

湖と海で環境 DNA の拡散距離は異なる

—生物多様性調査に向けた環境 DNA の”生態”の解明—

概要

環境 DNA 技術は、生物の分布や組成を水中に漂う DNA 情報から推測できるため、非侵襲的かつ省コストな生物多様性の調査手法として近年世界中で有望視されています。環境 DNA は水の流れや重力に沿って移動するため、その拡散範囲や沈降速度の理解が重要です。しかしながら、湖沼や海洋ではこうした移動特性の知見が乏しく、生物分布をどの程度の空間解像度で反映できるかは分かっていませんでした。

そこで、京都大学大学院情報学研究科 相馬寿明 特定研究員（兼：日本学術振興会特別研究員 PD）、東北大学農学研究科 村上弘章助教、横浜国立大学環境情報研究院 中臺亮介講師の研究グループは、湖沼と海洋での環境 DNA の移動拡散に関するこれまでの文献を収集し再解析することで、湖沼に比べて海洋では環境 DNA が 10-100 倍程度拡散されやすいことを示しました。この結果は、環境 DNA が湖沼では局所的な生物分布、対して海洋では広範囲の生物分布を反映することを意味しており、それぞれの系における生物多様性モニタリングのための採水調査デザインを立案する上での重要な示唆をもたらすことが期待されます。

本研究成果は、2025 年 4月15日に国際学術誌「*Ecological Indicators*」にオンライン掲載されました。

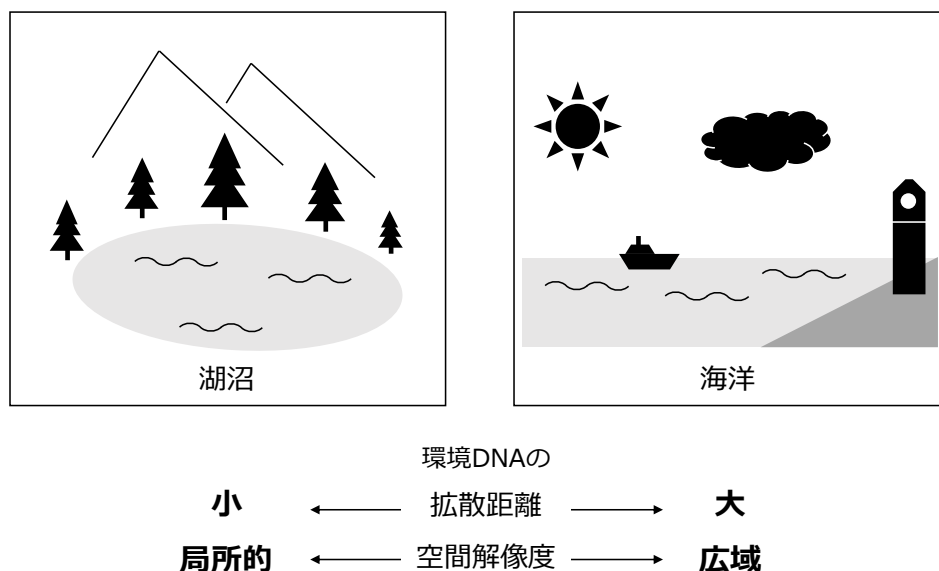


図. 本研究に基づく、湖沼と海洋の間での環境 DNA の拡散距離および空間解像度の違い（作成：相馬寿明）

1. 背景

生物多様性の喪失が全球的な問題となった昨今、「どこにどんな生き物がどれくらいいるのか」を迅速かつ正確に評価することが強く求められています。採捕調査は生物モニタリングの王道的な手法ですが、個体や生息地にとって侵襲的であるだけでなく、見た目に基づく種判別には専門的な知識が必要であり、調査労力の高さから多地点で高頻度に調査することは困難です。対して環境 DNA 技術は、水サンプル中に含まれる DNA 情報（環境 DNA）から生物の分布や組成を推測できるため、従来手法よりも非侵襲的かつ省コストに生物調査を進めることができ、保全管理を効果的に推し進めるための分布情報を得るための新たなモニタリングツールとして近年世界的に注目されています。

一方で、個体から放出された環境 DNA はその場に留まらず、水の流れや重力に沿って移動するため、個体から放出された環境 DNA がどれくらい遠くまで流されるのか/早く沈むのかは、環境 DNA の検出結果を適正に解釈する上で極めて重要な情報です。しかし、こうした研究は、湖沼と海洋では特に限られており、かつそれら研究間で結果は必ずしも一貫していません。そのため、環境 DNA がどれくらい遠くまで流され、どれくらいの空間解像度で生物分布を反映するのか、そしてどのような間隔で採水すれば調査地の生物多様性を過不足なく評価できるのかは、湖沼および海洋生態系においてよく分かっておらず、生物多様性モニタリングを実施する上での大きな課題の一つとなっていました。

