

山地降雨流出予測解析システム



所属名：(社)日本土木工業協会
鹿島建設(株)

発表者：小田切 光典

1. はじめに

近年、局所的な集中豪雨が相次ぎ 1999 年福岡市、2000 年名古屋市、2004 年福井市と大きな都市型洪水が発生している。一方、我が国の国土は約 70%が山地からなり、福岡市や神戸市に代表されるように都市の背後に山地が迫っている都市域が多く存在する。これらの都市域での水害発生には山地からの降雨流出の影響が無視できず、都市域だけでなく山地流域も含む流域全体を考慮した総合的な洪水対策を講じる必要がある。このような背景から、ダムを含む山間地における洪水対策効果や森林土壌の持つ雨水貯留効果を考慮し、山地から都市域の河川上流までの降雨流出過程をシミュレートする「山地降雨流出予測解析システム」を開発した。本システムと既に開発済みである「都市型水害予測システム」を組み合わせることで流域を視野に入れた総合的な洪水対策の評価・提案を行うことができる(図-1 参照)。本報の前半では本システムの特長と解析モデルの詳細について説明し、後半では適用例として実流域における洪水再現計算結果とダムによる治水効果の評価例を紹介する。

2. 山地流域における流出現象

一般に、森林で覆われた山腹斜面は透水性の高い表層を持つことが多く、森林土壌に降った雨水は速やかに土中に浸透する。土中に浸透した雨水は地表流よりも緩慢に流出するため、森林土壌は結果的に雨水を貯留し、流出を抑制する効果を有することとなる。森林土壌中の水の流れは、土壌構造と土壌水分量の違いにより変化する。飽和浸透の場合、土壌中の大空隙(小動物の巣穴や樹木根が腐った跡)を含むすべての間隙が水の通り道として機能するため、大量の水が速やかに土中を通過する。これに対し、不飽和浸透の場合には、大空隙は水の通りみちとして機能せず、これを除いた毛管移動水が支配的な土壌間隙(マトリクス部と表現する)の透水性が浸透現象を支配する。このように、土壌構造と土壌含水量に応じて「マトリクス部での流れ」、「大空隙部での流れ」、「地表流」といった異なるタイプの流出現象が出現することになる(図-2 参照)。

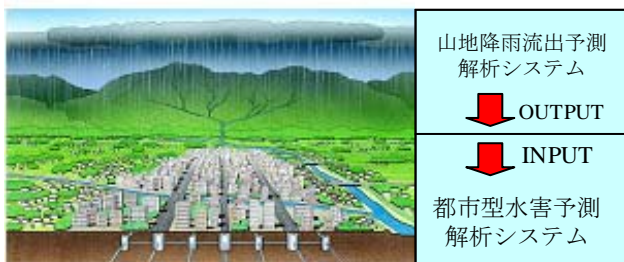


図-1 本システムと都市型水害予測システムの
組み合わせイメージ

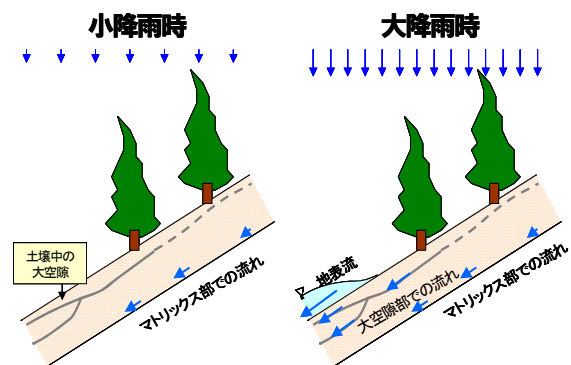


図-2 山地斜面における降雨流出模式図

3. 「山地降雨流出予測解析システム」について

3. 1 システムの特徴

3. 1. 1 分布型流出解析モデルの適用

流出解析モデルはブラックボックス的な「集中型モデル」と物理過程に基づく「分布型モデル」の二種類に大きく分けられる。本システムでは、局所的な山地斜面や土壌特性をより適切に表現するために、流水線に沿った分布型流出モデルを採用した。

