

湖沼への流入時期で分画した栄養塩類の 動態解析モデルの開発と試算

DEVELOPMENT AND TEST OF A MODEL TO ANALYZE DYNAMICS OF
NUTRIENTS BEING DIFFERENTIATED BY ENTERING PERIOD TO LAKES

天野 邦彦¹
Kunihiko AMANO

¹正会員 博(工) 国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室長
(〒305-0804 つくば市旭一番地)

Most water quality models need to be calibrated with many parameters to fit the calculation results to observed values and this process often includes vague decision. Water quality change in shallow lakes is highly dynamic because it is influenced by both fluctuation of river inflow and nutrient efflux from bottom sediments. This character makes it more difficult to calibrate parameters if we just take ordinary calibration procedure.

I have developed and tested a model to analyze the dynamics of nutrients which is differentiated by entering period to lakes. Also fractionated is internal and external nutrient load. This model showed advantage in understanding water quality change by clarifying the mechanism of the processes.

Key Words : Nutrients, Water Quality Model, Parameter Calibration

1. はじめに

湖沼における水質変化は、従来種々のモデルにより評価されてきている。湖沼や貯水池水質モデルは、対象とする環境要素やモデル特性によりいくつかの種類に分類出来るが、近代的な数値モデルとしては、湖沼・貯水池の水温構造の鉛直方向の変化を模擬するために鉛直一次元モデル¹⁻⁴⁾が1970年代より数多く開発された。これは、新たに建設された貯水池により放流水温が流入水温に比べて大きく変化してしまう問題や、日本ではさらに放流濁水の長期化問題解決のために開発が進められてきたものである。水温のみの解析とは異なり、濁水解析を行う場合は、流下方向の濃度差を考慮する必要があるために、運動方程式を解いて流動を扱う二次元モデル(平面二次元、鉛直二次元⁵⁾)、三次元モデル⁶⁾が開発され、計算に乱流モデルを組み込んだものも出現している。このような流動計算の精度向上によって荒天時に見られる水塊構造の急変も再現することが出来るほか、局所的な現象の解明に利用できるため、種々のモデルが開発されている⁷⁾。

生態系影響を評価する水質モデルについては、窒素・リン負荷量の増大に伴う湖沼・貯水池における一次生産

の増加(富栄養化現象)の対策の評価を行うために、植物プランクトン増殖のモデルを組み込んだ低次生態系モデル(たとえば、Di Toro et al.⁸⁾)が開発されてきた。Di Toro et al.⁸⁾のモデルでは、植物プランクトン(クロロフィル)、植食性動物プランクトン、肉食性動物プランクトン、有機および無機リン、有機窒素、アンモニア態及び硝酸態窒素の8つの変数を動的に組み合わせて水質変化を模擬している。このモデルは、1960~1970年代にかけて富栄養化に伴う水質汚濁から「北米の死海」と呼ばれたエリー湖における水質解析に用いられた。当初は、電子計算機の処理能力に限界があったため、モデルにおいては流動に関して水の運動方程式を解くことは行われず、湖を分割してそれぞれの構成部分間の移流量を定常値として与えることで水の流れによる水質変化を表現していた。米国においては、ほぼ同時期に湖沼や貯水池における時空間的な水質変化を追跡するための一般モデルとして開発されたWASP(Water Analysis Simulation Program)も使用されるようになった。このモデルは現在でも米国環境保護局により維持管理されており⁹⁾、北米における水質研究に多く利用されている。

わが国においても、初期の水質・生態系解析の数値モデルとして、1970年代から1980年代にかけて、琵琶湖を対象にしたモデル¹⁰⁻¹⁴⁾、霞ヶ浦を対象にしたモデル¹⁵⁾、

