

複数回の航空レーザ測量結果を活用した 代表1地点の観測値から簡易に ダム流域の積雪分布を推定する手法の検討

STUDY ON METHOD TO ESTIMATE SNOW DISTRIBUTION IN DAM BASIN BASED ON AN OBSERVED VALUE AT ONE REPRESENTATIVE SITE

西原照雅¹・谷瀬敦¹
Terumasa NISHIHARA and Atsushi TANISE

¹正会員 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

In water resource management and disaster prevention in the snowmelt season, it is very important to estimate snow distribution in the mountainous regions as accurately as possible before the snow starts to melt. This paper presents a simple method to estimate snow distribution with high accuracy based on an observed value at one representative site.

We applied the method to the Jozankei dam basin in Hokkaido, northernmost island of Japan, to estimate snow distribution. As a result, total snow water equivalents in the dam basin in 20 years and dam inflow in the 16 snowmelt season were estimated with high accuracy. We can probably estimate snow distribution in the Jozankei dam basin with high accuracy without snow surveys.

Key Words : snow distribution, observed value at one site, dam

1. はじめに

積雪寒冷地においては、融雪水は水資源として重要である。一方で、融雪水は融雪出水及び土砂災害の原因となる。このため、融雪期が始まる前に山間部の積雪分布をできるだけ正確に把握することは、水資源管理及び防災の両面で非常に重要である。

山間部の積雪分布は、樹林帯と森林限界以上の高標高帯においてその特徴が異なる¹⁾。山間部のうち樹林帯の積雪分布に関しては、調査者が厳冬期に直接入山して行う積雪調査が日本各地で行われてきた^{2),3)}。これらの調査結果によると、樹林帯においては、標高の増加とともに積雪深及び積雪相当水量が線形に増加することが示されている。樹林帯における標高と積雪相当水量との間の線形の関係は、ダム管理の現場において、融雪期が始まる前に、流域に蓄積されている積雪量を推定する際の標準的な手法⁴⁾となっている。

山間部のうち、冬季に立ち入りが困難である森林限界以上の高標高帯に関しては、航空レーザ測量により積雪分布を計測した例がある^{5),6),7)}。航空レーザ測量は三次元

空間データを高密度にかつ高精度で得ることが可能な手法であるため、広範囲の積雪分布を一度に計測することが可能である。このうち、西原らは⁷⁾は北海道大雪山系の旭岳において航空レーザ測量により積雪分布を計測し、積雪深と地形との関係を分析している。結果、森林限界以上の高標高帯における積雪深は地表面の凹凸を表すパラメタである地上開度⁸⁾との間に線形の関係があり、地上開度が大きくなる(地形が谷から尾根に変化する)に伴い、積雪深が線形に減少することが示されている。このため、地上開度が異なる複数の地点において積雪深を計測し、積雪深と地上開度との間の線形式を作成すれば、高標高帯における積雪分布を推定することが可能である。

このように、積雪調査や航空レーザ測量により、山間部における積雪分布の特徴の解明が進み、これらの知見に基づく積雪分布の推定手法が示されている。しかし、これらの手法を用いるためには複数の地点において積雪調査を行う必要があり、調査には多大な労力と雪崩等の危険を伴う。また、冬季に立ち入りが可能な範囲は限られていることから、積雪調査が可能な地点は限られており、得られるデータには限界がある。

