

降雨と融雪が重なって生じる融雪出水(2)

—3ヶ年の模擬降雨散水実験の比較—

Hydrological study of snowmelt flooding during a rain-on-snow event, 2; Comparison of rain simulation experiment in the 3 snowmelt seasons

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、一般に雨滴自体による融雪量は小さい。降雨時には、比較的気温と湿度が高く、風速が強いことや、凝結潜熱の増大、蒸発熱損失の抑制、夜間の雪面冷却の抑制などの二次的効果によって融雪が進む^{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、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、2011～2013年の各融雪期に、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しようとした。

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った。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し、散布範囲が直径 70～80 cm の円形となるようにノズルの高さを雪面上 1 m に設定した。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。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。実験を行う融雪観測室前の露場には、積雪期前の 10 月に 1 m×1 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櫓を 3ヶ所に設置し、同じ積雪条件下で 3 回の実験が行えるようにした。

実験は、融雪が進み、積雪全層が 0℃となっている積雪深 1 m 程度の時期を選んだが、年毎に融雪の進行が異なり、必ずしも積雪深 1 m で統一されていない。各年の実験で与えた降雨条件とその時の積雪深及び積雪層構造を表 1 と図 1 にまとめて示す。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 各年の実験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) | 積雪深 (cm) |
|-------|-------------|-------------|------------------|---------------|-------------|
| 2011年 | | | | | |
| 実験 1 | 25 | 25 | 35 | 43 | 106 |
| 実験 2 | 60 | 60 | 23 | 159 | 106 |
| 実験 3 | 200 | 200 | 34 | 356 | 106 |
| 2012年 | | | | | |
| 実験 1 | 170 | 170 | 35 | 295 | 173 |
| 実験 2 | 120 | 120 | 33 | 218 | 173 |
| 2013年 | | | | | |
| 実験 1 | 160 | 160 | 34 | 286 | 180 |
| 実験 2 | 120 | 120 | 35 | 207 | 116 |

3. 結果と考察

2011年の実験は4月5～7日に行った。期間中の積雪深は100～80cm、気温は-6.0～+9.9℃で推移した。3回の実験における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約1.5L（流出率3%）、実験3では200Lも散水したにもかかわらず流出量はゼロであった。実験3において積雪底面流出がゼロであった理由については次のように考えた。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。つまり、散布する水の量が多くなると散いた水は積雪内を水平方向に流れるようになり、鉛直下方の積雪底面からは流出しなかった。

2012年の実験も、ある程度の融雪が進み、積雪深が100cm程度になった時期に行おうとした。ところが、2012年の融雪期は、4月上旬は寒気の影響を受けて融雪が遅れ、4月15日になっても積雪深は170cmもあった。2011年に比べ2倍近い積雪深であったが、4月16～17日に2011年と同じ方法で2回の実験を行った。この時の積雪深は170～164cm、気温は-1.9～+12.5℃で推移した。積雪深が多いので2011年以上に水平方向の流れが生じやすく、積雪底面流出量は観測されないことが予想されたが、実験1では散水開始後50分で積雪底面流出が現れ、総散布量170Lに対し総流出量は46L、流出率は27%であった。実験2でも同様に散水開始後90分で積雪底面流出が現れ、総

