

気候変動が琵琶湖の水質・生態系にもたらす影響と適応策に関する研究

井上栄壮・永田貴丸・佐藤祐一・山口保彦・早川和秀・酒井陽一郎・石川可奈子・焦春萌・岡本高弘・
藤原直樹・奥居紳也・南真紀・宮下康雄¹⁾・小笠原翔・安達大輝・石崎陽平²⁾・岩本健也・河上新大

1. 目的

琵琶湖における在来魚介類のにぎわい復活に向けたこれまでの調査研究により、大型植物プランクトンの大規模な発生の頻発、気候変動の影響などによって、食物連鎖をはじめとする円滑な物質循環が妨げられている可能性があることがわかってきた。そのため、表層での有機物生産と底層への沈降、有機物の分解と酸素消費、底層の貧酸素化と底生生物の分布に着目し、気候変動が琵琶湖北湖の水質や生態系に及ぼす複合的な影響の評価とともに、気候変動適応策の方向性について提言する。

2. 研究内容と結果

【サブテーマ①-1 気候変動による表層の植物プランクトン生産への影響評価】

気候変動が植物プランクトン生産に及ぼす影響を評価するため、異なる水温（20℃、30℃、35℃）における増殖特性を評価した。最大比増殖速度は、小型種（<20μm）のセネデスムスは、大型種（>45μm）のスタウラストルム、ミクラステリアスの3～6倍程度大きかった。増殖率が高かった温度は、セネデスムスでは20℃と30℃、スタウラストルムでは30℃、ミクラステリアスでは20℃であった（図1）。

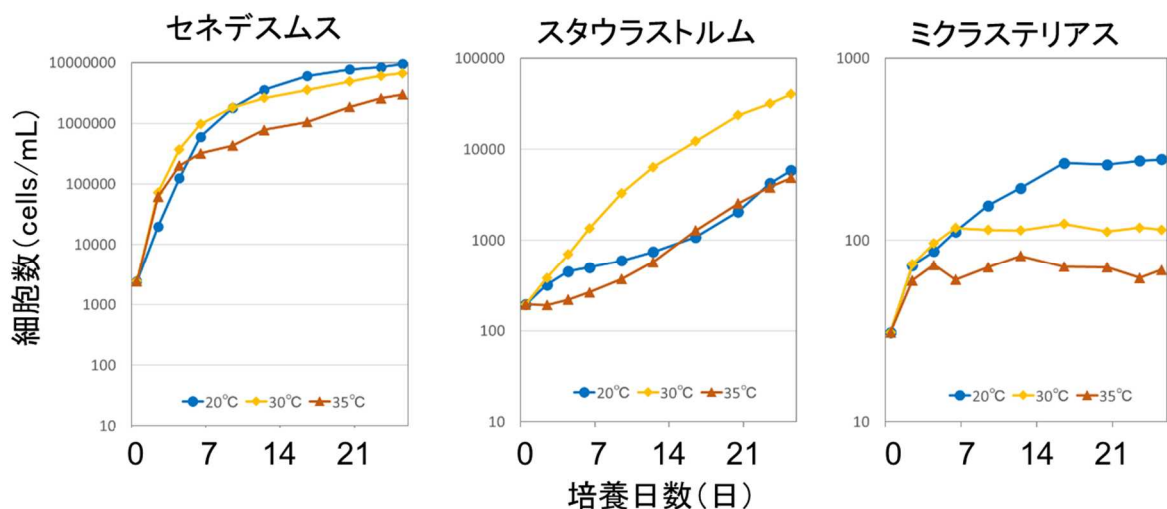


図1 植物プランクトン3種の水温別増殖特性

【サブテーマ①-2 表層から深水層・底層への植物プランクトン沈降量の評価】

近年の琵琶湖表層で度々大発生するスタウラストルム等の大型植物プランクトンは、細胞サイズが大型（>45μm）であるため、動物プランクトンには摂食されず、湖底に沈む。一方、これまでの研究結果から、大型植物プランクトンの細胞は、炭素あたりの窒素等の含有量が低い（低N:C比）ため、他生物の餌としての質が低いことが分かってきた。このことから、大型植物プランクトンが増えると、質の低い植物プランクトン由来の有機物が、沈降粒子となって湖底に大量に沈むと考えられる。これは、湖底で沈降し

