

魚野川流域における融雪流出解析手法と積雪機構に関する研究

地球環境研究室 阿部真也

指導教官 早川典生

1 はじめに

わが国に降る雪は雪崩や交通障害などの災害を引き起こす要因であるとともに、春先の融雪期には貴重な水資源として大地を潤すという二面性を持っている。このような雪を有効利用あるいは、防災上考えることは非常に重要な課題だと考えられる。

雪を有効な水資源として利用するためには、存在する積雪量を定量的に把握することが必要である。積雪が多い地域の多くは山岳地帯であり、積雪を連続した広範囲なデータを得るために観測を行うには、危険性が伴い、多大な人的・経済的資源が必要である。そこで、モデルによって山岳地帯の降雪・積雪状況を精度良く再現することが重要であり、それには実測データとの検証が必要になってくる。本研究は、分布型流出モデルにより融雪期の流域流量を高度化に解析する手法を解析する。本研究では特に、流域の積雪面積と融雪熱量について実測とモデルとの比較を行い、モデルの高度化を目指すものとする。

2 対象流域と使用データ

本研究の対象流域は、新潟県中越地方に位置する魚野川流域である。魚野川は、流路長 367 km 持つ日本最大の信濃川の支川であり、その信濃川の流域面積は利根川、石狩川に次いで大きく、約 11,900 km² である。魚野川はわが国でも有数の豪雪地帯である南魚沼地方を流れおり、この流域は冬期における降雪が非常に多いことで知られている。本研究では、魚野川流域のうち六日町地点よりも上流の流域を対象とするもので、その流域面積は 355 km² である。標

高は 160m ~ 2,000m までであり、平均標高は約 760m である。図 1 に魚野川流域を示す。

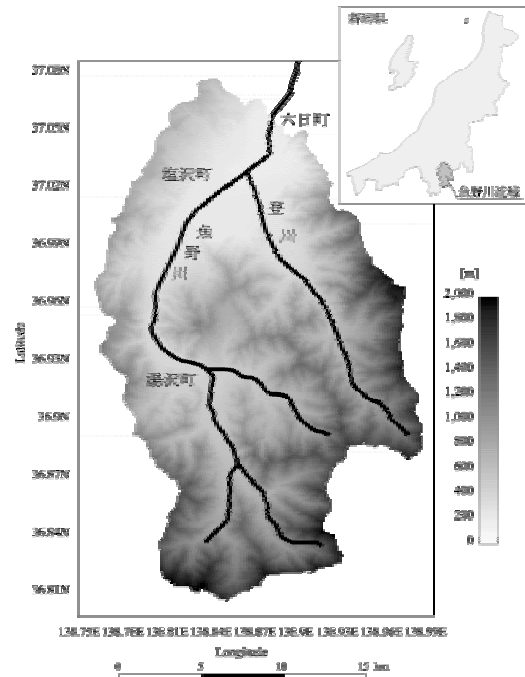


図 1 魚野川流域

3 分布型融雪流出モデル

本研究で使用する分布型モデルは、陸ら (1989) による分布型流出モデルと小池ら (1985) 太田ら (1992) による分布型融雪モデルを組み合わせた分布型融雪流出モデルである。また、このモデルのうちの降雪量を補正する降雪量補正モデルを組み込んでいる。

分布型融雪流出モデルは、対象とする流域を細かなメッシュで分割し、各メッシュに村して降雪モデル・融雪モデル・流出モデルを適用し、降雪・融雪・流出の過程を表現する。各メッシュからの流出量は Kinematic Wave 法により追跡計算され、流域出口での流量に変換される。図 2 に本モデルのフローチャートを示す。

