

【5-1607】琵琶湖における有機物収支の把握に関する研究 (2016～2018 74,390 千円)

研究代表者 早川 和秀 (滋賀県琵琶湖環境科学研究センター)

1. 研究実施体制

- (1) 環境因子と湖内生産量の関係整理および湖内生産量の明示化の検討
(滋賀県琵琶湖環境科学研究センター)
- (2) 植物プランクトンの一次生産量の実測と環境因子との関係解析 (滋賀県立大学)
- (3) 細菌生産の定量的解析 (国立研究開発法人国立環境研究所)
- (4) メタゲノミクスによる細菌と原生生物の群集解析 (京都大学)
- (5) 動物プランクトンの生産量評価に関する検討
(滋賀県琵琶湖環境科学研究センター)

2. 研究開発目的

本研究では、琵琶湖における一次生産、細菌生産、動物プランクトンの生産について、野外の観測と室内実験を実施して有機物収支を把握して、水域内の食物連鎖にかかる物質循環の特性や問題点を明らかにすることを目的とした。また、このような有機炭素フローの把握を行うことで、湖沼環境の現状に合わせた的確かつ効率的な水質管理や生態系管理が実現できるよう、湖の生産性の測定手法や管理指標の検討を行った。

サブテーマ1 (以下サブ1と省略) では、微生物食物連鎖の起点である有機物について、有機物の微生物利用性の点で不明確となっていることが多いことから、微生物による有機物の生分解性の条件や微生物利用性の有機物のモニタリング指標、COD と有機炭素の関係を見直すことを目的とした。さらに、利用困難な有機物である難分解性有機物の細菌による生成についても検討した。サブ2では生食食物連鎖の起点である植物プランクトンの一次生産について、従来の手法よりも時空間的に高解像度の測定ができる光学的測定法を確立して、植物プランクトンの現存量、一次生産速度、種組成を明らかにすることを目的とした。さらにそれらと各環境因子 (水温、光量子量、栄養塩濃度など) の関係性を評価した。サブ3では、微生物食物連鎖の中心である細菌生産量を、安定同位体の指標を用いた新たな測定方法を導入して、実測条件の検討やデータの収集を行うことを目的とした。国内で実測例のほとんどなかった細菌生産量の測定を国内の湖沼へ初めて適用した。サブ4では目覚ましい発展が見られる生物の分子系統解析を用いて、細菌種と原生生物の群集解析を空間・季節的に詳細に調査することを目的とした。また、優占種の細菌と各原生生物の摂食関係を考察した。サブ5では、琵琶湖における動物プランクトンの成長・生産量を測定するとともに、微生物食物連鎖の高次捕食者への貢献を検討することを目的として、細菌や原生生物を餌とした動物プランクトンの生存率、成長量、生産量や摂食・捕食速度、比取込み速度を室内試験および野外試験より求めた。最後にサブ1にて、以上のデータから低次食物連鎖網における有機炭素バイオマスとフ

ローの収支をまとめて物質循環の特性を把握し、生態系保全に向けて対策すべき点を検討した。特に貧栄養化の影響により高次捕食者への餌が減少する懸念が考えられることから、流入負荷の増減がもたらす影響については食物連鎖モデルを構築して解析した。

3. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

生態系保全を考慮した水質管理施策を実現するために必要となる、確度の高い一次生産や細菌生産などの測定手法の確立と実測、および細菌を出発点とする微生物食物連鎖の生産に対する貢献を明らかにするため、琵琶湖における低次生態系の生産量や有機物収支の把握を行った。その結果、以下の成果を得た。

◇一次生産では、パルス変調式クロロフィル励起蛍光法などの光学的手法を組み合わせ、日間一次生産速度の測定法を確立し、季節変動や気象イベントに応答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、 ^{15}N -デオキシアデノシン法を用いた細菌生産の定量が確立し、これまでに現場での測定が困難であった細菌生産に関して、国内に類を見ない多地点、多頻度の細菌生産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。

