

光珠内季報

- ・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 …………… 1
- ・治山ダムと周辺の地形・植生を測る新しい方法
—その1：ドローンを用いた空中写真測量—
速水将人・中田康隆 …………… 8
- ・治山ダムと周辺の地形・植生を測る新しい方法
—その2：iPad LiDARを用いた3D測量—
速水将人・中田康隆・濱坂 晃 …………… 15
- ・北海道産ノリウツギと和紙の関係
錦織正智 …………… 19
- ・現場写真で見る林内道路の侵食・崩壊
—路体消失—
佐藤弘和・津田高明・岩崎健太・蓮井 聡・対馬俊之 …………… 24

サルナシ (雌株)

地方独立行政法人

北海道立総合研究機構

森林研究本部 林業試験場

NO. 202

2022. 3

イタヤカエデ

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

治山ダムの改良が縦断的な連続性の再生を通じて溪流魚の保全に寄与することを解説しました。また、改良効果のモニタリングを効率的に行う手法の一つとして、環境 DNA メタバーコーディングの利用可能性や利用上の留意点についても併せて報告しています。

治山ダムと周辺の地形・植生を測る新しい方法

—その1：ドローンを用いた空中写真測量—

速水将人・中田康隆

森林を流れる川の上流域には、「治山ダム」という小規模な人工構造物が設置されています。本稿では、リモートセンシング技術を応用した治山ダム周辺の地形と植生を効率的に把握できる手法について紹介します。

治山ダムと周辺の地形・植生を測る新しい方法

—その2：iPad LiDAR を用いた 3D 測量—

速水将人・中田康隆・濱坂 晃

森林を流れる川の上流域には、「治山ダム」という小規模な人工構造物が設置されています。本稿では、iPad LiDAR を活用した治山ダム周辺の地形・植生の 3D 測量方法と、その応用例として 3D プリンターにより作成した治山ダムの 3D 模型作成方法について紹介します。

北海道産ノリウツギと和紙の関係

錦織正智

北海道で採れるノリウツギの樹皮は、和紙の原料「ねり」の材料として重用されています。道産ノリウツギは文化財の修復などに用いる伝統的な和紙をつくる上で不可欠な素材です。ここでは道産ノリウツギと和紙の関係と、和紙用途の樹皮の採取から出荷までの工程を紹介します。

現場写真で見る林内道路の侵食・崩壊

—路体消失—

佐藤弘和・津田高明・岩崎健太・蓮井 聡・対馬俊之

豪雨等の災害に伴い、林道や森林作業道で発生した道路の路体消失の状況について写真を使って紹介します。路体消失のタイプには、盛土や路体を構成する土そのものの移動（すべり）による消失タイプ、路網内の排水に起因した消失タイプ、沢や川の水の流れに起因した消失タイプがありました。路体消失への対処方法では、盛土のり面崩壊が拡大する前の早期修復や洗い越しの活用などがあげられます。

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，渓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。

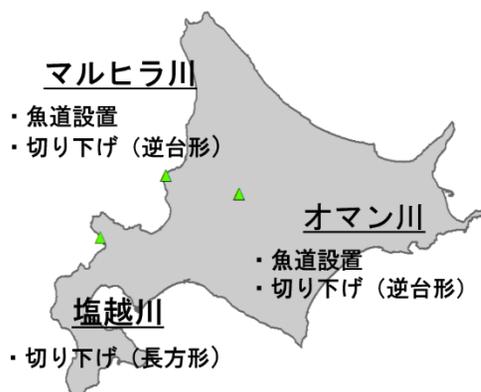


図-2 調査河川の位置図



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。

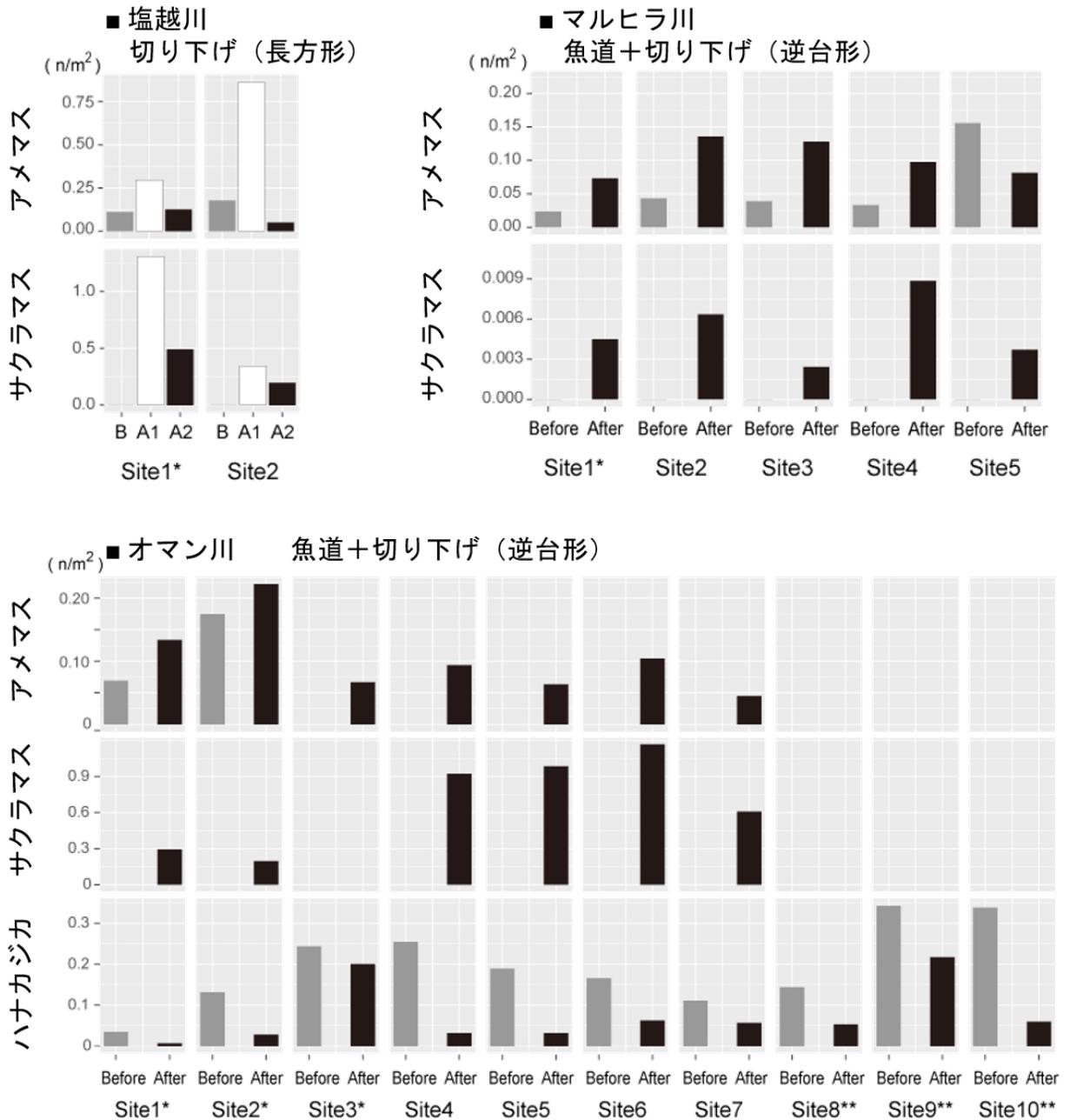


図-5 治山ダム改良前と後(数年から約10年後)での魚類密度の変化

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、現地では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、現地では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。

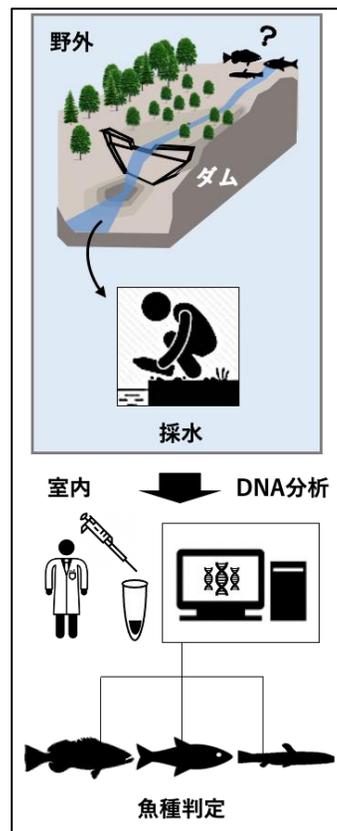


図-7 環境 DNA 調査の概要

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可能性があ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、前述のような改変区の前後比較を軸とした評価を行っています。従来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.

