

山間部における積雪分布の特徴

西原 照雅^{*1} 谷瀬 敦^{*1}

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用をまかなっており、積雪は水資源として重要である。一方で、融雪水は融雪出水や土砂災害といった災害の原因にもなる。このため、融雪が始まる春先にダム流域における積雪の分布や流域に分布する積雪の総量をできるだけ正確に把握することは、水資源管理及び防災の観点から非常に重要である。

山間部の積雪分布に関しては、1970年代頃から、調査者が厳冬期に直接入山して行う積雪調査が日本全国で行われてきた。例えば、山田ら¹⁾は北海道大雪山系の旭岳において調査を行った結果、樹林帯においては標高の増加とともに積雪深及び積雪相当水量が線形に増加することを報告している。また、森林限界以上の高標高帯においては、積雪深及び積雪相当水量と標高との間に、樹林帯において見られたような関係はなく、山田ら¹⁾は、高標高帯においては強い風が高頻度で吹いているため、積雪の堆積と剥離及び再堆積が活発に起こり、積雪は凹部では多く、凸部では少なく、全体として地表面の凹凸を平坦化するように堆積することを報告している。このような調査の積み重ねにより明らかになった積雪分布の特徴は、ダム管理の現場において活用されており、例えば、樹林帯における標高と積雪相当水量との関係は、春先に流域に存在している積雪の総量を推定する際の標準的な手法²⁾とされている。しかし、積雪調査は厳冬期に行われ、雪崩等の危険を伴うことから、調査可能な地点が限られており、得られるデータには限界がある。

近年、リモートセンシング技術が発達し、冬季に立ち入りが困難な範囲についても積雪分布を計測することが可能となった。中でも航空レーザ測量は三次元空間データを高密度にかつ高精度で得ることが可能な手法である。航空レーザ測量による積雪分布の計測例として、西原ら³⁾が北海道大雪山系において計測を行い、積雪深と地形との関係を分析した例が挙げられる。西原ら³⁾は、同一範囲を対象として2回（2012年3月及び2015年3月）実施した計測結果を基に、過去に積雪調査により解明した積雪分布の特徴を検証するとともに、森林限界以上の高標高帯においては、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報告している。さらに、計測年が異なる積雪分布の間に類似したパターンが見られたことを報告している。

本稿では、これまでに航空レーザ測量を用いて、山間部の積雪分布と地形との間の関係を分析してきた中から、実務に



図-1 積雪調査の様子
(国土交通省豊平川ダム統合管理事務所提供)

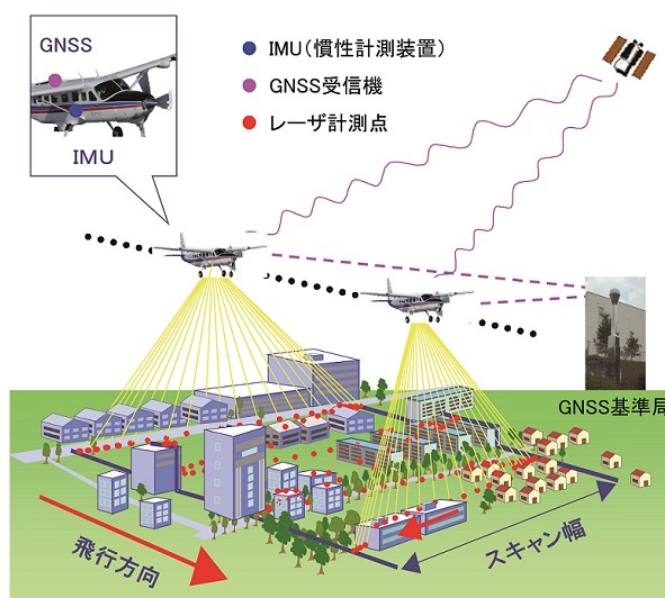


図-2 航空レーザ測量のイメージ⁴⁾

有用と考えられるものに絞り報告する。

2. 航空レーザ測量を用いた積雪深の算出方法

航空レーザ測量とは、図-2のように、航空機やヘリコプターに搭載したレーザスキャナから地上にレーザ光を照射し、地上から反射するレーザ光との時間差より得られる地上までの距離と、GNSS測量機、IMU（慣性計測装置）から得られる航空機の位置情報より、地上の標高や地形の形状を調べる測量方法である⁴⁾。

