

## 近年の研究成果②斐伊川

# 人との相互作用によって持続する 汽水湖生態系の構築

東京大学・産業技術総合研究所 山室真澄

## 1. はじめに

本研究の対象は、斐伊川水系の汽水湖である宍道湖です。宍道湖では研究開始当時、「異変」が起きていると認識されていました。それまでほとんど無かった水草が突然繁茂するようになり、同時にアオコも発生していました。何より、地域の重要な産業であるシジミ漁の漁獲が激減していました。水草が生えていることが望ましい生態系とされる湖もありますが、宍道湖では突如侵入してきた水草によってシジミが減った可能性もありました。河川生態研究では望ましい生態系を保全することも目的のひとつですが、人が高密度に住まう日本においては、「人にとって望ましい状態が相互作用によって持続する生態系」という観点も重要と考えました。そこで本研究ではどのような状態が望ましいのか、日本人の生活様式が大きく変わる前まで遡って検討し、その上で現在何が起きている、それを望ましい生態系に戻すにはどうすればいいのかを解明することにしました。

## 2. 江戸時代以降の宍道湖生態系の変遷

宍道湖では大正期に行われた大橋川拡幅までは淡水だったとする見解が、一部に流布していました。しかし宍道湖東部で得られた柱状堆積物の生元素濃度や安定同位体比を分析したところ、1820年代から1850年代に堆積した有機物の炭素安定同位体比から、当時の塩分は現在より高かったと考えられました。またC:N:P比から、現在の中海で発生するものと同じ渦鞭毛藻類が有機物起源でした<sup>1)</sup>。注目すべきは、江戸時代の宍道湖東部は赤潮の頻発や塩分成層により、現在よりも堆積物中有機炭素濃度が高かったこと、つまり現在よりも富栄養化していたことです(図1)。

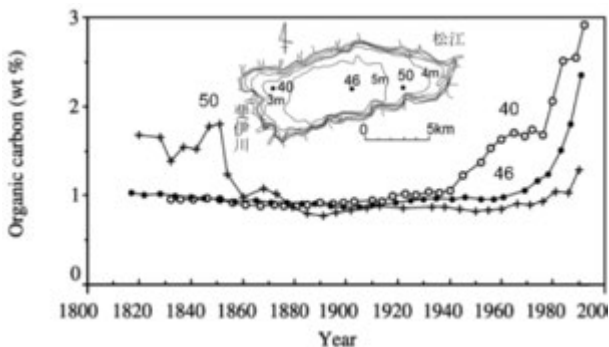


図1 図中で示した宍道湖3カ所(40・46・50)で得られた柱状堆積物における有機炭素濃度。年代は放射性鉛・セシウム法で決定した。

宍道湖では1990年代まで、*Prorocentrum minimum*による大規模な赤潮が時々発生していました。1994年11月に発生した同種による赤潮は、ヤマトシジミが生息する湖岸部ではシジミの摂食により翌朝には消滅していました(山室、未公表資料)。一方で2012年にアオコが発生した際にはラン藻類が全く濾過されずに残存していたことから、シジミにとって*P. minimum*は餌としての価値があり、ラン藻類にはないと考えられました。つまりシジミの餌という観点からは、富栄養化は一概に弊害とは言えず、かつ、江戸時代にも起こっていたのです。

宍道湖東部では1800年代が現在よりも有機物が蓄積しやすい状況でしたが、その後、第二次世界大戦終了までは東西・湖心ともに同様に低い有機炭素濃度を示しています。この頃の宍道湖は住民に対するインタビューでシャジクモに似ているとされた植物が湖底を這うように繁茂していて、肥料用に盛んに刈り出されました<sup>2)</sup>。また1947年10月にアメリカ軍が撮影した写真では湖底が水深4mまで見えるほど透明度が高く、また湖底を這うタイプ的水草が湖底に点在している様子が写っていました。このことから、1950年代までの宍道湖は貧栄養で、植物プランクトンが非常に少ない状態だったと考えられます。

朝鮮戦争が勃発し、米軍の日本での物資補給の必要から工業化が促され、農業から工業に労働人口を移動させる必要が生じました。このため全国一斉に農薬や化学肥料の使用が始まりました。この時に各地の平野部湖沼で水草が消滅し、肥料用採草も行われなくなりました<sup>2)</sup>。宍道湖でも富栄養化が進み、植物プランクトンを摂食するヤマトシジミが急増しました。ただしその漁獲量は他産地が衰退し、衰退した産地にシジミを運搬する手段が開発されるなど、外部条件に左右されていました(図2)。