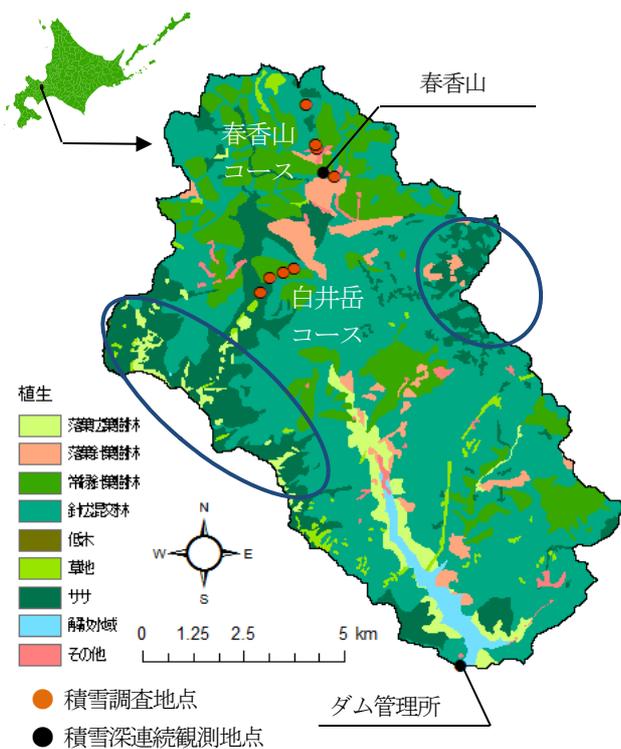


図-1 定山溪ダム流域と積雪深観測地点

このような中、西原ら⁹⁾は、北海道大雪山系の旭岳において、同一範囲の積雪分布を2回（2012年3月及び2015年3月）航空レーザ測量により計測した結果より、両者の積雪分布のパターンの類似性に着目し、代表1地点における積雪深の観測値から山間部の積雪分布を推定する手法を構築した。航空レーザ測量を行った範囲が含まれる忠別ダム流域に同手法を適用したところ、流域の積雪分布を精度良く推定できたことを報告している。西原らの手法を用いると代表1地点における積雪深の観測値から簡易に低コストで毎年の積雪分布を推定できるため、実務上有用であるが、対象とする範囲において航空レーザ測量により積雪分布を計測せずに適用できるかどうかは明らかになっていない。そこで本研究では、札幌市近郊の定山溪ダムを対象に、航空レーザ測量による積雪分布の計測を行わずに、西原らの手法を適用し、推定した積雪分布の精度を検証した。

2. 対象ダム流域の概要と使用データ

対象流域は図-1に示した定山溪ダム流域である。定山溪ダム流域は豊平川流域の上流部に位置し、流域面積は104km²、流域の標高帯は概ね300m～1,300mである。

図-1には、環境省による自然環境保全基礎調査の結果を用いて9分類した植生を示したが、流域の多くが森林である。しかし、図中の丸で囲んだ範囲のように、標高が高く、尾根に近い範囲においては、草地やササといった森林以外の植生が主たる植生となっている。

流域内における積雪深の観測は、テレメータによる連続観測及び毎年3月に行われる積雪調査により実施されている。このうちテレメータによる観測は、図-1の黒丸で示した2地点において行われ、積雪調査は図-1のオレンジ丸で示した2コース計8地点において行われている。いずれの地点も樹林帯に位置し、標高は概ね400mから850mである。流域の積雪分布の推定の際に必要な地形データは、国土地理院が公開している基盤地図情報数値標高モデル（水平解像度10m）を用いて求めた。また、積雪分布の推定、水収支の計算及びダム流入量の計算には、ダム管理所において観測されている気象・水文データ及び積雪調査の結果を用いた。

3. 積雪分布を推定する手法の概要

西原ら⁹⁾は、2回の航空レーザ測量により計測された積雪分布に類似したパターンが見られる要因として、両者の積雪分布に共通する基礎的な成分があり、この基礎的な成分に対し、降雪量といった各年の気象条件を反映した成分が作用して、各年の積雪分布が決まっていると考え、積雪分布を推定する手法を構築している。

具体的には、2回の航空レーザ測量により計測された積雪分布から共通する基礎的な成分（以降「積雪基礎ラスタ」という）を抽出する。山間部における積雪分布は樹林帯及び森林限界以上の高標高帯においてその特徴が異なることから、樹林帯においては積雪基礎ラスタの値（以降「積雪基礎ラスタ値」という）と標高との間の線形式、高標高帯においては積雪基礎ラスタ値と地上開度との間の線形式をそれぞれ作成する。定山溪ダム流域においては、複数回の航空レーザ測量による積雪分布の計測が行われていないことから、北海道大雪山系の旭岳において行われた航空レーザ測量結果から作成された線形式⁹⁾をそのまま定山溪ダム流域に適用する。また、水平解像度を変化させても積雪分布の推定精度がほとんど変化しないことから⁹⁾、積雪基礎ラスタの水平解像度は100mとする。次に、図-1に示した植生分布を用いてダム流域を樹林帯及び高標高帯の2つに区分する。区分する方法は4章に示す。樹林帯においては基盤地図情報数値標高モデルから求めた地表面の標高、高標高帯においては同モデルから求めた地上開度を用い、前述した線形式からダム流域の積雪基礎ラスタを作成する。

