

# 降雪分布推定と融雪洪水解析モデルの構築

## ESTIMATION OF SNOWFALL DISTRIBUTION AND DEVELOPMENT OF DISTRIBUTED SNOWMELT RUNOFF MODEL

柏俊輔<sup>1</sup>・風間聡<sup>2</sup>・朝岡良浩<sup>2</sup>  
Shunsuke KASHIWA, So KAZAMA, and Yoshihiro ASAOKA

<sup>1</sup>学生会員 東北大学大学院 工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 東北大学大学院 工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

This paper evaluates the influence of interpolating method of precipitation on runoff analysis in a heavy snow area using distributed snowmelt runoff model. We prepared three kinds of precipitation dataset as driving data for the runoff model: (1) precipitation dataset by interpolating AMeDAS precipitation data and considering altitudinal distribution of precipitation, (2) Radar-AMeDAS composite precipitation (RAP), and (3) precipitation dataset by combining dataset between AMeDAS and RAP.

As results of case study in the Yoneshiro River catchment, all of runoff analysis using three kinds of driving data showed underestimation of river discharge due to lack of precipitation. Moreover, sensitive analysis of altitudinal distribution of precipitation suggested that optimization of the altitudinal coefficient for the precipitation is effective to estimate the water budget during snowmelt season but cause the overestimation in high elevation area and underestimation in low elevation area.

**Key Words :** *snowfall, river discharge estimation, AMeDAS, Radar-AMeDAS composite precipitation, catchment water budget*

### 1. はじめに

日本海側気候に属する地域は世界の中でも有数の多雪地帯である。世界の豪雪域と比較して低緯帯に位置しているにも関わらず多雪地帯となる要因は、シベリア大陸からの季節風と対馬暖流に大きく起因している。対馬暖流から水蒸気を供給された季節風は、脊梁山脈によって上昇気流が起り、日本海側に大雪をもたらす。このような地域において、冬期に積雪貯留された水は、春期に融雪水として河川に流出するため、河川流量は融雪期に最も豊富となる。その水は農業用水、生活用水、工業用水、地下水の源となり、産業、生活の基盤となる。このように雪は、下流地域において重要な水資源となるが、一方で融雪洪水、交通障害、雪崩、土石流などの人的被害を及ぼす自然災害要因としての側面を持つ。したがって国土の半分以上を豪雪地帯で占めている日本にとって、降積雪に関する定量化は重要な課題である。しかし降雪、積雪、融雪についての定量的かつ空間的な観測は時間、労力を要し、十分な観測がなされていない。そのため流域における降雪、積雪、融雪分布の推定と、それに伴う

融雪出水の推定に関する数多くの研究がなされてきた。小池ら<sup>1)</sup>は、日射量、気温、降水量のデータを用いた融雪モデルを提案し、降雪の影響のない融雪期において、融雪量分布の妥当性を示した。陸ら<sup>2)</sup>は、魚野川六日町流域(流域面積 355km<sup>2</sup>)において、小池らの融雪モデルを組み込んだ分布型融雪解析を行い、降雪、積雪、融雪現象を広域的にとらえ、流量を十分に再現できることを示した。中津川ら<sup>3)</sup>は積雪の貯留効果を簡便な貯留関数で定式化し、積雪貯留を考慮した融雪流出解析を行い、100km<sup>2</sup>程度の流域面積を対象とした解析のハイドログラフのピーク値の再現性を示した。小原ら<sup>4)</sup>は、降水量予測モデル、積雪深モデル、融雪量予測モデルに関する数多くのパラメータを現地観測および室内実験から同定することにより、湯田ダム流域(流域面積 583km<sup>2</sup>)の河川融雪流出量を良好な精度で解析した。

これらの研究は主に融雪モデルに着目されているが、年間を通じた長期流出解析においては、降雪量の空間分布が推定精度に大きく影響する。本研究は、モデルのフォーシングとなる降雪量の空間分布に着目し、降水量の補完方法が流出モデルの河川流量推定に及ぼす影響を評価することを目的としている。石塚ら<sup>5)</sup>は、綾川流域