治山ダムと周辺の地形・植生を測る新しい方法 — その1：ドローンを用いた空中写真測量 —

速水将人・中田康隆

はじめに

森林を流れる川の小流域には、「治山ダム」という小規模な人工構造物が設置されています(写真-1)。治山ダムの設置目的は、土砂をダム後背部に捕捉することで急峻な川の勾配を緩やかにし、川底や川岸が水の流れて侵食されることを防ぐことです(日本治水治山協会 2009)。治山ダムが目的通り機能を発揮すれば、土砂災害のリスクが減少し、周辺の森林植生も保全することができます。

治山ダムを設置した後は、計画通りに谷の侵食防止機能や森林保全機能が発揮されているのか評価する必要があります。しかし、設置された治山ダムが谷の侵食をどの程度抑えているのか、森林が保全されているのかの評価は、写真による簡易的なものが多く、具体的な効果はあまり把握されていません。また北海道には、35,000基以上の多くの治山ダムが設置されています(玉手・早尻 2008)。治山ダムの設置数が多く、設置場所の小流域の規模や地形・植生の特徴にも多様なパターンがあるため、効率的な評価方法を確立する必要があります。そこで本稿では、無人航空機(UAV; Unmanned Aerial Vehicle; 通称ドローン; 以下 UAV)による写真測量を応用した最新のリモートセンシング技術による治山ダム周辺の地形と植生を効率的に把握できる手法を紹介します。

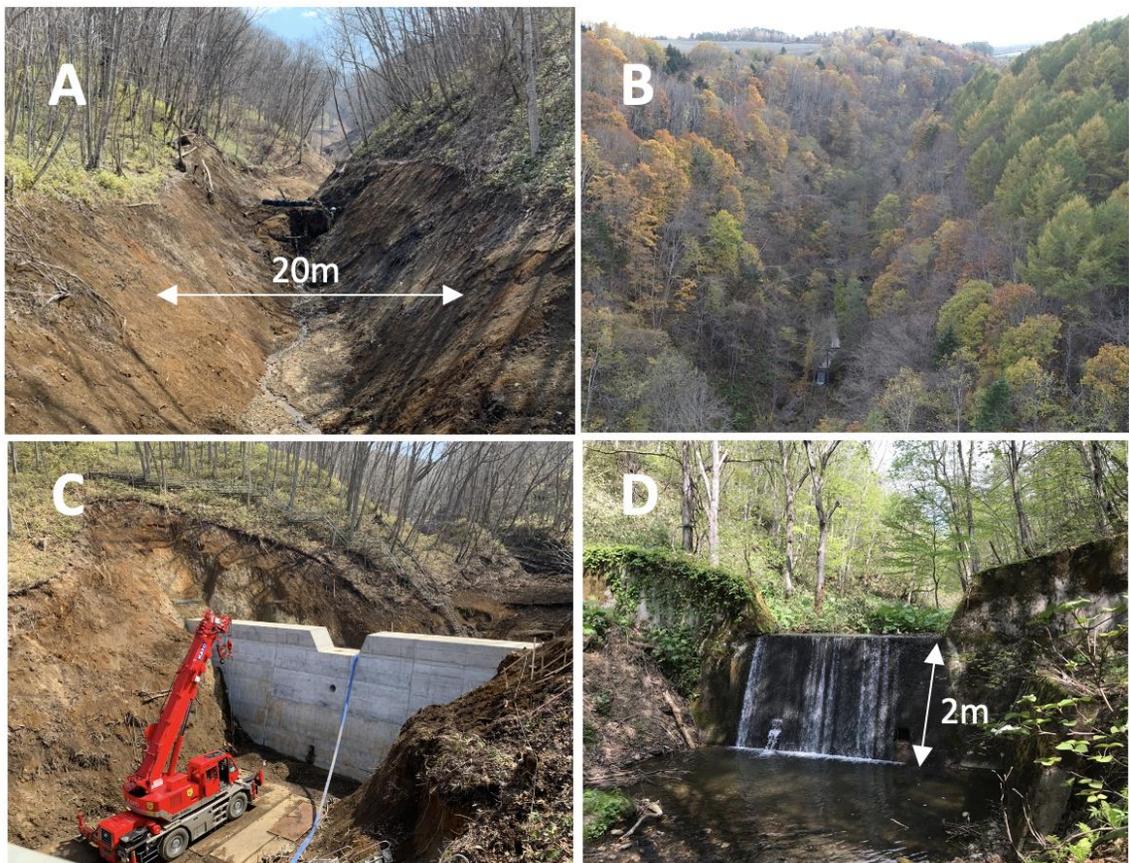


写真-1 治山ダム設置対象の谷の地形 (A) と周辺の森林植生 (B) の様子。Aにおいて実際に新規に建設された治山ダム (C) と50年以上経過した治山ダム (D; 昭和38年施工完了)

さまざまな測量機器と測量方法

この章では、代表的な測量方法である「レーザー測量」と「写真測量」に用いられる測量機器とその特徴について簡単に紹介します。これまでの一般的な測量には、光波測距儀（トータルステーション）が代表的な機器として用いられてきました（写真-2（上）、表-1）。トータルステーションによるレーザー測量は、測量対象となる点の距離と角度を同時に測定し、測点の座標化を行います。実際の測量では、事前に測量する点に杭を設置した後、各点ごとに座標や距離を取得していきます。森林上流域の治山ダム周辺の地形を測量する場合は、測点設置から現地測量までの間に測量対象の河川を何度も往復する必要があるため、1つの調査地あたりの作業時間は数日を要することも珍しくありません。機器の重量は徐々に軽量化が進んでいるものの、三脚や他の調査用具を合わせて10 kg程度の荷物を持ちながら河道内の各測点に移動するのは、労力的な負担が大きい作業と言えます。近年では、地上型3Dレーザースキャナ（写真-2（下））という新たなレーザー測量機器が利用可能になりました。この機器では、約300 m²の範囲の地形や植生の点群データ（点の集合体で個々の点に座標や色などの情報を持つ）を高精度で取得できます。地上型3Dレーザースキャナは、トータルステーションに比べて導入コストが約7~17倍と大きいものの、一度に測量できる点の数が圧倒的に多くなるため、近年では道路の公共測量や人工構造物の測量にも導入され始めています。しかし、正確な3次元形状の把握には機器を移動させながら複数方向からのスキャンが必要となるため、トータルステーションと同様に重い機器類を人力で持ち運ぶ必要があり、測量時間や労力の負担が大幅に軽減されるとは言えません。この機器重量の問題を克服した測量機器が、上空からレーザー測量が可能なUAV-LiDAR（光による距離検知センサー（Light Detection And Ranging）搭載型のUAV）です。UAV-LiDARは、測量対象となる範囲を事前に踏査しなくても、地形・植生を高解像度で把握できます。ただしUAV-LiDARの導入コストは、トータルステーションの20~30倍（これまで普及している一般的なUAVの50倍以上）が必要となります（表-1）。

UAVによる空中写真測量は、近年めざましく進歩しており、これまでの測量のさまざまな問題点が克服されつつあります（写真-3、表-2）。例えば、近年、UAVで撮影した複数枚の画像から、対象となる空間の3次元情報を面的に把握する手法（Structure-from-Motion and Multi-View-Stereo; SfM-MVS法）が利用可能になっています（早川ほか2016）。ただし、UAVで撮影した空中写真からSfM-MVS法による地形測量を行う場合、事前に位置座標を測定した後空中写真に写るように地上に設置する「対空標識」を、測量予定の範囲に満遍なく複数設置す



写真-2 トータルステーション（上）
地上型レーザースキャナ（下）



写真-3 実際に用いた小型UAV（上）
とGNSS(Trimble R2;NIKON Trimble社)による対空標識
(白黒マーカー)の位置測定(下)

る必要があります(写真-3)。UAV 写真測量の精度は、対空標識の数や配置箇所が不適切な場合(上空から認識困難な場合)や、天候等の急変で対空標識が移動してしまった場合には、正確な3次元形状が取得困難となることが報告されています(Tonkin and Midgley 2016)。特に、治山ダム周辺に対空標識を設置しようとする、谷の急斜面など危険を伴う場所や、樹木の枝葉に遮られ上空から認識できない場所も多く、満遍なく設置することが困難なこともあります。また本来治山ダムは、森林内の起伏の富んだ谷地形に設置されるため、小規模な土砂移動により地形が変化しやすい場所も多いという特徴があります。以上から、UAV を用いた治山ダムの調査では、対空標識の設置の困難さという課題を解決する必要があります。

表-1 レーザー測量に用いる各機器と測量方法・精度・価格の比較

測量機器名	トータルステーション	地上型3Dレーザースキャナ	UAV-LiDAR
測量方法	地上から各測点にレーザーを照射して単点座標を計測する	地上からレーザーを放射状照射し対象範囲の面的な計測を行う	空中からレーザーを放射状照射し対象範囲の面的な計測を行う
地上作業の必要性(理由)	必要 (測点設置・現地測量)	必要 (ターゲット設置・現地測量)	基本的に不要
測量可能範囲	約800m	約300m ² (1スキャン)	~1km ² (1フライト)
測量精度	1.5~2mm	4~20mm	数 cm
機器質量	約 5 kg	約 5.7 kg	約 6.3 kg
価格(機器名) 2021年12月時点	50-200万円 (TOPCON OS-205F)	880-1430万円 (TOPCON GLS-2000)	1000-1500万円 (DJI MATRICE 200)

この点に関し、近年、対空標識を設置しなくても高精度測量が可能な UAV (Real Time Kinematic-UAV; 以下 RTK-UAV) が登場しました。RTK-UAV には、空中写真を撮影する際に位置情報の補正信号をリアルタイムに地上から受信できる衛星測位システムが内蔵されているため、対空標識が設置困難な土砂災害現場でも、誤差数 cm 以内で地形と植生を含む地表面の高精度測量が可能なが実証されています(中田ら 2020, Nakata et al. 2021)。以上のように、さまざまな測量機器の特性や有利な点を比較すると、RTK-UAV による空中写真測量は、従来問題だった踏査労力の問題を克服できると同時に、治山ダムが設置される森林域の谷地形でも高精度な測量が実現できる可能性があります。

