

光珠内季報

・グイマツ雑種F₁の生育状況
ーカラマツとの比較ー

ミヤママタタビ (雄株)

滝谷美香 …… 1

・地形モデルの違いによるUAV空撮画像を用いた樹高計測精度

蝦名益仁 …… 6

・現場写真で見る林内道路の侵食・崩壊
ー路面侵食ー

佐藤弘和・津田高明・岩崎健太・蓮井 聡・対馬俊之 …… 11

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. 201
2022. 1

イタヤカエデ

グイマツ雑種 F₁ の生育状況 —カラマツとの比較—

滝谷美香

カラマツ一般苗に比較して、初期成長が良くネズミ被害に強いとされているグイマツ雑種 F₁ は、植栽が始まってから 40 年以上が経過している。今後利用期を迎えるグイマツ雑種 F₁ について、カラマツとの成育状況を比較し、今後の取扱等について考察を行った。

地形モデルの違いによる UAV 空撮画像を用いた樹高計測精度

蝦名益仁

近年注目されている、UAV-SfM 多視点ステレオ写真測量を用いた森林計測について報告します。本報告では特に、樹高に注目し、地形モデルが樹高計測精度にどのような違いを与えるかについて、道有林十勝管理区（浦幌町）のトドマツ人工林における UAV 空撮、LiDAR 計測、現地調査に基づく検証事例について紹介します。

現場写真で見る林内道路の侵食・崩壊 —路面侵食—

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面侵食の状況について写真を使って紹介します。路面侵食のタイプには、わだちに水が集まって侵食される「路面集水型」、側溝から溢れた水で侵食される「側溝溢水型」、沢や川からの水が路面に流れて侵食される「溪流流入型」がありました。路面侵食への対処方法では、路面流水の分断と横断溝の通水維持などの維持管理が重要です。

グイマツ雑種 F₁ の生育状況

－カラマツとの比較－

滝谷美香

はじめに

グイマツ雑種 F₁ (以後「F₁」という) はグイマツを母親, カラマツを父親 (花粉親) とする交雑種であり, 1970 年代から北海道において広く植栽されてきました。F₁ はカラマツと比較してネズミ被害を受けにくく (Hayashi *et al.* 1998), 材の強度や通直性などの形質に優れている (Fujimoto *et al.* 2006) とされています。F₁ の中には, 優良苗として特に炭素固定能の高い “クリーンラーチ” などもあります。

2019 年現在における道内一般民有林では, 最も高齢な F₁ 人工林は 63 年生 (1957 年植栽; 森林簿による) です。その後徐々に植栽面積が増加し, 近年 20 年間に植栽された I~IV 齢級の F₁ 人工林面積は, それぞれ 1500~2000 ha 程度となりました (図-1; 2017 年現在)。カラマツ類の人工林面積に F₁ が占める割合は, 3.4% ですが, I~IV 齢級の範囲では, 9.2% です。また 2012~2016 年の造林実績をみると, F₁ は 270~423 ha/年 (平均 346 ha/年) と安定して植栽が実施されているといえます。北海道では, 今後優良苗を含んだ F₁ の造林面積をカラマツ類全体の 3 割~6 割とすることを計画しており (道総研林業試験場 2017), 全体として F₁ 人工林面積は更に増加することが見込まれます。

北海道水産林務部提供データによると, 一般民有林における 2016 年のカラマツ類伐採量は 208 万 m³ であり, うち F₁ 伐採量は, 1 万 3 千 m³ でした。今後, カラマツ類全体で標準伐期齢 (30 年) を迎える林分が増加することから, 10 年後には伐採面積も増加し, 再造林にあたって植栽する樹種を検討することが予想されます。

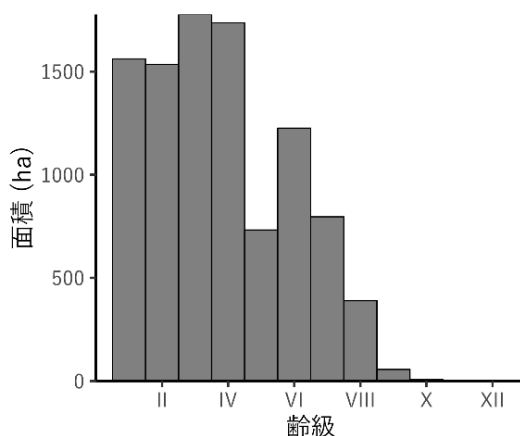


図-1 グイマツ雑種 F₁ の 2017 年現在における齢級別人工林面積
北海道水産林務部 2019 より

これまでの研究報告から, 15 年生程度の初期成長を比較すると, F₁ はカラマツよりも成長量大きいことが知られています (宮木 1990) が, 16 年生以降 (IV 齢級以降) も, F₁ の成長量がカラマツよりも優位かどうかを明示する必要があります。また, カラマツ類に限らず, 植物の成長は気象や地理的条件

に影響を受けるため、 F_1 の成長量の地域差についても明らかにすることが重要です。更に、 F_1 はカラマツに比較してネズミに食われにくいとされており(高橋・西口 1966)、この点についても成林した F_1 林分で比較・検討する必要があります。そこで、本報では F_1 とカラマツについて16~31年生の林分の平均直径、樹高、及び地位指数の差異を解析した結果と、ネズミ被害の受け易さの違いについて報告します。

F_1 とカラマツの成長量の比較

F_1 とカラマツの生育状況の比較には、全道で調査した93林分の F_1 の調査データ(図-2;北海道水産林務部2009-2011グイマツ雑種 F_1 人工林実態調査)と、カラマツの林分調査データ約2000点(北海道水産林務部1972-2013森林吸収源調査データ)のうち、林齢が F_1 データの調査範囲と一致する486林分のデータを用いました。林齢の範囲は15~31年(IV~VI齢級)で、図-3に示したとおり F_1 もカラマツも林齢毎の林分数の分布が同等になるようにしました。

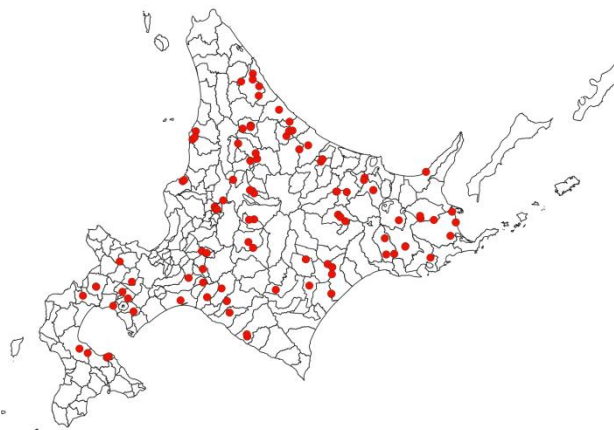


図-2 グイマツ雑種 F_1 調査地

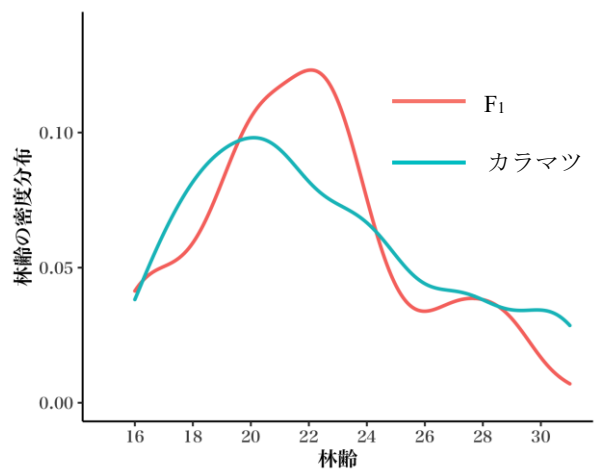


図-3 グイマツ雑種 F_1 及びカラマツ人工林データの林齢の分布(密度分布で示した;密度分布を合計すると1となる)