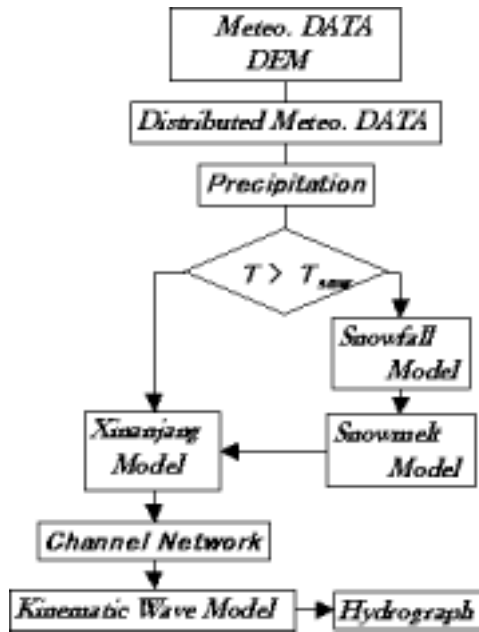


図2 流出解析フローチャート

3.1 降雪量補正モデル

流域内の降雪量分布を表現するモデルとして、本研究では一般に言われている、降雪量は標高とともに線形的に増えていくことをモデル化した以下の式を用いた。

$$P(h) = A(1 + B(h - h_{gauge}))P(h_{gauge}) \quad (1)$$

ここで、A:雨量計補正係数、B:降雪量標高補正係数、P(h):当該メッシュの降水量、h:当該メッシュの標高、P(h_{gauge}):降水量観測所の降水量、h_{gauge}:降水量観測所の標高である。式-(1)はメッシュの気温が2以下 のときに適用される。

3.2 気温の補正

各メッシュの気温の補正は、流域内の気温減率を求め、以下の式を用いて行う。

$$t = t_{gauge} - 0.01\gamma(h - h_{gauge}) \quad (2)$$

ここで、t:h:当該メッシュの気温()と標高(m)、t_{gauge}・h_{gauge}:観測所の気温()と標高(m)、γ:

気温減率(/100m)である。

3.3 融雪モデル

本研究では、融雪モデルとして小池らのモデルと太田らのモデルを組み合わせた以下の式で示すモデルを用いる。

$$M_{cal} = M_r + M_d + M_p \quad (3)$$

ここで、M_{cal}:総融雪量[mm]、M_r:放射収支による融雪量[mm]、M_d:顕熱による融雪量[mm]、M_p:降雨による融雪量[mm]である。

このモデルでは、放射収支による融雪の表現に太田らのモデルを、顕熱および降雨など熱収支に関する融雪の表現を小池らのモデルを用いている。これらは、メッシュ標高データから算出される斜面特性を地形データとし、降水・気温・日射量などを気象要素として入力し、各メッシュでの融雪量を推定するものである。

3.4 新安江モデル

本研究では、分布型モデルのうち流出過程を表現するモデルに、中国において広く使用されている新安江モデルを用いた。新安江モデルは1973年に新安江ダムの流入量を予測する際に構築されたモデルである。このモデルは中国の主要河川流域に適用されており、年降水量500mm以上の半乾燥地域においては、非常に良い適合性を示している。

3.4.1 超蓄流出理論

超蓄流出理論は1960年代初期に提案されたもので、その概略を図4に示す。この理論ではある点において降水(P)があったとき、その貯水量が貯水能力(WPM)に達するまでは流出が発生しないとしている。その点の貯水量が貯水能力に達してから最終浸透能(F_c)を用いて

浸透した分が基底流出 (R_g) となる。また降水のうち最終浸透能で最速できない分が直接流出 (R_s) となり、計算された基底流出と直接流出の和がその点での流出量 (R) となる。

3.3.2 蒸発散

新安江モデルでは、流域貯水能力を上層・下層・深層に分け蒸発量を計算する。蒸発散

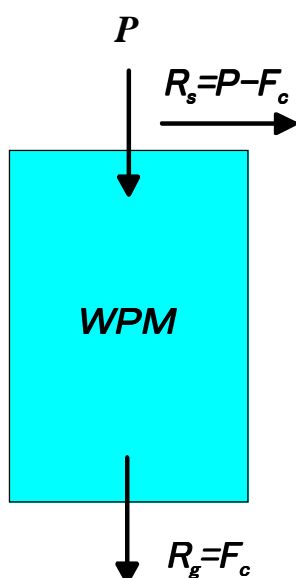


図3 超蓄流出理論

による土壌水分の消耗と降水による補給はどちらも上層から下層、深層へと計算を行う。補給の場合には、上層の貯水能力を満たした後に下層の貯水能力を満たそうと働く。消耗の場合には、上層から水分を奪い、貯水量が無くなったら、下層、深層から奪うという順序で計算が行われる。

4 積雪観測

分布型融雪流出モデルでは、流量を算出するのに加え、流域内の任意の時間・地点での積雪量も出力することができる。そこでモデルの検証データを得るために、解析期間中である2001年1月末から4月中旬に積雪観測として積雪断

