

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。

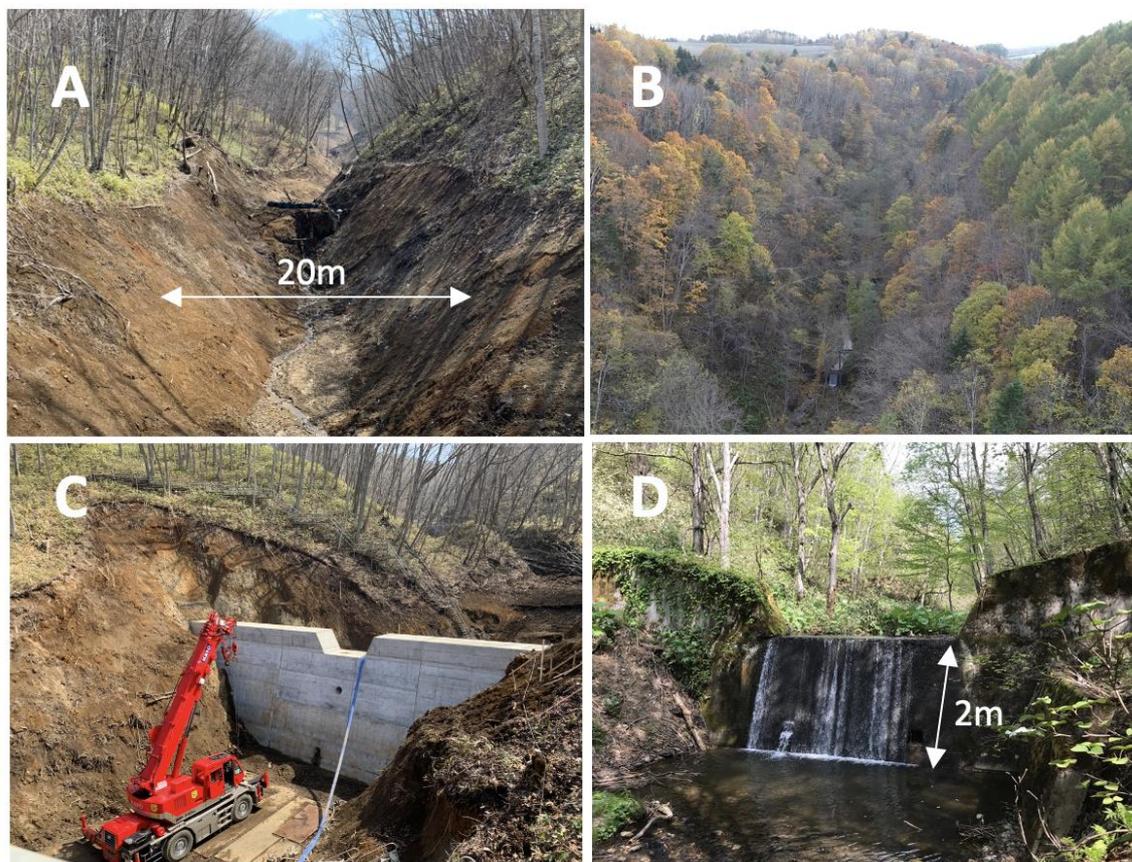


写真-1 治山ダム設置対象の谷の地形 (A) と周辺の森林植生 (B) の様子。Aにおいて実際に新規に建設された治山ダム (C) と50年以上経過した治山ダム (D; 昭和38年施工完了)

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・植生を高精度で把握できます。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、

