

# 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

松梨史郎<sup>1</sup>・井野場誠治<sup>2</sup>・下垣 久<sup>2</sup>・宮永洋一<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博（財）電力中央研究所 環境科学部（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646）

<sup>2</sup>正会員 工修（財）電力中央研究所 環境科学部（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646）

手賀沼を対象に、流動および水質・底質結合モデルによって年間に亘る時空間変動のシミュレーションを実施した。水質の実測値の縦断分布から、クロロフィルaやCODは流下方向に増大し、無機態窒素・リン、全窒素・全リンは減少すること、根戸下ではクロロフィルaやCODが概ね暖候期に高く寒候期に低いこと、無機態リンは暖候期に低く寒候期に高いことなどが、シミュレーションによって概略再現された。さらに、年間に亘る全リンの物質収支から、流入負荷量の5割が下流に流出し、5割が湖底に堆積することが確認され、底泥からの溶出フラックスは、静的な条件下では流入負荷量の2割であった。

**Key Words :**Lake Teganuma, water quality, sediment, nutrient release, numerical simulation

## 1. はじめに

手賀沼は、千葉県北西部の我孫子市に位置し、全国の湖沼の中で20年間以上に亘って、水質ワースト1が続いている湖沼として有名である<sup>1,2)</sup>。図-1に示すように、湖面積6.5km<sup>2</sup>（本手賀沼は5.5 km<sup>2</sup>）、平均容量560万m<sup>3</sup>（本手賀沼は470万m<sup>3</sup>）、平均水深0.86 mで、大きく分けて本手賀沼と下手賀沼より成り立ち、いずれも東西方向に細長い形状を呈している。農業用水、内水面漁業等に利用される重要な水源であり、沼の周辺は市民の憩いの場所として、種々の親水公園があるとともに、水質浄化のために実施中の様々な施設が設置されている。

千葉県は、水質・底質の浄化のために毎年底泥の浚渫を実施しているが、浚渫などによる水質・底質改善のためには、その効果を検討するための一環として、水質・底質の汚濁のメカニズムや底泥からの栄養塩の溶出フラックスが水質へ及ぼす影響を検討しておく必要がある。

細見・須藤<sup>3)</sup>は、手賀沼における湖水中、底泥内の窒素・リンおよび底泥からの溶出フラックスを測定し、物質収支を検討している。また小林・西村<sup>4)</sup>は、手賀沼の植物プランクトンの制限栄養塩がリンであるとして、底泥からのリンの溶出機構を検討している。彼らはさらに、湖水・底泥間の物質循環や全リン濃度の実測値に基づく物質収支の計算と、湖内のCOD濃度と全リン濃度の相関関係から、全リン負荷量の削減対策について検討している。

これらの実測値に基づく検討に対して、シミュレーションによる検討は、これまでに公表されたものでは、導水に伴う流動変化の計算<sup>5)</sup>やボックスモデルによる水質計算<sup>6)</sup>はあるものの、水質の時空間変化を解析したものは見当たらない。

実測値に基づく検討においては、実測値の時空間的に詳細な取得に限界がある。また日々変動する流動の影響などに十分に配慮することが困難であり、これについてはシミュレーションによる方法が有効であろうと考えられる。

著者らは既に、千葉県水質保全研究所による水質の縦断分布に関するデータ（1994年度のみ）と、公共用水域水質測定の年間のデータ（湖内2地点のみ）の両者を検討することにより、手賀沼の水質の時空間特性を浮き彫りにした<sup>7)</sup>。さらにこれらのデータを対象に水質の年間に亘るシミュレーションを実施し、藻類の増殖の制限要因について検討した<sup>7)</sup>。

しかし同計算では流動の予測において、降雨による流入河川流量の変動や風の影響について考慮していなかった。また底泥からの栄養塩の溶出フラックスに関しては実測値を与え、水質と底質の相互作用についても考慮しなかった。

このため本論文では、複雑な流動・水質の時空間変動と底泥との相互影響を定量的に把握することを目的として、流動の予測に降雨による流入河川流量の変動や風の影響を考慮し、水質の時空間変動の予測精度を向上させた。さらに底質モデルを用いて底質の時空間変動予測を行い、水質モデルとの結合に

より、底泥からの栄養塩の溶出フラックスの計算をし、溶出フラックスによる水質への影響について検討した。

またこのようなシミュレーションモデルを用いることにより、将来の流入流量や流入負荷の変化に伴う流動・水質・底質への影響を予測・評価することが可能となると考えられる。

## 2. 水質の実態

水質の実態については、文献7)に示したので、ここでは要点のみを述べる。

### (1) 空間分布

平間ら<sup>2)</sup>は、1994年8月から翌1995年3月までの半年間に月に1回程度の割合で湖沼の縦断方向の水質調査を実施している。後述のシミュレーションではこのデータを検証データとするため、平間ら<sup>2)</sup>に基づき、8月～翌年3月の水質特性を整理する。

測定項目は、pH, COD, D-COD, クロロフィルa, 全窒素, アンモニア態窒素, 硝酸態窒素, 全リン, リン酸態リンの表層の縦断分布で、測定時期の降水量、下流の手賀排水機場の水門の開閉についても調査されている。

後述の図-5に示すように、平間ら<sup>2)</sup>は、水質調査結果から、寒候期の水質特性について、以下のことを明らかにした。

- 1) クロロフィルaは下流に向かって増加していた。
- 2) 全窒素、全リン、リン酸態リンは流下方向に減少しており、この原因として、河口部で高い無機栄養塩が藻類によって摂取され、沈降して除去されたとしている。
- 3) 下流の手賀排水機場水門が閉鎖されている時には、風向によって、水門が開放されている時の分布とは異なる分布を示すことがあった。

### (2) 季節変化

千葉県は公共用水域水質測定として、月2回、流入河川である大堀川、大津川、染井入落、湖内2ヶ所（根戸下、手賀沼中央）で富栄養化項目について測定している<sup>8)</sup>。測定水深はいずれも水深20cmである。1992年度から1995年度までの4年間に亘るこれらの測定結果を整理した結果、以下のような各水質項目の季節変化の特性が認められた。

- 1) クロロフィルaは、概して根戸下では夏季に高く、冬季に低い。一方、手賀沼中央では夏季より冬季に高い値を示している。また水温等の変化に伴って藻類の優占種が夏季は藍藻、冬季は珪藻または緑藻に交替している。
- 2) 根戸下・手賀沼中央ともに、年によっては各月の値に大きな差がある時期もあったものの、無機態窒素は夏季に低く、冬季に高い。特に夏季の無機態窒素は枯渇していた。
- 3) リン酸態リンは、根戸下では冬季に著しく高い。手賀沼中央では夏季と冬季で高い。また無機態窒素

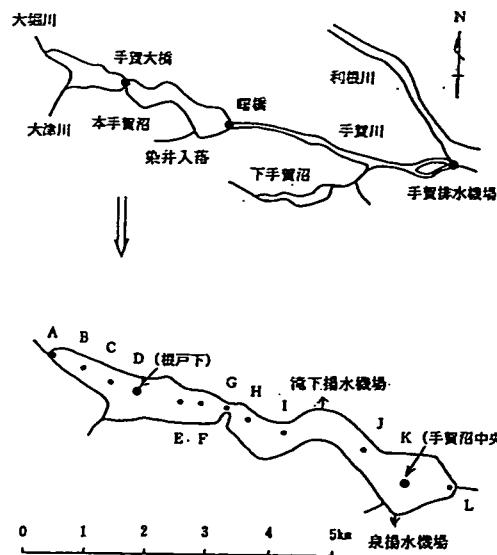


図-1 手賀沼の概略図と測定地点（平間ら<sup>2)</sup>に加筆）

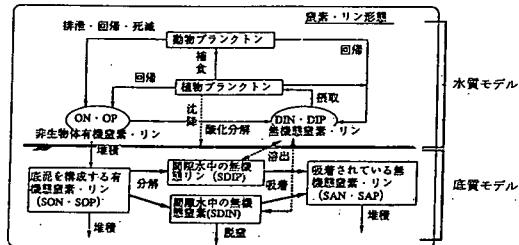


図-2 水質-底質モデルの概念図

に比べて年によって変動があり、後述のシミュレーションで対象とした1994年度は1995年度とともに渴水年であり、他の年に比べて濃度が高く、上記の傾向がより顕著に現れている。

