

現地観測とボックスモデルに基づく 夏季手賀沼におけるリン収支の把握

STUDY ON PHOSPHORUS BUDGET OF LAKE TEGANUMA IN SUMMER WITH FIELD OBSERVATIONS AND NUMERICAL COMPUTATION

本間孝幸¹・二瓶泰雄²

Yoshiyuki HONMA and Yasuo NIHEI

¹ 学生員 学(工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

² 正会員 博(工) 東京理科大学助教授 理工学部土木工学科(同上)

To grasp the phosphorus budget in Lake Teganuma, we have performed the field observations and numerical computation of water quality in summer in 2003 and 2004. The observed results indicated that the COD and T-P increased in the longitudinal direction in the lake, while the T-N decreased in the same direction. It is also found that the COD and T-P in 2004 were much larger than those in 2003. From the computational results, the higher value of the phosphorus in 2004 was mainly caused by the increase of the phosphorus release from the bottom in the lake. The phosphorus budget analysis illustrates that the phosphorus releases in 2003 and 2004 were comparable with those before the beginning of the environmental improvement project using the North-Chiba water conveyance channel.

Key Words : Lake Teganuma, water quality, phosphorus, nutrient release, COD

1. 序論

富栄養化湖沼として有名な千葉県北西部に位置する手賀沼¹⁾の水質環境は、かつては全国ワースト1であったが、近年では大きく改善されつつある。それは、下水道整備の促進や礫間浄化施設の整備などに加えて、北千葉導水事業の本格的な稼動によるものと考えられる。この導水事業は、利根川の河川水を手賀沼に最大 $10\text{m}^3/\text{s}$ 注水する、というものであり、2000年度より本格的に稼動している。これにより、沼内のCODの年平均値は、導水事業稼動前の1999年では 18mg/l であったのに対して、稼動後の2003年では 8.4mg/l へと大幅に減少し、2001年度より水質汚濁全国ワースト1の汚名を返上している。

このように手賀沼の水質環境は大きく様変わりしており、既存の知見^{2), 3)}の適用性は定かでない。特に、富栄養化の一因である底質からの栄養塩溶出³⁾が北千葉導水事業稼動前後でどのように変化しているかは不明である。著者らは、そのような観点に立って、手賀沼や流入・流出河川における総合的な水質環境調査を2003年夏季において実施し、CODの外部流入負荷・内部生産負荷特性を検討している(二瓶ら⁴⁾、以下、前報と呼ぶ)。

本論文では、前報に引き続いて、手賀沼における水質調査を猛暑が観測された2004年夏季において実施し、2003

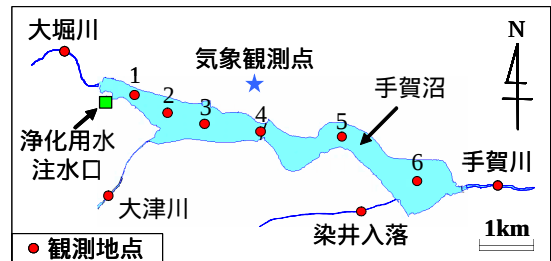


図 - 1 手賀沼と観測地点の配置

年と2004年の夏季手賀沼における水質環境、特にリンの収支特性を検討する。ここでは、水質環境調査に加えて、ボックスモデルを用いた水質計算を実施している。

2. 現地観測の概要

(1) 手賀沼の概要と水質環境の経年変化

東西方向に細長い湖沼である手賀沼は、図 - 1 に示すように、3つの流入河川(大堀川、大津川、染井入落)と1つの流出河川(手賀川)に接続している。きれいな利根川の河川水を手賀沼に注ぎ込む北千葉導水路の注水点は、手賀沼の西側に位置する(同図中の四角印)。手賀沼の滞留時間は、浄化用水を注入しない場合には約13日であ