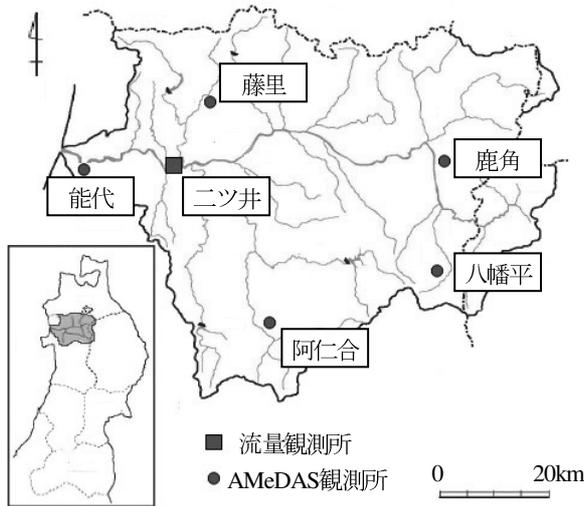


図-1 米代川流域およびニツ井地点.

(流域面積138km<sup>2</sup>)を対象とし、降雪、融雪の影響を受けない時期において、AMeDAS観測データを空間内挿した降水量の空間分布データ、レーダー・アメダス解析雨量の降水量空間分布データ、の2種類の雨量データを使用した際の流量推定精度の比較を行い、降雪、融雪の影響を受けない時期においてはレーダー・アメダス解析雨量を用いた方が河川流量の推定精度が向上すること示した。これに対して本研究では降雪、融雪期を対象としてAMeDASやレーダー・アメダス解析雨量から作成したデータをフォーシングとして使用した場合の流量推定精度を比較した。

## 2. 対象地域・データセット・流出モデルの概要

### (1) 対象地域

対象地域は日本有数の豪雪地帯に位置する米代川水系である。米代川流域は秋田県北部に位置し、幹川流路延長136km、流域面積4100km<sup>2</sup>の一級河川である。流出解析は流量観測を行っている地点のうち最も下流に位置するニツ井地点(流域面積3750km<sup>2</sup>)で行った(図-1)。この地域は狭窄部が形成されているため、数多くの洪水が記録されている。

### (2) データセット

解析に使用した標高データ、土地利用データは国土数値情報から、気温データ、降水量データ、風速データは地域気象観測(AMeDAS:Automated Meteorological Data Acquisition System)データから取得した。また降水量分布のデータセットの1つにはレーダー・アメダス解析雨量(RAP:Radar-AMeDAS composite precipitation)を利用した。メッシュ幅は250×250mとしデータを与えた。流出モデルの精度を検討するために、水文水質データベースよりニツ井地点の流量データを取得した。

### (3) 流出解析モデル

本流出モデルは斜面部の流出成分を直接流出と基底流出の2段タンクモデルで表現し、斜面部の直接流層にkinematic wave法、基底流層に貯留関数法、河道部にkinematic wave法を適用した分布型流出モデルである。250×250mメッシュに入力された降雨量、融雪量が標高データ、土地利用データより作成された河道網に従い下流メッシュに流出する。

以下にkinematic wave法と貯留関数法の説明を行う。

#### a) kinematic wave法

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = (R + SM - R_m)B \quad (1)$$

$$Q = \frac{1}{n} Bh^{5/3} I^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 $A$ は流水断面積(m<sup>2</sup>)、 $Q$ は流量(m<sup>3</sup>/s)、 $B$ はメッシュ幅(m)、 $R$ は降雨量(m/s)、 $R_m$ は浸透量(m/s)、 $t$ は時間(s)、 $x$ は流下方向の距離(m)、 $h$ は水深(m)、 $I$ は流路勾配、 $n$ はマンニングの粗度係数(m<sup>-1/3</sup>・s)、である。 $SM$ は後述する融雪モデルの出力を河道追跡のタイムステップに変換して用いる。浸透量 $R_m$ は以下の式により求めた。

$$R_m = k_a \times h \quad (3)$$

ここで $k_a$ はモデル定数( $k_a = 5.55 \times 10^{-6}$ )である。

#### b) 貯留関数法

$$\frac{ds}{dt} = R_m - q \quad (4)$$

$$s = kq^p \quad (5)$$

ここで、 $s$ は見かけの貯留高(m)、 $q$ は基底流の流出高(m/s)、 $k$ 、 $p$ はモデル定数( $k=150.0$ 、 $p=0.5$ )である。モデル定数は降雪、融雪の影響を受けない時期の解析により同定した。

