

融雪量の空間分布を考慮した流出解析
Runoff Analysis Considering Special Snowmelt Distribution

東 京 大 学 工 学 部	正 員	高 橋 裕
東 京 大 学 工 学 部	正 員	小 池 俊 雄
農 林 水 産 省 林 業 試 験 場		吉 野 昭 一
東 京 大 学 工 学 部		中 谷 成 一

1. はじめに

融雪流出解析の入力値である流域融雪量の推定に関しては、斜面特性や森林の影響を考慮した融雪モデルが提案され、¹⁾また河川表流水の電気伝導度を用いて融雪流出水を直接流出成分と基底流出成分へ分離する方法が提案されている。²⁾本研究ではこれらの結果を踏まえて、短期融雪流出解析に必要な時間融雪モデルとメッシュデータとして得られる融雪量に対応する分布型流出モデルの構成を検討する。

2. 対象流域と観測の概要

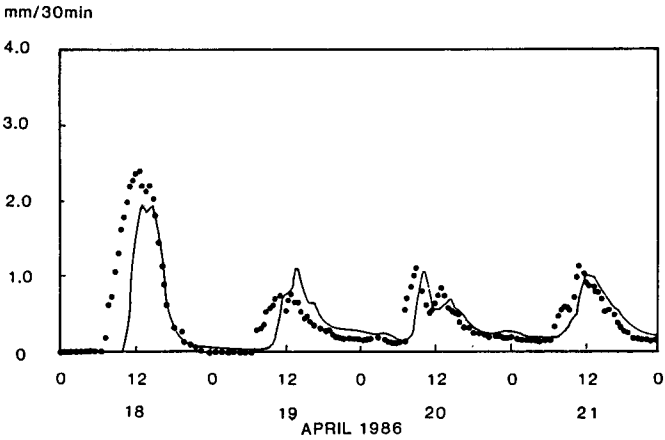
本研究で対象とした流域は利根川上流の林業試験場宝川試験地の初沢流域である。流域面積は1.2km²、標高は800～1400mで、南斜面が卓越している。植生は主にブナ林でヒバ、ナラが混交していたが、皆伐されて跡地にはスギ、カラマツが植林されている。³⁾観測項目は積雪面積、気象要素、河川の流量・水質、融雪量である。積雪面積の分布は、融雪期に流域の大半が見渡せアプローチが容易な地点から積雪分布の程度を目視で、0, 10, 25, 50, 75, 100%の6段階に区分して2万5千分の1の地形図に書き込み、各分布帯の面積を計量して求めた。融雪の発生に関わる気象要素については、日射量、気温、降水量を流域末端の露場（標高800m）で観測した。河川の水質については、自記観測が容易であるという利点を有する電気伝導度と水温を観測し、25℃換算の電気伝導度を指標として用いた。融雪量の観測には、ライシメーター法と断面観測法を用いた。前者は90cm四方の受水部の上部積雪層を乱さないように周囲を掘り返し、支柱とビニールシートで融雪水の水平移動を遮断した後に再び埋め戻し、融雪水を地下室に導いて転倒マスを用いて計量する方法で、融雪による雪面の低下とともに不用なビニールシートを取り除いていく。¹⁾後者は雪密度の鉛直プロファイルの観測より得られた全層平均密度と積雪深の積である積雪水量の変化から融雪量を計量する方法である。1984年4月25日18時～5月8日18時の観測で両者の誤差は0.8%で、十分な精度の資料が得られた。¹⁾ただしこの期間は記録計として週巻きの自記電接計を用いたので、日融雪量の読み取りが限界で時間融雪量を得るには至らなかった。1986年は日射量、気温、水温、電気伝導度とともに省電力・野外観測用のCTIS社製C200F型RAM記録計測機を用いて、4月15日17時～4月29日18時の30分間融雪量を計測した。

