

積雪水量分布の推定と融雪流出解析

Snowmelt Runoff Analysis Based On The Distribution Of Snow Water Equivalent

八田茂実*・小池俊雄**・陸 旻皎***

By Shigemi HATTA, Tosio KOIKE and Minjiao LU

Abstract

The objective of this paper is to apply the distributed snowmelt runoff model to a basin with no information on snow covered area(SCA). At first, we estimate the spatial distribution of snow water equivalent(SWE) using the snowmelt distribution model on the snow-line already obtained. The changes of SCA during snowmelt season are simulated successfully using the topographical distribution of SWE. The result of application of the distributed snowmelt runoff model including the simulated SCA is in good agreement with observed hydrograph.

Keywords: snowmelt runoff analysis, snow covered area, snow-line, distribution of snow water equivalent

1 はじめに

融雪流出解析は流域積雪量の推定、流域融雪量の推定、流出過程の検討の3段階に分けて考えることができる。近年のリモートセンシング技術の発達に伴い、それぞれの段階について積雪面積情報を用いた手法が提案されており^{1) 2) 3)}、その適合性がいくつかの流域で示されている。しかし、これら一連の融雪流出解析手法の適用において、最大の難点は解析対象期間に積雪面積情報が得られているケースが少ないという点にある。これは積雪面積情報の収集に最も有力である人工衛星データの観測頻度が天候の影響により、実質的には小さいことにある。

人工衛星からの観測は、積雪の面的な情報は得られるが、積雪の厚さに関する情報を得ることはできない。解析対象とする融雪期の積雪水量分布が推定されれば、分布型融雪量推定モデルとの組み合わせにより融雪に伴う積雪域の減少が推定可能である。本研究では、このような観点に基づき、融雪期間に何シーンか得られている積雪面積情報と、分布型融雪量推定モデルを組み合わせ、更に積雪水量が流域内の地形量の分布に依存するものとして積雪水量分布を推定し、これを用いて積雪域の減少を考慮した融雪流出解析を検討した。

* 正会員 苫小牧工業高等専門学校助手 (〒059-12 苫小牧市錦岡443)

** 正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 (〒940-21 長岡市上富岡1603-1)

*** 正会員 工博 長岡技術科学大学助手 (同上)

2 対象流域・観測データの概要

解析の対象とした流域は利根川上流の森林総合研究所宝川試験地の宝川本流流域で、流域面積19.1km²、高度分布が800-1950mの流域である。解析期間の気象要素は気温、日射量、雨量、流出量がそれぞれ流域末端で観測されている。流域及び観測地点の概要を図1に示す。また、融雪流出解析において重要となる積雪面積情報は、1983年の融雪期に4/26, 5/10, 5/14, 5/23の4シーンが目視観測により得られている。本研究では積雪域・無雪域の境界を0%の雪線と判定し、これを100m間隔でメッシュ化された流域地図上に再配置して解析を行った。

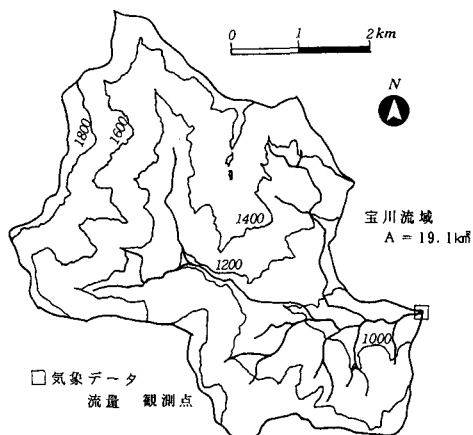


図1 対象流域の概要

3. 流域積雪水量の算定

3. 1 水収支式による流域積雪水量の推定

積雪面積情報収集日における流域積雪水量 S_s は、水収支式

$$S_s = \Sigma Q + \Sigma E - \Sigma P - S_{s1} + S_{s2} \quad (1)$$

ここに、

ΣQ , ΣE , ΣP : 積雪面積情報収集日から融雪終了日までの流出, 蒸発散, 降水量の総和

S_{s1} : 積雪面積情報収集日における地下水貯留量

S_{s2} : 融雪終了日における地下水貯留量

から算出される。ここで、蒸発散量については無雪域のみを考え、無雪域の平均標高により温度補正を行った後、Hamon式により算出した。また、地下水貯留量については、高橋・安藤⁴⁾によって適合性がよいと報告されている分数関数減水式により求めた。初期流出高 Q_0 は日最低流量を日単位に換算したものをを用いた。