各年の気象条件を反映した成分は、毎年異なる定数（以降「積雪倍率」という）とし⁹⁾、流域内において積雪深を観測している地点の積雪深を同地点における積雪基礎ラスタ値で除すことにより得られる。この積雪倍率を積雪基礎ラスタに乗じることにより、ダム流域の積雪分布を推定することができる。本稿では、積雪倍率を計算する地点を4地点選定し、これらを用いて求めた積雪分布の推定精度を6章において評価する。

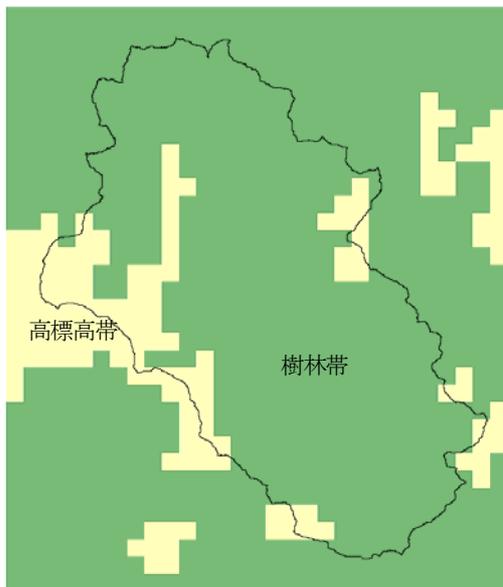


図-2 樹林帯と高標高帯に区分後のダム流域
(目視による区分後)

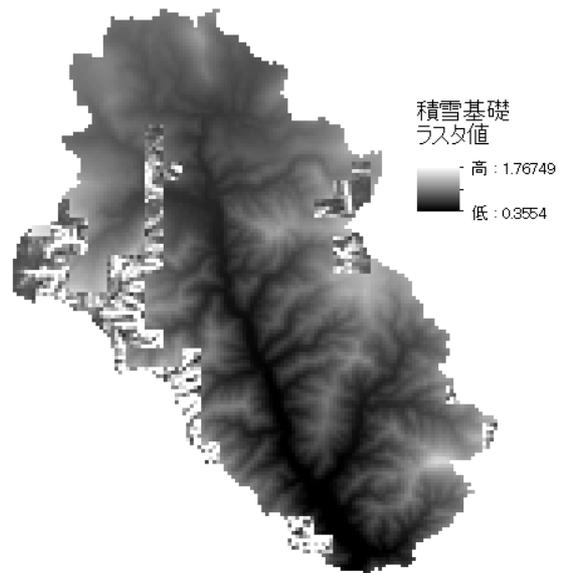


図-3 定山溪ダムの積雪基礎ラスタ
(水平解像度100m)

4. ダム流域を樹林帯と高標高帯に区分する方法

図-1に示した定山溪ダム流域の植生分布を概観すると、ある標高により明瞭に樹林帯及び高標高帯に区分されるような特徴を有していない。積雪分布の特徴は、樹林帯と高標高帯において異なるが、局所的な植生の変化に対応して積雪分布の特徴が変化するとは考えにくく、ある程度まとまった範囲を対象として樹林帯及び高標高帯を区分すれば良いと考えられる。また、融雪・流出モデルに用いられるメッシュの大きさは数100mから1km程度である。これらを踏まえ、ダム流域を樹林帯と高標高帯に区分する際に使用するメッシュの水平解像度は500mとした。図-1に示した植生分布から各メッシュに占める各植生の面積の割合を計算し、最も面積が多い植生の属性を基に、樹林帯と高標高帯に区分した。具体的には、最も面積が多い植生が低木、草地及びササの場合は高標高帯、これら以外の場合は樹林帯に区分した。なお、同手法により区分した結果、最も面積の多い植生が解放水域もしくはその他となったメッシュや広範囲の樹林帯の中に1メッシュだけ高標高帯に区分されたメッシュがあった。このため、最終的には目視による確認を行い、例えば、周辺のメッシュがすべて樹林帯に区分されている中に、最も面積の多い植生がその他であるメッシュや高標高帯に区分されたメッシュがある場合、当該メッシュは樹林帯に区分した。

図-2に定山溪ダム流域を樹林帯及び高標高帯に区分した図を示す。これは、目視による確認後の図である。図を見ると、流域の大部分は樹林帯に区分され、図-1の丸で示した標高が高く、尾根に近い範囲において高標高帯に区分されたメッシュがある。

