

◆特集：湖沼・貯水池の自然再生◆

モデルによる過去の湖沼環境の復元 —印旛沼の水生植物と濁度—

天野邦彦* 時岡利和**

1. はじめに

自然再生の対象となりうる湖沼においては通常、まず流入河川の水質改善を進めることが最重要課題であることは間違いないであろう。しかし、富栄養化に伴い水質悪化が顕在化した湖沼においては、流入河川水質がある程度改善されても、湖沼底泥から回帰する栄養塩類量が多いために、夏季において植物プランクトン量が低減しなかったり、有機物を多く含む底泥の風波による巻き上げが激しいために、水中の有機物濃度がなかなか低下しないといった状況が改善されないことが多い。これらの理由のため、浅い湖沼においては特に、流入河川水質の改善に見合った湖沼水質の改善がすぐには見られないと考えられる。

しかし、流入河川水質の改善傾向が継続すれば、時間遅れは生じるものの、徐々に湖沼水質は改善されるはずである。この湖沼水質改善の過程の中で、一旦消滅した水生植物が少しずつ回復し、それに伴い湖沼の透明度が上昇し、このことがさらなる水生植物の回復を促して、水質悪化が起こる以前の透明で水生植物（特に沈水植物）が繁茂する状況にまで湖沼環境が復元された例が紹介されている¹⁾。

上記の例などからの自然な推定として、浅い湖沼においては、流入河川水質が同等だとしても、水生植物の繁茂状況により、湖沼の水質を含めた環境が大いに異なるということが考えられる。Scheffer²⁾ は、浅い湖沼の2つの安定した状態として、大型の水生植物が繁茂して透明度の高い状態と、大型水生植物が無く、植物プランクトン濃度が高く濁った状態を挙げている。

本稿で検討の対象とする印旛沼は、現在濁った状況にあるが、水生植物が現時点で再生されたと仮定した場合、水質面から見てどのような環境となりうるのかについて、定量的に把握できれば、水生植物群落再生の水質改善効果について、ある

程度回答を提供できると考えられる。特に沈水植物が繁茂できれば、透明度が高い状況に沼の環境が回復する可能性があるため、このような検討は重要である。本稿は、上記の定量的検討を行うために、水生植物群落による風波の抑制、ひいては底泥の巻き上げ抑制を組み込んだ湖沼流動・水質シミュレーションを行い、現況再現を行った上で、過去（水生植物が繁茂していた時期）の湖沼環境をモデル上で復元し、水生植物と水質との関連性について検討するものである。

2. 印旛沼の概況

2.1 印旛沼の環境変遷

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、下水道整備を中心とする流入水質対策が奏功して、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)～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

Restoration of the Past Environment of a Lake by Model, Aquatic Vegetation and Turbidity in Inba Marsh

水植物も13種が認められていたが、沈水植物は徐々に減衰し、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帯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⁾。

このような状況から、現在、印旛沼においては水生植物群落の再生事業が始まっている。

2.2 印旛沼の水状況

印旛沼は、図-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、西沼西端から阿宗橋を経て流入する桑納川が挙げられる。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。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。

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。

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、計算ステップ毎に水生植物が存在しない状況における風波の有義波高HSと周期Tについて、Ijima and Tang⁵⁾の式を用いて計算した。

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)、 f_2 :最も風上になる地点から、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。

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、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⁸⁾。

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⁾。

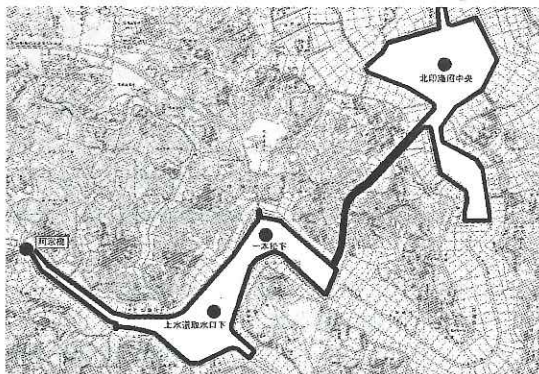


図-1 印旛沼平面図および水質調査地点

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

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 :植物体の単位高さあたりの流れ方向への投影面積 (= 0.015m²)、 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。

