

近年の温暖化が琵琶湖北湖の溶存メタン動態に与える影響の解明研究

京大大学生態学研究センター・教授 中野伸一
立命館大学理工学部・授業担当講師 池谷 透
京大大学生存圏研究所・准教授 伊藤雅之
滋賀県立大学環境科学部・准教授 尾坂兼一
九州大学工学研究院・准教授 藤林 恵

1. はじめに

二酸化炭素の30倍の地球温暖化係数をもつメタンの大気中濃度は2023年に工業化以前の2.65倍に増加したが、メタン炭素同位体比は2010年頃から減少に転じ、メタン放出の主な起源が化石燃料から微生物に変わったと考えられる¹⁾。嫌気的環境では有機物分解過程でメタンが生成される。メタン放出源の40%以上は湿地をはじめとする陸水域と見積もられている²⁾。世界的に拡大傾向にある水域の富栄養化と温暖化がもたらす有機物の蓄積と貧酸素化の相乗的相互作用がメタン放出量を増加することが懸念されているが³⁾、湖沼のメタン放出の解明は十分に進んでいない²⁾。

湖沼の温暖化は、水収支・熱収支を通じて物理的・化学的構造を左右する流動や波動、また、水面・底面・湖岸・河川との境界条件に影響を与える^{4,5)}。そのため、水域の有機物分解過程に対して、1)水中の酸素飽和度や呼吸など、代謝・分解速度への水温上昇の直接的影響に加え、2)夏季の季節(水温)躍層の強化や冬季冷却の遅延・弱化による温帯湖沼深層の酸素再曝気(re-oxygenation)の抑制によって貧酸素化が進む結果、溶存有機物の好氣的分解容量(許容負荷量)の減少を招くことが予想される⁶⁾。琵琶湖においても、1980年代後半には深層の溶存酸素の低下傾向が顕在化し、1990年代はじめの琵琶湖北湖湖底試料の「硫化水素臭の発生」や2007年の暖冬異変をきっかけに深層や湖底に生息する動物群集の生息環境への懸念が強まった^{7,8)}。

湖沼堆積物の無酸素環境でメタン生成菌によって生成したメタンは水柱に拡散し、さらに溶存メタンの拡散(diffusive flux)や気泡噴出(ebullition)による上方輸送を経て湖面から放出される。酸素が存在する水柱では、メタンモノオキシゲナーゼの遺伝子(*pmoA*)を持ち、メタンを炭素源・エネルギー源として利用する様々な分類群の(好気性)メタン栄養細菌(メタン酸化細菌)^{9,10)}によってメタンが利用され、細菌捕食を介して高次栄養段階を支える炭素流も生じる¹¹⁾。したがって、溶存メタン濃度とメタン放出フラックスは、メタン生成と利用・分解(酸化)の正味の差分で決まる。

Tsutsumi *et al.* (2012)¹²⁾は、琵琶湖第一湖盆沖合の水深90mと沿岸の水深40mの地点で採取した堆積物試料のインキュベーション実験によって好氣的条件下のメタン酸化速度を求め、メタンモノオキシゲナーゼ遺伝子(*pmoA*)コピー数との関係を調べた。沖合と沿岸のいずれの試料も、メタンの酸化速度は堆積物表層で最も大きく、Murase & Sugimoto(2002)¹³⁾が求めた生成速度の9.2倍、17倍に相当する酸化活性を示したが、メタン酸化速度の層別測定値は*pmoA*遺伝子コピー数や堆積物コアの鉛直分布と対応せず、このメタン酸化力が生じた要因が説明できなかった。一方、Murase *et al.* (2003)¹⁴⁾は1999~2000年の琵琶湖北湖の流入河川と琵琶湖第一湖盆の季節調査や野洲川河口から沖合水深30m地点間の横断調査の結果から、沖合では底層から拡散した溶存メタン

の大半が堆積物表層もしくは深層で酸化され、水温成層形成期終盤に向かって深層のメタン炭素同位体比が増加したと考えた。そして、沖合表層の溶存メタン濃度極大は沖合底層からの拡散ではなく、1) 溶存メタン濃度の高い河川水の流入(夏期)、2) 河口付近の沿岸堆積物(水深 5 m)で生成されたメタンの拡散(夏期)、3) 水深 30 m 付近の沿岸堆積物由来メタンの内部波による再懸濁(晩秋期)が主要な供給源と考察した。これらの先行研究から琵琶湖深層の溶存メタン濃度の低さは、水柱深層、もしくは、沖合堆積物表層のメタン酸化力が原因と考えられる。しかしながら、近年の深層の貧酸素化がメタン生成とメタン酸化に及ぼす影響は未解明だった。そこで、2016 年以来、琵琶湖第一湖盆(2016 年は第一湖盆最深点; 2017 年以降は今津沖中央定点)で深層の溶存酸素が低下する晩秋期に毎年調査を実施し、琵琶湖深層のメタン酸化に対する貧酸素化の影響と溶存メタン濃度を低く維持するしくみの解明を進めた²¹⁾。

