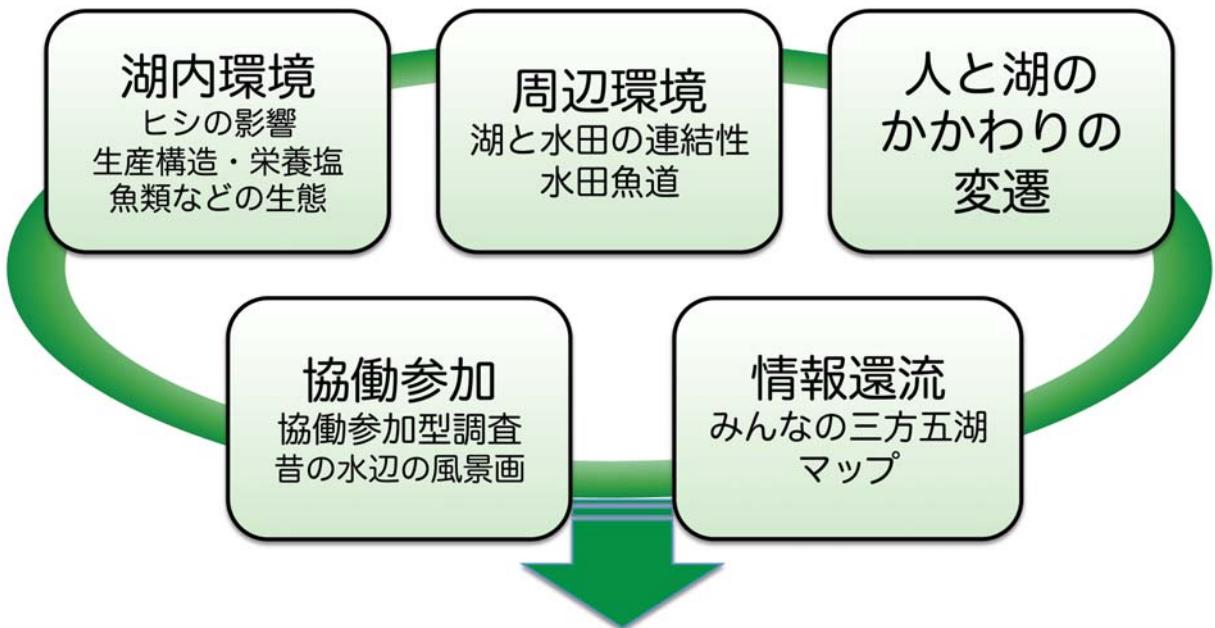


三方五湖の自然再生を支援する総合的環境研究

吉田丈人・鷲谷いづみ（東京大学）ほか

三方五湖の最上流にあり環境改変の顕著な三方湖を主な対象



目標① 地域主体の自然再生を支援する

目標② 水辺生態系再生の研究モデルを提示する

三方湖総合研究プロジェクトの概要。三方湖を主な研究対象とし5つのテーマからなります。湖内や周辺の環境において現在進行中の現象を科学的に評価するほか、水田魚道など有効な再生技術の開発を行っています。また、人文社会学的視点から地域の人と湖のかかわりの変遷を調べています。さらに、地域の多様な人々と共に調査や取組みを行うほか、地域と双方向に情報還流する仕組みをつくりつつあります。これらの研究により、地域主体の自然再生を科学的に支援するほか、他の地域にも適用できる研究モデルを提示することを目標としています。

持続可能な自然共生型社会
将来の世代にわたって生態系の
恵みを十分に享受し続けられる
実現が求められています。健全な
生態系や豊かな生物多様性の保
全や再生がなされることは、人と自
然とが密に関係する地域社会が
豊かであり続けられるのではないか
でしょうか。地域社会における
自然再生の取組みには、地域で培
われてきた知と、科学が積み上げ
てきた知を融合させ、地域に適合
した科学的基盤をもつことが有
効です。

三方五湖の現状と課題

違う環境をもつ五湖からなる三
方五湖は、多くの種類の魚類や鳥
類など、豊かな生物多様性を育ん
できました。しかし近年、生態系
の健全性が劣化し、生物多様性の
顕著な低下が見られます。これに
は、富栄養化など水環境の劣化、
湖と用水路・水田間の水系連結の
分断化、水草の繁茂する自然海岸

