

京都大学大学院 正員

椎葉充晴、堀 智晴、市川 温

京都大学大学院 学生員 ○

金澤瑞樹

1. **序論** これまで河川流域における長期の流出を扱う場合、タンクモデルや応答型モデルが用いられてきたが、これらのモデルでは流域内各地点の情報を知ることができなかった。しかし、最近では、流出現象の入力である降雨量や地形情報が、メッシュデータベースで整備されていることも少なくなく、流域内各地点の情報を得ることのできる、分布型流出モデルの開発が盛んとなってきた。しかし、その多くは短期の洪水予測を目的としたもので、現在の電子計算機的能力では、長期の流出予測を目的とした分布型モデルは実用的ではない。

例えば、椎葉・澤井(2000) [1] が構成した分布型モデルは、市川ら(1998) [2] の開発した実河川流域の地形構造に即した流域地形モデル上に、椎葉・金澤(1999) [3] の構築した蒸発散機構を備えた kinematic wave モデルを適用することで、河川流域全体における長期の流況評価を目的としたモデルであった。しかし、降雨量などの変動が激しい期間に計算を安定して進めるためには、計算時間ステップを小さく設定する必要がある。このために、計算にかかる時間が膨大となり、モデルの妥当性を検証することができないのが現状である。

そこで本研究では、計算時間ステップを小さくする必要のある期間には小さくし、小さくする必要のない期間には大きくするような、計算時間ステップの時間的変動を許す計算手法 (TRAM 法) を取り入れた要素モデルの構築を行った。また、部分流域で共通の計算時間ステップを使用するのではなく、市川ら [2] の流域地形モデル上で要素モデルを動作させることで、各斜面要素ごとに、つまり空間的にも、計算時間ステップの変動を許すモデルとした。要素モデルの基礎式としては、kinematic wave モデルではなく、斜面要素を分割しない、非線形貯留関数モデルを用いたため、分布型流出モデルと呼ぶにはふさわしくなく、本研究では半分布型流出モデルと呼ぶことにした。

2. **TRAM 法を用いた差分計算法** 本研究では、微分方程式の数値解法として予測子・修正子法の一つである Adams の公式 [4] を用いた。

さらに、刻み幅 (計算時間ステップ) の変動が可能な

TRAM 法を、Adams の公式に適用し、計算が安定して進むようにした。TRAM 法とは、修正子によって修正された量の 1/6 が予め設定した上限値より大きければ、刻み幅 Δt を半分にするが、予め設定した上限値を何回か続けて下回れば、逆に刻み幅 Δt を倍にするという手法である。

次節で紹介する要素モデルの計算手法に、TRAM 法を用いて計算を行った場合の、刻み幅 (計算時間ステップ) の変動の様子を図 1 に示す。降雨期間にはその強度に応じて刻み幅が減少し、無降雨時には刻み幅が増加しているのが見てとれる。

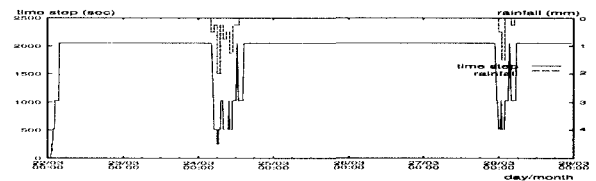


図 1 計算時間ステップの変動

3. **要素モデルと計算結果** 本研究では、要素モデルの基本計算モデルとして、非線形貯留関数モデルを用いた。非線形貯留関数モデルは、時刻 t [sec] での貯水高 $s(t)$ [m] を状態量とし、その基礎式は次のようである。

$$\frac{\partial s_j(t)}{\partial t} = r(t) + i(t) - q(t) \quad (1)$$

ただし、 $r(t)$ [m/sec]、 $i(t)$ [m/sec]、 $q(t)$ [m/sec] はそれぞれ降雨強度、上流端流入強度、流出強度である。

長期の流出予測を行うためには、蒸発散量や浸透量を無視することはできない。したがって、式 (1) に、蒸発散と浸透の機構を導入した要素モデルを構築した。蒸発散量は土壌水分量に依存するため、要素モデル内で熱収支式を随時解く必要がある。しかし、ニュートン法による収束計算は非常に時間がかかるため、本研究では次の方法を考えた。まず、蒸発散量 E [W/m³] の推定式

$$E = \rho \beta_w \beta C_e U (q_{SAT}(T) - q) \quad (2)$$

の土壌水分量に依存する係数 β_w (0~1) [-] と蒸発効率 β (0~1) [-] の積 $\beta_w \beta = \gamma$ を 1 として求めた蒸発散量 $E_{\gamma=1}$ と蒸発散量 E_γ の関係を γ の関数 α_γ を用いて、

$$E_\gamma = \alpha_\gamma E_{\gamma=1} \quad (3)$$

と近似した。ただし、式 (2) の各係数は、水の密度 $\rho[\text{kg/m}^3]$ 、潜熱輸送のバルク係数 $C_e[-]$ 、風速 $U[\text{m}]$ 、地表面温度 $T[\text{K}]$ での飽和比湿 $q_{SAT}(T)[-]$ 、比湿 $q[-]$ である。モデルを動かす際には、 $E_{\gamma=1}$ を入力とし、0.3 とした β と、貯水高から随時算出される $\beta_w(0 \sim 1)$ とを先で導いた近似式 (3) に用い、斜面要素の蒸発散量を推定した。

