

# 温暖化に起因する全循環の短期化・停止が琵琶湖生態系に及ぼす影響

後藤直成, 伴修平, 吉山浩平, 堂満華子, 尾坂兼一  
滋賀県立大学環境科学研究所

## 1. はじめに

2019年と2020年、琵琶湖では観測史上初めて冬期全循環が観測されなかった。この2年連続の全循環停止は、琵琶湖北湖北西部の湖底付近に大規模な貧酸素水塊(溶存酸素濃度で2 mgO<sub>2</sub>/L以下の水域)を形成するとともに、多量の栄養塩蓄積を引き起こした。このような湖水・物質循環の停滞は、湖底付近の深層だけでなく、表層も含めた琵琶湖の全生態系に大きな影響を及ぼすと考えられる。そこで、本研究では、全循環の停止・短期化の影響を受ける植物・動物プランクトン(琵琶湖生態系を根本から支え、かつ、水質を左右する生物群)に着目して、その影響を評価した。この目的を達成するため、本研究では、植物・動物プランクトンの現存量、種組成、生産速度の測定を従来にない時空間的高解像度の観測網で実施し、従来法では困難であった広域かつ詳細なプランクトン群集動態を捉えた。

植物プランクトン群集動態に影響を与える各環境因子(水温、溶存酸素、栄養塩など)もまた、全循環停止・短期化の影響を受ける。そこで本研究では上記研究と同時に、各環境因子のモニタリングを実施し、全循環停止・短期化が各環境因子の時空間的分布変動に与える影響を明らかにした。また、湖底付近における貧酸素化は湖底堆積物からの栄養塩溶出速度を増加させるため、貧酸素条件下における湖底堆積物からの栄養塩溶出速度を室内実験によって評価した。

本研究ではさらに、全循環停止に伴う貧酸素水塊の拡大が、近過去(現在からおおよそ数百年前)に発生していたかどうかを調査した。琵琶湖北湖最深部付近(深度100 m以深)で湖底堆積物の柱状試料を採取し、その堆積構造や堆積年代、色調、有機物量、硫化物量などを分析した。これらの分析結果に基づいて、近過去における大規模な貧酸素化現象の有無とともに、当時の水環境を推定した。

## 2. 方法

### (1)全循環短期化・停止が植物・動物プランクトン群集動態に及ぼす影響

2020年(4月～12月)の琵琶湖北湖湖心部(Sta. C1: 35° 18.7' N, 136° 8.7' E, 深度66 m)に係留系を設置し、クロロフィルa濃度(植物プランクトン現存量の指標)と水中光量子量を連続的(1時間間隔)で測定した(図1)。これらの両データと同期間に実験室内で測定(月1回の頻度)した光合成-光曲線から単位面積・1日あたりの一次生産速度を算出した(大田ら, 2013)。

2021年(4月～12月)の琵琶湖北湖湖心部(Sta. C1: 35° 18.7' N, 136° 8.7' E, 深度66 m)において、船舶観測(月1回の頻度)により、植物・動物プランクトンの種組成・生物量および植物プランクトンのサイズ別(大型:>20 μm, 中型:5-20 μm, 小型:<5 μm)のクロロフィルa濃度を測定した。

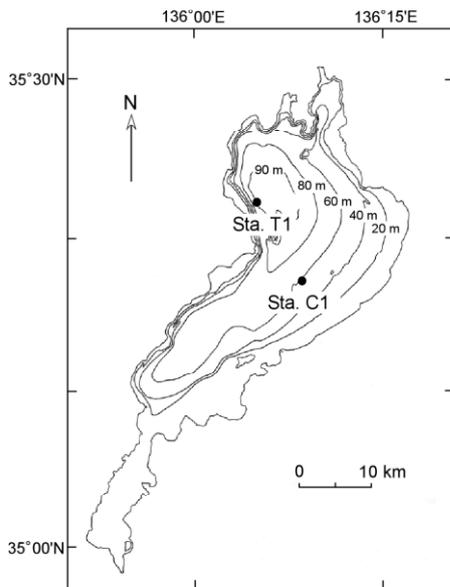


図 1. 琵琶湖における観測地点

2022年(5月～11月, 頻度月1回)の琵琶湖北湖のT1地点において, 計8～10深度から湖水を採取し, クロロフィル *a* 濃度を測定した(図 1)。

2020年～2022年の琵琶湖全域におけるクロロフィル *a* 濃度の分布を気候変動観測衛星(GCOM-C/SGLI, JAXA)から得られた衛星リモートセンシング反射率を用いて推定した(塚本ら, 2019)。

