

課題名 B-1004 浅い閉鎖性水域の底質環境形成機構の解析と
底質制御技術の開発

課題代表者名 西村 修（東北大学大学院工学研究科土木工学専攻環境生態工学研究室）

研究実施期間 平成22～24年度

累計予算額 42,834 千円（うち、平成24年度予算額：10,893 千円）
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 閉鎖性水域，底質汚濁，流動，巻き上げ，沈降，湖岸，緩傾斜化，
洪水制御，難分解性有機炭素，植生管理

研究体制

- (1) 底質制御技術の開発(東北大学大学院)
- (2) 底質形成機構(水の流動と底質の有機物含有率の関係)のモデリング(東北大学大学院)
- (3) 底質環境の長期連続モニタリングおよび底質環境形成機構の解析(東北大学大学院)

研究協力機関

立命館大学理工学部

研究概要

1. はじめに（研究背景等）

閉鎖性水域の富栄養化は水環境問題の中でも最も深刻である。わが国の湖沼の環境基準達成率はこの半世紀50%程度で推移しており、これまでの様々な富栄養化対策は悪化を防ぐ効果はもたらしたものの、改善に向けてさらなる対策が必要である。また、富栄養化は世界に共通する課題であり、中国など経済発展の著しい諸外国ではアオコ発生による利水障害が恒常化するなど問題が深刻化している。さらに、地球温暖化は富栄養化を加速度的に進行させることが予測されており、富栄養化対策の強化に向けた研究開発が必要とされている。

富栄養化は利水障害のみならず生物多様性を危機的状況に陥れている。特に富栄養化しやすい特性を有している浅い閉鎖性水域では、底質有機汚濁化、巻き上げによる水質汚濁が著しく、沈水植物や二枚貝類等底生動物の消滅をもたらしている。

研究代表者らが自然再生に取り組む伊豆沼・内沼も富栄養化によって水質ワーストラランキングの上位に位置する湖沼であり、かつての泳げる・飲める水質を維持していた面影はない。また、冬鳥の渡来地として世界的にも極めて価値の高い自然環境を有し、飛来数は過去最高を記録しているものの、沈水植物は絶滅の危機に瀕し、かつて多数存在したイシガイ・ドブガイ等二枚貝類は激減し、性成熟に達していない幼貝は殆どみつからない状況にある。

ところで、富栄養化研究の中で水質汚濁に関する研究が充実している一方、底質汚濁に関する研究は不十分である。底泥からの栄養塩溶出モデルなど優れた研究がなされてきてはいるが、富栄養化モデルに対するサブモデルとしての位置づけにあり、底質汚濁の現象把握・機構解明に関する研究の余地は大きい。

特に、底質の有機汚濁化には流動（波・流れ）が密接に関わり、流動制御が底質の改善を通じて水質改善、生物多様性の改善というインパクト・レスポンスをもたらす可能性は高いものの、波・流れ共存場における巻き上げに関する研究は研究分担者である梅田らの霞ヶ浦における現地調査研究などに限られ、巻き上げと沈降のバランスの結果である底質形成に対して流動がどのように関わっているのかに関する知見はほとんどない。すなわち浅い閉鎖性水域の底質環境形成機構の解明とそれに基づく新たな底質制御技術の開発（導水による流動強化・底質改善、水位低下による流動強化・底質改善、垂直護岸の緩傾斜化による流動強化・底質改善など）を行っていく必要がある。

2. 研究開発目的

本研究の目的は、浅い閉鎖性水域の底質制御技術の確立にある。このため、水域の流動が底質を支配するという仮説を立てて、浅い閉鎖性水域の砂地、泥地、沈水植物生育場、浮葉植物生育場など底質環境特性の異なる場を選定し、流動と水質・底質・底生生物のモニタリングを行い、それらの関係

を解析して統計モデルを構築する。また、流動場を三次元 $k-\epsilon$ モデルで計算し、乱流パラメータと底質の有機物含有率の関係を定式化し、底質の有機物含有率の予測可能なモデルを構築する。そして、導水、水位低下、垂直護岸の緩傾斜化、浮葉植物の刈り取りなどによる流動の変化がもたらす底質改善効果を予測し、実験的に検証する。

3. 研究開発の方法

(1) 底質制御技術の開発

浅い閉鎖性水域の底質制御技術の開発に向けて、以下の3つの底質制御に関わる項目について研究を行った。

1) 底質制御のためのインパクト・レスポンスモデルの構築

高等植物の維持管理には適切な知識および技術が必要であるが、水界において長期の生物分解により高等植物がどの程度まで分解するのか不明なところが多い。そこで、高等植物起源の有機物の水質および底質に及ぼす影響を検討するために、伊豆沼において優占化しているハスの分解実験を行った。次に閉鎖性水域において底質形成に影響を及ぼすと考えられる様々な人為的インパクトを整理し、動的平衡メカニズムに照らし合わせてインパクト・レスポンスモデルとしてまとめた。そして、浚渫や覆砂、および本研究で検討した人工洪水などの底質制御技術の有用性について定性的な評価を行った。

2) 湖岸の緩傾斜化による底質有機炭素含有率の制御の可能性の検討

ここでは、サブテーマ3において把握された緩傾斜湖岸における振動流の発生、それによる流速超過確率の上昇について理論的に確認し、湖岸の緩傾斜化の底質制御技術としての有用性を評価するために、湖岸において風によって生じる底質の輸送現象に着目し、モデル化、現象の解明を試みた。

3) 強風時の巻き上げ現象を利用した人工洪水による底質有機炭素の洗い出し効果の評価

ここでは、サブテーマ2において構築した底質巻き上げ現象のシミュレーションモデルを活用し、伊豆沼を対象として強風時に発生する巻き上げ現象の程度と年間発生回数を計算した。その結果をふまえて、巻き上げ発生時に人工洪水を起こし、懸濁する粒子中の難分解性有機炭素の排出量を計算した。

一方、高等植物の生産する難分解性粒子態有機物に関して、ハスの分解実験の結果を利用して伊豆沼における1年間の発生量を推定した。そして、人工洪水による難分解性粒子態有機炭素の排出量と比較し、人工洪水による底質制御効果の評価を行った。

(2) 底質形成機構（水の流動と底質の有機物含有率の関係）のモデリング

本サブテーマでは、宮城県内に位置する富栄養化した浅い湖沼である伊豆沼における底質と水の濁りに関する現地観測を2010年および2011年に行い、強風イベント時の濁度変化を整理した。また、水理学的な解析に基づく底質巻き上げモデルを用いた数値計算を行い、その結果について現地観測結果と比較検討した。

(3) 底質環境の長期連続モニタリングおよび底質環境形成機構の解析

1) 水の流動と底質の有機炭素含有率の関係解析

伊豆沼の5地点でモニタリング調査を行った。Stn. Aは河川流入部、Stn. Bは北岸で人工護岸近傍、Stn. Cは南岸に位置し、自然護岸近傍で岸辺にはマコモの植生がみられる。また、Stn. 1は最西端でヨシに囲まれた地点、Stn. 6は植生が見られる人工護岸近傍で湖心方向には多くのハスが見られる地点である。この5地点について、2010年12月から2011年12月まで計9回、表層堆積土0~1 cmについて柱状採泥器を用いてサンプリングし、元素分析装置により有機炭素含有率を測定し、底質中の有機物指標として解析に用いた。また、2010年12月と2011年9月に、同観測地点の堆積物表層から直上5 cmの位置に電磁流速計を設置し、流速・流向を1ヶ月ずつ連続測定した。

さらに、2011年12月5日から12月21日まで、Stn. C近傍で岸沖方向に6つ観測地点を設け、底質有機炭素含有率と流速・流向をそれぞれ観測した。岸から2 mの地点をC-1(水深: 0.34 m)とし、湖心方向に向かって6mずつ距離を置き、C-2, C-3, C-4, C-5, C-6(水深: 0.76 m)とした。

2) 脂肪酸と安定同位体比を用いた底質有機炭素の起源解析

2011年6月29と7月5日に伊豆沼の12地点から底質を採集した。7地点は沿岸域であり、残りの5地点は湖心部である。測定項目は、有機炭素含有率、炭素・窒素安定同位体比、脂肪酸組成そして脂肪酸の炭素安定同位体比を分析した。さらに底質の有機物起源として想定されるハスの葉、ヨシ、ヒシを採集し、脂肪酸組成および炭素・窒素安定同位体比を測定した。

4. 結果及び考察

(1) 底質制御技術の開発

1) 底質制御のためのインパクト・レスポンスモデルの構築

水生植物ハスを細かく裁断し、フリーズドライ処理を行って分解実験に供した結果、60日間で有機物濃度はほぼ定常状態に達した。この期間内に分解された有機物を易分解性の粒子態有機炭素(POC)および溶存態有機炭素(DOC), および残存した有機物を難分解性POCおよびDOCとして有機物収支を計算した結果を図1に示す。有機物の分解が進みやすい好気条件下の粉末ハス系においても約55%のPOCおよび約5%のDOCが残存することがわかり、これらが底質および水中に難分解性有機物として影響を及ぼすことが推定された。したがって、底質および水質の有機汚濁の改善をはかるためには、水環境中での高等植物の分解を管理する必要性が示唆された。

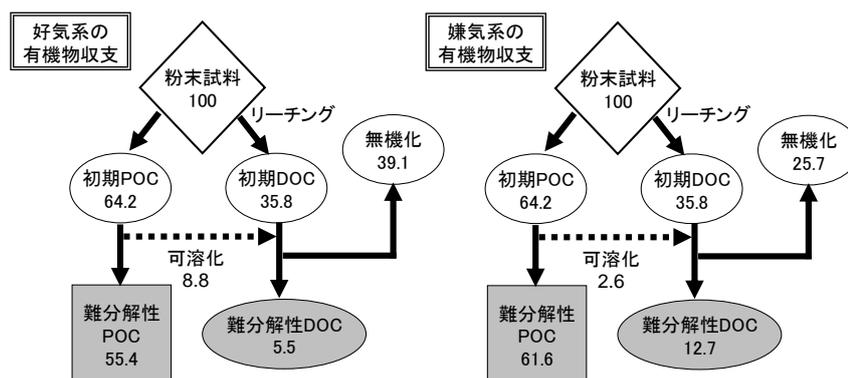


図1 粉末ハス系における好気系(左)および嫌気系(右)の有機物収支
(数値は粉末ハス試料のPOCを100とした場合の割合)

2) 湖岸の緩傾斜化による底質有機炭素含有率の制御の可能性の検討

傾斜護岸を含む領域の風の速度ベクトルおよび水流の流線を図2に示す。風は、領域左側から流入して全体的に右側に進む。水面付近に着目すると、水面上に発達する速度境界層を確認できる。傾斜護岸上部には、水面上に時計回りに回転する渦構造を確認できる。それに伴い、周囲の風は渦を乗り越えるように蛇行している。液相に着目すると、全体としては、表層部が風に駆動されて左から右に流れている。この流れは、護岸手前で深さ方向に方向を変え、底部付近を右から左に戻る流れを形成している。これらの流れに挟まれた深度付近では、時計回りに回転する渦構造を複数確認できる。これらの渦構造の存在により、湖底部を還流する流れは上下に蛇行している。また、傾斜護岸上、先に述べた水面上に存在する気流の渦構造の直下の水中には、水深程度のスケールを持つ渦構造が分布している。

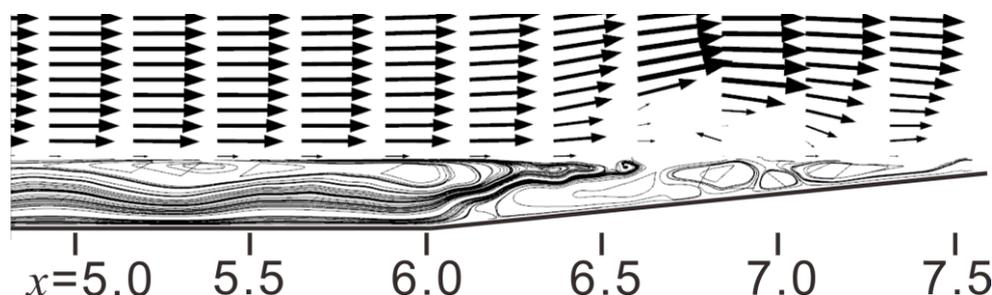


図2 護岸付近における風速ベクトルおよび吹送流の流線

図3に風速 $V = 6.0 \text{ m/s}$ における底質の濃度分布の経時変化を示す。時刻は $t = 10.0 \text{ s}$ から 40.0 s までの代表4時刻である。場所は、 $2 < x < 4$, $-0.2 < y < 0.0$ の領域を拡大して示している。図の下面は水底部、上面は初期の水面位置に相当する。図中の白い部分は底質濃度が濃い領域、黒い部分は薄い領域である。 $t = 10.0 \text{ s}$ では、底質はほぼ初期位置から動いておらず、水底部に集中して存在している。ただし $x = 2.2 \text{ m}$, $x = 3.8 \text{ m}$ 付近には、やや盛り上がった領域をわずかに確認できる。 $t = 20.0$

sでは、底質が水面方向に向けて上昇する様子が複数個所で見受けられる。特に、 $x = 3.3$ m付近には高濃度部分の水面方向への顕著な上昇が確認できる。これは、局所的な底質の巻き上げ現象であると考えられる。 $t = 30$ sでは、複数個所で上昇した底質が、さらに水平方向に移動する様子が分かる。これは、巻き上げられた底質が、水流に乗って水平方向に流された結果と考えられる。 $t = 40.0$ sでは、この現象はさらに顕著になり、一部の底質は水面付近にまで到達している。また、 $x = 3.0$ m付近では、初期に配置された底質のほとんどが流失している。

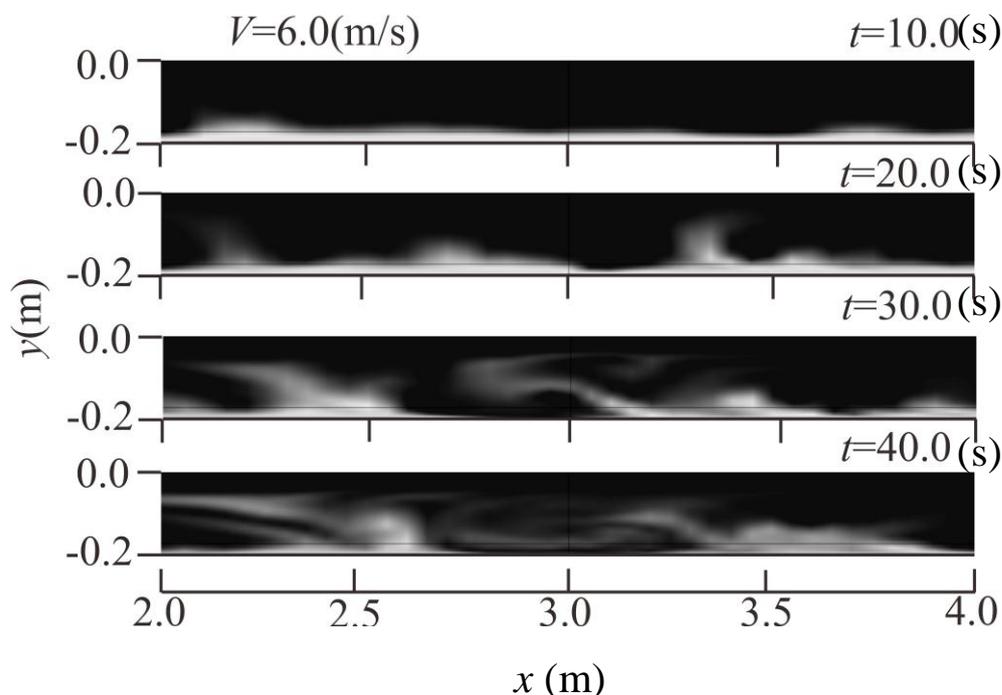


図3 底質濃度分布の時間変化

3) 強風時の巻き上げ現象を利用した人工洪水による底質有機炭素の洗い出し効果の評価

ここでは、本実験結果を踏まえ伊豆沼におけるハスによる難分解性有機物の年間生産量を推定した。伊豆沼の湖水面積 2.87 km²、ハスの被覆率 50% (2008年)、ハスの単位面積あたりの乾燥重量 250 g/m² (鈴木ら, 2010年)とすると、伊豆沼で残存する難分解性有機炭素量は 86 tonと試算された。

さらに年間の底質中難分解性有機物の流去という観点から人工洪水の効果を検証してみた。水位 5 cm低下に相当する洪水の放流量は 14.5 千 ton, 巻き上げ時の浮遊物質(SS)濃度を 50 mg/Lとすると、1回の人工洪水によるSSの排出量は 7 tonとなり、難分解性有機物の排出量は 0.7 tonと試算される。年間10回の人工洪水を起こすと 7 ton, 前述の 86 tonからすると1割以下となり、人工洪水の底質中難分解性有機物の流去に対する効果は限定的であることがわかったことから、すなわち現在の伊豆沼においてはハスの過繁茂対策による底質の有機汚濁化の防止が必須であることがわかった。

(2) 底質形成機構(水の流動と底質の有機物含有率の関係)のモデリング

現地観測の結果からは、おおむね風速 5 m/s以上になると、巻き上げりが生じていることが分かった。ただし、巻き上げの強度に関しては、風速のみならず、風向への依存性も高いと考えられる結果であった(図4)。その理由として考えられるのは、東西方向に長いという伊豆沼の湖形状が影響して、風向により吹送距離が変化する影響であった。実際、波高や流速の変化は、単なる風速の増減には対応していなかった。これに対し、吹送距離を考慮することで、流速変動量をうまく説明することができた。

さらに、本研究対象と同様に浅く富栄養化した湖沼である霞ヶ浦における既往の研究で用いられた底質巻き上げモデルにより、濁度の経時変化を計算した(図5)。ただし、現地観測結果に対する分析結果を用いて、水面における境界条件の改良を施した。すなわち、風速および吹送距離を考慮して、水面での摩擦速度や乱流パラメータの設定をした。その結果、風による底質の巻き上げを高い精度で再現することができた。

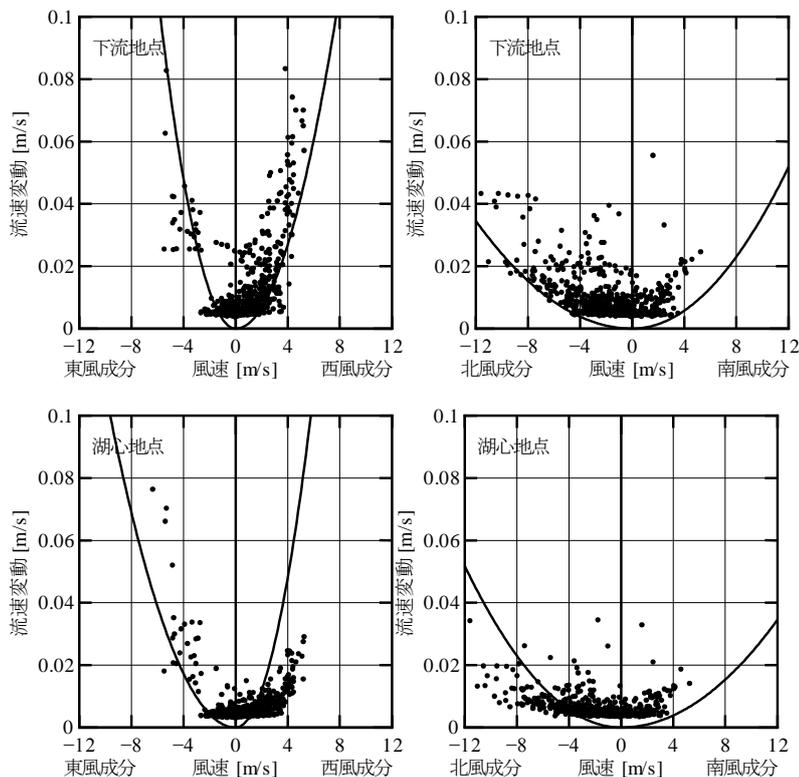


図4 風速と流速変動の地点別、方位別の関係

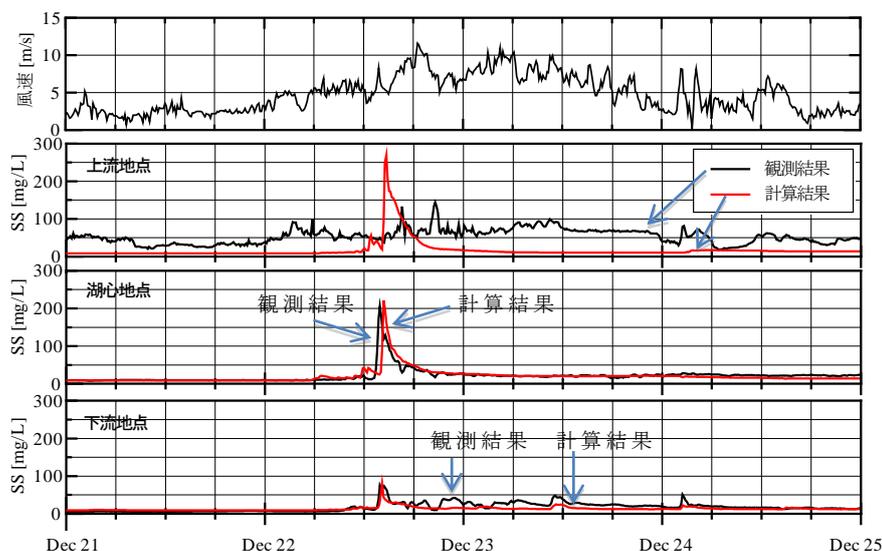


図5 計測地点に対応するSSの計算結果および風速

(3) 底質環境の長期連続モニタリングおよび底質環境形成機構の解析

1) 水の流動と底質の有機炭素含有率の関係解析

有機炭素含有率と平均流速との間に有意な相関はみられなかった。そこで、10分ごとに1秒間隔で30個観測した流速データのうち、流速が10 cm/sを超えるデータ数を全データ数で割ることで得られる流速超過確率を導入した。図6に底質の有機炭素含有率と流速超過確率の関係を示す。これは干潟域における既往研究のデータも含むものであるが、湖沼においてもおおむね流速超過確率が高いところでは有機炭素含有率が低く、超過確率が低いところでは有機炭素含有率が高い傾向があることが示唆できた。また、この結果から流速超過確率を0.01程度以上に保つことで泥化が防止できることが明らかとなった。流速超過確率で表現できたのは平均流速が平均の流れの速さを示すのに対し、流速超過確率

は瞬間的な流れの速さを示し、巻き上げ、沈降の両方に対応した指標となり得るためと考えられる。今後さらにデータを増やして検証を行っていく必要があるが、流動を表す指標として流速超過確率を用いることが有望である。

次に自然護岸近傍の岸沖方向における現地観測の結果について、伊豆沼のStn. C近傍の岸沖方向6地点における流速超過確率を図7に示す。岸に近いほど流速超過確率は大きくなっており、そのメカニズムはサブテーマ1において解析した通りである。すなわち岸辺を緩傾斜化することによって沿岸部の流動を強化でき、底質の有機炭素含有率の制御が可能なが示された。

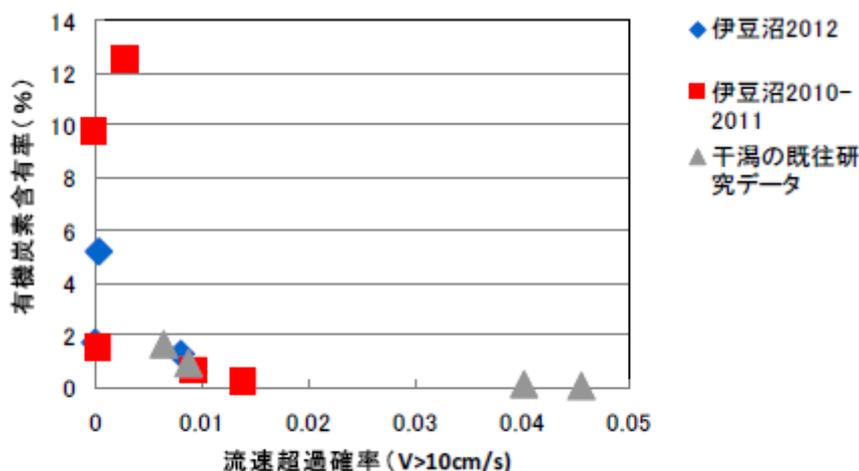


図6 底質の有機炭素含有率と流速超過確率の関係

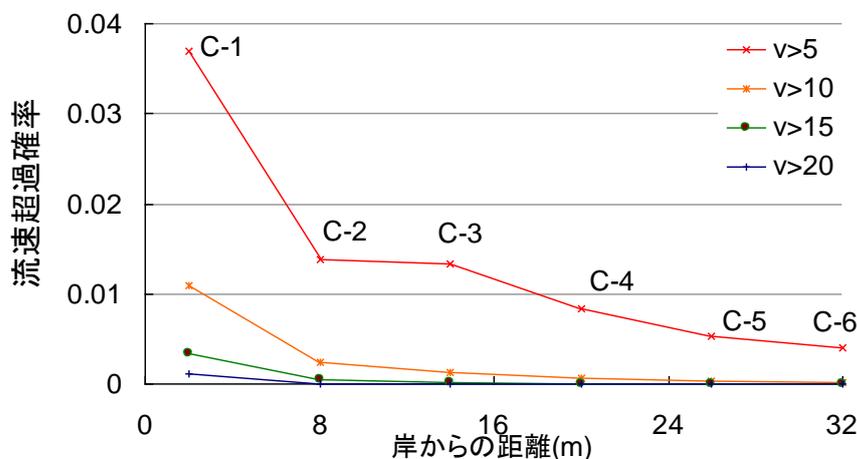


図7 Stn. C近傍における岸からの距離と流速超過確率との関係

2) 脂肪酸と安定同位体比を用いた底質有機炭素の起源解析

各底質サンプルにおける有機炭素含有率に対する、高等植物由来脂肪酸および微細藻類由来脂肪酸の含有量 (mg/g) の関係を図8, 9に示した。なお、ここでは珪藻および渦鞭毛藻類由来の合計を微細藻類由来の脂肪酸として用いている。図9に示すように底質に含まれる微細藻類由来の脂肪酸と有機炭素含有率との間には有意な関係性は見られなかった。しかし、図8に示すように高等植物においては有意な正の相関が検出された。このことは、有機物が蓄積している底質ほど高等植物由来の脂肪酸が多く含まれていることを示しており、底質の有機汚濁には高等植物が関与していることが明らかとなった。すなわち、高等植物起源の有機物が生物分解を受け、それによっても分解されないLCFA(長鎖脂肪酸)などの粒子態有機物が蓄積し、底質の有機炭素含有率の上昇を引き起こしていることが示唆された。

なお、富栄養化の著しい中国太湖においても同様の結果を確認しており、太湖において生産者として卓越している植物プランクトン起源の有機物は、高等植物起源有機物に比べて速やかに分解し、質の有機汚濁化への影響は小さいことが示唆されている。

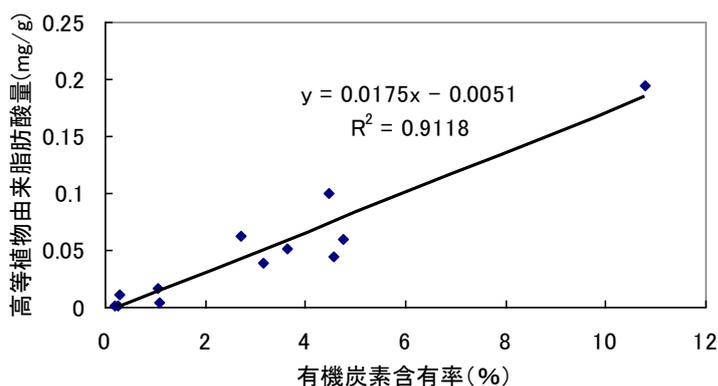


図8 底質有機炭素含有率と高等植物由来脂肪酸含有量の関係

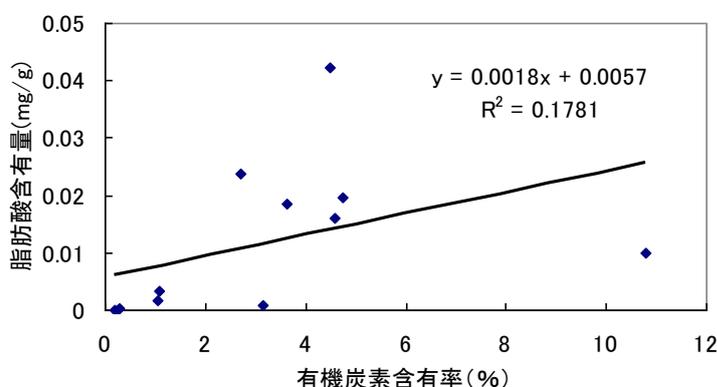


図9 底質有機炭素含有率と微細藻類由来脂肪酸含有量の関係

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

本研究では、底質に堆積する有機物を制御するには底質形成機構を的確に理解し、それをふまえて適切なインパクトを底質に与え、レスポンスとして望ましい底質の状態を引き出す必要があると考え、サブテーマ2、3において浅い閉鎖性水域の底質のモニタリング、モデリングを行い、これらの結果をふまえて、サブテーマ1においては底質制御のためのインパクト・レスポンスモデルを構築し、底質制御のためのインパクトの与え方についてまとめた。

本研究において得られた成果の科学的意義を以下にまとめる。

- ・ 浅い閉鎖性水域の底質に堆積する有機物の起源は高等植物であり、難分解性の粒子態有機物として堆積していることがわかった。これまで閉鎖性水域の底質汚濁機構としては、富栄養化による一次生産の増大が原因とされてきたが、本研究では一次生産者の中でも高等植物が起源であり、富栄養化によりアオコの発生が著しい湖沼においてもこの現象が確認されたことから、底質の有機汚濁化に普遍的な知見と考えられる。これは、底質に堆積する有機物の制御を考える上できわめて有用な科学的知見である。
- ・ 上記の有機物起源解析に用いた脂肪酸分析は、有機物の安定同位体比から起源を解析していた従来手法に比較して、特定の脂肪酸をバイオマーカーに用いることで起源をより詳細に解析でき、精度を高めることが可能である。さらに本分析においてはバルクではなくバイオマーカー脂肪酸の炭素同位体比を分析し、太湖底質中には検出されない（少ない）藍藻をバクテリアが主に分解していることが明らかになった。このような底質起源解析手法は世界的にも例が少なく、新規性の高い知見である。本手法は底質研究の基盤技術として今後の活用が期待される。
- ・ 底質（有機炭素含有率）と流動（流速超過確率）の関係をモデル化し、流速超過確率は底質を推定するために有用なパラメータであることがわかった。また、流速超過確率を0.01程度以上に保つことで、底質の泥化を防止することができることが示された。この知見は、坂巻・西村が発表して

いた干潟における底質と流動の関係モデルを発展させたモデルであり、底質環境形成機構を理解する上できわめて有用である。

- ・ 緩傾斜の湖岸では岸沖方向に振動流が発生しやすく、それが底質の有機汚濁化を防ぐことがモニタリング調査により明らかになり、数値モデルによってその機構を考察することができた。この知見は新規性が高いとともに、今後の湖岸形状のデザインを考慮する上で有用な知見である。
- ・ 風速および吹送距離を考慮して、水面での摩擦速度や乱流パラメータの設定を行い、風による底質の巻き上げを高い精度で再現する数値モデルを開発した。このモデルを用いて強風時の巻き上げを利用して人工洪水により底質中有機物を系外排除する効果を見積もり、実現可能と考えられる規模の人工洪水によって排出できる底質中の難分解性粒子態有機物は、現在の伊豆沼で高等植物が1年間に生産する難分解性粒子態有機物の1%程度であり、ハスが湖面の50%を被覆するほどに繁茂する現在の伊豆沼においては、ハスを含む高等植物を適正に管理することが底質の泥化を防ぐために必須であることが示された。底質の主な有機物起源である難分解性粒子態有機物（主に高等植物の分解残さ）の収支を解析する試みは本研究が初めてであり、浅い閉鎖性水域の底質環境健全化を図る上できわめて重要な知見である。

（2）環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

本研究の成果は、現在実施中である伊豆沼・内沼自然再生事業（研究代表者が自然再生協議会会長をつとめる）に対して順応的管理を行うための科学的知見として提供している。ハスの管理方策の策定、底質改善方策の策定など今後の事業推進において活用する予定である。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

流速（10cm/sec）超過確率を0.01程度以上に保つことで底質の有機汚濁化が防止できることが明らかとなった。本モデルは経験モデルであるためさらにデータを集めて信頼性を高める必要があるが、本知見を環境アセスメント手法やミティゲーション効果の予測に活用していく必要がある。

具体的には流動を制御して底質を変化させる手法として湖岸の緩傾斜化が提案できる。すなわち生物・生態系に配慮した湖岸のデザイン手法の確立へとつなげていく必要がある。

一方、高等植物起源の底質に堆積する有機物は難分解性であるため、蓄積する一方である。これを制御するためには有機物の系外排除が行われる必要があり、イベント的な人工洪水の発生や周囲を遊水池とした氾濫による洗い出しが必要である。しかし、このような物理的な系外排除ができない場合、適切な高等植物の管理が必要であり、水生植物の再生等に当たっては底質の有機汚濁化を招かないように環境配慮が必要である。

6. 研究成果の主な発表状況

（1）主な誌上発表

＜査読付き論文＞

1) 長濱祐美, 中山 亮, Woo-Seok Shin, 藤林 恵, 野村宗弘, 西村 修: 環境工学研究論文集, 48, III_117-III_122 (2011).

「海草コアマモ場と近傍裸地における底質有機物の起源」

2) 梅田 信, 別当雄亮, 進東健太郎: 土木学会論文集A2(応用力学), 67(2), I_615-I_623 (2011).

「伊豆沼における底質の巻き上げと湖面風の関連」

3) 藤林 恵, 野村宗弘, 許暁光, 李 先寧, 相川良雄, 西村 修: 土木学会論文集(環境工学研究論文集), 49, III_493-III_498 (2012).