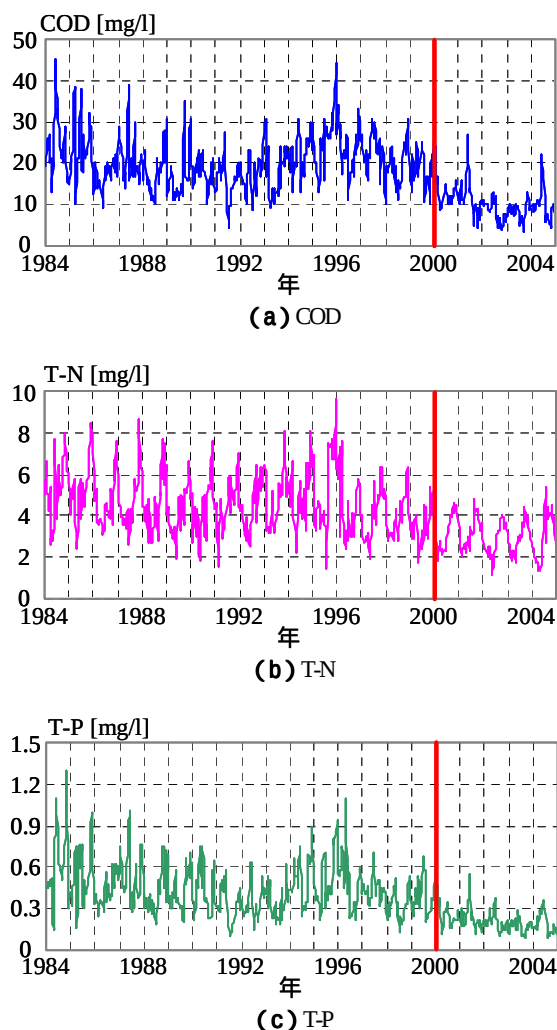


図 - 2 手賀沼における水質環境の経年変化（沼東側）

るのに対して、上記の浄化用水の最大量を手賀沼へ注水すると4日弱となる。

長期間における手賀沼の水質環境を見るために、公共用水域の水質データとして千葉県により計測された手賀沼のCOD、T-N、T-Pの時間変化を図 - 2 に示す。ここでは、沼内の東側（図 - 1 のStn.6付近）において、1984年から2004年まで計測された水質濃度の変遷を図示している。この図より、1980年代初頭ではCODは20～30mg/l、T-Nは4～7mg/l、T-Pは0.4～0.8mg/lと高濃度となっていた。その後、各水質濃度は徐々に低下したものの、1995、96年には再び1980年代初頭程度の水質環境まで悪化し、以後再び水質濃度は漸減した。さらに、2000年に本格稼動した北千葉導水事業の効果により、現在の手賀沼の水質環境は1980年代初頭の濃度値の1/3～1/2程度まで低下し、手賀沼の水質環境が大きく改善されていることが分かる。

（2）観測方法

手賀沼及び流入・流出河川、浄化用水の水質環境を把握するために、いくつかの現地調査を行う。ここでは、

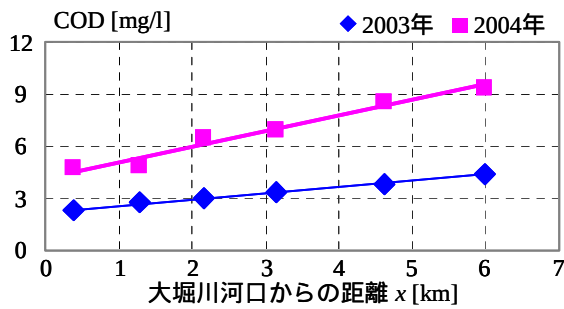
前報と同様に、定期的な水質調査、メモリ内蔵型測器を用いた長期連続調査、日射量等の気象観測を行った。の調査については、図 - 1 に示している手賀沼内6地点と流入・流出河川4地点（大堀川、大津川、染井入落、手賀川）、浄化用水注水口1地点において、定期的に採水観測を実施した。観測期間としては、2003年7月10日～10月9日、2004年6月9日～10月19日とした。これらの期間において、ほぼ週一回の間隔で、表層バケツ採水を行った。得られたサンプル水に対して、COD、T-N、T-Pの分析を下水試験方法⁵⁾に準じて行った。の調査では、水質調査と同期する形で自記式測器を用いた水位・水温等の計測を沼内や流入河川にて行った。主要流入3河川においては水位 H を自記式水位計（Diver, Eijikelkamp社製）により計測し、別途算出した H - Q 曲線を用いて流量 Q を算出した。また、沼内における水温を計測するために、手賀沼中央部（図 - 1 中のStn.3）の表・中・底層において小型水温計（TidbiT, Onset社製）を係留した。の気象観測では、手賀沼中央部付近の陸岸（図 - 1）にて、風向・風速、気温、湿度、日射量に関する連続観測を、と同期して実施した。

