

技術報 融雪出水予測モデルの高度化研究

融雪モデル研究グループ

福島 健一郎 (研究 G 代表)

梅原 有理子・東倉 弘晃・齋藤 勇貴・鈴木 皓達



本研究では、米代川流域における高標高地点の積雪観測値を使って取り組んできた融雪予測モデルを基に、同地点で追加計測を開始した気温観測値を用いて融雪洪水の予測精度を高める手法の研究と、全国の一級水系で取り組みが進められている水害リスクライン (<https://frrl.river.go.jp/>) の標準手法である流出・河川水位予測モデルとのマッチングを図ったものである。気温観測値の活用については、平地で計測された気温に通減率を用いた従来方法では平地と高地で気温が逆転する現象に対応できない事が判り、高地での実測気温観測とそのデータ活用が融雪予測に有効であることが証明できた。また融雪係数は、実績の融雪出水データから同定し、流域ごとに一定値と考えられていたが、波形全体の再現性が得られないことから、融雪係数を可変と考えて、実績データに追従 (同化) させるよう改良したプログラムを水害リスクラインモデルに組み込み、その有効性が確認された。

キーワード：積雪深観測、観測データ解析、融雪洪水、洪水予測、水害リスクライン、融雪係数、同化

1. はじめに

近年、気候変動の影響により、水災害の激甚化・頻発化が深刻な社会課題となっている。我が国の一級水系では、水害リスク情報の充実を目指し、水害リスクライン (<https://frrl.river.go.jp/>) を通じて河川水位情報や予測 (河川管理者向け) を公開している。河川管理者向けの洪水予測については、近年にその手法が RRI (降雨-流出-氾濫一体モデル) へ一斉に変更され、実運用が開始されたところである。洪水予測モデルはこれまで夏季出水を対象に検討されてきたが、水害リスクラインは季節・時間を問わずインターネットで閲覧されるため、最近では低水や融雪も注目され始めてきている。

本研究では、以前より秋田県北部に位置する米代川流域を対象に、現行の水害リスクラインに融雪予測機能を組み込むための技術に取り組んできた。本報は、融雪モデルの基礎的な考え方や蓄積してきた知見を活かし、現行の水害リスクライン用予測計算プログラムへの組み込みについて報告するものである。

2. 対象流域及び観測データ

(1) 対象流域

秋田県北部に位置する米代川を対象流域とした。米代川は、その源を秋田県、青森県及び岩手県の 3 県境に位置する中岳 (標高 1,024m) に発し、一旦、岩手県を南下した後、その向きを西に変えて秋田県に入り、複数の支川を合わせながら、大館盆地を貫流し、能代市において日本海に注ぐ、幹川流路延長 136km、流域面積 4,100km² の一級河川である。

当該地域は、北海道や北陸地方と並ぶ豪雪地域である。

これらの降雪が流域の積雪となり、これが気温上昇と小降雨に起因して急激に溶けだすことで、融雪洪水を引き起こす。米代川では 1980 年 (昭和 55 年) 3 月に発生した融雪洪水が既往第 3 位規模を記録している。

(2) 山岳地での積雪・気温観測

米代川流域では、4 地点のアメダスによる積雪観測の他に、融雪出水予測の精度向上を目的に標高 1,167m の森吉山阿仁スキー場 (以下、スキー場) に非接触型積雪計と気温計を設置し、2016 年 11 月から観測している (気温観測は 2021 年 12 月から)。この観測は 1 日 3 回自動で観測し、携帯電話ネットワークを用いてデータを転送している。図-1 に積雪観測等位置を示す。



図-1 積雪観測等位置図

(3) 積雪観測データ

2018~2022 年度におけるスキー場の年度別の積雪観測データを図-2 に示す。スキー場では 3 月初め頃に積雪深が最大となり、4 月下旬~5 月上旬頃に消雪となる。

この過程で積雪深が減少する傾きが大きいほど融雪量が大きくなると推定できる。2020 年度はバッテリー不良で長期欠測となっており、その後も他年度でも短期欠測が発生している。これは積雪計の光学センサーへの着雪（樹氷状態）が原因である。当該地は樹氷が著名な地域であり、 -25°C 対応の機器の導入やヒーター装備など低温対策を実施しているが、過酷な条件下のためデータ欠測が生じた。

観測期間内においては、大規模な融雪洪水が発生しておらず、図-3 に示す二ツ井地点の河川水位では最大水位 2.64m (2022 年 3 月 27 日) となっており、いずれも水防団待機水位以下にとどまっている。

