

## I-18 湖底生態系に配慮した新しい底泥処理技術に関する基礎的研究

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

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】

本研究課題では、印旛沼における浮葉植物の底泥巻上げ抑制効果を現地観測と数値シミュレーションにより調査し、霞ヶ浦における底泥中の散布体密度、発芽ポテンシャルの分布を底泥中の散布体抽出、発芽試験等により調査した。その結果、印旛沼における浮葉植物は底泥の巻上げを抑制し、底面の光環境の改善に寄与していることが分かった。また、霞ヶ浦においては湖岸形状が入り江状になっている箇所、流入河川河口部付近で散布体密度が高くなる傾向を示し、底泥の表層付近よりは 20cm～40cm の層で高密度の散布体が存在し、発芽ポテンシャルも高いことが分かった。

キーワード：浅い湖沼，沈水植物，散布体バンク，底泥巻上げ

### 1. はじめに

流入水質対策が容易に奏功しない浅い富栄養化湖沼の環境保全対策として、本研究では湖底生態系に配慮した新しい底泥処理技術について検討を行った。具体的な技術開発としては、浅い湖沼における大型水生植物（特に沈水植物）の修復に関する技術開発を行った。

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。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。また、栄養塩類濃度の上昇に伴い、大型植物量は増加する上に水柱全体あるいは水面付近に集中する<sup>1)</sup>。このような状況は漁業やレクリエーション利用の観点から問題視されることが多く、このため水草が刈り取られることが多い。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<sup>2)</sup>。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。このため、富栄養化して水生植物が減少した浅い湖沼における大型水生植物（特に沈水植物）の修復に関する技術開発の重要性は高い。

本研究課題では、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て検討を行うと共に、沈水植物が消失した湖沼における底泥中の散布体（種子や卵胞子）を利用した再生手法について検討を行った。

日本で第2位の面積を有する霞ヶ浦においては、1970年代以降の流域開発による湖沼水質の悪化、護岸工事等による影響で沈水植物群落は減少し始め、1997年には群落としての沈水植物はほぼ消失し、現在でもほとんど存在していない<sup>3)</sup>。

浅い湖沼における沈水植物群落は、底泥の巻上げ抑制による水質改善効果等、優れた生態的機能を有していることが分かっており<sup>4)5)</sup>、霞ヶ浦においても、失われた沈水植物群落の再生が望まれている。

すでに失われてしまった沈水植物を、生物多様性の保全に配慮した形で再生する方法として、湖沼底泥中の散布体バンク（埋蔵された未発芽の種子や卵胞子）を用いる方法が注目されている。

底泥中の散布体バンクを効率よく利用するには、当該湖沼において底泥中の散布体密度が高い箇所を推定することが必要である。しかし、湖沼における散布体密度の分布特性は明らかになっていない。そこで、本研究では、霞ヶ浦において過去に沈水植物群落が存在した場所付近を中心に底泥の採取と深さ方向への分割を行い、散布体の抽出と発芽試験を行った。また、採取された底泥の堆積年代分析を行い、散布体の存在状況と堆積年代との関係性を評価した。また、湖沼流動シミュレーションを行うことにより、過去の沈水植物群落から放たれた散布体がどのように移動するのかを調査した。それにより、霞ヶ

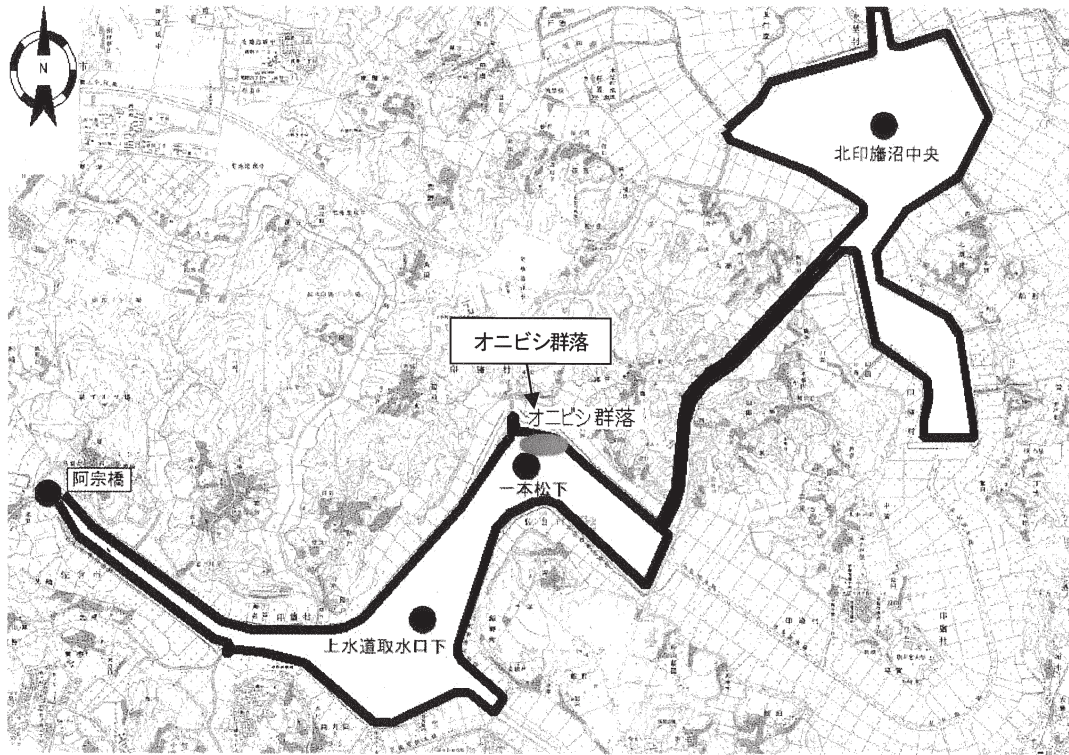


図-1 印旛沼平面図および水質調査地点

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、デービス社 ウェザーウイザード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 (パ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 オニビシが発生した現場

浦における散布体の分布特性を明らかにする。

## 2. 研究方法

### 2.1 既往底泥処理技術の整理

文献調査により既往の底泥処理技術のうち、代表的なものについて目的と欠点、湖底生態系に与える影響につ

いて評価した。対象とする底泥処理技術は浚渫、覆砂、深水層曝気、リンの沈降不活性化、底泥置換覆砂の5種類とした。

### 2.2 大型水生植物の底泥巻き上げ抑制効果検討

印旛沼(図-1)に残存するオニビシ(浮葉植物)群落内外において得られた連続水質観測を利用し、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

#### 2.2.1 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

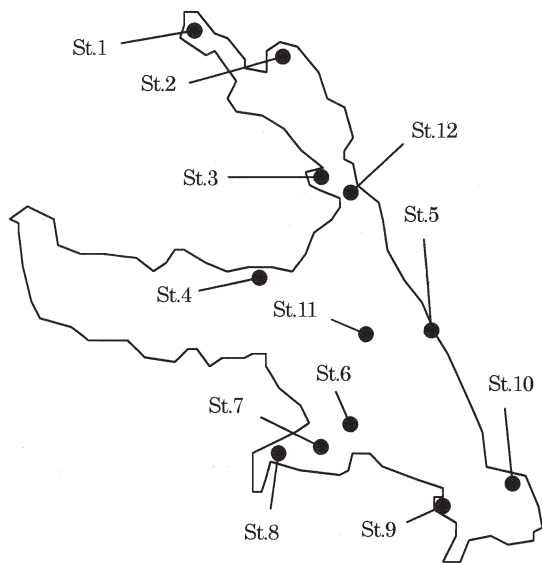


図-2 底泥採取地点

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-1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。

### 2.2.2 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, 現地観測結果に基づく検証を行った。沼内の流動計算は, 3次元モデル<sup>6)</sup>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<sup>7)</sup>と同様に行った。モデル式などについては, 既報<sup>6)7)</sup>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

