

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・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）。

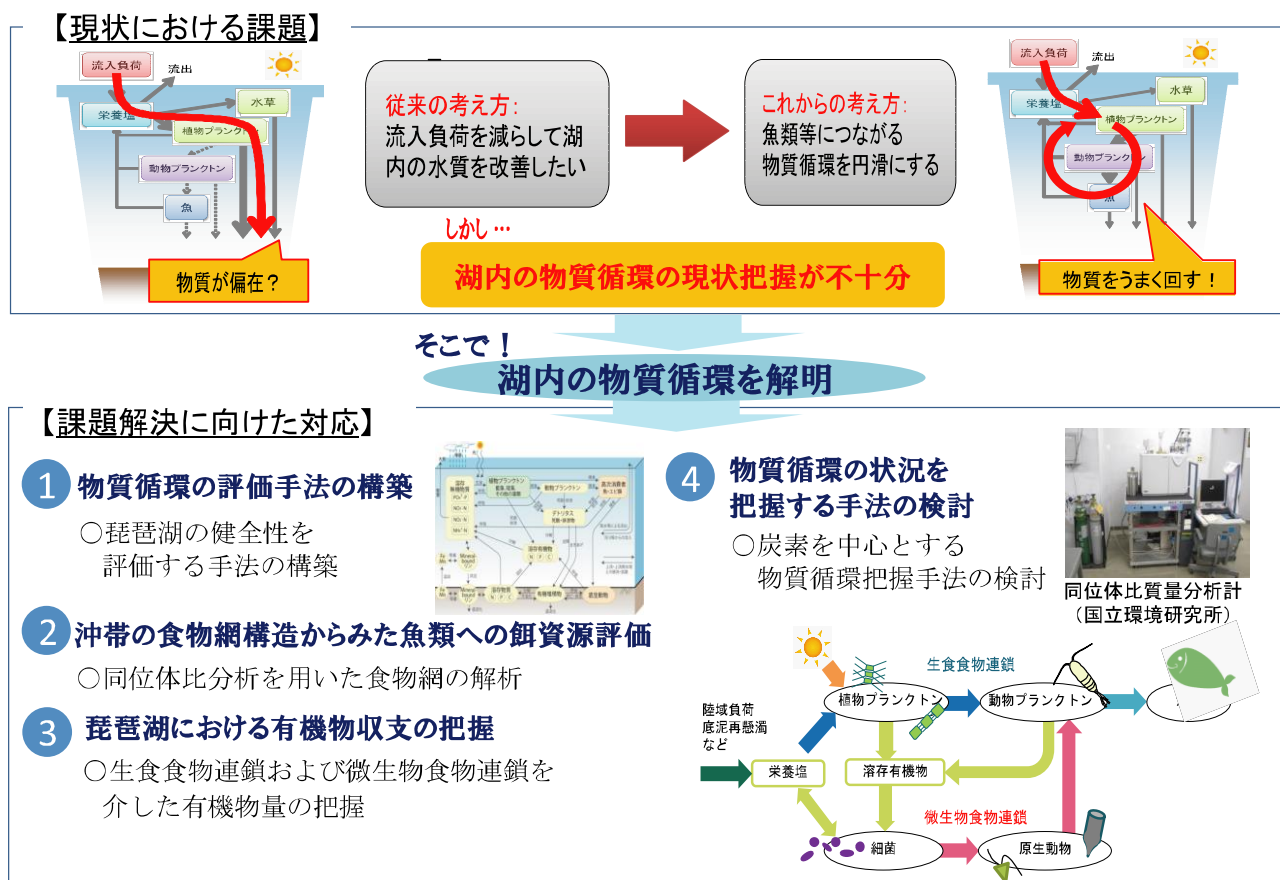


図 1 研究の全体像

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】

湖内における物質循環の「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、琵琶湖を対象とした食物連鎖モデルを構築し、「水のきれいさ」と「魚の豊かさ」が両立するために必要な要件について検討を行った。

