

浄化用水量の変化が手賀沼の水質環境に及ぼす影響

INFLUENCES OF DISCHARGE VARIATIONS OF PURIFICATION WATER ON WATER QUALITY ENVIRONMENTS IN LAKE TEGANUMA

山崎裕介¹・二瓶泰雄²・猪爪高見³・西村司⁴

Yusuke Yamasaki, Yasuo Nihei, Takami Inotsume and Tsukasa Nishimura

¹ 学生員 修(工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻博士後期課程(〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

² 正会員 博(工) 東京理科大学講師 理工学部土木工学科

³ 非会員 修(工) 長岡工業高等専門学校

⁴ 正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科

To investigate the influences of the temporal variations of the discharge from North-Chiba water conveyance channel on the water quality environments in Lake Teganuma, we have attempted to carry out field measurements and 3-D numerical simulations. The observed results indicate that the temporal and spatial variations of water qualities strongly depend on the discharge from the channel. The computed results for the current and water quality in Lake Teganuma illustrate that these variations of the water qualities in the lake are mainly related with the convective and diffusive processes of the purification water from the channel.

Key Words : Lake Teganuma, water quality, North-Chiba water conveyance channel, discharge

1. はじめに

富栄養化湖沼として有名な手賀沼^{1), 2)}では、様々な水質改善対策が実施されており、沼内におけるアオコ回収や水生植物の植栽、底泥浚渫³⁾に加えて、2000年度より、利根川水を手賀沼やそこに流入する主要河川の一つである大堀川に注水する、という北千葉導水事業が行われている。この北千葉導水事業の本格的な稼動に伴って、沼内における年平均COD値が大きく減少していることが明らかとなっている。北千葉導水路からの浄化用水量は、利根川における余剰水の状況に大きく依存しているため、常に一定の浄化用水量を手賀沼へ注水することは困難である。このようなことから、浄化用水量の変化に対する沼内の水質環境の応答を把握することは、手賀沼における適切な水質管理を行う上で必要不可欠である。

そこで本研究では、北千葉導水路からの浄化用水注水量の変化が手賀沼の水質環境に及ぼす影響を把握するために、現地観測と数値解析を行うことを試みる。ここでは、まず、約一ヶ月間にわたり実施された手賀沼全域における水理・水質環境調査結果⁴⁾と同時期に行われたCTD・採水調査結果を用いて、

浄化用水量と沼内における水質環境の関係について述べる。次に、三次元流動・物質輸送シミュレーションを実施して、沼内における浄化用水挙動を把握するとともに、水質濃度に関する観測値と計算値を比較・検討する。

2. 現地観測の概要

(1) 手賀沼と北千葉導水路の概要

手賀沼は、本手賀沼と下手賀沼から構成されており、本手賀沼の湖沼面積は5.5km²、水容量は470万m³、平均水深は0.86mである。以下では、この本手賀沼を手賀沼と呼ぶ。この手賀沼には、**図-1**に示すように、主として、大堀川と大津川という二つの都市河川が流入している。また、手賀沼東端で接続している手賀川を通して、手賀沼の水は利根川へ流出している。

北千葉導水路は、**図-1**に示すように、利根川から取水された河川水を、手賀沼と大堀川、坂川へと運んでいる。手賀沼と大堀川への最大注水量はそれぞれ10m³/s、0.5m³/sである。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日であるのに

