

琵琶湖における水質管理のあり方に関する研究と課題

Current research and issues concerning water quality management in Lake Biwa

早川 和秀^{1*}・佐藤 祐一¹・岡本 高弘¹・永田 貴丸¹・後藤 直成²・富岡 典子³・中野 伸一⁴
Kazuhide HAYAKAWA¹, Yuichi SATO¹, Takahiro OKAMOTO¹, Takamaru NAGATA¹, Naoshige GOTO²,
Noriko TOMIOKA³ and Shin-ichi NAKANO⁴

¹滋賀県琵琶湖環境科学研究センター

²滋賀県立大学 環境科学部

³国立環境研究所 地域環境研究センター

⁴京都大学 生態学研究センター

¹Lake Biwa Environmental Research Institute

²School of Environmental Sciences, University of Shiga Prefecture

³Center for Regional Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

⁴Center for Ecological Research, Kyoto University

摘 要

琵琶湖をはじめとする国内の指定湖沼の一部では著しい水質汚濁が減少した一方で、生態系の異変が起きている。水質を維持しつつ生態系を保全するためには、両者のバランスをとる評価指標が必要である。本稿では私どもがこれまでに実施した琵琶湖における有機物の収支解析の結果を示すと共に、関連する湖沼水質保全分野のレビューを紹介する。有機物の収支解析の結果、琵琶湖沖帯の生物生産は、微生物食物連鎖に比べて生食食物連鎖が主体であることが確認された。さまざまな状況証拠から、湖沼の水質管理では、栄養塩を減らすだけでなく、魚介類資源の保全に適度な濃度を設定できる可能性が示された。よって、水域の有機物や栄養塩の収支解析は、水質と生態系保全を両立させるための評価手法として有効と考えられる。

キーワード：湖沼、水質管理、物質循環、有機物収支

Key words : lakes, water quality management, material cycles, organic matter budget

1. はじめに

日本の湖沼では、生活環境を守るための水質環境基準として化学的酸素要求量 (Chemical Oxygen Demand : COD), 全窒素 (Total Nitrogen : TN), 全リン (Total Phosphorus : TP) を導入して水質汚濁を防止し、有機汚濁負荷や富栄養化の削減に大きな役割を果たしてきた。その結果、近年、琵琶湖や諏訪湖、宍道湖といった国内の指定湖沼の一部では汚濁削減対策が進み、著しい水質汚濁が改善してきた。一方で、水質改善と相まって進むはずであった水中の生物の生息量や種数の改善は進まず、上述の湖沼では水草の異常繁茂や漁獲量の減少といった問題が起きている。また、水利用の変遷や多様化によって、水質汚濁の防止だけでなく、豊かな水辺や快適な生活空間の創造等まで期待されるようになってきた (環境省, 2011)。環境基本法の制定をきっかけとして、湖沼環境においても国内の水環境の保全のあり方の見直しが普及しつつあり、従来の公害規制型から自然環境保全や地球環境等の分野も包括した環

境保全・管理型の取り組みが求められている。本稿では、琵琶湖における水質管理の状況を踏まえつつ、滋賀県琵琶湖環境科学研究センターを中心とする研究グループで取り組んできた水質評価の手法研究と水質管理のあり方に関する検討と課題を紹介する。

2. 琵琶湖の状況

琵琶湖は我が国最大の淡水湖であり、近畿 1,450 万人の生活と経済的発展を支える貴重な水資源となっているだけでなく、多くの水産資源や固有種が生息する重要な生態系を有する湖沼である。1960 年代以降、社会経済活動の高成長や都市化の進展に伴う流域人口の増加により、琵琶湖に流入する有機物や栄養塩の負荷量が増え、湖の富栄養化が進んだ。その結果、異臭味を生成する植物プランクトンの発生や北湖での淡水赤潮の発生等の水質汚濁の問題が生じた。1970 年代に水質汚濁に対する対策が始まり、水質汚濁防止法、富栄養化防止条例に基づく排

受付：2020年8月31日、受理：2020年10月27日

* 〒520-0022 滋賀県大津市柳が崎 5-34, E-mail : hayakawa-k@lberi.jp

水規制に加え、1984年には、湖沼水質保全特別措置法(湖沼法)が制定された。これらの法令に基づいて排水規制や下水道整備などの汚濁負荷削減対策が行われた結果、水質には一定の改善がみられてきた。滋賀県環境白書によると、2002年以降では「湖の富栄養化は抑制されてきた」と表現され、2008年以降は「TN、TP濃度が経年的に低下している」としている(滋賀県、2002-2018)。

しかし、琵琶湖の水環境はいまだ問題を抱えており、異臭味の発生による利水障害、内部負荷による水質への影響、外来魚の繁殖、水草の異常繁茂、在来魚類や二枚貝等の著しい減少をはじめとした生態系の異変が現れている(滋賀県、2012)。水資源の有効活用や治水、利水を目的とした多大な事業は、人々の生活に安全・安心、衛生的で快適な暮らしをもたらしたが、湖岸堤の建設等による湖辺のヨシ帯や自然湖岸の減少、農業用排水路の整備等による魚類の生息環境の減少などにつながった(滋賀県、2000)。滋賀県では、その反省をふまえ、2000年より琵琶湖総合保全整備計画(マザーレイク21計画)を策定し、新たな保全の方向性を打ち出した。第1期10年間の目標を水質保全、水源涵養、自然的環境・景観保全と定めた(滋賀県、2000)。

