

I-12 湖沼における水質・生態系保全の評価手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 15～平 17

担当チーム：河川生態チーム

研究担当者：天野邦彦、時岡利和

【要旨】

湖沼水質変動は、各湖沼特有の水理・水文状況に生態系活動が反応して生起しているため、例えば藍藻類の大量発生が主な問題であれば、この発生について水理・水文、生化学的に機構解明を行い適切な対策を行うことで、競合関係にある種（他の植物プランクトンや大型植物）や捕食者（動物プランクトン）との関連を通して大量発生を防止あるいは軽減できる可能性がある。そこで、湖沼水質変動を詳細な流動計算と水質計算により表現する数値モデルに大型水生植物のもつ底泥の巻き上げ抑制機能を表すモデルを組み込んで、植物プランクトン増殖抑制の効果を評価しうるモデルを開発した。このモデルを使用することにより、大型水生植物群落の再生による水質保全効果の様な現象を評価することが可能となった。

キーワード：湖沼水質モデル、植物プランクトン、大型水生植物、底泥、栄養塩類

1. はじめに

本課題では、生態系要素を組み入れて、藻類の大量発生機構を説明する湖沼流動・水質・生態系の数値シミュレーションモデルを提案し、現地調査、実験を通して、モデルの検証を行い、湖沼特性に応じた藻類発生軽減策の策定を目指す。このため、3次元の流動計算が可能なモデルに、詳細に物質収支を計算することで水質変動を解析するモデルを結合させて、湖沼水質・生態系モデルを作成した。このモデルを現地に適用することで、実際の水質改善計画の適切な策定に利用することが可能と考えられる。富栄養化が進行した千葉県印旛沼を対象に、このモデルを適用し、藻類増殖抑制のために実施しうる対策について考察を行った。

2. 研究方法

湖沼の水質・生態系保全の評価手法の提案としては、数値解析モデルを作成して、これを現地に適用して検証するという方法をとった。以下に、まず作成した数値解析モデルの概要を示す。

2.1 流動モデル

流動に関するモデルは、Princeton Ocean Model (POM)¹⁾の境界条件を改良したものを使用した。主な変更点は、水温に関する計算のための熱フラックスモデルとしてOctavioら²⁾が使用したものを採用したこと、水面における風の応力の計算に本多・光易の式³⁾を用いたこと、ここでの計算には、海洋に

おける流動計算の境界条件としての潮汐や、塩分濃度の計算は必要ないので、これらを省いたものとなっていること、塩分濃度の計算の代わりに水中懸濁物(SS)の収支を計算するようにしていること、湖沼と流入河川との水の交換を表現するためにそれに相当する計算格子点における境界条件を新たに設定したことである。

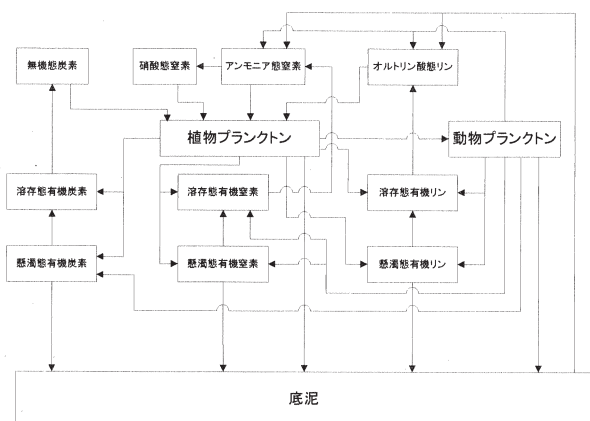
2.2 水質モデル

水質解析モデルは、Cerco and Cole⁴⁾のモデルを改良して作成したモデルを使用した(図-1)。

モデルの特徴として、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の懸濁態(デトライタス)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。また、印旛沼では夏季の高水温時には藍藻類が、その他の時期には珪藻類が優占的に繁茂していることから、植物プランクトンについては、計算対象としてこの2種類を採用し、増殖に関するパラメータをそれぞれ同定した。