3. 時間融雪モデル

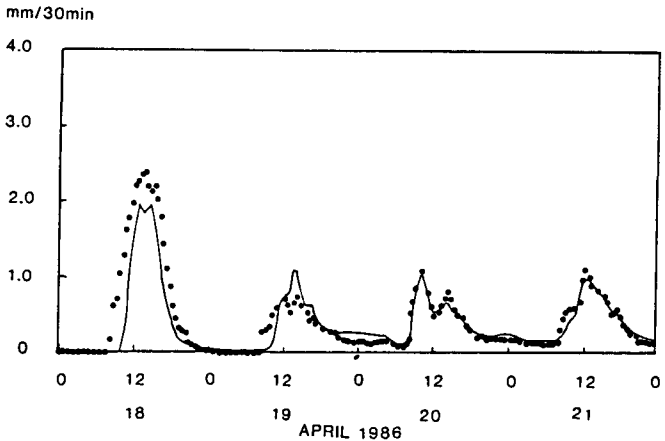
流域の融雪量分布を考える上で標高・斜面の効果は重要で、また、森林が融雪に及ぼす効果も無視し得ない。そこで小池・高橋・吉野はこれらの影響を表し得る日融雪モデルとして次式を提案している（記号については文献1）を参照）。

$$M_{cat} = \frac{0.332 I \left(\frac{\bar{T}_{6-18} + 273}{273} \right)^4 - 33.4 \Delta T_{18-21} \left(\frac{273}{\bar{T}_{18} + 273} \right)^4 + 3.0}{8} + 0.102 d h + \frac{2.49 \Sigma (e_{sat} - 6.1) + \frac{P \bar{T}_p}{10}}{8} \quad (1)$$

この融雪モデルは、右辺第1項が放射収支項で、分子の第1項が昼間の放射収支、残りが夜間の放射収支を表している。第2項は顕熱項をdegree hour法で表したもので、第3項は降雨時の潜熱と雨滴の熱量である。1986年融雪期は降雨観測に不備が生じていたため降雨量の観測資料は得られなかった。そこで本稿では降雨時を除く期間について解析した。図1 a), 図2 a)はライシメーターによる30分間融雪量の観測結果と融雪モデルによる計算結果である。ただし30分間融雪量の計算値は、日射量は毎30分の値とし、気温時間のかわりに 0°C 以上の毎30分の気温観測値の1/2の値を用い、夜間放射収支量は総計を夜間30分間数23で割った値として式(1)より求めた。また、夜間の放射冷却により融雪熱量が負になる場合はその累積値と6時以降の融雪熱量との和が正になるまで、融雪量を0とした。なお4月15日の積雪深は115cmで全層ザラメ化しており、5月1日には消雪している。図に示すように各時期ともハイドログラフの実測値と計算値は時間的なずれはあるが絶対値は良く一致している。そこで時間的なずれが小さくなるように計算値に遅れ時間、75分、45分を与えた結果がそれぞれ図1 b), 図2 b)で実測値と計算値はよく一致している。これは全層がザラメ化した場合は積雪層に貯留効果がなく、地表面到達融雪水量を算定するためには、積雪層内の融雪水の流下時間のみを考慮すればよいことを示している。なお1986年以外は気象要素の観測時間間隔は1時間であり、日射量・気温



a) 時間遅れなし



b) 時間遅れ75分

図1 融雪量の計算値(●)と実測値(実線)

時間は毎正時の値を用い、夜間放射収支量は総計を夜間時間数11で割った値として(1)式より時間融雪量を求め解析に用いた。

流域の各地点での融雪量を算定するためには、斜面、標高、森林の影響を融雪モデルに組み込む必要があり、日射量と気温を次式で補正して(1)式に代入する。

$$I = (1 - C) \frac{S_N}{S_0} I_0 \tag{2}$$

$$T = \Delta \theta (h_N - h_0) \tag{3}$$

ただし、 C ：森林の日射遮へい率、 S_N 、 S_0 ：地点N及び日射量観測地点での受光係数、 I_0 ：日射量観測値、 $\Delta \theta$ ：標高に対する気温減率、 h_N 、 h_0 ：地点N及び気温観測地点での標高

各地点の融雪量はこのようにして得られた(1)式に積雪面積率を乗じて計算される。ここで受光係数は流域をメッシュ化して各格子点の標高データから計算され、また積雪面積率も森林の日射遮へい率もメッシュデータとして与えられる。従って融雪量は各メッシュ毎に異なる分布量として計算される。