2000年代以降の琵琶湖では、アオコ・カビ臭などの富栄養化の問題が継続しつつ、新たな問題が起きてきた。特に、南湖における水草の異常繁茂やアユ等の漁獲量の減少、北湖の水温上昇は大きな問題となった(滋賀県、2012)。マザーレイク21計画の第2期では、第1期以降の新たな問題が現れたことへの対応と、それまで保全に重きを置いてこなかった琵琶湖流域の生態系保全や暮らしと湖の関わり再生に重点を置くよう計画が改訂された(滋賀県、2012)。この計画改訂では、それまで計画で優先されてきた水質保全だけでなく、生態系保全が前面に出された点で画期的であった。

3. CODの増加と有機物管理

琵琶湖の富栄養化の抑制が進む一方で、水質項目のうち、CODは1984年以降の増加から横ばいが続いており、1990年代以降の琵琶湖の環境問題の1つとなっていた。CODの増加の問題に対して、国立環境研究所や琵琶湖環境科学研究センターでは、水中の難分解性有機物の存在の検証をはじめ、さまざまな研究を行った。本稿では課題点を以下に記す。研究成果の詳細は他の文献(岡本・早川、2011;津田ほか、2014;早川ほか、2015a, b)を参照いただきたい。

『難分解性有機物の存在』：琵琶湖水のCODで検出される有機物の6割は、100日の生分解試験でも分解しない難分解性有機物であることが明らかにされた。すなわち、水中の酸素を消費しない有機物で

ある。さらにそれら有機物の代表となる琵琶湖水の有機物から抽出されたフルボ酸による水生生物の急性毒性試験は陰性であり、湖水の難分解性有機物は有害なものとは認められなかった(早川ほか、2015a)。しかし、難分解性有機物が湖沼生態系へ与える長期的な影響は微生物による有機物利用の観点からも不明な点があり、引き続き注視することにした。

『CODの課題と有機物指標の再構想』：CODの増加は、指標の本来の意味では有機汚濁の増加である。しかし、琵琶湖集水域からのCOD負荷推定量は、1990年代以降で経年的に減少してきて、かつ、湖水CODの6割は難分解性有機物であったことから、水中の酸素を消費するような“水質汚濁”とは別のものであった。また、CODにはさまざまな課題があった。CODの酸化剤である過マンガン酸カリウムの酸化率の低さゆえに分析精度に課題がある(早川ほか、2018)。流域における有機物指標は、浄水は全有機炭素(Total Organic Carbon: TOC)、河川は生物化学的酸素要求量(Biochemical Oxygen Demand: BOD)、湖沼はCOD酸性法、沿岸海洋はCODアルカリ法であり、流域管理における指標の不統一がある。その他CODのさまざまな課題から、CODに代わり水域の有機物の総量や質を評価できる有機物指標の構築が期待され、有機物総量の指標にはTOCが挙げられた。この成果をもとに、琵琶湖の第7期湖沼水質保全計画にはTOCの目標水質が新たに書き込まれた。

『新たな水環境問題への対応』：琵琶湖では富栄養化の抑制が進む一方で、水草の異常繁茂や漁獲量の減少などが起きている点に対しては、水質保全とは別に生物の生息環境や産卵環境の保全が必要である。生物の課題に対応する上で、生物群集相互やそれを取り巻く環境との作用を考えると、生物の現存量や物質の流れを把握する物質循環の理解が有効である。マザーレイク21計画の第2期計画改訂では、将来の目標像として、良好な水質と生物のにぎわいの両立が掲げられた。そのため、両者のバランスをとる指標が必要とされ、後述するが、有機炭素の現存量と収支を評価することが期待された。

4. 水環境行政における生態系保全の普及

水環境における水質だけでなく生物も含めた総合的な保全の考え方は、国の水環境行政においても進んできた。1993年に制定された環境基本法に基づく第一次環境基本計画には、「水質、水量、水生生物、水辺地を総合的にとらえ…水域生態系を保全するなど、対策を総合的に推進する」の文言がある。その後、1994年の環境省内の水環境ビジョン懇話会、2003年の健全な水循環系構築に関する関係省庁連絡会議、2004年からの環境省における水環境健全性指

標の開発を通じて、水環境の総合的な保全の考え方が醸成されてきた(水環境の総合指標研究委員会, 2013)。

2011年には環境省にて「今後の水環境保全の在り方について」が取りまとめられ、良好な水環境を実現するためには、水質、水量、水辺地、水生生物等について個別の望ましい目標を設定しつつ、それらを総合的に考慮した望ましい水環境像を提示し、健全な水循環系の確保とともに、良好な水環境が本来有している機能を発揮できるよう、保全に向けた取り組みを進めていくことが望ましいとされた(環境省, 2011)。

実際には総合的な保全に向けていくつかの取り組みがある。取り組みの1つには、化学物質が生物や生態系に及ぼす影響から水生生物の保全のための環境基準が導入された。従来の我が国の水環境保全行政は、人にとっての良好な環境の保全が中心で、水生生物やその生息環境を中心に据えた施策は講じられていなかった。しかし、生物に対する化学物質の影響の重要性が認識されるようになり、第一次環境基本計画において、化学物質による生態系に対する影響の評価と管理の推進が掲げられた。そして、2003年に水生生物の保全に係る水質環境基準として亜鉛が導入され、その後ノニルフェノール、直鎖アルキルベンゼンスルホン酸及びその塩(LAS)が追加された。クロロホルム、フェノール及びホルムアルデヒド等も要監視項目として設定されている(環境省, 2013)。

