

湖沼の円滑な物質循環につながる要件と指標に関する研究

佐藤祐一・早川和秀・永田貴丸・山口保彦・中村光穂・岡本高弘・藤原直樹

1. 目的

琵琶湖では流入負荷の削減により、水質が1970～80年代と比較して改善する一方で、漁獲量の減少や水草の大量繁茂、大型緑藻の増加などの新たな課題が顕在化している。これらの事象は湖内の物質循環と大きく関連しており、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。そのため、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（＝琵琶湖が「健全」な姿になること）が求められている。

第5期中期計画において、生食食物連鎖および微生物食物連鎖を介した有機物量について調査した結果、琵琶湖における生態系物質循環の特長は、内部生産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水質保全と豊かな在来生物の保全の両立に大きく影響することが明らかとなった。そこで本研究では、動物プランクトンに捕食されやすい中小植物プランクトンの増殖に着眼し、湖内における有機物および栄養塩の円滑な循環につながる要件を明らかにするとともに、物質循環の円滑さを評価する指標を検討することを目的とする（図1）。

背景



- 琵琶湖では流入負荷の削減等により長期的には水質は改善
 - 一方で、漁獲量の減少や、水草の大量繁茂、大型緑藻の増加など、新たな課題が顕在化
- 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要因では？



魚介類等につながる物質循環を円滑にして（＝琵琶湖が「健全」な姿になる）、**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必要**

目的

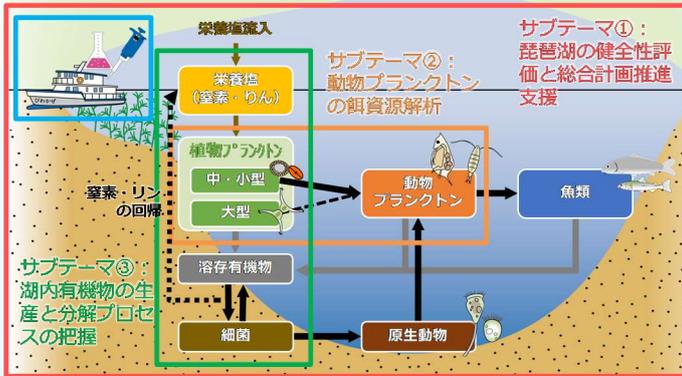
琵琶湖の物質循環は生食食物連鎖が中心で、円滑な物質循環のためには、動物プランクトンに捕食されやすい中小植物プランクトンの存在が重要（第5期研究成果）

中小植物プランクトンの増殖に着眼し、湖内における有機物および栄養塩の円滑な循環につながる要件を明らかにするとともに、物質循環の円滑さを評価する指標を検討

方法

サブテーマ④：物質循環の状況把握とその指標の検討

栄養塩の流入・循環の状況と、植物プランクトンのサイズや生産に関する調査を実施。動物プランクトンの摂餌実験の結果も踏まえ、統合モデルを構築して解析。



アウトカム

「健全な琵琶湖」の実現に向けた提案

- 中小植物プランクトン増殖要件
- 湖沼計画への反映
- 物質循環の円滑さを表す指標

中小植物プランクトンの増殖を通じた円滑な物質循環につながる施策の方向性提案

図1 研究の背景および目的

2. 研究内容と結果

【サブテーマ① 琵琶湖の健全性評価と総合計画推進支援】

本サブテーマでは、琵琶湖流域水物質循環モデル（以下「モデル」と呼ぶ。）を用いて、第8期湖沼水質保全計画にかかる水質の現況再現と将来予測を行うとともに、大型植物プランクトンのモデル化方法について検討を行った。

第8期湖沼計画では、生態系保全も視野に入れた水質管理手法を検討するため、各種水質指標のみならず、魚介類等を含む物質循環や全層循環の状況などについて、長期の連続計算と再現ができるよう改良を行ったモデルを用いて、現況再現と将来予測を行った。具体的には、2020年度における社会や環境の状況について整理し、2018～2020年度の再現計算を行うとともに、5年後（2025年度）までの対策等のシナリオについてデータを整理し、2020年度を現況とした2025年度までの水質予測計算を実施した。

