

令和6年度びわ湖セミナー

琵琶湖深湖底を探る
～底生動物たちの知られざる生態～

要旨集

令和7年3月20日(木・祝)13:00～15:55
コラボしが21 3階大会議室

【主催】滋賀県琵琶湖環境科学研究センター

目 次

・ プログラム	1
・ 基調講演	
「琵琶湖は大きくて深いからこそおもしろい： 深層の微生物と底生動物の生態から将来の琵琶湖生態系について」	3
・ 口頭発表	
「琵琶湖北湖深湖底における底生動物の生息状況」	4
「底生動物の働き：底生動物の摂食と排泄による栄養塩循環への寄与」	5
「底生動物が琵琶湖の底層環境に与える影響： 細菌生産と有機物分解速度からの評価」	6
・ ポスター発表	
「琵琶湖における底層 DO の年間推移と底層水質について」	7
「滋賀県における環境中の PFAS の状況について」	8
「太陽光発電量と使用済みパネル廃棄量の将来見通し」	9
「琵琶湖の全層循環」	10

プログラム

13:00～ 開場・ポスター発表

13:30～ 開会

挨拶

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター センター長 津野 洋

趣旨説明

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター 総合解析部門 専門研究員 永田 貴丸

13:45～ 基調講演

「琵琶湖は大きくて深いからこそ面白い：

深層の微生物と底生動物の生態から将来の琵琶湖生態系について」

京都大学生態学研究センター長 教授 中野 伸一 氏

14:30～14:40 休憩

14:40～「琵琶湖北湖深湖底における底生動物の生息状況」

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター 総合解析部門 専門研究員 井上 栄壮

15:05～「底生動物の働き：底生動物の摂食と排泄による栄養塩循環への寄与」

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター 総合解析部門 専門研究員 永田 貴丸

15:30～「底生動物が琵琶湖の底層環境に与える影響：

細菌生産と有機物分解速度からの評価」

国立研究開発法人 国立環境研究所 企画部研究推進室 霜鳥 孝一 氏

15:55 終了

**琵琶湖は大きくて深いからこそおもしろい：
深層の微生物と底生動物の生態から将来の琵琶湖生態系について**

中野 伸一（京大大学生態学研究センター）

1980年代～2000年代の琵琶湖では、水質改善が進んだにもかかわらず、化学的酸素要求量（COD）の上昇が見られました（現在は、横ばい状態）。私たちの研究グループは、これまで、琵琶湖のCOD上昇に関係する溶存有機物（DOM）生成メカニズム、とりわけ腐植様DOM生成の一端を解明してきました。その研究の中で、私たちは夏季の水温成層している琵琶湖北湖全域の深水層で、クロロフレクサス門に属するCL500-11細菌一種が優占することを発見しました。この細菌は腐植様DOMを餌資源として利用している可能性があります。さらに私たちは、夏季の琵琶湖深水層では細菌食者であるキネトプラスチド鞭毛虫が、全鞭毛虫の45%も優占していることを解明しました。すなわち、琵琶湖の深水層では、腐植様DOMがCL500-11細菌に利用され、CL500-11細菌はキネトプラスチド鞭毛虫に摂食されるという、深水層特有の微生物食物連鎖が駆動しているのかもしれません。

1990年代以降の琵琶湖では、地球温暖化による水温上昇が年々顕在化し、2019年と2020年にはいわゆる「琵琶湖の深呼吸」が十分に起こらず、イサザやヨコエビなどのベントス（底生動物）がへい死するなど、琵琶湖の深層や底泥の酸素環境に深刻な影響をもたらすようになりました。このことは、琵琶湖深水層の微生物食物連鎖にも何らかの影響があるでしょう。私たちは、琵琶湖のベントスがどのような変遷をたどったかを知るため、1966年から2000年までの琵琶湖北湖におけるベントスの現存量と組成の長期的な変化を調べ、様々な環境要因との関係について解析しました。その結果、琵琶湖北湖が富栄養化していた時期は、エラミミズが優占しました。1980年代後半からはユリミミズとイトミミズが優占しました。このように、琵琶湖では富栄養化の期間から気候変動の期間へと移るにしたがってベントスの優占種も入れ替わることが示されました。興味深いことに、イトミミズの優占は、環境条件の変化というより、むしろイサザなどの魚類による捕食の低下等の生物間相互作用がより重要と思われました。