貯水池を対象にしたモデル^{16, 17)}などが開発されており、その後も数多くの適用例がある。

生態系影響を評価する水質モデルによる水質変化現象の再現のためには数多くのパラメータを設定する必要があるという点が共通している。これらのパラメータがとりうる値については、既往事例から一般的な範囲が設定されているものの、採用したパラメータ値の組み合わせによって予測結果が異なるため、パラメータ値の感度分析を行い、鋭敏なパラメータ設定には十分配慮すると共に、現地における水質変化特性を十分に咀嚼して、妥当な設定をする必要がある。通常モデルでは時空間的な水質変化は、モデルにおいて要素分割した過程ごとの変化の総和として示されるが、松岡¹⁵⁾は、霞ヶ浦における水質解析において詳細なパラメータの感度分析を実施すると共に、計算要素ごとに計算結果に与える影響度合いを分析しており、計算の妥当性や精度を高める対応策として示唆に富んだ研究を実施している。

本研究は、数多くの流入河川が存在すると共に人為的取水が生じることで複雑な水の流れが生じており、また流入栄養塩類濃度が高いことから生産性が非常に高く、水深が浅いこともあり水質変化が激しい千葉県印旛沼における水質解析計算を対象に、水質計算結果の妥当性を向上させることを目的として、新しく要素計算を実施し、水質変化機構についての詳細な検討を加えたものである。

具体的には、印旛沼における時空間的な水質変化が、季節的に大きく変動する流入河川水量にどのように影響を受けているかを調べることをねらい、沼内の地点毎での植物プランクトン濃度変化がいつ流入した栄養塩類を摂取したことで生じているかについて定量評価可能なモデルを開発し検討を行った。

2. 研究方法

(1) 要素計算の考え方

本研究で開発したモデルは、湖沼内に存在する解析対象とする水質項目について、通常モデルの様に物質濃度変化の時空間的变化を計算するのみではなく、湖沼に流入した時間を要素として、その内訳を追跡しながら計算するものである。流入時期の分割単位は1ヶ月とし、各計算格子における水質項目の全存在量（濃度）に占める各月毎に流入した成分を逐次計算する。

通常の水質解析モデルに共通な解析構造は、計算対象領域を格子により区分して、移流拡散モデルを解くことでオイラー的に時空間的水質変化を求めるということである。計算対象としている水質項目が項目そのもの自体の変化が生起しない保存量である場合などは、その項目の濃度変化を記述する移流拡散方程式は線形微分方程式として表される。移流拡散方程式が線形であれば、湖沼に流入する計算対象水質項目について、通常と同じ移流

拡散方程式を適用しつつ計算変数を流入月毎に独立の変数として個別に分割して計算すれば、各月に流入した計算対象水質項目の濃度を個別に計算することが可能である。また各計算格子において流入月毎の濃度の総和をとれば、流入月の区別を行わない通常の計算における水質濃度と一致する。

しかし、通常の水質変化は空間的な移流拡散のみにより生起するものではなく、水塊の移動を伴わない生化学的变化によっても駆動されるのが通常であり、このような変化は非線形方程式で記述される場合が多い。例えば、栄養塩類濃度が植物プランクトンの増殖速度を規定する関係は、Monod式の様非線形であり、月別に流入した栄養塩類濃度を個別に式に当てはめて計算した結果を足し合わせることで、増殖速度を求めることはできない。

栄養塩類の動態を記述するモデル式は、非線形項を含むことから、これに対応するため今回開発したモデルは、計算対象とする物質（計算項目）の濃度を表す変数の次元について時間(t)、場所(x,y,z)に負荷流入月(i)を加えて計算するモデルとした。このようなモデルを作成することで、各物質濃度変化について負荷流入時期の情報を記録しながら計算することができる。水質変化の計算は、以下に示す手順で実施した。

