

課題 1 (1) 印旛沼の水質シミュレーションモデルの改良

1 はじめに

湖沼の浄化対策を検討するためには、水質に関与すると考えられる要素・プロセスをモデル化し、対策による水質改善効果を定量的に推定することが必要である。

印旛沼の第4期湖沼水質保全計画（計画期間：平成13～17年度）策定に使用した水質シミュレーションモデル¹⁾の作成に当たっては、外部条件の時間変化を3期計画（計画期間：平成8～12年度）モデルより細かく設定するなど、より現実に近いモデルとすることを試みた。しかしながら、水質の季節変化を十分には再現できておらず、特に、夏季の藍藻類の増殖とそれに伴うCODの上昇を再現できていないなど、モデルの信頼性に問題が残っていた。このため、各水質項目の再現性を詳細に検討したところ、無機態窒素の供給速度が過小に評価されていたため、窒素制限の度合が過大になっており、藍藻類の増殖とそれに伴うCODの上昇を再現できていないと考えられた。水中の無機態窒素濃度に影響を与える因子としては、脱窒による除去、有機物の分解による供給、底泥からの溶出による供給などが考えられる。このうち、脱窒速度に注目して、パラメータと水質項目の再現性との関係について検討を行い、実際に水質シミュレーションの計算を行う際に適当と思われるパラメータの値を求めた。

2 印旛沼の第4期湖沼水質保全計画策定に使用した水質シミュレーションモデルの概要¹⁾

4期計画の策定に当たっては、水質予測の精度を向上させるため、3期計画策定に使用したモデル²⁾の改良を行った。主な改良点は以下のとおりである。

- ①従来、流入水量、気象条件は月平均値を用い、負荷量は年間を通じて一定としていたが、より細かく日単位で設定した。
- ②空間分割を、従来の5ボックスから、200m間隔の格子で約270のメッシュに細分化した。
- ③植物プランクトンの種類を、従来の藍藻、珪藻に

緑藻を加え、3種類とした。

4期計画モデルの概要を以下に示す。

(1) 排出負荷量算定システム

フレームデータ、排出負荷原単位などの編集及びこれらのデータからブロック別（流域別・市町村別）排出負荷量の算出を行うサブシステムである。

(2) 流入水量・負荷量算定システム

本システムは、ブロック別に算出された排出負荷量を流域別に集計し、沼に流入する1日ごとの水量・負荷量を推計するサブシステムである。算出手順の概要は以下のとおりである。

- ① 年間排出負荷量の算出（排出負荷量算定システムによる）
- ② 流達率と年間流入負荷量の設定（流達率は1とする。ただし、河川浄化施設、取水などによる除去負荷量は、排出負荷量から差し引く。）
- ③ 公共用水域水質測定結果からL-Q式（流量と負荷量の関係式）を設定
- ④ 降雨データから日流量の計算（タンクモデルによる；実測値と比較して検証する）
- ⑤ ③と④の結果を用いて日負荷量を計算する。
- ⑥ ⑤で得られた日負荷量合計に対する、②で得られた年間負荷量の比率を求める。
- ⑦ ⑥で得られた比率を補正係数として⑤で得られた日負荷量に乗ずる。

日流量は、印旛沼流域を9流域に分割し、各流域ごとに降雨量、蒸発散量から4段タンクモデルを用いて計算を行う。降雨量は気象庁アメダスの観測地点である佐倉の値を用いた。タンクモデルのパラメータは計算結果と河川の流量の実測値を比較して調整した。

(3) モデルの構造

モデルの構造は3期計画策定に使用したもの⁴⁾とほぼ同じであるが、近年、緑藻類が優占する時季がみられるため、植物プランクトンの種類を、従来の藍藻、珪藻に緑藻を加え、3種類とした。

