

# 山間部における積雪分布の特徴 —複数回の航空レーザ測量結果から—

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 ○西原 照雅  
谷瀬 敦

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なかっていることから、山間部の積雪分布を精度良く把握することが重要である。本研究では、忠別ダム流域において2012年3月及び2015年3月の2回にわたり航空レーザ測量を行い、積雪分布を計測した。これらの計測結果を用いて積雪分布と地形との関係を分析し、2カ年の積雪分布の特徴を比較した結果、計測年に関わらず、ほぼ同様の特徴が見られたことを報告する。

キーワード：積雪分布，山間部，水資源管理，ダム

## 1. はじめに

積雪寒冷地では、春先の融雪水をダムに貯留して夏季にかけての水利利用を賄っており、融雪水は水資源として重要である。加えて、融雪水は融雪出水や土砂災害の原因ともなる。このため、北海道のダムでは、流域の積雪包蔵水量（流域全体の積雪相当水量の合計値）が最大となる毎年3月に積雪調査を行い、流域の積雪包蔵水量を推定している。融雪が始まる前に流域の積雪包蔵水量をできるだけ正確に把握することは、水資源管理及び融雪期における防災の上で非常に重要である。しかし、雪崩等の危険を伴うことから、調査者が入山して行う積雪調査が可能な地点は限られている。特に、森林限界以上の高標高帯においては、尾根やその周辺以外に調査地点を設けることが難しく、標高帯を代表する積雪深を計測できているとは言い難い。

ダム流域のような山間部の積雪分布は標高の低い森林内と森林限界以上の高標高帯で大きな違いがある<sup>1)2)</sup>。このうち、森林内の積雪分布については多数の報告がある<sup>1)3)4)</sup>。これらは、積雪深及び積雪相当水量は標高とともに線形に増加することを報告しており、この関係は、ダム管理の実務において、積雪包蔵水量を推定する際の標準的な手法に用いられている<sup>5)</sup>。

一方、近年、航空レーザ測量により広範囲の三次元空間データを高密度に得ることが可能となり、立ち入りが困難な範囲を対象に、上空から測量を実施した例が報告されている。西原ら<sup>2)</sup>は、北海道の大雪山系旭岳に位置する忠別ダム流域の森林限界以上の高標高帯において、航空レーザ測量により積雪深を計測し、この結果を用いて積雪深と地形との関係を分析した。結果、森林限界以上の高標高帯における積雪深は、地形の凹凸を表す指標である地上開度との間に線形の関係があることがわかった。さらに、毎年の積雪調査の結果に、積雪深と地上開

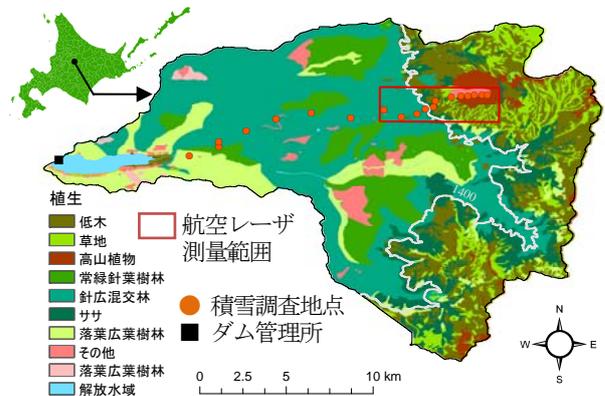


図-1 対象ダム流域（忠別ダム流域）

度との関係を適用することで、高標高帯における積雪分布が適切に推定され、ダム流域における積雪包蔵水量や、融雪期におけるダム流入量を精度良く推定できる可能性を示した<sup>6)</sup>。

しかし、高標高帯における積雪分布の調査報告例が少ないため、西原<sup>2)</sup>らの分析結果にどの程度の一般性があるかは確認できていない。そこで、西原ら<sup>2)</sup>が積雪深と地形との関係を分析した範囲を対象に、再度航空レーザ測量を用いて積雪深を計測した。本稿では、2年分の計測結果を用いて、これまでに積雪調査や航空レーザ測量結果を分析した結果から解明された、積雪分布の特徴を検証する。

