

手賀沼の水質の時空間変化特性に関する検討

ANALYSIS OF SEASONAL AND SPATIAL CHARACTERISTICS OF WATER QUALITY IN LAKE TEGANUMA

松梨史郎¹・井野場誠治²・下垣 久²・宮永洋一¹

Shiro MATSUNASHI, Seiji INOBA, Hisashi SHIMOGAKI and Yoichi MIYANAGA

¹正会員 工博 (財)電力中央研究所 環境科学部 (〒270-1194 我孫子市我孫子1646)

²正会員 工修 (財)電力中央研究所 環境科学部 (同上)

Seasonal and spatial characteristics of water quality in Lake Teganuma were investigated by using the field data and were simulated by a water quality numerical simulation model. Chlorophyll-a increased and inorganic nitrogen decreased toward downstream direction. Chlorophyll-a increased in summer and decreased in winter, and inorganic nitrogen decreased in summer and increased in winter at Nedo-shita. The numerical simulation roughly reproduced those characteristics of water quality in Lake Teganuma. The results of the simulation suggested that the limiting factor for growth of phytoplankton at Nedo-shita was not inorganic nitrogen but light intensity.

Key Words: Teganuma, water quality, numerical simulation, phytoplankton, nutrient

1. はじめに

手賀沼は、千葉県北西部に位置し図-1に示す形状をした湖沼で、湖面積 6.5km^2 (本手賀沼は 5.5km^2)、平均淡水量 560万m^3 (本手賀沼は 470万m^3)、平均水深 0.86m の浅く、細長い湖沼である¹⁾²⁾。農業用水、内水面漁業等に利用される重要な水源となっているが、全国の湖沼の中で水質ワースト1が20年間以上続いている湖沼として有名である。手賀沼は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。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。

小林・西村³⁾は、手賀沼の制限栄養塩がリンであるとして、湖内COD濃度と全リンの相関関係から、全リン負荷量の削減対策について検討している。また小林ら⁴⁾は湖内の10年間のCOD、全窒素、全リンのデータに基づいて、栄養塩からCODへの変換について検討している。これらに対して水質シミュレーションは、これまでに公にされたものでは、導水に伴う流動変化のシミュレーション⁵⁾はあるものの、水質の

時空間変化を議論した手賀沼の水質シミュレーションは見当たらない。下水道の建設など、種々の水質改善対策の検討のためにも、水質のシミュレーションは有効な方法である。

水質の空間分布の特性を再現することは、河川からの流入無機栄養塩の同化、懸濁態の沈降、有機物の分解・無機化、底泥からの栄養塩の溶出という生物・化学的反応速度と移流・拡散による物理的な物質輸送速度の相互関係を、実態調査とモデル解析を通じて議論することを意味している。そしてこれは手賀沼の持つ流入負荷の受け入れ体制、すなわち環境容量を推定する手がかりとなり、適正な負荷量、流入流量の算定へとつなげることができる。

また季節変化を再現することは、種々のプランクトンの消長への外的要因(水温、照度、栄養塩等)の寄与度の議論が可能であることを意味している。そしてこれは手賀沼に限らず、富栄養化した湖沼で共通して見られる種々のプランクトンの特性の把握にもつながると考えられる。

こうしたことを踏まえて、千葉県水質保全研究所による縦断分布に関するデータ(平成6年度のみ)と、公共用水域水質測定の間年のデータ(平成4年度~7

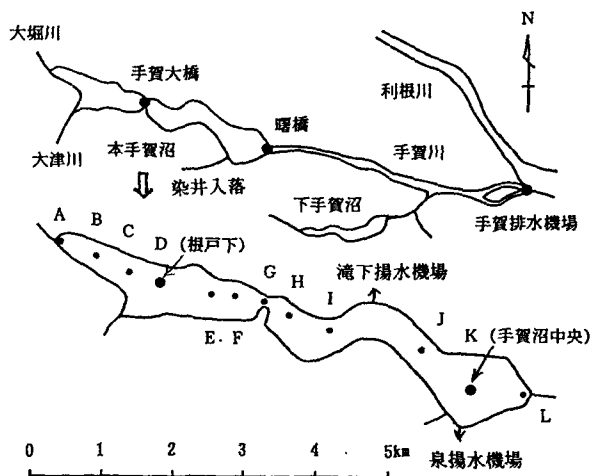


図-1 手賀沼の概略図と測定地点 (平間ら²⁾に加筆)

