

# 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

Statistical analysis on snow depth distribution in mountainous regions using airborne laser scanning data

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う等、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。このことから、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、山間部の積雪分布を調査するため、国内各地において積雪調査が盛んに行われた (Yamada<sup>1)</sup> 他多数)。しかし、積雪調査は厳冬期に調査者が直接入山して実施するため、多大な労力を要し、雪崩等の危険を伴うことから、調査可能な地点に限られていた。

近年、レーザ測量技術の発達により、地表面の状態を広範囲に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計測された積雪深と、地形や植生との関係を分析した例が報告されている。西原ら<sup>2)</sup>は北海道大雪山系旭岳周辺の風衝斜面において積雪ピーク期に積雪分布を計測し、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、森林限界以上の高山帯においては地表面の凹凸を表現するパラメタである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た。海外においても航空レーザ測量により計測した積雪分布を分析した例が多数報告されている。Zheng et al.<sup>3)</sup>はシエラネバダ山脈の複数の範囲において計測した積雪深を対象に、標高、傾斜、斜面方位、Penetration fraction<sup>3)</sup>を説明変数として統計解析を行った。結果、積雪深に最も影響する変数は標高であること、重回帰分析を行った結果、変数を標高のみとした場合に決定係数が最大で 0.43 となったこと、すべての変数を用いた場合に決定係数が最大で 0.57 となったことを報告している。

Tennant et al.<sup>4)</sup>はシエラネバダ山脈の複数の範囲において計測した積雪深を対象に、標高、Eastness, Northness, 傾斜、樹高を変数として統計解析を行った。結果、樹林帯及び高山帯における積雪分布には統計的に有意な差が見られること、樹林帯においては標高及び斜面方位が積雪深に与える影響が大きいこと、高山帯においては斜面方位のみが重要であることを示した。また、Schirmer et al.<sup>5)</sup>は、アルプス山脈において計測した積雪深を分析し、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。

以上のように、海外においては、山間部における積雪分布の特徴を解明するため、航空レーザ測量により計測した積雪分布と地形及び植生に関する変数との関係を評



図-1 航空レーザ測量範囲

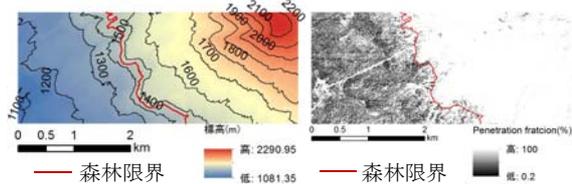


図-2 測量範囲の標高及び Penetration fraction

価する統計解析が多数行われているが、国内においてこのような解析を行った事例はほとんど無い。そこで、本研究では、北海道大雪山系旭岳周辺において、3カ年の積雪ピーク期に航空レーザ測量により計測した積雪分布と、地形及び植生に関する変数との関係を評価する統計解析を行い、積雪ピーク期における積雪分布の特徴を明らかにすることを目的とする。

## 2. 航空レーザ測量範囲

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、北海道大雪山系旭岳周辺に位置し、石狩川上流域に位置する忠別ダムの流域に含まれる 10km<sup>2</sup>の範囲である。測量範囲の標高帯は概ね 1,100m~2,300m であり、標高 1,450m 付近に森林限界がある (図-2)。航空レーザ測量は、無積雪期の 2009年9月22日~25日、積雪ピーク期の 2012年3月10日、2015年3月27日、2017年3月13日に実施した。積雪深は積雪ピーク期及び無積雪期の二時期の標高差とした。データの水平解像度は 5m である。計測された積雪量は 2017年が最も多く、2015年、2012年の順に積雪量が少なくなる。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ため<sup>6)</sup>、測量範囲は主に風衝斜面で構成される。

## 3. 積雪分布の分析方法

航空レーザ測量範囲の積雪分布については、西原ら<sup>2)</sup>により、樹林帯及び高山帯において積雪分布の特徴が異

なること、樹林帯においては標高と積雪深の間に線形の関係があること、高山帯においては地上開度と積雪深の間に線形の関係があることが示されている。このことから、測量範囲を森林限界である標高 1,450m を境界に、樹林帯及び高山帯に区分して分析を行う。

