

課題名 5B-1102 湖沼水質形成における沿岸帯の機能とその影響因子の評価

課題代表者名 一瀬 諭（滋賀県琵琶湖環境科学研究センター環境監視部門生物圏担当専門員）

研究実施期間 平成23年度～平成25年度

累計予算額 41,543千円（うち25年度13,641千円）
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 琵琶湖、植物プランクトン、動物プランクトン、長期変動、貧酸素、泥質化、シードバンク、湖底勾配、数理モデル、シナリオ計算

研究体制

- (1) プランクトン動態および水質解析（滋賀県琵琶湖環境科学研究センター）
- (2) 琵琶湖の沿岸帯のシードバンク機能評価（滋賀県琵琶湖環境科学研究センター）
- (3) 浅い富栄養化池沼の好気、嫌気条件におけるシードバンクのポテンシャルの把握（埼玉県環境科学国際センター）
- (4) 沖帯および沿岸帯の底質環境の分析と評価（東レテクノ株式会社）
- (5) 水塊に回帰してきたプランクトンの増殖、生産とそれに伴う水質影響評価（龍谷大学）
- (6) 総合解析（滋賀県琵琶湖環境科学研究センター、龍谷大学）

研究協力機関

兵庫県立大学、京都大学、関西医科大学、東北大学

研究概要

1. はじめに（研究背景等）

全国の湖沼における環境基準の達成率が53%と水質改善が進んでいない原因について、琵琶湖を例に外部流入負荷より内部負荷の寄与率が遥かに大きいことを明らかにしてきた。本研究では、この内部負荷に大きな影響を及ぼすと考えられる沿岸帯の機能を評価するための研究である（図1）。さらに、湖沼の底層において溶存酸素低下により水生生物の生息不可となる状況も認められることから、泥質化の程度と微生物の生息可能なDO値を考察し、今後の湖沼水質保全やプランクトン生態系機能の維持を考慮した底質環境のあり方や適切な底質環境を創造する手段についての提言を行うために実施した。

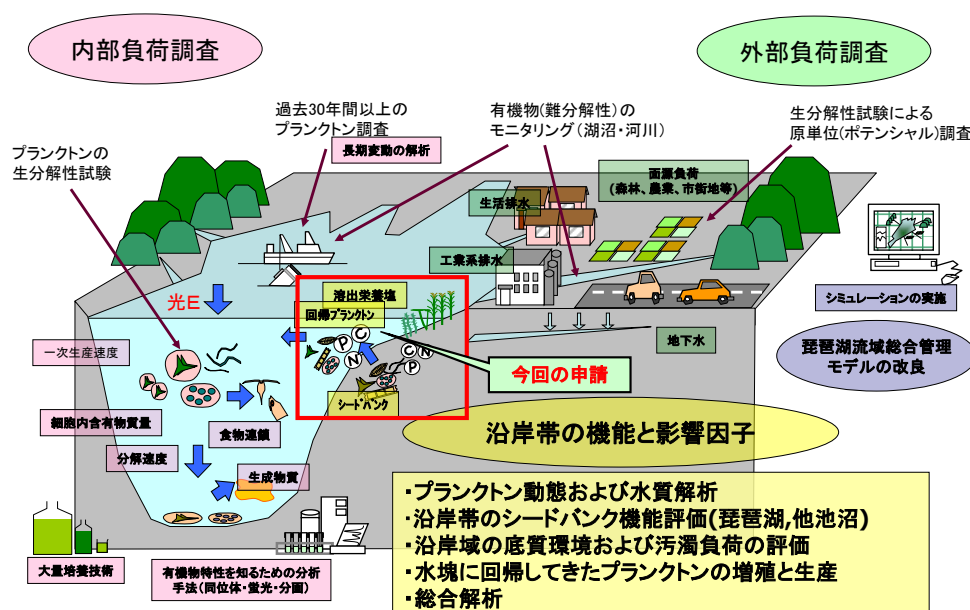


図1. 湖沼水質形成における沿岸帯の機能と影響因子の評価の位置付け

2. 研究開発目的

琵琶湖のような水深の深い湖沼では、一旦沖帯の底層に沈降した植物プランクトンが有光層に回帰し、再増殖することは考えにくい。植物プランクトン種の維持には水深の浅い沿岸帯が重要な役割を果たしている可能性が示唆される。さらに、沿岸帯は生物生産や底質における有機物分解も活発であることから、沖帯への有機物やN、Pの供給源としても重要である。本研究では、沖帯への植物プランクトン種の供給源としての沿岸帯の評価を行うことを目的とする(図2)。また、底質環境が湖沼水質および付着藻類やプランクトン群集構造に与える影響について下記の5つのサブテーマに分け研究を推進し、湖岸の底質環境が湖沼水質および付着藻類やプランクトン群集維持における役割を評価する。さらに、平成25年度には、龍谷大学と共同し、底質環境が湖沼の水質や藻類およびプランクトン群集構造に与える影響を明らかにし、その影響因子の評価を行う。この評価結果をふまえ、今後の湖沼水質保全やプランクトン生態系機能の維持を考慮した底質環境のあり方や適切な底質環境を創造する手段についての提言を行うことを目的とした。

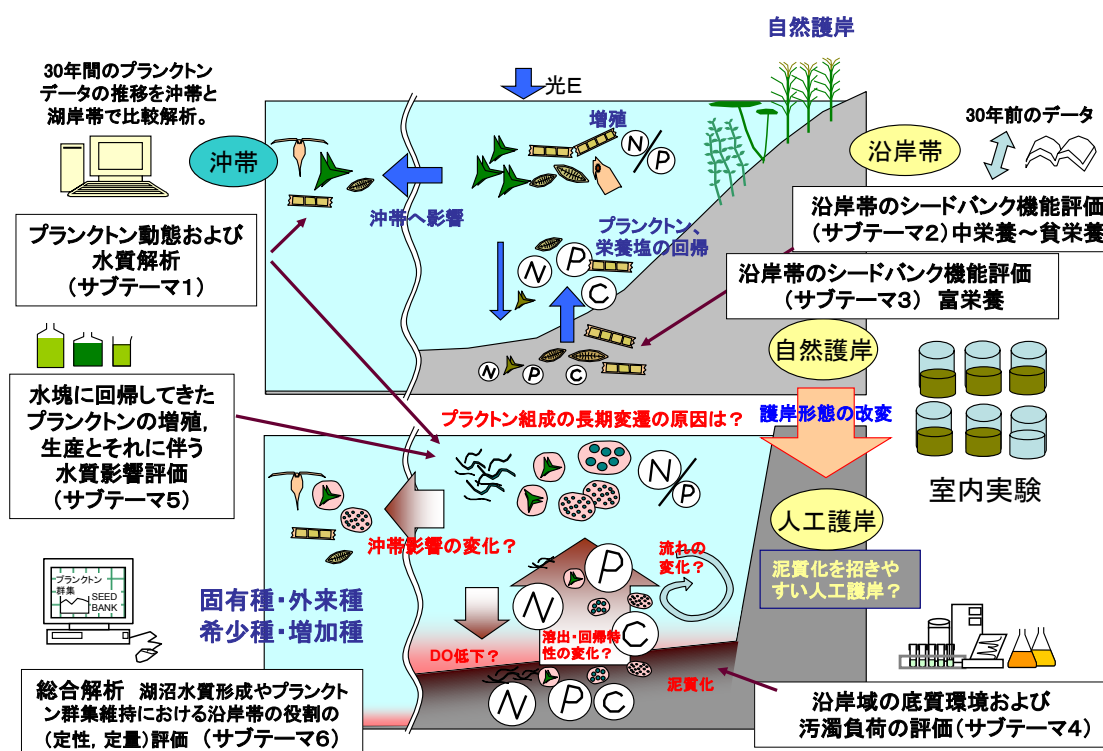


図2. 湖沼水質形成における沿岸帯の機能とその影響因子の評価の概要

3. 研究開発の方法

(1) プランクトン動態および水質解析に関する研究

本サブテーマでは「1) 沿岸帯と沖帯における植物プランクトン総細胞容積、総細胞炭素量、粘質鞘の長期変動解析、2) 沿岸帯と沖帯における植物プランクトン総炭素量と水質項目との相関解析、3) 植物プランクトン種類数の変化や長期的な変動解析、4) 動物プランクトン種組成変化や長期的な変動解析、5) 動物プランクトンと植物プランクトンとの関係解析、6) 底泥を用いた動物・植物プランクトンの回帰実験、7) 動物・植物プランクトンを用いた室内的な検証実験」について検討した。

1) では、琵琶湖5地点において植物プランクトンデータを用い、調査期間は1979年～2010年までの30年間、調査回数は毎月基本的に2回実施した。植物プランクトンの計数は、種毎の細胞数と平均細胞容積を算出し、各種の総細胞容積Vを求めた。次に細胞容積から細胞内炭素量を換算式によって、細胞容積から炭素量への換算を実施した。さらに、植物プランクトンが産生する粘質鞘の総体積量は墨汁(5倍液)染色後に算出した。

2) では、沖帯や沿岸帯の各水質項目と植物プランクトンとの関係性を評価するために1980年代、1990年代、2000年代の三期に分け、植物プランクトン総炭素量と有機態リン、有機体窒素、SS、Chl-a量との相関解析を実施した。

3) では、各植物プランクトンを種類別、綱別に分類し総炭素量を算出し長期的な変動解析を行った。

4) では、動物プランクトンのデータ解析を実施した。調査は沿岸帯として北湖東岸の長浜沖、沖帯として今津沖中央の2地点、1980年～2008年までの28年間1～2回/月の頻度で調査を行った。

5) では、動物・植物プランクトンの1995年と2000年の計数生データを抽出し、動物プランクトンと植物プランクトンとの関係解析を実施した。動物プランクトン調査は原生動物、ワムシ、甲殻類の各種類と個体数を計数し、各動物プランクトンの平均個体体積と総炭素量を算出した。その後、植物プランクトンと動物プランクトンとの関係や沿岸帯と沖帯の関係についての評価を行った。

6) では、人工的な湖岸帯の底泥と自然的な湖岸帯の底泥を比較するため、動・植物プランクトンの回帰実験を実施した。実験に用いた底泥は、愛知川沖、長命寺沖、長浜沖の3地点からイクマンバージ採泥器で採泥し、前処理として暗条件4℃で1ヶ月間保存した底泥を用いた。底泥の分析は、全有機炭素、全炭素、全窒素、全リン、化学的酸素要求量、強熱減量、酸化還元電位、水分率、固形分率、Chl-a、全鉄、全マンガ、粒度分布、金属元素の各項目の分析を実施した。回帰実験期間は2013年6月28日～8月27日までの約60日間、培養条件は温度20℃、18時間明条件/6時間暗条件、静置培養、各漕のカブリングは1週間毎に10回実施し回帰してくる動・植物プランクトンの同定および計数を実施した。

7) では、動物プランクトンの餌資源としてどのような植物プランクトンが良好か否かについて実験を遊泳阻害試験法や繁殖阻害試験法に準じ検証的に実施した。餌となる植物プランクトンは琵琶湖から純粋分離した藍藻(5種類)、緑藻(7種類)、珪藻(2種類)の計14種類を用い、実験期間は、2013年8月28日～9月11日までの15日間、動物プランクトンはミジンコを用いた。実験には生後24時間以内の子供を使用した。測定は毎日行い、ミジンコの成長や生存数、産仔数、親の死亡数、親の遊泳阻害数等を計測した。

(2) 「琵琶湖の沿岸帯のシードバンク機能評価」

1) 回帰試験方法

滅菌を行ったマグナム瓶に底泥を50g入れ、孔径0.45μmのメンブレンフィルターでろ過を行った、採泥地点の直上水を250mL添加し、この直上水を48時間毎に採取し分析等を行った。直上水の採取後は、新たにろ過済みの直上水250mL添加し、48時間後に採取する、この作業を8回繰り返した。回帰試験の条件は好気攪拌、好気静置、嫌気静置とした。なお、好気攪拌は自然的湖岸の底層部が攪拌により好気的な条件であり、嫌気静置は、人工的湖岸の底層部でほとんど流れがないため嫌気的な条件になることからこの2条件で実施した。好気静置は嫌気静置の対照として一部実施した。また、回帰試験の条件は20±1℃、12h:12hの明暗周期で光強度は60μmolm⁻²s⁻¹とした。

2) 2年間の嫌気暴露底質によるシードバンク機能劣化評価

底泥を、2Lの密栓付ポリ瓶に入れ、各調査地点の直上水で水封した。この時の底泥直上のDOは0.1～0.2mg/Lであったため、これを嫌気保存とした。好気保存は、底泥をビーカーに入れ、底泥直上水に常時エアレーション(70mL/min)を行うことで好气的状況を保った。この両者を2年間保存し、嫌気暴露によるシードバンク機能の違いについて評価を行った。また、採取時と2年間保存との評価に加え経時的に、6ヶ月、1年、1年6ヶ月、2年保存の回帰試験を実施した。

3) シードバンク機能維持必須DO量の定量的評価

底泥を、2Lのポリ瓶に入れ、各調査地点の直上水で水封した。これを好気条件(DO:10.6mg/L)とした。微好気保存①(DO:7.7mg/L)は、嫌気ジャーに入れ酸素吸収剤を1個入れた。微好気保存②(DO:4.6mg/L)は、同様に酸素吸収剤を2個入れた。嫌気保存(DO:0.7mg/L)は、クリーンボックスに窒素ガスを充填し、酸素がおおよそ1%以下になったことを確認して、嫌気ジャーに試料を入れ酸素吸収剤を3個入れた。この4条件について、全て4℃、暗所で保存し、経時的に6ヶ月、1年、1年6ヶ月保存の回帰試験を行った。

(3) 浅い富栄養化池沼の好気、嫌気条件におけるシードバンクのポテンシャルの把握

本サブテーマでは「1)浅い富栄養化池沼山ノ神沼の底層環境モニタリング」、「2)藻類回帰実験及び酸素条件が底質の藻類シードバンク機能に及ぼす影響」について検討した。

1) では、山ノ神沼における現場底層の連続モニタリング調査は、データの連続記録が可能な多項目水質計を用いて行った。調査は夏季は平成23年8月、冬季は11月に行った。MS5センサー部が底質面直上10cmに位置するように固定設置して、底層DOの日周及び季節変動を把握した。気象情報は山ノ神沼に最も近い距離に位置する気象庁測定所の観測データから、日照時間は熊谷地方気象台測定局、降水量及び風速は久喜地域気象観測所を利用した。

2) では、2個の1Lt-ルビカ-に底質を80ml(湿重量約90g)加え、孔径0.45μmの膜でろ過した湖沼

水とよく攪拌し、易沈殿性底質を沈降させた後に実験を開始した。光条件はタイマー運転した蛍光灯照明による12h/12h周期明暗条件、または、完全遮光した連続暗条件の2条件を設定した（参照：詳細、図(3)-2）。温度条件は同一とし、各ビーカー内の水温、pH及びDOは20分おきに多項目水質計を用いて連続記録した。本方法は藻類活性を炭酸同化作用（光合成）を原理として、DO及び水素イオン濃度（pH）で評価する。実験には初夏に採取した山ノ神沼底質（表層1cm）をよく混ぜた後、貧酸素条件容器に密閉し、微好気条件（DO \sim 3mg/L）及び好気条件（DO $>$ 6mg/L）は窒素ガスもしくは空気により調節し、室温遮光状態で100日保存したものをを用いた。ビーカー内に回帰した藻類は生物顕微鏡により観察した。

（４）沖帯および沿岸帯の底質環境の分析と評価

１）水質、底質調査方法

調査地点の水質と底質の状況を知るために、琵琶湖および山ノ神沼において、2011年10月～2013年11月の間、1ヶ月間隔または季節毎の頻度で、水質および底質の調査を行った。調査項目は、水質では、pH、電気伝導度、酸化還元電位、色度、濁度、TOC、COD、窒素、リン、浮遊物質、コロフィル、溶存酸素とし、底質では、全炭素、有機炭素、COD、窒素、リン、コロフィル、金属元素、強熱減量、酸化還元電位、粒度分布、水分率とした。

２）底質直上、直下の溶存酸素濃度測定

底質の表面付近の溶存酸素の分布状況を把握するために、2012年9月および2013年11月に琵琶湖長浜沖、愛知川沖、長命寺沖でコアサンプルを採取し、溶存酸素マイクロセンサー（先端のサイズ10 μ mおよび500 μ m）を用いて、底泥表面+20 mm～底泥中 15 mmを1mmピッチで測定した（参照：詳細、図(4)-2）。

３）底質の酸化還元状況の測定

底質の酸化還元状態と元素の存在状態との関係を短時間で知るために、底質環境の硫黄(S)のX線吸収近傍構造(XANES)測定を行った。測定は立命館大学SRセンターBL-10軟X線XAFSビームラインを用いて行った。試料は、2011年11月、2012年9月、2013年7月に琵琶湖沿岸帯から採取し、硫黄の存在状態の概要把握、底質を洗浄して鉱物のみにした状態での測定、底質を採取後に完全に大気に触れない状態で保持した場合での測定を行った。また、遠心分離法により間隙水を採取し、溶存有機物、形態別無機窒素(アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素)、電気伝導率、pHを測定した。

４）ドップラー流速プロファイラー(ADCP)による流向流速の現地測定

底質が泥質化している長命寺沖と、底質が泥質化していない愛知川沖において、ドップラー流速プロファイラー-ワークスADCP1200kHzを使用して流況観測を実施した。設置方法は、ADCPを専用の架台に装着したうえで、底面にヘドロへの沈み込み防止用のベニヤ板（0.9m \times 0.9mのコンパネ）を取り付けて、湖底に長さ0.8mのSUS製の杭で固定した（参照：詳細、図(4)-4）。設置期間は2012年9月13日～9月20日の8日間とした。

（５）水塊に回帰してきたプランクトンの増殖、生産とそれに伴う水質影響評価

本サブテーマでは「1)水温、N/P比が植物プランクトン細胞サイズや粘質鞘サイズに及ぼす影響の評価」「2)一次生産有機物の微生物分解における微小原生動物の役割の評価」「3)濁度が植物プランクトン群集変化に与える影響の評価」「4)植物プランクトンの増殖特性の評価及びその挙動解析」について検討した。

１）では、供試藻類として粘質鞘を有する大型緑藻 *Staurastrum arcticon* 単藻株を用い、M11培地（萩原、1984）のクエン酸鉄濃度を1/10としたM11改変培地で三角フラスコを用いた静置培養を行った。この際、N、P濃度を調整し、N/P比を5～100（重量比）に変化させた。培養の間、細胞容積や粘質鞘容積を計測し、温度やN、P濃度、N/P比等が細胞容積や粘質鞘容積に及ぼす影響を評価した。

２）では、植物プランクトンとして大型緑藻の *Staurastrum dorsidentiferum*、バクテリア食の動物プランクトンとして繊毛虫綱 *Paramecium caudatum*、バクテリア源として琵琶湖水ろ過水を用いた。滅菌したガラス製スクリー瓶に *S. dorsidentiferum*、*P. caudatum* およびろ過湖水を添加し、20 $^{\circ}$ C、暗条件で30日間静置培養を行って分解挙動を追跡した。

３）では沈降性植物プランクトンとして *S. dorsidentiferum*、浮上性植物プランクトンとして藍藻 *Microcystis wesenbergii* を用い、墨液を濁度100度相当となるように培養液に添加し、培養実験を実施した。単独培養と二者混合培養を実施し、濁度の有無と併せて各々の植物プランクトンの増殖速度に及ぼす共存影響および濁度影響を評価した。

４）の植物プランクトンの挙動解析では、琵琶湖より単離した主要な植物プランクトン（緑藻

Staurastrum dorsidentiferum var. *ornatum*、*Staurastrum arcticon*、藍藻 *Aphanothece clathrata*、*Microcystis wesenbergii*) の増殖特性を窒素濃度やリン濃度を調整したM11改変培地を用いた培養実験により評価するとともに、文献より他の植物プランクトンについて増殖特性を整理した。加えて、琵琶湖優占種である *S. dorsidentiferum* に着目し、琵琶湖における個体数の変動要因を解析した。

(6) 総合解析

琵琶湖北湖3地点（長命寺沖、愛知川沖、長浜沖）および南湖3地点（帰帆島、琵琶湖大橋、柳が崎）において底泥を採泥し、底泥酸素消費速度を計測するとともに、底泥分析、水質分析を実施し、底泥酸素消費速度影響因子解析を行った。加えて、琵琶湖沿岸域底質調査データを解析し、琵琶湖沿岸帯の泥質化影響因子を抽出した。

琵琶湖の沿岸帯における植物プランクトン種ごとのシード量および現存量を再現・予測することを目的として、水柱単位での評価が可能なモデル（システムダイナミクスモデル）を構築した。構築されたモデルを用いて、シードの保存性や回帰性、プランクトンの増殖特性等が植物プランクトン種ごとの現存量に与える影響について解析を行い、観測値との比較を行った。また人工の湖岸を自然的湖岸に変更した場合の仮想的なシナリオ計算を行った。

4. 結果及び考察

(1) プランクトン動態および水質解析に関する研究

1) 琵琶湖の沖帯と沿岸帯の長期的な現存量の変化は増減を繰り返しながらも徐々に減少している傾向が認められた。しかし、植物プランクトンの中でも藍藻に属し粘質鞘と呼ばれる無色・透明の有機物を多く産生する種は近年増加傾向を示し、地点別の傾向をみると水深の浅い南湖や沿岸帯の地点で顕著であることが明らかとなった。

2) プランクトン総炭素量と水質項目との相関解析の結果、プランクトン総炭素量とChl-a量との相関が0.35~0.86と最も高かった。特に年代別にみると、1980年代では0.86と最も高いのに対して、1990年代は0.56、2000年代には0.52と徐々に減少傾向が認められた。このことは、過去に比べChl-a量のみでは評価できない有機物が増加してきていることが明らかとなった。

3) 植物プランクトン種類数の変化では、各地点ともに1990年以降、急速に減少していることが認められ、特に、沿岸帯の定点での減少が顕著であった。

4) 動物プランクトン炭素量の経年変化をみると、2000年以降減少傾向が認められ、植物プランクトンと同様に動物プランクトン量も近年減少傾向にあることが明らかとなった。

5) 動物プランクトンと植物プランクトンとの関係解析では、沿岸帯は沖帯に比べ植物プランクトン量は大きな差は認められなかったものの、原生動物やワムシ類が明らかに多く分布しており、これらの種類が捕食する植物プランクトン量を考慮すると沿岸帯の内部生産が沖帯に比べ大きいと考えられた。さらに、これらの動物プランクトンが多い時期には、これらの種類が食べ残した群体性の藍藻などの植物プランクトン種が内部生産量として評価されている可能性も示唆された。

6) 底泥を用いた動物・植物プランクトンの回帰実験では、人工的な湖岸帯の底泥は泥質化が進行しており、群体性藍藻の発生や根足虫などの腐食性を好むような種類が発生しやすいことが明らかとなった。

7) 動物・植物プランクトンを用いた室内的な検証実験結果から、粘質鞘を有するような微細な藍藻は、ミヅコなどの動物プランクトンの餌としては不適であることが明らかとなり、緑藻や珪藻に属する種類がミヅコの餌として優れていることが明らかとなった。今後、琵琶湖の水産魚貝類の復活に向かい、ミヅコの餌資源として阻害となる藍藻類の増加を抑制するための対策や、珪藻や大型緑藻が増殖しやすい湖岸帯の環境整備が重要であることが本実験結果から明らかになった。

(2) 「琵琶湖の沿岸帯のシードバンク機能評価」

1) 人工的湖岸（長浜沖）と自然的湖岸（愛知川沖）の水質調査結果から、藍藻が優先種として確認されることはなく、珪藻が優先しており、人工的湖岸と自然的湖岸ではTOC等の水質も大きな違いは確認できなかった。

2) 底泥の成分を見ると底質でみるとTOC、TC、TN、は約10倍程度長浜沖で高く、CODやT-Pは約20倍もの高い値を示しており、長浜沖ではORPも年間を通じてマイナスの値を示しており底泥は嫌気的な状態にあることが示唆された。また、水分率も長浜沖は愛知川沖の2倍程度の値となっていた。愛知川沖底質の粒径分布をみると、細砂成分が最も多く全体の90%以上を占めていた。一方、長浜沖の底質は、細砂成分が全体の43%で、細かいシルト分も47%を占めていた。このように、底質は自然的

湖岸の愛知川沖の底泥と人工的湖岸の長浜沖の底泥では大きな違いを確認した。

3) 底泥中の藻類細胞数と回帰試験により回帰した藻類細胞数は、底泥中の藻類細胞数が多いほど回帰する藻類細胞数が多い比例関係にあり、相関係数は $r=0.82(p<0.05)$ と高い相関関係にあることが分かった。また、2年間の嫌気暴露底質によるシードバンク機能劣化評価により、好気保存と嫌気保存を行い、6ヶ月、1年、1年6ヶ月、2年保存を行い保存される藻類シード量の変化を見ると、愛知川沖と長浜沖ともに藍藻が最も多く観察された。この藍藻の保存状況をみると、好気保存では6か月後に半減するのに対して、嫌気保存では、愛知川沖、長浜沖ともに約80%が保存されていた。さらに、2年後の結果をみると、好気保存では、約20%しか保存されていないが、嫌気保存では約50%以上も保存されていた。一方緑藻は、長浜沖では好気保存において約20%が保存されているのに対し嫌気保存では約5%しか保存されていなかった。また、保存した底泥を用いて行った回帰試験結果でも、回帰した藻類は藍藻が最も多く、2年後においても回帰する藻類種は愛知川沖と長浜沖ともに藍藻のみであった。この結果から、藍藻は嫌気保存で保存されやすく、緑藻は好気保存で保存されやすいことが示唆された。

4) 底泥を保存した直上水のDOを変えて保存を行いシードの保存状況を調べた。底泥直上水のDOは、好気保存(DO: 10.6mg/L)、微好気保存①(DO: 7.7mg/L)、微好気保存②(DO: 4.6mg/L)、嫌気保存(DO: 0.7mg/L)における1年6ヶ月保存後の藻類シード数の経時変化を見た。好気保存と微好気保存①では、6ヶ月後の藍藻の細胞数が、約半数以下にまで減少するのに対し、微好気保存②と嫌気保存では、約7割が保存されていた。

底泥を水封した直上水のDOが低いほど藍藻≒珪藻>緑藻の順に保存率が高かった。

次に、回帰試験結果を見ると、微好気的な条件(DO: 4.6mg/L)では、保存された藍藻シードが最も多く回帰することがわかった。アオコが発生する湖辺域における、底質の低酸素化が藻類のシード数および藻類の回帰におよぼす影響は大きいことが推察された。

(3) 浅い富栄養化池沼の好気、嫌気条件におけるシードバンクのポテンシャルの把握

1) 浅い富栄養池沼山ノ神沼の底層環境を調査した。その結果、底質直上10cmのDO値(以下、底層)は、夏季には概ね18時前後に最大値、7時前後に最小値を示し、冬季には概ね16時前後に最大値、5時前後に最小値を示す日周変化を示した。さらに、夏季は日射時間が短い又は全く無い条件時に底層は貧酸素化した。そして最寄りの気象観測所の風速データと底層との相関をとったところ、両者には弱い正の相関が見られた(参照: 詳細、図(3)-14、図(3)-15)ことから、風によるせん断力が沼水を混合し、底層の貧酸素状態を解消していると考察された。同様に冬季の山ノ神沼では北から吹き付ける季節風によって底層の貧酸素状態は解消されやすいことが示唆された。本研究によって、底層が貧酸素化する状態であっても、水深が浅いと貧酸素状態は容易に解消されると考察された。

2) 藻類回帰実験及び酸素条件が底質の藻類シードバンク機能に及ぼす影響

貧酸素、微好気及び好気条件で100日保存した山ノ神沼底質を用いた実験の結果、ピーカー内に回帰した藻類種は詳細版、図(3)-23(参照)に示した。藍藻では*Synechococcus* sp.や*Merismopedium tenuissimum*、緑藻では*Scenedesmus* spp.、そして珪藻では*Nitzschia* spp.であるが、種類数は極わずかであった。そして保存時のDOが低いほど、藍藻が緑藻や珪藻よりも高い細胞密度で観察された。このことから、底質の貧酸素化は藍藻にとって有利な環境条件となっている可能性が示唆された。なお、珪藻類は微好気保存において最も保存されていた(参照: 詳細、図(3)-24)。本研究から貧酸素状態で保存した底質からは藍藻が優占して観察された一方、好気保存した底質からは緑藻、珪藻及び藍藻がバランスよく観察できた。また、微好気状態で保存した底質から珪藻が最も多く観察された。底質の藻類シードバンク機能の維持に必要なDO量は、貧酸素状態は藍藻の優占化を引き起こす恐れがあるため、最低限微好気状態が維持されることが望ましいと考察された。

(4) 沖帯および沿岸帯の底質環境の分析と評価

1) 水質、底質調査結果

琵琶湖沿岸帯における水質調査結果と、沖帯の水質調査結果(琵琶湖定期水質観測)を比較した結果、沿岸帯では、沖帯より浮遊物質、粒子状有機物量、 COD_{Mn} 量が多い傾向がみられた。また、底質調査の結果から、長浜沖、長命寺沖および山ノ神沼は、泥質化が進んでいるが、愛知川沖は泥質化が進んでいない地点である位置付けが可能であることを確認した。

2) 底泥直上・直下の溶存酸素濃度の分布調査

底泥直上・直下の溶存酸素濃度の分布調査の結果、底質の泥質化が進んだ長浜沖では、底質表面の酸化層の厚さが約2mmの薄さであり泥質化がすすんだ長浜沖が薄く(約2mm)、砂質の愛知川沖が相

対的に厚い（6mm）ことが判明し、底質の泥質化が進むことにより、底質表面付近における湖水の嫌気化が生じやすいことが示唆された（参照：詳細、図(4)-8）。

3) 底質の酸化還元状況の測定

泥質化状況の異なる地点のXANESスペクトルを取得し比較したところ（参照：詳細、図(4)-11）、泥質化が進んだ長命寺沖（図中B地点）のみ単体S(S8リング)のエネルギー位置(2472 eV)にピークが認められた。このことから、長命寺沖の底質の泥質化が進んだ結果、硫酸還元菌や硫黄細菌の活動により、単体硫黄が生成した可能性を示唆している。また、泥質を洗浄して測定を行ったところ、硫酸イオンは鉱物由来で無いことが判明し、詳細版(4)-12(参照)に示した分布状況であることが示唆された。また、琵琶湖沿岸帯における底質の間隙水中の無機窒素は、ほとんどがアンモニア態窒素（還元的）であった。

4) 流向流速測定結果

ADCPを用いて流向流速（流況）の連続測定を行い、底質が砂質の愛知川沖と泥質化している長命寺沖と比較したところ、愛知川沖では一方向への流れが卓越していたこと、長命寺沖では、水塊が同じ場所に留まる傾向が見られた（参照：詳細、図(4)-12）。これらのことから、沿岸帯では、沖帯と比べて多い傾向がある粒子状物質が、その供給量や地形、流向・流速等に影響を受けながら沈降し堆積する量により底質の基礎的な特性を決定し、その結果、泥質化が進んだ場合には、溶存酸素が低下し、還元的環境が形成される過程が実測データを元に示唆された。また、形成された底質環境が、他のサブテーマで研究した各種プランクトンの休眠細胞の生存率や再帰率に影響を与えるため、沿岸帯の流況や濁質量に影響を与える因子の管理が、沿岸帯の底質環境を保全する上で重要であると考えられた（参照：詳細、表(4)-6）。

(5) 水塊に回帰してきたプランクトンの増殖、生産とそれに伴う水質影響評価

1) 水温、N/P比が植物プランクトン細胞サイズや粘質鞘サイズに及ぼす影響の評価において、実験の結果、細胞容積および粘質鞘容積は水温、N/P比によって変化することが認められた。これらの変化は増殖速度（生合成速度）と光合成速度の環境因子依存性の違いに起因していると考えられ、生合成速度が相対的に低下するリン制限条件および高水温において細胞外排泄有機物が増大し、粘質鞘が肥大化することが示唆された。

2) 一次生産有機物の微生物分解における微小原生動物の役割の評価において、生分解試験を実施した結果、POCの分解はPOC濃度に関する一次反応で近似されたが、微小原生動物共存・非共存による分解速度定数の有意差は認められなかった。一方、DOCについては一次反応を仮定した物質収支モデルにより生分解速度定数を推定したが、こちらも微小原生動物共存・非共存による統計的有意差は認められなかった。これらの結果は、従来の有機物の難分解性評価のための生分解試験方法の妥当性を支持するものであった。

3) 濁度が植物プランクトン群集変化に与える影響の評価において、濁度および浮上性藍藻と沈降性緑藻の共存による増殖速度への影響を実験的に検討した。その結果、沈降性緑藻は濁度および浮上性藍藻による強い光阻害（阻害率76%以上）を受けたのに対し、浮上性藍藻は光阻害の影響を受けにくかった。よって、比較的濁度が高い（透明度が低い）沿岸域は光環境によって藍藻が優占しやすい環境にあると判断された。

4) 植物プランクトンの増殖特性の評価及びその挙動解析において、藍藻、緑藻、珪藻の増殖特性を整理した結果、藍藻は比較的高水温に適應しており、逆に珪藻は低水温に適應しているという特徴が認められた。琵琶湖北湖沿岸域での藻類群集挙動と増殖特性を比較検討した結果、野外における出現順序は主として水温の影響を受け、夏季～秋季には硝酸枯渇による窒素制限の影響を受けていることが明らかとなった。過去30年間で晩秋～冬季の緑藻（車軸藻綱）*Staurastrum dorsidentiferum*の出現頻度が高まっているが、これは湖沼温暖化に伴う水温成層期間の延長の影響を受けていると考えられた。

(6) 総合解析

底泥を加えたBOD瓶中溶存酸素（DO）濃度は一次反応的に減少したことから、一次反応を仮定して酸素消費速度定数を求めた。得られた速度定数から底泥酸素消費速度を求めたところ、0.106～0.215 g/m² dayと評価された。年間の底層DOの経時変化を表現できる数理モデルを構築し、モデルを用いて各パラメータの感度解析を行った結果、底層DOに対して含泥率が最も強く影響を有していることが明らかとなった。沿岸帯底層の貧酸素化の防止には沿岸帯底質の泥質化を防止することが最も有効であると判断された。琵琶湖北湖沿岸帯における湖底泥質化実態調査データを解析した結果、湖底勾配変

化量が3%以上の勾配急変部より沖側で泥質化が進行する傾向が認められた。よって、泥質化防止対策として、勾配急変部を解消するような沿岸帯整備を行うなどの対策の有効性が示唆された。

(2)において実施した回帰試験の結果、および(5)において実施・整理した植物プランクトンの増殖特性に関する結果をもとに、モデルパラメータの推定を行い、現況再現計算を行ったところ、長浜沖および愛知川沖における藍藻、珪藻、緑藻の季節遷移を概ね再現することができた。また本モデルを用いて、人工的湖岸の自然化を想定したシナリオ計算を実施したところ、底質DOの改善、泥質化の改善、水交換率の増大により藍藻現存量を抑制できる可能性が示唆された。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

1) これまで底泥から回帰する植物プランクトンの研究は、ある特定の種類のみについて行われており、回帰する植物プランクトン種全てについての研究は行われてこなかった。このため、緑藻、藍藻、珪藻等綱別の回帰数を求めることで、植物プランクトンのシードバンク機能として底泥を評価する新しい手法となる。

2) 底泥中の藻類シード量を直接顕微鏡で観察を行った結果、シルト分が多く、水分率の高い底質で保存され、砂質分の多い底質では、藻類シード量が少ないことが明らかとなった。この手法により、底泥の評価に活用できる。

3) 湖岸底泥から回帰してくる緑藻や藍藻、珪藻等の綱別の回帰数を求めることで、植物プランクトンのシードバンク機能として底泥を評価する新しい手法が確立できた。また、底泥の評価法として、2年間の嫌気暴露底質によるシードバンク機能劣化評価を行うため2年間嫌気条件に暴露させ、好気的条件下で保存した底泥との比較実験を行うことで、嫌気化が藻類の回帰に与える影響についての評価が可能となった。

4) 採取した底泥を用い、シードバンク機能維持必須DO量の定量的評価として底泥保存直上水のDOを変えることで、微好気条件保存し底泥の比較実験を行った。この結果、底層部の貧酸素化が藻類の回帰に与える影響について評価を行い、微好気的な条件下で保存された底泥から藍藻が回帰し易いことが明らかとなり、沿岸帯の機能を考える上で重要な知見となった。

5) 微好気条件下で保存した*Anabaena macrospora*の休眠細胞が、好気条件下で保存した休眠細胞の発芽率を2倍以上も上回った結果が得られたことから、これを用いた底泥の評価が可能となる。

6) 本研究の研究開発により湖岸底泥から回帰してくる緑藻や藍藻、珪藻等の綱別の回帰数を求めることで、植物プランクトンのシードバンク機能として底泥を評価する新しい手法が確立できた。また、底泥の評価法として、貧酸素条件下で1年間暴露させ、好気的条件下で保存した底泥との比較実験を行うことで、貧酸素化が藻類の回帰に与える影響についての評価が可能となった。さらに、光の強度が底質中の植物プランクトンの再活性化に重要な環境因子であることが確認でき、湖岸帯の光条件の環境改善(浅場化)が貧酸素状態の解消に貢献することを裏付けている。今回の研究結果から、深い水深で貧酸素が強くなるとシード機能が低下し、緑藻が減少し藍藻が増加するなど、種によって耐性が異なっている可能性が示唆された。従来では、環境分析分野では使われていなかった分析手法であるXANES測定による底質中の硫黄の元素存在状態を測定したところ、本法により酸化還元状態を反映したスペクトルが取得できることが確認され、硫黄は、底質環境を評価するよい指標となり得ることが確認された。植物プランクトンの生分解試験において、これまで微小原生動物の影響は具体的に検討されてこなかったが、本研究において、少なくとも顕著な影響を持たないことが明らかとなり、従来の生分解試験の評価結果を用いることの妥当性が示唆された。また、沿岸域での底質巻上げや植物プランクトンの繁殖による透明度低下によって、アオコなどの浮上性植物プランクトンの優占化が進む可能性が示唆された。

7) 富栄養化の進行した山ノ神沼では夏季及び冬季に関わりなく、底層では一時的に貧酸素状態になっている実態が明らかとなった。しかし、水深の浅いことが幸いし、底層の貧酸素化が解消されやすい状態にあるものと考察された。底質からのプランクトン回帰実験において、山ノ神沼のような高有機底質を用いた場合においては、特別な処理を必要とせず、水とよく攪拌混合するだけで嫌気状態を再現できることが分かった。

8) 富栄養湖沼の山ノ神沼は最深部で約2mと浅いため風等によって容易に攪拌され酸素供給が行われることから、泥質化は琵琶湖以上に進行しているにも拘わらず底層・底層環境は極端な還元状態にはならないことが実証された。さらに、貧酸素状態は藍藻のシードにとって保存される上で有利であると考えられ、藻類シードバンク機能を維持するためには、貧酸素状態が解消されるべきである。したがって、沿岸帯整備の際には、なだらかな湖岸形状に復活させることにより、水の滞留域の解消及

び藻類の光合成を可能とする光環境の改善が有効であることが推察された。

9) 人工的湖岸の底層部の嫌気化の進行が藍藻シードの保存に繋がることから、湖辺域を好気的な環境に整備することで藍藻類が減少することを明らかにした。また、琵琶湖以上に富栄養化が進行した湖沼であっても、水深が浅いことによってアオコを形成する藍藻以外の緑藻や珪藻が季節的に出現することから、なだらかな湖岸形状の沿岸帯整備を行う等、今後の沿岸帯対策の方向性を提示することができた。

10) 貧酸素 (DO 0mg/L) 状態で保存した底質からは藍藻が優占して観察された一方、好気 (同 >6mg/L) 状態で保存した底質からは緑藻、珪藻、藍藻がバランスよく観察できた。また、微好気 (同 2~3mg/L) 状態で保存した底質から珪藻が最も多く観察された。これらのことから、底質の藻類シードバンク機能を健全に維持するために必要な DO 量を定量的に評価すると、貧酸素状態は藍藻の優占化を引き起こす恐れがあるため、微好気の状態が最低限維持されることが望ましいと考察された。

11) 琵琶湖沿岸帯 (長浜沖、愛知川沖、長命寺沖の3地点) の水質データと沖帯の水質を比較したところ、琵琶湖沿岸帯では、沖帯より浮遊物質量、粒子状有機物、クロロフィル量が多い傾向がみられることが判明し、湖岸帯水質の特徴の一部を明らかにすることが出来た。

12) 底質の泥質化が進むと、底質表面の酸化層の厚さが薄くなり、泥質化が進んでいない地点 (愛知川沖) では 4~6mm の厚さであるが、泥質化が進んだ地点 (長浜沖) では 2mm 程度であることをマイクロセンサーによる測定により、初めて明らかにした。

13) X線吸収端近傍構造測定 (XANES) 法により、底質中の硫黄の存在状態を測定することが可能であることを示し、さらに、還元的硫黄は、鉱物以外の堆積物由来であることを明らかにした。

14) 底泥間隙水の分析により、琵琶湖沿岸帯における間隙水中の窒素の存在形態が、ほとんどがアンモニア態窒素 (還元的) であることを明らかにした。

15) ドップラー流速プロファイラー (ADCP) を用いて流向流速の連続測定を行った結果、底泥の泥質化には流向流速が関与している可能性があることを明らかにした。

16) 沿岸帯においては、沖帯と比べて多い傾向がある粒子状物質が、その供給量や地形、流向・流速等に影響を受けながら沈降し堆積する量により底質の基礎的な特性を決定し、その結果、泥質化が進んだ場合には、溶存酸素が低下し、還元的環境が形成されると考えられた。

17) 植物プランクトンの細胞容積や粘質鞘容積の環境因子依存性を明らかにするとともに、植物プランクトンの増殖特性から野外での植物プランクトンの挙動が特に水温とそれに伴う水温成層状況に強く影響されていることを明らかにした。有機物の難分解性を判断する生分解試験における微小原生動物の影響を評価した結果、微小原生動物は試験結果に有意な影響を与えておらず、従来の試験法の妥当性が示された。また、沿岸帯における透明度低下 (濁度上昇) が *Microcystis* などの浮上性藍藻の優占化に寄与している可能性を明らかにした。

18) 沿岸帯底泥を用いた底泥酸素消費速度評価実験を通じて、底泥酸素消費速度が温度、含泥率、窒素含有率に強く影響を受けていることを明らかにした。鉛直一次元の溶存酸素収支モデルを構築し、底層溶存酸素濃度に影響する因子を検討した結果、含泥率が底層貧酸素化に強く影響することが示唆された。琵琶湖北湖湖岸帯湖底泥質化実態調査データを再解析した結果、湖底勾配変化量3%以上の勾配急変部より沖側で泥質化が進行する傾向があったことから、勾配急変部を解消するような沿岸帯整備を行うなどの対策の有効性を指摘した。また、本研究で構築した沿岸帯プランクトン量予測モデルを用いて人工的湖岸の自然化を想定したシナリオ計算を実施することにより、湖岸形態が植物プランクトン種ごとの現存量に与える影響を半定量的に評価することが可能となった。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

本研究により富栄養化及び底質の有機化が進行した湖沼において、水深が浅いことは底層の貧酸素状態の解消に有利であることが示唆された。湖岸帯の光条件の改善は、底質由来の藻類の光合成の再活性化を促進することが実験的に示唆されたことから、湖岸帯の構造を浅場化することは、生態工学的貧酸素状態の解消に貢献することを裏付けている。さらに、1年間貧酸素状態で保存した後も藻類の再活性が確認できた。しかし、種によって貧酸素耐性が異なる可能性も示唆されたことから、今後の研究により湖沼の底層貧酸素管理政策の基礎データとして貢献できると考えられた。また、人工的湖岸の自然化を想定したシナリオ計算を実施したところ、藍藻の現存量が大きく減少する傾向が見られたことから、自然的な湖岸を復元していくことにより湖内のプランクトン種ごとの現存量にも影響を与えられる可能性が示された。

<行政が活用することが見込まれる成果>

分析技術の確立、今回実施した観測や測定方法を用いることによって、沿岸帯底質の泥質化状況を把握することが出来たことから、本手法により、他の湖沼においても、底質の泥質化状況を把握することができると考えられる。また、沿岸帯の湖岸形状や流況を適切に管理することが、底質の泥質化を防止し、健全な水環境を創出する上で重要であることを明らかにした。一方、沿岸帯における透明度の低下（濁度上昇）が*Microcystis*などのアオコを形成する浮上性藍藻の優占化に寄与していることが明らかになったことから、アオコ制御という観点から沿岸帯の濁水対策の重要性が示唆される。さらに、総合解析においても、沿岸帯の泥質化が底層DOの貧酸素化に大きな影響を持っていることを示し、沿岸帯の泥質化の要因の一つとして湖底の勾配急変部の存在を指摘したことから、勾配急変部を解消するような沿岸帯整備を行う等、今後の沿岸帯対策への活用が期待される。

本研究の成果により、琵琶湖北湖における自然的湖岸と人工的湖岸の底質の持つ藻類シードバンク機能の違いと、底層部の嫌気化が藍藻シードの保存に繋がることを明らかとしたことから、琵琶湖南湖の自然的湖岸と人工的湖岸の底質について、滋賀県では平成26年～28年にかけて実態調査を行うこととなった。

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) 一瀬諭、池谷仁里、古田世子、藤原直樹、池田将平、岸本直之、西村修：日本水処理生物学会誌.49(2), 65-74 (2013)「琵琶湖に棲息する植物プランクトンの総細胞容積および粘質鞘容積の長期変動解析」
- 2) 矢島悠一、野村宗弘、一瀬諭、鈴木有咲海、西村修：日本水処理生物学会誌 49(3) 103-108(2013)「Anabaena休眠細胞の大量形成・回収および発芽評価方法」
- 3) 鈴木恵、岸本直之、一瀬諭、古田世子：水環境学会誌 35(11), 181-186(2012)「琵琶湖北湖における大型緑藻（車軸藻綱）*Staurastrum dorsidentiferum* var. *ornatum*の象徴と増殖生理特性」
- 4) N. KISHIMOTO, S. ICHISE, K. SUZUKI and C. YAMAMOTO : Limnology, 14, 117-128 (2013) "Analysis of long-term variation in phytoplankton biovolume in the northern basin of Lake Biwa"
- 5) K. SUZUKI, M. KOJIMA, N. KISHIMOTO, S. ICHISE and S. FURUTA : Journal of Water and Environment Technology, 11, 49-58 (2013) "Influence of cultural conditions on the cellular biovolume and gelatinous sheath volume of *Staurastrum arctiscon* (Charophyceae)"
- 6) N. KISHIMOTO and S. ICHISE: Understanding Freshwater Quality Problems in a Changing World (IAHS Publication 361), 132-141 (2013) "Water quality problems in Japanese lakes: a brief overview"
- 7) 奥村浩気、岸本直之、一瀬諭、馬場大哉、田中仁志：水環境学会誌 37(2), 55-62 (2014)「琵琶湖北湖と右岸における湖岸形状と泥質化の関係」

(2) 主な口頭発表（学会等）

- 1) 一瀬諭、古田世子、馬場大哉：日本陸水学会第76回大会（2011）講演要旨集 P190.「琵琶湖北湖岸における底泥調査とアオコ形成種の分布について」
- 2) 鈴木恵、岸本直之、一瀬諭、古田世子：日本陸水学会第76回大会（2011）「琵琶湖北湖における大型車軸藻*Staurastrum dorsidentiferum* var. *ornatum*の細胞密度の変動要因」
- 3) 岸本直之、山本千尋、鈴木恵、一瀬諭、古田世子：日本陸水学会第76回大会（2011）「小型ラン藻*Aphanothece clathrata*における純生産速度の比増殖速度依存性」
- 4) 鈴木恵、岸本直之、一瀬諭、古田世子：日本水処理生物学会第48回大会（2011）「琵琶湖北湖・南湖における大型車軸藻*Staurastrum dorsidentiferum* var. *ornatum*の挙動解析」
- 5) K. SUZUKI, N. KISHIMOTO, S. ICHISE and S. FURUTA: The 4th IWA-ASPIRE Conference &

Exhibition (2011)

"Growth characteristics and occurrence of *Staurastrum dorsidentiferum* var. *ornatum* (Charophyceae) in Lake Biwa, Japan"

- 6) 古田世子、池田将平、藤原直樹、一瀬諭、田中仁志、馬場大哉、郡司房子、岸本直之：日本陸水学会第76回大会(2011)「湖沼底質のプランクトンを対象にしたシードバンク機能について(琵琶湖)」
- 7) 一瀬諭、古田世子、馬場大哉：第38回 環境保全・公害防止研究発表会(2011)講演要旨集 P60-61 「琵琶湖北湖岸における泥質化の現状とアオコ形成種の分布について」.
- 8) 田中仁志、古田世子、池田将平、藤原直樹、一瀬諭、馬場大哉、郡司房子、岸本直之：日本陸水学会第76回大会(2011)「湖沼底質のプランクトンを対象にしたシードバンク機能について(山ノ神沼)」
- 9) 田中仁志、古田世子、一瀬諭：第38回 環境保全・公害防止研究発表会(2011)「湖沼底質の泥質化及び貧酸素化による藻類を対象にしたシードバンク機能への影響評価手法の検討」
- 10) 矢島悠一、野村宗弘、中野和典、西村修、一瀬諭：日本水処理生物学会第48回大会(2011)講演要旨集 P43. 「Anabaenaの休眠細胞に関する生理生態学的研究」
- 11) 一瀬諭、古田世子、山中直、田中仁志、馬場大哉、岸本直之、西村修：日本陸水学会第77回大会(2012)「琵琶湖における沿岸帯の機能とその影響因子の評価について」
- 12) 一瀬諭、古田世子、藤原直樹、岡本高弘：第49回日本水処理生物学会(2012)「琵琶湖沿岸帯における植物プランクトン動態および水質解析」
- 13) 一瀬諭、古田世子、藤原直樹、廣瀬佳則、山中直：第39回環境保全・公害防止研究発表(2012)「湖沼水質形成における沿岸帯の機能とその影響因子の評価」
- 14) 古田世子、池田将平、藤原直樹、一瀬諭、田中仁志、馬場大哉、岸本直之、西村修：第46回日本水環境学会年会(2012)「琵琶湖沿岸帯における底泥からの植物プランクトンの回帰について」
- 15) 古田世子、廣瀬佳則、藤原直樹、一瀬諭、田中仁志、馬場大哉、郡司房子、岸本直之、西村修：日本陸水学会第77回大会(2012)「琵琶湖と山の神沼の底質を用いた藻類のシードバンク機能について」
- 16) 古田世子、藤原直樹、一瀬諭、田中仁志、馬場大哉、宮田直幸、岸本直之、西村修：第39回 環境保全・公害防止研究発表会(2012)「琵琶湖沿岸帯の底泥を用いた藻類の回帰実験結果について」
- 17) 古田世子、藤原直樹、一瀬諭、田中仁志、馬場大哉、宮田直幸、岸本直之、西村修：日本水処理生物学会第49回大会(2012)「琵琶湖沿岸帯の底質を用いた藻類のシード保存状況について」
- 18) 田中仁志、古田世子、藤原直樹、一瀬諭、馬場大哉、岸本直之、西村修：日本陸水学会第77回大会(2012)、「溶存酸素量の違いが湖沼底質の藻類シードバンク機能に及ぼす影響」
- 19) 田中仁志、古田世子、一瀬諭：第39回環境保全・公害防止研究発表会(2012)「底質中の藻類の再活性化に及ぼす光照度の影響」
- 20) 田中仁志、古田世子、一瀬諭：第15回自然系調査研究機関連絡会議(NORNAC、2012)「浅い富栄養化湖沼山ノ神沼における底層の貧酸素化実態調査」
- 21) 鈴木恵、小島誠、岸本直之、一瀬諭、古田世子：第46回日本水環境学会年会(2012)「大型車軸藻*Staurastrum arcticon*の粘質鞘サイズに及ぼす培地中N/P比の影響」
- 22) K. SUZUKI, M. KOJIMA, N. KISHIMOTO, S. ICHISE and S. FURUTA : Water and Environment Conference 2012 (2012)
"Influence of cultural conditions on the cellular biovolume and gelatinous sheath volume of *Staurastrum arcticon* (Charophyceae)"
- 23) N. KISHIMOTO, S. ICHISE, K. SUZUKI and C. YAMAMOTO : 2012 ASLO Aquatic Sciences Meeting: Voyages of Discovery (2012)
"Potential factors influencing changes in average cell size of the phytoplankton community in Lake Biwa, Japan"
- 24) K. SUZUKI, M. KOJIMA, N. KISHIMOTO, S. ICHISE and S. FURUTA : 2012 ASLO Aquatic Sciences Meeting: Voyages of Discovery (2012)
"Influence of N/P ratio in culture medium on gelatinous sheath size of *Staurastrum arcticon* (Charophyceae)"
- 25) K. SUZUKI, N. KISHIMOTO, S. FURUTA and S. ICHISE : The 4ty IWA Asia-Pacific Young Water Professionals Conference (2012)
"Biodegradation characteristics of photosynthetic organic matter under the coexistence of a

ciliate"