## 2. 対象流域

対象流域は図-1 に示す忠別ダム流域である。忠別ダムは、石狩川水系忠別川流域の上流部に位置し、流域面積は 239km<sup>2</sup>、流域の標高帯は 400m～2,300m 付近である。

図-1には、自然環境保全基礎調査の結果を用いて10分類した植生を示した。図中の白線は標高1,400mの等高線であるが、この標高1,400m付近に森林限界があり、これを境に主たる植生が森林から草地やササといった森林以外に変化する。流域面積の約6割が樹林帯、約4割が森林限界以上の高標高帯である。

次に、解析に使用した資料を示す。航空レーザ測量は、図-1の赤枠で示す範囲で実施した。測量範囲は南北方向の長さが2km、東西方向の長さが5kmであり、面積は10km<sup>2</sup>である。データの水平解像度は5mである。図-2～図-5に測量範囲の航空写真及び地形の分布を示す。

図-3は航空レーザ測量を実施した範囲の標高分布である。標高帯は概ね1,100m～2,300mであり、標高が2,291mの旭岳山頂が含まれている。図中の赤線は標高1,450mの等高線であるが、測量範囲の植生は、ここを境に森林と低木、草地、ササといった森林以外に分かれ、

標高1,450m以上の範囲では、約98%が森林以外の植生である。図-4に航空レーザ測量を実施した範囲の斜面方位分布を示す。図は北を0°として時計回りに360°標記している。航空レーザ測量範囲は、主として西向きの斜面である。北海道の日本海側は、冬の荒天時に強い西風が吹くことが多いが、航空レーザ測量を実施した範囲は、このような荒天時には、風上側の斜面（風衝斜面）となる。

また、前述したとおり、測量範囲には旭岳山頂が含まれているため、山頂付近から東側は斜面の向きが異なり、東向きの斜面となる。加えて、使用したデータは水平解像度が5mが高く微地形を捉えているため、主として西向きの斜面内においても一部に東向きの斜面がみられる。このような東向きの斜面は、西風の吹く荒天時には、風下側の斜面（風背斜面）となる。図-5に航空レーザ測量を実施した範囲の地上開度分布を示す。ここで、地上開度とは、横山ら<sup>7)</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。地上開度は、式(1)から求められる。

地上開度は、式(1)から求められる。

$$\Phi = (\phi_0 + \phi_{45} + \phi_{90} + \phi_{135} + \phi_{180} + \phi_{225} + \phi_{270} + \phi_{315})/8 \quad (1)$$

ここで、 $\Phi$ ：地上開度(°)、 $\phi_i$ ：着目する地点から、指定した探索距離以内で、方位*i*°方向の空を見ることができる天頂角の最大値(°)である。地上開度は、探索距離を指定でき、8方位の天頂角の平均値を求めるため、方位及び局所地形に依存しない指標である。図-6に地上開度のイメージを示したが、着目地点が谷の場合には地上開度 $\Phi < 90^\circ$ となり、谷が深いほど数値が小さくなる。着目地点が尾根の場合には地上開度 $\Phi > 90^\circ$ となり、尾根が突き出ているほど数値が大きくなる。着目地点が平地の場合には地上開度 $\Phi = 90^\circ$ となる。探索距離は任意に設定できるが、西原ら<sup>2)</sup>に倣い100mとした。図より、



