

# 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

(独)土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム ○西原 照雅  
室蘭工業大学大学院 工学研究科 中津川 誠  
(独)土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム 浜本 聡

積雪寒冷地のダムでは、冬季に流域に蓄積された積雪が、春先の融雪時に流出する水を貯留し、夏までの水需要を賄っている。このため、ダムでは、毎年3月頃の積雪最盛期に積雪調査を行い、ダム流域の積雪包蔵水量を推定している。しかし、同調査は厳冬期に行われるため、調査地点は限られている。一方、近年、航空レーザ測量による地形データを用いて様々な解析が行われており、無積雪期と積雪期の二時期の航空レーザ測量による標高差から、積雪分布を面的に捉えることができる。本稿では、ダム流域で実施した航空レーザ測量から積雪分布と地形及び植生との関係について考察し、同結果を基にダム流域の積雪包蔵水量を推定した。

キーワード：航空レーザ測量、積雪分布、積雪包蔵水量

## 1. まえがき

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、毎年3月頃の積雪最盛期に積雪調査を行い、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、同結果を用いた様々な地形解析が行われている。例えば、無積雪期と積雪期の二時期の航空レーザ測量による標高差からは、積雪分布を面的に捉えることができる。鳥谷部ら<sup>1)</sup>、西原ら<sup>2)</sup>は積雪分布と標高や斜面方位との関係を分析した結果を基に、ダム流域における積雪包蔵水量を推定している。ダム管理の実務においては、積雪相当水量が標高とともに線形に増加する関係を用いて、流域の積雪包蔵水量を推定するのが一般的である。しかし、笹ら<sup>3)</sup>、島村ら<sup>4)</sup>により、森林限界よりも高い標高における、森林の無い範囲や尾根では、積雪の移動により積雪深が減少することが報告されている。このため、現在の手法では、このような範囲の積雪相当水量を過大に評価している可能性がある。

そこで、本研究では、豊平川上流の定山溪ダム流域において広範囲に行われた航空レーザ測量結果より、積雪深と標高、地形及び植生との関係について分析した結果を基に、森林の無い範囲や尾根における積雪深の減少を考慮して、ダム流域の積雪包蔵水量の推定を行った。

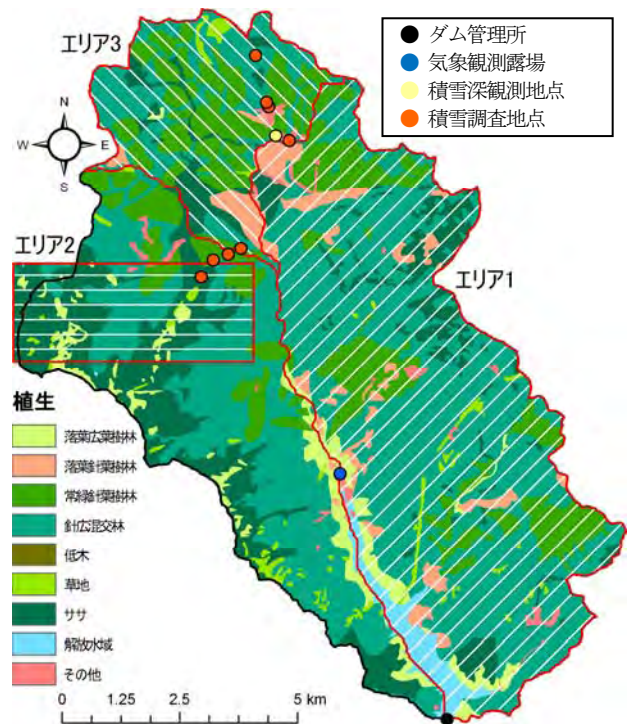


図-1 定山溪ダム流域

## 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及び図-2に示す豊平峡ダム流域である。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104km<sup>2</sup>、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