◇細菌と原生生物の現存量と種・グループレベルでの群集組成をメタゲノミクス解析によって空間・季節的に詳細に明らかにして、新奇未培養細菌の一大系統群を含む琵琶湖の細菌群集の多様性の高さを見出した。特に世界的にも稀有であった湖沼の細菌系統の生態に関する情報のみならず、断片化した全 DNA の網羅的シーケンスによるゲノムの再構築により、細菌の生理・代謝特性の推定まで行った点は、従来の研究を国際的に凌駕する成果を得た。

◇動物プランクトンの毎月調査の結果、琵琶湖の動物プランクトンの現存量は、1980年代～1990年代と同程度の水準であることを確認した。細菌や原生生物の捕食による動物プランクトンの成長や生産を培養・野外実験から評価した結果、例外はあるものの、琵琶湖の動物プランクトンの生産性は、細菌や原生生物よりも植物プランクトンの捕食で高いことを見出した。

◇琵琶湖水中に含まれる難分解性の溶存有機物は微生物による生分解に対して促進を施しても耐性のあることが明らかとなった。有機物の生分解性の評価には、 BOD_{28} を用いることで精度よく評価できることを確認した。 COD は生分解時に起こる酸素消費量と等量でないことが示された。

◇D-アミノ酸バイオマーカーを用いた細菌由来 DOM の寄与度定量を、湖沼環境でも適

用可能なアプローチとして世界で初めて確立した。細菌由来の有機物指標となる D/L-アミノ酸の解析より難分解性溶存有機物として細菌由来と真核植物プランクトンなどの、少なくとも二種類の異なる生成源を明らかにした。

◇食物連鎖モデルを用いて、栄養塩流入負荷の増減がもたらす各生物種のバイオマスや健全性指標値への影響を解析した結果、流入負荷を増やしても魚類が増加しないか、あるいは魚食性魚のみが増加する可能性が示唆された。

◇各実測値にもとづく琵琶湖沖帯の有機炭素収支を概算すると、細菌炭素要求量は一次生産量の約 50%に相当していた。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。現在の琵琶湖にとっての望ましい食物連鎖の流れは、 $<20\ \mu\text{m}$ の小型の植物プランクトンから動物プランクトンを経て高次捕食者へ至るパスであると考えられ、今後の琵琶湖保全の施策の方向性が見出された。

（２）環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

◇湖沼水質保全特別措置法に基づく第 7 期琵琶湖に係る湖沼水質保全計画では、我々研究グループが提案していた生態系保全を視野に入れた有機炭素等による水質管理の重要性が認められ、生態系保全も視野に入れた TOC 等による水質管理手法の検討を位置づけるとともに、従来の COD による水質目標の提示に加えて TOC による水質目標が提示された。

◇滋賀県庁で水産課を中心に立ち上げられた「アユの不漁原因解明に係る検討会」において、アユ不漁のその原因解明と対策の協議に、研究で得た動物プランクトンの密度、現存量、生産量に関わるデータの一部を情報提供した。検討会では、関係部局より提出された資料をもとにアユの不漁原因の絞り込みが行われ、滋賀県議会環境・農水常任委員会に報告された。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

◇有機炭素による低次生態系のバイオマスとフローの記載により、低次生態系の生産実態の把握が可視化された。今後、湖岸造成、河床耕耘、魚類の水田生育事業などの水域生態系や水産資源の保全施策が展開される中において、水質汚濁とのトレードオフや新たな生態系の変化につながらないよう、取組を総合的な視点から成果を測る指標として、上記成果を基にした有機炭素ベースによる環境評価の活用が考えられる。

◇本研究プロジェクトの中間報告では、生態系保全を視野に入れた水質管理を検討する科学的な情報蓄積のため、公共用水域の水質モニタリングにおいて、現状の COD に併用して有機炭素（TOC）の計測を行うことを政策提案した。この提案は、島根県や埼玉県などいくつかの自治体で関心をもたれており、今後、有機炭素の計測の利用が見込ま

れる。

◇海域や湖沼における環境基準として設定されている COD については、水質を示す指標としての妥当性に疑問があるなどの問題があり、行政部局により科学的知見を網羅的に整理した上で取扱いを検討すべき課題がある。本研究の COD と TOC の関係整理は、湖沼や河川その他排水を網羅した情報となっていることから、課題検討での資料として活用が見込まれる。