^{*1} 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所

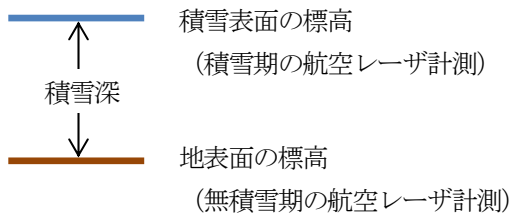


図-3 航空レーザ測量結果を用いた積雪深の計算方法

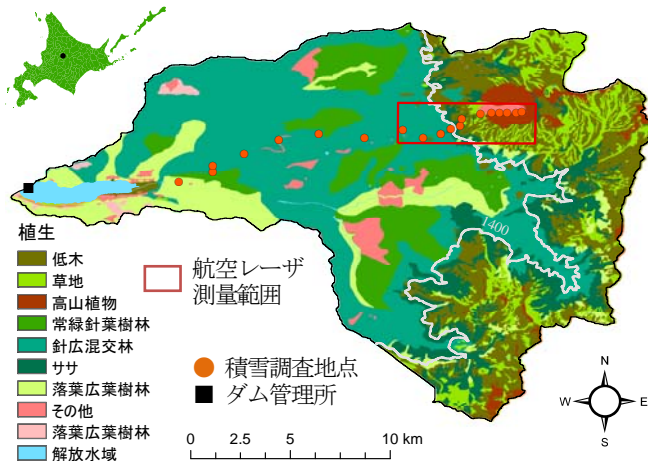


図-4 対象ダム流域 (忠別ダム)

レーザ光は、地表面（積雪期は積雪表面）だけではなく、樹木や建物からも反射して戻ってくるため、地表面（積雪期は積雪表面）のデータを作成する場合は、樹木等のデータを取り除き、標高のみのデータを作成する。

航空レーザ測量を用いて積雪深を求めるためには、無積雪期及び積雪期にそれぞれ航空レーザ測量を行う必要がある。無積雪期に行った航空レーザ測量から地表面の標高データを作成し、積雪期に行った航空レーザ測量から積雪表面の標高データを作成し、積雪表面の標高データから地表面の標高データを差し引いたものが積雪深となる。

3. 対象ダム流域

対象流域は図-4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239km²、流域の標高帯は400m～2,300m付近である。図-4には、環境省の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ている。図中の白線は標高1,400mの等高線であるが、標高1,400m付近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、分析に使用した資料を示す。航空レーザ測量は図-4の赤枠で示す範囲で実施した。測量範囲の面積は10km²、標高帯は1,100m～2,300m付近の主に西向き斜面である。測量範囲の植生は標高1,450m付近を境に森林と森林以外に分かれ、

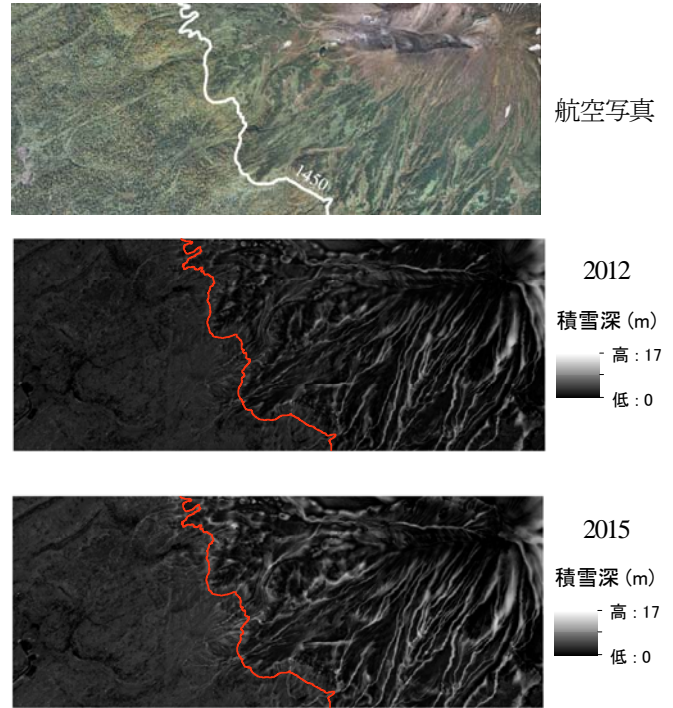


図-5 対象範囲の航空写真と計測された積雪分布

標高1,450m以上の範囲では、98%が森林以外である。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、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た。データの水平解像度は5mである。積雪深の計測精度は±30cm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。

4. 積雪分布の特徴

航空レーザ測量を用いて2012年及び2015年に計測した積雪分布を図-5に示す。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。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両年の積雪分布に同様のパターンが見られる。このような積雪分布の類似性に着目して、簡易かつ高精度に積雪分布を推定する手法が提案されている⁹⁾。