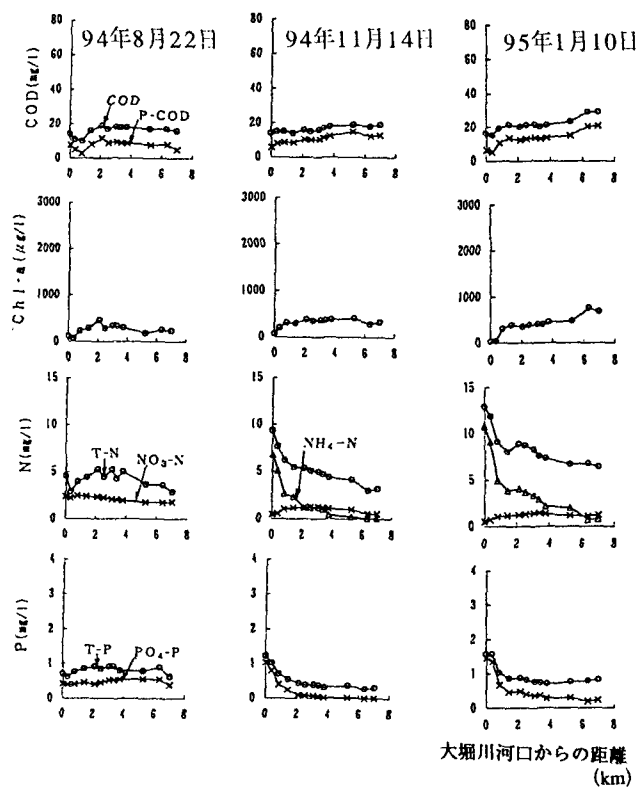


図-2 各水質の縦断変化 (平間ら²⁾より抜粋)

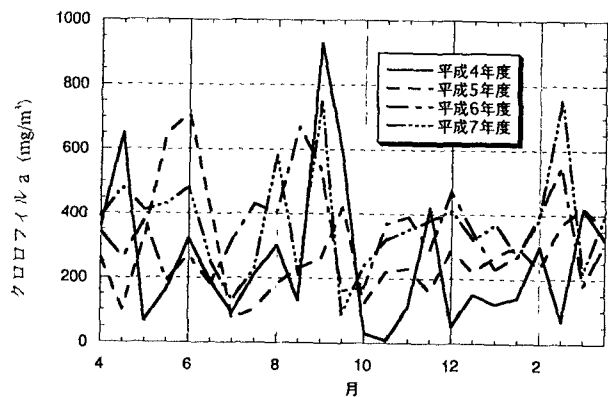


図-3 クロロフィル a の季節変化 (根戸下)

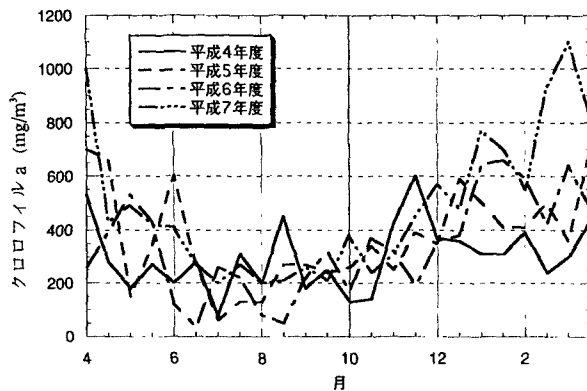


図-4 クロロフィル a の季節変化 (手賀沼中央)

