

米代川の融雪期における洪水と融雪量推定 の高標高観測値の効果

EFFECT OF HIGH ALTITUDE OBSERVATION DATA TO ESTIMATE FLOOD
AND SNOWMELT VOLUME DURING SPRING SNOWMELT PERIOD
AT THE YONESHIRO RIVER

黒澤 祥一¹・福島 健一郎²・風間 聡³・小笠原 由次⁴
Shoichi KUROSAWA, Kenichiro FUKUSHIMA, So KAZAMA and Yoshiji OGASAWARA

¹正会員 三井共同建設コンサルタント株式会社 河川・砂防事業部 第一部
(〒141-0032 東京都品川区大崎1-11-1 ゲートシティ大崎ウエストタワー15階)

²非会員 三井共同建設コンサルタント株式会社 河川・砂防事業部 第六部
(〒980-0021 宮城県仙台市青葉区中央4-10-3 仙台キャピタルタワー3階)

³正会員 工博 東北大学 大学院工学研究科 教授 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6)

⁴非会員 国土交通省 東北地方整備局 能代河川国道事務所 調査第一課長
(〒016-0121 秋田県能代市鰯渚字一本柳97-1)

In recent years, requirement of accurate flood prediction information against excess flood is rising, in order to use it for disaster prevention activities and minimize flood damage. The target of information is not only about flood caused by rainfall, but also about flood caused by snowmelt during spring season.

This paper provides result of study on accuracy improvement of flood prediction during the spring snowmelt period by using high altitude observation data of 2017 at the Yoneshiro River.

Key Words : *Snowmelt flood, Snow depth observation, Snow coverage distribution
Snowmelt amount, Snowmelt model, Flood prediction*

1. はじめに

東北地方, 特に日本海側の地域は, 北海道, 北陸地方と並び冬期間に多量の降雪があり, 降雪は流域内に積雪として蓄えられ, 春先の雨や暖かい気温等により融雪水として河川に流出する. この融雪水は, 利水面上は貴重な水資源となるが, 治水上は融雪洪水として水害をもたらす要因となる.

河川管理者は, 融雪洪水災害を未然に防止または軽減するために, 洪水予測を行い, 洪水に関する情報をすみやかに関係機関等に伝達し, 水防活動及び沿川住民の避難等に対する活動の支援を行う責任がある.

一例として, 国土交通省 能代河川国道事務所で管理している米代川では, 昭和55年に発生した融雪洪水が既往第3位の洪水規模となっている.

近年では, 水防活動や被害の最小化に資するため, より高精度な洪水予測の情報提供が求められているが, 現在運用されている洪水予測システムは, 降雨に起因する夏期洪水を対象としたものが多く, 春先の融雪洪水に適



図-1 対象流域位置図 (米代川流域)

用できない課題がある. また, 融雪洪水を取り扱っていても山岳域の降雪量, 積雪深を補外しており, 融雪量の高い精度での推定が保証されていない¹⁾²⁾³⁾. さらに, 融雪量の推定には, 降雪量の補正が十分でないこと, 積雪深と標高の関係が精度に影響することから, 山岳域の積雪観測値の重要性を示唆している⁴⁾.

このような背景を踏まえ, 米代川において, 融雪洪水を含む年間を通じた洪水予測が可能となるよう高標高に積雪深計を新設し, その観測値をリアルタイムで利用した融雪モデルを組み込んだ洪水予測システムの構築を行った.

本論文では, 米代川を事例とした平成29年融雪期における洪水予測精度向上を目的とし, 高標高での積雪観測の取り組みと得られた観測値による検証結果を報告する.

