

## 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・早川和秀・石川可奈子・山口保彦・焦春萌・酒井陽一郎・藤原直樹<sup>1)</sup>・山本春樹・岡本高弘・七里将一・那須文彰・奥居紳也<sup>2)</sup>・南真紀・宮下康雄<sup>3)</sup>・小笠原翔・安達大輝・石崎陽平<sup>4)</sup>・岩本健也<sup>5)</sup>・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を評価するとともに、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、異なる水温における増殖特性を評価した。大型緑藻ミクラステリアスの比増殖速度を 20℃、30℃、35℃で測定した結果、20℃で最も高かった (図 1a)。また、15℃、20℃、25℃で同様に測定した結果、20℃で最も高く、次いで 15℃、25℃の順であった (図 1b)。これらの結果から、ミクラステリアスの増殖速度は 20℃で最も高いと考えられた。

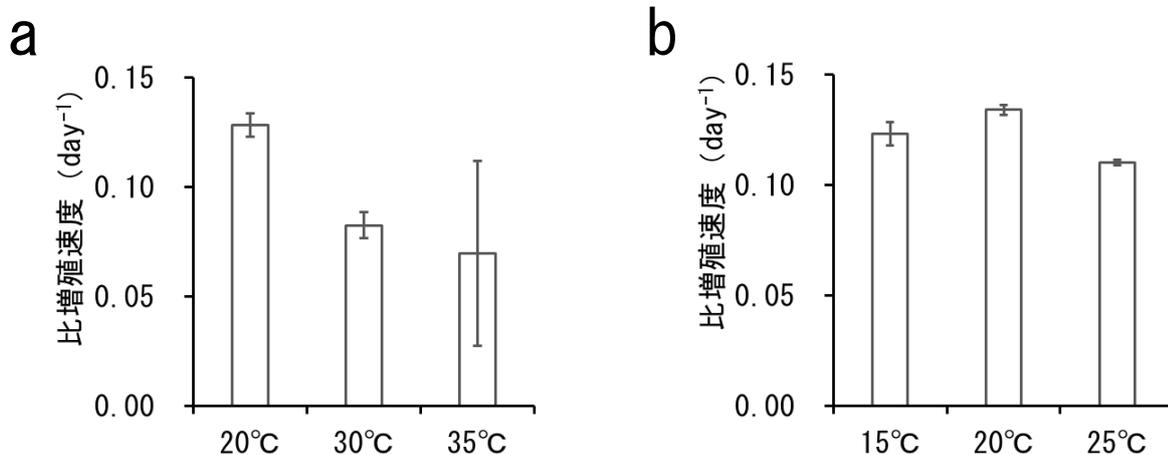


図1 ミクラステリアスの比増殖速度。a: 20℃, 30℃, 35℃; b: 15℃, 20℃, 25℃。a、bにおける20℃での比増殖速度は、使用した培養株等の条件が異なる別々の測定結果である。

#### 【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】

琵琶湖北湖の今津沖中央 (17B) の表層 (深度 5m) において、各サイズのセストン (植物プランクトン等の粒子) 量を 2023 年度から調査した。2023 年度と同様に、2024 年度もほとんどの時期で小型 (<45μm) のセストンが大型 (45-250μm) より多かったが、5月と6月のみ大型が多かった (図 2a)。2024 年 5月と6月は大型植物プランクトンのミクラステリアスが多かった (滋賀県, 2025) ことから、5月と6月の高い大型セストン量はミクラステリアスの増加によるものと考えられた。一方、2024 年度における各サイ

ズのスエストンの餌としての質 (N:C 比) は、小型より大型の方が概ね低く、特にミクラステリアスが多かった 6 月に低かった (図 2b)。2023 年度では、大型植物プランクトンのスタウラストルムが高密度になった 6 月に大型スエストンの N:C 比が低下した (図 2a, b)。これらのことから、大型植物プランクトンが高密度になると、大型スエストンの質 (N:C 比) が低下すると考えられた。

