

福岡県農業総合試験場特別報告

第20号

福岡県における農業用水の水質実態と
無機養分の流入および浄化が水稻栽培に
及ぼす影響

平成16年3月

福岡県農業総合試験場

(福岡県筑紫野市大字吉木)

SPECIAL BULLETIN
OF
THE FUKUOKA AGRICULTURAL RESEARCH CENTER

NO. 20

**Trends in Quality of Irrigation Water in Fukuoka Prefecture and the
Effects of the Inflow and Removal of Nutrients from Irrigation Water
on rice Cultivation**

by

MIZUTA Kazue

THE FUKUOKA AGRICULTURAL RESEARCH CENTER

Chikushino, Fukuoka 818-8549, Japan

March 2004

福岡県における農業用水の水質実態と
無機養分の流入および浄化が水稻栽培に
及ぼす影響

水 田 一 枝

2 0 0 4

序

近年、農業用水の水質汚染は都市近郊のみならず農業地帯にも広く進行している。農業用水の汚染は水稻の生育や品質への悪影響を与えるだけでなく、広く自然環境保全の面からも懸念されるものであり、早急かつ抜本的な対策が求められている。そのため福岡県では、県内農業用水の水質維持や向上、環境に配慮した作物生産技術の開発に従来から重点的に取り組んできたところである。

そのため本研究では、県内の農業用水の実態を調査し、その長期的な経年変化を明らかにし、農業用水とともに流入する養分量を水稻の生育時期別に推定し、汚濁水が米の食味に及ぼす影響を検討し、さらに減肥による施肥方法の改善や植物を利用した水質の浄化を試みている。

その結果得られた知見は、県内農業用水の水質維持や向上、環境保全型の水稲栽培管理技術の確立および化学肥料の低投入による良食味米生産拡大などの諸施策に寄与するところが大きいいえる。そこで、ここに特別研究報告として公表することとし、今後の本県における環境保全、低投入持続型農業生産のための基礎的資料として利活用され、ひいては県民によるさらなる深い理解に基づく水田農業の振興に寄与することを期待するものである。

なお、本報告は 1995 ～ 2001 年にかけて、筑後川水系開発基本調査および水質保全対策事業などの一連の調査研究として、福岡県農業総合試験場生産環境研究所化学部公鉤害研究室を中心として行われたものを取りまとめたものである。

本研究の遂行や論文の執筆にあたり終始激励とご指導を頂いた宮崎大学農学部教授續栄治博士に厚くお礼申しあげる。また、福岡県農業総合試験場公鉤害研究室の職員をはじめとする多くの職員の協力により成果をあげることができたことを付記し、関係各位に深く感謝の意を表する。

平成 16 年 3 月

福岡県農業総合試験場

場長 今林 惣一郎

目 次

第 1 章	緒 論 -----	1
第 2 章	福岡県における農業用水およびクリーク水路の水質実態 -----	3
	緒 言 -----	3
	第 1 節. 福岡県の農業用水の水質実態とその経年変化 -----	3
	1. 材料と方法 -----	4
	2. 結果と考察 -----	5
	第 2 節. 福岡県南部の筑後川および矢部川を主水源とする クリークの水質実態 -----	14
	1. 材料と方法 -----	14
	2. 結果と考察 -----	14
	摘 要 -----	23
第 3 章	農業用水による水田への窒素およびリンの流入量の推定 -----	24
	緒 言 -----	24
	1. 材料と方法 -----	24
	2. 結果と考察 -----	25
	摘 要 -----	28
第 4 章	植物を利用した農業用水の浄化機能の開発 -----	29
	緒 言 -----	29
	第 1 節. 汚水中の窒素・リンに対する有用植物の浄化能力 -----	29
	1. 材料と方法 -----	29
	2. 結果と考察 -----	32
	第 2 節. 遮光処理が植物の浄化能力に及ぼす影響 -----	35
	1. 材料と方法 -----	35
	2. 結果と考察 -----	35
	摘 要 -----	43
第 5 章	農業用水の水質が水稻栽培に及ぼす影響 -----	45
	緒 言 -----	45
	第 1 節. 農業用水中の窒素濃度が水稻の生育, 収量および食味に 及ぼす影響 -----	45
	1. 材料と方法 -----	45
	2. 結果と考察 -----	46
	第 2 節. 富栄養化農業用水の利用による施肥量削減の可能性 --	52
	1. 材料と方法 -----	52
	2. 結果と考察 -----	52
	摘 要 -----	54
第 6 章	総合考察 -----	55
	総合摘要 -----	57
	謝 辞 -----	59
	引用文献 -----	60
	S u m m a r y -----	63

第1章 緒 論

私たち人間が生きていくうえで必要不可欠な水は、水道の蛇口をひねれば出てくるものとなっている。そして日本のほとんどの水道水は、そのまま飲む事ができる。しかし地球上にある水分の97%は海水であり、人間が使用できる淡水はわずか3%にすぎない。

このわずかしが使用できない人間にとって貴重な水をめぐる情勢のなかで、今、水資源不足、酸性雨、水質汚濁などの水環境の悪化が深刻になってきている。このことは食糧不足と共に、21世紀の人類にとって最重要課題となっている。これら水環境の悪化は、地球規模での温暖化や干ばつ、地下水の過剰な汲み取り、世界の都市化、人口の増加、途上国の工業化、火力発電や自動車の排気ガスなどが要因となっている。とりわけ水質汚濁は、環境基本法で「公害」と規定され、人間の健康を保護するために厳しく基準が定められている。

水質汚濁の内容としては、食べ物や動植物の死骸などの有機物による汚染、重金属、ダイオキシン類や農薬などが流れ込む有害物質による汚染、栄養塩類（窒素、リン、カリウム）が増える富栄養化による汚染、土砂などの無機物による汚染によるものである（生活と科学社 2003）。なかでも栄養塩類増加による富栄養化による水質汚染は、安全・安心で高品質な水稻を安定的に生産していくうえで重要な問題である。

富栄養化による水質汚濁は、年とともに生活排水に含まれる有機物や農耕地からの化学肥料成分流出などによる窒素、リンなどの無機物による汚濁により増加しており、河川や湖沼などの水質の悪化を招いている（玉川大学工学部 2003）。また水質汚濁は、水稻の生育を阻害して収量を減じることが報告されている（坂井ら 1974）。

こうした我が国の水質状況の中で、農業用水の使用量は年間水使用量のうちの約3分の2を占めている。さらに、農業用水の約95%が水稻のかんがい用として利用され、その水源のほとんどは河川・湖沼である（河川情報センター 1999、農林水産省 2002）。一方、環境保全の視点から近年は過剰施肥をできるだけ避け、環境に配慮した農業を目指した「環境に優しい水稻高品質栽培技術の開発」が行政や生産者から強く求められている。このため、農業用水の富栄養化の進行の防止およびその軽減に向けての施肥管理の方策を構築するとともに、農業用水の水質に対応した水稻高品質生産のための肥培管理技術の確立が急務であると考えられる。

ところで、従来の農業用水の水質に関する研究は、農業用水基準値（農林省 1970）が設定されている項目である水素イオン濃度（pH）、電気伝導率（EC）、全窒素（T-N）、化学的酸素要求量（COD）、浮遊物質（SS）、溶存酸素量（DO）についての実態と変動の解明に重点がおかれてきた。その結果、農業用水の水質汚濁の進行が進んでいることが明らかにされてきた（松村ら 1981、日高・芝 1983、森川・松岡 1985、平山 1986、伊藤ら 1990、桑名ら 1990、井上・庄籠 1991、小沢 1991、宮崎ら 1994）。しかしながら、これらの研究はいずれも人体にとっての有害物質や条例の排出基準からみた窒素およびリンの含有率の測定に関する検討が主であった。それに対し、農業用水の水質実態を水稻生産の視点から検討し、富栄養化した農業用水中に含まれる窒素、リンおよびカリウムの流入量を地域別ならびに水稻の生育時期別に明らかにした報告は見あたらない。また、河川・湖沼水・農業用水の富栄養化は、意図しない追肥を行ったのと同じ結果となってしまう可能性があり、玄米中のタンパク含有率を高めて食味の低下を招くことが懸念されるが、水質汚濁水が米のタンパク質含有率や食味に及ぼす影響を見たものはない。さらに、陸生植物を利用した農業用水の水質浄化を試みた報告も極めて少ない。

これらの諸点を明らかにすることは、河川・湖沼を窒素やリンなどによる水質汚濁から防ぎ、良好な水質を保つ環境保全型的水稻栽培法を確立するうえで重要である。さらに、地域別の農業用水

の水質に対応した水稻肥培管理技術の確立に役立ち、ひいては安全・安心な良食味米の生産拡大に大きく寄与することが期待できる。

本研究は以上のような背景と観点から、環境に配慮した、化学肥料の低投入による水稻高品質生産技術の開発のための基礎的知見を得る目的で行われた。その構成として、まず、第2章では、最近の福岡県における農業用水および県南部の筑後地域におけるクリーク水の実態を明らかにするとともに、過去10年間ににおける水質の変動についての検討を行った。第3章では、富栄養化した農業用水中に含まれる窒素、リンおよびカリウムの流入量を地域別ならびに水稻の生育時期別に推定した。第4章では、富栄養化した溜池を想定した、低濃度の汚水に対する植物の浄化能力の効果および遮光が植物の浄化能力に及ぼす影響について明らかにし、植物による浄化機能の開発を検討した。第5章では、農業用水中の窒素濃度が、水稻の生育、収量および食味に及ぼす影響を明らかにし、収量と食味からみた施肥量の削減についての検討を行った。

第2章 福岡県における農業用水およびクリーク水路の水質実態

緒言

近年、都市近郊の農村地帯では、宅地と農地の混在化や生活様式の多様化に伴い、農業用水の水質汚濁が進行している（高橋 1995, 斉藤・半田 1985）。農業用水の汚濁は水稻の生育に悪影響を与えており、酸・アルカリ性が強い場合や塩類濃度が高い場合には根の活力が低下して生育を抑制し、一方、窒素濃度が過剰に高い場合では過繁茂、倒伏、品質の低下などを引き起こす（森川ら 1982, 土山ら 1984）。

福岡県での農業用水の水質については、井上・庄籠（1991）が全窒素濃度（T-N）や化学的酸素要求量（COD）が多くの採取地点で農業用水としての基準値を超えていること、筑後川下流で有機物による汚染が著しいこと、都市近郊では生活排水による汚染がみられることなどを報告している。福岡県以外の地域における農業用水の水質の実態については、福島県（小沢 1991）、群馬県（松村ら 1981）、栃木県（宮崎ら 1994）、茨城県（平山 1986）、埼玉県（日高・芝 1983）、千葉県（森川・松岡 1985）、兵庫県（桑名ら 1990）、山口県（伊藤ら 1990）などがあり、いずれも福岡県の場合とほぼ同様な傾向であることを報告している。

生活様式が以前にも増して多様化、複雑化している現在において、農業用水の水質状況は、これら10数年前の報告内容に比べてさらに富栄養化が進んでいることが予測される。しかし、富栄養化の原因となるT-NやCOD、全リン濃度（T-P）の実態についての詳細は明らかにされていない。

また、福岡県内でも筑後川と矢部川が流れる県南部の筑後地域は肥沃な土壌を有する農業地帯の中心である。この地域は低湿地であるため、古くからかんがいや排水用として縦横に人工的に掘られた水路（クリーク）が発達している。両河川を主水源としたクリークは農業用水のみならず、洪水調整、集落排水、防火用水、淡水魚の養殖、自然環境維持と地域住民の生活に密着した諸機能を有している。しかしながら、宅地と農地の混在化の進展や生活様式の多様化にともない、前述したようなクリーク本来の機能に障害が出ており、クリークの水質についても生活排水の影響が大きいこと（柚山ら 1994）、麦作圃場の近傍では暗渠からの肥料成分の流出が大きく、クリークの水質に影響を及ぼしていること（白谷ら 1986）、農業用水として反復利用されるため、窒素、リン酸、カリウムなどの含有率が河川よりも高いこと（古賀・白石 1977）などが報告されている。散在するクリークの統廃合による大規模な用・排水系統の再編成や水路拡張などの整備が行われているが、生活排水などの混入は避けられない状況であるため、このような水質汚濁の改善は、非常に困難である。このことからクリークの水質の富栄養化に伴う汚濁は、自然環境の劣化のみならず水稻の生育や良食味米生産への悪影響が懸念される。

一方、地球環境の保護という視点から、環境に配慮した農業を目指し「環境に優しい水稻高品質栽培技術の開発」が求められており（福岡県 2002）、農業用水中の養分に対応した水稻肥培管理技術の新たな構築が急務となっている。

そこで本章では、近年の福岡県内の農業用水およびクリークの水質実態とその経年変化を地域別ならびに水稻の生育期別に検討した。

第1節 福岡県の農業用水の水質実態とその経年変化

1996～1998年における福岡県内の主要な農業用水の水質実態とその経年変化を明らかにした。

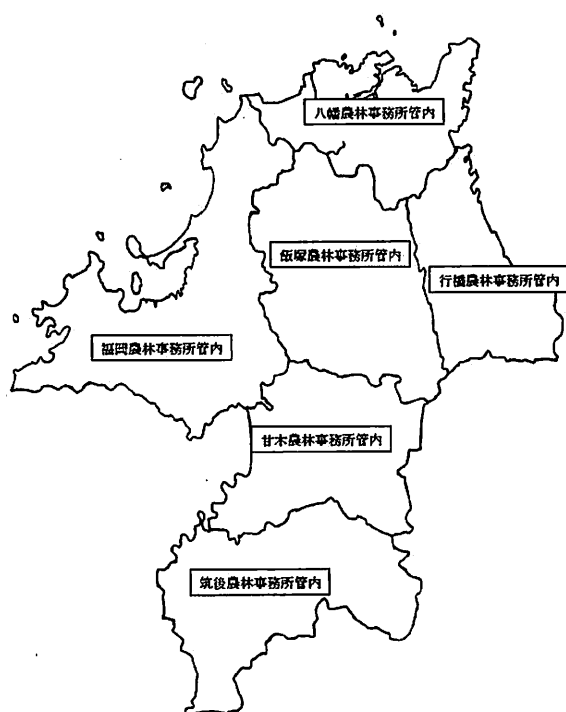
1. 材料と方法

調査は、1996年には福岡県内の21地点、1997年には14地点、1998年には11地点、合計46地点で行った。採水地点の地域を福岡県の各農林事務所管内別で見ると（第2-1図）、福岡地域は1997年では3地点、1998年では4地点、甘木地域は1997年では5地点、1998年では3地点、飯塚・八幡地域は1996年では3地点、1997年では2地点、1998年では1地点、筑後地域は1996年では15地点、1998年では3地点、行橋地域は1996年では3地点、1997年では4地点であった。第2-2図に、採水地点の位置図を示した。

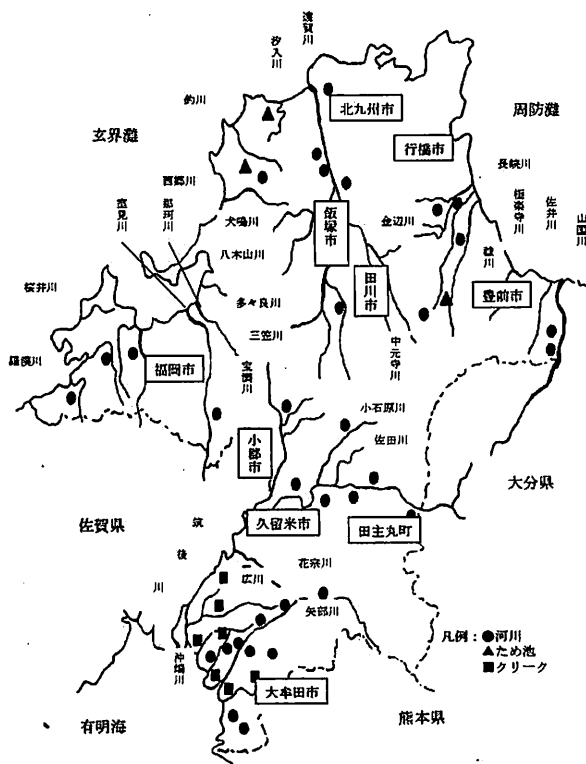
各地域での代かき期、分けつ期、幼穂形成期、穂ばらみ期および登熟期にあわせておおむね5回ずつ、各水路で2Lのポリエチレン容器に直接採水した。採水当日または翌日に、第2-1表に示した分析の項目と方法に基づき分析を行った。採取した場所は、河川を取水とする農業用水路が35地点（採水地点における水路の幅は1～3 m、水深は約1 m：第2-3図）、クリークが8地点（同幅2～35 m、深さ0.3～4 m）、溜め池を取水とする用水路が3地点（同幅1.2～3 m、深さ0.1～3 m）であった。

第2-2表に、各地域別の生育段階別の採水期間を示した。採水期間は採水地点での対象品種の生育段階に合わせており、飯塚・八幡地域ではコシヒカリ、その他の地域ではヒノヒカリを対象とした。同一地域内でも作期が異なるため採取時期の幅広い場合があるが、ここでは水稻の生育時期別にあわせて期間をとりまとめた。総計で232点の水質調査を行った。

同じ採水地点での経年変化を検討するため、今回行った1996～1998年の第3次調査（以後3次調査）の調査結果の中で、1986～1988年の第1次調査（以後1次調査）における水質調査結果および1991～1993年の第2次調査（以後2次調査）における水質調査結果と共通な採水地点に絞って経年変化を比較した。これらの採水地点数は、福岡地域では3地点、甘木地域では6地点、飯塚・八幡地



第2-1図 福岡県内における農林事務所の管内図。



第2-2図 農業用水の採水地点。

域では5地点、筑後地域では10地点、行橋地域では4地点であり、それらの平均値で水質の経年変化を検討した。調査時期は、1次調査、2次調査および3次調査ともほぼ同じ時期にあわせて調査を行った。

第2-1表 水質分析方法¹⁾。

項 目	分析方法
p H	ガラス電極法 (TOA社 WM-50EG)
電気伝導率 (EC)	電気伝導法 (TOA社 WM-50EG)
化学的酸素要求量(COD)	100℃における過マンガン酸カリウムによる酸素消費量
全窒素濃度 (T-N)	紫外線吸光光度法 (島津社 UV-160A)
アンモニア態窒素濃度 (NH ₄ -N)	インドフェノール法
硝酸態窒素濃度 (NO ₃ -N)	フェノール硫酸法・イオンクロマト法 ²⁾
有機態窒素濃度 (Org-N)	T-Nから無機態窒素 (NH ₄ -NとNO ₃ -N) を差し引いたもの
全リン濃度 (T-P)	モリブデン青法
塩素イオン濃度 (Cl ⁻)	モール法・イオンクロマト法 ²⁾
溶存酸素濃度 (DO)	溶存酸素計 (YSI 59型)
浮遊物質 (SS)	ガラス繊維ろ過法

1) JIS0120工場排水試験法 (1993) に準拠して行った。

2) イオンクロマト法 (TOSOH SC-8020シリーズ, TSKGEL IC-Anion-PWXLカラム) については1998年以降の調査について適用した。

第2-2表 地域別の用水の採取期間 (月/日)。

農林地域	採水地点数	代かき期	分げつ期	幼穂形成期	穂ばらみ期	登熟期
福岡	7	6/11-6/17	6/26-7/ 8	7/17-7/22	7/30-9/11	9/11-10/ 7
甘木	8	6/10-6/17	6/26-7/22	7/18-8/ 5	8/26-8/28	10/ 1-10/ 8
飯塚・八幡	6	4/26-6/27	5/16-6/27	6/27-8/ 8	7/18-9/11	8/ 8-10/ 2
筑後	18	6/17-6/19	7/ 1-7/ 2	7/31-8/ 5	8/26-8/29	10/ 3-10/31
行橋	7	6/ 4-6/13	6/25-7/ 4	7/24-8/ 1	8/ 8-8/28	9/12-10/31

調査期間：1996～1998年。

2. 結果と考察

1) 水質測定項目別に見た推移

第2-4図に、全調査点数232点におけるpH、電気伝導率 (EC)、COD、T-N、T-P、浮遊物質 (SS)、塩素イオン濃度 (Cl⁻) の頻度分布を示した。pHは、7.0～7.5に調査点数の半数以上が分布し、6.0未満は見られなかった。ECは、100～200 μScm^{-1} に調査点数の半数以上が分布した。CODは、2.0～4.0 mgL^{-1} における分布が最も多く、2.0 mgL^{-1} 以下から14.0 mgL^{-1} 以上まで広い範囲で分布した。T-Nは、1.0～2.0 mgL^{-1} に多く分布した。T-Pは、0.1 mgL^{-1} 以下が点数の半数以上を占めた。SSは、20 mgL^{-1} 以下に調査点数の半数以上が分布し、用水基準値である100 mgL^{-1} 以下にほとんどが分布した。

(A)



(B)



(C)



(D)



第2-3図 農業用水路採水地点.

(A) 福岡県福岡地域

(B) 福岡県筑後地域

(C) 福岡県甘木地域

(D) 福岡県飯塚・八幡地域

Cl^- は、 20.0 mgL^{-1} 以下にほとんどが分布したが、一部 100 mgL^{-1} を超えることがあった。

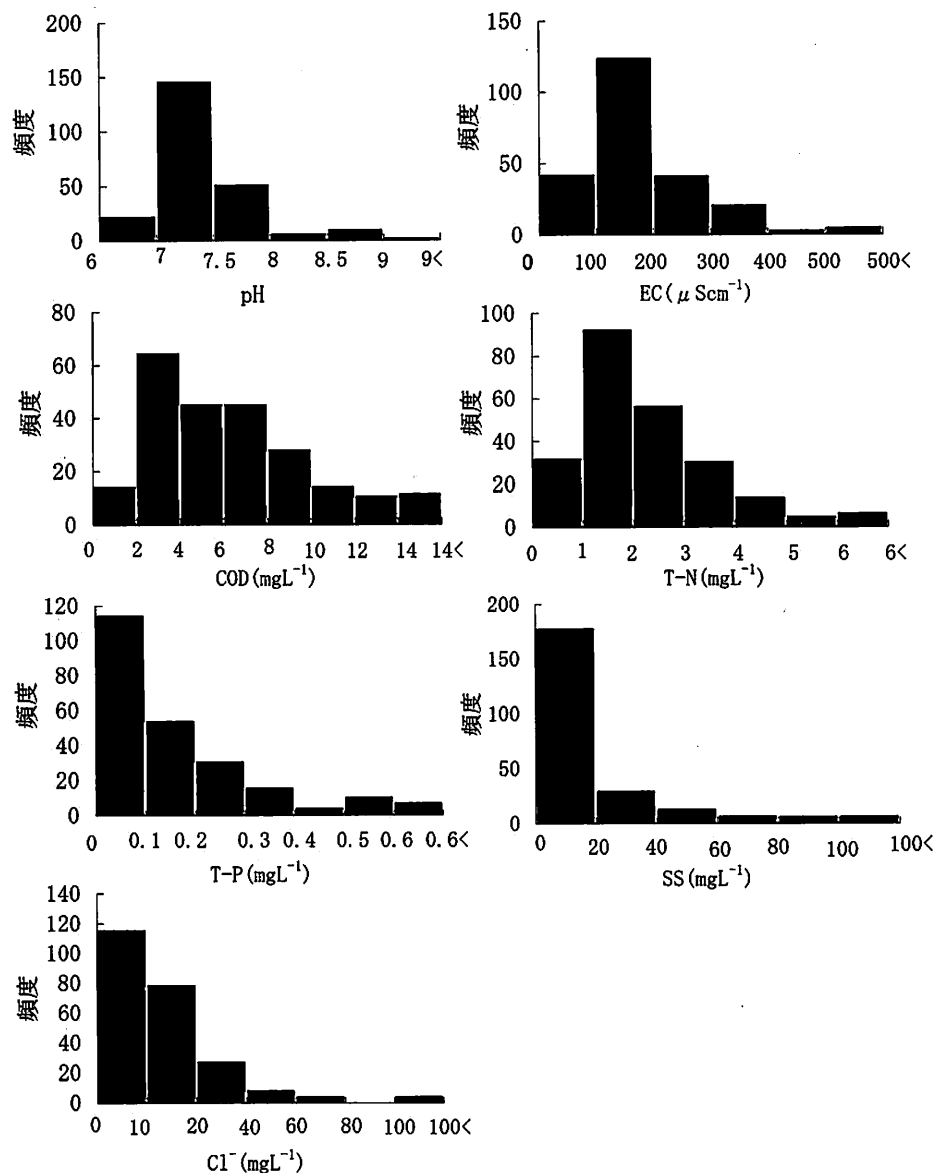
これらを、各地域の取水水系別に分け、それぞれの水質を1次、2次調査とあわせて第2-3表に示した。

pHの全平均値は7.4で、特に福岡地域、飯塚・八幡地域のため池で高い傾向が見られた。2次調査と比較して変化はなく、1次調査での平均値も7.3であり、変化はあまり見られなかった。

ECの平均値は $178 \mu \text{Scm}^{-1}$ で、筑後地域の隈川水系で農業用水基準値（以下基準値）を超えた。2次調査の $175 \mu \text{Scm}^{-1}$ よりやや高いが、1次調査より低くなった。

CODの平均値は 6.4 mgL^{-1} で、基準値を超えた水系が多かった。特に水稻生育に影響があると言われている 8 mgL^{-1} 以上（坂井ら 1974）の水系が、どの地域にも存在した。1次調査の 4.5 mgL^{-1} 、2次調査の 4.4 mgL^{-1} と比較して著しく増加した。

T-N濃度の平均値は 2.3 mgL^{-1} で、1次調査の平均 1.6 mgL^{-1} の時点で農業用水の基準値を超えており、2次調査における 2.0 mgL^{-1} と比較しても増加していた。



第2-4図 福岡県内における農業用水分析値の頻度分布 (n=232) .

福岡地域では那珂川水系, 行橋地域では山国川, 今川, 喜多良川水系のみが基準値以下であった. 一方, $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は, 一部高い採水地点があるものの, 1次調査, 2次調査と比較して, ほとんど変化してないことから, T-N濃度の経年的な増加は, T-Nからこれら無機態窒素濃度を差し引いたOrg-N濃度が増加したものであると考えられた.

T-P濃度の平均値は 0.17 mgL^{-1} であった. 1次調査の平均値は 0.14 mgL^{-1} であったので, T-P濃度も経年的に高くなった. Cl^- 濃度の平均値は 16.6 mgL^{-1} であったが, 筑後地域の隈川水系で海水の混入と思われる極めて高い値がみられた.