本報告で用いたモデルは、生態系モデルの内の、植物プランクトンのみを考慮した生物系モデルに分

類される³⁾。状態変数としたのは、クロロフィル a (藍藻, 珪藻, 緑藻), 非生物態COD, 非生物態有機態窒素, 無機態窒素, 非生物態有機態りん, 無機態りんの各濃度で, 考慮に入れた物質循環過程は, 植物プランクトンの生産, 細胞外分泌, 呼吸, 枯死,

及び沈降, 有機物の分解, 有機物の沈降, COD, 窒素, りんの底泥からの溶出などである。モデル化した沼内の物質循環過程の概略を図1に, 物質収支式を表1に示す。

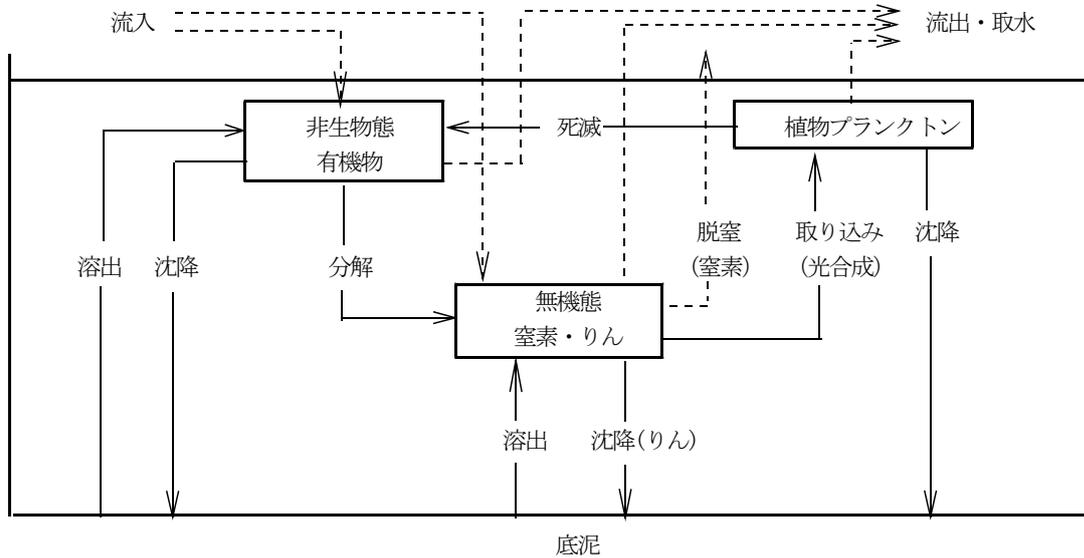


図1 沼内の物質循環過程の概略

表1 物質収支式 (移流項を除く)

クロロフィルa	$dChl/dt = -Chl \cdot q/V + Pr(1-\epsilon) - kr \cdot Chl - kd \cdot Chl - v_{p1} \cdot Chl/h$
非生物態COD	$dC_o/dt = L_c/V - C_o \cdot q/V - \gamma_{c_o} \cdot C_o - v_{c_o} \cdot C_o/h + R_{c_o}/h + (kd \cdot Chl + Pr \cdot \epsilon) \cdot \alpha_{cchl}$
非生物態有機態窒素	$dN_o/dt = L_N(1-r_{Ni})/V - N_o \cdot q/V + (kd \cdot Chl + Pr \cdot \epsilon) \cdot \alpha_{cchl}/\alpha_{CN} - \gamma_{N_o} \cdot N_o - v_{N_o} \cdot N_o/h$
無機態窒素	$dN_i/dt = L_N \cdot r_{Ni}/V - N_i \cdot q/V - Pr \cdot \alpha_{cchl}/\alpha_{CN} + kr \cdot Chl \cdot \alpha_{cchl}/\alpha_{CN} + \gamma_{N_o} \cdot N_o - \gamma_{N_i} \cdot N_i + R_{N_i}/h$
非生物態有機態りん	$dP_o/dt = L_P(1-r_{Pi})/V - P_o \cdot q/V + (kd \cdot Chl + Pr \cdot \epsilon) \cdot \alpha_{cchl}/\alpha_{NP} - \gamma_{P_o} \cdot P_o - v_{P_o} \cdot P_o/h$
無機態りん	$dP_i/dt = L_P \cdot r_{Pi}/V - P_i \cdot q/V - Pr \cdot \alpha_{cchl}/\alpha_{NP} + kr \cdot Chl \cdot \alpha_{cchl}/\alpha_{NP} + \gamma_{P_o} \cdot P_o - v_{P_i} \cdot P_i + R_{P_i}/h$

