

◆特集：閉鎖性水域の環境保全◆

湖沼における水質・生態系保全の評価手法に関する研究

天野邦彦*

1. はじめに

我が国における湖沼の環境問題は、多くの場合流域からの栄養塩類流入負荷量の増大に伴い進行した富栄養化による水質悪化に注目することが多い。昭和59年の湖沼水質対策特別措置法の制定などを契機に、富栄養化による湖沼環境の悪化への対策が流域からの負荷削減を中心に進められた結果、諏訪湖のように水質改善が見られ、同時に湖沼の生態系にも変化が起こってきている湖沼も見受けられる。その反面、霞ヶ浦のように統計量からは流域からのリン流入負荷量は減っているように思われるものの、湖内のリン濃度が漸増している湖沼もある。霞ヶ浦では無機態のリン、窒素が水柱で枯渇していないにもかかわらず、一次生産が減少しているという指摘もある。湖沼水質と湖沼生態系は、密接に関連している上にその関係は単純なものではない。

従来、湖沼水質及び生態系を解析するために、栄養塩類濃度、一次生産者である植物プランクトン、その捕食者である動物プランクトン、魚類間の相互関係を動的に解析するモデルが開発されてきている。このようなモデルの多くは、それぞれの栄養レベルの要素間の相互作用を捕食-被食関係により記述することにより炭素、窒素、リンといった生元素の物質収支を表して、さらに要素毎の変化量を、増殖や死滅速度をモデル化することで、生態系要素の量的な変動を計算すると共に、水質の変動を解析する。このように湖沼における流動、熱収支、物質収支を動的に解析して湖沼生態系の変動特性を記述する従来のシミュレーションモデルにおいては、生態系の構成要素である生物は、湖沼水中の物質循環に変化を与えることで湖沼の環境に影響を与える形で組み込まれていることが多かった。

しかし、生物のもつ環境機能には種々のものがあり、湖沼の物理環境にも影響を与えることがある。特に湖沼水質と生態系との関係のなかでも、浅い湖沼における植生の役割についての関心が高

まってきている。本特集の他の論文においても記述しているが、水質汚濁が進行する前の浅い湖沼においては、多くの水生植物が繁茂し、透明度の高い水を蓄えていたことが示されている。しかし水質汚濁の進行は、湖水を濁らせて、沈水植物を減少させる結果となる。このような場合には、植物プランクトンの増大と底泥の巻き上げ増加により湖沼の濁りはさらに上昇し、光条件の悪化により植生を破壊してしまう場合もある¹⁾。このような状況に達すると、たとえ流入水質が改善されても底泥からの栄養塩類の回帰により植物プランクトンの量は減少しない上に底泥の巻き上げにより濁ったままの状態が続くことになり、湖沼の環境修復は困難なものになる。

本稿では、上記のようにScheffer¹⁾が指摘したものと同様の環境変化を経ている印旛沼を対象に大型水生植物がもつ底泥巻き上げの抑制という機能について現地調査とシミュレーションを併用した検討結果について記述する。ここでは、底泥の巻き上げという浅い湖沼において重要な水質規定過程に、湖沼生態系の要素である大型水生植物がどの程度影響するのかという環境機能を定量的に評価し、浅い湖沼の環境修復を進める上で水生植物群落の修復がどのような影響を持ちうるのかについて考察を行うと共に過去の状況について推定する。

2. 研究の方法

印旛沼においては、干拓事業という大きな改変の後、高度成長期における水質汚濁の進行に伴う水生植物の減衰期を経て、流域における下水道事業の伸展などに伴う流入河川水質の改善が見られている。しかし、沼内の水質改善は進まず、水生植物についても、刈り取りなどの人為的インパクトを受けながら変遷し、現在では沼周囲の抽水植物帯と浮葉植物のオニビシ群落を除き減衰したままである。

本研究では、まず、印旛沼における水質と水生植物の変遷について既往資料に基づき整理した。また、水生植物が沼内水質に与える影響として底泥巻き上げの抑制に着目し、現地に残存するオニ

