



Title	積雪域に大雨が降った時の雪氷水文現象
Author(s)	石井, 吉之
Citation	低温科学, 77, 41-48
Issue Date	2019-03-20
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.77.41
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/73991
Type	departmental bulletin paper
File Information	07_p041-048.pdf



積雪域に大雨が降った時の雪氷水文現象

石井 吉之¹⁾

2019年1月4日受付, 2019年1月16日受理

北海道における最近の ROS イベントに関する研究成果の一部を取り上げて解説した。2012 年 4～5 月は、日射が十分な上に気温が高く風も適度な春の好天が 20 日以上続いたことにより、例年になく速く融雪が進み、4 月下旬から 5 月初めには ROS イベントが重なって融雪災害が多発した。母子里では、雪面上に著しい大雨が降った場合を想定した模擬降雨散水実験が 2 通りの方法で行われた。自然積雪法では積雪底面流出が出現する場合と出現しない場合のどちらもが観測された。積雪ブロック法では積雪底面流出の流出率はほぼ 1 になるが、浸透水の自然の流れを乱している可能性がある。2018 年 3 月 9～10 日には ROS イベント時に雪泥による河道閉塞が起こり、その後の閉塞部の崩壊によって融雪鉄砲水が発生したと推察される。

Snow hydrological impacts due to rain-on-snow events

Yoshiyuki Ishii¹

Some results of recent rain-on-snow (ROS) event studies in Hokkaido are discussed. Snow melting rates during April to May in 2012 were remarkably fast due to the warm, weak wind and a lot of sunshine conditions. Then, snowmelt hazards occurred many sites during a ROS event from late April to early May. Artificial rain sprinkling experiments were carried out in Moshiri by the two different ways. One was the natural snowpack method, and the other one was the snow block method. Both methods have merits and demerits. Under the ROS event from March 9 to 10 in 2018 in central Hokkaido, stream water level showed the typical changes at the time of the occurrence of snowmelt flash flood.

キーワード：ROS イベント, 融雪期, 模擬降雨散水実験, 融雪鉄砲水

Rain-on-snow event, Snowmelt season, Artificial rain sprinkling experiment, Snowmelt flash flood

1. はじめに

北海道では多くの地点で 2 月下旬にその冬の最深積雪が観測され、その後、3 月から 4 月にかけて融雪期を向

かえる。本格的な融雪はその地点の日平均気温が 0℃を超え、積雪全層で雪温が 0℃になった後に始まり、積雪底面からもさかんに融雪水が流出するようになる。融雪速度は、一般には日射（天候）、大気放射（雲量、気温、水蒸気量など）、大気からの顕熱供給（気温、風速）などの大気条件によって決まる。さらに大雨が降るような気象条件が重なると、高い気温や強い風速による顕熱供給の増大が融雪の加速を招き、大雨と相まって河川流量の急激な増大や傾斜地での土砂崩れなどをもたらすことがある。

積雪上にまとまった雨が降る現象は rain-on-snow (ROS) イベントと呼ばれ、春先の融雪期のみならず冬の積雪期間中にも起こり、全層雪崩・土砂崩れ・地すべ

連絡先

石井 吉之

北海道大学 低温科学研究所

〒060-0819 札幌市北区北 19 条西 8 丁目

Tel. 011-706-5583

e-mail: ishiy@pop.lowtem.hokudai.ac.jp

1) 北海道大学 低温科学研究所

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

りや融雪洪水などの災害要因になっている。ROS イベントに関する雪氷水文学的な研究は、2000 年まではそれほど多くなかった (Harr, 1986; Singh et al., 1997; Marks et al., 1998; Marshall et al., 1999; Sui and Koehler, 2001 など) が、2000 年以降は世界各地でさかんに研究されるようになり (Whitaker and Sugiyama, 2005; McCabe et al., 2007; Mazurkiewicz et al., 2008; Eiriksson et al., 2013; Cohen et al., 2015; Wayand et al., 2015; Juras et al., 2016; Pomeroy et al., 2016 など)、2014 年のアメリカ地球物理学連合秋季大会では“Rain-on-snow floods in a changing climate”という特別セッションが開催されるまでに至った。日本でも、2016 年の日本雪氷学会・日本雪工学会合同全国大会において特別セッション「Rain-on-snow: 積雪時の降雨と災害」が開催され、ROS イベントに関する研究の必要性や今後の方向性についての議論がなされた。また、最近では ROS イベント時に対象とされる湿雪 (水を多く含む降雪や積雪) についての関心が高まり、2017 年の日本雪氷学会誌には湿雪特集号が組まれた。しかし、実際に野外での ROS イベントに関する調査研究事例となると数は少ない。その理由は、大雨に強風が重なる悪天候下での観測が必要になるため、必ずしも十分なデータを得ることができないからであり、それがまたこの現象についての理解が遅れる一因にもなっている。

