

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

ESTIMATION OF SNOW WATER EQUIVALENT DISTRIBUTION OUTSIDE FORESTS USING AIRBORNE LASER SCANNING

西原照雅¹・中津川誠²

Terumasa NISHIHARA and Makoto NAKATSUGAWA

¹正会員 (独)土木研究所 寒地土木研究所水環境保全チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

²正会員 博士(工学) 室蘭工業大学大学院工学研究科くらし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

For better estimation of snow water equivalents for a dam basin in cold snowy regions, the relationship between snow depth distribution outside forests and topography was investigated using high-resolution digital elevation model (DEM) created from airborne laser scanning. A linear relationship between snow depth outside forests and overground-openness was clarified. A method to estimate snow depths and snow water equivalents outside forests was developed using this linear relationship.

Using the method, snow water equivalents in the Chubetsu Dam basin were estimated and resulted in estimates with a higher level of accuracy than those based on existing methods.

Key Words : snow depth distribution, outside forests, overground-openness, snow water equivalents

1. はじめに

積雪寒冷地の多目的ダムでは、春先の融雪水を貯留し、夏季にかけての水利用を賄っている。このため、ダムでは、積雪包蔵水量が最大となる毎年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。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、調査可能な地点は限られている。

ダム流域のような山間部の積雪深分布は標高の低い樹林帯と森林限界以上の高山帯で大きな違いがある¹⁾。このうち、森林内の積雪深分布については多数の報告がある^{1), 2), 3)}。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標準的な手法に用いられている⁴⁾。また、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、このデータを用いて積雪深分布と地形との関係が報告されている^{5), 6), 7)}。西原ら⁷⁾は、森林内の積雪深は標高に加えて、傾斜、曲率との間にも線形の関係があること、斜面方位には依存しないことを示した。さらに、この関係を用いて北海道内の複数のダム流域の積雪包蔵水量を推定したところ、標高のみを考慮した方法と比較して推定精度が向上したことを報告している^{7), 8)}。

一方で、森林限界以上の高山帯等、森林外の積雪深は標高との線形関係を示さない。森林内と比較して、積雪深及び積雪相当水量は小さい傾向があることは知られているものの、国内では報告例が少ない。例えば山田ら¹⁾は、北海道の大雪山旭岳の森林限界以上の高山帯における積雪深分布を調査している。高山帯で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、全体として地形の凹凸を平坦化するように堆積することを示した。また、島村ら³⁾は森林限界より高い標高帯の積雪相当水量を推定する際、関数で近似することが困難であることから、尾根上で実施した積雪調査の結果を平均して、一定値としている。海外では、アラスカのツンドラ地帯やロッキー山脈の森林限界以上の高山帯において積雪調査が行われ、この結果に基づくモデルの構築が行われた例^{9), 10)}がある。これらによると、森林外の積雪は風の影響を強く受け、風衝斜面や尾根のように強い風に吹きさらされる範囲で剥離し、風背斜面や森林のように風の弱い範囲に堆積することが報告されている。しかし、これらの報告は、限られた地点における調査やモデルによる計算結果を基にしており、高山帯等の森林外の積雪深分布について、広範囲に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。

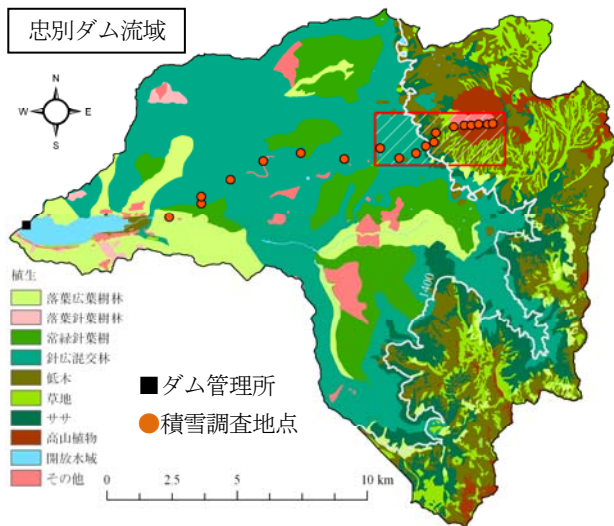


図-1 解析対象ダム流域

今後、地球温暖化により降雪量の変化が予想されている¹¹⁾。この中で北海道は、標高の低い地域における降雪量の減少が予測され、標高の高い地域における降雪量の増加が予測されている¹¹⁾。このため、今後、標高の高い地域の積雪は、水資源としての重要性が増してくると考えられる。したがって、標高の高い地域に多い森林外の積雪深分布の特徴を明らかにし、積雪深分布を精度良く推定する手法の開発が急務である。

