

(44) 三春ダムにおける植物プランクトン増殖特性に関する基礎的研究

**Fundamental Study of the Growth Characteristics of the Phytoplankton
in Miharu Dam Reservoir**

手塚公裕* 佐藤洋一** 高橋幸彦*** 中村玄正**
Masahiro TEZUKA*, Youichi SATOU**,
Yukihiko TAKAHASHI*** and Michimasa NAKAMURA**

ABSTRACT ; Abnormal growth of phytoplankton (water bloom) causes the impediments of water utilization. In Miharu Dam Reservoir, the water bloom did not grow in 2001, but it grew in 2002. Seasonal changes of the phytoplankton growth, water quality and weather condition in Miharu Dam Reservoir were investigated during 2001–2002. Growth characteristics of the phytoplankton in Miharu Dam Reservoir are examined from differences in 2001 and 2002.

Major results obtained from this study are;

- (1) Conditions of the water temperature, daylight hours, and phosphorus were suitable for growth of the phytoplankton in 2002 rather than 2001.
- (2) The difference of the phosphorus concentration of 2001 and 2002 is remarkable, and the difference is considered to have induced the difference of the phytoplankton growth.
- (3) The phosphorus concentration of Miharu Dam Reservoir receives influence by the amount of the inflow phosphorus loads, and the amount of inflow phosphorus loads is restricted to the variation of flows accompanied by rain. Thus, it is considered that variation of the inflow phosphorus load accompanied by rain is the limiting factor of the phytoplankton in Miharu Dam Reservoir.

KEYWORDS ; phytoplankton, water bloom, eutrophication, nutrient salt, inflow characteristic.

1 はじめに

21世紀に入り、自然環境保全の考えが広まってきているが、湖沼やダム湖の環境基準達成率は河川や海域に比較して低く¹⁾、水利用上からも閉鎖性水域の水質保全は大きな課題となっている。閉鎖性水域の富栄養化に伴って生じる植物プランクトンの異常増殖(アオコ)は浄水処理や生態系への影響等の問題を引き起こす。植物プランクトンの増殖因子としては水温、日照時間、滞留時間、栄養塩等が挙げられ、各水域の特性が影響を及ぼすと考えられる。調査対象とした三春ダムでは夏季に植物プランクトンの異常増殖による水質問題が懸念されている。三春ダムにおける富栄養化の可能性に関する既往研究には、相馬による制限物質の検討²⁾があるが、三春ダム建設前の流入河川水を対象に実施されているため三春ダムの富栄養化を直接評価するものではない。また、佐藤らは前ダムの効果評価と三春ダムの富栄養化に関する考察を行っている³⁾が、三春ダムでの植物プランクトン増殖特性に関する知見は少ない。

三春ダムにおいては2001年にはアオコの発生が見られていないが、2002年にはアオコの発生が見られており、同一ダムでアオコ発生の有無がある例は極めて少ない。本研究ではアオコの

* 日本大学大学院工学研究科博士後期課程

(Graduate School of Engineering, Nihon University)

** 日本大学工学部 (College of Engineering, Nihon University)

*** 哈爾濱工業大学市政環境工程学院

(School of Municipal and Environmental Engineering Harbin Institute of Technology)

発生が見られなかった2001年と、夏季に藍藻類*Microcystis* sp.のアオコが発生した2002年の植物プランクトン増殖因子を比較することにより、三春ダムにおける植物プランクトン増殖因子の把握と増殖特性の検討を行った。さらに、ダム湖への汚濁負荷流入特性について明らかにし、三春ダムの水質特性と植物プランクトンの増殖特性への影響を検討した。

2 三春ダムとダム流域の概要

三春ダムは福島県三春町の阿武隈水系大滝根川に建設され、1998年から運用されている。総貯水量4,280万 m^3 、有効貯水量3,600万 m^3 を有し、洪水調節、流水の正常な機能維持、灌漑用水の補給、水道用水の供給、工業用水の供給等を目的とする多目的ダムである⁴⁾。三春ダム流域の概略を図1に示す。三春ダム流域は福島県阿武隈山地のほぼ中央に位置し流域面積226.4 km^2 を有している⁴⁾。流域面積の約6割は山林、その他の平坦部を農地と市街地、集落が占めており、農業（稲作、葉タバコ、桑畑）と畜産業（牛：6,700頭⁵⁾）といった一次産業が古くから盛んである。流域人口は約34,000人、人口密度は約150人/ km^2 と東北地方におけるダム

流域の平均人口密度約25人/ km^2 の6倍であり、東北地方のダム流域では最大の人口密度となっている⁴⁾。一方、流域の下水道普及率は、郡山市55.4%、三春町で12.5%、船引町、常葉町、大越町、滝根町の4町については2004年4月に大滝根川流域下水道が供用開始されたばかりである。流域の地質は阿武隈変成帯に属し、大半を花崗閃緑岩と花崗岩が占める⁷⁾。花崗岩は風化作用によりマサ土となり、降雨時には流出しやすくなる。また、2004年に家畜排泄物の管理の適正化に関する法律が本格的に実施されるが、現在も家畜糞尿の野積みや素掘り投棄は行われており畜産排水対策が必要とされている。このような流域特性を有する三春ダムでは汚濁負荷が流入しやすいため、富栄養化が促進される可能性が高いと考えられる。

3 調査概要

3.1 調査目的

本研究は2001年と2002年で植物プランクトンの増殖因子を比較することにより、三春ダムにおける植物プランクトン増殖因子の把握と増殖特性の検討を行ったものである。また、植物プランクトン現存量と活性を定量的に示し、2001年と2002年の三春ダムにおけるアオコ発生の相違を明確化した。さらに、汚濁負荷流入特性について明らかにし、三春ダムの水質特性と植物プランクトンの増殖特性への影響を検討した。