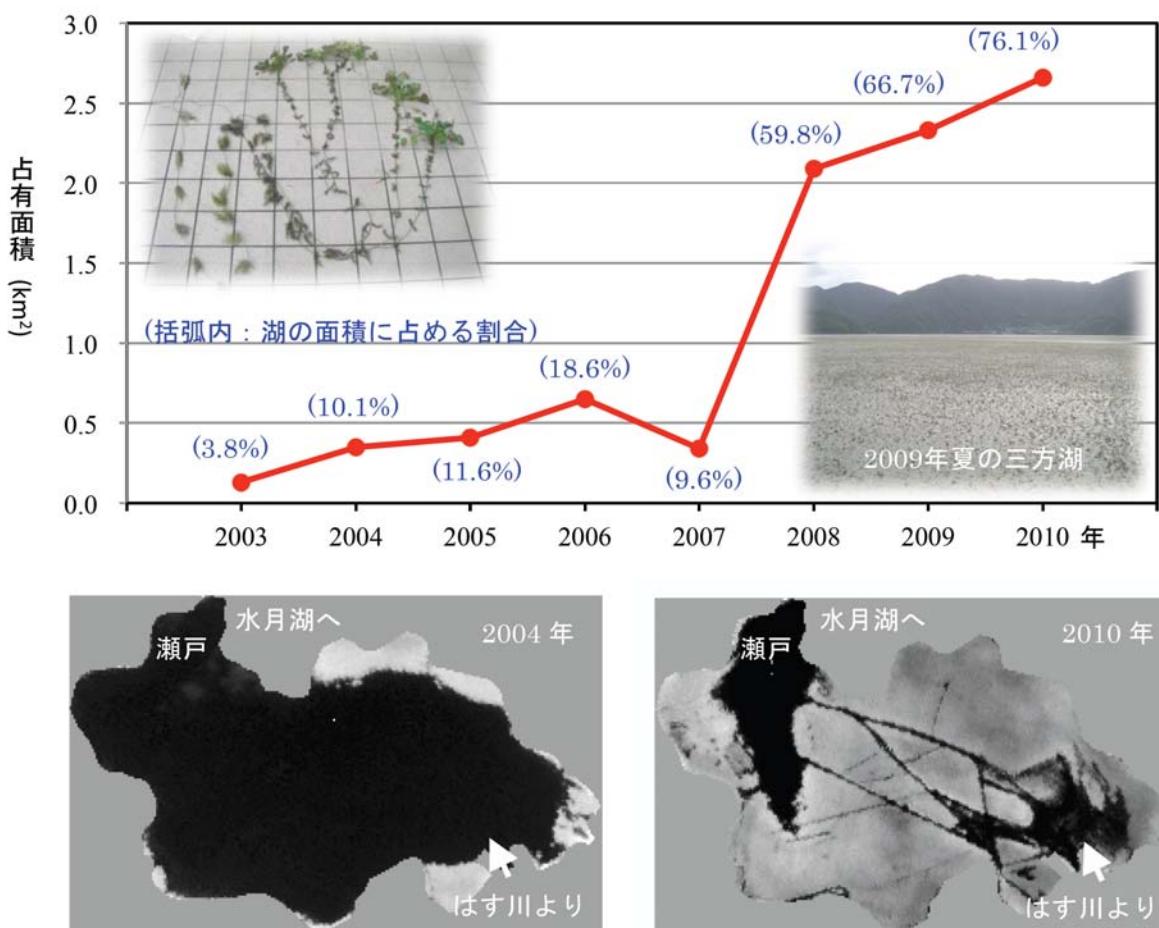
の消失、在来種を駆逐する外来種
の侵入などが、主要な原因として
考えられます。

三方湖総合研究 プロジェクト

三方五湖の自然再生を支援する
総合的な環境研究を、最上流にあ
り環境改変がもつとも顕著な三
方湖を対象として、平成21年度
に開始しました（図）。生息環境
や水系連結の評価を行い、人と自
然のかかわりの変遷を解明し、再
生の必要性が高い環境要因を明
らかにしようとしてきました。ま
た、有効と考えられる再生策を実
験的に行い、順應的な取組みのき
っかけを提供してきました。さら
に、地域の多様な人たちが積極的
に参加する自然再生の実現を目的
として、協働参加型調査も行つ
きました。このあとに続くページ
では、今後の三方五湖の自然再
生に活かされることを期待して、過
去3年間で私たちが調べてき
た調査結果や実験的取組みを紹介
します。

三方湖のヒシはいつどこに繁茂したのか？

西廣 淳・加藤義和・吉田丈人（東京大学）



上のグラフは三方湖におけるヒシの生育範囲と面積の変化を示しています。下の白黒の画像は、人工衛星画像を用い、正規化植生指標（波長組成の値を用いて植物を識別する指標）に基づいてヒシの葉が白く表現されるようにした分布図です。2004年と2010年の例を示しました。

私たちには、人工衛星から撮影された画像と、現地調査の結果を照合することにより、湖全体でのヒシの生育範囲を比較的容易に把握する手法を開発しました。夏季に撮影された人工衛星画像の解析の結果、2007年までは、ヒシが繁茂する範囲は、湖の北側など、局所に限られていたことがわかりました。しかし、その

2008年夏、三方湖の湖面は水草「ヒシ」に覆われました。水面が見えなくなり、例年とは大きく表情を変えた湖の様子は、新聞でも取り上げられました。ヒシは湖の底に根を張り、長い茎で水面まで葉を到達させる「浮葉植物」です。4月頃に発芽して茎をのばし、6月頃に水面に到達し、夏の間は葉で水面をびっしりと覆います。秋には枯れ、種子で越冬する一年生植物です。ヒシの繁茂は、湖の景色を変えてしまうだけでなく、船の航行障害などの影響をもたらします。そのため、三方湖ではヒシの刈り取り管理が行われています。

ヒシはいつから増えた？

ヒシが湖の広範囲を覆った年でも、はす川の河口部付近と、水月湖につながる「瀬戸」付近は、ヒシがほとんど生育していません。はす川の河口では、大雨が降ると流速の速い水の流れが生じます。このため、ヒシの種子が安定して湖底に維持されないようです。このことは、ヒシの種子を網袋に入れて設置する実験から示唆されました。一方、瀬戸付近は、現地での測定と実験の結果、時々水月湖から塩分を含んだ水が流入することで、ヒシの生育が阻害されていました。