まず、2018・2019年度末は観測史上初めて全層循環未完了となったことから、モデルによる再現性を確認した。底層付近の水温およびDOについて、2018年度末はともに良好な再現結果を得られたが、2019年度末はほぼ全層循環完了に近い計算結果となり、特にDOで実態と乖離が見られた。湖底における酸素消費速度の違いや風による攪乱の影響なども含め、今後検証が必要である。表層のTOCについては季節的な変化を概ね再現できたが、北湖における大型緑藻や南湖における群体形成藍藻の一時的な増殖については再現ができなかった（図2）。2025年度の将来予測については、流入負荷の変化がわずかであったことから、ほぼ全ての水域・水質について現況との変化は見られなかった。

物質循環の円滑さに影響すると考えられる大型植物プランクトンについて、モデルにおける植物プランクトン種の構成を3種から4種に増加させ、新たに大型緑藻のコンパートメントを追加した。大型緑藻について、光合成活性が高い、強行ストレスに強い、N:C比・P:C比が小さい等の特性を考慮して計算したところ、その濃度レベルや季節変化を一定再現することが可能となった。

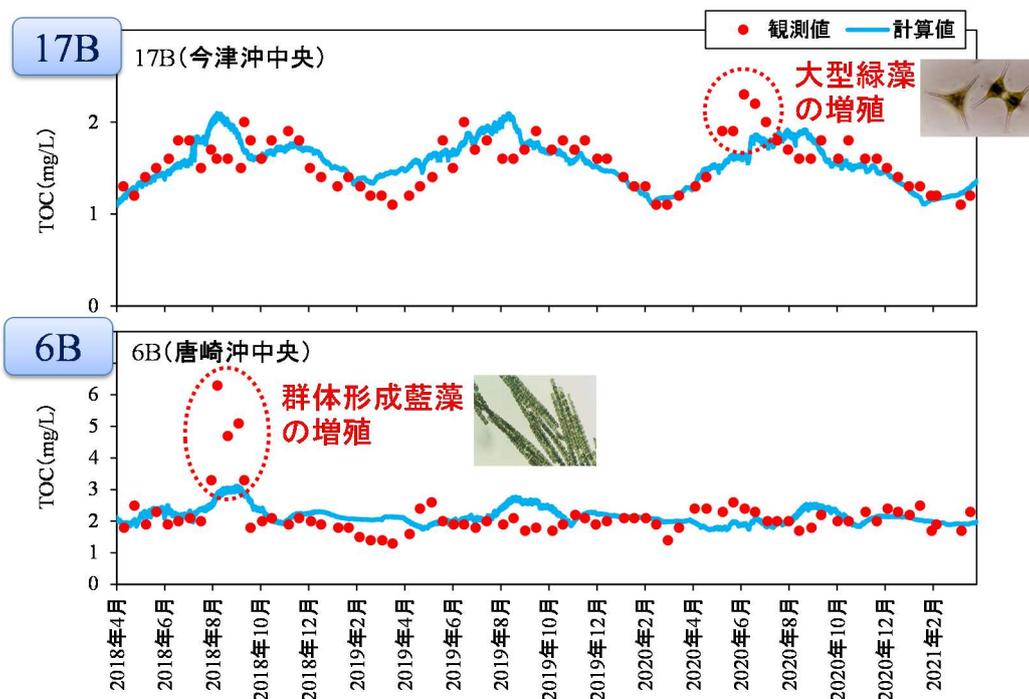


図2 2018～2020年度における表層TOCの再現計算結果

【サブテーマ②動物プランクトンの餌資源解析】

本サブテーマでは、琵琶湖の動物プランクトンの生産量と、その餌環境との関係を把握するため、有機物や栄養塩等の流入負荷の状況が異なる沖帯（南比良沖中央，水深約 60 m）と沿岸帯（長命寺沖，水深約 7 m）において、優占種のヤマトヒゲナガケンミジンコ（成体とコペポディド期）の個体数、体長、抱卵数（成体のみ）と、餌となるセストン（植物プランクトンや微生物）を調べた。ヤマトヒゲナガケンミジンコの体長は、Kawabata and Urabe (1998)の体長と乾燥重量との関係式で乾燥重量に換算し、その乾燥重量を、Urabe and Watanabe (1990)による乾燥重量あたりの炭素量の比（0.45）から炭素量へと換算した。求めた個体あたりの平均炭素量と個体数から現存量を求めた。そして、ヤマトヒゲナガケンミジンコの個体数、乾燥重量、現存量、抱卵数から、Adalsteinsson (1979)の下式を用いて生産量を推定した。

$$P = B_t - B_{t-1} + (N_{t-1} + (E_{t-1} + E_t) / 2 \times I / D - N_t) \times (W_{t-1} + W_t) / 2$$