- 4) 全リンは、根戸下・手賀沼中央ともに、夏季と冬季にピークがあり、1994年度、1995年度は特に高い。

以下のシミュレーションでは、これらの特性を再現することを目標とした。

## 3. モデルと計算条件

### (1) 流動

手賀沼は平均水深0.86mと浅く、著者らが上沼（根戸下）および下沼（図-1のI地点近傍）で、1997年8月に後述の底泥からの栄養塩溶出フラックス調査時に併せて測定したデータから、各水質とともに鉛直分布はほとんど無かった。このため流動モデルは、連続式および運動方程式を鉛直方向に積分した平面2次元モデルで、差分メッシュ間隔は40mである。以下に基礎式を示す。

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_x^2}{s+h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{M_x M_y}{s+h} \right) \\ = -g(s+h) \frac{\partial s}{\partial x} + A_x \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 M_x}{\partial y^2} \\ + \tau_{ax} - \tau_{bx} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_x M_y}{s+h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{M_y^2}{s+h} \right) \\ = -g(s+h) \frac{\partial s}{\partial y} + A_x \frac{\partial^2 M_y}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} \\ + \tau_{ay} - \tau_{by} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\tau_{ax} = \rho_a C_d U_a (U_a^2 + V_a^2)^{1/2} \quad (4)$$

$$\tau_{ay} = \rho_a C_d V_a (U_a^2 + V_a^2)^{1/2} \quad (5)$$

$$\tau_{bx} = \rho C_b U_b (U_b^2 + V_b^2)^{1/2} \quad (6)$$

$$\tau_{by} = \rho C_b V_b (U_b^2 + V_b^2)^{1/2} \quad (7)$$

$$C_d = 1.3 \times 10^{-3}, \quad C_b = 2.6 \times 10^{-3} \quad (8)$$

ここに,  $M_x, M_y$ :  $x$  方向,  $y$  方向の線流量,  $s$ : 平均水面からの水位,  $h$ : 平均水面からの水深,  $A_x, A_y$ :  $x$  方向,  $y$  方向の水平方向の渦動粘性係数,  $\rho_a$ : 空気の密度,  $\rho$ : 水の密度,  $\tau_{ax}, \tau_{ay}$ :  $x$  方向,  $y$  方向の湖面での摩擦,  $U_a, V_a$ :  $x$  方向,  $y$  方向の風速,  $\tau_{bx}, \tau_{by}$ :  $x$  方向,  $y$  方向の湖底での摩擦,  $U_b, V_b$ :  $x$  方向,  $y$  方向の湖底流速,  $C_d$ : 湖面での摩擦係数,  $C_b$ : 湖底での摩擦係数である。

計算条件は以下のようにした。流入河川として大堀川, 大津川, 染井入落を対象とし, 三河川からの流入流量の毎日の変動は, 我孫子におけるアメダスによる1時間ごとの降水量データから日降水量を求め, これによる変動と同じとした。前回の計算<sup>7)</sup>では流入流量の値として, 低水時の値しか用いていなかった。しかし実際には降雨時の大きな流入流量が湖水の交換に寄与している影響が大きいと考えたため, 降雨量による変動を流入流量に考慮した。また4月~8月は灌漑用水として, 滝下揚水機場から0.26m<sup>3</sup>/s, 泉揚水機場から0.61m<sup>3</sup>/sを取水した。渦動粘性係数および渦動拡散係数は, 以前著者らがダム貯水池で濁水を流して実測したデータに基づいて1m<sup>2</sup>/s, 水面での摩擦係数は0.0013, 底面での摩擦係数は0.0026とした<sup>9)</sup>。また下流端では流量データ

が取得できなかっただため, 水位制御として1994年度の水位の時系列変化を与える, 水面ではアメダスによって測定された我孫子における1994年度の風向・風速の時系列変化を与えた。流动計算における $\Delta t$ は4秒とし, 同様の境界条件に基づいて2カ年に亘って計算し, 以下には2年目の結果を示した。

## (2) 水質

図-2にモデルの概念図を示す。本モデルは, 窒素・リンの循環を基礎に, 植物プランクトンを中心とした低次生態系モデルで, クロロフィルa, 動物プランクトン, リン酸態リン, 非生物体の有機態リン, 全リン, 無機態窒素, 非生物体の有機態窒素, 全窒素, 非生物体のCOD, 全COD, 溶存酸素を対象とする。

水質計算にも流动計算と同様に, 鉛直方向に積分した平面2次元モデルを用いた。以下に基礎式を示す。

手賀沼は極端に浅く, プランクトンの濃度が著しく高い湖沼であることから, 照度の関数として植物プランクトン自身の自蔽効果を考慮した。また水温の関数として後述のように, 季節的に変化する藻類の種組成による特性の相違を考慮した。その他の定式化については, 文献10)と同様である。

a) クロロフィルa  $Y$  (g/m<sup>3</sup>)

$$\frac{\partial HY}{\partial t} = H \{ G_y - R_{y20} \theta_{RY}^{T-20} \} Y - HC_{g20} \theta_{CG}^{T-20} Z Y - W_y Y + F(Y) \quad (9)$$

b) 動物プランクトン  $Z$  (g/m<sup>3</sup>)

$$\begin{aligned} \frac{\partial HZ}{\partial t} = H \left( \frac{a_s K_Y}{K_Y + Y} C_{g20} \theta_{CG}^{T-20} Y \right) Z \\ - \{ R_{z20} \theta_{RZ}^{T-20} + D_z \} Z + F(Z) \end{aligned} \quad (10)$$

c) リン酸態リン  $P$  (g/m<sup>3</sup>)

$$\begin{aligned} \frac{\partial HP}{\partial t} = -H \{ G_y - \gamma_y R_{y20} \theta_{RY}^{T-20} \} Y \\ + H \gamma_z R_{z20} \theta_{RZ}^{T-20} Z \end{aligned} \quad (11)$$

$$+ HK_{D20} \theta_{KD}^{T-20} D + W_p + F(P) + q(P)$$

d) 非生物体の有機態リン  $D$  (g/m<sup>3</sup>)

$$\begin{aligned} \frac{\partial HD}{\partial t} = H(1-\gamma_y) R_{y20} \theta_{RY}^{T-20} Y \\ + H(1-f_y) C_{g20} \theta_{CG}^{T-20} Z Y \\ + H(1-\gamma_z) R_{z20} \theta_{RZ}^{T-20} Z + HD_z Z \\ - HK_{D20} \theta_{KD}^{T-20} D - W_D D + F(D) + q(D) \end{aligned} \quad (12)$$

e) 全リン  $TP$  (g/m<sup>3</sup>)

$$TP = Y + Z + P + D \quad (13)$$

f) 無機態窒素  $N$  (g/m<sup>3</sup>)

$$\frac{\partial HN}{\partial t} = -H \sigma_{Ny} \{ G_y - \gamma_y R_{y20} \theta_{RY}^{T-20} \} Y$$

$$+ H\sigma_{Nz} \gamma_z R_{z20} \theta_{RZ}^{T-20} Z \\ + HK_{E20} \theta_{KE}^{T-20} E + W_N + F(N) + q(N) \quad (14)$$

g) 非生物体の有機態窒素  $E$  ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

$$\frac{\partial HE}{\partial t} = H\sigma_{Ny} (1 - \gamma_y) R_{y20} \theta_{RY}^{T-20} Y \\ + H\sigma_{Nz} (1 - f_y) C_{g20} \theta_{CG}^{T-20} ZY \\ + H\sigma_{Nz} \{(1 - \gamma_z) R_{z20} \theta_{RZ}^{T-20} Z + D_z Z\} \\ - HK_{E20} \theta_{KE}^{T-20} E - W_E E + F(E) + q(E) \quad (15)$$

h) 全窒素  $TN$  ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

$$TN = \sigma_{Ny} Y + \sigma_{Nz} Z + N + E \quad (16)$$

i) 非生物体のCOD  $C$  ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

$$\frac{\partial HC}{\partial t} = H\sigma_{Cy} (1 - \gamma_y) R_{y20} \theta_{RY}^{T-20} Y \\ + H\sigma_{Cz} (1 - f_y) C_{g20} \theta_{CG}^{T-20} ZY \\ + H\sigma_{Cz} \{(1 - \gamma_z) R_{z20} \theta_{RZ}^{T-20} Z + HD_z Z\} \\ - HK_{C20} \theta_{KC}^{T-20} C - W_C C + F(C) + q(C) \quad (17)$$

j) 全COD  $TCOD$  ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

$$TCOD = \sigma_{Cy} Y + \sigma_{Cz} Z + C \quad (18)$$

k) 溶存酸素  $DO$  ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

$$\frac{\partial HO}{\partial t} = H\sigma_{oy} \{G_y - R_{y20} \theta_{RY}^{T-20}\} Y \\ - H\sigma_{oz} R_{z20} \theta_{RZ}^{T-20} Z - H\sigma_{oD} K_{D20} \theta_{KD}^{T-20} D \\ + HK_s (O_s - O) - W_o + F(O) \quad (19)$$

$$G_y = G_{y\max 20} f_T f_f \text{Min}(f_p, f_n) \quad (20)$$

$$F(X) = -\frac{\partial}{\partial x} UHX - \frac{\partial}{\partial y} VHX \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left( HK_x \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( HK_y \frac{\partial X}{\partial y} \right) \quad (21)$$

