

富栄養化と気候変動の琵琶湖生態系への影響

—湖底に住む生き物は何を物語るか—

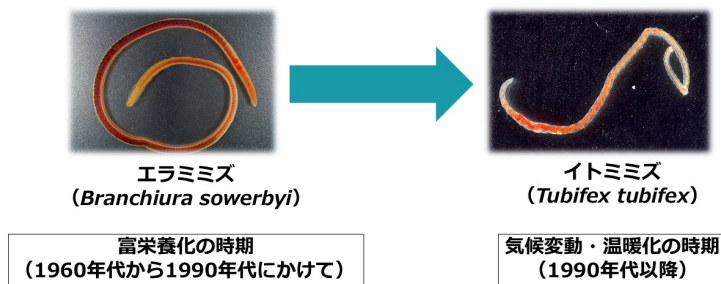
概要

成田哲也 京都大学生態学研究センター助手（研究当時）、上田孝明 同技官（研究当時）（故人）、池谷透 同機関研究員（研究当時、現：立命館大学理工学部授業担当講師）、中野伸一 同教授は、1966年から2000年にかけて、琵琶湖の北湖・近江舞子沖定点の湖底の底泥に住む水生ミミズなどの底生動物（ベントス）の個体密度と種組成の変遷がなぜ起こったのか、現地の諸環境要因の変化との関係について解析しました。1960年代から1990年代にかけては琵琶湖が富栄養化していた期間であり、1990年代以降は気候変動・地球温暖化が琵琶湖生態系に影響した期間です。このため、私たちの論文は単に長期モニタリングデータを報じただけのものではなく、琵琶湖に起こった2つの重要な環境変化についてベントスを通じて解析したユニークかつ重要なものです。また、気候変動・地球温暖化については、20世紀には社会的関心がそれほど高くありませんでしたが、21世紀にはいと国際的に社会的関心が高まり、現在では地球環境問題の筆頭に挙げられています。本研究では、20世紀に得られた研究データを21世紀の視点から解析したものとしても重要です。

琵琶湖北湖が富栄養化していた時期は、水生ミミズのエラミミズ (*Branchiura sowerbyi*) が優占していました。その後、1980年代後半からはユリミミズ (*Limnodrilus* 属の2種) とイトミミズ (*Tubifex tubifex*) が優占しました。このように、私たちの論文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明らかになりました。また、この優占種の変遷は、環境要因だけでなく、むしろイサザなどの魚類による捕食がより重要との解析結果も示しました。

本研究成果は、2024年8月5日に国際陸水学会の学会誌「*Inland Waters*」(概要版)にオンライン掲載されました。

琵琶湖環境の移り変わりと、それぞれの時期に多く見られたベントス種の変化



写真の撮影者は、西野麻知子博士です。また、写真は滋賀県琵琶湖環境科学研究センターからご提供いただきました。

図：1960年代から2000年代に至るまでの、琵琶湖・湖底の底泥中に生息するベントス優占種の移り変わり。この間、琵琶湖は富栄養化と気候変動・地球温暖化の影響を受けていた。

1. 背景

近畿地方 1400 万人の貴重な水資源である琵琶湖は、1960 年代から富栄養化が進行し、赤潮やアオコが頻発していました。1970 年代以降、滋賀県民と地元自治体が一体となって水質改善に取り組み、1990 年代からは少しずつ琵琶湖の水質が改善されてきました。一方、1990 年代以降は、気候変動・地球温暖化が琵琶湖生態系に影響し、2019 年と 2020 年にはいわゆる「琵琶湖の深呼吸¹」が十分に起こらず、琵琶湖の重要水産魚種の一つであるイサザが大量へい死するなど、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。

湖の環境問題の多くは、赤潮やアオコなどの植物プランクトンの大增殖によるものです。植物プランクトンのごくわずかな環境変化にも反応するので、数日単位の環境変化に対する生物・生態系応答を調べるには適しています。一方、湖沼の底に住む底生動物（ベントス）は、底泥環境のように数十年間にわたる環境変化の蓄積に対する生物・生態系応答を調べる際には有効な生物群です。私たちは、1960 年代から 1990 年代の琵琶湖に優占したベントスは琵琶湖の富栄養化に適応したであろうという仮説（仮説 1）と、温暖化による水温上昇がベントスの優占種を決定するであろうという仮説（仮説 2）を立て、この 2 つの仮説を検証するために、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、これらの変化を様々な環境要因との関係について解析しました。