図-2 航空レーザ計測範囲の航空写真

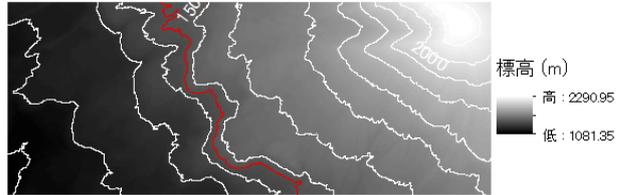


図-3 航空レーザ計測範囲の標高分布

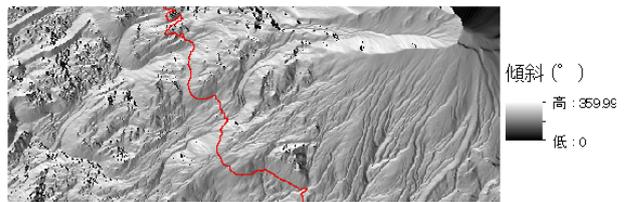


図-4 航空レーザ計測範囲の斜面方位分布

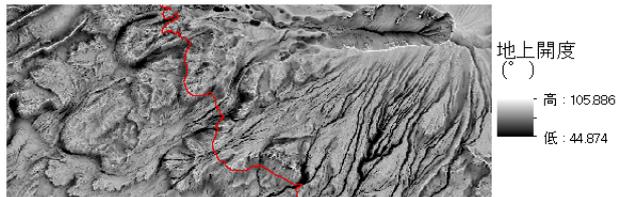


図-5 航空レーザ計測範囲の地上開度分布

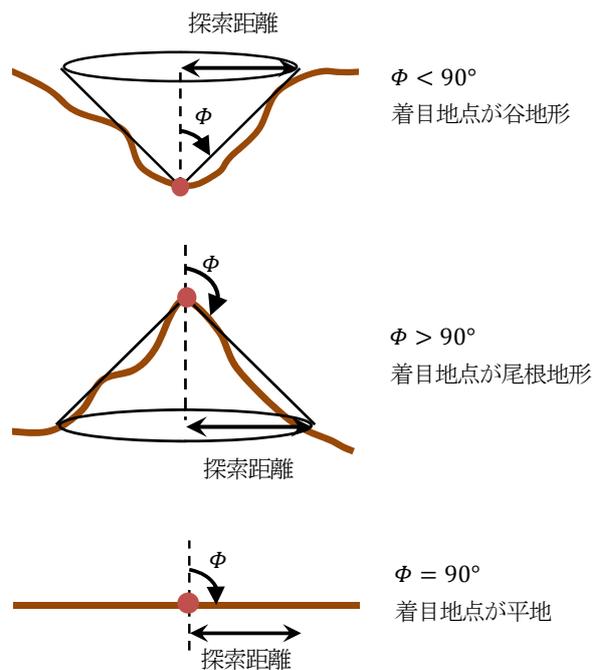


図-6 地上開度のイメージ

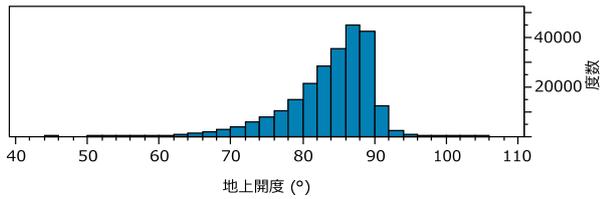


図-7 高標高帯における地上開度の度数分布

森林限界以上の高標高帯においては、明暗がはっきりしており、地上開度を用いると、尾根や谷を明確に識別できることがわかる。図-7 に航空レーザ測量を実施した範囲のうち、高標高帯における地上開度の度数分布を示したが、地上開度は、概ね 60°~95°の間に分布しており、このうち 80°~90°の出現頻度が多い。

航空レーザ測量は、無積雪期の 2009 年 9 月 22 日~25 日、積雪期の 2012 年 3 月 10 日及び 2015 年 3 月 27 日に実施した。積雪深は、積雪期及び無積雪期の二時期の標高差として求めている。航空レーザ測量に使用した機器の精度から求めた積雪深の計測精度は±30cm である。

### 3. 積雪分布の特徴

図-8に航空レーザ計測により得られた積雪分布を示す。図中の赤線は森林限界であり、赤線の左側が樹林帯、右側が森林限界以上の高標高帯である。計測した範囲においては、2012年と比較して2015年の積雪が多い。樹林帯と高標高帯の積雪分布が異なることは、多数の論文によって報告されているが、航空レーザ測量により計測された積雪分布を見ると、このことが明解となる。両年の図を概観すると、樹林帯と高標高帯の積雪分布が異なること、樹林帯においてはほとんどが暗色であることから積雪深が小さく、狭い範囲に分布しているのに対し、高標高帯においては明暗が明瞭であることから積雪深が幅広く分布し、尾根に沿って積雪の少ない箇所、谷に沿って積雪の多い箇所が分布していることといった特徴が見られる。また、両年の積雪分布に酷似したパターンが見られる。このパターンを利用することにより、毎年の積雪分布を簡易に推定できる可能性があると考えられることから、今後、分析を進めていく予定である。