3.5 水質解析モデル

水質解析モデルは、Cerco and Cole⁹⁾のモデルを改良して作成したモデルを使用した (図-2)。

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

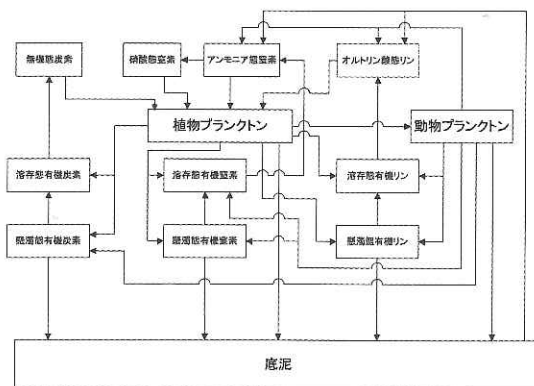


図-2 水質モデル概念図

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。

3.6 水質解析計算

3.6.1 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。

3.6.2 過去の植生分布を仮定した水質計算

(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

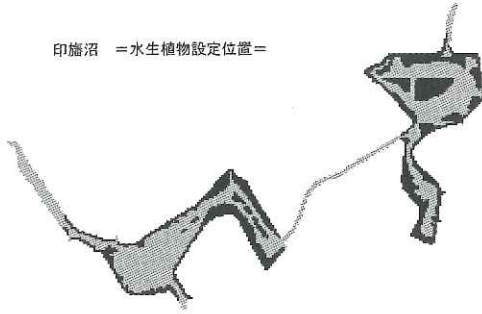


図-3 昭和63年当時の植生分布図 (黒色部分)

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。

4. 計算結果

4.1 水質再現計算

水質再現計算結果を図-4に示す。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) の時系列変化と比較している。

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

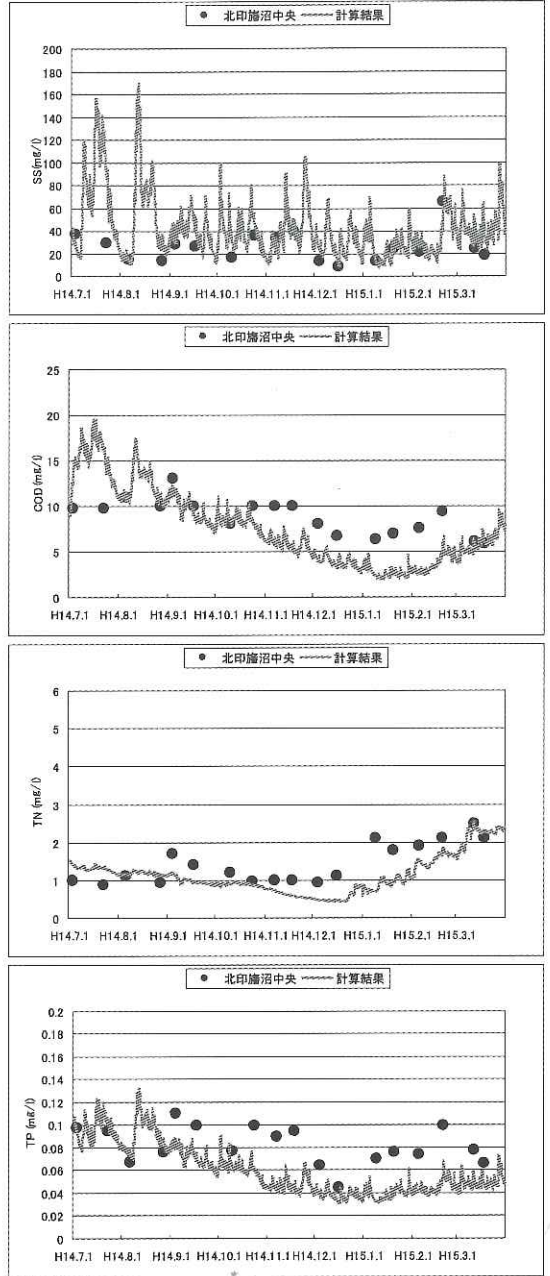


図-4 水質再現計算結果と観測値との比較

と考えられる。

4.2 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、浮葉植物のオニビシ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した。

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-5)。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。

4.3 過去の植生分布を仮定した水質計算

(植生影響評価計算)

4.1に述べた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を行い、モデルによる過去の湖沼環境の復元を試みた。その結果、植生繁茂によるSS低減効果が見られた(グラビア参照)。さらに、例えばCODの計算結果で水草の有無による比較を行っても、植生繁茂による低減効果が見て取れる(表-1)。ここでは、水質再現計算結果を水草無し、昭和63年の水草繁茂状況下での計算結果を水草有りとしている。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1(mg/l)の低下を示している。