た有機物を食べる底生生物の餌質が、大型植物プランクトンが大発生した時期に低下する可能性があることを示している。このことを検証するため、2023 年度に琵琶湖北湖の今津沖中央（17B）において、表層の小型（ $<45\mu\text{m}$ ）と大型（ $45\text{--}250\mu\text{m}$ ）のセストン（植物プランクトン等の粒子）の炭素（C）と窒素（N）量を測定することで、各サイズの植物プランクトンの発生状況と、それぞれの質（N:C 比）の変化を調べた。また、同地点の深層（深度 60 m）に設置したセジメントトラップで沈降粒子を採取し、小型（ $<45\mu\text{m}$ ）と大型（ $45\text{--}250\mu\text{m}$ ）の粒子の沈降水量（C 量）を調べるとともに、それぞれの質（N:C 比）を評価した。そして、表層と深層で得られた結果の関係性について考察した。

表層において各サイズのセストン量を調べたところ、ほとんどの時期は大型より小型の粒子が多かったが、6 月のみ大型が極めて多かった（図 2a）。6 月は大型植物プランクトンのスタウラストルムとミクラステリアスの大発生が認められた（琵琶湖環境科学研究センター，2024）ことから、6 月の高い大型セストンの量は、大型植物プランクトンの増加によるものと考えられた。一方、各サイズのセストンの質（N:C 比）は、小型より大型の方がおおむね低く、特に 6 月に低かった（図 2b）。この結果から、大型植物プランクトンを含む大型セストンの方が、小型セストンより質が低いことがわかった。

深層に沈む各サイズの粒子の沈降水量を調べた結果、7 月上旬に大型粒子の沈降水量が多かった（図 2c）。6 月は表層で大型植物プランクトンが大発生したことから、7 月上旬の高い大型粒子の沈降水量は、表層で増えた大型植物プランクトンが深層に沈んだ結果と考えられた。一方、全サイズ（小型+大型）の沈降粒子の N:C 比を求めた結果、大型粒子の沈降水量が多かった 7 月上旬に、特に N:C 比が低かった（図 2d）。このことから、大型植物プランクトンが表層で大発生すると、彼らは湖底へと大量に沈むが、質（N:C 比）が低いため、その影響で底生生物が湖底で食べる沈降有機物（沈降粒子）の質が低下すると考えられた。

