

渡良瀬貯水池における初夏の栄養塩回帰に ついての現地観測と解析

AN ANALYSIS OF EARLY SUMMER NUTRIENT MINERALIZATION IN WATARASE RESERVOIR THROUGH FIELD MEASUREMENT AND NUMERICAL SIMULATION

天野 邦彦¹・李 建華²・鈴木 宏幸³・野本 岳志⁴
Kunihiko AMANO, Jianhua LI, Hiroyuki SUZUKI and Takeshi NOMOTO

¹正会員 工博 (独) 土木研究所 河川生態チーム 主任研究員 (〒305-8516 つくば市南原1-6)

²理博 (独) 土木研究所 水質チーム 専門研究員 (同上)

³正会員 国土技術政策総合研究所 河川環境研究室 研究員 (〒305-0804 つくば市旭一番地)

⁴正会員 西松建設(株) 技術研究所 環境保全グループ 主任 (〒242-8520 大和市下鶴間2570-4)

The concentration of phosphate and ammonium nitrogen increases in early to middle June in Watarase reservoir. Although the concentration of these inorganic components increases, both total phosphorus and nitrogen do not increase. Since total concentration does not increase, the augmentation may not be a simple result of nutrient release from bottom sediments. We have conducted a series of intensive field measurement of water quality change in Watarase reservoir and numerical simulation to analyze the mass balance quantitatively. Simulation results hypothesizing that phytoplankton was grazed by zooplankton and organic nutrients were mineralized rapidly agreed very well with the observed results. This shows the importance of the comparison of intensive field data and comprehensive ecological model.

Key Words : clear water phase, shallow reservoir, ecological model, and eutrophication

1. はじめに

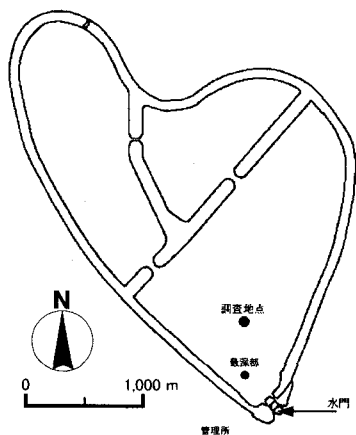
利根川水系渡良瀬貯水池においては、例年6月初旬から中旬に河川水の流入がない場合でも無機態のリン酸態リン、アンモニア態窒素濃度が急上昇する現象が観測される。本貯水池では、水位低下時に底泥からの栄養塩回帰によると考えられる全リン、全窒素濃度の上昇を伴う、リン酸態リンやアンモニア態窒素濃度の上昇が見られるが¹⁾、6月初旬から中旬にかけては例年水位低下しておらず、さらに全窒素、全リン濃度は上昇していないことから、水位低下時に顕著な底泥からの回帰とは違った原因でこれらの無機態栄養塩濃度が急上昇している可能性がある。

本貯水池に流入する河川水は、無機態の栄養塩としてはリン酸態リン、硝酸態窒素濃度が高いため、河川水が流入した直後はリン酸態リンと硝酸態窒素濃度が共に上昇する。本貯水池における水質変化特性として、河川水流入後に水位低下がない場合は、植物プランクトンによる摂取により無機態栄養塩濃度が徐々に低下

し、さらに植物プランクトンの死滅等により懸濁態の栄養塩が底泥に沈降して全リン、全窒素濃度共に低下するというパターンを示すことが多い¹⁾。これに対して6月初旬から中旬にかけて観測される現象は、リン酸態リン濃度と共にアンモニア態窒素が急上昇するという特異な変化を示している。アンモニア態窒素濃度が上昇していることから、一旦生態系に取り込まれた栄養塩が無機化されて供給されているものと考えられるが、当該期間中は、水位が比較的高く、底泥への物理的な攪乱もあまり大きくなく、また底層の嫌気化も起こっていないため、懸濁物が底泥に沈降した後に回帰しているのかどうかは不明であった。そこで本研究では、6月初旬から中旬にかけて例年観測されるリン酸態リンとアンモニア態窒素濃度上昇の機構解明を目的として、この期間中に集中的に現地観測調査を行い、詳細な水質変化を把握すると共に、水質シミュレーションを行った。