さらに、土壌の保水機能を表現するために圃場容水量を考慮し、土壌乾燥時の急な降雨に対する出水を表現するために、みずみち・パイプ構造を考慮したモデルとした。

島根県匹見川上流の道川流域 (集水面積:52.5km²) 地形を 500m メッシュに区切った斜面要素に本要素モデルを適用し、1995 年の観測値と計算値の比較を行った結果が図 2 である。要素モデルの入力量である降雨量は AMeDAS 八幡観測所のデータを、 $\gamma = 1$ での蒸発散量を求めるために必要な、気温、風速、全天日射量、水蒸気圧は浜田市測候所のデータを用いた。

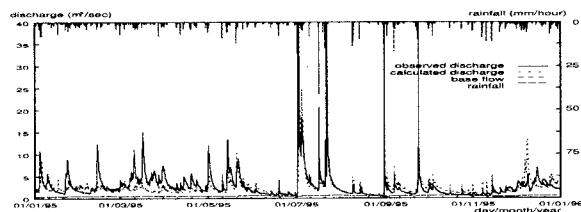


図 2 道川観測流量と計算流量との比較

結果は、夏・秋季に比べて、冬・春季に計算値の適合度が悪くなった。差が生じる要因の一つとして、積雪・融雪の影響を考慮することができる。この可能性は、積雪期 (1、2、3、12 月) と非積雪期に分けて日平均観測流量と日平均計算流量の流況曲線を比較した図 3、図 4 からわかる。

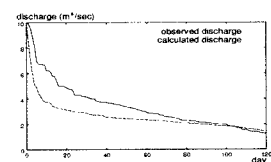


図 3 観測値と計算値の流況曲線比較 (積雪期)

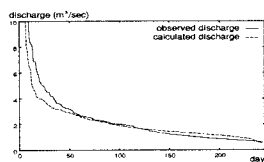


図 4 観測値と計算値の流況曲線比較 (非積雪期)

さらに、本要素モデルを匹見川流域 (集水面積 356.2km²) に適用し、1991 年から 95 年の 5 年間で計算した。匹見川流域を 7 つの部分流域に分割し、それぞれの流域近辺に存在する AMeDAS 観測所の降雨データを用いた。 $\gamma = 1$ での蒸発散量については上の計算と同様のデータを用いた。CPU が Pentium Pro 334.09MHz の計算機で約 4 時間で 1 年分の流出計算を行うことができた。1995 年の観測流量と計算流量の比較を図 5 に示す。

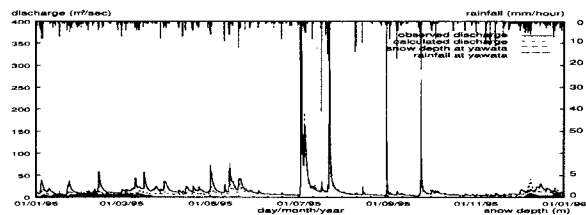


図 5 匹見川全体の観測流量と計算流量との比較 (1995 年)

冬・春季に適合度が悪いという点以外では、計算値が全体として小さく見積もられたことを挙げるができる。この理由として 2 点を考える。まず、降雨の空間分布を十分捉えていないためであると考え。匹見川流域では、流域内で年間降雨量に 500~1100mm もの差が生じる。しかし、流域近辺には数個の観測所しか存在せず、降雨量の空間的分布を十分表現しているとはいえなかった。2 点目は、蒸発効率の設定に問題があったためと考える。本研究では、蒸発効率を年間を通して一定値 (0.3) として蒸発散量を計算したが、実際の蒸発効率には季節変化がある。本研究で用いた蒸発効率の値 0.3 は、夏季には適した値といえるが、冬季には大きい値であったと考える。

4. 結論 本研究では、河川流域規模における長期の流出モデルの構築を行うために、流域を流域構造に応じて斜面要素群に分割し、各斜面要素に非線形貯留関数法による要素モデルを適用した半分布型流出モデルを構築した。本モデルは、長期流出計算にあたって無視することのできない、蒸発散・浸透機能や、土壌の機能である、圃場容水量、みずみち・パイプ機構を備えており、現実的現象に即したモデルといえる。また、本要素モデルでは、状態量の微分方程式を解く手段として Adams の公式を用いた TRAM 法を採用した。TRAM 法によって、長期の流出計算を行うに際して、非常に安定した効率の良い計算を行うことが可能となった。結果、計算に費す時間もそれほど大きいものではなく、実用的なモデルであるといえる。

主な課題としては、降雨の空間分布を考慮すること、積雪・融雪の影響をモデルに導入することである。

参考文献

- [1] 金澤瑞樹・澤井伸宏・椎葉充晴・立川康人・市川 温：大気・陸面過程を内包した山腹斜面水文モデルの河川流域への適用、京大防災年報、第 43 号、B-2、2000。
- [2] 市川 温・小椋俊博・立川康人・椎葉充晴：山腹斜面流 kinematic wave モデルの集中化、京大防災年報、第 41 号、B-2、1998。
- [3] 椎葉充晴・市川温・堀智晴・田中賢治・金澤瑞樹：陸面水文過程と山腹斜面流出モデルの結合、京大防災年報、第 42 号、B-2、1999。
- [4] 一松 信：数値解析、朝倉書店、1994。