

航空レーザ測量を活用した 森林限界以上の高標高帯における積雪分布に関する研究 A study of snow depth distribution in high elevation zone above forest limit using airborne laser scanning

西原照雅 ((独) 土木研究所 寒地土木研究所), 中津川誠 (室蘭工業大学大学院)
Terumasa Nishihara and Makoto Nakatsugawa

1. はじめに

積雪寒冷地では、融雪水をダムに貯留して夏季にかけての水需要を賄う。このため、ダム管理の現場では毎年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。

ダム流域のような山間部の積雪分布は、標高の低い樹林帯（以降、「森林内」と表記）と森林限界以上の高標高帯（以降、「森林外」と表記）で異なることが報告されている¹⁾。このうち、森林内の積雪深及び積雪相当水量については、標高の増加とともに線形に増加することが多数報告されており、この関係はダム管理の実務において流域の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²⁾。一方で、森林外の積雪深及び積雪相当水量は標高との間に線形の関係を示さない。例えば山田ら¹⁾は、大雪山系旭岳の森林外において積雪調査をした結果、積雪は凹部では多く、凸部では少なく、全体として地形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。しかし、森林外は、冬季の立ち入りに危険を伴うことから、広範囲にわたり積雪分布を面的かつ定量的に計測し、地形との関係を詳細に分析した事例はない。

そこで本研究では、忠別ダム流域において実施した航空レーザ測量結果を用いて、森林外の積雪分布と地形との関係を解析した。この結果から、森林外の積雪分布を簡易に推定する手法を提案する。

2. 対象流域

対象流域は図-1に示す忠別ダム流域である。標高帯は400m～2,300m付近である。図には、環境省が公表している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が、白線で示した標高1,400m付近を境に植生が森林から森林以外に変化し、

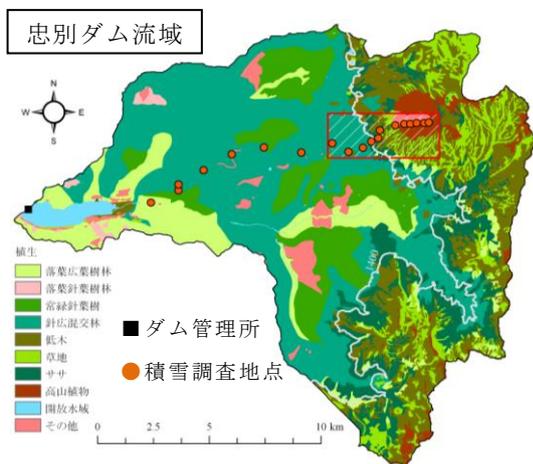


図-1 対象流域

流域面積の約6割が森林、約4割が森林以外である。積雪深分布の解析は、図-1の赤枠斜線で示す範囲で実施した航空レーザ測量結果を用いた。面積は10km²、標高帯は1,100m～2,300m付近の主に南～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、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日及び積雪期の2012年3月10日に実施し、二時期の測量の標高差を積雪深とした。データの水平解像度は5mである。なお、測量に

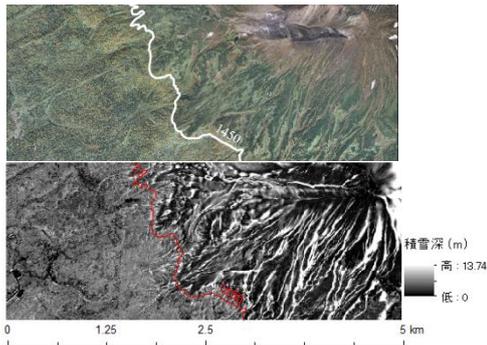


図-2 航空レーザ測量範囲の
航空写真（上）と積雪分布（下）

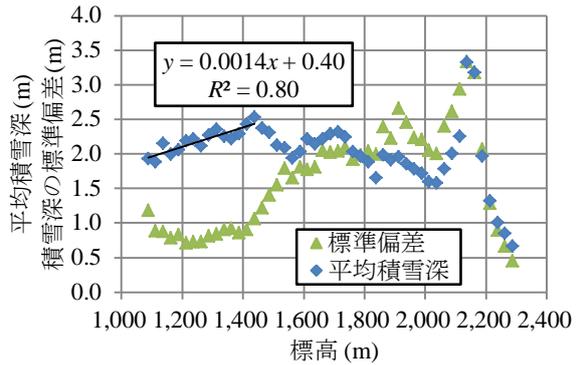


図-3 標高と積雪深及び標準偏差の関係

使用した機器の計測精度を基に算出した積雪深の計測精度は±30cmである。図-2に航空レーザ測量を実施した範囲の航空写真と測量日の積雪分布を示したが、森林限界である標高 1,450m 付近を境に積雪分布の特徴が大きく異なることが見てとれる。

