

水田を通過する農業用水の水質変化の実態

宮崎成生¹⁾・亀和田國彦・岩崎慎也²⁾

摘要：本県の水田が農業用水の水質に及ぼす影響を把握するため、県内の主要水田地域の田川・姿川流域、五行川流域および巴波川流域で、水田を通過することによる流入水の水質変化を、水稲移植後 20 日頃、最高分けつ期頃および出穂期頃の 3 回、のべ 395 地点で溶存態栄養塩類など 13 項目について実態調査を行った。因子分析の結果、各調査地点の水質は 4 種の因子に整理された。さらに、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} および SiO_2 濃度の寄与が大きい第 1 因子ならびに NO_3^- 及び NH_4^+ の寄与が大きい第 4 因子によって流入水、水尻水または暗渠排水という採水部位の特徴が示された。 NO_3^- は流入水の濃度にかかわらず大部分の地点で表面流去および地下浸透により低くなった。 NH_4^+ 濃度は流入濃度が低い場合、表面流去または地下浸透により濃度が上昇する傾向で、 $0.12 \sim 0.15 \text{ mmol L}^{-1}$ が平衡濃度であった。 H_2PO_4^- はおよび K^+ は水稲移植後 20 日の灰色低地土で、表面流去または地下浸透により上昇する地点が多かった。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} および SiO_2 濃度は、表面流去により低下し、地下浸透により上昇した。本調査による濃度変化を水収支に基づき予測される濃度変化の値と比較した結果、水田が浄化する元素は窒素のみで、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- および SO_4^{2-} は、肥料の副成分や堆肥などの各種有機質資材から持ち込まれる量が水稲による吸収量を上回るため、水田外に流出しているものと推測した。

キーワード：水田、水質浄化、表面流去、地下浸透、栄養塩類、因子分析

Quality Changes of Agricultural Water Passing through Paddy Fields

Naruo MIYAZAKI, Kunihiko KAMEWADA, Shinya IWASAKI

Summary: In order to grasp the influence of paddy fields on the quality of agricultural water in this prefecture, how the quality of water running into paddy fields changed was studied in the watersheds of the Tagawa, Gogyogawa and Uzumagawa rivers, which are major paddy field regions in this prefecture. A field survey was conducted for 13 elements including dissolved nutrient salts and the like at 395 test sites in total three times: about 20 days after transplanting rice seedlings to paddy fields, around peak tillering time, and around heading time. A factorial analysis led to a classification of water quality at the survey sites by four factors. In addition, factor 1, which was largely contributed by Ca^{2+} , Mg^{2+} , and SiO_2 concentrations, and factor 4, which was significantly affected by NO_3^- and NH_4^+ , characterized water quality by sampling site: inlet water, outlet water, and underdrainage water. NO_3^- concentration decreased at most of the sampling sites by surface runoff and permeation into ground regardless of its concentration in inlet water. NH_4^+ concentration tended to increase by surface runoff or permeation into ground when its concentration was low in inlet water and reached equilibrium at $0.12\text{-}0.15 \text{ mmol L}^{-1}$. H_2PO_4^- and K^+ concentrations increased by surface runoff or permeation into ground at many of the sampling sites with gray lowland soil 20 days after transplanting seedlings to paddy fields. Ca^{2+} , Mg^{2+} , and SiO_2 concentrations decreased by surface runoff and increased by permeation into ground. The concentration changes obtained by this survey were compared with those predicted on the basis of water balance. The result revealed that the paddy fields purified water for nitrogen alone. Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- and SO_4^{2-} were estimated to run out of the paddy fields because more of them were brought in by secondary ingredients of fertilizers and various organic materials such as composts than absorbed by rice plants.

Keywords: paddy field, water purification, surface runoff, permeation into ground, nutrients salts, factorial analysis

1) 現栃木県農業大学校, 2) 現栃木県農政課

緒言

水田は食料生産以外に、水質浄化、水源の涵養、土壌浸食防止、洪水防止および生物多様性の保全などの役割を果たしている。本県の水田面積は 102,800ha であり、耕地面積の 78.7%、県土面積の 16% を占め¹⁴⁾、水田かんがい水として年間約 22 億 m³ の水を必要とする¹⁵⁾。また、本県は那珂川、鬼怒川、渡良瀬川の水源に位置しているが、都市下流域や南部畑作地域の一部で水質汚濁がみられる^{5,6)}。水質汚濁の原因物質は有機物と栄養塩類で、多種にわたっている。そのため、水田地帯の農業用水水質の形成経過を知るためには、農業用水が水田を通過することによって受ける水質変化を知る必要がある。

これまでに単一水田または単一の用排水路系内の水田群が水質に与える影響について、主に水稻生育に影響の大きい窒素およびリンの濃度変化や収支について、これまでに調査が行われ、流入水の濃度が高いほど、流入水の流速が遅いほど、または地下浸透量が少ないほど、水田による浄化割合が大きいことが明らかにされている^{1,2,4,8,11,12)}。しかし、多種の栄養塩類について灌漑期間全般にわたって濃度変化を明らかにした事例はない。

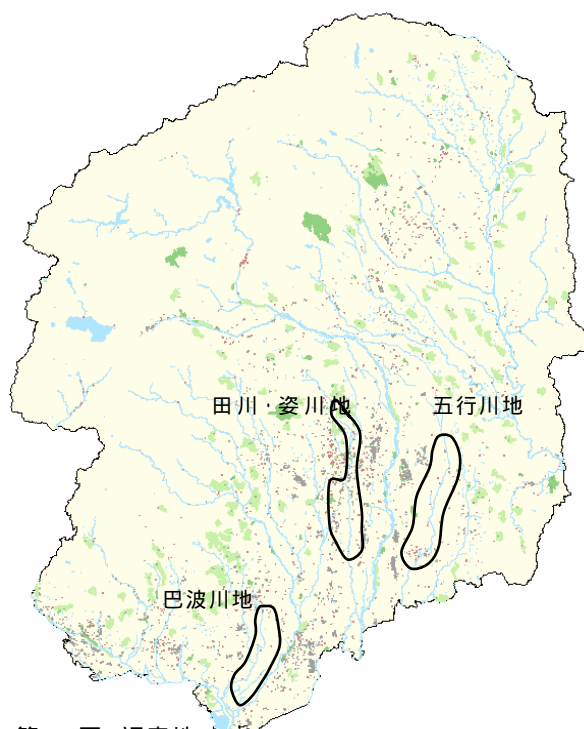
そこで、水田の表面通過および地下浸透により、溶存態栄養塩類など 13 項目の水質変化を水質および管理の異なる多くの地点で調査し、流入水中濃度、土壌の種類または水稻の生育ステージの違いとの関連について一定の成果を得たので報告する。なお、本稿の一部は日本土壤肥料学会神奈川大会⁷⁾で報告した。

方法

県内の主要な水田3地域(田川・姿川流域、五行川流域および巴波川流域)について、2001～2003年に水田の流入部(流入水)と排水部(水尻、暗渠排水)の水質調査を行った。ただし、2001年は流入水と水尻だけであった。