2. 融雪洪水予測を検討する際の課題

(1) 事例流域

米代川は、秋田県、青森県及び岩手県の3県境に位置する中岳を源流とし、岩手県境付近を南下した後、その向きを西に変え秋田県に入り、大館盆地を貫流し、阿仁川等の支川を合わせて能代市において日本海に注いでいる。事例流域の選定は下記の項目に留意した。

- ①融雪洪水により浸水被害が懸念されること。
- ②流域内で過去の積雪観測値が蓄積されていること。
- ③土壌の飽和状況などが洪水予測モデルに考慮され、年間を通じた流出量の計算が可能な洪水予測システムが既に構築済みであること(分布型流出モデル)。

(2) 検討する際の課題

米代川流域では3月中旬から低標高の約150m未満の平地部で消雪が始まり、4月上旬には標高約500m以上、5月上旬は標高約1,000m以上で残雪する状況にある。

一方、流域内のアメダスのうち、4地点で積雪深観測が実施されているものの、観測標高は200m未満の低標高のみで観測されているため、融雪洪水前に消雪する傾向にある。

図-2には国土数値情報のメッシュ標高と米代川の流域面積率の関係を示すが、同流域の約7割が標高200m以上であり、アメダスでは流域全体の積雪分布を適切に推定できない状況にある。図-3には積雪観測位置(観測標高)を示す。

さらに、洪水予測システムではリアルタイムの観測値を取り込み予測計算する必要があるため、米代川における融雪洪水予測を検討する際の課題は下記のとおりであった。

- ①積雪観測体制：低標高に設置されているアメダスでは春先に消雪し、予測に利用不可。
- ②予測に利用する観測値：限られた積雪観測値から流域全体の積雪分布を把握する手法が必要。森吉山ダムサイトの積雪観測値の利用の可能性。
- ③融雪モデルの作成：リアルタイムで利用できる限られた観測値を活用し、予測精度を確保することが重要。

3. 高標高観測の実施

(1) 積雪観測機器の設置場所

高標高での積雪観測と流域の積雪分布推定を目的として、標高1,167mの森吉山阿仁スキー場に積雪観測機器を新設した。(アメダスで最も標高が高い観測点は青森県の酸ヶ湯の標高890mである。)

観測場所の選定にあたっては、自然の積雪面を観測できる場所であること、スキー客が容易に機器や計測面に近づけない場所であること、機器を設置するスペース等

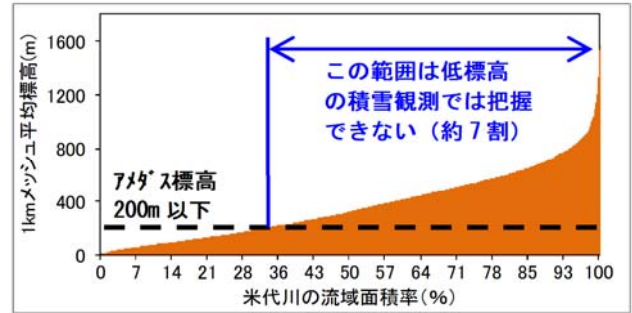


図-2 メッシュ標高と流域面積率



図-3 積雪観測位置図



図-4 積雪センサーの状況(左：降雪当初、右：2月上旬)

の要件を満足する場所であることで実施した。

積雪センサーは、半導体レーザーを使った非接触式で、携帯電話通信網の電子メールを使ってリアルタイムに観測値(観測は1日3回)を送信するものである。

(2) 積雪観測結果

スキー場での積雪観測は平成28年11月下旬から開始した。しかしながら、スキー場は日本三大樹氷で有名な場所であり、12月下旬頃から積雪センサーへの着雪が原因とみられる欠測が増えている。センサー本体にはテフロン塗布加工を施しているものの、風向や雪質の関係からセンサーへの着雪が避けられない。なお、センサーで観測している雪面は自然状態(スキー客が立ち入らない場所)であり、当場所が観測に適していると判断できていること、3月上旬からは継続的に観測できているため、融雪洪水予測には利用できる観測値が取得できている。