「炭素・窒素安定同位体比を指標とした太湖底質有機物動態の解析」

（2）主な口頭発表（学会等）

1) 中山 亮, 長濱祐美, 武地修一, 野村宗弘, 西村 修: 平成22年度土木学会東北支部技術研究発表会 (2011)

「コアマモ場における懸濁態有機物の輸送解析」

2) 野村宗弘, 中山 亮, 長濱祐美, 武地修一, 西村 修: 土木学会第66回年次学術講演会 (2011)
「コアマモ生育場における懸濁態有機物の輸送解析」

3) 中山 亮, 野村宗弘, 長濱祐美, 武地修一, 西村 修: 第48回環境工学研究フォーラム (2011)
「コアマモ群落における懸濁態有機炭素の挙動解析」

4) 鄧 輝, 野村宗弘, 藤林 恵, 佐々木久雄, 千葉信男, 西村 修: 第6回伊豆沼・内沼研究集会

(2011)

「伊豆沼における底質の長期連続モニタリングおよび底質形成機構の解析」

5) 鄧 輝, 野村宗弘, 藤林 恵, 佐々木久雄, 千葉信男, 西村 修, 李 先寧: 第46回日本水環境学会年会 (2011)

「水理環境と起源解析から見る伊豆沼の底質形成機構解析」

6) 別当雄亮, 梅田 信: 平成22年度東北地域災害科学研究集会 (2011)

「伊豆沼における湖面風と底質の巻き上げについて」

7) 別当雄亮, 梅田 信: 平成22年度土木学会東北支部技術研究発表会 (2011)

「伊豆沼における底質の挙動に関する研究」

8) 梅田 信, 別当雄亮, 進東健太郎: 土木学会応用力学講演会 (2011)

「伊豆沼における底質の巻き上げと湖面風の関連」

9) 金田一航, 野村宗弘, 中山 亮, 丸尾知佳子, 千葉信男, 西村 修: 平成23年度土木学会東北支部技術研究発表会 (2012)

「伊豆沼の沿岸部における底質と流動の関係」

10) 中山 亮, 野村宗弘, 長濱祐美, 丸尾知佳子, 西村 修: 日本沿岸域学会第25回研究討論会 (2012)

「海草群落における懸濁態有機炭素の挙動解析」

11) 梅田 信, 別当雄亮, 進東健太郎: 第6回伊豆沼・内沼研究集会 (2012)

「伊豆沼における底質の巻き上げと湖面風の関連」

12) 仲田信也, 梅田 信, 嶋田哲郎: 平成24年度東北地域災害科学研究集会 (2012)

「伊豆沼における底質組成の空間分布」

13) 千葉高之, 野村宗弘, 藤林 恵, 丸尾知佳子, 西村 修: 平成24年度土木学会東北支部技術研究発表会 (2013)

「閉鎖性水域における水生植物由来有機物の室内実験による分解特性解析」

14) 仲田信也, 梅田 信, 嶋田哲郎: 平成24年度土木学会東北支部技術研究発表会 (2013)

「伊豆沼における底質組成の空間分布と形成モデリング」

15) 中山 亮, 野村宗弘, 丸尾知佳子, 西村 修: 第47回日本水環境学会年会 (2013)

「現地観測に基づくコアマモ場における有機物輸送解析」

16) 許 暁光, 藤林 恵, 野村宗弘, 西村 修, 李 先寧: 第47回日本水環境学会年会 (2013)

「Investigating the sources of sedimentary organic matter in hypereutrophic Lake Taihu (China) by using stable isotope ratio and fatty acid biomarkers」

7. 研究者略歴

課題代表者: 西村 修

東北大学工学部卒業, 工学博士, 現在, 東北大学大学院工学研究科教授

研究参画者

(1): 西村 修 (同上)

(2): 梅田 信

東京工業大学卒業, 現在, 東北大学大学院工学研究科准教授

(3): 野村宗弘

東北大学工学部卒業, 現在, 東北大学大学院工学研究科助教

B-1004 浅い閉鎖性水域の底質環境形成機構の解析と底質制御技術の開発**(1) 底質制御技術の開発**

東北大学大学院工学研究科
東北大学大学院工学研究科
東北大学大学院工学研究科
<研究協力者>
立命館大学理工学部

西村 修
梅田 信
野村 宗弘

吉岡 修也

平成22～24年度累計予算額：32,989千円

(うち、平成24年度予算額：8,909千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

底質に堆積する有機物を制御するには、底質形成機構を的確に理解し、それをふまえて適切なインパクトを底質に与え、レスポンスとして望ましい底質の状態を引き出すことが重要である。そこで本研究では、サブテーマ2、3において閉鎖性水域の底質のモニタリング、モデリングを行い、底質に堆積する有機物の起源は高等植物の分解生成物(難分解性有機物)であること、および流動と底質有機炭素含有率には密接な関わりがあることを明らかにした。このことをふまえて、サブテーマ1においては、(1)底質制御のためのインパクト・レスポンスモデルを構築し、また、高等植物の分解によって生じる難分解性の有機物の実験的評価を行い、底質制御のためのインパクトの与え方についてまとめた。次に、(2)緩傾斜湖岸により流動が強化されるメカニズムを数値実験によって解析し、有機炭素含有率を低下させる技術としての可能性を検討した。最後に(3)強風時に生じる巻き上げ現象を利用して、人工洪水により底質に堆積する有機物を洗い出す効果について、巻き上げの数値実験結果等を用いて解析した。

その結果、(1)有機炭素含有率上昇の原因は、主として流動の弱化(閉鎖性の強化)にあるため、流動を弱化させるインパクトについては適切にアセスメントを行い、影響を緩和する必要があること、一方で流動を強化するインパクトを適切に与えて積極的に環境再生を図る必要があることをまとめた。(2)湖岸で発生する渦の空間スケールは垂直に比して緩傾斜の場合に、より沖まで影響範囲が拡大し、振動流が発達することが数値モデルによって再現できたことから、湖岸の底質制御技術として緩傾斜化が有用であることが明らかとなった。(3)伊豆沼を対象として数値実験を行い、可能と考えられる規模の人工洪水によって排出できる底質中の難分解性粒子状有機物は高等植物の生産する難分解性粒子状有機物の1%程度であり、ハスが湖面の50%を被覆するほどに繁茂する現在の伊豆沼においては、ハスを含む高等植物を管理することが底質の泥化を防ぐために必須であることが示された。

[キーワード]

閉鎖性水域、底質制御、植生管理、緩傾斜湖岸、人工洪水

1. はじめに

わが国の湖沼の環境基準達成率はこの半世紀50%程度で推移しており、これまでの様々な富栄養化対策は悪化を防ぐ効果はもたらしたものの、改善に向けてさらなる対策が必要である。また、富栄養化は世界に共通する課題であり、さらに地球温暖化は富栄養化を加速度的に進行させることが予測されており、富栄養化対策の強化に向けた研究開発が必要とされている。

富栄養化研究の中で水質汚濁に関する研究が充実している一方で、底質汚濁の現象把握・機構解明に関する研究は不十分である。このことが底質制御技術の開発が不十分である理由と考える。すなわち底質制御技術として代表的な浚渫や覆砂は、対症的に泥化した底質を砂化させることはできるが、効果の持続性には大きな疑問がもたれていることも事実である。また、シードバンク(土壌中に含まれる発芽能を持った埋土種子)としての底質の機能を損なうため、この面からの注意も必要である。

底質に堆積する有機物を持続的に制御するには、底質形成機構を的確に理解し、それをふまえて対症的ではなく原因療法的に適切な(最小限の)インパクトを底質に与え、レスポンスとして望ましい底質の状態を引き出すことが重要である。そこで本研究では、サブテーマ2、3において閉鎖性水域の底質のモニタリング、モデリングを行い、底質に堆積する有機物の起源は高等植物の分解生成物(難分解性有機物)であること、および流動と底質有機炭素含有率には密接な関わりがあることを明らかにした。このような底質形成機構をふまえて、サブテーマ1においては、(1)底質制御のためのインパクト・レスポンスモデルを構築し、水生植物の管理の必要性をまとめた。また、(2)湖岸の緩傾斜化により流動を強化し、有機炭素含有率を低下させる技術の機構について解析した。さらに(3)強風時に生じる底質巻き上げ現象を利用して、人工洪水による底質堆積有機物の洗い出し効果を解析した。

2. 研究開発目的

本研究の目的は、浅い閉鎖性水域の底質制御技術の開発にある。このため、以下の3つの底質制御に関わる項目について研究を行った。

- (1)底質制御のためのインパクト・レスポンスモデルの構築
- (2)湖岸の緩傾斜化による底質有機炭素含有率の制御の可能性の検討
- (3)強風時の巻き上げ現象を利用した人工洪水による底質中の難分解性粒子状有機炭素の洗い出し効果の評価

(1)では、底質形成機構の的確な理解が底質制御を行っていくうえで必要不可欠であるという考え方で、サブテーマ2、サブテーマ3の結果をふまえ、さらに高等植物ハスの長期分解実験を行って自然の底質制御機構の理解を深め、それをもとに底質制御のためのインパクト・レスポンスモデルで構築した。(2)では、サブテーマ3で緩傾斜湖岸において振動流が発生し、流速超過確率が上昇することで底質の有機炭素含有率が低下した現象をふまえ、その機構を数値モデルによって解析し、湖岸の緩傾斜化の有用性について検討した。(3)では、サブテーマ2でモデリングした水の流動による巻き上げ現象をふまえ、伊豆沼を対象として強風時の巻き上げによる人工洪水を発生させて排出できる底質中の難分解性粒子状有機物を計算し、高等植物の生産する難分解性粒子状有機物と比較してその効果を考察した。

3. 研究開発方法

(1) 底質制御のためのインパクト・レスポンスモデルの構築

1) 高等植物の分解実験

サブテーマ3より、底質堆積有機物の起源は主に高等植物であることが明らかになった。

水環境に生育する高等植物は栄養塩を吸収し、様々な生物のハビタット(すみか)になるなど環境に対して多面的な機能を提供する一方で、リター(落葉落枝)が底質に堆積し分解を受けることによる底質近傍の低酸素化および嫌気化、ならびに溶存態有機物やリン、窒素などの溶出による有機汚濁・富栄養化をもたらす可能性がある。このため高等植物の維持管理には適切な知識および技術が必要であるが、水界において長期の生物分解により高等植物がどの程度まで分解するのか不明なところが多い。そこで、高等植物起源の有機物の水質および底質に及ぼす影響を検討するために、伊豆沼において優占化しているハスの分解実験を行った。

a. 実験方法

実験に用いる高等植物ハス *Nelumbo nucifera* と湖水を2012年9月25日に伊豆沼において採集した。微生物の分解を促進するために、ハスを凍結乾燥し、ミルミキサーにより粉末化後ふるいにかけて粒径を500 μm 以下にした粉末ハス試料と、凍結乾燥せず約2 mm四方の立方体に刻んだ粒状ハス試料を用意した。以降、粉末ハス試料を用いた系を粉末ハス系、粒状ハス試料を用いた系を粒状ハス系とする。湖水はWhatmanガラス繊維ろ紙GF/B(孔径1 μm)にて吸引ろ過し1 μm 以上の有機物および細菌を捕食する原生動物を除いた。粉末ハス系は粉末ハス試料1 g-dryを、粒状ハス系は粒状ハス試料6 g-wetをそれぞれ100 mL三角フラスコに入れた後、湖水50 mLを入れ、好気分解系は好気培養用シリコン栓を、嫌気分解系は脱気後密栓をして条件を保った。

フラスコは20 $^{\circ}\text{C}$ で暗条件の恒温室に保管し、好気分解系は回転数100 rpmのシェイカーで攪拌することで、嫌気分解系は静置することでそれぞれの酸素条件を満たした。フラスコ内の溶存酸素は非接触・非破壊酸素濃度計Fibox3(TAITEC)を用いることで測定し、酸素条件が所定に制御されていることを確認した。

b. 分析方法

分析項目はフラスコ内の粒子態有機炭素(Particulate Organic Carbon: 以下, POC), 脂肪酸量, および溶存態有機炭素(Dissolved Organic Carbon: 以下, DOC)である。粉末ハス系は実験開始から0, 4, 7, 14, 32, 60日, 粒状ハス系は0, 60日経過したフラスコの中身を、質量を測定しておいたガラス繊維ろ紙GF/Bにて吸引ろ過した。そして残渣は凍結乾燥処理し質量を測った後に、ろ液は孔径0.45 μm のメンブレンフィルターでろ過を行った後に、分析を行うまで冷凍保存した。POCおよびDOCは残渣およびろ液の一部を用いて全有機炭素計TOC-L(SHIMAZU)にて分析し、また、脂肪酸量は既往の研究と同様の方法¹⁾を用いて残渣の一部から脂肪酸を抽出した後ガスクロマトグラフィー(GC17A, GC SHIMAZU)にて分析し、それぞれフラスコ内の全量として算出した。

2) インパクト・レスポンスモデル

まず、自然状態において底質が動的平衡性²⁾を保つメカニズムについて、既往研究および上記分解実験、およびサブテーマ2, 3の結果をふまえて考察した。

次に、閉鎖性水域において底質形成に影響を及ぼすと考えられる様々な人為的インパクトを整理し、動的平衡メカニズムに照らし合わせてインパクト・レスポンスモデルとしてまとめた。そして、浚渫や覆砂、および本研究で検討した人工洪水などの底質制御技術の有用性について定性

的な評価を行った。

(2) 緩傾斜化による底質有機炭素含有率の制御

本研究ではサブテーマ3において把握された緩傾斜湖岸における振動流の発生，それによる流速超過確率の上昇について理論的に確認し，湖岸の緩傾斜化の底質制御技術としての有用性を評価するために，湖岸において風によって生じる底質の輸送現象に着目し，モデル化，現象の解明を試みた。

一般的に，水底部の底質は，底層の水流により巻き上げられ，水流に乗って水域内を広く移動する³⁾。これら水域内に生じる水流は，水域への河川水の流入の他，上空の風によっても駆動される(吹送流)。しかし浅い閉鎖性水域では，自然風に起因して発生する水面における風波による攪乱が，巻き上げ現象に支配的と推察されている⁴⁾。この風による自由表面付近の乱流構造とスカラ輸送について，小林ら⁵⁾は気液2相流の3次元直接数値解析により検討し，スカラフラックスが高い領域は，液相側の乱れ強さが高い領域と一致し，この領域は風波の風下側に形成される事を明らかにした。Chambarelら⁶⁾は，砕波に対する風の影響を数値解析によって検討し，砕波の形状に及ぼす風の影響は，特に水深が浅い場合に大きいことを示した。しかし，上記の報告は気液界面付近における現象の考察に重きを置いており，湖底への影響や底質輸送に関する検討はされていない。稲垣ら⁷⁾は，南サンフランシスコ湾において，潮流・吹送流・風波を考慮できるモデルを作成し，湾内の土砂輸送機構を説明した。豊田ら⁸⁾は，同様のモデルを用い，諏訪湖の底質輸送現象を検討し，吹送距離が大きく水深が浅い水域にて鉛直方向への底質輸送現象である巻き上げが顕著に発生することを示した。しかし，上記の二例は，自然風の自由表面への入力計算領域上面の境界条件としてのみ与えられている。したがって，自由表面の変形や，それに伴う水流の発生は細かく検討されていない。以上より，これまでの関連する研究例では，気液界面を考慮した自然風と水流の関係，あるいは水流と底質輸送の関係が主に取り扱われている。一方で，自然風，吹送流，底質輸送の三者を同時に評価した例は少ない。そこで本研究では気液2相を含む流体運動，および底質輸送の支配方程式を同時に評価する数値解析を行うことで，自然風による底質の挙動の解明を試みた。テストケースは，湖岸を含む水域の2次元断面で，ここに沖合側から陸地側に風が吹く状態で，風，水流，底質輸送の関係について検討した。

本研究の数値解析は，微分方程式ソルバーCOMSOL Multiphysics⁹⁾を利用し，流体運動と物質輸送の連成問題として行った。

支配方程式は，流体運動に対しては表面張力および重力を考慮した2次元非圧縮性ナビエ・ストークス方程式および連続の式，底質輸送に対しては多化学種の物質移流拡散方程式とした。

流体運動

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{u})^T] + \rho\mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (1-1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1-2)$$

底質輸送

$$\begin{aligned}\rho_s \frac{\partial \omega_i}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j} + \rho_s (\mathbf{u} \cdot \nabla) \omega_i &= 0 \\ \mathbf{j} &= - \left(\rho_s D \nabla \omega_i + \rho_s D \frac{\nabla M_n}{M_n} \right) \\ M_n &= \left(\sum \frac{\omega_i}{M_i} \right)^{-1}\end{aligned}\quad (1-3)$$

気液界面は、フェーズフィールド法により再現した。これは、気相と液相の間に、2種類の流体の物性値が緩やかに変化する有限厚さのフェーズフィールドを配置する手法である。気液界面に生じる表面張力 F は、ナビエ・ストークス方程式の外力項として取り扱う。本計算では、COMSOL Multiphysics に実装されている気液界面取扱い手法をそのまま利用した。

まずベンチマークテストとして、本手法により、直方体岩礁を越える孤立波の伝播を計算した。計算領域と座標系を図(1)-1に示す。計算領域左側に一定水深の水域を、右側に岩礁を配置した。境界条件は、上空部分のみ対称境界条件、それ以外は滑りなし条件とした。初期気液界面の高さ η mは、Lubinらのテストケース¹⁰⁾を参考に以下とした。

$$\eta(x) = H \operatorname{sech}^2 \left(\sqrt{\frac{3H}{4d^3}} (x - x_0) \right) \quad (1-4)$$

ここで、初期速度分布 $u_0(x)$ 、 $v_0(x, y)$ はそれぞれ

$$\begin{aligned}u_0(x) &= \frac{\eta}{d} \sqrt{gd} \\ v_0(x, y) &= \frac{y}{d} \frac{1}{c} \frac{\partial \eta}{\partial t} \sqrt{gd}\end{aligned}\quad (1-5)$$

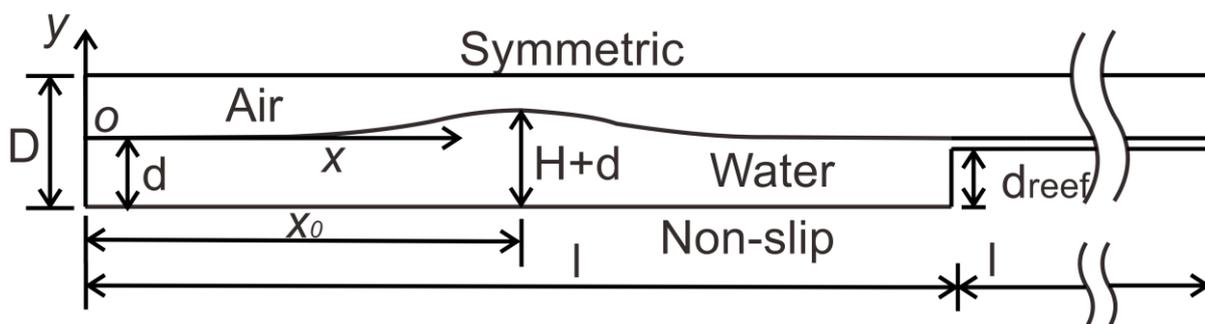
とした。なお、図(1)-1には、初期状態の水面を合わせて示す。岩礁は初期状態から水に覆われている。孤立波の初期条件および計算領域の詳細を表(1)-1に示す。本ベンチマークテストでは、時間進行に伴い、孤立波が右方向に移動し、岩礁部分において砕波となる現象を再現する。

次に、傾斜護岸を含む水域における底質輸送の計算を行った。計算領域は傾斜護岸を有する砂浜の横断面を模擬した。図(1)-2に計算領域と座標系を示す。横断面 $y = 0$ より上側を空気、下側を水とした。水底部には底質を模擬した物質を、水との質量分率が14%となる濃度で $y = -0.175$ より下部に配置した。底質はカオリナイトを想定しており、密度は 2680 kg/m^3 とした。拡散係数は韓ら¹¹⁾の採用した数値を用いた。なお、境界条件は気相左側が空気の一様流入(速度 $V \text{ m/s}$)、右側が自由流出とした。それ以外は滑り無しとした。速度 V は $V = 1.0$ から 6.0 m/s まで変化させた。計算は実時間換算で45秒間を行った。ここで、風速 V 、吹送距離 x_i 、空気の動粘度 ν に基づく

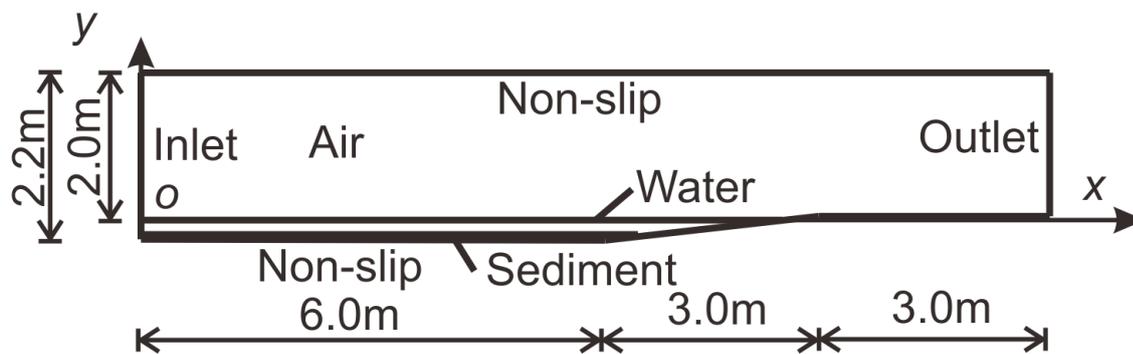
$\text{Re} = \frac{Vx_i}{\nu}$ は、 4.0×10^4 から 2.7×10^6 である。ここで、吹送距離 x_i は初期気液界面の長さ 8.0 m である。

表(1)-1 孤立波の初期条件および計算領域の詳細

l	D_c	d_{reef}
4.000m	0.600m	0.263m
x_0	H	d
2.000m	0.131m	0.310m



図(1)-1 座標系および計算領域(ベンチマークテスト)



図(1)-2 座標系及び計算領域

(3) 強風時の巻き上げ現象を利用した人工洪水による底質有機炭素の洗い出し

本研究では、サブテーマ2において構築した底質巻き上げ現象のシミュレーションモデルを活用し、伊豆沼を対象として強風時に発生する巻き上げ現象の程度と年間発生回数を計算した。その結果をふまえて、巻き上げ発生時に人工洪水を起こし、懸濁する粒子中の難分解性有機炭素の排出量を計算した。

一方、高等植物の生産する難分解性粒子状有機物に関して、ハスの分解実験の結果を利用して伊豆沼における1年間の発生量を推定した。そして、人工洪水による難分解性粒子態有機炭素の排出量と比較し、人工洪水による底質制御効果の評価を行った。

4. 結果及び考察

(1) 底質制御のためのインパクト・レスポンスモデルの構築

1) 高等植物の分解による難分解性有機物の生成

粉末ハス系におけるフラスコ内のPOCおよびDOCの経時変化を図(1)-3に示す。フラスコに投入した試料の初期POCは点線で示した。POCは試料を湖水に添加後速やかに減少(初期POCと0日目のデータの差)したが、これは凍結乾燥により植物の細胞壁が壊れ、物理的溶出(リーチング)が生じたためである。しかし、その後32日目まで好気系、嫌気系ともにPOCに減少の傾向は認められなかった。

一方DOCは、32日目まで急激な減少が認められた。特に好気系においてその傾向は著しかった。

32日目から60日目にかけては、POCにわずかな減少の傾向は認められるものの、DOCの減少は認められなかった。すなわち分解過程をみると、POCの減少が始まった時期とDOCの減少が止まった時期は概ね一致することから、細菌が利用できるDOCが無くなったため、POCの可溶化・分解が始まった可能性が考えられた。

粒状ハス系におけるフラスコ内のPOCおよびDOCの経時変化を図(1)-4に示す。粒状ハス系においてもPOC試料を湖水に添加後速やかに減少(初期POCと0日目のデータの差)したが、粉末ハス系に比較して約半分の量であった。粉末ハス系においては凍結融解処理を行ったのに対して、粒状ハス系においては物理的切断のみであり、試料のサイズを比較すると凍結乾燥した粉末ハスが1辺500 μm 以下に対して粒状ハスは2000 μm 程度とかなり大きかった。すなわち、粒状ハスの細胞壁の破壊が十分に進んでいないことにより、分解実験初期において可溶化が生じ、分解傾向に差が生じたと考えられる。また、好気系を比較すると粒状ハス系は60日を経過してちょうど粉末ハス系の初期POC減少量(物理的溶出量)割合(約36%)と同等のPOC減少量割合(約33%)になることから、ハスのような高等植物の生物学的可溶化には少なくとも2ヶ月以上の時間が必要であることがわかる。

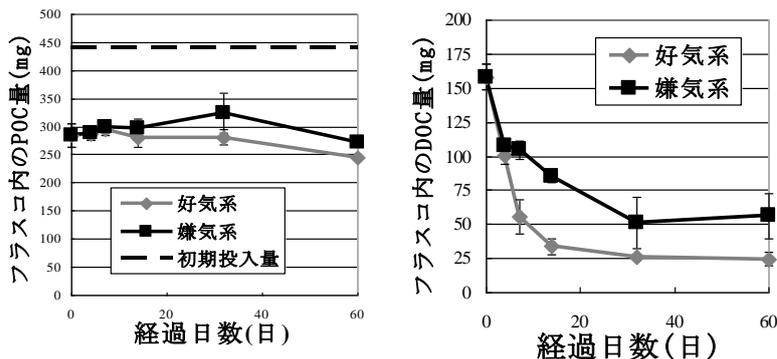
また、粒状ハス系では嫌気条件においてPOCの減少があまり進まなかった。すなわち可溶化に対しては、好気性微生物の働きが重要であることを示しており、底質の環境が嫌氣的になることは、底質に堆積する有機物の分解速度を減少させるという点で、底質性状に大きな影響を及ぼすことがわかった。

次に、本実験期間内に分解された有機物を易分解性POCおよびDOC、および60日目に残存した有機物を難分解性POCおよびDOCとして有機物収支を計算した。その結果を図(1)-5および図(1)-6に示す。有機物の分解が進みやすい好気条件下の粉末ハス系においても約55%のPOCおよび約5%のDOCが残存することがわかり、これらが底質および水中に難分解性有機物として影響を及ぼすこと

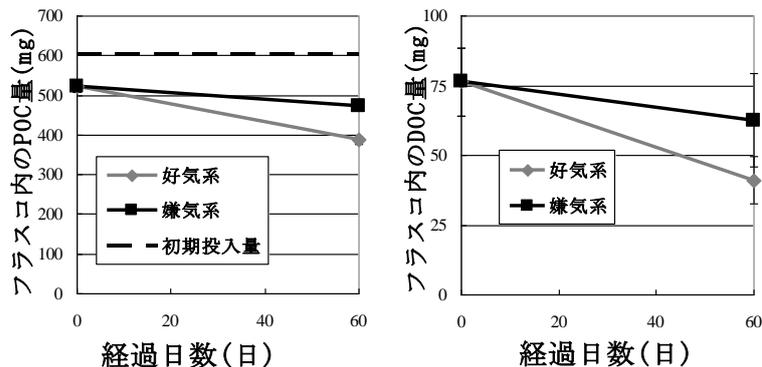
が推定された。したがって、底質および水質の有機汚濁の改善をはかるためには、水環境中での高等植物の分解を管理する必要性が示唆された。

1980年代後半から、琵琶湖、霞ヶ浦等の多くの湖沼において、湖内の溶存態有機物量、すなわち溶存態の化学的酸素要求量(COD)濃度が徐々に増大する傾向が観察されている。この原因として難分解性の溶存有機物があげられており、湖沼において増大する難分解性有機物の発生原因として、霞ヶ浦では下水処理水が無視できないほど大きいことが明らかにされている¹²⁾。

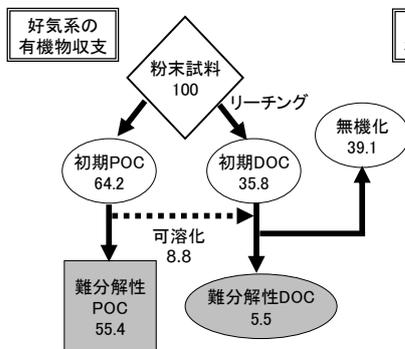
本研究では、高等植物の分解によっても難分解性の溶存態対有機物が生じることを明らかにしており、高等植物の繁茂する水域においては注意が必要である。



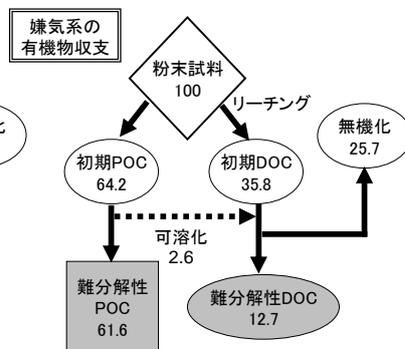
図(1)-3 粉末ハス系フラスコ内のPOCおよびDOCの経時変化



図(1)-4 粒状ハス系フラスコ内のPOCおよびDOCの経時変化



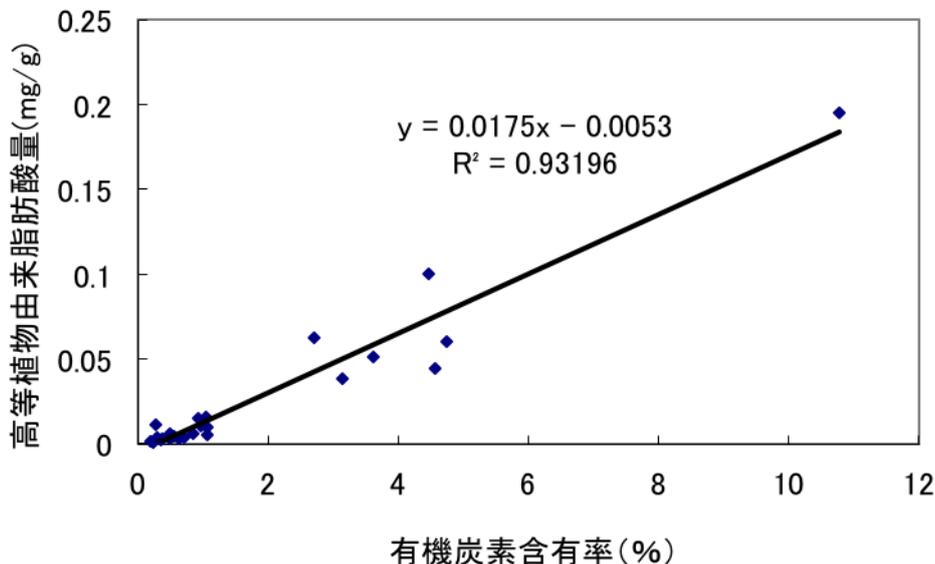
図(1)-5 粉末ハス系における有機物収支(好気系)



図(1)-6 粉末ハス系における有機物収支(嫌気系)

2) インパクト・レスポンスモデル

本研究のサブテーマ3より、閉鎖性水域に堆積している有機物の主たる起源は、高等植物であることが示された。



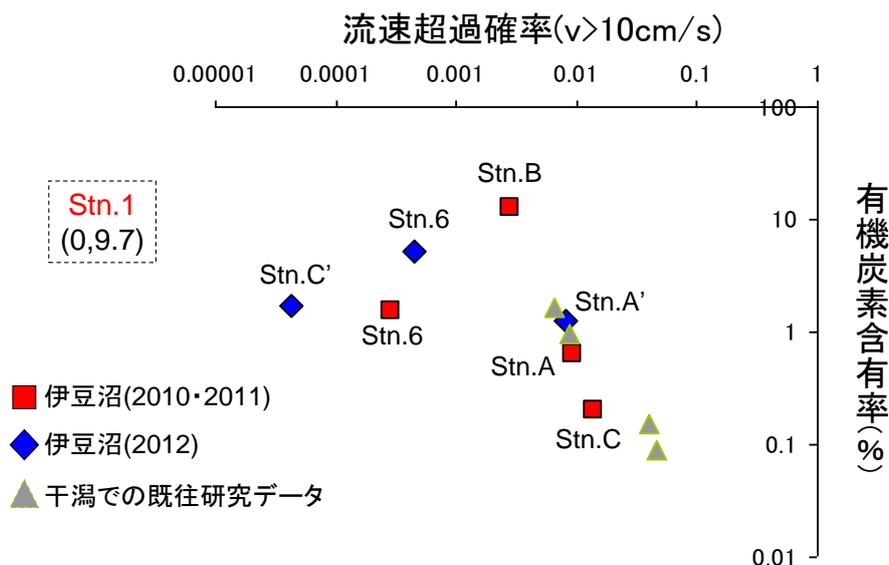
伊豆沼と太湖における底質有機炭素含有率と高等植物由来脂肪酸含有量の関係

この結果は、高等植物が繁茂する伊豆沼およびアオコの著しい太湖に共通しており、どんな有機物が底質に堆積しているのかという課題に対して高等植物の分解生成物（難分解性粒子状有機物）であるという結果が得られた。特に、後者の太湖は毎年アオコが発生して深刻な水質問題を発生させている富栄養湖であり、沈降物質としては藍藻類が卓越しているにもかかわらず、底質の有機物起源は高等植物であることに鑑みると、浅い閉鎖性水域で底質に蓄積する有機炭素が高等植物由来であるという本研究の発見が普遍的なものである可能性を示唆している。

このような結果をもたらす要因として、バクテリア由来の脂肪酸から同化有機物起源を検証した結果、伊豆沼は主に高等植物、太湖では藍藻を分解していることが分かった。すなわち、それぞれの湖沼で有機物収支を考えると、高等植物の繁茂する伊豆沼において底質に供給される主たる有機物は高等植物起源であり、それが底質環境において分解され残存すること、一方でアオコの発生する太湖において底質に供給される主たる有機物は藍藻類起源であるものの、それは底質環境で分解されるために残存せず、供給量的にはわずかと考えられる高等植物に由来する難分解性粒子態有機物が底質に残存して有機物起源となることが明らかになった。

底質の有機物起源が生産者構造の異なる湖沼（植物プランクトン優占化湖沼と高等植物優占化湖沼）に共通して高等植物であるという事実は、底質に堆積する有機物の量を支配する主因が底質に供給される有機物量ではないことを意味する。言い換えれば、アオコが発生することで底質が有機汚濁化することに直接的な因果関係はなく、そのような場所は高等植物の分解生成物も堆積しやすいため間接的に関係性が生じることが考えられる。

では、なぜ有機物が底質に堆積するのかという課題に対して、本研究では水の流動（流速超過確率）と底質の有機炭素含有率に明確な関係が認められ、流速超過確率の小さいところにおいて、高等植物起源の有機物が堆積することが明らかになった。



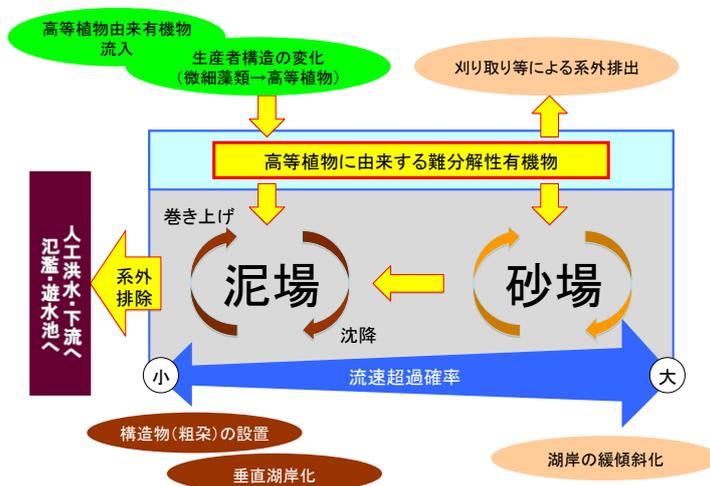
河川における流速と河床粒径の関係では、掃流力(流速の2乗に比例)が大きいほど抵抗力(粒径に比例)の大きな材料を動かすことから、日本の河川では流速の速い上流域では大きな石が、流速の小さい下流域では土砂が堆積することが知られている。また、干潟においてはある一定の流速を超える割合(流速超過確率)が高くなると有機炭素含有率は減少するという負の相関が認められている¹³⁾。

しかし、さらに流速が小さい閉鎖性水域において、粒径の小さな粒子態有機物との関係についてはよく知られていなかった。本研究において、有機炭素含有率は平均流速との関係に比して流速超過確率との間に相関が認められた。これは常日頃発生する流速が底質の性状を支配していることを意味しており、ある一定流速を超えて底質中の粒子態有機炭素の巻き上げる頻度が高いと底質は砂化し、頻度が低いと粒子態有機炭素の沈降が促進され、泥化するものと考えられる。

以上の結果をまとめると、閉鎖性水域において底質の有機炭素含有率は常日頃の流動状態が支配しており、流動の弱いところには粒子態有機物が堆積し泥化し、流動の強いところには粒子態有機物が堆積しにくく砂化する、というような動的平衡性が保たれていることがわかった。

以上の結果をもとに、底質の有機物形成に関わるインパクト・レスポンスモデルを作成した。底質の有機物は、高等植物由来の難分解性粒子態有機炭素で構成されており、上流域で分解を受けながら流入するものと、富栄養化による高等植物の繁茂(内部生産)・枯死・分解して沈降するものに大別される。特に富栄養化により繁茂した大型植物は直接的な供給源となるため影響が大きく、刈り取り等による適切な管理を必要とする場合もあろう。堆積した有機物は風による風波や吹掃流、湖流により巻き上がり沈降を繰り返すが、流速超過確率が低い場においては有機物が堆積しやすく、泥場を形成する。一方流速超過確率の高い場では有機物が堆積しにくく、砂場を形成する。これを人為的に制御する方法としては、流速超過確率の低下方法として構造物(粗朶)の設置や、垂直湖岸化が考えられる。逆に流速超過確率を上昇させる場合には、湖岸の緩傾斜化が有効であり、この理由としては振動流の発生が促されるためである。このような常日頃の流動状態が底質有機炭素含有率を支配する。

しかし、このような底質制御方法では系外への有機物の郵送は行われぬ。すなわち系内での砂場から泥場へ、泥場から砂場への有機物の輸送が起こるものの、全体として有機物の蓄積は進んでいく。これを制御するためには有機物の系外排除が行われる必要があり、イベント的な人工洪水の発生や周囲を遊水池とした氾濫による洗い出しが必要となる。



図(1)-7 底質制御に関わるインパクト・レスポンスモデル

このような底質制御方法を組み合わせながら、底質の有機炭素含有率を調整し、底質をハビタットとする生物の生育・生息を促進することが必要である。

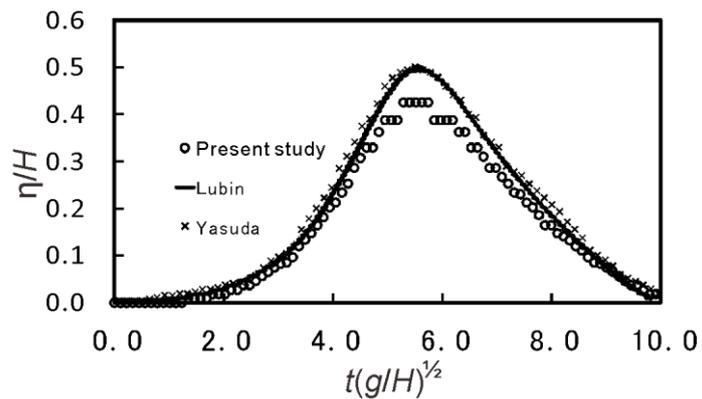
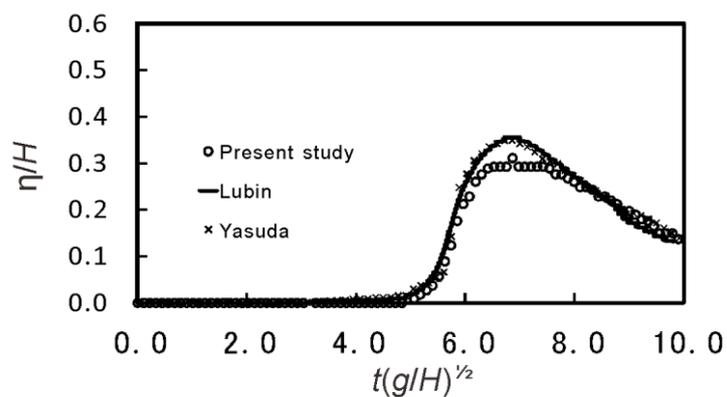
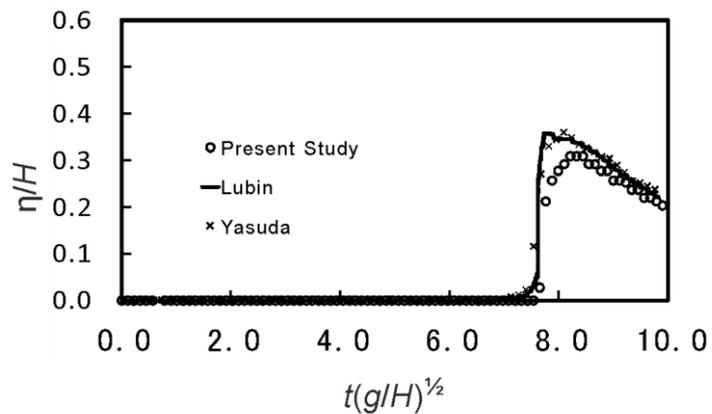
(2) 緩傾斜化による底質有機炭素含有率の制御

1) 孤立派の伝播(ベンチマークテスト)

ベンチマークテストの結果である岩礁前から岩礁上までの3か所における波高の時間変化を図(1)-8に示す。同様の系にて行われたYasudaら¹⁴⁾の実験およびLubinら¹⁵⁾の数値解析の結果も合わせて示す。岩礁通過前($x = 8.000$ m)である図(1)-3を見ると、波高が最大となる時刻は本計算結果と他の2例とでよい一致を示す。一方、波高は本計算結果の方が、他の2例と比較して約13%低い値となった。波高の立ち上がりおよび減衰の傾向は、3者間で定性的に良い一致が見られる。ただし本計算では、波高の最大値が低いことから、変化はやや緩やかとなっている。

次に、岩礁開始位置($x = 8.515$ m)の図(1)-8-2)を見ると、同様に波高の最大値は本計算の方がやや低い、時間変化の様子は他とよく一致している。岩礁上($x = 9.200$ m)では、図(1)-8-3)に示すよう、孤立派の立ち上がりは実験結果では急峻となり、減衰は緩やかになる傾向がある。この傾向はLubinの数値解析結果と一致している。本計算では、波高の急激な上昇は捉えているが、上昇フェーズ後半において上昇率がやや鈍る。その結果、波高の最大値は小さい。