第2-4表に, 農林水産省による基準値を超える, すなわちpH 6.0~7.5, EC $300 \mu\text{S cm}^{-1}$ 以下, COD 6 mgL^{-1} 以下, T-N 1 mgL^{-1} 以下, SS 100 mgL^{-1} 以下(坂井ら 1974)を満たさない比率, および水稻の生育に影響を与えるとされるCODの 8 mgL^{-1} 以上とT-Nの 5 mgL^{-1} 以上(坂井ら 1974, 森川ら 1982)に入る比率を地域別ならびに水稻の生育時期別の平均でそれぞれ示した.

第2-3表 各地域の水系別に見た県内水質分析値

農林地域名	取水河川	pH	EC (μScm^{-1})	COD (mgL^{-1})	T-N (mgL^{-1})	$\text{NO}_3\text{-N}$ (mgL^{-1})	$\text{NH}_4\text{-N}$ (mgL^{-1})	Org-N (mgL^{-1})	T-P (mgL^{-1})	CL^- (mgL^{-1})
	基準値	6.0～ 7.5	300 以下	6 以下	1 以下					
福岡	雷山川	7.3	169	8.6	2.5	0.87	0.64	1.04	0.36	12.0
	羅漢川	7.0	143	6.7	1.9	0.53	0.53	0.79	0.36	11.2
	室見川	7.4	120	4.5	1.5	0.66	0.37	0.57	0.10	7.3
	那珂川	7.4	66	2.8	0.9	0.36	0.25	0.30	0.02	3.8
	大井川	7.4	241	6.8	4.0	1.49	0.83	1.68	0.21	22.5
	薬王寺川	7.6	147	2.5	1.7	0.89	0.34	0.47	0.07	10.4
	ため池	7.7	259	6.7	1.9	0.65	0.48	0.74	0.17	22.6
甘木	草場川	7.3	148	9.5	3.8	1.19	1.17	1.44	0.44	6.8
	筑後川	7.4	109	4.0	1.2	0.37	0.22	0.61	0.10	7.7
	小石原川	7.5	117	4.2	1.4	0.68	0.26	0.50	0.06	4.6
飯塚・八幡	堀川	7.5	271	8.3	2.4	0.52	0.43	1.44	0.20	16.0
	犬鳴川	7.5	259	7.5	1.8	0.27	0.38	1.13	0.20	15.9
	遠賀川	7.5	282	6.8	2.2	0.41	1.01	0.80	0.15	7.3
	彦山川	8.1	283	5.9	1.4	0.41	0.19	0.80	0.08	14.5
	ため池	8.6	188	6.5	2.2	0.83	0.39	0.98	0.08	14.7
	花宗川	7.4	105	2.6	2.3	1.78	0.10	0.44	0.03	6.6
筑後	隈川	7.6	496	13.2	3.3	0.37	0.27	2.70	0.46	141.4
	矢部川	7.2	136	4.0	3.2	1.90	0.14	1.17	0.08	8.8
	星野川	7.3	95	2.3	2.7	1.86	0.09	0.78	0.04	5.0
	沖端川	7.1	140	4.9	2.7	1.27	0.30	1.15	0.15	11.6
	クリーク	7.3	204	10.1	3.4	1.06	0.42	2.00	0.28	18.1
	佐井川	7.3	83	4.9	1.1	0.41	0.23	0.45	0.08	12.7
行橋	山国川	7.6	75	6.2	1.0	0.32	0.22	0.48	0.09	8.5
	白川	7.2	201	9.2	2.6	0.16	1.12	1.30	0.11	13.6
	今川	7.2	121	4.0	1.0	0.31	0.18	0.53	0.06	7.3
	喜多良川	7.5	101	2.5	0.9	0.39	0.16	0.39	0.04	7.2
	長峽川	7.0	232	4.3	2.0	0.69	0.30	1.01	0.11	16.3
	ため池	7.9	158	8.4	1.6	0.33	0.23	1.04	0.04	10.9
平均値	3次調査	7.4	178	6.4	2.3	0.83	0.38	1.12	0.17	16.6
	2次調査	7.4	175	4.4	2.0	0.68	0.38	0.98	0.16	8.7
	1次調査	7.3	194	4.5	1.6	0.80	0.38	0.42	0.14	12.2

網掛けは基準値を超える数値 (CODにおける濃い網掛けは 8mgL^{-1} 以上)。

Org-N (有機態窒素) は、T-N から無機態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$) を差し引いたもの。

1次調査：1986～1988年，2次調査：1991～1993年，3次調査：1996～1998年。

第2-4表 地域別および時期別にみた農業用水の基準値を超過比率(%)

農林地域 又は 時 期	pH*	EC	COD	COD	T-N	T-N	SS
	7.5<	300<	6<	8≤	1<	5≤	100<
		(μScm^{-1})	(mgL^{-1})	(mgL^{-1})	(mgL^{-1})	(mgL^{-1})	(mgL^{-1})
福 岡	35	11	41	22	86	6	2
甘 木	25	0	10	8	70	3	0
飯塚・八幡	60	34	69	43	94	0	0
筑 後	14	13	60	35	100	8	4
行 橋	31	0	40	20	74	0	0
代かき期	24	11	56	33	93	15	7
分けつ期	27	11	47	22	91	2	2
幼穂形成期	30	7	50	37	100	2	2
穂ばらみ期	30	9	33	15	80	0	0
登熟期	24	13	46	26	73	2	2
県全体	28	11	47	27	88	4	3
1次調査	18	10	23	10	76		

農業用水基準値は、pH: 6.0~7.5, EC: 300 μScm^{-1} 以下, COD: 6 mgL^{-1} 以下, T-N: 1 mgL^{-1} 以下, SS: 100 mgL^{-1} 以下である(坂井ら 1974)。

COD 8 mgL^{-1} ≤ および T-N 5 mgL^{-1} ≤ は、水稻の生育に被害を及ぼすとされる濃度。

*: pHの基準値は、6.0~7.5であり、基準値を超過数値は6.0未満または7.5より高い数値であるが、本調査結果において6.0未満がなかったため、7.5<とした。

pHは、調査した232点の内65点(28%)が基準値の7.5を超えており、6.0より低いものは認められず、7.5を超えた測定結果は飯塚・八幡地域が多かった。水稻生育期別の頻度分布では、ほぼ同様であった。1次調査では、基準値を満たしていない測定サンプルは全体の18%であったので(井上・庄籠 1991)、基準値を満たしていない割合は3次調査でかなり増加したことになる。

ECは、全体の11%が基準値の300 μScm^{-1} 以下を満たしていなかった。基準値を超えたサンプルは、飯塚・八幡地域に多く、甘木地域や行橋地域ではみられなかった。水稻生育期別では、登熟期に多く、次いで、代かき期と分けつ期に多くなる傾向であった。1次調査では全体の10%が基準値を超えていたので、この比率はあまり変化しなかった。

CODは全調査点数の内の108点(47%)が基準値の6 mgL^{-1} 以下を超えており、飯塚・八幡地域の比率が高く、代かき期および幼穂形成期が多かった。1次調査では全体の23%が基準値を超えていたので、CODの基準値を超える値も3次調査ではほぼ倍増した。水稻の生育に影響を及ぼすとされるCOD 8 mgL^{-1} 以上の比率は、全体の27%を占め、これは1次調査の際の10%をはるかに超えていた。

T-N濃度は、全調査点数の内の204点(87%)が基準値の1 mgL^{-1} 以下を満たしておらず、筑後地域で最も多く100%であった。また、水稻生育期別では、基準値を満たさない比率は幼穂形成期が100%と最も高くなった。1次調査でも基準値を満たさない比率は全体の76%と高かったが、さらにこの比率が増加したことになる。生育障害を起こすとされるT-N濃度5 mgL^{-1} 以上の比率は4.3%あった。

SS濃度では、基準値の100 mgL^{-1} 以下を超える比率は全体の3%であり、これは降雨による懸濁態物質の流出によるものと考えられる。

これらの値を他県での測定結果と比較すると、pHは1986~1988年に66点の調査を行った兵庫県に

おける平均値7.5（桑名ら 1990）とは大差なく、1991～1993年に104点の調査を行った栃木県における平均値7.2（宮崎ら 1994）より高かった。1986～1988年に93点の調査を行った福島県における基準値を満たさない比率25 %（小沢 1991）と大差なかった。ECは兵庫県における平均値190 μScm^{-1} および栃木県における平均値177 μScm^{-1} と大差なかったが、福島県における基準を満たさない比率の1 %よりかなり高かった。CODは兵庫県における平均値3.3 mgL^{-1} および栃木県における平均値4.5 mgL^{-1} よりかなり高く、福島県における基準値を満たさない比率の12 %よりも高くなった。T-Nは兵庫県における平均値0.67 mgL^{-1} および栃木県における平均値 2.15 mgL^{-1} より高く、福島県における基準値を満たさない比率の27 %より高かった。T-Pは兵庫県における平均値0.12 mgL^{-1} および栃木県における平均値0.14 mgL^{-1} よりも高い値であった。

以上のように福岡県の農業用水は、富栄養化の要因となる項目である、COD、T-N濃度およびT-P濃度の平均値および基準値を満たさない比率が他県の報告より高い値であった。

2) 地域別に見た水質の生育時期に伴う推移

第2-5図に、地域別にpH、EC、COD、T-N、T-PおよびSSの生育時期に伴う推移を示した。

pHは、飯塚・八幡地域で高くなった。筑後地域は幼穂形成期には一時的に上昇するものの、おおむね他地域より低く推移した。それ以外の地域における生育時期別傾向はあまり明確ではなかった。

ECは飯塚・八幡地域で生育時期を通して一貫して値が高かった。このことは、井上・庄籠(1991)が指摘しているように、旧炭坑からの湧水の影響がこれらの地域で依然として残っていると考えられる。甘木地域や行橋地域では生育期間を通して一貫して低い値であり、これらの地域では各種無機イオン濃度が低く、水質の汚染は生育期間に関わらずあまりないものと考えられた。

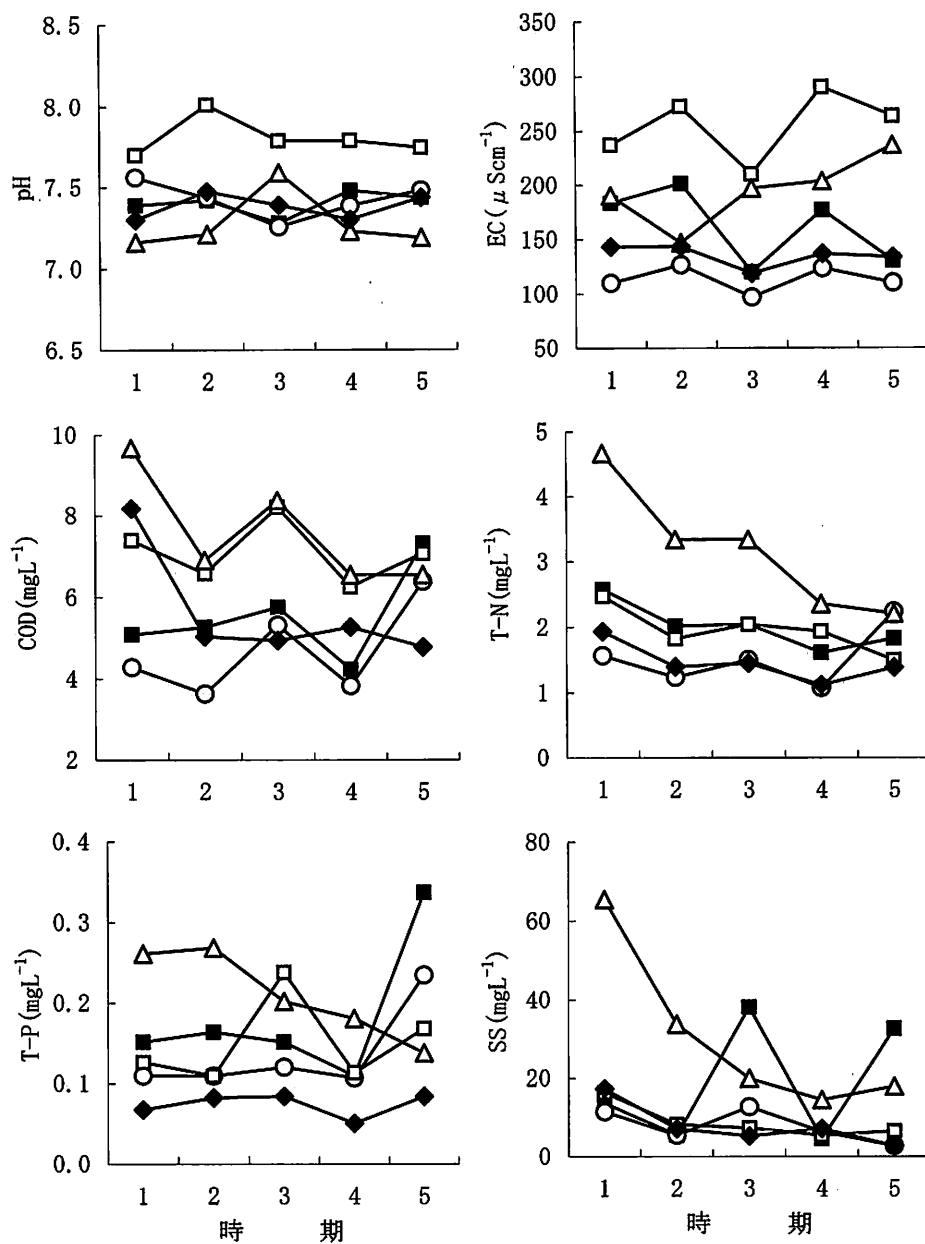
飯塚・八幡、福岡、行橋および甘木各地域の幼穂形成期における一時的な低下を除いて、時期別の変化の傾向は明確でなかった。

COD濃度は筑後、飯塚・八幡の両地域で生育期間を通して一貫して高く、用水中の有機物が多いことを示した。甘木地域では登熟期を除いて低い値であった。時期による変動は地域間で必ずしも斉一ではなかったが、代かきや施肥作業の影響で高くなる傾向が認められた。COD濃度と他の形質との相関関係を第2-5表に示したように、T-N、Org-NおよびT-Pの各濃度との間に強い正の相関関係が認められ、COD濃度が高い程、T-N、Org-NおよびT-Pの各濃度が高くなることを示した。このため、水稻の生育に影響を与えるとされるCOD濃度が8 mgL^{-1} を超す場合が多い、飯塚・八幡、筑後の両地域ではT-N、T-Pの各濃度も高くなった。このような地域では、過繁茂による倒伏や病害虫発生などの栽培管理にも注意が必要であることが推察される。

T-N濃度は農村地帯である筑後地域が全時期を通して高い値であった。また全体的に田植え期で高く、それ以後はいずれの地域も低下傾向を示した。これは代かきや施肥による窒素の用水路への流出のため（井上・庄籠 1991）と推察される。甘木、行橋の両地域ではいずれの時期も比較的低い値であった。T-P濃度はT-N濃度と同様に農村地帯である筑後地域で高く、一方、甘木、行橋の両地域で低い値であった。筑後地域ではT-N濃度と同様に田植え期で高く、それ以後は低下傾向を示し、T-N濃度と同様に代かきや施肥によるリン酸の用水路への流出が示唆された。SS濃度は筑後と福岡の両地域で基準値を超えた生育時期があり、福岡地域を除き田植え期でいずれも高い傾向を示した。

3) 福岡地域と筑後地域の比較

福岡県内で宅地と農地との混在化の点で最も対照的であると思われる2地域、すなわち混在化が著しく進んでいる福岡地域と、福岡県内で最も農業生産高の大きい農村地帯で混在化が進んでない筑後地域の水質を比較して検討した。第2-6表に、両地域の Cl^{-} 、pH、EC、COD、T-N、T-PおよびSS



第2-5図 農林地域別でみた水稻生育別推移.

時期は、1：代かき期、2：分げつ期、3：幼穂形成期
4：穂ばらみ期、5：登熟期.

第2-5表 CODと各項目の相関関係.

	pH	EC	T-N	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	Org-N	T-P	Cl^-
	ns	**	**	ns	ns	**	**	ns
COD	0.076	0.425	0.560	-0.079	0.364	0.710	0.692	0.128

n=232.

**は1%の水準での有意性を示す.

nsは有意性なし.

相互間の相関係数を示した。CODは、福岡地域ではT-N ($r=0.377$), T-P ($r=0.790$) およびSS ($r=0.682$) との間に有意な正の相関が認められ、筑後地域ではpH ($r=0.304$), EC ($r=0.461$), T-N ($r=0.441$), T-P ($r=0.714$) およびSS ($r=0.473$) との間に1%水準で有意な正の相関が認められた。Cl⁻は生活排水に多く含まれるとされるが、両地域ともECとの間に有意な正の相関があったもののCODとの相関性は有意ではなかった。しかし、筑後地域では、海水の影響と考えられるCl⁻の非常に高い値 (Cl⁻ ≥ 50 mgL⁻¹) を除くと、Cl⁻とCODとの間に有意な相関が得られた。1次調査の結果では、両地域ともCl⁻とCODとの間に有意な相関が認められていることから、福岡地域では、生活排水における合併浄化などの処理により農業用水への直接流入防止について改善が図られたものと考えられる。しかし、CODとT-Pとの間の相関係数の値が高かったことから、処理水中のNやPの除去技術は確立されないと考えられた。筑後地域では、CODとT-P濃度との間の相関係数の値は、CODとT-N濃度との間の相関係数より高かった。しかし、T-N濃度の値が他の地域よりかなり高いことから、T-N濃度が高い要因は、施肥流亡のみではなく、生活雑排水の流入や農業由来と考えられた。両地域ともにCODとT-P濃度との間の相関係数は高くなったことから、有機物による水質の汚染が関係していること、T-P濃度による影響が大きいことが示唆された。

第2-6表 福岡地域と筑後地域におけるCl⁻, pH, EC, T-N, COD, T-PおよびSS相互間の相関係数.

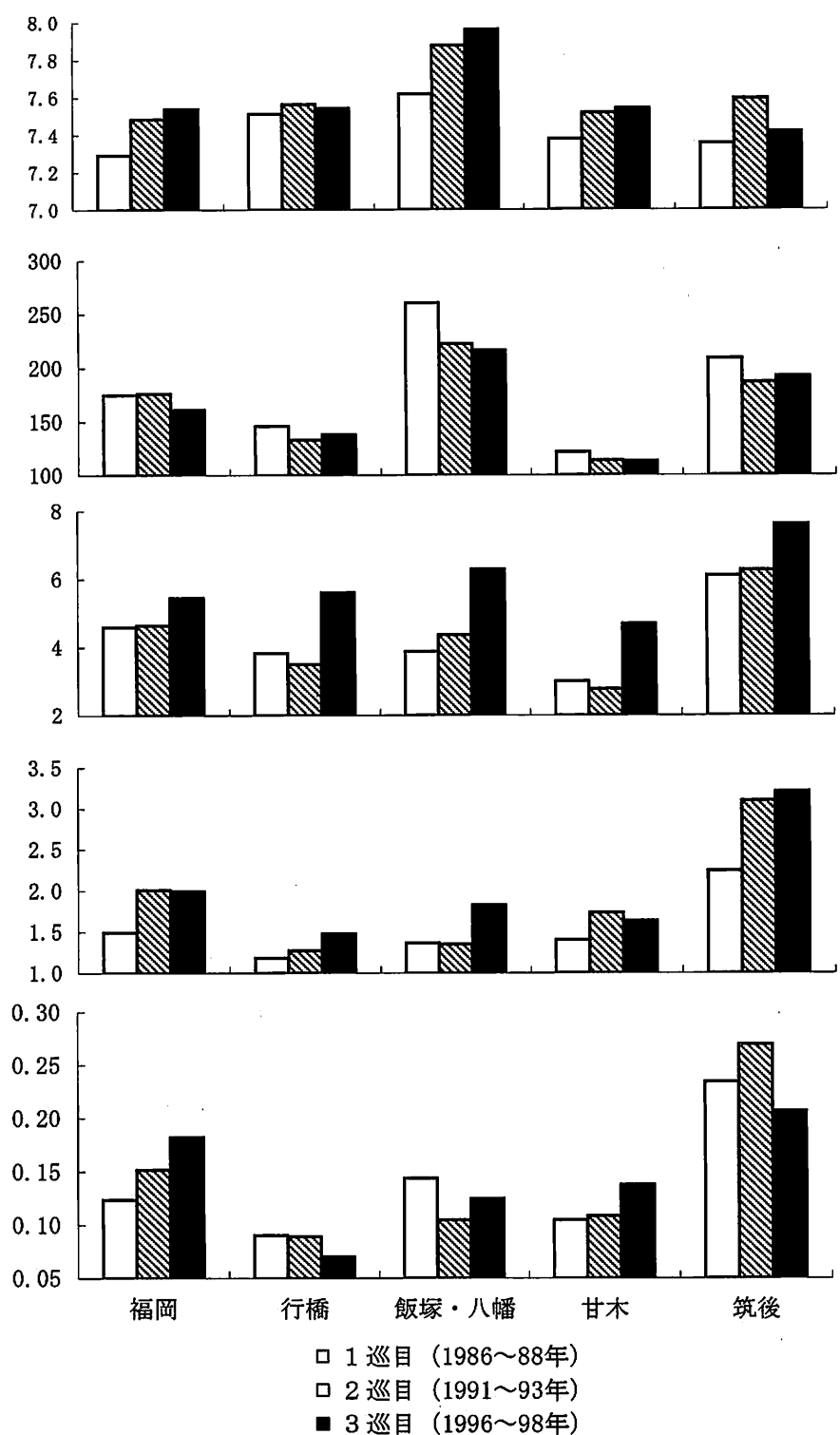
地域	n	水質形質	pH	EC	COD	T-N	T-P	SS
福岡	37	Cl ⁻	0.368* ¹⁾	0.796** ¹⁾	0.114ns ¹⁾	0.545**	-0.052ns	0.015ns
	37	pH		0.275ns	-0.290ns	-0.106ns	-0.362*	-0.163ns
	37	EC			0.170ns	0.593**	0.009ns	-0.081ns
	37	COD				0.377*	0.790**	0.628**
	37	T-N					0.319ns	0.136ns
	37	T-P						0.483**
筑後	88	Cl ⁻	0.136ns	0.664**	0.113ns	-0.075ns	0.176ns	0.008ns
	80	(	-0.155ns	0.860**	0.320**	0.161ns	0.538**	0.228*) ²⁾
	88	pH		0.196ns	0.304**	-0.162ns	0.128ns	-0.116ns
	88	EC			0.461**	0.157ns	0.505**	0.251*
	88	COD				0.441**	0.714**	0.473**
	88	T-N					0.714**	0.649**
	88	T-P						0.612**

1)*, **はそれぞれ5%, 1%水準での有意性を, nsは有意性なしを示す.

2) ()はCl⁻が50 mgL⁻¹以上の測定値 (n=8) を除いたn=80における値.

4) 同一採水地点で見た水質の経年変化

第2-6図に、同一採水地点での1次調査 (1986~1988年), 2次調査 (1991~1993年) および3次調査 (1996~1998年) におけるpH, EC, COD, T-NおよびT-Pの経年変化を地域別の平均値で示した。pHは全体として経年的に増加傾向であり、1次調査から測定値の高い飯塚・八幡地域では3次調査にかけてさらに増加した。ECは飯塚・八幡地域では1次調査より2次および3次調査で低下したが依然測定値が高く、筑後地域では1次調査より2次調査で値が低くなったものの3次調査でまた増加する傾向を示した。福岡地域と甘木地域では、わずかながら測定値は低下傾向であった。CODは1次調査で最も測定値の高かった筑後地域で依然増加を示しており、他の地域も3次調査ではすべ



第2-6図 同一採水地点でみた水質の経年変化.

て増加していた。他の水質分析項目から示されるように、農業用水の水質汚染が比較的少ないと考えられる甘木地域でも、近年CODが増加しているため、注意が必要である。

T-Nは、他の地域よりかなり測定値が高い筑後地域では、特に2次調査で増加程度が大きくなった。飯塚・八幡地域も3次調査で測定値が増加しており、他の地域も微増傾向であった。T-Pは筑後地域では3次調査で減少傾向だが、依然高い値を示した。飯塚・八幡地域では2次調査で減少し

たにもかかわらず3次調査で増加に転じており、福岡地域でも経年的に増加していた。

このように福岡県の農業用水の水質は基準値を超える場合が多く、他県と比較しても各測定項目の平均値が高く、また基準値を満たさない比率が高い場合が多かった。経年的な変化でも、十数年前と比較して増加傾向にある測定項目が多かった。

今後の対策としては、下水道の普及（高橋 1995）や土地改良事業（斉藤・半田 1985）などに加えて、植物を利用した浄化（水田ら 1998）などを含めた総合的対策（志村 1994）による対応が必要である。さらに、水稻の肥培管理において、T-NやCODの濃度の高いかんがい水を用いる場合は、中干しや間断灌水を十分に行うとともに、生育状態によって追肥の調整を行うなどの対処が必要である（土山ら 1984）。

また、COD濃度との相関関係から明らかなように、T-P濃度の高い排水は有機物による水質汚染に大きく関与している可能性が高いので、T-Pを多く含む排水を抑制することが今後の水質保全に特に重要であると考えられる。

第2節 福岡県南部の筑後川および矢部川を主水源とするクリークの水質実態

筑後川下流域における幹線水路の水質は、1984～1985年の調査結果で、各々の幹線水路によりECの変動が大きいこと、T-Nの形態としては、Org-Nが多くNH₄-NやNO₃-Nは少なかったと報告されている（福岡県農政部 1986）。

第1節で述べたとおり、筑後地域のT-NやCODの濃度は高く、富栄養化が進行していることが懸念され、環境保全および水稻生育への影響を把握するため、今後の水質におけるモニタリング体制を強化することが重要である。

このため、筑後川を主水源とする整備済みの幹線クリーク（以下筑後川水系）と矢部川を主水源とする同様の幹線クリーク（以下矢部川水系）の水質を明らかにした。

1. 材料と方法

調査は1992～2001年にかけて、筑後川水系のクリーク6カ所（筑後川上流域の大木町田川城島線、同町中木室線、筑後市西浜武線の計3カ所、下流域の城島町田川城島線1号、大木町中木室線、同町西浜武線の計3カ所）、矢部川水系のクリーク5カ所（矢部川上流域の三橋町岩神線の1カ所、中流域の大和町下久末線の1カ所、下流域の高田町黒崎開線、柳川市柳川南部第2号幹線、大和町大和南部第3号幹線の計3カ所）の合計11カ所で行った。採水地点の位置および採水風景をそれぞれ第2-7図、第2-8図に示した。採水時期と回数は、各地域での代かき期、活着期、分けつ期、幼穂形成期、出穂開花期および登熟期にあわせて、該当年次における生育時期に合わせて採取を行った概ね6回（以上を水田かんがい期とする）と、冬期の11月および2月の非かんがい期に2回（以上を水田非かんがい期とする）の計8回行った。試料は各クリーク地点から2Lのポリエチレン容器に直接採取した。

水質の分析は、第2-1表により工場排水試験法JIS0102（日本工業規格協会 1993）に準拠して実施した。なお、pH（東亜電波工業社、HM-12P）、EC（東亜電波工業社、CM-14P）および溶存酸素（DO）（セントラル科学社、UC-12-SOL）は採水時に現地で測定した。それ以外の項目は採取当日または翌日に分析を行った。

(A)



(B)



(C)



(D)



第2-8図 クリーク採水場所および採水風景.