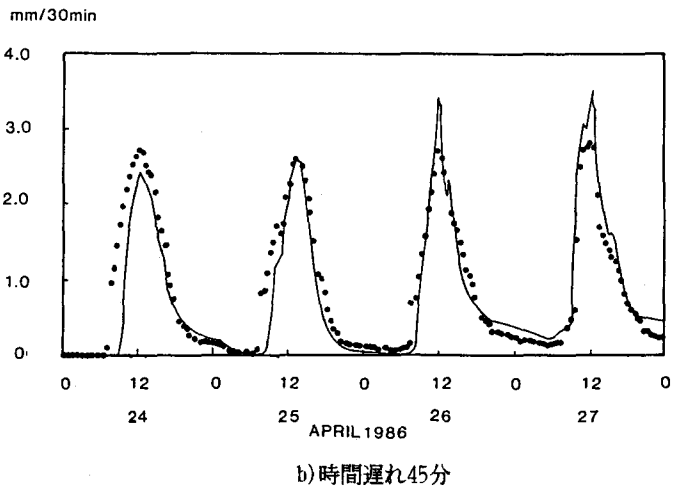
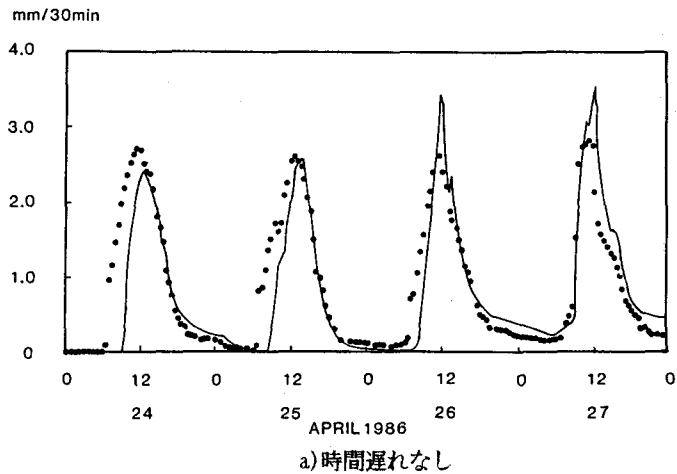


図2 融雪量の計算値（●）と実測値（実線）

4. 分布型流出モデル

河川流出水は概念的に直接流出と基底流出に分けて考えられ、小池・高橋・吉野は河川流出水の電気伝導度を用いた各流出成分の分離法を提案している。²⁾これは、流量と濃度に関する保存則と各流出成分の流量電気伝導度との関係を用いたもので、

$$C_s Q_s + C_g Q_g = C Q \quad (4)$$

$$Q_s + Q_g = Q \quad (5)$$

$$1/Q_g = a C_g + b \quad (6)$$

$$C_s = 13.8 \text{ (}\mu\text{S/cm)} \quad (7)$$

ここに、 C 、 Q ：電気伝導度、流量、 C_g 、 Q_g ：基底流出成分の電気伝導度、流量

C_s 、 Q_s ：直接流出成分の電気伝導度、流量、 a 、 b ：定数

と表される。小池・高橋・吉野らはさらにそれぞれの流出成分を集中型流出モデルである貯留関数でモデル化しているが、²⁾本研究では直接流出成分について前節で示された分布型入力に対応し得る分布型流出モデルの構成を検討する。

流出モデルへの入力値である融雪量がメッシュの格子点で計算されることを考慮して、流域内の格子点を結ぶ流路網系を考える。これは、各格子点の周りの8点から最も勾配が急になる格子点を選び、この間を広幅矩形の仮想流路で結んだものである。流路への入力値は格子点のみで考え、流路途中での横流入や降雨入力は考えない。格子点への入力値は Δt 間の融雪量と上流からの流入量であり、下流への伝播は kinematic waveとし、運動方程式はManning則を用いる。なお、粗度係数と水路幅は各メッシュで異なると考えられるが、本研究では簡単のために流域内一定とした。洪水波の追い越しの処理も含め、到達時間の計算は上流流路よりおこない、各流路の下流端の格子点で時間配分をおこなって、その地点における流入量時系列とする。図3に流路網の概念を示し、図4に初沢流域における100mメッシュの流路網を示す。電気伝導度を用いた流出成分分離によって得られた3時期の直接流出成分に²⁾この流出モデルを適用し、 $\Delta t = 10$ 分で解析した結果を図5a)～c)に示す。いずれの場合も粗度係数0.2、水路幅50mで良好な結果が得られた。なお、雪面から地表面までの到達時間は積雪量の違いに伴って、それぞれ、60分、30分、0分を仮定した。ただし、減水部につ