- 26) 岸本直之、山本千尋、鈴木恵、一瀬諭：日本陸水学会第77回大会（2012）
「植物プランクトン計数データに基づく琵琶湖水柱一次生産量の推定」
- 27) 鈴木恵、岸本直之、古田世子、一瀬諭：日本陸水学会第77回大会（2012）
「微小繊毛虫共存系における一次生産有機物の分解に関する研究」
- 28) 奥村浩気、岸本直之、一瀬諭、馬場大哉：日本陸水学会第77回大会（2012）
「湖沼沿岸域底質の酸素消費速度の関する研究」
- 29) 一瀬諭、古田世子、山中直：第47回日本水環境学会年会（2013）
「琵琶湖の底泥より発生した藻類について」
- 30) 一瀬諭、古田世子、廣瀬佳則、藤原直樹、馬場大哉、岸本直之、西村修：日本陸水学会第78回大会(2013)「湖沼における沿岸帯の機能評価について(1)琵琶湖における沿岸帯機能評価の概要」
- 31) 一瀬諭、古田世子、藤原直樹、廣瀬佳則、永田貴丸、馬場大哉、西村修：日本水処理生物学会第50回大会(2013)「琵琶湖沿岸帯における動・植物プランクトンの分布と底泥からの回帰実験について」
- 32) 一瀬諭、古田世子、藤原直樹、廣瀬佳則、永田貴丸、馬場大哉、岸本直之、西村修：第40回環境保全・公害防止研究発表会、(2013)「沿岸帯の機能評価① 琵琶湖沿岸帯における底泥からの動・植物プランクトンの回帰実験について」
- 33) 一瀬諭、古田世子、山中直：第47回日本水環境学会年会（2013）「琵琶湖の底泥より発生した藻類について」
- 34) 古田世子、藤原直樹、一瀬諭、馬場大哉、岸本直之、西村修：第40回 環境保全・公害防止研究発表会(2013)「沿岸帯の機能評価②琵琶湖沿岸帯における底質と藻類シードバンク機能の関係について」
- 35) 田中仁志、古田世子、廣瀬佳則、藤原直樹、一瀬諭：第39回 環境保全・公害防止研究発表会(2013)「沿岸帯の機能評価③～山ノ神沼底質における藻類シードバンク機能と環境因子の影響～」
- 36) 馬場大哉、郡司房子、古田世子、一瀬諭、奥村浩気、岸本直之、中野伸一：日本陸水学会第78回大会（2013）「湖沼における沿岸帯の機能評価について(3)-マイクロセンサーによる底泥直上・直下の溶存酸素分布測定結果」
- 37) 田中仁志、古田世子、廣瀬佳則、藤原直樹、一瀬諭、馬場大哉、岸本直之、西村修：日本水処理生物学会第50回大会（2013）「富栄養湖沼山ノ神沼における底層環境と底質中の休眠藻類の再活性化条件の実験的検討」
- 38) 田中仁志、古田世子、廣瀬佳則、藤原直樹、一瀬諭、馬場大哉、岸本直之、西村修：日本陸水学会第78回大会（2013）「湖沼における沿岸帯の機能評価について(6) - 浅い富栄養湖沼山ノ神沼における底層環境とシードバンク機能-」
- 39) 鈴木恵、岸本直之、古田世子、一瀬諭：第47回日本水環境学会年会（2013）
「*Staurastrum dorsidentiferum* var. *ornatum*における一次生産有機物の分解に関する研究」
- 40) 奥村浩気、岸本直之、一瀬諭、馬場大哉、田中仁志：第47回日本水環境学会年会（2013）
「琵琶湖北湖東岸における護岸形態と底質の関係」
- 41) N. KISHIMOTO and S. ICHISE : "Knowledge for the Future" Joint Assembly, Gothenburg, Sweden (2013)
"Water-quality problems in Japanese lakes: regulations, the past, and the future".
- 42) 奥村浩気、岸本直之、一瀬諭、馬場大哉、田中仁志：日本陸水学会第78回大会（2013）
「湖沼における沿岸帯の機能評価について(2)-泥質化に及ぼす流れと湖岸勾配の影響」
- 43) 山本純也、岸本直之、一瀬諭、古田世子：日本陸水学会第78回大会（2013）
「藻類バイオマス生産を目的とした排水処理水中での*Aphanothece clathrata*の増殖特性の評価」
- 44) 一瀬諭、古田世子、永田貴丸、藤原直樹、廣瀬佳則、馬場大哉、西村修：第48回日本水環境学会年会(2014)「沿岸帯の機能評価-琵琶湖底泥からの動・植物プランクトンの回帰試験結果-」
- 45) 古田世子、藤原直樹、一瀬諭、田中仁志、馬場大哉、宮田直幸、岸本直之、西村修：第48回日本水環境学会年会(2014)「琵琶湖における沿岸帯の機能評価-底質の保存条件と藻類シードバンク機能について-」
- 46) 馬場大哉、郡司房子、古田世子、一瀬諭、奥村浩気、岸本直之、村上綾、中野伸一：第48回日本水環境学会年会(2014)「琵琶湖における沿岸帯の機能評価-マイクロセンサーによる底泥直上・直下の溶存酸素分布測定結果-」

7. 研究者略歴

課題代表者：一瀬 諭

東北大学大学院工学研究科博士課程修了、博士（工学）

現在、滋賀県琵琶湖環境科学研究センター、環境監視部門 専門員

研究参画者

(1) : 一瀬 諭 (同上)

(2) : 古田世子

名古屋衛生技術短期大学衛生科学科卒業、

現在、滋賀県琵琶湖環境科学研究センター 専門員

秋田県立大学大学院生物資源科学研究科博士課程在籍

(3) : 田中仁志

東北大学大学院工学研究科博士課程修了、博士（工学）

現在、埼玉県環境科学国際センター 水環境担当 主任研究員

(4) : 馬場大哉

愛媛大学大学院農学研究科修了

現在、東レテクノ株式会社 環境科学技術部 環境・材料分析室 開発グループリーダー

(5) : 岸本直之

京都大学工学部卒業、博士（工学）、現在、龍谷大学理工学部教授

(6) : 佐藤祐一

京都大学工学部卒業、博士（工学）、現在、滋賀県琵琶湖環境科学研究センター主任研究員

5B-1102 湖沼水質形成における沿岸帯の機能とその影響因子の評価

(1) プランクトン動態および水質解析に関する研究

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター環境監視部門 一瀬 諭・古田世子・藤原直樹・廣瀬佳博
 龍谷大学理工学部 環境ソリューション工学科 岸本直之

<研究協力者>

龍谷大学理工学部 環境ソリューション工学科 鈴木 恵
 兵庫県立大学大学院生命理学研究科 池谷仁里

平成23～25年度累計予算額：7,832千円

(うち、平成25年度予算額：2,520千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

琵琶湖沿岸帯におけるプランクトン動態および水質解析では、沿岸帯と沖帯の植物プランクトン量の相違や細胞炭素量、粘質鞘の長期変動、また、植物プランクトン総炭素量と水質項目との相関解析を実施し、植物プランクトンの中でも藍藻に属し粘質鞘と呼ばれる無色・透明の有機物を多量に産生する種類が近年増加傾向を示し、地点別でみると水深の浅い南湖や沿岸帯の地点で顕著であることが明らかとなった。また、植物プランクトン種類数は、各地点で1990年以降、急速に減少していることが認められ、特に、沿岸帯の定点での減少が顕著であった。動物プランクトン量の経年変化をみると、2000年以降減少傾向が認められ、植物プランクトンと同様に近年では減少傾向にあることが明らかとなった。

琵琶湖北湖における沿岸帯は沖帯に比べ植物プランクトン量は大きな差は認められなかったものの、原生動物やワムシ類が明らかに多く分布しており、これらの種類が捕食する植物プランクトン量を考慮すると沿岸帯の内部生産が沖帯に比べ大きいと考えられた。さらに、これらの動物プランクトンが多い時期は、捕食圧に強い群体を形成するような藍藻などの種が内部生産量として評価されている可能性も示唆された。

次に、底泥を用いた動物・植物プランクトンの回帰実験では、人工的な湖岸帯の底泥からは群体性藍藻の発生や根足虫などの腐食性を好むような種類が発生しやすいことが明らかとなり、今後は、泥質化が進み難い緩やかな斜面の自然的湖岸の再生が必要であることが推察された。さらに、動物・植物プランクトンを用いた室内的な検証実験からは、藍藻に属し粘質鞘を有するような種は、ミジンコなどの動物プランクトンの餌としては不適であることが明らかとなり、緑藻や珪藻に属する種がミジンコの餌として優れていることが明らかとなった。今後、琵琶湖の水産魚貝類の復活に向かい、ミジンコの餌資源として阻害となる藍藻類の増加を抑制するための対策や、珪藻や大型緑藻が増殖しやすい湖岸帯の環境整備が重要であることが本実験結果から明らかになった。

[キーワード]

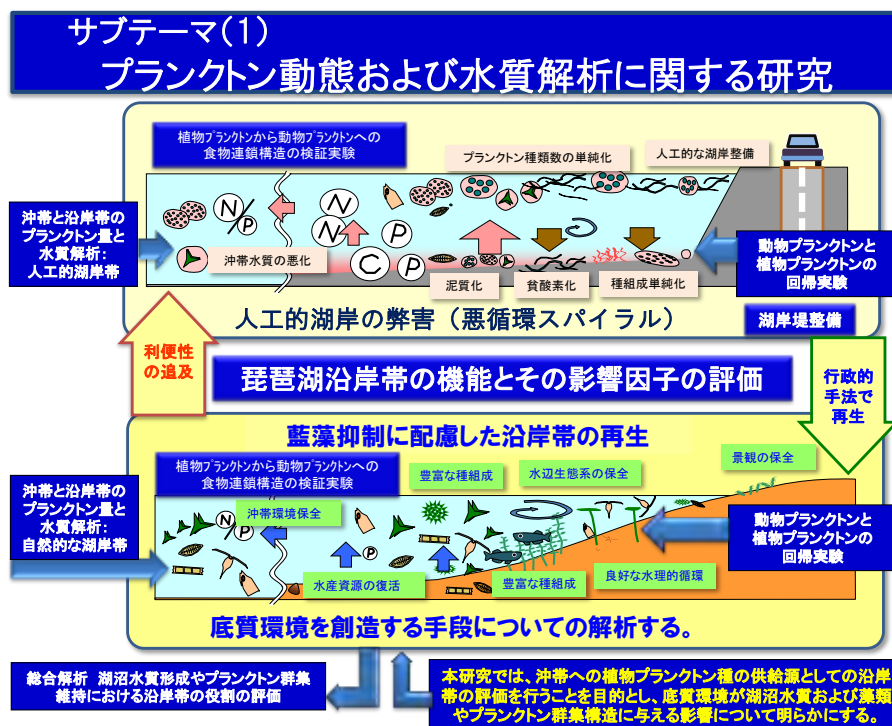
琵琶湖、植物プランクトン、動物プランクトン、長期変動、底質

1. はじめに

湖沼水質形成における沿岸帯の機能とその影響因子の評価のためサブテーマ（1）では、沿岸帯の機能とその影響因子を評価するため、沿岸帯と沖帯における植物プランクトン現存量の長期変動と有機態リンや有機体窒素、SS、Chl-a量などの水質項目との関係について解析する必要がある。また、沿岸帯と沖帯における植物プランクトン種や動物プランクトン種の種類数の変化についても把握する必要がある。さらに、沿岸帯の中でも、自然的な緩斜面の湖岸帯と人工的な急勾配の湖岸帯では、泥質化の状況が相違すると考えられ、また、その底泥中からの動物・植物プランクトンの発生状況も人工的湖岸と自然的湖岸帯では相違すると推察された。また、近年、沿岸帯で増加傾向にある植物プランクトンが動物プランクトンの餌資源として好適か不適かについても評価していくことも重要であると考えられた。

2. 研究開発目的

琵琶湖のような水深の深い湖沼では、一旦沖帯の底層に沈降した植物プランクトンが有光層に回帰し、再増殖することは考えにくいいため、植物プランクトン種の維持には水深の浅い沿岸帯が重要な役割を果たしている可能性が示唆される。本研究では、沖帯への植物プランクトン種の供給源としての沿岸帯の評価を行うことを目的とし、サブテーマ（1）では、沿岸帯と沖帯における植物プランクトン総細胞容積、総細胞炭素量、粘質鞘の長期変動解析や沿岸帯と沖帯における植物プランクトン総炭素量と水質項目との相関解析、植物プランクトン種類数の変化や長期的な変動解析、動物プランクトン種組成変化や長期的な変動解析、動物プランクトンと植物プランクトンとの関係解析、底泥を用いた動物・植物プランクトンの回帰実験、動物・植物プランクトンを用いた室内的な検証実験を実施することにより、本研究では、沖帯への植物プランクトン種の供給源としての沿岸帯の評価を行うことを目的とし、湖岸形態が湖沼水質および藻類やプランクトン群集構造に与える影響について明らかにする（図1）。



図(1) プランクトン動態および水質解析に関する研究概要

3. 研究開発方法

(1) 沿岸帯と沖帯における植物プランクトン総細胞容積、総細胞炭素量、粘質鞘の長期変動解析

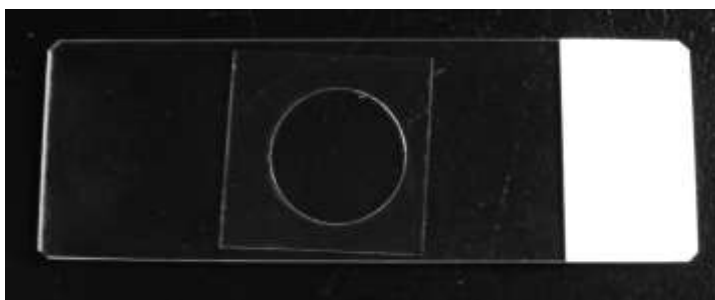
琵琶湖における植物プランクトン調査や水質調査は、沿岸帯として北湖の今津沖、長浜沖、丹出川沖中央、南湖の唐崎沖中央の4地点の水深0.5m層のデータを用い、沖帯としては、北湖の今津沖中央の水深0.5m層の1地点の計5地点のデータを用いてデータ解析を実施した。調査データは1979年～2010年までの30年間、調査回数は毎月1～2回実施した。植物プランクトンの計数方法は、種類毎に細胞数と平均細胞容積を算出した¹⁾。なお、各種類の細胞容積計数については各細胞を楕円柱、楕円体、直方体およびこれらの組み合わせで近似し、一瀬らの換算方法^{2,3)}で細胞容積 V を求めた。次に細胞容積から細胞内炭素量を算出した。細胞容積から炭素量への換算は宮井(1988)ら⁴⁾の換算式を用いて実施した。

今回、湖内生産由来の有機物量の変化を解析する目的で、植物プランクトンの総細胞容積量の変化の視点から、植物プランクトンが産生する無色・透明の寒天質状物質である粘質鞘(写真(1)-1、墨汁染色後の*Microcystis novacekii*の粘質鞘、白く見える部分が粘質鞘)についての解析を実施した。調査地点は、琵琶湖北湖の今津沖(17A)、今津沖中央(17B)、長浜沖(17C)の3地点で、調査期間は、1980 - 2009年の30年間である。

次に、植物プランクトンが産生する粘質鞘の有無の確認は墨汁染色で行い、試料は2008年1月～2010年12月の琵琶湖プランクトン定期調査で得られた試料を用いた。また、粘質鞘体積の計測は、一瀬らの手法⁵⁾を用いた。この手法は、スライドガラスの中央部に丸く切り抜いた(直径15mm)シリコンシート(No. 345-095 5LH3-6-1, ケス)を貼り付け、厚みを一定($h = 50 \mu\text{m}$)に保った粘質鞘計測用スライドガラスを作成し(写真(1)-2、粘質鞘計測専用スライドガラス)、墨汁原液(サノト株式会社)を5倍に希釈して染色を行った後に計測を行った。また、各細胞が有する無色透明の粘質鞘の有無の確認については、細胞を薄く覆う種類も多く存在するため、細胞容積の2倍以上の粘質鞘を有する種類について粘質鞘を持つ種類と定義した。データ解析は、琵琶湖北湖3地点において1980年～2009年に出現した主要な植物プランクトンについて総細胞容積中に占める各種類の割合について解析を実施した。



写真(1)-1 墨汁染色後の *Microcystis novacekii* 群体の粘質鞘



写真(1)-2 植物プランクトンが産生する粘質鞘を計測するための専用スライドガラス(厚さ $50 \mu\text{m}$ のシリコンシート)

(2) 沿岸帯と沖帯における植物プランクトン総炭素量と水質項目との相関解析

沖帯や沿岸帯の水質項目と植物プランクトンとの長期変動を評価するため、沖帯として北湖今津沖中央(0.5m)、沿岸帯として東岸長浜沖(0.5m)、北湖西岸今津沖(0.5m)とし、①1979～1989年(1980年代)、②1990～1999年(1990年代)、③2000～2009年(2000年代)の三期に分けて相関解析を実施した。調査項目は、

有機態リン(全リンーリン酸)、有機体窒素(全窒素ー(アンモニウム態+亜硝酸態+硝酸態))、S S、Chl-a量、また、植物プランクトンは、総炭素量として算出し相関解析を実施した。

(3) 植物プランクトン種類数の変化や長期的な変動解析

琵琶湖における植物プランクトンの種類数の経年変化についての調査を実施した。植物プランクトンの計数方法は、採水後、プランクトン計数板(松浪硝子工業、界線1mmピッチ、枠付きプランクトン計数板、S6300)を用いて1ml中の植物プランクトンの同定および計数を行った。植物プランクトンは、種類別、網別に分類し総炭素量を算出し長期的な変動について解析した。

(4) 動物プランクトン種組成変化や長期的な変動解析

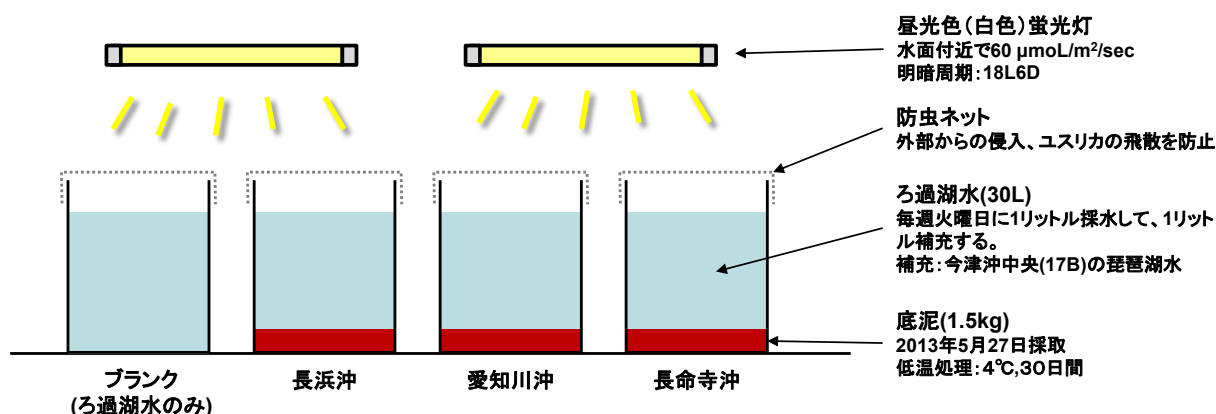
琵琶湖における動物プランクトン調査の調査地点は、沿岸帯として北湖東岸の長浜沖(17C)水深 0.5m層、沖帯として今津沖中央(17B)の水深 0.5m層の2地点のデータを用い、動物プランクトン調査は1980年～2008年までの28年間1～2回/月の頻度で調査を行った。動物プランクトン濃縮方法は、湖水1Lをグルタルアルデヒド固定液(グルタルアルデヒド 25%溶液：500ml にホルマリン 37%溶液：5ml、塩化カルシウム 9.43g)5ml加えて固定し、10mlにまで濃縮した。その後、固定サンプル中の1mlをプランクトン計数板に取り、動物プランクトンの種類と個体数の計数を実施した。

(5) 動物プランクトンと植物プランクトンとの関係解析

動物・植物プランクトンの調査回数に合わせ1995年、2000年の計数データを抽出し、各年度の動物プランクトンと植物プランクトンとの関係解析を実施した。動物プランクトン調査は植物と同様に毎月1～2回実施し、原生動物、ワムシ、甲殻類の各種類と1L当たりの個体数を計数し、今津沖中央地点では各動物プランクトンの平均個体体積と計数した個体数から総炭素量を算出した。その後、1980年～2008年までの中から1995年、2000年の欠測データの少なかった2年間分のデータを抽出して植物プランクトンとの関係解析を実施した。

(6) 底泥を用いた動物・植物プランクトンの回帰実験

人工的な湖岸帯の底泥と自然的な湖岸帯の底泥を比較するため、動・植物プランクトンの回帰実験を実施した。実験に用いた底泥は、2013年5月27日に琵琶湖北湖東岸の愛知川沖、長命寺沖、長浜沖の3地点からエクマンバージ採泥器で各地点3回採泥し、直上0cm～5cmの底泥を採集し混合した。前処理として暗条件4℃で1ヶ月間保存した底泥を用いた。底泥の分析項目は、全有機炭素(TOC)、全炭素(TC)、全窒素(TN)、全リン(TP)、化学的酸素要求量(COD)、強熱減量(IL)、酸化還元電位(ORP)、水分率、固形分率(100-水分率)、クロロフィル-a(Chl-a、蛍光法)、全鉄(T-Fe)、全マンガン(T-Mn)、粒度分布、金属元素の各項目の分析を実施した。回帰実験の方法を図(1)-1に示した。回帰実験は、2013年6月28日～8月27日までの約60日間、恒温培養実験室内で実施し、初期条件は、50Lの大型培養器を用い、各地点の30Lのろ過湖水に対し底泥1.5kgの底泥を加え実験を開始した。培養条件は温度20℃、光60μmol/m²/sec、18時間明条件/6時間暗条件、攪拌なし(静置培養)、各槽のサブリングは1週間に1回の頻度で10回実施した。各槽から湖水1Lを静かに採取し、グルタルアルデヒド固定液で固定後、20μmメッシュのプランクトンネットでろ過濃縮を行った。動・植物プランクトンの計数方法は、前処理後速やかにプランクトン計数板(松浪硝子工業、界線1mmピッチ、枠付きプランクトン計数板、S6300)を用いて同定および計数を実施した。



図(1)-1 琵琶湖沿岸帯における動・植物プランクトンの回帰実験方法 (2013年)

(7) 動物・植物プランクトンを用いた室内的な検証実験

近年、琵琶湖沿岸帯では植物プランクトン現存量に占める藍藻の割合が増加している。この沿岸帯に多く分布する藍藻が、捕食者となる動物プランクトン(ミジンコ)にとって成長阻害や繁殖阻害を与える可能性が推察されるため、今回、ミジンコの生態影響試験法に準じて検証的な実験を実施した。餌となる植物プランクトンの種類は表(1)-1に示したように、荻原⁶⁾らの方法を用い琵琶湖から純粋分離した藍藻(5種類)、緑藻(7種類)、珪藻(2種類)の計14種類を用いた。なお、対照種としてOECDの生態影響試験方法で用いられている市販のクロレラ(*Chlorella* sp.)を用いた。検証実験は、ミジンコ類の急性遊泳阻害試験法や成長阻害試験法など生態影響試験法に準じて実施した。また、実験期間は、2013年8月28日～9月11日までの15日間、生物種には、琵琶湖北湖の下層から分離したミジンコ(*Daphnia pulex*)を用い、実験には生後24時間以内に生まれた子供を各区、10頭使用した。測定は毎日行い、ミジンコの成長や生存数、産仔数、親の死亡数、親の遊泳阻害数を計測した。

表(1)-1 生態影響実験に用いた植物プランクトン種(琵琶湖から純粋分離した種類)

略称	綱類	種名	細胞の大きさ
AM	藍藻	Anabaena macrospora	中型
MWE	藍藻	Microcystis wesenbergii	中型
PTG	藍藻	Phormidium tenue(緑色株)	小型
PTB	藍藻	Phormidium tenue(茶色株)	小型
PP	藍藻	PicoPlankton	小型
AST①	珪藻	Asterionella formosa(低濃度)	中型
AST②	珪藻	Asterionella formosa(高濃度)	中型
SEL	緑藻	Selenastrum sp.	中型
CLO	緑藻	Closterium sp.	大型
SEN	緑藻	Scenedesmus sp.	小型
STD	緑藻	Staurastrum dorsidentiferum var. ornatum	大型
STA	緑藻	Staurastrum arcticon	大型
CC	緑藻	Coelastrum cambricum	中型
MK	藍藻	Microcystis wesenbergii(群体形成種)	中型
BL	緑藻	Chlorella sp.	

4. 結果及び考察

(1) 沿岸帯と沖帯における植物プランクトン総細胞容積、総細胞炭素量、粘質鞘の長期変動解析

琵琶湖の今津沖、今津沖中央、長浜沖、丹出川沖中央、唐崎沖中央の5地点における植物プランクトン総細胞炭素量を図(1)-2に示した。沿岸帯である今津沖における季節変動は、年によって増減はあるものの春季から夏季にかけて増加し、冬季に減少する季節変動を示した。過去30年間の総細胞炭素量の変動でみると、0.003~1.92mgC/Lで推移し、平均値は0.26mgC/Lであり、5地点の中では低い値であった。沖帯である今津沖中央は、0.002~2.39mgC/Lで推移し、平均値は0.27mgC/Lであり、平均値は今津沖に比べやや高い値であった。東岸の長浜沖(17C')では、0.002~2.57mgC/Lで推移し、平均値は0.31mgC/Lであり、北湖の平均値としては最も高かった。北湖でも南湖に近い丹出川沖中央は、0.01~3.20mgC/Lで推移し、平均値は0.26mgC/Lであり、最大値や最小値は北湖の定点の中では高い値であった。また、南湖に位置する唐崎沖中央における植物プランクトン総細胞炭素量は、0.01~3.70 mgC/Lで推移し平均値は0.37 mgC/Lと琵琶湖5地点の中では最も高い値であった。今回、沖帯と沿岸帯の長期的な現存量の変化を比較するため、植物プランクトンの各細胞容積と各炭素量の関係式を構築し、植物プランクトンの現存量の長期変動を炭素量として評価したところ、各地点で現存量は増減を繰り返しながらも徐々に減少している傾向が認められた。特にその傾向は水深の浅い南湖や沿岸帯の地点で顕著であることが明らかとなった。

琵琶湖北湖3地点において1980年~2009年に出現した主要な植物プランクトンについて総細胞容積中に占める各種類の割合についての調べた結果、スタウラストム(*Staurastrum dorsidentiferum* var. *ornatum*)の1細胞の細胞容積は $3.2 \times 10^4 \mu\text{m}^3/\text{cell}$ と大型であり、総細胞容積中に占める割合は、今津沖中央で平均40.1%と最も大きく、次いでクステリウム(*Closterium aciculare* var. *subpronum*)の7.6%の順であった。また、沿岸域である今津沖や長浜沖についてもスタウラストムがそれぞれ40.4%、32.0%と最も多くを占め、藍藻3種類、黄色鞭毛藻1種類、珪藻2種類、渦鞭毛藻1種類、褐色鞭毛類1種類、緑藻類6種類の合計14種類の植物プランクトン総細胞容積が全体の総細胞容積に占める割合は、調査した3地点で78.4~84.8%を占めており、これら主要な14種で総細胞容積量の変動が推定できると判断した(一瀬ら⁷⁾)。

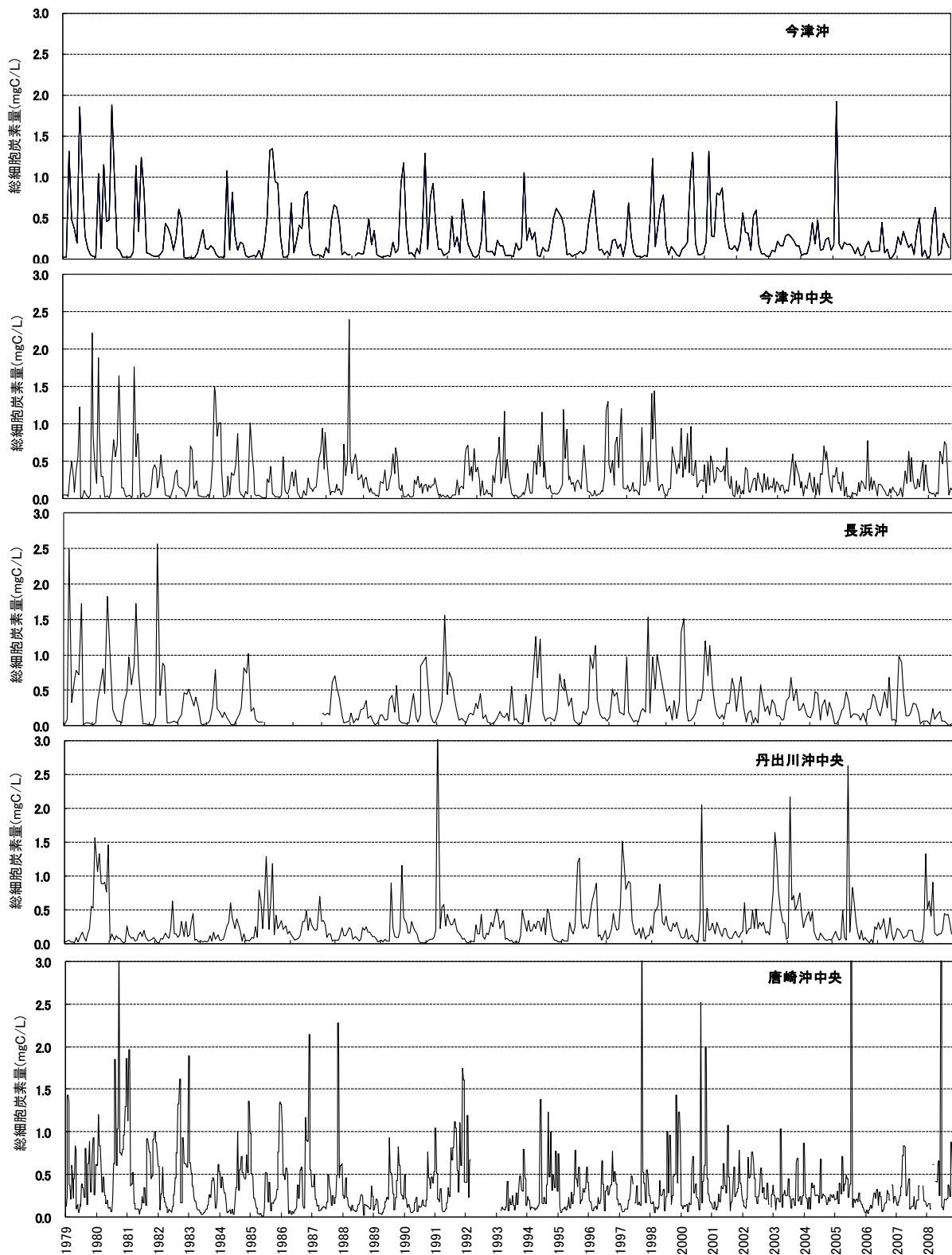
次に、各細胞が有する無色透明の粘質鞘の有無の確認については、細胞を薄く覆う種類も多く存在するため、細胞容積の2倍以上の粘質鞘を有する種類について粘質鞘を持つ種類と定義した。琵琶湖における粘質鞘を有する植物プランクトンの調査結果を表(1)-2に示した。

表(1)-2 琵琶湖における粘質鞘を有する植物プランクトン (1980- 2009年)

Class name	A	B	Dominant species
Cyanophyceae	51 / 70	73	<i>Gomphosphaeria lacustris</i>
Chrysophyceae	3 / 50	6	<i>Uroglena americana</i>
Bacillariophyceae	0 / 152	0	<i>Stephanodiscus suzukii</i>
Dinophyceae	0 / 20	0	<i>Ceratium hirundinella</i>
Cryptophyceae	0 / 7	0	<i>Cryptomonas</i> sp.
Euglenophyceae	0 / 16	0	<i>Trachelomonas</i> sp.
Chlorophyceae	106 / 286	37	<i>Staurastrum dorsidentiferum</i> var. <i>ornatum</i>
Total	161 / 601	27	

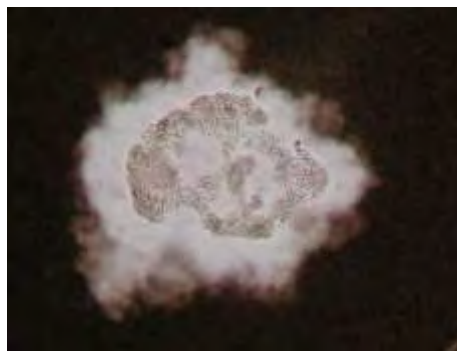
A: The number of species with extracellular polysaccharides volume over a double of cell volume against total number of species

B: The ratio of the number of species with extracellular polysaccharides to total number of species



図(1)-2 琵琶湖における植物プランクトン総細胞炭素量の長期変遷

表3に示したように合計601種類(未同定種を含む)中で約27%の種類が粘質鞘を有していた。特に藍藻では73%、緑藻では37%と多くの種類に粘質鞘が認められたが、珪藻や渦鞭毛藻、褐色鞭毛藻やミドリムシ藻では1種類も認められず、粘質鞘を生成する種類としない種類の詳細が明らかとなった。次に、過去30年間の主要な植物プランクトン14種類の増減についても調べた結果では、7種類が細胞容積にして2倍以上の粘質鞘を有し、藍藻と緑藻が3種類ずつ含まれていた。この中で細胞容積当たり、粘質鞘が最も多く含まれていた種類は、藍藻の



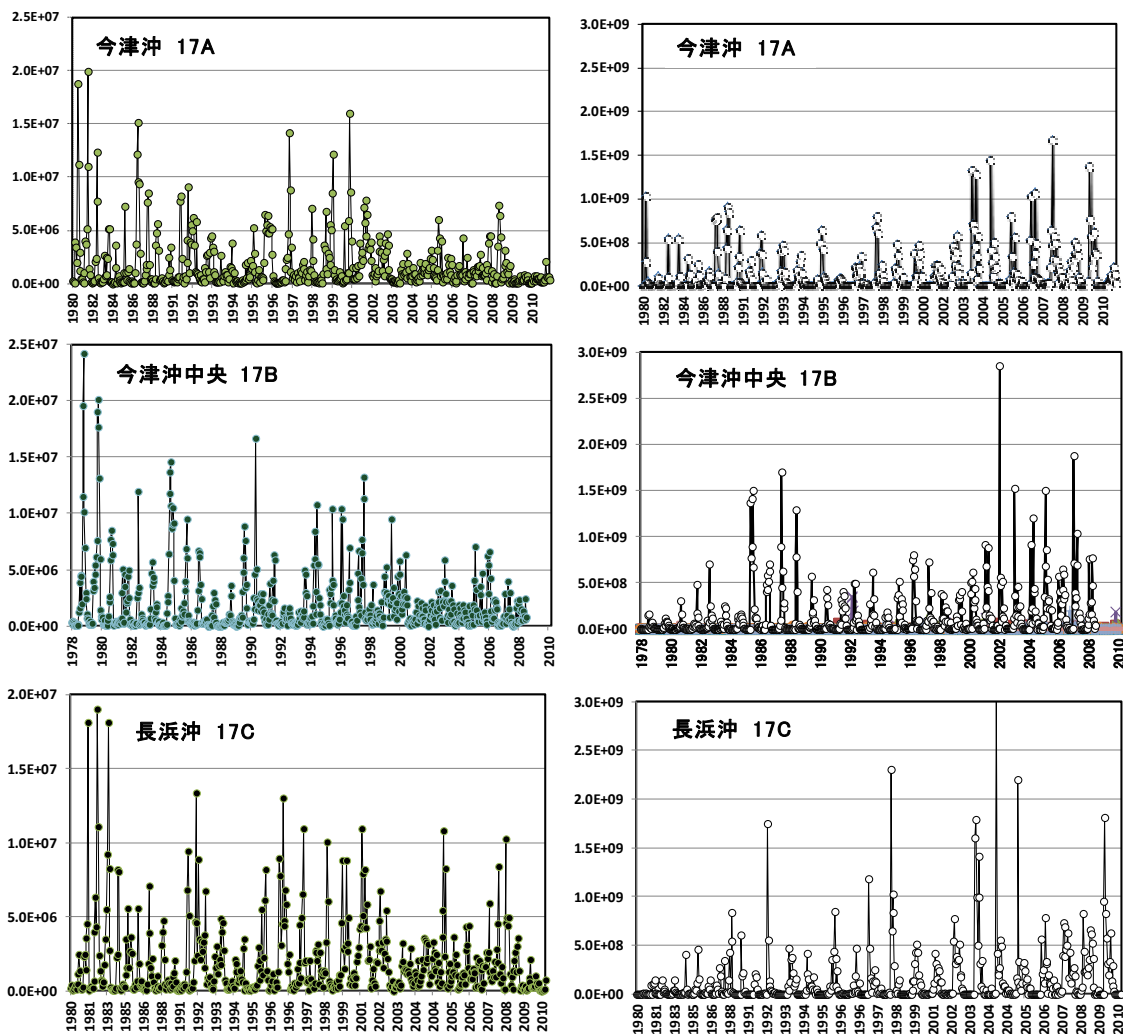
写真(1)-3 粘質鞘を多量に保有するアファノテーケ(墨汁染色後撮影)

アファノテーケ(写真(1)-3 *Aphanotece clathrata*)であり、墨汁染色により計測した結果、細胞容積の3,300倍と多量の粘質鞘を有していた。また、北湖3地点における植物プランクトンの総体積と粘質鞘総体積の長期変動結果を図(1)-3に示した。図(1)-3における左列は総細胞容積を示し、右列に粘質鞘の総体積量を示した。総細胞容積量は1980年代に比べ2000年代は明らかに減少傾向を示すのに対し、粘質鞘の総体積量の変化は各地点で増加傾向が認められた。さらに、表(1)-3に10年毎に集計した結果を示した。北湖3地点の湖水に含まれる植物プランクトンの総細胞容積量は、1980年以降の30年間で63~85%に減少した。一方、植物プランクトンが有する粘質鞘の総体積の平均値を1980~1989年と比較すると、2000年~2009年は、長浜沖で300%、今津沖で168%、今津沖中央部で187%といずれも増加しており、琵琶湖北湖全域においても増加していることが示唆された(一瀬ら⁵⁾)。次に、総細胞容積量と総粘質鞘体積量の季節的な変化について図(1)-4に示した。今津沖中央における総細胞容積および総粘質鞘体積の季節変化を10年間隔で比較した結果では、1980~1989年における総粘質鞘体積のピークは、2000年までは8月から9月であったのに対して、2000~2009年では6月から7月だったことから、植物プランクトンの群集の変化が2000年以降に起きていることが明らかとなった。以上のように、琵琶湖において粘質鞘の現存量が増大している現状を鑑みれば、琵琶湖内における有機物の総細胞容積や内部負荷を評価する場合、BODやクロロフィルa量や植物プランクトンの総細胞容積だけでなく、植物プランクトンが多量に産生する無色・透明の粘質鞘の存在についても考慮する必要があると考えられた。これらの植物プランクトンの総細胞容積量の長期的な変化や粘質鞘体積量が増加した原因については、琵琶湖に流入するCODの負荷量が減少していることや(岡本⁸⁾)、湖内の栄養塩類であるリン量の減少(今井ら⁹⁾)、また、湖沼温暖化に伴う温度成層の強化(Hsieh, C., K. Ishikawa, et al.¹⁰⁾、Kagami, Urabe¹¹⁾)、さらには、平均風速増加に伴う鉛直混合条件の変化(Kishimoto, Ueno¹²⁾)などの変化も内部生産量や種組成の変化に起因している可能性が考えられた。

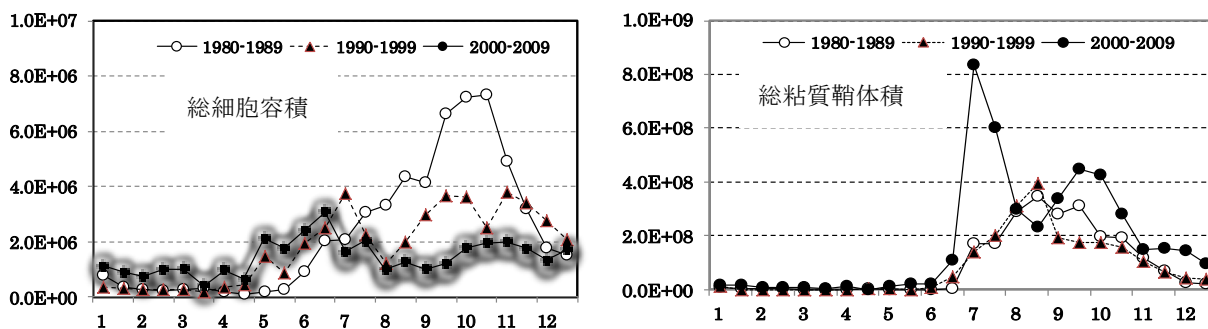
表(1)-3 琵琶湖北湖における植物プランクトンの総体積と粘質鞘総体積の長期変動 (1980-2009)

	Imazuoki			Imazuokichuo			Nagahamaoki		
	Total biovolume ($\mu\text{m}^3/\text{ml}$)	EPS volume ($\mu\text{m}^3/\text{ml}$)	R	Total biovolume ($\mu\text{m}^3/\text{ml}$)	EPS volume ($\mu\text{m}^3/\text{ml}$)	R	Total biovolume ($\mu\text{m}^3/\text{ml}$)	EPS volume ($\mu\text{m}^3/\text{ml}$)	R
1980-1989 a	2,372,000	97,527,000	41	2,343,000	94,049,000	40	2,164,000	67,009,000	31
1990-1999	1,705,000	78,173,000	46	1,721,000	86,480,000	50	2,145,000	107,447,000	50
2000-2009 b	1,502,000	163,919,000	109	1,469,000	176,022,000	120	1,845,000	207,118,000	112
Average	1,860,000	113,210,000	65	1,844,000	118,850,000	70	2,051,000	127,191,000	64
b/a %	63	168		63	187		85	309	

R: Ratio of EPS volume to cell volume



図(1)-3 琵琶湖北湖 3地点における植物プランクトンの総細胞容積と総粘質鞘体積の長期変動



図(1)-4 琵琶湖今津沖中央(水深 0.5m)における主要植物プランクトンの総細胞容積と総粘質鞘体積の季節変化 (1980-2009)

(2) 沿岸帯と沖帯における植物プランクトン総炭素量と水質項目との相関解析

沖帯や沿岸帯の水質および植物プランクトンとの関係を見るため、1979年から2009年の30年間について植物プランクトン総炭素量と有機態窒素、有機態リン、懸濁物質(SS)、Chl-a量等について比較し相関係数を算出した結果を表(1)-4に示した。調査地点は沖帯として北湖今津沖中央部(17B:水深0.5m)、沿岸帯として北湖東岸長浜沖(17C':水深0.5m)、北湖西岸今津沖(17A:水深0.5m)とし、調査期間は1979～1989年(1980年代)、1990～1999年(1990年代)、2000～2009年(2000年代)に分けて相関係数を算出した。

表(1)-4 植物プランクトン総炭素量と水質項目との相関関係(1979-2009)

水質項目	調査期間	沖合水域	沿岸水域	沿岸水域
		北湖今津沖中央 (17B)	北湖東岸長浜沖 (17C')	北湖西岸今津沖 (17A)
有機態リン	1979年度～1989年度	0.39	0.15	0.38
	1990年度～1999年度	0.12	0.07	0.18
	2000年度～2009年度	0.35	0.11	0.16
有機態窒素	1979年度～1989年度	0.38	0.46	0.4
	1990年度～1999年度	0.46	0.48	0.47
	2000年度～2009年度	0.39	0.23	0.61
SS	1979年度～1989年度	0.48	0.16	0.44
	1990年度～1999年度	0.36	0.1	0.26
	2000年度～2009年度	0.33	0.08	0.53
Chl.a	1979年度～1989年度	0.86	0.7	0.8
	1990年度～1999年度	0.56	0.55	0.53
	2000年度～2009年度	0.52	0.35	0.72

1) 有機態リン: 1979年～2009年における植物プランクトン総炭素量と有機態リンとの相関係数は0.07～0.39と相関が低く、有機態窒素よりさらに相関係数は低かった。また、沿岸帯の17C'でその相関係数が低いことから植物プランクトン由来以外の泥の巻き上がりの粒子や河川からの流入する負荷の要因が大きく関与している可能性が示唆された。

2) 有機態窒素: 1979年～2009年における植物プランクトン総炭素量と有機態窒素との相関係数は0.23～0.61であり、特に2000年代の北湖西岸の17Aでは0.61と比較的高かった。しかし、北湖東岸部の17C'では0.23と低かった。このことは植物プランクトン由来の有機態窒素以外の要因が関与していることを示している。後述する懸濁物質でも同地点の相関が低いことから、底質の巻き上げ等の影響や河川からの流入してくる濁度などの影響を受けている可能性が示唆された。

3) 懸濁物質(SS): 1980年代の植物プランクトン総炭素量とSSとの相関係数は0.16～0.48とChl-a量と比較すると相関係数は低かったが、3地点の中では北湖中央部17Bの1980年代が0.48と比較的高かった。しかし、2000年代では0.08～0.53とばらつきが大きかった。さらに、浅瀬が少ない北湖西岸の地点である17Aでは0.53と比較的高く、北湖東岸の地点である17C'では0.08と相関係数が最も低かった。このことは、北湖東岸部は水深が浅いことによる濁度の巻き上げの影響や河川からの影響を大きく受けており、東岸沿岸部のSSには植物プランクトン由来以外の要因が大きいことが推察された。

4) Chl-a量(chl.a): 1979年～2009年における植物プランクトン総炭素量とChl-a量との相関係数は0.35～0.86と高い相関が認められた。特に北湖中央部に位置する17Bでの相関係数は1980年代に0.86と最も高いのに対して、1990年代は0.56、2000年代には0.52と徐々に減少傾向が認められた。また、

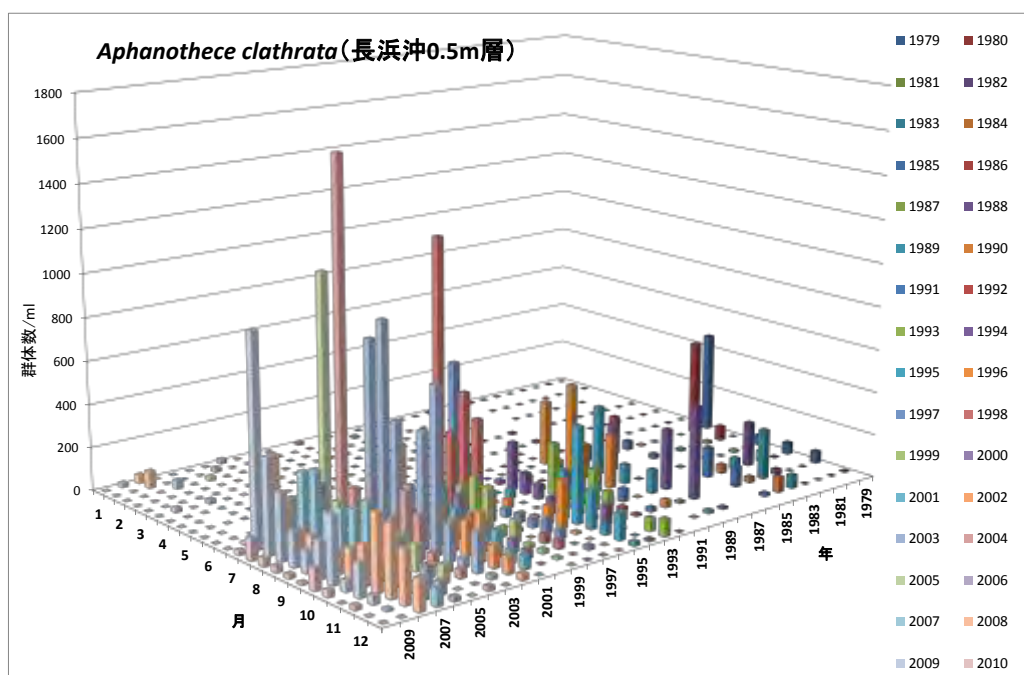
この傾向は沿岸帯の 17C'でも確認された。このことは、近年は、過去に比べ Chl-a 量のみでは評価できない無色透明な粘質鞘と呼ばれる有機物を多く保有する植物プランクトン種が増加したためであり、植物プランクトン由来の有機物の質的な変化が関与している可能性が示唆された^{5),7)}。

(3) 植物プランクトン種類数の変化や長期的な変動解析

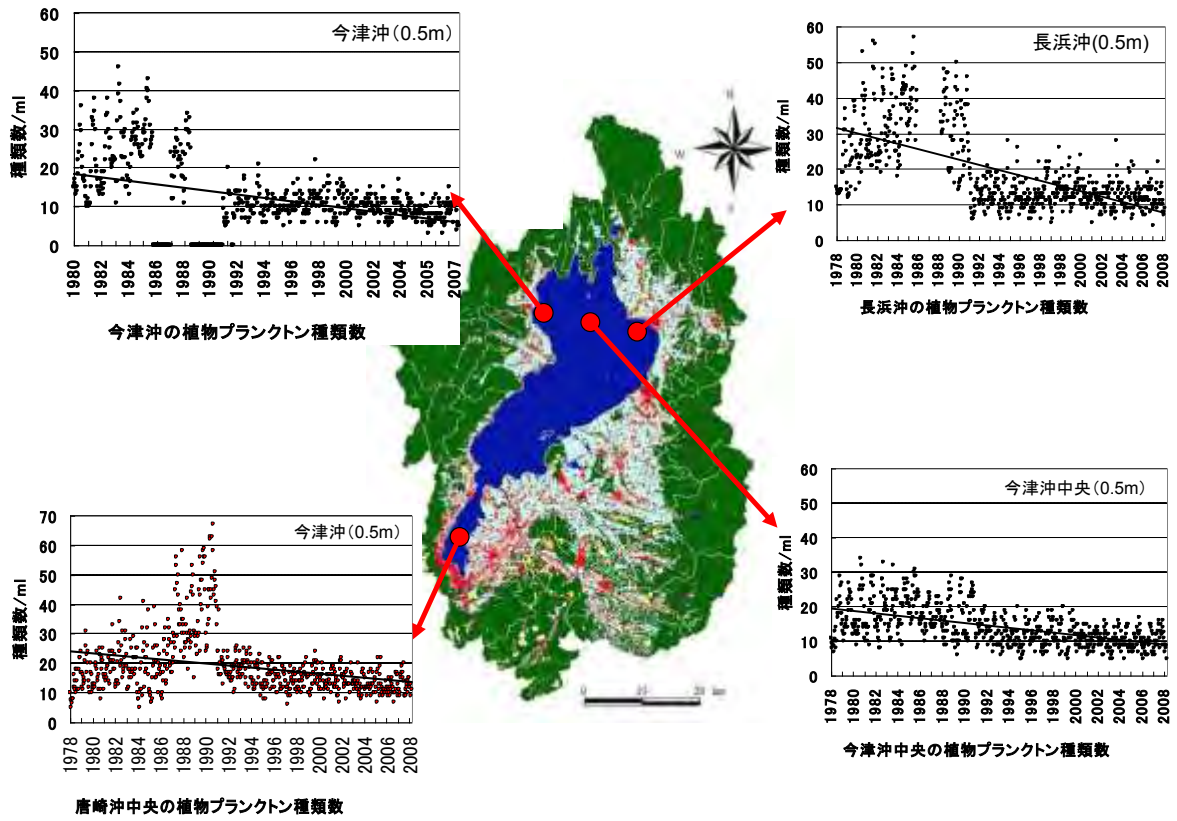
琵琶湖における植物プランクトン種類数の変化を図(1)-4 に示した。植物プランクトンの種類数の変化は各地点ともに 1990 年以降、急速に減少していることが認められ、特に、沿岸部定点での減少傾向が顕著であった。琵琶湖北湖の今津沖中央(水深 0.5m)の結果について詳細にみると、1978~1987 年までの 10 年間では、湖水 1ml 中に最高値で 34 種、最低値で 7 種類であり、その平均値は 18 種類であった。しかし、1990 年代に入ると急激に減少を続け、1998 からの 10 年間では、最高値 20 種類、最低値で 5 種類、平均値は 11 種類となり、この約 20 年間で 26%の種類が認められなかった。さらに、過去 30 年間の調査結果を 10 年間毎に出現した種類を集計・整理した結果を図(1)-5 に示した。各 10 年間に観察された網別種類数の変化では、北湖中央部では、1979~1988 年までの種類数は 148 種類であったが、1999~2008 年では、110 種類と 38 種類の植物プランクトン種が減少した。また、南湖中央においても、1979~1988 年では 208 種であったが、1999~2008 年では 140 種となり、68 種類が減少し、琵琶湖全体において植物プランクトン種類数からみた生物多様性が失われてきていることが明らかとなった。

特に、顕著に減少している種類は、琵琶湖で古くから分布していた緑藻に属する *Staurastrum dorsidentiferum* や *Pediastrum biwae* などの変種が減少しており、さらに、冬季に大量に計数された固有種である *Auracoseira nipponica* などの珪藻種も減少傾向にあることが明らかとなった。一方、図(1)-6 に示すように近年増加してきた種類としては、微細な細胞が集まり群体を形成するような *Aphanothece clathrata*、*Gomphosphaeria lacustris* などの藍藻の種類であり、琵琶湖の沖帯でも沿岸帯でも長期的な推移をみると植物プランクトン種類から見た生物多様性が失われてきている事が明らかとなった。

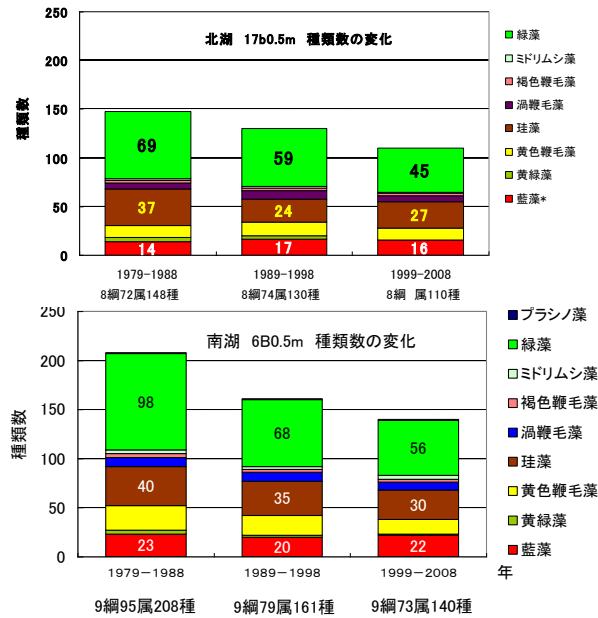
さらに、琵琶湖の植物プランクトンの細胞容積と炭素量の関係式を構築して植物プランクトン現存量の長期変動を炭素量として評価したところ、総細胞容積から見た植物プランクトンの現存量は、周期的な増減はあるものの藍藻類は徐々に増加傾向にあることが明確となった。



図(1)-6 *Aphanothece clathrata* アファノテーケ クラスター
琵琶湖長浜沖における藍藻類の一種



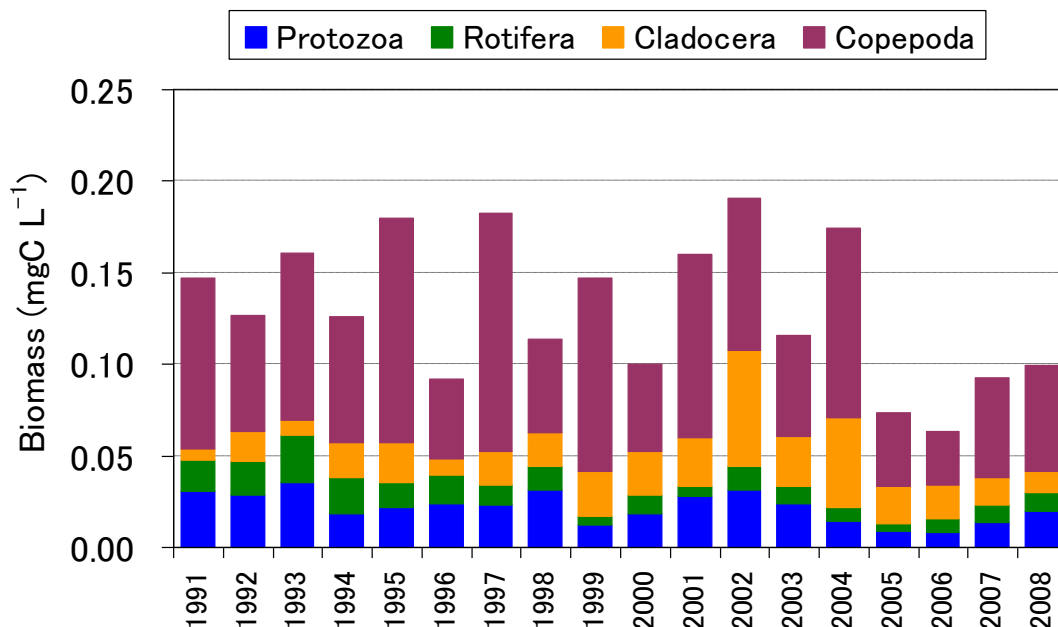
図(1)-4 琵琶湖における植物プランクトン種類数の長期変動（湖水 1ml 中の種類数、1978-2008 年）



図(1)-5 琵琶湖における網別植物プランクトン種類数の変化(1978-2008 年)

(4) 動物プランクトン種組成変化や長期的な変動解析

琵琶湖北湖中央(今津沖中央、17B、水深 5m)における各動物プランクトン個体数を原生動物、ワムシ、甲殻類に分け種類別の計数し、各種類の平均体積量から平均炭素量に変換し積算した結果を図(1)-7 に示した。

