(27)

小流域からの無機イオンの流出特性とその影響因子

Runoff Characteristics and the Regulating Factors of Inorganic Ions from a Small River Basin

藤原 拓* 大年邦雄* 吉田 綾*
Taku FUJIWARA, Kunio OHTOSHI, Aya YOSHIDA

ABSTRACT; Inorganic ions as well as nitrogen and phosphorus affect the eutrophication in a closed water area. To investigate the runoff characteristics of inorganic ions in Uji river basin in Kochi prefecture, Japan, continuous surveys were conducted every one or two weeks during from June 2000 to June 2001. It was found through the survey that Na^+ and Cl^- were diluted according to the increase of flow rate, while NO_3^--N and PO_4^{3-}-P concentrations increased oppositely. Principal component analysis revealed that 80% of the information in the original data set was integrated into 3 principal components; (1) dilution due to the increase of flow rate, (2) photosynthesis, and (3) nitrification. The analysis also demonstrated that the influence of the dilution was detected particularly at the day having a larger flow rate, that the effect of photosynthesis appeared more significantly from July to the beginning of September, and that nitrification did not occur perfectly from February to May.

KEYWORDS; Small river basin, Runoff characteristics, Inorganic ions, Principal component analysis

1. はじめに

河川水中の無機イオン濃度は，集水域の降水量や降水成分，土壌組成，地質，植生など自然的な影響を受けるのみならず，農地への施肥，生活排水，産業排水など人為的な影響によっても大きく変化する．さらに，光合成にともなう水生植物への吸収や生物化学的変換によって河川水中で濃度が変化する．湖沼等での藻類の増殖を考える場合，増殖に必要な栄養塩や無機物質が必要な時期に存在するかどうかが重要であり，その供給側となる流入河川の無機イオンの負荷量と流出形態を明らかにする必要があるとされている[1]．無機イオンのうち窒素やリンの流出に関しては，農業小集水域からの流出水の水質に関する研究[2]，森林集水域からの栄養塩負荷流出に関する研究[3]，市街地河川における研究[4]など多数行われてきた．しかしながら，窒素やリン以外の無機イオンについては，定期的な1年間以上の観測を通じて濃度の年間変動特性・変動要因の検討，あるいは流出負荷量を検討した例としては海老瀬[1]，森ら[5]など限られている．

そこで本研究では，高知県中部の小流域を対象として，無機イオンの流出特性を検討するとともに主成分分析を用いてその変動要因について考察を加えた．

2. 調査概要

2.1 調査地域の概要

高知県中部の伊野町に位置する仁淀川水系宇治川を調査対象とした．図1に宇治川流域の概要を示しているが，流域面積が14.7km^2，河川長は7.5kmであり，流域のうち山林，住宅地および農耕地がそれぞれ76%，13%，11%（水田5%・畑地5%・樹園地1%）を占めている．調査地域における水稲の移植期は4月中旬で

* 高知大学農学部生産環境工学科 (Dept. of Environmental Technology, Faculty of Agriculture, Kochi University)

である．流域人口は平成10年度末現在で14,775人であり，人口密度は1005人／km^{2}である．家庭排水の処理形態別人口は，農業集落排水施設による処理人口が159人，以下 公共下水道：2339人，合併処理浄化槽：897人，単独処理浄化槽：2736人，し尿汲み取り：8644人となっている（平成10年度末現在）．その結果，住宅地の多くで生活排水が直接河川に流入しており，さらに支流の早稲川には製紙工場の排水が流入している．そのため宇治川は，四国の一級河川で最も水質汚濁が進行した河川の一つであり，平成6年に「水環境改善緊急行動計画（清流ルネッサンス21）」の第二次計画対象河川として選定され，水環境改善へ向けての様々な取り組みが関係者一体となって行われてきた．

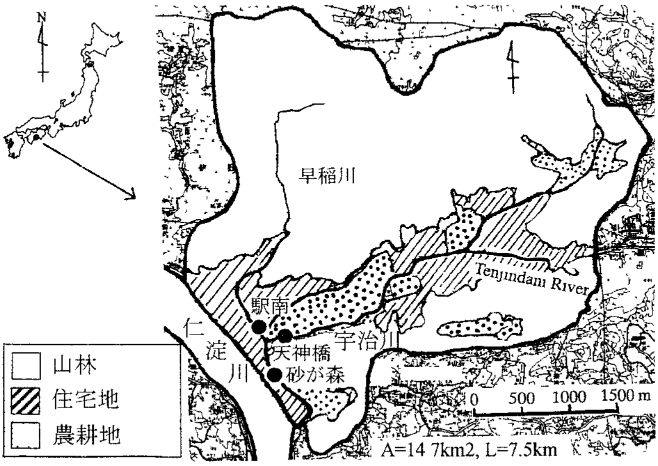

図1　調査地域の概要

2.2　調査方法

調査は2000年6月7日から2001年6月13日にかけて1週間ないし2週間に1回の頻度で行った．調査時刻は砂が森地点における著者らの24時間調査の結果に基づき，原則として水曜日の午後2時とした．調査地点は支流早稲川との合流前後の3地点（早稲川駅南地点，天神橋地点，砂が森地点）とし，現地で表層水の採水を行うとともに水温，pH，DO，ORP，ECの測定を行った．採取した試料は冷蔵して大学の実験室へ持ち帰り，速やかにガラス繊維ろ紙（WhatmanGF/B，有効粒子保持能 1μm）によるろ過を行った．未ろ過試料およびろ過試料について，SS，BOD，TOC，全窒素，全リン，形態別の窒素・リン，陽イオン，陰イオンなど合計30項目の水質を測定したが，