調査は、2001～2003年とも移植後20日頃、最高分げつ期、出穂期の3回実施した。

調査地点数を第1表に示した。調査地点数は3年間で、田川・姿川流域が136、五行川流域が134、巴波川流域が



第1図 調査地

125の合計395地点であった。

調査対象地域を第1図に示した。田川・姿川流域は、多湿黒ボク土および灰色低地土が混在し、水稻の作型が早植え栽培であった。調査地点は宇都宮市の上流と下流に分布した。五行川流域は、多湿黒ボク土で早植え栽培、農村地域であった。巴波川流域は、灰色低地土系、普通植え栽培で、調査地点は栃木市の下流に位置した。

調査項目は、pH、導電率(EC)、溶存態全窒素(T-N)、硝酸イオン(NO₃⁻)、アンモニウムイオン(NH₄⁺)、溶存態無機リン(本報では代表的イオン種 H₂PO₄⁻で表示)、カリウム(K⁺)、カルシウム(Ca²⁺)、マグネシウム(Mg²⁺)、ナトリウム(Na⁺)、塩化物イオン(Cl⁻)、硫酸イオン(SO₄²⁻)、ケイ酸(SiO₂)の13項目とした。ただし、SO₄²⁻および SiO₂は2003年だけ行った。

分析方法は、主に日本工業規格工場排水試験法¹⁰⁾によった。すなわち、pHはガラス電極法、ECは導電率計法、T-Nは紫外線吸光光度法、NH₄⁺はインドフェノール青吸光光度法、NO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻はイオンクロマトグラフ法、H₂PO₄⁻はモリブデン青(アスコルビン酸還元)吸光光度法、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、

第1表 調査地点数

地域名	地点数									合計	主な水稻作型	主な土壌統群
	移植20日後			最高分げつ期			出穂期					
	2001	2002	2003	2001	2002	2003	2001	2002	2003			
田川・姿川流域	20	10	13	20	10	16	20	10	17	136	早植	多湿黒ボク土、灰色低地土
五行川流域	20	11	14	20	10	14	20	11	14	134	早植	多湿黒ボク土
巴波川流域	13	10	14	20	10	14	20	10	14	125	普通植	灰色低地土

Na⁺はフレ-ム原子吸光法, SiO₂はモリブデン黄吸光光度法で測定した。pHおよびECは採水液をそのまま, 他の項目は濾液を分析に供した。

結果および考察

1. 調査地域の用水水質

調査結果を第2表に示した。全流入水の各項目の値は, pHが5.4~9.6(中央値7.5), ECが0.096~0.481(同0.197) dSm⁻¹, T-Nが0.019~0.704(同0.159) mmolL⁻¹, NO₃⁻が0.000~0.695(同0.122) mmolL⁻¹, NH₄⁺が0.000~0.052(同0.001) mmolL⁻¹, H₂PO₄⁻が0.0000~0.0077(同0.0006) mmolL⁻¹, K⁺が0.02~0.17(同0.05) mmolL⁻¹, Ca²⁺が0.21~1.65(同0.48) mmolL⁻¹, Mg²⁺が0.07~0.54(同0.20) mmolL⁻¹, Na⁺が0.21~1.02(同0.50) mmolL⁻¹, Cl⁻が0.15~

1.46(同0.36) mmolL⁻¹, SO₄²⁻が0.008~2.00(同0.23) mmolL⁻¹, SiO₂が0.15~0.68(同0.31) mmolL⁻¹であり, 県内農業流入水の平均的水質に近似した値⁵⁾であった。また, T-Nの大部分はNO₃⁻として存在した。

移植20日後, 最高分けつ期および出穂期の各項目の中央値を比較する。NH₄⁺およびH₂PO₄⁻は, それぞれ移植20日後0.005mmolL⁻¹, 0.0016mmolL⁻¹, 出穂期0.000mmolL⁻¹, 0.0003mmolL⁻¹で, 時間の経過とともに減少した。他の11項目は時期による水質変化は少なかった。

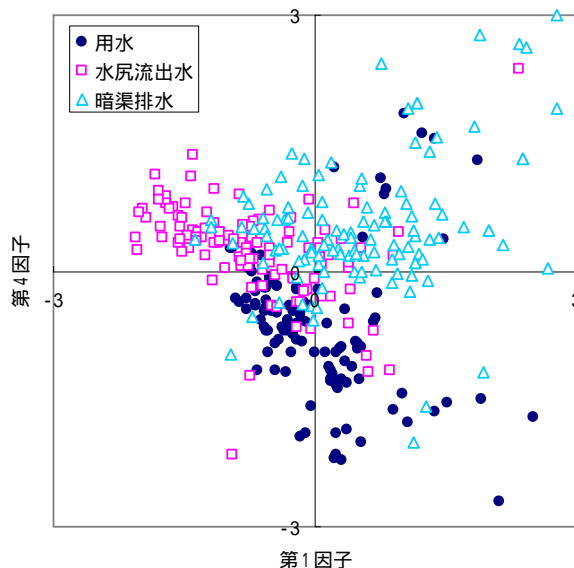
Cl⁻の値は1mmolL⁻¹程度と比較的高濃度の地点ではNa⁺も比較的高く, またそれら地点は宇都宮市または栃木市下流域に位置することから生活排水の影響を受けていると推測した。

第2表 用水水質

時 期	項 目	pH	EC	mmolL ⁻¹										
			dSm ⁻¹	T-N	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	H ₂ PO ₄ ⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SiO ₂
移植20日後	中央値	7.6	0.191	0.161	0.119	0.005	0.0016	0.06	0.46	0.18	0.52	0.39	0.23	0.28
	最大値	8.6	0.357	0.704	0.695	0.041	0.0077	0.17	0.94	0.49	1.02	1.46	0.42	0.60
	最小値	6.6	0.107	0.027	0.001	0.000	0.0000	0.03	0.29	0.07	0.30	0.15	0.10	0.15
最高分けつ期	中央値	7.3	0.198	0.139	0.126	0.001	0.0006	0.05	0.47	0.19	0.50	0.36	0.24	0.35
	最大値	9.0	0.481	0.374	0.366	0.048	0.0065	0.11	1.65	0.54	0.76	0.72	2.00	0.68
	最小値	6.3	0.096	0.019	0.000	0.000	0.0000	0.02	0.21	0.08	0.21	0.15	0.08	0.19
出穂期	中央値	7.5	0.197	0.166	0.128	0.000	0.0003	0.05	0.50	0.21	0.47	0.35	0.23	0.32
	最大値	9.6	0.305	0.644	0.638	0.052	0.0026	0.10	1.40	0.42	0.73	0.76	0.54	0.57
	最小値	5.4	0.103	0.031	0.018	0.000	0.0000	0.02	0.25	0.11	0.22	0.16	0.10	0.20
全体	中央値	7.5	0.197	0.159	0.122	0.001	0.0006	0.05	0.48	0.20	0.50	0.36	0.23	0.31
	最大値	9.6	0.481	0.704	0.695	0.052	0.0077	0.17	1.65	0.54	1.02	1.46	2.00	0.68
	最小値	5.4	0.096	0.019	0.000	0.000	0.0000	0.02	0.21	0.07	0.21	0.15	0.08	0.15