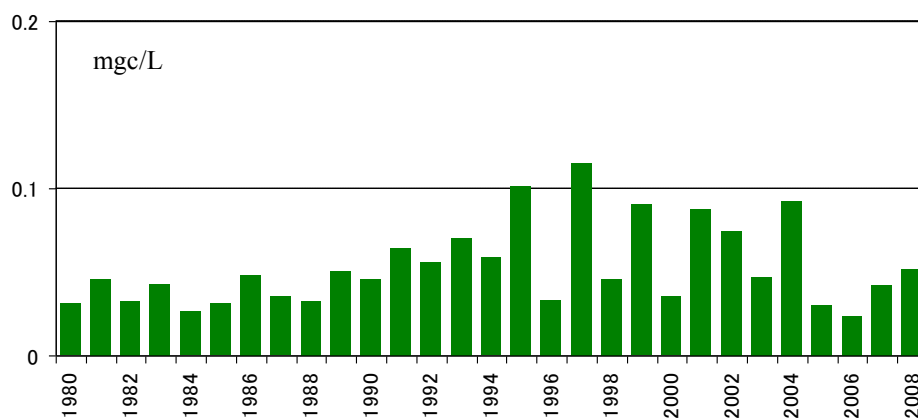


図(1)-7 琵琶湖北湖中央(17B)における動物プランクトン炭素量の経月年化

琵琶湖中央における 1991～2008 年の動物プランクトン炭素量の経年変化をみると、動物プランクトン全体のバイオマスとしては、2000 年以降減少傾向が認められた。詳細にみると原生動物(Protozoa)の主な出現種は小型の繊毛虫に属するストロビディウムであった。原生動物は個体数としては最も多く計数されたが、換算した炭素量でみると全炭素量の 15～25%程度と少なかった。

また、原生動物の長期的な変動をみると緩やかに減少傾向にあったが、2001～2003 年にはやや増加した。原生動物より大型のワムシ類(Rotifera)の現存量は全体としては少なく 5～10%を占めていた。代表的な種類としてはハネ

デラムシであった。ミジンコ類(Cladoceta)は年によって大きな変動が認められた。特に 2002 年と 2004 年に大きな増加が認められた。代表的なミジンコ類の種類はカブトミジンコであった。カイアシ類は、琵琶湖では全体の炭素量の 30

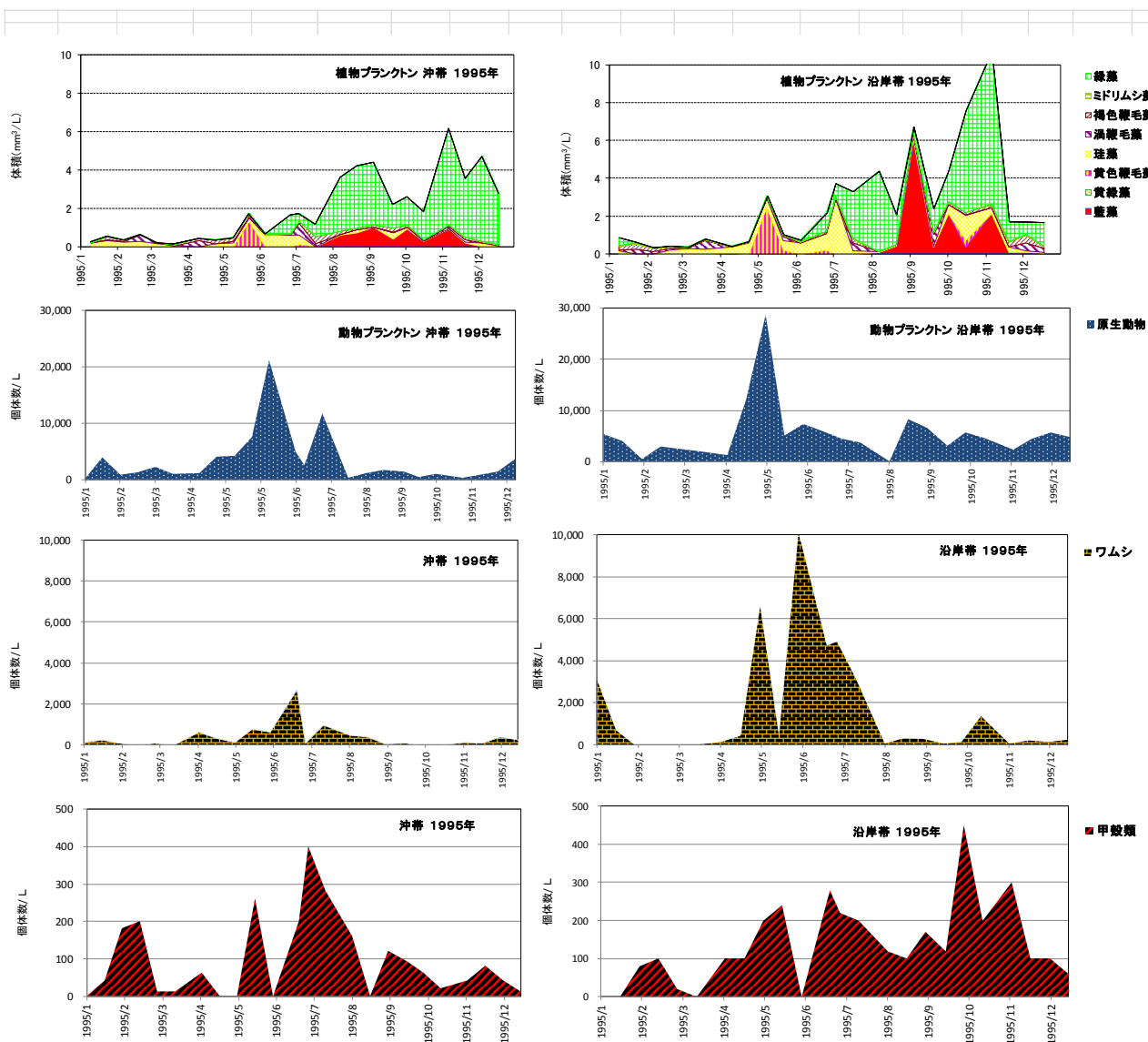


図(1)-8 琵琶湖北湖中央(17B)におけるヤマトヒゲナガケンミジンコの炭素量の経年年化

～60%と最も多くを占めていた。代表的な種類はヤマトヒゲナガケンミジンコ(図(1)-8)であり 1997 年の増加が最も大きかった。

(5) 動物プランクトンと植物プランクトンとの関係解析

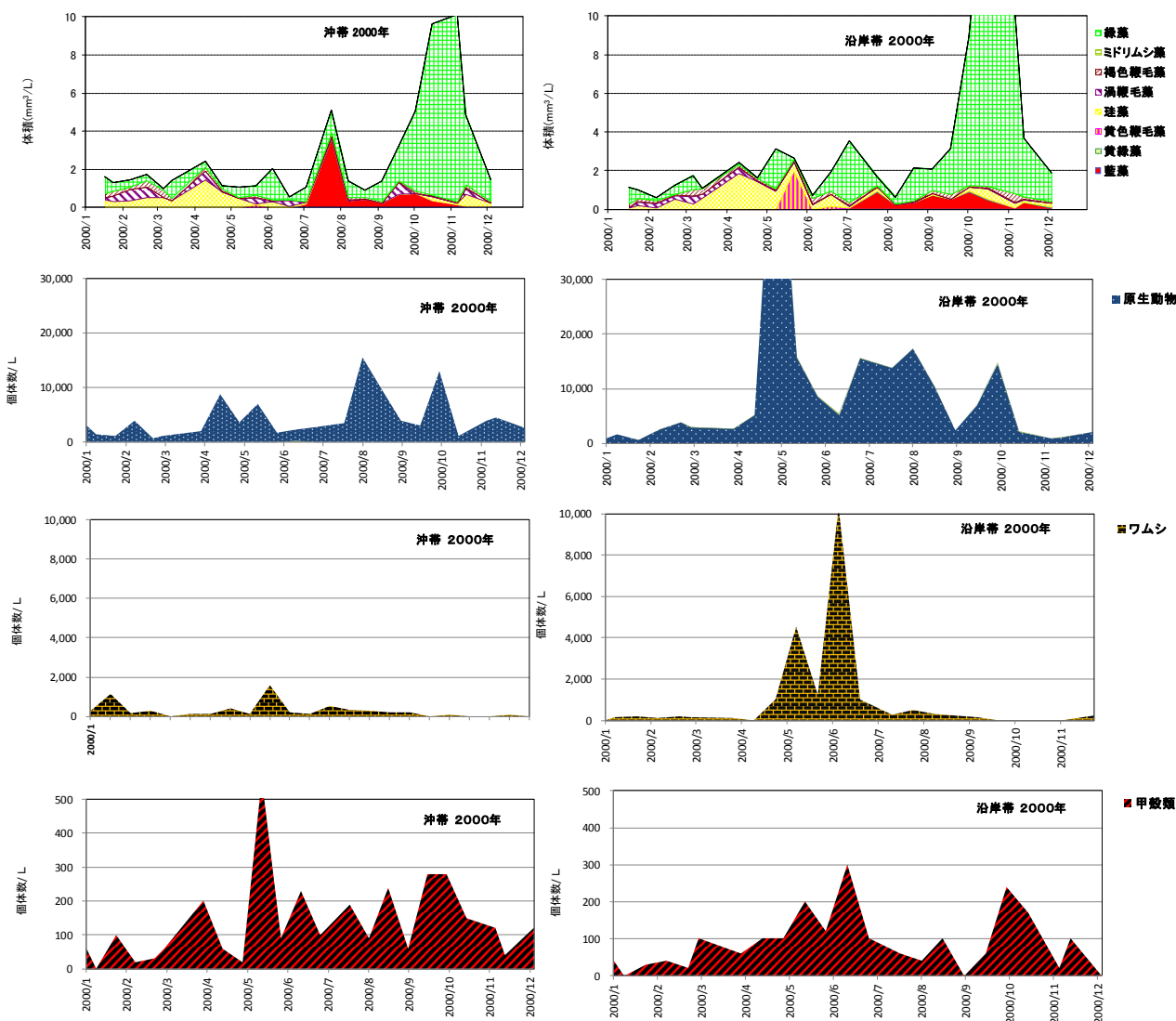
琵琶湖北湖の沖帯である今津沖中央(17B、水深 0.5m層)と北湖東岸の沿岸帯である長浜沖(17C、水深 0.5m 層)における植物プランクトンと動物プランクトンの群集構造の相違について明らかにするため、動物プランクトンおよび植物プランクトンの計数データが揃っている 1995 年、2000 年の調査結果を例として比較検討し、沿岸帯と沖帯の動物プランクトンの個体数の変化と植物プランクトン総体積量の季節変化と個体数の季節変化について図(1)-9 および図(1)-10 に示した。



図(1)-9 琵琶湖沖帯と沿岸帯における動物・植物プランクトンの経月変化 (1995 年)

1995 年における植物プランクトン総体積量の変化をみると、1～4 月までは沿岸帯でも沖帯でも同様に少なく推移していた。しかし、5 月に淡水赤潮の原因となるウログレナ(黄色鞭毛藻類)の小さな増加が両

地点で認められた。その後、珪藻や緑藻、藍藻が入れ替わりながら増加を示し11月まで続いた。今回の調査結果から、植物プランクトンは、沖帯よりも沿岸帯で早く増加が始まる傾向が認められ、春季の黄色鞭毛藻や珪藻の増加量も沿岸帯が沖帯より多い傾向が認められた。動物プランクトンでは、小型の原生動物は植物プランクトンと同様に1月～4月までは少なく、5月に入ると沿岸帯でも沖帯でも大きな増加が認められた。沿岸帯が沖帯よりやや多く計数された。ワムシ類は沖帯では明らかに少なく沿岸帯の5月～8月にかけて大量に発生することが認められた。また、甲殻類では増減のバラツキがあるものの沖帯では7月に沿岸帯では10月に大きなピークが認められた。



図(1)-10 琵琶湖沖帯と沿岸帯における動物・植物プランクトンの経月変化 (2000年)

2000年の結果を図(1)-10に示した。2000年における植物プランクトンの総体積量の変化は、沿岸帯も沖帯も同様の変動を示したが、10～11月の緑藻の大増加は沿岸帯が顕著であった。また、沖帯における7月の藍藻の増加はアオコ形成種ではなく、偽空胞を持たず微細な細胞が集まり群体を形成するアファナーケ

と呼ばれる種類の増加によるものであった。次に動物プランクトンの増加をみると原生動物は沿岸帯で5月にまず増加が始まり、少し遅れて沖帯でも増加する傾向が認められた。次に、ワムシ類についても沿岸帯の6月に多くのワムシの分布が確認され、特にハネウデワムシが最も多く計数された。このワムシ類は濾過食で微細な植物プランクトンを捕食するため、湖岸に分布する小型の植物プランクトン種に与える捕食圧を考えると沿岸帯の内部生産量が沖帯に比べ大きいことを示していると推察された。

表(1)-5 琵琶湖における沖帯と沿岸帯の植物プランクトン総体積の比較(平均値:総体積量 mm^3/L)

	1995年			2000年		
	沖帯(17B)	沿岸帯(17C')	倍率	沖帯(17B)	沿岸帯(17C')	倍率
	a	b	b/a	a	b	b/a
最高値	6.17	10.7	1.73	16.0	19.0	1.19
平均値	1.93	2.6	1.32	3.2	3.3	1.03
最低値	0.15	0.3	2.14	0.4	0.6	1.68

表(1)-6 琵琶湖における沖帯と沿岸帯の動物プランクトン総個体数の比較 (平均値:個体数/L)

	1995年			2000年		
	沖帯(17B)	沿岸帯(17C')	倍率	沖帯(17B)	沿岸帯(17C')	倍率
	a	b	b/a	a	b	b/a
原生動物	3,348	5,412	1.62	4,178	8,939	2.14
ワムシ	347	1,551	4.47	274	901	3.29
甲殻類	94	136	1.44	129	87	0.67

表(1)-5に沖帯と沿岸帯における植物プランクトン総体積と沖帯の総体積量を比較した結果、1995年の平均総体積量は、沖帯で $1.93\text{mm}^3/\text{L}$ 、沿岸帯で $2.60\text{mm}^3/\text{L}$ であり、また、2000年の平均体積量においても、沖帯で $3.2\text{mm}^3/\text{L}$ 、沿岸帯で $3.3\text{mm}^3/\text{L}$ とやや沿岸帯の植物プランクトン量が多かったものの、ほとんど沖帯と沿岸帯の植物プランクトン量の差としては同じ程度であると考えられた。しかし、動物プランクトンについてみると表(1)-6に示すように大型の甲殻類では、明確な差は認められなかったが、ワムシ類では1995年の沖帯は347個体/Lであるのに対し、沿岸帯では1,551個体/Lと沿岸帯が4.47倍と多く、2000年においても、沖帯では274個体/Lであるのに対し、沿岸帯では901個体/Lと沿岸帯が3.24倍と沿岸帯にはワムシが多く分布していることが明らかとなった。

これらの結果から、沿岸帯では沖帯に比べ原生動物やワムシ類が明らかに多く分布しており、これらの種類が植物プランクトンに対する捕食圧を考えると沿岸帯の内部生産が沖帯に比べ大きいことを示唆していると考えられた。さらに、このことは、動物プランクトンが多い時期には、これらの動物プランクトンが食べられない程度の大きさか、また、食べ残した植物プランクトン量が内部生産量として評価されている可能性もあることも示唆された。

(6) 泥質化の相違による動物・植物プランクトンの回帰実験

底質の異なる底泥からの動・植物プランクトンの回帰実験に用いた底質の分析結果を、表(1)-7 に示した。自然的な湖岸である愛知川沖に比べ、人工的湖岸である長命寺沖や長浜沖は泥質化が進んでおり、特に底泥が最も泥質化が進んでいた地点は長浜沖であり、ORP 値も-120mV と嫌気的な状態であることが明らかとなった。

表(1)-7 琵琶湖沿岸帯における底質分析結果 (2013 年)

底質		愛知川沖	長命寺沖	長浜沖
分析項目	単位	2013/5/27	2013/5/27	2013/5/27
TOC(NC計)	%・dry	0.199	1.725	1.439
TN(NC計)	mg/kg・dry	340	1910	1650
T-P	mg/kg・dry	310	950	840
COD	mg/g・dry	3.03	19.1	23
IL	%・dry	3.2	6.9	6.1
ORP	mV	120	-11	-120
水分率	%	32.5	56.7	51.0
固形分率(100-水分率)	%	67.5	43.3	49.0
クロロフィルa (蛍光法)	μg/g			
T-Fe	mg/kg・dry	24300	45000	40200
T-Mn	mg/kg・dry	463	874	929

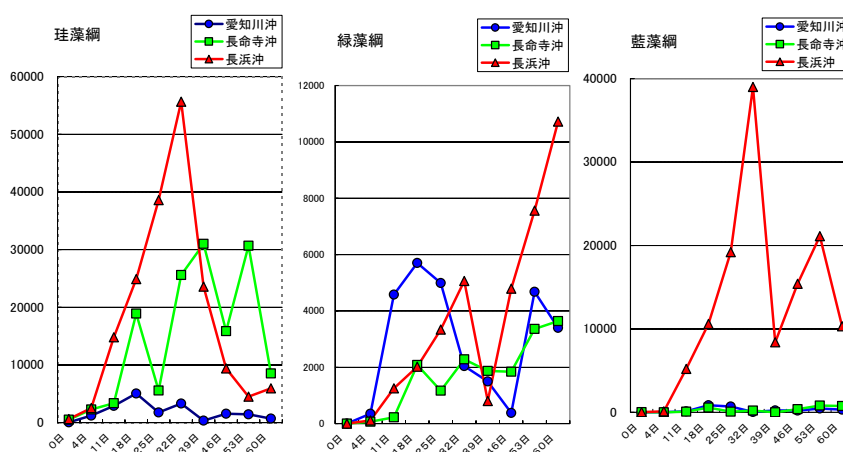
次に、各地点の底泥を用いた回帰実験結果を、図(1)-9 および、図(1)-10 に示した。

長浜沖では、他の2地点に比べ藍藻の回帰数が多かった。中でもアオコの原因となる種類の回帰数が多く、藍藻の中でも小型細胞が集まって群体を形成するような *Anabaena affinis*、*Anabaena sp.* および、近年、琵琶湖北湖で増加傾向を示している *Aphanothece clathrata*、*Gomphosphaeria lacustris* 等の回帰数が多いことが明らかとなった。さらに、長浜沖の培養46日目からは、水質汚濁の指標生物とされている *Homoeothrix janthina* の発生が認められた。本種は、付着性で分岐しない糸状体が多く集まり群体を形成し、薄いマット状に水面や

培養器の壁面で増加したため、湖水中のプランクトンとしては少ないが、その壁面に発生した現存量としては非常に多いことが示唆された。近年、琵琶湖北湖において増加傾向を示している藍藻に注目すると、砂浜帯である愛知川沖では9種

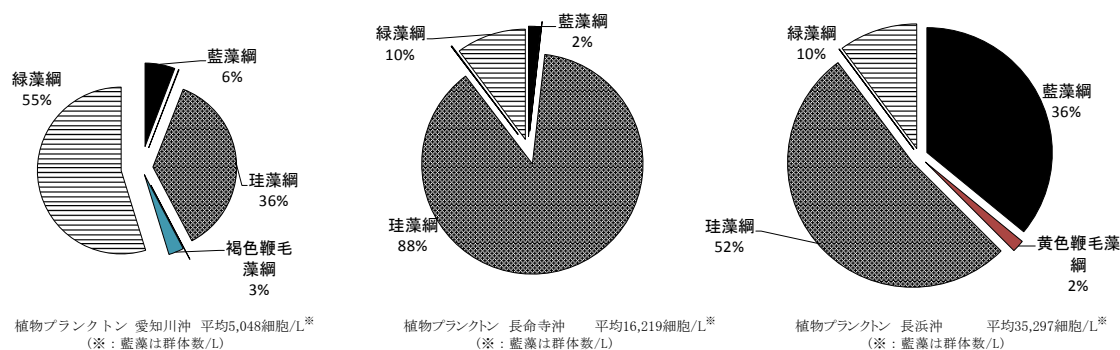
類と少なく回帰数も少なかったが、長浜沖では13

種類と多く、図(1)-12 に示したように総回帰数に占める藍藻の割合は、愛知川沖で6%、長命寺沖で2%であるのに対し、長浜沖では36%であり、長浜沖の底泥からの藍藻に属する種類の回帰数が最も多いこ



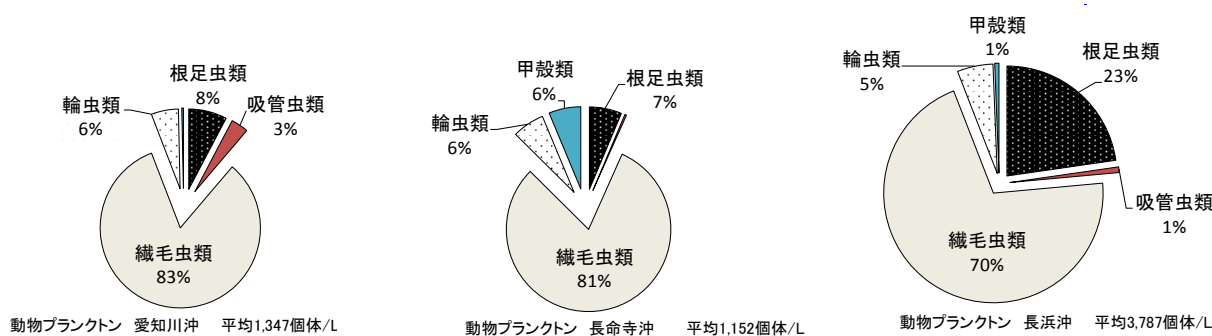
図(1)-11 沿岸帯における植物プランクトンの回帰実験結果 (2013 年)

とが、検証実験から明らかとなった。泥質化が進行することで藍藻が回帰しやすいことは、今後、沿岸帯の泥質化の評価指標の一つとしても活用できる可能性が推察された。



図(1)-12 琵琶湖沿岸帯における植物プランクトンの回帰実験結果 (2013年)

次に、底泥から回帰してきた動物プランクトンの結果を図(1)-13に示した。回帰数が多かった地点は、泥質化が進んでいた長浜沖の底泥であり、腐水性を好むと考えられる小型の繊毛虫類に属する原生動物の回帰数が他の地点より多いことが明らかとなった。特に、アメーバー類や太陽虫類の仲間である *Arcella vulgaris* や、*Amoeba* sp.、*Centropyxis aculeata*、*Staurophrya* sp. などの種類は水質汚濁の進んだ水域に多く分布し、これらの根足虫類が総回帰数中に占める割合は、愛知川沖が8%、長命寺沖が7%に対し、長浜沖では23%と長浜沖での根足虫類の回帰が多かった。これらの結果から、自然的な砂浜帯である愛知川沖の底泥からは、量的には少ないが植物プランクトンでは、緑藻や珪藻、藍藻、褐色鞭毛藻とバランスのとれた生物相が回帰してきており、また、藍藻の回帰数も少なかったことから、群体性藍藻の発生抑制のためにも、藍藻や根足虫などの腐食性を好むような種類が発生しにくい、緩やかな斜面の自然的湖岸の再生が必要であることが推察された。

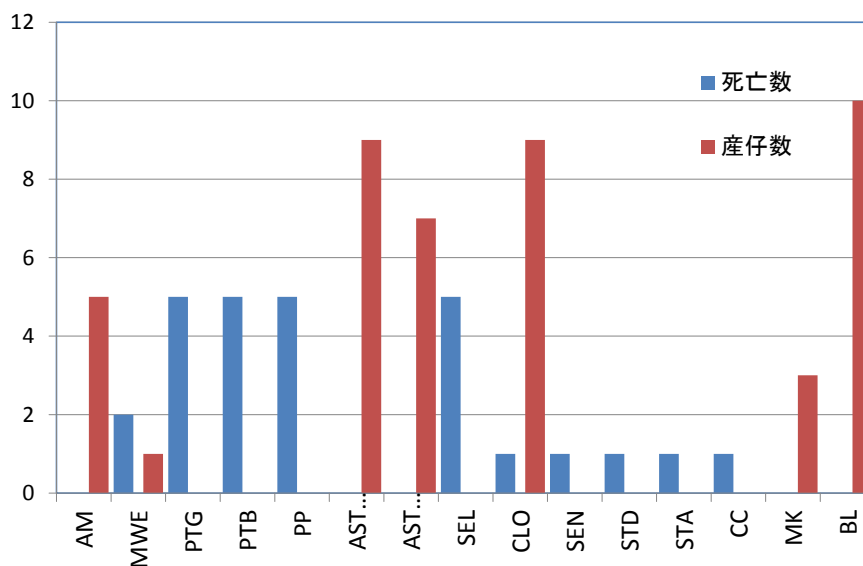


図(1)-13 琵琶湖沿岸帯における動物プランクトンの回帰実験結果 (2013年)

(7) 動物・植物プランクトンを用いた室内的な検証実験

琵琶湖から分離した 14 種類の植物プランクトンを、その捕食者となる動物プランクトン (*Daphnia pulicaria*) に与えることにより、その成長や繁殖の有無について調べた結果を図(1)-14 に示した。藍藻に属しカビ臭を生成する小型の *Phormidium tenue*(PTG、PTB)や超微細な細胞のピコ植物プランクトン(PP)は、動物プランクトン(ミジンコ)の餌としては不適であり、親ミジンコになるまでに全滅した。また、藍藻の中でも、浮上性群体を形成する *Anabaena mmacrospora*(AM)や *Microcystis*(MWE、MK)はミジンコ成長阻害とはならなかったが、産仔数としては少なかった。大型緑藻の *Closterium*(CLO)や大型珪藻の *Asterionella*

formosa(AST)がミジンコの餌として優れており、産仔数も多いことが明らかとなった。今後、琵琶湖の水産魚貝類の復活に向かい、ミジンコの餌資源として阻害となる藍藻類の増加を抑制するための対策や、珪藻や大型緑藻が増殖しやすい湖岸帯の環境整備が重要であることが本実験結果から明らかになった。



図(1)-14 琵琶湖産ミジンコ(*Daphnia pulicaria*)を用いた餌(植物プランクトン)に対する生態影響試験結果

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

1) 沿岸帯と沖帯における植物プランクトン総細胞容積、総細胞炭素量、粘質鞘の長期変動解析

琵琶湖の沖帯と沿岸帯の長期的な現存量の変化を比較した結果、各地点で植物プランクトンの現存量は増減を繰り返しながらも徐々に減少している傾向が認められた。しかし、植物プランクトンの中でも藍藻に属し、粘質鞘と呼ばれる無色・透明の有機物を産生するような種が近年増加傾向を示し、地点別の傾向をみると水深の浅い南湖や沿岸帯の地点で顕著であることが明らかとなった。

2) 沿岸帯と沖帯における植物プランクトン総炭素量と水質項目との相関解析

植物プランクトン総炭素量と水質項目との相関係数はChl-a量との相関が0.35~0.86と高く、特に北湖中央部に位置する17Bでの相関係数は1980年代に0.86と最も高いのに対して、1990年代は0.56、2000年代には0.52と徐々に減少傾向が認められた。また、この傾向は沿岸帯の地点でも確認され、近年では、過去に比べChl-a量のみでは評価できない無色透明な粘質鞘と呼ばれる有機物を多く保有する植物プランクトン種が増加したことが明らかとなった。

3) 植物プランクトン種類数の変化や長期的な変動解析

植物プランクトンの種類数の長期変化は各地点ともに1990年以降、急速に減少していることが認めら

れ、特に、沿岸帯の定点での減少が顕著であった。

4) 動物プランクトン種組成変化や長期的な変動解析

動物プランクトン炭素量の経年変化をみると、2000年以降減少傾向が認められ、植物プランクトンと同様に近年減少傾向にあることが明らかとなった。

5) 動物プランクトンと植物プランクトンとの関係解析

琵琶湖北湖における沿岸帯は沖帯に比べ植物プランクトン量は大きな差は認められなかったものの、原生動物やワムシ類が明らかに多く分布しており、これらの種類が捕食する植物プランクトン量を考慮すると沿岸帯の内部生産が沖帯に比べ大きいと考えられた。さらに、これらの動物プランクトンが多い時期には、これらの種類が食べ残した藍藻などの植物プランクトン種が内部生産量として評価されている可能性も示唆された。

6) 底泥を用いた動物・植物プランクトンの回帰実験

自然的な砂浜帯である愛知川沖の底泥からは、藍藻の回帰数も少なかったが、人工的な湖岸帯の底泥からは群体性藍藻の発生や根足虫などの腐食性を好むような種類が発生しやすいことが明らかとなり、今後は、泥質化が進み難い緩やかな斜面の自然的湖岸の再生が必要であることが推察された。

7) 動物・植物プランクトンを用いた室内的な検証実験

動物・植物プランクトンを用いた室内的な検証実験の結果、粘質鞘を有するような微細な藍藻は、ミジンコなどの動物プランクトンの餌としては不適であることが明らかとなり、緑藻や珪藻に属する種類がミジンコの餌として優れていることが明らかとなった。今後、琵琶湖の水産魚貝類の復活に向かい、ミジンコの餌資源として阻害となる藍藻類の増加を抑制するための対策や、珪藻や大型緑藻が増殖しやすい湖岸帯の環境整備が重要であることが本実験結果から明らかになった。

(2) 環境政策への貢献

本研究により沿岸帯と沿岸帯の機能評価を実施することにより、将来的に環境政策へ貢献できることが明らかとなった。今後、琵琶湖の水産魚貝類の復活に向かい、ミジンコの餌資源として阻害となる藍藻類の増加を抑制するための対策や、珪藻や大型緑藻が増殖しやすい湖岸帯の環境整備が重要であることが本実験結果から明らかになった。

<行政が既に活用した成果>

マザーレイク計画では、2050年までに春に固有種の本ホシゴイやニゴロブナが産卵し、湖辺の足元にさらさらとした砂地とセタシジミの復活と水遊びをする人々などの復活をめざしている。

今回の研究成果により、琵琶湖沿岸帯の人工湖岸化が植物プランクトンや動物プランクトンの種組成を左右し、また、泥質化の進んだ底質から発生する動・植物プランクトンの種組成の変化とその特性についても明らかに出来たことから、滋賀県では、第四期中期計画(平成26年～28年)の中で、琵琶湖南湖の自然的湖岸と人工的湖岸の泥質化状況と人工的な湖岸化が沿岸帯の機能に及ぼす影響評価を実施し、さらに、在来魚介類の生息環境の再生からみた沿岸帯管理の方向性提示するための実態調査を行うこととなった。

<行政が活用することが見込まれる成果>

滋賀県が現在、目指しているマザーレイク計画では、2050年までに春には固有種の本ホシゴイやニ

ゴロブナが産卵し、湖辺の足元にさらさらとした砂地とセタシジミの復活と水遊びをする人々の復活をめざしている。湖沼水質形成における沿岸帯の機能とその影響因子の評価に関する本研究により、琵琶湖沿岸帯における水質や植物プランクトン、動物プランクトンの重要性が明らかとなり、さらに人工的湖岸の底質から発生する動・植物プランクトンの種組成の変化とその特性についても明らかにしたことから、琵琶湖南湖の自然的湖岸と人工的湖岸の底質については、平成 26 年度～28 年度にかけて人工湖岸化が沿岸帯の生態的機能に及ぼす影響を把握するために滋賀県が実態調査を行うこととなった。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) 一瀬諭、池谷仁里、古田世子、藤原直樹、池田将平、岸本直之、西村修:日本水処理生物学会誌、vol.49,No.2 ,65-74(3013)「琵琶湖に棲息する植物プランクトンの総細胞容積および粘質鞘容積の長期変動解析」

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 一瀬諭、用水と廃水、 vol. 55, No. 4号, 300-307(2013) 「琵琶湖の水環境の現状と沿岸帯の機能評価に向けて」

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 一瀬諭、古田世子、馬場大哉：日本陸水学会第76回大会（2011）「琵琶湖北湖岸における底泥調査とアオコ形成種の分布について」講演要旨集 P190.
- 2) 一瀬諭、古田世子、馬場大哉：第38回 環境保全・公害防止研究発表会（2011）「琵琶湖北湖岸における泥質化の現状とアオコ形成種の分布について」講演要旨集 P60-61.
- 3) N. Kishioto, S. Ichise, K. Suzuki, C. Yamamoto：2012 ASLO Aquatic Sciences Meeting: Voyages of Discovery (2012)
"Potential factors influencing changes in average cell size of the phytoplankton community in Lake Biwa, Japan"
- 4) 一瀬諭、古田世子、山中直、田中仁志、馬場大哉、岸本直之、西村修：日本陸水学会第77回大会（2012）「琵琶湖における沿岸帯の機能とその影響因子の評価について」
- 5) 一瀬諭、古田世子、藤原直樹、岡本高弘：第49回日本水処理生物学会（2012）
「琵琶湖沿岸帯における植物プランクトン動態および水質解析」
- 6) 一瀬諭、古田世子、藤原直樹、廣瀬佳則、山中直：第39回環境保全・公害防止研究発表（2012）
「湖沼水質形成における沿岸帯の機能とその影響因子の評価」
- 7) 一瀬諭、古田世子、山中直：第47回日本水環境学会年会（2013）
「琵琶湖の底泥より発生した藻類について」

- 8) 一瀬諭、古田世子、廣瀬佳則、藤原直樹、馬場大哉、岸本直之、西村修：日本陸水学会第78回大会 (2013)「湖沼における沿岸帯の機能評価について(1)琵琶湖における沿岸帯機能評価の概要」
- 9) N. KISHIMOTO and S. ICHISE: "Knowledge for the Future" Joint Assembly, Gothenburg, Sweden (2013) "Water-quality problems in Japanese lakes: regulations, the past, and the future".
- 10) 一瀬諭、古田世子、藤原直樹、廣瀬佳則、永田貴丸、馬場大哉、西村修：日本水処理生物学会第50回大会、「琵琶湖沿岸帯における動・植物プランクトンの分布と底泥からの回帰実験について」
- 11) 一瀬諭、古田世子、藤原直樹、廣瀬佳則、永田貴丸、馬場大哉、岸本直之、西村修：第40回環境保全・公害防止研究発表会、(2013)「沿岸帯の機能評価① 琵琶湖沿岸帯における底泥からの動・植物プランクトンの回帰実験について」
- 12) 一瀬諭、古田世子、山中直：第47回日本水環境学会年会 (2013)「琵琶湖の底泥より発生した藻類について」

(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）

- 1) 湖沼生態系に及ぼす沿岸帯の機能評価 (2013年9月12日、龍谷大学瀬田学舎2号館120講義室、観客80名)

(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) 一瀬諭、若林徹哉、松岡泰倫、山中直、藤原直樹、田中勝美：滋賀県立衛生環境センター所報、「琵琶湖の植物プランクトンの形態に基づく生物量の簡易推定について」、30、p27-35 (1995)
- 2) 一瀬諭、若林徹哉、藤原直樹、水嶋清嗣、伊藤貢：第9回世界湖沼会議要旨、「琵琶湖における植物プランクトンの現存量の変遷について(1978-2000)」、337-340 (2001)
- 3) 一瀬諭、若林徹哉、古田世子、吉田美紀、岡本高弘、原良平、青木茂：滋賀県琵琶湖環境科学研究センター所報、「琵琶湖北湖における植物プランクトン総細胞体積量の長期変遷と近年の特徴について」、第2号、97-108 (2007)
- 4) 宮井博、松崎加奈恵、小川数也、杉原拓郎：日本プランクトン学会報、「植物プランクトンの形態に基づく種別生物量の簡易推定法」35(2)121～126 (1988)
- 5) 一瀬諭、池谷仁里、古田世子、藤原直樹、池田将平、岸本直之、西村修：日本水処理生物学会誌、「琵琶湖に棲息する植物プランクトンの総細胞容積および粘質鞘容積の長期変動解析」、49(2)、65-74 (2013)

- 6) 荻原富司, 矢木修身, 高村義親, 須藤隆一 : 水質汚濁研究, 7(7), 437-442 (1984)
「霞ヶ浦に発生する*Microcystis aeruginosa*の純粋分離」
- 7) 一瀬諭, 岸本直之, 古田世子, 早川和秀他 : 環境省環境研究総合推進費平成22年度終了研究成果報告書、「湖内生産および分解の変化と難分解性有機物を考慮した有機汚濁メカニズムの解明に関する研究(B-0805) 」 (2010)
- 8) 岡本高弘, 早川和秀 : 日本水環境学会誌、「琵琶湖における溶存有機物の現状と課題」、34(A) No. 5、151-157 (2011)
- 9) 今井章雄, 松重一夫, 木幡邦夫, 高村典子, 井上隆信, 野原精一, 佐野友春, 相崎守弘, 福島武彦, 小澤秀明, 滝和夫, 細見正明 : -特別研究-平成9年度～平成11年度、国立環境研究所特別研究報告、「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評価に関する研究」、環境庁国立環境研究所 (2001)
- 10) Hsieh, C., K. Ishikawa, et al.: "Phytoplankton community reorganization driven by eutrophication and warming in Lake Biwa." *Aquatic Sciences* 72(4): 467-483 (2010)
- 11) Kagami M., Urabe J. : Phytoplankton growth rate as a function of cell size: an experimental test in Lake Biwa. *Limnology* 2: 111-117. (2001)
- 12) Kishimoto N., Ueno K.: Influence of phosphorus concentration on the biodegradation of dissolved organic matter in Lake Biwa, Japan. *Journal of Water and Environment Technology* 9: 215-223 (2011)

(2) 「琵琶湖の沿岸帯のシードバンク機能評価」

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター生物圏担当

古田世子・一瀬 諭・池田将平(平成23年度)

廣瀬佳則(平成24～25年度)

東レテクノ (株)

馬場大哉

<研究協力者>

東北大学大学院工学研究科

矢島悠一(平成23年度)

平成23～25年度累計予算額：10,626千円

(うち、平成25年度予算額：4,101千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

自然的湖岸の愛知川沖と人工的湖岸の長浜沖における水質に大きな差はないが、底質は異なる性質をもち人工的湖岸において有機物量はおよそ10倍、水分率は2倍程度自然的湖岸に比較して高い、ORPは年間を通じてマイナスの値を示しており嫌気的な環境にあった。さらに、人工的湖岸の底泥はシルト分が多く細かい粒子で構成されており、自然的湖岸では、細砂で占められていた。

この底質を用いて、藻類の細胞数や回帰する細胞数を調べたところ、シルト分の多い人工的湖岸の底泥は、藍藻細胞の密度が高く、藍藻の回帰細胞数も多かった。このように底泥中の藻類細胞数が多いほど回帰する藻類細胞数が多い比例関係にあることも分かった。

また、調査地点の底泥を嫌気保存すると回帰する藻類細胞数は藍藻が多く、好気保存すると緑藻が保存されやすいことや、微好気的な条件で保存されると藍藻の回帰細胞数が多いことから、藍藻の少ない底泥環境を保つためには、底泥を好気的な状態に保つことが重要である。

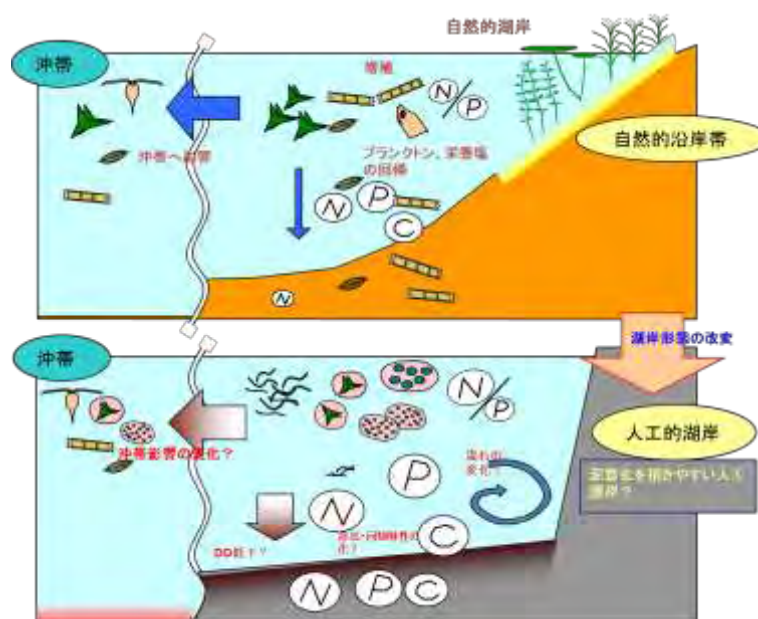
[キーワード]

琵琶湖、底質、DO、植物プランクトン、藍藻、人工的湖岸、自然的湖岸

1. はじめに

琵琶湖北湖では、植物プランクトンの現存量やクロロフィルa量が減少傾向にある。しかし、粘質鞘を持つ小型の藍藻類は、増加傾向にあり、この粘質鞘が、琵琶湖で問題となっている難分解性有機物に関与していることが指摘されている¹⁾。

琵琶湖北湖における沖帯の水深は、平均約60mと深く、植物プランクトンが、沖帯の底質から回帰しているとは



図(2)-1 サブテーマ2のイメージ図

考えにくい。

このため、琵琶湖北湖に存在している植物プランクトンは沿岸帯の底質から回帰して増殖することが考えられる。

琵琶湖沿岸は、図(2)-1に示したように、なだらかな緩斜面の自然的湖岸と急に深くなる人工的湖岸が存在している。このような沿岸形状の違いにより、底泥の有機物量や水分率や底泥中の溶存酸素濃度(DO)は異なることが考えられ、その結果藻類シードバンク機能が異なるものと考えられる。そこで、自然的湖岸の底泥と人工的湖岸の底泥に保存されている藻類シードバンク機能について評価を行い、粘質鞘を持つ藍藻が保存されている底質について解明する。

《定義》

藻類シードバンク：植物プランクトンや藻類の種の保存庫・供給源

藻類の回帰：水中に存在した藻類（栄養細胞、藻類シード、休眠細胞等）が、底質に移行した後、増殖に適した条件時に水中に再び回帰または増殖することをいう。

沿岸：有光層の2倍



図(2)-2 調査地点

2. 研究開発目的

自然的湖岸と人工的湖岸の底質を用いて、藻類の回帰試験を行うことにより、底質中に存在している藻類のシードバンク機能の違いを明らかにする。

さらに、底泥を嫌気条件や微好気条件等で長期間保存を行い、藻類種毎のシードの保存状況を把握することで、底泥の嫌気化と藻類シード（特に藍藻シード）との関係性を明らかにする。

3. 研究開発方法

(1) 調査地点

琵琶湖における、自然的湖岸の代表地点として愛知川沖を、人工的湖岸の代表地点として、長浜沖を調査地点として選定した(図(2)-2)。この2地点について、水質および植物プランクトンの季節変動調査を1年間実施した。

また、季節(春、夏、秋、冬)毎に本調査地点の採泥を行い各種試験等の試料とした。

(2) 調査月日

水質および植物プランクトン調査：2012年4月



図(2)-3 クリーンボックス内の作業



図(2)-4 嫌気静置条件による回帰試験

～2013年2月の間、毎月1回。

底泥調査：2011年11月14日(秋)、2012年2月13日(冬)、2012年5月23日(春)、2012年9月5日(夏)

2年間の嫌気暴露底質によるシードバンク機能劣化評価試験：2012年2月13日採泥試料

シードバンク機能維持必須 DO 量の定量的評価試験：2012年9月5日採泥試料

(3) 調査方法および試験方法

1) 水質および植物プランクトンの季節変動調査

表層 0.5m 層で採水を行い、植物プランクトンの計数は、プランクトン計数板に希釈試料 1ml を加え計数を行った。また、水質分析項目は、水温、TOC、DOC、POC、COD、D-COD、TN、DN、PN、TP、DP、pH、EC、色度、濁度、SS、DO、ORP、クロロフィル a を実施した。

2) 採泥および回帰試験方法

採泥方法：エクマンバージ採泥器を用いて採取を行った。また、採泥した底泥の表層から 1 cm を試料として夾雑物を取り除き、攪拌を行い均一な試料とした。

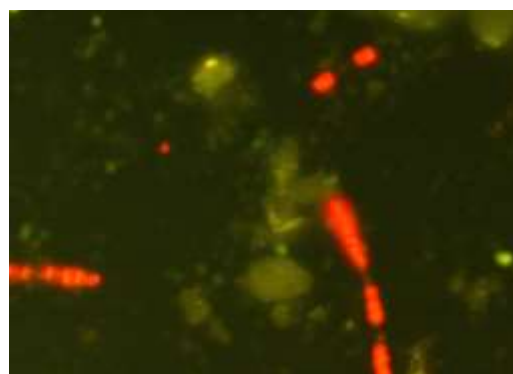
回帰試験方法：滅菌を行ったメジウム瓶に底泥を 50g 入れ、孔径 0.45 μ m のメンブレンフィルターでろ過を行った、採泥地点の直上水を 250mL 添加し、この直上水を 48 時間毎に採取し分析等を行った。直上水の採取後は、新たにろ過済みの直上水 250mL 添加し、48 時間後に採取する、この作業を 8 回繰り返した。

回帰試験の条件は好気攪拌(直上水添加時によく攪拌)、好気静置(直上水添加時に泥の巻き上げが起きないように静かに添加)、嫌気静置(窒素ガスを充てんした、クリーンボックス内(図(2)-3)で、直上水の添加を行い、嫌気ジャーにメジウム瓶と酸素吸収剤(Anaero Pak) 3 個を入れることにより嫌気条件(溶存酸素濃度(DO) 0.1mg/L 以下)(図(2)-4)とした。なお、好気攪拌は自然的湖岸の底層部が攪拌により好気的な条件であり、嫌気静置は、人工的湖岸の底層部でほとんど流れがないため嫌気的な条件になることからこの 2 条件で実施した。好気静置は嫌気静置の対照として一部実施した。また、回帰試験の条件は 20 \pm 1 $^{\circ}$ C、12h:12h の明暗周期で光強度は 60 μ molm⁻²s⁻¹ とした。

回帰試験時の分析項目は、植物プランクトンの同定計数(蛍光顕微鏡(G 励起 546nm)を用いた、蛍光を発する細胞の計数(図(2)-5))、粒径分布(Coulter counter Multisizer 3, Beckman Coulter)、TOC、DO、T-P,T-N,COD とした。



図(2)-5 回帰試験：蛍光を発する藻類細胞の写真(蛍光顕微鏡：G 励起 546nm)



図(2)-6 底泥直接観察法：蛍光を発する藻類細胞の写真(蛍光顕微鏡：G 励起 546nm)

また、底泥は、TOC、TC、TN、T-P、COD、IL、ORP、水分率、固形分率、クロロフィル a、T-Fe、T-Mn、粒度分布、ICP を用いた重金属分析および底泥直接観察法により藻類シード(細胞)計数を行った。底泥の藻類シードの計数方法は、底泥 1g を滅菌した三角フラスコに採取し、直上水 100ml 加え、よく混和を行った試料を原液として、必要に応じて希釈を行い計数に用いた。計数はプランクトン計数板に希釈試料 1ml を加え、蛍光顕微鏡(G 励起 546nm)を用いて、蛍光を発する細胞のみ計数を行った(図 (2-6))。

3) 2年間の嫌気暴露底質によるシードバンク機能劣化評価

2012年2月13日に、採泥を行った底泥を、2Lの密栓付ポリ瓶に入れ、各調査地点の直上水(0.45 μ mのメンブレンフィルターでろ過)で水封した。この時の底泥直上のDO(HQ40d:HACH社製)は0.1~0.2mg/Lであったため、これを嫌気保存とした。好気保存は、底泥をビーカーに入れ、底泥直上水に常時エアレーション(70mL/min)を行うことで好气的状況を保った。この両者を2年間保存し、嫌気暴露によるシードバンク機能の違いについて評価を行った。また、採取時と2年間保存との評価に加え経時的に、6ヶ月、1年、1年6ヶ月、2年保存の回帰試験を実施した。回帰試験の条件は好気攪拌、嫌気静置で行った。

回帰試験方法は、滅菌を行ったメジウム瓶に底泥を20g入れ、底泥の巻き上げが起きないように、孔径0.45 μ mのメンブレンフィルターでろ過を行った、採泥地点の直上水を100mL添加する。この直上水を48時間毎に採取し分析等を行った。直上水の採取後は、新たにろ過済みの直上水を100mL添加し、48時間後に採取する、この作業を20 $^{\circ}$ C、12h/12hの明暗周期、光強度は60 μ molm⁻²s⁻¹で、6回繰り返した。分析項目は、植物プランクトンの同定計数、粒径分布、TOC、DO、T-P、T-N、CODとした。

4) シードバンク機能維持必須DO量の定量的評価

2012年9月5日に、採泥を行った底泥約1kgを、2Lのポリ瓶に入れ、各調査地点の直上水(0.45 μ mのメンブレンフィルターでろ過)で水封した。これを好気条件(DO:10.6mg/L)とした。微好気保存①(DO:7.7mg/L)は、図(2)-3の嫌気ジャーに入れ酸素吸収剤(アネロパック・ケンキ:三菱ガス化学株式会社)を1個入れた。微好気保存②(DO:4.6mg/L)は、同様に酸素吸収剤を2個入れた。嫌気保存(DO:0.7mg/L)は、クリーンボックスに窒素ガスを充填し、酸素がおよそ1%以下になったことを確認して、嫌気ジャーに試料を入れ酸素吸収剤を3個入れた。この4条件について、全て4 $^{\circ}$ C、暗所で保存し、経時的に6ヶ月、1年、1年6ヶ月保存の回帰試験を行った。分析項目は、水温、DO、クロロフィル、粒径分布および藻類種の同定計数と藻類シード(細胞)計数を行った。回帰試験の条件は、好気攪拌と、嫌気静置の2条件とした。

回帰試験方法は、滅菌を行ったメジウム瓶に底泥を20g入れ、底泥の巻き上げが起きないように、孔径0.45 μ mのメンブレンフィルターでろ過を行った、採泥地点の直上水を100mL添加する。この直上水を48時間毎に採取し分析等を行った。直上水の採取後は、新たにろ過済みの直上水を100mL添加し、48時間後に採取する、この作業を20 $^{\circ}$ C、12h/12hの明暗周期、光強度は80 μ molm⁻²s⁻¹で、6回繰り返した。分析項目は、植物プランクトンの同定計数、粒径分布、TOC、DO、T-P、T-N、CODとした。

5) 藍藻の休眠細胞の発芽実験

発芽実験にはアナベナ マクロスポーラ株(琵琶湖環境科学研究センターの継代培養株)を用い、

大量培養した後、休眠細胞を回収した。休眠細胞の発芽実験は、4℃で1ヶ月保存後、4, 10, 15, 20, 25, 32℃の条件下で保存した休眠細胞を計数板に封入し、顕微鏡下で計数板の同一視野の5箇所を撮影した。その後、20℃, 12h明-12h暗の光強度は80μmol/m²/sで発芽的条件下に移して休眠細胞を発芽させ、1週間後の発芽前後の画像を比較することで、発芽率を算出した。

4. 結果及び考察

(1) 水質および植物プランクトン調査結果

調査地点(図(2)-2)において、2012年4月～2013年2月に、水質調査(表層0.5m)を行った結果を、愛知川沖は表(2)-1、長浜沖は表(2)-2に示した。

表(2)-1 愛知川沖水質調査結果(表層0.5m)

分析項目	単位	2012/4/24	2012/5/23	2012/6/25	2012/7/17	2012/8/21	2012/9/5	2012/10/11	2012/11/7	2012/12/5	2013/1/16	2013/2/14
水温	℃	13.0	18.0	20.9	27.3	28.7	29.3	21.6	15.0	10.0	7.0	6.0
TOC(POC+DOC)	mg/L	2.4	1.7	3.4	3.5	2.2	1.6	1.8	1.7	1.7	1.5	0.9
DOC(燃焼法)	mg/L	1.4	1.2	1.4	1.6	1.6	1.1	1.2	1.1	1.1	1.3	0.8
POC(NC計)	mg/L	1.1	0.5	2.0	1.9	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6	0.2	0.2
COD	mg/L	2.1	3.0	4.2	4.6	3.0	2.5	2.7	2.4	2.2	2.0	1.3
D-COD	mg/L	2.0	2.5	2.3	2.6	2.3	2.4	2.6	1.8	1.9	1.8	1.3
TN(P-TON+D-TN)	mg/L	0.28	0.26	0.37	0.23	0.15	0.16	0.24	0.18	0.32	0.28	0.37
DN(熱分解法)	mg/L	0.26	0.22	0.15	0.10	0.06	0.07	0.17	0.15	0.24	0.23	0.32
PN(NC計)	mg/L	0.02	0.04	0.22	0.13	0.09	0.09	0.06	0.03	0.08	0.05	0.05
TP	mg/L	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
DP	mg/L	0.002	0.002	0.002	0.002	0.006	0.002	0.004	0.004	0.004	0.002	0.002
pH	-	8.0(23)	8.4(22)	9.4(25)	9.8(25)	9.1(22)	8.8(24)	8.2(23)	8.1(21)	7.9(18)	7.7(17)	7.8(20)
EC	mS/m	12.2	12.2	12.0	11.9	11.9	11.9	13.0	12.1	12.5	12.1	11.7
色度	度	0.7	1.6	1.9	1.7	1.5	1.1	1.6	1.3	1.3	1.0	1.5
濁度	度	2.5	2.1	4.0	3.7	1.6	0.9	2.7	1.4	1.8	1.4	1.4
SS	mg/L	1.6	2.3	4.9	4.5	1.1	0.6	2.5	1.3	4.0	1.1	1.2
DO	mg/L	11.5	10.9	11.0	10.7	8.3	7.8	8.6	9.2	10.1	10.7	11.5
ORP	mV	272	261	230	219	257	99	286	258	265	242	239
クロロフィルa(アト抽出法)	μg/L	4	3.4	30.3	33.8	5.1	1.2	7.3	6.7	3.5	1.8	1.9

表(2)-2 長浜沖水質調査結果(表層0.5m)

分析項目	単位	2012/4/24	2012/5/23	2012/6/25	2012/7/17	2012/8/21	2012/9/5	2012/10/11	2012/11/7	2012/12/5	2013/1/16	2013/2/14
水温	℃	11.2	18.2	21.1	24.6	28.3	28.5	21.6	15.0	9.7	7.0	6.1
TOC(POC+DOC)	mg/L	2.4	2.1	2.8	4.1	2.5	2.0	2.2	3.2	2.7	1.7	1.4
DOC(燃焼法)	mg/L	1.6	1.4	1.5	1.9	1.9	1.5	1.5	1.5	1.1	1.4	1.1
POC(NC計)	mg/L	0.8	0.7	1.3	2.2	0.5	0.5	0.7	1.7	1.6	0.4	0.3
COD	mg/L	2.2	3.0	4.0	5.1	2.8	2.8	3.0	3.8	3.2	2.5	2.5
D-COD	mg/L	2.1	2.2	2.4	2.5	2.3	2.5	2.7	2.2	2.0	2.3	1.7
TN(P-TON+D-TN)	mg/L	0.39	0.29	0.38	0.35	0.25	0.18	0.19	0.27	0.40	0.50	0.32
DN(熱分解法)	mg/L	0.27	0.21	0.24	0.12	0.18	0.09	0.12	0.15	0.25	0.44	0.25
PN(NC計)	mg/L	0.12	0.08	0.14	0.22	0.08	0.09	0.07	0.12	0.16	0.06	0.07
TP	mg/L	0.02	0.02	0.04	0.03	0.02	0.01	0.02	0.04	0.04	0.04	0.01
DP	mg/L	0.004	0.002	0.002	0.002	0.014	0.004	0.002	0.004	0.004	0.011	0.002
pH	-	8.0(22)	8.7(20)	9.2(25)	9.5(25)	9.1(23)	9.1(23)	8.3(22)	8.2(21)	8.0(17)	7.7(17)	7.6(16)
EC	mS/m	12.5	12.9	12.4	12.6	12.6	12.4	12.8	13.9	13.3	14.7	12.7
色度	度	1.5	2.0	2.2	2.1	1.7	1.5	2.4	2.2	1.4	3.7	1.5
濁度	度	3.9	2.2	4.4	4.8	1.2	1.1	2.0	5.6	4.9	3.8	1.4
SS	mg/L	3.2	1.9	4.2	5.6	0.9	0.7	2.5	11.2	14.0	3.5	1.9
DO	mg/L	11.8	11.2	11.4	9.6	7.7	8.6	8.7	9.3	10.1	10.4	11.0
ORP	mV	260	237	230	205	238	67	264	289	230	257	240
クロロフィルa(アト抽出法)	μg/L	5.3	7.3	24.0	32.7	3	0.9	10.8	25.4	11.5	2.3	3.2

