

分布型タンク流出モデルに関する研究

日大生産工(院)
日大生産工

朝香智仁
西川 肇

日大生産工
日大生産工

木田哲量
近藤 勉

1 はじめに

洪水流出計算モデルは従来より多くのタイプが提案されているが、集中型モデル (lumped model) と分布型モデル (distributed model) とに大別できる¹⁾。分布型モデルは、流域における流出場の物理的な特性を空間分布情報として取り扱い、流域をメッシュ状に区切った集合体として評価することができる。分布型モデルに関する既往研究において未だ問題となっている点は、モデルに採用している運動方程式に設定するモデルパラメータを試行錯誤的に決定していることである。洪水の最大値の一致に重点を置くか、洪水流出の立ち上がり点や流出曲線の全体的な一致に重点を置くかは用途によって異なるが、いずれの場合においてもモデルパラメータを調節する事で解決を図ることが多い。そのため、運動方程式は物理的な背景を持つものも多いにも関わらず、モデルパラメータの本質的な意味が曖昧になってしまう。

本研究は、河川流域内のメッシュ分割域における降雨流出現象をタンクモデルとして扱った分布型タンク流出モデルを構築し、流域の浸透域と非浸透域における流出場の物理学的特性、時事刻々と変化する土地被覆状況などの空間分布情報ならび高密度降雨量分布情報を活用できる降雨流出解析法の提案を目的とした。また、物理的な背景を持つタンクモデルの運動方程式のパラメータに現地調査データを設定し、分布型タンク流出モデルに採用した基礎式が実際の雨水流動を表現しているかを、実際の山地河川流域を対象として検討した。

2 研究対象流域

本研究では、神奈川県南足柄市を流れる酒匂川の支流にあたる、狩川の岩原橋水位観測所から上流を研究対象流域に選定した。

狩川岩原橋上流域を研究対象流域に選定した理由は、支流の流域は比較的大きな流域ではなく、農

業・工業用水として多少の取水はあるものの、ダムなどの大規模な取水堰がないため、降雨特性が流出波形に直接反映されると思われるからである。また、著者らは、狩川岩原橋上流域を対象とした降雨流出特性に関する研究、および林地土壌の物理学的性質を継続的に調査しており、流域の概況を経験的に把握している事も選定理由である。

3 研究手法

本研究で提案する分布型タンク流出モデルの基本構造は、分布型モデルの中でも集中型モデルであるタンクモデルを空間的に配置したモデルである。分布型タンク流出モデルへ入力する空間分布情報は、数値標高モデル (Digital Elevation Model : DEM) から作成する4つの地形表現形式データ (流路網データ、流路集積数データ、流域界データ、斜面勾配データ)、衛星データから作成する土地被覆画像、レーダ・アメダス解析雨量データから得ることができる高密度の降雨量分布情報である。それぞれの空間分布情報の作成方法については、以下のとおりである。なお、本研究では、C言語で実装した自作のプログラムを用いて地形表現形式データを作成した。

3.1 分布型タンク流出モデルへ入力する空間分布情報の作成

(1) 流路網データ

流路網 (Drainage Direction Matrix : DDM) は、地上に降雨があった場合、雨水がどの方位に流れていくのかを示す落水線図である²⁾。落水方向は、注目画素の近傍 3 × 3 画素における標高を参照し、その中で最も低い方向へ水が流れていくという簡単な原理によって決定される。しかしながら、DDM を自動的に決定するためにはいくつか検討すべき問題がある。それは、数値標高モデルに潜在的に存在する窪地を処理する方法、また、落水

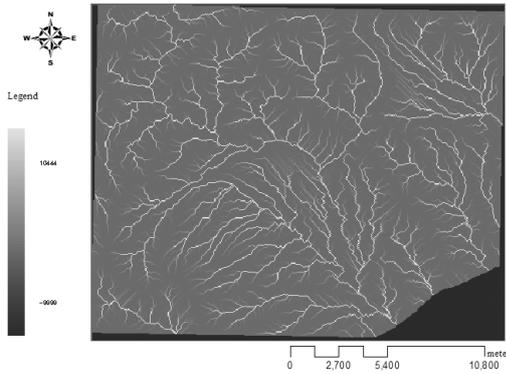


図- 1 研究対象流域周辺の流路集積数データ

方向が2つ以上または平坦地のために複数存在する地点における処理方法である³⁾。窪地の処理は、窪地を周囲の画素より高くなるように埋めていく方法を採用した。また、落水方向が複数ある場合には、より水理的に自然な落水方向が決定できるように乱数を発生させて決定させる方法ではなく、近傍画素を拡大して処理する方法を採用した。落水方向が複数選択された場合には、複数選択された画素を注目画素とした近傍3×3画素の標高値を重み付けをし、その平均値を比較して最小の値をとる方向を落水方向に決定する方法を採用した。本研究では、以上のアルゴリズムを適用し、DEMから流路網データを作成した。

