

第1節 自然科学的立場からのモニタリング

3. メソ視点より一濁水の行方

3.2 水田地帯における小水系の水質形成特性

井桁明丈¹⁾、山田佳裕²⁾、陀安一郎³⁾、和田英太郎¹⁾※

1) 総合地球環境学研究所 2) 香川大学農学部

3) 京都大学生態学研究センター

※(現所属) 海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター

1. はじめに

琵琶湖集水域には400以上もの流入河川が存在する。それらの河川の水質環境を把握し生態系を保全することは、琵琶湖のみならず京阪神地域における生活、産業を支える用水源の保全のためにも重要である。

都市部を流れる河川は工業排水や生活排水の流入により汚濁が進行しているが、近年下水道の整備により地域によっては一定の改善が見られる^{1,2)}。一方、農業区域を流れる河川においては、水質保全の観点から注目されることは少なかった。農地特有の面的広がりや汚濁の排出実態の把握が困難であることもその一因である³⁾。農業区域を流れる河川は他の河川と比較して流路及び流域面積が小さいという特徴があり、農業用水排水路としての役割を有している。そのため水質状況は1年を通して一定ではなく、農業活動の影響を強く受け、灌漑期においては都市河川や大・中規模河川以上に水田由来の汚濁物質が放出されることが報告されている^{4,5)}。

西日本有数の米生産地である琵琶湖集水域では耕地面積の92%が水田である⁶⁾。そのため代掻き田植え時期において懸濁態粒子(SS)が河川に供給され^{7,8)}、その量は年間供給量の大部分を占めると言われている⁹⁾。これにともない、多くの窒素やリンといった生元素も河川へ供給されており、河川生態系に大きな負荷を与えていると考えられる。

これまで水田等農地における物質循環や保全を視点においた研究、例えば、代掻きや施肥による水田内の物質の変化や収支や^{7,10~12)} 農業集水域小河川への汚濁物質の流出負荷特性等に関しては季節変動や年間総量、降雨の影響などの加味した研究が数多く報告されている^{9,13,14)}。このような上記の研究に加えて、農業地帯を流れる河川について、水系といった水循環の主要なユニットの中

で良好な水を得るための水環境を考えることが必要である。このような視点からの研究は、今後、農業を主要な土地利用としている地域における自然環境の管理、保全を考える上で必要になるであろう。そして水系生態系を考える上での基礎データの収集、調査対象や調査方法の検討が必要であろう。本研究では水田地帯における小水系の上流(水田排水路)、中流、下流において代掻き及び田植え時期(4月下旬から5月下旬)を中心に1年間にわたり、懸濁物、生元素濃度に関する調査を行い、これらの空間的・時間的分布を明らかにした。加えて、対象河川の中流にて合流する都市部を通過する支川においても同様な調査を行い、水系レベルでの河川水質の解析を行った。

2. 調査地点及び調査方法

調査は琵琶湖流域の蛇砂川水系で行った。調査地点図を図1に、蛇砂川流域における土地利用形態、推定人口及び推定人口密度を表1に示す。

蛇砂川水系は本流の蛇砂川と支流の筏川で構成され、西ノ湖を介して琵琶湖に注いでいる。蛇砂川は永源寺ダムを水源とする全長36km、流域面積49.1km²の河川である。流域の森林を除く土地利用形態は多くが農地で占められており(71%、32.6km²)、そのほとんどが水田である。ダム湖からの豊富な水を水源としており、水田の用排水の分離が進んでいる。推定人口密度は590人 km⁻²である。筏川は愛知川を水源とし、全長5.7km、流域面積7.2km²で蛇砂川と中流にて合流する。流域の49%、3.58km²が水田であり、八日市(現 東近江市)市街地を流れるため流域の推定人口密度が2137人 km⁻²、流域面積の約42%を市街地が占める。

調査地点は蛇砂川上流水田区(stns. A1, A2, A3)、蛇砂川中流(stn. B1)、蛇砂川下流(stn. C)、筏川(stn. B2)に設けた。stn. A1は調査水田区の

表1 蛇砂川流域の土地利用形態及び人口密度

a) 土地利用形態 (km ²)					
	水田	その他の農地	森林	建設用地	その他
蛇砂川 (上流～中流)	16.4	0.7	4.5	2.9	1.7
蛇砂川 (中流～下流)	12.6	0.1	5.9	3.2	1.0
筏川	3.6	0.0	0.2	3.0	0.5

b) 土地利用形態 (%)					
	水田	その他の農地	森林	建設用地	その他
蛇砂川 (上流～中流)	62.5	2.8	17.2	11.0	6.5
蛇砂川 (中流～下流)	55.1	0.3	25.7	14.1	4.8
筏川	49.5	0.4	2.2	41.6	6.3

c) 人口及び人口密度		
	人口	人口密度 (person km ⁻²)
蛇砂川 (上流～中流)	13544	516
蛇砂川 (中流～下流)	15982	698
筏川	15435	2137