樹種毎に全てのデータをプールした場合の平均胸高直径は、カラマツで 16.1 ± 2.93 cm, F_1 で 16.4 ± 7.87 cmであり、平均樹高はカラマツで 13.9 ± 2.96 m, F_1 で 14.3 ± 3.08 mでした。これらの値は樹種間では統計的に有意な差は認められませんでした。同じデータを齢級に区分し、一般化線形モデルにより樹種と齢級の効果を比較した場合、平均胸高直径および平均樹高は齢級の増加により高くなりました(図-4;いずれも $p < 0.01$)。樹種間では、平均樹高に対する効果は弱いですがカラマツで低い傾向にありました(図-4(B); $p < 0.1$)が、平均胸高直径には効果は認められませんでした(図-4(A))。

使用したデータは各林齢で平均樹高や直径にばらつきがあり、全道で調査されていることから、各調査林分の気象条件や地理的条件に差があることは予想に難くありません。このような違いを考慮した樹木の潜在的な成長量の指標として、地位指数が用いられます。地位指数は、一般的にはある基準となる林齢に達したときの、優占個体の平均樹高で示されることが多い値です。この報告では、各調査地点についてヘクタール当たり上位100本の平均樹高を算出して地位指数を推定しました。地位指数の推定には「北海道版カラマツ人工林収穫予測ソフトウェア」(八坂ほか 2011)に使用された式を用い基準林齢を40年としました。

地位指数の平均値は、 F_1 で 23.0 ± 3.15 , カラマツで 22.2 ± 3.49 であり、統計学的には弱いながら F_1 で有意に高かったものの、両者とも全道で大きくばらつきがありました。そこで、この地位指数のばらつきの地域的な傾向について、振興局を単位として F_1 とカラマツで比較しました。今回使用した F_1 データの林齢幅が15年間と狭く、平均値としては誤差が大きい可能性もあります。また、今回は F_1 の地位

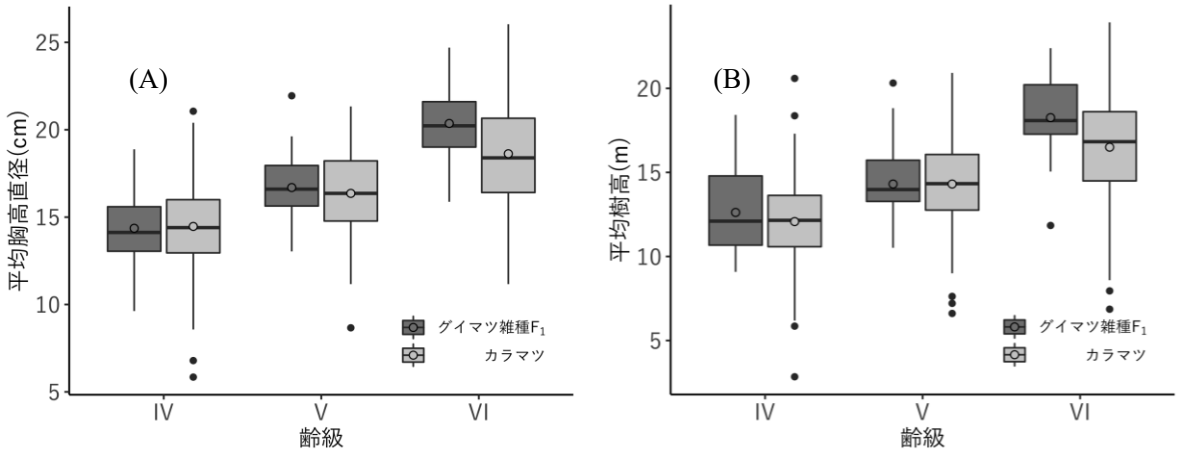


図-4 ギイマツ雑種 F₁ 及びカラマツにおける林分の齢級と平均胸高直径 (A) 及び平均樹高 (B) との比較

垂直線上端は最大値，下端は最小値を，四角形の上端はデータの 75%，下端は 25% を示し，箱中央の水平線は 50% を示している。また○は平均値，上下の点は外れ値を示す。

もカラマツの地位指数曲線を用いて推定していますが，F₁ では地位指数曲線自体がカラマツとは異なることも想定されます。これらの理由により，今回推定した F₁ の地位指数は暫定的な値となるため，地位指数を直接示さず相対値として示しました。

図-5 は，最も地位指数の高かった十勝の F₁ の値を 1 とした場合の相対値で示しています。実線よりも上に位置する点は F₁ の樹高成長がカラマツよりも優れていることを示します。全体として，カラマツの地位が低い地域は F₁ の地位も低く，同様にカラマツの地位が高い地域では F₁ も高い傾向にありました。十勝やオホーツクの F₁ はカラマツより 0.2 ポイント程度高くなりました。一方で，留萌などカラマツよりも低くなっていた地域もわずかながらみられました。したがって，F₁ はどこに植栽してもカラマツよりも優れた成長を示すとは限らず，地域的な特性を考慮して，植栽品種の選定や施業を実施する必要があると考えられます。

F₁ はカラマツに比較してネズミの被害を受けにくいとされています。上記 93 林分の F₁ と同時期に調

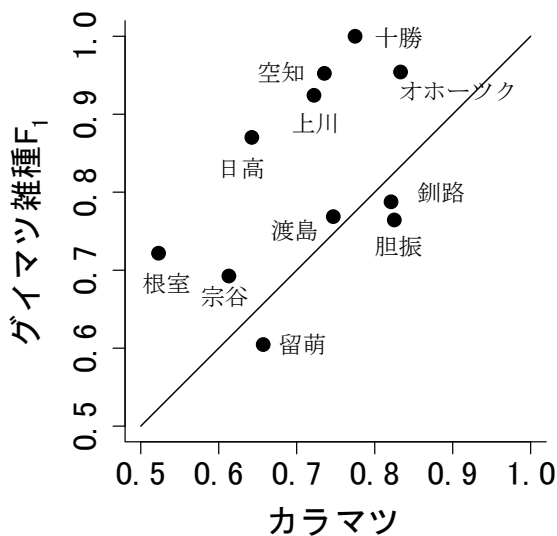


図-5 ギイマツ雑種 F₁ とカラマツの地位指数の関係

地位指数は最も値の高い十勝地域の F₁ を 1 とした場合の相対値
 実線は 1:1 の関係を示す

査された全道 21 地点のカラマツ林のネズミ被害を比較しました。図-6 は、各調査地において、調査対象個体に 1 本でもネズミ被害が確認された場合に 1、全く確認されなかった場合を 0 とし、全体の被害発生林分割合を比較したものです。被害発生が確認された調査地は F₁ では 11.4%であるのに対し、カラマツ林では 33.3%となりました。各林分の被害程度や地理的条件などは反映されてはいませんが、ネズミ被害の受けやすさは F₁ の方が低い結果になりました。