以上より、本手法によって、波高の厳密な再現には問題があるものの、波の伝播については再現できることが分かった。

1) 岩礁通過前 ($x = 8.000$ m)2) 岩礁開始位置 ($x = 8.515$ m)3) 岩礁上 ($x = 9.200$ m)

図(1)-8 波高の時間変化(ベンチマークテスト)

2) 自然風による底質輸送

傾斜護岸を含む領域の風の速度ベクトルおよび水流の流線を図(1)-9に示す。図は、 $t = 7.5$ s

の状態を示す。風は、領域左側から流入して全体的に右側に進む。水面付近に着目すると、水面上に発達する速度境界層を確認できる。傾斜護岸上部には、水面上に時計回りに回転する渦構造を確認できる。それに伴い、周囲の風は渦を乗り越えるように蛇行している。液相に着目すると、全体としては、表層部が風に駆動されて左から右に流れている。この流れは、護岸手前($x = 6.5$ m付近)で深さ方向に方向を変え、底部付近を右から左に戻り流れる流れを形成している。これらの流れに挟まれた深度付近では、時計回りに回転する渦構造を複数確認できる。これらの渦構造の存在により、湖底部を還流する流れは上下に蛇行している。また、傾斜護岸上、先に述べた水面上に存在する気流の渦構造の直下の水中には、水深程度のスケールを持つ渦構造が分布している。

図(1)-10に、 $V = 6.0$ m/sにおける底質の濃度分布の経時変化を示す。時刻は $t = 10.0$ sから 40.0 sまでの代表4時刻である。場所は、 $2 < x < 4$, $-0.2 < y < 0.0$ の領域を拡大して示している。図の下面は水底部、上面は初期の水面位置に相当する。図中の白い部分は底質濃度が濃い領域、黒い部分は薄い領域である。 $t = 10.0$ sでは、底質はほぼ初期位置から動いておらず、水底部に集中して存在している。ただし $x = 2.2$ m, $x = 3.8$ m付近には、やや盛り上がった領域をわずかに確認できる。 $t = 20.0$ sでは、底質が水面方向に向けて上昇する様子が複数個所で見受けられる。特に、 $x = 3.3$ m付近には高濃度部分の水面方向への顕著な上昇が確認できる。これは、局所的な底質の巻き上げ現象であると考えられる。 $t = 30$ sでは、複数個所で上昇した底質が、さらに水平方向に移動する様子が分かる。これは、巻き上げられた底質が、水流に乗って水平方向に流された結果と考えられる。 $t = 40.0$ sでは、この現象はさらに顕著になり、一部の底質は水面付近にまで到達している。また、 $x = 3.0$ m付近では、初期に配置された底質のほとんどが流失している。

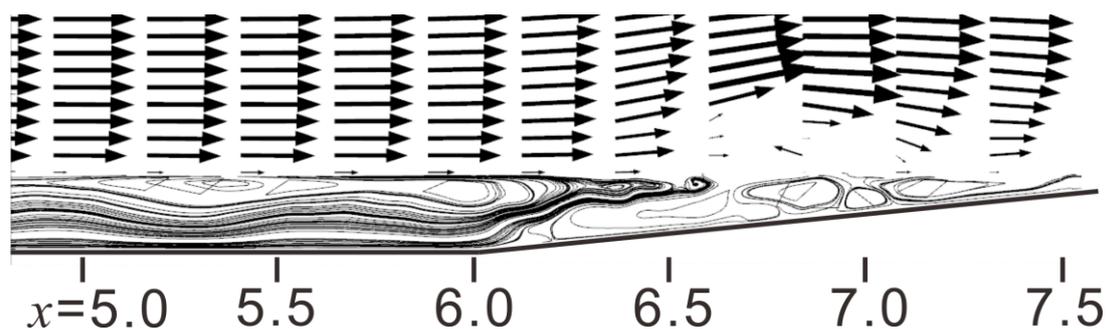
次に、上記の通り表現された底質の移動を定量的に評価するため、底質と水の初期界面 $y = -0.175$ mを鉛直方向に通過する底質の質量流束 E を算出した。正および負の質量流束は、それぞれ巻き上げ量、沈降量の度合いに相当する。図(1)-11に、 $t = 7.5$ sでの各風速における質量流束を示す。図は、流入口よりやや下流の $x = 1.0$ mから、傾斜護岸開始位置の $x = 6.0$ mまでの x 位置における質量流速を示す。 $V = 4$ m/sの低風速時には、 x 位置による質量流束の変化はなだらかである。 $V = 5$ m/sでは、 x 位置により質量流速がややばらつき傾向がみられる。 $V = 6$ m/sの高風速時には、質量流束の局所的なばらつきが目立つようになる。特に、 $x = 2.4, 5.0, 5.8$ m付近で顕著に見られる。全体としては質量流速は正方向(巻き上げ方向)に変化する傾向が強い。 $V = 6$ m/sの結果である図(1)-10において、時間進行とともに徐々に見られた局所的な底質の移動は、図(1)-11で局所的に顕著にみられる正方向の質量流束によってもたらされたと考えられる。

上記の底質輸送に与える風波の影響を調べる為、底質移動が顕著に見られた、風速 $V = 6.0$ m/s、 $x = 3.0$ mにおける波高、底質質量流束、水流速度の関係を調べた。図(1)-12には、 $x = 3.0$ mにおける水面高さおよび底質質量流束の高さ方向積分値 E_s 、 $(x, y) = (3.0, -0.175)$ における水流速度の水平成分を示す。底質質量流速を高さ方向の積分値 E_s で示した理由は、上部の風波によって底質が上下方向に移動する傾向を捉えるためである。水面高さは、水が風によって下流方向に移動するので、時間経過に従って減少している。波高、質量流束、速度の変動を比較すると、波高の変化が緩やかな時は、質量流束、速度ともになだらかな変化を示す(例： $15 < t < 20$ の領域)。一方、波高の変化が急激な時には、両者の変化も激しくなり、質量流速の絶対値は増加する傾向がある(例： $30 < t < 35$ の領域)。このことから、底質の巻き上げには、風波の通過が強く影響し

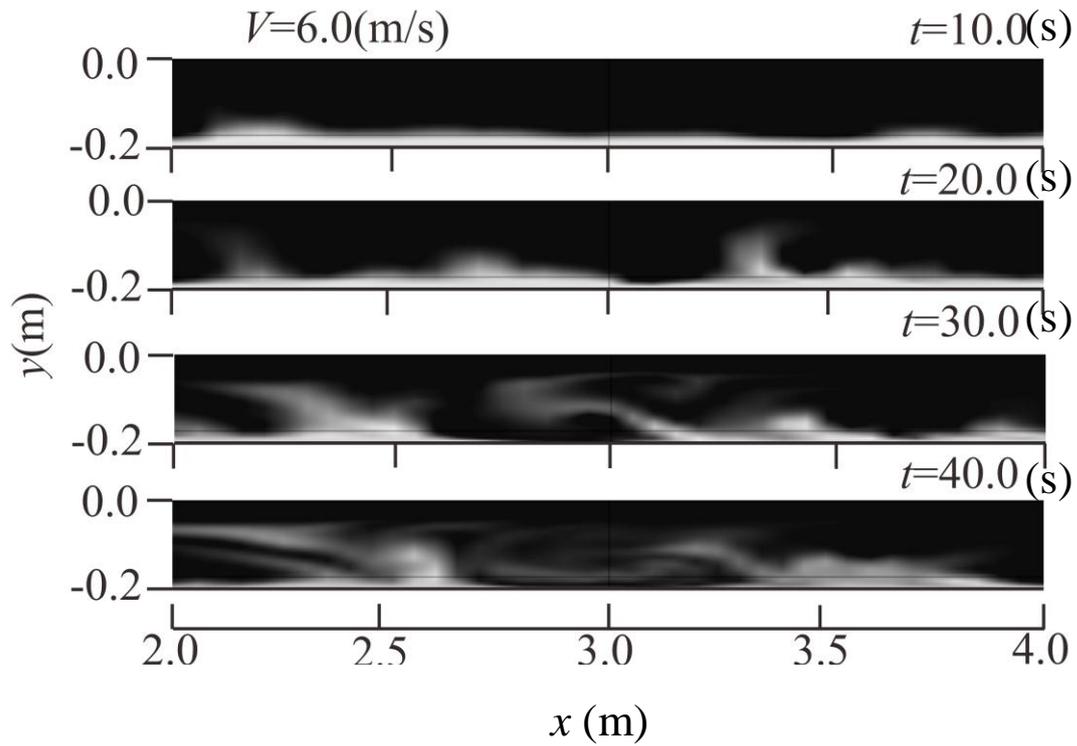
ていることが分かる。すなわち、激しい波高変動は底質質量流速の増加と、速度変動をもたらす。

次に、この速度変動をより詳細に検討する。図(1)-13に、風速 $V=6.0$ m/s, $x=3.0$ m時の $-0.20 < y < -0.10$ における水流速度の水平成分の深度方向分布を示す。各プロットは、代表的な5時刻を示している。図より、時刻によって速度が正負に反転していることが分かる。このことから、風波によって深度方向全域に渡って振動流が発生していることが分かる。Van Leussenら¹⁵⁾によれば、振動流は底質の限界応力を低下させるため、底質輸送現象の要因になると言われている。本計算の結果は、これと整合する。

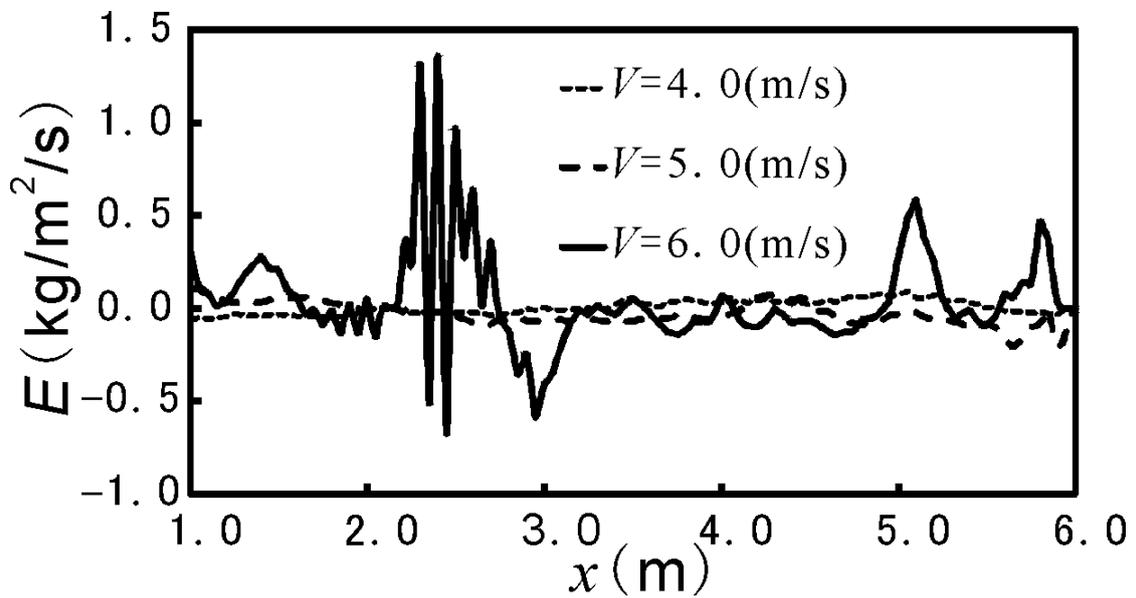
最後に、振動流の規模と巻き上げの関係を明らかにするため、 $x=3.0$ mの水底部における水流速度の水平成分の時間変化を風速別に検討した。結果を図(1)-14に示す。風速は、 $V=2.0, 4.0, 6.0$ m/sで、評価位置は初期の水と底質の境界面である $y = -0.175$ mである。風速によらず、速度が正負に反転する長周期の変動と、それに乗った短周期の変動がみられる。風速が上がるほど、これらの周波数が高くなる傾向がある。図中には、速度信号から算出したRMS値も示す。風速が大きい時ほどRMSが大きくなることから、振動の振幅が増加している。従って、高風速時に活発となる底質の巻き上げは、振動流の周波数や振幅の増加と関係している可能性がある。



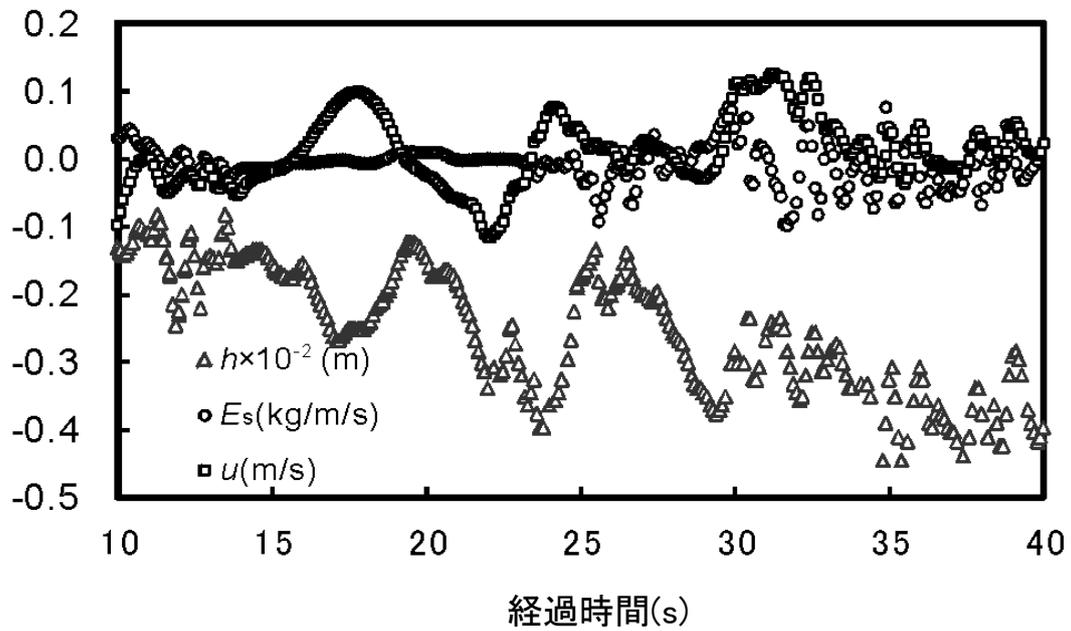
図(1)-9 護岸付近における風速ベクトルおよび吹送流の流線



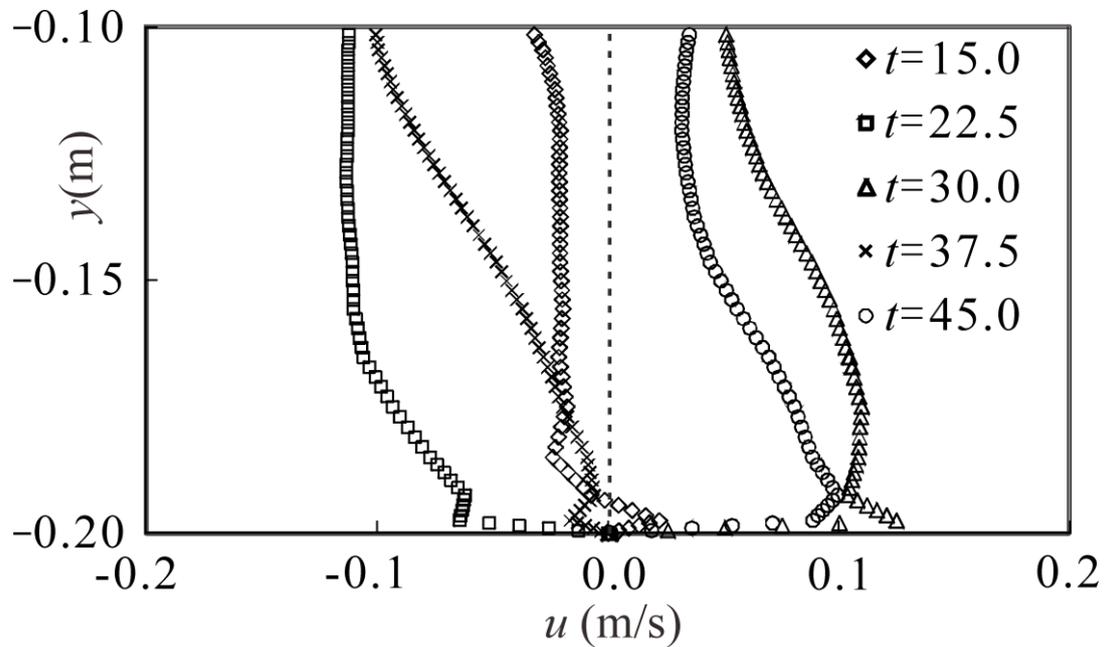
図(1)-10 底質濃度分布の時間変化



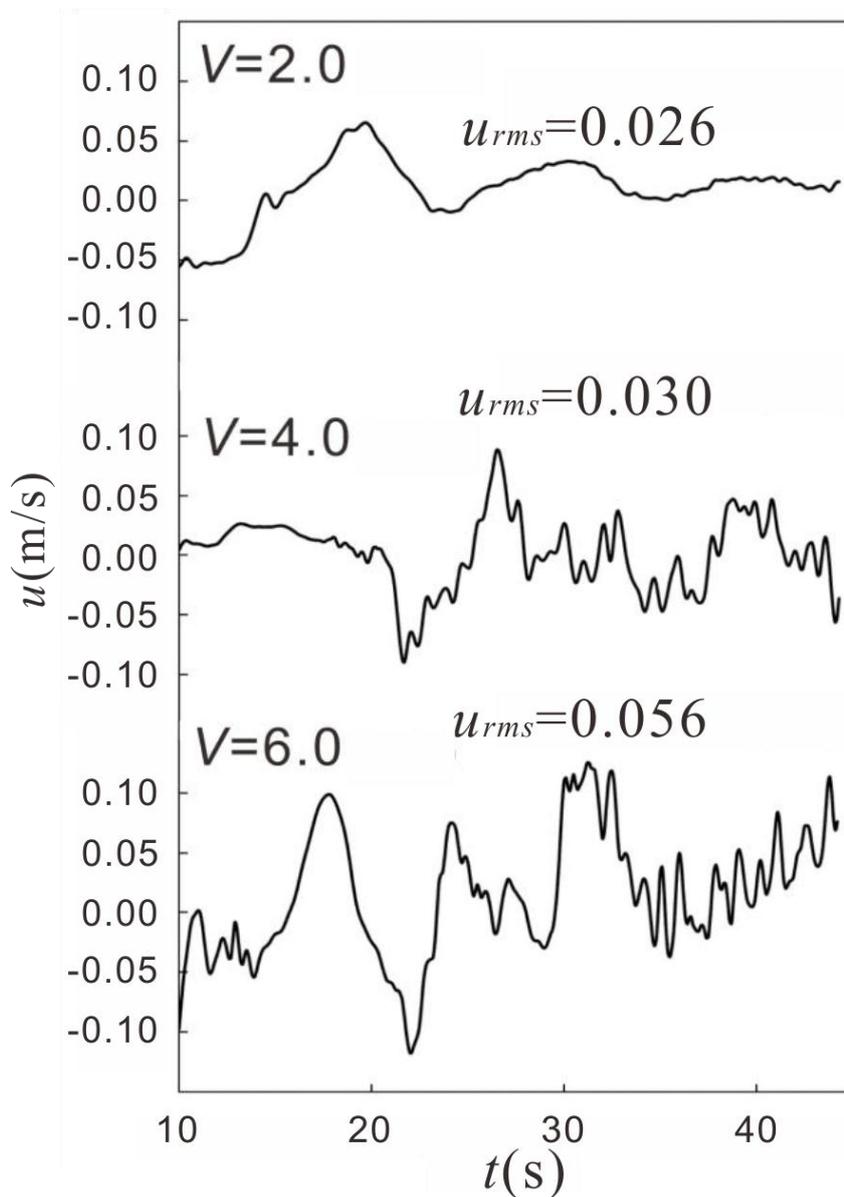
図(1)-11 水底部付近における底質の質量流束



図(1)-12 波高，底質質量流束，水流速度の時間変化



図(1)-13 水流速度の深度方向分布

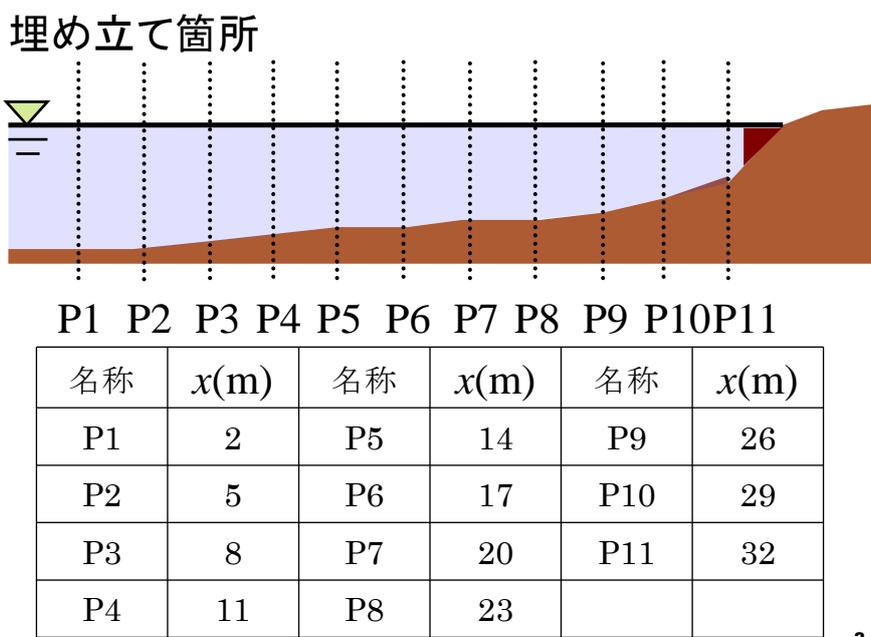


図(1)-14 水底部近傍の水流速度の時間変化

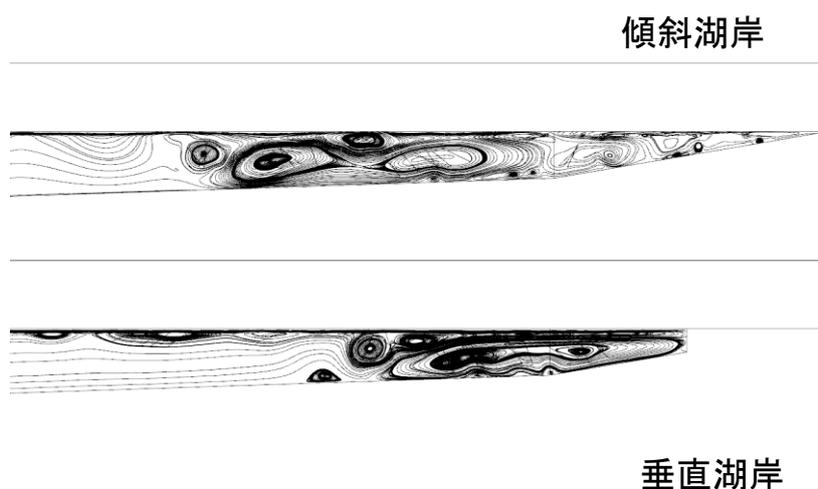
以上のとおり、緩傾斜湖岸における風による水の流動、それに伴う底質の巻き上げの現象が計算され、既往研究およびサブテーマ3でモニタリングされた振動流を再現できたことから、湖岸の形状変更(垂直湖岸化)による影響について、図(1)-15のような形状を仮定して、緩傾斜湖岸と比較しながら流動および底質の巻き上げの特性を解析した。

図(1)-16にはそれぞれの湖岸形状における流線を示した。渦の空間スケールに違いが認められ、傾斜湖岸において沖まで影響が及んでいることがわかる。一方、垂直湖岸は渦が岸付近に集中している。次に、図(1)-17に、岸沖方向の底質フラックスの鉛直プロファイルを示した。傾斜湖岸では、底面で岸方向にフラックスが大きく、底質が岸に寄せられていることがわかる。一方、垂直湖岸では水面付近で沖方向に大きなフラックスが認められ、複雑な鉛直プロファイルを呈した。最後にサブテーマ3で観測された流速超過確率と、本計算によって求められた湖底部のせん断応

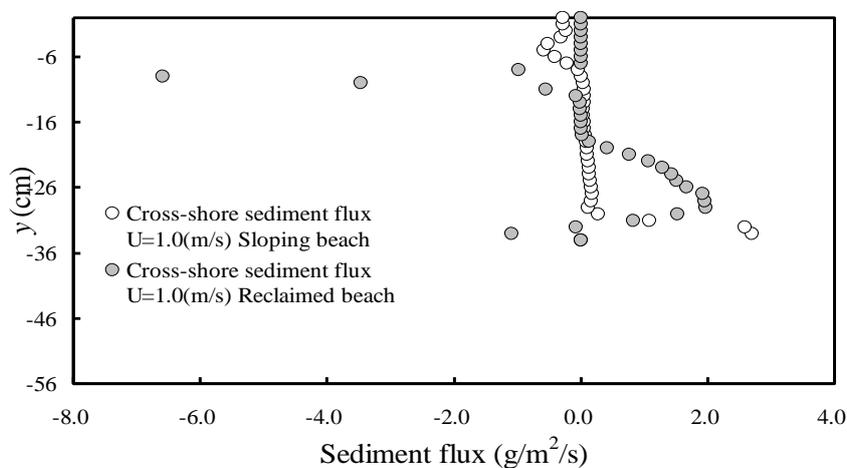
力，流速のRMS値（振動）の値を図(1)-18に示した．それらの岸沖方向の傾向は一致し，流速超過確率が岸に近づくにつれて上昇する主因は振動流であることが再現できている．これらの解析結果から，サブテーマ3でモニタリングされた緩傾斜湖岸における振動流の発生，それによる流速超過確率の上昇，さらに底質有機炭素含有率の低下には密接な関係があることは明らかであり，湖岸の緩傾斜による底質制御の可能性が示された．



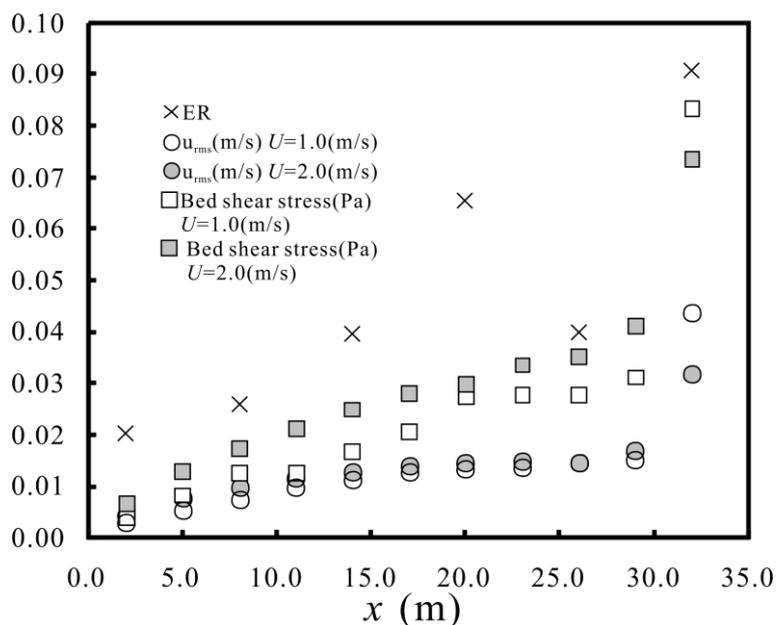
図(1)-15 緩傾斜湖岸の埋立による垂直湖岸化の概要図



図(1)-16 傾斜湖岸および垂直湖岸の流線



図(1)-17 岸沖方向の底質フラックスの傾斜湖岸および垂直湖岸の比較

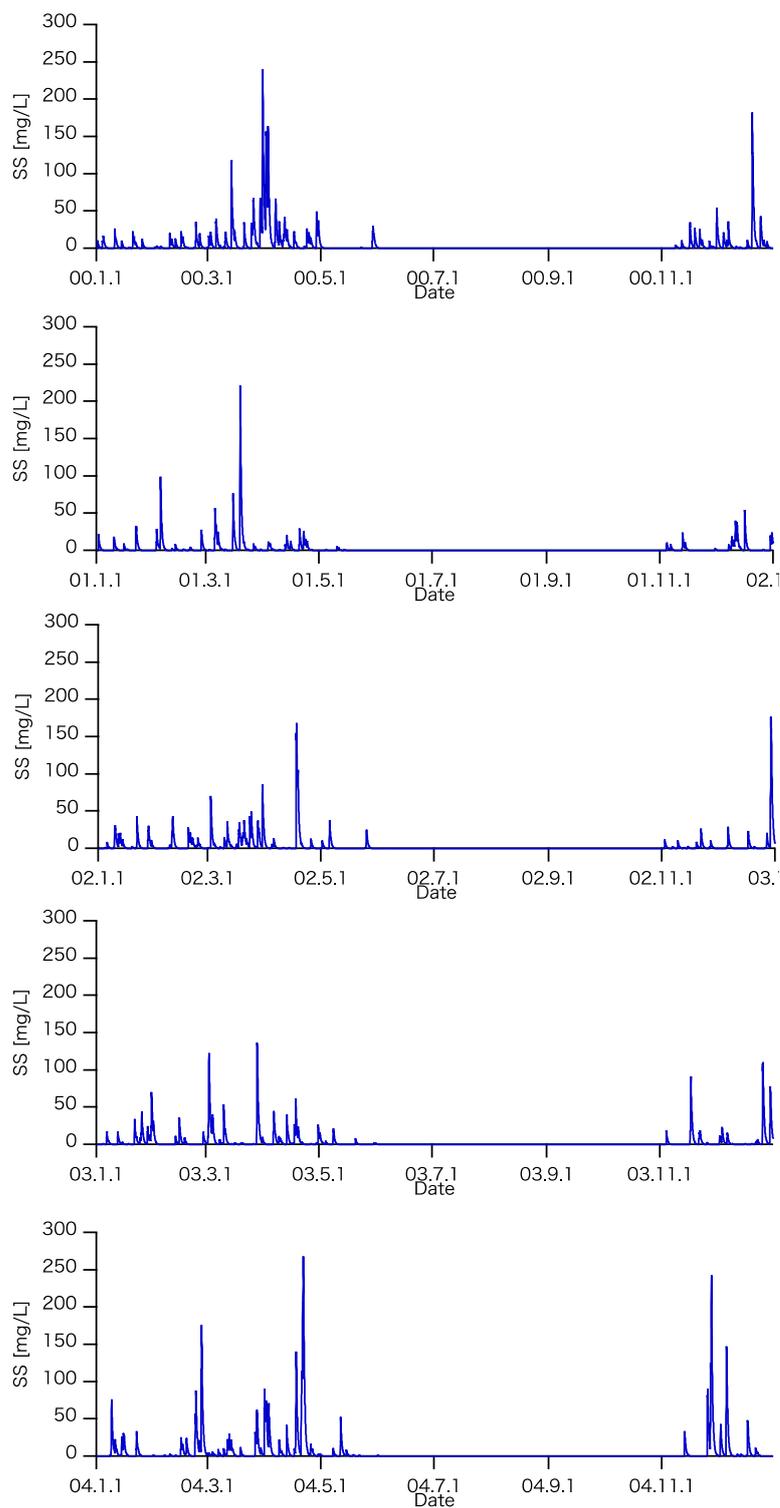


図(1)-18 岸沖方向の流速超過確率 (ER) , 湖底部のせん断応力および流速RMS値 U_{rms}

(3) 強風時の巻き上げ現象を利用した人工洪水による底質有機炭素の洗い出し

サブテーマ2で構築した浅く富栄養化した湖沼に適用できる底質巻き上げモデルを用いて、風による底質の巻き上げ減少を高い精度で再現することができた。このモデルを用いて、2000～2004年の5年間の風データを用いて濁度の計算したものを図(1)-19に示す。

風向および風速によって濁度の値は大きく異なるが、冬から春にかけて巻き上げ減少が顕著であり、伊豆沼の特徴とも一致する。この結果によれば50度程度の巻き上げは冬期間（非灌漑期）にほぼ発生していることがわかる。



図(1)-19 伊豆沼における2000～2004年の風による巻き上げ計算結果

この結果、および各サブテーマの結果をふまえ、伊豆沼における難分解性粒子態有機炭素の精算と人工洪水による排出の関係を求めた。

まずハスによる難分解性有機物の年間生産量を推定した。伊豆沼の湖水面積 2.87 km^2 、ハスの被覆率 50% (2008年)、ハスの単位面積あたりの乾燥重量 250 g/m^2 (鈴木ら, 2010年)¹⁶⁾とすると、伊豆沼で残存する難分解性有機炭素量は 86 ton と試算される。

さらに底質中難分解性有機物の流去という観点から人工洪水の効果を試算する。水位 5 cm 低下に相当する洪水の放流量は 14.5 千 ton 、巻き上げ時のSS濃度を 50 mg/L とすると、1回の人工洪水によるSSの排出量は 7 ton となり、難分解性有機物の排出量は 0.7 ton と試算される。年間10回の人工洪水を起こしても 7 ton にとどまり、ハス起源で生産される 86 ton からすると1割以下となり、人工洪水の底質中難分解性有機物の流去に対する効果は限定的であることがわかった。したがって、人工洪水のみならずハスの過繁茂対策とあわせて実施するなどの方策が必要と考えられた。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究において、浅い閉鎖性水域の底質形成機構として底質中の粒子態有機炭素の起源は高等植物であり、それが多量に堆積する原因として流動が弱いこと、そして新たに流速超過確率を導入し、それによって底質中の粒子態有機炭素含有量が説明可能なことを示した。このような底質形成メカニズムをふまえて、湖岸を緩傾斜化することで振動流が発生し、流速超過確率が上昇して底質の有機炭素含有率が低下することが、理論的に説明された。また、高等植物の分解により生成した難分解性粒子態有機炭素の閉鎖性水域での蓄積を防ぐためには系外排除が必要であり、洪水や氾濫などのイベント的な流出・排除が閉鎖性水域の底質の恒常性を要因であることが合理的に推論された。この成果によって、浅い閉鎖性水域の底質形成機構の解明が大きく前進し、対症的ではない原因療法的な対策を考えることが可能となり、環境科学的に極めて新規性・有用性の高い成果である。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

<行政が活用することが見込まれる成果>

これまで閉鎖性水域の底質汚濁機構としては、富栄養化による一次生産の増大が原因とされてきたが、本研究では一次生産者の中でも高等植物が起源であり、その管理が底質制御に重要であることを示した。水生植物による水質浄化や生物多様性の保全は自然再生事業として活用される手法であるが、本研究結果は水生植物の繁茂が底質の有機汚濁化、結果として底質をハビタットとする底生動物にも悪影響を及ぼすことが懸念され、科学的な知見をベースとした自然再生が重要であることを示唆している。

閉鎖性の強化による底質の悪化は、湖沼や内湾・内海に共通して生じている現象と考えられる。本研究結果に鑑みると、これまでの環境影響評価において湖岸の垂直化や港湾の建設などのインパクトが底質の性状に及ぼす影響は十分に評価されていなかったと考えられる。また、沿岸態を

緩傾斜化し、流動を強化して底質性状を改変する試みは、自然再生を進める上で有力な手法になり得ると考えられる。既に多くが人工的に改変された沿岸帯を保全・活用するためのデザインのあり方、洪水や攪乱を抑えることによる悪影響とその緩和手法の構築のために、さらに研究成果を蓄積していきたい。

研究代表者は、伊豆沼・内沼自然再生協議会に参加し、会長をつとめているが、本研究は自然再生の計画を立案する中で構想に至ったものである。巻き上げが著しく、水質が極めて悪い状態で、かつて見られた二枚貝も激減するなど、伊豆沼・内沼においては底質に起因する問題が様々発生している。この原因として閉鎖性の強化と高等植物の繁茂に焦点をあてて、今後の自然再生に活かしていきたい。

6. 国際共同研究等の状況

本研究成果を基盤として、研究代表者が参画するグローバルCOEプログラム「環境激変への生態系適応に向けた教育研究」において中国東南大学李先寧教授をカウンターパートとした「太湖融合研究」を実施した。本研究を博士課程の研究テーマとする学生を受け入れ、これまでに3度、中国を訪問し太湖フィールド調査を行った。浅い閉鎖性水域の富栄養化問題は世界に共通する課題であり、成果を蓄積した後は二国間から多国間へと共同研究を広げたいと考えている。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

〈論文（査読あり）〉

1) 長濱祐美, 中山 亮, Woo-Seok Shin, 藤林 恵, 野村宗弘, 西村 修: 環境工学研究論文集, 48, III_117-III_122 (2011).

「海草コアマモ場と近傍裸地における底質有機物の起源」

2) 藤林 恵, 野村宗弘, 許曉光, 李 先寧, 相川良雄, 西村 修: 土木学会論文集(環境工学研究論文集), 49, III_493-III_498 (2012).