(A) 筑後川水系上流 (B) 筑後川水系下流
(C) 矢部川水系上流 (D) 矢部川水系下流

系が筑後川水系に比べてやや高い値を示した。非かんがい期では両水系ともかんがい期と同様の傾向を示した。かんがい期と非かんがい期を比較した場合、T-Pを除く項目で非かんがい期の方が高い値を示した。非かんがい期のT-Pの平均値は、筑後川水系で 0.17 mgL^{-1} 、矢部川水系で 0.19 mgL^{-1} と、両水系とも植物プランクトンの発生限界濃度である 0.02 mgL^{-1} を超えているものの、冬季で水温が低く、D0が過飽和状態と好気条件下のために植物プランクトン体内に取り込まれたためにT-P濃度が低くなったものと考えられる。

第2-9図に、各測定項目別の経年変化を調査初年度の1992年を1とした相対値で、各年次のかんがい期および非かんがい期における平均値について示した。pHおよびT-Nはこの10年間でかんがい期および非かんがい期、水系の別を問わず、相対値が2以内で変化の程度は小さかった。EC、COD、T-Pおよび Cl^{-} 濃度は矢部川水系の非かんがい期および渇水年である1994年を除いて変化の程度はそ

れほど大きくなかった。SSは両水系の非かんがい期では経年変化は認められなかったが、かんがい期では降雨量の影響により少雨の年で高くなるとされる経年変化が認められた。NH₄-Nは年次間の変動ではそれほど大きくなかった。また、NO₃-Nは筑後川水系の非かんがい期で経年的に大幅な増加が認められたが、その他の幅は小さかった。

第2-10図と第2-11図には、前述の経年変化をさらに水系の上流域および下流域に分けて示した。第2-9図では経年的な変化が認められなかったpHとT-Nのうち、T-Nでは筑後川水系上流域の非かんがい期で1992年に比べて2001年では約4倍に増加した。また矢部川水系の非かんがい期で認められたEC、COD、T-PおよびCl⁻の変化は、矢部川水系下流域での変化に起因するものであった。NH₄-Nの場合、かんがい期においては両水系の上・下流域共に、1993年以降年々減少した。しかし、非かんがい期では年次による変動が大きかったが、その要因は明らかではなかった。さらに筑後川水系では上流域と下流域がほぼ同様な経年変化を示したのに対し、矢部川水系では1998年に下流のみが高くなった。これはCl⁻でも同様な傾向を示していることから、クリーク水の循環が無く、水量が少ないのに加えて生活排水の流れ込みが一時的に多くなったためと考えられる。またNO₃-Nは筑後川水系のかんがい期では上、下流域共に経年的な増加が認められた。非かんがい期では筑後川上流域

第2-7表 水田かんがい期におけるクリークの水質.

水 系		pH	EC (μScm^{-1})	DO (mgL^{-1})	SS (mgL^{-1})	COD (mgL^{-1})
筑後川	最大値	8.4	318	12.8	57.4	10.4
	最小値	6.4	145	5.6	17.5	4.6
	平均値	7.3	200	8.5	29.8	7.6
	標準偏差	0.5	34	1.7	10.9	1.7
矢部川	最大値	7.7	347	9.0	59.5	10.0
	最小値	5.7	106	3.9	14.2	4.0
	平均値	6.8	196	6.6	35.6	6.7
	標準偏差	0.5	68	1.4	12.3	1.5

水 系		T-N (mgL^{-1})	NH ₄ -N (mgL^{-1})	NO ₃ -N (mgL^{-1})	T-P (mgL^{-1})	Cl ⁻ (mgL^{-1})
筑後川	最大値	3.6	0.71	1.84	0.30	27.2
	最小値	1.5	0.14	0.09	0.08	6.5
	平均値	2.6	0.37	0.87	0.21	11.5
	標準偏差	0.5	0.14	0.39	0.05	3.7
矢部川	最大値	3.9	0.77	1.42	0.76	44.3
	最小値	2.1	0.19	0.31	0.15	4.7
	平均値	2.8	0.39	0.94	0.28	15.0
	標準偏差	0.4	0.17	0.22	0.12	12.6

筑後川水系 (n=283) : 6ヶ所×6回/1年×9年.

矢部川水系 (n=215) : 5ヶ所×6回/1年×9年.

最大値, 最小値および標準偏差は, 年平均値について示す.

第2-8表 水田非かんがい期におけるクリークの水質.

水 系		pH	EC (μScm^{-1})	DO (mgL^{-1})	SS (mgL^{-1})	COD (mgL^{-1})
筑後川	最 大 値	9.2	983	16.2	76.0	12.6
	最 小 値	6.9	197	6.4	11.2	4.2
	平 均 値	8.1	316	11.4	32.5	8.7
	標準偏差	0.8	119	2.7	14.8	2.2
矢部川	最 大 値	9.2	990	14.7	39.8	19.7
	最 小 値	6.2	122	5.6	8.0	2.4
	平 均 値	7.8	327	10.6	23.2	6.6
	標準偏差	0.8	208	2.5	9.7	3.3

水 系		T-N (mgL^{-1})	NH ₄ -N (mgL^{-1})	NO ₃ -N (mgL^{-1})	T-P (mgL^{-1})	Cl ⁻ (mgL^{-1})
筑後川	最 大 値	5.2	1.17	3.29	0.43	136.3
	最 小 値	1.3	0.13	0.00	0.09	11.9
	平 均 値	3.2	0.40	1.17	0.17	29.8
	標準偏差	0.9	0.26	0.86	0.06	28.4
矢部川	最 大 値	8.6	1.87	2.40	0.39	214.3
	最 小 値	1.5	0.13	0.44	0.04	6.6
	平 均 値	3.1	0.54	1.15	0.19	43.3
	標準偏差	1.3	0.70	0.50	0.10	53.3

筑後川水系 (n=93) : 6ヶ所×2回/1年×9年.

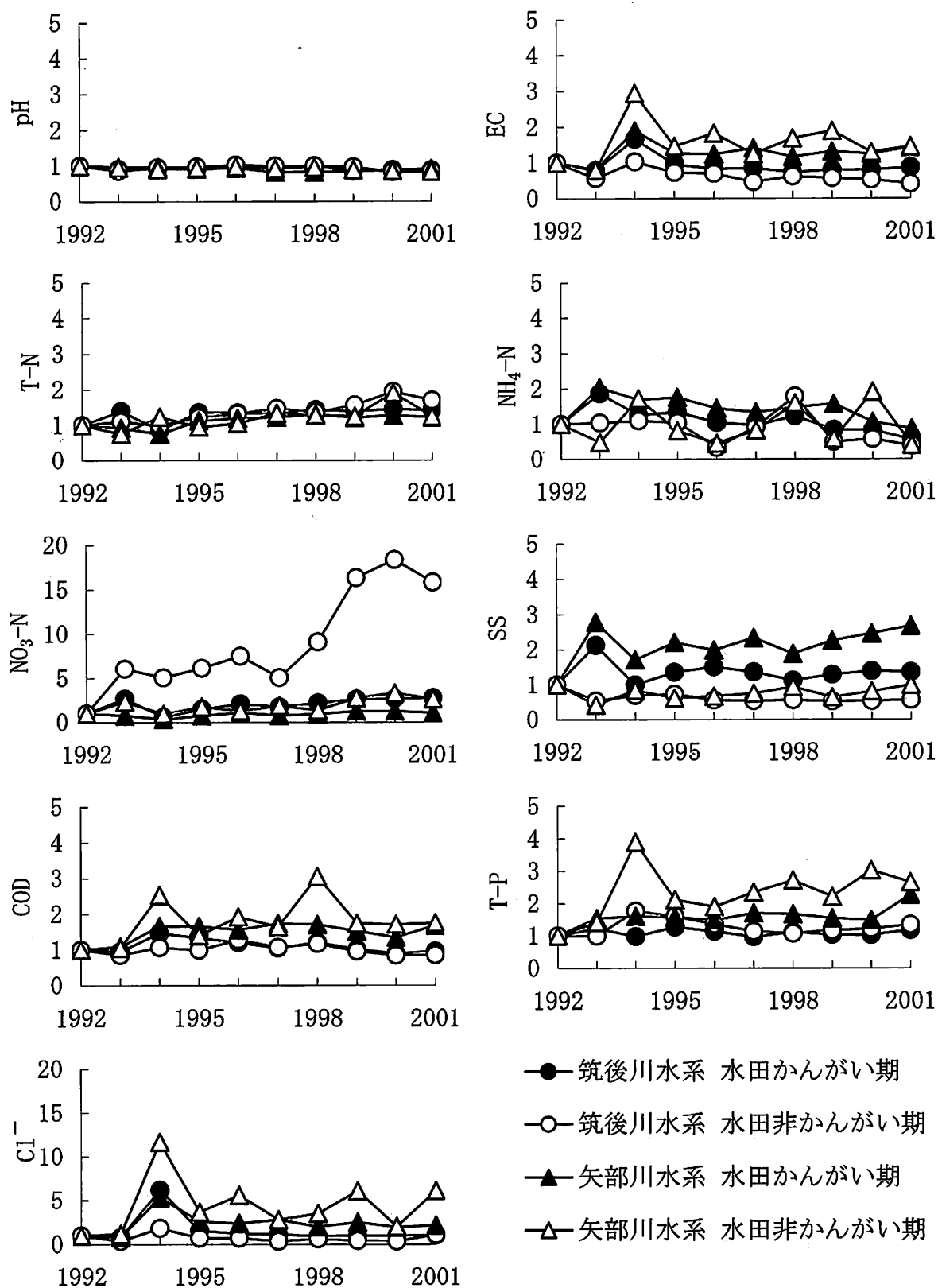
矢部川水系 (n=76) : 5ヶ所×2回/1年×9年.

最大値, 最小値および標準偏差は, 年平均値について示す.

の変化が大きかった. これは矢部川のNO₃-N濃度が調査初年度の1992年ですでに測定値が高かったのに対して, 筑後川水系では調査初年度における NO₃-N濃度がかなり低かったため相対値が大きくなったと考えられる. 古賀・白石 (1977) は, 1977年では1950年と比較してT-Nは4倍の2.7 mgL^{-1} に, 水溶性リン酸は3倍の0.6 mgL^{-1} になっており, 20数年間で著しく富栄養化したと報告している. 本章における1992年以降10年間の推移を見ると, 富栄養化が懸念されていた筑後川および矢部川を主水源とする幹線クリークの水質は, 汚濁は徐々に進行しており, 改善は認められなかった. これは, 冬季の麦作暗渠からの土砂や肥料の流出がおり, また掘干しなどの慣習が消滅していることから, 冬季の停滞水がかんがい期にそのまま流れ込むこと (岡 1979), 堆積したクリーク泥土からの溶脱がおこることなどが水質の汚濁に影響を及ぼしているものと考えられる.

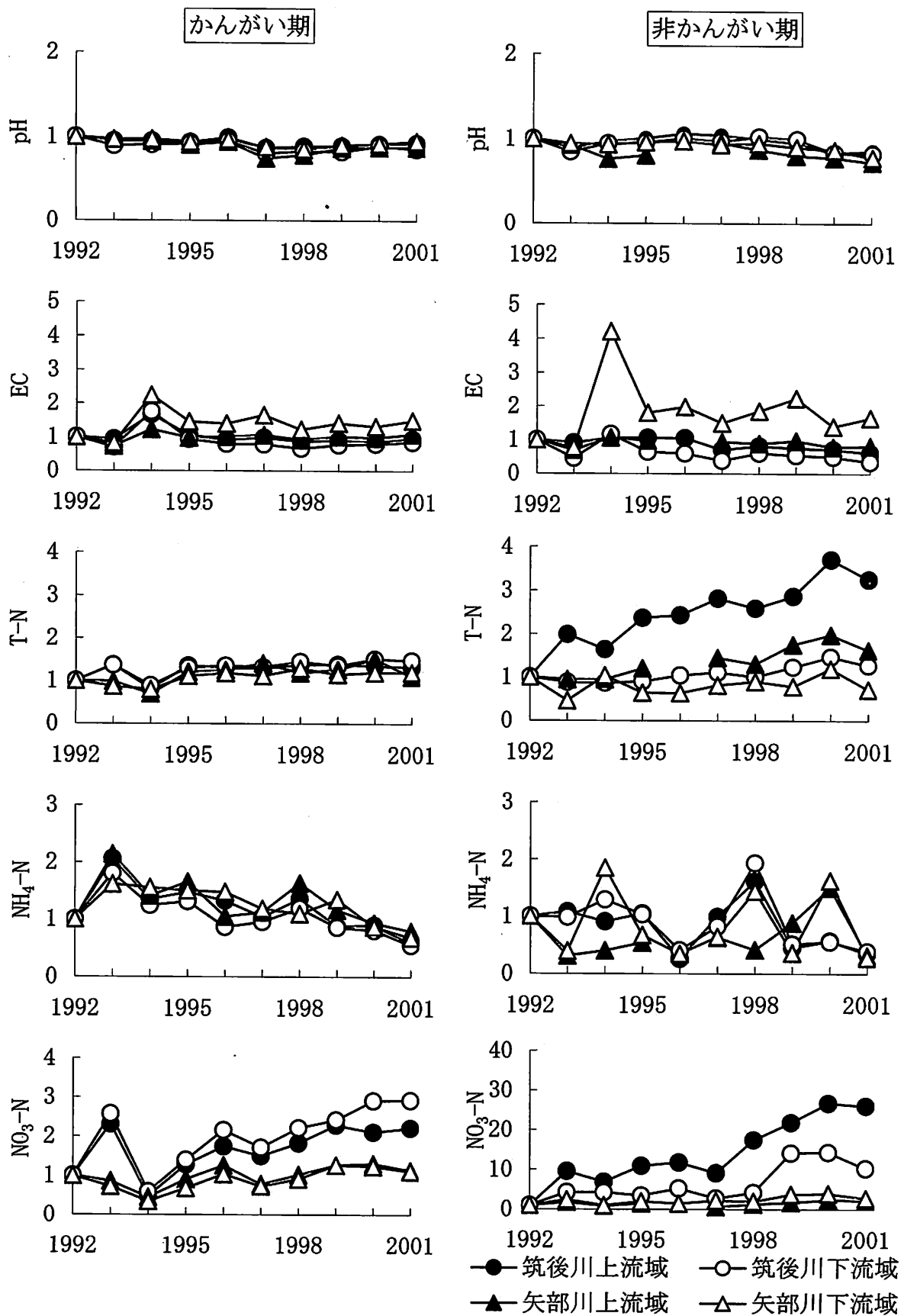
2) 窒素の形態

T-Nでは, 経年変化が見られていないにもかかわらず, 水稻の生育に影響を及ぼす無機態窒素成分のNH₄-NやNO₃-Nに関する経年変化の程度は, 大きかった. そこで生育時期別にNH₄-NやNO₃-Nを検討した. 第2-12図は, T-Nに占めるNH₄-NおよびNO₃-Nの比率を示したものである. 筑後川水系では, 水稻の生育期間中におけるNH₄-Nの比率は, 上, 下流域ともに10~20 %の範囲にあり, ほとんど変化



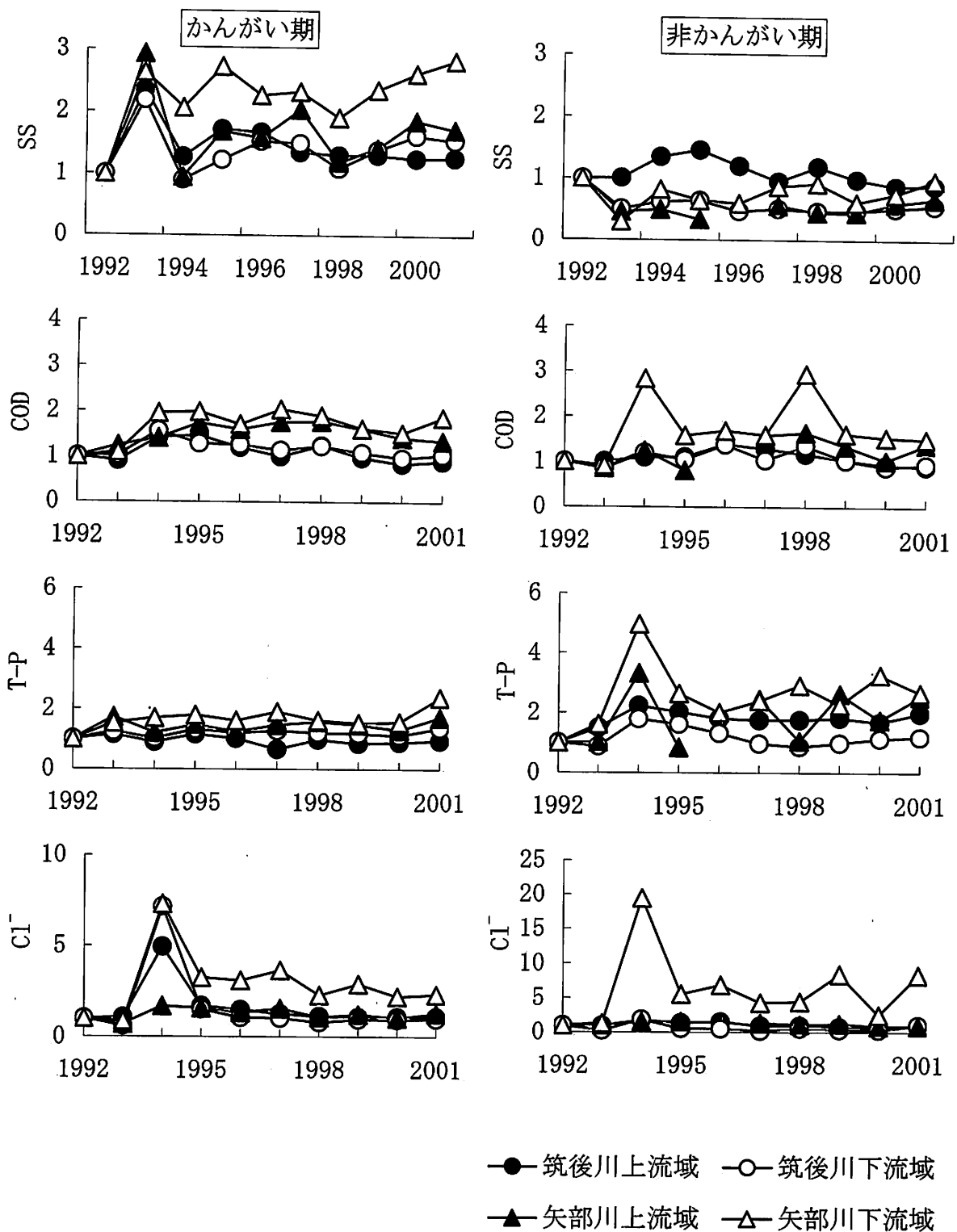
第2-9図 水系別でみた水質の経年変化.

1992年の値を1とした値で示した.

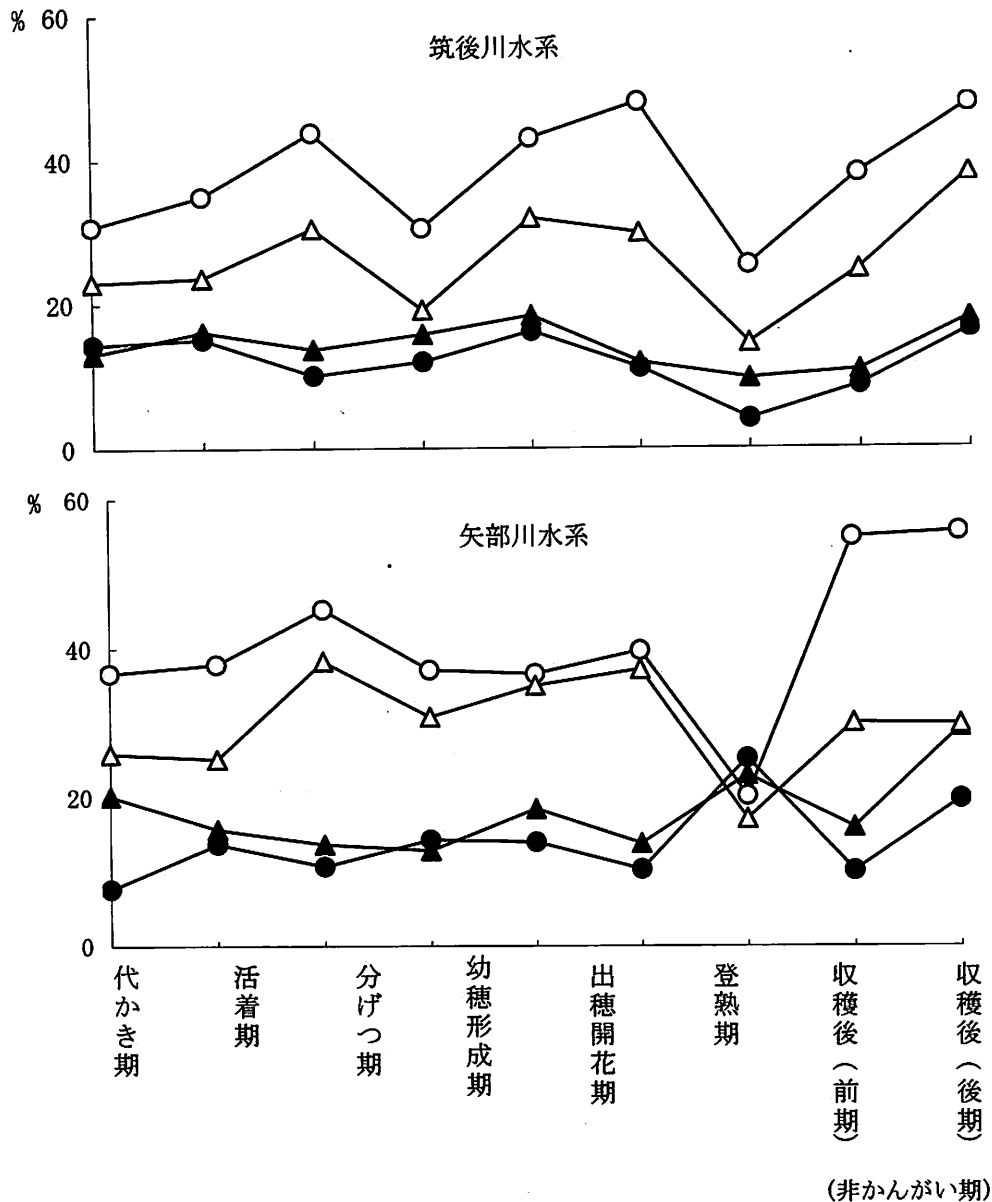


第2-10図 かんがい期及び非かんがい期を水系の上、下流域でみた水質の経年変化。

1992年の値を1として相対値で示した。



第2-11図 かんがい期及び非かんがい期を水系の上、下流域別でみた水質の経年変化（続）。
1992年の値を1とした相対値で示した。



第2-12図 T-N中に占める $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{NO}_3\text{-N}$ の比率の水稻生育別および非かんがい期の変化。

は認められなかった。一方、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の比率は年間を通して上流域が高く30～50 %の範囲にあり、下流域では20～30 %であった。上、下流域共に両比率の生育時期に伴う変化はほぼ類似した動きを示し、分けつ期および登熟期に増加する傾向を示した。1985～1986年の筑後川下流域における幹線水路11カ所の調査（福岡県農政部 1986）では、平均してT-N濃度は 2.2 mgL^{-1} 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は 0.56 mgL^{-1} であった。第2-7表および第2-8表の数値と比較すると、1985～86年に比べてT-N濃度はやや増加したものの、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は減少していることから、T-Nの形態が1985～86年の時点から徐々に変化したものと考えられる。

矢部川水系の水稻生育期間中における $\text{NH}_4\text{-N}$ の比率では上、下流域共に筑後川水系と同様に10～20 %の範囲で推移した。上流域では代かき期で低く、下流域では逆に代かき期と出穂開花期で高かった。 $\text{NO}_3\text{-N}$ の比率では筑後川水系と同様に、上流域で高く40～50 %の値を示したのに対し、下流域では30～40 %と低い値を示した。生育時期別では上、下流域共に分けつ期および出穂開花期で高い値を示した。

また、非かんがい期では $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{NO}_3\text{-N}$ の比率は水系および上、下流域を問わず高い値を示した。無機態窒素がこのような推移をした要因としては、水田裏作や畑作物への施肥由来によるもの、水門操作などの人為的水管理によって水移動や水量が支配されること（農業工学研究所 1994）、クリークや水田の自浄作用により、窒素やリンなどの有機物流入負荷量が上回っていることなどが考えられる。