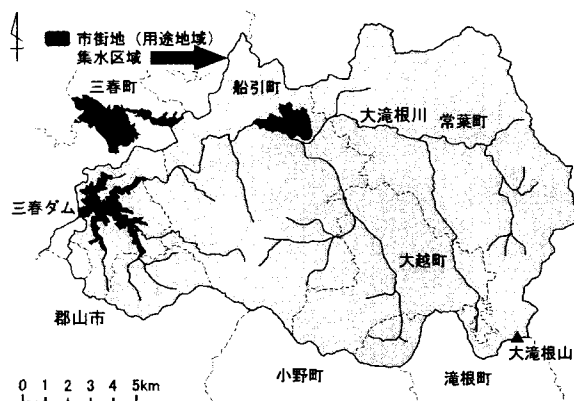


図1 三春ダム流域の概略

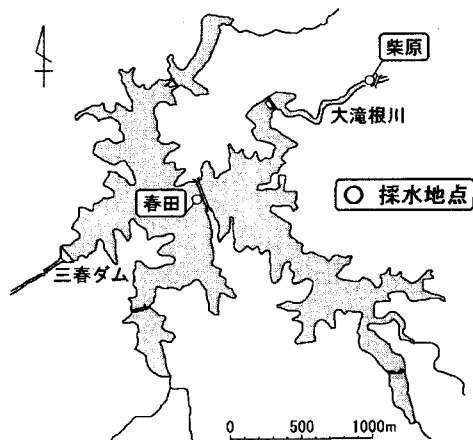


図2 調査地点の概略

3.2 調査地点

調査地点の概略を図2に示す。三春ダム湖水の代表として三春ダムのほぼ中央に位置し三春ダムの補助基準点とされている春田地点（三春ダム）、流入河川水の代表として大滝根川の柴原地点（流入河川）を選定し調査した。三春ダムに発生するアオコはガス胞を有し浮上性のある藍藻類である。その増殖に最も影響があるのは表層水の水質と考え調査対象を表層とした。なお、三春ダムには流入河川が5河川あるが流入負荷量を比較した結果、BOD、SS、窒素、リン等の全項目で大滝根川が80％程度と卓越していた。よって、大滝根川が三春ダムの水質に与える影響は流入河川の中で最も大きいと考えられる。

また、汚濁負荷流入特性を検討するため、流入河川を対象にSS粒度分布や河床堆積物を調査した。

3.3 調査項目

水質調査項目は、植物プランクトン増殖の制限因子となる水温、窒素、リン、植物プランクトン量の指標として有機態SS（SSの強熱減量を有機態SSと表記）、植物プランクトン活性の指標としてpH、DOである。分析は河川水質試験方法（案）⁸⁾に準じた。植物プランクトン濃度はプランクトン計数板を用いて計測した。粒度分布はレーザー回折／散乱式粒度分布測定装置HORIBA LA-920を用いて測定した。河床堆積物のリン含有量はふるいにより粒径を75 μ m未満、75 μ m以上2mm未満、2mm以上に分けた後にT-Pは芦野らの方法に準じた硫酸-硝酸分解抽出法⁹⁾、I-Pは1N-H₂SO₄による抽出法¹⁰⁾を用いたモリブデン青法により定量した。三春ダム流域の降水量と三春ダムの流入水量は国土交通省東北地方整備局三春ダム管理所、日照時間は福島地方気象台のデータを用いた。

水質調査は2001年7月20日～2002年2月15日、2002年6月12日～10月23日に週1回定期的に行った。2001年12月14日～2002年2月15日は流入河川調査のみを行った。なお、調査時刻は午前9時～10時頃とした。SS粒度分布は2003年7月に平水時と増水時を対象に5回、河床堆積物のリン含有量は2003年4月に調査した。

4 調査結果と考察

4.1 水温

三春ダムにおける2001年と2002年の水温の比較を図3に示す。藍藻類*Microcystis* sp.は水温25～35℃¹¹⁾で最も増殖するとされている。2001年の三春ダムでは調査を開始した7月中旬～8月下旬、2002年では7月中旬～9月上旬において水温が25℃前後で推移している。2001年と2002年と比較すると、2001年より2002年で水温が25℃を超える期間が長くなっていた。また水温の最大値は2001年が26.5℃、2002年が28.6℃と2002年が高かった。よって、水温は2001年より2002年の方が植物プランクトンの増殖に適していたと考えられる。

4.2 日照時間

光条件と植物プランクトンの関係を検討する場合は曇りの光条件も検討できる日射量を用いる必要があるが、今回は福島地方気象台のデータがある日照時間を用いて検討した。

三春ダム周辺における2001年と2002年の日照時間の比較（6月～11月）を図4に示す。2001年と2002年の日照時間は共に0時間～12.8時間の間で推移した。2001年6月と2002年6、7月で日照時間の低下

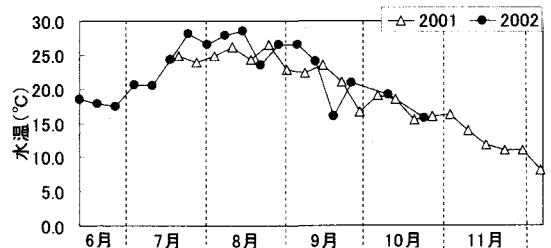


図3 2001年と2002年の水温の比較

が見られた。これは梅雨の時期と重なるため梅雨の影響と考えられる。また、2001年8月中旬で日照時間が0時間の日が続いていた。2001年と2002年の各月の合計日照時間を比較すると7月と8月で顕著な差が見られた。7月では2001年が2002年よりも89.4時間（1日当たり2.9時間）長く、逆に8月では2002年が2001年よりも75.0時間（1日当たり2.5時間）長かった。植物プランクトンの増殖条件が整う8月を比較すると、日照時間は2001年より2002年の方が長く植物プランクトンの増殖に適していたと考えられる。

4.3 滞留時間

2001年と2002年の三春ダムにおける滞留時間の比較を図5に示す。滞留時間はH-V換算による三春ダム貯水量と1日平均全流入水量から算出した。2001年6月～11月の滞留時間は6日～342日の間で推移し平均78日、2002年6月～11月の滞留時間は2日～2063日の間で推移し平均83日となっていた。

藍藻類*Microcystis* sp.の比増殖速度は水温、光条件、栄養塩条件等で変化するが比較的増殖が遅くなる水温20℃では比増殖速度は約 0.1 日^{-1} ¹¹⁾とされている。これを世代時間（細胞の数が2倍になるのに要する時間）にすると約7日であり藍藻類*Microcystis* sp.の増殖には滞留時間が7日以上必要であると考えられる。2001年と2002年で滞留時間7日を上回る日数を比較すると、2001年6月～11月で183日中182日（99%）、2002年6月～11月で183日中180日（98%）と共に多く、大きな違いもなかった。よって2001年と2002年では共に藍藻類*Microcystis* sp.の増殖に十分な滞留時間を有していたと考えられる。