本講演では、魚類の餌となる動物プランクトンの現存量の長期変動、2010年以降に見られる動物プランクトンに摂食されにくい大型緑藻のミクラステリアスによる優占など、琵琶湖生態系の将来について課題となる項目も紹介します。

琵琶湖北湖深湖底における底生動物の生息状況

井上 栄壮（琵琶湖環境科学研究センター 総合解析部門）

琵琶湖北湖では、おおむね、冬季の全層循環により水深約90mまでの深湖底の溶存酸素濃度（D0）が年最低値から年最高値に回復した後、翌年の全層循環まで低下し続けます。近年、2018年度と2019年度に全層循環が完了しなかったほか、水深約90mの深湖底では水生生物の生息に支障がないD0の目安とされる2mg/Lを頻繁に下回るようになり、気候変動の影響が指摘されています。

私たちは、気候変動による深湖底のD0低下等が底生動物に及ぼす影響と、それによる湖内の物質循環への影響の評価に資するため、底生動物の生息状況について現状把握を続けてきました。2023年からは直接採取による調査の地点数と頻度を増やし、琵琶湖北湖の第一湖盆4地点（水深約60～90m）、第二湖盆2地点（水深約60～75m）の計6地点で3か月毎に行っています。2023年4月から2024年10月までの調査結果において、生息密度では全調査地点、全調査時期とも貧毛類（ミミズ類）が平均9,034個体/m²となり優占しました。昆虫のユスリカ科は全調査地点で採取され、生息密度は平均101個体/m²でした。二枚貝のマメシジミ属は水深約80m以浅の4地点で採取され、特に第二湖盆の2地点で生息密度が高く、4地点の平均は192個体/m²でした。深湖底には他に、甲殻類のアナンデールヨコエビ（固有種）、ミズムシ、スジエビ、扁形動物のビワオオウズムシ（固有種）等が生息します。

また、過去の調査結果と比較可能な地点について、生息密度の長期変化を評価しました。今津沖の17B地点（水深約90m）と近江舞子沖のIe地点（水深約75m）における1992年以降の生息密度をみると、貧毛類は17B地点、Ie地点とも明瞭な増減は認められませんでした。ユスリカ科は17B地点、Ie地点とも2000年代後半から増加傾向で、特にIe地点で顕著でした。マメシジミ属は17B地点では採取されていませんが、Ie地点では2010年代から増加傾向で、特に2020年代から顕著でした。これらの変化の要因は不明ですが、今後、深湖底の環境条件や気候変動との関連について検証したいと考えています。

本研究は、環境省・（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20232M02）により実施しました。

底生動物の働き：底生動物の摂食と排泄による栄養塩循環への寄与

永田 貴丸（琵琶湖環境科学研究センター 総合解析部門）

近年、国内外の多くの湖沼では、気候変動の影響で数日から数か月の貧酸素化（ $<2 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ ）が頻発しています。その様な湖沼では、湖底に生息する底生動物が貧酸素の影響で死亡し、減少しています。琵琶湖の深湖底でも、貧酸素化が度々生じており、その影響によるヨコエビ類等の底生動物の死亡が報告されています。気候変動は年々顕在化しており、今後も、琵琶湖深湖底の底生動物は、気候変動による貧酸素化の悪影響を避けられません。よって、底生動物の保全や、彼らの減少によって琵琶湖生態系に生じるリスク評価を行うことが緊急課題です。

