

積雪重量計を用いた冬季水文観測について

HYDROLOGIC MEASUREMENT USING SNOWCOVER WEIGHTMETER IN WINTER

新目 竜一¹・山下 彰司¹

Ryuuichi SHINME, Shoji YAMASHITA

¹ 正会員 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

Snowmelt runoff is a precious water resource in cold region. However it causes disasters by influence of a warm air and a rainfall in spring. Therefore accurate estimation of snow water equivalent and forecast of snowmelt discharge are vital for river management. We investigated how snow water equivalent changes with time in the Jozankei Dam basin and on the premises of the Ishikari Experiment Laboratory. It was done by continuously monitoring of snowcover weight and snowmelt discharge using snowcover weightmeters and lysimeters. We observed time-lag of snowmelt runoff and excessive snowmelt runoff. It was caused by structure of snowcover layer. We proposed a simple equation for estimation of snow density by multiple linear regression analysis. We estimated snow water equivalent in the Jozankei dam basin by using the equation. The result of estimation is almost satisfactory.

Key Words : snow water equivalent, snow density, snowcover weightmeter

1. はじめに

積雪寒冷地において、融雪水は貴重な水資源であり、一方で、春季には暖気や降雨の影響により融雪洪水を引き起こすといった問題がある。流域内の積雪相当水量を的確に把握し、精度の高い流出量予測を行うことは水資源管理と洪水管理の両面において非常に重要な課題である。

また、1 年間の中で安定的に土砂・栄養塩類等の供給を行っているのも融雪出水であり、物質循環や河川生態系の観点からも重要である。融雪出水は積雪表面で融け

た水が積雪層内を浸透、流下し、地面へ到達し流出に至るのだが、積雪層内の浸透、流下過程は雪質に大きく左右され、流出応答にも大きく影響している。

本研究では、年間の積雪・融雪期間を通して、積雪の密度変化や積雪相当水量を経時的に把握し、融雪機構を把握するため、積雪重量を直接測ることの出来る積雪重量計とライシメータによる融雪量の連続観測結果を報告するものである。

2. 現地観測

現地観測は代表的な積雪寒冷地の北海道札幌市南部の豊平川流域に位置する定山溪ダム観測露場（標高 400m）及び石狩川の河口近くに位置する寒地土木研究所石狩実験場（標高 7m）において実施した。

写真-1 に定山溪ダム観測露場の積雪観測状況を示す。観測項目は表-1 に示す各項目で、積雪重量計による積雪観測とともに、融雪量を計測するためライシメータ（2m×2m）による積雪底面流出量観測を行った。データ収集は平成 18 年 12 月から平成 19 年 5 月にかけて 1 時間毎に行った。

積雪重量の計測に用いた積雪重量計は新潟電機（株）製 MN-301 であり、ステンレス製の薄板扁平容器 2 枚の中に不凍液を充填し、容器内の圧力を圧力センサーで電



写真-1 積雪観測状況(定山溪ダム)

表-1 観測項目一覧

観測項目	計測器名	単位
融雪量	ライシメータ +転倒ます型流量計	mm/hr
積雪重量	積雪重量計	kg/m ²
降水量	雨雪量計	mm/hr
積雪深	積雪深計	cm
気温	温度計	°C
湿度	湿度計	%
風速	風速計	m/s
下向き短波放射	長短波放射計	W/m ²
下向き長波放射		W/m ²
上向き短波放射		W/m ²
上向き長波放射		W/m ²
積雪表面温度	放射温度計	°C

氣的に計測するものであり、一枚あたり1m×2mの大きさで、最大1,999kg/m²まで計測可能となっている。なお、この機器の計測誤差は±10kg/m²である。

3. 積雪表面融雪量の算出

積雪表面での融雪量とライシメータによる積雪底面流出量及び積雪重量変化との関係を把握するため、熱収支法により融雪量を計算した。

積雪表面での熱収支は次式で示される。¹⁾

$$QM = NR - SH - LH + QR \quad (1)$$

ここで、 NR ：放射収支量、 SH ：顕熱伝達量、 LH ：潜熱伝達量、 QR ：雨からの伝達量、 QM ：融雪熱量を表す。融雪熱量 QM は正の時に融雪、負の時に融雪水再凍結を意味する。なお、雪温が0°C未満の場合には、 QM は、積雪層内の貯熱量の変化を表す。なお、積雪中の伝達熱量及び地中伝達熱量は、融雪時期のため積雪温度を一律0°Cとみなせ、地中熱も冷えて小さいことから共に無視した。²⁾

