



特集 ウナギはどこにいる？

～環境DNA解析で生物を採らずに分布を調べる～

●文：笠井 亮秀（北海道大学教授・水産科学研究院）

環境DNAとは水や土壌といった環境中に含まれるDNAの総称です。近年注目されているのは、生物を直接捕獲しなくても生息域に含まれる微量な環境DNAから、対象生物の在／不在がわかる分析技術の確立です。それには、世界に先駆けて行われてきた日本の環境DNA研究が大きく寄与しています。本号では、北海道大学水産科学研究院の笠井亮秀教授に、環境DNA分析により明らかとなったニホンウナギの分布についての研究例 (Kasai et al., 2021, *Frontiers Ecology and Evolution*)、ならびに環境DNA分析における今後の展望について執筆いただきました。



東京大学大気海洋研究所生物海洋学分野提供

絶滅危惧種となったニホンウナギ

ウナギは、蒲焼などのご馳走としてとても馴染み深い魚です。日本ではニホンウナギ(学名: *Anguilla japonica*)、オオウナギ(学名: *Anguilla marmorata*)、そしてニューギニアウナギ(学名: *Anguilla bicolor pacifica*)の3種類のウナギの生息が確認されていますが、これらのうち食用となっているのはほとんどがニホンウナギです。そのニホンウナギ、現在では漁獲量はかなり少なくなっています(図1)。そのため、2013年に環境省によって絶滅危惧種IB類に指定されました。またその翌年には、国際自然保護連合(IUCN)もニホンウナギを絶滅危惧種EN(Endangered)類として登録しました。これは、トキやジャイアントパンダと同じ扱いです。よって今後もニホンウナギ(以下、ウナギという)を保護しながら、水産物として持続的に利用していくためには、その資源をこれ以上減らさないように、適切に管理しなければなりません。しかし実はこれまで、ウナギ

が日本のどこに、どれくらい生息しているのかすらよくわかっていませんでした。それは、普段ウナギが岩陰に隠れたり砂泥中に潜っていたりするので、捕獲したり見つけたりすることが難しいからです(図2)。また、河川や湖沼から河口域、沿岸域まで様々な環境に生息しているため、統一した手法で生息量を調べるのが難しい、という問題もあります(図3)。そこで私たちは、従来の手法にとって代わる新しい調査手法である環境DNA分析によって、統一した手法で全国の河川におけるウナギの分布を詳細に調べました。

全国のウナギの分布が何によって決まるのかを考える際には、ウナギの生活史も考慮に入れなければなりません。ウナギは日本からはるか南方の2,500kmも離れた太平洋マリアナ海溝付近で産卵するといわれています。生まれたばかりのウナギの卵や仔魚は、北赤道海流に乗って西方に運ばれフィリピン付近に達したのち、黒潮によって北方に輸送されながらシラスウナギに変態していきます(図4)。その後行きついた東アジア各国の河川に遡上して数年から10年ほ

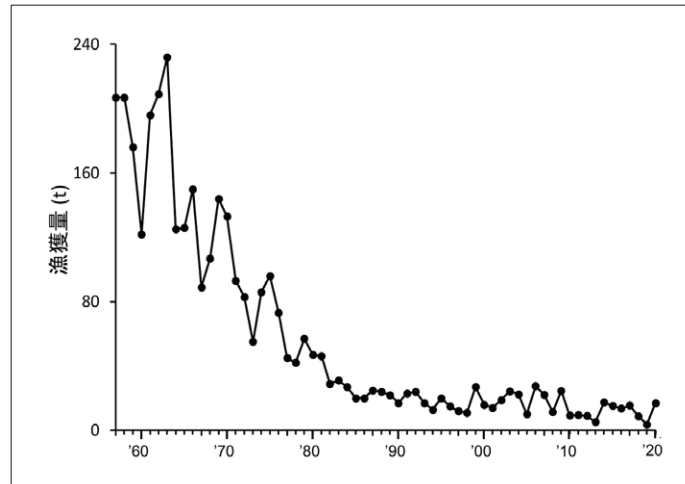


図1 日本国内のニホンウナギ稚魚漁獲量の推移。2002年までは漁業・養殖業生産統計年報による。2003年からは水産庁調べ(池入れ数量 - 輸入量)