3．観測結果

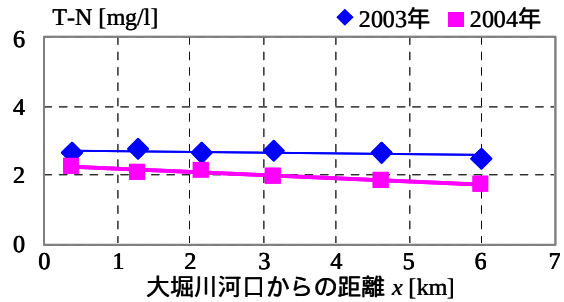
（1）水質濃度の縦断方向変化

まず、手賀沼における水質濃度の縦断方向変化を把握するため、2003年と2004年におけるCODとT-N、T-Pの縦断方向変化に関する平均像を図 - 3 に示す。図中には、各観測点における7～9月のCOD、T-N、T-Pの平均値をプロットしている。なお、ここでは表層でかつ横断面内の一地点しか採水調査を実施しておらず、その結果を横断面内の代表値として図示している。この図を見ると、CODは両年ともに大堀川河口からの距離とともに概ね増加し、有機物が内部生産されていることが分かる⁴⁾。両年の結果を比べると、2004年のCODの方が全地点において2003年よりも高くなっている。図中には、観測データに対する近似直線も合わせて図示している。また、そこで得られた近似式を表 - 1 に示す。これから、2004年における近似直線の傾きは2003年の約2.5倍、切片は約1.9倍である。これより、2004年でのCODの高濃度化の要因は、外部流入負荷よりも内部生産負荷の寄与の方がやや大きいものと推測される。

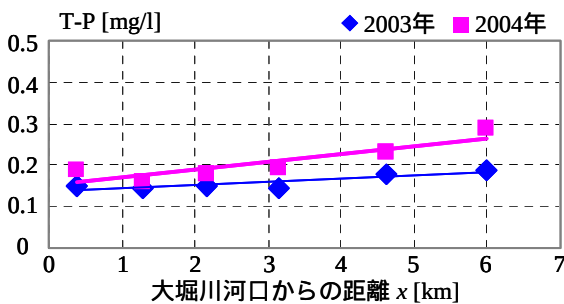
次に、T-Nに関しては、両年ともに、大堀川河口域からの距離とともに減少しており、その減少率は2004年の方が顕著である。このように、縦断方向にT-Nが減少する理由としては、沼内の植物プランクトンの光合成により窒素が利用され、最終的に沼内に沈降したためであると考えられる。また、T-Pに着目すると、2003年、2004



(a) COD



(b) T-N



(c) T-P

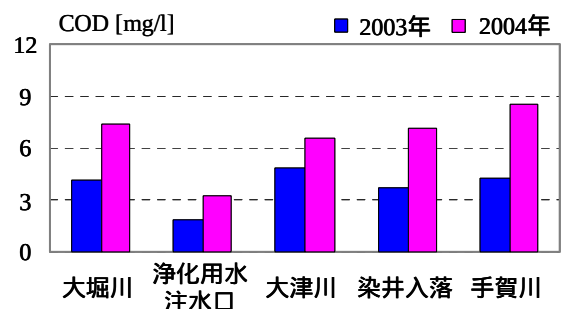
図 - 3 各水質項目の縦断方向変化

表 - 1 各期間の直線近似式

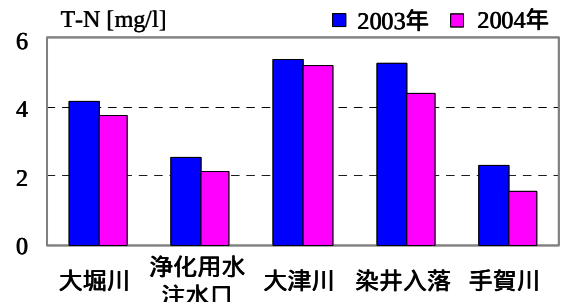
COD	2003年	$COD = 0.3630x + 2.2145$
	2004年	$COD = 0.8956x + 4.1828$
T-N	2003年	$T-N = -0.0283x + 2.7399$
	2004年	$T-N = -0.0884x + 2.2589$
T-P	2003年	$T-P = 0.0081x + 0.1346$
	2004年	$T-P = 0.0196x + 0.1491$

