

降雨時等の非定常流入負荷の定量的把握と その琵琶湖水質への影響把握

大久保卓也・川崎悦子¹⁾・辻村茂男・須戸幹¹⁾・柴原藤善²⁾

要約

本センターの重点プロジェクト研究「ノンポイント負荷の琵琶湖水質への影響把握」および農業技術振興センターとの共同研究「近畿地域の水稻の環境負荷低減技術の体系化と負荷予測モデル開発」（大久保担当）の平成17年度（2005年度）に実施した研究の成果概要は下記の通りである。

① 琵琶湖流入河川のうち典型的な農地河川の白鳥川（水田占有率51%）において降雨時を含めた汚濁負荷量の詳細調査を行った結果、2005年度はSS（懸濁物質）、窒素、リン負荷量とも5月の負荷量が月別負荷量としては年間で最も大きく、代かき・田植え時期に流出する懸濁物質および栄養塩の流出量が大きいことが確認された。水田における汚濁負荷削減対策はこの時期に重点をおいて進めることが大事であると考えられる。

② 白鳥川における年間流出負荷量に占める降雨時負荷量（短期流出分）の比率は、T-N（全窒素）で33%、T-P（全リン）で42%となった。この比率は霞ヶ浦流入河川における報告値とほぼ同じであった。年間で最も負荷量の大きかった5月では、降雨時負荷量の占める比率は年間平均の比率よりも小さく、降雨時の流出負荷対策よりも農業用水の節水などの晴天時の流出負荷対策が重要であると考えられる。

③ 琵琶湖の南比良沖（北湖S局）における0～20m層での連続観測では、秋季（2005年11月）と春季（2006年5月）にクロロフィルaのピークが0～20m層全体でみられ、5月初旬のピークが最大であった。この5月初旬の植物プランクトンの増殖に代かき濁水に伴い流入する栄養塩が関与しているのかどうかは現時点は不明であり、さらに研究が必要である。

④ 降雨時に陸域から流入する栄養塩の北湖S局のクロロフィルa濃度への影響は2005年7月～2006年6月の期間では明確にみられなかった。2005年度は降水量が少なかったため、このような結果が一般的なものかどうかさらに継続的に調査を進めて検討する必要がある。

1. はじめに

赤潮やアオコの発生原因となる主な栄養塩は窒素、リンであるが、そのうちリンの琵琶湖への流入負荷量は、下水道整備や排水規制などの対策の実施によって、1980年頃から徐々に減少してきたと推定される（滋賀県、2006）。また、琵琶湖水中のリン濃度も陸域からの負荷量減少と連動して徐々に低下する傾向がみられる。窒素の流入負荷量は、リンに比べると減少率は小さいものの1995年以降徐々に減少している推定結果となっている（滋賀県、2006）。しかし、滋賀県が実施している月1回の河川水質調査結果から求めた北湖流入河川の窒素流出負荷量では明確な減少傾向がみられず、琵琶湖北湖の窒素濃度も明確な減少傾向はみられていない（環境省、2005）。このような窒素の原単位法等による推定排出負荷量の変化（減少傾向）と実測による河川流出負荷量の変化（横ばい傾向）の食い違いの原因を探ることが水質改善対策を進める上での一つの課題となっている。この食い違いの原因として考えられることは、下水道整備等の対

策実施によって減少してきた生活系や工場・事業場系の窒素負荷量の減少量が、①降水由来、大気由来の窒素負荷量や②農地からの施肥由来の窒素負荷量に比べて量的に小さく、そのため対策の実施効果が明確に現れてこないのではないかという可能性である。つまり、降水由来や農地由来の面源負荷（ノンポイント負荷）が、湖沼水質保全計画などで推定している量よりもかなり大きいのではないかという可能性が考えられる。例えば、農地由来の琵琶湖への窒素、リン流入負荷量について、國松（2000）は、滋賀県が推定した値の窒素で約3倍、リンで約20倍と見積もっている。

この可能性を検証するためには、代かき・田植え時や降雨時を含めた河川由来の負荷量を正確に把握し、原単位法で求めた負荷量と比較し、原単位法の信頼性を検討する必要がある。また、代かき・田植え時や降雨時に短期的に琵琶湖に流入する栄養塩が植物プランクトン現存量の変動に実際にどのような影響を及ぼしているかを把握することも必要である。そこで、重点プロジェクト研究

1) 滋賀県立大学環境科学部 2) 滋賀県農業技術振興センター

「ノンポイント負荷の琵琶湖水質への影響把握」（2005～2007年度）では、琵琶湖北湖の野洲川、日野川、白鳥川からの栄養塩負荷量の詳細な把握とその河口沖合地点におけるクロロフィル濃度変動に対する河川負荷量の影響把握を目的に調査を進めている。本稿ではその調査の途中経過について報告する。なお、白鳥川の水質・負荷量調査の一部は、農林水産省の先端技術を活用した農林水産研究高度化事業の地方領域設定型研究「近畿地域の水稲の環境負荷低減技術の体系化と負荷予測モデル開発」（代表：柴原藤善）の研究として実施している。