2012年11月～12月に長浜沖でTOCおよびCODが愛知川沖に比べ高い値を示していたが、水質については大きな違いは確認できなかった。

次に、植物プランクトンの優先種を表(2)-3に示した。付着藻類よりも植物プランクトン由来の種類が多く、6月と7月には長浜沖で *Staurastrum dor. v. ornatum* が優先種として出現していた。10月は、愛知川沖で、*Oocystis sp.*、長浜沖では、*Gomphoshaeria lacustris* が優占種として確認され、11月は、

愛知川沖で、*Aulacoseira granulate* が、長浜沖では、*Uroglena americana* が優占種として確認された。ほとんどの種類が琵琶湖沖帯でも多く観察される種類であった。また、藍藻が優先種として確認されることはなく、珪藻が多く優占していた。

表(2)-3 愛知川沖および長浜沖における植物プランクトンの優占種

調査月日	愛知川沖	長浜沖
2012年4月23日	<i>Asterionella formosa</i>	<i>Asterionella formosa</i>
2012年5月22日	<i>Fragilaria crotonensis</i>	<i>Fragilaria crotonensis</i>
2012年6月24日	<i>Ceratium hirundinella</i>	<i>Staurastrum dor. v. ornatum</i>
2012年7月16日	<i>Nitzschia holsatica</i>	<i>Staurastrum dor. v. ornatum</i>
2012年8月20日	<i>Aulacoseira gra. v. angustissima</i>	<i>Aulacoseira granulata</i>
2012年9月4日	<i>Eudorina elegans</i>	<i>Oocystis sp.</i>
2012年10月10日	<i>Sphaerocystis sp.</i>	<i>Aulacoseira granulata</i>
2012年11月7日	<i>Aulacoseira granulata</i>	<i>Cyclotella glomerata</i>
2013年1月16日	<i>Fragilaria crotonensis</i>	<i>Fragilaria crotonensis</i>
2013年2月14日	<i>Rhodomonas sp.</i>	<i>Aulacoseira nipponica</i>

(2) 底泥調査結果

底質調査は、季節毎に行い、

* : 12月5日は欠測

2011年11月14日(秋)、2012年2月13日(冬)、2012年5月23日(春)、2012年9月5日(夏)の4回実施した。

表(2)-4 愛知川沖底質調査結果

分析項目	単位	2011/11/14	2012/2/13	2012/5/23	2012/9/5
TOC(NC計)	%・dry	0.18	0.18	0.14	0.26
TC(NC計)	%・dry	0.19	0.19	0.16	0.28
TN(NC計)	mg/kg・dry	280	310	210	380
T-P	mg/kg・dry	320	330	290	370
COD	mg/g・dry	2.1	2.6	2.1	4.1
IL	%・dry	1.2	1.5	1.9	1.5
ORP	mV	-81	139	205	-104
水分率	%	23.6	23.8	25.7	33.1
固形分率(100-水分率)	%	76.4	76.2	74.3	66.9

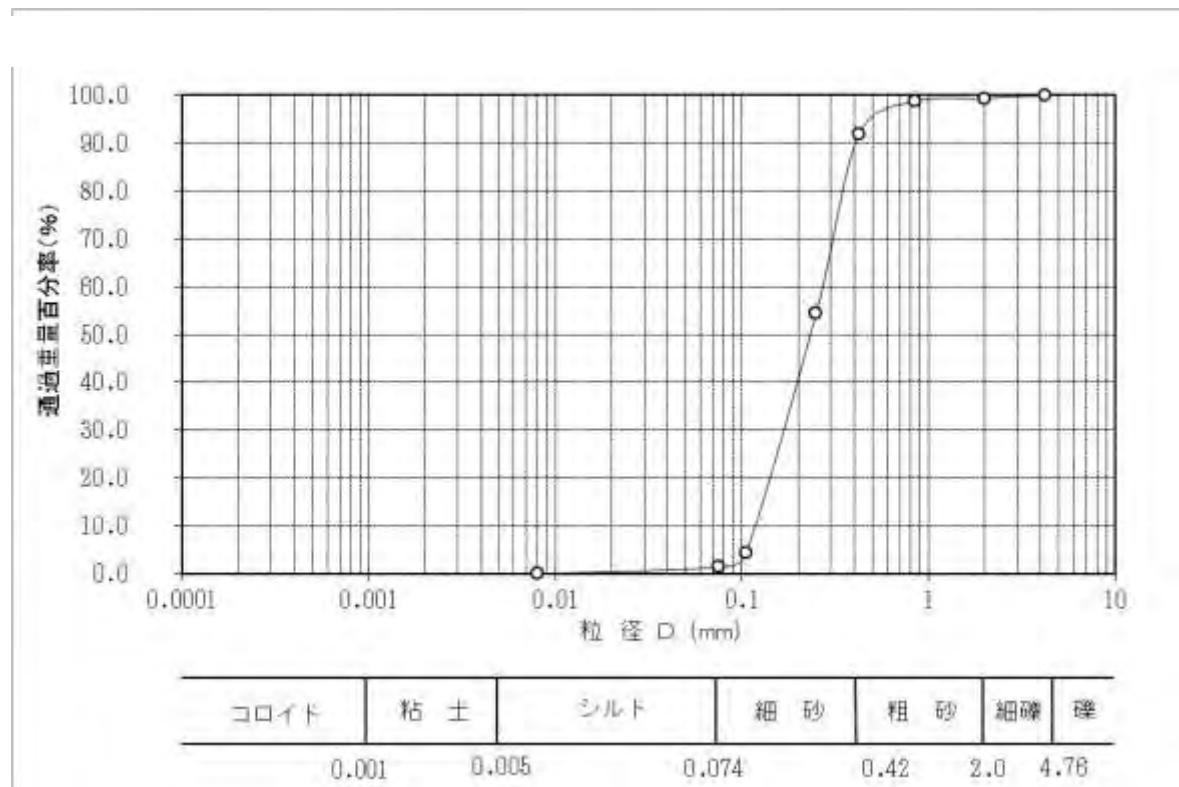
愛知川沖の調査結果を表(2)-4に、長浜沖の調査結果を表(2)-5に示した。4(1)の水質調査結果や植物プランクトンの優占種でみると、差異は確認できなかったが、底質でみるとTOC、TC、TN、は約10倍程度長

表(2)-5 長浜沖底質調査結果

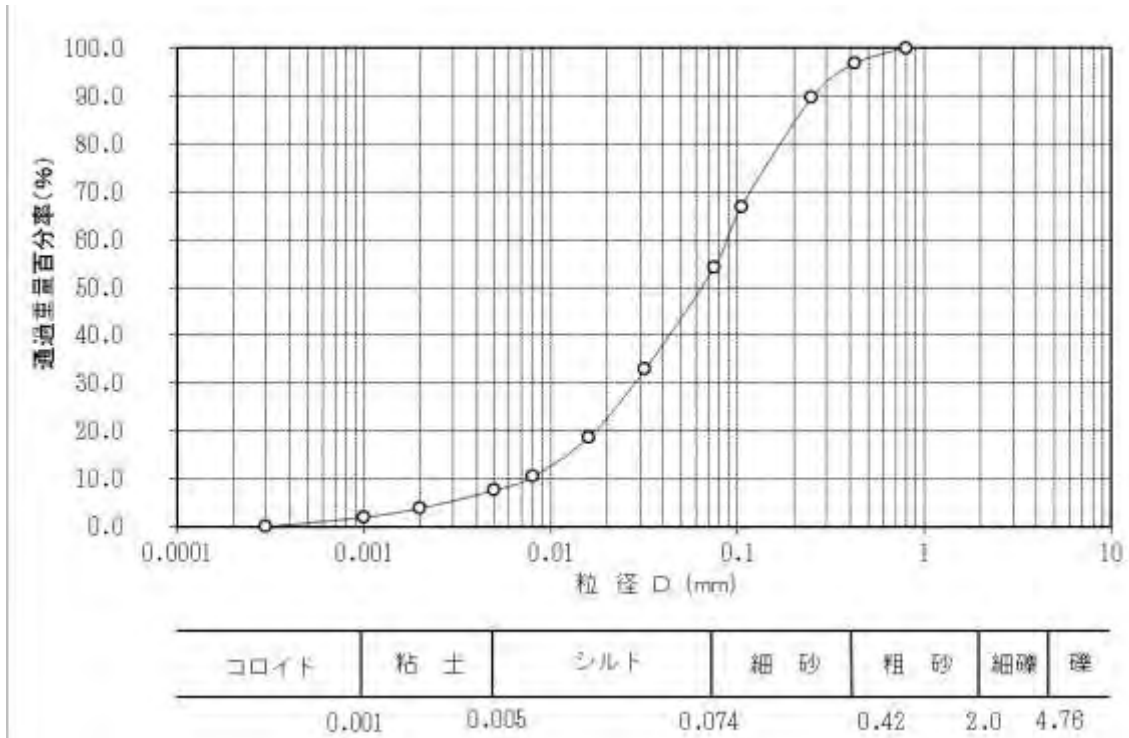
分析項目	単位	2011/11/14	2012/2/13	2012/5/23	2012/9/5
TOC(NC計)	%・dry	2.41	2.55	1.69	2.11
TC(NC計)	%・dry	2.56	2.45	1.86	2.16
TN(NC計)	mg/kg・dry	2600	2710	1980	2390
T-P	mg/kg・dry	1600	1400	1500	1600
COD	mg/g・dry	41	41.9	29.0	31.1
IL	%・dry	7.1	6.9	6.5	6.9
ORP	mV	-52	-69	-101	-122
水分率	%	62.4	61.1	55.7	59.9
固形分率(100-水分率)	%	37.6	38.9	44.3	40.1

浜沖で高く、CODやT-Pは約20倍もの高い値を示しており、長浜沖ではORPも年間を通じてマイナスの値を示しており底泥は嫌気的な状態にあることが示唆された。

また、水分率も長浜沖ではおよそ60%で愛知川沖の2倍程度の値となっていた。そこで、2011年11月14日の愛知川沖底質の粒径分布図((2)-7)をみると、細砂成分が最も多く全体の90%以上を占めていた。一方、長浜沖の底質(図(2)-8)は、細砂成分が全体の43%でこれより細かいシルト分が47%を占めており、長浜沖の底質は粒径が細かい成分であることが分かった。このように、底質は自然的湖岸の愛知川沖の底泥と人工的湖岸の長浜沖の底泥では大きな違いを確認した。



図(2)-7 愛知川沖底質調査結果(2011年11月14日採泥)



図(2)-8 長浜沖底質調査結果(2011年11月14日採泥)

(3) 回帰試験結果

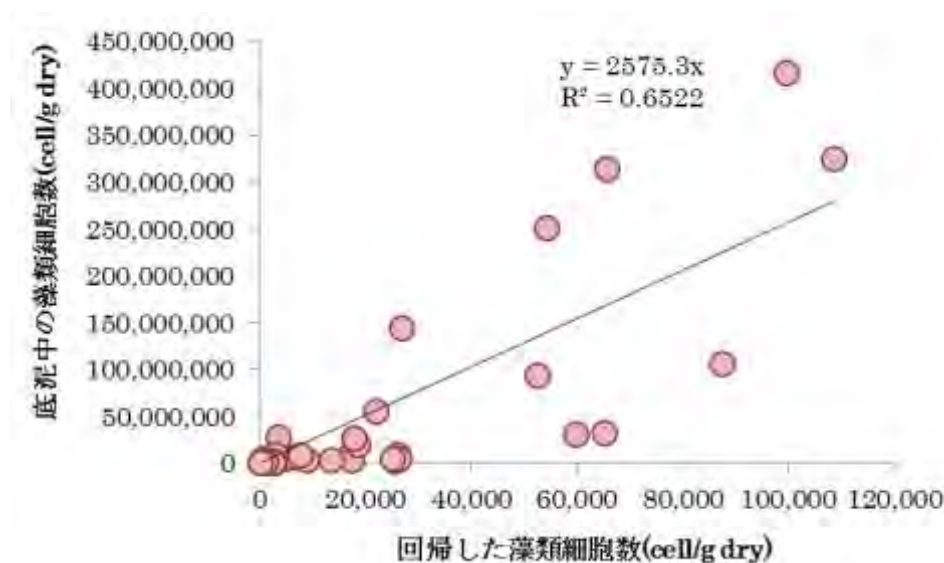
底質調査を実施した、2011年11月14日（秋）、2012年2月13日（冬）、2012年5月23日（春）、2012年9月5日（夏）の底泥を用いて回帰試験を実施した結果を図(2)-9に示した。

回帰試験による回帰細胞数は、すべての季節を通じて愛知川沖より長浜沖で3倍～10倍多く、底泥中のシード数は10倍程度も多かった。回帰する藻類は、嫌気静置条件では調査地点にかかわらず藍藻が最も多かった。さらに、底泥中の藻類の内長浜沖では藍藻細胞が最も多かった。次に季節ごとにみると、回帰細胞数が最も多かったのは11月で続いて2月となった。しかし、底泥中の藻類細胞数が最も多かったのは9月であり、回帰細胞数とは異なる結果となった。これは、藻類のシードの中には回帰の条件として冬を越すこと（低温暴露）が必要な種があり、本試験では底泥採取後すみやかに、回帰試験を行っているためと考えられた。



図(2)-9 調査地点における藻類回帰細胞数

また、底泥中の藻類細胞数と回帰試験により回帰した藻類細胞数との関係を図(2)-10に示した。底泥中の藻類細胞数が多いほど回帰する藻類細胞数が多い比例関係にあった。相関係数は $r=0.82(p<0.05)$ と強い相関関係にあることが分かった。



図(2)-10 底泥中の藻類細胞数と回帰した藻類細胞数の相関

(4) 2年間の嫌気暴露底質によるシードバンク機能劣化評価

藻類シードの嫌气的状況下における保存状況をみるため、2012年2月13日に採泥を行った底泥を用いて、好気保存と嫌気保存を行い、6ヶ月、1年、1年6ヶ月、2年保存を行い保存される藻類シード量の変化を見た。結果は図(2)-11に示したとおりで、愛知川沖と長浜沖ともに藍藻が最も多く観察された。

藍藻の保存状況をみると、好気保存では6か月後に半減するのに対して、嫌気保存では、愛知川沖、長浜沖ともに約80%が保存されていた。さらに、2年後の結果をみると、好気保存では、約20%しか保存されていないが、嫌気保存では約50%以上も保存されていた。一方緑藻でみると、長浜沖では好気保存において約20%が保存されていたが嫌気保存では約5%しか保存されていなかった。

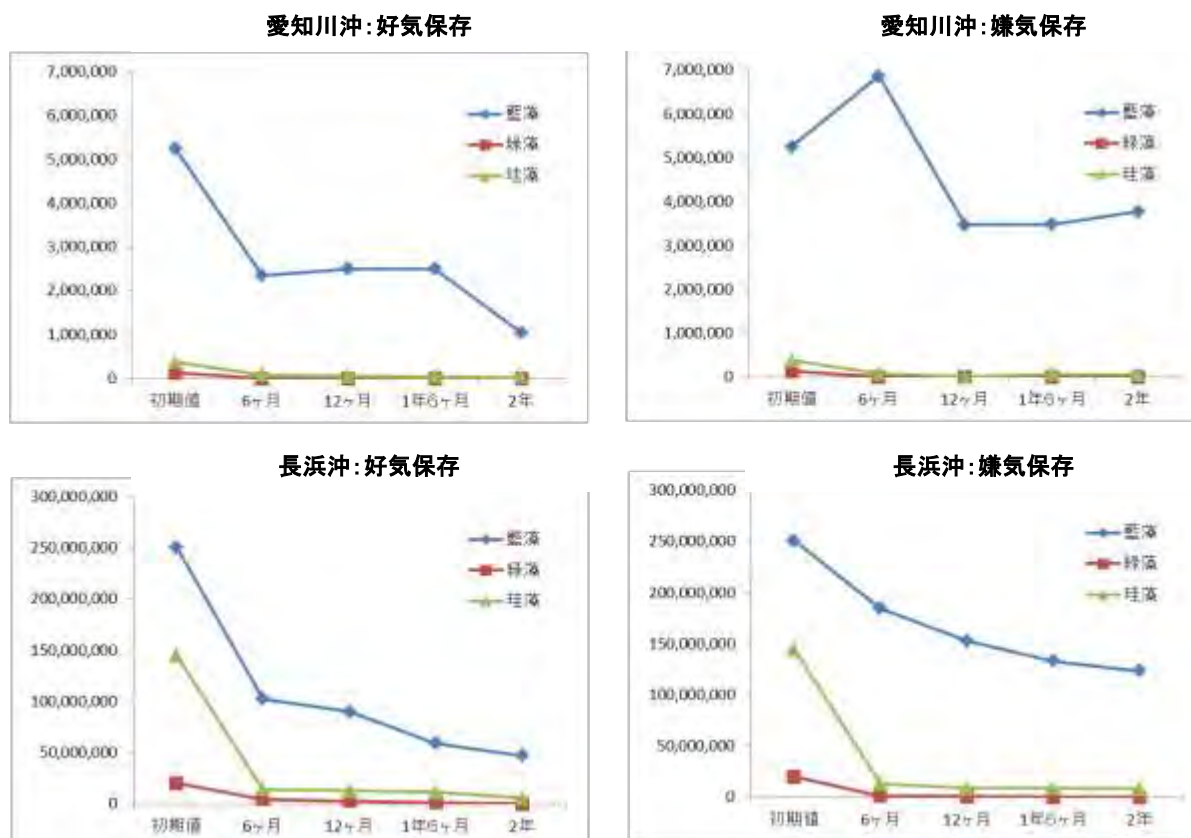
また、保存した底泥を用いて行った回帰試験結果でも、回帰した藻類は藍藻が最も多く、2年後においても回帰する藻類種は愛知川沖と長浜沖ともに藍藻のみであった。

この結果から、藍藻は嫌気保存で保存されやすく、しかも2年間の長期的な保存にも耐えることができ、緑藻は好気保存で保存されやすく、長期的には保存されにくいことが示唆された。

(5) シードバンク機能維持必須DO量の定量的評価

藻類シードの保存状況に直上水の溶存酸素濃度がどのようなかわりがあるのか明らかとするため、底泥を保存した直上水のDOを変えて保存を行いシードの保存状況を調べた。2012年9月5日に採泥を行った底泥を用いて、藻類シード量の変化を見た。愛知川沖の結果を図(2)-12に、長浜沖の結果を図(2)-13に示した。底泥直上水のDOは、好気保存(DO: 10.6mg/L)、微好気保存①(DO: 7.7mg/L)、微好気保存②(DO: 4.6mg/L)、嫌気保存(DO: 0.7mg/L)であった。

1年6ヶ月保存後の藻類シード数の変化を、6ヶ月、1年の経時変化と併せ図(2)-11,12,13)に示した。好気保存と微好気保存①では、6ヶ月後の藍藻の細胞数が、約半数以下にまで減少するのに対し、微好気保存②と嫌気保存では、約7割が保存されていた。さらに、1年6ヶ月になると、好気保存と微好気保存①では、約20%以下にまで減少するが、微好気保存②と嫌気保存では、50%以上が保存されていた。



図(2)-11 2年間の嫌気暴露底質によるシードバンク機能劣化評価(上:愛知川沖、下:長浜沖)

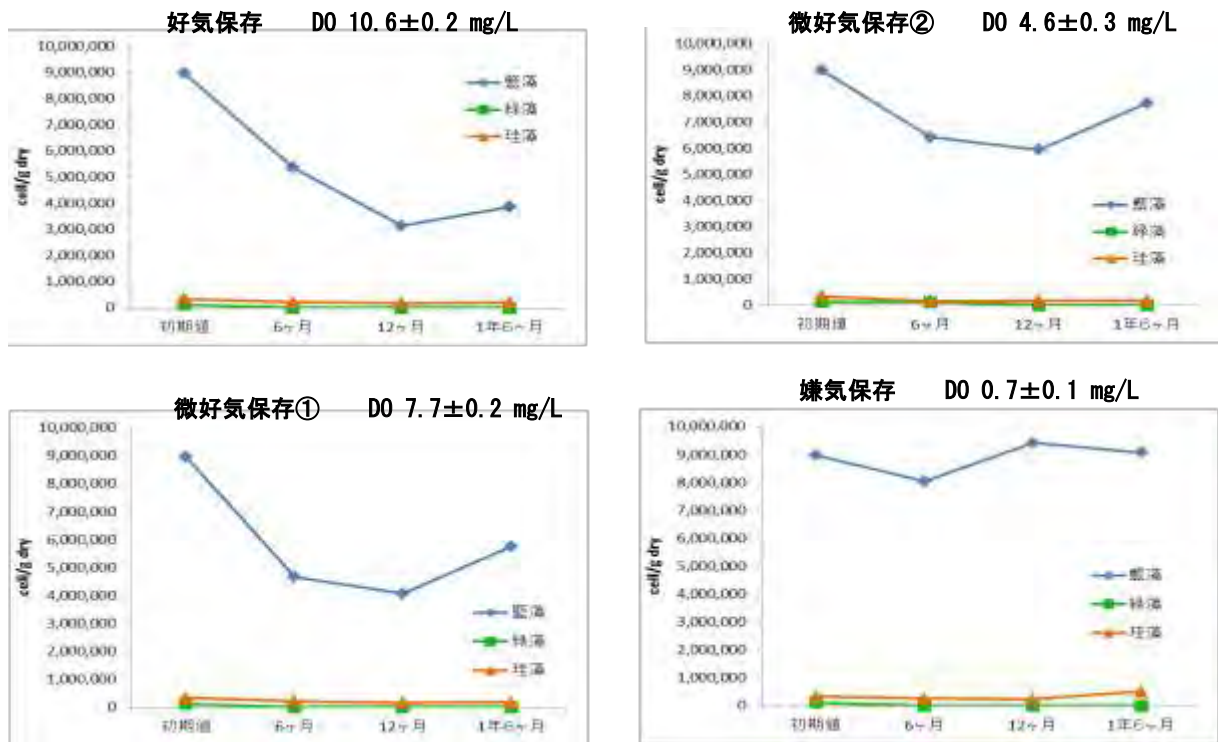
また、珪藻においても細胞数は少ないものの、ほぼ藍藻と同様な結果が得られた。一方で緑藻は、好気保存で6ヶ月後に50%以上が保存されていたが、微好気保存①②と嫌気保存では20%以下しか保存されていなかった。底泥を水封した直上水のDOが低いほど藍藻≒珪藻>緑藻の順に保存率が高かった。

次に、回帰試験結果(図(2)-14)を見ると、好気攪拌条件による回帰試験結果では、藍藻の回帰細胞数が最も多かったのは、微好気保存②で1年後および1年6ヶ月後の両方で高い回帰率となった。さらに、嫌気静置条件で見ても、微好気保存②で6ヶ月、1年、1年6ヶ月で最も藍藻の回帰細胞数が多かった。

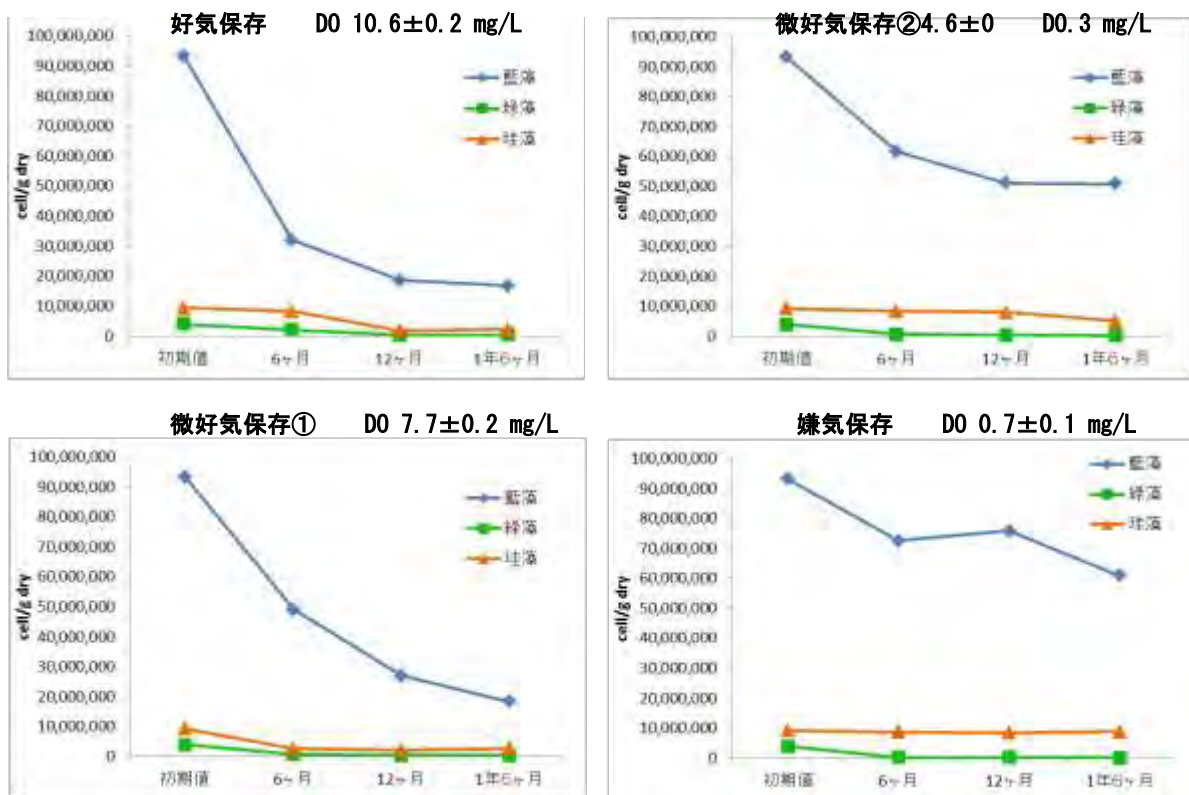
以上の結果から、藍藻は、嫌気状態で保存されやすく1年~2年の長期的な保存にも適応できることがわかった。特に微好気的な条件(DO:4.6mg/L)では、保存された藍藻シードが最も多く回帰することがわかった。

アオコが発生する湖辺域における、底質の低酸素化が藻類のシード数および藻類の回帰におよぼす影響は大きいと考えられた。

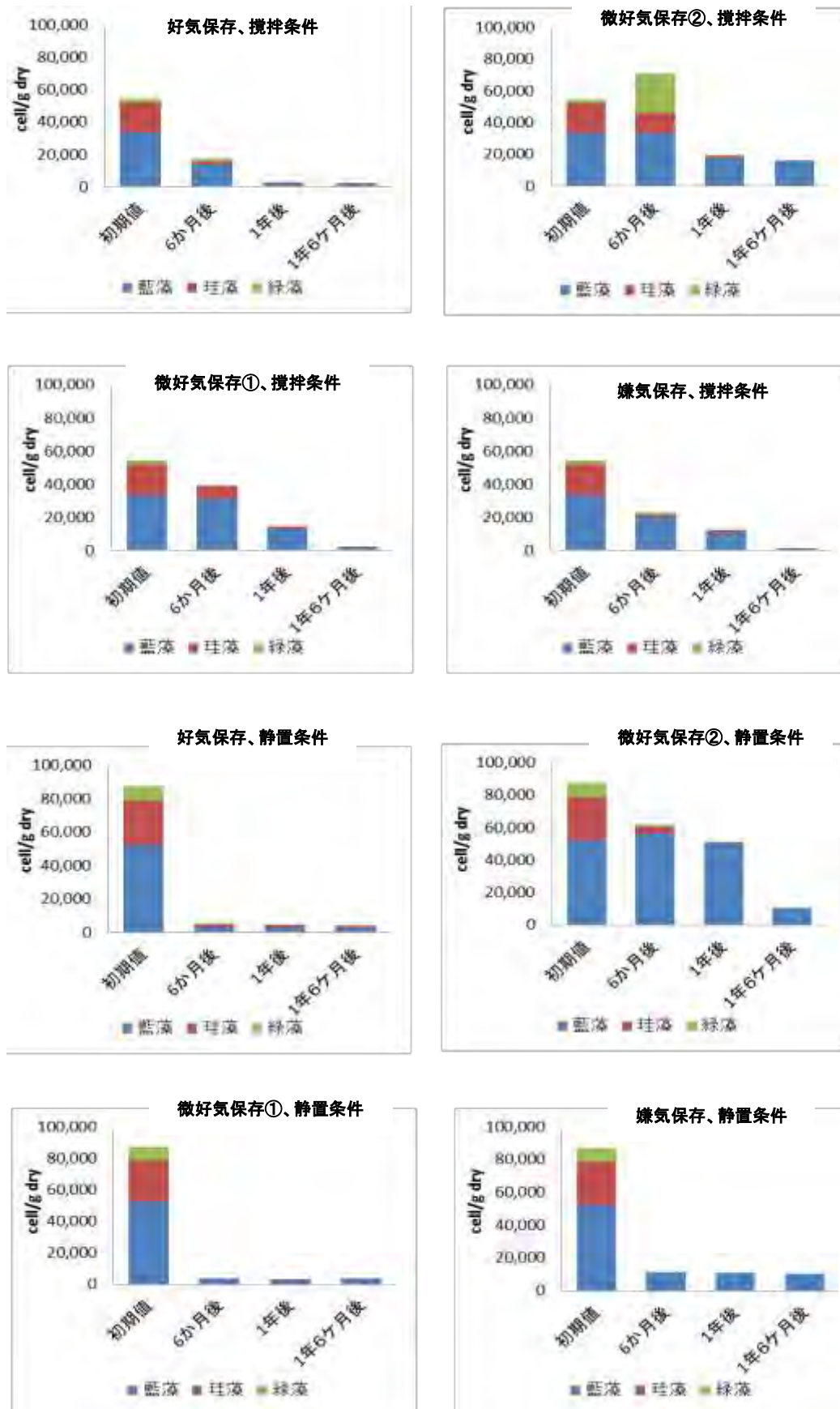
なお、本サブテーマにより得られた結果は、サブテーマ6総合解析「沿岸帯プランクトン量予測モデルの構築とシナリオ計算」に用いられた。



図(2)-12 愛知川沖底泥における保存直上水の DO 別および底泥中の藻類細胞数



図(2)-13 長浜沖底泥における保存直上水の DO 別および底泥中の藻類細胞数

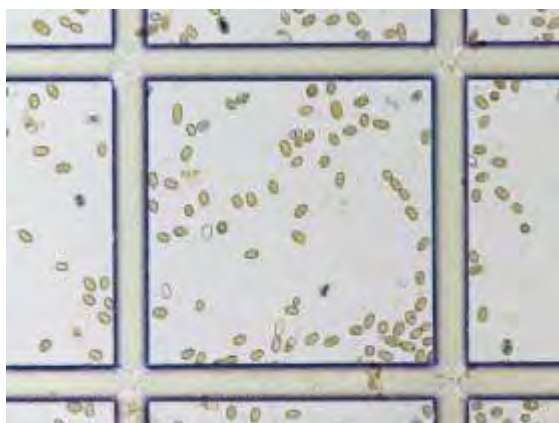


図(2)-14 長浜沖底質による好気保存、微好気保存①②、嫌気保存の藻類シードの回帰

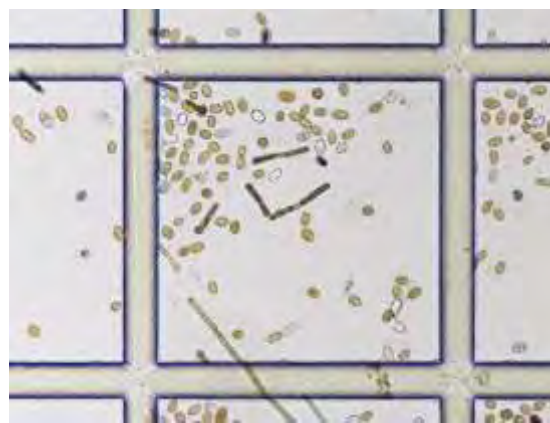
(6) 藍藻の休眠細胞の発芽実験

琵琶湖では流れの少ない人工的湖岸において、藍藻によるアオコ現象を認めることが多い、このため、自然的湖岸の底泥と人工的湖岸の底泥を用いての休眠細胞の保存により、その発芽率の変化を求めるため、本実験を実施し、培地を用いた発芽率を求め保存底泥を評価するための基礎実験とした。

藍藻に属するアナベナの休眠細胞の発生培地について2種類の培地で検討した結果、有機物量の多いCT培地と少ないM11培地では、トリコーム細胞はどちらも増殖するが、CT培地が多くの休眠細胞を形成したのに対し、M11培地では、CT培地の2割程度しか休眠細胞が形成されなかった。これはトリコーム細胞の増殖に必須となる物質と休眠細胞形成に必須となる物質が異なる可能性を示唆していると考えられた。図(2)-15、図(2)-16、に発芽実験前後の同じ箇所の休眠細胞の様子を示す。



アナベナ休眠細胞の発芽前
糸状体が全く認められない。

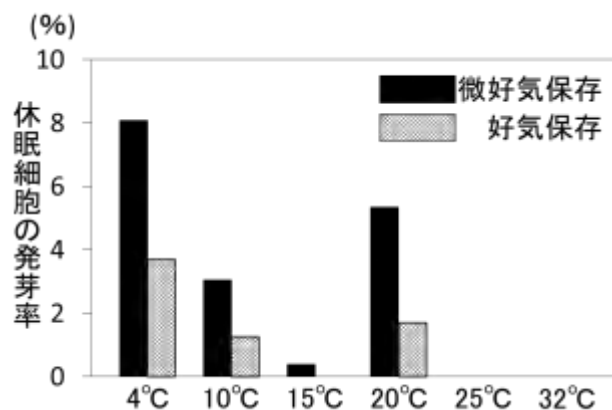


アナベナ休眠細胞の発芽後
糸状体の形成が認められる。

図(2)-15 アナベナアキネートの発芽実験前後の休眠細胞の様子



図(2)-16 アナベナのアクィネート
(矢印は発芽後のアクィネート)



図(2)-17 アナベナアキネートの保存条件の
違いによる発芽率(%)

発芽前は、*Anabaena macrospora* の休眠細胞のみが確認できるが、1週間後には、発芽した休眠細胞の透明な外殻とともに、糸状体の *Anabaena macrospora* の栄養細胞が確認できた。図(2)-17にCT培地で形

成させた休眠細胞の発芽率を示した。20℃の保存条件を除くと、保存水温が高い程、発芽率が低下する傾向が確認でき、特に 25℃、32℃の保存条件では、発芽が確認されなかった。また、同じ保存水温であっても、微好気条件で保存した休眠細胞が、好気条件で保存した休眠細胞の発芽率を 2 倍以上も上回った結果が得られた。以上の結果から、培地の違いによって休眠細胞形成量に大きな差が出ることで、同じ条件で形成された休眠細胞でも、保存条件の違いによって発芽率に大きな差が生じることが明らかとなった。

5. 本研究開発により得られた成果

(1) 科学的意義

1) これまで底泥から回帰する植物プランクトンの研究は、ある特定の種類のみについて行われており、回帰する植物プランクトン種全てについての研究は行われてこなかった。このため、緑藻、藍藻、珪藻等綱別の回帰数を求めることで、植物プランクトンのシードバンク機能として底泥を評価する新しい手法となる。

2) 底泥中の藻類シード量を直接顕微鏡で観察を行った結果、シルト分が多く、水分率の高い底質で保存され、砂質分の多い底質では、藻類シード量が少ないことが明らかとなった。この手法により、底泥の評価に活用できる。

3) サブテーマ 2 では、湖岸底泥から回帰してくる緑藻や藍藻、珪藻等の綱別の回帰数を求めることで、植物プランクトンのシードバンク機能として底泥を評価する新しい手法が確立できた。また、底泥の評価法として、2年間の嫌気暴露底質によるシードバンク機能劣化評価を行うため 2年間嫌気条件に暴露させ、好气的条件で保存した底泥との比較実験を行うことで、嫌気化が藻類の回帰に与える影響についての評価が可能となった。

4) サブテーマ 2 では、採取した底泥を用い、シードバンク機能維持必須 DO 量の定量的評価として底泥保存直上水の DO を変えることで、微好気条件保存し底泥の比較実験を行った。この結果、底層部の貧酸素化が藻類の回帰に与える影響について評価を行い、微好気的な条件下で保存された底泥から藍藻が回帰し易いことが明らかとなり、沿岸帯の機能を考える上で重要な知見となった。

5) 微好気条件で保存した *Anabaena macrospora* の休眠細胞が、好気条件で保存した休眠細胞の発芽率を 2 倍以上も上回った結果が得られたことから、これを用いた底泥の評価が可能となる。

(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>

サブテーマ 2 の研究成果により、琵琶湖北湖における自然的湖岸と人工的湖岸の底質の持つ藻類シードバンク機能の違いと、底層部の嫌気化が藍藻シードの保存に繋がることを明らかとしたことから、琵琶湖南湖の自然的湖岸と人工的湖岸の底質について、平成 26 年～28 年にかけて実態調査を行うこととなった。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

矢島悠一、野村宗弘、一瀬諭、鈴木有咲海、西村修(2013) 「*Anabaena*休眠細胞の大量形成・回収および発芽評価方法」日本水処理生物学会誌 49 (3) 103-108 2013

<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) 古田世子, 池田将平, 藤原直樹, 一瀬諭, 田中仁志, 馬場大哉, 郡司房子, 岸本直之: 日本陸水学会第76回大会(2011)「湖沼底質のプランクトンを対象にしたシードバンク機能について(琵琶湖)」
- 2) 矢島悠一、野村宗弘、中野和典、西村修、一瀬諭: 日本水処理生物学会第48回大会(2011)「*Anabaena*の休眠細胞に関する生理生態学的研究」講演要旨集 P43.
- 3) 古田世子, 池田将平, 藤原直樹, 一瀬諭, 田中仁志, 馬場大哉, 岸本直之, 西村修: 第46回日本水環境学会年会(2012)「琵琶湖沿岸帯における底泥からの植物プランクトンの回帰について」
- 4) 古田世子、廣瀬佳則、藤原直樹、一瀬諭、田中仁志、馬場大哉、郡司房子、岸本直之、西村修: 日本陸水学会第77回大会(2012)「琵琶湖と山の神沼の底質を用いた藻類のシードバンク機能について」
- 5) 古田世子、藤原直樹、一瀬諭、田中仁志、馬場大哉、宮田直幸、岸本直之、西村修: 第39回 環境保全・公害防止研究発表会(2012)「琵琶湖沿岸帯の底泥を用いた藻類の回帰実験結果について」
- 6) 古田世子、藤原直樹、一瀬諭、田中仁志、馬場大哉、宮田直幸、岸本直之、西村修: 日本水処理生物学会第49回大会(2012)「琵琶湖沿岸帯の底質を用いた藻類のシード保存状況について」
- 7) 古田世子、藤原直樹、一瀬諭、馬場大哉、岸本直之、西村修: 第40回 環境保全・公害防止研究発表会(2013) 沿岸帯の機能評価②～琵琶湖沿岸帯における底質と藻類シードバンク機能の関係について～
- 8) 古田世子、藤原直樹、一瀬諭、田中仁志、馬場大哉、宮田直幸、岸本直之、西村修: 第48回日本水環境学会年会(2014) 琵琶湖における沿岸帯の機能評価—底質の保存条件と藻類シードバンク機能について—

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

- 1) 古田世子、廣瀬佳則、藤原直樹、一瀬諭、馬場大哉、岸本直之、西村修: 日本陸水学会第78回大会(2013)「湖沼における沿岸帯の機能評価について(5)-琵琶湖底質を用いた藻類のシードバンク機能について-」

(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

- 1) 矢島悠一, 一瀬 諭, 野村宗弘, 西村 修: 第46回日本水環境学会年会優秀発表賞(クリタ賞)
(2012)「Anabaena の休眠細胞の生理生態学的研究」
- 2) 矢島悠一、野村宗弘、中野和典、西村修、一瀬諭: 日本水処理生物学会第48回大会(2011)「Anabaena の休眠細胞に関する生理生態学的研究」講演要旨集 P43. ベストプレゼンテーション賞

8 引用文献

- 1) 一瀬諭, 池谷仁里, 古田世子, 藤原直樹, 池田将平, 岸本直之, 西村修 (2013) 琵琶湖に棲息する植物プランクトンの総細胞容積および粘質鞘容積の長期変動解析, 日本水処理生物学会誌, 49 (2), 65-74.

(3) 浅い富栄養化池沼の好気、嫌気条件におけるシードバンクのポテンシャルの把握

埼玉県環境科学国際センター

田中仁志

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター

古田世子・廣瀬佳則・藤原直樹・一瀬 諭

東レテクノ（株）

馬場大哉

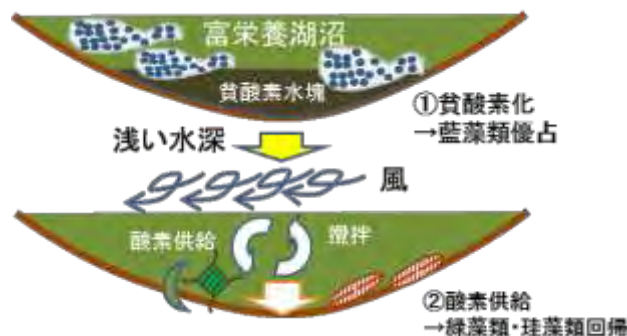
平成23～25年度累計予算額：5,200千円

（うち、平成25年度予算額：1,600千円）

予算額は、間接経費を含む。

【要旨】 沿岸帯は植物プランクトン（藻類）の供給源として機能し、そこから供給され、増殖した藻類は湖沼水質に大きな影響を及ぼすと考えられる。一方、湖沼の新たな環境問題として懸念される、富栄養化に伴う底層の溶存酸素低下や泥質化は、底質中に保存される藻類に悪影響を及ぼす可能性がある。本サブテーマでは、富栄養化が進行した湖沼のモデルとして埼玉県蓮田市山ノ神沼を用いて、今後の湖沼水質保全やプランクトン生態系機能の維持を考慮した底質環境のあり方や適切な底質環境を創造する手段についての提言を行うために実施した。まず、山ノ神沼において底層環境の調査を行った。その結果、山ノ神沼底質の炭素含有量(TC)及び酸化還元電位(ORP)を琵琶湖で有機化が進行しているとされる長浜沖底質と比較したところ、TCはそれぞれ6.8%・dry及び1.8%・dryであるのに対して、ORPはどちらも平均約90mVと同程度であることが明らかとなった。また、山ノ神沼の底層では夏季及び冬季に関わりなく、一時的に貧酸素状態になっている実態が明らかとなった。従って、山ノ神沼底層は、夏季は透明度の低下による酸素消費の卓越が理由に挙げられるが、透明度が改善する冬季においてもDO低下が見られたことから、すでに潜在的貧酸素環境にあるものの、水深の浅いことが幸いし、風によるかく乱等により底層の貧酸素化が解消されやすいものと考察された(図(3)-1)。

次に、山ノ神沼から底泥を採取し、密閉容器を用いて酸素(好気、嫌気)条件及び暴露時間等をパラメータとした藻類回帰実験を行った。その結果、約2年間貧酸素状態で保存した底質からも光合成活性を有する状態で藻類が保存されることを確認した。また、貧酸素(DO 0mg/L)状態で100日間保存した底質からは藍藻が優占して観察された一方、好気(同 >6mg/L)状態で保存した底質からは緑藻、珪藻及び藍藻が観察できた。なお、微好気(同 2~3mg/L)状態で保存した底質から珪藻が最も多く観察された。これらのことから、貧酸素状態は藍藻の優占化を引き起こす恐れがあるため、微好気の状態が最低限維持されることが望ましいと考察され、山ノ神沼の底質は、浅いことが幸いし、少なくとも微好気環境で維持されていると推察された(図(3)-1)。



図(3)-1 浅い富栄養湖沼における底層貧酸素状態の解消と底質の藻類シードバンク機能の維持イメージ図

【キーワード】

富栄養湖沼、貧酸素、藻類回帰条件、浅い水深

1. はじめに

近年、海域や湖沼等の新たな閉鎖性水域の問題として、底層水の貧酸素化による水圏生態系への影響が懸念されている^{1,2)}。底質の有機物量増加に伴う酸素消費量の増加が一因と考えられるが、琵琶湖を始めとする湖沼では、温暖化による湖水循環が減少することにより、底層の貧酸素化が懸念されている^{2,3)}。一方、琵琶湖では1989年以降、総細胞容積量で評価した植物プランクトン優占種の変遷は珪藻や緑藻が優占する藻類相に加え、渦鞭毛藻や褐色鞭毛藻、藍藻などが優占する藻類相へと移行していく傾向が認められた。さらに増加した種の中には寒天質状物質の粘質鞘を有しているものが増えてきたことが、COD成分の増加が環境基準の達成を困難にしている原因となっている可能性が指摘されている⁴⁾。一方、このような湖沼における藻類相変化と、底層の貧酸素化との関連性は明らかになっていない。仮説として、湖沼底層の貧酸素状態が顕在化した場合において、底質の重要な機能の一つとして考えられる植物プランクトン（藻類）のシードバンク機能に影響を及ぼしている可能性がある。本研究では底質の有機化が進行したモデル湖沼として、埼玉県蓮田市にある山ノ神沼（面積約3ha）に着目した。山ノ神沼は夏季にはアオコが毎年発生しているが、緑藻や珪藻も優占種となる浅い富栄養湖沼（最深部水深約2m）であり、そこで得られた知見は琵琶湖沿岸帯の更なる有機化や全国で見られる富栄養化が問題となっているため池等の適用を想定している。

2. 研究開発目的

本研究は、湖沼における沖帯への藻類種の供給源としての沿岸帯の評価を行い、今後の湖沼水質保全やプランクトン生態系機能の維持を考慮した底質環境のあり方や適切な底質環境を創造する手段についての提言を行うことを目的として実施した。まず富栄養湖沼である山ノ神沼の溶存酸素量等水質及び藻類組成の季節変化を予備的に把握し、採取した底泥を用いて酸素量制御化での藻類回帰実験系確立のために予備検討を行った。次に山ノ神沼の水質及び藻類組成の季節変動調査、予備検討条件による藻類回帰実験、並びに貧酸素1年間暴露底質によるシードバンク機能劣化評価を行った。さらに貧酸素2年間暴露底質によるシードバンク機能劣化評価、山ノ神沼及び琵琶湖底質回帰試験結果の総合解析による底質のシードバンク機能維持必須DO量の定量的評価を行った。

3. 研究開発方法

(1) 浅い富栄養池沼山ノ神沼の季節的水質及び藻類組成変化の予備的把握

水試料は、ベイラーサンプラーを用いて水面から底質面直上10cmまで水柱状に採水した全層沼水及び底質面直上10cmの位置で採水した底層沼水の2種類である。それぞれChl-a、COD、全窒素（T-N）、全りん（T-P）、藻類等を測定した。調査は平成23年6月から平成24年1月まで1回/月の頻度で行った。藻類の同定は埼玉県環境科学国際センターが、化学分析は東レテクノ株式会社が担当した。現場底層水の連続モニタリング調査はpHや溶存酸素量（DO）等を同時測定及びデータの連続記録が可能な多項目水質計を用いて行った。MS5センサー一部が底質面直上10cmに位置するように固定設置して、山ノ神沼における底層DOの日周及び季節変動を把握した。気象情報は山ノ神沼に最も近い距離に位置する気象庁測定所の観測データから、日照時間は熊谷地方気象台測定局、降水量及び風速は久喜地域気象観測所を利用した。

(2) 山ノ神沼の底泥を用いた酸素濃度、水温及び光をパラメータとする藻類回帰実験系確立のための予備実験

予備実験に用いた底質は、平成 23 年 6 月に山ノ神沼から採取してよく混ぜた後、ビニール袋に密閉し、4℃暗所で保存しておいたものを用いた。浄水器で処理した脱塩素水道水 3L を満たした 2 個の 3L トールビーカーに底質を等量加え、水とよく攪拌してから一時間以上静置して、底質を沈降させた後実験を開始した（図(3)-1）。光条件は、タイマー運転した蛍光灯照明（約 4,500lux）による 12h/12h 周期明暗条件又はアルミホイルを用いて完全遮光した連続暗条件の 2 条件を設定した（図(3)-2）。温度条件は同一とし、各ビーカー内の水温、pH 及び DO は 20 分おきに多項目水質計（ハイドロラボ社製 MS5）を用いて連続記録した。実験開始時から定期的に回帰した藻類を生物顕微鏡により観察した。

（3）山ノ神沼の水質及び藻類組成の季節変動調査

山ノ神沼の沼心において水質モニタリングを行ない、実施回数は 1 地点×6 回（平成 24 年 5 月から平成 25 年 1 月まで）、分析項目は Chl-a、COD、全窒素（T-N）、全りん（T-P）、藻類である。

（4）予備検討条件による藻類回帰実験、貧酸素 1 年間暴露底質によるシードバンク機能劣化評価

予備検討条件を踏まえ、光条件が藻類の底質中からの回帰に及ぼす影響を評価した。光条件は、タイマー運転した蛍光灯照明（1,000lux [約 15 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$]、2,500lux [約 47 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$]) による 12h/12h 周期明暗条件（以下、明暗条件）又はアルミホイルを用いて完全遮光した連続暗条件（以下、暗条件）の 3 条件を設定した。採泥後、貧酸素状態で 1 年を経過した底泥を用いてシードバンク評価を行った。実験に用いた底質は、平成 23 年 10 月に山ノ神沼から採取した底質（表層 1cm）をよく混ぜた後、ビニール袋に密閉し、4℃暗所で 1 年間保存しておいたものを用いた。浄水器（National 製 PJ-40MRF）で処理した脱塩素水道水 800ml を満たした 1L トールビーカーに底質を 80ml（湿重量約 90g）加え、水とよく攪拌してから一時間以上静置して易沈降性底質を沈降させた後、実験を開始した。

（5）貧酸素 2 年間暴露底質によるシードバンク機能劣化の評価

底質のシードバンク機能の評価は、昨年度までに開発した藻類の光合成活性を指標とする方法を用いた（図(3)-2）。本方法は藻類が光合成活性を有している場合には、照明下において藻類による炭酸同化作用（光合成）が行われ、DO 及び水素イオン濃度(pH)は上昇することを原理としている。実験に用いた底質は、採泥器で採取した底質ケーキの表層 1 cm までの部分を削り取ってよく混ぜた後、ビニール袋に密閉し、4℃暗所で保存しておいたものを用いた。底質を採泥した地点の湖沼水 800ml（0.45 μm のメンブレンフィルターでろ過）を 1L トールビーカーに満たし、試料の底質 80ml を加え、水とよく攪拌してから一時間以上静置して砂などの易沈降性の懸濁物質を沈降させた後、実験を開始した。光条件はタイマー運転した蛍光灯照明（2,500lux [約 47 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$]) による 12hr/12hr 周期明



図(3)-1 底質を投入して攪拌直後の様子



図(3)-2 本研究で開発した底質中の藻類シードの光合成活性評価システム

暗条件（以下、明暗条件）およびアルミホイルを用いて完全遮光した連続暗条件（以下、暗条件）で行った。温度条件は同一とし、各ビーカー内の水温、pH及びDOは多項目水質計（ハイドロラボ社製MS5）を用いて20分間隔で連続記録した。藻類の光合成活性評価実験条件設定は表(3)-1に示した。水中に回帰した藻類は生物顕微鏡により観察した。

表(3)-1 藻類の光合成活性評価実験条件

環境因子	実験条件設定
攪拌の有無	底質投入後よく攪拌、静置
溶存酸素量	未調整
温度	室温(20~25℃)
光	12hr明/12h暗、24h暗
照度(lux)	0、2,500
底質保存条件	暗所4℃、最長2年
底質量(ml)	80ml(比重1.1)
試験水	ろ過湖沼水
水質測定	多項目水質計 (ハイドロラボ社製MS5)

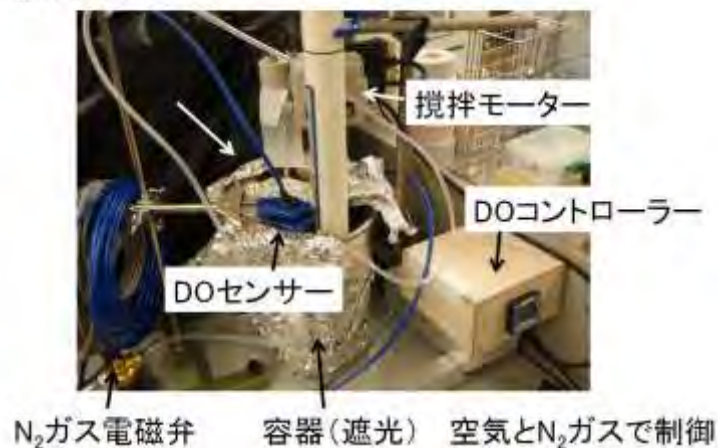
(6) 山ノ神沼及び琵琶湖底質回帰試験結果の総合解析によるシードバンク機能維持必須DO量の定量的評価

室温（空調設定温度21℃）において山ノ神沼底質を用いてDO濃度を0、2~3、>6mg/Lの3段階に設定して100日以上保存した底質を用いてシードバンク機能を評価した。

DO 0mg/Lの状態は、密閉容器に脱酸素剤エージレス（三菱ガス化学製）とともに保存することで作り出した。DO 2-3mg/Lの保存は、DO電極を用いてDO2-3mg/Lの範囲を逸脱すると自動で窒素ガス(N₂ガス)または空気が吹き込まれるリアルタイム制御システムを用いて行った（図(3)-3）。

