

富栄養化の進んだ湖沼における導水等による 水質改善に関する考察—印旛沼を事例にして—

WATER QUALITY CHANGE IN EUTROPHIC LAKES DUE TO DIVERSION AND WATER SUPPLY FROM NEARBY RIVERS, CASE FOR INBA MARSH

天野 邦彦¹・中西 哲²
Kunihiko AMANO and Satoru NAKANISHI

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

²正会員 工修 (独) 土木研究所 河川生態チーム 研究員 (〒305-8516 つくば市南原1-6)

Water quality conservation for eutrophic lakes has many perspectives in terms of factors by which phytoplankton growth is affected. Change of water control such as diversion and water supply from nearby rivers seems to provide instantaneous effect on water quality of the lakes. However, these changes will lead to the change of both retention time and nutrient supply. Therefore, it is essential to predict water quality change by simulation analysis. We have conducted several water quality simulation which deals with the change of water control in Inba marsh. Since nutrient concentration of nearby rivers is high, dilution effect is cancelled by the increase of nutrient loading. Large amount of water with relatively lower nutrient concentration stored in northern part of the marsh has potential to improve water quality of western marsh without deteriorating the water quality of other water body.

Key Words : *Eutrophication, retention, nutrient loading, simulation*

1. はじめに

湖沼における富栄養化に伴う水質汚濁現象は、植物プランクトンの大量発生に伴う水への着色、着臭や有機物量の増加が問題として顕在化する場合が多い。このため、植物プランクトンの増殖を抑制するために種々の対策が実施されてきているが、植物プランクトンを湖内で大量に増殖させないための方法は、いくつかの方向性に分類できると考えられる。

一般的に湖沼においては、栄養塩類、光、温度の3要因が植物プランクトンが増殖するのに適した状況で、ある程度の滞留時間があれば、植物プランクトンの大量発生につながる。このため、伝統的に上記の3要因に滞留時間を加えた4つの要因に働きかけることで水質対策を講じてきており、それぞれの要因別に対策の方向性が存在する。

一つ目の要因である植物プランクトン増殖に関係する必須元素である窒素やリンの湖内濃度を低下させる方法のみについて考えても、異なる方向性を持つ手法が存在する。最も根本的な方法(方向性)としては、下水処理の普及など流域からの栄養塩類負荷を低下させる方法が

挙げられるが、この他に、水質汚濁が進んだ河川の流入を迂回させて栄養塩類負荷を低下させる方法や、底泥除去など内部負荷の抑制をねらう方法がある。最初に挙げた流域からの栄養塩類負荷そのものの抑制であれば、流入栄養塩濃度の低下という形でのみ影響が生じる。しかし、下水の放流が系外の場合や汚濁河川を迂回させた場合は、栄養塩類の流入負荷は減少するが、同時に流入水量も減少するため、湖沼における滞留時間が増加するという影響も同時に生じることになる。底泥の除去についても、大規模な事業の場合、湖沼の容積を増加させることで、これもやはり滞留時間の増加を同時に引き起こす可能性がある。

このように見ると、多くの水質保全対策は、植物プランクトン増殖に関わる上記の4つの要因のどれかに働きかけることを目論んで実施されるが、同時に別の要因から見た場合、条件的に不利な方向に働く場合もありうる事がわかる。我が国において富栄養化に伴う水質問題を抱える湖沼を取り巻く状況は単純ではなく、水質保全対策を講じる場合、細心の注意が必要である。

本研究においては、千葉県に存在する富栄養化が進んだ印旛沼を対象に、詳細な水質データと水質シミュレーションモデルを用いて栄養塩類動態と植物プランクトン

増殖との関係について検討を行うと共に、いくつかの想定された水質保全対策のシナリオに基づいた水質予測計算を実施することで、種々の対策が与える沼水質への影響について整理することで、多くの制約が存在する状況下において、より効果的な水質保全対策を確立していくための考え方について議論を行う。