2. 研究方法

渡良瀬貯水池に設置した調査地点（図—1）において貯水池水を採取して水質変化を調査すると共に、水質解析モデルを用いて測定された水質変化の要因について検討した。渡良瀬貯水池は、浅い貯水池で、水門付近に約1m深くなった部分が存在するが、ほぼ全域にわたり平面的で水深変化は少ない。



図—1 渡良瀬貯水池平面図及び調査地点

(1) 現地調査の概要

a) 自動採水装置を用いた水質調査

平成13年5月30日から7月30日にかけて渡良瀬貯水池において自動採水装置（6712サンプラー、ISCO社製）を用いて貯水池水を採取した。5月30日午後12時から6月29日午前10時までは2時間毎に1日12サンプルを採取し、毎日回収して速やかに実験室に持ち帰り水質分析に供した。6月29日午後2時から12時間毎に採水し、3～4日毎に週2回回収し、実験室に持ち帰り速やかに水質分析に供した。自動採水装置は、24本のまでの採水が可能であるが、採水したサンプルの変質を防ぐ目的で装置内の温度を低く保つために採水容器1本おきに保冷材を充填した。

採取水深は、調査地点における全水深の中間となるよう、調査期間中サンプル回収の度に調整した。調査地点における水深は貯水池の平均的な水深である。また、サンプル回収時には、調査地点において表層（水深0.5m）、中層（自動採水と同水深）、底層（貯水池底上0.5m）、及び貯水池最深部の底層（最深部底上0.5m）の4地点においてバンドーン採水器を用いて採水を行い、自動採水装置により採水されたサンプル同様分析に供した。

サンプルについては、全窒素(T-N)、硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)、亜硝酸態窒素($\text{NO}_2\text{-N}$)、アンモニア態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)、全リン(T-P)、リン酸態リン($\text{PO}_4\text{-P}$)、懸濁物質(SS)、揮発性懸濁物質(VSS)、クロロフィル a (Chl-a)について分析を行った。

$\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ についてはオートアナライザー（AACS-II, BRAN + LUEBBE社製）を用い

て分析を行った。T-N、T-Pについては、5月30日から6月30日のサンプルに関しては、ペルオキシ2硫酸カリウム分解法で前処理し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ としてオートアナライザー（前出）で分析を行い、分解試薬の添加量について補正して測定値とした。また、7月1日以降のサンプルについては、全窒素・全リン専用オートアナライザー（T-N, T-P Auto Analyzer, BRAN+LUEBBE社製）を用いて分析を行った。

SSについては、予め420℃で3時間加熱し有機物を燃焼させた後、質量を求めておいたガラス繊維ろ紙（GF/F, Whatman社製、孔径0.7μm）でサンプルを100～200mlろ過し、ろ紙を110℃で2時間乾燥、冷却後、天秤を使用して±0.01mgの精度で質量測定し、残留物の質量を求めて測定した。VSSについては、同様のろ紙を600℃で30分強熱して、残留物の質量を求めて測定した。

Chl-aに関しては、予め酸で洗浄したガラス繊維ろ紙（GF/F, Whatman社製、孔径0.7μm）でろ過してろ紙上の色素をエタノールで抽出し抽出液について分光光度計で吸光度を測定して求めた。

b) 水質鉛直構造調査

上記調査期間中、小型メモリー水温計（MDS-T, アレック電子社製）を係留したサーミスタチェーンを設置し、50cm毎の鉛直水温分布を10分間の測定間隔で計測し、貯水池の混合状況について観測を行った。また、サンプル回収時に鉛直方向の水温、濁度、溶存酸素(DO)、pH、電気伝導度(EC)について多項目水質計（Datasonde4, Hydrolab社製）を用いてほぼ50cm毎に計測した。