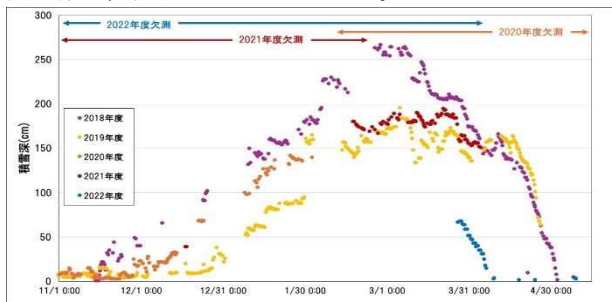


図-2 スキー場積雪深データ年度別重ね図

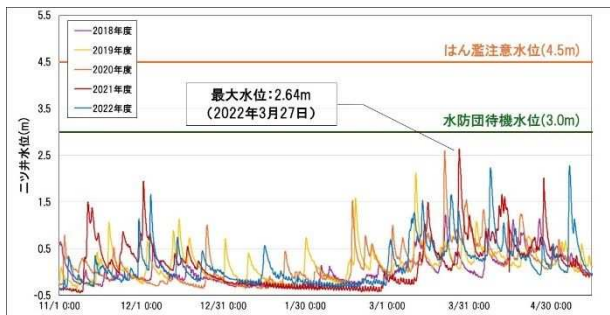


図-3 二ツ井地点の河川水位（水文水質データベースより）

(4) 気温の逆転現象

スキー場で観測する前は、既存の気象庁観測値に逓減率（一般に $-0.5 \sim -0.7^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 程度）を乗じて高地の気温補正を掛けて融雪量を算定してきた。スキー場に気温計を導入して以降の観測では、標高の高いスキー場において気温が平地より高くなる現象がみられ、近隣他河川流域の気温観測値（高所と平地）や秋田高層気象台のラジオゾンデ観測値を調査したところ、前線通過時には起こり得る事象と判明した。この現象は前線の通過に伴い、下層に冷気が滞留し上層が暖気に置換されることによって気温の逆転層が生じたものと説明でき、また融雪出水がこのタイミングで発生している事も裏付けられたため、気温の温度補正方法を逓減率スキー場観測値で行うよう改良した。

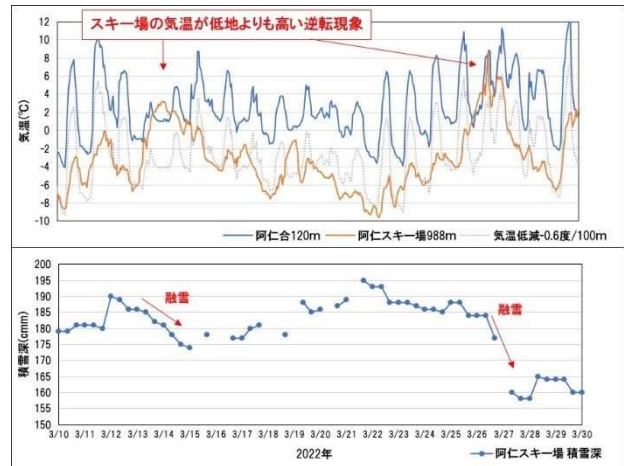


図-4 阿仁合とスキー場における気温の関係

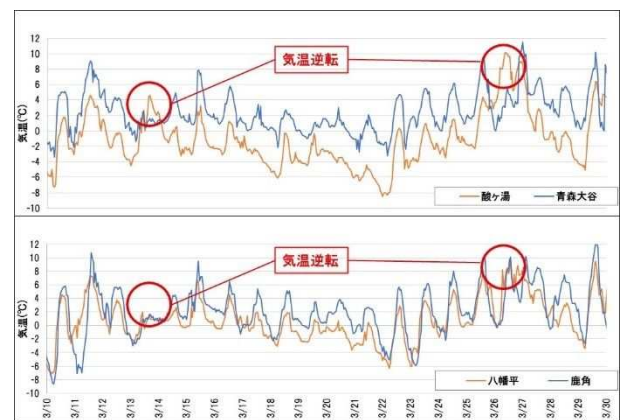


図-5 逆転現象（近傍他地点での高所・平地の比較）

3. 予測計算プログラム改良

(1) 水害リスクラインモデルへの組み込み

水害リスクラインに予測結果を提供している洪水予測モデルは、分布型流出モデル（RRI モデル）と河道の一次元不定流モデルが組み合わせられたものであり、本研究で開発している融雪モデルは、分布型モデルに降雨量を入力するプロセスに組み込む。また河道の予測水位結果は水害リスクラインモデルと同様に、一次元不定流（粒子フィルタ付）の結果で出力する。