面観測、グラントルースを行った。

4.1 積雪断面観測

分布型融雪流出モデルでは積雪を水量として計算しているため、比較データとして積雪相当水量を使用することとした。積雪相当水量とは積雪を水の量に換算した値であり、スノーサンプラーを用いた積雪断面観測によって得ることができる。観測を行った日時は2001年の1月31日、3月14、31日、4月16、24日であり、観測地点はそれぞれ南魚沼郡にある塩沢町鉄道総合研究所と清水、六日町八箇峠である。

4.2 グラントルース

グラントルースとは、リモートセンシングデータと観測対象物との対応関係を明らかにするために、地上の実態に関する情報を観測・測定・収集することであり、本研究では、Landsat 衛星が魚野川流域に飛来した2001年4月16日に行った。

5 衛星画像の解析

本研究ではモデルの最適化の指標として解像度の高いLandsat 衛星画像を使用した。これを画像分類し、積雪有りと積雪無しに2値化して積雪を表すこととした。

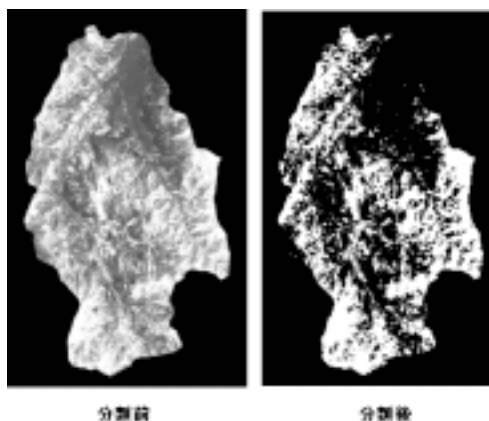


図4 衛星画像の分類 (4月16日)

6 顕熱・潜熱輸送量の観測

モデルの信頼性を確かめるために、モデル内の融雪量から求めた融雪熱量と実測（積雪深データ）との比較、またモデル内の顕熱による融雪熱量と実測（超音波風速計）との比較を行うために、2001年3月15日～3月24日まで塩沢町鉄道総合研究所において積雪深、顕熱・潜熱輸送量の観測を行った。

7 モデルの魚野川流域への適用

7.1 降水量データの配分

湯沢・塩沢にあるアメタス観測点の降水量と、清水・六日町で観測された降水量を用い、各グリッドで最も近い観測所のデータを使用するように配分した。図-6に観測所の位置と降水量の配分を示す。

7.2 流域内の気温の推定

本研究では、実測された気温をもとに平均的な気温逓減係数を算出し、各メッシュの気温を算出している。湯沢の AMeDAS 観測点長岡国道工事事務所による六日町(170m)・三保(630m)・浅貝(1060m)で観測された、1991～1994年の全期間での時間気温データを用いて気温逓減係数を計算した。図-7に気温逓減係数の計集結果であり、60日の移動平均をかけたものである。これより、計算期間での平均は0.62/100mとなり、本研究ではこの値をモデルでの気温逓減係数として使用して流域内の気温を推定することとした。

7.3 モデルの最適化方法

本研究では降雪量補正モデルのパラメータである降雪量補正係数Aと降雪量標高補正係数Bの最適化を行うこととした。モデルの最適化の目的関数として、これまでの流域出口での実測流量と計算流量の誤差を最小にするように計算を行った。また、衛星画像から求めた積雪面積とモデル計算値、観測から求めた融雪熱

量とモデル計算値との比較を行った。

7.3.1 流量の誤差算出方法

実測流量と計算流量の誤差は解析期間全体のものとした。また誤差の算出には以下の式を用いた。

$$Error_q = \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{cal})^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (4)$$

ここで、 $Error_q$:流量の誤差、 Q_{obs} :実測流量 (m^3/s)、 \bar{Q}_{obs} :実測流量の平均 (m^3/s)

Q_{cal} :計算流量(m^3/s)である。

7.3.2 積雪面積の比較と誤差算出

積雪面積の誤差の計算には、実測積雪量として Landsat 衛星画像、計算積雪量としてモデルの途中計算で出力できる積雪水量の流域分布を用いた。具体的には、まず魚野川流域の各グリッドにおいて、実測および計算での積雪の有無を判別していく。そして判別結果には表-1に示すようなパターンが発生する。