2024 年度は今津沖中央定点の継続調査と沿岸 6 地点の調査および第一湖盆中央(T1)の季節調査を実施した。また、硫酸還元菌をはじめとする細菌群同定の改訂や気温・降水量などの過去データや将来予測データの収集を行い、採取試料の化学分析までの結果に基づいて検討を進めた。

2. 方法

2. 1 調査

2024 年 12 月 2 日に今津沖中央定点(水深約 89m)で各層採水、2024 年 12 月 10 日に主要流入河川(日野川・愛知川・天野川・姉川・安曇川・野洲川)河口地先の 6 地点(水深約 30m)と今津沖中央定点で不攪乱柱状採泥器による採泥とボトムタッチ型採水器による直上水(堆積物から 0.5m 上)の採水を行った。滋賀県環境白書によると上記の河川流量の合計は北湖流入河川の総計の 70% 以上に相当する。採泥試料は上層 1.5cm を分取し、細菌組成解析と化学分析に供した。間隙水の細菌組成解析には、50ml チューブに気相を除いて密閉した採泥試料を冷蔵庫で 1 昼夜静置後の上清を孔径 0.2 μ m フィルターで捕集し、フィルターを冷凍保存した。後日、核酸を抽出・解析予定である。間隙水の化学分析は、細菌組成解析用の上清を除去後に遠心分離(6000rpm, 30 min)で得た上清を 0.2 μ m フィルターでろ過して調整したろ液(「6K 間隙水」)と上述の細菌組成解析用試料のろ液を静置前の存在比率で混合した「再構成間隙水」を調整し、各々、分析に供した。各層採水試料も細菌組成解析用に 0.2 μ m ろ過を行い、フィルターとろ液を凍結保存した。12 月 2 日には、脂肪酸マーカー細菌解析用試料と食物網解析用バルク炭素同位体比分析試料調整のため、各層採水試料の GF/F フィルター捕集と開閉式プランクトンネットの鉛直曳きによる動物プランクトン捕集を行った。第一湖盆中央(T1: 35°22' N, 136°6' E, 水深約 90m)では、4 月 12 日・6 月 13 日・9 月 13 日・12 月 25 日に各層採水を行い、0.2 μ m フィルターのろ液を化学分析に供した。

2. 2 化学分析

溶存メタン濃度は水素炎イオン化検出器を用いたヘッドスペースガスクロマトグラフィーにより¹⁵⁾、各種イオン濃度はイオンクロマトグラフィーにより、微量金属類は誘導結合プラズマ質量分析により、硫黄同位体比は硫酸イオンのバリウム沈殿について同位体比質量分析により測定を行った。調査現場の測定は、高速応答 DO センサー搭載メモリー式電気伝導度-水温-深度プロファイラー(RINKO)により行った。

塩濃度の年々変化を表層・深層の2層の平均値で示した。

2019年から2020年は2年にわたって冬期の全層循環が停滞した結果、深層の溶存酸素は2020年に最も低くなった。溶存メタンは2018年から2019年まで横ばい状態を経て2020年に3倍に増加した。調査期間中、表層と深層は同程度に増減し、深層の溶存メタン濃度は表層の1/5程度に低く維持されていた。貧酸素化の影響が顕在化した1990年代はじめの第一湖盆の溶存メタン濃度¹⁶⁾と比較したところ、2017~2023年の深層溶存酸素は1993年の82%にまで低下したにも関わらず、溶存メタン濃度は46%と当時に比べても低く抑えられていた。一方、硫酸塩濃度の推移を確認すると、表層・深層ともに溶存酸素の低下に先立って2017年以降減少傾向にある。溶存酸素は2021年以降2023年まで回復傾向にあったが、硫酸塩濃度は2022年に遅延して上昇した。2024年には深層の溶存酸素が再び低下し、硫酸塩濃度も表層・深層ともに低下した。

メタン代謝関連細菌群の組成と環境因子を検討した結果、晩秋期の琵琶湖沖合深層の溶存メタン濃度の変動要因には、深層のメタン酸化細菌群の消長に伴うメタン酸化(内部変動要因)と晩秋期の大気冷却によって深層の湖水より冷えた河川水や沿岸表層水が深層に沈降することに伴う表層成分の下方輸送(外部変動要因)が影響すると考えられた²²⁾。また、2023年は表層の硫酸塩濃度が低下し、嫌気代謝を行う硫酸還元菌が表層でも増加した。そこで、2024年度はメタン酸化細菌と硫酸還元菌のOTU同定精度を上げて再解析を行い、細菌群によるメタン酸化過程を詳細に検討した^{23, 24)}。また、琵琶湖北湖のメタン動態に対する流入河川近傍の沿岸の影響を考慮して主要流入河川河口地先の沿岸にも調査地点を設け、今津沖中央の深層と水深の沿岸の浅瀬における堆積物境界層近傍の対比調査を実施した。