年ともに、T-P は縦断方向に増加しており、沼内での増加量は2004年の方が大きくなっている。CODと同様に、T-P も、2004年では高濃度化していることが分かる。

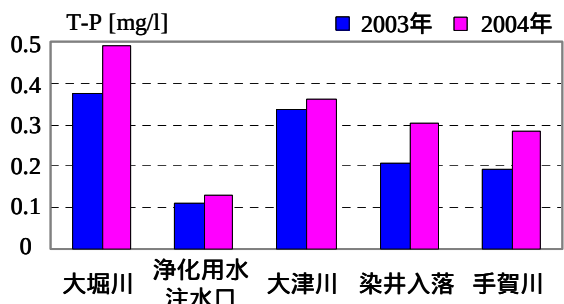
北千葉導水事業開始前においては、縦断方向に対してCODは増加、T-N・T-Pは減少する分布となっていた⁶⁾。この結果と本観測結果を比べると、CODやT-Nに関しては事業開始前の縦断方向変化と一致するのに対して、T-Pの縦断方向変化パターンは事業開始前と後とは一致していないことが分かる。



(a) COD



(b) T-N



(c) T-P

図 - 4 流入・流出河川における水質濃度

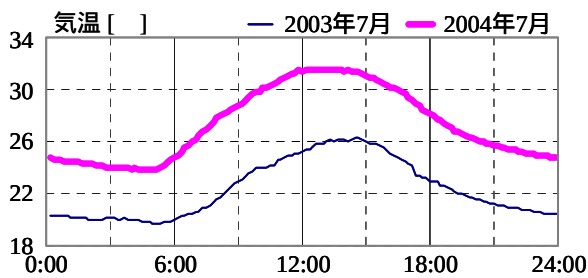
(2) 2003年及び2004年における外部要因の比較

a) 流入河川の水質環境

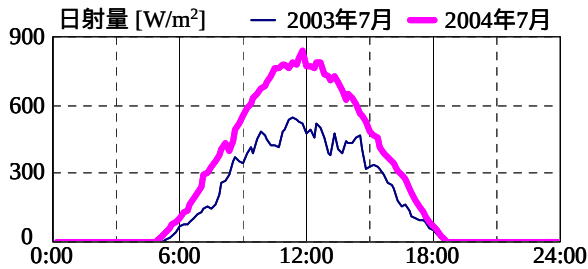
前述したように、夏季手賀沼における水質環境は2003年と2004年とは異なっていることが、CODとT-N、T-Pにて共通して見られた。この違いを引き起こす外部要因について調べる。まず、3つの流入河川経由の外部負荷特性を見るために、流入・流出河川と浄化用水注水口における水質濃度を図-4に示す。ここでも、各年において7~9月までの平均値が表示されている。CODに関しては、3つの流入河川とともに2004年のCODの方が2003年よりも大きく、その増加率は、大堀川と染井入落の方が大津川よりも大きい。T-Pについても、全流入河川において2004年の方が2003年よりも大きくなるものの、その増加率はCODと比べると小さい。また、T-Nについては、逆に2003年の濃度値の方が2004年よりも大きい。

b) 気象条件

湖沼の水質環境に大きな影響を及ぼす気象条件⁷⁾を見るために、2003年と2004年における気温と日射量の時間



(a) 気温



(b) 日射量

図 - 5 2003 年と 2004 年における気象条件の比較 (両年 7 月における時間帯別平均値の日変化を示す)