表1 判読パターン

	衛星	計算
パターン1		
パターン2	×	×
パターン3		×
パターン4	×	

ここで、表中 \square は積雪有り、 \times は積雪無しを示している。本研究では、パターン1とパターン2をカウントして次式を用いて積雪量の誤差を算出した。

$$Error_{snw} = 1 - \frac{count_s + count_g}{n} \quad (5)$$

ここで、 $Error_{snw}$:積雪面積の誤差、 $count_s$:パタ

ーン 1 の個数、count_g:パターン 2 の個数、n: 魚野川流域のグリッド総数(36233 個)である。

表 2 最適化パラメータ

降水量補正係数 A	1.2
降雪量標高補正係数 B	0.003
誤差	0.2095

計算値は期間全体を通して概ね再現していることがわかった。

7.3.3 融雪熱量の比較方法

7.3.3.1 顕熱・潜熱輸送量の算出

融雪モデル内の顕熱による融雪量からの融雪熱量の比較として、超音波風速計などの応答速度の速い測器で測定された値を用いてフラックスを直接求めることができる渦相関法を用いた。これは用いる仮定が少なく、精度が良いとされているからである。

$$H = \rho C_p \overline{w'\theta_0'} \quad (6)$$

$$E = \rho L_e \overline{w'q_0'} \quad (7)$$

H:顕熱フラックス (W/m²) E:潜熱フラックス (W/m²) ρ:空気密度 (kg/m³) C_p:空気の定圧比熱 (J/K・kg) w':鉛直風速の変動成分 (m/s) θ₀':温度の変動成分 (K) q₀':比湿の変動成分 (kg/kg) である。また添字の 0 は地表面の値を意味している。

7.3.3.2 融雪熱量の算出

融雪量から融雪熱量を算出するために以下の式を用いた。

$$Q_M = L_m M \quad (8)$$

ここで、Q_M:融雪熱量 (W/m²) M:融雪水当量 (mm) L_m:氷の融解潜熱 (=0.3336 M J kg⁻¹) である。

8 モデルの計算結果

8.1 流量について

最適値の計算において降水量補正係数 A を 1.0~2.0 まで 0.2 ずつ変化させ、降雪量標高補正係数 B を 0.001~0.006 まで変化させ計算を行った。その中で誤差が最小であったものは、以下の表の値である。