#### c) モデルの精度評価

本研究は、長期流出解析の再現性を評価するNash-Sutcliffe指標<sup>6)</sup>を用い精度評価を行った。以下にNash-Sutcliffe指標の式を示す。

$$NS = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{N'} (Q_{o,j} - Q_{s,j})^2}{\sum_{j=1}^{N'} \left( Q_{o,j} - N' \sum_{j=1}^{N'} Q_{o,j} \right)^2} \quad (6)$$

ここで、 $Q_{o,j}$ は時間目の実測流量(m<sup>3</sup>/s)、 $Q_{s,j}$ は時間目の解析流量(m<sup>3</sup>/s)、 $N'$ は解析した時間数、 $NS$ はNash-Sutcliffe指標である。降雪、融雪の影響を受けない時期の2006年7月～8月の解析において、Nash-Sutcliffe指標は、AMeDASデータを用いたケース、レーダー・アメダス解析雨量を用いたケース、それぞれ0.89、0.87と十分な再現性が得られている。このことから本モデルの降雨流出過程のモデリングに問題はないと考えられる。

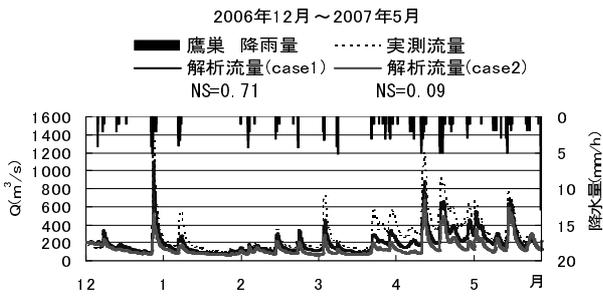


図-2 case1, case2の流出解析結果

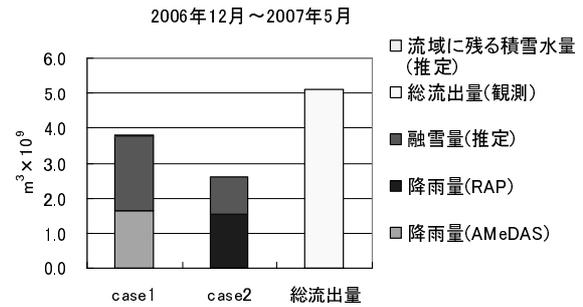


図-3 case1, case2の水収支(2006年12月～2007年5月)の比較

### 3. 気象データの作成

Kazama *et al.*<sup>7)</sup> にならい SWEモデルを用いることにより1時間単位の積雪水量分布を推定した。気温分布は AMeDAS観測データを用い、重み付き距離平均法により空間内挿した。その際、気温減率を0.006°C/mとして標高に対する気温の補正を行った。SWEモデルは以下の式(7)で表される。

$$\frac{d}{dt}(SWE) = SF - SM \quad (7)$$

ここで、*SWE*は積雪水量(mm)、*SF*は降雪量(mm/h)、*SM*は融雪量(mm/h)である。融雪量はdegree hour法で推定を行い、降雪量はいくつかのデータセットを作成し、それぞれのケースに対しての積雪水量分布を推定した。

#### (1) 融雪モデル

融雪量の算定は底面融雪を 2.0mm/day とし、表面融雪は degree hour 法により 1 時間融雪量を求めた。以下は融雪量算定の式である。

$$SM = K \times T + 2.0/24 \quad (8)$$

ここで、*T*は1時間の時間平均気温(°C)、*K*は融雪係数(mm/°C・h)である。融雪係数*K*は積雪期間中一定の値と仮定し、モデルによる消雪日が実測値の消雪日と一致するように値を設定した。