摘 要

- 1) 1996～98年に福岡県の農林地域別の計46地点で、水稻の代かき期から登熟期に農業用水の水質をみた。pHの全平均値は7.4で、調査総数232の28 %が農業用水の基準値以上であった。ECの平均値は $179 \mu\text{Scm}^{-1}$ で、全体の11 %が基準値以上、CODの平均値は 6.4 mgL^{-1} で全体の46 %が基準値以上、T-Nの平均値は 2.3 mgL^{-1} で全体の87 %が基準値以上、T-Pの平均値は 0.17 mgL^{-1} 、SS（浮遊物質）の平均値は 18.4 mgL^{-1} で全体の3 %が基準値以上であった。水稻に生育障害を起こすとされるCOD 8 mgL^{-1} 以上の比率は27 %、T-Nの 5 mgL^{-1} 以上の比率は4 %であった。これらの比率は近年に報告された他県での測定結果よりも高い場合が多かった。
- 2) 農林地域および水稻の生育時期別にみると、CODは筑後や飯塚・八幡地域で高く、T-N濃度は農村部の筑後地域が全時期を通して高く、特に田植え期で高く、代かきや施肥による用水路への無機態窒素の流出が示唆された。CODはT-P濃度との間の相関係数が高く、有機物による汚染がT-P濃度の高い排水によって示されており、T-Pを多く含む排水の抑制が水質保全に重要と考えられた。
- 3) 1986～88年および1991～93年における福岡県内の既往の調査結果と比較すると、pHはいずれの地域も経年的に増加し、ECは飯塚・八幡や筑後地域での測定結果が依然として高く、CODはどの地域も増加傾向であり、T-Nは筑後以外の地域も増加傾向を示した。
- 4) 1992～2001年に、クリークの水質を、筑後川と矢部川を主水源とする河川別の計11カ所について、水稻の代かき期から登熟期にかけてのかんがい期および非かんがい期に調査した。両水系のクリークともに、全窒素および化学的酸素要求量の平均値は水稻の農業用水基準値を超えていた。
- 5) クリークの水質では、溶存酸素、浮遊物質、全リンを除くほとんどすべての項目で、水田のかんがい期よりも非かんがい期の方が高い値を示した。
- 6) クリークの水質の経年変化から判断すると、最近10年間（1992～2001年）では汚濁は徐々に進行し、改善は認められなかった。
- 7) クリーク水中のT-N濃度では経年変化は認められなかったが、無機態窒素である $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{NO}_3\text{-N}$ の経年変化は大きく、特に非かんがい期における測定結果の経年変化が大きかった。水稻の生育時期別に比較すると、分けつ期では筑後川水系および矢部川水系共に全窒素に占める $\text{NO}_3\text{-N}$ の比率が高かった。

第3章 農業用水による水田への窒素およびリンの流入量の推定

緒言

近年、河川や湖沼の富栄養化が進行している。水稻栽培に用いる農業用水の約9割は、この河川・湖沼を水源としている。水源の富栄養化とは、窒素やリンなどの栄養塩類濃度が高まった結果、植物プランクトンなどが異常繁殖を起こす現象である（松村 1988）。農業用水中に含まれている窒素が水稻に及ぼす影響については、倒伏、過繁茂、品質の悪化を引き起こす事が言われている（森川ら 1982, 森川・松岡 1985, 土山ら 1984）。水稻栽培への悪影響を防止するためには農業用水中の窒素流入量を把握し、それに対応した施肥管理を行うことが大切である。

農業用水のかんがいによる窒素流入量は、水量の推定法で異なるが、水稻生育期間中で $4 \text{ kg}10\text{a}^{-1}$ 程度（星川 1980）、あるいは $2\sim5 \text{ kg}10\text{a}^{-1}$ 程度（田淵 1997）と報告されている。

また、かんがいによる窒素流入量の推定には、農業用水中の窒素濃度と農業用水量の測定値が必要である。水稻生育期間での農業用水量は、 $900\sim1400 \text{ t}10\text{a}^{-1}$ （姫田 1987）、 $1000\sim1400 \text{ t}10\text{a}^{-1}$ （他に代かき用に約90t）（星川 1980）、あるいは、流量計による測定値で $1316 \text{ t}10\text{a}^{-1}$ （代かき期は除く）（陣内・岩渕 2000）とされている。代かきには、湿田で $80\sim120 \text{ t}10\text{a}^{-1}$ 、乾田で $100\sim180 \text{ t}10\text{a}^{-1}$ が必要とされ、生育時期別では植付け期と穂ばらみ期前後に多量の農業用水を必要とする（農水省構造改善局 1977）。

水稻作付け期間中に使用する大量の農業用水が窒素やリンを多く含む富栄養化した水質であれば、意図しない液肥を施用したこととなり水稻栽培に悪影響を及ぼすことが予測される。

このため、福岡県内の数カ所の農業用水路について、水田のかんがい期に5回農業用水中の窒素（N）、リン（P）、カリウム（K）濃度を測定し、既往の農業用水量の測定結果から、水田への農業用水によるN、PおよびKの流入量を、福岡県内の農林地域別および水稻の生育時期別に推定した。ただし、農業用水以外の無機養分の供給量や、水田外への再流出量、あるいは水稻による無機養分吸収効率についての考察は行っていない。

1. 材料と方法

1) 採水および分析の方法

1996年に福岡県内の21地点、1997年に14地点、1998年に11地点、合計46地点の用水路から農業用水を採取した。採水地点は第2章第1節と同様である。地域別（福岡県の農林事務所管内図の第2-1図参照）の地点数は、福岡地域は7、甘木地域は8、飯塚・八幡地域は6、筑後地域は18、行橋地域は7であった。測定年次の差は考慮しなかった。

各地域における水稻の代かき期、分けつ期、幼穂形成期、穂ばらみ期および登熟期に各水路の用水を2Lのポリエチレン容器に直接採取し、採取当日または翌日に、第2-1表に準じて分析を行った。なお、第2-1表に記載していないカリウムイオン（ K^+ ）濃度は、炎光光度法（英弘精機社 フレームフォトメーターFLD型）を用いて測定した。

2) 用水量および水田へのN、PおよびKの流入量の計算方法

農業用水量は、福岡県農業総合試験場（筑紫野市）内の砂壤土の水田において1990～1992年の3年間測定した平均値を用い、分けつ期 $366 \text{ t}10\text{a}^{-1}$ 、幼穂形成期 $436 \text{ t}10\text{a}^{-1}$ 、穂ばらみ期 $222 \text{ t}10\text{a}^{-1}$ 、登熟期 $292 \text{ t}10\text{a}^{-1}$ と算出された（陣内・岩渕 2000）。また、代かきのための用水量は、前出の農業用水実態調査（農水省構造改善局 1977）に記された値の中央値である $125 \text{ t}10\text{a}^{-1}$ とした。したがって、水稻栽培期間中の合計では $1441 \text{ t}10\text{a}^{-1}$ と算出された。なお、筑後地域の土壌は主に粘土質であ

り、筑紫野市における砂壤土より減水深が4 cm/日程少ないので、筑後地域での農業用水量は、前述の値に0.83（注：農水省土地改良事業標準設計によった）を乗じて算出した。また、農業用水量は実際には天候等の条件によりかなり変動することが予想される。水量を代かき以外の農業用水量が900~1400 t10a⁻¹（姫田 1987）+代かき用に125 t10a⁻¹とした場合の無機養分の流入量も計算した。水田へのN、PおよびK流入量は、T-N、T-PおよびK⁺濃度に農業用水量を乗じて算出した。

2. 結果と考察

第3-1表に、水田への農業用水によるN、PおよびKの流入量を、福岡県内の農林地域別および水稻の生育時期別に平均値で示した。同表の最下段には全測定値（44点）の平均値を時期別に示した。また、代かき期を含む全期間におけるT-N、T-PおよびKの流入量について県内全体と、第2章第1節の結果から農業用水のT-N濃度が県内で最も高い筑後地域における頻度分布を第3-1図に示した。

1) N流入量の推定

水稻栽培の全期間合計のT-N流入量は、全測定値の平均で2.88 kg10a⁻¹（代かき期を除くと2.54 kg10a⁻¹）と算出され、農業用水量の変動を考慮すると2.07~3.03kg10a⁻¹の範囲であった。地域別にみると甘木地域が1.84 kg10a⁻¹と福岡県内で最も少なく、筑後地域が3.69 kg10a⁻¹で最も多かった。筑後地域のN流入量は甘木地域の約2倍であり、地域間差が大きかった。これは第2章で述べたとおり、筑後地域はクリークのように湖沼に似た停滞水域があるため、T-N濃度が高い（第2章第2節）ことによっている。本章でのN流入量の推定はT-Nの濃度と用水量とを乗じて算出しているため、T-N濃度がN流入量に影響していると考えられる。N流入量を生育時期別にみると、10a当たり代かき期で0.34 kg、分けつ期で0.75 kg、幼穂形成期で0.95 kg、穂ばらみ期で0.36 kg、登熟期0.46 kgであり、分けつ期や幼穂形成期の生育前半にかなり多くのN量が流入していた。これは水稻栽培において、この時期に農業用水を最も多く使用するためである。さらに穂ばらみ期以降の生育後期にも1 kgN10a⁻¹程度の比較的多量のNが流入していた。

NO₃-Nの全期間合計の流入量は、全測定値の平均で0.62 kg10a⁻¹、NH₄-Nは0.85 kg10a⁻¹であり、両者の合計は1.47 kg10a⁻¹（代かき期を除くと1.30 kg10a⁻¹）であった。農業用水量の変動を考慮すると、NO₃-Nの流入量は0.44~0.65 kg10a⁻¹、NH₄-Nは0.61~0.89 kg10a⁻¹の範囲で、両者の合計は1.05~1.54 kg10a⁻¹であった。また、生育時期別の平均値では、10a当たり代かき期で0.17 kg、分けつ期で0.37kg、幼穂形成期で0.41 kg、穂ばらみ期で0.18 kg、登熟期で0.30 kgであった。すなわち、穂ばらみ期以降の生育後期に0.48 kg10a⁻¹（筑後地域では0.64 kg10a⁻¹）の無機態窒素が流入していたことになる。

N流入の要因については、施肥や降雨以外にも微生物によるN固定があり、ラン藻により水田表層の空中から稲作期間中に2.58 kg10a⁻¹の窒素が固定されたと報告されている（小野・古賀 1984）。水稻は土壌中から供給される地力窒素の68 %を吸収している（山本 1995）。N流出については、水田からの地下浸透と地表排出で窒素の1~5 kg10a⁻¹は水田外へ再流出するとも推定されている（田淵 1997）。また、農業用水中のNO₃-Nが水稻に吸収される比率は36 %程度とされている（日高 1995）。

一方、玄米子実中のタンパク質含有率が高いと食味が低下する。良食味米の施肥基準（福岡県農政部 1995）では、第2回目の追肥は止葉抽出期頃に1.5 kg10a⁻¹を施すとしている。このため、良食味米生産の視点から、穂ばらみ期以降に無機態窒素が約0.5 kg10a⁻¹農業用水から流入することにも充分留意して、化学肥料の2回目における追肥量を制御することが大切である。

福岡県における水稻の窒素施肥基準では、肥沃土壌で栽培したヒノヒカリについては、基肥4.0、第1回穂肥2.0、第2回穂肥1.5（kg10a⁻¹）の計7.5 kg10a⁻¹である。これは、T-Nで見た場合、肥沃な土壌である筑後地域では、農業用水に含まれるT-Nから推定した窒素量は窒素施肥量の約49 %に相

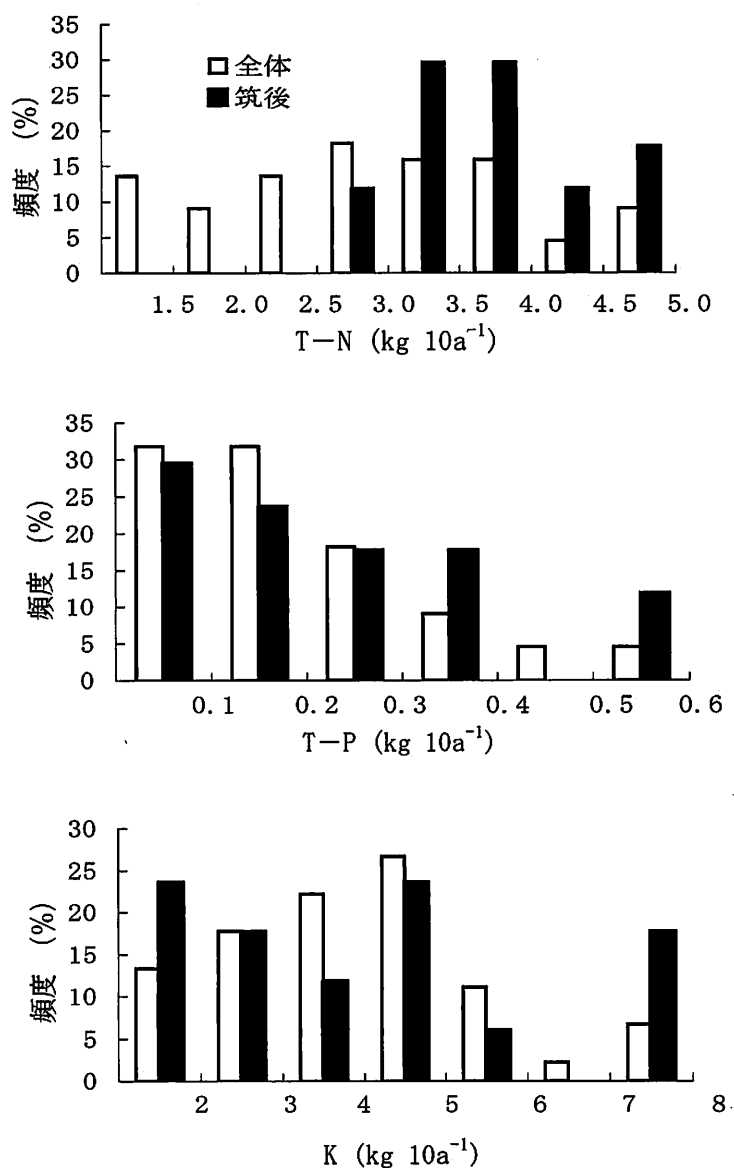
第3-1表 水田へのかんがい水によるT-N, NO₃-N, NH₄-N, T-P, PO₄-P
およびKの地域別および生育時期別の流入量 (kg10a⁻¹).

地域	生育時期	T-N	NO ₃ -N	NH ₄ -N	T-P	PO ₄ -P	K
福岡 n=7	代かき期	0.32	0.11	0.12	0.019	0.009	0.38
	分けつ期	0.72	0.26	0.12	0.059	0.043	1.20
	幼穂形成期	0.92	0.29	0.21	0.067	0.040	0.75
	穂ばらみ期	0.37	0.16	0.05	0.024	0.018	0.58
	登熟期	0.55	0.28	0.13	0.099	0.038	0.78
	計	2.88	1.09	0.63	0.268	0.148	3.70
飯塚 ・八幡 n=6	代かき期	0.31	0.04	0.12	0.017	0.007	0.44
	分けつ期	0.66	0.11	0.17	0.040	0.019	1.09
	幼穂形成期	0.92	0.14	0.33	0.105	0.048	1.31
	穂ばらみ期	0.44	0.08	0.11	0.026	0.014	0.80
	登熟期	0.43	0.13	0.09	0.050	0.010	0.91
	計	2.76	0.50	0.82	0.238	0.098	4.55
筑後 n=18	代かき期	0.49	0.06	0.17	0.027	0.018	0.50
	分けつ期	1.00	0.10	0.42	0.080	0.049	0.98
	幼穂形成期	1.22	0.07	0.39	0.070	0.029	1.26
	穂ばらみ期	0.44	0.06	0.18	0.033	0.018	0.79
	登熟期	0.54	0.16	0.24	0.033	0.017	0.96
	計	3.69	0.44	1.40	0.244	0.131	4.50
行橋 n=7	代かき期	0.24	0.06	0.05	0.008	0.004	0.35
	分けつ期	0.50	0.14	0.11	0.030	0.023	0.92
	幼穂形成期	0.63	0.20	0.10	0.037	0.013	0.92
	穂ばらみ期	0.25	0.07	0.03	0.011	0.007	0.52
	登熟期	0.41	0.21	0.06	0.025	0.010	0.68
	計	2.04	0.67	0.35	0.111	0.057	3.38
甘木 n=7	代かき期	0.15	0.05	0.04	0.012	0.006	0.36
	分けつ期	0.45	0.17	0.09	0.035	0.025	1.07
	幼穂形成期	0.70	0.28	0.06	0.054	0.036	0.90
	穂ばらみ期	0.24	0.08	0.04	0.018	0.008	0.64
	登熟期	0.30	0.06	0.06	0.024	0.016	0.99
	計	1.84	0.64	0.30	0.143	0.091	3.96
全測定 値平均 n=44	代かき期	0.34	0.06	0.11	0.019	0.011	0.42
	分けつ期	0.75	0.14	0.23	0.057	0.036	1.04
	幼穂形成期	0.95	0.16	0.25	0.066	0.032	1.01
	穂ばらみ期	0.36	0.08	0.10	0.025	0.014	0.65
	登熟期	0.46	0.16	0.14	0.043	0.018	0.87
	計	2.88	0.62	0.85	0.210	0.111	3.99

当し、第2回目穂肥の 65 %に相当する。無機態窒素では、第2回目穂肥の約43 %に相当する。以上のことより、流入窒素量の推定値から試算すると、施肥基準の穂肥2回目の施肥量は約40 %削減できるのではないかと考えられる。

2) リン流入量の推定

T-Pの水稲栽培全期間の合計流入量は、全測定値の平均で $0.210 \text{ kg}10\text{a}^{-1}$ （代かき期を除くと $0.191 \text{ kg}10\text{a}^{-1}$ ）と算出され、農業用水量の変動を考慮すると $0.149 \sim 0.221 \text{ kg}10\text{a}^{-1}$ の範囲であった。地域別にみると、行橋地域や甘木地域では少なく、T-N流入量の多かった筑後地域でも特に高い値ではなかった（第3-1図）。都市近郊である福岡地域で $0.268 \text{ kg}10\text{a}^{-1}$ と他地域より高い値であり、生活排水などの処理水による農業用水への汚染が示唆された（第2章第1節）。 $\text{PO}_4\text{-P}$ の全期間の合計流入量は $0.111 \text{ kg}10\text{a}^{-1}$ （代かき期を除くと $0.100 \text{ kg}10\text{a}^{-1}$ ）と算出され、農業用水量の変動を考慮すると $0.079 \sim 0.117 \text{ kg}10\text{a}^{-1}$ の範囲であった。 $\text{PO}_4\text{-P}$ は、微生物が分解した易分解性リンおよび化学肥料由来によるもの（日本分析学会北海道支部 1994）であるが、T-P流入量の約50 %を占めていた。



第3-1図 水田のかんがい水によるT-N、T-P、K流入量の頻度分布。

全体：n=44、筑後地域n=18。

3) K流入量の推定

Kの水稻栽培全期間の合計流入量は、全測定値の平均で 3.99 kg10a^{-1} （代かき期を除くと 3.57 kg10a^{-1} ）と算出され、農業用水量の変動を考慮すると $2.86 \sim 4.22 \text{ kg10a}^{-1}$ の範囲であった。

地域別に見ると、飯塚・八幡地域と筑後地域がそれぞれ 4.55 、 4.50 kg10a^{-1} とやや高くなったが、他地域との差は小さかった。

生育時期別では、分けつ期と幼穂形成期がともに高い値を示した。

4) 降雨によるN, PおよびKの流入量

降雨に含まれるN, P, Kの濃度は、多田ら（1999）はT-N濃度が 1.04 mgL^{-1} 、許斐（福岡県農業総合試験場 未発表）はT-N濃度が 0.78 mgL^{-1} 、T-P濃度が 0.028 mgL^{-1} 、K濃度が 0.25 mgL^{-1} であったとしている。

福岡県農業総合試験場における水稻生育期間中の降雨量は 613 t10a^{-1} であった（注：地域気象予報システム、アメダス太宰府、1990～92年の平均値）。両者の数値の平均を取り、T-N 0.91 mgL^{-1} 、T-P 0.028 mgL^{-1} 、K 0.25 mgL^{-1} とすると、10aの水田への降雨による降下量はT-Nでは 0.56 kg 、T-Pでは 0.017 kg 、Kでは 0.15 kg と推定された。

摘 要

水稻生育に強く影響をするN, PおよびKの水田への農業用水による各流入量を、福岡県内の農林地域別および水稻の生育時期別に推定した。推定方法は、農業用水中のN, PおよびKの各含有率に既往の農業用水量推定値を乗じて求めた。

1) 代かきを含む全期間合計のT-N流入量は、全地域平均で10a当たり $2.1 \sim 3.0 \text{ kg}$ であった。

2) 筑後地域のT-N流入量は10a当たり 3.69 kg と他の地域に比べて多く、穂ばらみ期以降にも約 1 kg10a^{-1} のT-Nが流入していた。筑後地域では、農業用水のT-N量はヒノヒカリの窒素施肥基準量の約49 %に相当し、第2回目穂肥の65 %に相当した。無機態窒素の流入量では、第2回目穂肥の約43 %に相当することから、施肥基準の第2回目穂肥の施肥量が、約40 %削減できるのではないかと示唆された。また、T-N流入量には、地域間差が大きかった。

3) 無機態窒素である $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ の合計は全期間で10a当たり $1.1 \sim 1.5 \text{ kg}$ と算出され、穂ばらみ期以降に約 0.5 kg10a^{-1} 流入していた。

4) 10a当たりの流入量は、T-Pでは $0.15 \sim 0.22 \text{ kg}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ では $0.08 \sim 0.12 \text{ kg}$ 、Kでは $2.9 \sim 4.2 \text{ kg}$ と算出された。

4) 水田への降雨による降下量は、10a当たりT-Nでは 0.56 kg 、T-Pでは 0.017 kg 、Kでは 0.15 kg と推定された。

第4章 植物を利用した農業用水の浄化機能の開発

緒言

近年、農村における宅地と農地との混在化の進展，ならびに農業生産の集約化などで農業用水の水質が悪化しており（高橋 1995），水質の富栄養化が進行している．このため，水質浄化技術の確立が早急に求められている．

水質浄化に関する技術および知見としては，下水道の建設，処理施設の設置，汚水処理技術の開発などがある．しかし，農業では負荷源が分散して存在するため，大型公共下水道や総合浄化槽などのエネルギーを多用する技術の適用は難しい．省エネルギー，低コストの汚水浄化技術として，深谷ら（1987）はケイ酸カルシウム濾材，井上・斉木（1982）は土壌・植物濾材，森本ら（1985），若月ら（1989）は土壌，Bhargava and Killedar（1991）はfishbone charcoal（魚骨粉）を用いた浄化を試みている．またAbeら（1993），Abe and Ozaki（1995，1997）は，水生植物とともに多くの陸生植物を利用した水質浄化技術の開発を目的として，資源循環型の植物－濾材系水路（バイオジオフィルター）を試作し，ケナフ，パピルス，ソルガム，イタリアンライグラスおよびハナナが，生活排水の2次処理水など高濃度の窒素やリン酸を含む汚水の浄化に有効であることを明らかにした．

県内に水稻用かんがい水として利用されているため池は，約5,000カ所存在する．ここでは，富栄養化した溜池にこれらの有用植物を栽培することが水質浄化に有効であるかを検討した．

第1節 汚水中の窒素・リンに対する有用植物の浄化能力

ため池は，生活排水に比べ窒素やリンの濃度が1/10程度と低いものの，流量が多い．そのため，富栄養化した溜池の浄化には，濾材や土壌，水生および陸生植物などを利用する方法が有効であると考えられる．

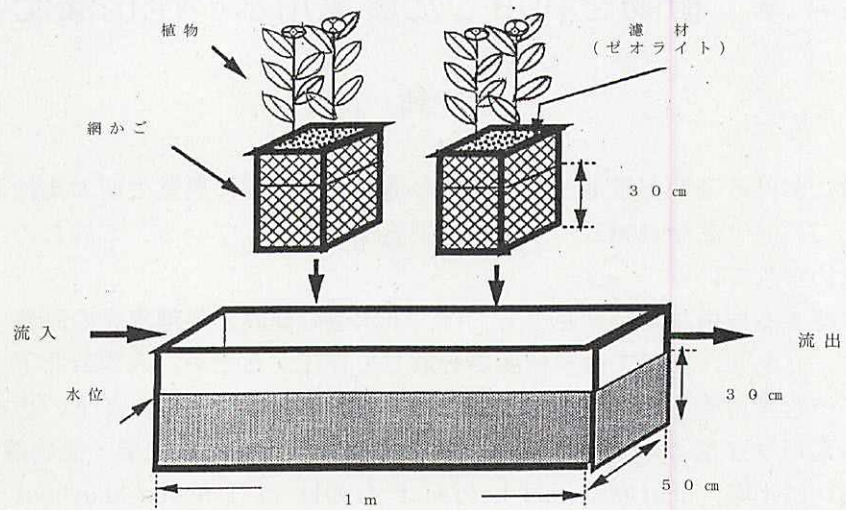
本研究では，水辺環境や景観を考慮し，比較的収穫作業が容易で，収穫後の用途を有している，阿部らの生活排水2次処理に有効であった有用植物を用いて，その植物体が有する浄化能力を明らかにした．

1. 材料と方法

1) 浄化水路

Abe and Ozaki（1995）の方法に従い，農林水産省農業研究センター（茨城県つくば市）のガラス室内でバイオジオフィルター（長さ100 cm，幅50 cm，水深 30cmのモデル水路）（第4-1図）に，濾材としてゼオライトを充填した網かご（30×40 cm，高さ40 cm）を設置し，その中に植物を栽植した（第4-2図）．各水路にはそれぞれ一種類の植物を植え，対照として濾材のみの無栽植水路を設け，配置図および水の流れをそれぞれ第4-3図，第4-4図に示した．

流入水は，T-N濃度を 2.5 mgL^{-1} （ $\text{NO}_3\text{-N}$ が 1.9 mgL^{-1} ， $\text{NH}_4\text{-N}$ が 0.6 mgL^{-1} ），T-P濃度を 0.5 mgL^{-1} となるように，ハイスピリッドエアリッチ専用液肥（太陽興業社製）を水道水で希釈したものを使用した．水路面積当たりの負荷速度は窒素が $1.3 \text{ gm}^2\text{d}^{-1}$ ，リンが $0.25 \text{ gm}^2\text{d}^{-1}$ に相当する．流入水量は1日水路面積 1m^2 当たり500 Lで，滞留時間は12時間とした．



第4-1図 バイオフィルター水路.

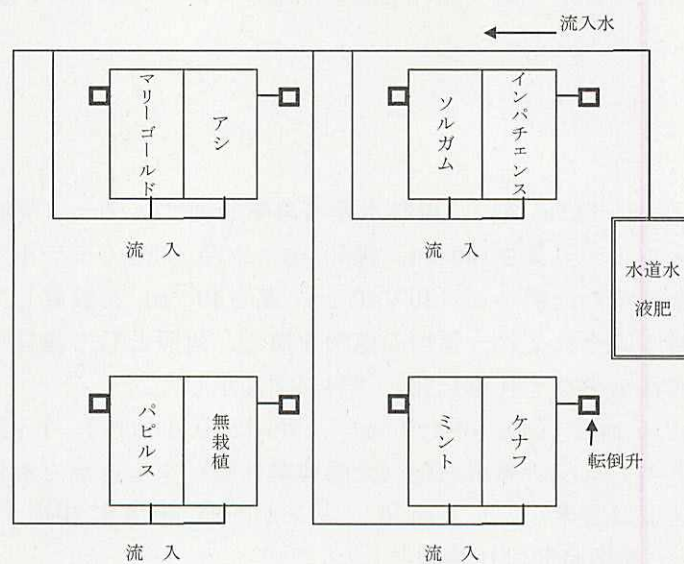


植栽前



ケナフ植栽後

第4-2図 バイオフィルター水路の設置カゴ.



