

積雪・融雪状況に適応した寒冷地ダムの流水管理に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：水環境保全チーム

研究担当者：矢部浩規，西原照雅，水垣滋，
数馬田貢，丸山政浩

【要旨】

積雪寒冷地のダム流域における積雪包蔵水量を精度良く推定するため、積雪期と無積雪期の二時期の航空レーザ測量結果を基に作成した高解像度 DEM より、積雪深分布と地形との関係を分析した。分析は、積雪分布の特徴が異なる森林内と森林外に分けて行った。この結果を基に、ダム流域の積雪包蔵水量を推定する手法を構築した。この手法を用いてダム流域の積雪包蔵水量を推定した結果、積雪調査や既存手法による推定結果と比較して、精度良く積雪包蔵水量を推定することができた。

キーワード：積雪深分布，積雪相当水量分布，積雪包蔵水量，森林，地形，航空レーザ測量

1. はじめに

積雪寒冷地の多目的ダムでは、冬季にダム流域に蓄積された積雪が、春先の融雪に伴い流出する水を貯留し、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月頃に積雪調査を行い、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る調査であり、雪崩等の危険と多大な労力を伴うことから、調査できる地点は限られている。現在のダム管理の実務においては、流域内の数点～数十点の積雪調査結果を用いて、流域の積雪包蔵水量を推定するのが一般的である。

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（森林内）と森林限界以上の高山帯（森林外）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⁾。一方で、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。このため、森林外の積雪分布の推定に関しては、ダム管理の実務に適用できる手法が確立されていないのが現状である。

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、このデータを用いた様々な解析が行われている。積雪に関しては、無積雪

期と積雪期の二時期の航空レーザ測量の標高差から積雪深を求め、地形との関係を分析した Hopkinson ら⁵⁾、岡本ら⁶⁾、秋山ら⁷⁾、花岡ら⁸⁾の研究が報告されている。

このように、山間部の積雪分布を対象とした研究は、多数あるものの、ダム管理の実務への適用を視野に入れた研究は少ないのが現状である。特に、森林外の積雪分布については、報告例がない。また、航空レーザ測量を実施することにより、広範囲の三次元空間データを高密度に得ることが可能であるものの、ダム流域のような広範囲の航空レーザ測量を毎年行うことは、コストが高く現実的ではない。このため、限られた範囲の航空レーザ測量結果から積雪深分布の特徴を捉え、毎年ダムで実施されている積雪調査や、流域内の定点で自動観測している積雪深といったサンプルデータを用いて、ダム流域の積雪深分布や積雪包蔵水量を精度良く推定する手法の開発が期待されている。

そこで、本研究では、航空レーザ測量により広範囲の積雪深を計測した結果を用いて、積雪深分布と地形との関係を分析した。さらに、分析した関係を基に、毎年ダムで実施されている積雪調査結果等を用いて、ダム流域の積雪分布、積雪相当水量分布、積雪包蔵水量を精度良く推定する手法を構築した。なお、前述したように森林内と森林外では積雪分布の特徴が異なる。そこで、本研究は森林内と森林外に分けて、検討を行っている。

2. 森林内の積雪分布

土地利用の多くが森林であるダム流域を対象とした研

究に、鳥谷部ら⁹⁾ ¹⁰⁾や西原ら¹¹⁾の研究がある。これらの研究では、定山溪ダム流域の一部で実施した二時期の航空レーザ測量結果より高解像度 DEM (Digital Elevation Model: 数値標高モデル) を作成し、二時期の標高差から求めた積雪深分布を分析している。鳥谷部ら⁹⁾はメッシュの大きさが積雪深分布に与える影響を分析し、大地形的には積雪深と標高の高い相関が認められるものの、微地形的には標高との相関が小さくなり、尾根部や谷底部では曲率の影響が大きくなることを報告している。また、鳥谷部ら¹⁰⁾は同データを標高 25m ピッチに区分し、平均積雪深及び積雪深の標準偏差と標高の関係を分析し、標高からこれらを推定する式を提案した。西原ら¹¹⁾はこれを発展させ、標高に加えて斜面方位を導入した。両研究とも、提案した式を用いて、ダム流域における毎年の積雪包蔵水量を推定し、既存の方法と比べて精度が向上したことを報告している。しかし、これらの研究を概観すると、考慮している地形因子が異なり、積雪深分布の特徴が異なる森林と森林外を区別していない。

著者らは、定山溪ダム流域において広範囲に実施された航空レーザ測量結果を入手した。そこで本研究では、入手した航空レーザ測量結果から求めた積雪深分布と標高、傾斜、曲率、斜面方位との関係を分析し、これらの地形因子を考慮して積雪深を推定する手法を提案する。さらに、この手法を用いてダム流域の積雪包蔵水量を簡易に推定する方法を構築する。なお、本研究では森林内の積雪深分布に焦点を当てるため、大部分が森林の範囲を積雪深分布の解析範囲とした。

2. 1 積雪深分布の解析範囲及び基礎資料

積雪深分布の解析対象は定山溪ダムである。定山溪ダムは、石狩川水系豊平川流域の上流部に位置し、流域面積は 104km²、標高帯は 300m~1,300m 付近である。流域の植生は環境省が WEB で公開している自然環境保全基礎調査の結果を用い、図-2.1 に示すように 9 分類した。流域の土地利用の 8 割が森林である。

次に、解析に使用した資料を示す。積雪深分布の解析は、図-2.1 の赤枠白斜線で示した範囲において実施された航空レーザ測量結果を用いた。面積は 67km²、ダム湖の左岸側の南~南西向きの斜面であり、土地利用は 86% が森林である。無積雪期及び積雪期の測量は、それぞれ 2010 年 6 月 6 日~12 日、2010 年 4 月 8 日に実施し、二時期の測量の標高差を積雪深とした。航空レーザ測量範囲には、テレメータで積雪深を自動観測している春香山地点が含まれるため、同地点の航空レーザ測量日の積雪

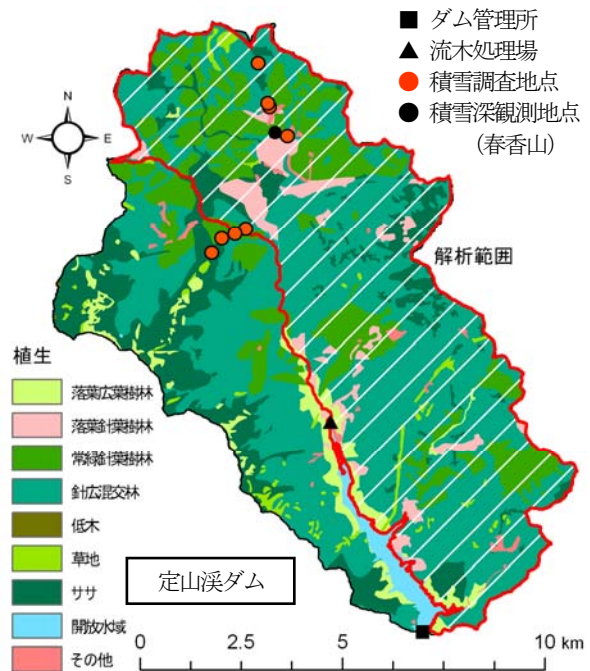


図-2.1 積雪深分布の解析範囲

深を比較したところ、テレメータで観測した積雪深が 2.18m に対し、航空レーザ測量より求めた積雪深は 2.13m であり、精度の高い計測結果が得られている。なお、データの水平解像度は 5m である。

