

**斜面内多層流れを考慮した流出計算手法の提案と
洪水ハイドログラフの形成に関する研究**
STUDIES ON RUNOFF ANALYSIS CONSIDERING MULTI-LAYER FLOWS
IN A SLOPE AND FORMATION OF HYDROGRAPH

土木工学専攻 33号 吉見和紘
Kazuhiro YOSHIMI

1. はじめに

「流出解析において普遍的な流出モデルを構築する」事が本研究の最大の目的である。しかしながら、流出現象を解析するにあたり数多くの問題点が存在する。著者らはその一つ一つを解決することで普遍的な流出モデルの構築を目指している。降雨流出モデルは、

- 1) 降雨流出過程を表現出来ること
 - 2) 河川流量や水位を適切に再現できること
- が重要であり、流出解析をする際には、「物理的意味を持ち、且つ河川水位を適切に再現できる降雨流出モデル」を用いることが必要である。そこで本研究では、洪水ハイドログラフのピーク値及び逓減部を同時に高い精度で再現するため、表面流及び中間流からなる既存の流出解析手法の鉛直浸透機構に、山田が理論的に導出した準線形貯留型モデルを組み込み、斜面内多層流れを考慮した降雨流出モデルを構築した。

2. 土壌地形特性に基づく流出計算手法の概要

(1) 単一斜面における降雨流出の基礎式の導出

山田¹⁾は、従来から単一斜面における一般化した降雨流出の基礎式を提案している。以下にその理論の概要を記す。単一斜面に対して幅広矩形断面を想定するとともに、様々な流出形態に対応するため運動則を(1)式に示すよう、断面平均流速は水深のべき乗に比例するという形式で表現する。一般的なKinematic Wave理論における(1)式の表現は、著者らの記述方法とは異なり、単位幅流量 q が水深の冪乗に比例する形式で記述する事が多いので冪数 m の値に注意されたい。連続式に関しては(2)式で表現される。(1)式と(2)式より単位幅流量 q についての(3)式を得る。

$$v = \alpha h^m, \quad q = vh = \alpha h^{m+1} \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \quad (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \alpha q^b \frac{\partial q}{\partial x} = \alpha q^b r(t) \quad (3)$$

$$a = (m+1)\alpha^b \quad (4), \quad b = \frac{m}{m+1} \quad (5)$$

ここに、 v : 断面平均流速[mm/h], h : 湛水深[mm], q : 単位幅流量[mm²/h], $r(t)$: 降雨強度[mm/h], α, m は流域特性を表すパラメータである。直接流出は流出寄与

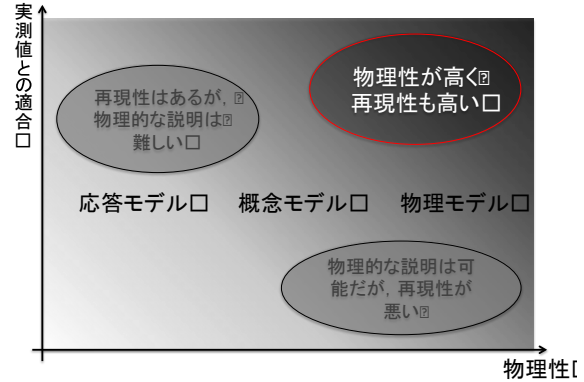


図-1 モデルの適切さ

域(河道及び河道近傍の湿潤領域)のみからの流出と考えると、斜面長は実地形上の斜面長より十分短いものと考えられ、(6)式に示す変数分離形の近似式が仮定できる。

$$q(x,t) \cong xq_*(t) \quad (6)$$

ここに、 q_* : 流出高[mm/h]である。また、斜面長 L の末端で考え $x=L$ として(6)式を用いると、偏微分方程式である(3)式は(7)式に示すように流出高に関する常微分方程式に変形できる。

$$\frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^b (r(t) - q_*) \quad (7)$$

ただし、
$$a_0 = aL^{b-1} = (m+1) \frac{\alpha \partial 0^{1+m}}{\partial L \theta} \quad (8)$$

ここに、 L : 流出寄与域斜面長である。(7)式が一般化された単一斜面からの降雨流出の基礎式となる。

土壌・地形特性を示す流出パラメータ α と m の値に関して志村ら²⁾は、鈴木^{3, 4)}、窪田ら⁵⁾の不飽和浸透理論とKinematic Wave法の式展開を比較する事により式(9), (10)で示されるよう、土壌・地形特性から決定できる事を示している。

$$\alpha = \frac{k_s i}{D^{\gamma-1} w^\gamma} \quad (9), \quad m = \gamma - 1 \quad (10)$$