3. 2 積雪面積情報による流域積雪水量推定モデル

小池・高橋・吉野は積雪面積情報を用いた流域積雪水量推定式を提案している¹⁾。これは流域地形の高度分布が測定され、積雪水量の高度分布に依存する係数が同定されれば、積雪面積率の観測によりリアルタイムに積雪水量を推定することのできるものである。宝川流域においては、100mメッシュ標高データを用いて地形特性を解析した結果、積雪水量算定式は

$$S_s = \begin{cases} 271a(1-A_s)^{3/2} - 813a(1-A_s)^{1/2} + 575a & (0.5 < A_s < 1) \\ 271aA_s^{3/2} & (A_s < 0.5) \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 A_s : 積雪面積率

が得られている¹⁾。ここで、 a は流域平均積雪水量の高度分布特性を示す係数で、水収支式による積雪水量を用いて同定した。図2は対象とする1983年のデータによる同定の結果を示しており、高度分布係数 $a=2.5$ が得られた。これは流域平均的な積雪水量の高度分布を示す。

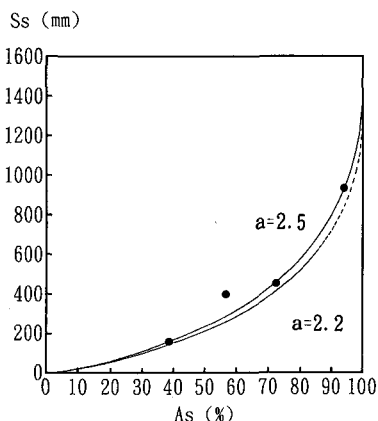


図2 積雪面積率と流域平均積雪水量

4. 積雪水量分布の推定

積雪水量の流域内分布を推定する手法としては積雪調査に基づく地形因子による方法（例えば山口ら⁶¹⁾）、雪線情報から最大積雪水量を算定する手法（例えば武田ら⁶²⁾）が提案されている。

本研究では融雪期に何シーンか得られている雪線情報と分布型融雪量推定モデルを組み合わせて積雪水量の分布を推定する。この方法は、図3の様に基準時刻 t_1 を定め、融雪後の時刻 t_2 における雪線が得られたとき、雪線上の (x, y) のある時刻 t における融雪量を $M(x, y, t)$ とすれば、基準時刻 t_1 における積雪水量 $S_s(x, y, t_1)$ は

$$S_s(x, y, t_1) = \sum_{t=t_1}^{t_2} M(x, y, t) \quad (3)$$

で表すことができる。

積雪面積情報が連続的に得られるような場合にはこの方法を直接用いて全格子点の積雪水量が得られるが、現実には積雪面積情報は連続的に得られていることは希である。このため、まず積雪面積情報が得られているシーンについての雪線上の格子点の総融雪量、すなわち基準時刻 t_1 における積雪水量を算定し、積雪水量分布に影響を与えると考えられる地形量との関係を求め、モデルにより流域内の全格子点の積雪水量を推定することとする。尚、解析に用いる融雪モデルは比較的少ない観測項目で流域内の融雪量分布を比較的良好に表現できる小池らによる手法²⁾を用いた。

4. 1 積雪水量の分布特性

流域内の積雪水量分布を支配する地形量は、標高などの鉛直方向の地形量に依存する要因と、主尾根からの距離、起伏度などの水平的な地形量に依存する要因が挙げられている⁵⁾。鉛直分布特性は積雪水量が標高に従って直線的に増大することが多くの積雪調査で確認されている。一方、水平的な分布特性に関しては、極めてlocalな地形量に依存する傾向があり、定量的な判断は困難である。このため、本研究では積雪水量分布を鉛直分布成分・水平的な分布成分に分けて考え、それらと積雪水量の定性的な関係を踏まえた上で積雪水量分布を推定した。

(a) 積雪水量の鉛直分布

図4は各積雪面積情報から得られる雪線上の格子点の積雪水量推定値と標高の関係をプロットしたものである。各雪線毎にみると格子点の積雪水量に大きな変化はないが、標高のばらつきは大きい。これは融雪期では標高に関わりなくほぼ一様に融雪が生じるという観測結果と一致している。積雪水量と標高の関係を知らため、雪線毎に標高、積雪水量の平均値をとり、これを雪線の代表値とすると、標高と積雪水量の間には直線関係が見られる。この直線の傾き $a=2.2$ (mm/m)は流域の平均的な積雪水量の高度分布係数であると考えられ、これを用いて流域積雪水量推定モデルを適用すると図2の破線が得られる。水収支式を用いて同定した高度分布係数による推定線とよく一致しており、流域平均積雪水量は雪線の代表値を用いることで推定が可能である。

