

メッシュタンクモデルによる日融雪流出解析

Mesh Tank Model for Daily Snowmelt
Runoff Analysis

宇治橋康行・高瀬信忠・松田千周

By Yasuyuki Ujihashi, Nobutada Takase and Chikane Matsuda

A new distributed rainfall-runoff model is developed to estimate a daily flow including snowmelt runoff.

It is basically a four-tank cascade model. Each cascade tank is corresponding to an element basin with different discretization scale. The discretization scale becomes grater toward the lower tank. The runoff from each tank is routed through a quasi-channel network system. The model was applied to the Uchikawa Dam basin. It was found that the model was able to simulate the rainfall and snowmelt runoff.

Keywords; distributed rainfall runoff model, snowmelt, tank model, quasi-channel network

1. まえがき

わが国は東アジアのモンスーン地帯に位置し、温帯多雨気候に属するにもかかわらず世界でも有数の多雪地域である。北陸などの豪雪地域では年間総降水量の20～50%が降雪であり、地形が急峻で流路が短く、洪水の流出時間の短いわが国の河川にとって、冬期に山間部に貯留される雪は貴重な水資源である。したがって、水資源の開発、高度利用・管理を行っていくには積雪水量、融雪量および融雪流出量の算定が必須である。筆者らはこれまで降積雪から融雪・流出に至る一連の物理過程を組み込み、比較的容易に入手可能な気象因子のみを用いて積雪水量、融雪量などを日単位で算定するモデルを構築し、その妥当性を地点データに対して確かめてきた。しかしながら、水資源問題への適用、地球温暖化による水循環過程の変化およびそれに伴う利水安全度の変化などを検討していくためには、モデルの流域スケールへの拡張および流出モデルとの結合が必要である。

本研究では積雪水量、融雪量算定モデルを流域スケールへ拡張し、これに対応する流出モデルとの結合による日単位の流出解析モデルについて述べる。

* 正会員 工博 金沢大学助手 大学院自然科学研究科
(〒920 石川県金沢市小立野2-40-20)

** 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科(同上)

*** 学生員 金沢大学大学院 土木建設工学専攻(同上)

2. 融雪量の空間分布の算定

融雪の主要な熱源である日射および大気放射は斜面の勾配、方位および周辺地形の起伏等の地形要素に影響される。また、顕熱や潜熱も気温、風速などの気象因子の空間分布に影響される。この結果、融雪量の分布は流域内で空間的に一様とはならない。したがって、流域をメッシュ分割し、各メッシュを一つの斜面と考え、斜面特性に応じて入射エネルギーを算定し、融雪熱エネルギーの空間分布、すなわち融雪量の空間分布を求める必要がある。しかし、風速の空間分布を求めることは容易ではないため、顕熱、潜熱の空間分布の算定は容易ではなく、ここでは放射エネルギーの内、日射量に対してのみ斜面特性を考慮した。

斜面上の日射量は

$$I = D_s + S_s + S_r \quad (1)$$

と表される¹⁾。ここに、 I は斜面上の全天日射量、 D_s は斜面に放射される直達日射量、 S_s は斜面に放射される散乱日射量、 S_r は斜面前の平地で反射された水平面全天日射量のうち斜面上へ入射する成分である。

傾斜角 θ 、方位角 ψ の斜面上での式(1)の各成分は、天空散乱放射と反射放射の均一角度分布を仮定すると、それぞれ

$$D_s = \frac{D_H}{\sin h} \{ \cos \theta \cdot \sinh + \sin \theta \cdot \cosh \cdot \cos(\psi_s - \psi_0) \} \quad (2)$$

$$S_s = \cos^2(\theta/2) S_H \quad (3), \quad S_r = \sin^2(\theta/2) A_r I_H \quad (4)$$

となる。ここに、 D_H は水平面直達日射量、 h は太陽高度、 ψ_0 は太陽方位角、 S_H は水平面へ入射する散乱放射量、 A_r は斜面前面の雪のアルベド、 I_H は水平面全天日射量である。したがって、式(2)～式(4)により、水平面上での全天日射量、直達日射量および散乱日射量が分かれば、斜面上の各成分が求められる。

水平面全天日射量は雲量に応じて次式を用いて求められる²⁾。

晴天の時 ($n < 0.3$)

$$\begin{aligned} I_H/I_0 &= 1 - 0.43 - 0.016e - 0.061 \log e \\ &\quad + 10^{-0.13n} (0.43 + 0.061e) \\ m &= \sec \theta_0 \end{aligned} \quad (5)$$

