
	12	3.3	2.5	8.2	7.8	14.0	3.8	10.8	9.3
	16	2.9	3.3	7.9	9.1	21.8	12.6	13.3	10.1
	20	2.4	3.1	8.8	8.5	20.6	13.6	11.5	9.2
	24	2.7	2.8	7.9	8.4	19.7	14.4	12.1	8.5
Oct.	28	2.2	2.6	7.7	8.0	22.3	13.2	12.9	8.6
	2	2.5	2.8	7.2	8.4	24.1	14.1	15.7	9.6
	6	2.0	2.5	7.7	7.8	22.1	14.5	14.3	8.1
	10	1.6	1.9	7.7	7.2	21.6	12.9	14.1	7.5
	14	1.9	2.0	7.5	7.3	23.7	14.6	14.4	7.8
	18	1.9	2.2	7.4	7.6	24.3	14.2	14.8	9.1
	22	1.5	1.6	7.2	7.0	21.3	12.5	14.1	7.8
	26	1.6	1.6	7.3	7.5	23.2	13.1	14.1	8.2
Nov.	30	1.7	1.6	8.0	7.8	23.6	15.3	14.4	8.4
	3	1.9	1.7	10.4	9.2	24.1	16.0	14.0	9.3
	7	1.9	1.8	10.1	9.1	15.0	14.2	3.3	6.5
	11	1.6	1.6	8.4	7.7	18.3	11.9	12.4	6.7
	15	1.7	1.6	8.3	9.1	22.8	14.3	13.5	7.4
	19	1.9	1.6	8.5	7.6	23.4	14.1	14.1	7.6
	23	2.0	1.6	9.2	8.5	23.4	14.6	13.4	7.6
	27	1.9	1.7	9.2	8.7	—	16.2	12.8	7.8
Dec.	1	1.5	1.3	8.8	8.9	18.4	13.1	13.0	7.5
	5	1.8	1.5	8.3	8.1	20.6	13.2	13.0	7.0
	9	1.9	1.5	8.5	8.5	21.3	13.7	13.0	7.1
	13	1.9	1.6	8.9	8.5	22.1	14.6	12.8	7.2
	17	1.9	1.6	8.9	8.6	22.2	14.4	12.8	7.3
	21	1.9	1.6	9.2	8.9	22.4	14.4	12.4	7.4
	25	2.0	1.7	9.6	9.2	22.8	15.4	12.7	7.6
	29	1.9	1.7	9.5	8.9	22.5	15.6	11.9	7.5
1983									
Jan.	2	1.9	1.6	8.9	8.9	22.1	15.3	12.3	7.2
	6	1.9	1.7	9.1	8.6	22.6	15.5	11.7	7.2
	10	2.0	1.6	9.5	8.8	22.0	15.7	11.2	7.4
	14	1.9	1.6	9.3	8.4	21.7	15.1	11.7	7.3
	18	1.9	1.6	9.1	8.4	21.6	15.3	11.9	7.1
	22	1.8	1.6	8.8	8.6	21.4	15.3	11.4	7.0
	26	1.8	1.6	8.9	8.3	21.0	16.0	12.7	7.3
	30	1.9	1.6	8.8	8.1	20.7	15.4	12.8	7.1
Feb.	3	1.9	1.7	8.5	8.3	20.3	15.1	12.1	7.0
	7	1.9	1.7	8.8	8.9	20.3	15.2	12.3	7.2
	11	1.7	2.0	8.7	8.9	19.8	14.8	11.6	7.3
	15	2.0	1.8	9.0	9.0	20.0	16.4	12.8	7.3
	19	1.5	1.5	8.4	7.2	13.0	15.0	12.5	7.4
	23	1.8	1.7	7.9	7.9	14.0	14.0	10.1	5.4
	27	1.8	1.8	8.0	8.0	15.6	13.3	11.3	5.9

*Fertilizer applied plot

**Sludge applied plot

国立公害研究所特別研究成果報告

- 第 1 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究——霞ヶ浦を対象域として——昭和51年度。(1977)
第 2 号 陸上植物による大気汚染環境の評価と改善に関する基礎的研究——昭和51, 52年度 研究報告。(1978)

(改 称)