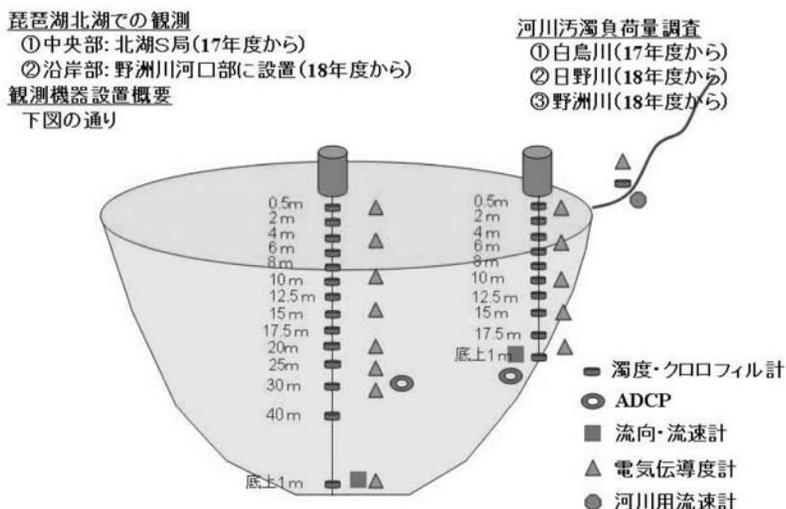


図1 観測体制

2. 方法

2.1 観測体制

本プロジェクト研究の観測体制を図1に、調査地点を図2に示す。琵琶湖では南比良沖の北湖S局と野洲川河口沖の2地点、河川では野洲川、日野川、白鳥川の3河川の下流部にそれぞれ調査地点を設け、河川流入負荷量の時間変動と北湖の沿岸と沖合の水質の時間変動との対応関係を自動観測を主体に把握する観測体制としている。琵琶湖北湖比良沖の北湖S局（St. A）は、2005年7月から一部の観測を開始し、徐々に観測機器を増設しながら観測システムを整備しているところである。また、2006年度からは野洲川河口域に調査地点（St. B）を追加し、沿岸と沖合の2地点での水質変動の比較を行っている。河川流入負荷量の調査は、2005、2006年度は白鳥川で実施し、2006、2007年度は野洲川と日野川を追加して実施する予定である。

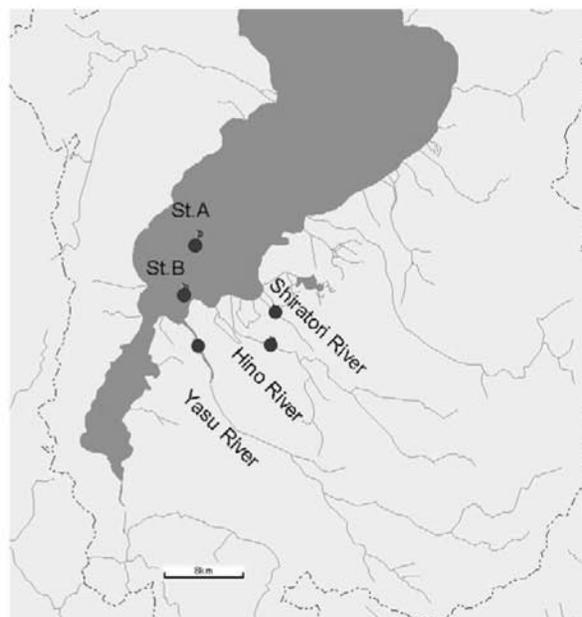


図2 調査地点

2.2 河川流入汚濁負荷量の調査方法

2005年度は、琵琶湖流入河川の中で農地河川として代表的な河川である白鳥川の負荷量調査を行った。調査地点は琵琶湖からの逆流の恐れのない下流部に設けた（図3のSt.1）。ここに自動採水器（ISCO社製6700型）を設置し12時間間隔で採水している。また、降雨時などの短期的な水質変動を把握するため、自記濁度計（アレック電子製COMPACT-CLW）を設置し20分間隔で濁度を測定している。自動採水器で採水したサンプルは毎週回収に行き、その際、バケツ採水も行っている。自動採水器で採取したサンプルについては、SS（懸濁物質）、T-N（全窒素）、D-N（溶存態窒素）、T-P（全リン）、



図3 白鳥川の流出汚濁負荷量調査地点

D-P (溶存態リン) を測定し、バケツ採水のサンプルについては、これに加えてDOC (溶存有機炭素) 等を測定している。ろ過はWhatmann GF/Fで行っている。また、自記水位計 (STS社製MC-1100W) を設置し10分毎に水位を測定している。水位から流量への換算は、この地点で流量の実測を10回以上行って求めた

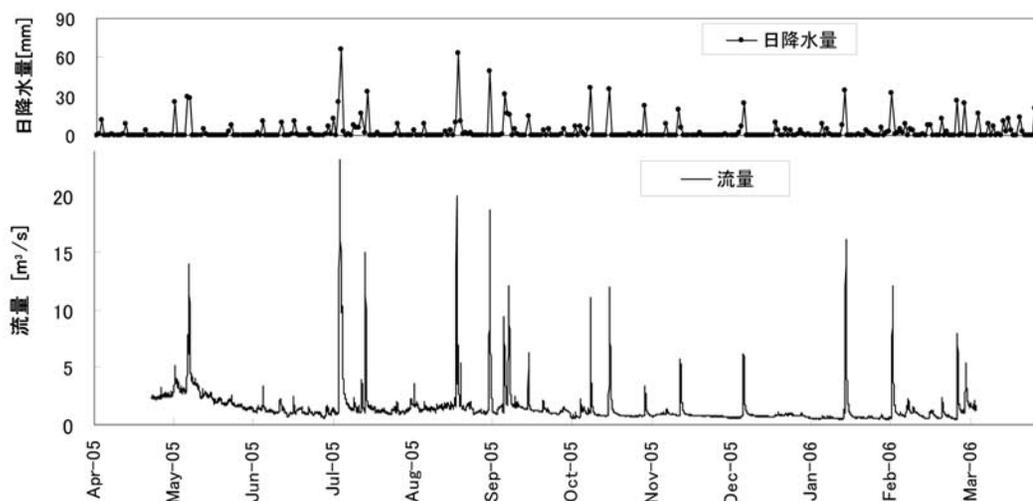


図4 白鳥川St. 1における流量変化 (2005年4月～2006年3月)

HQ 曲線(水位から流量への換算式)を用いて行った。調査対象とした白鳥川は、集水域面積が3,915haであり、農地が51%、工場・宅地が23%、森林が20%を占める(滋賀県東近江地域振興局, 2004)。本流の延長は約20kmである。水田を主体とする農地が集水域面積の半分を占め、典型的な農地河川といえる。2000年時点における流域人口は約22,000人で下水道普及率は14%とまだ低く、農業集落排水処理施設による処理人口が約3,000人、合併処理浄化槽人口が約5,800人、単独処理浄化槽人口が約1,400人、し尿処理人口が約8,300人となっている。流域内には畜産施設があり、2000年時点で牛が約600頭、豚が約1,200頭、鶏が約8,000羽飼われている(滋賀県, 2001)。