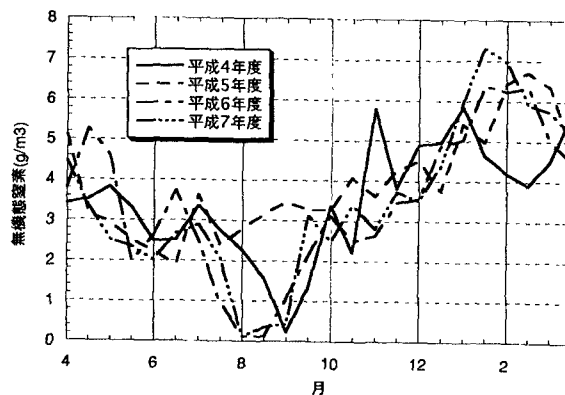


図-5 リン酸態リンの季節変化 (根戸下)

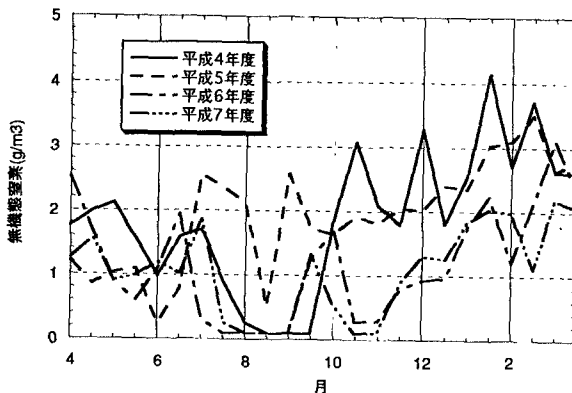


図-6 無機態窒素の季節変化 (手賀沼中央)

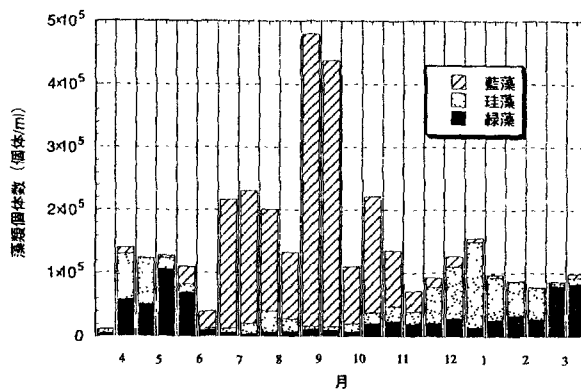


図-7 藻類の種の季節変化 (手賀沼中央、平成6年度)

年度、2地点のみ)の両者を検討することにより、手賀沼の水質に関する時空間特性を浮き彫りにした。次にこれらのデータを対象に水質モデルによる年間のシミュレーションを実施し結果について検討した。

2. 水質の実態

(1)空間分布

平間ら²⁾は、平成6年8月から翌7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おり、後述のシミュレーションではこのデータをターゲットとするため、平間ら²⁾に基づき、寒候期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、下流端での水位制御や排水量、水温も併せて調査されている。

図-2に示す水質調査結果から、寒候期の水質特性について、以下のようなことが明らかにされている。

- ・COD、クロロフィルaは下流に向かって増加している。これらは流下に伴う生産と沈降のバランスで決定されているであろうことが想定される。

- ・全窒素、全リン、リン酸態リンは流下方向に減少している。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考えられる。

- ・図-2は下流端の手賀排水機場の水門が開放されている通常時の分布であるが、平間ら²⁾は水門が閉鎖されている時には、風向によっては図-2とは異なる分布を示すことがあることも指摘している。

(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カ所(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。測定水深はいずれも水深20cmである。公共用水域水質測定点は湖内に2カ所であり、また月2回のデータであるため、図-3～6に示すように、平成4年度から7年度までの4年間に亘る測定結果⁶⁾を整理・検討した。その結果、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。