#### (2) AMeDASを用いた降雪分布データ

AMeDAS降水量データは能代、阿仁合、八幡平、鹿角、藤里の5地点(図-1)を代表値とし、重み付き距離平均法により降水量分布を作成した。観測所の降水量データは、雨量計の捕捉特性を考慮し、横山ら<sup>8)</sup> にならい以下の式で降雨量、降雪量の補正を行った。

$$P = (1 + mV)P' \quad (9)$$

ここで*P*は降水量の真値(mm/h)、*P'*は雨量計の降水量の測定値(mm/h)、*V*は風速(m/s)、*m*は風の影響の度合いを表す係数(雨の場合*m*=0.0192、雪の場合*m*=0.128)である。降水形態は、2°C以上を降雨、2°C未満を降雪として判別した。

降雪量は近藤ら<sup>9)</sup> にならい以下の式による降雪量の補正を行い、降雪の標高依存性を考慮した。

$$SF = SF' \times \{1 + \alpha(elv_i - elv_k)\} \quad (10)$$

ここで、*SF* は標高補正した降雪量(mm/h)、*SF'*は補正前の降雪量(mm/h)、*elv<sub>k</sub>*はメッシュ標高値(m)、*elv<sub>i</sub>*は観測点標高値(m)、*α* は標高補正係数である。近藤らは流域水収支から宮城県秋山沢川の標高補正係数(*α*=0.001)を求めており、多くの研究(Kazama *et al.*<sup>7)</sup>, Motoya *et al.*<sup>10)</sup>, 朝岡ら<sup>11)</sup>)において*α*=0.001 という値が他の流域や地域において用いられてきた。

#### (3) レーダー・アメダス解析雨量を用いた降雪分布データ

レーダー・アメダス解析雨量の降水量分布データから2°C以上を降雨、2°C未満を降雪として降水形態を判別した。

#### (4) 数値計算の概要

本研究では以下に示す4種類の降水量分布を作成して解析を解析を行った。

case1) AMeDAS降水量データの空間内挿と標高依存性を考慮した降水量分布(標高補正係数*α*=0.001)。

case2) レーダー・アメダス解析雨量の降水量分布データ。

case3) AMeDAS観測所の降水量データがすべて0mmの時間帯に限りレーダー・アメダス解析雨量を用い、その時間帯以外はAMeDAS降水量データの空間内挿と標高依存性を考慮した降水量分布(標高補正係数*α*=0.001)。

case4) AMeDAS降水量データの空間内挿と標高依存性を考慮した降水量分布(標高補正係数*α*=0.006)。

## 4. 結果および考察

### (1) AMeDASを用いた解析結果

図-2は2006年12月から2007年5月の流出解析結果(case1, case2)である。両ケース共に、融雪期にあたる3月～5月において実測値に対して過少推定する結果となった。

図-3に二ツ井地点流域における2006年12月初日から2007

2006年7月～2006年12月

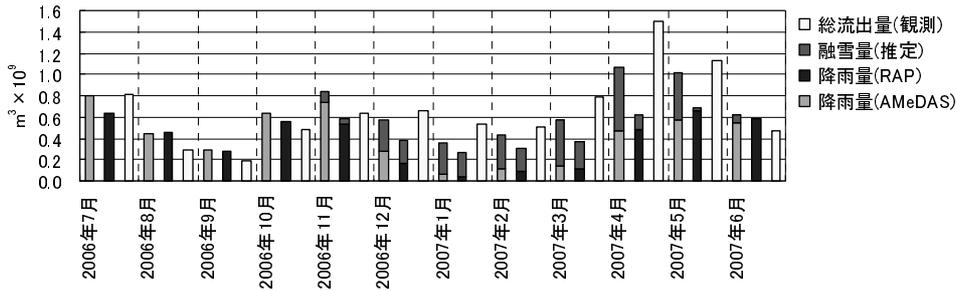


図-4 case1, case2の月ごとの水収支の比較.

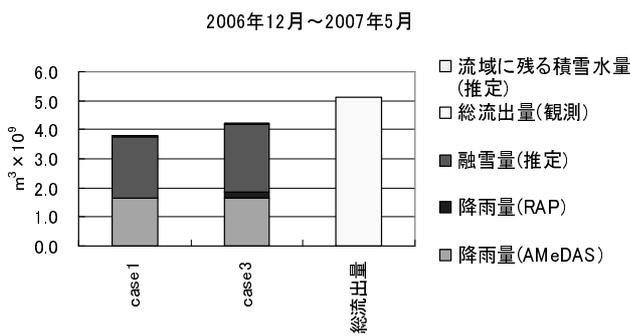


図-5 case1, case3の水収支(2006年12月～2007年5月)の比較.

