

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

THE ESTIMATE OF SNOW DEPTH DISTRIBUTION IN A DAM BASIN USING AIRBORNE LASER SCANNING

西原照雅¹・中津川誠²・浜本聡¹

Terumasa NISHIHARA, Makoto NAKATSUGAWA and Satoshi HAMAMOTO

¹正会員 (独)土木研究所 寒地土木研究所 (〒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 (〒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 and topography (elevation, slope, curvature and slope aspect) in the forest was investigated using a high-resolution digital elevation model (DEM) created from an airborne laser scanning survey conducted on a certain day in the snowy period and another one in the snow-free period. Based on the results, a snow water equivalent estimation model was developed.

The model was used to estimate snow water equivalents in the Jozankei Dam, and resulted in the estimate with a higher level of accuracy than those based on snow surveys and existing models.

Key Words : snow depth distribution, slope, curvature, slope aspect, airborne laser scanning

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、雪崩等の危険を伴うことから、調査できる地点は限られている。

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、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¹⁾、岡本ら²⁾、秋山ら³⁾、花岡ら⁴⁾の研究が報告されている。しかし、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。また、ダム流域のように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、現在得られている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定点で自動観測している積雪深等のサンプルデータを用いて、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る。

ダム流域を対象とした研究に、鳥谷部ら⁵⁾や西原ら⁷⁾

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⁵⁾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⁶⁾は同データから標高25mピッチの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、標高を用いてこれらを推定する式を提案した。西原ら⁷⁾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の経年的な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計測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、これらの地形因子から積雪深分布を推定する方法を提案する。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

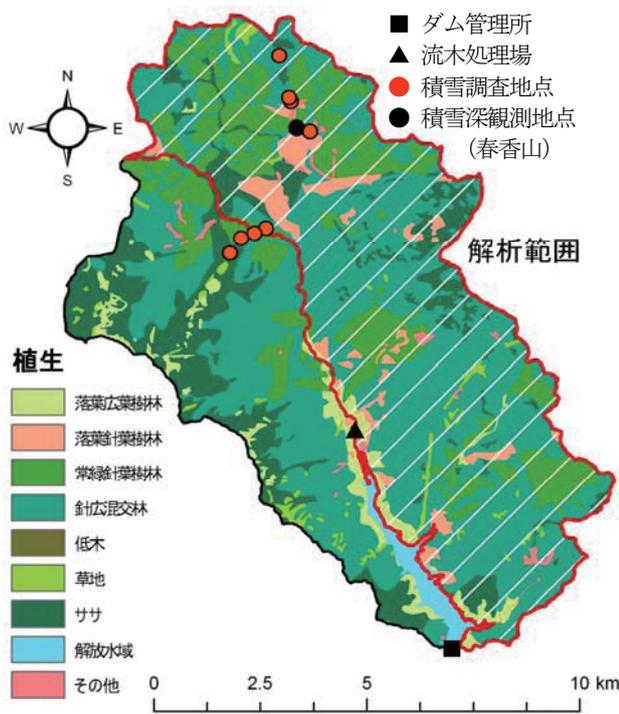


図-1 解析対象ダム流域

積雪深分布に焦点を当てるため、大部分が森林の範囲を解析範囲とした。

2. 対象流域及び基礎資料

対象流域は図-1に示す定山溪ダム流域である。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付近～1,300m付近であり、流域の土地利用の多くは森林である。

次に、解析に使用した資料を示す。積雪深分布の解析は、図-1の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でダム湖の左岸側の南～南西向きの斜面である。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。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、航空レーザ測量日の積雪深を比較すると、テレメータの積雪深2.18mに対し、航空レーザ測量より求めた積雪深は2.13mであった。データの水平解像度は5mである。また、水収支の算出には、ダムでルーチン的に観測している気温、降水量、流入量を用いた。なお、植生は環境省が公開している自然環境保全基礎調査の結果を用い、図-1に示すように9分類した。解析範囲の土地利用は86%が森林である。

3. 地形と積雪深の関係

航空レーザ測量で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の地形因子との関係を考察する。

はじめに、積雪深と標高の関係である。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⁸⁾）を報告している。図-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い標高帯である。笹ら⁹⁾や島谷ら¹⁰⁾により、森林の無い範囲や尾根では、風により積雪が移動しやすく、積雪深が減少することが報告されており、このことが積雪深減少の要因と考える。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。