表-2 空中写真測量に使用される各機器と測量方法・精度・価格の比較

測量機器名	小型UAV	RTK-UAV
測量方法	空撮写真を合成して3次元形状を推定	リアルタイム補正された高精度位置情報付き空撮写真を合成して3次元形状を推定
地上作業の必要性(理由)	必要 (対空標識の設置)	基本的に不要 (位置情報補正用アンテナの設置は必要)
測量可能範囲	~1km ² (1フライト)	~1km ² (1フライト)
測量精度	数10 cm~数 m	数cm~数10 cm
機器質量 (バッテリー・プロペラ含)	199g ~ 1.4 kg	約 1.4 kg
価格(機器名) 2021年12月時点	6~40万円 (DJI mini, Phantom 4 pro2など)	約70万円 (DJI Phantom 4 RTK)

RTK-UAV を用いた空中写真測量による地形測量の試み

私たちは、樹木の葉がまだ芽吹く前の、地形が空からでも見通しやすい雪解け直後の春(2020年4月)を狙って、RTK-UAVによる治山ダム周辺の地形測量を行いました。誤差を小さくするため、RTK-UAVの写真に付与されたデータの解析が可能なソフトウェア(KLAU PPK; GeoLink Japan社製)を用いて写真の位置情報の後処理補正を行ってから、SfM-MVS法により3次元モデルを構築しました。検証試験は、北海道奈井江町の道有林内の森林溪流に1985年に設置された治山ダムを対象とし、位置精度の検証には、上空から確認できるように河道周辺に9個の検証点を設置しました。その後、治山ダム堤体上の既知点(Trimble R2 GNSS・NIKON-Trimble社製で事前に測定)を基準にトータルステーションを用いて測量した位置座標を真値として、RTK-UAVの空撮画像から構築した3次元モデルから抽出した位置座標との誤差を求めました。

その結果、RTK-UAVの飛行高度150mで空撮写真の後処理補正を行った3次元モデルは、水平・垂直誤差20cm以内に収まることがわかりました。さらに調査時間は、現地での空撮時間が約5分、室内の解析時間が25分で、合計30分程度と、トータルステーションによる測量の1/10の時間でした。したがって、写真の後処理補正を含めたRTK-UAVによる写真測量は、現地踏査や対空標識を設置しなくても、

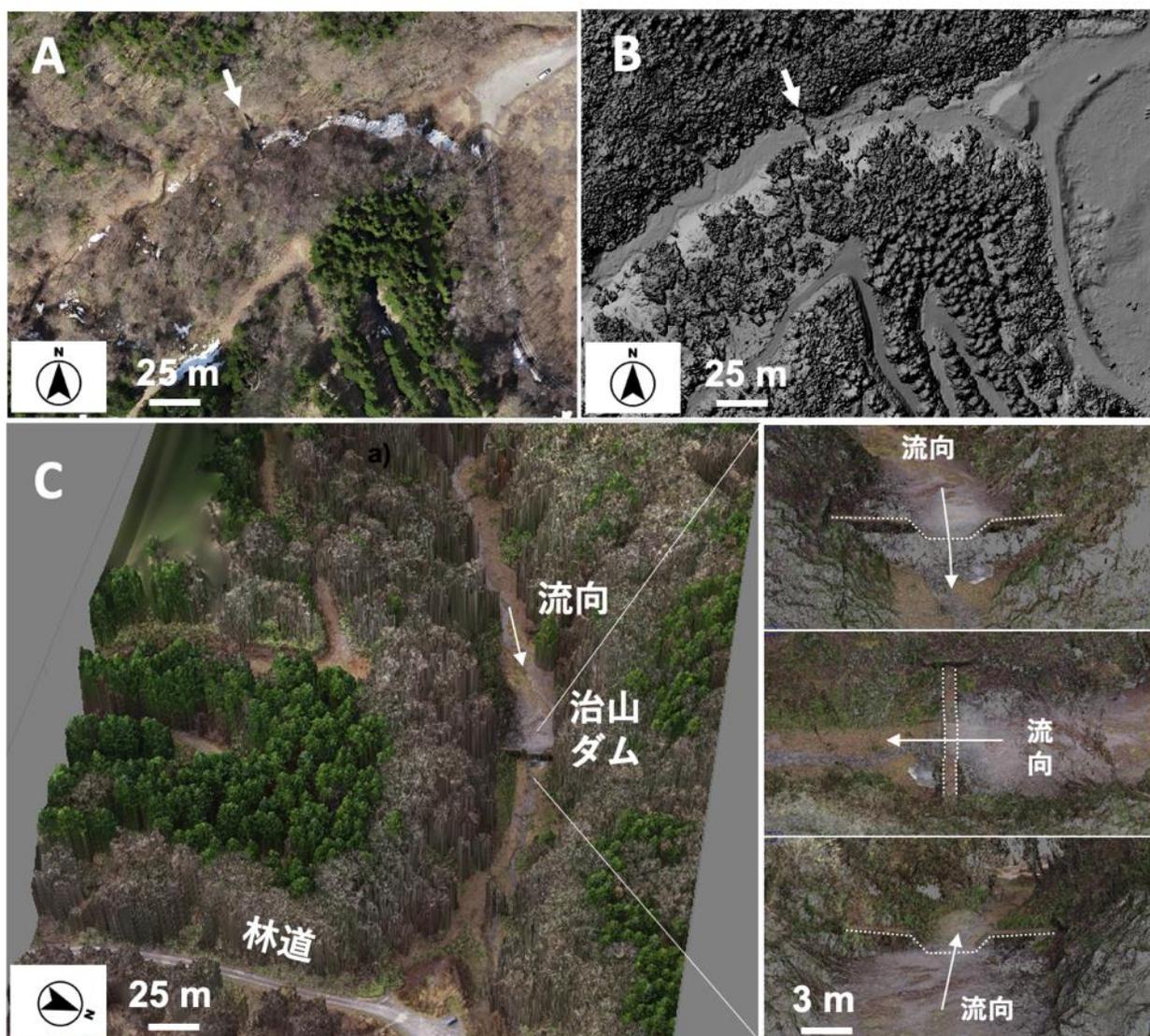


図-1 後処理補正したRTK-UAV空撮画像から作成したオルソ画像(A; 矢印は治山ダム)、陰影起伏図(B; 矢印は治山ダム)、3次元モデル(C).

0.5 km² の範囲の治山ダムを含む地形を面的に把握できることがわかりました。この手法では、起伏に富み比高差がある谷地形や樹木など干渉される要素が多い場所でも、効率的に地形測量が可能であることを示しています。ただし、RTK-UAV による測量誤差範囲内の状況や、河川の水の中や比高差が大きく写真に映らなかった部分の測量は困難となります。これらの点に留意すれば、従来の測量で得られる地形や周辺植生の大部分が、RTK-UAV による測量で十分把握可能であることがわかりました。

小型軽量 UAV による植生の現況把握の試み

上記で紹介してきた RTK-UAV による測量法は、樹木の展葉後に再度空撮を行った場合、植生の現況把握も可能なオルソ画像や植生図が作成できます (図-2A, B)。ただし RTK-UAV など機体重量が 200g 以上の無人航空機は、安全な飛行を確保するため、観測対象から 30 m 以上 150m 未満で維持する必要があります (国土交通省 2022a)。一方 200g 以下の UAV は「模型航空機」に分類されており (国土交通省 2022b)、空港周辺や航空路以外の区域で安全が確保できる場所 (無人地帯など) では、観測対象に近づ