### 4. 標高と積雪深の関係

航空レーザ測量により得られたデータは約40万個あるため、そのままでは積雪深と地形との関係を捉えることが困難である。このため、標高を25mピッチのように、幅を持った区間に区分し、この区間の平均積雪深を求め、地形因子との関係を考察する。図-9に標高と積雪深の関係を示す。標高は25mピッチで区分した。図に示した

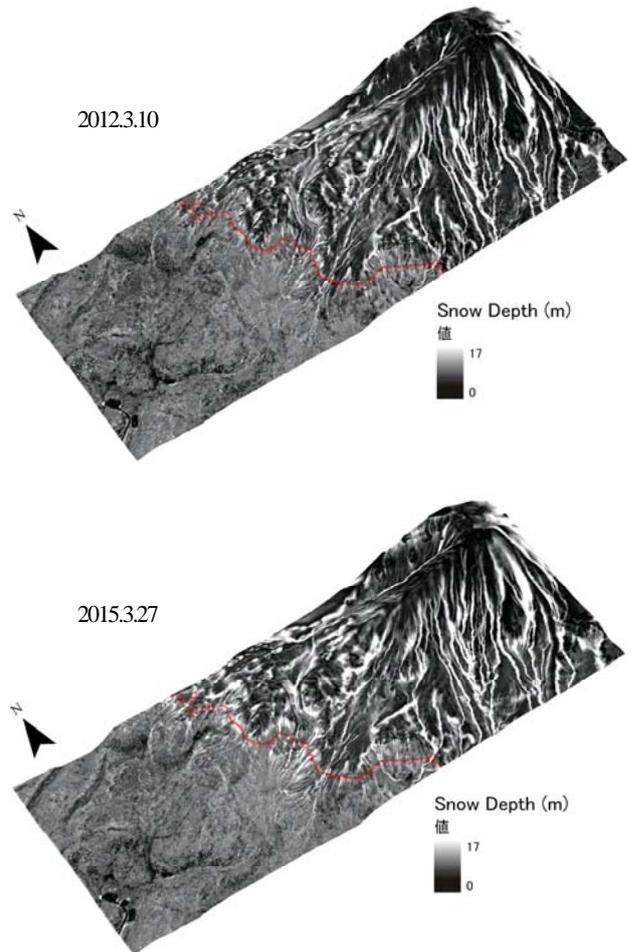


図-8 計測された積雪分布

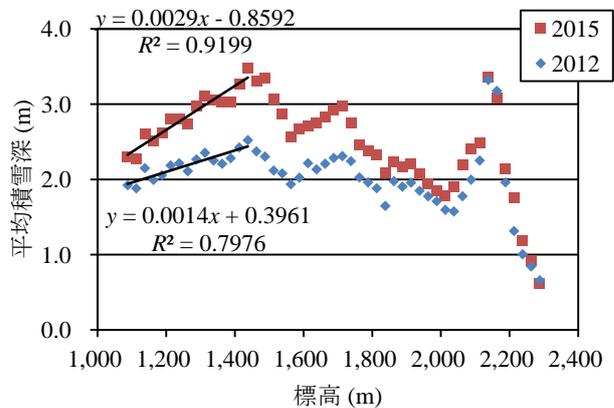


図-9 標高と積雪深の関係

2012年及び2015年の積雪深を概観すると、標高に対する積雪深の増減の傾向がほぼ同一である。これは、3章において示したように、両年の積雪分布のパターンが酷似していることが一因と考えられる。また、積雪深の差は、各年の積雪の多寡が反映されたものと考えられる。標高 1,450mまでは樹林帯と対応し、この範囲では、既往の研究結果と同様に、標高と積雪深との間に線形の関係が見られる。直線式の傾きは、積雪が多い2015年の方が大きい。標高1,450m以上は森林限界以上の高標高帯と対応し、

