

## 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：谷瀬敦，西原照雅，水垣滋，  
柏谷和久

### 【要旨】

積雪寒冷地では水資源を積雪に依存していること、融雪水は融雪出水の原因となることから、融雪期におけるダム流入量の予測精度向上が求められている。また、積雪寒冷地においては、気候変動による積雪の減少が予測されていることから、気候変動が水資源に与える影響の評価が求められている。そこで本研究では、森林限界以上の高標高帯における積雪分布と地形との関係を解明し、ダムの貯水率が高い融雪後期における融雪・流出モデルを用いたダム流入量の計算精度を向上させた。また、気候変動モデルデータを用い、気候変動が融雪期のダムに与える影響を評価した。

キーワード：ダム、積雪分布、森林限界、高標高帯、融雪、気候変動

### 1. はじめに

積雪寒冷地では、春先の融雪水をダムに貯留して夏季にかけての水利利用を賄っており、融雪水は水資源として重要である。一方で、融雪水は融雪出水の原因ともなる。このため、北海道のダムでは、流域の積雪包蔵水量（流域全体の積雪相当水量の合計値）が最大となる毎年3月に積雪調査を行い、流域の積雪包蔵水量を推定している。融雪が始まる前に流域の積雪包蔵水量をできるだけ正確に把握することは、水資源管理及び融雪期における出水の規模を想定する上で非常に重要である。しかし、雪崩等の危険を伴うことから、積雪調査が可能な地点は限られており、流域の積雪包蔵水量や積雪分布の精度は低く、このことが融雪期におけるダム流入量の予測精度が低い一因となっている。ダム流域のような山間部の積雪深分布は標高の低い樹林帯と森林限界以上の高標高帯で大きな違いがある<sup>1)</sup>。そこで本研究では、リモートセンシング技術の一つである航空レーザ測量を用いて山間部における積雪分布を計測し、森林内と森林外に分けて地形との関係を分析した。さらに、この結果を用いてダム流域の積雪包蔵水量及び積雪分布を精度良く推定する手法を開発し、融雪・流出モデルに組み込み、融雪期におけるダム流入量の精度向上を試みた。

また、2014年10月にIPCC第5次評価報告書の統合評価報告書が公表された<sup>2)</sup>。同報告書では、気候システムの温暖化には疑う余地がなく、1950年代以降、観測され

た変化の多くは数十年から数千年にわたり前例のないものであること、大気と海洋は温暖化し、雪氷の量は減少し、海面水位は上昇し、温室効果ガス濃度は増加していることが示されている<sup>2)</sup>。さらに、中央環境審議会が2015年にとりまとめた日本における気候変動による影響の評価に関する報告と今後の課題について（意見具申）<sup>3)</sup>によると、水資源に関して、河川流量等の両極端現象について大きな増大が予測され、全国的に影響が及ぶが、特に融雪を水資源とする地域に影響が及ぶこと、水不足は水道用水、農業用水、工業用水などの多くの分野に影響を与える可能性があり、社会的経済的影響が大きいことが示されている。実際に、積雪寒冷地では、融雪水をダムに貯留して、春から夏にかけての水需要を賄う等、水資源を積雪に依存している。このため、気候変動による積雪の減少は、渇水のリスクを増大させる可能性がある。また、大雨や短時間強雨の発生回数が増加することにより、融雪と大雨が同時生起することが増加し、大規模な出水や土砂災害の発生も懸念される。このように積雪寒冷地である北海道では、気候変動による影響を考慮した、ダム等の既存施設の水供給の安全度評価が急務であるが、これらを対象とした影響評価は進んでいない。そこで本研究では、札幌市に水道用水を供給している豊平峡ダム及び定山溪ダムを対象に、気象庁が提供している気候変動モデルデータNHRCM5を用いて融雪期における気候変動の影響を考察した。

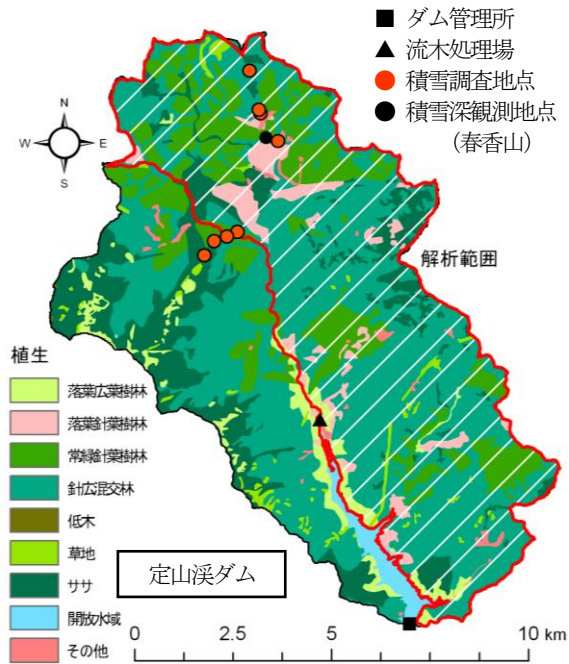


図-1 積雪深分布の解析範囲

## 2. リモートセンシング技術等を活用した積雪・融雪調査手法開発

### 2.1 森林内における積雪分布<sup>4),5)</sup>

#### 2.1.1 積雪深分布の解析範囲及び基礎資料

積雪深分布の解析対象は定山溪ダムである。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～1,300m付近である。流域の植生は環境省がWEBで公開している自然環境保全基礎調査の結果を用い、図-1に示すように9分類した。流域の土地利用の8割が森林である。

次に、解析に使用した資料を示す。積雪深分布の解析は、図-1の赤枠白斜線で示した範囲において実施された航空レーザ測量結果を用いた。面積は67km<sup>2</sup>、ダム湖の左岸側の南～南西向きの斜面であり、土地利用は86%が森林である。無積雪期及び積雪期の測量は、それぞれ2010年6月6日～12日、2010年4月8日に実施し、二時期の測量の標高差を積雪深とした。航空レーザ測量範囲には、テレメータで積雪深を自動観測している春香山地点が含まれるため、同地点の航空レーザ測量日の積雪深を比較したところ、テレメータで観測した積雪深が2.18mに対し、航空レーザ測量より求めた積雪深は2.13mであり、精度の高い計測結果が得られている。なお、データの水平解像度は5mである。

また、水収支の算出には、ダムで連続観測している気温、降水量、流入量を用いた。積雪包蔵水量の推定に必要な、流域の標高、傾斜、曲率及び斜面方位算出には、国土地理院がWEBで公開している基盤地図情報の数値

標高モデルを使用した。

#### 2.1.2 地形と積雪深の関係

航空レーザ測量により得られたサンプルデータは、約250万データあり、そのままでは積雪深と地形との関係を捉えることが困難である。このため本研究では、標高を25mピッチ、傾斜を2°ピッチ、曲率を0.02ピッチ、斜面方位を16方位に区分して平均積雪深を求め、平均積雪深とこれら地形因子との関係を分析する。

はじめに、標高と積雪深の関係である。既往の研究は、標高の増加とともに積雪深が線形に増加すること(例えば山田ら<sup>1)</sup>)を報告している。図-2.1に示した解析範囲の積雪深と標高の関係を見ると、積雪深がピークに達する標高975mまでは、標高の増加とともに積雪深は高い相関で線形に増加しており、既往研究と傾向が一致している。標高が975mを超えると積雪深が減少に転じるが、ここは標高帯の面積に占める森林面積の割合が60%以下になり、ササや草地の占める割合が大きく、尾根に近い標高帯である。笹ら<sup>6)</sup>や島村ら<sup>7)</sup>により、植生が森林以外の尾根では、風により積雪が移動しやすく、森林内と比較して積雪深は減少することが報告されている。このことにより、積雪深が減少に転じたと考える。なお、この範囲のサンプル数は全体の1%以下であり、このことも影響している可能性がある。

次に、傾斜と積雪深の関係である。図-2.2に積雪深と傾斜の関係を示す。図より、傾斜が10°～60°付近の範囲では、傾斜の増加とともに積雪深は高い相関で線形に減少している。また、傾斜が0°～10°付近までは傾斜が増加するとともに積雪深は対数関数的に増加し、10°付近でピークとなっている。この範囲は、尾根付近で、植生がササの範囲が比較的多く含まれているため、10°付近をピークに積雪深が小さくなったと考えられる。さらに、傾斜が60°を超えると、積雪深が急激に増加し、75°付近から、急激に減少している。この積雪深の急増は雪庇によるもの、急減は積雪がほとんど堆積できない傾斜に達したことが要因と考える。なお、この範囲は、サンプル数が全体の2%以下であり、このことも影響している可能性がある。

続いて図-2.3に曲率と積雪深の関係を示した。曲率は、負の値が凸地形、正の値が凹地形を表す。図を見ると、曲率が-0.2～0.2の範囲で、曲率が増加する(地形が凸地形から凹地形に変化する)とともに、高い相関で積雪深が増加していることがわかる。なお、曲率-0.2～0.2の範囲外はサンプル数が全体の1%以下であり、このことが、

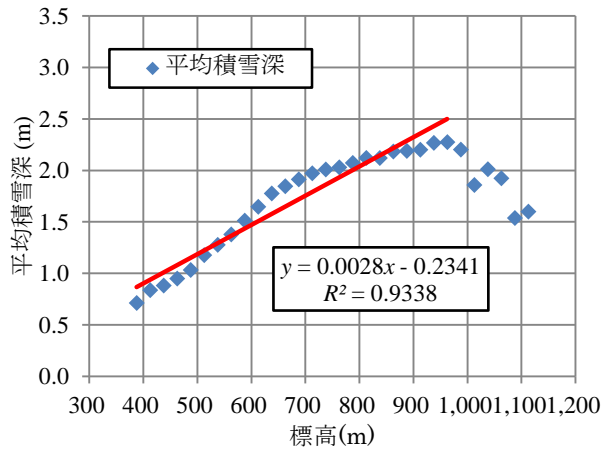


図-2.1 標高と積雪深の関係

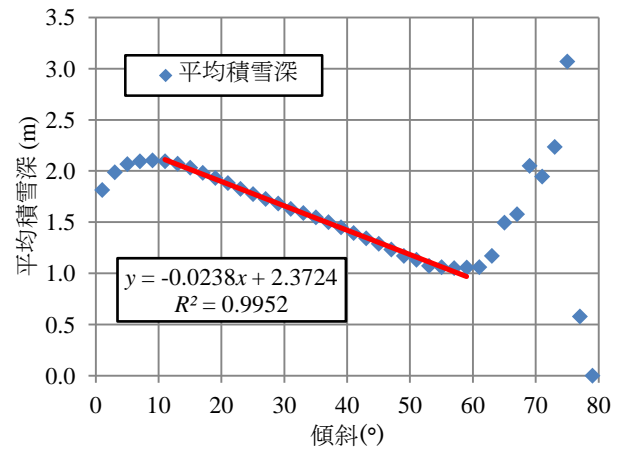


図-2.2 傾斜と積雪深の関係

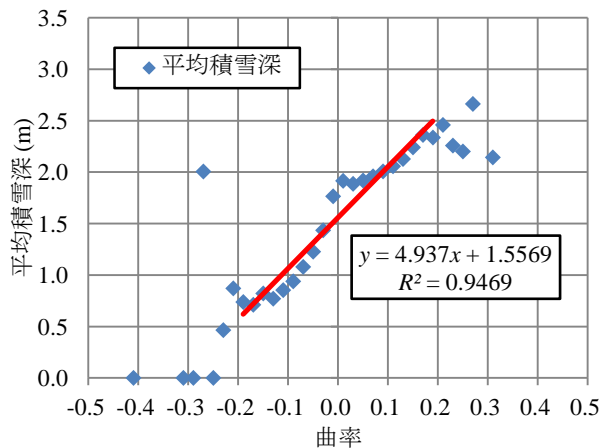


図-2.3 曲率と積雪深の関係

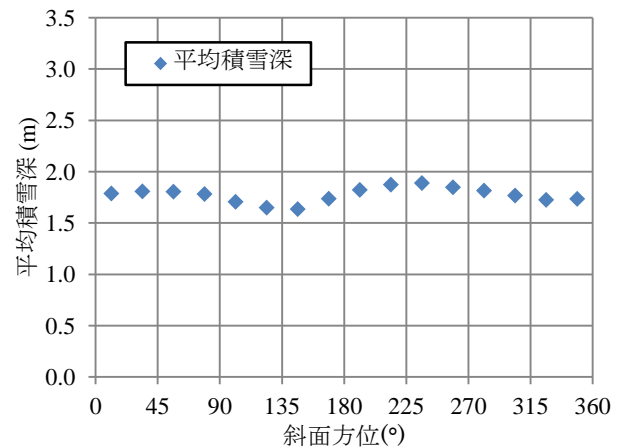


図-2.4 斜面方位と積雪深の関係

図-2 地形と積雪深の関係

積雪深を急激に変動させていると考える。

最後に、図-2.4に斜面方位と積雪深の関係を示す。本解析は南～南西向きの斜面を対象としているが、データの水平解像度が5mであり、微地形を捉えている。このため、16方位それぞれのサンプル数は全体の4%～9%の間にあり、方位による偏りのないデータである。図より斜面方位と積雪深の関係を見ると、周期性が見られるものの、これまでに考察した3パラメタと比較して変動が小さい。西原ら<sup>8)</sup>は、定山溪ダム流域内の北東向きの斜面における航空レーザ測量結果から、積雪深と斜面方位の関係を分析し、積雪深は斜面方位に対して周期的に変動すること、気温が高い午後に太陽放射を受けて熱負荷の大きい南西斜面で積雪深が小さく、反対に熱負荷の小さい北東斜面で積雪深が大きいことを報告している。しかし、西原らが対象とした範囲は約50%が森林以外の植生であるのに対し、本研究は86%が森林の範囲を対象としている。このことにより、斜面方位に対する積雪深分布の特徴に差違が生じたと考える。

なお、積雪深と地形因子との間に線形の関係が見られ

た標高975mまで、傾斜10°～60°、曲率0.02～0.02、さらに斜面方位全方位の範囲は、土地利用の約90%が森林である。森林には風を減速する効果等があり、堆雪効果を発揮する<sup>9)</sup>ことが報告されているが、このことが積雪深と地形因子との間に安定した関係が見られた要因であると考えられる。

### 2.1.3 積雪深分布の推定

2.1.2節における結果は森林内における積雪深分布の一般的傾向を示していると考えられる。地形因子を考慮して森林内の積雪深分布を簡易に推定する以下の式を提案する。

$$SD = a_1 x_{ele} + a_2 x_{slo} + a_3 x_{cur} + a_4 \cos(x_{asp} - 45) + a_5 \quad (1)$$

ここで、 $SD$ ：積雪深(m)、 $x_{ele}$ ：標高(m)、 $x_{slo}$ ：傾斜(°)、 $x_{cur}$ ：曲率、 $x_{asp}$ ：斜面方位(°)、 $a_1 \sim a_5$ ：回帰係数である。右辺の前半3項は、積雪深と標高、傾斜、曲率と

表-1 回帰分析結果

	地形考慮法	標高考慮法
$a_1$	0.00248	0.0028
$a_2$	-0.0154	—
$a_3$	7.106	—
$a_4$	-0.0737	—
$a_5$	0.449	-0.234

の線形関係をそれぞれ表現した。また、図-2.4より他の因子と比較して寄与は小さいと考えられるが、右辺第4項は、熱負荷の影響を受けて、積雪深が斜面方位360°に対して周期1の周期性を持つことを表現した<sup>8)</sup>。回帰分析は2.1.2節で述べた積雪深と地形因子の関係が安定している範囲に対して行った。結果を表-1に示す。パラメータは、残差平方和が最小となるように決定した。比較のため、積雪深と標高の線形関係のみを適用した場合の結果を併せて示す。以降、地形の4因子を考慮した方法を「地形考慮法」、標高のみを考慮した方法を「標高考慮法」とそれぞれ標記する。

2.1.4 ダム流域の積雪包蔵水量の推定

ここでは、2.1.3節において作成した積雪深の推定式を用い、ダム流域の毎年の積雪包蔵水量を推定する。対象は、図-3に示す6ダムである。6ダムとも流域面積の7割～9割が森林である。

