生態系保全につながる物質循環のあり方に関する研究

佐藤祐一・早川和秀・永田貴丸・尾原禎幸・廣瀬佳則[1]・七里将一・岡本高弘・山口保彦・酒井陽一郎

1. 目的

琵琶湖では流入負荷の削減等により水質（透明度、TN、TP 等）は改善する一方で、漁獲量が減少したり、水草が大量繁茂するなど、新たな問題が顕在化している。この要因として、流域スケールでの物質循環の様相が大きく変化し、植物プランクトンから動物プランクトン、魚介類につながる物質循環が滞ってきたことが指摘されている。すなわち、流入負荷を抑制して湖内の物質量を削減するだけではなく、魚介類等につながる物質循環を円滑にして、良好な水質と魚介類の資源量の改善の両立を図ることが求められている。しかしながら、湖内の一次生産や二次生産、微生物食物連鎖といった物質循環に大きな影響を与える可能性のある因子についての現状把握が不十分であった。

そこで本研究では、湖内の物質循環の状況を詳細な調査により把握し、モデルを用いて魚介類資源量との関連について解析することで、生態系保全の観点から望ましい湖内物質循環のあり方を検討することを目的とする。具体的には、生食食物連鎖および微生物食物連鎖を介した有機物量を把握するとともに、食物網の構造や魚類の餌資源を解析して、湖内における物質循環の状況を明らかにする。また、魚類等を考慮できる水物質循環モデルを構築し、琵琶湖の健全性を評価する手法を構築する（図 1）。