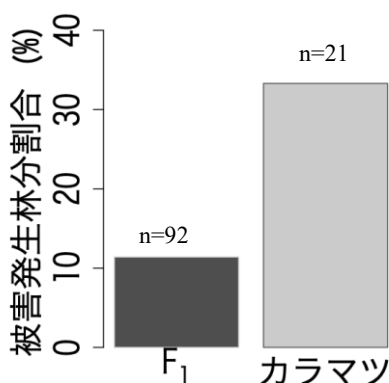


図-6 ギイマツ雑種 F₁ とカラマツのネズミ被害発生林分割合の比較

まとめ

今回の結果から、全道レベルで VI 齢級までの成育状況を F₁ とカラマツとで比較すると、平均直径には差はなく、平均樹高には若干の差がありました。地位指数で比較すると、F₁ の成長量はカラマツと比較してやや高いという結果になりました。また地位指数を振興局レベルで比較すると、概ね F₁ の方がカラマツよりも成長が良い傾向が見られましたが、カラマツの成長量が低い一部の地域では、期待される成長量を得られないだけでなく、カラマツよりも低くなる可能性も示されました。地位指数を算定する地位指数曲線は、今回の解析には含まれていない III 齢級以下や VII 齢級以上の値にも影響を受けることは想像に難くないので、推定精度向上には更なるデータが必要です。また、ネズミの被害については、全道レベルで比較すると、F₁ の方がカラマツよりも発生しにくいという従来の見解を裏付けるものでした。

今後、林業の経済性や炭素吸収源確保の観点から、より成長量の高い優良品種を植栽する傾向が強まると考えられますが、植栽品種を選定する際には、本研究の結果なども参考に植栽地域における環境適応性に配慮していくことが必要と考えられました。

引用文献

道総研林業試験場 (2016) 「北海道版カラマツ人工林収穫予測ソフトウェア」 ver3. <http://www.hro.or.jp/list/forest/research/fri/keiei/syukakuyosoku/karayosoku.html>. (2021年9月17日アクセス)

Fujimoto, T., Akutsu, H., Nei, M., Kita, K., Kuromaru, M. and Oda, K. (2006) Genetic variation in wood stiffness and strength properties of hybrid larch (*Larix gmelinii* var. *japonica* * *L. kaempferi*). *Journal of Forest Research* 11:343-349.

Hayashi, E. Iizuka, K. Sukeno, S. Kohno, K. (1998) Relationship between resistance to vole browsing and content of ether extract in bark of larch species and hybrids. *Journal of Forest Research*. 3:119-122.

道総研林業試験場 (2017) 林業用優良種子の安定確保に向けた採種園整備指針. 22pp, 美唄

北海道水産林務部 (2021) 北海道林業統計. <https://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/sum/kcs/rin-toukei/01rtk.html>. (2021年9月17日アクセス)

北海道水産林務部 (2021) 造林事業実績. <http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/srs/zourin/jisseki.htm> (2021年9月17日アクセス)

宮木雅美 (1990) ハイブリッドカラマツの特性と改良. 北海道の林木育種 33:7-12.

高橋延清・西口親雄 (1966) 林木の耐鼠性に関する研究 (2) 雑種カラマツ F₁ 苗に対するエゾヤチネズミの摂食嗜好性. 東京大学農学部演習林報告 62: 173-188.

八坂通泰・滝谷美香・山田健四 (2011) システム収穫表「北海道版カラマツ人工林収穫予測ソフト」の開発. 北海道林業試験場研究報告 48:65-74.

(森林経営部経営グループ)

地形モデルの違いによる UAV 空撮画像を用いた樹高計測精度

蝦名益仁

はじめに—UAVによる樹高計測とは—

現地調査の省力化のため、無人航空機（UAV）で空撮した画像をSfM（Structure from Motion）多視点ステレオ写真測量と呼ばれる画像解析技術を用いて森林の表面形状を三次元化し、森林計測する技術の開発が近年進められています。計測項目のなかでも『樹高』は樹木の材積や地位（林地の成長ポテンシャル）を求めるのに用いられるため、特に開発が求められています。このとき必要となるのが数値表層モデル（以降、表層モデル）と数値地形モデル（以降、地形モデル）です。

樹冠や建物の表面など、上空からの可視領域を三次元化して得られるのが「表層モデル」です。表層モデルはUAV-SfM多視点ステレオ写真測量を用いて取得する手法が一般的です。その他に、レーザ光を用いた検出・測距技術（LiDAR：Light Detection and Ranging）を用いて取得する手法があり、いずれも高精細な表層モデルが得られますが、LiDAR（後者）に用いるセンサは高価なため、前者の手法がよく用いられます。

一方、「地形モデル」とは地盤高そのものを表し、複数の取得手法があります。表層モデルの値から地形モデルの値を差し引くことで樹高を求めるため、どの地形モデルを使えば、どの程度正確に樹高が計測できるか検証することが重要です。そこで本稿では、異なる4つの地形モデルを使い、樹高計測精度の違いについて検証した事例を紹介します。

地形モデルの種類と特徴

表-1に地形モデルの特徴をまとめました。

まず、国土地理院が公開している数値標高モデル（DEM：Digital Elevation Model）を利用する方法があります。これは5 m メッシュ（以降、5 m DEM）と10 mメッシュ（以降、10 m DEM）の二種類あり、5 m DEMは航空機LiDAR計測を用いて作成されているため、高精度の地形モデルが無料で入手できます。しかし、北海道の山間部では未整備のエリアが多く、現時点では利用できない箇所が多く存在することがネックです。一方、10 m DEMは全国一円で整備されています。しかし、10 m DEMは空中写真測量を基に作成された地形図の等高線を内挿補間して作成しているため、精度が低く、解像度も10 mと粗いため地表面の細かい凹凸や起伏を正確にとらえられていないと言われています。