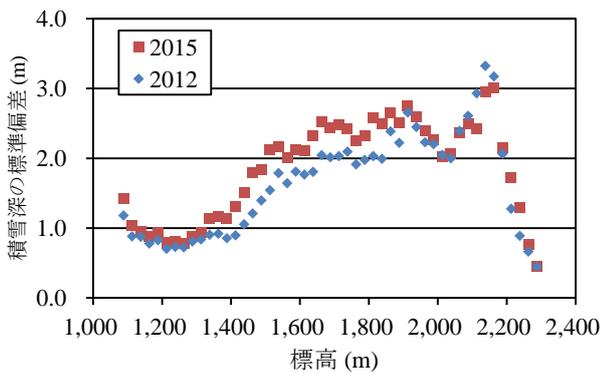


図-10 標高と積雪深の標準偏差の関係

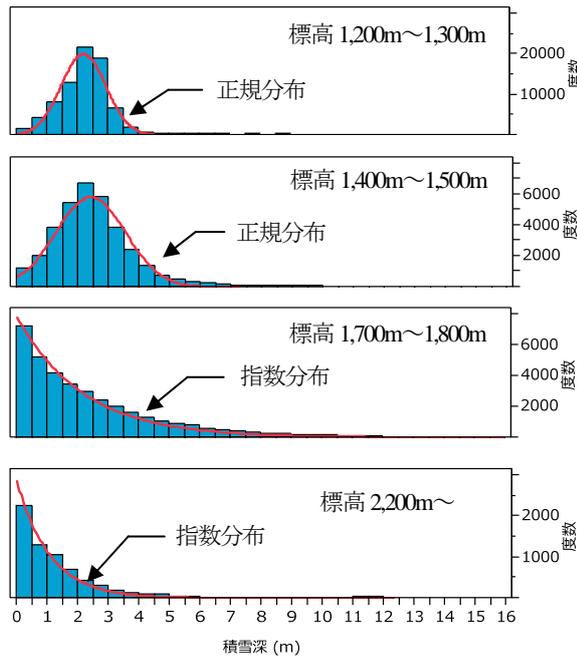


図-11 標高と積雪深の度数分布の変化(2012年)

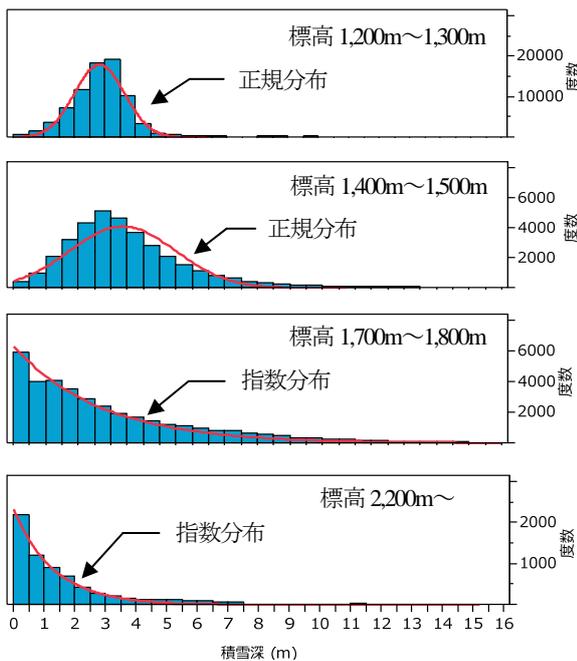


図-12 標高と積雪深の度数分布の変化(2015年)

積雪深の変動が大きく、樹林帯において見られたような線形の見られず。

標高と積雪深との関係を分析するに当たり、標高を25mピッチで区分したため、この区間に含まれる積雪深の標準偏差を求めることが可能である。図-10に標高と積雪深の標準偏差の関係を示す。概観すると、図-9と同様に、標高に対する標準偏差の増減の傾向は兩年とも同一である。標準偏差は、森林内に対応する範囲において概ね1.0m以下であり、森林限界である標高1,450mを挟む範囲において標高の増加とともに徐々に増加し、森林外の範囲において2.0m~3.0m程度となっている。森林限界を挟む標高帯において標準偏差が徐々に増加する要因として、この標高帯においては、主たる植生が森林から森林以外に徐々に移行していることが挙げられる。また、標高2,200m以上の測量範囲には旭岳山頂を含む積雪が堆積しづらい尾根地形が多いため、積雪深の幅が小さくなり、標準偏差が小さくなったと考えられる。