2. 3 北湖S局における水質調査方法

2005年7月13日に、南比良沖の琵琶湖北湖S局 (図2のSt. A、水深約60m) に濁度・クロロフィル計 (アレック電子製COMPACT-CLW) を水深0.5、2、4、6、8、10、12.5、15、17.5、20mに計10台設置した。測定頻度は最初は30分間隔に設定したが、ヒドラ等の付着生物の計器への付着量が夏季から秋季にかけて多くなり、濁度計の光経路の掃除が30分間隔のワイパー掃除では不十分と思われたため、2005年12月からは、20分間隔の測定に変更した。また、2006年3月に電気伝導度計 (RBR製XR420-CTfおよびアレック電子製COMPACT-CTW) を水深0.5、5、10、15mに計4台設置した。観測機器のメンテナンス (センサー付近の付着物の除去) をおおよそ1回の頻度で行った。この時に、クロロフィルa、栄養塩等の水質分析のための採水を濁度・クロロフィル計の設置水深と同じ水深でバンドーン採水器を用いて行った。

3. 平成17年度の調査結果

3. 1 白鳥川での汚濁負荷量調査

(1) 流量の変化

まず、流量の変化をみてみよう。10分毎の水位観測から求めた流量の時間変化を図4に示す。平時時の流量は1~2 m³/s程度、降雨時には5~20 m³/s程度であった。4月下旬から5月にかけての期間は、他の時期に比べて流量が多くなっていた。これは、この時期に水田への灌漑用水供給量が多くなり、その排水が白鳥川に流入してくるためと考えられる。冬季には農業用水の供給がなくなり降水量も少ないため流量は少なくなった。

(2) 水質の変化

次に、水質の変化をみてみよう。SS、窒素、リンの濃度変化を図5~7に示した。SS濃度 (図5) は、5月のゴールデンウィーク前後の代かき・田植え時期に顕著に高った。また、降雨時にも濃度が高くなったが、代かき・田植え時期に比べて短期間で濃度が下がっていた。このグラフから農地河川では水質に対する代かき濁水の影響が非常に大きいことがわかる。代かき濁水の影響は、窒素濃度 (図6) やリン濃度 (図7) にも現れていた。ただし、窒素濃度に対する代かき濁水の影響は、SSやT-P濃度に比べると相対的に小さいものになっていた。

窒素濃度は、流量が少なくなる冬季に高くなる変化を示していた。これは、窒素は生活排水由来や地下水由来のものなど定常的に流出してくるものが多く、流量が少なくなる時期には水による希釈効果が小さくなるためと考えられる。また、アンモニア態窒素 (NH₄-N) の濃度も冬季に高くなる現象がみられた。これは、温度が低い冬季にはアンモニア態窒素を硝酸態窒素へ硝化するバクテリアの活動が抑制されるためと考えられる。アンモニア態窒素は、代かき・田植え時期にもやや高くなる傾向がみられ、これは施肥の影響と考えられる。

T-P濃度は、SS濃度とほぼ同じ変化を示していた。一方、溶存態のD-P、 PO_4 -Pは、SSやT-Pのように降雨時に顕著に高くなる現象はみられず、灌漑期に一般的に高い傾向がみられ、特に代かき・田植え時期に高い傾向を示した。冬季には、リン濃度は各形態とも低くなった。

(3) 負荷量の変化

次に負荷量の変化をみてみよう。ここでは、まず流量の時間平均値を求め、水質は12時間毎の測定値から線形補間で毎時の値を求め、両者のかけ算から毎時の河川負荷量の値を求めた。次に降雨時に短期的に流出してくる負荷量(降雨由来負荷量)とそれ以外の安定的に流出してくる基底負荷量を分けて月別に集計して月ごとの負荷量を求めた。流量についても負荷量と同様に降雨時に短期的に流出してくるものとそれ以外の安定的に流れてくるものを分けて求めてみた。本来は、降雨由来の流量および負荷量は中間流出でゆっくり出てくるものも含めて考えるべきであるが、中間流出で出てくるものを分けて求めることが難しいため、ここでは、短期的に流出してくるもののみを降雨由来として扱うこととした。

このようにして求めた流量の経月変化を図8に示す。流量は5月が最も大きく、この月は基底流量

が他の月に比べて顕著に大きくなっていった。この時期は、農業用水を一年で最も多く使用する時期であ

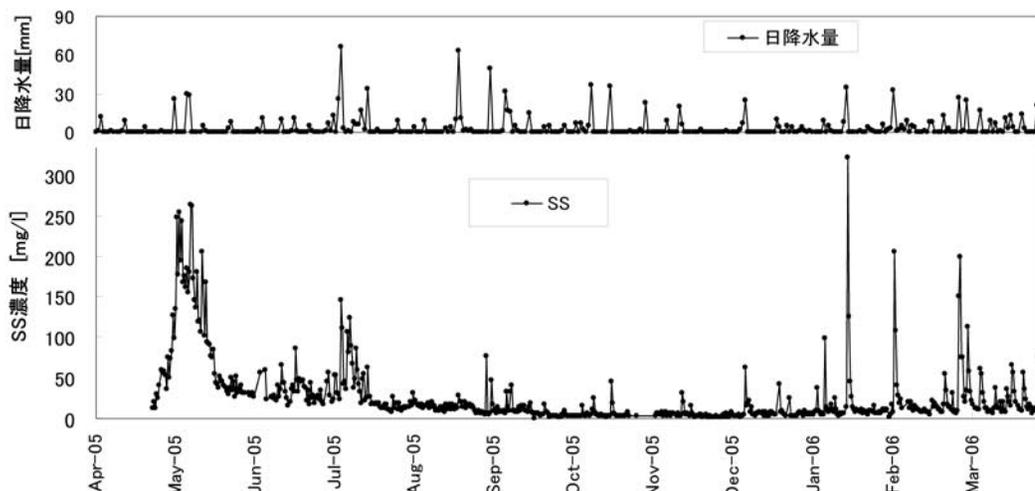


図5 白鳥川St. 1におけるSS濃度変化 (2005年4月~2006年3月)