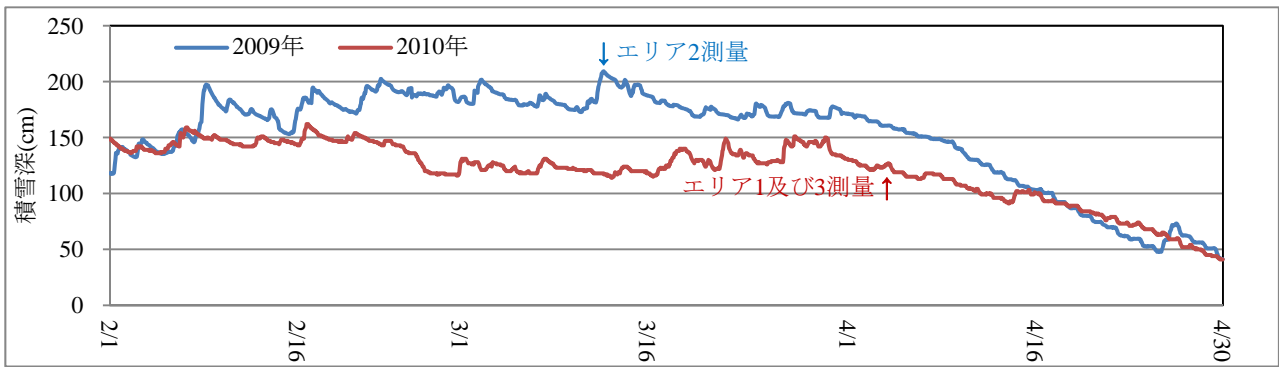


図-3 航空レーザ測量年の積雪状況（定山溪ダム気象観測露場）

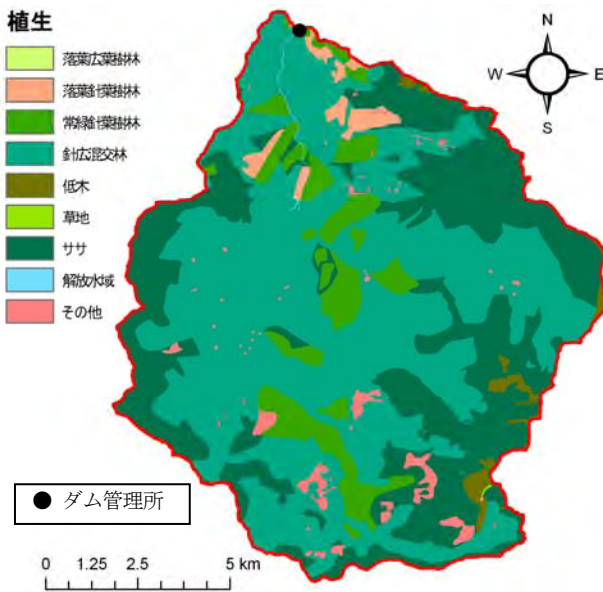


図-2 豊平峡ダム流域

森林である。豊平峡ダムは、定山溪ダムと同じく豊平川流域の上流部に位置し、流域面積は134km<sup>2</sup>、標高帯は400m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が、定山溪ダムと比較すると、尾根（流域界）付近にササが広く分布している。

次に、解析に使用した資料を示す。積雪分布の解析は、図-1に示す定山溪ダム流域において実施された航空レーザ測量結果を用いる。エリア1は面積が53km<sup>2</sup>で南西向き、エリア2は10km<sup>2</sup>で北東向き、エリア3は16km<sup>2</sup>で南向きの斜面である。それぞれのエリアの航空レーザ計測は、表-1に示す日時に実施したものである。この結果を基に5mメッシュで内挿した高解像度DEM（数値標高モデル）を作成し、積雪深は二時期のDEMの標高差として求めた。求めた積雪深を積雪調査やテレメータで観測した積雪深と比較したところ、エリア2で40cm程度、エリア1及びエリア3で+10cm程度の誤差であった。また、水収支の計算にはダム管理所でルーチ的に観測している気温、降水量、流入量

表-1 航空レーザ測量日時

測量範囲	無積雪期	積雪期
エリア 1,3	2010/6/6～12	2010/4/8
エリア 2	2008/10/31	2009/3/8

を用いた。さらに、植生は自然環境保全基礎調査の結果を基に、図-1及び図-2に示すように9分類した。

### 3. 航空レーザ測量年の積雪の状況

積雪期の航空レーザ測量は、異なる年に実施しているため、積雪の状況が異なる。各年の積雪の状況を確認するため、図-3に図-1に示す気象観測露場において観測した積雪深を示す。図-3を見ると、2009年より2010年の方が2月上旬～4月中旬にかけての積雪深が小さくなっている。また、航空レーザ測量を実施した日は、2009年がその年の積雪深のピークにあたること、2010年がその年の積雪深のピークを過ぎ積雪深が減少期に入っていることから、融雪の初期にあたるのがわかる。なお、ダム近傍にあるアメダスの小金湯地点で見ると、平年値(1971年～2000年)と比較して、2009年は若干積雪が多い年、2010年は積雪が少ない年であった。

