

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・七里将一・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）。

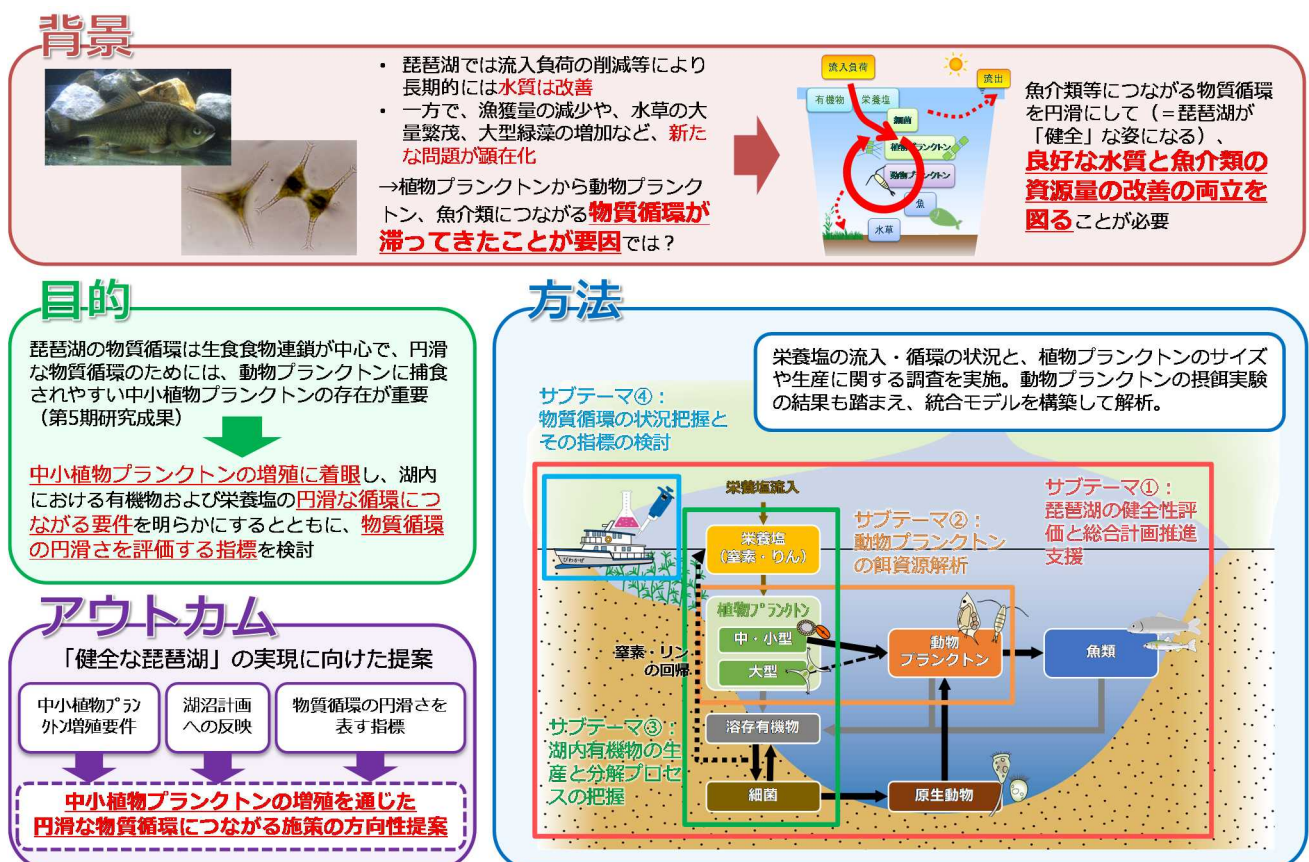


図 1 研究の背景および目的

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、湖内における物質の循環状況を把握するために、湖沼水質保全計画の水質予測等で活用してきた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、2000～2010年代の水量・水質等の再現を行うとともに、陸域からの流入負荷、および湖内の食物連鎖を通じた物質の移流量を推定した。

