地上レーザスキャナを用いた高山帯における積雪分布の連続計測

Repeated Measurements on Snow Depth Distribution in the Alpine Region by Terrestrial Laser Scans

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 〇正 員 西原 照雅 (Terumasa Nishihara) 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 正 員 谷瀬 敦 (Atsushi Tanise)

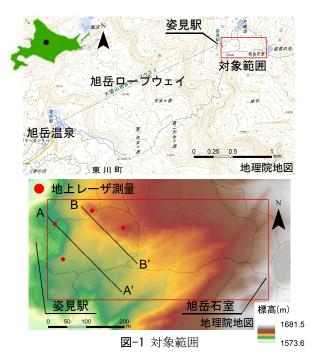
1. はじめに

積雪寒冷地においては融雪水をダムに貯留して水需要をまかなっており、水資源を融雪水に依存している.一方、融雪水は融雪出水や土砂災害の要因となる.このため、山間部における積雪の量及びその分布を正確に把握することは、水資源管理及び防災の面で重要である.

過去に国内各地の山間部において盛んに行われた積雪調査の結果から(例えば Yamada¹⁾) , 樹林帯においては標高と積雪深(積雪相当水量)との間に線形の関係があることが報告されており、この関係は、現在でもダム管理の現場において、流域の積雪量を推定する際に用いられている.

近年, 航空レーザ測量の普及により, 広範囲における 地表面を, 高解像度で高精度に計測できるようになった. このため、航空レーザ測量により、冬季に立ち入りが困 難な山間部における積雪分布を計測し、地形や植生との 関係を分析した例が報告されている. 国内では, 西原ら 2)が,北海道の大雪山系旭岳周辺において,航空レーザ 測量により積雪分布を計測し、樹林帯においては標高と 積雪深との間に線形の関係があること, 高山帯において は地表面の地上開度 3)と積雪深との間に線形の関係があ ることを報告している. しかし, 航空レーザ測量はコス トが高いことから、定期的に積雪分布を計測することは 困難であり, 西原らの計測も積雪のピーク期に行われた のみである. 高山帯においては、気象と局所地形との相 互作用により積雪分布が複雑となり、 さらに、風による 積雪の再堆積が起こるが、このような積雪の過程を捉え るには至っていない.

最近,地上レーザ測量や UAV 写真測量の普及が進ん だ. これらの技術による地表面の計測では、広範囲の計 測は困難であるものの、コストが低く、機動性が高いこ とから、高頻度の観測が可能である. UAV 写真測量に よる積雪の計測については、内山ら 4が雪崩災害調査に 適用した例や、小花和ら5が山地斜面を対象に計測した 例がある. これらによると, UAV 写真測量により, 高 解像度で高精度の積雪分布のデータが高頻度で得られる といったメリットが示されている 4,5, しかし, 主とし て UAV の運航限界に起因し、航続時間が短いことから 観測範囲が狭いこと,強風時や降雪等により視界が悪い 時に計測が難しいことといった課題や, 積雪表面からの 太陽光の反射により写真のコントラストが低くなること を防止する必要があることが示されている 4,5, 一方, 地上レーザ測量は機材が高価であり、観測の際に機器を 設置した位置から死角になる範囲の計測ができないとい ったデメリットがあるものの, 多少の強風時や降雪時に



は計測が可能であることから, 山間部の高山帯のような, 積雪期に晴天日が少ない範囲において定期的に積雪分布 を計測することを可能にすると考えられる. 例えば, Fey et al.のはオーストリアの山岳地帯において, 2014 年 ~2018年にかけて23回の地上レーザ測量により積雪分 布を計測している.この中で、積雪調査により計測した 積雪深を用いて, 地上レーザ測量から求めた積雪深の精 度が高いことが検証されているの。また、このようなデ ータセットは,積雪分布の時間的な変化の特徴から風に よる再堆雪プロセスを解明すること、積雪を観測してい る地点の代表性を検証することや, 積雪分布を計算する モデルのキャリブレーション等に活用できることを示し ている 6. 他にも、雪崩発生の前兆を検知することや雪 崩対策の効果を検証するために地上レーザ測量により積 雪分布を複数回計測した例 7や、山間部において融雪期 に積雪が減少していく様子を地上レーザ測量及び UAV 写真測量を同時に行って追跡した例 8もある.

本研究では、北海道の旭岳ロープウェイ姿見駅周辺の 高山帯において、積雪の過程を捉えることを目的に、複 数回の地上レーザ測量により積雪分布を計測した.本稿 では、得られた積雪分布を分析した結果を報告する.