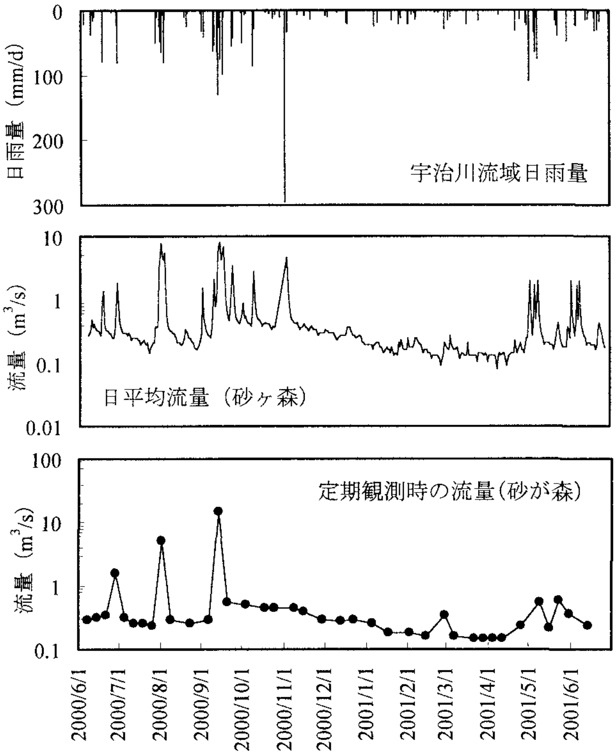

図2　雨量および流量の経時変化

本研究では主に無機イオンの結果について検討を加える．なお，窒素・リンについてはオートアナライザー（ブランルーベAACSⅡ），主要イオンについてはイオンクロマトグラフ（ダイオネクスDX-120）により分析を行った．HCO_3^-およびCO_3^{2-}に関してはPアルカリ度およびMアルカリ度の結果より算出した．調査地域の降雨量および河川流量は，高知県土木部河川課および国土交通省高知工事事務所の観測データを提供していただいた．

3．調査結果および考察

3.1　対象河川の水質の概要

図2に調査期間中の日雨量，砂が森地点における日平均流量および観測日の調査時刻における流量をまとめて示した．なお，早稲川駅南地点（以下早稲川地点）の流量は観測上の技術的問題により使用不可能となったため，以下の議論では早稲川地点および天神橋地点に関しては濃度のみの検討を行うこととする．

調査期間中の降雨量は2792mm（2000年6月から2001年5月で計算）であり，1991年から2000年にかけての年平均降雨量2697mm（標準偏差は816mm）とほぼ等しかったことから，調査期間中の降雨量は平均的な値であったと評価できる．また，2000年6月から11月にかけて合計降雨量の69%に相当する1928mmの降雨があり，9月には最大月降雨量716mmを観測した．1991年から2000年にかけての平均値では，9月に月降雨量が最大値434mmを示し，6月から11月に年平均降雨量の68%に相当する合計1834mmの降雨があった．したがって，調査期間は合計降雨量のみならずその降雨パターンも概ね平均的であったと判断できる．砂ヶ森地点における河川流量は降雨量に対応して変化し，2000年6月から11月にかけて多かった．一方，2000年12月から2001年4月にかけては降雨量の減少にともない河川流量も少なくなり，その後2001年5月から6月にかけては幾分流量が増加した．

図3に主要な陽イオン，陰イオン濃度の経時変化を，図4に各態窒素・リン濃度の経時変化を示すとともに，表1に基本統計量を示した．平均値で比較すると，3地点でいずれのイオンも天神橋地点で最も濃度が高く，濃度が低い早稲川との合流後の砂が森地点では幾分濃度が低下している．早稲川のイオン濃度が低い理由としては，イオンおよび窒素・リン濃度が低い製紙工場の排水が多量に流入していること，流域に農耕地が少ないことなどが考えられる．早稲川の流量は上述したように不明であるが，宇治川本川と比較して流