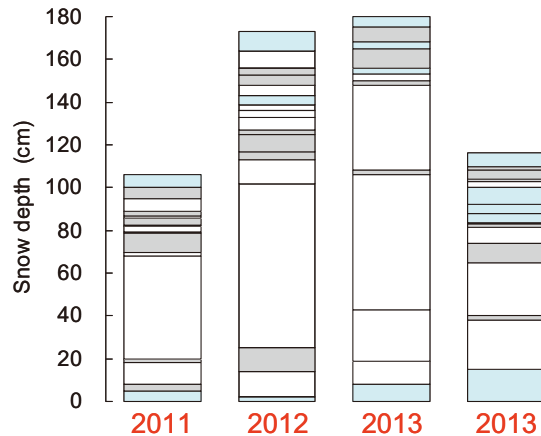


図 1 実験時の積雪の層構造（水色部は著しく濡れた層、灰色部は大粒の層を表す）

散水量 120L に対し総流出量は 48L, 流出率は 40%であった(図2). 散水した岩内海洋深層水(脱塩水)の水素同位体比は+1‰, 実験前の全層積雪の水素同位体比は実験 1, 2とも-93‰であった. 積雪底面流出水の水素同位体比は, 実験 1 では流出開始時の-86‰から散水終了時には-26‰まで重くなった. 同様に実験 2 では流出開始時の-109‰から終了時には-34‰になった. 散水量と流出量がほぼ定常となった時点で散水を終了したが, 終了時における積雪底面流出水に含まれる模擬降水の割合は, 水および同位体収支式より, 実験 1 では 71%, 実験 2 では 63%と見積もられ, 概ね 6~7割であった.

これまでの融雪水の積雪内浸透に関する研究では, 化学成分や水の安定同位体をトレーサーに用いることによって, 晴天日や弱い降雨時(総雨量 20mm 程度)には積雪内部に貯留されていた水が押し出されるように積雪底面から流出し, その割合は 9 割以上に及ぶと言われていた^{3), 4)}. しかし, 顕著な降雨と融雪が重なった時にはこうした流出過程とは異なることも指摘されていた. 今回の実験では, 積雪上に総量 120~170mm の降雨があった時には, 降ってきた降水の概ね 6~7 割が積雪底面から流出することが明らかになった.

2013 年の実験では, 積雪内で水平方向の水みちとなる氷板や大粒のザラメ雪層ができる前後で, 融雪水の浸透がどのように変化するかを明らかにするために, 水平方向の顕著な水みち層が発達する前(積雪深 180cm)と後(同 116cm)とで模擬降雨散水実験を比較した. 実験

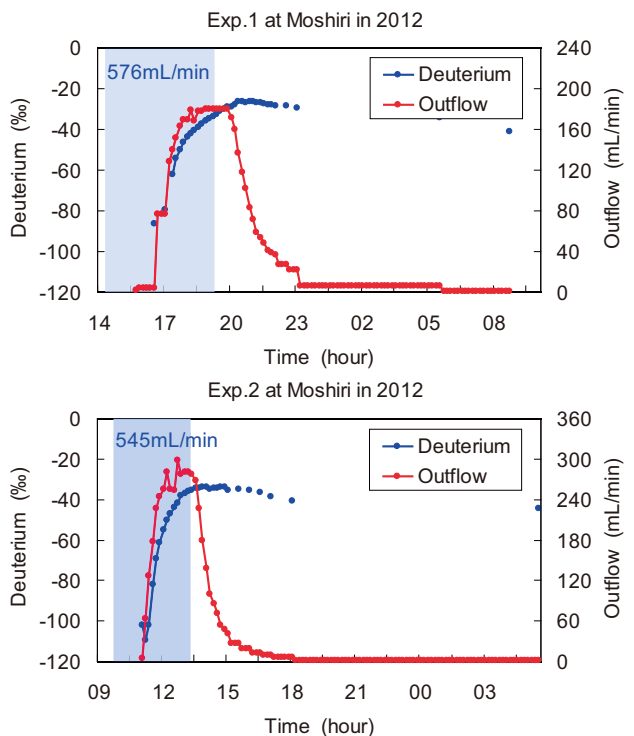


図2 散水量と底面流出量及びその同位体濃度の時間変化(2012年の実験)