また、水収支の算出には、ダムで連続観測している気温、降水量、流入量を用いた。積雪包蔵水量の推定に必要な、流域の標高、傾斜、曲率及び斜面方位算出には、国土地理院が WEB で公開している基盤地図情報の数値標高モデルを使用した。

2. 2 地形と積雪深の関係

航空レーザ測量により得られたサンプルデータは、約 250 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。このため本研究では、標高を 25m ピッチ、傾斜を 2°ピッチ、曲率を 0.02 ピッチ、斜面方位を 16 方位に区分して平均積雪深を求め、平均積雪深とこれら地形因子との関係を分析する。

2.2.1 標高と積雪深の関係

はじめに、標高と積雪深の関係である。既往の研究は、標高の増加とともに積雪深が線形に増加すること（例えば山田ら¹⁾）を報告している。図-2.2.1 に示した解析範囲の積雪深と標高の関係をみると、積雪深がピークに達する標高 975m までは、標高の増加とともに積雪深は高

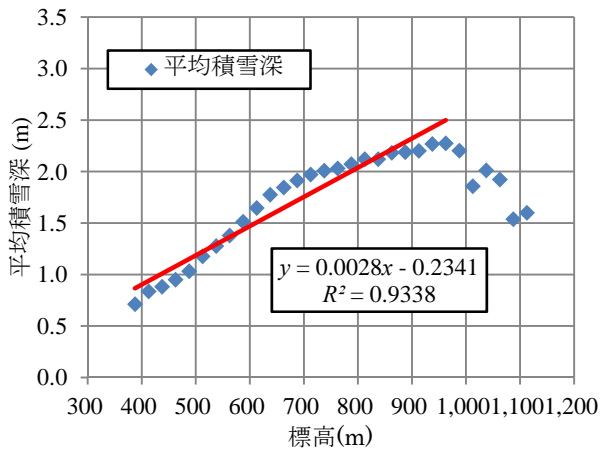


図-2.2.1 標高と積雪深の関係

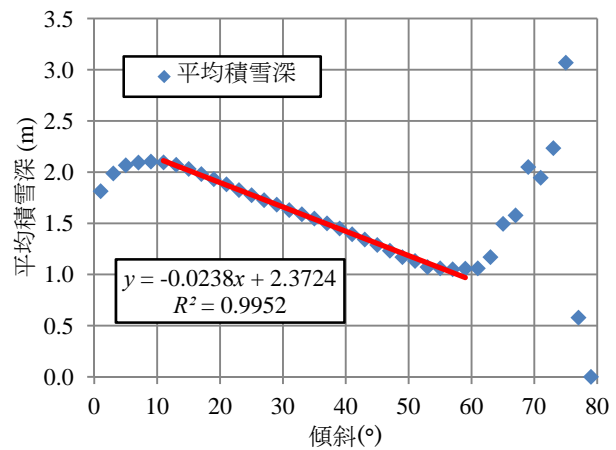


図-2.2.2 傾斜と積雪深の関係

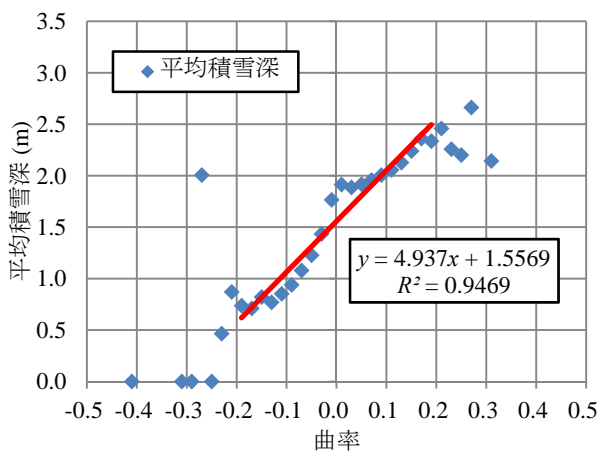


図-2.2.3 曲率と積雪深の関係

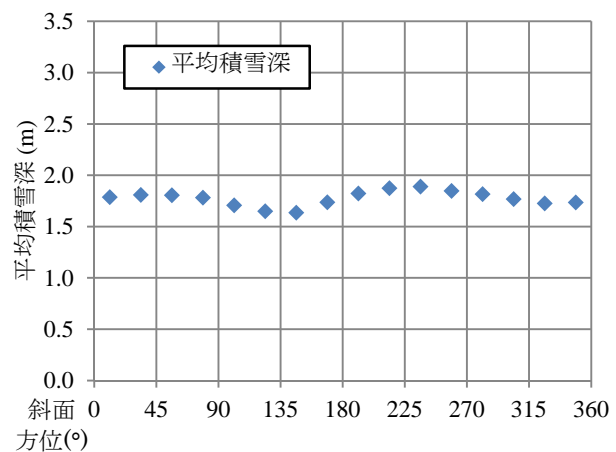


図-2.2.4 斜面方位と積雪深の関係

図-2.2 地形と積雪深の関係

い相関で線形に増加しており、既往研究と傾向が一致している。標高が 975m を超えると積雪深が減少に転じるが、ここは標高帯の面積に占める森林面積の割合が 60% 以下になり、ササや草地の占める割合が大きく、尾根に近い標高帯である。笹ら¹²⁾や島村ら³⁾により、植生が森林以外の尾根では、風により積雪が移動しやすく、森林内と比較して積雪深は減少することが報告されている。このことにより、積雪深が減少に転じたと考える。なお、この範囲のサンプル数は全体の 1% 以下であり、このことも影響している可能性がある。

2.2.2 傾斜と積雪深の関係

次に、傾斜と積雪深の関係である。図-2.2.2 に積雪深と傾斜の関係を示す。図より、傾斜が 10°~60° 付近の範囲では、傾斜の増加とともに積雪深は高い相関で線形に減少している。また、傾斜が 0°~10° 付近までは傾斜が増加するとともに積雪深は対数関数的に増加し、10° 付近

でピークとなっている。この範囲は、尾根付近で、植生がササの範囲が比較的多く含まれているため、10° 付近をピークに積雪深が小さくなったと考えられる。さらに、傾斜が 60° を超えると、積雪深が急激に増加し、75° 付近から、急激に減少している。この積雪深の急増は雪庇によるもの、急減は積雪がほとんど堆積できない傾斜に達したことが要因と考える。なお、この範囲は、サンプル数が全体の 2% 以下であり、このことも影響している可能性がある。

2.2.3 曲率と積雪深の関係

続いて、図-2.2.3 に曲率と傾斜の関係を示した。曲率は、負の値が凸地形、正の値が凹地形を表す。図を見ると、曲率が -0.2~0.2 の範囲で、曲率が増加する（地形が凸地形から凹地形に変化する）とともに、高い相関で積雪深が増加していることがわかる。なお、曲率 -0.2~0.2 の範囲外はサンプル数が全体の 1% 以下であり、このこ

とが、積雪深を急激に変動させていると考える。

2.2.4 斜面方位と積雪深の関係

最後に、図-2.2.4 に斜面方位と積雪深の関係を示す。本解析は南～南西向きの斜面を対象としているが、データの水平解像度が5mであり、微地形を捉えている。このため、16方位それぞれのサンプル数は全体の4%～9%の間にあり、方位による偏りのないデータである。図より斜面方位と積雪深の関係をみると、周期性が見られるものの、これまでに考察した3パラメタと比較して変動が小さい。西原ら¹¹⁾は、定山溪ダム流域内の北東向きの斜面における航空レーザ測量結果から、積雪深と斜面方位の関係を分析し、積雪深は斜面方位に対して周期的に変動すること、気温が高い午後に太陽放射を受けて熱負荷の大きい南西斜面で積雪深が小さく、反対に熱負荷の小さい北東斜面で積雪深が大きいことを報告している。しかし、西原らが対象とした範囲は約50%が森林以外の植生であるのに対し、本研究は86%が森林の範囲を対象としている。このことにより、斜面方位に対する積雪深分布の特徴に差が生じたと考える。