流入負荷については、下水道整備、排水規制、河川水質浄化事業、環境に配慮した農法の普及など多様な施策により減少してきたと考えられている。一方で近年は気候変動の影響などにより豪雨の頻度が高まり、降水量の増加傾向が見られている。また流入負荷量の算出に用いられる市街地や農地、森林といった面源由来負荷の原単位（単位面積あたり負荷量）も調査年次が古い等の課題がある。そこで、モデルにより年次ごとの気象条件等を考慮して流入負荷量の変遷を計算したところ、TOC、TN、TPのいずれにおいても、2000年代以降は流入負荷が減少する傾向は見られず、原単位を使って計算した結果とは乖離が見られた。点源負荷は減少してきたものの、それと同程度に面源負荷が増加してきたことが示唆された。

陸域・湖内の物質循環について、モデルを用いて有機物フラックスの年平均値（tC/year）を計算した結果を図2に示す。地表や湖底、湖面降水を通じて湖内に流入する有機炭素量は合計6,731 tである一方で、植物プランクトンによる一次生産量は148,500 tあり、湖内の有機物動態に与える湖内生産・分解等の影響が非常に大きいことが分かった。したがって、湖内の物質循環を把握する観点からは、陸域からの直接の有機物負荷よりも、湖内生産・分解に寄与する栄養塩の挙動が重要と考えられた。そこでリンについてもモデル計算により同様の収支を描いたところ、陸域から流入するリンの多くが懸濁無機態（PIP）であるため、植物プランクトンの一次生産で用いられる溶存無機態（DIP）の大部分は、湖内の有機物の分解等に伴い放出されるリンでまかなわれていると考えられた。