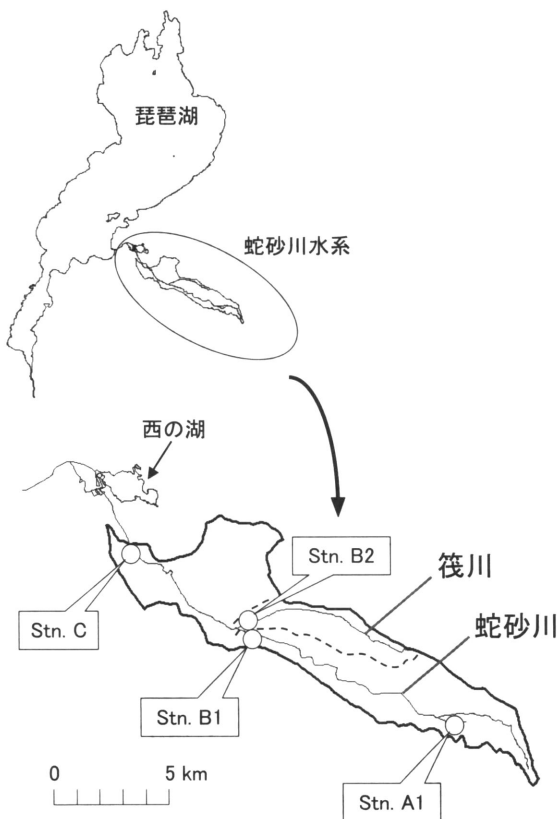


図1 調査地点

排水路末端である。stn. A2は調査水田区の灌漑用水の取水設備から用水を各圃場へ供給する用水路である。stn. A3からは山林からの渓流水が流入する水路である。永源寺ダムから供給される灌漑用水は調査水田区に隣接した調整池に溜められ、調整池とパイプラインで繋がっている取水設備を介して各圃場へ供給される。この取水設備は代掻き期は日中は常時稼動しており、代掻き時期に用水が不足することはない。また、この水田区はすべて用排水が分離されており、stn. A2から供給される水の余剰水はstn. A1を通過せず直接蛇砂川本流に流入する。取水装置は用水を必要とする時期以外は稼動させないため用水使用時以外はstn. A2は水が流れない状態になる。stn. A3から流入する渓流水と各水田から排出される排水が水田排水路末端のstn. A1を通過する。stn. A1とstns. A2, A3の間には18圃場(約0.04km²)が存在し、他の水田区からの排水は流入しない。蛇砂川中流域には蛇砂川と筏川の合流点の直上にstn. B1(蛇砂川中流)とstn. B2(筏川)に調査地点を設けた。

調査は2003年4月25日から2004年3月9日まで水田活動が活発になる5月を中心に各地点において28回河川水を採水した。stns. B1, B2にロガー付水位計(光進電気 MC1100W型)を設置し、4月25日から7月5日までを10分間隔で、それ以降は20分間隔で水位を連続測定した。採水した試料はWhatman社製GF/Fフィルター(0.7μm)でろ過したろ液について無機イオン類(NO₃⁻-N, NO₂⁻-N, NH₄⁺-N, PO₄³⁻-P)を測定し、孔径150μmのプランクトンネットでリターなどをとりのぞいた試料についてSS(懸濁態粒子量)、Total-N(全窒素)、Total-P(全リン)を測定した。SSは、あらかじめ450℃で強熱し、秤量したWhatman社製GF/Fフィルターに試料水一定量を減圧濾過し、60℃で乾燥後秤量し、その重量差を測定した。無機イオン類はイオンクロマトグラフ(DIONEX ICS-90)を用いて測定した。Total-Nはアルカリ性ペルオキソ二硫酸カリウム分解法¹⁵⁾、Total-Pはペルオキソ二硫酸カリウム分解法¹⁶⁾にて測定した。また、Total-NからDIN(溶存態無機窒素; NO₃⁻-N, NO₂⁻-N, NH₄⁺-N)を減じたものをOrganic-N(有機態窒素)、Total-PからPO₄³⁻-Pを減じたものをOrganic-P(有機態リン)とした。降水量データは滋賀県蒲生気象台データを用いた¹⁷⁾。

3. 結果

3.1 物理環境

蛇砂川流域の降水量及び蛇砂川中流及び筏川の水位変動（1日ごとの平均値）を図2及び表2に示す。

蛇砂川流域の降水量は代掻き田植え時期（4月25日～5月16日、代掻き期とする）は総雨量100mm（4.6mm d⁻¹）で、これ以降は比較的降水量の多い5月17日～9月30日（総雨量894mm、7.3 mm d⁻¹、多雨期とする）、と比較的降水量が少ない10月1日～3月9日（総雨量442mm、2.8 mm d⁻¹、少雨期とする）に分けられた。

蛇砂川の水位は多雨期に高く（平均38.8cm）、小雨期は低かった（平均26.2cm）が、代掻き期は降水量が比較的少ないにも係らず38.2cmと高

く、多雨期と同程度の水位であった。筏川の平均水位は代掻き期は37.6cm、多雨期は40.9cm、少雨期は31.8cmと蛇砂川中流と比較して水位変動が小さかった。

3.2 SS

Stns. A2と A3のSSの各測定項目の平均値（4月25日～5月27日）を表3に、stns. A1、B1、B2、CのSSの時系列分布を図3に示す。

stn. A1のSS量は水田に水入れを始めた4月25日には118mg L⁻¹、代掻き作業が始まった5月1日には640mg L⁻¹と最大値を示した。5月19日には11.4mg L⁻¹と減少し、2004年3月9日まで1.7～18.9mg L⁻¹の間で推移した。水田の用水にあたるstns. A2と A3ではSS量はそれぞれ2.6mg L⁻¹、7.5mg L⁻¹であった。stn. B1では水田に水入れを始めた4月25日のSSは127mg L⁻¹、代掻き作業が始まった5月8日には454mg L⁻¹と高かった。5月19日には12.5mg L⁻¹と減少した。多雨期には河川工事が行われた8月13日を除いて4.5～40.2mg L⁻¹、少雨期には2.4～22.8 mg L⁻¹で推移した。stn. B2では観測期間を通してSS量は低かった。代掻き期の5月1日と5月8日にはそれぞれ54.5mg L⁻¹、48.0mg L⁻¹と比較的高い値が観測されたものの、5月16日以降は河川工事が行われた8月13日と2004年2月13日を除いて多雨期は1.6～11.6mg L⁻¹、少雨期は1.63～4.46mg L⁻¹と低い値で安定していた。stn. Cはstn. B1と同様な傾向を示した。水田に水入れを始めた4月25日は127mg L⁻¹、5月8日には244mg L⁻¹と高い値を示し、5月19日には8.3mg L⁻¹に減少した。多雨期には河川工事が行われた8月13日を除いて3.9～33.3mg L⁻¹、少雨期は河川工事が行われた10月22日を除いて3.0～13.8mg L⁻¹で推移した。

表2 調査期間中の1日あたりの降水量（平均）及びstn.B1、stn.B2の平均水位

	降水量(mm d ⁻¹)	水位(cm)	
		stn. B1	stn. B2
代かき期 (4/25-5/16)	4.6	38.2	37.6
多雨期 (5/17-9/30)	7.3	38.8	40.9
少雨期 (10/1-3/9)	2.8	26.2	31.8

