

## 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相当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ー測量結果を基に作成した高解像度 DEM より、積雪深分布と標高、傾斜、曲率、植生との関係を考察し、これらを考慮して積雪相当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、積雪包蔵水量、斜面方位、傾斜、曲率、植生、航空レーザー測量

### 1. はじめに

積雪寒冷地域の多目的ダムでは、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。この推定は、積雪調査結果より作成した積雪相当水量と標高の関係式を基に行われている。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、調査できる地点は流域内で数点～数十点に限られる。このため、流域内の積雪分布を詳細に把握することができず、積雪包蔵水量の推定精度が良くないのが現状である。また、このように求めた積雪分布を入力して融雪流出モデルを用いても、ダム流入量の推定精度を上げることは困難である。

一方、近年、航空レーザー測量から得られる高密度の地形データを用いて、様々な地形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ー測量結果から積雪分布を求め、地形との関係から積雪の空間的な分布を推定した Hopkinson ら<sup>1)</sup>、岡本ら<sup>2)</sup>、鳥谷部ら<sup>3)</sup>、秋山ら<sup>4)</sup>の研究が報告されている。しかし、経年的な積雪包蔵水量の推定や、ダムの実務への適用を視野に入れた研究は少ない。また、ダム流域のように広い範囲の航空レーザー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ー測量結果から積雪分布の特徴を捉え、積雪調査等のサンプルデータから、積雪包蔵水量や積雪分布を精度良く推定する手法の開発が期待される。

そこで、本研究では、航空レーザー測量より求めた積雪分布について、地形や植生との関係を分析し、ダム流域の積雪分布や積雪包蔵水量の推定を行った。

### 2. 斜面方位を考慮したダム流域の積雪包蔵水量の推定

航空レーザー測量から得られる積雪の空間的な分布について、ダム流域を対象とした研究に鳥谷部ら<sup>5)</sup>の研究がある。鳥谷部らは、標高と積雪深及び積雪深分布のばらつきを考慮してダム流域における積雪包蔵水量を推定する方法を提案し、過去10年程度の積雪包蔵水量を推定したところ、水収支を基にした評価で3割程度の誤差が含まれたことを報告している。以降、本稿では鳥谷部らによる方法を標高分布法という。

一方、陽光及び熱の指標となる定性的な斜面方位を数値化した指標として熱負荷指標 (HLI) がある<sup>6)</sup>。熱負荷は、気温の高い午後に太陽放射を受ける南西斜面で最も大きく、北東斜面で最も小さい。積雪はこのような斜面方位による熱負荷の違いの影響を受けると考えられるが、標高分布法<sup>5)</sup>には考慮されていない。このため、本稿では、定山溪ダムで行われた航空レーザー測量結果より作成した高解像度 DEM を基に、標高に加え、斜面方位を考慮した積雪包蔵水量の推定方法を提案する。本手法は、毎年ダムで行われている積雪調査やテレメータで観測している積雪深を用い、簡易に積雪包蔵水量を推定できるようにした。さらに、本手法を複数のダムに適用し、水収支を基に手法の適用性及び汎用性を評価した。

#### 2.1 対象流域及び基礎資料

対象流域は図-1に示す6つのダム流域である。岩尾内ダムは天塩川の上流域に位置し、他のダムは石狩川の上流部で、定山溪ダム及び豊平峡ダムは豊平川流域、漁川ダムは漁川流域、桂沢ダムは幾春別川流域、金山ダムは空知川流域に位置する。6つのダムとも流域の土地利用の多くが森林であり、それぞれのダムの標高帯は、定山