4.4 流入河川と三春ダムの窒素濃度

(1) 流入河川の窒素濃度

2001年と2002年の三春ダム流入河川における窒素濃度と流量の経日変化を図6に示す。2001年のT-N濃度は1.4～2.4mg/lで推移し平均1.9mg/l、DI-N（ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ と $\text{NO}_2^-\text{-N}$ と $\text{NO}_3^-\text{-N}$ の合計）濃度は1.0～1.8mg/lで推移し平均1.4mg/lとなっていた。

2002年のT-N濃度は1.4～2.5mg/lで推移し平均1.8mg/l、DI-N濃度は1.1～1.8mg/lで推移し平均1.4mg/lとなっていた。

平均するとT-Nに占めるDI-Nの割合は2001年が70%、2002年が80%で、DI-Nに占める $\text{NO}_3^-\text{-N}$ の割合は共に90%以上であった。流量と窒素濃度の関係は殆ど見られなかった。

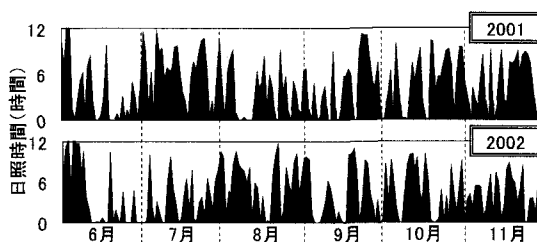


図4 2001年と2002年の日照時間の比較

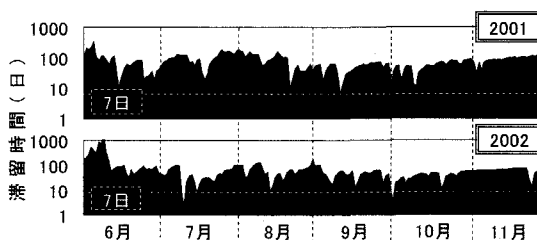


図5 2001年と2002年の滞留時間の比較

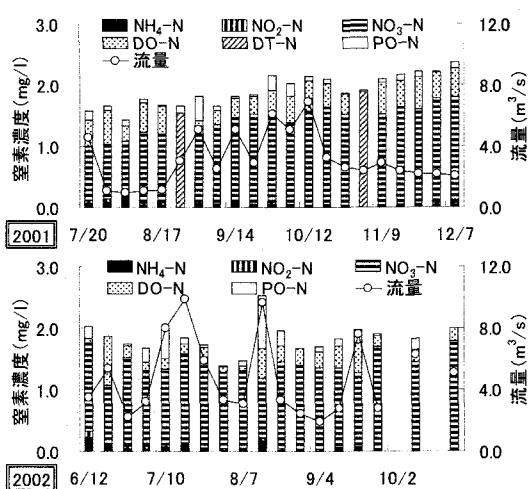


図6 2001年と2002年の窒素濃度：流入河川

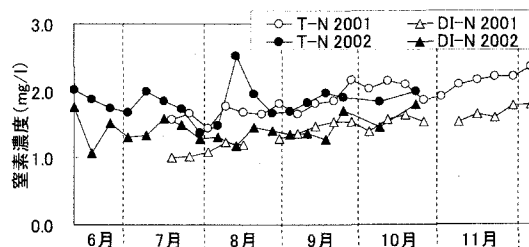


図7 流入河川窒素濃度の比較

2001年と2002年の三春ダム流入河川におけるT-N、DI-N濃度の比較を図7に示す。2001年と2002年のT-N、I-N濃度を比較すると概ね同様の濃度で推移していた。一般の河川では流量増加時に河床生物膜の剥離や淵の堆積物流出による窒素濃度と組成の変化が見られる¹²⁾。この傾向は若干であるが2002年の8月中旬に見られ、PO-N濃度の増加が見られた。調査時は降雨の影響により約3週間おりに流量増加が起きていたことから、河床等に蓄積していた負荷が掃流されたものと考えられる。しかし、流量増加時でも濃度増加がない時もあり、流量と窒素濃度に関係は殆ど見られていない。よって、河床等にかんがりの窒素負荷が蓄積しないと流量による窒素濃度の変化は生じないものと考えられる。

(2) 三春ダムの窒素濃度

2001年と2002年の三春ダムにおける窒素濃度の経日変化を図8に示す。2001年のT-N濃度は1.2～1.7mg/lで推移し平均1.4mg/l、DI-N濃度は0.8～1.2mg/lで推移し平均1.0mg/lとなっていた。

2002年のT-N濃度は1.2～11.4mg/lで推移し平均2.0mg/l、DI-N濃度は0.1～1.4mg/lで推移し平均1.1mg/lとなっていた。

平均するとT-Nに占めるDI-Nの割合は2001年が70%、2002年が80%で、DI-Nに占める NO_3^- -Nの割合は共に90%以上であった。窒素の濃度や形態は流入河川とダム湖の差、2001年と2002年の差は共に少なかった。しかし、2002年の三春ダムではT-N濃度が夏季において若干であるが植物プランクトン量に連動した変動を示し、アオコが発生した9月上旬で11.4mg/lと高濃度を示した。一方、DI-N濃度と植物プランクトン量の関連性は殆ど見られなかった。流入DI-N負荷が多く、植物プランクトンの摂取によるDI-N濃度の減少が打ち消されたものと考えられる。しかし、アオコが発生した2002年9月上旬においてはDI-N濃度が0.1mg/lと低くなった。このことから、植物プランクトンによるDI-Nの摂取により、DI-N濃度が減少し、T-N濃度（特にPO-N）が増加していたと考えられる。なお、9月上旬のアオコ発生は局所的な現象であることが確認されており、ダム湖水を水源としている浄水場では水処理上の障害は報告されていない。

2001年と2002年の三春ダムにおけるT-N、I-N濃度の比較を図9に示す。2001年と2002年のT-N、I-N濃度を比較すると、2002年の9月上旬のアオコ発生時以外に顕著な差は見られなかった。

三春ダムではアオコの発生時以外では常にDI-Nが1mg/l程度は存在していた。このことから三春ダムへのDI-Nの供給は比較的多く、植物プランクトンの増殖に必要な窒素が常に十分な状態であったと考えられる。

4.5 流入河川と三春ダムのリン濃度

(1) 流入河川のリン濃度

2001年と2002年の三春ダム流入河川におけるリン濃度と流量の経日変化を図10に示す。2001年のT-P濃度は0.03～0.26mg/lで推移し平均0.09mg/l、 PO_4^{3-} -P濃度は0.03～0.16mg/lで推移し平均0.06mg/lとなっていた。

