降雨と融雪が重なって生じる融雪出水

石井 吉之*¹

Hydrological study of snowmelt flooding during a rain-on-snow event

Yoshiyuki ISHII*¹

Abstract

Snow hydrological studies were carried out in two experimental watersheds in Hokkaido to examine the mechanism of spring snowmelt runoff during a rain-on-snow event. A study of the runoff process within the snowpack showed that not less than 90% of the water that flowed out from the bottom of the snowpack had been stored within the snowpack before the event, and that this rate did not vary much based on whether it was a snowmelt-only event or a rain-on-snow event. A study of the peak streamflow under a rain-on-snow event showed that the peak streamflow was caused by the large initial streamflow just before the hydrograph rise and by the large inflow intensity comprised of the rainfall intensity and the snowmelt intensity. Furthermore, an artificial heavy rainfall on the snow surface was experimentally simulated, and although 200 L of water was sprinkled on 1 m² of snow surface for 6 hours, no outflow appeared from the bottom of the snowpack. This result indicated that a horizontal flow component became remarkable beyond expectation when a lot of water was supplied over the snow surface. To clarify the detailed processes of spring snowmelt runoff under a rain-on-snow event, it is crucial to know how much water is supplied to the ground surface under the snowpack. To do so, we need to accumulate more observation results regarding the amount of snowpack bottom outflows using a snow lysimeter.

Key words: rain-on-snow event, snowmelt flooding, snowpack stored water, peak streamflow, artificial rainfall simulation

1. はじめに

降雨と融雪が重なる現象は rain-on-snow (ROS) event と呼ばれ, 春先の融雪期のみならず冬期の積雪期間中にも生じ, 融雪洪水や全層雪崩・地すべりなどの災害要因になっている。アメリカ北西部オレゴン州の山岳地帯では, 冬期に Pacific Storm と呼ばれる太平洋からの比較的温暖湿潤な海洋性気団が侵入し, 真冬にもかかわらず ROS によって全層雪崩や融雪洪水などの被害が生じて

いる (Harr, 1986 ; Marks *et al.*, 1998 ; Ferguson, 2000)。ドイツ南部では 12 月後半に ‘Christmas-snowmelt flooding’ と呼ばれる ROS 洪水が頻発し, 年間最大流量を引き起こす原因の約 80% が冬期の ROS に起因している (Sui and Koehler, 2001)。日本国内では, 本州日本海側の積雪地域において, 真冬の降雨に伴う積雪底面流出や ROS 出水の例が報告されている (Whitaker and Sugiyama, 2005)。しかし, 顕著な ROS 洪水は春先の融雪期に生じる。これまでに, 富山県神通川上流や北

* 1 北海道大学低温科学研究所 Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

海道豊平川上流などにおいて、ダム管理者等の実務者レベルでの ROS 洪水の報告がなされているが、水文気象学的に議論した研究は少ない。

春先の融雪期において降雨と融雪が重なって生じる融雪出水を、特にここでは降雨融雪出水と呼ぶ。降雨融雪出水では、あたかも雨によって融雪が促進されて河川増水が起きているかのように見えるが、日本のような中緯度地帯の融雪期の気温はそれほど高くはなく、雨自体による融雪量は小さい。降雨時には、気温・湿度が比較的高く、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。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（小島ほか, 1973; 石川, 1994）。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、降雨融雪出水の際に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いる。中津川・星 (2001) は豊平川上流域 (134km²) において、融雪期中頃の降雨 (3 日間で 168mm) に対するピーク流出量が 210m³s⁻¹ であったのに対し、融雪期後半の降雨 (3 日間で 102mm) に対するピーク流出量は 300 m³s⁻¹ と大きく、積雪内部での貯留効果の大小によって流出率が大きく異なるという観測結果を報告した。一方、石狩川支流雨龍川源頭部の母子里では、融雪初期 (積雪深 1.8m) の約 20mm の降雨が、ほとんどハイエトグラフの形を変えずに 3 時間の遅れで積雪底面から流出し、積雪内部での貯留効果が小さかった観測例もある (石井, 2007)。同様の結果が、オーストリア・アルプスの高地 (標高 2,640m) において自然積雪上に模擬的に降雨を散水した実験でも報告されているが (Singh *et al.*, 1997)、それとは逆に、降雨によって積雪が圧密され浸透水の流下に著しい影響を与えるという研究もある (Marshall *et al.*, 1999)。このように積雪面に降雨が与えられた時の積雪内部での水の流動についても未解明の問題が残されている。