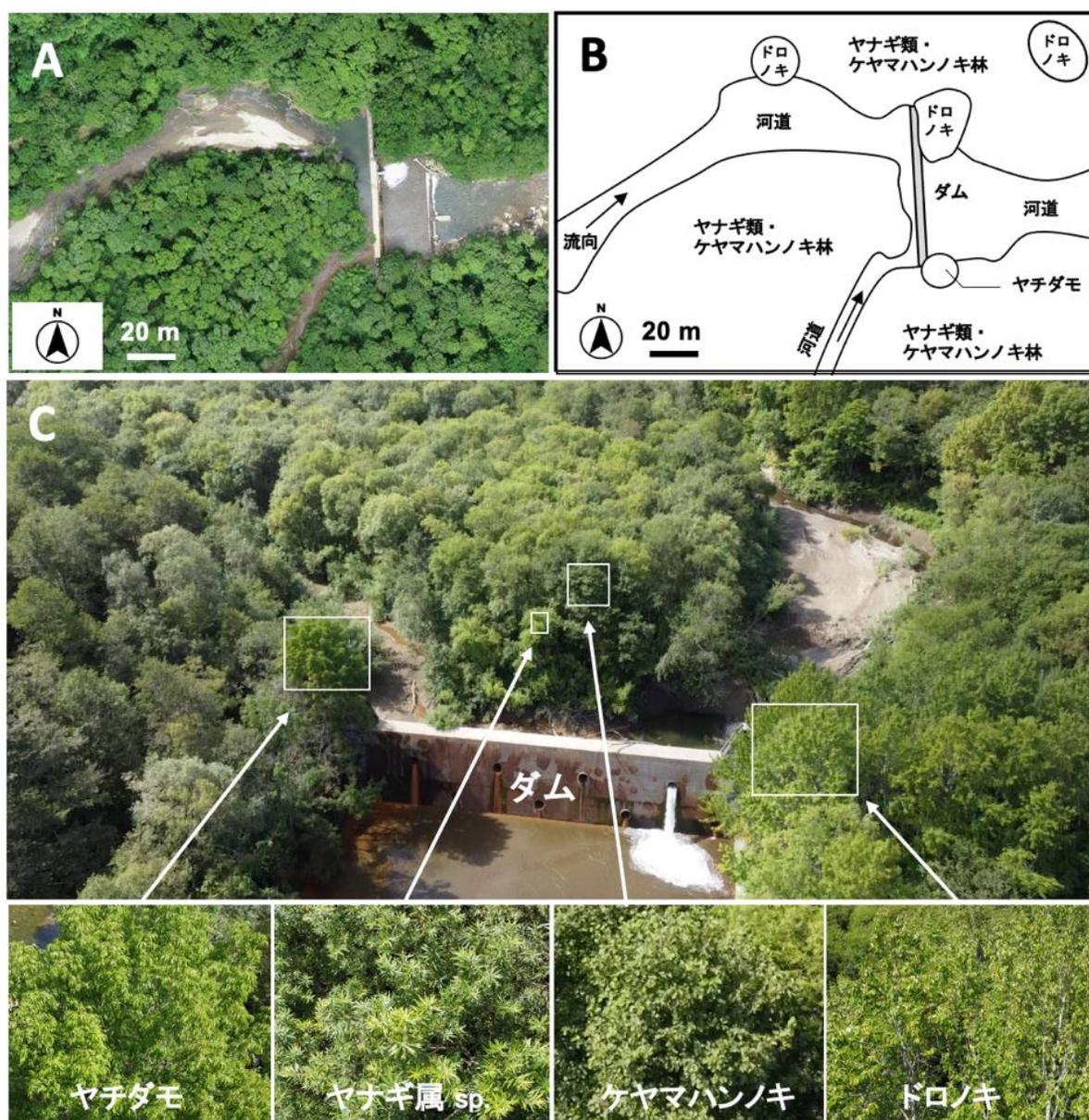


図-2 RTK-UAV 空撮画像から作成したオルソ画像 (A), RTK-UAV 空撮画像と小型軽量 UAV で作成した植生図 (B), 小型軽量 UAV で撮影した動画から行った樹種判定の様子 (C)。

きながら低空で飛行させることが可能です。私たちは、より手軽に低コストで植生の現況把握が可能かどうかを検討するため、200g以下の重量で高画質な動画撮影が可能な小型軽量 UAV (DJI mini; DJI 社製, 2021年12月現在 約6万円) に着目しました。この小型軽量 UAV は、持ち運びが容易で機動性が高く、治山ダム周辺の植生を飛行高度10~20m程度で低空飛行させながら動画撮影することで、室内でも動画から樹種判定を行うことができます。私たちは、設置から50年以上経過し後背面の堆砂地に溪畔林が成立している雨竜町オシラリカ川上流の砂防ダム(1971年設置: 治山ダムに類似した構造の河川横断工作物)を対象に動画を撮影し、室内で樹種判定を試みました。その結果、ヤナギ属樹木に関しては樹種判定までは困難でしたが、河畔に優占する樹種であるケヤマハンノキ・ドロノキ・ヤチダモを単木レベルで確認できました(図-2C)。今回は、RTK-UAVから作成されたオルソ画像を検証データとして用いながら治山ダム周辺の樹種判定を行いました。実際には小型軽量 UAV でも RTK-UAV と同様にオルソ画像を作成することも可能なため、小型軽量 UAV のみで樹種と対応させた植生図を作成することもできます。したがって、治山ダム後背面の詳細な植生のデータが必要な場合には、小型軽量 UAV による治山ダム周辺の植生の現況把握は有効と考えられます。ただし、治山ダムが設置されるような谷地形では、大きな樹木の葉や枝・地形の起伏により目視内での UAV の低空飛行が困難な場合もあるので、適用には注意が必要です。

まとめ・今後の展望

本稿では、RTK-UAV (Real Time Kinematic-UAV) を用いた空中写真測量を例に、低コストで効率的な測量方法について紹介しました。また、RTK-UAV だけでなく、持ち運びが容易で機動性が高い200g以下の小型軽量 UAV を組み合わせることで、1日複数地点の地形・植生の現況把握も可能になると考えられます。さらに近年の測量機器の技術的な進歩は早く、例えば2021年夏には300万円以下の UAV-LiDAR (Zenmuse L1; DJI 社製) が発売されました。今後さらにレーザー測量や写真測量の効率や精度が向上していけば、管理区域全ての治山ダムや、その周辺の地形と植生を一挙に把握できる時代に差し掛かっています。

治山ダムの耐用年数は50年と設定されていますが、古いものでは設置後60年以上が経過しており、今後は更新・長寿命化・改良等の将来的な対策の検討時期を迎えています。林業試験場では、これらのリモートセンシング技術の進歩にあわせた効率的な地形・植生の把握手法の検討を続け、治山ダムの今後の対策を講じる際の検討材料を速やかに提供できるよう研究を進めていきます。

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、空知総合振興局の方々に厚く御礼申し上げます。

(森林環境部環境グループ)

引用文献

国土交通省(2022a) 無人航空機の飛行ルール(日本語版) <https://www.mlit.go.jp/koku/content/001414567.pdf>

国土交通省(2022b) 無人航空機(ドローン、ラジコン機等)の安全な飛行のためのガイドライン。
<https://www.mlit.go.jp/common/001202589.pdf>

中田康隆・速水将人・輿水健一・竹内史郎・蝦名益仁・佐藤創(2020) RTK-UAV を用いた地形変化の観測と応用の可能性: 北海道胆振東部地震で発生した森林域の崩壊跡地における検証. 景観生態学, 25(1), 43-52.

Nakata, Y., Hayamizu, M., Ishiyama, N., & Torita, H. (2021). Observation of Diurnal Ground Surface Changes Due

- to Freeze-Thaw Action by Real-Time Kinematic Unmanned Aerial Vehicle. *Remote Sensing*, 13(11), 2167.
- 日本治山治水協会 (2009) 治山技術基準：総則・山地治山編.
<https://www.rinya.maff.go.jp/j/sekou/kizyun/pdf/tgkijun.pdf>.
- 早川裕弐・小花和宏之・齋藤仁・内山庄一郎 (2016) SfM 多視点ステレオ写真測量の地形学的応用. 地形, 37(3), 321-343.
- 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.
- T. N. Tonkin, and N. G. Midgley (2016) Ground-control networks for image based surface reconstruction: an investigation of optimum survey designs using UAV derived imagery and structure-from-motion photogrammetry, *Remote Sensing.*, vol. 8, p. 786

治山ダムと周辺の地形・植生を測る新しい方法 － その2 : iPad LiDAR を用いた3D 測量 －

速水将人・中田康隆・濱坂 晃

はじめに

近年、地形や植生の3Dデータを離れた位置から取得できる測量機器の低価格化がすすみ、手軽に3D測量が可能となりました。本稿では、タブレット端末内蔵型の小型レーザー測量機器 iPad LiDAR を用いた治山ダムとその周辺の地形・植生の簡易的な3Dデータ取得法を紹介します。また同時に、近年手軽かつ低価格で作成可能となってきた3Dプリンターによる3D模型の作成方法についても、iPad LiDAR で取得した3Dデータの活用例として紹介します。

3D データ取得方法 -LiDAR 測量とは-

高精度な3Dデータを取得する方法の1つに、3次元光検出測距 (Light Detection And Ranging: LiDAR) と呼ばれるレーザー測量法があります。この方法は、離れた場所にある物体にレーザー光線をパルス状に照射することで、その反射時間と角度から物体の相対的位置や空間の位置関係を算出できる光学リモートセンシング手法です。得られるデータは、無数の点の集合体としてコンピューター上に表現される“3D点群データ”になります(図-1)。この3D点群データは、LiDAR計測の際に照射されるレーザーパルスの密度(解像度)が高いほど、計測対象の空間の精緻な情報が手に入ります。一方、高解像度な点群の取得には、高密度にレーザーを照射できる高額なLiDARセンサーが搭載された測量機器や、多くの計算リソースと電力を用いて点群解析が可能なコンピューターが必要です。そのため、一定程度の計測精度を保ちつつ、非専門家でも手軽にLiDAR計測が可能となれば、より多くの人々が治山ダムとその周辺の地形・植生の現況の3Dデータを取得できるようになります。

2020年3月、タブレット端末にLiDARセンサーが搭載されたiPad LiDAR (Apple社製)が登場しました。iPad LiDARは持ち運びが容易で、導入コストも地上型レーザースカナやUAV-LiDARの1/150程度(定価94800円;2022年2月確認)と従来機器より低価格であるため、これまでよりも簡単に治山ダムの地形・植生の把握が可能となると考えられます。私たちはこのiPad LiDARに注目し、治山ダム周辺の地形と植生の3Dデータ化を試みました。



図-1 3D点群データ化された治山ダム。無数にある点のそれぞれに対して、色情報・3次元位置座標などが付与され、様々な情報が抽出できる。

iPad LiDAR による治山ダムの 3D モデルの作成

林業試験場内の幅 15m の治山ダム堤体を対象に、2021 年 10 月に検証用の測量用ポール 3 本(2m, 2.2m, 1.7m) を設置し、その周辺約 300 m² を対象に約 15 分間で 3D スキャンを行いました。3D スキャンは、iPad LiDAR に専用の無料アプリケーション Scaniverse をダウンロードして用いました。Scaniverse を使用して取得した 3D データから、予め設置した 3 本の測量ポールの長さを抽出した結果、治山ダムの堤体と周辺の 3 次元モデルが誤差 5 cm 以内で取得できました (図-2)。このことは、iPad LiDAR による 3D モデルの作成は、従来の手法に比べて導入コストや利便性が飛躍的に向上したと言えます。ただし、iPad LiDAR のレーザーは最大 5 m しか届かないので、5 m 以上の離れた距離にある物体 (樹木など) の測量の際には端末を直接近づける必要があります。また、iPad LiDAR は 3D データを合成しながら対象範囲をスキャンしていくため、合成する際の位置ずれが生じないように、ゆっくりと満遍なくレーザーを照射する必要があります。水深 5 cm 以上の河床や草本が密生している場所には、レーザーがうまく反射せず、データに欠刻が生じることがあるため、対象範囲全体の正確な 3D モデルを作成するためには、iPad LiDAR の特性を事前に理解する必要があります。

