

降雨と融雪が重なって生じる融雪出水 — 雪面上への模擬降雨散水実験 —

Hydrological study of snowmelt flooding during a rain-on-snow event; Rain simulation experiment over the snow surface

石井吉之, 中坪俊一, 森章一, 的場澄人 (北海道大学低温科学研究所)

Yoshiyuki Ishii, Shun-ichi Nakatsubo, Shoichi Mori, Sumito Matoba

1. はじめに

融雪期にまとまった雨が降ると河川は著しく増水する。あたかも雨によって融雪が促進されて増水したかのように見えるが、日本のような中緯度では春先の気温はそれほど高くはなく、雨粒そのものが雪を融かす量はわずかである。雨が降る時には、気温が高くて風速が強い場合が多く、雪面への顕熱輸送が進むことや、湿度が高いために融けた水が蒸発しにくく、蒸発による熱損失が抑えられること、また、曇天・降水により夜間も雪面が冷やされないことなどの二次的要因により融雪が進む^{1), 2)}。しかし、それでも降雨時の融雪量は晴天時の融雪量に比べて小さい。融雪量が小さいにもかかわらず、なぜ著しい河川増水が起きるかについては十分に理解されていない。また、降雨を伴った融雪出水において積雪がどのような役割を果たすかについても、積雪内での貯留が効く例と効かない例との相反する結果が報告されており^{3), 4)}、よくわかっていない。

北大低温研の水文気象グループでは、降雨と融雪が重なって生じる融雪洪水の発生メカニズムと、この時に積雪が果たす役割を明らかにするために、2003年に北海道北部の母子里試験地、2008年に札幌市郊外の豊平川上流域（定山溪ダム試験地）で、野外観測データに基づいた研究を行ってきた^{5), 6)}。しかし、いずれの場合にも融雪期には総雨量20~50 mm程度のイベントしか対象にできず、明確な結論は得られていない。そこで、2011年の融雪期に、雪面上に模擬的に降雨を散布することにより、積雪底面流出や積雪内部での水貯留の実態を実験的に明らかにさせることを試みた（図-1）。

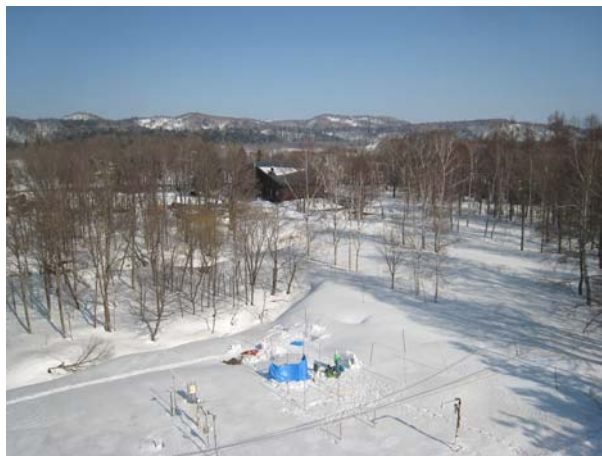


図-1 融雪観測室露場での実験のようす

2. 実験方法

実験は北海道幌加内町母子里の北大雨龍研究林内の融雪観測室前の露場で行なった。

(1) 実験装置

容量25 Lの塩ビ製の耐圧円筒タンクを複数連結させて散布に必要な水量を確保した。タンクにはコンプレッサで圧力を掛け、常時一定圧力となって散布量が一定になるよ

うに調整した。ホースの先には市販の噴霧ノズルを付け、ノズルの先からはミスト状ではなく実際の雨と同様の微水滴が出るように調整し、最適な噴霧条件として噴霧角 70° 、圧力 0.2 MPa 、噴霧量 0.6 L/min を与えた。散布範囲が直径 $70 \sim 80 \text{ cm}$ の円形となるようにノズルの高さを調整し、風による飛散を防ぐために風上にブルーシートで側壁を設けた (図-2)。また、散布した水の積雪内での挙動や積雪との混ざり具合を調べるため、水の安定同位体を天然トレーサーとして用いた。同位体比の重い岩内町海洋深層水脱塩水を散布用の水試料として用いることにより、同位体比の軽い積雪との濃度コントラストを大きくさせた。実験を行なう融雪観測室前の露場には、積雪期前の 2010 年 10 月に $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ の積雪ライシメータ (積雪底面流出測定用) 2 台と散水装置据付用の槽を 3 ヶ所に設置し、同じ積雪条件下で 3 回の実験が行なえるようにした (図-3)。



図-2 実験 1 での散水状況



図-3 ライシメータの設置状況 (2010 年 10 月)