第3表 用水, 水尻および暗渠排水水質の因子分析結果

項目	第1因子	第2因子	第3因子	第4因子
NO ₃ ⁻	0.229	0.209	0.000	-0.826
NH ₄ ⁺	0.484	0.190	0.195	0.579
H ₂ PO ₄ ⁻	-0.011	-0.051	0.884	-0.108
K ⁺	-0.005	0.215	0.814	0.280
Ca ²⁺	0.832	0.357	0.075	0.005
Mg ²⁺	0.860	0.301	0.125	0.025
Na ⁺	0.145	0.842	0.062	-0.124
Cl ⁻	0.118	0.902	0.226	-0.015
SO ₄ ²⁻	0.339	0.645	-0.130	0.037
SiO ₂	0.832	-0.016	-0.251	-0.170
寄与率	0.256	0.229	0.164	0.115



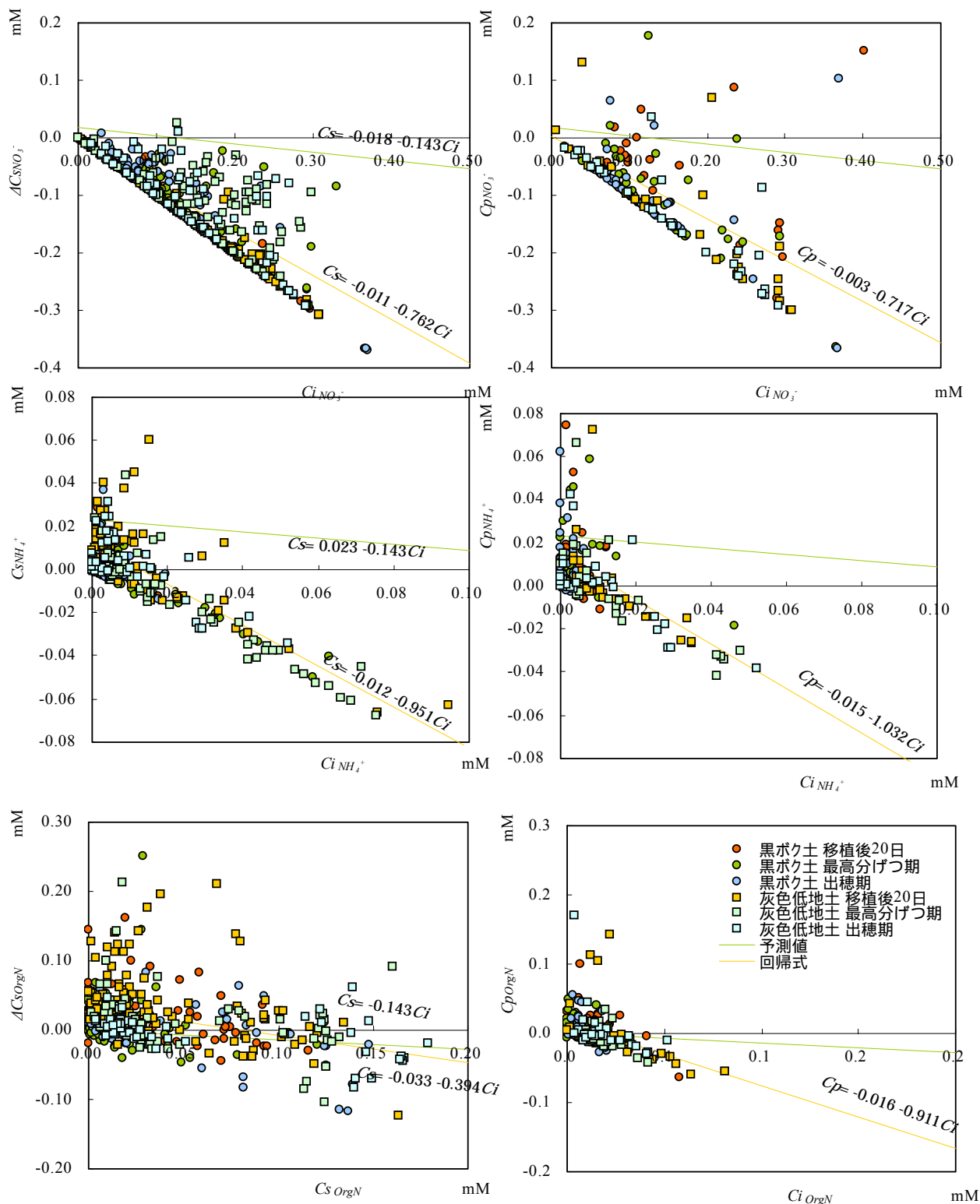
第2図 用水, 水尻流出水および暗渠排水水質の得点分布

2. 流入水, 水尻流出水および暗渠排水の関係

各調査検体の水質が, どのような項目によって特徴付けられるか明らかにするため, 調査項目の多い2003年の全調査検体について因子分析を行った. 因子分析には, 成分濃度をそのまま示す NO_3^- , NH_4^+ , H_2PO_4^- , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} および SiO_2 の10項目を用いた.

因子分析の結果を第3表に示した. 調査検体の水質は4種の因子に整理された. 第1因子は Mg^{2+} , Ca^{2+} および SiO_2 , 第2因子は Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-} , ならびに第3因子は H_2PO_4^- , K^+ , 第4因子は NO_3^- , NH_4^+ の因子負荷が大きかった.

さらに各検体の因子得点分布を採取部位別に第2図に示した. 第1因子および第4因子により, 流入水, 水尻流出水お



第3図 NO_3^- -N, NH_4^+ -N および有機態Nの濃度変化

よび暗渠排水の水質が特徴付けられた。つまり、第1または第4因子の因子負荷から、全地点における特徴として、流入水は表面流去により Ca^{2+} , Mg^{2+} , SiO_2 および NO_3^- 濃度が低下し、また地下浸透により NO_3^- 濃度が低下し NH_4^+ 濃度が上昇する傾向が示された。なお、暗渠排水は、地下浸透水の一部を採取しているものと考えられ、本調査では、地下浸透水を代表するものとみなして論議を進める。