### (2) 全循環短期化・停止が各環境因子に及ぼす影響

2020年～2022年の北湖T1地点において, 水温および溶存酸素濃度の鉛直分布を多項目水質計で測定(月1回の頻度)した。同時に, 鉛直的に湖水を採取し, 栄養塩濃度(窒素, リン, ケイ素)を測定した。

湖底堆積物からの栄養塩溶出量の測定精度をより向上させるため, 湖水を任意の溶存酸素(DO)濃度に保ったまま湖底堆積物からの栄養塩溶出量を測定する手法を検討した(図 2)。その後, 本法を用いて, 北湖北西部(Sta. T1)の湖底堆積物を DO 濃度 0.35～9.95 mgO<sub>2</sub>/L の範囲で培養したときの, 各栄養塩の溶出速度を測定した(Osaka et al. 2021)。

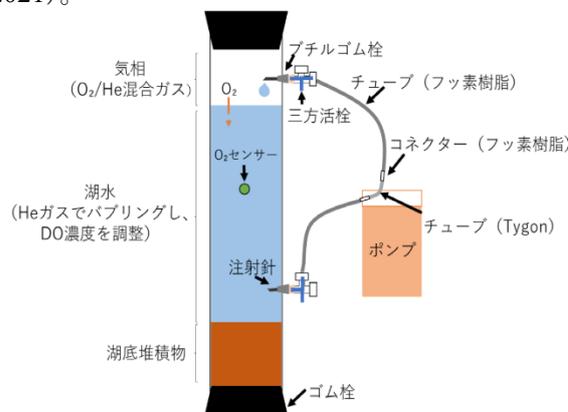


図 2. 栄養塩溶出測定用のカラム実験概要  
合計24本のカラムを179～269時間培養し, そのほとんどの場合で DO 濃度変動の標準偏差が 0.1 mgO<sub>2</sub>/L 以下であった(Osaka et al. 2021)。

### (3) 近過去における大規模な貧酸素化現象の有無の推定に関する研究

2021年(8月20日)と2022年(8月22日)に北湖最深部(深度104m)において, 湖底柱状堆積物(コア)を採取した。2021年に採取したコアを研究室に持ち帰った後, 0.5 cm 毎にスライスした各層における含水率, 色調, 粒度, 全有機炭素量(TOC), 全硫黄量(TS)を測定した。色調の測定には色彩・色差計を, 粒度分析にはレーザ回折式粒度分析装置(SALD-2300, 島津製作所)を, TOCの測定にはCHNコーダー(MT-5, ヤナコ)をそれぞれ用いた。TSについては硫酸比濁法にもとづき作製した試料水の吸光度を分光光度計(U-1100, HITACHI)で測定し, 硫酸イオン濃度からTS(%)を算出した。堆積物の年代を推定するための<sup>210</sup>Pbおよび<sup>137</sup>Csの各濃度は金沢大学環日本海域環境研究センター低レベル放射能実験施設のGe半導体検出器で測定した。

### 3. 結果と考察

#### (1) 全循環短期化・停止が植物・動物プランクトン群集動態に及ぼす影響

2020年の植物プランクトンの一次生産速度は、 $0.04 \sim 3.56$  (平均  $0.87$ )  $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$  の範囲を変動しており、5月から6月において比較的高く、8月以降は低い一次生産速度で推移した(図3)。本研究における一次生産速度は、全循環停止前の2018年に測定された一次生産速度(平均  $1.69 \text{ gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )と比較して低い傾向にあり、特に、8月から11月の一次生産速度が著しく低下していた。この時期(8月~11月)の平均最大風速(彦根)は、2018年と比較しておよそ半減しており、また、湖水を混合させる擾乱イベントである台風の接近もなかった。このような静穏な環境は、琵琶湖の水温成層の強化・長期化を引き起こし、結果として、深層から表層への栄養塩供給量を減少させる。このような一連の現象が、2020年8月以降の一次生産速度の低下を引き起こしたと考えられる。これらの結果は、温暖化の進行が琵琶湖の有機物生産力の低下を引き起こすことを示唆している。

