

2 カ年の航空レーザ測量データを用いた

風衝斜面と風背斜面の積雪ピーク期における積雪分布の分析

An analysis between snow depth distributions on windward slope and that on leeward slope
at peaks of two snow accumulation seasons using airborne laser scanning

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 ○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夏にかけての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、融雪が始まる直前の積雪ピーク期までに山間部に蓄積された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。

過去には北海道各地の山間部において積雪調査が盛んに行われ、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ために積雪調査が行われているが、同調査は冬季に直接入山する必要があることから、調査可能な地点が限られ、雪崩等の危険と多大な労力を伴う。

近年、航空レーザ測量技術の普及により、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。これにより、冬季に立ち入りが困難な山間部における積雪分布を広範囲に計測できるようになったことから、航空レーザ測量により積雪分布を計測し、地形や植生との関係を分析した例が報告されている。国内の例を挙げると、西原ら²⁾は、北海道大雪山系旭岳周辺において、流域界である尾根を挟み風衝斜面及び風背斜面に跨る範囲の積雪分布を航空レーザ測量により計測し、積雪分布と地形及び植生との関係を分析した。結果、樹林帯における標高と積雪深との線形の関係及び高山帯における地表面の地上開度³⁾と積雪深との線形の関係は、風衝斜面及び風背斜面の両方において確認されたことを報告している。

最近では、航空レーザ測量により積雪深を計測したデータの蓄積が進み、積雪期における積雪分布の時間的な変化や、複数年の積雪のピーク期における積雪分布を分析した例がある^{4),5),6)}。Schirmer et. al.⁴⁾は、積雪期に数回発生する荒天時における卓越風向が、積雪ピーク期の積雪分布に強く影響し、積雪ピーク期には毎年類似した積雪分布のパターンが見られることを示した。国内においては、西原ら^{5),6)}は、北海道大雪山系旭岳周辺の風衝斜面の同一範囲において、3 カ年の積雪ピーク期に航空レーザ測量により計測された積雪分布を比較し、積雪分布の類似度が高いことを示している。

日本列島は、中央部に日本海側と太平洋側を分ける脊梁山脈が位置し、積雪期の荒天時における卓越風向に対し風衝斜面である日本海側と風背斜面である太平洋側において、積雪分布の特徴が異なると考えられる。しかし、両斜面を含む範囲の積雪深を広範囲にわたって複数回計

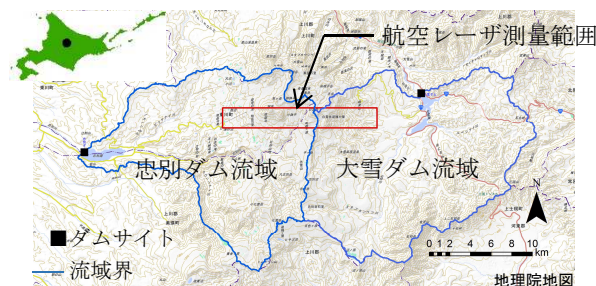


図-1 航空レーザ測量範囲

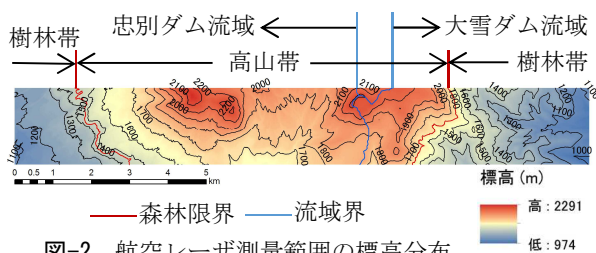


図-2 航空レーザ測量範囲の標高分布

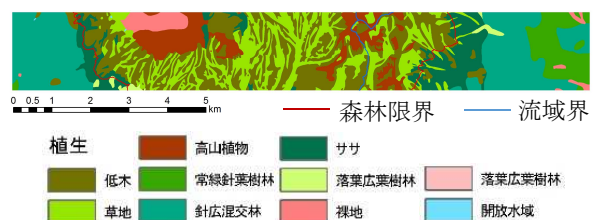


図-3 航空レーザ測量範囲の植生分布

測し、その特徴を分析した例はない。本研究は、北海道大雪山系旭岳周辺において、流域界である尾根を跨ぐ範囲を対象に、2 カ年のピーク期に、航空レーザ測量により計測された積雪分布を分析し、その特徴を明らかにすることを目的とする。