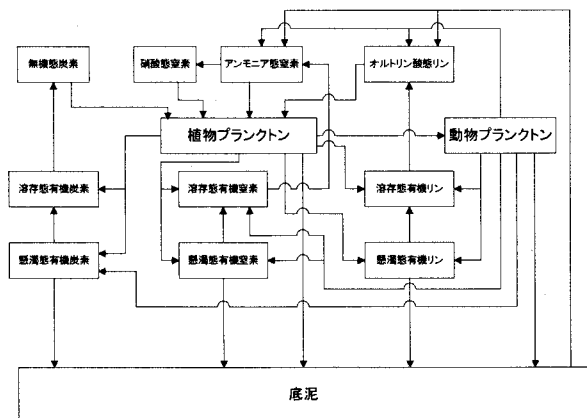
(2) 水質解析計算

調査期間中の水質変化の再現計算を数値シミュレーションモデルを用いて行った。使用したシミュレーションモデルは3次元の流れモデル²⁾にCерco and Cole³⁾の富栄養化モデルを改良した水質変化モデルを結合したものを新たに開発した。平成13年4月17日に測定された定期観測時の水質を初期値とし、平成13年7月31日まで計算を行った。計算入力条件として必要な気象条件については、風向・風速は30分毎に貯水池に設置されたブイ上で計測されている測定値を用い、気温、湿度、日射量については1時間毎に貯水池に隣接した管理所における観測値を用い、雲量に関しては、高崎気象観測所で観測されたアメダスデータを用いた。流入水量と放流量については、管理所で記録されたデータを使用した。また、利根川上流工事事務所により行われた動植物プランクトンに関する調査結果を参考にパラメータを設定した。以下にモデルの概要を示す。

(3) 水質モデルの概要

水質モデルについては、植物プランクトンの消長を表すために、図—2に示すように植物プランクトン、

動物プランクトン、炭素、窒素、リンの動態をモデル化している。基本モデルの詳細については、文献³⁾を参照のこと。基本としたモデルからの改良点としては、動物プランクトンの項を追加したこと、植物プランクトンが栄養塩を摂取する際の窒素と炭素の比について定数としていたものをリンと炭素比同様に变化するようにモデル化したこと、底泥からの栄養塩回帰量について、底泥表面に作用するせん断応力の関数として表したことが挙げられる。ただし、現段階では底泥における物質の変化は考慮せず、沈降した懸濁物は底泥に捕捉され、リン酸態リン及びアンモニア態窒素として回帰するものとしている。これら改良点と現象再現のために行った操作に関しては、結果の項で述べる。



図—2 水質モデル概念図

3. 研究結果

(1) 現地調査結果

調査開始から6月11日までは貯水池と河川との間での水の交換はなかった。6月11日以降は、6月29日まで約10(m³/s)で放流が行われ、水深は3mにまで低下した。その後も数度の放流が行われ、7月17日には水深が2mにまで低下した。7月18日から20日までは約20(m³/s)で取水があり、その後は取水、放流が繰り返された(図—3 (1))。

a) 窒素

図—3 (2) に調査期間中の窒素各態の濃度変化を示す。第1回目の採水を行った5月29日には0.039(mg/l)と非常に低いレベルであったNH₄-Nが、計測開始直後の5月30日から急速に増加し、6月8日には0.35(mg/l)と最大値を示した。その後、NH₄-N濃度は急激に低下して6月13日にはほとんど検出されなくなった。このNH₄-N濃度減少に相応するNO₂-N濃度が同時に上昇しており、硝化が起こっていることを示している。NO₂-NはNH₄-Nが消滅した6月13日に最大値となるが、その2日後の6月15日からは急速に濃度が低下し、1日で消滅して

いる。この消滅までの1日の間に今度はNO₂-N濃度減少分に相当する濃度分NO₃-N濃度が上昇しており、さらに硝化が進んだことが示されている。6月16日以降は、無機態窒素要素としてはNO₃-Nのみが検出される状況が7月8日まで続いた。この間、NO₃-Nは徐々に低下し、7月8日には無機態窒素が検出されなくなった。この後は、7月18日に河川水の取水が行われるまで、無機態窒素は検出されない状態が続いた。7月18日から7月20日までの河川水の取水に伴い、NO₃-Nを主体として窒素濃度が急増する。7月18日から7月26日にかけては、河川水の流入と共に窒素濃度が上昇し、取水の停止に伴い濃度が低下するという変化を示した。

b) リン

図—3 (3) にリンに関する濃度変化を示す。第1回目の採水を行った5月29日には検出されなかったPO₄-Pが5月31日から急激に濃度上昇し、6月6日から6月9日にかけて0.032(mg/l)の最大値を示した。それ以降は、徐々に濃度が低下したが、6月14日から15日にかけては一旦減少傾向が止まり、若干の増加を示した後、さらに低下し6月19日には検出されなくなった。この間、T-Pは、増減を繰り返しながらも漸減している。