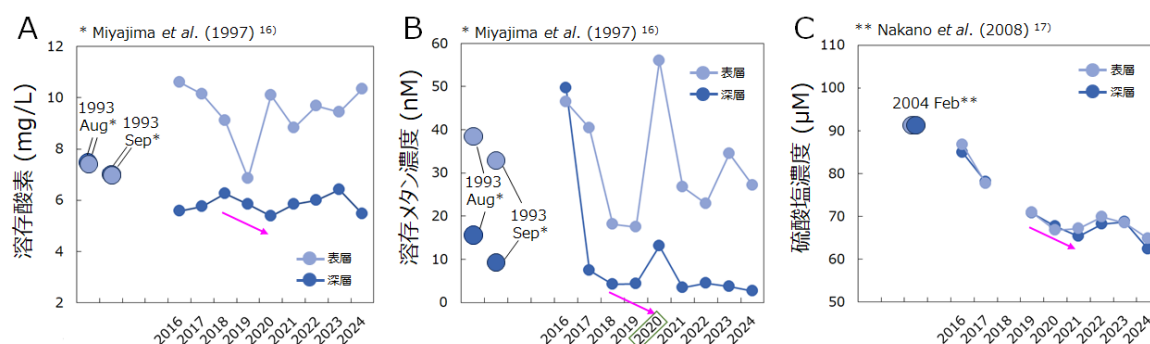


図 2. 晩秋期の表層と深層における溶存酸素、溶存メタン濃度、硫酸塩濃度の年々変動 (2016-2024 年)。

3. 3 深層の溶存メタンの内部変動要因の検討ー冬季冷却弱化による全層循環不全と深層におけるメタン酸化のしくみ

深層の溶存酸素が最も低下した 2019-20 年はメタンモノオキシゲナーゼ遺伝子 (*pmoA*) をもつメタン酸化細菌群 (*pMMO* gene cluster) が深層で増加した (図 3A)。一方、2017 年から 2020 年に堆積物境界層付近で溶存酸素が低下するにつれ、メタン生成の炭素源やメタン生成と酸化のバランスの指標となるメタン炭素同位体比は堆積物境界層付近で顕著に増加した (伊藤 私信)。メタン炭素同位体比の増加がメタン酸化に伴う同位体分別による変化ならば、メタン酸化の強化によって堆積物境界層付近の溶存メ

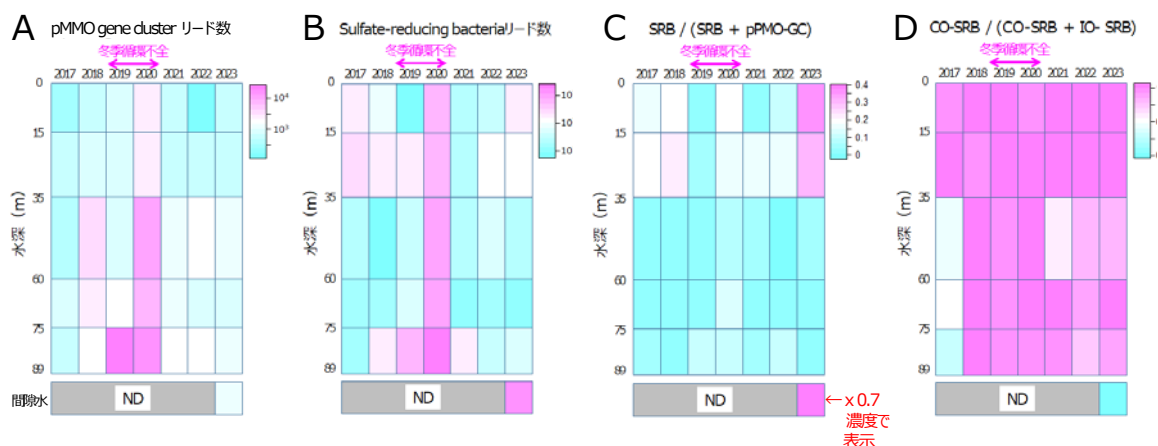
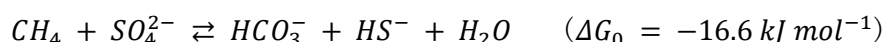


図3. 好気性メタン酸化細菌群(A)、硫酸還元菌(B)、硫酸還元菌の相対出現率(C)、完全酸化型硫酸還元菌の相対出現率(D). SRB: 硫酸還元菌; CO-SRB: 完全酸化型硫酸還元菌; IO-SRB: 不完全酸化型硫酸還元菌