熱収支の各項の計算方法は以下に示される。

$$NR = L^{\downarrow} + S^{\downarrow} - L^{\uparrow} - S^{\uparrow} \quad (2)$$

ここで、 L^{\downarrow} ：下向き長波放射量、 S^{\downarrow} ：下向き短波放射量、 L^{\uparrow} ：上向き長波放射量、 S^{\uparrow} ：上向き短波放射量を表す。

顕熱伝達量 SH 及び潜熱伝達量 LH はバルク法により(3)及び(4)式にて算出した。

$$SH = \rho_a C_p \cdot K_H \cdot (T_s - T) \cdot U \quad (3)$$

$$LH = \rho_a l \cdot K_E \cdot (q_s - q) \cdot U \quad (4)$$

ここで、 T ：気温、 q_s ：積雪表面温度に対する飽和比湿、 Q ：比湿、 U ：風速、 T_s ：積雪表面温度、 $K_H \cdot K_E$ ：無次元バルク数、 ρ_a ：空気密度、 C_p ：空気の比熱、 l ：気化潜熱を表す。

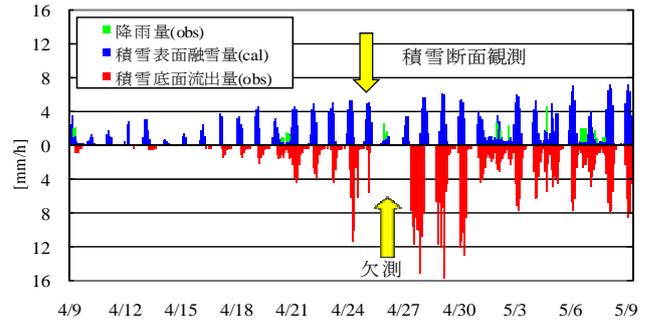


図-1 積雪表面融雪量と積雪底面流出量 (定山溪ダム)

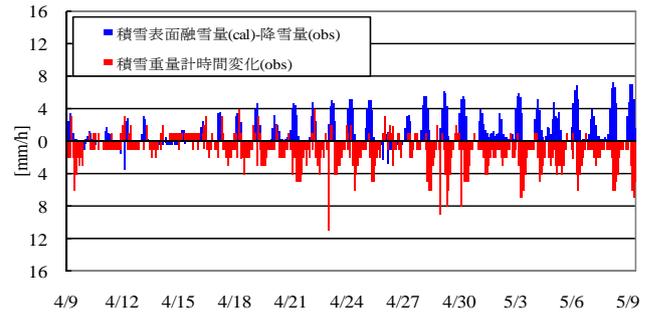


図-2 重量計時間変化と(表面融雪量-降雪量) (定山溪ダム)

雨によってもたらされる熱量は次式により表される。

$$QR = R \cdot C_w \cdot (T_R - 0) / \Delta t \quad (5)$$

ここで、 R ：単位時間 Δt 間の降水量、 T_R ：雨水の温度、 C_w ：雨水の比熱である。

したがって、融雪量 Q は次式により求められる。

$$Q = QM / I_f \cdot \Delta t \quad (6)$$

ここで、 Q ：単位時間当りの融雪量、 I_f ：氷の融解潜熱である。

4. 積雪表面融雪量と積雪底面流出量の関係

(1) 定山溪ダム

定山溪ダムの前章で算出された積雪表面融雪量 Q と現地観測された降雨量及びライシメータによる積雪底面流出量の時系列変化の比較を図-1に、積雪重量計の時間変化(下向き：減少、上向き：増加)と積雪表面融雪量 Q -降雪量(上向き：積雪表面融雪量>降雪量、下向き：積雪表面融雪量<降雪量)の比較を図-2に示す(なお積雪重量の時間変化は、積雪相当水量 mm/h に換算している)。定山溪ダム流域における2007年春季の融雪は4月21日前後の降水と気温上昇により本格的に始まっている。5月1日から5月9日の間は、積雪表面での融雪量と降雨量の和が積雪底面流出量と良く一致しているものの、4月24日から4月30日の間は(4月25日17時か