3. 表面流去および地下浸透による水質の変化

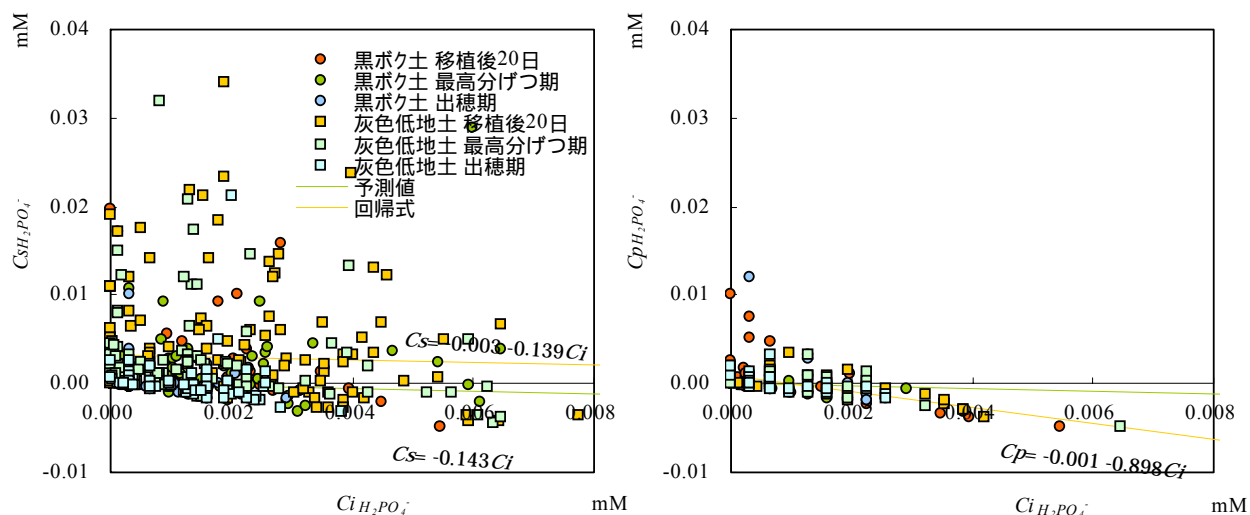
1) NO_3^- , NH_4^+ および有機態 N

前項で第4因子に負荷が大きかった NO_3^- , NH_4^+ および関連項目として有機態 N (Org-N) について、濃度変化と流入水濃度との関係を検討するため、流入水の濃度 (C_i) と表面流去に伴う濃度変化 ($\Delta C_s = \text{水尻流出水濃度 } C_s - \text{流入水濃度 } C_i$)、また地下浸透に伴う濃度変化 ($\Delta C_p = \text{暗渠排水濃度 } C_p - \text{流入水濃度 } C_i$) との関係を示した。

有機態 N は T-N から NO_3^- および NH_4^+ 濃度を差し引いて求めた。

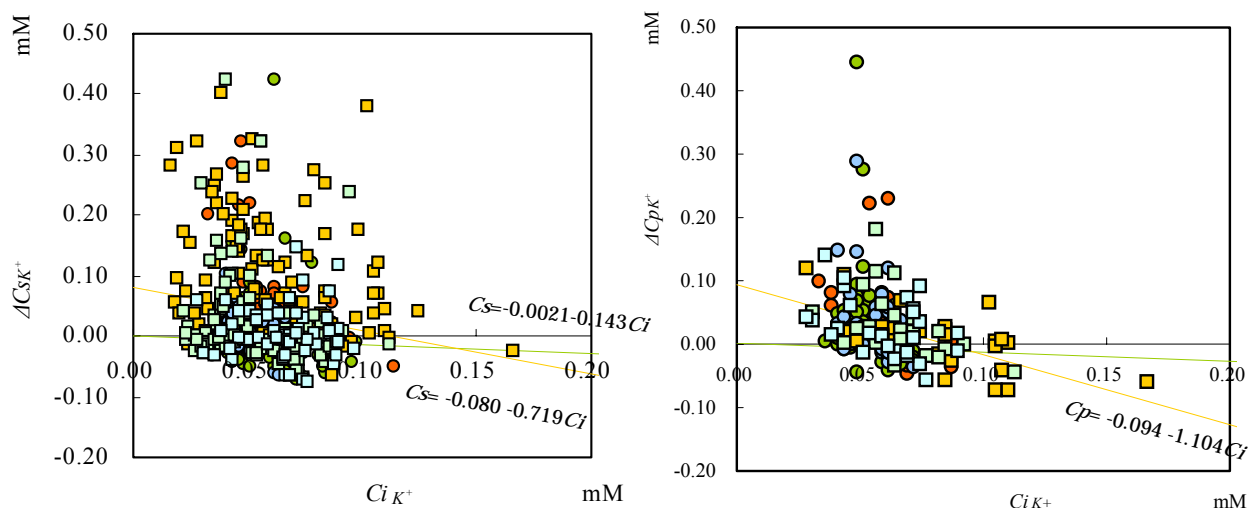
NO_3^- 濃度は、表面流去によって $\Delta C_s = -C_i$ に近い値を示す地点が多く、特に移植 15 日まではその傾向が強かった。また、回帰直線に基づく $\Delta C_s = 0 \text{mmolL}^{-1}$ の C_i 値を第5表に示した。その値はおおむね 0mmolL^{-1} で、流入水の濃度が低くても濃度が低下することを示した。地下浸透でも同様の傾向を示したが、 $\Delta C_p > 0 \text{mmolL}^{-1}$ と流出水が流入水の濃度を上回る地点が数か所あった。

NH_4^+ 濃度の $\Delta C_s = 0 \text{mgL}^{-1}$ の C_i 値は、表面流去水では 0.012mmolL^{-1} 、地下浸透では 0.015mmolL^{-1} で、流入水低濃度では流入水が水田を通過することによって濃度が上昇する事が示された。さらに、暗渠排水の NH_4^+-N 濃度は、地点間のばらつきが少なく、流入水の水質にかかわらず中央値 0.012 から 0.015mmolL^{-1} で流出する傾向があり、土壌との間に平衡が成立しているものと考えた。



黒ボク土出穂期: $\Delta C_s = 0.0005 - 0.2661 C_i$ ($\Delta C_s=0$ の C_i 値 $.0019 \text{mmolL}^{-1}$)

灰色低地土出穂期 $\Delta C_s = 0.0008 - 0.3955 C_i$ ($\Delta C_s=0$ の C_i 値 $.0020 \text{molL}^{-1}$)