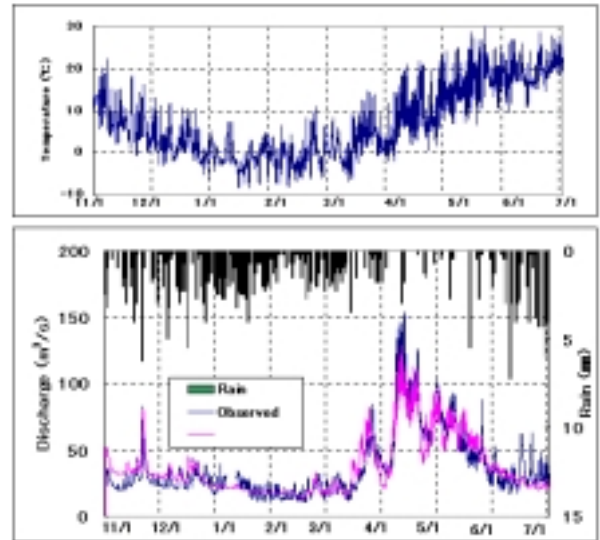


図 5 流量の実測値と計算値

8.2 衛星画像の比較

図 6 において左が衛星画像、真中が衛星画像の 2 値化後、右が流量の最適値によって算出された積雪面積の画像である。また、図 7 に積雪水当量の結果を示す。

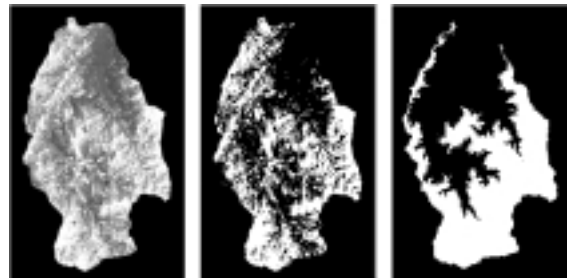


図 6 積雪面積

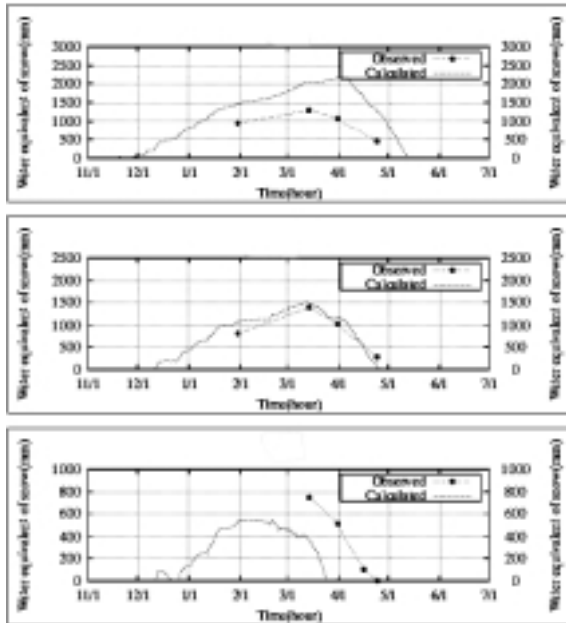


図7 積雪相当水量

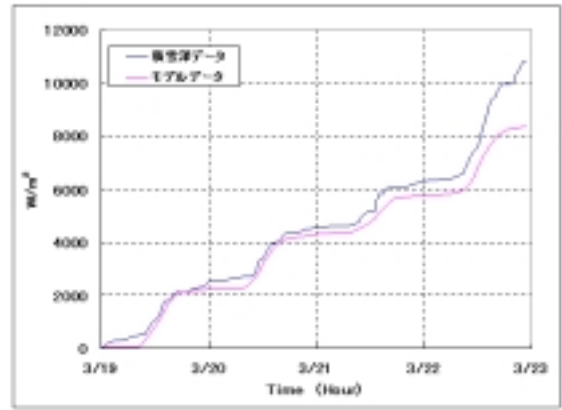
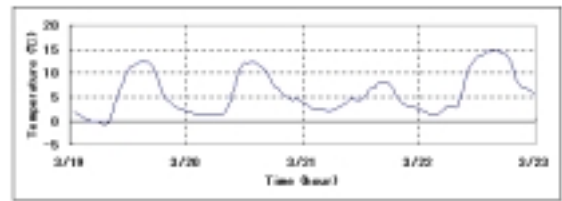


図9 融雪熱量の比較

8.3 融雪熱量の比較

顕熱の比較を図8に、融雪熱量の比較を図9に示す。両方ともモデルとほぼ一致している。

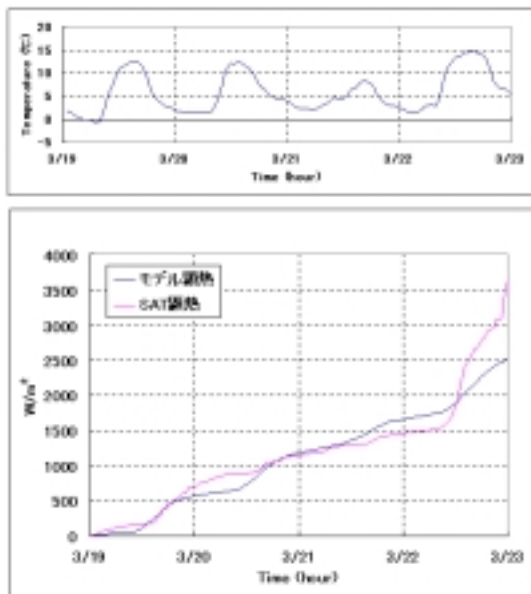


図8 顕熱の比較

9 結論

本研究で得られた結果について以下にまとめる。分布型融雪流出モデルのパラメータ同定では、解析期間全体での流量を再現できた。積雪面積の比較では、実際の積雪面積よりも若干多く見積もっていた。積雪相当水量については、積雪分布は再現されているが、積雪量に誤差がある。融雪熱量については、概ね一致する結果が得られた。

今後の課題の課題としては、降雪量補正モデルの見直しが必要であることが示唆された。