ヒシの繁茂には、ヒシの種子を押し流す力の強さや、下流の湖からの塩水の逆流量といった「水の動き」が、他の要因とともに影響しているかもしれません。

湖を覆うヒシ

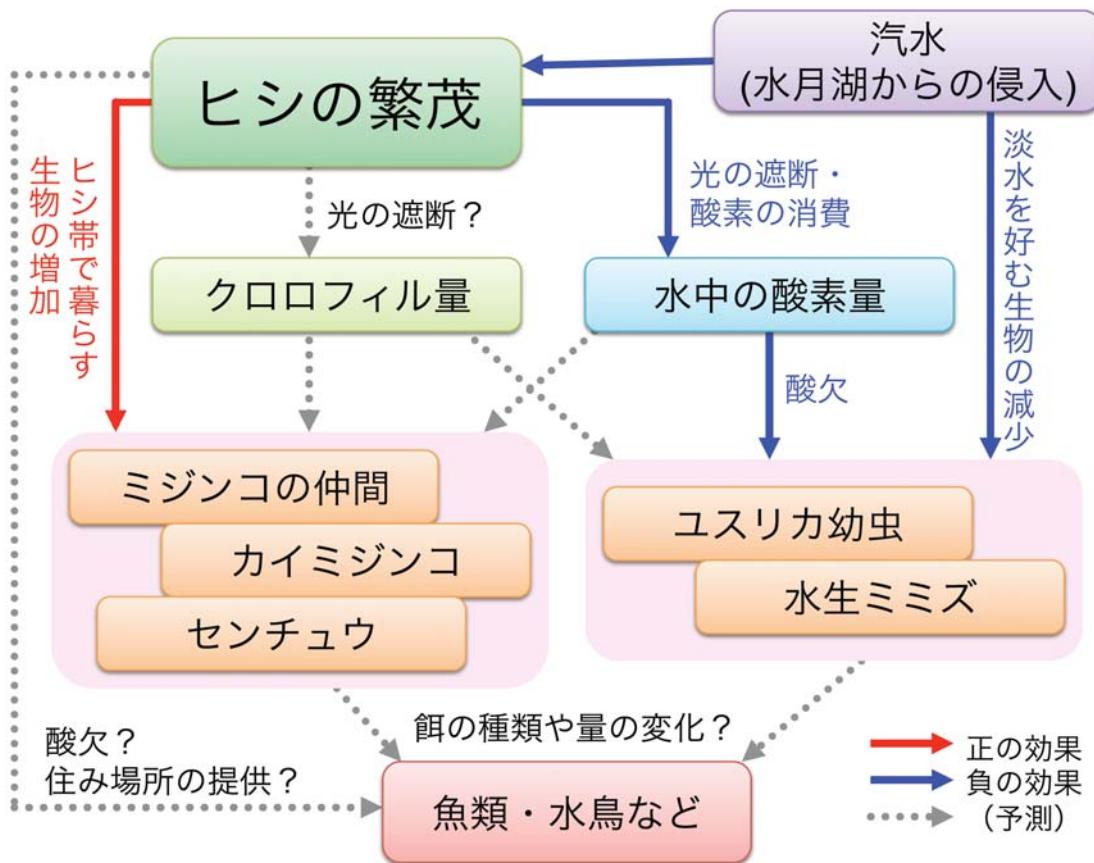
08年以降は湖の面積の半分以上を覆うようになつたことがわかりました（グラフ）。

このような急増の原因は、まだよくわかつていません。しかし、三方湖の中でのヒシが繁茂する場所の条件を分析することで、ヒントが得られてきました。

ヒシが繁茂する場所

繁茂したヒシは、三方湖をどう変えたのか？

加藤義和・西廣淳・吉田丈人（東京大学）



繁茂したヒシが三方湖に及ぼす影響をまとめた図。生物の数を増やすような影響を“正の効果”（赤い矢印）、逆に生物の数を減らすような影響を“負の効果”（青い矢印）として示してあります。また、これまでの研究ではまだ確かめられていないものの、想定される影響を“(予測)”（灰色の矢印）で示しました。さらに、三方湖特有の現象として、水月湖から不定期に侵入する汽水の影響も加えてあります。

三方湖では、2008年の夏からヒシが湖面を覆うようになり、その風景を一変させました。このとき、湖の中では、どのような変化が起きていたのでしょうか？私たちはこれまでに、季節を通じて湖内の調査を行ってきましたが、水質や動物プランクトン、小型のベントス（湖底で生活する動物）などの調査から、さまざまな変化が明らかになってきました。

夏になってヒシが湖を覆うと、水中に届く光が少なくなり、クロロフィル量（植物プランクトン量の指標）も少なくなりました。また、水中の酸素量が少なくなり、特に湖底では、魚が住めないほど酸欠が起いていました。さらに、ユスリカの幼虫や水生ミミズ（水中で生活するミミズの仲間）など、酸素の多い場所を好む動物は、ヒシに覆われた場所ではほとんど見られませんでした。秋になってヒシが枯れると、湖の中は再び酸素の豊富な環境に戻り、ユスリカの幼虫や水生ミミズ

が湖の広い範囲で見られるようになります。このような状態は、翌年に再びヒシが成長し、水面が覆われるまで続きました。一方、ミジンコやカイミジンコの仲間、センチュウはヒシに覆われた場所で数多く見つかり、ヒシのない場所やヒシが枯れている時期にはほとんど見つかりませんでした。これらの動物は、ヒシの茂った環境を好んで利用していると考えられます。