PO₄-Pが消滅した6月19日以降、PO₄-Pは7月9日まで検出されなかったが、7月9日以降、徐々に増加し、7月18日の河川水の取水に伴い、急激に増加した。その後は急激に減少後、漸減した。6月19日以降、T-Pは当初同レベルで推移したものの、6月29日以降は変動しながら徐々に増加傾向を示した。さらにPO₄-Pが増加し始めた7月9日以降は、7月18日まで増加速度を増した。7月18日の河川水取水後は、一旦急激に増加したが、その後急速に低下し、7月21日以降は、ほぼ同様のレベルで推移した。

c) クロロフィル a

Chl-aの変化を図—3 (4) に示す。調査開始時に30(μg/l)程度であったが、減少し続けて6月9日には5(μg/l)程度となり、本貯水池においては極めて低い値を示した。この最低値を示した後は、無機態窒素が枯渇する7月8日まで徐々に増加した。その後は変動幅を大きくして推移するが、河川水の流入があった7月18日以降は、一旦希釈効果により減少するが、窒素、リン共に豊富でかつ水温が高い好条件を利用して、植物プランクトンが急速に増殖したと考えられ、7月24日までに約170(μg/l)という高濃度を示すようになる。その後は100(μg/l)程度に低下し、そのまま推移した。

d) SS

SSについては、調査開始から一旦上昇した後、6月中は風を伴う降雨のあった6月14日に再度上昇した以外は、減少傾向にあった。水深が3m以下で推移した7月中は水深の低下と共に底泥の巻き上げが激しくなったと考えられるSS濃度の上昇が見られた。河川水の取水後は、水深の上昇により、SS濃度は再度低下した。

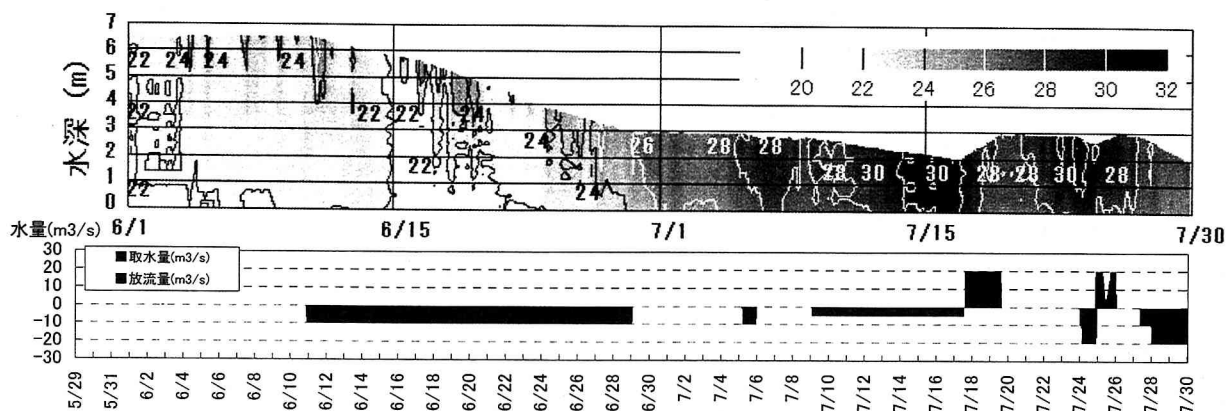


図-3(1) 貯水池水深、水温変化及び運用図(取水量は正で、放流量は負で表している)