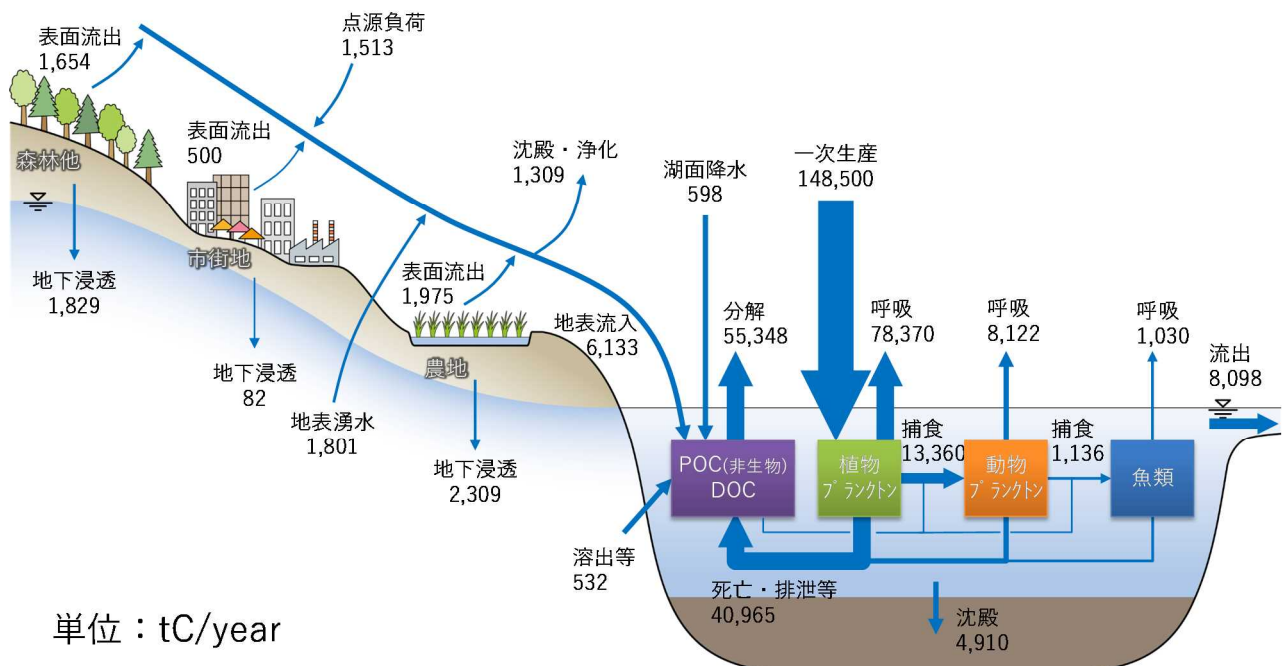


図2 琵琶湖流域の有機物（TOC）収支（2010～19年度平均）

【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量とその餌環境との関係を把握するため、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、動物プランクトンと餌となるセストン（植物プランクトン（以後、藻類）や微生物）のモニタリングを行った。また、摂食による餌から動物プランクトンへの物質の流れ（物質フロー）を把握するため、沖帯と沿岸帯における動物プランクトンの同化速度（生産量に相当）を評価する実験を行った。

動物プランクトンの餌となる $<30\ \mu\text{m}$ のセストンは、どの季節でも沖帯より沿岸帯の方が多かった（図 3 左）。一方、動物プランクトンの密度は、夏に沿岸帯の方で高くなった（図 3 右）。これは、水温が高くなるにつれ、沖帯より餌が多い沿岸帯の方で、動物プランクトンの生産量が顕著に高まったためと考えられる。

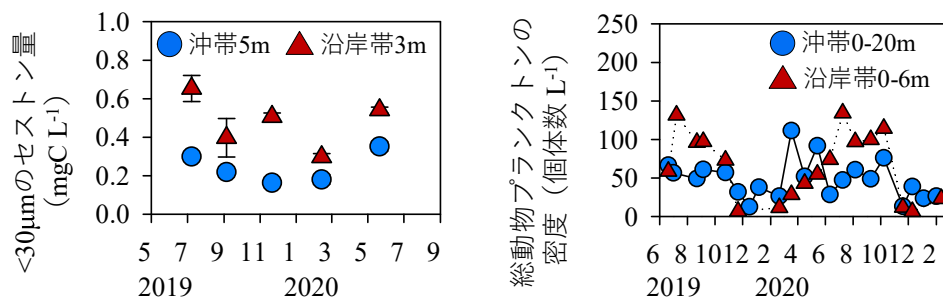


図 3 沖帯と沿岸帯におけるセストン量（左図）と、動物プランクトンの密度の季節変化（右図）

沖帯と沿岸帯の動物プランクトンは、夏の沿岸帯を除き、微生物よりも藻類の方を多く同化しており、その同化速度は、沿岸帯の方が高い傾向があった（図 4）。これは、物質フローとしては、藻類から動物プランクトンへ繋がる生食食物連鎖が主であったことを示す。一方、夏の沿岸帯では、動物プランクトンは微生物の方を多く同化しており、その同化速度は、実験期間中で最も高かった。このことから、夏の沿岸帯では、微生物から動物プランクトンへの物質フロー（微生物食物連鎖）が卓越しており、その様な時期には、動物プランクトンの生産量が非常に高まる可能性が示された。

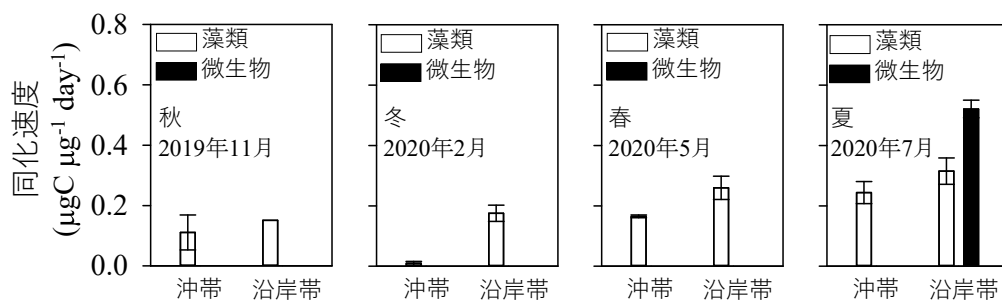


図 4 各季節における $<45\ \mu\text{m}$ の藻類と微生物に対する動物プランクトンの同化速度（クリタ水・環境科学振興財団研究成果報告書 19B047 より転載）。平均 $\pm$ SD。同化速度は、沖帯の 5 m 層と沿岸帯の 3 m 層の動物プランクトン、藻類、微生物を用いた ^{13}C トレーサー実験で求めた。