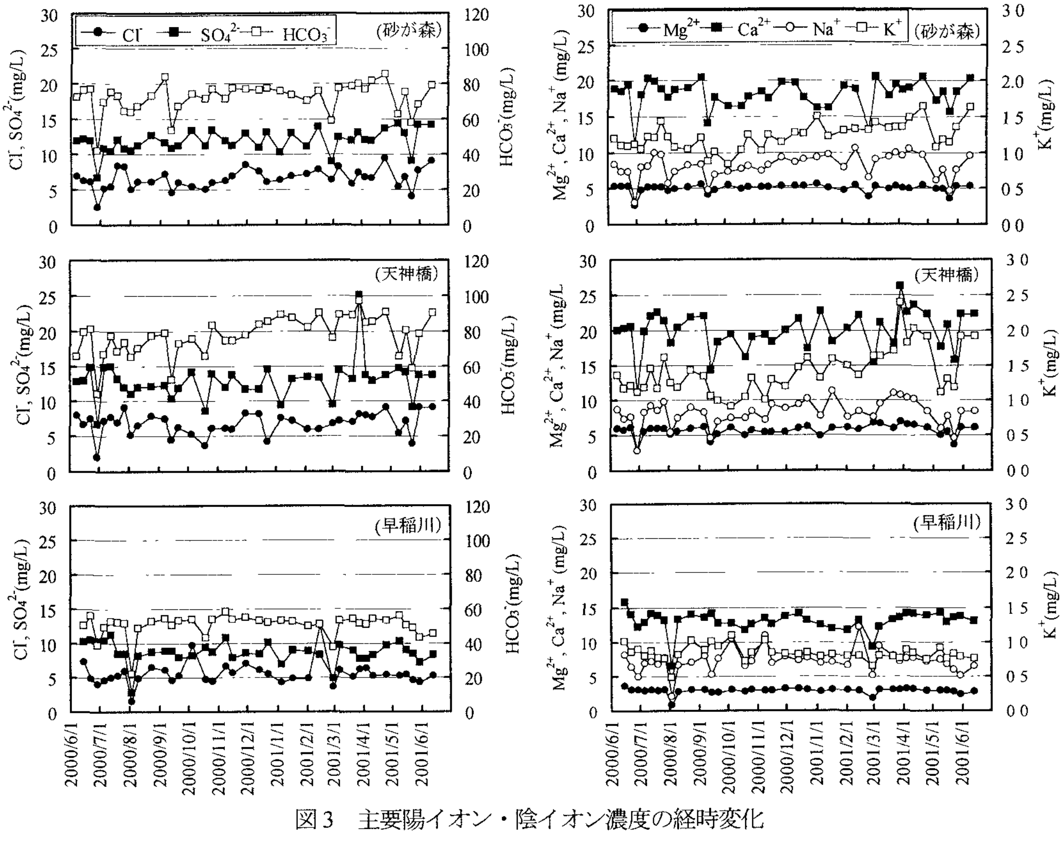

図3　主要陽イオン・陰イオン濃度の経時変化

量が少ないので，合流後の濃度の低下率は小さい．また，無機イオンのうち Na^+，Cl^-，各態窒素・リンの変動係数は20%以上であり，年間の変動が大きいことが明らかになった．また，図4 に示されているように砂が森および天神橋地点では2000年7月初旬から9月初旬の間には，降雨が生じた 8 月 2 日を除くと NO_3^--N 濃度が低下した．宇治川では河道内に多量の水生植物が繁茂していたこと，この時期にはDO濃度が過飽和となっていたことを考慮すると，光合成にともなう植物体への吸収が生じたと推定される．また，2001 年 2 月初旬から 5 月下旬にかけて NO_3^--N 濃度は減少し，NH_4^+-N および NO_2^--N 濃度は増加した．これは水温低下にともなう硝化量の減少が原因と推測される．これらについては，3.3 で詳しく考察する．その他のイオンは特徴的な年間変動がなかった．

3.2 無機イオンの流出特性とその起源に関する考察

表 2 に平均比流量および各イオンの平均比流出負荷量を示した．ここで，降雨日は観測日の日雨量が 10mm 以上であった日として定義した．比流量および比流出負荷量は，観測日の流量あるいは各イオンの流出負荷量を平均し，流域面