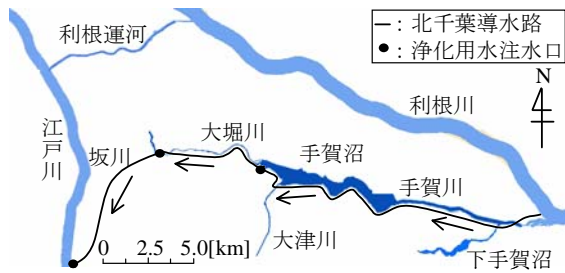


図-1 北千葉導水路の概要

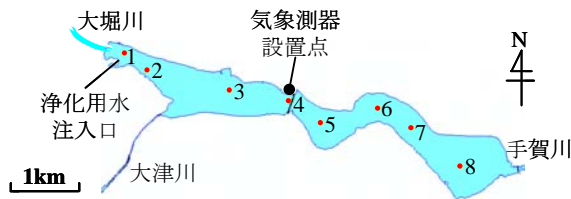


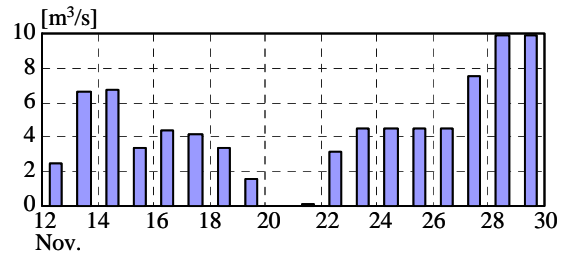
図-2 観測点配置図

対して、上述した浄化用水の最大量を注水するときの滞留時間は4日弱となり、大幅に短縮される。

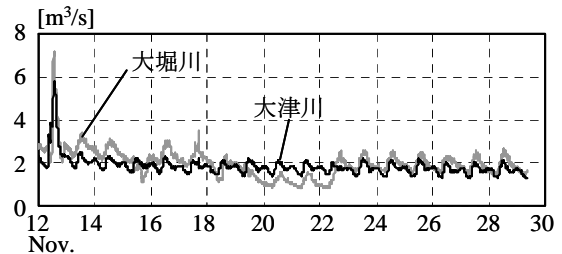
(2) 観測方法

現地観測は、手賀沼と周辺河川において、1) 2001/10/27 から 11/29 の約一ヶ月間にわたる自記式測器を用いた長期連続観測⁴⁾と、2) 同時期におけるCTD・採水調査、という2種類の観測を実施した。観測点の一部を図-2に示す。1)に関しては、手賀沼全域をカバーするように沼内に15点の観測地点を設け、大堀川と大津川、さらに手賀川にそれぞれ一点ずつ観測点を設けた。測定項目としては、全点において水位・水温を計測し、Stn.3においては水位・水温に加えて流速や濁度・Chl.a濃度等の水質項目を計測した。ここで、Chl.a濃度の計測には、蛍光光度計(ACL104-8M, アレック電子株)を用いた。なお、その他の現地観測方法の詳細に関しては、二瓶ら⁴⁾を参照されたい。

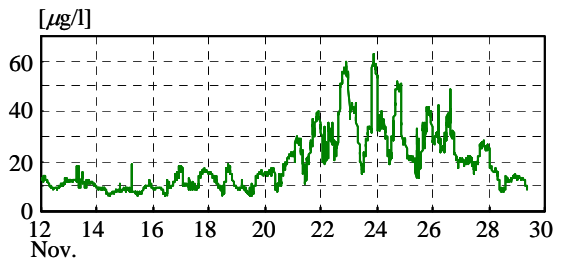
2)の観測では、まず、Stn.4付近において、11/22～29にて一日一回採水調査を行い、水質濃度の時間変動特性を把握することを試みた。また、水質濃度の空間分布を調べるために、11/22と29に、手賀沼の縦断方向8地点(Stns.1～8)と各河川、浄化用水注水口にてCTD・採水調査を実施した。採水サンプルに対して、T-N, T-P, COD, Chl.a濃度という水質項目の分析を行った。分析方法としては、T-N, T-P, CODについては下水試験方法97年度版⁵⁾に、Chl.a濃度に関しては上水試験方法78年度版⁶⁾に準拠している。



(a) 浄化用水量



(b) 河川流量



(c) Chl.a濃度 (Stn.3)