本稿では、北海道北部の母子里と札幌市郊外の定山溪ダム流域において実施された降雨融雪出水の研究結果や、2011 年 4 月に母子里で行なった雪面上での模擬降雨実験の結果を紹介しながら、この現象の複雑さや解明する上での問題点などについて論じる。

Ⅱ. 積雪内部での降雨浸透水の貯留と水交換

北海道北部の母子里 (北緯 44°22′, 東経 142°16′) は日本で最も寒い場所のひとつである。この場所から南西に約 13km 離れた AMeDAS 朱鞠内地点における年平均気温、年降水量、最深積雪の平年値 (1981 ~ 2010 年) はそれぞれ 4.5 °C, 1,647 mm, 236 cm であり、冬期の多雪寒冷な気候が特徴である。冬期の日最低気温は -35 ~ -40 °C に達することもあるが、積雪の断熱効果によって土壌は凍結することがなく、積雪と土壌の境界は 0 °C に保たれている。年降水量の 1/3 は降雪によってもたらされ、積雪期間は概ね 11 月から 5 月中旬までの 6 ヶ月以上に及ぶ (Ishii *et al.*, 2004)。3 月になると一時的な気温上昇によってわずかな融雪が起きる時もあるが、本格的な融雪は 4 月に入ってから始まる。観測露場の消雪日は例年 5 月中旬である。

母子里では、2003 年 4 ~ 5 月の融雪期に、降雨融雪時における積雪内部での流出過程に注目し、降雨と融雪水の流出応答や混合割合を調べた (穴戸ほか, 2005)。流入量 (降雨量 + 融雪量) に対する積雪底面からの流出量は、積雪期前に気象観測露場に設置しておいた 3.6m × 3.6m の大型積雪ライシメータで連続測定した。晴天が続いた期間の前後、ならびに降雨イベント前後に積雪断面観測を行ない、成層構造・雪質・密度・粒径・含水率などを調べた。また、流入水と流出水の定時採取に加え、積雪断面観測の際には 3 ~ 5 層程度の大まかな層毎に雪サンプルを採取し、pH・電気伝導度・主要無機イオン濃度・酸素同位体比を測定し、積雪層内での化学成分収支を解析した。これらの調査から以下の結果が得られた。

1) 融雪期全体の流出応答および貯留量変化には、降雨時と晴天時とで大きな違いは認められなかったが、降雨イベント毎には、前後の晴天日に比べ降雨当日の流出率が高くなる傾向が見られた。

2) 積雪底面からの流出水の中に積雪内部で貯留されていた水がどの程度含まれるかを化学成分収支から見積ると、晴天時は約 95%，降雨時は約 91% となり、晴天時も降雨時も大きな違いはなかった。

これらのことから、Fig. 1 に示すように、降雨融雪時の流出過程は晴天時の融雪のみによる流出過程と同様であることがわかった。しかし、ここで対象とした降雨は総量が 30mm 以下の比較的小さなイベントであり、100mm 程度のより大きな降雨イベント時にはどうなるかという課題が残された。

