

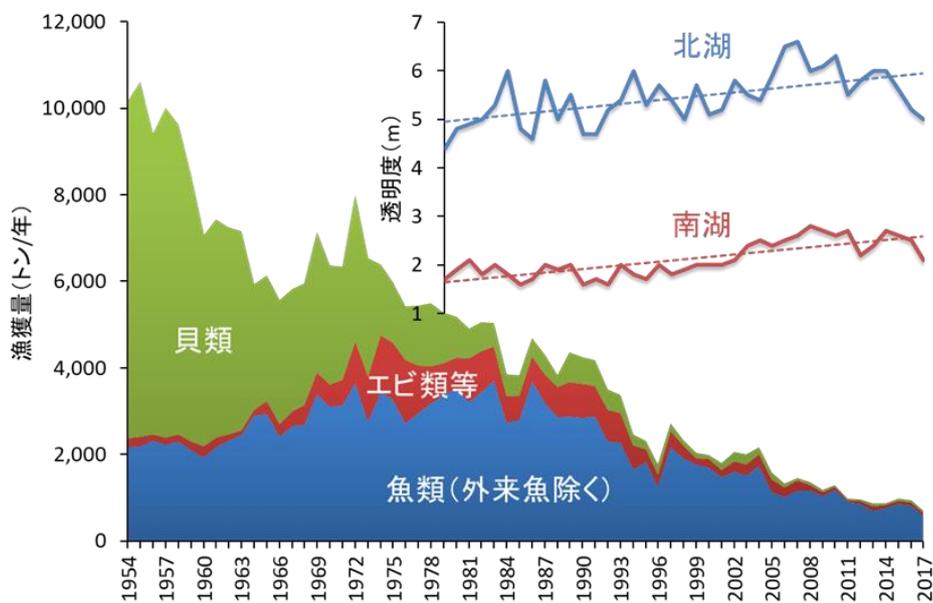
在来魚介類のにぎわい復活に向けた研究（第2期）

研究期間 平成29年度～令和元年度

1. はじめに

琵琶湖流域では、1977年(昭和52年)の大規模な赤潮の発生以来、「せっけん運動」を始めとする県民活動や各種施策の実施等により、水質は改善傾向にある。しかし、一方で、水草の大量繁茂やプランクトン種組成の変化など、生態系においても新たな課題が顕在化している。特に在来魚介類については、種苗放流やヨシ帯造成、外来魚駆除などを行っているにもかかわらず、琵琶湖漁業全体の漁獲量は減少傾向にあり、大きな課題となっている(図1)。また、在来魚介類の減少を含むこれらの課題は、その要因が互いに影響し合い、一方の課題解決が必ずしも全ての課題解決につながらないなど、複雑・多様化している。

このような状況に対して、琵琶湖環境研究推進機構では、平成26年度より、在来魚介類の減少に対する総合的視点からの改善に向けた研究として、「在来魚介類のにぎわい復活に向けた研究」を実施している。



漁獲量データ: 1954~2009 滋賀農林水産統計年報(近畿農政局滋賀農政事務所)

2010~2017 内水面漁業生産統計調査(農林水産省)

透明度データ: 国土交通省近畿地方整備局琵琶湖河川事務所、水資源機構、滋賀県琵琶湖環境科学研究センター

図1 琵琶湖における漁獲量および透明度の変化

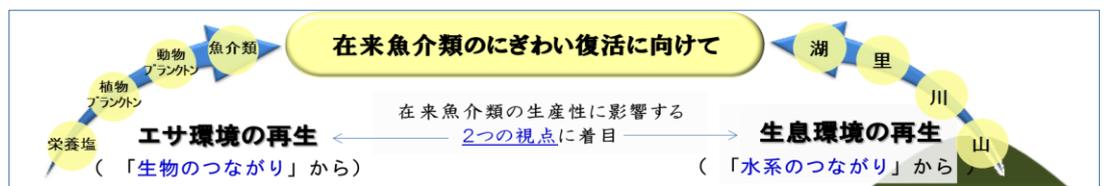
2. 研究概要

本研究においては、在来魚介類のにぎわい復活に対して「つながり」に着目しており、第1期（平成26年度～平成28年度）では、水系および生物のつながりから、それぞれ「**生息環境**」と「**餌環境**」に着目した研究を実施し、底質、流域、餌環境の現況評価や在来魚介類にとって望ましい生息条件などを把握した。

第2期（平成29年度～令和元年度）では、生息環境（水系のつながり）について、第1期の研究知見である、在来魚介類の望ましい生息環境として必要な沿岸域の浅い砂地の保全・修復や流域における適切な土砂の供給を施策に活かしていくために、より実証的な研究として「**沿岸環境**」と「**流域環境**」の2つに着目して、「**琵琶湖沿岸域における湖底環境・生物再生に向けた研究**」と「**在来魚の保全に向けた水系のつながり再生に関する研究**」を実施した。

また、餌環境（生物のつながり）について、第1期では琵琶湖の動植物プランクトンの現存量変化や魚介類資源量との関係をとりとまとめた。第2期では、その研究を発展させ「**物質循環**」に着目した琵琶湖の健全性評価の構築に向けて、環境省環境研究総合推進費も活用して実施する「**生態系保全につながる物質循環のあり方に関する研究**」として、栄養塩からプランクトン、魚類へのつながりに関する研究を実施した。本研究は、国立環境研究所や京都大学等の外部研究機関とも連携し取り組んだ。

【第1期(H26-H28)の取組】



大きな視点へ

実証的な研究へ

【第2期(H29-R1)の取組】

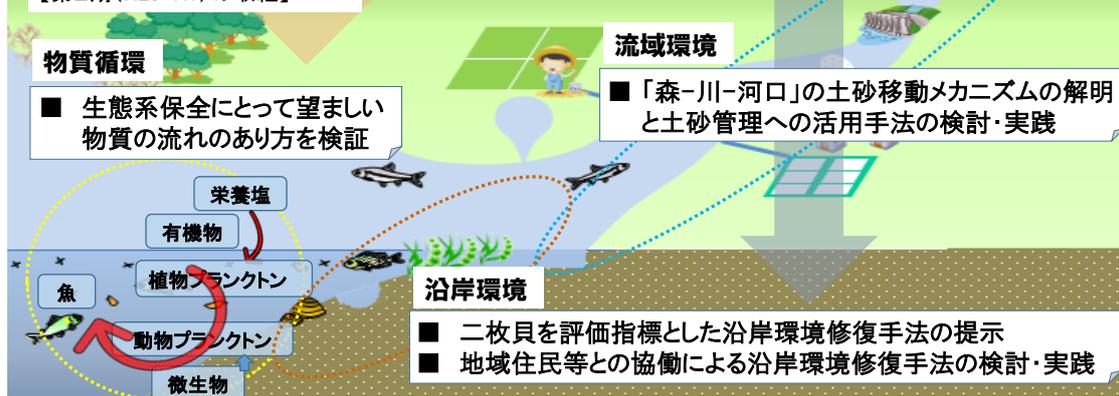


図2 研究の全体像

2.1 琵琶湖沿岸域における湖底環境・生物再生に向けた研究の概要

在来魚介類の生息基盤である「沿岸域」における生態系改善に向けた対策の一つとして、浅い砂地の修復・再生に向けた事業の設計に必要な知見を得るために、二枚貝等を評価指標とした生息環境・餌環境を形成する要因を評価するとともに、住民参加による湖辺環境修復活動を実践した。また、養浜等の事業における底質や生物の影響を評価することにより、場所の特性に合わせた二枚貝等がにぎわう沿岸環境を修復・保全する設計手法を提示することを目指し調査研究を実施した（図3）。

具体的には、底生動物を指標とした沿岸域における生態系の改善に必要な条件を解明するため、二枚貝の生残・成長と生息環境・餌環境との関係の把握などを行った。また、浅い砂地の環境修復のための実証的な研究として、保全活動の担い手である住民と協働して湖底耕耘や水草除去など湖辺環境修復活動を実践し、その効果を検証した。

さらに、養浜事業実施場所における底質や生物の回復過程を評価するため、養浜事業実施前後の底生動物の回復過程や底質、プランクトン等の動態の把握などを行った。



図3 琵琶湖沿岸域における湖底環境・生物再生に向けた研究の概要

2.2 在来魚の保全に向けた水系のつながり再生に関する研究の概要

森林から湖までの水系のつながりにおける土砂の動きは、魚介類の生息・産卵環境の形成に影響があることが徐々に明らかになる中で、「森-川-河口」の土砂移動メカニズムを解明するとともに、地域主体の自然再生活動の継続性に焦点を当てることにより、産卵環境に資する土砂管理方法や地域における自然再生活動を継続させるためのポイントを提示することを目指し調査研究を実施した（図4）。

具体的には、土砂移動メカニズム解明のため、森林からの土砂流出状況の把握やドローンによる地形測量技術および写真による粒径分布の定量化技術の開発を行った。また、アユの産卵に適切な河床の粒径を把握した。さらに、多様な主体の協働による在来魚保全・再生活動に関して、各活動主体が活動を継続していくために必要な進行管理の要件を「場」、「目標」、「成果」の3つの観点から検討した。



図4 在来魚の保全に向けた水系のつながり再生に関する研究の概要

2.3 生態系保全につながる物質循環のあり方に関する研究の概要

良好な水質と魚介類の資源量の改善を両立するためには、流入負荷の抑制による湖内物質量の削減だけではなく、魚介類等につながる物質循環を円滑にすることが重要である。そのため、湖内の物質循環の状況を把握し、生態系保全の観点から望ましい物質循環のあり方を研究することにより、物質循環の滞りを改善する施策や管理方法を提示することを目指し調査研究を実施した。

具体的には、湖内の食物連鎖（生食・微生物）の状況を炭素・窒素安定同位体比による調査や動物プランクトンの比同化速度の調査等により把握した。また、把握した状況から琵琶湖流域の水や物質循環の様相を再現し、様々な要因が水質等に与える影響を予測できる「琵琶湖流域水物質循環モデル」を用いて、琵琶湖の物質循環の円滑さを評価する指標を構築した（図5）。