ここに、 $Y$ ：クロロフィル a (=植物プランクトン態リノンとの換算比は1:1である)， $Z$ ：動物プランクトン (=動物プランクトン態リノン)， $P$ ：リノン酸態リノン， $D$ ：非生物体の有機態リノン， $N$ ：無機態窒素， $E$ ：非生物体の有機態窒素， $C$ ：非生物体のCOD， $TCOD$ ：全COD， $O$ ：溶存酸素， $F(X)$ ：水質  $X$  に対する移流・拡散項， $q(X)$ ：水質  $X$  に対する負荷量， $H$ ：全水深 ( $= s + h$ )， $s$ ：平均水面からの水位， $h$ ：平均水面からの水深， $U$ ， $V$ ： $x$  方向， $y$  方向の流速， $K_x$ ， $K_y$ ： $x$  方向， $y$  方向の渦動拡散係数 ( $= 1\text{m}^2/\text{s}$ ) である。他のパラメーターは、計算に用いた数値とともに表-1に示す。

水温の関数  $f_T$  は季節的に変化する藻類種 (夏季

表-1 水質パラメーター

パラメーター	本計算での値
最大硝化率 $G_{max} (\text{day}^{-1})$	2.0
温度定数 $\theta_{xy} (-)$	1.07
絶対日射量 $I_{abs} (\text{cal}/\text{cm}^2/\text{day})$	300
リン半飽和定数 $K_{Ly} (\text{g}/\text{m}^3)$	0.03
植物プランクトン呼吸速度 $R_{y20} (\text{day}^{-1})$	0.025
温度定数 $\theta_{y20} (-)$	1.045
動物プランクトン沈水速度 $C_{g20} (\text{m}^3/\text{gDay})$	8.3
温度定数 $\theta_{g20} (-)$	1.045
植物プランクトン沈降速度 $W_g (\text{m}/\text{day})$	0.1
植物プランクトン最大同化効率 $a_{xy} (-)$	0.6
植物プランクトン同化半飽和定数 $K_{xy} (\text{gP}/\text{m}^3)$	0.051
動物プランクトン呼吸速度 $R_{z20} (\text{day}^{-1})$	0.04
温度定数 $\theta_{z20} (-)$	1.045
動物プランクトン死滅速度 $D_z (\text{day}^{-1})$	0.075
植物プランクトン回帰率 $\gamma_x (-)$	0.2
動物プランクトン回帰率 $\gamma_z (-)$	0.2
有機態リノン分解速度 $K_{Ry20} (\text{day}^{-1})$	0.02
温度定数 $\theta_{Ry20} (-)$	1.08
有機態リノン沈降速度 $W_R (\text{m}/\text{day})$	0.1
換算係数 $\sigma_{xy} \sigma_{yz} \sigma_{xz} (\text{gO/gP})$	142
再通気係数 $K_S (\text{day}^{-1})$	0.6
底泥による酸素消費速度 $W_o (\text{gO}/\text{m}^3/\text{day})$	0.0
窒素半飽和定数 $K_N (\text{g}/\text{m}^3)$	0.1
有機態窒素分解速度 $K_{E20} (\text{day}^{-1})$	0.02
温度定数 $\theta_{E20} (-)$	1.08
有機態窒素沈降速度 $W_E (\text{m}/\text{day})$	0.1
換算係数 $\sigma_{xy} \sigma_{yz} (\text{BN/gP})$	10
換算係数 $\sigma_{xy} \sigma_{yz} (\text{gC/gP})$	50
COD 分解速度 $K_{C20} (\text{day}^{-1})$	0.02
温度定数 $\theta_{C20} (-)$	1.08
COD 沈降速度 $W_C (\text{m}/\text{day})$	0.1

表-2 底質パラメーター

パラメーター	本計算での値
間隙率 $\phi (-)$	0.9
比重 $\rho_s (\text{g}/\text{m}^3)$	$2.4 \times 10^6$
堆積速度 $W_{SED} (\text{m}/\text{day})$	$10^{-4}$
窒素の拡散係数 $K_{NPK} (\text{m}^2/\text{day})$	$8.5 \times 10^{-3}$
リンの拡散係数 $K_{PK} (\text{m}^2/\text{day})$	$8.5 \times 10^{-3}$
窒素吸着速度 $K_{NADS} (\text{day}^{-1})$	0.44
リン吸着速度 $K_{PADS} (\text{day}^{-1})$	0.44
20°Cにおける窒素分解速度 $K_{NOx0} (\text{day}^{-1})$	0.008
20°Cにおけるリン分解速度 $K_{SO40} (\text{day}^{-1})$	0.008
窒素の分解に関する温度定数 $\theta_{NPK} (-)$	1.07
リンの分解に関する温度定数 $\theta_{PK} (-)$	1.07
分解不可能な窒素濃度 $SONo (\text{mg}/\text{g})$	0.0
分解不可能なリン濃度 $SOPo (\text{mg}/\text{g})$	0.2

は藍藻、その他の季節は珪藻・緑藻) の特性を考慮して以下のようにする。同式において  $Min()$  の部分については、松岡が霞ヶ浦で用いた珪藻の式<sup>11)</sup>を用いた。

$$f_T = Max \left\{ \theta_{GY}^{T-20}, Min \left( \frac{T}{14}, 1, 2 - \frac{T}{20} \right) \right\} \quad (22)$$

照度の関数  $f_I$  は以下のようにする。

$$f_I = \frac{1}{kH} \left\{ \exp \left( 1 - \frac{I}{I_{opt}} e^{-kH} \right) - \exp \left( 1 - \frac{I}{I_{opt}} \right) \right\} \quad (23)$$

ここに、 $I_{opt}$ ：最適光強度， $I$ ：水面での光強度， $k$ ：減衰係数である。 $I$ の値としては、全天日射量の0.5倍の値を用いた。減衰係数については、霞ヶ浦で測られたデータ<sup>11)</sup>を基に次式を用いた。

$$k = 10 \cdot Y + 0.6 \quad (24)$$

ただし、 $Y$ ：クロロフィル a ( $\text{g}/\text{m}^3$ )である。今回の計算では、前回の計算<sup>7)</sup>に用いた減衰係数式を用いるとクロロフィル a 濃度が低めになり、自蔽効果が効き過ぎると判断したため、式(24)を採用した。同式は、前回の計算<sup>7)</sup>に用いた減衰係数式の導出に用いられた霞ヶ浦のデータ<sup>11)</sup>のうち、比較的小さな値のデータから導出したが、参照した霞ヶ浦のデータにも相当な幅があり、許容範囲と考えている。

栄養塩の関数  $f_p$ ,  $f_N$  は、次式で表される。

$$f_p = \frac{P}{K_p + P} \quad (25)$$

$$f_N = \frac{N}{K_N + N} \quad (26)$$

なお式(11), (14)中の  $W_p$ ,  $W_N$  は、それぞれりん、窒素の底泥からの溶出速度( $\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$ )であり、後述の底質モデルによる水-底泥間の拡散より計算される。すなわち後述の式(31), (28)の第1項で計算される拡散量の絶対値に等しい。