底生動物の多くは、湖底において、沈んだ有機物を食べ、排泄することで、湖底の栄養塩循環に寄与していると考えられます。しかし、国内湖沼では、こういった底生動物の働き（機能）は十分に認知されておらず、その機能に関する知見は限られています。底生動物の機能に関する知見は、底生動物の保全や、彼らの減少で琵琶湖生態系に生じるリスク評価を行うために必要なものです。そこで私たちは、環境省・（独）環境再生保全機構 環境研究総合推進費の研究助成により、「2MF-2302 水質・底質の健全化に資する底生動物の機能評価と彼らの減少がもたらすリスクの推定」の研究プロジェクトを立ち上げました。本研究プロジェクトでは、底生動物の機能のうち、水質・底質の健全化に資するものに着目することとし、湖底における底生動物の栄養塩循環への寄与を明らかにすることにしました。

研究では、まず琵琶湖深湖底で多くみられるスジエビ、アナンデールヨコエビ、ビワオオウズムシ、イトミミズの4種を用い、彼らの餌を食べる（摂食）速度（イトミミズは摂食量を評価）と、排泄等によって水中に栄養塩が放出される速度との関係を室内実験で調べました。実験結果から、前述の4種は、摂食と排泄を通して、いずれも無機化された窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）を水中に放出することが分かりました。4種のうち、スジエビとアナンデールヨコエビは、水中に無機化されたリン（ $\text{PO}_4\text{-P}$ ）も放出しました。今回の実験に用いた餌では、ビワオオウズムシとイトミミズは、 $\text{PO}_4\text{-P}$ を放出しませんでした。以上の結果から、スジエビとアナンデールヨコエビは無機化された窒素とリンを、ビワオオウズムシとイトミミズは無機化された窒素を放出することで、湖底－水中間における栄養塩循環に寄与していることが明らかになりました。これは、国内湖沼では、今までほとんど評価されてこなかった知見です。今後も、水質・底質の健全化に資する底生動物の機能を調べ、得た知見を、底生動物の保全や、彼らの減少で琵琶湖生態系に生じるリスクの評価に活かしていきます。

底生動物が琵琶湖の底層環境に与える影響： 細菌生産と有機物分解速度からの評価

霜鳥 孝一（国立研究開発法人 国立環境研究所 企画部研究推進室）

近年の気候変動の影響で、多くの湖で貧酸素化（ $2\text{ mgO}_2/\text{L}$ 未満）が発生する状況が観測されています。貧酸素の期間は様々ですが、短期間であっても湖底に生息する底生動物が貧酸素によって死亡するリスクが生じます。琵琶湖の湖底でも、貧酸素化に起因すると考えられるヨコエビ類等の底生動物の死亡が確認されています。底生動物は世代時間が比較的長いため、一度減少した現存量の回復には時間がかかり、その間、湖で果たす役割も失われてしまいます。それでは、底生動物はどのような役割を湖で果たしているのでしょうか。

底生動物は湖底の餌（有機物）を食べて排泄することで、窒素やリンなど微生物が必要とする栄養塩類を供給・循環促進や細菌活動を活性化させる可能性があります。しかし、その影響については十分に解明されていません。そのため、国立環境研究所では、滋賀県琵琶湖環境科学研究センターと共同で底生動物と細菌生産の関係性を明らかにする研究に取り組んでいます。

底泥表面の有機物を分解し、窒素やリンを水中に供給する働きを担っている細菌ですが、その活動（細菌生産）の測定方法は世界的にも確立されていませんでした。国立環境研究所では、底泥中の細菌に窒素安定同位体（ ^{15}N ）でラベルしたデオキシアデノシンをDNAに取り込ませ細菌生産を測定する手法の開発に成功しました。この手法が確立されたことで、細菌生産と底生動物の関係性を調べることができるようになりました。そこで、アナンドールヨコエビ、スジエビ、ミズムシ、イトミミズが底泥の細菌生産に与える影響を調べたところ、ヨコエビ等の底生節足動物が底泥の細菌生産を高める可能性があることが分かりました。