- ・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。また手賀沼中央では夏季に劣らず冬季に高い値を示している。この季節変化の相違の要因として、図-7に示すように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たり、灌漑期に灌漑用水による交換率の増大が影響していることなどが指摘される⁷⁾。

- ・根戸下・手賀沼中央ともに、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。季節変化の大筋は同じではあるが、年によっては各月の値に大きな差がある時期もあった。

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

手賀沼は極端に浅く、著者らが上沼(根戸下)および下沼(図-1の1地点近傍)で、平成9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、各水質ともに鉛直分布はほとんどなかった。このため流動モデルは、連続式及び運動方程式を鉛直方向に積分した平面2次元モデルである。水平方向の差分メッシュは40mとした。

計算条件として、流入河川は大堀川、大津川、染井入落を対象とし、三河川からの流入流量を暖候期と寒候期に分け、4月～9月は大堀川0.67m³/s、大津川1.00m³/s、染井入落0.20m³/s、10月～翌3月は大堀川0.48m³/s、大津川0.58m³/s、染井入落0.03m³/sとした。また4月～8月は灌漑用水として、滝下揚水機場から0.26m³/s、泉揚水機場から0.61m³/sを取水した。渦動粘性係数および後述の渦動拡散係数は10³cm²/sとした。これは著者が、以前ダム貯水池で濁水を流して拡散係数を求めた実験結果に基づく。また底面摩擦係数は0.0026とした⁸⁾。なお風の影響は今回は考慮していない。

(2)水質

水質モデルも流動モデルと同様に、鉛直方向に積分した平面2次元モデルである。以下に基礎式を示す。手賀沼が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違いを考慮した。その他の定式化については、文献⁹⁾と同様である。

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \{G_y - R_{y20}\theta_{RY}^{T-20}\}Y - C_{g20}\theta_{CG}^{T-20}ZY - \frac{W_y Y}{H} + F(Y) \quad (1)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = (f_y C_{g20}\theta_{CG}^{T-20}Y - R_{z20}\theta_{RZ}^{T-20} - D_z)Z + F(Z) \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\{G_y - \gamma_y R_{y20}\theta_{RY}^{T-20}\}Y + \gamma_z R_{z20}\theta_{RZ}^{T-20}Z$$

$$+K_{D20}\theta_{KD}^{T-20}D+\frac{W_P}{H}+F(P)+q_P \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial t} = & (1-\gamma_y)R_{y20}\theta_{RY}^{T-20}Y + (1-f_y)C_{g20}\theta_{CG}^{T-20}ZY \\ & + (1-\gamma_z)R_{z20}\theta_{RZ}^{T-20}Z + D_zZ \\ & - K_{D20}\theta_{KD}^{T-20}D - \frac{W_D D}{H} + F(D) + q_D \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} = & -\sigma_{Ny}\{G_y - \gamma_y R_{y20}\theta_{RY}^{T-20}\}Y \\ & + \sigma_{Nz}\gamma_z R_{z20}\theta_{RZ}^{T-20}Z \\ & + K_{E20}\theta_{KE}^{T-20}E + \frac{W_N}{H} + F(N) + q_N \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} = & \sigma_{Ny}(1-\gamma_y)R_{y20}\theta_{RY}^{T-20}Y \\ & + \sigma_{Nz}(1-f_y)C_{g20}\theta_{CG}^{T-20}ZY \\ & + \sigma_{Nz}\{(1-\gamma_z)R_{z20}\theta_{RZ}^{T-20}Z + D_zZ\} \\ & - K_{E20}\theta_{KE}^{T-20}E - \frac{W_E E}{H} + F(E) + q_E \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} = & \sigma_{Cy}(1-\gamma_y)R_{y20}\theta_{RY}^{T-20}Y \\ & + \sigma_{Cz}(1-f_y)C_{g20}\theta_{CG}^{T-20}ZY \\ & + \sigma_{Cz}\{(1-\gamma_z)R_{z20}\theta_{RZ}^{T-20}Z + D_zZ\} \\ & - K_{C20}\theta_{KC}^{T-20}C - \frac{W_C C}{H} + F(C) + q_C \end{aligned} \quad (7)$$