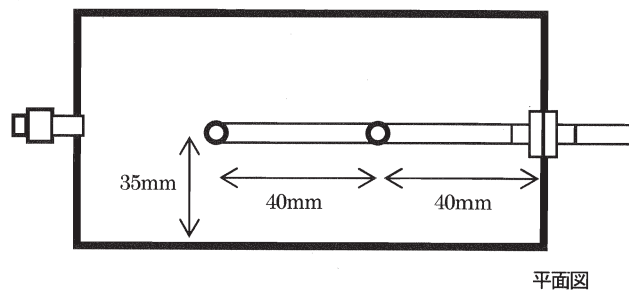
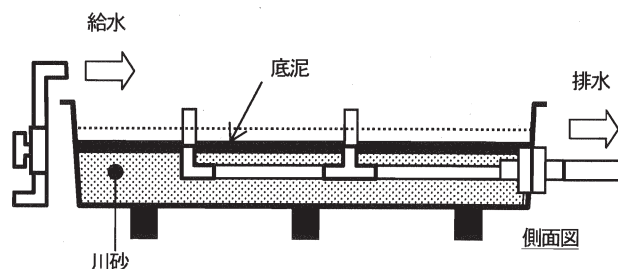


図-3 発芽実験池

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。

### 2.3 霞ヶ浦における底泥採取

#### 2.3.1 散布体平面分布調査用サンプル採取

図-2に霞ヶ浦における底泥採取地点を示す。2005年3月にSt.1~St.10において表層から20cmの底泥を採取し, 散布体を抽出した。散布体の抽出に用いた底泥サンプルは6Lである。散布体の抽出方法については後ほど詳しく説明する。

#### 2.3.2 散布体鉛直分布調査用サンプル採取

図-2に示すSt.1, 3, 11において底泥のコアサンプルを採取した。底泥コアは直径20cmのアクリルコアサンプラーを用いて表層から厚さ50cm程度を採取した。採

表-2 既存底泥処理技術の評価

対策	目的	欠点	事例に基づいた総合的評価	湖底生態系に与える影響
浚渫	栄養塩に富んだ底質の除去	・底質の攪乱 ・浚渫土の処分	・浚渫の効果は通常5~6年持続する ・栄養塩濃度が高い底質で、浅い湖では効果が高い ・経費が高く、広範囲での実施は難しい	・攪乱により底生生物層が破壊されるが、2~3年で回復する ・水生植物相の破壊と埋土種子の喪失
覆砂	底泥表面の被覆による栄養塩溶出防止と、巻き上げの抑制	・砂の調達 ・水深が深いと作業が困難	・湖面積が大きく、富栄養泥が湖底に均一に分布している場合は実施が難しい	・水生植物相の破壊と埋土種子の喪失 ・二枚貝の生息場が形成される
深水層曝気	底層付近を好気化することによってリンの溶出を抑制	・有機物分解によるリンの回帰 ・浅い湖沼では適応できない	・水深が深く、深水層が嫌気状態の時のみ適応でき、水深が浅い場合には巻き上げやリンの回帰促進等を引き起こし、逆効果である	・底層が好気化されることにより底生魚及び底生生物層は改善される
リンの沈降不活性化	硝酸カルシウム注入による底層の酸化	・pHの低下	・外部からの流入負荷が多い場合には効果が持続しない	・直接的な影響は少ないが、改善もしない
底泥置換覆砂	底泥の下に堆積する砂質土を噴流により押し上げ、覆砂する	・広範囲での実施が困難	・まだ実証実験の段階である。外部から砂を調達しなくてもよい利点があるが、堆積している砂質土の量に左右される	・覆砂と同じ

取した底泥コアについて、St.3 については 20cm 毎に分割し、鉛直方向に 3 層の底泥サンプルを作成した。St.1, 11 については 10cm 毎に分割し、鉛直方向に 5 層の底泥サンプルを作成した。散布体の抽出に用いる底泥サンプルは一層あたり 6L を用いた。St.3 については 2004 年 3 月に採取を行い、St.1, 11 については 2005 年 3 月に採取を行った。

### 2.3.3 発芽試験用サンプル採取

図-2 に示す St.1, 3, 9 において底泥のコアサンプルを採取した。底泥コアは直径 20cm のアクリルコアサンプラーを用いて表層から 60cm 分を採取した。採取した底泥コアについて、St.3 については 20cm 毎に分割し、鉛直方向に 3 層の底泥サンプルを作成した。St.1, 9 については 10cm 毎に分割し、鉛直方向に 5 層の底泥サンプルを作成した。それぞれの底泥サンプルをビニルハウス内に撒き出し、発芽試験を行った。発芽試験の詳細については後ほど詳しく説明する。

### 2.3.4 年代測定用サンプル採取

図-2 に示す St.1, 3, 12 において底泥のコアサンプルを採取した。底泥コアは直径 10cm のアクリルコアサンプラーを用いて表層から 60cm 分を採取した。採取した底泥コアについて 2cm 毎に分割し、鉛直方向に 30 層の底泥サンプルを作成した。それぞれの底泥サンプルについて年代測定を行い、堆積年代の推定を行った。年代測定の詳細については後述する。

## 2.4 散布体の抽出

採取および作成した底泥サンプルを用いて散布体の抽出を行った。

抽出は、目視および実態顕微鏡（6.7~40 倍）を用いて行い、抽出した散布体について種類別に個数を計測した。

### 2.5 発芽試験

ビニルハウス内に発芽実験池を作成し、底泥サンプルをまき出すことにより発芽実験を行った。St.3 については 200cm×200cm×深さ 2cm でまき出し、St.1, 9 については 150cm×150cm×深さ 1cm でまき出した。発芽実験池は常に井水で冠水状態となるようにした。発芽実験中は水温の上昇を防ぐために実験施設内を遮光ネット（遮光率 30~35%）で覆い、井水を緩やかに連続的に流入させた。発芽試験は St.3 については 2004 年 3 月 24 日~2004 年 5 月 19 日の期間行い、St.1, 9 については 2005 年 4 月 22 日~2005 年 7 月 22 日の期間行った。図-3 に発芽実験池の概要を示す。

### 2.6 底泥堆積年代測定

本研究で対象としている年代の幅は現在~100 年前程度である。このような年代幅における年代測定を行う場合は鉛-210 法、セシウム-137 法が適している<sup>8)</sup>。鉛-210 法は底泥中に沈降した鉛の半減期を利用して堆積年代を推定する方法であり、セシウム-137 法は大気圏原水爆実験により放出された放射性物質（セシウム-137 法）の有無、量を利用して堆積年代を推定する方法である。ただ、鉛-210 法は堆積状態の良好（ほとんど乱されていない）な底泥の場合のみに適応可能な手法であり、本研究における調査地点では St.12 の底泥サンプルのみで測定可能であった。よって St.12 において鉛-210 法、セシウム-137