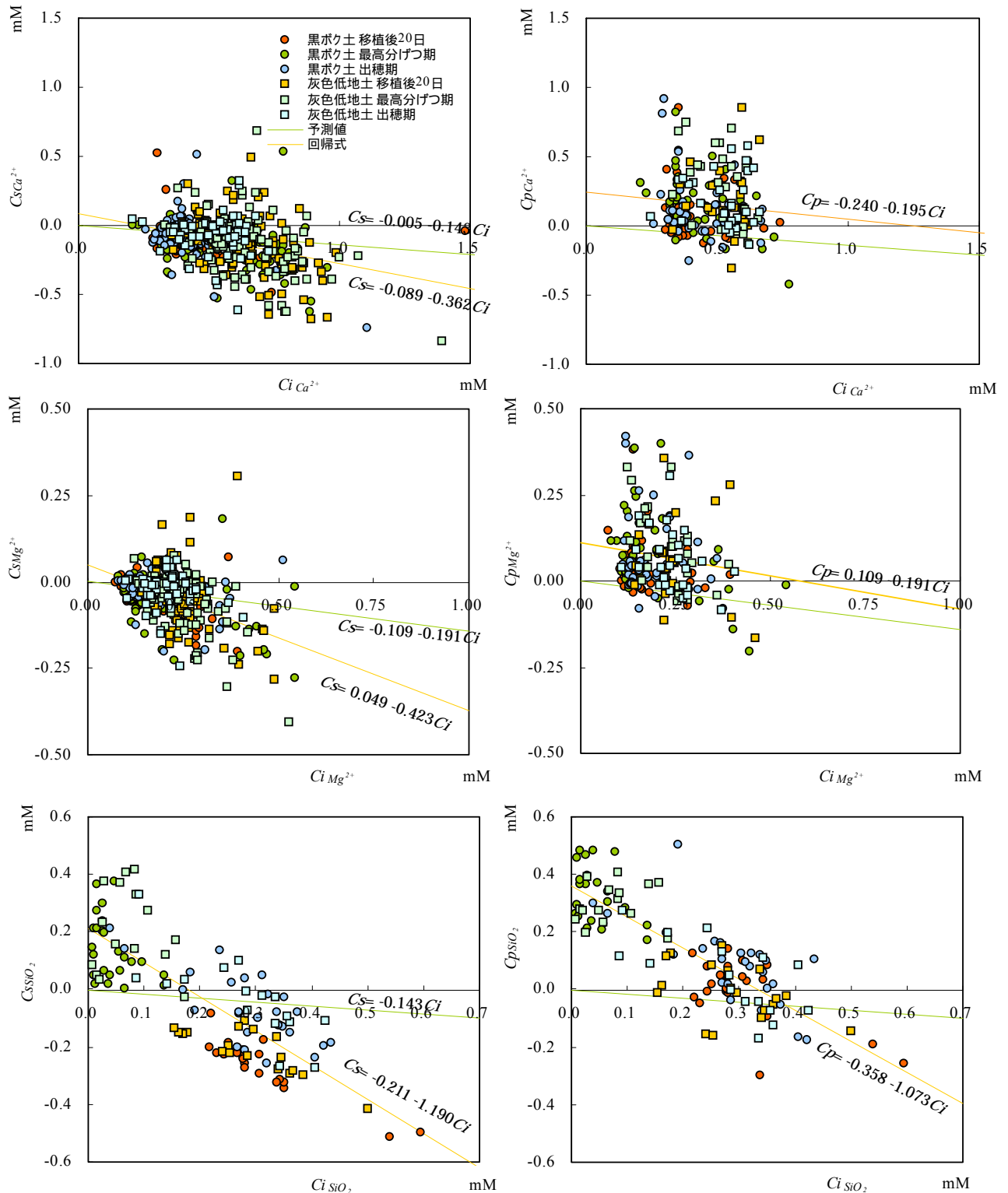
第4図 K^+ および H_2PO_4^- の濃度変化

有機態 N の $\Delta C_s = 0 \text{ mmolL}^{-1}$ での C_i 値は、表面流去で 0.08 mmolL^{-1} 、地下浸透で 0.02 mgL^{-1} で、水田の通過によって濃度が上昇する地点が多かった。表面流去ではばらつきが大きかったものの地下浸透では 0.02 mmolL^{-1} が平衡濃度と考えられる。流入水の T-N の大部分は NO_3^- であり、 NH_4^+ や有機態 N 濃度変化の影響は小さく、窒素全量としては、表面流去、地下浸透ともに濃度は低下する。

2) H_2PO_4^- , K^+

前項と同様に、因子分析で第3因子の因子負荷が大きい H_2PO_4^- および K^+ の流入水濃度の影響を把握するため、流入水中濃度と濃度変化の関係を第4図に示した。

H_2PO_4^- の $\Delta C_s = 0 \text{ mmolL}^{-1}$ での表面流去水 C_i 値は全地点で 0.022 mmolL^{-1} であったものの、移植後20日では C_s が正の値にあり、田面通過によって濃度が上昇する地点が多