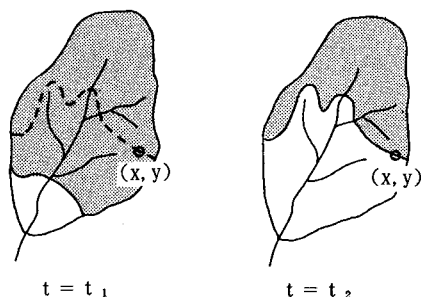


図3 積雪水量分布推定概念

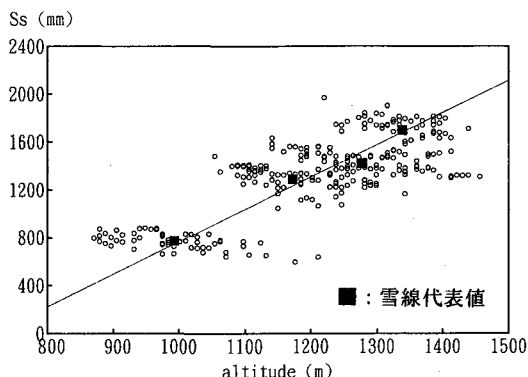


図4 雪線上の格子点の標高と積雪水量

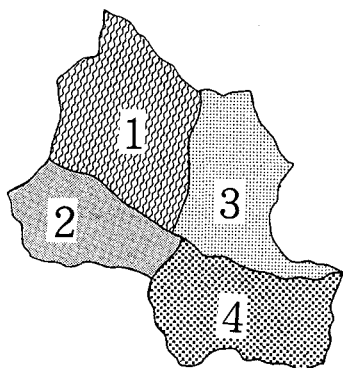


図5 流域の分割

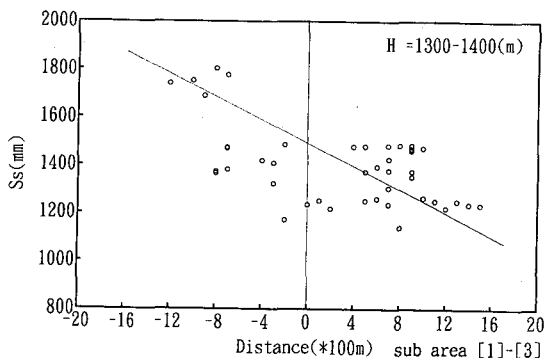


図6 尾根からの距離と積雪水量の関係

(b) 積雪水量の水平的な分布

同一標高・同一流域内においても複合斜面からなる流域では積雪水量の分布は大きく異なることがいくつかの積雪調査の結果から得られている(例えば文献7))。このため、宝川流域を図5の様に4つの地域に分割して扱うこととした。標高が大きくなると積雪水量も大きくなる傾向があるので、100mの等高線間隔で1つの標高帯と見なし、この標高帯の中で水平的な積雪水量の分布を検討する。図6は分割した地域1,2を西側に、3,4を東側に分ける尾根からの距離と積雪水量の関係を示している。尾根より西側では距離の増加に伴い積雪水量は増加、東側では距離の増加に伴い積雪水量が減少するという傾向がみられる。この他にも水平的な分布特性として挙げられている、斜面勾配・起伏度などについても同様な検討を行ったが、雪線にあたる格子点のサンプル数が少ないこともあり定性的な傾向を見いだすことはできなかった。

4. 2 積雪水量分布の推定

以上の結果をふまえ、雪線上の格子点について標高・尾根からの距離により積雪水量を推定する。各分割流域の標高による平均的な積雪水量は回帰式から

$$S_{s,H} = a \cdot H_{ij} + b \quad (4)$$

ここに、 $S_{s,H}$: 標高 $H(m)$ における平均的な積雪水量

が得られる。これに、尾根からの距離による影響の効果を考慮して推定される積雪水量は、

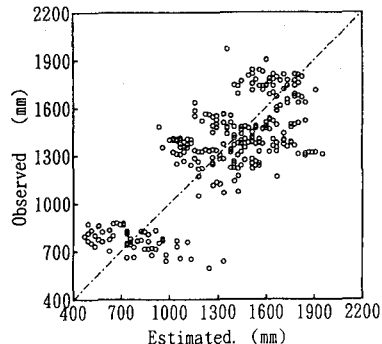
$$S_{s,mod} = S_{s,H} + r_n \cdot d_{ij} \quad (5)$$