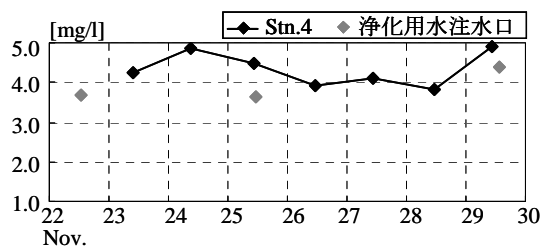
図-3 浄化用水量と河川流量、Chl.a濃度の時間変化

3. 観測結果と考察

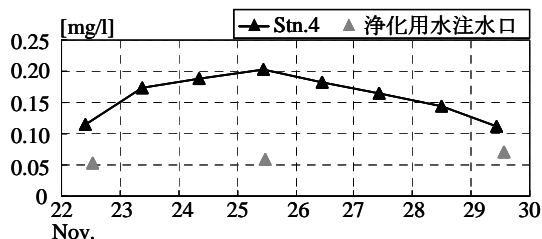
(1) 浄化用水量・河川流量とChl.a濃度の関係

まず、浄化用水量や大堀川・大津川における流量と、水質濃度に関する基本的な関係を把握するために、11/12～29における浄化用水量、河川流量、Chl.a濃度(Stn.3)の時系列データを図-3に示す。ここで、浄化用水量は、日平均値として表記されている。これを見ると、浄化用水量に関しては、11/12～19においては1.0～7.0m³/sの間で増減し、11/20には注水量が完全に0となり、11/21より注水を再開し、11/28以降では最大注水量である10m³/sを放流している。河川流量に関しては、11/12頃に小規模の出水が見られる程度であり、両河川ともに2m³/s弱の流量となっている。これより、両河川における流量の合計値は、浄化用水量と比べて、同程度かやや小さくなっている。

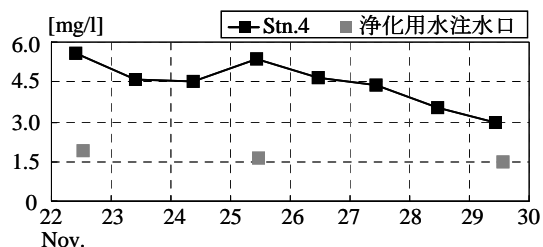
Chl.a濃度に関しては、11/20までは概ね20µg/l以下の低濃度状態を保っているものの、それ以降ではChl.a濃度は大幅に上昇し、11/24頃にピーク値をとり、その後減少している。このChl.a濃度が増加し



(a) T-N

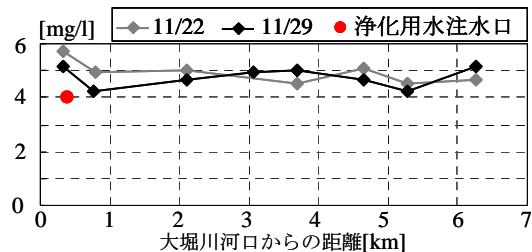


(b) T-P

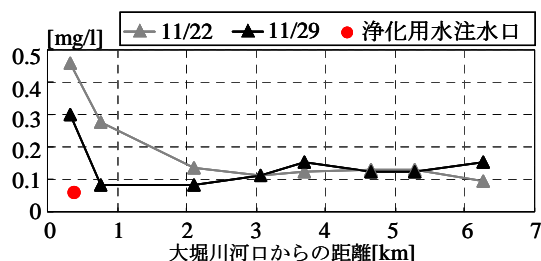


(c) COD

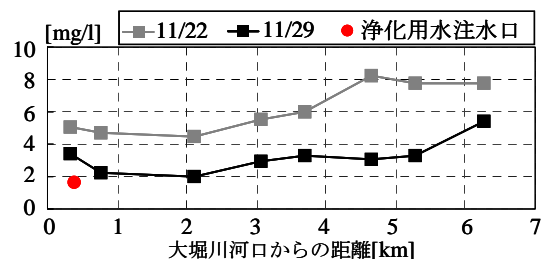
図-4 T-N と T-P, COD の時間変化
(沼中央部 (Stn.4) と浄化用水注水口)



(a) T-N



(b) T-P



(c) COD

図-5 T-N と T-P, COD の縦断方向分布

始めるタイミングは、浄化用水量が 0 となった 11/20 頃と一致している。さらに、11/22 以降には、浄化用水の注水が再開されているにもかかわらず Chl.a 濃度はすぐには減少せず、数日間高濃度となっている。この期間では、河川流量はほぼ一定値であることから、このような Chl.a 濃度の変化は、浄化用水量の変化により生じたものと考えられる。

(2) 水質濃度の時空間変動特性

a) 沼中央部における水質濃度の時間変化

浄化用水量の変化が見られた 11/22~29 における沼中央部 (Stn.4) での T-N, T-P, COD の時系列変化を図-4 に示す。図中には、比較のために、浄化用水注水口における結果も図示している。これを見ると、まず、浄化用水の水質濃度に関しては、どの項目もほぼ一定値を取っており、T-N は 4.0mg/l, T-P は 0.06mg/l, COD は 1.5mg/l 程度である。一方、沼中央部 (Stn.4) の結果に着目すると、T-P や COD に関しては Stn.4 での結果は浄化用水注水口での値よりも大きく、最大で 3~4 倍の差が見られるものの、T-N については、両者は同程度となっている。また、