光合成項 $Pr = \mu_{max} \cdot Ni / (Ni + KN) \cdot Pi / (Pi + KP) \cdot f(I) f(T) \cdot Chl$ μ_{max} : 最大比増殖速度
 $f(I) = (I/I_{opt}) \exp(1 - I/I_{opt})$ KN : 窒素の半飽和定数
 $f(T) = (T/T_{opt}) \exp(1 - T/T_{opt})$ KP : りんの半飽和定数
 I : 照度 I_{opt} : 最適照度
 T : 水温 T_{opt} : 最適水温

Chl: クロロフィルa濃度 (藍藻, 珪藻, 緑藻) α_{cchl} : 植物プランクトンのCOD/クロロフィルa
 C_o : 非生物態COD濃度 α_{CN} : 植物プランクトンのCOD/窒素
 N_o : 非生物態有機態窒素濃度 α_{NP} : 植物プランクトンの窒素/りん
 N_i : 無機態窒素濃度 kr : 植物プランクトンの呼吸速度定数
 P_o : 非生物態有機態りん濃度 kd : 植物プランクトンの枯死速度定数
 P_i : 無機態りん濃度 ϵ : 植物プランクトンの分泌量/光合成量
 q : 取水量, V : メッシュ体積, h : メッシュ平均水深

γ_{c_o} : 非生物態CODの分解速度定数 v_{p1} : 植物プランクトンの沈降速度 L_c : COD流入負荷量
 γ_{N_o} : 非生物態有機態窒素の分解速度定数 v_{c_o} : 非生物態CODの沈降速度 L_N : T-N流入負荷量
 γ_{P_o} : 非生物態有機態りんの分解速度定数 v_{N_o} : 非生物態有機態窒素の沈降速度 L_P : T-P流入負荷量
 γ_{N_i} : 脱窒速度定数 v_{P_o} : 非生物態有機態りんの沈降速度 r_{Ni} : T-N流入負荷量のうち無機態窒素の占める割合
 R_{c_o} : 非生物態CODの溶出速度 v_{P_i} : 無機態りんの沈降速度 r_{Pi} : T-P流入負荷量のうち無機態りんの占める割合
 R_{N_i} : 無機態窒素の溶出速度
 R_{P_i} : 無機態りんの溶出速度

前述のとおり、空間分割を、従来の5ボックスから、200m 間隔の格子で約270のメッシュに細分化した。平均水深が約1.7m と浅いため、鉛直方向は1層モデルとした。

沼内での移流・拡散による水質分布の変化を評価するために、水質計算に先立ち、流動計算を行う。流動計算は日単位で行い、各メッシュの平均水深、タンクモデルで計算された河川流量を入力データとする。水質計算は、流動計算で得られた流動場、流入負荷量算定システムで得られた日負荷量及び水温、日射量を入力データとして行う。水温も日単位

で設定する必要があるが、公共用水域水質測定計画に基づく調査は月2回に限定されているため、気温と水温の1次回帰式を求め、アメダスによる気温から水温を推定した。日射量については、印旛沼に最も近い観測地点である気象庁館野高層気象台（つくば市）における全天日射量の平均値を用いた。

表2の物質循環パラメータ等は、既存の文献を参考にし、計算結果の実測値再現性を考慮しながら調整した。4期計画の目標値設定に使用した値を表2に示す（参考として、手賀沼の値も掲載した）。