式(1)に示されるように、ある地点(x, y, z)におけるある時点(t)の物質A（仮名）の総濃度C(x, y, z, t)は、異なる流入時期（月別）(i)を持つ物質A濃度(C(x, y, z, t, i))の総和であることは自明である。

$$C(x, y, z, t) = \sum_i C(x, y, z, t, i) \quad (1)$$

流入時期(i)別の物質A濃度について式(1)を用いて一旦総和すれば、次の時間ステップにおける物質Aの総濃度の移流、拡散、沈降、反応などの過程(j)毎の変化量は通常モデルにより計算可能である。通常モデルでは、物質Aの流入時期は考慮せずに、総濃度のみを対象に次の時間ステップにおける過程(j)に起因する変化を求めた上で、全過程による変化を総和して、逐次総濃度変化を求めている。この次の時間ステップにおける物質Aの総濃度の過程(j)毎の変化量を $\sum_j C(x, y, z, t)$ と示すことにする。各種の過程(j)による変化量について、流入時期(i)により変化速度の相違があるとは考えにくいことから、流入時期(i)を持つ物質Aの過程(j)による濃度変化量($\sum_j C(x, y, z, t, i)$)は、その時間ステップにおける物質A総濃度に占める各流入時期(i)別の物質A濃度の割合($C(x, y, z, t, i) / C(x, y, z, t)$)で按分した量と考えられるというのが、本モデルの考え方である(式(2))。

$$\begin{aligned} & \sum_j C(x, y, z, t, i) \\ &= C(x, y, z, t, i) / C(x, y, z, t) \cdot \sum_j C(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (2)$$

さらに、各種反応などの過程(j)ごとに式(2)で求められた流入時期(i)別の物質A変化量を合算することで、次の時間ステップにおける物質Aの流入時期(i)別濃度分布が

計算できる(式(3)) .

$$C(x, y, z, t+1, i) = \sum_j \sum_j C(x, y, z, t, i) + C(x, y, z, t, i) \quad (3)$$

上記の手順を繰り返すことで、流入時期(i)を記録しながら物質A濃度の変化を計算することが可能となる。本研究では、植物プランクトン増殖に与える栄養塩類の影響について流入時期毎の特性を検討することを想定している。植物プランクトン形態として取り込まれる栄養塩類についても、流入時期(i)を記録しながら計算を実施した。

(2) モデル概要

水質モデルの概要は、概要図(図-1)の様に無機態の窒素やリンが植物プランクトンに摂取され、そして植物プランクトンの枯死などにより窒素やリンに回帰する構造としている。本研究で開発した水質解析モデルは、Cerco and Cole¹⁸⁾のモデルを改良して作成しているが、水質変化過程のモデル化の特徴として、窒素、リンの栄養塩類を植物プランクトンが利用可能な溶存態、動植物プランクトン自身が含有する分としての懸濁態、及び生物遺骸等により構成される非生物分(デトリタス)の懸濁態有機窒素、リン、炭素に分けることで、植物プランクトンによる摂取、懸濁態の沈降といった現象に基づく栄養塩類の動態が、適切に再現されるようにしていること、また、底泥からの窒素及びリンの回帰についても、巻き上げによる懸濁およびアンモニア態窒素及びリン酸態リンの溶出とに区分し、それぞれ評価していることが挙げられる。

河川を通して流入した時期により区別した栄養塩類負荷が湖沼内でどのように分布するかを計算するために、図-1に示した窒素およびリンの各構成要素(動植物プランクトンを含む)に関しては、式(1)~(3)に示したように流入時期毎(本研究においては月ごと)の変数にさらに細分化している。動植物プランクトン形態以外の窒素およびリンの各構成要素は、河川から計算境界を通して流入させる際の時点での月を割り当てる。

モデル計算においては、図-1に示す水質変化機構によって計算構成要素間を窒素およびリンが移動した場合も流入時点の情報を保持する様に設定している。河川から流入した窒素およびリンが図-1に示す構造で循環する中で流入時点の情報を保持することが出来る。ただし、本稿で示す計算において、計算開始時点において湖沼内に存在した分と計算期間中底泥から回帰した分に関してはその他の起源として取り扱っている。