表-1 地形モデルの種類と特徴

地形モデルの種類	入手方法	精度	その他の特徴
5 m DEM	国土地理院ホームページよりダウンロードによって入手	高い	整備範囲に限られる。無料。
10 m DEM	〃	低い	全国全域で整備。無料。
UAV-SfM-MVS	空撮画像から生成	樹木密度など障害物の有無に依存	一回の飛行で取得できる範囲に限られる。ソフトウェアがあれば自作可能。
UAV-LiDAR	LiDAR計測データから生成	非常に高い	データ取得コストがとて高い。一回の飛行で取得できる範囲に限られる。
航空機LiDAR	測量業者に委託	高い	データ取得コストが高い。行政・大規模森林所有者によって広範囲に整備されることが多い。

UAV空撮画像を用いて地形モデルを作成する手法もあります。しかしこの手法では、樹木密度が高い森林や、ササなど下層植生が繁茂して地表が見えない部分は、高精度な地形モデルを作成することは困難です。一方LiDARを用いた計測ではデータ取得コストが高くなるものの、レーザ光の一部が地表に到達しさえすれば、高精度な地形モデルを作成することが可能です。特に、UAVからのLiDAR計測は航空機からのLiDAR計測に比べ測定対象に接近し計測でき、高密度に点群が取得できることから、より高精細な地形モデルが作成できます。

本報告で用いる地形モデル4種類(①航空機LiDAR, ②UAV-LiDAR, ③UAV空撮画像, ④国土地理院提供の10 m DEM)は精度, コスト, 取得可能範囲がそれぞれ異なるため, 用途に応じたデータを選択する必要があります。

地形モデルおよび樹高の精度検証の手順

今回の対象地は道有林十勝管理区(浦幌町)にある急傾斜地に植栽されたトドマツ人工林(林齢60年)です。航空機LiDAR・UAV-LiDAR・UAV空撮画像(それぞれ北海道が2019年に取得)と国土地理院提供の10 m DEMの4種類の地形モデルを用い解析を行いました。

樹高計測精度の検証のため, トドマツの樹高・位置の計測を行い, 地形モデルの精度検証のためのGNSS(人工衛星による全球の位置測位システム)による位置座標の測量(20点)を行い検証点としました(図-1左)。GNSS測量による標高値の取得は現地におけるデータ取得と国土地理院によって全国に設置されている電子基準点の情報を用いた, 後処理キネマティック法(PPK: Post Processing Kinematic)という手法を用いて行い(光珠内季報No. 194にて紹介している『RTK』を後処理で行ったものを『PPK』と呼称する), 斜面に対して横断, 縦断するように検証点を設置しました。本試験で精度検証に用いるGNSSの測定精度は後処理の結果, 水平精度3 cm, 垂直精度4 cmになりました。

地上に設置した参照点を基にSfM多視点ステレオ写真測量を行い, 三次元点群データを作成しました。SfM多視点ステレオ写真測量は使用した参照点に対して, 平面誤差0.95 cm, 垂直誤差4.3 cmで三次元点群データを作成することができました。三次元点群データより正射画像, 表層モデル, 地形モデルを作成しました(図-1)。

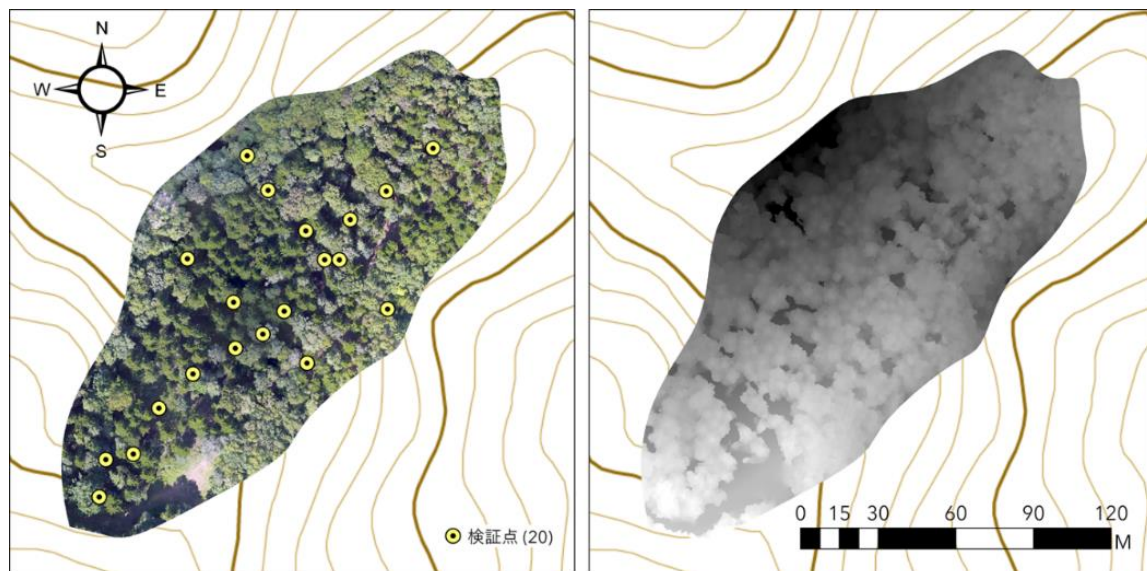


図-1 UAV SfM多視点ステレオ写真測量で作成した正射画像(左)と表層モデル(右)

(出典: 地理院タイルを一部改変)

実証試験をした範囲を図示。黄丸は検証に用いたGNSS測量位置

GNSS 測量で取得した標高値を正值とし、UAV-LiDAR, 航空機 LiDAR, 10 m DEM, UAV-SfM 多視点ステレオ写真測量の 4 タイプの地形モデルから取得した標高値を正值と比較することにより、各地形モデルの精度を検証しました。

樹高の精度検証で用いた樹冠モデルは地形モデルの精度検証で用いた各地形モデルと UAV-SfM 多視点ステレオ写真測量から作成した表層モデルの差分から導いた 4 タイプのものを使用しました。各樹冠モデルと正射画像を用い、道総研林業試験場開発の AI (AI については“北海道立総合研究機構林業試験場年報 令和 2 年度 : UAV を活用した低コストの森林調査手法の研究”をご参照ください) を用いトドマツの樹冠だけを自動抽出し、自動抽出した樹冠内の最高点を樹高としました。現地計測樹高は Vertex (Haglöf 社製) を用いて取得しました。