4-3図 バイオフィルター 水路の配置図.



第4-4図 バイオジオフィルター浄化試験における水の流れ。

2) 供試材料

パピルス (*Cyperus papyrus* L.), マリーゴールド (*Tagetes erecta* L.), アシ (*Phragmites communis* Trin.), ペパーミント (*Mentha piperita* L.), ソルガム (*Sorghum bicolor* Moench), インパチエンス (*Impatiens sultani* Hook. f.) およびケナフ (*Hibiscus cannabinus* L.) の7種類で、移植期は1996年5月27日（ただしペパーミントは1995年7月）とし、各々1反復とした（第4-5図）。なお、パピルス、アシ、ミントは株分け（12 株 m^2 ）して実験に供試し、その他の植物は種子から供試した。

3) 測定項目および分析方法

気温、水温、日射量、流入・流出量、流入・流出液中のT-NおよびT-P濃度について測定し、分析を行った。

水路の水深は30 cmに保ち、流出水量は転倒升（1回100 mL）で計測した。

流入および流出水のT-NとT-Pの各濃度を1996年5月30日から同年8月17日までの1週間に2回、T-Nは微量窒素分析装置（三菱化成社TN05）で、T-Pはペルオキシ二硫化カリウムで分解後、オートアナライザー（テクニコン社）で測定した。採水時間は10時40分とした。

4) 計算方法

一日当たりの流入水量は、

水道メータにより測定し、

一日当たりの流出水量

= 転倒マスのカウント $\times$ 100mL / 日数

水路1 m^2 、1日当たりの窒素やリンの除去速度 ($\text{gm}^{-2}\text{d}^{-1}$)

= (流入水量 $\times$ 流入水濃度 - 流出水量 $\times$ 流出水濃度) / 0.5 m^2 / 日数,

窒素やリンの除去率 (%)

= $100 - ((\text{流出量} \times \text{濃度}) / (\text{流入量} \times \text{濃度}) \times 100)$

でそれぞれ算出した。

ここで植物の浄化能力は、流出濃度の低下程度、流量と濃度からみた除去率、流量と流出濃度およ

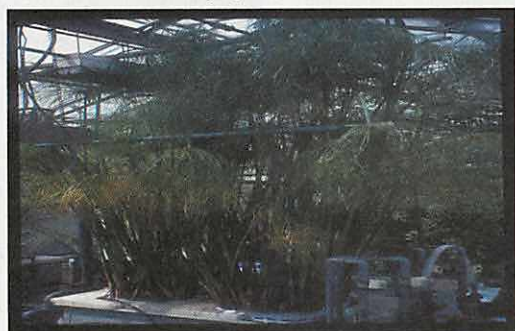
び面積から計算した除去速度を指し，流出濃度が低く，除去率および除去速度が高い場合を浄化能力が高いと定義する．



アシ



マリーゴールド



パピルス



ソルガム



ケナフ



インパチェンス



ミント

第4-5図 水質浄化試験に供試した植物．

2. 結果と考察

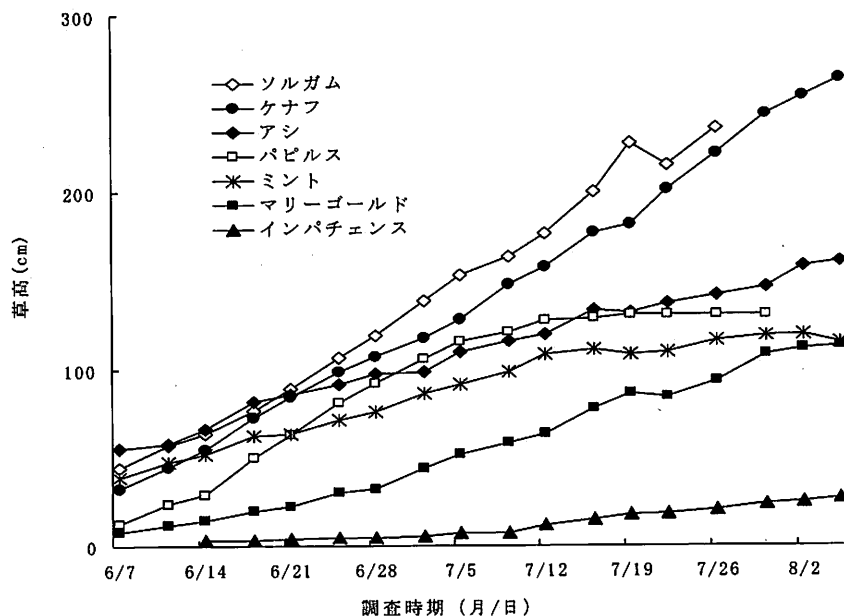
試験期間中における各供試植物の草高の推移を第4-6図に示した．ケナフ，ソルガムは生育途中

にあり、草高は、播種後約2ヶ月でケナフでは264 cm、ソルガムでは7月30日に236 cmとなった。パピルスでは131 cm程度まで生育し、茎数は m^2 当たり54 本から123 本に増えた。同様に草高はアシでは55 cmから160 cmに、マリーゴールドでは8 cmから113 cmに、インパチェンスでは3 cmから27 cmに、ミントでは39 cmから115 cmになった。また、ソルガムは8月上旬に出穂し、マリーゴールドおよびミントでは7月下旬、インパチェンスでは7月上旬に開花した。

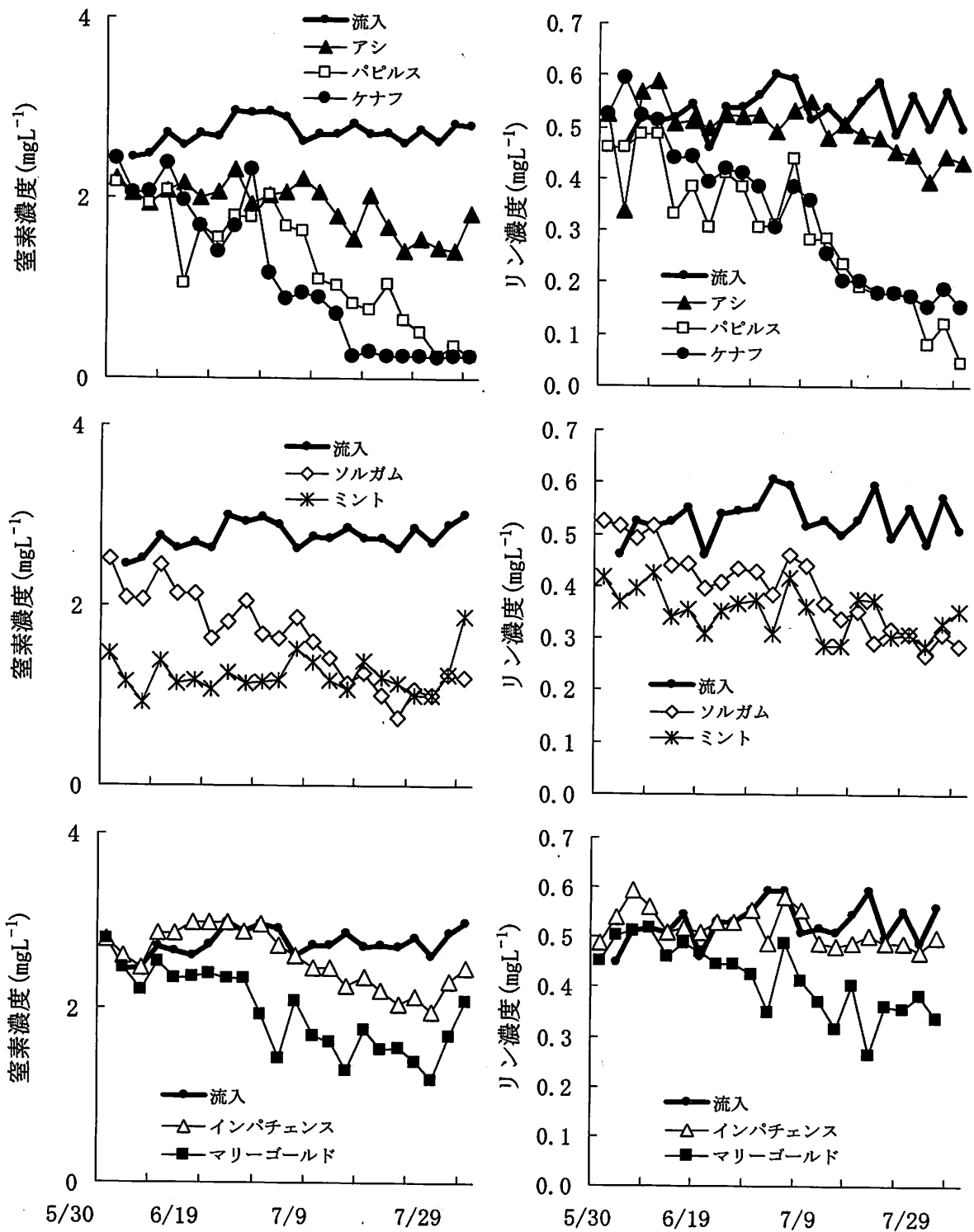
第4-7図に、流入水と各植物別の流出水におけるT-NおよびT-P濃度の8月5日までの期間における時期別推移を示した。いずれの植物を栽植した水路においても、流入した人工汚水中のT-NおよびT-Pの各濃度は、ともに低濃度となって流出し、栽植植物の浄化能力が認められた。とくにパピルスとケナフの浄化能力は高く、パピルスでは流出水の窒素濃度が 0.27 mgL^{-1} 、リン濃度が 0.09 mgL^{-1} 、ケナフでは窒素濃度が 0.22 mgL^{-1} 、リン濃度が 0.19 mgL^{-1} にまで低下した。ただし、インパチェンスとアシについては他の植物に比べてリンの流出濃度は高かった。また、いずれの植物も生育が進み、草高が高くなるにつれて窒素およびリンの各流出濃度は低下した。第4-8図には、植物の生育が最も旺盛な時期（7月30日～8月7日）における窒素およびリンの除去率の平均値を示した。流入水に対して、パピルスでは窒素の92 %、リンの93 %、ケナフでは窒素の93 %、リンの77 %を除去した。無栽植区でも窒素の16 %、リンの12 %を除去した。パピルスやケナフでは窒素およびリン吸収能力が高いことから (Abe and Ozaki 1995, 1997)、窒素、リン濃度の高い汚水で浄化能力が高かった植物はいずれも、窒素およびリン濃度の低い汚水中においても浄化能力を発揮することが判明した。

供試した各植物の浄化能力は、供給される窒素およびリン濃度により制約される。制約の程度が最も大きいのはソルガムで、閾値は窒素濃度で 0.1 mgL^{-1} 、リン濃度で 0.06 mgL^{-1} である (Abe 2001)。本試験の人工汚水は、窒素 2.5 mgL^{-1} 、リン 0.5 mgL^{-1} と供試した植物の浄化能力が制約されない濃度であったため、供試植物が浄化能力を発揮できる環境であり、浄化能力の差は主に植物体の生育量の差によるものと考えられる。

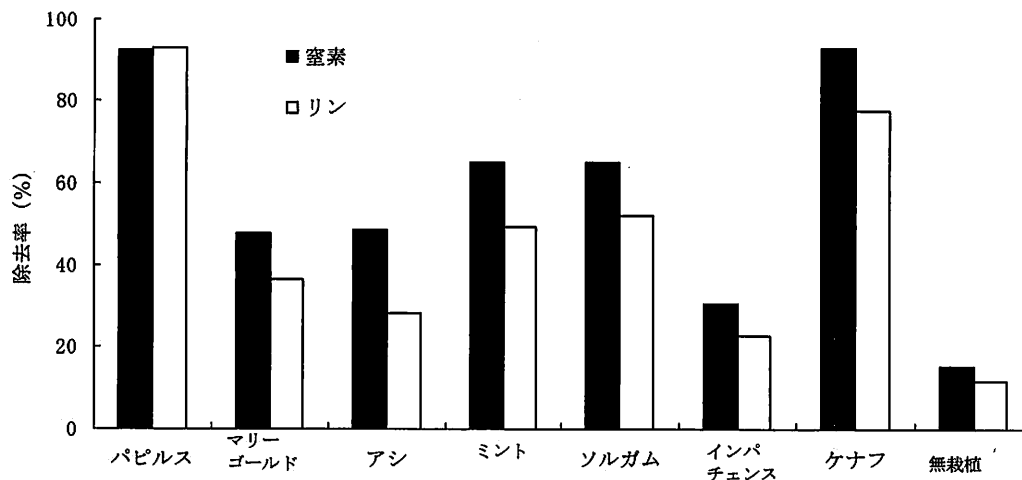
供試植物の中で、パピルス、ケナフ、ソルガムおよびミントの窒素およびリンの除去能力は、水生植物のホテイアオイ (松崎ら 1990)と同様に非常に高かった。また、本研究で供試した植物は、収穫物を食用・飼料用、紙の原料用に供給できる利点も有している。



第4-6図 各浄化植物の草高の時期的推移。



第4-7図 栽植水路における窒素・リン濃度の時期別変化.



第4-8図 浄化植物の生育最盛期における窒素およびリンの除去率.

除去率 (%) = $100 - ((\text{流出量} \times \text{濃度}) / (\text{流入量} \times \text{濃度})) \times 100$ とし、
7月30日～8月7日の期間の平均値で示した。

第2節 遮光処理が植物の浄化能力に及ぼす影響

前節で浄化能力を検討したバピルス、マリーゴールド、アシ、ペパーミント、ソルガム、インパチェンスおよびケナフの7種類の有用植物を用いて、降雨・曇天等による日射量の減少がこれらの植物の浄化能力に与える影響を明らかにするために、生育が最も旺盛な時期に遮光処理を行い、処理が植物の浄化能力に及ぼす影響を検討した。

1. 材料と方法

供試材料および測定項目、測定方法は、第1節に準じて行った。

日射量の影響をみるために、8月7日から13日までの7日間、遮光率85%の寒冷紗で実験装置を覆い、この間は毎日採水し、水の分析を行った。

2. 結果と考察

第1節において、栽植水路の排出水中における窒素およびリン濃度の時期別濃度変化から、各水路の流出水における窒素およびリンの濃度は、植物の生育とともに低下するという傾向が示されたが、一時的に流出濃度が低下せずに上昇する小さな変動が認められた（第4-7図）。この変動は、降雨時のように日射量が大きく低下した期間に流出水の濃度が上昇するためではないかと推察された。

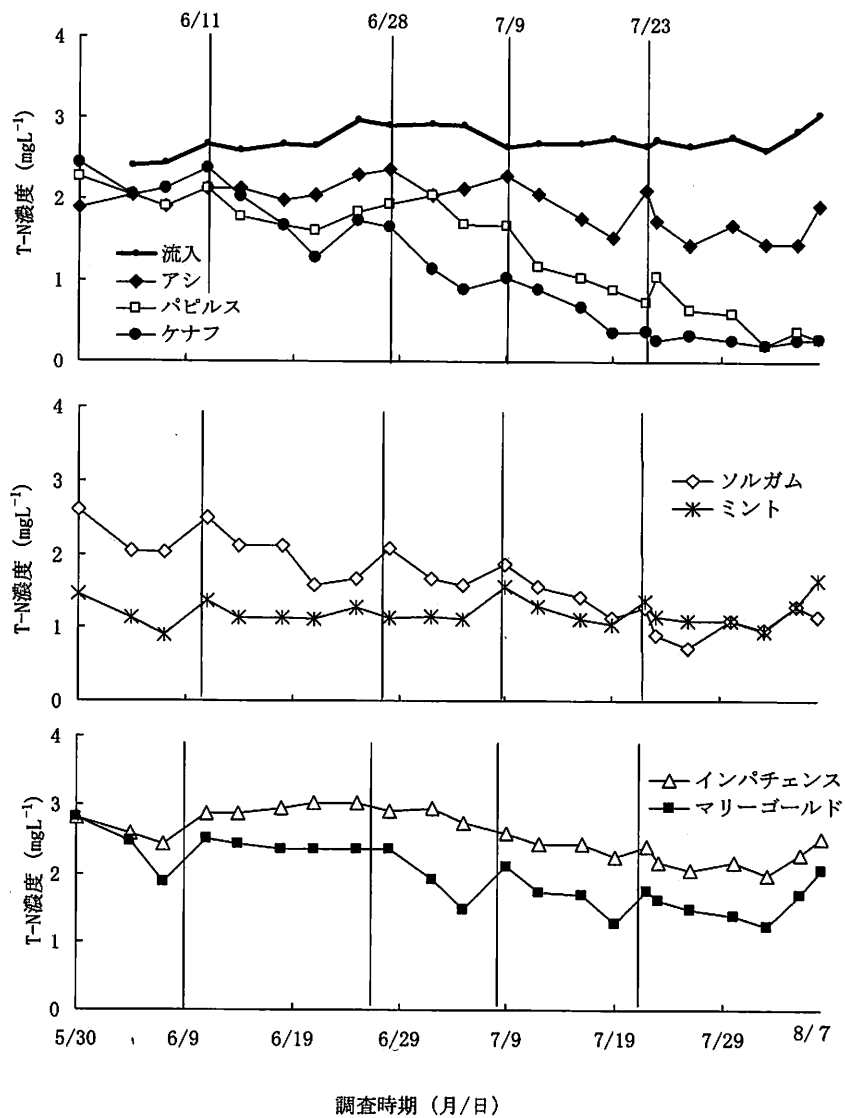
そこで、各植物の流出濃度と降雨時との関係についてみると（第4-9図）、流出水中のT-N濃度が上昇した日と降雨日がほぼ一致していた。さらに、窒素およびリン濃度の低下程度を、無栽植水路流出水中の濃度と栽植水路流出水中の濃度の差とし、窒素およびリン濃度の低下程度の時期別変化を供試全植物の平均値として、第4-10図に示した。窒素およびリン濃度ともに低下程度は時間の経過とともに増加しているが、日変動がみられ、これは日射量の変化に概ね対応する傾向を示した。このことは、日射量が多いと窒素およびリン濃度の低下程度が大きいこと（無栽植区と比較して供試植物からの流出濃度が低いこと）を示す。そこで、植物の生長により、暦日と共に窒素およ

びリン濃度の低下程度が大きくなるので、濃度の低下程度や日射量の経時変化の影響を消去するために、暦日（6月1日からの日数）に対する窒素およびリン濃度の低下程度および日射量の二次回帰式（第4-10図の白ぬき記号上の線）を作成した。この回帰曲線からの偏差を調査日ごとに計算した。第4-11図に、窒素およびリン濃度の低下程度と日射量の偏差との関係を、窒素およびリン濃度別に示した。このように回帰曲線を用いて、植物の生長量や日射量の季節的变化の影響を消去した値で比較すると、窒素濃度の低下程度は日射量の多い日で高くなり、両者の間の相関係数は0.727で1 %水準で有意であった。リン濃度も同様な傾向を示し、相関係数は0.521であり、5 %水準で有意であった。このことから、供試植物の窒素およびリンの浄化機能は、日射量の影響を強く受けていることが明らかになった。このことは、供試した植物における光合成能力と浄化機能により吸収した窒素、リンが利用能力とが密接に関係していることを示していると考えられる。

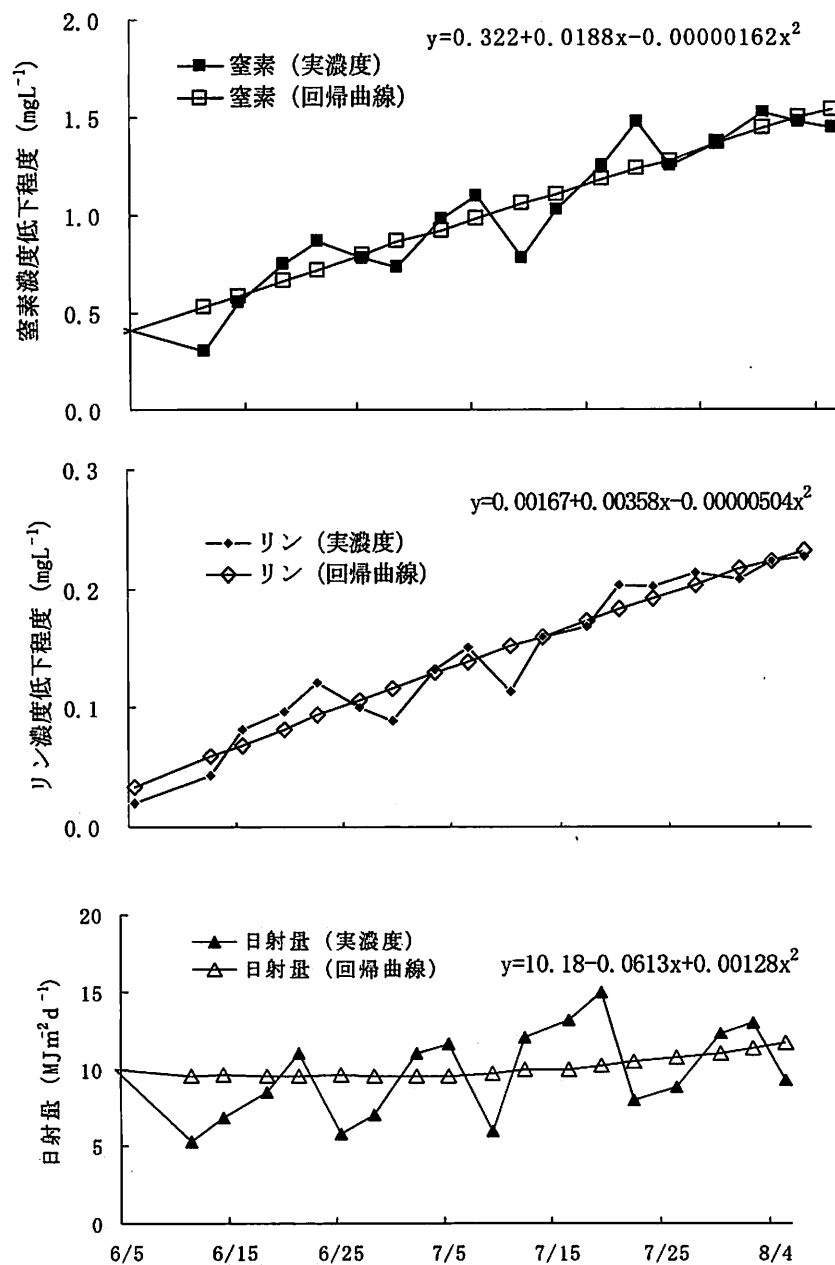
遮光処理期間中の気温、水温および日射量の変化を第4-1表に示した。日射量の実測定値から、遮光率は約86 %であった。ガラス室と遮光処理内部における気温の差は認められなかった。流入水および流出水中の水温は気温と同程度に推移したことから、水温に対する遮光処理の影響は小さいと考えられ、本試験における結果は、遮光処理の影響だけであると考えられた。また、第4-12図に遮光期間を含めた各植栽区の窒素濃度の推移を示した。どの植物も生育と共に、流出水における窒素濃度は低下していくが、遮光処理期間中は窒素濃度が上昇した。第4-13図に、リン濃度の場合を示した。リン濃度も窒素濃度と同様に、植物の生育と共に流出水中のリン濃度は低下し、遮光処理期間中は濃度が上昇した。これを遮光前、遮光処理期間中および遮光解除後に分けて、窒素およびリンの除去速度を計算し、第4-2表に示した。除去速度は窒素、リンともに遮光前には高く、遮光処理中は除去速度が低下したが、遮光解除後は、遮光前と同等の除去速度となった。次に、遮光処理によって低下した窒素除去速度の変化を検討するため、遮光直前の各植物の除去速度を100とした、窒素除去速度の比率の変化を第4-14図に示した。遮光開始後2～3日目に窒素の除去速度は低下を開始し、その後も除去速度は低下を続け、ケナフを除いて遮光前の50 %以下に低下した。しかしケナフの除去速度は遮光前の70 %にとどまり、低下程度は比較的小さかった。遮光処理解除後は、どの植物においても1～3日以内に遮光前の80～90 %にまで除去速度が回復した。同様にリン除去速度も遮光直前を100とした除去速度の相対値の変化を第4-15図に示した。リンの除去速度は、窒素ほど遮光に伴い急激に低下はしなかったが、遮光処理後に除去速度は低下を続け、遮光前の40～80 %にまで低下した。しかし、遮光処理解除後は、窒素と同様に急速に除去速度が回復した。

以上のことから、植物の浄化能力は日射量に強く影響されることが明らかとなり、降雨などによる日射量の減少に伴い、窒素およびリンの浄化能力は低下した。しかし遮光処理により窒素、リンの除去速度は一時的に低下するものの、7日程度の遮光処理ではほぼ処理前の値に数日以内に回復することが判明した。

また、供試植物の除去速度は、窒素除去速度の方がリン除去速度より遮光処理の影響を受けやすかった。遮光処理による窒素除去速度の低下には、植物種間差が見られ、ケナフは窒素の除去速度の低下が小さく、日射量の減少の影響を受けにくいことが明らかになった。



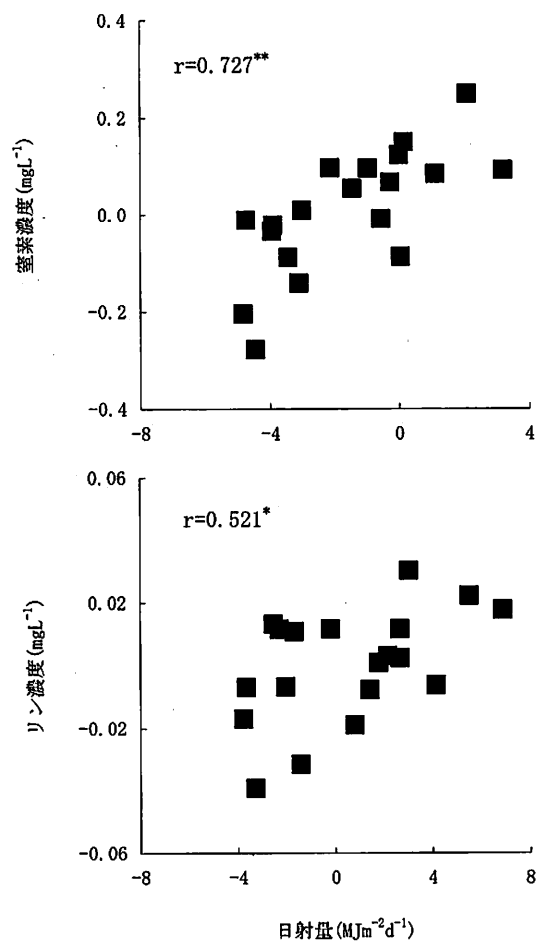
第4-9図 各植物の浄化水路における流出水中の窒素濃度の時期的変化。
6/11、6/28、7/9および7/23の縦線は降雨日を示す。



第4-10図 窒素およびリン濃度の低下程度および日射量の時期別変化.