(3) 解析対象湖沼概要

解析対象とした印旛沼(千葉県)は、図-2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。印旛沼は平均水深1.7m、最大水深

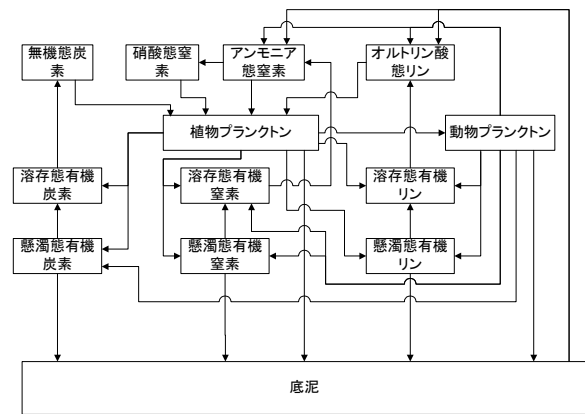


図-1 モデル概要

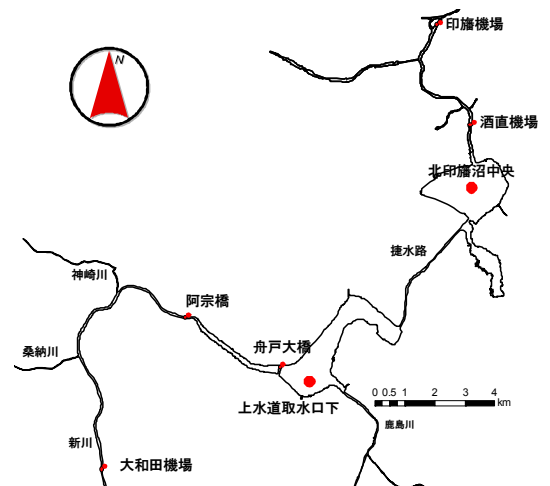


図-2 印旛沼平面図および水質調査地点(●は位置)

2.5mで沼底の傾斜が極めて緩い形状を有した浅い沼である。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の特徴としては、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)程度であり、生産性が高く、富栄養化した湖沼である。しかし、水深が浅いため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。

(4) 計算条件

水質変化の再現計算は以下の条件で行った。平成14年7月1日を初期値として、平成16年6月30日までの2カ年を対象に計算を行った。計算格子は水平方向に50m×50m、鉛直方向に5層（座標）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、佐倉および千葉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、師戸川に関しては千葉県が実施した観測結果を用いた。上水及び農水取水水量および酒直機場、大和田機場からの流出入量は、水資源機構により整理された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、地下水の流出入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水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。

計算に必要となる種々の条件は、流入時期を区別しない既往モデルの適用を通して同定されている。水質再現計算結果については、既報¹⁹⁾を参照のこと。

3. 研究結果

本稿では、栄養塩類負荷の流入時期に着目した解析を行ったが紙面の都合上、窒素を中心に計算結果の経時変化を示す。図-3に示す濃度は、流入時期別に分画した濃度であり、ある時点において図中の要素を総和すれば、その時点での当該水質濃度になる。また、計算開始時の平成14年7月に流入したTN、TPIは2ヶ月程度でほぼ消失する結果が示されている。このため初期条件の影響を無視できると考えられる平成14年9月以降を対象に議論する。

(1) 全窒素

西印旛沼と北印旛沼における水質変化を示す代表2地点（図-2）において、流入時期別に計算した全窒素濃度の経時変化を示す。西印旛沼と北印旛沼の流域面積は、それぞれ431km²、84km²であり、西印旛沼の流域は北印旛沼のその約5倍の大きさである。また、水の流れは通常、西印旛沼から北印旛沼に向かっているため、西印旛沼の代表地点である上水道取水口下地点においては、北印旛沼の代表地点の北印旛沼中央地点に比べて流入河川の影響を直接受けやすい。計算結果もこれを反映して、上水道取水口下における変化の方が各月の負荷の値が高く、河川流入の影響を鋭敏に示す計算結果となっている。