2023 年度と同様に深層に沈む各サイズの粒子の沈降量を調査した結果、2024 年度は 6 月中旬に超大型サイズ (>250 $\mu$ m) の粒子 (凝集した大型植物プランクトン+動物プランクトン) の沈降量が多かった (図 2c)。5 月と 6 月は表層でミクラステリアスが高密度だったことから、6 月中旬の高い超大型粒子の沈降量は、表層で増えたミクラステリアスが深層に沈んで凝集した結果と考えられた。一方、2024 年度における全サイズ (小型+大型+超大型) の沈降粒子の N:C 比を求めた結果、超大型粒子の沈降量が多かった 6 月中旬に特に N:C 比が低かった (図 2d)。また、大型サイズ (45-250 $\mu$ m) の粒子 (大型植物プランクトン) の沈降量が多かった 7 月上旬にも、特に N:C 比が低かった (図 2c, d)。2023 年度にも同様の傾向がみられたことから、大型植物プランクトンが表層で高密度になると、湖底へ沈む粒子の沈降量は増えるが、質 (N:C 比) が低下すると考えられた。これは、湖底に生息する底生生物の餌 (沈降粒子) の質が、高密度の大型植物プランクトンで低下することを意味する。現在の琵琶湖で大型植物プランクトンが増えて高密度になるのは、1~2 か月の短期間であるため、底生生物の餌質の低下は一時的である。しかし、底生生物の保全に向けた餌量・質の評価のためには、今後もサイズ別の植物プランクトンの発生状況をモニタリングすることが必要であると考えられる。

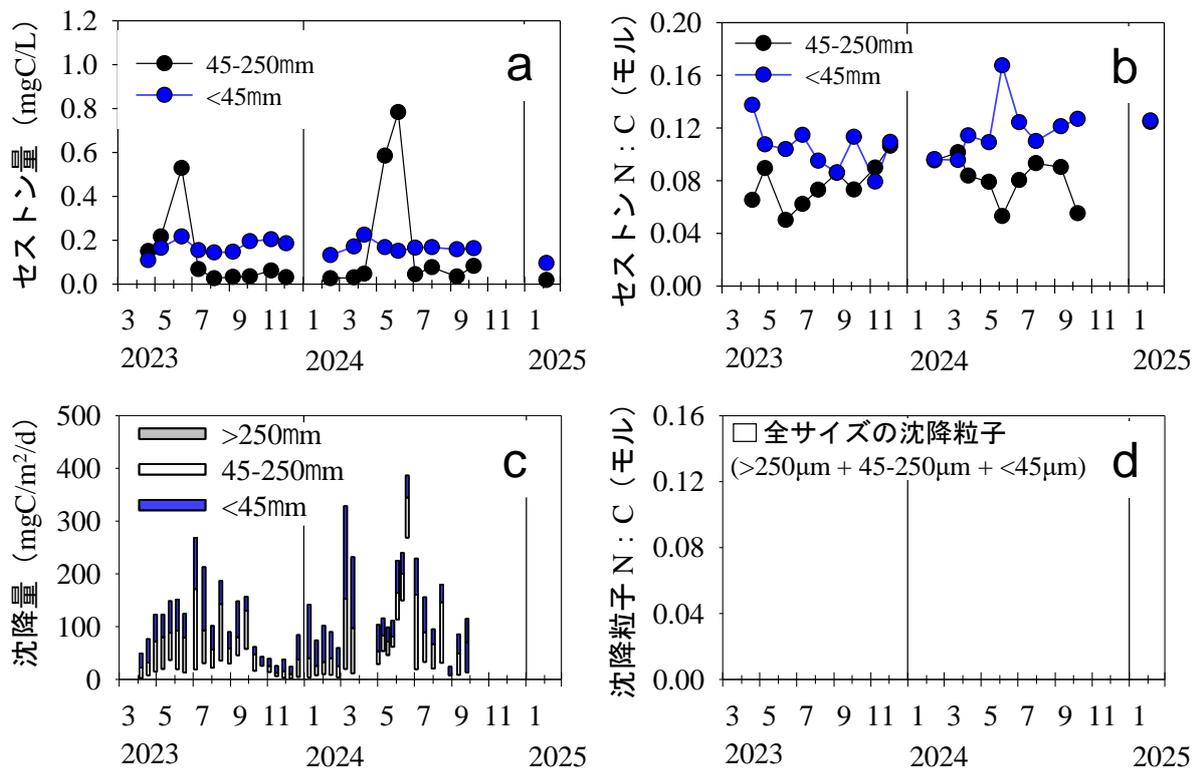


図2 今津沖中央 (17B) の表層 (深度 5m) における、a: 小型 (<45 $\mu$ m) と大型 (45-250 $\mu$ m) のセストン量; b: セストンの質である N:C 比; c: 17B の深層への小型 (<45 $\mu$ m)、大型 (45-250 $\mu$ m)、超大型 (>250 $\mu$ m) の粒子の沈降量; d: 沈降粒子の質である N:C 比。小型と大型は、それぞれ小型と大型の植物プランクトンが含まれるサイズ分画を示す。超大型は凝集した大型植物プランクトンと動物プランクトンが含まれるサイズ分画を示す。