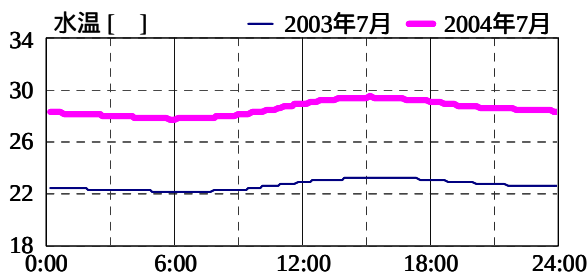


図 - 6 2003 年と 2004 年 7 月における水温の日変化 (時間帯別平均値, Stn.3)

変化を図 - 5 に示す。ここでは、気温と日射量の日変化の平均像を比べるために、両年の 7 月におけるデータを対象として、時間帯毎に一ヶ月間のデータを平均したものを図示している。これを見ると、気温の最高値としては、2003 年では 26 であるのに対して、2004 年では 32 であり、2004 年の方が 6 も高い。一方、日射量に関しても、ピーク時では、2003 年では約 500 W/m^2 、2004 年では約 800 W/m^2 であり、2004 年の方が 300 W/m^2 も大きい。このように、2004 年では、手賀沼周辺においても猛暑が観測されていることが分かる。

底質からの栄養塩溶出など水質変化に直接的な影響を及ぼす水温の日変化を図 - 6 に示す。ここでも、図 - 5 と同様に、2003 年と 2004 年の 7 月における水温データに対して時間帯別に平均した結果を図示している。これは、Stn.3 で計測された水温データであり、鉛直方向においても平均化されている。これより、気象条件の違いを反映して、2004 年の水温は全般的に約 5 も 2003 年の水温を上回っている。このように、2004 年における高水温化に伴って、沼内における内部生産負荷や栄養塩の溶出も増

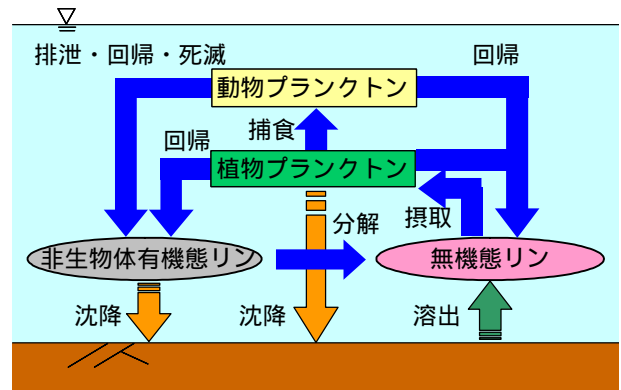


図 - 7 水質モデルの概念図

大したものと推測される。これらに関して定量的に検討するために、次章では、水質シミュレーションを行う。

4 .ボックスモデルに基づく水質シミュレーション

(1) 数値計算の概要

手賀沼の水質環境に対する外部流入・内部生産負荷の影響を定量的に調べるために、リンに着目した水質シミュレーションを行う。ここでは、手賀沼を一つのボックスと見立てて、沼内における移流・拡散・混合過程を考慮しないボックスモデルとする。水質モデルとしては、松梨ら³⁾とほぼ同じモデルとし、リンの存在形態は、無機態リン $\text{PO}_4\text{-P}$ 、非生物体有機態リン Org-P 、植物プランクトン $\text{Chl}a$ 、動物プランクトン Z の 4 つとしている。各形態間のやり取りは、図 - 7 に示しているとおりであり、松梨ら³⁾と同じ基礎式や式中のパラメータを用いており、詳しくは松梨ら³⁾を参照されたい。なお、松梨ら³⁾はこの水質モデルと底質モデルを結合して、底質中の栄養塩・有機物量を計算しているが、ここでは、底質データが不十分なため、底泥からのリン溶出速度 W_p を一定値として与えることとする。この溶出速度 W_p を決定する方法としては、各計算条件において溶出速度 W_p を変化させて数値計算を行い、得られる T-P の計算結果と 3. で述べた観測結果を比べて、両者が最も近くなる溶出速度 W_p を採用する。

