

ダム湖内魚類相を効率的に捉えるための 環境DNA調査方法に関する検討

STUDY ON ENVIRONMENTAL DNA SURVEY
TO CAPTURE FISH FAUNA IN DAM RESERVOIR

村岡敬子¹・天羽淳²・菅野一輝³・篠原隆佑⁴・中村圭吾⁵
Keiko MURAOKA¹, Jyun AMOU², Kazuki KANNO³, Ryusuke SHINOHARA⁴ and Keigo
NAKAMURA⁵

¹正会員 国研 土木研究所 流域水環境研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²非会員 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 (〒100-8918 東京都千代田区霞ヶ関2-1-3)
(現:国土交通省 北海道開発局 帯広開発建設部)

³正会員 博(農)国研 土木研究所 流域水環境研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

⁴正会員 修(生資)国研 土木研究所 流域水環境研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

⁵正会員 博(工)国研 土木研究所 水環境研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
(現:公益財団法人 リバーフロント研究所)

河川水辺の国勢調査(以降水国調査)への環境DNA(以降eDNA)実装に向け、ダム湖内の魚類相を捉えるための最適な採水方法を検討するため、ダム湖の水国調査地区である流入部と湖岸部、水質調査地点である湖心部を比較した。流入部と湖岸部では、水国捕獲種数・個体数ともに流入部のほうが高かった。湖岸部におけるeDNAによる検出状況では、湖岸部のみで捕獲された種は、湖岸部・流入部双方で捕獲された種よりも有意に低かった。また、湖岸部で捕獲された種のうち、大型のサケ科魚類、小型のコイ科魚類、底生魚はeDNAで検出されにくい傾向を示した。これらのことから、ダム湖では、eDNA含有物質の面的な拡散範囲が狭く、生物の分布範囲の近傍で採水する必要があると考えられた。流入部で採水したサンプルへの流入河川の影響は小さかったことから、水国調査にeDNAを実装する際には、流入部を基本地点とするとともに、魚類の日周行動なども考慮しながら、追加の採水地点を設定することが望ましいと考えられた。

Key Words: eDNA, fish, dam, Vertical distribution, Water flow dynamics

1. はじめに

河川や湖沼の水に含まれる生物の組織片や分泌物など(以降組織片等)からDNAを取り出し、その持ち主の生物情報を得るeDNA調査技術は、現地での調査負担が少ないことから、生物調査の効率化を図ることができると期待されている。特にデータベースが充実し、研究事例も多い魚類では、既に国が行う河川の生物調査においても試験的に利用されつつある^{例えは¹⁾}。河川の生態系を把握し、多自然川づくりを始めとする河川行政に資することを目的に、国土交通省では全国109水系を対象とした河川水辺の国勢調査(以降水国調査)を行っており、令和元年度からは、水国調査にeDNAを実装し、調査の効率化や高度化を図るための全国調査(以降水国テーマ調査)を開始した。この調査の中で、水国調査1地区当たり1LのサンプルのeDNA分析により水国調査で捕獲された種を検出できた割合(以降検出率)を比較すると、ダムおよび汽水域の検出率は、河川に比べ有意に低い結果となっ

た。このうち、汽水域では潮の干満によって魚類相が変化するため、1回の採水によるeDNA調査では不十分であると考え、令和4年度の水国テーマ調査では汽水域における採水の場所や時間帯の最適化に向けた検討を進めているところである。

ダムにおける水国調査地区は、ダム湖、流入河川、下流河川に区分され、さらにダム湖は、流入河川が流入するダム湖内の浅場である“流入部”と、流入部以外の浅場で魚類が生息している可能性がある場所に設定される“湖岸部”に分けられ、後者は必要に応じて複数設定することができる²⁾。

eDNA調査では、生物の組織片等がどのように存在しているのかを考慮した採水地点の設定が必要である。河川では、eDNA含有物質の到達範囲もふくめ、河道内の動態が明らかとなりつつあるとともに^{3),4)}、水国テーマ調査の結果を踏まえ、採水地点の具体的な提案に至った(篠原ら未発表)。