2. 航空レーザ測量

図-1 に航空レーザ測量を実施した範囲を示す。測量範囲は、北海道大雪山系に位置し、石狩川上流域に位置する忠別ダム及び大雪ダムの流域に含まれる南北に2km、東西に15km、面積30km²の範囲である。図-2 に測量範囲の標高分布を示す。忠別ダム側の標高帯は概ね1,100m～2,300m、大雪ダム側は概ね1,000m～2,300mであり、旭岳山頂を含む。図-3 に測量範囲の植生分布を示す。これは、環境省の自然環境保全基礎調査を用い、植生を10分類したものである。忠別ダム側の森林限界

は標高 1,450m であり、大雪ダム側の森林限界は標高 1,700m である。忠別ダム側は測量範囲の 23%が樹林帯、78%が高山帯に位置し、大雪ダム側は 70%が樹林帯、30 %が高山帯に位置している。測量範囲においては、積雪期の荒天時における卓越風向は北西から西である⁷⁾。このため、流域スケールにおいては、荒天時の卓越風向に対して、忠別ダムと大雪ダムの流域界である尾根が概ね直角に交わり、忠別ダム側が風衝斜面、大雪ダム側が風背斜面となる。以降、流域スケールにおいて区分した風衝斜面を「忠別ダム」、風背斜面を「大雪ダム」と表記する。

航空レーザ測量は、無雪期である 2008 年 9 月 12 日～10 月 16 日、積雪ピーク期である 2017 年 3 月 13 日及び 2018 年 3 月 21 日に行った。無雪期における測量データから地表面の DEM (Digital Elevation Model)を、積雪ピーク期における測量データから積雪表面の DEM をそれぞれ作成した。DEM の水平解像度は 5m とした。積雪深は積雪ピーク期における DEM から無雪期における DEM を引いた値とし、この値がマイナスとなったメッシュはデータから除外した。なお、傾斜が 55°以上の斜面には積雪が堆積しない⁸⁾ことが報告されていることから、該当するメッシュにおける積雪深は 0 とした。加えて、人工構造物が多い旭岳温泉地区及び旭岳ロープウェイの施設周辺をデータから除外した。なお、測量範囲に含まれる旭岳温泉に国土交通省が設置している積雪深計によると、航空レーザ測量日における積雪深は、2017 年が 3.18m、2018 年が 3.03m であった。

3. 積雪深の分析方法

積雪分布の分析は、分布の特徴が異なる範囲に区分して行う。樹林帯及び高山帯における積雪分布は特徴が異なる^{1), 2), 5), 9)}ことから、測量範囲を風衝斜面（忠別ダム）及び風背斜面（大雪ダム）に区分し、さらに、それぞれの斜面を樹林帯及び高山帯に区分する。水平解像度 5m の積雪深データはサンプル数が多く、そのままでは積雪分布の特徴を捉えることが困難である。このため、地形パラメタを幅を持った区間（例えば標高 25m 区間）に区分し、この区間に含まれるメッシュの積雪深の平均値と地形パラメタの中央値との関係を分析する²⁾。また、西原ら²⁾は、対象範囲においては、風衝斜面及び風背斜面ともに、樹林帯においては標高の増加とともに積雪深が線形に増加すること、高山帯においては地表面の地上開度の増加とともに積雪深が線形に減少することを示している。ここで地上開度とは、横山ら³⁾が開発した指標であり、着目する地点が周辺に比べて地上に突き出ている程度及び地下に食い込んでいる程度を数量化したものである。着目地点が谷の場合に地上開度 $\phi < 90^\circ$ 、尾根の場合に $\phi > 90^\circ$ となる。測量範囲の高山帯における地表面の地上開度の出現割合を図-4 に示す。出現割合は、忠別ダム及び大雪ダムのそれぞれ高山帯の面積に対する、それぞれの範囲において地上開度 1°区間に含まれたメッシュの面積の割合である。忠別ダム流域においては、地上開度が 45°～110°、大雪ダムにおいては地上開度が 59°～105°に分布している。両ダム流域ともに 80°～90°

