

三国川ダム上流域を対象とした熱収支法による融雪流出解析

長岡高等工業専門学校 ○非会員 清水琉我
長岡高等工業専門学校 正会員 山本隆広

1. はじめに

豪雪地域の融雪水は春先において重要な水資源である一方、水害を引き起こす場合もある。融雪流出解析で用いられている Degree-hour 法は気温と融雪係数から融雪量を簡単に求めることができる。しかしながら、この方法では気温だけに依存してしまい、放射、風速などの物理条件が考慮されていない。そのため将来の気候変化時の融雪水を適切に予測するためには気温だけでなく放射環境や風速などの様々な気象情報を解析モデルに組み込むことが重要である。そこで本研究では、近藤ら¹⁾によって開発された熱収支モデルを分布型水文モデル²⁾に組み込み、熱収支を考慮した融雪モデルの融雪流出解析への適用を検証した。

2. 対象流域と使用データ

対象流域は世界有数の豪雪地帯である三国川ダム上流域（流域面積：76.2 km²）とした。

本研究では気象庁 55 年長期再解析（JRA-55）を初期値とし、ダウンスケーリング手法を用いて作成された JRA55 領域ダウンスケーリング（DSJRA-55）の下向き短波放射、下向き長波放射、気圧、露点差、風の水平方向の風速を使用する。水平解像度は 5 km、時間解像度は 1 時間のデータである。

解析期間は 2005 年、2006 年、2007 年の 3 年間とし、その前に助走期間 5 年を設けることとする。2005 年の場合、2000 年 11 月から 2005 年 10 月末までの 5 年間に助走期間を設け、2005 年 11 月から翌年 5 月まで解析を行った。同様に 2006 年、2007 年も助走期間を設け解析を行った。

3. 解析手法

3.1 分布型水文モデルの概要

本研究で用いた分布型水文モデルは陸ら²⁾が開発した分布型水文モデリングシステムを星野ら³⁾が参考にして構築したものである。このモデルは対象流

域を約 250 m のセル状に分割し、各セルに地形や気象情報を与え、セルごとに行う流出量や蒸発量の計算をもとに河川流量を計算する手法である。降雨流出モデルには新安江モデル、蒸発モデルにはマッキンク法、河道追跡モデルには kinematic wave 法を用い、積雪底面の融雪量は 2 mm/day の一定値とした。

3.2 融雪モデル

3.2.1 Degree-hour 法

Degree-hour 法は融雪量を気温との比例関係から求める方法であり、次式で表される。

$$M = k \cdot T \quad (1)$$

ここで M は融雪量、 k は融雪係数、 T は気温である。本研究では k を試行錯誤的に求め、2005 年は 0.292、2006 年と 2007 年は 0.208 mm/°C/h とした。

3.2.2 熱収支法

本研究では近藤⁴⁾の理論を参考にした熱収支モデルを使用した。その熱収支式を次式で表す。

$$Q_G = R - \varepsilon\sigma T_s^4 - H - \iota E + Q_B + Q_R \quad (2)$$

ここで Q_G は積雪層が表面と底面から得る正味のエネルギーであり、温度を上昇させるエネルギー Q_S と融雪エネルギー Q_M の和である。 R は入力放射量、 ε は積雪面の黒体放射率、 σ はステファン・ボルツマン定数、 T_s は積雪表面温度、 H は顕熱、 ιE は潜熱、 Q_B と Q_R は地中伝導率と雨の熱量である。融雪期積雪内部は温度勾配がなくなるため Q_S は 0 とし、雨の熱量も少ないため Q_R も 0 とした。 Q_B は底面融雪として 2 mm/day を与えているために省く。また、潜熱と顕熱は次式のパルク式で得られる。

$$H = c_p \rho C_H U (T_s - T) \quad (3)$$

$$\iota E = \iota \rho C_E U [(1 - rh) q_{SAT} + \Delta (T_s - T)] \quad (4)$$

ここで c_p は空気の定圧比熱、 ρ は空気の密度、 ι は水の気化潜熱、 C_H と C_E は顕熱と潜熱のパルク輸送係数、

U は風速, rh は相対湿度, q_{SAT} は気温に対する飽和比湿, Δ は飽和比湿に対する気温の変化率である. 気温は分布型水文モデルの中のデータを使用し, 他は DSJRA-55 のデータから求める. Q_M が正の場合は融雪にエネルギーが使われるが, 融雪水はすべて流出せず積雪内に保持される. 本研究では積雪の最大含水率を近藤ら⁴⁾と同様 5% とし, 最大含水量を超えた分が流出するとした. また, Q_M が負の場合には凍結にエネルギーが使われるため積雪内の液体水は再凍結する. 積雪に液体水が含まれるとき T_S は 273 K だが, 乾燥している場合は, 液体水がないため Q_M は負ではないが, 融雪が発生している可能性がある. そのため $Q_M=0$ とした式(2)に, 式(3), (4)を代入し, T_S を計算する, このとき $C_H \approx C_E$ と近似した.