DO >6mg/Lの保存は、常時空気を吹き込み、最低DOを6mg/Lとして実施した。

エアポンプ

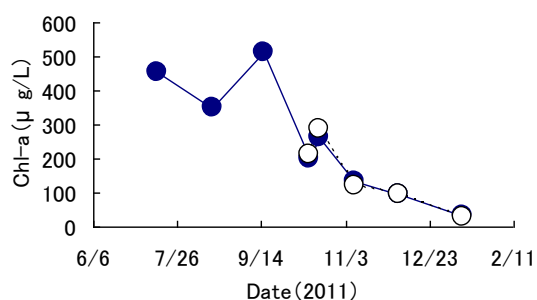


図(3)-3 本研究で用いたリアルタイム溶存酸素量制御システム

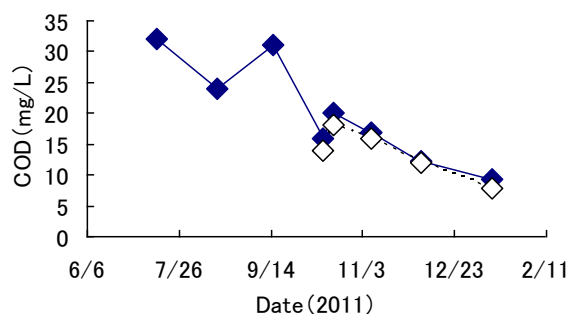
4. 結果及び考察

(1) 浅い富栄養池沼山ノ神沼の季節的水質及び藻類組成変化の予備的把握

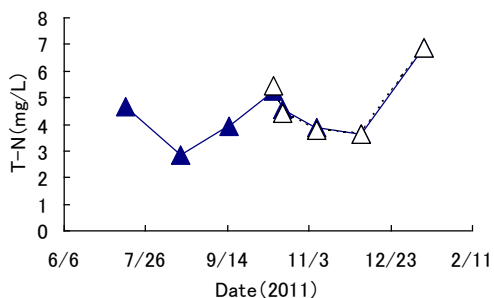
山ノ神沼の全層水及び底層水の水質分析結果を図(3)-4～図(3)-9に示した。各項目ともに夏季に高く冬季に低くなる傾向が認められ、平均値は Chl-a=170 μ g/L、COD=16mg/L、T-N=4.3mg/L、T-P=0.28mg/Lであった。また、COD、T-N、T-PはChl-aの推移によく追従していることから、藻類が水質形成に大きく寄与していることが分かった。SSはChl-aと同様に推移したが秋頃まで底層の方が高い値を示し、底質の巻き上げなどでChl-aを含まない懸濁物質が多く存在していたと推察された。さらに、COD中のD-CODの割合は7月～12月は3～4割、1～2月は6～8割となり、冬季は溶存態有機物の存在割合が大きいことが明らかになった。



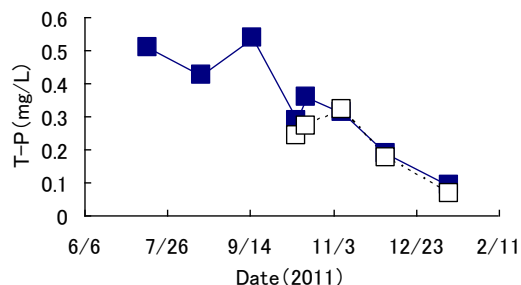
図(3)-4 本研究で行った山ノ神沼調査結果
(Chl-a) 白抜き：全層水、塗り潰し：底層水



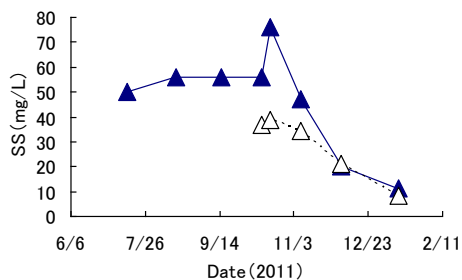
図(3)-5 本研究で行った山ノ神沼調査結果
(COD) 白抜き：全層水、塗り潰し：底層水



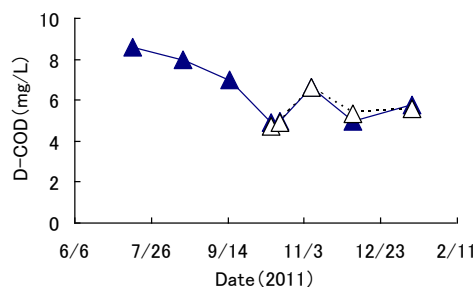
図(3)-6 本研究で行った山ノ神沼調査結果
(T-N) 白抜き：全層水、塗り潰し：底層水



図(3)-7 本研究で行った山ノ神沼調査結果
(T-P) 白抜き：全層水、塗り潰し：底層水



図(3)-8 本研究で行った山ノ神沼調査結果
(SS) 白抜き：全層水、塗り潰し：底層水



図(3)-9 本研究で行った山ノ神沼調査結果
(D-COD) 白抜き：全層水、塗り潰し：底層水

藻類調査の結果、山ノ神沼では夏季には *Microcystis* 属を主とするアオコ(藍藻)が発生する(図(3)-10)。一方、冬期の藻類相は *Nitzschia acicularis* (3.7×10^3 cells/ml) を始めとする珪藻が優占する(図(3)-11)。また、冬季は底層において藻類が多く計数されたことから、底層に沈降した状態で越冬していることが示唆された。したがって、冬季に観察されない *Microcystis* 属についても底泥中で冬を越す機能を有すると推察された。



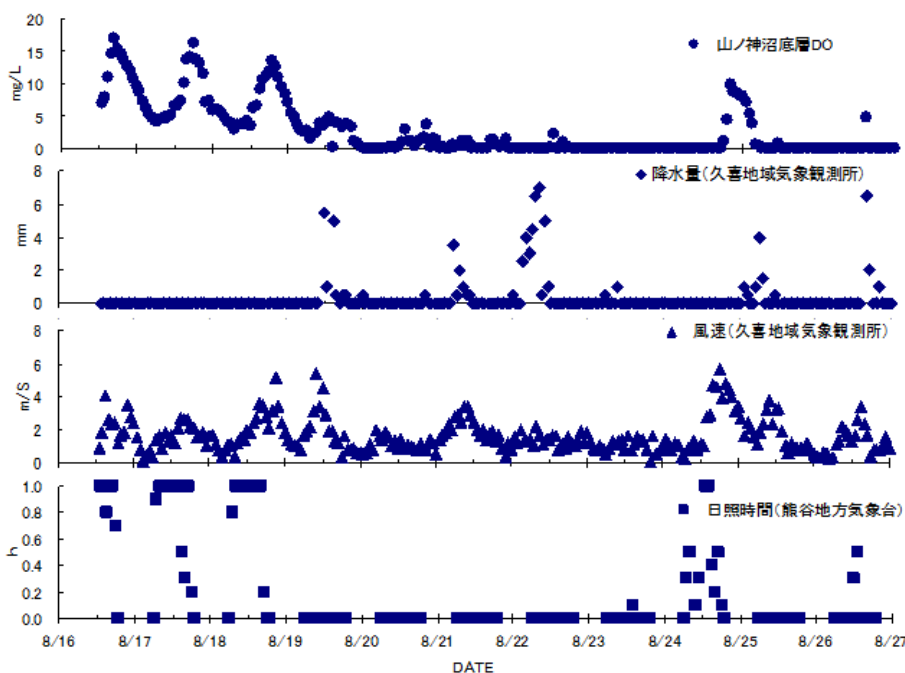
図(3)-10 山ノ神沼における藻類の顕微鏡写真(平成23年9月)バーは100 μ m
藍藻類(*Microcystis* 属及び *Anabaena* 属)が優占する。



図(3)-11 山ノ神沼における植物プランクトンの顕微鏡写真(平成24年2月)バーは100 μ m
藍藻類は確認できず *Cyclotella* 属、*Nitzschia* 属など珪藻が優占する。

多項目水質計 MS5 を用いた底質直上 10cm の DO 値(以下、底層)は、夏季(8月16日~26日)に行った調査では、概ね 18 時前後に最大値、7 時前後に最小値を示し、冬季(11月24日~12月3日)に行った調査では、概ね 16 時前後に最大値、5 時前後に最小値となる日周変化を示した(図(3)-12、図(3)-13)。

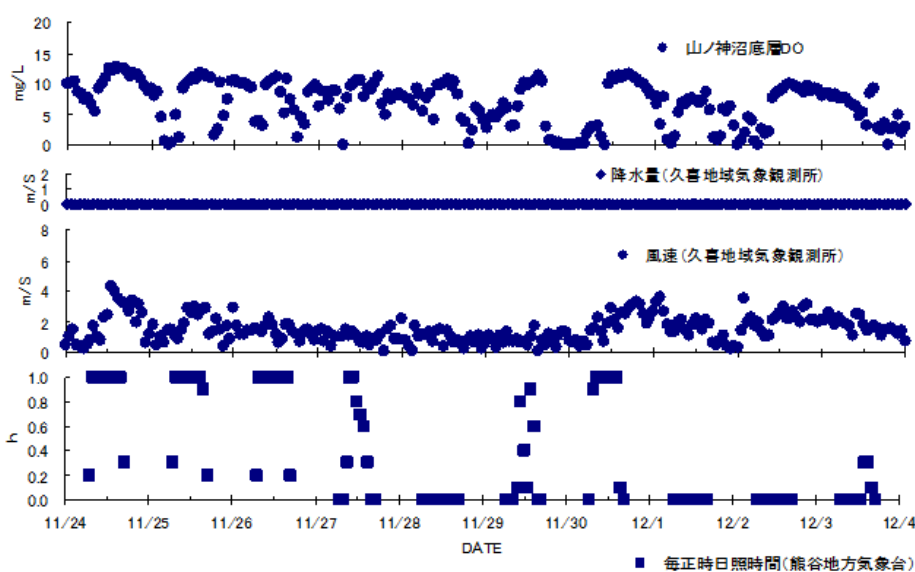
次に、夏季は日射



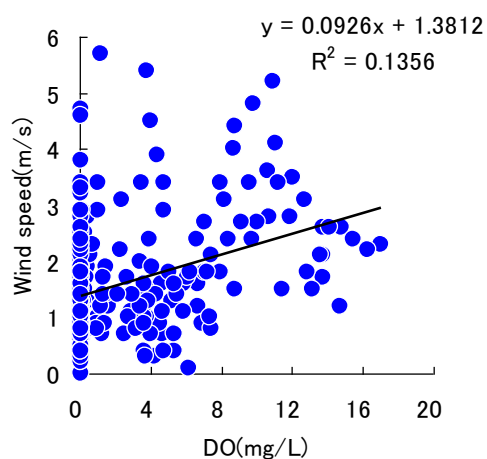
図(3)-12 山ノ神沼における夏季の底層 DO、風速(久喜地域気象観測所)及び日照時間(熊谷地方気象台)の経時変化

時間（気象庁熊谷地方気象台データ）が短い又は全く無い気象条件において、底層の貧酸素（0mg/L）状態が顕在することが本調査により明らかとなった。このことは、藻類の光合成に伴う酸素供給の重要性を示している。気象庁久喜地域気象観測所の風速データと底層 DO の相関をとったところ、両者にはややわずかに正の相関が見られた（図(3)-14、図(3)-15）ことから、風に起因すると考えられるせん断力が沼水を混合することによって、底層の貧酸素状態が解消されていることが考察された。一方、冬季は連続して降水量が 0mm の日が続き、比較的日射時間が確保されていることから光合成が行われやすく、さらには継続的に風が吹いていることから底層に DO が供給され、貧酸素状態が解消されやすい状態にあることが示唆された。

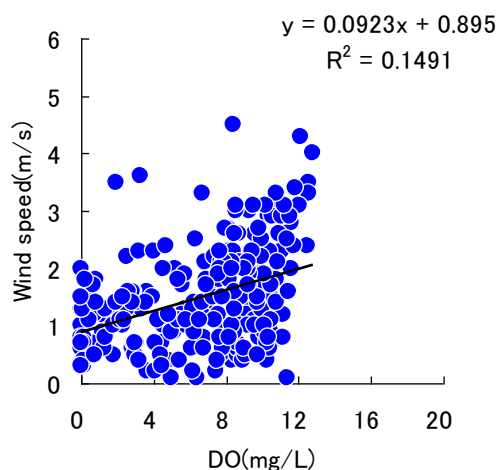
本研究によって、山ノ神沼において夏及び冬季に関わりなく、底層では一時的に貧酸素状態になっている実態が明らかとなり日照の重要性が示された。従って、山ノ神沼底層は、すでに潜在的貧酸素状態になっているものの、水深の浅いことが幸いし、底層の貧酸素化が解消されやすいものと考察された。



図(3)-13 山ノ神沼における冬季の底層 DO、風速(久喜地域気象観測所)及び日照時間(熊谷地方気象台)の経時変化



図(3)-14 山ノ神沼における夏季(8月16日～26日)の底層 DO 及び風速(久喜地域気象観測所データ)との関係



図(3)-15 山ノ神沼における冬季(11月24日～12月3日)の底層 DO 及び風速(久喜地域気象観測所データ)との関係

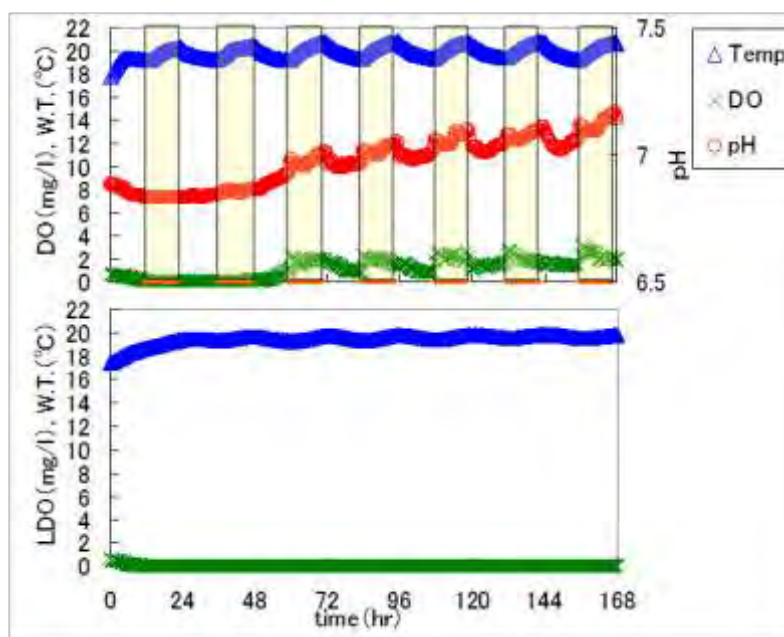
(2) 山ノ神沼の底泥を用いた酸素濃度、水温及び光をパラメータとする藻類回帰実験系確立のための予備実験

山ノ神沼底質を用いたビーカー実験において、水中の貧酸素状態（DO はほぼ 0mg/L）を再現することができた。採泥後 6 ヶ月経過した底質 300ml（湿重量約 330g）、室温（空調設定温度 21℃）における結果を図(3)-16 に示す。連続暗条件では、DO は急激に減少後、34 時間以降は嫌気状態を示すほぼ 0mg/L で推移した。一方、12h/12h 周期明暗条件では、DO は連続暗条件と同様に、急激に減少しほぼ 0mg/L で推移した。その後、50 時間後から上昇傾向を示し、60 時間後には約 2mg/L まで上昇した。明期中に DO と連動して pH が一時的に上昇する特徴が見られた。この現象は底質量 300ml に設定した実験の方が、底質量 30ml のときよりも顕著に見られた。DO 上昇は底質から回帰した藻類の光合成による酸素供給によるものと考察され、底質量に比例して回帰量も増えることが推察された。

次に水中の藻類を蛍光顕微鏡で観察した結果、暗条件よりも明暗条件の実験系の方が蛍光を発する細胞数が多かった。このことから明暗条件における pH 及び DO 上昇は、底質由来の藻類の光合成が寄与したものと考察された。しかし、藍藻（*Merismopedia* sp.や *Phormidium* sp.）の方が、緑藻（*Scenedesmus* sp.）や珪藻（*Navicula* sp.）よりも多く観察され、藍藻類が回帰しやすい環境にあった可能性が示唆された。

本研究から、山ノ神沼底質からの藻類回帰実験の際、貧酸素状態を再現するに当たっては、底質及び水の体積比は底質 1：水 30 より小さくすることが適当と判断された。

さらに光の照射が底質中の藻類の活性化に重要であることから、今後は現場環境を踏まえた光の強度及び照射時間による藻類の活性化への影響確認を行う必要がある。嫌気条件がシードバンク機能へ与える影響については、本年度採集した山ノ神沼底質試料は密封容器を用いて嫌気状態で保存し、1 年間及び 2 年間嫌気に暴露させた後、本章で確立した実験方法により回帰実験を行い、評価する予定である。



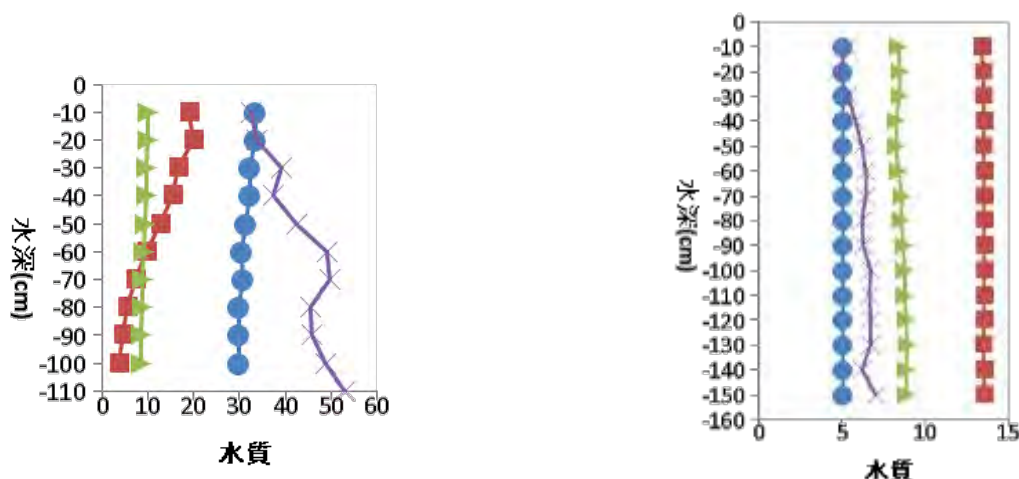
図(3)-16 底質量 300ml/3L のときの藻類回帰予備実験における水質の経時変化
(上：12h/12h 周期明暗条件，下：連続暗条件)

(3) 山ノ神沼の水質及び藻類組成の季節変動調査

山ノ神沼の全層水及び底層水の水質分析結果をみると、各項目の平均値（括弧内は昨年度）は、Chl-a=280 (170) µg/L、COD=27 (16) mg/L、T-N=3.7 (4.3) mg/L、T-P=0.38 (0.28) mg/L であった。

COD [R²=0.56]、T-P [R²=0.77]、SS [R²=0.80] は（角括弧は決定係数）、Chl-a 量との回帰直線によく当てはまることが分かった。また、COD に対する D-COD の割合は、平均で 3 割程度であったことから、藻類が水質形成に大きく寄与していると考えられた。一方、T-N [R²=0.02] は Chl-a 量との回帰直線は当てはまらなかった。夏季には、T-N のうち溶存態で存在する N の割合が大きくなることが原因と考えられた。また、SS は、6～11 月には全層に比べて底層の方が大きい値を示し、底層付近では底質の巻き上げなど懸濁物質が多く存在し、冬季には全混合が行われていたと推察された。藻類調査の結果では、山ノ神沼では夏季には *Microcystis* 属を主とするアオコ（藍藻）が発生したことを確認した（7～10 月）。一方、冬季の藻類相は *Monoraphidium* spp. (4.0×10^4 cells/ml) などの緑藻が優占した。昨年度の同時期には、*Nitzschia acicularis* (3.7×10^3 cells/ml) などの珪藻が優占していた点で異なった結果となった。

山ノ神沼の沼心における夏季と冬季の水質の 10cm ごとの鉛直分布を示す。平成 24 年 8 月と平成 25 年 2 月では、全水深が異なっているが、降雨や水田の落としの流入の有無などによって、水位に季節変動があるためと考えられた。8 月は緩やかな鉛直方向に温度勾配が見られ、DO は表層で 18mg/L の過飽和を示したが、沼底付近では 3.6mg/L まで DO が大きく低下した（図(3)-17）。一方、2 月の水温は 5℃、DO は 13mg/L でどの水深においてもほぼ一定であり、沼水が完全混合状態にあったと考えられた（図(3)-18）。Chl-a 量は表層から底層に向かって増加していく傾向が見られたが、特に 8 月において顕著であった。昨年度、夏季及び冬季にかかわらず、沼底付近は日の出前の時間帯には、一時的に無酸素状態になることを確認した。今年度の調査においても、夏季の日中は貧酸素状態にある一方、冬季は底層においても溶存酸素量は過飽和な状態で存在していることが観察された。このことから、浅い湖盆形状は、底層に酸素の供給面で有利であると考えられた。



図(3)-17 山ノ神沼水質鉛直調査結果（8月） 図(3)-18 山ノ神沼水質鉛直調査結果（2月）

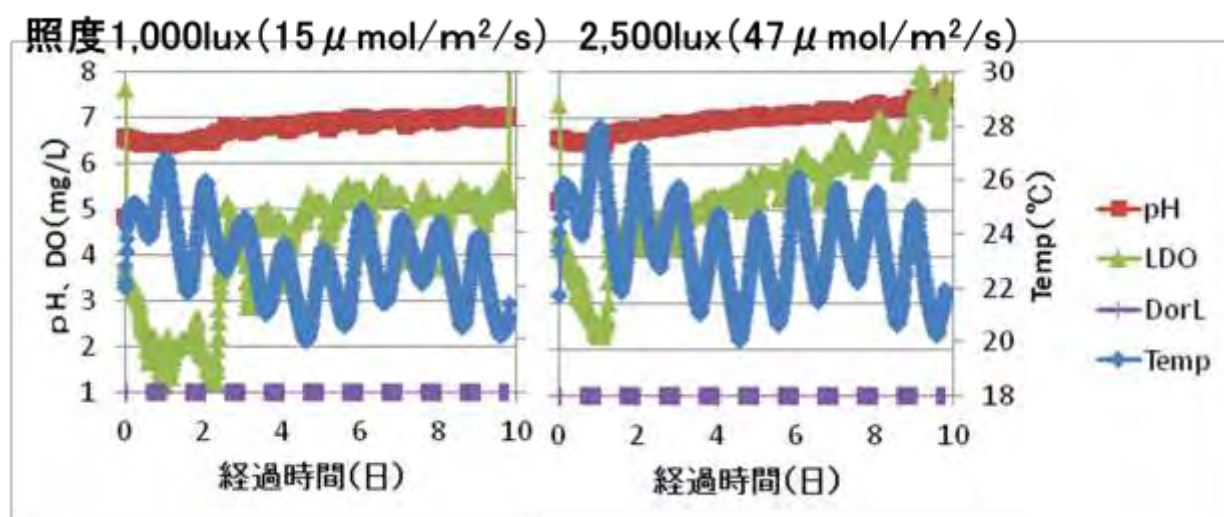
●：水温（℃）、▲：pH、■：DO（mg/L）、×：Chl-a（μg/L）、ただし2月のChl-a量は1/10の値をプロットした。

（4）予備検討条件による藻類回帰実験、貧酸素1年間暴露底質によるシードバンク機能劣化評価

昨年度の藻類回帰実験の予備検討を踏まえ、照度の影響を考慮した回帰実験を行った。採泥後1年を経過した山ノ神沼の底質 80ml（湿重量約 90g）、室温（空調設定温度 21℃）における結果を図(3)-19に示す。連続暗条件では、DOは急激に減少後、2日目以降は嫌気状態を示すほぼ 0mg/L で推移した。

一方、12h/12h 周期明暗条件では、DO は連続暗条件と同様に、急激に減少し、ほぼ 0mg/L で推移した。その後、2 日目から上昇傾向を示し、4 日目には約 5mg/L まで上昇した。明期中の DO 上昇は底質から回帰した藻類の光合成による酸素供給によるものと考察され、水中の溶存酸素量の上昇は、1,000lux [約 15 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$] よりも 2,500lux [約 47 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$] の方が大きく、光強度が大きいほど顕著であった。さらに、水中の藻類を光学顕微鏡で観察した結果、暗条件よりも照明ありの実験系において細胞数が多かった。暗条件では、藍藻 (*Synechococcus* sp.) や珪藻 (*Aulacoseira* sp. (細)) など、ごくわずかであるのに対し、2,500lux では藍藻 (*Synechococcus* sp.)、珪藻 (*Nitzschia acicularis*, *Cyclotella* sp.) などが観察された。このことから明暗条件における pH 及び DO 上昇は、底質由来の藻類の光合成が寄与したものと考察された。しかし、光照射下においても、藍藻が緑藻や珪藻よりも高い細胞密度で観察され、藍藻類が回帰しやすい環境にあった可能性が示唆された。

本研究から、光の強度が底質中の藻類の活性化に重要な環境因子であることが分かった。さらに、嫌気条件で 1 年間保存した底質中からも藻類の藍藻の種類については発芽活性が確認できたが、緑藻など多くの種類の発芽は確認できなかったため、今後さらに詳しく調べる必要がある。



図(3)-19 4°C暗所で1年間、密閉状態で保存した山ノ神沼底質(底質量 80ml/800ml)を用いた回帰実験における実験中の水質変化

(5) 貧酸素2年間暴露底質によるシードバンク機能劣化の評価

富栄養化湖沼の山ノ神沼と琵琶湖の水質を比較すると、山ノ神沼の窒素、りん濃度は TN4.5mg/L 及び TP0.24mg/L であり、琵琶湖北湖よりも富栄養である南湖の TN0.30mg/L、TP0.018mg/L に対して 10 倍以上高かった(表(3)-2)。さらに底質を比較すると、山ノ神沼は琵琶湖の3地点(愛知川沖、長命寺沖及び長浜沖)よりも炭素、窒素、りん含有量が TC6.8%・dry、TN7.6g/kg・dry、TP1.7 g/kg・dry のようにいずれも多く、有機化・富栄養化が進行していた(表(3)-3)。このため、底質の酸素消費量は琵琶湖よりも山ノ神沼の方が大きいという特徴を有していた。一方、山ノ神沼の底質を ORP で比較すると、極端に有機化が進行しているにも関わらず、長命寺沖と長浜沖と同程度であった(図(3)-20)。

このことから、山ノ神沼の底質は琵琶湖底質に比べて過度に有機化が進行しているにもかかわらず、琵琶湖長命寺沖や長浜沖が 4~5m の水深であるのに対して、山ノ神沼は最深部で約 2m と浅いこ

とによって、極端な還元状態にはならないことが明らかになった。

図(3)-21 は 4℃、遮光した密閉容器中（貧酸素条件）で約 2 年間保存した山ノ神沼底質を用いて藻類活性を調べた結果である。その結果、照明下において光合成活性が見られ、シードバンク機能を有していることが分かった。遮光条件では DO、pH はほぼ一定の値で推移したのに対し、光が照射される間に DO と pH が上昇し、全体として実験終了時には高い値を示した。このことは琵琶湖に対して有機化が極端に進行した山ノ神沼の底質を貧酸素状態で約 2 年間保存した場合においても、底質中に藻類シードは光の照射によって光合成活性が生じることが可能な状態の生活性を維持しながら保存されていたことを示しているものの、出現種は限られる傾向があった。また、水中に観察された藻類は細胞数で比較すると、藍藻が最も多く、珪藻及び緑藻の順であり、貧酸素条件では藍藻類が多くなる可能性を示していると考えられた（図(3)-22）。

表(3)-2 琵琶湖と山ノ神沼の規模及び水質の比較

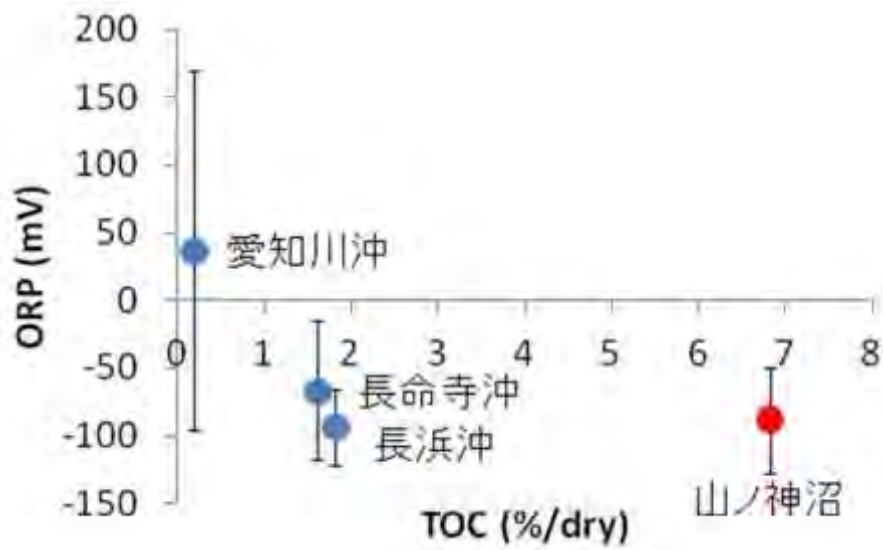
	単位	琵琶湖	山ノ神沼
面積	Km ²	670.25	0.03
平均水深	m	北湖約43	約1
	m	南湖約4	
最大水深	m	103.58	約2
貯水量	億m ³	275	0.0003
Chl-a	μg/L	H22年度南湖 7.5	S56年～170
COD	mg/L	3.4	23
TN	mg/L	0.30	4.5
TP	mg/L	0.018	0.24

データは埼玉県、滋賀県 HP より

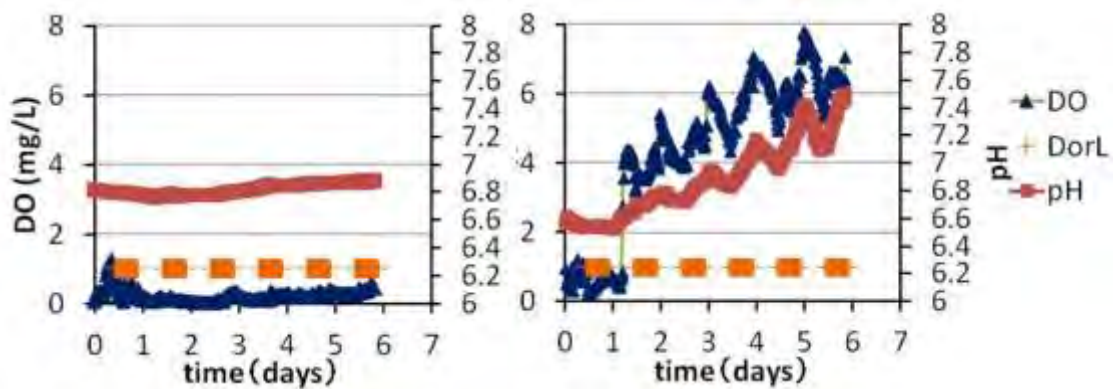
表(3)-3 琵琶湖及び山ノ神沼の調査地点における底質の TOC、TC、TN 及び TP（季節平均）

分析項目	単位	山ノ神沼	長命寺沖	愛知川沖	長浜沖
TOC	%・dry	6.8	1.6	0.18	1.8
TC	%・dry	6.8	1.6	0.19	1.8
TN	g/kg・dry	7.6	1.8	0.29	2
TP	g/kg・dry	1.7	0.95	0.31	1.2

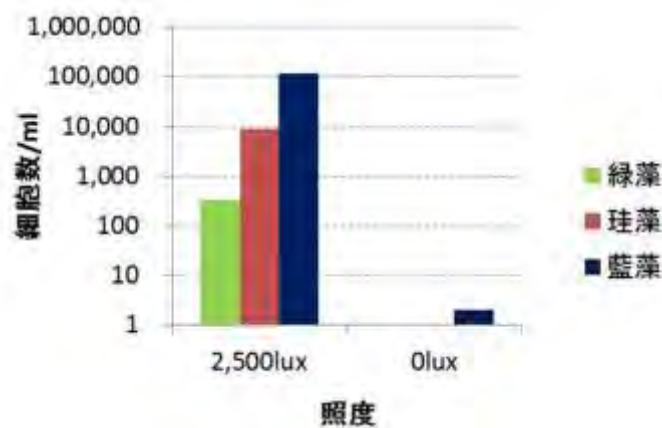
東レテクノ（株）分析データを引用



図(3)-20 湖沼底質 TOC と ORP の関係 (季節平均) 東レテクノ (株) 分析データを引用



図(3)-21 2年間貧酸素保存した山ノ神沼底質を用いた光合成活性試験における水質変化



図(3)-22 約2年間貧酸素保存した山ノ神沼底質を用いた試験において出現した藻類細胞数

(6) 山ノ神沼及び琵琶湖底質回帰試験結果の総合解析によるシードバンク機能維持必須 DO 量の定量的評価

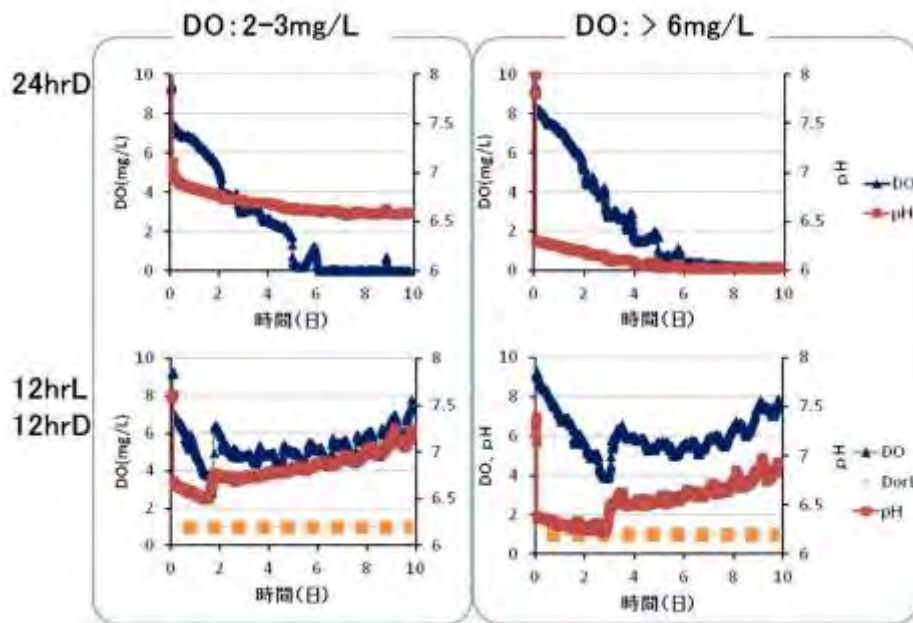
DO を 2~3mg/L 及び >6mg/L に設定し、室温遮光状態で 100 日保存した山ノ神沼底質を用いた光合成活性試験における実験中の水質変化を図(3)-23 に示す。保存時の DO が 2~3mg/L も >6mg/L もどちらも連続暗条件では、DO は一次反動的に減少後、6 日目以降はほぼ 0mg/L で推移した。一方、12h/12h 周期明暗条件では、DO は連続暗条件と同様に減少したが、その後、明期中に DO と連動して pH が一時的に上昇する特徴が見られた。DO 上昇は底質から回帰した藻類の光合成による酸素供給によるものと考察された。この現象は保存 DO 2~3mg/L では 2 日目から、>6mg/L では 3 日目から上昇傾向を示し、10 日目には DO は約 8mg/L まで上昇した。pH は保存 DO が 2~3mg/L も >6mg/L の方が低い値を示した。この原因は保存時の DO が高い方が硝酸などの酸性物質が生成したためと考えられた。

水中の藻類を光学顕微鏡で観察した結果、暗条件よりも明暗条件の実験系において細胞数が多かった。一方、出現した種類は、藍藻は *Synechococcus* sp. や *Merismopedium tenuissimum*、緑藻は *Scenedesmus* spp.、そして珪藻は *Nitzschia* spp. であり、種類数は極わずかであった。保存時の DO が低い条件であるほど藍藻が緑藻や珪藻よりも高い細胞密度で観察されたことから、底質の貧酸素化は藍藻にとって活性が維持された状態で保存されるので有利な環境条件となる可能性が示唆された。なお、珪藻類は保存条件が DO 2~3mg/L において最も保存されていた結果となった (図(3)-24)。

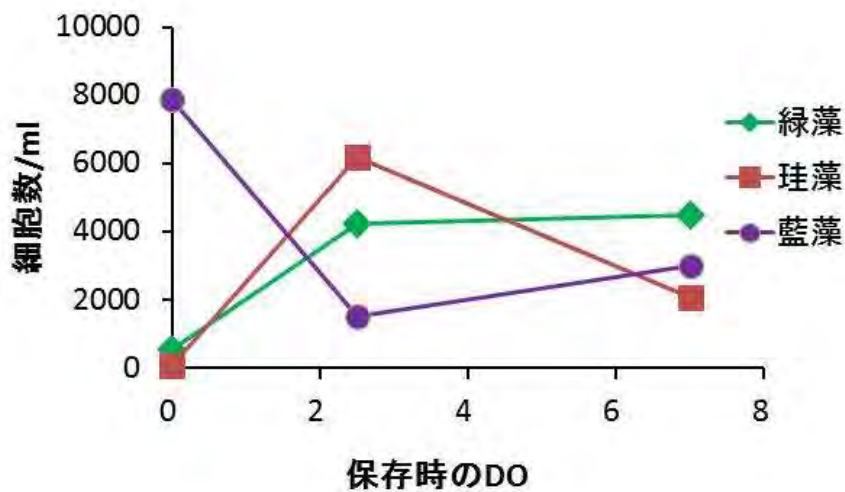
また、採泥 (2013/5/27) 直後の琵琶湖底質を用いた光合成活性試験結果を図(3)-25 に示す。長浜沖及び長命寺沖では、DO が 0mg/L に低下した後、照明下では 1 日後から増加する傾向が見られた。これは山ノ神沼底質を用いた実験における DO 変化に類似しており、底質は有機化しており、かつ、藻類シードを大量に含有している富栄養化の特徴を反映していると考えられた。一方、愛知川沖では、DO は 4mg/L 程度まで低下したに過ぎず、また、照明下において DO は 3 日後から徐々に上昇した。それ以上に愛知川沖の底質は主に砂で有機物が少なく、同一体積あたりの藻類含有量が小さいことが原因と考えられた。

藻類量の目安となる Chl-a は暗条件 (0lux) において、長命寺沖 ≒ 長浜沖 > 愛知川沖の順に小さくなり、これは底質の藻類シード含有量に依存した結果であると推察された (図(3)-26)。また、実験終了時の Chl-a は長浜沖で最も大きく、愛知川で最も小さくなったが、長浜沖の底質には増殖しやすい状態の藻類シードが存在していたと考えられた。なお、長命寺沖はそれらの中間的な特徴を示した。藻類の細胞数は、愛知川では珪藻が多かったのに対し、長浜沖では藍藻が多く、山ノ神沼の底質に類似しており、有機化した底質の特徴と考えられた。以上のことから、山ノ神沼底質を用いて開発した本光合成活性試験方法は、琵琶湖の底質を用いても藻類保存状態の評価ができることが分かった。

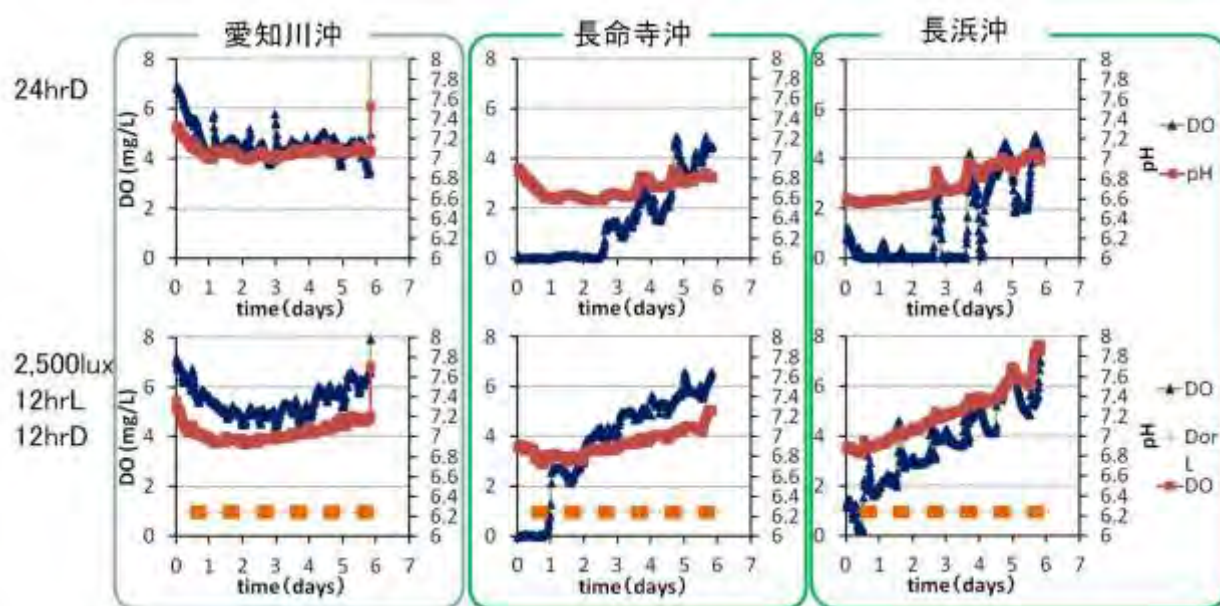
本研究から貧酸素 (DO 0mg/L) 状態で保存した底質からは藍藻が優占して観察された一方、好気 (同 >6mg/L) 状態で保存した底質からは緑藻、珪藻、藍藻がバランスよく観察できた。また、微好気 (同 2~3mg/L) 状態で保存した底質から珪藻が最も多く観察された。これらのことから、藻類のシードバンク機能を維持するために必要な DO 量を定量的に評価すると、貧酸素状態は藍藻の優占化を引き起こす恐れがあるため、微好気の状態が最低限維持されることが望ましいと考察された。



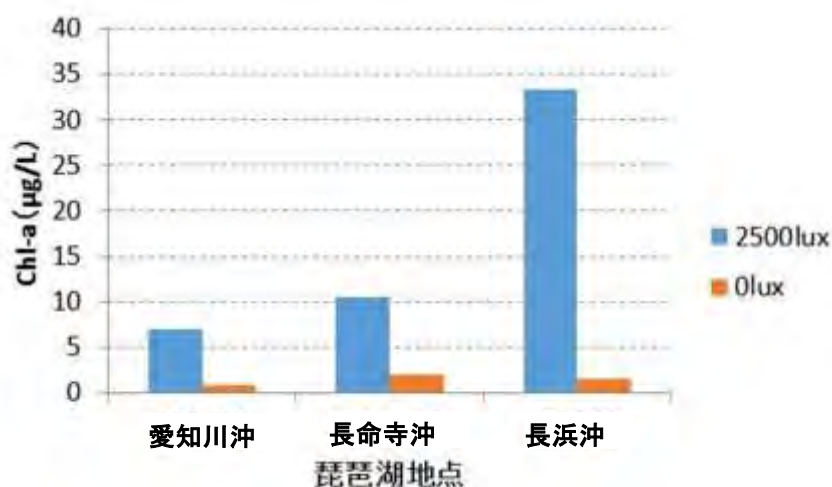
図(3)-23 DOを2~3mg/L及び>6mg/Lに設定し、室温遮光状態で100日保存した底質を用いた光合成活性試験における水質変化(保存時のDO 2~3mg/L(左)、>6mg/L(右)、光合成活性実験時の光条件は暗条件(上段)、暗条件(下段))



図(3)-24 DOを貧酸素(0mg/L)、微好気(2~3mg/L)及び好気(>6mg/L)の各条件に設定し、室温遮光状態で100日保存した底質を用いた光合成活性試験において出現した藻類細胞数と保存DOの関係



図(3)-25 琵琶湖底質（2013/5/27 採泥）を用いた光合成活性試験における実験中の水質変化
光合成活性実験時の光条件は暗条件（上段）、暗条件（下段）



図(3)-26 琵琶湖底質（2013/5/27 採泥）を用いた光合成活性試験における Chl-a 量

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

1) 富栄養化の進行した山ノ神沼では夏季及び冬季に関わりなく、底層では一時的に貧酸素状態になっている実態が明らかとなった。しかし、水深の浅いことが幸いし、底層の貧酸素化が解消されやすい状態にあるものと考察された。底質からのプランクトン回帰実験において、山ノ神沼のような高有機底質を用いた場合においては、特別な処理を必要とせず、水とよく攪拌混合するだけで嫌気状態

を再現できることが分かった。

2) 光の強度が底質中の藻類の再活性化に重要な環境因子であることが確認でき、湖岸帯の光条件の環境改善（浅場化）が貧酸素状態の解消に貢献することを裏付けている。

今回の研究結果から、深い水深で貧酸素が強くなるとシード機能が低下し、緑藻が減少し藍藻が増加するなど、種によって耐性が異なっている可能性が示唆された。

3) 富栄養湖沼の山ノ神沼は最深部で約 2m と浅いため風等によって容易に攪拌され酸素供給が行われることから、泥質化は琵琶湖以上に進行しているにも拘わらず底層・底質環境は極端な還元状態にはならないことが実証された。さらに、貧酸素状態は藍藻のシードにとって保存される上で有利であると考えられ、藻類シードバンク機能を維持するためには、貧酸素状態が解消されるべきである。したがって、沿岸帯整備の際には、なだらかな湖岸形状を復活させることにより、水の滞留の解消及び藻類の光合成を可能とする光環境の改善が有効であることが推察された。

4) 人工的湖岸の底層部の嫌気化の進行が藍藻シードの保存に繋がることから、湖辺域を好気的な環境に整備することで藍藻類が減少することを明らかにした。また、琵琶湖以上に富栄養化が進行した湖沼であっても、水深が浅いことによってアオコを形成する藍藻以外の緑藻や珪藻が季節的に出現することから、なだらかな湖岸形状の沿岸帯整備を行う等、今後の沿岸帯対策の方向性を提示することができた。

5) 貧酸素 (DO 0mg/L) 状態で保存した底質からは藍藻が優占して観察された一方、好気 (同 >6mg/L) 状態で保存した底質からは緑藻、珪藻、藍藻がバランスよく観察できた。また、微好気 (同 2~3mg/L) 状態で保存した底質から珪藻が最も多く観察された。これらのことから、底質の藻類シードバンク機能を健全に維持するために必要な DO 量を定量的に評価すると、貧酸素状態は藍藻の優占化を引き起こす恐れがあるため、微好気の状態が最低限維持されることが望ましいと考察された。

(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>

本研究により富栄養化及び底質の有機化が進行した湖沼において、水深が浅いことは底層の貧酸素状態の解消に有利であることが示唆された。

湖岸帯の光条件の改善は、底質由来の藻類の光合成の再活性化を促進することが実験的に示唆されたことから、湖岸帯の構造を浅場化することは、生態工学的貧酸素状態の解消に貢献することを裏付けている。さらに、約 2 年間貧酸素状態で保存した後も藻類の再活性が確認できた。しかし、種によって貧酸素耐性が異なる可能性も示唆されたことから、今後の研究により湖沼の底層貧酸素管理政策の基礎データとして貢献できると考えられた。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表**<論文(査読あり)>**

特に記載すべき事項はない。

<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) 田中仁志、古田世子、池田将平、藤原直樹、一瀬諭、馬場大哉、郡司房子、岸本直之：日本陸水学会第76回大会(2011) 「湖沼底質のプランクトンを対象にしたシードバンク機能について(山ノ神沼)」
- 2) 田中仁志、古田世子、一瀬諭：第38回 環境保全・公害防止研究発表会(2011) 「湖沼底質の泥質化及び貧酸素化による藻類を対象にしたシードバンク機能への影響評価手法の検討」
- 3) 田中仁志、古田世子、藤原直樹、一瀬諭、馬場大哉、岸本直之、西村修：日本陸水学会第77回大会(2012)、「溶存酸素量の違いが湖沼底質の藻類シードバンク機能に及ぼす影響」
- 4) 田中仁志、古田世子、一瀬諭：第39回環境保全・公害防止研究発表会(2012) 「底質中の藻類の再活性化に及ぼす光照度の影響」
- 5) 田中仁志、古田世子、一瀬諭：第15回自然系調査研究機関連絡会議(NORNAC,2012) 「浅い富栄養湖沼山ノ神沼における底層の貧酸素化実態調査」
- 6) 田中仁志、古田世子、廣瀬佳則、藤原直樹、一瀬諭、馬場大哉、岸本直之、西村修：日本陸水学会第78回大会(2013) 「湖沼における沿岸帯の機能評価について(6)-浅い富栄養湖沼山ノ神沼における底層環境とシードバンク機能-」
- 7) 田中仁志、古田世子、廣瀬佳則、藤原直樹、一瀬諭、馬場大哉、岸本直之、西村修：日本水処理生物学会第50回大会(2013) 「富栄養湖沼山ノ神沼における底層環境と底質中の休眠藻類の再活性化条件の実験的検討」
- 8) 田中仁志、古田世子、廣瀬佳則、藤原直樹、一瀬諭：第39回 環境保全・公害防止研究発表会(2013) 「沿岸帯の機能評価③～山ノ神沼底質における藻類シードバンク機能と環境因子の影響～」

(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) 西野麻知子：資源環境対策（2010）地球温暖化による琵琶湖の環境変化と生態系への影響、46(9)、50-57.
- 2) 花里孝幸、永田貴丸：四万十・流域圏学会誌（2011）湖水中の生き物の世界と、それに影響を与える地球温暖化、第10巻、第2号9～12.
- 3) 丸茂恵右、横田瑞郎：海生研研報（2012）貧酸素水塊の形成および貧酸素の生物影響に関する文献調査、第15号、1～21.
- 4) 一瀬諭、池谷仁里、古田世子、藤原直樹、池田将平、岸本直之、西村修：日本水処理生物学会誌（2013）琵琶湖に棲息する植物プランクトンの総細胞容積および粘質鞘容積の長期変動解析、Vol.49、No.2、65-74.