2.1.3節において、航空レーザ測量より求めた積雪深を用いて決定した表-1のパラメータは、測量の範囲や実施日の積雪深分布を反映している。このため、毎年ダムで実施している積雪調査結果を用いて、パラメータを置き換えることを試みた。ダムにおける積雪調査は、標高別に数地点で実施されており、この結果から以下の回帰式を作成することができる。

$$SD = b_1 Z + b_2 \quad (2)$$

ここで、 $SD$ ：積雪深(m)、 $Z$ ：標高(m)、 $b_1 \sim b_2$ ：回帰係数である。毎年の積雪深分布は、表-1のパラメータ $a_1$ 及び $a_5$ を、それぞれ各年の $b_1$ 及び $b_2$ に置き換えた式(1)を用いて算出した。その他のパラメータは特定が困難なため、表-1の値をそのまま用いた。なお、積雪密度は、観測時期が同じであれば標高に関わらずほぼ一定値となる(例えば小池ら<sup>9)</sup>)ことが報告されていること、積雪調査で計測した各地点の積雪密度はほぼ均一であったことから、積雪調査地点全点の平均値を用いて、一定値とした。こ

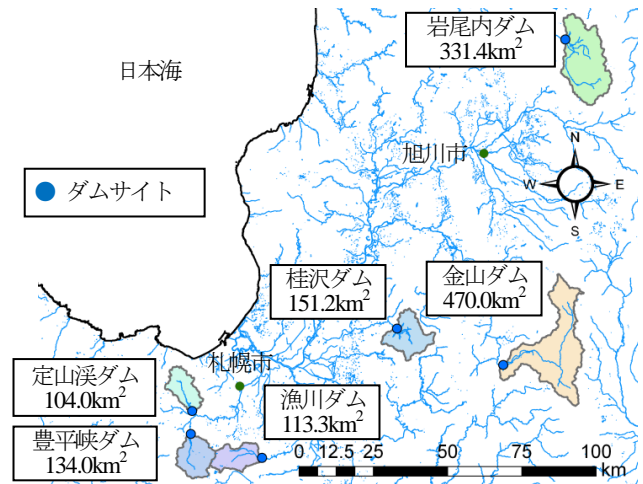


図-3 積雪包蔵水量を推定したダム

表-2 積雪包蔵水量(×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>)の推定値と水収支の比較 (定山溪ダム：2001年～2010年)

	地形考慮法	標高考慮法	積雪調査	水収支
2001	95	104	115	88
2002	79	88	93	83
2003	101	110	115	89
2004	97	107	111	97
2005	133	143	141	139
2006	114	124	127	123
2007	92	101	105	98
2008	75	85	86	68
2009	107	117	121	105
2010	94	105	104	94
誤差の10年平均	5.7%	11.1%	15.1%	-

のように、各年の積雪調査日における値をパラメータとして用いたため、推定した積雪包蔵水量は積雪調査日の値となる。流域の標高、傾斜、曲率及び斜面方位の算出には、基盤地図情報の数値標高モデルを使用した。同データの水平解像度はダムによって異なり、5m または 10m である。なお、5m または 10m のメッシュを用いた場合、ダム流域のメッシュ数が 100 万を超えるため、実用性を考え、100m メッシュにリサンプリングしている。

水収支はガイドライン<sup>10)</sup>に示されている方法を用いて算出し、対象期間は積雪調査日の翌日から同年6月30日までとした。

定山溪ダムの結果を表-2に示す。比較のため、標高考慮法及びダム管理の実務で採用されている方法による推定結果を併せて示した。実務においては、積雪調査地点

表-3 積雪包蔵水量( $\times 10^6\text{m}^3$ )の推定結果

	定山溪ダム (再掲)			豊平峡ダム			漁川ダム		
	地形考慮法	積雪調査	水収支	地形考慮法	積雪調査	水収支	地形考慮法	積雪調査	水収支
2006	114	127	123	130	139	115	31	54	36
2007	92	105	98	欠測			48	56	47
2008	75	86	68	87	96	91	28	39	29
2009	107	121	105	122	134	129	41	57	40
2010	94	104	94	101	109	141	41	49	35
誤差の平均	5.2%	12.4%	-	13.0%	13.3%	-	7.5%	37.5%	-
	桂沢ダム			岩尾内ダム			金山ダム		
	地形考慮法	積雪調査	水収支	地形考慮法	積雪調査	水収支	地形考慮法	積雪調査	水収支
2006	81	83	81	198	218	267	欠測		
2007	61	69	86	149	169	214	209	190	205
2008	56	76	89	145	169	168	139	124	114
2009	48	61	71	239	179	239	193	170	191
2010	47	66	69	238	248	275	167	152	168
誤差の平均	26.3%	11.1%	-	16.6%	14.9%	-	11.5%	9.2%	-

の標高と積雪相当水量に対して線形の式を当てはめ、この式から求めた標高区分ごとの積雪相当水量に、標高区分の面積を乗じ、合算して、積雪包蔵水量としている。以降、実務と同じ手法で推定した結果を「積雪調査」と表記する。誤差の10年平均は、毎年の推定値に対して、水収支を真値とした場合の相対誤差の絶対値を算出し、10年間で平均したものである。誤差の10年平均を見ると、地形考慮法の精度が最も高いことがわかる。さらに、推定した10年間について、水収支を真値として積雪包蔵水量の二乗平均平方根誤差 RMSE を式(3)から求める。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - x_i)^2} \quad (3)$$

ここで、 $X_i$  : 積雪包蔵水量の推定値、 $x_i$  : 水収支、 $n$  : 年数、 $i$  : 年を表す。結果、地形考慮法で  $6.4 \times 10^6 \text{m}^3$ 、標高考慮法で  $11.7 \times 10^6 \text{m}^3$ 、積雪調査で  $15.7 \times 10^6 \text{m}^3$  であった。西原ら<sup>8)</sup>が標高と斜面方位を考慮して、本研究と同じ定山溪ダムにおける、10年間の積雪包蔵水量を推定した結果によると、RMSE は  $10.4 \times 10^6 \text{m}^3$  と報告されており、本手法はこれを上回る精度である。

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、この結果から各年の  $b_1$  及び  $b_2$  を求めた。推定結果を表-3 に示す。推定した期間の RMSE は地形考慮法で  $21.9 \times 10^6 \text{m}^3$ 、積雪調査で  $19.6 \times 10^6 \text{m}^3$  であった。また、相対誤差の5年平均は、地

形考慮法で 13.0%、積雪調査で 13.3% であった。地形考慮法による推定結果は、積雪調査による推定結果とほぼ同等の精度であった。

漁川ダムでは、ダム管理所付近の標高 300m~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。積雪調査の結果だけでは、標高の高い範囲の積雪深を考慮できないため、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加えて、各年の  $b_1$  及び  $b_2$  を求めた。結果を表-3 に示す。推定した期間の RMSE は地形考慮法で  $3.5 \times 10^6 \text{m}^3$ 、積雪調査で  $14.0 \times 10^6 \text{m}^3$  であった。また、相対誤差の5年平均は、地形考慮法で 7.5%、積雪調査で 37.5% であった。積雪調査結果にテレメータ積雪深を加えて、地形考慮法を用いることで、大幅な精度の向上が見られた。

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、 $b_1$  及び  $b_2$  を求めた。結果を表-3 に示す。推定した期間の RMSE は地形考慮法で  $23.5 \times 10^6 \text{m}^3$ 、積雪調査で  $10.7 \times 10^6 \text{m}^3$  であった。また、相対誤差の5年平均は、地形考慮法で 26.3%、積雪調査で 11.1% であった。桂沢ダムでは、精度の向上が見られなかった。なお、2008年及び2010年は、標高の低いダム管理所付近の積雪深より、標高の高い放水口地点の積雪深が小さく、 $b_1$  が負となったため、 $a_1 = 0$  とした。



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、この結果から各年の $b_1$ 及び $b_2$ を求めた。なお、岩尾内ダムは、これまでの4ダムと比較して流域面積が大きい。流域面積の大きいダムでは、ダム流域を複数の領域に分割した上で、領域毎に積雪相当水量を推定し、これらを合算して、ダム流域の積雪包蔵水量としている。現在、岩尾内ダムでは流域を4領域に分割しているが、本手法の適用にあたっては、流域を $b_1$ の値に近い2領域に分割し、計算を簡素化した。結果を表-3に示す。推定した期間のRMSEは地形考慮法で $16.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、積雪調査で $14.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ であった。また、相対誤差の5年平均は、地形考慮法で16.6%、積雪調査で14.9%であった。流域の分割数を減らしたものの、推定精度は積雪調査とほぼ同等である。

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いる。流域面積が大きいので、流域を10領域に分割して積雪包蔵水量を推定している。ここでは、岩尾内ダムと同様、流域を $b_1$ の値に近い2領域に分けて地形考慮法を適用した。結果を表-3に示す。推定した期間のRMSEは地形考慮法で $23.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、積雪調査で $16.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ であった。また、相対誤差の5年平均は、地形考慮法で11.5%、積雪調査で9.2%であった。流域の分割数を大幅に減らしたものの、大幅な精度の低下とはならなかった。

表-3を見ると、地形考慮法による推定値は、航空レーザ測量を行った定山溪ダムの精度が最も高い。また、豊平峡ダム、岩尾内ダム、金山ダムは積雪調査とほぼ同程度の精度である。これらのダムは、積雪調査の地点数が多く、このことが要因と考える。次に、精度の向上の程度は漁川ダムが大きい。標高が低い地点のみの積雪調査結果に、標高の高い地点にあるテレメータ地点の積雪深を加えてパラメータを決めたことが要因と考える。ただし、漁川ダムと同様のアプローチを試みた桂沢ダムは積雪調査と比較して精度の向上が見られていない。桂沢ダムは、積雪深観測点が管理所付近とテレメータ地点の2点しかなく、調査地点が少ないことが要因と考える。標高帯別に複数の地点で積雪深を観測することが、積雪包蔵水量の推定精度向上に繋がると考える。

また、岩尾内ダムと金山ダムは、流域の分割数を減らして推定方法を簡素化したものの、地形考慮法を適用すると、現在の積雪調査とほぼ同等の精度で積雪包蔵水量を推定できた。これは、地形考慮法の精度の高さを示していると考えられる。また、この結果は、積雪調査の地点数を減らすことが可能であることを示唆していると考えられる。

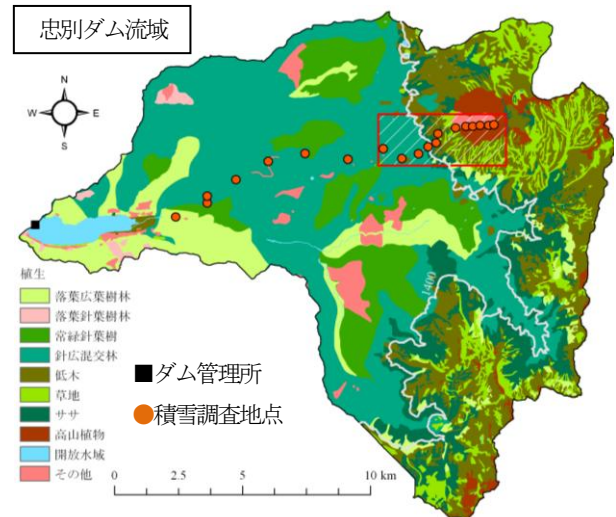


図-4 解析対象の忠別ダム流域

## 2.2 森林外における積雪分布<sup>11),12)</sup>

### 2.2.1 積雪深分布の解析範囲及び基礎資料

対象流域は、図-4に示す忠別ダム流域である。忠別ダムは、石狩川水系忠別川流域の上流部に位置し、流域面積は $239 \text{ km}^2$ 、標高帯は400m~2,300m付近である。流域の植生は、環境省が公表している自然環境保全基礎調査の結果を用い、図-4のように分類した。図-4には標高1,400mの等高線を白線で示してあるが、この標高付近で植生が森林から森林以外に変化し、流域面積の約6割が森林、約4割が森林以外である。

次に、解析に使用した資料を示す。積雪深分布の解析は、図-4の赤枠斜線で示す範囲で実施した航空レーザ測量結果を用いた。面積は $10 \text{ km}^2$ 、標高帯は1,100m~2,300m付近の主に南~西向き斜面である。測量範囲の植生は標高1,450m付近を境に森林と森林以外に分かれ、標高1,450m以上の範囲では、98%が森林以外である。航空レーザ測量は、無積雪期である2009年9月22日~25日、積雪期は2012年3月10日及び2015年3月27日に2回実施し、二時期の測量の標高差を積雪深とした。データの水平解像度は5mである。なお、測量に使用した機器の計測精度を基に算出した、積雪深の計測精度は $\pm 30 \text{ cm}$ である。

また、流域の積雪相当水量分布の推定には、図-4に丸で示した地点の積雪調査結果を用いた。なお、流域の標高、傾斜、曲率、斜面方位及び地上開度の算出には、基盤地図情報の数値標高モデルを使用した。同データの水平解像度は10mである。さらに、水収支の算出には、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。

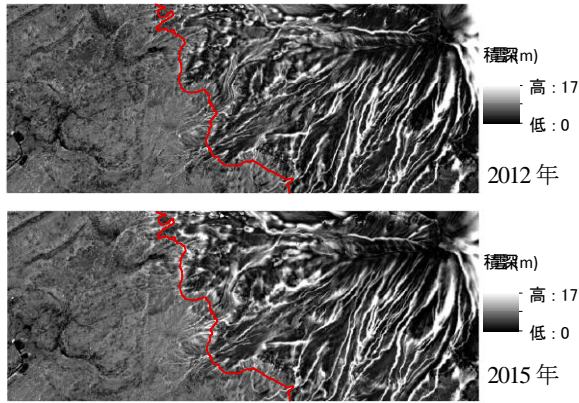


図-5 航空レーザ測量により計測された積雪分布

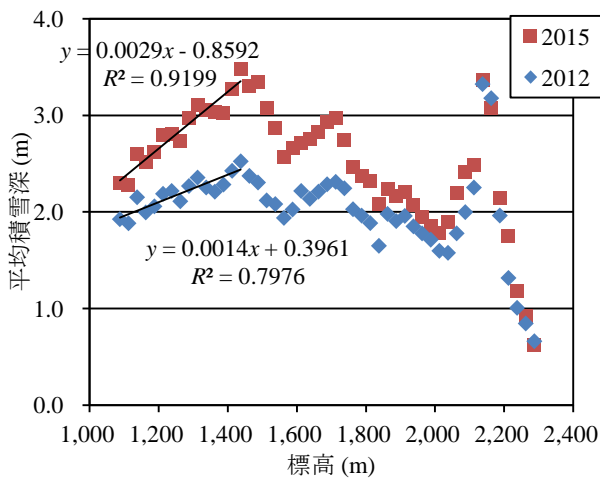


図-6 標高と積雪深の関係

### 2.2.2 地形と積雪深の関係

図-5 に航空レーザ測量により計測された積雪分布を示す。図中の赤線は森林限界を示し、赤線の左側が樹林帯、右側が森林限界以上の高標高帯である。図を見ると、森林限界を境界として、積雪分布の特徴が異なることが明らかである。また、積雪の量が異なるものの、2012年及び2015年の積雪分布を比較すると、ほぼ同様の傾向を示している。

航空レーザ測量で得られたメッシュデータは、約40万データあり、そのままでは積雪深と地形との関係を捉えることが困難である。このため、標高25mピッチのように、幅を持った範囲に区分し、その範囲の平均積雪深を求め、地形因子との関係を考察する。

図-6 に標高と積雪深の関係を示す。標高は25mピッチで区分した。積雪深は標高1,450mまで増加し、標高2,000m～2,200m付近で急激に増加減少するものの、標高1,450m以上では徐々に減少する傾向が見られる。

はじめに、標高1,450mまでの積雪深が増加している範囲は、主たる植生が森林である範囲と対応している。

この範囲の標高と積雪深について線形回帰分析を行った結果を図中に示したが、既往報告<sup>1)</sup>と同様に、高い相関で線形の関係が見られる。また、2012年と2015年を比較すると、2015年の積雪深が大きい。忠別ダム流域において2012年3月22日及び2015年3月13日に行われた積雪調査の結果によると、2015年の積雪深が大きく、この傾向が反映されている。