年5月末日までの積算降雨量，積算融雪量，5月末日の積雪水量の総和と二ツ井地点における実測総流出量をまとめたものを示す．融雪期を含む冬期全体にわたって，実測総流出量に対して降雨量，融雪量が不足していることが確認できる．5月末日までの積算融雪量と積雪水量の総和は5月末日までの降雪量と等しいと仮定することができ，また降雪，融雪の影響を受けない時期においては，十分な降水量を与えられていることから，流量の過少推定の原因は，冬期の主な降水形態である降雪に対し過少推定していることによると考えられる．

(2) レーダー・アメダス解析雨量を用いた解析結果

降雪，融雪の影響を受ける2006年12月から2007年5月の解析結果は，レーダー・アメダス解析雨量を使用したケース(case2)よりも，AMeDASを空間内挿して作成した降水量データ(case1)を使用したケースの精度が高くなる．

図-4はレーダー・アメダス解析雨量の降水量分布を用いたケース(case2)と，AMeDAS観測データを空間内挿した降水量分布を用いたケース(case1)について，二ツ井地点流域における月ごとの積算降雨量と積算融雪量の総和の比較を2006年7月から2007年6月までまとめたものである．レーダー・アメダス解析雨量を用いた解析結果(case2)は，降雪，融雪の影響を受けない7月から10月においては，空間内挿して得た解析結果(case1)と同様に実測総流出量と近い値を示した．しかし融雪期においては，レーダー・アメダス解析雨量を用いた解析結果(case2)は，

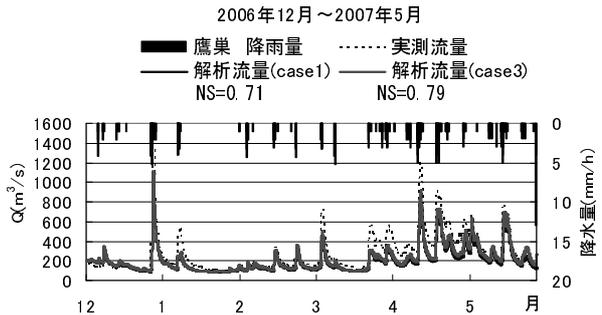


図-6 case1, case3の流出解析結果(2006年12月～2007年5月).

AMeDASの降水量データを空間内挿して得た解析結果(case1)と比較して融雪量が少なく，さらに冬期の降雪量を過少推定した．2006年12月初日から2007年5月末日までの積算降雨量，積算融雪量と5月末日の積雪水量の総和は実測総流出量に対して約55%との結果を得た．以上のことから冬期の解析においてはレーダー・アメダス解析雨量を直接利用することはできないと考えられる．これはレーダーの観測原理が降雨粒子を対象としたものであり，降雪粒子を正確に捉えることができないこと，さらに，レーダーデータから解析雨量に変換する際，AMeDAS降水量データを用いて校正しているが，AMeDAS観測データに風速補正処理がされていないため，レーダー解析値そのものに過少推定が起こるものと推察される．

(3) AMeDASとレーダー・アメダス解析雨量を用いた解析結果

重み付き距離平均法により空間内挿した降水量分布(case1)の欠点として，アメダス観測所の降水量がすべて0mmの場合，流域全域において降水量が0mmとなり，高標高域の降雪を表現できない点が挙げられる．そこでAMeDAS観測所の降水量がすべて0mmの時間帯に限りレーダー・アメダス解析雨量を用い，その時間帯以外は空間内挿した降水量分布を用いる解析(case3)を行い，局地的な降水量の補完を試みた．図-5はこの条件による解析を示したもので，図-6は二ツ井地点流域における2006年12月初日から2007年5月末日までの積算降雨量，積算融