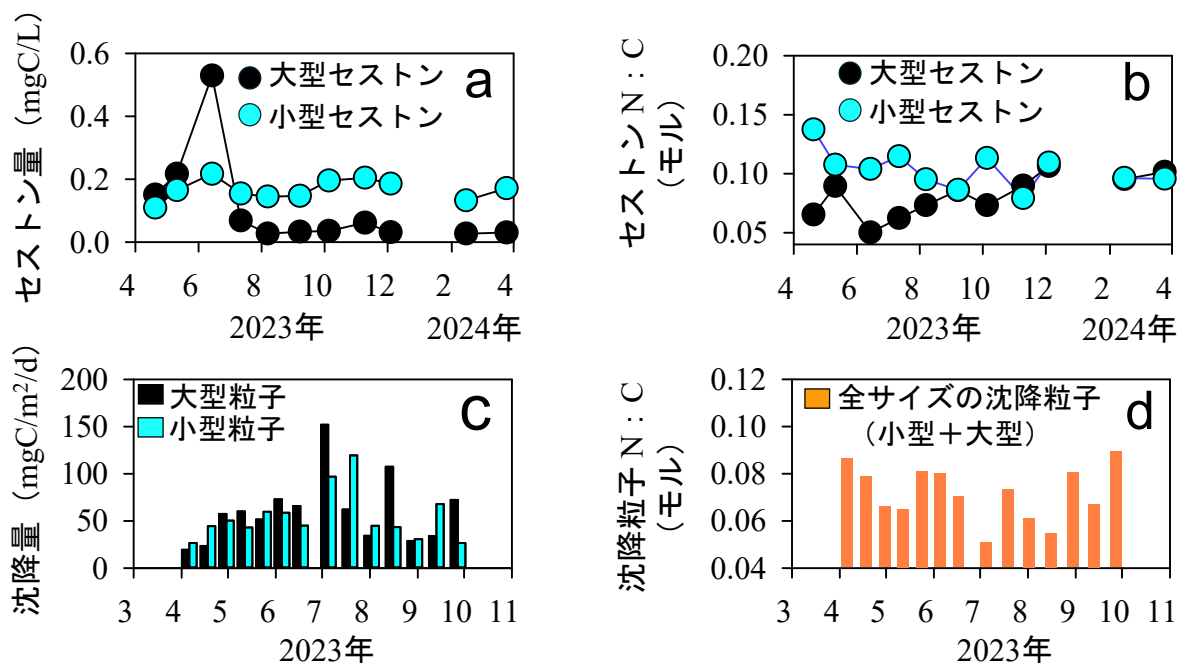


図2 琵琶湖北湖の今津沖中央（17B）の表層（深度 5m）における小型（ $<45\mu\text{m}$ ）と大型（ $45\text{--}250\mu\text{m}$ ）のセストン量（a）とその質である N:C 比（b）、17B の深層への小型（ $<45\mu\text{m}$ ）と大型（ $45\text{--}250\mu\text{m}$ ）の粒子の沈降水量（c）、沈降粒子の質である N:C 比（d）。小型と大型は、それぞれ小型と大型の植物プランクトンが含まれるサイズ分画を示す。

【サブテーマ①-3 気候変動による深水層・底層における有機物分解への影響評価】

過去の貧酸素化等の事象に気候変動が及ぼした影響を評価するため、1979 年以降の琵琶湖の水質モニタリングデータを活用した指標解析を実施した。底泥と水柱を合わせた深水層全体の酸素消費速度である AHOD（深水層酸素欠損）は、成層期（5～10 月）における溶存酸素（DO）濃度の水深分布の経時変化から算出した。底泥のみの寄与である SOD（底泥酸素消費速度）は、DO 消費プロセスに関する簡易的な逆解析モデルを用いて、底泥と水柱の寄与を区別して推定した。逆解析モデルを用いた SOD 推定値を、底泥コアを用いた室内実験による実測値（2014～2022 年）と比較した結果、台風等による鉛直混合の影響が小さい年には、モデルによる推定値と室内実験による実測値がおおむね一致した。このため、2013 年以前についても SOD の値を推定可能となった。

1979～2022 年の AHOD と SOD は、長期的な傾向は明瞭でなく、近年の値は 1980～90 年代と同程度だった（図 3）。つまり、近年の琵琶湖北湖表水層の貧栄養化は、深水層の酸素消費速度の減少につながっていないことがわかった。特に、貧酸素水塊が拡大した 2020 年は、AHOD が 1979 年以降の最高値だった。今後、これらのデータを、深水層水温、表水層水温、粒子状有機炭素（POC）濃度、植物プランクトンの量・組成等のモニタリングデータと比較することで、気候変動の影響を評価していく予定である。