◇植物プランクトンから動物プランクトン、および動物プランクトンからプランクトン食性魚への転換効率の向上が「水がきれいである」「魚が豊かである」環境のために重要であることが明らかになった。換言すれば、捕食者に食べられやすいプランクトンを増加させることが、生態系に配慮した水質管理の上で重要といえる。

◇養殖のりの品質改善や魚介類の増加を目的として、瀬戸内海などでは下水処理場からの栄養塩の供給などが実施されているが、琵琶湖における安易な栄養塩の添加は、水質は悪化するが魚類は増えないか、あるいは漁獲対象ではない魚種が増えるなど、望まない結果をもたらす可能性があることに留意する必要がある。

◇琵琶湖に係る湖沼水質保全計画の策定についての施策の土台となる一次生産及び細菌生産の貴重なデータを取得し、過去との比較から現状の琵琶湖の状況についての科学的認識が深まった。次期の第 8 期琵琶湖に係る湖沼水質保全計画に向けて、本研究の結果をもとに水質生態系モデルによる水質と生物生産に関する正確な予測を行うことができる。さらに、国立研究開発法人国立環境研究所琵琶湖分室の設立時に行われた研究として、国立環境研究所琵琶湖分室と滋賀県琵琶湖環境科学研究センターの共同研究の先鞭となった。

◇本研究の一次生産と植物プランクトンの光学的測定法は、高解像度で一次生産速度を測定でき、また、測定にかかるコストも低いため、今後の湖における植物プランクトン群集の現存量、群集構造、一次生産速度のモニタリングに活用できると期待される。一次生産量は水域の健全性を考える上でも重要な要素である。今後、水質管理と水産資源管理のそれぞれの部局と連携を強化して活用方法について検討を進めることが必要である。

◇また、本研究結果で得られた気象イベントに対する一次生産速度と植物プランクトン群集構造解析の結果は、大型緑藻の *Staurastrum dorsidentiferum* と *Micrasterias hardyi* の増殖特性と環境因子の関係を明示した。大型緑藻の増大は、プランクトン食魚の餌環境や湖底の酸素消費へ影響を及ぼす可能性があり、それらの状態を危惧する琵琶湖環境の保全・再生にとって重要な知見となった。今後、大型緑藻の制御に向けた栄養塩管理に方策を検討すべきである。

◇我が国の多くの湖沼では COD が環境基準を超えており、その低減のための早急な対策が求められている。COD の大きな部分は DOM によって占められているため、COD の低減のためには微生物による DOM 低減効率を高める方策が求められる。DOM の低減にかか

る科学的知見には、細菌による生分解だけでなく、捕食や排泄といった微生物食物網も関与した機構の理解が必要である。本研究は、湖沼の微生物食物網を解明する手立てを示した。

◇動物プランクトンは、湖沼のプランクトン食魚の餌資源であり、その変動は植物プランクトンの発生状況だけでなく、移入種の出現や水温上昇等によって変わりうる。それゆえ、プランクトン食魚を生態系資源として保全をめざす湖沼では、動物プランクトンの現存量、生産量、摂食・捕食量の情報取得やモニタリングは重要である。本研究の成果は、1990 年代以降、不足していた動物プランクトンの情報として貴重であり、今後、上記湖沼での参考資料としての活用が期待される。

4. 委員の指摘及び提言概要

琵琶湖における生態系保全をはかりながら水質保全計画を策定する行政ニーズにこたえるために、有機物収支を明らかにしようとした研究であり、新たな研究成果も生まれている。

しかし、湖での炭素循環は非常に複雑で様々な要因が関与しており、それらの解明に至ったとはいえ、また得られた有機炭素収支がどの程度の信頼性があるのかについての議論が欲しかった。琵琶湖の生態系と水質保全計画を論じるためには、外部からの有機物負荷、魚類生産に関して、検討を加えるべきではなかったか。

5. 評点

総合評点：B