図2 岩陰に隠れているウナギ。伊佐津川にて益田玲爾氏撮影。自然の河川でウナギを見つかり、捕まえたりするのは難しい



図3-1 魚を捕まえる手法①：釣り。個人の力量によって、調査結果が変わってしまう。また、釣れる魚種には限りがある



図3-2 魚を捕まえる手法②：地曳網。浅い砂浜では有効。岩礁帯や水深の深い場所では難しい



図3-3 魚を捕まえる手法③：電気ショッカー。水中に微量な電気を流して魚をしびれさせ、浮いてきた魚を網ですくって捕まえる方法。流れの速い川や濁った池で捕り逃さないように捕まえるのは難しい。また、塩水や深い場所ではこの方法は使えない



図3-4 水中の魚を調べる方法①：目視観察。動きの速い魚の魚種を特定したり、岩陰に隠れている魚を見つけたりするのは難しい

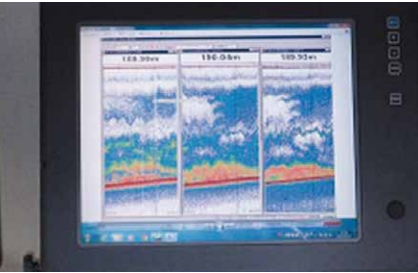


図3-5 水中の魚を調べる方法②：魚群探知機。水中に音波を出し、はね返ってくる音を検知して生き物を調べる。魚種まで判別するには、熟練の技術が必要

どかけて河川、湖沼または河口域付近で成長します。よって、海にいる仔魚期に海流によってどのように運ばれてくるかが、その後の生息場所や生息量を定めるうえで重要になると考えられます。

環境DNAとは

水中、土壌中、空気中などあらゆる環境中には、そこに生息している生物由来のDNAが存在しています。そのような環境中のDNAを総称して、'環境DNA'と呼んでいます。あらゆる生物は遺伝子としてDNAを持っています。バクテリアのような微生物は生体そのものが環境中に存在するので、当然そのDNAも環境中に含まれています。環境DNA分析は、もともとはそのような微生物を分析する手段として発展してきた技術です。1990年代に、従来行われてきた培養による分析にかわって、直接環境中の微生物のDNAを調べることができる分子生物学的な技術が発展しました。この手法により、さまざまな環境中に多様な微生物が

存在しており、それぞれの生態系の中で重要な役割を果たしていることが明らかとなりました。

一方水中には、マクロ生物から糞などの排泄物や分泌物の形で体外に放出された

DNAも存在しています。微生物とは異なり、マクロ生物由来の環境DNAは、生体から分離したDNAです。そのような生体外の微量なDNAでも、現在の技術をもってすれば検出可能であると、2008年にフランスの科学者によって発表されました。彼らは外来ウシガエルの分布を調査している際に、池から汲んだわずかな量の水からウシガエルのDNAが高い確率で検出されることを発見したのです。私たちがそれまで想像していたよりもはるかに多くのマクロ生物由来のDNAが環境中に存在していたということになります。それ以来わずか10年ほどの間に、マクロ生物の環境DNA研究は大きな発展を遂げました。

DNAは種に特異的なので、環境DNAを分析することで、生態系内の生物群集について様々な情報が得られます。例えば、マルチプライマーと呼ばれるある分類群に含まれる生物のDNAを網羅的に増幅することのできるプライマーを使えば、調べたい水域にどのような生物が何種類くらい生息しているのかを推定することができます。また生物の個体数が多ければ環境DNAも多く放出されると予想されるため、環境DNAの濃度から、その環境に生息している生物量も把握できる可能性があります。この環境DNA解析は生物を捕獲したり殺傷したりしないので、特に絶滅危惧種や固有種など生息数の少ない生物の分布調査に適した調査手法です。また海洋保護区など生物の捕獲調査ができない場所でも、そこに生息している生物種の目星を付けることができます。現場で行う作業は採水とろ過だけで簡便なので、調査員間の差を小さく抑えることができるという利点もあります。