環境庁(当時)が水質に関わる環境基準を告示したのが1971年で、流域からの汚濁負荷を減らす試みはこの年から始まりました。しかし宍道湖では漁獲規制により、植物プランクトンを食べるシジミの漁獲量を抑制することで流入負荷減少効果が相殺されたために、2006年頃までCOD濃度がほぼ同じレベルで推移しました(図2)。

1980年代から2000年代初めまでのシジミ漁獲量減少が資源の枯渇ではなく意図的な漁獲規制の為であったことは、シジミ漁獲量とシジミ単価の関係から推定できます。宍道湖における漁獲量、価格、休漁日数の変遷

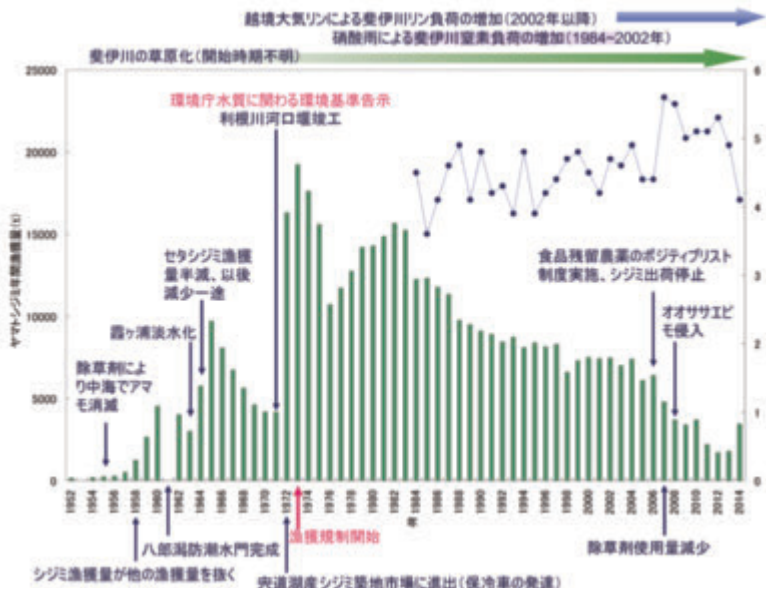


図2 宍道湖におけるヤマトシジミ年間漁獲量、年間平均 COD 濃度と関連事項

を調べた研究では、宍道湖では 2000 年代前半までは価格が上がることで漁獲量を一定に保ち、それにより資源を維持しつつ、売上げを維持していました<sup>3)</sup>。

宍道湖最大の流入河川である斐伊川では、1984 年頃から越境大気窒素による負荷の増加が見られ、特に冬季の斐伊川水の硝酸濃度が高くなる現象が顕著になっていました<sup>4)</sup>。その後、中国での石炭燃焼量の増加から越境大気リンが増加し、2002 年以降は斐伊川で N/P が減少するようになり<sup>5)</sup>、宍道湖水の N/P も減少傾向になりました (図3)。

湖水の N/P が低下すると珪藻よりラン藻類が優占しやすくなることから、ラン藻類の優占によって、2007 年頃からシジミの漁獲量の減少と COD 濃度の増加が起こったと考えられました。本研究の色素を使った植物プランクトン構成の検討でも、シジミが減少していたときはラン藻類が優占していたことが分かりました。この頃に除草剤使用量の減少により水草の繁茂も始まった為<sup>6)</sup>、「宍道湖異変」として関係者の不安を引き起こしたのです。

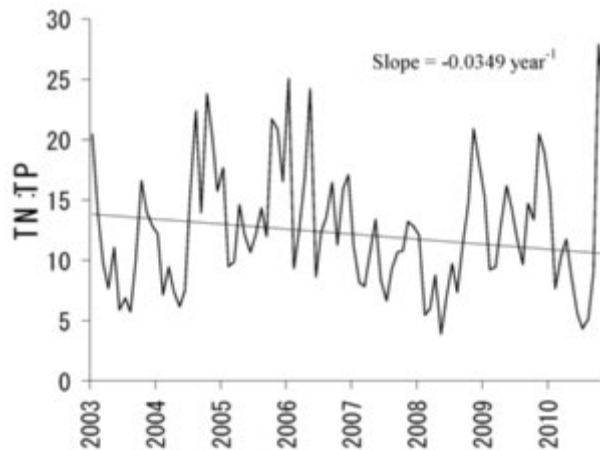


図3 宍道湖湖心表層水の全窒素：全リン比の経年変化

越境大気負荷の影響は斐伊川の河岸にも及んでいました。斐伊川でも「樹林化」が進行していますが、砂河川であるため樹林ではなく、正確にはセイタカヨシを中心とする「草原化」が進んでいます。斐伊川水系では越境大気負荷により窒素やリンが供給されることと、河床が砂であることから、他の日本の河川よりも植物生産が大きいことが分かりました。出水時にはその植物枯死体が宍道湖へ流入し、有機汚濁負荷になります (図4)。