曇天の時 ($n > 0.3$)

$$I_H/I_0 = 0.22 + 0.55(t - n) \quad (6)$$

ここに、 θ_0 は南中時の太陽天頂距離、 I_0 は大気上端における水平面日射量、 e は地表面付近の日平均水蒸気圧、 t は雲の種類を表すパラメータであり、低層雲が多い北陸の冬期では $t = 1.1$ である³⁾。

水平面全天日射量の直達・散乱成分への分離は、吉田・篠木の式⁴⁾を用いて行われ、散乱日射成分は

$$\begin{aligned} S_H &= (I_H - 0.048 G_{10} I_0) \{ 0.733 - 1.119 (N/N_0) \\ &\quad + 0.762 (N/N_0)^2 + 0.217n \} + 0.048 G_{10} I_0 \end{aligned} \quad (7)$$

により推定される。ここに、 N 、 N_0 は、それぞれ日照時間および可照時間であり、 N/N_0 は日照率、 n ($= 0 \sim 1$)は雲量、 G_{10} ($= 0 \sim 1$)は積雪指数であり、積雪10cm以上の月間日数と1ヶ月の日数との比である。

雪面に与えられる日射以外の熱エネルギーの成分は、大気放射に対してはBrunt-山本の式を、顕熱、潜熱伝達量はバルク法を用いて、それぞれ算定することができ、その結果から表面融雪量が算定できる。積雪下

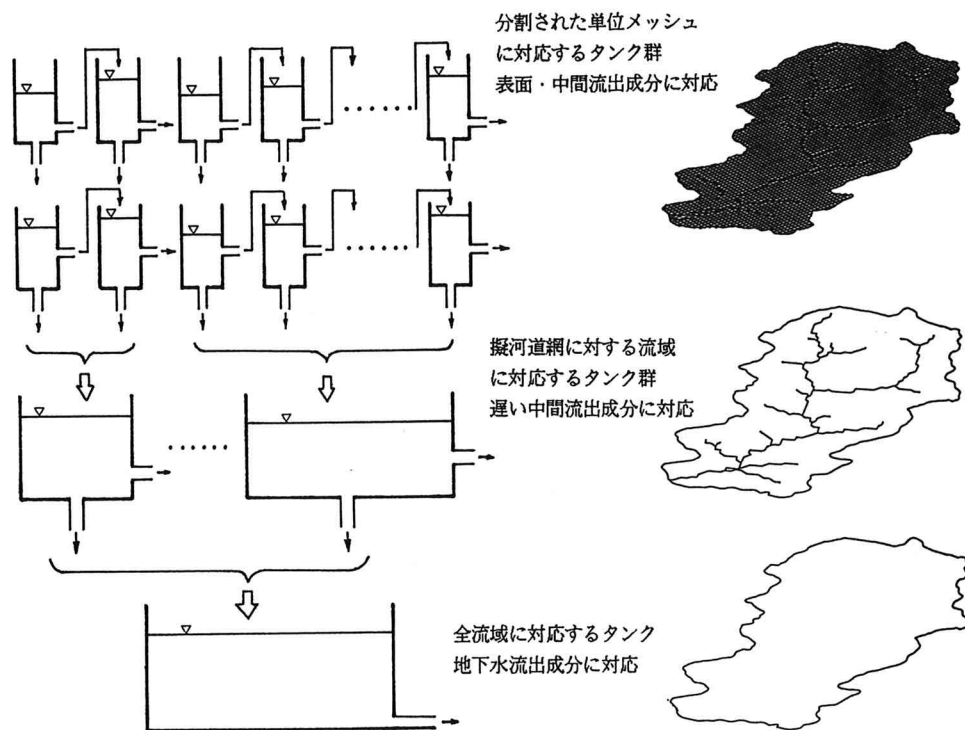


図-1 メッシュタンクモデルの概念図

面での融雪量を合わせた地表面に到達する融雪量および積雪深などは筆者らがこれまで用いてきたモデルを用いて求めることが出来るが、その詳細は文献⁵⁾に譲りここでは割愛する。