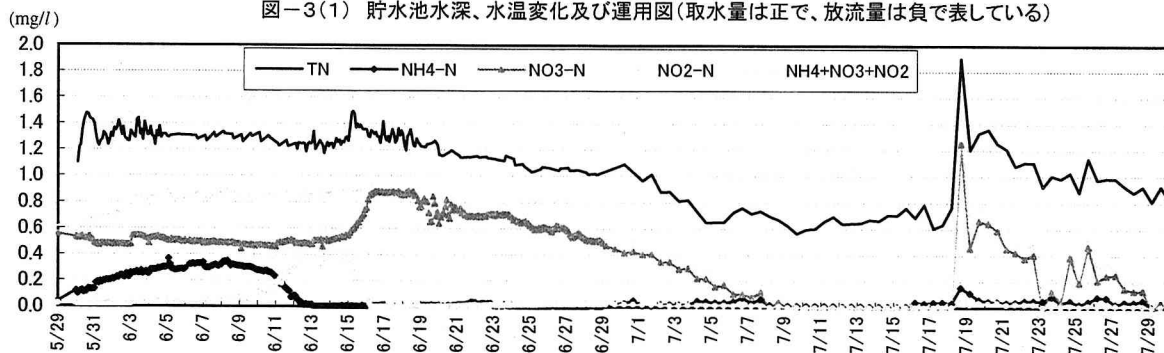


図-3(2) 窒素各態の濃度変化

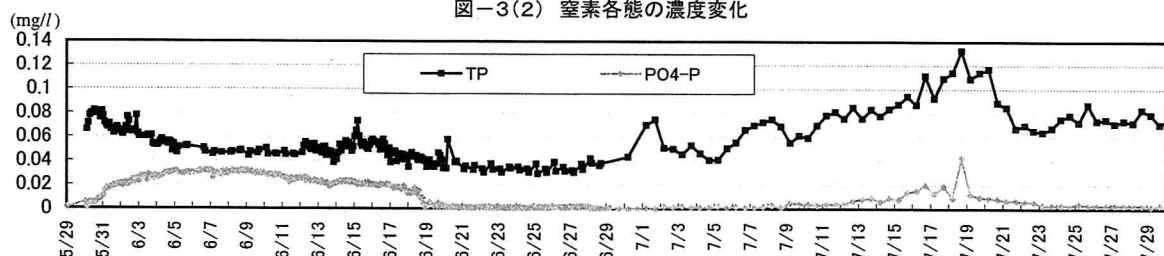


図-3(3) リン各態の濃度変化

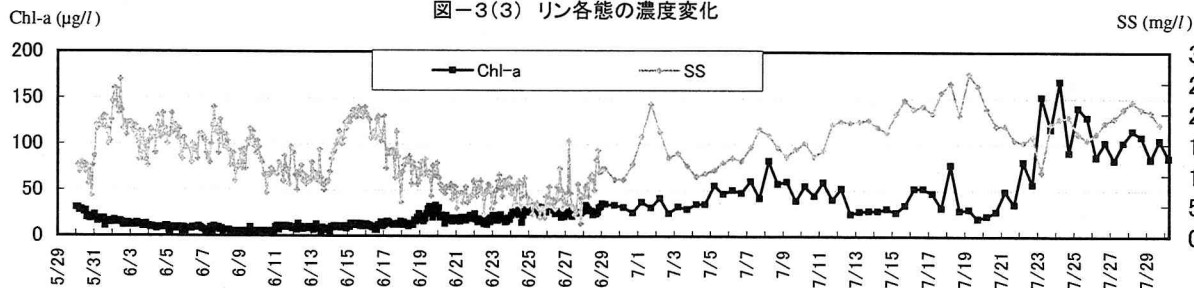


図-3(4) クロロフィル-*a*とSS濃度変化

(2) 水質シミュレーション

水質シミュレーションについては、現地調査から得られた結果を基に、種々の仮説を立て、これら仮説に基づいた計算を行い、現象を再現することが可能かどうかについて調べた。以下に示すモデルによる検証結果を得るために最終的に決定した仮説は次に示す通りである。

a) 植物プランクトンの集中的被食

現地観測結果からは、調査開始直後からChl-*a*濃度が急激に減少したことが示されている。この原因としては、動物プランクトンによる補食圧の急上昇が仮説として考えられる。現地における動物プランクトン数の