図-5 積雪センサーの樹氷化解消状況（3月上旬）

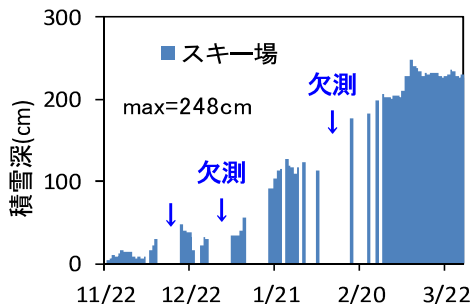


図-6 スキー場の積雪観測結果（H28年11月～H29年3月）

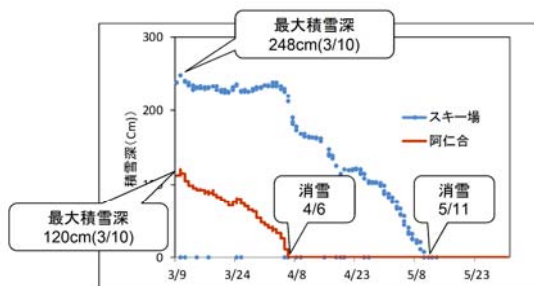


図-7 スキー場と阿仁合の観測値の比較グラフ

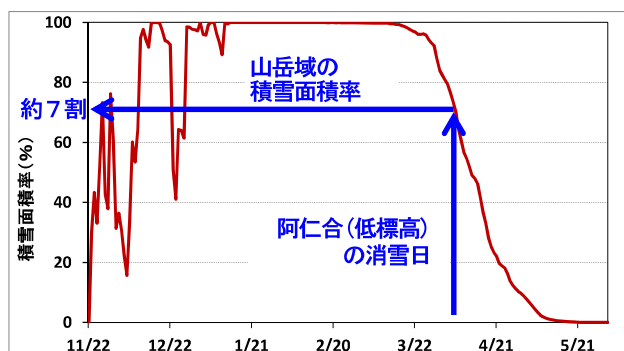


図-8 流域内の積雪面積率（衛星画像データによる）

図-5には3月上旬の積雪センサー状況写真を示すが、気温上昇に伴い自然に樹氷化が解消されたものと推定できる。

図-7にはスキー場と阿仁合（アメダス）の観測値を最大積雪深から消雪までの期間で比較した。

阿仁合は4月6日に消雪しているが、この時点でスキー場では150cm程度の積雪が認められ、消雪日は阿仁合から1か月遅い5月11日であり、両者に明確な差が表れた。

また、「一般財団法人 日本気象協会」が情報提供している「衛星画像データ（1kmメッシュ積雪深）」から阿仁合の観測値が消雪した時点の米代川流域内の積雪面積率（残雪）を集計すると約7割であり、融雪量には高標高での観測は重要である（図-8）。

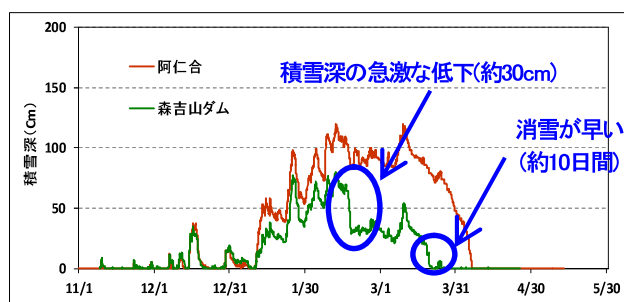


図-9 森吉山ダムと阿仁合の観測値（積雪）の比較グラフ

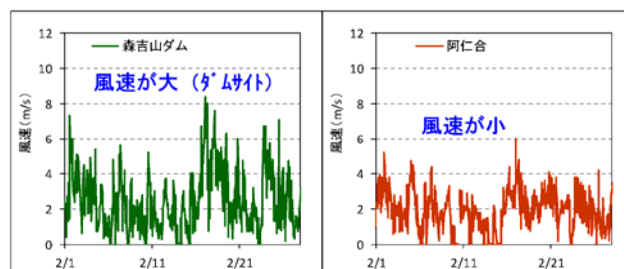


図-10 森吉山ダムと阿仁合の観測値（風速）の比較グラフ



図-11 森吉山ダムの観測場所状況

4. 融雪モデルの作成

(1) 利用する観測値

流域内における積雪深観測体制（位置、標高など）を把握したうえで、高標高での観測実施と同観測データをリアルタイムで入手することが融雪洪水予測には必要である。

積雪観測にはアメダスの他、森吉山ダム管理支所での観測、道路情報提供システム（東北地方整備局）、気象会社が提供しているデータなどがあるが、例えば、ダムサイトでの観測は立地上、風の影響を受けやすい状況にあるため、近傍の観測値と比較し、予測に利用するデータとして適切か妥当性検証を行うことが重要であった。