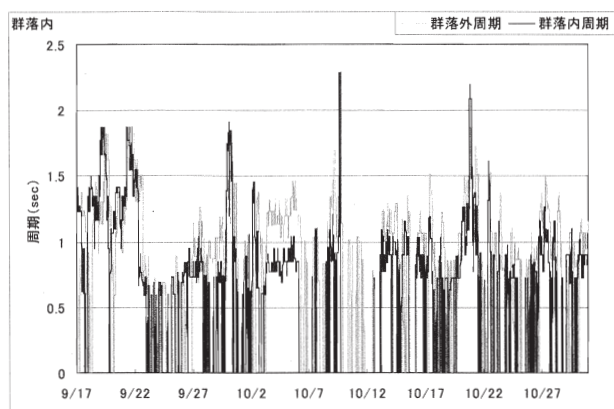


図-4 計算風波周期

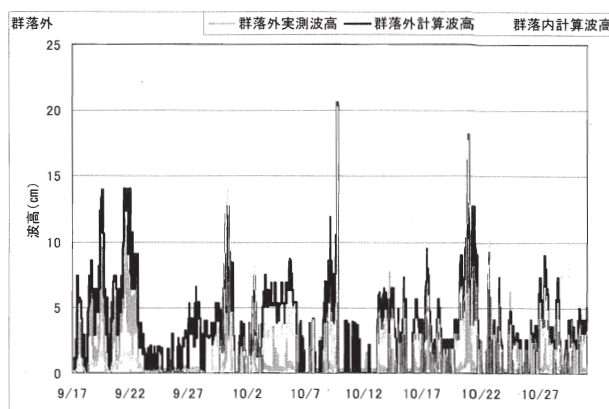


図-5 波高の実測値と計算値との比較

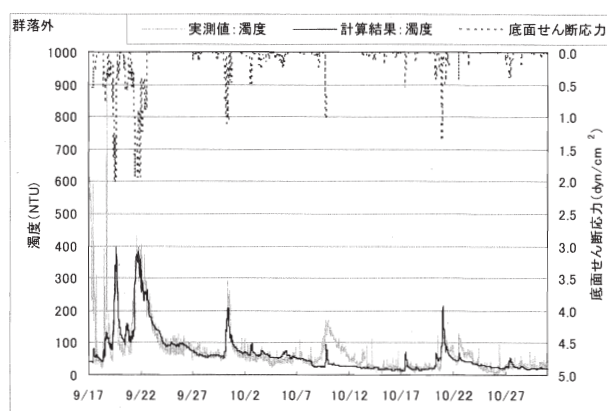
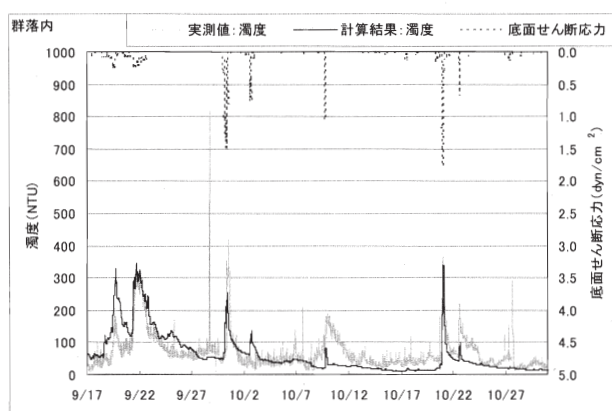


図-6 オニビシ群落内(左)および群落外(右)における観測濁度変化、計算濁度変化および底面せん断応力

法で計測を行い、St.1, 3においてセンウム-137法で計測を行った。

## 2. 7 底泥粒度分布測定

底泥中の散布体の発芽ポテンシャルと底質との関係の評価するためにSt.1, 3, 9における発芽試験用底泥サンプルを用いて粒度組成を分析した。なお、粒度分布分析についてはSt.3においても底泥コアを10cm毎に5層に分けて分析を行った。

## 2. 6 霞ヶ浦流動シミュレーション

沈水植物を含めて、水生植物は種々の方法で再生産を行っていると考えられる。地下茎を延伸して生息域を伸ばしたり、散布体を水中に放出して水流を利用してそれらを拡散させたりすることで、生息域を広げるという方法である。散布体を放出した場合、これらが湖底に着床し、発芽に適した環境であった場合にのみ再生産が可能となると考えられる。霞ヶ浦の環境が沈水植物にとって再生産可能な環境になったとして、復元を助成するためには、どの地点で重点的に復元作業を行うべきなのかについて検討する場合に流れによる散布体の運搬を把握し

ておく必要がある。

数値解析モデルには、風向・風速や気温などの気象条件や、流入・放流量などの水文条件等を外力として、湖沼内における3次元流動計算が可能なモデルを選定した。霞ヶ浦全体を水平方向に500mメッシュに区分けし、鉛直方向には5層に分割して計算を行った。気象条件としては、土浦における気象観測結果(気温、湿度、風向風速、雨量、日射量、日蒸発量、雲量)を入力データとして用いた。水文条件として、霞ヶ浦流域流出モデル解析結果を霞ヶ浦への河川流入量として採用すると共に、放流量については、常陸水門からの放流記録を用いた。また、初期条件、検証データとして定期水質観測データを使用した。

## 3. 結果

### 3. 1 既往底泥処理技術の整理

表-2に既往の底泥処理技術に関して整理したものを示す。

### 3. 2 オニビシの底泥巻き上げ抑制効果

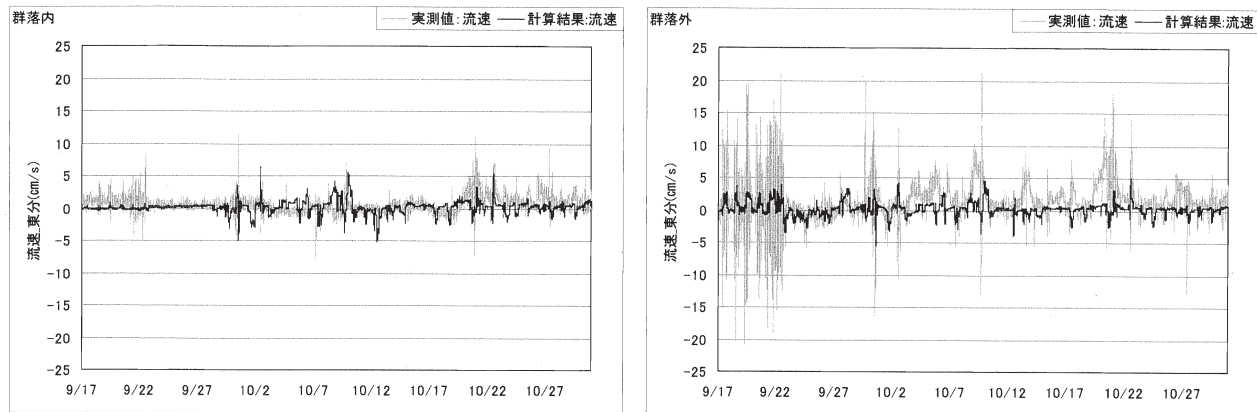


図-7 オニビシ群落内 (左) および群落外 (右) における東方流速成分の実測値と計算値の比較

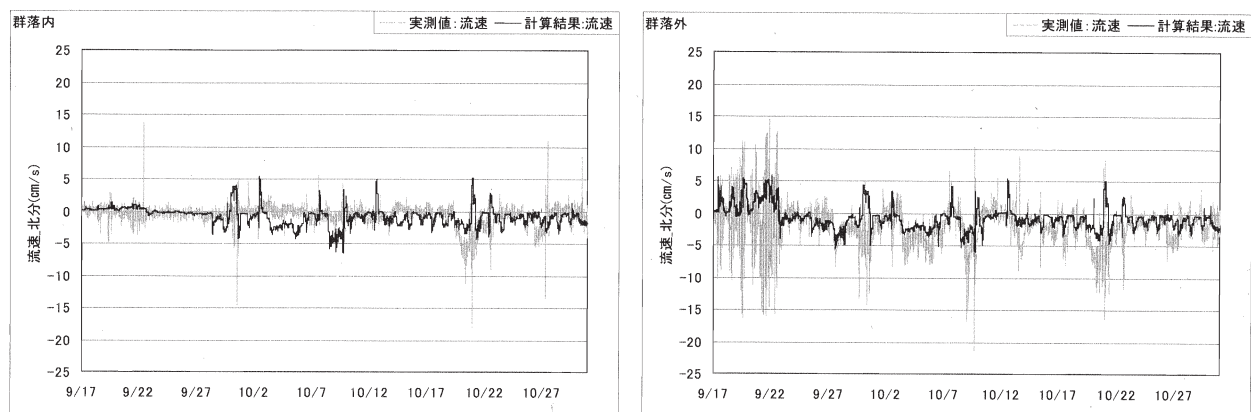


図-8 オニビシ群落内 (左) および群落外 (右) における北方流速成分の実測値と計算値の比較

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-4、5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と5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-6、7)。