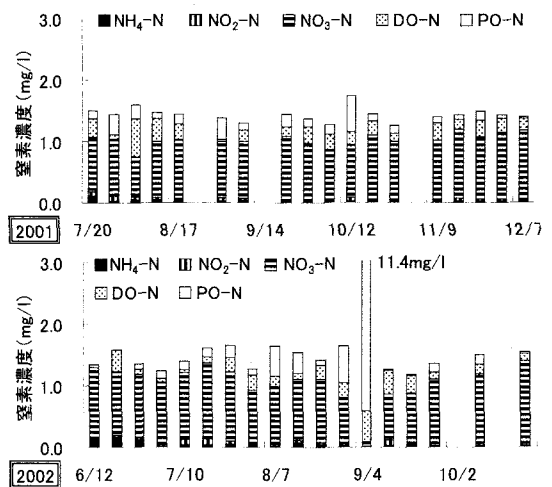


図8 2001年と2002年の窒素濃度：三春ダム

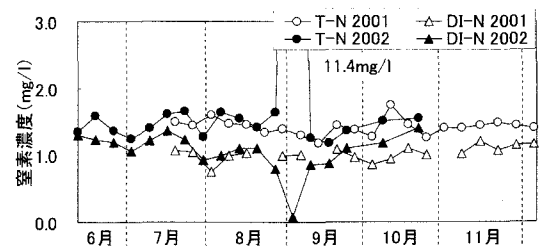


図9 三春ダム窒素濃度の比較

2002年のT-P濃度は0.05～0.61mg/lで推移し平均0.18mg/l、 PO_4^{3-} -P濃度は0.04～0.60mg/lで推移し平均0.15mg/lとなっていた。

平均するとT-Pに占める PO_4^{3-} -Pの割合は2001年が約70%、2002年が約80%と共にT-Pの大部分が PO_4^{3-} -Pであった。T-P、 PO_4^{3-} -P濃度は流量と連動した変動を示したため、降雨時流出する面源負荷が負荷源となっている可能性が高いと考えられる。

2001年と2002年の三春ダム流入河川におけるT-P、 PO_4^{3-} -P濃度の比較を図11に示す。2001年と2002年のT-P、 PO_4^{3-} -P濃度を比較すると、2002年が2001年よりもT-P、 PO_4^{3-} -P濃度が高い値を示すことが多かった。特に8月中旬で高い値を示し、流量増加時であることから降雨時流出負荷の影響と考えられる。しかし同程度の流量でも濃度増加の割合が異なるため、降雨や流量の履歴（先行晴天日数等）の影響が考えられる。

(2) 三春ダムのリン濃度

2001年と2002年の三春ダムにおけるリン濃度の経日変化を図12に示す。2001年のT-P濃度は0.02～0.06mg/lで推移し平均0.03mg/l、 PO_4^{3-} -P濃度は0.00～0.02mg/lで推移し平均0.01mg/lとなっていた。2001年ではT-P、 PO_4^{3-} -Pは共に明確な季節変動が見られなかった。

2002年のT-P濃度は0.03～1.05mg/lで推移し平均0.13mg/l、 PO_4^{3-} -P濃度は0.01～0.07mg/lで推移し平均0.03mg/lとなっていた。2002年ではT-P、 PO_4^{3-} -P濃度は流入水量の増加に伴い高まる傾向が見られ、流入水量が増加した数日後に三春ダム（春田地点）のT-P、 PO_4^{3-} -P濃度が高まった。これは流入水量に伴う流入負荷の増加によるものと考えられる。また、夏季では PO_4^{3-} -P濃度が低くT-P濃度が高くなる傾向が見られた。アオコが発生した9月上旬においてはT-P濃度が1.05mg/lと高濃度を示し、 PO_4^{3-} -P濃度が0.01mg/lと低濃度を示した。これらのことから、植物プランクトンの増殖により PO_4^{3-} -Pが摂取され、 PO_4^{3-} -P濃度が減少し、粒子性有機態リン（PO-P）として植物プランクトンが蓄積した結果、T-P濃度が増加したと考えられる。

2001年と2002年の三春ダムにおけるT-P、 PO_4^{3-}

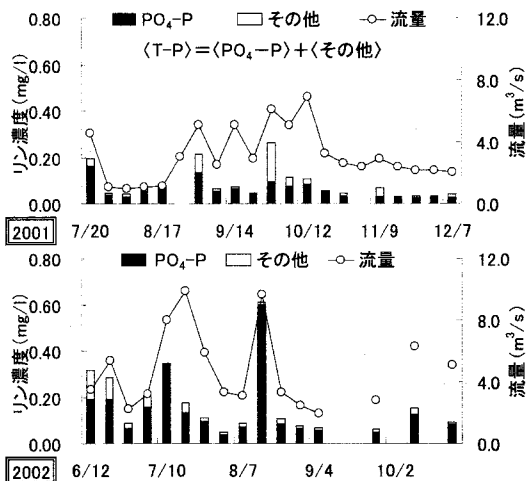


図10 2001年と2002年のリン濃度：流入河川

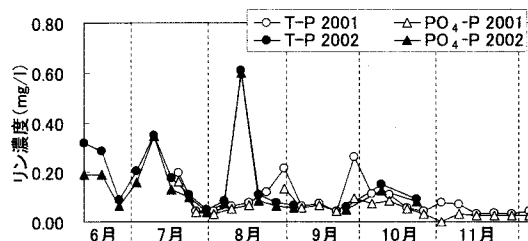


図11 流入河川リン濃度の比較

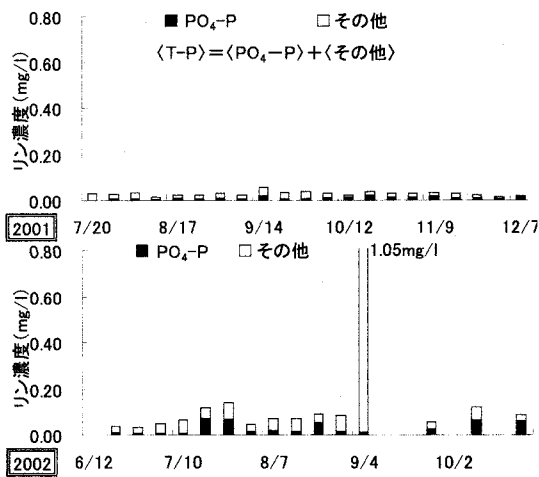


図12 2001年と2002年のリン濃度：三春ダム

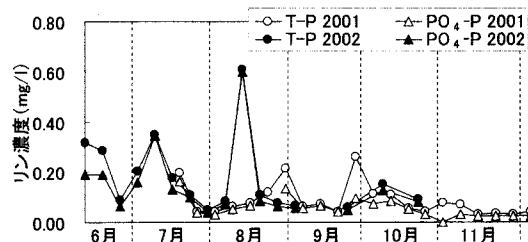


図13 三春ダムリン濃度の比較

-P濃度の比較を図13に示す。2001年と2002年のT-P、 PO_4^{3-} -P濃度を比較すると、2002年9月上旬のアオコ発生時以外では2001年より2002年のT-P、 PO_4^{3-} -P濃度が高いことが特徴的である。このことから2001年よりも2002年のリン濃度の条件が植物プランクトンの増殖に適していたと考えられる。2001年と2002年で顕著なリン濃度の差が生じた原因については後述する「4.8 L-Q式による流入負荷量の推定」で検討する。