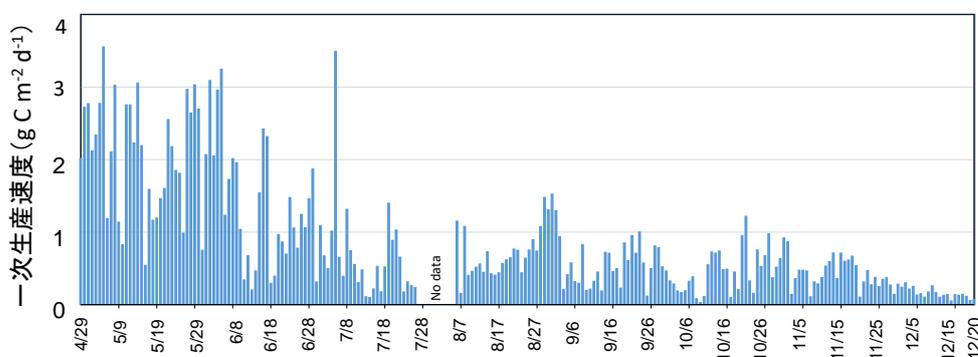


図3. 2020年の琵琶湖北湖における一次生産速度の季節変動

2021年における植物プランクトンのクロロフィルa濃度(Chl.a)は、観測期間を通じて $1.82 \sim 13.19$  (平均  $4.52$ )  $\text{g L}^{-1}$  の範囲を変動した(図4)。春期(4月~6月)におけるChl.a濃度は、 $1.8 \sim 13$  (平均  $6.8$ )  $\text{g L}^{-1}$  の比較的高濃度の範囲にあり、この時期は、例年観測される大型植物プランクトンを優占種(緑藻:*Staurastrum dorsidentiferum*)とする春季ブルームが発生した。

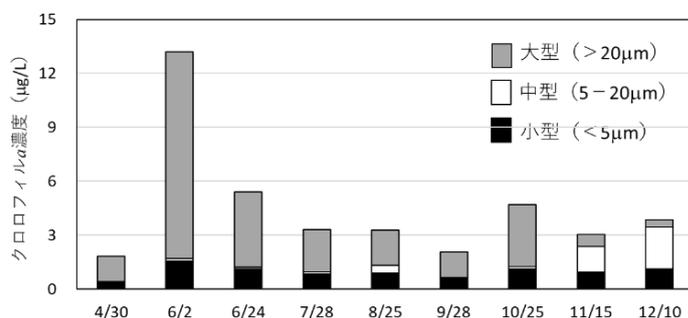


図4. サイズ別クロロフィルa濃度の季節変動

夏期(7月~9月)には、Chl.a濃度は大きく減少し、 $2.1 \sim 3.3$  (平均  $2.9$ )  $\text{g L}^{-1}$  の範囲にあった。この時期は、小型植物プランクトン(シアノバクテリア)の現存量が相対的に増加した。これは、夏季の成層構造の強化に伴い、深層から表層への栄養塩の供給量が減少したことが要因と考えられる。

秋期(10~12月)におけるChl.a濃度は $3.1 \sim 4.7$  (平均  $3.9$ )  $\text{g L}^{-1}$  の範囲にあり、夏季とほぼ同じ濃度範囲であった。この時期は中型植物プランクトン(珪藻:*Stephanodiscus suzukii*)が優占した。

例年、この時期は大型植物プランクトンを優占種とする秋季ブルームが発生するが、本研究を実施した 2021 年はブルームを確認できなかった。2021 年夏季から秋季は、琵琶湖に接近した台風がなく、また、秋季における降水量が例年と比較して非常に少ない年であった。これらの気象現象が要因となり、2021 年秋季は湖内からも、陸域からも栄養塩供給がほぼ絶たれた状態に陥り、表層は夏季から続いて貧栄養状態であったと推察される。このような貧栄養環境が 2021 年秋季のブルームを消失させたと考えられる。この秋季ブルームの消失は衛星観測からも確認できた。