別の取り組みとしては、生物や水環境の健全性を指標から評価して保全に役立てる取り組みがある。国内では古くから汚水生物学としての「生物学的水質評価法」による水域の水質階級判定があり、日本版平均スコア法もまとめられている(環境省, 2017)。河川管理においても、1997年の河川法改正によって、自然豊かな河川環境の保全・再生が求められ、いくつかの指標を用いた河川生態環境の評価が進められている。2009年に環境省、水環境学会で取りまとめられた水環境健全性指標(環境省, 2009)は、水質のみならず生物群集や生息環境などさまざまな要素を導入して、総合的に考慮した望ましい水環境を保全することを目的としている(水環境の総合指標研究委員会, 2013)。

国外においても、例えば、欧州連合(EU)の水枠組み指令(Water Framework Directive: WFD)では、地表水における良好な生態学的状態と化学的状态が目標となっていて、生態学的状態を判定する要素に生物群集の質が要件として掲げられている(Reyjol *et al.*, 2014)。そのため、WFDでは生態系の健全性をみるための生物群集の属性や特性、またそれらを支える水域の特性を評価する手法が多く開発されてきた(Birk *et al.*, 2012)。これらの方法は、理想とする生態系と現実の環境とのギャップを簡易に見分け

ることができる。しかし、生態系の保全対策までに踏み込んで考えるためには、生態系の機能や安定性/回復力などのメカニズムを理解することが必要となる(Reyjol *et al.*, 2014)。

5. 琵琶湖における水質と生態系の保全の両立に向けて

琵琶湖においても、生態系保全の取り組みとして水生生物の保全のための環境基準が導入されている。さらに2015年に、琵琶湖の公共用水域水質測定計画には、全国でも数少ない「植物プランクトン」を測定項目に追加した。また、近隣の大学や研究機関を中心に生物モニタリングや、生息環境等に関する研究も行われており、それらの知見に基づく生態系環境の問題点も指摘されつつある(滋賀県琵琶湖環境科学研究センター, 2015)。一方で、前述したように、良好な水質と生物のにぎわいの両立を満たすような施策を考えるためには、水質管理と生態系保全を横断的に見渡すものが必要とされた。

すべての生物は自らの細胞を形成する有機物や窒素、リンといった物質が必須であり、炭素、窒素、リンは親生物元素と呼ばれている。これらの元素が植物による同化から植食者による摂食、排泄、遺骸の分解を通じて循環しているため、湖沼生態学において、各過程における元素の量的な関係を考える「化学量論」が発達してきた(Brönmark and Hansson, 2005)。例えば、動物プランクトンや魚など高次の生物ほど体内のリン要求性が高いため、捕食一被食の関係には、摂食のサイズだけでなく、摂餌の栄養比率(例えば炭素：リン比)も重要な要素となる。そのため、食物連鎖構造における栄養動態は化学量論による議論が盛んである(たとえば Hessen *et al.*, 2013)。

一方、水質管理において考えられてきた有機物や窒素、リンの制御の問題は、湖沼内の物質循環を抜きに考えることはできない。湖内には有機物や栄養塩の湖底への蓄積と湖底からの再溶出による内部負荷の現象があり、さらに、生物体による栄養塩の取込と食物連鎖を通じた高次捕食者への栄養塩の分配という現象も、広い視野からみれば湖内物質循環の一部である。それゆえ、湖内の水質管理と食物連鎖構造における栄養動態は基本的に結びついている。

2014年より琵琶湖の水質管理について議論が行われてきた滋賀県の「琵琶湖における新たな水質管理のあり方懇話会」では、良好な水質と生物のにぎわいの両立を見定めるためには、湖内の水質形成と生態系の食物連鎖に共通する有機物や栄養塩に着目して物質循環を把握することが必要という考え方が示された。特に、前述のCODにかかる課題から、琵琶湖における微生物による有機物の利用とその有機炭素フローや、湖内の食物連鎖構造における有機炭

素フローを実測して湖内物質循環の実像を把握する。さらにその物質循環のフローに滞りや偏りがなさを評価することで水質保全との折り合いをつける生態系保全の可能性が提案された。例えば、動物プランクトン/植物プランクトン生産量比が高いほど、生産された有機物が効率良く高次生物に利用される。すなわち、これからの水質管理は、集水域からの有機物や栄養塩の流入負荷を減らし続けるのではなく、水域の物質循環を効率的に滞りなく働かせることで、水質に余分な栄養を残すことなく魚介類資源を豊かにするという方向である。

6. 琵琶湖の貧栄養化と微生物食物連鎖

琵琶湖では、近年、水産関係者から、主な漁獲対象魚であるアユにとっての餌不足が指摘されるようになった(酒井ほか, 2015)。この一因として、栄養塩の流入負荷の減少により植物プランクトンの生産量が減少し、それを餌とする上位の生態系にも影響が生じる貧栄養化の問題が指摘されている(山本・花里, 2015)。通常の水中の生態系では、植物プランクトンが動物プランクトンに捕食され、それらがプランクトン食魚に摂食される食物連鎖(生食物連鎖)が知られている(図1)。一方で、水中の生態系には、細菌群集の増殖を起点に繊毛虫や鞭毛虫などの原生動物が細菌を摂食し、さらに動物プランクトンの捕食へとつながる微生物食物連鎖が存在する(図1)。