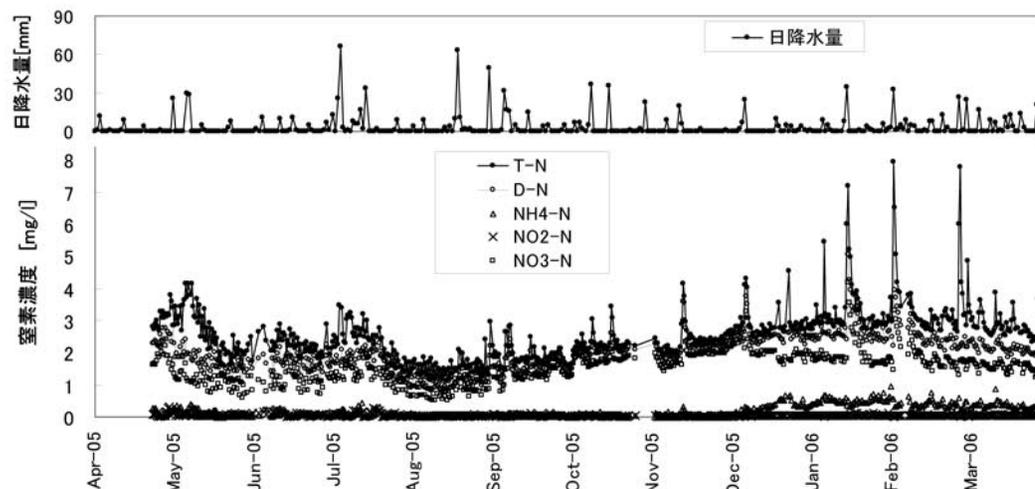


図6 白鳥川St. 1における窒素濃度変化 (2005年4月~2006年3月)

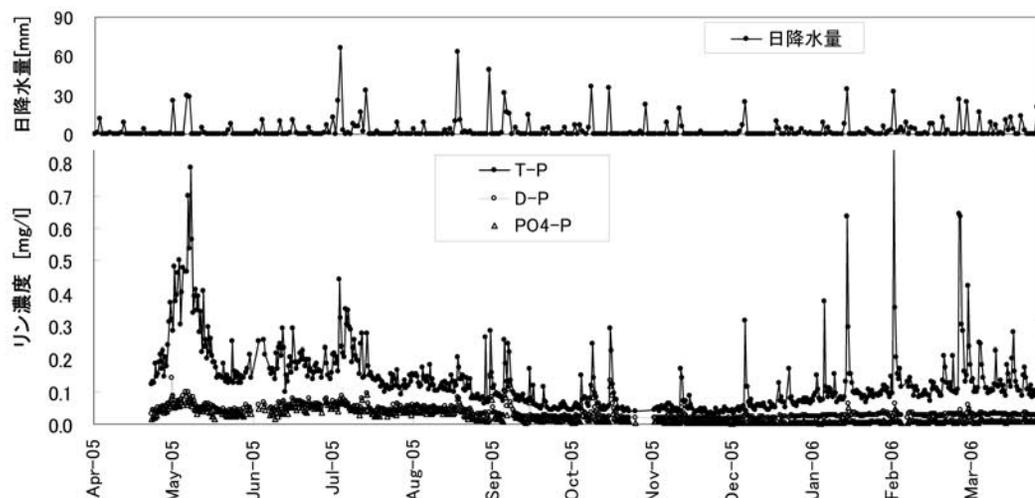


図7 白鳥川St. 1におけるリン濃度変化 (2005年4月~2006年3月)

り、琵琶湖逆水や永源寺ダム、地下水等から流域内の農地に供給された農業用水が、白鳥川に流出してくるために基底流量が増えたと考えられる。5月の他に灌漑期に当たる6～9月は、非灌漑期に比べて基底流量が多く、農業用水の河川流量への影響が大きいことが伺える。

SS負荷量(図9)は、5月に顕著に高くなり、代かき・田植え時に流出する濁水の影響が非常に大きいことを示していた。降雨時にもSS負荷量は大きくなるが短期的であるため、代かき時のような大きな負荷量にはならなかった。T-N負荷量(図10)は、SSやリン負荷量に比べると変動幅が小さいものの、やはり5月の負荷量が最も大きくなり、水田での施肥(元肥)の影響が大きいことが推定された。T-P負荷量(図11)は、SS負荷量とほぼ同様の变化であり、代かき・田植え時に流出してくるリン、特に粒子態のリンの負荷量が大きい結果となった。

(4) 年間負荷量に占める降雨時負荷量の比率

年間負荷量に占める降雨由来負荷量(短期流出分)の比率は、SS負荷量で45%、T-N負荷量で33%、T-P負荷量で42%となった。また、年間流出流量に占める降雨由来流量(短期流出分)の比率は、24%であった。推定方法は異なるが守山市の法竜