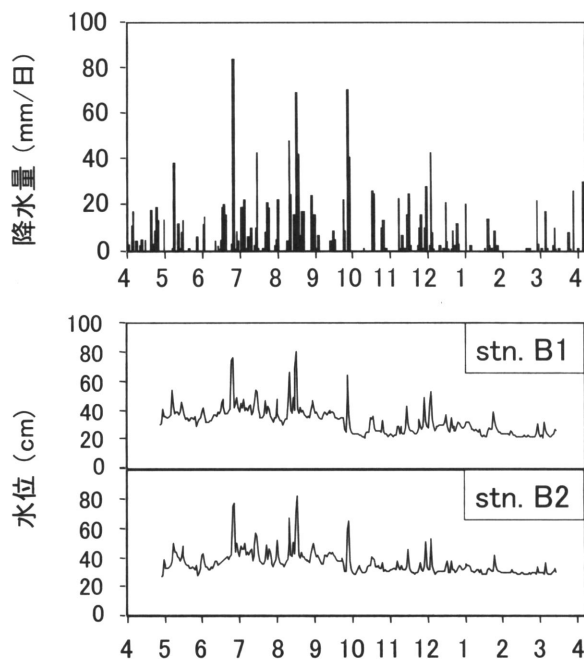


図2 調査期間中の降水量及びstn.B1、stn.B2の水位変動

表3 stns. A2及びA3の各測定項目の平均値

	stn. A2	stn. A3
SS(mg/L)	2.6	7.5
Total-N(μg/L)	473	513
NO ₃ ⁻ -N(μg/L)	355	334
NO ₂ ⁻ -N(μg/L)	<5	<5
NH ₄ ⁺ -N(μg/L)	21.7	21.0
Total-P(μg/L)	15.2	19.6
PO ₄ ³⁻ -P(μg/L)	<5	<5

※2003 4/25-5/27

(n=4)

(n=5)

3.3 生元素の変動

3.3.1 窒素

stns. A2とA3のTotal-N、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -Nの平均値（4月25日～5月27日）を表3に、stns. A1、B1、B2、Cの各態窒素の時系列分布を図4に示す。

代掻き期におけるstn. A1のTotal-Nは822～3249 $\mu\text{g L}^{-1}$ であった。多雨期は660～1345 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、少雨期は696～1847 $\mu\text{g L}^{-1}$ であった。 NO_3^- -Nは代掻き期において194～287 $\mu\text{g L}^{-1}$ であった。多雨期、少雨期はそれぞれ134～247 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、133～584 $\mu\text{g L}^{-1}$

と観測期間を通して他の地点より低かった。 NH_4^+ -Nは5月16日に2682 $\mu\text{g L}^{-1}$ の非常に高い値が観測された。多雨期には100 $\mu\text{g L}^{-1}$ を超える比較的高い NH_4^+ -Nが3回観測され、観測期間中（計11回）に不均一な分布となり、12～285 $\mu\text{g L}^{-1}$ であった。少雨期は NH_4^+ -Nの流出は非常に少なく、<5～17 $\mu\text{g L}^{-1}$ であった。stns. A2とA3のTotal-Nの平均値はそれぞれ473 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、513 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、 NO_3^- -Nはそれぞれ355 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、298 $\mu\text{g L}^{-1}$ であった。

stn. B1のTotal-Nは代掻き期において902～1761 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、多雨期では445～1022 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、でstn.

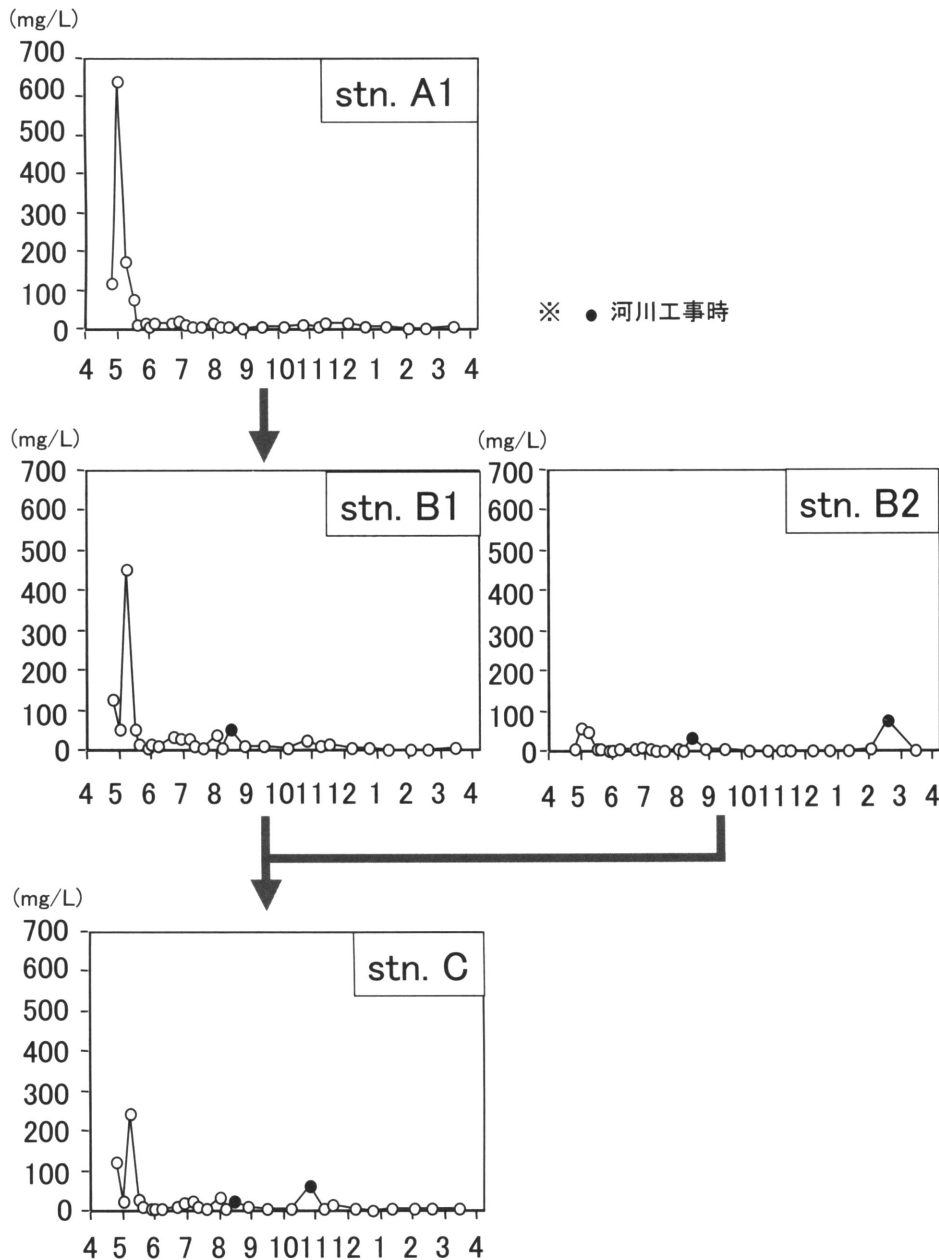


図3 SS濃度の時系列分布

A1と同程度であったが、少雨期には727~2443 $\mu\text{g L}^{-1}$ とstn. A1より高くなった。NO₃⁻-Nは代掻き期は358~624 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、多雨期は304~500 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、少雨期は437~1311 $\mu\text{g L}^{-1}$ となり、少雨期に上昇した。NH₄⁺-Nは代掻き期は33~208 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、多雨期は<5~79 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、少雨期は<5~172 $\mu\text{g L}^{-1}$ となり、代掻き期に高くなったものの、全体的に低かった。