幸い、本研究の期間中に斐伊川放水路の運用が始まったことで、出水時の負荷がある程度減少することが、本研究より明らかになりました。

以上述べた宍道湖における生元素循環の変遷は、過去 30 年間における宍道湖表層堆積物中有機炭素濃度の比較からも裏付けられました。表層堆積物中有機炭素濃度は、流入負荷の削減を進めた 1982 年から 1997 年にかけて減少傾向でしたが、2017 年に向けて増加傾向に転じていました。また、全く同じ方法で採泥し全く同じ方法で分析した表層堆積物中窒素濃度を 1996 年と 2017 年で比較したところ、宍道湖では 1996 年には中海より少なかった窒素濃度が、2017 年には中海に近い濃度になっていました。中海では有意な増加は生じていませんでした。宍道湖では 2002 年以前まで働いていた有機物除去システム (=シジミ漁獲による系外除去) が働かなくなり、中海と同様の状況になったことを反映していると解釈できます。

先述のように宍道湖では越境大気リンの影響で湖水の N/P が減少しており、過去と同じ塩分でもラン藻類が優占しやすい状態になっています。加えて、近年の水草の繁茂は湖水中の二酸化炭素を水草が光合成で使

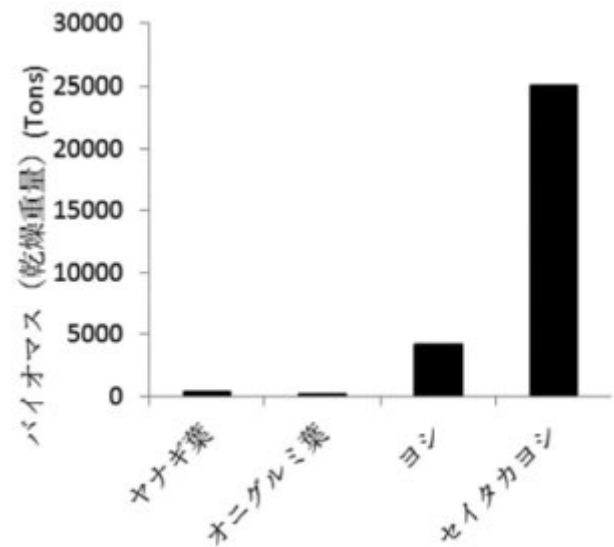


図4 宍道湖上流 25km 区間における斐伊川からの洪水時植生流出量



用することから pH がアルカリ側に傾き、珪藻は利用できないがラン藻は利用できる  $\text{HCO}_3^-$  が卓越する状態を引き起こしています。宍道湖では 2012 年に過去最大のアオコが発生しましたが、同じく水草に覆われている琵琶湖でも 2016 年には過去最多、2017 年には過去最速でアオコが発生しました<sup>7)</sup>。本研究の調査により、水草が繁茂している場所の方がそうでない場所より貧酸素化しやすい傾向があることが示されましたが、貧酸素化した湖底からリンが溶出することでさらに、ラン藻類の優占を促進する可能性も考えられます。

その水草は、宍道湖で暖候期の塩分が平年値の 2 倍である 8PSU で推移した 2013 年にはほとんど繁茂せず、同時に珪藻の優占によってシジミ資源の回復につながりました。もともと宍道湖では塩分が高いときに珪藻、低いときにラン藻が優占する傾向がありました。水草が侵入した現在はさらに、塩分が通常より高い方が水草の繁茂が抑えられ、珪藻が優占し、その珪藻をシジミが食べることで COD が減少して漁獲量も安定するという、人が持続的に利用しやすい生態系になることが分かりました。

懸濁物食性二枚貝であるヤマトシジミは富栄養化とともに漁獲量が増えましたが、その他の漁獲対象種も 1980 年代まではヤマトシジミと類似した増加をたどっていました。しかしヤマトシジミが 2000 年代前半まで一定の漁獲量を保っていたのに対して、ワカサギとウナギの漁獲量は 1993 年を境に激減して今日まで回復していません (図 5)。一方、ワカサギやウナギ同様に単価が高いシラウオは、有意ではありませんが、1993 年以降に漁獲量が増加していました。