両年における夏季の平均的な水質環境を抽出するため、2003 年と 2004 年における 7 月と 8 月の再現計算を実施する。そのため、図 - 5, 6 に示したように、月ごとに日射量と水温の日変化データを作成し、そのデータを入力する。また、初期条件としては、大堀川河口部に最も近い Stn.1 における現地観測により得られた T-P の観測値を与える。本調査では T-P しか計測していないため、上記の 4 つの存在形態のデータは取り揃えていない。そこで、初期条件としては、平間ら⁸⁾の水質調査結果を参考にして、無機態リンは T-P の 0.8 倍、有機態リンは T-P の 0.18 倍とし、植物プランクトン態及び動物プランクトン態

ンは両方とも T-P の 0.01 倍として与える．なお，計算時間については，河川流量と浄化用水注水量の和から沼への流入量の平均値を算出し，それから得られる沼の滞留時間（＝沼体積／流入量）を計算時間とする．なお，計算に用いている流入量は 2003 年 7・8 月，2004 年 7・8 月それぞれ 11.9，10.9，10.5，8.0m³/s である．

（２）計算結果

a) T-P 及び各存在形態の時間変化

まず，溶出速度 W_p を変化させたときに T-P の計算結果の違いを見るために，3つの溶出速度（0.02，0.04，0.06 gP/m²/day）における T-P の時間変化を図 - 8 に示す．ここでは，一例として，2004 年 7 月の再現計算の結果について図示している．また，そのときの観測結果も示しており，各観測点における時間 t は，Sm.1 から各観測点までの容積を流入量で除したものととして換算している．これより，リンの溶出量が卓越するため，3つの溶出速度において，T-P は時間とともに直線的に増加している．これらの結果と観測値を比較すると， $W_p = 0.04$ gP/m²/day のときに計算値が観測値と最も近くなっていることが分かる．このような形で，各計算条件におけるリンの溶出速度 W_p を決定する．

この溶出速度を用いたときの各存在形態の時間変化を図 - 9 に示す．ここでは，無機態リン PO₄-P，有機態リン Org-P，植物プランクトン態リン Chl.a を図示しており，動物プランクトン態リンは非常に小さいため省略している．これより，時間とともに植物プランクトン態リンが増加し，摂取された無機態リンは減少しており，リンの存在形態の大小関係が数日間で変化していることが分かる．

る．前述したように，沼の滞留時間が 4 日程度であるとすると，この程度の時間で無機態リンと植物プランクトン態リンの大小関係が逆転しており，有機物の内部生産を引き起こす植物プランクトン増殖の抑制を考慮して，浄化用水注水量が設定されているものと推測される．

b) 沼内におけるリン収支

次に，計算結果により得られた沼内のリン収支特性を

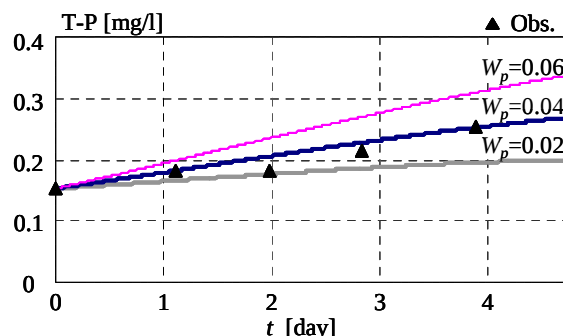


図 - 8 T-P の観測値と計算値の比較
(2004 年 7 月， W_p の単位：gP/m²/day)

