

道内での治山ダム改良による縦断的な河川連続性の再生

石山信雄・速水将人

河川の縦断的な連続性再生の重要性

河川生態系は3方向の連続性によって成り立っているといわれています。上流から下流に沿った水域のつながりを指す“縦断的な連続性”, 河川と周囲に広がる氾濫原間のつながりを指す“横断的な連続性”, 河床間隙を介した河川水と帯水層間のつながりを指す“垂直的な連続性”がそれに該当します。特に1点目の縦断的な連続性は, サケやアユなど海と川を行き来しながら一生を終える漁業対象種の保全に大きく関係することもあり, 日本において古くからその再生が注目されてきました。例えば, 国管理の中下流域の直轄区間では, 1991年から「魚がのぼりやすい川づくりモデル事業」が試行され, 河川横断工作物に魚道設置等の改良が進められています。平成21年の調査結果では, 全国の直轄区間内に1,401基の河川横断工作物があり, その内の約65%に魚道が設置されていました(小川ら2011)。

治山ダムの改良による河川の縦断的な連続性の再生

こうした縦断的な連続性の再生が必要な場所は, 河川の中下流域に限ったものではありません。河川の上流域は, 魚類の産卵場や出水時の避難場としても機能することが知られており, 溪流魚が生活史を全うするためには本川と支流間や支流どうしの連続性が健全に保たれている必要があります。一般に河川上流域は森林に覆われているため, 中下流域に比べ人為的な影響が少ないのではと思われる方も多くおられると思いますが, 現状は違います。なぜなら, 上流域では治山ダムによる分断化が生じているためです。治山ダムは, 山脚の固定及び土砂流出の抑止・調節を図る小型の横断工作物です。その多くは山奥の沢や斜面に設置されているため, 普段私たちがあまり目にすることはありませんが, 全国に約44万基(林野庁2018), 道内でも3万5千基以上(玉手・早尻2008)が設置されています。近年では, こうした治山ダムの河川生態系へのインパクトを緩和するため, 治山ダムの改良による縦断的な連続性の再生が道内でも進みつつあります。

2種類の改良タイプ

縦断的な連続性の再生を目的とした治山ダムの改良方法として“魚道の設置”と“堤体の切り下げ”が挙げられます(石山ら2017)。図-1で示すように, 魚道は堤体の一部または全面にわたって水生生物が移動できる流路を取り付ける改良方法です。また, 切り下げとは堤体に切れ込みを入れ水通し天端の高さを河床に近づける改良を指し, 部分的なダム撤去(partial dam removal)と呼ばれることもあります。

■ 魚道の設置 (堤高: 2.0 m)



■ 堤体の切り下げ (堤高: 2.5 m)



図-1 オマン川における治山ダムの改良事例

改良前(左)および改良直後(右)の様子。
速水ら(2021)の図を改良して使用。

採捕調査による治山ダム改良効果の検証

このような治山ダムの改良事例は道内でも蓄積されつつあります。今後のより効果的な治山ダム改良の実現のためには、こうした個々の事例を適切に評価し、次の事業に活かす順応的管理が求められますが、水生生物への改良効果を定量的に評価した研究は限られていました。そこで私たちの研究グループでは、治山ダムの改良（魚道の設置、堤体の切り下げ）がその上流の溪流魚類相に与える影響について、改良前および後（改良から最大10年後）に行った採捕調査によるモニタリングを通して検証しました。なお、今回の報告は速水ら（2021）に基づいたものです。

改良工事の評価は、道央および南西部に位置する塩越川、マルヒラ川、オマン川の3河川で行いました（図-2）。採捕調査の地点数は、塩越川が2、マルヒラ川が5、オマン川が10の計17地点です。治山ダム改良工事として、ダム下流側に突き出した形（突出型）の魚道設置（マルヒラ川、オマン川）、堤体に逆台形型の切れ込みを1つ入れ落差を緩和させた切り下げ（マルヒラ川、オマン川；以下、逆台形型切り下げ）、天端の中央部に長方形のスリットを1つ入れ落差を緩和させた部分撤去（塩越川：以下、長方形型切り下げ、図-6参照）の計3種類が採用されました。各河川での改良工事の終了時期は、塩越川が2015年11月、マルヒラ川が2009年2月、オマン川が2011年11月でした。

