

農薬による湖沼生態系の攪乱 — 島根県・宍道湖の例 —

山室 真澄¹⁾

1. はじめに

島根県の宍道湖^{しんじこ}において、水田などで利用されるネオニコチノイド系殺虫剤(以下、ネオニコチノイド)が餌となる生物を殺傷することで間接的にウナギやワカサギを激減させていた可能性を突き止め、Science 誌で公表しました(Yamamuro *et al.*, 2019).

ネオニコチノイドは水溶性で、昆虫に対して選択的に毒性を発揮するとされ、有機リン系殺虫剤と比べ人を含む哺乳類や鳥類・爬虫類への安全性が高いとされます。また植物に浸透することで効果が持続することから散布回数を減らせると期待され、世界の殺虫剤市場の25%を占めるほど広汎に使用されています。しかし全ての昆虫が害虫ではなく、ミツバチや昆虫食鳥類の減少などの、生態系への悪影響が指摘されていました。日本でもアカトンボの減少原因をネオニコチノイドに求める論文が公表されています(上田・神宮宇, 2013)。これらの研究はネオニコチノイドにより直接殺傷される動物か、陸上の生態系を対象にしています。

それに対し今回の報告は、水界でもネオニコチノイドにより生態系に深刻な攪乱が起こっていること、またその攪乱が食物連鎖を通じて上位段階の動物に及び産業(=漁業)に影響していることを世界で初めて指摘し、国内外で数多く報道されました。研究の内容はプレスリリースなどで解説されていますので、ここでは、生態学ではなく地学だからこそ化学物質による水界生態系の異変を突き止めることができた背景を中心に解説します。

2. 宍道湖の生態系は過去にも農薬で激変していた

ワカサギやウナギの減少原因がネオニコチノイドだと疑ったのは、宍道湖では過去にも生態系が農薬によって激変していたためでした。

最初に農薬の影響に気づいたのは地質調査所(当時)が1990年代後半に展開した「富栄養化湖沼における食物連鎖を利用した水質浄化技術に関する研究」(環境庁国立機関等公害防止等試験研究, 1994～1998年度)の終盤

頃でした。この研究では炭素や窒素などの元素量として食物連鎖を通じた物質循環を定量化することで、食物連鎖のどこで何がどこおっている為に植物プランクトンだけが異常繁茂してしまうのかを検討しました。そのため生物・非生物にかかわらず、宍道湖に存在する主要素を全て分析しました。通常、生物の分析は植物プランクトン、よくて動物プランクトンくらいですが、この時はワカサギやウナギなどの魚はおろか、シジミを食べる鴨も捕獲してミンチにして分析しました。検収に当たった事務担当者が箱に詰まった鴨の死体をおそろおそろ確認していて、申し訳なく思ったことを今でも覚えています。

このように多種多様な生物試料を持っていることを工業技術院資源環境技術総合研究所在職時から知り合いだった益永茂樹横浜国立大学教授(当時)が聞きつけられ、ダイオキシンの生物濃縮研究への協力を依頼されました。益永教授は、日本の水域では水田除草剤の不純物起源のダイオキシンが燃焼起源よりも影響していると考え、過去の状況をどうやって復元するか模索していました。そこで私は、宍道湖堆積物の柱状試料の分析を提案しました。宍道湖に流入する斐伊川^{ひいかわ}は土砂供給量が比較的多いので堆積速度が大きく、解像度が高い試料が得られるという利点があります。そのうえ宍道湖は汽水湖なので湖盆部は常に塩分成層し、堆積物は還元的で生物攪乱を起こす底生動物はいません。過去に行われた年代分析でも、ほとんど攪乱がないことが示されていました。その宍道湖堆積物の柱状試料を使って世界で初めて、除草剤不純物起源のダイオキシンが使用開始直後から湖に流入していたこと、そして堆積物中ダイオキシンのうち燃焼起源は14%に過ぎず、残り84%が水田除草剤起源であることが判明したのです(Masunaga *et al.*, 2001)。

同じ年に湖沼生態系に関して、6年後には著者自身が否定(Scheffer and van Nes, 2007)することになる説が、Nature 誌に掲載されました(Scheffer *et al.*, 2001)。浅い湖沼では富栄養化による濁度の増加によって沈水植物(=草体全体が水面下にある水草)が消滅し、沈水植物が使っていた栄養塩を植物プランクトンが使うようになる。このため植物プランクトンが多く濁った状態か、沈水植物が多