表-1 ダム湖内で捕獲されず、eDNAで検出された種。

	ダム	魚種名	eDNA検出		同年水国流入 河川での確認	過年度水国での確認		備考
			流入部	湖岸		流入河川	ダム湖	
①	A	カジカ属	●	●		●ハカジカ	●ハカジカ	ダム湖内3地点でeDNA検出
②	A	コイ	●	●		△	△	ダム湖内3地点でeDNA検出
③	A	ドジョウ	●	●				ダム湖内3地点でeDNA検出
④	A	ニジマス	●	●	●	●	●	
⑤	A	イワナ		●	●	●		
⑥	B	ジュズカケハゼ		●	●	●	●	春季、秋季ともeDNA検出
⑦	E	カジカ	●	●		●		
⑧	E	タモロコ属	●					周辺・下流含めて確認なし
⑨	G	ビワヒガイ	●			●	△	
⑩	G	ヌマチチブ	●					

●は確認されたことを、空欄は確認されなかったことを示す。△は、過年度水国で確認されているが、地区を特定できなかったことを示す。

湖沼では、天然湖沼における採水地点数を検討した事例もある⁵⁾。しかし、コイ、オオクチバスなど大型の遊泳魚を対象とした事例があるものの^{6), 7)}、湖沼における小型の遊泳魚や底生魚など水際を利用する魚種についての知見は乏しく、これらの種を含むダム湖の魚類相を捉えるための採水地点の知見は乏しい。

また、河川におけるeDNA調査では、水国調査で捕獲されなかった種も検出され、その原因として、生息していたのに捕獲できなかった種がいた場合や、周辺水域に生息していた種に由来するeDNAが検出された場合が考えられている。ダム湖においても、ダム湖ではなく流入河川に生息する生物の影響も想定され、それが湖内のどの範囲に及ぶものかについては採水地点を設定する上で重要な情報である。水国調査では、網で捕獲できる範囲は調査地点に限定されており、水国調査で捕獲されていない種が電気ショッカーを使うことで捕獲されたことも報告されている⁸⁾。これまでの水国調査との連続性を考えるときに、ダム湖のeDNA調査によって得られる生物情報が、どの範囲の生物相を反映した情報なのかを考察するための材料も必要である。そこで、本研究では、ダム湖における水国調査の捕獲地区を中心に、各地点のeDNA検出結果や捕獲状況を整理し、ダム湖内の魚類相を効率的に捉えるeDNA調査方法について検討した。

2. 調査内容

(1) 既往文献調査

平成28～30年度の水国調査でeDNAを併用した21ダムの水国調査報告書もしくはその要約版を入手し、捕獲個体数の情報があり、湖岸部および流入部で捕獲とeDNA調査の記録があった9ダム（北海道3うち1ダムは湖岸部のみ、東北2、中部3、九州1）を抽出し、捕獲されていないのに流入部や湖岸部のeDNAで検出された種について、各ダムの過年度における全水国調査における確認状況と比較

した。次に、eDNA分析時に良好なデータが得られていないと考えられた2ダムを除く7ダムについて水国調査での捕獲結果とeDNA検出状況の比較を行った。さらに、流入部と湖岸部のサンプリング環境を比較するために、過去の水国調査データを用い、流入部と湖岸部における1調査1地区当たりの捕獲個体数、確認種数を整理した。

(2) ダムの水国調査および水質調査を利用した調査

令和2年度に水国調査を実施したダムのうち4ダム（玉川ダム、矢作ダム、殿ダム、池田ダム）より水国調査地区の表層水および水質調査時の湖心サンプルの提供を受け、MiFishによるeDNA分析を行った⁹⁾。分析およびデータの精査は、北川ら³⁾と同じ方法で実施し、メタバーコーディング解析により得られた種ごとのリード数を用いて、同一サンプル内の魚種の相対的な比較を行った。