細菌活動が活発化すると有機物分解も促進されますが、底泥の有機物分解速度の測定手法も世界的に確立されていませんでした。有機物分解では「 $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ 」の反応が起こります。そのため、底泥有機物の元となっている植物プランクトンに炭素安定同位体（ ^{13}C ）を取り込ませ、それを人工底泥として細菌に分解させ、生じる CO_2 を定量する有機物分解速度測定手法を構築しました。その結果、底泥の有機物が分解されると、溶存無機炭素への移行割合が大きいことや、イトミミズが有機物分解を促進する可能性があることが分かりました。

今後も引き続き、底生生物の役割に関する研究を進め、琵琶湖の水環境保全への貢献を目指します。

琵琶湖における底層 D0 の年間推移と底層水質について

山本 春樹（琵琶湖環境科学研究センター 環境監視部門 公共用水域係）

底層溶存酸素量（底層 D0）は、国において 2016 年 3 月に生活環境の保全に関する水質環境基準として追加され、2021 年 12 月に琵琶湖における水域類型の指定が行われました。これを受け、滋賀県では、2023 年 3 月に底層 D0 の環境基準点 16 地点を設定し、環境基準としての底層 D0 モニタリングを開始しました。併せて、底層 D0 低下の影響や要因を解析するため、底層 D0 の測定の際に、底層の水質調査を行っています。

2023 年度の底層 D0 調査の結果では、生物 3 類型（基準値：2.0 mg/L 以上）の基準点 2 地点ともに基準値を下回りました。また、生物 2 類型（基準値：3.0 mg/L 以上）の基準点 3 地点のうち 1 地点で基準値を下回りました。これら 3 地点では、春から夏にかけて底層 D0 が低下し始め、9 月から 10 月の間に基準値を下回りました。以降、2 月まで 2 mg/L 前後で推移した後に底層 D0 が回復し始め、3 月中旬に 10 mg/L 以上に回復しました。

これらの地点がある今津沖水深約 90 m の「第一湖盆」と呼ばれる水域では、底層 D0 が 2 mg/L を下回る「貧酸素状態」が、秋から冬にかけての長い期間にわたって観測されることが多くなっています。長期化の要因としては、春に発生した大型植物プランクトンが湖底に沈降して分解され底層 D0 の低下が早まること、夏の高水温の長期化や冬の水温低下の進行の遅れにより湖水の鉛直混合が進みにくくなることなどが考えられます。

底層水質調査の結果では、生物 3 類型・2 類型の地点で、無機態窒素（DIN）やりん酸態りん（ $\text{PO}_4\text{-P}$ ）と D0 との間に負の相関がみられ、D0 低下による底質からの栄養塩溶出が懸念されました。実際は、D0 低下時に $\text{PO}_4\text{-P}$ と同時に溶出する可能性がある鉄の濃度は増加しておらず、珪藻が分解されて増加する溶性珪酸と D0 との間に負の相関がみられました。このため、これら栄養塩の増加は、底層の有機物が D0 を消費して分解されて生じたものと考えています。一方で、水深が約 3 m と浅い地点でも、DIN や $\text{PO}_4\text{-P}$ と D0 との間に負の相関がみられる地点があり、水草の繁茂による底層水の滞留等によるものと考えられました。

底層 D0 低下の影響や要因は、各調査地点によって異なります。そのため、これらの把握のためには、水深や地形も含めた地点の特徴を踏まえて調査を行う必要があります。

近年は、冬に底層で、表層よりも低水温・高 D0 の水塊が確認されるようになり、2024 年の冬も観測されました。これまでは、表層から順に湖水が冷やされ鉛直混合して全層循環していましたが、水温・D0 が鉛直方向に均質化せず底層 D0 が高くなることが 2021 年の冬以降毎年みられています。こういった現象は、暖かい日が続く湖水が十分冷却されないところへ、急激な冷え込み等によって表層水が冷却され底層に潜り込むことによるものと考えています。これらをはじめ、気候変動が琵琶湖の水質形成機構に与える影響を把握することが重要になっているといえます。