森吉山ダムでは管理支所のダム湖脇で積雪観測（標高188m）を実施している。図-9には近傍の阿仁合と比較したグラフを示すが、標高が低い阿仁合より全体的に積雪深が少なく、消雪日も早い傾向である。さらに2月中旬には急激な積雪深低下が発生しており、この主要因は強風の影響（無降雨で気温はほぼ同一状況）により雪が飛ばされるものと推定した（図-10）。

このため、ダムサイトでの観測値は予測には利用していない。また、道路情報提供システムでは国道での積雪観測が実施されているが低標高で、さらに除雪の影響もあることから融雪量の算出には利用できない。

(2) 融雪モデル

米代川で採用した融雪モデルは下記のとおりである。
 なお、流出モデルは分布型(1kmメッシュ)を採用している(図-13)。分布型を採用している理由は、降雨・融雪の浸透過程を表現できるように地表面はkinematic wave法、地下層はDarcy則を適用した「地表面+地下4層構造(物理モデル) (図-14)」で常時計算していることから夏期と融雪期でモデル条件(飽和流出率など)の切り替えが不要であるためである。

STEP①入力データ：レーダ雨量、気温、積雪深。

STEP②積雪分布・積雪深の推定：標高と積雪深関係などから1kmメッシュ単位で推定。

STEP③融雪量の計算：「表面融雪」と「底面融雪」の和。表面融雪はdegree hour法、底面融雪は1日あたり2mm(一定量)で設定。

$$\begin{aligned} 1\text{時間融雪量} &= \text{表面融雪} + \text{底面融雪} \\ &= \text{融雪係数} \times 1\text{時間平均気温} + \text{一定値} \end{aligned} \quad (1)$$

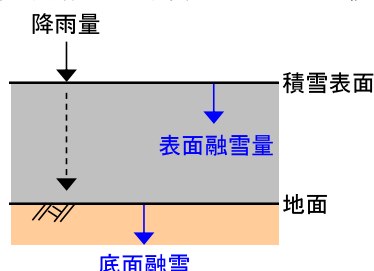


図-12 融雪量の概念図

STEP④雨雪の判別：2℃以上を降雨、2℃未満を降雪として設定。

STEP⑤流出量の算定：「レーダ雨量」と「融雪量」の和を分布型流出モデルの降雨外力（メッシュ毎）とし入力し、流出量(河川流量)を算定。

STEP⑥河川水位へ換算：H-Q式もしくは、不定流計算(一次元不定流モデル)を用いて、予測地点の河川水位に変換。

図-15と図-16には阿仁合における3月以降の積雪深減少時の積雪深と気温の関係、気温と風速の関係を整理した。関係図は過去5年間（平成25年～平成29年）の3月と4月データ（阿仁合）から日積雪深減少量と日平均気温・風速をプロットしている。また、グラフ内の黒線は線形近似線である。