ここに、 $S_{s,mod}$: 積雪水量の推定値

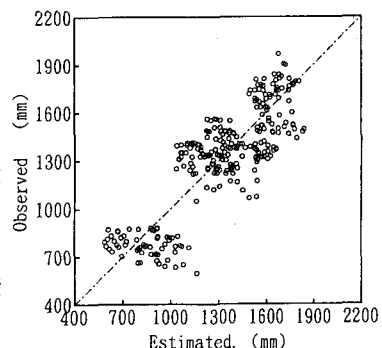
r_n : n 番目の分割流域の尾根からの距離による補正係数

d_{ij} : メッシュ格子点 (i, j) から尾根までの距離

で表す。ここで r_n は各分割流域において尾根から東へ行くほど積雪水量が小さくなる事を念頭にいれながら残差の平方和が最小になるように選定した。以上のようにして得られた積雪水量の推定値を横軸に、融雪モデルから計算された積雪水量を縦軸にとって



(a) 鉛直分布のみを考慮



(b) 鉛直分布, 水平的な分布を考慮

図7 積雪水量推定値の検証

プロットすると図7(a),(b)が得られる。図7(a)は鉛直分布のみを考慮した場合、(b)は式(4),(5)を用いて水平的な分布を考慮した場合を示しており、水平的な分布を考慮する事により積雪水量分布の推定が改善されると考えられる。更に、ここで得られた式を用いて流域内の各格子点の融雪開始日における初期積雪水量を算定し、この日から融雪量モデルを適用して各種雪面情報収集日における積雪水量・積雪面積率・積雪域を推定した。図8(a)-(d)は観測積雪域と本手法で推定した積雪域の比較の結果を示している。積雪水量・積雪面積率はほぼ再現でき、積雪域は斜面勾配の急変点付近など局所的な部分を除けばよく再現しているといえる。

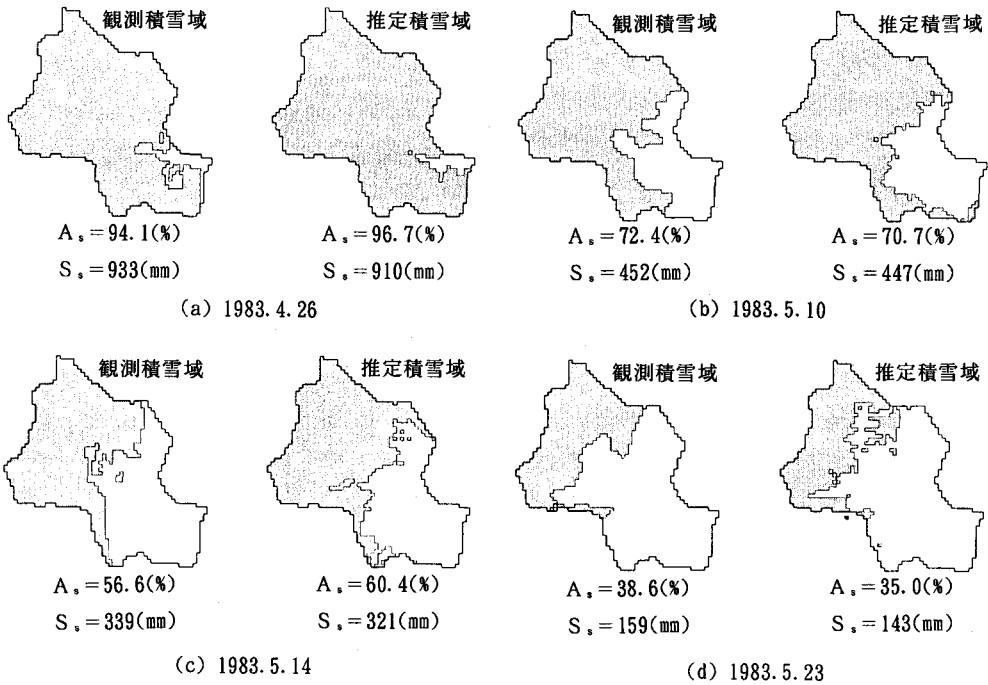


図8 積雪域の観測値と推定値の比較 (■: 積雪域)