表-2 積雪断面観測結果 (定山溪ダム)

定山溪ダム		04/25/07	雪質分類		粒 度
高さ (cm)	雪温 (°C)	密 度 (g/cm ³)	厚さ (cm)	雪 質	
81	0.0	0.47			
70	0.0	0.55	13	ざらめ	2-4mm
60	0.0	0.56	10	氷板	
50	0.0	0.54	10	ざらめ	2mm
40	0.0	0.52	6	しまり・ざらめ	1mm
30	0.0	0.49		ざらめ	1mm
20	0.0	0.52	34	ざらめ	1mm
10	0.0	0.50			
0	0.0		8	シャーベット	

ら4月27日19時まで欠測), 積雪底面流出量が極端に多くなっているとともに, 積雪表面融雪との間に時間遅れを生じている。

流出の時間遅れは積雪深や雪質に強く影響を受けると言われるが, 特に積雪層内に形成された氷板や融雪水による水みちの形成などにより流出の集中化を引き起こすと言われている。³⁾

4月25日に実施した積雪断面観測の結果を表-2に示す。高さ68cmの位置に写真-2のスケール2.5cmの付近に薄く白く見える厚さ数mm程度の氷板が確認された。

また, 写真-3に見られるように水みち形成を裏付ける積雪表面の雪エクボが確認された。

こうした氷板の存在や融雪水による水みちの形成が時間遅れやライシメータの集水面積を大きく上回る過大な積雪底面流出を引き起こしている原因のひとつと考えられる。

積雪深観測データでは, 5月1日18時の積雪深は67cmであったことから, 5月1日が氷板消雪日と推定されるが, 以降, 積雪表面融雪量の計算値と積雪底面流出量が良く一致していることから氷板の影響が伺われる。

また, 図-2では, 積雪重量計の時間変化量と積雪表面融雪量-降雪量の比較を描いたものであるが, 時々, 観測雑音のようなものが見られるが, 時間遅れを伴いながら, 概ね良好な対応を示しており, ライシメータが過大値を示していると思われる時も, 良い対応を示しており, 積雪重量計の有効性を示唆するものである。

(2) 石狩実験場

谷瀬ら⁴⁾の報告や図-3に見られるように積雪深と積雪重量(=積雪相当水量)はループを描き, 初冬期と融雪期では同じ積雪深でも積雪重量が異なるヒステリシス現象を呈している。

これが山間地域に特有の現象であるのかを確認するため, 平地部の石狩実験場においても同様の連続観測を実施した。石狩実験場における積雪深と積雪重量の関係を

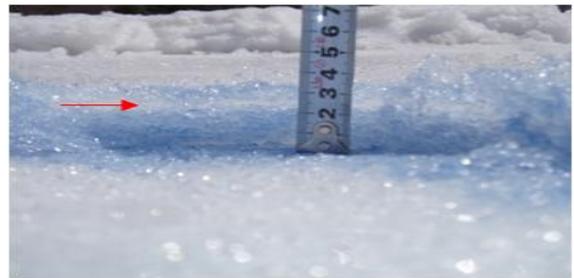


写真-2 積雪層内の氷板層 (定山溪ダム 4/25/07)



写真-3 積雪表面の雪エクボ (定山溪ダム 4/25/07)

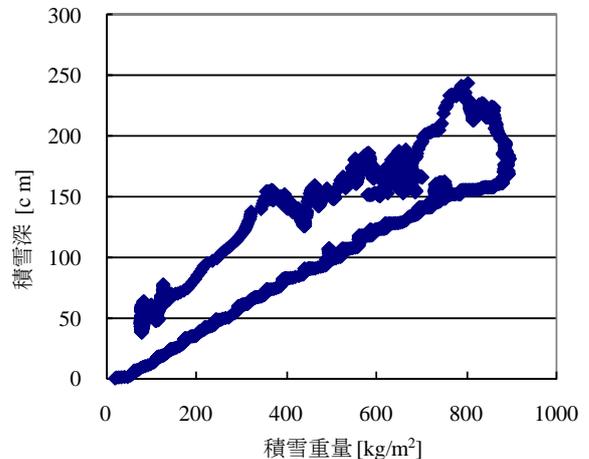


図-3 積雪深と積雪重量の相関 (定山溪ダム)