$$TCOD = \sigma_{Cy}Y + \sigma_{Cz}Z + C \quad (8)$$

$$G_y = G_{y\max} f_T f_l \text{Min}\left(\frac{P}{K_P + P}, \frac{N}{K_N + N}\right) \quad (9)$$

$$f_y = a_y \frac{K_y}{K_y + Y} \quad (10)$$

ここに、 Y ：クロロフィル a (g/m^3) (=植物プランクトン態リン)， Z ：動物プランクトン態リン(g/m^3)， P ：無機態リン(g/m^3)、 D ：非生物体の有機態リン(g/m^3)， N ：無機態窒素(g/m^3)， E ：非生物体の有機態窒素(g/m^3)， C ：非生物体の COD， $TCOD$ ：全 COD(g/m^3)， $F(X)$ ：水質 X に関する移流・拡散項 (渦動拡散係数= $10^3\text{cm}^2/\text{s}$)， q_X ：水質 X の流入負荷量， H ：水深(m)である。その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。同式のうち $\text{Min}()$ の部分については松岡が霞ヶ浦で用いた珪藻の式¹⁰⁾を用いた。

$$f_T = \text{Max}\{\theta_{GY}^{T-20}, \text{Min}\left(\frac{T}{14}, 1, 2 - \frac{T}{20}\right)\} \quad (11)$$

本来ならば藻類の種ごとの方程式を立てるのが順当と思われるが、植物プランクトンの消長が式(1)のように1本で表わされるならば、他の基礎式については種を考慮しない場合と同様の式を適用できるため、本研究では種の特性的相違として比較的明瞭な水温の関数についてのみ考慮した形で計算を行った。

照度の関数 f_l は以下のようにする。

$$f_l = \frac{ef}{kH} \left\{ \exp\left(-\frac{I}{I_{opt}} e^{-kH}\right) - \exp\left(-\frac{I}{I_{opt}}\right) \right\} \quad (12)$$

ここに、 $e = 2.718$ ， f ：日照率， I_{opt} ：最適日射量 ($\text{cal/cm}^2/\text{day}$)， I ：全天日射量($\text{cal/cm}^2/\text{day}$)， k ：減衰係数(m^{-1})である。減衰係数については、霞ヶ浦で用いられた次式¹⁰⁾を用いた。同式は植物プランクトンによる自蔽効果を考慮して、クロロフィル a 濃度が $0 \sim 400\text{mg/m}^3$ の範囲までカバーしている。

$$k = 20 \cdot Y + 1.1 \quad (13)$$

差分メッシュは流動計算と同様である。千葉県水質保全研の水質縦断分布調査は平成6年度に実施されているため、計算も平成6年度を対象に実施した。

流入負荷量は、平成6年度の大堀川、大津川、染井入落の月2回の実測調査結果 (公共用水域水質データ) を補間して与えた。水温については湖内の測定結果から、空間的な分布はほとんど無いため、手賀沼中央の月2回の実測値を補間して設定した。

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く、底泥からの栄養塩の溶出量は、平成9年8月と平成10年1月に根戸下付近で採取した底泥を用いて行った好気条件下における実験で求めた¹¹⁾。

4. 水質の計算結果と実測結果の比較

(1)空間分布

千葉県水質保全研究所が行った平成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-8に全COD、クロロフィル a，無機態窒素，リン酸態リンの平成7年1月における計算結果の平面分布を示す。図-2と比較した結果、全COD、クロロフィル a は流下方向に増加し、無機態窒素，リン酸態リンは減少する分布や濃度勾配が、ほぼ再現された。なお平間ら²⁾は、通常時と逆の空間分布を呈する場合について風の効果や下流端の手賀排水機場の水門の開閉による影響を指摘しているが、本計算ではこのような変化を考慮していないため、これらの要因に影響される空間分布の再現は今後の課題としたい。