表-1 積雪深観測地点の積雪基礎ラスタ値

ダム管理所テレ	春香山テレ
0.371	0.501
春香山 No.9	白井岳 No.5
0.721	0.619

5. 積雪分布の推定方法

西原ら⁹⁾が、忠別ダム流域における積雪分布を推定する際に積雪倍率を求めることとした地点は、標高約1,100mの樹林帯に位置しており、毎年3月の積雪深が2mを超える地点である。また、積雪倍率を求める地点は、テレメータにより積雪深を観測している地点のように、継続して観測が行われている地点や、冬季における立ち入りが容易である地点とすることが望ましい。そこで、定山溪ダム流域において積雪深を観測している地点から、テレメータにより積雪深を観測している2地点（ダム管理所地点：標高393m、春香山地点：標高568m）、積雪調査が行われている2コースそれぞれの最も標高が高い地点（白井岳コースNo.5：標高700m、春香山コースNo.9：標高850m）の計4地点を、積雪倍率を計算する地点に選定した。なお、積雪調査は毎年3月に1回行われているのみであることから、積雪倍率を求める地点をテレメータにより積雪深を連続観測している地点とする場合を含め、積雪調査が行われた日の積雪分布を求める。

3章及び4章に示した方法により作成した定山溪ダムの積雪基礎ラスタを図-3に示す。図-2の区分に従い流域を樹林帯及び高標高帯に区分したため、それぞれの区域において積雪基礎ラスタの特徴が異なる。積雪倍率を計算する4地点の積雪基礎ラスタ値を表-1に示す。すべての

表-2 積雪深の推定精度

積雪倍率：ダム管理所テレ		
	相対誤差	RMSE (m)
春香山テレ	0.216	0.618
春香山No.9	0.106	0.411
白井岳 No.5	0.144	0.512
平均	0.156	0.514
積雪倍率：春香山テレ		
	相対誤差	RMSE (m)
ダム管理所テレ	0.288	0.457
春香山No.9	0.214	0.781
白井岳 No.5	0.122	0.470
平均	0.208	0.569
積雪倍率：白井岳 No.5		
	相対誤差	RMSE (m)
ダム管理所テレ	0.185	0.307
春香山	0.103	0.381
春香山No.9	0.106	0.374
平均	0.131	0.354
積雪倍率：春香山No.9		
	相対誤差	RMSE (m)
ダム管理所テレ	0.125	0.211
春香山	0.170	0.542
白井岳 No.5	0.093	0.321
平均	0.129	0.358

地点が樹林帯に位置しているため、標高が高い地点ほど積雪基礎ラスタ値の値は大きくなっている。各地点の積雪調査日における積雪深を表-1に示した積雪基礎ラスタ値で除すことにより、積雪倍率が得られる。この積雪倍率を図-3に示した積雪基礎ラスタの全メッシュの値に乘じることにより、流域の積雪分布が求まる。

6. 推定した積雪分布の評価

はじめに、5章において設定した各地点を、積雪倍率を求める地点として設定し、その他3地点における積雪深を求め、その推定精度を評価する。対象日は1997年から2016年までの20年間の積雪調査日である。表-2に結果を示す。表中の相対誤差は積雪深の観測値を真値として積雪基礎ラスタから推定した積雪深の相対誤差を求め、その絶対値を20年間で平均したもの、RMSEは20年間のRMSEである。表を見ると、積雪倍率を計算する地点を白井岳No.5もしくは春香山No.9とした場合に相対誤差及びRMSEが小さく、他の3地点における積雪深の推定精度が高い。また、積雪倍率を求める地点としてダム管理所を選定した場合も、前述した2地点と比較して若干劣るが、比較的高い精度で他の3地点における積雪深を推定している。