現地での水質分析結果より、CODと有機炭素(TOC)濃度との間には高い相関関係が見られてお

り、この相関関係に基づき CODは TOC の 2.13 倍として計算した。TOC の計算値としては、植物プランクトン起源の TOC とデトライタス起源の TOC の和として算出した。



図—1 水質モデル概念図

2.3 水生植物の影響評価モデル

水生植物が湖沼水質に与える影響要素としては、消波、底泥巻き上げ抑制効果の他にも、植物自体の栄養塩類吸収効果や光遮断効果、植物表面に付着する微生物による影響、動物プランクトンや小型魚類に生息場を提供することによる効果、植物プランクトンなど他の植物の生長を抑制する多感作用などが指摘されている。これらを全てモデルにより評価するのは困難であるため、ここでは、検討対象とした印旛沼において水質への影響が大きかったと考えられる水生植物による消波、底泥巻き上げ抑制効果についてモデル化を行う。その他の影響については、今後の課題である。

2.3.1 風波の評価モデル

印旛沼のような浅い湖沼における底泥巻き上げに最も強く影響するのは、風波であると考えられる。後述する水質解析モデルの水表面計算格子の各中心地点における風速、風向に応じたフェッチ、及び水深を用いて計算することで、水生植物が存在しない状況における風波の有義波高 H_s と周期 T については、Ijima and Tang⁵⁾の式を用いて計算した。

2.3.2 水生植物による消波効果評価モデル

今回の検討では、水生植物の直接的影響として、風波の抑制およびそれに伴う底泥巻き上げ量の低下という観点で評価を行った。風波の抑制については、以下の方法で評価した。

植生帯について、最も風上になる地点では、植生の影響は無いと考えられるので、Ijima and Tang⁵⁾の

式で波高、周期を求め、植生帯を通過するにしたがって Kobayashi and Asano⁶⁾の方法を利用して、波高が減衰するものとした(式(1))。

$$h = h_1 \cdot \exp(-k_i \cdot f_2) \quad (1)$$

ここで、 h :植生帯内の地点での波高(m)、 h_1 :最も風上になる地点での波高(m)、 k_i :減衰係数(=0.01 1/m)、最も風上になる地点から、 f_2 :計算対象地点までのフェッチ長(m)

植生帯からさらに風下に植生無しの水面が存在する場合は、植生帯の最も風下の地点から、計算対象地点までの距離を新たなフェッチ長と考えて、Ijima and Tang⁵⁾の式によりこの距離に応じて新たな波高の増加分を計算し、上記の植生帯の最も風下の地点における波高に加えることで算定した。

2.3.3 底泥巻き上げモデル

底泥巻き上げモデルについては、Luettich ら⁷⁾のモデルを使用し、前述の水質解析モデルの各計算格子水底部における SS の発生源として、境界条件になるように与えた。底泥巻き上げ量は、風波に応じて発生する底面せん断力の関数として与えられる⁸⁾。

2.3.4 流動モデルの改良

流動モデルについては、既開発のモデルの運動方程式に水草による抵抗項を追加することで、植生の影響評価を試みた。抵抗項は、水平方向 2 成分について、それぞれ次式で計算される⁶⁾。

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D b N u_m^2 \quad (2)$$

ここで、 F :x, y 方向成分の抵抗応力、 ρ :水の密度、 C_D :抗力係数、 b :植物体の流れ方向への投影幅(=0.015m)、 N :植物体の本数(100 本/m²)、 u_m :x, y 方向成分流速(平均流速と波に伴う流速との和)