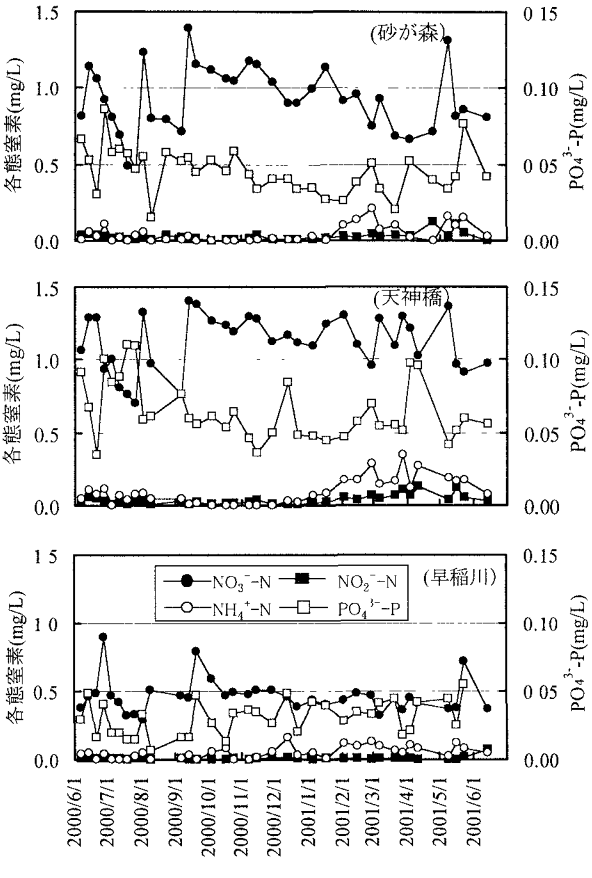

図4　窒素・リン濃度の経時変化

表1　観測日の水質基本統計量

	単位	砂が森		天神橋		早稲川	
		平均値	変動係数(%)	平均値	変動係数(%)	平均値	変動係数(%)
標本数		38		38		37	
流量	m^3/s	0.84	290	—	—	—	—
比流量	$m^3/s/km^2$	0.057	290	—	—	—	—
水温	℃	20.1	26.8	20.2	0.295	18.4	0.168
pH		7.6	6.0	7.7	7.5	7.2	4.3
DO	mg/L	9.6	25.1	10.0	33.4	8.5	6.8
EC	mS/m	17.0	10.9	18.5	14.4	12.4	15.2
Cl^-	mg/L	6.51	21.6	6.74	24.2	5.57	31.5
SO_4^{2-}	mg/L	11.8	13.5	12.9	21.8	8.68	18.2
HCO_3^-	mg/L	72	12	77	15	50	13
Mg^{2+}	mg/L	4.99	11.5	5.70	14.3	2.87	15.2
Ca^{2+}	mg/L	18.1	11.3	19.9	14.4	13.0	11.8
Na^+	mg/L	8.05	20.8	8.16	21.9	7.21	23.9
K^+	mg/L	1.23	14.9	1.41	23.4	0.83	13.2
NO_3^--N	mg/L	0.93*	23.5	1.12**	17.1	0.46	26.4
NO_2^--N	mg/L	0.026*	99.1	0.039***	94.1	0.009	135
NH_4^+-N	mg/L	0.043*	130	0.089***	98.9	0.048	88.8
PO_4^{3-}-P	mg/L	0.046*	32.5	0.066**	32.5	0.031	40.5

*：標本数 35，**：標本数 36，***標本数 37，変動係数＝標準偏差／平均値

表2　平均比流量および平均比流出負荷量

	単位	年間平均（晴天日平均，降雨日平均）	海老瀬[1)]
比流量	$m^3/y/km^2$	1.8×10^6（6.3×10^5，6.2×10^6）	3.1×10^5-1.2×10^6
Cl^-	$t/y/km^2$	9.3（4.0，2.9×10）	6.2-29.5
SO_4^{2-}	$t/y/km^2$	2.0×10（7.6，6.6×10）	－
HCO_3^-	$t/y/km^2$	1.1×10^2（4.6×10，3.5×10^2）	－
Mg^{2+}	$t/y/km^2$	8.1（3.2，2.6×10）	－
Ca^{2+}	$t/y/km^2$	2.9×10（1.1×10，9.3×10）	3.7-13.7
Na^+	$t/y/km^2$	1.1×10（5.1，3.1×10）	3.0-10.8
K^+	$t/y/km^2$	1.9（7.3×10^{-1}，6.3）	1.9-7.0
NO_3^--N	$t/y/km^2$	2.3（6.3×10^{-1}，9.1）	0.24-1.86
NO_2^--N	$t/y/km^2$	3.4×10^{-2}（1.4×10^{-2}，1.2×10^{-1}）	0.02-0.42
NH_4^+-N	$t/y/km^2$	7.9×10^{-2}（1.9×10^{-2}，3.2×10^{-1}）	0.07-1.45
PO_4^{3-}-P	$t/y/km^2$	1.0×10^{-1}（2.8×10^{-2}，4.0×10^{-1}）	0.01-0.38

