

## 寒冷地における降雨に伴う融雪出水特性に関する検討

## —釧路市標茶を事例として—

Characteristics of rain on snow (ROS) flood event at Shibechea area in Kushiro city

北海道大学工学部環境社会工学科 ○学生員 守田銀二 (Ginji Morita)  
 北海道大学大学院工学研究院 教授 正会員 今日出人 (Hideto Kon)  
 北海道大学大学院工学研究院 准教授 正会員 久加朋子 (Tomoko Kyuka)  
 北海道大学大学院工学研究院 教授 フェロー 清水康行 (Yasuyuki Shimizu)

## 1. はじめに

北海道のような積雪寒冷地域では、春先、雪解けに伴い河川水位が上昇する融雪洪水が毎年生じる。なかでも、降雨と融雪が重なる現象は rain-on-snow (ROS) event と呼ばれ、世界各地で大規模な融雪災害をもたらす事例が報告されている<sup>1)2)</sup>など。たとえば、アメリカ合衆国の北西部、オレゴン州の山岳地帯では真冬にかかわらず 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<sup>3)</sup>。また、高緯度に位置するヨーロッパ諸国においても、スイスのアルプスでは 116 箇所にて合計 1000 回以上の ROS による融雪出水が記録されていることが報告されている<sup>2)</sup>。冬期や早春期の rain-on-snow flood (降雨を伴う融雪洪水) の発生は、水の冷たさも加わり、甚大な被害をもたらす可能性が高いことが分かる。

北海道においても、rain-on-snow flood による融雪災害は明治期の頃から多数報告されており、尻別川など、融雪洪水対策を目的に築堤が始まった河川も少なくない<sup>3)</sup>。北海道を代表する河川である石狩川においても 1956 年、わずかな降雨に融雪が加わり、rain-on-snow flood による氾濫によって死者 15 名、行方不明者 43 名が記録されている。北海道においては、夏季の洪水に加え、冬期の出水に備えた治水対策も重要な課題であったことが分かる。しかしながら、治水対策の進んだ今日においても、rain-on-snow flood による被害は 2002 年における札幌市内望月寒川<sup>4)</sup>、2006 年における天塩川<sup>5)</sup>、2012 年における尻別川<sup>6)</sup>、2018 年における釧路川の標茶・弟子屈地域 (図-1) など、比較的高頻度で発生している。

降雨を伴う融雪と、rain-on-snow flood に関する研究は、かなり古くから報告されており、比較的少ない降雨によっても引き起こされることが指摘されている。実際、小島ら<sup>7)</sup>の検討では、北海道大学雨竜地方演習林母子の盆地を流れる川の流域を対象に平地での雨の融雪効果等の観測を実施し、放射吸収が全融雪熱量の約 65% を占めるなか、雨自身の融雪熱量の寄与は 0.5% にすぎなかったことが分かった。つまり、早春期は断続的な気温上昇に伴う融雪により河川流量が増加しており、少量の降雨であっても洪水を引き起こす可能性がある。しかしながら、降雨による融雪量は晴天日の融雪量に比べて少なく<sup>8)9)</sup>、それ以外の要因として、積雪や雪崩、投雪過多による河道閉塞など、rain-on-snow flood と呼ばれる融雪災害には複数の洪水形態が存在することが分かる。寺



図-1 釧路川標茶・弟子屈における ROS に伴う融雪出水の様子、高水敷の冠水と内水氾濫が確認される (2018年3月9日撮影、(株)北開水工提供)

田ら<sup>10)</sup>は、この洪水形態として、通常の溢水、シャーベット状の雪の塊が押し寄せるもの、大きな雪の塊を抱え込んだ鉄砲水(雪泥流)の存在を指摘している。さらにこのほか、後述する釧路市標茶では、通常の積雪量が比較的少ないにも関わらず、降水を伴う融雪出水により釧路川本川の水位が上昇し、(1) 高水敷が氾濫危険水位まで冠水すると共に、(2) 樋門を閉めたことに伴って内水域で降った雨が雪を含んで小水路に流れ込み、水が排水されないために冠水被害にあったと報告されている(平成30年3月出水)。こうした融雪時期における rain-on-snow flood の規模は気温、湿度、降雨量、積雪深、雪の含水率、風速、さらには流域特性などと関係性があることが指摘されている<sup>1)</sup>。しかし、降雨と積雪量との関係、積雪による降雨貯留による出水ピークの遅れ<sup>11)</sup>、比較的小さい降雨量で著しい水位上昇が起きる要因<sup>9)</sup>など、未だ分かっていない部分も多い。