「炭素・窒素安定同位体比を指標とした太湖底質有機物動態の解析」

〈その他誌上発表（査読なし）〉

特に記載すべき事項はない

(2) 口頭発表（学会等）

1) 中山 亮, 長濱祐美, 武地修一, 野村宗弘, 西村 修: 平成22年度土木学会東北支部技術研究発表会 (2011)

「コアマモ場における懸濁態有機物の輸送解析」

2) 野村宗弘, 中山 亮, 長濱祐美, 武地修一, 西村 修: 土木学会第66回年次学術講演会 (2011)

「コアマモ生育場における懸濁態有機物の輸送解析」

3) 中山 亮, 野村宗弘, 長濱祐美, 武地修一, 西村 修: 第48回環境工学研究フォーラム (2011)

「コアマモ群落における懸濁態有機炭素の挙動解析」

- 4) 鄧 輝, 野村宗弘, 藤林 恵, 佐々木久雄, 千葉信男, 西村 修: 第6回伊豆沼・内沼研究集会 (2011)

「伊豆沼における底質の長期連続モニタリングおよび底質形成機構の解析」

- 5) 鄧 輝, 野村宗弘, 藤林 恵, 佐々木久雄, 千葉信男, 西村 修, 李 先寧: 第46回日本水環境学会年会 (2011)

「水理環境と起源解析から見る伊豆沼の底質形成機構解析」

- 6) 金田一航, 野村宗弘, 中山 亮, 丸尾知佳子, 千葉信男, 西村 修: 平成23年度土木学会東北支部技術研究発表会 (2012)

「伊豆沼の沿岸部における底質と流動の関係」

- 7) 中山 亮, 野村宗弘, 長濱祐美, 丸尾知佳子, 西村 修: 日本沿岸域学会第25回研究討論会 (2012)

「海草群落における懸濁態有機炭素の挙動解析」

- 8) 千葉高之, 野村宗弘, 藤林 恵, 丸尾知佳子, 西村 修: 平成24年度土木学会東北支部技術研究発表会 (2013)

「閉鎖性水域における水生植物由来有機物の室内実験による分解特性解析」

- 9) 中山 亮, 野村宗弘, 丸尾知佳子, 西村 修: 第47回日本水環境学会年会 (2013)

「現地観測に基づくコアマモ場における有機物輸送解析」

- 10) 許 暁光, 藤林 恵, 野村宗弘, 西村 修, 李 先寧: 第47回日本水環境学会年会 (2013)

「Investigating the sources of sedimentary organic matter in hypereutrophic Lake Taihu (China) by using stable isotope ratio and fatty acid biomarkers」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) シンポジウム, セミナー等の開催 (主催のもの)

特に記載すべき事項はない

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

(6) その他

特に記載すべき事項はない

8. 引用文献

- 1) Abdulkadira, S. and M.Tsuchiya : One-step method for quantitative and qualitative analysis of fatty acids in marine animal samples, Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, Vol. 354, pp.1-8, 2008.
- 2) 西村 修, 野村宗弘, 坂巻隆史: 河口干潟における堆積有機物の物理的制御機構, 月刊海洋,

- 39(9), pp.586-592, 2007.
- 3) 例えば, 中川康之: 内湾域における泥質物の堆積過程に関する研究, 運輸省港湾技術研究所報告, 37(4), pp.113-133, 1998.
 - 4) 梅田 信, 長峯知徳, 長広 遙, 石川忠晴, 宇多高明: 霞ヶ浦湖心部における底泥の巻き上げ過程に関する研究, 水工学論文集, 45, pp.1171-1176, 2001.
 - 5) 小林武徳, 鵜飼健弘, 今城貴徳, 黒瀬良一, 小森 悟: 風波気液界面近傍の乱流とスカラ輸送の直接数値シミュレーション, 日本機械学会論文集(B編), 76(764), 2006.
 - 6) Chambarel, J. , Kharif, C. and Kimmoun., O. : Generation of two-dimensional steep water waves on finite depth with and without wind. European Journal of Mechanics B/Fluids, 29, pp.132-142, 2009.
 - 7) 稲垣 聡: Monismith.S.G, Koseff.J.R, Bricker.J.D, 南サンフランシスコ湾における底泥輸送解析, 海岸工学論文, 48, pp.641-645, 2001.
 - 8) 豊田政史, 北村 聡, 富所五郎: 諏訪湖における風波の影響を考慮した底泥の輸送解析, 水工学論文集, 47, pp.1213-1218, 2003.
 - 9) COMSOL Multiphysics Manual, COMSOL Inc.
 - 10) Lubin, P.and Lemonnier, H. , Test-case number 33: Propagation of solitary waves in constant depths over horizontal beds (PA, PN, PE), Multiphase Science and Technology, 16, pp.239-250, 2003.
 - 11) 韓 銅珍, 丸谷尊彦, 中辻啓二: 閉鎖性内湾における水質・底質モデルの構築とその検証, 海岸工学論文集, 47, 土木学会, pp.1091-1095, 2000.
 - 12) 今井章雄: 湖沼において増大する難分解性有機物の発生原因と影響剽悍井に関する研究, 国立環境研究所ニュース, 19巻, 6号, 2001.
 - 13) T.Sakamaki and O.Nishimura: Dynamic equilibrium of sediment carbon content in an estuarine tidal flat: characterization and mechanism, Marine Ecology Progress Series, 328, pp.29-40, 2006.
 - 14) Yasuda, T., Mutsuda, H. and Mizutani, N. : Kinematics of overturning solitary waves and their relations to breaker types. Coastal Engineering, 29(3), pp.317-346, 1997.
 - 15) Dronkers, J. and Van Leussen, W. : Physical processes in estuaries, pp.13-14, Springer-Verlag, 1988.
 - 16) 鈴木 康, 三宅保士, 三塚ひろみ, 嶋田哲郎, 溝田智俊: 伊豆沼・内沼のハス *Nelumbo nucifera* の窒素含有率の季節変動, 伊豆沼・内沼研究報告, 4, pp.9-18, 2010.

(2) 底質形成機構（水の流動と底質の有機物含有率の関係）のモデリング

東北大学大学院工学研究科

梅田 信

平成22～24年度累計予算額：5,332 千円
(うち、平成24年度予算額：1,247 千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

本研究では、宮城県北部に位置する浅く富栄養化した湖沼である伊豆沼において、強風時における底質の巻き上がり現地観測および数値解析を行った。現地観測の結果からは、概ね風速5 m/s以上になると、巻き上がりが生じていることが分かった。ただし、巻き上げの強度に関しては、風速のみならず、風向への依存性も高いと考えられる結果であった。その理由として考えられるのは、東西方向に長いという伊豆沼の湖形状が影響して、風向により吹送距離が変化する影響であった。実際、波高や流速の変化は、単なる風速の増減には対応していなかった。これに対し、吹送距離を考慮することで、流速変動量をうまく説明することができた。

さらに、本研究対象と同様に浅く富栄養化した湖沼である霞ヶ浦における既往の研究で用いられた底質巻き上げモデルにより、濁度の経時変化を計算した。ただし、現地観測結果に対する分析結果を用いて、水面における境界条件の改良を施した。すなわち、風速および吹送距離を考慮して、水面での摩擦速度や乱流パラメータの設定をした。その結果、風による底質の巻き上げを高い精度で再現することができた。さらに得られたデータから風速と巻き上げ率の関係を求めたところ、べき関数で概ね表現することができた。また、この関係式を用いて底質の巻き上げによる濁度の時系列の再現計算を行った結果、湖面風による底質の巻き上げの効果を表すことができた。

[キーワード] 閉鎖性水域、底質モデル、流動、巻き上げ、沈降

1. はじめに

富栄養化が進行した多くの閉鎖性水域において水質改善の対策がなされてきているが、十分に効果が発現していないことも多く、課題となっている。特に、浅い湖沼の水質悪化の傾向が顕著であり、健全な生態系を保全するためにも水質の改善・管理が必要となる¹⁻²⁾。しかし、浅い湖沼においては、河川流入による流動や風浪などの条件により底泥が巻き上げられるため、水質改善が妨げられている可能性がある。底泥からの内部負荷による水質への影響を抑制し、効果的な水質対策を行うためには、風による巻き上げを含めた底質の挙動を考慮に入れることが重要であると考えられる。

湖沼における底質の巻き上げに関する力学的な研究は、従来多くなされてきた。代表的なものの一つとして、大坪ら³⁻⁴⁾による霞ヶ浦の底質を対象とした研究が挙げられる。富栄養化した湖沼における底質の特徴として、細粒分(シルトや粘土)を多く含むため粘着性が高いことに加えて、含水比が非常に高いという性質がある。このような底質を「流体泥」⁵⁾あるいは「Fluid Mud」⁶⁾と呼ぶことがある。このような底質の挙動は、湖沼に限らず閉鎖性水域における水質環境に大き

な影響を及ぼすことから、非常に多くの研究成果がすでに存在している。底質の巻き上げに関して、環境条件に応じて働く外力の性質により挙動が異なってくることから、種々の条件下での検討がなされている。例えば、一方向流れの場を想定した条件³⁻⁵⁾や、振動流的な外力の条件⁷⁻⁹⁾、あるいは乱流が卓越する流動条件^{6,10)}などが挙げられる。一方でこのような底質の挙動は現場固有の特性や水理条件の影響が大きいいため、理論的あるいは室内実験的研究のみならず、現場スケールの状況を考慮した研究の重要性が指摘されている⁵⁾。そのような観点から現地観測に基づいた検討や比較的大規模な水路を用いた検討もされている¹¹⁾。

また、浅い湖沼における水環境、特に富栄養化現象に対して、底質および底質の巻き上げによる影響が大きいことも従来指摘されている。一つは、レジームシフトと呼ばれる、富栄養化が進んでいった際に急激(カタストロフィック)に生態系や水質環境が変化することがある現象¹²⁾である。これに対しては、底質の巻き上げによる水の濁り(または透明度)あるいは巻き上げられる粒子に含まれる栄養塩などが、このような変化を記述する一つの指標となる。今ひとつは、前記とも関連はあるが、水生植物と底質および水質環境の関係である^{13,14)}。清澄な湖沼であれば、車軸藻などの沈水植物が多く生えているが、このような沈水植物は、それ自体が底質を覆うようにして生えるため、底質の巻き上げを抑制し、清澄な環境を維持することに寄与することが知られている¹⁵⁾。一方、底質の巻き上げが活発で水の濁りが高い環境では、沈水植物の生息が難しく、抽水植物や浮葉植物が優占することになる。したがって、浅い湖沼においては特に底質の挙動と生態系や水環境が密接に関わっていると言える。

2. 研究開発目的

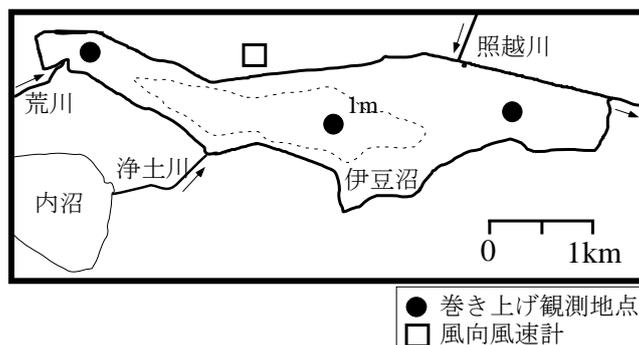
本研究では以上の背景を踏まえ、宮城県内に位置する富栄養化した浅い湖沼である伊豆沼における底質と水の濁りに関する現地観測を行い、強風イベント時の濁度変化を整理した。また、水理学的な解析に基づく底質巻き上げモデルを用いた数値計算を行い、その結果について現地観測結果と比較検討した。

3. 研究開発方法

(1) 研究対象地の概略

研究対象である伊豆沼は、宮城県北部に位置する湖面積2.89 km²、最大水深1.6 m、平均水深0.76 mの浅い湖である。伊豆沼の平面図を図(2)-1に示す。流入河川は本川である荒川、内沼からの流出河川である浄土川などがある。これに対して、流出は湖東端の1ヶ所である。また、伊豆沼の水位は下流端に設置されているゲートで管理されている。

伊豆沼および周辺の湿地環境は、多様な動植物の生息地となっており、国内有数の渡り鳥の飛来地としてラムサール条約にも登録されている。しかし、家庭排水の流入、水鳥の糞や餌などの影響により水質が悪化し、富栄養化が深刻な問題となっている。実際、2010年11月に環境省から発表された平成21年度公共用水域水質測定結果では、CODの年間平均値が10 mg/Lにもなり、全国でもっともCODの値が高い湖沼にランクされた。そのため、伊豆沼の水質を含む水環境の改善は、市民や行政を含む人々の関心事項となっている。



図(2)-1 伊豆沼の平面図と観測地点

(2) 現地観測方法

2010年および2011年に底質の巻き上げに関する現地観測を実施した。観測事項は、風向・風速および湖内濁度の連続観測と底泥物性の調査である。観測地点は図(2)-1のように設定した。

風向・風速は、図(2)-1に示した地点に風向・風速計を設置し、10分間隔で連続計測を行った。この地点は、湖岸近くで高台になっている場所である。風速計は、この場所の地上から約3 mの高さに設置したが、湖面からは約20 mの高さにあたる。

濁度の観測は次の2通り実施した。まず、12月5日に図(2)-1に示した伊豆沼の上流、湖心、下流の3地点において多項目水質計(旧アレック電子(株)製AAQ-1183)を用いて濁度の鉛直分布を測定した。また、2010年12月5日から12月26日、2011年3月7日から5月8日および7月29日から10月6日の3度に渡って、上記と同じ3地点において、湖底から0.5 mの位置にワイパー付き濁度計(JFEアドバンテック(株)製 Infinity CLW)を設置し、10分間隔で連続計測を行った。

さらに、この濁度計測と同時に流速と波高の測定も行った。流速計(JFEアドバンテック(株)製 COMPACT-EM)は湖心と下流地点の2箇所に、波高計(JFEアドバンテック(株)製 COMPACT-WH)は下流地点のみの1箇所に設置した。

なお、富栄養化した湖沼の底質は、平均粒径が数十 μm 程度で粘土、シルト分を中心に構成されている。このような粘着性の底質の巻き上げには、風波などによって引き起こされる乱流の影響が大きい¹⁰⁾ことが分かっている。本研究で用いた測器では、乱流計測は難しいが、できる限り変動成分のデータ解析を行えるよう、計測間隔やデータ数を設定した。流速は、0.5 秒間隔で180データの測定を30分毎に行った。波高は、0.25 秒間隔で1200データの測定を30分毎に行った。

測器の設置は、いずれも湖底から約0.5 mの高さにセンサーが来るように取り付けを行った。設置時の各地点における水深は、湖心と下流地点が約1.3 m、上流地点が約0.7 mであった。湖水位の変化が、観測期間中に数十 cmほど生じたが、センサーが乾出することはなかった。

底泥の物性調査は、エクマン・バージ採泥器を用いて底泥を採取し、含水率および粒径分布を測定した。粒径分布は、500, 250, 125 μm のふるい分けをした後、125 μm 未満の細粒分については、レーザー回折・散乱式の粒度分析装置MICROTRAC HRA9320-X100(日機装(株)製)を用いて分析した。

(3) 風の傾向分析

底質の巻き上げに対して、重要な外力となる風の傾向をまず調べた。用いたデータは、伊豆沼の

西側6 km地点にある築館アメダスのデータである，対象期間を2000年から2004年として季節ごとの風向の偏り，風速について検討した．

(4) 数値解析方法

1) 湖水流動に関する基礎方程式

本研究で用いた解析モデルは，伊豆沼と同様に富栄養化した浅い湖である霞ヶ浦において開発された底質巻上げモデルである．流動解析部分は，銭ら¹⁶⁾により構築された， $k-\varepsilon$ 乱流モデルを用いた3次元流動モデルを基本として構成した．基礎方程式は，以下のとおりである．

$$\frac{Du}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_L \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_L \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_T \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + fv \quad (2-1)$$

$$\frac{Dv}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_L \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_L \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_T \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - fu \quad (2-2)$$

$$\frac{Dw}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_L \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_L \frac{\partial w}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_T \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2-3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2-4)$$

$$\frac{Dk}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_L}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_L}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) = P_r - \varepsilon \quad (2-5)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_L}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_L}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) = C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_r + C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2-6)$$

ここに， x, y ：水平座標（それぞれ東西方向，南北方向に対応する）， z ：鉛直上向き座標， u, v, w ：それぞれ x, y, z 方向の流速， k ：乱れエネルギー， ε ：粘性散逸率， p ：圧力， ν_T ：鉛直方向の実行動粘性係数（動粘性係数 ν と渦動粘性係数の和）， ν_L ：水平方向の実効動粘性係数， f ：コリオリ係数（ 8.6×10^{-5} 1/s）である． $k-\varepsilon$ 乱流モデルの式において， P_r はせん断による乱流エネルギーの生成項であり，

$$P_r = \nu_t \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] \right\} \quad (2-7)$$

で表される．鉛直方向の渦動粘性係数 ν_t は，

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2-8)$$

で求め，水平方向についてはRichardsonの4/3乗則を適用して，

$$\nu_L = \nu + 0.5L^{4/3} \quad (2-9)$$

として求めた．ここに L ：水平方向の空間スケールでありメッシュサイズを用いた．また， C_1 と C_2 ， C_μ は $k-\varepsilon$ モデルの定数であり，それぞれ標準値（1.44，1.92，0.09）を用いた．

なお，銭らの検討では密度成層が対象であったため，水温および密度差（浮力）が考慮されていた．それに対し，本研究は最大水深が1m程度と霞ヶ浦よりもさらに浅い湖を対象としている上に，対象期間が冬季であったため，水温成層は十分無視することができる．そのため，浮力に関する

効果は考慮に入れなかった。式(2-1)から(2-6)の基礎方程式は有限体積法で離散化し、運動方程式と連続式のカップリングはSIMPLE法により行った。

2) 底質の巻き上げに関する解析方法

底質の巻き上げのモデル化は、湖水流動と同様に、霞ヶ浦の底質巻き上げに対して提案された次式を用いた。

$$F_{sed} = A\varepsilon - Cw_s \quad (2-10)$$

ここに F_{sed} は湖底における底質フラックス(上向き)を示しており、第一項が巻き上げ、第二項が堆積を表している。Cは湖底直上における底質粒子の濃度(すなわちSS)、 w_s は沈降速度である。また、Aは定数であり、霞ヶ浦の湖深部に対してはA = 15が設定され、良好な再現性が得られていた¹⁰⁾。ただし、これは経験的な係数であるため、伊豆沼を含む他の湖沼(あるいは異なる底質の条件)において適用する場合には再設定の必要性が考えられる。

巻き上げられた底質は、底質粒子の沈降を踏まえた移流拡散方程式に基づき、SSとして湖内の輸送を考慮した。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial Cu}{\partial x} + \frac{\partial Cv}{\partial y} + \frac{\partial C(w-w_s)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_L}{\sigma_c} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_L}{\sigma_c} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_T}{\sigma_c} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (2-11)$$

湖沼の底質巻き上げに対して、一方向流れで生じるせん断よりも、風波に由来する振動流と乱流の組み合わせから生じる効果が大きいという特性¹⁰⁾を考慮したもので、これは粒径が数十 μm 程度と細粒で含水比が高い粘着性底質の場合に顕著である。それを式(2-10)でモデル化している。

3) 計算条件

計算は、観測を実施した全期間のうち、特に強風が吹き顕著な濁度変化が観測されたイベントを対象にした。濁度変化のあった日の前後一日程度を含め、12月21日0時から25日0時までを計算期間とした。湖底形状は、宮城県により実施された深浅測量結果を参考にして、データを作成した。水平方向の計算格子は94 m \times 100 mとし、鉛直方向には0.1 mとした。

底質の沈降速度は、粒度分析結果から与えた。測定した3地点の底質の平均粒径分布を求め(後述する図(2)-2参照)、代表粒径として25%、50%、75%の値を選定した。粒径はそれぞれ24、62、200 μm である。これらの粒径に対してストークスの沈降則から沈降速度を換算し、 4.39×10^{-4} m/s、 2.93×10^{-3} m/s、 3.05×10^{-2} m/s と与えた。各沈降速度成分に対して、式(2-10)の巻き上げと堆積および式(2-11)の移流拡散方程式を個別に適用し、3成分の計算結果を足し合わせて、湖水中の全SSとした。

境界条件として湖水の流入と流出は無視した。理由は、対象期間における正確な流量が不明だったことに加え、今回のイベントにおける底質の巻き上げは、強風による湖流が引き起こしたものである。そのため、流入や流出の影響が小さいと考えられるからである。また、湖底における流速および k と ε に対する境界条件は、梅田ら¹⁰⁾と同様に与えた。一方、湖面風による応力等の条件は、伊豆沼に固有な条件を考慮するため、別途本研究において設定方法を検討した。これについては後述する。

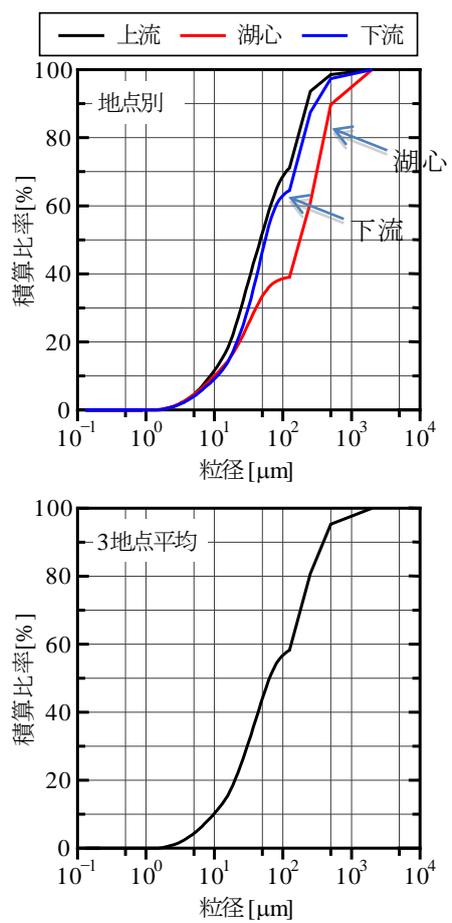
4. 結果及び考察

(1) 観測結果

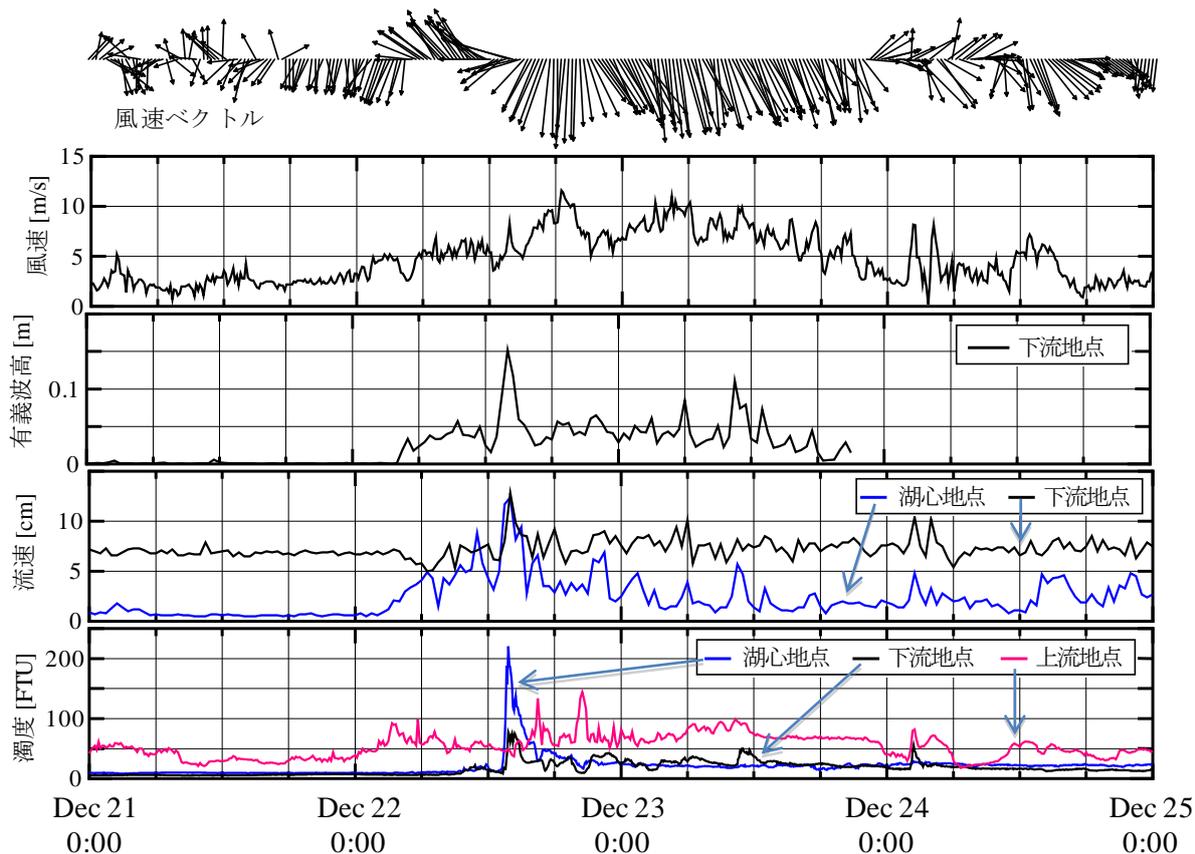
底質の粒度分析結果を図(2)-2に示す。各地点の粒度組成に加えて、3地点を平均した分布も示した。125 μm の箇所では線が不連続に折れ曲がって見えるのは、この粒径を境に分析方法が異なるためである。それぞれの地点の粒径の中央値は47 μm (上流地点)、約200 μm (湖心地点)、54 μm (下流地点)であった。一般的には、流入端に近い範囲に粗粒分が多いと考えられるが、今回の調査結果によると、湖心地点で比較的砂質分が多かった。

2010年12月6日から12月26日までの観測期間中、比較的大きな巻き上がりが生じた12月21日から12月25日における観測結果を図(2)-3に示す。図は上から、風ベクトル、風速、有義波高(下流地点)、流速(湖心および下流地点)、濁度である。このときの最大風速は10 m/sを超えた。現場付近では年間を通じて西風の頻度が高いが、今回の事象では北風が卓越していることが特徴である。一方、風速と他の測定項目を見比べると、風速に必ずしも対応しているように見えない。波高と流速および濁度(特に湖心と下流地点)は、風速が7 m/s程度であった12月22日14時頃にピークを迎えている。ただし、ベクトル図より分かるように、この時間帯に風向は南寄りから北風へと大きく変化している。そのため、単に風速だけではなく、風向も大きな要因となって湖内の水理条件が変化していると推測できる。この点に関しては、後に詳細に解析を行う。

湖心地点と下流地点では、濁度上昇後にはその前に比べて濁度の高い状態が数日間持続している。一方で上流地点は、他の地点と比べるとかなり高い濁度が常時継続している。ここは、流入河川が近いことや水深が小さいことなどが影響していると考えられる。なお、波高のデータが12月23日で途切れてしまっているのは、測器の記録容量が一杯になってしまったため、それ以降は欠測となったからである。



図(2)-2 底質の粒度分析結果

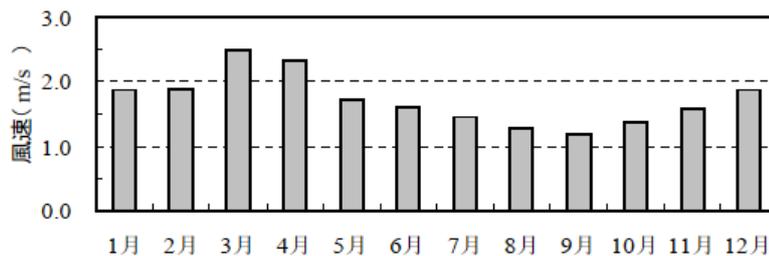


図(2)-3 底質巻き上げイベント時を中心とした現地計測結果
(風速, 波高, 流速, 濁度の時系列)

図(2)-3に示した流速は、各測定時で0.5秒ごとに90秒間計測した値を平均した流速である。最大で10 cm/sを超える程度であり、既往の知見⁵⁾を参考にすると、粘着性の湖沼底質を巻き上げるには不十分である。したがって、濁度の上昇と平均流速の増加が対応しているように見えるが、実際には風波により生じた振動流や乱流の影響の方が大きいと考えられる。そこで、流速変動成分に着目した解析を行った。

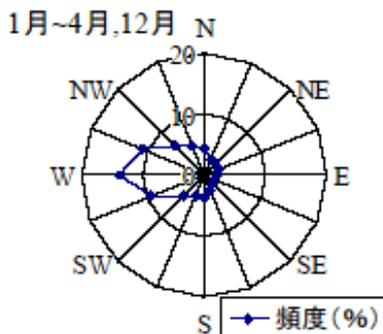
(2) 風の傾向分析

図(2)-4に2000年から2004年5年間を平均した月ごとの平均風速を示す。12月から4月にかけて平均風速が大きく、特に3月から4月にかけて強い風が吹いていることがわかる。図(2)-5に2000年から2004年の12月から4月の風向の頻度分布を示す。

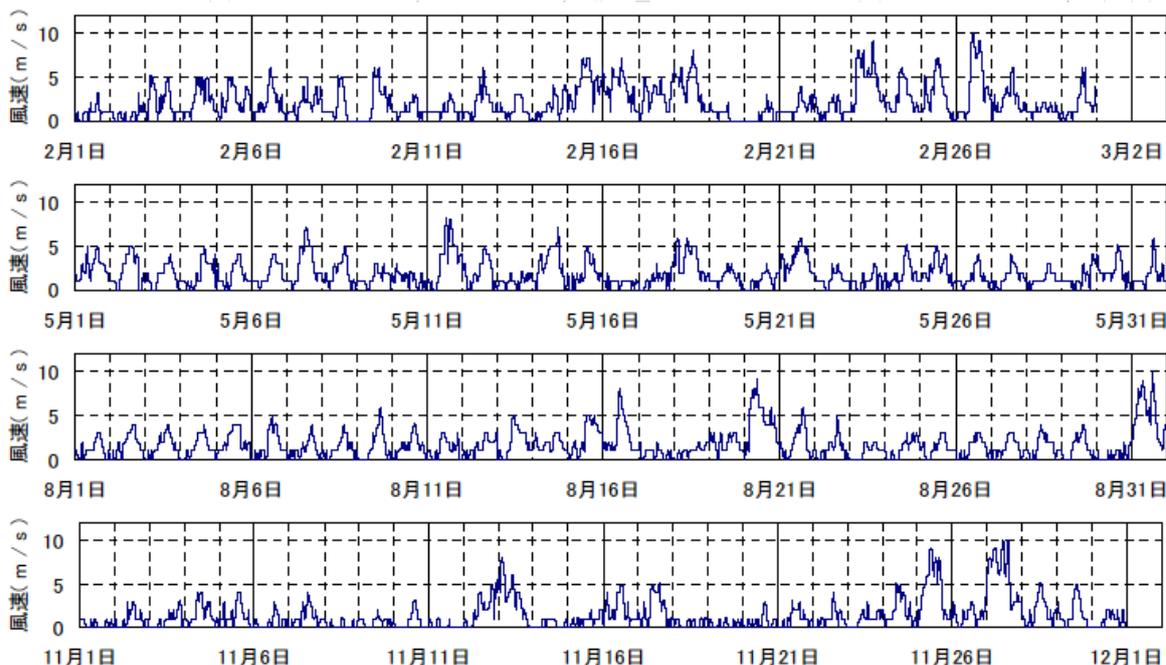


図(2)-4 2000~2004年の月ごとの平均風速

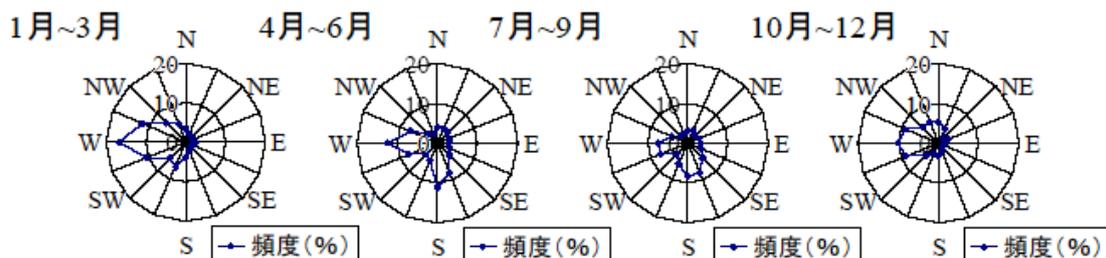
また、図(2)-6に2004年2月、5月、8月、11月の風速変動を、図(2)-7に2004年1月から3月、4月から6月、7月から9月、10月から12月の風向頻度分布を示した。図(2)-6から年間を通して1日周期の風が吹きやすいことがわかる。図(2)-5および図(2)-7では、冬季に西風の頻度が高いのが特徴的である。これは伊豆沼の上流から下流側への長手方向に対応している。このため、冬季には風下側にあたる伊豆沼の東側ほど風の影響を受けやすく、巻上げが発生しやすいのではないかと考えられる。



図(2)-5 2000～2004年の風向



図(2)-6 2004年2月、5月、8月、11月の風速

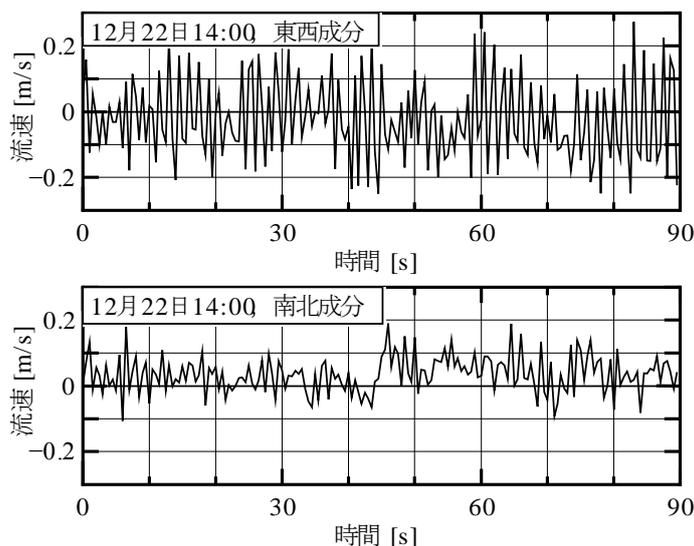


図(2)-7 2004年季節ごとの風向頻度分布

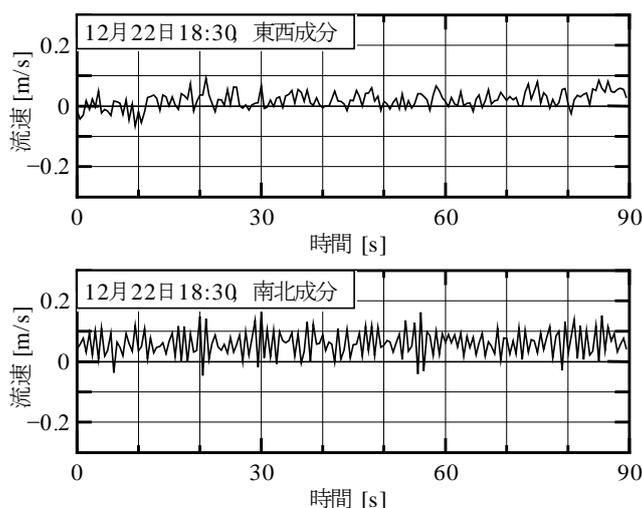
(3) 湖面風と水理条件の関連

風向風速と各水理量の観測結果から、伊豆沼という小さな水域においても、吹送距離の影響が強くでていることが示唆された。そこで、観測諸量を方角の成分に分割して考察を行った。まず底質巻き上げ(濁度上昇)時の風速と流速振動の関係を調べた。これは、風速は風向から方角(東西成分、南北成分)に分けることができ、流速も本研究で用いた電磁流速計は東西成分と南北成分に分けて出力されていることを利用した検討である。図(2)-8と図(2)-9に示した流速は、それぞれ濁度が最大になった12月22日14時と、風速が最大になった12月22日18時30分における、下流地点での計測結果を方位成分別に表したものである。これらの時刻における風向風速は、濁度ピーク時の22日14時には東南東の風6.5 m/s、風速ピーク時の22日18時30分には北の風11.6 m/sだった。この風速は、湖岸で計測したものであるため、湖面上の風と厳密に一致しない可能性は高い。しかし、14時には東西方向の流速変動が卓越しているのに対して、18時30分では振幅が小さいながらも南北成分が大きい。このことから、流速振幅は概ね風向と同じ成分が大きくなっていると言える。一方、それら大きさは、風速に2倍近く差があるにもかかわらず、14時の方がかなり大きい。これは、図(2)-1からも分かるように、東西方向に長軸を持つという伊豆沼の形状的な特徴による、吹送距離が大きく効いているためと考えられる。

上記の点を考慮して、つぎに、風速と流速振幅のそれぞれの方位成分に関する関係を調べた。図(2)-8と図(2)-9に示したような湖心地点と下流地点の各流速測定値について整理したものを図(2)-10に黒丸で示す。縦軸に「流速変動」として示したものは、図(2)-8,9のような90秒間の生データに対して標準偏差を求めた値である。本研究で用いた流速計は、すでに述べたとおり、データ取得間隔が最短でも0.5秒だった。それに対して、流速変動の周期はせいぜい1~2秒程度であったため、詳細な変動量に関する解析ができない。そこで、本論文では変動量を表すために標準偏差を指標とした。



図(2)-8 濁度がピーク時の下流地点における流速の測定結果
(上段：東西成分，下段：南北成分)



図(2)-9 風速がピーク時の下流地点における流速の測定結果
(上段：東西成分，下段：南北成分)

図(2)-10より，風の東西成分に対して大きな応答が見られることがよく分かる．ただし，よく見ると，例えば同じ西風成分に対しても，湖心地点と下流地点を比べると，下流地点の方が大きな流速変動が生じているようである．これが，それぞれの地点での吹送距離の差に対応していると想像される．そこで，各地点の方位別の吹送距離を地図から読み取って求めた．ここでは，観測地点から各方位の湖岸までの単純な距離を，吹送距離として扱った．吹送距離の算定結果を表(2)-1に示す．

風速と吹送距離から，方位別の流速変動量を求める式を作成する．海岸，海洋における波浪推算では，有義波法(SMB法)などにみられるように風速と吹送距離に加えて，吹送時間も考慮される¹⁷⁾．図(2)-3でも見られたように，波高と流速は対応があるので，吹送時間も考慮すると精度がよると想像される．しかしながら，本論文で対象としたイベントでは風向の変化が早いため，吹送時間を算定するのが難しい．また小さな湖沼であるため，吹送距離もせいぜい2.5 kmと短い．そのため，海洋での風波と同様な定式方法は適用できないと考えられる．そこで本研究では，以下に示すような単純な関係式を設定した．