3. 結果

(1) 捕獲されずeDNAで検出された種

ダム湖内で捕獲されていないにも関わらず、流入部や湖岸部のeDNAで検出された事例は、4ダムのべ10件であった。それらを対象に過年度の水国調査での確認状況を整理した結果を表-1に示す。同じダム湖に複数の河川が流入している場合は、それぞれに流入部に調査地区が設定され、その上流側の湛水の影響を受けない場所に流入河川の水国調査地区は設定されているが、いずれかの流入河川で捕獲履歴があれば過年度の水国調査において流入河川で捕獲されたとして整理を行った。10件のうち、同時期の水国調査の流入河川で捕獲されていたのは3件（表-1中の④、⑤、⑥）あったが、このうち流入部でeDNAが検出されたのは1件（④）のみだった。さらに、この3件では湖岸部で当該種のeDNAが検出され、さらに流入部で検出された④を含む2件は、過年度の水国調査においてダム湖内の捕獲履歴があった。

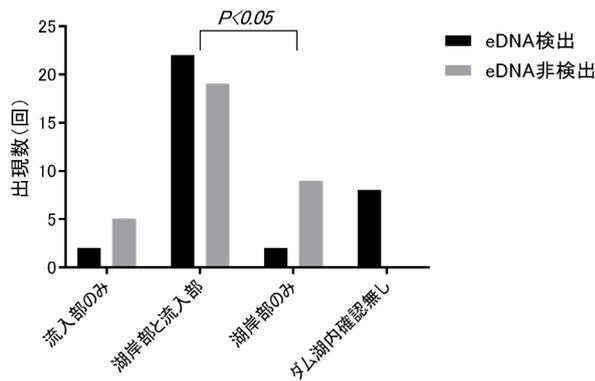


図-1 流入部のeDNAで検出された種の水国調査捕獲状況。

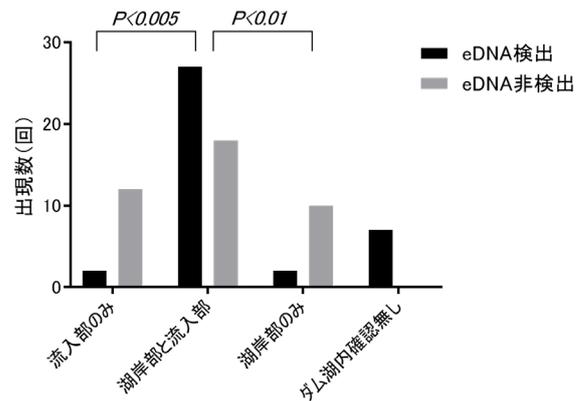


図-2 湖岸部のeDNAで検出された種の水国調査捕獲状況。

過年度の水国調査においてダム湖内で捕獲されない種が流入部のeDNAで検出された件数は6件あるが(②, ③, ⑦~⑩), このうち3件は湖岸部においても当該種が検出されていた(②, ③, ⑦)。

(2) 流入部・湖岸部におけるeDNA検出結果と水国捕獲確認状況

ダム湖内の魚類分布範囲とeDNAによる検出状況を比較するため、7ダムの水国調査による捕獲結果を、“流入部のみで捕獲”、“湖岸部のみで捕獲”、“湖岸部・流入部双方で捕獲”の3区分に分けるとともに、流入部、湖岸部で採水した水のeDNA分析により捕獲された種に該当する配列が検出されたか否か(以降eDNA検出結果)について整理を行った。ここに、湖岸部・流入部双方で捕獲されたのは25種で、のべ41回出現した。

流入部サンプルのeDNAで検出された種のダム湖内における水国調査捕獲状況を図-1に示す。流入部で捕獲された種に該当する種をeDNAで検出した率(以降検出率)は50%だった。このうち、eDNA検出結果は、湖岸部・流入部双方で捕獲された群と湖岸部でのみ捕獲された群との間に有意な違いがみられ(Fisherの正確確率検定, $p=0.0463$)、流入部が湖岸部よりも上流側である位置関係を反映した結果となった。湖岸部・流入部双方で捕獲された群と流入部でのみ捕獲された群には有意な違いはなかった。

湖岸部サンプルのeDNAで検出された種のダム湖内における水国調査捕獲状況を図-2に示す。湖岸部で捕獲された種の検出率は51%と、流入部の検出率と同程度だった。しかし、流入部でのみ捕獲された種の検出は2回しかなく、流入部・湖岸部双方で確認された群に比べ有意に低かった(Fisherの正確確率検定, $p=0.0048$)。また、湖岸部でのみ捕獲された種のeDNA検出結果は、湖岸部と流入部双方で確認された種よりも有意に低かった(Fisherの正確確率検定, $p=0.0099$)。