物質循環の円滑さ、および琵琶湖の健全性を、以下の3つの指標で捉える。

①「過不足がない」：“呼吸効率”（＝群集総呼吸量／一次生産量）

評価対象の受水域における生態系全体をみて、分解されずに残される有機物がほとんど存在せず、生産から呼吸を引いたものが生態系内の生体量の蓄積に対応している。

②「滞りがない」：“転換効率”（＝二次生産／一次生産等）

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。

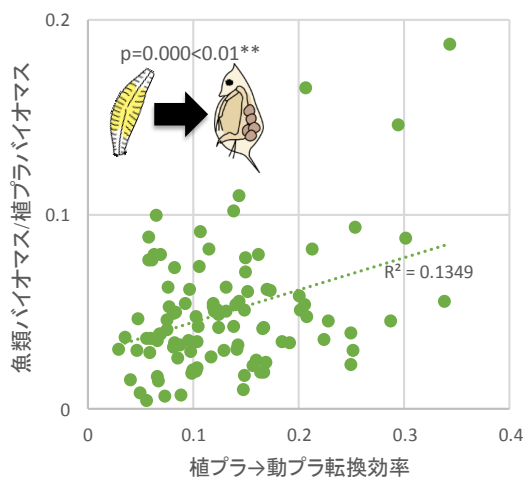
③「偏りがない」：“生物バランス”（＝魚類バイオマス／植物プランクトンバイオマス）

物質循環が円滑になった結果として、水質が一定レベルに抑えられ、かつ魚介類の資源量が保全されるというように、各栄養段階のバイオマスが「偏りなく」存在する。

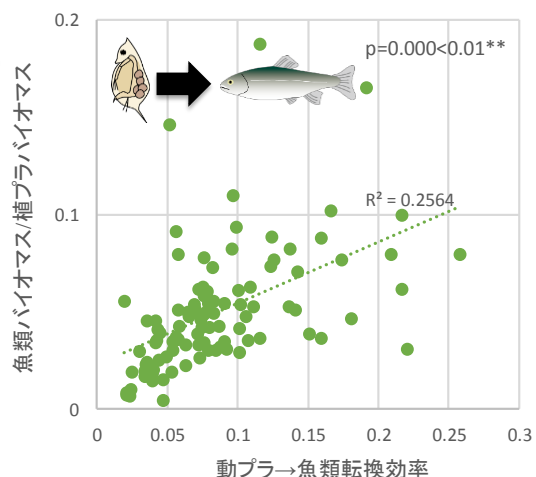
上記3つの指標値を向上させる方策について検討するため、琵琶湖を対象として簡易な食物連鎖モデルを構築した。各モデルパラメータの値をランダムに設定してモデルを10年間Runし、10年目の栄養塩濃度および植物プランクトン・動物プランクトン・魚類バイオマスの平均値が観測値の範囲内にあれば、そのモデルを採用することとした。モンテカルロ法により100パターンのパラメータセットが得られるまで繰り返した。採用されたモデルについて、指標間の相関関係を解析した。

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魚類への転換効率の双方が、生物バランスと正の有意な相関がみられた（図2）。このことから、動物プランクトンや魚類に食べられやすい餌生物が存在することが、「水がきれいで魚が多い」環境のために重要であると考えられた。

植プラ→動プラ転換効率 × 生物バランス



動プラ→魚類転換効率 × 生物バランス



水がきれいで魚が多い

図2 転換効率と生物バランスの関係

【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】

琵琶湖でのアユとホンモロコの餌環境を把握するため、北湖で採取したアユとホンモロコの成魚と餌生物（プランクトン等）の炭素・窒素安定同位体比を分析した。アユとホンモロコの成魚は、2018 年 7 月と 10 月にそれぞれ採取し、プランクトン等は同年 5 月から 1 か月、または 2 カ月間隔で採取した。アユとホンモロコは、体サイズごとに分けて分析した（アユ：大=>8 cm, 中=7-8 cm, 小=<7 cm；ホンモロコ：大=>10 cm, 中=7-9 cm, 小=<7 cm）。安定同位体比の転換速度から（魚=約 3 か月、プランクトン=1 か月以内）、アユ成魚については、5~7 月の餌生物の平均データとの関係性を調べた。一方、餌生物の取得データの関係から、ホンモロコ成魚については、9 月の餌生物のデータとの関係性をみた。