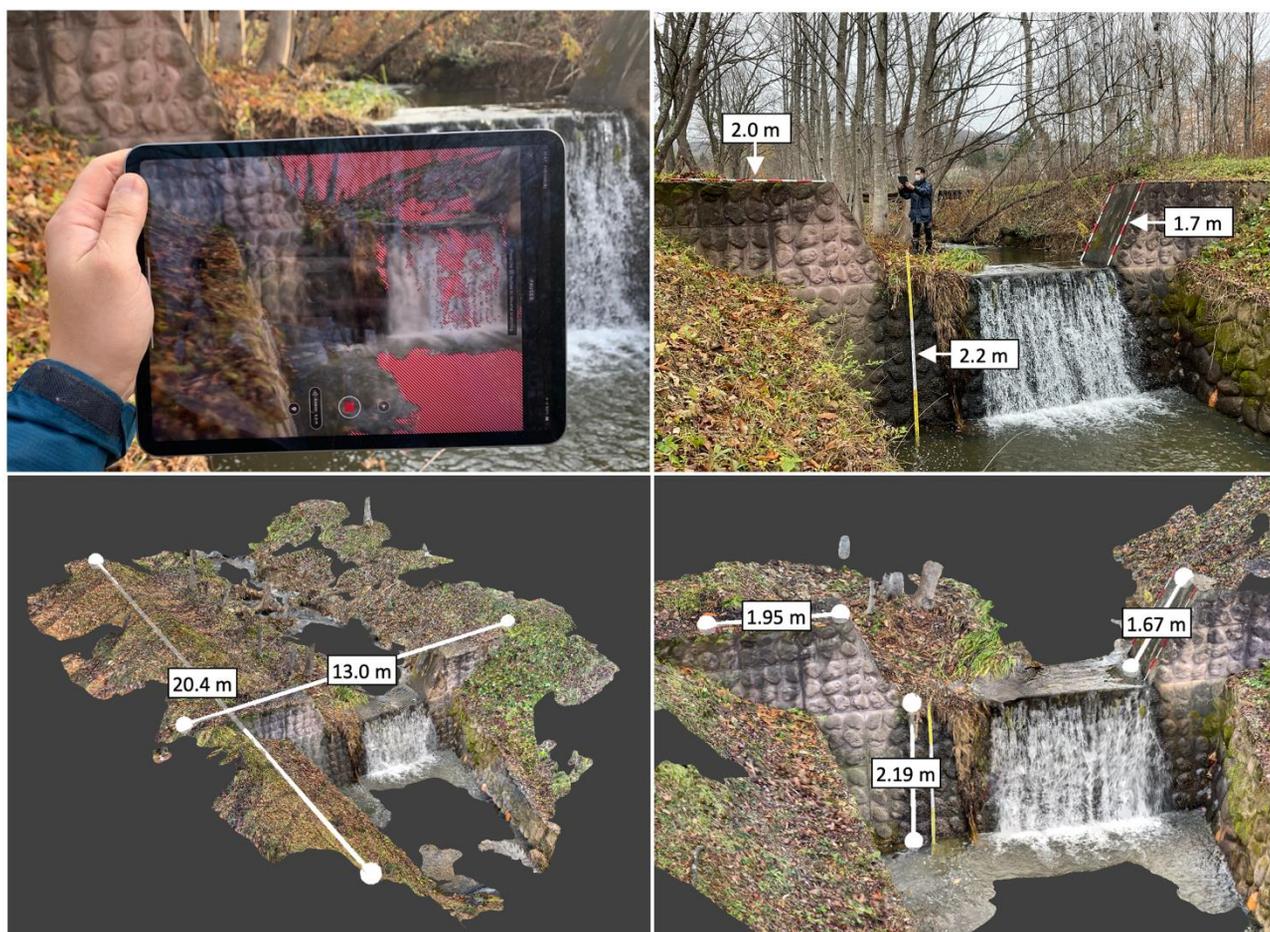


図-2 iPad LiDAR 測量の様子(上)と構築した 3D モデル(下)。上段写真内の数字は、検証用ポールの長さ (m) を示す。下段の 3D モデル内の数字は、3D データから抽出した距離 (m) を示す。

治山ダムの 3D データ活用例 -3D プリントによる模型作成-

iPad LiDAR による測量で構築された 3D データは、タブレット端末上で高精細な 3D モデルとして表示させることができますが、その 3D データを活用して精巧な 3D 模型を作成することができます。現在 3D プリントは、作成元データの加工に若干の知識が必要ですが、30×30 cm 以内の模型であれば、高価な専用ソフトはほとんど不要で、無料のアプリケーションや有料の 3D プリントサービス (例えば

DMM 社の 3D プリント造形サービスは材料により価格が大きく変動)を利用して手軽に作成できるようになっています。また、3D プリントされた模型は、高校生・大学生を対象とした地学・地理教育の授業や、視覚障害を持つ方々が直接触れながら地形的特徴を理解するため触察立体教材としても活用されています(行富ほか 2014; 澤村・曾我 2014; 山内ほか 2019)。このように、3D プリンターで現況を忠実に再現した立体模型を作成できれば、従来の単点測量では困難だった「治山ダム周辺環境の面的な様子」を広く普及できるツールとして有効ではないかと考えました。

今回私たちは、iPad LiDAR で取得した治山ダムの 3D データを使用しました。3D データは、メッシュデータ加工ソフト Meshmixer を使用し、ノイズや余分な箇所を除去する簡単な加工を行った後、3D プリンター(機種名: Artillery Sidewinder X1 300×300, Shenzhen Yuntu Chuangzhi Technology 社製)に出力しました。材料はフィラメント PLA 樹脂(ポリ乳酸)を使用し、3D プリントの設定は、積層ピッチ 0.2mm・インフィル密度 20%としました。その結果、約 36 時間無色の模型が出力されました(写真-1 左)。その後、実際の写真を参考にしながら着色などの加工を行い、治山ダムの立体的な模型を作成しました(写真-1 右)。

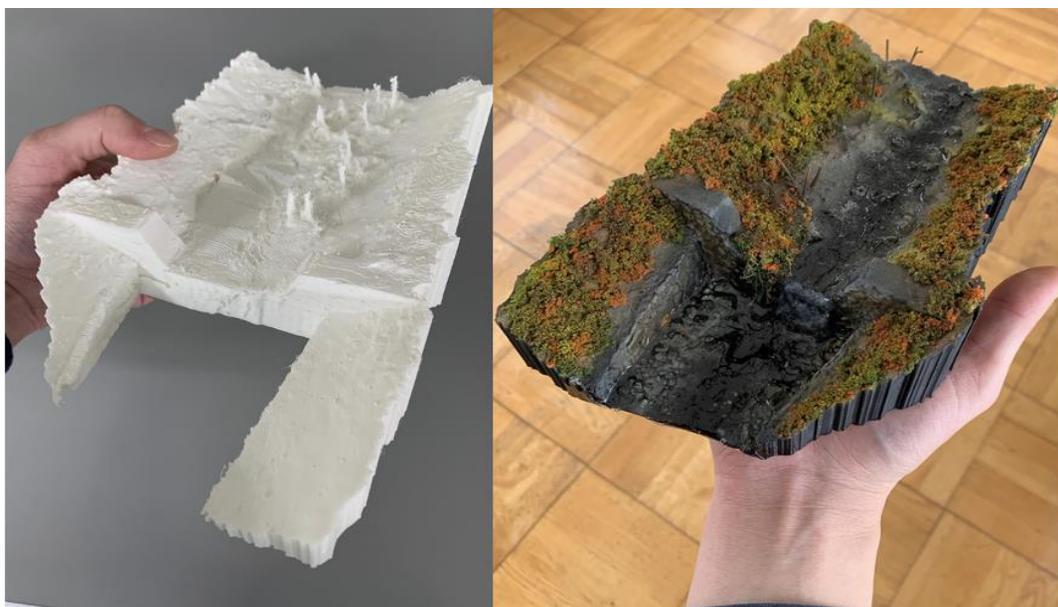


写真-1 iPad LiDAR の 3D データにより作成した 3D 模型(左)と、加工した模型(右)

作成した模型は、林業試験場に会場してくださった高校生への測定の授業でも活用しました(写真-2)。3D 模型があれば、画面上での解説と並行して、実際に手に取りながら自由に視点を変えて見ることができます。また、2次元の地図で地形や植生の特徴を捉えることが難しい人でも、全体を俯瞰して見ることができるため、理解を深めることができます。リモートセンシングにより取得した 3D データは、iPad LiDAR に限らず、ドローンを用いて作成した 3次元モデルも加工することで 3D プリントが可能です。このように 3D 模型は、治山ダムが設置された場所の地形や植生の特徴を、幅広い年齢層やハンディキャップを持つ人々に広く理解してもらうために有効と言えます。



写真-2 3D 模型を触りながら地形と植生の特徴を学ぶ高校生

まとめ・今後の展望

本稿では、iPad LiDAR を例に、簡易的な 3D データ取得法とその活用法を紹介しました。iPad LiDAR による 3D モデルの作成方法は、従来の手法に比べて導入コストや利便性が飛躍的に向上し、非専門家でも手軽に治山ダムの現況を面的に把握できる革新的な技術と言えます。また、iPad LiDAR から取得した 3D データから簡易的に治山ダムの 3D モデルを作成できるため、同地点の異なる時期のモデルを作成することで、地形や植生の変化を可視化することもできます。林業試験場では、進歩するリモートセンシング技術と使用者のニーズにあわせた効率的な地形・植生の把握手法の検討を続けるとともに、測量結果をわかりやすく示すことのできる 3D モデルを活用し、治山ダムを含めた山野の現況などの理解の促進につなげていこうと思います。

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、空知総合振興局の方々に厚く御礼申し上げます。また、3D モデル作成・着色にご協力頂いた林業試験場普及 G のみなさまに御礼申し上げます。

(森林環境部環境グループ・水産林務部森林環境局森林活用課)

引用文献

澤村貴雄・曾我聡起 (2014) 3D データ・3D プリンタの教育利用の可能性について. PC Conference 論文集 (pp. 48-51).