2006年12月～2007年5月

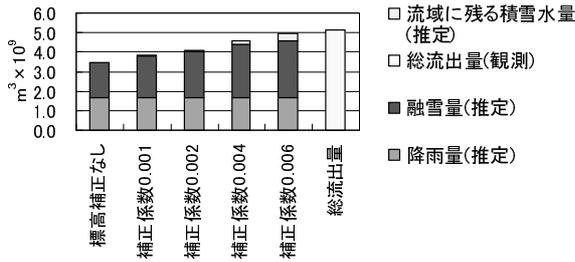


図-7 標高補正係数の違いによる水収支(2006年12月～2007年5月)の変化。

雪量と5月末日の積雪水量の総和を示したものである。この条件による解析結果(case3)は、AMeDASデータのみを用いた解析結果(case1)と比較して12月初日から5月末日までの降水量は1.1倍程度増加したが、実測総流出量と比較して約20%降水量が不足しており、実測流量と等しくなるほどの降水量は補えていない。このことから、レーダー・アメダス解析雨量が山岳域の降雪量を過少推定していることと、AMeDAS観測データを空間内挿した降雪量が高標高域にばかりでなく平野部を含む流域全域に不足していることが考えられる。

#### (4) 降雪量の標高補正係数に対する解析流量の変化

降雪量の不足を補うため、降雪量の標高補正係数を変数として解析を行い、積算降雨量と積算融雪量の総和を調べた。図-7に標高補正係数を0.0, 0.001, 0.002, 0.004, 0.006とした5ケースの二ツ井地点流域における2006年12月初日から2007年5月末日までの積算降雨量、積算融雪量と5月末日の積雪水量の総和を示した。この解析から標高補正係数が0.006の場合、降雨量と降雪量の総和が最も実測総流出量に近い結果が得られた。図-8は標高補正係数を0.006として、流出解析を行った結果(case4)を示したものである。図-8が示すように、3、4月において解析流量は実測流量に対してなお不足しており、また5月において解析流量は実測流量を上回る。これは平地は融雪期の初期に消雪するのに対し、山地は補正係数の値が大きすぎるため5月になるまで積雪が残り融雪が起きているためである。融雪係数の値を大きくすることにより月ごとの水収支のつりあいがとれるが、AMeDAS観測点における実測の消雪日とモデル推定による消雪日に不一致が生じる。この結果より、本研究で対象としている米代川流域では、水収支のつりあいがとれる標高補正係数(0.006)を設定した場合、高標高域で降雪量を過大推定、低標高域で過少推定しており、標高補正係数を大きくし、標高の高いところの降雪量を増加させる手法は実用的と言えるが、正確な積雪水量分布の推定に対して不十分であると考えられる。低標高域の降雪分布の過少推定の要因に対しては、今後、地上観測データを詳細に解析する必要がある。