(4) 沖帯および沿岸帯の底質環境の分析と評価

東レテクノ（株）	馬場大哉
滋賀県琵琶湖環境科学研究センター 生物圏担当	古田世子・一瀬 諭
龍谷大学 理工学部 環境ソリューション工学科	岸本直之・奥村浩気
<研究協力者>	
関西医科大学物理学教室	竹本邦子
京都大学生態学研究センター	中野伸一・村上 綾

平成23～25年度累計予算額：11,449千円

（うち、平成25年度予算額：3,200千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

湖沼沿岸帯の水質環境の特徴、沿岸帯底質の泥質化状況が、理化学的分析値と底質の直上・直下における溶存酸素の分布状況と与える影響を知るために、琵琶湖3地点（長浜沖、愛知川沖、長命寺沖）および山ノ神沼において底質、水質、間隙水および溶存酸素分布調査を行った。底質分析では、X線吸収端近傍構造測定(XANES)法を試み、硫黄の存在形態について解析を行った。また、溶存酸素の分布状況調査では、溶存酸素マイクロセンサーを用いて、底質の直上直下の微細な溶存酸素濃度分布を測定した。これらの結果、琵琶湖沿岸帯では、沖帯より浮遊物質量、粒子状有機物量、クロロフィル量が多い傾向がみられ、底質の泥質化が進んだ長浜沖では、底質表面の酸化層の厚さが約2mmの薄さであり、泥質化が進んだ底質では、硫黄の存在形態が還元的であり、底泥間隙水の溶存態窒素の存在形態が還元的であった。また、琵琶湖において、底質の泥質化と流向流速の状況の関連性を知るために、ドップラー流速プロファイラー(ADCP)を用いて流向流速の連続測定を行った結果、底質が砂質であった地点では、底質が泥質化していた地点と比べて一方向への流れが卓越していたこと、底質が泥質化していた地点では、流向が変化しながら全体として水塊が同じ場所に留まる傾向が見られた。

これらのことから、沿岸帯においては、沖帯と比べて多い傾向がある粒子状物質が、その供給量や地形、流向・流速等に影響を受けながら沈降し堆積する量により底質の基礎的な特性を決定し、その結果、泥質化が進んだ場合には、溶存酸素が低下し、還元的環境が形成されることが示唆された。また、形成された底質環境が、他のサブテーマの研究テーマである、各種プランクトンの休眠細胞の生存率や再帰率に影響を与えるため、粒子状物質の供給量や沈降堆積量の管理が、沿岸帯の底質環境を保全する上で重要であると考えられた。

[キーワード]

水質、底質、マイクロセンサー、X線吸収、流向流速、ADCP

1. はじめに

湖沼における植物プランクトンの栄養細胞は、底質に存在する休眠細胞が、栄養細胞として水塊へ帰することにより初期個体が供給されることが知られており、底質のシードバンク機能と言われている。

琵琶湖では、水深が有光層の数倍以上あるため、湖内の植物プランクトンの種組成への影響は、湖心ではなく沿岸帯におけるシードバンク機能であると考えられ、沿岸帯底質中の植物プランクトン種組成調査や、底質の状況として、底質の理化学分析が行われてきた¹⁾。また、シードバンク機能に影響を与える環境因子として底質の溶存酸素量に注目し、室内実験において、溶存酸素量と、回帰する栄養細胞の種数、細胞数を知るための回帰試験が行われている²⁾。

しかしながら、室内実験結果を考察する上で参考となる、湖沼沿岸帯と沖帯の水質環境の違い、における底質の形成要因や溶存酸素の詳細な分布状況、酸化還元状態については詳細なデータが無い。そこで、本サブテーマでは、回帰試験に用いた試料を採取した現地および、持ち帰った試料を用いて、水質、底質、間隙水の理化学的分析を行った。また、現地の流向流速状況を知るために、ドップラー流速プロファイラーを用いて流向流速の連続測定を行った。

2. 研究開発目的

湖沼沿岸帯の水質環境の特徴、沿岸帯底質の泥質化状況が、理化学的分析値と底質の直上・直下における溶存酸素の分布状況に与える影響を知ること、および、他のサブテーマにおける考察の基礎資料となることを目的とし、琵琶湖3地点および山ノ神沼において、底質分析、水質分析、間隙水分析、マイクロセンサーによる溶存酸素分布調査、X線吸収端近傍構造測定(XANES)法による硫黄の存在形態解析を行った。また、琵琶湖において、底質の泥質化と流向流速の状況の関連性を知ることが目的とし、ドップラー流速プロファイラー(ADCP)を用いて流向流速の連続測定を行った。また、これら結果を元に、底質の泥質化状況に与える因子について考察を行った。

3. 研究開発方法

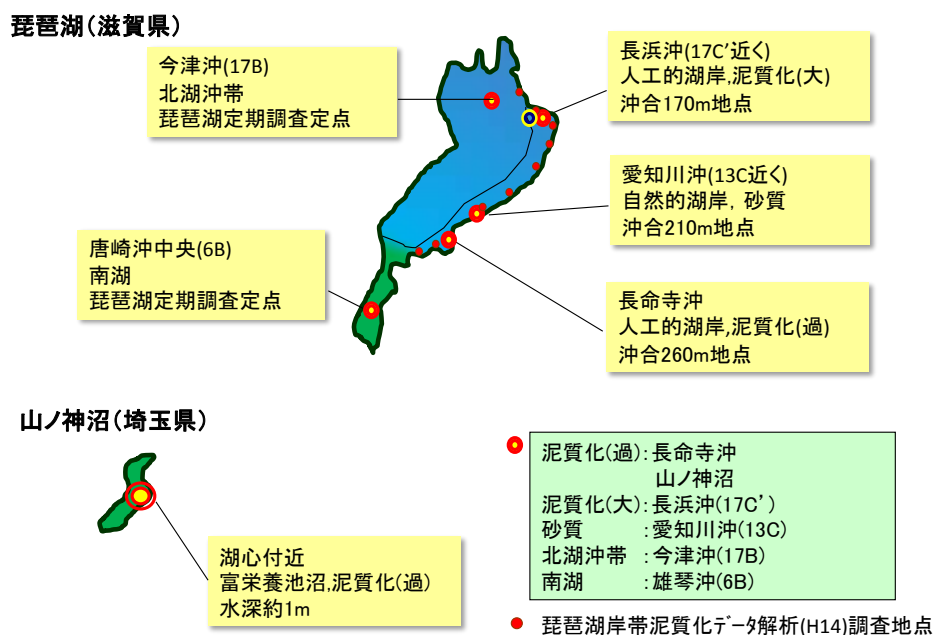
(1) 水質調査方法

水質調査は、琵琶湖においては、泥質化が進んでいた地点（長浜沖、長命寺沖）と泥質化が進んでいなかった地点（愛知川沖）を調査地点として選定し、2011年10月～2013年3月は毎月1回の頻度で調査し、それ以降は2013年5月と2013年11月に調査した。採水は、バンドーン型採水器を用い、表層50cmおよび底層（湖底-0.5m）から湖水を採取した。浅く富栄養化が進んだ湖沼として山ノ神沼（埼玉県）を選定し、現地調査および埼玉県環境科学国際センターによる試料採取により、2011年10月～2013年8月において20回実施した。調査地点を図(4)-1に、調査項目を表(4)-1に示した。琵琶湖での測定データは、滋賀県が実施している定期調査における、沖帯のデータとの比較を行った。

(2) 底質調査方法

底質調査は、水質調査地点と同じ地点において実施し、2011年10月～2013年11月に、長浜沖、愛知川沖では8回、長命寺沖、山ノ神沼では6回調査した。採泥は、エクマンバージを使用し、船上で底泥表面1cmのみを分取したものを分析に供した。調査項目を表(4)-2に示した。

なお、底質調査結果は、平成14年度(2002年度)に琵琶湖東岸において本調査地点を含む90地点の測線実施した調査結果との比較を行い、本研究での調査地点の位置づけを確認した。



図(4)-1 調査地点(他項の調査地点も合わせて示した)

表(4)-1 水質分析方法

分析項目	単位	分析方法
pH	-	ガラス電極法
電気伝導度(EC)	mS/m	ガラス電極法
ORP	mV	ORP 計法
色度	度	吸光光度法
濁度	度	積分球式吸光光度法
TOC	mg/L	計算値(P-TOC+D-TOC)
溶解性有機炭素(DOC)	mg/L	GF/C でろ過後、ろ液を TOC 計
粒子態有機炭素(POC)	mg/L	GF/C でろ過後、残渣をNC分析計
COD	mg/L	JISK0102 滴定法
D-COD	mg/L	0.45μmメンブレンフィルターでろ過後、JISK0102
TN	mg/L	計算値(P-TON+D-TN)
溶解性窒素(DN)	mg/L	GF/C でろ過後、ろ液を TN(熱分解)計
粒子態有機窒素 PN(PON))	mg/L	GF/C でろ過後、残渣をNC分析計
TP	mg/L	モリブデンブルー吸光光度法
溶解性リン(DP)	mg/L	0.45μmメンブレンフィルターでろ過後、吸光光度法
浮遊物質(SS)	mg/L	ろ過重量法
クロロフィル a(Chl-a)	μg/L	アセトン抽出吸光光度法
DO	mg/L	滴定法または現地測定

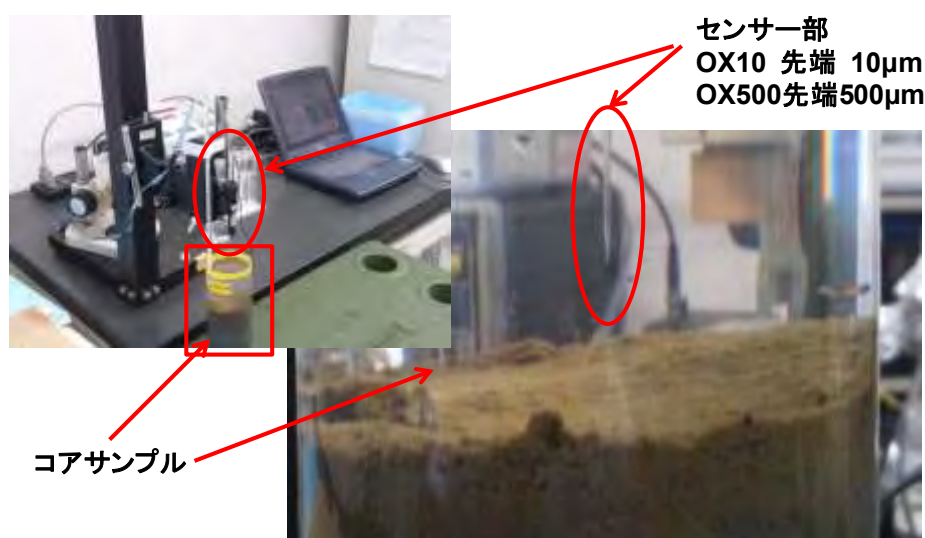
表(4)-2 底質分析方法

分析項目	単位	分析方法
TC	%・dry	NC計
TOC	%・dry	NC計
COD	mg/g・dry	底質調査方法 滴定法
TN	mg/kg・dry	NC計
TP	mg/kg・dry	底質調査方法 吸光光度法
Chl-a	μg/g	DMF抽出/蛍光法
金属元素	-	ICPIによる定性・半定量分析法
IL	%・dry	底質調査方法 重量法
ORP	mV	ORP計法
粒度分布	-	レーザー回折法
乾重量(水分率)	%	底質調査方法 重量法

(3) 底泥直上、直下の底質環境の測定方法

1) マイクロセンサーによる底泥直上、直下の溶存酸素濃度の微細測定

底泥表面付近における底泥間隙水中の溶存酸素の微細分布を測定する手法について、本研究では、マイクロセンサーの活用について検討し測定を行った。マイクロセンサーは、極めて細い先端を持つガラス電極により溶存酸素の微細分布測定を行うことが可能な装置である。図(4)-2 にマイクロセンサーの外観と先端部を、表(4)-4 に測定装置と測定条件を示した。なお、平成 24 年度においては、OX-10（先端の径が 10 μm ）を用いたが、砂質である愛知川沖底質については、ガラス電極を破損する恐れがあり測定出来なかった。このため、平成 25 年度は、OX-500（先端の径が 500 μm ）を使用した。



図(4)-2 マイクロセンサーの外観と先端部

表(4)-4 マイクロセンサー測定装置および測定条件

項目	諸元, 設定内容
測定機	ユニセンス(Unisense)社製 マイクロセンサー
センサー	OX10 先端 10 μm (2012 年度), OX500 先端 500 μm (2013 年度)
測定位置	底泥表面+20 mm~底泥中 15 mm, 1mm ピッチで鉛直分布測定
測定時水温	室温約(15~20 $^{\circ}\text{C}$)に馴化
遮光	アルミホイルで遮光して測定
試料の保管	コアサンプルを現地採取後 4 $^{\circ}\text{C}$ にて1晩保管し、測定時室温に戻して測定(2012 年度)、コアサンプルを現地採取当日に室温で測定(2013 年度)
対象試料	2012 年 9 月 5 日 現地採取 長浜沖、長命寺沖 2013 年 11 月 11 日 現地採取 長浜沖 2013 年 11 月 18 日 現地採取 愛知川沖

2) X線吸収端近傍構造(XANES)による硫黄の存在状態測定

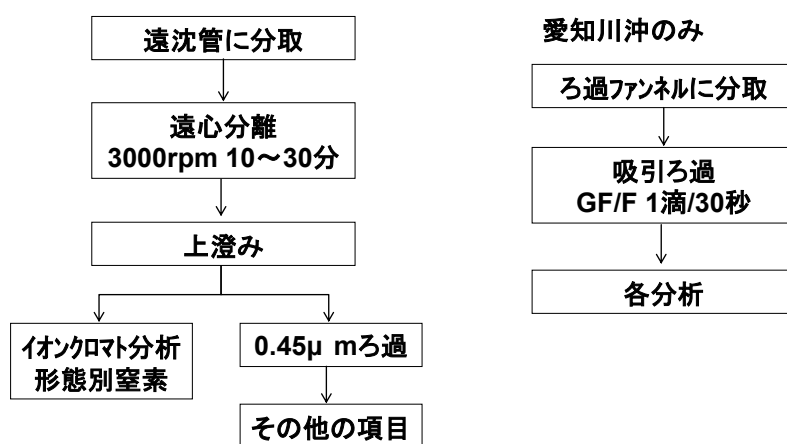
底質の泥質化状態の指標として、底質の酸化還元状態と元素の存在状態との関係を短時間で知るために、底質環境の硫黄(S)の XANES 測定を行った。硫黄は、酸化還元状態により、最も酸化された硫酸(SO_4^{2-})から還元硫黄(S^2, S_8)まで価数が増える。XANES 測定では、これら元素の存在状態を知ることが出来るため、本研究では、硫黄を測定対象とした。

測定では、初めに、泥質化が進んでいない底質と進んだ底質について、各形態の硫黄の存在状態の概要を把握した。その後、底質中の硫黄が鉱物由来である可能性を確認するために、比較的粒径が大きく、 S_8 のピークを含む底質を十分洗浄して、鉱物のみにした状態での測定を行った。また、底質を採取後の硫黄の形態変化を避けるために、完全に大気に触れない状態で保持した場合での測定を行った。

測定は立命館大学 SR センターBL-10 軟 X 線 XAFS ビームラインを用いて、大気曝露していない底質を乾燥窒素雰囲気中で遠心分離し適当な水分量にした後、テフロン製の試料セルに入れ、4 μm の PET 薄膜で密閉した。測定は、He ガス置換の大気圧条件下で行い、検出はシリコンドリフト検出器を用いた蛍光 X 線収量法により行った。分光結晶には Si(111)を用い、S K 吸収端のエネルギーは K_2SO_4 のホワイトラインを 2481.7 eV として校正した。

3) 底泥間隙水の分析

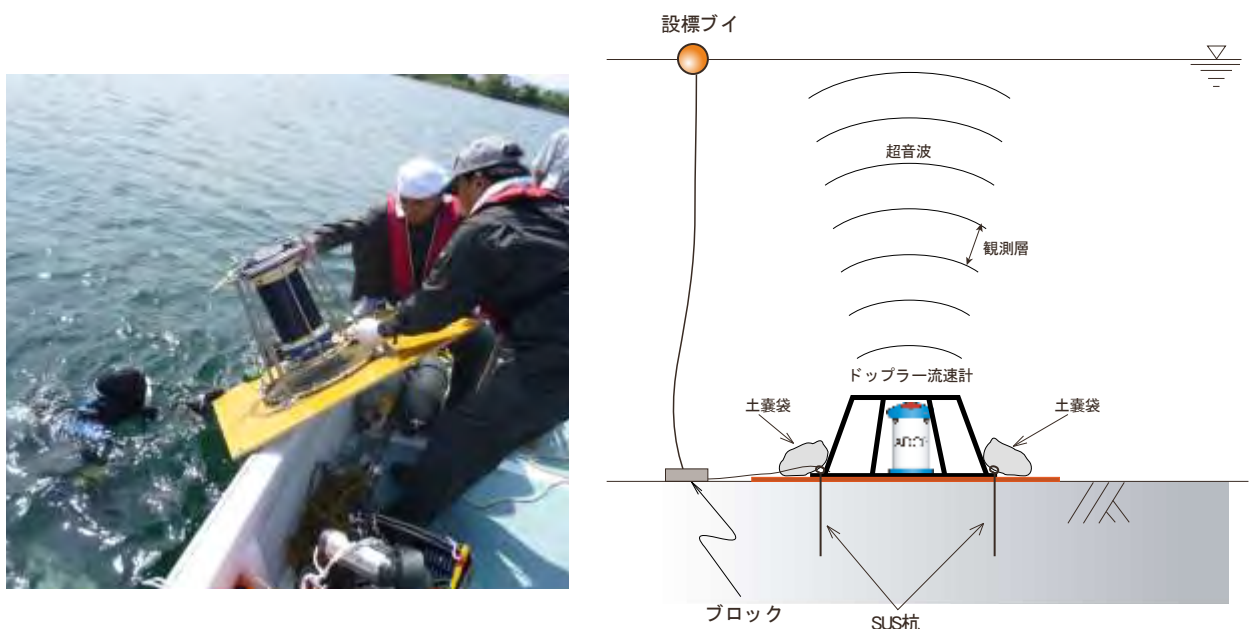
現地採取した底質試料を用い、遠心分離法により間隙水を採取し、形態別無機窒素、有機炭素量等を測定した。なお、愛知川沖はろ過分離により間隙水を採取した(図(4)-3)。得られた間隙水中の溶解有機物(DOC)、形態別無機窒素(アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素)、電気伝導率、pHを測定した。



図(4)-3 間隙水の採取方法

(4) ドップラー流速プロファイラーによる流向流速の現地測定方法

底質が泥質化している長命寺沖と、底質が泥質化していない愛知川沖において、ドップラー流速プロファイラーワークホース ADCP1200kHz (Teledyne RD Instruments 社製, 以下 ADCP) を使用して流況観測を実施した。本研究では ADCP の観測水深間隔を 10cm に設定し、湖底に設置し水面までのプロファイルを計測した。ただし、湖底に設置した ADCP 本体が 0.5m あり、ブランクを含めると湖底直上から 0.9m までは未測定エリアとなる。また、表層 0.3m~0.5m は干渉ゾーンとなるため、長命寺地点の有効観測層数は 41 層、愛知川地点の有効観測層数は 35 層となった。設置方法は、ADCP を専用の架台に装着したうえで、底面にヘドロへの沈み込み防止用のベニヤ板 (0.9m×0.9m のコンパネ) を取り付けて、湖底に長さ 0.8m の SUS 製の杭で固定した (図(4)-4)。設置期間は 2012 年 9 月 13 日~9 月 20 日の 8 日間とした。長命寺地点はその南側約 700m 地点に長命寺川の河口があり、愛知川地点はその西側約 400m 地点に愛知川の河口がある。調査地点に選定した 2 地点は直線距離で約 8.1km の距離にあり、陸からの距離はおよそ 160m 内外、水深は 5m 前後と地理的条件としては似かよった環境にあると見られる。しかし、2002 年に行った北湖東岸湖底泥質化実態調査の結果より、両地点の底質環境は大きく異なっていた。長命寺地点の含泥率は 96.8%、愛知川地点は含泥率 0.4% であり³⁾、長命寺地点は泥質地点であるが愛知川地点には泥質がほとんど無いことが分かる。また、2012 年にも ADCP 設置地点において 2002 年と同様の底泥調査を行った。その結果、長命寺地点の含泥率は 67%、愛知川地点の含泥率は 1.4% であり、長命寺地点は多少含泥率が低下したが両地点を比較すると長命寺地点は泥質地点である。

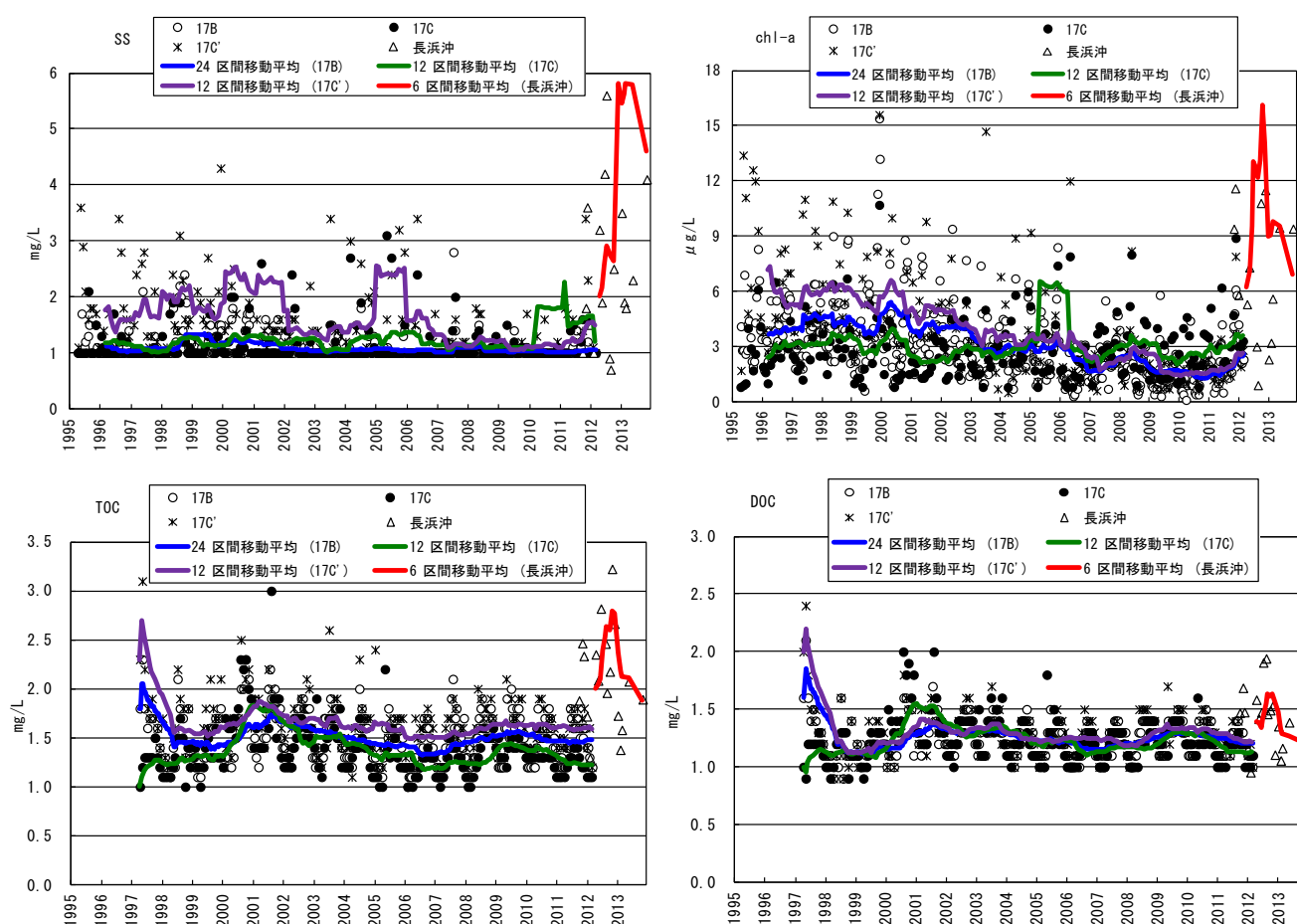


図(4)-4 ドップラー流速プロファイラーの設置作業 (左) と設置状況 (右)

4. 結果及び考察

(1) 水質調査結果

図(4)-5 に 1995 年以降の琵琶湖定期水質観測地点の経時的な水質変化と、本調査における水質調査結果を重ねて示した。この結果、SS、TOC、Chl-a は、本調査における測定結果が、沖帯の水質濃度の変動幅より高濃度であったが、DOC は、沖帯の水質濃度の変動幅と同程度であった。このことは、沿岸帯が粒子状物質（プランクトンや底質および流入濁水由来と考えられる）が高濃度になりやすい環境であることを示唆している。

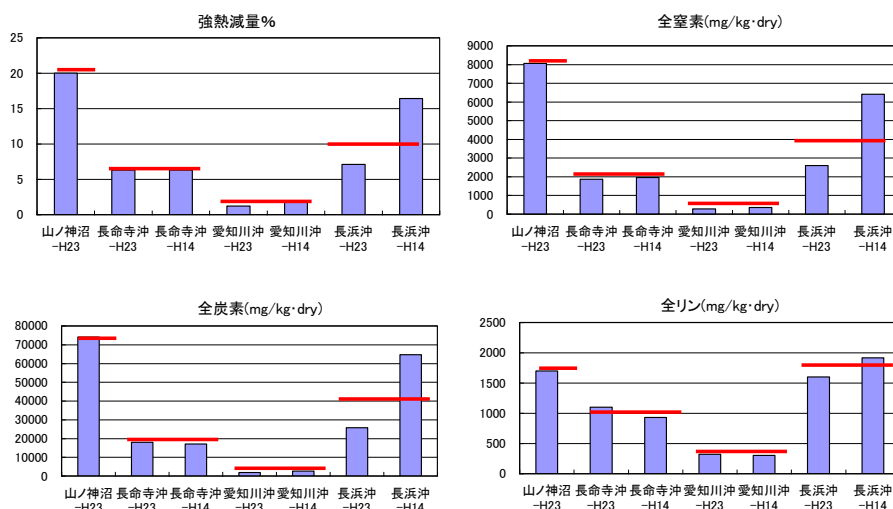


図(4)-5 沿岸帯水質と沖帯水質との比較 (17B-17C-17C'-長浜沖)

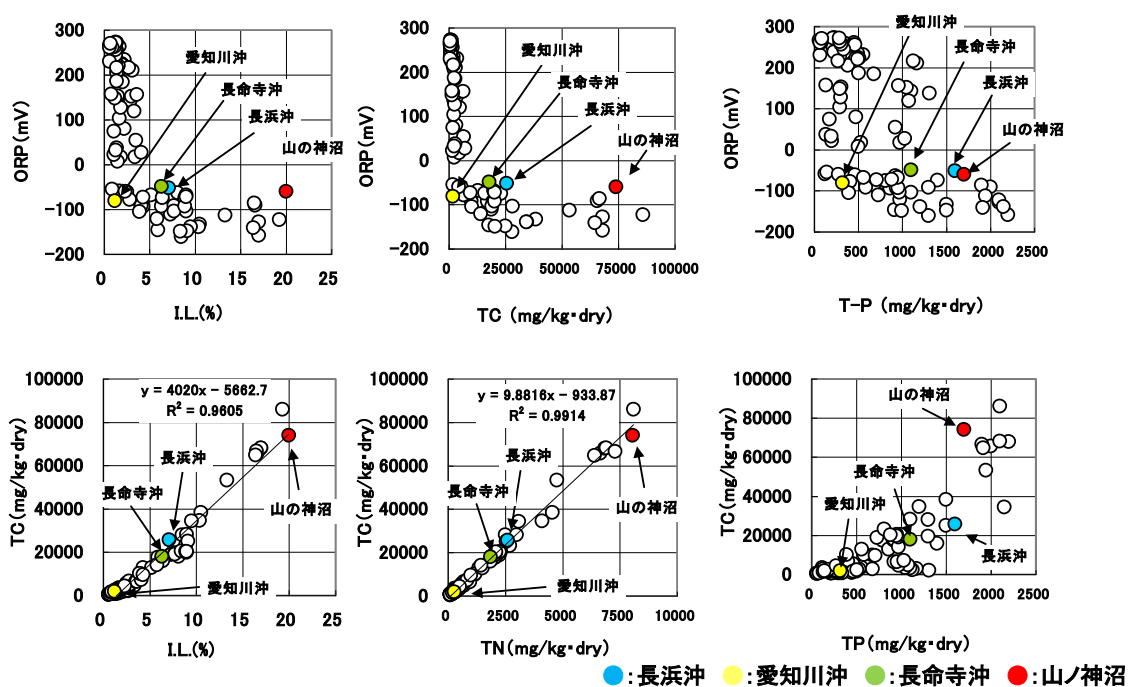
(2) 底泥調査結果

本研究で得られた底泥の理化学分析の結果と平成14年度調査の同地点の結果について、強熱減量、全炭素、全リン、全窒素の比較を行った(図(4)-6)。また、平成14年度調査での全90地点の全炭素-全リンの相関図、全窒素-全リンの相関図上に、本年度調査結果を重ねてプロットしたところ、平成14年度調査の相関図のプロット範囲に位置された。このことは、本年度調査地点の物質量の比が、平成14年度と類似している事を示していると考えられる(図(4)-7)。

これらのことから、本年度選定した各地点は、当初の目的通り、長浜沖、長命寺沖が泥質化が大きく、愛知川沖が泥質化が小さく、山ノ神沼は、琵琶湖の調査地点より泥質化が大きい状態であることが確認された。



図(4)-6 底質分析結果(本研究調査4地点間のデータ比較)

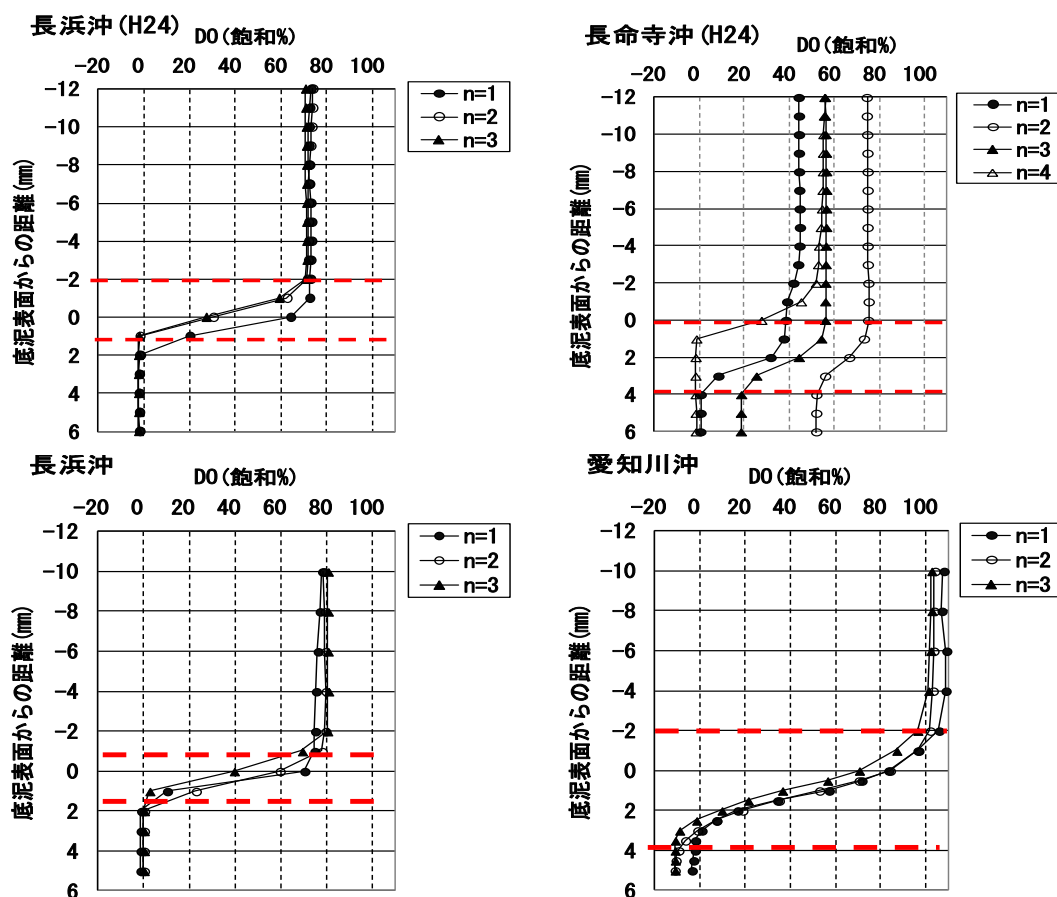


図(4)-7 底質分析結果(平成14年度相関図上の本研究での取得値)

(3) 底泥直上、直下の底質環境の測定結果

図(4)-8 に本調査で得られた長浜沖と愛知川沖の底泥直上、直下の溶存酸素分布および昨年度に測定した結果を示した。本年度測定結果では、底泥直上 2mm までは好氣的な状態であるが、底泥直上 2mm から直下 2~6mm の間で急激に溶存酸素濃度が低下し、長浜沖、愛知川沖ともに、溶存酸素濃度がほとんど存在しない状況であった。このことは、各地点の底泥表面に、いわゆる「酸化層」が存在するが、その厚さは 2~6mm と薄いため、底泥直上における酸素供給が低下すると、底泥表面が嫌氣的状況で水層に接することを示唆している。また、平成 24 年度と 25 年度の測定値の傾向は概ね一致しており、現場の溶存酸素の微細分布状況が、経年的に明確な変化をしていないことを示唆している。

平成 25 年度における底泥直上の溶存酸素濃度の測定結果から、溶存酸素が低下し始めてから低下しきるまでの厚さは、泥質化がすすんだ長浜沖が薄く（約 2mm）、砂質の愛知川沖が相対的に厚い（6mm）ことが明らかとなった。このことは、底質の泥質化が進むことにより、底質表面付近における湖水の嫌気化が生じやすいことを示唆していると考えられた。



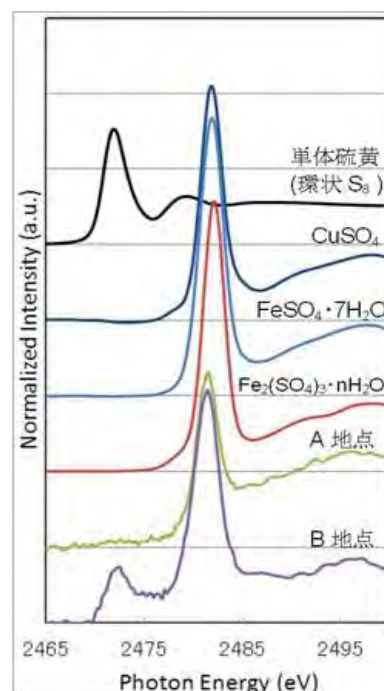
図(4)-8 底泥直上・直下の溶存酸素分布測定結果

上段：平成 24 年度測定 下段：平成 25 年度測定

(4) X線吸収端近傍構造(XANES)による硫黄の存在状態測定

1) 泥質化状況の異なる地点の XANES スペクトルの比較

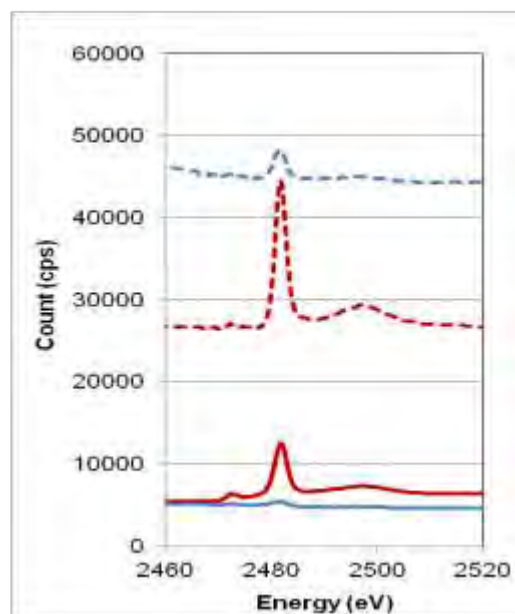
H23年度は、泥質化が進んでいない底質（愛知川沖）と泥質化が進んだ底質（長命寺沖）の XANES 測定を行った。底質は、2011年11月に採取し、測定までの間乾燥を防ぎながら冷暗所(4°C)で保管した。各泥を 10 μm 厚のポリエチレン袋に湿潤なままパックして測定試料とした。分光結晶には Ge(111)を用いた。図(4)-9 に測定した底泥の S K 吸収端 XANES スペクトルを示す。泥質化が進んでいない愛知川沖（図中A地点）と泥質化が進んだ長命寺沖（図中B地点）のスペクトルは、硫酸イオン(SO₄²⁻)を示すエネルギー位置(約 2481 eV)に鋭いピーク構造を持っていた。このことから、両地点の底質土には硫酸イオン(SO₄²⁻)が含まれていることが分かった。長命寺沖のスペクトルには単体 S(S8 リング)を示すエネルギー位置(2472 eV)にピーク構造を持っていたが、愛知川沖のスペクトルにはこの構造は含まれていなかった。これは底質環境が、長命寺沖の底泥状態が嫌氣的であった結果、硫酸還元菌や硫黄細菌の活動により、単体硫黄の生成を示唆している可能性が考えられる。



図(4)-9 泥質化の異なる地点の S K 吸収端 XANES スペクトル

2) 底質中の硫黄の由来の検討

底質中の硫黄の由来として、鉱物由来である可能性が考えられたため、H24年度は、観測された SO₄²⁻と S8 が鉱物由来である可能性について検討した。試料は 2012年9月に愛知川沖で採取した底質を使用し、精製水 10 回以上、超音波洗浄、精製水 5 回洗浄したものについて、洗浄後含水状態を保持した試料（含水試料）と、洗浄後 120°C で 1 時間乾燥させた試料（乾燥試料）を用意した。比較のため、未処理の試料（含水試料と乾燥試料）も測定した。その結果、洗浄と乾燥操作により SO₄²⁻のピーク強度は激減していた（図(4)-10）ことから、SO₄²⁻は鉱物由来ではないことが示された。また、洗浄に寄ってピークが消失した S8 も鉱物由来ではなく、底質環境の変化により後天的に生成されたものであると考えられる。例えば底泥状態が嫌氣的であった結果、硫酸還元菌や硫黄細菌の活動により、単体硫黄の生成を示唆している可能性がある。



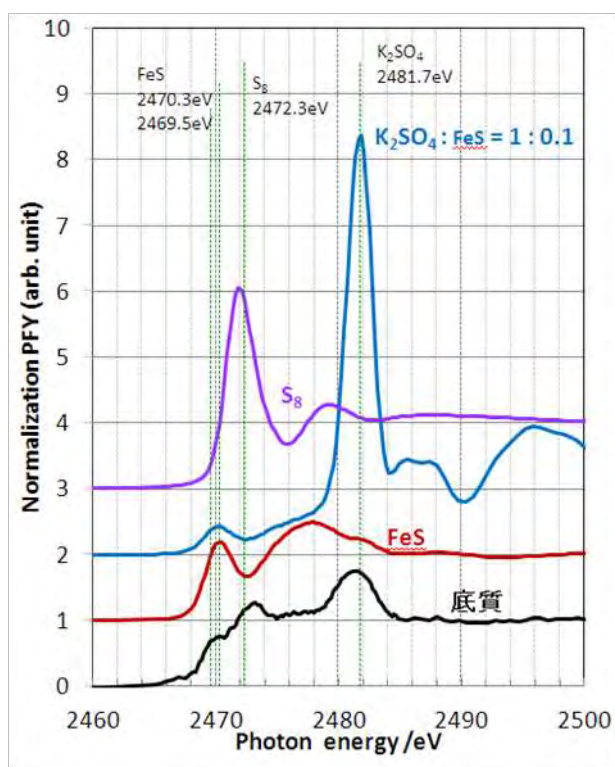
図(4)-10 採取した S 含有底泥の S K 吸収端 XANES スペクトル

— 未処理・乾燥 — 洗浄・乾燥
 未処理・含水、 洗浄・含水

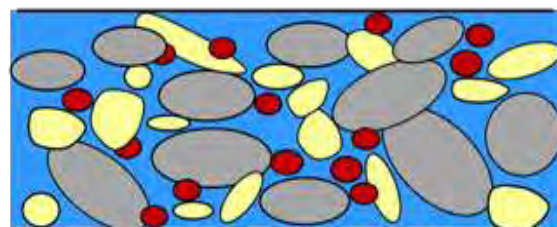
3) 大気に触れない状態で採取した底質の測定結果

図(4)-11 に大気に触れない状態で保持した底質の S K 吸収端 XANES スペクトルを示す。上記で検出されてきた SO_4^{2-} と S_8 を示すエネルギー位置以外に、 $\text{S}^{2-}(\text{FeS})$ を示すエネルギー位置(2470eV 付近)にピークが出現した。 S^{2-} のピークは、大気曝露した採取泥では検出されなかったものである。この結果より、底質の還元状態は S-K XANES 測定で検出可能であること示された。2470eV 付近のピークは、その形状から、 S_8 以外に S^{1-} のピークや有機体 S の存在を予測させる。 S^{1-} のピークや有機体 S のピーク分離は今後の課題である。

底質環境の酸化還元状態を簡単に手早く調べるため、XANES 分析の適応を試みた。S をプローブとし、採取から測定までを大気非曝露下で行うことにより、底質中の-2 から+6 の S の状態を検出することができた。分析結果から、底質は、図(4)-12 に示すように S 非含有鉱物と湖内で生産された S_8 や硫化物等の硫 S 化合物から成りっていると推察される。



図(4)-11 大気に触れない状態で保持した底質の S K 吸収端 XANES スペクトル



図(4)-12 底質中の硫黄の存在状態 (模式図)

- S_8 (価数: 0)
- 硫化物 (価数: -2~-1)
有機体 $\text{S}^{0 < \text{価数} \leq +5}$
- 水 (SO_4^{2-}) (価数: +6)
- 鉱物 (S 非含有)

(5) 底泥間隙水の分析結果

底泥間隙水の測定結果を表(4)-5に示した。これによると、泥質化が進んだ、山ノ神沼、長浜沖、長命寺沖は、泥質化が進んでいない愛知川沖より溶存有機物濃度が高いこと、山ノ神沼と長浜沖は他の地点と比べて電気伝導率が高いこと、全地点とも、無機窒素は、ほとんどアンモニア態窒素であることが判明した。これらのことから、底質の泥質化が進むことにより、間隙水中の有機物濃度、電解質濃度が高くなること、底泥直下の溶存酸素濃度が低かったことに依存して、無機窒素形態がアンモニア態窒素に還元を受けていることが考えられた。また、波浪等によって底泥が攪乱されたときには、直上の水質よりも高濃度の溶存有機物が回帰することが考えられた。

表(4)-5 底泥間隙水の分析結果(2011年11月)

項目	単位	山ノ神沼	長浜沖	長命寺沖	愛知川沖
DOC	mg/L	7.3	8.1	5.6	3.4
NO ₂ -N	mg/L	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
NO ₃ -N	mg/L	<0.1	<0.1	<0.1	0.2
NH ₄ -N	mg/L	7.4	8.6	2.0	0.49
EC	mS/m	42	27	16	16
pH	-	8.3	8.1	7.9	7.6

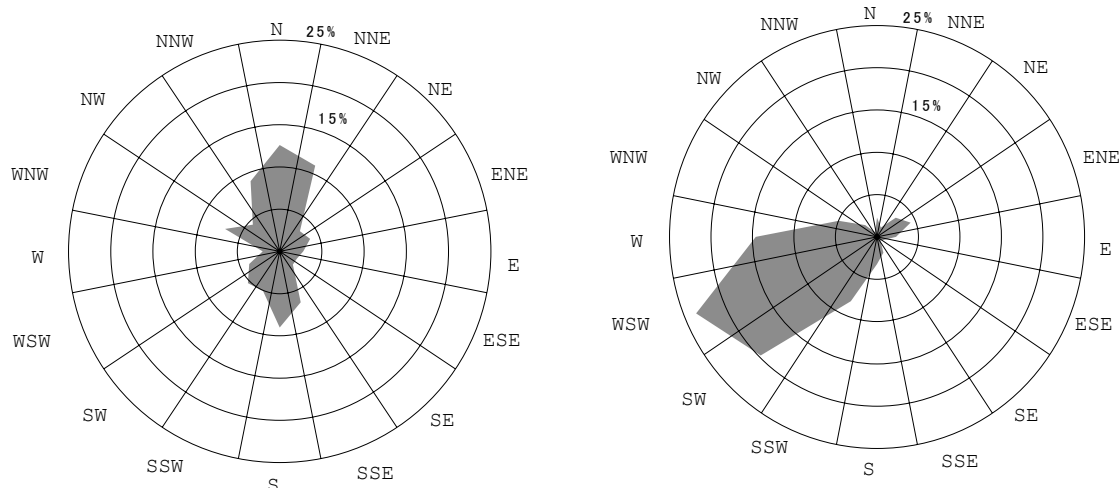
(6) 流向流速測定結果

1) 観測データの解析方法

粒径ごとの碎屑物の削剥、移動、沈殿の関係を示す Hjulstrom diagram⁴⁾では湖底直上 1m の平均流速を用いて議論されているため、本研究においても湖底直上 1m の流向、流速の値を用いて解析を行った。また、測定期間内の 2012 年 9 月 16 日に台風 16 号が測定地点に接近し風速が平常時の 3 倍に大きくなったため、本研究の解析では台風接近以前の 2012 年 9 月 13 日～2012 年 9 月 15 日の値を用いた。ADCP によって得られた値より、3 日間での平均流速、最大流速、最小流速と流向頻度を求めた。さらに流向頻度と平均流速より合成速度ベクトルを求めた。合成速度ベクトルは各流向での流向頻度に各流向での平均流速を乗じ、北方成分と東方成分に分け全流向の総和を取って求めたものである。一方向の流れが卓越する場合は合成速度ベクトルが大きくなり、流向が一定しない場合は合成速度ベクトルの大きさが 0 に近づく。なお、浅瀬での測定のため風の影響を受けると考えられたため、彦根地方気象台（長命寺地点より約 23km、愛知川地点より約 15km）と東近江観測所（両地点より約 17km）の気象データを確認したところ、特異的な風況は認められなかった。

測定期間中における湖底直上 1m の平均流速は、長命寺地点が $3.4 \pm 1.9 \text{ cm s}^{-1}$ (平均流速 ± 標準偏差)、愛知川地点が $3.9 \pm 2.0 \text{ cm s}^{-1}$ と大きくは異ならなかった。また測定期間中の最大流速値は長命寺地点が 9.6 cm s^{-1} 、愛知川地点が 9.3 cm s^{-1} であった。最小流速値は長命寺地点、愛知川地点共に 0.2 cm s^{-1} であった。したがって、平均流速および最大・最小流速と湖岸形状および含泥率には関係が見られなかった。

図(4)-12 に両地点の流向頻度を示す。これによると、長命寺地点の最多出現流向は出現率 12.5%の北向きであり、北向きの平均流速は 3.9cm s^{-1} であった。また、南向きの出現率は 8.9%で平均流速は 4.7cm s^{-1} であった。さらに全方位の合成速度ベクトルは北西に 0.37cm s^{-1} であった。一方、愛知川地点の最多出現流向は出現率 22.5%の西南西で、平均流速は 5.1cm s^{-1} であった。真逆の方角である東北東の出現頻度は、4.2%で平均流速は 4.5cm s^{-1} であった。合成速度ベクトルは南南西に 2.5cm s^{-1} であった。合成速度ベクトルの大きさを比較すると愛知川地点は長命寺地点の約 7 倍になることが分かった。したがって、愛知川地点は長命寺地点よりも一方向への流れが卓越していることが分かった。このことより長命寺地点では流向が変化しながら全体として水塊が同じ場所に留まる傾向にあり、水理営力により浮上したシルトは沖に輸送されずに同じ地点で前後左右に行き来しながら留まって、流速が弱まると再沈降すると考えられる。また、長命寺地点は大きな湖岸勾配を有しており、直立式防波堤や急勾配の斜面では波が反射されることが知られていることから⁵⁾、湖岸勾配の影響を受けている可能性が示唆される。一方、愛知川地点は一方向流のためシルトは一旦浮上すると沖へ流出し、結果として泥質化しにくい環境にあると考えられる。愛知川地点が一方向流になる要因としては、愛知川地点はその西側約 400m 地点に愛知川河口があり、愛知川からの流入による影響が示唆される。愛知川の 2012 年 4 月から 2013 年 3 月の平均流量（滋賀県、2013）は $5.52\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ と長命寺と比較すると大きく、愛知川からの流入の影響を受けている可能性が考えられる。なお、長命寺地点においても南側約 700m 地点には長命寺川の河口があり、長命寺地点の合成ベクトルは北西向きであることから堆積しているシルトは、長命寺川からの流入の影響を受けている可能性がある。ただし、合成ベクトルの大きさが 0.37cm s^{-1} と小さいことに加えて、長命寺川の 2012 年 4 月から 2013 年 3 月の平均流量（滋賀県、2013）が $2.8\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ と小さいことから晴天時の影響は小さいと判断される。



図(4)-12 長命寺（左）と愛知川（右）の流向出現頻度

(7) 沿岸帯底質の泥質化過程と泥質化の影響（まとめ）

前項までの各種調査・検討の結果および一般に言われる陸水学的知見に基づき、沿岸帯底質が泥質化する過程と、泥質化した結果生じる底質環境の変化を表(4)-6にまとめた。

表(4)-6 底質の泥質化過程と泥質化の影響

泥質化過程	原因となりうる要因	底質環境の変化
濁質の沈降・堆積量増加	<ul style="list-style-type: none"> ・湖岸形態の変化, 湖流の停滞 ・流入河川(水量、水質)の変化 ・湖沼水質の変化(粒子状物質の増加) ・植物プランクトンの増加 	浮泥(有機物)、シルト質の増加
酸素消費量の増加	<ul style="list-style-type: none"> ・微生物による有機物分解に伴う酸素消費 	<ul style="list-style-type: none"> ・溶存酸素の低下 ・表面酸化層が薄くなる
溶存酸素の枯渇	<ul style="list-style-type: none"> ・酸素消費速度>供給速度となる 	<ul style="list-style-type: none"> ・還元的な化学種の生成, 増加 (アンモニア態窒素, 硫化物等)
有機物分解速度の減速	<ul style="list-style-type: none"> ・溶存酸素不足による好氣的分解の減速 	<ul style="list-style-type: none"> ・還元的物質の蓄積
堆積速度の増加	<ul style="list-style-type: none"> ・嫌氣的微生物群集への変化に伴う有機物分解速度の減速 	<ul style="list-style-type: none"> ・泥質化の加速

5. 本研究開発により得られた成果

(1) 科学的意義

1) 琵琶湖沿岸帯（長浜沖、愛知川沖、長命寺沖の3地点）の水質データと沖帯の水質を比較したところ、琵琶湖沿岸帯では、沖帯より浮遊物質、粒子状有機物、クロロフィル量が多い傾向がみられることが判明し、湖岸帯水質の特徴の一部を明らかにすることが出来た。

2) 底質の泥質化が進むと、底質表面の酸化層の厚さが薄くなり、泥質化が進んでいない地点（愛知川沖）では4～6mmの厚さであるが、泥質化が進んだ地点（長浜沖）では2mm程度であることをマイクロセンサーによる測定により、初めて明らかにした。

3) X線吸収端近傍構造測定(XANES)法により、底質中の硫黄の存在状態を測定することが可能であることを示し、さらに、還元的硫黄は、鉱物以外の堆積物由来であることを明らかにした。

3) 底泥間隙水の分析により、琵琶湖沿岸帯における間隙水中の窒素の存在形態が、ほとんどがアンモニア態窒素（還元的）であることを明らかにした。

5) ドップラー流速プロファイラー(ADCP)を用いて流向流速の連続測定を行った結果、底泥の泥質化には流向流速が関与している可能性があることを明らかにした。

6) 上記のことから、沿岸帯においては、沖帯と比べて多い傾向がある粒子状物質が、その供給量や地形、流向・流速等に影響を受けながら沈降し堆積する量により底質の基礎的な特性を決定し、その結果、泥質化が進んだ場合には、溶存酸素が低下し、還元的環境が形成されると考えられた。

(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>

沿岸帯の機能に着目した場合、沿岸帯における粒子状物質の供給量や沈降堆積量を管理し、適切な状態を保つことが、底質の泥質化を防止し、健全な水環境を創出する上で重要である可能性を明らかにした。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない。

<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) 馬場大哉、郡司房子、古田世子、一瀬諭、奥村浩気、岸本直之、中野伸一：日本陸水学会第78回大会(2013)「湖沼における沿岸帯の機能評価について(3)-マイクロセンサーによる底泥直上・直下の溶存酸素分布測定結果」
- 2) 馬場大哉、郡司房子、古田世子、一瀬諭、奥村浩気、岸本直之、村上綾、中野伸一：第48回日本水環境学会年会(2014)琵琶湖における沿岸帯の機能評価—マイクロセンサーによる底泥直上・直下の溶存酸素分布測定結果—

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

- 1) 湖沼生態系に及ぼす沿岸帯の機能評価(2013年9月12日、龍谷大学瀬田学舎2号館120講義室、観客80名)

(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) 一瀬諭、古田世子、藤原直樹、廣瀬佳則、永田貴丸、馬場大哉、岸本直之、西村修(2004) 「琵琶湖北湖沿岸帯湖底における泥質化の現状と藻類・アオコ形成種の分布」,用水と排水,46(5), 391-401
- 2) 矢島悠一、野村宗弘、一瀬諭、鈴木有咲海、西村修(2013) 「Anabaena 休眠細胞の大量形成・回収および発芽評価方法」,日本水処理生物学会誌,49(3),103-108
- 3) 奥村 浩気,岸本 直之,一瀬 諭,馬場 大哉,田中 仁志(2014) 「琵琶湖北湖東岸における湖岸形状と泥質化の関係」,水環境学会誌,37(2),45-53
- 4) Gray Nichols(2009) “Sedimentology and stratigraphy 2nd edition“, Wiley-Blackwell, Chichester
- 5) 磯部雅彦 (1999) 「2.波の変形, 「環境圏の新しい海岸工学」 (榎木享監修) 」,22-23,フジ・テクノシステム,東京

(5) 水塊に回帰してきたプランクトンの増殖、生産とそれに伴う水質影響評価

龍谷大学理工学部環境ソリューション工学科

岸本直之

<研究協力者>

龍谷大学大学院理工学研究科

鈴木 恵・山本純也

平成23～25年度累計予算額：4,600千円

(うち、平成25年度予算額：1,300千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

本サブテーマでは沿岸域からシードとして供給された植物プランクトンが水塊中で再増殖し、特徴ある植物プランクトン群集を形成していく過程を理解するとともに、一次生産された有機物の湖沼中での残存性を明らかにし、その水質影響を評価することを目指し、(1)水温、N/P比が植物プランクトン細胞サイズや粘質鞘サイズに及ぼす影響の評価、(2)一次生産有機物の微生物分解における微小原生動物の役割の評価、(3)濁度が植物プランクトン群集変化に与える影響の評価、(4)植物プランクトンの増殖特性の評価及びその挙動解析を実施した。その結果、細胞容積は高水温条件下で小さくなる傾向にあったが、粘質鞘容積は逆に高水温および高い硝酸性窒素濃度条件下で増加する傾向にあった。これらの変化は増殖速度（細胞質合成速度）および純生産速度の環境応答性の違いにより起因していると考えられた。バクテリア食の微小原生動物が生分解に及ぼす影響については、生分解実験において有意な影響は認められなかったことから、従来の有機物の難分解性評価のための生分解試験方法の妥当性が示された。

濁度が植物プランクトン群集に与える影響については沈降性植物プランクトンである *Staurastrum dorsidentiferum* は濁度や共存する *Microcystis wesenbergii* による光阻害により増殖が阻害されたが、浮上性植物プランクトンである *M. wesenbergii* は *S. dorsidentiferum* に比べて濁度阻害が小さいことから、沿岸帯のような比較的透明度が低く濁度の高い水域において、光阻害により浮上性植物プランクトンの優占化が進行しやすいことが示唆された。植物プランクトンの増殖特性について培養実験および文献調査により評価した結果、珪藻が低水温に適応しており、藍藻は高水温に適応していることが示唆された。植物プランクトンの野外挙動を検討した結果、野外での植物プランクトンの挙動は水温、窒素・リン濃度の影響を受けているが、特に水温とそれに伴う水温成層状況に強く影響されていることが明らかとなり、温暖化影響について今後注視していく必要があると考えられた。

[キーワード]

増殖特性、粘質鞘、細胞容積、濁度影響、微生物分解

1. はじめに

湖では、冬季に水塊から消失したプランクトン種は底泥に沈降し、越冬した後、水温上昇とともに水塊に回帰してくると考えられるが、琵琶湖北湖のような水深の深い湖において、深水層に沈降した植物プランクトンが水塊に回帰してくることは考えにくい。よって、沿岸域底泥が琵琶湖北湖の植物プラン

クトン群集のシードバンクとして機能していることが示唆される。本研究では、沿岸域からシードとして供給された植物プランクトンが水塊中で再増殖し、特徴ある植物プランクトン群集を形成していく過程を理解するとともに、一次生産された有機物の湖沼中での残存性を明らかにし、その水質影響を評価することを旨とし、「2. 研究開発目的」に示す研究を実施した。

2. 研究開発目的

- (1) 水温、N/P比が植物プランクトン細胞サイズや粘質鞘サイズに及ぼす影響の評価
- (2) 一次生産有機物の微生物分解における微小原生動物の役割の評価
- (3) 濁度が植物プランクトン群集変化に与える影響の評価
- (4) 植物プランクトンの増殖特性の評価及びその挙動解析

3. 研究開発方法

- (1) 水温、N/P比が植物プランクトン細胞サイズや粘質鞘サイズに及ぼす影響の評価

供試藻類として粘質鞘を有する大型緑藻（車軸藻綱）*Staurastrum arctiscon*単藻株を用い、M11培地¹⁾のクエン酸鉄濃度を1/10としたM11改変培地で三角フラスコを用いた静置培養を行った。対数増殖期に入った細胞をM11改変培地の窒素およびリンを除いた飢餓培地に接種し、倍加時間静置培養を行って、細胞内の栄養塩含量を最小とした。飢餓培地で培養した細胞を、リン濃度を0.01または0.1mg/Lに調整し、N/P重量比を5～100に調整したM11改変培地に接種し、静置培養を行った。対数増殖相に達したことを確認後、ランダムに20細胞を取り出し、細胞容積、粘質鞘容積を計測した。同様にN/P比調整M11改変培地で培養する前の細胞についても細胞容積、粘質鞘容積を計測した。培養温度は15、20、25℃に設定した。

粘質鞘を有する小型藍藻*Aphanothece clathrata*単藻株を用いて、*S. arctiscon*と同様にM11改変培地を用いて試験管静置培養を実施した。*A. clathrata*は不定形群体を形成し、粘質鞘容積を正確に求めることが困難であったため、培地中細胞密度と全有機炭素（TOC）を測定し、粘質鞘を含む純生産速度を評価した。

- (2) 一次生産有機物の微生物分解における微小原生動物の役割の評価

植物プランクトンとして琵琶湖より単離された緑藻（車軸藻綱）の*Staurastrum dorsidentiferum*、バクテリア食の動物プランクトンとして繊毛虫綱*Paramecium caudatum*を用いた。それぞれM11培地¹⁾のクエン酸鉄濃度を1/10としたM11改変培地および大麦若葉粉末抽出液（0.2g/L）を用いて継代培養したものである。また、バクテリア源として琵琶湖水をガラス繊維ろ紙（Whatman GF/B）でろ過したろ過湖水を用いた。あらかじめオートクレーブ滅菌したガラス製の70mLスクリー管（マルエム、No. 7L）21本のそれぞれに事前に高密度に培養した*S. dorsidentiferum*培養液を60mL、*P. caudatum*を2個体、ろ過湖水を1.2mL添加し、20℃、暗条件下で30日間静置培養を行った。

培養期間中、0、1、2、5、10、20、30日目にスクリー管3本を開封し、有機炭素（TOC、DOC）、窒素（TN、DN）、リン（TP、DP）浮遊物質（SS）および菌数（DAPI法）を測定した。また、コントロールとして、*P. caudatum*を接種しないスクリー管を21本準備し、同様の操作を行った。

- (3) 濁度が植物プランクトン群集変化に与える影響の評価

濁度影響を評価する植物プランクトンとして、琵琶湖より単離された緑藻（車軸藻綱）に属する*S.*

*dorsidentiferum*と藍藻に属する*Microcystis wesenbergii*を用いた。これらの植物プランクトンはいずれもM11培地¹⁾のクエン酸鉄濃度を1/10としたM11改変培地を用いて継代培養したものである。人工濁質として、墨液（サンノート、書道用墨液ぼくえき）を用いた。墨液の添加量は0.07mL/Lであり、これはカオリン濁度100度に相当する。あらかじめオートクレーブ滅菌し、底面および側面をアルミホイルで遮光した500mLのストレートボトル（Fisher Scientific）にオートクレーブ滅菌した培地200mLを入れ、事前に高密度培養した*S. dorsidentiferum*培養液を2mL、*M. wesenbergii*培養液を0.5mL接種した。ストレートボトル上部に滅菌したシャーレを被せ、上部からのみ光が入射するようにした。植物プランクトン接種後のストレートボトルを人工気象器（日本医科器械製作所、LH-55-RDS）内に設置し、静置三連培養を行った。培養条件は20℃、光強度（光合成有効放射PAR）は水面上で36.5 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ に設定した。この条件でのストレートボトル底面での光強度は水面の光強度の8.2%であり、概ね琵琶湖東岸水深6.5~7mの光環境に相当する。培養期間中、2~3日に1度の頻度でストレートボトルを手で軽く攪拌し、植物プランクトン数を計数した。*S. dorsidentiferum*の計数にはプランクトン計数板（Matsunami, MPC-200）を、*M. wesenbergii*の計数には細胞計算板（Digital Bio, C-chip DHC-B02）を用い、光学顕微鏡で直接計数した。比較のために、それぞれの植物プランクトンの単独培養も実施した。また、混合培養、単独培養いずれにおいても濁度を添加した系と濁度を添加しない系を準備し、濁度の影響を評価した。