山内啓之・小口高・早川裕弐・小倉拓郎・浅野悟史 (2019) 3D プリントによる地形模型の教育的活用.

In 日本地理学会発表要旨集 2019 年度日本地理学会秋季学術大会 (p. 73). 公益社団法人 日本地理学会.

行富誠一・小針智雄・春日亀美智雄・金子秀聡 (2014) 視覚障害児のための触察立体教材の開発. 日本デザイン学会研究発表大会概要集, 61, 126.

北海道産ノリウツギと和紙の関係

錦織正智

和紙の原料「ねり」

古来より、人は樹木を巧みに使いこなしてきました。材木としてだけではなく、薬や染料、食料など、様々な用途を見出して生活に取り入れました。ここで話題にするノリウツギ（糊空木）も、その一つです。先人が粘りのある樹液に「糊」の字を充てたことは、この木を実用的な視点で認識したからでしょう。ノリウツギの「糊」が意味するのは、接着剤でも、洗濯糊でも、防染糊でも無く、和紙を漉くときに使う「のり＝植物性粘液（抄紙用粘剤）」を指しています。抄紙用粘剤は、材料とする植物の種類や産紙地方によって「ねり」「たも」「さな」「にべ」等、呼び方が異なります。和紙に関する書籍に目を通すと、総称として「ねり」の呼称が広く使われているので、この先は「ねり」で話を進めます。

手漉き和紙をつくる工程において「ねり」は、とても重要な役割を果たしています。紙漉きは、①紙の素材になる植物（紙料植物：コウゾ、ミツマタ、ガンピなど）から繊維を解きほぐし、②紙漉槽（水槽）へ繊維と水、「ねり」を入れ、③繊維を水中に分散させて、水ごと簀桁（すけた）ですくって縦横にゆらし、紙を漉きます（写真-1）。

この工程において、「ねり」を加えた水は粘りを帯びることから、繊維は水中に沈むことなく、紙漉槽にむらなく分散します。そして、漉いた紙層から粘度を帯びた水がゆっくりと抜ける過程で繊維は並び、均等に広がります。また、「ねり」の粘性は時間が経過すると減退することから、漉いたばかりの湿紙を重ねてもくっつくことはありません。

紙の製法は朝鮮半島を通して日本へ伝わり、聖徳太子が和紙増産の基礎を築きました。「ねり」を利用する技法は、日本独自の製法として奈良時代から平安時代へ移る頃に誕生したといわれています。元々、紙の製造方法は中国で開発されましたが、中国の文献に植物由来の抄紙用粘剤が登場するのは、日本よりも遅れて17世紀に宋応星が著した産業技術書「天工開物」が初めてです。

抄造技術が日本国内で磨かれ・伝播し・伝承する過程において、「ねり」の原料となる植物の探求や取捨選択があったことが想像できます。ビナンカズラ、アオギリ、ギンバイソウ、ヒガンバナなども使われました。全国にある和紙の産地から国の重要無形文化財・選択無形文化財・選定保存技術に指定されている和紙を選び、「ねり」の原料に使われる植物を表-1に整理しました。主に使われる植物はトロロアオイとノリウツギの2種類です。

トロロアオイ（学名：*Abelmoschus manihot*）は、アオイ科トロロアオイ属の草本。中国が原産地の渡来植物です。「ねり」は根から抽出する粘液を使います。「明治前園芸植物渡来年表」（磯野 2007）を参照すると、トロロアオイの記録は室町時代中期に活躍した画家 土佐広周（1429～1487年）が描いた重要文化財「四季花鳥図屏風」（1491年）が最も古いとされています。このことから、日本でのトロロアオイ栽培は500年以上続いていると推察できます。現在の栽培状況について、公益財団法人日本特産農産物協会「地域特産作物（工芸作物、薬用作物及び和紙原料等）」に関する資料（令和元年産）」を見ると、



写真-1 紙漉き

吉野手漉き和紙 福西和紙本舗 HP より

全国で12県が栽培しています。生産量の上位は茨城県7,500kg、長野県1,830kg、他の10県は8-25kgです。生産者の減少や高齢化、後継者不足を背景に、この10年間で生産量は約1/7に減少しました。

ノリウツギ(学名: *Hydrangea paniculata*) は、アジサイ科アジサイ属の落葉樹。国内に自生しており、分布は北海道・本州・四国・九州(屋久島まで)です。北海道では別名サビタで親しまれています。「ねり」は樹皮から抽出する粘液を使います。樹皮は野生の個体から採取されており、和紙用途での栽培の記録はありません。このことから生産量と流通についての情報は極端に乏しく、森林・林業・農業に関する様々な統計情報にノリウツギは見当たりません。

表-1 文化財に関わる和紙と「ねり」に使う植物

	名称	「ねり」に使う植物	生産地
重要無形文化財	越前奉書	トロロアオイ・ノリウツギ	福井県
	土佐典具帖紙	トロロアオイ	高知県
	名塩雁皮紙	ノリウツギ	兵庫県
	細川紙	トロロアオイ	埼玉県
	石州半紙	トロロアオイ	島根県
	本美濃紙	トロロアオイ	岐阜県
選択無形文化財	小国紙	トロロアオイ	高知県
	西の内紙	トロロアオイ	茨城県
	泉貨紙	トロロアオイ・ホゼ(ヒガンバナ)	愛媛県
	程村紙	トロロアオイ	栃木県
選定保存技術	唐紙製作	トロロアオイ	京都府
	宇陀紙	ノリウツギ	奈良県
	美栖紙	トロロアオイ	奈良県
	表具用手漉和紙	トロロアオイ・ノリウツギ	高知県
	吉野紙	トロロアオイ	奈良県

北海道は和紙用途ノリウツギの産地

農林水産省の資料「和紙原料の生産状況等について(令和3年6月)」の中では、ノリウツギについて次のように書かれています。

- ・国内では北海道、本州、四国、九州の冷温帯の森林等に分布するが、近年、シカの食害等により大きく減少。
- ・絶滅危惧種に設定されている県もあり、現在では群生状に生育している箇所は極めて少ない状況。
- ・かつては山村地域の収入源として、農業や林業の傍らに自生するノリウツギを採取して販売していたが、後継者不足や資源の減少などにより全国的に採取者は少なくなり、確認も難しい状況。
- ・近辺にあるものよりも糊の品質が良いことから、一部の地域においては北海道の森林組合に依頼し、ノリウツギを調達している事例がある。

上の資料に北海道の情報を追加すると、次のとおりです。

道産ノリウツギの品質は和紙職人に高く評価されています。現在は書跡や絵画等の文化財修復にも用いられる宇陀紙(奈良県)や、鎌倉時代から徳川幕府の終焉まで幕府御用の公文書用紙に使われた格調高い和紙 越前奉書(福井県)にも用いられています(表-1)。

この原稿を書いている時点において、北海道が和紙用途のノリウツギ産地になった経緯を記録した文献や資料を見つけることはできていません。しかし、道内で聞き取りを行ったところ、道外への出荷は100年以上も前、明治時代にはじまっていたようです。場所は、留萌管内中部にある初山別村。初山別村から本州への出荷量が増加にするのに伴って、収穫する対象地域は日本海沿いに苫前町、小平町、ついには上ノ国町まで広がったそうです。ところが、近年には増加したエゾシカに樹皮が剥がされるようになり、事業を継続することが難しくなりました。そして、平成29年から産地は宗谷地方東部に位置する浜頓別町へ移りました。現時点において、浜頓別町が確認されている唯一の産地です。

他方、消費地である道外において道産ノリウツギについて述べている古い記録を探すと、1953年の高分子学会（現 公益社団法人高分子学会）の雑誌「高分子」に次のように書かれています。

日本紙の抄造において「のり」の原料となり得るものには「にべ」、黄蜀葵根、梧桐、「なしかずら」、南五味子（とこりかずら）、「どうねり」、董、「ほがり」、「まんじゅさげ」等その数は少ない。しかしながら実際に使用されているものには黄蜀葵根から得られる「のり」及び「にべ」から溶出される接骨糊（たずのり）に過ぎない。黄蜀葵は栽培ができる利点があるので、大部分の日本紙の産地において使用され、接骨糊に依存しているのは福井県の五箇（今立郡岡本村）位のところであろう。因に「にべ」というのは主として北海道に産する樹木の名称であって、接骨糊はその樹木の皮から溶出したものである（小栗捨蔵, 1953, p24）。

上記の「にべ」を漢字で書くと「木楡」、ノリウツギのことです。「骨折糊（たずのり）」はノリウツギ由来の「ねり」です。福井県の五箇（今立郡岡本村）は日本を代表する和紙 越前紙の産地です。同年代の他の資料にも道産ノリウツギに関する記述が見られることから、昭和中期には道産ノリウツギが本州で使われていたことは確かです。