本研究では、北海道の溪流の代表的な魚類であるアメマス（*Salvelinus leucomaenis*）、サクラマス（*Oncorhynchus masou masou*）、およびハナカジカ（*Cottus nozawae*）の3魚種を対象種としました（図-3）。アメマスとサクラマスは秋に河川上流域の砂礫底に産卵後、数年河川生活を行い降海する遡河回遊魚です（アメマスの一部には陸封型個体群が見られます）。一方、ハナカジカは一生を淡水で過ごす純淡水魚です。採捕にはエレクトロフィッシャーという電気を利用した採捕器具を用い（図-4）、各調査地点における各魚種の採捕数を調査面積で除して生息密度（n/m²）を求めました。なお、エレクトロフィッシャーは魚類を一時的に電気で動かなくさせるものであり捕殺することはありません。採捕個体は種同定を現場で行った後、速やかに放流しています。

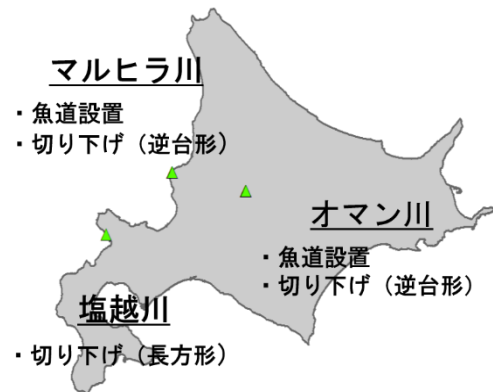


図-2 調査河川の位置図



図-3 評価対象とした3種の溪流魚



図-4 魚類採捕調査の様子

採捕調査の結果、アメマスとサクラマスはいずれの河川でも改良後にダム上流で生息密度が増加する傾向にありました(図-5)。但し、塩越川のダム上流(Site2)では、これら2種の生息密度は改良直後に一旦増加したものの、2度目の調査で低下する傾向にありました。ハナカジカについては、治山ダム改良以前からオマン川本川と分断されたダム上流で生息が確認されていましたが、2019年度の改良後の調査では改良前調査よりも全地点で密度が低下していました。