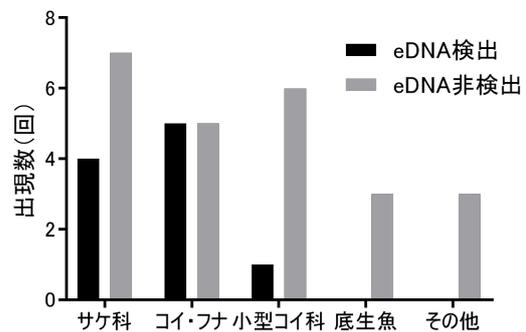


図-3 湖岸部で捕獲された種の湖岸部eDNA検出結果。

サケ科：ニジマス、サクラマス、ヤマメ、ニッコウイワナ、アメマス類、カラフトマス、コイ・フナ：コイ、ギンブナ、小型コイ科：モツゴ、アブラハヤ、ゼゼラ、底生魚：カジカ、ハナカジカ、ドンコ、その他：キンギョ、ブルーギル

(3) 湖岸部を利用する魚種の検出状況

湖岸部で捕獲された魚類を、“サケ科”、“コイ・フナ”、“小型のコイ科魚種”、“底生魚”、“その他”のグループに分け、湖岸部サンプルのeDNA検出結果を整理した(図-3)。コイ・フナの検出率が高いのに対し、小型のコイ科魚類や底生魚が確認されたのは、わずか1回であった。また、サケ科の検出率は、コイ・フナに比べて低かった。

(4) 水国データによる流入部と湖岸部の比較

湖内における魚類の分布状況を探るため、9ダムを対象に、過年度の水国データによる流入部と湖岸部の地区別捕獲個体数(図-4)と確認種数(図-5)を整理した。流入部と湖岸部の捕獲個体数、種数ともに流入部のほうが多い傾向を示し、両者の間には有意な違いがあった(対応のあるt検定, 捕獲個体数: $p=0.0214$, 種数: $p=0.0436$)。

(5) 流入部・湖岸部・湖心の検出レベルの比較

令和2年度にサンプルの提供を受けた玉川ダム、矢作ダム、殿ダム、池田ダムの流入部、湖岸部および湖心の

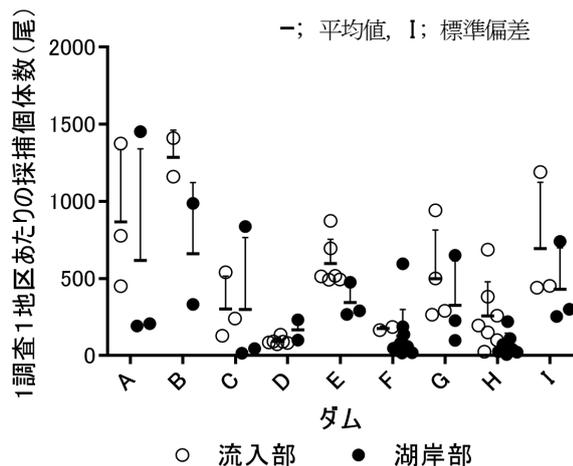


図-4 過年度の水国調査で捕獲された個体数.

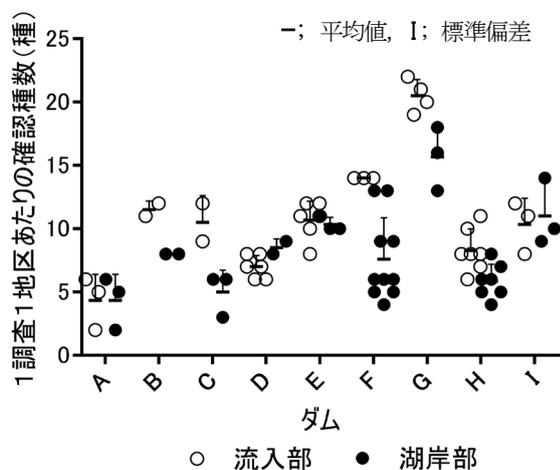


図-5 過年度の水国調査で捕獲された種数.