(2)季節変化

次に千葉県の公共用水域水質測定結果と比較する。

表-1 水質パラメーター

パラメータ	本計算での値
最大増殖率	$C_{max}(day^{-1})$ 2.0, 3.0(20℃以下の時)
温度定数	$\theta_{10}(-)$ 1.07
最適日射量	$I_{opt}(cal/cm^2/day)$ 300
リン飽和定数	$K_p(g/m^3)$ 0.03
植物プランクトン呼吸速度	$R_{pd}(day^{-1})$ 0.025
温度定数	$\theta_{R_p}(-)$ 1.045
動物プランクトン連水速度	$C_{dp}(m^3/gPday)$ 8.3
温度定数	$\theta_{C_{dp}}(-)$ 1.045
植物プランクトン沈降速度	$W_p(m/day)$ 0.0
植物プランクトン最大同化効率	$a_p(-)$ 0.6
植物プランクトン同化半飽和定数	$K_p(gP/m^3)$ 0.051
動物プランクトン呼吸速度	$R_{dp}(day^{-1})$ 0.04
温度定数	$\theta_{R_d}(-)$ 1.045
動物プランクトン死滅速度	$D_p(day^{-1})$ 0.075
植物プランクトン回復率	$\gamma_p(-)$ 0.2
動物プランクトン回復率	$\gamma_d(-)$ 0.2
有機態リン分解速度	$K_{Lp}(day^{-1})$ 0.02
温度定数	$\theta_{K_{Lp}}(-)$ 1.08
有機態リン沈降速度	$W_{Lp}(m/day)$ 0.1
底泥からのリンの溶出速度	$W_{Lp}(gP/m^2/day)$ 0.0165(上沼), 0.0023(下沼)
窒素半飽和定数	$K_n(g/m^3)$ 0.1
有機態窒素分解速度	$K_{Ls}(day^{-1})$ 0.02
温度定数	$\theta_{K_{Ls}}(-)$ 1.08
有機態窒素沈降速度	$W_{Ls}(m/day)$ 0.1
換算係数	$\sigma_{NO_3}, \sigma_{NH_4}(gN/gP)$ 10
底泥からの窒素の溶出速度	$W_{Ls}(gN/m^2/day)$ 0.0731(上沼), 0.0669(下沼)
換算係数	$\sigma_{CO_2}, \sigma_{CH_4}(gC/gP)$ 50
COD分解速度	$K_{CD}(day^{-1})$ 0.02
温度定数	$\theta_{K_{CD}}(-)$ 1.08
COD沈降速度	$W_{CD}(m/day)$ 0.1

