

浅い湖沼の水質への水生植物の影響解析

AN ANALYSIS OF EFFECTS OF AQUATIC MACROPHYTES ON WATER QUALITY IN A SHALLOW MARSH

天野 邦彦¹・時岡 利和²・対馬 孝治³
Kunihiko AMANO, Toshikazu TOKIOKA, and Kohji TSUSHIMA

¹正会員 工博 (独) 土木研究所 河川生態チーム 上席研究員 (〒305-8516 つくば市南原 1-6)

²正会員 (独) 土木研究所 河川生態チーム 研究員 (同上)

³農博 (独) 土木研究所 河川生態チーム 専門研究員 (同上)

Aquatic macrophytes function in several ways in aquatic environment. We have analyzed the effects of aquatic macrophytes focusing on the reduction of resuspension of bottom sediments. Aquatic macrophytes are known to suppress the development of wind wave in shallow waters. Reduced wave height leads to the reduction of the resuspension of bottom sediments. This function that aquatic macrophytes may have seem important in deciding the water quality of shallow water bodies. A numerical simulation model was developed to estimate the quantitative effects of aquatic macrophytes on the water quality of a shallow marsh. Simulation results showed good agreement with observed water quality data. A simulation case that assumed dense vegetation of which area was maximum in recent years resulted in less turbid and lower organic matter concentration. The degree of reduction in suspended solids presumed by the simulation agreed well with the previous records in Inba marsh, Chiba prefecture that experienced the decay of aquatic macrophytes. Restoration of native aquatic macrophytes is important to restore the marsh to a previous clear state.

Key Words : Aquatic macrophytes, bottom sediments, Inba marsh, and restoration

1. はじめに

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¹⁾²⁾³⁾。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⁴⁾。

今回の研究では、水生植物による水質への影響として底泥の巻き上げ抑制効果に着目し、水生植物のもつこの効果を考慮した水質変化の数値シミュレーションモデルを開発し、検討を加えた。また、底泥の巻き上げについては、沼内の栄養塩濃度にも影響を与えるため、このことも考慮した上で水質解析を行い、水生植物による水質改善効果の検討を行った。

2. 研究方法

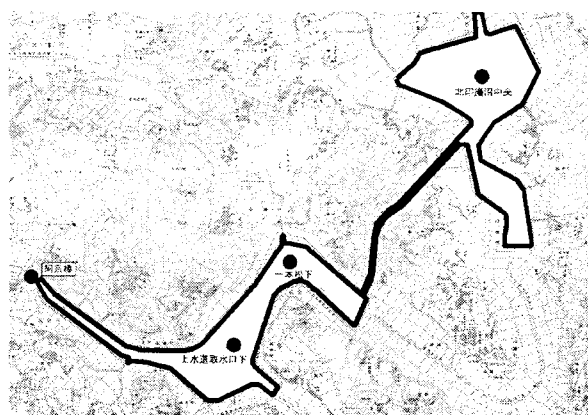
研究対象とした印旛沼は、浅く富栄養化した沼で

ある。浅く富栄養化した湖沼や貯水池では、その水質変化に底泥が大きく影響することが知られており⁵⁾⁶⁾、特に風波による底泥の巻き上げは、水中の懸濁物濃度を上昇させるため、水利用の観点からは湖沼の審美的価値が低下するという問題があるほか、水中の光環境を変化させることや、栄養塩類の動態にも影響を及ぼすことから、湖沼生態系にとっても影響が大きい現象である。

水生植物が底泥巻き上げに与える影響については、風波に伴う底面への物理的攪乱（せん断力）の抑制が指摘されている¹⁾²⁾³⁾。また、水生植物が持つ消波効果についても多くの研究が行われている⁷⁾。本研究では、印旛沼における水生植物が持つであろう種々の水質への影響について、その消波効果と底泥巻き上げ抑制効果に着目しこれをモデル化し、数値シミュレーションモデル（3次元流動モデル）と結合させることで、この機能の定量的評価を試みた。また、過去からの水質変化について整理し、水生植物の消長と比較することで、この評価の検証を試みた。