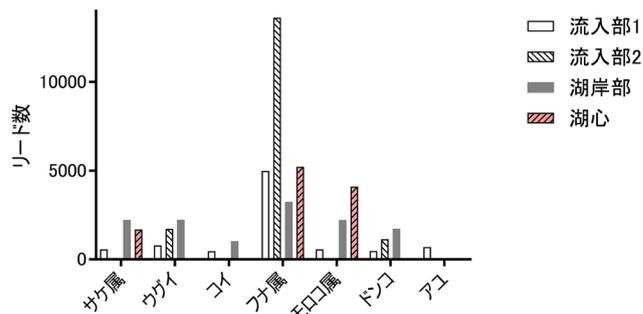
eDNA検出結果を比較したところ、湖心は流入部よりも確認種数、リード数共に小さい傾向がみられるとともに、湖心でのみ確認された種はいなかった。また、流入部や湖岸部で検出された種の半数以上が、湖心では検出されなかった。

殿ダムと矢作ダムの種別リード数を図-6に示す。湖岸部を利用すると考えられる底生魚では、カジカを除き湖心のリード数が湖岸よりも小さい傾向を示した。一方で、殿ダムのサケ属とタモロコ属、矢作ダムのカジカとアカザのように、湖岸部と同等もしくはそれ以上のリード数を示した種もあった。ここに、サケ属、カジカは冷水性の魚類で、アカザは高温に弱い魚種である。

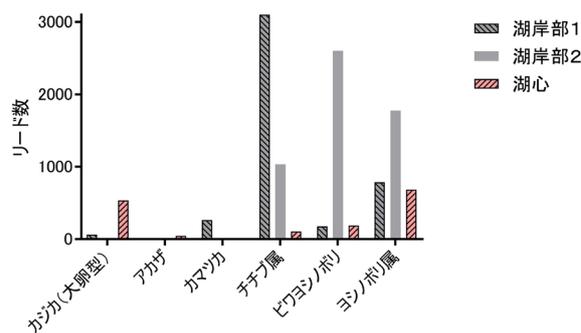
4. 考察

(1) ダム湖内におけるeDNA含有物質の挙動

河川では、eDNAを含有する組織片などの物質は、物質動態モデルで表現されることが報告されている¹¹⁾。河



a. 殿ダム



b. 矢作ダム

図-6 水国および水質調査のeDNA分析で得られたリード数.

川に比べて流速が小さいダム湖内においては、生物から放出される組織片は沈降しながら拡散するため、表層水のeDNAはそれほど広い範囲の生物相を反映しないと考えられる。本研究においても、流入部のみで捕獲された魚種の湖岸部における検出率は低かった(図-2)。また流入部や湖岸部のeDNAで検出された種の半数が湖心部では検出されず、リード数も相対的に低い傾向があるなど(図-6)、湖内での組織片等の拡散が限定的であることが示唆された。

流入部と湖岸部とでは、捕獲される種数・個体数共に流入部よりも湖岸部のほうが有意に高かった(図-4, 5)。また、湖岸部のみで捕獲された種のうち、水際帯を利用する小型のコイ科魚種と、底生魚の検出率は低い結果となった(図-3)。湖沼では、湖岸の水際は、波浪の影響により浸食を受けやすい^{例えは15)}。浅い湖沼では、浸食により流出した土砂が湖岸に浅瀬を形成するが、水深が大きいダム湖では浅瀬ができるのは元地形の勾配が緩い場所などに限られ、それ以外の場所では、浸食により岩盤が露出した急峻な湖岸が形成される。流入部では、緩勾配の元地形が水面付近にあり、土砂等の流入もあるため広く多様な浅瀬を形成するのに対し、湖岸部ではそのような場所は局所的でかつ規模も小さくなる。また、ダム湖では、もともと水位変動のため恒常的な水草の生育環境が天然湖沼に比べて乏しい^{16), 17)}。そのため、小型魚類が利用する水際植生帯や、底生魚が利用できる浅瀬の