ビシ群落内外において連続水質観測を行い、シミュレーションモデルによる観測結果の検証を行った。以下に、研究方法について示す。

2.1 現地概要

現在の印旛沼（千葉県）は、図-1の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。

現在の印旛沼および流域特性は、表-1に示すとおりである。特徴としては、流域人口が多く、

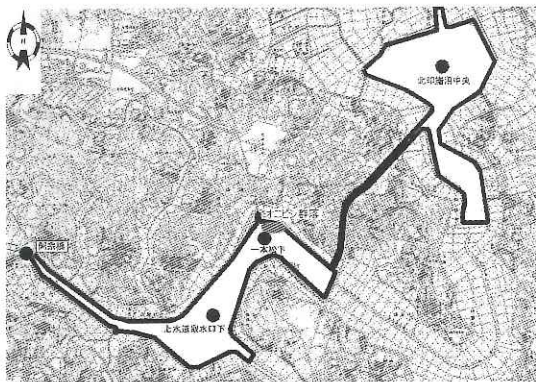


図-1 印旛沼平面図および水質調査地点

表-1 現在の印旛沼および流域特性

平面積 (km ²)	11.55
容量 (m ³)	27,700,000
周囲長 (km)	38
水深 (m)	Max. 2.5, Ave. 1.7
平均滞留時間 (day)	22.8
流域面積 (km ²)	541.1
流域人口	718,000
下水道普及率	75.6%

下水道も完全に普及していないことから、流入河川の平均的水質は全リンで0.1 (mg/l)、全窒素で3.0 (mg/l) 程度となっており、生産性が高く、富栄養化した湖沼である。

2.2 印旛沼水質と水生植物の変遷

印旛沼（図-1）における植生の変遷については、笠井による長期にわたる観測記録²⁾がある。また、公共用水域水質調査結果が1969年から残っているため、これらの記録を整理して水質変化と植生遷移とを比較する。

2.3 現地観測

2004年9月16日から11月17日まで、西沼内の一本松下地点付近に存在したオニビシ群落（浮葉性、図-1）の内外2地点に観測ステーションを設置し（約200m離れている）、気象、水質、波高、流向・流速の連続観測を行った。観測器および測定方法は、表-2に示すとおりである。また、観測を行った地点におけるオニビシ群落の繁茂状況を写真-1に示す。

2.4 シミュレーションモデルによる検証

風波による底泥の巻き上げを考慮した沼内の水質変化過程をシミュレーションモデルで解析し、現地観測結果の検証を行った。沼内の流動計算は、3次元モデル³⁾を使用した。流動計算を行った格子毎に風波の計算、風波による底泥巻き上げの計算を行い、風による底泥巻き上げが沼内水質にどのような影響を与えるかについて、計算を行った。

植生による巻き上げ抑制のモデル化については、既報⁴⁾と同様に行った。モデル式などについては、既報^{3), 4)}を参照のこと。本研究においては、特に濁りと光の関係に着目し、植物プランクトン

表-2 連続観測項目、使用機器、測定方法

項目	観測機器	測定間隔	設置水深等
水温、濁度、DO、pH、EC	多項目水質計、堀場製作所 U-23 (1週間毎に交換)	10分毎 瞬間値	2割水深
風向・風速	風向風速計、デビス社 ウェザーウィザードⅢ	10分毎 120サンプルの 平均値	水面上約 3m
流向・流速	電磁式2次元流向・流速計、アレック電子 ACM-8M	10分毎 1秒間隔30サンプル (バースティングモード)	2割水深
波高	水圧式波高計、三洋測器 MWR-II	10分毎 0.1秒間隔300サンプル	8割水深



写真-1 オニビシが密生した現場

による遮蔽に加えて、底泥巻き上げによる濁りに由来する光の散乱を考慮した。このために現地では2005年4月から9月にかけてほぼ半月毎に17箇所、水深方向に9点で、同時に同深度において、濁度計(U-21XD、堀場製作所)および光量子計(LI-193SA、LI-COR社製)を用いて、水中での濁度と光量を計測した。水中光量は濁度に応じて水深方向に指数関数的に減衰すると考えられる。上記の計測毎に得られた濁りと光との関係から、計測毎の消散係数を最小二乗法で求め、さらにこれらの推定値を平均することで、単位濁度あたりの光の消散係数を0.18とし、濁りによる光の減衰を評価した。