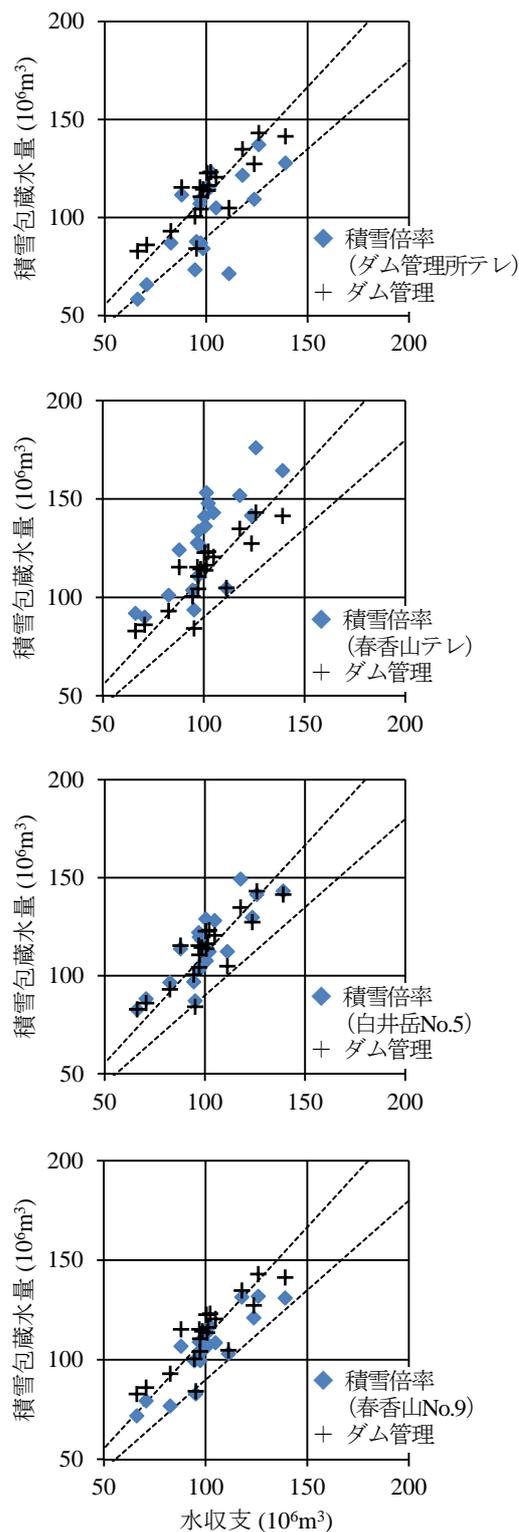


図-4 積雪包蔵水量の推定値と水収支との比較

表-3 積雪包蔵水量の推定値のRMSE (10^6m^3)

ダム管理所テレ	春香山テレ
15.580	31.530
春香山 No.9	白井岳 No.5
9.458	17.399
ダム管理	
15.207	

次に、各地点を、積雪倍率を求める地点として設定して推定した積雪分布を用いてダム流域における積雪包蔵水量（ダム流域全体における積雪相当水量の合計値）を求め、その推定精度を評価する。対象期間は1997年から2016年までの20融雪期である。積雪包蔵水量は推定した積雪分布の各メッシュの積雪深に積雪密度を乗じて各メッシュの積雪相当水量を求め、ダム流域全体にわたって合算して求めた。なお、積雪密度に関しては、国内各地で行われた積雪調査結果から、観測時期が同じであれば標高に関わらず積雪密度はほぼ一定値となる（例えば小池ら¹⁰⁾）ことが示されている。定山溪ダム流域において1997年から2016年までの20年間に行われた積雪調査の全結果を確認したところ、積雪調査日における積雪密度は概ね300 kg/m³から450kg/m³の間に分布していた。各年では、8地点の積雪密度の平均値は概ね320 kg/m³から430kg/m³の間に分布し、標準偏差は概ね7kg/m³から24kg/m³の間に分布していた。8地点の積雪密度の標準偏差は平均値と比較して数%であることから、定山溪ダム流域においても、標高に関わらず積雪密度がほぼ一定値となっていると考え、積雪密度は対象とした年に行われた積雪調査の結果から8地点の平均値とした。