そこで本研究では、流域面積の約4割が森林限界以上の高山帯である、忠別ダム流域において実施した航空レーザ測量結果から、森林外の範囲を対象に、積雪深分布と地形との関係を分析した。その結果を基に、森林内と森林外に分けて、ダム流域の積雪包蔵水量及び積雪相当水量分布を推定する手法を構築した。

2. 対象流域及び基礎資料

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239km²、標高帯は400m～2,300m付近である。流域の植生は、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、図-1のように分類した。図-1には標高1,400mの等高線を白線で示してあるが、この標高付近で植生が森林から森林以外に変化し、流域面積の約6割が森林、約4割が森林以外である。

次に、解析に使用した資料を示す。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～西向きの斜面である。測量範囲の植生は標高1,400m付近を境に森林と森林以外に分かれ、標高1,400m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、測量に使用した機器の計測精度

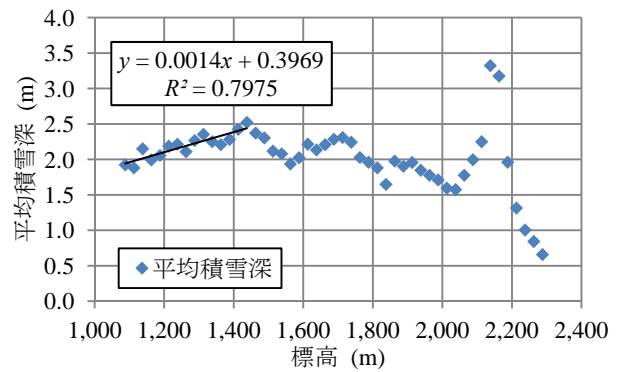


図-2 標高と積雪深の関係

を基に算出した、積雪深の計測精度は±30cmである。

また、流域の積雪相当水量分布の推定には、図-1に丸で示した地点の積雪調査結果を用いた。なお、流域の標高、傾斜、曲率、斜面方位及び地上開度の算出には、基盤地図情報の数値標高モデルを使用した。同データの水平解像度は10mである。さらに、水収支の算出には、ダム管理所でルーチン的に観測している気温、降水量、流入量を用いた。

3. 標高と積雪深の関係

航空レーザ測量で得られたメッシュデータは、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⁷⁾。

図-2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。積雪深は標高1,450mまで増加し、標高2,000m～2,200m付近で急激に増加減少するものの、標高1,450m以上では徐々に減少する傾向が見られる。

はじめに、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範囲と対応している。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^{1), 2), 3)}と同様に、高い相関で線形の関係が見られる。

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の範囲と対応している。ここでは、既往報告^{1), 3)}と同じく、森林内と比較して積雪深が小さい傾向がある。減少の程度を見ると、標高2,000m付近まではほぼ一定の割合で減少しているように見えるものの、標高2,000m～2,100m付近で急激な増加、標高2,100m以上で急激な減少が見られる。このような積雪深の変動を、標高のみをパラメタとして説明することは困難と考えられることから、本研究では、標高以外のパラメタとの関係を分析する。なお、図-1において積雪深は、標高1,450mまでが森林内、標高1,450m以上が森林外の特徴を示したため、4章では、森林外の特徴を示した標高1,450m以上の範囲に限って分析する。

4. 森林外における地形の凹凸と積雪深の関係

山田ら¹⁾は、大雪山旭岳の森林限界を超えた高山帯における積雪は、凹部で多く、凸部で少なく、全体として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現する指標として、曲率と地上開度の2つについて、積雪深との関係を分析する。なお、3章と同様、幅を持った範囲に区分し、その範囲の平均積雪深を求め、曲率及び地上開度との関係を考察する。