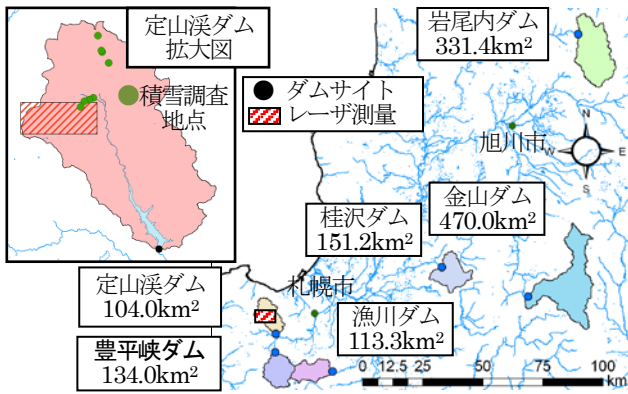


図-1 解析対象ダム流域

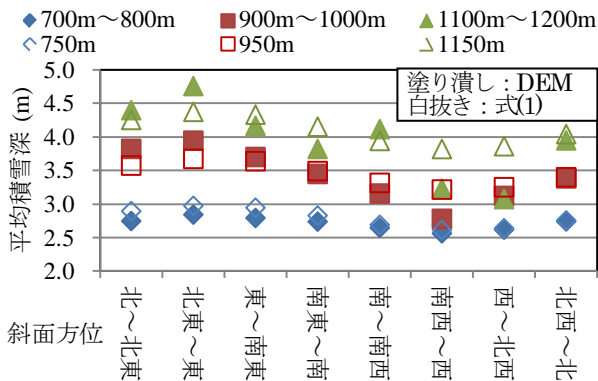


図-2 斜面方位と平均積雪深の関係

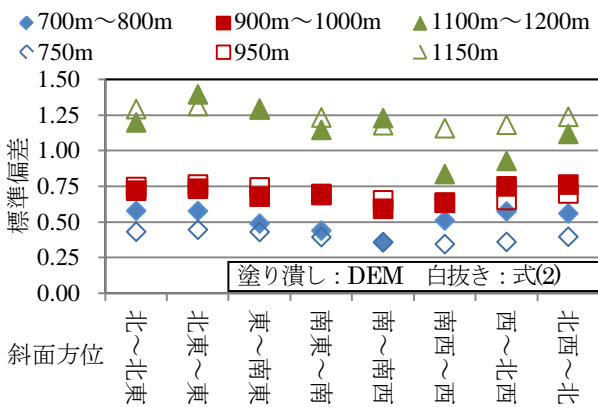


図-3 斜面方位と標準偏差の関係

溪ダム、豊平峡ダム、漁川ダム、桂沢ダムが 300m 付近～1,300m 付近、金山ダムが 300m 付近から 1,900m 付近、岩尾内ダムが 300m 付近～1,500m 付近である。金山ダム及び岩尾内ダムは他の 4 つのダムと比較して標高が高く、流域面積が大きい。次に、解析に使用した基礎資料を示す。積雪分布の解析は、定山溪ダム流域の一部(図-1 赤斜線枠内 10km<sup>2</sup>)において、無積雪期の 2008 年 10 月 31 日及び積雪最盛期の 2009 年 3 月 8 日に実施した航空レーザ測量を基に 5m メッシュで内挿した高解像度 DEM を

用いた<sup>3)5)</sup>。積雪深はこの二時期の DEM の標高差として求めた。さらに、ダム管理所でルーチン的に観測している気温、降水量、積雪深、流入量を用いた。また、ダム流域の標高及び斜面方位分布の算出には基盤地図情報の数値標高モデルを使用した。同データの解像度は 10m である。

## 2. 2 積雪深の空間分布

鳥谷部ら<sup>5)</sup>は、高解像度 DEM を用い、10km<sup>2</sup> 当たり約 40 万個のサンプリングデータを標高 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詳細に分析し、平均積雪深は標高の増加とともに線形に増加すること、積雪深の標準偏差は標高の増加とともにべき乗的に増加することを報告している。本稿では、標高に加え、斜面方位について考察する。

図-2 は標高 100m ごとに平均積雪深と斜面方位の関係を示したものである。ここで、斜面方位は横軸に示す 8 方位で区分した。図-2 より積雪深は斜面方位に対して周期的に変動し、この変動は標高が高くなるに従い大きくなるのがわかる。また、熱負荷の小さい北東斜面の積雪深が大きく、熱負荷の大きい南西斜面の積雪深が小さくなっている。図-3 は、斜面方位と積雪深の標準偏差との関係を示したものである。図からは、前述した平均積雪深と同様の関係があることがわかる。

## 2. 3 斜面方位を考慮した積雪深の推定方法

標高分布法<sup>5)</sup>では、平均積雪深及び積雪深のばらつきと標高の関係を基に、積雪包蔵水量を推定しているが、2.2 で示した通り、平均積雪深及び積雪深のばらつきは斜面方位により変動する。そこで、本稿では標高に加えて、斜面方位を考慮した積雪包蔵水量の推定方法を提案する。以降、標高斜面方位分布法という。同法による平均積雪深と積雪深の標準偏差は、それぞれ式(1)及び式(2)で求める。両式の前半部分は、2.2 に示した鳥谷部ら<sup>5)</sup>の報告を基にしている。また、後半部分は平均積雪深、標準偏差とともに、斜面方位に対して周期的に変動し、この変動は標高が高くなるに従い大きくなること、熱負荷の差違により北東斜面の積雪深が大きく、南西斜面の積雪深が小さいことを基にしている。

$$\mu = a_1 + a_2 Z_i + a_3 Z_i \sin(\theta + a_4) \quad (1)$$

$$\sigma = b_1 e^{b_2 Z_i} + b_3 Z_i \sin(\theta + b_4) \quad (2)$$

ここで、 $\mu$ : 平均積雪深(m),  $Z_i$ : 標高区分の代表値(m),  $\theta$ : 斜面方位の代表値(°),  $\sigma$ : 標準偏差(m),  $a_1 \sim a_4$ ,  $b_1 \sim b_4$ : 回帰係数である。式(1), (2)について、標高 25m ピッチ及びそれぞれを 8 方位に区分した平均積雪深及び標準偏差に対し、回帰分析を行った結果が表-1 である。パラメタは残差平方和が最小となるように決定し、平均

表-1 回帰分析結果

平均積雪深			標準偏差		
	標高斜面 方位分布法	標高 分布法		標高斜面 方位分布法	標高 分布法
$a_1$	0.00326	0.0036	$b_1$	0.0462	0.0725
$a_2$	0.348	0.1249	$b_2$	0.00286	0.0025
$a_3$	0.000245	—	$b_3$	0.0000674	—
$a_4$	11.144	—	$b_4$	24.175	—