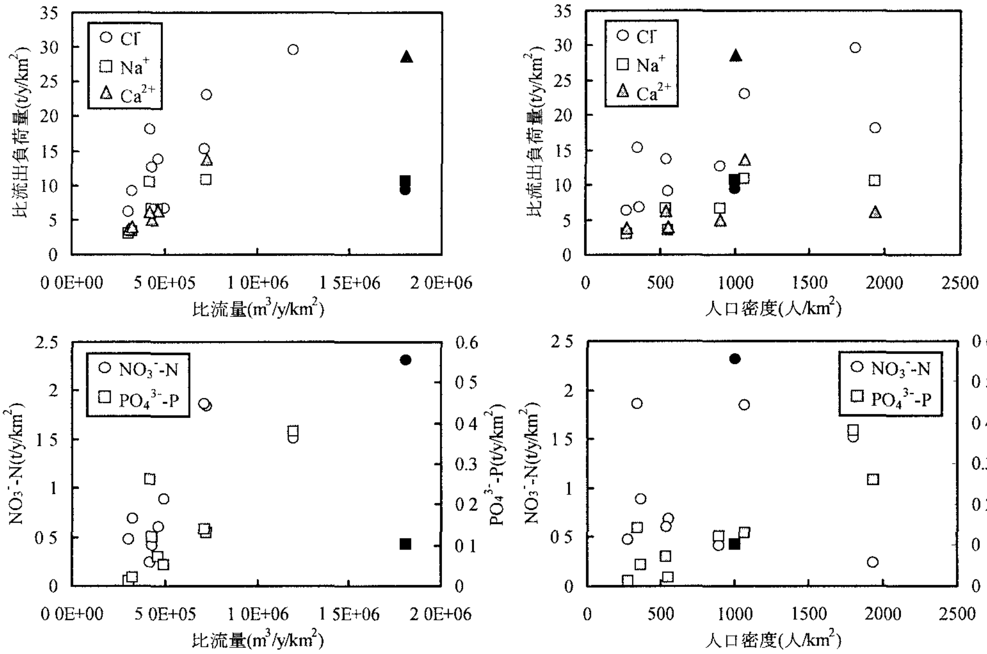

図5　比流量および人口密度と比流出負荷量との関係

積（14.7km²）で除すことにより算出した．表2には海老瀬による霞ヶ浦流入河川の観測結果[1)]を併示しているが，そのうち新利根川は灌漑期に他水系から大量の農業用水の導水があり，流量・流出負荷量とも1年間を通しての解析は他の河川と同様には行い難い，とされているため，表2および以下の解析からは除外した．なお，本研究で対象としたような小流域では降雨による影響期間が短く，1週間から2週間に1回程度の頻度の調査では降雨時流出の影響を十分捉えきれているとは言えない．したがって，得られた値は幾分過小評価になっている可能性がある．

調査期間中の宇治川流域の降雨量は上記のように2792mmと多いため，比流量は霞ヶ浦流入河川の最大値以上となった．比流量が多いにもかかわらず，比流出負荷量は概ね霞ヶ浦流入河川の値の範囲内であったが，Ca^{2+}およびNO_3^--Nはやや高い値となっている．図5に平均比流量あるいは人口密度と平均比流出負荷量との関係を主要なイオンについて霞ヶ浦流入河川のデータと併せて示した．図中の黒塗記号が宇治川における結

果である．図よりNa^+およびCl^-の比流出負荷量は人口密度に対して概ね比例関係にあり，宇治川の調査結果もその傾向を逸脱していない．一方比流量との関係についてみると，宇治川は比流量が多いにもかかわらず比流出負荷量は低い値でとどまっている．これらの結果は，霞ヶ浦流入河川と比較して宇治川流域では，Na^+およびCl^-のうち点源に由来する割合が相対的に大きく，降雨時に面源から流出する負荷量の寄与が相対的に小さいことを示唆している．そこで，家庭排水からのCl^-発生負荷量を推定し，実測された平均流出負荷量との比較を試みる．宇治川流域での実測値がないため，横浜市の内陸部に位置する下水処理場のうち工場排水の影響が大きい処理場を除く 4 箇所（港北，都筑，西部，栄第二）の下水処理場流入水[6)]，および農業集落排水処理施設放流水[7)]の合計 5 箇所の平均Cl^-濃度 45.9mg/L に，宇治川流域での水使用の原単位 270L/人/日[8)]を乗じ，家庭排水からのCl^-発生負荷量原単位を算出した結果 12.4g/人/日を得た．また，し尿による発生原単位は収集し尿の塩素イオン濃度の非超過確率 50%値 2400mg/L[9)]に，し尿収集量の原単位 1.82L/人/d[9)]を乗じた結果，4.4 g/人/d を得た．これらの差が雑排水による原単位 8.0 g/人/d と考えた．これらの値を用い，上述した処理形態別人口より宇治川流域での流域面積あたりのCl^-発生負荷量を算出すると 2.9t/y/km^2 となった．ここで，公共下水道の終末処理場処理水およびし尿汲み取り家庭のし尿分については，宇治川の最下流部あるいは流域外に放流されるため考慮せず，その他については各処理施設から 100%排出されるとした．得られた値は表 2 に示した晴天日の平均比流出負荷量の 72%に相当し，Cl^-が保存性物質であることを勘案すれば，この結果は晴天日のCl^-負荷量の大半が家庭排水由来であることを示唆している．降雨日も含めた全平均比流出負荷量と比較してもその 31%が家庭排水に由来すると推定された．

Ca^{2+}の比流出負荷量は比流量に対して概ね比例関係にあり，宇治川での観測結果もその傾向を逸脱していない．人口密度との関係をみると，霞ヶ浦流入河川でのCa^{2+}の比流出負荷量は人口密度との明確な関係がみられず，宇治川の結果はこれらよりはるかに高い値を示した．以上より，Ca^{2+}は主に面源から流出し，宇治川では比流量が多いために比流出負荷量が大きくなったと考えられる．

NO_3^--N の平均比流出負荷量は表 2 に示しているように 2.3t/y/km^2 であった．また，全窒素の平均比流出負荷量は 2.7t/y/km^2 であった．宇治川流域での家庭排水系の窒素の発生負荷量は 66.9kgN/d である[8)]ことから家庭排水由来の発生負荷量原単位は 1.7t/y/km^2 と試算され，晴天日のNO_3^--N の平均比流出負荷量 0.63t/y/km^2（全窒素の晴天日平均比流出負荷量は 0.81t/y/km^2）よりもかなり大きい．このことは流下中の生物分解・沈殿・吸着等を示唆している．全窒素の平均比流出負荷量（2.7t/y/km^2）と発生負荷量原単位（1.7t/y/km^2）から計算すると，宇治川流域では家庭排水以外に起因する窒素負荷が少なくとも 39%程度あり，流下中の生物分解を勘案すればそれ以上が面源・工場排水等に起因することが明らかになった．図 5 より，NO_3^--N の比流出負荷量は人口密度とはほぼ無関係であるのに対して，宇治川の観測結果も含めて比流量にはほぼ比例している．このことからも，NO_3^--N の流出に対して面源の影響が大きいことが示されている．