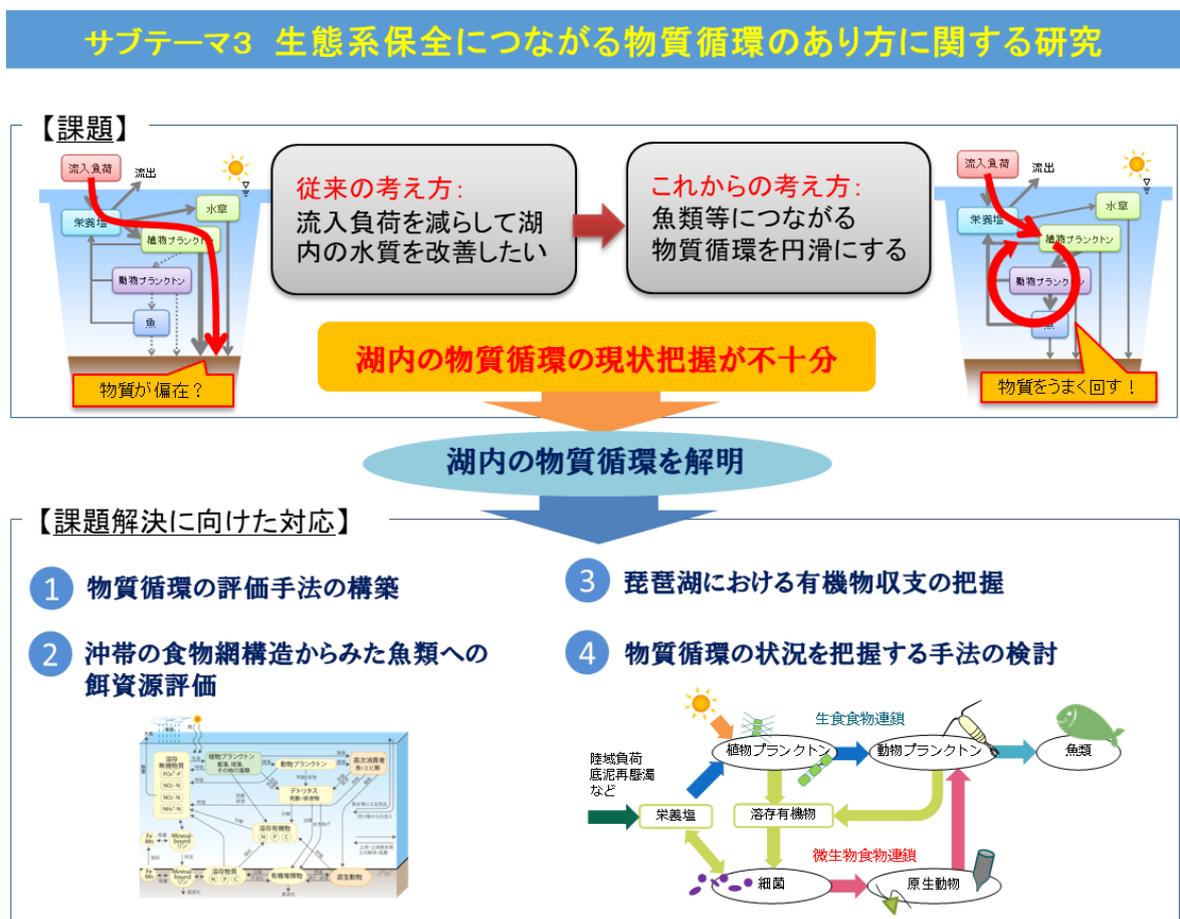


図5 生態系保全につながる物質循環のあり方に関する研究の概要

3. 研究成果

各研究テーマの主な成果を要約すると以下のとおりである。

① 沿岸環境に関する研究成果の要約

- ・シジミ稚貝給餌実験では、肥満度・生残率は、珪藻>緑藻>藍藻の順に高いこと。
- ・シジミの生息密度が高くなるために必要な環境条件の1つとして、粒径 0.34~0.5mm 程度の砂地が重要であること。
- ・住民参加による湖底耕耘や水草除去により、満1~2歳程度の稚貝が増加する可能性があること。
- ・養浜工事など砂地の造成により底生動物の生息環境改善を図る場合、地形変化が生じる場所では、底生動物の定着までに数年見込む必要があることがわかったこと。

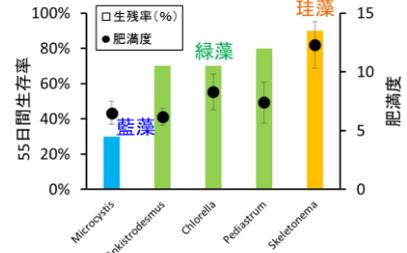


図6 餌環境とシジミ稚貝の生残・成長

② 流域環境に関する研究成果の要約

- ・シカ食害により下層植生の植被率が10%未満になると、植被率60%の場合と比較して5-10倍の土砂流出量となること。
- ・ドローンによる画像撮影・解析は、人工衛星、航空機と比較して安価に測定でき、数百mから数cmまでの微細な地形変化を把握できるため、河道の滞筋変動や砂礫堆(砂州)の表層粒径分布の把握に有効であること。
- ・河床耕耘によるアユの産卵に適した粒径(8~16mm)の礫移動が、アユの産卵などの生息環境改善に役立つこと。
- ・多主体協働の活動を継続するためには、多様な人たちを巻き込む場づくり、地域課題にもとづく分かりやすい目標、小さな成果の積み重ねの3点が重要であること。



図7 自然再生方法の手引き

③ 物質循環に関する研究成果の要約

- ・大きさが45μm以下の中小型の植物プランクトンが動物プランクトンに捕食されやすく、魚類生産にもつながること。
- ・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ること。
- ・物質循環の円滑さを評価するためには、①「過不足がない」：呼吸効率、②「滞りがない」：転換効率、③「偏りがない」：生物バランスの3つの指標が有効であることを明らかにしたこと。
- ・良好な水質と魚介類の資源量の改善の両立には、「転換効率」の向上が重要であること。
- ・生物に利用される有機物(易分解性)の状況を把握するのに、培養期間を28日に延長した生物化学的酸素要求量(BOD₂₈)が有効であること。

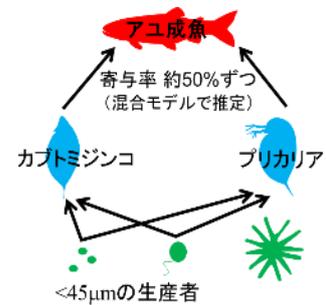


図8 アユ成魚への餌のつながり

第2期研究成果の総括

第1期より生息環境・餌環境の2つの視点から検討してきた「在来魚介類のにぎわい復活に向けた研究」の第2期における研究全体の成果は、にぎわい復活に向けた環境づくりに対して、直接的につながる具体的な要素を把握し、目指すべき方向性を示したことである。

生息環境については土砂の動きが重要であり、シジミ類の生息環境等の分布概況を主成分分析により把握した結果、シジミ類の生息密度が高くなるのは、0.34~0.5mm程度の砂地に限られることがわかった。また、森林での下層植生の植被率による土砂流出量および河川でのアユの産卵環境に関する現地調査等の結果、植被率10%未満では植被率60%と比較して、砂泥の割合が多く5~10倍の土砂が流出することおよび8mm~16mmの小礫の土砂移動が見られた場所で、アユの生息環境が改善することがわかった。

このことから、土砂の動きについて供給源である森林では下層植生の植被率が一つの要因であり、河川・沿岸域では、魚介類にとって好適な粒径の土砂供給・堆積が重要であることがわかった。また、森林-河川-沿岸域を一連の流れとした土砂の適切な供給と入れ替わりが起きることが、在来魚介類を中心とした流域全体の生息環境改善につながることを示唆された。また、住民参加による環境修復の効果等から、にぎわい復活に向けた環境づくりには、分かりやすい指標の設定と多様な主体の参画および連携が重要であることも示唆された。

餌環境については、シジミ稚貝の餌別による飼育実験の結果、生存率・肥満度は珪藻類が最も高く、藍藻類が最も低かった。また、炭素・窒素安定同位体比による食物連鎖の状況調査をした結果、アユやホンモロコシの主な餌となるミジンコ類・ケンミジンコ類は、45 μm 以下の中小型の植物プランクトンを餌としており、45 μm 以上の大型のものはほとんど食べないことがわかった。

このことから、在来魚介類のにぎわい復活のための餌環境改善の要素として、沿岸から湖内において、珪藻類が多く藍藻類が少ないことが望ましく、沖帯の食物連鎖については、植物プランクトンのサイズとして大型が少なく中小型が多い環境づくりが湖内の生態系保全の観点から望ましい物質循環につながることを示唆された。また、このような環境づくりのための具体的な要件や方法については、今後さらなる調査研究が必要である。

4. 今後の展開

上記のとおり、在来魚介類のにぎわい復活には、森林-河川-沿岸域を一連の流れとした土砂の適切な供給と入れ替わりが重要であること、住民参加のためには分かりやすい指標の設定と多様な主体の参画・連携が必要であること、藻類の種類および植物プランクトンのサイズが関与していることが示唆された。

そのことを踏まえ、今後は、より直接的に施策に反映できるあるいは現場で実践できる手法等にするための実証的な研究や、より具体的な要件や方法を検討するための調査研究を推進することが必要である。

そのため、第3期（令和2年度~令和4年度）では、引き続き、「沿岸環境」、「流域環境」、「物質循環」に着目し、次の研究推進方針により研究を進める。また、物質循環の研究成果である中小サイズの植物プランクトンの増加が重要という知見を踏まえ、「生産力回復技術の実証」研究を実施する。

① 沿岸環境

- ・「(仮称) 湖辺環境改善技術資料」を作成し、これに従って琵琶湖湖辺の複数地点で現状の評価・解析を行い、湖辺環境の改善目標と対策について提言する。
- ・住民等による持続的・効果的な活動の構築手法を確立・実装する。あわせて、砂地環境改善に向けた現状比較（養浜の有無）を行う。

② 流域環境

- ・森-川-湖の土砂のつながり再生の社会実装に向けた流域環境改善手法の実証的検討を進める。
- ・行政や市民による粒径分布や河床硬度などのモニタリング手法の技術開発を通じて、将来における多様な主体の合意形成に資する科学情報の創出に役立てる。
- ・多様な主体の協働による在来魚保全・再生活動の要件や課題を明らかにする。

③ 物質循環

- ・中小サイズの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。
- ・「栄養塩の供給」や「植物プランクトンのサイズ」に着目した物質循環の円滑さを評価する指標を検討し、琵琶湖の健全性評価手法および流域対策のあり方を提案する。

④生産力回復技術の実証【新規】

- ・湖内生物の餌資源を増やす手法の検討を目的として、湖底に蓄積した栄養塩を湖水中に回帰させることによる漁場（湖内）生産力の回復技術の実証研究を行う。（湖底耕耘による栄養塩回帰の状況の把握およびそれによる植物プランクトン等の組成、量の変化の把握）



図9 第3期(R2~R4)在来魚介類のにぎわい復活に向けた研究の全体概要

また、第2期の研究成果を踏まえた各研究テーマにおける今後の取組に関する方向性は、以下のとおりである。

- 動物プランクトンを増やすためには、高い増殖速度を持つ中小サイズの植物プランクトンが増えやすい環境づくりを進める。
- その環境づくりのためには、物質循環の円滑さが重要であり、その指標として、「呼吸効率」、「転換効率」、「生物バランス」の3つを利用する。
- 良好な水質と魚介類の資源量の改善の両立させるために、「転換効率」の向上を図る。
- 取組成果を総合的な視点から測る指標として、有機炭素ベースによる環境評価の活用を進める。

- 森林では、砂泥の流出を抑止するため、下層植生の植被率が60%以上を保持できるよう、シカ防護柵の設置などを進める。
- 河川では、在来魚の産卵、生息環境を改善するため、河床の硬化や砂州、水の主な流れの固定化を防止し、産卵に適した河床環境を増やすため、河川環境のモニタリング手法を活用しながら、多様な主体と協働し、河川環境の管理を進める必要がある。
- これらの実施にあたっては、地域課題に基づく分かりやすい目標を立てるとともに、関係する多様な主体をつなげる場の設置や多様な主体による小さな自然再生活動の推進が重要である。

③ 物質循環

② 流域環境



① 沿岸環境

- 第2期の研究から得られた湖辺環境改善に関する知見を「技術資料」として取りまとめ、湖辺の健全な生態系機能を回復させる手順を確立させる。
- 技術資料に則した湖辺環境改善手法の実装段階として、住民等による湖底耕耘や水草除去を通じた自発的な活動を促進・支援する。
- 住民等による自発的な活動の推進においては、シジミ類等の分かりやすい評価指標を設定した上で、活動による環境改善効果の検証結果を共有し、環境改善の目標や手法等の共通認識を形成することにより、積極的・持続的な活動につなげることが重要である。

(※さらに詳しい内容は参考資料に示している)

別添資料

琵琶湖環境科学研究センター
提言・成果集（抜粋）

サブテーマ1「琵琶湖沿岸域における湖底環境・生物再生に向けた研究」

(試験研究の背景・目的)

在来魚介類の減少は喫緊の課題であり、中でも二枚貝（シジミ類等）の減少が著しい。その生息場所となる沿岸域の生態系改善に向けた評価指標として、大きくは移動せず、沿岸環境を形成する多くの因子の影響を受ける底生動物が適している。二枚貝（シジミ等）は、地域の保全活動を担う住民等にも目的を共有しやすいこと等から、象徴的な指標として取り上げ、二枚貝のすみやすい環境づくりを通じた生態系改善手法の提言を目的とした。

第1期（H26-H28）では、底質と底生動物の現状比較から、沿岸域の生態系改善に向け、良好な湖底環境（浅い砂地）の確保が必要であることを明らかにした。

第2期（H29-R1）では、沿岸域の生態系改善に向けた持続的・効果的な対策の提言に必要な知見を得るため、二枚貝を含む底生動物を評価指標として、環境条件との関係評価や住民参加による改善手法の検証を進めた。

