

## まとめと残された課題

---

山室真澄（東京大学・産業技術総合研究所）

### はじめに

「宍道湖保全再生協議会」は、2012～2017年度の6年間の予定で発足しました。発足した2012年の宍道湖では、宍道湖の漁業に直接間接に影響する深刻な「異変」が多発していました。まずヤマトシジミ漁獲量が急減していました。原因として様々なことが言われていましたが、2008年頃から水草が繁茂するようになっていたことから、「濁ってプランクトンが多い状態から透明で水草が多い状態にレジームシフトした結果」との見解もありました。ただし2012年には水草の大繁茂とアオコの大発生が同時に起こっていました。同じく水草で、水質浄化作用があるとされていたヨシの枯死体が、出水後に大量に鋤簾にかかる事態も発生していました。2007年頃には、採れたシジミがカビ臭により販売できませんでした。これはラン藻類の1種が原因と分かりましたが、ではなぜ宍道湖でラン藻が増えるようになったのかは不明なままでした。さらにはシジミだけでなく、宍道湖七珍として身近な漁獲対象だったワカサギやウナギ、テナガエビも採れなくなっていました。

ここではまず、上記の異変の原因として本協議会が達した結論や解明できなかったことをまとめます。次に考え得る対策と、対策を行う上での課題を紹介します。

### 協議会の研究でわかったこと

#### 1. ヤマトシジミの増減は、塩分によって珪藻かラン藻のどちらが優占するかで決まる

2010年から2012年にかけて急減した宍道湖のヤマトシジミ資源量は、2013年の秋に急速に回復した。本報告書1-2によると、2010年から2012年にかけての宍道湖では植物プランクトンとしてラン藻類が優占していたが、2013年には珪藻が優占していた。また宍道湖よりもシジミが速く成長する神西湖では、対象期間中、常に珪藻が優占していた。これらのことからヤマトシジミの餌となる植物プランクトンがラン藻か珪藻かで、シジミの成長速度や資源量が増減したと考えられたことから、飼育実験が行われた。

本報告書2-4によると、シジミの浮遊幼生のうち珪藻・緑藻を与えられた個体は、ラン藻を与えられた、もしくは何も与えられなかった個体より速く成長し、浮遊期間が短く、生残率が高かった。また本報告書2-1の成貝を使った実験によると、ラン藻はほとんど同化されておらず、緑藻は同化されていたが、最もよく同化されていたのは珪藻だった。ラン藻、緑藻、珪藻を与えてから消化糞が排出されるまでの時間を比較した本報告書2-2の実験でも、最も速く消化糞が排出されたのは珪藻だった。さらに本報告書2-3の稚貝・成貝・その中間の3サイズを用いた実験によると、殻長15mmまでのシジミはラン藻だけ摂食すると多価不飽和脂肪酸を合成できず、成長が阻害される可能性があることが分かった。このようにシジミにとってラン藻は珪藻と比べて餌としての価値はるかに劣ることが複数の異なる実験で共通して示された。

餌の価値が異なることが原因かどうかは未定であるが、塩分が高いとヤマトシジミは成長が早いだけでなく、稚貝の加入が複数回起こることも確認された（本報告書 3-1）。

宍道湖でラン藻と珪藻のどちらが優占するかは塩分で決まることが、現時点ではほぼ確実に考えられる。2012年夏はラン藻が優占し、特にアオコが発生した。この時の塩分は約4 PSUであった。これに対し珪藻が優占した2013年夏は、その倍の8 PSUだった。ただしどの塩分以上、もしくは以下でラン藻か珪藻かが分かれるという明瞭な塩分は、現段階では特定できていない。またある塩分以上だと必ず珪藻が優占するかについても、宍道湖より高塩分の中海で発生している渦鞭毛藻との競合関係が分かっていないため、現段階では特定できない。