（4）植物プランクトンの増殖特性の評価及びその挙動解析

琵琶湖より分離培養した主要な植物プランクトン（緑藻*Staurastrum dorsidentiferum* var. *ornatum*、*Staurastrum arctiscon*、藍藻*Aphanothece clathrata*、*Microcystis wesenbergii*）の増殖特性を窒素濃度やリン濃度を調整したM11改変培地を用いた培養実験により評価した。培養条件として水温10~35℃、窒素濃度0.1~2.0mgN/L、リン濃度0.01~0.1mgP/Lを変化させた。また、栄養塩濃度調整時は飢餓培地による2週間の前培養を行った。対数増殖期の細胞密度変化データから比増殖速度を求めた。加えて、その他の藍藻、珪藻、緑藻に属する植物プランクトンについて文献調査を実施し、様々な淡水植物プランクトンの増殖特性を整理・評価した。文献調査においては必ずしも比較可能な情報が明記されていないため、必要に応じて文献に記載されている増殖曲線グラフをデジタル化し、数値を読み取った上でカーブフィッティングを行い、増殖パラメータを求めた。

また、細胞容積から見た琵琶湖優占種である大型車軸藻*Staurastrum dorsidentiferum* var. *ornatum*に着目し、琵琶湖北湖今津沖中央地点の水質、水温データと培養により得られた増殖特性のデータから、野外における*S. dorsidentiferum*の変動要因を解析した。

4. 結果及び考察

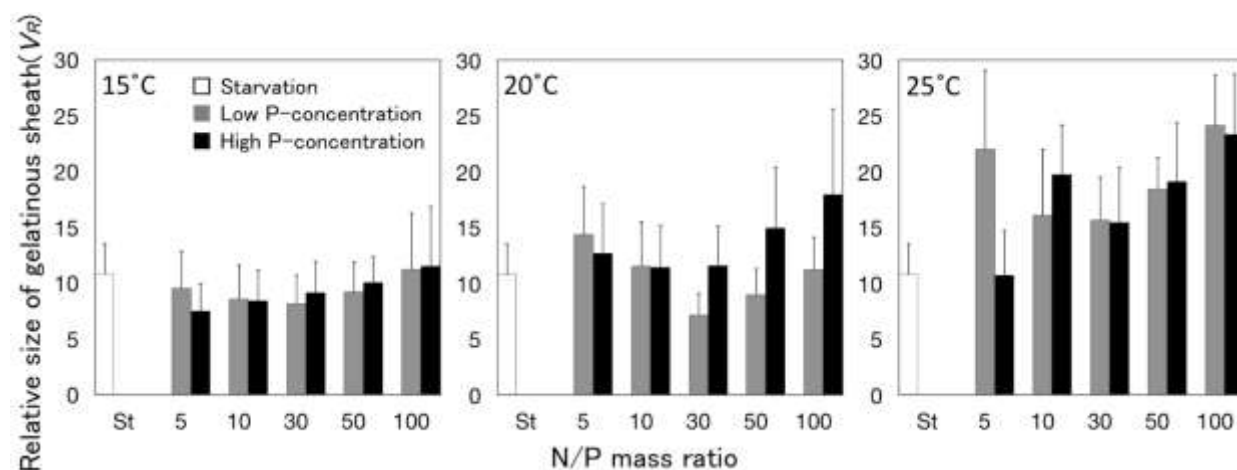
（1）水温、N/P比が植物プランクトン細胞サイズや粘質鞘サイズに及ぼす影響の評価

実験結果の一例として、表(5)-1に*S. arctiscon*の粘質鞘容積と細胞容積のデータを、図(5)-1に*S. arctiscon*を培養した際の粘質鞘相対容積（ $V_R = \text{粘質鞘容積} \div \text{細胞容積}$ ）の測定結果を示す。表の範囲およびグラフのエラーバーは観測値の不偏標準偏差を示し、培地中リン濃度0.01mgP/Lのときを低濃度、0.1mgP/Lのときを高濃度として表示している。表(5)-1より水温が高くなるにつれ、粘質鞘容積が大きく、細胞容積は小さくなる傾向が見て取れるが、リン濃度の影響やN/P比の明確な影響は認められなかった。また、図(5)-1より粘質鞘相対容積においても温度上昇とともに増加する傾向が見られるが、粘質鞘容積と同様にリン濃度およびN/P比の影響は明確ではなかった。これらの結果を踏まえ、水温、硝酸イオン濃度、リ

ン酸イオン濃度を説明変数として重回帰分析を行った。解析結果を表(5)-2に示す。表より粘質鞘容積および粘質鞘相対容積は水温および硝酸イオン濃度に関して有意な正の回帰係数を示したのに対し、細胞容積は水温との間にのみ有意な負の回帰係数を示した。一般に水温上昇に伴って増殖速度および純生産速度は増加するが、両者は同じように増加するわけではない。

Raven and Geider²⁾は光合成、呼吸および硝酸還元活性のQ10値がそれぞれ2.6, 2.0, 1.8であることを報告している。硝酸還元活性は生合成速度と関係していることから、これらのQ10値は温度上昇に伴う純生産速度の増加率は生合成速度の増加率よりも大きいことを示している。すなわち、水温上昇に伴って純生産速度が生合成速度よりも大きく増加することから、光合成産物である炭水化物が過剰生産されることになる。その結果、余剰の炭水化物は細胞外に放出され、粘質鞘の成長を促し、粘質鞘容積の増大を招くと考えられる。一方、増殖速度の増大は分裂直後の細胞の割合を増加させる。その結果、平均細胞サイズは小さくなると考えられる。まとめると、増殖速度（生合成速度）増加率と純生産速度の増加率の違いが細胞容積と粘質鞘容積の温度依存性を変化させている要因であると推測された。

粘質鞘相対容積と比増殖速度の関係を図(5)-2に示す。図(5)-2より、水温15°Cの場合を除いて、比増殖速度の増加とともに粘質鞘相対容積が減少する結果となった。同様の関係は藍藻*A. clathrata*の純生産速度と比増殖速度との関係でも認められた（図(5)-3）。N/P比を増大させると比増殖速度が低下したことから、P制限により細胞分裂が抑制された結果、生合成速度が低下し、余剰な光合成産物が細胞外排泄有機物として分泌され、粘質鞘の増大に結びついている可能性が示唆された。



図(5)-1 N/P比の異なる培地における粘質鞘相対容積の変化
(St: 飢餓培養時)

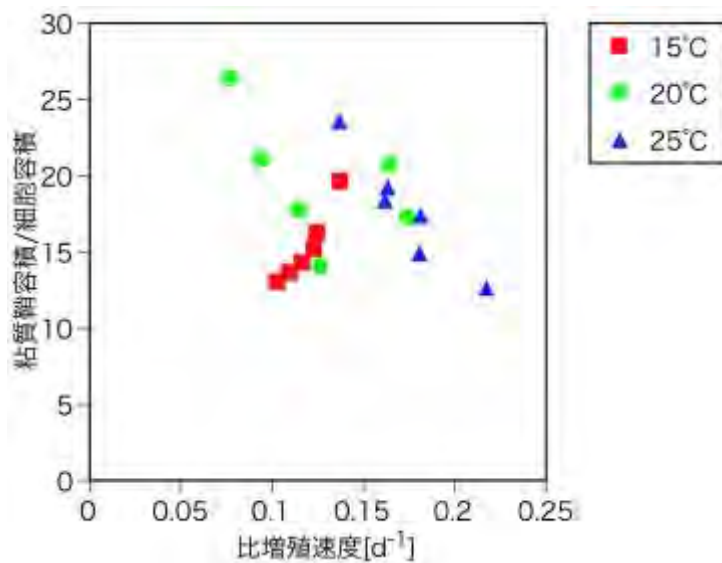
表(5)-1 *S. arctiscon*の粘質鞘容積(V_G)と細胞容積(V_C)のデータ (St: 飢餓培養時)

$V_G [\times 10^3 \mu\text{m}^3/\text{cell}]$						
N/P	Low P concentration (0.01 mg P/L)			High P concentration (0.1 mg P/L)		
	15°C	20°C	25°C	15°C	20°C	25°C
St	1190 ± 281					
5	992 ± 303	1239 ± 306	1940 ± 597	777 ± 192	1169 ± 418	1068 ± 296
10	991 ± 396	1078 ± 407	1389 ± 411	903 ± 297	1123 ± 352	1717 ± 327
30	911 ± 297	704 ± 171	1470 ± 324	924 ± 311	1087 ± 307	1263 ± 240
50	1259 ± 279	927 ± 164	2043 ± 372	1448 ± 561	1659 ± 658	1412 ± 303
100	1238 ± 270	797 ± 109	1863 ± 249	1428 ± 380	1106 ± 660	1744 ± 263

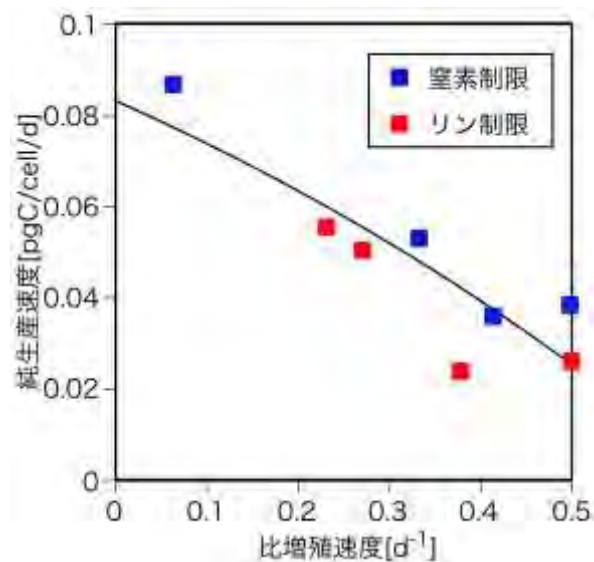
$V_C [\times 10^3 \mu\text{m}^3/\text{cell}]$						
N/P	Low P concentration (0.01 mg P/L)			High P concentration (0.1 mg P/L)		
	15°C	20°C	25°C	15°C	20°C	25°C
St	111 ± 23					
5	107 ± 20	89 ± 15	90 ± 14	109 ± 20	94 ± 17	103 ± 25
10	116 ± 19	95 ± 14	89 ± 16	110 ± 21	101 ± 17	88 ± 9
30	115 ± 23	102 ± 16	95 ± 8	102 ± 13	96 ± 17	88 ± 19
50	141 ± 21	104 ± 13	110 ± 9	136 ± 21	114 ± 19	74 ± 14
100	118 ± 27	74 ± 8	77 ± 7	124 ± 17	61 ± 4	71 ± 12

表(5)-2 重回帰分析結果

Dependent variable	V_G	V_C	V_R
Predictor variable			
WT	50.4×10^3 ($p = 0.001$)	-2.91×10^3 ($p = 0.000$)	0.913 ($p = 0.000$)
N	3.86×10^3 ($p = 0.048$)	-0.104×10^3 ($p = 0.268$)	0.061 ($p = 0.002$)
P	-120×10^3 ($p = 0.359$)	-5.26×10^3 ($p = 0.935$)	-13.4 ($p = 0.276$)
Intercept	249×10^3 ($p = 0.36$)	160×10^3 ($p = 0.000$)	-5.225 ($p = 0.046$)
Adjusted R^2	0.37	0.407	0.702



図(5)-2 *S. arctiscon*の粘質鞘相対容積の比増殖速度依存性



図(5)-3 *A. clathrata*の純生産速度の比増殖速度依存性

(2) 一次生産有機物の微生物分解における微小原生動物の役割の評価

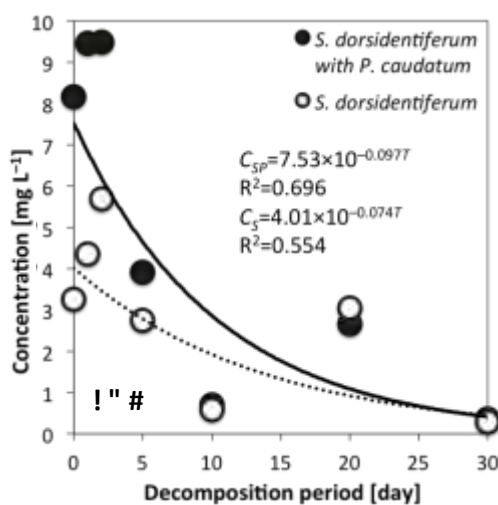
図(5)-4に生分解過程でのPOCの経時変化を示す。POCは共に経時的に減少しており、生分解が起きていることが確認された。POCの生分解曲線は概ねPOC濃度に関する一次反応で近似された。図(5)-4に示した近似曲線より、POCの生分解速度定数は*P. caudatum*非共存系で0.074 d⁻¹、*P. caudatum*共存系で0.097 d⁻¹であったが、 $p=0.398$ であり、統計的有意差は認められなかった。

DOC生分解速度はPOCの分解に伴うDOCの生成があることから、DOC濃度変化のみでは評価できない。DOCに関する物質収支式は以下の通りとなる。

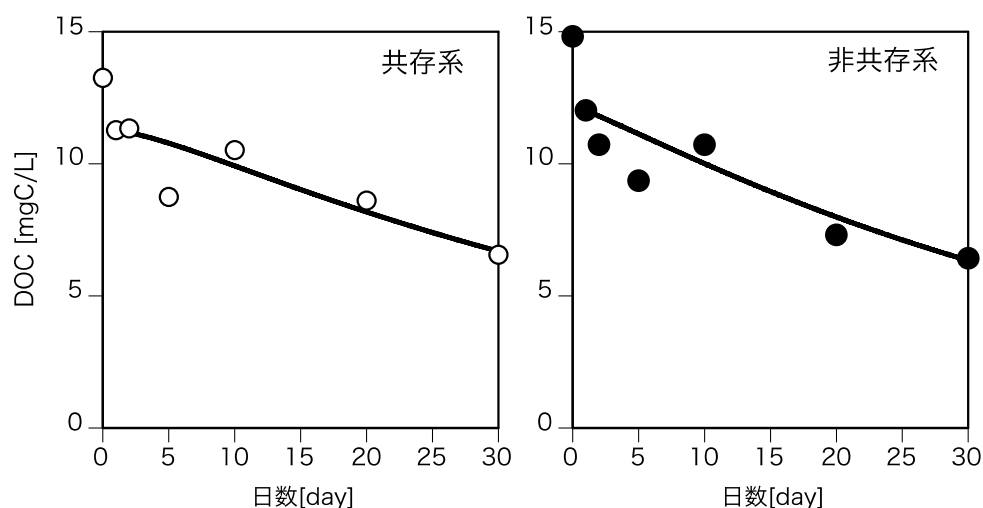
$$\frac{dC_{DOC}}{dt} = -a \frac{dC_{POC}}{dt} - k_{DOC} C_{DOC} \quad [1]$$

ここで、 C_{DOC} はDOC濃度、 C_{POC} はPOC濃度、 t は時間、 k_{DOC} はDOC生分解速度定数であり、 α はPOCの生分解に伴って排出されるDOCの割合である。式[1]の右辺第一項はPOCの生分解に伴うDOCの供給速度を表しており、右辺第二項はDOCの生分解速度を表している。式[1]において、非定常状態を仮定し、数値計算法により k_{DOC} の値を評価した。図(5)-5に*P. caudatum*共存系および非共存系のDOC経時変化の計算値と実測値を示す。なお、計算に当って、 α は過去の生分解実験結果から0.1の値を与えた。また、生分解試験の初期には培地等に含まれる易分解性有機物の影響で有機物分解過程が大きく影響されることが危惧されることから、生分解1日後のデータを数値計算の初期値に採用した。図より、実測値と計算値は概ね一致していることが判る。計算値と実測値の相関係数を求め、相関係数が最大となるように k_{DOC} を試行錯誤的に検討した結果、生分解速度定数は*P. caudatum*共存系で 0.020 d^{-1} ($R=0.87$)、非共存系で 0.023 d^{-1} ($R=0.92$)と評価された。両者に統計的有意性は認められなかったことから、POCと同様に生分解試験においてバクテリア食の微小原生動物はDOC分解速度に影響を及ぼすとは言えないという結果となった。

以上より、POC生分解速度定数、DOC生分解速度定数のいずれも*P. caudatum*共存系においてやや大きくなる傾向が得られたが、統計的有意差は認められず、バクテリア食の微小原生動物が一次生産有機物のバクテリアによる生分解に有意な影響は及ぼさないと判断された。本結果は、従来の有機物の難分解性評価のための生分解試験方法の妥当性を支持するものであった。



図(5)-4 *S. dorsidentiferum*の生分解過程におけるPOC濃度の経時変化



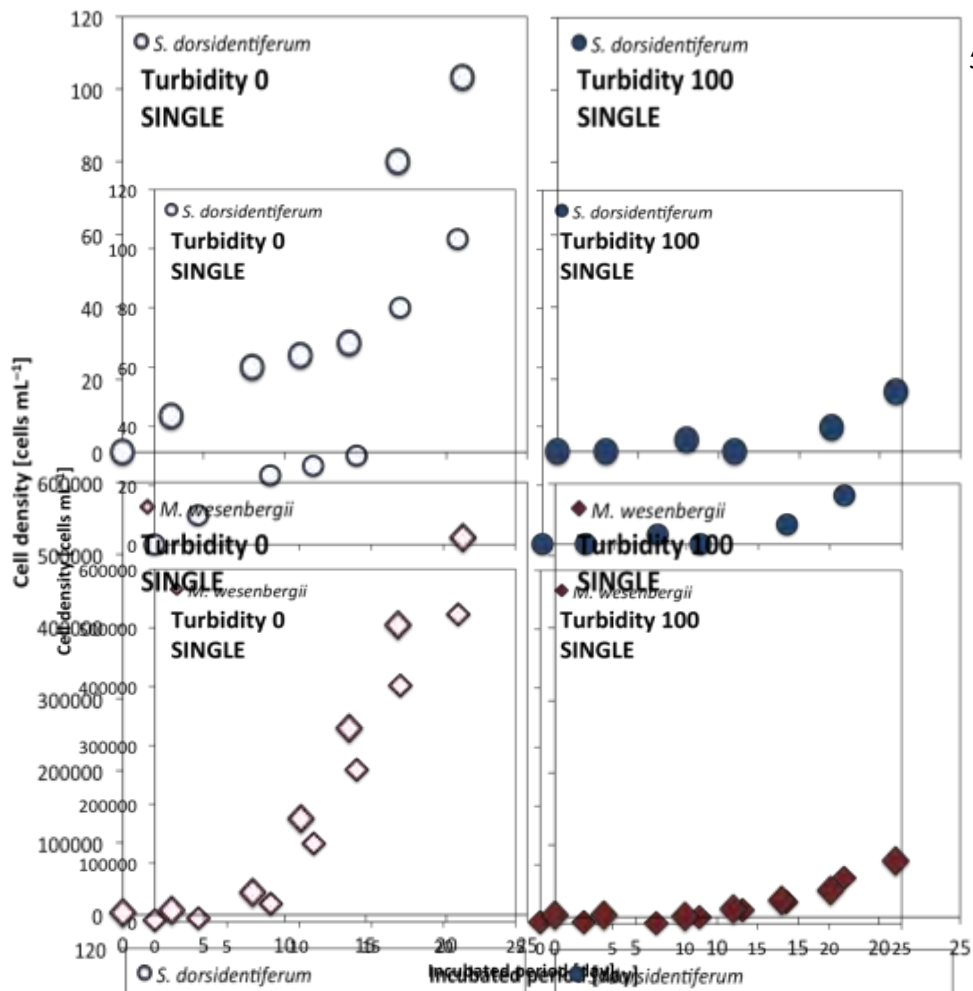
図(5)-5. *S. dorsidentiferum*の生分解試験における微小原生動物*P. caudatum*共存の有無によるDOC経時変化（プロット：実測値、実線：モデル計算による予測値）

(3) 濁度が植物プランクトン群集変化に与える影響の評価

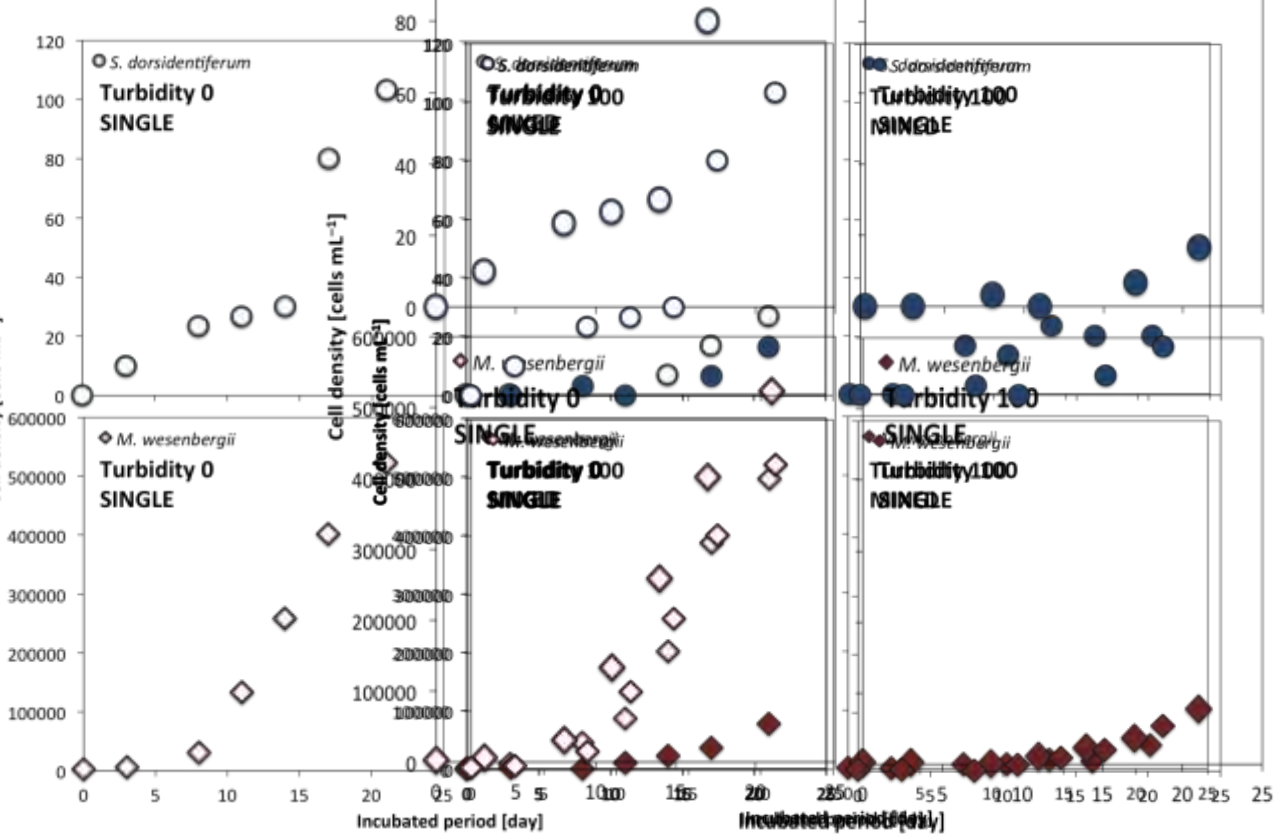
図(5)-6に各植物プランクトンの単独培養時の増殖曲線を、図(5)-7に混合培養時の増殖曲線を示す。図(5)-6より、*S. dorsidentiferum*および*M. wesenbergii*のいずれも濁度添加により増殖が阻害されている。これは濁度成分による光阻害であると考えられた。また、図(5)-7より*M. wesenbergii*は*S. dorsidentiferum*の共存の影響をあまり受けないが、*S. dorsidentiferum*は*M. wesenbergii*との共存によっても増殖阻害を受けることがわかる。この要因として、*S. dorsidentiferum*が*M. wesenbergii*による他感作用と*M. wesenbergii*の繁茂による光阻害が考えられる。これらの増殖阻害効果を評価するために、以下の式に基づいて、濁度阻害率を算出した。

$$IR = \frac{m_0 - m}{m_0} \cdot 100 [\%]$$

ここで、IRは阻害率、 μ_0 はコントロール条件の比増殖速度、 μ は比較条件の比増殖速度である。得られた結果を各条件の比増殖速度の値とともに表(5)-3、(5)-4に示す。



図(5)-6 *S. dorsidentiferum*および*M. wesenbergii*の単独培養時の増殖曲線



図(5)-7 *S. dorsidentiferum*および*M. wesenbergii*の混合培養時の増殖曲線

表(5)-3. *M. wesenbergii*の比増殖速度と増殖速度阻害率

	濁度0度	濁度100度	濁度阻害率
単独培養	0.315 d ⁻¹	0.155 d ⁻¹	51%
混合培養	0.281 d ⁻¹	0.145 d ⁻¹	48%
混合培養阻害率	11%	有意差なし	

表(5)-4. *S. dorsidentiferum*の比増殖速度と増殖速度阻害率

	濁度0度	濁度100度	濁度阻害率
単独培養	0.119 d ⁻¹	0.011 d ⁻¹	91%
混合培養	0.028 d ⁻¹	0.024 d ⁻¹	有意差なし
混合培養阻害率	76%	有意差なし	

表(5)-3より、*M. wesenbergii*は濁度0度のときに混合培養によって11%ほどの阻害が見られるものの、濁度100度の時には阻害は認められず、また、濁度による阻害（阻害率48～51%）と比較して低かったことから、濁度の影響を受けるが、*S. dorsidentiferum*の影響は受けないことが示された。一方、表(5)-4より、*S. dorsidentiferum*は単独培養時に濁度により91%の増殖阻害を受け、濁度0度のとき混合培養により76%の阻害を受けたが、濁度と混合培養による複合影響は見られなかった。よって、混合培養時の増殖阻害は主として*M. wesenbergii*の繁茂による光阻害が原因と考えられた。

*S. dorsidentiferum*は沈降性の植物プランクトンであり、*M. wesenbergii*は浮上性の植物プランクトンであることから、本結果は、底質巻上げによる濁度発生やプランクトンの繁茂により、透明度が低下した場合、*M. wesenbergii*に代表される浮上性植物プランクトンが優占しやすくなることを示唆している。

(4) 植物プランクトンの増殖特性の評価及びその挙動解析

植物プランクトン培養実験結果及び文献調査結果を併せて、各植物プランクトンの最大比増殖速度、至適水温、Monodモデルにおける栄養塩濃度の半飽和定数を表(5)-5～(5)-7にまとめる。表に示すように増殖特性は植物プランクトンの種依存性が強く明確な違いを指摘することは難しいが、珪藻は緑藻と比較して統計的に有意に至適水温が低いという特徴があった。また、有意性はないものの緑藻の最大比増殖速度は小さい傾向にあり、表には示していないが、藍藻の増殖可能水温下限値は10～15℃付近にあり、緑藻や珪藻に比較して高いという特徴が認められた。

表(5)-5 藍藻、珪藻、緑藻の最大比増殖速度

分類	種名	μ_{\max} [d ⁻¹]	出典
ラン藻 0.91±0.54 (平均±SD)	<i>Anabaena flos-aqua</i>	1.19	3)
	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	0.95	4)
	<i>Aphanothece clathrata</i>	0.60	本研究
	<i>Microcystis aeruginosa</i>	1.10	5)
		1.79	6)
	<i>Microcystis wesenbergii</i>	0.43	本研究
	<i>Oscillatoria redkeil</i>	0.27	6)
		0.45	6)
	<i>Phormidium luridum</i>	1.40	3)
	<i>Synechococcus</i> sp.	0.31	7)
	1.73	6)	
	<i>Tychonema bourrellyi</i>	0.69	8)
珪藻 1.14±0.86 (平均±SD)	<i>Asterionella formosa</i>	1.03	8)
	<i>Aulacoseira granulata</i>	0.32	7)
	<i>Fragilaria crotonensis</i>	0.67	9)
	<i>Nitzschia palea</i>	2.75	6)
	<i>Nitzschia</i> sp.	0.32	7)
	<i>Skeletonema costatum</i>	1.31	3)
		1.61	6)
緑藻 0.57±0.37 (平均±SD)	<i>Ankistrodesmus falcatus</i>	0.32	7)
	<i>Pediastrum biwaë</i>	0.49	10)
	<i>Sphaerocystis schroeteri</i>	1.44	3)
	<i>Closterium aciculare</i>	0.44	11)
	<i>Staurastrum arcticon</i>	0.49	本研究 12)
	<i>Staurastrum cingulum</i>	0.66	8)
	<i>Staurastrum dorsidentiferum</i>	0.36	13)
		0.37	本研究 14)

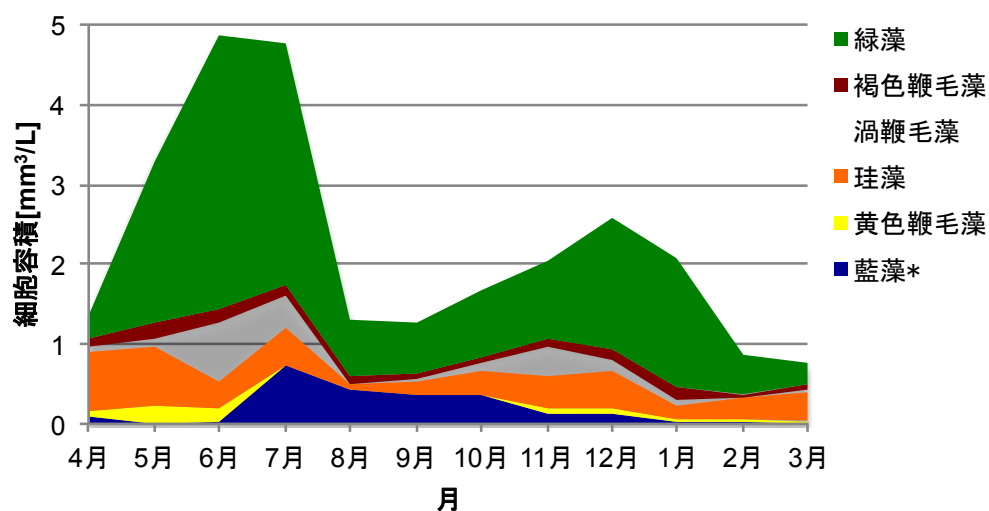
表(5)-6 藍藻、珪藻、緑藻の増殖指摘水温

分類	種名	T_{opt} [°C]	出典
ラン藻 25.0±5.4 (平均±SD)	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	26.5	4)
	<i>Aphanothece clathrata</i>	20.8	本研究
	<i>Microcystis aeruginosa</i>	32.1	5)
	<i>Microcystis wesenbergii</i>	30.0	本研究
	<i>Synechococcus</i> sp.	21.5	7)
	<i>Tychonema bourrellyi</i>	18.9	8)
珪藻 21.3±2.4 (平均±SD)	<i>Asterionella formosa</i>	21.0	8)
	<i>Aulacoseira granulata</i>	20.4	7)
	<i>Fragilaria crotonensis</i>	24.7	9)
	<i>Nitzschia</i> sp.	19.1	7)
緑藻 26.9±2.8 (平均±SD)	<i>Ankistrodesmus falcatus</i>	24.8	7)
	<i>Closterium aciculare</i>	24.7	11)
	<i>Staurastrum arcticon</i>	25.0	本研究 12)
	<i>Staurastrum cingulum</i>	30.0	8)
	<i>Staurastrum dorsidentiferum</i>	30.0	本研究 14)

表(5)-7 藍藻、珪藻、緑藻のMonodモデルにおける栄養塩濃度の半飽和定数

分類	種名	K_N [$\mu\text{gN/L}$]	K_P [$\mu\text{gP/L}$]	出典
ラン藻	<i>Aphanothece clathrata</i>	370	18	本研究
	<i>Microcystis aeruginosa</i>	140	8.9	5)
	<i>Synechococcus sp.</i>	1,068	11.6	7)
珪藻	<i>Aulacoseira granulata</i>	28	4.1	7)
	<i>Fragilaria crotonensis</i>	3,200	310	9)
	<i>Nitzschia sp.</i>	288	2.1	7)
緑藻	<i>Ankistrodesmus falcatus</i>	155	5.3	7)
	<i>Pediastrum biwae</i>	74	6.7	15) 16)
	<i>Closterium aciculare</i>	220	31	11)
	<i>Staurastrum arctiscon</i>	76	11	本研究 12)
	<i>Staurastrum dorsidentiferum</i>	1,230	92	13)
		91	7.5	本研究 14)

次に図(5)-8に琵琶湖北湖長浜沖（17C'）地点表層における2005～2009年度の植物プランクトン細胞容積の経月変化を示す。図より、珪藻は4～5月頃に優占し、その後5～7月に緑藻のピークが到来し、緑藻に遅れて7～10月に藍藻が出現していることが判る。各藻類の増殖特性を鑑みると、4～5月は水温が15℃以下と低く、その結果低水温に適した珪藻が優占するものと考えられる。その後、水温上昇（5～7月で15～25℃）により高温に適した緑藻にシフトし、更なる水温上昇により増殖可能水温下限値の大きい藍藻も活発な増殖によりブルームを形成するものと推測される。このように増殖生理特性から考えると野外における植物プランクトン群集の遷移は主として水温の影響を受けていることが示唆された。

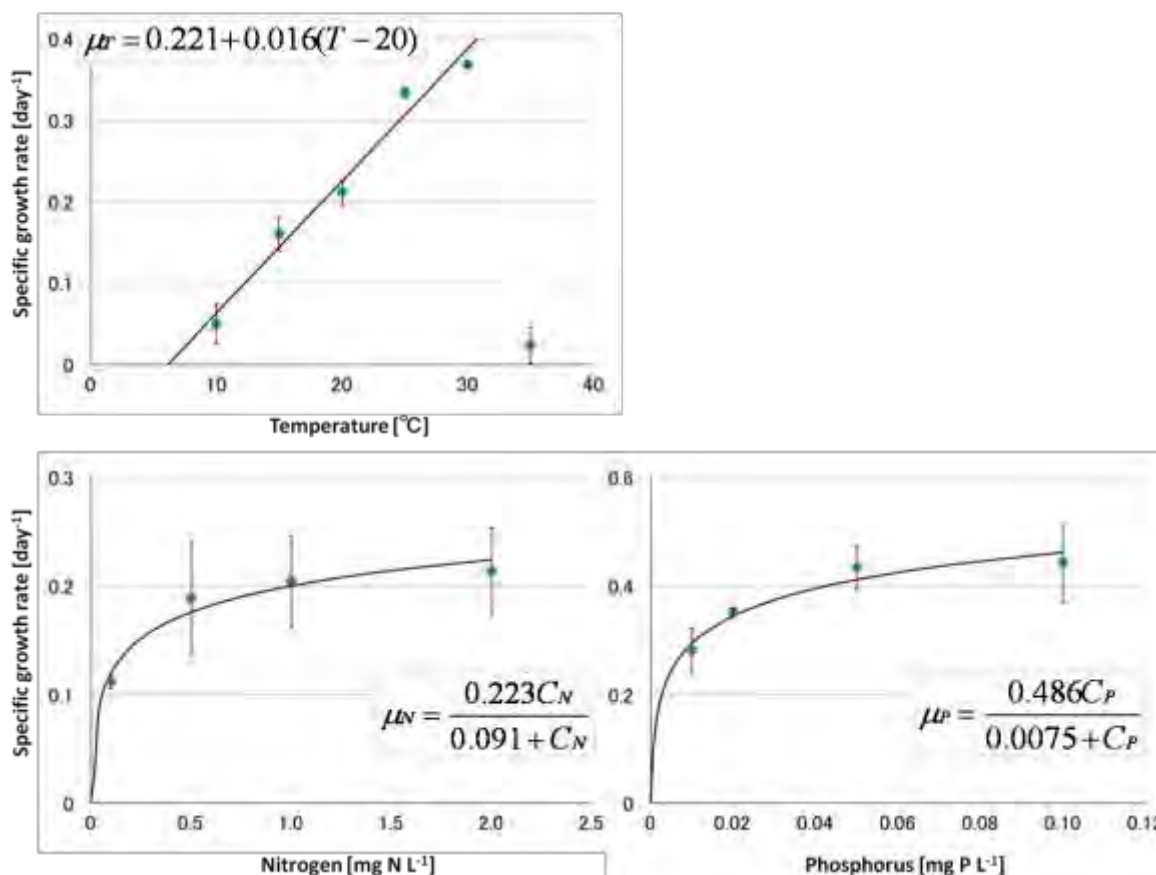


図(5)-8 2005～2009年度平均植物プランクトン細胞容積の経月変化（17C'長浜沖）

次に*S. dorsidentiferum*の野外挙動解析結果について述べる。*S. dorsidentiferum*の増殖特性を培養実験結果を図(5)-9に示す。本培養実験における増殖至適水温は30℃であり、そのときの比増殖速度は0.368 d⁻¹であった。また、図により比増殖速度は水温10～30℃の範囲で直線的に増加した。

$$m_T = 0.221 + 0.016(T - 20) \text{ [d}^{-1}\text{]}$$

ここで、 μ_T : 水温 T [°C]における比増殖速度である。ただし、水温 35°C では強い増殖阻害が見られ、ほとんど増殖しなかった。石上・穂積¹³⁾も*S. dorsidentiferum*を 35°C で培養したところ2週間後に死滅したと報告していることから、本種の増殖上限温度は $30\sim 35^\circ\text{C}$ の間にあると考えられた。一方、増殖下限温度については上式より、 6°C 付近にあると推測された。



図(5)-9 *S. dorsidentiferum*の比増殖速度の水温・窒素濃度・リン濃度依存性

比増殖速度の窒素濃度・リン濃度依存性は以下に示すMonod式で近似することができた。

$$f_N = \frac{C_N}{0.091 + C_N}$$

$$f_P = \frac{C_P}{0.0075 + C_P}$$

ここで、 f_N, f_P : 窒素及びリン濃度に関する影響関数、 C_N, C_P : 窒素及びリン濃度[mg/L]である。

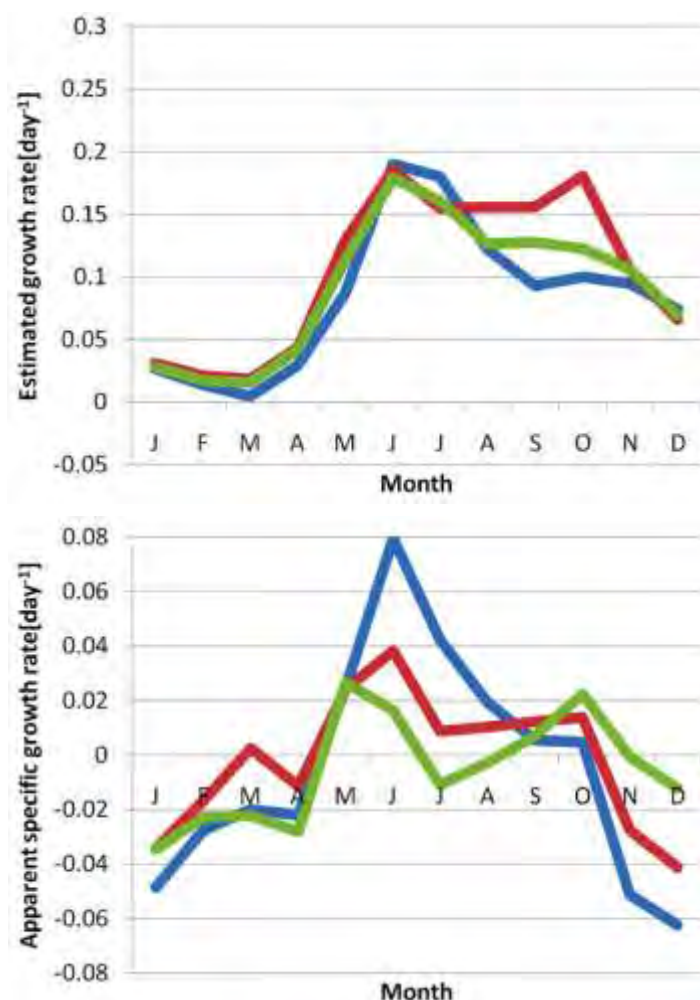
これらの式と琵琶湖北湖今津沖中央地点の環境条件から、以下の式により、*S. dorsidentiferum*の生理学的な比増殖速度および野外での*S. dorsidentiferum*の細胞密度変化から求めた見かけの比増殖速度と推定した。

$$m_{\text{phy}} = m_T \cdot \min(f_N, f_P)$$

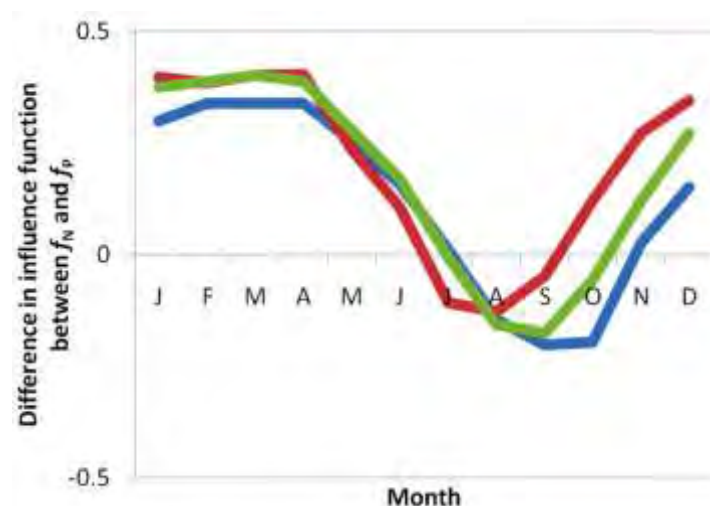
$$m_A = \frac{\ln M_{t+Dt} - \ln M_t}{Dt}$$

ここで、 μ_{phy} は増殖生理特性より求めた生理学的な比増殖速度[d^{-1}]、 μ_A は見かけの比増殖速度[d^{-1}]、 $\min()$

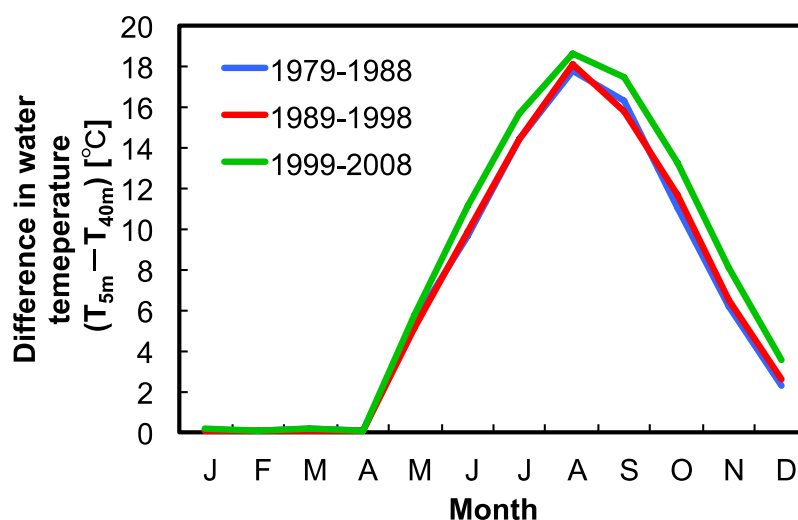
は最小値をとる関数、 M は観測された細胞密度[cells/mL]、 t および $t+\Delta t$ はサンプリング日、 Δt はサンプリング時間間隔[day]である。推定結果を図(5)-10に示す。図より、特徴的な挙動として、成層期である夏季の比増殖速度の低下が認められ、30年間で晩秋の見かけの比増殖速度が顕著に増加していることが判った。図(5)-11に窒素濃度影響関数とリン濃度影響関数の経月変化を示す。琵琶湖は一般にリン制限湖といわれているが、夏季～秋季においては窒素濃度影響関数の方がリン濃度影響関数よりも小さくなっており、窒素制限になっていることがわかる。従って、夏季～秋季の比増殖速度の低下は主として表水層での硝酸イオンの枯渇に伴う窒素制限の影響を受けていることが示唆された。一方、晩秋の比増殖速度の増加は増殖特性では説明できなかつた。図(5)-12に琵琶湖北湖今津沖中央地点での表水層と深水層の水温差の経月変化を示す。図より、晩秋の成層期が近年、半月～1ヵ月程度長くなっていることがわかる。よって、晩秋の見かけの比増殖速度の増加は成層期間延長に伴い沈降損失が緩和されたことが主因であると推測された。



図(5)-10 琵琶湖北湖今津沖中央地点における推定比増殖速度（上）と見かけの比増殖速度（下）
（青：1979-1988年平均、赤：1989-1998年平均、緑：1999-2008年平均）



図(5)-11 琵琶湖北湖今津沖中央地点における窒素濃度影響関数とリン濃度影響関数の差 ($f_N - f_P$) の経月変化 (青：1979-1988年平均、赤：1989-1998年平均、緑：1999-2008年平均)



図(5)-12 琵琶湖北湖今津沖中央地点における表水層と深水層の水温差の経月変化

以上のように、野外での植物プランクトンの挙動は水温、窒素・リン濃度の影響を受けているが、特に水温とそれに伴う水温成層状況に強く影響されていることが明らかとなった。琵琶湖では水温の経年的な上昇が報告されており、水温成層は湖沼温暖化の影響を受けやすいことから、温暖化影響についてもさらに注視していく必要があると考えられる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

植物プランクトンの細胞容積や粘質鞘容積の環境因子依存性を明らかにするとともに、植物プランクトンの増殖特性から野外での植物プランクトンの挙動が特に水温とそれに伴う水温成層状況に強く影響

されていることを明らかにした。有機物の難分解性を判断する生分解試験における微小原生動物の影響を評価した結果、微小原生動物は試験結果に有意な影響を与えておらず、従来の試験法の妥当性が示された。また、沿岸帯における透明度低下（濁度上昇）が*Microcystis*などの浮上性藍藻の優占化に寄与している可能性を明らかにした。

（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>

沿岸帯における透明度の低下（濁度上昇）が*Microcystis*などのアオコを形成する浮上性藍藻の優占化に寄与していることが培養実験の結果、明らかになったことから、アオコ制御という観点から沿岸帯の濁水対策の重要性が示唆される。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

（１）誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 鈴木恵、岸本直之、一瀬諭、古田世子：水環境学会誌 35(11)、181-186 (2012)
「琵琶湖北湖における大型緑藻（車軸藻綱）*Staurastrum dorsidentiferum* var. *ornatum*の象徴と増殖生理特性」
- 2) Naoyuki Kishimoto, Satoshi Ichise, Kei Suzuki, Chihiro Yamamoto : Limnology 14(1), 117-128 (2013)"Analysis of long-term variation in phytoplankton biovolume in the northern basin of Lake Biwa"
- 3) Kei Suzuki, Makoto Kojima, Naoyuki Kishimoto, Satoshi Ichise, Seiko Furuta : Journal of Water and Environment Technology 11(1), 49-58 (2013)
"Influence of cultural conditions on the cellular biovolume and gelatinous sheath volume of *Staurastrum arctiscon* (Charophyceae)"
- 4) N. KISHIMOTO and S. ICHISE: Understanding Freshwater Quality Problems in a Changing World (IAHS Publication 361), 132-141 (2013)
“Water quality problems in Japanese lakes: a brief overview“

<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) 鈴木恵、岸本直之、一瀬諭、古田世子：日本陸水学会第76回大会（2011）
「琵琶湖北湖における大型車軸藻*Staurastrum dorsidentiferum* var. *ornatum* の細胞密度の変動要因」

- 2) 岸本直之、山本千尋、鈴木恵、一瀬諭、古田世子：日本陸水学会第76回大会（2011）
「小型ラン藻*Aphanothece clathrata*における純生産速度の比増殖速度依存性」
- 3) 鈴木恵、岸本直之、一瀬諭、古田世子：日本水処理生物学会第48回大会（2011）
「琵琶湖北湖・南湖における大型車軸藻*Staurastrum dorsidentiferum* var. *ornatum*の挙動解析」
- 4) K.Suzuki, N.Kishimoto, S.Ichise, S.Furuta: The 4th IWA-ASPIRE Conference & Exhibition（2011）
"Growth characteristics and occurrence of *Staurastrum dorsidentiferum* var. *ornatum* (Charophyceae) in Lake Biwa, Japan"
- 5) 鈴木恵、小島誠、岸本直之、一瀬諭、古田世子：第46回日本水環境学会年会（2012）
「大型車軸藻*Staurastrum arctiscon*の粘質鞘サイズに及ぼす培地中N/P比の影響」
- 6) Kei Suzuki, Makoto Kojima, Naoyuki Kishimoto, Satoshi Ichise, Seiko Furuta : Water and Environment Conference 2012 (2012)
"Influence of cultural conditions on the cellular biovolume and gelatinous sheath volume of *Staurastrum arctiscon* (Charophyceae)"
- 7) N. Kishioto, S. Ichise, K. Suzuki, C. Yamamoto : 2012 ASLO Aquatic Sciences Meeting: Voyages of Discovery (2012)
"Potential factors influencing changes in average cell size of the phytoplankton community in Lake Biwa, Japan"
- 8) K. Suzuki, M. Kojima, N. Kishimoto, S. Ichise, S. Furuta : 2012 ASLO Aquatic Sciences Meeting: Voyages of Discovery (2012)
"Influence of N/P ratio in culture medium on gelatinous sheath size of *Staurastrum arctiscon* (Charophyceae)"
- 9) Kei Suzuki, Naoyuki Kishimoto, Seiko Furuta, Satoshi Ichise : The 4ty IWA Asia-Pacific Young Water Professionals Conference (2012)
"Biodegradation characteristics of photosynthetic organic matter under the coexistence of a ciliate"
- 10) 岸本直之、山本千尋、鈴木恵、一瀬諭：日本陸水学会第77回大会（2012）
「植物プランクトン計数データに基づく琵琶湖水柱一次生産量の推定」
- 11) 鈴木恵、岸本直之、古田世子、一瀬諭：日本陸水学会第77回大会（2012）
「微小繊毛虫共存系における一次生産有機物の分解に関する研究」
- 12) 鈴木恵、岸本直之、古田世子、一瀬諭：第47回日本水環境学会年会（2013）
「*Staurastrum dorsidentiferum* var. *ornatum*における一次生産有機物の分解に関する研究」
- 13) N. KISHIMOTO and S. ICHISE : "Knowledge for the Future" Joint Assembly, Gothenburg, Sweden (2013)
"Water-quality problems in Japanese lakes: regulations, the past, and the future".
- 14) 山本純也、岸本直之、一瀬諭、古田世子：日本陸水学会第78回大会（2013）
「藻類バイオマス生産を目的とした排水処理水中での*Aphanothece clathrata*の増殖特性の評価」

（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

- 1) 鈴木恵：日本水処理生物学会第48回大会ベストプレゼンテーション賞受賞（2011年11月17日）
受賞研究発表「琵琶湖北湖・南湖における大型車軸藻*Staurastrum dorsidentiferum* var. *ornatum*の挙動解析」
- 2) 鈴木恵、岸本直之、一瀬諭、古田世子：日本水環境学会年間優秀論文賞受賞（2013年11月9日）
受賞論文「琵琶湖北湖における大型緑藻（車軸藻綱）*Staurastrum dorsidentiferum* var. *ornatum*の消長と増殖生理特性」水環境学会誌, 35(11), 181-186, 2012.