計算期間は、現地観測に合わせた。流動については1週間の助走計算を行った後に再現計算を開始した。計算格子は水平方向に50mX50m、鉛直方向に5層に区分した。

3. 結果

3.1 印旛沼水質と水生植物の変遷

印旛沼の環境は、1964年の干拓工事により大きく変化した。干拓前の印旛沼は、面積2,900ha、平均水深1mで透明度が高く水底まで透視できる状態であったことが記されている²⁾。植生は湿地性植物、抽水性植物、浮葉性植物、沈水性植物がそれぞれ安定した群落を形成しており、水域では浮葉性のガガブタ、アサザ、ヒシなどの9種と沈水性のササバモ、センニンモ、コウガイモなど20種ほどが生育し、沼底のほぼ100%を被った状況であった²⁾。

干拓工事により沼は捷水路によりつながれた北沼と西沼に別れ、面積1,150ha、水深約1.8mと面積が約半分、水深は約2倍と現在の形となった。

工事終了後、1972年に行われた調査では、浮葉性植物が8種、沈水性植物は16種が認められているものの、1977年の調査では西沼では浮葉性植物が4種、沈水性植物が8種とそれぞれ半減している。この年の調査で北沼では浮葉性植物が7種、沈水性植物が14種発見されており、北沼に比べて西沼での水生植物の減衰が顕著に見て取れる。干拓事業という大きな改変の影響を受けた後、水質悪化に伴い水生植物種が減少したと考えられる。

笠井²⁾によれば、1976年頃から沼周辺の開発による水質汚濁が問題視されるようになったとしているが、公共用水域水質調査のデータからも、1980年代前半まで水質汚濁が進行していたことが分かる。ただし、1980年代後半になると、下水道整備に代表される流入河川水の改善が進み、現在では笠井が指摘した1976年頃に比べて全リン濃度で1/6程度にまで低下するなど、少なくとも流入水質自体は、水生植物が減衰し始める以前の状態よりも、むしろ良好な状態にまで回復していると言える。

3.2 オニビシの底泥巻き上げ抑制効果

オニビシ群落は、現地観測を始めた段階では、群落内の観測地点を覆い尽くすほどであったが(写真-1)、2004年は台風が多く接近したこともあり、9月21日には強風により岸に寄せられ、9月27日には規模が縮小し、観測開始時に群落内に位置していた観測地点の周辺においてもまばらになった。10月13日の時点では、枯死が進み、小群落が散在する程度になり、10月20日には周囲にわずかに点在するのみとなった。10月27日にはわずかに残っていたものも台風により消滅し、水面上には見られなくなった。計算では、現地で記録されたこのオニビシの分布を与えて消波効果を考慮している。

現地観測を開始した直後では、群落の密度も高く、このため群落内では消波効果が高かったと考えられる。図-2、3に計算および実測による風波関連諸量の変動特性を示す。群落密度が高い時期には、波高が抑制される計算結果が出ている(群落内での波高測定が不調であったため、波高の測定値については群落外のみ記載している)。波高が抑制されることによる底面剪断応力の抑制、さらに底泥巻き上げの抑制効果も図-4の左右の比較から見て取れる。群落内の底面せん断応力の9月20日から22日にかけての計算結果を見ると、強風による底面せん断応力の上昇が見られるものの、群落外の計算値に比べて低くなる傾向が見て取れ