地形モデルの精度検証 ～地表はどのくらい正確にとらえられている？～

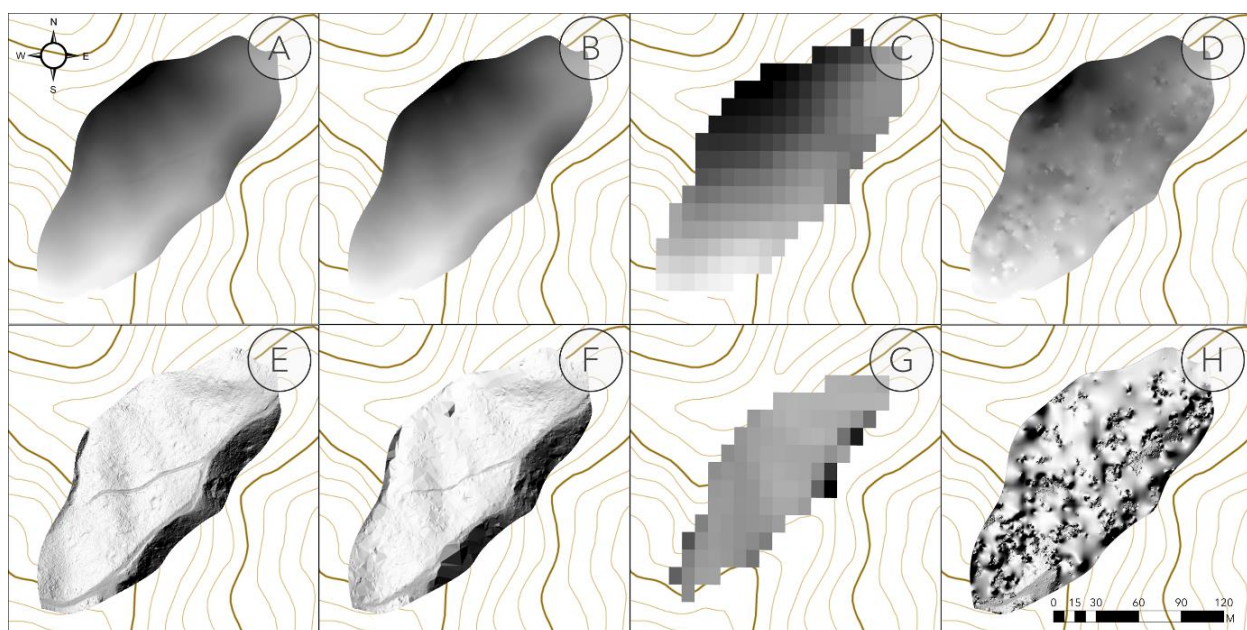


図-2 タイプ別の地形モデル(A~D)と陰影起伏図(E~H) (出典：地理院タイルを一部改変)

A, E は UAV-LiDAR を B, F は航空機 LiDAR を C, G は 10 m DEM を D, H は UAV-SfM 多視点ステレオ写真測量を示す。地形モデルは黒から白になるにつれ標高が高くなっていることを示す。

図-2 において各地形モデル及び陰影起伏図 (陰影により起伏を強調した図) を確認すると、LiDAR では航空機 (B, F) より UAV (A, E) のほうがより精細に地表をとらえていることがわかります。また 10 m DEM は解像度が荒く (C, G), UAV-SfM 多視点ステレオ写真測量では不自然な平滑面や凹凸が見られません (D, H)。これらは地表をとらえることができず、値が欠損しているか、もしくは誤って植生を地表面として捉えていることが原因だと推察できます。図-3 に各地形モデルと GNSS 標高の比較を示しました。比較の際、地形モデルの解像度は 4 タイプの中で一番細かい UAV-SfM 多視点ステレオ写真測量の解像度に統一し 5.6 cm になるよう内挿補間しました。UAV-LiDAR (A) と航空機 LiDAR (B) では 2 m 以下の誤差で標高値を取得することができました。また、40 cm ほど UAV-LiDAR のほうが高精度に標高値を取得することができました。一方、10 m DEM (C) と UAV-SfM 多視点ステレオ写真測量 (D) の 2 つは大きな誤差が発生しました。10 m DEM ではもともとの地形図の精度と解像度が要因で誤差が大きくなったと考えられます。UAV-SfM 多視点ステレオ写真測量では一部の点では高精度に計測することができましたが、地面の見えていない箇所が集中しているところで大きな誤差が発生したため全体の誤差が大きくなったと考えられます。

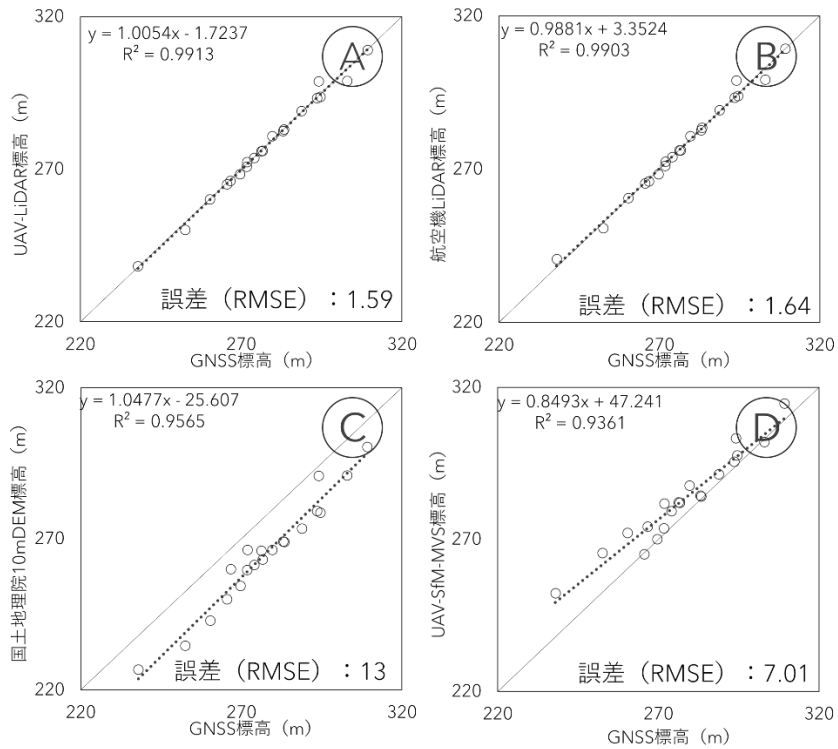


図-3 各地形モデルとGNSS測量による標高の関係

A~Dは図-2と同じ。実線は1:1の線を示し、点線は回帰直線を示す。グラフ中に各地形モデルにおける回帰式、相関係数、誤差を示す。X軸は地形モデルとの比較に用いたGNSSで取得した標高値を示し、Y軸は各地形モデルから取得した標高値を示す。