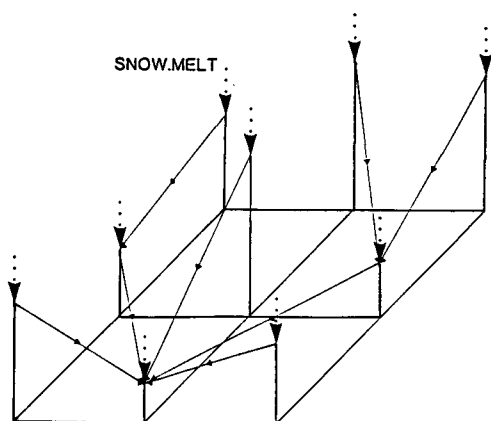


図3 モデルの概念図

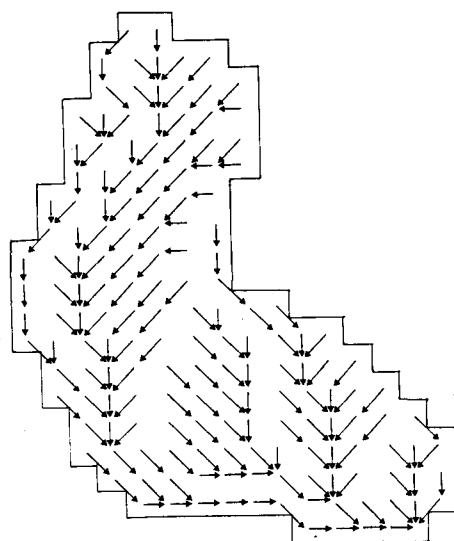


図4 初沢流域の流路網

いては計算値が実測値よりも低く、これは到達時間が比較的遅い中間流出成分を無視しているためであると考えられる。

基底流出成分は集中型として分数関数型の減水式で表し、これを時間について積分すると、次式のように貯留関数で表示される。²⁾

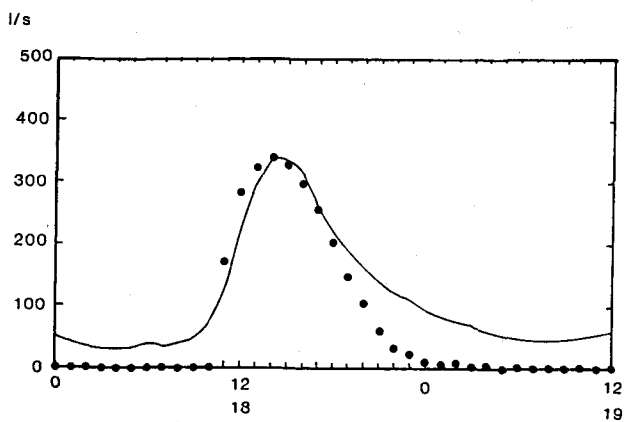
$$Sg = Kg Qg^{0.5} \quad (8)$$

ただし、

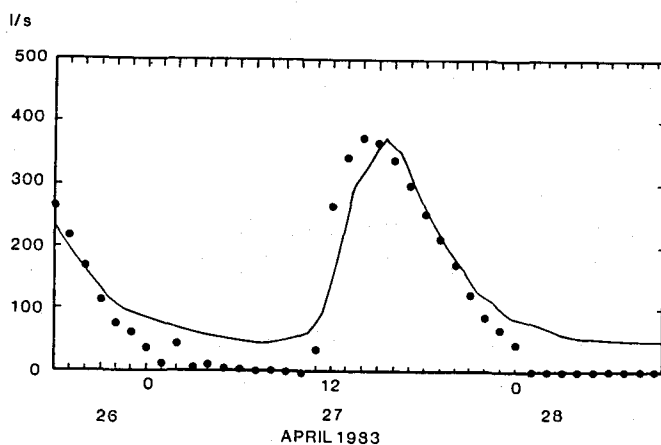
$$Kg = 1/Au \quad (9)$$

(9)式の分数関数減水定数 Au は、初沢流域における降雨終了後10日以上続いた無降雨日の流量資料より得られた値の平均値を時間に換算して定めた。⁴⁾

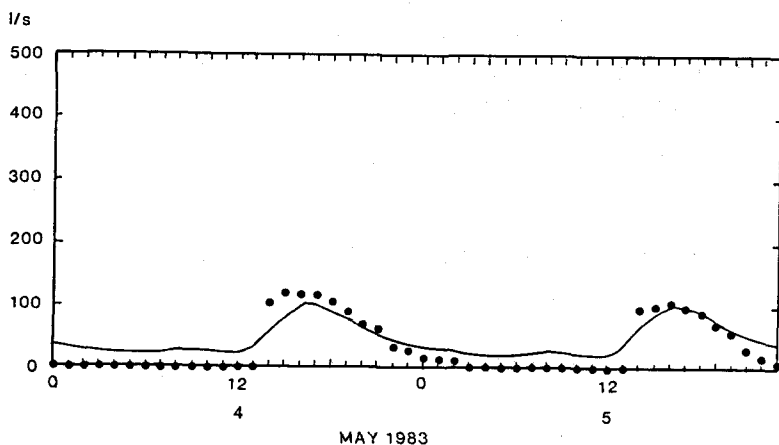
以上より、晴天の続いた1983年4月下旬～5月上旬(4月29日～4月30日には少雨があった)について、日射量と気温データより融雪量を計算し、基底流出成分と直接流出成分の分配率をそれぞれ、0.5, 0.4として、直接流出成分に対応する分布型流出モデルと基底流出に対応する集中型モデルを組み合わせて流出計算すると、図6に示すように、降雨の影響のあった期間



a) 4月18日 0時～4月19日14時



b) 4月26日18時～4月28日11時



c) 5月 4日 0時～5月 5日23時

図5 分布型モデルによる直接流出成分の計算値(・)と実測値(実線)