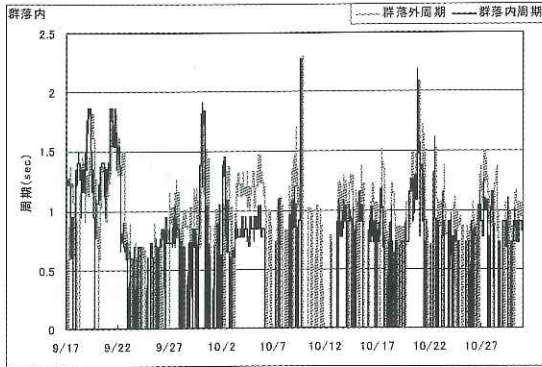


図-2 計算風波周期

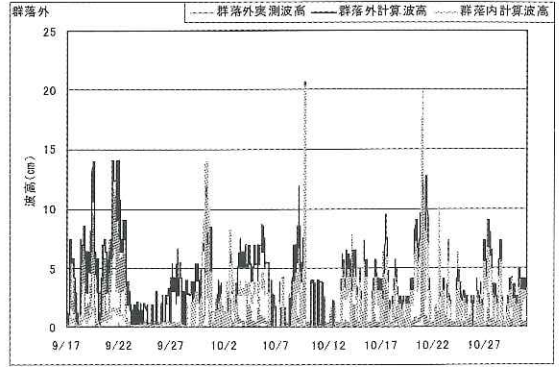


図-3 波高の実測値と計算値との比較

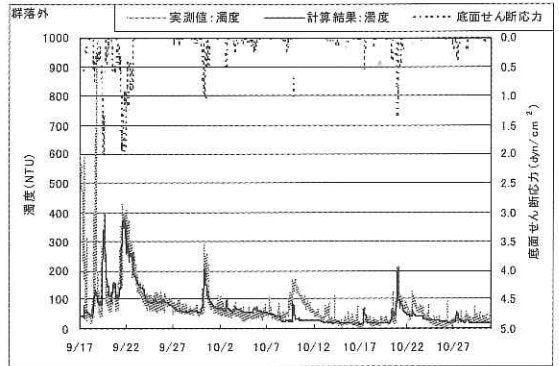
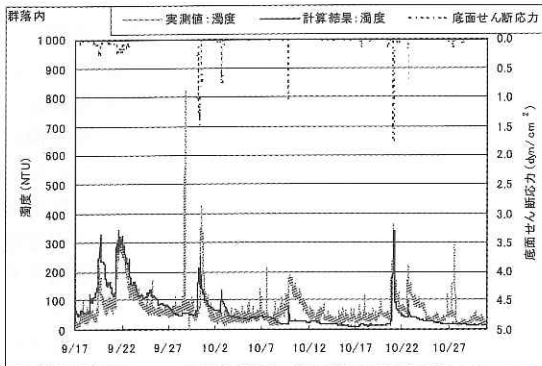


図-4 オニビシ群落内（左）および群落外（右）における観測濁度変化、計算濁度変化および底面せん断応力

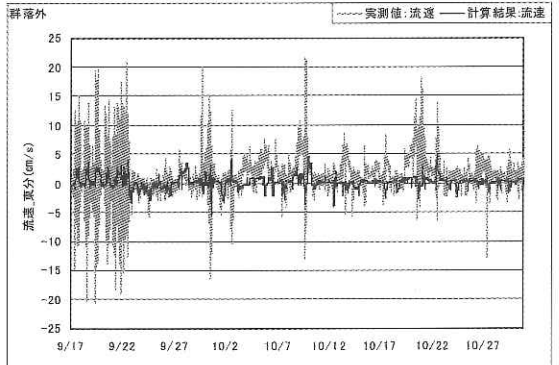
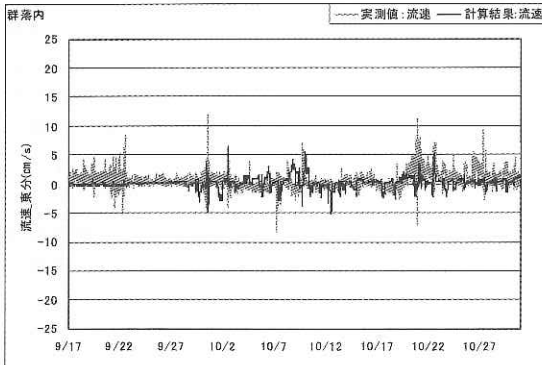


図-5 オニビシ群落内（左）および群落外（右）における東方流速成分の実測値と計算値の比較

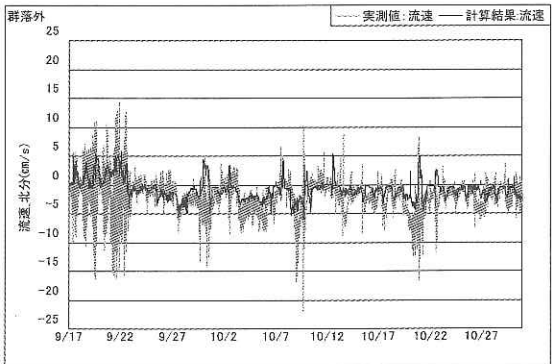
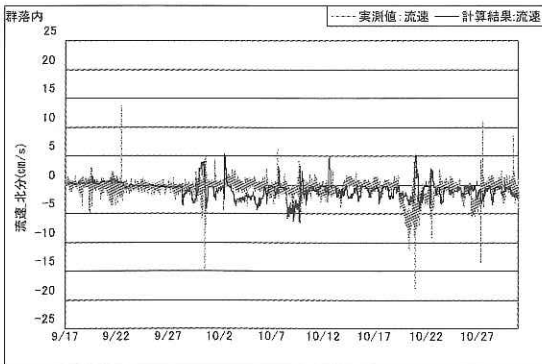