stn. B2のTotal-Nは代掻き期は1195~2225 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、多雨期は1199~3166 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、少雨期は2486~5952 $\mu\text{g L}^{-1}$ と代掻き期と比較して多雨期、少雨期

が高く、特に少雨期に高かった。NO₃⁻-Nは代掻き期は346~1555 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、多雨期は940~2953 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、少雨期には2060~5184 $\mu\text{g L}^{-1}$ とTotal-Nと同様な変動を示した。NH₄⁺-Nは代掻き期は92~141 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、多雨期は<5~118 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、少雨期は117~454 $\mu\text{g L}^{-1}$ となり、少雨期に増加傾向を示した。同様にNO₂⁻-Nも少雨期に増加傾向を示した。

stn. CのTotal-Nは代掻き期は2133~2595 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、多雨期では1719~3145 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、少雨期には2738~3333 $\mu\text{g L}^{-1}$ となりstns. A1、B1と比較して年間を通して高かった。NO₃⁻-Nは代掻き期は763~

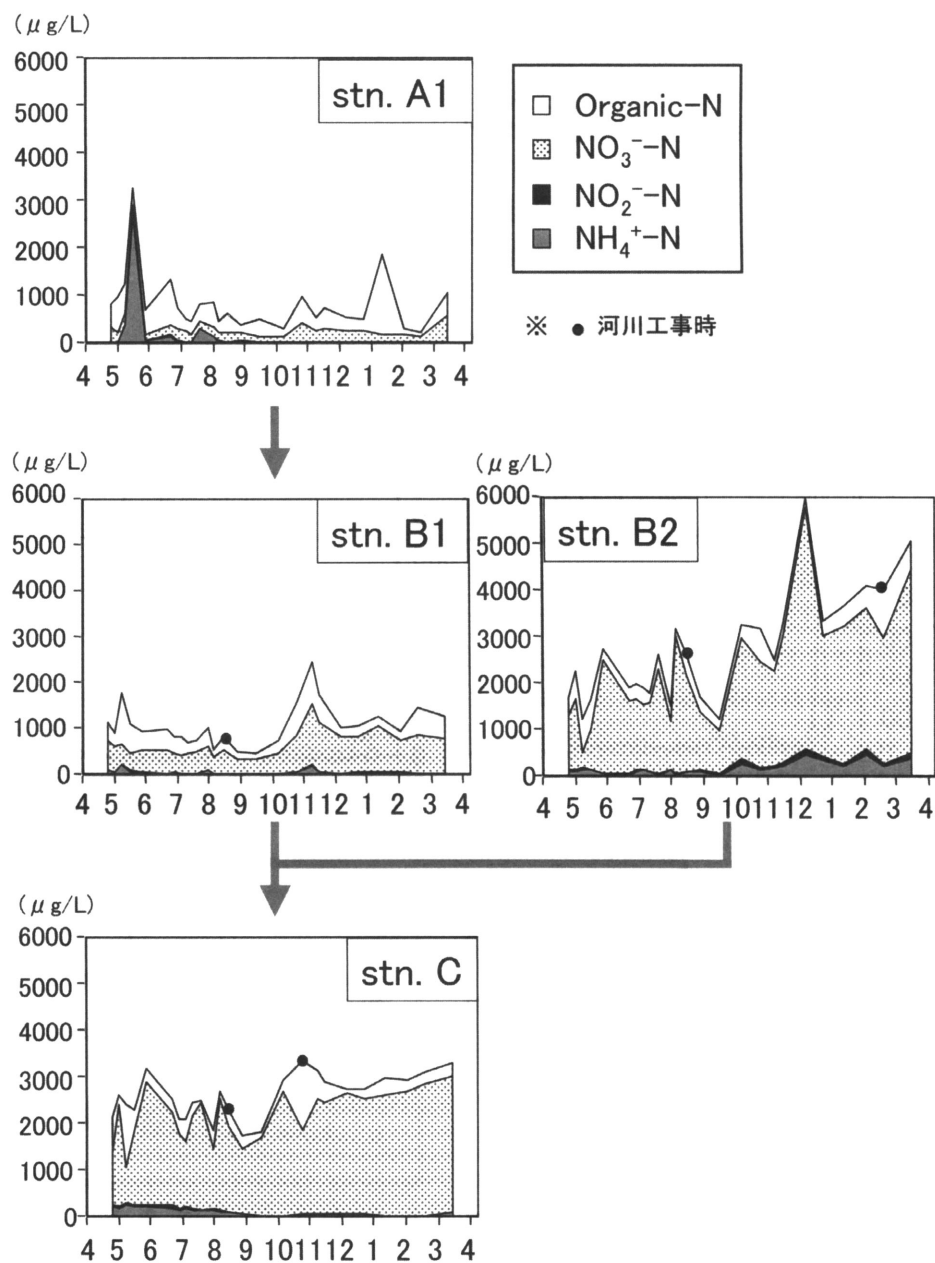


図4 各態窒素の時系列分布

2192 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、多雨期は1303~2625 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、少雨期には1799~2883 $\mu\text{g L}^{-1}$ とTotal-N同様に高かった。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ は代掻き期は182~248 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、多雨期は13~192 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、少雨期は<5~89 $\mu\text{g L}^{-1}$ となり、代掻き期に高い傾向を示した。