差分メッシュ間隔は流動計算と同様である。千葉県水質保全研究所の水質縦断分布調査は1994年度に実施されているため、計算も同年を対象とした。

流入負荷量は、基礎式の中のリン酸態リン、非生物体の有機態リン、無機態窒素、非生物体の有機態窒素、非生物体のCODについて設定した。1994年度の排出負荷量がCODとして4545kg/day、全窒素として1570 kg/day、全リンとして210 kg/dayが示されているため<sup>12)</sup>、これを用いた。各河川への配分は大堀川のCODが1750 kg/day、全窒素が700 kg/day、全リンが90 kg/day、大津川のCODが2300 kg/day、全窒素が750 kg/day、全リンが100 kg/dayとなっているため<sup>12)</sup>、染井入落はその残りとしてCODが495 kg/day、全窒素が120 kg/day、全リンが20 kg/dayとして、それぞれ年間に亘って一定として与えた。また無機態窒素・リンは、1994年度公共用水域水質測定結果<sup>8)</sup>より、それぞれ全窒素・全リンの8割程度であると仮定し、残りを非生物体の有機態窒素・リンとした。本来、流入負荷量は降雨量の変動に伴って変化するはずであるが、ノンボリントソースについては勿論のこと、ポイントソースについても千葉県が原単位法で算出している負荷量以上に精度を上げられるだけの情報が無く、降雨量からの推定が流入流量ほどの精度をもって設定できなかったため、本計算では上記のような一定値を用いることとした。

水温については、湖内の測定結果から空間分布はほぼ一様であり、流動・水質と同様の平面2次元モデルで試計算を実施したところ、空間分布はほとんど無く、季節変化のみが生じたため、手賀沼中央の月2回の実測値(公共用水域水質測定結果)を線形補間して与えた。ただしこれらの実測値は午前9時のみの測定値であり、補間ににおいても日変化は考慮

していない。

### (3) 底質

小林・西村<sup>4)</sup>は、リンの溶出機構を検討するためには、嫌気的底泥から溶出したリンが好気的界面を通じて好気的湖水中に放出されるとしている。しかしこの場合、金属錯化容量、鉄分等の収支モデルも介在させなければならず、これらについての実測値や情報は、特別な調査計画を組まない限り得ることが難しい。これらを詳細に扱うことは、モデル化としては高度であるが、不確定なパラメーターを増やす要因となる。

また本研究の目的が溶出機構の解明ではなく、複雑な流動・水質の時空間変動と底泥との相互の影響を定量的に把握することであることから、底質モデルは嫌気的底泥のみを対象として一層モデル(層厚  $\Delta h = 2\text{cm}$ )とし、リンの溶出に伴う複雑なメカニズムは、底泥中の有機物の分解、吸・脱着、窒素についてはさらに脱窒の各過程での反応速度を温度の関数として設定することによって取り込めるものとした。

図-2にモデルの概念図を示す。本モデルは、底泥中の窒素・リンの循環を基礎としたモデルで、底質として底泥中の有機態窒素・リン、間隙水中の無機態窒素・リン、底泥に吸着されている無機態窒素・リンを対象としている。

以下に基礎式<sup>13), 14)</sup>を示す。基礎式は単位面積当たり単位時間当たりの物質量の変化( $\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$ )で表す。

a) 底泥中の有機態窒素  $SON$  (g/g)

$$\frac{\partial \{SON \cdot \rho_s \Delta h (1-\varphi)\}}{\partial t} = (\text{沈降}) - (\text{堆積}) - (\text{分解}) \\ = (W_y \sigma_{Ny} Y + W_E E) - W_{SED} SON \cdot \rho_s (1-\varphi) \\ - K_{SON} (SON - SON_0) \times \rho_s \Delta h (1-\varphi) \quad (27)$$

b) 間隙水中の無機態窒素  $SDIN$  ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

$$\frac{\partial \{SDIN \cdot \Delta h \varphi\}}{\partial t} = - (\text{拡散}) + (\text{分解による生成}) - (\text{脱窒}) - (\text{吸着}) \\ = - K_{NK} \frac{SDIN - N}{\Delta h / 2} \varphi \\ + K_{SON} (SON - SON_0) \rho_s \Delta h (1-\varphi) \\ - DENIT - K_{NADS} SDIN \cdot \Delta h \varphi \quad (28)$$

c) 底泥に吸着されている無機態窒素  $SAN$  (g/g)

$$\frac{\partial \{SAN \cdot \rho_s \Delta h (1-\varphi)\}}{\partial t} = - (\text{堆積}) + (\text{吸着}) \\ = - W_{SED} SAN \cdot \rho_s (1-\varphi) + K_{NADS} SDIN \cdot \Delta h \varphi \quad (29)$$

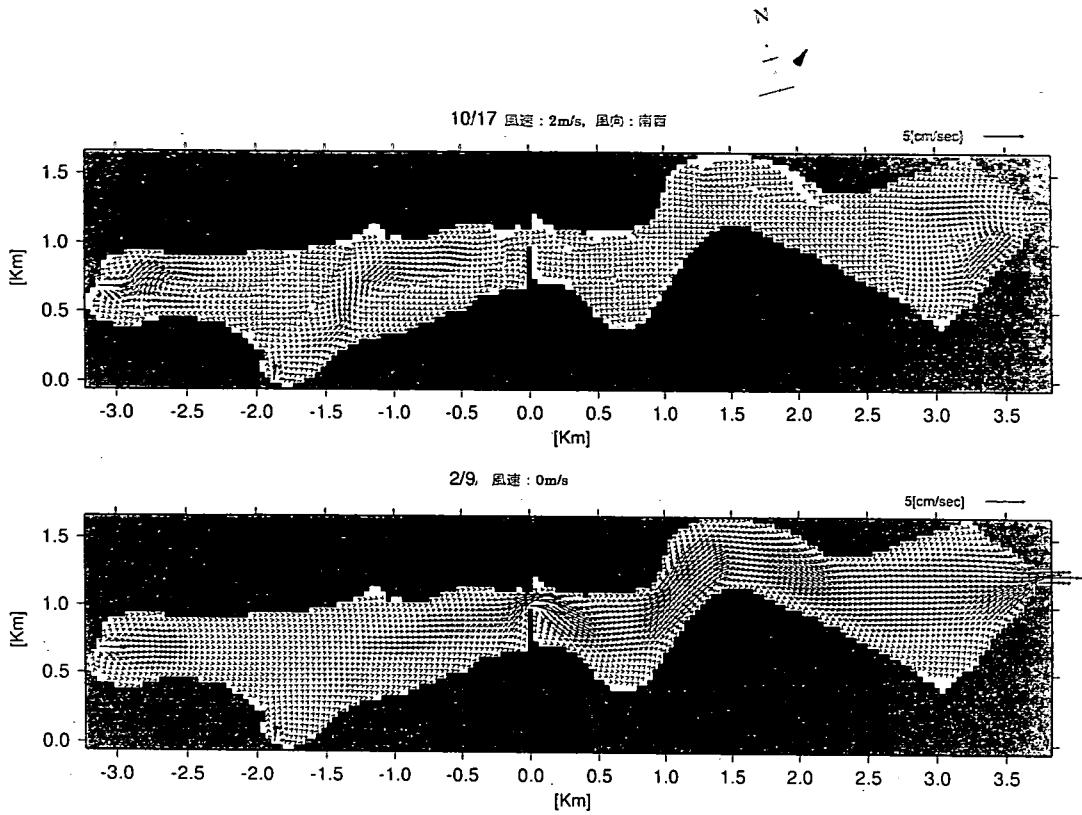


図-3 流動の計算結果（上図：10月17日午前0時、南西の風、流入流量 $1.5\text{m}^3/\text{s}$ 、下図：2月9日午前0時、無風、流入流量 $1.5\text{m}^3/\text{s}$ ）

d) 底泥中の有機態リン  $SOP$  (g/g)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \{SOP \cdot \rho_s \Delta h (1 - \phi)\}}{\partial t} \\ &= (\text{沈降}) - (\text{堆積}) - (\text{分解}) \\ &= (W_y Y + W_D D) - W_{SED} SOP \cdot \rho_s (1 - \phi) \\ & \quad - K_{SOP} (SOP - SOP_0) \times \rho_s \Delta h (1 - \phi) \end{aligned} \quad (30)$$

e) 間隙水中の無機態リン  $SDIP$  (g/m<sup>3</sup>)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \{SDIP \cdot \Delta h \phi\}}{\partial t} = -(\text{拡散}) + (\text{分解による生} \\ & \text{成}) - (\text{吸着}) = -K_{PK} \frac{SDIP - P}{\Delta h / 2} \phi \\ & \quad + K_{SOP} (SOP - SOP_0) \rho_s \Delta h (1 - \phi) \\ & \quad - K_{PADS} SDIP \cdot \Delta h \phi \end{aligned} \quad (31)$$

f) 底泥に吸着されている無機態リン  $SAP$  (g/g)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \{SAP \cdot \rho_s \Delta h (1 - \phi)\}}{\partial t} = -(\text{堆積}) + (\text{吸着}) \\ & = -W_{SED} SAP \cdot \rho_s (1 - \phi) + K_{PADS} SDIP \cdot \Delta h \phi \end{aligned} \quad (32)$$