【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】

気候変動が琵琶湖における過去の貧酸素化等の事象にもたらした影響の評価に向けて、1979 年以降の水質等モニタリングデータを活用した指標解析を行った。底泥と水柱を合わせた深水層全体の酸素消費速度  $AHOD_{vm}$  (鉛直混合影響を補正した値) は、成層期 (5-9 月) における今津沖中央 (17B) の溶存酸素 (DO) 濃度の水深分布の経時変化から算出した。底泥酸素消費速度 (SOD) と水柱酸素消費速度 (WCM) 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推定した。

$AHOD_{vm}$  と SOD の推定値は、2001-2024 年に長期的な増加傾向がみられ (図 3a)、5-6 月の 17B 表水層 (水深 0-20m 平均) の湖水中粒子状有機物 (POC) 濃度と有意な正の相関を示した (図 3b, c)。また、5-6 月の 17B 表水層の湖水中 POC 濃度は、同時期・同地点の表水層 (水深 0-5m 平均) の水温と有意な正の相関を示した (図 3d)。

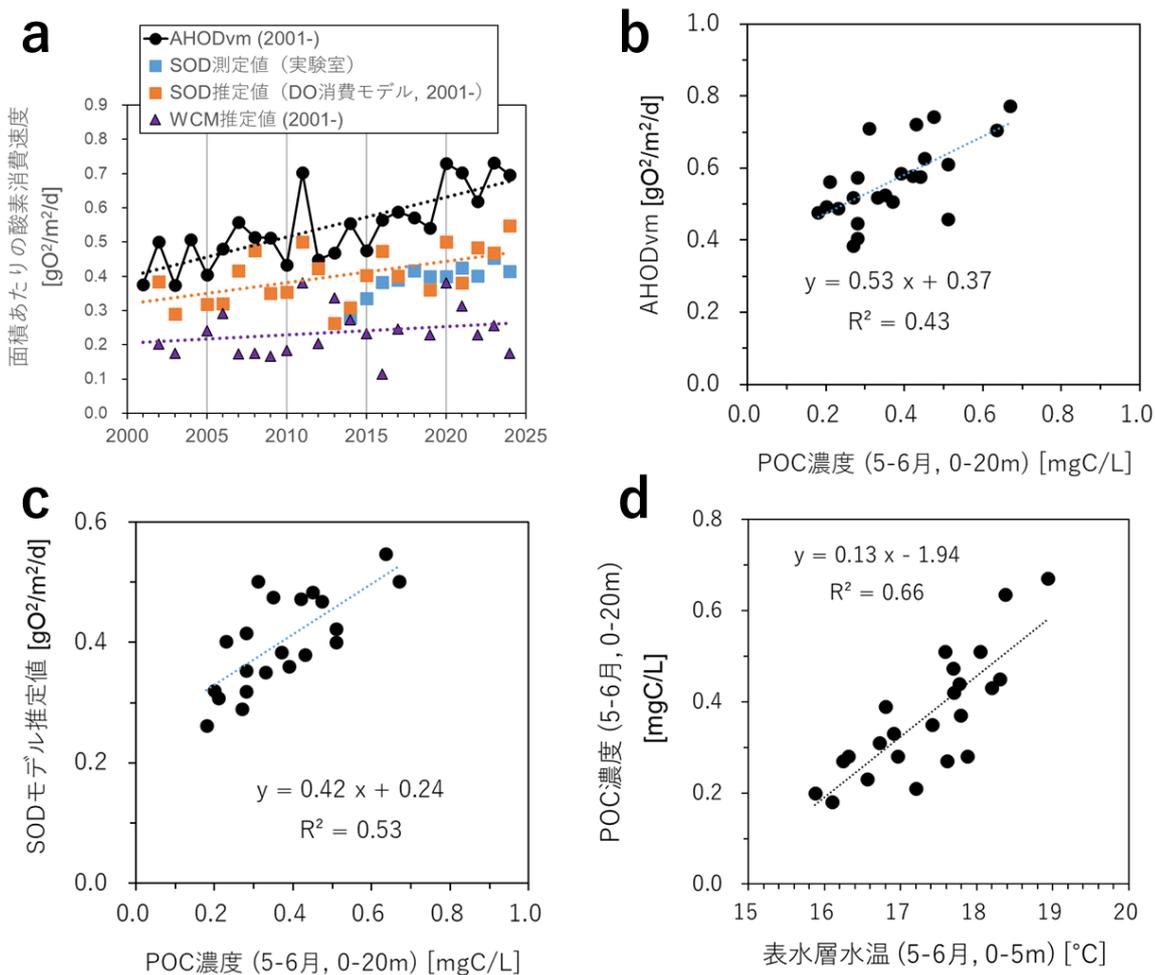


図 3 a: 水質等モニタリングデータの解析から推定した、成層期における深水層全体の酸素消費速度 ( $AHOD_{vm}$ : ●)、底泥酸素消費速度 (SOD: ■)、水柱酸素消費速度 (WCM: ▲) の 2001-2024 年における推移。底泥コアを用いた室内実験による SOD 測定値 (2014-2024 年の 5-10 月平均値: ■) も示した。b, c: 2002-2024 年における、 $AHOD_{vm}$  および SOD モデル推定値の、5-6 月の 17B 地点表水層 (水深 0-20m 平均) の湖水中粒子状有機物 (POC) 濃度との相関。d: 2002-2024 年における、5-6 月の 17B 地点表水層 (水深 0-20m 平均) の湖水中 POC 濃度と、同時期の 17B 地点表水層水温 (水深 0-5m 平均) との相関。