ここに、 i : 斜面勾配, D : 表層土層厚[mm], γ : 土壌の透水性を表す無次元パラメータ, k_s : 飽和透水係数[mm/h], w : 有効空隙率であり、 $w = \theta_s - \theta_r$ (θ_s : 飽和含水率, θ_r : 残留含水率)で定義される。これにより、斜面流下方向流れに関して飽和・不飽和側方流を対象とする場合、土壌・地形特性から流出パラメータを決定し降雨流出計算を行う事が可能である。

呉ら⁶⁾は、表面流、鉛直浸透流、飽和・不飽和側方流

を考慮した降雨流出計算手法を提案し、土壌・地形特性と降雨強度の関係から表面流の発生が表現可能である事を示している。また、(7)式中の降雨強度 $r(t)$ は有効降雨強度であり、本論文では、山田らが提案している保水能の理論により決定している。これらの詳細は参考文献⁶⁾を参照されたい。

3. 実流域への適用とハイドログラフの再現性

(1) 対象流域と計算手法

計算の対象とした流域は利根川上流域(5110km²)及び、渡良瀬川流域に位置する草木ダム流域(254km²)である。本章では、表面流、鉛直浸透流、飽和・不飽和側方流に関する多層流れを考慮した降雨流出計算手法により斜面流出計算を行い、その出力を河道の上流端境界条件として一次元不定流計算を行なっている。

著者は、利根川上流域を対象として「降雨形態の変化が流出に与える影響」や「ダムの持つ治水機能」についての検証も行なっているが、本稿では割愛する。詳細は参考文献^{7), 8)}を参照されたい。

(2) ハイドログラフの再現性

既往の研究^{1), 6)}において、既存モデルの再現性について十分に検証されてきたが、二峰性の洪水や降雨強度が瞬間的に大きくなる洪水、長く雨が降り続く洪水では、ハイドログラフの全体的な波形や逓減部において実測値と計算値が一致しない傾向にある。二峰性の洪水イベントにおいて、このような傾向が見られる理由として、

- 1) 降雨が長く降り続き土壌が飽和した状態で主要な降雨イベントを迎えている。
- 2) 主要な降雨イベントの降雨強度は、瞬間的に強くなっている。

ことが考えられる。

4. 斜面内多層流れを考慮した降雨流出計算手法の提案

先にも述べたとおり、既存の流出モデルは、二峰性の洪水や降雨強度が瞬間的に大きくなる洪水、長く雨が降り続く洪水では、ハイドログラフの全体的な波形や逓減部において実測値と計算値が一致しない傾向にある。一般的に山地流域における流出現象では、表面流より中間流が卓越することが知られている。このため、表面流と中間流の2層構造である既存モデルでは、実質的に中間層のみからの流出時とほぼ変わらない流出形態となり、ピーク値は再現することが出来ても、ハイドログラフの立ち上りや逓減部の再現を同時に可能とするには限界があると考えられる。

以上より、著者は、洪水ハイドログラフの再現性に関して、既存の流出計算手法に改良を加えた手法の開発が必要不可欠であると考えた。

(1) 準線形貯留型モデルの理論的導出

山田、呉ら⁹⁾は2. (1)に示した単一斜面における降雨流出の基礎式を用いて、貯留関数法、準線形貯留型モデ

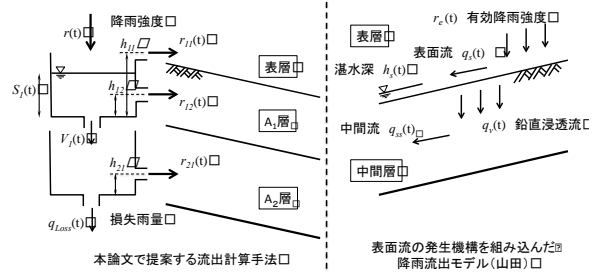


図-2 斜面内多層流れを考慮した降雨流出機構及び表面流の発生機構を考慮した降雨流出機構の概念図

ル、タンクモデル等概念モデルとしての降雨流出過程を取り扱う流出モデルの理論的導出を行なっている。

2. (1)に示した基礎式に対して、以下のような仮定を考えることで、準線形貯留型モデルが理論的に導出される。斜面流下方向断面平均流速が流下距離に比例すると考えると(11)式が仮定できる。