定期調査結果を見ると、大型の鰓脚（ミジンコ）類、橈脚（ケンミジンコ）類の数が、調査開始直後に非常に多くなっている（測定された鰓脚類、橈脚類個体数を総和すると、4月17日に0だったものが、5月8日には100、調査開始直後の6月5日には490、その後7月3日には220（個体/l）であった。）。現モデルでは、動物プランクトンによる植物プランクトンの補食速度が植物プランクトン量のみに従属する形になっているので、この現象をモデル上で再現するために、5月23日から6月10日までの間に限り補食速度を通常の2倍に設定した。モデル式中では、以下の通り示される。植物プランクトンの炭素量を $P_C(\text{mg C/l})$ とすると、 P_C の時間変化

を次式で表しているが、このうち被食速度を表す係数 BPR について、同定計算により $0.43(1/d)$ とした。

$$\frac{dP_c}{dt} = [P_m \cdot f(T) \cdot f(I) \cdot f(N) - BMr \cdot e^{KT_{bmr}(T - T_{opt})} - BPR \cdot e^{KT_{bpr}(T - T_{opt})} - S_{vpc} \cdot \frac{d}{dz}] P_c \quad (1)$$

ここで、 P_m は最適環境下での増殖速度 ($1/d$)、 $f(T)$ は水温制限関数、 $f(I)$ は光制限関数、 $f(N)$ は栄養塩制限関数、 BMr は最適水温時の呼吸速度 ($1/d$)、 e は自然対数、 KT_{bmr} は呼吸に係わる水温係数 ($^{\circ}C$)、 T は水温 ($^{\circ}C$)、 T_{opt} は最適水温 ($^{\circ}C$)、 BPR は最適水温時の枯死 (被食) 速度 ($1/d$)、 KT_{bpr} は枯死に係わる水温係数 ($^{\circ}C$)、 S_{vpc} は植物プランクトンの沈降速度 (m/d) である。

b) 動物プランクトンの排泄

調査開始直後からの急激なリン酸態リンとアンモニア態窒素の増加については、補食されて失われた植物プランクトン態の有機リン及び窒素が無機化されたものと考えられる。この状況を再現するために動物プランクトンによる栄養塩の無機化について、分解速度を増加させた。また、分解速度の増加を行った期間は、5月31日から6月15日である。動物プランクトンによる炭素、窒素、リン動態への寄与は、植物プランクトン態のものを補食した後に懸濁態有機物、溶存態有機物、無機態の3種類に分けて排泄するとしてモデル化した。ここでは簡単のために排泄物は懸濁態有機物と無機態への分解のみとした。動物プランクトン態の有機物の変化については、すべて式(1)の大括弧内の第2、3頁と同型の式により表し、係数の値は同定計算により $0.7(1/d)$ とした。さらに、炭素と窒素については、このうちの15%が無機態へ分解され、85%が懸濁態として排泄されるとし、リンについては、45%が無機態へ分解され、55%が懸濁態として排泄されると同定計算により設定した。

c) 硝化速度

実測値に見られたアンモニア態窒素から亜硝酸態、硝酸態への硝化については、次式で硝化速度を計算したが、6月10日から12日の間については、同定計算により NTM を $1.05(1/d)$ とした。

$$NT = \frac{DO}{KH_{out} + DO} \cdot \frac{NH_4}{KH_{nit} + NH_4} \cdot NTM \cdot f(T) \quad (2)$$

ここで、 KH_{out} は硝化に係わる溶存酸素量の半飽和定数 (mgO_2/l)、 KH_{nit} は硝化に係わるアンモニア態窒素の半飽和定数 (mgN/l)、 NTM は最適水温時の硝化速度 ($1/d$)、 $f(T)$ は水温制限関数、 DO は溶存酸素濃度 (mgO_2/l)、 NH_4 はアンモニア態窒素濃度 (mgN/l) である。

d) シミュレーションによる検証結果

クロロフィル a 、窒素、リンについての再現計算結果を図-4に示す。植物プランクトンが動物プランクトンにより急速に補食を受け、その後、無機態として水柱に回帰すると仮定することで、6月初旬に見ら

れたクロロフィル a の急激な減少とそれに伴うアンモニア態窒素とリン酸態リンの増加を再現することが可能となった。また、アンモニア態窒素の硝化、植物プランクトンの摂取による硝酸態窒素の枯渇のタイミングについても良好な一致を見せている。リンについても6月初旬のリン酸の上昇、さらに7月に入ってから底泥からの回帰、また、窒素が枯渇した期間は、植物プランクトンの摂取が制限されるために底泥から回帰したリン酸態リン濃度が上昇するといった現地観測で得られた変化特性が良好に再現される結果となった。