3.3.2 リン

stns. A2と A3のTotal-P、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ の平均値（4月25日~5月27日）を表3に、stns. A1、B1、B2、Cの各態リンの時間変動を図5に示す。

stn. A1のTotal-PはSSと同様な挙動を示し、代

掻き期にSSとともに99~431 $\mu\text{g L}^{-1}$ と高い値を示したが、代掻き田植え時期以降は多雨期26~111 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、小雨期<5~68 $\mu\text{g L}^{-1}$ と低濃度であった。また $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ は代掻き期には8~24 $\mu\text{g L}^{-1}$ だったが、多雨期、小雨期においては殆ど検出されなかった。stn. B1のTotal-Pは代掻き期は123~379 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、多雨期40~154 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、小雨期は39~175 $\mu\text{g L}^{-1}$ とstn. A1同様代掻き期に高い傾向を示した。 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ は代掻き期は15~75 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、多雨期は<5~50 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、小雨期は<5~105 $\mu\text{g L}^{-1}$ となった。stn. B2のTotal-Pは代掻き期は46~205 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、

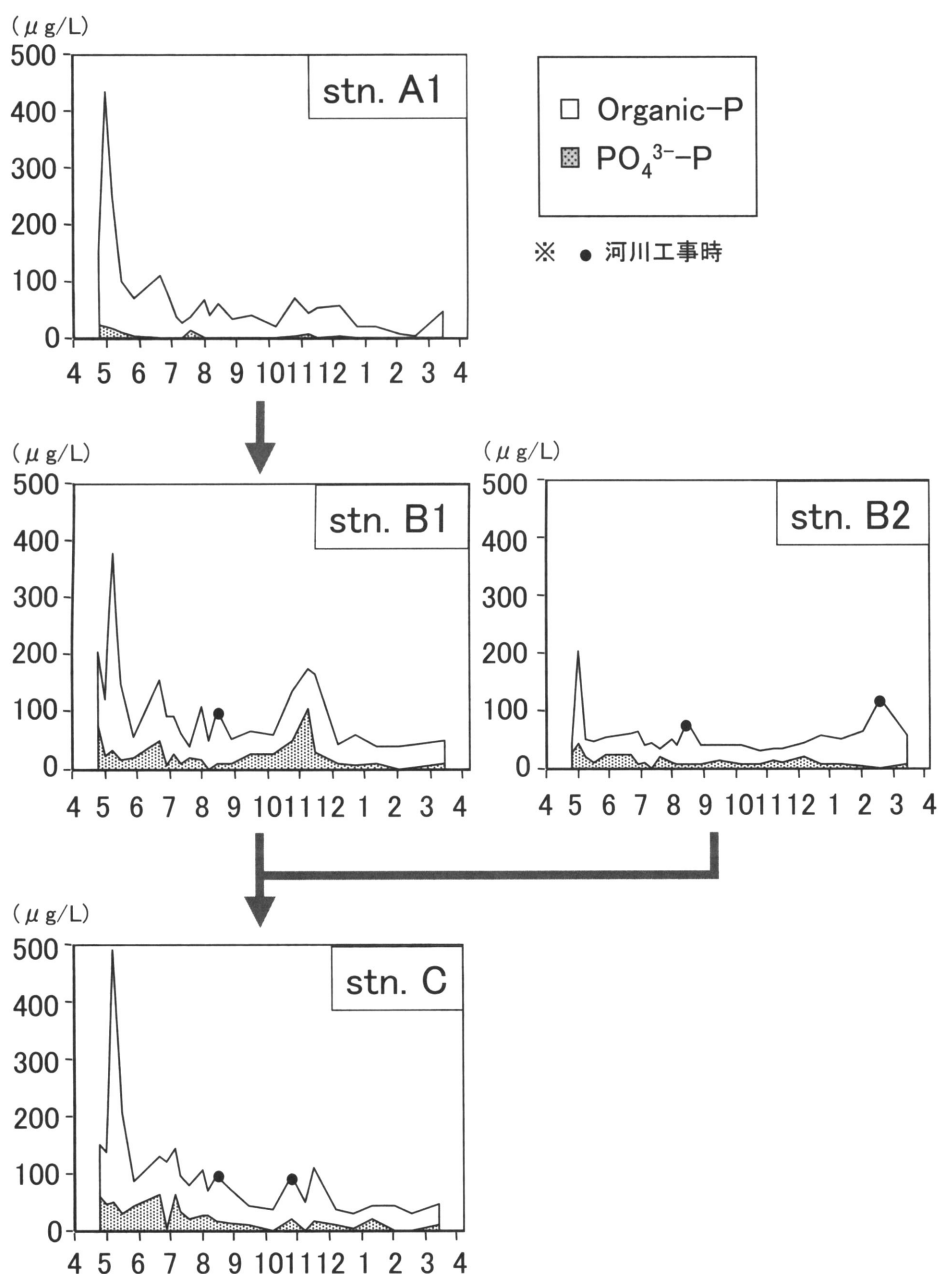


図5 各態リンの時系列分布

多雨期は $35\sim 64\mu\text{g L}^{-1}$ 、小雨期は $32\sim 64\mu\text{g/L}$ となった。 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ は代掻き期は $9\sim 45\mu\text{g L}^{-1}$ 、多雨期は $<5\sim 25\mu\text{g L}^{-1}$ 、小雨期は $5\sim 19\mu\text{g L}^{-1}$ であった。stn. CのTotal-Pは代掻き期は $136\sim 490\mu\text{g L}^{-1}$ 、多雨期は $43\sim 143\mu\text{g L}^{-1}$ 、小雨期は $28\sim 109\mu\text{g L}^{-1}$ となり、stns. A1、B1同様に代掻き期に高い傾向を示した。 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ は代掻き期は $30\sim 60\mu\text{g L}^{-1}$ 、多雨期は $<5\sim 63\mu\text{g L}^{-1}$ 、小雨期は $<5\sim 18\mu\text{g L}^{-1}$ であった。

4. 考察

4.1 水田を集水域とする小水系の水文特性

蛇砂川流域の代掻き期の降水量は 4.6mm d^{-1} と多雨期 (7.3mm d^{-1}) の6割程度であるが、代掻き期の蛇砂川中流の平均水位は 38.2cm と多雨期 (38.8cm) と同程度の水位であった。これは代掻き期において降雨以外の水が蛇砂川流域に供給されていることを示しており、永源寺ダムからの灌漑用水が圃場に供給されて河川に排出された、2次的水位増加と考えられる。また、少雨期の蛇砂川の水位の大幅な低下は降水量の減少とともに、永源寺ダムからの放水量の減少の影響によるものであり、水源をダムに依存する河川特有の現