3. メッシュタンクモデル

流出現象の生起場である流域は多数の斜面と河道網から構成され、各斜面はその勾配、方位、植生、土壌等が異なり、河道網を構成する各河道の川幅、勾配、粗度等もそれぞれ異なり、流域は空間的に著しく不均一である。さらに、入力である降水も空間的に不均一であることも知られている。また、融雪とその流出を考慮する場合、前述のように雪面が受ける融雪の主要な熱源である日射や大気放射は斜面の勾配、方位および周辺地形の起伏等の地形要素に影響され、顕熱や潜熱も気温、風速などの気象因子の空間分布に影響される。この結果、融雪量の分布は空間的に一様とはならない。特に、融雪が進行し、流域内に雪線が現れるようになると非積雪域での融雪量はゼロであり、融雪入力の分布は一段と不均一になる。したがって、このような流域および入力の不均一性に対応して、用いるべき流出モデルは分布型モデルでなければならない。

分布型流出モデルに関しては、おもに直接流出成分を対象とした川谷ら⁶⁾、陸ら^{7), 8)}、早川ら⁹⁾の研究があるが、ここでは日単位の解析を目的としているので、斜面流出量の河道網系での合成・変形・伝播過程は考慮せず、池淵ら¹⁰⁾の多層メッシュモデルに類似したメッシュタンクモデルを用いた。ここで用いたメッシュタンクモデルの特徴は、タンクの各段からの流出成分の応答早さを考慮して空間的集中化スケールを変化させたことである。すなわち、早い流出成分に対しては分割スケールを小さくし、遅い流出成分に対しては分割スケールを大きくした。流域のメッシュ分割、それに対応するモデルの構成および流出の追跡計算手順

について以下に述べる。

- ① デジタイザーを用いて $1/25,000$ の地形図から 100m 間隔で等高線を読み取る。
 - ② メッシュがほぼ正方形となるように経線間および緯線間を等分割し、各メッシュ交点の標高を求めデジタルマップを作成する。
 - ③ ② で作ったメッシュの中心をメッシュ交点とする新しいメッシュを作り、各メッシュ交点の標高を求め、これに基づいてしきい値 1 の落水線図¹¹⁾を作る。
 - ④ 適当なしきい値を選択して $1/25,000$ の地形図に記載されている河道網に最も近い擬河道網を描く。
 - ⑤ 表面流出を含む表層近傍の早い流出成分は直列 2 段のタンクで表し、② で構成した各单位メッシュ流域毎にタンクを考慮する。
 - ⑥ 各タンクからの流出量は③ で求めた落水線にしたがって順次下流側のタンクへの流入量とし、④ で求めた擬河道を含むメッシュからの流出量は遅れも変形もなく流域出口に達するとする。
 - ⑦ 第 1 段タンクからの浸透量は第 2 段タンクの入力となり、第 2 段タンクからの浸透量は第 3 段タンクへの入力となるが、第 3 段タンクは遅い流出成分に対応し、その集水面積は単位メッシュではなく④ で求めた擬河道の流域面積とその残留域となる。第 3 段タンクからの流出量はそのまま流域出口に到達するとする。
 - ⑧ 第 4 段タンクは地下水流出成分に対応し、全流域で一つのタンクを考える。
- 上に述べたモデルの概念の模式図と対応する流域分割を図-1に示す。

4. 実流域への適用例

メッシュタンクモデルの適用対象流域は図-2に示す金沢市東南部に位置する犀川水系内川ダム流域である ($A=34.45\text{km}^2$)。解析には昭和55年のデータを用いた。降水量、気温、風速および積雪深のデータはダムサイトの管理事務所にて測定されたものを用い、融雪モデルの計算に必要なデータの中で対象流域内で観測されていないもの (水蒸気圧、雲量) については金沢地方気象台での観測値をそのまま用いた。風速は一日に一回しか観測されていないが、これを日平均値としてそのまま用いた。また、降水量の流域内での分布についても検証データが無いためここでは考慮していない。流域のメッシュ分割は、経度 5 分を 54 等分、緯度 6 分を 45 等分した ($203\text{m} \times 199\text{m}$)。しきい値 1 の落水線図、 $1/25,000$ の地形図の実河道に最も近い擬河道網、この例ではしきい値 15 の落水線図に対応、および $1/25,000$ の地形図の実河道網を図-3に示す。

各タンクの定数はメッシュ内の植生地質等を考慮して定めるべきであるが、そのためのデータが無いため、ここでは各段のタンクの定数はメッシュあるいは流域ごとに一律とし、モデル定数は6月から11月の非積雪期のデータを用い、式(8)の相対誤差を基準として試算により定めた。

$$E = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sqrt{(Q_{\text{cal}} - Q_{\text{obs}})^2} \quad (8)$$