謝辞：本サブテーマの一部は、クリタ水・環境科学振興財団の国内研究助成の支援により実施しました。ここに記して深く謝意を表します。

【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プロセスの一つである、溶存有機物（DOM）の分解プロセスに着目して、湖水（琵琶湖北湖今津沖中央 17B 地点：水深 89m）・河川水（野洲川下流）を用いた長期生分解実験から、DOM の分子サイズ別の分解速度の分布を調べた。地点・季節・温度条件によって、高分子の準易分解性溶存有機炭素（SLDOC）の分解速度は大きく変動したが、低分子の SLDOC の分解速度は概ね一定だった（図 5）。SLDOC 分解速度と DOM 中タンパク様蛍光強度の間に相関関係が見られたため、DOM の化学組成の違いが分解速度を規定している可能性が考えられる。

さらに、2020 年循環期深水層の琵琶湖湖水を用いた分解実験では、分解実験試料の経時変化と現場湖水の月別変遷を比較した（図 6）。20℃条件の実験では、急速に高分子 DOC 濃度が減少した。深水層現場水温に近い 9℃条件の実験でも、分解実験試料の高分子 DOC 濃度は、9～11 月には深水層現場湖水よりも低い値になった。分解実験試料と現場湖水の違いの原因は、湖表層から供給される沈降粒子を元にした、深水層現場湖水における高分子 DOC 生産プロセスにあると考えられる。つまり、琵琶湖の深水層では、従来の想定よりも高速な DOM の生産・分解が起きていて、物質循環を駆動している可能性がある。

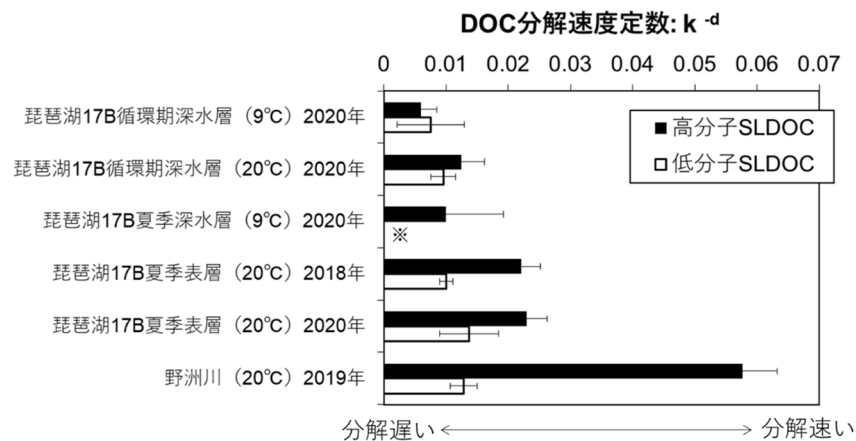


図 5：長期生分解実験の結果から計算した、分子サイズ別の準易分解性溶存有機炭素（SLDOC）の分解速度定数（黒＝高分子、白＝低分子）。琵琶湖 17B 夏季深水層（9℃）2020 年の低分子 SLDOC（※）のみ、分解速度定数を十分な精度では算出できなかった。