ここに、 $\phi$ ：底泥の間隙率、 $\rho_s$ ：土の比重(g/cm<sup>3</sup>)、  
 $W_{SED}$  (m/day)：堆積速度、 $K_{NK}$ 、 $K_{PK}$  (m<sup>2</sup>/day)：  
 それぞれ窒素・リンの拡散係数、 $K_{NADS}$ 、  
 $K_{PADS}$  (day<sup>-1</sup>)：それぞれ窒素・リンの吸着速度、  
 $K_{SON}$ 、 $K_{SOP}$  (day<sup>-1</sup>)：それぞれ窒素・リンの分解  
 速度、 $SON_0$ 、 $SOP_0$  (mg/g)：それぞれ窒素・リ  
 ンの分解不可能な濃度、である。

水中から底泥へは、生物体及び非生物体が、水中  
 の有機態窒素・リンとして沈降し堆積する。底泥内  
 での堆積フラックスは堆積速度を仮定する。

間隙水中の窒素・リンの移動過程については、拡

散のみを考慮した。拡散係数は窒素・リンとともに定数を与える。溶出フラックスは、底泥内間隙水中の濃度と水中の濃度との差、および拡散係数で決定される。拡散係数はこれまでの研究における実測値や計算に用いられた値を参考に設定している。

底泥内の有機態窒素・リンの分解によって無機態窒素・リンが生成される。分解速度はこれまで実験等で得られた結果を参考に、底泥内の温度の関数とする。

$$K_{SON} = K_{SON0} \cdot \theta_{KN}^{T-20} \quad (33)$$

$$K_{SOP} = K_{SOP0} \cdot \theta_{KP}^{T-20} \quad (34)$$

ここに、 $K_{SON0}$ 、 $K_{SOP0}$  (day<sup>-1</sup>)：それぞれ窒素・リンの20℃における分解速度、 $\theta_{KN}$ 、 $\theta_{KP}$ ：それぞれ窒素・リンの分解に関する温度定数、である。

窒素については脱窒を考慮した。上田・小倉<sup>15)</sup>は手賀沼において脱窒速度  $DENIT$  を測定しており、温度の関数として以下のようになっている。

$$DENIT = 0.892 \times T^{1.2} \text{ (mg/m<sup>2</sup>/day)} \quad (35)$$

その他のパラメーターについては、文献値等を参考して設定した。用いた値を表-2に示す。

水質・底質計算における $\Delta t$  は45秒として、同様の境界条件に基づいて2カ年に亘って計算し、以下には2年目の結果を示した。

## 4. 計算結果

### (1) 流動

図-3に、代表的な流動パターンとして、水質の観測日の内、10月17日、2月9日における流動の計算結果を風向、時刻、流入流量とともに示す。実測値が無いため、計算結果の検証はできないが、流動の計算結果は、図-4に示すような降雨量に応じて変化する河川からの流入流量の変動と、風による影響を相乘的に受けていると考えられる。10月17日のように河川流量が小さく、南西方向の風が吹いた場合には、湖内の数ヶ所に風に伴う渦が生じ、根戸下付近に反時計回り、そのまま下流に時計回り、下沼では手賀沼中央付近で反時計回りの循環が形成された。また2月9日は卓越した風は無く、河口から下流へ向けての流れとなった。

### (2) 水質

#### a) 空間分布

千葉県水質保全研究所が実施した平成6年度の調査結果を検証用データとして計算結果と比較する。

図-5にクロロフィルa、リン酸態リン、無機態窒素、全リン、全窒素について、1月10日午前0時の計算結果の縦断分布を実測値と併せて示す。

図-5の計算結果を見ると、クロロフィルaは下流

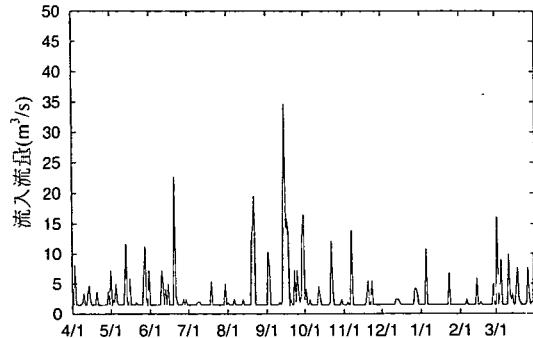


図-4 計算に用いた流入流量

に行くに従って、増大している。一方、リン酸態リンや全窒素・全リンは、下流に向かって減少する縦断分布の特性がほぼ再現された。

前報<sup>7)</sup>の計算では、流入流量については平水時の流量のみを考慮していたため、流動が微弱で栄養塩が湖内に停滞気味であったが、今回の計算ではそれが改善された。

#### b) 季節変化

季節変化については、水質保全研究所のデータが夏季以降のデータのみであるため、測点数は2点であるが年間を通じて測定されている千葉県の公共用水域水質測定結果と比較する。図-6に実測値と計算結果の比較を示す。

根戸下では、実測値、計算値ともに変動が大きいが、クロロフィルa、全CODについては、おおむね暖候期に高く寒候期に低い傾向が、リン酸態リンについては、暖候期に低く、寒候期に高い季節変化がほぼ再現された。また全リンについても年間の変化がほぼ再現された。しかし根戸下のみでの実測値との比較であることもあり、時期によっては値が大きく外れる場合も生じ、無機態窒素については寒候期の変化は再現されたが暖候期については外れている。また全窒素は全体的に低い。

空間分布と同様、季節変化においても、前報<sup>7)</sup>の計算では、流入流量については平水時の流量のみを考慮していたため、流動が微弱で栄養塩が湖内に停滞気味であったが、今回の計算ではそれが改善された。前報<sup>7)</sup>の計算結果に比べて、今回の計算では流入流量の変動と風による影響を流動計算に考慮したため、それが流動の計算結果を通じて水質計算に反映され、水質濃度の細かな変動の再現に寄与している。

しかし水質計算の更なる精度向上のためには、前述したような流入負荷量の変動も考慮する必要性があると思われる。このため図-6の全リンや全窒素において、流入流量が増大しているにもかかわらず、計算値が実測値を下回っている8月初旬、9月初旬、および3月の値などは、図-4に示すような流入流量