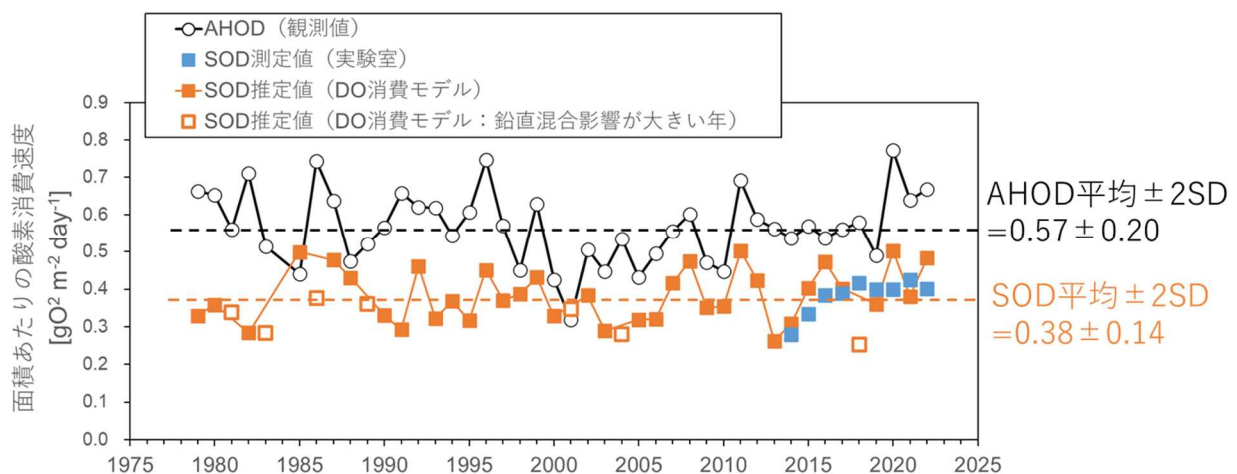


図 3 湖水中溶存酸素濃度等のモニタリングデータの解析から推定した、深水層全体の酸素消費速度（AHOD）と底泥の酸素消費速度（SOD）の 1979～2022 年における推移

【サブテーマ①-4 気候変動による深水層・底層における酸素消費への影響評価および底層 DO 等のモニタリング】

琵琶湖において、深度 60m 以深の水温は 7～9℃でほぼ一定である。しかし、気候変動による気温上昇が深水層の水温上昇をもたらし、飽和溶存酸素量の低下や、微生物活性の上昇による底泥の SOD の増加が生じ、底層 DO の低下を促進する可能性がある。SOD と温度の関係を評価するため、17B と 12B の 2 地点において、現場を考慮しない幅広い温度幅として 4℃、8℃、20℃で小型バイアル法 (Shimotori et al., 2021) により SOD を測定した結果、温度が高いほど指数関数的に SOD が増加した（図 4）。より狭い温度幅として 6℃、8℃、10℃で同様に SOD を測定した結果、温度が高いほど SOD が増加し、水温上昇 2℃で SOD が 10%増加する関係がみられた。

2023 年に設定された底層 DO 環境基準点（図 5）等における底層 DO と、一部地点における底層水質の

モニタリング調査を実施した。水深 90m 層では、9 月下旬から 1 月下旬まで貧酸素状態となり、80m 層の一部まで広がった（図 6）。底層水質について、底層 D0 生物 1 類型の地点では全マンガングン濃度（T-Mn）はほぼ検出されなかったが、生物 2・3 類型では底層 D0 低下時に T-Mn が最大 0.3mg/L まで上昇し、底層 D0 が 3mg/L 以下で T-Mn が急増する関係がみられた（図 7）。今後、引き続き底層 D0 と連動して変化する水質項目を把握し、底層 D0 低下の要因や影響を評価していく予定である。