3. 1. 2 精緻な流水線モデルの適用

山地斜面に降った雨水は勾配が急な斜面に流れることを考慮し、本システムでは山地斜面上での雨水流出方向をネットワーク化して表現する「流水線」を適用した（図-3 参照）。「流水線」を適用することで、精度を維持し計算の高速化を可能にした。流水線表現形式は椎葉ら^{1), 2)}が提案する手法を用いた。

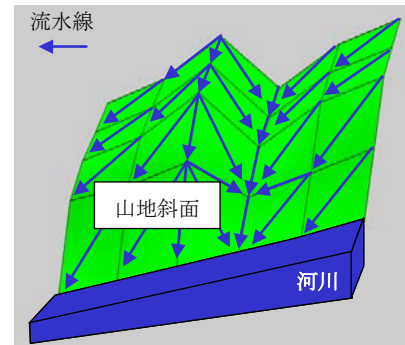


図-3 流水線概念図

3. 1. 3 森林土壌による降雨流出抑制効果の適切な評価

山地における降雨流出現象では、土壌構造と土壌含水量に応じて「マトリックス部での流れ」、「大空隙部での流れ」、「地表流」といった異なるタイプの流出が出現することを前述したが、本システムでは、立川ら³⁾が提案する流量流積関係式を導入することにより、土壌構造と土壌含水量に応じた流出タイプの変化を適切に表現でき、森林土壌の持つ雨水を貯留し流出を抑制する効果も評価可能となった。

3. 1. 4 ダムのモデル化

本システムでは、GIS情報を利用して既存のダムの位置やその諸元をシステム上で確認することができる。また、既存ダムや新規ダムの諸元や操作ルールを入力することにより、これらの施設による治水効果を加味した流出解析を行うことが可能である。さらに近年進められているダム再編の検討に際して、複数ダムの連携や導水効果を評価することも可能である。ダム操作のモデル化は佐山ら⁴⁾が洪水制御を目的としたダムに共通な操作を一般化しており、これに従った。

3. 1. 5 GIS 技術を用いたプレ・ポスト処理システム

GIS 情報を取得し解析に必要な入出力データを処理・可視化するための「プレ処理システム」ならびに解析結果の確認あるいは説明のための「ポスト処理システム」を開発した。これらはユーザーフレンドリーなシステムとなっており、国土数値情報や数値地図 50m メッシュ（標高）から、日本国内の如何なる流域に対しても解析に必要な情報を容易に取得・作成することが可能である。また計算終了後は任意地点のハイドログラフ表示や流出状態（マトリックス部流れ・大空隙部流れ・地表流）の表示などが可能であり、いつどのような場所で地表流が発生しやすいかといった局所的な情報を簡単に見ることができる。

3. 2 山地斜面での流出解析及び流量流積関係式

本システムの解析モデルは流水線に沿った kinematic wave モデルであり、基礎式は流水線方向の連続式と抵抗則（流量流積関係式）である。

連続式は、流水線に沿うため 1 次元であり、次式で表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 h : 水深、 q : 単位幅流量、 x : 流水線方向の座標、 r : 有効雨量である。なお、水深 h は土壌水分量を高さの単位で表現したものである。

流量流積関係式（立川ら³⁾）は土壌水分量 (h) に応じて 3 段階（マトリックス部流れ・大空隙部流れ・地表流）に変化し、次式で与えられる（図-4 参照）。

$$q = \begin{cases} k_m i d_m (h/d_m)^\beta & , 0 \leq h < d_m \\ k_m i d_m + k_a i (h - d_m) & , d_m \leq h < d_a \\ k_m i d_m + k_a i (h - d_m) + \sqrt{i/n} (h - d_a)^m & , d_a \leq h \end{cases} \dots (2)$$

ここに、 k_a ：大空隙部の透水係数、 k_m ：マトリックス部の透水係数、 n ：地表の粗度係数、 β ：体積含水率の減少に伴う透水係数の減少の程度を表すパラメータ、 d_m ：マトリックス部の最大水分量、 d_a ：大空隙部での最大水分量である。また本モデルで想定する土壌構造は、重力水が支配的な大空隙部と毛管移動水の流れが支配的なマトリックス部からなっている（図-5 参照）。

