

◆ 特集：閉鎖性水域の環境保全 ◆

沈水植物群落の再生による湖沼環境改善手法の提案

天野邦彦* 時岡利和**

1. はじめに

高度成長期に水質汚濁が進行した多くの湖沼において、下水道整備に伴い徐々に流入河川水質の改善が見られる。しかし流入河川水質が改善されても湖沼水質は横ばいの状況である湖沼が多く見られる。浅い湖沼における水質問題の一つに底泥の巻き上げがある。この底泥の巻き上げが湖沼水質が向上しない原因の一つとも考えられる。

浅い湖沼における底泥の巻き上げについては、植生の有無により、その程度に違いがある。中でも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、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)}。

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²⁾。特に浮葉植物は、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、刈り取られることが多い。刈り取りが、実施されると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⁴⁾。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）の再生は、湖沼環

境改善にとり重要な要素である。

沈水植物を再生することを目指しても、既に当該湖沼において植物体が消滅している場合、再生には、他所から植物を再導入するという手法もあるが、その湖沼在来の植物で再生することが基本である。そのための方法として、本稿では、大型沈水植物が消滅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。

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）を用いる方法は、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、この特性を明らかにすることを目的として、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を評価した。

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が減少し始め、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⁵⁾。生態系の修復という意味からも、沈水植物の再生が強く望まれるところである。

2. 研究の方法

2.1 霞ヶ浦における底泥採取

2.1.1 散布体平面分布調査用サンプル採取

図-1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

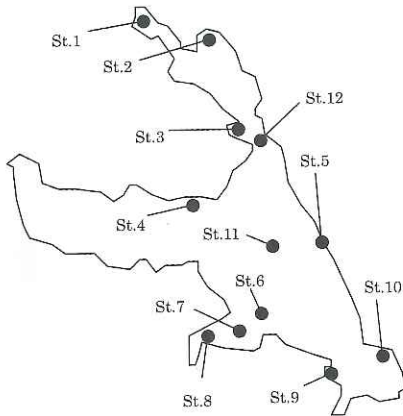


図-1 底泥採取地点

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。

2.1.2 散布体鉛直分布調査用サンプル採取

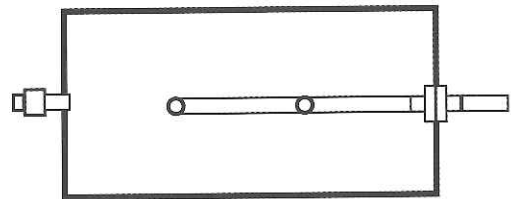
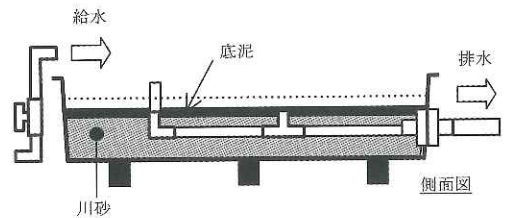
図-1に示すSt.1、3、11において散布体鉛直分布調査用の底泥コアサンプルを採取した。底泥コアは直径20cmのアクリルコアサンプラーを用いて表層から厚さ50cm程度を採取した。採取した底泥コアについて、St.3については20cm毎に分割し、鉛直方向に3層の底泥サンプルを作成した。St.1、11については10cm毎に分割し、鉛直方向に5層の底泥サンプルを作成した。散布体の抽出に用いる底泥サンプルは一層あたり6Lを用いた。St.3については2004年3月に採取を行い、St.1、11については2005年3月に採取を行った。

2.1.3 発芽試験用サンプル採取

図-1に示すSt.1、3、9において発芽試験用の底泥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。

2.1.4 年代測定用サンプル採取

図-1に示すSt.1、3、12において堆積年代測定用の底泥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



平面図

図-2 発芽実験池

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。

2.2 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。

2.3 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から発芽試験用に採取した底泥については200cm×200cm×深さ2cmでまき出し、St.1、9からのものについては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-2に発芽実験池の概要を示す。

2.4 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⁶⁾。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法は大気圏原子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法の両方で計測を行い、St.1、3においてはセシウム-137法のみで計測を行った。

2.5 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。

3. 結果

3.1 散布体密度の平面分布

図-3に散布体平面分布調査用サンプルから得られた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20,000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。これらの結果から、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。