抗力係数は、以下の式で求めた⁶⁾。

$$C_D = \left(\frac{2200}{R_e} \right)^{2.4} + 0.08 \quad (2200 < R_e < 18000) \quad (3)$$

$$R_e = \frac{b u_m}{\nu}, \quad (\nu = 0.01) \quad (4)$$

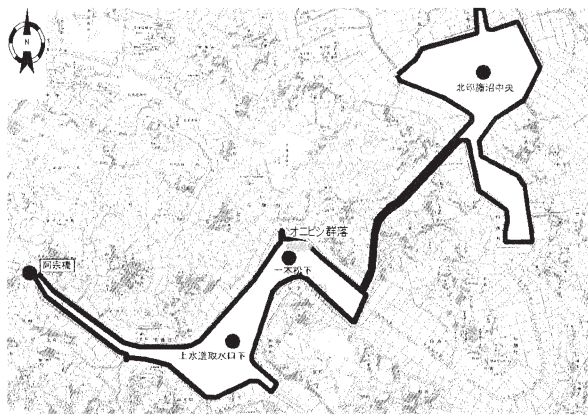
波に伴う流速については、Ijima and Tang⁵⁾の波浪推定式から求めた。

2.4 現地(印旛沼)の概要

千葉県に位置する印旛沼は、流域開発に伴う流入水質の悪化に伴い、COD値で見て上水水源としてはワースト 1 の水質状況が継続している富栄養化した沼である。印旛沼および流入河川における公共用水域水質

調査結果からは、昭和50年代前半に流入河川水質が年間平均全リン濃度で0.5(mg/l)、全窒素濃度で6.0(mg/l)を超過すると言ったレベルから近年ではこれが全リンで0.1(mg/l)、全窒素で3.0(mg/l)程度にまで改善されてきたことが示されている。しかしながら沼内のCODやクロロフィル-aといった水質指標を見るとこの間に見られる変化は横ばいか北印旛沼ではむしろ増加する傾向を示している。印旛沼は昭和38～44年にかけて行われた干拓により西沼と北沼に分離されているが、特に北沼における近年の水質悪化は、流入水質改善と逆の傾向を示しており、沼内の環境変化によるところが大きいと考えられる。

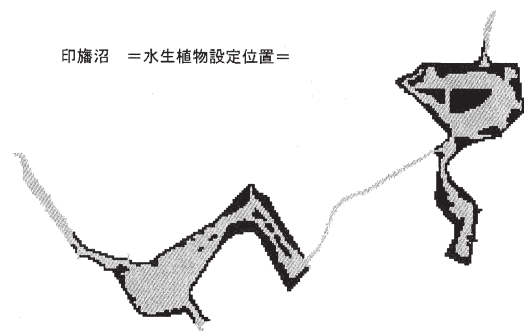
北沼において特に顕著な環境変化として、水生植物(特に沈水植物)の減衰があげられる。沈水植物や浮葉植物については、湖沼や沿岸域の水質に種々の影響を持つことが指摘されており、中でも浅い湖沼においては、底泥の巻き上げを抑制することで濁りや植物プランクトン増殖を抑制する効果を持つことが示されている⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。北沼における既往の水生植物調査によると、昭和52年には沈水植物も13種が認められていたが、沈水植物が徐々に減衰し、昭和61年には浮葉植物のオニビシの大繁茂が生じている。その後、オニビシの刈り取りが行われた結果、現在では沼沿岸の抽水植物体とある程度のまとまりを持ったオニビシ群落とその他の浮葉植物が点在する程度になっている¹²⁾。