図-5には河川水流入時の底層におけるリン酸リン濃度の平面分布変化を示す。水門から流入した高濃度の水塊が平面的に広がり希釈される様子が認められる。河川水流入時に、リン酸態リン、硝酸態窒素濃度が急上昇した後の濃度低下が、6月初旬の低下速度に比べて非常に急速だったことは、移流・拡散によるものであったことが分かる。

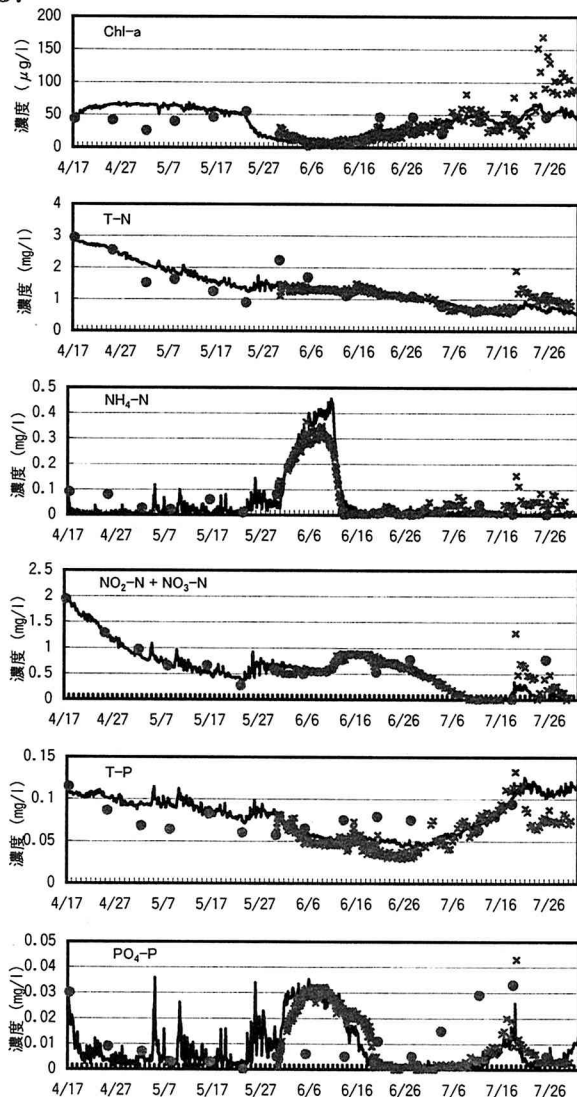
4. 考察とまとめ

現地における集中観測とシミュレーション計算による検証結果から、6月初旬の無機態栄養塩の回帰は底泥からのものではなく、植物プランクトンが急速に補食されて、さらに非常に速い速度で無機化された結果である可能性が高い。そうであれば、これは、Lampert⁴⁾ が *clear water phase* として報告している現象であったと考えられる。

植物プランクトンが補食により減少した後、急速に無機態栄養塩濃度が上昇した理由としては、動物プランクトンの排泄物や食べかすが水柱でバクテリアにより分解された可能性が高いと考えられる。植物プランクトンの鉛直分布については、クロロフィル a 濃度から示されるが、この時期のクロロフィル a 濃度の鉛直分布は全水深にわたりほぼ一様であり⁵⁾、全層にわたり、同様の変化が起こったとしても不自然ではない。

底層からの回帰であれば底層から回帰したアンモニア等の濃度が表層に比べて高くなると考えられるが (6月初旬は小さいながらも表層と底層において水温差が存在する日が多かった、図-3(1))、濃度上昇は全層で大きく変わらなかったこともこの可能性を裏付けている。また、この時期には一旦上昇したSS濃度の低下速度が遅く、SS濃度の割にChl- a 濃度が低い⁶⁾。SSの主体が動物プランクトンの排泄したデトリタスであると考え、沈降速度が遅いこと、有機物を多く含むことからバクテリアに分解されることで無機栄養塩が急速に水柱に回帰するという現地で観測された結果と矛盾しない現象が起こることが説明できる。