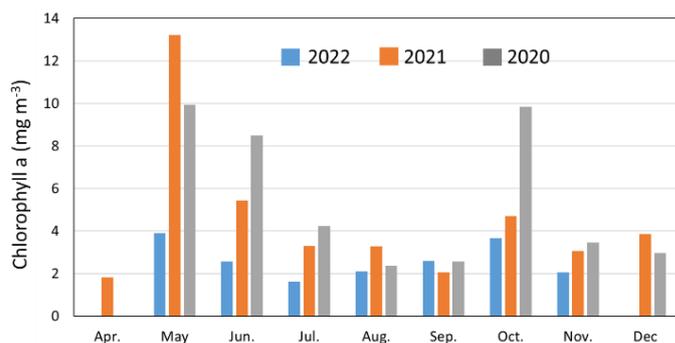


図 5 2020～2022 年の琵琶湖表層（深度 0～20 m）におけるクロロフィル a 濃度

船舶観測で得られた 2020～2022 年の表層（深度 0～20 m）における平均クロロフィル a 濃度を図 5 に示す。2022 年の平均クロロフィル a 濃度は、1.60～3.90 mg m<sup>-3</sup>（平均 2.64 mg m<sup>-3</sup>）の範囲にあり、例年と比較して低い濃度で推移していた。例年、琵琶湖では春季と秋季にブルームが観測されるが、2022 年は明瞭なブルームが観察されなかった。2019

年と 2020 年に冬期全循環が停止した後、2020 年に秋季ブルームが小規模化し、続く 2021 年にはその秋季ブルームが消失した（図 5）。さらに、2022 年は春季ブルームも観測されなくなった。これらブルームの小規模化・消失の主な要因は、温暖化に起因する成層強化・長期化に伴う深層から表層への栄養塩供給量の減少であると考えられる。

甲殻類動物プランクトンの個体数密度は、2018 年～2021 年の 4 年間に、1.8～38.9 ind/L の範囲で変動した。出現した優占種は、*E. japonicus*, *Daphnia galeata*, *Daphnia pulicaria*, *Cyclopoida* spp., *Bosmina* spp., *Diaphanosoma orientalis* であり、季節的にはいずれの分類群も夏に向かって増加する傾向を示した。年平均値でみると、2018 年が 24.1 ind/L, 2019 年が 21.0 ind/L, 2020 年が 12.0 ind/L, そして 2021 年が 17.7 ind/L で、過去 2 年間はそれ以前の 2 年に比べて個体数密度が 30～50%低下していた。この低下に寄与していたのは、カイアシ類ノープリウス幼生の個体数密度低下であった。2018～2019 年には、別途行った個体数計数と成長実験を用いて、*E. japonicus* と *Daphnia* spp.について生物量と生産量を計算した。これらの合計でみると、年平均生物量は、2018 年に 2.1 g/m<sup>2</sup>であったのに対して 2019 年には 1.4 g/m<sup>2</sup>に減少した。一方、年間生産量は、2018 年が 18.1 gC/m<sup>2</sup>/y であったのに対して、2019 年には 11.8 gC/m<sup>2</sup>/y まで減少した。これら 2 年間にみられた生物量と生産量の低下は、成層期における湖水の鉛直安定度に影響を受けている可能性が示唆された。

## (2) 全循環短期化・停止が各環境因子に及ぼす影響

2020 年の T1 地点の湖底直上（湖底から 1m）における溶存酸素濃度は 0.29 (12 月)～7.16 (6 月) mgO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> の範囲にあり、成層初期 (5 月) から中期 (9 月) かけて減少し、10 月以降は 1 mgO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> 以下となった。また、成層後期 (11 月) に実施した 3 大学 (滋賀大, 京都大学, 滋賀県立大学) 共同調

査では、底生生物の生息下限とされる溶存酸素濃度  $2 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$  以下の貧酸素水塊が北湖北部に大規模に広がっている様子を捉えた。このような溶存酸素濃度の枯渇と大規模な貧酸素水塊の形成は、琵琶湖において過去に例がなく、温暖化に起因する全循環停止が琵琶湖生態系に深刻な影響を及ぼしていることが明らかとなった。

このような湖底付近における溶存酸素の枯渇は、窒素・リン等栄養塩の循環過程にも影響を及ぼしていた。全循環が停止した 2020 年の成層後期(11 月～12 月)の湖底直上におけるリン酸態リン濃度とアンモニア態窒素濃度は例年と比較して大きく増加し、一方、硝酸態窒素濃度は例年と比較して大きく減少していた。このような栄養塩循環の変化は、琵琶湖の植物プランクトン動態に大きな影響を及ぼすため、今後、この影響を注視する必要がある。

