

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

The Estimate of Snow Water Equivalent in the Dam Basin Considered Ridge and Vegetation

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 ○正 員 西原照雅 (Terumasa Nishihara)
 室蘭工業大学大学院工学研究科 正 員 中津川誠 (Makoto Nakatsugawa)
 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 正 員 浜本 聡 (Satoshi Hamamoto)

1. まえがき

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。

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結果から積雪分布を求め、この分布と標高や斜面方位との関係性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た鳥谷部ら¹⁾、西原ら²⁾の研究が報告されている。

一方、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³⁾、島村ら⁴⁾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。

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 53km² で南西向き、エリア 2 は 10km² で北東向き、エリア 3 は 16km² 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 2 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-1 に示すように 8 分類した。

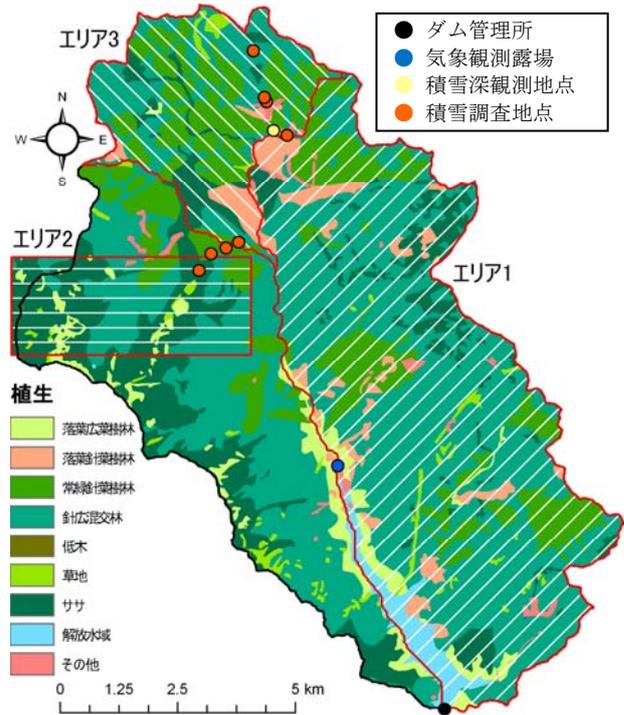


図-1 解析対象ダム流域

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

3. 航空レーザ計測年の積雪の状況

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。各年の積雪の傾向を確認するため、図-2 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-2 より、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、融雪期の初期にあたるということがわかる。

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。

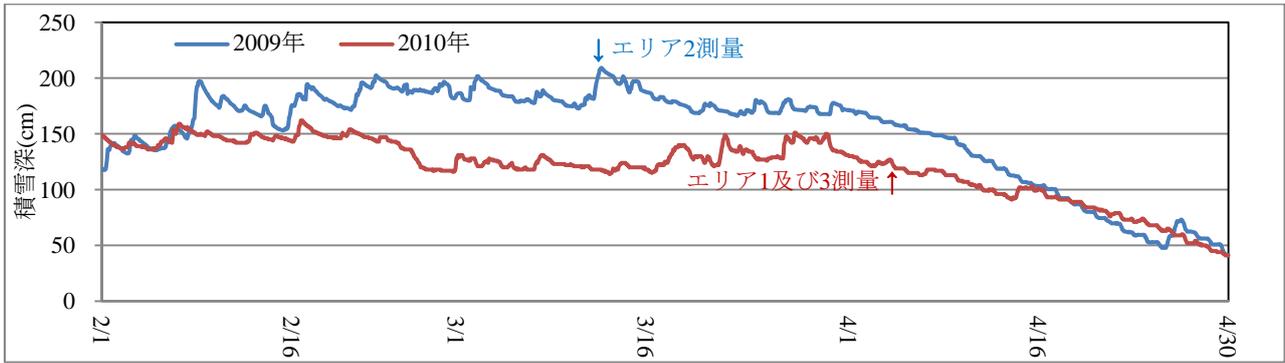


図-2 航空レーザ測量年の積雪状況 (定山溪ダム気象観測露場)

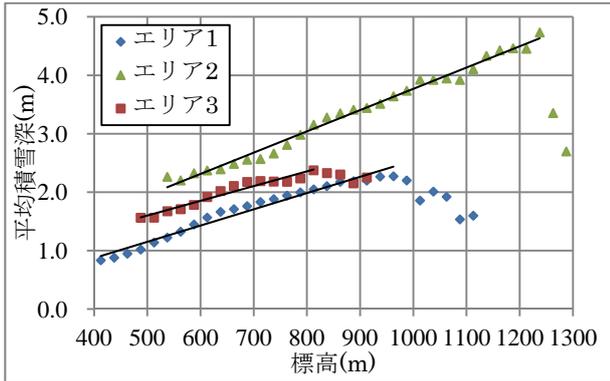


図-3 標高と積雪深の関係

4. 積雪深と標高の関係

山田ら⁵⁾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(1)となる。

$$S_i = a_1 Z_i + a_2 \quad (1)$$

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-3 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-2 に示す。