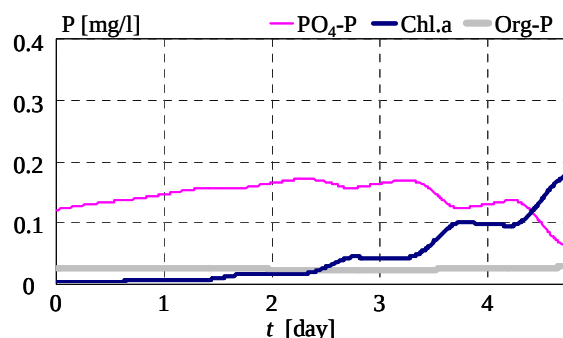


図 - 9 リンの各存在形態の時間変化（2004 年 7 月）

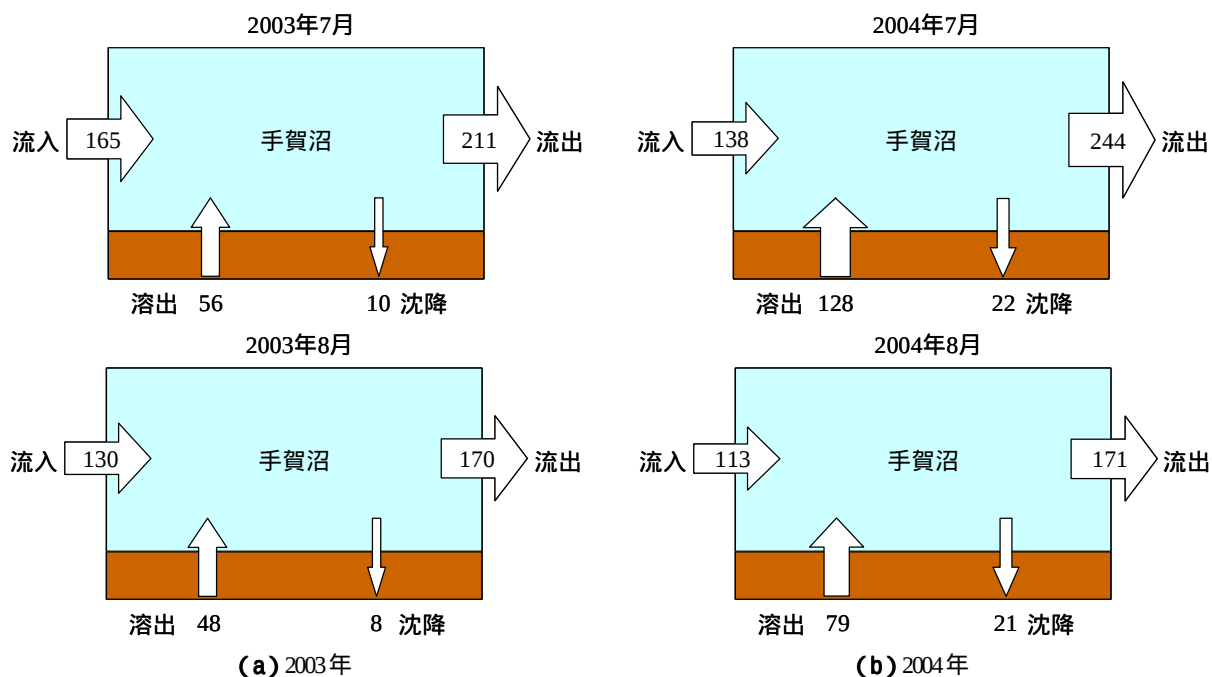


図 - 10 2003 年及び 2004 年におけるリン収支特性 (Unit: kg/day)

表 - 2 北千葉導水事業開始前後のリン収支特性の比較（本研究：2003～04年，松梨ら：1994～95年，小林・西村：1983～85年）

(Unit: kg/day)

	対象	流入	流出	沈降	溶出
本研究	導水後	113～165	170～244	8～22	48～128
松梨ら ³⁾	導水前	210	123	162	61
小林・西村 ⁹⁾		300	195	225	120

図 - 10 に示す．ここでは，両年の 7 月と 8 月における結果について，流入量，流出量，溶出量，沈降量がそれぞれ記載されている．これを見ると，流入量に関しては 2003 年の方が 2004 年よりも大きいものに対して，流出量に関しては逆の大小関係となっている．一方，2004 年における底泥からの溶出量は 2003 年の約 2 倍であり，また，2004 年における流入量の 80% 程度と非常に大きいことが分かる．また，沈降量は，両年ともに，溶出量と比べて非常に小さい値となっている．このようなことから，2004 年において，リンの高濃度化が生じた要因は，外部流入負荷ではなく，底泥からの溶出が大きく増加したためであることが明らかとなった．このような溶出量の増加には，図 - 6 に示したように，2004 年の水温は 2003 年よりも平均的に約 5 も高く，結果として底泥のリン分解速度が大きくなったためである．また，沈降量が溶出量と比べて非常に小さくなる要因は，図 - 9 に示しているように，植物プランクトン態リンの増加が顕著ではないためであり，これには導水事業により滞留時間が減少したことが密接に関係していると考えられる．