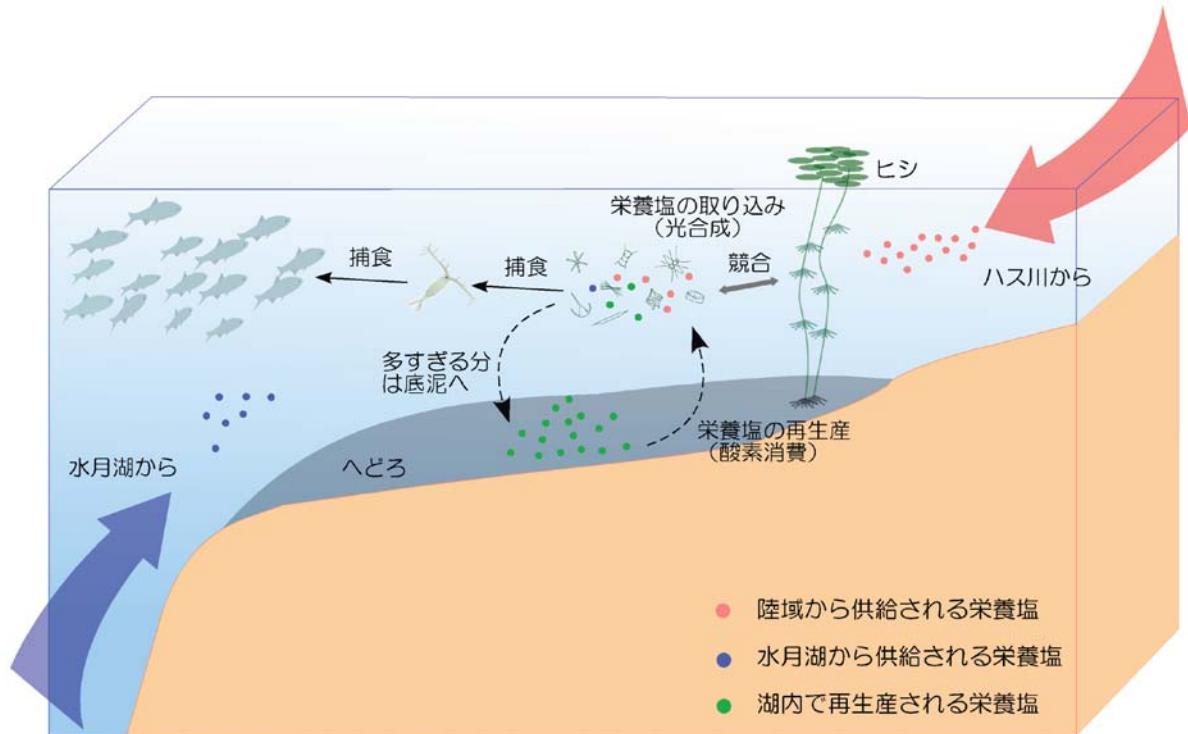
ヒシとうまくつき合つには

繁茂したヒシが三方湖に与える変化はさまざまであり、まだ十分に分かっていないものもあります。魚類や水鳥といった、より大きな動物への影響も明らかにする必要があります。

ヒシは三方湖にもともとあった植物であり、今後もうまくつき合っていく必要があります。繁茂したヒシがどのような変化をもたらすのかをよく知ることで、その答えが得られるはずです。

三方湖の一次生産構造から富栄養化の原因を探る

杉本 亮・草野 充・佐藤専寿・小北智之・青海忠久・富永 修（福井県立大学）



上図は、本研究により明らかになった三方湖の一次生産構造をまとめたものです。三方湖の植物プランクトンは、図のように多様な起源の栄養塩を取り込んで増殖します。また、植物プランクトンとヒシは、どちらも栄養塩を取り込んで増殖する一次生産者ですから、栄養塩を巡る競合関係が春から夏にかけて起こっています。栄養塩を取り込んだ植物プランクトンは、動物プランクトンなどの高次消費者に捕食されることで、最終的には魚などの重要な餌源となっています（5ページ参照）が、まだ過剰な増殖が起こっているのが現状です。

はじめに

少し前まで三方湖と言えばアオコの湖でした。アオコは悪臭を放ち、見た目も悪いですから発生しなくなつたことは良いことかもしれません。アオコが発生しなくなった三方湖では今、湖面を覆い尽くすほどに繁茂するヒシが大きな問題となっています。なぜ三方湖ではアオコにしてもヒシにしても異常とも言えるほどに大増殖するのでしょうか。異常増殖の背景には、湖の富栄養化が大きく関係しています。

富栄養化を診断する

アオコやヒシは水中の栄養塩を取り込んで成長する一次生産者です。異常増殖の原因を考えるには栄養塩の起源を考える必要があります。そこで、安定同位体比というツールを使って、三方湖の一次生産者が利用する栄養塩の起源を調べたところ、大きく三つありました。一つは、陸域から排出