タン濃度が低くなったと考えられる。しかしながら、メタンモノオキシゲナーゼが触媒する好気性メタン酸化には酸素が必要なことから、2019-20年のように堆積物表層付近の酸素が極端に欠乏した状況でメタン酸化力が強まったとは考えにくい。

近年、好気性メタン酸化とは異なる新たな嫌気性メタン酸化の解明が進んできた¹⁸⁾。この反応は、本来ならメチル補酵素 M からメタンの生成を触媒するメチル補酵素 M 還元酵素 (Mcr) がメタン生成の逆反応でメタンを二酸化炭素に酸化する。逆反応が進むには、Mcr を持つ嫌気メタン資化性古細菌 (ANME 古細菌: Anaerobic Methanotrophic archaea) と嫌気性細菌の間の相互作用によって、硝酸塩や硫酸塩などの「電子受容体」を酸素の代替として供与することが鍵になる。そうした「電子受容体」を供与する脱窒菌や硫酸還元菌と ANME 古細菌との間で酸化還元反応が共役するとメタンが酸化され、メタン生成は抑制される状況になる。硫酸塩は、酸化還元電位の最も低い嫌気的な環境で電子受容体として作用し、硫酸還元と嫌気性メタン酸化の収支式は、



と表される (Cui *et al.* 2015)。この反応の自由エネルギー変化を表す平衡式は、

$$\Delta G_{\text{net}} = \Delta G_0 + RT \ln \frac{[\text{CH}_4][\text{SO}_4^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-][\text{HS}^-]}$$

となるため、炭酸塩と硫化水素が多いとメタン生成が進み、反対に、メタンと硫酸塩が多いと嫌気性メタン酸化が進むことを示している。硫酸還元菌の出現動向を確認したところ、2019-20年に好気性メタン酸化細菌群と共に堆積物境界層を中心に著しく増加したことが明らかになった(図3B)。これらのことから、貧酸素化傾向のもとで琵琶湖深層の溶存メタン濃度が低く抑える内部変動要因には、水柱に分布する pMMO gene cluster 細菌群による好気性メタン酸化と堆積物境界層付近を中心とする溶存酸素欠乏領域での嫌気性メタン酸化の2つのメタン酸化作用が考えられる。