2.2.5 他の地域で実施された航空レーザ測量との比較

ここからは、北陸地方の立山において64km²の範囲で行われた二時期の航空レーザ測量結果を基に、本研究と同様に積雪深と標高、傾斜、曲率、斜面方位との関係を分析した花岡ら⁸⁾の報告との比較を行う。花岡らの報告では、標高2,500m程度までは標高の増加とともに積雪深がほぼ線形に増加し、標高が2,500mに達した後、積雪深が減少に転じている。傾斜が40°～45°まで積雪深はほぼ一定であり、40°～45°を超えると積雪深は減少傾向となっている。曲率が0.2～0.2の間で、曲率の増加とともに積雪深がほぼ線形に増加している。また、斜面方位に対して積雪深が周期1で周期的に変動し、北～東向き斜面で積雪深が大きく、南～西向き斜面で積雪深が小さい傾向が得られている。本研究で得られた結果と比較すると、傾斜が小さい範囲と斜面方位を除いて、傾向が一致する。従って、本研究で得られた積雪深と標高、傾斜、曲率との関係は一般的な傾向であると考えられる。なお、傾斜が小さい範囲や斜面方位に関しては、既往の報告と異なる傾向が得られたが、これは積雪深の解析範囲における森林の割合が影響している可能性がある。なお、積雪深と地形因子との間に線形の関係が見られた標高975mまで、傾斜10°～60°、曲率0.02～0.02、さらに斜面方位全方位の範囲は、土地利用の約90%が森林である。

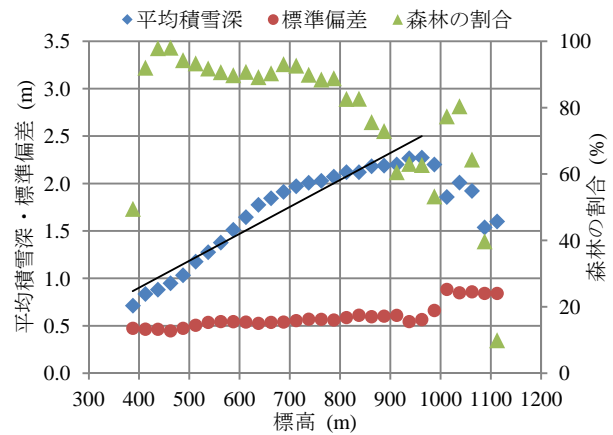


図-2.3 積雪深の標準偏差

森林には風を減速する効果等があり、堆雪効果を発揮する¹²⁾ことが報告されているが、このことが積雪深と地形因子との間に安定した関係が見られた要因であると考えられる。また、図-2.3に、標高25mピッチに区分して、積雪深の標準偏差と森林の割合を求めた結果を示す。標高と積雪深の間に線形関係が見られる範囲、つまり、森林の割合が多い範囲では標準偏差が0.5付近でほぼ一定である。しかし、標高が975mを超え、森林の割合が少なくなった範囲では標準偏差が増加し、積雪深の変動が大きくなる。このような傾向は、標高だけではなく傾斜と曲率にも見られる。このことから森林内の積雪深分布は非常に安定していることがわかる¹³⁾。

2.3 積雪深分布の推定

2.3.1 積雪深分布の推定式

2.2の結果は森林内における積雪深分布の一般的傾向を示していると考えられる。そこで、2.2における考察を踏まえ、地形因子を考慮して森林内の積雪深分布を簡易に推定する以下の式を提案する。

$$SD = a_1 x_{ele} + a_2 x_{slo} + a_3 x_{cur} + a_4 \cos(x_{asp} - 45) + a_5 \quad (1)$$

ここで、SD:積雪深(m)、 x_{ele} :標高(m)、 x_{slo} :傾斜(°)、 x_{cur} :曲率、 x_{asp} :斜面方位(°)、 $a_1 \sim a_5$:回帰係数である。右辺の前半3項は、積雪深と標高、傾斜、曲率との線形関係をそれぞれ表現した。また、図-2.2.4より他の因子と比較して寄与は小さいと考えられるが、右辺第4項は、熱負荷の影響を受けて、積雪深が斜面方位360°に対して周期1の周期性を持つことを表現した¹¹⁾。回帰分析は2.2で述べた積雪深と地形因子の関係が安定してい

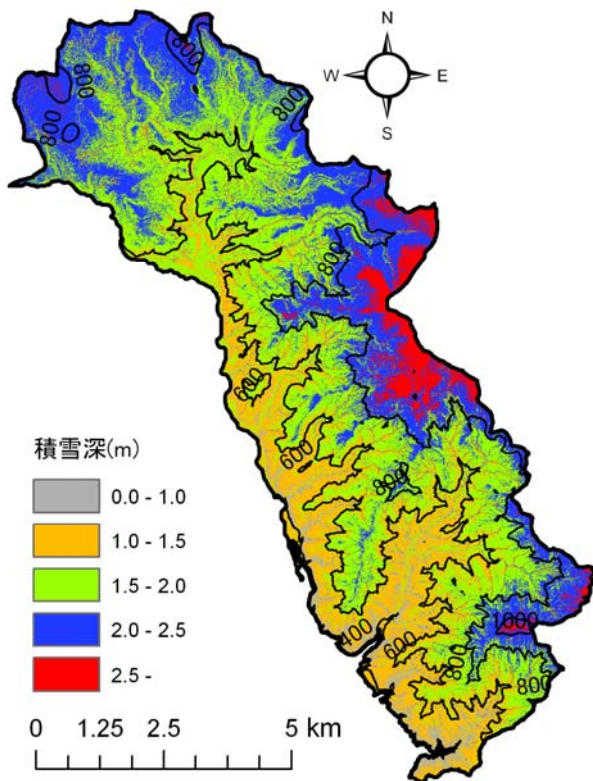


図-2.4.1 地形考慮法

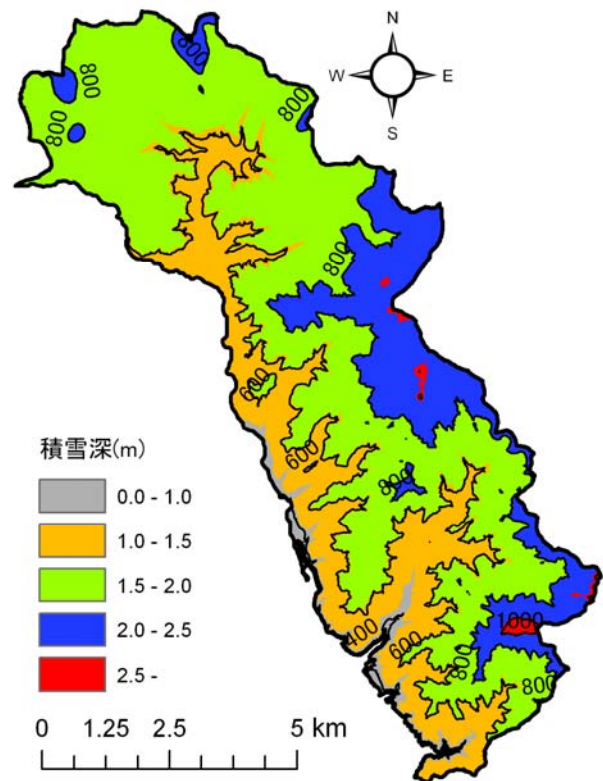


図-2.4.2 標高考慮法

図-2.4 推定した積雪深分布

表-2.1 回帰分析結果

	地形考慮法	標高考慮法
a_1	0.00248	0.0028
a_2	-0.0154	—
a_3	7.106	—
a_4	-0.0737	—
a_5	0.449	-0.234