(2) 硝酸態窒素

硝酸態窒素の流入時期別濃度変化を見ると、4月から9月

にかけて流入した分が沼水中に存在する期間は、長くても次月の中旬程度までである。しかし、10月から3月に流入した分に関しては、長期間沼水中に残留し、5月中旬にようやく消滅する（図-3(b)）。この特徴は特に北印旛沼において顕著である。

(3) 植物プランクトンの形態で存在する窒素

植物プランクトンに取り込まれた植物プランクトン形態窒素の流入時期別濃度変化について見ると、2カ所とも4月から9月にかけては、当該月を流入時期としてもつ分の濃度が急激に上昇すると共に硝酸態窒素濃度の低下に呼応して次月には急速に消失する結果となっている。これは河川から流入した硝酸態窒素が、速やかに沼内で植物プランクトンに取り込まれていると共に、プランクトンの消失も早期に起こっていることを示す結果となっている。

また、この時期は、底泥からの回帰が増加するが、底泥からの窒素はアンモニア態で回帰する。このため、植物プランクトン形態窒素のうち図中他起源分として分類されている部分はアンモニア態窒素を摂取した部分を示している（図-3(c)）。北印旛沼中央では、植物プランクトン形態窒素の大半は年間を通してほぼ沼内で回帰した窒素により構成されているという計算結果になった。

10月から3月に流入した硝酸態窒素は、長期にわたり沼内に残留するが（図-3(b)）、植物プランクトンの摂取という観点から見れば、流入した硝酸態窒素が植物プランクトン形態窒素に変換されるまでに要する時間が長くかかるということでもある。特に北印旛沼の計算結果で顕著に現れており、12月から3月に河川を通して流入した無機態窒素（硝酸態窒素が主体）は、4月中旬になってようやく植物プランクトン形態への変換が活発に起こっているという結果であった（図-3(c)）。

(4) 全リン

リンに関しては、全リンに関する計算結果のみを示す。リンは、窒素に比べて河川から流入した成分に比較して沼内で循環しているものの比率が高い結果を示している。この特性は夏季において特に顕著であると共に、北印旛沼では年間を通してほとんどが沼内で一回以上循環したものであることを示す結果となった（図-3(d)）。

4. 考察

今回開発したモデルを使用することで、流入時期という情報を考慮に入れた湖沼内における栄養塩類循環の定量的な評価を行うことが可能となった。通常の水質計算においても、計算結果を注意深く解釈することで、湖沼内での栄養塩類循環特性を詳細に理解することが可能であるが、今回の検討はさらに流入時期で分画した成分毎