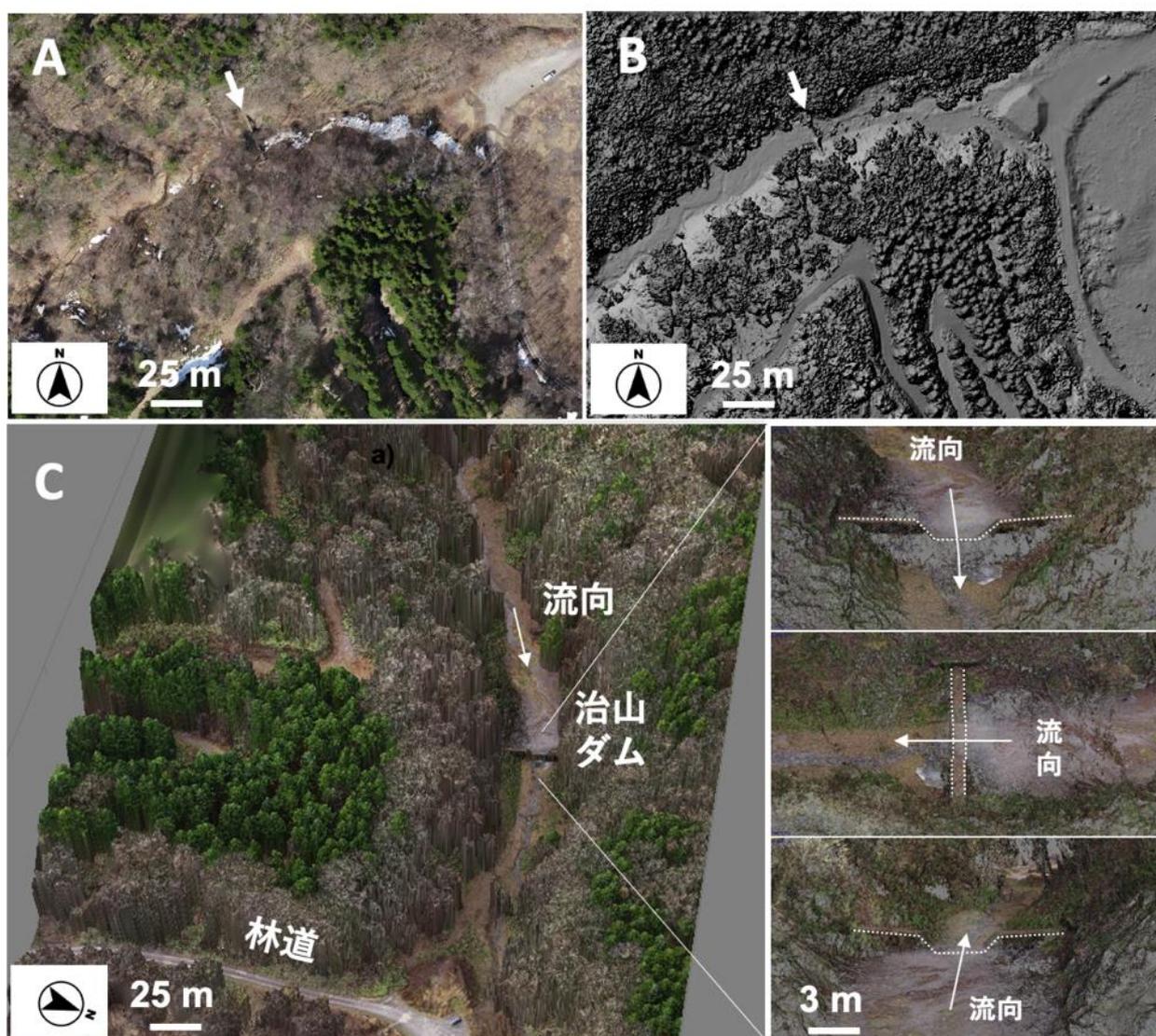


図-1 後処理補正したRTK-UAV空撮画像から作成したオルソ画像(A; 矢印は治山ダム)、陰影起伏図(B; 矢印は治山ダム)、3次元モデル(C)。

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

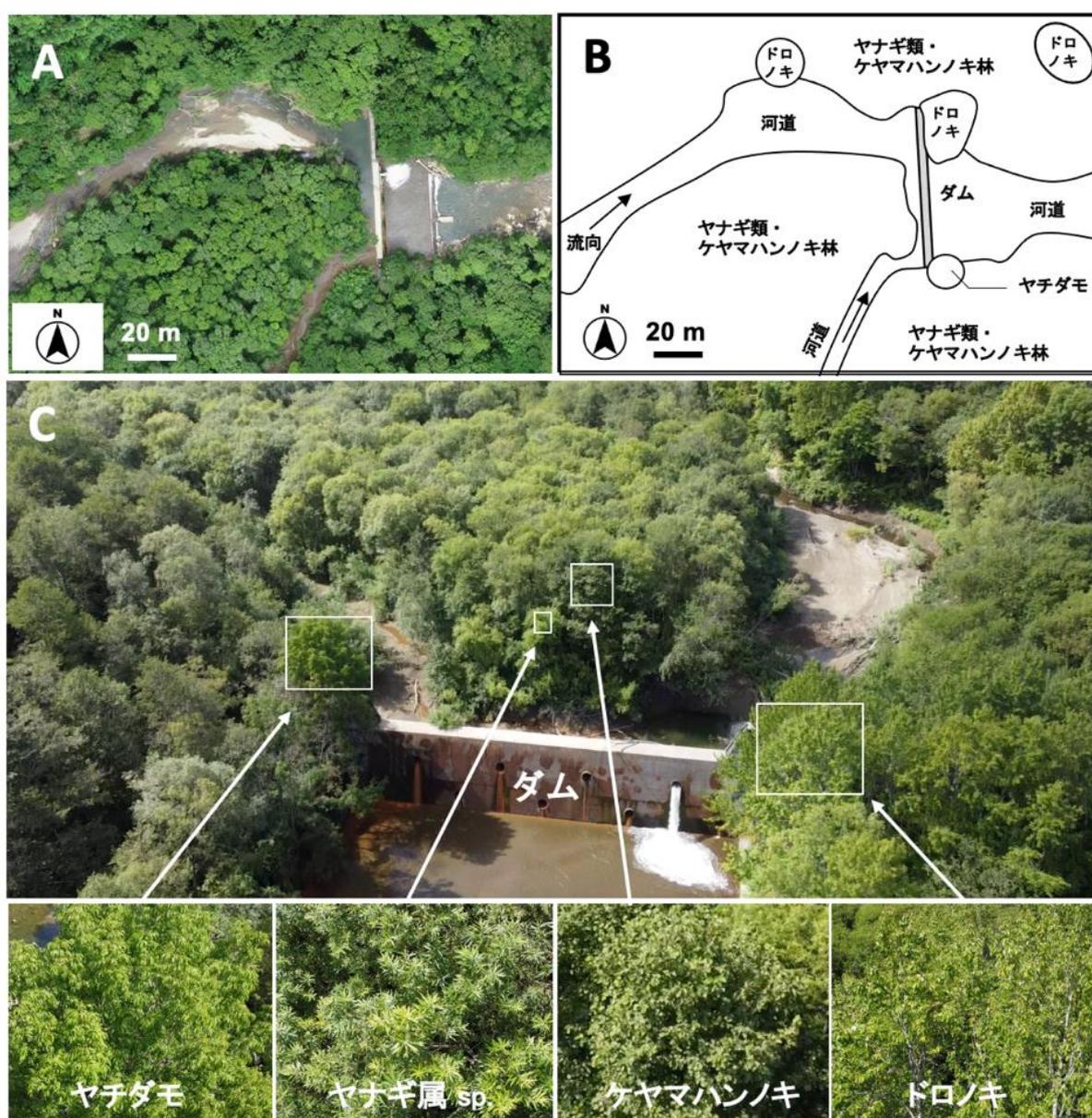


図-2 RTK-UAV 空撮画像から作成したオルソ画像 (A), RTK-UAV 空撮画像と小型軽量 UAV で作成した植生図 (B), 小型軽量 UAV で撮影した動画から行った樹種判定の様子 (C)。

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年以上経過した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・興水健一・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