ここで、P は生産量、B は現存量、N は個体数、E は抱卵数、W は平均の個体乾燥重量、I は調査日間隔、D はコペポディド期までの発育に掛かる日数、t は調査日を示す。D は、Liu et al. (2014)に従って算出した。

動物プランクトンの餌となる < 45 μm（可食サイズ）のセストン量は、沿岸帯の方が沖帯より常に高かった（図 3）。この結果から、動物プランクトンの餌は、沿岸の方が豊富であることが分かった。一方、ヤマトヒゲナガケンミジンコの実産量は、沖帯より沿岸帯の方で、夏から秋に高くなった（図 3）。これは、餌が豊富な沿岸帯において、水温上昇によって生産量が高まった結果と考えられる。本サブテーマの結果から、沿岸帯は、動物プランクトンを主な餌とするアユ等の餌場として、重要な役割を担っていることが示唆された。

<参考文献>

Adalsteinsson, H. (1979), Oikos 32:162-194
 Kawabata, K. and J. Urabe (1998), Freshwater Biology 39:199-205
 Liu, X., D. Beyrend-Dur, G. Dur and S. Ban (2014), Limnology 15:85-97
 Urabe, J and Y. Watanabe (1990), Oecologia 82:362-368

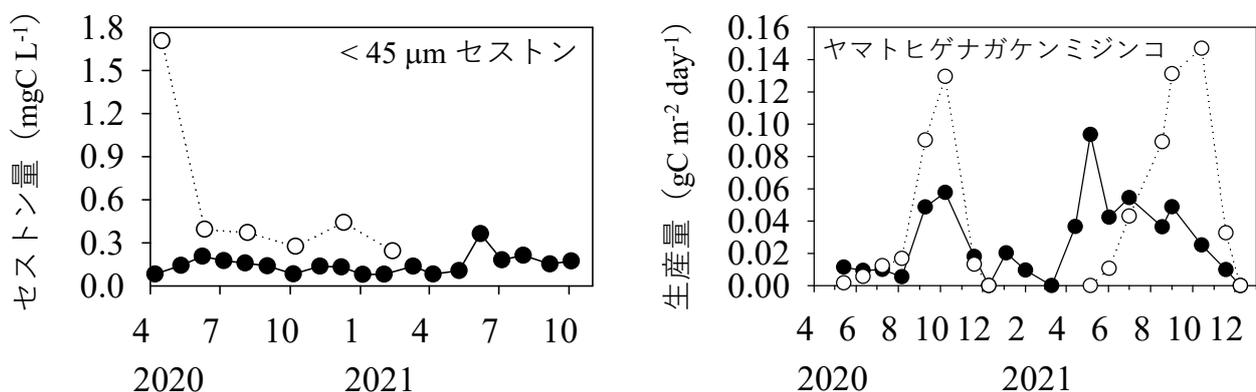


図 3 琵琶湖の沖帯（●）と沿岸帯（○）の表層における < 45 μm のセストン量（左図）と、沖帯 0～20m（●）と沿岸帯 0～6m（○）における優占種ヤマトヒゲナガケンミジンコの実産量の季節変化（右図）。沿岸帯のセストン量は、2021 年 2 月まで。

【サブテーマ③ 湖内有機物の生産と分解プロセスの把握】

本サブテーマでは、湖内の栄養塩の主要供給経路の一つである、溶存有機物（DOM）の分解プロセスの実態とそのメカニズムを明らかにするため、分子サイズ別の DOM 分画濃縮法の開発を進めた。DOM の炭素窒素リン比等の化学組成を分子サイズ別に明らかにするには、分析必要量に届くまでの DOM の濃縮技術が必須であり、開発できれば、長期生分解実験で明らかにした有機炭素ベースの分子サイズ別生分解速度の情報（昨年度報告書）と組み合わせることで、DOM の栄養塩生成ポテンシャル等の機能を詳細に評価可能になる。

まず、数十Lスケールの湖水から DOM を分画濃縮するための、独自の限外濾過システムを2台、設計・製作した（図4左）。安価な工業用スパイラル型の膜エレメント（膜面積 0.3 m²）を装着でき、精密濾過、限外濾過、ナノ濾過、逆浸透等の様々な種類の膜を使用できる設計とした。次に、1~2Lスケールの DOM 分画濃縮に用いる、平膜（膜面積 0.006 m²）を装着する限外濾過システムも2台、設計・製作した。どちらのスケールでも、膜洗浄工程、接液部素材等の検討により、膜の透過液と濃縮液の両方で十分に低い DOM ブランク（0.05 mgC/L 未満）を達成できた。