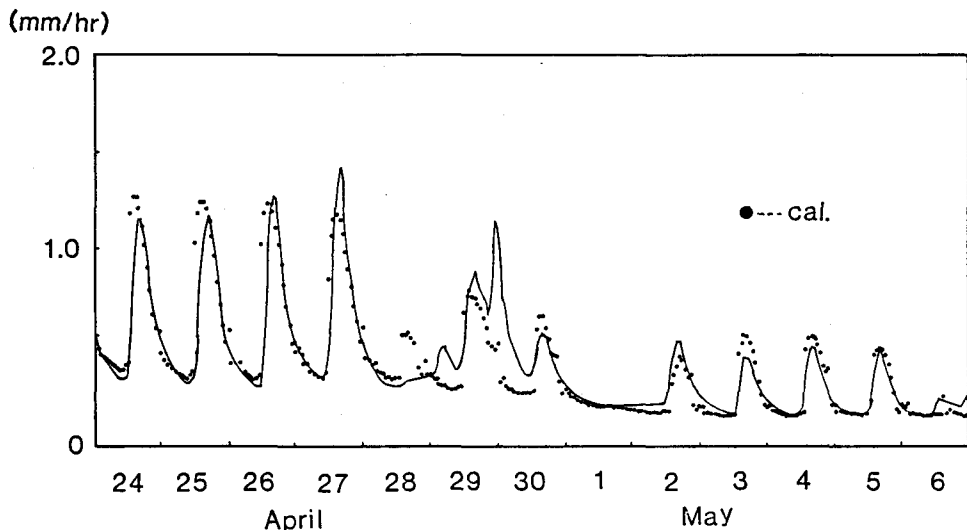


図6 融雪流出モデルの適用(1983年)

を除いて融雪流出量がほぼ再現された。

5. 結論

本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- (1) 日融雪モデルを用いて30分間融雪量の算定が可能である。
- (2) 全層ザラメ化すると積雪層における融雪水の貯留効果は見られず、融雪水の流下時間のみ考慮すればよい。
- (3) 融雪量のメッシュ入力に対応する直接流出成分の分布型流出モデルが構成された。
- (4) 基底流出と直接流出の各流出モデルを組み合わせて、長期にわたる流出モデルの適用の可能性が示された。

謝辞

本研究を進めるにあたり、林業試験場防災部からは観測資料の提供を受け、現地観測においては東京大学学生釣友会や東京大学大学院の各位に多大な御協力を得ました。なお、本研究は昭和61年度文部省科学研究費奨励研究(A)と財団法人鹿島學術振興財団研究助成によりました。ここに記して各位に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 小池・高橋・吉野：融雪量のモデル化に関する研究，土木学会論文集，No. 363/II-4，pp. 165-174，1985。
- 2) 小池・高橋・吉野：電気伝導度を用いた融雪流出過程の検討，土木学会第30回水理講演会論文集，pp. 25 - 30，1986。
- 3) 永見・吉野・阿部：森林伐採にともなう暖候期間の流出量変化，林業試験場宝川森林理水試験地第3回報告，pp. 61-64，1964。
- 4) 高橋・安藤・伊藤・伊藤：山地河川の低水流出の減水特性に関する研究，土木学会論文報告集，No. 377，pp. 75-81，1983。