2. 研究方法

本研究の対象とする印旛沼は、浅い富栄養化した沼であり、種々の水質対策が講じられている。ここでは、伝統的な水質保全対策に加えて沼内の植生を修復することで植物プランクトン増殖を緩和させようとする試みも開始されている¹⁾。この対策も含め、いくつかのシナリオに基づく水質変化予測を実施した。

(1) 現地概要

現在の印旛沼（千葉県）は、図-1の左下に位置する西沼と右上に位置する北沼、及びこれらを結ぶ捷水路からなっている。主要な流入河川は、西沼南東端から流入する鹿島川（流入直前に高崎川と合流している）、西沼西端から阿宗橋を経て流入する桑納川（流入直前に神崎川、新川と合流している）が挙げられる。また、北沼は図中上端に位置する河川により利根川と接続している。これは酒直機場、印旛機場の2つの水門により流動が管理されており、印旛沼水位が高い場合は、利根川へ印旛沼水を放流しているほか、印旛沼水位が低い場合には、利根川からの取水が行われている。また、新川上流には大和田機場というポンプ施設があり、出水時に印旛沼水位が上昇した際には、新川を経て東京湾へ出水の放流を行うことが可能である。また、灌漑、工業用水、水道水の取水量が大きく、取水による直接利用が印旛沼の水循環に大きな影響を与えているのが特徴である。

現在の印旛沼および流域特性は、表-1に示すとおりである。特徴としては、流域人口が多く、下水道も完全に普及していないことから、流入河川の平均的水質は全リンで0.1 (mg/l)、全窒素で3.0 (mg/l)程度であることから、生産性が高く、富栄養化した湖沼である。しかし、水深が浅いことから水中では底層でも貧酸素化するという問題が生じることはない。

(2) 水質シミュレーションモデル

水質解析モデルは、Cerco and Cole²⁾のモデルを改良して作成したモデルを使用した。詳細については、既報³⁾を参照のこと。

今回の検討に際しての大きなモデル改良点としては、湖沼内の沈水植物等の植物群落による底泥巻き上げ抑制効果を算定する計算モジュールを追加した³⁾ことが挙げられる。これにより植生修復による水質改善効果算定も実施可能となった。

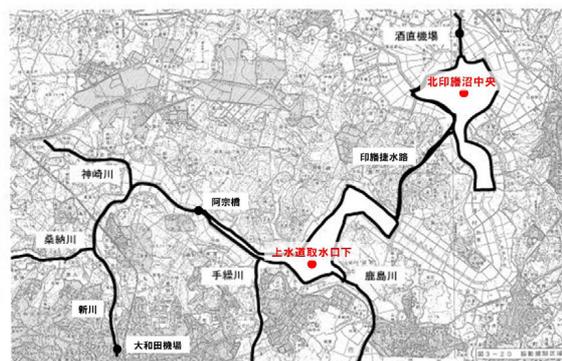


図-1 印旛沼平面図および水質調査地点

表-1 現在の印旛沼および流域特性

平面積 (km ²)	11.55
容量 (m ³)	27,700,000
周囲長 (km)	38
水深 (m)	Max. 2.5, Ave. 1.7
平均滞留時間 (day)	22.8
流域面積 (km ²)	541.1
流域人口	718,000
下水道普及率	75.6 %

(3) 水質解析計算

a) 水質再現計算

水質変化の再現計算を上記の数値シミュレーションモデルを用いて行った。平成14年7月1日を初期値として、平成15年12月31日までの1年半の期間について計算を行った。計算格子は水平方向に50mX50m、鉛直方向に5層に区分した。