る範囲に対して行った。結果を表-2.1に示す。パラメータは、残差平方和が最小となるように決定した。比較のため、積雪深と標高の線形関係のみを適用した場合の結果を併せて示す。以降、地形の4因子を考慮した方法を「地形考慮法」、標高のみを考慮した方法を「標高考慮法」とそれぞれ標記する。

2.3.2 積雪深分布の推定結果

図-2.4.1及び図-2.4.2に地形考慮法、標高考慮法で推定した積雪深分布をそれぞれ示す。使用したメッシュの大きさは5mである。図中の線は等高線である。なお、回帰分析で得られたパラメータを、航空レーザ測量を実施した2010年4月8日の積雪深より決定したため、同日の

積雪深を推定したことになる。図を比較すると、標高考慮法では、標高のみ考慮しているため、等高線とはほぼ同一の積雪深分布になったのに対し、地形考慮法では、標高の増加とともに積雪深が増加することに加えて、傾斜、曲率、斜面方位の各因子により、地形に合わせて積雪深が調整されていることがわかる。航空レーザ測量より求めた積雪深を真値とし、メッシュ毎に積雪深の絶対誤差を求め、推定した範囲のRMSEを算出したところ、地形考慮法で0.51、標高考慮法で0.57であった。このことから、地形考慮法の精度が高いことを確認できる。

図-2.5には地形考慮法で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。図中の線は等高線である。図より、誤差の小さい範囲が大きく、積雪深の再現性が良いことがわかる。全メッシュの42%が±25cm以内、73%が±50cm以内で積雪深を再現している。誤差の分布について概観すると、標高が600m～800mの範囲に積雪深を過小推定したメッシュが多く、これ以外の範囲に過大推定したメッシュが多く見られた。図-2.2.1を見ると、標高が600m～800mの範囲の範囲は、航空レーザ測量による積雪深が回帰直線を上回っていること、これ以外の範囲は下回っていることが要因と考えられる。また、丸で囲んだ範囲は過大推定の程度が大き

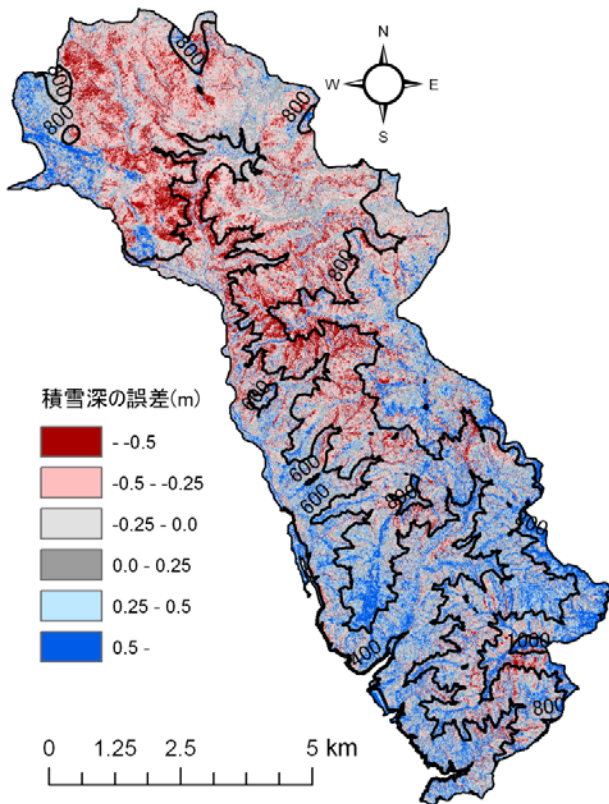


図-2.5 地形考慮法で推定した積雪深の絶対誤差

い範囲であるが、この範囲は傾斜が 10° 以下で、尾根に沿ってササが多く分布している範囲が多い。森林限界を超えた標高帯等、森林外の積雪深は、森林内と比較して小さい傾向があるが^{1),3)}、本手法ではこのような傾向を考慮していない。このことが積雪深を過大推定した要因と考える。本手法は主たる植生が森林である範囲を対象としたものであり、主たる植生が森林以外である範囲に適用した場合、推定された積雪深に大きな誤差が生じる可能性があることに注意が必要である。

なお、曲率と斜面方位に関しては、誤差の分布との間に特徴的な関係は見られなかった。

2.3.3 積雪の総量の推定結果

最後に、積雪の総量について考察する。積雪の総量はメッシュ毎の積雪深に対してメッシュの面積を乗じ、対象範囲について合算したものである。結果を表-2.2に示す。また、表-2.2には地形因子毎の積雪の総量の内訳を併せて示した。航空レーザ測量より求めた積雪の総量と比較すると、地形考慮法で1%、標高考慮法で5%の誤差であった。両手法とも積雪の総量を精度良く再現している。また、積雪の総量の内訳を見ると、標高考慮法では切片が負の寄与となったのに対し、地形考慮法では傾斜

表-2.2 航空レーザ測量範囲の積雪の総量($\times 10^3\text{m}^3$)と内訳(%)

	航空レーザ	地形考慮法	標高考慮法
積雪の総量	119,269	120,315	112,692
標高	—	94.4%	110.7%
傾斜	—	-20.2%	—
曲率	—	0.0%	—
斜面方位	—	0.8%	—
切片	—	25.0%	-10.7%

が負の寄与となった。曲率と斜面方位は、積雪深を増加させる地形と減少させる地形がほぼ均等に分布しているため、積雪の総量への寄与がほとんどなかった。積雪の総量に関しては、西原ら¹¹⁾が、定山溪ダムの 10km^2 の範囲に対し、航空レーザ測量より求めた積雪の総量と、標高のみ考慮した方法と標高に加えて斜面方位を考慮した方法で推定した積雪の総量を比較したところ、推定値にほとんど差がなかったことを報告している。これは、本研究の結果とも一致する。また、西原ら¹³⁾は、森林内の積雪深はほぼ正規分布であることを報告している。これは、ある程度広い範囲の積雪の総量を推定する場合、正の誤差と負の誤差が相殺され、標高を考慮するだけで、良い精度で推定できることを示唆していると考えられる。また、限られた地点の積雪深しか調査できない場合でも、平均積雪深が得られる地点を標高帯別に複数調査すれば、森林内の積雪の総量は、標高のみ考慮するだけで、良い精度で推定できると考えられる。

2.4 ダム流域の積雪包蔵水量の推定

2.4.1 積雪包蔵水量の推定方法と結果の評価方法

ここでは、2.3で作成した積雪深の推定式を用い、ダム流域の毎年の積雪包蔵水量を推定する。対象は、図-2.6に示す6ダムである。6ダムとも流域面積の7割~9割が森林である。