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

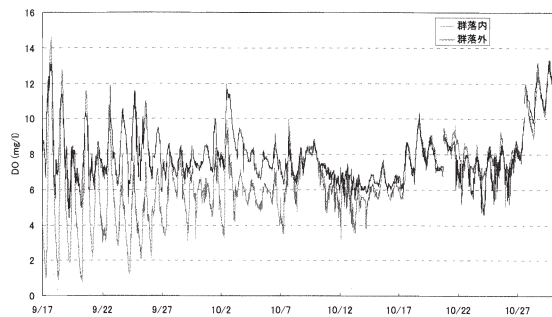


図-9 オニビシ群落内外での溶存酸素変化

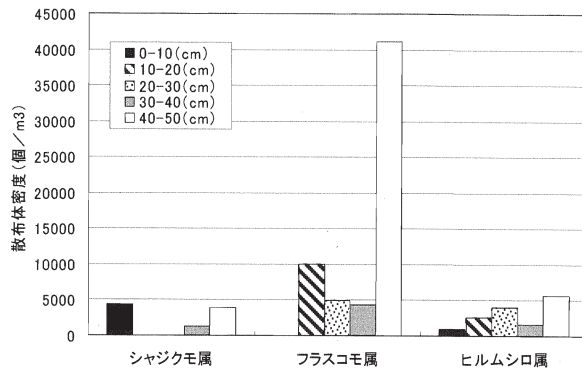


図-12 St.1における散布体鉛直分布

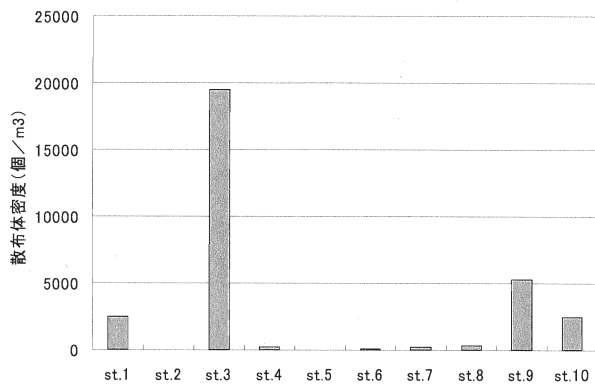


図-10 地点別散布体密度

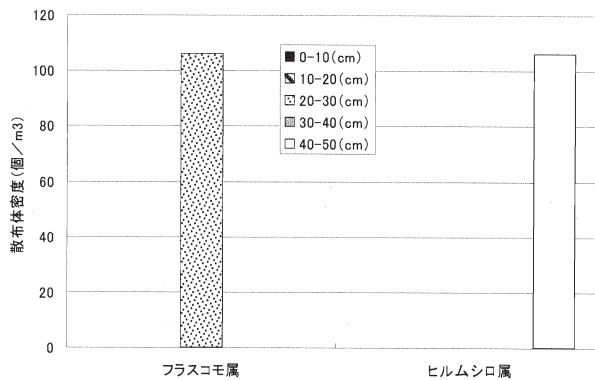


図-13 St.11における散布体鉛直分布

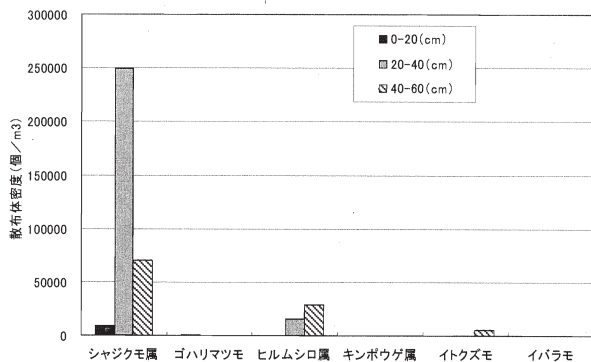


図-11 St.3における散布体鉛直分布

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-7, 8)。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-6)。

### 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。

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

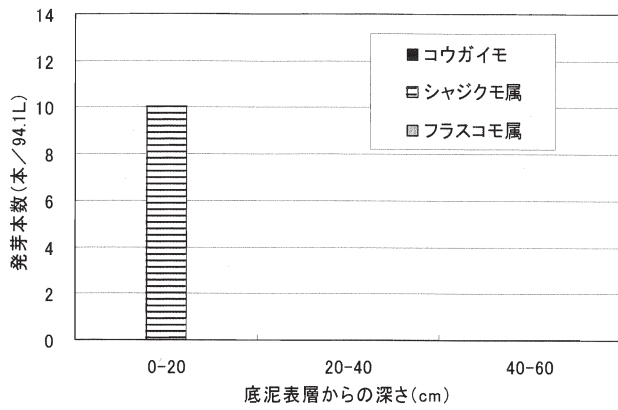


図-14 St.3における発芽試験結果

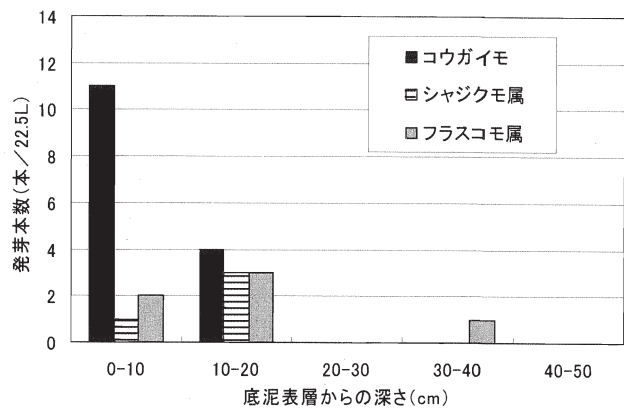


図-16 St.9における発芽試験結果

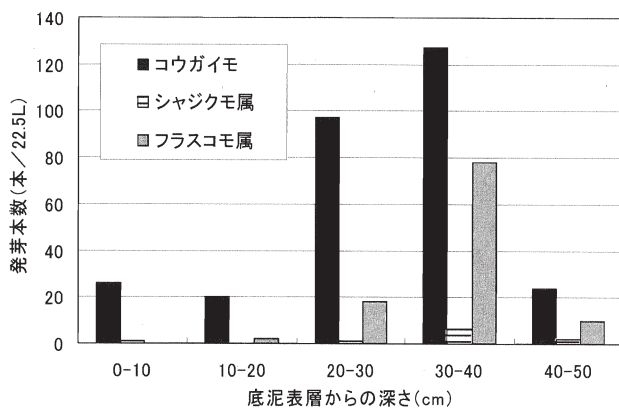


図-15 St.1における発芽試験結果

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失したことで、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。

対象としていないので、群落内外での測定結果について示す(図-9)。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

### 3. 4 散布体密度の平面分布

図-10にSt.1~10における散布体密度( $m^3$ 換算)を示す。St.1, 3, 9, 10において散布体密度が高くなっており、特にSt.3における散布体密度は約 $20000$ 個/ $m^3$ と非常に高くなっている。St.2, 5では散布体は抽出されなかった。調査地点間における散布体密度には非常に大きな偏りがあることが分かる。