川での推定結果では、降雨由来の比率が流量で14%、SS負荷量で87%、T-N負荷量で23%、T-P負荷

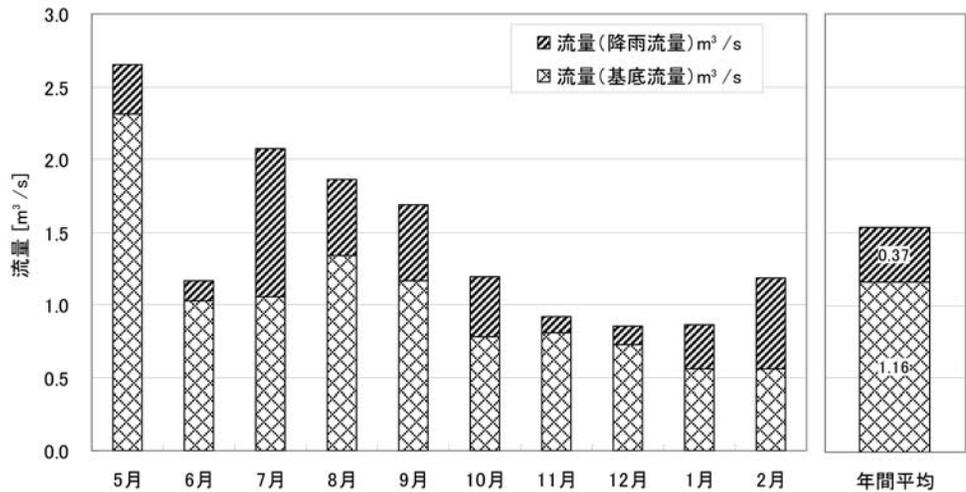


図8 白鳥川St. 1における流量の経月変化(2005年5月～2006年2月)

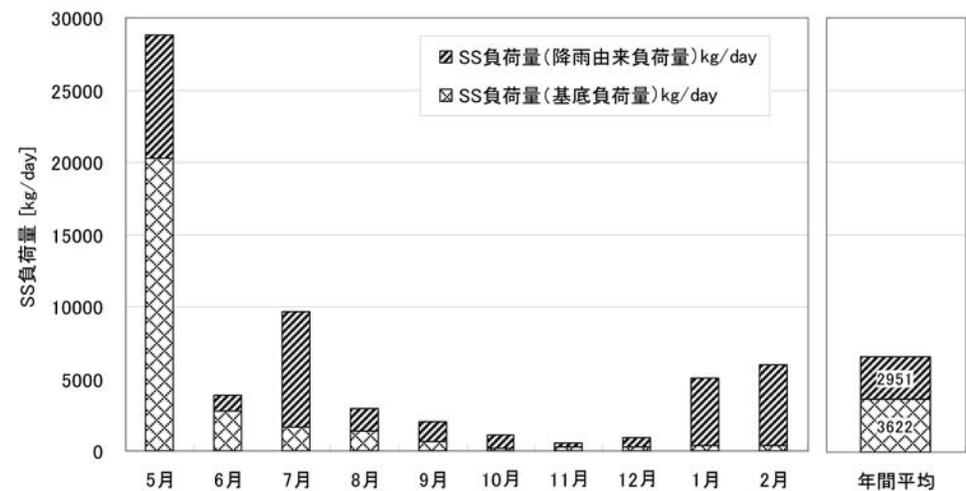


図9 白鳥川St. 1におけるSS負荷量の経月変化(2005年5月～2006年2月)

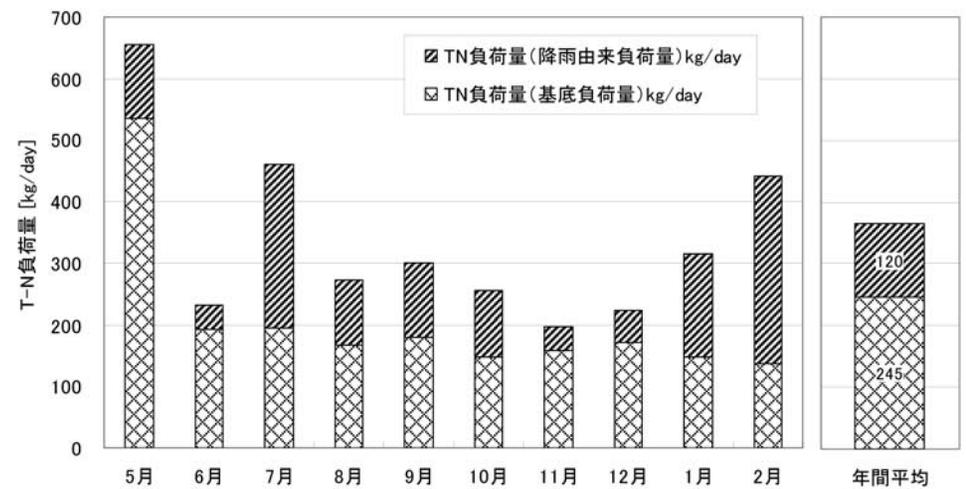


図10 白鳥川St. 1におけるT-N負荷量の経月変化(2005年5月～2006年2月)

量で52%であった(大久保ほか、2002)。流量の降雨由来比率が、白鳥川に比べ法竜川が小さいのは、

法竜川流域では地下水を多量に揚水している工場があるためと考えられる。T-N、T-P負荷量の降雨由来比率では両河川で大きな違いはみられない。SS負荷量では、白鳥川に比べ法竜川の降雨由来負荷量の比率がかなり大きくなった。これは法竜川の調査地点の上流に樋門があり、降雨時にその樋門が開放された場合に底泥巻き上げの影響が大きかったことが原因として考えられる

が、降雨由来負荷量は年々の雨の降り方の影響が大きいのでさらに調査を継続して比較検討する必要がある。

年間負荷量に占める降雨由来負荷量の比率を、琵琶湖集水域以外の調査例でみると、霞ヶ浦流域では、T-Nで約30%、T-Pで約40~50%（海老瀬, 1984）、広島県太田川では、T-Nで66%、T-Pで77%（橋本ら, 1990）の値が報告されている。今回、白鳥川で求めた値は、霞ヶ浦流域の値に近い値であった。