積雪深で 46.8, 標準偏差で 10.2 であった。また, 表-1 に標高分布法によるパラメタを併せて示す。同法は斜面方位を考慮していないため,  $a_3$  及び  $a_4$  は—と記載した。表-1 に示したパラメタより求めた平均積雪深と標準偏差は図-2 及び図-3 に白抜きでプロットした。図より, 平均積雪深及び標準偏差を概ね再現しているが, 標高が高くなるに伴い, 誤差が大きくなる傾向があり, 特に南～西にかけて過大に推定する傾向が見られる。これは, 南西～西のサンプル数が 40 万個のうち 1.8% であり, 他の斜面方位と比較して少ないことが一因と考えられる。

2. 4 積雪量の再現

高解像度 DEM で得られているのは積雪深であり, これに対象とする範囲の面積を乗じると, この範囲の積雪量となる。はじめに, 2.3 で示した式の精度を検証するため, 高解像度 DEM が得られている定山溪ダムの 10km<sup>2</sup> を対象に, DEM から求めた積雪量を真値とし, 2.3 で示した式により求めた積雪量と比較する。積雪量は, 下記の通り, 鳥谷部ら<sup>9)</sup>が標高ごとの積雪深分布は正規分布に従うことを基に積雪相当水量を推定した, 標高分布法と同様の考え方により求めた。

$$S_z = \sum p \cdot S_i \quad (3)$$

$$S_i = x \quad (4)$$

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (5)$$

ここで,  $S_z$  : 標高区分及び斜面方位区分ごとの積雪深分布(m),  $S_i$  : 積雪深(m),  $p$  : 頻度(%),  $x$  : 積雪深区分の代表値(m),  $\mu$  : 平均積雪深(m) (式(1)),  $\sigma$  : 積雪深の標準偏差(m) (式(2)) である。

表-2 に積雪量の再現結果を標高分布法による結果と併せて示す。なお, 積雪量は標高区分及び斜面方位ごとの積雪深にその面積を乗じて合算したものである。DEM との誤差は-0.40%であり, 斜面方位を考慮していない標高分布法と比較して精度が向上した。

表-2 積雪量の再現結果

	積雪量(m <sup>3</sup> )	誤差(%)
DEM	33,306	
標高分布法	33,131	-0.53
標高斜面方位分布法	33,174	-0.40

表-3 積雪量の比較 (斜面方位別)

斜面方位	積雪量 (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )				
	DEM	標高 分布法	誤差 (%)	標高 斜面 方位 分布法	誤差 (%)
北～北東	7,310	7,221	-1.22	7,302	-0.11
北東～東	7,423	6,878	-7.34	7,146	-3.73
東～南東	6,688	6,538	-2.25	6,740	0.77
南東～南	2,989	3,098	3.64	3,070	2.71
南～南西	818	882	7.71	835	2.03
南西～西	488	566	15.89	519	6.23
西～北西	2,528	2,802	10.82	2,588	2.38
北西～北	5,061	5,147	1.70	4,973	-1.73

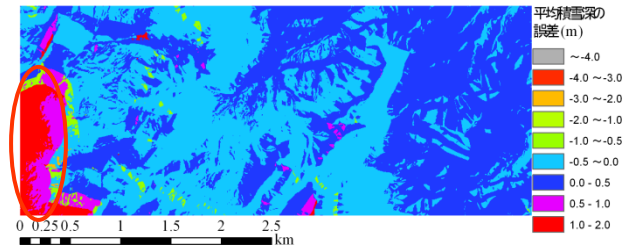


図-4 標高斜面方位分布法と DEM の平均積雪深の差

次に, 斜面方位別に示した結果が表-3 である。なお, 比較のために示した標高分布法は斜面方位を考慮していないため, 10 km<sup>2</sup> に占めるそれぞれの斜面方位の面積割合で全積雪量を按分した値を示した。表-3 より, 標高斜面方位分布法は, どの斜面方位についても誤差は概ね5%以内に収まっており積雪深を良好に再現している。ただし, 南西～西は, 他の方位と比較して誤差が大きい。これは, 2.3 で考察したとおり, 南～西にかけては式(1)及び式(2)が平均積雪深及び標準偏差を過大に評価する傾向があることが原因と考えられる。標高分布法と比較すると最大で 10% 程度の差があり, この結果は, 斜面方位を考慮しなければ, 斜面方位別の積雪深を精度良く推定できないことを示している。

最後に積雪深分布を示す。図-4 は標高斜面方位分布法で求めた標高 25m ピッチ及びそれぞれを 8 方位に区分した平均積雪深と DEM より求めた同様の平均積雪深の差

である。図より、誤差は概ね±0.5m以内に収まっており、標高斜面方位分布法は積雪深分布を良好に再現している。なお、図の赤線で囲った箇所は主たる植生が草地やササであり、ここでは風により積雪が移動している可能性がある<sup>7)</sup>。このため、式(1)及び式(2)の関係が成り立たず、誤差が大きくなっている。2.3における回帰分析ではこの範囲を除外しており、積雪深を再現できていない。

