

札幌定山溪における融雪過程の年々特性

Interannual Characteristics of Snow Melting Process in Jozankei, Sapporo

北海道大学大学院工学院
(株)建設技研インターナショナル
北海道大学大学院工学研究院
土木研究所 寒地土木研究所

○学生員
正 員
正 員
正 員

細井遵敬 (Nobutaka Hosoi)
布川敦士 (Atsushi Nunokawa)
山田朋人 (Tomohito Yamada)
西原照雅 (Terumasa Nishihara)

1. はじめに

積雪寒冷地において、雪は春先から夏にかけての貴重な水資源になる。たとえば、北海道内の多くの多目的ダムは、融雪期前にその貯水量が最低となり、春先に流入する融雪水を貯めることで、初夏の各種用水を確保している。その一方で、融雪は災害を引き起こすといった負の側面も有する。2018 年 3 月初旬に釧路では降雨を伴った融雪出水が、市街地の浸水を引き起こした¹⁾。融雪量の推定には積雪深に加え密度の把握が不可欠である一方、航空機で高い精度を持ちながら広範囲を測定できる積雪深とは違い、広範囲かつ高精度での密度の把握は困難な課題である。

北海道札幌市南区に位置する、定山溪ダム観測露場で観測を行なった先行研究において、融雪期には積雪重量計から算出される流出量とライシメータを用いて計測された積雪底面流出量には違いがあることが指摘された²⁾。この違いとして、氷板や水みちといった積雪層内部の現象に依存すると考えられる。

本研究では、同観測露場で行われた観測データを用いて、融雪期における底面流出量と計算によって求められる積雪表面融雪量を比較することで、底面流出量の違いを議論する。また、2016 年 11 月から 2017 年 5 月まで著者らが定山溪ダム観測露場に設置した誘電式含水率計による観測結果と同観測所で行われている観測結果との比較をし、結果を紹介する。

2. 使用したデータ

北海道札幌市南区に位置する、定山溪ダム観測露場において寒地土木研究所が 2005 年より毎年 12 月以降 1 時間ごとに観測を実施している。これは山間地における気象・積雪の変化を記録した貴重なデータである。同露場では寒地土木研究所が設置した積雪重量計による積雪重量観測とともに、2m×2mのライシメータを用いて、融雪量を計測する積雪底面流出観測などを行なっている。観測項目は表-1 に示した。

一方、積雪層構造の変化を調べるために、積雪断面観測も行われている。積雪断面観測は、積雪に鉛直方向の穴を掘ることで、積雪の層構造や高さ毎の雪中温度、積雪密度、含水率、雪質などを調べるための観測手法である。定山溪ダムの観測露場において、積雪断面観測は 2007 年から行われており、2016 年度から著者らも参加している。

そして、2016 年 11 月から 2017 年 5 月にかけて、前

述の誘電式含水率計による観測が開始された。地上から 10cm、30cm の高さに一本ずつ水平に設置したセンサーと、地面から 250cm の高さに斜めに設置した、計 3 本のセンサーを用いて、積雪相当水量や鉛直方向の平均密度などを測定した。

3. 積雪表面融雪量の推定式

融雪量とライシメータによる積雪底面流出量の関係を把握するため、熱収支法を用いて、積雪表面における融雪量を算出した。使用した熱収支式は式(1)に示す通りである。

$$M_s = R_n + Q_s + Q_l + Q_r + Q_u \tag{1}$$

M_s [W/m²]は融雪に使われる熱フラックス、 R_n [W/m²]は放射収支量、 Q_s [W/m²]は顕熱フラックス、 Q_l [W/m²]は潜熱フラックス、 Q_r [W/m²]は降雨による熱フラックス、 Q_u [W/m²]は積雪層への熱フラックスをそれぞれ示す。右辺第一項の放射収支量は現地観測で得られた、下向き短波放射、下向き長波放射、上向き短波放射、上向き長波放射から求めた。その他の熱フラックスは各種の気象観測データを用いた推定値である。

各種熱フラックスの推定式とそれに関連する式を以下の式(2)から式(8)に示す。まず初めに、顕熱フラックス量の推定式を式(2)に示す。

$$Q_s = c_p \rho_a C (T_a - T_s) \tag{2}$$

ここで、 c_p [KJ/(kg・K)]は空気の定圧比熱、 ρ_a [kg/m³]は空気の密度、 C [m/s]は顕熱輸送の交換係数、 T_a [K]は高さ z_a [m]に置ける気温、 T_s [K]は積雪表面温度である。