3.2 散布体密度の鉛直分布

散布体鉛直分布調査用サンプルのうち、St.3における散布体密度（ m^3 換算）の鉛直分布を図-4に示す。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（*Chara*）、ゴハリマツモ（*Ceratophyllum demersum*）、ヒルムシロ属（*Potamogeton*）、キンボウゲ属（*Ranunculus*）、イトクズモ（*Zannichellia*

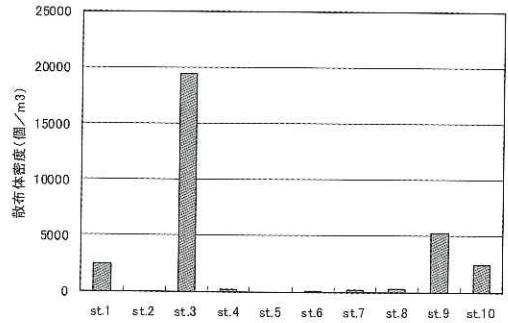


図-3 地点別散布体密度

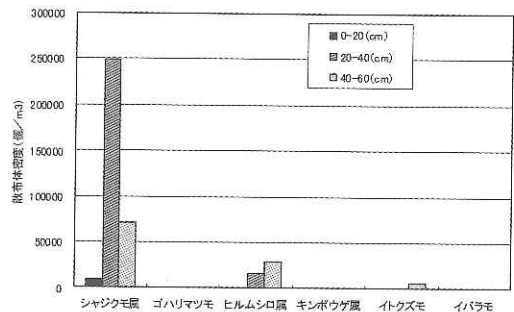


図-4 St.3における散布体鉛直分布

palustris Linnaeus)、イバラモ (*Najas marina*) 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-5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40～50cm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）からは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。

さらに、図-6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。

3.3 発芽試験結果

図-7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

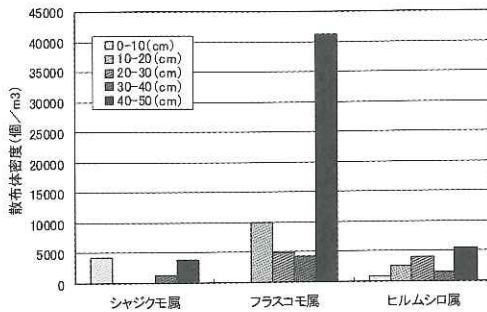


図-5 St.1における散布体鉛直分布

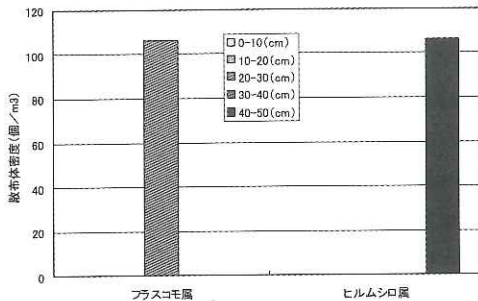


図-6 St.11における散布体鉛直分布

り、発芽した層も0～20cmの層のみである。

次に、図-8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30～40cm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の層では比較的发芽本数が少ない。

