

忠別ダム流域における植生・地形特性に着目した積雪分布解析及び積雪調査への応用

国立研究開発法人土木研究所
国立研究開発法人土木研究所
国立研究開発法人土木研究所

寒地土木研究所 水環境保全チーム
研究評価・国際室
寒地土木研究所 水環境保全チーム

○山田 崇
水垣 滋
横山 洋

航空レーザー測量技術は広く普及し、地表面の高さを計測可能にしている。その成果を積雪分布計測に活用し、空間不均一性に着目した研究成果が公表されている。主な内容としては、森林域と非森林域では積雪深の空間不均一性に有意な差が認められ、植生の影響を確認するとともに、地形特性との明確な相互関係を確認した。本論文ではこの成果と積雪調査への応用として、積雪調査地点選定・間引きの検討についての紹介を行う。

キーワード：航空レーザー測量、積雪深分布、植生・地形特性

1. はじめに

積雪寒冷地において積雪は重要な水資源となっており、春から夏にかけて長期間安定した水を人間社会に供給している¹⁾。これは日本、世界的にもアメリカ西部の半乾燥地域²⁾やアジア、ヨーロッパや南米等を含めて10億人以上が氷河を含めて積雪に水資源を依存³⁾している。そのため、山岳域における積雪水量（積雪を水に換算した量）の把握は極めて重要である。積雪水量の把握には流域踏査による流域内の積雪水量の把握が行われているが、その結果は調査のコースや時期に左右される⁴⁾。また、寒地土木研究所では積雪寒冷地の多目的ダムにて行われる積雪水量の推定・検証が適切に行われることを目的に、2012年に「ダムにおける積雪包蔵水量推定ガイドライン（案）」⁵⁾（以後、ガイドラインとする）を作成・公開している（図-1）。現在のガイドラインでは流域の大部分が森林域のダムを対象にしており、主に高標高域が属する非森林域を対象外としている。

航空レーザー測量による計測技術が普及し広範囲の地表面計測が可能となっている。航空レーザー測量であれば広範囲の積雪分布を計測できるメリットがあり、積雪分布計測を行った事例が特に北米や欧州で多数報告されている。北米ではTennant et. al.⁶⁾は、計測範囲18 km²~294 km²（平均標高は1843 mから3043 m）のデータを用いて統計解析を行っている。欧州においてもGrünewald et. al.⁷⁾が、ヨーロッパ及びカナダでの1.5 km²~28 km²での計測データ（高山域に着目しており植生域は除外）を利用して重回帰分析を行っている。これらの研究では積雪分布の不均一性に影響を及ぼす因子として、標高、傾斜角及び斜面方位等が挙げられており、植生（森林の有無）の影響も

指摘している。さらにその影響の程度は調査範囲によって異なったとされている。すなわち、積雪分布の推定においては空間不均一性の把握が重要であり、その影響因子は地域特性の影響を受けていると考えられる。日本国内においても、西原・谷瀬⁸⁾が大雪山系旭岳で航空レーザー測量を行い、植生特性、標高及び地上開度と平均積雪深（地形特性による一定区間での平均値）との関係性を見出している。ただし、西原・谷瀬⁸⁾では植生・地形特性に基づいた変動係数等による空間不均一性の詳細な解析はされていない。

本論文では西原・谷瀬⁸⁾による急峻な地形及び森林の無い高標高帯を有する大雪山系での観測データを利用して、積雪深と植生・地形特性との関係性の基礎解析を行った成果である、Yamada et. al.⁹⁾の論文の内容について紹介するとともに、従来のガイドラインでは対象外の非森