海洋では、植物プランクトンを起点とする生食物連鎖だけでなく、微生物食物連鎖も高次捕食者の餌資源として貢献することが知られている(たとえばAzam, 1998)。湖沼では、微生物食物連鎖の起点となる細菌生産速度は、植物プランクトンの一次生産の20%~30%とされる(Cole *et al.*, 1988)が、国内においては実測例が不足しており不明な点が多い。近年の琵琶湖では、貧栄養化に向かう経過において、一次生産の減少によって相対的に微生物食物連鎖の重要性が増すと考える(加藤・増田, 2014)があり、細菌を起点とした微生物食物連鎖による湖内の物質循環への貢献が注目される。

そこで我々の研究グループは、琵琶湖における物

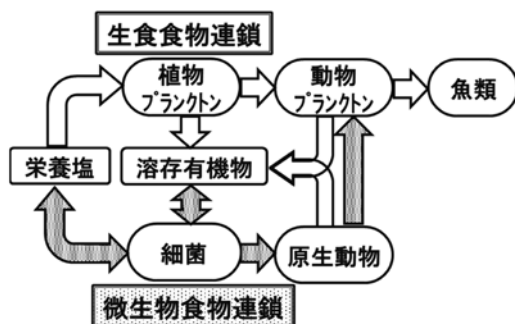


図1 生食物連鎖と微生物食物連鎖の模式図。

質循環の把握手法の導入として、琵琶湖における生食物連鎖と微生物食物連鎖の生産とフラックスを評価する研究を行った(滋賀県琵琶湖環境科学研究センターほか, 2019)。特に、従来から湖の一次生産や細菌生産の測定は煩雑であることに加え、細菌生産では放射性核種を使用しなければならない技術的な課題もあった。よって、それを簡略化できる新たな技術導入も試みた。以下に成果の概要を示す。

植物プランクトンの一次生産量の測定手法として、蛍光式クロロフィル計とパルス変調式クロロフィル励起蛍光法を組み合わせた光学的手法を用い、従来の手法より時空間的に高解像の測定を行った(太田ほか, 2013)。その結果、気象イベントにตอบสนองする植物プランクトンの一次生産速度の変化を観測できた。これらは従来の測定法では捉えることができなかった植物プランクトン動態に関する現象であり、琵琶湖北湖における水質や一次生産を考える上で有用な知見となった。

細菌生産では、安定同位体の¹⁵N-デオキシアデノシンを用いた定量化手法を適用した(Tsuchiya *et al.*, 2020)。この手法により、これまでは水域現場での測定が困難であった細菌生産を、国内に類を見ない多地点、多頻度で測定を行えるようになった。その結果、これまで知られていなかった琵琶湖内の地点間や深さ方向の細菌活性の違い、長期的な琵琶湖の細菌生産の変化を明らかにした(Tsuchiya *et al.*, 2020)。

原生動物については、生産速度や摂食量を評価するとともに、現存量と種レベルの群集組成をメタゲノミクス解析によって解明した(Mukherjee *et al.*, 2017)。動物プランクトンの生産速度や摂食量も、現存量調査や摂食実験を行って推定した(永田ほか, 2018)。以上より、琵琶湖の沖帯表層における有機炭素循環の様相を明らかにした。

琵琶湖沖帯の一次生産量は年間平均1.11 gC m⁻² d⁻¹ (0~20 m 深、総生産推定値)と算出され(図2)、1990年代以降に実測された一次生産量と同等であった。琵琶湖では2000年代以降、水中の透明度の上昇や全窒素濃度の減少があったにもかかわらずそのような結果であったことは、透明度の上昇にともなう有光層深度の増加や水温上昇による生分解速度の増加によって栄養塩回帰速度が高まっているなどの影響があるかもしれない。

細菌の炭素要求量は一次生産量の約50%に相当していた(図2)。しかし細菌の呼吸を引いた細菌生産量は小さく、微生物食物連鎖の上位の捕食者への有機物供給は乏しいことが明らかとなった。高次捕食者への有機炭素の伝達には、微生物食物連鎖よりも生食物連鎖の方が主体であった。加藤・増田(2016)は、琵琶湖の概念的な生態系モデルにおいて微生物食物連鎖による高次捕食者への物質伝達を推定している(表1)。本研究において、¹³C安定同位体トレーサーを用いた取り込みにより炭素の同化速度を求め

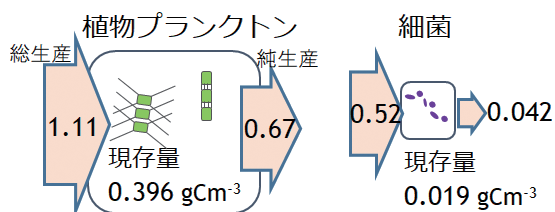


図2 琵琶湖において実測された一次生産と細菌生産量 ($\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$)。

表1 琵琶湖沖帯における動物プランクトンの同化量から見た植物プランクトンと細菌生産量の合計量に対する細菌生産量の割合(%)。

加藤・増田モデル*		永田 ^{13}C 実験**	
1985年	2010年	2018年7月	2018年9月
22.1	32.8	26.9	21.0

*:加藤・増田(2016)