Stn.4 における水質濃度の時間変動特性としては、T-P や COD に関しては 11/25 頃をピークとして増加・減少しており、図-3 に示した Chl.a 濃度の時間変動特性と類似していることが分かる。それに対して、T-N については、明確な時間変動傾向が見られない。これは、浄化用水注水口と沼内の T-N がほぼ同じとなっているためである。

b) 水質濃度の縦断方向変化

水質濃度の空間変動特性を調べるために、浄化用水注水再開直後 (11/22) とその一週間後 (11/29) における T-N と T-P, COD に関する沼内縦断方向分布を図-5 に示す。図中には Stns.1~8 における採水観測結果が示されており、ここでの横軸は大堀川河口部から各観測点までの距離を表している。また、浄化用水注水口における結果として、図-4 に示した 3 時点の平均値も合わせて図示している。これを見ると、T-N に関しては、11/22 と 11/29 における結果には明確な差は見られない。一方、T-P と COD については、11/29 における結果は 11/22 の値よりも全体的に減少しているものの、その低下の様子は T-P と

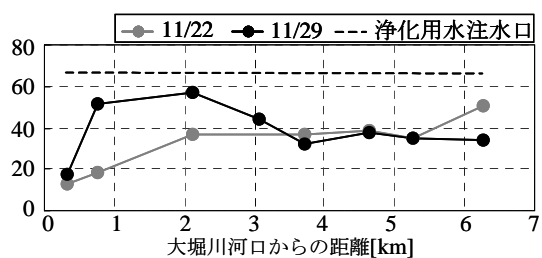


図-6 N/P比の縦断方向変化

COD とで大きく異なっていることが分かる。具体的には、T-P における濃度低下域は沼西側においてのみ見られるのに対して、COD については沼全域にわたって濃度低下が生じている。以上の結果をまとめると、浄化用水注水状況により、沼内での水質濃度空間分布は大きく異なっていること、また、その様子に関しては水質項目毎に明確な差が見られることが明らかとなった。

図-6 は、同じ 11/22 と 29 における N/P 比の沼内縦断方向分布を示している。図中の点線は、浄化用水注水口での結果を表している。これを見ると、11/22 における沼内の N/P 比は浄化用水注水口での値よりも全般的に小さくなっている。それに対して、11/29 においては、沼西側での N/P 比は、東側での結果よりも相対的に高く、また浄化用水の値に近くなっている。これより、11/29 の時点では、沼西側では浄化用水起源の水とほぼ完全に入れ替わっていることが推察される。なお、大堀川河口部に最も近い点では、両日ともに、大堀川からの影響を受けて、N/P 比は 20 以下となっている。

4. 三次元流動・物質輸送シミュレーション

(1) 数値モデルの概要

3. で詳述したように、浄化用水注水量変化に伴う水質濃度の時空間変動特性が、水質項目毎に大きく異なっていることが明らかとなった。この要因を把握するために、手賀沼における三次元流動・物質輸送シミュレーションを行うことを試みる。ここで用いる流動モデルとしては、二瓶ら⁷⁾で用いている数値モデルに基づいている。具体的には、鉛直座標系として σ 座標系を、鉛直方向運動の取り扱いに関しては静水圧近似を適用している。また、計算時間を短縮するために、数値モデルを三次元計算の部分とそれを鉛直積分した二次元計算の部分に分割して計算を行う、という mode-split 法を採用している。また、物質輸送シミュレーションでは、水質濃度の沈降・溶出などの内部生産項を無視した形で、三次元移流拡散計算を行った。

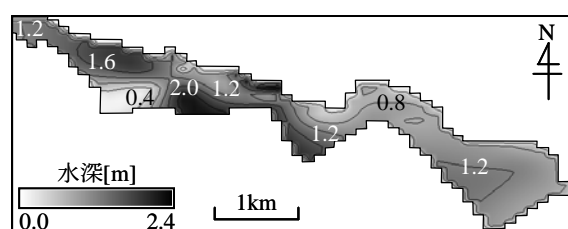
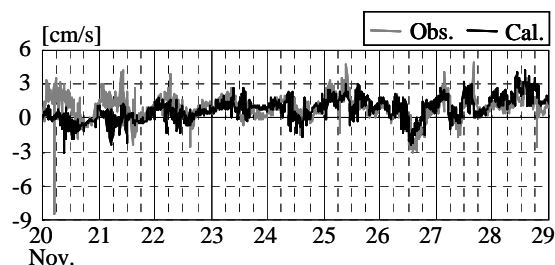
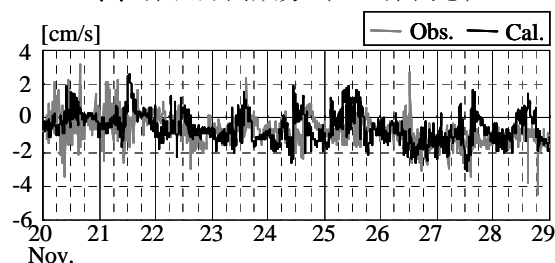