図—2 印旛沼平面図および水質調査地点

印旛沼は、図—2に示すとおり、図中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。

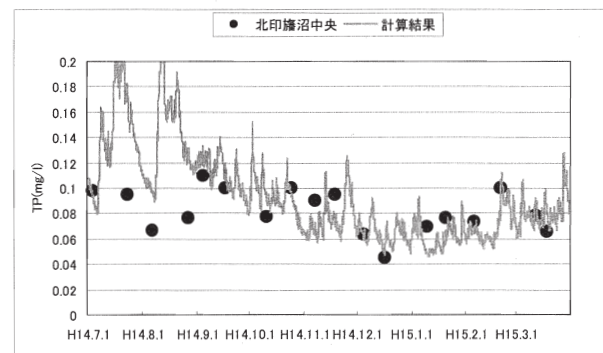
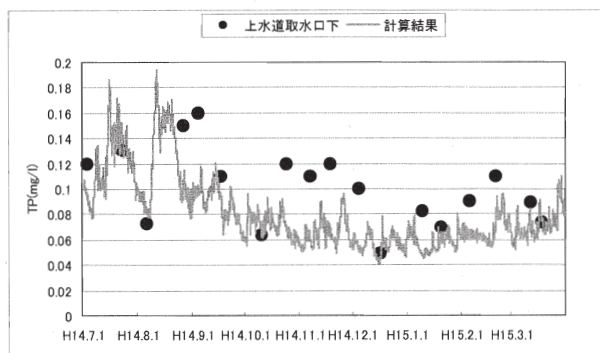
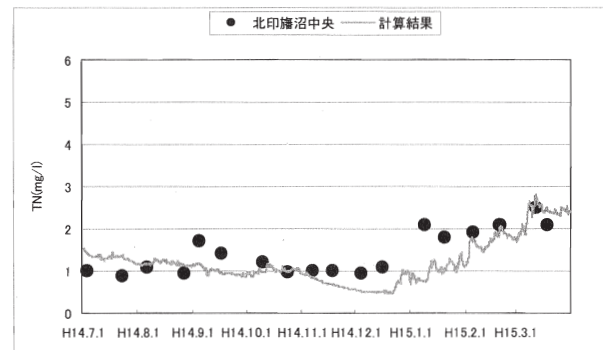
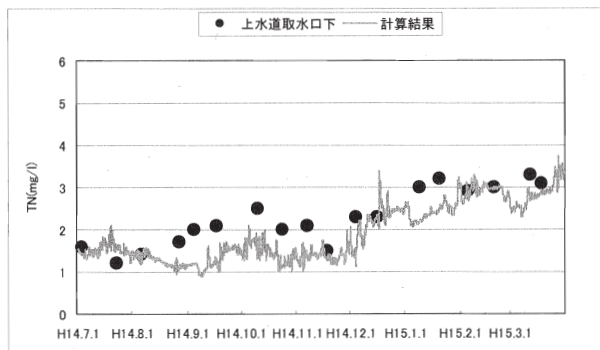
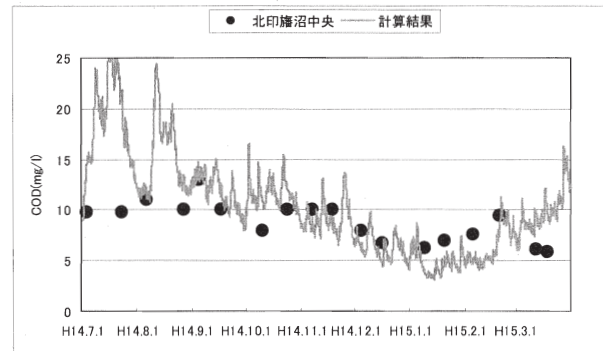
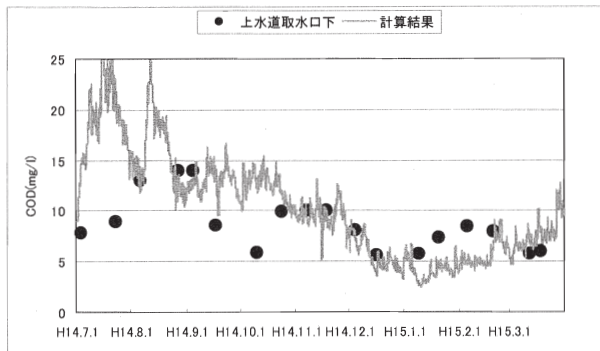
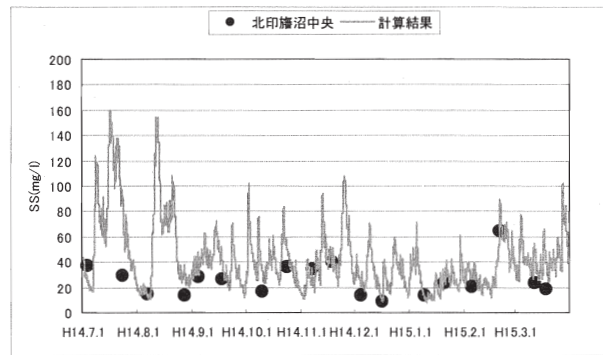
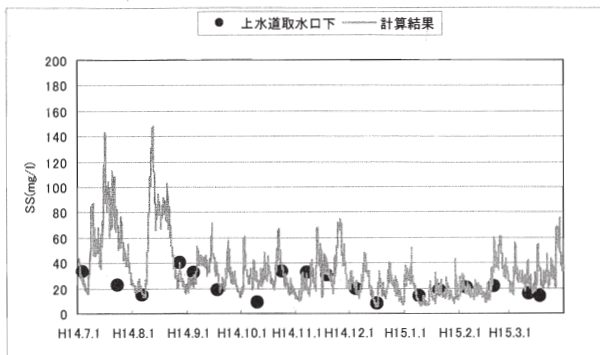