表2 計算に使用したパラメータ等の値

パラメータ等	単位	数 値	
		印旛沼	手賀沼
μ_{max} (藍藻)	1/日	1.5	1.5
(珪藻)		0.6	1.0
(緑藻)		1.0	1.0
K_N	mg/ℓ	0.10	0.10
K_P (藍藻)	mg/ℓ	0.005	0.005
(珪藻)		0.005	0.020
(緑藻)		0.005	0.010
T_{opt} (藍藻)	°C	30	28
(珪藻)		10	10
(緑藻)		22	22
I_{opt} (藍藻)	MJ/m ² /日	8	8
(珪藻)		4	4
(緑藻)		6	6
α_{Chl}	-	40	40
α_{CN}	-	9	8
α_{NP}	-	8	8
k_r	1/日	0.02exp(0.0693(t-20))	0.02exp(0.0693(t-20))
k_d	1/日	0.02exp(0.0693(t-20))	0.02exp(0.0693(t-20))
ϵ	-	0.1	0.1
γ_{Co}	1/日	0.10exp(0.0695(t-20))	0.05exp(0.0695(t-20))
γ_{No}	1/日	0.05exp(0.0695(t-20))	0.10exp(0.0695(t-20))
γ_{Po}	1/日	0.05exp(0.0695(t-20))	0.10exp(0.0695(t-20))
γ_{Ni}	1/日	0.15exp(0.24(t-20))	0.06exp(0.0695(t-20))
v_{pl} (藍藻)	m/日	0.1	0.05
(珪藻)	m/日	0.5	0.1
(緑藻)	m/日	0.1	0.05
v_{Co}	m/日	1.0	0.5
v_{No}	m/日	1.0	0.5
v_{Po}	m/日	1.0	0.5
v_{Pi}	m/日	1.0	0.1
R_{Co}	mg/m ² /日	99.0exp(0.0698(t-20))	70.0exp(0.0698(t-20))
R_{Ni}	mg/m ² /日	32.5exp(0.0698(t-20))	110exp(0.0698(t-20))
R_{Pi}	mg/m ² /日	5.10exp(0.0698(t-20))	10.0exp(0.0698(t-20))

注) t : 水温 (°C)

3 検討の概要

印旛沼の第4期湖沼水質保全計画策定に使用した水質シミュレーションモデル¹⁾において、水温 t °C における脱窒速度定数は、以下のように設定されており（ここでは、表2の γ_{Ni} を k と表記した）、

$$k_t = k_{20} * \exp(a(t - 20))$$

k_{20} : 20°Cにおける脱窒速度定数 (day^{-1})

a : 温度依存係数

全窒素の再現性に配慮して調整を行った結果、 $k_{20} = 0.15$, $a = 0.24$ としている。これらの値を用いて水質計算をした場合、T-Nの再現性は比較的良好であるが、COD、T-Pの再現性はあまりよくないこと、温度依存係数 a の値0.24は、一般的な反応速度の温度依存性と比べて、かなり大きな値であるという問題点がある。ここでは、これらの値を上限とし、 $k_{20} = 0 \sim 0.15$, $a = 0.1 \sim 0.24$ の範囲で水質の再現計算を行い、計算値と実測値の相関係数を目安として、適当と思われるパラメータの値を求めた。

4 結果と考察及び今後の課題

脱窒速度定数を変えた場合のCOD、T-N、T-Pの計算値と実測値の相関係数を表3に示す。

20°Cにおける脱窒速度定数 k_{20} (day^{-1})、温度依存係数 a のいずれも、値が大きくなると、COD、T-Pの再現性が低下し、T-Nの再現性が向上するという相反する傾向が見られる。

COD、T-N、T-Pの再現性のバランスに配慮して表3の中からパラメータを選択すれば、 $(k_{20}, a) = (0.03, 0.2)$, $(0.05, 0.15)$ などの組み合わせが適当と思われる。