本稿では、積雪域に大雨が降った時の雪氷水文現象として ROS イベントに焦点をあて、2012 年 4~5 月の北海道内陸部から日本海側地域にかけての ROS イベントを含めた速い融雪の特徴、北海道北部の母子里で行われた ROS イベントを想定した積雪上への模擬降雨散水実験の結果と問題点、および 2018 年 3 月の北海道中央部における融雪鉄砲水発生時の河川水位変動について報告する。

2. 2012 年 4 月の速い融雪

前節でも述べたように、融雪の進み方には日射や大気放射、および雪面への顕熱供給を決める気温や風速などが効いており、積雪深の大小には関係しない。融雪の開始時期や消雪までに要する日数には、その年の気象条件や積雪深の大小に応じた年毎の違いはあっても、融雪の進み方すなわち融雪速度には年毎の違いは小さいという一般的傾向がある。

ところが、2012 年 4 月の北海道内陸部から日本海側地域にかけての融雪は、これまでになく速い速度で進んだ。図 1 は石狩川水系雨龍川源流部の母子里で観測された

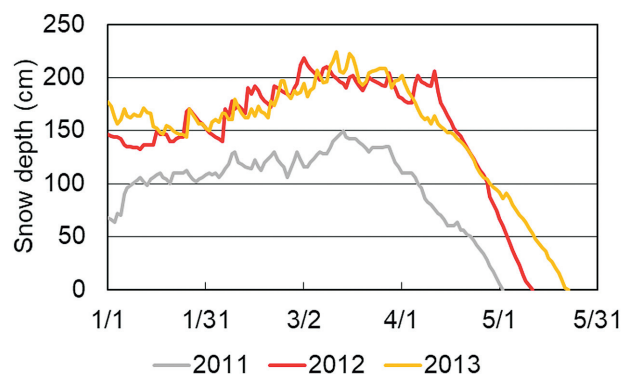


図 1: 母子里における 1~5 月の積雪深変化。

2011~2013 年のそれぞれ 1~5 月の積雪深変化である。2011 年は少雪年、2012 年と 2013 年は多雪年であったが、積雪深の大小に関らず 2011 年も 2013 年も同じ速度で融雪が進んだのに対し、2012 年の融雪はこれらに比べ著しく速く融雪が進んだ。特に 4 月下旬から 5 月初めにかけては、本州南岸の発達した低気圧が北海道を南から北に通過し、南からの暖気の流入によって気温が高く風も強い状態が続いたために融雪量が多くなり、これに降雨が重なって北海道各地 (初山別村、沼田町、夕張市、霧立峠、中山峠など) で土砂崩れや融雪洪水が発生した。札幌圏の幹線国道 230 号線を管理する北海道開発局の調査によると、中山峠で融雪土砂崩れが発生した 5 月 4 日の日換算雨量は 126 mm (雨量 70 mm + 融雪量 56 mm) で、過去 18 年間で最も大きな値であった。先述の母子里では晴天日の平均的な融雪熱量が $60 \sim 80 \text{ Wm}^{-2}$ であるのに対し、この時には 107 Wm^{-2} まで増大した。放射収支量が大きかったことに加え顕熱輸送量の増加も融雪熱量の増大に寄与した。このような暖気の流入と顕著な大雨に伴って融雪量が著しく増大し災害に至る例は、必ずしも多くはないが良く知られている。たとえば、2006 年 5 月 10~11 日の天塩川の融雪洪水などもその一例である (石井, 2012a)。

しかし、2012 年 4 月の速い融雪は 4 月下旬から 5 月初めの ROS イベントが起きる以前から観測されていた。図 2 に母子里近隣の AMeDAS 幌加内における 2011~2013 年のそれぞれ 1~5 月の積雪深、日平均気温、日平均風速、日照時間の経日変化を示す。積雪深、気温、日照時間については平年値も併記した。ROS イベント時には気温が高く風も強かったので融雪量が大きくなったが、4 月上旬から下旬にかけては、気温も他の年や平年値と比べ高くはなく、風速も同程度であった。母子里における 4 月 18~24 日の 1 週間平均の融雪熱量は 59.2 Wm^{-2} で、この地域における晴天日の平均的な融雪熱量