第3期（R2-R4）では、これまでの知見を基に、湖辺の生態系改善に向けた考え方や、その実践事例として第五期における琵琶湖での取組をまとめた「(仮称) 湖辺環境改善技術資料」を完成させ、実装することを目指す。

サブテーマ1の成果・提言の要旨

底生動物の再生について、シジミ類等の二枚貝を指標として検討した結果、良好な餌環境として、「珪藻類の増加」、「藍藻類の減少」の重要性が示唆された。

また、養浜実施場所において土砂搬入が底生動物等に及ぼす短期的な影響（数年）について把握したが、長期的（10年程度）な影響を把握するため、引き続き検証が必要である。

加えて、行政、住民等の協働により、沿岸域の生態系改善に向けた取組の推進に活用されるよう「(仮称) 湖辺環境改善技術資料」を作成していく。

成果・提言 1「琵琶湖沿岸域における湖底環境・生物再生に向けた方向性」

(試験研究を通してわかったこと)

- ・シジミ稚貝の飼育実験結果を踏まえると、良好な餌環境の条件として「珪藻類の増加」、「藍藻類の減少」の重要性が示唆された。
- ・湖辺で環境修復活動を実施した場所におけるシジミ類の生息状況を踏まえると、シジミの増加に向けては、満2歳程度までの稚貝の生残率が低いことが課題と考えられる。
- ・住民参加による継続的な湖底耕耘や水草除去により、満1～2歳程度の稚貝が増加する可能性がある。
- ・養浜実施場所における底生動物の生息状況と湖底環境（湖底断面地形等）についての関係性から、砂地の造成により底生動物の生息環境改善を図る場合、短期的な視点からは、湖底の侵食・堆積状況や、ライフサイクルの長いシジミ類等の定着に要する期間を数年見込む必要がある。
- ・砂地の造成が底生動物の生息状況と生息環境に及ぼす長期的な影響について把握するため、10年程度前に養浜が実施された場所と未実施の場所において現状を把握し、比較検証する必要がある。

(センターとしての提言)

- ・湖辺の健全な生態的機能を回復させる手順を確立するため、琵琶湖での検証事例を基に、二枚貝を指標とした現状・課題把握の調査方法、目標の設定・達成に向けた施策の効果予測方法を「(仮称)湖辺環境改善技術資料」として令和2年度(2020年度)に作成し、この「技術資料」の内容を保全活動の担い手に提供し、効果的に環境修復活動を広げる必要がある。
- ・住民等による自発的な活動の推進においては、シジミ類等の分かりやすい評価指標を設定した上で、活動による環境改善効果の検証結果を共有し、環境改善の目標や手法等の共通認識を形成することにより、積極的・持続的な活動につなげる必要がある。



図1 住民との協働による湖辺環境改善活動(左)、調査活動(中央)、活動周知に向けた体験イベント(右)

今後の試験研究の方向性

湖辺における生態系の改善に向け、持続的、効果的な砂地湖底の回復手法を具体化するため、第3期(R2-R4)の「二枚貝等を評価指標とした湖辺環境改善手法の検討・実装に関する研究(サブテーマ1)」において、以下の研究を実施予定。

- ・湖辺の健全な生態的機能を回復させる手順を確立するため、現状・課題把握の調査方法、目標の設定・達成に向けた施策の効果予測方法を「(仮称)湖辺環境改善技術資料」として令和2年度(2020年度)に作成する。
- ・上記「技術資料」に則した湖辺環境改善手法の実装段階として、住民等による湖底耕耘や水草除去を通じた自発的な活動を促進・支援する。
- ・砂地の造成による底生動物とその生息環境の長期的な変化を検証するため、過去に養浜が実施された場所と、未実施の場所で現状を比較し、底生動物や良好な湖底環境に関する諸要因の回復に及ぼす効果を評価する。

サブテーマ2「在来魚の保全に向けた水系のつながり再生に関する研究」

（試験研究の背景・目的）

在来魚の減少は大きな課題であり、在来魚の生産性に大きな影響を与えると考えられる生息環境に着目し、水系のつながりの視点から、減少要因を明らかにし、改善方法を提案する必要がある。

第1期（H26-28）では、主に土砂と魚類の関係に焦点を当てて研究を行い、森—川—河口における土砂の動きは魚介類の生息環境や産卵環境の形成に影響があることを明らかにした。

第2期（H29-R1）では、「森—川—河口の土砂移動メカニズムの解明」および「地域主体の自然再生活動の継続性」に焦点をあてて研究を行った。

第3期（R2-R4）では、これまでに得られた知見を活かし、在来魚を保全するための流域環境改善方法を検討する。

成果・提言 2-1 「在来魚の保全に向けた森-川の総合的な対応施策」

（センターとしての成果・提言の要旨）

在来魚の保全、ひいてはにぎわい復活を図るためには、上流から下流までの水系のつながりを捉え、多様な主体が協働し一貫した考えのもと取り組んでいく必要がある。

森林では、砂泥の流出を抑止するため、下層植生の植被率が60%以上を保持できるように、シカ防護柵の設置などを進める必要がある。

河川では、在来魚の産卵、生息環境を改善するため、河床の硬化や砂州、^{みおすじ}滯筋（主に水が流れている場所）の固定化を防止し、産卵に適した粒径の砂礫が^{されま}柔らかく堆積するような河床環境を増やすため、河川環境のモニタリング手法を活用しながら、多様な主体と協働し、河川環境の管理を進める必要がある。

これらの実施にあたっては、地域課題に基づく分かりやすい目標を立てるとともに、関係する多様な主体をつなげる場としての土砂総合管理協議会の設置や多様な主体による小さな自然再生活動の推進が重要である。

今後の試験研究の方向性

在来魚の生息産卵環境を改善するために、愛知川水系や^{やなわね}家棟川水系（野洲市）などで研究成果を活用する予定。

成果・提言 2-2 「在来魚の保全に向けた森林管理」

（試験研究を通してわかったこと）

- シカの食害と人工林の間伐不足等により下層植生が衰退し、森林域の溪流の砂泥の割合が多くなる。一般的に砂泥が多くなるとアユやビワマス^の生息産卵環境に悪影響を与える可能性がある。
- 下層植生に林床が被覆された森林では、土砂生産率が小さくなることが確かめられた。

（センターとしての提言）

- 砂泥を苦手とする魚類（アユなど）のにぎわいを再生するためには、砂泥流出を抑止できる下層植生の豊かな森を育成・造成する必要がある。
- 「シカ食害の防止」、「人工林の適切な間伐等の管理^{けいばん}」、「^{けいばん}溪畔林に適した樹種の植栽」などにより、下層植生の植被率が60%以上を保持できるようにする森林管理を行う必要がある。
- その方策として、シカ^{ふしこう}不嗜好性植物を用いた林床の緑化やシカ防護柵の設置による下層植生の繁茂の促進が期待される。（琵琶湖環境科学研究センター第五期中期計画（H29-R1）の政策課題研究5より）

今後の試験研究の方向性

第2期に得られた知見を提供して、アユなどが生息しやすい森づくりを、市町等と協力しつつ、社会実装できるように推進する予定

成果・提言 2-3「在来魚に好適な河川環境の条件とその把握手法」

(試験研究を通してわかったこと)

- ・県内の河川中流域から河口までは、土砂不足や土砂移動の減少により、河床の硬化や砂州、^{みおすじ} 滯筋の固定化などの課題がある。
- ・固定化された砂礫堆を50m×400m=20,000m²の面積を^{こううん} 耕耘することによりアーモコート破壊を実施して土砂移動を促した。その結果、令和元年(2019年)にはおよそ2,500m³の土砂流出が確認できた。
- ・耕耘下流部で小礫(主に粒径8-16mm)の土砂移動が見られた場所ではアユの生息環境が改善された。
- ・ドローン撮影により詳細に土砂移動による地形変化の動向を把握することができた。
- ・アユやビワマスの産卵環境の特徴などから、河床の硬化や砂州、^{みおすじ} 滯筋の固定化が起こるとアユやビワマス等の軟らかな礫床を産卵環境とする魚種に悪影響が生じている可能性が示唆された。

アユやビワマス等の在来魚の好適な産卵、生息環境について、以下のことを明らかにした。

- ・琵琶湖のアユの好適な産卵場は、1kgf/cm²以下の軟らかな小礫できていること。
- ・琵琶湖のアユの好適な産卵場は、粒径2-16mmの礫が50%以上の構成割合であること。
- ・河床変動2次元シミュレーションと現地調査によれば、16mm以下の礫は20N/m²以上のせん断力で流されること。

愛知川において、アユやビワマス等の産卵に適した粒径の砂礫が柔らかく堆積するような河床環境を増やすためには、砂礫堆(砂州)の地形変化による砂礫の流下促進といった短期的視点の対策検討と、上流からの砂礫供給を増加させるような長期的視点の対策検討の両方が必要である。

河川の土砂管理に必要なモニタリング手法について、以下のことを明らかにした。

- ・人工衛星、航空機は流域レベルの数kmから数百m程度の空間的に広範囲な地形変化を把握するには有効である。しかし、コストが高く河道内の土砂移動などの1m前後の比較的小さい地形変化に関しては得意ではない。それに対して、ドローン等の空撮データは数百mから数cmまでの空間的に微細な地形変化を把握するのに有効であり、なおかつ人工衛星や航空機レーザー測量と比較してコストも安価であり、解析もソフトウェアが充実しているため、高頻度に高精度の河川の土砂移動メカニズムの解明に必要な河道の滯筋変動や砂礫堆(砂州)の表層粒径分布を把握することが可能となった。将来的には、この技術は他の河川の河床環境の診断や、対策事業、自然再生活動の効果検証を行うための簡易分析ツールとして応用が可能である。
- ・ドローンの空中撮影などの最新技術を導入すると土砂移動はモニタリングしやすくなり、低コストで高頻度、高精細な土砂管理や河川環境管理が容易になる。

（センターとしての提言）

- ・固定化した砂州を耕耘することにより、粒径8-16mmの粒径の礫を表層に出しつつ、表層を2kgf/cm²より軟らかな状態にして、大水時のおよそ20N/m²から50N/m²のせん断力（営力）で粒径8-16mmの土砂移動を促進することにより、アユやビワマスなどが好む河床環境に改善する。

今後の試験研究の方向性

- ・愛知川では、アユやビワマスなどの生息産卵環境の改善に向けた活動を、県機関、地元と協力しながら、社会実装できるように推進する予定。
これまでに土砂の供給源となる砂礫堆（砂州）の地形や粒径分布の空間分布を評価できるようになったが、産卵環境に直接的に関係する水中の河床状況の把握が十分にできていない。そのため、こういった水中環境を把握する新たな方法も加えながら、河床環境の把握とその応用に取り組む予定。

成果・提言 2-4「多様な主体の協働による在来魚保全・再生活動の進行管理」

（試験研究を通してわかったこと）

- ・家棟川（野洲市）で平成27年（2015年）に結成された「家棟川・童子川・中ノ池川にビワマスに戻すプロジェクト」では、多様な主体がビワマスの生息・産卵環境の保全再生のために、①ビワマス産卵床の造成、②落差工への魚道の設置、③遡上調査と監視の3つの活動を実施。
- ・検討と実践を進めた結果、ビワマスの産卵が確認され、魚道を遡上するなど大きな成果を上げることができた。多様な主体が適切に協働し、順応的なプロセスのもとで自然再生を行うことで、在来魚の保全・再生につながるということが実証された。

多様な主体が協働による在来魚保全・再生活動を継続していくために必要な、「場」、「目標」、「成果」の3つの観点における進行管理のポイントは、以下の3点である。

- ・多様な人たちを巻き込む場づくりをすること
- ・地域課題にもとづき分かりやすい目標を立てること
- ・小さな成果を積み重ねること

（センターとしての提言）

- ・多様な主体が協働で取り組む「小さな自然再生」の進め方は、河川・流域により大きく異なるため、他の河川に展開していくためには、上記3点の基本認識を念頭に置きつつ、各河川の自然の営みや関わる人たちに寄り添いながら、共に考え、試行錯誤しながら実践していくことが何よりも重要である。