象と考えられる。

4.2 各調査地点のSS及び生元素流出特性

代掻き期、多雨期、少雨期の各測定項目の平均値を表4に示す。

stn. A1

代掻きがさかんに行われていた5月1日にSSは 640mg L^{-1} と最大であったが、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ のピークは5月16日であった ($2682\mu\text{g L}^{-1}$)。このSSと $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の流出の時間差はこの地域で近年主流となりつつある代掻き時には施肥を行わず、田植え時に苗植えと一緒に粒状の緩効性肥料を加える施肥方法による影響であると考えられる。従って、代掻きによる濁水の流出によって起こったSSの増加と、施肥による無機塩類 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) の流出には時間的ズレを生じたといえる。また、6月20日に $110\mu\text{g L}^{-1}$ 、7月18日と7月30日にそれぞれ $285\mu\text{g L}^{-1}$ 、 $138\mu\text{g L}^{-1}$ と比較的高い $\text{NH}_4^+\text{-N}$ が見られたが、これは追肥、稲肥の影響と思われ、水田直下に設置されている排水路では施肥の影響が直接的に反映されたと考えられる。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の流出は8月下旬まで続いたが、9月以降は低濃度で推移し $20\mu\text{g L}^{-1}$

表4 stns. A1, B1, B2, Cの各測定項目の平均値

	stn. A1			stn. B1		
	代かき期 (4/25-5/16)	多雨期 (5/17-9/30)	少雨期 (10/1-3/9)	代かき期 (4/25-5/16)	多雨期 (5/17-9/30)	少雨期 (10/1-3/9)
SS(mg/L)	252	10	8	171	16	9
Total-N($\mu\text{g/L}$)	1574	660	696	1224	737	1335
$\text{NO}_3^-\text{-N}$ ($\mu\text{g/L}$)	225	174	253	493	422	843
$\text{NO}_2^-\text{-N}$ ($\mu\text{g/L}$)	4	9	<5	17	12	15
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($\mu\text{g/L}$)	779	66	7	92	17	38
Total-P($\mu\text{g/L}$)	233	54	34	214	77	80
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ($\mu\text{g/L}$)	17	<5	<5	36	17	24

	stn. B2			stn. C		
	代かき期 (4/25-5/16)	多雨期 (5/17-9/30)	少雨期 (10/1-3/9)	代かき期 (4/25-5/16)	多雨期 (5/17-9/30)	少雨期 (10/1-3/9)
SS(mg/L)	29	5	3	104	11	6
Total-N($\mu\text{g/L}$)	1691	2028	3801	2352	2282	2969
$\text{NO}_3^-\text{-N}$ ($\mu\text{g/L}$)	987	1672	3040	1419	1868	2652
$\text{NO}_2^-\text{-N}$ ($\mu\text{g/L}$)	16	24	84	32	34	9
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($\mu\text{g/L}$)	112	55	278	209	121	28
Total-P($\mu\text{g/L}$)	88	47	46	246	94	47
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ($\mu\text{g/L}$)	25	12	9	47	30	6

※ 河川工事時のデータは除く

を超える値は観測されなかった。この結果は水田からの $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の流出は元施肥を中心としたごく限定された時期に増加、流出するという既往の報告と同じである^{14, 18)}。代かき期においてSSとTotal-Pには相関が見られた ($r=0.959$:表5)。これは代掻きにより前年秋季の施肥によって加えられた酸化リン (P_2O_5) や田植え時の施肥によって供給されたリンが土壌粒子と結合して懸濁粒子として排出されたためと考えられる。また、この時期の無機塩類の流出は施肥による一時的な $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の流出を除き少ない。これは金木らや山田らの報告と同様な傾向であり、代掻き期において水田から排出される窒素、リンの多くが懸濁態(有機態)として放出されていることを表している^{19, 20)}。

多雨期においてSS、窒素、リンともに代かき期と比べて高い値は見られなかった。このことから水田からの汚濁物質の地表面流出特性として相対的に降雨の影響は小さく、代掻き時期のみに大量に流出することが分かった。

stn. B1

農業集水域を流れるstn. B1においてSSは代掻き期にのみ高い値を示し、且つSSとTotal-P ($r=0.991$) 及び $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($r=0.992$)、Total-N ($r=0.980$) と強い相関を示した(表5)。これらの結果は下流の方が水田直下よりも、より広域的な濁水の排出に影響されたと考えられる。

代掻き期および多雨期におけるstn. B1の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ はstn. A1と比べ低く、stn. A1で見られた高濃度の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ はstn. B1では観測されなかった。一方、stn. A1と比較して $\text{NO}_3^-\text{-N}$ が高くなっていることから、この間で硝化されたものと考えられる。

代掻き期においてstn B1の無機塩類はStn A1と

同様に低濃度であり、Total-Pは大部分が懸濁態リンであった。こうした挙動は鈴木と田淵¹⁴⁾、山田ら²⁰⁾の報告と同様であり、水田からの窒素、リンの放出形態の多くが懸濁態(有機態)であることから農業集水域小河川においても懸濁態(有機態)窒素、リンの割合が高いことを示している。従って、水系の中流域においても水田排水路直下の化学組成が反映されていることが分かった。

小雨期は多雨期より窒素濃度が高くなったが、これは降水量の減少に伴う河川水量の減少による影響と考えられる。

stn. B2

都市部を集水域とし、生活排水の流入が多いstn. B2の代掻き期のSSは同時期のstn. B1の1~17分の1程度であった。この結果はstn. B2(筏川)の集水域に占める水田面積が 3.6km^2 とstn. B1(蛇砂川中流)の集水域に占める水田面積 16.4km^2 の約5分の1程度しか水田が存在しないことによるものと考えられる。また、代掻き期以降のSSは河川工事が行われていた日を除いて多雨期、小雨期でそれぞれ平均 5.1mg L^{-1} 、 2.7mg L^{-1} とstn. B1の30%程度であり、都市域河川からのSSの負荷は非常に小さいものであった。

Total-Nは代掻き期及び多雨期は $1000\sim 3000\mu\text{g L}^{-1}$ 、小雨期は $3000\sim 6000\mu\text{g L}^{-1}$ と1年を通じてstn. B1と比較して高く、Total-Nの大部分が $\text{NO}_3^-\text{-N}$ であった。この結果は集水域に多くの住宅地を持つ都市域河川の特徴であると考えられ、生活排水を多く含む都市域河川は他河川と比較して窒素濃度が高く、また、Total-Nに占める $\text{NO}_3^-\text{-N}$ の割合が高いという滋賀県が行った主要25河川での調査の傾向と同じである²¹⁾。従って、生活排水が多く流入する河川による水系への窒素負荷は無機態によるものが主であるといえる。多雨期と小雨期の濃度差は降水量の減少に伴う水量の低下によるものと考えられる。少雨期において $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ の増加が見られたが、流量の減少や水温の低下に伴う硝化細菌の活性の低下によるものと考えられる。