アユ成魚と餌生物の安定同位体比をプロットし、一般的な栄養段階ごとの安定同位体比の濃縮係数（炭素 $1.0 \pm 1.0\text{‰}$ 、窒素 $3.3 \pm 1.0\text{‰}$ ）から判断すると、アユ成魚は主にミジンコ類（カプトミジンコとプリカリヤ）を捕食し、餌のミジンコ類は<45 μm の有機物（<20 μm と 20-45 μm の植物プランクトン等）を摂食していたと考えられた（図 3）。これは、アユ成魚が、<45 μm の植物プランクトン等の生産者から始まる食物連鎖に入っていたことを示す。一方、ホンモロコ成魚については、安定同位体比のプロットと濃縮係数から判断すると、餌生物を特定できなかったが、ホンモロコも<45 μm の植物プランクトン等から始まる食物連鎖に入っていたと考えられた（図 4）。近年、琵琶湖では、ミクラステリアスやスタウラトルム等の大型緑藻が時々大量発生する。本サブテーマの結果から、その様な大型緑藻は、アユやホンモロコを支える食物連鎖には入っていないと考えられた。

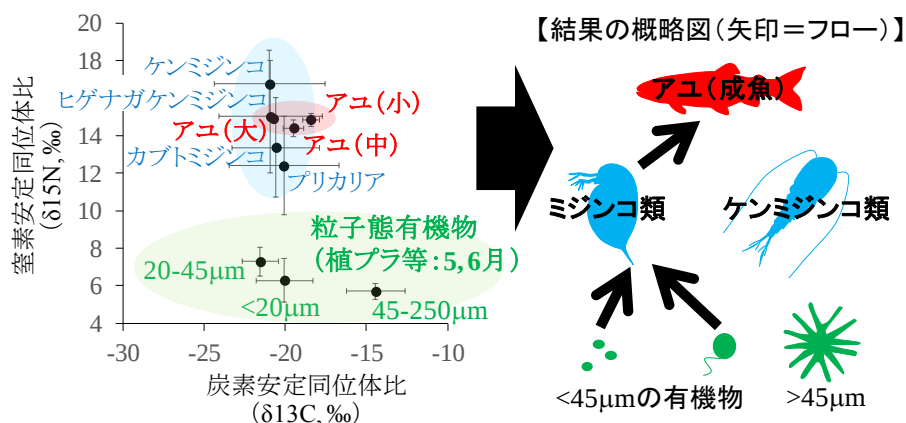


図 3 7 月のアユ成魚と 5-7 月の餌生物（平均値）の安定同位体比の関係（左図）と結果の概略図（右図）。

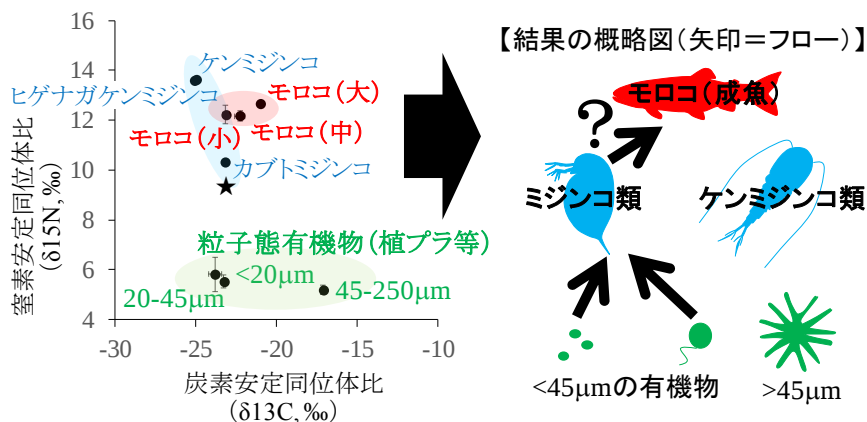


図 4 10 月のホンモロコ成魚と 9 月の餌生物の安定同位体比の関係（左図）と結果の概略図（右図）。左図内の★は一般的な安定同位体比の濃縮係数（本文参照）から推定されるホンモロコの餌の値。