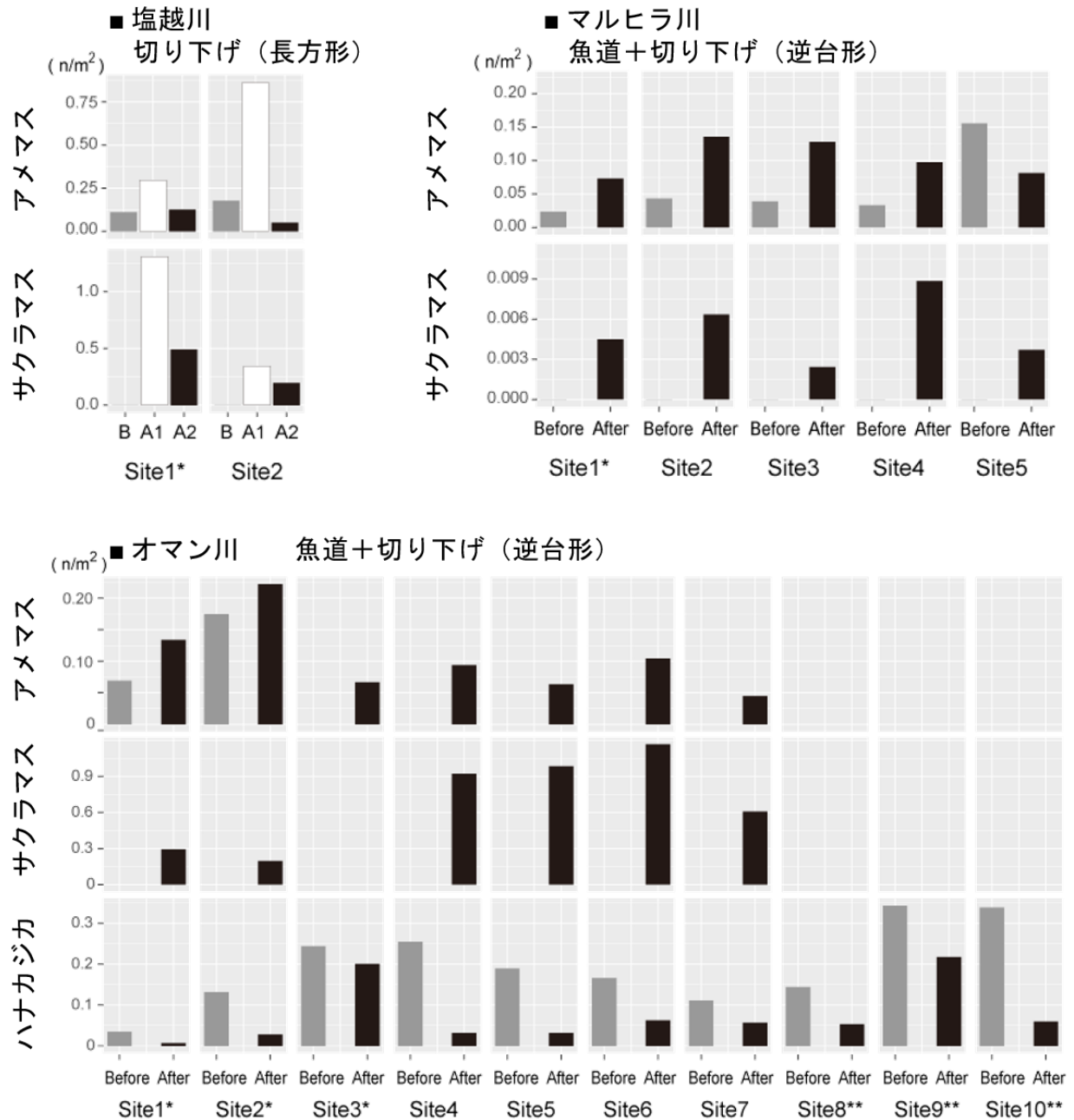


図-5 治山ダム改良前と後(数年から約10年後)での魚類密度の変化

塩越川のみ改良直後のデータを掲載(B:施工前, A1:施工後8ヶ月, A2:施工後3年9ヶ月)。*を付したサイト:改良前からダムの下流に位置するため、分断化の影響を受けていない地点。**を付したサイト:非改良ダムの上流に位置するため、前後を通して分断化の影響を受ける地点。

上記の結果からわかるように、遡河回遊魚であるサケ科2種については、治山ダム改良によってダム上下流の魚類の移動が可能となり、上流域の生息密度を高めることができることがわかりました。今までの道内の報告では、その効果が改良直後から5年6か月持続する事例がありましたが(Nagayama et al. 2020)、今回の研究では最長で10年5か月の改良効果が確認できました。今回の結果は、適切に治山ダムが改良されることで河川生態系の保全効果が長期間維持されることを示した貴重な研究成果と言えます。但し、特に治山ダムの切り下げは徐々に増えてきているものの、その効果についてはまだ知見を蓄積する段階にあります。例えば本研究の場合、逆台形型切り下げが実施されたマルヒラ川とオマン川では10年後においても効果が確認されましたが、長方形型に切り下げた塩越川では(切り下げ幅50cm)、2019年の魚類採捕の際に切り下げ箇所が流木により閉塞していたことが確認されました(図-6)。このように、工法によっては流木の除去等により改良効果を持続させるための継続的な管理が必要な場合もあります。実際、この堰堤上流では、改良直後(2016年)には遡河回遊魚の増加傾向が認められたものの、改良から3年9か月後の2019年の調査では減少傾向に転じていました(図-5)。改良効果がどの程度持続するのか、持続性の違いを生む要因は何か(改良の工法、気候、地形条件など)、といった問いに答えるためには、治山ダムに本来求められている機能を維持しつつ、さらなる改良の実施と科学的検証を行っていく必要があるでしょう。また、移動性の高いサケ科魚類について改良効果が認められた一方で、定住性の強い底生魚のハナカジカについては、治山ダム改良後にダム上流域で生息密度が減少する傾向がありました。この種間での効果の違いを生む要因については現段階では不明です。改良によるダム上流の物理環境の変化、サケ科魚類の増加による種間競争の激化などがその要因として考えられます。その詳細の解明には今後一層の生態学的な調査研究が必要です。