2.3において、航空レーザ測量より求めた積雪深を用いて決定した表-2.1のパラメタは、測定の範囲や実施日の積雪深分布を反映している。このため、毎年ダムで実施している積雪調査結果を用いて、パラメタを置き換えることを試みた¹¹⁾。ダムにおける積雪調査は、標高別に数地点で実施されており、この結果から以下の回帰式を作成することができる。

$$S = b_1 Z + b_2 \quad (2)$$

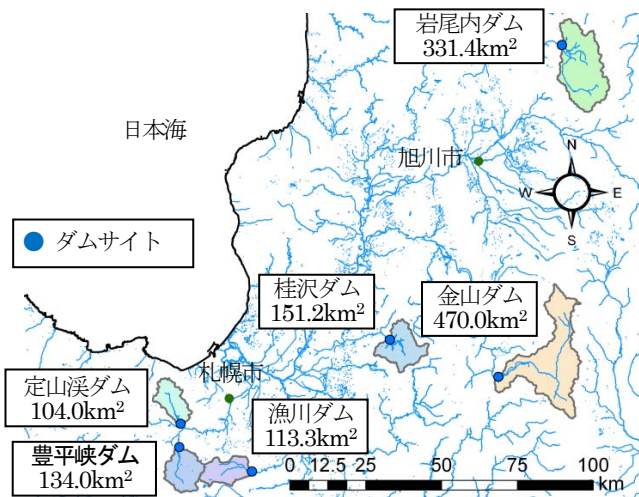


図-2.6 積雪包蔵水量を推定したダム

ここで、 S : 積雪深(m), Z : 標高(m), $b_1 \sim b_2$: 回帰係数である。毎年の積雪深分布は、表-2.1のパラメタ a_1 及び a_5 を、それぞれ各年の b_1 及び b_2 に置き換えた式(1)を用いて算出した。その他のパラメタは特定が困難なため、表-2.1の値をそのまま用いた。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¹⁴⁾)ことが報告されていること、積雪調査で計測した各地点の積雪密度はほぼ均一であったことから、積雪調査地点全点の平均値を用いて、一定値とした。このように、各年の積雪調査日における値をパラメタとして用いたため、推定した積雪包蔵水量は積雪調査日の値となる。流域の標高、傾斜、曲率及び斜面方位の算出には、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ダムによって異なり、5mまたは10mである。なお、5mまたは10mのメッシュを用いた場合、ダム流域のメッシュ数が100万を超えるため、実用性を考え、100mメッシュにリサンプリングしている。

推定結果は融雪期(各年とも積雪調査日翌日から同年6月30日まで)の水収支と比較して評価する⁴⁾。水収支は、

$$Q_i - R + E_{pt} \quad (3)$$

で表し、 Q_i : ダム流入量(m^3), R : 降水量(m^3), E_{pt} : 可能蒸発散量(mm/day)である。口澤ら¹⁵⁾の定山溪ダム流域における研究によると、森林域の実蒸発散量は可能蒸発散量に近い値を示すことから、この期間の水収支はダムの総流入量から総降水量を引いた値に、以下に示すHamon法で推定した可能蒸発散量を加えた値とした。

表-2.3 積雪包蔵水量($\times 10^6 m^3$)の推定値と水収支の比較
(定山溪ダム : 2001年~2010年)

	地形 考慮法	標高 考慮法	積雪調査	水収支
2001	95	104	115	88
2002	79	88	93	83
2003	101	110	115	89
2004	97	107	111	97
2005	133	143	141	139
2006	114	124	127	123
2007	92	101	105	98
2008	75	85	86	68
2009	107	117	121	105
2010	94	105	104	94
誤差の 10年平均	5.7%	11.1%	15.1%	-

$$E_{pt} = 0.140D_0^2 q_t \quad (4)$$

ここで、 D_0 : 日照時間(月平均の1日の日の出から日没までの時間を12時間で除した値), q_t : 日平均気温に対する飽和絶対湿度(g/m^3)である。なお、融雪開始の頃は気温が低い場合、降雪となる場合があるが、対象とする期間内の降水量全体に占める割合が少ないと考えられること、データはヒータ付きの雨雪量計で雨量として観測されていることから観測値をそのまま用いた。

2.4.2 定山溪ダム(2001年から2010年)

定山溪ダムでは、標高500m~850mの間の合計8地点で積雪調査が行われており、この結果から各年の b_1 及び b_2 を求めた。結果を表-2.3に示す。比較のため、標高考慮法及びダム管理の実務で採用されている方法による推定結果を併せて示した。実務においては、積雪調査地点の標高と積雪相当水量に対して線形の式を当てはめ、この式から求めた標高区分ごとの積雪相当水量に、標高区分の面積を乗じ、合算して、積雪包蔵水量としている。以降、実務と同じ手法で推定した結果を「積雪調査」なお、誤差の10年平均は、毎年の推定値に対して、水収支を真値とした場合の相対誤差の絶対値を算出し、10年間で平均したものである。誤差の10年平均を見ると、地形考慮法の精度が最も高いことがわかる。さらに、推定した10年間について、水収支を真値として積雪包蔵水量の二乗平均平方根誤差RMSEを式(5)から求める。

表-2.4 積雪包蔵水量(×10⁶m³)の推定結果

	定山溪ダム (再掲)			豊平峡ダム			漁川ダム		
	地形考慮法	積雪調査	水収支	地形考慮法	積雪調査	水収支	地形考慮法	積雪調査	水収支
2006	114	127	123	130	139	115	31	54	36
2007	92	105	98	欠測			48	56	47
2008	75	86	68	87	96	91	28	39	29
2009	107	121	105	122	134	129	41	57	40
2010	94	104	94	101	109	141	41	49	35
誤差の平均	5.2%	12.4%	-	13.0%	13.3%	-	7.5%	37.5%	-
	桂沢ダム			岩尾内ダム			金山ダム		
	地形考慮法	積雪調査	水収支	地形考慮法	積雪調査	水収支	地形考慮法	積雪調査	水収支
2006	81	83	81	198	218	267	欠測		
2007	61	69	86	149	169	214	209	190	205
2008	56	76	89	145	169	168	139	124	114
2009	48	61	71	239	179	239	193	170	191
2010	47	66	69	238	248	275	167	152	168
誤差の平均	26.3%	11.1%	-	16.6%	14.9%	-	11.5%	9.2%	-

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - x_i)^2} \quad (5)$$

ここで、 X_i : 積雪包蔵水量の推定値、 x_i : 水収支、 n : 年数、 i : 年を表す。結果、地形考慮法で $6.4 \times 10^6 \text{m}^3$ 、標高考慮法で $11.7 \times 10^6 \text{m}^3$ 、積雪調査で $15.7 \times 10^6 \text{m}^3$ であった。西原ら¹¹⁾が標高と斜面方位を考慮して、本研究と同じ定山溪ダムにおける、10年間の積雪包蔵水量を推定した結果によると、RMSEは $10.4 \times 10^6 \text{m}^3$ と報告されており、本手法はこれを上回る精度である。

2.4.3 豊平峡ダム (2006年から2010年)

豊平峡ダムでは、標高 650m~950m の間の合計 11 地点で積雪調査が行われており、この結果から各年の b_1 及び b_2 を求めた。推定結果を表-2.4 に示す。推定した期間の RMSE は地形考慮法で $21.9 \times 10^6 \text{m}^3$ 、積雪調査で $19.6 \times 10^6 \text{m}^3$ であった。また、相対誤差の 5 年平均は、地形考慮法で 13.0%、積雪調査で 13.3% であった。地形考慮法による推定結果は、積雪調査とほぼ同等の精度であった。