Ⅲ. 降雨融雪時の河川流出応答

母子里は北海道北部に位置するため、融雪期に 50 ～ 100mm の降雨イベントが起きる頻度はそう高くない。そこで次に、母子里より南に位置し、過去にも何度か 100mm 以上の降雨イベントが観測された札幌市郊外の定山溪ダム流域（面積 104km²、標高 400 ～ 1300m）で研究を行なった。積雪内部の流出過程を明らかにすることも重要ではあるが、ここでは、降雨融雪時にいかにして河川が増水するかを検討した（高橋ほか，2010）。流域内の気象・水文量については北海道開発局定山溪ダム管理支所の観測資料（気温、積雪深、雨量、流量）を用い、1990 ～ 2008 年の毎年 3 ～ 5 月の資料の中から、積雪のある時期に顕著な降雨融雪出水が起きた事例を解析対象とした。任意時間の降雨融雪量に対応する河川流出量は、ハイドログラフの水平分離あるいはそれに近い形で流出量が容易に切り取れる場合のみを選び、22 の出水事例を抽出した。また、流域平均融雪量は、気温のみを指標とする融雪係数法によって 200m 幅の標高帯毎に算出し、各標高帯の総和として求めた。融雪係数を求めるため、ならびに融雪係数や降雨量の標高毎の違いを知るために、2008 年 3 ～ 5 月に流域内の標高の異なる 8 地点で、気温、雪面低下量、積雪密度、雨量を観測したが、気温以外は標高毎の違いは認められなかった。この時の融雪係数は標高によらず 0.52 cm℃⁻¹day⁻¹ となった。さらに、融雪係数法による融雪量の算定結果は、寒地土木研究所によって行なわれた 2006 年 3 ～ 5 月の融雪熱収支観測の結果とも照合させ、妥当性を確認した。

3 ～ 5 月における晴天時の融雪出水の流出率（流出量／流入量）が 0.03 ～ 0.05 であるのに対し、Fig. 2 に示すように降雨融雪時の流出率は 0.07 ～ 0.30 となり、値とばらつきが大きくなった。夏期（7 ～ 8 月；流出率 0.02 ～ 0.09）や秋の長雨期（9 ～ 10 月；流出率 0.11 ～ 0.19）の降雨流出時には見られなかった 0.20 以上の大きな流出率の事例も出現した。しかし、降雨融雪時の流出率と、積

Fig. 1 Water budget comparison between the snowmelt-only event and the rain-on-snow event at the lower part of the snowpack estimated by the chloride content budget. Dark gray, light gray and white represent the snowpack stored water, inflow water and solid snow particles, respectively.

雪深、初期流量、降雨条件（総量、強度、継続時間）等との間には明瞭な関係は認められなかった。ところが、融雪期間中の河川流出量における大きなピーク流量は降雨融雪出水時によく出現した。その理由としては、融雪期には毎日継続して融雪による流入があるため増水前の初期流量がもともと大きく、この状態に降雨が重なることでピーク流量がさらに大きな値になると考えられる。また、時間あたりの融雪強度と降雨強度をそれぞれピーク時について比較すると、融雪強度よりも降雨強度の方が大きく、このことも降雨融雪時に大きなピーク流量が出現する一因になっている。降雨融雪時の流出と融雪のみの流出を同じ程度の流入量の事例で比較したところ、前者の方がよりピーク流量が大きくなりやすい傾向があった（Fig. 3）。

Fig. 2 Difference in the stream runoff ratio for each of 22 rain-on-snow events.

Fig. 3 Relationship between the input intensity and the effective peak runoff. The effective peak runoff is the peak streamflow minus the initial streamflow before the hydro-graph rise.