図-6 オニビシ群落内（左）および群落外（右）における北方流速成分の実測値と計算値の比較

る。しかし、群落面積が減少した後の計算では、消波効果は限定的で、風向き次第ではむしろ群落内の底面せん断応力の方が大きくなるという計算結果となった。

濁度の測定結果は、オニビシ群落密度が高かった9月20日から22日にかけては、群落内での濁度上昇が外に比べて抑制されているのに対して、群落面積の減少後は、差が減るかむしろ群落内での濁度の方が高くなる結果となっており、上記の計算結果の妥当性を示していると考えられる。また濁度の計算結果も測定結果と同様の变化特性を示している(図-4)。

群落内外ともに10月8日から12日にかけて、実測値の濁度は上昇しているが、計算ではこの傾向が見られない。この理由として、この期間に降雨があり、河川から沼に濁水が流入したことが挙げられる。印旛沼における濁りの変化の大部分は、底泥巻き上げにより規定されているため、今回の計算では、流入河川からの懸濁物供給に関して、出水時の濁度上昇を特に考慮していないことが不一致の理由として挙げられる。この期間中、強い風が連続的に吹かなかったため、計算では濁度の上昇が限定的であったが、測定では河川由来の濁りが到達したために値が上昇したものと考えられる。底泥巻き上げによる濁度上昇の際は、粒径が比較的大きい濁質が速やかに沈降するのに対して、河川由来の濁りは、測定位置に到達した時点で、このような成分がすでに沈降しており、濁質粒径が小さかったと考えられ、一旦上昇した濁度の低下が緩やかである。このような特長からも、この期間の実測と計算との差は、流入河川由来濁水の算定誤差によるもので、底泥巻き上げ量の算定誤差によるものではないと考えられる。

流速に関しても、計算、実測値共に群落密度が高い期間中、群落内での値が低く、群落密度の減少と共に、群落内外の差が小さくなる傾向を示した(図-5、6)。これら実測および計算結果は、密生している期間中のオニビシ群落の消波効果、底泥巻き上げ抑制効果を示している。群落密度が高い期間の底泥巻き上げ抑制効果は強い風が吹いた場合にはっきりと見られるが、平常時の濁度も低く抑えられている(図-4)。

3.3 その他の水質項目変化の比較

オニビシ群落が密生することによる水質への影響として、濁りについて見たところであるが、ここでは、その他の水質項目について、オニビシ群落内外での変動特性の差について検討する。