### 4. 積雪深と標高の関係

山田ら<sup>9)</sup>は、樹林帯における積雪深は標高の増加とともに線形に増加し、高山裸地帯では標高と無関係になることを報告している。この樹林帯における積雪深と標高の関係を式で表すと、式(1)となる。

$$S = a_1 Z + a_2 \quad (1)$$

ここで、 $S$ ：積雪深(m)、 $Z$ ：標高(m)、 $a_1 \sim a_2$ ：回帰係

表-2  $a_1$ ,  $a_2$ , 相関係数 (航空レーザ測量)

	$a_1$	$a_2$	相関係数 $R^2$
エリア 1	0.0028	0.24	0.97
エリア 2	0.0036	0.13	0.99
エリア 3	0.0025	0.34	0.94

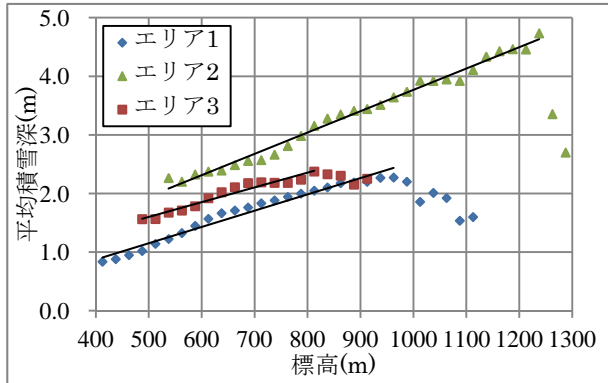


図-4 標高と積雪深の関係 (航空レーザ測量)

数である。

図-4 は DEM より求めた積雪深を標高 25m ピッチで区分して平均積雪深を求め、標高と平均積雪深の関係を示したものである。なお、図中の直線は、それぞれのエリアについて、平均積雪深が最大となる標高まで式(1)で回帰分析した結果を示したものである。これらの回帰式の $a_1$ ,  $a_2$ , 相関係数を表-2 に示す。

図-4 及び表-2 より、平均積雪深がピークとなる標高までは、平均積雪深は標高の増加とともに高い相関で線形に増加していることがわかる。平均積雪深がピークとなる標高に着目すると、エリア 1 で 975m, エリア 2 で 1,250m, エリア 3 で 825m である。また、平均積雪深の減少の程度に着目すると、エリア 1 及びエリア 3 ではピーク後に、徐々に減少しているのに対し、エリア 2 ではピーク後に急激に減少している。なお、積雪の多い年に測量を実施したエリア 2 の平均積雪深は、エリア 1 及び 3 の平均積雪深と比較して全体的に大きくなっている。

## 5. 積雪深と地形及び植生との関係

笹<sup>4)</sup>らは、強風地で、北海道のような積雪が乾いており容易に再移動しやすい地域では、森林による風の減速効果等により、森林は草地等と比べて堆雪効果を発揮することを報告している。つまり、森林内では積雪深が大きく、森林外では積雪深が小さくなるということである。また、島村ら<sup>5)</sup>により、森林限界よりも高い標高帯では、風衝斜面から風背斜面へ、もしくは

尾根から谷へ、上流から下流へといった積雪の剥離・移動・再堆積が起こり、積雪は風衝斜面や尾根で減少し、風背斜面や谷では増加することが示されている。図-4 で見られた標高の高い範囲における平均積雪深の減少は、これらが要因と考えられるため、ここでは平均積雪深がピークとなる標高付近において、標高と傾斜及び曲率、さらに植生との関係を考察する。

図-5 には 4 章で標高と積雪深との関係を分析した際と同様に、標高 25m ピッチで区分して平均傾斜を求め、標高と平均傾斜との関係を示した。また、図-6 には同様の方法で標高と平均曲率との関係を示した。曲率は正が凹地形、負が凸地形を示している。