** :滋賀県琵琶湖環境科学研究センター(2019)

た実験の結果からは、微生物食物連鎖の同化割合が24% (7月と9月の平均値)と試算された(表1)。

琵琶湖の現状における微生物食物連鎖の割合は、モデルで考えられた2010年の比率よりは低かった(表1)。ただし、本研究の結果はまだデータの蓄積が十分でなく、今後更に検討を進める必要がある。

琵琶湖沖帯の一次生産は、水中の栄養塩濃度の減少に見られるほどには著しい減少はなく、また、微生物食物連鎖に比べて生食食物連鎖が主体であることが確認された(滋賀県琵琶湖環境科学研究センターほか, 2019)。さらに、動物プランクトンのモニタリングデータでは、琵琶湖の動物プランクトン現存量は、1980~1990年代と同程度の水準にある(Liu *et al.*, 2020)。こうした状況は、アユの餌不足と相反する状況にあり、アユ不漁の原因については、アユの生活史や被食関係に踏み込んだ詳細な調査が必要である。

一方で、近年の琵琶湖にはツツミモ科の大型緑藻の増殖がみられる(Hodoki *et al.*, 2020)。これらの藻類は、細胞サイズが $45 \mu\text{m}$ を超えるため(これを大型と呼ぶ)、動物プランクトンに摂食されにくい。このような状況から、生食食物連鎖が効率的に高次の捕食者にまで伝達されるには、大型でない(中・小型と呼ぶ、 $45 \mu\text{m}$ 未満)細胞サイズの植物プランクトンの発生が好ましい(滋賀県琵琶湖環境科学研究センターほか, 2019)。一般に細胞サイズのより小さな植物プランクトンほど栄養塩濃度が低い環境下で成長が有利である(Brönmark and Hansson, 2005)。このように見てくると、湖沼の水質管理では、富栄養化対策のためには栄養塩を極力減少させることを目指すが、湖内の食物連鎖を考慮すると、栄養塩を減らすばかりでなく、中・小型の植物プランクトンが成長しうる濃度という適度な着地点がありそうである。

今後は、中・小型の植物プランクトンが優占的に成長しうる環境を実験やフィールド調査で探究するとともに、琵琶湖の水質・生態系モデルを改訂して、そのような環境を再現・予測できるものを構築していく予定である。

7. WFDの取り組み

我々の研究は、まだ途中の段階にある。一方、生態系の評価と保全を目指す欧州のWFDの研究には先行していることも多く、我々の研究の先を考えるための示唆となる。

WFDの生態系保全に関する研究プロジェクトには10の課題があり、並行して研究が進められている(Reyjol *et al.*, 2014)。中には、水域の生態系の状態を、水域の生物群の“生物学的質的要素”(BQE)によって、栄養塩環境の変化や酸性化など水域のさまざまな環境改変要因との関係を解析することでそれらの影響を評価する手法も検討されている(Hering *et al.*, 2013)。しかし、いまだに湖沼生態系の評価では生物調査手法に課題が多いとされる(Reyjol *et al.*, 2014)。

10の研究課題の1つとして、生態系機能の評価がある。生態系の保全対策を考えるためには、生態系の機能を理解することが1つの方策と考えられている。その方法の1つとして、生態系システムを介した栄養ネットワークと物質(有機物)とエネルギーのフラックスの解析が提案されている(Reyjol *et al.*, 2014)。これには、生態化学量論のアプローチが用いられ、生態系におけるエネルギーと親生物元素のバランスが生物にどのように影響し、影響を受けるかを考慮する(Frost *et al.*, 2005)。水中の食物網における栄養段階の効率や栄養元素のリサイクルなど研究にはよく扱われる(Hessen *et al.*, 2013)。例えば、生態系の高次消費者の元素組成に関する情報は、食物網の元素の不均衡を特定し、栄養素循環にかかる課題プロセスを見出すことができる(Gilbert, 2012)。また、生物間のエネルギーと元素のバランスや栄養ネットワークの構造が、生態系の安定性と回復力に関する示唆を与える可能性があると考えられている(Arreguín-Sánchez, 2014)。他にも生態系機能の評価する手法として、生物サイズに基づく生態系構造の解析(たとえばSprules and Munawar, 1986)や、生態系の熱力学的概念に基づく解析(Jørgensen *et al.*, 2010)などがある。

現代の河川や湖沼の生態系の壊変が、酸性雨などの1つの問題で起こるのでなく、複数の要因によって引き起こされている(Hering *et al.*, 2013)。生物モニタリングでは、複合的な影響や累積的な影響をとらえることができる一方、直接的な因果関係の解析に弱い。EUでは湖沼における環境改変には、富栄養または貧栄養化などの栄養塩環境の変化と、気候

変動による水温や降雨の変化による影響が大きいとされている(Hering *et al.*, 2013)。その点からも、それらについて栄養・有機物のフラックスの解析は、生態系の異変の原因の確定と対策につながる可能性が高く、効率的であると考えられる。

8. 今後の課題

琵琶湖の水質管理のあり方について、“良好な水質と生物のにぎわいの両立”を目指し、栄養塩の流入負荷を減らし続けるのではなく、水域の物質循環を滞りなく活発なものにして、魚介類資源を豊かにしていくことが考えられている。望ましいとされる目標が水質と生態系保全の両立にあったため、我々の研究アプローチは有機物循環の評価となったが、豊かな水産資源や生態系の構築の観点からみて、滞りなく活発な物質循環が健全な生態系に通じるかについては、まだ議論が十分でない。