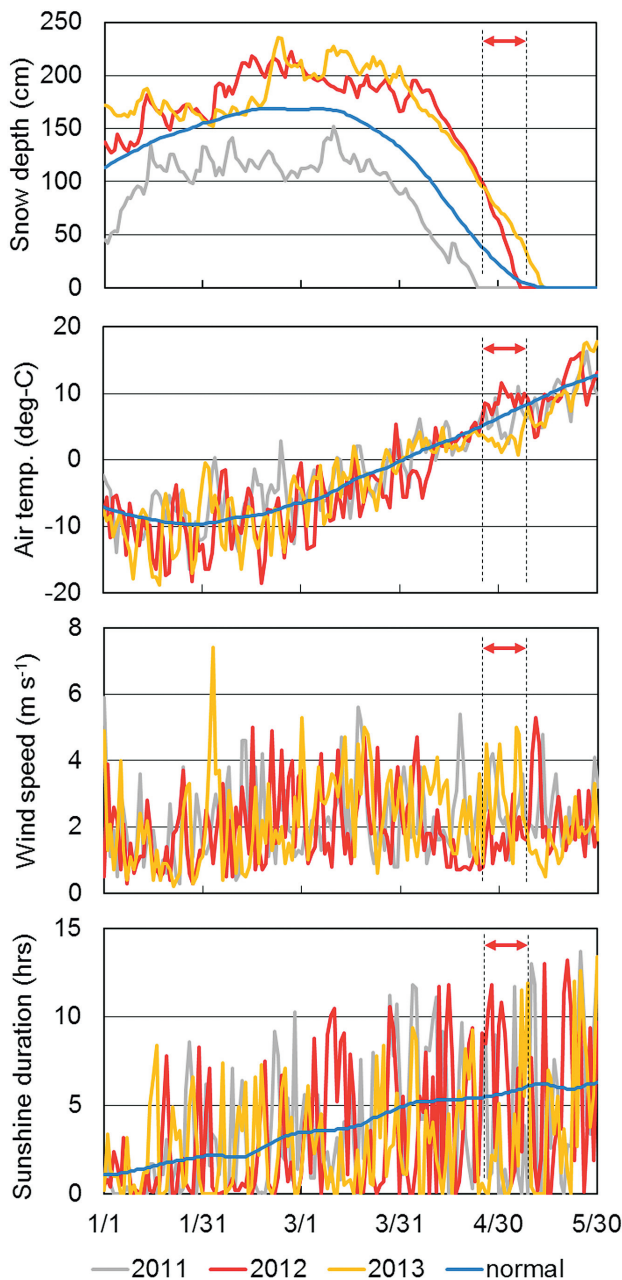


図2：AMeDAS 幌加内における1～5月の積雪深、気温、風速、日照時間の経日変化（赤矢印は2012年に暖気流入とROSイベントが起きた期間を示す）。

であった。また、4月の月降水量は55.5 mmで平年値65.8 mmよりやや少なく、雨によって融雪が進んだとも考えにくい。積雪密度や層構造の鉛直分布を図3に示すが、2012年だけが積雪特性が異なるようすは認められない。AMeDAS 幌加内における2012年の前後5年分の3～5月の積雪深変化を図4に示す。11ヶ年のうち2012年だけが融雪速度が速いわけではなく、2010年4月下旬などにも同程度の融雪速度の期間が見られる。しかし、2012年のように4月上旬から20日間以上も速い融雪が継続した年はない。図2の中で、4月10日から30日ま

での21日間における気温、風速、日照時間の期間平均値を3ヶ年および平年値について表1にまとめた。2012年は他と比べて気温が高く、風が適度に吹き、日照時間が大きいようすが分かる。つまり、日射が十分な上に気温が高く風も適度な春の好天が20日以上続いたことが速い融雪につながったと考えられる。一時的な寒気の流入や、厚い低層雲に覆われ弱い降雨も伴うような悪天候によって、順調に進んでいた融雪が小休止する期間が毎年のように出現するが、2012年は春の好天が長く続いたことが速い融雪につながり、さらに4月下旬から5月初めのROSイベントによって速い融雪が約1ヶ月も続くことになった。

3. 雪面上への模擬降雨散水実験

ROSイベント時における積雪内部での浸透水の流動や貯留の実態を把握することは、積雪下の土壤層に供給される水の量や応答時間を知る上で重要である。しかし、ROSイベントは毎年のように起きる現象ではなく突発的に起こることが多いので、十分に観測体制を整えてのデータ取得が難しい。そこで積雪の上から模擬的に降雨を散水し、積雪内の水の挙動や積雪底面流出水の流出応答を調べようという研究がなされている（Singh et al., 1997; Eiriksson et al., 2013; Juras et al., 2016; 石井, 2012b など）。散水実験の方法には、自然積雪の上に散水する方法（自然積雪法）と、積雪ブロックを切り出して散水する方法（積雪ブロック法）の2通りがある。自然積雪法では積雪内浸透水は必ずしも鉛直に流下するわけではなく、層境界などで水平方向に流動してしまうことがあるため、流出率が著しく小さくなる恐れがある。一方、積雪ブロック法は周囲との浸透水の行き来を遮断するため流出率は1に近くなる。しかし、流動場を区切ってしまいうので自然状態での浸透水の流れを再現しているとは言いがたい側面もある。どちらの方法にも一長一短があり、どちらがより好ましいかの判断は難しい。この節では、北海道の母子里で行われた上記2通りの方法による模擬降雨散水実験の結果を述べ、それぞれの問題点や改善すべき点などについて論じる。

3.1 自然積雪法による模擬降雨散水実験

北海道北部の母子里盆地では2011～2013年の各融雪期に、積雪表面に100 mm以上の大雨が降った時を想定した模擬降雨散水実験が行われた（石井ほか, 2013）。前年10月に地表面に1 m×1 mの積雪ライシメーターを敷設しておき、冬の間はこの上に自然積雪を堆積させる。