1) 産総研 地質調査総合センター 地質情報研究部門

キーワード：物質循環, ウナギ, シラウオ, ワカサギ, 除草剤, 殺虫剤, 水田

く透明な状態かのどちらかで安定するとの主張でした。その論文では透明な状態から濁った状態になる原因を整理した表が掲載されていて、第一の可能性として除草剤を挙げていました。ところが除草剤の可能性は全く議論せずに、富栄養化だけを原因としていたのです。そもそも水草は水中にある葉からではなく、堆積物中にある根から主に栄養を取ります。それだけでもナンセンスですが、日本の生態学者はこの説を根拠に、自然再生として沈水植物だけでなく浮葉植物(根は堆積物、葉は水面にある水草)のアサザや、抽水植物(根は堆積物、葉は空中まで伸びる水草)のヨシを植えることによって水質が浄化され、自然が再生すると主張するようになりました。宍道湖でも「護岸工事によって消滅したヨシを植えることで魚やシジミが増える」と生態学者が主張し、植栽が行われました。宍道湖は大きな湖なので波が高く、その為に湖棚部に堆積するのは砂で、だからこシジミが大量に生息できます。そんな湖岸にヨシは無かったと戦前から周辺に住んでいた住民が証言していたのに、植栽区域はどんどん広がりました。

そこで私達はかつての宍道湖の状況を聞き取る調査を始めました。そして1950年代半ばに除草剤を使用するまで宍道湖の浅い湖底は沈水植物で覆われていて、宍道湖及び隣接する中海では、沈水植物を肥料用に根こそぎに近い状態で採取していたことが分かりました。湖岸にヨシはなく湖内に沈水植物が生えていたことは、米軍が終戦直後に撮影した写真でも後日確認できました(小室・山室, 2013)。水草の採草量も古い統計から算定しました。対象を本州全域に広げて同様の調査を行ったところ、調査した全ての湖沼で肥料用に沈水植物を採草していて、宍道湖同様、除草剤使用によって沈水植物が消滅したことが分かりました(平塚ほか, 2006)。

堆積物の柱状試料の研究から宍道湖には除草剤使用開始直後からその不純物が流入していたことが分かっていたので、除草剤によって沈水植物が衰退したという結果には全く驚きませんでした。生態系では光合成を行う植物が根幹となります。その根幹が湖底で繁茂する沈水植物から水中を漂う植物プランクトンに変わることは、生態系の構造そのものが変わってしまう大きな攪乱です。その原因を生態学では根拠がないまま護岸工事や富栄養化としていました。しかし日本では富栄養化以前に除草剤によって、その攪乱が起こっていたのです。さらには生態学者が主張するように水草を植えれば「かつてのように」魚が増えるのではなく、水草を肥料用に根こそぎ刈り取っていたからこそ、結果的に水草に覆われて魚が住みづらくなるのが無かったのです(平塚ほか, 2006)。

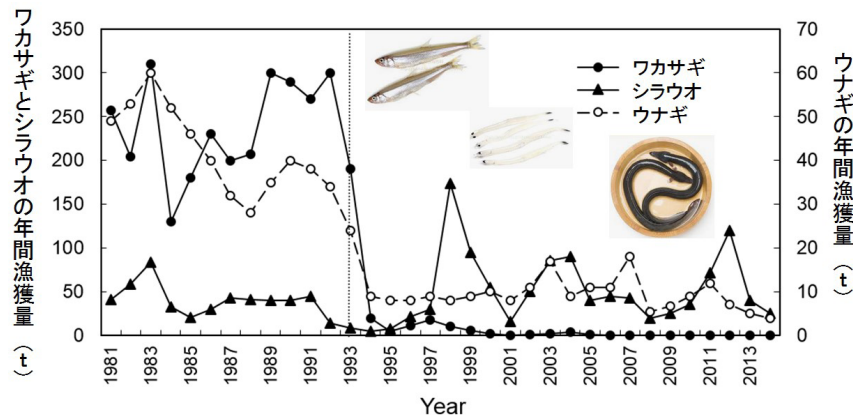
3. 湖沼の漁獲量減少は外来性魚食魚とされていた

日本の湖で近年になって漁獲量が減っている原因について Matsuzaki and Kadoya (2015) は、30年にわたる全国の主な湖沼の漁獲統計(魚類, エビ類, 貝類など全て)と湖沼の形態や流域面積, 塩分, また人為的要因として富栄養化, 湖岸改変, 魚食性外来魚の侵入の影響との関係を統計解析した結果, 外来魚の侵入が漁獲量減少に最も影響を与えたと結論づけました。この結論は, 各湖沼がどのような場であるかを重視する地学の観点からは極めて不可解でした。対象にした湖沼の約半分が汽水で, 淡水性である魚食性外来魚の影響は皆無か, ほとんどなかったからです。さらには湖沼の漁獲量のかなりの部分が貝類で, 貝は魚食魚に食べられません。