滋賀県における環境中の PFAS の状況について

中村忠貴, 佐貫典子, 古角恵美, 大橋和也, 柴田果歩
(琵琶湖環境科学研究センター 環境監視部門 化学環境係)

PFOS（ペルフルオロオクタンスルホン酸）、PFOA（ペルフルオロオクタン酸）とは、有機フッ素化合物（PFAS）の一種で、2000 年代初め頃までさまざまな工業や身の回りの製品で使用されていました。これらは、水や油をはじき、化学的にも安定した性質を持つことから、PFOS は主にメッキ処理剤や泡消火剤など、PFOA は主に撥水剤や界面活性剤などに使用されていました。

その後、環境中での残留性や健康影響の懸念から、2009 年以降は国際的に規制が進み、現在では、日本を含む多くの国で製造・輸入等が禁止されています。しかしながら、その分解されにくい性質から現在も環境中に残留しており、それらが土壌や地下水を經由し、水道水汚染を引き起こしていることが近年全国的に明らかになってきています。

滋賀県では、2009 年から琵琶湖および県内河川での PFOS および PFOA の調査を実施しており、2021 年からは、県の公共用水域測定計画に基づく要監視項目として、定期的なモニタリング調査を実施しているところです。当センターでは、琵琶湖および県内河川の PFOS および PFOA にかかる採水や分析を行っています。

PFOS および PFOA の暫定目標値は合計 50ng/L（1ng=10 億分の 1g）とごく微量であることから、分析にあたっては、サンプル中の PFOS、PFOA の濃縮作業を行い、高感度・高選択性の検出機器（高速液体クロマトグラフ質量分析装置）を用いて測定を行っています。また、採水用具や分析機器からの混入を防ぐために、専用の容器を用いたり、専用の分析カラムを使用したりしています。

これまでの琵琶湖および県内河川でのモニタリング調査では、琵琶湖北湖で 3～11ng/L、琵琶所南湖で 3～31ng/L、県内河川で不検出～41ng/L とすべて暫定目標値 50ng/L 未満で推移しております。

今後も継続してモニタリング調査を実施するとともに、最新の動向やニーズを踏まえ、PFOS および PFOA 以外の有機フッ素化合物の分析方法や、琵琶湖水・河川水以外の試料の分析方法についても、国や他地方自治体の研究所と連携して検討を進めてまいります。

太陽光発電量と使用済みパネル廃棄量の将来見通し

河瀬 玲奈（琵琶湖環境科学研究センター 総合解析部門）

2050年までにCO₂ネットゼロを達成するためには、再生可能エネルギーを最大限利用することが不可欠です。滋賀県における再生可能エネルギーポテンシャルに占める割合は太陽光発電が最も大きく、滋賀県CO₂ネットゼロ社会づくり推進計画では、2030年度までに2019年度と比較して約2倍の発電容量を導入することを目標としています。

太陽光パネルによる発電量は、気温や日射量により変化します。地球温暖化により、今後数十年は、気温上昇や日射量の増加することが見込まれています。日射量の増加は、太陽光発電量の増加に寄与します。一方で、日射量の増加や気温上昇は太陽光パネルの温度を上昇させ、発電効率を低下させてしまいます。そのため、太陽光発電量の変化を月別にみると、発電量が最も多い月は5月であることが多いです。また、太陽光発電設備は設置されてから時間がたつと経年劣化し、発電効率が低下します。