規模は、流入部に比べ湖岸部は小さく、流入部のほうが湖岸部に比べ種数も個体数も多かったと考えられる。さらに、小型魚や底生魚は、1個体が湖中に放出する組織片等の量が他の魚種に比べて少ない。湖岸部のみで確認された種の内、小型魚種や底生魚の検出率が低くなったのは、個体数・個体が放出する組織片等の量双方の面から組織片等の量が低濃度となったためと考えられる。また、流入部と湖岸部双方で捕獲された種が湖岸部のみで捕獲された種よりも有意に高く検出されたのは、流入部など他の地区に由来する当該種の組織片により検出されやすくなった可能性も考えられる。

流入部は流入河川に由来する組織片等の影響を受ける可能性もあるが、今回整理を行った9ダムの事例では、流入河川の影響を受けた可能性の残る事例は1事例のみであった(表-1)。河川からの流入水は、ダム湖に到達した際、相当水温の層に侵入し、流入地点から遠くなると、貯水池の幅が広がるため流速は減少する^{11, 12)}。夏から秋の出水の影響を受けない日に行われる水国調査時には、ダム湖の表層水の水温は日照により温められており、山間部の冷たい河川水は流入河川の生物の組織片とともに下層に侵入し、流速の低減とともに沈降し、流入部へ影響は限定的であったと考えられる。

(2) 魚の日周性とeDNA

湖内を利用する種においても、コイ・フナの検出率に比べ、サケ科魚類は低い傾向がみられた(図-3)。サケ科成魚の適水温は、ヒメマスで3.5~12℃、サクラマスで6~13℃であるのに対し、コイは20~28℃(成長適温)¹⁸⁾であり、両者はダム湖内の水深方向に異なる水温帯を利用していると考えられる。天然湖の研究事例ではサケ科魚類は、鉛直方向に日周行動をすることが知られており、そのうちヒメマスでは夏季・秋季の夜間には、湖全体の表層から水温躍層にわたって分散するが、昼間は夜間に匹敵する数の魚影が表層で確認されなかったことが報告されている¹⁹⁾。水国調査では、刺し網などを夕方に仕掛け、翌朝回収しているため、日周行動をする魚類も捕獲できるが、日中に表層水を採水したeDNA調査では、サケ科魚類の組織片等を十分に採取できなかったことが考えられる。同様に、冷水性魚類は、日中は低水温の層にいますと考えられる。流入部や湖岸部に比べてリード数が低くなりがちな湖心部において、殿ダムのサケ属や、矢作ダムのカジカとアカザ(共に夜行性)のリード数が流入部や湖岸部に相当するリード数を示していたのは、これら魚種のeDNAが表層水全体に大きな偏りなく存在していることを示唆しており、低リードながらも夜間の表層付近における行動を反映している可能性も考えられる。河川では、日周性のある魚類であっても、昼間のサンプルのeDNAサンプルで十分に把握することができるとの報告があるが²⁰⁾、面的にも深さ方向にも水の循環がほとんどなく、組織片等の拡散が期待できない

ダム湖においては、水深方向の魚類の分布や魚類の日周性を考慮した採水計画が必要と考えられる。

(3) 効率的な調査のために検討すべき事項

流入部と湖岸部の水国調査地区は、前者は流下方向に、後者は湖岸沿いに30~100mの規模を持つ。水国調査では湖岸部では投網、たも網などにより浅瀬に生息する魚類を、湖心方向に向けては刺し網などが、夕方から翌朝まで設置され、その網の範囲を通過した魚類の種リストが得られている。

本研究により、ダム湖における生物の組織片は面的にそれほど広い範囲に拡散せず、eDNA調査で生物情報が得られる範囲は、河川よりも狭いことが示された。ダム湖の調査地区内で、例えば、湖内側で刺し網の範囲を複数の深さ・時間帯で採水すれば、水国調査に匹敵する検出率を得られるだろうが、調査の効率性を考えると、より簡便な導入方法の検討が必要である。