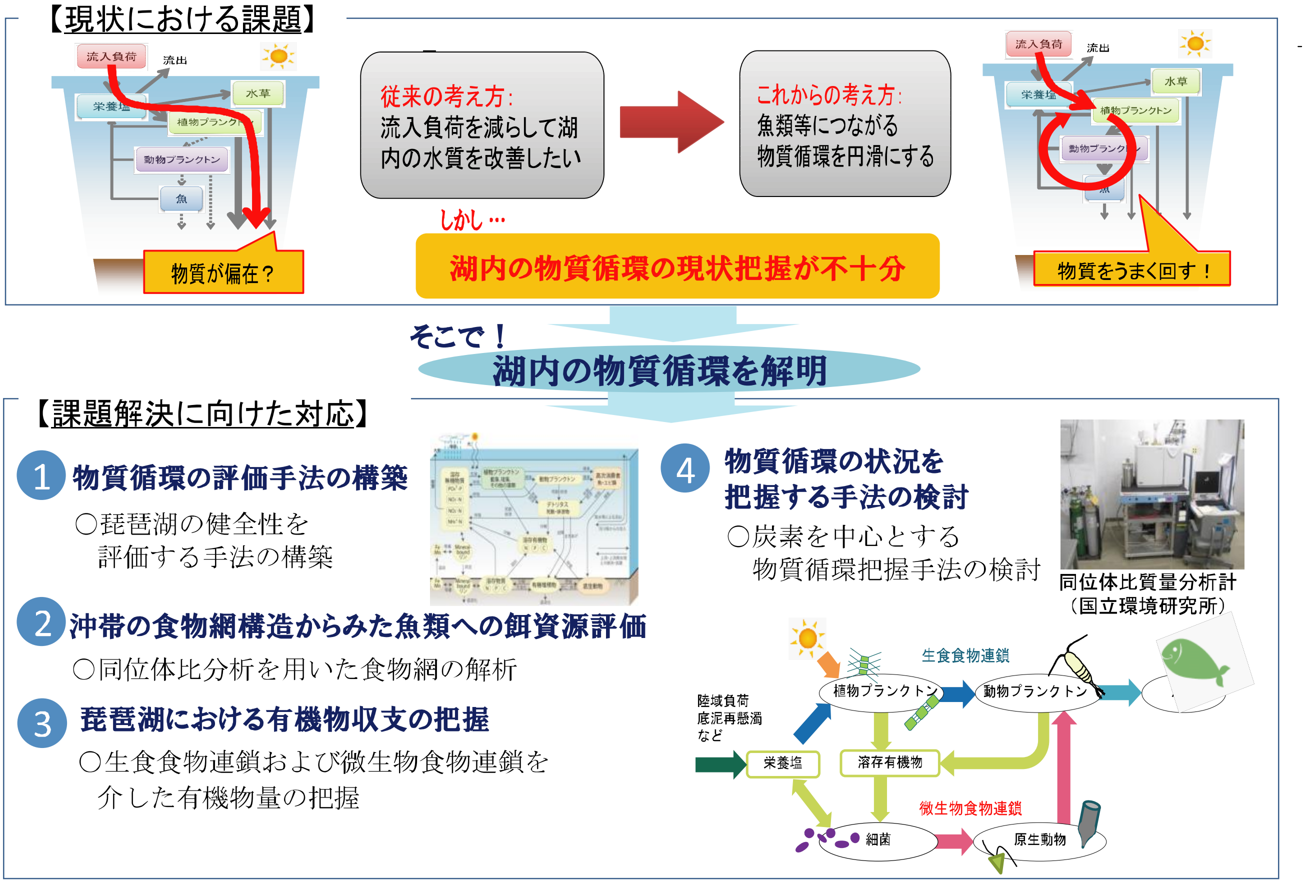

図 1　研究の全体像

[1]現：滋賀県循環社会推進課

2. 研究内容と結果

【サブテーマ①：物質循環評価手法の構築に関する研究】

物質循環の「円滑さ」から琵琶湖の健全性を評価する指標を提案するとともに、流入負荷の増減がもたらす健全性指標値への影響を食物連鎖モデルを用いて解析した。

琵琶湖における物質循環の円滑さを表す指標の1つとして、本研究では「転換効率（＝二次生産／一次生産等)」を取り上げた。これは、各栄養段階をみて、植物によって生産された有機物が高次の消費者に多く受け渡され、生物の連鎖の中で効率よく利用されていることが、物質循環の円滑さにつながると考えられるからである。

この指標値を向上させる方策について検討するため、琵琶湖を対象として簡易な食物連鎖モデルを構築した。具体的には、琵琶湖全体を 1 ボックスの完全混合槽と仮定し、植物プランクトン、動物プランクトン、魚類（プランクトン食性魚・魚食性魚）の生産や捕食、呼吸、分解、沈降等を表現するモデルとした。モンテカルロシミュレーションにより 100 パターンのパラメータセットを持つモデルを構築し、流入負荷量（生物利用可能リンを想定）を 0.5～3.0 倍（10 段階）にしたときに各指標値がどのように変化するか感度解析を行った。

転換効率に関する結果の例を図 2 に示す。植物プランクトンから動物プランクトンへの転換効率は、流入負荷量が 1.8 倍を超えると減少し、それ以内の増減ではあまり変わらない傾向が見られた。一方で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は、流入負荷量が現況もしくは 0.9 倍あたりのところに極大値が見られるというように、流入負荷量増減の影響は栄養段階によって異なると考えられた。またこれらの結果は、モデル構造によっても大きく変化することがわかった。

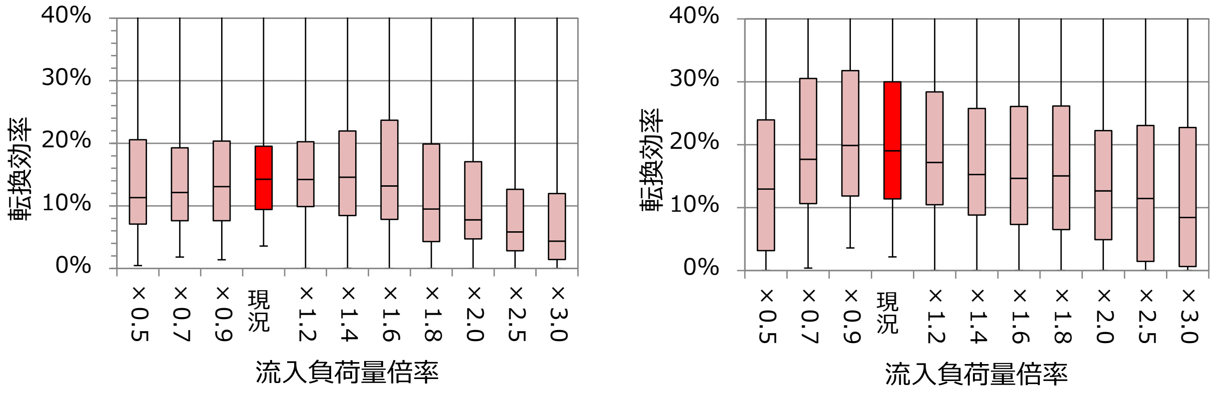

図 2　食物連鎖モデルによる転換効率の計算結果例（左：植物プランクトン→動物プランクトン、右：動物プランクトン→プランクトン食性魚）

【サブテーマ②：沖帯の食物網構造からみた魚類への餌資源評価】

アユやホンモロコといった在来魚への餌環境の影響評価に向け、沖帯の食物網構造を在来魚と餌生物の窒素・炭素安定同位体比から解析した。在来魚は琵琶湖北湖で 2017 年 7 月と 10 月に採取し、餌生物は同年 6 月、7 月、9 月、10 月に北湖の南比良沖中央（12B）付近で採取した。在来魚の採取は、堅田漁業協同組合にご協力いただいた。採取した全生物の窒素・炭素安定同位体比を測定し、測定値から Mixing モデルで在来魚の餌への各餌生物の寄与を求めた。