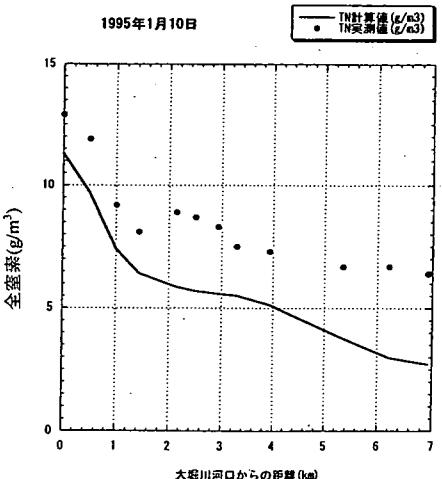
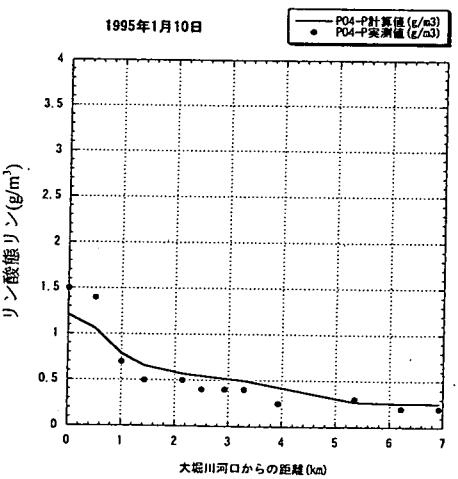
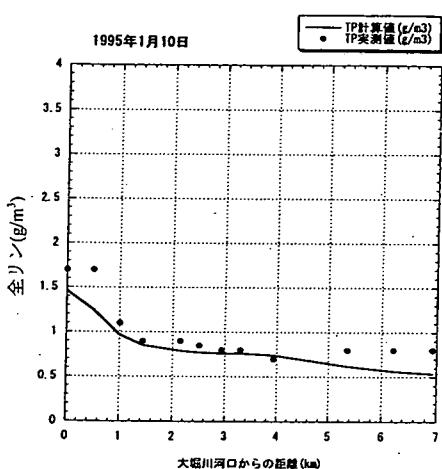
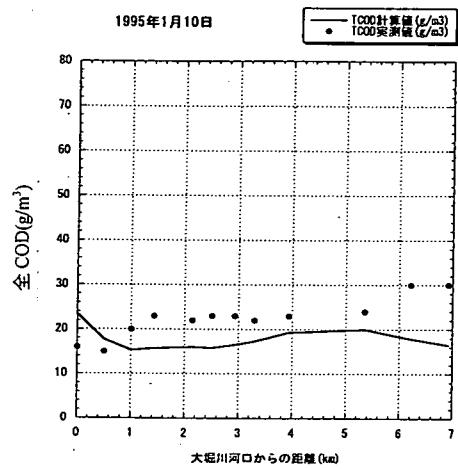
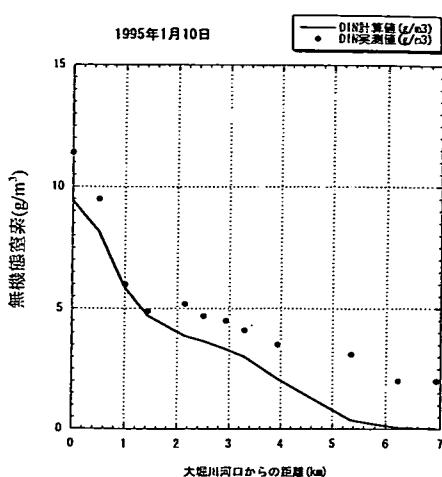
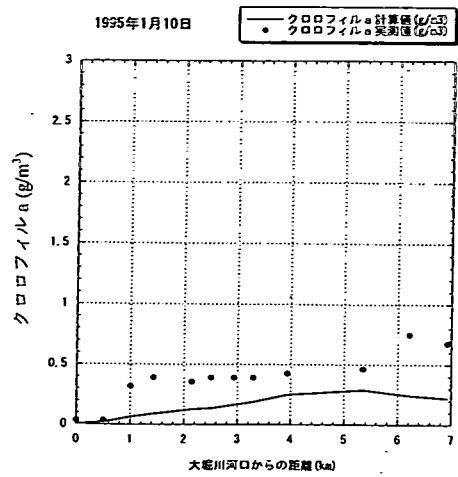


図-5 水質の実測値と計算結果の比較（1月10日における縦断分布）

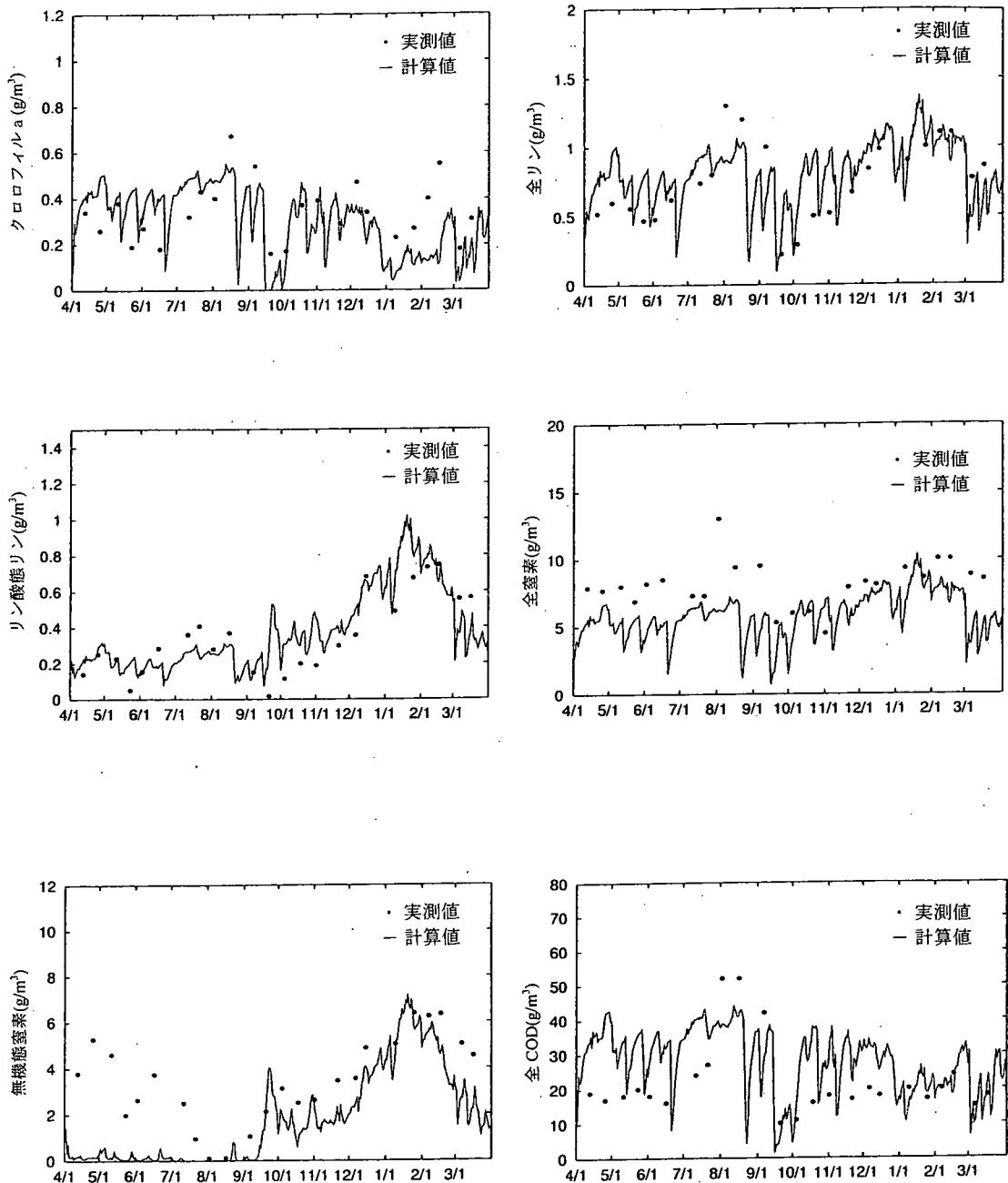


図-6 水質の実測値と計算結果の比較（根戸下における季節変化）

の増大に伴って流入負荷量を増大させれば、計算精度の向上が期待できる可能性がある。

この他に、吹送流による底泥の巻き上げに伴う溶出量の増大等、底泥からの栄養塩溶出量の変動性の検討が必要である。現行の計算では、底泥の巻き上げに伴う栄養塩溶出のモデル化ができていないため、そこまでの考慮はしていない。手賀沼のような浅い湖沼では今後このような強風時におけるインパクトの解析が必要である。

### (3) 底質および底泥からの溶出フラックス

小林・楠田<sup>16)</sup>は、手賀沼全域において底泥表層の全窒素、全リンの分布（1980年10月）データを得ている。

細見・須藤<sup>3)</sup>は、上沼の最上流（根戸下より上流）及び下沼（手賀沼中央）における底泥からの栄養塩の溶出フラックスを、1986年1月～12月に月1回測定している。また小林・西村<sup>4)</sup>は、それらの実測結果に基づいて物質収支を検討している。細見・須藤<sup>3)</sup>の溶出フラックスの上沼での値は、後述の井野場ら<sup>17), 18)</sup>の実測と比べると、実測場所が上流側に位置し、値も高い。

手賀沼では夏季でも底層まで溶存酸素が豊富であることが多い。井野場ら<sup>17), 18)</sup>は、人工ゼオライトによる窒素・リンの溶出制御効果を検討することを目的として、1997年8月に根戸下付近で採取した底泥を用いて、好気条件下におけるそれらの溶出フラックスを求めている。その結果、リンの溶出量は16～20mg/m<sup>2</sup>/day、アンモニア態窒素の溶出量は40～110mg/m<sup>2</sup>/dayとなった。