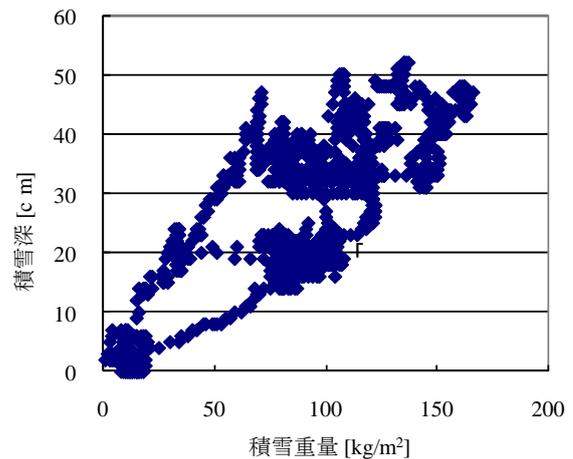


図-4 積雪深と積雪重量の相関 (石狩実験場)

図-4に示す。定山溪ダムと同様に二価性の傾向は伺えるものの, 定山溪ダムに比べて不明瞭であった。

定山溪ダムにおける図-1及び図-2と同様の図を図-5及び図-6に示す。積雪表面融雪量と積雪底面流出量は, 概ね良好な対応を示しているが, 定山溪ダムに比べて融

表-3 積雪断面観測結果 (石狩実験場)

石狩実験場		03/14/07		雪質分類	
高さ (cm)	雪温 (°C)	密度 (g/cm ³)	厚さ (cm)	雪質	粒度
33	0.0	0.28			
32					
30	0.0		8	しまり	0.5mm
28				氷板	
26				ざらめ	2mm
24			2	氷板	
22				ざらめ	2mm
20	0.0	0.45	3	氷板	
18				ざらめ	2mm
16			7	氷板	
14				ざらめ	2mm
12				氷板	
10	0.0		4	ざらめ	2.5mm
8		0.35	1	氷板	
0	0.0		8	ざらめ	2mm

雪が1ヶ月以上早いから、図-7に見られるように気温もかなり低いことから、連続的に融雪が進むのではなく、気温が上昇したときに、断続的に融雪が起きている。積雪水量が少ないこともあるが、その断続的な数日で融雪を終了している。

また図-6の積雪重量計との比較においては、2月26日から3月4日にかけて顕著に見られるように、融雪もなく、また降雨・降雪もないので、本来、重量は変化しないはずであるが、重量変化の増減を繰り返す不自然な挙動を示している。図-7を見ると丁度、気温の寒暖に呼応して変化しているように見える。積雪重量計の設置にあたっては掘削置き換え厚が20cm程度であったため、厚さ不足により凍上の影響を強く受けている可能性が考えられる。

積雪重量計は積雪重量を圧力センサーで電氣的に計測していることから、今後は設置に当り凍上についても十分考慮する必要があると思われる。

表-3に3月14日に実施した積雪断面観測結果を示すが、積雪深33cmの薄さで氷板層が6層も形成された複雑な層構造を呈している。

この原因としていくつか考えられるが、図-7及び図-8の融雪期間の気象変化を見てみると、石狩川の河口付近に位置する石狩実験場は、融雪末期の1ヶ月間の平均風速が3.5m/sと定山溪ダムの平均風速0.9m/sに比べてかなり強いことや、観測期間中には図-7の3月11日に見られるような降雨直後の急激な気温低下という現象が2月下旬にも観測された。