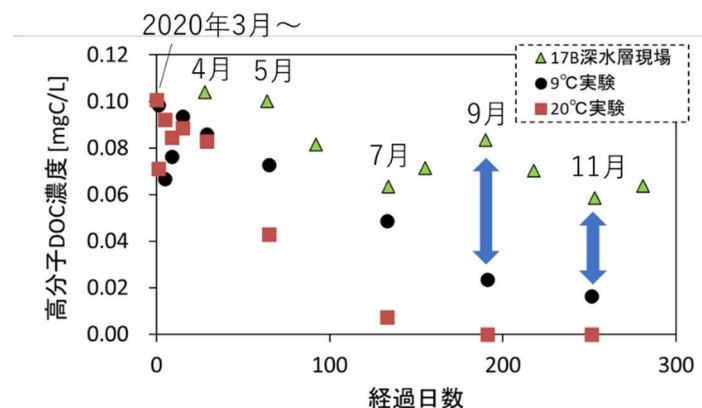


図 6：2020 年循環期深水層の琵琶湖湖水を用いた長期生分解実験（黒丸：暗所 9℃、赤四角：暗所 20℃）における高分子 DOC 濃度の経時変動と、同地点深水層で月別に採取した現場湖水中の高分子 DOC 濃度の変遷（緑三角）。

【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、湖内有機物の分解特性の状況を把握するため、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、湖内有機物の難・易分解性比率を把握するための100日生分解試験（20℃、暗所）を実施した。この試験は湖沼水質保全計画に反映するため、約5年ごとに実施しており、今回の結果を2009年度、2015年度と比較した。

生分解試験の結果から溶存態有機物（DOC）を難・易分解性に分けて図7に示す。難分解性DOCは場所や季節によらずほぼ一定であり、表層と底層で大きな差は認められなかった。また表層水の易分解性DOCは季節によらず北湖より南湖の方が高い傾向であった。これらの傾向は2009年度、2015年度に実施した結果と同様であった。一方、17Bの表層と底層で比較した場合、冬季だけが表層より底層の方が易分解性DOCを多く含む結果となり、これまでの結果とは異なる傾向が認められた。



図7：琵琶湖におけるDOCの難・易分解性比率の季節変化（採水期間：2009.2～11、2015.5～2016.2、2020.5～2021.1。2009年度の底層水は水深90m）

さらに、春季と夏季について粒子態有機物（POC）を難・易分解性に分けて追加した結果を図8に示す。明確な経年的傾向は見られなかったが、難分解性有機物（難分解性POC＋難分解性DOC）は、場所によらず1.0mg/L前後であった。また、表層は底層よりもTOC残存率が低くなる傾向が認められた。

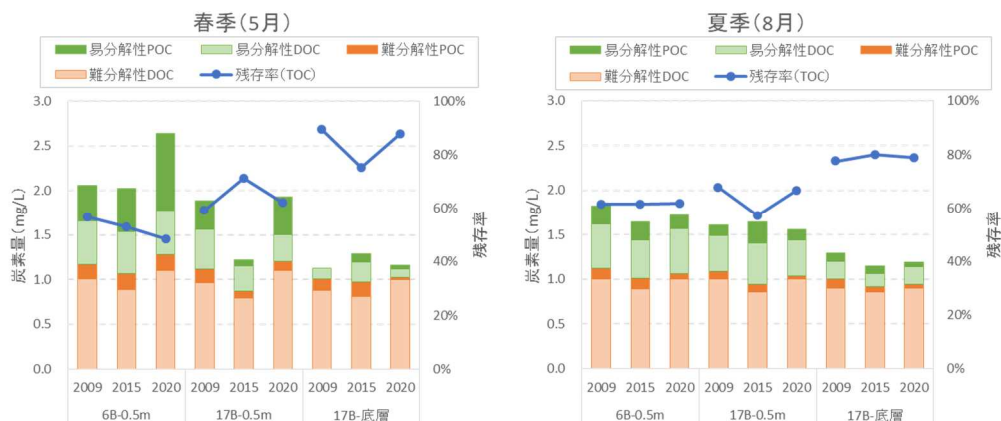


図8：琵琶湖における有機物の難易分解性比率の季節変化（春季、夏季）

3. まとめ

2020 年度の研究成果をまとめたものを図 9 に示す。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に着目すると、沖帯よりも沿岸帯の方が多く、またその結果、動物プランクトンの現存量や生産量も沿岸帯の方が大きかった。モデル解析からは、植物プランクトンが利用する溶存無機リンは湖内の有機物分解に由来することが分かったが、その主なソースである高分子（準易分解性）溶存有機物の分解速度は場所や季節により異なっていた。