今後の試験研究の方向性

家棟川における自然再生を継続して進めるとともに、新大宮川や愛知川など他の河川でも多様な主体による在来魚保全のための小さな自然再生を展開する予定。



図2 多様な主体の協働による在来魚保全・再生活動(野洲市家棟川)

サブテーマ3「生態系保全につながる物質循環のあり方に関する研究」

(試験研究の背景・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、漁獲量が減少するなど新たな課題が顕在化している。この要因の一つとして、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。湖内の物質循環の状況を把握するとともに、良好な水質と生態系保全の両立の観点から望ましい湖内物質循環のあり方を検討する。

第1期(H26-H28)では、プランクトン食魚と餌資源の関係解析を実施するとともに、流域社会や琵琶湖内における物質循環の状況について簡易なモデル解析を行った。

第2期(H29-R1)では、湖内の有機物収支に着目し、植物プランクトンによる生産や食物連鎖を通じた物質循環の状況を詳細に把握した。その結果、現在の琵琶湖では生食食物連鎖を通じた魚への物質伝達が重要であること、また小さな植物プランクトンの方が動物プランクトンに捕食されやすく、魚類生産にもつながることを明らかにした。

第3期(R2-R4)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目し、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。

サブテーマ3の成果・提言の要旨

物質循環の円滑さに着目した琵琶湖の健全性を評価する指標として、①「過不足がない」：呼吸効率、②「滞りがない」：転換効率、③「偏りがない」：生物バランスの3つを提案する。

動物プランクトンが食べやすい中小サイズの植物プランクトンを増やすことは、動物プランクトンの増加を通じて「魚の豊かさ」の向上につながるだけでなく、「水のきれいさ」にもつながることが明らかとなった。

琵琶湖や流域で実施される各種施策の成果を総合的な視点から測る指標として、有機炭素ベースによる環境評価の活用を進めるべきである。また、湖内における物質循環状況を把握する観点から、有機物の生分解性を評価できる代替的な指標(BOD₂₈など)について活用を検討していく必要がある。

成果・提言 3-1「物質循環の円滑さを評価する指標について」

(センターとしての提言)

- ・流入負荷を削減して水質を保全するという考え方から、「水域の健全性」を第一の目標とした、新しい流入負荷管理へと転換していくことを提案する。具体的には、湖内で生産された有機物ができるだけ無駄なく活用され、上位の消費者等にも回っていくこと、すなわち湖内に残存する「ストック」としての有機物に着目するだけでなく、「フロー」としての物質循環が円滑であることが琵琶湖の健全性に直結し、その結果として水道や水産といった各種用途目標も一定達成されるという考え方である。これは人間の健康で例えると、体重を減らすために極度なダイエットを進めるのではなく、バランスの取れた食事を適量摂り、日々の生活や運動の中で適切に消化・分解されることを意味する。
- ・物質循環の円滑さを表す指標として、①「過不足がない」：“呼吸効率”(=群集総呼吸量/一次生産量)、②「滞りがない」：“転換効率”(=二次生産/一次生産等)を考え、さらに結果としての水質と魚介類資源のバランスを捉えるため、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)を加え、これら3種の指標により琵琶湖の健全性を評価することを提案する。

- ・琵琶湖流域水物質循環モデルで指標値の試算を行ったところ、呼吸効率は年間を通じて大きな変動がない一方で、転換効率や生物バランスは季節的に大きく変動する可能性が示唆された。これらの指標値は既存の調査からすぐに明らかにできるものではないが、今後、新たな調査あるいはモデル解析などで把握するとともに、向上させるための施策を検討していく必要がある。

今後の試験研究の方向性

第3期 (R2-R4) の「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 (サブテーマ3)」において、物質循環の円滑さを表す指標についてさらに検討を進めるとともに、琵琶湖流域水物質循環モデルを用いてそれらの指標に影響を与える環境因子の解析を行う予定。

成果・提言 3-2 『水のきれいさ』と『魚の豊かさ』の両立に向けた施策等の方向性について』

(センターとしての提言)

- ・湖内の食物連鎖には、植物プランクトンから動物プランクトン、魚に至る「生食食物連鎖」と、有機物から微生物(細菌、原生動物)、動物プランクトンに至る「微生物食物連鎖」がある。これらの寄与について調べたところ、栄養塩の負荷量が減少した琵琶湖でも、魚の餌となる動物プランクトンは、栄養塩で増える植物プランクトンを主に食べており、有機物で増える微生物はわずかししか食べていなかった。よって、魚への物質伝達(餌と消費者の関係)としては、植物プランクトンで始まる生食食物連鎖の方が、微生物で始まる微生物食物連鎖よりも重要であることが明らかになった。
- ・動物プランクトンは、植物プランクトンの中でも小型(<20 μm (マイクロメートル))のものを主食にしており、中型(20-45 μm)のものも時々食べるが、大型(>45 μm)のものはほとんど食べないことを確認した。実際、大型藻類(>45 μm)が大発生した時期には、数種の動物プランクトンの現存量や生産量が低くなる傾向があった。よって、動物プランクトンを増やすためには、高い増殖速度を持つ中小サイズの植物プランクトンが増えやすい環境づくりが必要である。
- ・水質保全と魚類資源量の増加を両立させるためには、植物プランクトンから動物プランクトン、動物プランクトンから魚への転換効率(生産された物質が食物連鎖で上位の種に伝達される効率)の向上が鍵であることが明らかになった。すなわち、動物プランクトンが食べやすい中小サイズの植物プランクトンを増やすことは、動物プランクトンの増加を通じて「魚の豊かさ」の向上につながるだけでなく、「水のきれいさ」にもつながることが明らかになった。
- ・中小サイズの植物プランクトンを増加させる方策としては、沿岸帯への小規模な栄養塩供給が一例として考えられるが、その具体策や有効性について調査・研究していく必要がある。

今後の試験研究の方向性

中小サイズの植物プランクトンが増えやすい環境づくりに向け、第3期 (R2-R4) の「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 (サブテーマ3)」において、栄養塩の負荷条件が異なる沖帯と沿岸帯で、植物プランクトンの生産量と動物プランクトンの摂食・生産量との関係を調べる調査・実験を実施予定。

成果・提言 3-3 「湖内有機物収支を用いた環境評価について」

(試験研究を通してわかったこと)

- ・有機炭素による一次生産から動物プランクトンまでのバイオマスとフローの記載により、生態系の生産実態を可視化して様相を整理できた。今後の湖岸整備や湖底耕耘、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、取組成果を総合的な視点から測る指標として、有機炭素ベースによる環境評価の活用を進めるべきである。
- ・大型緑藻の増大が常態化しており、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る。大型緑藻は、気象や栄養塩環境との関係が示唆されており、今後、大型緑藻の制御に向けた栄養塩管理について検討を始めるべきである。
- ・植物プランクトン群集の現存量と一次生産を測定する光学的測定法は、近年、進歩を遂げ、高解像度で低コストになったことから、湖のモニタリングに活用できると期待される。今後、水質管理と水産資源管理のそれぞれの部局と連携して活用方法について検討を始めるべきである。
- ・琵琶湖湖水の溶存有機物 (DOM) の起源として、植物プランクトンだけでなく、細菌も量的に重要であることが分かった。細菌によるプロセス (DOM の生産や再利用等) が DOM の生分解性に与える影響について、さらに知見を得ることが重要になる。

今後の試験研究の方向性

以下を第3期 (R2-R4) の「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 (サブテーマ3)」にて実施予定。

- ・中小サイズの植物プランクトンが増えやすい環境づくりに向け、栄養塩の負荷条件が異なる沖帯と沿岸帯で、植物プランクトンの生産量と動物プランクトンの摂食・生産量との関係を調べる研究
- ・大型緑藻の増殖特性について調べる研究
- ・植物プランクトン群集の現存量と一次生産を測定する光学的測定法のさらなる改良
- ・アミノ酸組成分析等を用いた DOM の起源推定手法の検討

成果・提言 3-4 「有機物指標の整理」

(試験研究を通してわかったこと)

- ・化学的酸素要求量 (COD) は今後とも湖沼流域の一定の有機汚濁レベルを示す指標として有効であるが、正確な負荷量や水質検討には、有機炭素により環境評価を行う方が活用度が高い。
- ・有機炭素を環境評価に用いる観点から、公共用水域での水質測定に全有機炭素 (TOC) を導入することが望ましいと考えられ、湖沼水環境保全に関する自治体連携などを通じて、TOC測定を普及するべきである。TOC の測定については、懸濁物を含む試料でも精度を損なわない方法を推奨するべきである。
- ・長期的な琵琶湖の細菌生産の減少が明らかとなり、長期の COD の横ばいや栄養塩の循環利用など、これまで不明であった水質のメカニズム解明に科学的進展が期待できる。よって、細菌活性や溶存有機物の生分解性、微生物構造について、さらに調査研究やモニタリングを進めるべきである。

今後の試験研究の方向性

以下を第3期（R2-R4）の「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（サブテーマ3）」にて実施予定。

- ・ 中小サイズの植物プランクトンが増えやすい環境づくりに向け、植物プランクトンや動物プランクトンの有機炭素と栄養塩との関係を調べる研究
- ・ 企業との TOC 計測に関する研究を継続
- ・ 琵琶湖北湖における溶存有機物と、微生物構造に関する大学との共同研究を継続

成果・提言 3-5「有機物の分解性を把握する指標について」

（試験研究を通してわかったこと）

- ・ 流入負荷が削減されてきた一方で湖水の COD が減少しないことから、その原因となる難分解性有機物が問題視されてきたが、湖内における有機物の循環の円滑さに着目するのであれば、循環に寄与する易分解性有機物の評価が重要となる。有機物の分解性を評価する手法として、これまで 100 日間におよぶ生分解試験が実施されてきたが、調査・分析の迅速性や簡便性に課題があることから、代替的に生分解性を評価できる指標の開発が急務である。
- ・ 微生物が利用可能な有機物量の間接的な把握方法として BOD（生物化学的酸素要求量）があるが、BOD 値の低い琵琶湖水においては従来の 5 日間の培養期間（BOD₅）では精度に問題があった。そこで培養期間を 28 日間（BOD₂₈）に延長することによって精度良く測定することを可能とし、BOD₂₈ は有機物の生分解性の指標となることを明らかにした。
- ・ 琵琶湖水の粒子態有機物（POC）の炭素安定同位体比は、POC の生分解性の指標として有用な可能性がある。また、冬季に特異的に大型緑藻の増加が見られた場合にも炭素安定同位体比が上昇したため、難分解性 POC に大型緑藻が影響を及ぼしていることが示唆された。
- ・ 琵琶湖水の溶存態有機物（DOM）は、高分子 DOM と低分子 DOM という二つの画分に大別でき、前者は 100 日以内にほぼ全て生分解されて栄養塩に回帰する易分解性であり、後者は 100 日程度経過しても大部分が残存する難分解性であることが分かった。両画分の濃度比等が、DOM の生分解性に関する新たな水質指標として有用である可能性がある。今後、各画分について起源や特性を詳細に把握することが重要になる。

今後の試験研究の方向性

以下を第3期（R2-R4）の「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（サブテーマ3）」にて実施予定。

- ・ DOM の起源や特性を、生分解性別に詳細に把握するために、高分子 DOM と低分子 DOM を分離・濃縮して分析する手法を開発する。
- ・ 湖内の物質循環の状況を詳細に把握するため、生分解試験を実施し、DOM 分子サイズ分布、長期 BOD（28 日分解）、アミノ酸組成、安定同位体比等の分析を行う。それらの指標候補の中から有機物の生分解性を把握できる有用な指標を提示する。
- ・ 第8期琵琶湖に係る湖沼水質保全計画の策定のため難・易分解性有機物等の調査分析を実施する。