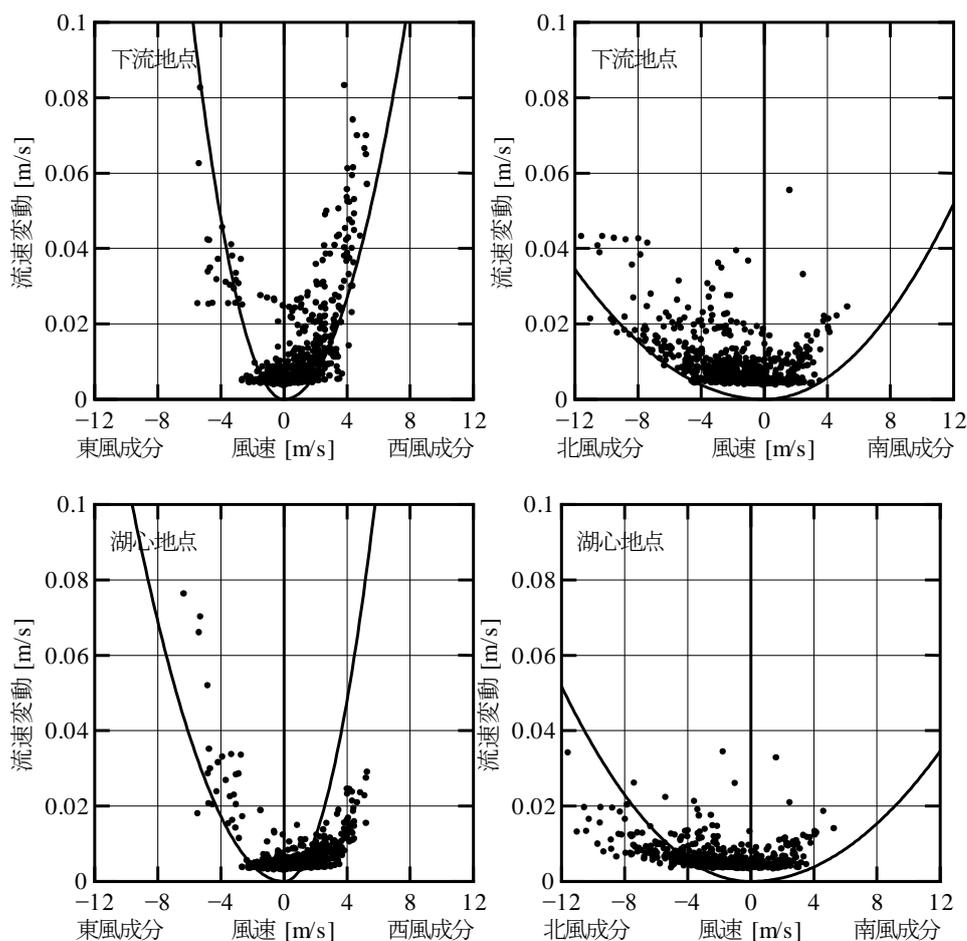
$$u_w = aF_i^b W_i^c \quad (2-12)$$

ここに， u_w ：流速振幅[m/s]， F_i ：風の*i*方位成分に対応する吹送距離[km]， W_i ：風速の*i*方位成分[m/s]である．また， a ， b ， c は定数である．経験的にこれらの定数を設定したところ， $a = 1.2 \times 10^{-3}$ ， $b = 1$ ， $c = 2$ が最適であると求められた．

図(2)-10中の実線は，式(2-12)および表(2)-1の吹送距離を用いて，各地点および各方位に対する流速変動量を求めた結果である．個別に見ると多少の過大評価，過小評価が認められるが，一般的な再現性は十分にあると言える．特にここで注目したい東西方向に対する流速変動と南北方向に対する流速変動の強度が大きく異なるということに対しては，十分に評価されていると考えられる．したがって，この関係に基づいて，湖水流動および底質の巻き上げの数値解析を行うことにする．

表(2)-1 地点別，方位別の吹送距離（単位：km）

	上流地点	湖心地点	下流地点
東側	0.2	2.5	1.4
西側	0.2	0.9	2.5
北側	0.2	0.2	0.3
南側	0.2	0.3	0.2



図(2)-10 風速と流速変動の地点別，方位別の関係
 黒丸が測定値，実線が式(2-12)および表(2)-1からの推定値

(4) 底質巻き上げの数値解析

1) 湖面風を考慮した水面条件

前章の考察により，湖面風によって生じる流速変動成分が，式(2-12)のように表されることが分かった．これはあくまでも水中で得られた流速であるが，このような流速変動は湖面風や風波による擾乱で引き起こされるものであることから，この関係を水面における境界条件として活用することを考える．そこで，まず水面における流速変動 u_{ws} は

$$u_{ws} \propto F_i W_i^2 \quad (2-13)$$

であると仮定する。

また、霞ヶ浦における既往の観測結果によると、吹送流によって生じる流速変動は、波動成分と乱れ成分の両方を含んでいるが、乱流成分は流速変動の波動成分と概ね比例の関係になることが報告されている。このことから、流速変動の乱流成分 u' は、本研究で調べたような流速変動量 u_w にも比例するものと仮定する。

$$u_t \propto u_w \quad (2-14)$$

さらに、乱流エネルギー k の定義は、乱流強度の各方向成分の和である

$$k = \frac{1}{2}(u' + v' + w') \quad (2-15)$$

ことを考慮すれば、水面における k の値 k_s として

$$k_s = c_k (u_{wEW}^2 + u_{wNS}^2) \quad (2-16)$$

と表されると考えられる。ここに u_{wEW} と u_{wNS} は、それぞれ流速変動の東西成分と南北成分、 c_k は定数である。以上より、

$$k_s = c_w (F_{EW} W_{EW}^2 + F_{NS} W_{NS}^2) \quad (2-17)$$

として水面での乱流エネルギー k_s を与えることができる。ここに C_w は定数であり、実測値と計算値の整合性から決定する必要がある。

さらに、式(2-17)と壁法則から、水面での風で生じる摩擦速度 u_{*EW} 、 u_{*NS} および散逸率 ϵ_s の境界条件を与えた。

$$u_{*EW} = \sqrt{c_w C_\mu F_{EW} W_{EW}} \quad (2-18)$$

$$u_{*NS} = \sqrt{c_w C_\mu F_{NS} W_{NS}} \quad (2-19)$$

$$\epsilon_s = \frac{k_s^{3/2}}{\kappa \Delta z / 2} \quad (2-20)$$

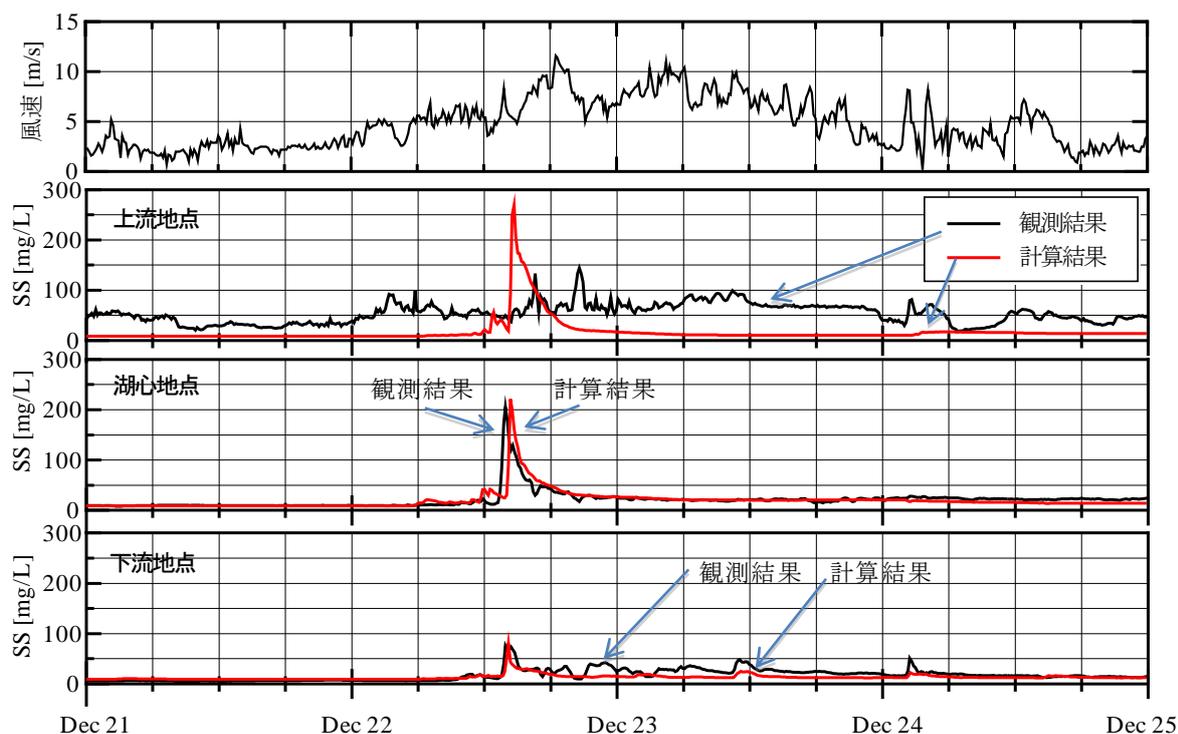
ここに κ はカルマン定数、 Δz は鉛直格子間隔である。

2) 湖内濁度の計算

前述した計算条件により、2010年12月21日0時から25日0時までの湖水流動および濁度の計算を実施した。図(2)-11に計算結果を示す。図は上から順に、風速および濁度(SS)の上流地点、湖心地点、下流地点を示している。なお、実測値は濁度であるのに対して、計算で考慮しているものは粒子としてのSSである。ただし、一般には同一の現場で採取される懸濁粒子に対して、SSと濁度は概ね比例関係が成り立つ¹⁸⁾。そこで、本論文では濁度とSSが同じ値であるとして、図(2)-11のような比較を行った。

なお検討したモデル内にいくつか経験的に設定が必要な定数があった。これらは、SSの再現性

を考慮しながら値を設定した．式(2-10)の底質巻き上げに係わる定数は， $a = 0.05$ とし，式(2-16)の湖面における乱流エネルギーに係わる定数は， $c_k = 1.0 \times 10^{-6}$ とした．巻き上げに関する定数 a の値は，既往研究での霞ヶ浦における値(15.0)と比較してかなり小さな値となった．この値は，設定したもう一つの定数である c_k とのバランスや底質の沈降速度分布から，ある程度の調整を行うことも可能である．しかしながら，予備的に行った検討として，境界条件の与え方を含め，既往研究(霞ヶ浦における検討)と同じ方法で計算を実施した．つまり，底質の平均粒径から沈降速度を設定し，風向に依存した風応力等の条件を考慮に入れない計算を行った．その結果，湖内のSSは桁違いに過大評価された．すなわち，伊豆沼では同等の湖面風に対して，霞ヶ浦よりも巻き上げりにくい傾向にあると言える．理由の一つに，底質の違いが挙げられる．本研究の観測地点で採取した底質の含水比を計測したところ，350%から500%程度であった．それに対して，霞ヶ浦では900%(地点などの条件によっては1,000%以上)もの含水比に達する．また，底質の粒度も，霞ヶ浦では中央粒径が約 $15 \mu\text{m}$ であり，先に示したように本論文の観測地点のうち，もっとも細かかった上流地点でも $47 \mu\text{m}$ だった．このような底質の条件が異なることが，巻き上げに関する係数の差に現れたものと考えられる．



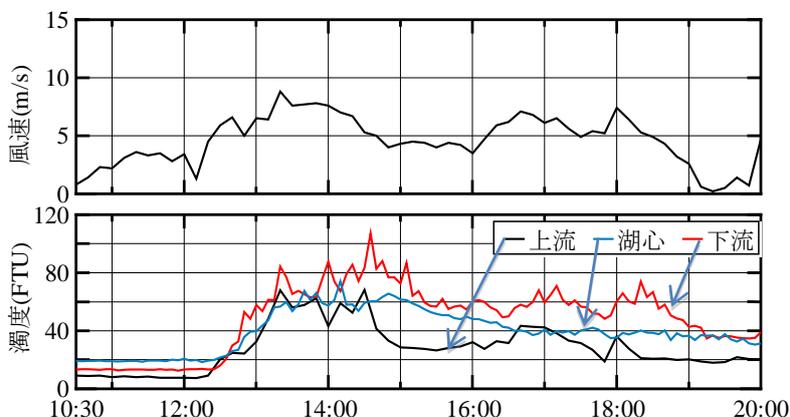
図(2)-11 計測地点に対応するSSの計算結果および風速

3) 巻き上げ率を考慮した湖内濁度の計算

12月，3月，4月に底質の巻き上げ事象が多数確認できた．その一例として，図(2)-12に3月19日の風速と濁度の観測結果を示す．全般的な傾向として，風速が約 5 m/s を超えると巻き上げが生じることがわかった．巻き上げと風速の関係を分析するため，得られたデータから鉛直水柱内での濁質収支を考え，巻き上げ率を算定した¹⁰⁾．濁質の収支式は次式で表される．

$$E = h \frac{dC}{dt} + w_s C \quad (2-21)$$

ここに、 E ：巻き上げ率 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)， h ：水深 (m)， C ：濁質密度 (kg/m^3)， w_s ：沈降速度 (m/s) である。



図(2)-12 2011年3月19日の風速と濁度の観測結果

なお、実測値は濁度であるのに対して、計算ではSSとして考慮している。ただし、一般には同一の現場で採取される懸濁粒子に対して、SSと濁度は比例関係が成り立つ¹⁸⁾。また、その比例数は多くの場合1前後であり、概ねSS=濁度とみなせる事例^{19,20)}も得られている。そこで、本研究では濁度とSSが同じ値であるとして計算を行った。沈降速度は実測の濁度時系列から求めた。その際、濁度がピークに達してからの低減時間帯に注目した。このような時には、巻き上げが起こっていないと仮定すると、式(2-21)は以下ようになる。

$$h \frac{dC}{dt} = -w_s C \quad (2-22)$$

これをCについて解くと、以下ようになる。

$$C = C_0 e^{-At} \quad (2-23)$$

ここに、 C_0 は定数、 $A = w_s / h$ [$1/\text{s}$] である。

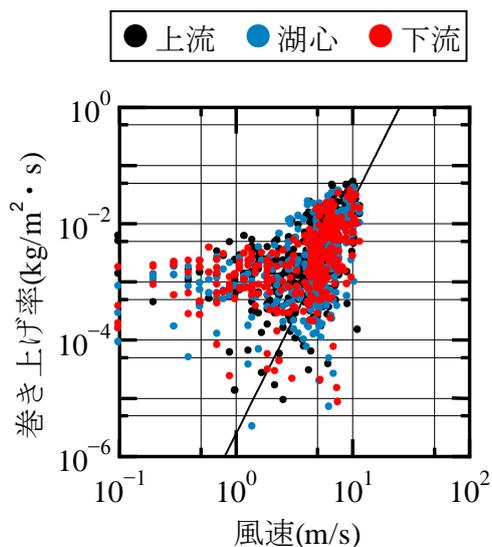
このことから、沈降速度は、経過時間と濁度の片対数をプロットした直線の傾きに水深を乗ずることで求めることができる。そこで、巻き上げ事象毎に沈降速度を求め、観測地点別に平均すると、沈降速度は、 $1.52 \times 10^{-5} \text{m}/\text{s}$ (上流地点)， $2.37 \times 10^{-5} \text{m}/\text{s}$ (湖心地点)， $3.78 \times 10^{-5} \text{m}/\text{s}$ (下流地点) となった。

本研究では、風速と巻き上げ率が以下に示す関係式で表せると仮定して検討した。

$$E = aW^b \quad (2-24)$$

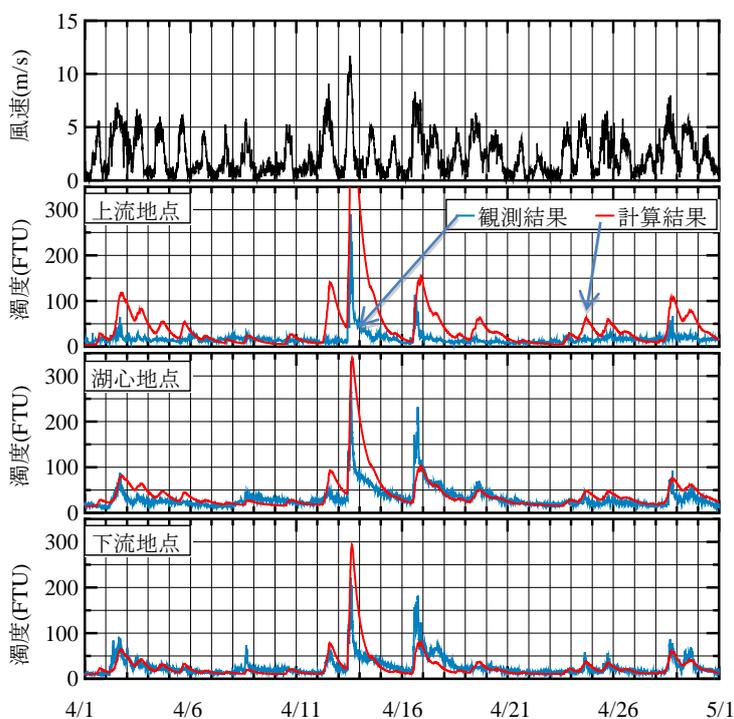
ここに、 E ：巻き上げ率 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)， W ：風速 (m/s) である。また、 a と b は定数である。

比較的大きな巻き上げが生じた4回のイベント (3月14日，19日，4月13日，16日) における風速と巻き上げ率の関係をプロットしたものを図(2)-13に示す。さらに、図(2)-13の実測値を表現できるように経験的に a と b を求めた。その結果、 $a = 2.5 \times 10^{-6} (\text{kg} \cdot \text{s}^3/\text{m}^6)$ ， $b = 4$ を与えると図(2)-13の実線で示したように概ね実測値と整合するようになった。



図(2)-13 風速と巻き上げ率の関係

式(2-21)および式(2-24)に基づき、2011年4月を対象として濁度の時系列の再現計算を実施した。図(2)-14に風速および濁度の観測、計算結果を示す。上流地点では、計算結果に過大評価の傾向が高い。また、3地点ともピーク後の濁度の低下が遅い傾向もみられる。しかしながら、外力である湖面風に応じた濁度の上昇（底泥の巻き上げ）は、概ね再現できたと考えられる。このことから、本研究で提案した式(2-24)によって、湖面風による底質の巻き上げの効果を表すことができた」と評価できた。



図(2)-14 2011年4月の風速および濁度の観測、計算結果

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究では、浅く富栄養化した湖沼に適用できる底質巻き上げモデルの開発をめざし、既存のモデルの水面における境界条件の改良を施した。すなわち、風速および吹送距離を考慮して、水面での摩擦速度や乱流パラメータの設定をした。その結果、風による底質の巻き上げを高い精度で再現することができた。

この結果、モデル中の経験的なパラメータに関しても霞ヶ浦と伊豆沼を比較しながら湖沼形状、底質性状の差異を考慮して説明することが可能となった。今後解析を深めて経験的なパラメータを合理化し、様々な特徴を有する浅い閉鎖性水域の底質形成機構を説明できるモデルへと発展させたい。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究成果は、現在実施中である伊豆沼・内沼自然再生事業（研究代表者が自然再生協議会会長をつとめる）に対して順応的管理を行うための科学的知見として提供し、環境政策の推進に貢献する予定である。

6. 国際共同研究等の状況

本研究成果を基盤として、研究代表者が参画するグローバルCOEプログラム「環境激変への生態系適応に向けた教育研究」において中国東南大学李先寧教授をカウンターパートとした「太湖融合研究」を実施している。本研究を博士課程の研究テーマとする学生を受け入れ、これまでに3度、中国を訪問し太湖フィールド調査を行った。浅い閉鎖性水域の富栄養化問題は世界に共通する課題であり、成果を蓄積した後は二国間から多国間へと共同研究を広げたいと考えている。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

1) 梅田 信，別当雄亮，進東健太郎： 土木学会論文集A2（応用力学），67(2)，I_615-I_623 (2011).

「伊豆沼における底質の巻き上げと湖面風の関連」

2) 仲田信也，梅田 信，嶋田哲郎： 土木学会論文集A2（応用力学），投稿中．

「伊豆沼における底質の巻き上げに関する観測と解析」

<その他誌上発表（査読なし）>

1) 別当雄亮，梅田 信： 東北地域災害科学研究，47，135-140（2011）.

「伊豆沼における湖面風と底質の巻き上げについて」

2) 仲田信也, 梅田 信, 嶋田哲郎: 東北地域災害科学研究, 49, 103-108 (2013).
「伊豆沼における底質組成の空間分布」

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 別当雄亮, 梅田 信: 平成22年度東北地域災害科学研究集会 (2011)
「伊豆沼における湖面風と底質の巻き上げについて」
- 2) 別当雄亮, 梅田 信: 平成22年度土木学会東北支部技術研究発表会 (2011)
「伊豆沼における底質の挙動に関する研究」
- 3) 梅田 信, 別当雄亮, 進東健太郎: 土木学会応用力学講演会 (2011)
「伊豆沼における底質の巻き上げと湖面風の関連」
- 4) 梅田 信, 別当雄亮, 進東健太郎: 第6回伊豆沼・内沼研究集会 (2012)
「伊豆沼における底質の巻き上げと湖面風の関連」
- 5) 仲田信也, 梅田 信, 嶋田哲郎: 平成24年度東北地域災害科学研究集会 (2012)
「伊豆沼における底質組成の空間分布」
- 6) 仲田信也, 梅田 信, 嶋田哲郎: 平成24年度土木学会東北支部技術研究発表会 (2013)
「伊豆沼における底質組成の空間分布と形成モデリング」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) シンポジウム, セミナー等の開催 (主催のもの)

特に記載すべき事項はない

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

(6) その他

特に記載すべき事項はない

8. 引用文献

- 1) 本間孝幸, 二瓶泰雄: 現地観測とボックスモデルに基づく夏季手賀沼におけるリン収支の把握, 水工学論文集, Vol. 50, pp. 1327-1332, 2006.
- 2) 天野邦彦, 中西 哲: 富栄養化の進んだ湖沼における導水等による水質改善に関する考察—印旛沼を事例にして—, 水工学論文集, Vol. 52, pp. 1267-1272, 2008.
- 3) 大坪国順, 村岡浩爾: 底泥の物性および限界掃流力に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 363, pp. 225-234, 1985.
- 4) 大坪国順, 村岡浩爾: 流れによる底泥の飛び出し率, 土木学会論文集, No. 375, pp. 43-52, 1986.
- 5) 梅田 信, 高峰 一, 石川忠晴, 大滝 諭, 市山 誠: 霞ヶ浦底泥の洗掘過程に関する実験的研

- 究, 土木学会論文集, No.740/II-64, pp.63-73, 2003.
- 6) Krannenburg, C. and Winterwerp, J. C. : Erosion of fluid mud layers. I: Entrainment model, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.123, pp.504-511, 1997.
 - 7) Maa, P. Y. and Mehta, A. J. : Mud Erosion by Waves: a Laboratory Study, *Continental Shelf Research*, Vol.7, pp.1269-1284, 1987.
 - 8) 鶴谷広一, 江口秀二, 鷹濱 潤 : 流れと波による底泥の巻き上げに関する実験的研究, *海岸工学論文集*, 35, pp.357-341, 1988.
 - 9) 山西博幸, 楠田哲也 : 振動流下における高濃度層の形成・保持機構に関する研究, *海岸工学論文集*, 39, pp.286-290, 1992.
 - 10) 梅田 信, 長嶺知徳, 長広 遥, 石川忠晴, 宇多高明 : 霞ヶ浦湖心部における底泥の巻き上げ過程に関する研究, *水工学論文集*, Vol.45, pp.1171-1176, 2001.
 - 11) 梅田 信, 高峰 一, 五味 啓, 石川忠晴, 市山 誠 : 平面噴流による霞ヶ浦底泥の洗掘限界に関する実験的研究, *水工学論文集*, 第47巻, pp.1183-1188, 2003.
 - 12) Scheffer M et al. : Catastrophic Shifts in Ecosystems, *Nature*, vol.413, pp.591-596, 2001.
 - 13) Horppila, J. and Nurminen, L. : Effects of submerged macrophytes on sediment resuspension and internal phosphorus loading in Lake Hiidenvesi (southern Finland), *Water Research*, Vol.37, pp.4468-4478, 2003.
 - 14) James, W.F., Barko, J. W. and Butler, M. G. : Shear stress and sediment resuspension in realltion to submersed macrophyte biomass, *Hydrobiologia*, Vol.515, pp.181-191, 2004.
 - 15) 天野邦彦, 大石哲也 : 霞ヶ浦における沈水植物群落の消長と環境変遷の関連性解析に基づく修復候補地の抽出, *水工学論文集*, Vol.53, pp.1369-1374, 2009.
 - 16) 銭 新, 石川忠晴, 西部隆宏 : 霞ヶ浦高浜入りにおける日成層形成時の湾水交換の数値シミュレーション, *土木学会論文集*, Vol.43, pp.1216-1220, 1996.
 - 17) 例えば, 土木学会 : 水理公式集, 昭和60年版, p.486.
 - 18) 横山勝英 : 濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察, *土木学会論文集*, 58号, pp.93-98, 2002.
 - 19) 関 智弥, 福島武彦, 今井章雄, 松重一夫 : 霞ヶ浦の濁度上昇と底泥巻き上げ現象, *土木学会論文集G*, 811, pp.149-161, 2006.
 - 20) 横山勝英, 石川忠晴, 梅田 信 : 濁質生産量の推定方法に関する研究, *ダム工学*, 10(4), pp.311-322, 2000.

(3) 底質環境の長期連続モニタリングおよび底質環境形成機構の解析

東北大学大学院工学研究科

野村宗弘

<研究協力者>

東北大学大学院工学研究科

藤林 恵

平成22～24年度累計予算額：4,513 千円

(うち、平成24年度予算額：737 千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

本研究では底質に有機物質を堆積させない、流出を促進させる技術の開発をめざし、伊豆沼をフィールドとして砂質、泥質、砂泥質と底質性状の異なる地点を選定して1ヶ月以上の連続モニタリングを行い、底質環境特性の異なる場における流動特性を比較して底質性状と流動との関係を考察した。その結果、人工護岸によって直線化した岸に平行した風向が卓越する場合その下流で瞬間的には風速に匹敵する非常に高い流速が発生すること、一方でそれ以外の風向の場合には流速が極度に抑えられること、自然護岸においては流速1 cm/s以下の低流速である頻度が高いこと、岸沖方向に振動流が発生しやすく、それが底質の性状に影響を及ぼしている可能性が高いことなどの新たな知見が得られた。また、底質(有機炭素含有率)と流動(流速超過確率)の関係をモデル化し、流速超過確率は底質を推定するために有用なパラメータであることがわかった。また、流速超過確率を0.01程度以上に保つことで、底質の泥化を防止することができることが示唆された。さらに自然護岸では岸に近い部分で流速が大きくなることが示された。これらの成果を通じて環境改変に伴う底生生物相の応答評価が期待できる。

さらに、浅い閉鎖性水域である湖沼の底質有機炭素の起源を解明するために、脂肪酸組成および安定同位体比を指標として生産者構造の異なる宮城県北部に位置する伊豆沼(高等植物：ハス)と、中国江蘇省に位置する太湖(微細藻類：藍藻)を対象に調査を行った。その結果、両湖とも底質に堆積している有機炭素は主に高等植物に起源を有することが明らかとなった。さらに、両湖のデータを同時に解析したところ、底質有機炭素含有率と高等植物由来の脂肪酸含有量には有意な正の相関が認められた。この結果は、閉鎖性水域において高等植物由来の有機炭素が閉鎖性水域の有機汚濁を引き起こしているという本研究の発見が普遍的なものであることを示唆しており、閉鎖性水域の有機汚濁を改善するためには、高等植物の管理が重要であることが示された。

[キーワード] 閉鎖性水域、底質汚濁、流動、巻き上げ、モニタリング

1. はじめに

閉鎖性水域の富栄養化は水環境問題の中でも最も深刻である。当該研究グループが自然再生に取り組む伊豆沼・内沼も富栄養化によって水質ワーストランキングの上位に位置する湖沼であり、かつての泳げる・飲める水質を維持していた面影はない。また、冬鳥の渡来地として世界的にも極めて価値の高い自然環境を有し、飛来数は過去最高を記録しているものの、沈水植物は絶滅の

危機に瀕し、かつて多数存在したイシガイ・ドブガイ等二枚貝類は激減し、性成熟に達していない幼貝は殆どみつからない状況にある。

これは伊豆沼・内沼以外の浅い閉鎖性水域に共通する課題でもある。「浅い」ことは、水-気界面の風波による水-土界面の底質巻き上げは栄養塩の溶出、内部負荷の増加のみではなく、底層表面の微生物環境に対する影響、透明度の低減による一次生産者の生産量への影響、浮遊や沈水植物などの分布など様々な影響を与える。つまり、底質の堆積有機物含有量は、生態系の化学的、生物的特性を決める重要なパラメータであると考えられ、浅い閉鎖性水域の保全・再生を可能とするうえでは、有機物の動態と底質の形成過程および性状との関係を解明することが不可避であるといえる¹⁾。

ところで、なぜ底質が有機汚濁化するのかに関しては、富栄養化による沈降・堆積有機物の増加とともに、治水・利水のために堰や垂直護岸の整備によって攪乱が制御され、これまで流去していた懸濁有機物が堆積し、底質の有機汚濁化、内部負荷の増加をもたらしている可能性は高い。特に浅い閉鎖性水域である伊豆沼や霞ヶ浦では堰の整備によって水位が上昇し、風波による攪乱が弱まり底質の移動が妨げられている可能性がある。本研究では底質に有機物を堆積させない、流出を促進させる技術の開発をめざすが、これは基本的に自然の攪乱を利用したオンサイトの技術であり、経済性に優れる可能性は非常に高い。これまで行われてきた底質改善対策としての浚渫や覆砂は効果の持続性、費用対効果、シードバンク(土壌に含まれる発芽能を持った埋土種子)の喪失などの問題があり、それらに代わる底質改善対策として有望である。

他方、底質に堆積する有機炭素の起源を明らかにすることも抜本的な対策を講じるうえで、不可欠である。一般的に湖沼に堆積する有機物としては陸上植物などの外部由来のものと、湖沼内部で生産されるものに分けられる²⁾。これらの有機物の寄与が湖沼によって異なるのか、あるいは湖沼のタイプによってある特定の傾向を有しているのかを知るための十分なデータは蓄積されていない。底質有機物の起源を解析する方法としては炭素安定同位体、脂肪酸組成さらに脂肪酸の炭素安定同位体比に注目した方法が知られている。潜在有機物源として想定される、陸上植物や湖沼内部で生産される藻類の炭素安定同位体比は、それぞれが利用する無機炭素の炭素安定同位体比が異なっていることなどに起因して、有意に異なる値を示すことが多い。この潜在有機物起源の炭素安定同位体比がそれぞれ異なることを利用して、底質有機炭素の炭素安定同位体比から底質に対する潜在有機物起源の寄与を推定することができる。脂肪酸を用いた方法では珪藻や渦鞭毛藻類などの潜在有機物起源ごとに特有の脂肪酸があることが知られており、これらの脂肪酸を底質から検出することで、底質の有機物起源を知ることができる。また、脂肪酸の炭素安定同位体比を用いた方法は、まだ発展途上であり報告例は少ないが、同様の脂肪酸マーカーを有する起源有機物を同位体比の差異から区分できる可能性や、微生物の分解により消失した有機物の存在を、細菌由来の脂肪酸の同位体比を測定することで推測できるものと期待されている。

2. 研究開発目的

本研究の目的は、浅い閉鎖性水域の底質制御技術の確立にある。このため、水域の流動が底質を支配するという仮説を立てて、浅い閉鎖性水域の砂地、泥地、沈水植物生育場、浮葉植物生育場など底質環境特性の異なる様々な場を選定し、流動と水質・底質・底生生物のモニタリングを行い、それらの関係を解析して統計モデルを構築する。平成22年度は、伊豆沼をフィールドとし

て砂質、泥質、砂泥質と底質性状の異なる地点を選定して1ヶ月以上の連続モニタリングを行い、底質環境特性の異なる場における流動特性を比較して底質性状と流動との関係を考察した。

次にこれまでに閉鎖性水域においては底質有機物含有率と流動の関係が明らかになっていない。また、流動を制御する手法として緩傾斜の自然護岸化を考えたが、自然護岸でどのように流動が変化するかは分かっていない。そこで本研究では、底質有機物含有率と流動の関係に注目し、湖沼の沿岸部および自然護岸近傍における底質環境と水理環境との関係を明らかにすることを目的として、伊豆沼の沿岸部においてモニタリング調査を行った。

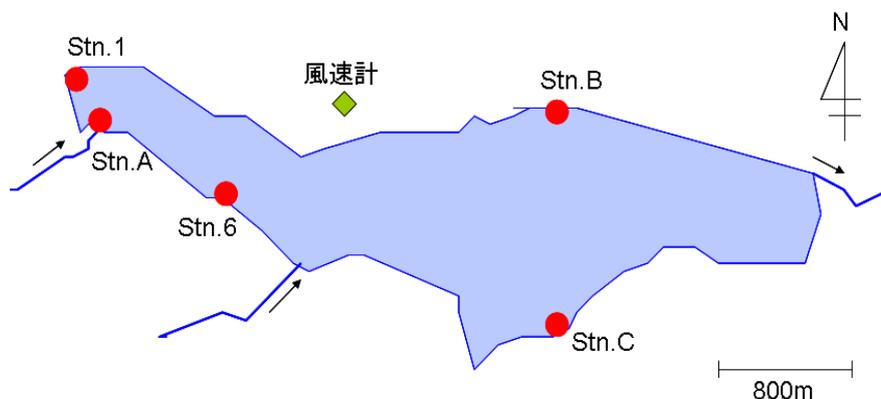
さらに、生産者構造の異なる富栄養化した閉鎖性水域である伊豆沼および太湖において炭素安定同位体比、脂肪酸、そして脂肪酸の炭素安定同位体比を用いて底質有機物の起源を解明することを目的とした。さらに、伊豆沼で採集したハスの分解過程を明らかにするとともに、現場調査で得られた底質の脂肪酸データの解釈の助けとするために、ハスの分解実験を実験室で行った。

3. 研究開発方法

(1) 底質環境の長期連続モニタリングおよび底質環境形成機構の解析

1) 研究対象水域の概要

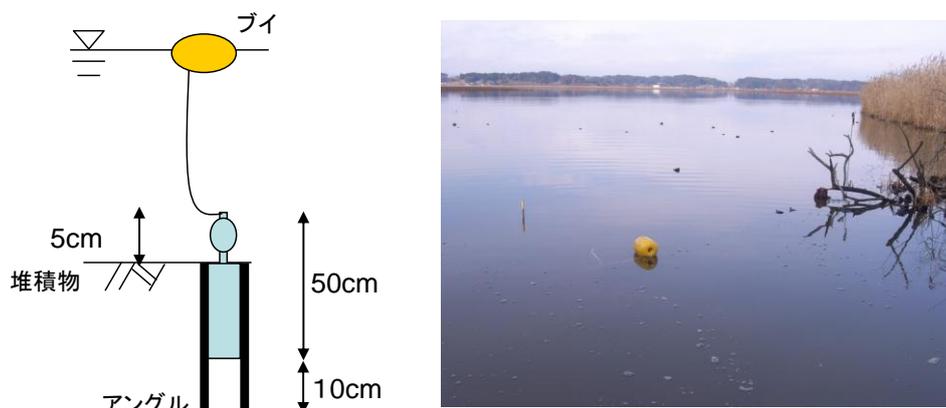
研究対象水域とした宮城県伊豆沼は、最大水深1.6 m、平均水深0.76 mと浅い湖沼である。このため様々な水生植物が湖面を覆い、豊かな植物環境が形成されており、トンボなどの昆虫類や魚類、水鳥類をはじめとする多様な生物相を育てている。一方、伊豆沼・内沼は2008年度の湖沼のCOD高濃度水域ワースト1位であり³⁾、年間の平均COD値は2009年度で10 mg/L、2008年度では9.5 mg/Lであった。



図(3)-1 伊豆沼の全体図と観測地点

2) 流動特性に関する現地観測

観測期間は、2010年12月9日から2011年1月21日までである。調査地点は異なる堆積有機物含有量の底質を有する3地点(Stn. A, B, C: 図(3)-1)から2週間間隔で表層底質(0-1 cm)を採取し、有機物の指標として全炭素含有率を測定した。観測地点は現地踏査から底質を確認しながら選定したもので、Stn. Aは伊豆沼の河川流入部で底質は砂質、Stn. Bは伊豆沼北岸で人工護岸の近傍で底質は泥質、Stn. Cは伊豆沼南岸で自然護岸の近傍で底質は砂泥質である。この期間内、3地点に電磁流速計(INFINITY-EM; JFEアドバンテック(株))を堆積物直上5cmに設置し、流向・流速(10分毎に1秒間隔で30個)を連続観測した(図(3)-2)。



図(3)-2 流速計の設置方法

3) 水の流動と底質の有機炭素含有率の関係解析

図(3)-1に示す5地点でモニタリング調査を行った。Stn. Aは河川流入部，Stn. Bは北岸で人工護岸近傍，Stn. Cは南岸に位置し，自然護岸近傍で岸边にはマコモの植生がみられる。また，Stn. 1は最西端でヨシに囲まれた地点，Stn. 6は植生の見られる人工護岸近傍で湖心方向には多くのハスが見られる地点である。この5地点について，2010年12月から2011年12月まで計9回，表層堆積土0～1cmについて柱状採泥器を用いてサンプリングし，元素分析装置（VarioEL III；エレメンタール社）により有機炭素含有率を測定し，底質中の有機物指標として解析に用いた。また，2010年12月と2011年9月に，同観測地点の堆積物表層から直上5cmの位置に電磁流速計（INFINITY-EM；JFEアドバンテック）を設置し，流速・流向を1ヶ月ずつ連続測定した。

さらに，2011年12月5日から12月21日まで，Stn. C近傍で岸沖方向に6つ観測地点を設け，底質有機炭素含有率と流速・流向をそれぞれ上記の方法で観測した。岸から2mの地点をC-1（水深：0.34 m）とし，湖心方向に向かって6mずつ距離を置き，C-2，C-3，C-4，C-5，C-6（水深：0.76 m）とした。