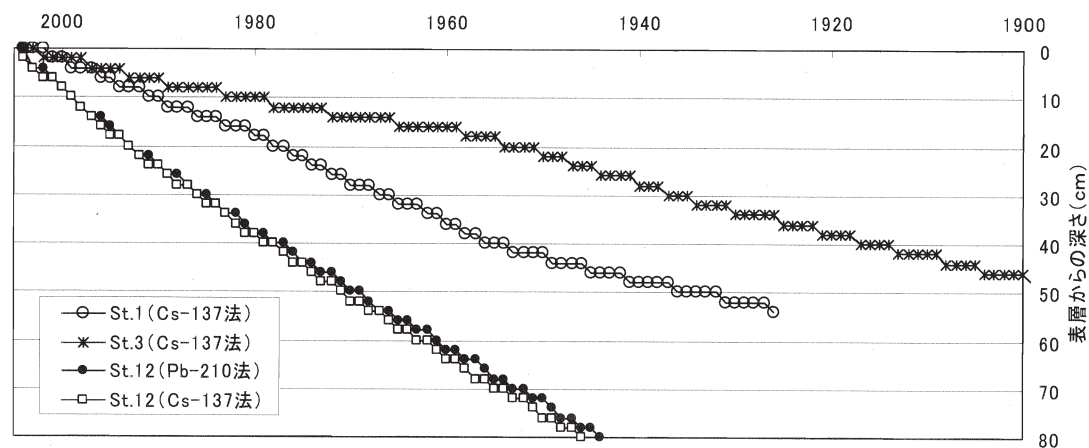
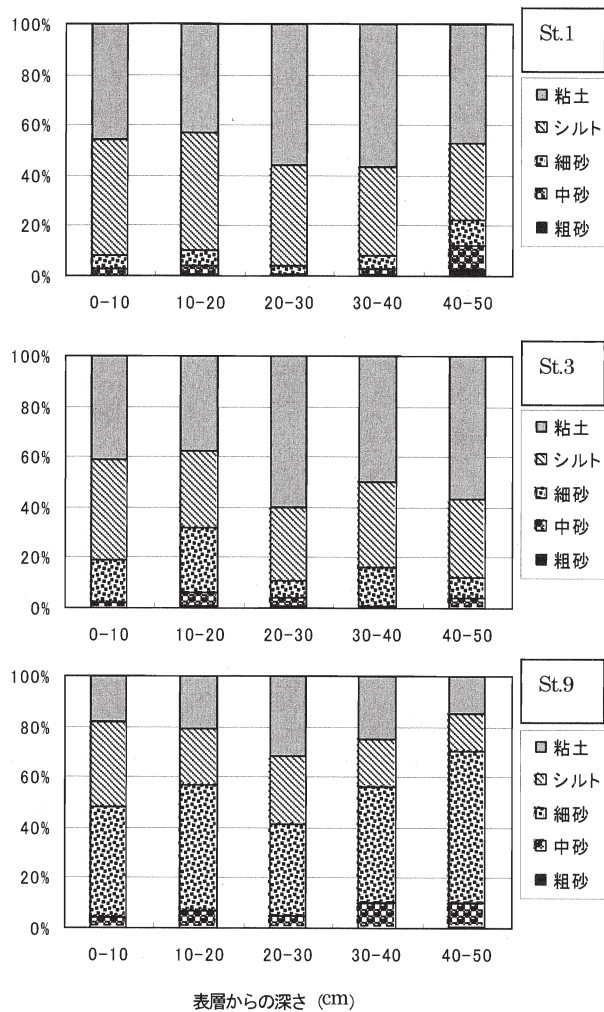


図-17 底泥堆積年代推定結果





表層からの深さ (cm)  
図-18 地点別鉛直方向の粒度分布

図-11に St.3 における散布体密度 ( $m^3$ 換算) の鉛直分布を示す。凡例は底泥表層からの深さを示す。抽出された散布体の種類は主にシャジクモ属, ゴハリマツモ, ヒルムシロ属, キンポウゲ属, イトクズモ, イバラモの 5 種であった。ほとんどはシャジクモ属の散布体であり, ヒルムシロ属がそれに続く。St.3 における散布体はこの 2 種で 98%以上を占めている。鉛直方向別に見ると, 0~20cm の層ではどの種もほとんど抽出されず, シャジクモについては 20cm~40cm の層で最も多く抽出された。

次に, 図-12に St.1 における散布体密度 ( $m^3$ 換算) の鉛直分布を示す。抽出された散布体の種類は主にシャジクモ属, フラスコモ属, ヒルムシロ属の 3 種であった。結果を見ると, シャジクモ属をのぞく 2 種は採取したコアの最下層である 40cm~50cm の層でもっとも多く抽出されている。St.1 においても表層付近 (0~10cm) からほとんど抽出されていない。シャジクモ属についてはほぼ表層付近と最下層のみで抽出されている。

次に, 図-13に St.11 における散布体密度 ( $m^3$ 換算) の鉛直分布を示す。この地点からは散布体はほとんど抽出されず, 僅かにフラスコモ属, ヒルムシロ属が抽出されたのみであった。

### 3. 6 発芽試験結果

図-14に St.3 における発芽試験の結果を示す。発芽した種のうち沈水植物はシャジクモ属のみであり, 発芽した層も 0~20cm の層のみである。

次に, 図-15に St.1 における発芽試験の結果を示す。発芽した種のうち沈水植物はシャジクモ属, フラスコモ属, コウガイモの 3 種であった。どの種も 30cm~40cm の層からの発芽本数がもっとも多い。最も発芽本数の多い種はコウガイモであり, 22.5L の底泥中 120 本以上の発芽が確認された。3 種とも 0~20cm の層, 40~50cm の層では比較的発芽本数が少ない。

次に, 図-16に St.9 における発芽試験の結果を示す。発芽した種のうち沈水植物は St.1 と同様の 3 種であった。ただし, こちらは 0~20cm の層で多くの発芽が確認され, それ以下の層ではほとんど発芽しなかった。

### 3. 7 年代測定結果

図-17に St.1, 3, 12 における年代測定の結果から堆積年代を推定した結果を示す。St.1, 3, 12 の平均堆積速度はそれぞれ 0.69cm/年, 0.46cm/年, 1.33cm/年である。St.3 における散布体密度が高かった 20cm 以下の層は 1953 年以前の層であり, St.1 における散布体密度が高かった 40cm 以下の層は 1955 年以前の層であると推定された。また, St.3 における底泥からの発芽本数が確認された 20cm 以上の層は 1953 年以降の層であり, St.1 における発芽本数が多かった 30cm~40cm の層は 1955 年~1966 年の層であると推定された。

### 3. 8 底泥粒度分布測定結果

図-18に St.1, 3, 9 における粒度分布の結果を示す。各地点とも鉛直方向に大きな違いは無いことが分かる。また, St.1, 3 は粘土, シルトがほとんどを占めているが, St.9 は細砂の割合が比較的多くなっていることが分かる。

### 3. 9 霞ヶ浦流動シミュレーション結果

図-19に流動シミュレーション結果の一例を示す。これは, 平成 6 年 4 月 1 日に湖内の 5 ヲ所に可視化用の粒子をそれぞれ 5,000 個投入して (図-19 上), 一年後の分布を推定したものである (図-19 下)。現時点では粒子は中立浮力で計算しているが, 土浦入り奥, 高浜入り奥に最初に配置した粒子の一部が西浦全体に残留しているのに対して潮来付近のものは残留しない結果が示された。