標準偏差の変化を詳細に分析するため、図-11及び図-12に標高100mピッチに区切った標高帯に含まれる積雪深の度数分布を示す。樹林帯であり標準偏差が大きく変動していない標高1,200m~1,300m、森林限界が含まれる標高1,400m~1,500m、高標高帯であり標準偏差が大きく変動していない標高1,700m~1,800m、山頂付近である2,200m以上の4つの標高帯の図を代表して示している。樹林帯である1,200m~1,300mの標高帯においては、積雪深の分布はほぼ正規分布であり、この結果は西原らが定山溪ダムの樹林帯を対象に分析した報告と一致している。高標高帯である標高1,700m~1,800m及び2,200m以上においては、積雪深の分布は概ね指数分布に一致している。森林限界を含む標高1,400m~1,500mの図からは、積雪深の分布が樹林帯の分布から高標高帯の分布へ移行していることが見て取れる。また、標高が高くなり、樹林帯から高標高帯に移移するにともない、積雪深の分布する幅が大きくなり、尾根に近い標高帯に達すると、分布の幅が小さくなる。このような変化の要因として、樹林帯においては風が弱く積雪が移動しづらいこと、高標高帯においては強風が吹き抜けるため、積雪が移動しやすく、尾根のように積雪が0に近い箇所や、谷や吹き溜まりのように積雪が大きい箇所といった、積雪が極端に小さいもしくは大きい箇所が出現しやすくなっていることが挙げられる。また、計測を行った範囲においては、2012年と比較して2015年の積雪が多いことから、2015年は積雪深が多い側の出現頻度が大きくなっている。

## 5. 高標高帯における地上開度と積雪深の関係

西原ら<sup>2)</sup>は、森林限界以上の高標高帯における積雪深は、地上開度との間に線形の関係があることを報告して

おり、この関係について、2 年間のデータを用いて検証する。

地上開度と積雪深との関係を図-13 に示す。積雪深は森林限界である標高 1,450m 以上の範囲を抽出し、地上開度を 5°ピッチで区分して算出した平均値である。図を見ると、2012 年及び 2015 年の両年とも、地上開度が大きくなるに伴い、積雪深が高い相関で線形に減少している。2015 年の積雪深が大きく、線形式の傾きが大きいことは、2012 年と比較して 2015 年の積雪が多いことが原因である。谷の積雪深が大きく尾根の積雪深が小さいことは、風による移動後の積雪分布の特徴であり<sup>1)</sup>、航空レーザ測量により計測された積雪深は、風により積雪が移動した後の再堆積分布であると考えられる。再堆積分布が形成される過程において、積雪が捉えられやすい谷地形（地上開度が 90°以下）の積雪が多くなり、積雪が留まることが困難な尾根地形（地上開度が 90°以上）の積雪が少なくなっている。また、図より 2012 年、2015 年ともに、地上開度が 95°付近において積雪深がほぼ 0 となっており、風が強い高標高帯においては、平地に近いならかな尾根であっても積雪が留まることは困難であることを示している。

次に、図-13 に示したデータを標高 100m 毎に区切り、各年の標高帯別の積雪深と地上開度との関係を図-14 及び図-15 に示した。なお、サンプル数が少ない場合、極端に大きいもしくは小さい値となる可能性があるため、サンプルが 100 を超えたものを図示している。図より、標高が 2,000m を超えた標高帯の谷の積雪深が若干小さいが、どの標高帯においても、積雪深と地上開度との間に線形の関係が見られる。図示した全データを用いて線形回帰分析を行ったところ、図-13 に示した回帰式とほぼ同一の式が得られた。さらに、図-7 に示した地上開度の頻度分布と図-11 及び図-12 に示した標高 1,700m 以上の標高帯における積雪深の頻度分布を比較すると、谷の積雪深が大きく、尾根の積雪深が小さいことに対応して酷似した分布となっており（例えば、図-7 を左右反転し地上開度が大きい順に並べる）、高標高帯においては、積雪深が地上開度に強く依存していることがわかる。

ここまで、2 回の航空レーザ測量による積雪深の計測結果を用いて積雪深と地形との関係を分析したが、樹林帯においては積雪深と標高の間に線形の関係があること、高標高帯においては積雪深と地上開度との間に線形の関係があることが確認された。さらに、高標高帯における積雪深は標高に依存せず、地上開度に強く依存することがわかった。