地上開度は、横山ら¹²⁾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。

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

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となる。

図-3に、航空レーザ測量を実施した範囲の航空写真と地上開度を示す。地上開度の探索距離は100mとした。地上開度は、周囲から高く突き出ている地点、つまり山頂や尾根で大きくなり、窪地や谷底では小さくなる。図を見ると、尾根に沿って地上開度が大きく、谷地形である溪流に沿って地上開度が小さいことがわかる。

はじめに、図-4に曲率と積雪深の関係を示す。曲率は0.02ピッチで区分し、平均積雪深を算出した。なお、曲率が負は凸地形、正は凹地形を表す。図を見ると、曲率が大きくなるに伴い、積雪深が大きくなるのがわかる。これは、地形が凸地形から凹地形になるに伴い、積雪が堆積しやすくなることに対応する。細かく見ると、曲率が-0.2~0.0付近及び0.0~0.2付近を、それぞれ直線と対数曲線で近似できる。なお、曲率が-0.2を下回る範囲及び0.2を上回る範囲はサンプル数が少ないため、平均積雪深に大きな変動が現れる。しかし、この範囲の曲率は流域面積に占める割合が1%以下であり、検討対象外として問題無いと考える。

次に、地上開度と積雪深との関係を図-5に示す。地上開度は5°ピッチで区分し、平均積雪深を算出した。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伴い、積雪深が高い相関で線形に減少していることがわかる。なお、積雪深が5mを超える地上開度60°付近についても、十分なサンプル数を確保している。

ここまで、曲率と地上開度について積雪深との関係を分析したところ、両者とも簡単な関数で積雪深との

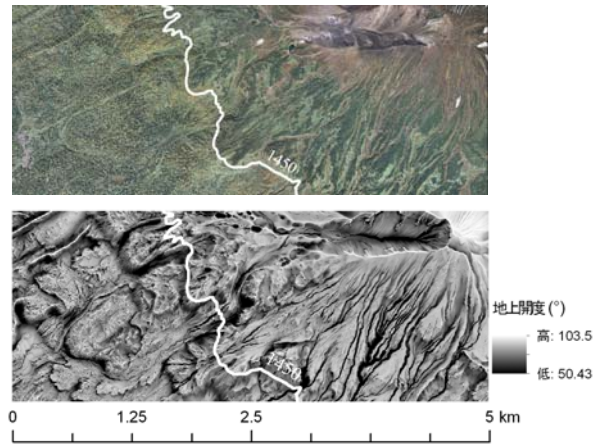


図-3 航空レーザ測量範囲の航空写真と地上開度(°) (探索距離100m)

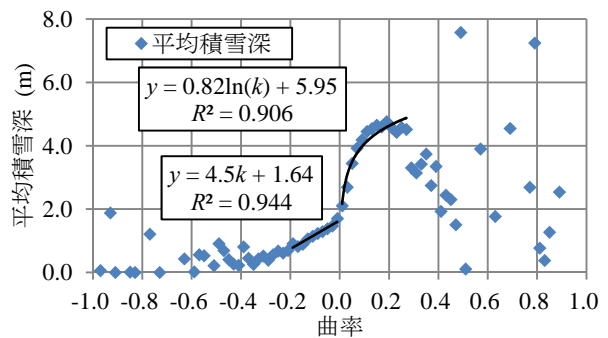


図-4 曲率と積雪深の関係

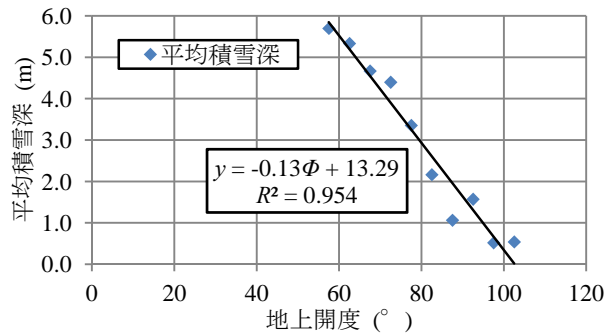


図-5 地上開度と積雪深の関係

関係を表現できる可能性があることがわかった。しかし、両者を比較すると、地上開度を用いた場合に、積雪深との関係を1つの直線で表せる、大きな積雪深を再現できるといったメリットがある。したがって、以降、地上開度を用いて積雪深分布の再現を試みる。