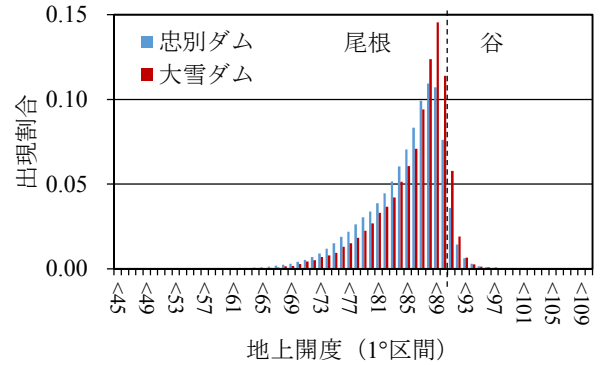


図-4 地表面の地上開度の出現割合

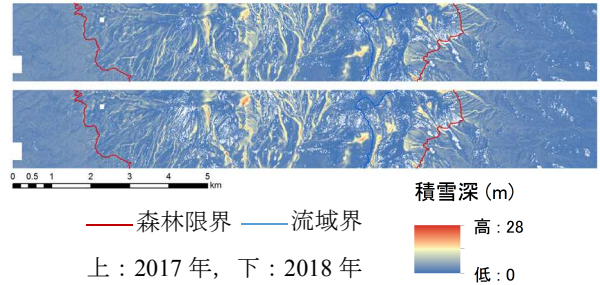


図-5 航空レーザ測量データから求めた積雪分布

の出現頻度が高く、忠別ダム流域においては 74.1%、大雪ダム流域においては 77.2%がこの区間に含まれる。本研究では、西原ら²⁾の報告を踏まえ、標高及び地上開度と積雪深との関係を中心に分析を行うこととする。積雪分布の類似度に関しては、同一メッシュにおける 2 年間の積雪深の関係に対して、原点を通る（切片=0）の直線を当てはめる回帰分析を行った結果から評価する。

また、高山帯を対象に、地上開度の出現割合が大きい範囲を対象とした直線回帰式から、積雪深を推定する手法を検討し、推定した積雪深の精度を評価する。

4. 結果と考察

4.1. 積雪分布の特徴

図-5 に航空レーザ測量データから求めた積雪深の分布を示す。図の白抜きとなっている範囲は、積雪期における DEM から無雪期における DEM を引いた際に値がマイナスとなったメッシュ、旭岳温泉地区及び旭岳ロープウェイの施設周辺の分析から除外したメッシュである。対象範囲（30km²）に対する除外したメッシュの割合は、2017 年が 5.7%、2018 年が 7.6%であった。

図より、樹林帯における積雪分布の特徴と高山帯における積雪分布の特徴が異なることが明瞭である。樹林帯においては、2017 年及び 2018 年、忠別ダム流域及び大雪ダム流域いずれの場合も、1m～6m の積雪深が全体の 95%以上の出現割合を占め、積雪深のばらつきが小さい。一方で、高山帯においては、積雪深が 0 の箇所や積雪深が 10m を超える箇所が見られ、積雪深のばらつきが大きい。2017 年及び 2018 年の積雪分布を概観すると、同様のパターンが見られており、積雪が堆積しにくい箇所及び積雪が堆積しやすい箇所は年によらず同じである可能性がある。

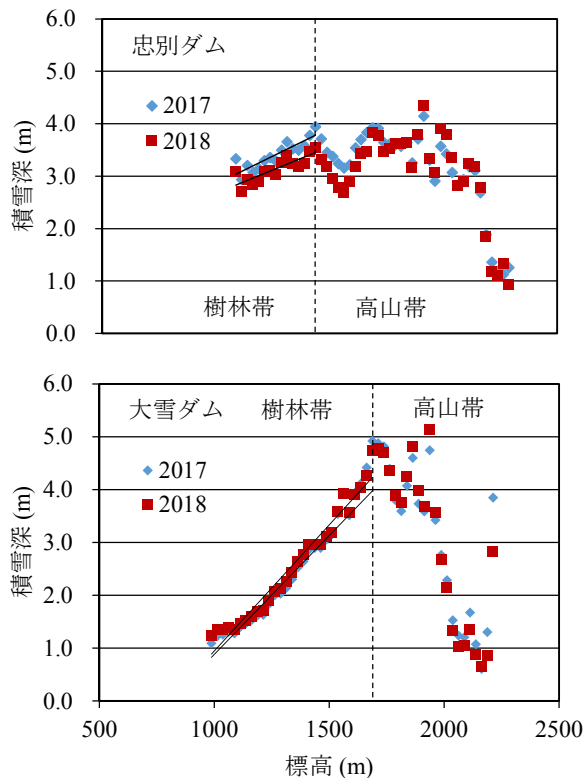


図-6 標高と積雪深の関係

4.2. 標高と積雪深の関係

図-6 に標高と積雪深との関係を示す。図示した積雪深は標高 25m の区間に含まれるメッシュの積雪深の平均値である。図には、樹林帯における標高と積雪深との間の回帰直線を併せて示している。図を見ると、樹林帯においては、風衝斜面及び風背斜面ともに、標高の増加とともに積雪深が線形に増加している。回帰式の決定係数は、忠別ダム側の 2017 年が 0.77、2018 年が 0.72、大雪ダム側は 2017 年及び 2018 年ともに 0.96 であった。一方、森林限界以上の高山帯においては、標高と積雪深との間に線形の関係は見られず、標高の増加に対して積雪深が不規則に増減している。両年の航空レーザ測量日に旭岳温泉において観測された積雪深より、両年の積雪深は概ね同等であると考えられるが、図-6 に示した標高に対する両年の積雪深は概ね同等であり、積雪深の増減の傾向も概ね一致している。