全循環が再開した 2021 年と 2022 年は、成層後期(10 月～11 月)の深層湖底付近において、リン酸態リンと硝酸態窒素濃度が増加した。これらの時空間的濃度分布は、貧酸素水塊が大規模に発生した 2020 年以前の濃度分布とほぼ同様であった。これらの結果は、成層期に発生する貧酸素水塊の規模によって、深層の栄養塩循環が変化することを示している。

図 2 の実験装置を用いて、DO 濃度  $0.35 \sim 9.95 \text{ mgO}_2/\text{L}$  における湖底堆積物からの栄養塩溶出速度を測定した。リン酸態リンは DO 濃度が  $1.5 \text{ mgO}_2/\text{L}$  以下になると急激に溶出量が増大することが明らかになった (Osaka et al. 2021)。また、硝酸態窒素+亜硝酸態窒素は DO 濃度が  $3.0 \text{ mgO}_2/\text{L}$  以下になると急激に消費されたが、DO 濃度が低下するとアンモニア態窒素の溶出量が増加するため、無機態窒素量(アンモニア態、亜硝酸態、硝酸態窒素の和)としては湖底の DO 濃度が低下すると溶出量が増加することが明らかになった。本研究により琵琶湖底堆積物からの栄養塩溶出に対する湖水の DO 濃度の影響を定量化することができた。

### (3) 近過去における大規模な貧酸素化現象の有無の推定に関する研究

2021 年に採取したコアは、シルト主体の堆積物で構成され、その連続性は良好であった。 $^{210}\text{Pb}$  法および  $^{137}\text{Cs}$  法から年代モデルを構築した結果、同コアは 1884～2021 年までの過去 137 年間の記録であることが判明し、TOC および TS の時間的変化の特徴から時代 I～IV に区分された。時代 III(1952～2000 年)は富栄養化の進行によって湖内の生物生産が高まった時代であることを考慮すると、時代 III の TOC と TS の増加は湖底に供給される有機物量の増加によって底層が還元的な環境へと変化していったことを反映すると解釈できる。底層の貧酸素化が顕著に進行した時代 IV(2000～2021 年)では TOC が約 5%まで増加したことから、この時代は還元的環境下で多量の有機物が堆積した可能性がある。溶存酸素濃度の記録が存在しない時代 I(1884～1930 年)は時代 II(1930～1952 年)と同様に低 TOC・低 TS で特徴づけられることから、当時の底層は全循環が十分に機能していた有酸素環境であったと推定される。つまり、1884～1952 年の約 70 年間は現在のような大規模な貧酸素化現象は起こっていなかった可能性が高い。

2022 年のコアにおいても、今後、 $^{210}\text{Pb}$  および  $^{137}\text{Cs}$  のデータも加えて年代モデルの構築を進めるとともに、琵琶湖底層水の溶存酸素量の指標となる TOC および TS の含有率の時間的変化を調べ、琵琶湖湖底の大規模な貧酸素化現象の有無について明らかにしていく予定である。

#### 4. 謝辞

本研究を行うに当たり、滋賀県立大学の海外文一郎船舶技師には実習調査船「はっさか」と「はっさかⅡ」による観測にご協力いただきました。また、滋賀県立大学の学生諸氏には、船舶による調査および化学分析の際にご協力いただきました。なお、本研究の一部は金沢大学環日本海域環境研究センター共同研究(21044)のもとで実施されました。以上の方々に感謝の意を表します。

#### 5. 引用文献

Osaka K., R. Yokoyama, T. Ishibashi and N. Goto (2021) Effect of dissolved oxygen on nitrogen and phosphorus fluxes from lake sediments and their thresholds based on incubation using a simple and stable dissolved oxygen control method. *Limnology and Oceanography Method*, doi: 10.1002/lom3.10466.

太田洋平, 後藤直成, 伴修平(2013)クロロフィル蛍光を用いた現場植物プランクトン一次生産力測定法の検討.陸水学雑誌, 74:173-181

塚本浩貴, 後藤直成, 吉原亜悠, 高木裕太, 新井那莉, 林正能, 石坂丞二(2019)衛星リモートセンシングを用いた琵琶湖におけるクロロフィル a 濃度の推定. リモートセンシング学会誌, 39: 103-111.