手賀沼におけるリン収支特性を北千葉導水事業開始前後において比較した結果を表 - 2 に示す．ここで，導水事業開始後の結果として本観測結果を，事業開始前の結果として松梨ら³⁾と小林・西村⁹⁾の結果を，各々表示する．これより，事業開始前の夏季手賀沼におけるリンの溶出量は 61～120 kg/day であり，これは北千葉導水事業開始後（48～128 kg/day）と同程度である．このことから，導水事業開始前後では，底泥からの溶出量に違いは見られないことが示唆された．また，導水事業開始後における流入量は事業開始前よりも激減しているものの，溶出量が変わっていないため，事業開始前後において流出量は増加傾向となっている．このように，北千葉導水事業の効果により外部負荷と内部負荷のバランスが変化して，事業開始後では内部負荷の寄与率が増加していることが分かる．また，北千葉導水事業等により水質環境は大幅に改善されたものの，溶出量の観点に立つと底質環境はほとんど変化していないことが示唆された．

5．結論

本研究で得られた結論は，以下に示すとおりである．

- 1) 手賀沼内における水質環境の縦断方向変化を調べたところ，縦断方向に COD・T-P は増加し，T-N は減少する傾向にあることが示された．これより，北千葉導水事業開始前後では，COD と T-N の縦断方向変化は類似しているものの，T-P の縦断方向変化パターンは異なっていることが明らかとなった．
- 2) 2003 年と 2004 年における水質環境を比べたところ，COD や T-P に関しては，2004 年における値が 2003 年の約 2 倍となっていた．
- 3) 2004 年におけるリンの高濃度化に対しては，流入負荷量よりも底泥からの溶出量が大きく寄与していることが示された．
- 4) 北千葉導水事業稼働後における底泥からのリン溶出量は 48～128 kg/day となり，導水事業開始前とほとんど変化していない．

なお，ここではリン収支のみを示しているが，窒素・有機物収支に関する議論を行うことは不可欠であり，今後検討を実施する予定である．

謝辞：水質分析に際しては，東京理科大学理工学部土木工学科出口浩教授に様々な便宜を図って頂いた．国土交通省関東地方整備局利根川下流河川事務所には水位データ等を提供して頂いた．本研究の一部は，科学研究費補助金基盤研究（C）（2）（研究代表者：二瓶泰雄）によるものである．ここに記して謝意を表する．

参考文献

- 1) （社）日本水環境学会編：日本の水環境 3 関東・甲信越編，技報堂出版，pp.153-166，2000．
- 2) 小林節子：手賀沼の抜本的水質改善へ向けた富栄養化の解析，用水と廃水，Vol.39，No.6，pp.479-486，1997．
- 3) 松梨史郎，伊野場誠治，下垣久，宮永洋一：手賀沼における流動・水質・底質の時空間変動シミュレーションと底泥からの栄養塩溶出の水質への影響，土木学会論文集，No.712 / -60，pp.161-173，2002．
- 4) 二瓶泰雄，丸山寛樹，尾関利文，山崎祐介：夏季手賀沼における外部流入・内部生産負荷に関する検討，水工学論文集，第 49 巻，pp.1237-1242，2005．
- 5) （社）日本下水道協会：下水試験方法上巻 - 1997 年版 - ，pp.136-201，1997．
- 6) 山田安彦，白鳥孝治，立本英機：印旛沼・手賀沼 - 水環境への提言 - ，古今書院，pp.1-167，1993．
- 7) 福島武彦，上西弘晃，松重一夫，原沢英夫：浅い富栄養湖の水質に及ぼす気象の影響，水環境学会誌，Vol.21，No.3，pp.180-187，1998．
- 8) 平間幸雄，木内浩一，小林節子：手賀沼の水質縦断調査，千葉県水質保全研究所年報，pp.103-108，1995．
- 9) 小林節子・西村肇：湖沼のリン循環過程の現状把握にもとづいた湖沼の COD 予測法，水環境学会誌，Vol.16，No.10，pp.711-722，1993．

(2005.9.30 受付)