3.4 沖合深層の溶存メタン濃度変動に対する内部変動要因と外部変動要因の複合的影響

2017~2024年の沖合深層の溶存酸素と溶存メタン濃度の年々変動(図2・図4)につい

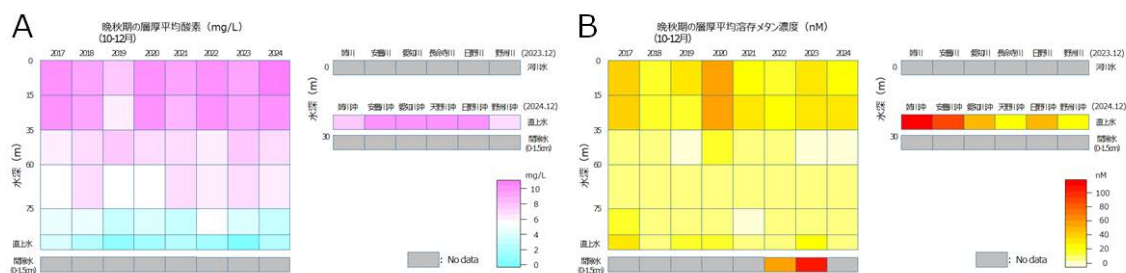


図 4. 今津沖中央と沿岸調査地点の溶存酸素 (A) と溶存メタン濃度 (B) の分布。

て、3. 3章で述べた深層のメタン酸化(内部変動要因)と琵琶湖表層水や河川水の加熱・冷却などによる境界条件の変化(外部変動要因)の影響を検討した。

2017 年は 10 月末に 2 回連続して台風が接近し、10 月の月別降水量や河川水流量は前後 10 年と比較して 10 倍以上多く、11 月末には河川水水温が琵琶湖深層に比べて低くなり、冷たい河川水や沿岸表層水が深層に沈降する量が多かった。そのため、表層水に多く分布する酸素やメタンなどの溶存成分が下方輸送され、2017 年 12 月には堆積物境界層の溶存酸素が 4.2mg/L と調査期間中で最も高くなったと考えられる(図 4A・4B)。一方、2017 年は 2019-20 年とは対照的にメタン酸化細菌の検出数が少なかった(図 3A)。硫酸還元菌も少なく(図 3B)、pMMO gene cluster 細菌群との相対出現率も低い(図 3C)。硫酸還元菌には、分解物を二酸化炭素まで酸化できる完全酸化型(Complete oxidizing sulfate-reducing bacteria)と中間産物の酢酸を残す不完全酸化型(Incomplete oxidizing sulfate-reducing bacteria)があるが、2017 年の深層は他の年とは異なり、不完全酸化型が多く、堆積物間隙水に類似していた(図 3D)。これらのことから、沿岸から湖盆斜面に沿って密度流が沈降し、表層の溶存成分や斜面の堆積物表層を巻き込みながら深層に外部変動要因として作用した可能性が考えられる。その結果、深層は冬季混合に先立って溶存酸素が再曝気され、堆積物境界層の嫌気状態が緩和されて嫌気性メタン酸化が抑制された結果、湖底から水柱への溶存メタンの拡散も多くなり、堆積物境界層を中心に 33nM まで溶存メタン濃度が増加したと考えられる(図 4A・4B)。したがって、密度流沈降による外部変動要因の影響は、表層から深層への溶存メタンの下方輸送だけでなく、溶存酸素の下方輸送による堆積物境界層の嫌気性メタン酸化や深層の好気性メタン酸化の内部変動を伴う複合的な効果をもたらすと考えられる。

一方、溶存酸素が最も低下した 2020 年や 2023 年は、堆積物内部のメタン生成が強く促進され、堆積物間隙水から水柱への拡散促進が堆積物表層付近の嫌気性メタン酸化による溶存メタンの拡散抑制を上回ったと考えられる(図 4A・4B)。堆積物境界層付近では嫌気性メタン酸化は貧酸素化が強まっても下方から水柱への溶存メタンの拡散をある程度までは抑制し、水柱では溶存メタンの供給に応じて好気性メタン酸化細菌が増殖するために溶存メタンの上方拡散を上回るような利用のバランスが維持され、琵琶湖深層の溶存メタン濃度を低く抑えていると考えられる。

晩秋期の密度流沈降による表層水や河川水の下方輸送は、溶存メタンをメタン酸化力の高い深層に供給し、表層と深層の溶存メタン濃度の同期的変化を生じながらプランクトン食物網への栄養転送を経て二酸化炭素に散逸する循環の役割を担っていると考えられる(図 2B・4B)。

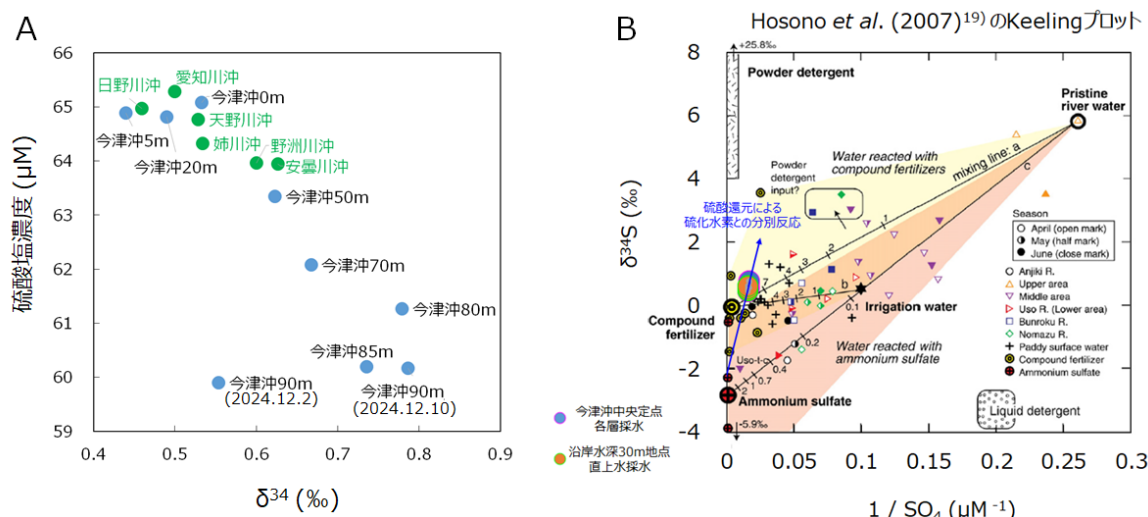


図 5. 今津沖中央と沿岸地点の硫黄同位体比と硫酸塩濃度の関係 (A) と宇曽川河川水中の硫酸塩負荷成分の硫黄同位体比と硫酸塩濃度の関係¹⁹⁾との対応関係 (B)。

3. 5 琵琶湖北湖の硫酸塩動態—沖合と沿岸の硫酸塩濃度と硫黄同位体比の対比調査

表層と深層の硫酸塩濃度の減少傾向 (図 2C) は、近年の深層の貧酸素化傾向によって沖合と沿岸の堆積物内部の嫌気化が強まった結果、堆積物表層で硫酸還元が強まったことが原因になった可能性が考えられる。2023 年には、今津沖中央の表層で硫酸還元菌の増加やメタン酸化細菌に対する相対出現率の増加が確認され、表層の水温上昇による沿岸堆積物の嫌気化との関連が懸念された (図 3B・3C)。そこで、沖合の今津沖中央に加えて新たに沿岸に調査地点を設け、堆積物境界層付近の硫酸塩濃度や硫酸還元の指標となる硫黄同位体比の対比調査を実施した。