図-3 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。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。

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

5. 積雪深と地形及び植生の関係

笹³⁾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⁴⁾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。4 章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-4 は 4 章で標高と積雪深の関係进行分析した際と同様に、標高 25 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-5 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-4 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 3 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-5 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。

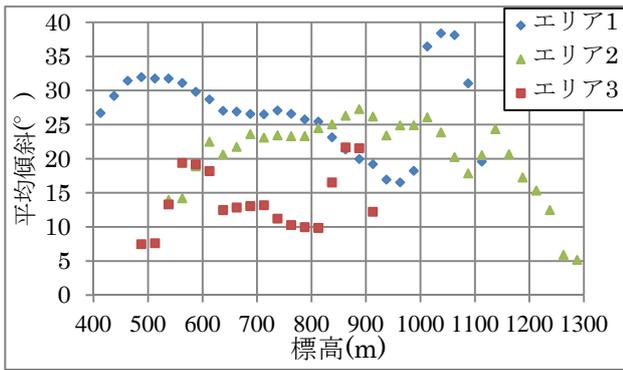


図-4 標高と傾斜の関係

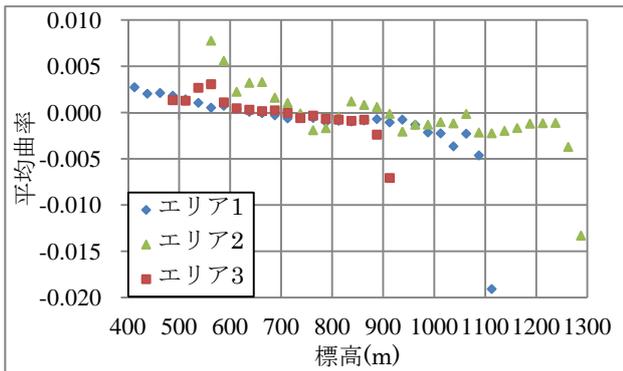


図-5 標高と曲率の関係

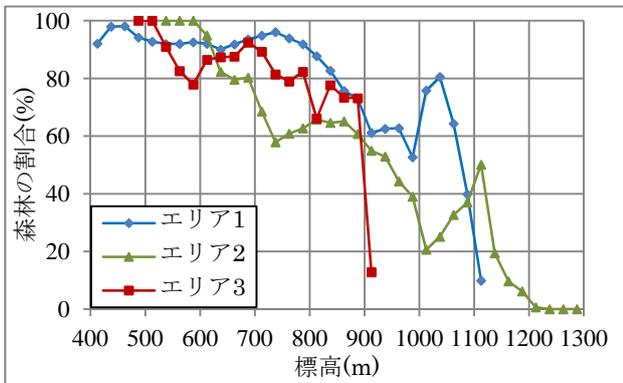


図-6 標高帯の面積に占める森林の割合

次に、植生との関係について考察する。図-6 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-1 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-6 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 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。

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⁶⁾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地点の積雪密度を平均した一定値 (414 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 $Q_i - R + E_{pt}$ 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⁷⁾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(2))で推定した可能蒸発散量を加えた値と

表-3 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

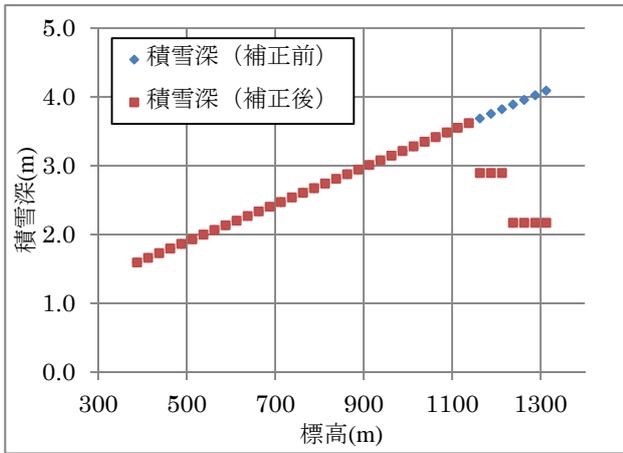


図-7 補正した積雪深

表-4 積雪包蔵水量の推定結果

	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	—

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。

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

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。

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、このパラメータを用いて標高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-7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-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。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%しかないことが挙げられる。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。

7. 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。

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。

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) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.