(2) 脂肪酸と安定同位体比を用いた底質有機炭素の起源解析

1) 伊豆沼における調査の概要

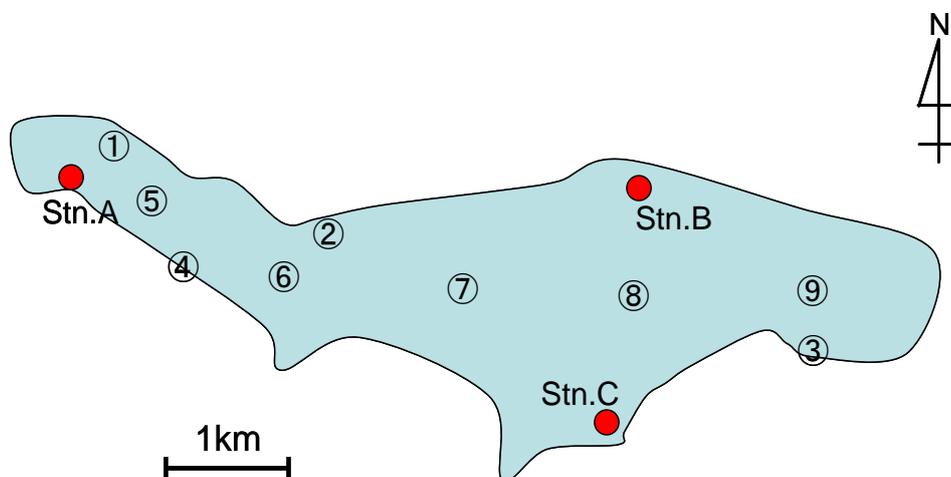
a. 伊豆沼の概要

宮城県栗原市と登米市に位置する伊豆沼の富栄養化ならびに水質の状況については上述したとおりである。伊豆沼の生産者の特徴としては浮葉植物であるハスの大群落が存在することであり，夏には湖面の半分以上をハスが覆うこともある。その一方で，湖面を覆うために光が制限となり水中の藻類にとっては増殖しがたい環境になっていると考えられる。

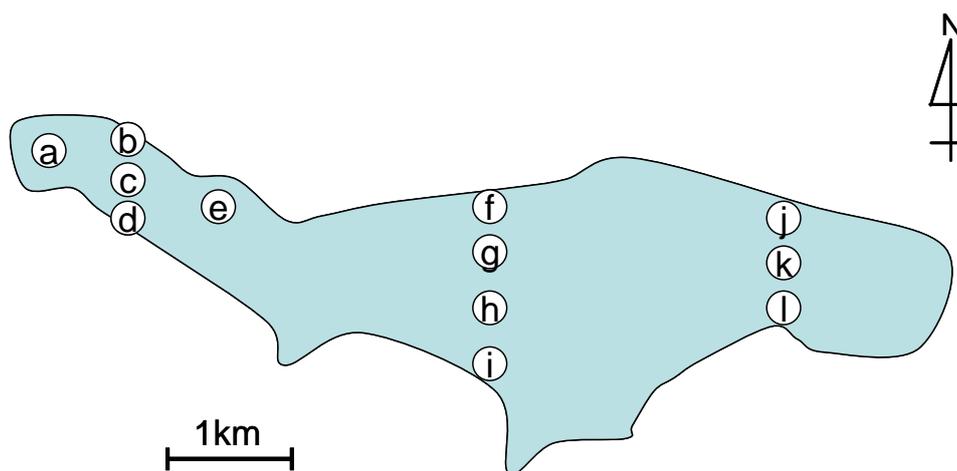
b. サンプリング

2011年6月29と7月5日に12地点から底質を採集した。Stn. A～C，Stn. 1～4は沿岸域であり，残りのStn. 5～9は湖心部である（図(3)-3）。Stn. A～Cでは有機炭素含有率，炭素・窒素安定同位体比，脂肪酸組成そして脂肪酸の炭素安定同位体比を分析した。他の地点から得られたサンプルは

有機炭素含有率と脂肪酸組成を分析した。さらに底質の有機物起源として想定されるハスの葉、ヨシ、ヒシを採集し、脂肪酸組成および炭素・窒素安定同位体比を測定した。また、2012年8月にも伊豆沼全体から12地点 (Stn. a~l) (図(3)-4) から底質を採集し、脂肪酸組成を分析した。



図(3)-3 2011年における伊豆沼調査地点



図(3)-4 2012年における伊豆沼調査地点

c. 分析方法

i 有機炭素含有率

フリーズドライした底質サンプルに1 N塩酸を加え、一晚静置し無機炭素を除去した。超純水で塩酸がなくなるまで洗浄し、60 °Cの乾燥炉で再度乾燥させたものを有機炭素含有率測定用のサンプルとした。サンプルは元素分析装置(エレメンタール社製, VarioEL III)で分析した。

ii 安定同位体比

底質に関しては上述の有機炭素含有率を測定するために酸処理したサンプルを炭素安定同位体比の分析に用いた。窒素安定同位体比分析用のサンプルは酸処理を行っていないものを用いた。植物に関してはフリーズドライ処理のみを施し、サンプルとした。各サンプルは質量分析計

(Finnigan MAT社, Delta plus)を用いて分析した。炭素・窒素安定同位体比は次式を用いて標準物質からの相対千分差で表した。

$$\delta^{13}\text{C or }^{15}\text{N} (\text{‰}) = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000 \quad (3-1)$$

ここで R_{sample} はサンプルの $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ または $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ を表し, R_{standard} は標準物質の $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ または $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ を表す。標準物質は炭素がPeeDee Belemnite (PDB) であり, 窒素は大気である。

iii 脂肪酸組成および脂肪酸の炭素安定同位体比

脂肪酸はAbdulkadirらのOne-step method⁴⁾を用いて抽出・メチルエステル化を同時に行い, n-ヘキサン溶液とした。抽出を行う際, 内部標準物質としてトリコサン酸 (C23:0, 東京化成(株)製)を用いた。脂肪酸組成分析は水素炎イオン化検出器付きガスクロマトグラフ (GC-2014, 島津製作所(株)製) に充填カラムとしてキャピラリーカラム (Select FAME, 100 m×0.25 mm, ID, 0.20 μm, Agilent社製)を用いて分析した。カラムの昇温プログラムは150 °C (5 min保持) - 4 °C/min - 230 °C (10 min保持) - 4 °C/min - 250 °C (20 min保持) とした。キャリアーガスはヘリウム定圧モード, 331 kPaとし, 注入口温度260 °C, 検出器温度280 °Cで分析した。各脂肪酸の標準物質としてSpelco®37 Component FAME Mix (Sigma Aldrich社製)を用いてリテンションタイムから各脂肪酸の同定を行い各脂肪酸の含有量を計算した。なお本研究では標準物質のリテンションタイムに該当しないピークは全て除外した。

さらに脂肪酸分析で使用した抽出ヘキサン試料を用いて各脂肪酸中の $\delta^{13}\text{C}$ 分析を行った。各脂肪酸中 $\delta^{13}\text{C}$ 分析には前処理装置として脂肪酸組成分析と同じキャピラリーカラム (Select FAME) を充填したガスクロマトグラフ (TRACE GC Ultra, Thermo Fisher Scientific社製) と連結した同位体比質量分析計 (Delta-V advantage, Thermo Fisher Scientific社製) を用いて分析した。キャリアーガスにはヘリウムを用い, 80 °C (0 min) - 5 °C/min - 180 °C (0 min) - 0.5 °C/min - 205 °C (0 min) - 3 °C/min - 250 °C (5 min保持) の昇温プログラム, 注入口温度250 °Cで分析した。標準物質は脂肪酸組成分析と同じSpelco®37を用いてリテンションタイムから各脂肪酸の同定を行った。

d. 解析方法

i 脂肪酸マーカーに注目した底質有機物の起源

既往の研究でしばしば用いられている脂肪酸マーカーを本研究でも採用した⁵⁾ (表(3)-1)。しかし, 緑藻・藍藻のマーカーとされる18:2ω6および18:3ω3は高等植物も含有しているため, 潜在有機物起源としてハスやヨシが想定される伊豆沼においてはこれらの脂肪酸を緑藻・藍藻のマーカーとして利用することは難しい。そこで, 本研究では緑藻・藍藻のマーカーは利用しなかった。

表(3)-1 マーカーとして利用されている脂肪酸

trophic marker	Source
i-15:0, a-15:0, i-17:0	細菌
a-17:0, i-18:1 ω 7	緑藻／藍藻
18:2 ω 6, i-18:3 ω 3	珪藻
20:6 ω 3, i-18:4 ω 3	渦鞭毛藻
LCFA	陸上植物

ii IsoSourceを用いた潜在有機物源の底質有機炭素に対する寄与率の計算

底質有機炭素に対する3種類の高等植物、ハス、ヨシ、ヒシの寄与を調べるため、これらの植物および底質の炭素・窒素安定同位体比を基に、IsoSource⁶⁾を用いて解析した。IsoSourceの計算条件はIncrement: 1%とし、またToleranceには3つ潜在有機物源の標準偏差のうちもっとも大きい値を用いた。

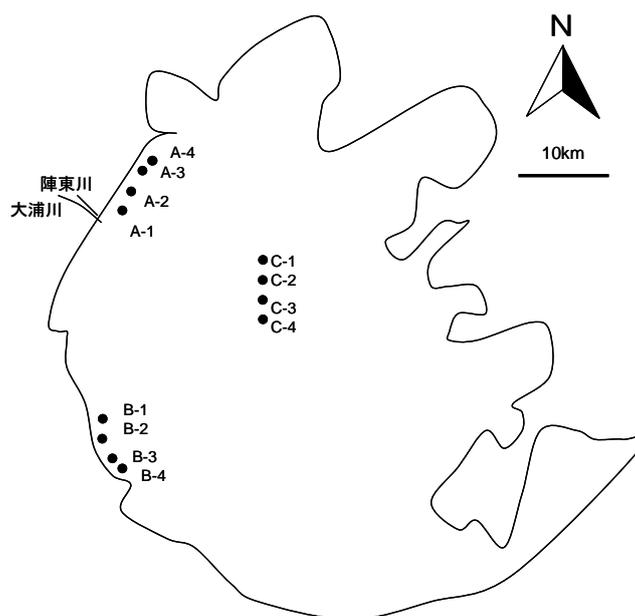
2) 太湖における調査の概要

a. 太湖の概略

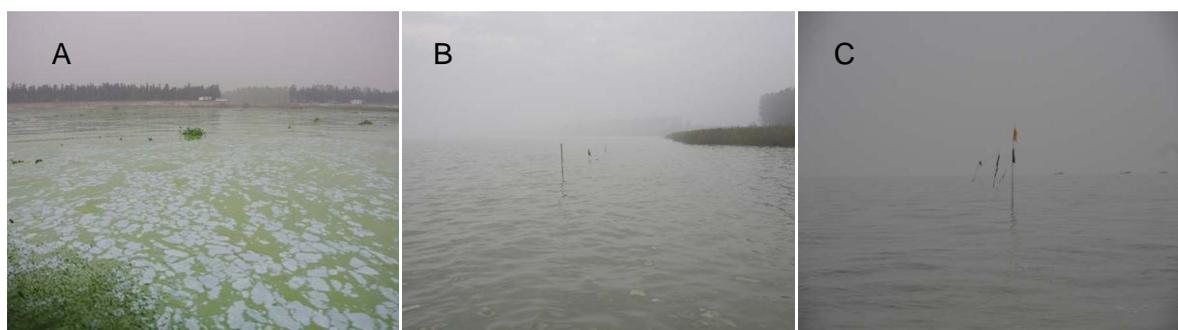
中国江蘇省にある太湖も富栄養化問題を抱える湖の一つである。太湖は面積2,338 m²と中国で3番目に広い湖であるが、平均水深は1.9 mと浅い。太湖は集水域3,000万人の水源であると同時に活発な養殖や漁業が行われており、地域住民の生活にとって非常に重要な湖である。また、醸し出す風光明媚な景観は観光資源としても高い評価を受けている。しかし、周辺地域の発展に伴い深刻な富栄養化が引き起こされ、藍藻類の異常増殖が発生している。2007年には太湖の水を水源とする無錫市の水道が、藍藻由来のカビ臭のために使えなくなるという事態も発生している。太湖に発生するアオコは特に北西部で顕著であり、ほぼ一年中アオコが残存するエリアもあるなど、生産者として浮遊藻類が卓越している。その一方で、太湖南部には藍藻の発生が相対的に少なく沈水植物が繁茂し、透明度も比較的高いエリアも残されている。

b. サンプルング

2011年11月に太湖の3つのエリア、すなわち北西部、南西部、湖心部から4地点ずつ表層1 cm程度の底質を採集した(図(3)-5)。各エリアの様子を示した写真を図(3)-6に示す。北西部では調査日が11月であったにもかかわらず、藍藻がマット状に水面を覆っていた。南西部、湖心部においても北西部ほどではないものの、水面にフロックを形成しながら漂う藍藻類が認められた。採集した底質サンプルは、有機炭素含有率、脂肪酸組成、炭素窒素安定同位体比を測定した。また、北西部から得られた底質に関しては、脂肪酸の炭素安定同位体比も測定した。また、各エリアにおいて水面に浮遊しているアオコを、そして北西部の流入河川に群生しているヨシを採集し、脂肪酸組成および炭素・窒素安定同位体比を測定した。北西部においてはさらに、底生動物を採集し、脂肪酸組成および炭素窒素安定同位体比を分析することで、食物源の解析を行った。



図(3)-5 太湖調査地点



図(3)-6 2011年11月調査時点の太湖調査エリアの藍藻の発生状況

c. 分析方法

i 有機炭素含有率

上述の伊豆沼の調査の際に行った分析方法と同様の手順で分析を行った。

ii 安定同位体比

底質の炭素・窒素安定同位体比は1N塩酸にて酸処理を行い、無機炭素を取り除き、その後、蒸留水で塩酸を洗い流し、60℃の乾燥炉で乾燥させたものを分析に供試した。底質の窒素安定同位体比および有機物源(アオコおよびヨシ)の炭素・窒素安定同位体比は凍結乾燥したものをそのまま分析に供試した。動物サンプルは後述の方法で脱脂し、60℃の乾燥炉で乾燥させたものを分析に供試した。分析には質量分析計(Finnigan MAT社, Delta plus)を用いた。炭素・窒素安定同位体比は(3-1)式を用いて標準物質からの相対千分差で表した。

$$^{13}\text{C} \text{ or } ^{15}\text{N} (\text{‰}) = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000 \quad (3-1)$$

ここで R_{sample} はサンプルの $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ または $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ を表し, R_{standard} は標準物質の $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ または $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ を表す. 標準物質は炭素がPeeDee Belemnite (PDB) であり, 窒素は大気である.

iii 脂肪酸組成および脂肪酸の炭素安定同位体比

上述の伊豆沼の調査の際に行った分析方法と同様の手順で分析を行った.

d. 解析方法

i 脂肪酸マーカーに注目した底質有機物の起源

潜在有機物源であるヨシとアオコの脂肪酸組成の結果から, それぞれの有機物源に特有の脂肪酸を選定し, マーカーとして用いた.

ii 炭素安定同位体比による底質有機物起源の割合

底質有機炭素に対する有機物起源の寄与率を次式⁷⁾を利用して算出した.

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{泥}} = f_{\text{藍藻}} \cdot \delta^{13}\text{C}_{\text{藍藻}} + f_{\text{陸上植物}} \cdot \delta^{13}\text{C}_{\text{陸上植物}} \quad (3-2)$$

$$1 = f_{\text{藍藻}} + f_{\text{陸上植物}} \quad (3-3)$$

ここで f は各添え字に書かれている有機物の底質有機炭素に対する寄与率を示してしている.
 $\delta^{13}\text{C}$ は各添え字に書かれている有機物の炭素安定同位体比を示している.

iii 脂肪酸の炭素安定同位体比による細菌の同化した有機物起源の特定

細菌の脂肪酸の炭素安定同位体比は同化した有機物のそれよりも3‰程度軽くなるという性質⁸⁾を有することが知られている. この性質を利用して, 細菌が藍藻と陸上植物のどちらをより同化しているか(3-4), (3-5)式により求めた.

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{bacterial FA: 泥}} + 3 = f'_{\text{藍藻}} \cdot \delta^{13}\text{C}_{\text{藍藻}} + f'_{\text{陸上植物}} \cdot \delta^{13}\text{C}_{\text{陸上植物}} \quad (3-4)$$

$$1 = f'_{\text{藍藻}} + f'_{\text{陸上植物}} \quad (3-5)$$

ここで f' は添え字に書かれている有機物が底質中の細菌に同化される有機炭素の寄与率を示している.
 $\delta^{13}\text{C}_{\text{bacterial FA: 泥}}$ は泥から抽出された細菌由来脂肪酸の炭素安定同位体比, $\delta^{13}\text{C}_{\text{藍藻}}$ および $\delta^{13}\text{C}_{\text{陸上植物}}$ は各有機物全体の炭素安定同位体比を示している. なお, 本研究では細菌由来の脂肪酸として知られているi15:0およびa15:0⁹⁾を用いて, 両脂肪酸の炭素安定同位体比の平均値を計算に用いた.

3) 高等植物の分解実験

2012年9月伊豆沼にて実験材料としてハスと湖水を採集した. ハスは結乾燥処理した後ミルミキサーを用いて粉末にし, ふるいにより粒径を500 μm以下としたものを分解実験用の試料とした. 粉末ハス試料乾燥重量1 gとガラス繊維ろ紙GF/B (Whatman 孔径1 μm, 直径47 mm) で吸引ろ過を行った湖水50 mlを100 ml三角フラスコ入れ, シリコン栓をし, 好気条件, 室温20 °C, 暗条件下でシェーカーを用いて100 rpmで攪拌させながらハスを分解させた.

実験の開始から0, 4, 7, 14, 32, 60日目にフラスコを取り出しGF/Bを用いてろ過を行い, ろ紙

上に残ったものをサンプルとして、凍結乾燥後に脂肪酸組成を分析した。脂肪酸組成の分析方法を上述の方法と同様である。

4. 結果及び考察

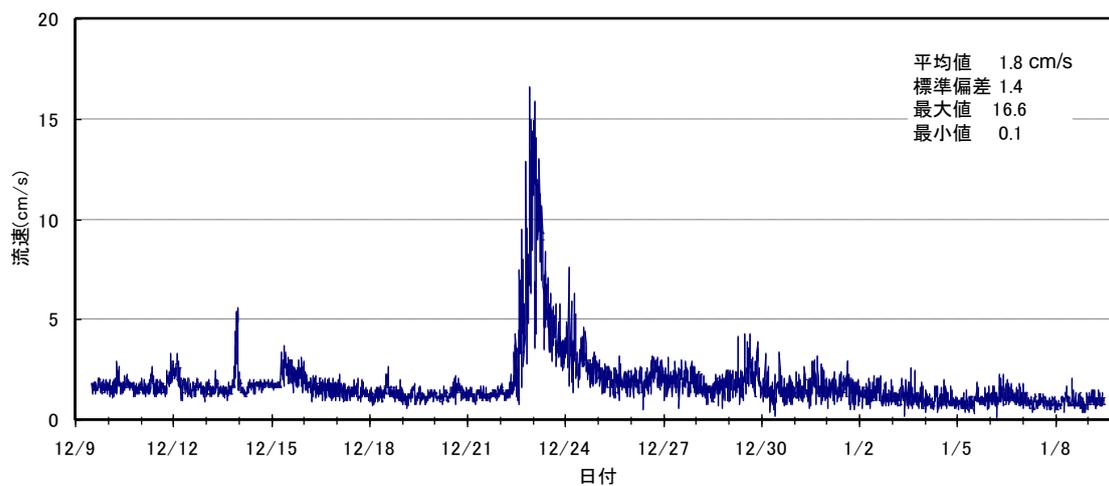
(1) 底質環境の長期連続モニタリングおよび底質環境形成機構の解析

1) 各地点の平均流速の経時変化の特徴

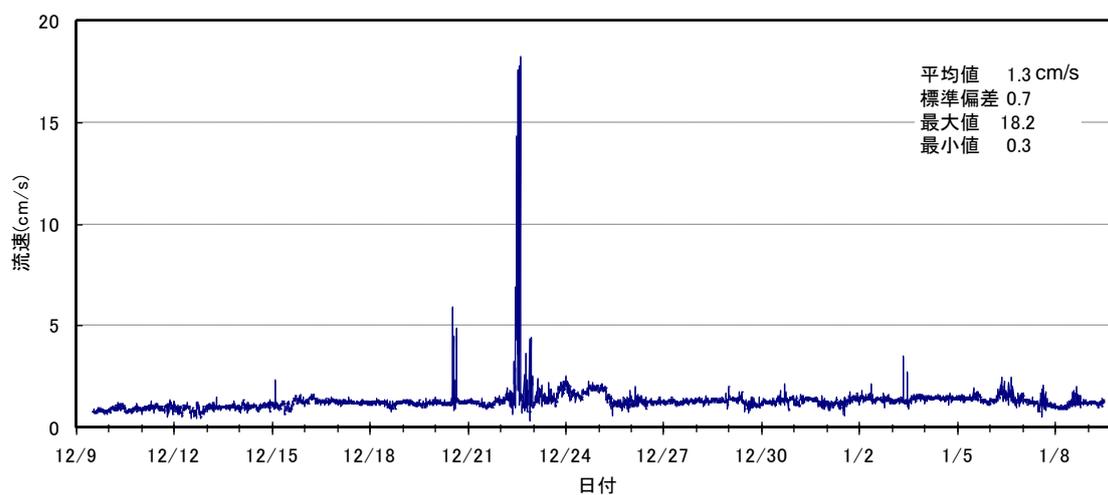
図(3)-7~9にStn. A~Cにおける合成流速の時系列データを示す。なお、本データは1秒間隔で30個測定したものを平均し、それを10分毎にプロットしたものである。Stn. Bのデータは水位低下に伴い測器のセンサー部分が露出したため、1月9日までの観測結果となった。このため全ての地点のデータは12月9日正午から1月9日正午までの32日間として解析に用いた。

Stn. A, Bにおいて12月22日~23日の荒天時に流速が急激に増加し、一時的ではあるが両地点ともに15cm/sを越える流速が測定された。一方、同時期のStn. Cにおいては若干の流速の増加が認められたものの、Stn. A, Bとは異なり、他の期間と大差のない程度の流速にとどまった。この12月22, 23日は風速も5 m/sを超えており(図(3)-10)、風により波・流れが発生したことがわかる。特に注目すべきはStn. Bで観測された流速ピークの急激な減衰である。風速自体は23日にかけてさらに上昇し、10 m/sを超える時間帯もあった。この影響はStn. Aの流速のピークと一致している。しかし、Stn. Bでは風速の上昇に対して流速は急激に減少している。この理由は風向にあると考えられる。Stn. Bの鋭い流速ピークをもたらした風は東風である(図(3)-10)。その後、風向は北風に変化しさらに風速を増している。この北風は岸に近いStn. Bから沖に向かう風であり(図(3)-1)、吹送距離は極端に短い。このため強風であっても流速は非常に低く抑えられたと考えられる。ただし、吹送距離から考えるとStn. Cは南風によって流速を上昇させておかしくない。このような現象が見られないことの原因については後で考察する。

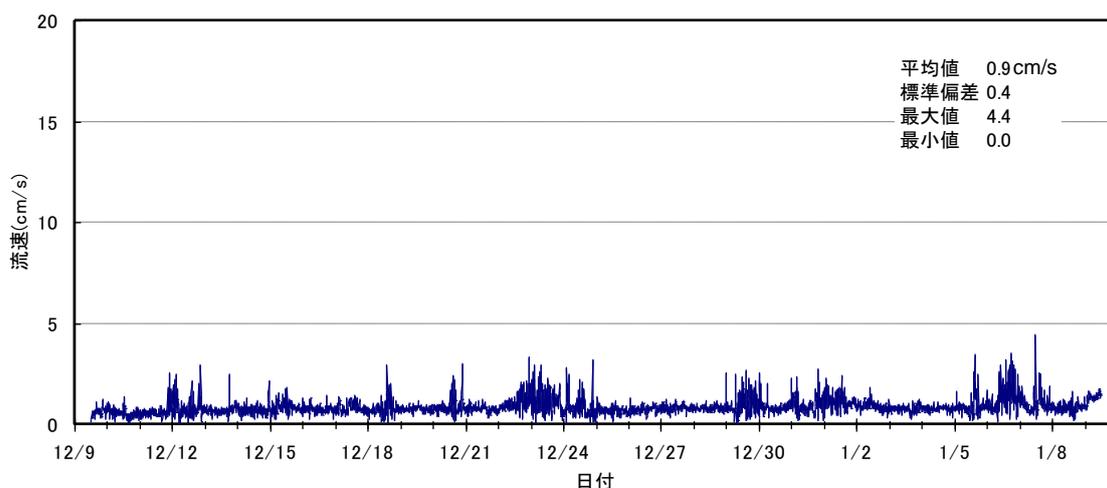
各観測地点で流速の平均値を比較するとStn. A(1.8 cm/s)、Stn. B(1.3 cm/s)、Stn. C(0.9 cm/s)の順に大きかった。標準偏差もStn. A(1.4 cm/s)、Stn. B(0.7 cm/s)、Stn. C(0.4 cm/s)の順に大きかった。したがって、巻き上げが発生しやすい高流速、高流速変動の場はStn. A, Stn. B, Stn. Cの順と整理して良さそうであるが、底質の性状はそれぞれ砂質、泥質、砂泥質であり、Stn. B, Stn. Cの水理環境と底質環境の関係はサブテーマ1でまとめたものと矛盾する。そこで、より詳細に各地点の流速の特徴を解析する。



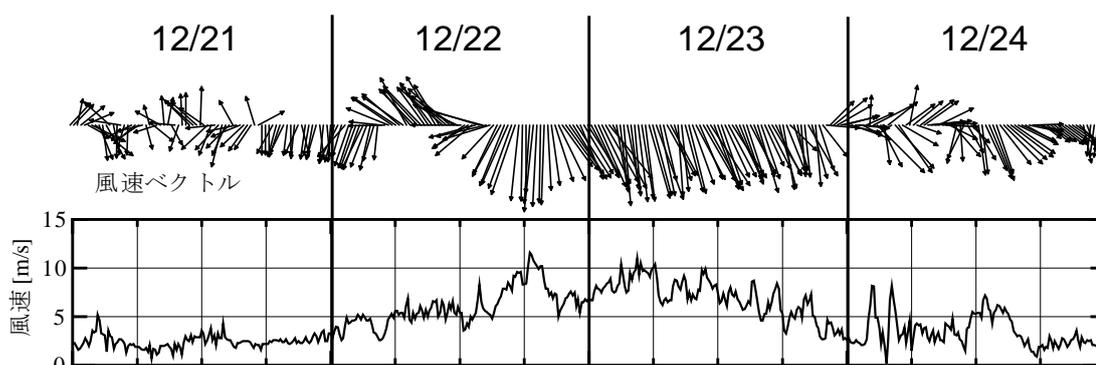
図(3)-7 Stn. Aにおける30秒間平均流速の時系列データ



図(3)-8 Stn. Bにおける30秒間平均流速の時系列データ



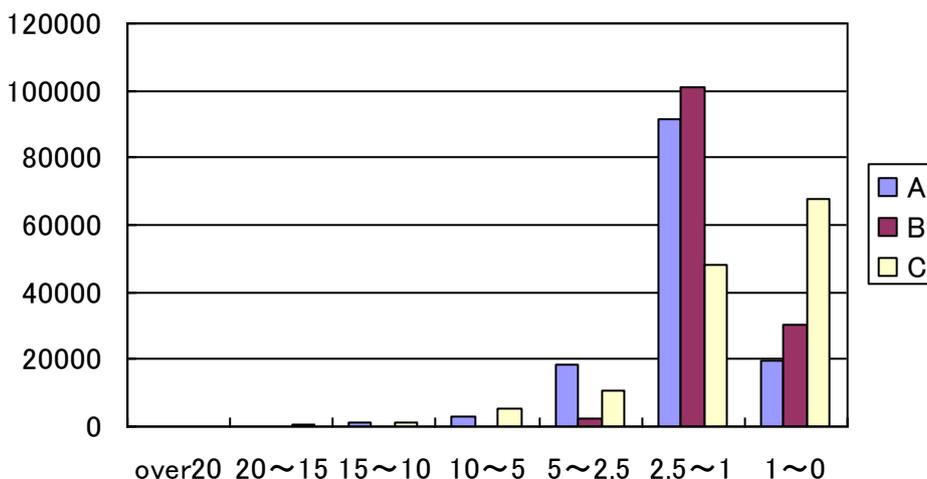
図(3)-9 Stn. Cにおける30秒間平均流速の時系列データ



図(3)-10 12月21日～24日における風速ベクトル図

2) 各地点の流速の度数分布

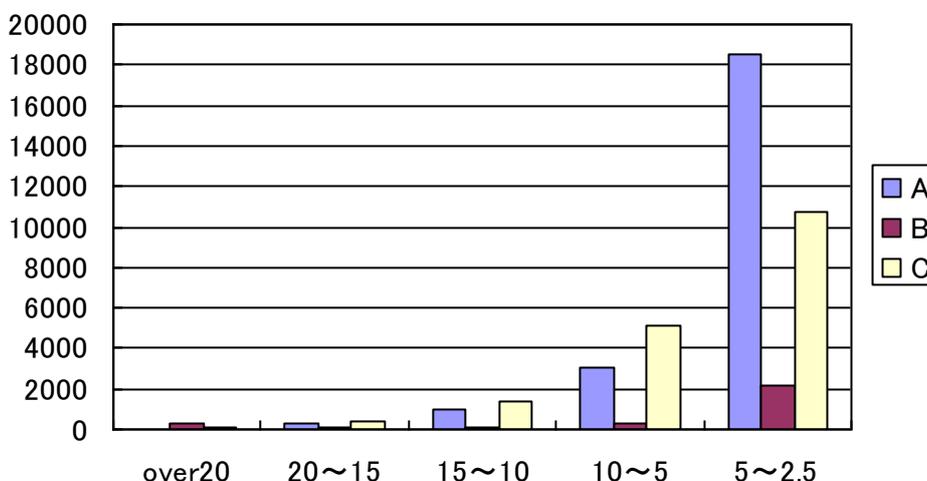
図(3)-11には流速を1秒間隔で30秒間測定し、9分30秒後に同じ測定を繰り返して32日間、計30,240個の所得したデータの度数分布を示した。すべての地点でほとんどの流速は2.5 cm/s以下であり、平均流速はこのような比較的低流速での値に影響を受けていることがわかる。しかし、細かく見るとStn. Bにおいては2.5 cm/s以上の度数が他の地点に比べて非常に低いことがわかる。また、Stn. AとCを比較すると、Stn. Aは1～2.5 cm/sの度数が最も多く、Stn. Cは0～1 cm/sの度数が最も多く、このことが底質性状に影響を及ぼしている可能性を伺わせる。



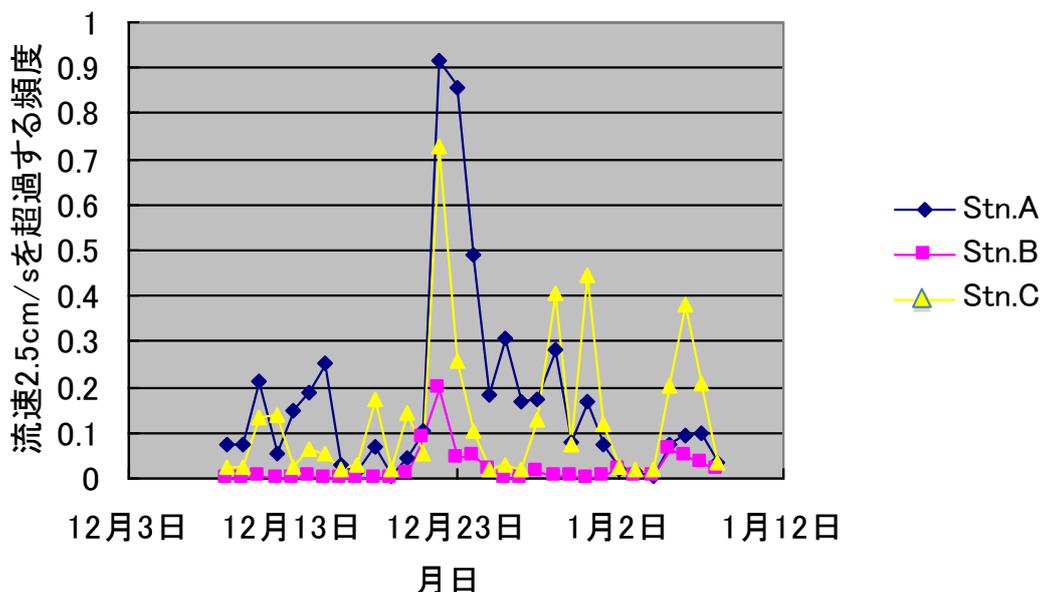
図(3)-11 各地点の流速の度数分布（横軸：流速範囲（cm/s），縦軸：度数（個））

さらに、図(3)-11では高い流速での度数分布の特徴が見えないので、図(3)-12に流速2.5 cm/s以上のみを選択して拡大した図を示す。この図から、Stn. Bにおいては度数は少ないものの20 cm/sを超える流速も時々検出され、それはStn. AやCよりも明確に多いことがわかる。すなわち図(3)-8の平均流速のピークに見られたような、低頻度ではあるものの高流速の減少が見られることがStn. Bの大きな特徴であった。

サブテーマ1に示したように、流動の強い場では底質は砂質に、流動の弱い場では泥質になることを考えると¹⁰⁾、流速2.5 cm/sは、底質の性状に関する流動のパラメータとして何らかの意味を持っているのではないかと考えられる。そこで、1日間で2.5 cm/s以上の流速を検出する頻度を調べ、その経時変化調べたものを図(3)-13に示す。これより、平均流速では見られなかった流速の変動の傾向が明らかになり、Stn. Aでは日常的に2.5 cm/sの流速が検出されること、Stn. Bでは非常に頻度が低いこと、Stn. Cでは比較的Stn. Aに近いものの、頻度が0に近い、すなわちStn. Bに近い日も多いことがわかった。



図(3)-12 各地点の流速(2.5 cm/s)の度数分布（横軸：流速範囲(cm/s)，縦軸：度数(個)）



図(3)-13 各地点の流速が1日間で2.5cm/sを超過する頻度の経日変化

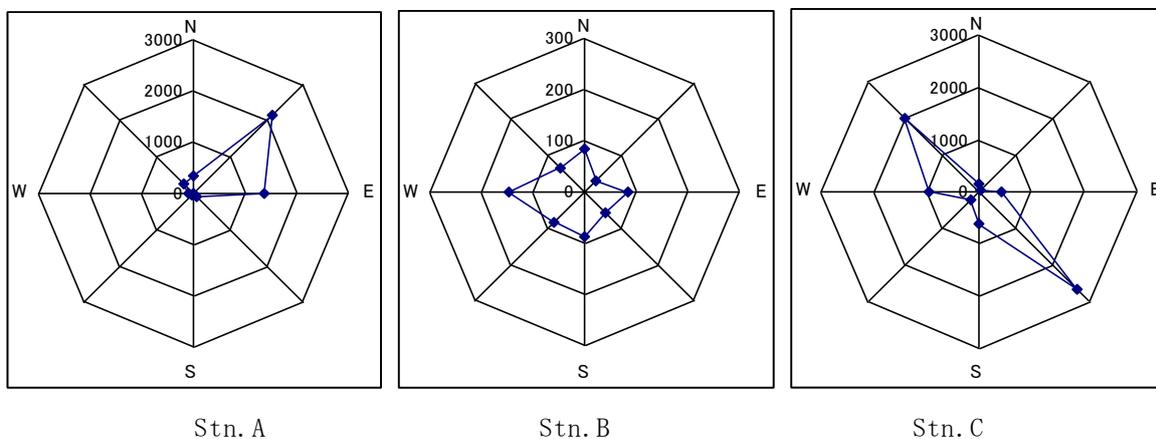
3) 各地点の流向の特徴

風向が流速に大きな影響を与える可能性は先に示したとおりであるが、各地点の流向の特徴について流速2.5 cm/sを超過する流速についてまとめたものを図(3)-14に示す。この図からわかるように、Stn.Aは北東方向の流向が卓越しており、これは岸から沖に向かう方向である。流入河川の影響等も受けて、常時この方向の流れが発生していることが特徴である。Stn.Bは方向性に偏りはない。そもそも流速が2.5 cm/sを超える頻度も低かったが(図(3)-13)、これには人工護岸が影響している可能性がある。図(3)-1からわかるように、この付近は人工護岸化されており、岸沖方向すなわち南北方向の流れは発生しにくい場所である。このようなことから常日頃はごく低流速しか観測されず、東風が卓越したときに異常な高流速となる。このような場に有機物が沈降・堆積するメカニズムとしては、イベント的な高流速時の有機物供給が想定されるが(サブテーマ1)、これに関しては調査結果を充実させて底質形成機構の解明につなげたい。

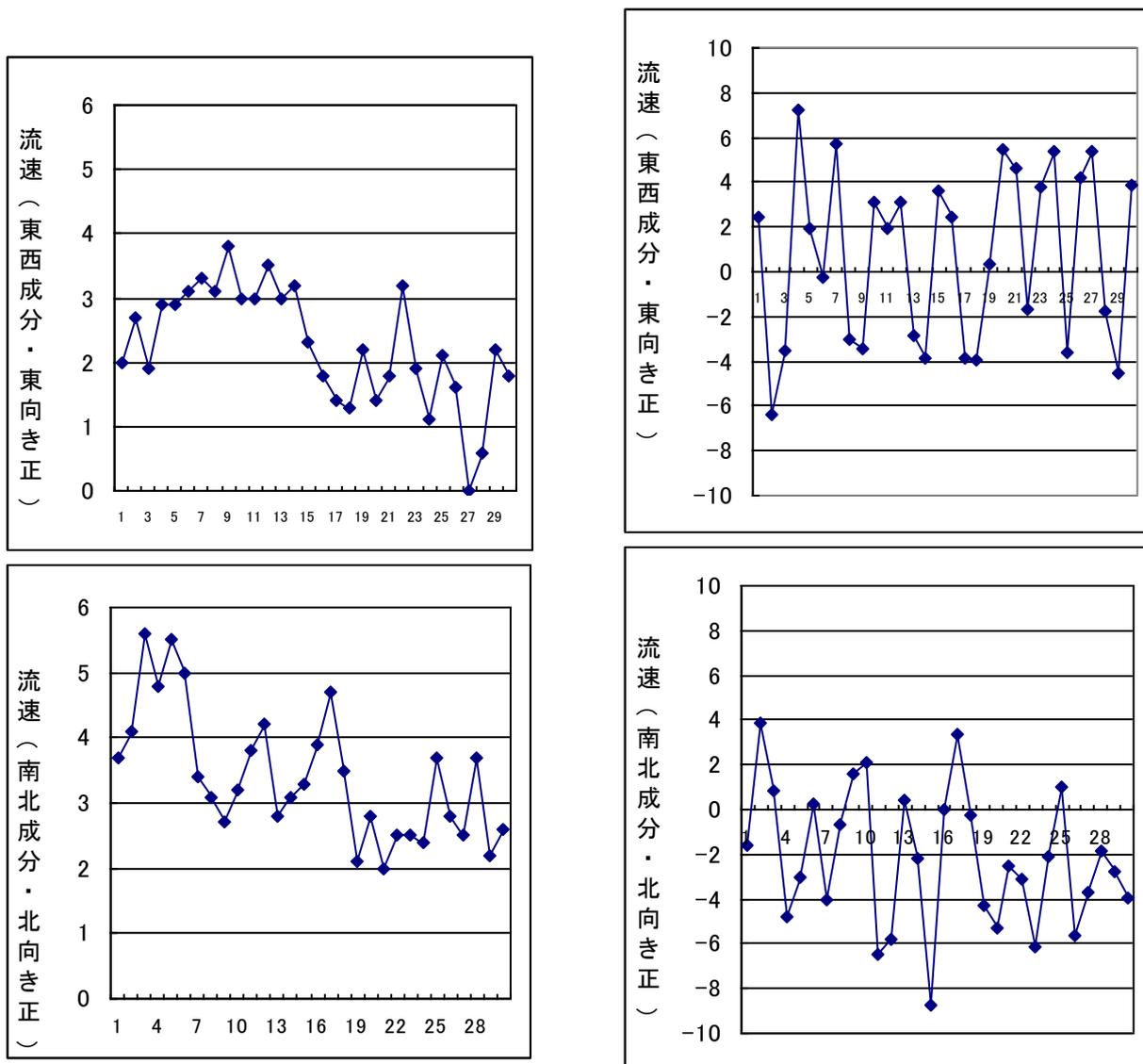
4) ミクロな時間スケールにおける流速変化の特徴

図(3)-15にはStn.AおよびStn.C(右図)の2010年12月23日11時50分0秒から29秒までの毎秒の流速成分の経時変化を示した。23日は図(3)-13からもわかるように両地点とも流速2.5 cm/sを超える頻度が高かった日である。しかしながら、流向を考慮した水理環境は大きく異なっている。Stn.Aにおいては東西成分、南北成分とも正の値をとり、北東方向に強い流れが定常的に発生していることが明らかである。一方、Stn.Cにおいては東西成分、南北成分とも周期的に正負を繰り返しており、図(3)-14に示されたような振動流が発生していることがわかる。この北西と南東の方向の振動流は、Stn.Cの地点としては岸沖方向に相当する。またStn.Cは自然護岸であり、岸边にはマコモの植生がみられる。このときの風は南東方向に5m/s以上で吹いており、振動流には風が強く影響しているものと思われる。このような場を自然護岸化した場合に水理環境、さらには底質環

境がどのように変化するであろうか. その予測を合理的に行うためにも, 本研究結果をふまえたさらなる調査・解析が必要である.