国立公害研究所研究報告

- ※第 3 号 A comparative study of adults and immature stages of nine Japanese species of the genus *Chironomus* (Diptera, Chironomidae). (1978)
(日本産ユスリカ科 *Chironomus* 属9種の成虫, サナギ, 幼虫の形態の比較)
- 第 4 号 スモッグチャンバーによる炭化水素-窒素酸化物系光化学反応の研究——昭和52年度 中間報告。(1978)
- 第 5 号 芳香族炭化水素-窒素酸化物系の光酸化反応機構と光酸化二次生成物の培養細胞に及ぼす影響に関する研究——昭和51, 52年度 研究報告。(1978)
- 第 6 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅱ)——霞ヶ浦を中心として。——昭和53年度。(1979)
- ※第 7 号 A morphological study of adults and immature stages of 20 Japanese species of the family Chironomidae (Diptera). (1979)
(日本産ユスリカ科20種の成虫, サナギ, 幼虫の形態学的研究)
- ※第 8 号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究——昭和52, 53年度 研究報告。(1979)
- 第 9 号 スモッグチャンバーによる炭化水素-窒素酸化物系光化学反応の研究——昭和53年度 中間報告。(1979)
- 第 10 号 陸上植物による大気汚染環境の評価と改善に関する基礎的研究——昭和51~53年度 特別研究報告。(1979)
- 第 11 号 Studies on the effects of air pollutants on plants and mechanisms of phytotoxicity. (1980)
(大気汚染物質の植物影響およびその植物毒性の機構に関する研究)
- 第 12 号 Multielement analysis studies by flame and inductively coupled plasma spectroscopy utilizing computer-controlled instrumentation. (1980)
(コンピュータ制御装置を利用したフレイムおよび誘導結合プラズマ分光法による多元素同時分析)
- 第 13 号 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1980)
Part 1. The distribution of chironomid species in a tributary in relation to the degree of pollution with sewage water.
Part 2. Description of 20 species of Chironominae recovered from a tributary.
(多摩川に発生するユスリカの研究
——第1報 その一支流に見出されたユスリカ各種の分布と下水による汚染度との関係——
——第2報 その一支流に見出された Chironominae 亜科の20種について——)
- 第 14 号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壌生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究——昭和53, 54年度 特別研究報告。(1980)
- ※第 15 号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究——昭和54年度 特別研究報告。(1980)
- 第 16 号 計測車レーザーレーダーによる大気汚染遠隔計測。(1980)
- ※第 17 号 流体の運動および輸送過程に及ぼす浮力効果——臨海地域の気象特性と大気拡散現象の研究——昭和53, 54年度 特別研究報告。(1980)

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

- 第 40 号 大気汚染物質の単一及び複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究 — 昭和56年度 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 Orthoclaadiinae recovered from the main stream in the June survey.
 Part 7. Additional species collected in winter from the main stream.
 (多摩川に発生するユスリカ類の研究
 — 第 5 報 本流に発生するユスリカ類の分布に関する 6 月の調査成績とユスリカ亜科に属する 15 新種等の記録 —
 — 第 6 報 多摩本流より 6 月に採集されたエリユスリカ亜科の各種について —
 — 第 7 報 多摩本流より 3 月に採集されたユスリカ科の各種について —)
- 第 44 号 スモッグチャンバーによる炭化水素-窒素酸化物系光化学反応の研究 — 環境大気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年~55年度 特別研究報告. (1983)
- 第 46 号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土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) — 霞ヶ浦の湖内物質循環とそれを支配する因子 — 昭和55~57年度 特別研究報告. (1984)
- 第 52 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (III) — 霞ヶ浦高浜入における隔離水界を利用した富栄養化防止手法の研究 — 昭和55~57年度 特別研究報告. (1984)
- 第 53 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (IV) — 霞ヶ浦の魚類及び甲殻類現存量の季節変化と富栄養化 — 昭和55~57年度 特別研究報告. (1984)
- 第 54 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (V) — 霞ヶ浦の富栄養化現象のモデル化 — 昭和55~57年度 特別研究報告. (1984)
- 第 55 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (VI) — 富栄養化防止対策 — 昭和55~57年度 特別研究報告. (1984)
- 第 56 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (VII) — 湯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 — 大気中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)

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

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

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

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

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

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

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

* in Japanese

※ out of stock

RESEARCH REPORT FROM
THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES, JAPAN

No. 68

国立公害研究所研究報告 第68号
(R-68-'84)

昭和59年8月31日発行

編集 国立公害研究所編集委員会
発行 環境庁 国立公害研究所
茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2

印刷 前田印刷株式会社筑波支店
茨城県筑波郡谷田部町東新井14-5

Published by the National Institute for Environmental Studies
Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
August 1984