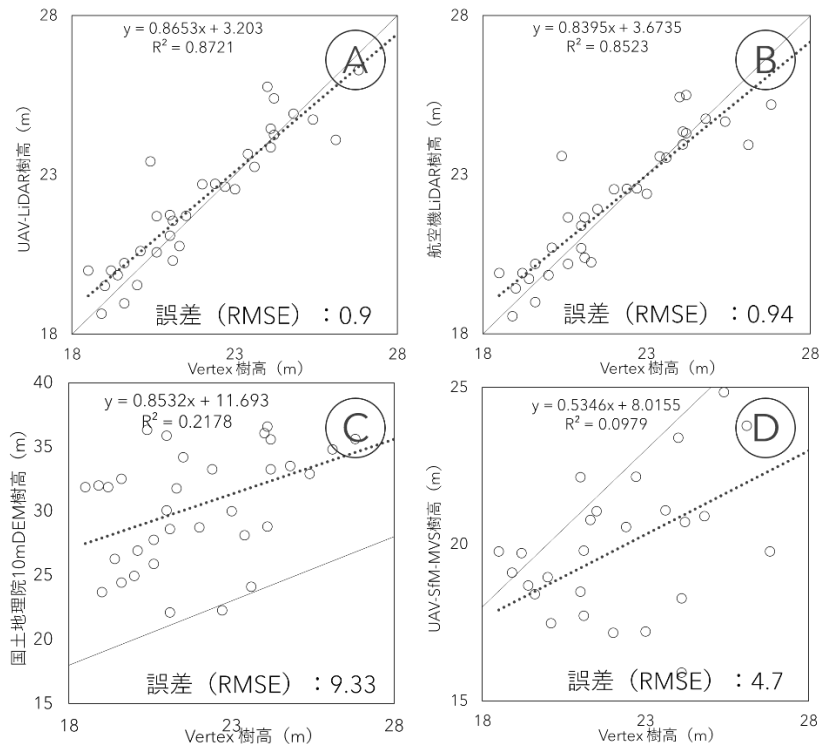


図-4 各樹冠モデルより計測した樹高と現地計測樹高の関係

A~Dは図-2と同じ。実線は1:1の線を示し、点線は回帰直線を示す。グラフ中に各樹冠モデルにおける回帰式、相関係数、誤差を示す。X軸は樹冠モデルとの比較に用いたVertexで計測した樹高を示し、Y軸は各樹冠モデルから取得した樹高を示す。対象としたトドマツは林冠に達したもので、AIによる樹冠抽出と位置が一致したもののみ(32本)

樹高の精度検証 ～樹高は正確に測れるのか？～

図-4に各樹冠モデルから計測した樹高と現地計測樹高の比較を示しました。地形モデルの精度検証と同じ傾向が見られました。LiDARを用いた2つの計測(A:UAV, B:航空機)では1 m以下の誤差で計測することができました。これは、LiDAR計測の精度が高いことに加え、AIで検出した樹冠内の最高点を樹高としたため、樹頂点を正しく選択することができたためと推測できます。10 m DEM(C)で計測したものは誤差が大きく、相関係数も低いため、樹高の測定結果として扱うことは困難であると考えられます。UAV-SfM多視点ステレオ写真測量(D)も同様に誤差が大きく、相関係数が低いのですが、一部精度よく計測できているものもありました。林道近くや林冠ギャップなど、地表面が計測できる可能性がある場所では、樹高計測を行える可能性があります。

まとめ

本事例からLiDARを用いた地形モデルを使用した場合、高精度に樹高が計測できることがわかりました。比較的地形計測の誤差が発生しやすいといわれる急傾斜地においてよい結果が得られたことから、緩傾斜地の多い北海道では多くの場所で同程度以上の精度で樹高が計測できることが期待できます。今後、安価なLiDARセンサの開発によって現地のUAV計測で取得したデータのみを利用して、簡易に高精度な地形モデルが取得できる可能性も示唆されています。道総研林業試験場ではより安価で高精度に森林計測する技術の開発を進めていく予定です。

一方で、10 m DEMやUAV-SfM多視点ステレオ写真測量の地形モデルを用いた場合、樹高が高精度に計測できない場合があることが示唆されました。10 m DEMを地形モデルとして利用した樹高計測を行う場合、樹高計測を高精度に運用できないことを考慮し、標本抽出による樹高精度の確認などを併用し運用することが必須です。UAV-SfM多視点ステレオ写真測量で作成した地形モデルを利用して樹高計測を行う場合、間伐直後など林分密度が高すぎず計測範囲内に適度に地表が見えている箇所が確保されているかの確認が必要です。

謝辞

データ提供・現地調査では北海道十勝総合振興局森林室および北海道水産林務部道有林課の協力を得ました。現地調査の際は特に大坪器氏・渡部聡太氏に協力いただきました。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- ・蝦名益仁・速水将人・竹内史郎・大野泰之・中田康隆(2020)高精度位置情報の取得—低価格2周波GNSS受信機の可能性—。光珠内季報194
- ・北海道立総合研究機構林業試験場(2021)UAVを活用した低コストの森林調査手法の研究。北海道立総合研究機構林業試験場年報 令和2年度

(森林経営部経営グループ)

現場写真で見る林内道路の侵食・崩壊

－路面侵食－

佐藤弘和・津田高明・岩崎健太・蓮井 聡・対馬俊之

林内道路の路面で起きること

林業に従事する方は、林内道路*を走行して伐採や保育が行われる現場に向かいます。一般の方には身近な道路とはいえない林内道路ですが、『北海道林業統計』によると、林道（自動車道）の総延長は24,000kmを超えており、道内の高速道路、一般国道、道道、市町村道の合計延長の約1/4に相当します（佐藤 2018）。森林作業道などの延長がこれに加わると、さらに長くなります。※「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。

北海道林業統計によるところの「林地とその周辺200m以内の国道・道道・市町村道といった公道」や一部の林道を除いて、林内道路は未舗装の道（以後、「未舗装道」といいます）がほとんどです。未舗装道としては、砂利が敷かれた道や、もともとある地盤（地山）が露出した道などがあります。車のスピードを出さなければ、砂利道や地山の道でも安全に走行できます。しかし、舗装道路とは異なり、未舗装道では路面に深い溝が刻まれていることがあります（写真-1）。林業関係者にとっては、このような路面の溝に遭遇する機会があるかと思えます。溝といってもサイズは様々で、最低地上高が高い車種でもなければ車両走行が困難な場合や、そもそも車が通ることができないほど酷い場合があります。こうした溝の形成は、「路面侵食（road surface erosion）」によるものです。砂利道や土が露出した路面では、降水や融雪水が浸透しにくいために路面上を流れることがよく起こります。路面上の水の流れは砂利やその下の土を削り溝が深くなると、車両走行に支障をきたします。さらに、路面では細かい粒径の土砂を含む濁水が発生しやすく、これが川に流れ込む（写真-2）と水生生物の生息に悪影響を及ぼすことがあります。路面侵食や濁水発生を抑制するためには、各種排水施設の設置が重要です。

これまで道内各所において路面侵食箇所を探索し、その状態について調査してきました。林内道路（一部公道での事例を含みます）の路面侵食状況を多数見ているうちに、路面侵食を発生源によってタイプ分けできることに気づきました。また、融雪期の路面流水の観察から、これまでの濁水発生に対する考え方を見直す現象が確認されました。さらに、いろいろな路面侵食対策とその問題点も捉えることができました。