各研究テーマの成果概要

研究概要・目的

沿岸域における生態系改善に向けた対策の一つとして、浅い砂地の修復・再生に向けて、事業の設計に必要な知見を得るために二枚貝等を評価指標とした沿岸域での生息環境・餌環境を形成する要因を評価するとともに、養浜等の事業における底質や生物の影響を評価することにより、場所の特性に合わせた二枚貝等がにぎわう沿岸環境を修復・保全する設計手法を提示する。

研究成果の概要

提言等に関連する研究成果(アウトプット)の概要を記載

右端の数字は関連する提言・成果等の番号

■ **沿岸域の生息環境・餌環境形成因子の評価（環境省「琵琶湖保全再生等推進費」事業）**

1

- 湖辺の生態系改善を進める上での評価指標として、大きくは移動せず、生息環境、餌環境、それらの形成基盤となる流動・波浪等、多くの環境因子の影響を受ける底生動物に着目した。その中でも二枚貝（シジミ類等）は、地域の保全活動を担う住民等にも目的を共有しやすいこと等から、象徴的な指標として取り上げ、二枚貝のすみやすい環境づくりを通じた生態系改善手法の構築を目的とした。
- 琵琶湖沿岸において、底生動物とその生息環境・餌環境等の分布概況を把握した。各調査地点の生息環境条件（水質、底質）を主成分分析により座標化し、シジミ類の生息密度が高かった調査地点（1000 個体/m²以上）と、それ以外の調査地点を比較した。その結果、シジミ類は広範囲な環境条件で生息できるが、生息密度が高くなる場合は特定の条件の砂地（破線囲いの領域）に限られると考えられた（図1）。

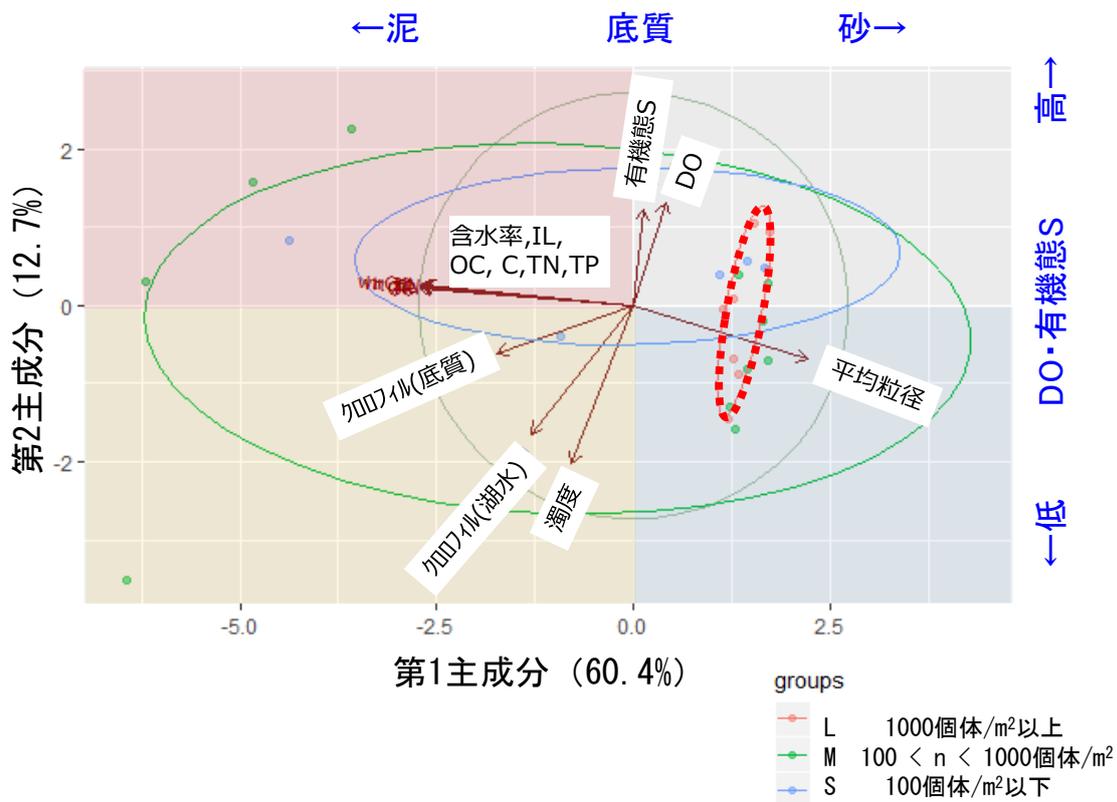


図1 琵琶湖沿岸のべ25地点(平成29年(2017年)12月～令和元年(2019年)7月)における生息環境条件の主成分分析に基づく、第1・第2主成分得点の座標化結果。

- 単離培養した植物プランクトンを餌としたシジミ稚貝の飼育実験結果から、シジミ稚貝の生存率・肥満度は、餌別では珪藻類、緑藻類の順に高く、藍藻類で最も低いことが分かった (図2)。

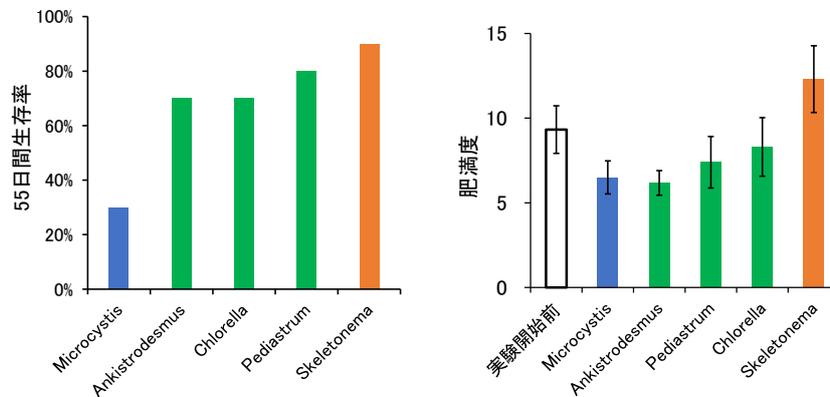


図2 各植物プランクトン種を給餌したシジミ類稚貝の 55 日間生存率(左)、肥満度(右:平均値±標準偏差)。
青:藍藻;緑:緑藻;橙:珪藻。

- 南湖の湖底環境に影響を及ぼす要因の 1 つとして、夏季の沈水植物 (水草) 繁茂と、底生動物の生息密度の現状を把握した。水草は、平成 29 年 (2017 年) ~平成 30 年 (2018 年) に減少した後、令和元年 (2019 年) 8 月頃から増加し、種構成の変化も認められるなど、年変動が大きいことを再確認した (図3)。また、水草が多いほど、底生動物の生息密度で優占する水生貧毛類 (ミミズ類) が少なく、生息環境の悪化につながることを再確認した (図4)。

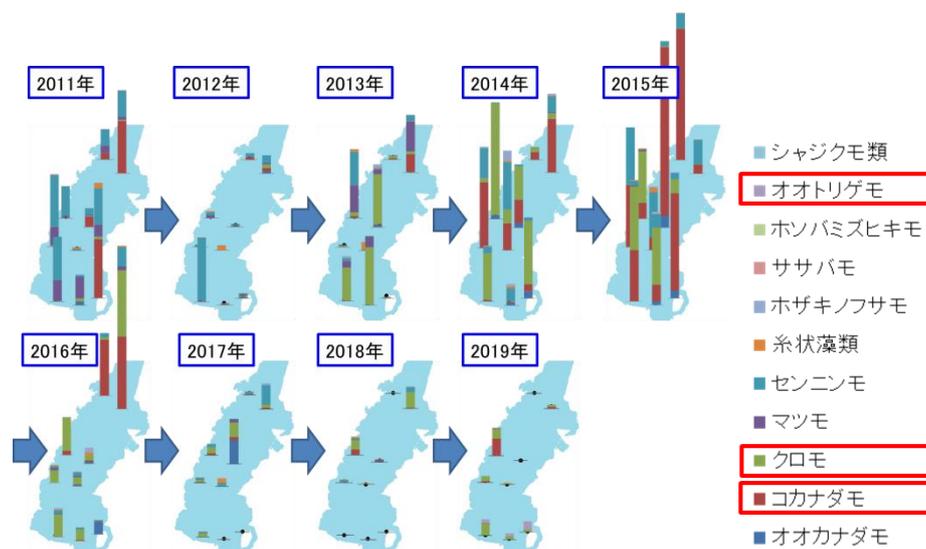


図3 南湖 9 定点における 8 月の水草種構成と乾燥重量相対値(平成 23 年(2011 年)~令和元年(2019 年))。

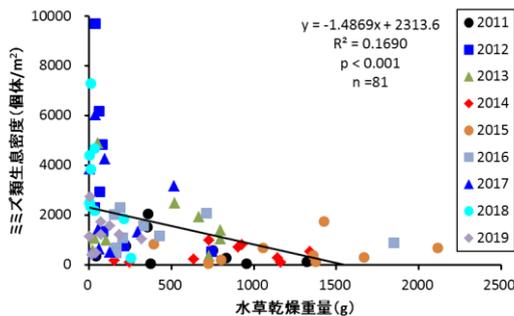


図4 南湖9定点における8月の水草乾燥重量相対値とミズ類生息密度の関係(平成23年(2011年)~令和元年(2019年))。

■ 住民等との協働による湖辺環境修復・維持手法の検証(環境省「琵琶湖保全再生等推進費」事業)

- 琵琶湖湖南湖辺の試験地(耕耘区)において、住民・漁業者との協働による環境修復活動として、平成29年(2017年)7月から令和2年(2020年)3月まで毎月、人力・船舶による湖底耕耘・水草除去を実施した。耕耘区および隣接する対照区において底質粒径等を比較した結果、耕耘区の底質は、対照区より粒径が粗く、有機物が少なかったことから、本活動により泥質の堆積が抑制されたと考えられた(図5)。

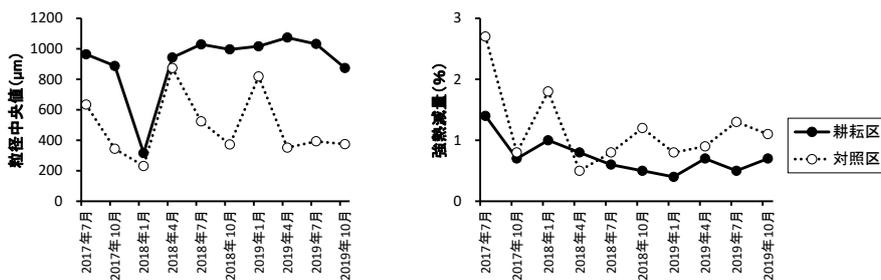


図5 耕耘区・対照区の底質表層1cmにおける粒径中央値(左)、強熱減量(右)(平成29年(2017年)7月~令和元年(2019年)10月)。

- 耕耘区および対照区においてシジミ類の生息状況を比較した結果、シジミ類は耕耘区では推定満1~2歳の稚貝が多かったが、対照区では推定満1歳以下の微小な稚貝が多かった(図6)。シジミ類大型個体の定着・成長阻害要因の1つとして満2歳までの生残率が低いことが考えられるが、本活動により泥質の堆積が抑制され、満1~2歳のシジミ類が増加した可能性がある。

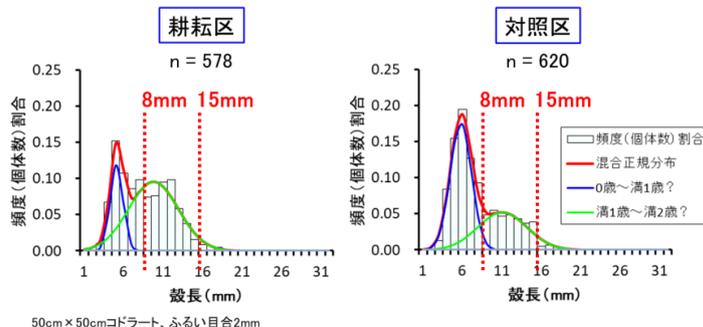


図6 耕耘区(左)・対照区(右)においてコドラート(方形枠:50cm×50cm、ふるい目合2mm)で採取されたシジミ類の殻長分布(平成29年(2017年)7月~令和2年(2020年)1月累計)。nは各回の採集個体数。