そこで、本研究では、まず始めのステップとして北海道内での融雪出水に伴う洪水被害が生じる可能性の高い地域を把握した。続いて、2018年3月9日に各々 rain-on-snow flood により融雪被害の生じた、釧路市標茶を事例とし、融雪洪水形態とそれに伴う出水特性の違いを把握することを目的とした。また、融雪期と夏季の出水の比較として、2016年3月と2016年8月出水の降雨と流量ピークの遅れを比較すると共に、数値解析より水位上昇の再現性を確認した。

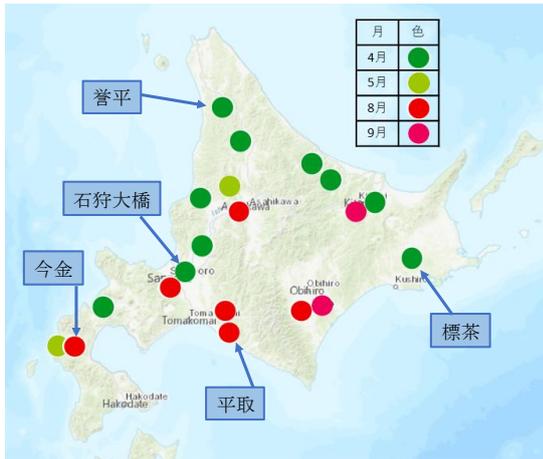


図-2 道内1級河川の20観測所における年最高日流量の記録回数が最も多い月

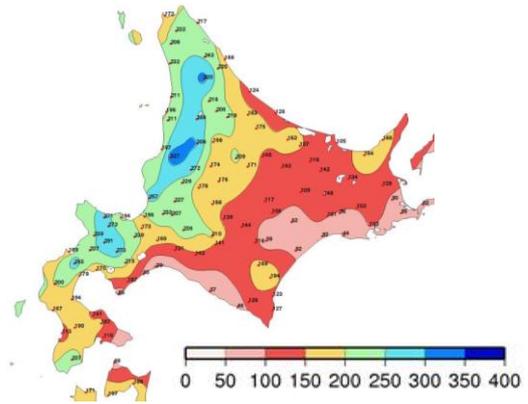


図-3 北海道内の1月の平均降雪量 (気象庁観測データ, 国土交通省資料より転載)

## 2. 北海道における融雪出水の地域特性

北海道における各河川について、1年のどの時期に最も大規模な出水を経験するのかを把握することを目的に、国土交通省の水文水質データベース (URL: <http://www1.river.go.jp/>) よりダウンロード可能な経年的な流量データを整理した。観測所は、長期的な傾向を見るため、1級河川の中でも25年以上の流量観測記録のある計20観測地点を選択した。なお、このうち14地点は各河川の基準点に該当する。

図-2に、各観測地点における年最高の日流量の記録回数が最も多い月を示す。図-2によると、日本海に面する地域、たとえば石狩川水系(石狩大橋)、天塩川水系(譽平)で融雪期に年最大日流量を記録する月が最も多いことが分かる。また網走や知床、釧路地域(標茶)においても融雪期に最大日流量を記録することが多いことが分かる。その一方で、北海道の南側に位置する沙流川水系(平取)、十勝川水系では夏季における最大日流量の記録数が多いことが分かる。