2.4.4 漁川ダム (2006年から2010年)

漁川ダムでは、ダム管理所付近の標高 300m~400m 間の 3 地点で積雪調査を行い、積雪包蔵水量を推定している。積雪調査の結果だけでは、標高の高い範囲の積雪深を考慮できないため、この 3 地点に加えて流域内の標高

580m に位置する奥漁地点のテレメータ積雪深を加えて、各年の b_1 及び b_2 を求めた。結果を表-2.4 に示す。推定した期間の RMSE は地形考慮法で $3.5 \times 10^6 \text{m}^3$ 、積雪調査で $14.0 \times 10^6 \text{m}^3$ であった。また、相対誤差の 5 年平均は、地形考慮法で 7.5%、積雪調査で 37.5% であった。積雪調査結果にテレメータ積雪深を加えて、地形考慮法を用いることで、大幅な精度の向上が見られた。

2.4.5 桂沢ダム (2006年から2010年)

桂沢ダムでは標高ごとの積雪調査は行われておらず、ダム管理所付近の定点の積雪調査で求めた積雪相当水量に過去の調査結果を基に設定した係数を乗じて積雪包蔵水量を推定している。このため、この定点調査と流域内の標高 344m にある放水口地点のテレメータ積雪深を用いて、 b_1 及び b_2 を求めた。結果を表-2.4 に示す。推定した期間の RMSE は地形考慮法で $23.5 \times 10^6 \text{m}^3$ 、積雪調査で $10.7 \times 10^6 \text{m}^3$ であった。また、相対誤差の 5 年平均は、地形考慮法で 26.3%、積雪調査で 11.1% であった。桂沢ダムでは、精度の向上が見られなかった。なお、2008 年及び 2010 年は、標高の低いダム管理所付近の積雪深より、標高の高い放水口地点の積雪深が小さく、 b_1 が負となったため、 $a_1 = 0$ とした。

2.4.6 岩尾内ダム (2006年から2010年)

岩尾内ダムでは、標高 300m~950m の間の合計 25 地点で積雪調査が行われており、この結果から各年の b_1 及び b_2 を求めた。なお、岩尾内ダムは、これまでの 4 ダム

と比較して流域面積が大きい。流域面積の大きいダムでは、ダム流域を複数の領域に分割した上で、領域毎に積雪相当水量を推定し、これらを合算して、ダム流域の積雪包蔵水量としている。現在、岩尾内ダムでは流域を4領域に分割しているが、本手法の適用にあたっては、流域を b_1 の値の近い2領域に分割し、計算を簡素化した¹⁾。結果を表-2.4に示す。推定した期間のRMSEは地形考慮法で $16.6 \times 10^6 \text{m}^3$ 、積雪調査で $14.9 \times 10^6 \text{m}^3$ であった。また、相対誤差の5年平均は、地形考慮法で16.6%、積雪調査で14.9%であった。流域の分割数を減らしたものの、推定精度は積雪調査とほぼ同等である。

2.4.7 金山ダム (2006年から2010年)

金山ダムでは、標高340m~850mの間の合計52地点で積雪調査が行われている。流域面積が大きいため、流域を10領域に分割して積雪包蔵水量を推定している。ここでは、岩尾内ダムと同様、流域を b_1 の値の近い2領域に分けて地形考慮法を適用した。結果を表-2.4に示す。推定した期間のRMSEは地形考慮法で $23.6 \times 10^6 \text{m}^3$ 、積雪調査で $16.2 \times 10^6 \text{m}^3$ であった。また、相対誤差の5年平均は、地形考慮法で11.5%、積雪調査で9.2%であった。流域の分割数を大幅に減らしたものの、積雪調査とほぼ同等の精度で推定できており、大幅な精度の低下とはならなかった。

2.4.8 考察

表-2.4を見ると、地形考慮法による推定値は、航空レーザ測量を行った定山溪ダムの精度が最も高い。また、豊平峡ダム、岩尾内ダム、金山ダムは積雪調査とほぼ同程度の精度である。これらのダムは、積雪調査の地点数が多く、このことが要因と考える。次に、精度の向上の程度は漁川ダムが大きい。標高が低い地点のみの積雪調査結果に、標高の高い地点にあるテレメータ地点の積雪深を加えてパラメータを決めたことが要因と考える。ただし、漁川ダムと同様のアプローチを試みた桂沢ダムは積雪調査と比較して精度の向上が見られていない。桂沢ダムは、積雪深観測点が管理所付近とテレメータ地点の2点しかなく、調査地点が少ないことが要因と考える。標高帯別に複数の地点で積雪深を観測することが、積雪包蔵水量の推定精度向上に繋がると考える。

また、岩尾内ダムと金山ダムは、流域の分割数を減らして推定方法を簡素化したものの、地形考慮法を適用すると、現在の積雪調査とほぼ同等の精度で積雪包蔵水量を推定できた。これは、地形考慮法の精度の高さを示し

ていると考える。また、この結果は、積雪調査の地点数を減らすことが可能であることを示唆していると考えられる。

2.5 森林内の積雪分布のまとめ

本章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積雪深の空間分布と、標高、傾斜、曲率、斜面方位との関係进行分析した。この結果から、森林内におけるこれらの地形因子と積雪深の一般的な関係を示した。
- 2) 1)で得られた関係を基に、標高、傾斜、曲率、斜面方位を考慮して森林内の積雪深を推定する簡易式を示した。この式を用いて推定した積雪深を、航空レーザ測量より求めた積雪深と比較し、精度良く積雪深を再現していることを確認した。
- 3) 2)で示した森林内の積雪深を推定する簡易式と、毎年ダムで実施している積雪調査の結果とテレメータで観測している積雪深を用いて、ダム流域の積雪包蔵水量を簡易に推定する方法を構築した。本手法を用いて、北海道内の6ダムにおける過去5年間の積雪包蔵水量を推定し、水収支を真値として評価した。
- 4) 3)の結果、積雪調査やテレメータ観測により、複数の標高帯において、積雪深が観測されているダムほど、地形考慮法の適用による推定精度が高い傾向が見られた。この結果は、積雪調査等により、複数の標高帯で積雪深を観測することの重要性を示唆している。また、岩尾内ダムと金山ダムについては、積雪調査地点を減らすことができる可能性を示した。

本章で示した積雪深分布と地形との関係は、森林内における一般的な特徴であると考えられる。このため、流域面積の大部分を森林が占めるダムについては、本手法を用いることで積雪包蔵水量を精度良く推定できる。

3. 森林外の積雪分布

森林外の積雪分布については、山田ら¹⁾の報告がある。これは、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たものである。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^{16,17)}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。

今後、地球温暖化により降雪量の変化が予想されている¹⁸⁾。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¹⁸⁾。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。

3.1 対象流域及び基礎資料

対象流域は図-3.1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-3.1のように分類した。図-3.1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-3.1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を基に算出し

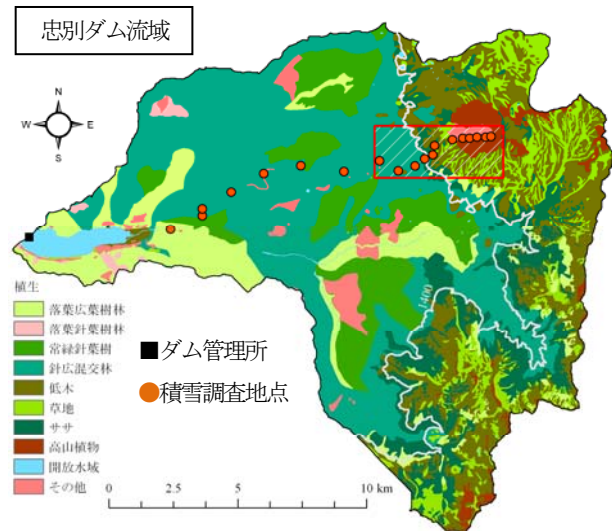


図-3.1 解析対象ダム流域と解析範囲

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-3.1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。