推定した積雪包蔵水量は、ダム管理所において観測している気象・水文データより求めた水収支を真値として評価する。水収支はダム流入量から降水量を除き、Hamon法による可能蒸発散量を加えることにより求めた。各年の計算期間は積雪調査の翌日から6月30日までとした。詳細は、ガイドライン⁴⁾を参照されたい。図-4に水収支と推定された積雪包蔵水量をプロットした図を示す。比較のため、ダム管理所が積雪調査の結果から標高と積雪相当水量の直線の関係を用いて推定した積雪包蔵水量を併せて示す。図中の点線は水収支に対して相対誤差が20%以内の範囲を示している。表-3には20融雪期を対象とした積雪包蔵水量の推定値のRMSEを示した。これらの図表を概観すると、積雪倍率を計算する地点を春香山No.9とした場合に積雪包蔵水量の推定精度が最も良く、次いで積雪倍率の計算地点を白井岳No.5もしくはダム管理所とした場合に積雪包蔵水量の推定精度が良い。図-4を見ると、積雪倍率を計算する地点をダム管理所とした場合に積雪包蔵水量を過小推定している年が散見され、積雪倍率を計算する地点を白井岳No.5とした場合に積雪包蔵水量を過大推定している年が散見されるが、このことが積雪倍率を計算する地点を春香山No.9とした場合との精度の差の要因と考えられる。積雪倍率を計算する地点を春香山No.9とした場合、20融雪期の積雪包蔵水量の推定値は、水収支と比較して相対誤差が概ね20%以内となっている。ダム管理所が推定した積雪包蔵水量の精度と比較すると、積雪倍率の計算地点を白井岳No.5もしくはダム管理所とした場合に精度が同程度であり、積雪倍率の計算地点を春香山No.9とした場合に精度が良くなっている。

表-4 ダム流入量の計算精度

	ダム管理所テレ		春香山テレ	
	Nash	E _v	Nash	E _v
2003	0.862	-0.035	0.679	-0.200
2004	0.721	0.133	0.514	-0.011
2005	0.702	0.149	0.828	-0.023
2006	0.940	0.061	0.855	-0.128
2007	0.883	-0.037	0.851	-0.264
2008	0.461	-0.271	0.071	-0.526
2009	0.865	-0.162	0.487	-0.424
2010	0.871	-0.154	0.632	-0.349
2011	0.807	-0.097	0.720	-0.333
2012	0.896	-0.139	0.870	-0.192
2013	0.864	-0.121	0.600	-0.308
2014	0.757	-0.295	0.436	-0.488
2015	0.800	-0.132	0.552	-0.306
2016	0.704	-0.286	0.389	-0.427
平均	0.795	0.148	0.606	0.284
標準偏差	0.126	0.146	0.231	0.164
	白井岳 No.5		春香山 No.9	
	Nash	E _v	Nash	E _v
2003	0.735	-0.162	0.856	-0.049
2004	0.649	0.073	0.751	0.188
2005	0.791	0.088	0.727	0.135
2006	0.905	-0.062	0.931	-0.010
2007	0.795	-0.316	0.861	-0.252
2008	0.136	-0.501	0.349	-0.390
2009	0.695	-0.321	0.850	-0.190
2010	0.725	-0.289	0.708	-0.301
2011	0.780	-0.280	0.758	-0.300
2012	0.900	-0.132	0.912	-0.097
2013	0.851	-0.143	0.878	-0.094
2014	0.813	-0.225	0.795	-0.255
2015	0.574	-0.294	0.740	-0.190
2016	0.778	-0.237	0.767	-0.246
平均	0.723	0.223	0.777	0.192
標準偏差	0.200	0.165	0.146	0.173

最後に、各地点を、積雪倍率を求める地点として設定して推定した積雪調査日における積雪分布を初期値として融雪・流出モデルに入力し、ダム流入量を求め、その精度を評価する。使用した融雪・流出モデルは、臼谷ら¹¹⁾が開発したモデルである。融雪・流出モデルにおいては、ダム流域を1kmメッシュに分割し、メッシュ毎に標高が与えられ、融雪量が計算される。このため、春先に気温が高くなるのが早い標高の低い範囲から、気温が高くなるのが遅い標高の高い範囲に向かって融雪が進行し、消雪となる過程が反映されることから、積雪分布の推定精度が高いほどダム流入量が精度良く計算される傾向が

あると考えられる。積雪密度は、積雪包蔵水量を推定した際と同様に、対象とした年に行われた積雪調査の結果から8地点の平均値とした。対象とした期間は、計算に必要なデータが電子化されている2003年から2016年の14融雪期とした。結果を表-4に示す。表中の「Nash」はNash-Sutcliffe指標、「 E_v 」は流出ボリューム誤差¹¹⁾である。流出ボリューム誤差は、ダム流入量の総量の相対誤差を表す指標であり、計算された総流入量が観測値された総流入量と比較して過大の場合に負、過小の場合に正となる。両指標は積雪調査日の翌日からモデル計算における消雪日までを計算期間とした。また、流出ボリューム誤差の平均は、各年の値の絶対値の平均である。表を見ると、積雪倍率を計算する地点をダム管理所とした場合にダム流入量の計算精度が最も良く、次いで積雪倍率の計算地点を春香山No.9とした場合が続く。Nash-Sutcliffe指標は0.8を超えていれば精度が高いと判定される指標であるが、この2地点を積雪倍率の計算地点とした場合は、2008年を除きNash-Sutcliffe指標が0.7を超えていること、標準偏差が小さいことから、毎年安定して精度良くダム流入量が計算されている。