低下程度は(無栽植区水路流出濃度-栽植区水路流出濃度)で計算し、供試全植物の平均で示した.

日射量は前回調査から当日調査までの期間の平均値.

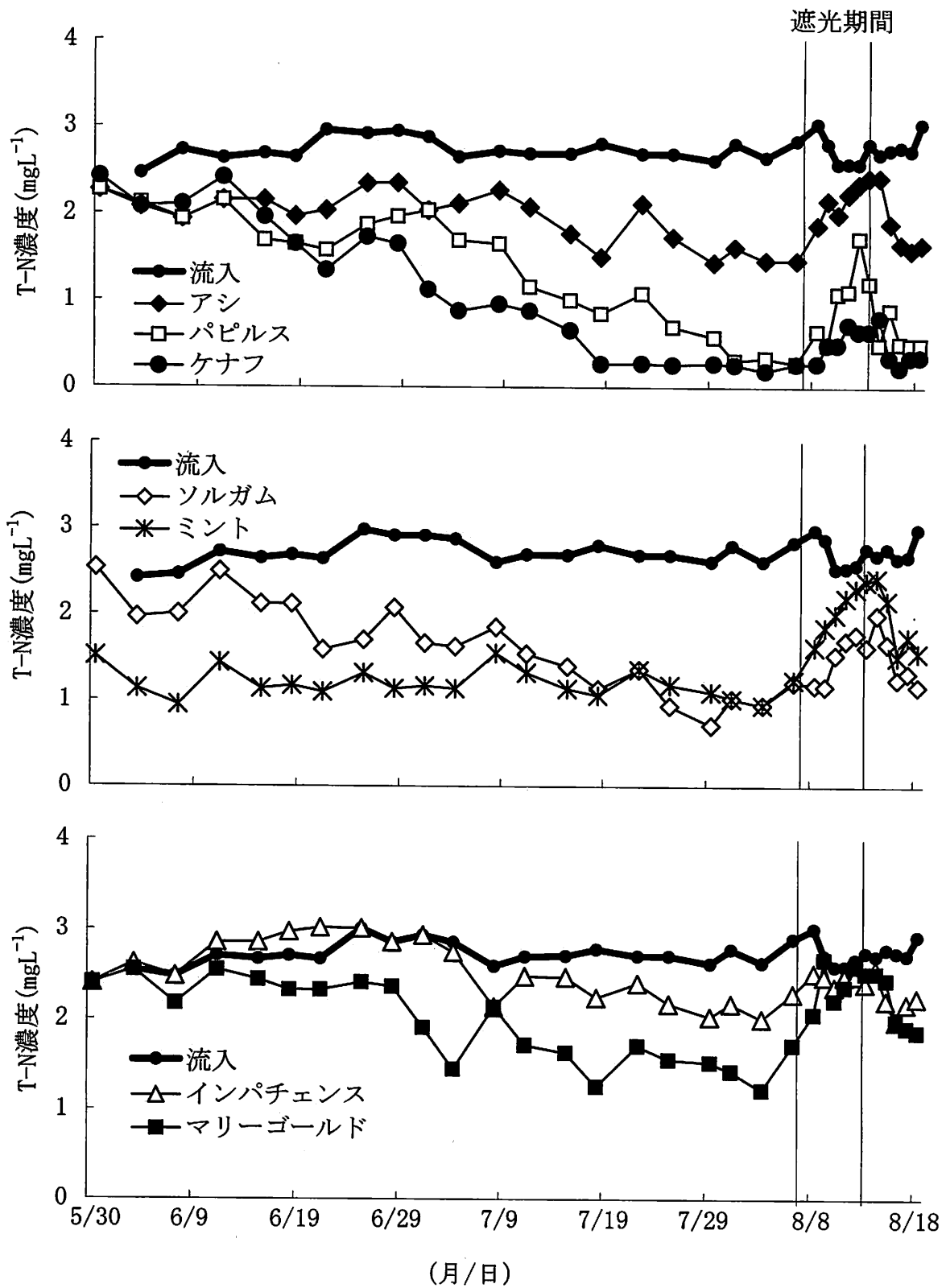


第4-11図 窒素およびリン濃度の低下程度に関する回帰式からの偏差と日射量に関する回帰式の偏差との関係.

** : $P < 0.01$, * : $P < 0.05$

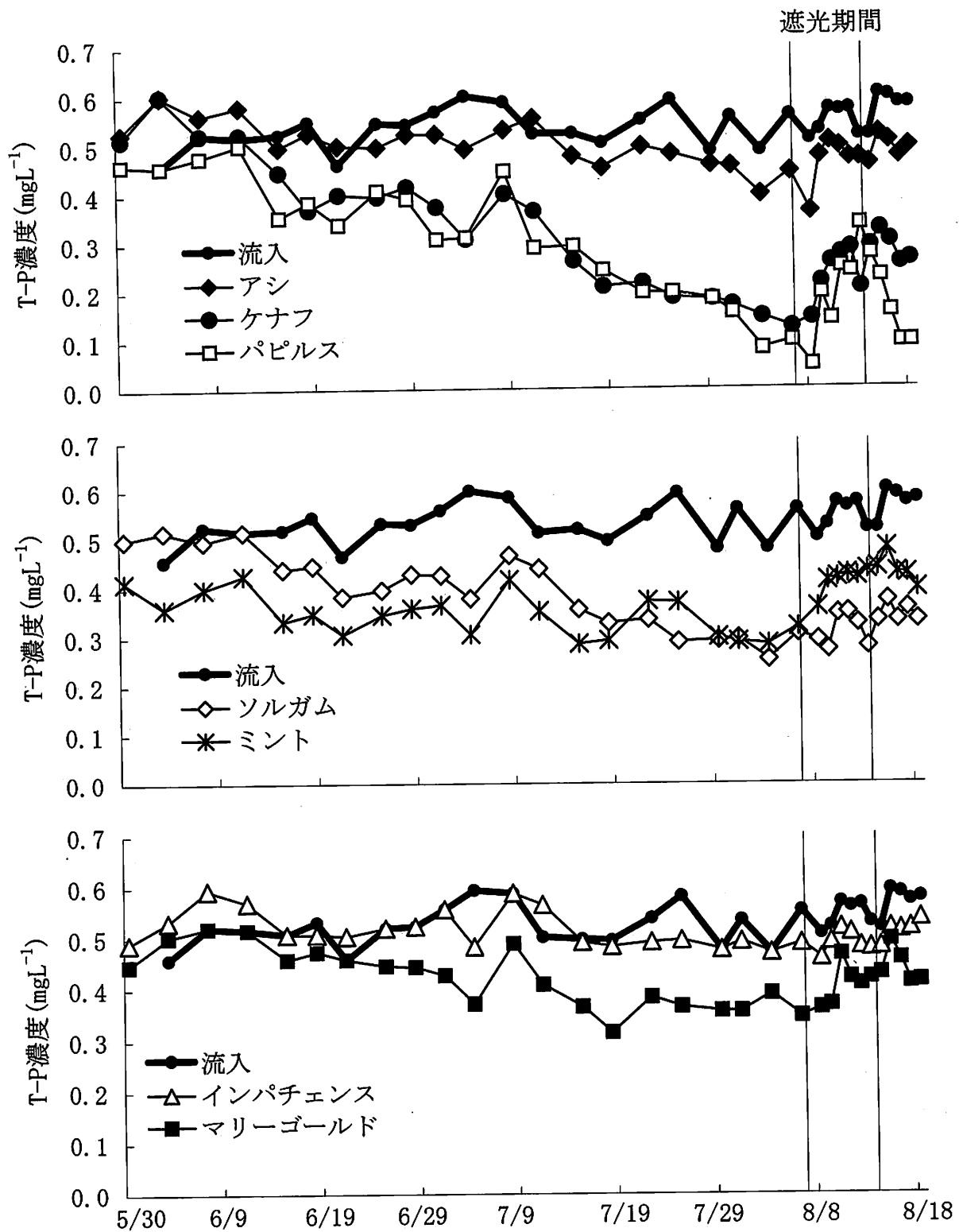
第4-1表 遮光処理期間および処理解除後の気温、水温および日射量.

月	日	ガラス室内 平均気温 (°C)	遮光処理内 平均気温 (°C)	流入水温 (°C)	流出水温 (°C)	遮光処理内 日射量 (Mjm ⁻²)	ガラス室内 日射量 (Mjm ⁻²)
8月	7日	25.6		28.9	28.8		13.3
8月	8日	23.5	23.9	24.8	24.3	1.2	9.3
8月	9日	23.1	23.3	24.1	23.3	0.9	6.9
8月	10日	26.0	25.9	25.1	24.6	1.8	12.6
8月	11日	26.7	26.6	25.5	25.3	1.7	13.2
8月	12日	26.4	26.5	25.8	25.6	1.8	12.4
8月	13日	26.3	26.2	25.8	25.6	1.6	10.9
8月	14日	28.8		26.8	27.0		13.8
8月	15日	30.9		28.0	28.6		12.1
8月	16日	32.1		28.8	29.4		14.6
8月	17日	30.0		28.4	29.0		14.8
8月	18日	28.1		27.5	27.7		13.0
8月	19日	28.0		27.3	27.6		10.9
8月	20日	26.0		26.9	27.2		14.6



第4-12図 遮光処理期間を含めた各植栽区における流出水中の窒素濃度の推移。

遮光期間は8/7～8/13.



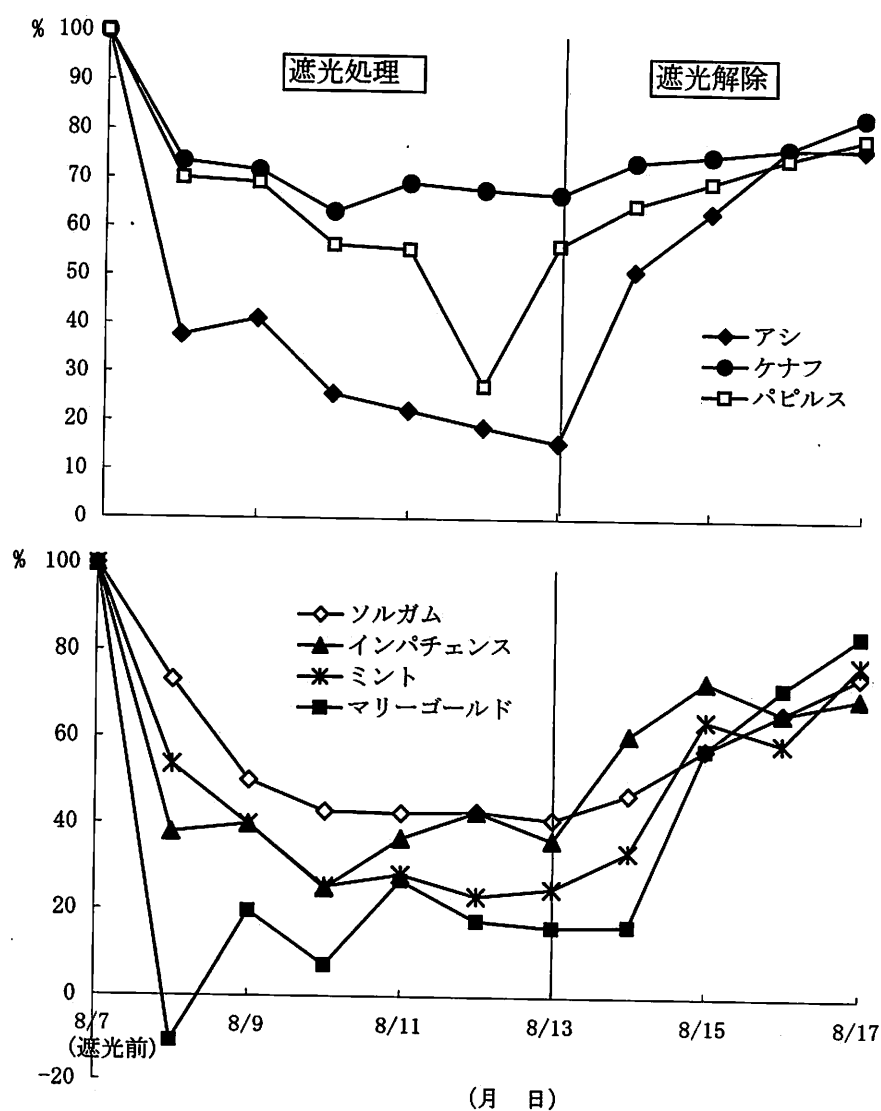
第4-13図 遮光処理期間を含めた各植栽区における流出水中のリン濃度の推移。

遮光期間は8/7～8/13。

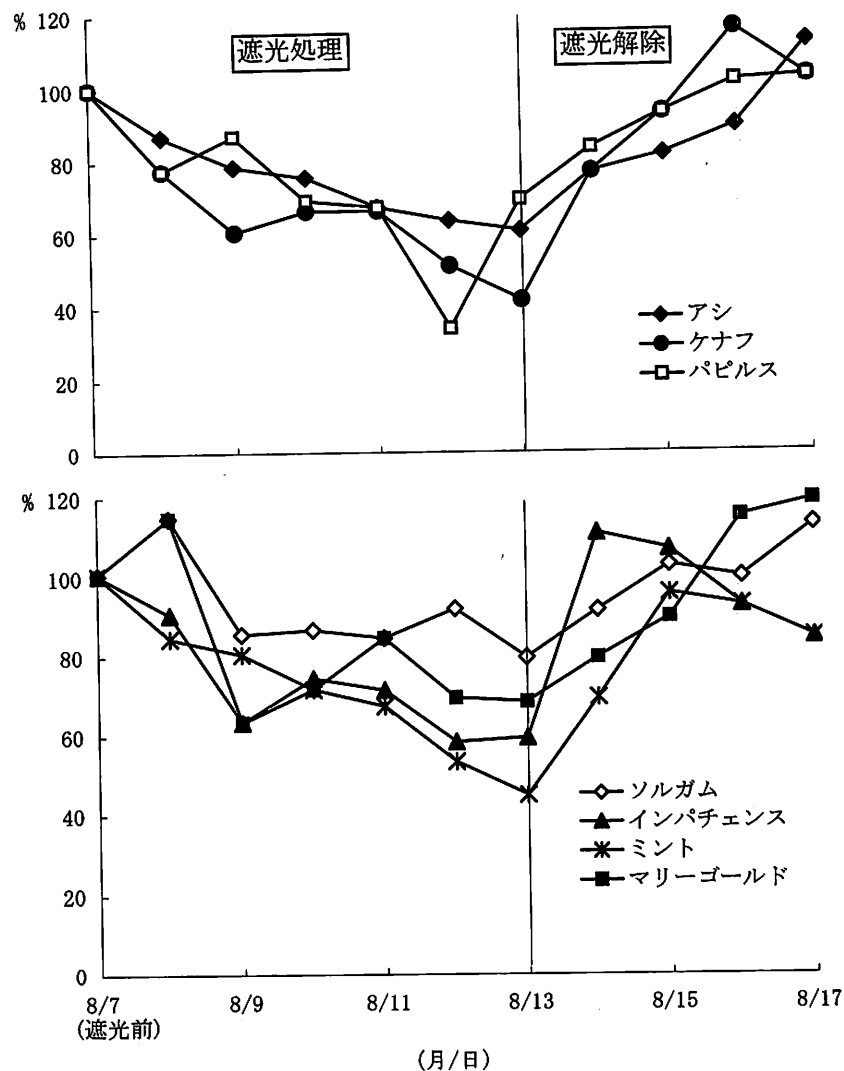
第4-2表 遮光処理期間およびその前後における植物別の窒素およびリンの除去速度.

(単位: $\text{gm}^2\text{day}^{-1}$)

		無栽植	パピルス	マリー ゴールド	アシ	ミント	ソルガム	インパ チェンス	ケナフ
T-N	遮光処理前	0.12	1.17	0.59	0.58	0.75	0.80	0.36	1.07
	遮光処理中	0.04	0.81	0.10	0.20	0.26	0.50	0.17	0.87
	遮光解除後	0.10	1.11	0.39	0.49	0.50	0.68	0.36	1.04
T-P	遮光処理前	0.12	0.21	0.07	0.05	0.11	0.12	0.04	0.16
	遮光処理中	0.04	0.16	0.06	0.04	0.07	0.11	0.04	0.13
	遮光解除後	0.10	0.22	0.07	0.05	0.08	0.12	0.05	0.16



第4-14図 遮光直前を100とした窒素除去速度比率の遮光に伴う変化.



第4-15図 遮光直前を100としたリン除去速度比率の遮光に伴う変化。

摘要

パピルス、マリーゴールド、アシ、ペパーミント、ソルガム、インパチェンスおよびケナフの7種類の有用植物を、富栄養化した溜池を想定した人工汚水を流入させた水路で育て、各植物による窒素およびリンの浄化能力や、遮光処理による日射量の変化が浄化能力に及ぼす影響を検討した。

1) これらの植物は窒素およびリンに対する浄化能力があり、特にパピルス、ケナフは、T-N濃度約 2.5 mgL^{-1} 、T-P濃度約 0.5 mgL^{-1} の人工汚水（1日、 1m^2 当たり500 Lを供給し、滞留時間は12時間）中の窒素およびリンを、生育期間の最高で70～90%除去した。

2) パピルス、ケナフおよびソルガムの除去速度は、窒素ではそれぞれ 1.17 、 1.07 、 $0.80 \text{ gm}^2\text{d}^{-1}$ 、リンではそれぞれ 0.21 、 0.16 、 $0.12 \text{ gm}^2\text{d}^{-1}$ であった。

3) 浄化能力は日射量の影響を受け、85%の遮光処理によって窒素およびリンの浄化能力は顕著に低

下したが、7日程度の遮光期間では、浄化能力は遮光解除の1～3日後に、遮光前の80～90 %に回復した。

4) 遮光処理による影響は、窒素除去速度の方がリン除去速度より影響を受けやすかった。窒素除去速度の低下には、作物種間差が見られ、ケナフの除去速度は日射量の減少の影響を受けにくいことが明らかになった。

第5章 農業用水の水質が水稻栽培に及ぼす影響

緒言

現在日本で使用する年間水使用量は約900億 m^3 である。農業用水は、その約3分の2を占めている。さらに、農業用水の約95%が水田かんがい用として利用され、その水源は河川・湖沼がほとんどである（河川情報センター 2003, 農林水産省 2003）。我が国の水質状況は、有害金属などによる汚染は減少しているものの、生活排水などによる有機物汚濁や窒素およびリンの流入による富栄養化に伴う汚濁は増加しており、河川や湖沼などの水質の悪化を招いている（玉川大学工学部 2003）。このため、河川や湖沼を水源とする農業用水の富栄養化に伴う汚濁は年々進行している（生活と科学社 2003）。

現在福岡県では、農業用水について県独自の基準を設定しておらず、農林水産省の農業用水基準を用いている。しかし、第2章で述べたとおり、農業用水基準を満たした水質を確保することは非常に困難な状況となっている。農業用水の富栄養化は、作物の生育に悪影響を与え、水稻では、窒素成分の供給過剰が懸念され、倒伏、過繁茂および品質の悪化を引き起こすことが指摘されている（森川ら 1982, 森川・松岡 1985, 土山ら 1984）。しかし、今まで農業用水の水質が水稻の収量および食味に及ぼす影響については、検討されていない。

この章では、同一の土壌を用い、第4章に示したように植物体により窒素成分を低下させた農業用水と無処理の通常の農業用水により水稻栽培を行い、農業用水中の窒素濃度が水稻の生育、収量および食味に与える影響について検討した。さらに、環境に配慮した持続型農業技術を開発するため、富栄養化が進行した農業用水に対応した、化学肥料削減の栽培技術の可能性についても検討を行った。

第1節 農業用水中の窒素濃度が水稻の生育、収量および食味に及ぼす影響

発現する地力窒素の条件を一定とするために、同一ほ場で通常の無処理の農業用水と、浄化能力が高いホテイアオイ（松崎ら 1990）に窒素成分を吸収させた農業用水を用いて、農業用水中の窒素濃度が水稻の生育、収量および食味に及ぼす影響を検討した。

1. 材料と方法

中生品種ヒノヒカリを供試し、2002年6月21日に福岡県農業総合試験場内の中粗粒灰色低地土水田において移植栽培した。

栽培方法は稚苗を用いて1株4本植えとし、栽植密度は株間15 cm, 条間30 cmの標準栽植で22.2株 m^{-2} とした。

施肥量（基肥＋第1回穂肥＋第2回穂肥）は、無肥料区と10a当たりの窒素成分量で5＋2＋1.5 kgの計8.5 kgとし、リン酸、カリはそれぞれ計5 kg, 9 kgとした標準施肥区（以後標肥区）とを設けた。追肥は、第1回穂肥を8月8日、第2回穂肥を8月21日に行った。

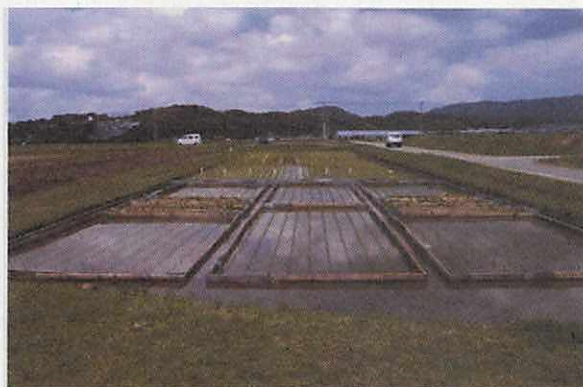
農業用水の水質を変えるために、無肥料区および標準施肥区に通常の無処理の農業用水で栽培する区（以下対照区）と、浄化能力が高いホテイアオイを農業用水が流入する水路の一部に栽植し、ホテイアオイにより浄化された農業用水を用いて栽培する区（以下浄化区）の2区を設定した（第5-1図）。ホテイアオイによる浄化の規模および投入量は、ホテイアオイの窒素吸収量を0.5 $\text{gm}^{-2}\text{day}^{-1}$ （尾崎, 阿部 1993）として算出した。すなわちホテイアオイによる浄化面積は、浄化区の

水稻栽培面積の約67%となり、100～200 g/株のホテイアオイを1.01 kgm²投入した（第5-2図）。試験は、1区18～20 m²の2反復で行った。

農業用水は、7月3日～9月24日に1週間毎に採水し、分析を行った。分析項目は、T-N、NH₄-N、NO₃-N、T-Pおよび溶存T-N（定量測定用ろ紙でろ過した後T-Nを測定、日本分析化学会北海道支部1994）であり、第2-1表に基づいて行った。

供試したほ場は、福岡県水稻・麦施肥基準（福岡県農政部 1998）の改善目標値である腐植含量2 g（乾土100g当たり）以上、可給態窒素含量8～20 mgN（100 g乾土当たり）を満たす中粗粒灰色低地土である。

食味官能評価は、福岡県農業総合試験場農産研究所産ヒノヒカリ（標準栽培）を基準にして、供試点数6、パネル構成員17～19名で12月に実施した。なお、食味評価のための試料調製および評価法は、松江（1993）の方法に準じて行った。



試験ほ場全景



ホテイアオイ投入後

第5-1図 ほ場試験区。



第5-2図 ホテイアオイ開花期（7月中旬）。

2. 結果と考察

1) 農業用水の浄化の有無と水質

対照区と浄化区における7月3日から9月24日までの農業用水の水質を、施肥量別に第5-1表に示した。pHは、標肥区および無肥料区ともに農業用水基準値（6.0～7.5）以内であり、対照区に比べて浄化区の方が低くなった。ECは全採水期間を通して基準値以内（300 μ Scm⁻¹）であった。pHと同様に浄化区の方が低い値を示した。T-Nは、標肥区、無肥料区ともに農業用水基準値 1 mgL⁻¹を超えお

り、対照区に比べて浄化区の方が高かった。これは、浄化区が田面水採水であるため、中干し期などの時期によっては水量がほとんどなく、観察により微生物が大量に混入したためと考えられる。そこで、採水時における混入物の差を無くするため、定量測定用ろ紙 (No.5 C) でろ過した試料中の T-N を、溶存 T-N として測定した (日本化学分析学会北海道支部 1994)。この溶存 T-N で見てみると、浄化区は、対照区に比べて標肥区では 20 %、無肥料区では 7 % 窒素濃度が低下した。また、 $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{NO}_3\text{-N}$ は、標肥区、無肥料区共に対照区に比べて浄化区の方が低かった。T-P は、T-N と同様に混入物の比率が高い条件下での分析であったため、対照区に比べて浄化区の方が高くなる現象が生じた。

次に、ホテイアオイの生育量および浄化能力を、第 5-2 表に示した。両施肥区とも収穫時の生体重は、投入時の約 2 倍量となっていた。各窒素濃度と推定流入水量 (陣内・岩淵 2000) から求めた窒素の平均除去率は、標肥区では溶存 T-N 19.6 %、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 51.4 %、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 92.0 % であり、無肥料区では溶存 T-N 17.7 %、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 44.6 %、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 94.0 % であった。滞留時間が短く流量の多い農業用水は、ホテイアオイの浄化機能を発揮するのに十分であったと思われる。ただし、ホテイアオイの窒素除去速度は、水稻生育期間中に中干し作業や降雨などのため水量の測定が不十分となり、明確に表せなかった。

第 5-1 表 対照区と浄化区における農業用水の水質。

施肥量	処理区	pH	EC (μScm^{-1})	T-N ¹⁾ (mgL^{-1})	溶存 T-N (mgL^{-1})	$\text{NH}_4\text{-N}$ (mgL^{-1})	$\text{NO}_3\text{-N}$ (mgL^{-1})	T-P (mgL^{-1})
標 肥	対照区 ²⁾	7.5	154	2.4	1.5	0.18	0.47	0.54
	浄化区	7.1	108	3.8	1.2	0.09	0.04	1.20
無肥料	対照区 ²⁾	7.5	154	2.4	1.5	0.18	0.47	0.54
	浄化区	7.0	115	4.3	1.4	0.11	0.03	0.89