図(3)-14 各地点の2.5 cm/sを超過する流速の方向の度数分布



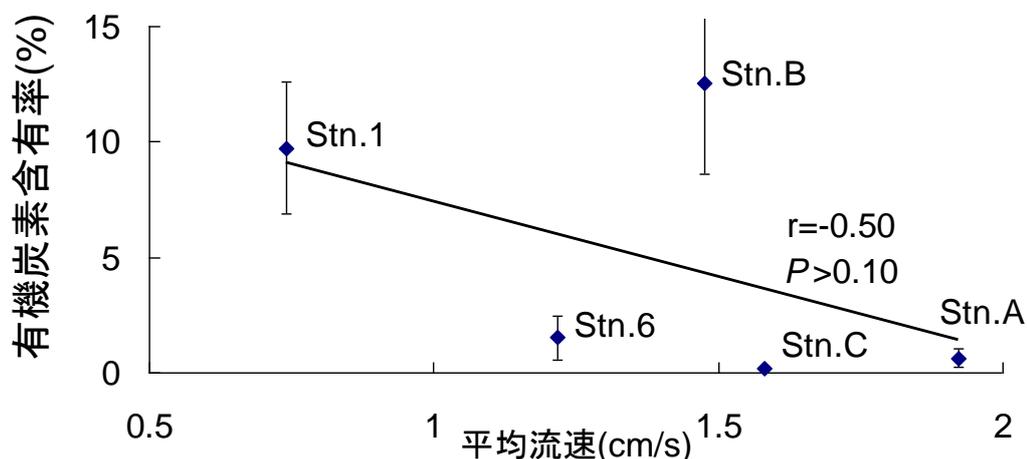
図(3)-15 Stn. A(左図), Stn. C(右図)の2010年12月23日11時50分0秒から29秒までの毎秒の流速成分の経時変化

5) 水の流動と底質の有機炭素含有率の関係解析

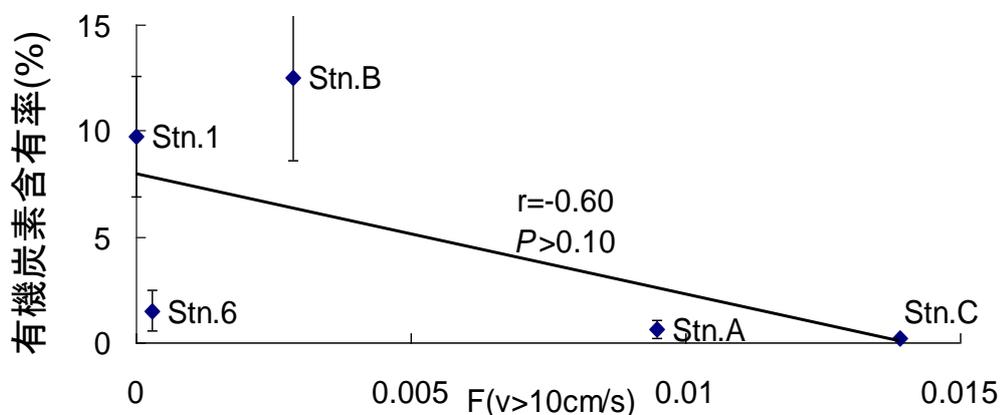
伊豆沼の沿岸部5地点における有機炭素含有率と平均流速の関係を図(3)-16に示す。相関係数の検定をしたところ、有機炭素含有率と平均流速との間に有意な相関は見られなかった ($P > 0.10$)。そこで、10分ごとに1秒間隔で30個観測した流速データのうち、流速が10 cm/sを超えるデータ数を全データ数で割ることで流速超過確率を求め、それと有機炭素含有率との関係を図(3)-17に示す。ここで、閾値を10 cm/sに設定したのは、沈殿処理において経験的に沈降しない流速として知られているためである。

$$\text{流速超過確率} = \text{流速が10cm/sを超えるデータ数} / \text{1秒間隔の全データ数} \quad (3-6)$$

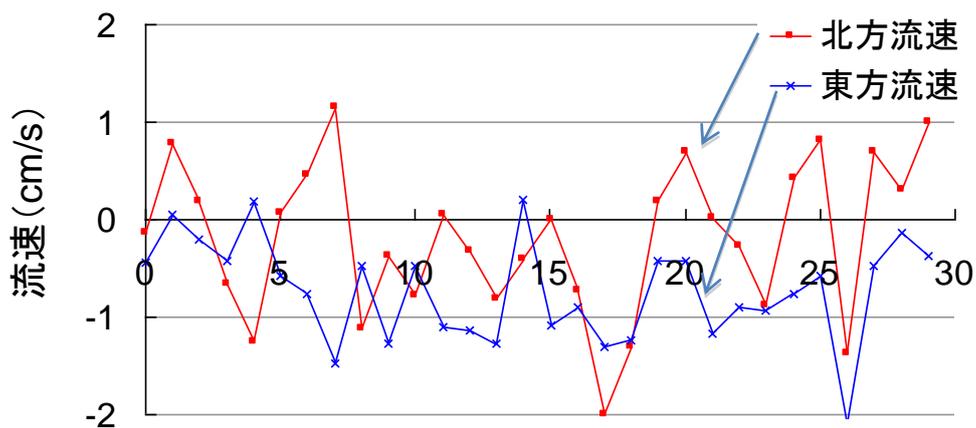
相関係数の検定を行うと有意ではなかったが負の相関が認められた ($P > 0.10$)。これは平均流速が平均の流れの速さを示すのに対し、流速超過確率は瞬間的な流れの速さを示し、巻き上げ、沈降の両方に対応した指標となり得るためと思われる。したがって、今後、流動を表す指標として流速超過確率を用いることができそうである。また、今回、閉鎖性水域である湖沼においても干潟と同様な傾向が見られ、流動を制御できれば底質の有機汚濁を改善できる可能性が示された。Stn. 6において、有機炭素含有率が小さいにも関わらず流速超過確率が小さかった。Stn. 6を除いた4点では、有機炭素含有率と流速超過確率には負の相関の傾向がみられた ($r = -0.90$, $P \leq 0.10$)。そこでStn. 6の流動を詳細に把握するため、流速の1秒ごとの変動を図(3)-18に示す。南北方向、東西方向ともに上下に変動し、振動流が発生していることがわかる。ここで流速の大きさが同じで一方向流れと振動流を比較した場合、振動流の方で巻き上げ限界流速が小さいことが知られており^{11,12)}、このことがStn. 6が回帰直線から外れた理由と考えられた。したがって、有機炭素含有率は、流速超過確率だけでなく、振動流の有無により決定されると推測される。



図(3)-16 沿岸部の平均流速と底質有機炭素含有率との関係

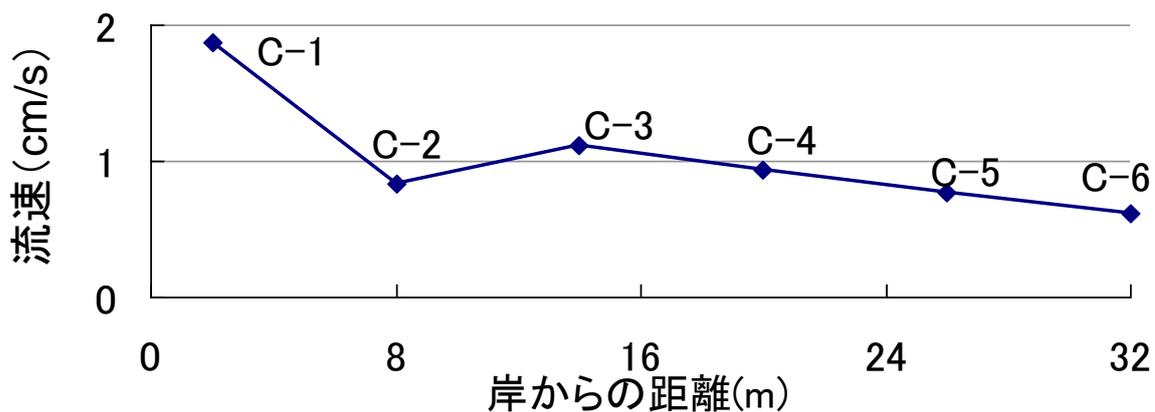


図(3)-17 沿岸部の流速超過確率と底質有機炭素含有率との関係

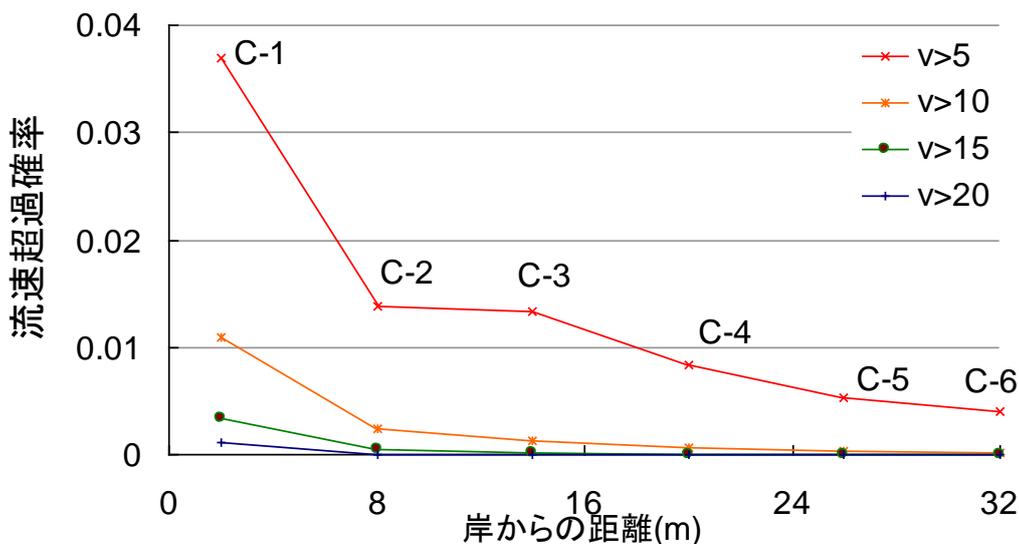


図(3)-18 Stn. 6における2011年9月3日12:00:00から30秒間の流速成分の経時変化
(北向き, 東向き正)

次に自然護岸近傍の岸沖方向における現地観測の結果について、伊豆沼のStn. C近傍の岸沖方向6地点における17日間の平均流速を図(3)-19に示す。また、流速超過確率を図(3)-20に示す。平均流速、流速超過確率ともに岸に近いほど大きくなっており、自然護岸化することによって沿岸部の流動を強化できることが示唆された。Stn. C近傍では有機炭素含有率が非常に小さく、元素分析装置では検出されているが定量限界未満であり、これらを正確に評価できなかったため、底質と流動の関係を考察できなかった。今後、有機炭素含有率が大きいとわかったStn. Bなどの泥質の地点と比較検証することで、岸沖方向についても底質と流動の関係を明らかにできる可能性が示唆された。



図(3)-19 Stn. C近傍における岸からの距離と平均流速との関係

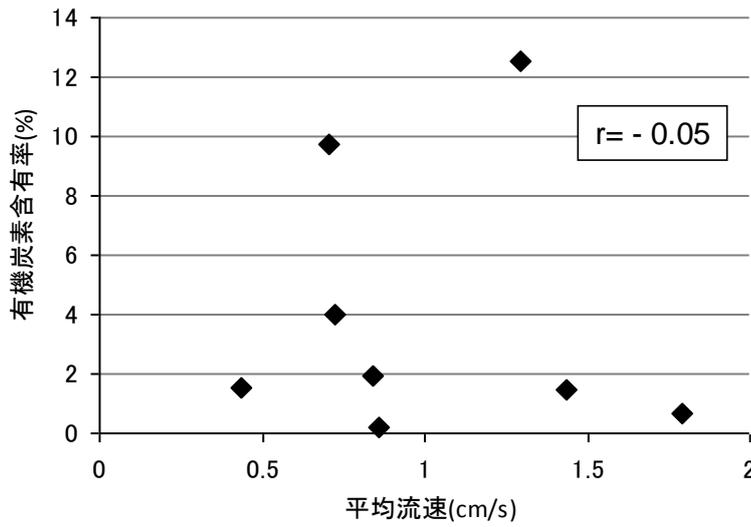


図(3)-20 Stn. C近傍における岸からの距離と流速超過確率との関係

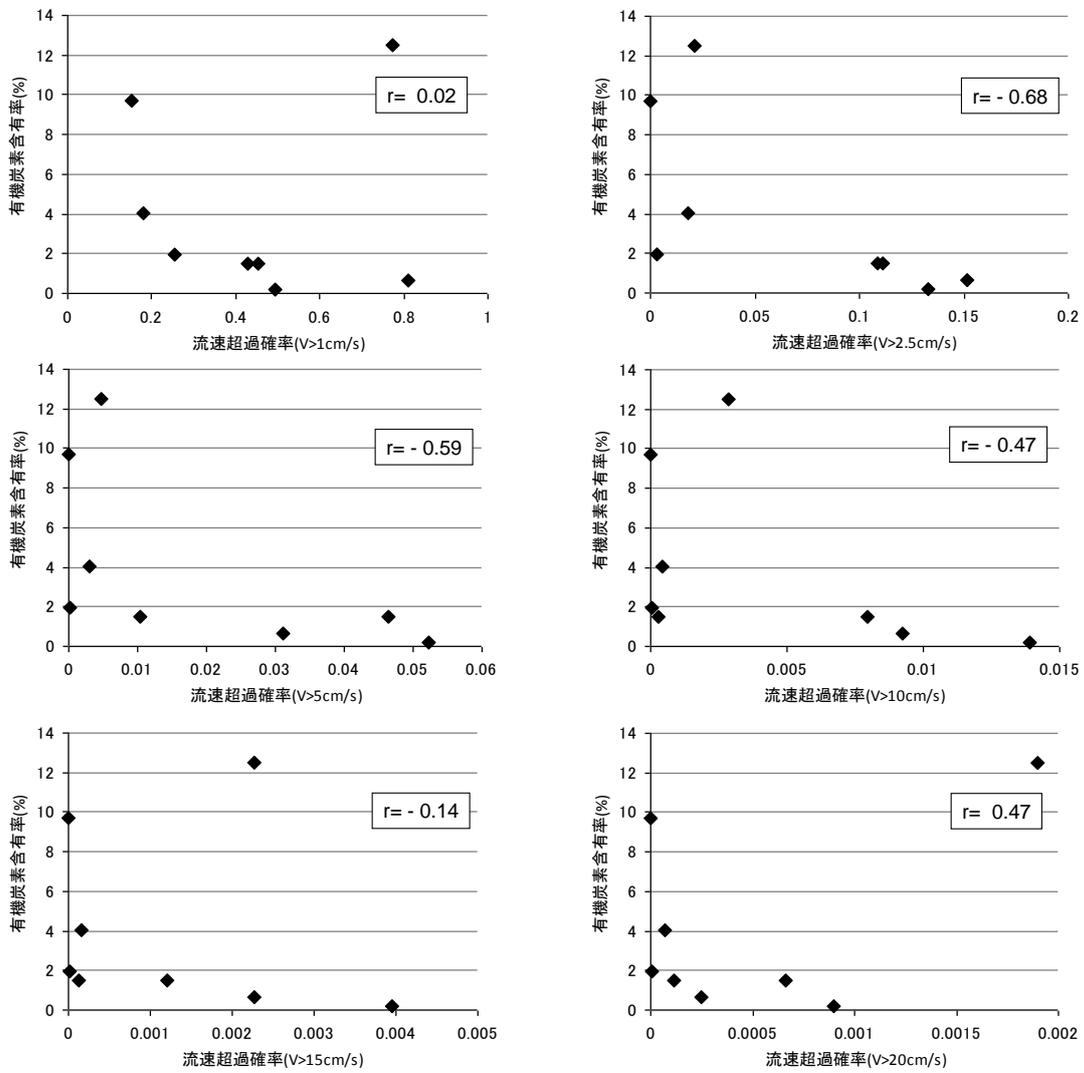
伊豆沼は多様な底質環境が分布していて、その中から5地点を選定し、調査したところ、有機炭素含有率と流速超過確率に負の相関があることが明らかになり、閉鎖性水域においても流動が強い場では有機炭素含有率が小さく抑えられることがわかった。また、自然護岸では岸に近い部分で流速が大きくなること示唆された。今後、人工護岸と比較検証するなど、より詳細に自然護岸の特徴を明らかにすることで、自然護岸化が流動を制御するための手法として応用できるか検証を重ねたい。

次に2010～2012年において伊豆沼沿岸部で観測された全データを用いて、水の流動と底質の有機炭素含有率の関係解析を行った。平均流速と有機炭素含有率の関係をみたが、相関は認められなかった(図(3)-21)。そこで、流動のパラメータに流速超過確率を導入した。ここではいくつかの流速の閾値(1, 2.5, 5, 10, 15, 20 cm/s)を設定し、図(3)-22にその関係を示した。流速の閾値を2.5～10cm/sと設定した場合には、おおむね流速超過確率が低い地点で有機炭素含有率が高く、流速超過確率が高い地点で有機炭素含有率が低くなる傾向が認められた。なお、相関係数は-0.47～-0.68と同程度の負の相関を示した。このことから2.5～10 cm/s程度の流速閾値を設定することで流速超過確率を用いて有機炭素含有率が評価できることがわかった。なお、閾値を1, 15, 20 cm/sとした場合には、相関性は低かった。

有機炭素含有率が平均流速では説明できず、流速超過確率と相関が見られたことに関して、平均流速が平均の流れの速さを示すのに対し、流速超過確率は瞬間的な流れの速さを示し、巻き上げ、沈降の両方に対応した指標となり得るためと思われる。



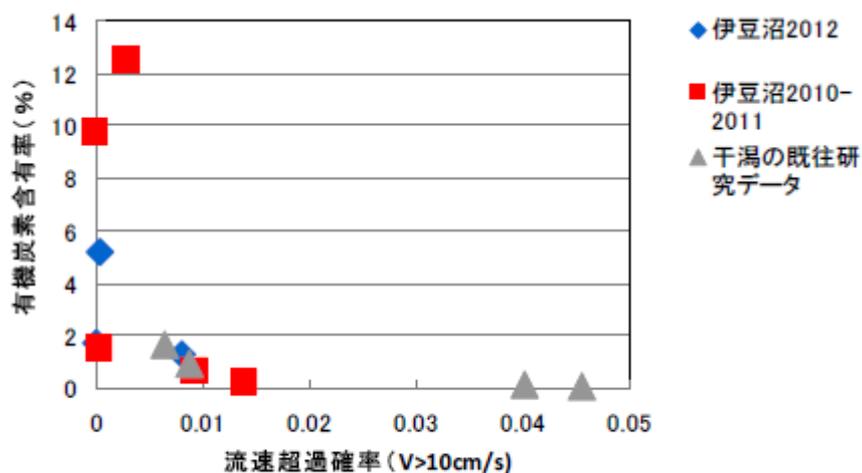
図(3)-21 平均流速と有機炭素含有率の関係



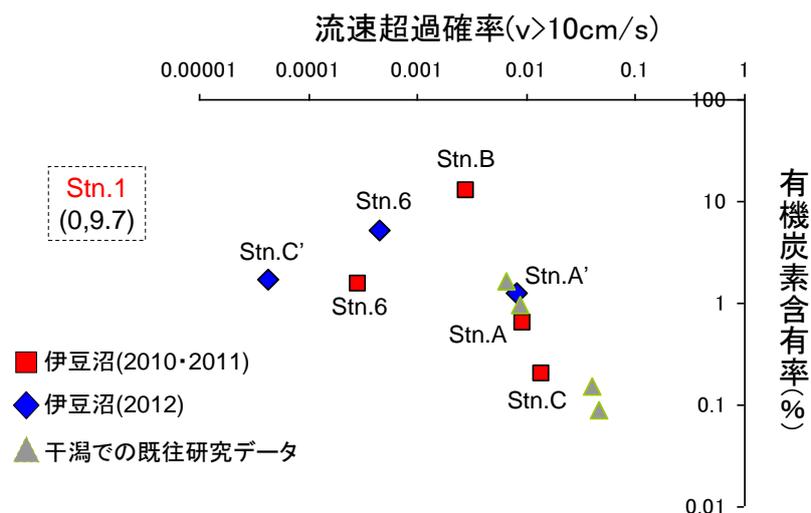
図(3)-22 流速超過確率(閾値：1, 2.5, 5, 10, 15, 20 cm/s)と有機炭素含有率の関係

本研究の成果として、図(3)-23および24に底質の有機炭素含有率と流速超過確率の関係を示す。これは干潟域における既往研究のデータも含むものであるが、湖沼においてもおおむね流速超過確率が高いところでは有機炭素含有率が低く、超過確率が低いところでは有機炭素含有率が高い傾向があることが示唆できた。また、この結果から流速超過確率を0.01程度以上に保つことで泥化が防止できることが明らかとなった。

流速超過確率を算出する際の流速データの採取方法（本研究では1秒間隔で30秒、10分毎の観測を行った）や有機炭素含有率も含めて年間を通じての代表値かどうか、また、本研究では閾値を10 cm/sとした流測値の意味など今後明らかにする課題も抽出できた。



図(3)-23 底質の有機炭素含有率と流速超過確率の関係①

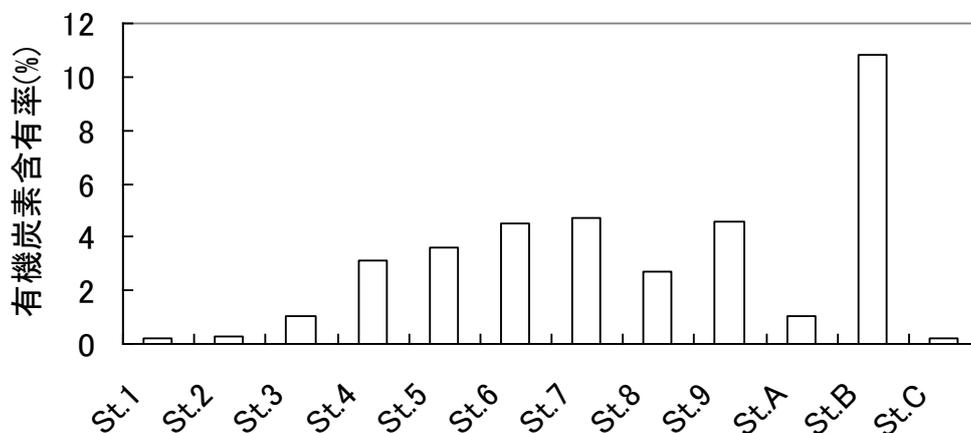


図(3)-24 底質の有機炭素含有率と流速超過確率の関係②

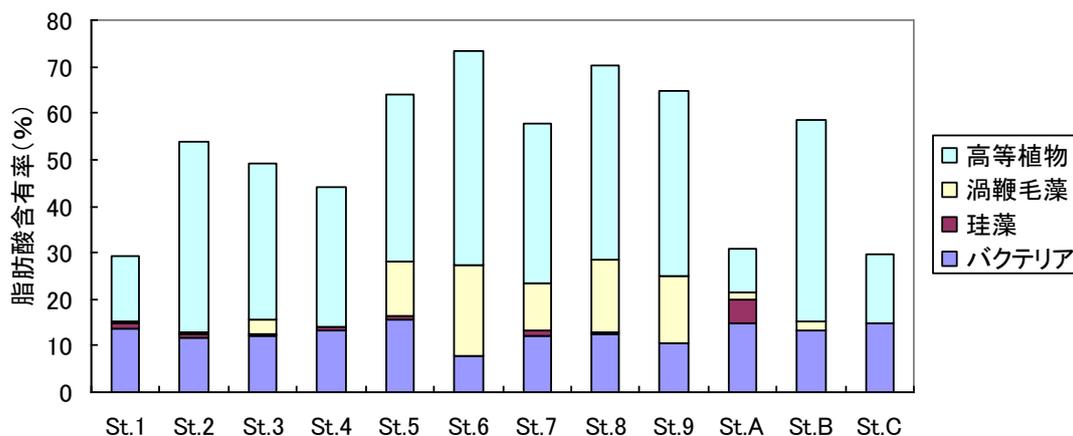
(2) 底質有機炭素の起源解析

1) 伊豆沼とハスの分解実験

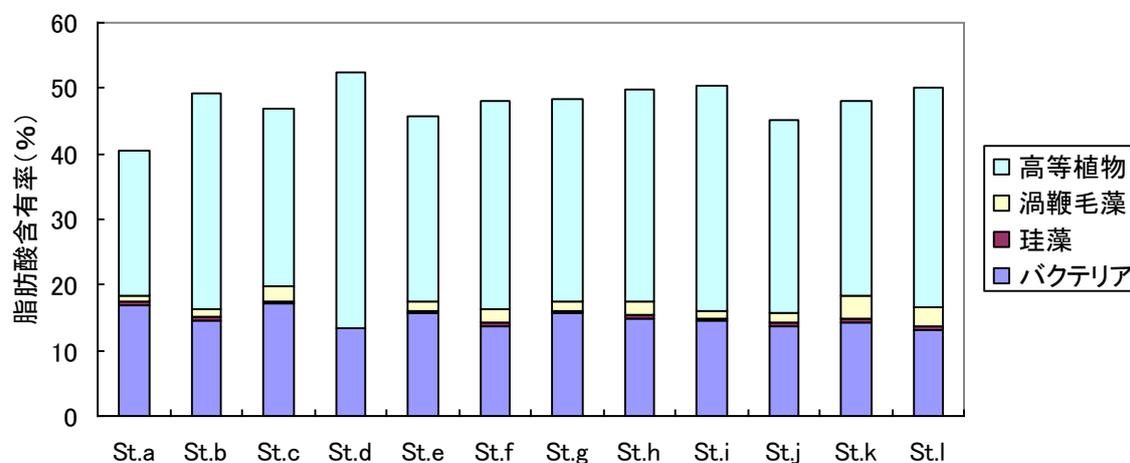
伊豆沼における乾燥重量に対する底質有機炭素の含有率を図(3)-25に示す。サンプリング地点間で有機炭素含有率は異なり、砂地であったStn.1の有機炭素含有率が0.2%と最も低く、Stn.Bの10.8%が最も大きかった。2010年6月～7月に採集した底質のマーカ―脂肪酸の含有率を図(3)-26に、2012年8月に採集した底質のマーカ―脂肪酸の含有率を図(3)-27に示した。各地点に含まれるマーカ―脂肪酸の含有率はどの地点でも高等植物由来の脂肪酸が多く含まれていた。2011年の結果では湖心部のサンプリング地点では渦鞭毛藻類由来の脂肪酸の含有率が高くなっているが、2012年では渦鞭毛藻類の脂肪酸は湖心部においてもほとんど検出されておらず、季節性があることが示された。一方、高等植物由来の脂肪酸は2011年、2012年ともに全サンプリング地点で多く含まれていた。



図(3)-25 伊豆沼における各サンプリング地点の有機炭素含有率 (%)

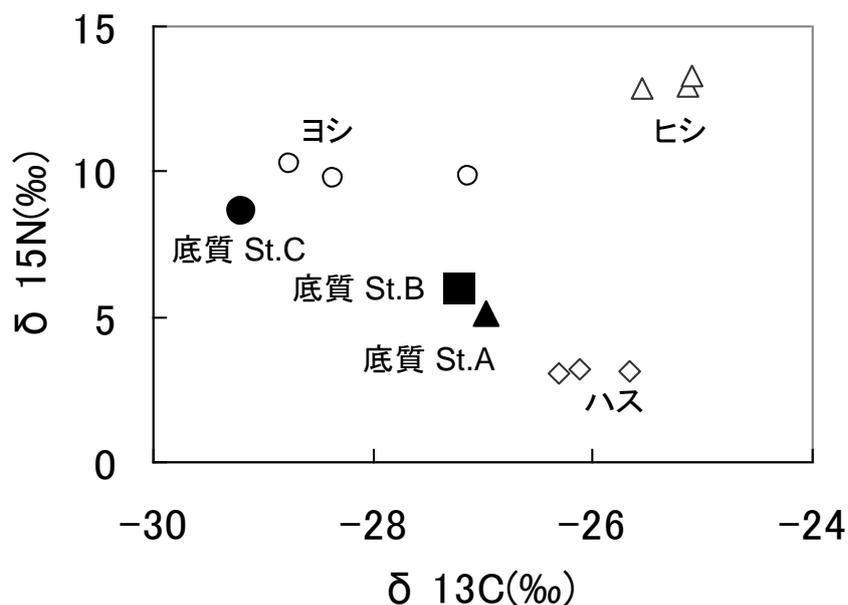


図(3)-26 2011年における伊豆沼底質から抽出したマーカ―脂肪酸の含有率



図(3)-27 2012年における伊豆沼底質から抽出したマーカー脂肪酸の含有率

次に、2011年6月に採集したSt. A, St. B およびSt. Cの底質および潜在有機物源としてのハス(葉), ヨシ, ヒシの炭素・窒素安定同位体比(図(3)-28)を基にIsoSourceを用いて有機炭素の寄与率を計算した結果を表(3)-2に示した。本研究ではStn. A, Stn. BおよびStn. Cともに浮遊性藻類の存在を示す、渦鞭毛藻類由来の脂肪酸がほとんど検出されていないことを踏まえて、潜在有機炭素源として高等植物のみを対象とし、エンドメンバーに内部生産者である微細藻類を加味しなかった。Stn. AおよびStn. Bではハスの寄与が、Stn. Cではヨシの寄与が大きく、地点によって高等植物種の寄与は異なることが分かった。また、ヒシの寄与は各地点で小さかった。ヒシは各サンプリング地点で最もバイオマスが少なく、またヨシはStn. C付近にもっとも多く見られており、IsoSourceによる計算結果はおおよそ現地状況を反映する結果となった。

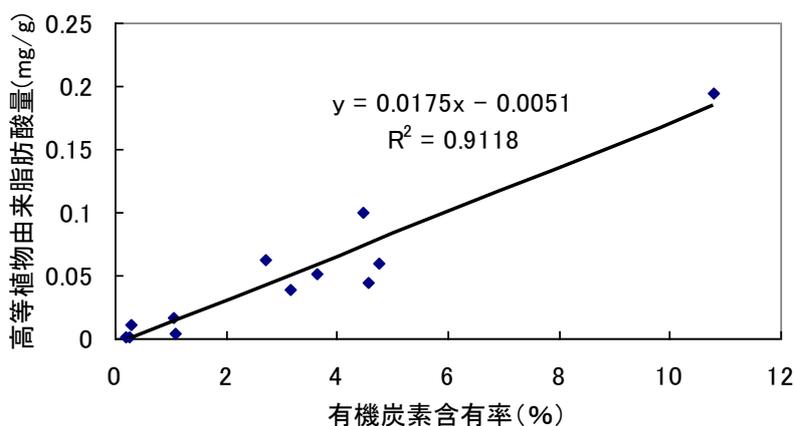


図(3)-28 2011年伊豆沼における高等植物と底質の炭素・窒素安定同位体比

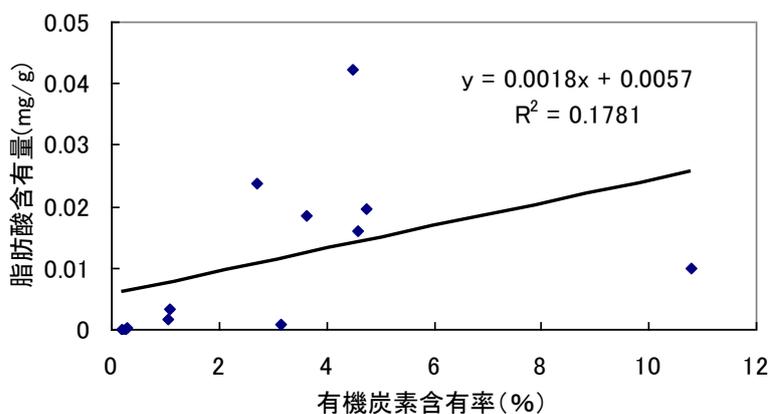
表(3)-2 IsoSourceの計算による各高等植物の底質に対する寄与率(%)
(平均値(最小値~最大値))

	ハス葉	ヨシ	ヒシ
St.A	72(56-89)	18(1-44)	9(0-25)
St.B	60(44-77)	30(13-56)	9(0-25)
St.C	3(3-4)	96(96-97)	0(0-1)

次に、各底質サンプルにおける有機炭素含有率に対する、高等植物由来脂肪酸および微細藻類由来脂肪酸の含有量 ($\mu\text{g/g}$) の関係を図(3)-29, (3)-30に示した。なお、ここでは珪藻および渦鞭毛藻類由来の合計を微細藻類由来の脂肪酸として用いている。底質に含まれる微細藻類由来の脂肪酸と有機炭素含有率との間には有意な関係性は見られなかった。しかし、高等植物においては有意な正の相関が検出された。このことは、有機物が蓄積している底質ほど高等植物由来の脂肪酸が多く含まれていることを示しており、底質の有機汚濁は高等植物の蓄積によって引き起こされていることを示唆している。

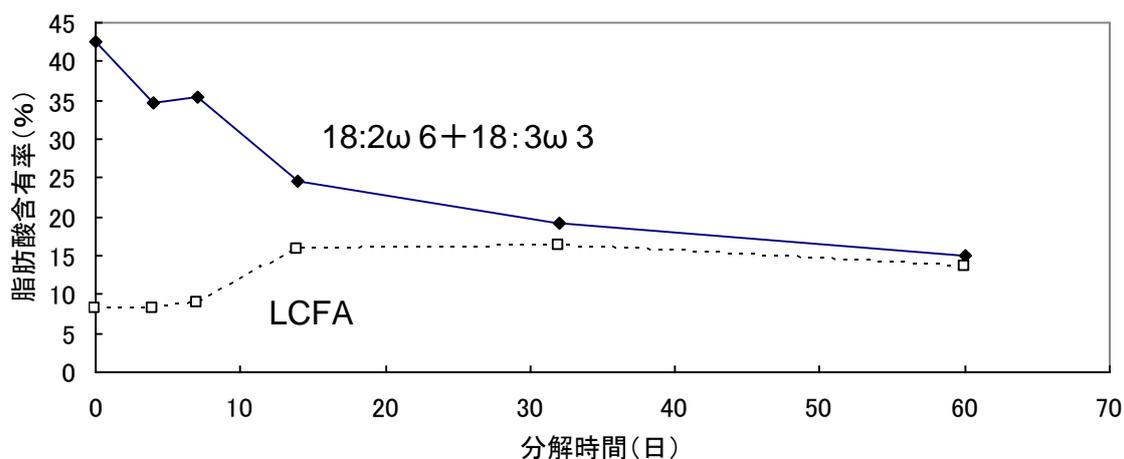


図(3)-29 底質有機炭素含有率と高等植物由来脂肪酸含有量の関係



図(3)-30 底質有機炭素含有率と微細藻類由来脂肪酸含有量の関係

分解実験に伴うハスのマーカー脂肪酸組成の経時変化を図(3)-31に示す。ハスには不飽和脂肪酸である18:2 ω 6や18:3 ω 3がもっとも多く含まれており、高等植物由来の脂肪酸である長鎖脂肪酸(LCFA)は7%程度であった。しかし、分解の過程で不飽和脂肪酸は急激に減少し、相対的にLCFAの寄与率が増加し、60日目には13%となった。既往の研究からも、LCFAは不飽和脂肪酸と比較して難分解性であるとされており¹³⁾、分解経過時間が大きくなるにつれてLCFAの割合が大きくなると考えられる。伊豆沼で採集した泥にはLCFAが30%ほど含まれており、分解が進行した高等植物が堆積していることが示唆された。