次に、積雪深と傾斜の関係である。図-2.2に積雪深と傾斜の関係を示す。図より、傾斜が10°付近～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、積雪深が小さくなったと考えられる。さらに、傾斜が60°を超える付近からは、積雪深の変動幅が極端に大きくなっている。この範囲は、サンプル数が全体の2%以下であり、このことが、積雪深を急激に変動させた要因と考える。

続いて、図-2.3に積雪深と曲率の関係を示した。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たと考えられる。

最後に、図-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⁷⁾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し、気温が高い午後に太陽放射を受け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、本稿は86%が森林の範囲を対象としている。このことが積雪深の変動が小さくなった要因と考える。

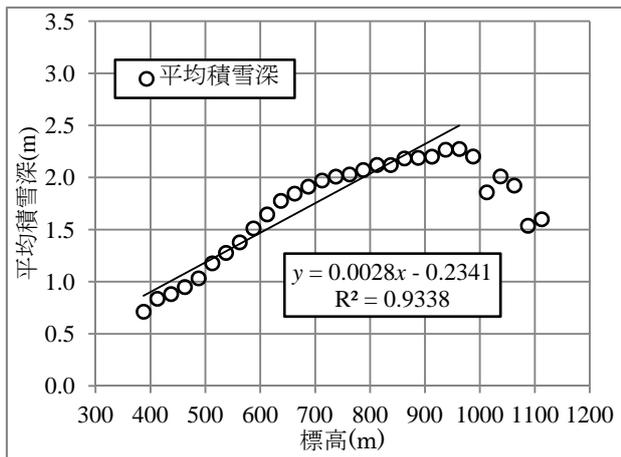


図-2.1 標高と積雪深の関係

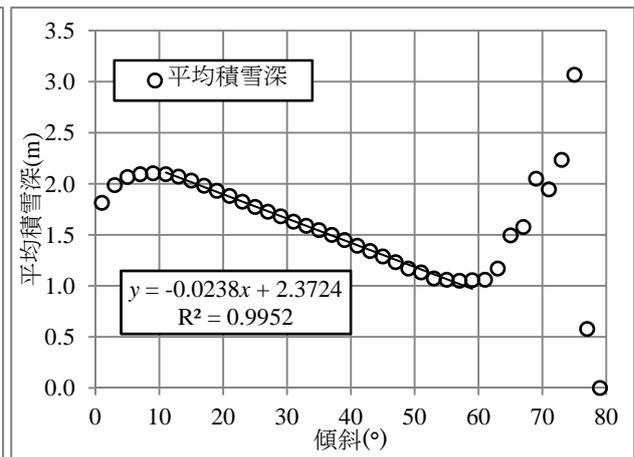


図-2.2 傾斜と積雪深の関係

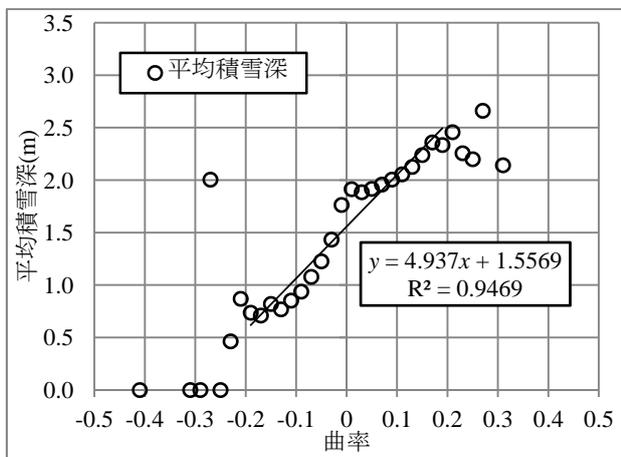


図-2.3 曲率と積雪深の関係

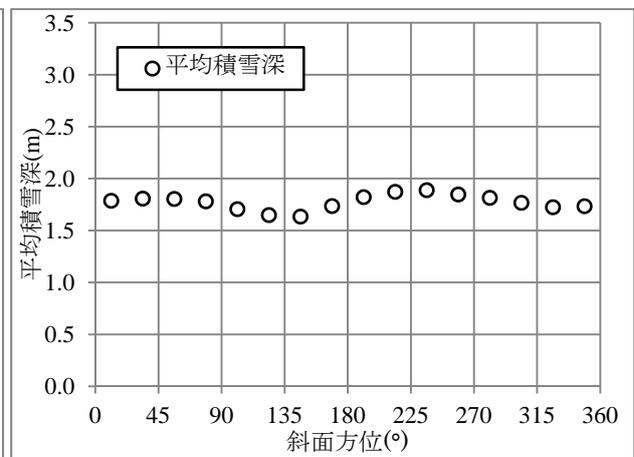


図-2.4 斜面方位と積雪深の関係

図-2 地形と積雪深の関係

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、本稿と同様に積雪深と標高、傾斜、曲率、斜面方位との関係を考察した花岡ら⁴⁾の報告と比較を行う。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、積雪深が斜面方位に対して1周期で周期的に変動し、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。本稿で得られた結果と比較すると、傾斜が緩やかな範囲と斜面方位を除いて、傾向が一致する。従って、本稿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、傾斜が緩やかな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

解析対象とした範囲における森林の分布が影響している可能性がある。この点は、引き続き航空レーザ測量結果を解析する中で、検証していきたい。

なお、本解析で積雪深と地形因子との関係が安定している標高975mまで、傾斜10°~60°、曲率-0.02~0.02、斜面方位全方位の範囲は、土地利用の約90%が森林である。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⁹⁾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関係を安定させた要因であると考えられる。

4. 積雪深分布の推定

3章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、3章における考察を踏まえ、地形因子を考慮した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。