以上のように個別の要素について明らかになったことはあるが、気象条件のほか、有機物の分解や栄養塩の循環と、サイズ別植物プランクトンの増殖等の関係は明らかになっていない。今後は、年度・季節・場所ごとの物質循環や生物種変遷を詳細に調査、解析していく予定である。

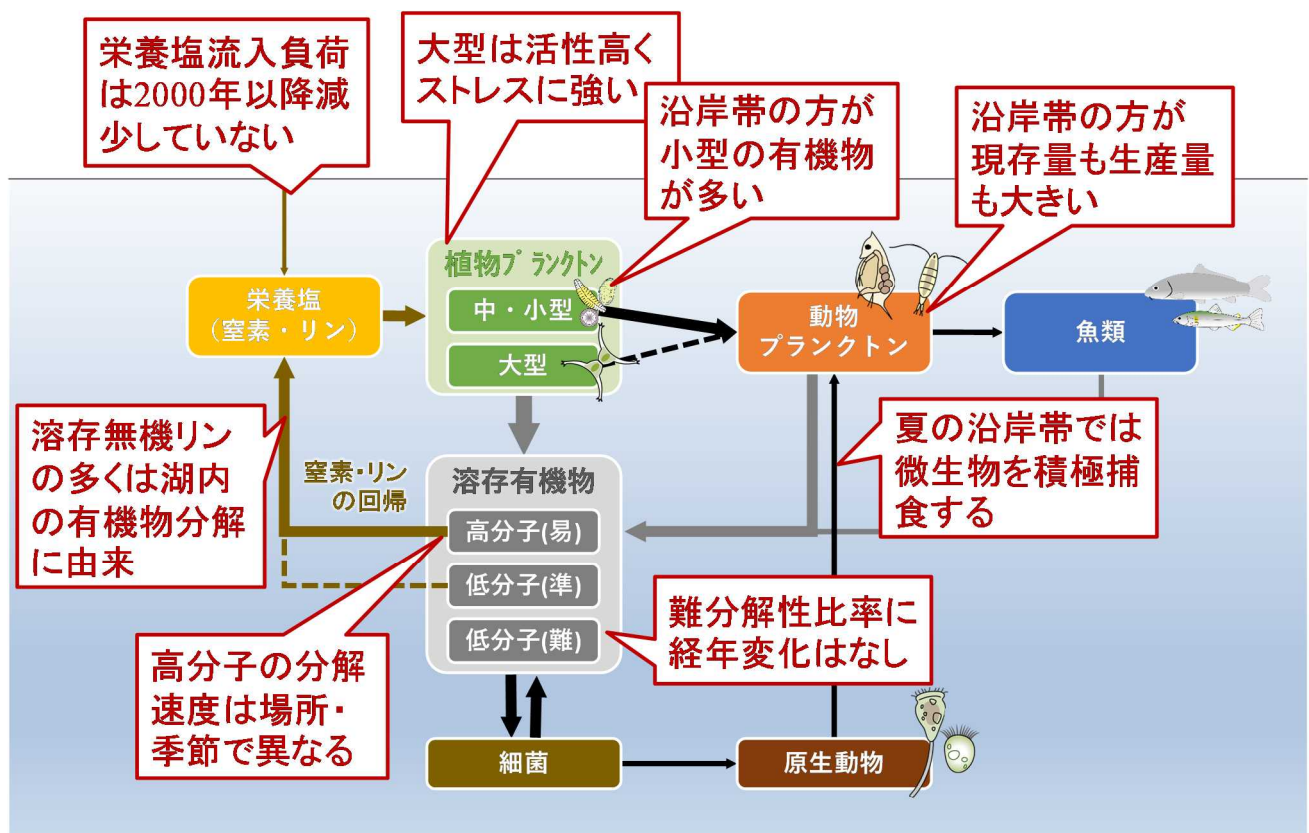


図 9 2020 年度の研究成果のまとめ