図—3 昭和63年当時の植生分布図(黒色部分)

2.5 水質解析計算

2.5.1 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3月31日まで計算を行った。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、師戸川に関しては千葉県が実施した観測結果の提供を受け、これを用いた。上工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入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。ただし、桑納川、神崎川については水質調査地点から流入地点までの距離が大きいことから、阿宗橋地点での水質観測結果を流入水質として与えた。

2.5.2 植生影響評価計算

昭和63年の6月から10月の沼内植生現地調査結果に基づき、図-3に示す範囲に植生が存在するという条件設定のみ変化させて、それ以外は上記水質再現計算と同様の条件で水質変化計算を行った。

3. 研究結果

3.1 水質再現計算

水質再現計算結果を図-4に示す。西沼の代表地

点として上水道取水口下、北沼の代表地点として北印旛沼中央(図-2)における表層計算結果(直線)と観測結果(黒丸)の時系列変化で比較している。

SSの計算結果は、風による巻き上げが顕著でない平穏時の値は観測値と良い一致を示している。また、計算結果は強風に伴う濁りの上昇を示している。強風の日には公共用水域調査では採水していないことから、観測結果との直接的な比較は出来ないが、平成16年度から水資源機構が開始した機器計測による連続的濁度モニタリングでも、濁度で150度を超える値がしばしば観測されている(未発表データ)ことから、強風時には、SSの急上昇が生じていると考えられる。

CODの観測結果は、植物プランクトン増殖に伴う夏季の高濃度状態から、10月頃に一旦低下後、再上昇、低下を繰り返すパターンを示しているが、計算は、冬季にかけて減少した後、春季に向けて再上昇する結果となった。

全窒素は、9月から11月にかけて計算結果が実測値を下回ったが、11月以降、河川流入量の低下に伴う流入河川水の硝酸濃度上昇を反映して、計算結果は観測結果をよく再現している。全リンに関しては、観測結果に見られた濃度上昇を再現できず、計算値が低い値にとどまった。

懸濁物濃度、有機物濃度、栄養塩類濃度の変化についての再現計算は、流入河川水質推定における誤差を考慮すれば、充分妥当な結果が得られたと考えられる。

3.2 流動解析計算

印旛沼における流れについて検討するため、強風時(平成14年7月14日)の流速分布計算結果(図-5)を示す。図-5(a)は、再現計算結果で、図-5(b)は、植生が昭和63年当時の分布状況だと仮定した条件での想定計算結果である。強風時の表層流速は、植生があったと仮定した場合、植生の抵抗により流速が落ちる結果を示している。