表-1 測定項目

観測項目	計測機器名	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	℃
湿度	湿度計	%
風速	風速計	m/s
下向き短波放射	超短波放射計	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	℃

空気の密度 $\rho_a[\text{kg/m}^3]$ の推定式を式(3)に示す。

$$\rho_a = 1.293 \frac{273.15}{T_a} \frac{p}{p_0} \left(1 - 0.378 \frac{e}{p} \right) \quad (3)$$

式(3)において、 $p[\text{hPa}]$ は観測地点の大気圧、 $p_0[\text{hPa}]$ は標準大気圧、 $e[\text{hPa}]$ は水蒸気圧である。

観測地点の大気圧 $p[\text{hPa}]$ は式(4)で推定した。

$$p = p_0 \left(1 - \frac{0.0065h}{T_a + 0.0065h} \right)^{5.257} \quad (4)$$

式中の $h[\text{m}]$ は観測露場の標高であり、400mとした。

顕熱輸送の交換係数の推定式は式(5)である。

$$C = \frac{ku_*}{0.74 \ln(z_a/z_0)} \quad (5)$$

ここで、 k はカルマン定数、 $u_*[\text{m/s}]$ は摩擦速度、 $z_a[\text{m}]$ は風速の観測高さ、 $z_0[\text{m}]$ は空力学的粗度であり、0.0002[m]と仮定した。

摩擦速度 $u_*[\text{m/s}]$ は式(6)で求める。

$$u_* = \frac{U_a}{\ln(z_a/z_0)} \quad (6)$$

式中において、 $U_a[\text{m/s}]$ は高さ $z_a[\text{m}]$ での1時間平均風速である。

潜熱フラックス量 $Q_l[\text{W/m}^2]$ の推定式は式(7)の通りである。

$$Q_l = C \frac{0.622L\rho_a\beta}{R_aT_a} \quad (7)$$

式(7)において、 $L[\text{KJ/kg}]$ は水から水蒸気への昇華潜熱、 $\beta[\text{W/m}^2]$ は蒸発効率、 $e_s[\text{W/m}^2]$ は飽和水蒸気量である。融雪が進んでいる積雪表面は十分に湿っていると考え、蒸発効率 $\beta[\text{W/m}^2]$ は1.0と仮定した。

降雨による熱フラックス $Q_r[\text{W/m}^2]$ は式(8)で推定する。

$$Q_r = r_r \rho_w c_{pw} (T_a - T_s) \quad (8)$$

ここで、 $r_r[\text{mm/h}]$ は降雨強度、 $\rho_w[\text{kg/m}^3]$ は水の密度、 $c_{pw}[\text{KJ/(kg} \cdot \text{K)}]$ は水の定圧比熱である。

最後に、積雪層表面への熱フラックスだが、地中伝導熱量は積雪および、融雪水によって十分に冷やされると考えられるので、0 $[\text{W/m}^2]$ とした。

4. 融雪期における表面融雪量と底面流出量

本研究において、融雪期は積雪深が最大値を示した点を起点とし、積雪深が0cmを示す点を終点とした。

2007年から実施されている断面観測において、氷板の少なかった年と多かった年について、氷板の数と総厚をグラフにしたものを図-1に示す。また、その年の融雪期における表面融雪量と底面流出量の関係を示したものを図-2に表した。各図におけるa、b、c、dはそれぞれの観測期間に対応しており、aが2007年から2008年における観測結果を、bが2010年から2011年における観測結果を、cが2012年から2013年における観測結果を、dが2014年から2015年における観測結果をそれぞれ示している。

aとbはそれぞれ氷板の少ない年の例であり、表面融雪量と底面流出量の対応を見ると、おおよそ1対1の直線に沿って散布図がプロットされている。一方、cとdはそれぞれ氷板の多い年の例である。これらの年について、表面融雪量と底面流出量の対応を見ると、底面流出

量が表面融雪量に比べて多く出ていることがわかる。このことから、氷板の数量が底面流出量に影響を与えていることがわかる。

先行研究²⁾でも本研究と同じように氷板と底面流出の影響は指摘されているが、積雪層内の時系列を詳細に追うことは難しく、直接どのような要因で影響を与えているかを指摘することは困難である。