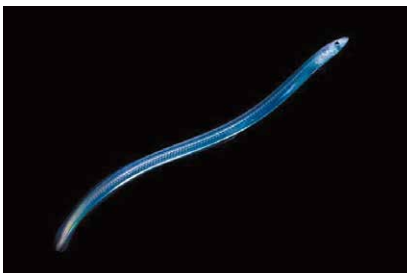


図4 シラスウナギ

工藤誠也氏撮影。生まれて間もないころは遊泳能力が小さいので、黒潮などの海流によって輸送される

ウナギの分布調査

私たちは、北海道から沖縄に至る全国265河川の下流域、合計365地点で環境DNA調査を行いました。現場で行ったことは、水温や塩分の測定、堰の有無の確認、そして河川水を数百ml採って、その水をフィルターでろ過をした(図5, 6)だけです。従来の手法に比べると、現場での作業はさほど大掛かりなものではありません。ですから、一日のうちに多くの地点で調査をすることができました。河川水をろ過したフィルターは研究室に持ち帰り、フィルター上に捕集されているDNAを抽出しました。そして、ニホンウナギにのみ反応するプライマーを用いてDNAを増幅させ、定量PCR解析によって環境DNAの濃度を調べました。その結果、ウナギの環境DNAは、関東以西の本州太平洋側や瀬戸内海そして九州西岸の河川において、高濃度で確認されました(図7)。一方日本海側は、能登半島以西では低濃度ながら検出されましたが、能登半島以北ではほとんど検出されませんでした。東北地方に注目すると、三陸以南の太平洋側で検出されましたが、津軽海峡や日本海側では全く検出されていません。そして北海道の河川からも、ほとんど検出されませんでした。

一方、ウナギの仔魚がまだ海にいる段階で、海流によってどこにどのように運ばれるかをシミュレーションによって調べました。シミュレーションには、気象庁が2020年秋に運用を開始したMRI.COM-JPNモデルによって計算された流れを用いました。このモデルは、東アジアの沿岸域を広く網羅しているにもかかわらず、水平解像度が2 kmととても緻密で、これまでにないほどの高精度で沿岸域の流れを

よく再現できます。ウナギの仔魚に見立てた8万個の粒子を台湾東方の黒潮域に放流し、日本周辺海域に仔魚が輸送される様子をシミュレーションで再現しました。2008年から2017年までシミュレーションを行い、どの沿岸域に到達するかを平均的に表したものが図8です。ウナギの仔魚は、西日本の沿岸域に多く到達し、北日本では少ないことが分かります。特に北海道や東北日本海側にはほとんど運ばれてきません。この結果は環境DNA調査の結果(図7)とよく一致しています。このことから、海洋での仔魚の輸送状況が日本国内の河川におけるウナギの分布を決める主要因になっていると考えられます。

一方ウナギは、北海道を除く全国の様々な地域で放流されています。この放流されたウナギが河川での分布に影響を与えているかもしれないので、都府県別のウナギの放流量と環境DNA濃度を比較してみました。その結果、両者はまったく一致しませんでした。これらのことから、日本の河川下流域に生息しているウナギの多くは天然のウナギであり、その分布は仔魚期の海洋での輸送状況によって決まると考えられます。

ウナギの好む環境とは？

ではウナギにとって好適な環境とはどのようなものでしょうか。ウナギの環境DNA濃度が高かった河川は、全窒素濃度も高い傾向にありました。これは高栄養環境にある河川ほどウナギの生残や成長が良いことを示唆しています。全窒素濃度は富栄養化の指標とされ、水質の良し悪しの判断に用いられています。高度経済成長期に日本の水環境が

著しく悪化したことに基づき、かつては全窒素濃度が高いといわれる汚れた川と判断されていました。しかし近年の下水処理技術の発達や、様々な面から水環境に対する配慮が行われてきたおかげで、日本の河川は見違えるほどきれ



図5 いろいろな場所で環境DNA用の採水をしている様子。(e)外洋では、専用の採水器具を使えば数千メートル下の深海からも採水できる。(f) 氷に穴をあけて氷下の水を採って分析すれば、氷下に生息する生き物も分かる



図6 採水した河川水をろ過している様子。注射筒の先についている白い物が、フィルターの入ったカートリッジ

いになりました。そのため本研究で得られた全窒素濃度が高い河川というのは、一昔前のように汚れた河川ではなく、むしろ生産性が高く豊かな河川ととらえた方がよいでしょう。つまり本研究中、全窒素濃度とウナギの環境DNA濃度の間に正の相関が得られたことは、豊かな河川にウナギが多く生息していることを反映していると考えられます。