(2) 実験条件

実験は、積雪がすでに全層 0°C となり、融雪が 50 cm ほど進んだ 2011 年 4 月 5 ~ 7 日の晴天日の日中に行なった。期間中の積雪深は $100 \sim 80 \text{ cm}$ 、気温は $-6.0 \sim +9.9^\circ\text{C}$ で推移した。実験は 3 回行い、各回の総散布量 (総雨量)、平均雨量強度、散布時間はそれぞれ 1 回目が 25 L (25 mm)、 35 mm/h 、 43 分 、2 回目が 60 L (60 mm)、 23 mm/h 、 159 分 、3 回目が 200 L (200 mm)、 34 mm/h 、 356 分 である。2 回目の実験では、当初、 2.5 時間 に 75 L の散布を予定したが、ノズルのフィルター目づまりのため時間的には長く、量的には少ない散布実験となった。なお、散布量の雨量への換算は、全量がライシメータの面積上に散布されたと見なして計算した (表-1)。

表-1 実験 1~3 で設定した降雨条件

	総散布量 (L)	総雨量 (mm)	平均雨量強度 (mm/h)	散布時間 (min)
実験 1	25	25	35	43
実験 2	60	60	23	159
実験 3	200	200	34	356

3. 結果および議論

3回の実験後およびすぐ隣の対照区の濡れ密度と重水素濃度の鉛直プロファイルを図-4に示す。散水に伴う水当量の増加は、実験1では表層の10 cm深のみが増加し、実験2では10 cm深と40 cm深で顕著に認められたものの、実験3ではどの深度にも増加が認められず、散水量が多くなるにつれて水当量の増加が目立たなくなった(表-2)。積雪底面流出量は実験1ではゼロ、実験2では実験中から翌日にかけて1640 mL(流出率3%)、実験3では200 Lも散水したにもかかわらず流出量はゼロであった。

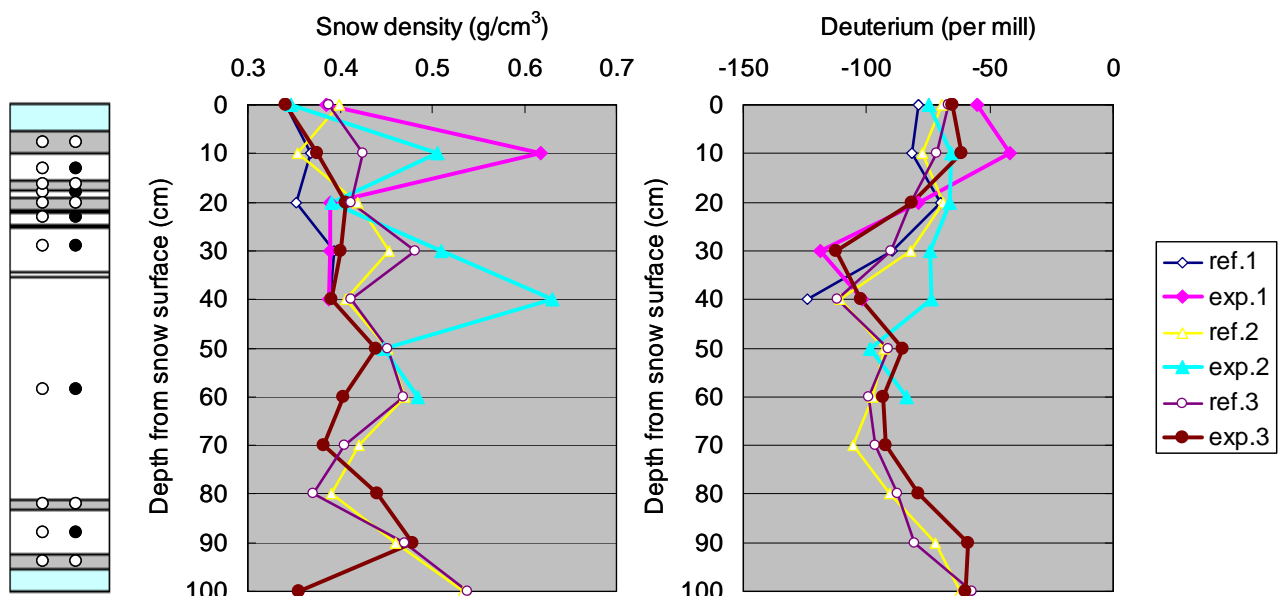


図-4 実験1～3及び対照区における濡れ密度と重水素同位体比の鉛直プロファイル(雪面を0 cmとする)とその時の積雪層構造(左端のカラム:水色は濡れの著しい層,灰色は大粒で比較的濡れた層を表す)