$$v = a_* \times x \quad (11)$$

ここに、 a_* : 比例定数[1/h]である。この仮定を用い、(3)式を整理することにより、(12)式が得られる。

$$\frac{dq_*}{dt} = a_*(m+1)(r(t) - q_*) \quad (12)$$

この(12)式は、有効降雨強度の流出への影響と貯留高の式形に内包される係数に、洪水到達時間の土地利用係数を用いれば、準線形貯留型モデルと同型である。また、中間流出孔と浸透孔を持つタンクからの流出と考えれば、菅原¹⁰⁾が提案したタンクモデルと同型である。タンクモデルは、非線形的な挙動を示す実際の流出現象の表現性の良さ、モデル構造の簡易さ、また比較的高い再現性を有する事から、現在広く流出解析に用いられている。

(2) 提案する流出解析手法の概要

斜面における降雨流出経路としては、表面流、飽和側方流、不飽和側方流、地下水流等があり、大規模出水もしくは斜面深層の流れを考慮した流出計算を行うためには、斜面内流れを多層構造として扱う必要がある。そこで著者は、山田らが理論的に導出した準線形貯留型モデルを流出計算手法の鉛直浸透機構に組み込み、新しい流出計算手法を提案する。

準線形貯留型モデルは、各層からの流出量を河川流とする(もしくは河道計算の入力とする)のが一般的であるが、図-2に示すように、本研究でのタンクの位置づけはあくまでも鉛直浸透機構を表現するものであり、降雨が流出に寄与するまでの遅れ時間や損失雨量の表現に用いる事とする。各流出孔からの出力は、山田らが提案してきた単一斜面における降雨流出の基礎式に入力される。

これにより、鉛直方向に多層構造をとる斜面流出計算が表現される。また、既往モデルでは、入力降雨を有効降雨としていたため、実降雨に対して有効降雨を決定する前処理を行う必要があった。しかし、タンク最下層に浸透孔を設けることでこの問題が解決され、流出孔からの流出量の総和を有効降雨量として表現する事が可能と

なった。

第 n 層における降雨流出計算手法

$$\begin{aligned} \frac{ds_n}{dt} &= V_{n-1} - r_{nm} - V_n \\ \frac{dq_{nm}}{dt} &= a_{nm} q_{nm}^{b_{nm}} (r_{nm} - q_{nm}) \\ \left. \begin{aligned} r_{nm} &= 0 & (s_n \leq h_{nm}) \\ r_{nm} &= a_{nm} (s_n - h_{nm}) & (s_n > h_{nm}) \end{aligned} \right\} \quad (13) \\ q_{Loss} &= V_n = b_n s_n \end{aligned}$$

ここに、 n : タンクの階層、 m : 各タンクにおける側方流出孔の数である。また、 r : 実測降雨強度[mm/h]、 s_n : 各タンクの貯留高[mm]、 a_{nm} 、 b_n : 流出孔、浸透孔の比例定数[1/h]、 h_{nm} : 各タンクの流出孔までの高さ[mm]、 r_{nm} 、 q_{Loss} (最下層のタンクのみ) $=V_n$: 各流出孔からの流出量[mm/h]である。 a_{nm} 、 β_{nm} は(7)式中のパラメータ a_0 、 β にそれぞれ対応する。以上が、降雨流出現象における鉛直浸透機構に準線形貯留型モデルを用いた流出計算手法の概要である。このように、鉛直浸透機構に準線形貯留型モデルを導入することにより、単一斜面における降雨流出の基礎式を斜面内 n 層の多層流れを表現可能となった。また、タンク最下層底部に流出孔を設けることにより損失雨量を表現し、入力降雨として有効降雨ではなく実測降雨を与えることが可能となった。

(3) タンクの構造決定

準線形貯留型モデルを降雨流出過程の鉛直機構に用いるためには、そのタンクの構造決定が重要である。本研究では、1段-流出孔2穴浸透孔1穴、2段-流出孔各1穴浸透孔各1穴、2段-流出孔1段目2穴2段目1穴浸透孔各1穴をそれぞれ、Type-A、Type-B、Type-Cと定義し、3Typeの鉛直機構を用いて流出計算を行い、それぞれの精度や特徴