5. 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-6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2012年及び2015年の積雪深を概

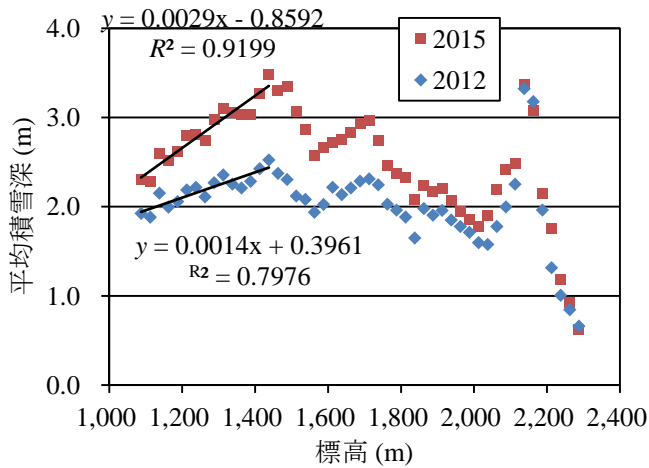


図-6 標高と積雪深の関係⁶⁾

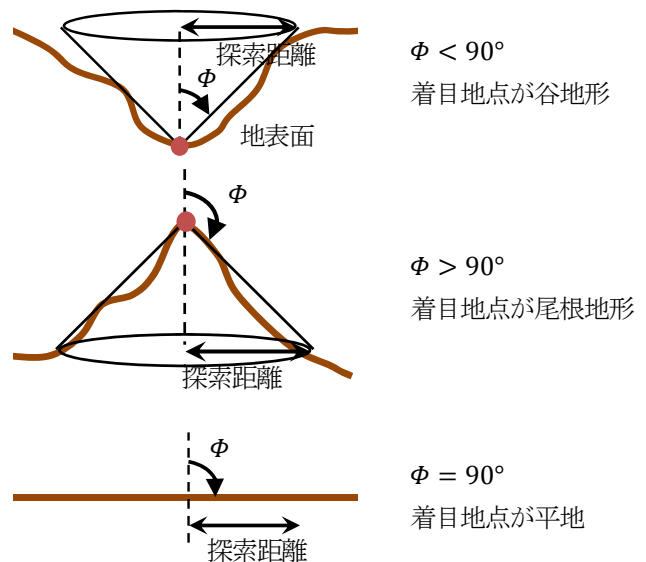


図-7 地上開度のイメージ

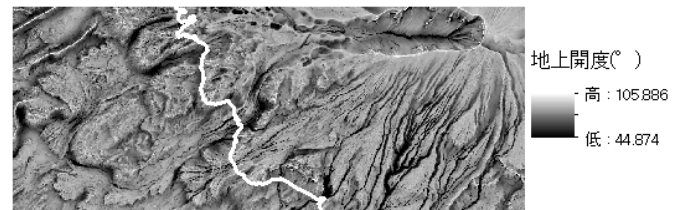


図-8 航空レーザ測量範囲の地上開度

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、4章において示したように、両年の積雪分布に同一のパターンが見られることが一因と考えられる。また、両者の差は、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。図には線形回帰式を示しているが、決定係数は概ね0.8を超えている。標高1,450m以上は森林限界以上の高標高帯と対応し、積雪深が大きく変動している。

6. 地上開度と高標高帯の積雪深の関係

5章において示した通り、樹林帯においては、標高を指標として簡易に積雪深を推定できる。高標高帯においても積雪深を簡易に推定できる指標があれば実務上有用である。そこで、既往研究において、高標高帯における積雪深は地形の凹凸に関係することが示されていることから、地上開度を指標として積雪深との関係を分析した。ここで、地上開度とは、横山ら⁷⁾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。

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

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。ここで、 Φ ：地上開度(°)、 ϕ_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とする天頂角の最大値(°)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。探索距離は100mとした。地上開度のイメージは、図-7を参照されたい。図-8に航空レーザ測量を実施した範囲の地上開度を示す。これは、

国土地理院がWebで公開している基盤地図情報数値標高モデルを(水平解像度10m)用いて計算した無雪期の地上開度(地表面の地上開度)である。森林限界を示した白線より右側の高標高帯に着目すると、谷の地上開度が小さく、尾根の地上開度が大きくなっており、明暗がはっきりしている。