$$T_S = \frac{R^4 - \varepsilon\sigma T^4 - \rho C_H U (1 - rh) q_{SAT}}{4\varepsilon T^3 + (\Delta + c_p)\rho C_H U} + T \quad (5)$$

$T_S < 273$ K なら融雪は起きない. $T_S \geq 273$ K なら融雪は発生するが, 実際の T_S は 273 K を超えない. そのため $T_S = 273$ K とおき, Q_M を求める.

4. 解析結果及び考察

河川流量の再現性を Nash 効率係数で表す. 一般的に Nash 効率係数が 0.7 以上で再現性が良好とされる. Nash 効率係数及び三国川ダムで観測された最大積雪深を表 1, 熱収支法で最も再現性の高かった 2006 年のハイドログラフ及び融雪量と融雪エネルギーのグラフを図 1, 2 に示す.

図 1 より熱収支法による河川流量は観測流量に比べて 4 月から 6 月にかけて流量が過大評価されている. この理由として, 森林などの地域的特性を考慮していないことが挙げられる. 森林内部は日射や風速を減少させるが, 本研究では対象流域を一様に積雪面としたため, 日射量が増大する 4 月から 6 月にかけて融雪が多く発生したと考えられる.

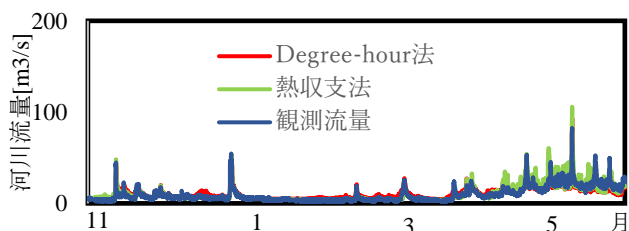


図 1 2006 年のハイドログラフ

表 1 各イベントの Nash 効率係数と積雪深

	2005	2006	2007
Degree-hour	0.9	0.75	0.86
熱収支法	0.33	0.71	0.68
積雪深 [cm]	418	128	271

図 2 から熱収支法は Degree-hour 法に比べて融雪が遅いことがわかる. 融雪水は時間をかけて積雪内に浸透し流出するが, 本研究では積雪内浸透を考慮していなかった. 夜間に再凍結を起こした結果, 夜間の間だけ積雪内部に融雪水が残った状態になるため融雪が遅れたと考えられる.

5. まとめ

本研究では三国川ダムを対象に熱収支を考慮した分布型水文モデルによる融雪流出解析を行った. その結果, 積雪が少ない年では比較的良好な再現性が得られたが, 融雪の多い年では森林などの地形的特性や積雪内浸透の影響で再現性が低くなったと予想する. 今後の課題として 5 月以降も融雪が残っているので 6 月まで解析期間を広げる必要がある. また, 解析期間を増やし, 信濃川の小千谷まで流域面積を広げ, 以上の原因を高い確度で示す必要が課題である.

文献

- 1) 近藤純正: 水環境の気象学, 朝倉商店, 1994.
- 2) 陸旻皎・小池俊雄・早川典正: 分布型水文情報に対応する流出モデルの開発, 土木論文集, 第 411 号/II-12, pp135-142, 1989
- 3) 星野大雅・平沢勇之助・戸倉駿人・山本隆広: 非超過確率を用いた新たな洪水氾濫リスク指標開発のための基礎研究, 土木学会関東支部新潟会研究調査 発表論文集, Vol.32, pp.88-91, 2014.
- 4) 近藤純正・山崎剛: 熱収支法による融雪の予想, 日本氷雪学会誌 47 巻 4 号, pp.181-191, 1987.

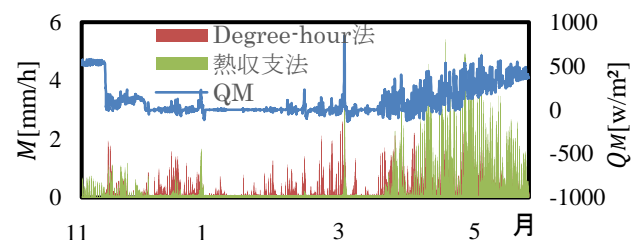


図 2 2006 年の融雪量と融雪エネルギー