はじめに図-5 を見ると、エリア 1 及び 3 の平均積雪深がピークとなる標高は、平均傾斜が急激に増加する標高とほぼ一致している。エリア 2 では、平均積雪深がピークとなる標高付近において傾斜の大きな変化は見られないが、比較的傾斜の小さい範囲で平均積雪深がピークとなっている。次に、図-6 を見ると、エリア 1 及び 2 の平均積雪深がピークとなる標高は、平均曲率が急激に減少する標高とほぼ一致している。エリア 3 では、平均積雪深がピークとなる標高よりも若干高い標高で平均曲率が急激に減少している。この急激な曲率の減少は、平均曲率が概ね-0.002 となる標高付近で見られた。これらのことから、標高が高くなり、尾根に向かって傾斜が急激に大きく、曲率が急激に減少する標高付近で、式(1)の積雪深と標高の関係が成り立たなくなり、ここからは標高が高くなるにつれて積雪深が小さくなる傾向があると考えられる。最後に、標高と植生との関係について考察する。図-7 は標高 25m ピッチの各標高帯の面積に占める森林の割合を示している。ここで、森林は図-1 の分類のうち、落葉広葉樹林、落葉針葉樹林、常緑針葉樹林及び針広混交林の合計とした。図-7 を見ると、3 エリアとも平均積雪深が減少に転じる標高付近で森林の割合は大きく変化していない。エリア 1 及び 3 は森林の占める割合が標高の増加とともに減少し、60%程度になった標高帯、エリア 2 は森林外で植生がササ、草地、低木のみとなった標高帯で平均積雪深が減少に転じていることがわかる。エリア 2 の積雪深が急激に減少した標高帯は、写真-1 の青線で囲ったような箇所と想定され、森林による堆雪効果が期待できず、積雪深が急激に減少したと考えられる。

ここで 4 章及び 5 章において考察した事項をまとめる。標高が低く、森林面積の割合が多い標高帯では、積雪深は標高の増加とともに線形に増加する。しかし、尾根に近づき、傾斜が大きく曲率が小さくなると積雪深は減少に転じる。この積雪深の減少の程度は、森林面積の占める割合が多い場合と比較して、森林がほとんど無く、主たる植生がササ、草地、低木である場合に大きくなる。