そこで、降雪量と融雪期の出水回数との関係を比較するため、図-3に、国土交通省によって観測された北海道内の1月の平均降雪量を示す。図-3より、日本海に面する地域は冬季の降雪量が多いことから、積雪の多い地域では融雪期の出水が多くなると推察される。一方、網走や釧路地区および北海道の南側の両地域は、降雪量がそれほど多くない地域であるにも関わらず、網走や釧路地域の方が融雪出水が多い要因は、両地域の夏季の降雨の差によるものであると推察される。

図-4に図-3に示す20箇所の観測所より、地域性の異なる5河川における各観測所の経年的な最大年日流量の出現回数を示す。図-4より、冬季と夏季の出水頻度を比較すると、譽平観測所(天塩川水系)では融雪期の出水が圧倒的に多いことが分かる。一方で、譽平以外の地域では融雪期と夏季の出水がほぼ同程度であった。これは、図-2と比較すると融雪期に最大流量が多い地域でも夏季出水が思いのほか多い地域もあるということを示している。ただし、釧路の標茶においては、その他の地域に比べて過去に1月や3月の融雪出水がしばしば認め

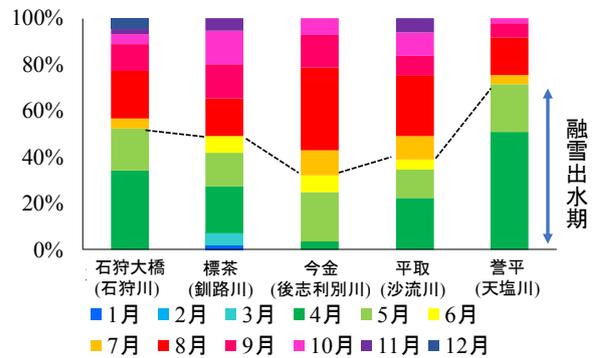


図-4 経年的な最大年日流量の出現回数

られることが分かる(図-4)。この一部は降雨を伴う融雪出水である(例えば図-5に示す1960年、2018年など)。つまり、日本海側の降雪量の多い地域に加えて、釧路地域もたとえ降雪量が少なくとも冬季や融雪期の降雨によるrain-on-snow floodに留意する必要がある地域であると考えられる。

## 3. 釧路川標茶における融雪出水概要

釧路市標茶や弟子屈では、冬季の積雪が少ない地域であるにも関わらず、3月頃に生じる降雨を伴うrain-on-snow-floodにより融雪災害が度々発生する(図-5)。ここでは、特に2018年3月9日出水を事例とし、標茶・弟子屈にて確認された融雪洪水の状況を整理する。

2018年3月、北海道では3月8日～3月9日にかけて前線を伴った低気圧が太平洋東部を通過し、釧路川流域に断続的に激しい雨が降り続いた。この間の24時間の降水量は弟子屈で119mm、標茶で87mm、鶴居で145mmを観測し、3月としては統計開始以降で最も多い記録となった。また、気温の上昇に伴う融雪の要因もあって、釧路川標茶水位観測所では「氾濫危険水位」を超え、気温上昇と大雨によって引き起こされた昭和35年3月出水に次ぐ、戦後2番目となる水位を記録した(図-5)。これにより、釧路市標茶では図-1および図-6に示す範囲での高水敷の冠水および内水氾濫が生じた。