数字は、7月3日～9月24日までの18回(9回×2地点)の平均値。

1) T-N および T-P 濃度は、浄化区において微生物の大量混入を含んでいる。

2) 標肥および無肥料の対照区は無処理の農業用水。

第 5-2 表 ホテイアオイの生育量と窒素除去能力。

施肥量	投入時生重 (kgm^{-2})	収穫時生重 (kgm^{-2})	除 去 率 (%)		
			溶存 T-N	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$
標 肥	1.3	3.0	19.6	51.4	93.0
無肥料	1.3	3.0	17.7	44.6	94.0

ホテイアオイの投入日：6月24日，収穫日：10月17日。

窒素量=水稻生育期毎のかんがい水流入量×溶存 T-N 濃度 (kg a^{-1}) の総和で算出し、

除去率= (通常のかんがい水中の窒素量-浄化区のかんがい水中の窒素量) /

(通常のかんがい水中の窒素量) ×100 で算出した。

2) 農業用水の浄化の有無と窒素成分諸濃度の推移

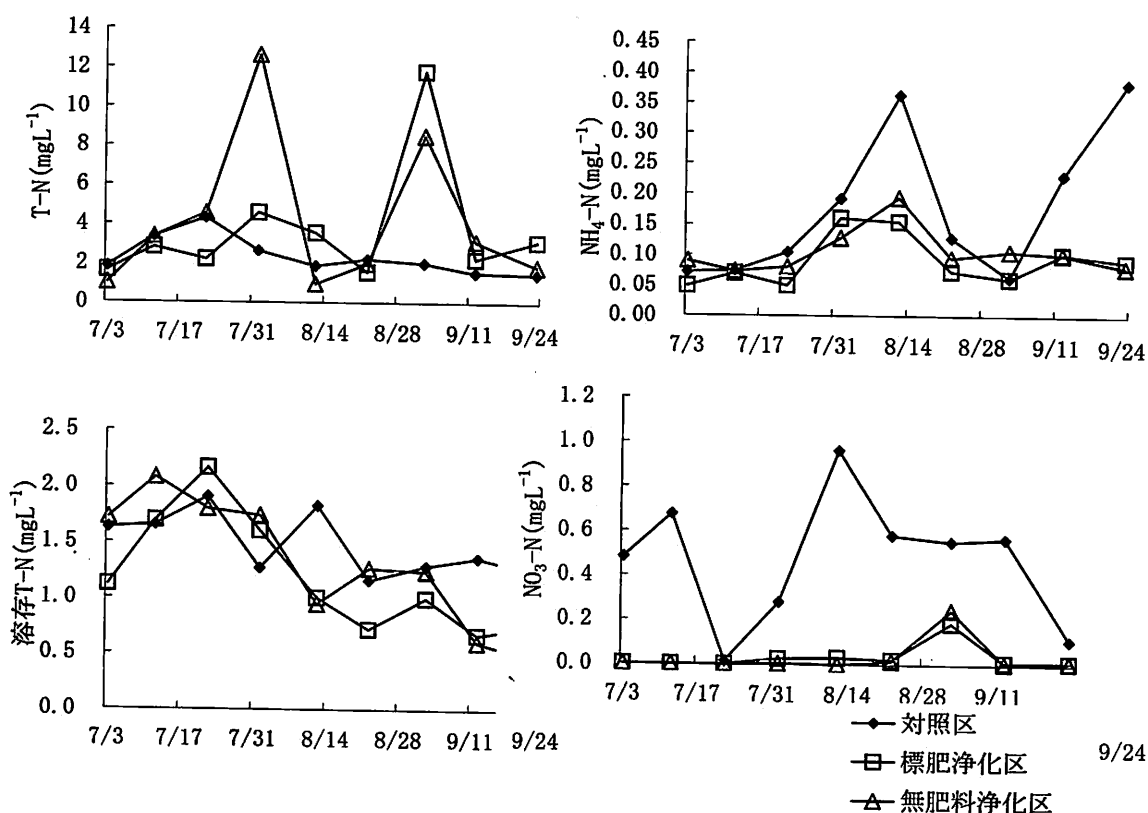
T-N, 溶存T-N, $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{NO}_3\text{-N}$ 諸濃度の推移を第5-3図に示した。

T-N濃度は、8月1日と9月2日の採水時に無窒素あるいは標肥の浄化区が 10 mgL^{-1} を超える非常に高い濃度となった。しかし、溶存T-N濃度では、8月上旬までは対照区に比べて浄化区の方の濃度が高くなる場合もあったが、8月中旬以降は浄化区の濃度の方が低かった。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は、対照区、浄化区ともに第1回穂肥を行った8月8日直後が最も高かったが、第2回穂肥を行った8月21日の直後は、濃度の上昇は認められなかった。9月4日以降では、浄化区では 0.1 mgL^{-1} を下回ったが対照区の $\text{NH}_4\text{-N}$ は上昇し、 0.4 mgL^{-1} 近くまで高くなった。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は、対照区に比べて浄化区の方が常に低い傾向であった。また、対照区は $\text{NH}_4\text{-N}$ の推移と異なり9月18日以降は急激に低下した。

以上のことにより、7月3日から9月4日の期間では、溶存T-N, $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{NO}_3\text{-N}$ 諸濃度ともに対照区と浄化区との差は明確ではなかったが、9月4日以降のT-N濃度以外の水質項目については、対照区に比べて浄化区の方が低かった。これは、ホテイアオイによる水質浄化力によるものと考えられる。

3) 農業用水の浄化の有無と水稻の生育および収量との関係

水稻の地上部の生育について、第5-3表に示した。標肥区では、浄化区は対照区に比べて草丈は同程度であり、区間差はなかった。茎数は7月22日では対照区の93 %と少なかったが、8月21日では対照区の107 %と多くなった。葉色はほぼ同程度であり、7月22日では両区共に39と最も高く、それ



第5-3図 農業用水中の窒素諸成分の推移。

以降は低下した。対照区に比べ浄化区では、稈長は2 cm、穂長は0.2 cm短く、穂数は対照区の101 %と同程度であった。無肥料区では、浄化区は対照区に比べて草丈は同程度で差はなかったが、茎数は7月22日で対照区の94 %、8月21日では同90 %と少なかった。葉色は同程度であり、7月22日で両区共に36と最も高く、それ以降は低下した。対照区に比べ浄化区では、稈長は1 cm低く、穂長は0.2 cm長く、穂数は対照区の96 %で、有意差はないものの、少なくなる傾向が見られた。生育調査の結果、対照区と浄化区との生育の差は標肥区では同程度であり、無肥料区で茎数および穂数が少なくなる傾向を示した。

次に収量、収量構成要素および検査等級に及ぼす水質浄化の影響を第5-4表に示した。標肥区では、浄化区は対照区に比べて穎花数は94 %と少なかったが、対照区に比べて登熟歩合が高かったため、精玄米重が99 %とほぼ同程度になった。検査等級は同程度の1等上および中であった。無肥料区では、浄化区は対照区に比べて穎花数は99 %と同程度で千粒重も同程度であったが、登熟歩合が低かったため、精玄米重は有意差はないものの、対照区の94 %と低い傾向を示した。検査等級はともに同程度の1等であった。

このことから、農業用水中の窒素濃度が水稻の生育および収量に及ぼす影響は施肥量によって異なり、農業用水の窒素濃度を低下させても標肥区では生育および収量はほとんど影響を受けないが、無肥料区では両者に対して影響を与え低下する傾向があることが判明した。このことは、今後農業用水中の窒素濃度に対応して化学肥料の施用量を削減することを考慮していく必要があることを示唆するものである。

第5-3表 農業用水の浄化の有無と水稻地上部における生育状況との関係。

施肥量	処理区	7月22日			8月8日		
		草 丈	茎 数	葉 色	草 丈	茎 数	葉 色
		(cm)	(本 m^{-2})		(cm)	(本 m^{-2})	
標 肥	対照区	54a	502a	39a	79a	487a	33a
	浄化区	54a	467ab	39a	78a	482ab	33a
無窒素	対照区	47b	395bc	36b	72b	421bc	30b
	浄化区	46b	371c	36b	72b	382c	31b

施肥量	処理区	8月21日			10月16日		
		草 丈	茎 数	葉 色	稈 長	穂 長	穂 数
		(cm)	(本 m^{-2})		(cm)	(cm)	(本 m^{-2})
標 肥	対照区	91a	454a	33a	83a	17.8a	405a
	浄化区	91a	464a	32a	81ab	17.6ab	411a
無窒素	対照区	83b	407b	29b	76ab	17.1b	342b
	浄化区	84b	367b	28b	75b	17.3ab	328b

葉色はSPAD値(ミノルタ社製SPAD-502)。

同一文字の付いた値の間には、ダンカンの多重検定により5%水準で有意差がないことを示す。

第5-4表 農業用水の浄化の有無と水稻の収量構成要素および検査等級との関係。

施肥量	処理区	m ² 当たり 穎花数 ×100	a 当たり 精玄米重 (kg a ⁻¹)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)	検査等級
標肥	対照区	342a	66.9a	87.2	23.2	1等上
	浄化区	321ab	65.9a	89.5	23.2	1等中
無肥料	対照区	288ab	58.7b	89.0	22.9	1等中
	浄化区	285b	55.2b	88.7	22.8	1等中

精玄米重および千粒重は水分を15%に換算した値。

検査等級は1等上～3等下の計9段階で評価。

同一文字の付いた値の間には、ダンカンの多重検定により5%水準で有意差がないことを示す。

4) 農業用水の浄化の有無とタンパク質含有率および食味との関係

精米中のタンパク質含有率と食味官能評価の結果を第5-5表に示した。浄化区は対照区に比べて精米中のタンパク質含有率は、標肥区では、両区ともに同程度であったが、無肥料区では浄化区は6.0%と低くなった。食味官能評価では、浄化区の総合が0.27、対照区の総合が0.28であり、対照区に比べて浄化区は同程度であった。本試験結果によると、無肥料区では精米タンパク質含有率には、浄化区と対照区との間に有意差が認められたにもかかわらず食味官能試験では両区の差が認められなかったのは、精米中のタンパク質含有率の差が小さかったためであると考えられる。

施肥および地力の影響が小さい無肥料区では、水稻の生育に対して農業用水中の窒素成分の影響が顕著であった。精米中のタンパク質含有率においても、浄化区と対照区との間に有意な差が見られた。登熟期以降の農業用水中に含まれる窒素は、食味に対して窒素施肥と同様な働きをしているものと考えられ、精米中のタンパク質含有率に強く影響を及ぼしていることが明らかとなった。

水稻への穂揃い期以後の窒素施肥が精米中のタンパク質含有率を高めることはいくつか報告されている(本庄 1971, 建部ら 1994)。しかし農業用水中に含まれる窒素成分が精米中のタンパク質含有率を高めることが明らかになったのは、本章の結果が初めてである。

第5-5表 農業用水の浄化の有無と水稻の精米中タンパク質含有率および食味官能試験との関係。

施肥量	処理区	精米中 タンパク質 含有率(%)	食 味 官 能 評 価			
			総合	外観	味	粘り
標肥	対照区	7.2a	0.08a	0.22a	0.02a	0.18a
	浄化区	7.1a	0.03a	0.11a	-0.14a	0.06a
無肥料	対照区	6.2b	0.28a	0.10a	0.20a	0.31a
	浄化区	6.0c	0.27a	0.19a	0.05a	0.22a

精米中のタンパク質含有率は乾物当り %。

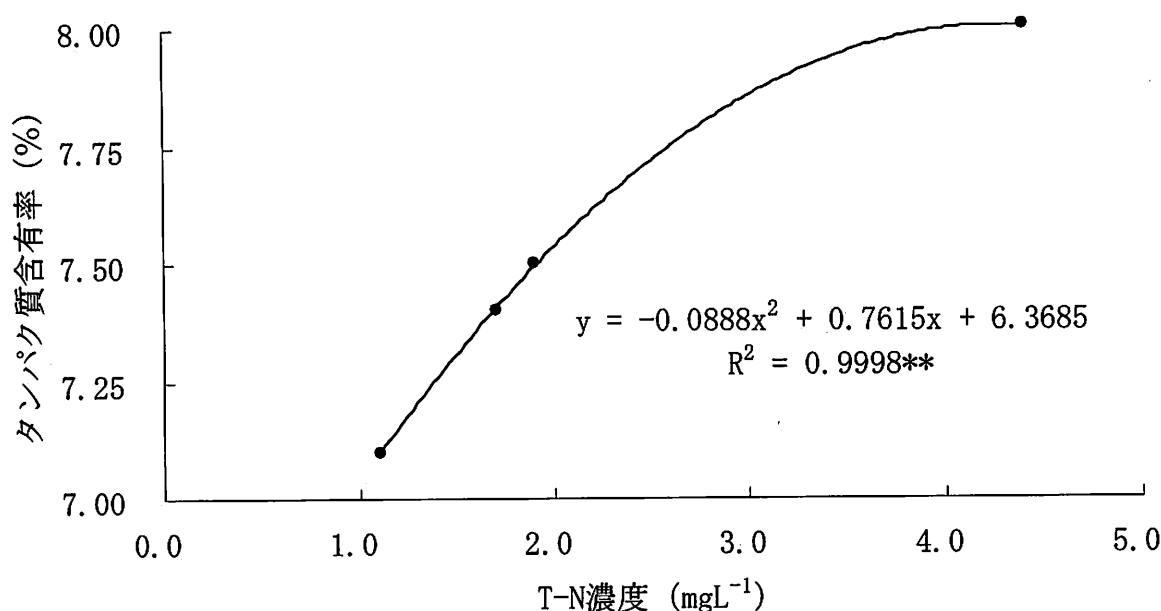
食味試験の基準は、農産研究所で標準栽培したヒノヒカリ。施肥量 (6+2+1.5Nkg10a⁻¹)。

同一文字の付いた値の間には、ダンカンの多重検定により5%水準で有意差がないことを示す。

5) 筑後地域のクリーク水が玄米中のタンパク質含有率に与える影響

第2章2節で述べたクリーク水のT-N濃度とその水を農業用水として用いた場合の水稲玄米中のタンパク質含有率との関係を第5-4図に示した。採水および水稲の収穫地点は、筑後川上流域の大木町中木室線，同下流域の大木町中木室線，矢部川上流域の三橋町岩神線，同下流域の高田町黒崎開線の4カ所である。土壌理化学性，施肥および移植時期はほぼ同様なこれら地点での，農業用水中のT-N濃度と玄米中のタンパク質含有率との関係を検討した。

移植期の6月中旬から9月5日までのT-N濃度は，筑後川上流域>矢部川上流域>矢部川下流域>筑後川下流域で低く推移した。しかし，9月12日の採水時でのT-N濃度は，筑後川上流域>筑後川下流域>矢部川上流域>矢部川下流域の順であった。この9月12日の採水時におけるT-N濃度の高低は，同一流域地点で収穫した水稲玄米中のタンパク質含有率の高低と一致しており，採水した農業用水中のT-N濃度と玄米中のタンパク質含有率との間には高い相関関係（ $n=4$ ， $r=0.9999$ ）が認められた。農業用水中の窒素濃度による水稲の生育および収量への影響は，幼穂形成期以降大きくなる（坂井ら 1974）との報告はあるが，本節の現地試験結果から，施肥した肥料および地力窒素の発現が消失した登熟期以降においては，農業用水中の窒素濃度が玄米タンパク質含有率に深く関与していることが裏付けられた。



第5-4図 筑後地域におけるクリーク水中のT-N濃度と玄米中のタンパク質含有率の関係。

水質および玄米品質の調査日は2002年9月12日、10月12日。

採水および収穫地点数は4ヶ所。

**は1%水準の有意性を示す

第2節 富栄養化農業用水の利用による施肥量削減の可能性

環境に配慮した持続型農業技術の開発の一環として、富栄養化した農業用水を利用する場合の化学肥料削減量について検討を行った。

1. 材料と方法

供試品種、ほ場、移植時期および栽植密度は本章第1節と同様である。

施肥量（基肥＋第1回穂肥＋第2回穂肥）は標準施肥区として10a当たりの窒素成分で5+2+1.5 kgとし、リン酸およびカリの施肥量はそれぞれ5 kg, 9 kg10a⁻¹とした。

また、試験ほ場で使用した農業用水の窒素濃度は、1988年～1998年の平均値で T-N濃度3 mgL⁻¹, NH₄-N濃度1.5 mgL⁻¹, NO₃-N濃度0.4 mgL⁻¹であった。この水質データを基に第3章と同様の方法で、全窒素および無機態窒素の流入量を推定し、

T-N推定流入量 $: 3 \text{ mgL}^{-1} \times 1,441 \text{ t } 10\text{a}^{-1} = 4.3 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$

無機態窒素推定流入量 $: 1.5 \text{ mgL}^{-1} \times 1,441 \text{ t } 10\text{a}^{-1} + 0.4 \text{ mgL}^{-1} \times 1,441 \text{ t } 10\text{a}^{-1}$
 $= 2.7 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$

このN量を流入量とし、標準窒素施肥量（8.5 kg）から削減したT-N減肥区（減肥A）の施肥による窒素成分を4.2 kg10a⁻¹, NH₄-NとNO₃-N濃度をあわせた無機態窒素濃度減肥区（減肥B）の施肥による窒素成分を5.8 kg10a⁻¹に設定した。この減肥A区は標準施肥区と比較して約51 %, 減肥B区は約32 %の施肥削減量に相当する。施肥法は、標準施肥の基肥＋第1回穂肥＋第2回穂肥の割合に合わせて、減肥A区は2.5+1+0.7 (kgN10a⁻¹), 減肥B区は3.4+1.4+1 (kgN10a⁻¹)の施用とした。また、リン酸、カリの施用は減肥Aでは3および4 (kg10a⁻¹), 減肥Bでは4および6 (kg10a⁻¹)とした。調査および分析は第1節と同様に行った。

2. 結果と考察

1) 減肥程度と水稻の生育・収量

減肥程度が水稻の生育に及ぼす影響を第5-6表に示した。減肥A区は、標肥区に比べて草丈は、7月22日では標肥区の94 %と短かったが、8月21日にはほぼ同程度となった。標肥区に比べて減肥区では、茎数は、標肥区の92～93 %で推移し、葉色は同程度で差はなく、稈長は5 cm低く、穂長は0.3 cm短く、穂数は標肥区の94 %であった。減肥B区は、標肥区に比べて草丈は7月22日では91 %と低かったが、8月21日には96 %とほぼ同程度となった。茎数は、7月22日には標肥区の98 %と同程度であったが、8月21日には95 %と少なくなる傾向で、葉色は標肥区と同程度で、稈長は3 cm低く、穂長は0.6 cm短く、穂数は標肥区の96 %であった。水稻地上部調査において、減肥Aおよび減肥B区は標肥区と比べて有意差はないものの、減肥A区は茎数および穂数が少ない傾向にあり、減肥A区と減肥B区との差は認められなかった。

収量、収量構成要素および検査等級を第5-7表に示した。減肥A区では標肥に比べて、穎花数には有意差はないものの標肥区の86 %と少ない傾向が見られたが、登熟歩合は93.7 %, 千粒重は22.7 gとほぼ同程度であったが、精玄米重は標肥区の94 %と少なくなる傾向となった。減肥B区では標肥に比べて、穎花数は有意差はないものの標肥区の92 %と少くなる傾向が見られた。減肥B区の登熟歩合は 91.6 %と高く千粒重は23.3 gで標肥区と同等であったので、精玄米重は標肥区の97 %と同程度となった。また、検査等級はすべて1 等上であった。本試験の結果、減肥A区、減肥B区共に生育状況、収量および検査等級は標肥区との間に有意差は認められず、減肥Aと減肥B区との差も認められなかった。

第5-6表 減肥程度と水稻地上部の生育状況との関係.

施肥量	7月22日			8月8日		
	草丈 (cm)	茎数 (本 m^{-2})	葉色	草丈 (cm)	茎数 (本 m^{-2})	葉色
標肥	54a	502a	39a	79a	487a	33a
減肥A	51a	469a	38a	75a	450a	32a
減肥B	53a	492a	38a	76a	465a	32a

施肥量	8月21日			10月16日		
	草丈 (cm)	茎数 (本 m^{-2})	葉色	稈長 (cm)	穂長 (cm)	穂数 (本 m^{-2})
標肥	91a	454a	33a	83a	17.8a	405a
減肥A	88a	417a	30a	78a	17.5a	380a
減肥B	89a	432a	32a	80a	17.2a	389a

葉色はSPAD値(ミノルタ社製SPAD-502).

減肥A : N成分は標準施肥量の約51%減. 減肥B : N成分は標準施肥量の約32%減.

同一文字の付いた値の間には, ダンカンの多重検定により5%水準で有意差がないことを示す.

第5-7表 減肥程度と水稻の収量構成要素および検査等級との関係.

施肥量	m^2 当たり 穎花数 $\times 100$	a 当たり 精玄米重 ($kg a^{-1}$)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)	検査等級
標肥	342a	66.9a	87.2	23.2a	1等上
減肥A	293a	63.1a	93.7	22.7a	1等上
減肥B	316a	64.8a	91.6	23.3a	1等上

精玄米重および千粒重は水分の15%に換算した値.

検査等級は1等上~3等下の計9段階で評価.

同一文字の付いた値の間には, ダンカンの多重検定により5%水準で有意差がないことを示す.

2) 減肥程度と精米中のタンパク質含有率および食味

第5-8表に, 精米中のタンパク質含有率と食味官能評価の結果を示した. 減肥A区は標肥区に比べて精米中のタンパク質含有率は0.7%低く, 食味官能評価はほぼ同程度であった. 減肥B区は標肥と比べて精米中のタンパク質含有率は0.6%低く, 食味官能評価は同等であった. 精米中のタンパク質含有率および食味官能評価では, 減肥Aおよび減肥B区との間に差は認められなかった. 精米中のタンパク質含有率は, 減肥A区で6.5%, 減肥B区で6.6%であり, 標肥区の7.2%に比べて低かったが, 標肥区との差が小さかったことから, 含有率の低下が食味に反映されなかったものと考えられた.

第5－8表 減肥程度と水稻精米中のタンパク質含有率および食味官能試験との関係.

施肥量	精米中 タンパク質 含有率(%)	食 味 官 能 評 価			
		総合	外観	味	粘り
標 肥	7.2a	0.11a	0.22a	0.02a	0.18a
減肥A	6.5a	-0.01a	0.11a	-0.09a	0.16a
減肥B	6.6a	0.08a	0.08a	0.05a	0.13a

精米中のタンパク質含有率は乾物当り %.

食味試験の基準は、農産研究所で標準栽培したヒノヒカリで、施肥量 (6+2+1.5Nkg10a⁻¹) .

同一文字の付いた値の間には、ダンカンの多重検定により5%水準で有意差がないことを示す.