これらの結果は、温暖化による水温上昇が、AHOD<sub>vm</sub> と SOD の増加の原因である可能性を示す。表水層の水温上昇が、5-6月の植物プランクトンブルームにつながり、高濃度の湖水中 POC の深水層・底層への沈降をもたらしたことで、AHOD<sub>vm</sub> と SOD を増加させたと考えられる。

【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 D0 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℃ではほぼ一定だが、気候変動による気温上昇は深水層の水温上昇をもたらす可能性がある。水温上昇は、飽和 D0 量の低下や微生物活性の上昇による SOD の増加を通じて、底層 D0 の低下促進につながる可能性がある。SOD と温度の関係を評価するため、底泥の性状が異なる 4 地点において、現場の底層水温を含む 4-28℃で小型バイアル法 (Shimotori et al., 2021) により SOD を測定した結果、すべての地点で温度が高いほど指数関数的に SOD が増加した (図 4)。

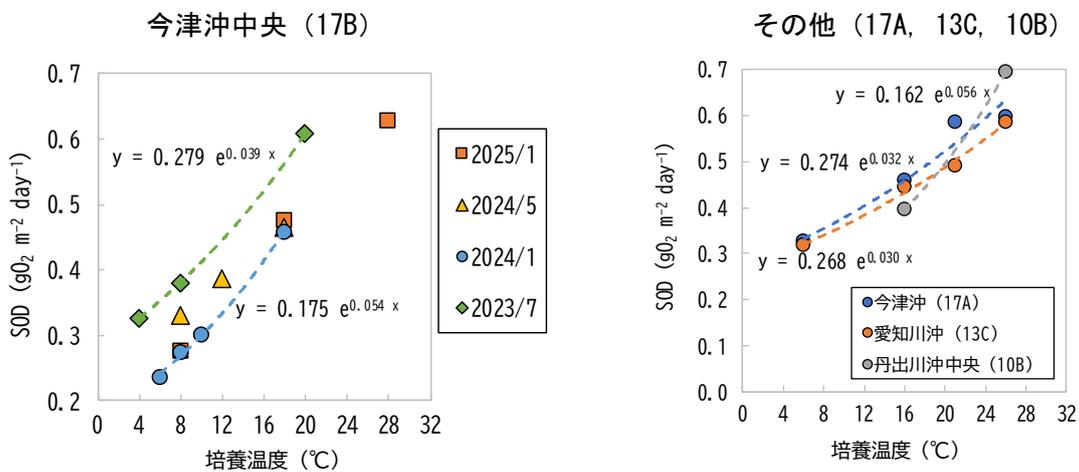


図 4 培養温度と SOD の関係。左：17B；右：17A, 13C, 10B。

2023 年に琵琶湖の底層 D0 環境基準点 (図 5 で○, ●, ◇で示した地点) が設定されたことを踏まえ、2024 年度もこれらの地点における底層 D0 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。北湖第一湖盆の水深 90m 層では、現在の調査範囲となった 2006 年以降 2 番目に早い 8 月 20 日に D0 濃度が 2 mg/L 未満の貧酸素状態を確認し 12 月末まで続いた (図 6)。また、第一湖盆の水深 80m 地点 (H 点、J 点、Q 点) および第二湖盆の水深 75m 地点 (Ie-1) でも底層の貧酸素状態を確認した (図 7)。Ie-1 地点の底層の貧酸素状態が観測されたのは 2020 年以來 2 度目だった。