各試料の硫酸塩濃度は沿岸や表層から沖合堆積物境界層 (直上水) に向かって減少する鉛直分布を示したが、このとき硫黄同位体比がわずかながら増加し、硫酸還元による変化の可能性が示唆された (図 5A)。また、これらの値を Honoso *et al.* (2007)¹⁹⁾ が報告した河川水成分と比較すると、灌漑水と肥料の混合成分に近い領域に位置することから (図 5B)、琵琶湖の硫酸塩は集水域の農業肥料に由来し、河川水を経て琵琶湖に流入後、堆積物境界層付近で嫌気代謝の影響を受けると考えられる。

第一湖盆中央 (T1) の硫酸塩濃度の季節変化を確認したところ、2024 年 4 月は 33 μM・53 μM と表層・深層ともに濃度が最も低く、9 月には 64 μM・65 μM にまで増加した。そ

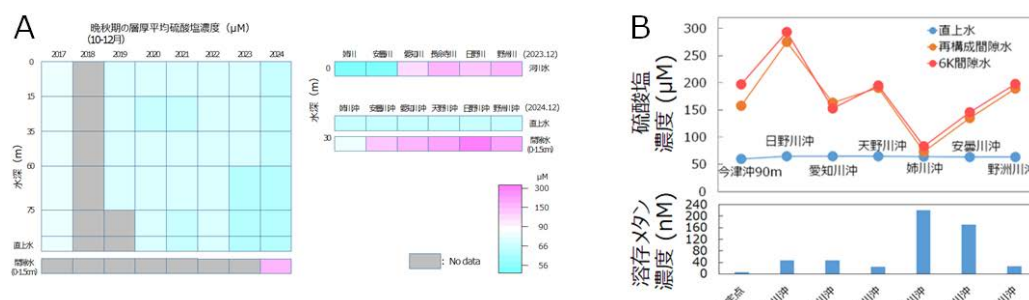


図 6. 今津沖中央と沿岸調査地点の硫酸塩濃度の分布 (A) と沿岸の堆積物境界層の硫酸塩の濃度勾配と溶存メタン濃度 (B)。

の後、12月に今津沖中央で65 μM ・62 μM と、深層の硫酸塩濃度9月から低下したことが確認された(図2)。このことから、流域スケールでは、湖水の硫酸塩濃度は全循環期や融雪期にいったん減少し、農業地域の河川水流入によって夏期まで上昇後、晩秋期に堆積物表層で硫酸還元によって減少する季節循環が形成されていて、ここ数年間は、晩秋期の減少に対して濃度が回復せず、深層を中心に減少が続いていると考えられる。

各調査地点の直上水と堆積物間隙水の硫酸塩濃度を比較すると、今津沖中央の沖合を含め、姉川沖測定を除くいずれの地点も堆積物間隙水の濃度が極めて高かった(図6A・6B)。堆積物間隙水の硫酸塩濃度は、近傍の河川水の過去分析試料と比較しても高く(図6A)、堆積物表層で硫酸塩濃度が蓄積していることを示すと考えられた。このことは、嫌気性メタン酸化が進む条件(3.3章参照)を考えると極めて興味深い。今津沖中央の過去試料では硫黄酸化細菌が硫酸還元菌と共に検出されることも確認している。硫酸還元菌と硫黄酸化菌が硫黄サイクルを形成し、硫酸還元後、硫化水素生成ではなく、再び、硫酸塩に再生する硫黄酸化が堆積物表層の微細な環境で行われた結果、堆積物表層の硫酸塩濃度が周囲より高くなっている可能性が考えられる。その結果、嫌気的条件下での嫌気性メタン酸化(メタン生成の逆反応)によってメタン酸化が起これ、堆積物内部で生成した溶存メタンが堆積物表層で補足され、深層の溶存メタン濃度を低く抑えることに寄与すると考えられる。硫化水素生成よりも硫黄サイクルが卓越する条件の維持が深層の溶存メタン濃度とメタン動態を左右する鍵になっているとすると、今後、その条件の解明が重要と考えられる。