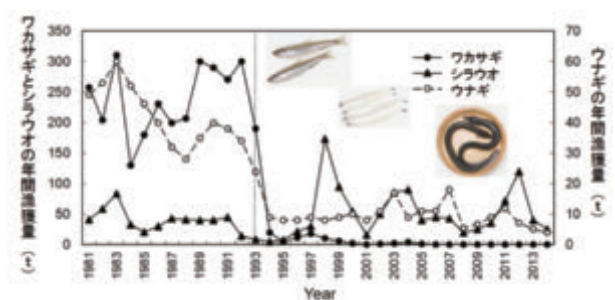


図5 宍道湖におけるワカサギ、シラウオ、ウナギの年間漁獲量 (宍道湖漁業協同組合ホームページ掲載のデータから作成)

ワカサギ漁獲量の激減は諏訪湖でも起こっていて、富栄養化によってワカサギの餌となるオオユスリカが減ったことなどが原因とされていました。しかし宍道湖では水の COD は横ばい状態、また先述のように堆積物中有機物もむしろ増加傾向にあり、富栄養化は起こっていません。その宍道湖でのオオユスリカ幼虫など、シジミ以外の底生動物の増減を解明するために、1980 年代の調査結果と現在とを比較しました (表 1)。かつては大量羽化して迷惑害虫とされていたオオユスリカは絶滅しており、他

の節足動物や低塩分に生息する環形動物も減っていました。逆に、より高塩分の中海に多く生息する環形動物は増えていました。

ウナギの主な餌は底生動物ですが、ワカサギにとって動物プランクトンも重要な餌です。宍道湖では出雲河川事務所が 1980 年代から毎月、湖心での動物プランクトンの現存量調査を継続していました。本研究でそのデータを頂いて解析した結果、宍道湖の動物プランクトンは 9 割以上がキスイヒゲナガミジンコで、その現存量が 1993 年 5 月に激減し、以後、回復していませんでした (図 6)。

表 1 主な底生動物の 1982 年夏と 2016 年夏の 1m<sup>2</sup>あたり平均個体数の比較

動物名/年	1982	2016
<b>節足動物</b>		
オオユスリカ	121	0.0
Tanypodinae 亜科ユスリカ類	125	19
ムロミスナウミナナフシ	30	0.2
<b>環形動物</b>		
ヤマトスピオ	88	131
イトゴカイ科の 1 種	101	0.4
ヒガタケヤリムシ	4.2	12
カワゴカイ属の 1 種	5.1	2.6
貧毛類	188	14

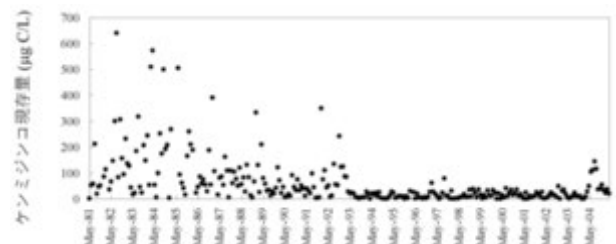


図 6 宍道湖湖心におけるキスイヒゲナガミジンコの現存量の経時変化

日本でネオニコチノイドという、昆虫に対する殺傷能力に優れた殺虫剤が初めて登録されたのが 1992 年 11 月で、水田用でした。従って 1993 年 5 月の田植え期に、宍道湖集水域で初めてネオニコチノイドが使われたこととなります。キスイヒゲナガミジンコは昆虫ではありませんが、昆虫と同じ節足動物なので、この殺虫剤により激減したと考えられました。

以上より、宍道湖でワカサギとウナギの年間漁獲量が 1993 年に激減して回復していないのはネオニコチノイドによって餌生物が激減した為で、植物プランクトンも食べるシラウオはその影響を受けなかったために漁獲量が変わらなかったと結論しました。

### 3. 残された課題

本研究により、宍道湖では現在の塩分よりやや高めのラン藻類が優占しない塩分であれば、シジミの餌となる珪藻が増え、水草も抑制できることが分かりました。し

かし塩分が高くなると、塩分成分により貧酸素化しやすくなる可能性もあります。本研究期間である2013年に宍道湖の塩分は通常よりかなり高い8PSUに達しましたが、風による混合により貧酸素化しませんでした。しかし、常に貧酸素化しないとする根拠はありません。