また、水質面での課題も残っている。琵琶湖の課題に立ち返ると、継続するアオコ・カビ臭などにつながる富栄養化、温暖化による湖水の水温上昇や近年の集中豪雨の増加など、水質にかかる環境改変の圧力が後を絶たない。琵琶湖では、湖沼水質保全計画における水質予測について、陸域の水・物質動態及び湖内の流動・生態系を考慮した三次元動態モデル「琵琶湖流域水物質循環モデル」を構築済みで(佐藤ほか, 2011)、気象や社会条件等を考慮した非定常解析が可能となっている。しかしながら、アオコ発生などの植物プランクトンの発生予測や、豪雨等による短期の降雨変動による水質変化予測については、十分な予測能力を有していない。それらのメカニズム解明やモデル構築には、我々が研究を推進してきた生態系を介した有機物と栄養動態の解析が有効と考えられ、湖底からの内部負荷や沿岸域での水質形成などを含めた研究が必要である。

国の総合戦略として地方創生が示され、湖沼においても、多様な利水用途や水産資源の活用など重要な地域資源として最大限の活用が目指されようとしている。今後の施策によっては水質保全とトレードオフとなる事象や新たな生態系の変化が起きるとも限らない。湖沼では、水質から水産資源、生態系までを包括した総合的な視点に基づく効果的な施策の立案と実施が求められている。そのためにも、我々が研究を推進する生態系を介した有機物と栄養動態の解析やそれに基づく管理指標やモデルの構築を適応的に進めていく必要がある。

謝 辞

滋賀県「琵琶湖における新たな水質管理のあり方懇話会」、環境研究総合推進費 5-1607「琵琶湖における有機物収支の把握に関する研究」を通じて、本

課題についてご意見をいただいた以下の方々(敬称略 順不同)に感謝する。津野洋, 今井章雄, 清水芳久, 田中宏明, 高村典子, 近藤竜二, 小野雅司, 小松直樹, 三和伸彦, 奥田一臣, 滋賀県琵琶湖環境部の皆様, 環境省環境省水・大気環境局水環境課の皆様。本研究の一部は滋賀県琵琶湖環境科学研究センター政策課題研究, 環境研究総合推進費 5-1607の支援により行われた。

引用文献

- Arreguín-Sánchez, F. (2014) Measuring resilience in aquatic trophic networks from supply-demand-of-energy relationships. *Ecological Modelling*, 272, 271–276. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.10.018>
- Azam, F. (1998) Microbial control of oceanic carbon flux: the plot thickens. *Science*, 280(5364), 694–696. <https://doi.org/10.1126/science.280.5364.694>
- Birk, S., Bonne, W., Borja, A., Brucet, S., Courrat, A., Poikane, S., Solimini, A., van de Bund, W., Zampoukas, N. and Hering, D. (2012) Three hundred ways to assess Europe's surface waters: an almost complete overview of biological methods to implement the Water Framework Directive. *Ecological Indicators*, 18, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.10.009>
- Brönmark, C. and Hansson, L. A. (2005) *The Biology of Lakes and Ponds*, second edition. Oxford University Press. USA. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198713593.001.0001>
- Cole, J. J., Findlay, S. and Pace, M. L. (1988) Bacterial production in fresh and saltwater ecosystems: a cross-system overview. *Marine Ecology Progress Series*, 43, 1–10. <https://doi.org/10.3354/meps043001>
- Frost, P. C., Cross, W. F. and Benstead, J. P. (2005) Ecological stoichiometry in freshwater benthic ecosystems: an introduction. *Freshwater Biology*, 50, 1781–1785. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2005.01457.x>
- Gilbert, P. M. (2012) Ecological stoichiometry and its implications for aquatic ecosystem sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4, 272–277. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.05.009>
- 早川和秀・廣瀬佳則・一瀬 諭・岡本高弘・古田世子・田中 稔・藤嶽暢英・田中仁志(2015a)琵琶湖水中のフルボ酸の OECD 試験法による水生生物への急性毒性評価. 日本水処理生物学会誌, 51(4), 105–114. <https://doi.org/10.2521/jswtb.51.105>
- 早川和秀・岡本高弘・五十嵐恵子・古角恵美・廣瀬佳則・一瀬 諭・古田世子・田中 稔・永田貴丸・津田久美子・清水芳久・日下部武敏・三崎健太郎・