3.2 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¹⁹⁾。

図-3.2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

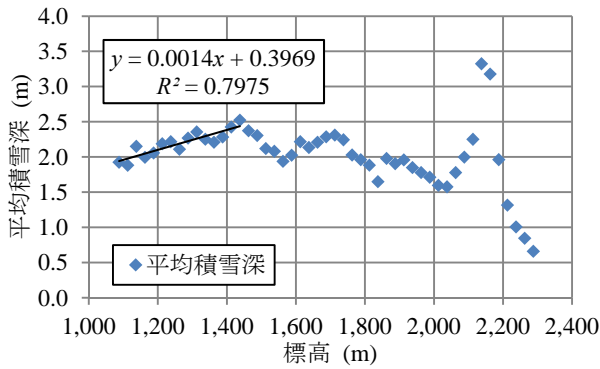


図-3.2 標高と積雪深の関係

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-3.2 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、3.3 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。

3.3 森林外における地形の凹凸と積雪深の関係

山田ら¹⁹⁾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、3.2 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²⁰⁾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(6)から求められる。

$$\Phi = (\phi_0 + \phi_{45} + \phi_{90} + \phi_{135} + \phi_{180} + \phi_{225} + \phi_{270} + \phi_{315})/8 \quad (6)$$

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となる。図-3.3 に、航空

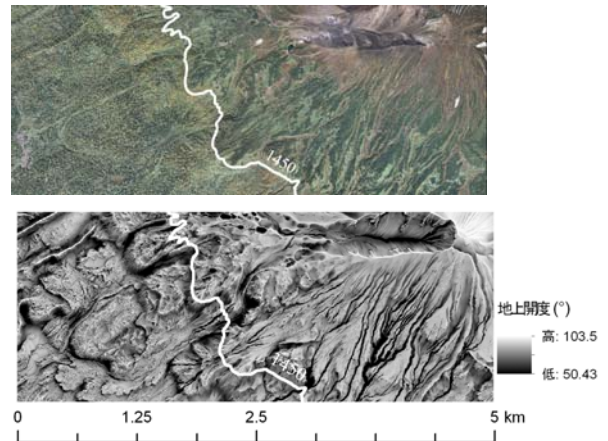


図-3.3 航空レーザ測量範囲の航空写真と地上開度(°) (探索距離 100m)

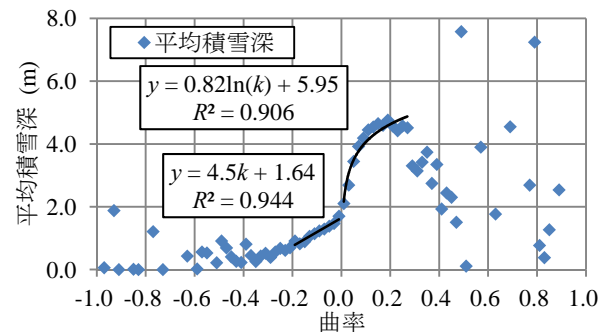


図-3.4 曲率と積雪深の関係

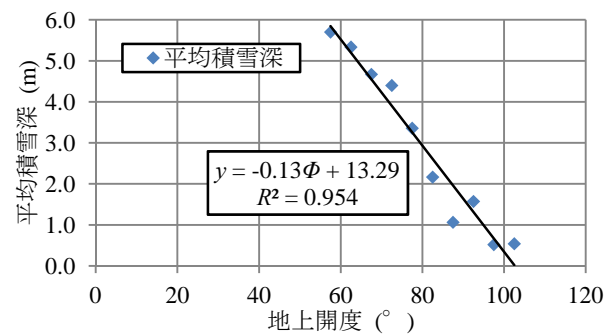


図-3.5 地上開度と積雪深の関係

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-3.4 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ことがわか

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 $-0.2 \sim 0.0$ 付近及び $0.0 \sim 0.2$ 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-3.5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。

3.4 森林外の積雪深分布の再現

3.3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(7)で表せる。

$$S = c_1 \phi + c_2 \quad (7)$$

ここで、 SD : 積雪深(m)、 ϕ : 地上開度($^\circ$)、 c_1 及び c_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 $1,450\text{m}$ 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-3.1に示す。以降、式(7)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。

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-3.2に航空レーザ測量より求めた全積雪量と式(7)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-3.1 回帰係数

a_1	a_2
-0.205	19.105

表-3.2 全積雪量(10^3m^3)

	航空レーザ	本手法
全積雪量	12,014	12,020

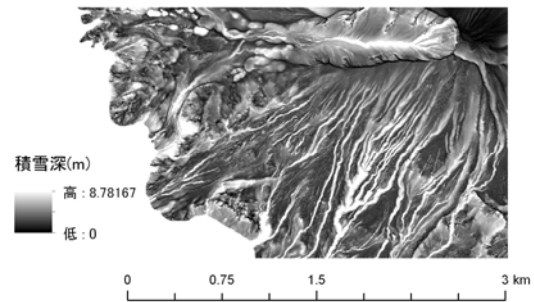


図-3.6 推定した積雪深 (森林外・標高 $1,450\text{m}$ 以上)

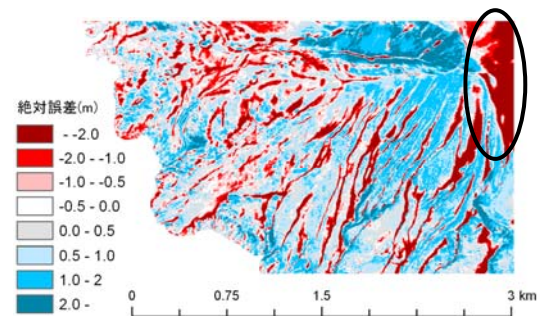


図-3.7 推定した積雪深の絶対誤差

次に、図-3.6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^{1), 16), 17)}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-3.7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。

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-3.7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-3.7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、Liston¹⁶ら及びMacDonaldら¹⁷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。

3.5 ダム流域の積雪相当水量分布の推定

3.4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。ここでは、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-3.1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、2章に示した地形考慮法を用いて推定する。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(7)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-3.8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

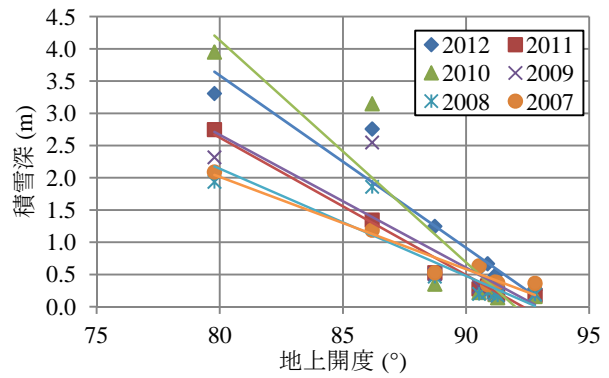


図-3.8 積雪調査地点の地上開度と積雪深 (森林外)