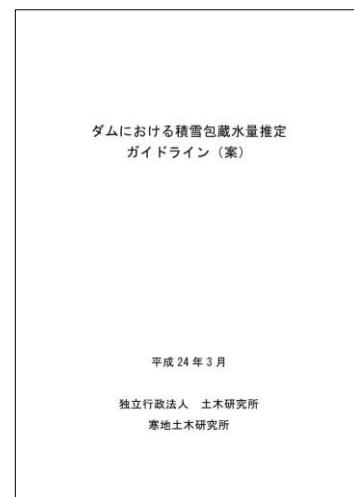


図-1 ダムにおける積雪包蔵水量推定

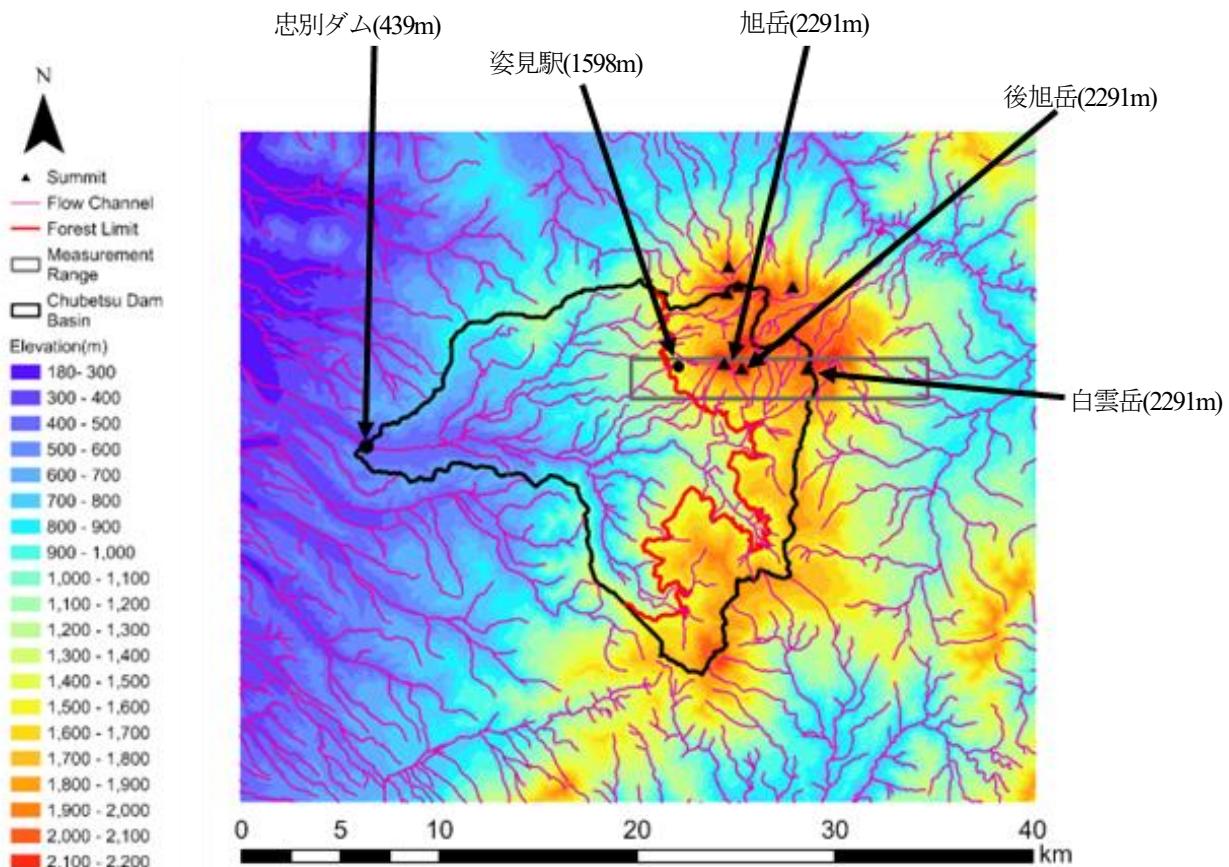


図-2 忠別ダム流域周辺の標高分布
Yamada et al.⁹より改変

林域での知見を追加したガイドラインの改訂方針についても紹介する。

2. 解析手法

(1) 対象領域

対象流域は石狩川水系忠別川の忠別ダム流域である。忠別ダムは北海道の中央部（北緯：43.63度、東經：142.63度、標高439 m）に位置し流域面積は238.9 km²であり、標高は概ね366 mから2290 mである（図-2）。流域内の最高標高は旭岳山頂（標高2290 m）であり、その東側0.83 kmに後旭岳（標高2216m）がある。忠別ダムの森林限界は概ね1450 m付近に存在し（西原・谷瀬⁸）、森林率は60 %である。忠別ダムにおける年間降水量、年間平均気温及び年最大積雪深（2010年～2019年の平均値）はそれぞれ、5.8 °C、1180 mm、84 cmである。

森林の有無による積雪分布特性の違いを明らかにすること、航空レーザ測量の範囲にコスト的な制限があったことから、忠別ダム流域の上流域（標高1065 m～2291m）20 km²を解析対象領域とした。図-3に対象領域の植生・地形特性及び積雪深を示す。積雪深は西原・谷瀬⁸によ

る航空レーザ測量による結果である。また、森林率は22 %である。

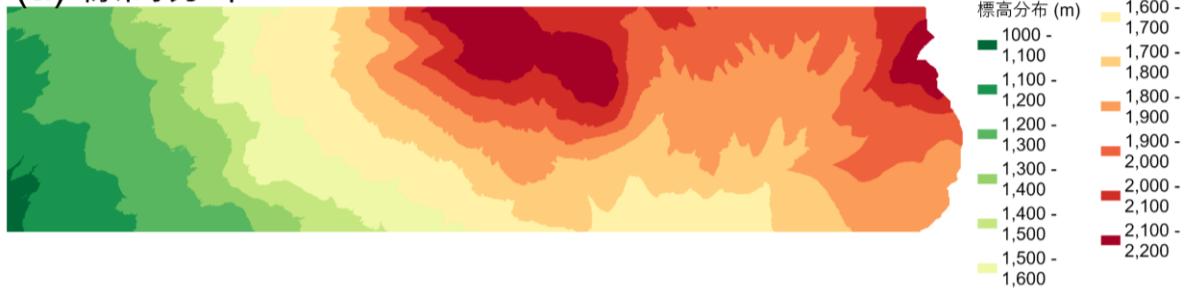
(2) 航空レーザー測量