その典型例が宍道湖です。宍道湖は汽水湖なので, 在来の海産魚食魚(=スズキ)が少なくとも江戸時代から侵入しています。ところが宍道湖の漁獲量の大部分を占めるシジミは2000年以降になって激減したのです。原因は何なのか, 私たちはプロジェクト研究「人との相互作用によって持続する汽水湖生態系の構築」(河川技術研究開発制度地域課題分野(河川生態)2012~2017年度)を立ち上げ, 漁獲対象生物を含む多様な動物の長期的な変動と環境との関係について, 元素分析や色素分析などの地球化学をベースに総合的に検討しました。その結果, シジミの減少は低塩分によってラン藻が優占し, シジミの餌として好適な必須脂肪酸を含む珪藻類が減った為と結論しました。実際, 2013年に高塩分になって珪藻が優占した途端にシジミ資源量が回復し, 私達の結論が正しかったことが実証されました。

ところがウナギやワカサギは回復しませんでした。実はこれらの魚類が減っていることは, 1990年代後半に行なったプロジェクトで気づいていました。富栄養化以前の1950年代と同じ漁網で同じ方法でウナギやワカサギなどの魚を採ったところ, 富栄養化した1990年代の方がはるかに少ない漁獲量だったからです。生元素循環の観点だけでは説明できない謎でしたが, その後の漁獲量データも合わせて改めて検討したところ, 1993年を境にワカサギとウナギの漁獲量が激減して今日まで回復していないことが分かりました(第1図)。また, 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。

シラウオの幼魚は植物プランクトン, 成魚は動物プランクトンを食べます。ワカサギの場合, 幼魚は動物プランクトン, 成魚は動物プランクトンに加えて羽化したユスリカ



第1図 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）

も食べます。ウナギは甲殻類や多毛類などの底生動物を食べるとされています。動物だけに依存するワカサギとウナギが減って植物も食べるシラウオは減っていないということは、光合成を行う一次生産者ではなく、それを食べる二次生産者が何らかの原因で減ったことで、その二次生産者だけを食べるウナギとワカサギが減った可能性を示しています。

そこで私たちはウナギの餌となる底生動物の状況を、1993年以前と現在とで比べました(第1表)。節足動物では淡水性のオオユスリカが絶滅していました。また、やや高塩分を好む残りの2種も激減していました。環形動物では高塩分の中海に多く生息するヤマトスピオとヒガタケヤリムシは増えていましたが、低塩分を好む種類は全て減っていました。このことから、昆虫を含む節足動物には塩分に関わらず影響し、かつ低塩分側から供給される何物かの影響が疑われました。

その影響が1993年のいつ起こったか分かれば、原因が分かるかもしれません。幸い宍道湖では、国土交通省出雲河川事務所が1980年代から湖心で毎月、動物プランクトン調査を行っていました。そのデータを頂いて検討した結果、宍道湖の動物プランクトンの9割以上を占めるキスイヒゲナガケンミジンコが、1993年の5月に激滅していました(第2図)。宍道湖周辺ではゴールデンウィークに田植えが行われ、大量の殺虫剤と除草剤が水田に撒かれます。そして水田用のイミダクロプリドというネオニコチノイドが1992年11月に農薬として登録され、初めて使用されたのが1993年5月でした。

以上の根拠に加えて水温や塩分、護岸工事や漁獲努力など、考えられるあらゆる要因が1993年以前と以後とで有意な差はないことを示し、宍道湖でウナギやワカサギが1993年を境に激滅した原因はネオニコチノイドによって甲殻類を含む餌生物が減少したと結論しました。

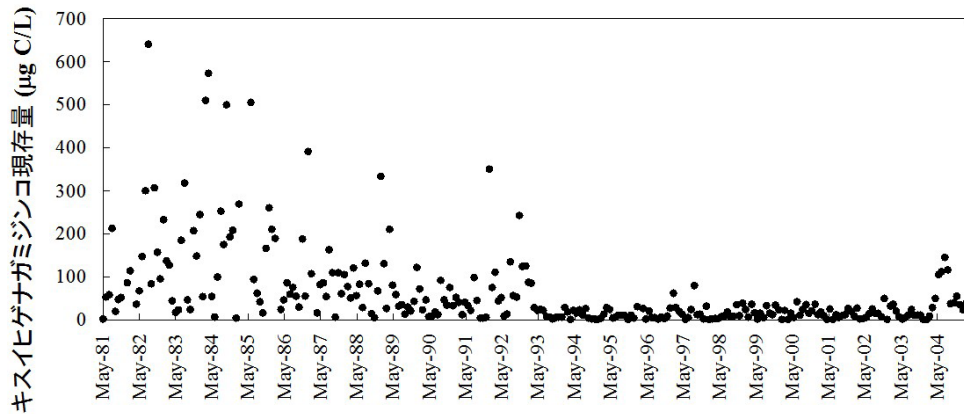
第1表 主な底生動物の1982年夏と2016年夏の1m²あたり平均個体数の比較

動物名/年	1982	2016
節足動物		
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
環形動物		
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