8. 引用文献

- 1) 荻原富司、矢木修身、高村義親、須藤隆一：水質汚濁研究, 7(7), 437-442 (1984)
「霞ヶ浦に発生する*Microcystis aeruginosa*の純粹分離」
- 2) Raven, J. A., Geider, R. J.: *New Phytologist*, 110, 441-461 (1988)
“Temperature and algal growth”
- 3) Litchman, E.: *Freshwater Biology*, 44, 223-235 (2000)
“Growth rates of phytoplankton under fluctuating light”
- 4) Tsujimura, S., Ishikawa, K., Tsukada, H.: *Phycological Research*, 49, 275-280 (2001)
“Effect of temperature on growth of the cyanobacterium *Aphanizomenon flos-aquae* in Lake Biwa and Lake Yogo”
- 5) 矢木修身：国立公害研究所研究報告第92号(1986)
「アオコの増殖及び分解に関する研究」
- 6) MacIntyre, H. L., Kana, T. M., Anning, T., Geider, R. J.: *Journal of Phycology*, 38, 17-38 (2002)
“Photoacclimation of photosynthesis irradiance response curves and photosynthetic pigments in microalgae and cyanobacteria”
- 7) 岸本直之、大西庸介、各地賢二、宗宮功、大西正記：環境工学研究論文集, 35, 227-233 (1998)
「ダム貯水池に発生する*Peridinium*淡水赤潮の発生要因に関する考察—共存藻類の増殖特性に着目して—」
- 8) Butterwick, C., Heaney, S. I., Talling, J. F.: *Freshwater Biology*, 50, 291-300 (2005)
“Diversity in the influence of temperature on the growth rates of freshwater algae, and its ecological relevance”
- 9) 石上三雄、浜野隆、川嶋宗継：滋賀大学教育学部紀要 自然科学・教育科学, 39, 17-28 (1989)
「オビケイソウ*Fragilaria crotonensis*の培養と増殖」
- 10) 小梶健一、万木清茂、東田充弘、石上三雄：滋賀大学教育学部紀要, 31, 25-32 (1981)
「ビワクンショウモの生長特性 I. 温度・照度・pHと生長」
- 11) 石上三雄、万木清茂、保積京子：滋賀大学教育学部紀要 自然科学・教育科学, 38, 23-32 (1988)

- 「ミカヅキモ *Closterium aciculare* var. *subpronum* の培養と増殖」
- 12) Suzuki, K., Kojima, M., Kishimoto, N., Ichise, S., Furuta, S.: *Journal of Water and Environment Technology*, 11, 49-58 (2013)
“Influence of cultural conditions on the cellular biovolume and gelatinous sheath volume of *Staurastrum arctiscon* (Charophyceae)”
- 13) 石上三雄、保積京子: 滋賀大学教育学部紀要 自然科学, 34, 33-40 (1984)
「ツヅミモ *Staurastrum dorsidentiferum* var. *ornatum* の培養と増殖」
- 14) 鈴木恵、岸本直之、一瀬諭、古田世子: 水環境学会誌, 35(11), 181-186 (2012)
「琵琶湖北湖における大型緑藻（車軸藻綱） *Staurastrum dorsidentiferum* var. *ornatum* の消長と増殖生理特性」
- 15) 石上三雄、北川仁志: 滋賀大学教育学部紀要 自然科学, 33, 51-57 (1983)
「ビワクンショウモの増殖特性 III. 窒素・微量金属・ビタミン類と増殖」
- 16) 石上三雄、小椋健一、東怜: 滋賀大学教育学部紀要 自然科学, 32, 105-112 (1982)
「ビワクンショウモの増殖特性 II. 炭素・リンと増殖」

(6) 総合解析

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター 環境監視部門	一瀬 諭
滋賀県琵琶湖環境科学研究センター 総合解析部門	佐藤祐一
龍谷大学大学院理工学研究科	岸本直之
<研究協力者>	
龍谷大学大学院理工学研究科	鈴木 恵

平成25年度累計予算額：1,836千円

(うち、平成25年度予算額：920千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

本サブテーマでは、琵琶湖沿岸域における環境因子と植物プランクトンを含む水質との関わりについて総合的に解析するため、調査データに基づき数理モデルの構築を行い、各因子間の関連や今後の対策の方向性について検討した。

まず、溶存酸素に着目し、琵琶湖沿岸域の泥質化影響因子および溶存酸素濃度影響因子を評価した。沿岸帯底泥を用いた底泥酸素消費速度評価実験を行った結果、底泥酸素消費速度が温度、含泥率、窒素含有率に強く影響を受けていることを明らかにした。鉛直一次元の溶存酸素収支モデルを構築し、底層溶存酸素濃度に影響する因子を検討した結果、含泥率が底層貧酸素化に強く影響することが示唆された。琵琶湖北湖湖岸帯湖底泥質化実態調査データを再解析した結果、3%以上の勾配急変部より沖側で泥質化が進行する傾向があったことから、勾配急変部を解消するような沿岸帯整備を行うなどの対策の有効性を指摘した。

つづいて、湖岸形態がシードの保存性や回帰性に与える影響、さらにはそれらが沿岸帯の植物プランクトン種ごとの現存量に与える影響を解析するため、沿岸帯を対象とした簡易なモデル（システムダイナミクスモデル）を構築した。サブテーマ2において実施した回帰試験の結果、およびサブテーマ5において実施・整理した植物プランクトンの増殖特性に関する結果をもとに、モデルパラメータの推定を行い、現況再現計算を行ったところ、長浜沖および愛知川沖における藍藻、珪藻、緑藻の季節遷移を概ね再現することができた。また本モデルを用いて、人工的湖岸の自然化を想定したシナリオ計算を実施したところ、底質DOの改善、泥質化の改善、水交換率の増大により藍藻現存量を抑制できる可能性が示唆された。

[キーワード]

溶存酸素、泥質化、湖底勾配、数理モデル、シナリオ計算

1. はじめに

湖では、冬季に水塊から消失したプランクトン種は底泥に沈降し、越冬した後、水温上昇とともに水塊に回帰してくると考えられるが、琵琶湖北湖のような水深の深い湖において、深水層に沈降した植物プランクトンが水塊に回帰してくることは考えにくい。よって、沿岸域底泥が琵琶湖北湖の植物プラン

クトン群集のシードバンクとして機能していることが示唆される。一方、サブテーマ2および3で検討しているように、シードバンク機能は底層付近の溶存酸素（DO）濃度に依存しており、底層付近の溶存酸素濃度は底泥の還元状態の影響を強く受けると考えられる。また、一般に還元的雰囲気の下では有機性細粒が蓄積し、泥質化が進行している場合が多い。これらの条件に加え、光条件や水温、プランクトン種ごとの増殖特性などが影響して、最終的に沿岸帯の水質が形成されることになる。

そこで、本研究では、沿岸域底泥の泥質化影響因子を現地調査データを用いて評価するとともに、底泥のDO消費速度を評価・モデル化し、数理モデルを用いて沿岸帯の溶存酸素濃度に及ぼす影響因子を評価した。また沿岸帯を対象とした簡易なモデル（システムダイナミクスモデル）を構築することで、シードの保存性や回帰性が植物プランクトン量に与える影響について解析を試みるとともに、本モデルを用いて人工的湖岸の自然化を想定したシナリオ計算を実施した。

2. 研究開発目的

本研究の目的は、沿岸帯の溶存酸素濃度に及ぼす影響因子の評価と琵琶湖沿岸域の泥質化影響因子の評価について実施し、さらに、その結果から沿岸帯プランクトン量予測モデルの構築とシナリオ計算を行い、本モデルを用いて人工的湖岸の自然化を想定したシナリオ計算を行うために実施した。

3. 研究開発方法

（1）沿岸帯の溶存酸素濃度に及ぼす影響因子の評価

琵琶湖北湖3地点（長命寺沖、愛知川沖、長浜沖）および南湖3地点（掃帆島、琵琶湖大橋、柳が崎）においてエクマンバージ採泥器により底泥表層1cmを採取するとともに、湖底直上1mの湖水をバンドーン採水器により採取した（図(6)-1）。サンプリング頻度は琵琶湖北湖においては季節毎に計4回、琵琶湖南湖においては月毎に計12回である。



図(6)-1 琵琶湖サンプリング地点

現場において水温、気温、pH、DO、ORPを測定した。サンプルは速やかに研究室に持ち帰って直上水についてはTOC、SS、Chl.a、フェオフィテインa、DN、硝酸態窒素、DP、リン酸態リンを、底泥については約50g（湿重）を24時間以上100℃で乾燥の後、2.0mm、250μm、63μmのステンレス製篩により篩い分けし、各篩い分け画分毎に酸素循環燃焼式のNCHアナライザー（Sumigraph NCH-22F）でN、C分析を行った。また、GF/Bろ紙にてろ過した湖底直上水のみを封入したBOD瓶とろ過湖底直上水に底泥適量を封入したBOD瓶を多数準備し、採取時水温にて6日間静置培養を行った。この間、培養開始時、1時間後および以降24時間毎にDOを測定し、DO変化曲線から酸素消費速度を評価した。

最終的に、泥質化影響因子の解析結果や底泥のDO消費速度影響因子解析結果から、適切な沿岸環境を創造するための方向性を提示した。

（2）琵琶湖沿岸域の泥質化影響因子の評価

平成14年度に滋賀県が実施した琵琶湖沿岸域底質調査データを再解析し、琵琶湖沿岸帯の泥質化影響因子を抽出した。

（3）沿岸帯プランクトン量予測モデルの構築とシナリオ計算

琵琶湖の沿岸帯における植物プランクトン種ごとのシード量および現存量を再現・予測することを目的として、水柱単位での評価が可能なモデル（システムダイナミクスモデル）を構築した。植物プランクトン種は、藍藻、珪藻、緑藻の3種とした。また対象地域は、典型的な人工的湖岸として長浜沖、自然的湖岸として愛知川沖を選定し、モデル構造は同一としながらも環境条件を変えることによるプランクトン量への影響を評価できるようにした。

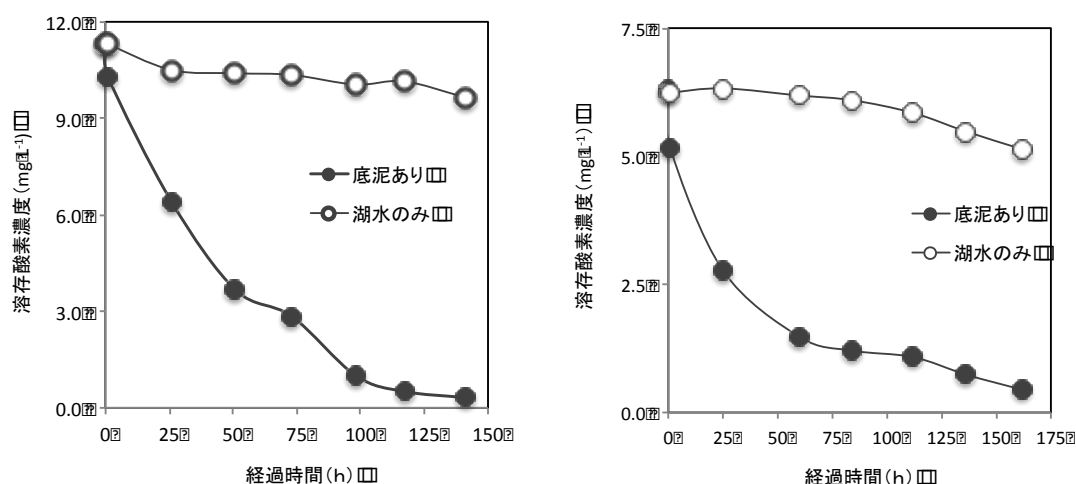
サブテーマ2において実施した回帰試験の結果、およびサブテーマ5において実施・整理した植物プランクトンの増殖特性に関する結果をもとに、モデルパラメータの推定を行った。各地点における環境条件は、サブテーマ4において調査された実測データに基づいて設定した。

構築されたモデルを用いて、シードの保存性や回帰性、プランクトンの増殖特性等が植物プランクトン種ごとの現存量に与える影響について解析を行い、観測値との比較を行った。また人工的湖岸を自然的湖岸に変更した場合の仮想的なシナリオ計算を行った。シナリオとしては、個別環境要素を自然的湖岸見合いに変更した4つのシナリオ、およびそれら全てを考慮したときのシナリオの合計5つについて計算を行った。

4. 結果及び考察

（1）沿岸帯の溶存酸素濃度に及ぼす影響因子の評価

BOD瓶を用いたDO消費速度計測実験における溶存酸素消費曲線の一例を図(6)-2に示す。実験の結果、底泥を加えたBOD瓶のDOは一次反動的に減少することが明らかとなった。そこで実験開始1時間以後のデータを用い、一次反応を仮定して酸素消費速度定数を求め、湖水のみの酸素消費速度定数を差し引くことで底泥酸素消費速度定数を算出した。



図(6)-2 溶存酸素消費曲線の一例（左：長浜11月、右：帰帆島12月）

算出された底泥酸素消費速度定数は現場水温（7.5～32℃）で計測した値であるため、温度影響を含んでいる。そこで、温度影響を補正するため、 Q_{10} 値を算出したところ、 Q_{10} 値は2.49と評価された。 Q_{10} 値を用いて20℃に補正した酸素消費速度定数から底泥酸化層厚を泥質地点で0.2cm、砂質地点で0.4cmとして底泥酸素消費速度を求めたところ、本研究による底泥酸素消費速度は0.106～0.215 g/m² dayと評価された。また、琵琶湖北湖の20℃での底泥酸素消費速度定数 S_{20} を目的変数として重回帰分析を行ったところ、含泥率 x_{Silt} および窒素含有率 x_N を説明変数とする有意な重回帰モデル（ $R=0.71$, $p<0.01$ ）が構築された。

$$S_{20} = \exp(0.0342x_{Silt} + 0.103x_N - 2.78)$$

本モデルを用い、以下に示す鉛直次元の数理モデルを構築した。

$$\frac{dC_s}{dt} = \frac{K_z A \Delta C}{V_s \Delta z} - \frac{F_s A}{V_s} - S_{BOD}$$

$$\frac{dC_B}{dt} = \frac{K_z A \Delta C}{V_B \Delta z} - \frac{S_{SOD} A}{V_B} - S_{BOD}$$

$$F_s = K(C^* - C)$$

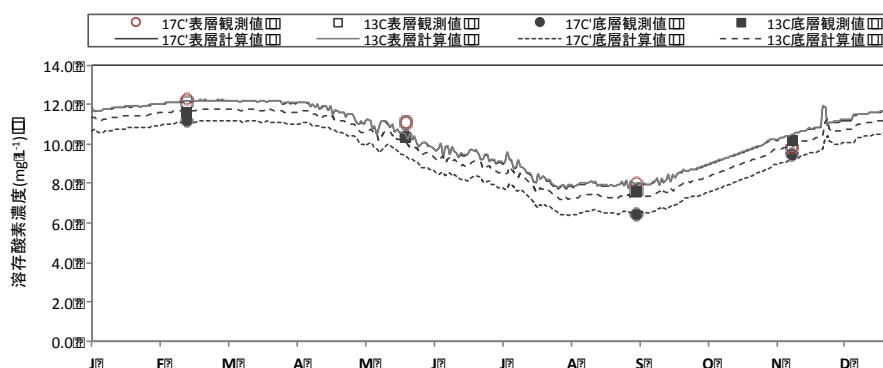
$$S_{SOD} = S_{20} \frac{C_B}{2} l q^{T-20}$$

ここで、 C_s ：表層の溶存酸素濃度（g m⁻³）， K_z ：鉛直渦動拡散係数（=0.9 m² day⁻¹）， A ：コントロールボリュームの底面積（=0.5 m²）， ΔC ：溶存酸素濃度差（g m⁻³）， Δz ：コントロールボリュームの中心間距離（m）， F_s ：大気からの溶け込み（g m⁻² day⁻¹）， S_{BOD} ：水中での酸素消費速度（g m⁻³ day⁻¹）， V_s ：表層体積（m³）， C_B ：表層の溶存酸素濃度（g m⁻³）， V_B ：底層体積（m³）， S_{SOD} ：底泥での酸素消費速度（g m⁻² day⁻¹）， K ：再曝気係数（=5 m day⁻¹）， C^* ：飽和溶存酸素濃度（g m⁻³）， θ ：温度係数（=1.05）， T ：水温（℃）， l ：底泥酸化層厚（m）であり、表層コントロールボリュームは水深0～5m、底

層コントロールボリュームは水深5～6mとした。また、飽和溶存酸素濃度 C^* は2013年に滋賀県が観測した愛知川表層の水温と溶存酸素濃度の関係より求めた以下の回帰式により求めた。

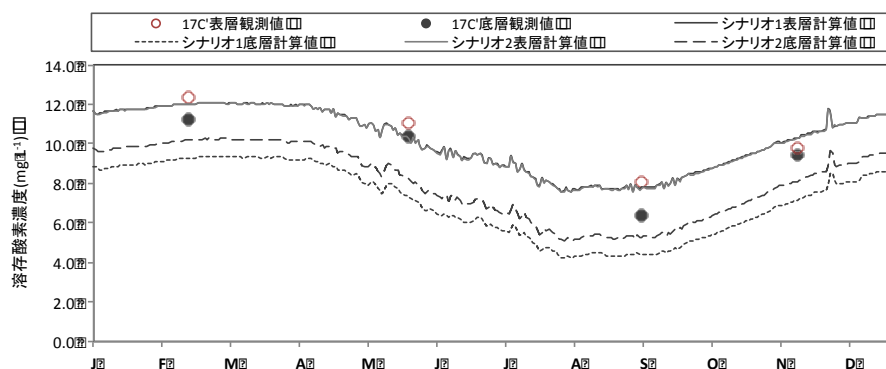
$$C^* = -0.0019T^2 - 0.133T + 13.3$$

以上のモデルを用いて長浜沖（17C、含泥率40%、窒素含有率0.3%）と愛知川（13C、含泥率1%、窒素含有率0.03%）の1年間の沿岸帯溶存酸素濃度の経時変化を予測した結果を図(6)-3に示す。プロットは実測値、線は計算値である。図より、計算値は実測値を良く再現していることがわかる。



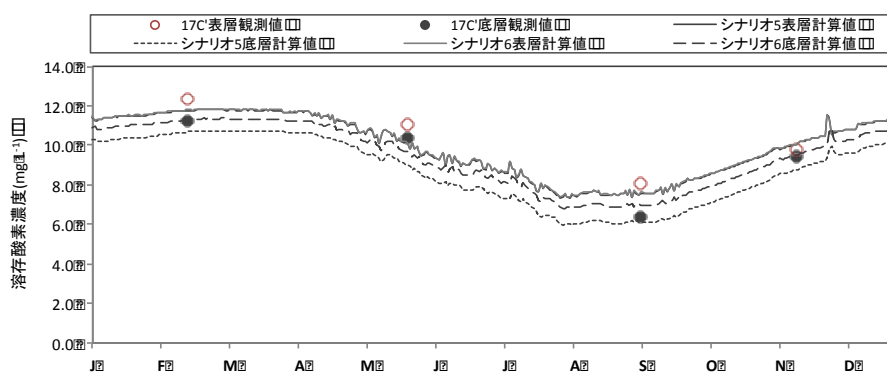
図(6)-3 長浜沖17Cおよび愛知川13C地点における溶存酸素濃度の数値モデルによる再現結果

次に、両地点において泥質化が進行した場合を想定し、含泥率が80%になった場合の予測計算結果を図(6)-4に示す。泥質化が進行することにより底層DOの低下が顕著となり、8～9月には5mg/Lまで低下すると予測された。



図(6)-4 泥質化進行に伴う溶存酸素濃度の変化予測（含泥率80%に上昇）

最後に、湖沼温暖化の進行を想定し、水温が2℃上昇した場合の予測計算結果を図(6)-5に示す。水温上昇に伴う飽和溶存酸素濃度の低下によって表層DOや底層DOが全般的に低下するものの、底層DOの減少幅はそれほど大きなものではなく、2℃程度の温暖化では顕著な底層貧酸素化は起こらないことが示唆された。



図(6)-5 湖沼温暖化に伴う溶存酸素濃度の変化予測（水温2℃上昇）

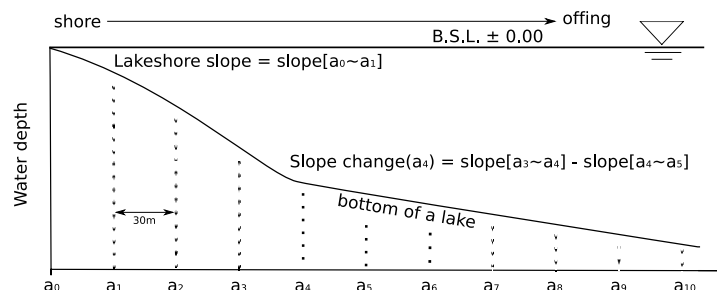
以上の結果、沿岸帯底層の貧酸素化には底質の泥質化の寄与が最も大きく、適切な沿岸帯環境の保全には泥質化防止が最も有効であると考えられた。

(2) 琵琶湖沿岸域の泥質化影響因子の評価

図(6)-6に北湖湖岸帯湖底泥質化実態調査の調査地点を示す。北湖東岸9測線において湖岸から沖合300mの間で30m毎に試料を採取し、各種泥質分析および粒度分布測定を行った。本研究では特に含泥率と底泥中の強熱減量、窒素、リン、炭素含有量および酸化還元電位（ORP）に着目した。ここで含泥率とはシルト以下のサイズ（0.075mm以下）の細粒堆積物の重量含有率のことである。また、湖底形状と泥質地点の関係を把握するために、水深測定結果より各測線の断面図を作成し、湖底の勾配変化を比較するために勾配変化量を求めた。図(6)-7において、 a_4 地点の勾配変化量は a_3 地点～ a_4 地点までの勾配から a_4 地点～ a_5 地点までの勾配の差をとって求められる。したがって、勾配変化量の大きい地点は急な勾配から緩やかな勾配になる地点を示している。

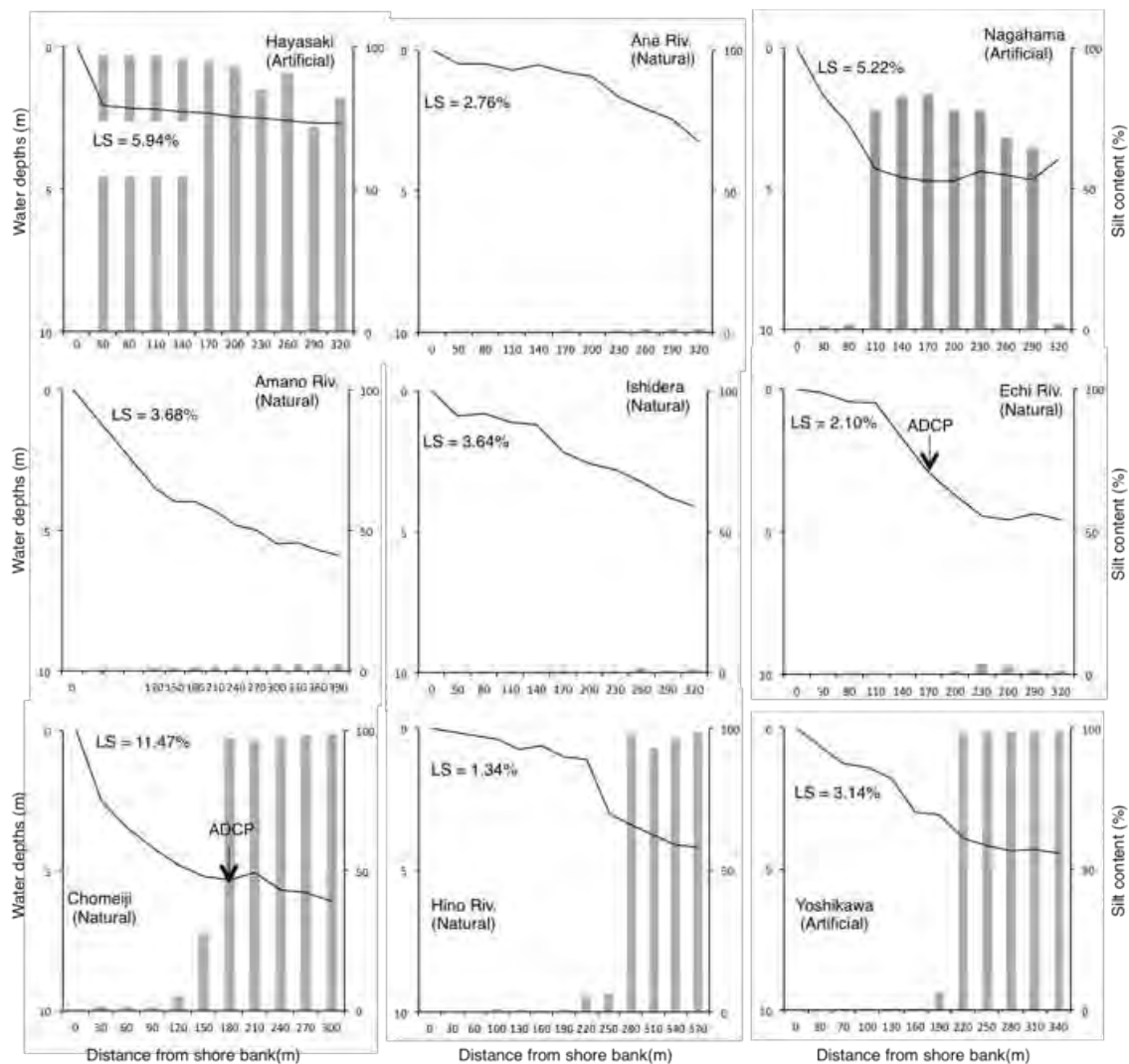


図(6)-6 サンプルング測線

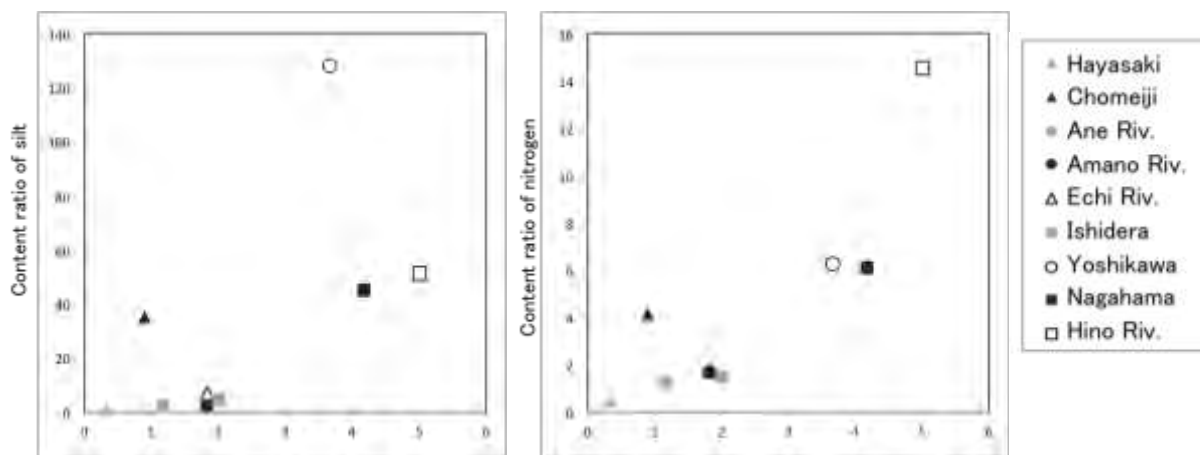


図(6)-7勾配変化量の算出方法（ $a_1 \sim a_{10}$ は測点を示す）

図(6)-8に各測線の断面図と含泥率を示す。図より泥質化の進行している地点とほとんど泥質化が見られない地点があるが、いずれの地点も沖合に行くほど泥質化が進行する傾向がある。また、谷地形形成地点の沖側で含泥率が大きくなる傾向が認められる。ここで、各測線において a_2 地点以遠の沖合での勾配変化量の最大値を沖合最大勾配変化量とし、沖合最大勾配変化量を示す地点を勾配急変部とする。勾配急変部より岸側の測点での含泥率、窒素、リン、炭素および強熱減量の平均値と勾配急変部の沖合側の測点での平均値の比をそれぞれの含有比と定義する。図(6)-9に含有比の一例として、含泥率および窒素の含有比と沖合最大勾配変化量との関係を示す。図からわかるように、沖合最大勾配変化量が大きくなると含有比も大きくなる傾向が認められた。図からは概ね沖合最大勾配変化量3%程度を境に各々の含有比が増大していることがわかる。よって、谷地形を形成する勾配急変部の存在により沿岸帯の泥質化が促進されることが強く示唆された。



図(6)-8 各測線の断面図と含泥率 (silt content) の関係



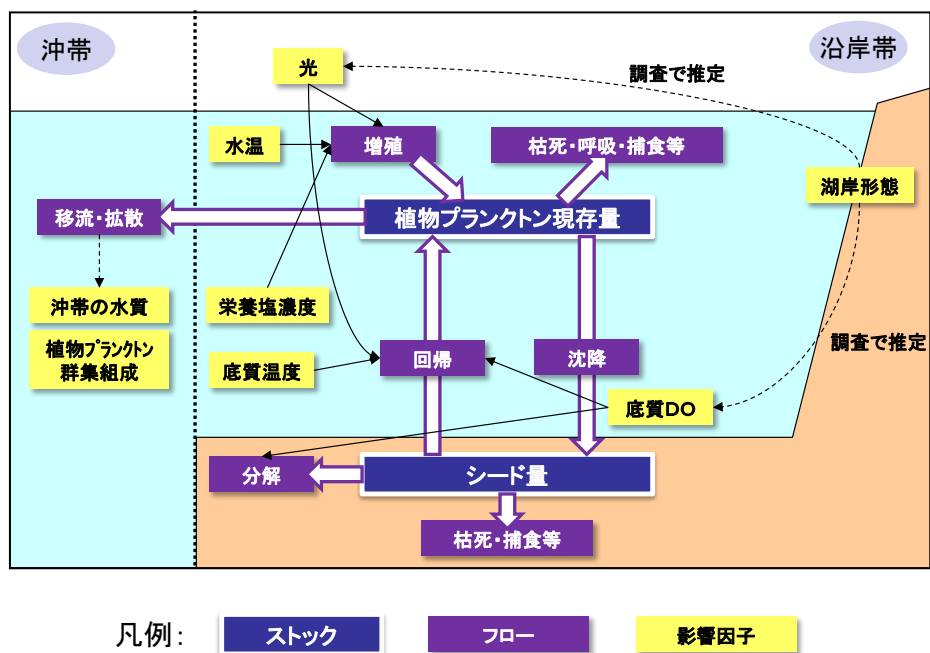
図(6)-9 沖合最大勾配変化量（横軸%）と含泥率および窒素の含有比（縦軸）

以上のように、北湖湖岸帯湖底泥質化実態調査データの解析から3%以上の勾配急変部の存在により沿岸帯の泥質化が進みやすい傾向が確認されたことから、勾配急変部を解消するような沿岸帯整備を行うなどの対策の有効性が示唆される。

(3) 沿岸帯プランクトン量予測モデルの構築とシナリオ計算

1) 沿岸帯モデルの構築

モデルで考慮する環境因子の関連図を図(6)-10に示す。モデルではあるまとまりをもった沿岸帯を単位面積あたり（水柱単位）で評価する。植物プランクトンの現存量や底泥中のシード量をストック、それぞれの増殖や回帰、沈降、分解等に関わる機構をフローとしたシステムダイナミクスモデルとして構築した。



図(6)-10 沿岸帯モデルの構造

植物プランクトンの現存量に関する収支式は以下ようになる。以下の式を植物プランクトン種ごと（藍藻・緑藻・珪藻）に作成する。

$$\frac{d(\text{植プラ現存量})}{dt} = \text{回帰率} \times \text{シード量} + (\text{増殖} - \text{沈降} - \text{枯死} \cdot \text{呼吸} \cdot \text{捕食}) \times \text{植プラ現存量} - \text{移流} \cdot \text{拡散}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{回帰率} = \text{最大回帰率} \cdot f_1(\text{光}) \cdot f_2(\text{底質温度}) \cdot f_3(\text{底質DO}) \cdot f_4(\text{採泥時期}) \cdot \alpha \\ \text{増殖} = \mu_{\max} \cdot g_1(\text{水温}) \cdot g_2(\text{栄養塩濃度}) \cdot \beta \\ \text{沈降} = \text{沈降速度} / \text{水深} \\ \text{枯死} \cdot \text{呼吸} \cdot \text{捕食} = k_1 \\ \text{移流} \cdot \text{拡散} = AD \cdot \text{植プラ現存量} \end{array} \right.$$

ここで、 α は地点ごとに固有の定数であり、混雑効果係数のような役割を果たす。また β は水温や栄養塩濃度以外の増殖に関する影響（光、混雑効果等）を評価するための定数である。

続いて、シード量に関する収支式は以下ようになる。以下の式を植物プランクトン種ごと（藍藻・緑藻・珪藻）に作成する。

$$\frac{d(\text{シード量})}{dt} = \text{沈降量} - (\text{分解} + \text{枯死} \cdot \text{呼吸} \cdot \text{捕食}) \times \text{シード量} - \text{回帰量}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{沈降量} = \text{沈降速度} / \text{水深} \times \text{植プラ現存量} \\ \text{分解} = h(\text{底質DO}) \\ \text{枯死} \cdot \text{呼吸} \cdot \text{捕食} = k_2 \end{array} \right.$$

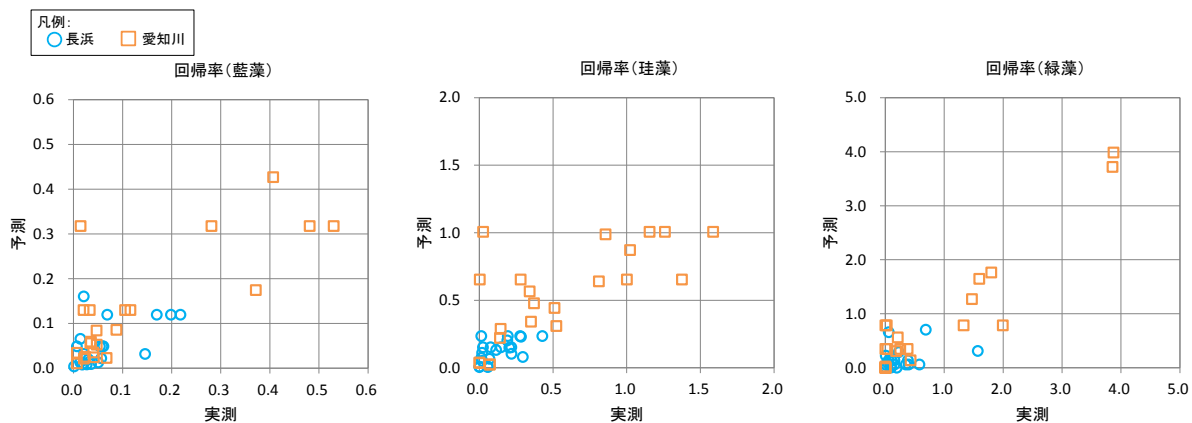
2) モデルパラメータの推定

サブテーマ2において実施した回帰試験の結果より、回帰率を求めるモデルのパラメータを推定した。その際、実験条件は離散的に設定された（光：強/弱、DO：好気/嫌気 等）ため、モデルも離散的なデータを元に評価できる形とした。モデルパラメータは、回帰率の実測値と計算値のRMSE（Root Mean Square Error：2乗平均平方根誤差）が最小となるように、EXCEL（Microsoft社）のソルバー機能を使いGRG法により最適化して求めた。

最適化実施後のプランクトン種ごとの回帰率の実測値と予測値を比較したものを図(6)-11に示す。実測値と予測値の相関係数は0.77～0.91と高く、全てのプランクトン種において概ね実測を再現できるモデルを構築することが出来た。

最適化実施後のパラメータを表(6)-1および図(6)-12に示す。特徴的なのは、光およびDOに関して、緑藻が藍藻・珪藻とは異なる傾向を示したことである。また回帰がしやすい時期もプランクトン種ごとに違いが見られ、藍藻は春および秋、珪藻は春～夏、緑藻は夏～秋に積極的な回帰が見られることが分かった。

また、プランクトン種ごとのシードの保存性の違いについても、シード保存試験の結果よりパラメータを推定し、モデルに活用した。

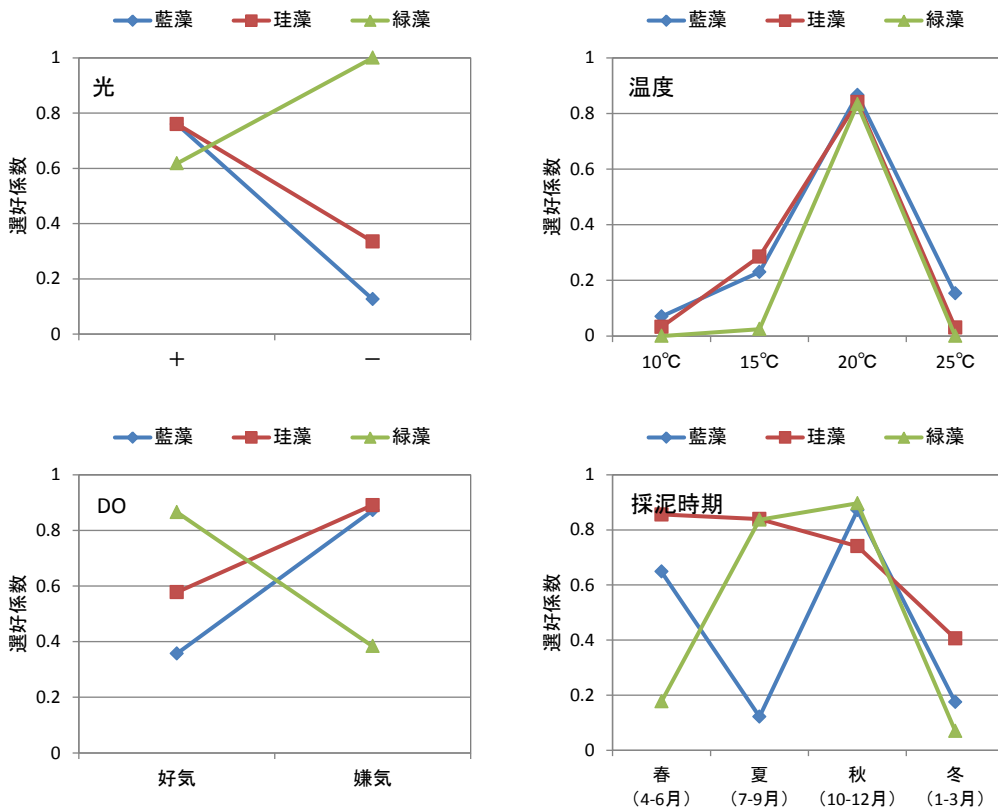


図(6)-11 回帰モデルの検証結果

表(6)-1 回帰モデルのパラメータ

項目	最大回帰率	f_1(光)		f_2(底質温度)				f_3(底質DO)		f_4(採泥時期)				補正係数 (長浜沖)
		+	-	10°C	15°C	20°C	25°C	好気	嫌気	春 (4-6月)	夏 (7-9月)	秋 (10-12月)	冬 (1-3月)	
藍藻	0.85	0.76	0.13	0.07	0.23	0.87	0.15	0.36	0.87	0.65	0.12	0.87	0.17	0.38
珪藻	2.06	0.76	0.34	0.03	0.29	0.84	0.03	0.58	0.89	0.86	0.84	0.74	0.41	0.23
緑藻	9.98	0.62	1.00	0.00	0.02	0.83	0.00	0.87	0.38	0.18	0.84	0.90	0.07	0.18

* + : 60μmol/m²/s - : 10μmol/m²/s, ** 好気 : DO9-10mg/L程度, 攪拌 嫌気 : DO0.1mg/L以下程度, 静置



図(6)-12 回帰モデルのパラメータ

続いて増殖に関するパラメータを、サブテーマ5において実施・整理された結果より設定した。ただしパラメータは植物プランクトン種ごとの差異が大きいため、琵琶湖において典型的な種を想定することにした。想定したプランクトンおよびそれぞれのパラメータ等を表(6)-2に示す。

表(6)-2 増殖モデルのパラメータ

種類	想定する プランクトン	最大比 増殖速度 μ_{max}	水温 影響関数 $\left\{ \frac{T}{T_{opt}} \exp \left(1 - \frac{T}{T_{opt}} \right) \right\}^{\xi}$	窒素濃度 影響関数 $\frac{X}{K_N + X}$	リン濃度 影響関数 $\frac{X}{K_P + X}$	文献
藍藻	<i>Microcystis aeruginosa</i>	1.10	T_{opt} 32.1 ξ 16.9	K_N 0.14	K_P 0.0089	矢木ら, 国立公害研究所研究報告, 92, 1986
珪藻	<i>Fragilaria crotonensis</i>	0.67	T_{opt} 24.7 ξ 1.29	K_N 3.2	K_P 0.31	石上ら, 滋賀大学教育学部紀要, 39, 17-28, 1989
緑藻	<i>Staurastrum dorsidentiferum</i>	0.368	T_{opt} 30.0 ※文献では線形式	K_N 0.091	K_P 0.0075	鈴木ら, 水環境学会誌, 35, 181-186, 2012

3) 現況再現

上記モデルを用いて、典型的な人工的湖岸である長浜沖において再現計算を行った。計算期間は2012年4月1日～9月30日の6ヶ月間とした。その他の計算条件は以下の通りである。

○ 初期値

- ・ 植プラ現存量： 全種で0 (gC/m²) → シードからの回帰のみの比較を行う
- ・ シード量： 植プラ種ごとの四季別シード量結果の平均値 (長浜沖)

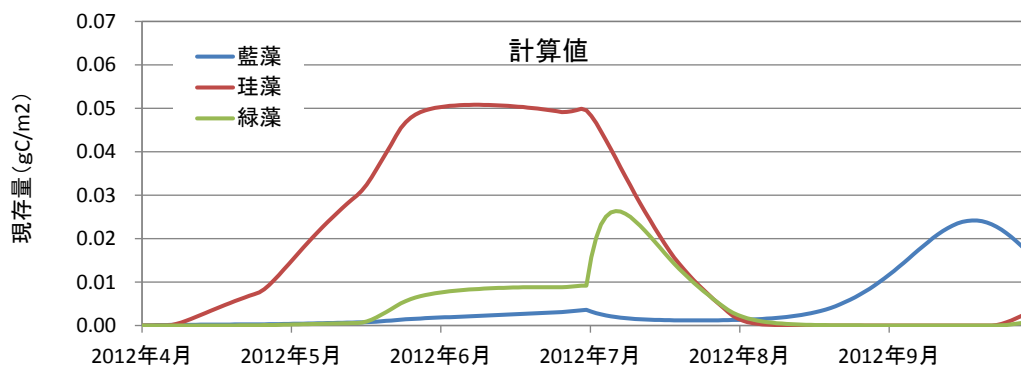
○ 地域諸元

- ・ 水深： 6m
- ・ 移流・拡散に係る係数： 0.15

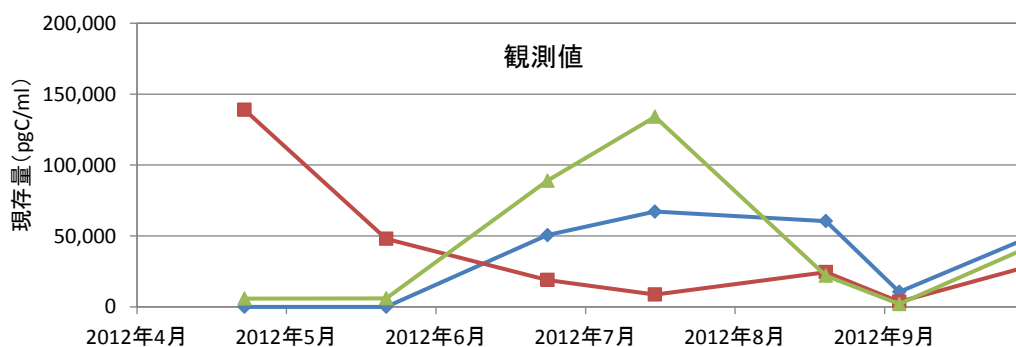
○ 観測データ

- ・ 光： 実験における「一」を使用
- ・ 底質DO： 嫌氣的条件と仮定
- ・ 水温： サブテーマ3の現地観測結果を補間して使用
- ・ 窒素濃度・リン濃度： サブテーマ3の現地観測結果を補間して使用

植物プランクトン種ごとの現存量の変化を図(6)-13に示す。まず珪藻が増加し、次いで緑藻、藍藻の順に増加するという季節変移を再現することができた。図(6)-14には、参考に現地で観測された植物プランクトン種ごとの現存量の変遷を示す。計算においては藍藻・珪藻・緑藻ごとに想定するプランクトンを限定していることから、必ずしも比較できるものではないが、こうした季節変移は現地においても観測されていることが分かる。



図(6)-13 モデル計算結果 (長浜沖)



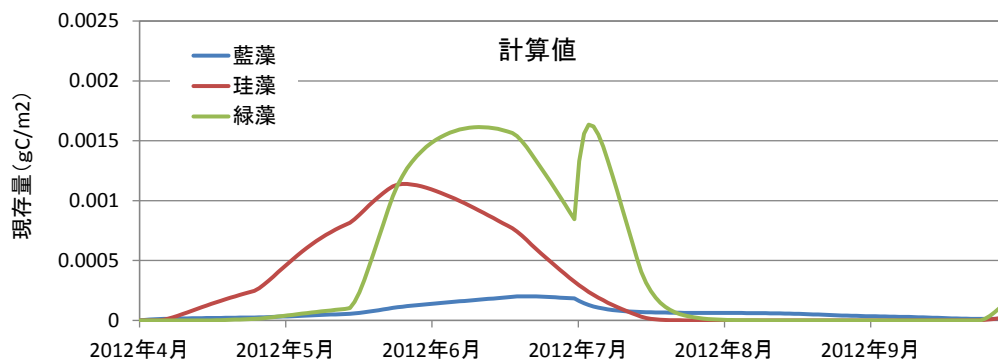
図(6)-14 観測結果 (長浜沖)

続いて典型的な自然的湖岸である愛知川沖において再現計算を行った。期間は長浜沖と同様、計算期間は2012年4月1日～9月30日の6ヶ月間とした。その他の計算条件は以下の通りである。

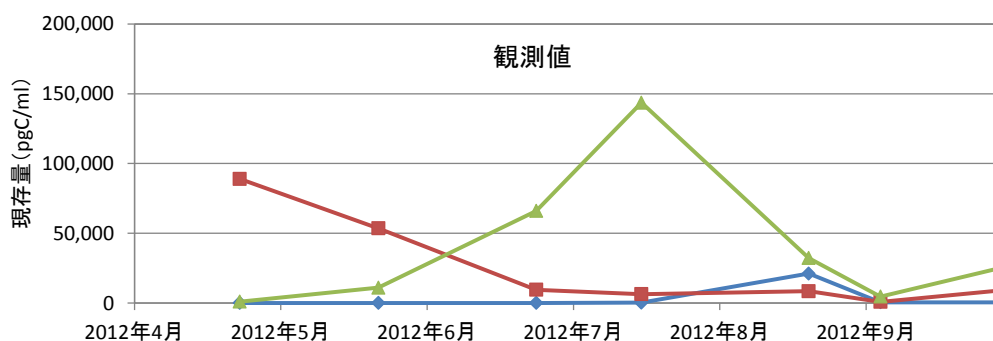
- 初期値
 - ・ 植プラ現存量： 全種で0 (gC/m²) →シードからの回帰のみの比較を行う
 - ・ シード量： 植プラ種ごとの四季別シード量結果の平均値 (愛知川沖)
- 地域諸元
 - ・ 水深： 6m
 - ・ 移流・拡散に係る係数： 0.2
- 観測データ
 - ・ 光： 実験における「+」を使用
 - ・ 底質DO： 好氣的条件と仮定
 - ・ 水温： サブテーマ3の現地観測結果を補間して使用
 - ・ 窒素濃度・リン濃度： サブテーマ3の現地観測結果を補間して使用

また、上記以外の植物プランクトン種ごとのパラメータについては、長浜沖と愛知川沖で同様とした。

植物プランクトン種ごとの現存量の変化を図(6)-15に示す。長浜沖とは異なり、藍藻が少なく、緑藻が多いことが分かる。図(6)-16には、参考に現地で観測された植物プランクトン種ごとの現存量の変遷を示す。上記に示す地点ごとの傾向の違いは観測にも現れており、人工的湖岸と自然的湖岸の違いをモデルで一定再現することができたと考えられた。



図(6)-15 モデル計算結果 (愛知川沖)



図(6)-16 観測結果 (愛知川沖)

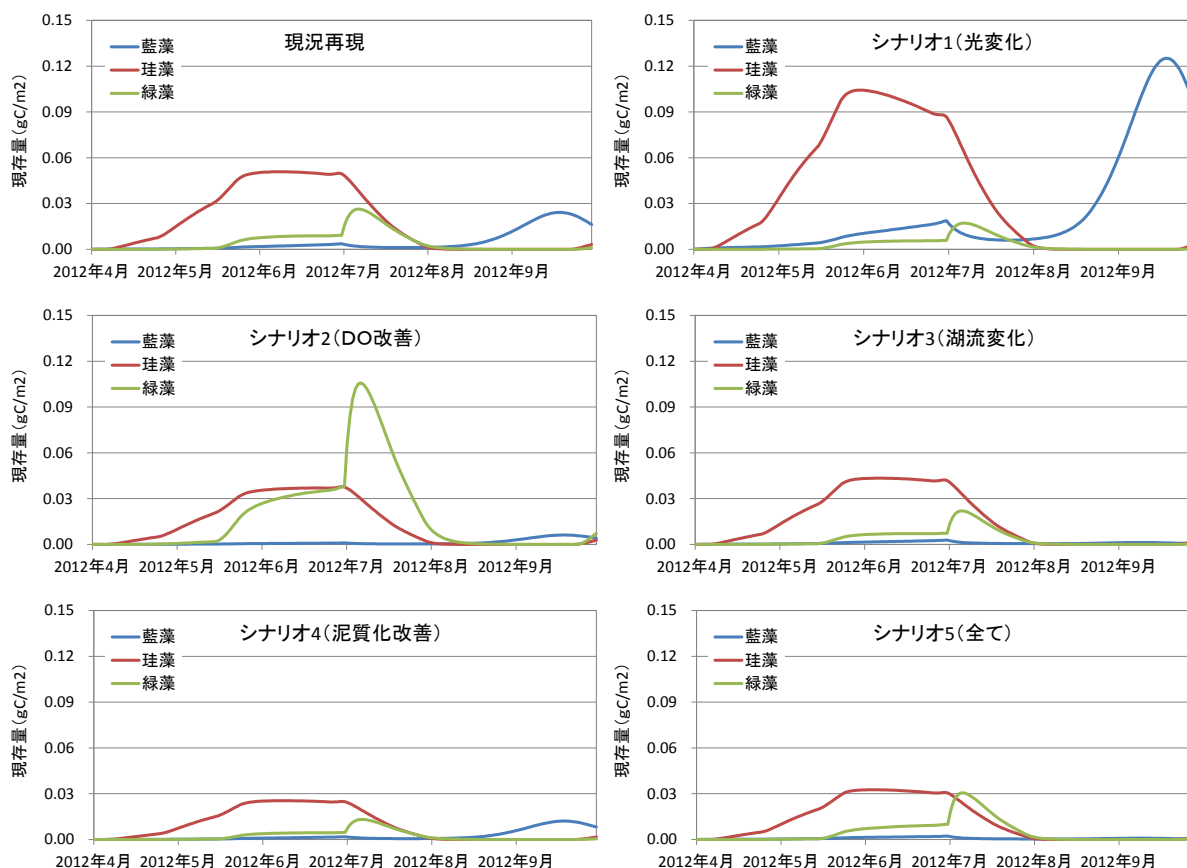
4) シナリオ計算

長浜沖を対象として構築されたモデルを用いて、湖岸を人工的なものから自然的なものに転換しときの植物プランクトン種ごとの現存量の変化について解析するため、シナリオ計算を実施した。想定したシナリオは以下の5ケースである。

- ・ シナリオ1： 光条件の変化（光 「-」 → 「+」）
- ・ シナリオ2： 底質DOの改善（底質DO 「嫌気」 → 「好気」）
- ・ シナリオ3： 湖流の変化（移流拡散に係る係数 0.15→0.2）
- ・ シナリオ4： 泥質化の改善（シード量初期値 プランクトン種ごとに半減）
- ・ シナリオ5： シナリオ1～4の全てを実施

ただしこれらは全て仮想的な設定であり、自然的湖岸に転換したからといって必ずしも上記のような変化が起きるとは限らない点に注意が必要である。その意味で、得られる結果に定量的な意味は小さく、あくまで対策を行ったときの変化の方向性を示すものといえる。

シナリオ計算を行った結果を図(6)-17に示す。光を増加させた場合には珪藻と藍藻が増加する一方で、DOを改善した場合には緑藻が増加して藍藻が減少した。また湖流の変化や泥質化の改善により、全てのプランクトン現存量が減少した。これらを重ね合わせると、結果として藍藻が大きく減少する一方、珪藻がやや減少、緑藻が横ばいという結果になった。以上をまとめると、自然的湖岸化を想定したシナリオ計算からは、底質DOの改善、湖流の変化、泥質化の改善のそれぞれにより藍藻の現存量の減少が見込まれた。



図(6)-17 シナリオ計算結果

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

沿岸帯底泥を用いた底泥酸素消費速度評価実験を通じて、底泥酸素消費速度が温度、含泥率、窒素含有率に強く影響を受けていることを明らかにした。鉛直一次元の溶存酸素収支モデルを構築し、底層溶存酸素濃度に影響する因子を検討した結果、含泥率が底層貧酸素化に強く影響することが示唆された。琵琶湖北湖湖岸帯湖底泥質化実態調査データを再解析した結果、3%以上の勾配急変部より沖側で泥質化が進行する傾向があったことから、勾配急変部を解消するような沿岸帯整備を行うなどの対策の有効性を指摘した。

沿岸帯プランクトン量予測モデルを構築して特徴の異なる沿岸帯の再現を試みたところ、環境条件に応じたシードの保存性や回帰性、また増殖特性の違いを適切に考慮することで、沿岸帯における植物プランクトン種ごとの季節遷移の概況を再現することが可能となった。また本モデルにより人工的湖岸の自然化を想定したシナリオ計算を実施することにより、湖岸形態が植物プランクトン種ごとの現存量に与える影響を半定量的に評価することが可能となった。

(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>

沿岸帯の泥質化が底層DOの貧酸素化に大きな影響を持っていることを示し、沿岸帯の泥質化の要因の一つとして湖底の勾配急変部の存在を指摘したことから、勾配急変部を解消するような沿岸帯整備を行う等、今後の沿岸帯対策への活用が期待される。

また人工的湖岸の自然化を想定したシナリオ計算を実施したところ、藍藻の現存量が大きく減少する傾向が見られたことから、自然的な湖岸を復元していくことにより湖内のプランクトン種ごとの現存量にも影響を与えられる可能性が示された。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 奥村浩気、岸本直之、一瀬諭、馬場大哉、田中仁志：水環境学会誌 37(2), 55-62 (2014)
「琵琶湖北湖東岸における湖岸形状と泥質化の関係」

<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) 奥村浩気、岸本直之、一瀬諭、馬場大哉：日本陸水学会第77回大会（2012）
「湖沼沿岸域底質の酸素消費速度に関する研究」
- 2) 奥村浩気、岸本直之、一瀬諭、馬場大哉、田中仁志：第47回日本水環境学会年会（2013）
「琵琶湖北湖東岸における護岸形態と底質の関係」
- 3) 奥村浩気、岸本直之、一瀬諭、馬場大哉、田中仁志：日本陸水学会第78回大会（2013）
「湖沼における沿岸帯の機能評価について(2)–泥質化に及ぼす流れと湖岸勾配の影響」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

- 1) 湖沼生態系に及ぼす沿岸帯の機能評価（2013年9月12日、龍谷大学瀬田学舎120講義室、観客80名）

(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

特に記載すべき事項はない。

Estimation of Functions of Littoral Zone on Lake Water Quality and Their Influence Factors.

Principal Investigator: Satoshi ICHISE

Institution: Lake Biwa Environmental Research Institute
5-34 Yanagasaki, Otsu-City, Shiga 520-0022, JAPAN
Tel: +81-77-526-4288 / Fax: +81-77-526-4803
E-mail: ichise-satoshi@pref.shiga.lg.jp

Cooperated by: Center for Environmental Science in Saitama, Toray Techno Co., Ltd.,
Ryukoku University

[Abstract]

Key Words: Lake Biwa, Phytoplankton, Zooplankton, Long-term variation, Oxygen depletion, Siltation, Seed bank, Lake bottom slope, Mathematical model, Scenario simulation

Phytoplankton biomass and chlorophyll-a in the northern basin of Lake Biwa tends to decrease from 1980s. On the contrary, cyanobacteria have been increased over time, and might contribute an increase in persistent organic matter in the lake. Since cyanobacteria are disappeared in winter, cyanobacteria seeds are supplied to the lake from some sources in spring or summer. However, the seed supply from the bottom sediment in the offshore zone of the lake is not thought to be a main source, because the average depth of the northern basin of Lake Biwa is about 60 m. Accordingly, we focused on the bottom sediment of the littoral zone as a seed source (seed bank) of phytoplankton, and tried to elucidate functions of littoral zone and their influential factors on the lake environment and behavior of cyanobacteria in the lake using experimental and modeling approaches.

The incubation experiments for estimation of seed bank potential of bottom sediments were performed using sediments sampled from the east coast of the northern basin of Lake Biwa and from Lake Yamanokami, and revealed that reappearance of cyanobacteria was enhanced under low dissolved oxygen condition, which was easily formed by muddy sediment with a high silt content. Thus, the prevention of siltation was thought to be important for a control of cyanobacteria.

To elucidate the reason why siltation occurs in specific areas, a comprehensive analysis between lakeshore configuration and siltation was performed. Consequently, the organic matter and silt contents of the bottom sediment increased with a steep lakeshore slope over 5% and a large slope change over 3%. Thus, a decrease in the lakeshore slope and the slope change may be effective to prevent the siltation.

As the results of various field surveys and experiments, a prediction model for dissolved

oxygen concentration and a system dynamics model for phytoplankton community in the littoral zone of Lake Biwa were constructed. The model calculation under several scenarios revealed as follows: The dissolved oxygen concentration in the benthic layer was strongly influenced by the silt content, and an enrichment of dissolved oxygen in the benthic layer, a decrease in silt content of the sediment, and an increase in water exchange rate were inferred to be potential countermeasures to decrease biomass of cyanobacteria.

Thus, the prevention of siltation will be effective in maintaining aerobic condition of benthic layer and deterring blooms of cyanobacteria.