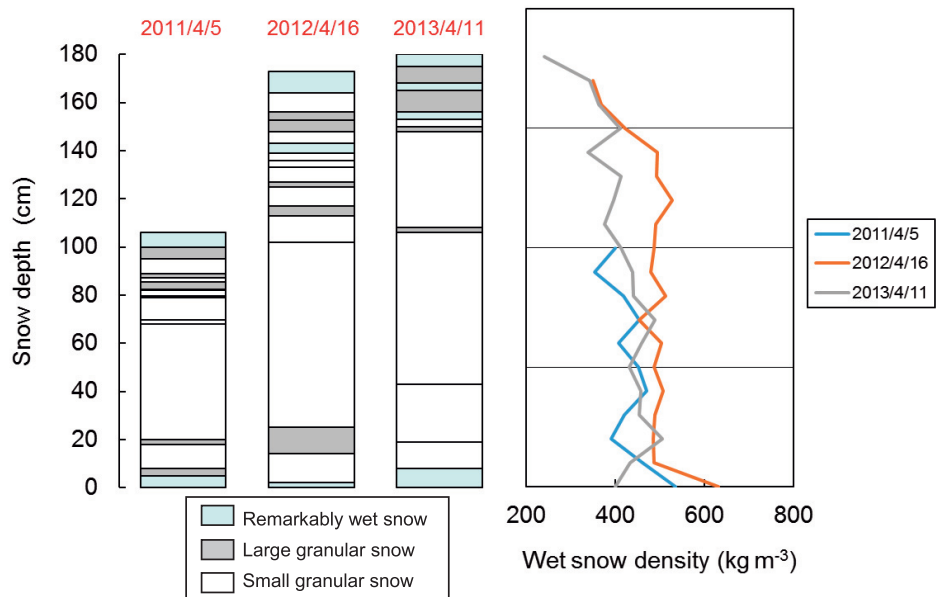


図3：積雪の層構造と濡れ密度の鉛直分布.

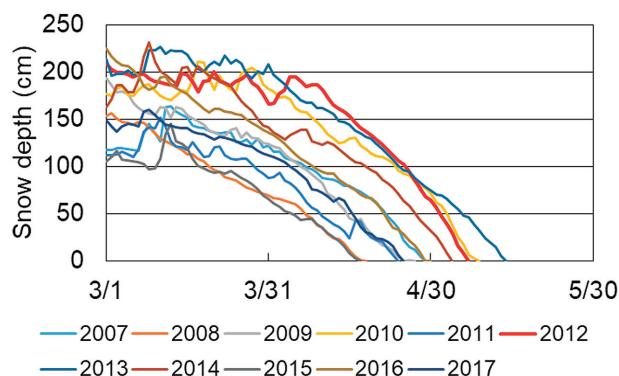


図4：AMeDAS 幌加内における3～5月の積雪深変化.

積雪ライシメーターとは積雪底面から流出する水をまとめてその流量を測る設備である。春になり2 m以上の積雪深が1 m程度になるまで融雪が進んだ時期に、市販の噴霧ノズルを用いて雪面上1 mから模擬降雨を降雨強度約 35 mmh^{-1} で散水した。降雨量や散水継続時間は実験によって様々であるが、3ヶ年の実験から、積雪底面流出が顕著に現れる場合とほとんど現れない場合とが観測

された。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、すなわち積雪内部で鉛直下向きの浸透が顕著な場合と水平方向の流動が顕著な場合のどちらかが起こりえることが明らかにされた(石井ほか, 2017a)。こうした違いは層境界での粒径コントラストによると考えられるので、コントラストに応じた流出特性の違いを多次元水分移動モデル(Hirashima et al., 2014)を用いた数値実験によって検討した。積雪底面流出が顕著な場合とそうでない場合について再現計算を行った結果、粒径コントラストは層境界での浸透水の滞留を引き起こすという面では重要であるが、積雪底面流出が出現するか否かは、層境界よりさらに下層での水みちの発達の仕方に強く依存することが分かった。

3.2 積雪ブロック法による模擬降雨散水実験

次に、散水強度を時間的に変化した場合の模擬降雨散水実験を2016年と2017年の各融雪期に実施したが、両年とも積雪底面流出は出現しなかった。そこで、

表1：AMeDAS 幌加内における気温、風速、日照時間の4月10日から30日までの期間平均値.