脱窒速度定数を変えた場合のCODの時系列変化の比較例を図2に示す（上段が4期計画策定時のパラメータを使用した場合）。

まだ十分とは言えないが、脱窒速度定数を低めに設定することにより、1995年、98年、99年、2000年の夏から初秋にかけてのピークの再現性が改善されている。

この時の計算値と実測値の相関係数は、最も小さいT-Pでも、 $r(142, 0.01) \approx 0.216$ より大きく、1%水準で有意である。また、これらの値から、印

旛沼の平均水深を1.63m、平均無機態窒素濃度を0.5mg/Lとして20°Cにおける平均脱窒速度を求めると、24~41mg/m²/dayとなり、水質がそれほど改善されていない時期の手賀沼の底泥を用いた実験から算定された脱窒速度^{4) 5)}の30mg/m²/day、及び29.8~60.2mg/m²/dayと同程度かやや低めであり、平均水質に見合った値になっていると考えられる。

以上のことから、印旛沼における脱窒速度定数としては、上記の選択された値を採用するのが概ね妥当と思われる。

現状においては、COD、T-Pの再現性とT-Nの再現性を両立させるのは困難であるが、実際の窒素供給量が計算上の値より大きいと仮定すれば、両者をともに良く再現することが可能と思われる。印旛沼流域における主要な窒素供給源の一つに畑地があるが、藤村⁶⁾は、第5期湖沼水質保全計画において採用された畑地の窒素負荷原単位は、実際よりもかなり過小に見積もられている可能性があるという指摘している。畑地の窒素負荷原単位が現行の値より大きくなれば、COD、T-Pの再現性とT-Nの再現性を無理なく両立させ得る可能性がある。

また、近年、印旛沼の窒素濃度が上昇傾向にあることが注目されており、この原因の一つとして、降水量の増加に伴う畑地からの窒素流出量の増加が推測されている⁷⁾。4期計画モデルでは、面源負荷については、降水量に応じて1日ごとの排出負荷量を設定しているものの、年間総負荷量は原単位法により算定された一定値としている。また、畑地の原単位自体も、降水量を反映してはいるが、平年値を用いており、年ごとの降水量の変化に対応可能なものとはなっていない。そのため、短期的な降水量の変化に伴う排出負荷量の変化を表現できるモデルとすることが、今後の課題として挙げられる。

第5期計画の策定に使用したモデル⁸⁾は、雨水浸透マスの設置等、水循環回復施策の効果を評価するため、流域における様々な水・物質循環過程をモデル化したこと、GISをベースにして、ユーザーインターフェースにも配慮している点に特徴がある。沼内モデルは4期計画と同じものを使用している。今後は、ここでの検討結果も踏まえ、5期計画の流

域モデルの内、重要と思われる過程について検討を加えながら、5期計画モデルの有効活用を図りたい。

文献

- 1) 国土環境株式会社：平成13年度 湖沼水質保全計画策定業務報告書（2002）
- 2) 平間幸雄，小林節子：印旛沼・手賀沼の水質予測の試算（2），千葉県水保研年報（平成9年度），59（1998）
- 3) 環境庁：湖沼水質管理指針策定調査（1983）
- 4) 上田真吾，小倉紀雄：手賀沼における底泥の脱窒活性と沼の浄化に果たす役割，陸水学雑誌，15，50(1)（1989）
- 5) 松山為時，小倉紀雄：手賀沼における間隙水成分の鉛直分布と窒素動態について，日本陸水学会 第67回大会 講演要旨集，109（2002）
- 6) 藤村葉子：畑地等からの汚濁負荷原単位と流出率の検討，千葉県環境研究センター年報第7号（平成19年度）（投稿予定）
- 7) 平間幸雄，小倉久子，飯村晃：印旛沼・手賀沼に関する情報の整理と解析（1）印旛沼の最近の水質，千葉県環境研究センター年報第6号（平成18年度），122（2006）
- 8) パシフィックコンサルタンツ株式会社：平成18年度 湖沼水質保全計画策定事業（将来予測等事業）報告書（2007）