以上が基礎方程式であるが、実際の解法は、(2)式を(1)式に代入した次式を差分法で解く。

$$\frac{\partial q}{\partial t} + c \frac{\partial q}{\partial x} = cr \dots (3)$$

ここに、 c は伝播速度であり、次式で表される。

$$c = \frac{\partial q}{\partial h} = \begin{cases} \beta k_m i (h/d_m)^{\beta-1} & , 0 \leq h < d_m \\ k_a i & , d_m \leq h < d_a \\ m \sqrt{i/n} (h - d_a)^{m-1} + k_a i & , d_a \leq h \end{cases} \dots (4)$$

3. 3 河道モデル

河道は山地斜面同様 kinematic wave モデルを適用し、抵抗則にはマンニングの式を用いた。基礎式は以下ようになる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = Q_{in} \dots (5)$$

$$q = \frac{\sqrt{i}}{n} h^{5/3} \dots (6)$$

ここに、 i ：河床勾配、 n ：マンニングの粗度係数、 h ：水深、 q ：単位幅流量、 x ：流水線の方向、 Q_{in} ：横流入流量、である。横流入量は、山地斜面からの降雨流入量であり、それぞれの河道流水線に流入する流水線の流量から計算し与えられる。また、河道への雨量直接流入量は山地斜面からの横流入量と比較し、十分小さいためここでは無視できるとした。

4. 実流域への適用（検証計算）

4. 1 対象流域の概要

実際に集中豪雨に見舞われ洪水の発生したA川流域を対象に再現計算を行った。A川流域図を図-6 に示す。対象としたA川流域の面積は 415.6 km²、幹線流路延長が 61.7 kmである。最上流部のB山とC橋の標高差はおよそ 1,200 mあり、河道勾配はD地点からE地点で 1/150 程度と大きく、E地点からC橋付近までが 1/250~1/200 と小さくなっている。検証データにはC橋の水位観測地点における実測流量を用い、計算値との比較を行った。以後、水位観測地点とはC橋水位観測地点を指す。