図-6 塩越川における治山ダムの改良事例

改良前(左)、改良直後(中)、改良3年後(右)の様子。速水ら(2021)の図を改良して使用。

*2019年撮影時には流木と土砂堆積により切り下げ部が閉塞し、落差が生じていることを確認。

河川生物調査のための新技術：環境DNAメタバーコーディング

このように、複数回にわたる生物の採捕調査を実施することで、治山ダムの改良が縦断的な河川連続性の再生に貢献する事がわかってきました。一方、こうした治山ダム改良の効果に関する科学的な評価は依然として不足しています。その要因の一つとして、従来の採捕調査に要する多大な時間や労力が考えられます。今後多くの現場で改良効果の評価が浸透していくためには、モニタリング調査の省力化を図っていく必要もあるでしょう。環境DNAメタバーコーディング(以下、環境DNA)は、現地で採取した水試料を濾過し、得られたDNA断片を増幅して塩基配列を特定することで、そのDNAの供給源となった生物種を網羅的に推定することができる技術です(高原ら2016)。この環境DNAによる技術は、現地で必要な作業は採水のみという簡便さから(図-7)、水生生物調査を効率化できる新技術として、様々な研究および環境アセスメントの現場で応用されはじめています。私たちの研究グループでは、前述した

ダム改良後の採捕結果と、環境 DNA による魚種の推定結果を比較し、環境 DNA による治山ダムの改良効果検証における有効性を検討しました。以下では、その成果について簡単にご紹介します。

環境 DNA 調査のための採水は、魚類採捕調査を実施した同日の魚類採捕前に、前述の 17 地点中 10 地点（塩越川 2 地点；マルヒラ川 4 地点；オマン川 4 地点）の下流端で行いました。河川水の採水後の濾過手順は、「環境 DNA 調査・実験マニュアル」Ver. 2.1(2019 年 4 月 25 日発行)に従って現地で行いました(環境 DNA 学会 2019)。濾過後の試料は、氷冷して実験室に速やかに持ち帰り、分析するまで-80℃で保存しました。持ち帰った試料からの環境 DNA の抽出や DNA の増幅・解析は、共同研究を行っている北海道大学大学院農学研究院と国立環境研究所の実験施設で、Minamoto et al. (2021)を参考に Yatsuyanagi et al. (2020)に準拠する形で行いました。その他の実験方法の詳細については、速水ら(2021)を参考にしてください。

環境 DNA では、3 河川 10 地点で実際の採捕で確認された全 9 魚種に加え、採捕では確認されなかったニジマスの計 10 種が検出されました(表-1)。採捕結果と環境 DNA の検出結果との一致率は、採水を行った 10 地点×10 種の延べ 100 件の組み合わせのうち、両手法による検出・非検出結果が一致したのは 91 件(検出 29 件、非検出 62 件)、不一致が 9 件(採捕のみの検出は 2 件、環境 DNA のみの検出は 7 件)で、一致率は 91%と算出され、環境 DNA の検出結果は実際の採捕と非常に良く一致することがわかりました(表-1)。また、アメマスとサクラマス的一致率は 90%、一番一致率が低かったハナカジカでも 70%と、魚種によって一致率が異なるものの、高確率で実際の採捕結果と対応していました。