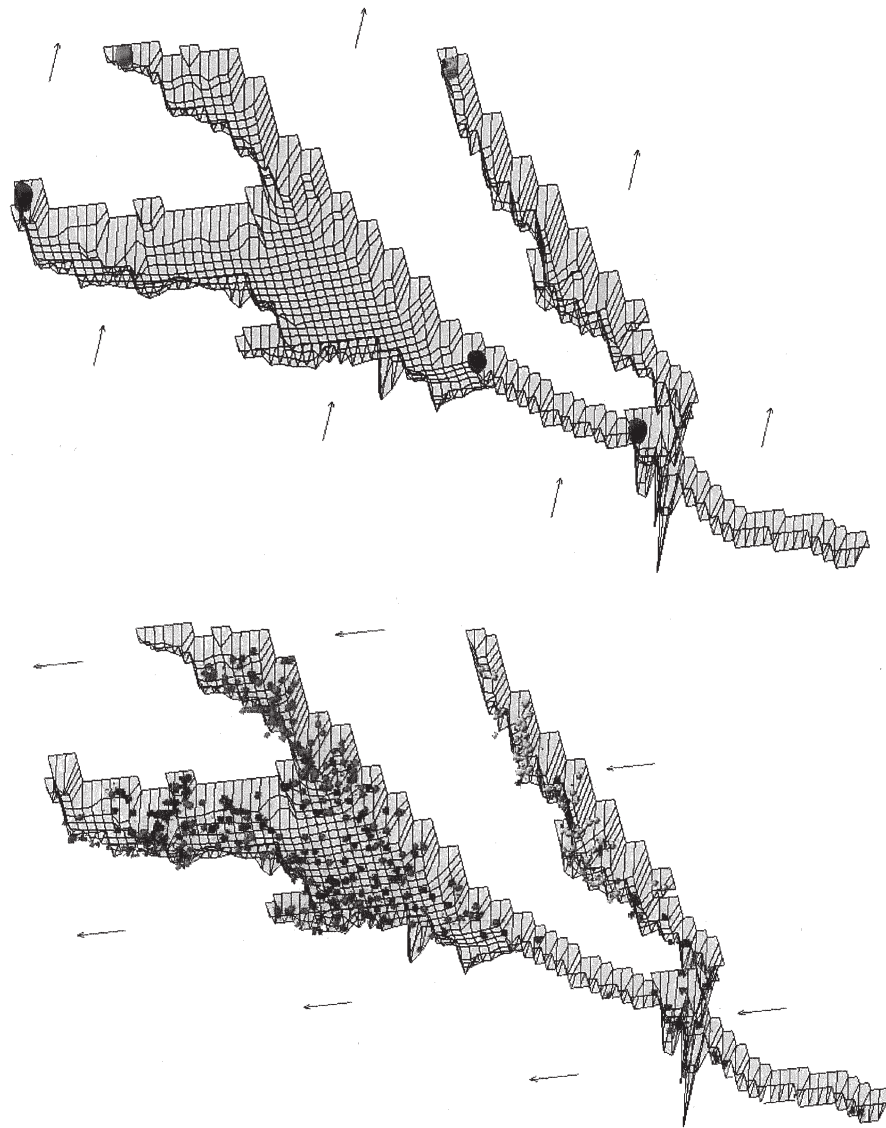


図-19 流動計算結果（水の移動予測）

#### 4. 考察

4.1 既往底泥処理技術が湖底生態系に与える影響  
底質対策の中で、浚渫は直接負荷源を除去するのに対して、他の対策は底泥からの栄養塩負荷発生機構を制御することを目的としている。浚渫は比較的水深の浅い湖沼で数多く実施され、成功例は平均水深 5m 以下の浅い湖沼に多い。一方、深水層の曝気は平均水深の深い湖沼での実施例が多い。それは、この対策が成層湖沼に対して行われることによる。リンの沈降・不活性化は中程度の平均水深で多く行われているが、比較的深い湖沼の方が成功率は高い<sup>9)</sup>。

また、湖底生態系に与える影響という観点からは、底生生物、水生植物等が比較的多く存在している、水深が

浅い湖沼における底泥処理に注目する必要がある。水深が浅い湖沼に適している浚渫や覆砂といった底泥処理技術は、富栄養化の抑制という面では成功例も見受けられるが、湖底生態系保全、特に一度失われてしまうと再び復元することが難しい水生植物やその埋土種子の保全、という視点での議論がほとんどなされていないように思われる。この要因として、これら湖底生態系に関する知見が不十分であることが考えられることから、湖底生態系に関する知見を深め、それを基に効果的な底泥処理手法を用いることにより、栄養塩負荷の抑制と湖底生態系保全の両立が実現すると考えられる。

#### 4.2 オニビシ群落の水質への影響

1977年8月

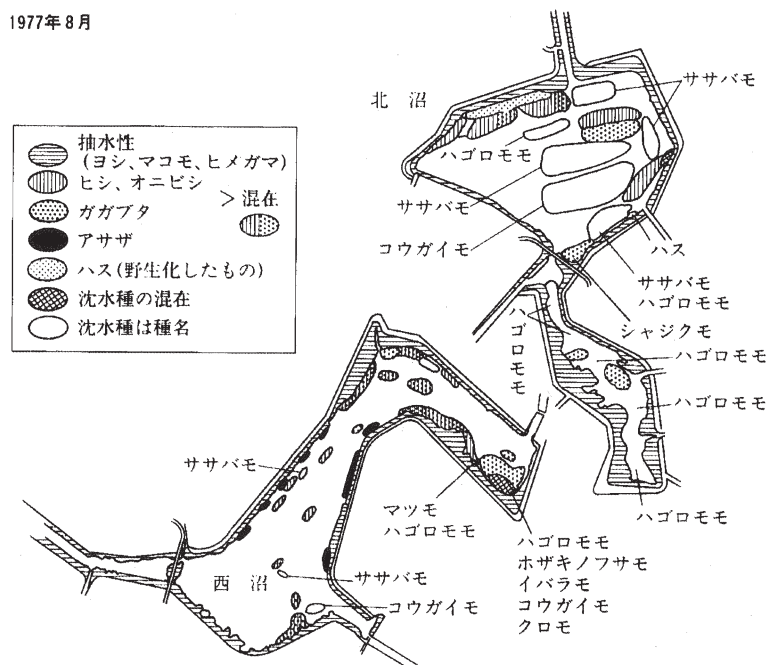


図-20 1977年の北印旛沼での水生植物群落分布<sup>2)</sup>

オニビシ群落があ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抵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。

現在の印旛沼には、大規模な沈水植物群落が存在しないために、沈水植物に関しては、今回の検討で行った様な群落内外での比較計測や検証計算を行うことはできないが、沈水植物群落がオニビシ同様の巻き上げ抑制効果を持つと仮定して、沈水植物群落が存在した沈水植物の分布域(図-20)に今回の検討で使用したモデルを適用して水質計算を行い、1977年の沈水植物群落が存在したとした場合の湖底の光状況の現状からの変化を推定した結果を図-21に示す。光状況は一日の間に大きく変化するため、7~9月について日最大値を抽出し、これらの中間値をプロットしている。

印旛沼では水質悪化に伴い、水生植物(特に沈水植物)が消滅したが、その原因の一つとして水の濁りが考えられる。図-21の結果は、1977年の植生分布を考えた場合の、湖底の現在からの光環境の変化を示している。1977

年の様な植生分布が存在すれば、湖底の光環境は改善されると考えられた。しかし、濁りの低減は顕著であるが、光は指数関数的に減衰するため、今回の計算から得られた湖底における光環境改善効果の程度は極めて小さいものであった。

何らかの方法で十分な光を湖底に届けることで沈水植物が再生すれば、沈水植物は自ら巻き上げを抑制し、光環境を改善することで、持続的に生育できると考えられる。しかし今回の結果は、現状でも1977年当時と湖底における光環境にはあまり差がなく、光は現在沈水植物が生育していない理由ではないということを示唆する結果となった。

ただし、別の見方をすると、①沈水植物群落は今回の計算で仮定したものより底泥巻き上げ抑制効果が高いと考えられ、今回の結果よりも巻き上げを抑制することが可能で、そうだとすると1977年当時の湖底での光環境は現在より良好であった、あるいは②1977年当時の底泥は細粒分が少なく、今回の計算結果よりも巻き上がりにくかった等の理由のために、実際には光環境が現在より良かったという可能性を残している。また1977年当時と現在では濁り以外の水質も異なることから、今後は、沈水植物が繁茂可能な光環境を確保するために必要な条件をさらに追求すると共に水質との関係について検討する必要がある。