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

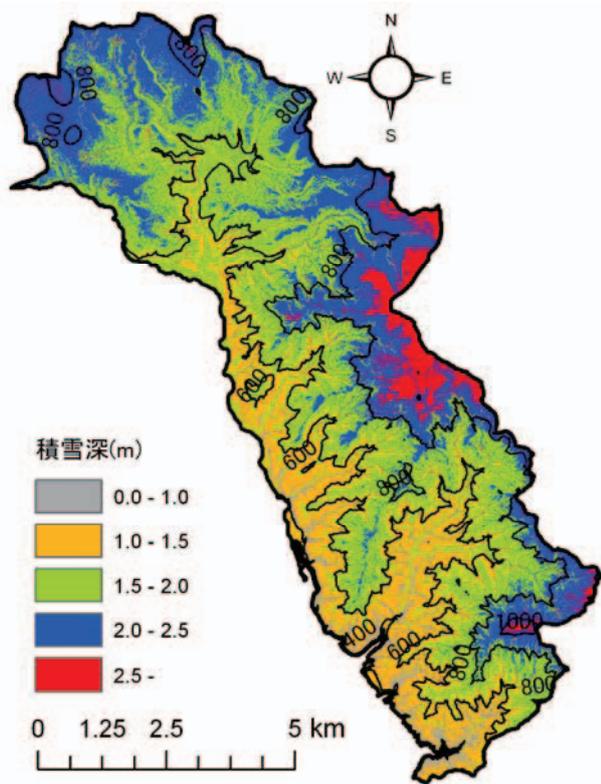


図-3.1 地形考慮法

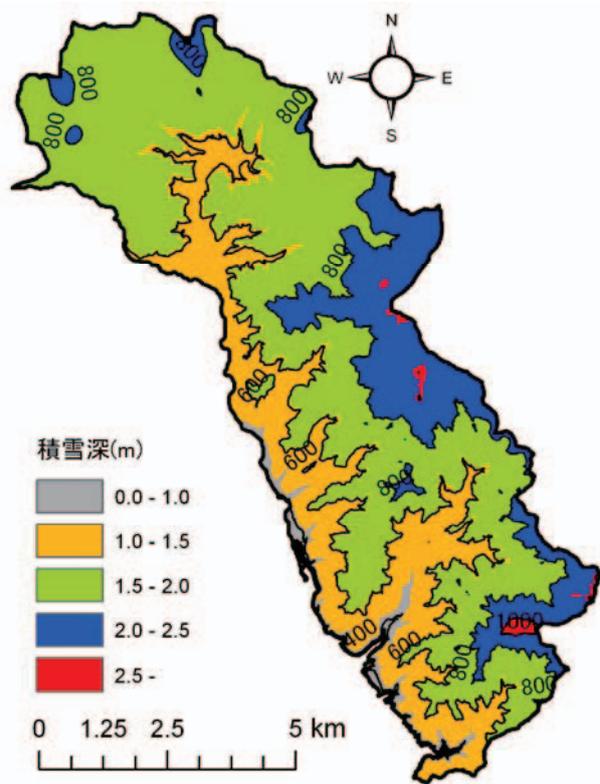


図-3.2 標高考慮法

図-3 推定した積雪深分布

表-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 |

ここで、 SD : 積雪深(m), x_{ele} : 標高(m), x_{slo} : 傾斜($^{\circ}$), x_{cur} : 曲率, x_{asp} : 斜面方位($^{\circ}$), $a_1 \sim a_5$: 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-2.4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、積雪深が斜面方位に対して周期1の周期性を持つことを表現した。回帰分析は3章で述べた積雪深と地形因子の関係が安定している範囲に対して行った。

式(1)について回帰分析を行った結果を表-1に示す。パラメタは積雪深に対し、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あわせて示す。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。

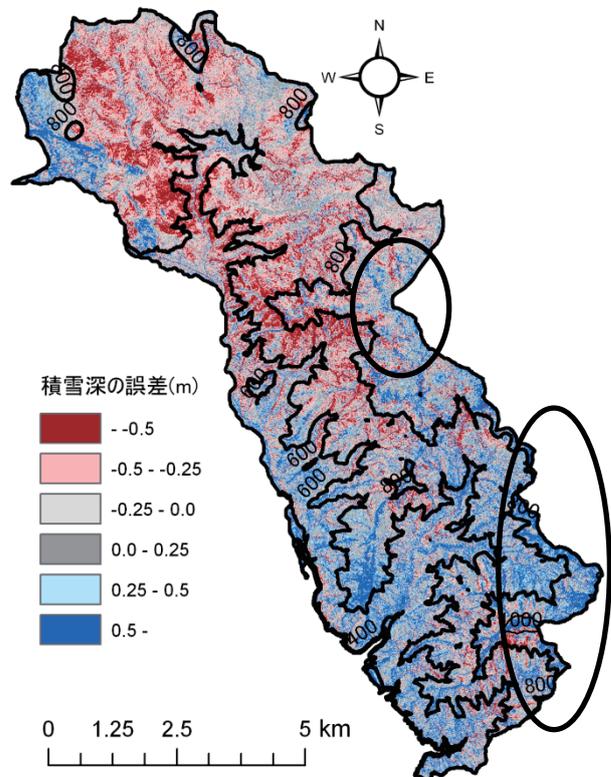


図-4 地形考慮法で推定した積雪深の誤差

図-3.1及び図-3.2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は、航空レーザ測量を実施した2010年4月8日の積雪深を基にしているため、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、等高線とほぼ同一の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得られた積雪深を真値としてメッシュ毎に積雪深の誤差を求め、推定範囲の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-4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得られた積雪深の誤差を示した。図中の線は等高線である。図より色が薄く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見られ、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-2.1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、丸で囲んだ範囲は積雪深を過大推定した範囲であるが、この範囲は傾斜10°以下で尾根に沿ってササが多く分布している領域が比較的多い。このことが積雪深を過大推定した要因と考える。なお、曲率と斜面方位に関しては、誤差の分布との特徴的な関係は見られなかった。

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に示す。また、表-2には地形因子毎の積雪の総量の内訳を併せて示した。航空レーザ測量による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⁷⁾が、10km²の航空レーザ測量した範囲の積雪量を、標高のみを考慮した方法と、標高に加えて斜面方位を考慮した方法で推定したところ、推定した積雪量の精度にほとんど差がなかったことを報告している。この結果は、本稿の結果とも一致する。鳥谷部ら⁶⁾は、積雪深の分布はほぼ正

表-2 積雪の総量(×10³m³)と内訳(%)

| | 航空レーザ | 地形考慮法 | 標高考慮法 |
|------|---------|---------|---------|
| 積雪総量 | 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% |

規分布であることを報告しており、ある程度広い範囲の積雪の総量を推定すると、正の誤差と負の誤差が打ち消しあい、標高を考慮すれば比較的良好な精度で積雪の総量を推定できることを示唆している。