4.3. 高山帯における地上開度と積雪深の関係

森林限界以上の高山帯における地表面の地上開度と積雪深との関係を図-7 に示す。図示した積雪深は地上開度 1°の区間に含まれるメッシュの積雪深の平均値である。サンプル数が少ない場合、積雪深が極端に大きい値や小さい値となることがあるため、概ね 100 サンプルが得られた区間を図示している。図の黒線は、図示した全区間を対象とした回帰直線である。図を見ると、風衝斜面及び風背斜面ともに、地上開度が増加する、つまり地形が谷から尾根に変化するに伴い、積雪深が線形に減少している。回帰式の決定係数は、忠別ダム側は 2017 年が 0.95、2018 年が 0.92、大雪ダム側は 2017 年が 0.88、

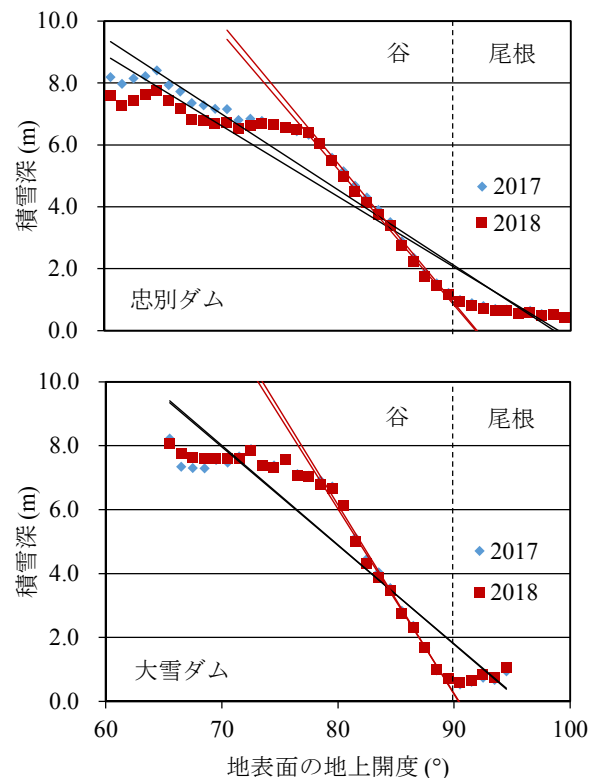


図-7 高山帯における地上開度と積雪深の関係

表-1 積雪分布の類似度

決定係数	忠別ダム	大雪ダム
樹林帯	0.84	0.96
高山帯	0.91	0.92

傾き	忠別ダム	大雪ダム
樹林帯	0.93	1.11
高山帯	0.98	0.99

2018 年が 0.89 であった。また、地上開度が 90°を超えると、積雪深がほぼ 0 になっている。航空レーザ測量により積雪深を計測した高山帯においては、計測時に植生が積雪下に完全に埋没しており、荒天時に強風が吹き抜けることから、積雪は谷に堆積しやすく、尾根に堆積しにくいと考えられる。標高の場合と同様に、地上開度に対する両年の積雪深は概ね同等であり、積雪深の増減の傾向も概ね一致している。

4.4. 積雪分布の類似度

同一メッシュにおける 2 カ年の積雪深について、2017 年の積雪深を x 軸、2018 年の積雪深を y 軸とし、切片 $=0$ の直線を当てはめる回帰分析を行った結果（決定係数 R^2 及び直線の傾き）を表-1 に示す。決定係数（上表）は 0.84～0.96 となっており、風衝斜面及び風背斜面ともに、両年の積雪分布のパターンの類似度が高いことを示している。また、両年の積雪深が概ね同等であるため、直線式の傾き（下図）は 0.84～1.11 となっており、風衝斜面及び風背斜面ともに、1 に近い値となっている。

表-2 高山帯における積雪深の推定結果

積雪の総量の相対誤差		2017	2018
忠別ダム	黒線	0.0379	0.0193
	赤線	0.0087	0.0101
大雪ダム	黒線	0.0877	0.0934
	赤線	-0.0244	-0.0267