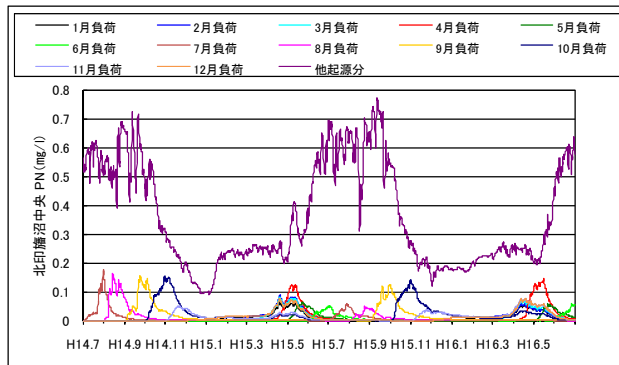
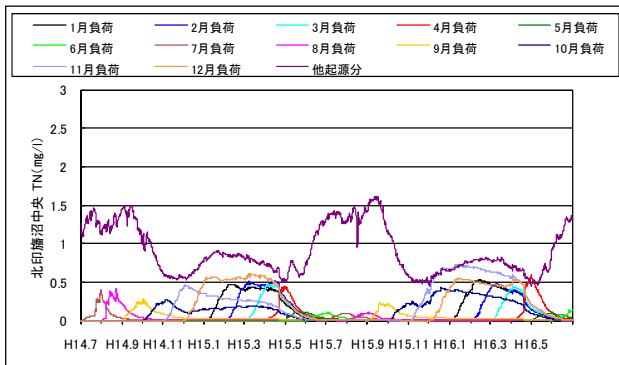
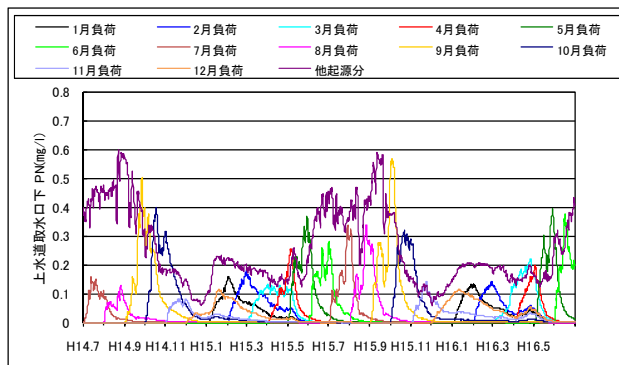
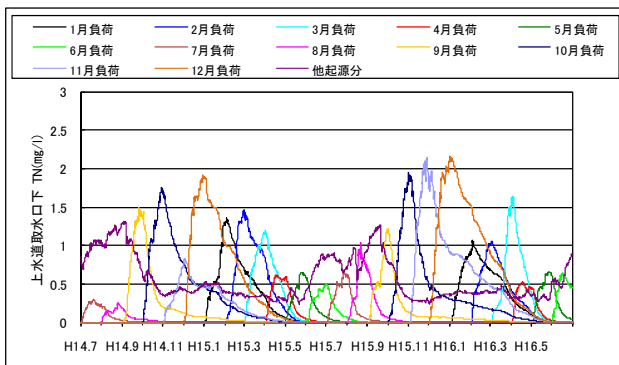


図-3(a) 流入時期別全窒素濃度の経時変化

図-3(c) 流入時期別植物プランクトン形態窒素濃度の経時変化

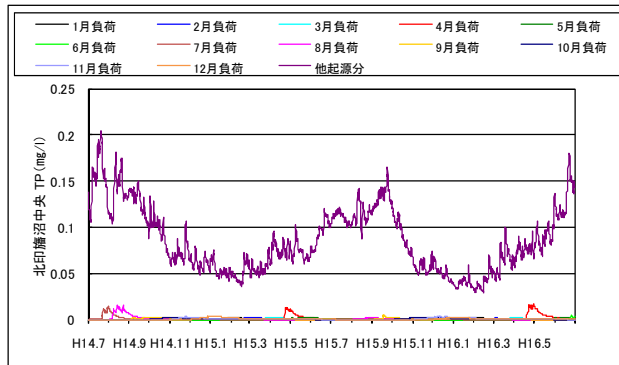
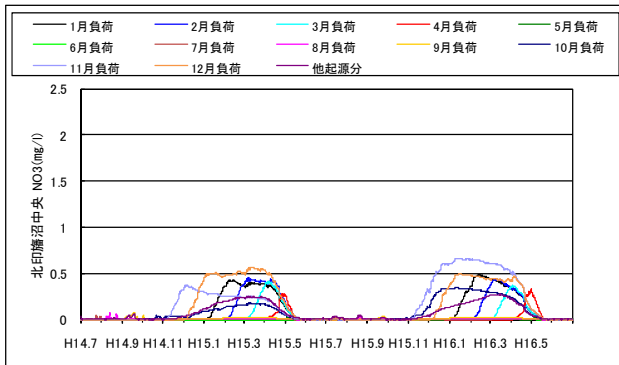
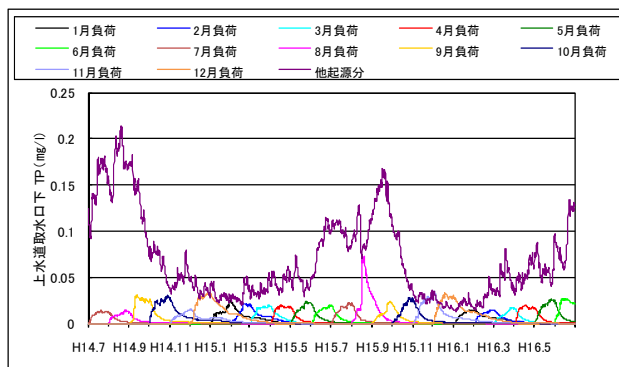
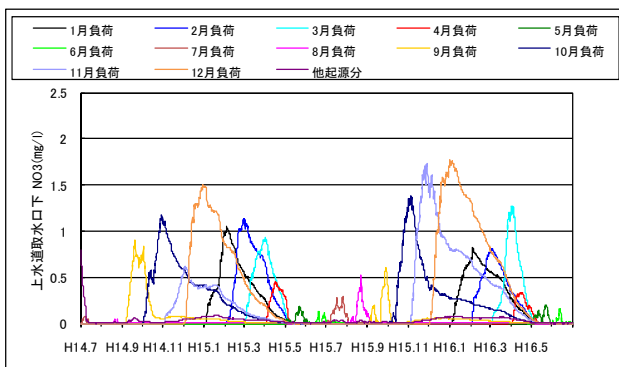