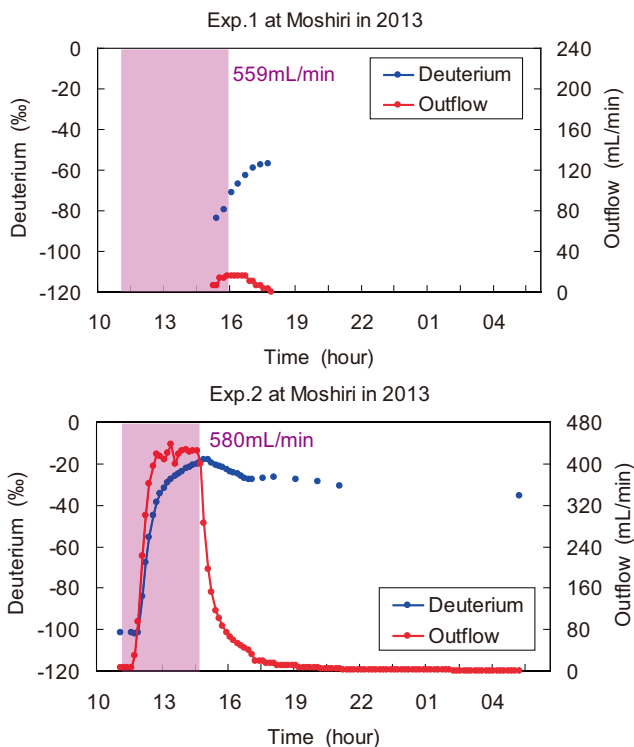


図3 散水量と底面流出量及びその同位体濃度の時間変化(2013年の実験)

1 は 4 月 11 日に行い、この時の積雪深は 180cm、散水中の気温は $-0.1 \sim +3.6^{\circ}\text{C}$ であった。散水開始後 240 分経過してからようやく積雪底面流出が現れたが、流出量が小さいまますぐに定常となり、3 時間後には停止した。総流出量は 1.8L にすぎず、流出率は 1% であった (図 3 上)。しかし、ピーク時における積雪底面流出水に含まれる模擬降水の割合は、水および同位体収支式より 34% となり、決して小さな割合ではなかった。図 1 に示したように雪面から深さ約 30cm までに大粒のザラメ雪層が発達しており、2011 年と同様に、散水した水の多くはこの層を通じて水平方向に流動したと考えられる。また、実験の前後で積雪層全体の濡れ密度が増大しており、散水した水は積雪中にも貯留されていたが、その量は 4L と推算され大きな量ではなかった。4 月 30 日には実験 2 を行った。この時の積雪深は 116cm、気温は $-0.5 \sim +2.8^{\circ}\text{C}$ であった。散水を始める前から通常の融雪に伴う積雪底面流出が観測されていたが、散水開始から 40 分後に顕著な流出量増加が始まった。総散水量 120L に対する総流出量は 85L で、流出率は 71% であった (図 3 下)。定常時における同位体比から見積もられる流出水中の模擬降水の割合は 81% となり、2012 年の実験における割合よりもさらに大きかった。積雪の層構造は雪面から深さ約 50cm までに水を含んだ明瞭な濡れ層が存在するが、それより下部の層の雪粒も大きくなっており、4 月上旬に比べると全体的に比較的大粒であった。このために水平方向よりも鉛直方向に流動しやすく、散布した水の 7 割が積雪底面から流出したと判断される。

4. おわりに

積雪全層が 0°C となる融雪期に、雪面上に 100mm 以上の大雨が降った時を想定した模擬降雨散水実験を 2011~2013 年の 3 融雪期に実施した。その結果、積雪底面からの流出が顕著に現れる場合とほとんど現れない場合が見られた。流出状況は散水量や積雪深とは関係がなく、その時の積雪の層構造に応じて多様であった。つまり、積雪内部で貯留される場合とされない場合の両方が起こり得ることが改めて明らかになった。今後、層境界での粒径コントラストを定量的に評価し、低温室実験や数値実験などによって、どのような層境界の時に鉛直浸透が妨げられるかを確認したい。また、野外でそれを簡易に判別する方法を、既存の“しみ上り高さ”法⁵⁾等を改良するなどして検討して行きたい。

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。

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) 鈴木啓助, 1993: 積雪中における押し出し流の形成. *地理学評論*, **66A-7**, 416-424.
- 4) 大戸真也・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.
- 5) 若浜五郎, 1968: 積雪内における融雪水の移動Ⅲ:水路流下速度,皮膜流下速度. *低温科学*, **26**, 77-86.