この結果、積雪深と気温には右上がりの傾向があり融雪量に影響することが確認できた(図-15)。

また、気温と風速の関係(図-16)も同様に右上がりの傾向を示しているため、気温を変数としたdegree hour法を融雪量の算定の基本式(式(1))とした。



図-13 米代川分布型流出モデル図

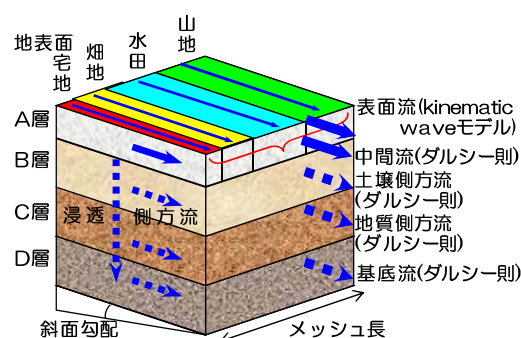


図-14 分布型流出モデルの単位メッシュ概念図

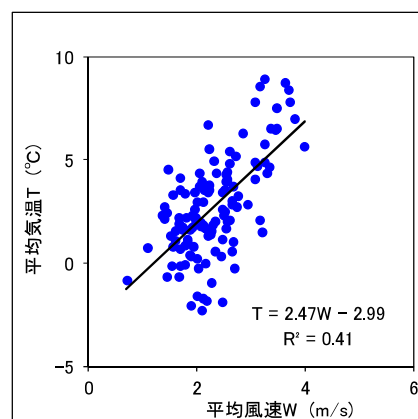


図-15 積雪深と気温の関係図（阿仁合）

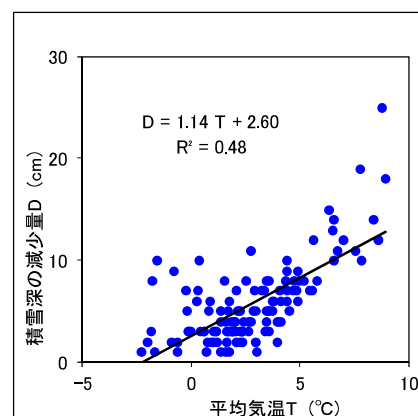


図-16 気温と風速の関係図（阿仁合）

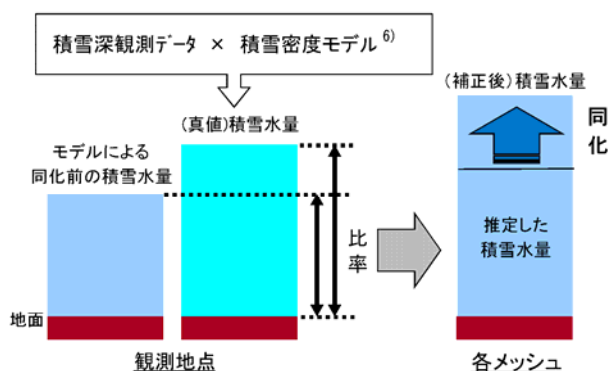


図-17 同化手法の概念図

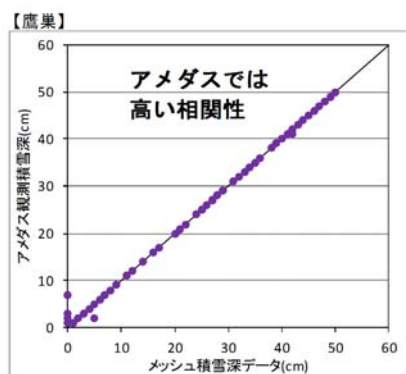


図-18 アメダスと衛星画像データの比較 (H28年11月～H29年5月)

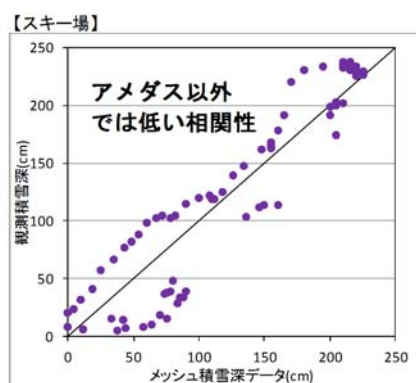


図-19 スキー場と衛星画像データの比較 (H28年11月～H29年5月)

(3) モデル作成にあたって留意事項

積雪観測値を補正(密度差)する方法として、積雪水量の補正(同化手法⁵⁾)を予測システムに実装し、河川流量・水位の再現性を確保した。積雪観測値から比率を算出し、各メッシュの積雪水量を補正している(図-17)。

図-18と図-19は一般財団法人 日本気象協会の「衛星画像データ(1kmメッシュ積雪深)」とアメダス及びスキー場の積雪深の関係を示した。

スキー場が位置するメッシュ積雪深の相関性は低く、衛星画像データは過小に積雪深を推定している。このため、米代川の融雪洪水予測では衛星画像データを利用していない。ただし、観測値は必ずしも流域を代表するものでないため、平均的なデータ(衛星画像データ)を利用し、流域での適用性を確認する方法もある。