表 2 に示したようにPO_4^{3-}-P の平均比流出負荷量は 0.10 t/y/km^2 であり，全リンの平均比流出負荷量は 0.15 t/y/km^2 であった．宇治川流域での家庭排水系のリンの発生負荷量は 8.88kgP/d である[8)]ことから家庭排水由来の発生負荷量原単位は 0.22t/y/km^2 と計算され，平均比流出負荷量が発生負荷量よりも小さいことが明らかになった．流下中でのPO_4^{3-}-P の土壌への吸着，固形性リンの沈殿などが原因と考えられる．図 5 より，霞ケ浦流入河川と比較して宇治川では比流量は大きいにもかかわらずPO_4^{3-}-P の比流出負荷量が小さいことがわかる．霞ヶ浦流入河川のPO_4^{3-}-P の原単位はその調査年度（1979 年～1982 年）における値であり，合成洗剤の無リン化の進行にともない現在ではもう少し小さな値となっていると予想される，と海老瀬は指摘していることから，調査当時の霞ヶ浦流域と比較して宇治川では家庭排水由来のリンの発生負荷量が小さかった可能性もある．しかし，図 5 に示すようにPO_4^{3-}-P の比流出負荷量は人口密度と概ね比例関係にあり，宇治川の結果も同程度の人口密度を有する霞ヶ浦流入河川とほぼ同等の比流出負荷量であった．したがって，点源からの単位人口あたりの発生負荷量が小さいというよりは，流量増加時の面源からの流出の影響が相対的に小さいために，宇治川では比流量が大きいにもかかわらず比流出負荷量が小さくなったものと考えられる．

表3　L-Q 式による流出特性の検討

	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Na^+	K^+	NO_3^--N	NO_2^--N	PO_4^{3-}-P
n	0.84	0.94	0.90	0.93	0.92	0.80	0.91	1.1	0.84	1.1
R^2	0.94	0.98	0.99	0.98	0.98	0.95	0.98	0.96	0.44	0.92

表3に負荷量と流量に関する経験式（$L=a \cdot Q^n$）による流出特性の検討結果を示しているが，Na^+およびCl^-のn値は各々0.80および0.84と低く，流量増加により希釈を受けやすいことが示された．その結果，流量増加時の濃度の低減率が大きく，変動係数が大きくなったと判断される．n値が小さいという結果は，これらのイオンが点源に由来する割合が相対的に高いとした上記の考察とも矛盾しない．一方，NO_3^--NおよびPO_4^{3-}-Pはn値がいずれも1.1と1.0以上になっており，流量増加にともない濃度が増加することが明らかになった．このことは，NO_3^--Nの流出に対して面源の影響が大きいと考えた上記の議論を補強するものである．PO_4^{3-}-Pに関しては，霞ヶ浦流入河川と比較すると面源の影響が相対的に小さいと考えられた宇治川においても，流量増加時には面源からの流出により濃度が増加することが示された．以上より，降雨にともなう流量増加時に多量の富栄養化物質が流出することが明らかになった．

3.3　主成分分析による無機イオン濃度の年間変動要因の検討

宇治川水質の総合的な特性付けを行うとともに，水質変動要因の検討を行う目的で相関行列による主成分分析を行った．ここで，砂が森地点の水質はイオン濃度の低い早稲川による希釈効果を受けているため，変動要因をより明確に把握する目的で，天神橋地点のデータを解析に供した．測定したイオン濃度の中でCO_3^{2-}濃度は標準偏差が測定限界に近いため除外した．一方，水素イオン濃度をあらわす指標としてpHも含めて解析を行った．なお，全項目のデータが整備されている合計35日分のデータセットを解析に供した．

表4　各主成分の寄与率

	固有値	寄与率(%)	累積寄与率(%)
第1主成分	5.42	45.1	45.1
第2主成分	2.54	21.2	66.3
第3主成分	1.68	14.0	80.3

表4に各主成分の寄与率を示すとともに，図6に固有ベクトルを示した．表4に示されているように固有値1以上の3個の主成分が得られ，第3主成分までの累積寄与率は80.3%であった．したがって，宇治川のイオンに関しては，合計12項目の原データに対して3個の主成分で80%以上の情報を集約できる．

