

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

THE ESTIMATE OF THE SNOW WATER EQUIVALENT IN THE DAM BASIN
CONSIDERED ASPECT OF SLOPE IN THE SNOWIEST SEASON

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 dam basins in cold snowy regions, snow depth distribution was investigated in relation to both elevation and aspect of slope 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 six dams, and resulted in estimates with a higher level of accuracy than those based on snow surveys and existing models.

Key Words : snow depth distribution, high resolution DEM, snow water equivalent, aspect of slope

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、夏季の水利用を賄っている。このためダムでは、毎年、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ることから、調査できる地点は限られている。

近年、航空レーザ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おり、無積雪期と積雪期の二時期の航空レーザ測量データを解析することにより、地形との関係から積雪量の空間的な分布を推定したHopkinsonら¹⁾、岡本ら²⁾、鳥谷部ら³⁾、秋山ら⁴⁾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分布の特徴を捉え、毎年ダムで実施されている限られた地点の積雪調査結果をあわせて、毎年の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。

鳥谷部ら³⁾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⁶⁾。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³⁾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. 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、

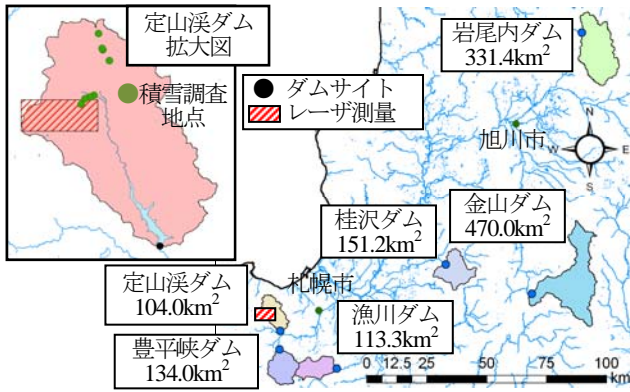


図-1 解析対象ダム流域

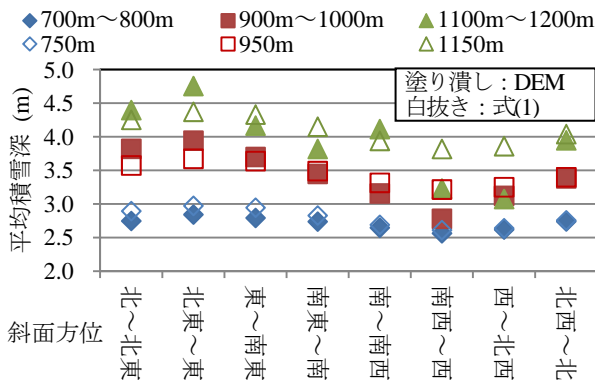


図-2 斜面方位と平均積雪深の関係

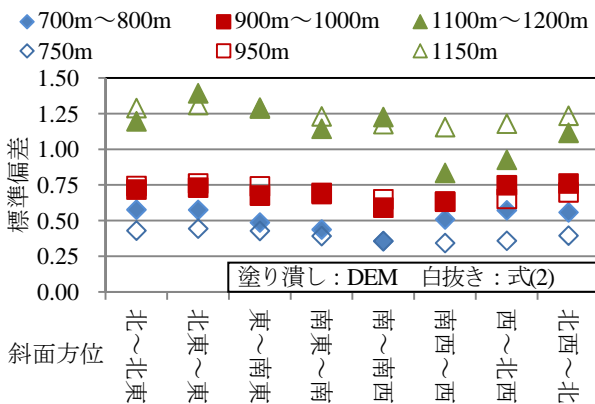


図-3 斜面方位と標準偏差の関係

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10km²）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^{3),5)}。積雪深はこの2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。

3. 積雪深の空間分布

鳥谷部ら⁵⁾は、高解像度DEMを用い、10km²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。

4. 斜面方位を考慮した積雪深の推定方法

標高分布法⁵⁾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、3章で示した通り、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、3章に示した鳥谷部ら⁵⁾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、 μ : 平均積雪深(m), Z_i : 標高区分の代表値(m), θ : 斜面方位の代表値(°), σ : 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

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	—

表-2 積雪量の再現結果

	積雪量(m ³)	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 ³ m ³)				
	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