5. 誘電式含水率計による観測結果と検討

誘電式含水率計による観測結果と定山溪ダム観測露場で積雪深計、ライシメータ、積雪重量計を用いて得られた観測結果とを比較した図を示す。

図-3aは誘電式含水率計に付属している超音波積雪深計と寒地土木研究所が設置している積雪深計の比較である。概ね一致していることがわかる。図-3bは誘電式含水率が示した積雪全層平均密度と、積雪重量計が示した値を積雪深計の示した積雪深の値で割った値とを示している。全体的に誘電式含水率計の値が小さいことがわかる。図-3cは誘電式含水率が示した積雪相当水量と、積雪重量計から算出した積雪相当水量とを比較している。こちらも全体的に誘電式含水率計の値が小さいことがわかる。

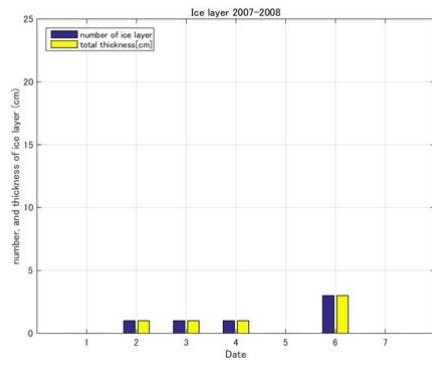
誘電式含水率計が示す密度と積雪相当水量が、積雪重量計から算出した値より小さい原因について、以下のことが考えられる。誘電式含水率計のセンサーは地上から、250cm高さまで斜めに貼られている。積雪深は200cmを超えることはなく、被覆率は80%を超えることはない。センサーが雪で覆われていない時、密度、積雪深はともに0を示すため、被覆率が影響していると考えられる。そのため、被覆率を100%として考えられるようにするため、得られた値に250cm/積雪深[cm]をかけて補正した。その結果を図-4a,bに示す。誘電式含水率計の補正後の積雪全層平均密度と積雪相当水量の値を見ると、積雪重量計等から算出した値と概ね一致していると言える。

6. まとめ

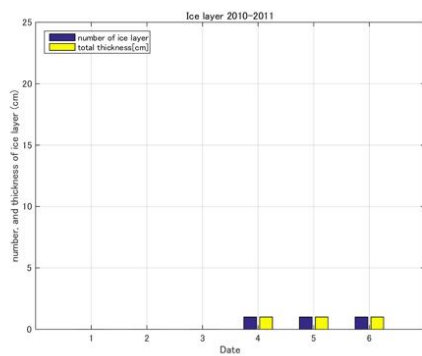
融雪期において、表面融雪量と底面流出量の関係性が氷板によって影響を受けることがわかった。今後は氷板形成の過程と気象場の関係性、積雪が融雪水を貯めるにあたって、氷板がどのような役割をするかなど、氷板形成とそれによる影響を中心に研究を進めて行きたいと考えている。

また、本年度も誘電式含水率計による測定を行なっているため、引き続き、そちらの観測値の検討も行っていきたい。特に、補正式に関しては、今後も継続して観測を行っていき検証を進めるとともに、物理的な裏付けが取れないかについて詳しく取り組む予定である。

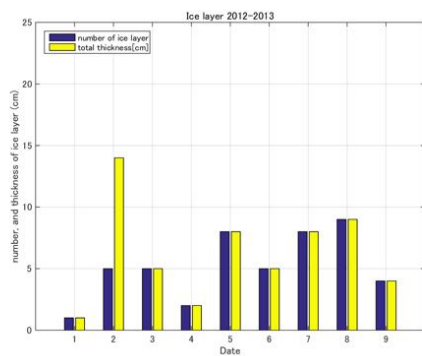
a)



b)



c)



d)