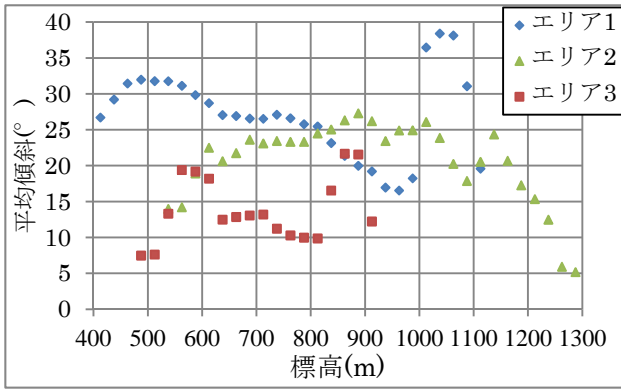


図-5 標高と傾斜の関係

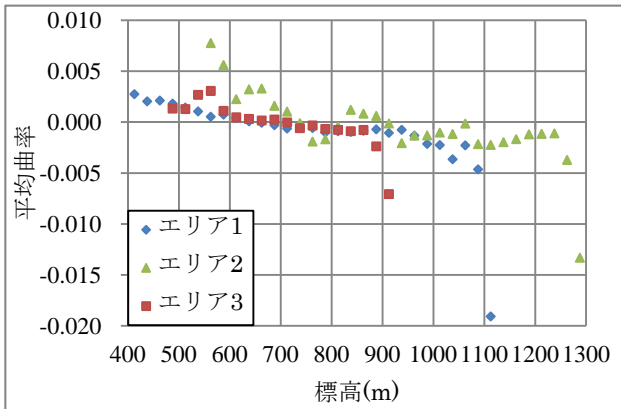


図-6 標高と曲率の関係

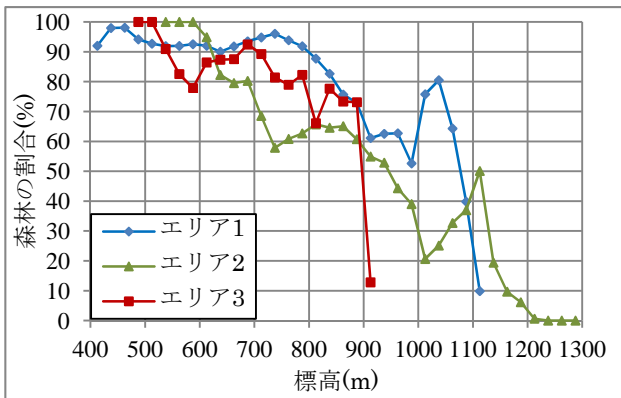


図-7 標高帯の面積に占める森林の割合



写真-1 風により積雪が移動しやすい植生の例

## 6. 定山溪ダム流域の積雪包蔵水量の推定

定山溪ダムでは、毎年、積雪最盛期の3月上旬に積雪調査を行い、ダム流域の積雪包蔵水量を推定している。同調査では、標高500m～850mの間の合計8地点における積雪調査の結果に対し、積雪相当水量が標高の増加とともに線形に増加する関係を用いている。しかし、4章及び5章で考察したとおり、積雪深はある標高で減少に転じるため、標高とともに線形に増加する関係式を用いると、標高の高い範囲の積雪相当水量を過大に評価することとなる。そこで、この範囲の積雪深の減少を考慮して積雪包蔵水量の推定を試みた。

なお、対象とするダムで航空レーザ測量による詳細な地形情報が得られているとは限らない。このため、積雪包蔵水量の推定には、国土地理院のWEBサイトで誰でも入手可能な基盤地図情報の数値標高モデルを用いた。同データの解像度は10mである。曲率及び森林の割合は、数値標高モデル及び自然環境保全基礎調査結果より、ESRI社のArcGISを用いて算出した。また、ダムの実務への適用を考え、ダム流域を1つの領域として扱っている。

対象年は2010年とした。同年の積雪調査は3月11日に実施され、流域の積雪包蔵水量は $104.31 \times 10^6 \text{ m}^3$ と推定されている。

標高が高い範囲で積雪深を減少させる方法は、積雪深の減少との対応が良かった平均曲率及び森林の割合を用いる。5章における考察から、積雪深は平均曲率が概ね-0.002以下になった標高から減少に転じたため、平均曲率が-0.002を下回った標高から積雪深を減じることとした。また、森林の割合が比較的高いエリア1及び3で積雪深のピークとピーク後の最小積雪深を比較すると、エリア1で29.5%の減、エリア3で9.7%の減であったため、積雪深を減少させる割合はこの中間の値を採用し、ピーク値から20%減じた一定値とした。なお、エリア3の森林のほとんど無い範囲では、積雪深のピークに対してピーク後の最小積雪深は42.9%の減であったため、森林の割合が10%を下回った標高から積雪深をピークから40%減じた。

積雪相当水量を求めるには積雪密度が必要であるが、鳥谷部ら<sup>7)</sup>により、定山溪ダム流域における積雪最盛期の積雪密度は、空間的にほぼ均一であることが報告されている。そこで、積雪密度は、積雪調査日における全調査地点の積雪密度を平均した一定値( $414 \text{ kg/m}^3$ )とした。

積雪包蔵水量の推定結果は融雪期(積雪調査日翌日から同年6月30日まで)の水収支との比較により評価する。水収支は $Q_i - R + E_{pt}$ で表し、 $Q_i$ :ダム流入量( $\text{m}^3$ )、 $R$ :降水量( $\text{m}^3$ )、 $E_{pt}$ :可能蒸発散量( $\text{mm/day}$ )である。口澤ら<sup>8)</sup>の定山溪ダム流域における

表-3  $a_1$ ,  $a_2$ , 相関係数 (2010 年定山溪ダム積雪調査)