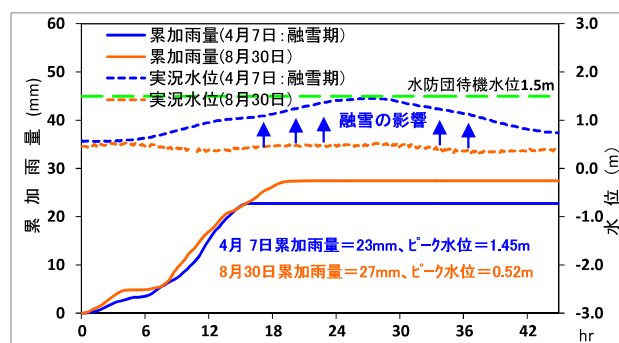


図-20 累加雨量と河川水位ハイドログラフ (H29, 向能代地点)

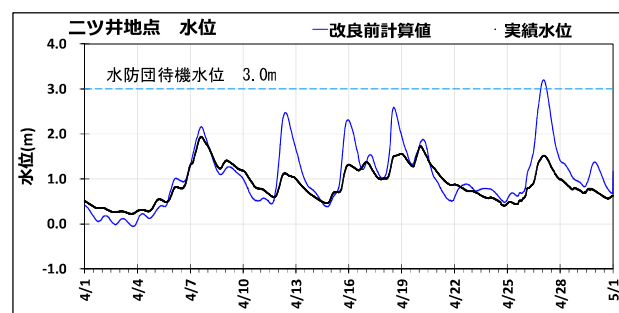


図-21 河川水位検証ハイドログラフ (H29, ニツ井地点, 改良前)

5. 平成29年融雪期の検証結果

(1) 融雪モデルを組み込む効果

平成29年融雪期は水防団待機水位未達の小規模洪水であったが、同規模の夏期洪水と比較して、河川水位が約1m上昇する状況(図-20)となり、もし雨量が多くなった場合には、融雪の影響で危険度の高い洪水になる可能性があるため、融雪モデルの組み込む効果は高いと言える。

(2) 河川水位の検証

ニツ井地点における河川水位の検証結果は、融雪当初の4月上旬ではピーク水位誤差は小さく良好な精度を確保しているが、4月中旬以降は実績水位と乖離する傾向にある(図-21)。この原因は積雪分布の推定(積雪面積率の誤差)によるものと判断した。積雪分布は過去の積雪観測値と衛星画像データから「雪線標高と積雪深の関係式」を設定し、降雪当初から消雪までの分布をメッシュ毎に推定している。関係式は、流域を3ブロック(上流域・左岸域・右岸域)に分割し流域斜面方向の影響を考慮しているものの、スキー場では観測開始直後のため、蓄積データが少なく、アメダスから融雪モデルで推定したスキー場位置の積雪で設定したため誤差(NASH係数=0.69)が生じた(改良前)。