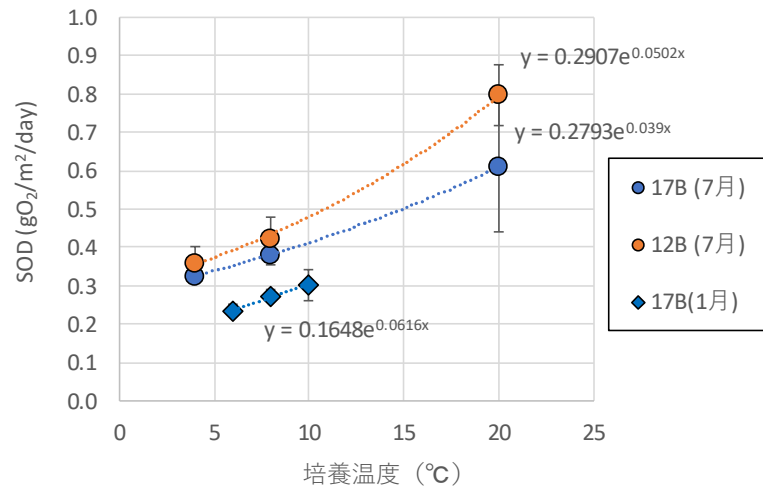


図 4 培養温度と SOD の関係。エラーバーは標準偏差（n=4）。

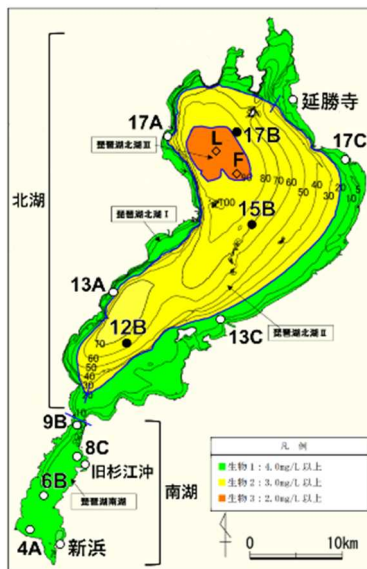


図 5 琵琶湖における底層 D0 環境基準点と類型

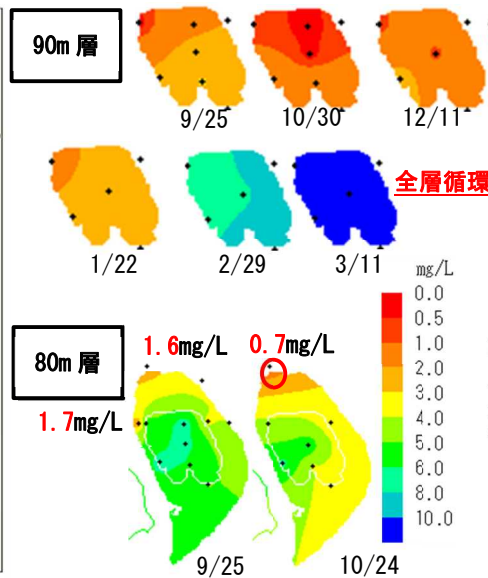


図 6 深度 90m、80m における底層 D0 測定結果の平面分布

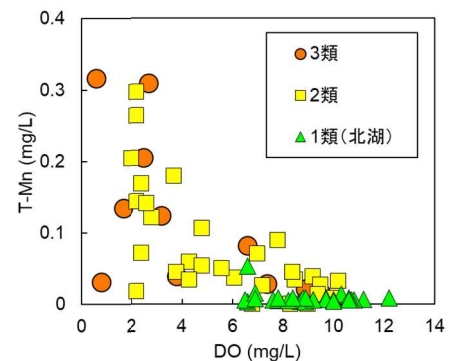


図 7 底層 D0 と T-Mn の関係

【サブテーマ②-1 気候変動が底生生物の分布に及ぼす影響評価】

琵琶湖北湖深湖底における底生生物の生息状況を把握するため、水深 50～90m の 5 地点において、水中有索ロボット（ROV）による底生生物の分布調査を 2012 年 4 月から 1～2 か月毎に継続している（石川ら，2023）。5 地点平均生息密度の年最大値は、2019～2020 年の全層循環未完了で生じた貧酸素水塊の拡大後に着目すると、アナンデールヨコエビは著しく減少した後に回復傾向、ビワオオウズムシは著しく減少した後に横ばい、スジエビとイサザは 2019～2020 年は明確な減少は認められなかったが後に減少した（図 8）。近年、スジエビは水深 90m 地点で、イサザは水深 50m 地点で、高密度の群れを確認できなくなった。貧酸素水塊が頻繁に生じることで、底生生物の分布や動態が変化した可能性があるため、今後も調査を継続し、状況の推移を注視していく。

琵琶湖北湖の6地点において、エクマン・バージ採泥器等による直接採取により底生生物の分布を把握した。過去の調査結果と比較可能な地点については、生息密度の経年変化を評価した。今津沖中央(17B)の水深90mの湖底において、1992年以降、生息密度で優占したミミズ類(主にイトミミズ)は明瞭な増減は認められず、ユスリカ類(主にアシマダラユスリカ)は2008年頃から増加傾向がみられた(図9)。