こうした気象条件に起因してウインドクラスト化やレインクラスト化が進行し、氷板へと発達したものと推察される。

定山溪ダム以上に、積雪層内に複数の氷板を有するも

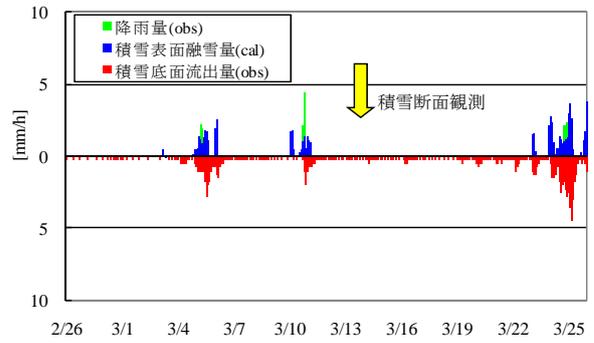


図-5 積雪表面融雪量と積雪底面流出量 (石狩実験場)

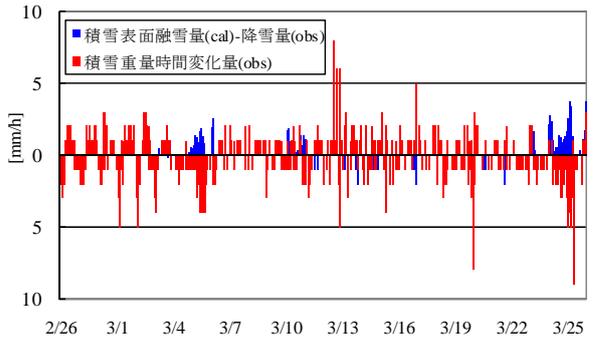


図-6 重量計時間変化と(表面融雪量-降雪量) (石狩実験場)

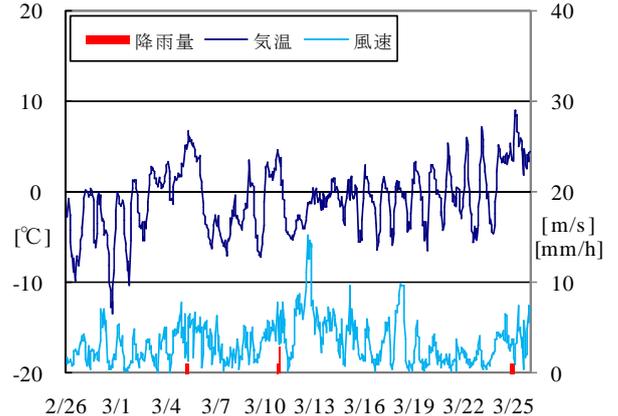


図-7 融雪期の気象変化 (石狩実験場)

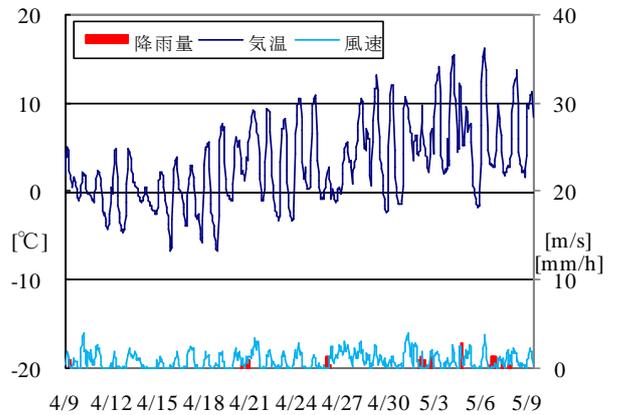


図-8 融雪期の気象変化 (定山溪ダム)

の、定山溪ダムで観測されたような過大な積雪底面流出は観測されず、また水みち形成を裏付ける雪エクボも確認されなかった。

5. 積雪深と積雪密度の推移

積雪重量計により観測された積雪重量と積雪深から算出された積雪密度と積雪深の推移について図-9に示す。

その推移の特徴は、①堆積と圧密過程を繰り返しながらやがて最大積雪深に到達し、②その後は積雪深を減少しながら圧密によってさらに密度を増加させ、③密度500kg/m³前後に到達後はほぼ密度を一定に保ちながら融雪によって積雪深が減少していく。④融雪末期の積雪深50cm前後から積雪深が減少しながら急激に密度を増大させている。