樹林帯において、積雪分布を分析する際に適用する地形及び植生に関する変数は、標高、傾斜、斜面方位、Penetration fraction<sup>3)</sup>とする。ここで、Penetration fraction は、樹林の開空率に類似した指標であり、航空レーザ測量により得られた点群データから求める。具体的には、水平解像度 5m のメッシュ内で反射した全点数に対する、積雪表面から反射した点数の比で表される。図-2 に航空レーザ測量範囲における Penetration fraction を示したが、樹林帯においては、常緑樹と落葉樹との間の樹幹密度の差や局所的な空地の存在により 0%から 100%の範囲に分布し、高山帯においては、植生が積雪下に埋没することからほとんどが 100%となる<sup>7)</sup>。また、Penetration fraction が大きいほど樹冠遮断等の影響が小さくなることから、Penetration fraction が大きいほど積雪深が大きくなる傾向が報告されている<sup>3),7)</sup>。樹林帯においては、積雪深に与える影響が最も大きい変数は標高と考えられることから、はじめに、標高を 1m ピッチに区切り、各標高帯における平均積雪深を算出し、標高の中央値と平均積雪深の線形回帰分析を行う。得られた線形回帰式から推定した各メッシュの積雪深を、航空レーザ測量により計測された同一メッシュの積雪深から差し引いて求めた残差と傾斜、斜面方位、Penetration fraction との関係进行分析する。この際、傾斜及び斜面方位は 1°ピッチ、Penetration fraction は 1%ピッチに区切り、これらの区間に含まれる残差の平均値を用いる。残差が正である場合は標高と積雪深との間の線形回帰式から推定した積雪深がレーザ測量から求めた積雪深より小さいことを示し、負である場合は同線形回帰式から推定した積雪深がレーザ測量から求めた積雪深より大きいことを示している。次に、重回帰分析により、標高、傾斜、斜面方位、Penetration fraction を変数として各メッシュの積雪深を推定する回帰式を作成し、同式の決定係数を評価する。加えて、統計ソフト R を用い、Random forest 法により、積雪深に対する各変数の相対的な重要度を評価する。なお、計算量が多くなることを避けるため、Random forest 法を適用する際は、樹林帯における全メッシュからランダムに抽出した 20,000 サンプルを入力値とした。以上の分析は 3 年間のデータに対してそれぞれ行う。最後に、積雪ピーク期における毎年の積雪分布の類似度を評価するため、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い、決定係数を評価する。

高山帯においては、積雪分布を分析する際に適用する地形に関する変数は、地上開度、標高、傾斜、斜面方位とする。分析する内容は、樹林帯における分析と同一であるが、高山帯においては、積雪深に与える影響が最も大きい変数は地上開度と考えられることから、地上開度と積雪深との間の線形の関係を用いて全メッシュの積雪深を推定し、残差を求める。ここで地上開度とは、横山

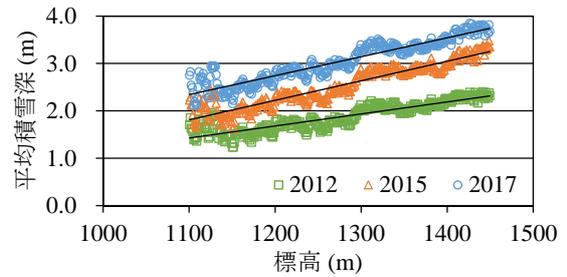


図-3 標高と積雪深の関係 (樹林帯)

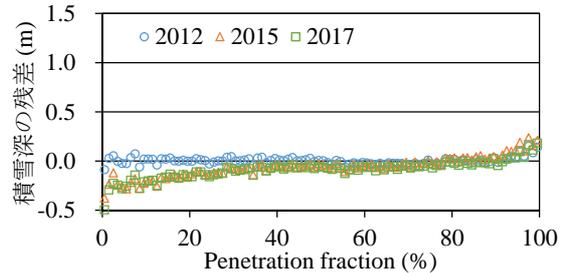
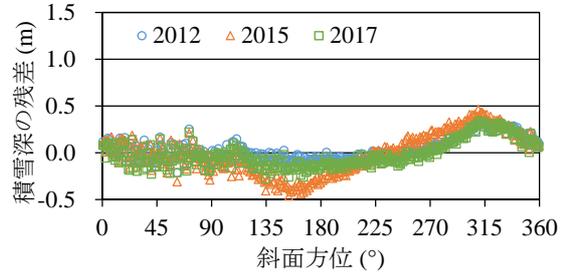
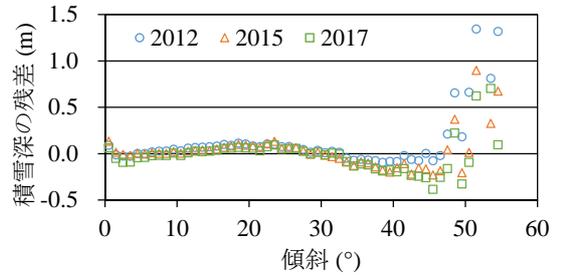