(1) 印旛沼の概要

印旛沼は、図一1（図は上が北を示している）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



図一1 印旛沼平面図および水質調査地点

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。

(2) 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。

a) 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 Tang⁸⁾の式を用いて計算した。

b) 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 Tang⁸⁾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 Asano⁷⁾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 Tang⁸⁾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。

c) 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⁹⁾のモデルを使用し、後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⁵⁾。

d) 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⁷⁾。

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

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⁷⁾。

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

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

波に伴う流速については、Ijima and Tang⁸⁾の波浪推定式から求めた。

d) 水質解析モデル

水質解析モデルは、Cerco and Cole¹⁰⁾のモデルを改良して作成したモデルを使用した(図-2)。

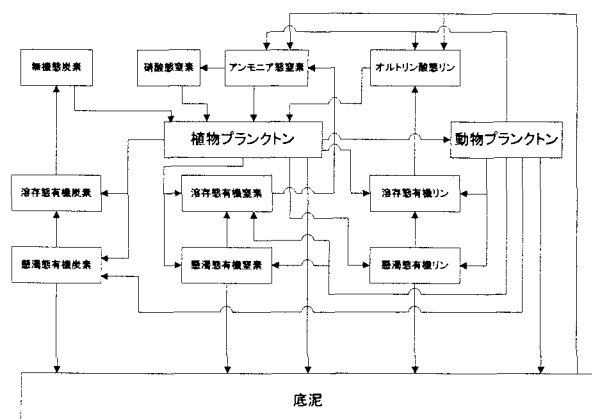


図-2 水質モデル概念図

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解態、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。

(3) 水質解析計算

a) 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。

b) 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。

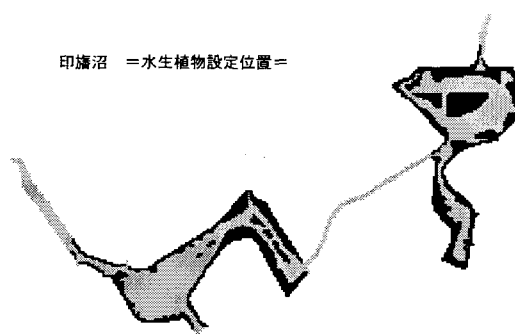


図-3 昭和63年当時の植生分布図(黒色部分)

(4) 既往水質調査データ解析

印旛沼においては、千葉県により図-1中の4カ所および流入河川で公共用水域水質調査がほぼ半月おきに行われている。調査結果は昭和47年から残っており、比較的水生植物が残存していた時期からデータが存在するため、植生繁茂状況と水質との比較がある程度可能である。ここでは、化学的酸素