## 2.5 ダム流域の積雪包蔵水量の推定

### 2.5.1 定山溪ダム (2009年3月)

2.4では、航空レーザ測量範囲に対して標高斜面方位分布法による積雪量の推定精度を検証し、良好に再現できることを確認した。次に、定山溪ダム流域の積雪包蔵水量の推定に適用する。積雪相当水量を求めるには、積雪密度が必要になるが、鳥谷部<sup>8)</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、2009年3月12日に行われた積雪調査における全地点の積雪密度を平均した一定値とした。積雪相当水量は式(4)の  $x$  に  $\rho$  : 積雪密度(kg/m<sup>3</sup>)を乗じて求める。積雪密度を乗じることにより、式(3)の  $S_z$  : 標高区分及び斜面方位区分ごとの積雪相当水量分布(m<sup>3</sup>)、 $S_i$  : 積雪相当水量(m<sup>3</sup>)となる。積雪包蔵水量は、積雪相当水量に対象範囲の面積を乗じ、合算したものであるが、標高斜面方位分布法を用いる場合、標高及び斜面方位ごとの面積が必要となる。これは、基盤地図情報の数値標高モデルからESRI社のArcGISを使用し算出した。なお、水平面は斜面方位を計算できないが、水平面は積雪のない水面が大部分であったため、無視した。定山溪ダム流域において水平面が占める面積は1.4%であった。

標高斜面方位分布法による推定結果はこの年に定山溪ダムで行われた積雪調査及び標高分布法による推定結果と比較する。積雪調査による積雪包蔵水量の推定は、標高500m～850mの間の合計8地点の積雪調査による結果から、以下の回帰式を用いている。

$$\bar{S}_i = c_1 Z_i + c_2 \quad (6)$$

ここで、 $\bar{S}_i$  : 標高区分ごとの積雪相当水量(m<sup>3</sup>)、 $Z_i$  : 標高区分の平均値(m)、 $c_1 \sim c_2$  : 回帰係数、 $i$  : 標高区分である。 $\bar{S}_i$ に標高区分ごとの面積を乗じて合算することで積雪包蔵水量が求まる。表-4に結果を示す。標高斜面方位分布法、標高分布法とも、積雪調査による推定結果と比較して-16%程度となった。ダムの積雪調査は、図-1に示すとおり、航空レーザ測量を行った範囲と異なる範囲で実施されており、このことが影響したと考えられる。これは、ある限られた範囲の積雪調査や航空レーザ測量結果を基に、ダム流域の積雪包蔵水量を推定する場合、水収支の観点からダムにおける平均的な積雪包蔵水量を推定できる調査範囲を選定することが重要であることを示

表-4 積雪包蔵水量の推定結果

	積雪包蔵水量 (m <sup>3</sup> ×10 <sup>3</sup> )
積雪調査	120,575
標高分布法	100,473
標高斜面方位分布法	100,163

表-5 斜面方位別の積雪相当水量の推定結果

斜面方位	積雪相当水量(m <sup>3</sup> ×10 <sup>3</sup> )	割合(%)
北～北東	13,180	13.2
北東～東	13,962	13.9
東～南東	14,542	14.5
南東～南	12,686	12.7
南～南西	11,383	11.4
南西～西	10,797	10.8
西～北西	11,488	11.5
北西～北	12,125	12.1
合計(積雪包蔵水量)	100,163	100.0

唆している。

また、標高斜面方位分布法では斜面方位別の積雪相当水量を算定することが可能である。表-5に斜面方位別の積雪相当水量を示した。これによると、東から南東斜面の積雪相当水量が多い。定山溪ダム流域は東から南東の斜面が最も多く、東から南東斜面は比較的熱負荷の少ない方位であることから、積雪相当水量が最大になったと考えられる。

### 2.5.2 経年的な積雪包蔵水量の推定

積雪最盛期の積雪密度が空間的に一様である場合、式(6)の線形関係は積雪深でも成り立ち、これは式(1)の前半部分( $a_1 + a_2 Z_i$ )に相当する。また、ダムでは、毎年、標高別に複数の地点で積雪調査を行っていること、テレメータで積雪深を連続観測しているダムもあることから、この関係式を作成することができる。ただし、2.5.1で示した通り、定山溪ダムの航空レーザ測量結果より作成した平均積雪深及び積雪深の標準偏差の推定式は測量範囲の積雪分布の特徴を反映していると考えられる。このため、毎年の各ダムにおける積雪調査及びテレメータで観測した積雪深と標高の関係から、各年の $a_1$ 及び $a_2$ を求め、表-1の値と置き換え、各年の積雪包蔵水量を推定した。ここで、 $a_1$ 及び $a_2$ は積雪調査日における値であることから、推定した積雪包蔵水量は、積雪調査日における値である。なお、その他のパラメータは特定が困難であることから表-1のままとした。また、積雪密度は空間的にほぼ均一であったため、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。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( $m^3$ ),  $R$ :降水量( $m^3$ ),  $E_{pt}$ :可能蒸発散量( $mm/day$ )である。口澤ら<sup>9)</sup>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、Hamon法(式(7))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。