$$\text{雪線標高} = \text{係数A} \times \text{積雪観測値} + \text{係数B} \quad (2)$$

ここに、係数A、Bは流域状況で変化する係数

(3) 積雪分布推定の改良

平成29年スキー場の観測値をもとに雪線標高と積雪深

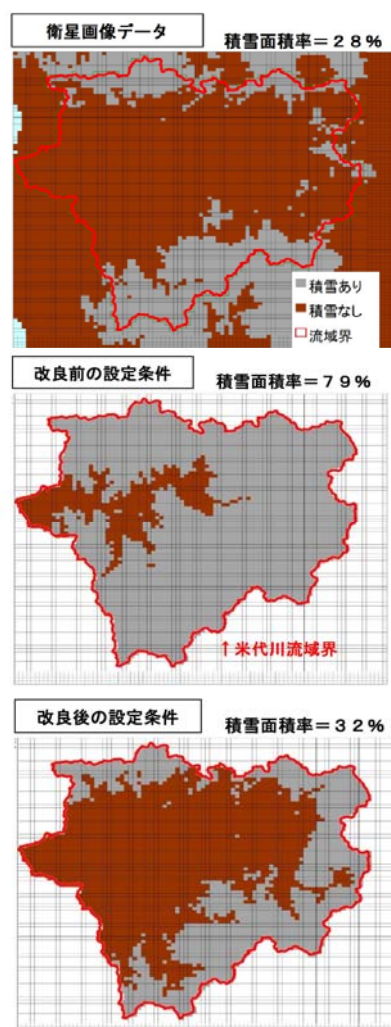


図-22 積雪分布の検証結果 (H29年4月18日の例)

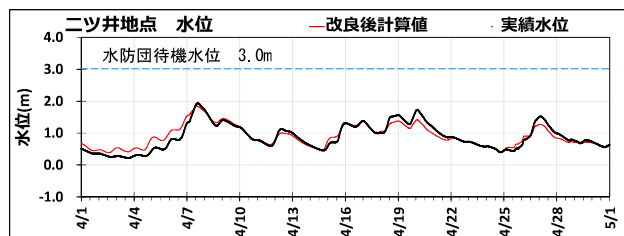


図-23 河川水位検証ハイドログラフ (H29, ニツ井地点, 改良後)

の関係式を再設定した結果を図-22に示した。4月18日積雪分布は一例だが融雪期終了に向け、改良前の設定条件では河川水位が過大となる積雪分布傾向を確認し、スキー場観測値を利用することで河川水位はNASH係数=0.88と高い再現結果が得られた(図-23)。

(4) 他年の適用

本研究の融雪洪水に対応した洪水予測システムは、平成29年融雪期の検証で実用できるものとなったが、他の事例についての予測精度が保証されていない。そこで、平成30年融雪期での河川水位を推定したところ、安定した精度(NASH係数=0.80)を確保した(図-24)。これらから本研究のモデルは実用可能なものと考えられるが、

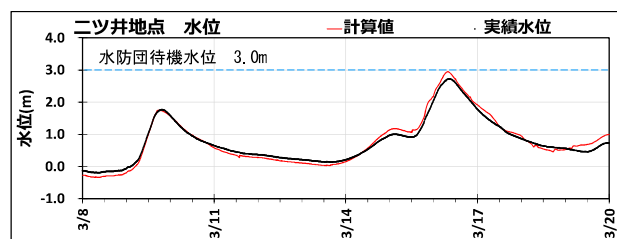


図-24 河川水位検証ハイドログラフ (H30, ニツ井地点)

一方、大規模な洪水が発生していないため、精度の確認は十分ではない。

6. おわりに

本論文の結果を下記に示した。

- ①高標高での積雪観測の重要性：スキー場の観測値は低標高のアメダスに比べ、約2倍の積雪深、約1ヶ月遅い消雪を確認。高標高の観測により流域標高を概ねカバー(約98%)。
- ②積雪分布の推定結果：積雪分布(雪線標高)をスキー場の観測値から推定することで、衛星画像データと積雪面積率がほぼ一致。(H29年融雪開始時では積雪面積率で誤差約8%)。
- ③融雪量などの推定結果：スキー場の観測値を利用した融雪モデルと分布型流出モデルを組み合わせることで河川流量(水位)の再現性を高める結果が得られた。H29年及びH30年融雪期ではニツ井地点(基準点)の検証結果はNASH係数が合格水準以上。この要因は、山地部に残雪している積雪分布(融雪量)を概ね再現できたことにある。

謝辞：本論文に際し、国土交通省 東北地方整備局 能代河川国道事務所 に対し、ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 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, 20-2, 2007.
- 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, 39, 1995.
- 3) 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, 36, 1992.
- 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, 1647-1664, 2017.
- 5) 柏俊輔, 朝岡良浩, 風間聡, 積雪深データ同化による融雪出水解析, 水工学論文集, 55, 2011.
- 6) 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, 41, 1997.

(2019. 4. 2受付)