【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】

良好な水質と魚介類の資源量の改善の両立を図るために、現状の食物連鎖（物質循環）を把握しなければならない。生態系の生産源である一次生産と細菌生産を把握した上で、植物プランクトンから魚類へ至る生食食物連鎖、さらには貧栄養化が進む湖で生産性を上げるには、細菌を起点とする微生物食物連鎖の上位捕食者への寄与も考慮する必要がある。湖沼のモニタリングでは、栄養塩やプランクトンなど現存量は測定されているが、生産フラックスは実測されていない。そこで本研究は、湖内物質循環の基礎である有機物の生産構造を把握する手法の確立・評価を行った。これには、平成 28 年度より環境省環境総合研究推進費の助成を受け、外部研究機関と連携して最新の測定技術を導入して調査を行った。

その結果、生食食物連鎖では、植物プランクトンの現存量や生産量には 1990 年代に比べて明瞭な減少はなかった。動物プランクトンの現存量も過去に比較して、同じ程度で維持されていた。植物プランクトンの生産に比して、動物プランクトンの生産性が高く、捕食者にとっては重要と考えられた。一方で、細菌を起点とする微生物食物連鎖は、栄養塩濃度が低下する環境で生産性を維持する仕組みとして期待されたが、細菌生産は植物プランクトンの生産の約 50% に相当していたものの、高次の捕食者への供給源として貢献が小さいことが判明した（図 5）。細菌炭素要求量は陸域からの有機物の供給を考慮しても過大であると考えられ、溶存有機物中のアミノ酸鏡像体の研究などを進めた結果、細菌生産は湖内の有機物を循環利用していると推定された。したがって、琵琶湖における高次捕食者への物質伝達には、微生物食物連鎖より生食食物連鎖が主体であり、捕食者に食べられやすい植物プランクトンや動物プランクトンを増やすことが重要と考えられた。

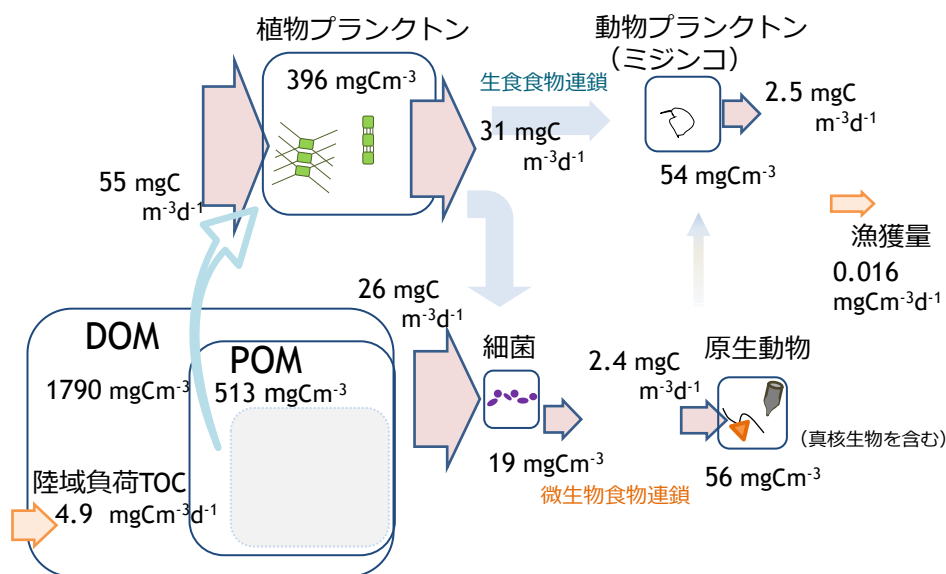


図 5 琵琶湖における有機物収支の概況

【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、琵琶湖の湖水有機物の長期生分解実験による有機物フローの把握手法の検討を行った。モニタリング調査については、毎月実施される水質調査から得られたデータが、物質循環の状況を把握するための基礎的なデータとして利用されている。また、長期生分解試験では、有機物の化学的指標の時系列変化を追跡することで、特に有機物の起源や分解性の指標としての有用性を検討している。平成 29 年度までは、分析項目として特に炭素

安定同位体比に着目し、生分解試験での経過ごとに分析を行い、安定同位体比の指標化の検討を行った。

平成 30 年度はアミノ酸鏡像異性体（D-アミノ酸）、分子サイズ分布など、新たな分析手法を導入し、並行して分析を進めた。2018 年 8 月に琵琶湖北湖の今津沖中央（17B）地点の水深 5m で採取した湖水を用いて、暗所 20℃で長期生分解実験を行い、205 日目までの途中経過試料を採取した。試料は、粒子状有機物（POM）と溶存有機物（DOM）に分けて分析した。