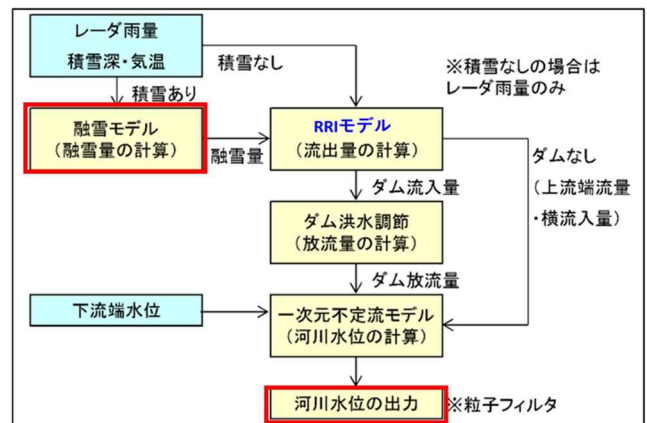


図-6 洪水予測モデル（融雪込み）の全体像

(2) 基本となる融雪モデルについて

本研究で使用した融雪モデルは、従来から米代川流域で取り組んできた表面融雪と底面融雪をそれぞれ計算する手法である（下図-6 参照）。底面融雪は融雪係数をパラメータとしており、これは融雪量と積算気温の間に、地域に固有の関係性が成立するものと言われ、一般に $0.3 \sim 0.9 \text{ g/cm}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{day}$ （単位換算して $0.125 \sim 0.375 \text{ mm/}^\circ\text{C} \cdot \text{hr}$ ）の範囲と言われている。

融雪モデルは前述のとおり予測モデルの降雨量計算の部分に組み込んでおり、季節によりモデル入替など行わず、システム全体を通年で計算させながら冬季のみ融雪量を降雨量に加算して与えるものとしている。

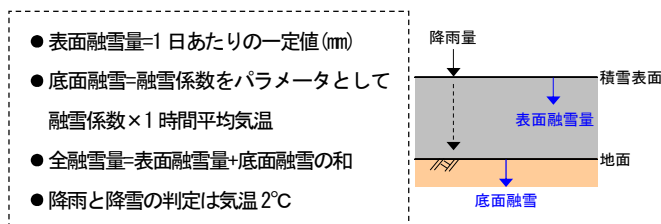


図-7 融雪モデル概念図と計算方法

(3) 気温推定プログラムの改良

前項 2 の(4)で示した気温の高所・平地の逆転現象を予測計算に反映するため、以前の気温逓減率を使った方法から、大館地点（標高 40m）とスキー場（標高 1,167m）の気温データから気温の高度傾斜をリアルタイムに推定し、各メッシュ標高に対する気温を推定する手法へ変更した。この変更による改善効果としては、八幡平地点（標高 588m）における実測気温と推定値を比較し、推定手法の見直しにより気温の予測精度（誤差）が RMSE (Root Mean Square Error) で 10.3°C から 4.3°C へと大幅に低下し、気温の推定精度の向上が確認できた。

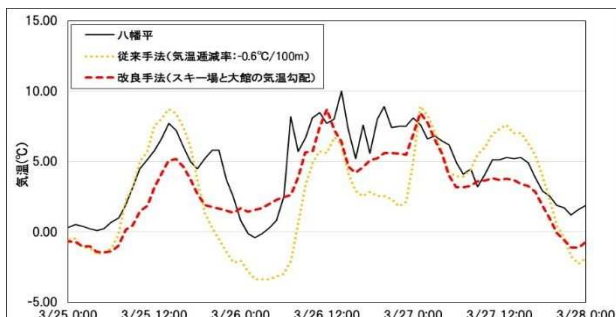


図-8 八幡平地点における実測気温と補正值の比較

(4) 一連融雪出水期間でのモデル検証

以前の研究では、1つの融雪出水だけをイベントだけに着目し短期間の検証計算を実施してきたが、今回、

気温推定の精度向上が図られたことから、2022年3月～4月の融雪出水を含む一連期間で検証計算を実施した。この間、モデルパラメータである表面融雪量と融雪係数を期間内で一定値として、この期間内の融雪出水である2022年3月27日の二ツ井基準点の流量再現性を狙って定数解析をして融雪係数を同定し、一般値の範囲内である $0.169 \text{ mm/}^\circ\text{C} \cdot \text{hr}$ を得た。再現計算結果は下図の図-8のとおりであり、特に融雪出水イベント以降の予測流出量を大きく算定してしまう傾向や、全般のごく小規模の流出波形に対して過大に計算される結果となった。このことから、本モデルで一定期間の再現性を確保しようとする、融雪係数は一定値に固定するのではなく、実績波形に応じて追従させながら可変とする方が望ましいと考えた。