本研究では大橋川上流地点における塩分の連続観測データが得られている計算格子を境界位置として物理モデルの再現性を確保した上で、水質計算に島根県の第6期湖沼水質保全計画において構築された水底質結合生態系モデルを基本とし、塩分に起因する植物プランクトン種の交代（ラン藻か珪藻か）と、植物プランクトン種交代の影響を受けたヤマトシジミの成長を考慮した生態系モデルを構築して計算を行っています。その結果、2012年、2013年の宍道湖の状況は概ね再現できました。今後は、高塩分だった2013年と同等の塩分が維持された場合に塩分成分がどうなるかを物理モデルから予測し、上記の望ましい状況が再現できるかを計算する必要があります。

本研究により、水田から流出した殺虫剤により節足動物が減少したことで、漁獲対象水生生物の減少をもたらした可能性があることが分かりました。このことは、河川管理者の所掌範囲だけでは、宍道湖の生物多様性を保全・再生することは不可能であることを示しています。

#### 4. おわりに

本研究が対象とした斐伊川から宍道湖に至る水系は、淡水から汽水域に至る範囲にまたがり、海域の影響も受ける位置にあります。このような複雑な水系の生態系をどのように捉えるかは非常に挑戦的なテーマで、新たな視点を河川生態研究に提示できたのではないかと思います。

本研究グループは地元研究機関に属さない研究者が多く参加し、土木以外の様々な分野の専門家がその分野の最先端の知見を導入し、現場を軸に問題意識を共有し、新たな発見を重ねました。また地元の関連する行政機関（出雲河川事務所、島根県水産課、島根県環境課）も毎年度末に参集し、本研究グループとともに知見や問題点の共有を図りました。このような体制で研究を進めたことで、出雲河川事務所や県の機関に蓄積された長年のモニタリングデータの情報が共有され、ネオニコチノイドにより水産対象種が減少するという、世界で初めての報告をScience誌に掲載し<sup>8)</sup>、諸外国から大きな反響を受けたのだと思います。このような研究交流の場が引き継がれることが、河口に連結汽水湖を有するという日本で唯一の一級河川である斐伊川水系の生態系を保全する上で、最も有効と思われる。

本研究の成果は個々の研究者が論文として投稿していますが、膨大な報告書は一般に公開されていません。そこで出雲河川事務所と地元機関とが協議した結果、島根県のホームページに概要版を掲載することになりました。また、その概要版をベースにして、書籍として刊行

しました<sup>9)</sup>。本研究の成果が多方面に伝わり、問題解決の一助になることを願っています。

#### 5. 引用文献

- 1) Yamamuro, M. and Kanai, Y. (2005) A 200-year record of natural and anthropogenic changes in water quality from coastal lagoon sediments of Lake Shinji, Japan. *Chemical Geology*, 218, 51-61
- 2) 平塚純一・山室真澄・石飛裕 (2006) 「里湖モク採り物語 50年前の水面下の世界」 生物研究社
- 3) 高橋正治・森脇晋平 (2009) 宍道湖におけるシジミ漁業の漁業管理制度. 島根県水産技術センター研究報告, 2, 23-29
- 4) Kamiya, H., Y. Kano, K. Mishima, K. Yoshioka, O. Mitamura, and Y. Ishitobi (2008) Estimation of long-term variation in nutrient loads from the Hii River by comparing the change in observed and calculated loads in the catchments. *Landscape Ecology and Engineering* 4, 39-46.
- 5) Miyazako, T, Kamiya, H., Godo, T., Koyama, Y., Nakashima, Y., Sato, S., Kishi, M., Fujihara, A., Tabayashi, Y., Yamamuro, M. (2015) Long-term trends in nitrogen and phosphorus concentrations in the Hii River as influenced by atmospheric deposition from East Asia. *Limnology and Oceanography*, 60, 629-640.
- 6) 山室真澄・神谷宏・石飛裕 (2014) 宍道湖における沈水植物大量発生前後の水質. *陸水学雑誌*, 75, 99-105.
- 7) 山室真澄 (2019) 湖沼における大型植物の異常繁茂に関する国内外の状況, *応用生態工学*, 22, 51-60.
- 8) Yamamuro, M., Komuro, T., Kamiya, H., Kato, T., Hasegawa, H., Kameda, Y. (2019) Neonicotinoids disrupt aquatic food webs and decrease fishery yields, *Science*, 366(6465), 620-623.
- 9) 山室真澄 (編著) (2020) 「豊かな内水面水産資源の復活のために—宍道湖からの提言」 生物研究社