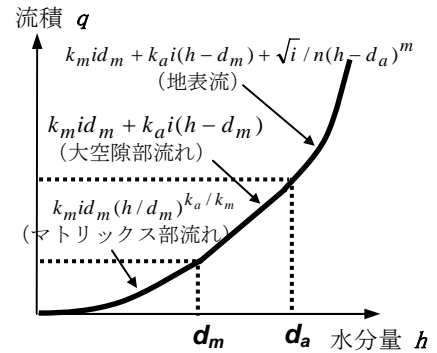


図-4 流量流積関係式

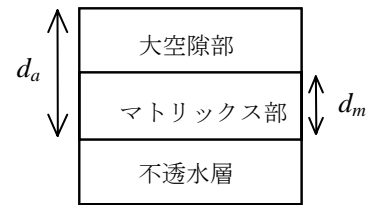


図-5 本モデルで想定する土層構造

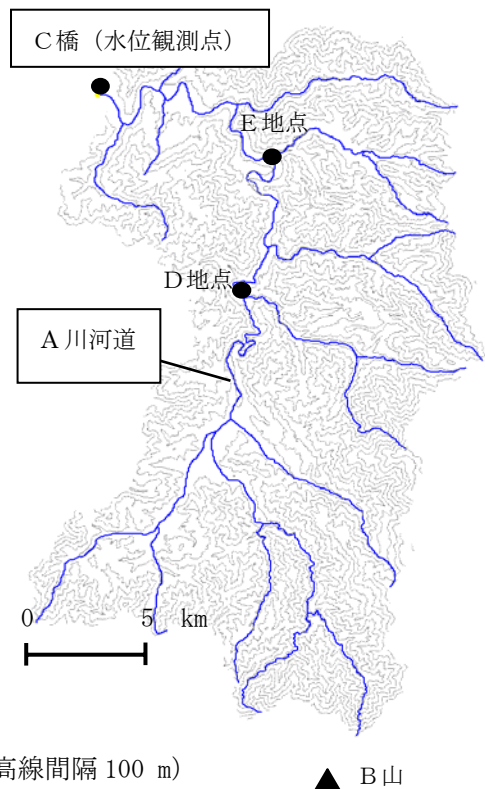


図-6 A川流域及び水位観測地点

4. 2 計算条件

計算条件を表-1に、各種解析モデルパラメータとその値を表-2に示す。

4. 3 計算結果

4. 3. 1 水位観測地点でのハイドログラフ

図-7に水位観測地点における実測流量及び計算流量を示す。この結果から、計算によるピーク流量が実測値をよく再現していることがわかる。一方、ピーク立ち上がり前後では、計算流量と実測流量に若干のずれが生じている。この原因として、降雨データの不確かさに起因する流域内の土壌水分空間分布（水深）

のずれが考えられる。本解析ではそれぞれの流水線から最も近い対象流域内の観測地点（12地点）の降雨データを用い、一時間ごとの雨量データを線形補間し降雨入力データとして使用している。このため、実際の降雨と降雨入力データが時間的、空間的に若干異なったことが影響したと考えられる。以上より、計算流量と実測流量のずれは現状では入手困難な情報に起因している点を考慮すると、計算結果は実測結果を良好に再現しているといえる。

表-1 計算条件

標高	数値地図50mメッシュデータ
降雨	集水域内の雨量観測所12地点のデータ

表-2 土壌及び河川パラメータ

パラメータ	記号	単位	設定値
マンニングの粗度係数: 土壌	n	$m^{-1/3}s$	0.4
マンニングの粗度係数: 河川	n	$m^{-1/3}s$	0.03
全空隙の層厚	da	m	0.28
マトリックス部の最大水分量	dm	m	0.15
マトリックス部の飽和透水係数	km	m/s	0.0025
大空隙部の飽和透水係数	ka	m/s	0.01

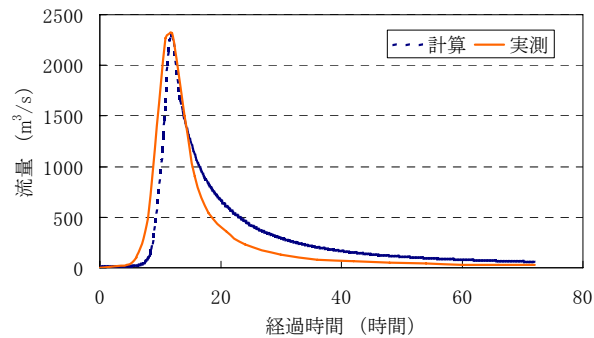


図-7 A川流域における水位観測地点でのハイドログラフ

4. 3. 2 流出状態の遷移

図-8に流出状態（マトリックス部流れ・大空隙部流れ・地表流）の時間変化を示す。山地斜面の河道に近い谷の部分において「地表流」が発生しやすい様子、降水増加や時間経過に伴ってマトリックス部での不飽和浸透流が、大空隙部での飽和浸透流、地表流へと遷移していく様子、降雨が止むとマトリックス部の流れのみ生じる地点が増加するといった実現象に即した様子が適切に再現されていることがわかる。