- 記述式アンケートによる活動参加住民の意識調査の結果、活動継続とともに琵琶湖環境への関心の拡大と共通認識の形成が認められ、積極的な参加につながったと考えられた（図7）。

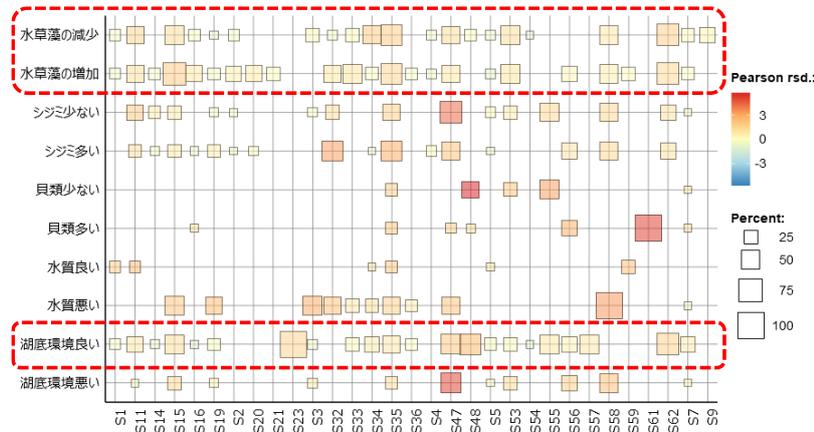


図7 湖底環境修復活動および湖底環境調査活動後の自由記述式アンケートにおける「琵琶湖の様子」記述内容に基づくトピックスの参加者間共通認識形成状況（令和元年度（2019年度））。横軸：参加者個人；縦軸：トピックス。

■ 沿岸環境の修復・保全手法の提示（環境省「琵琶湖保全再生等推進費」事業）

- 上記の成果等に基づき、沿岸環境の修復・保全対策の目標設定・手法検討のためのツールとして、二枚貝の増加条件を記述する数理モデルの枠組み（図8）を構築し、パラメータ調整を進めた。

個体成長モデルの物質収支式 個体重量 $\frac{dW_d}{dt} = hR_F C_p W_d - R_R W_d - (-R_O W_d)$ 摂餌・同化 呼吸 産卵

個体群挙動モデルの物質収支式 個体数 $\frac{dN}{dt} = e_E e_N R_{NO} N - R_{ND} N - R_{NF} N$ 加入 死亡 搬出(漁獲)

W_d : セタシジミ軟体部乾燥重量 [g/個体] N : セタシジミ生息密度 [個/m²]
 R_F : ろ水速度 [L/(g・d)] R_{NO} : 単位時間あたりの産卵個体の割合 [d⁻¹]
 C_p : 餌(植物プランクトン+デトリタス)濃度 [mg/L] e_E : 幼生の定着率 [-]
 η : 同化効率 [-] e_N : 産卵数 [個-幼生/個-母貝]
 R_R : 呼吸速度 [mg/(g・d)] R_{ND} : 死亡速度定数 [d⁻¹]
 R_O : 産卵による重量減少率 [-] R_{NF} : 漁獲による搬出速度定数 [d⁻¹]

図8 二枚貝の増加条件を記述する数理モデルの物質収支式。

- 湖辺の健全な生態的機能を回復させる手順を確立するため、現状・課題把握の調査方法、目標の設定・達成に向けた施策の効果予測方法を「(仮称)湖辺環境改善技術資料」として令和2年度（2020年度）に作成予定であり、令和元年度（2019年度）に素案をまとめた。

■ 養浜事業による沿岸域の底質・生物への影響評価（内閣府「地方創生推進交付金」事業）

- 野洲市マイアミ浜において、湖岸侵食対策として平成28年（2016年）11月に実施された養浜（土砂搬入）工事（滋賀県南部土木事務所所管）の前後で、施工地点（A、B）および対照地点（C）の湖底断面地形、底生動物等のモニタリング調査を実施した。この養浜事業は、波浪や漂砂の移動方向（施工地点→対照地点）を考慮した上で設計され、施工地点では、工事後に設計どおりの地形変化が認められ（図9）、ライフサイクルが長いシジミ類の生息密度は、地形変化が沈静化するまでの約1年間は対照地点より低く推移したことが分かった（図

10)。

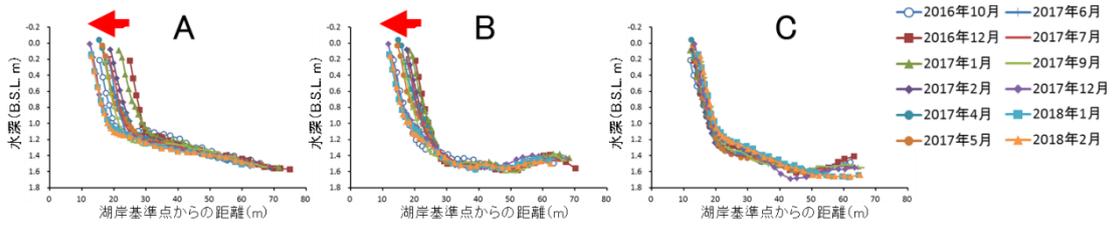


図9 マイアミ浜養浜施工地点(A、B)および対照地点(C)における湖底断面地形(平成28年(2016年)10月～平成30年(2018年)2月)。

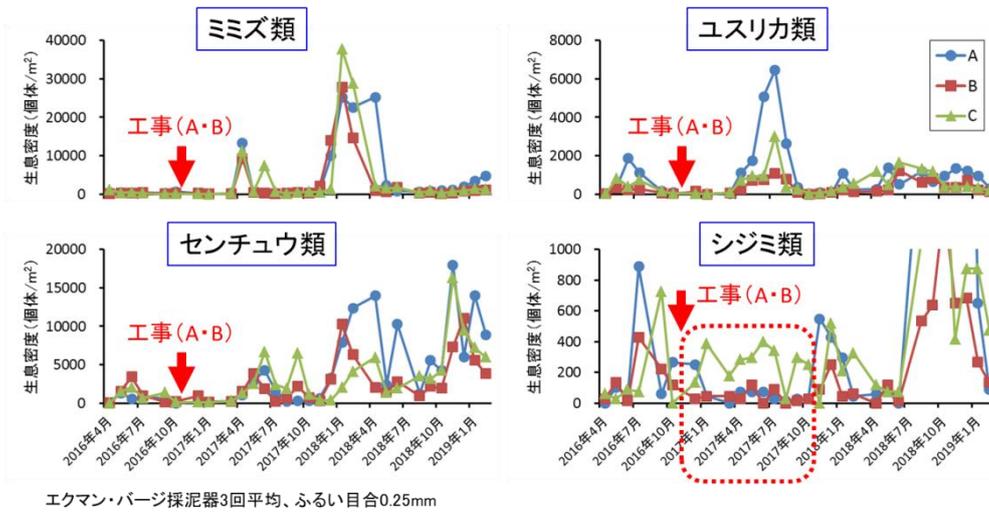


図10 マイアミ浜養浜施工地点(A、B)および対照地点(C)における工事(平成28年(2016年)11月)前後の主な底生動物(ミミズ類、ユスリカ類、センチュウ類、シジミ類)の生息密度(平成28年(2016年)4月～令和元年(2019年)2月)。

研究概要・目的

水系のつながりにおける土砂の動きは、魚介類の生息・産卵環境の形成に影響があることが徐々に明らかになる中で、「森-川-河口」の土砂移動メカニズムを解明するとともに、地域主体の自然再生活動の継続性に焦点を当てることにより、産卵環境に資する土砂管理方法や地域における自然再生活動を継続させるためのポイントを提示する。

研究成果の概要

提言等に関連する研究成果(アウトプット)の概要を記載

↓

右端の数字は関連する提言・成果等の番号

■ 在来魚の保全に向けた森-川の総合的な対応施策

2-1

- ・アユやビワマスなどの在来魚の生息産卵環境を改善するためには、森—川—湖のつながりに留意した流砂系において、アユの産卵に適した粒径 8-16mm の礫を森から琵琶湖まで流せるようにするという、特定の粒径の土砂移動（流砂系）に着目した管理方法が考えられる。
- ・上流の森林域においては、多様な主体の協力により「シカ食害防止」、「人工林の間伐等の森林管理」、「溪畔林への広葉樹の植樹」などの方法を用いて、下層植生の植被率 60%以上の保持を目標とした森林を育成・造成することにより、泥シルトの少ない粒径 8-16mm の礫割合の多い、土砂流出を目指す必要があると考えられる。
- ・アユの産卵に適した粒径 8-16mm の礫移動がアユの産卵環境形成に必要であるため、例えば「固定砂礫堆の耕耘」などにより、8-16mm などの砂礫の移動を促すことによって、一時的には生息産卵環境を改善することができる。恒久的には他の手法を検討することが必要である。
- ・多様な主体の協働による在来魚保全・再生活動の進行管理を進めるためには、「①多様な人たを巻き込む場づくりをすること」、「②地域課題にもとづき分かりやすい目標を立てること」、「③小さな成果を積み重ねること」の3つの要点を意識して、自然再生活動を継続させるように工夫していく必要がある。

■ 下層植生の植被率による土砂流出量の変化

2-2

- ・対照実験の結果、シカ食害で下層植生の植被率が 10%未満になる場合は、シカの食害が少なく下層植生の被植率が 40-60%の場合と比較して、土砂生産率が約 6 倍になることが明らかとなった(図 1)。(比叡山・大宮川水系の調査結果)
- ・シカの食害が少なく下層植生の植被率が 60%以上保持されている森林は土砂流出を抑える効果が大変強く、年間最大日降水量 172mm の強い雨が降った年でも 18 m³/km²/年という大変少ない土砂生産率となることが明らかとなった。(大篠原・光善寺川・日野川水系の調査結果)

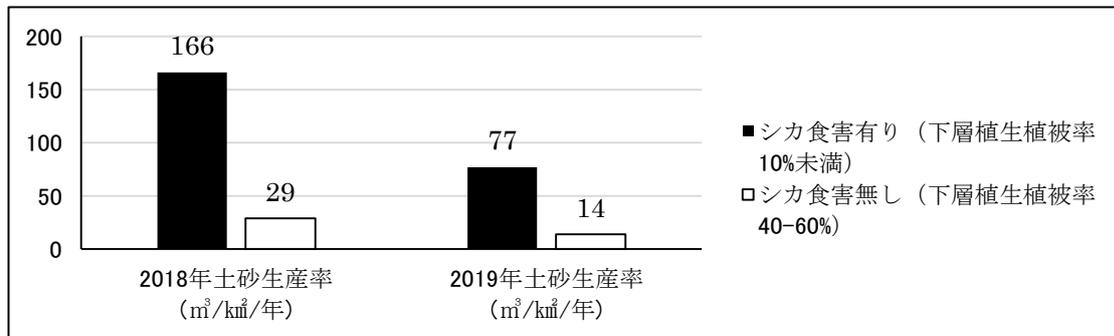


図 1 森林斜面におけるシカ食害による土砂生産率の対照実験結果

■ アユの産卵環境を改善する土砂の移動メカニズムの解明

- ・琵琶湖のアユの好適な産卵場は、 $1\text{kgf}/\text{cm}^2$ 以下の軟らかな小礫でできていること。
- ・琵琶湖のアユの好適な産卵場は、粒径2-16mmの礫が50%以上の構成割合であること。
- ・河床変動2次元シミュレーションと現地調査によれば、16mm以下の礫は $20\text{N}/\text{m}^2$ 以上のせん断力で流されること。
- ・愛知川では、アユの産卵に適した粒径8-16mmの礫は、流量 $100\text{m}^3/\text{s}$ 程度の年に数回起きる程度の出水で移動することが耕耘による調査から明らかとなった(図2)。
- ・河床変動2次元シミュレーションと現地踏査により土砂を移動させる力が $20\text{N}/\text{m}^2$ 以上で顕著な土砂移動があると推定された。
- ・アユの産卵に適した粒径8-16mmの礫は、大水により土砂移動が起こり、瀬頭に一時的に堆積してから、さらに流出するという土砂移動メカニズムの特徴が明らかとなった(図3)。
- ・アユ産卵に適した粒径8-16mmの土砂移動があった時の愛知川下流の河床では、河床に長く伸びたカワシオグサを確認できなかったことおよび既存研究の知見から、動く砂礫によりカワシオグサが効率良く剥離された可能性があることがわかった。
- ・粒径8-16mmの礫の「耕耘による砂礫堆の内部から表面への移動→大水による河床への移動→動く砂礫がカワシオグサ剥離することによるアユの生息河床環境改善→瀬頭への一時的な堆積によるアユの産卵環境改善」という一連の土砂移動メカニズムがアユの生息産卵環境改善に重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