ここに、 N はデータの個数、 Q_{cal} は計算流量、 Q_{obs} は実測流量である。蒸発量の算定にはハモン式を用いた。非積雪期における計算結果と非積雪期のデータから定められたモデル定数を用いて一年間の計算を行った結果を図-4および図-5に示す。また、ダムサイトの管理事務所付近で観測された積雪深とダムサイトを含むメッシュでの積雪深の計算値の比較を図-6に示す。

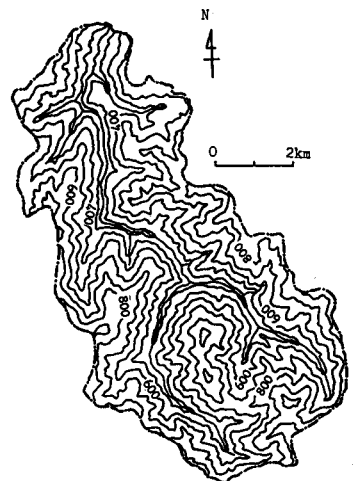
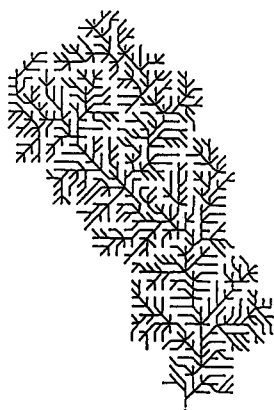
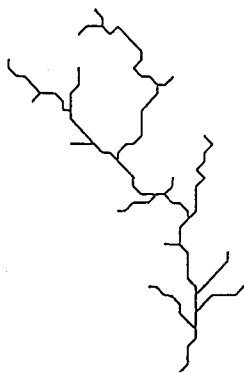


図-2 内川ダム流域図



(a) しきい値 1



(b) しきい値 15



(c) 実河道網

図-3 内川の落水線図および実河道網

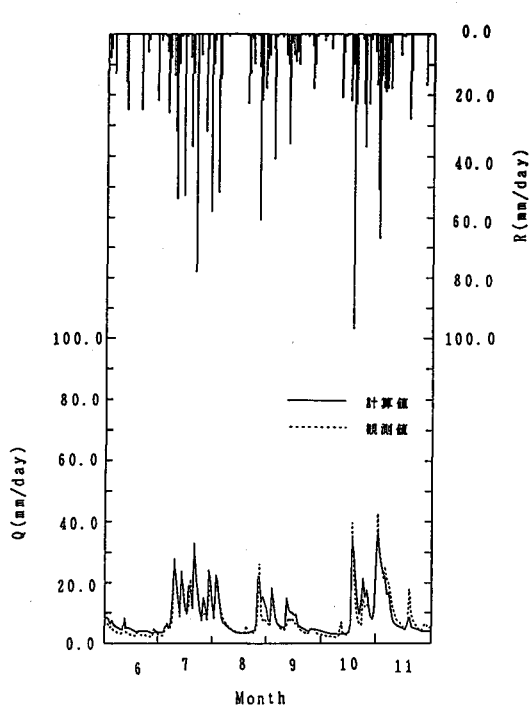


図-4 計算値と実測値の比較 (非積雪期)