	Air temperature (deg-C)	Wind speed (ms^{-1})	Sunshine duration (hours)
2011	4.0	2.6	4.4
2012	4.5	1.2	6.1
2013	2.7	2.5	3.2
normal year	4.1	—	5.4

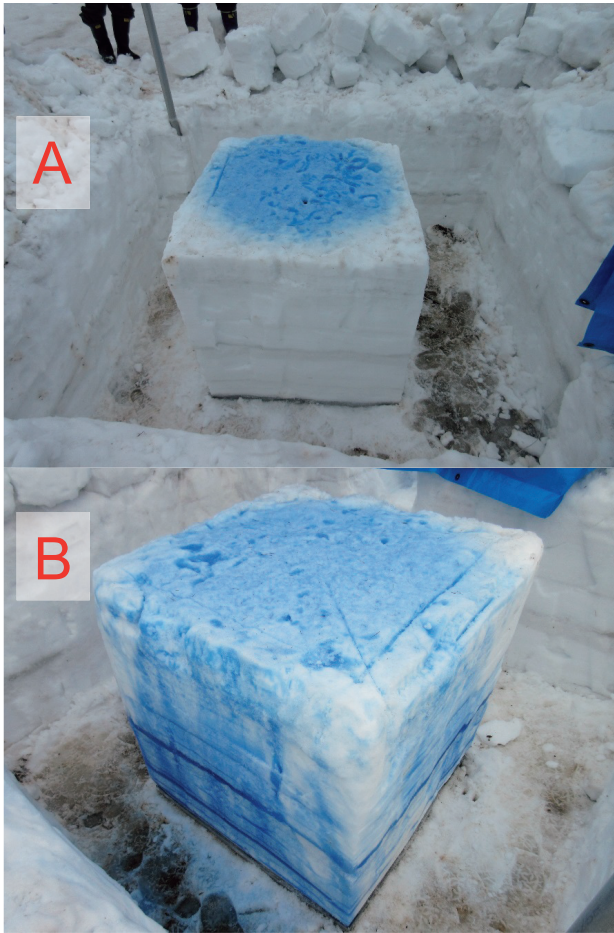


図5: 散水開始1分後(A)と30分後(B)の着色水の浸透状況(石井ほか, 2017b)。

Singh et al. (1997) や Juras et al. (2016) のように積雪ライシメーター上の深さ約1mの積雪ブロック(約 1 m^3)を切り出し、周囲の自然積雪から切り離した状態で散水実験を実施した。青インクで着色した水道水をノズルの先から一定強度 1.2 Lmin^{-1} (雨量強度にして 72 mmh^{-1})で75分間にわたって散水した。この時の気温は $0\sim 2^\circ\text{C}$ 、積雪深は 102 cm であった。散水開始1分後と30分後の着色水の浸透状況を図5に、また、散水量と積雪底面流出量の時間変化を図6に示す。底面流出は散水終了後も3時間以上も流出し続け、流出率は91%であった。積雪ブロックの4側面が大気圧にさらされるので、積雪内の浸透水の多くが側面に向かうようになり、4側面が着色した水で青く染まると予想されたが、1面だけではなく4面が大気圧条件にあったことで、側面の壁をつたう流れは顕著にはならなかった。また、ブロックの外へ出ていく水も無かったことから、散水量のほぼ全量がブロック内の降下浸透に伴う遅れを伴って積雪底面から流出した。こうした結果はSingh et al. (1997) や Juras et al. (2016) の結果と同様である。しかし、ブロッ

クを周囲の積雪から切り離すことは、積雪内の横方向の流れを人為的に妨げることになり、自然状態を再現しているとは言いがたい。鉛直浸透が強調されすぎた結果であるとも言えよう。融雪期のように積雪内部でさかんな融雪水の浸透が起きている場合、そのようすを観察あるいは測定しようと積雪ピットを掘ると、その断面が大気圧下におかれるため、その断面に向かう流れが起きてしまう。乾雪を対象とした積雪断面観測は、湿雪の場合は必ずしも妥当な方法とは言えない。特に、降雨と融雪が重なった時のように速い積雪内浸透が起きている時には注意が必要である。

4. 雪泥と融雪鉄砲水

2018年3月9～10日には、発達した低気圧や前線の影響で南から暖かく湿った空気が流れ込んで気温が上昇し、時ならぬ融雪が急速に進んだ。これに太平洋側を中心とした日雨量 100 mm 超の大雨が重なり、北海道各地で浸水や洪水・雪崩被害が起こった。特に上川管内美瑛町の辺別川では、雪泥による河道閉塞とその崩壊による融雪鉄砲水が発生したと考えられ、河川改修工事中の作業員が被災した。国土交通省の水文水質データベース(<http://www1.river.go.jp/>)に基づき、この時の河川水位変動を検証してみる。近隣のAMeDAS美瑛における降雨量、気温、風速の変動を図7に示す。3月8日から11日までの3日間の総雨量は 35 mm で、上流部のAMeDAS白金で観測された 134.5 mm に比べてかなり少ない。3日間の雪面低下量が 11 cm なのでこの期間の換算雨量は 73 mm となるが、必ずしも洪水をもたらすような量ではない。被災地を含む近隣の河川水位観測所の位置を図8に、各観測所におけるイベント前の最低水位をゼロとした時の相対的水位変動を図9に示す。A、B、Cの3地点が美瑛川本流の観測所、D地点がその支流の辺別川の観測所である。美瑛川の3観測所には降雨融雪イベントに対応する類似した水位変動が現れている。しかし、辺別川の水位変動は他の3地点に比べ水位の立ち上がりが遅れ、その後、急激な水位上昇と急低下が起きている。その後さらに2回の水位上昇と低下がある。このような水位変動は、河川水の流れが一時的にダムアップされた後に、ダム堤の開放によって鉄砲水が起きた可能性を示唆する。河川を浮遊するアイスジャムやスノージャムからなる雪泥および流木や土砂などが河道狭窄部や橋脚部などで流れに取り残されて積み重なり、一時的に河道が閉塞されて不安定なダム堤ができ、その後、ダム堤が崩壊して鉄砲水が生じたと考えられる。