3) 施肥削減の可能性

減肥A区と減肥B区との関係を見ると、差は認められず、標肥区と同程度であったことから、標肥の削減は十分可能であると考えられた。したがって富栄養化した農業用水を使用する場合、対標準窒素施肥量の約51 %まで削減で可能であることが明らかとなった。

これは、第1節で述べたように、地力の発現と農業用水の窒素成分を併せて、施肥による窒素成分量の51 %の削減が可能になったものであると考えられる。農業用水が登熟期以降に水稻玄米窒素含量に及ぼす影響を考慮すると、施用する肥料の削減は追肥時期に行うことが望ましい。また、登熟期以降は農業用水の窒素濃度を低下させることにより、良食味米とされる低タンパク米が得られる可能性が考えられる。

摘 要

同一土壌条件で予めホテイアオイを栽培して窒素成分を削減した農業用水と無処理の農業用水を用いて水稻の栽培を行い、農業用水の窒素濃度と水稻生育、収量構成要素、検査等級、タンパク質含有率および食味官能評価との関係について検討した。また、富栄養化が進行した農業用水に対応した、化学肥料削減の可能性についても検討した。

1) 農業用水中の窒素成分を植物（ホテイアオイ）により低下させても、水稻の生育、収量および食味官能試験結果に浄化区と対照区との差は認められなかった。

2) 水稻登熟期以降の農業用水中の窒素成分を低下させることにより、精米中のタンパク質含有率が低下した。

3) 本試験田において富栄養化した農業用水（溶存T-N濃度1.5 mgL⁻¹）を使用した場合、標準窒素施用量である8.5 kg10a⁻¹の約51 %が削減可能であった。また、精米中タンパク質含有率は標肥区に比べて低下するが、収量、検査等級および食味を損ねることはなかった。

4) 農業用水が登熟期以降に水稻精米中のタンパク質含有率に及ぼす影響を考慮すると、肥料の削減は追肥時期に行うことが望ましい。また、登熟期以降は農業用水の窒素濃度を植物等により極力除去することで、低タンパク質米が得られることが示唆された。

第6章 総合考察

現在、人間にとって貴重な水をめぐる情勢のなかで水資源不足、酸性雨、水質汚濁などの水環境の悪化が深刻になってきている。その一方で環境保全の視点から、近年は過剰施肥をできるだけ避け、環境に配慮した農業を目指した「環境に優しい高品質水稻栽培技術の開発」が行政や生産者から強く求められている。このため、農業用水の富栄養化の進行の防止および軽減に向けての施肥管理の方策を構築するとともに、富栄養化の進んだ農業用水の水質に対応した高品質生産米のための肥培管理技術の確立が急務であると考えられる。

従来の農業用水の水質に関する研究は、いずれも人体にとっての有害物質や条例の排出基準からみた窒素およびリン含有率の測定に関する検討が主で、農業用水の水質実態を水稻生産の視点から検討し、富栄養化した農業用水中に含まれる窒素、リンおよびカリウム流入量を、地域別および水稻の生育時期別に明らかにした報告は見あたらない。また、農業用水の富栄養化が米のタンパク質含有率や食味に及ぼす影響を見たものはない。さらに、陸生植物を利用した農業用水の水質浄化を試みた報告も極めて少ない。

本研究は以上のような背景と観点から、環境に配慮した化学肥料の低投入による水稻高品質生産技術の開発のための基礎的知見を得る目的でなされた。

まず始めに、県内における農業用水の実態を探るため、県内全域で水稻の代かき期から登熟期に農業用水の水質を1996～1998年にわたって調査した結果、pHでは調査総数232点の28 %、電気伝導率では11 %、化学的酸素要求量では46 %、全窒素では87 %が農林水産省が定める「農業（水稻）用水基準」以上であることが判明した。しかも、これらの値は近年に他の数県で報告された値よりも高かった。さらに、1986～88年、1991～93年での調査結果と比べて、pH、電気伝導率、化学的酸素要求量および全窒素は依然増加傾向であった。また、水稻の生育時期別でみると、全窒素や化学的酸素要求量は代かき期と幼穂形成期で高いことが認められ、その要因として代かきや穂肥の施用による用水路への養分の流出が示唆された。

福岡県南部の筑後地域に特有な存在であるクリークは、主要な農業用水の水源の一つで、筑後川および矢部川を主水源としたクリークの水質やその経年変化について調査したところ、両水系のクリークともに全窒素及び化学的酸素要求量の平均値は、筑後川水系ではそれぞれ 7.6 mgL^{-1} 、 2.6 mgL^{-1} 、矢部川水系ではそれぞれ 6.7 mgL^{-1} 、 2.8 mgL^{-1} と水稻の農業用水基準値を超えていた。ただし、水質の年次変化は、ここ10年間では水質汚濁は徐々に進行し、改善は認められなかった。

このように、県内の農業用水および筑後地域におけるクリークの水質は富栄養化が進行していることから、環境保全上、水質汚濁防止や水質浄化に関する技術開発が急務である。

農業用水の富栄養化は、環境汚染のみならず、水稻の生育、収量および食味にも悪影響を与えていることが考えられる。そこで富栄養化した農業用水に対応した肥培管理技術を確立するために、農業用水により流入する養分の流入量を推定した。その結果、代かきを含む全生育期間の合計で、全窒素流入量は全地域46点の平均で、10a当たり $2.1 \sim 3.0 \text{ kg}$ であった。また、筑後地域の全窒素流入量は10a当たり 3.69 kg と他の地域に比べて最も多く、穂ばらみ期以降に約 $1 \text{ kg}10\text{a}^{-1}$ もの全窒素が流入していた。アンモニア態窒素と硝酸態窒素の合計は全生育期間で $1.1 \sim 1.5 \text{ kg}10\text{a}^{-1}$ であり、穂ばらみ期以降に約 $0.5 \text{ kg}10\text{a}^{-1}$ 流入すると推定された。さらに、ここで得られた養分流入量の値から、水稻施肥量の削減の可能性についても検討した。農業用水による窒素流入量推定値と本県の標準窒素施用量から判断して、第2回目の穂肥量は40 %の削減が可能であることが明らかになった。富栄養化した農業用水中の窒素流入量を考慮しないで化学肥料を水稻栽培に施用している現状では、ここで得られた養分流入量の推計値は、良食味米生産に向けての精米中のタンパク質含有率の制御

を念頭においた窒素施肥法のための有効な知見となりうる。

農業用水の汚染防止には汚染源の除去などの根源的な対策が最重要であることは当然であるが、現実に富栄養化した農業用水を用いて水稻栽培が行われている現状では、なんらかの汚水浄化のための方策が求められている。このため、ここでは収穫後の利用が可能なケナフやパピルスなどの陸生植物を利用した農業用水の浄化を試みた。富栄養化した溜池を想定した人工汚水を流入させた水路で育てたところ、これらの陸生植物は窒素およびリンに対する浄化能力が認められ、特にパピルス、ケナフおよびソルガムは汚水中の窒素およびリンを最高70～90 %除去する能力を有していることが明らかになった。また、浄化能力は85 %の強い遮光条件下で低下するが、遮光解除後の1～3日目には回復し、天候による影響をあまり受けないことも明らかになり、これら有用植物を利用した浄化システムの可能性を示すことができた。

環境に優しい化学肥料の低投入による水稻栽培法を確立するために、富栄養化した農業用水の浄化が水稻の収量や食味に及ぼす影響と富栄養化に対応した窒素施肥法を検討した。水質浄化による水稻の収量と食味の低下は認められず、精米中のタンパク質含有率は低下した。富栄養化した農業用水（溶存全窒素濃度 1.5 mgL^{-1} ）を使用した場合、収量と食味から判断して標準窒素施用量である 8.5 kg10a^{-1} の約51 %が削減可能であった。このことから、農業用水中の窒素濃度に対応した化学肥料低投入型的水稻栽培法の可能性が明らかになった。

富栄養化の要因については、未解明の点が多々あり、今後は農業用水の水質変動に応じた施肥対応法や県独自の水質基準値の策定、ため池浄化による富栄養化の防止策の開発などの問題が残されている。しかし、本研究により、富栄養化した農業用水中における水稻生育時期別の養分流入量や農業用水の水質浄化方法および農業用水中の窒素濃度の差が水稻の収量および食味に及ぼす影響が明らかとなった。これらの知見を基にした環境保全型の栽培管理技術の改善上の理論的根拠が得られ、その結果環境に優しい化学肥料の低投入による安全・安心な良食味米生産拡大のための各種方策をとることが可能になったと考えられる。

総合摘要

近年、地域環境の保全は重要な課題であり、農業からの環境負荷軽減についても考慮しながら生産をしていかなければならない。このような情勢下で、本論文は、環境に配慮した化学肥料の低投入による水稻高品質生産技術の開発のための基礎的知見を得る目的で、農業用水からの養分流入量の推定を水稻の生育時期別に明らかにするとともに、陸生植物を利用した農業用水の水質浄化法についても検討した。さらには、農業用水中の養分が水稻の収量および食味に及ぼす影響を明らかにするとともに、農業用水の水質に対応した化学肥料削減量の検討を行った。

以下にその成果の概要を述べる。

- 1) 1996～98年に福岡県内46地点で、水稻の代かき期から登熟期に農業用水の水質をみた。pHの全平均値は7.4で、調査総数232点の28 %が農業用水の基準値以上であった。ECの平均値は179 μScm^{-1} で全体の11 %が基準値以上、CODの平均値は6.4 gmL^{-1} で46 %が基準値以上、T-Nの平均値は2.3 mgL^{-1} で87 %が基準値以上、T-Pの平均値は0.17 mgL^{-1} 、SS（浮遊物質）の平均値は18.4 mgL^{-1} で3 %が基準値以上であった。水稻へ生育障害を起こすとされるCOD 8 mgL^{-1} 以上の比率は27 %、T-N 5 mgL^{-1} 以上の比率は4 %であった。これらの値は近年に報告された他の数県での測定値よりも高い場合が多かった。
- 2) 県内の地域・水稻の生育時期別にみると、CODは筑後や飯塚・八幡地域で高く、T-Nは農村部の筑後地域が全時期を通して高く、特に田植え期で高く、代かきや施肥による用水路への窒素の流出が示唆された。CODはT-Pとの間の相関性が高く、有機物による汚染がT-P濃度の高い排水によっており、T-Pを多く含む排水の抑制が水質保全に重要と考えられた。
- 3) 1986～1988年の第1次調査および1991～1993年の第2次調査結果と比較すると、pHは全体的に増加し、ECは飯塚・八幡や筑後地域で依然として高く、CODはどの地域も増加傾向で、T-Nは筑後以外の地域でも増加傾向であった。
- 4) 1992～2001年に、クリークの水質を、筑後川と矢部川を主水源とする河川別に計11カ所について、水稻の代かき期から登熟期のかんがい期および非かんがい期に調査した。両水系のクリークともに全窒素及び化学的酸素要求量の平均値は、水稻の農業用水基準値を超えていた。
- 5) クリークの水質は、溶存酸素、浮遊物質および全リンを除くほとんどの項目で水稻かんがい期よりも、非かんがい期の方が高い値を示した。
- 6) クリーク水質の経年変化から判断すると、ここ10年間では汚濁が徐々に進行し、水質の改善は認められなかった。
- 7) T-Nの経年変化は認められなかったが、無機態窒素である $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{NO}_3\text{-N}$ の経年変化は大きく、特に非かんがい期における値の変化が大きかった。水稻生育期別に比較すると、分げつ期では筑後川水系及び矢部川水系共に全窒素に占める $\text{NO}_3\text{-N}$ の割合が高かった。
- 8) 福岡県内46地点の農業用水によるN、PおよびKの水稻作への流入量を推定した。代かきを含む全期間合計でのT-N流入量は、全地域平均で10a当たり2.1～3.0 kgであった。
- 9) 筑後地域のT-N流入量は3.69 kg10a^{-1} と他の地域に比べて多く、穂ばらみ期以降にも約1 kg10a^{-1} のT-Nが流入していた。筑後地域では、かんがい水のT-N量はヒノヒカリの窒素施肥基準量7.5 kg10a^{-1} の約49 %に相当し、出穂期以降の窒素流入量は、穂肥2回目施用量の65 %に、無機態窒素では約43 %に相当することから、施肥基準の穂肥2回目の施肥量が約40 %削減できるのではないかと示唆された。また、T-N流入量は地域間差が大きかった。
- 10) 無機態窒素である $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ の合計流入量は、全期間で1.1～1.5 kg10a^{-1} であり、穂ばらみ期以降に約0.5 kg10a^{-1} 流入していた。

- 11) T-P流入量は $0.15 \sim 0.22 \text{ kg10a}^{-1}$ であり、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の流入量は $0.08 \sim 0.12 \text{ kg10a}^{-1}$ であった。K流入量は $2.9 \sim 4.2 \text{ kg10a}^{-1}$ であった。
- 12) 水田への降雨による降下量は、T-Nは 0.56 kg10a^{-1} 、T-Pは $0.017 \text{ kg10a}^{-1}\text{g}$ 、Kは 0.15 kg10a^{-1} と推定された。
- 13) 富栄養化したため池の浄化試験に供試したケナフ、パピルス、ソルガム、アシ、ミント、インパチェンスおよびマリーゴールドなどの有用植物は、窒素およびリンの浄化能力があり、特にパピルス、ケナフおよびソルガムは、T-N濃度約 2.5 mgL^{-1} 、T-P濃度約 0.5 mgL^{-1} の人工汚水（1日、 1m^2 当たり500Lを供給し、滞留時間は12時間）中の窒素およびリンを最高70～90 %除去した。
- 14) パピルス、ケナフおよびソルガムの除去速度は、窒素ではそれぞれ 1.17 、 1.07 、 $0.80 \text{ gm}^2\text{d}^{-1}$ 、リンではそれぞれ 0.21 、 0.16 、 $0.12 \text{ gm}^2\text{d}^{-1}$ であった。
- 15) 植物の窒素およびリンの浄化能力は日射量の影響を受け、85 %の遮光処理によって浄化能力は顕著に低下したが、7日程度の遮光期間では、浄化能力は遮光解除後の1～3日目に遮光前の80～90 %に回復した。
- 16) 遮光処理の影響は、窒素除去速度の方がリン除去速度より影響を受けやすかった。窒素除去速度の低下には植物間差が見られ、ケナフは日射量の減少の影響を受けにくいことが明らかになった。
- 17) 農業用水の窒素成分を水生植物ホテイアオイの浄化機能により低下させることができた。
- 18) 水稻登熟期以降の農業用水の窒素成分を削減することにより、精米中のタンパク質含有率は低下した。また、水稻の生育、収量および食味官能試験結果に悪影響を及ぼすことはなかった。
- 19) 本試験田において富栄養化した農業用水（溶存T-N濃度 1.5 mgL^{-1} ）を使用した場合、標準窒素施用量である 8.5 kg10a^{-1} の約51 %が削減可能であった。この削減により、精米中のタンパク質含有率は標肥区に比べて低下させることができたが、収量、検査等級および食味には悪影響を及ぼさなかった。

以上、本研究で得られた知見を基に、環境保全型的水稻栽培管理技術の確立と化学肥料の低投入による良食味米生産拡大のための施策を提言した。

謝辞

本研究は、筆者が1995年から2001年にかけて、国庫受託である筑後川水系開発基本調査および水質保全対策事業などの一連の研究として、主に福岡県農業総合試験場生産環境研究所化学部公鉾害研究室（筑紫野市大字吉木）で行ったものであり、その他の一部は元農林水産省農業研究センター土壌肥料部水質保全研究室（茨城県つくば市）および福岡県内の現地数カ所で行ったものである。

本論文の提出にあたって、懇切な指導と校閲を賜った宮崎大学農学部教授續栄治博士に心から感謝し、厚くお礼を申し上げるとともに、校閲を賜った宮崎大学石井康之博士、杉本安寛博士、琉球大学村山盛一博士、佐賀大学野瀬昭博博士には心から感謝の意を表する。

本研究の遂行および本論文のとりまとめにあたって、温情ある研究指導と校閲を賜った福岡県農業総合試験場農産部長 松江勇次博士に心から感謝の意を表する。

さらに本研究を実施するにあたって、苦勞を共にし、協力を惜しまなかった、土壌・環境部環境保全チーム長 茨木俊行博士、研究員角重和浩氏に対して心から感謝し、厚くお礼申し上げる。

引用文献

- Abe, K., Y. Ozaki and N. Kihou 1993. Use of higher plants and bed filter materials for domestic wastewater treatment in relation to resource recycling. *Soil Sci. Plant Nutr.* 39: 257—267.
- Abe, K. and Y. Ozaki 1995. Wastewater treatment by terrestrial and aquatic plants usable for human life. *Proc. of 6th Conf. on the Conservation and Management of Lakes-Kasumigaura '95.* 961—964.
- Abe, K. and Y. Ozaki 1997. Introduction of fiber plant bed filter systems for wastewater treatment in relation to resource cycling. *Soil Sci. Plant Nutr.* 43:35—43.
- Abe, K. 2001. Advanced Treatment of Wastewater by Using Filter Materials Plants with Resource and Amenity Functions. 東京農工大学学位（博士）論文 85—143.
- Bhargava, D.S. and J. Killedar 1991. Batch studies of water defluoridation using fishbone charcoal. *Res. J. WPCF.* 63:848—858.
- 深谷幸夫・羽田野一幸・斉野平一弘・福光健二・鈴木睦美 1987. 畜産の汚水中のリン分除去—ケイ酸カルシウム濾材による汚水浄化 第1報—。畜産の研究 41: 1176—1180.
- 福岡県農政部 1986. 筑後川下流域幹線水路の水質調査。農業関係の試験研究成果 484—485.
- 福岡県 2002. 福岡県食料・農業・農村の動向
- 福岡県 2003. 環境白書. 53—104.
- 日高伸 1995. 環境保全型農業と水田の水質浄化機能. *農業技術* 50:393—397, 448—456.
- 日高伸・柴英雄 1983. 農業用水の水質汚濁の実態と水質変動要因の解析. *埼玉農試報* 39: 79—102.
- 姫田正美 1987. 管理. 野口弥吉・川田信一郎監修, *農学大事典*. 養賢堂, 東京. 1286—1289.
- 平山力 1986. 農業用水水質の地域性. *茨城農試報* 26: 209—216.
- 星川清親 1980. 新編食用作物. 養賢堂, 東京. 101—103.
- 本庄一雄 1971. 米のタンパク含有量に関する研究. *日作紀* 40: 190—196.
- 井上恵子・庄竈徹也 1991. 福岡県における農業用水の水質. *土肥誌* 62: 577—584.
- 井上重美・斉木孝 1982. 畜舎汚水の土壌・植物濾材による浄化の実用化技術 (1). 畜産の研究 36: 423—428.
- 伊藤忠・井口卓平・柳良實・福永明憲・木村靖 1990. 農業用水の水質汚濁 (第1報) 水質の日変化及び月変化. *山口農試研報* 42: 28—38.
- 陣内暢明・岩渕哲也 2000. 水稻分げつ期以降の長期間断灌水による用水の節減と生育・収量. *九農研* 62:8.
- 河川情報センター 2003. 日本の水事情. <http://www.river.or.jp>.
- 古賀凡・白石勝恵 1977. クリーク水田地帯における生態系の実態解析. *九州農業試験場研究資料* 56: 1—37.
- 桑名健夫・直原毅・砂野正・清水克彦・大谷良逸 1990. 1986年から1988年にかけての県下主要利水地点における農業用水の水質. *兵庫中央農技研報 (農業)* 38: 109—116.
- 松江勇次 1993. 水稻の食味に及ぼす環境条件の影響及び良食味の奨励品種選定に関する研究. *福岡農試特別報告* 6: 1—73.
- 松村明 1988. 大辞林. 三省堂, 東京. 2029.

- 松村蔚・海老原武久・山田要 1981. 群馬県内主要水田地帯の農業用水の水質解析. 群馬農試報 21 : 47—54.
- 松崎雅英・岡本政孝・彦坂治 1990. ホテイアオイによる食鶏処理場汚染水の処理効果. 畜産の研究. 44 : 458—460.
- 宮崎成生・青木一郎・鈴木聡 1994. 栃木県における農業用水の水質実態. 栃木農試研報 42 : 35—44.
- 水田一枝・阿部薫・尾崎保夫 1998. 有用植物による汚水中の浄化機能およびその遮光による影響. 日作紀 67 : 568—572.
- 水田一枝・角重和浩・平野稔彦 2001a. 福岡県における農業用用水路の水質とその経年変化. 日作紀 70 : 255—260.
- 水田一枝 2001b. 灌漑水による水田へのN, P, Kの流入量. 日作紀 70 : 595—598.
- 水田一枝・角重和浩・平野稔彦 2001c. 福岡県における農業用水の水質. 福岡県農業総合試験場研究報告 20 : 13—16.
- 水田一枝・角重和浩・茨木俊行・平野俊彦 2003. 福岡県南部における筑後川及び矢部川を主水源としたクリークの水質. 日作紀 72 : 93—99.
- 森川昌記・松丸恒夫・高崎強・松岡義浩 1982. 水質汚濁が稲作に及ぼす影響 第1報 汚濁物質濃度と稲作の関係. 千葉農試研報 23 : 83—89.
- 森川昌記・松岡義浩 1985. 水質汚濁が稲作に及ぼす影響 第3報 農業用水路における汚濁物質の動態. 千葉農試研報 26 : 65—70.
- 森本善明・中山隆司・中井貞夫 1985. 家畜の尿および畜舎汚水の土壌浄化に関する試験 (第4報) 混合土壌の汚水浄化能力. 兵庫県畜試研報 22 : 137—142.
- 日本分析学会北海道支部 1994. 水の分析 第4版. 化学同人. 京都. 31.
- 日本規格協会 1993. JIS工業排水試験方法. JIS K 0120 1—45, 116, 169—185.
- 農業工業研究所 1994. 低平クリーク地帯のフローダイヤグラムによる水質診断. 農業工学研究所成果.
- 農林水産省 2003. 暮らしと農業用水. <http://www.maff.go.jp>.
- 農水省構造改善局 1977. 農業の水質実態調査.
- 岡晃 1979. クリーク水田地帯におけるカンガイ水の循環の実態とその水質保全機能. 農土試技報 E-13 : 1—23.
- 小野信一・古賀汎 1984. 水田土壌表層における窒素の自然集積とラン藻による窒素固定. 土肥誌 55 : 465—470.
- 尾崎保夫・阿部薫 1993. 植物を活用した資源型水質浄化技術の課題と展望. 用水と廃水 35(9) : 771—783.
- 小沢一夫 1991. 農耕地の水質保全と有効利用に関する研究 第1報 福島県内における農業用水の水質実態. 福島農試研報 30 : 37—46.
- 坂井弘・松岡義浩・白鳥孝治・三好洋・松崎敏英・島崎多喜子・有馬慶彦 1974. 農業公害ハンドブック. 地人書館, 東京. 74—79.
- 斉藤健・半田仁 1985. 農業土木技術者のための水質入門 (その7) —農業用水の汚濁とその改善—. 農土誌53 : 151—158.
- 志村博康 1994. 現代の潮流—環境・水質志向—への農業用水の対応問題. 水利科学 219 : 1—7.
- 白谷作原・原喬・安中武幸 1986. 麦作期の圃場からの肥料成分の流出とクリークの水質環境. 農土誌 54 : 937—944.
- 生活と科学社 2003. 水質汚濁とは. <http://www.live-sceience.com>.

- 玉川大学工学部 2003. 日本の水環境問題. <http://www.tamagawa.ac.jp>.
- 田淵俊雄 1997. 水質保全, 集落排水. 志村博康他著, 新農業水利学. 朝倉書店. 東京. 170—171.
- 多田邦尚・川西幹昌・宇佐淳次 1999. 香川県における一降水毎に採取した降水中のpHと窒素成分. 香川大学農学部学術報告 51 : 45—52.
- 高橋強 1995. 農村地域における水質環境の現状と対策の必要性. 用水と排水 37 : 1—216.
- 建部雅子・宮田邦夫・金村徳夫・米山忠克 1994. 登熟にともなう玄米の糖・アミノ酸含有率の推移および窒素栄養条件の影響. 土肥学会誌 65-5 : 503—513.
- 土山健次郎・兼子明・松井幹夫 1984. 農業用水水質汚濁に関する調査研究 第3報 生活排水汚濁が水稻に及ぼす影響. 福岡農総試研報 A-3 : 93—98.
- 山本富三 1995. 暖地水田における地力窒素と水稻の収量. 福岡農試特別報告 8 : 1—63.
- 柚山義人・木下陽児郎・中村精文 1994. 筑後川流域クリーク地帯の水質診断. 農土誌 62 : 37—44.
- 若月利之・小村修一・阿部裕治・泉一成 1989. 多段土壌層法による生活排水中の窒素, リンおよびBOD成分の除去とその浄化能の評価. 土肥誌 60 : 335—344.

Trends in Quality of Irrigation Water in Fukuoka Prefecture and the Effects of the Inflow and Removal of Nutrients from Irrigation Water on Rice Cultivation

by

Kazue Mizuta

Summary

Today, one of the most important issues is to preserve the earth's environment, which includes to reduce the environmental burden by agricultural production. It is necessary to establish highly effective cultivation techniques in rice through low chemical fertilizer inputs favorable to environments. This encourages researches about the quality of irrigation water in Fukuoka Prefecture, its nutrient input into paddy fields, the removal method of the nutrients and the effects of the nutrients in irrigation water on the rice yield and quality. In this thesis, the several important findings could be clarified by the author as follows.

1. The changes in the chemical properties of irrigation water over a recent 10-year period were examined at 46 sites in Fukuoka Prefecture. From 1996 to 1998, waters were sampled several times each year from the puddling of paddy fields to ripening of rice plants. The values of pH, electric conductivity (EC), chemical oxygen demand (COD) and total nitrogen (T-N) content exceeded the standard level for agricultural irrigation water by 28%, 11%, 46% and 87 %, respectively, among total 232 samples. These values were generally higher than those reported in other Prefectures in Japan.
2. The T-N value was higher in Chikugo, a rural area in Fukuoka Prefecture, and T-N values declined after rice transplanting. Fertilizer applied to the paddy fields might runoff and caused the pollution of irrigation water. COD was highly correlated with total phosphorus (T-P) content, suggesting that the irrigation water pollution by organic matters was caused by wastewater discharge with a high T-P content. It is considered that reduction of T-P content in the wastewater discharge is especially necessary for preventing pollution in irrigation water.
3. Comparing the values obtained in 1996-98 with those in both 1986-88 and 1991-93 in Fukuoka Prefecture, it was shown that there existed tendency of increase in pH, COD, T-N and T-P contents over the recent several years in almost all examined sites.
4. The chemical properties of creek water derived from Chikugo and Yabe Rivers in the Southern Fukuoka Prefecture were examined from 1992 to 2001. The waters were sampled at 11 sites several times during the period from puddling of paddy fields to the ripening of rice plants and also during the non-irrigating period. The waters on average showed a higher value in T-N and COD than the standard level for agricultural irrigation water.
5. In the last ten years, a little deterioration was found judging from the values of chemical properties measured in the creek waters and no improvement was detected. The yearly fluctuation in $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$ contents was large, especially in the non-irrigating period. The ratio of $\text{NO}_3\text{-N}$ to T-N content was high in the tillering stage of rice in both creeks from Chikugo and Yabe Rivers.
6. N, P and K inputs into paddy fields from irrigation water in Fukuoka Prefecture were estimated from the N, P and K contents found in the irrigation water multiplied by reported

values of the amount of irrigation water. The average total amount of N input into rice paddy fields from irrigation water was estimated to range from 21 to 30 kg ha⁻¹.

7. The total amount of N input in Chikugo was 36.9 kg ha⁻¹, which was higher than other sites and it was noted that 10 kg ha⁻¹ N was input into paddy fields even after booting stage of rice. In Chikugo, the total amount of N input into paddy field from irrigation water was estimated to account for 49% of the standard N fertilization (75 kg ha⁻¹) or 65% of the second topdressing dosage which was equal to 40% N chemical fertilizers after heading stage. From those results, it could be deduced that 40% of the second topdressing dosage in rice can be reduced in Chikugo.

8. The input of the total amount of P was 1.5-2.2 kg ha⁻¹, and that of PO₄-P was 0.8-1.2 kg ha⁻¹. K input was 29-42 kg ha⁻¹.

9. Papyrus, marigold, reed, peppermint, sorghum, impatiens, and kenaf were effective for removing N and P from the wastewater, which contained 2.5 mg L⁻¹ T-N and 0.5 mg L⁻¹ T-P. In the ditch, planted with papyrus, kenaf or sorghum, 70-90 % of T-N and T-P loaded were removed. The rate of T-N removal by papyrus, kenaf, and sorghum, planted in the ditch was 1.17, 1.07, and 0.80 g m⁻² d⁻¹, respectively, and the rate of T-P removal was 0.21, 0.16, and 0.12 g m⁻² d⁻¹, respectively.

10. Removal rates of nutrients were fluctuated with the change in daily solar radiation. The removal rate decreased in the shading period at 85 %, while it recovered at 1-3 days after unshading.

11. The removal of N in the irrigation water by aquatic plants affected neither the growth, yield or palatability of polished rice.

12. The grain protein content in rice tended to decrease due to low N and P content in irrigation water absorbed by aquatic plants during the ripening stage.

13. The amount of N applied could be reduced to 51% of the total standard level (85 kg ha⁻¹) when the wastewater, which contained 1.5 mg L⁻¹ T-N, was irrigated for the paddy field. The grain protein content in rice tended to decrease due to low N and P content in irrigation water absorbed by aquatic plants, which did not affect the growth, yield or palatability of rice.

Concluding from the research findings, it was proposed to establish the rice cultivation techniques which can preserve the earth's environment and to adopt the governmental policy to expand the production of good quality rice by reducing the chemical fertilizer input.

福岡県農業総合試験場特別報告
第20号

福岡県における農業用水の水質実態と無機養分の
流入および浄化が水稻栽培に及ぼす影響

発 行 平成16年3月
福岡県農業総合試験場
(福岡県筑紫野市吉木)

著 者 水 田 一 枝

印刷所 大同印刷株式会社