2. 対象範囲

対象範囲を図-1 に示す. 地上レーザ測量に必要な機材の運搬や天候が急変した際の安全確保のため, 赤枠で示した旭岳ロープウェイ姿見駅周辺とした. 図-1 下に



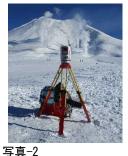


写真-1 複合気象センサー

地上レーザスキャナ

示した対象範囲周辺の標高分布によると, 姿見駅周辺に 比較的平坦な範囲があり、ここから北側及び東側に向か って標高が高くなる.対象範囲における主たる植生は, 樹高が 1~2m 程度のハイマツ, 高山植物であり, 一部 に裸地や露岩している箇所がある。 積雪期には、これら の植生等は積雪下に完全に埋没した状態になる.

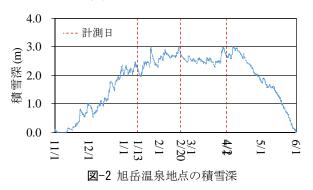
対象範囲周辺における気象データは, 姿見駅の屋根の 上に複合気象センサー (VAISALA 社製 WXT536) を設 置して取得した(写真-1). 取得した気象要素は、気温、 湿度, 風向風速, 気圧, 降水量である. また, 対象範囲 から若干離れているが、旭岳温泉において国土交通省が 積雪深を観測している.

3. 方法

地上レーザ測量による積雪の計測は、2019年1月~3 月にかけて、概ね1ヶ月間隔で3回実施するよう計画し た. 対象範囲は冬期に見通しの良い晴天日がほとんどな いため, 実際に計測ができた日は, 2019年1月13日, 2019年2月20日~21日(以降2月20日と表記), 2019 年4月2日であった.強風や降雪により積雪分布が変化 する可能性があるため、計測は1日で実施することが望 ましいが、2月20日は断続的に弱い降雪と霧により視界 が悪くなったため、計測に2日間を要した、計測に使用 した地上レーザスキャナは、RIEGL 社製の VZ-1000 で ある (写真-2). 最長測定距離が 1,400m のモードで水 平方向(360°)及び鉛直方向(100°)を 0.03°ピッチで 計測した. 1回の計測に要する時間は約24分である. 雪 面上に三脚を設置する際, 脚を深く雪中に入れて固定し, 計測中に機器の姿勢が変化しないようにすること、気温 と機器の温度差により、レーザ照射面が曇らないように することに留意した. また、機器を設置した位置から死 角になる範囲は計測できないため、図-1に示した4箇所 から計測を行い、データの欠損が少なくなるようにした. 計測により得られた点群データは、日ごとに1つのデ ータに合体した.合体した点群データの位置合わせには, 旭岳ロープウェイ姿見駅及び旭岳石室の屋根及び壁面を 使用した(写真-3 左). 具体的には, 2018 年 9 月 4 日 に、屋根や壁面上の位置を特定しやすい点(例えば三角 屋根の頂点)の座標を予め計測しておき、この中から点 群が取得できた点を標定点として使用し、点群データを 平面直角座標系 12 系に変換した. なお, 屋根上の積雪 や壁面への積雪の付着により、予め座標を計測した点が 冬期に視認できない可能性があるため(写真-3右),



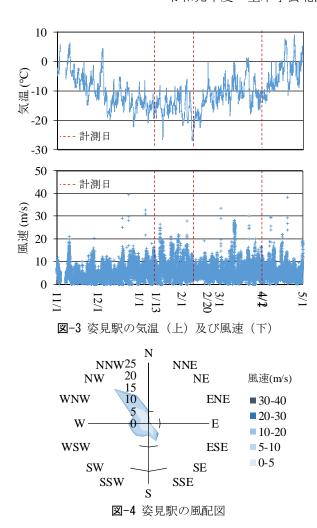
写真-3 位置合わせのために計測した点の例 (実際に位置合わせに使用した点ではない)



9月の計測の際は、できるだけ多くの点の座標を取得す るよう留意した. 位置合わせ後の点群データに対し, ロ ープウェイの施設等の地物取り除くフィルタリングを行 い、積雪表面から反射したデータを抽出した。2月の計 測時には弱い降雪があったが、降雪から反射したデータ はここで取り除かれている. 次に、積雪表面から反射し た点群データから TINを作成した. 地上レーザ測量によ り得られる点群データの特徴として、機器を設置した位 置から離れるにしたがい点密度が小さくなる傾向がある ことや、死角による欠損があることが挙げられる。この ため、点を取得できなかった範囲が内挿されることを防 ぐため、作成された TIN のうち、最大辺長が 2m を超え る TIN を除外してから積雪表面の DEM (Digital Elevation Model)を作成した. 積雪深は積雪表面の DEM と地表面 の DEM の標高差とする、国土交通省から提供を受けた 地表面の DEM の水平解像度が 1m であったため,これ に合わせて、積雪表面の DEM の水平解像度は 1m とし た. なお、積雪表面の DEM と地表面の DEM の標高差 がマイナスとなったメッシュはデータから除外した.