(5) 原単位法で求めた負荷量と実測負荷量の比較

湖沼水質保全特別措置法に基づく第4期琵琶湖水質保全計画策定時の資料を基に原単位法で白鳥川からの汚濁負荷量を推定すると、2000年時点で

T-N負荷量が250kg/日、T-P負荷量が21.4kg/日となり、そのうち農地由来のものはT-N負荷量で59kg/日、T-P負荷量で4.0kg/日となった（大久保試算）。これに対し今回実測で求めた2005年度の河川流出負荷量は、T-N負荷量が365 kg/日、T-P負荷量が25.8 kg/日であった。実測負荷量（2005年度）は、原単位法で求めた負荷量（2000年度）に比べ、T-N負荷量で1.5倍、T-P負荷量で1.2倍になった。2000年から2005年の間に下水道整備などの対策により負荷量は減少しているため、原単位法で求めた2005年度の負荷量はさらに小さくなるはずであり、原単位

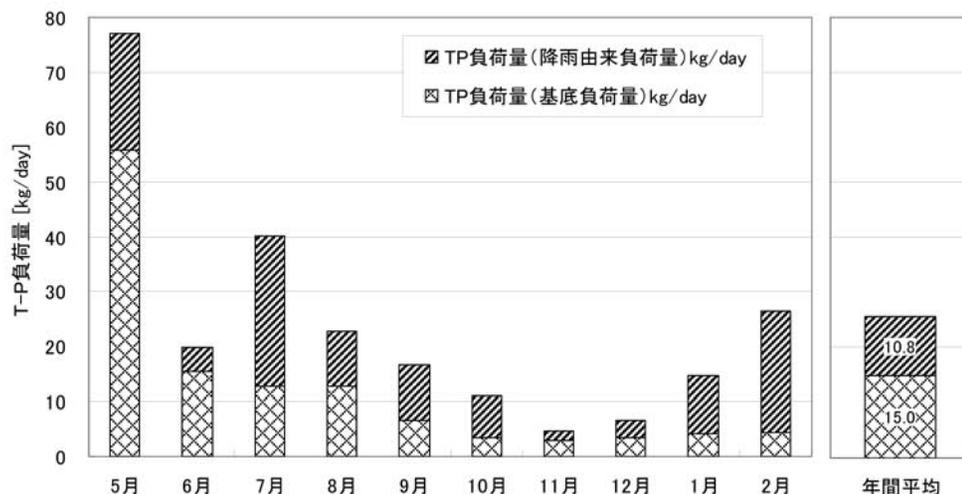


図11 白鳥川St. 1におけるT-P負荷量の経月変化（2005年5月～2006年2月）

法で求めた負荷量は過小評価になっていることがわかった。

生活系や工場系などの点源負荷については、自然条件に左右されることが少なく、多くの実測値を基に原単位を設定しているため推定に大きな誤差はないと考えられる。したがって、面源負荷については、原単位による見積もりが過少評価になっている可能性が示唆された。しかし、自然条件下にある農地等の現場で面源負荷量を正確に把握するには多くの困難を伴うこと、また降雨条件による年次変動も予想されることから、今後とも本調査を継続するとともに、水田等の面源からの汚濁負荷量の正確な把握に努める必要があると

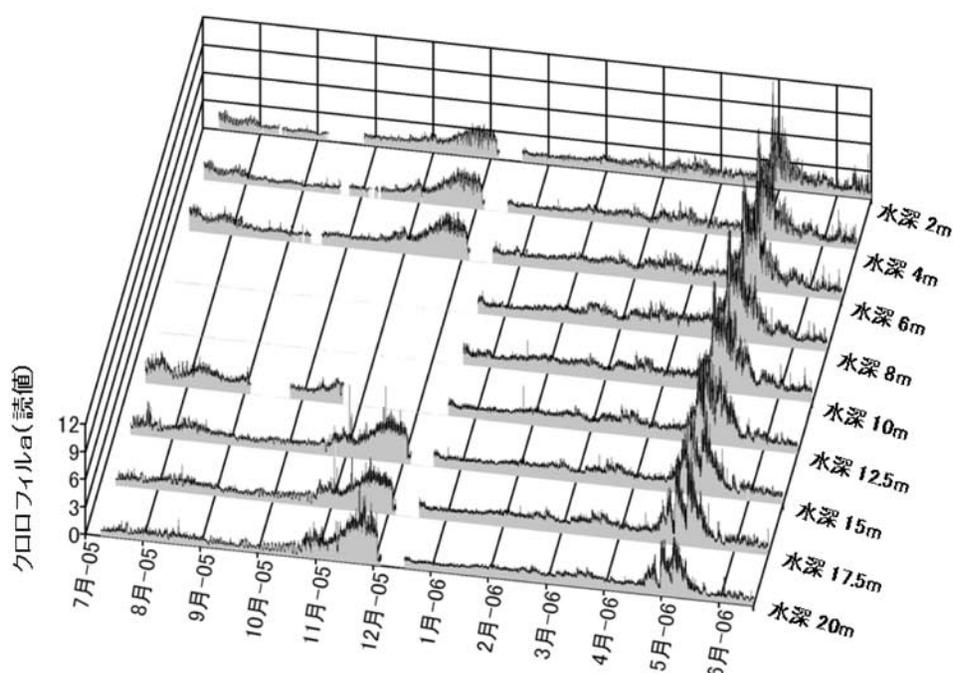


図12 北湖S局におけるクロロフィルa濃度（機械の読み値、未補正）の変化（2005年7月～2006年6月）

考えられる。

3. 2 北湖S局での水質調査結果

次に、琵琶湖の観測地点での調査結果をみてみよう。北湖S局に計測器を設置した2005年7月13日から2006年6月20日までのクロロフィルa（計器での読み値、未補正值）、濁度、水温の観測結果を図12～14に示す。また、この期間の気象条件の変化を図15に示した。

2005年7月3～4日に120mm程度の大雨があったが、7月13日以降の水深2～20m層の濁度、クロロフィル観測値にその影響は現れていなかった。当初、水深8mと10mで濁度・クロロフィルの高値がみられ降雨の影響ではないかと思われたが、この層では季節に関わらず高値が時々みられ、値が不安定であることから、北湖S局の大型ブイ本体の下部に濁度・クロロフィル計が接触し、その影響で値が高くなっているものと考えられた。そのため、2006年6月22日に水深0.5～10m層の計器は、北湖S局の本体ブイから離して係留する方法に変更した。図13の濁度変化で水深10m層ではその影響らしき不安定な変化がみられる。水深6m層でも不安定な変化がみられ本体ブイに接触していた可能性がある。