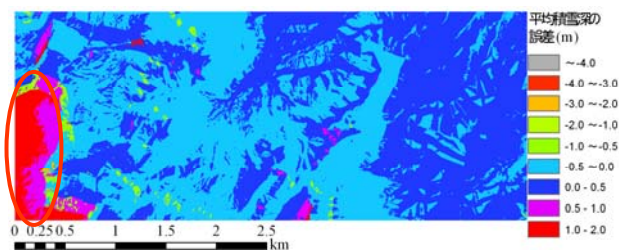


図-4 標高斜面方位分布法とDEMの平均積雪深の差

なるにつれ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原因の一つと考えられる。

5. 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、4章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10km²を対象に、DEMから求めた積雪量を真値とし、4章の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⁹⁾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)、 μ ：平均積雪深(m) (式(1))、 σ ：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。

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 km²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、4章で考察したとおり、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無立木地であり、ここでは風により積雪が移動している可能性がある⁷⁾。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。4章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。

6. ダム流域の積雪包蔵水量の推定

(1) 定山溪ダム (2009年3月)

表-4 積雪包蔵水量の推定結果

	積雪包蔵水量 (m ³ ×10 ³)
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 ³ ×10 ³)	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

5章では、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拡張する。積雪相当水量を求めるには、積雪密度が必要になるが、鳥谷部ら⁸⁾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 ρ ：積雪密度(kg/m³)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(m³)、 S_i ：積雪相当水量(m³)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を使用して算出した。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(m³)、 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) 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、(1)節で示した通り、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となる。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(m³)、 R ：降水量(m³)、 E_{pt} ：可能蒸発散量(mm/day)である。口澤ら⁹⁾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。

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⁹⁾、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。

e) 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 $13.3 \times 10^6 m^3$ 、水収支との誤差は9%となった。

f) 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¹⁰⁾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

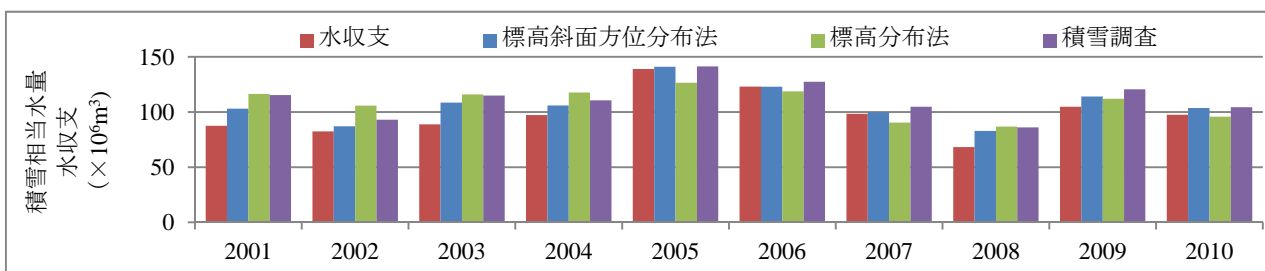


図-5 積雪包蔵水量の推定値と水収支の比較（定山溪ダム：2001年～2010年）

表-6 積雪包蔵水量の推定結果 (×10⁶m³)

豊平峡ダム			
	水収支	標高 斜面 方位 分布法	積 雪 調 査
2006	115	137	139
2007	欠測		
2008	91	95	96
2009	129	130	134
2010	141	109	109
平均	119	118	119

漁川ダム			
	水収支	標高 斜面 方位 分布法	積 雪 調 査
2006	36	53	54
2007	47	57	56
2008	29	33	39
2009	40	44	57
2010	35	42	49
平均	37	46	51

桂沢ダム			
	水収支	標高 斜面 方位 分布法	積 雪 調 査
2006	81	88	83
2007	86	69	69
2008	89	65	76
2009	71	63	61
2010	69	62	66
平均	79	69	71

岩尾内ダム			
	水収支	標高 斜面 方位 分布法	積 雪 調 査
2006	267	193	218
2007	214	156	169
2008	168	132	169
2009	239	202	179
2010	275	203	248
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

(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。

7. まとめ

本報告により得られた結果を以下にまとめる。

- 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。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、国土交通省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., 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) 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.
- 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.

(2011. 9. 30受付)