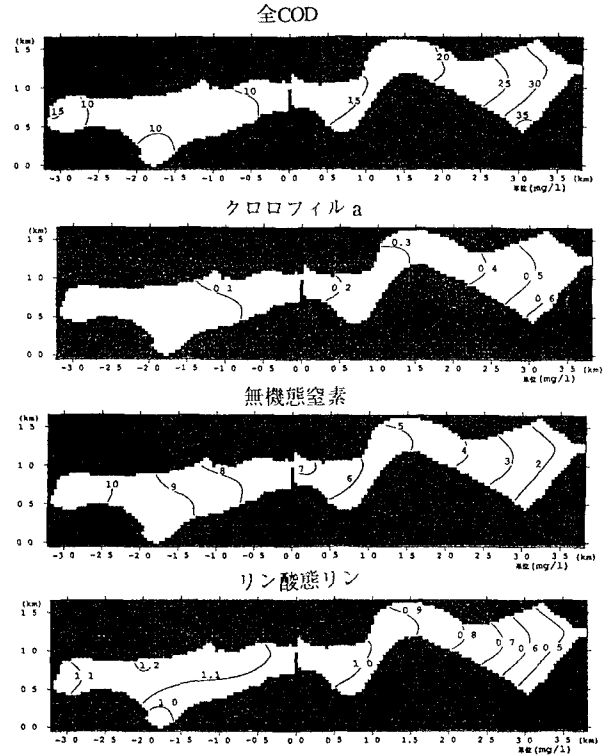


図-8 計算結果（平成7年1月10日の空間分布）

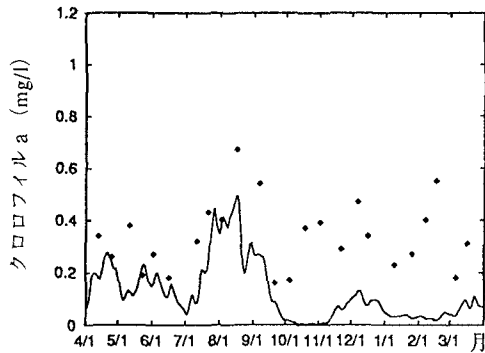


図-9 実測値と計算結果の比較（根戸下：クロロフィル a）

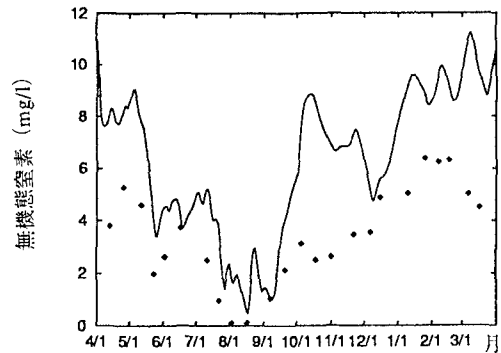


図-10 実測値と計算結果の比較（根戸下：無機態窒素）

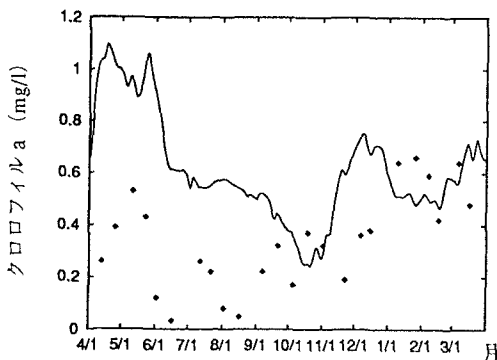


図-12 実測値と計算結果の比較
（手賀沼中央：クロロフィル a）

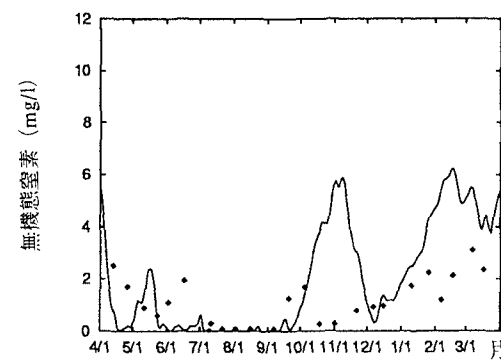


図-13 実測値と計算結果の比較
（手賀沼中央：無機態窒素）

図-9,10に根戸下におけるクロロフィル a, 無機態窒素の平成6年度の季節変化の実測値と計算結果の比較を示す。根戸下では、クロロフィル a は夏季に高く

冬季に低い季節変化の傾向が、無機態窒素は夏季に低く、冬季に高い季節変化の大筋がほぼ再現された。しかし2測点のみでの実測値との比較であることもあ

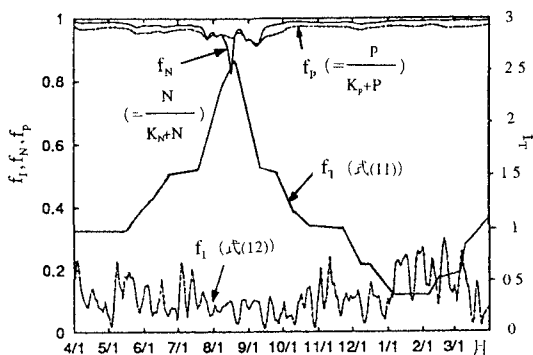


図-11 藻類増殖の制限要因の季節変化（根戸下）
（縦軸の数値の小さい方が制限要因として大きい）

り、時期によっては値が大きくなる場合も生じた。計算と実測とのずれについては、式(11)のような藻類の定式化によるものと、測定が月2回という実測値によるものの両方の影響が混在しており、一概には言えない。今後さらなる検討が必要と考える。

藻類の増殖への水温、照度、栄養塩の寄与度を比較するため、図-11に各制限因子の相対評価を示す。その結果、夏季に一時的に窒素の影響があるものの、照度の影響が栄養塩よりも大きかった。照度は藻類自身の濃度の影響を受けており、根戸下では特に夏季における照度の制限が大きい結果となった。

霞ヶ浦における富栄養化計算の結果¹⁰⁾では、藍藻類の制限因子は夏季は窒素と照度、冬季は水温であり、その他の藻類については夏季は窒素・リン、冬季は水温・照度であることが示されている。これは夏季の藍藻類の自蔽効果による光制限の強化を物語っており、今回の計算結果から手賀沼についても同様の事が指摘できる。

次に図-12,13に示すように、手賀沼中央ではクロロフィルaは夏季に劣らず冬季に高い値が、無機態窒素については夏季に低く、冬季に高い季節変化の大筋が再現された。しかし根戸下と同様、再現計算にはまだ不十分な点もあり、藻類の増殖要因や季節変化の要因についてはなお詳細な検討が必要である。

5. 結語

手賀沼の水質に関する時空間特性について、縦断分布に関するデータと、年間に亘る季節変化のデータの両者を検討するとともに、そのシミュレーションを実施し、以下の結果が得られた。