この融雪末期の密度増加は②のように圧密荷重の大ききときとは異なり、融雪が急激に進み、積雪深が減少し、積雪層自体の圧密荷重も減少している中での現象である。

中津川ら⁵⁾による1価の線形貯留関数を用いた積雪層の貯留効果を見込んだ定山溪ダム流域での融雪流出解析によると、積雪深52cm以下になると貯留効果を考慮する必要がなくなったとの報告がある。これは図-9④に見られるように融雪末期には積雪深50cm前後を境に急激に積雪密度が増加しており、ザラメ雪の濡れザラメ雪化が進行し、高含水比状態が起こっているものと推測される。

積雪表面融雪水が積雪層内の水分を押し出し流すために、図-1でも見られるように積雪底面流出の時間遅れが解消されたものと推測される。

6. 定山溪ダム流域の積雪相当水量の推定

積雪相当水量の推定は、流域内の標高の異なる地点を直接調査し、積雪深、積雪重量を計測するスノーサーベイによって行われているが、スノーサーベイは2月から3月にかけての厳冬の厳しい時期の調査で、多大な労力を必要とすることやコスト面から、時間的に連続した観測は一般的に行われていない。

そこで定山溪ダム流域の積雪相当水量の推定を試みた。積雪相当水量の推定を困難にしているものは、積雪密度の推定と積雪深の空間分布推定にあるが、積雪深の空間分布については、工藤ら⁶⁾による当該流域での標高差による積雪深増加率を用いる方法や標高比による帰式を用いるなどの方法が考えられる。

ここでは、積雪深の空間分布について、工藤ら⁶⁾による標高差100m当たりの積雪深増加率0.25を用いる(7)式を用いた。

$$h = h_0 + 0.25(H - H_0) \quad (7)$$

ここで、 H 及び h ：それぞれ求める箇所の標高[m]及び積雪深[m]、 H_0 及び h_0 ：基準となる地点の標高[m]及び

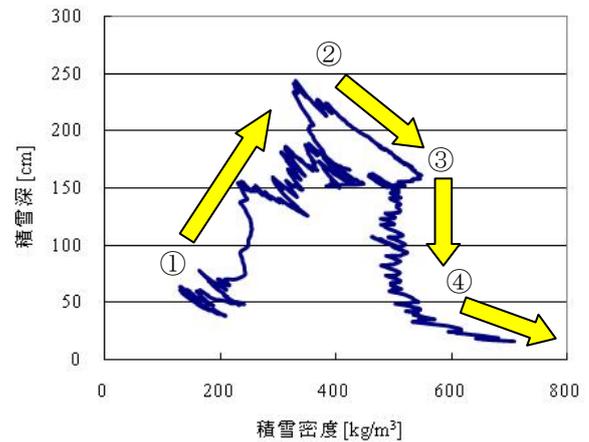


図-9 積雪深—積雪密度変化図(定山溪ダム)

表-4 重回帰係数一覧

α	β	γ	RMSE
15.77	0.11	128.1	31.98



図-10 積雪密度時系列と重回帰による推定積雪密度

積雪深 [m]であり、 h_0 として標高400mを用いた。

次に積雪密度の推定であるが、積雪深に対する積雪重量の二価性を考慮し、次の重回帰式を仮定した。

$$\rho = \alpha h + \beta t + \gamma \quad (8)$$

ここで、 ρ ：積雪密度 [kg/m³]、 h ：積雪深 [m]、 t ：根雪開始からの経過時間 [hour]を表す。

積雪重量と積雪深の連続観測から算出される積雪密度 (M =積雪重量 [kg/m²])、 h =積雪深 [m]で $\rho=M/h$ と積雪深観測結果 h 及び根雪開始からの経過時間 t を用いて、(8)式の α 、 β 、 γ の最適化を行った。