4.6 三春ダムにおける汚濁負荷流入特性

(1) 流量と窒素、リン、浮遊物質濃度の関係

流入河川における流量と窒素、リン、SS濃度の関係を図14に示す。なお、冬季の水質変化を把握するために延長した流入河川調査（2001年12月14日～2002年2月15日）のデータが含まれている。T-N濃度は流量 $3\text{m}^3/\text{s}$ 程度で2～3mg/lと高くなる傾向が見られたが、これはT-N濃度と水温に逆相関（相関係数は-0.922）があり冬季の流量が少なかったために生じたものと考えられる。また、I-Nについても同様の傾向が見られたが、これらの傾向は流量に直接影響されているものではないため、流量とT-N、I-N濃度の関連性は低いと考えられる。リン、SS濃度は水温との相関はなく、流量増加時に増加する傾向が見られた。明らかに窒素とリン、SSの流入特性が異なっていることが分かる。このため、降雨に伴う流量増加時には、窒素よりリンやSSの方が急激な負荷量増加が起こると考えられる。

(2) 流量による浮遊物質組成の変化

流入河川の流量とSS組成の関係を図15に示す。SSの窒素含有量はSSに対するPT-N、SSのリン含有量はSSに対するPT-P、SSの有機分率はSSに対する有機態SSから算出した。

降雨初期の流出を除くと、SSの窒素、リン含有量、有機分率は、流量 $5\text{m}^3/\text{s}$ 以上で低下する傾向が見られた。調査日前後の流況から判断すると、流量 $5\text{m}^3/\text{s}$ 以上の場合は殆どが降雨の影響を受けていた（無降雨時2回、降雨時11回）。流量が降雨の影響を受けない場合（流量 $5\text{m}^3/\text{s}$ 未満）は生活排水などの点源負荷に由来する懸濁態窒素、リン、有機物が多く、降雨により流量が増加した場合（流量 $5\text{m}^3/\text{s}$ 以上）は耕地部などの面源負荷に由来する懸濁態窒素、リン、有機物が多くなり、流量に伴いSSの窒素、リン含有量、有機分率が変化したと考えられる。流量が増加するとSSの窒素含有量は2～3mgN/gSS、SSのリン含有量は1～2mgP/gSS、有機分率は約20%に収束して一定値を示しており、面源負荷から流出するSSの窒素、リン含有量、有機分率は同程度であると推測される。しかし、比較的強い降雨の初期流出時では流量増加に伴うSSの窒素、リン含有量の低下が起きなかった。このため、流量や降雨の履歴（先行晴天日数など）によってSS組成が変化すると考えられる。

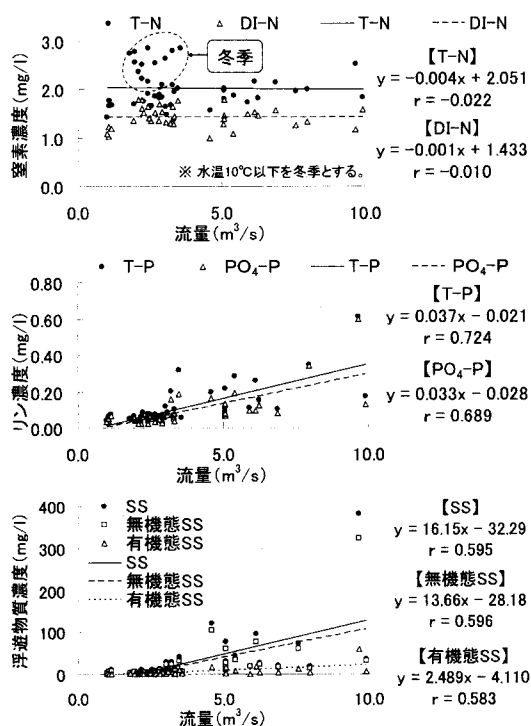


図14 流入河川の流量とN、P、SS濃度の関係

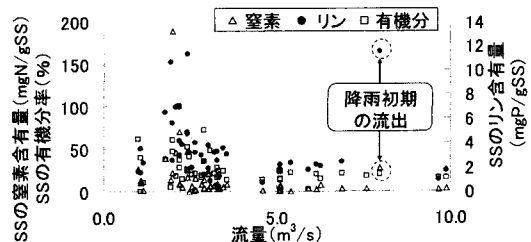


図15 流入河川の流量とSS組成の関係

流入河川の流量とSS粒径を図16に示す。流入河川では流量増加に伴いSSの粒径が大きくなる傾向が見られた。このことから、流量の変化によりSSの組成が変化していることが分かる。しかし年に数回の頻度で起こる $30\text{m}^3/\text{s}$ 規模の出水においてもSSの粒径の約70%が $75\mu\text{m}$ 未満であることから、流入河川におけるSSの大部分は移送されやすい粒径の小さな物質と考えられる。

流入河川における河床堆積物粒径とリン含有量の関係を図17に示す。河床堆積物においては粒径が小さいほどリン含有量が多い傾向が見られた。これは粒径が小さいほど比表面積が広くリンの吸着なども起こりやすくなるためと考えられる。河床堆積物の粒径 $75\mu\text{m}$ 未満ではT-P含有量が 1.63mgP/g 乾燥試料と流量増加時のSSのリン含有量に近い値であった。よって、河床堆積物が巻き上がりSSとなった可能性が考えられる。しかし、河床堆積物における $75\mu\text{m}$ 未満の割合は約20%と少ない。今後は流域土壌調査等により検討を進めたい。