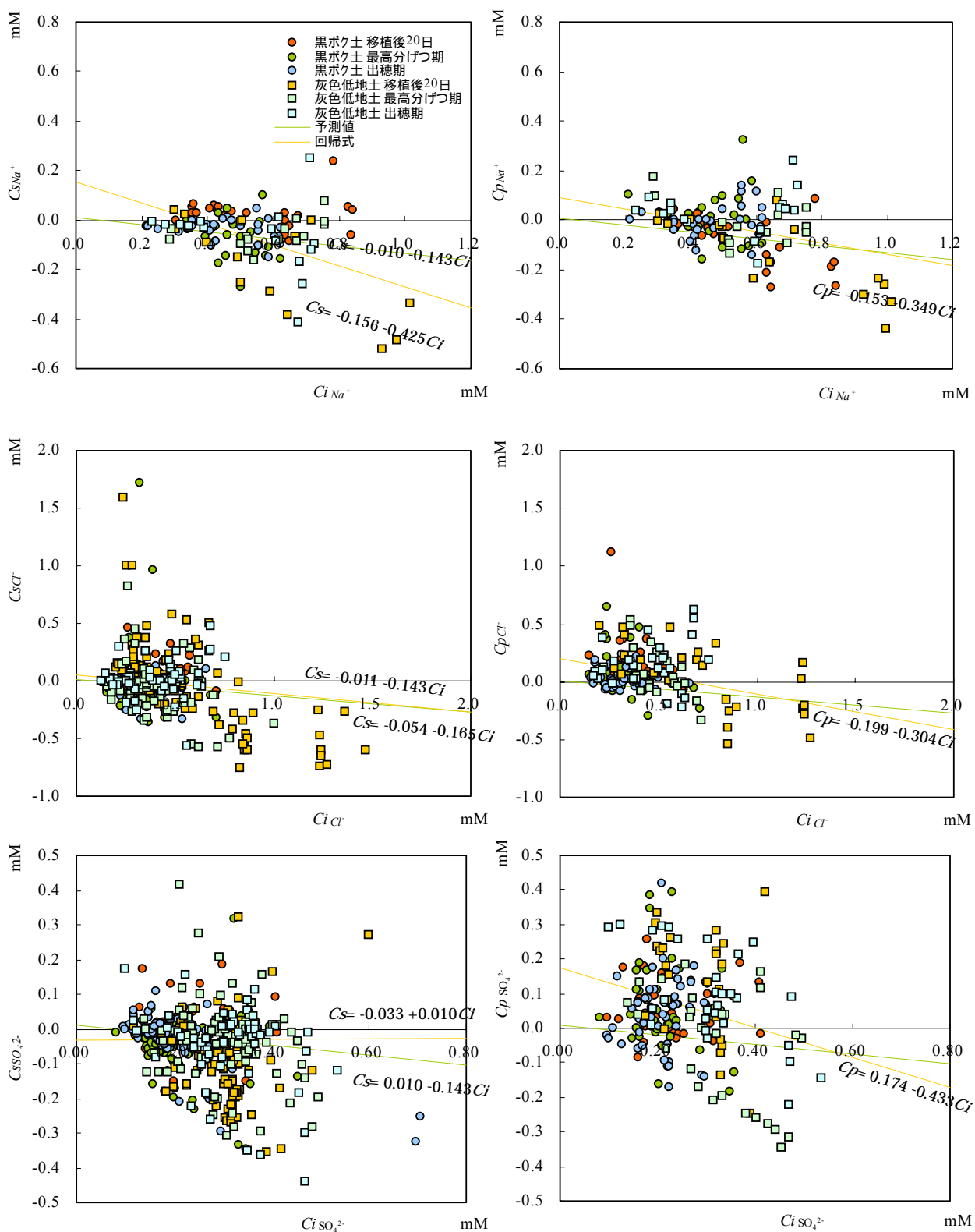


第5図 Ca^{2+} , Mg^{2+} および SiO_2 濃度変化

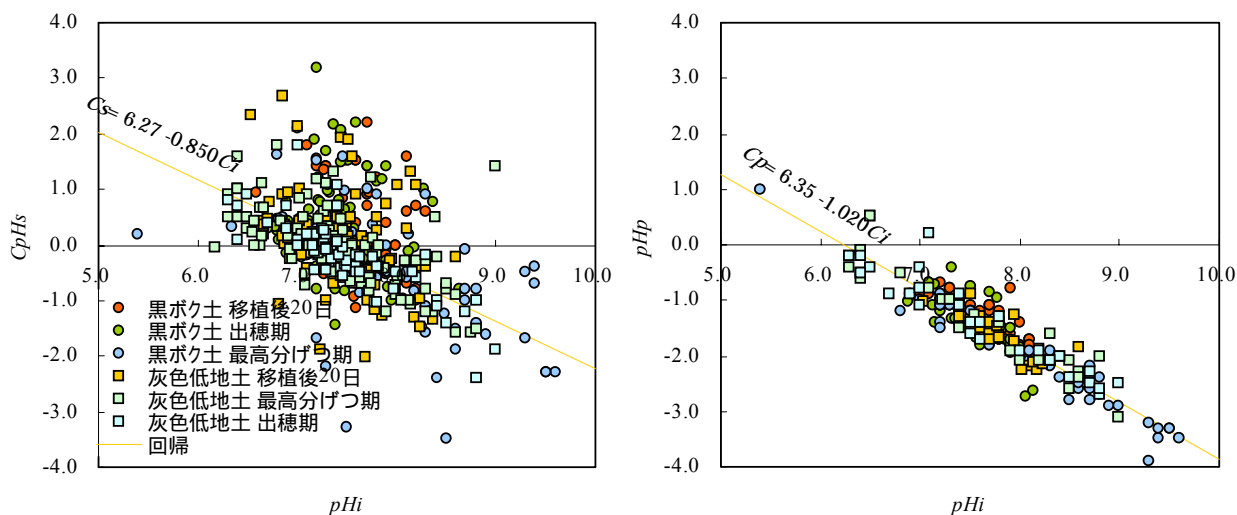
かった。一方、出穂期の $\Delta Cs = 0 \text{ mmolL}^{-1}$ での C_i 値は黒ボク土、灰色低地土ともに 0.002 程度であった。森川ら⁸⁾は T-P の浄化・負荷境界濃度を $0.24 \text{ mgL}^{-1} (0.008 \text{ mmolL}^{-1})$ としているが、一般に流入水の T-P の大半が水溶性の $\text{H}_2\text{PO}_4^{3-}$ であることをから、本調査の値はこれと比較してかなり低く、水稻生育期間後半には流入水が低濃度でも表面流去によって濃度が低下する傾向が示された。また濃度変化を土壌別に比較

すると、灰色低地土系では、濃度差 ΔCs が正で、表面流去によって濃度が上昇する地点が多かった。本調査地点には多湿黒ボク土を多く含み、土壌によるリンの吸着によって濃度が低下しやすく、森川らの報告との違いが生じたものと考えられる。

H_2PO_4^- は地下浸透濃度が $\Delta Cp = 0$ の C_i 値は 0.001 mmolL^{-1} で表面流去の値よりも小さくほとんどの地点で



第6図 Na^+ , Cl^- および SO_4^{2-} 濃度変化



第7図 pHの濃度変化

濃度が低下し、さらに回帰直線の傾きは 0.90 と比較的大きく、濃度の低下の程度も大きかった。この中で、濃度差 ΔCp 値が負になった多くの地点は移植後 20 日後で、施肥由来のリンが耕盤層の粗大孔隙をとおして直接下方に浸透したか、または湛水により還元化して可溶化した土壌由来のリンが流出したものと考えられる⁹⁾。

K^+ は表面流去、地下浸透ともに濃度差 ΔC がおおむね -0.1 から $+0.1\text{mmolL}^{-1}$ の範囲内に分布した。 K^+ の回帰式の傾きは、表面流去が地下浸透に比べ小さかった。 $\Delta C = 0\text{mgL}^{-1}$ での Ci 値は、表面流去が 0.11mmolL^{-1} 、地下浸透が 0.085mmolL^{-1} と表面流去でやや大きかった。移植 20 日後および最高分けつ期の表面流去では濃度差 ΔC が $+0.10\text{mmolL}^{-1}$ 以下、つまり水田通過によって 0.1mmolL^{-1} 以上濃度が上昇する地点が多かった。表面流去では H_2PO_4^- と同様に、施肥の影響により、また地下浸透では土壌からの脱着により K^+ 濃度が高まったものと推測される。

3) Ca^{2+} , Mg^{2+} および SiO_2

因子分析によって第 1 因子に負荷が大きかった Ca^{2+} , Mg^{2+} および SiO_2 の水田通過による濃度変化を第 5 図に示した。

Ca^{2+} および Mg^{2+} は表面流去によって多くの地点で $\Delta Cs < 0\text{mgL}^{-1}$ に分布し濃度が低下することが示された。回帰直線の傾きは Ca^{2+} および Mg^{2+} が $-0.3 \sim -0.4$ 程度であった。

Ca^{2+} , Mg^{2+} および SiO_2 の地下浸透による濃度差 ΔCp は正の値で濃度が上昇する地点が多かった。 SiO_2 の回帰直線の傾きは 1.07 であり、 Ca^{2+} の 0.20 または Mg の 0.19 に比較して大きかった、 SiO_2 の地下浸透による $\Delta Cp = 0$ での Ci 値は 0.33mmolL^{-1} であり、表面流去の 0.18 に比較して高く、地下

浸透水の平衡濃度が高いことが示された。

4) Na^+ , Cl^- および SO_4^{2-}

因子分析結果の第 4 因子に負荷が大きかった Na^+ , Cl^- および SO_4^{2-} の田面および浸透による濃度変化を第 6 図に示した。

Na^+ の $\Delta Cs = 0$ での Ci 値は、表面流去 0.37mmolL^{-1} 、地下浸透で 0.44mmolL^{-1} と他の項目よりも高い傾向であった。また、流入水の濃度と濃度変化との関連が明瞭に見られるのは移植後 20 日頃で、生育後期ほど両者の関係が不明瞭になった。

Cl^- も Na^+ と同様の傾向で、移植後 20 日頃は流入水中濃度と濃度変化に関連が見られたが生育後期には関係が不明瞭になった。また Cl^- 濃度は水田の通過によって上昇する地点も多く、この傾向は地下浸透で顕著であった。