2. 研究手法・成果

私たちは、環境 DNA の移動拡散に関するこれまでの研究をインターネット検索によって探し出し、計 59 件の原著論文を収集しました。その内、湖沼での研究は 8 件、海洋での研究は 12 件でした。これらの研究のほとんどは、設定したサンプリング距離の中で最もソース地点から遠くで環境 DNA が検出された地点（＝最大拡散距離）を報告しており、同じ湖沼・海洋生態系であっても研究間で大きくばらついていました。しかし、最大拡散距離はソース地点の生物量やサンプリング間隔によって影響を受けやすいため、そもそも研究間での単純な比較には向いていません。そこで私たちは、ソース地点から離れるにつれての環境 DNA 濃度の減衰率に着目し、この減衰率に基づく平均拡散距離 [1] を計算した結果、環境 DNA の平均拡散距離は湖沼よりも海洋で桁違いに大きいことが分かりました（湖沼: 4.7-36.0 m, 海洋: 266.0-10124.5 m）。また、ソース地点から放出された環境 DNA の 99%は、湖沼ではせいぜい数十 m 以内に留まるのに対して、海洋では最大 20 km 以上遠くにまで拡散しうることが分かりました。この結果から、湖沼では環境 DNA は局所的な生物分布を示しやすい一方、調査地全体の生物多様性を推測するには比較的高密度な採水が求められます。対して、海洋では環境 DNA は拡散しやすいため、一つの水サンプルが広範囲の生物分布を反映する一方、局所的な生物分布の推測にはあまり向かないことが考えられます。

3. 波及効果、今後の予定

これまで断片的に存在した様々な水環境における環境 DNA の移動拡散に関する知見を、本研究は初めて統合的に評価しました。本研究で明らかになった環境 DNA 拡散距離の違いは、環境 DNA が示す生物分布の空間解像度に直結すると共に、湖沼と海洋における環境 DNA アプリケーションの長所と短所を浮かび上がらせました。また、本研究で提示した環境 DNA の拡散距離は、生物多様性モニタリングのための湖沼や海洋における採水調査デザインを計画立案する上での重要な示唆をもたらすことが期待されます。しかしながら、環境 DNA 拡散に関する研究の数は未だ限られており、本研究で考慮できた研究数は決して十分なものではありません。加えて、環境 DNA の拡散距離に対する様々な環境要因（流速、水質、植生、底質など）の影響も本研究

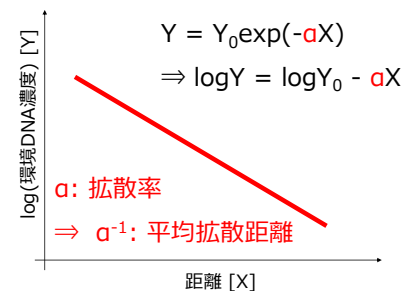
では考慮できていません。今後さらなる研究を積み重ねていくことで、本研究結果の妥当性を検証していくと共に、環境要因の影響も加味したより統合的な解析をしていきたいと考えています。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、JSPS 特別研究員奨励費 (JP22J00439 & JP22KJ3043) および環境省・(独) 環境再生保全機構の環境研究総合推進費 (JPMEER20234R01) の支援を受けて実施されました。

<用語解説>

[1] ソース地点から離れるにつれて、環境 DNA 濃度は指数関数的に減少すると考えられます。すなわち、対数変換された環境 DNA 濃度とソース地点からの距離の間には線形回帰が成り立ち、その回帰直線の傾きが減衰率に相当します (右図)。また、この減衰率の逆数をとった値は、ソース地点における環境 DNA の約 36.8% (ネイピア数 e の逆数; e^{-1}) が到達しうる距離で、ここでは平均拡散距離と呼んでいます。



<研究者のコメント>

「日本国内では 2018 年に一般社団法人環境 DNA 学会が設立されて以来、環境 DNA 技術の標準化に向けた取り組みが進められています。一方で、環境 DNA の放出後動態やその拡散の空間スケールがよく分かっていないために、採水地点の間隔などのサンプリング戦略の策定にはほとんど言及できていませんでした。私たちの今回の研究結果は、まだ不完全ではありますが、環境 DNA サンプリングにおける具体的な一つの『基準』を作ることに大きく貢献できたのではないかと自負しています。」(相馬寿明)

<論文タイトルと著者>

タイトル: Spatial dispersal of environmental DNA particles in lentic and marine ecosystems: An overview and synthesis

著者: Toshiaki S. Jo, Hiroaki Murakami, & Ryosuke Nakadai

掲載誌: *Ecological Indicators*

DOI: 10.1016/j.ecolind.2025.113469