表3 脱窒速度定数を変えた場合の計算値と実測値の相関係数

COD					
a \ k ₂₀		0.1	0.15	0.2	0.24
0		0.404	0.404	0.404	0.404
0.02		0.387	0.381	0.372	0.363
0.03		0.381	0.373	0.361	0.347
0.05		0.370	0.358	0.339	0.313
0.10		0.347	0.323	0.277	0.216
0.15		0.325	0.283	0.208	0.120

T-N					
a \ k ₂₀		0.1	0.15	0.2	0.24
0		0.112	0.112	0.112	0.112
0.02		0.228	0.283	0.326	0.353
0.03		0.261	0.322	0.364	0.386
0.05		0.303	0.370	0.407	0.423
0.10		0.346	0.420	0.450	0.458
0.15		0.358	0.438	0.466	0.470

T-P					
a \ k ₂₀		0.1	0.15	0.2	0.24
0		0.284	0.284	0.284	0.284
0.02		0.270	0.263	0.256	0.247
0.03		0.264	0.256	0.245	0.232
0.05		0.253	0.245	0.227	0.201
0.10		0.233	0.211	0.172	0.118
0.15		0.212	0.178	0.111	0.024

t℃における脱窒速度定数

$$k_t = k_{20} * \exp(a(t-20))$$

k₂₀ : 20℃における脱窒速度定数

a : 温度依存係数

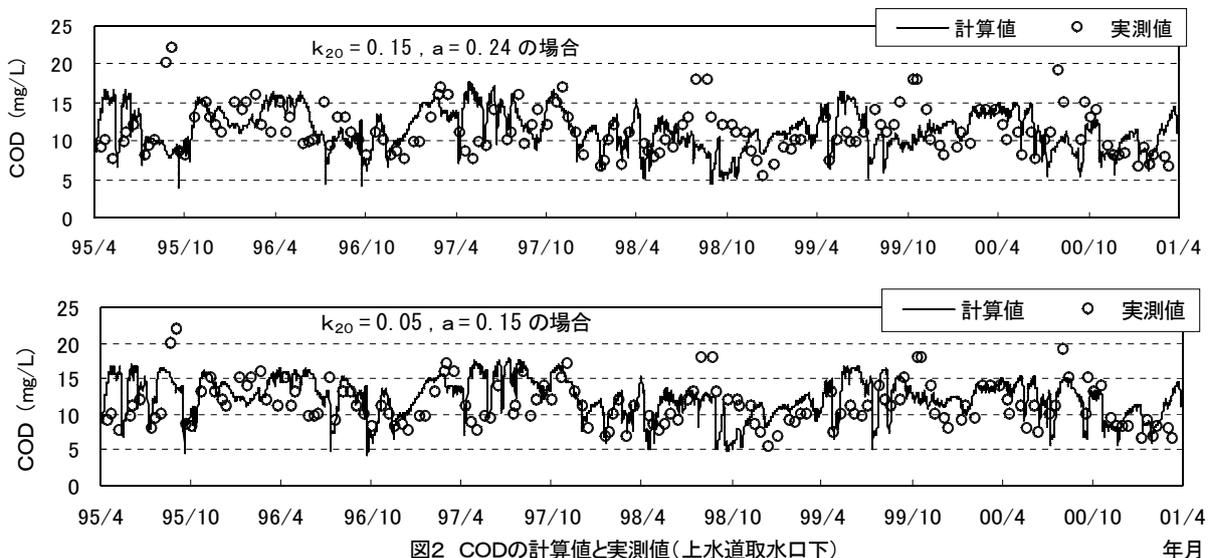


図2 CODの計算値と実測値(上水道取水口下)