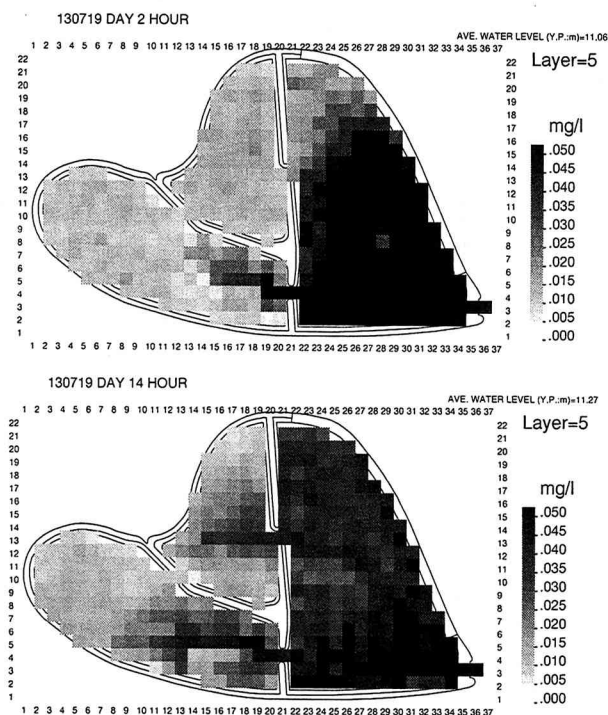
頻繁な動物プランクトンの計量及びバクテリアの計量を行わなかったために、完全な証明にはなっていないものの、詳細な観測とモデル計算結果を示したことで、調査対象とした期間に植物プランクトンが動物プランクトンにより捕食を受け、その後無機栄養塩濃度が急上昇したという可能性は非常に高いと考えられる。この期間、水柱全体でのバクテリア活動が活発であったことは、表層における溶存酸素濃度が6(mg/l)以下程度（この期間の表層水温は24℃前後であり、飽和濃度は8.4(mg/l)程度）に低下していることから裏付けられる。



図一4 計算結果と実測値との比較（計算結果は実線，集中観測による実測値が×，定期調査による実測値が●である）

また、全体を通しての水質変動について見た場合、6月初旬に水柱内で回帰した無機態栄養塩濃度の低下と河川流入時の無機栄養塩濃度の低下速度が非常に異なって観測されたことは、流れによる影響の考慮が重要であることを示している。このことから示されるように、生態系の関与による湖沼・貯水池水質の変動についての解析には、詳細な観測と総合的なモデル解

析が不可欠と考えられる。



図一5 河川水流入後のリン酸態リンの平面分布

（上段：平成13年7月19日午前2時，下段：同日午後2時）

謝辞：データ収集については、国土交通省関東地方整備局利根川上流工事事務所利水調査課の皆様、また、現地観測に際しては、同渡良瀬貯水池出張所の皆様にご協力いただきました。記して感謝します。

参考文献

- 1) 天野邦彦，李建華，鈴木宏幸，安田佳哉：渡良瀬貯水池における水質変化に関する考察 ―底泥と水柱間での物質収支特性―，国土技術政策総合研究所資料，No.12，2001.
- 2) 天野邦彦，安田佳哉，鈴木宏幸：浅い貯水池における表層底泥の巻き上げによる水質変化のモデリング，水工学論文集，第46巻，pp. 1085-1090，2002.
- 3) Cerco, C. F., T. Cole, User's Guide to the CE-QUAL-ICM Three-Dimensional Eutrophication Model, Technical Report EL-95-15, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, 1995.
- 4) Lampert, W., Climatic conditions and planktonic interactions as factors controlling the regular succession of spring algal bloom and extremely clear water in Lake Constance, Verh. Int. Verein. Limnol., v. 20, pp. 969-974, 1978.
- 5) 野本岳志，天野邦彦，鈴木宏幸，李建華，安田佳哉：浅い貯水池における水質変化に及ぼす気象の影響，土木学会第57回年講，VII-241，2002.
- 6) 天野邦彦，李建華，鈴木宏幸，安田佳哉：浅い貯水池における懸濁物組成とその水質への影響，水工学論文集，第45巻，pp. 1189-1194，2001.

（2002. 9. 30受付）