琵琶湖湖水を用いた DOM 分画濃縮の試験を実施し、高分子 DOM（重量平均分子量 100kDa 以上）と低分子 DOM（重量平均分子量 2kDa 程度）の二つの画分に分画する手法を検討した。サイズ排除クロマトグラフ-全有機炭素計（SEC-TOC）により DOM 分子サイズ分布を定量することで、分画濃縮した画分の分子サイズ、純度等を評価した。カットオフ分子量 30kDa の限外濾過膜を用いて、合計 550 倍の濃縮係数での濃縮の後、合計 80 倍の希釈倍率での超純水による脱塩を実施した工程により、高分子 DOM を高純度で濃縮回収できた（図4右）。低分子 DOM は、30kDa 限外濾過膜の透過液を酸性化した後に固相抽出することで、高純度かつ 60~70%程度の回収率で濃縮回収できた（図4右）。高分子と低分子 DOM の両者を高純度に濃縮回収可能な手法を開発できたことで、高分子と低分子 DOM の化学組成を直接分析できるようになった。今後、濃縮画分試料について様々な化学組成分析を実施するとともに、各 DOM 画分をより高回収率で濃縮回収するための手法も検討する。

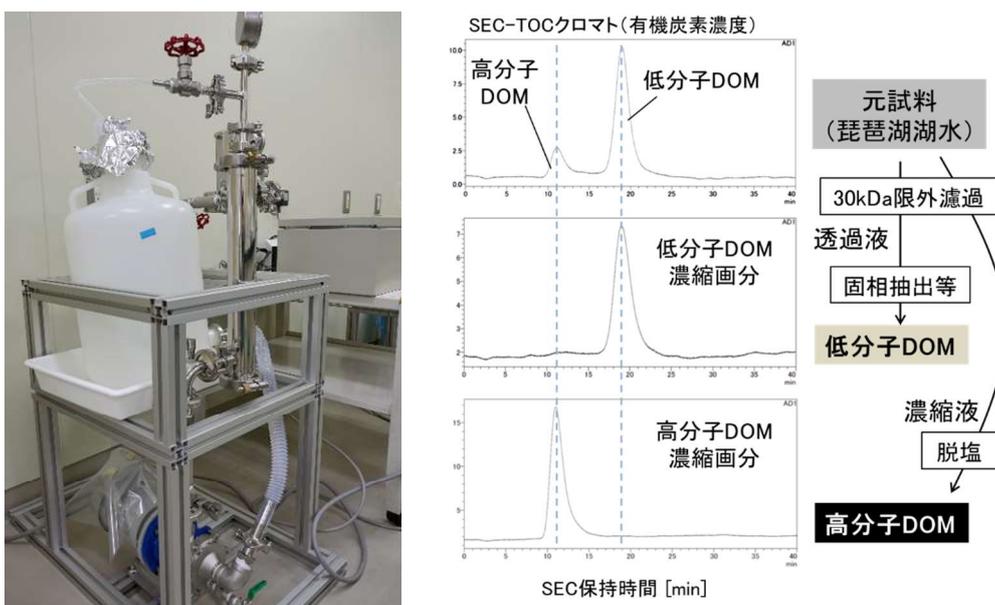


図4 開発した数十Lスケール用限外濾過システムの外観写真（左）
分子サイズ別に分画濃縮した DOM 画分の SEC-TOC クロマトグラム（右）

【サブテーマ④物質循環の状況把握とその指標の検討】

本サブテーマでは、湖水有機物の分解性指標の確立を目的として、南湖唐崎沖中央（6B）および北湖今津沖中央（17B）の2地点において、季節ごとに表層水（0.5m）および水深85mの底層水（17Bのみ）を採取し、400日以上長期生分解実験（20℃、暗所）を実施した。100日目（約5年ごとに当センターで実施している生分解試験と同じ日数）と、約400日目（本研究の最終採取日）の溶存有機炭素（DOC）濃度を比較すると、約400日目の方が平均で0.15 mgC/L 低くなっていた（図5）。一方で、100日目と約400日目のDOC濃度のばらつきは、ほぼ同程度（それぞれ±0.13, ±0.12 mgC/L : 2SD）であり、約400日目に一定の値に収束していく傾向はなかった。このため、分解日数を約400日まで伸ばしても、難分解性DOC濃度を一定と仮定することは難しいことが分かった。採取試料について、窒素リン分析、DOM三次元蛍光分析、SEC-TOCによるDOM分子サイズ分布分析を進めており、分解進行に伴うタンパク様蛍光強度の減少、腐植様蛍光強度の増加、高分子DOM/低分子DOM比の減少などのパターンが見られた。今後、こうしたDOM化学組成を有機物分解性指標として確立するためのデータ解析を進めていく。