図-4 標高から推定した積雪深の残差 (樹林帯)

ら<sup>8)</sup>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 $\theta < 90^\circ$ 、尾根の場合に $\theta > 90^\circ$ となる。

## 4. 結果と考察

### 4. 1. 推定した積雪分布の残差の特徴

図-3 に樹林帯における各年の標高と積雪深との関係を示す。極端な値が含まれること避けるため、50 以上のサンプルが得られた標高帯のデータをプロットした。図中の直線は回帰直線である。回帰直線の決定係数は、2012 年が 0.800、2015 年が 0.888、2017 年が 0.883 である。残差と傾斜、斜面方位、Penetration fraction との関係を図-4 に示す。斜面方位は北を  $0^\circ$  とし時計回りに  $360^\circ$  表記した。図を概観すると、積雪量が最も少ない 2012 年の残差が小さい傾向がある。傾斜と残差の関係をみると、傾斜が  $40^\circ$  を超えると残差が急激に大きくなる。これは、傾斜が大きい範囲の積雪深を標高のみを変数として推定した場合、積雪深が過小に推定される傾向がある

ことを示していると考えられる。斜面方位と残差の関係を見ると、北向き斜面において残差が正となり、南向き斜面において残差が負となる傾向が見られる。これは、標高のみを変数とした積雪深の推定式が、日射の影響を受けにくい北向き斜面において積雪深を過小に推定し、日射の影響を受けやすい南向きの斜面における積雪深を過大に推定したことが要因と考えられる。Penetration fraction と残差の関係を見ると、2012年を除き、概ね Penetration fraction が40%以下の範囲において残差が負となっている。Penetration fraction が小さい範囲は樹木や樹冠の密度が大きい範囲であるが、降雪量が多いほど樹冠によって遮断される降雪量が大きくなる<sup>9)</sup>ことが報告されており、このことにより、標高のみを変数とした積雪深の推定式が積雪深を過大に推定した可能性が示唆される。Penetration fraction が90%以上の範囲において残差が正となっているが、この範囲は樹林内に局所的に存在する空地であり、空地においては積雪深が大きくなる傾向があることから、標高のみを変数とした積雪深の推定式が積雪深を過小に推定したと考えられる。

図-5に高山帯における各年の地上開度と積雪深との関係を示す。樹林帯と同様に、50以上のサンプルが得られた地上開度帯のデータをプロットした。図中の直線は回帰直線である。回帰直線の決定係数は、2012年が0.904、2015年が0.952、2017年が0.959である。樹林帯と同様の方法で求めた残差と標高、傾斜、斜面方位との関係を図-6に示す。図を概観すると、樹林帯とは異なり、積雪量が最も少ない2012年の残差が小さい傾向は見られない。標高と残差の関係を見ると、標高2,100mから2,200mの区間に大きな正のピークが見られる。この標高帯には、旭岳山頂付近の風背斜面が含まれる。また、斜面方位と残差の関係を見ると、風背斜面である東向き斜面において残差のばらつきが大きく、大きな正の値が見られる。風衝斜面と比較して風背斜面における積雪深が大きい傾向があるが、測量範囲は主に風衝斜面であることから、地上開度を変数とした積雪深の推定式は、風背斜面における積雪深を過小に推定する可能性がある。このことが、標高2,100mから2,200mの区間及び東向き斜面において大きな正の残差が見られた要因と考えられる。傾斜と残差の関係を見ると、傾斜が概ね50°を超えると、残差が極端に大きな負の値となっている。風衝斜面の傾斜が大きい範囲においては、地上開度のみを変数とした積雪深の推定式が積雪深を過大に推定する可能性があることを示していると考えられる。