図-3(b) 流入時期別硝酸態窒素濃度の経時変化

図-3(d) 流入時期別全リン濃度の経時変化

にまで踏み込んだ定量的評価が可能である。

湖沼における水質変化は、移流、拡散、生化学的反応、底泥とのやりとりといった種々の過程による変化が合算されたものとして発現している。モデルとしてこれらの変化を再現しようとする際には、いくつかのパラメータを試行錯誤的に決定したり、入手できない入力条件を仮定することで同定計算を実施してモデルを設定すること

になる。このような際、通常のモデルでは水質変化の種々の過程を全て合算した結果と水質測定結果とを比較することしかできないため、限りのある同定計算では変化の内訳（機構）まで正確に再現しているかどうか判断が困難な場合が多い。

湖沼水質変化には、河川からの流入量変動と共に特に浅い湖沼においては底泥が大きく影響する。今回開発し

たモデルによって、湖沼内における栄養塩類濃度の変化過程計算を実施するにあたり、流入条件を時期毎に区別すると共に、外部からの流入と内部における循環（回帰）とを区別した解析が可能になった。このことで、植物プランクトンの増殖に影響する栄養塩類動態について、計算における内訳（機構）を定量的に明確に示すことが出来るという有利な特徴を得ることができた。このような新しいモデル計算により、結果のみ「合わせている」同定計算とは異なる、新しい検証方法を確立することが可能になると考えられる。

さらに今回開発したモデルは、水質計算精度の向上に資するのみではなく、その特性を活かして、湖沼水質変化機構の理解にも役立つものである。今回の計算は、窒素、リンともに沼内での循環が植物プランクトン量の多くを維持していること、特に北印旛沼における植物プランクトンが摂取するリンのほとんどは沼内で回帰したものであるという結果を定量的に示している。例えば今後、植物プランクトン態窒素について、安定同位体比測定により起源の定量的な推定をすることができれば、本モデルによる計算結果と比較することが可能となり、水質変化機構のより深い理解に役立つ。またこのことがさらなるモデル精度の向上につながることを期待できる。

5. まとめ

流入時期の情報を有する栄養塩類動態を解析するモデルを開発し試算を行った。浅い湖沼では、河川流入量の変動や湖沼内での循環が栄養塩類動態を活発かつ複雑に駆動するため、通常方法ではパラメータの同定が困難かつ妥当性を示しにくい。今回開発したモデル化手法を利用することで、栄養塩類の動態について、河川流入分については流入時期により区分、また河川流入分と湖沼内での循環分とを区分して、その定量的影響度合いを示すことができた。このような内訳を解釈しながらパラメータの同定を実施することで、妥当性を担保した精度の高い水質解析を行うことが可能になった。