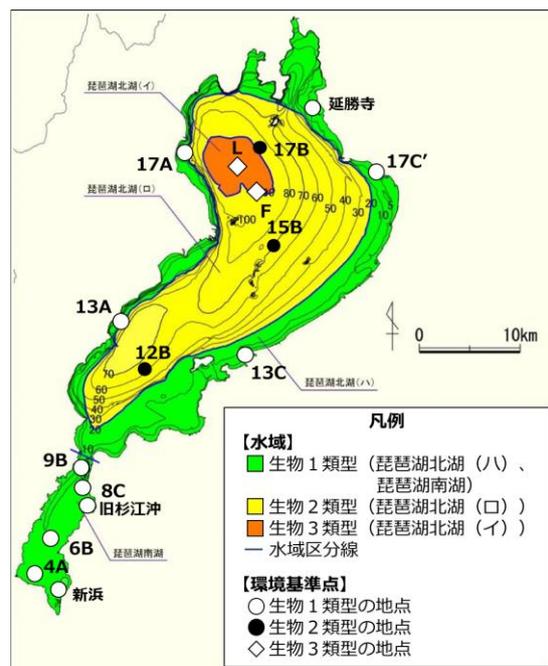


図 5 琵琶湖の底層 D0 に係る水域類型と環境基準点。

底層水質について、北湖の底層 D0 に係る環境基準の生物 1 類型の地点では全マンガン (T-Mn) は 2023 年度同様、ほぼ検出されなかったが、生物 2 類型、生物 3 類型では底層 D0 低下時に T-Mn が最大 0.33mg/L まで上昇し、2 類型の地点において 2023 年度より高い濃度を確認した (図 8)。今後も引き続き底層 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する予定である。