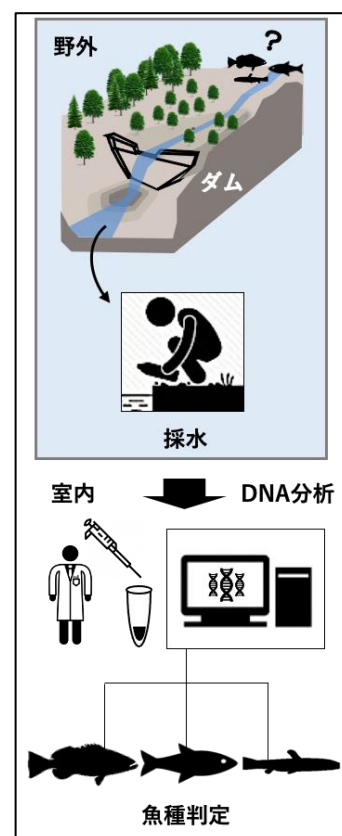


図-7 環境 DNA 調査の概要

表-1 調査地点単位での魚類採捕と環境 DNA 間での検出魚種の比較結果

河川名	調査地名	調査区の長さ	アメマス	サクラマス	ニジマス	ハナカジカ	カンキョウカジカ	ウグイ	シマウキゴリ	フクドジョウ	ルリヨシノボリ	ミミズハゼ
塩越川	Site1	26 m	○	○	-	-	○	○	○	-	○	-
塩越川	Site2	14 m	○	○	-	E	-	-	E	-	E	-
マルヒラ川	Site1	200 m	○	○	-	E	F	○	○	-	○	○
マルヒラ川	Site2	170 m	○	○	-	E	-	-	-	-	-	-
マルヒラ川	Site3	80 m	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-
マルヒラ川	Site4	90 m	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-
オマン川	Site2	10 m	○	○	E	○	-	-	-	○	-	-
オマン川	Site3	23 m	○	E	-	○	-	-	-	-	-	-
オマン川	Site7	30 m	F	○	-	○	-	-	-	-	-	-
オマン川	Site8	30 m	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-
採捕結果との一致率 (%)			90	90	90	70	90	100	90	100	90	100

○または-は採捕と環境 DNA の結果が一致していることを示し、F (採捕のみで確認) または E (環境 DNA のみで確認) は結果の不一致を示す。

上記のように環境 DNA による魚種の検出結果が採捕結果と高い一致率をしていたことは、一定の河川区間内の魚類相を高い精度で推定できることを意味しています。このことは、改良前の治山ダムにおける遡上障害の有無や、治山ダム改良前後の効果検証にも有効であると言えます。現段階では、魚種によ

って一致率が異なる要因を特定することまでは難しいですが、一致率を下げているのは採捕では確認されず環境 DNA のみで検出されているケースがほとんどでした。ハナカジカ、シマウキゴリ、ルリヨシノボリといった礫の下に隠れて生息する種群で見られていることから、魚種の行動特性として採捕から逃れやすい可能性、または調査地点より上流側の生息状況が反映された可能性などが考えられます。以上のことを考えあわせると、環境 DNA を治山ダムの改良効果の評価に適用する場合は、過去の採捕記録だけでなく、調査地点や対象魚種の特性に応じて推定結果の妥当性を判断する必要があります。