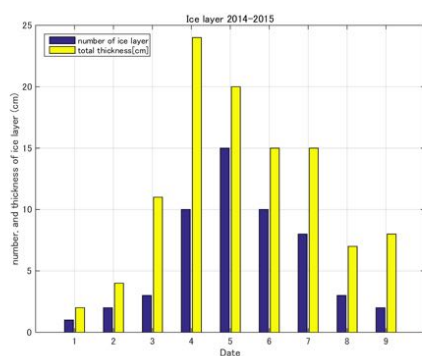
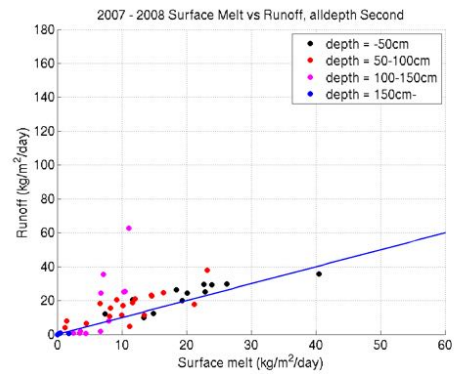
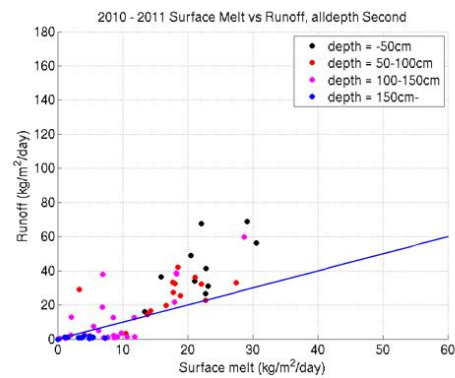


図-1 積雪断面観測時に確認した氷板の枚数と総厚。
a)2007 年度冬季に行った断面観測、 b)2010 年度冬季に行った断面観測、 c)2012 年度冬季に行った断面観測、 d) 2014 年度冬季に行った断面観測の結果。a,b は共に氷板が少ない年、c,d は共に氷板が多い年の例。

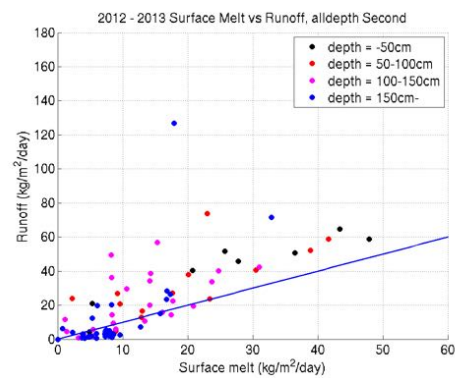
a)



b)



c)



d)

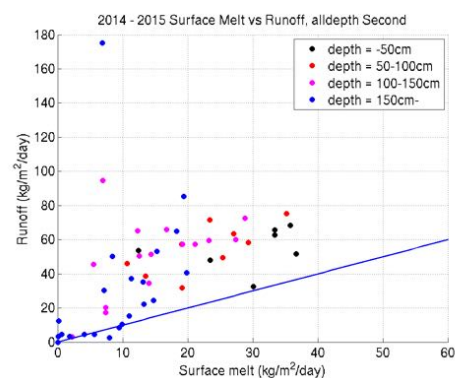


図-2 熱収支式によって求めた表面融雪量（横軸）と積雪底面流出量（縦軸）との相関関係。a)2007 年度冬季、 b)2010 年度冬季、 c)2012 年度冬季、 d) 2014 年度冬季における結果。