西原・谷瀬⁸による2017年の計測結果を対象とし、忠別ダム流域内の約20 km²の範囲を解析対象とした。計測範囲内の標高は1065 mから2290 mである。航空レーザ測量の実施時期は無雪期が2009年の9/12、9/12、9/25、10/10であり（国土交通省により計測）、積雪期が2017年3月13日に行われている。無雪期及び積雪期の計測データから、地表面及び積雪表面のDEM(Digital Elevation Model)を作成した。積雪深は積雪期のDEMから無雪期のDEMを引いた値とした。DEMの水平解像度は5 mである。計測機器の標高計測精度は±15 cmであり、積雪期の航空レーザ測量実施日における姿見駅（標高1598 m）での積雪深は300 cmである。

(3) 植生・地形特性毎の解析

前述の通り積雪は植生・地形特性による空間不均一性が大きい事が知られている。そのため、Yamada et al.⁹でも植生・地形特性毎に区分をして変動係数（平均値を

(a) 標高分布



(b) 植生分布



(c) 積雪深分布



(d) 地上開度分布



図-3 対象領域の植生・地形特性及び積雪深分布

Yamada et.al.⁹より改変

従来のガイドラインでは対象外の非森林域での知見を追加したガイドラインの標準偏差で除算した値)の計算を行い空間不均一性の大きい領域の評価を行っている。以降、空間不均一性は変動係数で定義する。

本論文で紹介する地形特性は標高及び地上開度とする。これはガイドラインの改訂に大きく関わる地形特性的ためである。地上開度は横山ら¹⁰⁾により提案された指標であり、着目する標本地点から一定距離Lの範囲内で見える空の広さを表している。地上開度が90度未満であれば着目地点は谷であり、90度を上回れば尾根となる。