これらのデータは測定年度や測定場所、測定方法等がそれぞれ異なっており、今回の計算結果と直接比較することはできないが、オーダーや分布・季節変化の傾向等の参考データにはなると考えられる。

図-7に底質の計算結果の空間分布を示す。底泥中の濃度については、どの底質項目についても流下方向への低下傾向を示し、図-7の有機態窒素+吸着態窒素、有機態リン+吸着態リンをそれぞれ全窒素、全リンとみなすならば、小林・楠田<sup>16)</sup>の全窒素、全リンの底泥表層の実測値の平面分布と比較してみると、計算結果は窒素は高め（実測値は4～8mg/g、計算値は6～11 mg/g）、リンは低め（実測値は1～4mg/g、計算値は0.7～1.4mg/g）であるが、流下方向への低下傾向は一致した。

図-8(1)(2)の計算結果を見ると、底泥からの溶出フラックスは、窒素・リンとともに夏季に増大している。この傾向は根戸下で著しい。細見・須藤<sup>3)</sup>らの溶出フラックスと比較すると、実測値が窒素については、8月はアンモニア態窒素+硝酸・亜硝酸態窒素が上沼で210mg/m<sup>2</sup>/day程度、下沼で75mg/m<sup>2</sup>/day程度、最小になる11月は上沼で65mg/m<sup>2</sup>/day程度、下沼で45mg/m<sup>2</sup>/day程度、一方計算結果は8月に最大値を示し、根戸下で270mg/m<sup>2</sup>/day程度、手賀沼中央で100mg/m<sup>2</sup>/day程度、11月はそれぞれ根戸下で50mg/m<sup>2</sup>/day程度、手賀沼中央で20 mg/m<sup>2</sup>/day程度で、ほぼ同程度の値となっている。ただし今回の計算結

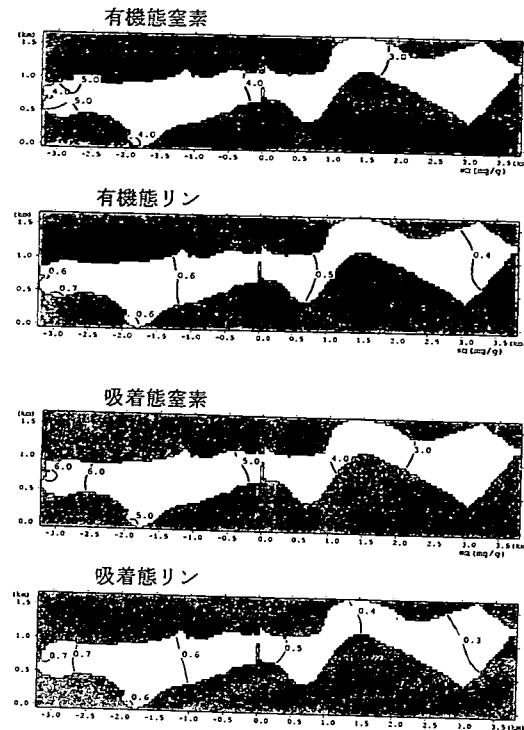


図-7 底質の計算結果（10月17日）

果の値は、井野場ら<sup>17), 18)</sup>の根戸下における8月の値（70 mg/m<sup>2</sup>/day程度）に比べるとかなり高めであった。リンについては、計算結果は根戸下では年間を通じて手賀沼中央の2倍程度の値になっているが、8月に30 mg/m<sup>2</sup>/day程度で細見・須藤<sup>3)</sup>らの結果ほど高くはないが、井野場ら<sup>17), 18)</sup>の値（20 mg/m<sup>2</sup>/day程度）に近くなっている。

前述のように、底質モデルによる計算結果は、実測値が年度も測定方法も異なるため、両者を直接比較して計算結果の妥当性を評価することは難しい。

しかし総じて実測値の縦断分布や季節変化の傾向は表すことができたと考えられる。

## 5. 物質収支と底泥からの栄養塩の溶出フラックスの影響

全窒素・全リンの上沼・下沼それぞれにおける収支を検討する。表-3, 4に本計算結果、小林・西村<sup>4)</sup>の結果、および細見・須藤<sup>3)</sup>の結果における全リンおよび全窒素の物質収支を示す。これらの表において表中の数値は各フラックス量の値をkg/dayの単位で表し、括弧書きで示した数値は、手賀沼全域に流入する負荷量に対する各フラックスの割合である。1983～1985年の実測値にもとづいて推算された細見・須藤<sup>3)</sup>の結果では、沼全域で見ると全リンでは

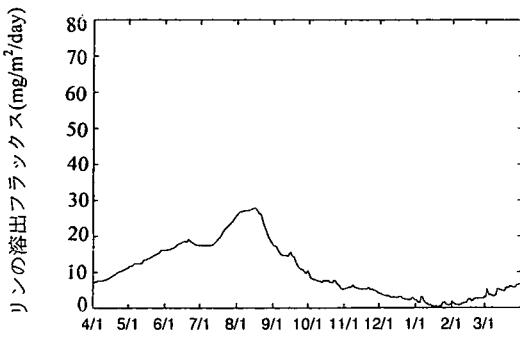
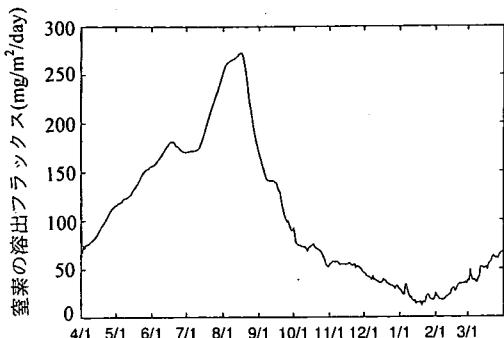


図-8(1) 底泥からの溶出フラックスの計算結果（根戸下における季節変化）

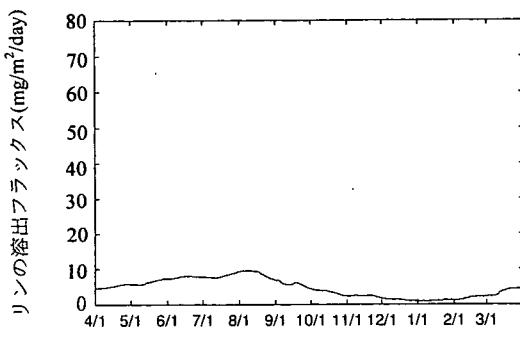
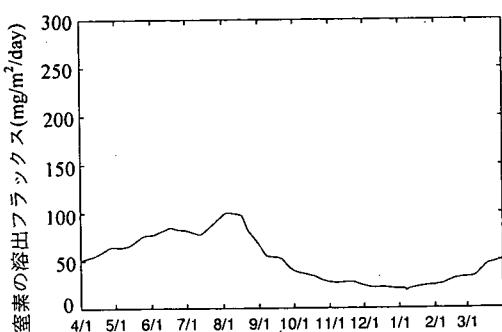


図-8(2) 底泥からの溶出フラックスの計算結果（手賀沼中央における季節変化）

表-3 全リンの収支（単位 kg/day）

区分		流入	流出	沈降	溶出	正味の堆積
本研究	年間	210	93.8 (0.45)	150.4 (0.71)	34.2 (0.16)	116.2 (0.55)
	夏季	210	123.0 (0.59)	162.0 (0.77)	61.0 (0.29)	101.0 (0.48)
	冬季	210	71.2 (0.34)	141.1 (0.67)	7.8 (0.04)	133.3 (0.63)
小林・西村	夏季	300	195 (0.65)	225 (0.75)	120 (0.4)	105 (0.35)
	冬季	379	162 (0.43)	254 (0.67)	37 (0.098)	217 (0.57)
細見・須藤	灌漑期	377	209 (0.55)			164 (0.44)
	非灌漑期	343	152 (0.44)			191 (0.56)