SO_4^{2-} は表面流去では多くの地点が、流入水の濃度によらず濃度差 ΔCs が -0.1 から $+0.1\text{mmolL}^{-1}$ の範囲に分布した。地下浸透では $\Delta Cp > 0\text{mmolL}^{-1}$ で濃度が上昇する地点が多かった。

4 浄化能力の評価

農業用水が水田を通過する過程で、栄養塩類濃度に影響する要因として、水稻による吸収、蒸発に伴う濃縮、土壌による吸脱着、土壌微生物による無機化、有機化および脱窒、ラン藻などによる窒素固定などが挙げられる。

水稻 1 作期間中の水田の水収支は次のとおり報告されている¹⁶⁾。つまり、収入として、用水 1800、降雨 900mm、支出として、表面流出 660、浸透 1440、蒸発散 600mm。さらに蒸発散量は蒸散量と蒸発量に分けられ、このバランスは水稻の生

第4表 降水中養分濃度の試算値

養分	平均濃度 mmolL ⁻¹
NO ₃ ⁻	0.043
NH ₄ ⁺	0.054
K ⁺	0.0037
Ca ²⁺	0.011
Mg ²⁺	0.0036
Na ⁺	0.023
Cl ⁻	0.025
SO ₄ ²⁻	0.024

注. これらの値は、栃木県保健環境センターが1997年4月から9月に河内町で調査した各養分沈着量を降水量で除した値. 本表に無い養分は濃度を0mmolL⁻¹とみなした.

育ステージによって大きく異なり、生育後半の葉面積指数(LAI)が3.5~4.0に達した段階で蒸散が全体の90%程度を占めるとされ、蒸発60mm、蒸散540mmと推測される. その他の水移動に濃度変化が伴わない場合、各溶質の収入は用水および降水からの合計値で、これが排水量、表面流水と浸透水に均一に拡散するとみなし、溶質濃度は次式で示される.

$$C_e = (1800C_i + 900C_p) / (660 + 1440) = 0.857C_i + 0.429C_p \quad \text{-----式1}$$

ただし、C_iは溶質の用水中濃度、C_pは降水中濃度、C_eは変化後の濃度.

さらに、濃度変化量 $C = C_i - C_e$ なので、本式に式1を代入し、次式が得られる.

$$\Delta C = 0.143C_i - 0.429C_p \quad \text{-----式2}$$

本式を濃度予測線として第3~7図に併せて示した. 降水中の各溶質濃度は栃木県中央部で1997年に調査された値を用いた. それら値は第4表に示した.

第3~7図において、各養分の濃度変化量(C_sまたはC_p)の値が0mmolL⁻¹になる用水濃度の値は、水田における当該養分の平衡濃度とみなされる. また濃度変化量が水収支に伴う予測濃度に一致する用水濃度は負荷、浄化ともに無い状態で、汚濁・浄化分岐濃度とみなされる. 回帰式および予測式に基づくこれらの値を第5表に示した.

第3図によれば、表面流去水のNO₃⁻濃度変化はほとんどの地点が本直線よりも下部に位置し汚濁・浄化分岐濃度は0未満で、水田中で浄化作用を受けたことを示している. 水田土壌の脱窒能は水稲1作期間中に15molm⁻²(210gm⁻²)にも及び、実際の水田ではNO₃⁻濃度が律速要因になっているとされ(亀和田, 未発表), 硝酸濃度変化の大部分は脱窒によるもので、流入したNO₃⁻の大部分が消失するものと推測される. NH₄⁺は前述のとおり、流入水中の濃度にかかわらず水田からは一定濃度(0.012~0.015mmolL⁻¹)で流出するため、本値が濃度上昇または低下の境界になる. 暗渠水のNO₃⁻濃度は一部の地点で上昇し、これら地点では、土壌から無機化した窒素が下層の酸化層で硝酸化成を受けて生成したものと考えられる.

H₂PO₄⁻は流入水中濃度が高いほど濃度低下が大きく、土壌による吸着と考えられる. しかし、流入水中濃度が低い地点では、濃度低下の程度が低く、または濃度が上昇する地点が多く、NH₄⁺と異なりその程度は地点間での差が大きかつ

た. リンの土壌吸着能力は土壌の種類毎に大きく異なり、その違いが田面水や浸透水中のH₂PO₄⁻濃度を規定しているものと考えられる. さらに、水稲移植後20日頃の表面流去水では流入水中のH₂PO₄⁻濃度にかかわらず大幅に濃度が上昇する地点が多く、施肥リンが溶解して直接流出しているものと考えら

れ、この影響は最高分けつ期までには無くなるが示された. リンの施肥量は水稲による吸収量よりも遙かに多く、連年栽培によって土壌に蓄積している. 水田流出水中濃度は、水稲移植直後を除いて土壌の性質と土壌中H₂PO₄⁻含量に規定されているものと考えられる.

出穂期のカリウムの表面流去水濃度は、予測線と同水準に分布し、土壌中で濃度変化を伴う作用を受けずに流出していることを示している. 移植後20日頃と最高分けつ期には濃度が上昇する地点が多く、リンと同様に施肥されたカリウムが田面水に溶解して流出しているものと推測される. 地下浸透水中のK⁺濃度はほとんどの地点で濃度予測線よりも上方

第5表 各養分の平衡濃度および汚濁浄化分岐濃度 mmolL⁻¹

養分	表面流去		土層浸透	
	平衡濃度	汚濁浄化分岐濃度	平衡濃度	汚濁浄化分岐濃度
有機態 N	0.084	0.131	0.018	0.021
NO ₃ ⁻	0.014	<0	0.004	<0
NH ₄ ⁺	0.012	<0	0.015	<0
H ₂ PO ₄ ⁻	0.022	<0	0.001	.001
K ⁺	0.111	0.135	0.085	0.096
Ca ²⁺	0.246	0.384	1.23	4.52
Mg ²⁺	0.115	0.167	0.570	2.23
Na ⁺	0.367	0.517	0.438	0.694
Cl ⁻	0.327	1.95	0.655	1.16
SO ₄ ²⁻	(<0)	0.281	0.402	0.565
SiO ₂	0.177	0.202	0.329	0.385
pH	7.37	-	6.23	-
HCO ₃ ⁻	0.158	-	-	-

注1 平衡濃度は第3図から7図の回帰式のx切片の値
 2 汚濁・浄化分岐濃度は回帰式と水収支に伴う変化予測式との交点のx値
 3 pHとHCO₃⁻濃度変化は物質収支との直接的関連が希薄なので汚濁・浄化分岐濃度は設定しない

第6表 濃度低下量に基づく浄化能力評価

項目	用水よりも濃度低下		浄化	
	表面流去	地下浸透	表面流去	地下浸透
有機態 N	○	○	○	○
NO ₃ ⁻	○	○	○	○
NH ₄ ⁺	○(高濃度)	○(高濃度)	○(高濃度)	○(高濃度)
H ₂ PO ₄ ⁻	○(高濃度)	○(高濃度)		○(高濃度)
K ⁺				
Ca ²⁺	○			
Mg ²⁺	○			
Na ⁺	○	○		
Cl ⁻	○(高濃度)			
SO ₄ ²⁻	○			
SiO ₂	○	○		