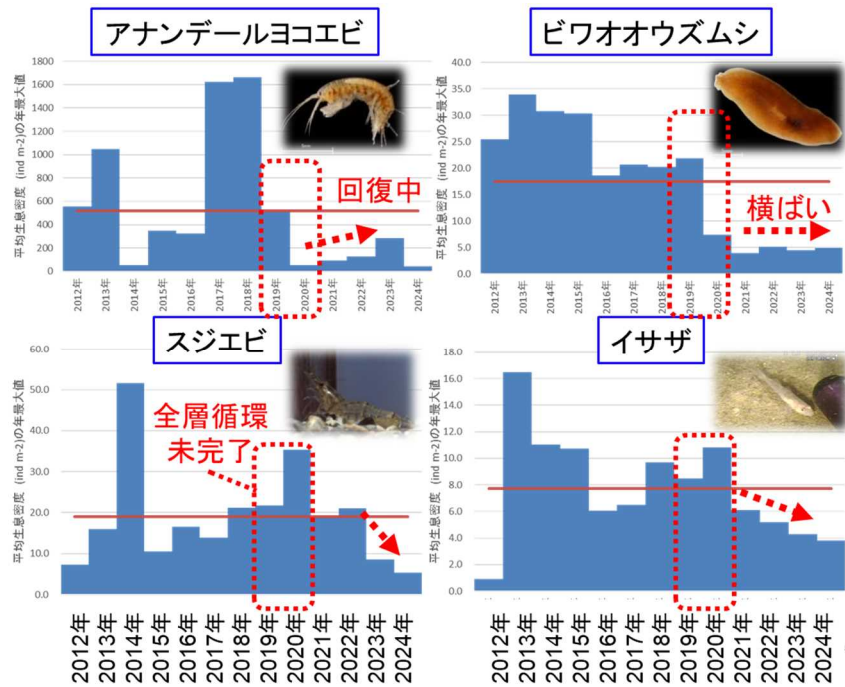


図8 底生生物4種の平均生息密度の年最大値(2024年3月まで)

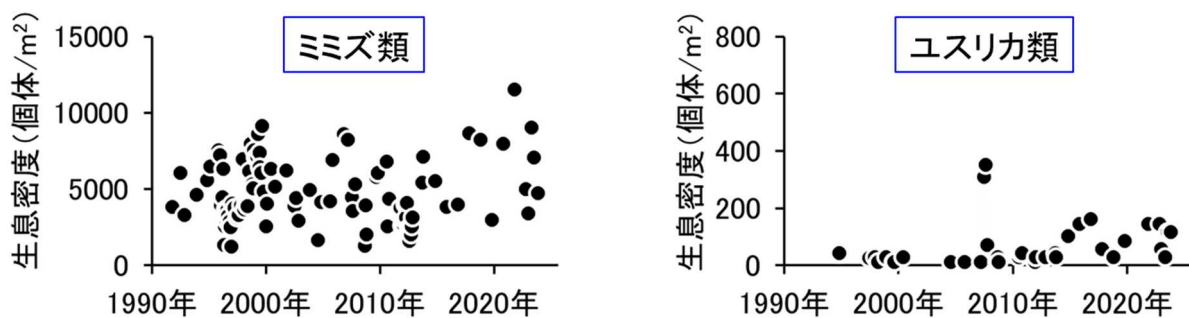


図9 今津沖中央(17B)におけるミミズ類(左)、ユスリカ類(右)の生息密度の経年変化(1992~2023年度)。1992~2019年は大高ら(2021)により作図。

【サブテーマ②-2 深水層における湖底境界層の動態把握】

琵琶湖北湖の深水層における貧酸素水塊の動態を把握するため、全層循環前の2024年1月にD0、水温等の南北鉛直断面調査を行った。調査前日に北西10m/s以上の強風が生じ、表層水が南に流れたため、水温躍層が鉛直約50mの振幅で激しく動いたことが分かった(図10)。

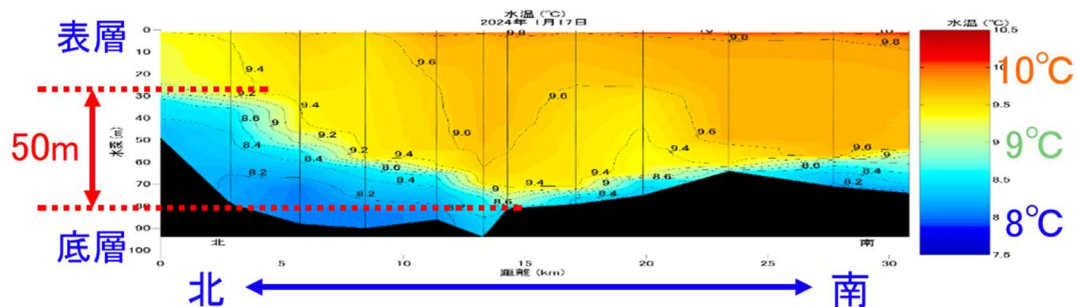


図10 琵琶湖北湖における水温の南北鉛直断面分布(2024年1月17日)