5. 森林外の積雪深分布の再現

4章において、森林外の積雪深は地上開度との間に線形の関係があることを明らかにした。本章では、この関係を用いて航空レーザ測量範囲のうち、森林外の積雪深分布を再現する。地上開度を用いると、森林外の積雪深は式(2)で表せる。

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

ここで、 SD ：積雪深(m)、 ϕ ：地上開度($^{\circ}$)、 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。以降、式(1)を用いて推定した積雪深分布と航空レーザ測量より求めた積雪深分布との比較を行い、本手法の精度を検証する。

表-1 回帰係数

a_1	a_2
-0.205	19.105

はじめに、航空レーザ測量を実施した範囲のうち、森林外の全積雪量を求める。全積雪量は、メッシュ積雪深にメッシュの面積を乗じ、対象範囲について合算して求めた。表-2に航空レーザ測量より求めた全積雪量と式(1)を用いて推定した全積雪量を示す。両者の全積雪量はほぼ同等であり、誤差は0.05%であった。

表-2 全積雪量(10^3m^3)

	航空レーザ	本手法
全積雪量	12,014	12,020

次に、図-6に式(1)を用いて推定した積雪深分布を示す。図を見ると、谷に沿って積雪の多い範囲が分布し、尾根に沿って積雪の少ない範囲が分布しており、既往報告^{9), 10)}で示されている森林外の積雪深分布の特徴を良く捉えている。図-7には、推定した積雪深と航空レーザ測量より求めた積雪深の絶対誤差を示した全メッシュのうち、誤差 $\pm 50\text{cm}$ 以内で積雪深を推定したメッシュの割合が27%、誤差 $\pm 1\text{m}$ 以内で推定したメッシュの割合が58%であった。

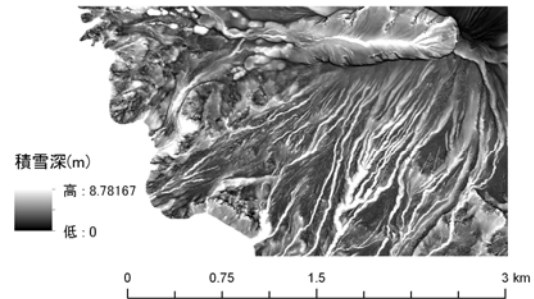


図-6 推定した積雪深 (森林外・標高1,450m以上)

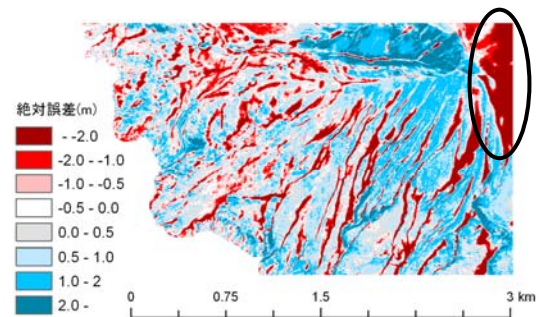


図-7 推定した積雪深の絶対誤差

これらの結果から、森林外の積雪深は地上開度を用いて良好に再現できることが確認された。一方で、図-7を見ると、深い谷の積雪深を過小評価する傾向がある。森林外の深い谷では、局地的に10mを超える積雪が見られる。本研究では、地上開度を用いて森林外における平均的な積雪深分布の特徴を捉えたものの、局所的な大きい積雪深を再現するには至らなかった。また、図-7の丸で示した範囲は積雪深を過小に推定している。この付近には旭岳山頂があり、斜面方位が西向きから東向きに変化する。積雪深を過小評価した範囲は、なだらかな東向き斜面である。大雪山周辺の高山帯では、冬期に西からの季節風が卓越すると考えられ、Liston⁹⁾ら及びMacDonaldら¹⁰⁾の報告にあるとおり、風背斜面に当たる東向き斜面の積雪深が大きくなったと考えられる。しかし、ここはなだらかな開けた斜面であるため、地上開度が大きい。このため積雪深が過小に推定されたと考えられる。