(2) 流路集積数データ

流路集積数データは、各画素における上流側と下流側の位置関係を規定したデータであるとともに、擬似河道網を決定するために重要なデータである。本研究では、流路集積数は、流路網データにおける各画素から落水方向に従って追跡し、画像の端、あるいは水域に到達した場合を探索終了条件としてその各画素の上流側にある画素数をカウントする事で決定した。

図-1は、流路網データから作成した研究対象流域周辺における流路集積数データを示したものである。凡例は流路集積数(単位:ピクセル)を表している。図-1と既存の1:25000数値地図における河道網とを比較したところ、河道網はほぼ一致することを確認した。

(3) 流域界データ

流域界データは、流路網が集水する面積を規定したデータである。本研究では、流域界は、流路網データの任意の画素を流末として指定し、その画素に到達する落水方向を持つ全ての画素を流域界と決定した。流域面積は、流域界として決定し

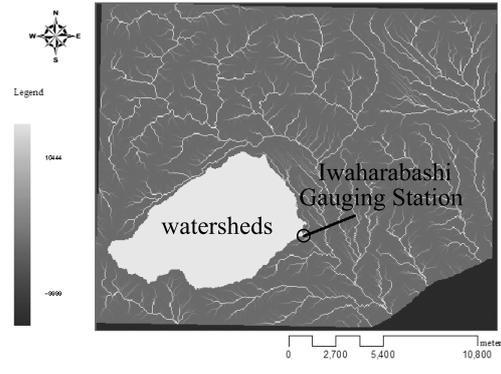


図- 2 研究対象流域周辺の流路集積数データと研究対象流域

た画素数を合計し、その値に流路網の空間分解能を面積で表した値を掛け合わせて求めた。

図-2は、流路網データから作成した研究対象流域周辺の流路集積数データと研究対象流域である狩川岩原橋水位観測所を示したものである。

(4) 斜面勾配データ

斜面勾配は、注目画素の近傍3×3画素におけるx方向(経度方向)とy方向(緯度方向)の偏微分値として下記(1)式のように表すことができる。

$$g = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

ここで、 g は斜面勾配、 $\partial z/\partial x$ はx方向の勾配、 $\partial z/\partial y$ はy方向の勾配、 z は標高値である。本研究では、x方向とy方向の偏微分値を近似的に差分式として扱い、DEMデータから斜面勾配データを作成した。

(5) 土地被覆分類画像

本研究では、2001年6月4日観測、Path-107, Row-36のLandsat/ETM+データを利用して土地被覆分類画像を作成した。2001年6月4日当時の狩川岩原橋上流域の上空は快晴で、太陽高度も66.9度と比較的高いために地形起伏による影の影響も少なかったため、前処理として衛星データに対しオルソ幾何補正のみを施した。土地被覆分類項目は、針葉樹・広葉樹・果樹園・伐採地および草地・農業用地・市街地・水域の7項目として、教師つき最尤法によって土地被覆分類画像を作成した。

(6) レーダー・アメダス解析雨量

(財)気象業務支援センター発行のレーダー・アメダス解析雨量は、レーダーによって推定された、密な降水分布をアメダス雨量で較正し、両者の長所を生かして作成されている。本研究では、レー