POM に関しては、細菌由来有機物の指標となる D-アミノ酸を分析したところ、アラニンとグルタミン酸のみ 2-4%程度の D-アミノ酸が検出され、POM への細菌細胞からの有意な寄与が示された。ただし、生分解を経ても値の変化は小さく、有機物分解性の指標としての有用性は、さらに検討が必要となる。

DOM の炭素安定同位体比を分析したところ、生分解を経ても値の変化が小さく、今回の実験では、易分解性有機物と難分解性有機物の同位体比に差が小さかったことが考えられる。一方で、DOM の分子サイズ分布を分析したところ、生分解によって大きく変化が見られた（図 6）。生分解前は、高分子 DOM（左側：分子量が 100kDa 程度）と低分子 DOM（右側：分子量が数百～数千 Da 程度）の二つのピークに分かれた。高分子 DOM ピークは 101 日経過時点ではほぼ消失した一方で、低分子 DOM は 205 日経過しても生分解実験開始前の有機炭素濃度の 78%程度が残存していた。低分子 DOM は蛍光特性も変化していた。炭素ベースの生分解速度を計算したところ、高分子 DOM は低分子 DOM よりも約 20 倍速かった。これらの結果により、特に分子サイズ分布が DOM 分解性の有用な指標となる可能性が示されたため、アミノ酸組成等の他の指標との比較も含めて、検討を今後進める。

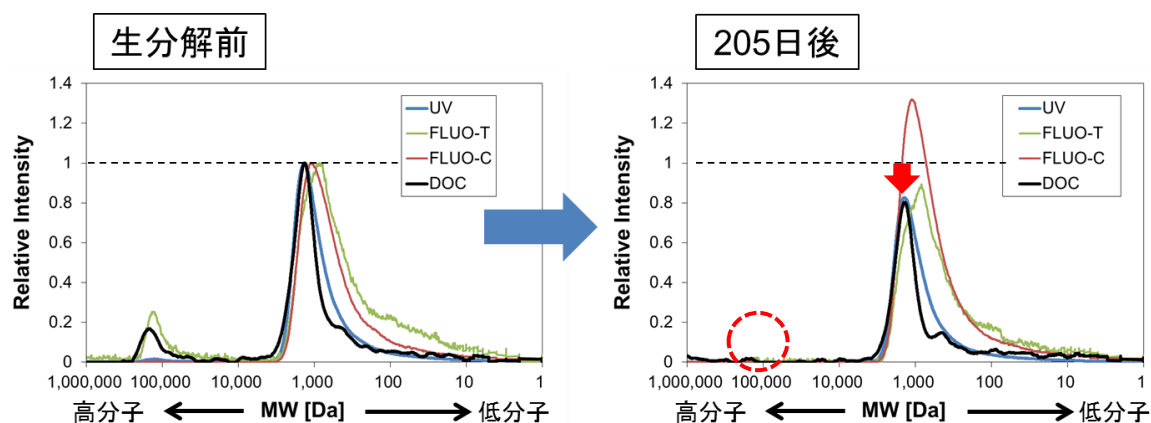


図 6 琵琶湖湖水の溶存有機物の分子サイズ分布の 205 日間の生分解に伴う変化

※ 黒線（DOC）＝有機炭素濃度、赤線（FLUO-C）＝腐植様蛍光、緑線（FLUO-T）＝タンパク様蛍光、青線（UV）＝紫外線吸光度。横軸は分子量（Da）で、縦軸は生分解前の低分子 DOM ピークの値（破線）を 1 とした相対値。

3. まとめ

琵琶湖における物質循環はリンの制限下、生食食物連鎖を基礎とする効率的な内部循環によって支えられており、特に植物プランクトンから動物プランクトンへの物質の転換効率が魚類の生産へ大きく影響することが明らかになった。動物プランクトンは、主に中・小型の植物プランクトンを選択的に摂食しており、そのサイズの植物プランクトンが豊富な状況であれば転換効率が良いと考えられた。生態系保全を視野に入れた新たな水質管理の指標を検討するため、これまで実施してきた安定同位体比の測定のほか、アミノ酸鏡像異性体、分子サイズ分布など、新たな分析手法を導入して分析を進めた。