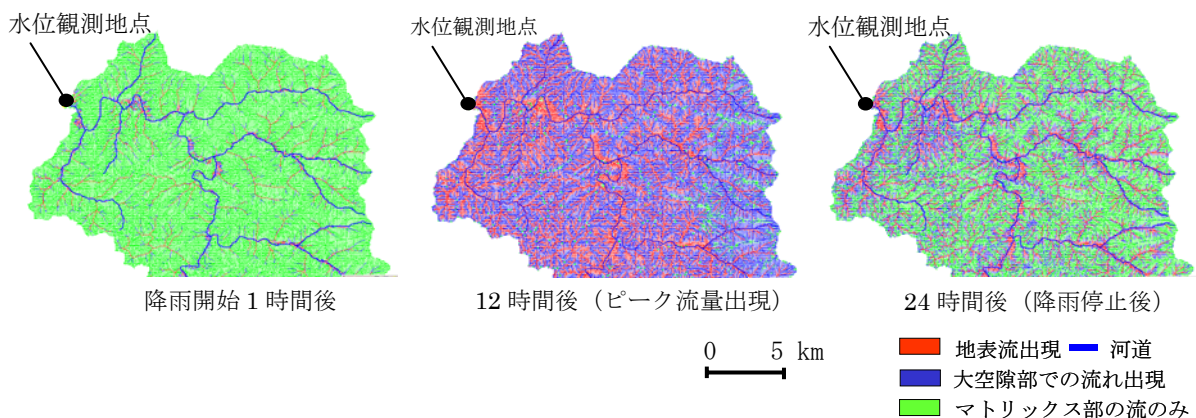


図-8 山地斜面における流出状態の時間変化

5. 洪水対策評価

本システムでは単独ダム運用や複数ダムの連携、導水などの治水効果を水位観測地点におけるピーク流量低減量として評価することができる。その一例として、前章で行った再現計算結果を用いて、仮想的ではあるが同流域内にダムを設置・運用したシミュレーション結果を図-9に示す。この際、計算結果はダムの規模や運用方法によって変化するため、ここではあえて図中に流量と時間の具体的な数値を入れていない。ダム設置地点は図-6のD地点付近である。Case 1はダムを設置していない場合、Case 2はダムを設置・運用した場合、Case 3はダムの運用と支流からダムへの導水操作を組み合わせた場合の結果となっている。この結果からCase 3のピーク流量低減効果が最も高いことがわかる。このように本システムでは、新規・既存ダムや導水による治水効果を定量的に評価することが可能である。

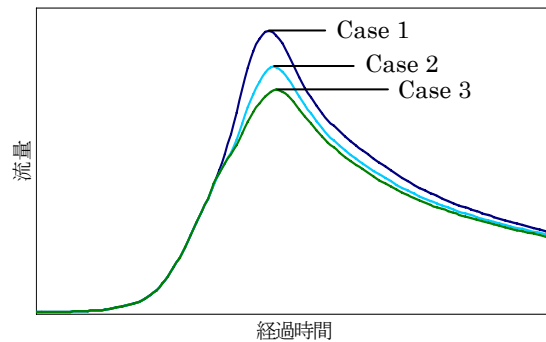


図-9 各種洪水対策による治水効果を考慮した水位観測地点におけるハイドログラフ

6. おわりに

山地流域から都市域の河川上流までの降雨流出過程を高速かつ高精度にシミュレートする「山地降雨流出予測解析システム」を開発した。本システムはすでに開発済みである「都市型水害予測システム」の上流境界条件を与えることができ、両システムを組み合わせ流域圏を視野に入れた総合的な洪水対策の評価・提案を行うことができる。またダムに着目すると、新たなダム整備が困難な現状から既存ダム施設の有効利用という考え方が今後の治水事業の重要な位置付けになるものと予想される。具体的には、流域内ダム群が一体となったより効果的な運用方法や複数ダムを水路で物理的につなぐダム群連携事業など、ソフト・ハード両面から流域の治水能力を向上していく対策が挙げられる。このような対策の提案・評価にも本システムを有効に活用できると考えている。

今後は、森林土壌の雨水貯留効果の評価、単独ダム運用・複数ダム連携などによる洪水対策効果の評価、土地利用形態の違いによる流出特性変化の予測などに基づき、総合的に水害に強い地域計画作りに貢献できるシステムにしていきたいと考えている。

謝辞

当システムの開発においては、京都大学・立川康人助教授にご指導いただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 市川温, 村上将道, 立川康人, 椎葉充晴; 流域地形の新たな数理表現形式に基づく流域流出系シミュレーションシステムの開発, 土木学会論文集, No. 691/II-57, (2001), pp. 43-52.
- 2) 椎葉充晴, 市川恩, 榊原哲由, 立川康人; 河川流域地形の新しい数理表現形式, 土木学会論文集, No. 621/II-47, (1999), pp. 1-9.
- 3) 立川康人, 永谷言, 寶馨; 飽和・不飽和れの機構を導入した流量流積関係式の開発水工学論文集, 第 48 卷, (2004), pp. 7-12.
- 4) 佐山敬洋, 立川康人, 寶馨; ダム群流況制御を考慮した広域分布型流出予測システムの開発, 京都大学防災研究所年報, 第 47 号 B, (2004), pp. 1-16.