航空レーザ測量での5 mグリッドデータではデータ数が膨大なためそれぞれ25 m、1度ピッチで区分してその区間内における値を解析対象とした。例えば、標高であれば1000 m-1025 mの区間内での標高及び積雪深が解析対象となる。

森林域と非森林域を区別するために図-3bの植生図を用いた。森林内の定義は図-3bの植生図における常緑針葉樹林、針広混交林及び落葉広葉樹林の範囲とした。

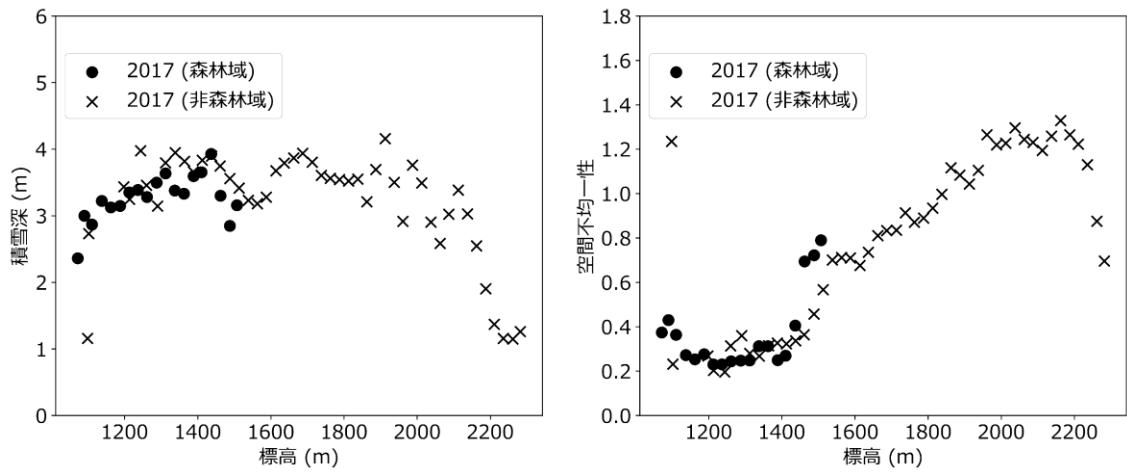


図-4 標高毎の積雪深及び空間不均一性 (左: 積雪深, 右: 空間不均一性)

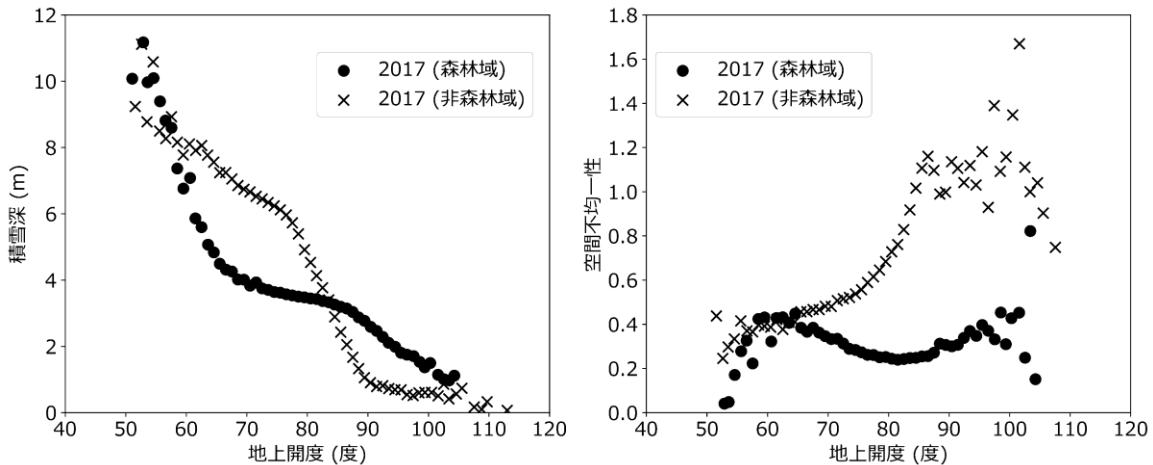


図-5 地上開度毎の積雪深及び空間不均一性 (左: 積雪深, 右: 空間不均一性)