このように今後変化する要素には、太陽光発電量の増加要因と減少要因の両方が存在します。そこで、どちらの要因がより大きな影響を与えるのか調べてみました。例えば、2080～2100年の気温上昇が約2.7℃になるシナリオ（SSP245）の場合、2030年代には日射量は2.1%増加するものの、気象起因の効率変化が-0.4%、経年劣化が-5.4%となり、合計では3.7%の発電量の減少となることが分かりました。必要となる電力量を得るためには、発電量の減少分を見込んだ太陽光パネルの導入量が必要となります。

大量に導入された太陽光パネルは、20～30年利用された後に廃棄物になります。発生した使用済み太陽光パネルを適正にリサイクルするためには、リサイクル施設が必要となります。しかし、滋賀県にはまだ、太陽光パネルをリサイクルするための施設が十分に整備されていません。今後必要となる施設規模を把握するため、太陽光パネル廃棄量の将来推計を2060年まで行いました。太陽光パネルが廃棄される時期としては、20～30年かけて分散的に廃棄される基準ケース、20年もしくは30年で全量が廃棄される20年ケース、30年ケースの3ケースを想定しました。

CO₂ネットゼロ計画における太陽光パネルの導入目標が計画通りにすすむ場合、パネル廃棄量(kW)は、2060年までは明瞭なピークは発生せず、2030年頃からの急激な増加ののち、2045年以降9～13万kWの範囲で横這いか微増となりました。このパネル廃棄量(kW)にkWあたりの重量をかけると排出重量(トン)が算出できます。太陽光パネル軽量化のための技術開発が進められており、kWあたりの重量はどんどん減少しています。そのため、20年や30年ケースでは排出重量に一時的なピークが出現することになります。排出重量は、2035～2055年の間に6,000～8,000トンでのピークが想定されますが、排出重量の平準化により6,000トンが目安となることが分かりました。

琵琶湖の全層循環

焦 春萌（琵琶湖環境科学研究センター 総合解析部門）

琵琶湖は年に一度、「深呼吸」をしています。人間の深呼吸が体内に酸素を届けるように、琵琶湖も「全層循環」と呼ばれる自然現象によって湖底に酸素を届けています。この現象は、真冬に湖の表面近く（表層）の水が冷やされて重くなり、湖底までの水が混ざり合うことで起こります。酸素を多く含む表層の水が湖底まで行き渡ることによって、湖底の生物を支えてきました。

しかし近年、地球温暖化により暖冬がやってくるようになり、琵琶湖全層循環が起こらない年（2019年、2020年）がありました。全層循環が起こらなかった2020年には、（その後の）夏から秋にかけて湖底では、例年より早く貧酸素水塊が形成され、その後ほぼ3か月間無酸素状態になり（図1）、湖底にすむ生物（イサザ、アナンデールヨコエビ、スジエビ等）に大変な被害があり、個体群が激しく減少しました。さらに温暖化が進むと、全層循環が起きない年が続くことも考えられ、その結果、湖底の生物が減るだけでなく、湖底の泥の質が変わって、水質を悪化させる物質（マンガンなど重金属類）が溶け出すかもしれません。



図1 2020年度琵琶湖第一湖盆の深湖底（今津沖中央、水深89m）における溶存酸素濃度の経月変動。点線は、貧酸素状態になる分界線（溶存酸素濃度が2mg/lである線）です。

地球温暖化による冬の気温は、年々単調に上昇するわけではなく、年によって暖冬（平年より気温が高い冬）や厳冬があります。琵琶湖の全層循環の遅延や不全は、暖冬の年に発生しています。冬に気温が高いこともさることながら、前年が厳冬であると低温の履歴をもつ深層水との温度差が大きくなるため、全層循環の遅延や不全が起こりやすくなります。

琵琶湖と同じ深い湖である鹿児島県の池田湖やドイツのコンスタンツ湖は、かつて年1回の全循環型の湖でしたが、現在では部分循環型へ移行しました。琵琶湖が同じ運命をたどるかは現時点では不明で、今後も注意深く観測して、解析を続ける必要があります。

[illegible]