2006年12月～2007年5月

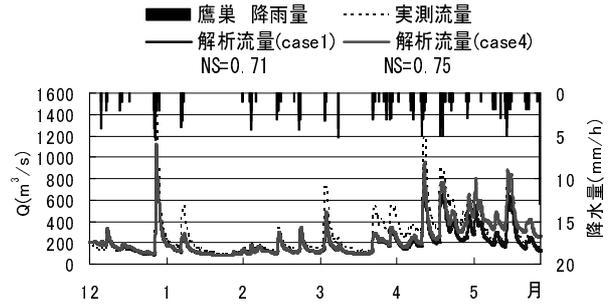


図-8 case1, case4の流出解析結果(2006年12月～2007年5月)。

## 5. まとめ

本研究から得られた結果のまとめは以下のとおりである。

- (1) AMeDAS データの空間内挿と降雪量の標高依存性を考慮した降雪量を使用した融雪期の解析(case1)は、解析流量が実測流量に対して過少推定する結果となった。これは冬期の降雪量の過少推定によるものである。
  - (2) レーダー・アメダス解析雨量の降水量データを用いた融雪期における解析(case2)は、AMeDAS 降水量データを空間内挿して得た解析(case1)よりもさらに流量を過少推定する結果となった。石塚ら<sup>5)</sup>は、レーダー・アメダス解析雨量を用いることにより、中小規模の河川流出解析の精度向上を報告しているが、本研究のように冬期の降雪を解析の対象とするケースにおいては、レーダー・アメダス解析雨量が適していないことが示唆された。
  - (3) AMeDAS 観測所の降水量がすべて 0mm の時間帯に限りレーダー・アメダス解析雨量を用い、局地的な降水量の補完を試みたが(case3)、実測総流出量と比較して約20%降水量が不足する結果を得た。これは、レーダー・アメダス解析雨量が山岳域の降雪量を過少推定していることと、AMeDAS 観測データを空間内挿した降雪量が流域全域に不足していることが考えられる。
  - (4) 降雪量の標高補正係数を増加させ、冬期の降雪量の不足を補った結果、標高補正係数の値を 0.006 とした際(case4)、流域における降雪量の不足が補えた。しかしながら、3、4月において、積算降雨量と積算融雪量の総和が実測総流出量に対して少なく、また5月において、積算降雨量と積算融雪量の総和が実測総流出量を上回る。この結果から、米代川流域では、高標高域の降雪量を過大推定、低標高域の降雪量を過少推定していると考えられる。
- 降雪分布推定は、AMeDAS 降水量データを空間内挿する手法やレーダー・アメダス解析雨量を用いる手法には限界があり、積雪深や積雪密度のデータで降水量観測データを補正する必要がある。

謝辞: 本研究を進めるにあたり, 足利工業大学都市環境工学科, 長尾昌朋教授には, レーダー・アメダス解析雨量の活用に関してご指導して頂きました。また, 建設技術研究所東北支社, 菊池祐二さんにはモデルの構築に関してご指導して頂きました。深く心から感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 小池俊雄, 高橋 裕, 吉野昭一: 融雪量分布のモデル化に関する研究, 土木学会論文集, 第363号/II-4, pp. 165-174, 1985.
- 2) 陸 旻皎, 小池俊雄, 早川典生: アメダスデータと数値地理情報を用いた分布型融雪解析システムの開発, 土木学会水工学論文集, 第42巻, pp. 121-126, 1998.
- 3) 中津川誠, 工藤啓介, 星 清: 積雪貯留を考慮した汎用的な融雪流出解析, 土木学会水工学論文集, 第48巻, pp. 37-42, 2004.
- 4) 小原一哉, 堺 茂樹: 降雪・積雪・融雪過程のモデル化と河川流出予測への応用に関する研究, 土木学会論文集B, Vol. 64, pp. 49-61, 2008.
- 5) 石塚正秀, 吉田秀典, 宮崎孟紀: レーダー・アメダス解析雨量を用いた中規模河川流域の流出解析と降雨特性分類に基づく検証, 土木学会論文集B, Vol. 66, pp. 35-46, 2010.
- 6) Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. : River flow forecasting through conceptual models part I –A discussion of principles, Journal of Hydrology, Vol. 10, pp.282-290, 1970.
- 7) So Kazama, Hirokazu Izumi, Priyantha Ranjan, Sarukkalige, Takayuki Nasu, Masaki Sawamoto: Estimating snow distribution over a large area and its application for water resources, Hydrological Processes, Vol.22, pp.2315-2324, 2008.
- 8) 横山宏太郎, 大野宏之, 小南靖弘, 井上 聡, 川方俊和: 冬期における降水量の捕捉特性, 日本雪氷学会誌, Vol. 65 pp. 303-316, 2003.
- 9) 近藤純正, 本谷 研, 松島 大: 新バケツモデルを用いた流域の土壤水分量, 流出量, 積雪水当量, 及び河川水温の研究, 天気, Vol. 42, pp. 821-831, 1995.
- 10) Motoya K. Yamazaki T. Yasuda N.: Evaluating the spatial and temporal distribution of snow accumulation, snowmelts and discharge in a multi basin scale: an application to the Tohoku Region, Japan, Hydrological Processes Vol. 15: 2101-2129. DOI: 10.1002/hyp.279. 2001.
- 11) 朝岡良浩, 小南裕志, 竹内由加里, 大丸裕武, 田中信行: 衛星観測に基づく積雪水量の広域推定と融雪係数の地域特性, 水文・水資源学会誌, Vol. 20, pp. 519-529, 2007.

(2010. 4. 8受付)