・水質の縦断分布から、有機物は流下方向に増大し、無機物は減少することが示された。また場所によって有機物の季節変化が異なり、根戸下では夏季に高く、冬季に低い季節変化を示したのに対し、手賀沼中央では夏季に劣らず冬季に高い値を示していた。

・上述の水質の時空間変化を水質モデルによって再現するために、藻類の増殖への水温の関数について季節によって異なる優占種の特性を考慮し、年間の時空間変化のシミュレーションを行った。その結果空間分布についてはほぼ良好に再現できた。季節変化についてはその大筋はほぼ再現できたが、時期によっては値が大きくなる場合も生じた。計算値と実測値のずれについては、藻類の定式化によるものと実測値によるものの両方の影響が混在していると考えられ、一概には言えない。また根戸下では夏季の藻類増殖の制限要因として栄養塩よりも照度の影響が大きいことが示唆された。

今回の解析では、水質変化の大筋を再現した。今後はこの結果を1ステップとして、シミュレーションの精度向上を図るとともに、現地調査計画に反映させ、さらに精度高く藻類増殖の制限要因や水質変化の特性を定量的に解析していく予定である。

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，p.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) 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。
- 4) 小林節子・宇野健一・吉澤 正：印旛沼，手賀沼のCOD，窒素，リンの水質特性，一内部生産CODと窒素，リンのCODへの変換率について，公害と対策，Vol.26，No.14，pp.47-56，1990。
- 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) 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。
- 7) 小川かおる：手賀沼の植物プランクトン，山田・白鳥・立本編，印旛沼・手賀沼 水環境への提言，古今書院，pp.73-81，1993。
- 8) 岩佐義朗・井上和也・劉樹坤・阿部 徹：琵琶湖湖流の三次元的な解析，京大防災研究所年報，第26号，B-2，pp.531-542，1983。
- 9) 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。
- 10) 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.97-99，1984。
- 11) 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。

(1998.9.30受付)