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、気温、湿度、降雨量については佐倉気象観測所で観測されたアメダスデータを用いた。日射量、雲量に関しては、千葉の気象観測所での観測値を用いた。河川流入水量については、鹿島川、高崎川、桑納川、神崎川、手繰川、師戸川に関しては観測結果を用いた。上水及び農水取水量は、水資源機構により整理されたデータの提供を受け、これら実績値を取水地点から取水する形で取り扱った。また、酒直機場、大和田機場からの流出量についても水資源機構から実績データの提供を受け、これら実績値を入力データとして使用した。流域からの直接流入や、地下水の流出量は観測されていないため、上記の水収支と沼水位変化から全体の収支がとれるように調整し、過不足分を河川流入量に加えることで調整した。この際、北沼に流入する2河川にも流域面積で按分した流入量を配分した。

流入河川水質については、千葉県により行われた水質観測結果と流量とを用いて灌漑期（4月1日から8月31日）と非灌漑期毎に2種類のL-Q式を作成して日ごとに観測された流量データをこの式に代入することで日ごとの水質変化を算定し、計算入力条件とした（図-2に

一例を示す)。印旛沼においては、沼から取水した灌漑用水を周辺水田で利用しており、余剰水が沼に再度流入すると考えられ、灌漑期と非灌漑期においては、河川流量と水質との関連特性が異なっていると考えられる。

また、河川水質調査において、無機態栄養塩類の観測データが少ないことから、出水時水質観測結果を用いて、流量に応じた溶存態比率（1 μ のフィルターで濾過した後のリンであれば溶存態のリン(DP)と全リン(TP)の比率、窒素であれば溶存態の窒素(DN)と全窒素(TN)の比率)の変化を求めて(図-3に一例を示す)、流量に応じてL-Q式から求められるTN、TP濃度からDP、DN濃度を求めた。観測値の特性に従い、DPはリン酸態リン濃度と置き換え、DNは測定値に応じて季節毎に設定した比率で硝酸態窒素とアンモニア態窒素に変換した。印旛沼流域からの栄養塩類負荷について考えた場合、特にリン酸態リンについては、市街地からの負荷が多いと考えられる。このような点源負荷が多い場合は、流量増加時にむしろ濃度が減少する希釈型の流出特性を示すため、このような処理が必要であった。懸濁態の流入については、この逆の傾向が見られた。

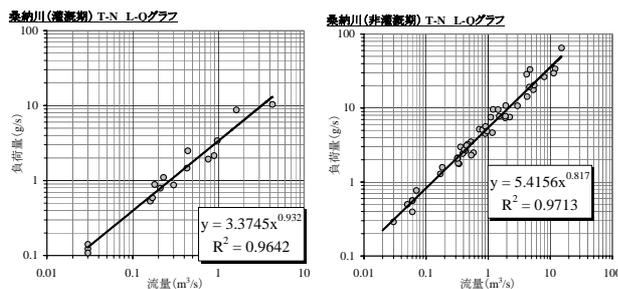


図-2 灌漑期、非灌漑期別の流量～負荷量式の例

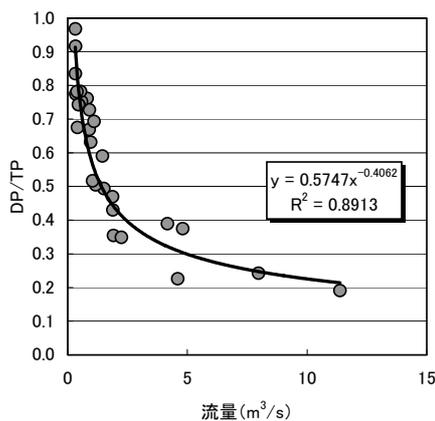


図-3 流量増加に伴う溶存態比率の減少

b) 水質保全対策の影響解析

以下に示す水質保全対策によりどのような沼水質変化が生じるかについて検討を行った。

① 植生帯整備による水質改善効果の検討

沼周囲に100m幅で植生帯を形成した場合の水質変化について、検討を行った。

② 導水・取水方式変更・流動化による水質変化の検討
利根川からの導水、上工水および灌漑用水の取水位置を変化させた場合の水質変化について検討を行った。それぞれの考え方は、以下の通り。

