

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 25 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420496

研究課題名(和文) 多雪流域における積雪水資源量の評価手法の開発

研究課題名(英文) Development of quantitative estimation method for snow water resources in heavy snow area

研究代表者

佐藤 嘉展 (Sato, Yoshinobu)

愛媛大学・農学研究科・准教授

研究者番号：90414036

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：温暖化が多雪流域における水資源量に及ぼす影響を明らかにするため、分布型流出モデルを用いた融雪期の河川流況計算精度を向上させることを第一目的とした。日本海側に面した多雪流域(手取川流域)を研究対象とし、現地観測に基づいた冬季降雪量および積雪・融雪の実態を正確に反映した降雪・積雪・融雪モデルの高度化を試みた。積雪水資源量の定量評価のため、初年度は、既存の気象水文観測資料の収集と観測体制の整備を行い、次年度から現地観測を開始した。ドローンを用いた空撮や、タイムラプスカメラを用いた定点観測、総合気象センサーを用いた積雪観測等を実施し、多雪山地流域における積雪水資源量の定量評価を実施した。

研究成果の概要(英文)：To evaluate the impacts of climate change on river discharge, we applied a hydrological simulation to one of the major river basins in Japan, located in a cold and mountainous region (Tedoru river basin). To improve the performance of our model simulation, we conducted field observation by various method such as time-lapse camera photograph analysis, aerial photograph analysis by UAVs (unmanned aerial vehicles), and mulch function meteorological monitoring. By using actual field observation data-sets, we could calibrate our model parameters such as rainfall-snowfall threshold temperature, density of snow, snow depth etc. These results will contribute to improve the reproducibility of our model simulation applied for the cold mountainous regions.

研究分野：水文学

キーワード：積雪量 降雪量 雨雪判別 融雪量 積雪密度

## 1. 研究開始当初の背景

1981年から2010年までの30年間の平年値によると、日本の平均気温は約10.3度であり、北海道から九州・沖縄地方まで南北に10以上の平均気温の違いがある。1910年から100年間の日本の平均気温はすでに約1.2度上昇しており、近年の急激な気温上昇の結果、温暖化による影響がますます懸念されるようになってきている。日本の年間降水量は約1700mmであるが、その多くは東北から北陸地方にかけての日本海側と九州から四国および近畿地方南部の太平洋側に集中しており、太平洋側の降水は主に暖候期における台風や前線に起因しており、日本海側の降水の大部分は冬季降雪に起因する。気象庁気象研究所によって開発された超高解像度気候予測モデル(MRI-AGCM3.1S/3.2S)による将来の気候予測によると、約100年後には日本の平均気温は約3度上昇することが予想されている。さらに、台風や前線活動の強化等により日本の主要河川における年最大流量は今世紀末までに約1~2割増加すると同時に、蒸発散量の増加や融雪出水の減少、無降雨期間の長期化等によって年最少流量は現在よりも4割近く減少するという予測結果が得られており、特に、河川流況が将来大きく変化するのは、日本海に面した東北から北陸地方にかけての多雪流域であり、温暖化(気温上昇)による、冬季降雪量が減少(降雨量が増加)し、それに伴う積雪量(融雪量)の減少、さらに融雪時期の早期化がその主な原因であることが明らかになってきている(Sato et al., TAO, 2012; Sato et al., Hydrol. Proc. 2013)。これらの多雪地域の河川流域では、その下流域(扇状地)で、融雪出水に依存した灌漑水田農業が盛んに行われており、期別水利権設定も現状の流況を考慮して設定されている。また、上流域に設置された多くの多目的ダムにおいても融雪出水を見込んだ運用が行われているため、将来、温暖化に伴って河川流況が大きく変化すると、各地域における水資源管理計画等を大幅に見直す必要がある。2011年の時点で日本の豪雪地帯は日本の国土面積の約50%を占め、そこに全人口の16%の人々が暮らしている。これらの地域に住む人々が、温暖化に伴う降雪・積雪・融雪量の変化によって直接・間接的にどのような影響を受けるのかを事前に予測しておくことも、地域経済や防災対策の面で早急に対応が求められる重要な課題である。温暖化による影響が顕著に現われるのは、現在の気候条件では固体(雪)となっている降水が、将来は液体(雨)に変化する地域であり、冬季平均気温が0度前後の期間が長い東北から北陸地方にかけての日本海側の豪雪地帯がそれに該当する。さらにこれら地域では、温暖化に伴って冬季のシベリア大陸からの北東季節風の吹き出しが弱まることによって冬季降水量そのものが減少するという報告