無雪期における地表面の地上開度と積雪深との関係を図-9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、積雪深が線形に減少している。線形式の傾きは、各年の積雪の多寡が反映されている。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¹⁾、航空レーザ測量により計測された積雪深は、風による移動後の再堆積分布であると考えられる。航空レーザを行った範囲においては、積雪期に気温が0°Cを超えることがほとんどなく、積雪は軽く乾燥している(いわゆるパウダースノー)状態であり、強風による積雪の剥離、移動及び再堆積が活発に起こる。強風により移動した積雪は、積雪が捕捉されやすい谷に堆積し、積雪を捕捉しにくい尾根にはほとんど堆積しないことを示している。

このことから、森林限界以上の高標高帯においては、地表面の地上開度と積雪深との間の線形の関係を用いて、簡易に積雪深分布を推定することが可能である。線形式の傾きは毎

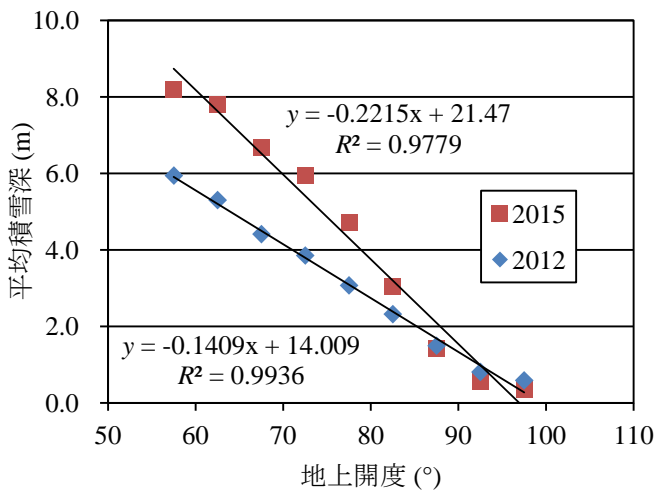


図-9 地上開度と高標高帯における積雪深の関係⁶⁾

年の積雪の状況により変化するが、地上開度が異なる複数の地点において積雪調査を行い、その結果を線形回帰分析することにより毎年の直線式を作成することができる。なお、国土地理院の基盤地図情報数値標高モデルにおいて、日本全国の標高データが公開されており、これを用いることで地上開度を算出することが可能である。

7. 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、樹林帯及び高標高帯毎に、16方位に区分して平均積雪深を算出した。図-10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、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なかったため仮説になるが、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剥離して移動し、再堆積した結果、風下側であり、積雪が堆積しやすい北東から南東にかけて（風背斜面）の積雪深が大きく、風上側であり、積雪が剥離しやすい北西から南西にかけて（風衝斜面）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。

8. まとめ

航空レーザ測量を用いて積雪深分布を計測し、積雪分布と地形との関係を分析した結果、以下に示す積雪分布の特徴を明らかにした。

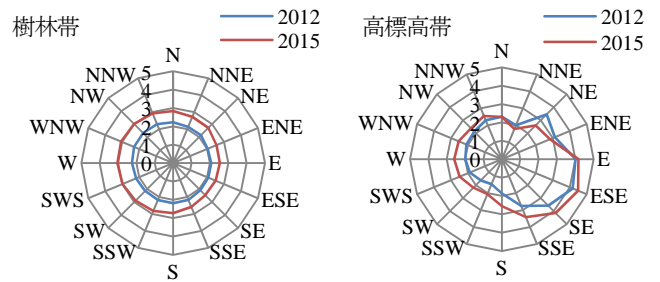


図-10 斜面方位と積雪深の関係⁶⁾

- ・ 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
- ・ 森林限界以上の高標高帯においては、地上開度の増加とともに積雪深が線形に減少する
- ・ 森林限界以上の高標高帯においては、積雪期の主風向に対して、風上側の積雪深が小さく、風下側の積雪深が大きい

このような積雪分布の特徴を用いることで、実務において積雪分布を簡易に推定することができる。

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。また、国土交通省忠別ダム管理支所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) (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. (<http://www.ceri.go.jp/contents/center/center07.html>)
- 3) 西原照雅, 谷瀬敦: 2カ年の航空レーザ測量結果を用いた山間部における積雪分布と地形の関係に関する研究, 北海道の雪氷第35号, pp.131-134, 2016.
- 4) 航空レーザ測量: 国土地理院. (http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser_index.html)
- 5) 西原照雅, 谷瀬敦: 積雪分布のパターンの類似性に着目した積雪分布の推定手法の検討, 土木学会論文集B1(水工学) (投稿中)
- 6) 西原照雅, 谷瀬敦, 渡邊和好: 森林限界以上の高標高帯における積雪分布と融雪・流出計算に適用する降雪分布について, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.72, No.4, I_475-I_480, 2016.
- 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.