次に、標高1,450m以上は、森林限界を超え、主たる植生が森林以外の範囲と対応している。ここでは、既往報告<sup>1)</sup>と同じく、森林内と比較して積雪深が小さい傾向がある。減少の程度を見ると、標高2,000m付近まではほぼ一定の割合で減少しているように見えるものの、標高2,000m～2,100m付近で急激な増加、標高2,100m以上で急激な減少が見られる。積雪の増減の傾向は、2年ともほぼ同一である。このような積雪深の変動を、標高のみをパラメタとして説明することは困難と考えられることから、本研究では、標高以外のパラメタとの関係を分析する。なお、図-6において積雪深は、標高1,450mまでが森林内、標高1,450m以上が森林外の特徴を示したため、以降では、森林外の特徴を示した標高1,450m以上の範囲に限って分析する。

山田ら<sup>1)</sup>は、大雪山旭岳の森林限界を超えた高標高帯において積雪調査を行い、森林外の積雪は凹部で多く、凸部で少なく、全体としては地形の凹凸を平坦化するように堆積することを報告している。そこで、本研究では地形の凹凸を表現する指標として、地上開度を用いて、積雪深との関係を分析する。なお、標高の場合と同様、幅を持った範囲に区分し、その範囲の平均積雪深を求め、地上開度との関係を考察する。

地上開度は、横山ら<sup>13)</sup>が開発した指標であり、着目する地点が周辺に比べて地上に突き出ている程度及び地下に食い込んでいる程度を数量化したものである。地上開度は、式(4)から求められる。

$$\Phi = (\phi_0 + \phi_{45} + \phi_{90} + \phi_{135} + \phi_{180} + \phi_{225} + \phi_{270} + \phi_{315})/8 \quad (4)$$

ここで、 $\Phi$ ：地上開度(°)、 $\phi_i$ ：着目する地点から、指定した探索距離以内で、方位 $i^\circ$ 方向の空を見ることができるとなる天頂角の最大値(°)である。地上開度は、探索距離を指定でき、8方位の天頂角の平均値を求めるため、方位及び局所地形に依存しない指標となる。 $\Phi < 90^\circ$ の場合に着目地点が谷地形、 $\Phi > 90^\circ$ の場合に着目地点が尾根地形であることをそれぞれ示している。また、 $\Phi = 90^\circ$ の



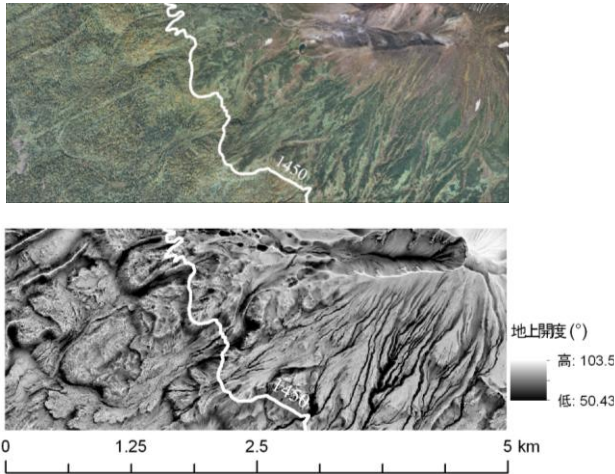


図-7 航空レーザ測量範囲の航空写真と地上開度(°) (探索距離 100m)

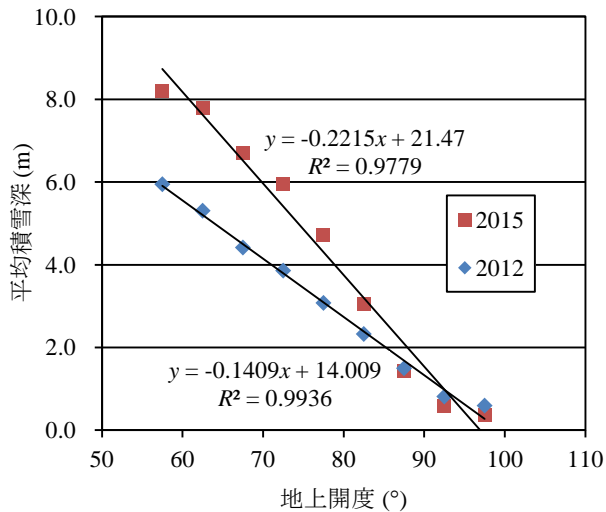


図-8 地上開度と積雪深の関係

場合、着目地点は平地である。図-7に、航空レーザ測量を実施した範囲の航空写真と地上開度を示す。探索距離は100mとした。地上開度は、周囲から高く突き出ている地点、つまり山頂や尾根で大きくなり、窪地や谷底では小さくなる。図を見ると、尾根に沿って地上開度が大きく、谷地形である溪流に沿って地上開度が小さいことがわかる。

地上開度と積雪深との関係を図-8に示す。地上開度は5°ピッチで区分し、平均積雪深を算出した。図より、地上開度が大きくなる、つまり地形が谷から尾根に変化するに伴い、積雪深が高い相関で線形に減少していることがわかる。なお、積雪深が5mを超える地上開度60°付近についても十分なサンプル数を確保している。また、2015年の積雪深が大きく、線形式の傾きが大きいことは、前節で述べた積雪調査の結果のとおり、2012年と比較して

2015年の積雪が多いことが原因である。谷の積雪深が大きく尾根の積雪深が小さいことは、風による移動後の積雪分布の特徴であり<sup>13, 14)</sup>、航空レーザ測量により計測された積雪深は、風による移動後の再堆積分布であると考えられる。

### 2.2.3 忠別ダム流域の積雪相当水量分布の推定

2.2.2節において、森林外の積雪深は地上開度との間に線形の関係があることを明らかにした。本章では、この関係を用いて航空レーザ測量範囲のうち、森林外の積雪深分布を再現する。地上開度を用いると、森林外の積雪深は式(5)で表すことができる。

$$SD = c_1 \Phi + c_2 \quad (5)$$

ここで、 $SD$ ：積雪深(m)、 $\Phi$ ：地上開度(°)、 $c_1$ 及び $c_2$ ：回帰係数である。本章では、地上開度と毎年忠別ダムで行われている積雪調査結果を用いて、忠別ダム流域の積雪相当水量分布を推定する。

忠別ダムでは、図-4に示した19地点において、毎年、積雪調査を実施している。調査地点の標高帯は400m～2,200m付近であり、19点のうち11点が森林内、残りの8点が森林限界を超えた森林外に位置している。ダム管理の実務において積雪包蔵水量を推定する際は、標高と積雪相当水量の間に、森林内は線形式、森林外は試行錯誤により多項式を当てはめ、標高帯毎に積雪相当水量を推定し合算している。以降、実務で採用されている手法を「標高法」と表記する。

本研究では、森林内と森林外で積雪深分布の特徴が異なることを考慮し、ダム流域の森林限界である標高1,400mを境に、森林内と森林外に分けて積雪相当水量を推定する。森林内の積雪相当水量分布は、地形考慮法を用いて推定する。使用する積雪調査点は森林内の11点である。なお、積雪密度は、観測時期が同じであれば標高に関わらずほぼ一定値となる(例えば小池ら<sup>9)</sup>)ことが示されているため、積雪調査地点11点の各年の平均値を用いて、一定値とした。

森林外の積雪相当水量分布は、森林外に位置する8点の積雪調査結果と地上開度を用いて推定する。はじめに、森林外にある積雪調査地点8点の地上開度の分布状況と、式(5)に示す地上開度と積雪深との線形関係の有無を確認するため、図-9に積雪調査地点の地上開度と積雪深をプロットした。標高の高い範囲は、尾根沿いに調査地点が多いため、地上開度の大きい調査地点が若干多いが、



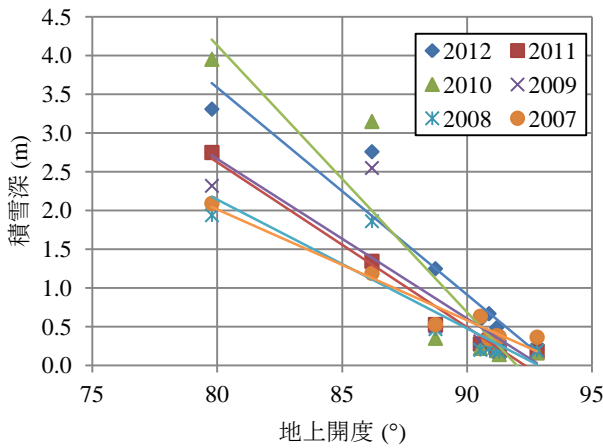


図-9 積雪調査地点の地上開度と積雪深 (森林外)

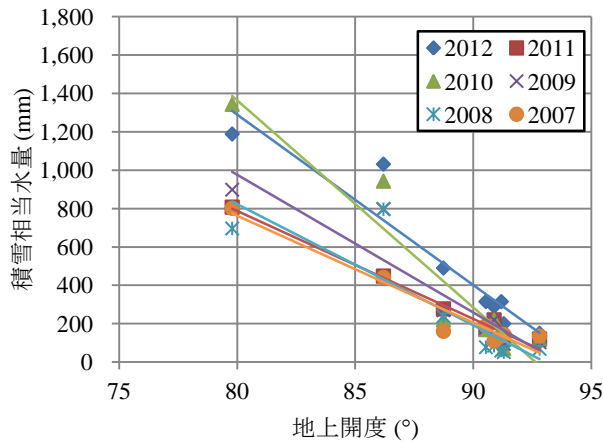


図-10 積雪調査地点の地上開度と積雪相当水量 (森林外)

線形回帰式を作成できる程度に、複数の地上開度の地点で調査がなされていると考えられる。また、各年の結果を見ると、地上開度が大きくなるに伴い、積雪深が線形に減少していることがわかる。各年の回帰直線を図に示したが、決定係数は最も低い年で $R^2 = 0.75$ であった。また、近傍にある旭川地点及び美瑛地点のアメダスで観測された積雪深と比較すると、多雪年(例えば2010年及び2012年)は回帰直線の傾きが大きく、少雪年(例えば2007年)は傾きが小さい傾向が見られた。地上開度が $90^\circ$ を超えた範囲は、地形的に雪が積りにくい尾根地形であるため、年変動が小さいと考えられる。

試みに、積雪調査地点の地上開度と積雪相当水量をプロットした図が図-10である。図より、積雪深だけではなく、積雪相当水量についても地上開度との線形の関係が見られた。各年の回帰直線の決定係数は、最も低い年においても $R^2 = 0.74$ となっており、十分な精度を確保していると考えられる。積雪深から積雪相当水量を求める際は、積雪密度が必要となるが、森林外の積雪調査地点のうち、積雪深が50cmを下回った地点の積雪密度は

表-4 積雪包蔵水量( $\times 10^6 \text{m}^3$ )の推定結果

	本手法	標高法	水収支
2007	135,842	141,337	158,818
2008	127,300	143,332	146,880
2009	160,869	180,337	175,779
2010	192,076	192,279	162,342
2011	142,359	179,854	129,751
2012	184,927	190,584	155,579
平均	157,229	171,287	154,858

$600 \text{kg/m}^3$ を超える大きな値であった。このため、森林内のように積雪密度を一定値で与えた場合、積雪相当水量の推定精度が低くなることが考えられる。しかし、積雪相当水量と地上開度の関係式を用いれば、積雪密度を別途考慮する必要が無い。そこで森林外は、積雪調査結果を式(6)に当てはめて線形回帰分析を行い、積雪相当水量を直接求めた。なお、直線の傾きは毎年異なるため、各年の積雪調査結果から、各年の回帰係数を決定した。

$$SWE = d_1 \phi + d_2 \quad (6)$$

ここで、 $SWE$ :積雪相当水量(mm)、 $\phi$ :地上開度( $^\circ$ )、 $d_1$ 及び $d_2$ :回帰係数である。なお、実用性から、積雪相当水量を推定するメッシュの大きさは100mとした。

はじめに、2007年～2012年の積雪調査日におけるダム流域の積雪包蔵水量を表-4に示す。比較のため、標高法による推定結果と水収支を併せて示す。水収支はガイドライン<sup>10)</sup>と同じ方法で算出し、期間は積雪調査日の翌日から同年6月30日までとした。水収支を真値とし、RMSEを算出すると、本手法で $22,502 \times 10^3 \text{m}^3$ 、標高法で $28,783 \times 10^3 \text{m}^3$ であり、標高法と比較して本手法の精度が高い。また、各年の推定値の相対誤差を見ると、本手法で-14%～19%、標高法で-11%～39%であり、本手法を用いると、誤差が20%以内に収まった。

次に、本手法と標高法で求めた標高100m毎の全積雪相当水量を図-11に示す。森林限界である標高1,400m以上に着目すると、標高1,600m～1,700mまでは本手法で推定した全積雪相当水量が少ない傾向があり、この標高帯を超えると関係が逆転する。森林外の積雪調査地点は標高1,700mまでは地上開度 $90^\circ$ 以下の谷に、標高1,700m以上では地上開度が $90^\circ$ 以上の尾根に位置しており、標高法では、標高1,700mまでは積雪が堆積しやすい地点、標高1,700m以上では積雪が堆積しづらい地点の積雪深を標高帯の代表値としている。一方で、標高1,400m以

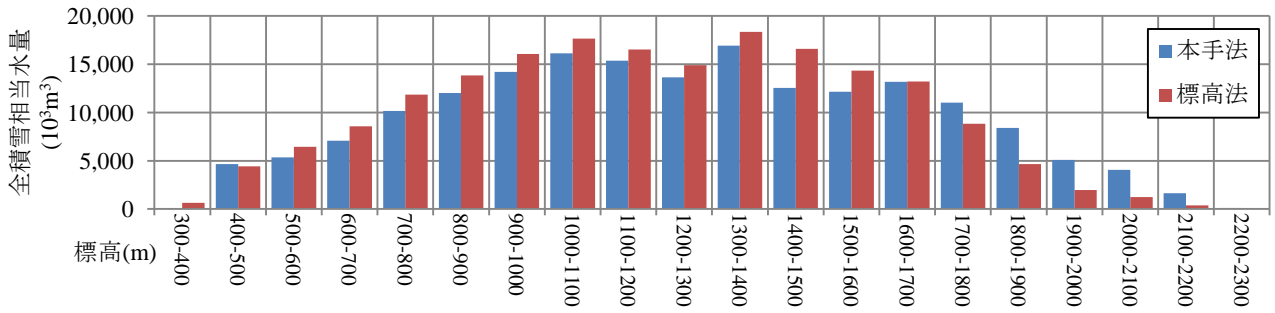


図-11 標高帯毎の全積雪相当水量 (2012年3月22日)

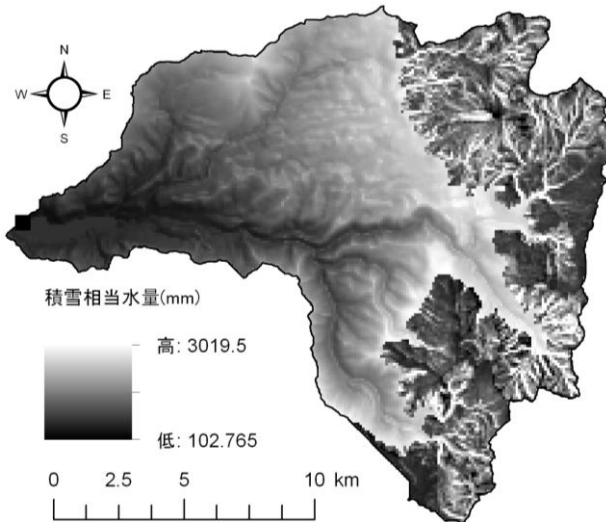


図-12 積雪相当水量分布 (2012年3月22日)

上の標高帯について地上開度の分布を確認すると、地上開度は標高に依存せず、概ね 70°~100°の間に分布し、尾根と比較して谷の割合が多かった。このことから、尾根で計測した積雪深を標高帯の代表値とするのは適切ではないと考えられる。地上開度を用いた本手法は、積雪が堆積しやすい地点、しづらい地点の両方を考慮したため、標高 1,700m 以上の積雪相当水量が適切に評価され、全積雪相当水量が逆転したと考えられる。現在のダム管理では、立ち入ることに危険を伴うことから、標高の高い範囲の積雪調査は尾根を中心に行われている。しかし、図-11 によると、尾根上で積雪調査が実施されている標高 1,700m 以上では、標高法で推定した全積雪相当水量が、本手法と比較して 56%過小評価された。森林外の積雪相当水量を精度良く推定するためには、安全を確保できる範囲で、地上開度が小さい地点を積雪調査地点に加えるべきである。