$$E_{pt} = 0.140D_0^2q_t \quad (7)$$

ここで、 $D_0$ :日照時間(月平均の一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。

#### a) 定山溪ダム(2001年~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、この結果より各年の $a_1$ 及び $a_2$ を求めた。図-5は2001年から2010年までの10年間について、水収支と標高斜面方位分布法、標高分布法<sup>5)</sup>、積雪調査による積雪包蔵水量を比較したものである。図-5より、水収支で評価すると、標高斜面方位分布法が最も良い精度であることがわかる。推定した期間について、水収支を真値として積雪包蔵水量のRMSEを求めたところ、標高斜面方位分布法で $10.4 \times 10^6 m^3$ 、標高分布法で $17.8 \times 10^6 m^3$ 、積雪調査で $15.6 \times 10^6 m^3$ である。水収支と比較すると、推定期間の各年の誤差の平均は9%である。また、 $a_1$ 及び $a_2$ の設定方法を変えたことで、2009年の推定精度が向上した。

以降、他のダムに標高斜面方位分布法を適用し、汎用性を検証する。 $a_1$ 及び $a_2$ 以外のパラメータ、積雪密度、水収支はすべて、定山溪ダムと同様に整理する。

#### b) 豊平峡ダム(2006年~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、この結果より各年の $a_1$ 及

び $a_2$ を求めた。推定結果を表-6に示す。推定した期間のRMSEは $19.8 \times 10^6 m^3$ である。また、水収支と比較すると、推定期間の各年の誤差の平均は12%である。

#### c) 漁川ダム(2006年~2010年)

漁川ダムでは、ダム管理所付近の標高300mから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。このため、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用いて、各年の $a_1$ 及び $a_2$ を求めた。結果を表-6に示す。推定した期間のRMSEは $9.9 \times 10^6 m^3$ である。水収支と比較すると、推定期間の各年の誤差の平均は23%である。

#### d) 桂沢ダム(2006年~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、 $a_1$ 及び $a_2$ を求めた。結果を表-6に示す。推定した期間のRMSEは $14.6 \times 10^6 m^3$ である。水収支と比較すると、推定期間の各年の誤差の平均は19%である。なお、2008年及び2010年は、標高の高い放水口地点の積雪深が小さく、 $a_1$ が負となったため、 $a_1 = 0$ とした。

#### e) 岩尾内ダム(2006年~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、この結果より各年の $a_1$ 及び $a_2$ を求めた。推定結果を表-6に示す。推定した期間のRMSEは $57.6 \times 10^6 m^3$ である。また、水収支と比較すると、推定期間の各年の誤差の平均は24%程度である。

#### f) 金山ダム(2006年~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おり、この結果より各年の $a_1$ 及び $a_2$ を求めた。推定結果を表-6に示す。推定した期間のRMSEは $53.0 \times 10^6 m^3$ である。また、水収支と比較すると、推定期間の各年の誤差の平均は27%である。なお、流域面積の大きいダムでは、複数のコースで積雪調査を行い、各コースの積雪包蔵水量を合算して、ダム流域の積雪包

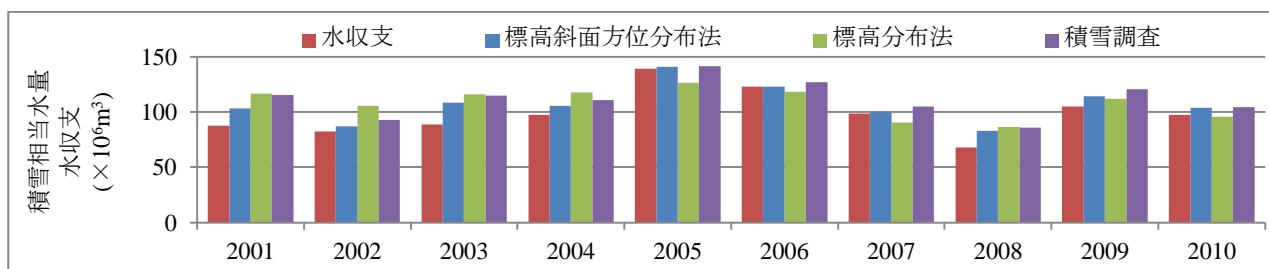


図-5 積雪包蔵水量の推定値と水収支の比較(定山溪ダム:2001年~2010年)

表-6 積雪包蔵水量の推定結果 (×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>)

	豊平峡ダム				漁川ダム		
	水収支	標高 斜面 方位 分布法	積雪 調査		水収支	標高 斜面 方位 分布法	積雪 調査
2006	115	137	139	2006	36	53	54
2007	欠測			2007	47	57	56
2008	91	95	96	2008	29	33	39
2009	129	130	134	2009	40	44	57
2010	141	109	109	2010	35	42	49
平均	119	118	119	平均	37	46	51

	桂沢ダム				岩尾内ダム		
	水収支	標高 斜面 方位 分布法	積雪 調査		水収支	標高 斜面 方位 分布法	積雪 調査
2006	81	88	83	2006	267	193	218
2007	86	69	69	2007	214	156	169
2008	89	65	76	2008	168	132	169
2009	71	63	61	2009	239	202	179
2010	69	62	66	2010	275	203	248
平均	79	69	71	平均	232	177	197