姉川沖の調査地点では堆積物間隙水の硫酸塩濃度が他の地点に比べて低く、直上水との濃度差が最も小さかった。堆積物試料の採取時に行った電気伝導度-水温-深度プロファイラーの計測結果によると、いずれの沿岸地点でも、堆積物を採取した水深30m付近の境界層付近には水柱の厚み1m前後の局所的な水温のギャップ構造が確認された。なかでも、姉川沖と安曇川沖では、ギャップ構造がシャープな水温逆転層に発達していた。このことは、急激な水温変化や波動などの沿岸斜面に沿って何らかの物理的擾乱が沿岸斜面に作用したことが原因と考えられる。沿岸の堆積物境界層の溶存メタン濃度は今津沖中央よりいずれも高いが、流量の大きな姉川沖と安曇川沖の濃度が特に高かった(図6B)。河川水は流量の変化による変動が極めて大きく、一時的な結果による判断は困難だが、河口から調査地点までの湖底の傾斜上、姉川沖と安曇川沖は、各々、河口からの距離が420m、600mと、その他の地点の2~4km程度に比べて近接していたこと、河川流量が多いために河川から運ばれた堆積物も多いことが原因となっている可能性が考えられる。そうした要因以外に、上述の物理的擾乱によって堆積物境界層が乱された結果、堆積物表層から直上水への間隙水成分の拡散が促進された結果、姉川沖のように堆積物間隙水の硫酸塩濃度が他の地点に比べて低く、直上水の溶存メタン濃度が高い結果が得られた可能性も考えられる。こうした擾乱は、河川水由来の低水温の水の流動や内部波による擾乱によって生起する可能性があるため、水温の鉛直構造の連続計測による水温変化や擾乱の時間スケールの調査によって詳細が明らかになると考えられる。

4. まとめと課題

湖沼の温暖化は生息する生物への直接的作用のほかに、湖面の加熱・冷却や河川流入水が混合する際の境界条件の変化を通じて湖の循環に影響する。その代表的事例が、溶存有機物の好氣的分解容量(許容負荷量)を左右する深層の貧酸素化である。今年度

の調査から、酸素再曝気が最も制限される堆積物表層の貧酸素化によって琵琶湖北湖の深層のみならず水深の浅い沿岸堆積物でも硫酸還元が促進していると考えられる。その結果、酸化還元電位の最も低い条件で酸素の代替の電子受容体として作用する硫酸塩の水柱からの減少と堆積物表層への蓄積が進んでいると考えられた。そのため、メタンの挙動は溶存酸素との対応関係が不明瞭になっていると考えられる。琵琶湖のメタン循環と溶存メタン濃度分布には、好気性メタン酸化と硫酸還元などの嫌気代謝に共役する嫌気性メタン酸化が内部変動要因として深く関わっていると考えられる。堆積物内部の嫌気環境では、有機物分解経路の最終段階でメタンが生成するが、堆積物境界層付近の嫌気性メタン酸化によって堆積物から水柱への溶存メタンの拡散が抑制され、深層では好気性メタン酸化によるメタンの利用によって琵琶湖北湖深層の溶存メタン濃度が他湖沼と比較して極めて低く維持されていると考えられた。

一方、沿岸斜面では、湖面冷却や風成作用が生じる対流や波動が堆積物表層を乱す結果、堆積物表層から直上水にメタンなどの間隙水成分の拡散を促進する物理的擾乱が及びやすい。琵琶湖は「すり鉢型」の湖盆形状で湖面と湖盆斜面が広く、物理的擾乱の影響を受けやすいと考えられる。そのため、琵琶湖北湖の深層は溶存メタン濃度が低いのに対して、沿岸斜面からの水平輸送によって表層の溶存メタン濃度が高くなる傾向があると考えられる¹⁴⁾。晩秋期の冷却時には、秋友ほか(2002)²⁰⁾のシミュレーション解析の例示のように姉川や安曇川などの流入河川や沿岸表層水が大気の冷却を受けて表層成分と共に密度流となって深層に沈降し、深層溶存メタン濃度の外部変動要因として作用すると考えられる。密度流沈降によって深層に供給された溶存酸素が、堆積物からの溶存メタンの拡散を抑制していた嫌気性メタン酸化を緩和したと考えると2017年の深層の溶存酸素と溶存メタンの分布が理解できると考えられた(3.4章)。

琵琶湖は山岳湖沼とは異なり、メタン代謝関連細菌群を含む田面水との細菌相の共通性²⁵⁾や農業肥料の施肥による硫酸塩の流入などの集水域の農業活動もメタン循環の形成要因の一つとして影響していると考えられる。現在の貧酸素化のレベルで琵琶湖深層の溶存メタン濃度が低く維持されているのは、深層の好気性メタン酸化細菌によるメタン酸化と堆積物表層の嫌気性メタン酸化の2つのメタン消費作用によると考えられる。2024年度調査では、硫酸還元に共役した嫌気性メタン酸化の好適条件となる硫酸塩の蓄積が堆積物表層で確認された。高次栄養段階の食物網への転送を含めたメタン酸化の実態解明、堆積物表層の硫黄サイクルや嫌気性メタンに関与する細菌・古細菌群の解明は今後の課題である。また、2016年に観測された高濃度の溶存メタン水塊がどのような起源をもち、琵琶湖深層のメタン循環に影響するかについては、溶存メタンと挙動が類似した共存因子や細菌解析から検証予定である。