表-2 実験区と対照区における積雪全層の濡れ密度, 積雪水量, 重水素濃度

	濡れ密度 (kg/m ³)	積雪水量 (mm)	重水素濃度 (‰)
対照区 1	418	459	-87.3
実験区 1	456	502	-82.4
対照区 2	394	394	-83.7
実験区 2	523	523	-83.7
対照区 3	399	399	-87.6
実験区 3	378	378	-84.7

散布した脱塩水および採取した積雪と水試料のδダイアグラムを図-5に示す。脱塩水以外はほぼ傾き8の直線(図中の破線)に乗り、d値(=δD - 8・δ¹⁸O)は20～25‰であった。脱塩水との混合も顕著ではなく、予想していた傾き8の直線からのシフトもほとんど認められなかった。なお、図中の赤実線(GMWL)は天水線(δD = 8・δ¹⁸O + 10)である。

散布量が少ない実験 1 での底面流出量ゼロは予想したとおりであったが、実験 2 と 3 でもほぼゼロ（或いは極めて微量）であった理由として以下が考えられる。積雪内に供給される水量が少ないうちは、水は雪粒間に保持されるが、供給水量が増加し、下方への浸透速度（強度）以上の水が加わってくると、雪粒間の水はもはや下方ではなく、多くの水を保持できる層内を水平方向に流れるようになる（図-6）。つまり、散布する水の量が多ければ多いほど散いた水は積雪内を水平方向に流れるようになる。その時、散布する以前に雪粒間に保持されていた水も一緒に取り込んで行く。そのため、実験 3 で観測されたように、1 m²に 200 L もの水を散いたにもかかわらず、実験後の全層水当量が対照区的全層水当量より小さくなるという、一見して逆の現象が起きたと考えられる。

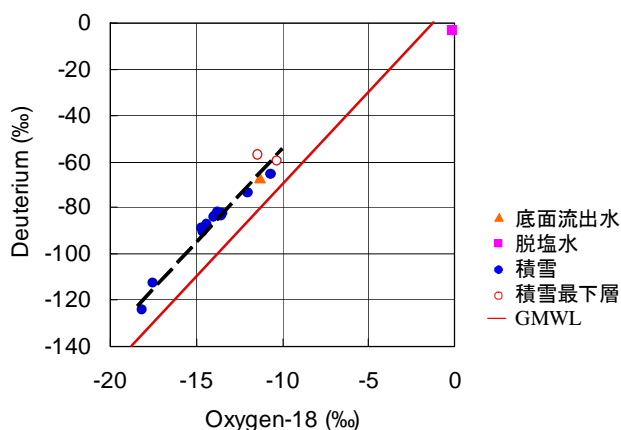


図-5 散布した脱塩水と採取した水試料の δ ダイアグラム



図-6 積雪層境界における水平方向の水の流れ（蛍光染料散布）

4. 今後の課題

雪面上への散水実験では散いた水の水平方向への流動が予想以上に顕著に現れた。水平方向の水の流れが起きないようにするか、或いはそれを積極的に計測できるようにするか、装置を改良し 2012 年の融雪期に再度実験を行なう予定である。

謝辞

模擬降雨用の岩内海洋深層水（脱塩水）の利用にあたっては岩内町地場産業サポートセンター（中家正希所長）のご協力を頂いた。現地実験を進める上では北大雨龍研究林のご協力を頂いた。以上の皆様に深謝致します。この研究に要した経費の一部は文科省科学研究費補助金（課題番号 22510193、代表・石井吉之）から支弁された。

参考・引用文献

- 1) 小島賢治・小林大二・油川英明・石本敬志・高橋修平・藤井俊茂, 1973: 母子里の小流域における融雪, 流出, および熱収支の研究Ⅲ(特に悪天候の影響について), *低温科学*, **31**, 159-177.
- 2) 石川信敬, 1994: 融雪と積雪層の熱収支. 基礎雪氷学講座Ⅵ「雪氷水文現象」, 古今書院, 17-48.
- 3) Marshall, H. P., Conway, H. and Rasmussen, L. A., 1999: Snow densification during rain. *Cold Regions Science and Technology*, **30**, 35-41.
- 4) Singh, P., Spitzbart, G., Hubl, H. and Weinmeister, W. H., 1997: Hydrological response of snow pack under rain on snow events: a field study. *Journal of Hydrology*, **202**, 1-20.
- 5) 宍戸真也・石井吉之・山崎学・田中夕美子, 2005: 降雨と融雪が重なった時の出水現象. *北海道の農業気象*, **57**, 15-27.
- 6) 高橋雅博・石井吉之・喜澤一史, 2010: 降雨と融雪が重なって生じる融雪洪水. 雪氷研究大会 (2010・仙台) 講演要旨集, 74.