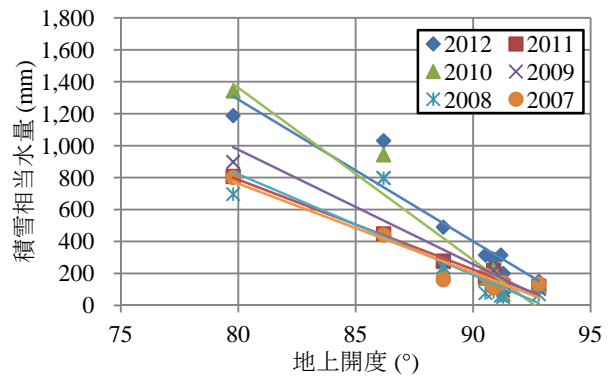


図-3.9 積雪調査地点の地上開度と積雪相当水量 (森林外)

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、地形的に雪が積も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。

試みに、積雪調査地点の地上開度と積雪相当水量をプロットした図が図-3.9である。図より、積雪深だけではなく、積雪相当水量についても地上開度との線形関係が見られた。各年の線形回帰式を作成したところ、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/m^3 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のが考えられる。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

表-3.3 積雪包蔵水量(×10⁶m³)の推定結果

	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

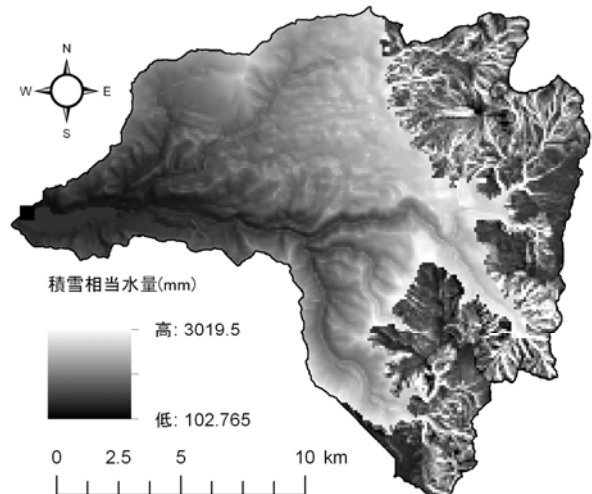


図-3.10 積雪相当水量分布 (2012年3月22日)

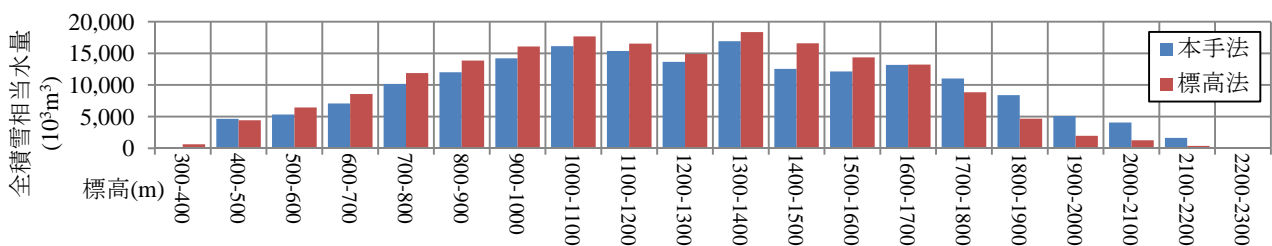


図-3.9 標高帯毎の全積雪相当水量 (2012年3月22日)

は、積雪調査結果を式(8)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。

$$SWE = d_1\phi + d_2 \quad (8)$$

ここで、 SWE : 積雪相当水量(mm)、 ϕ : 地上開度(°)、 d_1 及び d_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¹⁹⁾。

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-3.3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。水収支はガイドライン⁴⁾に示されている方法で算出し、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-3.9に示す。森林限界である標高1,400m以上に着目すると、標高1,600m～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-3.9によると、尾根上で積雪調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-3.10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。

3.5 まとめ

本章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。

3. おわりに

本研究では、航空レーザ測量結果を用い、積雪分布の特徴が異なる森林内と森林外に分けて、積雪分布と地形との関係を明らかにした。この結果を基に、毎年実施されている積雪調査等のサンプルデータから、ダム流域の積雪包蔵水量を推定する手法を構築した。本手法を北海道内の複数のダムに適用した結果、既存の手法と比較して精度良く積雪包蔵水量を推定することができた。

また、本手法を用いてダム流域の積雪深分布及び積雪相当水量分布を推定することも可能である。今後は、本研究で明らかにした積雪分布の特徴を流出モデルに組み

込む検討を行う予定である。

謝辞：本研究を実施するに当たり、国土交通省北海道開発局札幌開発建設部、豊平川ダム統合管理事務所、岩見沢河川事務所、千歳川河川事務所、空知川河川事務所、旭川河川事務所、名寄河川事務所から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) Hopkinson C., Sitar M., Chasmer L., Gynan C., Agro D., Enter R., Foster J., Heelsi N., Hoffman C., Nilsson J., Pierre S.R.: Mapping the Spatial Distribution of Snowpack Depth Beneath a Variable Forest Canopy Using Airborne Laser Altimetry, Proceedings of the 58th Annual Eastern Snow Conference, Ottawa, Ontario, Canada, pp.253-264, 2001.
- 6) 岡本隆, 黒川潮, 松浦純生, 浅野志穂, 松山康治: 山地の積雪深分布計測における航空レーザスキャナの適用性に関する検討, 水文・水資源学会誌第17巻5号, pp.529-535, 2004.
- 7) 秋山一弥, 花岡正明, 佐野久聰: 航空レーザ測量を用いた山地積雪深の計測と積雪深分布の地形的特徴, 日本雪工学会誌, pp.143-151, 2009.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 西原照雅, 中津川誠: 斜面方位を考慮した積雪最盛期におけるダム流域の積雪包蔵水量の推定, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.68, No.4, I_337-I_342, 2012.

- 12) 笹賀一郎, 藤原滉一郎, 佐藤冬樹: 森林の強風地における堆雪効果, 北海道大学農学部演習林研究報告46(4), pp.801-828, 1989.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 口澤寿, 中津川誠: 積雪寒冷地流域における水収支と蒸発散量の評価, 土木学会北海道支部年次技術発表会論文集第57号(B), pp.422-425, 2001.
- 16) Liston, G. E. and Sturm, M.: A snow-transport model for complex terrain, *Journal of Glaciology*, Vol.44, No.148, pp.498-516, 1998.
- 17) 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.
- 18) 気象庁: 地球温暖化予測情報第7巻, 2008.
- 19) 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.
- 20) 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.

A STUDY ON WATER MANAGEMENT OF THE DAM ADAPTED TO SNOW ACCUMULATION AND SNOW MELTING SITUATION

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2016

Research Team : Watershed Environmental
Engineering Team

Author : YABE Hiroki

NISHIHARA Terumasa

MIZUGAKI Shigeru

KAZUMATA Mitsugu

MARUYAMA Masahiro

Abstract: For better estimation of snow water equivalents for a dam basin in cold snowy regions, the relationship between snow depth and topography was investigated using a high-resolution digital elevation model (DEM) created from an airborne laser scanning. For snow depth in forests, we investigated the relationship between topography (elevation, slope aspect and slope curvature). For snow depth outside forests, the relationship between over-ground openness was investigated. Based on the results, a snow water equivalent estimation model was developed. The model was used to estimate snow water equivalents in several dam basins in Hokkaido, and resulted in estimates with a higher level of accuracy than those based on snow surveys and existing models.

Key words: snow depth distribution, snow water equivalent, forests, topography, airborne laser scanning