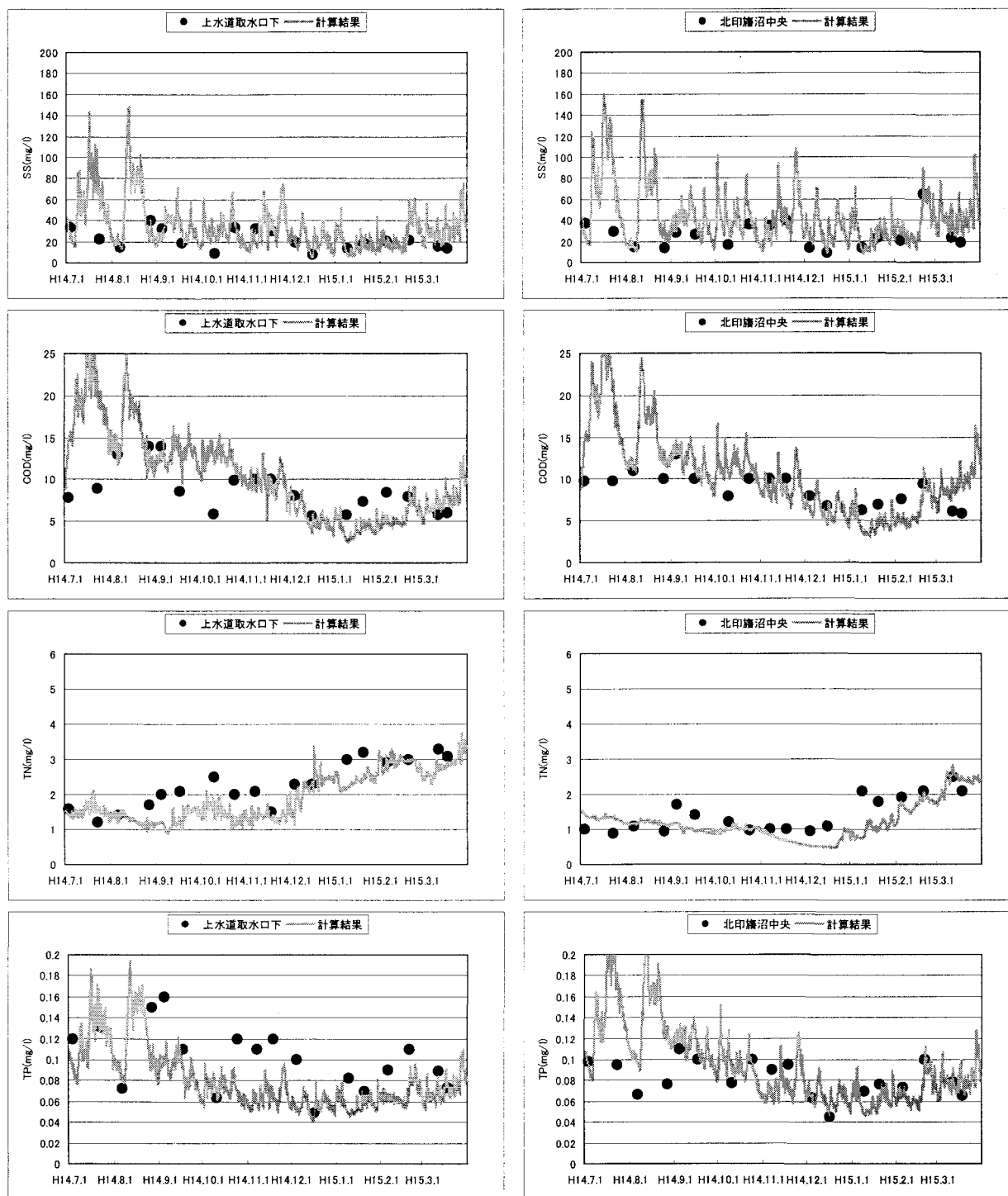


図-4 水質再現計算結果と観測値との比較（左側が西沼代表地点、右側が北沼代表地点）

要求量(COD), 水中懸濁物濃度(SS), クロロフィル
a (Chl-a)について, 浮葉植物のオニビンが繁茂した
時期の前後で有意な差があるかについて検討する。

3. 研究結果

(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-1)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。

(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。

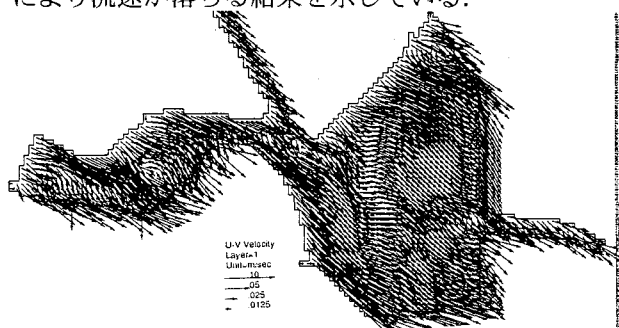


図-5(a) 強風時の表層流速再現計算結果（北沼）

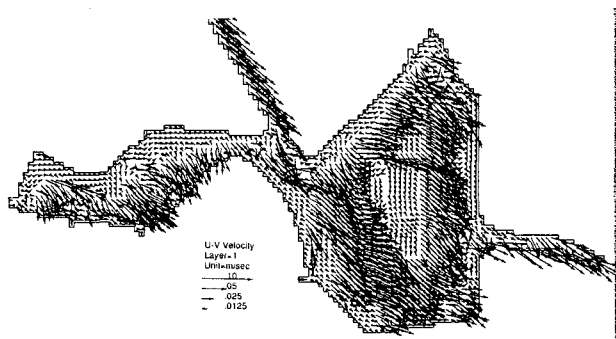


図-5(b) 植生による強風時の表層流速低減効果計算結果（北沼）

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。

(3) 既往水質調査データ解析

笠井⁴⁾は、昭和61年にオニビシが最大に繁殖し、北沼中央部の水面積の90%、西沼東部の80%がオニビ

シに覆われたと報告している。昭和59年頃から浮葉性のオニビシが大繁殖を始めて、昭和62年から平成3年まで北沼において刈り取り事業が行われた。そこで、1ヶ月に2回の割合で千葉県により実施されている公共用水域水質調査結果についてオニビシ刈り取り前後での水質を比較した結果刈り取り後にCOD、Chl-a、SSとも濃度が上昇する傾向が見られた（図-7）。（図中、刈り取り前は、昭和60年から平成3年の月平均値、刈り取り後は、平成4年から平成12年の月平均値、S61は、昭和61年の月平均値）。特にオニビシが最大に繁殖した昭和61年は、6月から9月にかけてSS濃度が極めて低い値を取っている点が特徴的である。また、8月後半の値を除き、CODも同様に低いレベルで推移している。8月後半の高い値はChl-a濃度の上昇によるものである。