7 月の同位体比の測定値から、アユの餌への各動物プランクトン種の寄与を求めた結果、カブトミジ

ンコ、ヤマトヒゲナガケンミジンコ、プリカリア、ケンミジンコの寄与が同程度であった（図 3)。アユをサイズ別に分けても同様の結果が得られた。この結果から、アユは、カブトミジンコ、ヤマトヒゲナガケンミジンコ、プリカリア、ケンミジンコを同程度の割合で餌にしている可能性が示された。

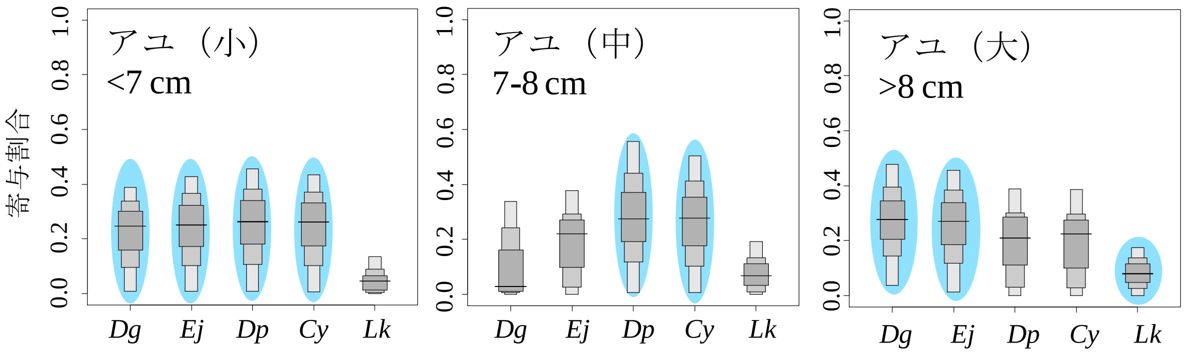

図 3 アユの餌への各動物プランクトン種の寄与割合（0-1)．線は平均値，箱は 50，75，95%ベイズ信用区間．*Dg*=カブトミジンコ，*Ej*=ヤマトヒゲナガケンミジンコ，*Dp*=プリカリア，*Cy*=ケンミジンコ，*Lk*=ノロ． は有意性のある関係（95%信用 区間に 0 を含まない）．

【サブテーマ③：琵琶湖における有機物収支の把握に関する研究】

環境省環境総合研究推進費の助成を受け、平成 28 年度より琵琶湖における有機物収支の把握を行ってきた。最新の技術を用いて植物プランクトンや細菌の生産量等を実測することを第一の目的として、さらに各生物の生産量からみた関係性を考察した。

植物プランクトンの一次生産量は、共同研究者である滋賀県立大学グループによって、琵琶湖北湖多景島沖にてクロロフィル蛍光計および光量子計の連続測定とパルス変調式クロロフィル励起蛍光計の測定から算出された（後藤ら 2018，陸水学会)。細菌生産は、国立環境研究所グループによって、琵琶湖北湖の南比良沖にて 15N-dA 法により実施された（土屋ら 2018，水環境学会)。

図４ プランクトン調査風景

2017 年 8 月～2018 年 2 月の彦根沖の一次生産の測定では、平均 0.61 gC/m^2/day、期間中、最大 2.34 gC/m^2/day の範囲を変動した。過去の報告値では 1981 年以降 0.16～2.20 gC/m^2/day（最小～最大）の範囲にあり（琵琶湖ハンドブック三訂版)、本研究の測定値は、さほど減少していなかった。

一方、細菌生産（呼吸を含む）は、2016-2018 年の南比良沖（0-20m 深まで）の測定で平均 0.52 gC/m^2/day であった。細菌生産量は、細菌の呼吸量まで含めると、一次生産とほぼ同等に近い量であることが明らかとなった。

過去の研究でも琵琶湖における細菌生産量は一次生産に比べて少なくないことが指摘されてきた（Nagata et al. 1987，Gurung et al. 2002）が、陸域からの有機物の供給を考慮しても、算出された細菌炭素要求量は過大であると考えられる。そのため、細菌生産には光合成生産物や陸域から供給される有機物の利用だけでなく、細菌による有機物の再利用などの別の機構を考える