#### 4. 2. 重回帰分析

4.1.において樹林帯及び高山帯を対象にそれぞれ選定した地形及び植生に関する変数を用い、重回帰分析により各メッシュの積雪深を推定する式を作成した。作成した式の決定係数 $R^2$ を表-1に示す。比較のため、樹林帯においては標高のみ、高山帯においては地上開度のみを変数とした場合の決定係数を併せて示す。樹林帯においては決定係数が0.085から0.165に、高山帯においては決定係数が0.320から0.450に分布している。局所的なばらつきが大きい積雪深の推定に高解像度のメッシュを

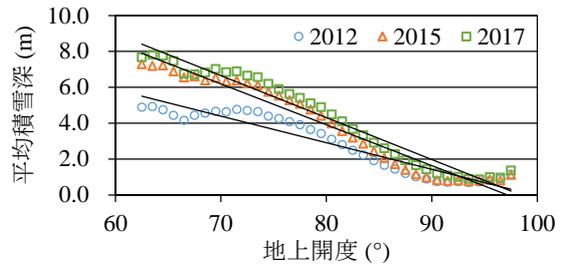


図-5 地上開度と積雪深の関係 (高山帯)

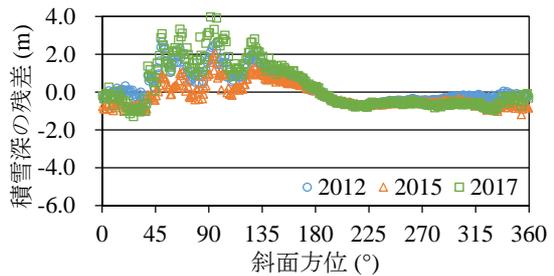
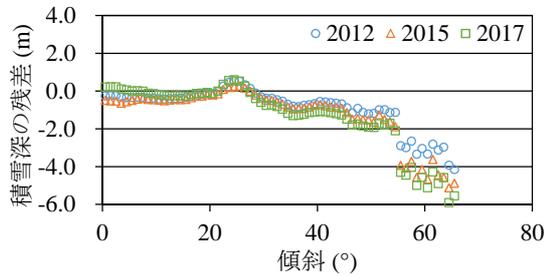
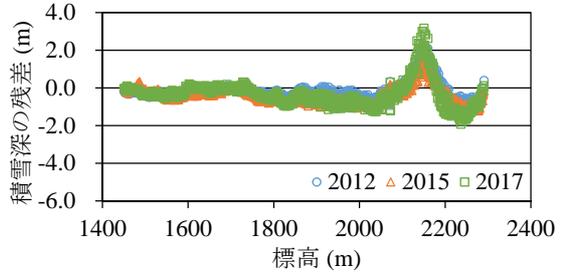


図-6 地上開度から推定した積雪深の残差 (高山帯)

表-1 重回帰分析の結果 (決定係数  $R^2$ )

	樹林帯		高山帯	
	標高のみ	全変数	地上開度のみ	全変数
2012	0.085	0.099	0.320	0.364
2015	0.133	0.178	0.450	0.477
2017	0.142	0.165	0.336	0.406

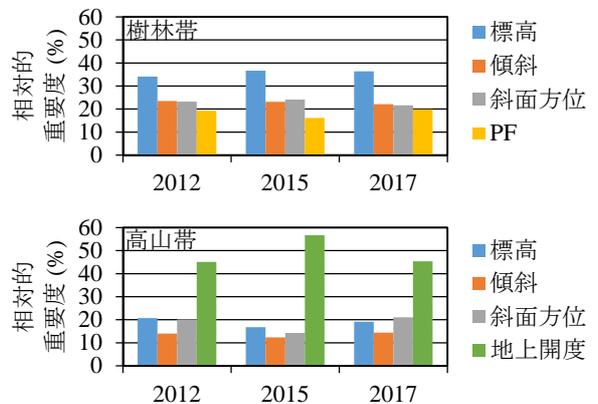


図-7 Random forest法により求めた積雪深に対する各変数の相対的重要度

表-2 積雪分布の類似度 (決定係数  $R^2$ )