それでは、浜頓別町において、ノリウツギはどのように採取されて、出荷されているのでしょうか？町内在住の仲野強氏と鈴木芳孝氏から教えていただきました（2021年6月29日）。

日当たりの良い環境を好むノリウツギは開けた場所や明るい林縁に育つので、見当をつけて探すことができます。夏季に咲くアジサイに似た白い花は離れた場所からも目印になります。採取地はオホーツク沿岸からクッチャロ湖と頓別川流域の間に広がる浜頓別町内の平地です。道路脇や牧草地の周辺、天北線の廃線跡地など、集荷するのに便利な場所が選ばれます。

樹皮を剥ぐことができる期間は限られています。浜頓別町では6月下旬から8月上旬。樹皮を利用するキハダやシラカンバと同様に時季を外すと樹皮は幹から剥がれません。幹は細くても収穫できますが、収量を上げるには幹が太いほど効率的です。採皮は次の手順で進みます（写真-2）。まず、ノリウツギの周囲の草やササをかき分けて、幹の地際まで見えるようにします。ナイフを樹皮に差し込むと、刃先が材へ達した感覚が手に伝わり、それより先に刃が進まないことが分かります。そのまま樹皮を割くように縦方向に切れ目を入れます。縦に裂け目が入った樹皮を左右に開くように少しめくり、樹皮と幹の間に両手を差し込んで、手のひらを幹に這わせると、手の甲が樹皮をめくり上げて、本当に「一皮むけるように」樹皮は幹から剥がれます。この作業に力は必要ありません。樹皮は容易に剥がれます。樹皮は地際に近いほど厚くなり、収量が増すそうです。幹から剥がしたばかりの樹皮は、内樹皮と外樹皮が一緒になっていますが、和紙づくりに必要な材料は内樹皮です。その場で内樹皮を外樹皮から剥がすことができるものもありますが、剥がせないものは作業場へ持ち帰り、ヘラなどの道具で丁寧に処理します。次に出荷の準備です。内樹皮を生重14kgと防腐剤を加えた水6kgをビニール袋に入れた計20kgを段ボール箱で梱包して、出荷されます（写真-3）。

また、樹皮を剥がれたノリウツギは、やがて枯れます。草やササが地面を覆っているからでしょうか？萌芽での更新は見当たりませんでした（写真-2）。



①周囲の下草・ササを掻き分けます
鈴木氏(左)と仲野氏(右)



②樹皮に縦の切れ目を入れます



③幹と樹皮の間に指を入れます



④樹皮がするりと剥げます



⑤手が届く範囲の樹皮を剥がします



⑥この木からは約 5 kgの樹皮が採れました



⑦採皮した幹に樹皮は再生されません



⑧採皮後はやがて枯れます

写真-2 ノリウツギの樹皮の採取過程 (2021年6月29日)



- ①内樹皮から外樹皮を取り除きます
②内樹皮と水、防腐剤をビニール袋へ入れ、丈夫な段ボール箱で梱包して出荷します

写真-3 ノリウツギの樹皮の出荷過程

伝統的な和紙材料ノリウツギの課題

和紙についての著述は余多あります。そこにはノリウツギの記述も少なくありません。しかし、採皮と流通に関しては、ほとんど触れられていません。かつて和紙産地では、どのようにノリウツギを調達していたのでしょうか？ どういう経緯で北海道がノリウツギの供給地になったのでしょうか？

とはいえ、聞き取り調査からは、千数百年続く和紙の歴史において、明治時代以降、道産ノリウツギが和紙文化の継承に重要な役割を果たしてきたことが分かりました。国宝や文化財の修復において、道産ノリウツギを使って漉かれる和紙は掛け替えのないものになっています。ボストン美術館、スミソニアン博物館、メトロポリタン美術館、大英博物館、ルーブル美術館、ギメ東洋美術館など名立たるミュージアムでも美術品の修復に使われています。

和紙や文化財の関係者から、道産ノリウツギの供給が続くことを切望されています。しかし、北海道の産地から道外の和紙職人まで、生産から消費の一連がすんなりとつながっている訳ではありません。採取は、生業とはならない夏季に限った短期間の収入源、経済的に不安定な位置づけです。エゾシカによる樹皮剥ぎ被害が深刻なことから、林野に自生する資源の収奪型採取を継続できる見通しはありません。中山間地域で進む過疎化は担い手不足に直結しています。何より、和紙文化における道産ノリウツギの重要性が道内では十分に認識されていません。

道産ノリウツギの安定供給体制の構築には、直面している種々の課題を整理し、道内外の関係者が一丸となって将来的な展望を考える時を迎えています。

(森林環境部樹木利用グループ)

参考文献

- 磯野直秀 (2007) 明治前園芸植物渡来年表, 慶應義塾大学日吉紀要 自然科学 42 : 27-58
 公益財団法人日本特産農産物協会 (2021) 地域特産作物 (工芸作物, 薬用作物及び和紙原料等) に関する資料 (令和元年産) http://www.jsapa.or.jp/pdf/Acrop_Jpaper/nousakumotuchousar1.pdf
 町田誠之 (1983) 和紙と日本人の二千年—繊細な感性と卓越した技術力の証明, PHP 研究所
 町田誠之 (1984) 和紙の伝統, 駸々堂出版
 町田誠之 (1989) 紙と日本文化, 日本放送出版協会
 農林水産省 (2021) 和紙原料の生産状況等について (令和3年6月)
<https://www.maff.go.jp/j/seisan/tokusan/attach/pdf/tokusan-3.pdf>
 小栗捨蔵 (1953) 日本紙製造原料の植物粘質について, 高分子 2 (4) : 24-27

現場写真で見る林内道路の侵食・崩壊

— 路体消失 —

佐藤弘和・津田高明・岩崎健太・蓮井 聡・対馬俊之

林内の道路がなくなる？

調査で林内道路※を歩いていると、ときおり道の前で様子がおかしなことに気がきます。近づいてみると、そこにあるべき道がなくなることがありました（写真-1）。路面侵食や路肩崩壊が拡大し、道路そのものが無くなっている「路体消失」です。林内道路では、路面を形成する路盤（砂利や碎石）の下部に路体（地山や盛土など、道路全体を支えている土）があります。路体消失では、①地山そのものが無くなっている場合、②谷に道を渡すための盛土（横断排水用の暗渠が設けられていることが多い）が無くなっている場合があります。また、厳密には消失ではありませんが、③道路の一部区間が沈んでしまった場合も路体消失に加えることにしました。①から③に共通しているのは、車両走行が完全に不可能になるということです。

※「林道」、「林業専用道」、「森林作業道」の総称として、ここでは林内道路とします。各区分の詳細は佐藤（2017）を参照ください。



写真-1 道がなくなっている

路体消失の実態

林道等に接続する公道の事例も含め、路体消失の様子をみていきましょう。写真-2では、斜面に取り付けられた道路の路体が崩落していました。この崩落は、表層崩壊によるものと判断しました。もはや、人や動物しか通れません（崩れた斜面に点線のように見えるのはシカの足跡です）。



写真-2 地山ごと崩壊した道



写真-3 川によってえぐられた道

写真-3は、川沿いに作設された道です。写真の手前側が上流にあたるのですが、川の水が道路の盛土のり面にぶつかり侵食されている様子が窺えます。川の水が衝突する溪岸の斜面は、「攻撃斜面」と呼ばれています（ちなみに、攻撃斜面の対面は「滑走斜面」、直線流路での溪岸斜面は「直走斜面」といいます）。この事例は台風による豪雨で生じたもので、増水時における川水の侵食力がいかに強いかがわかります。特に、それなりの規模の川に沿って付けられた林内道路では攻撃斜面に相当する道路箇所が消失しやすい傾向にあり、注意が必要です。

先に示した写真-1は、道路が谷をまたぐために作設した盛土が消失しています（谷底には排水用に埋設された管渠が崩れ残っていました）。写真-4は沢からの水を排水するための管渠（鉄筋コンクリート管）が埋設されている道路ですが、管渠まわりの盛土が侵食されています。写真をよく見ると管渠の上に土が取り残されています（写真では侵食された部分の中央にある、筋状に残った明るい色の部分）。おそらく、写真左側にある沢から、呑口が詰まるなどして管渠の排水能力を超えた水が管渠まわりを侵食していったものと考えられます。

写真-5は、路体消失まではいきませんが、横断排水溝の下部が侵食を受けた事例です。コンクリート製の開渠部分は残存していますが、その下部の路体がえぐられています。推測ですが、開渠からの排水によって盛土のり面が削られ、それが開渠の下部まで拡大したのかもしれませんが。この状態のまま放置すれば、開渠部分が崩落する可能性があります（他の林内道路では、横断排水溝の一部が崩落していた箇所もありました）。



写真-4 路面に横断的な侵食



写真-5 横断排水下の路体だけが崩れた



写真-6 道を支える基部が露出している



写真-7 沈み込んだ道にできた段差

写真-6では、道路の基部が地山ではなく鉄骨フレームとなっており、その上の盛土が消失し基部が露出しています。最初のきっかけは不明ですが、この道路に残った痕跡から、一度えぐれた路盤が道路奥からの路面流水で侵食拡大した様子がみえました。

写真-7は、路面は残っているものの、道路の一部の区間が沈み込んだ事例です（現地の様子から、道路のある斜面下部が川により侵食されて落ち込んだようです）。同写真は、沈み込んだ路面に立って、もとの路面（白色の巻き尺が途切れているあたり）を撮影したものです。段差が約1 mありました。これもそのまま放置すると、残存している道路ごと崩落する危険があります。