従来、塩分がヤマトシジミに与える影響については、発生期（例えば卵割時や浮遊幼生期）の塩分耐性が注目されていた。しかし本報告書 2-1 のモデル計算で、たとえ宍道湖の塩分が浮遊幼生発生には低すぎる塩分であっても、塩分が高めの東岸から西岸に浮遊幼生が供給される結果となった。またこのような現象が実際に起こっていることが、本報告書 2-4 での観測で確認された。従って宍道湖においてシジミの増減を決めるのは、産卵数ではなく、餌の状態（ラン藻か珪藻か）による生活史初期（例えば定着まで）の生残率や初期成長速度の増減であると結論された。

## 2. シジミ資源量が少ないときは、鴨類による捕食の影響が大きい可能性がある

ヤマトシジミの増減は餌の状態（ラン藻か珪藻か）に影響されることが分かったことから、本研究ではラン藻類を無効餌料とし、ラン藻と珪藻の塩分に対応した活性（例えば塩分 8PSU 以上では珪藻の活性は1に対してラン藻の活性は1/2）を設定した上で、シジミ資源の減少因子としてこれまで考慮されてこなかった鴨類による捕食量も組み込んでシミュレーションを行った。また、ヤマトシジミにとっての有効餌料（珪藻等）の存在比率、水温・塩分についてもシミュレーションを行い、観測値との比較を行った（本報告書第4章）。その結果、2011年10月から2012年10月にかけての資源量の急減（シミュレーションでは30856→21008トンに対し、実測値は30841→22170トン）と翌2013年10月にかけての急回復（シミュレーションでは67983トンに対し、実測値は77943トン）を再現することに成功した。また漁獲量についても2011年から2013年の年間漁獲量がそれぞれ2431、1701トンであるのに対し、シミュレーションでは2482、1967トンと、再現性は良好だった。

このとき、必要カロリー量から計算した鴨類による捕食量は、2011年から2013年がそれぞれ15011、14796、20971トンであった。特に2012年については資源量が22170トンであったことから、資源量の多くを鴨が捕食していると推定された。幸い2013年にかけて高塩分による珪藻類の優占によってシジミ資源が回復したが、仮に塩分が低いままで2013年もラン藻類が優占していた場合、宍道湖のシジミ資源は鴨類の捕食によって激減していた可能性が示唆された。

一方、2013年のようにシジミ資源量が急激に増大したのちに餌環境が悪化して加入量の減少や成長速度の低下などが起こる場合には、鴨類の捕食によるシジミ個体数の間引きが密度効果の影響を軽減する役割を果たすこともあり得ることが、漁獲制限をなくした感度解析結果から明らかになった。

### 3. 水草の繁茂はヤマトシジミ稚貝の移動を妨げ、局所的貧酸素化により資源減少を招く

宍道湖では人が立てる深さに降りて鋤簾を使ってヤマトシジミを漁獲する場合もあるが、多くは人が立てない深さで船上から鋤簾を引いて漁獲する。もしそのような人為的攪乱が激しいところに稚貝が好んで定着していたら、資源の初期減耗をもたらすはずである。

本報告書 3-3 では、殻長 0.2mm までの稚貝は水深 2m より浅いところに定着し、殻長 0.5mm になると、1 ヶ月に一度程度生じる波により、水平・垂直方向に移動分散すると推定した。移動・分散が本報告書 3-2 で報告されている粘液を使った能動的な移動が主なのか、受動的なものが大部分であるのかは未解明であるが、いずれにしても移動には水平・垂直方向の流れが必要であり、浅場造成や水草の繁茂がその流動状況に大きな影響を与えることが本報告書 3-2 で指摘された。

特に水草の繁茂については、稚貝が定着する浅場において底質の悪化を招かない程度の繁茂であっても、湖流の改変などの影響により稚貝の定着を阻害していることが分かった(本報告書 3-3)。さらには水草起源有機物の増加による貧酸素化によって、ヤマトシジミ資源量の減少をもたらす可能性が指摘された(本報告書 3-3)。