3. 標高と積雪深の関係

航空レーザ測量で得られたデータは約 40 万データあり、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、幅を持った範囲に区分し、その範囲の平均積雪深を求め、地形因子との関係を考察する。

図-3 に標高と積雪深の関係を示す。標高 1,450m までの積雪深が増加している範囲は、主たる植生が森林である。この範囲の標高と積雪深について線形回帰分析を行った結果を図中に示したが、既往報告と同様に、高い相関で線形の関係が見られる。また、積雪深の標準偏差は 0.5~0.8 程度であり、既往報告と一致した傾向がみられる³⁾。次に、標高 1,450m 以上は、森林限界を超え、主たる植生が森林以外である。ここでは、既往報告と同様に、森林内と比較して積雪深が小さい傾向がある。また、標高 1,450m を超えると積雪深の標準偏差が急激に大きくなっており、森林外では積雪深のばらつきが大きいことがわかる。また、森林外では、積雪深の変動が大きく、標高のみをパラメータとして積雪深を表現することは困難であると考えられる。

4. 地上開度と積雪深の関係

山田ら¹⁾は、森林外の積雪は地形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。そこで、本研究では、地形の凹凸を表す指標として地上開度を用い、積雪深との関係を解析する。地上開度は、横山ら⁴⁾が開発した指標であり、式(1)で求められる。

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

ここで、 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出来る天頂角の最大値(°)である。地上開度は、探索距離を任意に指定でき、8 方位の天頂角の平均値を用いるため、方位及び局所地形に依存しない指標となる。着目する地点が谷の場合は地上開度が 90°以下、尾根の場合は地上開度が 90°以上であり、平地の場合は地上開度が 90°となる。なお、本研究で用いた地上開度の探索距離は 100m である。

図-4 に地上開度と積雪深の関係を示す。地上開度は 5°ピッチで区分し、平均積雪深を算出した。なお、積雪分布が森林外の特徴を示した標高 1,450m 以上のデータを抽

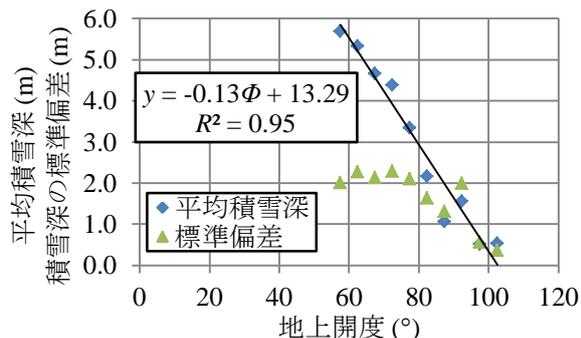


図-4 地上開度と積雪深及び標準偏差の関係

出している。図より、地上開度が大きくなる、つまり地形が谷から尾根に変化するにともない、積雪深が高い相関で線形に減少していることがわかる。また、積雪深の標準偏差を見ると、地上開度が90°までは概ね2.0程度となっており、森林外では谷地形であっても森林内より積雪深のばらつきが大きいことを示している。一方で、地上開度が90°を超えると、積雪深、標準偏差ともに小さく、森林外の尾根には積雪が堆積しづらいことを示している。

表-1 回帰係数

a_1	a_2
-0.205	19.105

表-2 全積雪量の推定結果(10³m³)

	航空レーザ	本手法
全積雪量	12,014	12,020

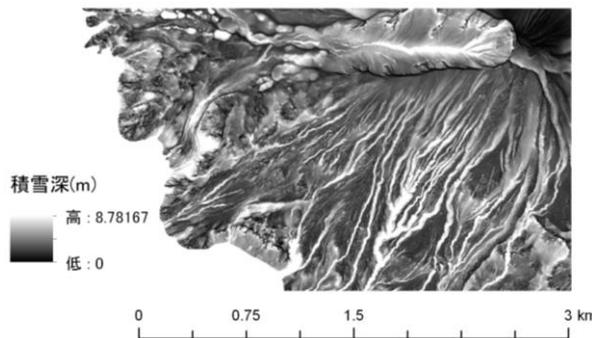


図-5 積雪分布の再現結果

5. 地上開度を用いた積雪分布の再現

4章における解析の結果、森林外の積雪分布は式(2)で表せることが明らかとなった。

$$SD = a_1\phi + a_2 \quad (2)$$

ここで、ここで、 SD ：積雪深(m)、 ϕ ：地上開度(°)、 a_1 及び a_2 ：回帰係数である。回帰係数は航空レーザ測量より得られたデータのうち、標高1,450m以上にある全データを対象とした線形回帰分析より決定した。結果を表-1に示す。この結果を用いて、航空レーザ測量範囲の積雪分布を再現した結果を図-5に示す。図を見ると、谷に沿って積雪が多く、尾根に沿って積雪が少なくなっており、森林外の積雪深分布の特徴を良く捉えている。航空レーザ測量により計測した積雪深を真値とすると、全メッシュのうち、誤差±50cm以内で積雪深を推定したメッシュの割合が27%、同じく誤差±1mの割合が58%であった。次に、図-5に示した範囲の全積雪量を推定した結果を表-2に示す。両者の全積雪量はほぼ同等であり、誤差は0.05%であった。以上より、地上開度を用いると、森林外の積雪分布を精度よく推定することが可能であると考えられる。