5. 参考文献

- 1) 世界気象機関(気象庁訳). WMO 温室効果ガス年報. 第20号 11 pp. 気象庁 温室効果ガス世界資料センター, 東京 (2024).
- 2) Rosentreter, J.A., Borges, A.V., Deemer, B.R. et al. Nat. Geosci. 14, 225-230 (2021).
- 3) Beaulieu, J.J., T. DelSontro, J.A. Downing. Nature Communications 10, 1375 (2019).
- 4) 遠藤修一・奥村康昭・川嶋宗継・福山直憲・大西祐子・中村直子・馬場礼子・田中聡子. 陸水学雑誌, 68(1), 15-27 (2007)

- 5) 永田 俊・熊谷道夫・吉山浩平. (編) 温暖化の湖沼学. 300 pp. 京都大学学術出版会, 京都 (2012).
- 6) Chapra, S.C. Camacho, L.A., McBride, G.B. Water 13, 2408 (2021).
- 7) 西野麻知子・大高明史. オウミア No.73 (2002).
- 8) 西野麻知子・中島拓男・辻村茂男・大高明史・杉原夕華. 琵琶湖研究所所報, 19, 18-35 (2002).
- 9) Tavormina, P.L., V.J. Orphan, M.G. Kalyuzhnaya, M.S.M. Jetten, M.G. Klotz. Environmental Microbiology Reports, 3(1), 91-100 (2011).
- 10) Chistoserdova, L. Modularity of methylotrophy, revisited. Environ. Microbiol. 13, 2603-2622 (2011).
- 11) Bastviken, D., J. Cole, M. Pace, L. Tranvik. Global Biogeochem. Cycles 18, GB4009 (2004).
- 12) Tsutsumi M, H. Kojima, M. Fukui. Microbes Environ. 27(1), 67-71 (2012).
- 13) Murase, J., A. Sugimoto. SIL Proceedings, 1922-2010, 28(2), 971-974 (2002).
- 14) Murase, J., Y. Sakai, A. Sugimoto, K. Okubo, M. Sakamoto. Limnology 4, 91-99 (2003).
- 15) Osaka, K., R. Nagata, M. Inoue, M. Itoh, S. Hosoi-Tanabe, H. Iwata. A simple, safe method for preserving dissolved methane in freshwater samples using benzalkonium chloride. Limnol. Oceanogr. Methods 22, 536-547 (2024).
- 16) Miyajima T., Y. Yamada, E. Wada, T. Nakajima, T. Koitabashi, Y.T. Hanba, K. Yoshii. Biogeochemistry 36, 205-221 (1997).
- 17) Nakano T, I. Tayasu, Y. Yamada, T. Hosono, A. Igeta, F. Hyodo, A. Ando, Y. Saitoh, T. Tanaka, E. Wada, S. Yachi. Sci Total Environ. 389(1), 132-48 (2008).
- 18) Cui, M., A. Ma, H. Qi, X. Zhuang, G. Zhuang. MicrobiologyOpen 4(1), 1-11 (2015).
- 19) Hosono, T., T. Nakano, A. Igeta, I. Tayasu, T. Tanaka, S. Yachi. Sci Total Environ. 384, 342-54 (2007)
- 20) 秋友和典・黒木聖夫・大久保賢治・熊谷道夫. 琵琶湖研究所所報. 21, 28-42 (2004).

6. 本課題に関連する成果公表（過去の発表を含む）

- 21) 池谷透・伊藤雅之・潮雅之・尾坂兼一・藤林恵・奥田昇. 琵琶湖北湖のメタン栄養微生物群動態解析. 日本微生物生態学会第35回大会 2022年11月1日.
- 22) 池谷透・伊藤雅之・尾坂兼一. メタン循環をめぐる琵琶湖北湖底層の細菌群集動態. 日本微生物生態学会第36回大会 2023年11月29日.
- 23) 池谷透・伊藤雅之・尾坂兼一・藤林 恵・中野 伸一. 琵琶湖北湖底層における2017年から2023年のメタン循環変動要因の検討. 日本微生物生態学会第37回大会 2024年10月30日.
- 24) 池谷透・伊藤雅之・尾坂兼一・中野伸一. 琵琶湖北湖深層のメタン・硫黄代謝関連細菌群集に対する貧酸素化の影響. 第14同位体環境学シンポジウム 2024年12月20日.
- 25) 池谷透. 琵琶湖集水域のリン循環・メタン循環と微生物の機能群解明. 生態学研究センターニュース, 151, 3 (2023)