6. ダム流域の積雪相当水量分布の推定

5章では、地上開度を用いて森林外の積雪深分布を良好に再現できることを確認した。本章では、地上開度と毎年忠別ダムで行われている積雪調査結果を用いて、忠別ダム流域の積雪相当水量分布を推定する。

忠別ダムでは、図-1に示した19地点において、毎年積雪調査を実施している。調査地点の標高帯は400m～2,200m付近であり、19点のうち11点が森林内、残りの8点が森林限界を超えた森林外に位置している。ダム管理の実務において積雪包蔵水量を推定する際は、

標高と積雪相当水量の間に、森林内は線形式、森林外は試行錯誤により多項式を当てはめ、標高帯毎に積雪相当水量を推定し、合算する。以降、実務で採用されている手法を「標高法」と表記する。

本研究では、森林内と森林外で積雪深分布の特徴が異なることを考慮し、ダム流域の森林限界である標高1,400mを境に、森林内と森林外に分けて積雪相当水量を推定する。森林内の積雪相当水量分布は、西原ら⁷⁾が提案した地形考慮法を用いて推定する。同手法は、標高に加えて、傾斜、曲率、斜面方位をパラメタとして積雪深を推定する手法である。使用する積雪調査地点は森林内の11点である。なお、積雪密度は、観測時期が同じであれば標高に関わらずほぼ一定値となる(例えば小池ら¹³⁾)ことが示されているため、積雪調査地点11点の各年の平均値を用いて、一定値とした。

森林外の積雪相当水量分布は、森林外に位置する8点の積雪調査結果と地上開度を用いて推定する。はじめに、森林外にある積雪調査地点8点の地上開度分布と、式(2)に示す地上開度と積雪深との線形関係の有無を確認するため、図-8に積雪調査地点の地上開度と積雪深をプロットした。標高の高い範囲は、尾根沿いに調査地点が多いため、地上開度の大きい調査地点が

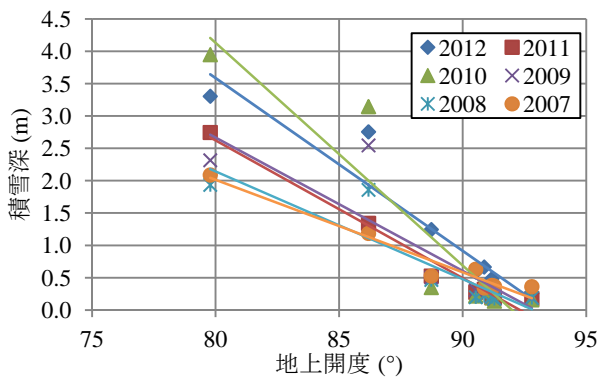


図-8 積雪調査地点の地上開度と積雪深（森林外）

表-3 ダム流域の積雪包蔵水量(10³m³)

	本手法	標高法	水収支
2007	135,842	141,337	158,818
2008	127,300	143,332	146,880
2009	160,869	180,337	175,779
2010	192,076	192,279	162,342
2011	142,359	179,854	129,751
2012	184,927	190,584	155,579
平均	157,229	171,287	154,858

若干多い。しかし、図を見ると、線形回帰式を作成できる程度に、複数の地上開度の地点で調査がなされていると考えられる。また、各年の結果を見ると、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ことがわかる。各年の回帰直線を図に示したが、相関係数は最も低い年で $R^2 = 0.75$ であった。また、近傍にある旭川地点及び美瑛地点のアメダスで観測された積雪深と比較すると、多雪年（例えば2010年及び2012年）は回帰直線の傾きが大きく、少雪年（例えば2007年）は傾きが小さい傾向が見られた。地上開度が90°を超えた範囲は、地形的に雪が積りにくい尾根地形であるため、年変動が小さいと考えられる。

紙面の制約から図は割愛するが、地上開度と積雪相当水量についても、図-8と同様の線形関係が見られた。各年の回帰直線の相関係数は、最も低い年で $R^2 = 0.74$ であり、十分な精度を確保していると考えられる。積雪深から積雪相当水量を求める際は、積雪密度が必要となるが、森林外の積雪調査地点のうち、積雪深が50cmを下回った地点の積雪密度は600kg/m³を超える大きな値であった。このため、森林内のように積