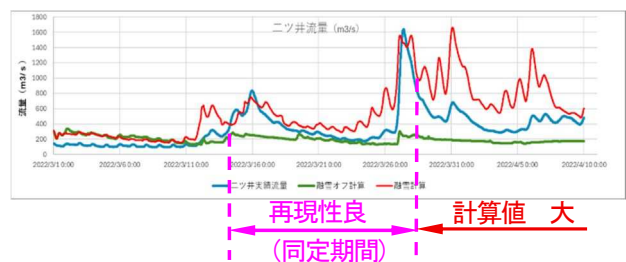


図-9 ニツ井基準点における一連期間検証計算（2022年）

(5) 融雪係数可変計算の試行

先の一連期間の検討は、二ツ井基準点での計算結果と実績を比較したものであった。水害リスクラインは特定の予測地点をターゲットにしたものでなく、河道の測線単位で予測し危険度を評価するものであることから、上流から下流まで場所を問わずに高精度であることが求められる。本研究では、融雪係数可変で計算する際になるべく単純な自然流域での検討から着手することとして、流域内の「森吉ダム」流域に着目した。

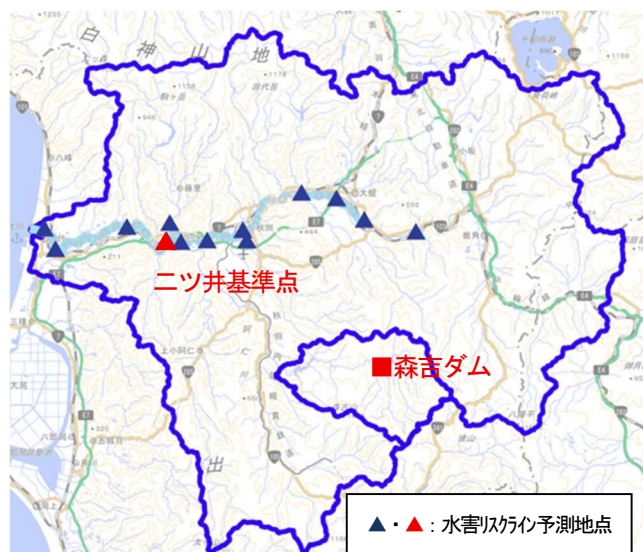


図-10 米代川の水位観測所と基準点・森吉ダムの位置関係

4. 森吉山ダム流入量による改良効果確認

前項 3. で改良した予測計算プログラムを用いて、森吉山ダム流域を対象に気温推定モデル+融雪係数可変化による予測計算の改良効果を確認した。

気温推定は山間地の気温を大館とスキー場の実測値から按分（一部外挿）する方法とし、融雪係数は実績の融雪出水イベントで同定した $0.169\text{mm}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$ を基準値として、これを 0.25 倍～4 倍の幅で係数を変えた予備計算を行い、その予備計算結果と実績値を比較して最適な値を掴んで先の計算をする手法とした。なお、予備計算は実際の水害リスクライン用計算サーバの能力を鑑みて、17 ケース実施する設定とした。

森吉ダム流入量で、先の連続計算事例の中に含まれる融雪出水（2022/3/27）の例で、融雪係数一定の計算値と融雪係数可変計算値を比較すると、一定の場合は立ち上がり後に予測値が実績より少ない、二ツ井基準点と反対の傾向となったが、可変とした場合は実績に追従するよう計算を行うため、立ち上がり後の低減部の精度が向上していることがわかる。