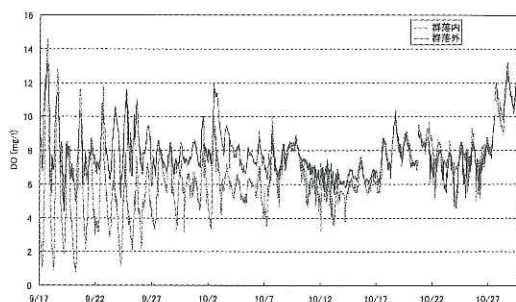


図-7 オニビシ群落内外での溶存酸素変化

富栄養化した湖沼の表層溶存酸素濃度は、植物プランクトンなどによる光合成のため、昼間に上昇し、場合によっては、過飽和になる場合がある。また、底層では、酸素消費により貧酸素化が起こる可能性が高いことが知られている。今回の検討では、溶存酸素については計算対象としていないので、群落内外での測定結果についてのみ示す(図-7)。群落密度が高い時期において、日周変化に顕著な違いが見られる。すなわち、群落内外共に昼間に濃度が上昇し、夜間に低下するものの、群落内においては、夜間に溶存酸素濃度の低下が著しく、このため昼間に溶存酸素濃度が上昇しても、群落外に比べて低い濃度にとどまっている。オニビシは浮葉植物であり、繁茂期間中は、水面をおおうため、水面における再曝気が妨げられる。また、オニビシの水中根には、多くの微生物が付着しているため、これらの呼吸により酸素消費が増加することで、溶存酸素濃度が低下しやすいと考えられる。10月13日以降は、群落が消滅したためと考えられるが、群落内外での溶存酸素濃度変化には差がほとんど見られなくなった。水面を被っていたオニビシの葉が消滅したことで、群落内外での差がなくなったものと考えられる。これ以降は、底泥巻き上げを含めてオニビシ群落がもつ沼の水質変化に対する影響がほとんど見られなくなったと考えられる。

4. 考察

オニビシ群落が有する水流や水質への影響については、消波効果による底泥巻き上げ抑制、群落の水流に対する抗力による流速の低減効果が計測結果から読みとることができた。また、計算からも同様の結果が得られた。これらの結果から、今回検討対象としたオニビシ群落ほどの水生植物の繁茂域が存在すれば、巻き上げに伴う濁度が周辺に比べて局地的に低下することが分かった。オニ

ビシのような浮葉植物のみならず沈水植物も同様な効果を持つことが示されている⁵⁾。このような理由から、沈水植物が復元出来れば、濁度低減が進み、これがさらなる沈水植物の増加を促進して、水質改善も進むと考えられる。また沈水植物は、葉が水中に没しているため、オニビシのような浮葉植物が密生することで夜間の溶存酸素欠乏も起こらないという有利性もある。

図-8は、これまでの水質変化と沈水植物の変遷の相関を概念的に示したものである。高度成長期以来、水質の悪化に伴い、植物プランクトンが優占して沈水植物が消滅した（上半分のループ）。現在の沼内リン濃度は、過去に沈水植物が繁茂していた頃のレベルにまで改善されつつある。今後の修復次第で、図中の破線に示したどれかの経過をたどると考えられる。沈水植物の修復が実現すれば、上に述べたような正のフィードバックが働き水質改善が進むことが期待される。しかし、現在の水質および底質状況では、すぐには沈水植物のような水生植物は再生されないと考えられる。このためには、沈水植物が再度繁茂するためのきっかけを提供していくことが必要である。本特集に記載されている底泥中の散布体（種子や卵胞子）を利用した再生手法による沈水植物の再生⁶⁾もこのようなきっかけの一つである。

5. まとめ

沈水植物のような大型水生植物が繁茂することで、底泥の巻き上げ抑制や、水質改善効果が発揮されることがモデルにおいてもある程度検証出来た。印旛沼のように一旦富栄養化して水生植物が減退した湖沼においては、沈水植物群落の修復が今後重要な自然修復の手法と考えられる。

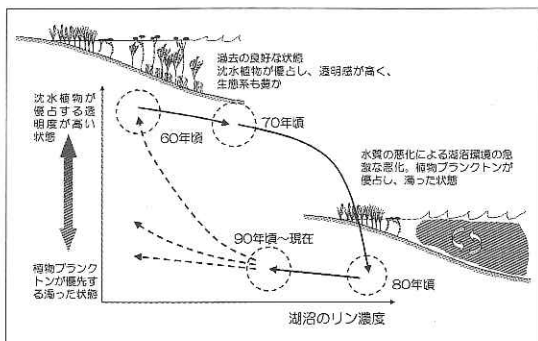


図-8 浅い湖沼における水質変化と沈水植物の変遷相関概念図

謝 辞

水質調査に関しては、国土交通省利根川下流河川事務所ならびに千葉県、特に印旛土木事務所のご担当者にご協力を頂いた。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) Scheffer, M., *Ecology of shallow lakes*, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 天野邦彦、時岡利和、対馬孝治：浅い湖沼の水質への水生植物の影響解析、水工学論文集、第49巻, pp. 1219-1224, 2005.
- 5) 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.
- 6) 天野邦彦、時岡利和、沈水植物群落の再生による湖沼環境改善手法の提案、土木技術資料, v. 49, n.6, pp. 34-39, 2007.

天野邦彦*



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所水環境研究グループ
河川生態チーム首席研究員、工
博
Dr. Kunihiko AMANO