雪密度を一定値で与えた場合、積雪相当水量の推定精度が低くなることが考えられる。しかし、積雪相当水量と地上開度の関係式を用いれば、積雪密度を別途考慮する必要が無い。そこで森林外は、積雪調査結果を式(3)に当てはめて線形回帰分析を行い、積雪相当水量を直接求めた。なお、直線の傾きは毎年異なるため、各年の積雪調査結果から、各年の回帰係数を決定した。

$$SWE = b_1 \phi + b_2 \quad (3)$$

ここで、 SWE ：積雪相当水量(mm)、 ϕ ：地上開度(°)、 b_1 及び b_2 ：回帰係数である。なお、実用性から、積雪相当水量を推定するメッシュの大きさは100mとした⁷⁾。

はじめに、2007年～2012年の積雪調査日におけるダム流域の積雪包蔵水量を表-3に示す。比較のため、標高法による推定結果と水収支を併せて示す。水収支は鳥谷部ら¹⁴⁾と同じ方法で算出し、期間は積雪調査日の翌日から同年6月30日までとした。水収支を真値とし、RMSEを算出すると、本手法で $22,502 \times 10^3 \text{m}^3$ 、標高法で $28,783 \times 10^3 \text{m}^3$ であり、標高法と比較して本手法の精度が高い。また、各年の推定値の相対誤差を見ると、本手法で-14%～19%、標高法で-11%～39%であり、本手法を用いると、誤差が20%以内に収まった。

次に、本手法と標高法で求めた標高100m毎の全積雪相当水量を図-9に示す。森林限界である標高1,400m以上に着目すると、標高1600m～1,700mまでは本手法で推定した全積雪相当水量が少ない傾向があり、この標高帯を超えると関係が逆転する。森林外の積雪調査地点は、標高1,700mまでは地上開度90°以下の谷に、標高1,700m以上では地上開度が90°以上の尾根に位置している。つまり、標高法では、標高1,700mまでは積雪が堆積しやすい地点、標高1,700m以上では積雪が堆積しづらい地点の積雪深を標高帯の代表値としている。一方で、地上開度は標高に依存せず、概ね70°～100°の間に分布しており、地上開度を用いた本手法は、積雪が堆積しやすい地点、しづらい地点の両方を考慮している。このことにより、標高1,700m付近を境に全積雪相当水量が逆転したと考えられる。

現在のダム管理では、立ち入ることに危険を伴うことから、標高の高い範囲の積雪調査は尾根を中心に行われている。しかし、図-9によると、尾根上で積雪調

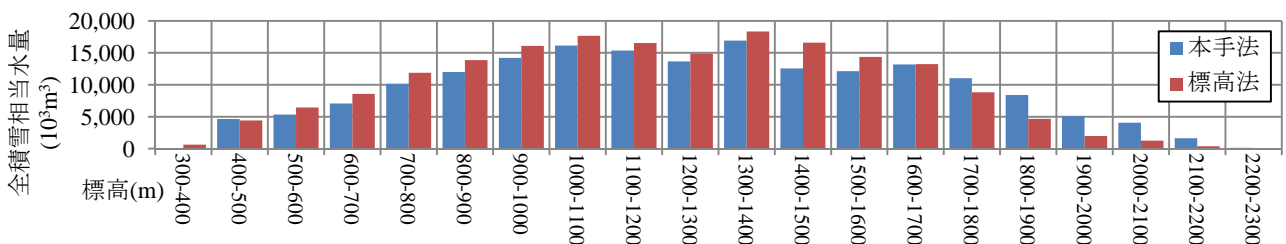


図-9 標高帯毎の全積雪相当水量（2012年3月22日）

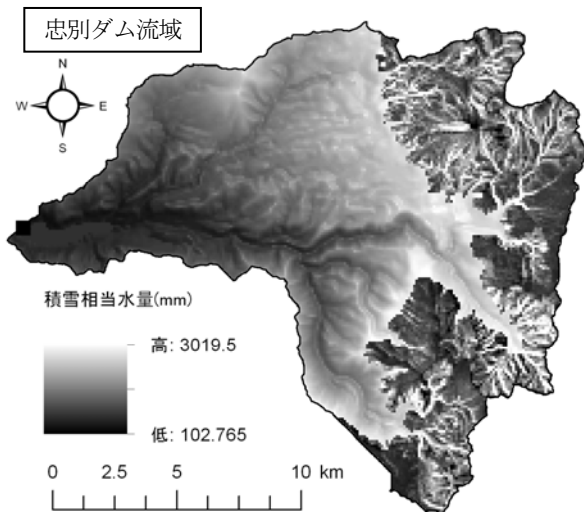


図-10 積雪相当水量分布 (2012年3月22日)