路体が消える過程

およそ半年ごとに同じ箇所の撮影で路体が消える過程を捉えた例を示します。写真-8は、2016年の9月21日に撮影された盛土のり面崩壊（路肩崩壊）です。このときすでに、盛土のり面は道幅2 m程度残して崩れていました。ちなみに、写真の左側は谷があり水が流れています。崩れた側の盛土には、谷の水を排水する管渠（コンクリート管）が見えています。写真-8の段階では、4本のコンクリート管がすでに谷の底に落ちていました。

写真-9は、2017年5月23日に同所を撮影したものです。一見比較しにくいのですが、盛土内に残っているコンクリート管上の土の残存状況から0.5 mほど道幅が減少していました。林内道路の崩壊は、台風や爆弾低気圧、ゲリラ豪雨のほか、凍結融解や融雪水などに起因することが考えられます。前回から今回



写真-8 2016年9月21日での盛土のり面崩壊



写真-9 2017年5月23日の様子



写真-10 2017年11月7日の様子



写真-11 2018年6月7日の様子（路体消失）

の撮影時まで降った降水量は、この場所の近隣にある気象台のデータから調べられます。1時間あたりの降水量（降雨強度）の期間最大は5.5mm/時でした。降雨強度が弱いことから、前回から今回の間に起きたのり面の崩壊は、大雨による崩壊というよりは凍結破碎や融雪水に起因したものと想定されます。

写真-10は、2017年11月7日に撮影したものです。道幅はすでに1mを切っています。盛土内に残っていた5本目のコンクリート管は落下し、これに繋がっている6個目のコンクリート管の一部がむき出しです。この時点では、降雨のみに起因した崩壊です。なお、前の撮影からこの日までの期間最大降雨強度は31.5mm/時でした。

写真-11は、2018年6月7日に同所を撮影したものです。前回の撮影時からおよそ7ヶ月経過しましたが、完全に崩壊して路体消失していました。この間、期間最大降雨強度16mm/時の雨と、融雪がありました。とどめを刺されたタイミングはわかりませんが、残っていた道幅2m分は最初に同所を発見してから1年9ヶ月経過して完全な路体消失に至りました。

路体が消失していく過程（経時変化）を追跡した事例は、筆者の知る限りあまりないです。この事例のように、一度崩れてしまった盛土のり面は、修復しなければそのまま崩壊が進行し、数年で路体消失に至ることになります。盛土のり面が崩れた場所では崩れ具合の経過を見極め、早めに補修するなどの対策が必要です。

路体消失のタイプ

各所で路体消失が発生した道路を辿っていくうちに、路体消失にはいくつかのタイプがあることがわかってきました。最初のタイプは、「盛土や路体を構成する土そのものの移動（すべり）による消失タイプ」です。これは、人為的な改変がない自然斜面における崩壊プロセスに準ずるものです。斜面崩壊には、地すべりや表層崩壊といった移動（すべり）タイプがあります。例えば、写真-2で示した盛土のり面ごと消失した事例は、表層崩壊タイプといえます。斜面崩壊の原因としては豪雨がありますが、胆振東部地震のような規模の大きな地震による斜面崩壊に伴い林内道路が広範囲にわたって消失することもあります。豪雨や地震による路体消失を防ぐには、林内道路を尾根に配置することが考えられます。また、盛土のり面側に土留めの役割を果たすコンクリート製の擁壁を設置する方法もあります。ただし、人の手による盛土や路体の維持には限界があることも忘れてはいけません。

次のタイプとして、「道路内（路面や側溝）の排水に起因した侵食による消失タイプ」があげられます。写真-5のように、横断排水溝から盛土のり面にそのまま排水が流れ込むと、水の当たる部分が削れて、ガリと呼ばれる溝状の地形ができることがあります。さらに、このガリは集水しやすい形状のため、降雨や融雪の度に拡大する恐れがあります。拡大が進んだ場合には、路体の基部が削られるまでに至り、上部の土塊が支持力を失い崩落することもあります。写真-6も、路面流水に起因したものであれば、このタイプに該当します。

最後のタイプとしては、「沢や川の水の流れに起因した侵食による消失タイプ」です。このタイプは、川水が直接路体を侵食する場合（写真-3）や、川水が橋脚周りを侵食する場合が該当します。この場合、橋そのものが崩壊することがあります。

川を通す、川を渡る対処方法

土が動く消失タイプや路面流水による消失タイプは、それぞれ盛土のり面崩壊と路面侵食への対策に共通するところがあります。これらについては、前報で報告しています。ここでは、川水による消失タイプの対処方法について紹介します。路体消失が起こりやすい川水に起因したタイプでは、川が道をどのよう

に横切るのか（または道が川をどのようにまたぐのか）によって対策が異なります。

【**暗渠**】沢や谷を跨いで道を通すとき、写真-12のボックスカルバートのように暗渠を使って路面より下で川水を流します。通水用の暗渠として、ボックスカルバートやアーチカルバート（アーチ状の断面）があるほか、簡易なものとして盛土内にコンクリート管やコルゲート管（側面が波付けされた鋼製管）などの管渠を埋設する方法があります。いずれの方法においても、排水できる断面積を確保することが重要です。施工数は少ないと思われる写真-13のタイプですが、断面確保のために複数の管を並べています（海外では、マルチプルカルバートと称している書籍がありました）。

呑口が立木や土砂などによってふさがれて排水断面積が減少した暗渠では、詰まりを起こした土砂などを除去して通水能力を確保することが道路の維持にとって重要です（ただし、大地震や豪雨による場合には、十分な維持管理をしても被害が生じることがあります）。暗渠施設の設置は川水に起因した消失タイプには有効なのですが、施工や維持管理にはコストが掛かります。



写真-12 ボックスカルバート



写真-13 マルチプルカルバート

【**河床路**】一方で、暗渠などを使わずに車両が川の中を直接走行するのが「河床路」です。この場合、川を横断する方向に河床路がつけられるのですが、なかには川の中を縦走する事例もありました（写真-14）。普通乗用車で川の中を直接走行する場合、車両が流されるほどの川の水量があれば走行不能になりますし、増水で移動した川底の礫が走行する箇所に堆積すると、走行上の障害物となります。増水していな



写真-14 奥にある道に行くには川を縦走



写真-15 川の中に作られた洗い越し

い川でも、川底の礫や砂利でタイヤがはまったり、礫が車底にぶつかったりする恐れがあります。写真-14のケースでは、林業機械による走行は可能かもしれませんが、普通乗用車でのアクセスは断念しました。横断箇所は、短い方が安全です。

林内道路において川底の上を車両が横切する方法として「洗い越し」があります。写真-15は洗い越しの例です。このように川の中にコンクリート製の走路が作られる場合や、沢の水が流れている路面部分をコンクリートで固めた簡易な造りがあります。最近作設された林業専用道の例では、グレーチングで川面を覆ったものがありました(写真-16)。洗い越しもコストが掛かる施設ですが、車両とそれに乗る人の安全を考えると導入を検討する余地があります。



写真-16 グレーチング付き洗い越し

林内道路の路体消失に関しては研究の余地がある

路体消失が一度起きると、復旧させるには大変な作業を伴います。安全で長期間使える林内道路を目指すには、路体消失が起きにくい路網配置や道路構造、維持管理などの情報が重要となります。そのためには、切土のり面崩壊、盛土のり面崩壊、路面侵食がどのような条件で、実際どのように起こるのかを知っておくことが、効果的な対策に繋がると考えます。

実際に、のり面の崩壊や路面侵食、路体消失が生じた状況について、大雨が降っている間、現地に張り付けて観測すればわかるかもしれませんが、しかし、降雨中に道路が崩れて、車で移動できなくなるなど、かなりの危険を伴うため、この方法は推奨できません。今回、路体消失が生じた現場を多数訪れることで、路体消失のタイプやその発生原因がおぼろげながら見えてきました。他の地域での事例と比較・類型化することで、新しい知見が得られることがあります。路体消失のタイプ別にその発生要因がそれぞれわかれば、路体消失の対処を図る上で貴重な情報となり、有効な対策が立てられます。

将来、先行研究で得られた知見のほかに、過去に生じた路体消失データのメタ解析、林内道路内での水文地形学的手法による水や土の動きの観測、道路模型を使った実験や川に見立てた水路実験、コンピューターでの数値シミュレーションなども取り入れられれば、路体消失のメカニズムの解明とそれに対処する新たな方法の開発に繋がるかもしれません。

(企画調整部企画課・森林経営部経営グループ・道東支場・森林環境部環境グループ・副場長)

参考文献

- 佐藤弘和 (2017) 知っていて損のない「林内路網の基礎知識」－「林道」の区分と英訳のはなし－. 光珠内季報 184 : 9-14.
- 佐藤弘和・津田高明・岩崎健太・蓮井 聡・対馬俊之 (2021) 現場写真で見る林内道路の侵食・崩壊－盛土のり面崩壊－. 光珠内季報 198 : 11-18.
- 佐藤弘和・津田高明・岩崎健太・蓮井 聡・対馬俊之 (2021) 現場写真で見る林内道路の侵食・崩壊－路面侵食－. 光珠内季報 201 : 11-18.

光珠内季報 NO. 202

発行年月 令和4年3月

編集 林業試験場刊行物編集委員会

発行 地方独立行政法人北海道立総合研究機構
森林研究本部 林業試験場

〒079-0198

北海道美唄市光珠内町東山

TEL (0126) 63-4164 FAX (0126) 63-4166

ホームページ <http://www.hro.or.jp/fri.html>