以上のことから、降雨を伴った融雪出水時には流出率が大きく変動し、流出率 0.20 以上の大きな値が現れる原因を特定するには至らなかったが、初期流量や流入強度が要因で大きなピーク流量が現れることがわかった。

IV. 雪面上への模擬降雨実験

母子里と定山溪ダム流域では野外実測データに基づいた検討を行なってきたが、いずれの場合にも融雪期には総雨量 50mm 程度のイベントしか対象にできず、明確な結論が得られたとは言いがたい。そこで、2011 年の融雪期に、雪面上に模擬的に降雨を散布し、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。

実験は母子里の観測露場で行なった。散水装置は、容量 25L の塩ビ製の耐圧円筒タンクを複数連結させてコンプレッサーで圧力を掛け、常時一定圧力となって散布量が時間的に一定になるようにした。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 0.2MPa, 噴霧量 0.6L min⁻¹を与えた。散布範囲が直径 70 ~ 80cm の円形となるようにノズルの高さを調整して約 1m とし、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。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、水素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深層海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。実験を行なう露場には、積雪期前の 2010 年 10 月に 1m × 1m 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隣り合う 3 ヶ所に設置し、同じ積雪条件下で 3 回の繰り返し実験が行なえるようにした。

模擬降雨実験は、積雪全層が 0℃となり、融雪が 50cm 程度進んだ 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 ～ 80cm, 気温は $-6.0 \sim +9.9^{\circ}\text{C}$ で推移した。実験は全部で 3 回行ない、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 25L (25mm), 35mm h^{-1} , 43 分, 2 回目が 60L (60mm), 23mm h^{-1} , 159 分, 3 回目が 200L (200mm), 34mm h^{-1} , 356 分である。散布する水のタンクは雪面に穴を掘って半分ほど埋めるとともに、直射日光を受けて高温にならないようにした。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一様に散布されたと仮定して計算した。

3 回の実験後および実験区に隣接する対照区 (散水していない場所) の濡れ密度と重水素濃度の鉛直プロファイルを Fig. 4 に示す。散水に伴う水当量の増加は実験 1 では 10 cm 深と 40 cm 深で顕著に認められたものの、実験 2 では表層の 10 cm 深のみが増加し、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。重水素濃度にも同様の傾向が見られる。すなわち、濡れ密度が増加した深度では重水素濃度も重くなるが、そうでない深度では重水素濃度にも変化がない。積雪全層の水当量変化と積雪底面流出量の測定結果を Table 1 に示す。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 1,640

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。

散布量が少ない実験 1 の底面流出量がゼロとなるのは予想したとおりであったが、実験 2 と 3 でも極めて微量或はゼロ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。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、 1m^2 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の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。

今後は、水平方向の水の流れが起きないようにするか、或いは逆にそれを計測できるようにするか、装置を改良して再度実験を行なう必要がある。しかし、今回の実験からは、雪面上に多量の水が供給されると積雪内における水平方向の水の流れが予想以上に顕著になることが明らかになった。

Fig. 4 Vertical profiles of snow density and deuterium content for each experiment site and reference site.

Table 1 Summary of 3 experiments as compared with a reference site.

	Snow density (kg m ⁻³)	Snow water equivalent (mm)	Deuterium content (‰)
Reference site 1	418	459	-87.3
Experiment site 1	456	502	-82.4
Reference site 2	394	394	-83.7
Experiment site 2	523	523	-83.7
Reference site 3	399	399	-87.6
Experiment site 3	378	378	-84.7

V. おわりに

降雨融雪出水では、雨自体による融雪量が小さいにもかかわらず著しい河川増水が起きる。この問題を解明するためには、積雪下の地表面にどのような水供給があるかを知ることが鍵となる。時間当たりの供給量は小さくても、それが昼夜を問わず1日から数日にわたって継続するためなのか、降雨量に融雪量加わって時間当たりの供給量そのものが大きくなるためなのか明らかになれば、積雪の無い時期の河川流出過程は概ね解明されているので、モデル計算によって流出機構も解明できるであろう。白谷ほか（2007）は積雪内浸透を考慮した河川流出モデル計算の適否から、積雪内では降雨浸透水がすばやく流下するというモデルを提案しており、それを裏付ける観測結果も報告されている（Whitaker and Sugiyama, 2005; 石井, 2007）。しかし、観測が難しいこともあって報告事例は決して多いとは言えない。今後も、総雨量が100mmを越えるような降雨融雪イベント時や模擬降雨実験を対象に、積雪ライシメータを用いた積雪底面流出量の観測例を増やしていく必要がある。

引用文献

- 石井吉之（2007）：水資源としての雪，水環境学会誌，**30**, 58-61.
 石川信敬（1994）：融雪と積雪層の熱収支．基

礎雪水学講座VI「雪氷水文現象」，古今書院，17-48.