i) 利根導水ケース

印旛沼の北側に位置する酒直機場から15m³/sの流量を常時揚水し、大和田機場から同量を常時東京湾へ排水する形で利根川の水の導水を実施するとしたケースである。想定上は現状の施設を使用することで実施可能なケースである。導水水質は利根川布川地点の値を用いて計算を行った。また、平常時のみ運転し、降雨時は停止するとした。

ii) 舟戸導水ケース

利根川の水を舟戸大橋地点へ常時15m³/sの流量で導水し、北側の酒直機場から同量を利根川へ排水する形で利根川の水の導水を実施するとしたケースである。現状の施設では、実行できないが、手賀沼で実施している北千葉導水による対策と同様の考え方で導水を行うことを想定したケースである。利根導水ケースと同様に導水水質は利根川布川地点の値を用いて計算を行った。また、平常時のみ運転し、降雨時は停止するとした。

iii) 工業用水・上水道用水取水施設の北印旛沼への移設

現在、西印旛沼の南側で取水している上工水の取水施設を北沼の東側に移設するとしたケースである。これも現状の施設では実行できないが、北沼の水質は西沼に比べて良好なため、取水水質の改善が期待できる。取水量は、現状と変わらないとして計算を行った。

iv) 沼自体の流動化(沼内循環)

北側の酒直機場より北印旛沼側で常時15m³/s北印旛沼の水を取水して、この取水した水を舟戸大橋付近(舟戸導水ケースで導水を行うとした地点と同様)に注入すると想定したケースである。現状の施設では実行できないが、沼の水を強制的に循環した場合、沼水質がどのように変化するかについて検討したものである。現在、印旛沼の水質は、西沼から北沼にかけて、若干ではあるが良くなる傾向にあるため、循環により、どのような水質変化が起こるかについて検討した。

v) 農業用水機場統合ケース

新川周辺で取水を行っている灌漑施設を統合し、上流側で取水した場合を想定したケースである。これも現状の施設では実行できないが、流入河川水が沼の水と混合する前に(栄養塩類濃度が高い場所で)灌漑に取水することで沼への栄養塩類負荷の軽減をねらったものである。

上記5種類の導水・取水方式変更・流動化による水質変化の検討における水操作方法の概略を図-4に示した。

③ 植生再生検討

現在消失してしまった沈水植物群落を修復した場合の

水質変化について、検討を行った。沈水植物群落の正確な分布調査結果が存在しないため、1988年におけるオニビシ（浮葉植物）群落の分布域（図-5）に沈水植物が分布すると想定した計算を行った。