5. ダム流域の積雪包蔵水量の推定

ここでは、4章で作成した積雪深の推定式を用い、定山溪ダム流域全体の経年的な積雪包蔵水量を推定する。4章において航空レーザ測量結果より決定した表-1のパラメータは、航空レーザ測量の範囲や実施時期を反映しているため、毎年ダムで実施している積雪調査結果を基に、パラメータを置き換えることを試みた⁷⁾。定山溪ダムにおける積雪調査は、毎年3月に標高500m～850mの間の合計8地点で行われており、この結果から以下の回帰式を作成することができる。

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

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-1のパラメータ a_1 及び a_5 をそれぞれ各年の b_1 及び b_2 に置き換えて算出した。その他のパラメータは特定が困難なため、表-1の値をそのまま用いた。なお、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ため、積雪密度は、各年の積雪調査で得られた全地点の積雪密度の平均値を一定値として与えている。なお、各年の積雪調査日におけるパラメータを使用したため、推定した積雪包蔵水量は積雪調査日の値となる。また、地形情報は無積雪期の航空レーザ測量より得られている水平解像度5mのデータを使用した。

推定した積雪包蔵水量は水収支と比較して評価する。水収支は鳥谷部ら⁶⁾や西原ら⁷⁾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。

結果を表-3に示す。比較のため、標高考慮法及び積雪調査による推定結果を併せて示した。積雪調査による積雪包蔵水量の推定は、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て合算して算出している。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

表-3 積雪包蔵水量($\times 10^6\text{m}^3$)の推定値と水収支の比較

| | 地形 考慮法 | 標高 考慮法 | 積雪調査 | 水収支 |
|--------------|-----------|-----------|-------|-----|
| 2001 | 90 | 104 | 115 | 88 |
| 2002 | 74 | 88 | 93 | 83 |
| 2003 | 96 | 110 | 115 | 89 |
| 2004 | 92 | 106 | 111 | 97 |
| 2005 | 128 | 142 | 141 | 139 |
| 2006 | 109 | 124 | 127 | 123 |
| 2007 | 87 | 101 | 105 | 98 |
| 2008 | 70 | 85 | 86 | 68 |
| 2009 | 102 | 117 | 121 | 105 |
| 2010 | 89 | 105 | 104 | 94 |
| 誤差の 10年平均 | 6.8% | 11.0% | 15.1% | - |

合の誤差率の絶対値を算出し、10年間で平均したものである。水収支を基に評価すると地形考慮法の精度が最も高いことがわかる。推定した10年間について、水収支を真値とし、推定した積雪包蔵水量のRMSEを求めたところ、地形考慮法で $8.1 \times 10^6\text{m}^3$ 、標高考慮法で $10.4 \times 10^6\text{m}^3$ 、積雪調査で $15.7 \times 10^6\text{m}^3$ である。西原ら⁷⁾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となった。標高と斜面方位だけではなく、傾斜と曲率を加えて地形を総合的に考慮することが、積雪包蔵水量の推定精度向上につながったと考える。また、対象とした定山溪ダムは、土地利用の81%が森林である。このことが式(1)を用いて積雪包蔵水量を高い精度で推定できた要因と考える。

6. まとめ

本稿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、斜面方位との関係を分析した。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) 本稿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から、ダム流域全体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、定山溪ダムの過去10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ところ、既存の方法と比較して精度

良く推定できた。

本稿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ている。このため、流域面積の大部分を森林が占めるダムにおいては、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可能性がある。今後は、他のダムに本手法を適用する等、手法の汎用性を検証していきたい。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、国土交通省北海道開発局札幌開発建設部及び豊平川ダム統合管理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る。

参考文献

- 1) Hopkinson C., Sitar M., Chasmer L., Gynan C., Agro D., Enter R., Foster J., Heelsi N., Hoffman C., Nillson 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, pp253-264, 2001.
- 2) 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, pp529-535, 2004.
- 3) 秋山一弥, 花岡正明, 佐野久聡 : 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, pp143-151, 2009.
- 4) 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, pp524-525, 2007.
- 5) 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, pp427-432, 2010.
- 6) 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, pp421-426, 2011.
- 7) 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.
- 8) 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, pp1-12, 1978.
- 9) 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), pp801-828, 1989.
- 10) 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, pp411-423, 2005.

(2012. 4. 5受付)