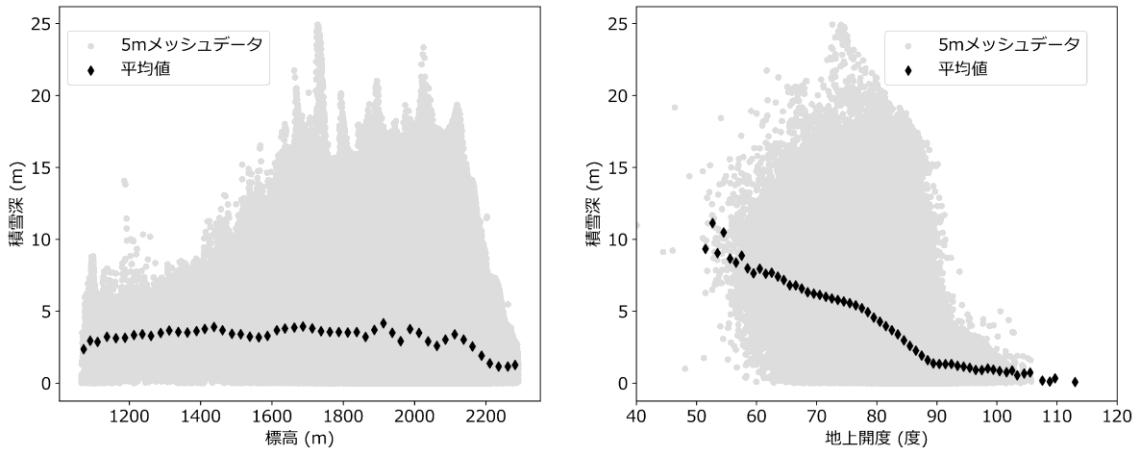


図-6 航空レーザー測量による5mメッシュデータ及び平均値 (左: 標高、右: 地上開度)

いずれの図も Yamada et. al.⁹⁾より改変

3. 結果

本論文では前述の通りガイドライン改訂に大きく関わる標高及び地上開度について、森林域・非森林域に分け

て結果を紹介する。他の地形特性や詳細な結果に関しては Yamada et. al.⁹⁾を参照されたい。主要な結果について図-4から図-6に示す。

(1) 森林域

森林域においては、標高と積雪深との線形関係が微増

ではあるが確認できた。また、地上開度においても積雪深とは変曲点が存在するものの、線形関係が確認できた。

空間不均一性に着目すると森林域にはおいては、後述する非森林域と比べていずれの地形特性でも小さい結果となっている。ただし、森林限界である1450 m付近では空間不均一性が大きい傾向にある。

(2) 非森林域

非森林域においては、標高と積雪深の間には関係性は確認できず、地上開度との間には森林域と同様に変曲点があるものの線形関係が確認できた。

空間不均一性は森林域と比較して大きな傾向にあり、特に積雪深が小さい領域で顕著となっている。

4. 考察とガイドライン改訂の方針

前述の通り現在のガイドラインでは、非森林域での積雪水量推定を対象外としている。また、多大な労力を有する積雪調査の負担・コスト軽減のための調査地点選定にも触れられていない。本章では、Yamada et. al.⁹⁾に基づき非森林域での知見を追加するとともに、負担・コスト軽減調査に向けた調査地点選定についての内容を紹介する。後述するこれらの知見に基づきガイドラインを改訂する予定である。