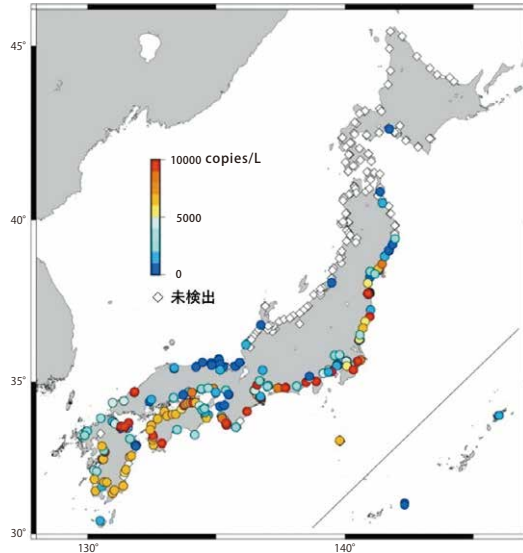


図7 河川下流域におけるニホンウナギの環境DNA濃度 (河川水中のDNA断片の数)

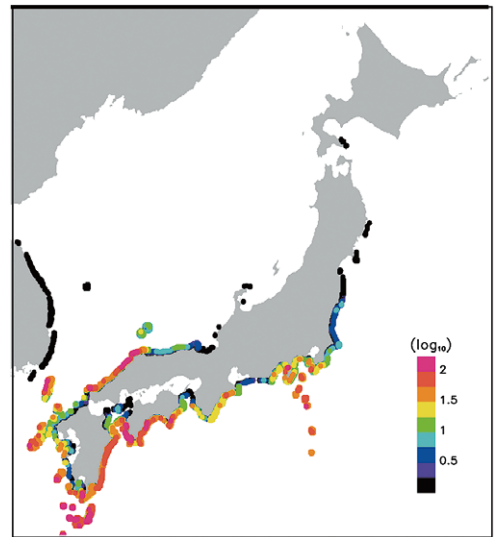


図8 ニホンウナギ仔魚が海流によって各地の沿岸域に輸送されてくる数。2008年から2017年のシミュレーション結果の平均値

今後の展開

環境DNA手法の最大のメリットのひとつは、従来の手法とは比べ物にならないくらい時空間的に密なマクロ生物の情報が得られることです。1日で数十地点もの環境DNA調査を行った研究例がありますが、従来の手法を用いた生物調査ではそんなにたくさんの地点を調査することは不可能です。また、毎週採水し、そのサンプル中の環境DNA分析を行うことで、様々な魚種の詳細な時間変動を追うことに成功したという報告もあります。今後、このような密な生物データを蓄積し、物理的、化学的な環境データと対応させれば、これまで見ることでできなかったマクロ生物の生態的特性が見えてくるに違いありません。生物と環境との対応だけでなく、生物どうしの種間相互作用についても、新たな知見が得られると期待されます。

環境DNA調査は従来の手法に比べると特殊な技能は必要ありません。つまり、一般市民でも行うことのできる調査です。これは環境DNAが持つもう一つのメリットで、生き物の分布調査に一般市民が参加できることを意味しています。いま私たちは、小学生にも環境DNA調査キットを渡して採水とろ過を行ってもらい、自分の住んでいる町の水辺の魚類相を研究者と一緒に調べる、というイベントを行っています(図9)。将来的にこの活動を広げていくことで、全国津々浦々の生物相が、一般市民の手によって詳細に分かるようになる日が来るでしょう。

ウナギのような貴重な生物を、捕獲したり傷つけたりすることなく、広範囲にわたる分布を詳細に明らかにで

きる環境DNA解析は、ほかの生物の調査にも広く適用可能です。絶滅危惧種だけでなく、例えば外来種がどの程度生息域を広げているか、といったことも調べられます。このような知見を重ねることで、貴重な生物の保護や生態系管理にも繋がることでしょう。また堰の設置や河川改修を行う際に、生態系にフレンドリーな方法をとる際の参考になることも期待されます。



図9 日本科学未来館のイベントで、子供たちに調査方法を説明している様子。日本科学未来館提供

笠井 亮秀 かさいあきひで

北海道大学水産科学研究院教授。1965年神戸市生まれ。1989年気象大学卒業。大学時代は海洋物理学を専攻。その後、流れや水温だけでなく、海洋環境と生き物とのかかわりに興味を持ち、大学院では東京大学海洋研究所の門を叩く。1995年東京大学博士(農学)。京都大学農学部助手、英国University of Wales, Bangor外来研究員、京都大学フィールド科学教育研究センター准教授を経て2015年より現職。専門は海洋環境学、水産海洋学。