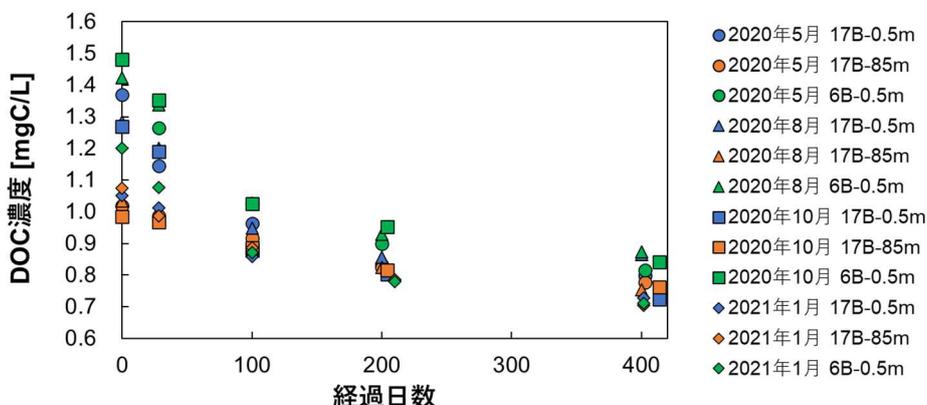


図5 季節別の長期生分解実験のDOC濃度の変化。各シンボルは、分解実験に用いた元の湖水試料の採取季節と場所を示す。

また、湖内の炭素や栄養塩等の状況を把握するため、モニタリング調査を始めた1979年度以降の17Bにおける成層期の深水層（40m以深）のデータから有機物無機化のC/N比を計算し経年変動を調べた（図6）。今後、この結果と生分解試験データのC/N比との比較、粒径別調査データ、気象との関係について解析を進めていく。

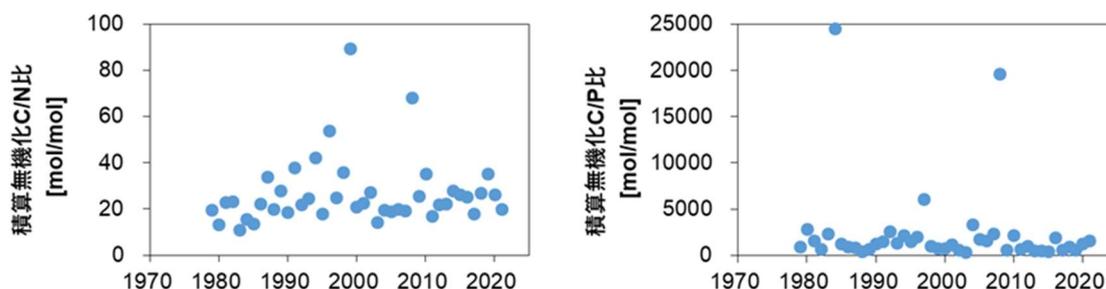


図6 17Bにおける成層期の深水層の経年変動。4~11月データによるC/N比、4~8月データによるC/P比を示す。

3. まとめ

第 8 期湖沼計画の策定に係る負荷量データの解析、および琵琶湖流域水物質循環モデルを用いた予測シミュレーションを実施し、計画に反映された。物質循環の円滑さの評価に向けて、モデルの全層循環の再現性を向上させるとともに、大型植物プランクトンを考慮できるようにモデルを改良した。動物プランクトンの餌となる $<45\ \mu\text{m}$ （可食サイズ）のセストン量は沿岸の方が豊富であり、また動物プランクトンの生産量は沖帯より沿岸帯の方で夏から秋に高くなったことから、沿岸帯はアユ等の餌場として重要な役割を担っていることが示唆された。分子サイズ別の DOM 分画濃縮法の開発を進め、DOM の栄養塩生成ポテンシャル等の機能評価にむけた準備を進めた。あわせて、生分解に伴う DOM 分子サイズ分布分析に基づく特性変化を踏まえて、DOM 化学組成を有機物分解性指標として確立するための検討を行った。次年度はこれらのデータを総合的に解析して、湖内における有機物および栄養塩の円滑な循環につながる要件を明らかにしていく予定である。