水草が繁茂するようになった原因が植物プランクトンの減少というレジームシフトではないことは、2012 年夏にアオコと水草の繁茂が起こったことから明らかである。ではなぜ宍道湖で水草が繁茂するようになったかの原因として、それまで水草の繁茂を抑制していた除草剤使用量が減少したことが考えられた(山室ほか, 2014)。2013 年夏の塩分である 8 PSU は異常繁茂が報告されている水草のほとんどが繁茂できない塩分であることが既に報告されていた(山室, 2014)。宍道湖で繁茂している水草のうち、オオササエビモは淡水種の雑種であるが、ツツイトモ(絶滅危惧種)とされている種については、山室(2014)では「塩分耐性不明」とされていた。再生協議会の研究で、宍道湖で繁茂しているツツイトモとされていた植物はツツイトモを片方の親とする雑種であることがわかり、その塩分耐性については、8 PSU 以上で殖芽の発芽が抑制されることが分かった(本報告書 2-4)。

### 4. 斐伊川河岸にはヨシなどの植物起源有機物が蓄積されているが、斐伊川放水路により極端な流入は回避できると考えられる

近年、斐伊川の出水後にヨシの枯死体が大量に鋤簾にかかる事態が発生している。当初は湖岸に植栽されたヨシが起源と考えられたが、本報告書 1-3 により、河道に繁茂する植生起源の有機物が、湖岸植生起源を凌駕することが明らかになった。

斐伊川河道における河岸植生は、越境大気負荷(Miyazako et al. 2015)により硝酸塩やリンを含んだ雨が降ることもあり、他地域の河川よりバイオマスが圧倒的に多い(本報告書 1-3)。ただし斐伊川放水路の運用が開始されたので、河道に蓄積された有機物が出水時に宍道湖に大量に流入する事態は回避できると考えられる(菅原ほか, 2016)。

一方、平水時の負荷については放水路での操作が及ばないことから、先述の越境大気負荷が集水域を含む宍道湖に与える影響は回避できない(Miyazako et al. 2015)。近年、過去にはアオコが発生しなかった塩分でアオコが発生する原因は、越境大気負荷による湖水の N/P 比の低下が主な原因と考えられるが、本研究ではその実証には至っていない。

## 5. 農薬がシジミ以外の漁獲対象種を減少させた可能性がある

宍道湖に限らず、近年、平野部の多くの湖沼で漁獲量が激減している。その原因として、海域で言われているように、負荷削減による貧栄養化が取りざたされている。しかし、特に宍道湖においては、湖水のCOD値が減少している事実はない。一方で、公共用水域のモニタリングには堆積物は含まれていない。魚の多くが底生動物を餌としていることから、本報告書1-4では、底生動物の餌と密接に関わる、湖底堆積物の有機物濃度の経年変化を解析した。

その結果、宍道湖では1980年代から1990年代においては負荷削減対策により底質中有機物濃度が減少したが、以後は増加していたことが分かった。同時に比較した中海の分析値から、その原因は分析誤差ではないことが確認された（本報告書1-4）。

餌となる有機物が減少していないにも関わらず、1980年代と比較して、シジミを除く宍道湖の大型底生動物の生息密度は、顕著に減少していた。特に節足動物の減少が著しく、オオユスリカ幼虫は1982年には1㎡当たり100個体以上生息していたのが、2016年には全く採集されなかった。出雲河川事務所が過去に行ったユスリカ調査報告書から、オオユスリカ幼虫が採取されなくなったのは1993年以降であることが分かった。さらに、出雲河川事務所が毎月宍道湖湖心で行っている動物プランクトンの調査でも、1993年から10年間、動物プランクトンの激減状態が継続していたことが分かった。