橘ら¹³⁾によると植物プランクトンによる懸濁態リンの利用は溶存態に近い状態で増殖に利用可能とされている。著者らも三春ダム流入河川水を用いて植物プランクトン培養実験を行った結果¹⁴⁾、橘らと同様の傾向を得ている。三春ダム流入河川では流量増加に伴いリン、SS濃度が増加する傾向があるため、微細なSSと共にダム湖に流入するリンを植物プランクトンが利用すると考えられる。流量が増加するとSSの窒素、リン含有量は減少するが、ダム内に流入するT-N、T-P負荷量は増加するため、今後は降雨時に流出する窒素、リンの負荷源把握とその流出機構の解明が必要である。

4.7 三春ダムの流域降水量と流入水量

2001年と2002年の三春ダム流域降水量の比較を図18に示す。2001年と2002年の降水量を比較すると7月の差が大きく、2001年よりも2002年の降水量が著しく多かった。

2001年と2002年の三春ダム流入水量の比較を図19に示す。2001年と2002年の流入水量を比較すると降水量と同様に7月の差が大きく、2002年の流入水量が著しく多かった。流入河川では流量増加に伴いリン濃度が高まる傾向があり、降雨時には流入リン負荷量の著しい増加が懸念される。

4.8 L-Q式による流入負荷量の推定

2001年より2002年の三春ダムでT-P、 PO_4^{3-} -P濃度が高い値を示した原因として流入負荷量の差が考えられる。このことを確認するには、2001年と2002年の流入負荷量を比較する必要がある。しかし、現場調査の結果を用いた流入負荷量(流量と濃度の積)の比較では調査回数が少ないため、調査時以外の負荷量を考慮することができ

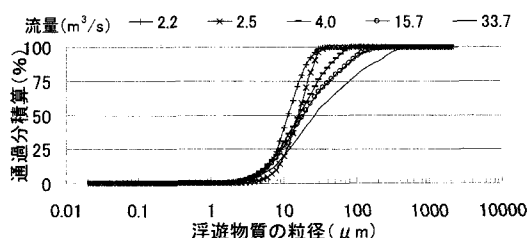


図16 流入河川の流量とSS粒径

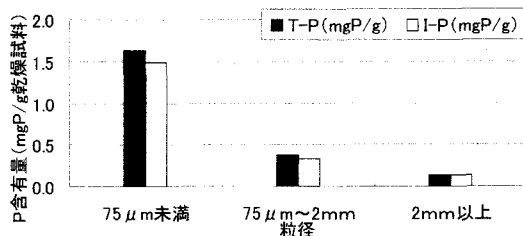


図17 河床堆積物粒径とリン含有量の関係

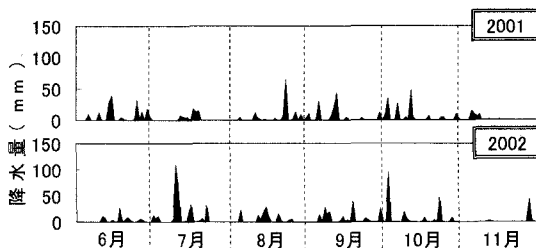


図18 2001年と2002年の降水量の比較

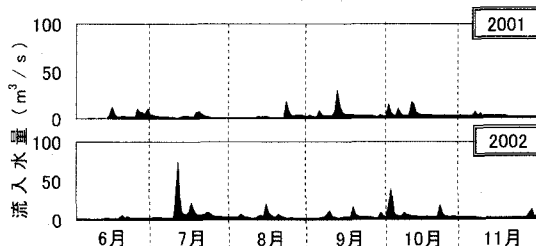


図19 2001年と2002年の流入水量の比較

ない。そこで、流量から負荷量を算出するL-Q式を作成し、毎時観測されている流量に適用し2001年と2002年の流入負荷量を比較する。

(1) L-Q式の作成

L-Q式は適用する流量までの調査データを用いて作成する必要がある。今回、L-Q式により負荷量を推定する流量は最大で約70m³/sであり、本調査では約10m³/sまでのデータしか得られていない。そこで、過去に同一地点で調査した流量約100m³/sまでのL-Q式³⁾と比較し適用範囲の拡大を検討した。その結果、最大でも約20%の差で全体的な傾向は変わらないことが確認された。そこで、本調査の結果を用いて作成したL-Q式を拡大適用し、流入負荷量を推定する。

(2) 2001年と2002年の推定流入負荷量の比較

流量と窒素、リン負荷量の相関係数は全て0.9以上で、強い相関が見られている。そこで、作成したL-Q式を2001年と2002年の6月～11月の日平均流量に適用し、それらを月毎に合計し2001年と2002年の各負荷量を比較する。2001年と2002年の推定流入窒素、リン負荷量の比較を図20に示す。2001年と2002年の推定窒素負荷量を比較すると、7月のT-N、I-N負荷量に差が見られ、T-N、I-N共に2002年が2001年の約4倍となっていた。2001年と2002年の推定リン負荷量を比較すると、7月のT-P、PO₄³⁻-P負荷量に差が見られ、T-Pでは2002年が2001年の約27倍、PO₄³⁻-Pでは2002年が2001年の約24倍となっていた。

2001年と2002年の推定窒素、リン負荷量は7月に差が見られ、特にリン負荷量の差が著しかった。三春ダムでは流入汚濁負荷の沈降除去を目的とした前ダムが設置されており、平水時ではT-Nは10%、T-Pが17%、増水時ではT-N、T-Pは共に28%程度捕捉される³⁾と考えられる。平水時よりも増水時に前ダムの負荷捕捉率が高いが、流量増加時には流入負荷も多くなるため、捕捉されずに本ダムに流入する負荷は多くなる。また、一般に夏季ではダム表層より流入河川の水温が低い中層に流入するが、降雨後の三春ダム表層でリン濃度の増加が確認されているため、流入河川水はダム中層だけではなく表層にも流入していると推測される。よって、流入負荷量の差が2001年より2002年の三春ダムで高いT-P、PO₄³⁻-P濃度を示した原因と考えられる。今後は三春ダムの水深方向の水質を調査し検討を進めたい。