RMSE		2017	2018
忠別ダム	黒線	2.93	3.20
	赤線	2.85	3.11
大雪ダム	黒線	3.25	3.43
	赤線	3.11	3.31

4.5. 高山帯における積雪深を推定する手法の検討

図-7 の黒で示した線形回帰式を見ると、決定係数は大きいものの、地上開度 78°付近及び 90°付近において残差が大きくなっている。これら残差が大きい範囲には、地上開度の出現割合が大きい範囲（図-4）が含まれる。西原ら²⁾は、傾斜が大きく、極端に大きい積雪が堆積している箇所が影響している可能性を示唆しているが、本研究では、地上開度の出現割合が大きい範囲を対象とした回帰式から、簡易に積雪深を推定する手法を検討し、推定した積雪深の精度を評価する。

図-7 の赤で示した直線は、出現割合が大きい地上開度が 80°~90°を対象に作成した回帰直線である。決定係数は、0.98~0.99 である。赤色の直線をそのまま積雪深の推定に適用すると、地上開度が小さい範囲における積雪深が過大に計算されてしまうが、図を見ると、概ね地上開度 80°以下の範囲においては、積雪深がほぼ一定になっている。図より、赤色の直線は地上開度 78°程度までの適合度が高いと考えられることから、地上開度 78°未満の範囲については、積雪深を一律 7m とした。また、地上開度が 90°を超える範囲に赤色の直線を適用すると、積雪深がマイナスとなる場合があるが、積雪深がマイナスとなったメッシュの積雪深は 0 とする。

表-2 に航空レーザ測量データから計算した値を真値とし、忠別ダム及び大雪ダムのそれぞれの高山帯全域について、積雪の総量の相対誤差（上表）及びメッシュの積雪深の RMSE（下表）を算出した結果を示す。積雪の総量を算出する場合、積雪深を合算する際に正の誤差と負の誤差が相殺されるため、黒線の式を用いた場合も総量を精度良く推定しているが（相対誤差 1.9%~9.3%）、赤線の式を用いた場合は、相対誤差が-2.7%~1.0%となっており、若干精度が向上している。RMSE は、赤線を適用した場合に、黒線を適用した場合と比較して若干の精度向上が見られるが、高山帯の積雪深は変動幅が大きく、これを平均化して推定式を作成しているため、RMSE のようにメッシュ単位で誤差を評価した場合、誤差が小さくなりにくいと考えられる。

5. まとめ

北海道大雪山系旭岳周辺において、流域界である尾根を跨ぐ範囲を対象に、2 カ年のピーク期に、航空レーザ測量により計測された積雪分布を分析した。

- ・ 樹林帯における標高と積雪深との線形の関係及び高山帯における地上開度と積雪深との線形の関係は、風衝斜面及び風背斜面の両方において 2 カ年とも確認された。
- ・ 風衝斜面及び風背斜面の両方において、積雪ピーク期における 2 カ年の積雪分布の類似度が高いことが確認された。
- ・ 高山帯を対象に、地上開度の出現割合が大きい範囲を対象とした回帰式から、簡易に積雪深を推定する手法を検討し、推定した積雪深の精度を評価したところ、地上開度の出現範囲全域を対象に作成した回帰式から推定した場合と比較して、積雪深の推定精度が向上した。

謝辞：ワカサリゾート(株)旭岳事業部に測量場所を提供して頂いた。無雪期の航空レーザ測量データは国土交通省に提供して頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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) Schimer, M., Wirz, V., Clifton, A. and Lehning, M.: Persistence in intra-annual snow depth distribution: 1. Measurements and topographic control, Water Resour. Res., 47, W09516, doi: 10.1029/2010WR009426, 2011.
- 5) 西原照雅, 谷瀬敦: 3 回の航空レーザ測量結果から分析した山間部における積雪分布の特徴, 雪氷研究大会講演要旨集, 237, 2017.
- 6) 西原照雅, 谷瀬敦: 航空レーザ測量データを用いた山間部における積雪分布の統計的解析, 土木学会北海道支部平成 29 年度年次技術研究発表会, B53, 2017.
- 7) 菊地時夫, 金田安弘, 山田知充: 大雪山における積雪期の気象状況について, 天気, 26, 751-757, 1979.
- 8) Farinotti, D., Magnusson, M., Huss, M. and Baudar, A.: Snow accumulation distribution inferred from time-lapse photography and simple modeling, Hydrol. Processes, 24, 2087-2097, doi: 10.1002/hyp.7629, 2010.