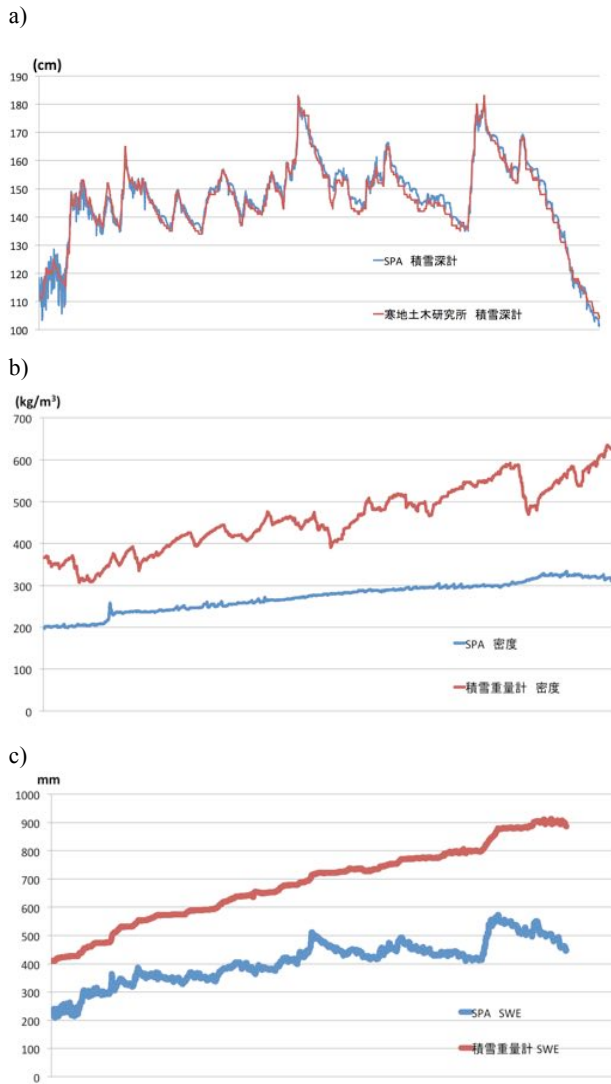


図-3 誘電式含水率計の測定値と積雪重量計等の計測機器の測定値との比較。青線が誘電式含水率計の値を示し、赤色が各種計測機器の値を示す。a)積雪深計の時系列における比較。b)密度の時系列における比較。c)積雪相当水量の時系列における比較。

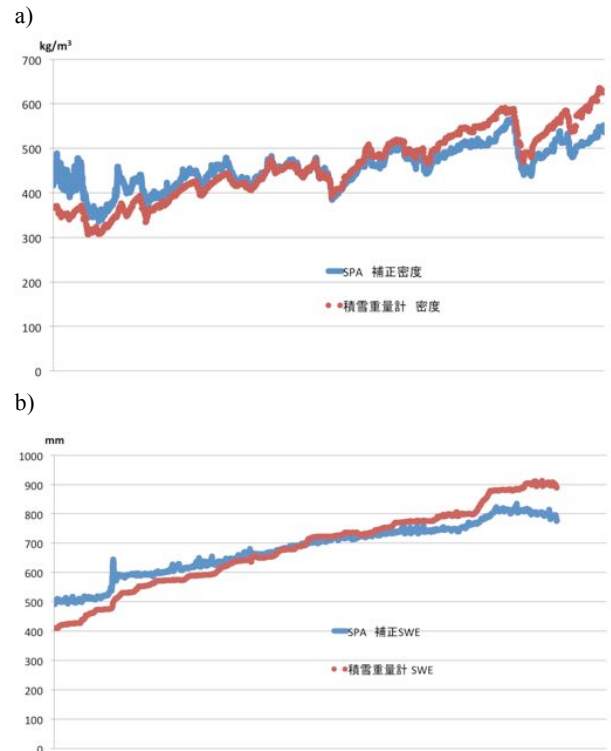


図-4 誘電式含水率計の測定値に 250cm/積雪深[cm]をかけて補正した値と積雪重量計等の計測機器の測定値との比較。青線が誘電式含水率計の値を示し、赤色が各種計測機器の値を示す。a)密度の時系列における比較。b)積雪相当水量の時系列における比較。

謝辞

本研究は、土木研究所寒地土木研究所の観測データを使用させていただいた。また、断面観測においては室蘭工業大学の中津川誠教授、日本気象協会の皆様にご協力をいただき実施した。最後に、観測機器の設置にあたり北海道開発局定山溪ダム管理支所に感謝の意を表する。

参考文献

- 1)北海道開発局 釧路開発建設部：平成 30 年 3 月 8~9 日の低気圧に伴う降雨による釧路川の出水量概要【速報板】，2018
- 2)山下彰司、新目竜一、谷瀬敦、鳥谷部寿人：積雪重量計による積雪融雪特性の研究、寒地土木研究所月報、pp.18-29、2008

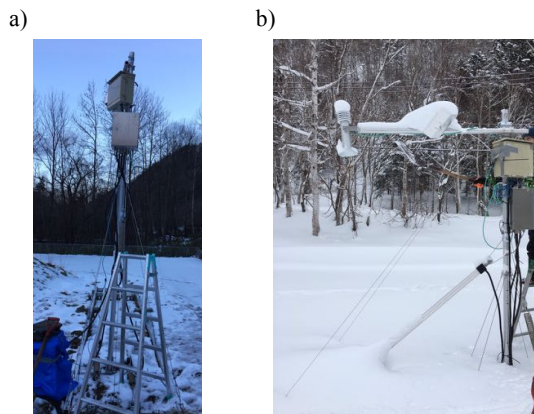


図-5 露場における誘電式含水率の様子 a)が設置時、b) が積雪の中に埋まっている時の様子。