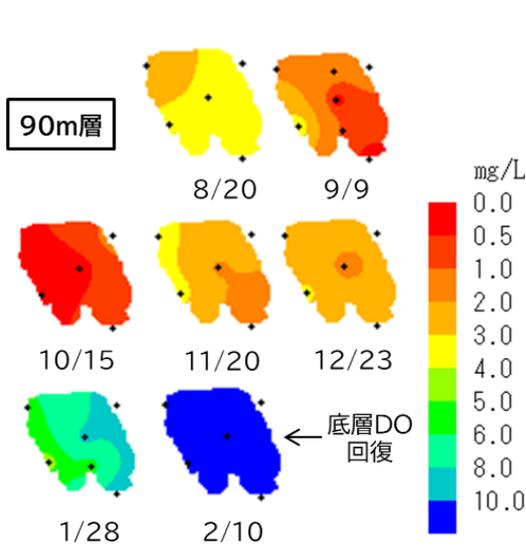


図 6 水深 90m 層における DO の分布。コンター図の色は、凡例に基づき DO の値を表したもの。

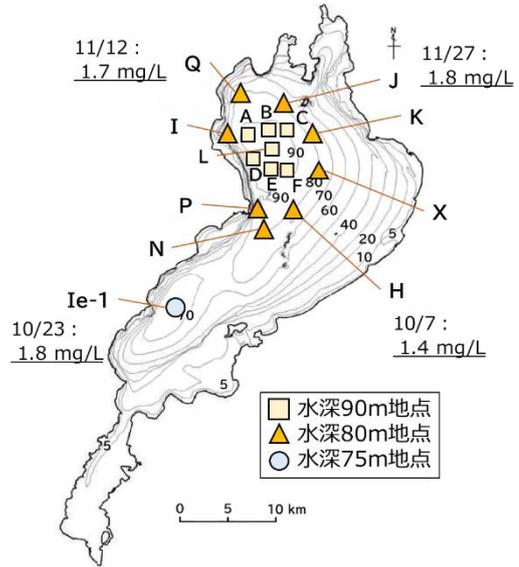


図 7 底層 DO 調査地点と底層の貧酸素状態確認日ならびにそのときの値。

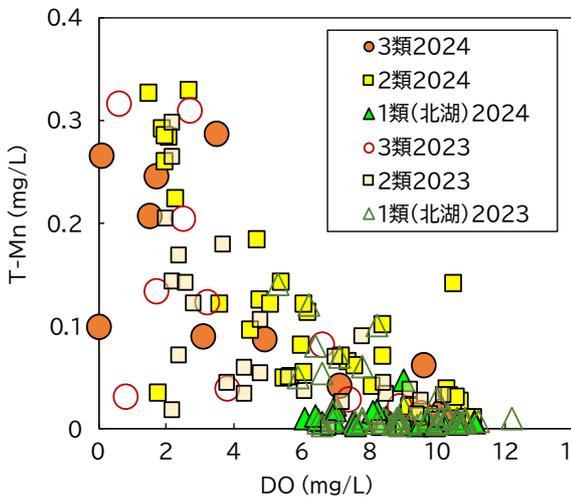


図 8 底層 DO と T-Mn の関係。

【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】

琵琶湖北湖の 5 ラインにおいて、2024 年 6 月に計量魚群探知機による夜間の音響観測を実施し、深度 20m 以深のアナンデルヨコエビの生息状況を評価した (図 9)。約 500m 毎に平均面密度 (個体/m<sup>2</sup>) を計算し、ライン毎に平均をしたところ、ライン 11 から 1 の順に 116, 151, 173, 48, 36 であり、第一湖盆沖合の深水層に分布が集中した。琵琶湖は、2019-2020 年に全層循環が未完了となり、湖底付近の貧酸素化が水深 70m 以深にまで拡大した。その際、湖底でアナンデルヨコエビおよびビワオオウズムシが

死亡した様子が観察され、生息密度が著しく減少した。その後の年も貧酸素化が生じたが、アナンデルヨコエビの生息状況は、周囲の水域から第一湖盆沖合の深水層に移入したことで回復したと考えられる。本研究は、北海道大学との共同研究「計量魚群探知機を用いた琵琶湖沖帯底生生物の識別と定量化手法の開発 (VII)」の成果の一部である。

琵琶湖北湖の6地点(図10)において、エクマン・バージ採泥器による直接採取により底生生物の生息密度を評価した。このうち第一湖盆の今津沖中央(17B、水深90m)と第二湖盆のIe(水深75m)について、過去の調査結果と比較した。1992年以降、生息密度で優占した貧毛綱(主にイトミミズ)は明瞭な増減は認められず、ユスリカ科(主にアシマダラユスリカ)は2000年代後半から増加傾向、マメシジミ属は17Bでは採取されなかったがIeでは2010年頃から増加傾向がみられた(図11)。これらの長期変化の要因については不明であるが、気候変動との関連を含め、今後検証する必要がある。