■ ドローンを使った低コストの高頻度高精細の地形測量方法の開発(東京大学 空間情報科学研究センター 共同研究)

- ・ドローンを使った空中撮影により、航空機を使ったレーザー測量より高精細な3次元地形モデルを構築し、高精度の2次元河床変動シミュレーションや粒度分布解析に適用することができた。そのため、ドローン測量を応用することにより、従来の航空機によるレーザー測量よりも低コストで、より高精度、高頻度に河床の土砂移動や粒度分布の状況を把握できることが明らかとなった。(東京大学 空間情報科学研究センター 共同研究 プロジェクト番号814: 高頻度・高精細地形情報を用いた河床における地形変化解析方法および地域住民への空間情報発信方法についての研究)

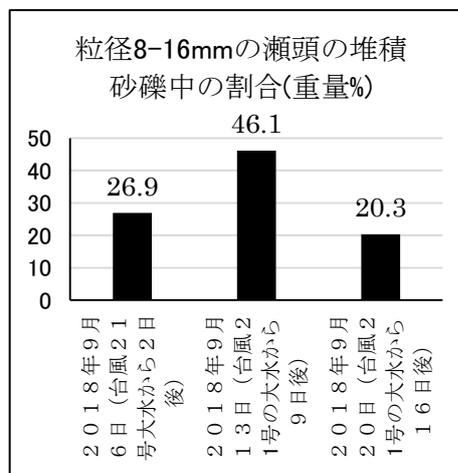
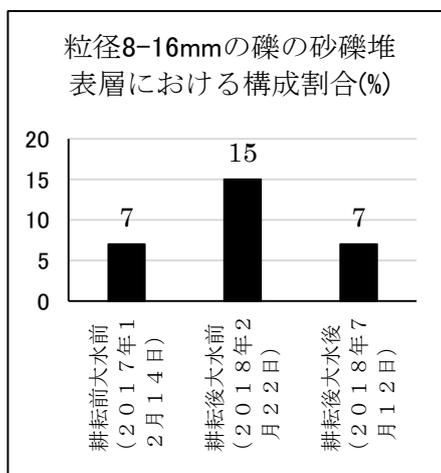


図2 砂礫堆表層礫の粒径 8-16mm の礫の土砂移動 図3 瀬頭に堆積した粒径 8-16mm の礫の土砂移動

■ 土砂移動ポテンシャルと粒径の評価技術の開発

- ・愛知川における河道の滞筋（主に水が流れている場所）の位置は、中流に比べると下流では、ある程度の変動を続けており、下流寄りに位置する耕耘事業地の土砂移動ポテンシャルは比較的高いことが示唆された(図4)。つまり、事業地では、出水があれば耕耘による土砂の流下促進効果が現れやすい可能性が示唆された。
- ・ドローン空撮により砂礫堆（砂州）の表層粒径の変化を評価する方法を開発し、耕耘事業地における平成30年（2018年）の出水前後の粒度変化を求めたところ、砂礫堆の一部の領域において顕著な粗粒化が見られ、主にそこから小さい粒径を含む土砂が流下したことが示唆された(図5)。

2-3

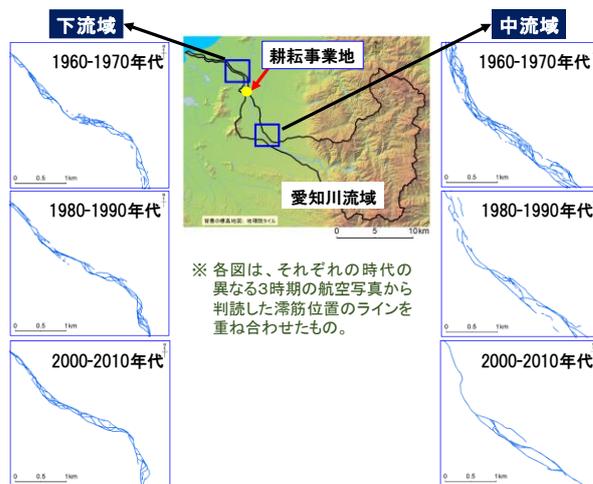


図4 愛知川における滞筋変

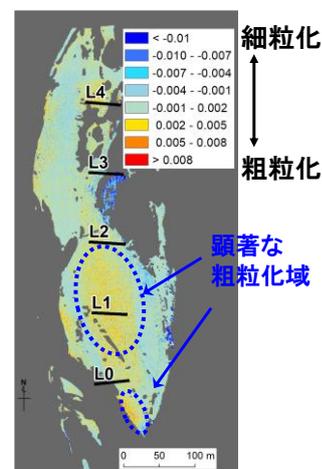


図5 耕耘事業地における2018年の出水前後(6月と12月)の粒度変化指数の分布

■ 多様な主体が協働で行う在来魚保全・再生活動の継続に必要な進行管理の要件

- ・従来、河川環境の回復による在来魚保全・再生は、河川管理者など公的機関が主となり対応してきた。しかし近年、日本各地で地域住民や企業、行政など、河川に関わる多様な主体が協働で取り組む「小さな自然再生」の機運が高まってきている。
- ・家棟川では、平成27年度（2015年度）より河床耕耘や土砂除去等を行った上で、数cm～10cm程度の砂利を投入してビワマス産卵床の造成を実施。その結果、ビワマスの産卵行動が見られ、翌年春には必ず稚魚が見つかるようになった(図6)。平成27年（2015年）にプロジェクトを開始する前の調査では稚魚が発見されたことはなかったため、産卵床造成の効果であると考えられた。
- ・落差工への魚道の設置については平成28年度（2016年度）から実施。落差3.2mの傾斜した落差工（勾配1/3程度）に、初年度は単管パイプで手作り魚道を設置したが、遡上には至らなかった。平成29年度（2017年度）は企業の助成を得て鋼製の魚道を設置したが、再び失敗。平成30年度（2018年度）はその構造を改良し、半円形の柵を下流端に設置して落差を小さくしたところ、ついにビワマスが上流まで遡上する姿が確認された(図7)。平成31年度（2019年度）はさらに上流端のアタッチメントの構造を改良することで、再びビワマスの遡

2-4

上が確認された。

・多様な主体が協働により行う在来魚保全・再生活動を継続していくために必要な進行管理について、家棟川におけるアクションリサーチからは、以下3点の重要性が明らかになった。

①多様な人たちを巻き込む場づくりをすること：

計画段階から一緒に考える、そういう場づくりをすることが重要である。行政が主導して方向性を決め、そこに住民が参加するのではなく、市民の取り組みに行政が参加・協力するという姿勢を持つことが求められる。

②地域課題にもとづき分かりやすい目標を立てること：

家棟川の場合は、地域に残る湖魚食の文化や子どもの頃の川遊びの記憶、「昔はビワマスがたくさん登った」という記憶や言い伝えがあったからこそ、「ビワマスを守ろう」という目標が地域の人たちに無理なく受け入れられた。

③小さな成果を積み重ねること：

家棟川では、自らの調査で貴重な生物が生息していることが分かったこと、産卵床を造成したら初めて稚魚が見つかったこと、地元の夢だった魚道が完成し3度目でついに遡上したことなどが、人々の気持ちを奮い立たせることにつながった。



図6 家棟川で発見されたビワマスの稚魚



図7 落差工の魚道を遡上するビワマス

研究概要・目的

流入負荷の抑制による湖内物質量の削減だけではなく、魚介類等につながる物質循環を円滑にすることの重要性が指摘され始めている。そのため、湖内の食物連鎖（生食・微生物）の状況を詳細な調査により把握し、琵琶湖流域水物質循環モデルを用いて解析し、生態系保全の観点から望ましい物質循環のあり方を研究することにより、物質循環の滞りを改善する施策や管理方法を提示する。

研究成果の概要

提言等に関連する研究成果(アウトプット)の概要を記載

↓

右端の数字は関連する提言・成果等の番号

■ 物質循環の円滑さを評価する指標について

3-1

- 生態系を、生産者、消費者、分解者の食物連鎖関係から模式的に表現したものを図1に示す。各バイオマスが平衡状態にあると仮定すれば、一次生産された有機物は最終的に呼吸により消費されるか、難分解物として蓄積するかのどちらかとなる。生産された有機物ができるだけ無駄なく活用され、上位の消費者等にも回っていくこと、すなわち「フロー」としての物質循環が円滑であることが水域の健全性に直結すると考え、琵琶湖の健全性を図中の3つの指標で捉える。

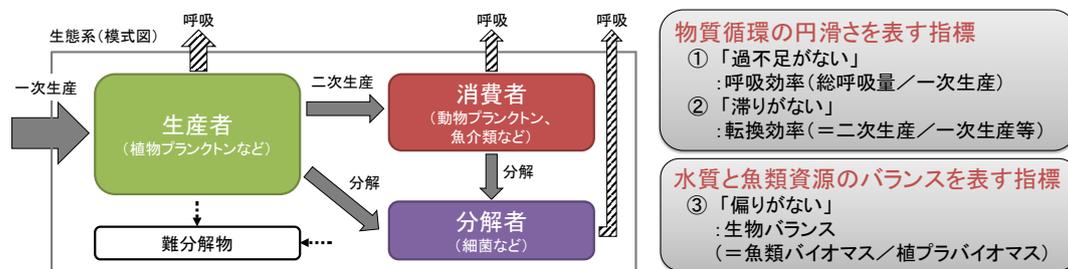


図1 生態系における食物連鎖の模式図と健全性を表す指標

- 琵琶湖流域水物質循環モデルを各指標値が計算できるよう改良し、平成29年度(2017年度)・平成30年度(2018年度)を対象に試算を行ったところ、一次転換効率や生物バランスは春季～秋季に高く、冬季に低くなる季節変動が認められた。一方で呼吸効率については年間を通じて90%程度の値で推移した。

■ 琵琶湖生態系の物質フローにおける生食食物連鎖の重要性について

3-2

- 動物プランクトン(以下「動プラ」)が、生食食物連鎖からの餌(植物プランクトン、以下「植プラ」と、微生物食物連鎖からの餌(微生物)のどちらを多く利用しているのかを調べるため、動プラの比同化速度を調べた。その結果から、動プラは、植プラの方を多く同化しており(11月は除く)、動プラへの餌の流れ(物質フロー)にとっては生食食物連鎖が重要であることが明らかになった(図2)。(環境研究総合推進費「琵琶湖における有機物収支の把握に関する研究」)

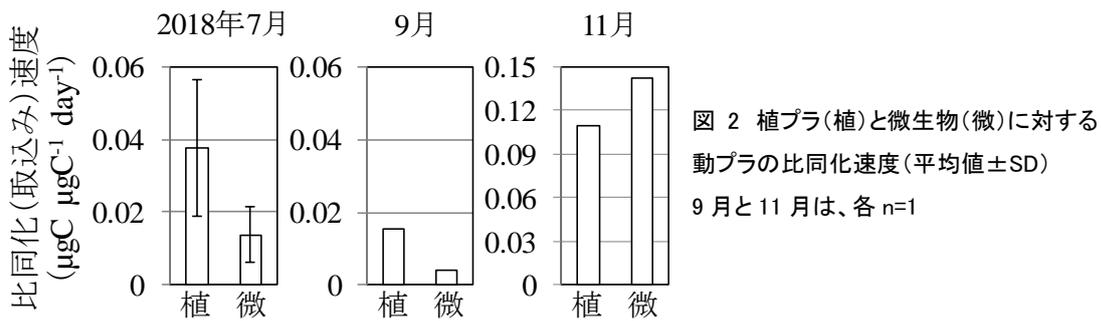


図 2 植プラ(植)と微生物(微)に対する動プラの比同化速度(平均値±SD)
9月と11月は、各 n=1

■ 動プラの餌のサイズについて

3-2

- 琵琶湖の食物網を炭素・窒素安定同位体比で調べた結果から、アユ成魚は主にミジンコ類を捕食し、ミジンコ類は<45 μm (<20 μm と 20-45 μm) の中小サイズの粒子態有機物(植プラ等)を食べるが、大型(>45 μm)のものはほとんど食べないことを確認した(図3)。