図(3)-31 分解過程におけるハスのマーカー脂肪酸組成含有率の経時変化

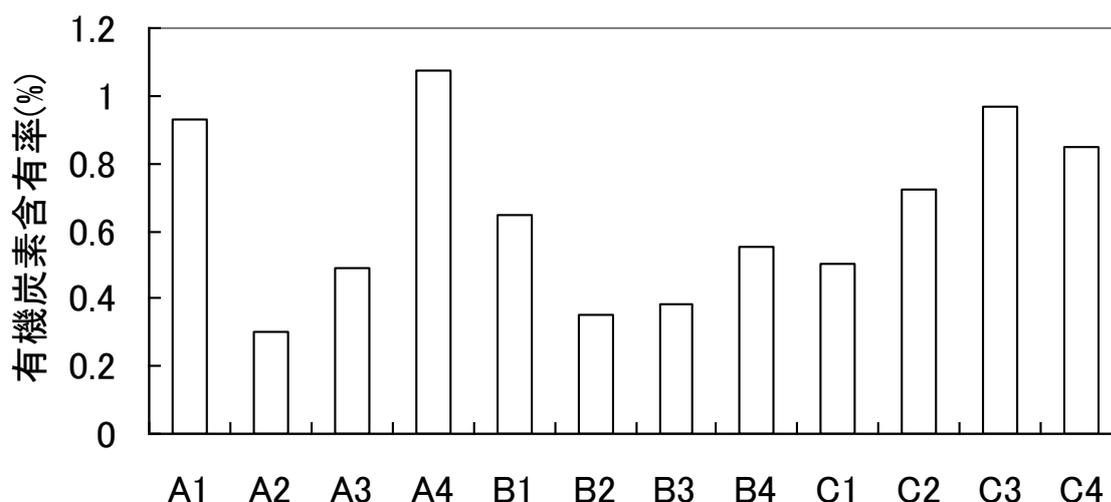
Stn. A～Cにおける底質から抽出されたバクテリア由来の脂肪酸である*i*15:0の炭素安定同位体比を表(3)-3に示す。バクテリアの脂肪酸の炭素安定同位体比は同化した有機物の炭素安定同対比より3 ‰程軽くなることが知られている。すなわち、これらの地点に定着しているバクテリアは-29～-26 ‰程度の有機物を分解していることになる。これは、ハスやヨシの炭素安定同位体比と一致する。6～7月の伊豆沼の浮遊藻類の炭素安定同位体比は-34～-32 ‰程度であり¹⁴⁾、伊豆沼の底質に定着するバクテリアは主に高等植物に由来する有機物を利用していると考えられる。

表(3)-3 脂肪酸由来の細菌の炭素安定同位体比

	<i>i</i> -15:0	<i>a</i> -15:0	同化有機物の δ 13C
泥st.A	-29.2	-30.2	-27.2～-26.2
泥st.B	-30.7	-32.3	-29.3～-27.7
泥st.C	-30.6	-30.3	-27.6～-27.3

2) 太湖

各調査地点の底質に置ける有機炭素含有率を図(3)-32に示す。各エリアは藍藻の発生状況や地理的な位置も大きく異なるものの、有機炭素含有率は0.5～1 ‰の範囲内に収まり、エリア間で有意差はなかった(分散分析, $p > 0.05$)。



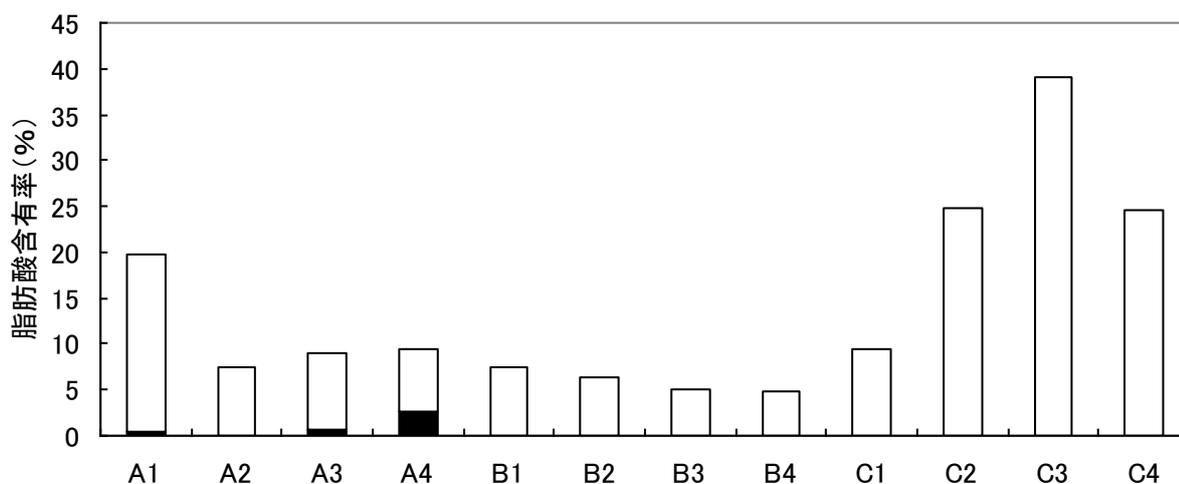
図(3)-32 太湖における各サンプリング地点の底質有機炭素含有率

次に潜在有機物源であるアオコとヨシの脂肪酸組成を表(3)-4に示す。ヨシには高等植物由来の脂肪酸であるLCFAが多く含まれていたが、藍藻にはこれらの脂肪酸は含まれていなかった。対して、藍藻には18:3 ω 6および18:4 ω 3が多く含まれていたが、ヨシにこれらの脂肪酸は含まれていなかった。よって、太湖においてはLCFAをヨシ由来の脂肪酸、18:3 ω 6と18:4 ω 3の和を藍藻由来の脂肪酸とみなして、底質の脂肪酸組成を解析した。その結果を図(3)-33に示す。太湖は藍藻が大量に発生する湖であるが、全地点でヨシ由来の脂肪酸が多く存在しており、南西エリアであるBエリアおよび湖心部であるCエリアからは藍藻由来の脂肪酸は検出されなかった。次に各地点における、炭素安定同位体比を基に計算したアオコおよびヨシの有機炭素に対する寄与率を図(3)-34に示す。これも、脂肪酸マーカーと同様の傾向であり、ほとんどの地点でヨシに由来する有機炭素の割合が多かった。本研究では底質に供給される有機物源の量を計測していないが、太湖北西部では近年では3月頃よりアオコが発生しており¹⁵⁾、断続的に藍藻が底質に有機物として供給されていると考えられる。一方、今回の調査は11月に行われており、ヨシなどの沿岸帯の陸上植物はまだ枯れ始めの時期であり、枯死体としての太湖への供給は少ないと考えられる。そもそも、人工護岸である北西部や湖心部では、周辺の植生が乏しく、有機炭素の供給量としては藍藻が卓越している可能性が高い。それにもかかわらず、底質の有機炭素が主に陸上植物に由来したの理由として動物による摂食・同化が考えられる。図(3)-35にアオコとヨシ、そして本調査で採集された底生動物、エビ*Palaemon modestus*、2種の巻貝*Semisulcospiria cacellata*、*Bellamyia* sp.、1種の二枚貝*Corbicula fluminea*の炭素窒素安定同位体比を示す。動物の炭素・窒素安定同位体比が同化した餌と比較してそれぞれ約1‰、約3‰高くなること¹⁶⁾を踏まえると、全ての動物種が藍藻を同化していることが示された。また、*C. fluminea*以外の動物では藍藻による寄与の方が大きく、特に*P. modestus*と*S. cacellata*は主に藍藻由来の有機物を炭素源として同化していることが示された。この底生動物による餌利用が藍藻の有機炭素としての底質への堆積を減少させる要因として機能していると考えられる。藍藻はこれまで動物の餌源としては利用されないこと¹⁷⁾、また、動物に対する餌としての栄養的価値が小さいことが報告されている¹⁸⁾。しかし、セルロースなどの難分解性の有機物を含む陸上植物も同様に動物の餌としては利用されにくいこと指摘されており¹⁹⁾、それら餌源を比較検討した例は見当たらなかったが、太湖では相対的に藍藻の方が餌として利用されやすいことが明らかになった。今回の調査ではシジミの仲間である*C. fluminea*が他の

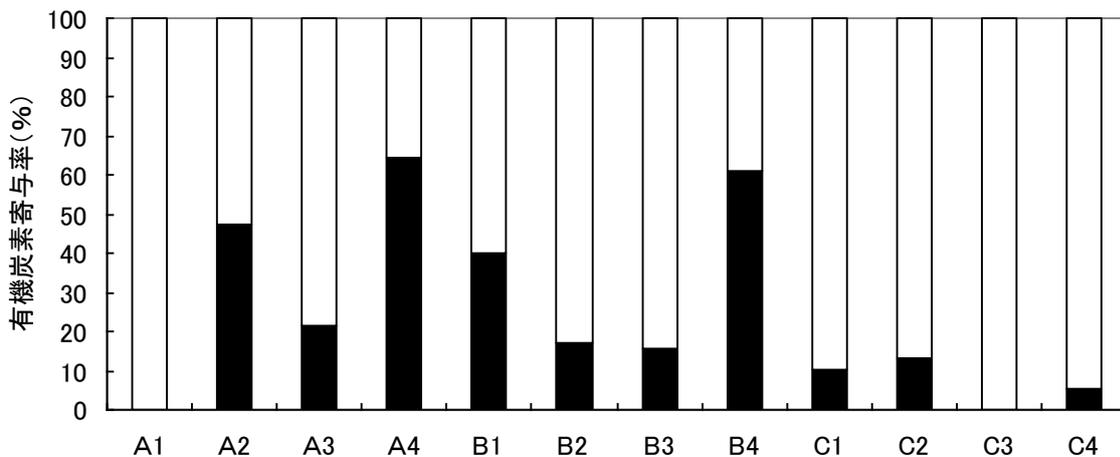
底生動物と比較して陸上植物由来の有機物の利用が多いことが示された。シジミはセルラーゼ活性を有しているという報告があり²⁰⁾、太湖に生息する*C. fluminea*も陸上植物を消化・同化する能力を持つため、陸上植物を利用していると考えられた。他の底生動物は藍藻を主に同化していた。本調査では*Bellamyia* sp.が最も多い個体数で採集されたが、同属の*Bellamyia chinensis*が必須脂肪酸要求の観点から藍藻類を好適な餌として同化している可能性が指摘されており²¹⁾、藍藻が優占する太湖は本種にとって有利な環境であった可能性が考えられた。

表(3)-4 潜在有機物源であるヨシと藍藻の脂肪酸組成

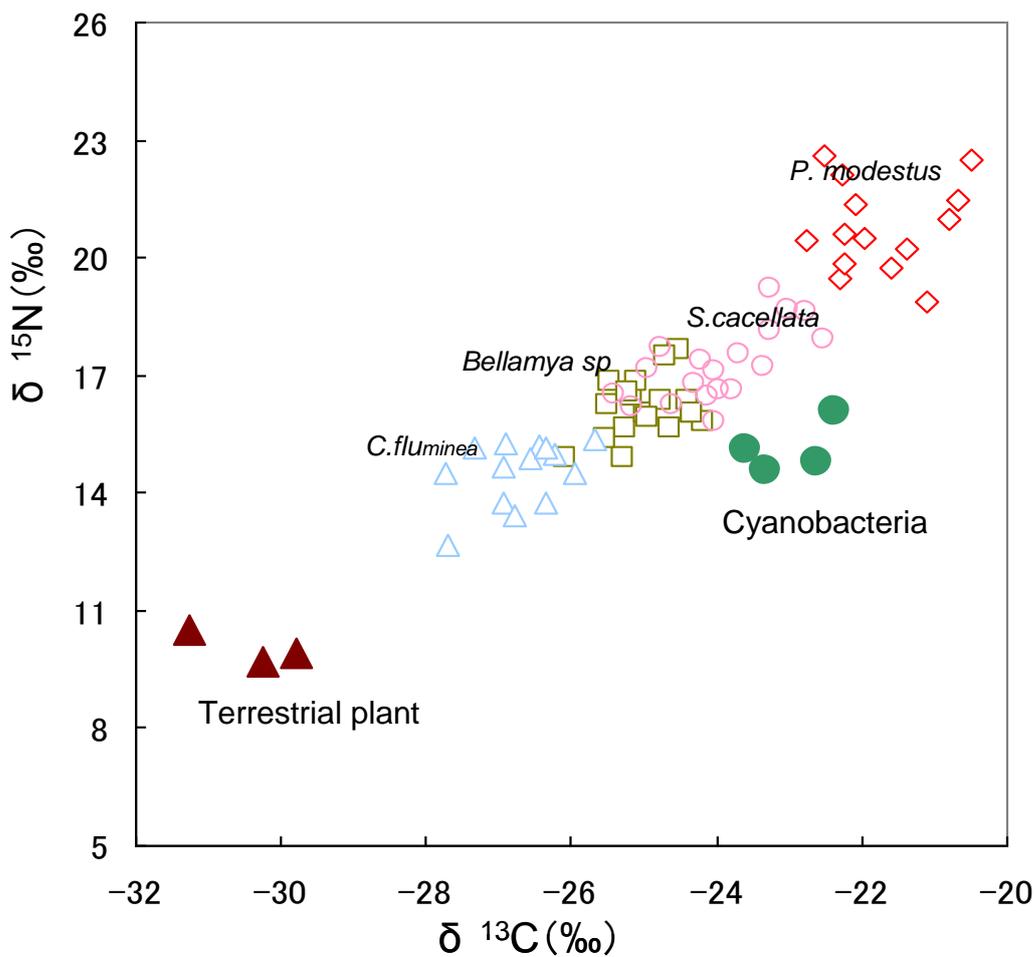
	ヨシ (n=3)		藍藻 (n=4)	
	Ave.	S.D.	Ave.	S.D.
16:0	21.7	4.2	47.1	0.5
16:1 ω 7	0.0	0.0	2.0	0.2
18:0	5.0	0.6	1.3	0.1
18:1 ω 9	5.3	0.2	2.7	0.4
18:1 ω 7	0.0	0.0	0.5	0.1
18:2 ω 6	25.8	1.1	5.6	0.3
18:3 ω 6	0.0	0.0	9.4	0.4
18:3 ω 3	18.4	3.0	13.5	0.2
18:4 ω 3	0.0	0.0	17.9	0.3
20:4 ω 6	1.3	1.9	0.0	0.0
28:0(LCFA)	5.5	1.8	0.0	0.0
30:0(LCFA)	17.0	3.4	0.0	0.0
Total	100.0	0.0	100.0	0.0



図(3)-33 太湖底質のマーカ脂肪酸含有率 (□: 高等植物 ■: 藍藻)

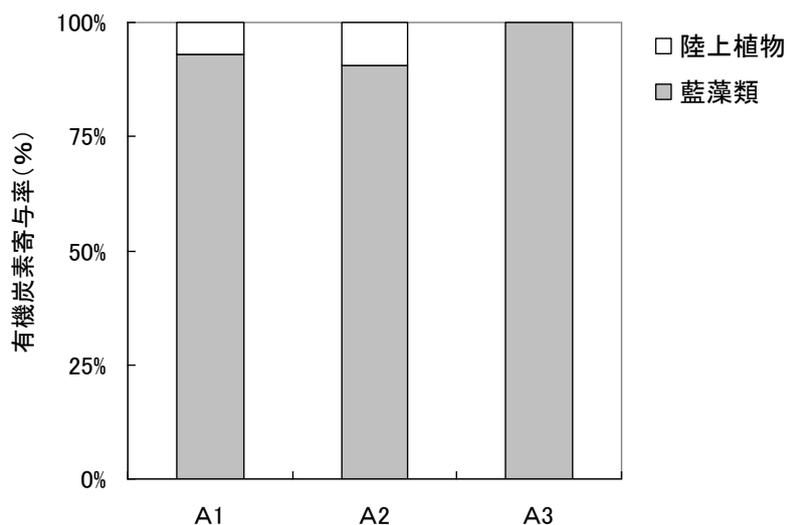


図(3)-34 炭素安定同位体比で計算した太湖底質に対する有機炭素起源の寄与率 (□: 高等植物 ■: 藍藻)



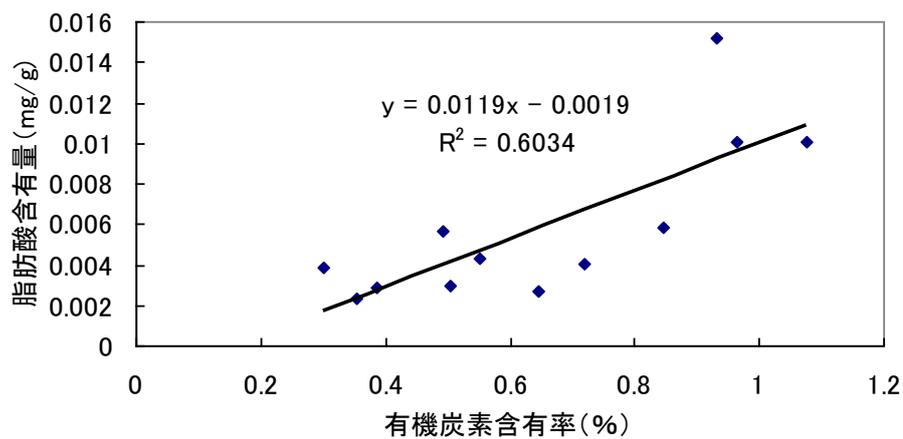
図(3)-35 底生動物と潜在餌源であるアオコおよびヨシの炭素・窒素安定同位体比

また、陸上植物由来の有機炭素が卓越したもう一つの要因として、分解性の相違が考えられる。一般に藻類は易分解性であるが陸上植物は難分解性であることが知られている²²⁾。北西部の底質から採集した底質から抽出した、細菌由来の脂肪酸の炭素安定同位体比とアオコおよびヨシの炭素安定同位体比を基に細菌が同化している有機物の割合を計算した結果を図(3)-36に示す。細菌は藍藻由来の脂肪酸を同化していることが明らかとなり、藍藻が優先的に分解されていることがわかった。このことが藍藻の有機物としての底質に対する供給量が多くても、底質有機炭素の蓄積に対する寄与は高等植物に比較して小さかったと考えられた。

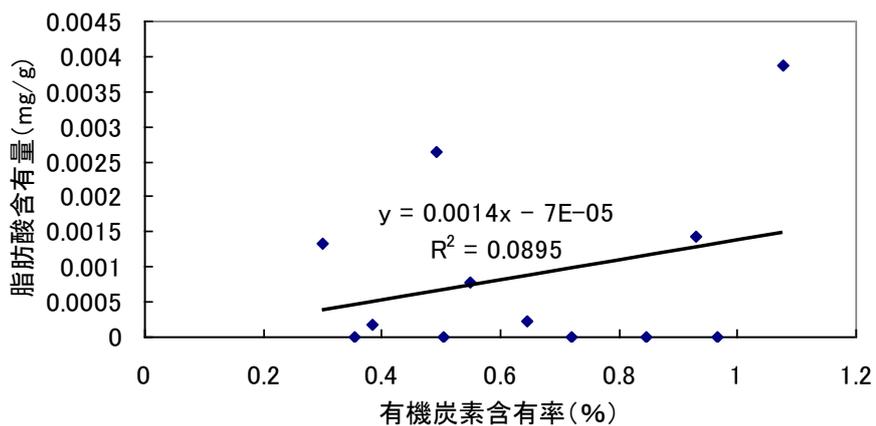


図(3)-36 底質に含まれる細菌由来脂肪酸の炭素安定同位体比から計算された細菌が同化している有機物起源（陸上植物と藍藻）の割合

次に、各底質サンプルにおける有機炭素含有率に対する、高等植物由来脂肪酸、微細藻類由来脂肪酸の含有量 ($\mu\text{g/g}$) の関係を図(3)-37, 38に示した。なお、ここでは珪藻および渦鞭毛藻類由来の脂肪酸と、藍藻由来の脂肪酸として用いた $18:3\omega6$ と $18:4\omega3$ の合計を微細藻類由来の脂肪酸として用いている。底質に含まれる微細藻類由来の脂肪酸では有機炭素含有率とは有意な関係が見られなかった。しかし、高等植物由来の脂肪酸と有機炭素含有率の間には有意な正の相関があり、高等植物の堆積が底質の有機炭素の蓄積を引き起こしていることが示唆された。



図(3)-37 底質有機炭素含有率と高等植物由来脂肪酸含有量の関係

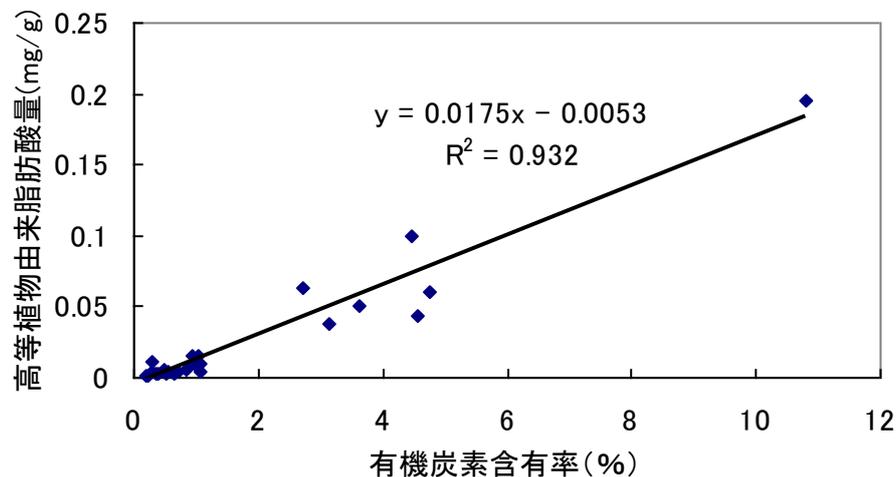


図(3)-38 底質有機炭素含有率と微細藻類由来脂肪酸含有量の関係

3) 伊豆沼と太湖の比較

ハスが優占する伊豆沼、藍藻類が優占する太湖と生産者構造の異なる二つの富栄養湖における底質有機炭素の起源を解析した結果、両者とも高等植物に起源をもつ有機物が蓄積していることが明らかとなった。図(3)-39には伊豆沼と太湖の全地点における底質有機炭素と高等植物由来の脂肪酸含有量の関係を示している。異なる湖であるが、一つの直線上にプロットが集まっている。この結果は、閉鎖性水域において底質に蓄積する有機炭素が高等植物由来であるという本研究の発見が普遍的なものである可能性を示唆している。

生産者構造の異なる両湖沼で、堆積している底質の有機炭素の起源が高等植物由来と同様の結果であったのに対して、バクテリア由来の脂肪酸から同化有機物起源を検証した結果、伊豆沼は主に高等植物、太湖では藍藻であることが分かった。すなわち、両湖沼の生産者構造の相違はバクテリアが利用している有機物に反映されていると考えられた。このことは、堆積している底質有機炭素の起源が類似していても、伊豆沼と太湖では異なる有機物フローが形成されていることを示しており、有機物分解に伴う栄養塩類の回帰の影響を考慮する際には、フローにも注目して解析していくことが必要であると考えられる。



図(3)-39 伊豆沼と太湖における底質有機炭素含有率と高等植物由来脂肪酸含有量の関係

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

沿岸域の水理環境の特徴を秒単位で長期連続測定したデータを基に解析し、瞬間的には風速に匹敵する流速が発生する場合があること、自然護岸では振動流が発生しやすいなどの興味深い知見も得られつつある。このような知見は水理学的にも新規性の高いものであり、科学的にも現象把握、機構解明は重要であると考えられる。

水の流動と底質の有機炭素含有率(有機物量)の関係について、これまで経験的に流動の強い場では底質は砂質に流動の弱い場では泥質になることや、河川では「流速20 cm/s以下では有機性懸濁物質が底に沈殿し、底質は栄養を含んだ泥層を形成する」²³⁾ことが知られていたが、閉鎖性水域においても水の流動のパラメータとして、流速の平均値ではなく流速超過確率を導入することにより、底質の有機炭素含有率との関係性を定量化できた。これは世界的に初めての知見であり、このモデルにより流速超過確率を0.01程度以上に保つことで泥化が防止できることが示唆できた。

また、閉鎖性の有機汚濁を引きこしている有機物起源が、藍藻の異常増殖が常態化している中国太湖においても高等植物であるという知見は学術的にも貴重な発見である。特に、底質の有機炭素含有率と高等植物由来の脂肪酸含有量には太湖、伊豆沼のデータを同時にプロットしても有意な正の相関があり、普遍的な関係である可能性が示唆された。今後、調査対象湖沼を増やしていくことで、本研究成果の普遍性を検証する予定である。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

<行政が活用することが見込まれる成果>

流速超過確率を0.01程度以上に保つことで泥化が防止できることが明らかとなったことから、底質の改善に向けた流動場の創出や緩傾斜護岸の整備のための提案が可能となった。さらに現在実施中である伊豆沼・内沼自然再生事業（研究代表者が自然再生協議会会長をつとめる）に対して順応的管理を行うための科学的知見として提供し、環境政策の推進に貢献する予定である。

また、生産者構造にかかわらず高等植物由来の有機物が底質の有機炭素の蓄積に寄与しているということは、底質の有機汚濁を防止するためには高等植物に対して何かしらの対策を施す必要があることを示している。

6. 国際共同研究等の状況

本研究成果を基盤として、研究代表者が参画するグローバルCOEプログラム「環境激変への生態系適応に向けた教育研究」において中国東南大学李先寧教授をカウンターパートとした「太湖融合研究」を実施している。本研究を博士課程の研究テーマとする学生を受け入れ、これまでに3度、中国を訪問し太湖フィールド調査を行った。浅い閉鎖性水域の富栄養化問題は世界に共通する課題であり、成果を蓄積した後は二国間から多国間へと共同研究を広げたいと考えている。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

1) 長濱祐美, 中山 亮, Woo-Seok Shin, 藤林 恵, 野村宗弘, 西村 修: 環境工学研究論文集, 48, III_117-III_122 (2011).

「海草コアマモ場と近傍裸地における底質有機物の起源」

2) 藤林 恵, 野村宗弘, 許曉光, 李 先寧, 相川良雄, 西村 修: 土木学会論文集(環境工学研究論文集), 49, III_493-III_498 (2012).

「炭素・窒素安定同位体比を指標とした太湖底質有機物動態の解析」

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 中山 亮, 長濱祐美, 武地修一, 野村宗弘, 西村 修: 平成22年度土木学会東北支部技術研究発表会 (2011)
「コアマモ場における懸濁態有機物の輸送解析」
- 2) 野村宗弘, 中山 亮, 長濱祐美, 武地修一, 西村 修: 土木学会第66回年次学術講演会 (2011)
「コアマモ生育場における懸濁態有機物の輸送解析」
- 3) 中山 亮, 野村宗弘, 長濱祐美, 武地修一, 西村 修: 第48回環境工学研究フォーラム (2011)
「コアマモ群落における懸濁態有機炭素の挙動解析」
- 4) 鄧 輝, 野村宗弘, 藤林 恵, 佐々木久雄, 千葉信男, 西村 修: 第6回伊豆沼・内沼研究集会 (2011)
「伊豆沼における底質の長期連続モニタリングおよび底質形成機構の解析」
- 5) 鄧 輝, 野村宗弘, 藤林 恵, 佐々木久雄, 千葉信男, 西村 修, 李 先寧: 第46回日本水環境学会年会 (2011)
「水理環境と起源解析から見る伊豆沼の底質形成機構解析」
- 6) 金田一航, 野村宗弘, 中山 亮, 丸尾知佳子, 千葉信男, 西村 修: 平成23年度土木学会東北支部技術研究発表会 (2012)
「伊豆沼の沿岸部における底質と流動の関係」
- 7) 中山 亮, 野村宗弘, 長濱祐美, 丸尾知佳子, 西村 修: 日本沿岸域学会第25回研究討論会 (2012)
「海草群落における懸濁態有機炭素の挙動解析」
- 8) 千葉高之, 野村宗弘, 藤林 恵, 丸尾知佳子, 西村 修: 平成24年度土木学会東北支部技術研究発表会 (2013)
「閉鎖性水域における水生植物由来有機物の室内実験による分解特性解析」
- 9) 中山 亮, 野村宗弘, 丸尾知佳子, 西村 修: 第47回日本水環境学会年会 (2013)
「現地観測に基づくコアマモ場における有機物輸送解析」
- 10) 許 曉光, 藤林 恵, 野村宗弘, 西村 修, 李 先寧: 第47回日本水環境学会年会 (2013)
「Investigating the sources of sedimentary organic matter in hypereutrophic Lake Taihu (China) by using stable isotope ratio and fatty acid biomarkers」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) シンポジウム, セミナー等の開催 (主催のもの)

特に記載すべき事項はない

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

(6) その他

特に記載すべき事項はない

8. 引用文献

- 1) 西村 修, 野村宗弘, 坂巻隆史, 河口干潟における堆積有機物の物理的制御機構, 月刊海洋, 39(9), pp.586-592, 2007.
- 2) Meyers, P. A. and R, Ishiwatari.: Lacustrine organic geochemistry: an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediment, *Organic Geochemistry*, Vol.20, pp.867-900, 1993.
- 3) 環境省WEB (<http://www.env.go.jp/>), 2013.3
- 4) Abdulkadira, S. and M.Tsuchiya.: One-step method for quantitative and qualitative analysis of fatty acids in marine animal samples, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Vol.354, pp.1-8, 2008.
- 5) 脂肪酸解析による伊豆沼周辺に生息するタニシ類の餌同化内容の解明, 藤林 恵, 中野和典, 野村宗弘, 千葉信男, 西村 修, 伊豆沼・内沼研究報告, Vol.2, pp.27-33, 2008.
- 6) Phillips, D. L. and Jillian W. G.: Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources, *Oecologia* Vol.136, pp.261-269, 2003
- 7) Ogrinc, N., G. Fontolan, J. Faganeli and S. Covelli.: Carbon and nitrogen isotope composition of organic matter in coastal marine sediments (the Gulf of Trieste, N Adriatic Sea): indicators of sources and preservation, *Marine Chemistry*, Vol.95, pp.163-181, 2005.
- 8) Williams, C. J., Jaffe, R., Anderson, W. T. and Jochem, F. J. : Importance of seagrass as a carbon source for heterotrophic bacteria in a subtropical estuary (Florida Bay), *Estuarine Coastal and Shelf Science*, Vol.85, pp.507-514, 2006.
- 9) Mfilinge, P. L., T. Meziane, Z. Bachok and M.Tsuchiya: Litter dynamics and particulate organic matter outwelling from a subtropical mangrove in Okinawa Island, South Japan, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol.63, pp.301-313, 2005.
- 10) 坂巻隆史, 西村 修, 干潟における底質有機物含有率の動的平衡性: 干潟生態系再生への応用に関する考察, 土木学会論文集G, 64(3), pp.250-260, 2008.
- 11) 鶴谷広一, 江口秀二, 佐々木豊喜, 流れおよび波による底泥の巻き上げ限界値の検討, 海岸工学論文集, 37, pp.235-239, 1990.
- 12) 海田輝之, 楠田哲也, 二渡 了, 栗生陽一, 柔らかい底泥の巻き上げ過程に関する研究, 土木学会論文集, 393, pp.33-42, 1988.
- 13) Mfilinge, P. L., T. Meziane, Z. Bachok and M.Tsuchiya.: Total lipid and fatty acid classes in decomposing mangrove leaves of *Bruguiera gymnorhiza* and *Kandelia candel*: Significance with respect to lipid input, *Journal of Oceanography*, vol.61, pp.613-622, 2005
- 14) Yasuno, N., S. Shikano, A. Muraoka, T. Shimada, T. Ito and E. Kikuchi.: Seasonal increase

- of methane in sediment decreases $\delta^{13}\text{C}$ of larval chironomids in a eutrophic shallow lake, *Limnology*, Vol.13, pp.107-116, 2012.
- 15) Duan, H., R. Ma, X. Xu, F. Kong, S. Zhang, W. Kong, J. Hao and L. Shang.: Two-decade reconstruction of algal blooms in China's Lake Taihu, *Environmental Science and Technology*, Vol.43, pp.3522-3528, 2009.
- 16) 富永 修, 高井則之 編: 安定同位体スコープで覗く海洋生物の生態 - アサリからクジラまで, 恒星社厚生閣, pp.31-45, 2008.
- 17) 高村典子, 中川 恵, 仲島広嗣, 若菜 勇, 伊藤富子, 五十嵐聖貴: 炭素・窒素安定同位体比による達古武沼生態系の評価, 陸水学雑誌, Vol.68, pp.169-186, 2007.
- 18) Brett M. T. and Muller-Navarra D. C.: The role of highly unsaturated fatty acids in aquatic food web processes, *Freshwater Biology*, Vol.38, pp.483-499, 1997.
- 19) Kristensen, J. H.: Carbohydrases of some marine invertebrates with notes on their food and on the natural occurrence of the carbohydrates studied, *Marine Ecology*, Vol.14, pp.130-142, 1972.
- 20) Sakamoto, K., S. Uji, T. Kurokawa and H. Toyohara.: Immunohistochemical, in situ hybridization and biochemical studies on endogenous cellulase of *Corbicula japonica*, *Comparative Biochemistry and Physiology*, Part B, Vol.150, pp.216-221, 2008.
- 21) 藤林 恵, 慎 祐爽, 長濱祐美, 中野和典, 相川良雄, 西村 修: 準絶滅危惧種マルタニシの必須脂肪酸要求特性の解明, 環境工学研究論文集, Vol.47, pp.9-14, 2010.
- 22) Enriquez, S., C.M. Duarte and K. Sand-Jensen.: Patterns in decomposition rates among photosynthetic organisms: the importance of detritus C:N:P content, *Oecologia*, Vol.94, pp.457-471, 1993.
- 23) 津田松苗著: 陸水生態学, 共立出版, 1974.

Analysis of Formation Mechanism of Bottom Environment and Development of Sedimentation Control Technology in Shallow Closed Water Area

Principal Investigator: Osamu NISHIMURA

Institution: Graduate School of Engineering, Tohoku University
6-6-06 Aoba Sendai, 980-8579 JAPAN
TEL: +81-22-795-7470 / FAX: +81-22-795-7471
E-mail: osamura@eco.civil.tohoku.ac.jp

[Abstract]

Key Words: Shallow closed water area, Bottom environment, Sedimentation Control Technology

Eutrophication in closed water area has been one of the most serious environmental concerns in all over the world. Not only water quality but also bottom sediment quality should be improved against for eutrophication. However there is not enough knowledge for improvement of bottom sediment quality. The purpose of this study is to develop technologies for the sustainable improvement of bottom sediments in shallow water area. We especially focused on the role of flux (wave and flow) on organic carbon content in bottom sediments.

We conducted long scale monitoring about relationship between flux and dynamics of bottom sediment in Lake Izunuma which is one of the most famous closed water lake in Japan for eutrophication. These data which were obtained from this monitoring were used for developing a statistical model which takes new parameters of turbulent flow into account for expectation of dynamics of organic carbon content in bottom sediments. Then we suggested the effective method for improvement of quality of bottom sediment based on the new findings and expectations from models we developed.

According to the results of our monitoring, accumulation of organic carbon in bottom sediment seemed to be induced by faint flux. Interestingly, while there was no relationship between organic carbon content in sediment and average of current velocity, we found a negative relationship with ‘exceedance probability of current velocity’ which was defined as the proportion of the number of times the current velocity of certain value or more was observed in whole observation periods. Furthermore, validity of reducing the incline of bank for enhancement of oscillating flow was confirmed by our simulation. It is considered that strengthening of flux including reducing incline is valid for improvement of bottom sediment quality.

The origin of organic carbon in bottom sediment in closed water area was mainly higher plants even in not only Izunuma Lake but also Taihu Lake where cyanobacteria

have been dominant. There was significant positive relationship between the amount of fatty acid of higher plants and organic carbon content in bottom sediment. It indicated that accumulation of organic carbon in bottom sediment in closed water area seemed to be induced by refractory organic carbon from higher plants. According to calculation, only 1% of refractory carbon of lotus will be flashed out by possible scale of an artificial flood in Lake Izunuma. These results showed the control of higher plants are required to manage closed water area.

底質制御 ② 高等植物の管理による泥質防止

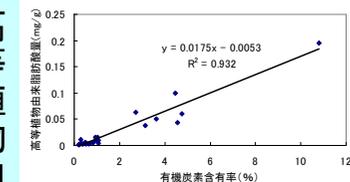
高等植物由来有機物
流入

生産者構造の変化
微細藻類→高等植物

刈り取り等による系外排出

底質の有機炭素の起源は
高等植物

高等植物由来
脂肪酸



底質有機炭素含有量

底質の有機物起源は高等植物に由来する難分解性有機物

巻き上げ

泥場

砂場

沈降

系外排除

底質制御 ①
流動の強化による
砂質化

人工洪水・下流へ
氾濫・遊水池へ

小

流速超過確率

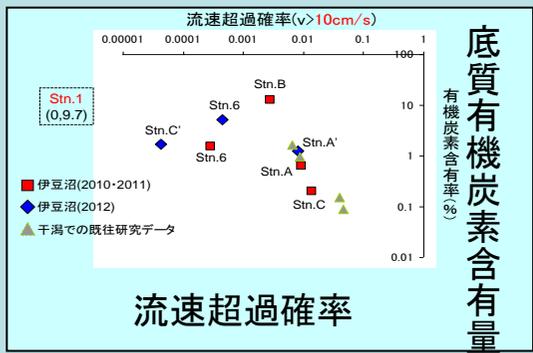
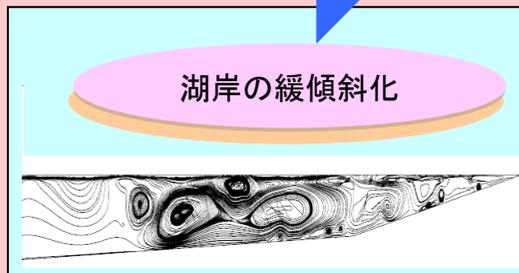
大

構造物の設置

垂直湖岸化

底質の泥化の原因は水の
流動の減衰・閉鎖性の強化

湖岸の緩傾斜化



流速超過確率

底質有機炭素含有量

浅い閉鎖性水域の底質環境形成機構の解析と
底質制御技術の開発(西村 修)