4. 地学だからこそ「生態系」を研究できた

日本の湖で除草剤が沈水植物を枯らしてしまったこと、また今のところ宍道湖だけでしか証明できていませんが、ウナギやワカサギが殺虫剤により餌が減ったことで激滅したことを、なぜ生態学ではなく、地学の研究者が証明できたのでしょうか。

生物学辞典(石川ほか編, 2010)では生態系を「生産者・消費者・分解者・非生物的(物理的)環境によって構成されており、おもに物質循環やエネルギー流に着目して機能系としてとらえたもの」と解説しています。湖や川などの水界で、生態系にどのような事が起こっているか。多くの方は、そのような課題を研究するのは生態学だと考えていると思います。残念ながら日本の場合、地球化学も専門とする一部の生態学関係者以外は、化学分析ができません。そのため上記の「非生物的環境」について、工事の有無とか富栄養化で濁ようになったなど目に見える情報に注目しがちで、目に見えない化学物質の影響に気づけません。また炭素や窒素、リンといった生物を構成する主要元素を分析できる生態学者もわずかなので、物質循環の観点から生態系に起こっていることを解析する研究も、日本の



第2図 宍道湖湖心におけるキスイヒゲナガミジンコの現存量 (Yamamuro et al. (2019) を改変)

生態学者はほとんど行いません。

さらには、目に見えない情報が過去にはどうだったかを明らかにする手法にも、生態学は疎遠です。地学であれば、堆積物試料から過去の様々な情報を取り出すことができます。また古文書の開花記録から古気候を推定するなど、化学分析にとどまらず、可能性のあるあらゆる手段を検討します。生態学ではそもそも、過去を復元する手段の検討を行わないのです。このような背景から生態学では、宍道湖（そして日本の平野部湖沼）で1950年代に起こった農業による沈水植物の衰退を、衰退後に起こった富栄養化などが原因だと主張しているのです。

地球温暖化など、人間が生態系に大きな攪乱を与えていることは、今や否定はできません。そして私たち人間の営為によって環境がどう変わり生態系がどう変化するのか、地学こそがその総合性によって、解を導きだすことができる学問だと思います。

なお今回 Science 誌に公開した論文は下記の方々と共同で発表しました。

小室 隆¹⁾・神谷 宏²⁾・加藤季晋²⁾・長谷川 瞳³⁾・亀田 豊⁴⁾

¹⁾ 国立大学法人東京大学

²⁾ 島根県保健環境科学研究所

³⁾ 名古屋市環境科学調査センター

⁴⁾ 学校法人千葉工業大学

文 献

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, 東京, 141p.

石川 統・黒岩常祥・塩見正衛・松本忠夫・守 隆夫・八

杉貞雄・山本正幸 (編) (2010) 生物学辞典. 東京化学同人, 東京, 1615p.

小室 隆・山室真澄 (2013) 1940年代に撮影された米軍空中写真を用いた宍道湖における水草群落分布範囲の推定. 応用生態工学, **16**, 51-59.

Masunaga, S., Yao, Y., Ogura, I., Nakai, S., Kanai, Y., Yamamuro, M. and Nakanishi, J. (2001) Identifying sources and mass balance of dioxin pollution in Lake Shinji basin, Japan. *Environmental Science & Technology*, **35**, 1967-1973.

Matsuzaki, S. S. and Kadoya, T. (2015) Trends and stability of inland fishery resources in Japanese lakes: introduction of exotic piscivores as a driver. *Ecological Application*, **25**, 1420-1432.

Scheffer, M., Carpenter, S. R., Foley, J. A., Folke, C. and Walker, B. (2001) Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, **413**, 591-596.

Scheffer, S. and van Nes, E. H. (2007) Shallow lakes theory revisited: various alternative regimes driven by climate, nutrients, depth and lake size. *Hydrobiologia*, **584**, 455-466.

上田哲行・神宮字 寛 (2013) アキアカネに何が起こったのか：育苗箱施用浸透性殺虫剤のインパクト. *TOMBO*, **55**, 1-12.

Yamamuro, M., Komuro, T., Kamiya, H., Kato, T., Hasegawa, H. and Kameda, Y. (2019) Neonicotinoids disrupt aquatic food webs and decrease fishery yields, *Science*, **366**(6465), 620-623.

YAMAMURO Masumi (2020) Disturbance on lacustrine ecosystem by agricultural chemicals – Case study of Lake Shinji, Shimane, Japan.

(受付：2020年1月6日)