ダム湖では、河川とダム湖を行き来する魚はいるものの、湖内の魚類相は年間を通じて大きく変化しない。現在の水国調査地区ではなく、ダム湖内の魚類相を捉える、という視点で採水方法を考察する。まず、流入部では、魚種数・個体数共に湖岸部よりも多く、良好なeDNA検出結果を得るために必要な組織片等がサンプル中に多く含まれることが期待される(図-5)。そこで、ダム湖におけるeDNA調査ではダム湖の表層水温が高い時期であれば、流入河川を通じた上流域の生物の影響も限定的と考えられる流入部を基本採水地点とし、流入部では捉えられない種のための追加地点を設定していくことを提案したい。ただし、底層部の流れや湖底に含まれる上流域の生物の組織片等を混入させないように採水する必要があり、その条件について事例を追加しながら検討していく必要がある。

流入部では捉えにくい種として、本研究では「湖岸部のみで捕獲される種」と「冷水性魚類や日周性がある種」が挙げられた。

湖岸部では、小型の魚類や底生魚は、少数が湖内の適地に分布し、流れが緩やかなこともあるため組織片等は局所的に存在すると考えられる。魚類が利用しそうな植生帯の極近傍やその中で採水することや、湖岸沿いに採水バケツを引きながら採水する²¹⁾など、少ない組織片等を効率よく捉える方法を検討していく必要がある。

次に昼間に表層水付近を避ける傾向にある冷水性の魚類や夜行性の魚種については、引き続き検討が必要である。例えば、大型の冷水性魚種では、稚魚が湖岸を利用する春先に採水をする、あるいは、冷水性魚類についてはダム湖の表層水温が下がる冬期に行う等により効率的な調査が可能となる可能性もある。また、複数の調査深度で採水するダム湖の定期水質調査²²⁾や、放流設備を利用したサンプリングも考えられる。

さらに、捉えにくい種への対応として、低濃度の組織

片を検出しやすくするための検討も必要である。採水量を増やす、分析阻害物質の影響低減を図るなど分析面での工夫や、データ精査時に低リードで検出される種の信頼性を担保しながら活かす検討が必要である。

ダム湖内の流動や魚類やハビタットの分布はダムの特性によって多様であり、効率的な導入に向け、これまでの水国の調査地区や調査時期にこだわらない柔軟な導入方法の検討を引き続き実施する必要がある。

5. まとめ

本研究により、ダムの水国調査地区におけるeDNAの特性を示すことができた。ダム湖では、組織片の面的な拡散範囲が極めて狭く、生物が近傍にいる場所で採水を行う必要がある。複数の採水地点を設定する際には、種数、個体数共に高い流入部を基本としつつ、湖岸地点を追加することで調査の最適化を図れる可能性がある。また、ダム湖内の魚類の分布には、湖岸環境のほか、湖内の水温も関与しており、湖内の水深方向の分布や魚類の日周性なども考慮しながら、採水計画を検討していく必要がある。ダム湖内の条件はさまざまであり、ダム湖の水国調査におけるeDNA調査の汎用的な指針を得られるよう、土木研究所においても引き続き検討を行っていく予定である。

謝辞：本研究の実施に当たっては、国土交通省地方整備局の皆様および水国や水質調査の受注者の皆様に多大なるご協力を賜りました。ここに深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Sakata, K. M. Maki, N. Sugiyama, H. Minamoto, T.: Identifying a breeding habitat of a critically endangered fish, *Acheilognathus typus*, in a natural river in Japan. *The Science of Nature*, vol. 104, 2017.
- 2) 国土交通省：河川水辺の国勢調査マニュアル 魚類調査編, 2016.
- 3) 北川哲郎, 村岡敬子, 天野聡, 岡本祐司, 中村圭吾: 河道内で検出された海産魚類を指標としたeDNA含有物質の有効検出範囲の推定, *河川技術論文集*, 27巻, pp. 295-300, 2021.
- 4) 赤松良久, 乾隆帝, 一松晃弘, 河野誉仁, 土居秀幸: eDNAを用いた河川内の魚類現存量推定に関する基礎的検討, *土木学会論文集B1 (水工学)*, 73-4/I pp. 1111-1116, 2017.
- 5) Sato, H., Sogo, Y., Doi, H., Yamanaka, H.: Usefulness and limitations of sample pooling for environmental DNA metabarcoding of freshwater fish communities. *Scientific Reports*, 7:14860, 2017.
- 6) 米山和良, 光永靖, 山根猛, 松田征也: 琵琶湖南湖エリ周辺における漁場水温の変化がコイの行動に与える影響, *日本水産工学会誌*, 44巻2号, pp. 113-118, 2007.