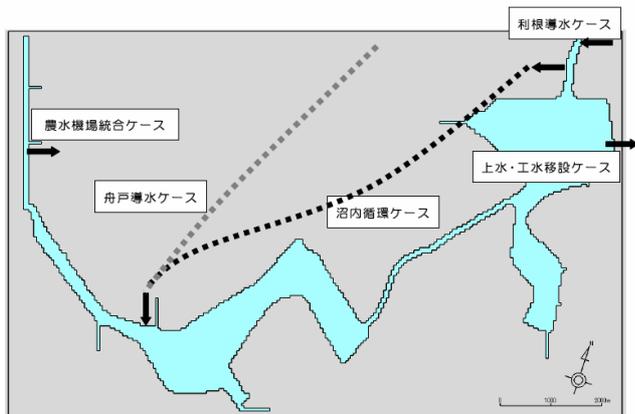


図-4 計算対象としたケースにおける水操作方法

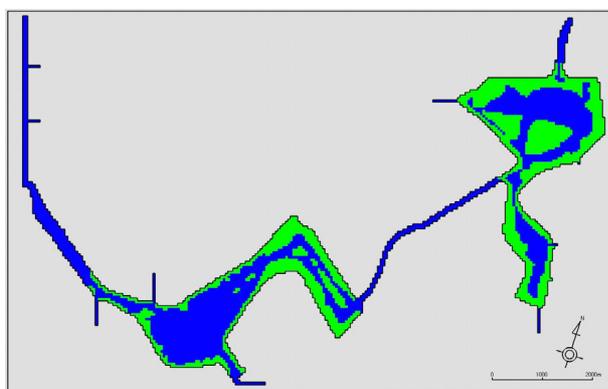


図-5 1988年の植生分布（緑色の部分が植生域）

④ 施策を複合した場合の水質変化検討

植生帯整備、新川における浚渫、桑納川浄化施設改良の施策を同時に実施した場合の水質改善効果について検討した。植生帯整備については、上記①同様に植生部分の巻き上げ制限を考慮し、新川における浚渫については、底質が浚渫により西沼と同等になると仮定し、溶出速度削減の効果を考慮に入れた。また、桑納川浄化施設改良については、COD82kg/日、全窒素42kg/日、全リン1.4kg/日の負荷除去が可能と想定して、流入負荷をその分削減した計算を実施した。

3. 結果

(1) 水質再現計算

水質再現計算結果の一部について、現場における観測値と共に図-6に示す。印旛沼の水質は、年間を通して高い生産性を示す。特に夏季をはさんで、春季から秋季にかけては、クロロフィルa濃度が非常に高い値で推移する。栄養塩類について見ると、ほぼ一年を通して、リンが枯渇している。特に西沼では、夏季以外は硝酸に余

剰が認められることから、リン制限の状態であることが分かる。逆に夏の一時期は、リン酸態リンに余剰が残っており、この時期においては、窒素が枯渇（硝酸態窒素がほとんど無い時期が特に北沼で顕著である）し、窒素制限になる場合があることがわかる。リンに比べて窒素は底泥からの回帰が少なく、流域からの供給に依存している。夏季においては、リンは底泥からの回帰量が増加するのに対して、窒素は灌漑の影響を受けて、負荷が減少する傾向にある。このため、夏季においては特に北沼で窒素制限になっている。水質再現計算は、このような窒素とリンとの動態を良好に再現する結果となっており、物質収支やそれに伴う植物プランクトンの変化を妥当に再現していると言える。

(2) 水質保全対策の影響解析

水質保全対策による水質変化予測結果について、紙面の都合から、クロロフィルa濃度の経時変化を一部抽出して図-7に示す。図を見やすくするために、図-7においては、各ケースについて、現況再現計算（図-6）からの差分をとり、その時間的変化を示している。値が負になる場合、水質改善が見られるということになる。

酒直機場からの利根川水導水は、西沼における水質改善効果は期待できるが、北沼においては、逆に水質が悪化する傾向が見られる（図-7 (a), (b) 緑ライン）。また、舟戸大橋付近への利根川水導水は、西沼において特に水質悪化が見られ、北沼においては、変化は顕著ではなかった（図-7 (a), (b) 青ライン）。上水道取水口移設では、上水道取水口下では西沼に流入した高栄養塩濃度水の滞留を助長するためか水質悪化が見られ、北沼ではあまり変化は見られなかった（図-7 (c), (d) 緑ライン）。施策複合、農業用水取水口統合については、効果は限定的だが、施策複合では北印旛沼で夏季に水質改善効果が見られた（図-7 (c), (d) 赤、青ライン）。これは、北沼では現状でも栄養塩が枯渇気味であるため、栄養塩類の負荷削減効果が発揮されやすいためと考えられる。

沼内循環ケース結果（図-7 (a), (b) 赤ライン）を見ると、北沼においては、大きな変化が見られないものの、西沼においては、酒直機場からの利根川水導水に匹敵するか上回るほどの水質改善が見られる。内部での循環の場合、濃度変化が緩和されるだけで、全体的な水質改善は見られない場合が通常である。今回の計算は、これとは異なる結果を示した。西沼におけるクロロフィルa濃度の低下は、無機態栄養塩類の濃度が低い北沼の水を大量に西沼に循環させるために、西沼における植物プランクトン増殖が減少すると共に、滞留時間が減少するため生じたもので、通常通りの反応であるが、北沼においては、逆にクロロフィルaが上昇するはずが、計算結果を見ると、北沼においても若干の減少を示している。計算は、北沼においては懸濁物の沈降が多く、このため植物プランクトン量が減少したことを示している。