閉鎖性水域の富栄養化を考える時、外部から流入する負荷と共に底泥として蓄積している負荷からの溶出（内部負荷）を考慮する必要がある。内部負荷が多くなると流入負荷を削減しても富栄養化が改善されない場合がある。底泥からの栄養塩溶出はDOや水温に影響を受けるが、三春ダム底泥付近でこれらの条件が1年間で著しく変化するとは考えられない。よって、三春ダムでは2001年と2002年の内部負荷に大きな差はなく、2001年と2002年の植物プランクトン増殖の差は内部負荷以外に起因している可能性が高いと考えられる。三春ダムの内部負荷と外部負荷の関係は時と共に移り変わると考えられるため、今後は三春ダムにおける水深方向水質の季節変動や底泥の溶出特性等を把握し、三春ダムの内部負荷を定量化して検討する必要がある。

4.9 植物プランクトンの現存量と種類

調査期間中の三春ダム（春田地点）においては流入水量に伴った有機態SS濃度の変動は見られず、有機態SSが内部生産に由来すると考えられる。植物プランクトンは生産者であるため、消費者（動物プランクトン）や分解者（バクテリア）の消長の起点であると考えられる。即ち、内部生産される有機態SSは植物プランクトンの影響を受けており、植物プランクトンの消長が

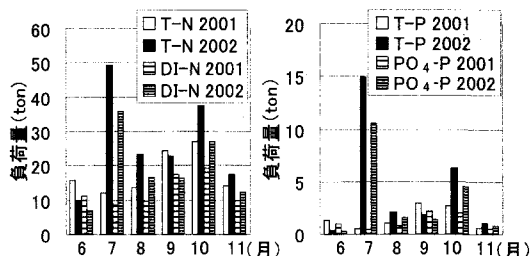


図20 2001年と2002年の流入負荷量の比較

有機態SSの変動に与える影響は動物プランクトンやバクテリアよりも大きいと考えられる。そこで、植物プランクトン量の指標として有機態SSを用いた。

2001年と2002年の三春ダムにおける有機態SS濃度の比較を図21に示す。2001年では最大でも9月下旬の5.0mg/lであるが、2002年では9月上旬のアオコ発生時に最大値150mg/lに達した。他の調査日についても概ね2002年で高い値を示した。この結果より2001年より2002年において三春ダムの植物プランクトンが多かったことが確認された。

SS濃度の環境基準¹⁵⁾は水道水源とする湖沼では5mg/l以下とされている。2002年の三春ダムでは夏季に植物プランクトンの増加により有機態SSのみでSSの環境基準を超過することがあった。

2001年の植物プランクトン種の同定は9月から実施した。2001年9月上旬では藍藻類 *Microcystis* sp. が優占し、一部で藍藻類 *Phormidium* sp. が藍藻類 *Microcystis* sp. の寒天質被膜中に散在していた。9月中旬になると珪藻類 *Melosira* sp. が現れ始め、10月下旬まで藍藻類 *Microcystis* sp. と珪藻類 *Melosira* sp. が見られた。また、原生動物である繊毛虫 *Vorticellidae* sp. が藍藻類 *Microcystis* sp. に付着している群体も存在していた。11月上旬～11月下旬に藍藻類 *Microcystis* sp. が消え珪藻類 *Melosira* sp. が優占種となった。珪藻類 *Melosira* sp. 以外の珪藻類も若干だが見られた。

2002年では7月上旬に藍藻類 *Microcystis* sp. の発生を確認した。7月下旬に減少したが8月上旬には薄いマット状の藍藻類 *Microcystis* sp. のアオコが発生し、9月上旬には春田付近に広がる厚いマット状の藍藻類 *Microcystis* sp. のアオコを確認した。その後は減少し、10月下旬には植物プランクトンの存在が確認されない程まで減少した。調査期間中の優占種は概ね藍藻類 *Microcystis* sp. であり、他の種は珪藻類 *Melosira* sp. が少し見られた程度で緑藻類、渦鞭毛藻類は殆ど見られなかった。

2002年では植物プランクトン濃度の調査を実施した。調査期間中の植物プランクトン濃度は $10^3 \sim 10^6$ cells/ml で推移し、夏季では $10^4 \sim 10^5$ cells/ml 程度であった。アオコが発生した9月上旬では 2.2×10^6 cells/ml と高濃度を示した。

4.10 植物プランクトンの活性

湖沼等において植物プランクトンの炭酸同化によりpHがアルカリ側に変化することが知られている。また、植物プランクトンの光合成によりDOが増加することが知られている。植物プランクトン活性が高い場合、pHとDOは昼間に高く夜間に低いという日周期がある。しかし今回の調査はほぼ同時刻に行ったのでpHとDOの日変動は考慮せず季節変動について検討した。

2001年と2002年の三春ダムにおけるpHの比較を図22に示す。2001年のpHは6.8～7.8程度で推移し顕著なpHの変化は見られなかった。2002年のpHは7.3～9.6程度で推移し、7月下旬～8月上旬、9月上旬でpHが高かった。2001年と2002年を比較すると、2001年ではpHが8以上にならなかったが、2002年の夏季ではpHが8以上で推移しpHが9以上になることがあり、2001年よりも2002

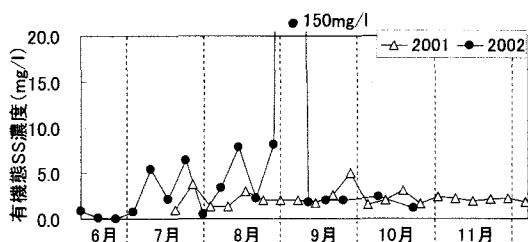


図21 2001年と2002年の有機態SSの比較

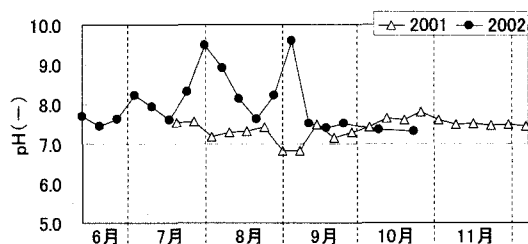


図22 2001年と2002年のpHの比較

年の植物プランクトン活性が高かったと推測される。pHの環境基準¹⁵⁾は水道水源とする湖沼では6.5以上8.5以下とされており2001年では満たしていた。しかし2002年では夏季に植物プランクトン増殖に伴い高まり基準値(pH 8.5)を一時的ではあるが超過した。