- 7) 角田裕志, 満尾世志人, 千賀裕太郎: 特定外来生物オオクチバスの違法放流：岩手県奥州市のため池の事例(保全情報), *保全生態学研究*, 16巻2号, pp. 243-248, 2011.
- 8) 富岡繁則, 北方真理子, 長岐孝司, 沖津二郎, 浅見和弘, 西城和彦: 河川水辺の国勢調査とショッカー船調査による北上川水系3ダムにおけるオオクチバス生息状況の比較, *応用生態工学*19(1). pp. 37-46, 2016.
- 9) Miya, M., Y. Sato, T. Fukunaga, T. Sado, J. Y. Poulsen, K. Sato, T. Minamoto, S. Yamamoto, H. Yamanaka, H. Araki, M. Kondoh, and W. Iwasaki, : MiFish, a set of universal PCR primers for metabarcoding environmental DNA from fishes: detection of more than 230 subtropical marine species, *Royal Society Open Science*, Volume 2, 2015.
- 10) 小林勘太, 赤松良久, 中尾遼平: 河川物質動態シミュレーションに基づくeDNA濃度にて魚類の生物量を把握し得る空間的範囲の検討, *水工学論文集*, 第77巻2号 (I), pp. 553- 558, 2021.
- 11) 堀内清司, 安部喜也: 美和貯水池における水の流動と水温, *地理学評論*, 34巻5号, pp. 268-279, 1961.
- 12) 新井正, 堀内清司: 田子倉貯水池の水温構造について, *地理学評論*, 36巻10号, pp. 590-601, 1963.
- 13) 増山貴明, 吉村千洋, 藤井学, 伊藤潤, 大谷絵利佳: 寒河江ダム貯水池と流入河川のエコトーンにおける堆積土砂と土壤環境特性の空間分布, *応用生態工学*, 14巻2号, pp103-114, 2011.
- 14) 渡辺仁治: 猿谷ダム湖(奈良県)の水位変動が生物へおよぼす影響, *日本生態学会誌*, 15巻2号, pp.60-66, 1965.
- 15) 宇多高明, 小菅晋, 岡村和男, 本田哲也, 木内秀規: 湖岸堤への覆土工による湖岸の環境改善と覆土の安定性, *海岸工学論文集*, 43巻, pp. 831-835, 1996.
- 16) 鈴木紀雄, 桜井善雄, 沖野外輝夫: 湖辺環境の保全とその意義 - 環境保全の理念の観点から-, *日本生態学会誌*, Vol. 39, No.1, pp81-89, 1989.
- 17) 百瀬浩, 須田真, 河野勝, 木部直美, 武田ゆうこ, 藤原宣夫: ダム湖の水位変動域におけるピオトープ池, *日緑工誌*, 27 (1), pp.136-141, 2001.
- 18) (社)日本水産資源保護協会: 環境条件が魚介類に与える影響に関する主要要因の整理, 1983.
- 19) 岡本峰雄, 奥本直人, 岩田宗彦, 生田和正, 福所邦彦: 中禅寺湖におけるサケ科魚類とくにヒメマスの鉛直分布について, *日本水産学会誌*, 59巻11号, pp.1813-1821, 1993.
- 20) 中尾遼平, 赤松良久, 齋藤稔, 宮園誠二, 稲葉愛美: 環境DNA定量メタバーコーディングを用いた魚類相の量的および質的な日周変動の把握, *土木学会論文集B1 (水工学)*, 77(2) pp.541546, 2021.
- 21) 一般社団法人環境DNA学会: 環境DNA調査・実験マニュアルVer.2.2, 2020.
- 22) 国土交通省水管理・国土保全局: ダム貯水池水質調査要領, 2015.

(2022. 3. 25受付)