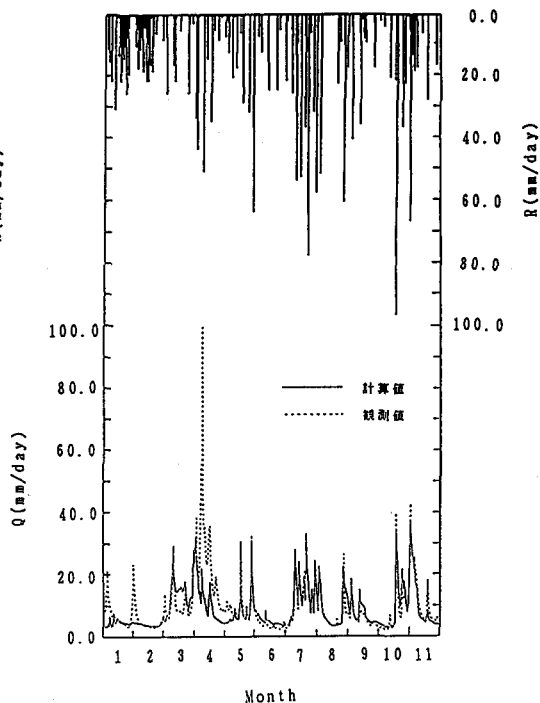


図-5 計算値と実測値の比較

図-4に示されるように、本モデルにより降雨期の日単位の流出は十分再現可能であることが分かる。しかし、図-5の通年の計算結果を見ると融雪流出期の再現性が悪い。この原因として次の2つが考えられる。はじめに、図-6のダムサイトを含むメッシュでの積雪深の計算結果を見ると、融雪最盛期では計算値が観測値よりかなり大きくなっている。すなわち、融雪量が実際より過小推定されていると考えられる。次に、前述のように、降水、特に降雪の空間分布を考慮していないため、標高の高いメッシュの積雪も低いメッシュに比べ数日遅れで消雪する。そのため融雪末期に降雨があった場合の大きな流出が再現できないものと思われる。これは、融雪量算定のための気象データが流域内でほとんど観測されておらず、流域外の低平地での観測データを用いたことによるものと思われる、流域内の降水量分布と合わせ今後検討する必要がある。

5. おわりに

本研究では流出成分の応答速度の差を考慮し、流出成分ごとに空間的集中化スケールを変化させた分布型の日単位の融雪流出を含む流出モデルを構成した。実流域に適用した結果、融雪量の推定に問題が残ったが、本モデルの有効性は検証出来た。今後はモデル定数の推定とともに、降雪、顕熱および潜熱の空間分布の推定について検討していく必要がある。なお、本研究は文部省科学研究費補助金・重点領域研究(2)(03201211)「融雪出水の流出機構と予測および防災に関する研究」(代表者 高瀬信忠)の補助を受けて行われたことを付記し、謝意を表する。最後に、計算に協力して頂いた当時学生田中尚人君(現在石川県庁)、谷川吉英君(現在富山県庁)に感謝致します。

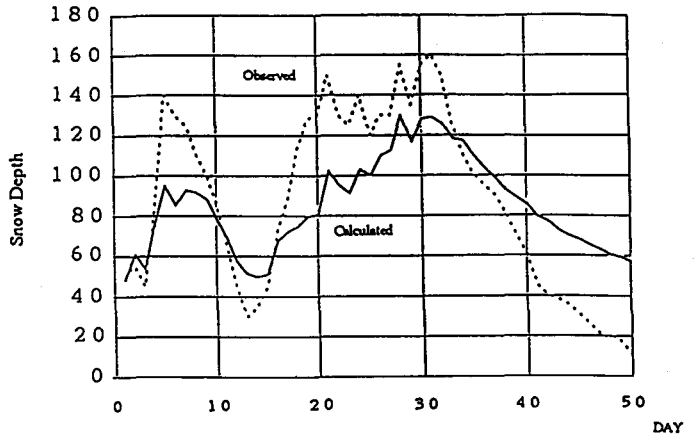


図-6 ダムサイトでの積雪深の計算値と実測値の比較

参 考 文 献

- 1) 清野、内嶋：複雑地形(阿蘇カルデラ)における太陽放射資源量の評価、農業気象、vol. 41、No. 3、pp. 247-255、1985。
- 2) 竹内、近藤：大気科学講座 1 地表に近い大気、東京大学出版会、pp. 81-84、1990。
- 3) 高瀬、宇治橋：積雪深、積雪水量、融雪量算定モデルに関する研究、水文・水資源学会1990年研究発表会要旨集、pp. 106-109、1990。
- 4) 吉田、篠木：日本における月平均水平面散乱日射量・同直達日射量の平均値および年々の変動係数のマップの作成、天気、vol. 30、pp. 201-215、1983。
- 5) 宇治橋：水文量の変動パターン解析とその水資源計画・管理への応用に関する研究、京都大学学位論文、1990。
- 6) 川谷、中野、菊田：地表流流出解析モデルへの地形要素の導入に関する研究、第32回水理講演会講演論文集、pp. 31-36、1988。
- 7) 陸、小池、早川：分布型水文情報に対応する流出モデルの開発、土木学会論文集、第411号/Ⅱ-12、pp. 135-142、1989。
- 8) 陸、小池、早川、益倉：分布型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。
- 9) 早川、藤田：流域の河道網構造を考慮した流出特性、水工学論文集、vol. 35、pp. 155-160、1991。
- 10) 池淵、久保：多層メッシュモデルの構成とその感度分析、水文・水資源学会1990年研究発表会要旨集、pp. 46-49、1990。
- 11) 野上、杉浦：パソコンによる数理地理学演習、古今書院、1986。