写真-1 路面にできた溝



写真-2 手前と奥の路面から流れ込む濁水

た。ここでは、路面における侵食の実態や濁水の発生状況、路面排水施設とそこで起こっていた問題点について写真を使ってご紹介します。

林内道路の路面について解説します

本論に入る前に、林内道路の構造と排水施設について簡単に説明します。林内道路において車両が走行する面が「路面」です。路面部位はいくつかの層からなります。舗装道路では、地表から「表層」「基層」（ともにアスファルト）、その下部に「路盤（上層が粒度調整砕石、下層が砕いただけの砕石）」「路床」「路体」と続きます。林内道路では盛土や、地山の地表面に砂利を敷くことが多いので、砂利の層が路盤となり、盛土箇所や地山が路体となるような構造です（図-1）。砂利がなくて路体そのものが直接路面となることもあります。道路の横断形状では、路面が①完全に平坦な場合のほかに、②路面の中央部が高く、両側の路肩それぞれに向かって傾斜している形状、③谷側の路面が尾根側の路面より高い形状、④尾根側の路面が谷側の路面より高い形状があります。②の形状をもつ林道について、屋根型林道と名付けている例があります。③については片勾配、④については外勾配としていることがあります。林道に関して書かれた海外の文献をみると、②は Crown、③は Inslope、④が Outslope と書かれていました。Crown は、土木分野で「路頂」という意味があてられています。

切土のり面側には、道路に沿って排水用の側溝が設けられることがあります（盛土のり面側にも設置される場合があります）。簡単な構造の側溝には、地山を直接溝状に掘った素掘り側溝があります。林道などでは、コンクリート製U字溝や丸太を側壁にあてがった側溝などがあります。また、排水施設には、道路を横切るように設置した横断排水があります。横断排水には、グレーチング付きU字溝のような開渠タイプがあります。沢や川が道路を横切る場合には、路面下に暗渠（カルバート）が設けられることがあります。暗渠の形状から、断面が長方形のボックスカルバート、アーチ形状のアーチカルバートがあります。また、ヒューム管（土管）や、側面が波状のコルゲート管などがあります。なお、ダムの排水などで使われている用語ですが、横断排水用の溝（管）で水が入る部分を「呑口」（のみぐち、のみくち）、横断排水溝から水が出る部分を「吐口」（はきぐち、はけぐち）といいます。暗渠では路面の下に水を流していますが、道の上を川が流れるようにしたものは「洗い越し」です。このほか、路面上を流れる水を分断するための排水版やゴム製の止水用構造物などが路面に設置されることがあります。

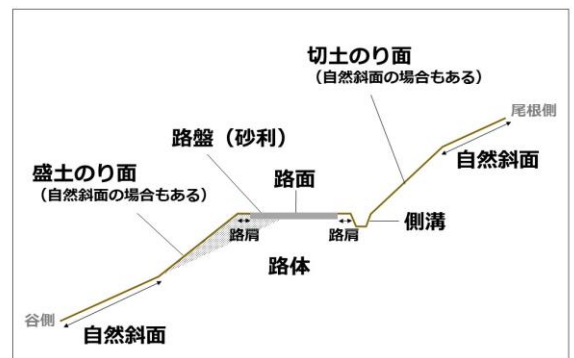


図-1 林内道路の構造



写真-3 深く掘れた路面侵食

路面侵食のタイプ

これまで多くの路面侵食箇所を調査してきましたが、代表的なタイプは写真-1 のような溝状の形態でした。この溝状の侵食について、地形学で使われている「ガリ（雨裂）侵食」（gully erosion, 単にガリとも）ということにします。ちなみに、面的に覆う水による侵食は「面状侵食」（sheet erosion）です。林内道路の侵食・崩壊調

査では、路面に発生したガリの長さを測るため、ガリの始まる箇所まで道路を登っていきました。著者らが調査した中で一番長いガリは1.3 km ありました。また、写真-3 では箱尺を傾けて置けていますが、深さは1.2 m を超えていました。

これまで現地において、何十箇所もの路面侵食に遭遇しました。ここでは、その成因から路面侵食を3タイプに分けました。最も多いタイプが、わだちを含む路面の凹凸に起因した地表流の集中によって生じるもので、①「路面集水型」と名付けました(写真-4)。乗用車やトラックのタイヤや高性能林業機械等の履帯(クローラまたは無限軌道といいます。キャタピラーは登録商標です)が通った後は、踏圧や路面の削剥により断面が凹状の「わだち」ができます。このわだちに水が集まると、ガリが生じます。水の集まり具合では、わだちを超えて路面上を縦横無尽に削り取っていることもあります。次のタイプは側溝から溢れた水(写真-9 参照)によるもので、②「側溝^{いっすい}溢水型」と名付けました。側溝が切土のり面の崩壊土砂でふさがれ、側溝を流れてきた水が行き場を失い路面に溢れて流れるものです。最後のタイプは、林内道路が小さな谷を横切る箇所から沢や川の水が路面に流れ込んで侵食されるもので、③「溪流流入型」と名付けました(写真-5)。



写真-4 わだちを流れる水

左側のわだちでは、地山が露出しています



写真-5 川水による路面の削れ

左側の谷から川水が流れ込んでいます

路面を流れる濁水

路面では土が締め固められているため、降雨や融雪水が浸透せずに路面上を流れます。水文学では地表流といわれていますが、ほかに「表流水」「路面流水」との表記があります。路面流水は、路面の土を削るために濁ることがあります。写真-6 は、植栽候補地に向かう手前の入り口付近を撮影したものです。現



写真-6 路面を流れる濁水

強い雨のあとに時間を置かずに発生しました



写真-7 ガリ内を流れる濁水

場に入ってから急な雨が降り、急いで写真の場所まで戻ってきました。時間にして、降雨から1時間も経っていませんでしたが、すでに濁水が発生していました。写真-6では、濁水がわだちから溢れ布状に広がって流れています。写真-7は、ガリ内を流れる濁水の様子を撮影したものです。ガリはある意味、水路のような形状です。路面勾配が急になれば、流水は勢いにつき、ガリの拡大を助長します。ちなみに、これらの写真とは異なる路線で、砂利路面を流れる濁水（粒子の直径が0.1mm以下）の濃度を測定したところ、最大で2,000mg/Lを記録しました。筆者が調べた範囲では、森林流域内を流れる渓流水の濁水濃度は無降雨時で数mg/Lオーダー、降雨時でも数百mg/Lオーダーに留まることが多いことから、路面を流れる濁水内の土砂濃度は高く、細粒の土が侵食され運ばれています。

何事にも例外があるもので、いつでも路面で濁水が発生するかというと、そうではありません。写真-8は、降雨後に濁水が路面を流れていた様子を9月に撮影したもので、確かに路面流水は濁っています。濁水発生のもとを辿ってみると、路面を流れていた濁水が一旦側溝に流入しましたが、途中で側溝から溢れて再び路面を流れていました（写真-9）。次に、同じ現場を4月に訪れました（写真-10）。手前の部分では雪が融けて地面が見えていますが、写真-8のような濁った路面流水は見当たりません。路面に近づいてみると、流れている水は透明でした（写真-11）。5月に再度同じ現場を確認したときには多少路面上を流れる水は白濁していましたが、敷設された砂利が目視で確認できる程度の濁りでした。理由を考えるのであれば、降雨時は雨滴侵食に加えて短時間で発生する路面流水の量が多く、路面を削る力や土砂を運ぶ力が強いことが考えられます。融雪では雨滴侵食のような現象は起こらず、長い期間を掛けてゆっくり雪が解けるために融雪水による侵食力・運搬力が降雨によるものに比べて弱いのかもかもしれません。すべての