日本で初めてネオニコチノイド系殺虫剤が登録されたのが、イミダクロプリドの1992年11月である。1993年は宍道湖におけるエビ類の漁獲量も顕著に減少し、2001年以降のエビ類の年間漁獲量は10トン未満の状態が続いている。（本報告書1-4）。ユスリカ幼虫や動物プランクトン、エビ類は魚類の餌として重要であることから、宍道湖でシジミ以外の漁獲量が減った一因として、ネオニコチノイド系殺虫剤の使用が考えられた。

### 考え得る対策と課題

ここではヤマトシジミ資源の維持・増加対策を提案する。

ヤマトシジミ資源の減少の原因は、餌となる植物プランクトンとしてラン藻が優占したことであった。従って、ラン藻が優占しないような塩分にするのが、有効な対策と考えられる。また、宍道湖では水草が繁茂するとシジミ資源が減少する可能性が示唆された。宍道湖に繁茂する水草のうちオオササエビモは淡水種と考えられ、またツツイトモ雑種は塩分が8PSU以上だと繁殖が阻害される可能性があることが分かった。

これらの観点からは、2013年8月に実際に起こった、塩分が8PSU程度に宍道湖の塩分を引き上げることが望ましい。実際、塩分が8PSUであった2013年8月には、懸念されていた貧酸素化の増強や、ホトトギスガイの侵入・繁殖も見られなかった。宍道湖ではかつて、大正時代に大橋川を改変することにより、塩分が増加したことがある。本報告書で数値シミュレーションを行った結果でも、大橋川の川幅を広げることにより、宍道湖の塩分は上昇した（本報告書1-1）。

ただし現時点でのシミュレーションは大橋川の塩分や流量を入力して宍道湖の状態を再現しており、日本海での潮位を入力することで宍道湖の塩分を再現できるモデルはまだ存在しない。今後の気候変動によって海面が現在より高い状態が続いた場合、現状を元に改変した予定塩分より

も高くなってしまいう可能性がある。従って大橋川の改変によって塩分を上昇させる場合には、洪水時の流下を妨げることがなく、高塩分水の逆流量を調節できるような改変を行う必要がある。

さらに、高塩分水の調節ができた場合でも、貧酸素化の問題が残っている。2013年は高塩分になると同時に成層が発達しないような強風が続いたために、貧酸素化しなかった。宍道湖の塩分を8PSUにした場合、最低どれくらいの風が常に吹いている必要があるかは、現段階では分かっていない。また分かったとしても風を制御することはできない。従って、現在より塩分を高くすることでラン藻類が優占しにくい宍道湖の状態にするのであれば、少なくともより精緻なシミュレーションモデルを構築することによって、どのような場合に宍道湖で貧酸素化が生じるのか、その弊害はシジミの生息範囲に及ぶのかが予測できるようになる必要があるだろう。

一方、本報告書1-2では、冬季に高塩分になることでラン藻の繁茂が抑制される可能性が示唆されている。冬季であれば成層しても貧酸素化がゆるやかであり、また風による混合も頻繁であることから、いつの時点にどの塩分であればラン藻が優占しないかについても検討を進める必要がある。

現状では塩分をコントロールすることは難しいため、宍道湖の現実の塩分に対応した植物プランクトンの変化に応じて、将来のシジミ資源を予測して適切な資源管理を進めることが当面の課題になる。今回得られた研究成果の一つとして、シジミ資源量の変動を予測するシミュレーションモデルの構築がある（本報告書4）。このモデルを用いてシジミ資源量を予測し、その資源量に合わせて漁獲量を調整することで、シジミ資源の最適な利用法を検討することが可能となった。

今回構築したモデルは2012年春から夏にかけてのラン藻類の優占や、2013年春から夏における珪藻類の優占状況を概ね再現できたことでシジミ資源量の再現にも成功し、さらにはCODなどの水質項目についても、観測値との時系列比較において整合性が確認された。本モデルは環境因子のひとつとして二枚貝の代謝を詳細に組み込むという世界でも初めての試みを行い、その結果、資源変動だけでなく、環境も精度良く再現できた。将来的には日本海での潮位から宍道湖の塩分を再現できるモデルを構築することで、地球温暖化による海面水位の変動に伴う、塩分を含む宍道湖の水質予測も精度良く行えるようになることが望まれる。当面は本モデルの運用により、現状の塩分状況のもとでの科学的な資源予測に基づいた漁業管理に転換し、宍道湖のヤマトシジミ漁業が安定的な漁獲体制が構築されることを期待したい。