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42.0(mg/l)であったものが、水草ありと仮定した場合16.7(mg/l)まで低下している。SSの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。CODについては、公共用水域水質調査結果の方が計算値に比べてそれぞれ3割程度高いため、富栄養化項目の計算精度は

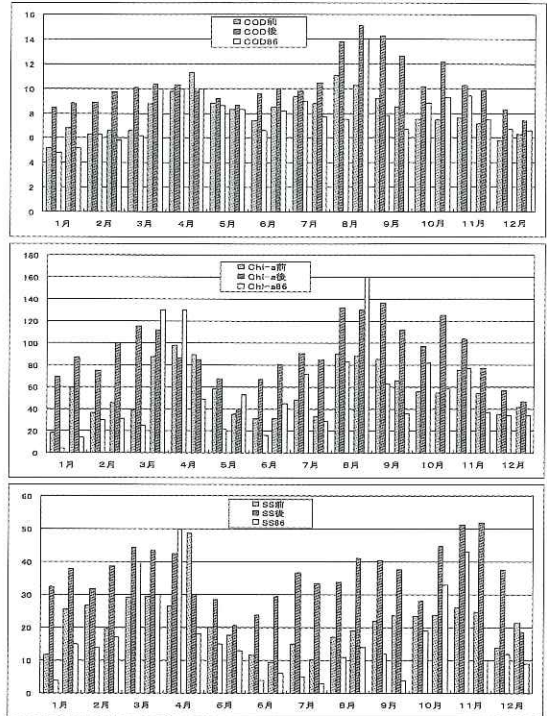


図-5 オニビシ刈り取り前後での水質変化
(図中の凡例：前は、昭和60年から平成3年の月平均値、後は、平成4年から平成12年の月平均値、86は、昭和61年の月平均値)

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	25%	35%
4-8	34%	29%
8-12	26%	22%
12-16	10%	14%
16-20	5%	0%
平均値	7.51	6.67

SSに比べて低かったことが分かるが、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。このように、モデルによる過去の湖沼環境復元結果と、水質調査結果とを比較することで、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、濁りが低減すると共に有意な水質改善効果が得られることが定量的に示された。

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、この透明度低下は、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ビシ）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高いと考えられる。

モデルによる検討でも、このような状況を示唆する結果が得られた。底泥巻き上げによる濁りやCODの上昇は、透明度を低下させる要因であり、水生植物が消滅したことで透明度の低下と、水質悪化が同時に起こったことが定量的にも説明可能な結果が得られた。逆にオニビシの様な浮葉植物群落から再生していくことで、透明度が上昇し、徐々に沈水植物群落も再生する可能性があると考えられ、今後の水生植物再生の方向性を示す結果となった。

5. まとめ

過去の水文データや気象データには限りがあるため、制約は存在するものの、入手可能なデータを用いて過去の湖沼環境をモデル上で復元することで、例えば植生を再生することによる水質改善効果の定量的評価が可能であることが示された。

このように今後の湖沼における自然再生に際しては、実行しようとしている再生事業の実現可能性の判断材料を得るために、再生の対象となる種々の環境要素（例えば水生植物）が湖沼環境に対して有する作用（例えば底泥巻き上げ抑制効果）について可能な限り定量的な影響評価を行うことが望まれる。このような評価により、どの程度の規模の再生を行う必要があるのかといった知見を得ることができる。

今回対象とした水生植物の底泥巻き上げ抑制による水質や透明度の改善といった現象の定量的評価は、モデルによる現象の物理的評価結果を過去の環境情報と比較検討することで、検証を試みて

いる。この様にモデルで過去の環境状況を復元して評価を試みる手法は生物を用いた環境修復の影響評価を行う際に利用可能であると考えられる。

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) Scheffer, M., *Ecology of shallow lakes*, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- 3) 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.
- 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) 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) Luetlich, 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) Cerco, C. F. and T. Cole, *User's Guide to the CEQUAL-ICM Three-Dimensional Eutrophication Model*, Technical Report EL-95-15, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, 1995.

天野邦彦*



独立行政法人土木研究所
水循環研究グループ河川
生態チーム上席研究員、
工博
Dr. Kunihiko AMANO

時岡利和**



独立行政法人土木研究所
水循環研究グループ河川
生態チーム研究員
Toshikazu TOKIOKA