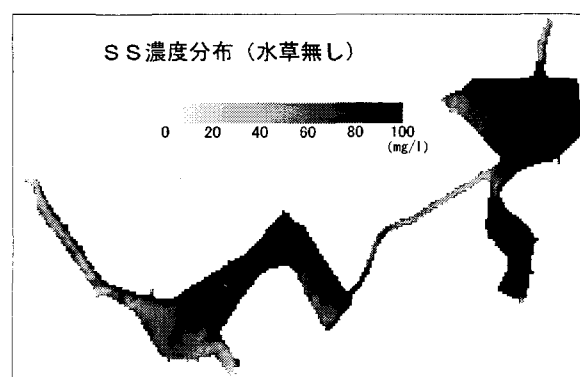


図-6(a) 表層SS濃度再現結果

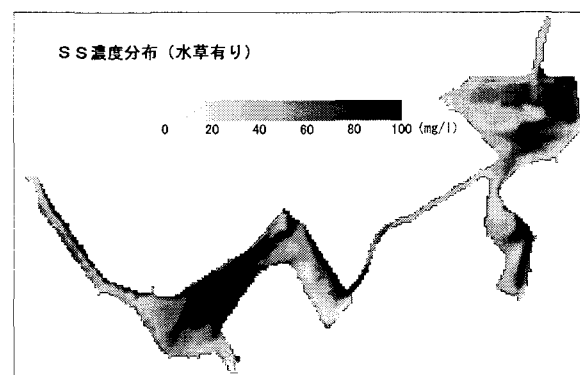
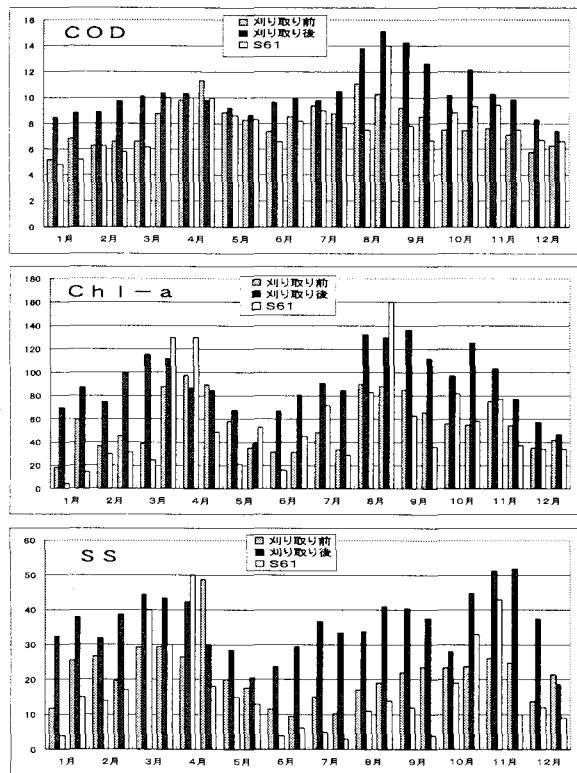


図-6(b) 植生による表層SS濃度上昇抑制効果検討結果

4. 考察とまとめ

印旛沼のような浅い湖沼水質には、底泥が大きく影響することが知られている。特に風波による底泥の巻き上げは湖沼水質を規定する重要な要素である。浅い湖沼における安定的な環境として、植物プランクトンが多く濁った状態と、水生植物が繁茂し濁りの少ない状態の2つに大きく分けられる³⁾。比較的近年まで水生植物が多く存在した印旛沼北沼の透明度について見ると、昭和61年度平均値は80cm程度だったものが、オニビシ刈り取り後は低下し続



図一七 オニシ刈り取り前後での水質変化

けて、平成11年度平均値では、40cm程度と半減している。この間、流入河川水質はほぼ横ばいか、若干の改善が見られているため、いわゆる内部生産に伴う水質汚濁が進行した結果とは考えにくい。むしろ底泥巻き上げを抑制していた水生植物（この時期としては浮葉性のオニシ）が刈り取りにより繁茂域を狭めたことから、底泥巻き上げ量が増大し、その結果として濁りが上昇すると共に、巻き上げられた底泥は有機物や栄養塩類を多く含むため、水質調査において巻き上げ底泥自身がCODの一部としてカウントされたり、巻き上げ底泥から水柱に回帰した栄養塩類を利用することで植物プランクトンがより増加し、COD値を増加上昇させた可能性が考えられる。このような濁りやCOD上昇は、透明度を低下させる要因であり、水生植物が消滅することで透明度の低下と、水質悪化が同時に起こることが説明可能である。

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（図一六）。さらに、例えばCODの計算結果を比較しても植生繁茂による低減効果が見て取れる（表一）。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。

表一 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

謝辞：データ収集については、国土交通省関東地方整備局利根川下流河川事務所、千葉県、水資源機構の担当の皆様にご協力いただきました。記して感謝します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) Scheffer, M., *Ecology of shallow lakes*, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 天野邦彦, 李建華, 鈴木宏幸, 安田佳哉: 浅い貯水池における懸濁物組成とその水質への影響, 水工学論文集, 第45巻, pp. 1189-1194, 2001.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.

(2004. 9. 30 受付)