樹林帯			
計測日	2012/3/10	2015/3/27	2017/3/13
2012/3/10	1		
2015/3/27	0.760	1	
2017/3/13	0.686	0.712	1
高山帯			
計測日	2012/3/10	2015/3/27	2017/3/13
2012/3/10	1		
2015/3/27	0.764	1	
2017/3/13	0.835	0.772	1
全域			
計測日	2012/3/10	2015/3/27	2017/3/13
2012/3/10	1		
2015/3/27	0.754	1	
2017/3/13	0.813	0.765	1

適用したことから、決定係数は大きくないが、ほぼ同一の変数及び解像度のメッシュを適用した Zheng et al.<sup>3)</sup>の報告と同程度の決定係数が得られている。

#### 4. 3. 各変数の相対的重要度

4.1.において樹林帯及び高山帯を対象にそれぞれ選定した地形及び植生の変数を対象に、Random Forest 法により求めた相対的な重要度を図-7 に示す。樹林帯においては、既往研究<sup>3),4)</sup>と同様に標高の相対的重要度が最も高く、次いで傾斜及び斜面方位、Penetration fraction の順となった。一方、高山帯においては、地上開度の相対的重要度が突出して高く、次いで標高及び斜面方位、傾斜の順となった。このような分析に地上開度が適用された例は無く、比較はできないが、高山帯においては、地上開度が積雪に与える影響が大きいことが示された。

#### 4. 4. 各年のピーク期における積雪分布の類似性

同一メッシュにおける2カ年の積雪深の関係に対して、直線を当てはめる回帰分析を行った結果(決定係数 $R^2$ )を表-2に示す。決定係数は0.686から0.835の間に分布している。Veitinger et al.<sup>10)</sup>はアルプス山脈における積雪分布を対象に同様の分析を行った結果、積雪ピーク期における毎年の積雪分布の類似性が高いことを報告しているが、表-2に示した決定係数はVeitinger et al.の報告とほぼ同等である。このことから、旭岳周辺においても積雪ピーク期における毎年の積雪分布の類似性が高いことが確認された。

#### 5. まとめ

北海道大雪山系旭岳周辺の風衝斜面において、3カ年の積雪ピーク期に航空レーザ測量により計測した積雪分布と、地形及び植生に関する変数との関係について統計解析を行った。

樹林帯及び高山帯それぞれに、積雪分布に対して最も影響が大きい変数を用いて推定した積雪深と航空レーザ測量により計測された積雪深の残差を求め、地形及び植生に関する変数との関係を分析した。結果、傾斜が大きい範囲、高山帯における風背斜面において残差が大きい傾向が見られた。

重回帰分析を行い、地形及び植生に関する変数から積雪深を推定する式を作成した。決定係数は大きくならなかったが、シエラネバダ山脈における積雪深を対象に、ほぼ同一の変数とメッシュ解像度を適用した場合と同程度の決定係数が得られた。

Random forest法を用い、積雪深に対する地形及び植生に関する各変数の相対的な重要度を評価した。結果、樹林帯においては標高の重要度が最も高いこと、高山帯においては地上開度の重要度が最も高いことを示した。

同一メッシュにおける2カ年の積雪深を線形回帰分析した結果から、積雪ピーク期における毎年の積雪分布の類似度が高いことを定量的に示した。

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。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: 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.
- 3) Zheng, Z., Kirchner, P. B. and Bales, R. C.: Topographic and vegetation effects on snow accumulation in the southern Sierra Nevada: a statistical summary from lidar data, The Cryosphere, 10, 257-269, doi: 10.5194/tc-10-257-2016, 2016.
- 4) 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 Resour. Res., 53, doi: 10.1002/2016WR019374, 2017.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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), 2018. (投稿中)
- 8) 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.
- 9) Schmidt, R. A. and Haupt, H. F.: Snowfall interception on branches of three conifer species, Can. J. For. Res., 21, 1262-1269, 1991.
- 10) Veitinger, J., Sovilla, B. and Purves, R. S.: Influence of snow depth distribution on surface roughness in alpine terrain: a multi-scale approach, The Cryosphere, 8, 547-569, doi: 10.5194/tc-8-547-2014, 2014.