$a_1$	$a_2$	相関係数 $R^2$
0.0027	0.55	0.79

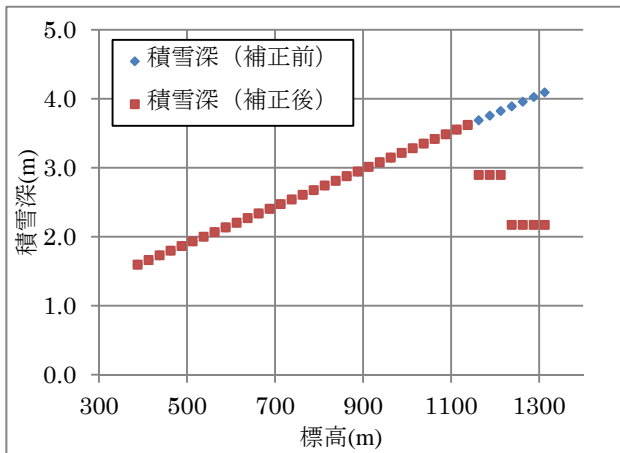


図-8 補正した積雪深 (2010 年定山溪ダム)

表-4 積雪包蔵水量の推定結果 (2010 年定山溪ダム)

	積雪包蔵水量( $m^3 \times 10^6$ )	誤差
本手法	103.79	6.5%
積雪調査	104.31	7.0%
水収支	97.50	—

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、Hamon 法(式(2))で推定した可能蒸発散量を加えた値とした。なお、融雪開始の頃は気温が低いため、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。

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

ここで、 $D_0$ ：可照時間（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。

積雪包蔵水量の推定結果を示す。2010年に実施された積雪調査を基に算出した、式(1)の $a_1$ ,  $a_2$ , 相関係数を表-3に示す。積雪深は、このパラメタを用いて標高25mピッチで求め、曲率が-0.002を下回った標高1,150mからは、積雪深をピーク値から20%減じた一定値とした。さらに、森林の割合が10%以下となった標高1,225mからは積雪深をピーク値から40%減じた一定値とした。図-8に補正した積雪深を示す。こ

の積雪深分布を用いてダム流域の積雪包蔵水量を推定した結果が表-4である。誤差は水収支との比較である。水収支を真値として評価すると、標高の高い範囲における積雪深の減少を考慮した結果、若干ではあるが精度が向上している。積雪深を減少させた範囲に限ると、積雪相当水量は34%の減となっており、現在の方法では標高の高い範囲で積雪相当水量を過大に評価している可能性がある。

なお、効果が小さかった原因は、定山溪ダムでは積雪深を減少させた範囲の占める面積が、流域面積の1.6%程度であることが挙げられる。

## 7. 豊平峡ダム流域の積雪包蔵水量の推定

次に、本手法の汎用性を検証するため、定山溪ダムと同様の方法で豊平峡ダムの積雪包蔵水量を推定する。豊平峡ダムも定山溪ダムと同様に、毎年積雪最盛期の3月上旬に積雪調査を行い、ダム流域の積雪包蔵水量を推定している。同調査では、標高650m~950mの間の合計11地点における積雪調査の結果結果に対し、積雪相当水量が標高の増加とともに線形に増加する関係を用いている。

対象年は定山溪ダムと同じく2010年とした。同年の積雪調査は3月12日に実施され、流域の積雪包蔵水量は $108.98 \times 10^6 m^3$ と推定されている。積雪密度は、積雪調査日における全地点の積雪密度を平均した一定値( $405kg/m^3$ )とした。

積雪包蔵水量の推定結果を示す。2010年に実施された積雪調査を基に算出した、式(1)の $a_1$ ,  $a_2$ , 相関係数を表-5に示す。積雪深は、このパラメタを用いて標高25mピッチで求め、定山溪ダムと同様の平均曲率及び森林の割合の条件により減少させた。図-9に補正した積雪深を示す。豊平峡ダムでは、曲率が-0.002を下回った標高が1,175mであったのに対し、森林の割合が10%を下回った標高が1,075mであった。このため、森林の割合が10%を下回った標高1,075m以上の積雪深をピーク値から40%減じた一定値とした。

この積雪深分布を用いてダム流域の積雪包蔵水量を推定した結果が表-6である。誤差は水収支との比較である。水収支を真値として評価すると、-20%以上の誤差があり、積雪深を補正したことによる改善は見られていない。