底面光量の中央値のケース間差分(2002年7月～2002年9月)  
「1977年植生ケース」-「現状ケース」

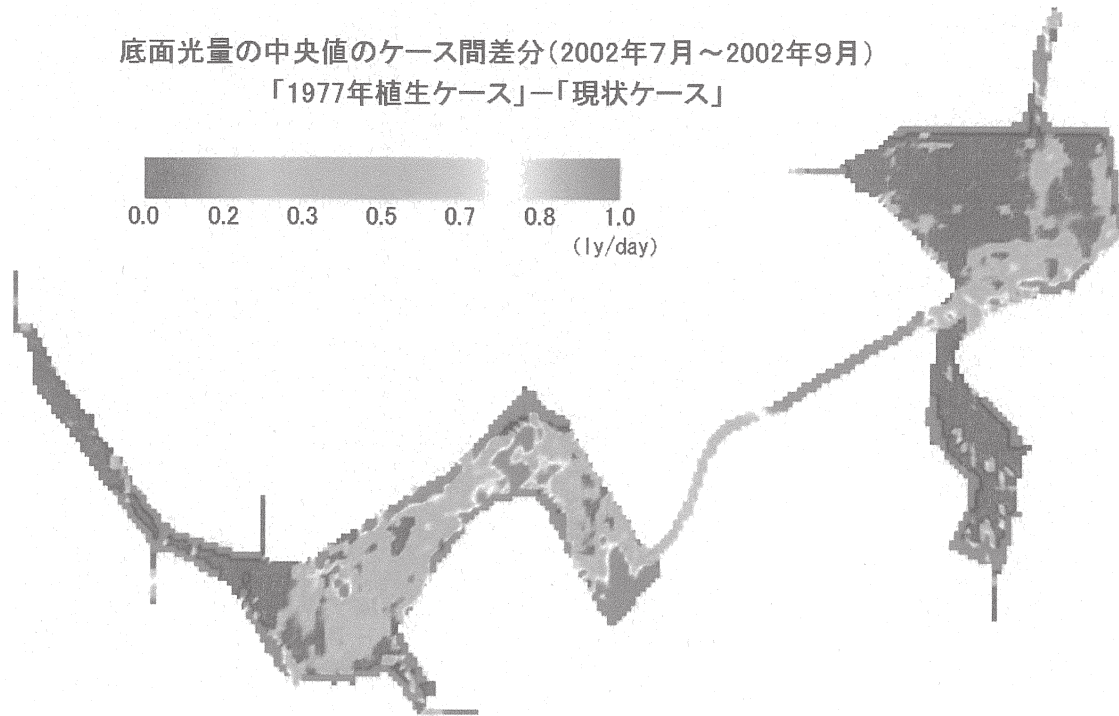


図-21 1977年植生条件での湖底光量の推定増加量

#### 4. 3 散布体密度が高い箇所の条件

図-10 における結果から、底泥中の散布体密度が高い箇所 (St.1, 3, 9, 10) には共通する条件があると思われる。すなわち、①湖岸形状が入り江状になっている場所、②流入河川の河口部に近い場所、③過去に沈水植物帯が存在した場所 (図-22 参照)、の3条件である。このうち、条件①は上記4箇所全てに共通する項目であり、条件②は St.1, 3 に共通する項目であり、条件③は St.1, 3, 10 に共通する項目である。以下にそれぞれの条件と散布体密度との関係を考察する。

条件①：湖岸形状が入り江状になっている箇所は、湖内の流れが滞留し易く風波による底面せん断力が比較的小さい箇所と考えられる。よって、沈水植物から放出された散布体が沈降し易く、一度沈降した散布体が再び風波等によって他の場所に流されにくい箇所であると考えられる。なお、図-19 に示された結果からも、湖岸形状が入り江状になっている河床で流れが滞留し易いことが分かる。今回の流動シミュレーションは霞ヶ浦全体の流動を把握するために行ったものであり、今後は少し小さいスケールでの計算を行い、St.3 や St.9 での流れの滞留を再現する必要がある。

条件②：流入河川河口部付近は出水等による河川からの堆積物が多く供給される箇所である。このため、湖底

に沈降した散布体の上に出水による河川からの堆積物が急激に堆積し、散布体が沈降してから短時間で還元的な環境に置かれた可能性がある。このような場合、他の場所と比べて散布体の腐食が抑制されていると考えられる。また、流入河川による流域からの散布体の供給もあると考えられる。

条件③：散布体は沈水植物から放出されたあとしばらくすると沈降するため、過去に沈水植物帯が存在していた箇所付近の散布体密度が高いと考えられる。

本研究における結果から、3つの条件の中で最も散布体密度と関係の深かった条件は湖岸形状に起因する底泥付近の水理的な安定性であると推測された。このことから、底泥中に残存する散布体密度の分布には過去の植生帯の位置も重要であるが、その場所の水理的な条件も重要な要因であると考えられる。

なお、別途調査した霞ヶ浦湖心での散布体密度は非常に低く (図-13)、沿岸域から離れた St.6, 7 においても散布体密度が低い (図-10) ことから底泥中の散布体は湖岸付近の入り江の部分に多く存在している可能性が高い。

#### 4. 4 散布体密度と発芽ポテンシャルの評価

図-11～16 にかけての結果から、散布体密度と底泥からの発芽率には明確な関係が見られないことが分かる。

まず、地点間の考察を行う。St.1 と St.3 では抽出され

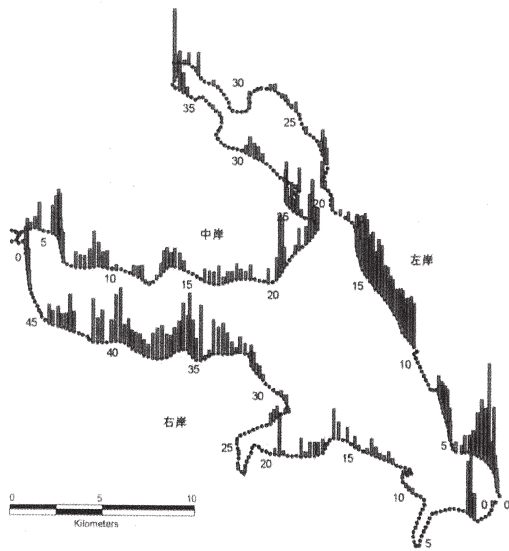


図-22 1972年時点における沈水植物帯存在  
エリア (参考文献9) より引用

た散布体密度は St.3 の方が遥かに高い (図-11, 12).  
しかし、発芽試験の結果では St.1 の方が多く発芽してい  
る

(図-14, 15). この理由として、St.3 の散布体は形状  
としては存在しているものの、休眠状態もしくは胚の腐  
食により発芽できない状態になっているものが多かった  
と思われる。図-18 に示す粒度分布の結果からは両地点  
の違いは確認できないが、その他底泥の環境条件の違い  
によりこのような差が現れたと考えられる。

次に、同一地点における鉛直方向の考察を行う。St.3  
については、深さ 20cm 以下の層において散布体密度が  
高くなっているが (図-11)、発芽は深さ 20cm 以上の層  
で確認されている (図-14)。St.1 については深さ 40cm~  
50cm の層で最も散布体密度が高くなっているが、発芽本  
数が多いのは深さ 20cm~40cm の層である。図-17 の堆  
積年代推定結果をみると、St.1 における 20cm 以下の層、  
St.3 における 40cm 以下の層はどちらも 1950 年代に堆積  
した層である。よって、これらの層に存在する散布体は  
生産されてから 50 年以上経過していると考えられ、散布  
体としての形状は保っているものの、発芽能力は失われ  
てしまったと考えられる。

#### 4. 5 沈水植物消失と散布体密度との関係

1980 年以降霞ヶ浦の沈水植物群落はその存在エリア  
が急速に減少した<sup>10)</sup>。図-17 を見ると St.1 における深さ  
20cm 以浅の層がこの期間にあたり、図-15 をみても 20cm  
以浅の層において発芽本数が急激に少なくなっているこ  
とが分かる。よって、1980 年代以降の堆積層においては、

散布体を放出する沈水植物自体が減少したことにより、  
散布体密度が低いと考えられる。

#### 4. 6 効果的な沈水植物群落再生手法の提案

底泥中に存在する沈水植物の散布体を利用して沈水植  
物群落の再生を行う場合、まず当該湖沼において実験エ  
リアを作成し、その場所において沈水植物の再生実験を  
行うのが適切であると考えられる。その際、なるべく発  
芽ポテンシャルの高い底泥を利用するのが望ましい。霞  
ヶ浦においてそのような底泥を採取する場合、以下の点  
に留意すれば効率的な底泥採取が可能になると考えられ  
る。

- ・実験エリア付近で湖岸形状が入り江状になっている箇  
所、流入河川が近くに流入している箇所、沈水植物群  
落が過去に存在していた箇所付近を選定し、底泥を採  
取する。
- ・選定した箇所の底泥を調査し、1950 年~1980 年の間に  
堆積した層を推定し、その層の底泥を重点的に採取す  
る

#### 5. まとめ

湖底生態系の保全に関しては特に浅い湖沼において  
重要と考えられるが、浅い湖沼における既往底泥処理技  
術としては、浚渫や覆砂が多く適用されている。これら  
技術は生態系への配慮が十分払われているとは言えない。  
このため、本研究では湖底生態系の要素として沈水植物  
をとりあげ、水質改善の効果と、失われた沈水植物の再  
生手法の検討を行った。