- 中野伸一・藤嶽暢英・山田悦・布施泰朗・田中仁志・杉山裕子・丸尾雅啓(2015b)琵琶湖における新たな水質指標に関する研究. 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター研究報告書(平成23~25年度), 10, 52-75. https://www.lberi.jp/app/webroot/files/03yomu/03-01kankoubutsu/03-01-03research_report/no9/files/04_.pdf(2020年8月27日確認)
- 早川和秀・岡本高弘・廣瀬佳則・佐藤祐一(2018)低濃度有機汚濁水域における有機物指標の特性把握: 琵琶湖流域におけるCOD(Mn), BOD, TOCの比較から. 水環境学会誌, 41(6), 193-203. <https://doi.org/10.2965/jswe.41.193>
- Hering, D., Borja, A., Carvalho, L. and Feld, C. K. (2013) Assessment and recovery of European water bodies: key messages from the WISER project. *Hydrobiologia*, 704, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1438-9>
- Hessen, D. O., Elser, J. J., Sterner, R. W. and Urabe, J. (2013) Ecological stoichiometry: An elementary approach using basic principles. *Limnology and Oceanography*, 58(6), 2219-2236. <https://doi.org/10.4319/lo.2013.58.6.2219>
- Hodoki, Y., Koitabashi, T., Goda, Y., Akatsuka, T. and Nakano, S., (2020) Long-term variation in abundance of the non-native phytoplankton *Micrasterias hardyi* (Zygnematophyceae, Streptophyta) in Lake Biwa, Japan. *Limnology*, 21, 67-72. <https://doi.org/10.1007/s10201-019-00595-x>
- Jørgensen, S. E., Xu, F. L. and Costanza, R. (2010) *Handbook of Ecological Indicators for Assessment of Ecosystem Health*, 2nd. CRC Press, USA. <https://doi.org/10.1201/EBK1439809365>
- 環境省(2009)水辺のすこやかさ指標(みずしるべ)水環境健全性指標 2009年版. <https://www.env.go.jp/water/wsi/download1.html>(2020年8月27日確認)
- 環境省(2011)今後の水環境保全の在り方について(とりまとめ). 環境省: 今後の水環境保全に関する検討会. 54pp. <http://www.env.go.jp/press/files/jp/17164.pdf>(2020年8月27日確認)
- 環境省(2013)平成25年版環境白書/循環型社会白書/生物多様性白書, 環境省, 東京. <http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h25/index.html>(2020年8月27日確認)
- 環境省(2017)水生生物による水質評価法マニュアル-日本版平均スコア法. <http://www.env.go.jp/water/mizukankyo/hyokahomanual.pdf>(2020年8月27日確認)
- 加藤伸悟・増田貴則(2014)微生物食物連鎖を含む概念的食網モデルの構築と細菌が食網動態におよぼす影響. 土木学会論文集G(環境), 70(7), III_389-III_401. https://doi.org/10.2208/jscejer.70.III_389
- 加藤伸悟・増田貴則(2016)流域汚濁負荷量と湖水中有機物量の関係についての概念的食網モデルを用いた考察. 水環境学会誌, 39(1), 1-15. <https://doi.org/10.2965/jswe.39.1>
- Liu, X., Dur, G., Ban, S., Sakai, Y., Ohmae, S. and Morita, T. (2020) Planktivorous fish predation masks anthropogenic disturbances on decadal trends in zooplankton biomass and body size structure in Lake Biwa, Japan. *Limnology and Oceanography*, 65(3), 667-682. <https://doi.org/10.1002/lno.11336>
- 水環境の総合指標研究委員会(水環境学会)(2013)水環境に関する総合指標の展開と今後.(特集 総説・水環境学の進歩: 研究委員会編(1)). 水環境学会誌, 36A(12), 439-445.
- Mukherjee, I., Hodoki, Y. and Nakano, S. (2017) Seasonal dynamics of heterotrophic and plastidic protists in the water column of Lake Biwa, Japan. *Aquatic Microbial Ecology*, 80, 123-137. <https://doi.org/10.3354/ame01843>
- 永田貴丸・廣瀬佳則・岡本高弘・早川和秀(2018)ミジンコの生存, 成長および再生産に対する従属栄養性鞭毛虫の餌としての影響. 日本水処理生物学会誌, 54(3), 73-82. <https://doi.org/10.2521/jswtb.54.73>
- 岡本高弘・早川和秀(2011)琵琶湖における溶存有機物の現状と課題. 水環境学会誌, 34(5), 151-157.
- 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. <https://doi.org/10.3739/rikusui.74.173>
- Reyjol, Y., Argillier, C., Bonne, W., Borja, A., Buijse, A. D., Cardoso, A. C., Daufresne, M., Kernan, M., Ferreira, M. T., Poikane, S., Prat, N., Solheim, A. L., Stroffek, S., Usseglio-Polatera, P., Villeneuve, B. and van de Bund, W. (2014) Assessing the ecological status in the context of the European Water Framework Directive: Where do we go now? *Science of the Total Environment*, 497-498, 332-344. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.119>
- 酒井明久・臼杵崇広・片岡佳孝(2015)琵琶湖におけるアユ資源の冬季減耗と環境要因. 日本水産学会誌, 81(4), 667-673. <https://doi.org/10.2331/suisan.81.667>
- 佐藤祐一・小松英司・永禮英明・上原浩・湯浅岳史・大久保卓也・岡本高弘・金再奎(2011)陸域-湖内流動-湖内生態系を結合した琵琶湖流域水物質循環モデルの構築とその検証. 水環境学会誌, 34(9), 125-141. <https://doi.org/10.2965/jswe.34.125>
- 滋賀県(2000)「マザーレイク21計画」琵琶湖総合保全整備計画. 滋賀県琵琶湖環境部水政課, 86pp. 大津. <https://www.pref.shiga.lg.jp/ippan/kankyoshizen/>