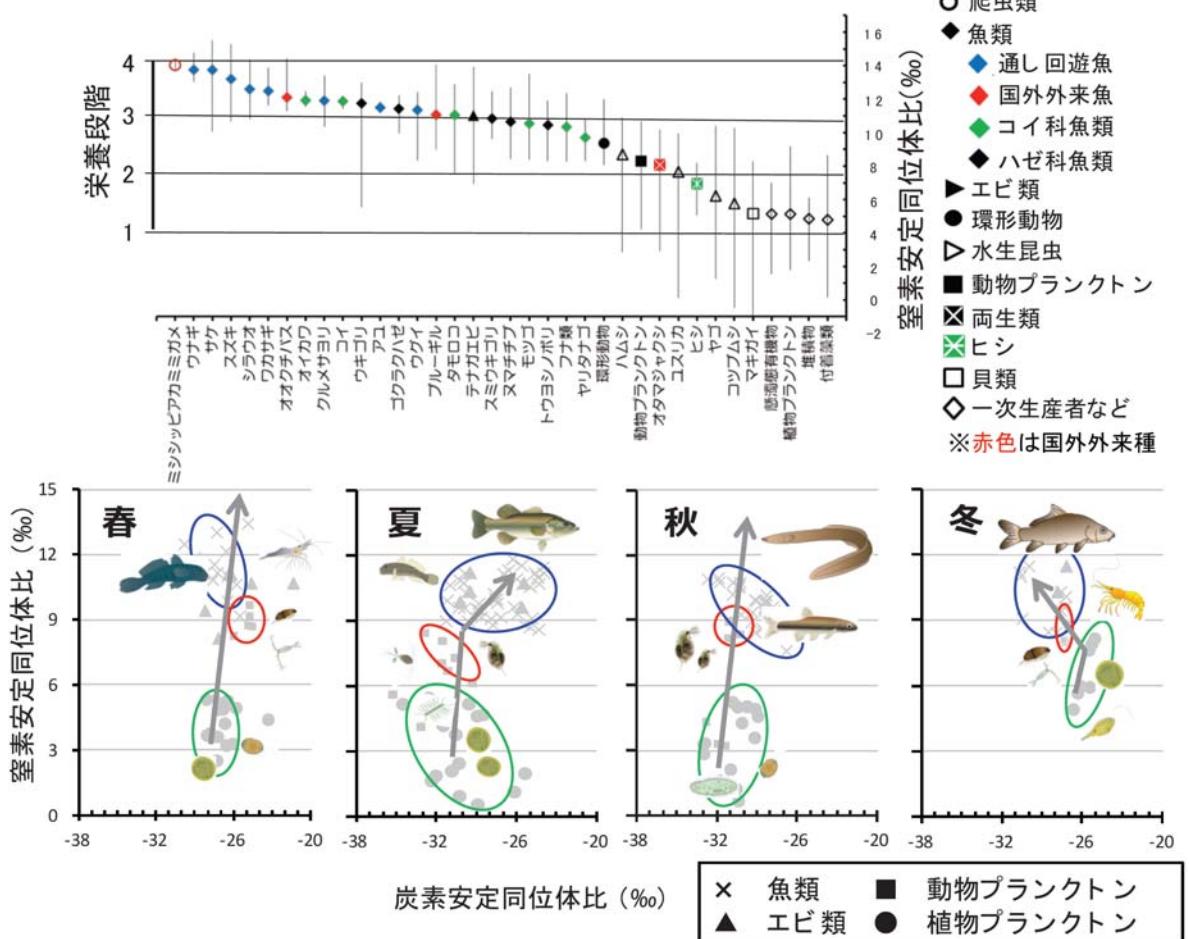
される栄養塩です。これには生活排水や農業排水が含まれます。次に、湖底のヘドロから分解される栄養塩があります。これは水温の上昇する夏場に特に大きな影響を与えています。また、隣接する水月湖からも栄養塩が供給されていることが分かってきました。

再生産する栄養塩

現在の三方湖は、まだまだ富栄養化がひどく、季節的には過剰な一次生産が起こっている状態です。これまで陸域から人為的に排出される栄養塩の削減は下水処理を普及させるなど積極的に行われてきましたが、湖内で再生産される栄養塩はそれほど重要視されていませんでした。ヘドロの多くは、過去に陸域から排出された人為起源の栄養塩や有機物です。今後は、陸域から排出される栄養塩だけでなく、ヘドロから再生産される栄養塩の対策も、湖内の富栄養化を抑えていく上では欠かすことのできない課題と言えます。

三方湖の食物網から生き物のつながりを見る

富永 修・草野 充・佐藤専寿・小北智之・青海忠久・杉本 嘉（福井県立大学）



三方湖ではウナギ、コイ科、ハゼ科、外来魚のブルーギルなど30種をこえる魚類が採集されました（上図）。また、植物プランクトン（緑楕円）と動物プランクトン（赤楕円）の安定同位体比は、春から夏にかけて左方向に移り、秋から冬にかけては、右上方向に変化します。上位の栄養段階の魚類（青楕円）は、少し遅れて同じように移動します。しかし、上下の移動は春にやや高くなるものの、あまり変化しません。これは、魚のように相対的に大きな生き物は、餌の同位体比を反映するために時間がかかるからです。また、冬から春は水温が低く、同化速度が低下することが考えられます。安定同位体比の挙動からみて、多くの魚類が食物源を植物プランクトンに依存しているようです（下図）。

三方湖ではヒシの大繁茂、二つ目は、2000年に初めて確認され、急増している特定外来魚ブルーギルの侵入です。問題が生じてから時間が短いために、どのような影響ができるのか、まだよくわかりません。そのため、まず網羅的に食物網構造を調べて、現状を把握することから始めました。