改善が見られなかった原因として、補正の対象とした積雪調査による線形の回帰式の相関係数が低く、積雪調査による積雪包蔵水量の推定精度が低いことが考えられる。鳥谷部ら<sup>1)</sup>や西原ら<sup>2)</sup>が提案した積雪包蔵水量を推定する方法を用いた場合も、豊平峡ダムの2010年の推定値は水収支と比較して誤差が大きく、過小となっており、本手法と同様の傾向が見られてい

表-5  $a_1$ ,  $a_2$ , 相関係数 (2010年豊平峡ダム積雪調査)

$a_1$	$a_2$	相関係数 $R^2$
0.0013	0.99	0.23

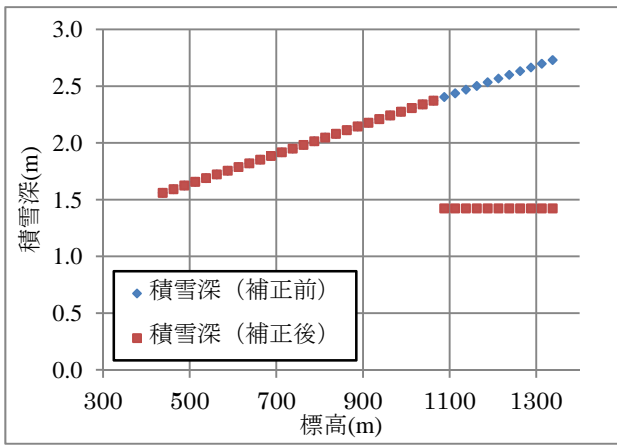


図-9 補正した積雪深 (2010年豊平峡ダム)

表-6 積雪包蔵水量の推定結果 (2010年豊平峡ダム)

	積雪包蔵水量( $m^3 \times 10^6$ )	誤差
本手法	106.83	-24.2%
積雪調査	108.98	-22.7%
水収支	141.01	—

る。原因を特定することは困難であるが、2010年は積雪包蔵水量を推定することが困難な年であったことが示唆される。

## 8. まとめ

本研究による結果を以下にまとめる。

- 1) 二時期の航空レーザ測量結果を基に、標高と積雪深の関係を分析した結果から、森林内の積雪深は標高の増加とともに線形に増加すること、尾根に近づき、傾斜が大きく曲率が小さくなると積雪深は減少に転じることがわかった。
- 2) 積雪深の減少の程度は、森林の占める割合が多い範囲と比較して、ほとんど森林が無く、主たる植生がササ、草地、低木である範囲で大きいことがわかった。
- 3) 1)2)を簡単に考慮して2010年の定山溪ダムの積雪包蔵水量を推定し、水収支で評価すると、積雪調査の結果と比較して若干精度が向上した。現在の

- 方法では、尾根付近や森林が少ない標高帯で積雪相当水量を過大に推定していることが示唆された。
- 4) 本手法の汎用性を検証するため、2010年の豊平峡ダムの積雪包蔵水量を推定し、水収支で評価したところ、過小に推定する結果となった。本手法は積雪調査の結果を基に積雪深と標高の関係を求め、これを補正する方法である。このため、本手法の適用には、積雪調査による積雪包蔵水量の推定に一定の精度が確保されている必要がある。

本研究は、航空レーザ測量の結果から、積雪深と標高、地形及び植生との関係を考察し、ダムの実務に簡単に摘要できる方法で、積雪包蔵水量の推定方法の改善を試みた一つの例である。引き続き、ダムの実務に摘要出来る手法の開発に努めていきたい。

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管理事務所からデータや観測場所の提供を受けるなど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) 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.
- 2) 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：水工学論文集, 第56巻, 2012. (印刷中)
- 3) 西原照雅, 中津川誠, 浜本聡：尾根と植生を考慮したダム流域の積雪包蔵水量の推定の試み, 土木学会北海道支部年次技術発表会論文集第68号B, 2012. (印刷中)
- 4) 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.
- 5) 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Vol. 18 No. 4, pp411-423, 2005.
- 6) 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.
- 7) 鳥谷部寿人, 山下彰司, 新目竜一：積雪重量計を用いた融雪観測と積雪相当水量に関する一考察, 土木学会北海道支部年次技術発表会論文集第65号B-32, 2009.
- 8) 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), pp422-425, 2001.