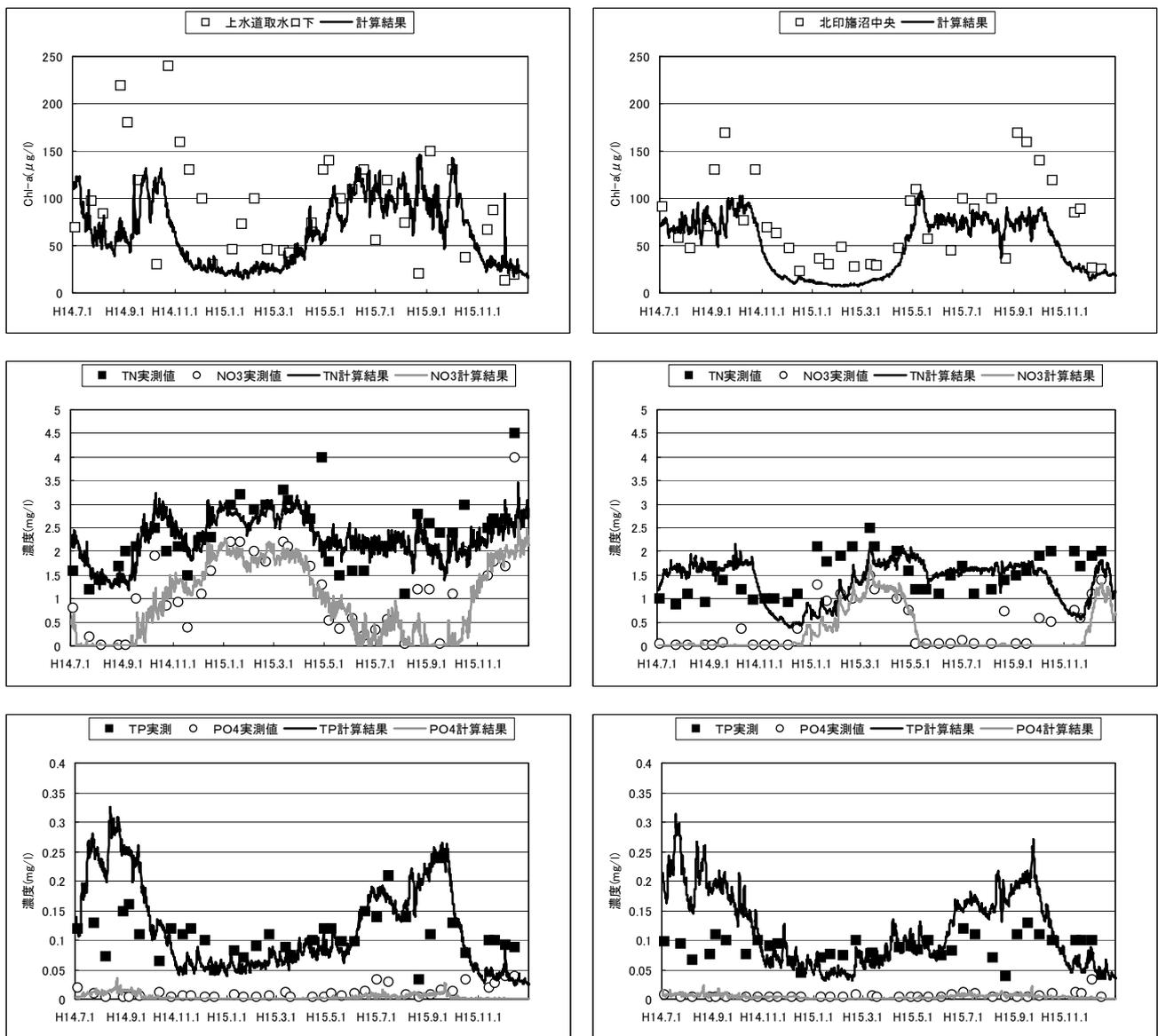


図-6 西沼（上水道取水口下）および北沼（北印旛沼中央）地点における水質観測結果と再現計算

4. 考察

一般的に導水は、回転率を上昇させることで植物プランクトンの増殖期間を減少させることで水質改善をねらうものである。しかし、現状での利根川からの導水は栄養塩類負荷も同時に増加させるため、場所により影響の出方が異なる。図-8に示すように、導水地点直近では、クロロフィルaは低下するが、無機栄養塩濃度が低下しきらない場所では、クロロフィルaの低下は起こらず、上昇する場合もある。ただし離れた地点で無機栄養塩濃度が十分低下する場所では、クロロフィルaの低下（水質改善）が見られる。

これは、植物プランクトン増殖について、完全混合で流量と湖沼容積が一定とした場合に成り立つモデルで単

純化して考えるとわかりやすい。このようなモデルを考えると、植物プランクトン濃度は、以下の式で表される。

$$C = C_0 \exp\left\{\left(\mu - \frac{Q}{V}\right) \cdot t\right\} \quad (1)$$

ここで、C:植物プランクトン濃度、 μ :比増殖速度、Q:流入量、V:容積、t:時間である。

この式から導かれる単純な結論は、比増殖速度を上回る回転率で導水を行えば、導水自体のクロロフィルa濃度が高くない限り、湖沼内のクロロフィルaは増加しない。すなわち水質改善が期待できるということである。

しかし、導水の無機態栄養塩類濃度が高い場合は、回転率を上げると同時に、比増殖速度も増加させることになる。このため、無機態栄養塩類の濃度が高い水を使うほど、導水による水質改善効果は低くなる。図-8に見