出水後の現地調査の報告によると、2019年3月9日

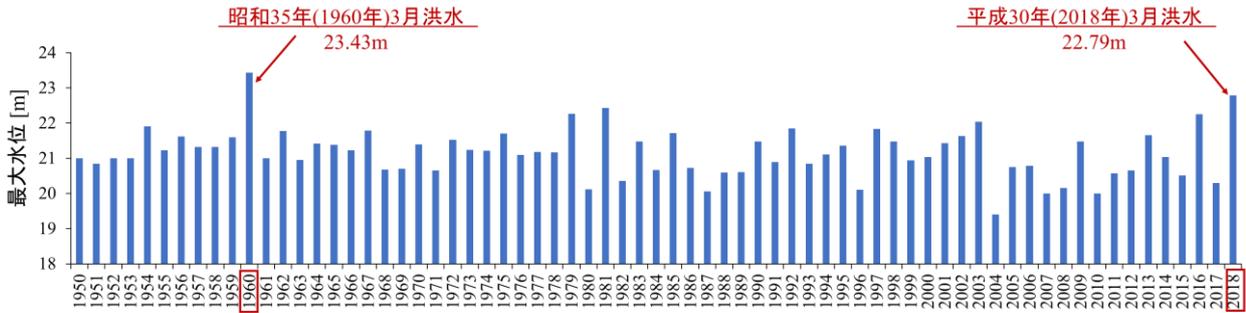


図-5 釧路川(標茶観測所) 年最高水位

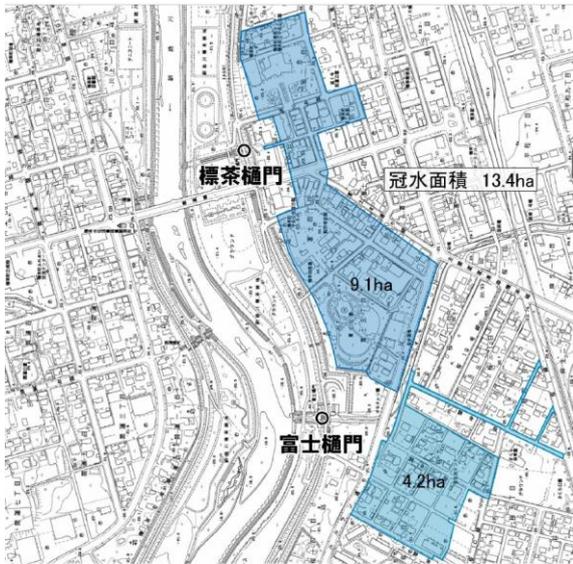


図-6 内水被害箇所位置図(標茶市街地)  
(北海道開発局提供)

の融雪災害では、河川の水位上昇に伴う越水氾濫は確認されず、痕跡水位は堤防高よりも低かったことが確認されている。また、内水氾濫については本川の水位上昇に伴い樋門を閉めたところに多量の水が流れこんだためと報告されている。

### 3. 降雨と流量ピーク

図-7 および図-8 に、2016年8月20日～23日および2018年3月8日～11日の間の降雨量(標茶上流に位置する弟子屈観測所)と水位(標茶観測所)の時間変化を示す。図-7より、2016年8月の夏季出水では、8月21日からの降水量(累計)が95.5mmとなり、降雨ピークから数時間程度の遅れで流量ピークに達した。流量ピーク値は出水前の流量に比べて5倍程度であったことが分かる。一方、図-8によると、2018年3月9日のrain-on-snow-floodでは、3月8日深夜から降雨が始まり、降水量(累計)は119mmと上述の夏季出水よりも若干大きい値を観測した。その後、上述の夏季出水と同じく数時間の遅れで流量ピークに達した。つまり、釧路地域では積雪量が少ないことから、多くのrain-on-snow floodが確認される豪雪地帯の報告<sup>8), 10)</sup>と異なり、降雨後から流量ピークを迎えるまでの時間差は殆ど観測されないようである。ただし、夏季出水に比べて流量ヒドログラフ

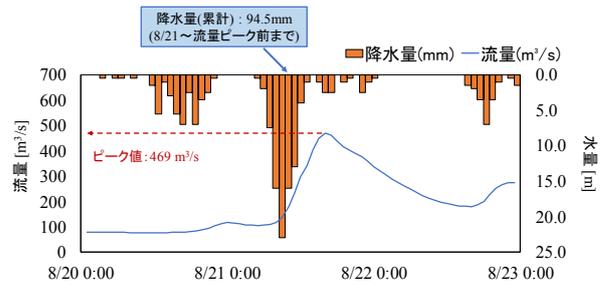


図-7 2016年8月出水時の  
降雨ハイトグラフと流量ヒドログラフ

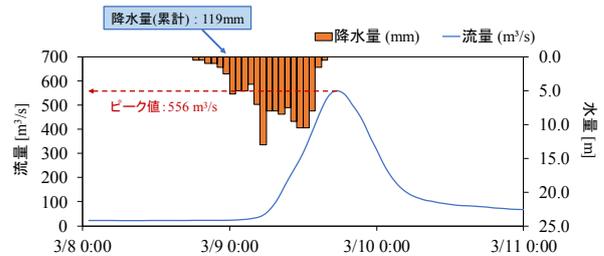


図-8 2018年3月出水時の  
降雨ハイトグラフと流量ヒドログラフ  
(暫定値, 釧路開発建設部提供)