図-7 計算領域と水深分布



(a) 東西方向成分 (正: 東向き)



(b) 南北方向成分 (正: 北向き)

図-8 表層流速の観測値と計算値の比較 (Stn.3)

(2) 計算条件

図-7 は計算領域と水深分布を示す。計算期間に関しては 2001/11/20~29 とし、計算格子数は $54 \times 34 \times 10$ 、水平方向格子幅は $126\text{m} \times 77\text{m}$ とした。mode-split 法における 2 次元計算、3 次元計算における時間刻み幅は、それぞれ 5s, 50s とした。境界条件については、水表面においては実測された風応力を、底面では底面摩擦力を与えた。さらに、浄化用水注水口においては、浄化用水注水量の観測値を与えた。乱流モデルに関しては、Smagorinsky モデルを採用し水平渦動粘性係数を求め、鉛直渦動粘性係数については一定値 ($=5.0 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$) とした。

本論文では、流動計算は同一として、以下に示す 2 種類の物質輸送シミュレーションを行った。まず、沼内における浄化用水の基本的な挙動を把握するために、浄化用水注水口からトレーサーを注入し、そのトレーサー濃度に関する移流拡散計算を行った。ここでトレーサー濃度に関しては、初期値としては全空間において 0 とし、境界条件として浄化用水注水口においてのみ 1.0 と設定した。二つ目の条件としては、水質濃度を対象とした三次元移流拡散計算を実施した。ここで、水質項目としては、T-P と COD