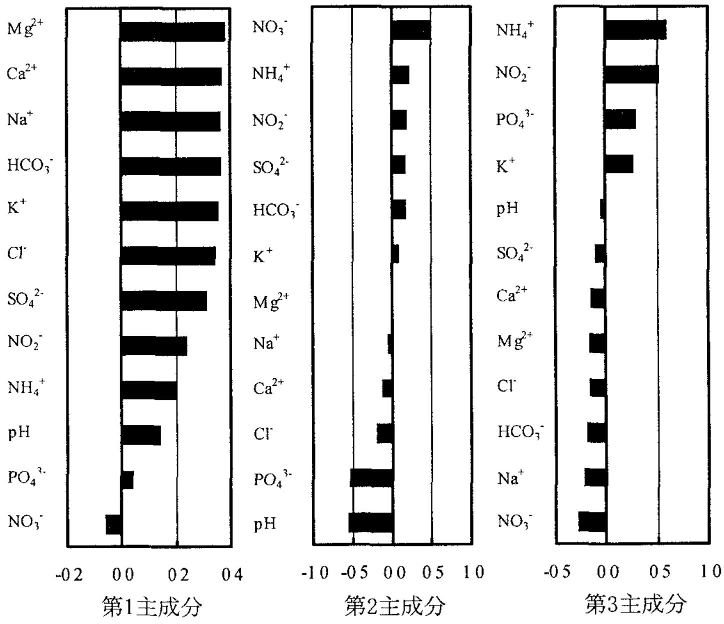

図6　各主成分の固有ベクトル

図6より，第1主成分の固有ベクトルは大半のイオンが正の値となったことから，流量増加にともなう希釈の影響をあらわす主成分と評価できる．固有ベクトルが負となったNO_3^--Nおよび正ではあるが0に近いPO_4^{3-}-Pは，表3に示したn値が1.0以上であり流量増加時に濃度も増加するのに対して，その他のイオンはn値が1.0以下

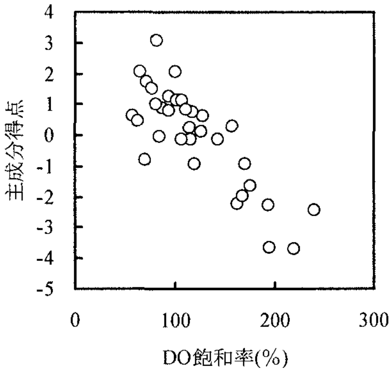

図7　DO 飽和率と第 2 主成分の主成分得点との関係

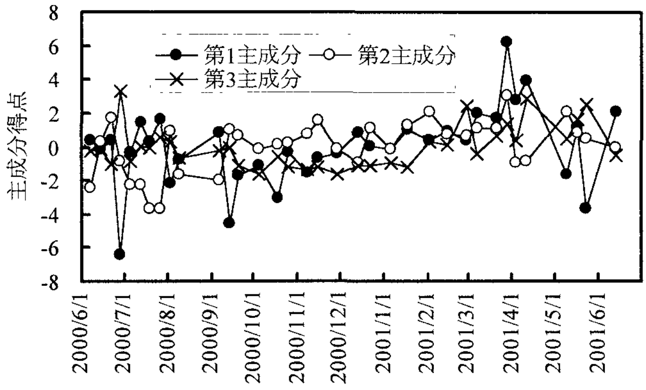

図 8　主成分得点の経時変化

であり希釈されることからもこのことが示されている．第 2 主成分の固有ベクトルは，NO_3^--N が正であるのに対して pH が負の値となっている．藻類の光合成にともない pH が上昇し，窒素・リンが摂取されることが知られている[10]ことから，第 2 主成分は光合成の影響を表す主成分と理解できる．図 7 に DO 飽和率と第 2 主成分の主成分得点との関係を示しているが，DO 飽和率の上昇にともない主成分得点が減少していることからも第 2 主成分が光合成を表すものと判断できる．なお，PO_4^{3-}-P が NO_3^--N とは異なり負の値となっている．砂が森橋から約 100m 下流の地点で筆者らが 1999 年 10 月 18 日から 19 日にかけて実施した 24 時間水質変動調査においても，日中に DO および pH が上昇し NO_3^--N が減少する，光合成に起因すると考えられる水質変動があった[8]が，その際にも PO_4^{3-}-P の明確な減少は観察されなかった．宇治川には沈水植物が多量に繁茂しており底質からリンを吸収した可能性があること，植物体中の窒素／リン含有比は植物により大きく異なり（沈水植物では 4.2～40.6[11]），現地に繁茂していた植物によってはリンの吸収量を十分捕らえ切れなかった可能性があること，などが光合成による PO_4^{3-}-P 濃度の減少が観察されなかった理由として考えられる．このように PO_4^{3-}-P の挙動についての明確な解釈は困難であるが，上記の理由より第 2 主成分が光合成の影響を表すと解釈しうる．なお，河川水中のクロロフィル a の測定を行っていないため，光合成が植物プランクトンと沈水植物のいずれに主に起因しているのかについては言及できない．

第 3 主成分の固有ベクトルは NH_4^+-N および NO_2^--N が正であるのに対して NO_3^--N が負の値となっており，河川中での硝化反応を表す主成分と判断される．以上より，宇治川のイオン成分は主に流量増加時の濃度希釈特性，光合成および硝化の 3 つの主成分に集約しうることが明らかになった．