6. 地上開度を用いた積雪相当水量分布の推定

毎年航空レーザ測量を実施することは困難なため、ダム流域の積雪包蔵水量を推定する場合は、毎年の積雪調査結果を用いることとなる。そこで、忠別ダムで実施されている積雪調査のうち、森林外で実施されている8点について、地上開度と積雪深の関係を図-6に示した。図には各年の回帰直線を併せて示したが、積雪調査結果についても、地上開度と積雪深の間に線形の関係が見られた。しかし、積雪深を用いた場合は、別途積雪の密度を考慮する必要がある。そこで、より簡便に実務に適用できるよう、試みに積雪相当水量と地上開度の関係をプロットした。結果を図-7に示す。

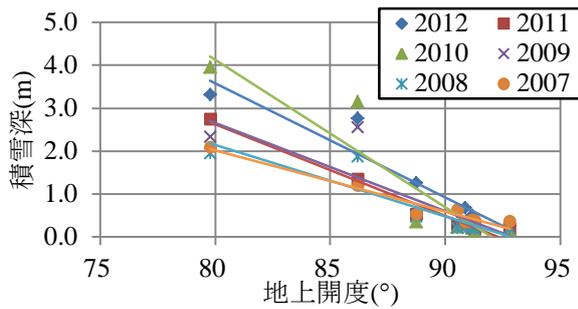


図-6 地上開度と積雪深の関係

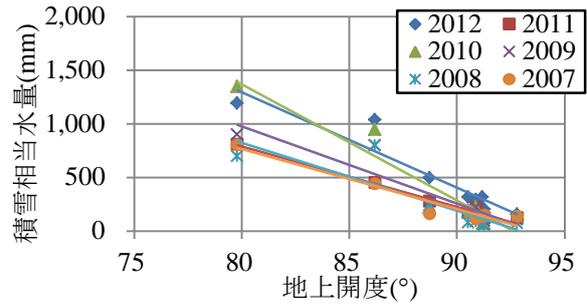


図-7 地上開度と積雪相当水量の関係

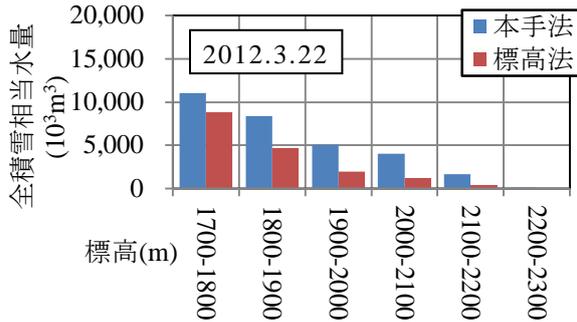


図-8 標高帯別全積雪相当水量

図-6と同様に、毎年の回帰直線を併せて示したが、積雪相当水量と地上開度の間にも線形の関係が見られた。図に示した6年間において、決定係数が最も低い年で $R^2=0.74$ であり、実務に適用するには十分な相関関係と考える。以上より、実務においては、地上開度と積雪相当水量の関係を用いることで、簡便かつ精度良く森林外の積雪相当水量を推定できることが明らかとなった。

最後に、標高1,700m以上の範囲に対し、積雪調査結果を用いて標高帯別の全積雪相当水量を推定した結果を図-8に示す。比較のために示した標高法とは、標高と積雪相当水量の間に試行錯誤により多項式をあてはめて推定した結果である。なお、標高1,700m以上は冬季の立ち入りが困難なため、積雪調査は尾根のみで行われている。図-8を見ると、すべての標高帯において、地上開度を用いて推定した全積雪相当水量が大きくなっている。これは、標高法では、積雪相当水量が小さい尾根上で計測した値が標高帯の代表値となっているためである。地上開度を用いた本手法は、積雪相当水量が多い谷地形を適切に評価し、全積雪相当水量を推定していると考えられる。

7. まとめ

森林限界以上の高標高帯で実施した航空レーザ測量結果から、森林外では、積雪深と地上開度の間に関係があることを明らかにした。さらに、森林外で行われた積雪調査結果について、積雪深及び積雪相当水量と地上開度の間に関係があることを明らかにした。この関係は、ダム管理上、非常に有用であると考えられる。

- 1) 山田知充, 西村寛, 水津重雄, 若浜五郎, 1978: 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, 1978.
- 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.
- 3) 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*, **No.31**, pp.41-44, 2012.
- 4) 横山隆三, 白沢道生, 菊池祐, 1999: 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.