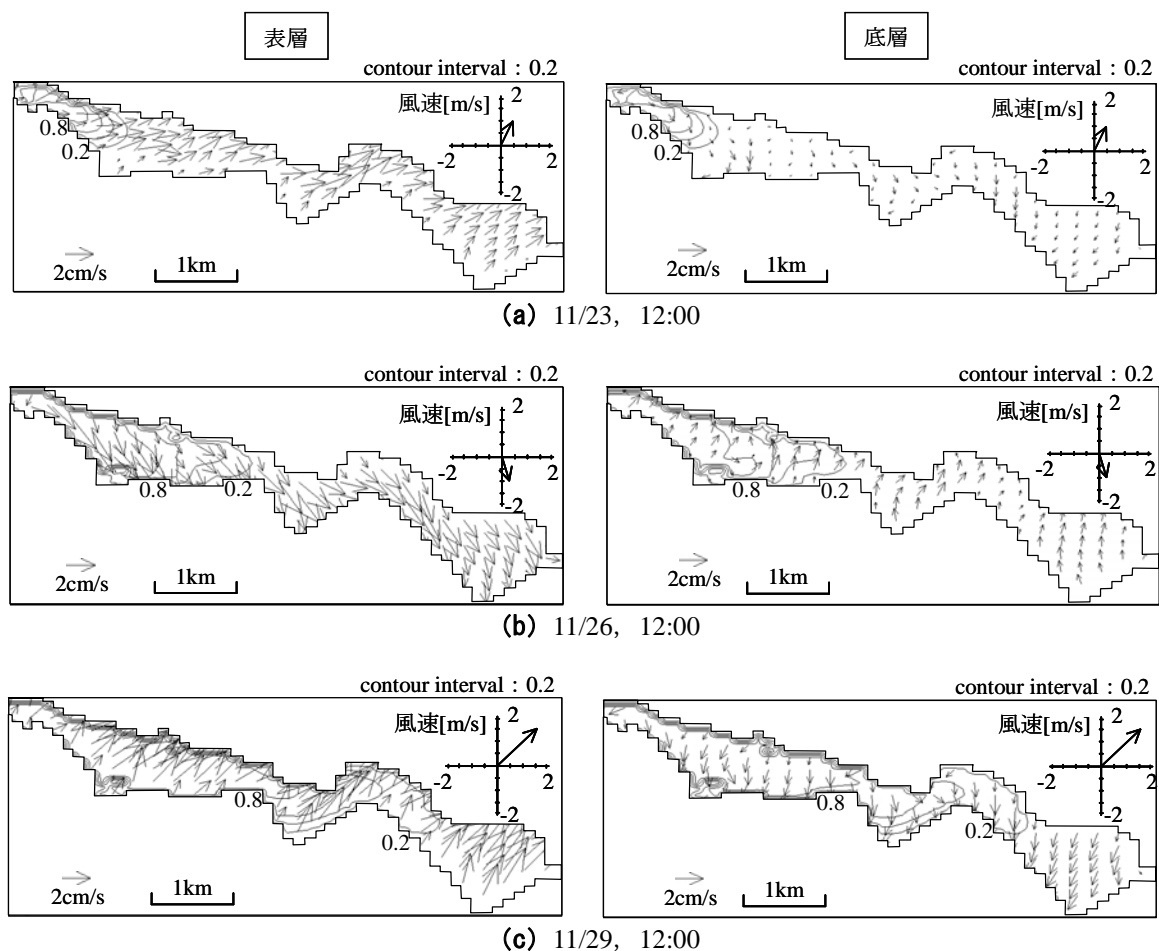


図-9 表層・底層における平面流速ベクトルとトレーサー濃度コンター

を選定している。計算期間は、2001/11/22～29とし、初期条件としては、図-5に示している11/22における観測値を空間内挿して与えた。また、境界条件として、浄化用水注水口においては実測値を与えた。

(3) 計算結果と考察

a) 本流動モデルの妥当性の検証

沼内における浄化用水挙動に関する計算結果を示す前に、本流動モデルの計算精度を検証するため、Stn.3の表層における水平流速に関する観測値と計算値を比較したものを図-8に示す。ここでは、水平流速を東西成分（東向き流れを正とする）と南北成分（北向き流れを正とする）に分けて図示している。この地点における表層流速は、風向きと概ね対応して時間変化していることが既に確認されている⁴⁾。この結果を見ると、表層流速に関する計算値の大きさや流向は、計算開始後2日間を除いて、概ね観測値と一致していることが分かる。このことから、本流動モデルの基本的な有効性が確認された。

b) 沼内における浄化用水挙動

手賀沼内における浄化用水挙動を把握するために、表層と底層における平面流速ベクトルとトレーサー濃度コンターを図-9に示す。図中には、11月23日12時、26日12時、29日12時における結果を示しており、同時刻の風速ベクトルも合わせて表示している。まず、平面流速ベクトルに着目すると、表層に関しては、3つの時点ともに、上述したように、風向や風速レベルの変化に追従して変化している様子がうかがえる。また、局所的には、水平地形に沿うように流れている。一方、底層に関しては、概ね、表層と逆向きの流れが形成されている。このように、手賀沼では平均水深が1m以下と極めて浅いにも関わらず、吹送流に伴う鉛直循環流構造が明確に生じていることが分かる。

同図中に示されているトレーサー濃度分布に着目すると、表層・底層における浄化用水のフロント部は、時間とともに西側から東側へ移動するとともに、フロント部でのコンター間隔が縦断方向に粗になっていく様子が分かる。これより、浄化用水は、沼内の縦断方向に大きく分散しながら、東側へ移動しているものと考えられる。このような様子が表層・底

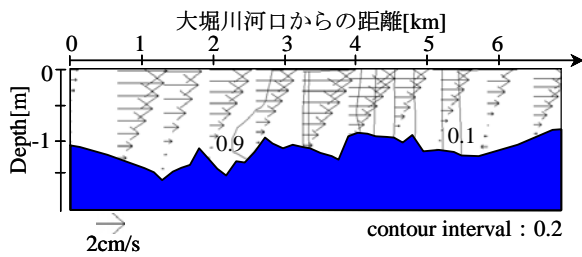


図-10 縦断面内における流速ベクトルとトレーサー濃度コンター (11/29, 12:00)