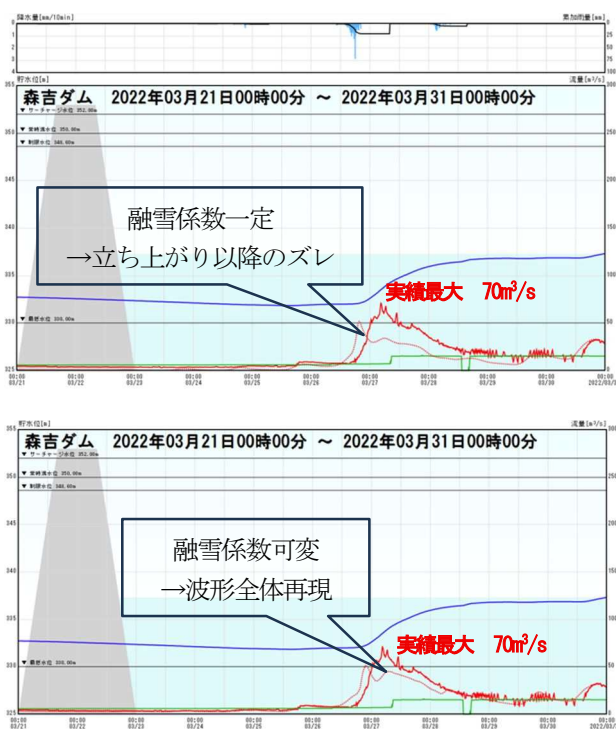


図-11 森吉ダム流入量によるプログラム改良効果

なお、この森吉ダムの結果では、融雪係数を一定とした時の計算値と実績値の大小関係が二ツ井基準点と異なる。これは、水害リスクラインのように各所での精度を保つために、融雪係数を与えるエリアのブロック化等、さらなる工夫が必要であることを示唆している。

5. まとめと今後の課題

本研究では、水害リスクラインモデルに融雪予測モデルを組み込み、ダム流域において精度向上を確認した。今後は、ダム下流域の主要地点での精度向上対策や実際のオンライン環境下での実証実験、本手法の PR 活動に力をいれていきたい。

参考文献

- 1) 八田茂実, 小池俊雄, 陸旻皎: 積雪水量分布の推定と融雪流出解析, 水工学論文集, 第 36 巻, pp. 617-622, 1992.
- 2) 小池俊雄, 陸旻皎, 早川典生, 古谷健, 石平博: 積雪高度分布を考慮した総合的融雪流出解析, 水工学論文集, 第 39 巻, pp. 79-84, 1995.
- 3) 臼谷友秀, 中津川誠, 星清: 積雪浸透を考慮した実用的融雪流出モデル開発, 水文・水資源学会誌, 第 20 巻 第 2 号, pp. 93-105, 2007.
- 4) Emmy E. Stigter, Niko Wanders, Tuomo M. Saloranta, Joseph M. Shea, Marc F. P. Bierkens, Walter W. Immerzeel: Assimilation of snow cover and snow depth into a snow model to estimate snow water equivalent and snowmelt runoff in a Himalayan catchment, *The Cryosphere*, 11, pp. 1647-1664, 2017.
- 5) 風間聡: 広域における積雪全層密度推定に関する研究, 水工学論文集, 第 41 巻, pp. 245-250, 1997.
- 6) So Kazama, Koji Sakamoto, Golam Saleh Ahmed Salem, Shunsuke Kashiwa: Improving the accuracy of snow and hydrological models using assimilation by snow depth, *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 26, No. 1, 05020043, 2020. 10. 29. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002019.
- 7) 西原照雅, 谷瀬敦: 人工衛星画像から作成した無雪期及び積雪期の標高モデルから求めた山間部の積雪分布の精度検証, 河川技術論文集, 25 巻, pp. 193-198, 2019.
- 8) Varun Khajuria, Mohit Kumar, Arun Gunasekaran, Kuldeep Singh Rautela, Snowmelt runoff estimation Using Combined Terra-Aqua MODIS Improved Snow product in Western Himalayan River Basin via degree day modelling approach, *Environmental Challenges*, Vol. 8, 100585, 2022.
- 9) Gang Zhou, Qiudong Zhao, Shiqiang Zhang, Dahong Zhang, Chao Li, Rolling forecast of snowmelt floods in data-scarce mountainous regions using weather forecast products to drive distributed energy balance hydrological model, *Journal of Hydrology*, Vol. 637, 131384, 2024.
- 10) 黒澤洋一, 福島健一郎, 梅原有理子, 吉田天, 風間聡: 融雪モデルと粒子フィルタを用いた米代川における融雪洪水予測, 土木学会論文集 B1(水工学), 77 巻 2 号, pp. 307-312, 2021.