必要がある。

【サブテーマ④：物質循環の状況把握手法に関する研究】

湖内の炭素や栄養塩等の物質循環の状況把握のためのモニタリング調査と、炭素安定同位体比測定による有機物フローの把握手法の検討を行ってきた。有機物には、生物によって分解されやすい易分解性有機物と分解されにくい難分解性有機物がある。本研究では、季節・深度別の湖水有機物の長期生分解試験を行い、炭素安定同位体比の時系列変化を追跡することで、易分解性有機物と難分解性有機物それぞれの値を推測し、有機物フロー解析（特に有機物の起源推定）に応用することを目的としている。有機物は、懸濁態有機炭素（POC）と溶存態有機炭素（DOC）に分けて分析した。

DOC の炭素安定同位体比（δ^{13}C）は、夏季試料について約 100 日間の分解過程において低下する傾向が見られた（表層で-25.3‰→-26.7‰：図 5）。つまり夏季の琵琶湖表層に蓄積する易分解性 DOC は、難分解性 DOC に比べて高い炭素安定同位体比の値を持つと考えられる。これは、現場の DOC の炭素安定同位体比の深度分布・季節変動と整合的であり、DOC の起源推定に有用な情報となる。

一方で、表層 POC の炭素安定同位体比は、約 100 日間の分解過程において高くなっていく試料が多かった。つまり DOC とは逆に、湖表層では難分解性 POC が易分解性 POC よりも高い炭素安定同位体比の値を持つと考えられる。また大型緑藻ミクラステリアス・ハーディが増加していた 2016 年 11 月において、今津沖中央表層の POC の炭素安定同位体比は生分解試験前が-19.1‰、生分解試験後が-17.5‰と、通常の藻類組成だった時期の試料と比べて特に高い値を示した。難分解性 POC の起源として、大型緑藻が重要である可能性が考えられる。

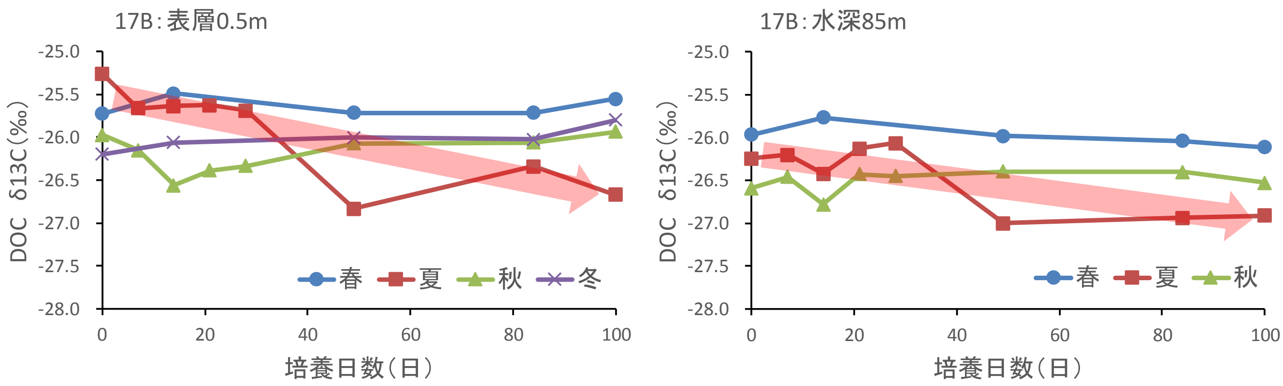

図 5　今津沖中央(17B)における季節ごとの生分解試験培養日数と DOC の炭素安定同位体比の推移(左：表層 0.5m、右：水深 85m)

3. まとめ

琵琶湖における物質循環の状況を把握するため、生食食物連鎖および微生物食物連鎖を介した有機物量の実測を行うとともに、アユの餌資源の採取や分析、生分解過程における炭素安定同位体比の調査等を行った。あわせて、食物連鎖モデルや水物質循環モデルを用いて、物質循環の現況把握や健全性評価指標の検討などを行った。これらの結果は、行政部局が設置する懇話会や検討会等で報告を行うとともに、2017 年度の政府提案にて TOC の環境基準設定の要望を提出するにあたり必要な知見の提供を行った。

今後、各種生産量等のデータを蓄積するとともに、窒素安定同位体比やアミノ酸の組成・鏡像異性体

比などを用いた新たな有機物起源推定の方法を検討し、琵琶湖における物質循環の円滑化に向けた指標の検討や評価を進めていく予定である。