クロロフィルaの濃度変化（図12）をみると、秋季の11月と春季の5月にピークがみられた。これは、陸水のテキスト（例えば、ホーン&ゴールドマン、1999）でみられる温帯地域における湖沼の典型的な植物プランクトン現存量の季節変化パターンであった。5月のクロロフィルaのピークは、代かき・田植えに伴う濁水発生時期と同時期に発生しており、両者に因果関係がある可能性も考えられる。しかし、この因果関係を解明するためにはさらに広範

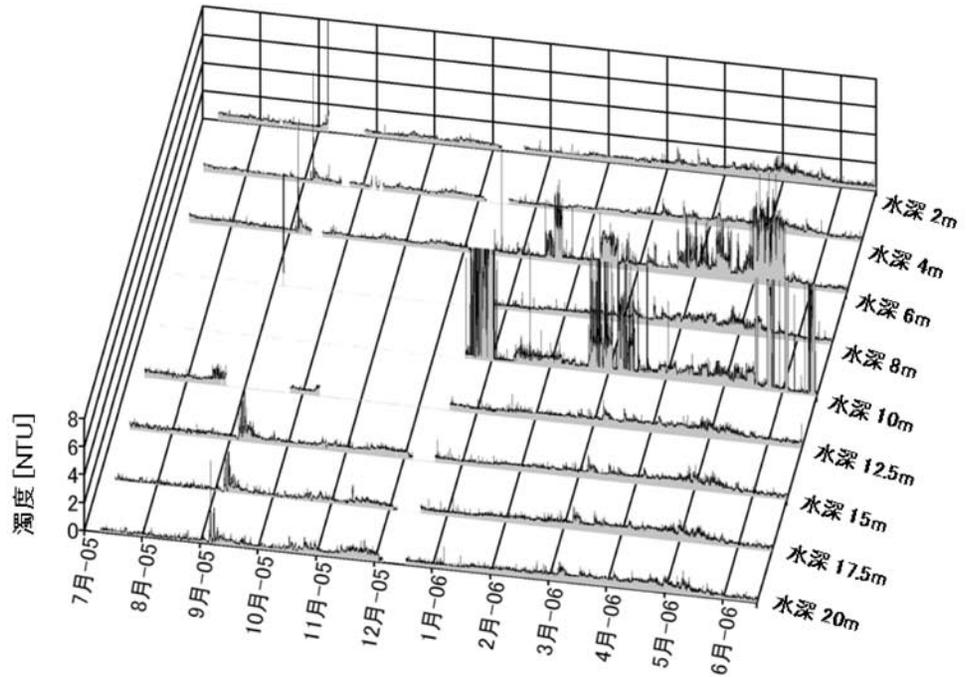


図13 北湖S局における濁度の変化
(2005年7月～2006年6月)

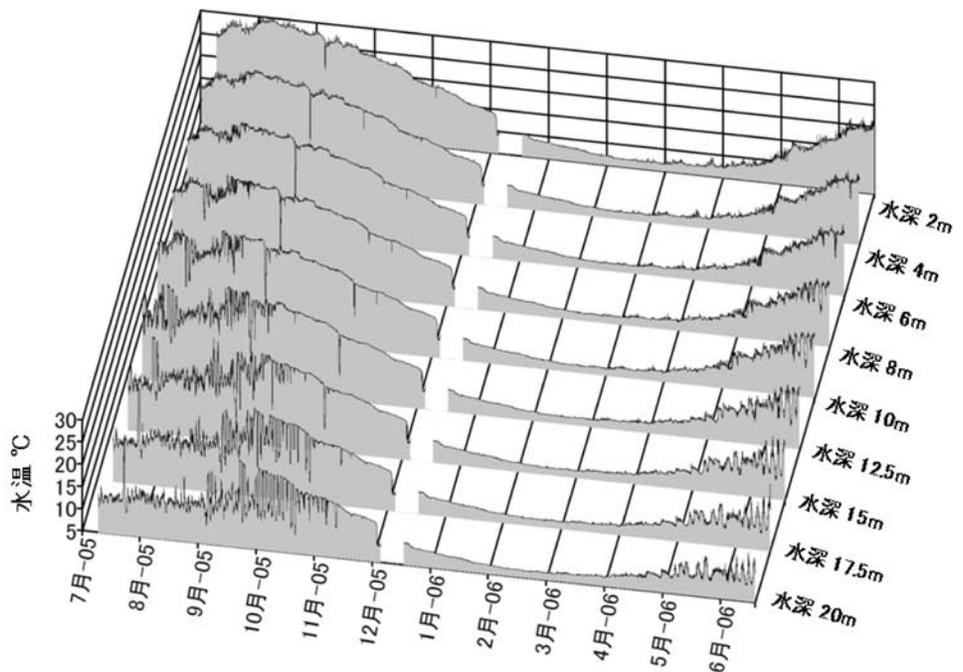


図14 北湖S局における水温の変化
(2005年7月～2006年6月)

困における調査と、この時期の植物プランクトン増殖の制限因子の解明が必要である。

水温の変化（図14）をみると、秋季の11月は水温成層が破壊され鉛直混合が始まりつつある時期であり、成層期に下層に貯まった栄養塩が有光層に供給される時期である。また、春季の5月は、表層から徐々に暖められて成層が形成されつつある時期であり、植物プランクトンが上層に留まりやすくなる時期で

ある。このような物理条件が植物プランクトンの増殖や集積に大きな影響を及ぼしている。陸域からの栄養塩供給の植物プランクトンへの影響をみるためには、このような物理条件の変化も同時に見ていく必要がある。