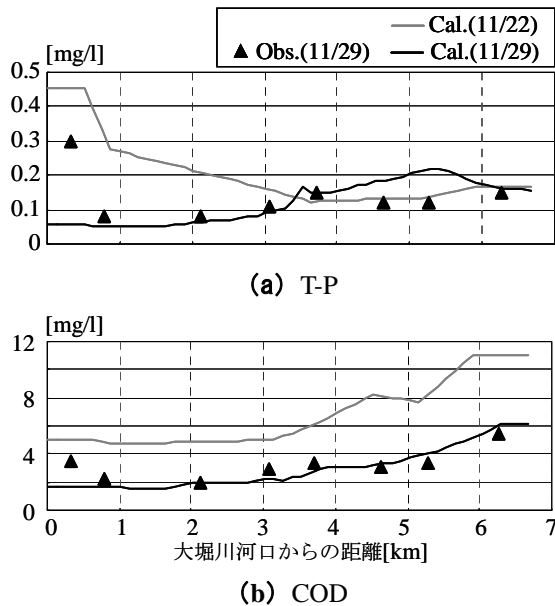


図-11 水質濃度の計算値と観測値の比較

層ともに見られることから、浄化用水は鉛直混合しながら水平方向に移流・拡散しているものと考えられる。また、採水調査の行われた 11/29 における計算結果を見ると、沼西側の大部分ではトレーサー濃度が 0.8 以上となっており、図-6 に示した N/P 比の観測値と概ね一致した傾向が得られている。

より詳細な鉛直分布構造を把握するために、観測点 Stns.1~8 を通る沼内縦断方向における鉛直二次元断面内での流速ベクトルとトレーサー濃度コンターを図-10 に示す。鉛直循環流構造に関しては、場所的に一様に生じていないことが分かる。具体的には、沼東側では表層と底層の流向が異なっているものの、中央部や大堀川河口部付近では、表層と底層の流向は一致している。また、トレーサー濃度は鉛直方向にほぼ一様化していることがうかがえる。

c) 浄化用水挙動と短期水質変動の関係

水質項目に関する三次元移流拡散シミュレーション結果から、11/29 における T-P と COD の沼内縦断分布に関する計算結果と観測結果を図-11 に示す。

これらの計算結果を見ると、大堀川河口付近を除いて、両者は良好に一致していることが分かる。すなわち、本計算により、T-P に関しては沼西側において顕著な水質濃度の低下が見られ、COD については沼全域において水質濃度が減少する、という観測で見られた水質環境変化の様子を再現できていることが分かる。これより、浄化用水量変化に起因した短期的な水質環境変化は、底泥などによる内部生産効果よりも、浄化用水の移流・拡散過程による影響が大きいことが明らかとなった。

5. 結論

本研究では、浄化用水注水量変化が手賀沼の水質環境に与える影響を把握するために、現地観測と数値計算を実施した。現地観測結果から、浄化用水量によって水質濃度が時空間的に変化するものの、その変化の様子は水質濃度毎に大きく異なっていた。また、数値シミュレーションを行ったところ、浄化用水量変化に起因した沼内の短期的水質変動は、浄化用水の移流・拡散過程による影響が大きいことが明らかとなった。

謝辞：本観測の実施に際して、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室の学生諸氏には多大なる御助力を頂いた。また水質分析に際しては、同学科出口浩助教授に様々な便宜を図って頂いた。本研究の一部は、文部科学省科学研究費若手研究 (B) (課題番号：13750498, 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。

参考文献

- 1) 山田安彦・白鳥孝治・立本英機：印旛沼・手賀沼 一水環境への提言一，古今書院，pp.1-167, 1993.
- 2) (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.
- 3) 本橋敬之助・立本英機：湖沼・河川・排水路の水質浄化 一千葉県の実施事例一，海文堂，pp.1-128, 1997.
- 4) 二瓶泰雄・山崎裕介・谷脇大介・大竹野歩・西村司：現地観測に基づく手賀沼における水温・Chl.a 濃度・流動特性に関する検討，水工学論文集，Vol.47, pp.1231-1236, 2003.
- 5) 下水試験方法 上巻 一1997年版一，日本下水道協会，pp.147-193, 1997.
- 6) 上水試験方法 一1978年版一，日本水道協会，pp.503-508, 1978.
- 7) 二瓶泰雄・山崎裕介・西村司・灘岡和夫：浅水流場を対象とした三次元数値モデルの近似手法に関する検討～ σ 座標系と静水圧近似に着目して～，海岸工学論文集，Vol.49, No.1, pp.411-415, 2002.

(2003.4.11 受付)