2001年と2002年の三春ダムにおけるDO飽和度の比較を図23に示す。2001年のDO濃度は6.3～

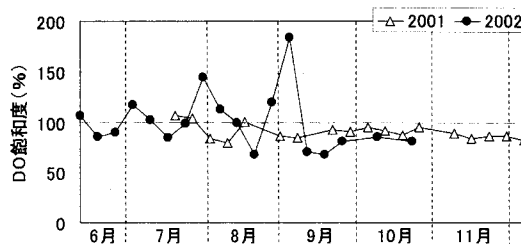


図23 2001年と2002年のDO飽和度の比較

9.4mg/l、DO飽和度は79～106%で推移し、100%を超えた日は少なく、植物プランクトンによるDOの過飽和現象は殆ど見られなかった。2002年のDO濃度は6.2～16.8mg/l、DO飽和度は64～211%で推移し、DOが過飽和となる日が多かった。特に7月下旬～8月上旬、9月上旬で高く、この時期に植物プランクトン活性が高かったと推測される。2001年と2002年を比較すると、2001年ではDO飽和度が90%程度で推移し変動が殆どないが、2002年では夏季の変動が大きくDOの過飽和、DO飽和度の低下が起きたことが分かる。2001年では植物プランクトンがあまり増殖しなかったため、DO変動は少なく、2002年では2001年とは対照的に植物プランクトンの増殖に伴うDOの過飽和と有機物の増加による有機物分解時のDOの消費が多くなったと推測される。以上の結果から、2001年よりも2002年の植物プランクトン活性が高かったと推測される。また、植物プランクトンの増殖に伴う有機物の増加による夜間のDO消費が懸念された。DO濃度の環境基準¹⁵⁾は水道水源とする湖沼では7.5mg/l以上とされている。2001年と2002年は共に基準値を概ね満たしていたが夏季に若干だが満たさないことがあった。

5 まとめ

三春ダムでは2001年にアオコ発生が見られず、2002年にアオコの発生が見られている。本研究は2001年と2002年で植物プランクトンの増殖因子を比較することにより、三春ダムにおける植物プランクトン増殖因子の把握と増殖特性の検討を行った。また、植物プランクトン現存量と活性を定量的に示し、2001年と2002年の三春ダムにおけるアオコ発生の相違を明確化した。さらに、汚濁負荷流入特性について明らかにし、三春ダムの水質特性と植物プランクトンの増殖特性への影響を検討した。以下に結果を示す。

- (1) 三春ダムでは2001年より2002年の水温、日照時間、リン濃度が植物プランクトン増殖に適していた。特に2002年のリン濃度が著しく高く、これが2002年におけるアオコ発生の支配因子と考えられる。
- (2) 三春ダムでは2001年より2002年の有機態SS濃度、pH、DO飽和度が高く、植物プランクトン増殖が活発であった。2002年9月上旬のアオコ発生時、有機態SS濃度は150mg/l、植物プランクトン濃度は 2.2×10^6 cells/ml、pHは9.4、DO飽和度は211%であり、植物プランクトンの優占種は藍藻類*Microcystis* sp.であった。また、アオコの発生に伴いSS、pH、DOの環境基準を満たさないことがあった。
- (3) 三春ダム流入河川では流量増加時にはSSの窒素、リン含有量は減少するが、窒素、リン濃度は減少しないため、負荷量は増加することが分かった。また、降雨によりSS組成が変化することから降雨の有無による負荷源の違いが示唆された。
- (4) 2001年と2002年の三春ダム流域降水量と流入水量は共に7月の差が大きく、2002年が著しく多かった。この影響により、2001年と2002年の推定窒素、リン負荷量は7月に差があり、特にリン負荷量の差が著しかった。この流入リン負荷量の差が2001年より2002年の三春ダムで

高いT-P、 PO_4^{3-} -P濃度を示した原因と考えられる。

- (5) 三春ダムのリン濃度は流入リン負荷量に左右され、流入リン負荷量は降雨に伴う流量変動に制限されている。即ち、降雨に伴うリン負荷流入が三春ダムのリン濃度を増加させ、植物プランクトン増殖を促進すると考えられる。この降雨に伴う流入リン負荷の変動が三春ダムにおける植物プランクトンの制限因子と予測される。今後は三春ダムの水深方向の水質を調査し、負荷の流入する水深や内部負荷に関する検討が必要と考えられる。

三春ダムにおける植物プランクトンの増殖は降雨に伴う流入負荷の増加に起因するが、降雨を操作し植物プランクトンの増殖を抑制することは不可能である。三春ダムは人為的汚濁負荷の流入により富栄養化しているが、外部負荷が少ない2001年ではアオコが発生しなかった。よって三春ダムでは流入栄養塩負荷（特に降雨時流入負荷）の削減により富栄養化抑制が可能であると考えられる。

謝辞

本研究は日本大学工学部学術フロンティア事業の助成を受け実施したものである。また、国土交通省東北地方整備局三春ダム管理所及び社団法人東北建設協会の御協力を頂いた。ここに記し関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 環境省編：平成15年版 環境白書、2003.
- 2) 相馬洋子：富栄養化のメカニズムに関する基礎的研究、東北大学工学部修士学位論文、1991.
- 3) 佐藤賢一ほか：三春ダム湖の富栄養化と前貯水池の流入負荷捕捉特性、環境工学研究論文集、第37巻、pp.201-207、2000.
- 4) 国土交通省東北地方整備局三春ダム管理所：三春ダムガイドブック.
- 5) 福島県合同庁舎県中農林事務所：福島県畜産統計、1999.
- 6) 福島県下水道課：公共下水道施設状況、2002.
- 7) 社団法人 水環境学会編：日本の水環境2東北編、技法堂出版、pp.123-128、1999.
- 8) 建設省河川局：河川水質試験方法（案）1997年度－試験方法編－：技法堂出版社、1997.
- 9) 芦田賢一ほか：底質試料中の全リンの分析方法について、兵庫県公害研究所研究報告、No8、pp52-55、1994.
- 10) 細見正明ほか：湖沼底泥からのリン溶出に関する研究、水質汚濁研究、第2巻、pp157-162、1979.
- 11) 矢木修身ほか：Microcystisの増殖特性、国立公害研究所研究報告、第25号、pp.47-58、1981.
- 12) 井上隆信ほか：河床付着生物膜現存量の周期変化と降雨による剥離量の評価、水環境学会誌、16（7）、507-517、1993.
- 13) 橘治国ほか：藻類増殖能力の推定に関する一考察（II）－自然河川水中の懸濁態態栄養塩による藻類増殖効果－、衛生工学研究論文集、第22巻、pp151-161、1986
- 14) 手塚公裕ほか：藻類存在水域における浮遊物質からのリン溶出機構について、第38回 日本水環境学会年会講演集、405、2004.
- 15) 環境省：環境基本法に基づく水質汚濁にかかわる環境基準