- 白谷友秀・中津川誠・星 清（2007）：積雪浸透を考慮した実用的流出モデルの開発．水文・水資源学会誌，**20**, 93-105.
 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.
 穴戸真也・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.
 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**.
 中津川誠・星 清（2001）：融雪期に豪雨が相俟って生起する出水の予測について．河川技術論文集，**7**, 25-30.
 Ferguson, S. A. (2000): The spatial and temporal variability of rain-on-snow. *Proc. of the International Snow Science Workshop*, 1-6 October 2000, Big Sky, Montana. American Avalanche Association. 178-183.
 Harr, D. R. (1986): Effects of clear cutting on rain-on-snow runoff in western Oregon: a new look at old studies. *Water Resour. Res.*, **27**, 1095-1100.
 Ishii, Y., Kodama, Y., Nakamura, R. and Ishikawa, N. (2004): Water balance of a snowy watershed in Hokkaido, Japan. *Northern Research Basins*

- Water Balance, IAHS Publ.*, **290**, 13-27.
- Marks, D., Kimball, J., Tingey, D. and Link, T. (1998): The sensitivity of snowmelt processes to climate conditions and forest cover during rain-on-snow: a case study of the 1996 Pacific Northwest flood. *Hydrol. Process.*, **12**, 1569-1587.
- Marshall, H.P., Conway, H. and Rasmussen, L.A. (1999): Snow densification during rain. *Cold Regions Science and Technology*, **30**, 35-41.
- Singh, P., Spitzbart, G., Hubl, H. and Weinmeister, W.H. (1997): Hydrological response of snow pack under rain on snow events: a field study. *J. Hydrol.*, **202**, 1-20.
- Sui, J. and Koehler, G. (2001): Rain-on-snow induced flood events in South Germany. *J. Hydrol.*, **252**, 205-220.
- Whitaker, A. C. and Sugiyama, H. (2005): Seasonal snowpack dynamics and runoff in a cool temperate forest: lysimeter experiment in Niigata, Japan. *Hydrol. Process.*, **19**, 4179-4200.
- (原稿受付：2012年3月14日)
(原稿受理：2012年4月24日)
-
- この論文に対する「討論」を2013年2月28日まで受け付けます。

降雨と融雪が重なって生じる融雪出水

石井 吉之

要 旨

降雨と融雪が重なった時の出水現象を明らかにする目的で、北海道の2つの流域で研究が行なわれた。積雪内部の流出過程に着目した研究では、積雪底面から流出する水の90%以上が積雪内部に貯留されていた水であり、晴天時でも降雨時でもこの割合に大きな違いはなかった。降雨を伴った融雪出水時に現れる河川流量の大きなピークの成因を調べた研究では、増水前の初期流量がもともと大きいことや、降雨量に融雪量を加えた流入強度が大きいことが要因であることが明らかにされた。さらに、雪面上に著しい大雨があった場合を想定した模擬降雨実験では、1m²の雪面上に6時間かけて200Lの模擬降雨を散布したが、積雪底面からの流出水は現れなかった。このことから、雪面上に多量の水が供給されると積雪内における水平方向の水の流れが予想以上に顕著になることが明らかになった。降雨と融雪が重なった時の出水現象を解明するためには、積雪下の地表面にどのような水供給があるかを知ることが鍵となり、積雪ライシメータを用いた積雪底面流出量の観測例を今後も増やしていく必要がある。

キーワード：降雨融雪イベント、融雪洪水、積雪内貯留水、ピーク河川流量、模擬降雨実験