最後に、本手法で推定した積雪相当水量分布を図-12 に示す。植生が森林から森林以外に変化する標高 1,400m を境に異なる手法を用いたため、ここの積雪相当水量に段差が生じる。植生限界付近には高木から低木に遷移す

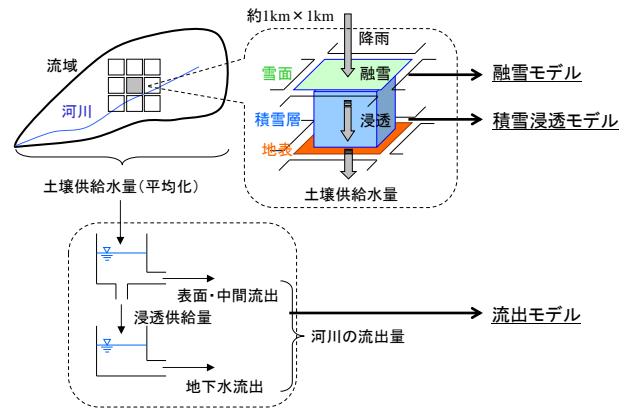


図-13 融雪・流出モデルの概要<sup>17)</sup>

る領域があり、この遷移に合わせて積雪深も遷移していると考えられる。このような遷移領域の積雪深分布の解明は今後の課題である。

### 3. 寒冷地ダムの流水管理を行うための融雪流量推定手法開発<sup>15),16)</sup>

#### 3.1 融雪・流出モデルの概要

2章において解明した積雪分布の特徴を融雪・流出モデルに組み込み、融雪期におけるダム流入量の計算精度の向上を試みる。対象とした融雪・流出モデル(白谷ら<sup>17)</sup>)の概要を図-13 に示す。同モデルは、融雪モデル、積雪浸透モデル、流出モデルで構成される。計算手順は、はじめに、融雪モデル及び積雪浸透モデルを約 1km 四方のメッシュに適用し、気象因子から土壌供給水量を推定する。次に、メッシュ毎の土壌供給水量を流域全体にわたって合計し、この値を流出モデルに入力してダム流入量を求める。積雪深(積雪相当水量)は融雪モデル内で計算され、近藤ら<sup>18)</sup>が提案している土壌もしくは積雪面及び植被層の熱収支を考慮できる 2 層モデルに基づいている。本モデルは、ダム流域内で観測されている気象データのみで流入量を計算できること、集中型モデルであるため、計算負荷が小さいといった特徴がある。

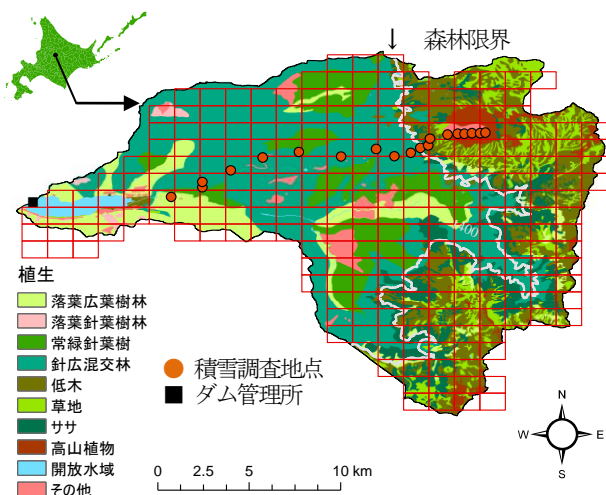


図-14 忠別ダム流域と積雪調査地点

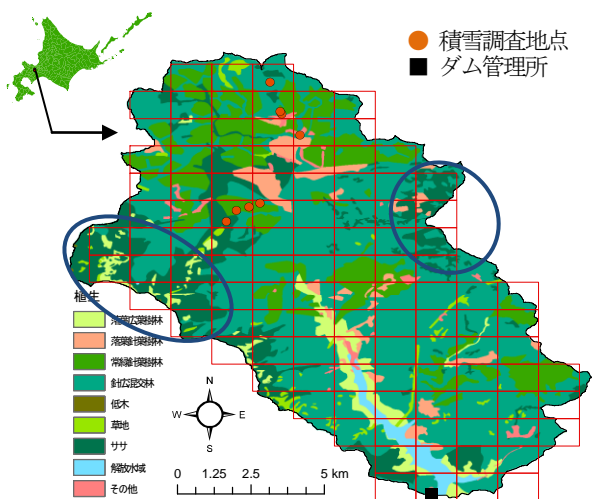


図-15 定山溪ダム流域と積雪調査地点

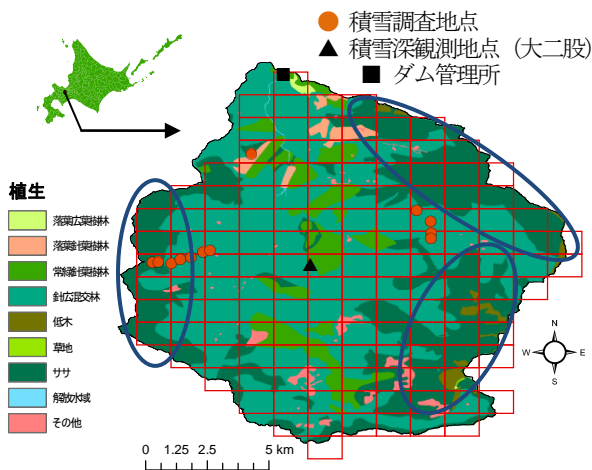


図-16 豊平峡ダム流域と積雪調査地点

### 3.2 対象流域と使用データ

対象流域は図-14 から図-16 にそれぞれ示した忠別ダム流域、豊平峡ダム流域及び定山溪ダム流域である。図

-14 から図-16 は、環境省による自然環境保全基礎調査の結果を用い10分類した植生を示している。忠別ダム流域では、白線で示した標高1,400m付近に森林限界があり、ここを境に植生が森林から森林以外に変化する。一方、豊平峡ダム及び定山溪ダムは、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、尾根に近い範囲では、草地やササといった森林以外の植生が主たる植生となる。

いずれのダムにおいても、毎年3月に積雪調査が行われているため、この結果を用いて、融雪・流出モデル内で熱収支法により求められた流域の積雪深分布及び積雪相当水量分布を補正する。

また、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の数値標高モデルを用いて求めた。上記の他、融雪・流出モデルの入力データとして、ダム管理所において観測されている気象データを用いている。なお、豊平峡ダムにおいては、日照時間及び日射量を観測していないため、近接する定山溪ダムにおける観測データを用いている。

### 3.3 積雪分布を補正する方法

#### 3.3.1 森林の内外の判定

本研究では、ダム流域を森林の内外に分けて、異なる方法で熱収支法により求められた積雪分布を補正する。このためには、融雪・流出モデルの各メッシュについて、森林の内外を判定する必要がある。判定は、図-14 から図-16 に示した植生分類を用いてメッシュ毎に森林植生、森林以外の植生の面積を求め、森林植生の面積の割合がメッシュの面積の60%を下回ったメッシュを森林外と扱うこととした<sup>19)</sup>。森林植生は図-14 から図-16 に示した植生分類のうち、落葉広葉樹林、落葉針葉樹林、常緑針葉樹林、針広混交林とし、これら以外の植生を森林外とした。

各ダム流域について、森林の内外を判定した結果を図-17に示す。図を見ると、図-14 から図-16 に示した植生を反映し、忠別ダムにおいては、森林限界である標高1,400mを境に、低標高帯側は概ね森林内、高標高帯側は概ね森林外と判定されている。また、定山溪ダム及び豊平峡ダムにおいては、標高が高く尾根に沿った範囲にあるメッシュが森林外と判定されている。忠別ダム流域においては全259メッシュのうち120メッシュ、定山溪ダム流域においては全111メッシュのうち17メッシュ、豊平峡ダム流域においては全142メッシュのうち60メッシュが森林外と判定された。



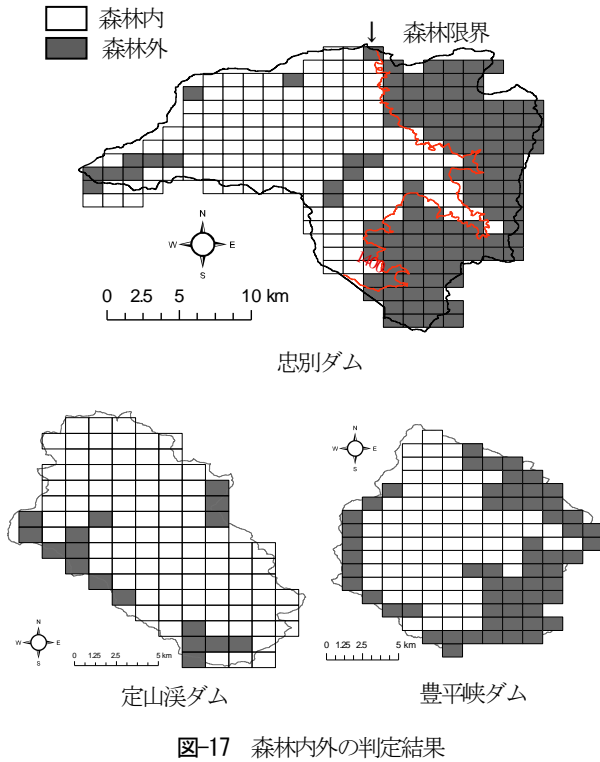


図-17 森林内外の判定結果

### 3.3.2 森林内の積雪分布の補正方法

森林内メッシュの積雪深の補正には地形考慮法を用いる。積雪深は式(1)で表される。5つの回帰係数は、各流域において実施された毎年の積雪調査の結果から求めることになるが、調査地点数が少ないため、すべての回帰係数を求めることはできない。そこで、 $a_2 \sim a_4$ は表-3に示し値を用い、固定値とした。 $a_1$ 及び $a_5$ は、積雪調査地点の標高及び積雪深を用いて、式(2)に示す直線回帰式により決定された $b_1$ 及び $b_5$ の値で置き換えた。

積雪相当水量を求める場合は、積雪密度が必要となる。過去に行われた積雪調査の結果を見ると、森林内においては、積雪調査が行われる時期の積雪密度は、流域全域ではほぼ一定である<sup>9)</sup>。このため、積雪深に対する式(1)及び式(2)の関係は、積雪相当水量に対しても適用できると考えた。具体的には、式(1)及び式(2)の積雪深を積雪相当水量に置き換えて、各メッシュの積雪相当水量を計算する。

積雪深及び積雪相当水量の補正は、毎年の積雪調査日に行う。

### 3.3.3 森林外の積雪分布の補正方法

森林外メッシュの積雪深の補正には、式(5)を用いる。森林外の複数の地点において積雪調査が行われている場合は、積雪調査地点の地上開度と積雪深を用いて、回帰

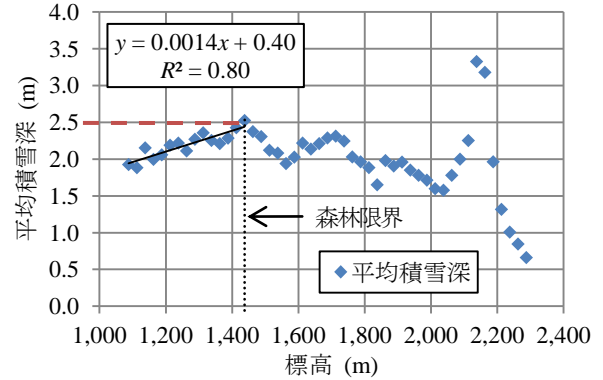


図-18 標高と積雪深の関係

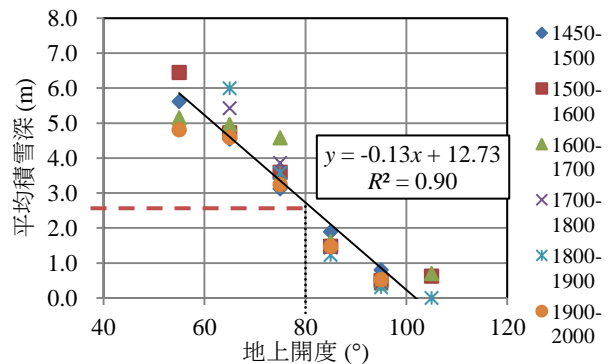


図-19 地上開度と森林外の積雪深の関係

係数を決定する。

しかし、積雪調査地点の多くは森林内に位置しており、回帰係数を求めることができないケースが多い。そこで、2012年に忠別ダム流域の森林の内外両方を含む範囲で行った航空レーザ測量の結果を分析し、森林外において積雪調査が行われていない場合に式(5)を作成する方法を検討した。図-18に標高と積雪深の関係を示す。航空レーザ測量を実施した範囲には、標高1,450m付近に森林限界があり、この標高までは、標高の増加とともに積雪深が線形に増加している。しかし、森林限界を超えると、積雪深の変動が大きくなり、森林内と比較して積雪深が小さい傾向が見られる。次に、森林限界以上の積雪深について、地上開度との関係を示したものが図-19である。森林外では、地上開度が大きくなることもない、積雪深が線形に減少していることがわかる。図-19には、標高を100mピッチに区切り、積雪深と地上開度との関係を示したが、標高による差異はほとんど見られない。さて、積雪深の補正には、直線である式(5)を用いるため、最低2点の地上開度に対し積雪深を決定しなければならない。この2点は、図-18及び図-19を分析した結果から、以下のように決定した。

はじめに、地上開度が90°以上の尾根である。尾根は



風により積雪が移動しやすい地形であると同時に、積雪が再堆積しにくい地形であるため、図-19において、地上開度 100°付近で積雪深が 0 となっている。このことから、地上開度 100°の点で積雪深を 0 とする。残りの 1 点は、直線の精度を確保するため、地上開度が 90°以下の範囲から選定することとする。山間部においては、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、森林外の積雪深は森林内と比較して小さくなることを考慮すると、ある任意の範囲の積雪深を考えた場合、積雪深のピークは、植生が森林の範囲において標高が最も高い地点に出現すると考えられる。図-18 を見ると、航空レーザ測量を実施した範囲では、標高 1,450m の積雪深 2.5m がこれに対応する。この積雪深が 2.5m の点は、図-19 において、地上開度 80°付近に対応する。残り 1 点の決定には、この関係を用いることとした。具体的には、はじめに図-14 から図-16 に示した植生分類を用いて 100m ピッチの標高帯の面積に占める森林植生の面積の割合を求める。この割合が初めて 60% を下回った標高帯を森林の範囲において標高が最も高い地点と考え、この標高帯において式(2)を用いて積雪深を計算する。ここで求めた積雪深を、地上開度が 80°の点における積雪深とした。以上のように計算した地上開度が 80°及び 100°における積雪深を用い、式(5)を作成する。

積雪相当水量は、式(6)を用いて求める。忠別ダムの森林外において行われた積雪調査の結果を見ると、森林外においても、尾根を除き、積雪密度がほぼ一定であったこと、尾根は積雪が堆積しづらく、積雪相当水量がほぼ 0 であることから、積雪に関する式(5)をそのまま積雪相当水量にも適用できると考える。

森林外の複数の地点において積雪調査が行われている場合は、積雪調査地点の地上開度と積雪相当水量を用いて、回帰係数を決定する。森林外において積雪調査が行われていない場合の計算方法は、積雪深の場合と同じである。

積雪深及び積雪相当水量の補正は、毎年の積雪調査日に行う。

### 3.3.4 積雪に作用させる倍率

ここまで示した方法を用いると、積雪調査日における各メッシュの積雪深及び積雪相当水量は一意的に求まる。しかし、毎年の気象状況等により計算精度が異なり、計算精度が低い年がある。例えば、鳥谷部ら<sup>12)</sup>は北海道内の 8 つのダムを対象に、積雪調査結果を用いて推定した積雪包蔵水量と融雪期における水収支を比較した結果、