2. 研究手法・成果

1966 年から 2000 年まで、琵琶湖北湖、近江舞子沖の定点（水深 73 m）において、毎月一回の頻度で、エクマン・バージ採泥器を用いてベントスのサンプルを採集しました。泥中のベントスを洗い出し、ホルマリンで固定・保存しました。その後、顕微鏡下でベントスを種ごとに計数し、また個体ごとに体重も測定しました。環境要因の測定も行い、水温、溶存酸素濃度、クロロフィル濃度、泥中の有機炭素・窒素量も測定しました。水温は気候変動・温暖化の指標であり、溶存酸素濃度とクロロフィル濃度は富栄養化の指標です。また、泥中の有機炭素・窒素量は、ベントスのエサ量の指標です。

長期変動のトレンドが統計学的に有意なのかについては、Mann-Kendall 法を用い、ベントスや魚類の食物連鎖についてはスピアマン順位相関解析を用いました。

その結果、琵琶湖北湖が富栄養化していた時期は、水生ミミズのエラミミズが優占していました。その後、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、私たちの論文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クリアに示されました。残念ながら、私たちが立てた 2 つの仮説（上記参照）は、いずれも統計学的には正しくはなかったのですが、状況証拠としてはエラミミズは富栄養化の影響を受けていました。大変興味深いことに、上記の優占種の変遷は、むしろイサザなどの魚類による捕食がより重要との解析結果が示されました。つまり、ベントスの種組成が長期的に変化する理由は、生物の食う－食われる関係が主に影響していたのかもしれない。

3. 波及効果、今後の予定

琵琶湖は 1960 年代から富栄養化し、1990 年代にかけて水質改善に成功した貴重な経験を持ちます。富栄養化では、大量の植物プランクトンが生産され、これらの植物プランクトンは底泥に蓄積します。ですから、富栄養化は湖底の底泥環境にも影響し、蓄積した植物プランクトンが分解されると酸素が消費され、場合によっては琵琶湖の深層や底泥が貧酸素化します。一方、気候変動・地球温暖化でも湖沼深層や底泥の貧酸素化は起こり、2019 年と 2020 年に「琵琶湖の深呼吸¹」が十分に起こらなかったのはその例であり、これらの年にはイサザ（魚類）やヨコエビ類が湖底で大量に死んでしまいました。私たちの研究は、このような状況で湖底

の生き物がどのように生きてきたのか、あるいは生き残れなかったのかを示しています。私たちの研究は、陸上に居る我々には見えない世界の現実を、半世紀以上前から現代までさかのぼって示すことができた貴重な報告です。

また、私たちの研究では、生物は環境条件の変化に対してある程度は耐えているのですが、捕食者に食べられるなど食う一食われる関係が生物の生き残りに大きく影響している可能性も示しました。このことは、温度や酸素、pHなどの物理・化学環境だけでなく、生物についての長期観測も重要であることを示しています。

4. 研究プロジェクトについて

本研究の一部は、科研費・基盤 B (19H03302)「湖沼深水層に卓越する微生物の世界」、および科研費・基盤 A (22H00382)「湖沼の深水層に卓越する未知の有機物循環系の解明」により行われました。

<用語解説>

¹琵琶湖の深呼吸：琵琶湖は通常、毎年1月中下旬から3月下旬あたりまで、湖の表層から底泥直上の深層までの湖水が完全に混合し（全循環）、琵琶湖の深層に酸素が供給される。このことにより、琵琶湖の湖底に住む生き物に酸素がいきわたる。

<研究者のコメント>

この研究成果は、京都大学が理学部附属旧大津臨湖実験所から生態学研究センターまでの100年以上にわたって船舶を維持管理し、船長や技官・技術職員、教員などのマンパワーも配置し、琵琶湖の長期モニタリングを継続する体制を維持してきたからこそ成し得た成果です。つまり、本研究は、担当した研究者のたゆまぬ努力に加え、それを支える組織の長期にわたる継続的なサポートによる成果としても大変重要です。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Long-term changes in the density and composition of profundal macrobenthos in Lake Biwa from 1966 to 2000 (1966年から2000年にかけての琵琶湖のベントスの個体密度・組成の長期変動)

著者：成田哲也、上田孝明、池谷透、中野伸一

掲載誌：*Inland Waters* DOI：10.1080/20442041.2024.2388338