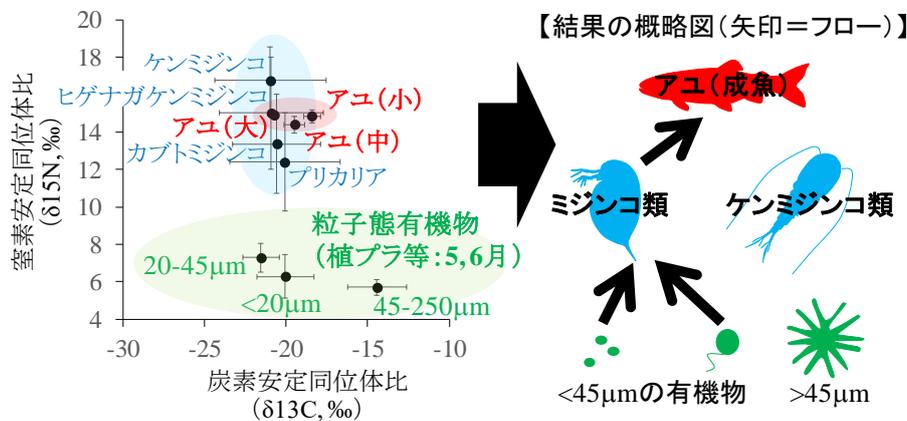


図 3 7月のアユ成魚と5-7月の餌生物(平均値±SD)の安定同位体比の関係(左図)と結果の概略図(右図)

- 動プラのモニタリングの結果から、平成28年(2016年)から平成29年(2017年)にかけての大型藻類(>45 μm)の大発生期間には、数種の動プラの現存量や生産量が低くなる傾向を捉えた。
- 琵琶湖の餌生物(植プラと微生物)を用いた動プラの摂食実験から、動プラは、<20 μmの植プラを主食にしており、20-45 μmの植プラも時々食べるが、微生物や大型藻類(>45 μm)はほとんど食べないことを明らかにした。(環境研究総合推進費「琵琶湖における有機物収支の把握に関する研究」)

■ 「水のきれいさ」と「魚の豊かさ」の両立に向けた施策等の方向性について

3-2

- 前述の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。解析の結果、植プラから動プラ、および動プラ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4)。このことから、動プラ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(=植プラが少ない)で魚が多い」環境のために重要であると考えられた。(環境研究総合推進費「琵琶湖における有機物収支の把握に関する研究」)

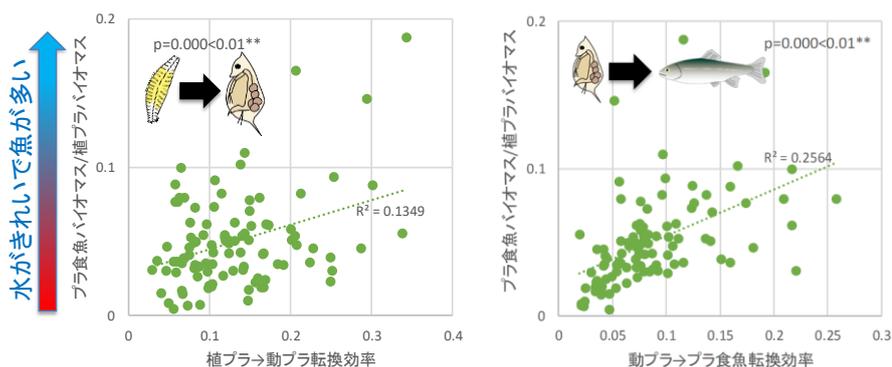


図4 転換効率と生物バランスの関係

■ 湖内有機物収支を用いた環境評価について

3-3

- ・ 植プラ、動プラ、細菌の生産性に関して、先進の各実測法を確立した。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、細菌がもつ炭素要求量（総生産力）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（純生産力）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。（環境研究総合推進費「琵琶湖における有機物収支の把握に関する研究」）
- ・ パルス変動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、連続の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大型緑藻などの植プラ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現象で、琵琶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。（環境研究総合推進費「琵琶湖における有機物収支の把握に関する研究」）

■ 溶存有機物の生成源としての細菌の寄与度推定

3-

- ・ D-アミノ酸バイオマーカーを用いた、細菌由来の溶存有機物の寄与度定量法を、分析法開発と微生物培養実験により、湖沼環境でも適用可能なアプローチとして新たに確立した。
- ・ 琵琶湖湖水の D-アミノ酸分析から、湖水 DOM（溶存有機物）の生成源として細菌の寄与が重要であることが分かった。特に難分解性 DOM には、細菌が 30-40%程度寄与していた。つまり、湖水 DOM には、細菌および植プラ等の、少なくとも二種類の異なる生成源が存在する。（環境研究総合推進費「琵琶湖における有機物収支の把握に関する研究」および水質保全研究助成「湖沼における細菌由来溶存有機物の寄与：鏡像異性体バイオマーカーを用いた定量法の確立」）

3, 5

■ 有機物指標の整理について

3-4

- ・ COD（化学的酸素要求量）と TOC（全有機炭素）の関係整理から、琵琶湖集水域での COD の酸化率は半分程度にすぎないが相対的に有機汚濁のレベルを示す指標として有効であった（図 5）。しかし、COD は生分解時に起こる酸素消費量と等量でなく、試料の量や質による COD の検出率の違いがときに負荷量に対して無視できない程度であることが確認された。BOD5（5 日間培養の生物化学的酸素要求量）は 0.2mg/L 以下では精度が良くないことが明らかとなった。

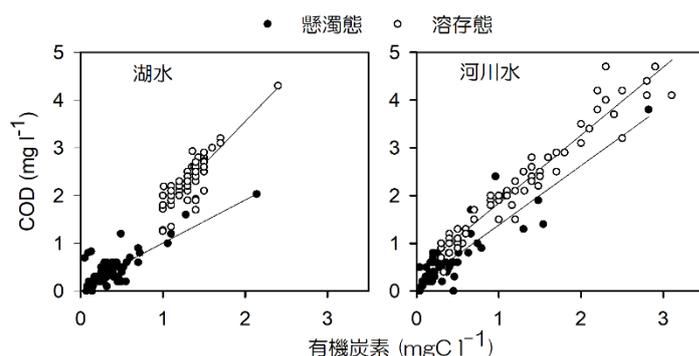


図5 琵琶湖流域における有機炭素濃度とCODの関係

- 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減少を明らかにした(図6)。(環境研究総合推進費「琵琶湖における有機物収支の把握に関する研究」)

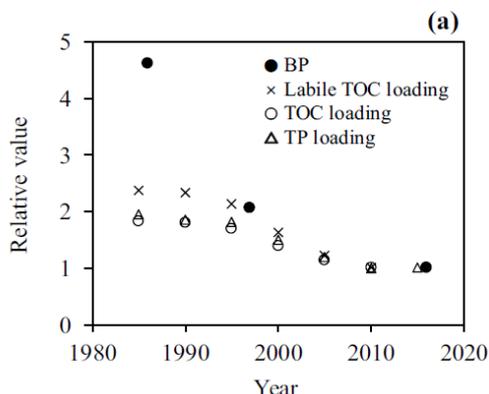


図6 琵琶湖北湖における推定細菌生産量(BP)と流域からの推定易分解性有機炭素負荷量、有機炭素負荷量およびリン負荷量(Tsuchiya et al 2019, Limnology 誌 Fig.6 より転載)

- 水環境における有機汚濁を示す指標の1つである全有機炭素(TOC)の測定について、燃烧酸化式TOC計による懸濁物を含む試料の測定では、正確性が落ちることを明らかにし、測定の改善方法を提案した。(島津製作所との共同研究「琵琶湖水のTOC計測手法に関する研究」)

■ 有機物の生分解性把握のためのBOD法の改良

- 有機物の生分解性を評価する分析手法としてBOD(生物化学的酸素要求量)があるが、琵琶湖においては従来の5日間の培養期間(BOD_5)では測定下限値である 0.5mg/L 未満となることが頻発し、精度に問題があった。そこで培養期間を28日間(BOD_{28})に延長することにより、酸素消費量が約3倍となり、多くの試料において測定下限値を上回り、精度よく測定することができた。
- 試料に栄養塩であるリンの添加を行ったところ、初期の5日間の酸素消費量は増加したが、 BOD_{28} と28日後の有機物量に有意な増加は見られなかった。よってリンの添加は細菌の代謝活性を高めるが、有機物の分解・無機化にはつながっていないと考えられた。(環境研究総合推進費「琵琶湖における有機物収支の把握に関する研究」)

■ 炭素安定同位体比分析による有機物の起源推定および分解性評価

- ・ 分解実験の結果から琵琶湖における難分解性の溶存態有機物 (DOM) の炭素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) はほぼ一定の値 (約 -26‰ 程度) であることを初めて実測した。これにより琵琶湖湖水 DOM の起源解析の計算において、陸域・湖内由来の寄与度を求める際に実測値を利用可能になった。
- ・ 分解実験前の粒子態有機物 (POC) の $\delta^{13}\text{C}$ 値が難分解性 POC の濃度に対して正の相関が見られた。このことから、湖水 POC の $\delta^{13}\text{C}$ 値が、難分解性 POC の濃度の指標として有用な可能性がある。
- ・ POC の $\delta^{13}\text{C}$ 値は夏季の植プラの増加だけでなく冬季に特異的に大型緑藻の増加が見られた場合にも値が上昇した。陸域由来の POC $\delta^{13}\text{C}$ 値はほぼ一定であるとされていることから、難分解性 POC の起源として大型緑藻が影響を及ぼしていることが示唆された。

■ 溶存有機物の分子サイズと生分解性

- ・ 琵琶湖湖水 DOM の分子サイズ分布を分析したところ、高分子 DOM と低分子 DOM の二つの画分に大別できた (図 7 左)。(国立環境研究所琵琶湖分室との共同研究)
- ・ 長期生分解実験により、両画分の生分解性の違いが明らかになった (図 7 右)。高分子 DOM は 101 日経過時点でほぼ生分解される易分解性だった。低分子 DOM は 205 日経過しても生分解実験開始前の 80%程度が残存する難分解性だった。生分解に伴う DOM の吸光・蛍光特性の変化も、分子サイズにより異なった。
- ・ これらの結果により、分子サイズ分布が DOM 生分解性の有用な指標となる可能性が示された。

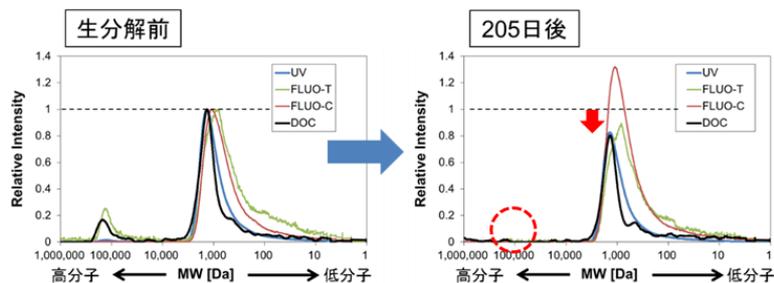


図 7 琵琶湖湖水の溶存有機物の分子サイズ分布の 205 日間の生分解に伴う変化

(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。)