今後の課題

これらの研究から、治山ダムの改良によって長期的な河川生態系の保全効果を得ることができると考えられることがわかってきました。但し、現段階では個別事例の評価に留まっており、理想的な評価デザインが実施できていないのも事実です。自然再生の効果を客観的に評価するには、十分なサンプル数のもと、事前 (Before) -事後 (After) という時間軸を設け、標準区 (Reference)、対照区 (Control)、改変区 (Impact) といった空間軸も組み込んだ BARCI デザインが理想とされています (中村 2004)。事後データについては、研究者等が評価する際に個々で実施することで取得可能ですが、各区での事前データが取られているケースはほとんどありません。本研究も、幸いなことに改変区だけは事前データが取られている河川があったため、前述のような改良区の前後比較を軸とした評価を行っています。従来の採捕調査による事前調査では、現場での労力上、対象とできる地点数に限界もあるかもしれませんが、本研究で着目した環境 DNA は種の検出精度も比較的高く、現地調査は採水だけで、そこに生息している魚種を知ることができます。また近年では、環境 DNA は魚類の在・不在だけでなく相対的な現存量を評価する上でも有効なツールであることが示されつつあります。今後こうした新技術も併用しつつ、適切なモニタリングがより多くの現場で実施されていくことで、改良工法による効果の程度やその持続年数の違いなどより詳細な検証が可能になり、より良い森と川づくりの一助となるでしょう。

謝辞

治山ダムに関する資料を提供頂いた北海道水産林務部、留萌振興局林務課治山係の職員の方々に感謝いたします。なお、本研究の一部は国立環境研究所による地方環境研究所等との共同研究課題「河川横断工作物の改良による森里川海のつながり再生の影響把握」および JSPS 科学研究費 17H03623, 18K18221 の助成を受けたものです。

(森林環境部環境グループ)

引用文献

- 速水将人・石山信雄・水本寛基・神戸崇・下田和孝・三坂尚行・ト部浩一・長坂晶子・長坂有・小野理 (2021) 北海道の溪流魚を対象とした治山ダムの改良効果の検証: 長期モニタリングによる検証と環境 DNA の活用可能性. 応用生態工学 24:61-73.
- 石山信雄・永山滋也・岩瀬晴夫・赤坂卓美・中村太士 (2017) 河川生態系における水域ネットワーク再生手法の整理: 日本における現状と課題. 応用生態工学 19:143-164.
- 環境 DNA 学会 (2019) 環境 DNA 調査・実験マニュアル(ver. 2.1).
https://ednasociety.org/wp/wp-content/uploads/2020/09/eDNA_manual_Eng_v2_1_3b.pdf 2021年2月19日確認).
- Minamoto T., Miya M., Sado T., Seino S., Doi H., Kondoh M., Nakamura K., Takahara T., Yamamoto S., Yamanaka H., Araki H., Iwasaki W., Kasai A., Masuda R. & Uchii K. (2021) An illustrated manual for environmental DNA research: water sampling guidelines and experimental protocols. Environmental DNA 3: 8-13.

- Nagayama, S., Ishiyama, N., Seno, T., Kawai, H., Kawaguchi, Y., Nakano, D. and Nakamura, F. (2020) Time Series Changes in Fish Assemblages and Habitat Structures Caused by Partial Check Dam Removal. *Water* 12:3357.
- 中村太士 (2004) 自然再生— 地域 (region), 流域 (catchment), 地区 (local site) における分析と復元の考え方. *日本緑化工学会誌* 30:391-393.
- 小川豪司・佐合純造・坂之井和之 (2011) 直轄管理区間における魚道の傾向. *リバーフロント研究所報告*:35-38.
- 林野庁 (2018) 治山施設長寿命化対策事例集.
https://www.rinya.maff.go.jp/j/tisan/tisan/attach/pdf/con_3-25.pdf.
- 高原輝彦・山中裕樹・源利文・土居秀幸・内井喜美子 (2016) 環境 DNA 分析の手法開発の現状～ 淡水域の研究事例を中心にして～. *日本生態学会誌* 66:583-599.
- 玉手剛・早尻正宏 (2008) 北海道における河川横断工作物基数とサクラマス沿岸漁獲量の関係. *水利科学* 52:72-84.
- Yatsuyanagi T., Ishida R., Sakata M. K., Kanbe T., Mizumoto H., Kobayashi Y., Kamada S., Namba S., Nill H., Minamoto T. & Araki H. (2020) Environmental DNA monitoring for short-term reproductive migration of endemic anadromous species, Shishamo smelt (*Spirinchus lanceolatus*). *Environmental DNA* 2: 130-139.