【サブテーマ③ 全層循環未完了が水質に及ぼす影響のモデル解析と適応策の検討】

全層循環未完了が水質に及ぼす影響を検討するためには、未完了が連続し、底層における無酸素状態が継続するような気象条件を把握することが必要である。琵琶湖では 2018～19 年度に全層循環未完了が生じたため、この期間の気温を現実的な範囲内で上昇させ、より全層循環未完了が生じやすい気象シナリオを作成した。具体的には、中長期的な気候予測の情報も踏まえて、3 か年の気象シナリオとして、①2018 年度の気象が連続、②2018～20 年度に 2090 年代並の気温まで徐々に上昇、③2018～20 年度の 3 か年ともに 2090 年代並の気温まで一気に上昇、の 3 つを検討した。「琵琶湖流域水物質循環モデル」(佐藤ら、2011)を用いて計算した結果、シナリオ②と③で全層循環未完了が連続し、長期間、底層で無酸素状態となることが予測された(図 11)。今後、これらのシナリオに基づき、全層循環未完了後に生じうる複合的な影響を解析していく予定である。

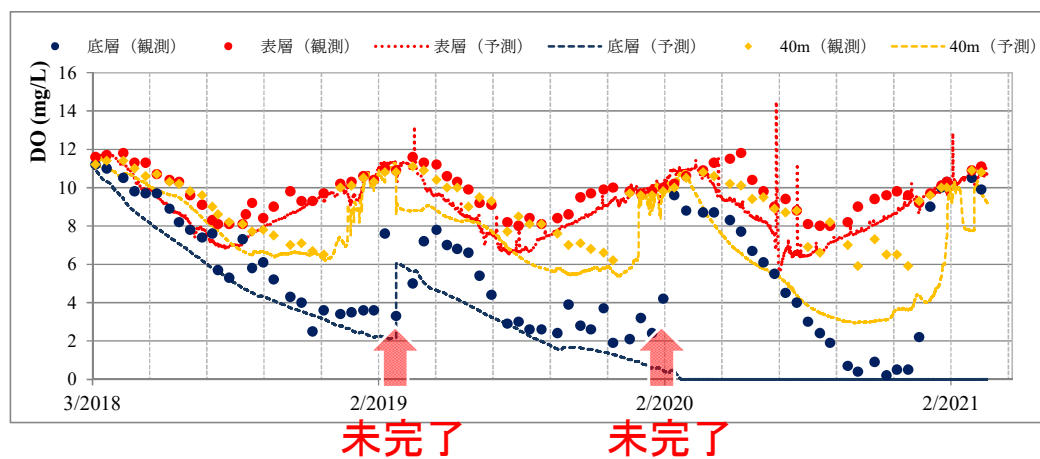


図 11 全層循環未完了と底層の無酸素化が継続する気象条件の予測結果（シナリオ②の例）

3. まとめ

気候変動により琵琶湖北湖で生じることとして、①表層では水温上昇により大型緑藻のスタウラストルムが増殖しやすくなること、②それに由来する沈降有機物も増加するが餌としての質は低くなること、③底層の有機物分解による酸素消費量の増加とともに、④全層循環の未完了が増加し底層の無酸素状態が長期化すること、⑤これらの結果として底生生物が減少すること等が考えられる。

今後、気候変動が水質や生態系に及ぼす複合的な影響を評価するため、植物プランクトン増殖実験の設定条件の追加、各項目の現地調査継続による年変動の把握、水質モニタリングデータ解析における長期的変動に影響を及ぼす要因の検討、琵琶湖流域水物質循環モデルの精緻化および気候変動適応策のモデル化等を行う。

引用文献

- 琵琶湖環境科学研究センター, 2024. <https://www.pref.shiga.lg.jp/file/attachment/5477910.pdf>.
石川可奈子ら, 2023. 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター研究報告書 19: 88-107.
大高明史ら, 2021. 陸水学雑誌 82: 17-37.
佐藤祐一ら, 2011. 水環境学会誌 34: 125-141.
Shimotori, K. et al., 2021. Journal of Soils and Sediments 21: 1222-1231.