の上昇率が大きく、出水前の流量に比べて約20倍以上まで一気に増水したことが分かる。

2018年3月のrain-on-snow floodの最高水位は22.79[m]であり、現地調査の痕跡水位と同様に計画高水位23.50[m]を超えなかった。しかしながら、氾濫危険水位を超えたため高水敷が冠水すると共に、標茶町郊外(下オソベツ樋門周辺)、標茶町市街地、弟子屈町市街地ではそれぞれ126.8[ha]、13.4[ha]、6.4[ha]の内水冠水被害があった(図-6)。釧路川流域ではこれまでも1960年、1979年、1987年など、同様に融雪時期に降雨が重なることで内水冠水被害が発生しており、本地域の特徴として、降雨とそれに伴う融雪に伴い一気に流域から大量の水が本川および樋門を有する小水路や排水溝に流れ込むことで、同等程度の降雨が生じたとしても夏季に比べて市街地の内水氾濫の危険性が高まるといった特徴があることが分かる。つまり、釧路川流域のrain-on-snow現象は積雪量の少ない凍った土壌の上に降雨が降ることで、一気に水が流出することによる融雪被害であり、寺田ら<sup>10)</sup>の述べる3タイプのrain-on-snow floodは異なることが分かる。ただし、この一気に増水する水の中に比較的少規模ではあるもののシャーベット状の雪の

塊も混ざっており、これらが水の流れにどのような影響を及ぼすかについては良く分かっていない部分が多い。シャーベット状に融けた雪の塊は小水路を閉塞させる事例も多いため、今後、比較的狭い水中での雪の塊の輸送状況を把握することも災害予想に重要と考えられる。

#### 4. 釧路川標茶における夏季と冬期の降雨と河川水位の対応関係の比較

上述のとおり、釧路市標茶や弟子屈では、積雪量が比較的少ないにも関わらず、降雨に伴う融雪災害が度々生じてきた。ここでは、釧路市標茶（河床勾配:1/1000）を対象に、非定常2次元流れの計算により夏季と融雪期における水位上昇をどの程度再現できるかについて比較した。モデルには、清水らの開発する iRIC の Nays2DH (<http://i-ric.org/ja/>) を使用した。計算に用いた地形データは、河道内は横断測量データ（H27 年度測量データ KP44.2 km-48.0 km, 北海道開発局提供）および国土地理院の基盤地図情報数値標高モデルを用い、市街地付近には 5mDEM, それより外側には 10mDEM を用いた。計算格子は流下方向に 10m, 横断方向に 10m とした。計算流量は、2016 年 8 月の夏季出水には図-7（国土交通省提供の水文水質データベース、標茶観測所）を用い、2018 年 3 月の融雪出水には図-8（暫定値、釧路開発建設部提供）を用いた。河床材料には現地調査データ（釧路開発建設部提供）を参考に 7mm の均一粒径を与えた。計算格子のマニング粗度係数は 0.03 を与えた。

図-9 に、夏季出水および融雪出水を対象とした左岸堤防の痕跡水位と計算水位の比較を示す。図-9 より、夏季出水も融雪出水もある程度計算水位が実測値を再現していることが分かる。両者の平均誤差を比較すると、各々、2016 年 8 月出水では平均 18.2cm, 2018 年 3 月出水では平均 28.2cm であった。これより、今回対象とした釧路市標茶における融雪期のシミュレーションは、夏季の図に比べてわずかに計算誤差が大きくなったものの、急激な水位上昇を評価できたことが分かる。これは、釧路川における降雨を伴う融雪出水は、積雪量が少なく、本川を流れる水の中に雪や氷の塊が殆ど含まれなかったためと考えられる。ただし、図-6 にも示すとおり、出水時、樋門を閉めたことによる内水氾濫が融雪期にのみ生じている。これは、融雪期の降雨は夏季に比べて一気に流出していること（図-7, 図-8）、さらに山から直接小水路へと流れ出た水には雪や氷の塊も含まれていたことなどが要因として考えられる。これらの点については今後の課題である。