5 融雪流出量の検討

河川流出量は概念的に直接流出量と基底流出量に分けて考えられる。直接流出成分に関しては、入力値とな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。これは格子点の回りの8点から最も勾配が急になる格子点を選び、この間を広幅矩形断面の仮想流路で結んだものである。擬河道網の構成は陸らの方法⁹⁾により、100mメッシュ標高データから自動的に決定された。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水の入力は考えない。格子点への入力値は Δt 時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、運動方程式にはManning則を用いる。なお、擬河道網内の各河道の河道幅 B_i と粗度係数 n_i は陸らによってモデル化されているが⁹⁾、ここでは簡単のために流域内一定として扱った。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した貯留関数法を用いた。これまで、融雪流出解析における分布型流出モデルは、格子点へ入力される積雪域の情報の頻度が疎であるため、積雪面積情報の得られた日の前後2～3日程度の適用に限られていた。しかし、本研究ではメッシュ格子点の積雪水量を推定しているため、融雪モデルを用いて解析期間中の任意の日時に対する積雪域の推定が可能である。ここでは、1983年の融雪期の比較的降雨の影響の少ない期間について流出解析を行った。なお、モデルに含まれるパラメータは全期間とも一定で、融雪流出

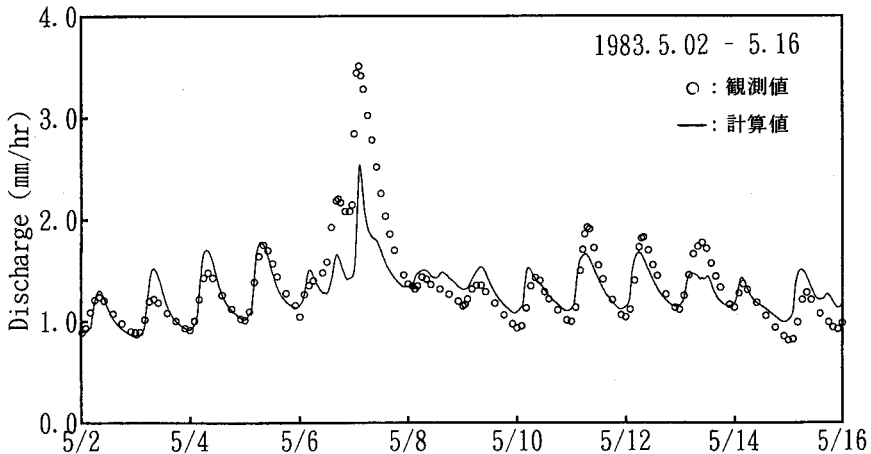


図9 推定積雪域を用いた融雪流出量の検討

率と表面流出率は解析期間中の前期融雪、及び降雨の影響が少ないと思われる日の水収支から推定した。図9はその適用結果を示しており、5/6～5/7の降雨日を除いて流出量をほぼ再現でき、本研究において推定した積雪水量分布が融雪流出解析に適用可能であることが示された。

6 結論

本研究により得られた主要な結論を以下に示す。

- (1)流域平均積雪水量は各雪線における融雪量の推定値と雪線平均標高の傾きから推定することが可能であり、雪線観測と気象データから積雪水量モデル中の高度分布係数を定めることが可能である。
- (2)雪線情報と分布型融雪量モデルから得られる雪線積雪水量と地形特性量の関係から流域積雪水量分布の推定が可能であり、積雪面積情報のない期間の融雪流出解析に適用できる。

謝辞

本研究で用いた流量データは森林総合研究所より提供されました。また、本研究は文部省科学研究費補助金重点領域研究(1)「山地豪雪災害の予測と防除・復旧対策に関する研究」(代表：秋田谷英次)によりました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1)小池・高橋・吉野:積雪面積情報による流域積雪水量の推定,土木学会論文集,357/Ⅱ-3, pp. 159-165, 1985.
- 2)小池・高橋・吉野:融雪量分布のモデル化に関する研究,土木学会論文集,363/Ⅱ-4, pp. 165-174, 1985.
- 3)小池・高橋・吉野・中谷:融雪量の空間分布を考慮した融雪流出解析,第31回水理講演会論文集, pp. 173-176, 1987.
- 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,土木学会論文集,337, pp. 75-82, 1983.
- 5)山口・長谷川:融雪流出の予知に関する研究,北海道開発局土木試験所報告,64, 1975.
- 6)武田・高橋:LANDSAT雪線情報と積算暖度法による流域最大積雪水量算定に関する研究,土木学会論文集,311, pp. 81-92, 1981.
- 7)山田・水津・若浜:大雪山の積雪水量分布,低温科学物理篇,38, pp. 63-71, 1979.
- 8)陸・小池・早川:レーダー雨量情報に対応する分布型流出モデルの検討,第33回水理講演会論文集, 1989.
- 9)陸・小池・早川:分布型流出モデルのための河道特性の評価,水工学論文集, vol. 35, pp. 161-166, 1991.