また、同日のSS濃度について再現計算結果(図-6(a))と昭和63年当時の植生を仮定した場合の想定計算結果(図-6(b))を比較すると、植生による消波効果により巻き上げが抑制され、同様の風が吹いた場合でもSS濃度は植生繁茂域を中心に低濃度であったであろうことを示す結果が得られた。

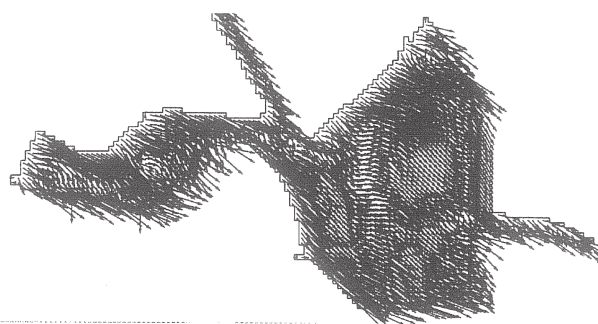


図-5(a) 強風時の表層流速再現計算結果(北沼)

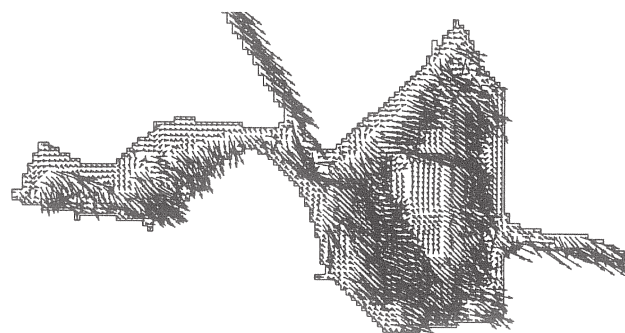


図-5(b) 植生による強風時の表層流速低減効果計算結果

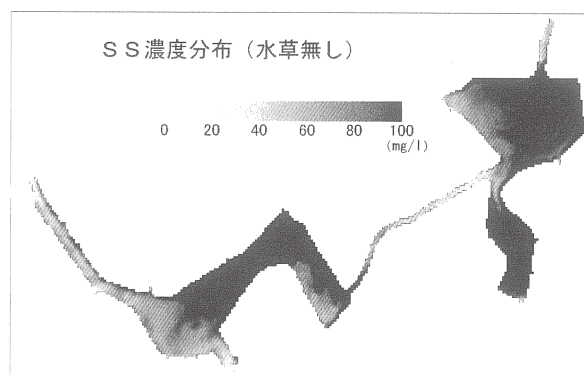


図-6(a) 表層SS濃度再現結果

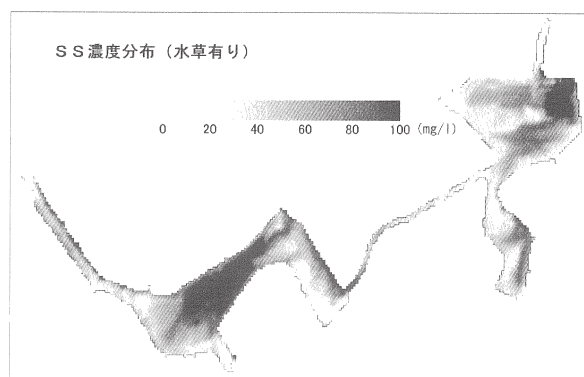


図-6(b) 植生による表層SS濃度上昇抑制効果検討結果

今回の水質再現計算期間において、昭和63年当時の

植生分布を想定した仮想的な計算結果と比較しても、植生繁茂による SS 低減効果が見られている(図—6)。さらに、例えば COD の計算結果と比較しても植生繁茂による低減効果が見て取れる(表—1)。過去の状況の仮想計算から推定した COD 平均値は植生の影響で現況再現計算より約 2.3(mg/l)の低下を示している。公共用水域水質調査結果では、刈り取り後期間の平成4年から平成12年の平均値で10.3(mg/l)、刈り取り前期間の昭和60年から平成3年の平均値で8.1(mg/l)であった。これらの良好な一致から植生繁茂による COD 抑制効果の傾向については、妥当な評価が出来たと考えられる。