#### 5. 結論

本研究の成果は以下の通りである、

- (1) 北海道における融雪出水は、主に日本海側、網走や釧路地域で頻発していることが分かった。前者は豪雪地帯、後者は積雪の比較的少ない地域である。
- (2) 釧路市標茶の融雪出水は、夏季の出水と同じく数時間程度の時間差で流量ピークに達した。しかし、夏季出水よりも流量増加率は大きく、2018 年 3 月の記録では出水前に比べて 20 倍以上まで一気に上昇し

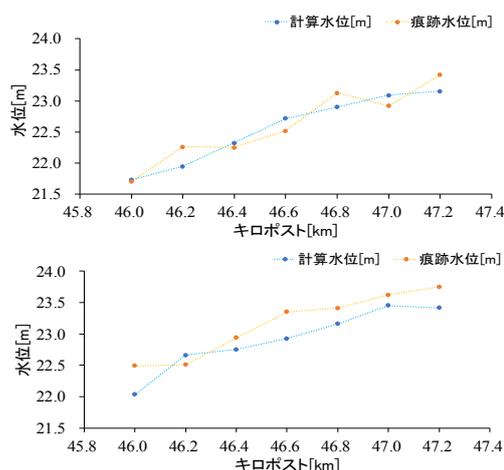


図-9 痕跡水位（左岸）と計算水位の比較  
上) 2016 年 8 月出水, 下) 2018 年 3 月出水

た。これは、標茶では積雪が少なく、土壤が凍っており、比較的降水が一気に比高の低い場所に流れ込むためと考えられた。

#### 6. 謝辞

本研究では、札幌開発建設部、釧路開発建設部、(株)北開水工コンサルタントの川嶋啓太氏、中西厚氏にご協力頂いた。

#### 7. 参考文献

- 1) Würzer, S.: Influence of Initial Snowpack Properties on Runoff Formation during Rain-on-Snow Events, American Meteorological Society, pp. 1801-1804, 2016.
- 2) Harr, D. R.: Effects of clear cutting on rain on-snow runoff in western Oregon: a new look at old studies. Water Resour. Res., Vol. 27, pp. 1095-1100, 1986.
- 3) 北海道開発局：尻別川水系河川整備計画, 2010.
- 4) 毎日新聞：1 月の一日では、降水量過去最高—北海道各地で豪雨被害, 2002.
- 5) 北海道開発局：低気圧・融雪による天塩川の出水状況, 2006.
- 6) 札幌管区気象台：平成 24 年 5 月 3 日から 5 日の大雨と融雪及び高波に関する気象速報, 2012.
- 7) 小島賢治・小林大二・油川英明・石本敬志・高橋修平・藤井俊茂: 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, Vol. 31, pp. 159-177, 1973.
- 8) 石井吉之: 降雨と融雪が重なって生じる融雪出水, 日本水文学会誌, Vol. 42, pp.101-107, 2012.
- 9) Jennings, K. and Jones, J. A.: Precipitation snowmelt timing and snowmelt augmentation of large peak flow events, western Cascades, Oregon. Water Resources Research, Vol. 51, pp. 7649-7661, 2015.
- 10) 寺田秀樹, 藤澤和範, 土田雅志: 融雪洪水の実態と流路工における融雪洪水対策に関する一考察, 砂防学会誌, Vol. 46, pp. 26-31, 1992.
- 11) 山崎学・石井吉之・小林大二・石川信敬・柴田英昭: 多雪山地流域における融雪期の CI 収支と地中水の流出過程. 日本雪氷学会誌雪氷, Vol. 67, pp. 477-491, 2005.