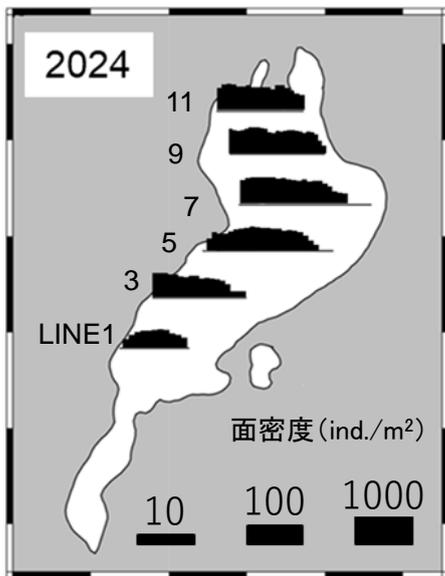


図9 アナンデルヨコエビの分布 (2024年6月)。

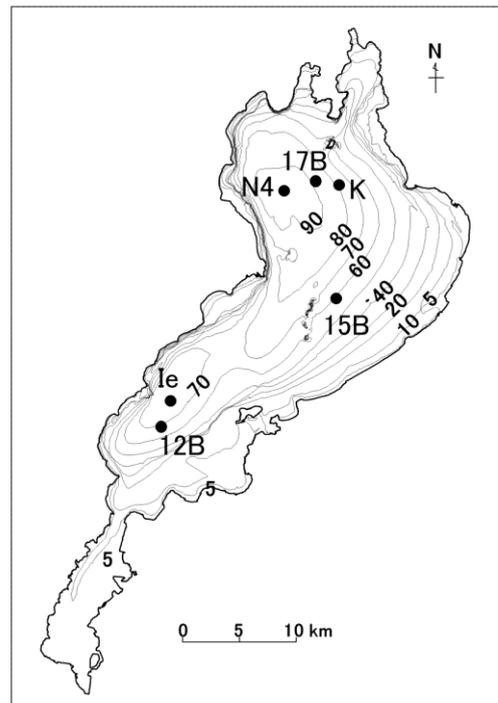


図10 琵琶湖北湖における底生生物調査地点 (●; 2023~2024年度)。

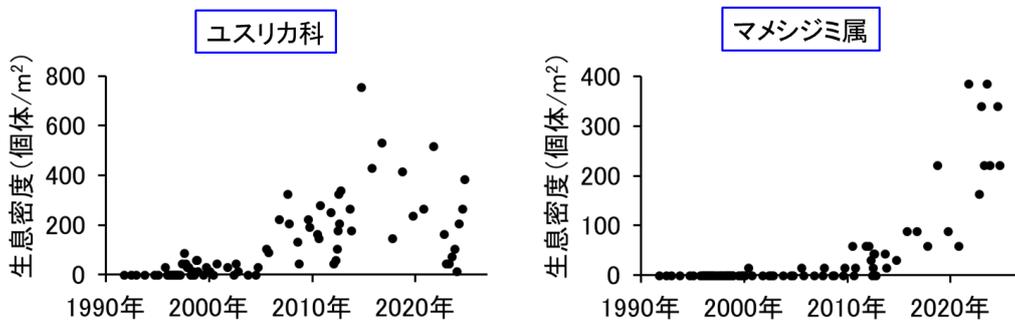


図11 Ie(水深75m)におけるユスリカ科(右)、マメシジミ属(左)の生息密度の経年変化(1992~2024年度)。1992~2019年は大高ら(2021)により作図。

【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等を把握するため、2024年9月にDO、水温等の南北鉛直断面調査を実施した。水深12-21mで水温が26℃から13℃に低下し強い成層状態であったこと、DOが低く濁度が高い貧酸素水塊は、湖底地形に沿って深水層に形成されていることを確認した(図12)。

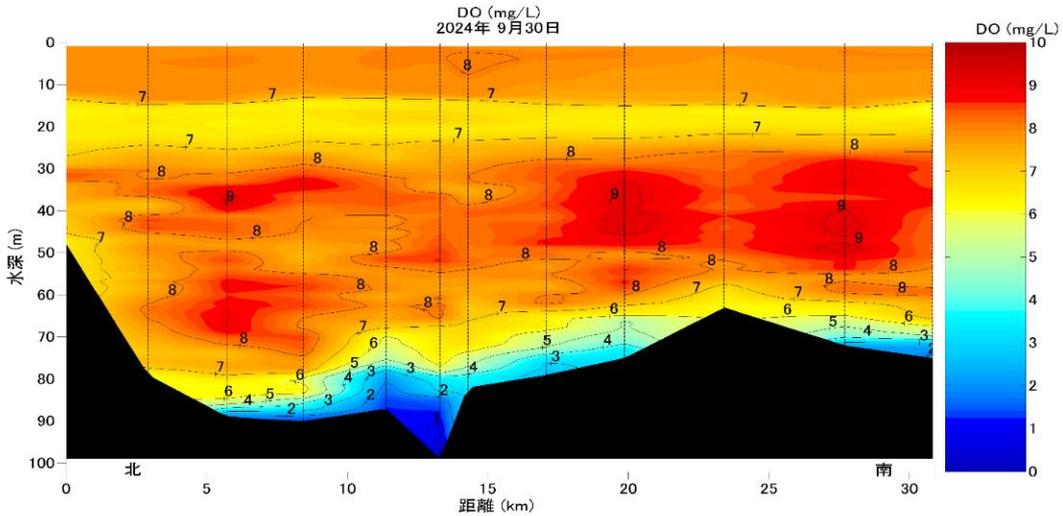


図12 琵琶湖北湖におけるDOの南北鉛直断面分布(2024年9月30日)。図の左方向が北。

【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】

全層循環未完了が複数年にわたり継続し、その後全層循環が生じた場合に琵琶湖水質に生じる影響について、「琵琶湖流域水物質循環モデル」(佐藤ら, 2011)を用いて予測した。計算期間は2018-2021年度の4か年とし、現況再現性を確認した上で、気温上昇シナリオによる予測計算を行った。具体的には、2018-2019年度の2か年にわたり、2090年代に予測される気温条件(約3℃上昇)とすることで、全層循環未完了が2か年連続し、その後完了することが想定される計算を行った。