塩分を当面高めることができない場合、水草による弊害の拡大が懸念される。これについては、当面は刈り取りを行うしか対策はない。どれくらい刈り取るかについて、貧酸素化やシジミの移動を妨げない最低限の範囲を数値シミュレーションなどによって推定するべきとの意見もある。しかし現実問題として、刈り取りを行うには水草がどこにあるかが確認できなければならない。濁度が高い宍道湖においては、湖上から見えるようになるまで育った時点で、既に貧酸素化が始まっている。従って水草対策としては、当面はこれまでのような刈り取りを行うのと平行して、水草の生活史（いつ殖芽が生長を始め、どのような水温でどれくらいの速度で伸び、いつ殖芽を形成するのかなど）を解明する必要がある。その上で、効果的な刈り取り方法を検討すべきだろう。

塩分を高め、水草の繁茂を抑制したとしても、解決されない問題が残されている。それは、塩分が宍道湖より高い神西湖でも問題になっている、シオクサの繁茂である。シオクサという名称から塩分が高いところで繁茂すると思われがちだが、シオクサ（Cladophora 属）と呼ばれる緑藻

は複数種あり、淡水から海水まで分布する。なぜ近年、シオクサが宍道湖や神西湖で増えるようになったか原因が解明されていないので、現状で行える対策は除去のみである。平塚ら（2006）は、1950年代頃まで宍道湖で行われていた採草漁に関する聞き取りを行っているが、当時、シオクサが繁茂していたとの証言はないことから、富栄養化が原因かもしれない。しかし、シオクサではないが底生緑藻の繁茂は貧栄養湖沼の代表であるバイカル湖をはじめ世界のいくつかの大湖沼で起こっており、世界的にも未解明の問題である。解決策を見いだすには、本協議会で行ってきたような総合研究の継続が必要だろう。

## おわりに

宍道湖で生じている、かつて「異変」とされた問題のかなりの部分について、6年間にわたる研究の結果、科学的に原因を特定することができました。それが可能になったのは、本協議会が日本全国から、水産に限定しない広い分野の専門家を招き、毎年それぞれの研究成果を報告書にまとめた上でその内容の確認と次に解明すべきことを議論し、行政担当者とともに知見を共有してきたからだと思います。

この6年間で解決できなかった課題は、世界でもまだ解明できていない問題です。即ち、宍道湖で解明されていない課題は、世界共通の課題でもあると言えるでしょう。例えばネオニコチノイド系殺虫剤が産業に弊害を与えているかについて、ミツバチの大量死の原因ではないかと言われていますが、実証はされていません。先述のようにシオクサ問題は、世界のいくつかの大湖沼で起こっている底生緑藻類の異常繁茂と類似の現象ですが、なぜ底生緑藻だけが異常繁茂するかについて確定した知見は未だ提示されていません。

そのような観点から宍道湖の問題を世界の問題と捉えた国内外の研究者、特に若手研究者が地元の関係者の支援を受けて新たな研究を展開することで、宍道湖に関する知見がさらに広がり、宍道湖がよりよい状態で次世代に継承されるような体制が今後も何らかの形でこの島根県で継続されることを期待しています。座長の私自身、大学の卒業論文のテーマとして宍道湖の大型底生動物の研究に取り組んでから約40年間にわたり、多くの方々からそのような支援を頂けたことで宍道湖の様々な側面を研究し、世界に向かって成果を発信し続けることができました。

本協議会の座長を退任するに当たり、お世話頂いた多くの宍道湖関係者の方々にお礼申し上げます。