表は割愛するが、SSの平均値はCODよりさらに顕著に低下し、水草なしとした再現計算では42.8(mg/l)であったものが、水草ありと仮定した場合17.1(mg/l)まで低下している。公共用水域水質調査結果からは、刈り取り後期間の平成4年から平成12年の平均値で35.7(mg/l)、刈り取り前期間の昭和60年から平成3年の平均値で21.5(mg/l)であったことから、計算精度は妥当なものと考えられる。

上記の様に、浅い富栄養化湖沼においては、水生植物が繁茂し、底泥巻き上げが抑制されれば、高い水質改善効果が得られることが定量的に示された。

表—1 COD 計算値の頻度分布と平均値比較(北沼)

COD値範囲 (mg/l)	水草無し	水草あり
0-4	3%	22%
4-8	32%	32%
8-12	37%	29%
12-16	20%	12%
16-20	7%	5%
平均値	10.4	8.1

4. まとめ

以上に述べたように湖沼水質・生態系モデルとして大型水生植物の影響を考慮したものを提案した。このモデルにより、現実の浅い湖沼(印旛沼)において大型水生植物の群落が水質改善に効果を発揮していることが定量的に評価された。この他にも、管理水位を低下させた場合の計算を実施したが、この場合は、水位低下に伴い、底泥の巻き上げが上昇するために濁りは上昇するが、底面に達する光量は増加することが示された。これは、大型水生植物の復元に好影響を及ぼすものであるため、このような管理水位の低下も、印旛沼においては、水質改善策として実施しうるものである可能性を示すものであ

た。今回、提案したモデルは、種々の湖沼管理の水質改善効果を定量的に算定しうるものであり、今後の利用が期待される。

参考文献

- 1) Mellor, G. L.: User's Guide for a Three Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model, Princeton University, 1996.
- 2) Octavio, K. H, G. H. Jirka and D. R. Harleman, Vertical Heat transport Mechanisms in Lakes and Reservoirs, M.I.T., Department of Civil Engineering, R. M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Report #227, 1977.
- 3) 本多忠夫, 光易恒: 水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究: 第27回海岸工学講演会論文集, vol.27, pp.90-93, 1980.
- 4) 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.
- 5) Ijima, T and F.L.W. Tang, Numerical calculation of wind waves in shallow water, Proc. 10th Conf. on Coastal Engineering, ASCE, v.2, pp. 38-45, 1962.
- 6) Kobayashi, N., A. W. Raichle and T. Asano, Wave attenuation by vegetation, *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engrng.*, v. 119, ASCE, pp. 30-48, 1992.
- 7) Luettich, R. A., D. R. Harleman and L. Somlyódy, Dynamic behavior of suspended sediment concentrations in a shallow lake perturbed by episodic wind events, *Limnol. Oceanogr.*, vol. 35, n. 5, pp. 1050-1067, 1990.
- 8) 天野邦彦, 安田佳哉, 鈴木宏幸: 浅い貯水池における表層底泥の巻き上げによる水質変化のモデリング, 水工学論文集, 第46巻, pp. 1085-1090, 2002.
- 9) van den Berg, M.S., M. Sheffer and H. Coops, The role of characean algae in the management of eutrophic shallow lakes, *J. Phycol.*, 34, pp. 750-756, 1998.
- 10) James, W.F., J. W. Barko and M. G. Butler, Shear stress and sediment resuspension in relation to submersed macrophyte biomass, *Hydrobiologia*, 515, pp. 181-191, 2004.
- 11) Scheffer, M., *Ecology of shallow lakes*, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- 12) 笠井貞夫, 印旛沼の水生植物の変遷, (山田安彦, 白鳥孝治, 立本英機編, 手賀沼・印旛沼), 古今書院, 1993.