Total-P及び $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ は多雨期、小雨期ともに大きな変動は見られず、1年を通してstn. B1と比較して同程度かもしくは低い値となった。従来都市域河川において生活排水由来の窒素及びリンの負荷が河川水質汚濁の大きな要因として指摘されてきたが⁴⁾、筏川流域の八日市市の污水及び生活排

表5 代かき期における各調査地点のSS濃度と他項目との相関(r)

	stn. A1	stn. B1	stn. B2	stn. C
Total-N	0.455	0.980**	0.155	0.221
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	0.491	0.992*	0.128	0.993*
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	0.476	0.267	0.019	(-0.893)
Total-P	0.959**	0.991*	0.678	0.865
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	0.446	0.100	0.601	0.508

* : significant at $P < 0.01$

** : significant at $P < 0.05$ (2003 4/25-5/16 n=4)

水処理施設整備率はそれぞれ93.6%、70.4%（整備人口比：2004年3月末現在）と高く、汚水の76.4%、生活排水の53.2%が下水道を経由して筏川流域外で高度処理されるため筏川に直接流入する生活排水は比較的少ない²¹⁾ 注1)。また、下水道未整備地域においても農業集落排水処理施設が普及しており、滋賀県内の農業集落排水処理のリン除去率は平均84%と単独・合併処理施設と比較して除去率が高い²²⁾。従って都市域河川からの汚水及び生活排水由来のリンの負荷は農地を集水域とする河川と比較して小さいものと考えられる。

stn. C

代掻き期におけるstn. CのSSは本流のstns. A1、B1と同様に高く、Total-Pや $\text{NH}_4^+\text{-N}$ と強い相関を示していることから（ $r=0.993$ ）、水田からの排水の影響を受けていると考えられる。しかし、Total-Nはstn. B1より高く、年間を通して $\text{NO}_3^-\text{-N}$ の変動はstn. B2と同調しており（ $r=0.813$ ）、蛇砂川下流における窒素の起源は筏川の影響も大きいことが示唆された。

Total-P及び $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ は代掻き期、多雨期と比較して小雨期において減少しており、水田由来の懸濁粒子の減少によるものである。また、河川流速の減少に伴う河床への堆積の可能性も考えられる。

4.3 水田地帯を集水域とする小水系と都市地帯を集水域とする小水系のSS及び生元素の流出特性

蛇砂川水系では代掻き期には水田からの懸濁物やリンが、年間を通して住宅地からの硝酸態窒素が水質形成に大きく影響を及ぼしていることが分かった。特に代掻き期におけるSSとともにTotal-P濃度は蛇砂川全域で高く、リンが有機態の形で流出しており、これは水田内の肥料成分のリンが土壌粒子と結合して流出しているものと考えられる。蛇砂川下流における代掻き期のTotal-P濃度は平水時の最大17.5倍で、代掻き期は河川水位が増加していることから流出量はさらに平水時と比較して大きいものと考えられる。従って、短期間ではあるが水田から代掻きによって大量のリンが河川全域に供給され、その量は村山らの報告同様に年間供給量の大部分を占めると考えられる⁹⁾。また、水田からの有機物の負荷によって代掻き期に田面水及び農業集水域小河川全域にてDOC濃

度が増加するという村山らの報告からも、代掻き期に水田から負荷された懸濁物質は下流の停滞水域において水中への回帰といったプロセスを通して、無機化された栄養塩類が河川水質及び生態系に影響を与えるものと思われる^{9, 23, 24)}。

一方、住宅地を流れる筏川では年間を通してTotal-N濃度が蛇砂川より高く、その殆どが $\text{NO}_3^-\text{-N}$ であった。筏川が流れる八日市市の污水処理施設整備率は93.6%と他の都市と比較しても高い整備率を誇っているが、生活排水の処理施設整備率は70.4%である。従って生活排水の29.6%は未処理で河川に流入しており、生活排水由来の窒素負荷が筏川の窒素濃度の増加に影響を及ぼしていると考えられる。また、稲森の報告と同様に生活排水由来の窒素は多量に含まれる $\text{NH}_4^+\text{-N}$ が易分解性であるため容易に生物分解を受け $\text{NO}_3^-\text{-N}$ となるため都市河川の硝酸濃度が高濃度で推移すると考えられる²⁵⁾。さらに一般に、有機物やリンは排水処理過程や河川での流下過程にて自然界の浄化作用によってかなり除去されるが窒素は除去されにくいことも一因である^{26, 27)}。

4.4 他河川との比較、琵琶湖への影響

蛇砂川水系の窒素、リン濃度は野洲川、姉川、安曇川といった県内の大規模河川と比較しても高い²⁸⁾。これらの大規模河川のTotal-Nは年間を通して $0.3\sim 1.5\text{mg L}^{-1}$ であるが、蛇砂川下流（stn. C）のTotal-Nは代掻き期及び多雨期は約 $2\sim 3\text{mg L}^{-1}$ 、少雨期は $3\sim 6\text{mg L}^{-1}$ で推移している。また、stn. CのTotal-Pは調査期間中 $28\sim 490\mu\text{g L}^{-1}$ の変動があるが上記大規模河川は1年を通じて $100\mu\text{g L}^{-1}$ 以下であり、蛇砂川と比較して時期的変動が小さい。この結果から水田を集水域とする小河川の蛇砂川は大規模河川と比較して窒素、リン濃度が高く、時期的変動が大きい。特にTotal-Pにその傾向が見られ、これは代掻き期における水田からの農業排水に起因している。

2003年の琵琶湖今津沖表層のTotal-N、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、Total-P、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ の平均濃度がそれぞれ、 $350\mu\text{g L}^{-1}$ 、 $140\mu\text{g L}^{-1}$ 、 $7.3\mu\text{g L}^{-1}$ 、 $0.5\mu\text{g L}^{-1}$ であることから²⁸⁾、蛇砂川のような水田を集水域とする小水系は琵琶湖に大きな窒素、リン負荷を及ぼしていると考えられる。また、琵琶湖北湖流域の他の小水系においても集水域の土地利用は蛇砂川水系と同様に水田地帯の中に住宅地が混在する水系が多く存在するため、本研究で得られた結果と同様な