また、図-9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。

3.4 年代測定結果

図-10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

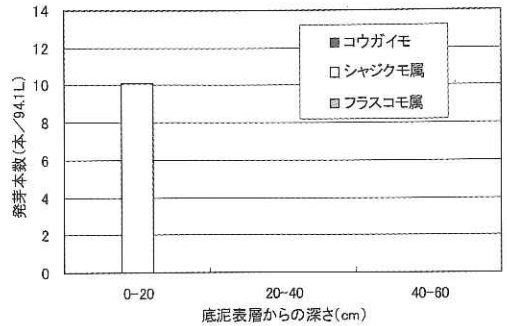


図-7 St.3における発芽試験結果

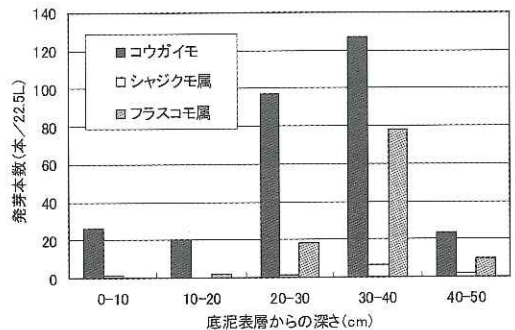


図-8 St.1における発芽試験結果

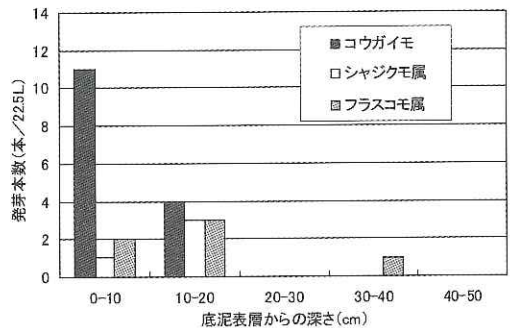


図-9 St.9における発芽試験結果

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。

3.5 底泥粒度分布測定結果

St.1、3、9における粒度分布については、各地点とも鉛直方向に大きな違いは無く、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た（図は割愛）。

4. 考察

4.1 散布体密度が高い箇所の条件

図-3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

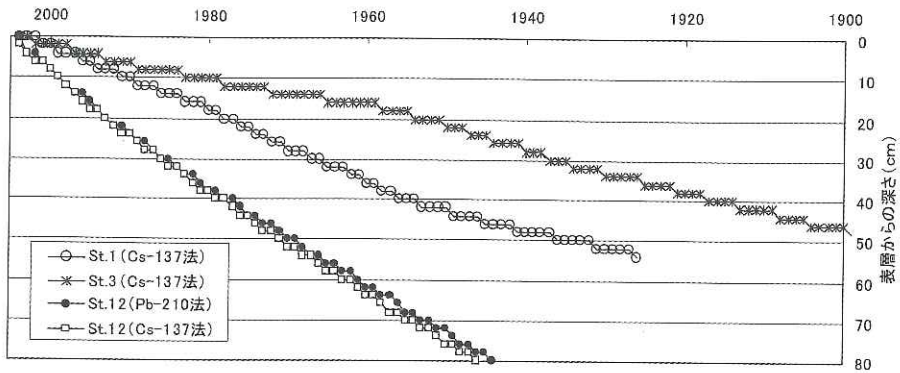


図-10 底泥堆積年代推定結果

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。

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後、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①の湖岸の入り江状の場所であった。以前は沈水植物が多く存在した地点であるSt.5ではほとんど散布体が発見されなかったことから、沈水植物の散布体が多

く残存する地点の条件として、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、浮遊物が沈降しやすいといった水理的な条件も重要な要因であると考えられる。なお、霞ヶ浦湖心での散布体密度は非常に低く、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-3)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。

4.2 散布体密度と発芽ポテンシャルの評価

図-4～9にかけて示した結果から、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では抽出された散布体密度はSt.3の方が遥かに高い(図-4、5)。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-7、8)。この理由として、St.3の散布体は数多く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。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可能性がある。

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以深の層において散布体密度が高くなっているが(図-4)、発芽は深さ20cm以浅の層で確認されている(図-7)。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-10の堆積年代推定結果をみると、St.1における20cm以深の層、St.3における40cm以深の層はどちらも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60年近く経過していると

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。

4.3 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。図-10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-8をみると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。

4.4 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。

- ・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。今回の調査結果から湖岸帯での堆積速度は約0.5～1.5cm/年であることから、最低15cm最大90cm程度の深さの層に発芽ポテンシャルを有する散布体が多く存在すると考えられる。掘削のしやすさを考えると、表層から50cm程度まで採泥して、発芽実験に供すれば効率よく散布体を採取できると考えられる。

5. まとめ

- ・霞ヶ浦における底泥中の散布体密度を調査した結果、場所によって密度には大きな偏りがあり、湖岸形状が入り江状になっている箇所に高密度で存在していることが分かった。浮遊物が沈降しやすい場所に多く存在するためと考えられる。

- ・底泥中の散布体密度について調査した結果、沈水植物群落が広く存在した時代に堆積した底泥の層に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

60年近く経過しており、発芽ポテンシャルは低く、発芽能力を有している散布体はより浅い30～60年前に堆積した層から多く発見された。

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) 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.
- 6) 沿岸環境調査マニュアル(底質・生物篇)、日本海洋学会編、恒星社厚生閣、1986.

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
水災害・リスクマネジ
メント国際センター国際普
及チーム(前 つくば中
央研究所水環境研究グル
ープ河川生態チ
ーム) 研
究員
Toshikazu TOKIOKA