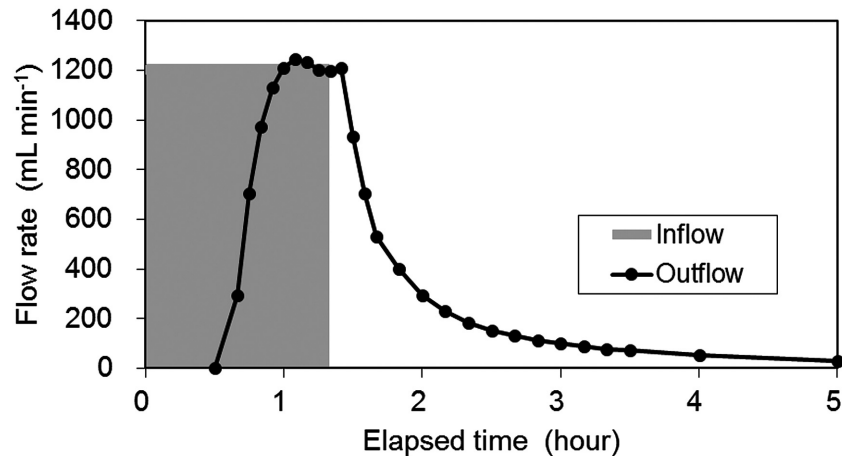


図6：散水量と積雪底面流出量の時間変化（石井ほか，2017b）.

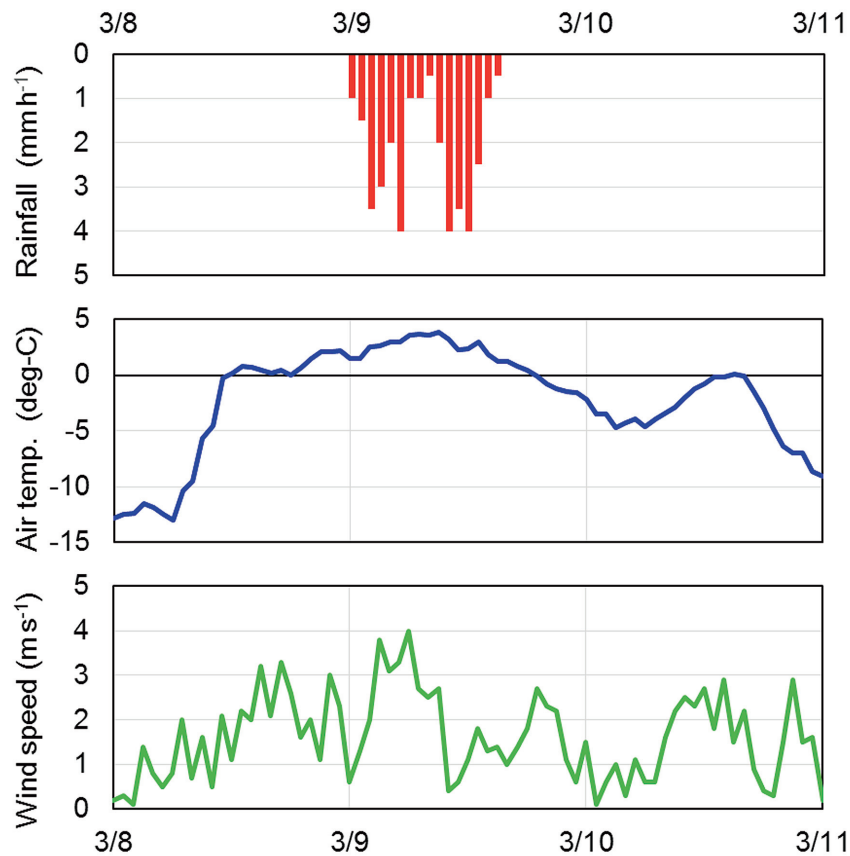


図7：AMeDAS 美瑛における降水量，気温，風速の時間変化.