査が実施されている標高1,700m以上では、標高法で推定した全積雪相当水量が、本手法と比較して56%過小評価された。森林外の積雪相当水量を精度良く推定するためには、安全を確保できる範囲で、地上開度が小さい地点を積雪調査地点に加えるべきである。

最後に、本手法で推定した積雪相当水量分布を図-10に示す。植生が森林から森林以外に変化する標高1,400mを境に異なる手法を用いたため、この積雪相当水量に段差が生じる。植生限界付近には高木から低木に遷移する領域があり、この遷移に合わせて積雪深も遷移していると考えられる。このような遷移領域の積雪深分布の解明は今後の課題である。

7. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 二時期の航空レーザ測量より求めた、森林外における積雪深の空間分布と地上開度との関係を分析した。結果、森林外の積雪深は、地上開度との間に線形の関係があることを明らかにした。
- 2) 地上開度と積雪深の線形関係を用いて、航空レーザ測量を行った範囲のうち、森林外の積雪深を再現し、良い精度で再現できることを示した。
- 3) 忠別ダムの森林外で実施された積雪調査の結果について、調査地点の地上開度と積雪深及び積雪相当水量の間に線形の関係があることを明らかにした。線形回帰式の傾きは、多雪年ほど大きく、少雪年ほど小さい傾向があることを明らかにした。
- 4) 積雪深分布の特徴が異なる森林内と森林外に分けて、ダム流域の積雪包蔵水量を推定する手法を構築した。本手法を用いて忠別ダムの積雪包蔵水量を推定し、水収支を真値として評価した結果、ダム管理の実務で採用されている手法と比較して、精度良く積雪包蔵水量を求めることができた。
- 5) 森林外の積雪深及び積雪相当水量を精度良く推定するには、尾根付近に加えて、地上開度が小さい

地点で積雪調査を行う必要があることを示した。

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、国土交通省忠別ダム管理支所に測量場所の提供やデータの提供等の多大な協力を頂いた。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) 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.
- 3) 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.
- 4) (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.
- 5) 花岡正明, 本間信一, 渡正昭, 飯田肇: レーザ計測を用いた積雪深分布解析, 平成19年度砂防学会研究発表会概要集, pp.524-525, 2007.
- 6) 鳥谷部寿人, 中津川誠, 石谷隆始, 菊地渉, 山下彰司, 清治真人: 航空レーザ測量成果を用いたダム流域における積雪深分布の把握, 水工学論文集第54巻, pp.427-432, 2010.
- 7) 西原照雅, 中津川誠, 浜本聡: 航空レーザ測量を活用したダム流域の積雪深分布の推定, 河川技術論文集第18巻, pp.465-470, 2012.
- 8) 西原照雅, 中津川誠: 航空レーザ測量を活用したダム流域の積雪包蔵水量の推定, 水文・水資源学会2012年度研究発表会要旨集, pp.10-11, 2012.
- 9) Liston, G. E. and Sturm, M.: A snow-transport model for complex terrain, Journal of Glaciology, Vol.44, No.148, pp.498-516, 1998.
- 10) MacDonald, M. K., Pomeroy, J. and Pietroniro, A.: On the importance of sublimation to an alpine snow mass balance in the Canadian Rocky Mountains, Hydrol. Earth syst. sci., 14, pp.1401-1415, 2010.
- 11) 気象庁: 地球温暖化予測情報第7巻, 2008.
- 12) 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.
- 13) 小池俊夫, 高橋裕, 吉野昭一: 融雪量分布のモデル化に関する研究, 土木学会論文集第363号/II-4, pp.165-174, 1985.
- 14) 鳥谷部寿人, 中津川誠: 高解像度DEMの積雪分布を用いたダム流域の積雪水量の推定の試み, 水工学論文集第55巻, pp.421-426, 2011.

(2012. 9. 30受付)