表-4に重回帰係数一覧、図-10に現地観測結果から算出される積雪密度の時系列変化と重回帰式から推定された積雪密度の時系列変化を示す。

降雪に伴う一時的な積雪密度の減少などは再現できないが、徐々に増加する積雪密度の変化傾向は概ね良好に再現できている。

次に定山溪ダム流域内の標高の空間分布を知る必要があるが、ここでは石狩川流域ランドスケープ情報⁷⁾の約

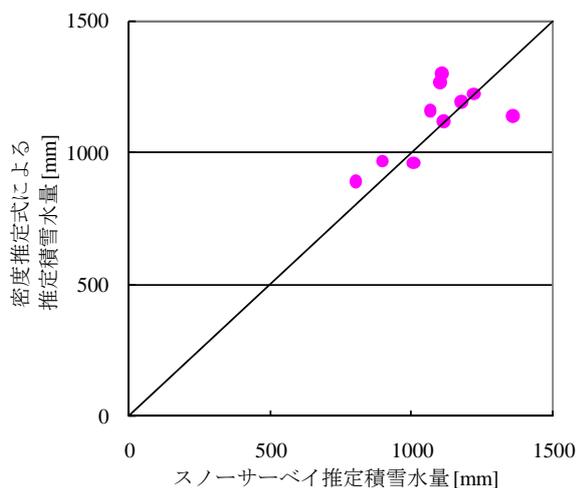


図-11 積雪相当水量の推定結果

1km×1km メッシュのメッシュ毎の平均標高を代表値として用いて、(7)式により標高 400m 地点の各年の積雪深のみを用いてメッシュ毎の積雪深を求め、そのメッシュ毎の積雪深と各年の根雪開始からの経過時間を用いて(8)式によりメッシュ毎の積雪相当水量を求めた。

定山溪ダムが過去 10 年 (1998-2007) に実施したスノーサーベイによる積雪相当水量との比較結果を図-11 に示す。概ねスノーサーベイの結果と良く一致しており、本手法の有効性が確かめられた。

7. おわりに

北海道の降水量の約半分は降雪によるものであり、冬季の積雪量は防災面からは融雪洪水に大きな影響を及ぼし、一方、春先の融雪水を有効利用することで水運用を図っている積雪寒冷地のダムにとって積雪相当水量の把握は利水面においても重要な課題である。

また、河川全体の水循環・物質循環の上でも融雪出水期には土砂・栄養塩類等の運搬の大半がなされており、河川生態系の観点からも非常に重要な時期である。

冬季水文に関する研究は今まで数多く行われてきているが、本研究のように、積雪重量を時系列的に直接連続観測した例は少ない。

今回の調査において、定山溪ダムでは積雪重量変化やあるいは熱収支計算から算出される融雪量を大きく上回る積雪底面流出が観測された。

この原因としては積雪層内に形成された氷板の存在と水みち形成の影響により、氷板上の広範囲の融雪水が水みちを通じて供給された結果と思われる。また氷板が融けたと推定される 5 月 1 日以降そうした現象は見られなかった。

一方、石狩実験場では氷板が 6 層形成されているものの、そうした現象は見られなかった。これらの違いは、氷板の存在のみだけでなく、水みち形成の有無が大きく関係しているものと考えられ、定山溪ダムでは確認された雪エクボは、石狩実験場では確認されなかった。

また、積雪重量及び積雪深の連続観測結果より積雪密度の時系列特性を明らかにするとともに、積雪密度を推定する重回帰式を提案し、それによって、定山溪ダム流域内の積雪相当水量を概ね良好に推定することができた。

今後、さらに調査を進めて、融雪流出や積雪相当水量の推定精度向上に資することができれば幸いである。

謝辞：本研究は北海道開発局の受託研究により実施された。また、北海道開発局石狩川開発建設部豊平川ダム統合管理事務所には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る。

参考文献

- 1)近藤純正編書：水環境の気象学，朝倉書店，1994.
- 2)小野延雄，石川信敬，新井 正，若土正暁，青田昌秋：基礎雪氷学講座VI，雪氷水文現象，p58，1994.
- 3)野村 睦，兒玉裕二，石井吉之，小林大二：融雪水の積雪内流下の非一様性，京都大学防災研究所水資源研究センター報告 12，pp13-22，1992.
- 4)谷瀬敦，山下彰司：積雪重量計を用いた積雪層の観測について，水工学論文第 51 巻，pp.355-360，2007.
- 5)中津川 誠，工藤啓介，星 清：積雪貯留を考慮した汎用的な融雪流出解析，水工学論文集第 48 巻，pp.37-42，2004.
- 6)工藤啓介，中津川 誠：石狩川流域の水文メッシュ値の推定，土木学会 59 回年次学術講演会，pp.151-152，2004.
- 7) (財)北海道河川防災研究センター 編集・発行：石狩川流域ランドスケープ情報，CD-ROM,1998.

(2007. 9. 30 受付)