北海道のような寒冷積雪地域では、河水の融解は一時期に集中して起きたり、本格的な融雪期前の大雨によって起きることがある。こうした場合には、アイスジャムやスノージャムからなる雪泥による河道閉塞、あるいは河川や水路などに廃棄した雪が固くて重い塊となって水流を妨げる通水障害などが生じることがあり、浸水被害や鉄砲水に対する注意が必要である。融雪期における河道閉塞とその後の鉄砲水発生については、地形学地質学及び水理学的な観点からの要因分析が必要なことは言う

までもないが、気象学及び雪氷学的な観点からの要因分析、すなわち、どういう気候条件のもとで発生しやすくなるか等の要因分析も必要と考えられる。

5. まとめ

本稿では、積雪域に大雨が降った時の雪氷水文現象として、北海道における最近のROSイベントに関係した研究成果の一部を取り上げて解説した。

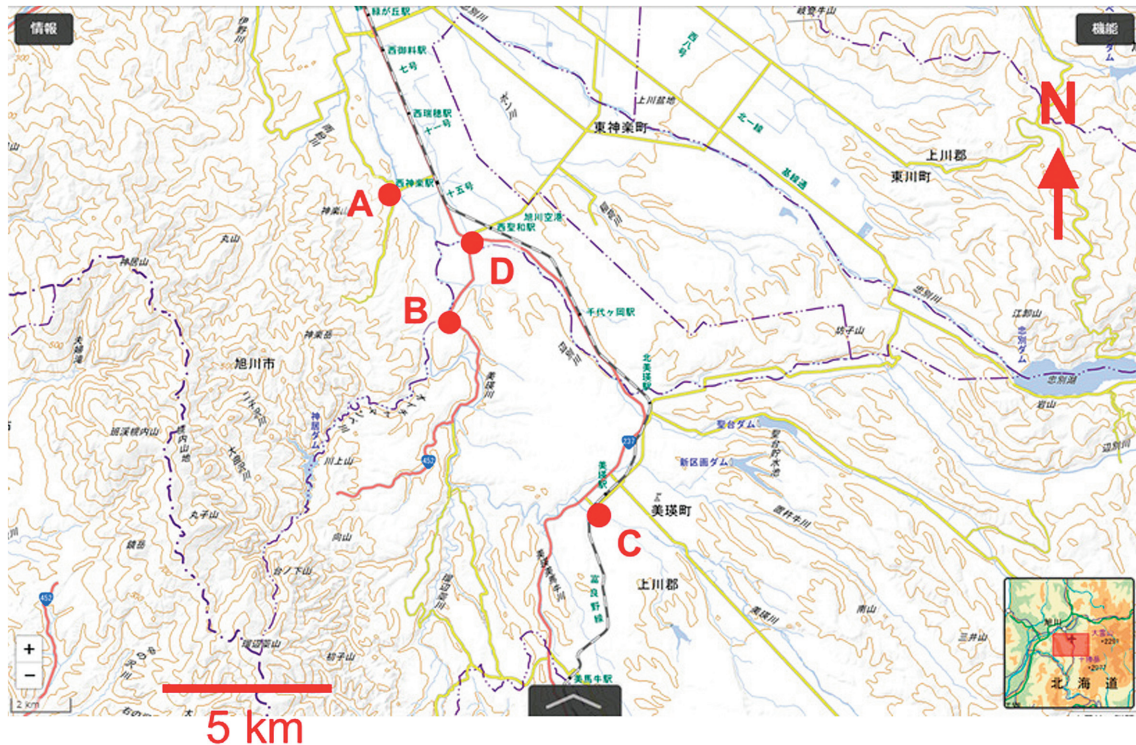


図8：被災地周辺の河川水位観測所の位置（下図は地理院地図より引用）。

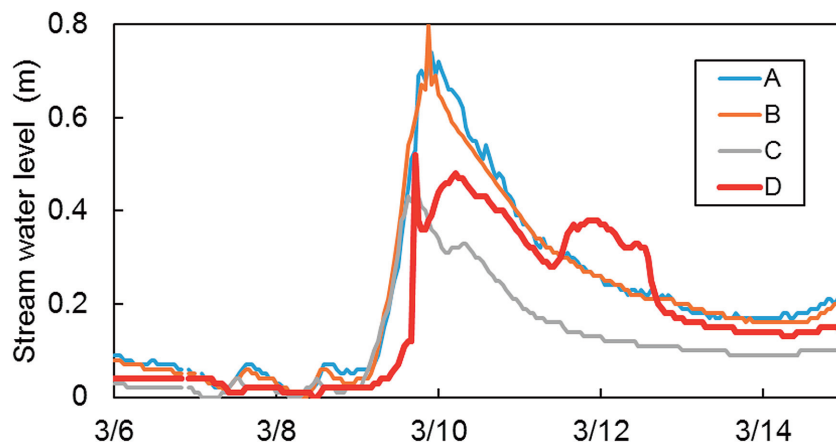


図9：各観測所における河川水位の時間変化。

一般に融雪は地域毎にある決まった速さで進むことが多いが、好条件が重なると著しく速くなることがあり、このような時に大雨が重なると深刻な融雪災害につながる危険がある。2012年4月～5月がまさにその例であり、大雨に伴う融雪災害が北海道各地で多発した年であった。