もされている(和田ら,土木学会論文集,2005)。そのため、降水量減少と降雪量減少により、積雪量および融雪量も減少し、それが融雪出水の時期と量が大きく変化することが予想される。

## 2. 研究の目的

上記の研究の背景をもとに、本研究では研究期間内に以下のことを明らかにする。

### 1. 対象地域

北陸地方の日本海側に面した多雪流域。具体的には石川県の手取川流域:809km<sup>2</sup>を対象とする。これらの流域は流域面積が比較的小さく、気象観測データの空間代表性が高く、山地から河口までの距離が短い急流河川であるため、人間活動による影響を受けにくく、自然に近い流況が得やすい流域として選定した。

### 2. 解析対象

人為的な影響の少ない上流域に設置されたダム・湖沼等への(主に融雪期における)河川流入量。具体的には、手取川上流域の手取川ダムへの流入量とし、1981年から2010年までの30年間の融雪期流量を観測流量との誤差を日流量ベースで±1%以内の精度で分布型流出モデル(Hydro-BEAM)を用いた流出解析によって予測可能とすること(再現性の向上)を目指す。

### 3. 実施方針

はじめに、気象庁のアメダス観測地点および気象官署の観測データを用いて流出解析を実施し、各地点における流況の再現性を確認する。ここで、冬季流量が大幅に過小評価されることがすでに既往研究(Sato et al., IAHS Publ, 2013; Ma et al., HRL, 2010; 立川ら, 水工学論文集,2009)によって明らかにされているので、現地観測を実施して冬季降水量の補正を試みる。具体的には、観測データの得られていない各流域の上流域の複数地点で気温および湿度と積雪量(降雪量)を計測し、雨雪判別モデルの閾値の調整を標高別に実施する。流況予測精度検証用の河川流量データは国土交通省のウェブサイトから入手し、それができない場合には、河川管理者およびダム管理者に直接データの提供を依頼する。また、地上気象観測地点を実際に視察し、どのような型式の降水量計が設置されているかによって、風速による降水量捕捉率の補正を横山ら(日本雪氷学会誌,2003)の方法で実施する。さらに、定点連続観測ビデオカメラ(ガーデンウォッチカム)による積雪量の時間変化を定点連続観測によって行うと同時に、デジタルカメラと放射温度計による低標高から高標高地点までの多地点観測により積雪量と地表面温度の空間分布の実態を把握する。その後、各地で得られた観測資料をもとに、これまで用いてきた流出解析モデルへの入力データを生成する陸面過程モデル(SVATモデル)の降雪・積雪・

融雪モデルの補正・改良を実施し、融雪期の河川流況の再現性向上を図る。最後に、気候予測モデルを入力として将来の流況変化を定量的に評価し、温暖化が地域の水資源に与える影響を明らかにする。

### 3. 研究の方法

日本有数の豪雪地帯である日本海沿岸地域の比較的小規模な河川上流域を対象とし、積雪量とそれに依存した水利用の実態を明らかにし、積雪水資源量の変化が地域の水資源に与える影響を明らかにすることを目的とし、具体的には下記項目について研究を実施した。