精度の良いダムにおいても 20% 程度の誤差があったことを報告している。積雪調査日における積雪量の補正は、融雪開始時における積雪分布の初期状態を設定することに相当するため、この精度が低い場合、融雪期全体のダム流入量の計算精度を低下させる。このような精度低下を回避するための試みとして、補正した積雪深及び積雪相当水量に対し、全メッシュ一律に 1.25, 0.75 といった倍率を乗じたケースの計算を併せて行った。

### 3.4 忠別ダムへの適用結果

忠別ダム流域においては、図-14 に示したとおり、8 点の積雪調査地点が森林外に位置している。このため、式(5)及び式(6)を直接使い、積雪深及び積雪相当水量を補正することができる。また、ダム流入量を過大に計算する傾向があったことから、積雪に作用させる倍率は、0.75 及び 0.5 とした。

計算は 2008 年～2012 年の 5 融雪期を対象とした。表-5 にダム流入量の観測値を真値として求めた計算値の Nash-Sutcliffe 指標、相対誤差及び流出ボリューム誤差を示す<sup>17)</sup>。なお、本手法の欄には最も Nash-Sutcliffe 指標が高い結果が得られた倍率 (3.3.4 節参照) による結果を示す。評価期間は積雪調査日の翌日からモデルにより計算された消雪日の前日 (概ね 3 月中旬から 7 月) である。Nash-Sutcliffe 指標は 0.8 を超えていれば精度が高いと判断される指標である。表を見ると、補正無しの場合と比較して、本手法の精度が高く、積雪分布の補正の効果が現れている。本手法は、精度の低い年があるものの、比較的精度良くダム流入量を計算できていると考える。また、流出ボリューム誤差は、負の場合に計算流量が過大であることを示す指標であるが、補正無しの場合は、30% 程度過大となっているのに対し、本手法の結果は、0 に近く、流出のボリュームの計算精度が向上している。これは、本手法を用いた積雪分布の補正により、融雪開始時の積雪包蔵水量の計算精度が向上したことを示していると考えられる。さらに、倍率をみると、2010 年～2012 年のように、倍率を作用させた場合の精度が最も良い年が存在する。倍率を作用させなかった場合、Nash-Sutcliffe 指標が最大で 0.3 程度低下しており、倍率を用いて複数のケースを同時に計算することにより、計算精度の低下を回避できることが確認された。

図-20 には、本手法の Nash-Sutcliffe 指標が最も高い 2011 年融雪期を例として、ダム流入量を示した。赤線で示した 0.5 を作用させたケースの Nash-Sutcliffe 指標が最も大きい。図を見ると、融雪初期から 6 月中旬までは、

表-5 ダム流入量の計算誤差 (忠別ダム)

	Nash-Sutcliffe 指標		相対誤差		流出ボリューム誤差		本手法の倍率
	本手法	補正無し	本手法	補正無し	本手法	補正無し	
2008	0.67	-0.65	0.26	0.72	-0.04	-0.51	1.0
2009	0.71	-0.01	0.23	0.44	0.03	-0.34	1.0
2010	0.79	0.13	0.22	0.48	0.06	-0.27	0.75
2011	0.90	0.50	0.21	0.40	-0.02	-0.26	0.5
2012	0.35	-0.80	0.34	0.80	0.07	-0.38	0.5
平均	0.68	-0.17	0.25	0.57	0.05	0.35	-

※流出ボリュームの平均は、各年の絶対値の平均値である。

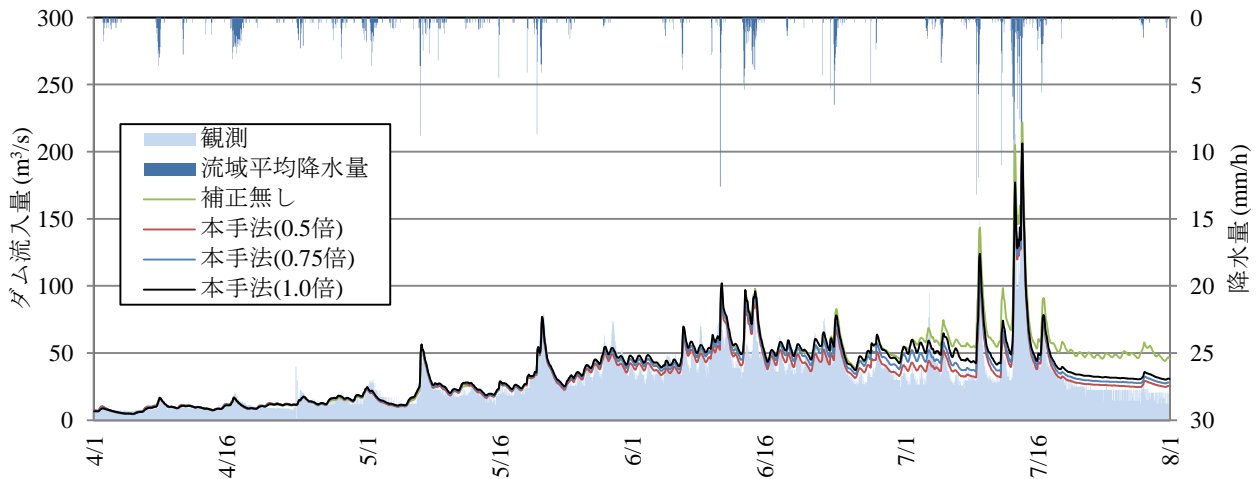


図-20 ダム流入量 (忠別ダム・2011年融雪期)

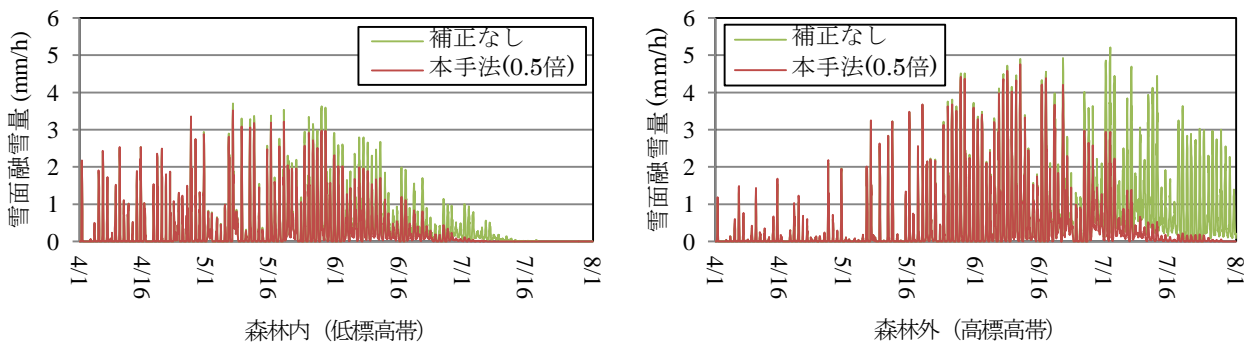


図-21 雪面融雪量 (忠別ダム・2011年融雪期)

補正無しの場合と本手法との間に大きな差は見られない。この時期は、流域の低標高帯から中標高帯が融雪の中心であることから、補正をしない場合、つまり熱収支法を用いた場合でも、この標高帯の積雪分布を精度良く計算できることを示していると考えられる。一方、6月中旬以降は、本手法がダム流入量を精度良く計算しているのに対し、補正無しの場合は過大となっている。この時期の融雪の中心は中から高標高帯であることから、森林外における積雪分布の補正の効果が現れていると考えられる。また、複数の計算を同時に行った場合、ダム管理の際にどのケースを参照すべきか判断しづらいことが考

えられる。2011年は倍率0.5を作用させた場合の精度が最も高い年であったが、図を見ると、積雪量が過大である場合は、ダム流入量の日変動が大きく、流入量は過大計算されて推移している。一方で、積雪量が過小である場合は、流入量の日変動が小さく、流入量が過小計算されて推移している。さらに、積雪が無くなった時点で融雪が終了し、流入量の日変動が無くなる。このような融雪期の流入量の特徴を把握しておけば、適切なケースの計算値を参照しながら、ダム管理を行うことは比較的容易と考えられる。また、本モデルは計算負荷が小さいことから、十分な計算資源を有している現在であれば、ダ

表-6 ダム流入量の計算誤差 (定山溪ダム)

	Nash-Sutcliffe 指標			相対誤差			流出ボリューム誤差		
	本手法	補正無し	標高法	本手法	補正無し	標高法	本手法	補正無し	標高法
2003	0.85	0.80	0.85	0.54	0.59	0.52	0.08	0.14	-0.04
2004	0.75	0.64	0.73	0.27	0.34	0.30	0.21	0.35	0.13
2005	0.70	0.25	0.76	0.68	0.82	0.63	0.15	0.31	0.09
2006	0.94	0.86	0.83	0.28	0.40	0.35	0.06	0.21	-0.03
2007	0.88	0.91	0.84	0.71	0.69	0.73	-0.21	-0.12	-0.26
2008	0.40	-0.24	0.20	0.68	0.73	0.65	-0.34	-0.62	-0.45
2009	0.85	0.58	0.78	0.43	0.60	0.48	-0.13	-0.37	-0.26
2010	0.83	0.87	0.72	0.43	0.47	0.56	-0.19	0.06	-0.29
2011	0.81	0.81	0.76	0.62	0.74	0.60	-0.20	-0.00	-0.28
2012	0.92	0.90	0.91	0.53	0.60	0.51	0.00	0.07	-0.10
平均	0.79	0.63	0.75	0.52	0.60	0.53	0.16	0.23	0.19

※流出ボリュームの平均は、各年の絶対値の平均値である。

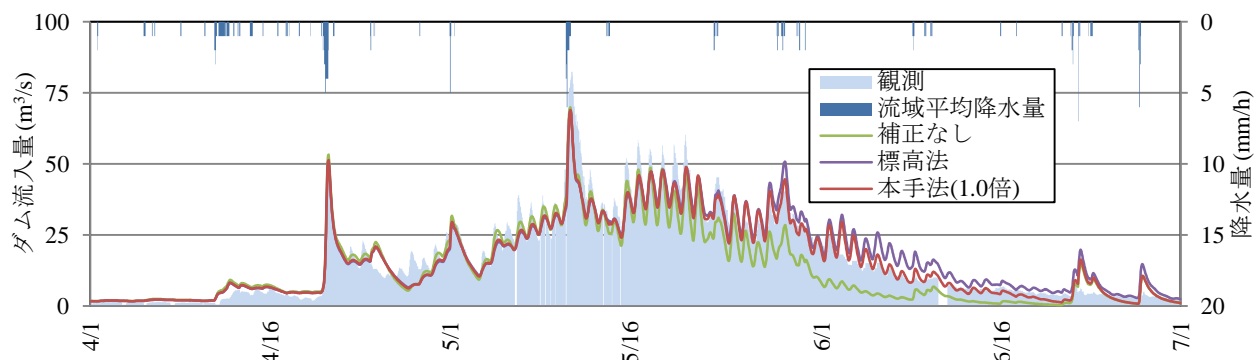


図-22 ダム流入量 (定山溪ダム・2006年融雪期)

ム管理の現場において複数の計算を同時に行うことが可能である。

図-21には、森林内と森林外メッシュのそれぞれの、単位面積当たりの平均雪面融雪量を示した。左図の森林内の雪面融雪量を見ると、補正無しの場合と本手法の間に大きな差は見られない。一方で、右図の森林外の雪面融雪量を見ると、補正無しの場合は6月中旬以降の融雪量が大きく、7月末時点でも融雪が終了していないといった大きな違いが見られる。このことが、融雪中から後期に補正無しの場合の計算結果が過大となった要因と考えられる。熱収支法を用いて積雪の計算を行う場合、降水もしくは降雪分布から積雪深(積雪相当水量)を計算する。一般的に、山間部では標高が高くなるに伴い、降水量が多くなる傾向があるため、熱収支法を用いた場合、この傾向がそのまま積雪分布に反映されることとなる。しかし、森林限界以上の高標高帯に堆積した積雪は風により移動しやすい。このため、森林外においては、積雪は降雪地点から移動し、積雪の多寡は地形の凹凸に影響されるようになる(図-19)。このため、融雪開始時に初期状態として設定する積雪分布は、風の影響を受けた後の再堆積分が適切と考えられる。地上開度を用いて積雪を補正すると、再堆積分布の特徴が反映されるため、

この補正は、降雪分布が反映された積雪分布を再堆積分布に補正していることに相当すると考えられる。このことにより、高標高帯における積雪分布が適切に補正され、特に融雪中期から融雪後期のダム流入量の計算精度向上に寄与したことが推察される。融雪後期はダムの貯水率が概ね80%を超えており、ダムへの流入を貯留するか放流するか判断が難しい。本手法は、融雪後期の計算精度が高いため、融雪期のダム管理に非常に有用であると考えられる。

### 3.5 定山溪ダムへの適用結果

定山溪ダム流域においては、森林外の範囲で積雪調査が行われていない。標高帯の面積に占める森林植生の割合は標高帯が900m-1000mにおいて60%を下回ったため、標高950mにおける積雪深及び積雪相当水量を地上開度80°における値として、式(5)及び式(6)を作成した。積雪分布の補正には、積雪調査の結果を用いて標高と積雪深(積雪相当水量)との間の線形の関係式を作成し、この関係を用いて補正することが一般的であるため、比較対象として、この方法により積雪分布を補正した計算を併せて行った(以降、標高法と表記する)。

2002年～2012年の10融雪期について、定山溪ダムの

ダム流入量を計算した結果から求めたNash-Sutcliffe 指標、相対誤差及び流出ボリューム誤差を表-6に示す。評価期間は各年の積雪調査日の翌日からモデルにより計算された消雪日の前日（概ね毎年3月上旬頃から6月上旬頃）までである。表-6を見ると、どの指標についても本手法の精度が平均的に高い。また、補正無しの場合でも比較的高い精度でダム流入量が計算されているものの、2005年や2008年のように計算精度が極端に低い年が存在し、精度が安定していない。本手法及び標高法の精度は安定して高く、積雪調査の結果を用いて積雪分布を補正した効果が現れている。次に、流出ボリューム誤差を見ると、標高法では負になっている年が多く、ダム流入量を過大に計算する傾向が見られる。なお、定山溪ダムにおける計算の際、積雪に対して倍率を作用させたケースの計算は行っていない。定山溪ダムは、積雪調査結果を用いた積雪包蔵水量の推定精度が高い<sup>13)</sup>ダムであり、倍率を作用させなくても積雪分布を精度良く補正できたと考えられる。

次に、図-22に本手法のNash-Sutcliffe 指標が最も高い2006年融雪期のダム流入量を示す。2006年融雪期は図に示した3手法とも高い精度でダム流入量を計算しており、5月中旬にかけては、各手法の計算結果にほとんど差が見られない。一方で、5月中旬以降は、手法間で計算結果に差が見られる。融雪中期以降の計算結果に差が見られる点は、忠別ダムと同様である。具体的には、補正無しの場合はダム流入量を過小計算、標高法は過大計算しているのに対し、本手法は精度良く流入量を計算している。一般的に、標高が高くなるに伴い積雪量は増加するが、森林限界を超えると、風により積雪が飛ばされやすくなるため、積雪量は森林限界付近において頭打ちとなる（図-18）。しかし、標高法を用いた場合は、森林限界を超えた範囲に対しても、標高が高くなるに伴い積雪量が大きく補正される。このことが、標高法を用いた場合にダム流入量を過大計算した要因と考えられる。一方で、本手法は森林内外に分けて積雪量を補正しているため、森林限界付近において積雪量が頭打ちになる性質が考慮される。さらに、森林外の積雪分布の特徴を踏まえ、地上開度をを用いた補正を行っている。このことが本手法の計算精度が高い要因と考えられる。また、森林外における積雪分布の補正は、忠別ダムにおいて行った航空レーザー測量の結果を分析した結果を基にした手法を用いたが、森林外の積雪量の影響が大きい融雪後期のダム流入量を精度良く計算できたことから、同手法は概ね妥当であったと考えられる。

### 3.6 豊平峡ダムへの適用結果

豊平峡ダム流域においては、森林外の範囲で積雪調査が行われていない。標高帯の面積に占める森林植生の割合は標高帯が800m-900mにおいて60%を若干下回ったが、近傍に位置する定山溪ダム流域の例を考慮し、標高950mにおける積雪深及び積雪相当水量を地上開度80°における値として、式(5)及び式(6)を作成した。積雪に作用させる倍率は、0.75、1.25及び1.5とした。標高法による計算も併せて行った。