	金山ダム			
	水収支	標高斜面方位 分布法(1領域)	標高斜面方位 分布法(2領域)	積雪 調査
2006	欠測			
2007	205	168	208	190
2008	114	100	139	124
2009	191	112	187	170
2010	168	110	162	152
平均	170	123	174	159

蔵水量としている。先の推定では、全調査地点を用いて1つの $a_1$ 及び $a_2$ を設定したことが誤差を大きくしたと考えられる。このため、流域を $a_1$ の近い2つの領域に分けて標高斜面方位分布法の適用を試みた。結果を表-6に示す。先の推定と比較して精度が向上し、RMSEは $13.3 \times 10^6 \text{m}^3$ 、水収支との誤差は9%となった。

### g) 結果の考察

岩尾内ダム及び金山ダム以外は標高分布法による推定結果<sup>10)</sup>が示されている。水収支と比較すると、2006年～

2010年の平均では、標高分布法で15%～30%、積雪調査で13%～37%の誤差に対し、標高斜面方位分布法では9%～23%の誤差である。標高斜面方位分布法は、既存の方法と比較して精度が向上した。

また、流域面積が小さく、標高別の積雪調査地点が多いダムほど、水収支と比較して精度が良い傾向があった。

さらに、近傍に位置し、ダムの規模や積雪調査の規模がほぼ同等である定山溪ダムと豊平峡ダムで比較すると、後者の誤差が大きい。豊平峡ダムは標高が1,000m以上の南～西向き斜面の面積が非常に大きく、この範囲は式(1)及び式(2)の誤差が大きい。これが、定山溪ダムと比較して豊平峡ダムの誤差が大きい一因と考えられる。

## 2. 6 まとめ

- 1) 航空レーザ測量結果より作成した高密度の積雪深の空間分布より、標高及び斜面方位別の積雪深分布を明らかにした。積雪深は斜面方位に対して周期的に変動し、北東斜面で大きく、南東斜面で小さいことを示した。
- 2) 標高及び斜面方位による積雪深の空間分布の変動を考慮し、積雪包蔵水量を推定する方法を構築した。定山溪ダムの積雪包蔵水量を推定に適用し、斜面方位別の積雪相当水量分布を明らかにした。
- 3) 2)の結果から、航空レーザ測量による積雪分布は測量範囲の特徴を有しており、ここから推定した積雪分布をそのままダム流域等の広い範囲の積雪分布の推定に拡張した場合、誤差が生じるおそれがあることを示唆した。
- 4) 2)及び3)の結果を基に、毎年の積雪調査等の結果から簡潔に積雪包蔵水量を推定する方法を構築し、6つのダムに適用した。推定結果を水収支で評価したところ、6ダムとも概ね20%以内の誤差であり、既存の方法と比較して精度が向上し、一定の汎用性があることを確認した。

## 3. 地形と植生を考慮した実用的なダム流域の積雪包蔵水量の推定方法

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利用して、ダム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>7)</sup>、島村ら<sup>11)</sup>により森林限界よりも高い標高帯等の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ため、このような範囲では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

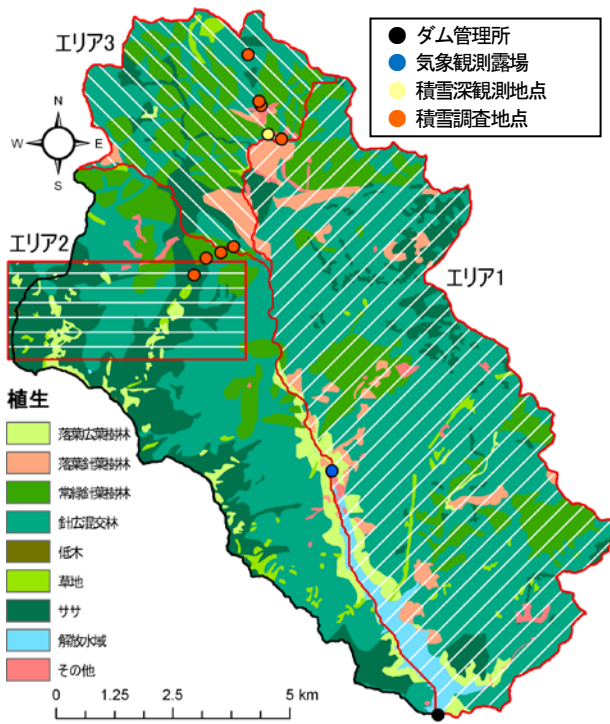


図-6 解析対象ダム流域

表-7 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

深と標高、地形及び植生との関係について分析した結果から、尾根や森林外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。

### 3.1 対象流域及び基礎資料

対象流域は図-6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森林である。次に、解析に使用した資料を示す。積雪分布の解析は、図-6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-7に示す日時に実施したものであり、この結果を基に5mメッシュで内挿した高解像度DEM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