ROSイベントは突発的に起こることが多いので、野外では十分に観測体制を整えてのデータ取得が難しい。そこで積雪の上から模擬的に降雨を散水し、積雪内の水の挙動や積雪底面流出水の流出応答を調べようという研究がなされている。これには自然積雪法と積雪ブロック法という2つの実験方法があるが、それぞれに一長一短が

あり、どちらが望ましいかの判断は現時点では難しい。

2018年3月9～10日のROSイベントではアイスジャムやスノージャムからなる雪泥および流木や土砂などで河道閉塞が起こり、その後、閉塞部のダム堤が崩壊して融雪鉄砲水が発生したと考えられる。地震や大雨に伴う土砂崩れによって川水が塞ぎ止められ、河道閉塞湖が生じる例は各地で報告されているが、北海道では雪泥による河道閉塞に対する注意喚起が必要である。

ROSイベント時の雪氷水文現象に関しては、野外観測データの蓄積が今後ますます重要になると考えられる。大学や研究機関のみならず行政担当者と連携し合うことにより、道路や河川の膨大な管理用データの中から希少

データの掘り起こしを行えば、ROS イベント時の雪氷水文現象の実態解明に一步近づけることが期待される。

謝辞

母子里における気象観測および模擬降雨散水実験には低温科学研究所技術部の高塚徹・千貝健・森章一・中坪俊一（現・JAXA）の各氏の支援を受けた。本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究（C）課題番号 26350482 の助成を受けて実施した。

参考文献

- Cohen, J., H. Ye and J. Jones (2015) Trends and variability in rain-on-snow events. *Geophysical Research Letters*, **42**, 7115–7122.
- Eiriksson, D., M. Whitson, C. H. Luce, H. P. Marshall, J. Bradford, S. G. Benner, T. Black, H. Hetrick and J. P. McNamara (2013) An evaluation of the hydrologic relevance of lateral flow in snow at hillslope and catchment scales. *Hydrological Processes*, **27**, 640–654.
- Harr, D. R. (1986) Effects of clear cutting on rain-on-snow runoff in western Oregon: a new look at old studies. *Water Resources Research*, **27**, 1095–1100.
- Hirashima, H., S. Yamaguchi and T. Katsushima (2014) A multi-dimensional water transport model to reproduce preferential flow in the snowpack. *Cold Regions Science and Technology*, **108**, 80–90.
- 石井吉之（2012a）融雪と河川水。北海道の農業と気象（日本農業気象学会北海道支部 編著），93–97，北海道新聞社，札幌。
- 石井吉之（2012b）降雨と融雪が重なって生じる融雪出水。日本水文科学会誌，**42**，101–107。
- 石井吉之，中坪俊一，森章一，的場澄人（2013）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——。北海道の雪氷，**32**，104–107。
- 石井吉之，平島寛行，山口悟（2017a）Rain-on-snow に伴う融雪災害の研究動向。日本水文科学会誌，**47**，119–126。
- 石井吉之，築場大将，森章一，高塚徹，佐藤陽亮（2017b）積雪ブロック法による模擬降雨散水実験，陸水物理研究会報，**39**，19。
- Juras, R., J. Pavlásek, T. Vitvar, M. Šanda, J. Holub, J. Jankovec and M. Linda (2016) Isotopic tracing of the outflow during artificial rain-on-snow event. *Journal of Hydrology*, **541**, 1145–1154.
- Marks, D., J. Kimball, D. Tingey and T. Link (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. *Hydrological Processes*, **12**, 1569–1587.
- Marshall, H. P., H. Conway and L. A. Rasmussen (1999) Snow densification during rain. *Cold Regions Science and Technology*, **30**, 35–41.
- Mazurkiewicz, A. B., D. G. Callery and J. J. McDonnell (2008) Assessing the controls of the snow energy balance and water available for runoff in a rain-on-snow environment. *Journal of Hydrology*, **354**, 1–14.
- McCabe, G. J., M. P. Clark and L. E. Hay (2007) Rain-on-snow events in the western United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **88**, 319–328.
- Pomeroy, J. W., X. Fang and D. G. Marks (2016) The cold rain-on-snow event of June 2013 in the Canadian Rockies - characteristics and diagnosis. *Hydrological Processes*, **30**, 2899–2914.
- Singh, P., G. Spitzbart, H. Hubl and W. H. Weinmeister (1997) Hydrological response of snow pack under rain on snow events: a field study. *Journal of Hydrology*, **202**, 1–20.
- Sui, J. and G. Koehler (2001) Rain-on-snow induced flood events in South Germany. *Journal of Hydrology*, **252**, 205–220.
- Wayand, N. E., J. D. Lundquist and M. P. Clark (2015) Modeling the influence of hypsometry, vegetation, and storm energy on snowmelt contributions to basins during rain-on-snow floods. *Water Resources Research*, **51**, 8551–8569.
- Whitaker, A. C. and H. Sugiyama (2005) Seasonal snowpack dynamics and runoff in a cool temperate forest: lysimeter experiment in Niigata, Japan. *Hydrological Processes*, **19**, 4179–4200.