ダー・アメダス解析雨量を分布型タンク流出モデルへ入力する高密度降雨量分布情報とした。

3.2 分布型タンク流出モデルにおけるタンクモデルの基礎式

メッシュ分割域に配置した各タンクモデルの基礎式および運動方程式に設定するモデルパラメータについては、以下のとおりである。

(1) タンクモデルの運動方程式

斜面流を表す運動方程式は、立川ら^{4),5)}の提案した流量流積関係式を採用した。下記(2)式に示す立川らの提案した流量流積関係式は、マトリックス部分での流出を表す不飽和状態、マトリックス部分が飽和した後の重力水による中間流出を表す飽和状態、土層内の空隙が全て飽和した後の表面流出と中間流出を表す状態を表現できるため、浸透域ではそのまま運動方程式として利用した。

$$q(h) = \begin{cases} v_m d_m \left(\frac{h}{d_m}\right)^\beta \\ v_m d_m + v_a (h - d_m) \\ v_m d_m + v_a (d_a - d_m) + \alpha (h - d_a)^{m_p} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 q は単位幅流量、 h は斜面に対して鉛直に取った実質の水深、 v_m は雨水がマトリックス部全体を流れると仮定したときの平均流速、 d_m はマトリックス部の最大水分量を水深で表したものの、 v_a は有効空隙部をダルシー則に従って雨水が流れると仮定したときの平均流速、 d_a は有効空隙部の最大水分量を水深で表したものの、 i は斜面勾配である。また、 $v_m = k_m i$ 、 $v_a = k_a i$ で表され、 β は空隙率の現象に伴う透水係数 k の減少程度を表す無次元パラメータであり、 $\beta k_m = k_a$ と条件付けられ、有効空隙部の飽和透水係数とマトリックス部の飽和透水係数との比として設定されている。 α は、 $\alpha = \sqrt{i}/n$ であり斜面勾配と等価粗度係数の比で表される。

非浸透域では、地表面で雨水を浸透させることができないため、立川らの提案した上記(2)式の三段目の式を改良し、雨水が全て表面流出となるような下記(3)式を提案した。

$$q(h) = \alpha h^{m_p} \quad (3)$$

ここで、 q は単位幅流量、 h は斜面に対して鉛直に取った実質の水深、 $\alpha = \sqrt{i}/n$ であり斜面勾配と等価粗度係数の比で表される。

(2) タンクモデルの連続の式

メッシュ分割域に配置した各タンクモデルにおける雨水の質量保存の法則を表す連続の式は、従来からタンクモデルに利用されている下記(4)式を採用した。

$$\frac{d}{dt}s = r(t) - w(t) \quad (4)$$

ここで、 s はタンクの貯留高を水深の単位で表したものの、 $r(t)$ は有効降雨量を水深高の単位で表したものの、 $w(t)$ は上流から流れ込む単位幅流量と下流へ流れ出る単位幅流量の差を水深高の単位で表したものである。

(3) タンクモデルの基礎式に設定するモデルパラメータ

本研究では、(2)式および(3)式に設定するマトリックス部空隙率、有効空隙率、有効土層厚、飽和透水係数の変数は、既往研究⁶⁾において調査した現地調査測定データを利用した。等価粗度係数については、文献値⁷⁾を設定した。なお、それぞれのモデルパラメータは、土地被覆項目ごとに設定した。

3.3 分布型タンク流出モデルの流出計算システムの構築

メッシュ分割域に配置した各タンクモデルは、斜面流を上流側から下流側へ河道に至るまで追跡計算することができる流域全体の流出計算システムを構築した。河道流は、150km²程度の通常の山地河川流域では雨水の到達時間内の平均化作用などを考えると、河道での集水流下過程は斜面からの流入量の線形合成過程と考えると差し支えないとされている¹⁾。本研究の研究対象流域である狩川岩原橋上流域は53.74km²であるため、河道流はこの概念を適用し、河道まで達した斜面流を流末まで線形合成して算出した。

3.4 流出予測精度を評価する指標

一般的に、流出予測精度を評価する基準は定めにくく、多くは計算ハイドログラフと実測ハイドログラフを目視によって比較する方法が取られている。しかしながら、この方法では主観的な判断が要求されるため、客観的な判断基準の一つとして下記(3.4)式で表される誤差評価値を最小にする方式が採用されている⁷⁾。

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{Q_o(i) - Q_c(i)}{Q_{op}} \right\}^2 \quad (5)$$

表- 1 降雨流出解析の対象とした降雨

対象降雨	期間
(A)	2000/09/23 10:00 - 2000/09/27 09:00
(B)	2001/09/10 01:00 - 2001/09/14 00:00
(C)	2002/10/01 00:00 - 2002/10/04 23:00