## 6. 斜面方位と積雪深の関係

森林限界以上の高標高帯における積雪分布は風の影響を強く受ける。この影響を分析するため、樹林帯及び高

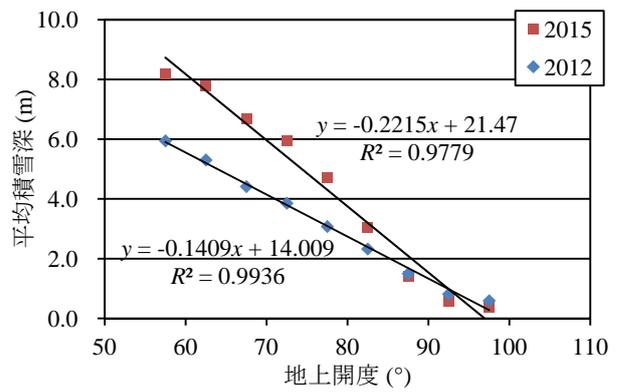


図-13 地上開度と積雪深の関係

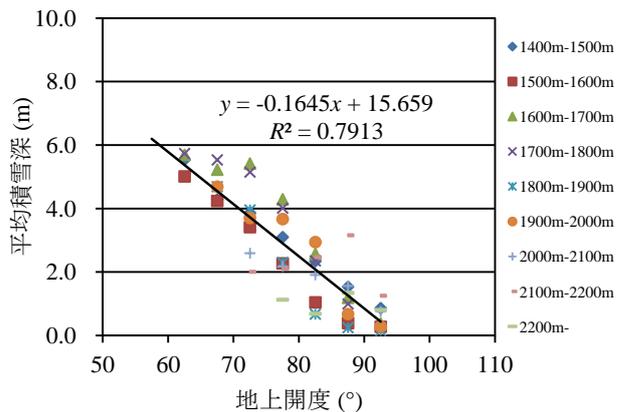


図-14 標高帯別の地上開度と積雪深の関係(2012年)

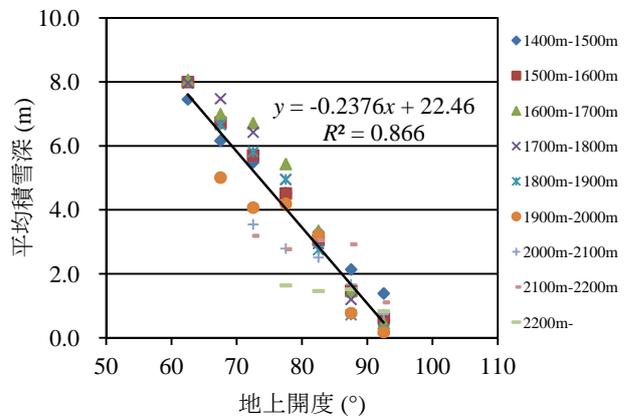


図-15 標高帯別の地上開度と積雪深の関係(2015年)

標高帯それぞれに 16 方位に区分した平均積雪深を算出した。

図-16 に示した樹林帯における積雪深の分布を見ると、2012 年及び 2015 年の両年ともほぼ円形となっていることから、方位によらずほぼ均一の積雪深となっている。一方で、図-17 に示した高標高帯における積雪深の分布を見ると、北東から南東にかけての積雪深が大きく、北西から南西にかけての積雪深が小さくなっており、方位による偏りが大きい。航空レーザ測量を実施した範囲において実測の風向風速が得られていないため仮説になるが、冬の北海道の日本海側においては、風による積雪の