2002年～2012年の10融雪期について、豊平峡ダムのダム流入量を計算した結果から求めたNash-Sutcliffe 指標を表-7に示す。本手法の欄には最もNash-Sutcliffe 指標が高い結果が得られた倍率による結果を示す。評価期間は各年の積雪調査日の翌日からモデルで計算された消雪日の前日（概ね毎年3月上旬頃から6月上旬頃）までである。また、豊平峡ダムは、薄別ダムからの流域外流入があるため、これを考慮している。なお、2004年融雪期は観測データに長期の欠測があったことから評価の対象外とする。表-7を見ると、どの指標についても本手法の精度が平均的に高い。本手法及び標高法の精度は安定して高く、積雪調査の結果を用いて積雪分布を補正した効果が現れている。本手法及び標高法の精度は概ね同等であるが、2006年のように本手法の適用により大きく精度が向上した年が見られる。倍率をみると、倍率を作用させたケースの精度が最も良い年が存在しており、豊平峡ダムにおいても、倍率を作用させて複数のケースを同時に計算することにより、計算精度の低下を回避できることが確認された。また、流出ボリューム誤差を見ると、本手法の誤差が最も小さく、本手法を用いた積雪分布の補正により、融雪開始時の積雪包蔵水量の計算精度が向上していると考えられる。

図-23には、本手法の適用により、補正無しの場合と比較して最もNash-Sutcliffe 指標が改善した2006年融雪期を例として、ダム流入量を示した。図を見ると、融雪初期から5月中旬までは、補正無し、標高法、本手法との間に大きな差が見られず、標高の高い範囲が融雪の中心となる5月中旬以降の計算結果に差が現れている点は、忠別ダム及び定山溪ダムと同様である。5月中旬以降のダム流入量の計算結果から類推すると、この時期は流域の中から高標高帯が融雪の中心であることから、いずれのケースにおいてもこの標高帯における積雪量を過小評価していること、過小評価の度合いが補正無し、標高法、本手法(1.5倍)の順に小さくなっていることが考えられる。定山溪ダムの計算結果を考察した際に述べたが、一



表-7 ダム流入量の計算誤差 (豊平峡ダム)

	Nash-Sutcliffe 指標			相対誤差			流出ボリューム誤差			本手法の倍率
	本手法	補正無し	標高法	本手法	補正無し	標高法	本手法	補正無し	標高法	
2003	0.80	0.65	0.80	0.35	0.46	0.36	-0.08	0.16	-0.03	1.25
2004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2005	0.90	0.68	0.85	0.28	0.38	0.32	-0.06	0.16	0.03	1.5
2006	0.82	0.45	0.69	0.28	0.39	0.33	0.01	0.30	0.14	1.5
2007	0.84	0.64	0.82	0.68	0.86	0.73	-0.25	0.05	-0.15	1.5
2008	0.49	0.46	0.52	0.65	0.67	0.67	-0.22	-0.23	-0.35	1.0
2009	0.71	0.64	0.67	0.55	0.59	0.52	-0.14	0.00	-0.21	1.0
2010	0.89	0.43	0.84	0.22	0.35	0.26	0.04	0.34	0.10	1.5
2011	0.69	0.65	0.67	0.29	0.32	0.28	-0.11	-0.05	-0.18	0.75
2012	0.93	0.89	0.93	0.44	0.41	0.43	0.01	0.23	0.01	1.25
平均	0.79	0.61	0.75	0.41	0.49	0.43	0.10	0.17	0.14	

※流出ボリュームの平均は、各年の絶対値の平均値である。

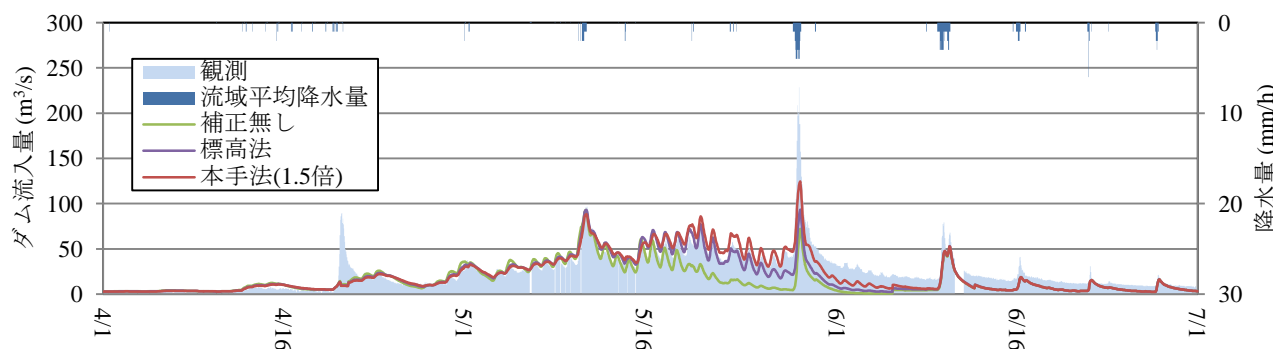


図-23 ダム流入量 (豊平峡ダム・2006年融雪期)

般に、積雪量は森林限界付近の標高帯において頭打ちとなるため、積雪調査により標高と積雪量との関係が精度良く求められている場合、標高法を用いて積雪量を補正すると、森林外における積雪量が過大に補正され、結果としてダム流入量が過大に計算されるはずである。図-23がこのような結果となっていない要因として、積雪調査の結果より作成した積雪分布の推定式の精度が低いことが考えられる。この場合、積雪調査地点の見直しを行い、推定式の精度を上げることが必要と考えられるが、山間部は冬季の立ち入りが困難な場所が多く、見直しが困難な場合がある。このため、本手法のように、積雪調査結果から作成した式に対して倍率を作用させ、精度が低くなることを回避することは、現実的な対応の一つと考えられる。

最後に、本手法には、融雪・流出モデルの各メッシュの森林内外の判定方法、積雪調査が行われていない場合の森林外の積雪分布の推定方法、積雪に作用させる倍率といった、これまでの研究成果を踏まえて経験的に設定している点がある。ダム管理の現場に導入する際は、これらの点について試行錯誤することにより、さらにダム流入量の計算精度をさらに高められる可能性がある。例えば、豊平峡ダムの2006年融雪期については、倍率を1.75とすることによって、Nash-Sutcliffe 指標 = 0.84 まで

ダム流入量の計算精度を高めることが可能であった。

#### 4. 積雪・融雪の長期トレンド解析手法開発<sup>20), 21)</sup>

##### 4.1 対象ダム

積雪寒冷地に位置するダムを対象に、気候変動による流域の積雪・融雪状況の長期トレンドの変化を解析する。対象としたダムは豊平峡ダム及び定山溪ダムである。ダムの目的は両ダムとも洪水調節、水道及び発電であり、札幌市の治水・利水にとって非常に重要な施設である。気象・水文観測は、図に示したそれぞれのダム管理所地点、積雪深連続観測地点及び積雪調査地点において行われており、これらのデータを気候変動モデルデータのバイアス補正及びメッシュデータの作成に用いる。

##### 4.2 気候変動モデルデータ NHRCM5 の概要

気象庁が提供している気候変動モデルデータ NHRCM5 は、温室効果ガス排出シナリオ SRES A1B に基づく日本の気候変化予測結果である<sup>22)</sup>。SRES A1B は、21世紀半ばまで温室効果ガス排出量が増加し、ピークを迎えた後、緩やかに減少する経過をたどるもので、中程度の温室効果ガス排出シナリオである。これは、IPCC 第5次報告における温室効果ガス排出シナリオ RCP6.0 に相当する<sup>23)</sup>。NHRCM5 の特徴は、水平解像度が5km

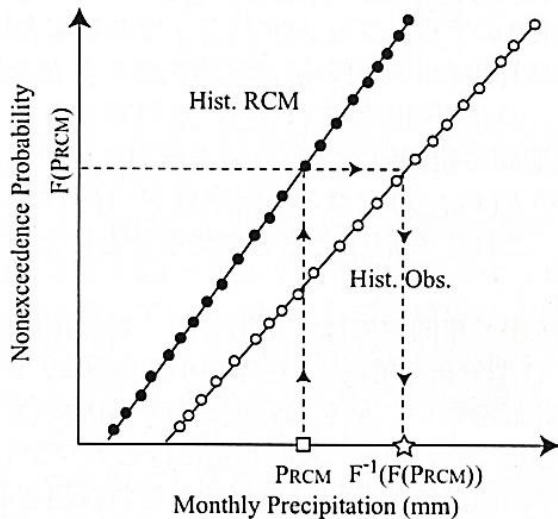


図-24 バイアス補正手法の概念図<sup>24)</sup>

であり地形の影響をより現実に近い状況で予測計算に反映させていること、支配方程式に非静力学方程式が用いられていること、特別値が提供されていること等が挙げられる。同データの計算対象としている年代は、現在気候が1980年から1999年、将来気候が2076年から2095年のそれぞれ20年間である。

#### 4.3 バイアス補正の方法

バイアス補正は、藤原ら<sup>24)</sup>の方法を用いた。これは、月降水量、月平均気温といった月単位での確率分布が保存されるように気候変動モデルデータを補正する方法である。月降水量を例として、バイアス補正手法の概念を図-24に示し、補正方法を以下に示す<sup>24)</sup>。

- ・ 現在気候におけるNHRCM5のデータ及び同期間のダム管理所における観測値を用い、月毎に月降水量の非超過確率をそれぞれ求める。
- ・ NHRCM5の値が $P_{RCM}$ である場合は、現在気候のNHRCM5の値で定めた確率分布を用いて、 $P_{RCM}$ の非超過確率 $F(P_{RCM})$ を求める。
- ・ 現在気候の観測値で定めた確率分布を用いて、非超過確率が $F(P_{RCM})$ となる月降水量 $F^{-1}(F(P_{RCM}))$ を算出し、これを $P_{RCM}$ と置き換えることにより補正を行う。

確率分布は、正規分布、対数正規分布、ピアソンⅢ型分布、2母数ガンマ分布に対して、標準最小二乗基準(SLSC)<sup>25)</sup>による適合度評価を行い、月毎に最も適合度が高い分布を採用した。なお、各確率分布の母数は、積率法を用いて推定している。

対象とした気象要素は、融雪・流出モデルを用いたダム流入量の計算に必要な、気温、比湿、風速、日射量、

地上気圧、降水量、降雪深である。このうち、降雪深は日別値、これ以外は特別値である。なお、要素によっては、バイアス補正の際に、換算を行っている。詳細を以下に述べる。気温は、気温減率 $6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ を用いて、標高0mの気温に換算した値をバイアス補正した。地上気圧は、気象観測の手引き<sup>26)</sup>に示されている方法を用いて、海面気圧に換算した値をバイアス補正した。降雪深は次のように求めた値を用いた。気候変動モデルの降雪深は、日最深積雪深の差とした。観測値の降雪深は、ダム管理所における積雪深の観測が毎日9:00のみであったため、毎日9:00の積雪深と前日9:00の積雪深の差とした。なお、融雪・流出モデルによる計算には、日照時間が必要となるが、日照時間は上限値(1.0)を持つ値であるため、前述した手法でバイアス補正を行うと、日照時間の上限値が1.0を超える値になる可能性や、1.0を下回る値で頭打ちとなる可能性がある。このため、日照時間は直接バイアス補正せず、日射量を用いて計算することとした。詳細は4.4に示す。

バイアス補正量は月毎に求められ、気温については差を、これ以外の要素については比を補正量とした。月毎の補正量をその月に含まれる全データに作用させる。

#### 4.4 メッシュデータの作成方法

後述する融雪・流出モデルを用いたダム流入量の計算には、1kmメッシュのデータが必要である。このため、気候変動モデルデータのうち、ダム流域の流域界から概ね5km以内に位置するデータをバイアス補正し、このデータを空間補間して1kmメッシュのデータを作成した。空間補間の方法はKriging法である。いくつかの要素は、4.3で述べた通り、換算した値をバイアス補正したため、1kmメッシュデータ作成の際に再度換算した。気温は1kmメッシュの標高を用いて標高補正した。海面気圧は1kmメッシュの標高及び気温を用いて現地気圧に換算した。また、融雪・流出モデルによる計算には相対湿度が必要であるため、1kmメッシュの比湿及び気温を用いて相対湿度を計算した。

日照時間は以下のように求めた。はじめに、定山溪ダム管理所地点の観測データを用いて、1時間当たりの大気上端の日射量と観測された日射量の比、可照時間(=1.0)と観測された日照時間の比の関係を整理する。図-25に結果を示す。日射量の観測値と大気上端の日射量の比、日照時間と可照時間の比は、概ね線形の関係にあると考えられる。そこで、日射量と日照時間の関係に式(7)を当てはめ、日射量から日照時間を計算した。

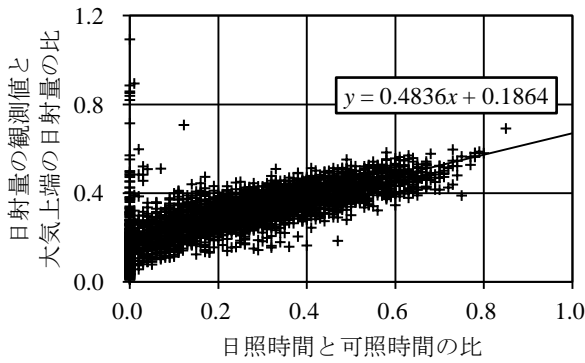


図-25 日照時間と日射量の関係

$$\frac{s}{s_0} = a \left( \frac{N}{N_0} \right) + b \quad (7)$$

ここで、 $S$  : 日射量の観測値、 $S_0$  : 大気上端における日射量、 $N$  : 日照時間、 $N_0$  : 可照時間(=1.0)、 $a$ 及び $b$  : 回帰係数である。大気上端における日射量の計算方法は、近藤ら<sup>18)</sup>の文献を参照されたい。回帰係数は、図-25に示した通り、 $a = 0.4836$ 、 $b = 0.1864$ と求まった。

#### 4.5 メッシュデータの作成結果

本研究では、1kmメッシュデータを作成した各要素の誤差要因等を詳細に追求することはせず、作成したデータを融雪・流出モデルに入力して計算したダム流入量が、融雪期におけるダム流入量の観測値を再現できるかどうかをもって、1kmメッシュ化の適否を判断した。

融雪期におけるダム流入量の計算は、白谷ら<sup>17)</sup>が開発した融雪・流出モデルを用いた。このモデルは、本研究が対象とする豊平峡ダム及び定山溪ダムにおける融雪期のダム流入量を精度良く計算できることが確認されている<sup>17)</sup>。作成した1kmメッシュデータを用いて豊平峡ダム及び定山溪ダムのダム流入量を計算した結果をそれぞれ図-26及び図-27の+印で示す。図に示したダム流入量は、旬合計値の平均値であり、豊平峡ダムは1981年からの20融雪期の平均、定山溪ダムは供用が1989年であることから、必要なデータが揃っている1991年からの10融雪期の平均とした。図を見ると、4月中旬までは観測値と計算値が概ね一致しているが、4月中旬以降は計算値が過小となっている。豊平峡ダム及び定山溪ダムにおける4月下旬以降の時期は融雪中期以降に当たることから、この時期に融雪の中心となる、流域内の標高が高い範囲の積雪が過小であることが原因と推察される。このため、降雪深に対して、川村ら<sup>27)</sup>の方法を参考に、標高をパラ

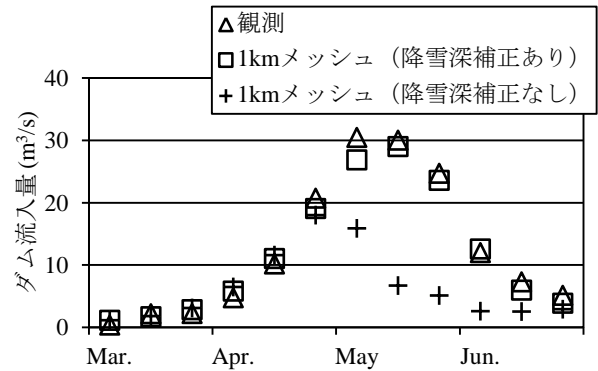


図-26 ダム流入量の検証結果 (豊平峡ダム)