ここで、 E は誤差評価値、 $Q_o(i)$ は時刻 i の実測流量、 $Q_c(i)$ は時刻 i の計算流量、 Q_{op} は実測のピーク流量、 n は計算時間数である。通常、誤差評価値 E を 0.03 以下にする事を基準にモデル定数を同定すれば実用上差し支えないと考えられている。本研究では、 E を流出予測精度を評価する指標とし、 E が 0.03 よりも小さくなることを基準とした。

4 結果と考察

狩川岩原橋流域内に設置されている雨量観測所で、2000年、2001年、2002年において観測された最も降雨強度が大きい時間を含む96時間を対象に、分布型タンク流出モデルによって降雨流出解析を行い洪水流出予測精度を評価した。表-1は、本研究で洪水流出予測精度を評価する上で対象とした降雨期間を示したものである。図-3は、対象降雨(B)における流出解析結果である。図中の上段の棒グラフは、流域内の雨量観測所で観測された降雨量を目安として表示したものである。図中の下段の実線は実測ハイドログラフであり、破線は計算ハイドログラフである。誤差評価値 E は、基準値を上回る0.0057であった。計算ハイドログラフにおいて、計算開始後23時間目に表れるピーク流量は過小評価しているが、全体的には複雑な流出波形を予測できていることを確認した。しかしながら、対象降雨(B)は狩川岩原橋上流域近くに台風が上陸した時であり、防災面から洪水を考えた場合に重要であるピーク流量の立ち上がり時間を正確に予測する事ができたため、分布型タンク流出モデルは実用性に適ったモデルであると考えられる。

また、対象降雨(A)から(C)までの流出解析結果より、分布型タンク流出モデルは、浸透域における土壌の物理学的性質を表すモデルパラメータを変えずに誤差評価値の基準値を上回る結果が得られた。従って、タンクモデルに採用した運動方程式は、実際の雨水流動を精度良くモデル化していると考え事ができ、さらに、本研究で作成した地形表現形式データが実流域に近い斜面流の挙

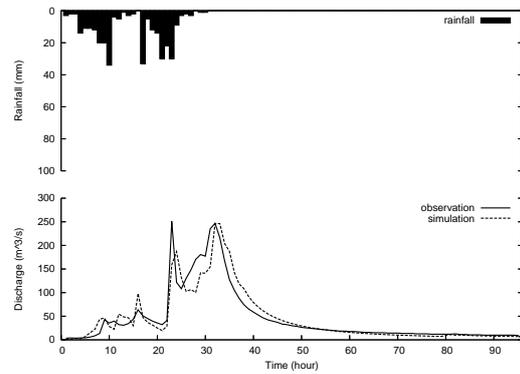


図- 3 対象降雨 (B) における降雨流出解析結果

動を表現することができると思われる。

謝辞: 本研究の一部は、平成18年度 日本科学協会 笹川科学研究助成(研究番号: 18-258, 研究課題: DEMと衛星データを利用した分布型タンクモデルの開発)によってサポートされています。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会 水理委員会: 水理公式集 [平成11年版], 社団法人 土木学会, pp.35-47, 1999.
- 2) 野上道男: DEM(数値標高モデル)からDDM(流水線図)を作成するアルゴリズムの改良とC言語プログラム, GIS-理論と応用, Vol.6(1), pp.95-102, 1998
- 3) 白沢道生, プリマ オキ ディッキ, 横山隆三: 50mメッシュDEMによる広域の水系抽出手法, 写真測量とリモートセンシング, Vol.39(5), pp.35-44, 2000.
- 4) 立川康人, 永谷 言, 寶 馨: 分布型流出モデルにおける空間分布入力情報の有効性の評価, 京都大学防災研究所年報, 第46号, B-2, pp.1-16, 2003.
- 5) 立川康人, 永谷 言, 寶 馨: 飽和・不飽和流れ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巻, pp.7-12, 2004.
- 6) 朝香 智仁, 西川 肇, 藤井 壽生, 木田 哲量: 分布型流出モデルによる洪水流出予測精度の評価 - Landsat/ETM+およびTerra/MODISデータの利用-, 土木学会論文集D, Vol.62(3), pp.369-382, 2006
- 7) 建設省河川局監修 日本河川協会編: 改訂新版 建設省河川砂防技術基準(案)同解説・調査編, 社団法人 日本河川協会編, pp.79-133, 1996.