( )内の数値は流入負荷量に対する各フラックス量の比率を表す。

表-4 全窒素の収支（単位 kg/day）

区分		流入	流出	沈降	溶出	正味の堆積
本研究	年間	1570	492.0 (0.31)	1430.7 (0.92)	353.7 (0.23)	1077.0 (0.69)
	夏季	1570	708.7 (0.44)	1554.3 (0.99)	600.0 (0.38)	954.3 (0.61)
	冬季	1570	326.7 (0.21)	1331.1 (0.85)	123.3 (0.08)	1207.8 (0.77)
細見・須藤	灌漑期	2703	1668 (0.62)			1035 (0.38)
	非灌漑期	2259	1485 (0.66)			774 (0.34)

( )内の数値は流入負荷量に対する各フラックス量の比率を表す。

灌漑期、非灌漑期ともに流入負荷量の50%が下流へ流出し、50%が湖底に堆積している。また全窒素では灌漑期、非灌漑期ともに流入負荷量の60%が下流へ流出し、40%が湖底に堆積している。また同じく1983～1985年の夏季(7～9月)・冬季(12～2月)のリノの実測値にもとづいて推算された小林・西村<sup>4)</sup>の結果によれば、夏季は流入負荷量の60%が、冬季は40%が下流へ流出している。

本計算結果においても、全リンについては、夏季は流入負荷量の60%が、冬季は40%が下流に流下し、年間を通じても流入負荷量の50%が下流河川に流下し、50%が湖底に堆積することが認められ、細見・須藤<sup>3)</sup>の結果や小林・西村<sup>4)</sup>の結果とほぼ同じ結果となった。一方、全窒素については計算結果が実測値に比べて低めであり、年間の物質収支においても流入負荷量の30%が流出し、70%が堆積する結果となった。これは細見・須藤<sup>3)</sup>の結果に比べて堆積量の過大評価となった。

底泥からの全リンの溶出フラックスについては、小林・西村<sup>4)</sup>の計算結果によると、夏季は流入負荷量の40%，冬季は10%で、季節による相違を示している。

本計算での全リンの溶出フラックスは、夏季は流入負荷量の30%，冬季は4%で、小林・西村<sup>4)</sup>と同様季節変化を示すとともに流入負荷量に対する比率も同程度であった。また全窒素の溶出フラックスは、夏季は流入負荷量の40%，冬季は10%であった。本計算では流入負荷量が年間を通じて一定とした。将来、河川の流入流量の変化に基づいて流入負荷量の変動を考慮することができれば、季節による底泥からの栄養塩溶出フラックスの影響の変化もより正確に提示できるものと思われる。また現段階ではいずれの研究結果においても、底泥からの栄養塩溶出フラックスとして静的な条件下における溶出のみを取り上げ、降雨や風等に伴う底泥巻き上げ時の溶出を考慮していない。これについても今後の課題である。現段階では、底泥からの溶出フラックスは少なくとも流入負荷量の20～30%であろうと推定される。

松岡<sup>10)</sup>は、霞ヶ浦での富栄養化シミュレーションで、底泥からの溶出フラックスの流入負荷量に対する割合を全窒素については40%，全リンについては10%としており、手賀沼は全リンについては同じ浅い湖沼である霞ヶ浦よりもなお底泥からの溶出フラックスの影響が大きいことがうかがえる。

## 6. 結語

手賀沼を対象に、水質の実測値に基づいてその時空間変動について検討するとともに、流動・水質・底質の年間に亘る時空間変動のシミュレーションを実施した。手賀沼において流動・水質・底質について年間に亘る時空間変動のシミュレーションはこれまでに実施されていない。水質の実測値の縦断分布から、クロロフィルaやCOD等の有機物は流下方向に増大し、無機態窒素・リン、全窒素・全リンは減

少すること、根戸下では季節変化としてクロロフィルaやCODが概ね暖候期に高く寒候期に低いこと、無機態リンは暖候期に低く寒候期に高いことなどが確認され、シミュレーションによってこれらの特性が概略再現された。

さらに、年間に亘る全リンの物質収支から、流入負荷量の50%が下流河川に流下し、残りの50%が湖底に堆積する結果となった。また底泥からの全リンの溶出フラックスは、静的な条件下では流入負荷量の20%であった。これらの値は既往の実測値による検討結果とほぼ同様であり、湖沼の流動・水質・底質の時空間変動を考慮した結果の物質収支においても、手賀沼における底泥の重要性が示された。

また本シミュレーションモデルを用いることにより、将来の流入流量や流入負荷の変化に伴う流動・水質・底質への影響を予測・評価することが可能となると考えられる。

## 参考文献

- 1) 本橋敬之助：閉鎖性水域環境と浄化、公害対策同友会, pp.168,1992.
- 2) 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.
- 3) 細見正明、須藤隆一：手賀沼における窒素およびリンの収支、水環境学会誌、第15巻、第2号, pp.105-112,1992.
- 4) 小林節子、西村 肇：湖沼のリン循環諸過程の現状・把握にもとづいた湖沼のCOD水質予測法、水環境学会誌、第16巻、第10号, pp.711-722,1993.
- 5) 木内浩一、平間幸雄、吉澤 正、小林節子：手賀沼における浄化用水導入に伴う水の流れの数値計算、千葉県水質保全研究所年報, pp.91-100,1993.
- 6) 平間幸雄、小林節子：印旛沼・手賀沼の水質予測の試算（2）、千葉県水質保全研年報, pp.59-62,1997.
- 7) 松梨史郎、井野場誠治、下垣 久、宮永洋一：手賀沼の水質の時空間変化特性に関する検討、水工学論文集、第43巻, pp.995-1000,1999.
- 8) 千葉県環境部：公共用水域水質測定結果及び地下水の水質測定結果、平成4年度～7年度。
- 9) 岩佐義朗、井上和也、劉樹坤、阿部 徹：琵琶湖潮流の三次元的な解析、京大防災研究所年報、第26巻、B-2, pp.531-542, 1983.
- 10) 松梨史郎：湾奥水域における水質の時空間変化の解析、土木学会論文集、No. 573/VII-4, pp.93-110,1997.
- 11) 松岡 謙：霞ヶ浦の富栄養化モデル、国立公害研究所報告、第54号, pp.97-99,1984.
- 12) 小林節子、平間幸雄：手賀沼の最近の水質の変化について、(1)排出負荷量と水質との関係、千葉県水質保全研年報, pp.63-71,1997.
- 13) 今村正裕、松梨史郎：都市河川の流入する湾奥部における水-底質モデルの開発、電力中央研究所研究報告、U97050, 29p., 1997.
- 14) 松梨史郎、今村正裕：湾奥水域における水-底質予測と負荷削減に伴う水質および栄養塩溶出フラックスの応答、土木学会論文集、No. 608/VII-9, pp.31-47, 1998.
- 15) 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、Japan Journal of

- Limnology, Vol.50, No.1, pp.15-24, 1989.
- 16) 小林節子, 楠田 隆: 手賀沼の底泥 -汚染泥の堆積と性状-, 用水と廃水, Vol. 27, No. 2, 1985.
- 17) 井野場誠治, 下垣 久, 松梨史郎, 宮永洋一: 人工ゼオライトによる底泥のN,P溶出抑制効果に関する実験的検討, 日本水環境学会年会講演集, pp.395, 1998.
- 18) 井野場誠治, 宮永洋一, 下垣 久, 松梨史郎: 石炭灰を転化した人工ゼオライトによる底質浄化の基礎的検討, 電力中央研究所報告, U98073, 18p., 1999.

(2001.6.29 受付)

## SEASONAL AND SPATIAL SIMULATION OF FLOW, WATER QUALITY AND SEDIMENT AND EFFECT OF NUTRIENT RELEASE FROM SEDIMENT IN LAKE TEGANUMA

Shiro MATSUNASHI, Seiji INOBA, Hisashi SHIMOGAKI and Yoichi MIYANAGA

Seasonal and spatial changes in water quality in Lake Teganuma were investigated by using the field data and were simulated by a flow, water quality and sediment model. Chlorophyll-a and COD increased, and inorganic nitrogen, phosphate, total nitrogen and total phosphorus decreased toward downstream direction. Chlorophyll-a increased in summer and decreased in winter, and inorganic nitrogen and phosphate decreased in summer and increased in winter at the observation point of Nedo-shita. These observed variations of nutrients were practically reproduced in the simulation of the flow, water quality and sediment. Furthermore, according to the mass balance, 50 percent of total phosphorus in the inflow load was transported to downstream and the rest of 50 percent was accumulated to the bottom of the lake. Moreover, the results of the simulation suggested that 20 percent of total phosphorus in the inflow load is release from sediment.