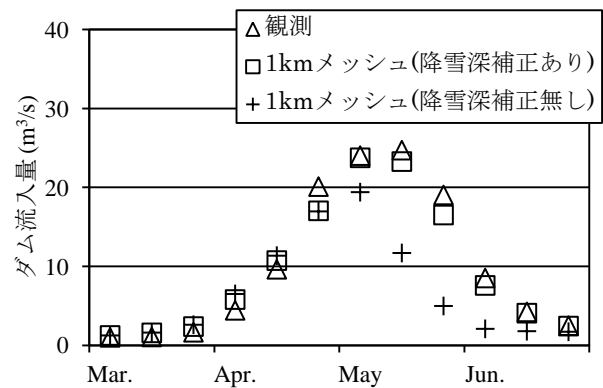


図-27 ダム流入量の検証結果 (定山溪ダム)

メタとして更なる補正を行った。

山間部の森林内における標高と積雪の関係に関しては、日本各地における積雪調査の結果から多くの報告がなされている(例えば山田ら<sup>1)</sup>)。これらによると、森林内における積雪深(積雪相当水量)は標高の増加とともに線形に増加することが示されている。さらに、この線形式の傾きについては、毎年異なること、一冬においても積雪期から融雪期にかけて大きくなること示されている。積雪期において直線式の傾きが大きくなる要因は、標高が高くなるに伴い、降雪深が大きくなることが原因と考えられる<sup>1)</sup>。一方で、融雪期において直線式の傾きが大きくなる要因は、融雪期には、気温の高い標高の低い範囲において融雪による積雪量の減少、気温の低い標高の高い範囲において積雪による積雪量の増加が起こることが原因である<sup>1)</sup>。本研究では、簡便のため、積雪調査及び積雪深の連続観測の結果を用いて、対象とした両ダム流域における平均的な直線式の傾きを特定し、これを基に降雪深を補正することとした。なお、積雪調査及び積雪深の連続観測地点は、風の弱い森林内に位置していることから、地表面に堆積した降雪は風により移動しづらく、積雪深は概ね降雪深に対応していると考えられる。

豊平峡ダム流域では、図-16 に示したダム管理所地点及び▲で示した大二股地点において連続観測されている積雪深を用いて、降雪深を補正する。一般的に、標高が高くなるに伴い積雪深は大きくなるが、1月～3月にかけての2地点の日積雪深と標高差から、この2地点においては、標高が100m増加するに伴い積雪深が平均で25.1cm増加し、この標準偏差は14.1cmであった。そこで、式(8)を用いて各メッシュの降雪深を補正した。

$$sf = sf_b(1 + ax_{dif}) \quad (8)$$

ここで、 $sf$ ：補正後の各メッシュの降雪深(m)、 $sf_b$ ：補正前の各メッシュの降雪深(m)、 $x_{dif}$ ：各メッシュとダム管理所地点の標高差(m)である。 $a$ は標高1m当たりの積雪深増加量であり、観測値の平均値及び標準偏差を参考に、試行錯誤的に0.001から0.004の間で変化させた。

定山溪ダム流域では、図-15の●で示した地点において、毎年3月に積雪調査が行われている。1990年から2000年の間に行われた積雪調査の全データを用いて、標高と積雪深との関係を直線回帰分析すると、標高が100m上がるに伴い、積雪深が16cm増加する傾向が見られた。そこで、式(9)を用いて1kmメッシュの降雪深を補正した。

$$sf = sf_b(1 + 0.0016x_{dif}) \quad (9)$$

なお、式(8)及び式(9)を用いて補正した降雪深は、標高が高くなるに伴い大きくなるため、積雪期において標高と積雪深との間の直線の傾きが大きくなる特徴は考慮される。さらに、融雪期における直線式の傾きの変化は、1kmメッシュデータを作成する際にメッシュの標高を用いて気温を標高補正していること、融雪・流出モデルにおいては、補正した気温を用いて、メッシュ毎に雨雪判定、積雪量もしくは融雪量の計算を行っていることから、モデルの計算の中で考慮されている。

式(8)及び式(9)を用いて1kmメッシュの降雪深を補正し、融雪・流出モデルを用いてダム流入量を計算した結果を図-26及び図-27の□で示す。図-26の豊平峡ダムに関しては、 $a = 0.0035$ とした場合の計算結果である。図を見ると、降雪深を補正することにより、4月下旬以降の計算値が改善し、観測値と概ね一致した。これより、バイアス補正、1kmメッシュ化及び降雪深の補正が適切になされていると判断した。

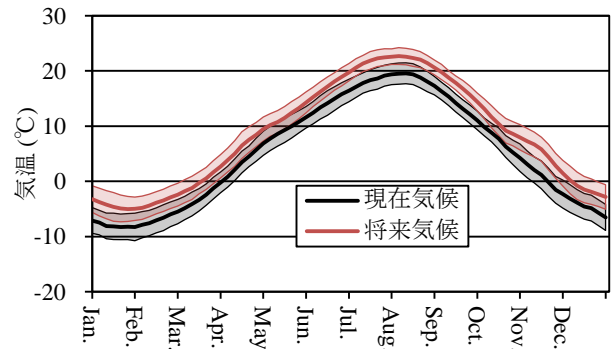


図-28 気温の将来変化 (豊平峡ダム)

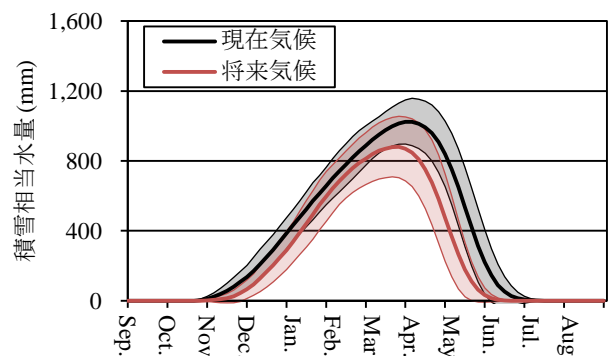


図-29 積雪層包蔵水量の将来変化 (豊平峡ダム)

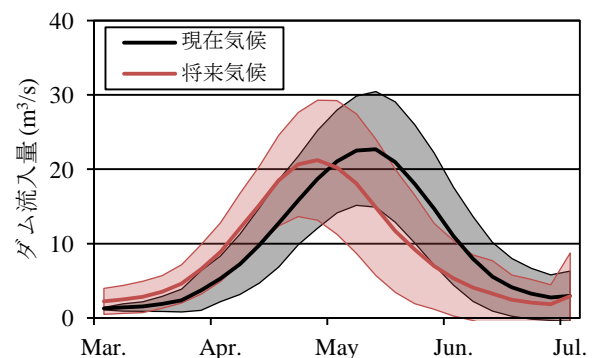


図-30 ダム流入量の将来変化 (豊平峡ダム)

## 4.6 融雪期における気候変動の影響

### 4.6.1 豊平峡ダム

4.5までに示した方法を用いて、将来気候のデータをバイアス補正、1kmメッシュ化及び降雪深の補正を行い、このデータを融雪・流出モデルに入力して、将来気候における積雪包蔵水量やダム流入量といった諸量を計算する。これらを同様の方法で作成した現在気候のデータを用いて計算した諸量と比較し、融雪期における気候変動の影響について考察する。

はじめに、図-28にダム管理所に最も近いメッシュにおける気温の将来変化を示す。図中の折線は通年半年平均値、陰影は年々変動の標準偏差を示し、5半旬で平滑



化している。現在気候データ、将来気候データともに、対象期間が20年であることから、サンプル数はそれぞれ20である。標準偏差はサンプルが正規分布であることを仮定して計算しており、平均値±標準偏差に含まれる現象(図の陰影で示した範囲)の出現確率は約68%となることから、この範囲に含まれる現象は「発生しやすい現象」と捉えることができる。図を見ると、年間を通して将来の平均気温は上昇し、冬季における気温上昇は3°Cから4°Cである。この結果は、気象庁の地球温暖化情報第8巻に示された、北日本の気温変化と一致している。

次に、ダム流域の積雪包蔵水量を計算した結果を図-29に示す。データ整理の方法は図-28と同様である。ここで、積雪包蔵水量とは、ダム流域全体における積雪相当水量の合計である。図を見ると、将来気候における積雪包蔵水量は、現在気候と比較して平均的に減少している。一方で標準偏差を見ると、現在気候と比較して、将来気候において変動幅が大きくなっている。具体的にどのような現象が起こるか想定すると、将来気候においては、現在気候における平均的な年と同等の積雪包蔵水量となる年が出現しやすい一方で、現在気候における平均的な年の2/3程度の積雪包蔵水量にしか達しない年が出現しやすくなる可能性があることを示している。また、積雪包蔵水量がピークを記録する時期は、現在気候においては4月上旬頃であるのに対し、将来気候においては3月下旬頃となっており、将来気候ではピークを記録する時期が半月程度早まっている。また、初冬の積雪包蔵水量が観測される時期が遅くなり、春先の積雪包蔵水量が0となる時期が早くなっており、根雪の期間が短くなっている。これらの傾向は、気象庁の地球温暖化情報第8巻に示された、北日本の積雪変化と一致している。

最後に、融雪期におけるダム流入量を計算した結果を図-30に示す。データ整理の方法は図-28と同様である。平均的な傾向を見ると、積雪包蔵水量の変化を反映して、将来気候におけるダム流入量は減少し、ピークを記録する時期が早くなっている。標準偏差を見ると、将来気候において、ピーク流量を記録した後に変動幅が大きくなる傾向が見られる。

#### 4.6.2 定山溪ダム

ここからは、定山溪ダムに対する結果を示す。各図を作成するにあたってのデータ整理の方法は、豊平峡ダムの場合と同様である。

はじめに、図-31にダム管理所に最も近いメッシュにおける気温の将来変化を示す。図を見ると、年間を通し

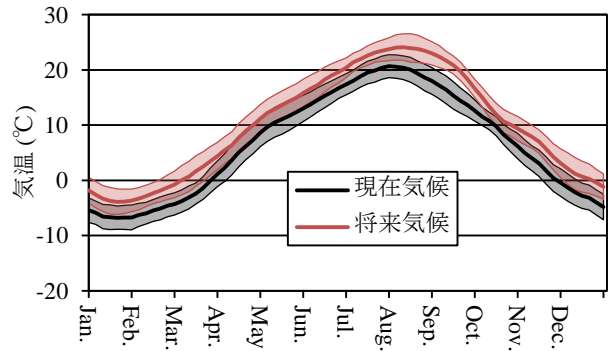


図-31 気温の将来変化(定山溪ダム)

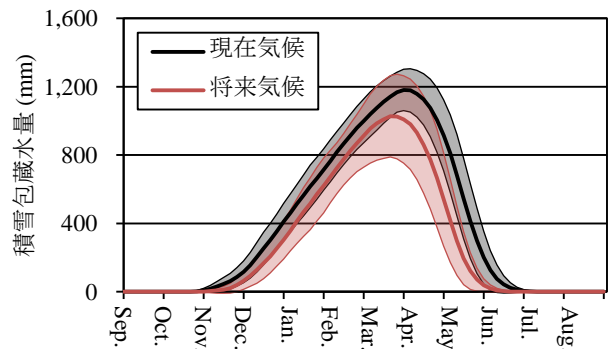


図-32 積雪層包蔵水量の将来変化(定山溪ダム)

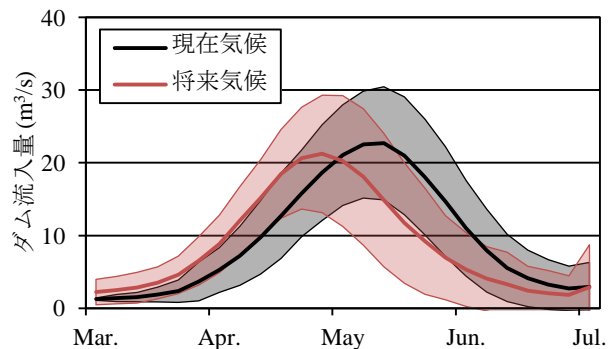


図-33 ダム流入量の将来変化(定山溪ダム)

て将来の平均気温は上昇し、冬季における気温上昇は3°Cから4°Cである。

次に、ダム流域の積雪包蔵水量を計算した結果を図-32に示す。図を見ると、将来気候における積雪包蔵水量は、現在気候と比較して平均的に減少している。一方で標準偏差を見ると、現在気候と比較して、将来気候において変動の幅が大きくなっている。具体的にどのような現象が起こるか想定すると、将来気候においては、現在気候における多雪年と同等の積雪包蔵水量となる年が出現しやすい一方で、現在気候における平均的な年の2/3程度の積雪包蔵水量にしか達しない年が出現しやすくなる可能性があることを示している。また、積雪包蔵水量がピークを記録する時期は、現在気候においては3月下旬

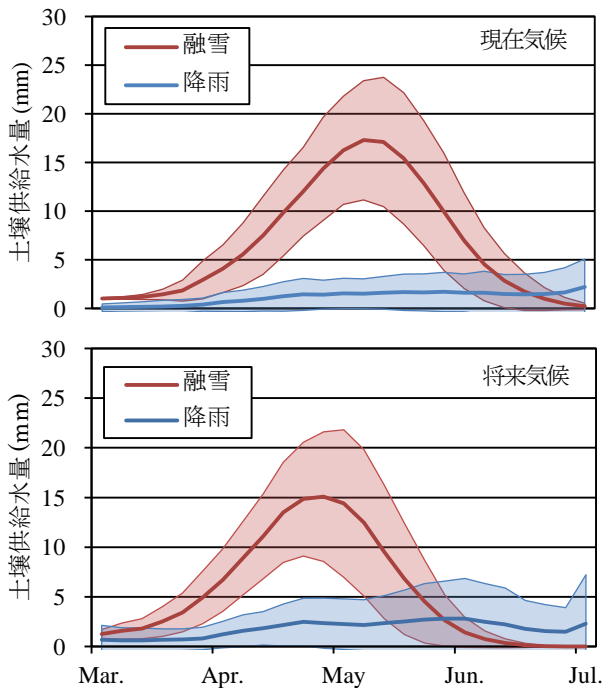


図-34 土壌供給水量の内訳 (定山溪ダム)

旬から4月上旬であるのに対し、将来気候においては3月中旬頃となっており、将来気候ではピークを記録する時期が半月程度早まっている。また、初冬の積雪包蔵水量が観測される時期が遅くなり、春先の積雪包蔵水量が0となる時期が早くなっている。

最後に、融雪・流出モデルを用いてダム流入量を計算した結果を図-33に示す。平均的な傾向を見ると、積雪包蔵水量の変化と同様に、将来気候におけるダム流入量は減少し、ピークを記録する時期が早くなっている。標準偏差を見ると、将来気候においてはピーク流量を記録した後に変動幅が大きくなる傾向が見られる。

ここまで、豊平峡ダム及び定山溪ダムの融雪期における気候変動の影響を示したが、両ダムが近傍に位置するため、同一の傾向が見られた。しかし、積雪包蔵水量に関しては、豊平峡ダムにおいては現在の平均的な年と同等の積雪包蔵水量となる年が出現しやすい一方で、定山溪ダムにおいては現在の多雪年と同等の積雪包蔵水量となる年が出現しやすいといった差が見られた。

#### 4.6.3 気候変動が融雪期においてダムに与える影響

両ダムに共通して見られた傾向の一つに、融雪期におけるダム流入量がピークを記録した後に、流入量の変動幅が大きくなることが挙げられる。この要因を分析するため、定山溪ダムを対象に、融雪・流出モデルにより計算される土壌供給水量を、融雪に由来する量と降雨に由来する量に分け、それぞれの平均値及び標準偏差を求め

ることとした。ここで、土壌供給水量とは、積雪表面において発生した融雪水及び降水が積雪層を通過し、積雪底面から土壌に供給される水量であり、流出モデルの入力値となる値である。結果を図-34に示す。データ整理の方法は図-28と同様である。融雪に関して現在気候と将来気候を比較すると、平均値やピークを記録する時期に差があるもののピークを記録した後の標準偏差に大きな違いは見られない。一方、降雨に関しては、現在気候と比較して将来気候の土壌供給水量が平均的に大きく、現在気候においては変動幅が徐々に上昇するのに対し、将来気候においては変動幅が急激に上昇している。特に、5月から6月にかけての標準偏差は現在気候の約1.5倍から1.8倍となっている。これは、将来気候においては、現在気候と比較して融雪期に強雨が発生する可能性が高まることを示している。融雪期に強い降雨が発生した場合、融雪と降雨が相まって、大規模な出水となる可能性がある。