4. 結果と考察

図-2 に旭岳温泉地点の積雪深を示す. 図より, 2018 年 11 月~12 月の間に積雪深が徐々に増加し、地上レー ザ測量を行った期間に当たる2019年1月~4月の間は多 少の増減はあるものの、積雪深が 2~3m の間で推移し ている. 積雪深のピークは 3.01m であった. 同地点にお ける過去 10 年間の積雪深のピークは、最大で 3.57m, 最小で 2.80m, 平均で 3.22m であり、2019 年は平均より も若干積雪が少ない年であったと考えられる. 図-3 に 姿見駅において観測した 10 分平均の気温及び風速を示 す. 気温を見ると、同地点においては11月~4月に間に 気温が 0℃を上回ることがほとんどなく, 地上レーザ測 量を行った日の気温は-10~-20℃であった. 使用した地



上レーザスキャナのレーザの波長は 1550nm であり、融雪等により水分が多い積雪から反射しにくい特性があることが指摘されているのが、この影響はほとんど無かったと考えられる. 風速を見ると、頻繁に強風が観測されている. 気温にもよるが、積雪粒子は風速 4~5m/s 以上になると転動や跳躍を開始し、風速 8~9m/s 以上になると浮遊する粒子が現れることが報告されておりの、対象範囲においては、積雪の再堆積が頻繁に発生していると推察される. 図-4 に姿見駅の風配図を示す. 期間は2018年11月1日から3回目の計測の前日(2019年4月1日)である. 図より、対象範囲付近の主風向は北西であり、積雪分布は北西風に強い影響を受けた特徴を示すと示唆される.

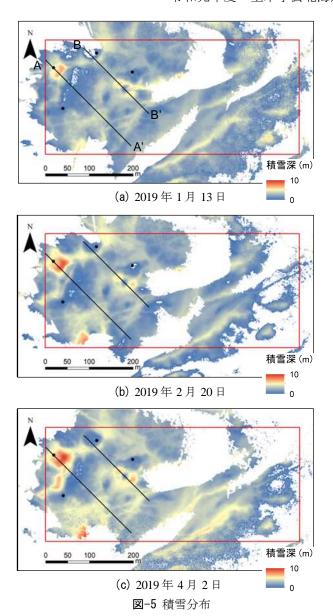
図-5に3回の計測により得られた積雪分布を示す.対象範囲をできるだけカバーできるよう,4箇所から計測したが,計測地点から離れた範囲(計測範囲の東側)に欠損が多く見られる.これは,観測地点から死角になる範囲を計測できないことが要因である.また,積雪により死角となる範囲が毎回異なるため,欠損となった範囲は毎回異なる.積雪分布を概観すると,全体的に1月から4月に向かって積雪深が増加していく傾向が見られるが,池のような窪地の周辺,展望台のような上に凸な地形の周辺,谷に沿った範囲に局所的に積雪深が大きい箇所が見られる.一方で,平坦な地形の範囲では,積雪深がほとんど変化していない.図-6に3回の計測により得

られた積雪分布の変化を示す. 5m を超える変化を示し た地点があるが、わずかであったため、全体の傾向を見 やすいよう-3m~3m のレンジで図示した. また, 図-7 に積雪深の変化が大きい範囲を通り、主風向(北西)と 平行な測線における地表面及び積雪表面標高(積雪の断 面図)を示す. 図-6 より,対象範囲の北西側に,積雪 が多く堆積している箇所があるが、ここには、北西から の主風向に概ね正対する向きに傾斜の大きい斜面があり, この手前に池がある.ここは、図-7上図の始点から0~ 100m 付近が対応するが、斜面に吹き付ける雪が風上か ら風下に向かって堆積し、徐々に池が埋まっていく様子 が観測されている. 今冬は、池を完全に埋めるには至ら なかったが、多雪年には池が完全に埋まり、平滑化され た積雪表面が観測される可能性がある。また、図-6の1 月 13 日~2 月 20 日の変化は箇所により増減のばらつき があるのに対し、2月20日~4月2日の変化はほとんど の箇所が積雪の増加を示している. 図-2 及び図-3 よる と,1月13日~2月20日は頻繁に降雪及び強風が観測 されており、この期間は局所的な積雪の堆積や積雪の再 堆積が起こりやすい気象条件であったことが推察され, このことにより積雪の増減にばらつきが見られたと考え られる.一方で、図-7 を見ると、深い谷以外の地表面 の凹凸上には、1月13日の時点で、平滑化された積雪表 面が形成されており、これに続く2月20日、4月2日に かけて積雪表面の形状はほとんど変化していない. この ことは、1月13日の時点で、以降の積雪の増減が起こり にくい平滑な積雪表面が出現していたことを示唆してお り、実際に図-6(a)の対象範囲内における積雪深の増減 は、79%が±1m以内であった. また、2月20日~4月2 日は、強風は観測されているものの(図-3)、降雪はほ とんど無く、計測を実施した4月2日の数日前にまとま った降雪が観測され(図-2),これより計測日までの間 に、強風があまり観測されていない(図-3).4月2日 に計測された積雪分布は、局所的な降雪の変動や積雪の 再堆積が起こりにくい気象条件下で、直前に降雪があっ たことが反映されたものと推察される. また, まとまっ た降雪の数日前ではあるが、3月下旬に気温が 0°Cを超 えた日があり(図-3),積雪表面の雪質が風による再堆 積が起こりにくいざらめ雪に変化していた可能性も示唆 される.