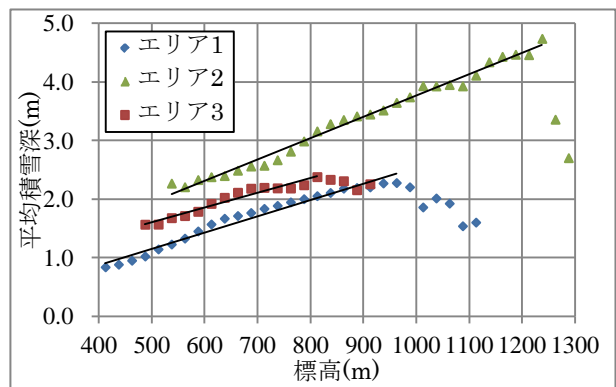


図-7 標高と積雪深の関係

表-8  $a_1$ ,  $a_2$ , 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

程度の誤差であった。また、水収支の算出に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。さらに、植生は自然環境保全基礎調査の結果を基に、図-6に示すように9分類した。

### 3.2 積雪深と標高の関係

山田ら<sup>12)</sup>によると、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が報告されている。この森林帯における関係を式で表すと、式(8)となる。

$$S_i = a_1 Z_i + a_2 \quad (8)$$

ここで、 $S_i$  : 標高区分ごとの積雪深(m)、 $Z_i$  : 標高区分の平均値(m)、 $a_1 \sim a_2$  : 回帰係数、 $i$  : 標高区分である。

図-7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対し、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-8に示す。

図-7及び表-8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。また、積雪の多い時期に測量を実施したエリア2の平均積雪深がエリア1及び3

と比較して全体的に大きい。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。

### 3.3 積雪深と地形及び植生の関係

笹<sup>7)</sup>らによると、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、森林は草地のような森林外に比べて、堆雪効果を発揮し、森林内では積雪深が大きく、森林外では積雪深が少なくなることが報告されている。また、島村ら<sup>11)</sup>によると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。3.2で見られた標高の高い範囲における積雪深の減少は、これらが要因と考えられるため、ここでは積雪深がピークとなる付近の標高と傾斜及び曲率、植生との関係について考察する。

図-8は3.2で標高と積雪深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、標高と傾斜の関係を示したものである。また、図-9は同様の方法で標高と曲率の関係を示したものである。曲率が正の場合は凹地形、負の場合は凸地形を示している。はじめに図-8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ことがわかる。エリア2については、平均積雪深がピークとなる標高付近において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-9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、曲率が急激に減少する標高とほぼ一致することがわかる。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曲率が急激に減少している。この急激な減少は曲率が概ね-0.002となる標高で見られた。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なり、曲率が急激に減少する標高付近で、積雪深が式(1)の関係をはずれ、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。

次に、植生との関係について考察する。図-10は標高25mピッチの各標高帯に占める森林の割合を示したものである。ここで、森林は図-6の植生のうち、常緑針葉樹林、落葉広葉樹林及び針広混交林の合計とした。図-10を見ると、3エリアとも平均積雪深が減少に転じる標高

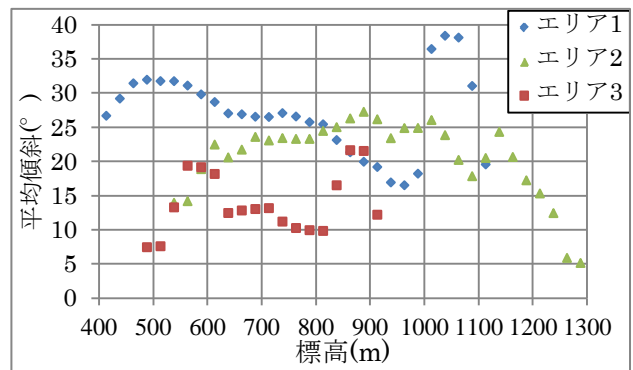


図-8 標高と傾斜の関係

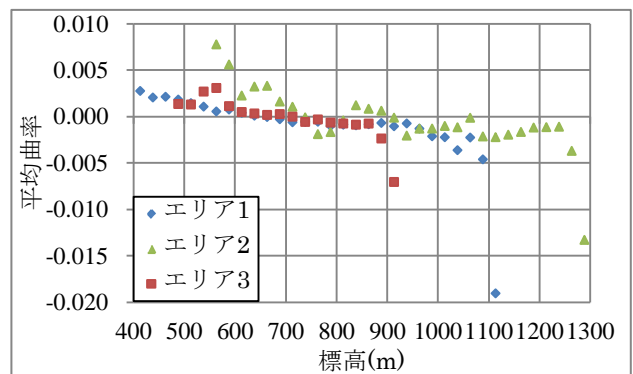


図-9 標高と曲率の関係

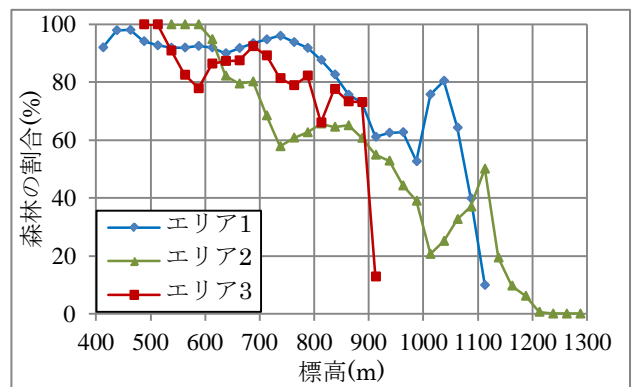


図-10 標高帯の面積に占める森林の割合

付近で森林の割合は大きく変化していないが、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。

ここで3.2及び3.3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が、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、森林の割合が多い場合と比較して、森林がほとんど無く、植生がササ、草地、低木となる場合に大きくなる。