三方湖の生き物の食物関係

私たちは、食物源と栄養段階を推定することができる安定同位体

食物網とは、ある場所で生活する生き物の「食う・食われる」の関係を括的に捉えたものです。食物網の解析は、捕食・被食関係をみるだけでなく、種間競争や餌生物のさじにその餌との相互作用を理解するのも重要です。種間の相互関係が乱されると、食物網構造が変化し、生物多様性が脅かされることがあります。三方湖では、この関係を乱す二つの問題が、ほぼ同時に発生しました。一

生き物の連関を保つために

初夏にヒシは植物プランクトンと栄養塩を奪い合うことになります。また、ブルーギルはモツゴやタナゴと餌を巡る競合が生じています。しかし、ヒシの存在により増加する線虫やカイムシなどもいます。今後、食物網を通して種間相互の関係を詳細に分析に与えるヒシの功罪やブルーギルの定着を可能にしていく要因を検討する事が課題といえます。

三方湖の食物網を乱す問題

比分析という手法を用いて食物網を調べました。三方湖の生き物の栄養段階は、植物プランクトンなどの一次生産者を1とすると、水生昆虫や動物プランクトンなどが2、モツゴやタナゴ、ブルーギルは3、最も高い生き物は、アカミミガメとウナギでした。また、植物プランクトンと魚類の安定同位体比の季節的挙動から、三方湖の多くの魚類が、食物源として植物プランクトンに依存していることがわかつきました。

三方湖における湖沼沿岸帶復元の取り組み

久保光（福井県雪対策・建設技術研究所）ほか

「水質浄化」+「生物多様性」

モニタリング調査結果

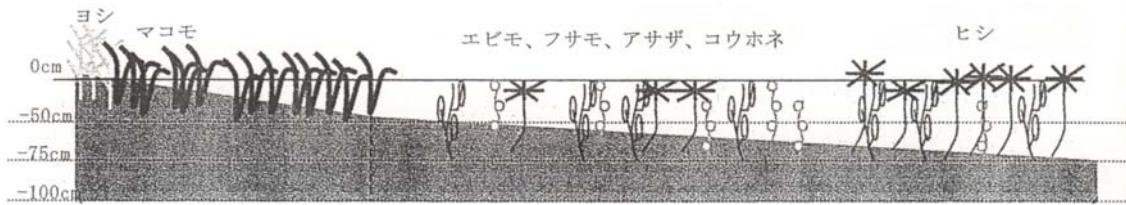


図1 復元する植生の目標

三方湖周辺で過去に記録されている絶滅危惧種（イバラモ、トチカガミ等）は多いですが、多くは護岸工事のときに激減し、その後は水質悪化等の影響もありほぼ壊滅状態となっているのが現状です。そこで、コンクリート護岸整備前（S20～35年頃）の岸辺の植生状況を聞き取り調査し、その結果を基にして復元する植生の目標設定（図1）を行いました。



図2 植生護岸整備箇所

植生護岸整備における基本方針（抜粋）

- ①水質の悪化している三方湖の浄化と失われた生物多様性の再生を目的とした植生護岸を計画する。
- ②植生計画には失われた自然植生の回復を盛り込む。
- ③植生護岸は現在の水深よりも浅くし、植生が可能となるように盛土する必要があるが、その水深ははす川の事例をもとに、最大水深を1mとする。
- ④盛土の勾配は、波高との関係から1:30とし、盛土材料は流域内のはす川の浚渫土を使用する。
- ⑤施工前後の植生状況を調査し、今後の植生護岸計画に反映していく。

近年、霞ヶ浦の「アサザプロジェクト」に代表されるように、植生帯を用いた「水質浄化」のみならず「生物多様性」にも配慮した植生護岸が注目を集めています。このような背景から、三方湖の実情に詳しい専門家でワーキンググループを形成し、生物多様性に配慮した植生護岸の工法を検討し工事を行い、モニタリング調査を実施しました。

植生護岸タイプ1は、捨石により法尻を保護し、背面を安定勾配の1:30で水深50cmまで盛土しました。また、はす川で採取したヨシを植栽しました。図2に示すようにK1～G2～K2の位置に植生護岸タイプ1を整備しました。また、植生護岸タイプ2は、捨石により法尻を保護し、背面を安定勾配の1:30で水深100cmまで盛土しました。表面には三方湖のはす川河口部の底泥を敷き均し、シードバンクからの発芽を期待しました。

近年、霞ヶ浦の「アサザプロジェクト」に代表されるように、植生帯を用いた「水質浄化」のみならず「生物多様性」にも配慮した植生護岸が注目を集めています。この背景から、三方湖の実情に詳しい専門家でワーキンググループを形成し、生物多様性に配慮した植生護岸の工法を検討し工事を行い、モニタリング調査を実施しました。

植生護岸のタイプ

施工した植生帯のモニタリング調査を引き続き行うとともに、これまでのモニタリング調査結果を基に適切な植生護岸を検討し目標とする湖岸植生を回復する必要があります。また、新たな生物多様性の指標として、ヨシ帯等での魚類の産卵や孵化を捉えることも必要と考えられます。ヨシによる水質浄化は、ヨシの刈り取り作業が必要となることから、官民協働の実施体制の構築が必要です。