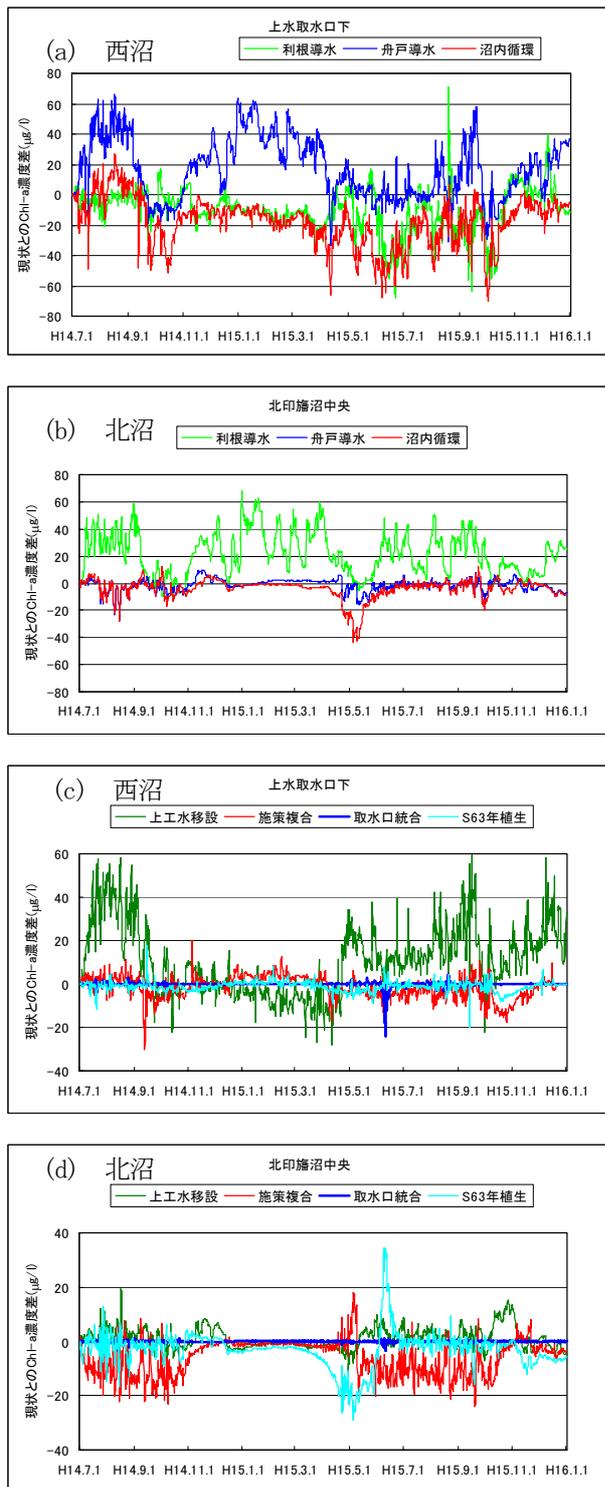


図-7 水質対策効果の比較

られる場所による水質変化特性の違いは、栄養塩類濃度の相違により導水の影響が異なった結果であると考えられる。このように現状における印旛沼のように周辺に栄養塩類濃度が低い河川が見あたらない場合、導水による水質改善は、水量の制約を考慮に入れると局所的にのみ可能であると考えられる。

西沼と北沼では、無機態栄養塩類の流入過程および懸濁物の沈降特性が異なっている。特に北沼には無機態栄養塩類濃度が低い大量の水が存在する。北沼の水を西沼

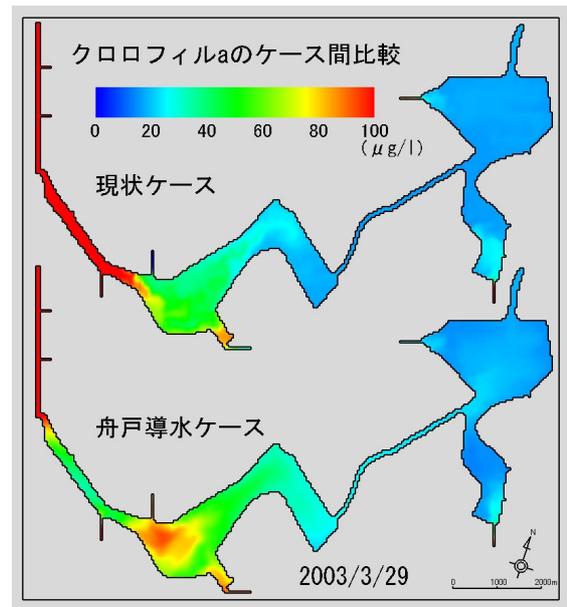


図-8 導水の平面的影響の例

と循環させるケースの計算結果は、平面的水質変化が大きい上に形状が不均質な湖沼の場合、人為的水循環が単純な混合とは異なる水質変化を生じさせる可能性を示したものであり、今後の対策案として検討する価値がある。特に北沼においては今後植生の再生が進む可能性がある。この場合、植生が繁茂することによる懸濁物沈降促進、動物プランクトンによる捕食の増加といった要因により、植物プランクトンの一層の抑制が期待できる。

5. まとめ

水質問題を抱える湖沼の周囲に良好な水質の水が大量に存在することはまれであるため、導水や流入水のバイパスのような対策を検討する場合、回転率と栄養塩類負荷の変化とを同時に考慮する必要がある。また、平面的な水質分布についての検討も重要である。

謝辞：水質調査に関しては、国土交通省利根川下流河川事務所ならびに千葉県、特に印旛土木事務所のご担当者にご協力を頂いた。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 千葉県, 印旛沼流域水循環健全化 緊急行動計画書, 2004.
- 2) Cerco, C. F. and 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.
- 3) 天野邦彦, 時岡利和, 対馬孝治: 浅い湖沼の水質への水生植物の影響解析, 水工学論文集, 第49巻, pp. 1219-1224, 2005.

(2007. 9. 30受付)