### 3. 4 定山溪ダム流域の積雪包蔵水量の推定

定山溪ダムでは、積雪包蔵水量が最大となる毎年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より、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、線形の関係式を用いると、標高の高い範囲では、積雪相当水量を過大に評価することとなる。そこで、積雪深の減少を考慮した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計測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。曲率等の算出にはESRI社のArcGISを使用した。また、ダムの実務への適用を考え、ダム流域を1つの領域として扱い簡素化を図った。

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曲率及び森林の割合を用いた。4章及び5章における考察から、積雪深は、曲率が概ね-0.002以下になった標高から減少に転じた。このため、曲率が-0.002を下回った標高から積雪深を減じた。積雪深を減少させる割合は、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、この中間の値を採用し、曲率が-0.002を下回った標高以上における積雪深を、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。このため、森林の割合が10%を下回った標高では、積雪深をピークから40%減じた。また、積雪相当水量を求めるには積雪密度が必要となるが、鳥谷部ら<sup>8)</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、空間的には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地点の積雪密度を平均した一定値( $414 \text{kg/m}^3$ )とした。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

表-9  $a_1$ ,  $a_2$ , 相関係数 (2010年積雪調査)

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

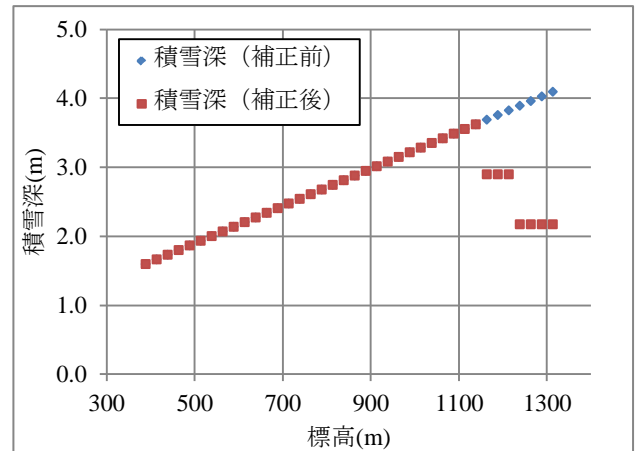


図-11 補正した積雪深

表-10 積雪包蔵水量の推定結果

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

$Q_i - R + E_{pt}$ 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>9)</sup>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、Hamon法(式(7))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。

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(8)の $a_1$ ,  $a_2$ , 相関係数を表-9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-11に補正した積雪深を示す。この積雪深を用いてダム流域

の積雪包蔵水量を推定した結果が表-10 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、精度が向上している。また、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。大雪山系に位置するダムのように、植生限界以上の占める面積が大きいダムでは、このような推定方法の効果が大きく現れると考えられる。

### 3. 5 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、標高が高くなり、尾根に近づくと、傾斜と曲率が急激に変化する標高付近で積雪深が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、ほとんど森林がなく、植生がササ、草地、低木のみとなっている範囲で大きいことがわかった。
- 3) 1)2)を簡潔に考慮して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を示した。

### 4. おわりに

航空レーザ測量結果から求めた積雪深分布と地形及び植生との関係を分析し、これらを考慮することで積雪深分布やダム流域の積雪包蔵水量を精度良く求めることができた。引き続き、積雪深分布と地形及び植生との関係の分析を進め、汎用性が高く、ダム管理の現場において実用的な、積雪深分布や積雪包蔵水量の推定方法の開発を目指す。

**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、名寄河川事務所から多大な協力を頂いた。ここに記して

謝意を表する。

### 参考文献

- 1) Hopkinson C., Sitar M., Chasmer L., Gynan C., Agro D., Enter R., Foster J., Heels 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, 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) 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.
- 4) 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, pp143-151, 2009.
- 5) 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.
- 6) McCune, B. and Keon, D. : Equations for potential annual direct incident radiation and heat load. J. Veg. Sci. 13, 603-606, 2002
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 鳥谷部寿人, 中津川誠: 航空レーザ計測データを活用したダム流域の積雪水量の推定, 土木学会北海道支部年次技術発表会論文集 第67号, B-40, 2011.
- 11) 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.
- 12) 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.

# 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 Research 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, snow depth distribution was investigated in relation to both topography (elevation, slope aspect, slope and curvature) and vegetation 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 estimates with a higher level of accuracy than those based on snow surveys and existing models.

**Key words** : *snow depth distribution, snow water equivalent, slope aspect, slope, curvature, vegetation, airborne laser scanning*