植生護岸タイプ1では、ヨシ帯での魚類数が増加しています。この原因は、植生護岸タイプ1を設置したことにより、既存植生地とつながり、魚類の生息環境が良くなつたためと考えられます。また、ホソバミズヒキモやクロモは、植生護岸タイプ2のシードバンクから発芽・生育した可能性があります。

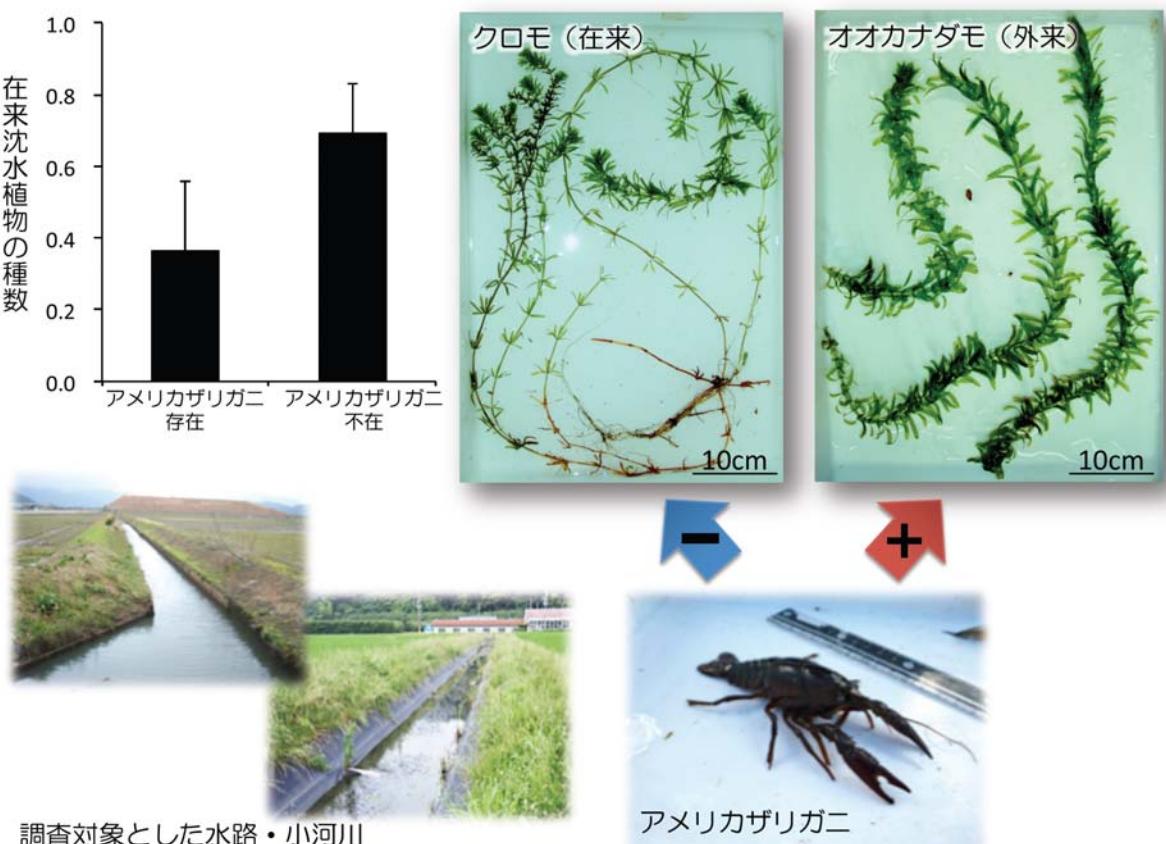
今後の課題

三方湖周辺の水路・小河川に生育する沈水植物

久保 優・照井 慧・西廣 淳・鶴谷いづみ（東京大学）

三方湖の沈水植物

分布に与える影響は？



アメリカザリガニが在来沈水植物クロモと外来沈水植物オオカナダモに与える影響。アメリカザリガニは在来沈水植物の生育には負の効果、外来沈水植物には正の効果を与える可能性が考えられました。棒グラフは、アメリカザリガニが確認された地点と、確認されなかった地点における、在来沈水植物の種数（平均値）を示しています。

三方湖周辺の水路や小河川における沈水植物の生育状況を調査した結果、クロモをはじめとする4種の在来沈水植物が確認されました。しかし、最も広い範囲で認められた種は、侵略性の高い外来沈水植物として知られるオオカナダモでした。また、この地域では、植物体を切断することでオオカナダモも確認されました。在来沈水植物を保全するためには、これら外来種による影響を明らかにする必要があります。

水路に生育する沈水植物

三方湖では、湖岸域の改变や水質悪化などの影響で、沈水植物はほとんど消失してしまいました。しかし、周辺の水田を流れる水路には、まだ沈水植物が残されています。

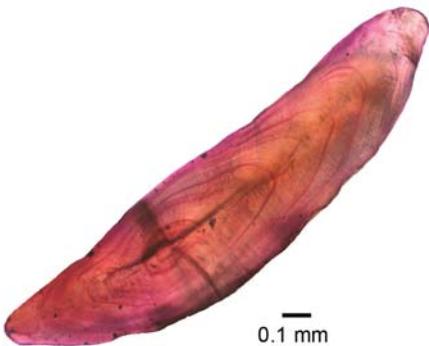
三方湖では、湖岸域の改变や水質悪化などの影響で、沈水植物はほとんど消失してしまいました。しかし、周辺の水田を流れる水路には、まだ沈水植物が残されています。