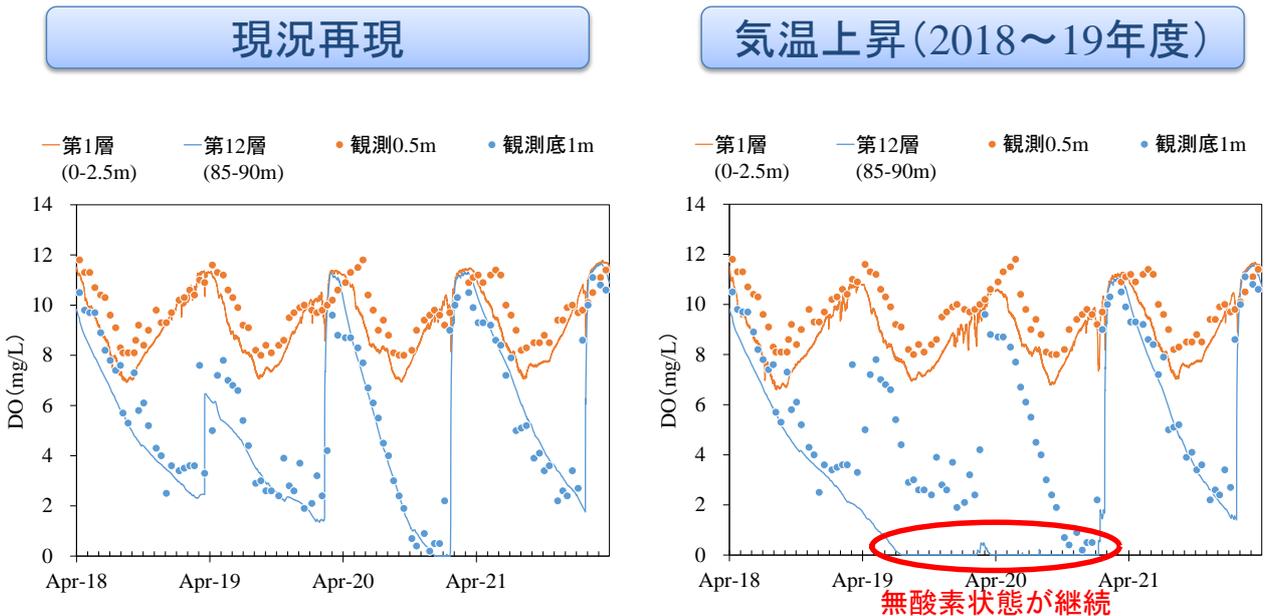


図13 現況再現(左)と気温上昇シナリオ(右)におけるDOの計算結果。

今津沖中央（17B）における表層（第1層）と底層（第12層）のDOの計算結果を図13に示す。気温上昇シナリオでは、2019年6月から2021年1月にかけて底層で無酸素状態となり、その後全層循環によりDOが回復すると予測された。これに伴い、湖底において栄養塩の溶出もみられたが、表層への回帰は限定的であった。一方、水温の上昇により、表水層における一次生産、分解、栄養供給が増加するとともに、水温躍層が強固になることで、表水層におけるPOCが増加することが予測された。

### 3. まとめ

気候変動が琵琶湖北湖の水質と生態系にもたらす影響の評価に向けて、①大型緑藻ミクラステリアス等の植物プランクトンの増殖温度、②ミクラステリアス等の増加による一時的な沈降有機物の増加と餌としての質の低下、③長期的な水温上昇による沈降有機物の増加と、それに由来する底層酸素消費の増加、④水質、底質、溶存酸素等の現状、⑤全層循環未完了が生じた後のアナンデルヨコエビの生息密度回復状況と、底生生物生息状況の長期変化等について、現地調査、室内実験、分析、およびデータ解析により把握した。また、モデル解析により、⑥水温上昇により全層循環未完了が連続する条件では、表水層における一次生産等の増加と、水温躍層の強化、粒子状有機物の増加が予測された。今後、これらの知見を総括し、気候変動がもたらす複合的な影響を評価するとともに、取りうる適応策とその効果について検討する。

### 引用文献

滋賀県, 2025. <https://www.pref.shiga.lg.jp/file/attachment/5561803.pdf>

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.