図 8 に主成分得点の経時変化を示した．希釈特性をあらわす第 1 主成分は図 2 に示した流量変動特性と対応し，流量が増加した日には主成分得点が小さくなっている．また，光合成の影響をあらわす第 2 主成分は，日射量が多いと考えられる 2000 年 7 月初旬から 9 月初旬にかけて主成分得点が減少している．また，この期間中においても第 1 主成分得点が急減している 8 月 2 日には第 2 主成分得点は急増している．このことは，降雨により日照がさえぎられたことを示唆しており，第 2 主成分得点は降雨により敏感に変動することが明らかになった．硝化反応の影響を表す第 3 主成分得点は，2001 年 1 月中旬までは概ね負の値で推移し，硝化反応が良好に進行していることが示されている．しかしながら，2001 年 2 月初旬から 5 月下旬にかけて主成分得点は増加し正の値をとることが多くなった．硝化細菌の比増殖速度は温度による影響を受けやすく，アンモニア酸化細菌の場合，経験的指数式における θ 値として 1.071～1.123 が示されている[12]．θ 値を 1.1 とした場合には水温が 10℃低下することにより比増殖速度が 39%に減少することから，河川中の水温の低下は硝化反応に大きな影響を及ぼすものと考えられる．天神橋地点における水温は 2001 年 1 月 5 日に最低の 8.4℃を記録し，その後 3 月 7 日まで 15℃以下の水温が続いた．以上より，2001 年 2 月初旬から 5 月下旬にかけて硝化反応が完全には進行しなくなったのは水温の影響と考えられるが，水温低下の時期に対して時間遅れが

生じている．硝化細菌の比増殖速度が遅いために，河川中での硝化活性が回復するまでに時間遅れが生じた可能性が考えられるが，詳細な検討は今後の課題としたい．

4．まとめ

本研究では，高知県の宇治川を対象とした1年間にわたる定期水質調査の結果に基づいて，無機イオンの流出特性の検討を行うとともに主成分分析を用いてその変動要因についての検討を行った．得られた主要な成果を以下にまとめる．

(1) Na^+およびCl^-は流量増加による希釈を受けやすく，濃度の年間変動が大きいことが示された．

(2) NO_3^--N およびPO_4^{3-}-P は経験式（$L=a\cdot Q^n$）の n 値が 1.0 以上であり，流量増加にともなって濃度が増加し高負荷量で流出することがわかった．

(3) 宇治川流域では，霞ヶ浦流入河川と比較して，Na^+およびCl^-の点源に由来する割合が相対的に大きく，降雨時に面源から流出する負荷量の寄与が相対的に小さいことが示唆された．また，晴天日の平均 Cl^-比流出負荷量の 72%が，また降雨日も含めた全平均比流出負荷量と比較してもその 31%が家庭排水に由来すると推定された．

(4) Ca^{2+}および NO_3^--N の流出に対しては面源の影響が大きく，宇治川では比流量が多いために比流出負荷量も大きくなったと考えられた．一方，PO_4^{3-}-P の流出に対する面源の影響は，霞ヶ浦流入河川と比較すると宇治川では相対的に小さいことが示唆された．

(5) 主成分分析により，宇治川のイオン成分は主に，①流量増加時の濃度希釈，②光合成，および③硝化反応，の3つの主成分に集約でき，これらで原データの情報の80%を集約できることが明らかになった．

(6) 濃度希釈の影響は流量増加時に，光合成の影響は日射量が多いと考えられる2000年7月初旬から9月初旬の間に，硝化反応が不充分となるのは2001年2月初旬から5月下旬にかけてであることが明らかになり，これらがイオン濃度の年間変動に大きな影響を及ぼしていることが示された．

謝辞

本研究の遂行に際し，水位・流量・雨量データおよび各種資料を提供していただくとともに調査にご配慮いただいた，国土交通省高知工事事務所，高知県土木部河川課ならびに伊野町に深甚の謝意を表します．また，調査に協力して頂いた高知大学卒業生の石川梨沙氏および池辺将光氏に対しても感謝の意を表します．

参考文献

1) 海老瀬潜一．無機イオンの流出負荷量原単位と流出特性，衛生工学研究論文集，Vol.24，pp.261-271，1988.
2) 中曽根英雄，黒田久雄，久保田建蔵：地形連鎖と水田灌漑を有する農業小集水域から流出する水質の特徴について，水環境学会誌，Vol.19，No.1，pp.56-62，1996.
3) 山田俊郎，大江史恵，清水達雄，橘治国：森林集水域からの栄養塩負荷流出とその特性に関する比較研究，環境工学研究論文集，Vol.35，pp.85-93，1998.
4) 高島英二郎，田中宏明，中村栄一：手賀沼流入河川における汚濁負荷量の流出特性および年間負荷量の把握，水環境学会誌，Vol.18，No.4，pp.297-306，1995.
5) 森雅佳，香川尚徳：河川の水質を制御する環境要因　－取水堰下流で再生した石手川の場合－，陸水学雑誌，Vol.62，pp.1-10，2001.
6) 多田実，石井彰，望月実：下水処理に関わる塩類の挙動調査，下水道協会誌，Vol.32，No.390，pp.74-87，1995.
7) 國松孝男，須戸幹，川地武，羅栄，中村久郎：農村下水道処理水を灌漑した水田の土壌・浸透水・水稲中の硝酸塩と有害金属の濃度および水稲の生育・収量，農業土木学会論文集，No.194，pp.133-140，1998.
8) 石川梨沙：高知県宇治川流域における点源汚濁負荷量に関する研究，高知大学農学部卒業研究，19p.，2000.
9) （社）全国都市清掃会議：汚泥再生処理センター等施設整備の計画・設計要領，2001.
10) 津野洋，西田薫：環境衛生工学，共立出版，34p.，1995.
11) 宗宮功編著：自然の浄化機構，技報堂出版，137p.，1990.
12) 宗宮功，津野洋：水環境基礎科学，コロナ社，127p.，1997.