5. まとめ

本研究では、北海道の旭岳ロープウェイ姿見駅周辺の 高山帯において、複数回の地上レーザ測量により積雪深 を計測し、積雪の堆積過程を分析した。今回の計測では、 深い谷を除き、積雪期の前半に概ね平坦な積雪表面が形 成され、以降は積雪表面の形状に大きな変化が見られな かった。このような特徴は、ピーク期における積雪分布 の推定に活用できる可能性があると考える。

謝辞:地上レーザ測量を行うに当たり、ワカサリゾート㈱旭岳事業部(旭岳ロープウェイ)に協力して頂いた. また、1mメッシュのDEMは国土交通省から提供を受けた.ここに記して謝意を表す.



参考文献

- Yamada, T.: Studies on accumulation-ablation processes and distribution of snow in mountain regions, Hokkaido, Contributions from the Institute of Low Temperature Science, A31, 1-33, 1983.
- 2) 西原照雅, 谷瀬敦: 航空レーザ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, I_883-I_888, 2018.
- 3) 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.
- 4) 内山庄一郎,鈴木比奈子,上石勲,中村和樹:雪崩災害調査への UAV-SfM の適用: 2017 年那須町雪崩災害の事例,自然災害科学 J.JSNDS, 37,特別号,119-135,2018.
- 5) 小花和宏之,河島克久,松元高峰,伊豫部勉,大前宏和:小型 UAV を用いた積雪分布の三次元計測,雪氷,78巻,5号,317-328,2016.
- 6) Fey, C., Schattan, P., Helfricht, K. and Schöber, J.: A compilation of Multitemporal TLS Snow Depth

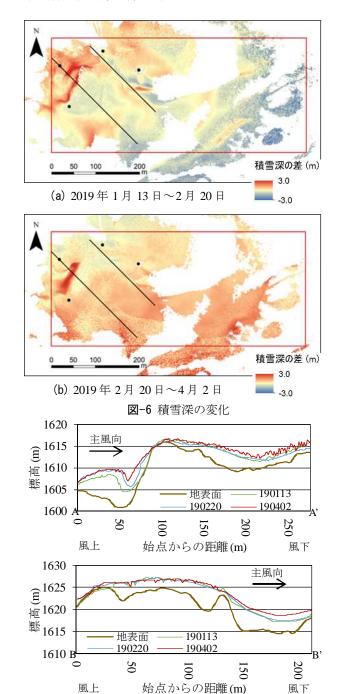


図-7 積雪深の変化(上: 測線 1, 下: 測線 2)

Distribution Maps at the Weisssee Snow Research Site (Kaunertal, Austria), Water Resources Research, 55, 5154–5164. https://doi.org/10.1029/2019WR024788, 2019.

- 7) Deems, J. S., Gadomski, P. J., Vellone, D., Evanczyk, R., LeWinter, A. L., Birkeland, K. W. and Finnegan, D. C.: Mapping starting zone snow depth with a ground-based lidar to assist avalanche control and forecasting, Cold Regions Science and Technology, Vol.120, 197-204, https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.09.002, 2015.
- Eker, R.; Bühler, Y.; Schlögl, S.; Stoffel, A. and Aydın, A.: Monitoring of Snow Cover Ablation Using Very High Spatial Resolution Remote Sensing Datasets, Remote Sens., 11, 699, doi: 10.3390/rs11060699, 2019.
- 9) 亀田貴雄, 高橋修平: 雪氷学, 古今書院, 2017.