以上、北海道大雪山系の旭岳において行った航空レーザ測量の結果を基に、定山溪ダム流域の積雪基礎ラスタを作成し、複数の積雪倍率を計算する地点を設定し、推定した積雪分布の精度を評価したところ、積雪倍率を計算する地点を春香山No.9もしくはダム管理所地点とした場合に、積雪分布を精度良く推定できることがわかった。試行錯誤が必要な点はあるが、対象とするダム流域において航空レーザ測量により積雪分布を計測しなくても西原らの方法⁹⁾を適用できる可能性があることが示された。ダム流域のような山間部を対象とした場合、地形が変化することはほとんどないと考えられることから、積雪基礎ラスタは長期にわたって使用が可能であると考えられる。また、定山溪ダム流域においては、積雪倍率を計算する地点をダム管理所とした場合にも比較的精度良く積雪分布を推定することができるが、この場合、積雪調査を実施する必要が無い。積雪密度は流域内においてほぼ一定値と考えて良いことから、アプローチが容易な安全な箇所において計測を行えば良い。本手法の適用により、多大な労力と危険を伴う作業を回避した上で、簡易に低コストで精度良く積雪分布を推定できる可能性がある。

なお、北海道大雪山系の旭岳において実施した航空レーザ測量は、3月下旬の積雪深が概ねピークの時期に実施したことから、本手法はピークの時期の積雪分布を推定する際に適用するものと考えている。積雪倍率を計算する地点を、テレメータにより積雪深を連続観測している地点とすれば、本手法により融雪期における積雪分布の変化を簡易に追跡できる可能性があるが、これは今後の課題である。

7. まとめ

複数の航空レーザ測量により積雪分布を計測した結果から、代表1地点の積雪深の観測値を用いて簡易にダム流域の積雪分布を推定する手法を検討した。本手法を札幌市近郊の定山溪ダムに適用し、積雪分布の推定精度を評価したところ、多大な労力と危険を伴う積雪調査を行わずに、簡易に低コストで精度良く積雪分布を推定できる可能性があることがわかった。

謝辞: 本研究を行うに当たり、国土交通省豊平川ダム統合管理事務所にデータ提供等の協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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, p.1-12, 1979.
- 2) 松山洋: 巻機山における積雪密度・積雪水当量の季節変化と高度分布, 水文・水資源学会誌, 第11巻, 2号, p.117-127, 1998.
- 3) 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, p.411-423, 2005.
- 4) (独) 土木研究所寒地土木研究所: ダムにおける積雪包蔵水量推定ガイドライン(案), 2012.
- 5) 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, p.524-525, 2007.
- 6) 鈴木啓助, 佐々木明彦: 上高地梓川流域における積雪深分布推定, 2012年雪氷研究大会概要集, p.145, 2012.
- 7) 西原照雅, 谷瀬敦, 渡邊和好: 森林限界以上の高標高帯における積雪分布と融雪・流出計算に適用する降雪分布について, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.72, No.4, L_475-L_480, 2016.
- 8) 横山隆三, 白沢道生, 菊池祐: 開度による地形特徴の表示, 写真測量とリモートセンシング, 第38巻, 4号, p.26-34, 1999.
- 9) 西原照雅, 谷瀬敦: 積雪分布のパターンの類似性に着目した積雪分布の推定手法の検討, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.73, No.4, L_37-L_42, 2017.
- 10) 小池俊夫, 高橋裕, 吉野昭一: 融雪量分布のモデル化に関する研究, 土木学会論文集, 第363号/II-4, p.165-174, 1985.
- 11) 白谷友秀, 中津川誠, 星清: 積雪浸透を考慮した実用的融雪流出モデルの開発, 水文・水資源学会誌, 第20巻, 第2号, p.93-104, 2007.

(2017. 4. 3受付)