写真-8 降雨時に生じた濁水



写真-9 側溝から流れる出る濁水



写真-10 融雪時の様子

場所は、写真-8と同じ道路



写真-11 融雪時に路面を流れる水

林内道路で同じことが起きているとはいませんが、融雪期における透明な路面流水は他の道路でもみられました。

路面での砂利の動き

路面を流れる水には、砂利をも動かす力があります(写真-12)。さらに、砂利のみならず、地山まで削るような力もあります(写真-13)。路面侵食を生じさせる主たる原因となる水としては、雨水、融雪水、道路に流れ込んだ川水があります。また、乗用車のタイヤやクローラ式林業機械の履帯による土の移動(わだちの形成など)も無視できません。そこで、路面上の砂利や土の動き(無くなり方)について、簡単に可視化する方法を試みました。林道の左右のわだちと、わだちとわだちの間(わだち間とします)に50cm四方の方形木枠を置いて、枠内を赤色の着色スプレーで塗りました(写真-14)。それから8日後に着色した区画の変化(色の着き具合)を確認しました。わだち間ではそれほど色の変化はありませんが、左右のわだちでは色がない部分が現れ、全体的に薄くなっています(写真-15)。7月8~16日における期間降水量は、合計73mmでした(札幌管区气象台のデータ)。この期間にどれだけの車両が走行したかは不明ですが、わだちを流れる水と車両走行による土の移動があったことが窺えます。色の残り方を精査すると、わだちでは路面にはまっている相対的にサイズが大きい砂利に付着した色が残っていました。ほとんど色の変化がなかったわだち間では、タイヤの走行がみられないことやわだちより幾分高い位置にあるため、路面流水は流れていなかったと判断しました。わだち間にある砂利が移動するとすれば、雨滴侵食によるものが想定されますが、色の残り具合からその影響は小さいといえます。



写真-12 砂利層だけが移動

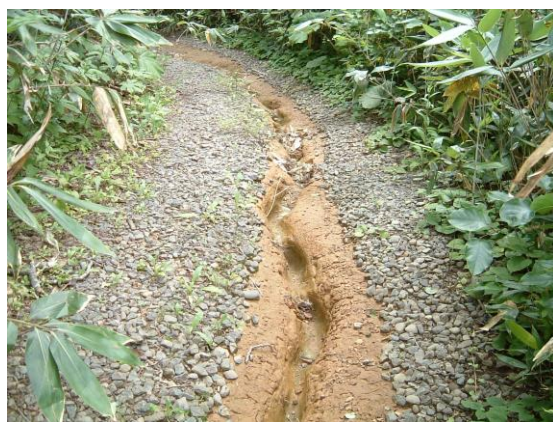


写真-13 砂利の移動と路床の削れ



写真-14 2002年7月8日の路面の様子



写真-15 2002年7月16日の路面の様子

路面侵食の対処方法

路面流水による侵食を回避する方法として、分散排水があります。わだちやガリに水が集まる量が増えれば、侵食する力や土を動かす力が増します。分散排水は、路面流水を途中で遮断し、路面外に排水します。路面流水を防ぐ設備として、路面排水版（写真-16）やゴム製の止水板（写真-17）、横断排水としての開渠（写真-18）などがあります。これらの方法は、路面集水型の路面侵食に対して有効です。路面勾配が急になるほど、排水設備の設置間隔を狭くすることが重要です。その反面、設置コストが掛かることが難点です。

流水を制御する施設は、作設後すぐに排水効果や止水効果を発揮します。しかし、水によって削られ運搬された土や砂利は、流れが緩くなったり止められたりすることで堆積に転じます。そして、排水施設は埋没することになります。林道ではコンクリート製のしっかりした横断排水が設置されることがありますが、そのまま放置しているといずれは埋没してしまいます（写真-19）。ある林道では、横断排水31箇所のうち埋没していなかったのは、わずか3箇所でした。この林道では舗装された区間があったにもかかわらず、舗装区間内の横断排水溝が埋没してい



写真-16 路面排水版（板、盤ではないです）



写真-17 ゴム製の止水施設



写真-18 コンクリート製横断排水溝



写真-19 埋没した横断排水明渠



写真-20 侵食される側溝

ました。水の流れをコントロールする上で重要な側溝も、場合によっては侵食されることがあります（写真-20）。横断排水溝の呑口に土砂が堆積すると、そこから溢れた水により側溝溢水型の路面侵食が起こることになります。側溝に堆積した土砂の排土や侵食防止は重要な対策なのですが、意外と見過ごされがちなので、注意が必要です。

溪流流入型の路面侵食対策では、カルバートや洗い越しなどの方法があります（路体消失を扱った話題のときに取り上げますので、詳細は割愛します）。

林内道路では砂利ではなく舗装されている区間も見受けられますが、砂利ではなく木質チップを敷設した例（写真-21）もあります。木質チップを路面に敷設した区間において濁水中の土砂濃度を調べたところ、砂利敷設区間の濃度より低下していました。木質チップの路面敷設による濁水濃度の抑制が期待されます。一方で、路面で生じる車両の走行によって表面に凹凸ができるなど乱れることが多く、ある路線では風によってチップが飛散したような痕跡がありました。また、木質チップが路面流水で流れ出す可能性もあります。木質チップを路面敷設する場合には、できるだけ路面にあるチップの移動を制御することが必要です。

林内道路を走行していると、路面一面に草本などが繁茂していることがあります（写真-22）。雨滴侵食の防止や濁水の発生を抑制する植生のマルチと捉えれば、低コストの路面侵食抑制方法といえるかもしれませんが、しかし、草本が繁茂した道路の走行は危険をはらんでいます。例えば、草本に埋もれた礫などに気づかず車底をこすったり、道路脇が崩れている状況が見えなかったりすることもあります。実際に体験しましたが、草本で路面状況がわからなかったため車から降りて歩いてみたところ、道幅が狭くなっていて、そのまま走行すると脱輪したかもしれない道路がありました。改めて、草本が繁茂した路面を走行する際には、気を付けた方がよいです（当たり前のことといわれるかもしれませんが、結構無理して繁茂した道路を歩いて現場に向かう人たちを見ている）。

路面侵食の対策と問題点などについて見てきましたが、森の中の道路を維持するためには、まず水の流れを制御することが必要です。路面流水が制御できれば、路面で発生する濁水発生の抑制にも繋がります。路面流水の制御や維持管理に関する実態把握と技術開発に関する研究は、欠かせないものといえます。



写真-21 木質チップを敷設した道路



写真-22 植生が繁茂した道路

引用文献

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（2018）知っていて損のない「林内路網の基礎知識」－北海道林業統計から読み解く道内の林道－. 光珠内季報 189：5-9.

（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）

光珠内季報 NO. 201

発行年月 令和4年1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>