三方湖周辺の水路59の地点で調査をしたところ、在来沈水植物だけが生育する地点では、複数種の沈水植物が混生していたのに對し、オオカナダモ以外の沈水植物はほとんど認められませんでした。オオカナダモは高密度なマット状の群落を形成するため、在来沈水植物が生育しにくくなっています。

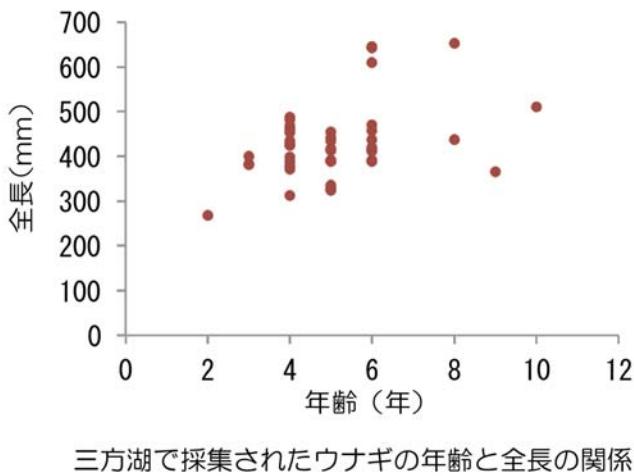
また、統計解析により、在来沈水植物はアメリカザリガニが存続すると出現しにくくなるのに對し、オオカナダモは、逆に出現しやすくなる傾向が認められました。オオカナダモは、切斷されてもすぐに根を出し、「切れ藻」によって増える性質が強いため、アメリカザリガニがプラスに働くかもしれません。また、オオカナダモは在来沈水植物とは異なり冬でも枯れないので、アメリカザリガニにとっても生息しやすい環境を作り出していることも考えられます。そのため、在来沈水植物を守るためには、これらの外来生物を、同時に、丁寧に排除することが重要です。

三方五湖に生息するウナギの成長と生息域利用

海部健三・塚本勝巳（東京大学）ほか



二ホンウナギの耳石（研磨・染色済）
岡山県児島湾で2008年に採集
5歳、455 mm



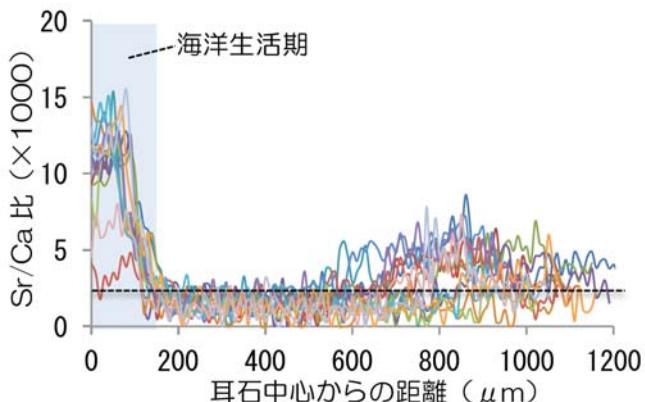
三方湖で2010年に採集された二ホンウナギ43個体について、年齢、全長、成長速度を求めました。これらのが天然加入群であると仮定した場合、1年あたりの成長速度の最大値は113 mm、最小値は34 mm、平均は77 mmでした。採集されたウナギが、1年程度養殖されたのちに放流されたと仮定すると、成長速度の最大値は79 mm、最小値は14 mm、平均は46 mmになります。



三方湖汽水域（右図試料採取水域）

$$\text{成長速度} = (\text{全長}-60)/\text{年齢}$$

ウナギの頭骨の中には、耳石と呼ばれる炭酸カルシウムの塊があります。耳石には、季節による成長の変化に伴って、輪紋が形成されるため、この輪紋の数を読み取ることによって、ウナギの年齢を知ることができます。年齢と捕獲時の大さ、シラスウナギの平均全長(60 mm)から、年間の成長速度を求めることができます。



三方湖汽水域（左図）で採集されたウナギのSr/Ca比。破線より下の値が淡水生活期、上の値が汽水生活期を示す。若齢期にSr/Ca比が低く、その後高くなっていることから、淡水域から汽水域へ移動したことが分かります。

できます。

三方湖で採集された上記の43個体について、Sr/Ca比により、汽水・淡水の生息域利用履歴を推測しました。その結果、すべてのウナギに、淡水経験があることが判明しました。他水域では、淡水経験のない個体や、汽水からの淡水への移動する個体がある程度の割合存在します。本水域に生息するウナギの場合、淡水から汽水、上流から下流へと、一定の方向へ移動している傾向が示されました。

成長

生息域利用

耳石の主成分は、おむね炭酸カルシウム(CaCO_3)です。カルシウム(Ca)と物理化学的性質が似たストロンチウム(Sr)が環境水中にあると、カルシウムと同じように耳石に取り込まれます。淡水中にはストロンチウムが少なくて、汽水・海水中に多いため、耳石中のSrとCaの比(Sr/Ca比)を測定すれば、耳石が淡水で成育したのか、汽水・海水中で成育したのか、調べることができます。

三方湖で採集された上記の43個体について、Sr/Ca比によ