しかし、融雪期においては、融雪水を貯留するためにダムの貯水位を下げていることから、融雪後期のような貯水位が高い時期の降雨を除き、基本的に洪水調節をする必要はない。そこで、ダムの貯水率が80%を超えている際に、洪水流量に達した回数を求め、現在気候及び将来気候の比較を行うこととした。このためには、ダムの貯水位を計算する必要がある。定山溪ダムの現在の運用を概説すると、融雪が始まる前に融雪水を貯留する容量を確保するため、発電最低水位である344.9mまで水位を下げた。その後、毎年5月1日に344.9m、6月1日に377.2m、7月11日に381.5mといった水道用水の供給のために確保すべき水位(以降、「確保水位」という)定められているため、これらを目指して融雪水を貯留していく。また、最大で $10\text{m}^3/\text{s}$ の発電放流が設定されているため、流入量が少ない融雪初期は全量を発電放流に当て、本格的な融雪が始まり、概ね $8\text{m}^3/\text{s}$ 以上の流入がある場合には、 $8\text{m}^3/\text{s}$ から $10\text{m}^3/\text{s}$ を発電放流している。このような現在のダムの運用を踏まえ、以下に示す簡単な操作ルールを設定し、ダムの貯水位を計算した。

- ・ 3月1日における貯水位を発電最低水位とする。
- ・ 洪水調節はしない。
- ・ 過去の実績を基に、発電放流の最大量を $8.87\text{m}^3/\text{s}$ とする。流入量が $8.87\text{m}^3/\text{s}$ を下回る場合は、流入の全量を発電放流する。 $8.87\text{m}^3/\text{s}$ を上回る場合は $8.87\text{m}^3/\text{s}$ を発電放流し、残りは貯留する。
- ・ 貯水位が常時満水位(381.50m)に達した段階で計算を終了する。

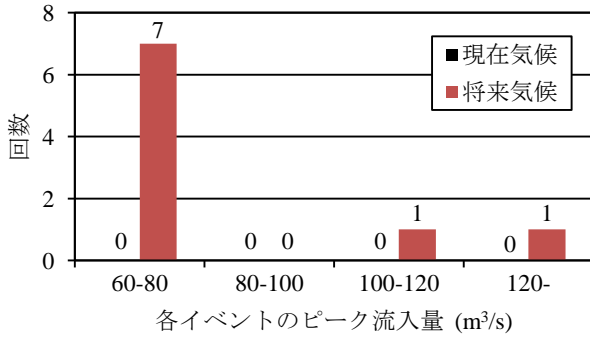


図-35 洪水流量に達した回数 (豊平峡ダム)

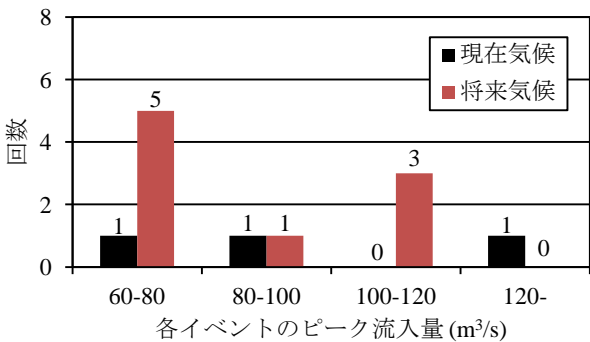


図-36 洪水流量に達した回数 (定山溪ダム)

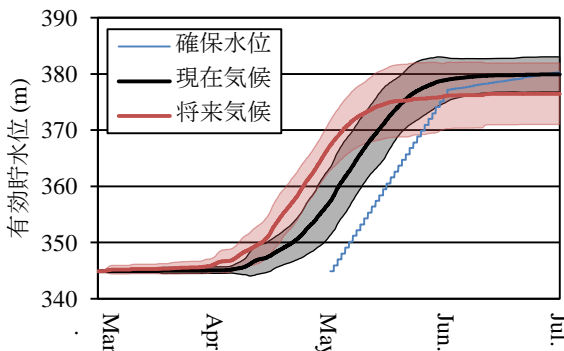


図-37 ダム貯水位の将来変化 (定山溪ダム)

なお、豊平峡ダムにおいても、定山溪ダムと同様の考え方により操作が行われている。豊平峡ダム及び定山溪ダムにおいては、流入量が  $60\text{m}^3/\text{s}$  を超えた場合に洪水流量としている。図-35 及び図-36 に貯水率が 80% を超えている際に、豊平峡ダム及び定山溪ダムにおいて洪水流量に達した回数をそれぞれ示す。横軸は、各イベントにおける最大流入量である。図を見ると、将来気候においては、貯水位が高い状態で、洪水流量に達する回数が増えている。加えて、流入量が  $100\text{m}^3/\text{s}$  を超えるような規模の大きい流入の回数が増えている。豊平峡ダムでは、現在気候において洪水流量に達した回数が 0 回であったのに対し、将来気候においては 9 回であった。このうち 2 回は流入量が  $100\text{m}^3/\text{s}$  を超えていた。

最後に、定山溪ダムを例に、水道用水を確保できるかどうかを検討した。図-37 に貯水位を計算した結果を示す。図の折れ線は、時間単位の貯水位の平均値、陰影は年々変動の標準偏差である。図を見ると、現在気候においては、平均的に確保水位を満足し、変動幅が小さい。一方、将来気候においては、平均的に 6 月以降は確保水位を満足することができていない。さらに、5 月中旬以降に貯水位の変動幅が大きくなり、確保水位を満足する年が出現しやすい一方で、確保水位を大きく下回る年が出現しやすくなる可能性を示している。各月の標準偏差を見ると、融雪後期の 6 月における標準偏差の変化が大きく、現在気候と比較して将来気候の標準偏差が約 1.8 倍となっている。

以上をまとめると、将来気候においては、現在気候と同程度もしくは多い積雪量・融雪量を期待できる年が出現しやすい一方で、十分な積雪量・融雪量を期待できない年が出現しやすくなることが示された。これにより、定山溪ダムにおいては、現在と同様の方法でダムを管理した場合に、必要な貯水量を確保できない年が出現しやすくなる可能性が示された。さらに、将来気候においては降雨の変動幅が大きくなるため、融雪後期の貯水位が高い時期に、強雨が発生する可能性が高まり、融雪と降雨が同時生起する出水が発生する可能性が増加することが示された。このため、将来はダム流域における積雪包蔵水量を正確に把握した上で、日々の融雪及び降水による流入量を精度良く予測し、ダムの操作に反映させるといった、精度の高い水資源管理、確実なダム操作が求められる可能性があると考えられる。

## 5. まとめ

本研究の成果は以下の通りである。

リモートセンシング技術等を活用した積雪・融雪調査手法開発に関しては、

- 1) 二時期の航空レーザ測量より求めた積雪深の空間分布と、標高、傾斜、曲率、斜面方位との関係を分析した。この結果から、森林内におけるこれらの地形因子と積雪深の一般的な関係を示した。
- 2) 1)で得られた関係を基に、標高、傾斜、曲率、斜面方位を考慮して森林内の積雪深を推定する簡易式を示した。
- 3) 2)で示した森林内の積雪深を推定する簡易式と、毎年ダムで実施している積雪調査の結果とテレメータで観測している積雪深を用いて、ダム流域の積雪包蔵水量を簡易に推定する方法を構築した。本手法を用いて、

北海道内の6ダムにおける過去5年間の積雪包蔵水量を推定し、水収支を真値として評価した。

- 4) 3)の結果、積雪調査やテレメータ観測により、複数の標高帯において、積雪深が観測されているダムほど、地形考慮法の適用による推定精度が高い傾向が見られた。この結果は、積雪調査等により、複数の標高帯で積雪深を観測することの重要性を示唆している。また、岩尾内ダムと金山ダムについては、積雪調査地点を減らすことができる可能性を示した。
- 5) 二時期の航空レーザ測量から求めた、森林外における積雪深の空間分布と地上開度との関係を分析した。結果、森林外の積雪深は、地上開度との間に線形の関係があることを明らかにした。
- 6) 忠別ダムの森林外で実施された積雪調査の結果について、調査地点の地上開度と積雪深及び積雪相当水量の間に線形の関係があることを明らかにした。線形回帰式の傾きは、多雪年ほど大きく、少雪年ほど小さい傾向があることを明らかにした。
- 7) 積雪深分布の特徴が異なる森林内と森林外に分けて、ダム流域の積雪包蔵水量を推定する手法を構築した。本手法を用いて忠別ダムの積雪包蔵水量を推定し、水収支を真値として評価した結果、ダム管理の実務で採用されている手法と比較して、精度良く積雪包蔵水量を求めることができた。
- 8) 森林外の積雪深及び積雪相当水量を精度良く推定するには、尾根付近に加えて、地上開度が小さい地点で積雪調査を行う必要があることがわかった。

寒冷地ダムの流水管理を行うための融雪流量推定手法開発に関しては、

- 1) 森林の内外の積雪分布の特徴を反映し、積雪調査結果を用いて積雪分布を補正する手法を組み込んだ、融雪・流出モデルを開発した。森林外において積雪調査が行われていないダムに適用できるような手法を併せて検討した。
- 2) 北海道内の3ダムに適用した結果、融雪期のダム流入量を精度良く計算できた。特に、ダム管理に対して有用である融雪中期から後期にかけての計算精度が向上した。
- 3) 融雪初期に複数の積雪分布のケースを設定することにより、ダム流入量の計算精度が低くなることを回避することが可能であった。

積雪・融雪の長期トレンド解析手法開発に関しては、

- 1) 札幌市に水道用水を供給している定山溪ダムを対象に、気象庁の気候変動モデルデータNHRCH5を用い

て、気候変動の影響を評価する手法を検討した。

- 2) 将来気候においては、積雪量・融雪量の変動幅が大きくなり、現在気候と同程度もしくは多い積雪量・融雪量を期待できる年が出現しやすい一方で、十分な積雪量・融雪量を期待できない年が出現しやすくなることが示された。
- 3) 定山溪ダムにおいては、将来気候において、水道用水に必要な貯水量を確保できない年が出現しやすくなる可能性が示された。
- 4) さらに、融雪後期の貯水位が高い時期に強雨が発生する可能性が高まり、融雪と強雨が同時生起する出水の可能性が高まることが示された。

**謝辞：**本研究にあたり、国土交通省北海道開発局管内の河川事務所及びダム管理所からデータを提供して頂いた。航空レーザ測量を行う際ワカサリゾート(株)旭岳事業部に地上測量の場所を提供して頂いた。気候変動モデルデータNHRCH5は気象庁に提供して頂いた。ここに記して謝意を表する。

## 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, pp.1-12, 1979.
- 2) Approved Summary for Policymakers: IPCC Fifth Assessment Synthesis Report, 2014.
- 3) 日本における気候変動による影響の評価に関する報告と今後の課題について(意見具申): 中央環境審議会, 2015.
- 4) 西原照雅, 中津川誠, 浜本聡: 航空レーザ測量を活用したダム流域の積雪深分布の推定, 河川技術論文集第 18 巻, pp.465-470, 2012.
- 5) 西原照雅, 中津川誠: 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, 水文・水資源学会 2012 年度研究発表会要旨集, pp.10-11, 2012.
- 6) 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), pp.801-828, 1989.
- 7) 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, pp.411-423, 2005.
- 8) 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, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.68, No.4, I\_337-I\_342, 2012.



- 9) 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, pp.165-174, 1985.
- 10) (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.
- 11) 西原照雅, 中津川誠: 航空レーザ測量を活用した森林外の積雪相当水量分布の推定, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.69, No.4, I\_409-I\_414, 2013.
- 12) 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, I\_475-I\_480, 2016.
- 13) 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, pp.26-34, 1999.
- 14) Ohara, N.: A practical formulation of snow surface diffusion by wind for watershed-scale applications, Water Resour. Res., 50, pp.5074-5089, 2014.
- 15) 西原照雅, 中津川誠, 白谷友秀: 森林内外の積雪分布の特徴を組み込んだ融雪・流出モデルの開発, 河川技術論文集第 20 巻, pp.449-454, 2014.
- 16) 西原照雅, 中津川誠, 白谷友秀: 森林内外の積雪分布の特徴を反映した流出モデルの高標高帯に位置するダムへの適用, 水文・水資源学会 2014 年度研究発表会要旨集, pp.224-225, 2014.
- 17) 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, pp.93-104, 2007.
- 18) 近藤純正編著, 水環境の気象学, 朝倉書店, 1994.
- 19) 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推定の試み, 土木学会北海道支部平成 23 年度年次技術研究発表会, B-31, 2012.
- 20) 西原照雅, 渡邊和好: 積雪寒冷地のダムを対象とした融雪期における気候変動の影響に関する一考察, 土木学会論文集 G(環境) Vol.71, No.5, I\_197-I\_203, 2015.
- 21) 西原照雅, 谷瀬敦: 気候変動が積雪寒冷地のダムに与える影響に関する一考察, 水文・水資源学会 2015 年度研究発表会要旨集, pp.256-257, 2015.
- 22) 地球温暖化予測情報第 8 巻: 気象庁, 2013.
- 23) Van Vuuren, D.P. and Carter, T.R.: Climate and socio-economic scenarios for climate change research and assessment: reconciling the new with the old, Climatic Change, volume 122, issue 3, pp. 415-429, 2013.
- 24) 藤原洋一, 大出真理子, 小尻利治, 友杉邦雄, 入江洋樹: 地球温暖化が利根川上流域の水資源に及ぼす影響評価, 水工学論文集, 第 50 巻, pp.367-372, 2006.
- 25) 宝馨, 高棹琢磨: 水文頻度解析における確率分布モデルの評価基準, 土木学会論文集, 第 393 号/II9, 151-160, 1988.
- 26) 気象観測の手引き: 気象庁, 1998.
- 27) 川村一人, 中津川誠, 杉原幸樹: 気候変動による利水への影響を踏まえたダム貯水池群の最適操作に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.68, No.4, I\_477-I\_482, 2012.

## A STUDY ON WATER MANAGEMENT OF THE DAM ADAPTED TO SNOW ACCUMULATION AND SNOW MELTING SITUATION

**Budget** : Grants for operating expenses General account

**Research Period** : FY2011-2015

**Research Team** : Watershed Environmental Engineering Research Team

**Author** : TANISE Atsushi

NISHIHARA Terumasa

MIZUGAKI Shigeru

KASHIWAYA Kazuhisa

**Abstract** : In cold, snowy regions, multi-purpose dams cover water use in summer by storing the influent water generated in spring with the thawing of snow accumulated on mountains in winter. Therefore it is necessary to estimate the snow water equivalents in a dam basin as exactly as possible.

The relationship between snow depth distribution and topography (elevation, slope, curvature and slope aspect) in forests was investigated using a high-resolution digital elevation model (DEM) created from airborne laser scanning. As a result, we found that snow depth in forests can be expressed by a simple formula using topography. Using this relationship, the snow water equivalent estimation model was developed. The model was used to estimate snow water equivalents in six dams, and resulted in the estimates with a higher level of accuracy than those using existing models.

The relationship between snow depth distribution outside forests and topography was investigated using high-resolution digital elevation model (DEM) created from airborne laser scanning. A linear relationship between snow depth outside forests and overground-openness was clarified. A method to estimate snow depths and snow water equivalents outside forests was developed using this linear relationship. Using the method, snow water equivalents in the Chubetsu Dam basin were estimated and resulted in estimates with a higher level of accuracy than those based on existing methods.

Given that snow distributions differ between inside of forest versus outside of forests, we developed a snowmelt runoff model that is able to correct the snow distribution by using observation data from snow survey. This paper reports the results obtained when the model was applied to three dams in Hokkaido, northernmost island of Japan. The accuracy of dam inflow calculation during snowmelt season was higher when proposed method is employed than when no correction is made.

We studied the effects of climate change on the Jozankei Dam during snowmelt season. As results, it is found that fluctuation of the amount of snow and snowmelt water might be increased and heavy rain might be occurred at the last half of snowmelt season in when percentage of storage is high in the future climate.

**Key words** : dam, snow depth distribution, forest line, high elevations, snowmelt, climate change