1. 雨雪判別モデルの改良
2. 冬季降水量補正モデルの導入
3. 積雪・融雪モデルの改良
4. 流域水利用の実態把握
5. 将来の水資源量変化に対する影響予測

研究対象地内に 5 つの観測地点：Site1 (石川県農林総合研究センター林業試験場：220m)、Site2(白山河内：136m)、Site3 (白山白峰、470m)、Site4 (南竜山荘：2080m)、Site5 (白山室堂：2450m) を設定した。積雪深は、近藤 (1994) と Kondo and Yamazaki (1990) の熱収支モデルを用い、日別の積雪深から融雪量を差し引いて推定した。積雪密度については、当初は簡易な線形モデル： $\rho = 0.0001DOY + 0.2$  (DOY: 通日) を適用した。解析には、AMeDAS 時別値(金沢、医王山、小松、白山河内、加賀菅谷、白峰)、気象官署の日別値(金沢、伏木、富山、福井、高山) の気象観測データを用い、距離逆数加重平均法で流域内 1km メッシュに内挿して用いた。なお、熱収支(SVAT)モデルについては Sato ら (2008) と同じものを用いた。

### 4. 研究成果

積雪深は、年によって大きく変動したが、各年の雪量(気象条件)に関わらず Site2 と Site3 では実際の積雪深の変化および積雪開始日および消雪日のタイミングを良好に再現できていることが確認できた。Site1 で積雪深が過小評価となった理由については、局所的な地点降水量や積雪密度の違いによる影響等が主な原因と考えられた。11月から7月までの手取川流域内の月別平均積雪深の空間分布の推定結果については、11月頃から標高の高い白山周辺から徐々に積雪が始まり、2月から3月頃に積雪のピークを迎え、4月から7月にかけて融雪に伴って減少していく積雪深と積雪域分布の変化を概ね良好に推定することができた。本研究では、手取川流域全体の積雪深の空間分布とその季節変化の簡易推定を試みたが、今後は、高瀬ら (2016) や藤原ら (2015) の詳細な解析事例を参考にし、今回で得られた結果の再現性や汎

用性をより向上させる必要がある。また、Site4 や Site5 については、インターバルカメラによる現地観測も実施しているので、それらのデータも活用して高標高地点での積雪深(概略値)や積雪期間についての再現性についても検証した。積雪深の推定は以下の手順で行った。(1) 距離逆数加重平均法および気温減率を用いた解析対象地点における気象データセットの作成。(2) 雨雪判別モデルによる降雨量と降雪量(新雪)の分離。(3) 積雪層の自重による密度変化の計算。(4) 熱収支法による融雪量の推定。(5) 日別積雪深の推定。

雨雪判別モデルと熱収支解析には、解析対象地点周辺の 5 地点の気象官署(高山、金沢、長野、富山、福井)における 5 要素(気温・湿度・降水量・風速・全天日射量)の時別値を使用した。降雪量および積雪深については、白山白峰および風嵐地点の値を使用し、白山室堂および白山南竜地点については、現地に設置した簡易温湿度センサーのデータを用いた。次に、解析対象地周辺の気象観測データから、雨雪判別モデル(経験式)を構築した。臨界相対湿度(%):ある気温  $T$  ( )での雨雪判別の閾値となる相対湿度の値を用い、臨界相対湿度以下では降水を雪と判別し、臨界相対湿度以上では雨と判別した。新雪の降雪深推定に必要な新雪の密度( $\rho_s$ )については、解析対象地周辺の気温  $T$  が 0 より低いときは  $0.05(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、1 より高いときは  $0.15(\text{g}/\text{cm}^3)$  で一定とし、0 以上 1 以下の間は、線形変化するように設定した。積雪の自重による積雪層の密度変化については、積雪層を下層から順に第 1, 2, 3, 4...n 層とし、最上層の密度のみ非圧縮の新雪密度を用い、下層の密度は  $0.7(\text{g}/\text{cm}^3)$  を上限値とし、全体の積雪深は、各層の積雪深を合計して求めた。最後に、融雪深については、熱収支式より求めた。白山白峰地点(510m)における積雪深の再現結果を現地観測値(国土交通省風嵐地点)と比較した結果、積雪開始日、消雪日、積雪期寒中の変動、ピーク積雪深はよく一致しており、RMSE は 15.3cm となった。最新の詳細な物理モデルを用いた Brown (2010) による Snow-MIP の結果でも RMSE の値は 12~76cm 程度であることから、今回の簡易なモデルによる解析結果でも積雪深の実態を良好に再現できていると判断された。積雪深の現地観測値のない山頂付近の白山室堂(2450m)と白山南竜 (2080m) 地点での積雪深の推定結果から、標高による気温の違いが、積雪深の違いに表れることが確認できた。また、積雪開始日、消雪日、および積雪深の変動については、現地に設置したインターバルカメラの画像と比較した結果、概ね再現できていることが確認できた。