このようなモデルに適合した現地データの取得を併せて実施することで、モデル精度の向上や水質変化機構に対する理解が深まり、より効果的な水質保全対策につながることを期待できる。

参考文献

- 1) Orlob, G. T. and L. G. Selna: Temperature variations in deep reservoirs, Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, HY2, pp. 391-410, 1970.
- 2) Huber, W. C., D. R. F. Harleman and P. J. Ryan: Temperature prediction in stratified reservoirs, Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, HY4, pp. 645-666, 1972.
- 3) 安芸周一, 白砂孝夫: 貯水池流動形態のシミュレーション解析 その1 発電専用貯水池の流動形態, 発電水力134, 1975.
- 4) 森北佳昭, 畑孝治, 三浦進: 貯水池の冷濁水ならびに富栄養化現象の数値解析モデル(その1), 土木研究所資料, 第2443号, 1987.
- 5) 岩佐義朗, 松尾直規, 遠藤正昭: ダム貯水池の水温予測, 京都大学防災研究所年報, 第19号B, pp. 221-236, 1976.
- 6) 岩佐義朗, 井上和也, 松岡隆之: 三次元解析法による琵琶湖湖流に関する二, 三の検討, 水理講演会論文集, 第29巻, pp. 751-756, 1985.
- 7) 湖沼技術研究会: 湖沼管理のための流動機構調査 より高度な湖沼管理に資するための調査に向けて, 湖沼技術研究会編(座長: 福岡捷二), 2003.
- 8) Di Toro, D. M., D. J. O'Connor and R. V. Thomann: A dynamic model of the phytoplankton population in the Sacramento-San Joaquin delta, In Non Equilibrium Systems in Natural Water Chemistry, Advances in Chemistry Series, n.106, American Chemical Society, 1971.
- 9) Ambrose, R. B., T. A. Wool and J. L. Martin: The water quality analysis simulation program, WASP5. Part A: Model documentation. USEPA ERL, Athens, 1993.
- 10) 土木学会: 琵琶湖の将来水質に関する調査, 昭和52年度, 1978.
- 11) Ikeda, S. and N. Adachi: A dynamic water quality model of Lake Biwa - a simulation study of the lake eutrophication, Ecological Modelling, 4, pp. 151-172, 1978.
- 12) Ikeda, S., Y. Inoue and S. Iwai: Multispecies of planktons and nutrients model of lake eutrophication. A simulation study in Lake Biwa, In State-of-the-Art in Ecological Modelling, v. 7, (ed.) Jørgensen, S. E., pp. 501-526, 1978.
- 13) 宗宮功, 海老瀬潜一, 奥川光治: Eutrophication simulation in the southern basin of Lake Biwa, 環境衛生工学研究論文集, 1, 京都大学衛生工学教室, pp. 19-30, 1979.
- 14) 宗宮功: 湖沼の物質循環モデル, 国立公害研究所調査報告, 第18号, pp. 114-151, 1981.
- 15) 松岡譲: 霞ヶ浦の富栄養化モデル, 国立公害研究所研究報告, 第54号, pp. 53-242, 1984.
- 16) 松尾直規: 貯水池における水温, 濁度ならびに富栄養化指標の予測に関する水理学的研究, 京都大学学位論文, 1982.
- 17) 森北佳昭, 天野邦彦: 貯水池水質の予測・評価モデルに関する研究, 土木研究所報告, 第182号, pp. 1-109, 1991.
- 18) 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.
- 19) 天野邦彦, 中西哲: 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 -, 水工学論文集, 第52巻, pp. 1267-1272, 2008.

(2009.9.30受付)