注 1. ○は濃度低下または浄化作用が認められる項目、浄化は、水収支に基づく濃度変化を考慮した評価で、実質的能力の有無

2. (高濃度)は、用水濃度が高濃度の場合のみ効果が認めらるに分布し、施肥または灌漑水由来の余剰なカリウムは土壤に吸着され、水稻に吸収されなかった部分が徐々に脱着して地下浸透しているものと考えられる。カリウムの施肥量は水稻吸収量をやや上回り、余剰分が施肥直後には表面流去水に溶解して、またその後は地下浸透水に溶解して流出していると考えられる。

Ca²⁺および Mg²⁺は表面流去水と地下浸透水では傾向が異なり、表面流去では予測濃度線と同水準に分布したものの、地下浸透では大部分の地点で濃度予測線の上方に分布し、負荷されていることが示された。これら物質は、灌漑水以外に、肥料の副成分や堆肥などの有機質資材などから水田に持ち込まれ、その量が水稻による吸収量を上回り、流出しているものと考えられる。その程度は表面流去水よりも地下浸透水で極端に大きく、カリウム同様に土壤に吸着された画分が徐々に脱着し浸透しているものと考えられる。

Cl⁻および SO₄²⁻の濃度分布は、Ca²⁺および Mg²⁺と同様の傾向で、やはり、肥料の副成分として、または堆肥などの各種有機質資材から持ち込まれ、徐々に下層に流出しているものと考えられる。この時、対イオンとして Ca²⁺、Mg²⁺、および K⁺が同時に流出しているものと考えられる。

地下浸透水の pH は流入水の値、土壤の種類または調査時期にかかわらず 6.2 に収斂することが示された。pH は、塩基飽和度、水溶性塩類濃度、または炭酸ガス濃度などに影響されるが、水田下層土は各種塩類濃度のばらつきが少ない下方浸透水が安定的に通過し、それら条件に地点間ので均質な環境が生じていることを示すと考えられる。

ケイ酸(SiO₂)は、流入水中濃度にかかわらず、最高分けつ期以降は地下浸透、表面流去ともに、0.3mmolL⁻¹程度になる傾向があり、H₂PO₄⁻同様に、土壤の種類とSiO₂含量に応じて田面水中のケイ酸濃度が平衡的に決定されているものと考えられる。しかし、移植 20 日後頃の表面流去水中の濃度は、流入水中の濃度にかかわらず 0mgL⁻¹ に近づく傾向がある。水稻の SiO₂ 吸収量は幼穂形成期以降に増大するため、移植 20 日後の SiO₂ 濃度の低下は土壤への吸着が原因と考えられるが、移植後 20 日頃に土壤による吸着が大きくなる原因は明らかではない。

以上の傾向から、調査項目毎に、水田を通過することによって濃度が低下するものと水収支を考慮した期待値との比較による浄化の有無を第6表に整理した。流入水中濃度などの条件にかかわらずに浄化できるのは NO₃⁻のみであった。H₂PO₄⁻およびケイ酸の田面水中濃度は土壤との平衡関係で成立し、そのため、流入水中濃度が高い場合には浄化能力を発揮するが、その境界値は土壤の種類と含有量によって異なる。NH₄⁺も、田面水中濃度が土壤の窒素無機化能力に規定され、同様の傾向を示す。他の項目に対しては、水田はいずれも、浄化能力は持たず、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻は、おそらく、肥料の副成分や堆肥などの各種有機質資材から持ち込まれる量が水稻による吸収量を上回るため、水田外に流出しているものと考えられる。水田土壤実態調査の中で、近年、交換性 Ca²⁺および Mg²⁺が増加傾向にあることから、それら元素の持ち込み量が増えていることを示している。

K⁺は表面流去水、地下浸透水とともに流出し、それに伴って流出水中の濃度も上昇させる傾向にある。この傾向は、H₂PO₄⁻とともに基肥および追肥後に顕著であり、これまでも指摘されているように^{1,4,11,12)}、この時期の流出水を減らすことは、水質保全に重要であることが改めて示された。さらに、本調査により、施肥の影響は、移植後 20 日でも、現れることが示された。

以上のように、水田は窒素に関しては明瞭に浄化作用を持つものの、他の元素に関しては負荷的に作用する可能性が示された。今後、さらに、水収支、土壤条件、または水稻の生育ステージなどの違いによる影響を明らかにして水田地帯における農業用水の水質保全技術の確立が必要である。

謝辞

本研究の実施に際し、分析の一部を田中技術員に分担して頂いた。また調査方法について岩崎企画情報室長の助言を頂いた。さらに、とりまとめ方法について伊藤環境技術部長の助言を頂いた。ここに記して感謝致します。

引用文献

1. 平山力・酒井一(1985)水田からの肥料成分の流出とその対策第1報水田からの肥料成分の流出。茨城農試研報 25:133-145.
2. 伊藤信 (1985)水田の水浄化能に関する研究。農研センター研報 5:119-145.
3. 川口桂三郎編(1978)水田土壌学。講談社, 東京.
4. 金木亮一・矢部勝彦・小谷廣道・岩間憲治(2001)田面水の窒素・リン濃度に及ぼす代かき, 施肥および土壌の種類の影響。土肥誌 73:125-133.
5. 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調査。栃木農試研報 42:35-44.
6. 宮崎成生(2000)栃木県南部畑作地帯の地下水水質の実態ならびに多量施肥による水質およびユウガオ収量への影響。栃木農試研報 49:47-57.
7. 宮崎成生・鶴野樹々子・岩崎慎也・亀和田國彦(2003)土肥要旨集:1.
8. 森川昌記・松岡義浩(1984)水質汚濁が水稻に及ぼす影響第2報水田における汚濁成分の動態。千葉農試研報 25:137-144.
9. 日本土壌肥料学会編(1984)水田土壌とリン酸。博友社, 東京.
10. 日本工業規格(1998)工場排水試験法
11. 西沢良一・中田均・勝木依正(1979)機械移植水稻の効率的施肥法に関する研究。滋賀農試研報 21:1-20.
12. 佐藤紀男・田口明広(2000)福島県の灰色低地土水田における代かき後の田面水の水質変化。土肥誌 71:866-873.
13. 田淵俊雄・高村義親(1985)集水域からの窒素・リンの流出。東京大学出版, 東京.
14. 栃木県(2005)平成 16 年度首都圏農業推進計画 21 レポート[統計資料編]:1,12.
15. 栃木県企画部水資源対策室(2003)とちぎの水:11. .
16. 農林水産省
17. 亀和田國彦・岩崎秀穂・柴田和幸・鈴木智久・鈴木康夫・印南一憲(2000)農耕地土壌の化学性の変化および化

学性を性格付ける因子と土壌管理の影響, 栃木農試研報 49, 25-32

18. 佐藤文政・川田 登, 閉鎖系火山灰水田地域における用水の物質収支(1986)栃木農試研報 32, 27-31
19. 阿部盟夫, 火山灰水田の効率的水利用に関する試験(1991)指定試験(土壌肥料)第 26 号, 農林水産技術会議事務局・栃木県農業試験場