本研究では、現地観測値のない多雪山岳地域の積雪深を、比較的入手が容易な周辺の一般地上気象データ(気温・湿度・降水量・風速・全天日射量)から簡易に推定する手法の構築

を試み、現地で気温と湿度のみを観測すれば、降水量や積雪深を直接観測しなくても、積雪深の変動や融雪量のある程度良好に推定できることがわかった。今後は、別の期間や地点でも本手法が可能かどうかについて、より詳細に検討を重ねていく必要があると考える。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

藤原洋一, 中西祐亮, 高瀬恵次, 小倉晃, 一恩英二, 長野峻介, 佐藤嘉展, “森林流域中における積雪分布の推定”, *応用水文*, 27, 65 - 77, 2015, 査読有.

藤原洋一, 佐藤嘉展, 星川圭介, 藤井秀人, “気候変動や人間活動が水文・水環境に及ぼす影響 - 手取川流域およびメコンデルタを対象として - ”, *作物研究*, 59, 19-53, 2014, 査読有.

〔学会発表〕(計 5 件)

佐藤嘉展, 佐藤貴弘, 高瀬恵次, 藤原洋一, “手取川流域における積雪分布の季節変化の推定”, *水文・水資源学会 2016 年度研究発表会*, コラッセふくしま 福島, 2016 年 9 月 16 日

Sato Y, Ebisu N\*, Takase K, Fujihara Y. Analysis of water balance in a small watersheds in Japan using SVAT and hydrological model. Proceedings of 5th International Conference on Hydrology and Ecology, Advances in Monitoring, Predicting and Manageing Hydrological Processess (Hydro Eco 2015), BOKU, Vienna, Austria, 15 April, 2015.

Fujihara Y, Takase K, Ogura A, Ichion E, Chono C, Sato Y. Estimating the spatical-temporal distribution of snow depth in a forest catchment. Proceedings of 26th IUGG General Assembly (International Union of Geodesy and Geophysics). HW18p-332. Prague Congress Centre, Prague, Czech. 24 June, 2015.

Sato Y, Ebisu N\*, Fujihara Y, Takase K, Ogura A. Spatio-temporal estimation of snow in mountainous region using a time-lapse camera network and unmanned aerial vehicles (UAVs). Proceedings of 26th IUGG General Assembly (International Union of Geodesy and Geophysics). HW18p-326. Prague Congress Centre,

Prague, Czech. 24 June, 2015.

Sato, Y., Murai, A., Sumi, T.: Snow-melt Runoff Simulation for Dam Reservoir in the Heavy Snow Region. Geophysical Research Abstracts 16: 5002, EGU General Assembly 2014, Austria Center Vienna (ACV), Vienna, Austria, 28 April, 2014.

〔図書〕(計 1 件)

Sato, Y.: Water resources recharge in heavy-snow watersheds of Japan, In Ecosystem services of headwater catchments, Springer (Capital Publishing), 35-46, 2016.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<http://yoran.office.ehime-u.ac.jp/profile/ja.eab5e13b2ad6d85f60392a0d922b9077.html>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 嘉展 (SATO, Yoshinobu)  
愛媛大学・農学研究科・准教授  
研究者番号: 90414036