(1) 森林域での積雪調査

前述の通り森林域では地形特性によらず、森林限界付近を除き積雪深の空間不均一性が小さい。これは、森林域では森林の影響で風が弱まることや雪崩の影響が緩和されることが要因と考えられる。また、空間不均一性の変曲点が60度付近及び90度付近に存在している。これは60度以上の領域は極めて急峻な谷地形であり、森林の影響以上に積雪が谷地形に溜まり非森林域と同様の積雪深になったと考えられる。90度以上の領域は平地から尾根地形であり、90度が谷地形から尾根地形への変曲点であることから雪の堆積に影響を及ぼし積雪深においても変曲点になったと考えられる。森林域でも地形特性の影響が確認できるが、森林の効果により地形特性の影響は大幅に緩和されている。

そのため、この結果をベースにして積雪調査地点の間引きが可能になると考えられる。具体的には、積雪調査地点が標高100 m毎に設定されている場合においては、標高間隔を200 mに設定できると考えられる。森林域では空間不均一性が小さいため、標高の影響が大きく相対的に調査地点の局所性が小さいためである。ただし、実際に間引きを行う際には過去の調査結果に基づき、その影響を十分に評価した上で行うことが望ましい。航空レーザー測量データのオリジナルデータ(5 mメッシュ)では積雪深のバラツキがあることから、調査コース・地点の新規設定にも十分な注意が必要である。

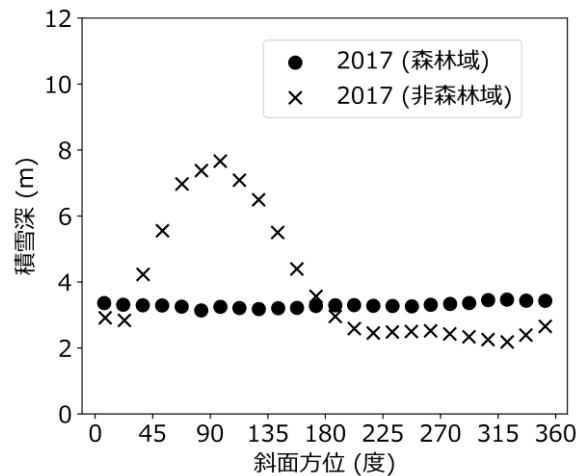


図-7 斜面方位別の積雪深

Yamada et.al.⁹⁾より改変

(2) 非森林域での積雪調査

非森林域においては、地上開度と積雪深との間に線形関係があり空間不均一性が森林域に比べて大きい結果であった。これは、非森林域では森林の影響がなく風が吹き抜けやすく、風による積雪の再分配、重力により積雪が移動するためと考えられる。ただし、この情報は積雪深に対するものであり密度を考慮した積雪水量ではないことに留意が必要である。

積雪調査地点の設定においては、積雪深と地上開度の線形関係を利用して地上開度毎に積雪調査地点を設定することが選択肢になる。さらに、森林域に比べて空間不均一性も大きく調査地点の選定の重要度は大きい。調査地点の設定は可能な限り空間不均一性の小さい地上開度75度程度以下の地点を含み、90度以下の領域で設定することが望ましいと考えられる。これは地上開度が75度付近から90度の領域にかけて、空間不均一性が急激に増大し、空間代表性が低下するためである。90度以上の領域は積雪深自体も0に近く、流域中に占める面積率にも影響されるが流域全体の積雪水量推定に影響しにくいことも考えられる。また、既に地上開度が90度以上の地点を複数選定している場合には、その利用を妨げるものではないが、森林域と同様に過去の調査データから影響を評価した上で、間引きや廃止が可能であると考えられる。また、非森林域においては斜面方位による積雪深の違いも確認されている(図-7)。そのため、調査コース・地点の新規設定に際しては、GISソフト等により流域の地形特性を十分に検証することが必要と考えられる。具体的には、斜面方位別の調査地点の設定を設定し斜面方位を含む重回帰分析を行うことが想定される。