今回の調査期間中には大雨が少なかったこともあり、降雨由来の窒素、リン負荷量が植物プランクトン現存量に影響を及ぼす現象ははっきりみられなかった。今後さらに調査を継続して降雨由来負荷量の水質および植物プランクトン現存量への影響を見ていく必要がある。

4. まとめ

本センターの重点プロジェクト研究「ノンポイント負荷の琵琶湖水質への影響把握」および農業技術振興センターとの共同研究「近畿地域の水稲の環境負荷低減技術の体系化と負荷予測モデル開発」（大久保担当分）の平成17年度（2005年度）に実施した研究の成果の概要は次の通りである。

- ① 琵琶湖流入河川のうち典型的な農地河川の白鳥川（水田占有率51%）において降雨時を含めた汚濁負荷量の詳細調査を行った結果、2005年度はSS、窒素、リン負荷量とも5月の負荷量が月別負荷量としては年間で最も大きく、代かき・田植え時期に流出する懸濁物質および栄養塩の流出量が大いことが確認された。水田における汚濁負荷削減対策はこの時期に重点をおいて進めることが重要であると考えられる。
- ② 白鳥川における年間負荷量に占める降雨時負荷量（短期流出分）の比率は、T-Nで33%、T-Pで42%となった。この比率は霞ヶ浦流入河川における報告値とほぼ同じであった。年間で最も負荷量の大きかった5月では、降雨時負荷量の占める比率は年間の比率よりも小さく、降雨時の流出負荷対策よりも農業用水の節水などの晴天時の流出負荷対策が重要であると考えられる。
- ③ 琵琶湖の南比良沖（北湖S局）における0～20m層での連続観測では、秋季（2005年11月）と春季（2006年5月）にクロロフィルaのピークが0～20m層全体でみられ、5月初旬のピークが最大であった。この5月初旬の植物プランクトンの増殖に代かき濁水に伴い流入する栄養塩が関与しているのかどうかは現時点は不明確であり、さらに研究が必要である。
- ④ 降雨時に陸域から流入する栄養塩の北湖S局の

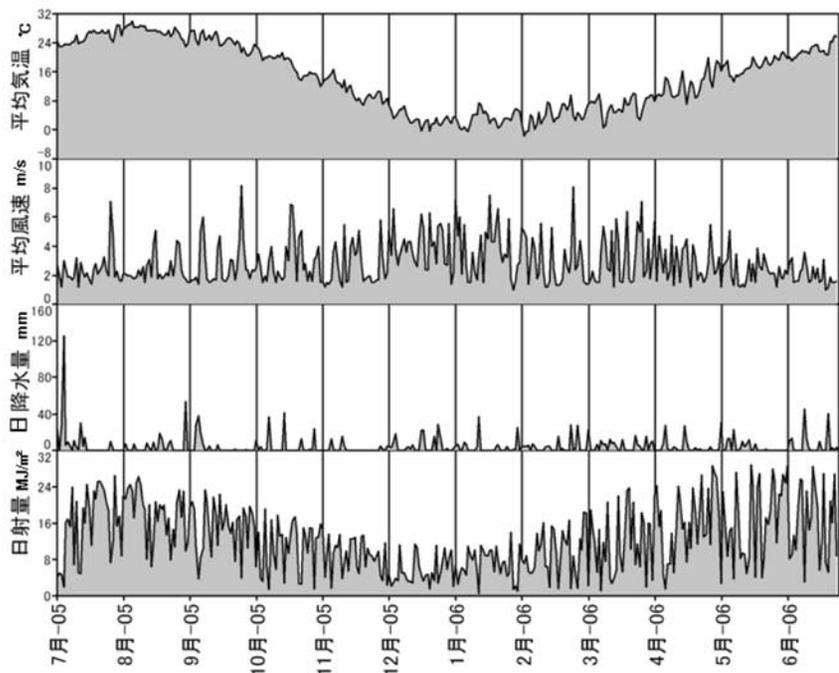


図15 観測期間中の気象条件の変化（彦根気象台データ）
（2005年7月～2006年6月）

クロロフィルa濃度への影響は2005年7月～2006年6月の期間では明確にみられなかった。2005年度は降水量が少なかったため、このような結果が一般的なものかどうかさらに継続的に調査を進めて検討する必要がある。

謝辞

本研究を進める上で、当センター非常勤職員の中森祐子様、赤岩さや佳様、西村剛史様、渡邊岳様、嘱託職員の竹村利生様には水質分析、現地調査等で多大なご協力をいただきました。琵琶湖の調査では「はっけん号」の乗組員の皆様にご協力いただきました。また、研究計画検討の際には滋賀大学の遠藤修一先生に御助言をいただきました。お世話になった皆様に深謝いたします。

引用文献

- 滋賀県（2006）：琵琶湖に係る湖沼水質保全計画第5期（滋賀県案）。
 國松孝男（2000）：農業地域と琵琶湖の環境保全。宗宮功（編著）
 「琵琶湖—その環境と水質形成—」，39-45，技報堂出版。
 環境省（2005）：平成16年度湖沼水質保全対策・総合レビュー検討調査報告書，琵琶湖編。
 滋賀県東近江地域振興局田園振興第二課（2004）：白鳥川流域水循環マスタープラン資料。
 滋賀県（2001）：第4期琵琶湖湖沼保全計画資料。
 大久保卓也，寺村善幸，市木敦之（2002）：集水域からの栄養塩負荷（降雨時）。滋賀県琵琶湖研究所プロジェクト研究報告書，No. 01-A01，「湖内現象を考慮したノンポイント負荷削減対策の検討」153-179。
 海老瀬潜一（1984）：霞ヶ浦流入河川による総流入負荷量の評価。国立公害研究所研究報告，50，41-58。
 橋本敏子，井澤博文，中富文雄（1990）：太田川における降雨時の流出汚濁負荷量。全国公害研究会誌，15(1)，17-23。
 アレキサンダー，J，ホーン・チャールズ，R，ゴールドマン（1999）：「陸水学（手塚泰彦訳）」，京都大学出版会。