biwako/305280.html(2020年8月27日確認)
滋賀県(2002-2018)滋賀の環境(平成14~30年度滋賀県環境白書, 滋賀県琵琶湖環境部環境政策課, 大津.
滋賀県(2012)琵琶湖総合保全整備計画(マザーレイク21計画)〈第2期改訂版〉. 滋賀県琵琶湖環境部水政課, 102pp. 大津. <https://www.pref.shiga.lg.jp/ippan/kankyoshizen/biwako/11350.html>(2020年8月27日確認)
滋賀県琵琶湖環境科学研究センター(2015)南湖生態系の順応的管理に関するサイエンスレポート. 琵琶湖環境科学研究センター研究報告書別冊(平成23~25年度), 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター, 大津. 131pp. https://www.lberi.jp/multidatabases/multidatabase_contents/detail/92/d03676a403a8047291c952bd20ae6a9f(2020年8月27日確認)
滋賀県琵琶湖環境科学研究センター(2019)琵琶湖における有機物収支の把握に関する研究. 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書(5-1607)平成28~30年度. https://www.erca.go.jp/suishinhi/seika/pdf/seika_1_r01/5-1607_2.pdf(2020年8月27日確認)
Sprules, W. G. and Munawar, M. (1986) Plankton size spectra in relation to ecosystem productivity, size,

and perturbation. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 43(9), 1789-1794. <https://doi.org/10.1139/f86-222>
Tsuchiya, K., Tomioka, N., Sano, T., Kohzu, A., Komatsu, K. Imai, A., Hayakawa, K., Nagata, T., Okamoto, T. and Hirose, Y. (2020) Decrease in bacterial production over the past three decades in the North Basin of Lake Biwa, Japan. *Limnology*, 21, 87-96. <https://doi.org/10.1007/s10201-019-00582-2>
津田久美子・早川和秀・岡本高弘(2014)有機汚濁と環境基準-琵琶湖を例にして-. 用水と廃水, 56(3), 59-72.
山本民次・花里孝幸(2015)海と湖の貧栄養化問題: 水清ければ魚棲まず. 地人書館, 東京



早川 和秀/Kazuhide HAYAKAWA

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター総合解析部門 部門長兼総括研究員。名古屋大学大学院 理学研究科大気水圏科学専攻修了, 博士(理学)。水圏の有機物動態や循環が専門。地球化学的アプローチによる海洋や湖沼の有機物動態に取り組んできた。現職場の配属から琵琶湖の水質管理の問題に従事。湖は社会を映す鏡であることを日々実感している。モンゴルや中国での湖沼水質の調査経験もあり, 大きな湖沼での水質形成に興味がある。



佐藤 祐一/Yuichi SATO

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。京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻修了, 博士(工学)。シミュレーションモデルを用いた環境動態解析(水質や生態系のシミュレーション)をメインとしつつ, 環境・社会調査, オペレーションズ・リサーチ, 市民参画による環境計画づくり, 多主体協働による環境保全・再生事業, ワークショップのファシリテーターなど, とにかく広く関わることで見えてくる「何か」を探して研究活動中。



岡本 高弘/Takahiro OKAMOTO

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター主任専門員。琵琶湖水質調査(測定, 分析, 解析)に従事。琵琶湖の有機物の測定やCODが減少しない要因等について調査, 解析を行ってきた。琵琶湖の水環境を対象に行われている調査・研究の成果が, 豊かな琵琶湖につながるよう, 現場での活用に取り組んでいる。1963年生まれ。



永田 貴丸/Takamaru NAGATA

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター総合解析部門 主任研究員。信州大学大学院工学系研究科地球環境システム科学専攻を修了(理学博士)。プランクトン生態学が専門で, 枝角類(ミジンコ類)等の動物プランクトンに着目して湖沼の食物網構造や, 動物プランクトンが関わる物質フローを解析している。現在は, 琵琶湖を研究の対象水域にしている。過去には, 諏訪湖等の長野県内の湖沼の他に, 沿岸海洋でも研究を行ってきた。



後藤 直成/Naoshige GOTO

滋賀県立大学環境科学部。名古屋大学大学院理学研究科博士後期課程修了, 博士(理学)。水圏生態系における生元素動態を生物地球化学的・環境科学的に研究している。主には, 微細藻類(植物プランクトン, 底性微小藻類)の有機物生産とそれに関わる生元素の動態について研究を行ってきた。最近では, 温暖化が湖沼生態系に及ぼす影響に関しても研究を進めている。



富岡 典子/Noriko TOMIOKA

国立研究開発法人 国立環境研究所 地域環境研究センター 主任研究員。千葉大学大学院 園芸学研究科中退, 博士(農学)。アオコ原因生物 *Microcystis aeruginosa* の生理及び動態を中心に研究に取り組んできた。霞ヶ浦を中心に, タイ国, ラオス, カンボジアのダム・湖沼のシアノバクテリアの動態の研究にも従事。今回の共同研究により初めて琵琶湖の微生物生産の研究に従事した。



中野 伸一/Shin-ichi NAKANO

水域生態系中の微生物学的諸プロセスに注目し, 微生物ループ(細菌と原生動物との食物連鎖)の構造と機能及び植物プランクトンの生態について, 研究を行っている。主な研究対象水域は琵琶湖などの湖沼であるが, その他にも沿岸海洋や河川においても研究を行ってきた。また, 富栄養化湖沼でアオコ問題を引き起こすシアノバクテリアの生態学的研究も進めてきた。最近では, 湖沼のベントスの生態についても研究を進めている。