現象が起こっていると考えられる。本研究から代掻き期において大量のリンが懸濁態（有機態）の形態で水系に負荷されていることが明らかになったが、琵琶湖は一般にリン律速の状態にあり²⁹⁾、琵琶湖の懸濁態リンの大部分が生物可給態であることから³⁰⁾、水田からの農業排水流出の防止は琵琶湖の富栄養化を防止する有効な手段となるであろう。

注釈

注1) 生活排水処理施設整備率は滋賀県琵琶湖環境部下水道計画課 山村幸男氏より提供していただいた。

参考文献

- 1) 新矢将尚・鶴保謙四郎・北野雅昭・萩原拓幸・後藤薫「20世紀後半の大阪市内河川水質汚濁の変遷」『平成12年度大阪市立環境科学研究所報告』(2001) 63:20-29
- 2) 新矢将尚・鶴保謙四郎・北野雅昭・土永恒彌「1990年代における大阪市内河川水質の変遷」『用水と廃水』(2002) 44:5-11
- 3) 井上隆信「非特定汚染源の原単位の現状と課題」『水環境学会誌』(2003) 26(3):131-134
- 4) 海老瀬潜一「土地利用の異なる流域からの年間流出負荷量の大きさと変化」『水質汚濁研究』(1989) 12(8):497-505
- 5) 中曾根英雄・黒田久雄・加藤亮「農業を主体とした小集水域流出水の水質変動特性」『農業土木学会論文集』(2001) 213:101-107
- 6) 大久保卓也・東善広「集水域からの汚濁負荷とその浄化 集水域から琵琶湖に流入する汚濁負荷量とその水質への影響」『琵琶湖研究所所報』(2003) 22:55-72
- 7) 近藤正・三沢真一・豊田勝「代掻き田植時期のN, P成分の流出特性について」『農業土木学会論文集』(1993) 164:147-155
- 8) 東善広・横田喜一郎・焦春萌・大久保卓也・山本佳世子「琵琶湖沿岸域における代かき・田植え時の濁水観測(1) - 集水域環境と水質の関係 -」『琵琶湖研究所所報』(1998) 17:20-25
- 9) 村山重俊・駒田充生・馬場浩司・津村昭人「農業集水域小河川の平常流量時の水質とその時期的変動」『日本土壤肥料学雑誌』(2001) 72(3):409-419
- 10) 宇土顕彦・笠文彦・大久保卓也・中村正久「灌漑期の水田における水量収支と栄養塩収支」『水環境学会誌』(2000) 23(5):298-304
- 11) 金木亮一・高橋紀之・矢部勝彦「代かきの有無および肥料の種類が田面水の窒素・リン濃度に及ぼす影響」『農業土木学会論文集』(2001a) 211:29-34
- 12) 金木亮一・岩佐光砂子・矢部勝彦「田面水のSS・COD濃度に及ぼす代かき、施肥および土壌の種類の影響」『農業土木学会論文集』(2001b) 215:93-98
- 13) 鈴木誠治・田淵俊雄「農業地域の小河川における降雨時の水質と流出負荷に関する研究」『農業土木学会誌』(1984a) 114:21-31
- 14) 鈴木誠治・田淵俊雄「農業地域小河川における流出負荷量の季節変動と年間総量について」『農業土木学会誌』(1984b) 114:32-38
- 15) D'Elia CF Stendler PA Corwin N, Determination of total nitrogen in aqueous samples using persulfate digestion. *Limnol. Oceanogr.* (1977) 22(4):760-764.
- 16) Mentzel D.W. and Corwin N, The measurement of total phosphorus in seawater based on the liberation of organic bound fractions by persulfate oxidation. *Limnol. Oceanogr.* 10, (1965) 280-282.
- 17) 彦根地方気象台『滋賀県気象月報』平成15年4月～平成16年3月(2003, 2004)
- 18) 田淵俊雄・黒田久雄・齊藤浩之・高橋恵子・室谷敬「灌漑期の農業集水域からの流出水の水質と負荷特性」『農業土木学会論文集』(1991) 154:55-64
- 19) 金木亮一・久馬一剛・岩間憲治・小谷廣通「無代かき移植・育苗箱全量施肥栽培法による表面流出負荷削減効果」『農業土木学会論文集』(1998) 196:183-188
- 20) 山田佳裕・井桁明丈・中島沙知・三戸勇吾・小笠原貴子・和田彩香・大野智彦・上田篤史・兵藤不二夫・今田美穂・谷内茂雄・陀安一郎・福原昭一・田中拓弥・和田英太郎「しろかき期の強制落水による懸濁物、窒素とリンの流出 - 圃場における流出実験 -」『陸水学雑誌』(2006) 67:105-112
- 21) 滋賀県琵琶湖環境部『平成16年度版環境白書 - 資料編 -』滋賀県. 大津 (2004)

- 22) 滋賀県農政水産部『平成16年の農村下水道処理施設の処理状況』滋賀県. 大津 (2005a)
- 23) 大久保卓也「環境水中における懸濁態物質の分解と栄養塩回帰」『用水と廃水』(1996a) 38 (2) : 5-20
- 24) 大久保卓也「懸濁態リンの生物利用可能性」『用水と廃水』(1996b) 38 (3) : 34-46
- 25) 稲森悠平・藤本尚志・須藤隆一「生活系排水の硝酸性窒素および亜硝酸性窒素対策」『用水と廃水』(1999) 41 (10) : 17-24
- 26) 大久保卓也「琵琶湖の水質・水位変化と水管理の課題」『都市問題研究』(2001) 53 (8) : 76-93
- 27) 大久保卓也「内湖における窒素・リンの除去効果 -彦根市神上沼での調査事例-」『琵琶湖研究所所報』(2004) 21 : 46-53
- 28) 滋賀県琵琶湖環境部『平成17年度版環境白書-資料編-』滋賀県. 大津 (2005)
- 29) Urabe, J., M, Nakanishi. and K, Kawabata, Contribution of metazoan plankton to the cycling of nitrogen and phosphorus in Lake Biwa. *Limnol. Oceanogr.* (1995) 40 (2) : 232-241.
- 30) Tezuka, Y. Is the suspended particulate phosphorus in Lake Biwa potentially bioavailable ?, *Jpn. J. Limnol.* (1994) 55 (2) : 171-175.