印旛沼のように一旦富栄養化して水生植物が減退した  
浅い湖沼においては、底泥の巻き上げに伴う濁りによる  
光制限により、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。現在の状況では、オニビシは  
生育が可能であり、濁りを押さえる効果があることが示  
されたが、大量に繁茂すると、測定結果に得られたよう  
に溶存酸素濃度が低下したり、漁業に利用されている印  
旛沼では航行の障害となるため、環境上あまり好ましく  
ない。このような問題を起こさずに濁りを低減しうる沈  
水植物が、現状で生育できない理由として光制限や水質  
悪化が考えられるが、いつどの程度まで改善すればこれ  
らが生育可能なのかあるいは、流域で使用された除草剤  
などの影響は無いのかについて評価することが、再生へ  
の糸口になると思われる。

また、霞ヶ浦における底泥中の散布体は以下のような  
特性で分布していると思われる。

- ・霞ヶ浦における底泥中の散布体密度を調査した結果、

場所によって大きな偏りがあり、湖岸形状が入り江状になっている箇所、流入河川河口部付近、過去に沈水植物群落が存在していた箇所に高密度で存在していることが分かった。また、湖沼流動シミュレーション結果からも湖岸形状が入り江状になっている個所で流れが滞留し易いことが示されており、浮遊物が沈降しやすい場所に多く存在すると考えられる。

- ・底泥中の散布体密度について調査した結果、沈水植物群落が多く存在した時代に堆積した底泥の層（深さ40cm～50cmの層）で最も高密度に存在していることが分かった。しかし、この層における散布体は生産されてから50年以上経過しており、発芽能力を有しているものは少なかった。
- ・霞ヶ浦の底泥を用いて発芽試験を行った結果、コウガイモ、シャジクモ属、フラスコモ属の発芽が確認され、概ね1950年～1980年の間に堆積した層における底泥から多くの発芽が確認された。

本研究課題の成果として、沈水植物群落を再生することで、底泥巻上げを抑制して、湖沼水質および透明度の向上を図る技術開発の方向性が確立された。各達成目標との関連では以下のようにまとめることができる。

達成目標①：既存底泥処理技術が湖底生態系に与える基礎的影響の解明

既存技術で適用例の多い浚渫は、攪乱による底生動物相への影響、水生植物群落や埋土種子の破壊を伴うことから、適用にあたっては、適用場所の選定が重要になる。また、覆砂や底層曝気は、貝類の生息域の創出や底層の酸素条件の改善により生態系への好影響も期待できることが整理された。

既存の底泥処理手法は、水質改善に重点を置いており、生態系修復を強く意識するものではなかったことが明らかになった。よって、生態系修復自体が水質改善を促進すると考えられる沈水植物群落の再生による湖沼環境改善技術の開発が必要であることが明らかとなった。

達成目標②：湖底生態系に配慮した新しい底泥処理手法の提案

新しい底泥処理手法として、沈水植物群落の再生による湖沼環境改善手法を提案した。沈水植物群落を再生することで、底泥巻上げが抑制され、透明度向上、さらなる植生繁茂、水質改善が促進される。このための手法

として、浮葉植物群落やカーテンを利用した消波技術の提案を行った。また、浅い湖沼における水質形成モデルを開発し、再生適地の選定・実現可能性評価、および沈水植物群落の再生による底泥巻上げの抑制と、それに伴う濁度等の水質改善や湖底の光環境改善の評価手法を提案した。

さらに、失われた沈水植物の再生材料として底泥中に存在する散布体（種子や卵胞子）に着目し、その分布特性、発芽ポテンシャルを解明した。

## 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) 藤原宣夫, 西廣淳, 中村圭吾, 宮脇成生: 霞ヶ浦湖岸植生帯の変遷とその地点間変動要因, 国土技術政策総合研究所資料, p.1, 2003
- 4) van den Berg, M.S., M. Scheffer and H. Coops, The role of characean algae in the management of eutrophic shallow lakes, *J. Phycol.*, 34, pp.750-756, 1998
- 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, 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.
- 7) 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.
- 8) 沿岸環境調査マニュアル (底質・生物篇) 5.3.5
- 9) 株式会社エックス都市研究所, 底質汚濁改善対策調査-淡水域-, 昭和57年度環境庁委託業務結果報告書, pp.83-95, 1983.
- 10) 柚木秀雄, 高村典子, 西廣淳, 中村圭吾: 浚渫土に含まれる水生植物の散布体バンクとバイオモニタリングを活用して霞ヶ浦湖岸に沈水植物群落を再生する試み, 保全生態学研究, vol.8, pp.99-111, 2003

## I-19 ITを活用した野生生物追跡調査手法の開発

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 13～平 17

担当チーム：河川生態チーム

研究担当者：天野邦彦、傳田正利

### 【要旨】

本課題では IT を活用した野生生物追跡調査手法の開発を行った。主に検討した内容は、①野生生物自動追跡システムの開発とその汎用化、②開発した野生生物自動追跡システムを活用した新しい野生生物調査手法の開発である。①野生生物自動追跡システムの開発とその汎用化では、野生生物の行動を約 3 分、誤差 10m～25m 程度で自動追跡が可能なシステムであるマルチテレメトリシステム（Multi Telemetry System、以下 MTS）を開発し中型野生生物の行動追跡に成功した。また、MTS の汎用化（小型化・低予算化・対象生物の拡大）を目的としたアドバンスドテレメトリシステム（Advanced Telemetry System、以下、ATS）を開発し、魚類の行動追跡、特に出水時の魚類行動の追跡に成功した。②の MTS、ATS を活用した新しい野生生物調査手法の開発では、MTS、ATS で追跡した野生生物の行動データを地理情報システム（Geographic Information System、以下、GIS）に取り込み物理環境情報との関係性を分析することで、野生生物と物理環境情報の関係性の分析、野生生物の行動を予測することが可能であることが明らかになった。貴重生物の生息空間の保全や環境に配慮した河川改修事業等の計画時、野生生物自動追跡システム（MTS、ATS）は、従来の調査手法で取得することが難しかった野生生物の行動特性の定量的なデータ取得を可能にし、効果的な自然環境の保全・復元に重要な調査ツールであることが明らかになった。

キーワード：野生生物、行動、自動追跡システム、GIS、河川改修、物理環境変化、騒音振動、出水時魚類行動

### 1. はじめに

河川改修事業やダム事業等の人為的インパクトが野生動物の行動に与える影響の把握については、既往研究・調査において多くの努力がなされてきた。しかし、生息域への人の侵入、生息空間の改変等の人為的インパクトが生じた時、野生動物の行動変化を把握、予測することは難しかった。土木研究所は野生生物の行動を定量的に追跡出来る行動追跡手法の開発を目標として研究・開発を行ってきた。既往技術で野生生物の行動を定量的に把握する手法として、テレメトリ（野生動物に電波発信機を装着し、行動を追跡する方法）があった。しかし、この手法は調査員がアンテナを持って電波の受信を音で確認しながら追跡するしか追跡方法がなく、高精度、長期間の連続調査は難しかった。

このような背景から土木研究所では既存のテレメトリ手法をシステム化し、自動で野生動物の行動追跡が可能なマルチテレメトリシステム（Multi Telemetry System、以下、MTS）の開発や、MTS の発展形・汎用型であるアドバンスドテレメトリシステ

ム（Advanced Telemetry System、以下、ATS）の開発を行った。また、MTS、ATS で取得した野生生物の行動データと物理環境情報を地理情報システム（Geographic Information System、以下、GIS とする）を用いて解析すると、野生生物の行動と物理環境変化の因果関係を定量的に確認できることが明らかとなった。

本報告では、2つの流れに従い本課題の成果を報告する。一つは、MTS、ATS と続くシステム開発・機能検証、機能検証結果に基づくシステム改良の流れを経時的に報告する。もう一方は、MTS、ATS で取得した野生生物の行動データと物理環境変化の因果関係を GIS を用いて解析する有効性を、実際の現地データを例示しながら報告する。内容は、①五ヶ瀬川水系北川における大規模河川改修時の植生伐採、騒音振動環境の変化が野生生物の行動に与える影響評価に関する研究、②信濃川水系千曲川における 6 ヶ月間の魚類行動軌跡と出水時の魚類行動と流速分布の因果関係に関する研究、以上の 2 点について報告する。