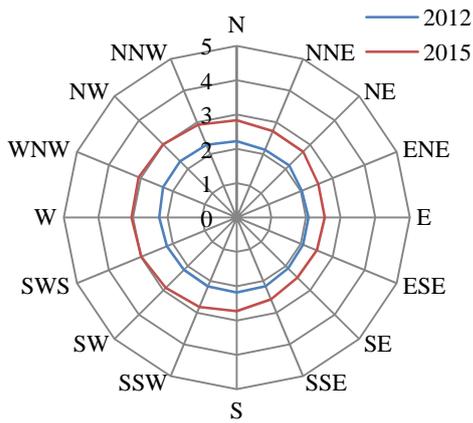


図-16 斜面方位別の積雪深（樹林帯）

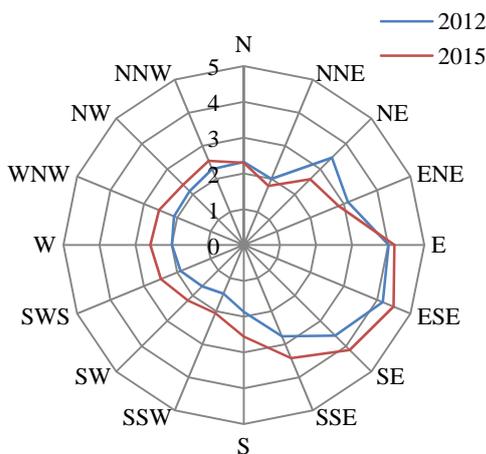


図-17 斜面方位別の積雪深（高標高帯）

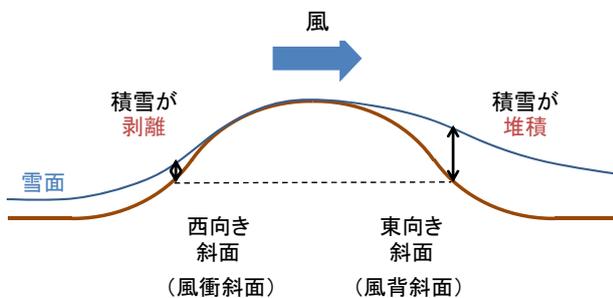


図-18 風の影響を受けた積雪深のイメージ

移動が起こるような荒天時には、強い西風が吹く傾向があるため、この西風により積雪が西から東に向かって移動した結果、北東から南東にかけての積雪深が大きく、北西から南西にかけての積雪深が小さいといった積雪深の偏りが生じたと考えられる。図-18 に現象のイメージを示したが、尾根を境に、西向き斜面は風衝斜面であるため積雪が剥離し、東向き斜面は風背斜面であるため積雪が堆積したと考えられる。5章において示したように、高標高帯における積雪深は地上開度に依存するが、図の点線で示したように、地上開度が同一であっても、風衝斜面に位置する場合と風背斜面に位置する場合では積雪

深が異なる可能性がある。しかし、今回、航空レーザ測量を行った忠別ダム流域は、荒天時の西風に対して風衝斜面が主であるため、風背斜面については十分なサンプルが得られていない。忠別ダム流域の東側に隣接する大雪ダム流域は、このような西風に対して風背斜面が多いことから、今後、航空レーザ測量範囲を大雪ダム流域側に広げて、風背斜面における積雪分布の特徴に関して分析を進めていく予定である。

## 7. まとめ

航空レーザ測量による同一範囲を対象に実施した2カ年の積雪分布の計測結果を用いて、積雪分布と地形との関係に関し、より一般性の高い分析を行った。結果、樹林帯においては積雪深と標高の間に線形の関係があること、高標高帯においては積雪深と地上開度との間に線形の関係があることが確認された。さらに、高標高帯における積雪深は標高に依存せず、地上開度に強く依存することがわかった。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、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。国土交通省北海道開発局にデータを提供して頂いた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 山田知充, 西村寛, 水津重雄, 若浜五郎: 大雪山旭岳西斜面における積雪の分布と堆積・融雪過程, 低温科学物理篇37, pp.1-12, 1979.
- 2) 西原照雅, 中津川誠: 航空レーザ測量を活用した森林外の積雪相当水量分布の推定, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.69, No.4, I\_409-I414, 2013.
- 3) 松山洋: 日本の山岳域における積雪水当量の高度分布に関する研究について, 水文・水資源学会誌第11巻2号, pp.164-174, 1998.
- 4) 島村雄一, 泉岳樹, 松山洋: スノーサーベイとリモートセンシングに基づく山地積雪水資源量の推定, 水文・水資源学会誌第18巻4号, pp.411-423, 2005.
- 5) (独) 土木研究所寒地土木研究所: ダムにおける積雪包蔵水量推定ガイドライン(案), 2012.
- 6) 西原照雅, 中津川誠, 白谷友秀: 森林内外の積雪分布の特徴を反映した流出モデルの高標高帯に位置するダムへの適用, 水文・水資源学会2014年度研究発表会要旨集, pp.224-225, 2014.
- 7) 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, pp.26-34, 1999.
- 8) 西原照雅, 中津川誠, 浜本聡: 航空レーザ測量を活用した森林内における積雪深分布と地形の関係に関する考察, 北海道の雪氷第31号, pp.41-44, 2012.