前述の地上開度が小さい地点は谷地形であり、立ち入りが困難で調査地点の設定が不可能であることが想定される。その場合にはUAV等による遠隔調査が有効である。UAVによる積雪深計測の事例は複数あり、例え

山田ら¹¹⁾や福井ら¹²⁾の事例がある。ただし、現時点ではUAV計測により得られる情報は基本的に積雪深であり、密度を考慮した積雪水量ではないことに留意が必要である。

5.まとめ

本論文ではYamada et. al.⁹⁾による積雪深分布と植生・地形特性との関係性の解析の成果について紹介するとともに、ガイドラインの改訂方針について紹介した。主な内容として、森林域では空間不均一性が小さく既往観測成果に注意しつつ調査地点の間引きが可能になり得ること、非森林域では地上開度を基準して調査地点を設定することが選択肢となり、調査地点によっては間引きが可能であることを見た。

謝辞：本論文は西原・谷瀬による計測成果を利用したYamada et. al.⁹⁾の成果を紹介したものである。論文の作成にあたり、国土交通省より無雪期の航空レーザー測量データ及び忠別ダムの水文・気象観測データ、ワカサリゾート株式会社より姿見駅の積雪観測データの提供を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 小野延雄, 石川信敬, 新井正, 若土正暁, 青田昌秋：雪氷水文現象（基礎雪氷学講座VI）, 前野紀一・福田正巳編, p17, 古今書院, 1994.
- 2) Roger C. Bales, Noah P. Molotch, Thomas H. Painter, Michael D. Dettinger, Robert Rice, Jeff Dozier: Mountain hydrology of the western United States, *Water Resources Research*, Volume42, Issue8, 2006.
- 3) Barnett, T., Adam, J. & Lettenmaier, D. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature* 438, 303-309, 2005.
- 4) 藤田睦博、中津川誠、八田茂実：融雪水と水資源、水文・水資源学会誌、Vol. 78、No. 2, pp. 451-459, 1994.
- 5) 寒地土木研究所：ダムにおける積雪包蔵水量推定ガイドライン（案）、2012.
- 6) Tennant, C. J., Harpold, A. A., Lohse, K. A., Godsey, S. E., Crosby, B. T., Larsen, L. G., Brooks, P. D., Van Kirk, R. W. and Glenn, N. F.: Regional sensitivities of seasonal snowpack to elevation, aspect, and vegetation cover in western North America, *Water Resources Research*, Volume53, Issue8, pp.6908-6926, 2017.
- 7) Grunewald, T., Stötter, J., Pomeroy, J. W., Dadic, R., Moreno Baños, I., Marturià, J., Sross, M., Hopkinson, C., Burlando, P. and Lehning, M.: Statistical modeling of the snow depth distribution in open alpine terrain, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, pp.3005-3021, 2013.
- 8) 西原照雅、谷瀬敦：航空レーザー測量を用いた風衝斜面及び風背斜面における積雪分布の分析、土木学会論文集 B1（水工学）、Vol. 74、No. 4, p. I_883-I_888, 2018.
- 9) Takashi Yamada, Shigeru Mizugaki, Hiroshi Yokoyama, Takaharu Kakinuma, Tomohito J. Yamada, Analysis of snow depth distribution focusing on vegetation and topographic features in JAPAN, *Hydrological Research Letters*, 19(2), 87-93, 2025.
- 10) 横山隆三、白沢道生、菊池祐：開度による地形特徴の表示、写真測量とリモートセンシング、第38巻4号、26-34, 1999.
- 11) 山田嵩、西原照雅、村上泰啓：地上レーザー測量及びUAV写真測量による積雪分布の計測、第64回（令和2年度）北海道開発技術研究発表会、pp.280-285、2021.
- 12) 福井幸太郎、飯田肇、川瀬宏明：UAV-LiDAR測量による立山黒部アルペンルート沿いの積雪深分布観測、雪氷研究大会（2024・長岡）、p222、2024.