について検証した。

(4) 流出パラメータの推定

準線形貯留型モデルやタンクモデルなどの概念モデルのパラメータを一意に決定することは難しい。本研究ではGauss-Newton法を用いることで、タンクの構造に関わらず、全てのパラメータを同時に推定した。

2段タンクの各層に対して側方流出孔及び浸透孔が1つずつ(Type-B)のモデルのパラメータの推定結果と各流出パラメータを推定する際に設定した初期値との比較を図-3に示す。側方流出孔までの高さを表現する h_{11}, h_{21} に着目する。検証した5つの洪水において、推定された h_{11}, h_{21} と設定した初期値とを比較すると、その差は小さく推定されたパラメータは設定した初期値に依存する。

また、斜面計算の基礎式中の流出パラメータ β に関しても h_{11}, h_{21} と同様の事が言え、初期値に対してその差は小さく、推定されたパラメータは初期値に依存する。

(5) 各流出成分の流出特性

推定結果を図-4に示す。左からType-A、Type-B、Type-Cの結果である。ハイトグラフに重なる青い実線は有効降雨を表しており、中間流出孔からの総流出量である。ハイドログラフの形状と各流出成分に着目すると、Type-Aでは、立ち上り及び低減部の再現性は良好であるが、ピーク値を過小評価している。また、各流出成分に着目すると、表面流出孔からの流出に対して中間流出孔からの流出が比較的多い事がわかる。Type-Bでは、ピーク付近で、1層目の流出孔からの流出が卓越しており、流出が早い成分で洪水が形成されている事がわかる。これは一般的に言う中間流出に対応すると考えられる。Type-Cは、Type-A,Bより流出孔が1つ多い構造となっている。ピーク付近の流出成分に着目すると、1層目の上

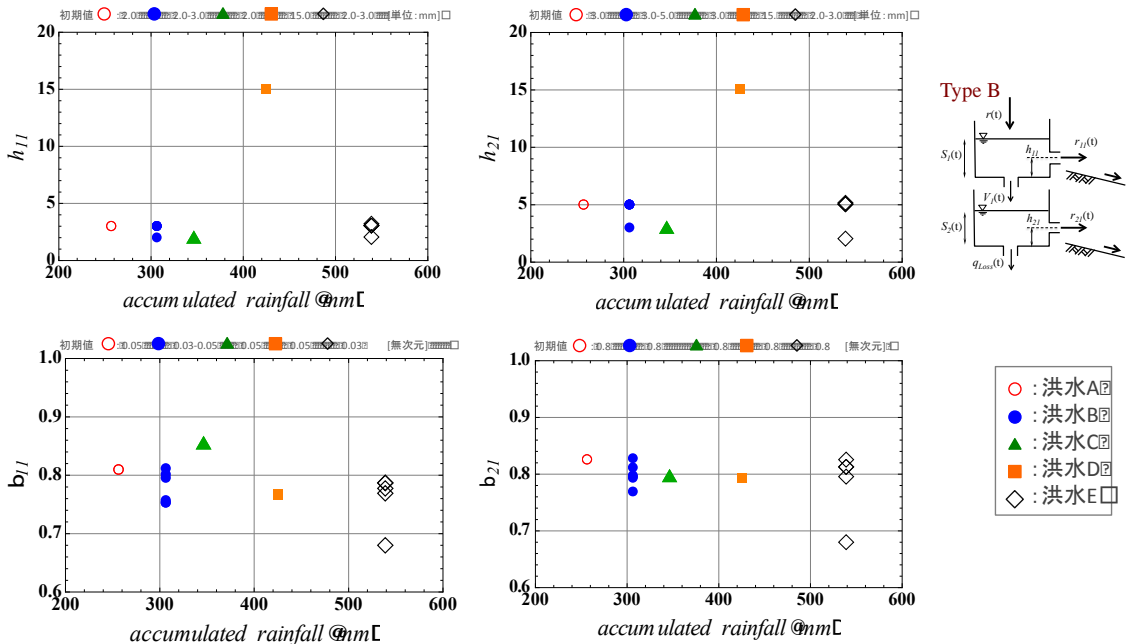


図-3 推定された流出パラメータの一例 (左上: h_{11} , 右上: h_{21} , 左下: β_{11} , 右下: β_{21})

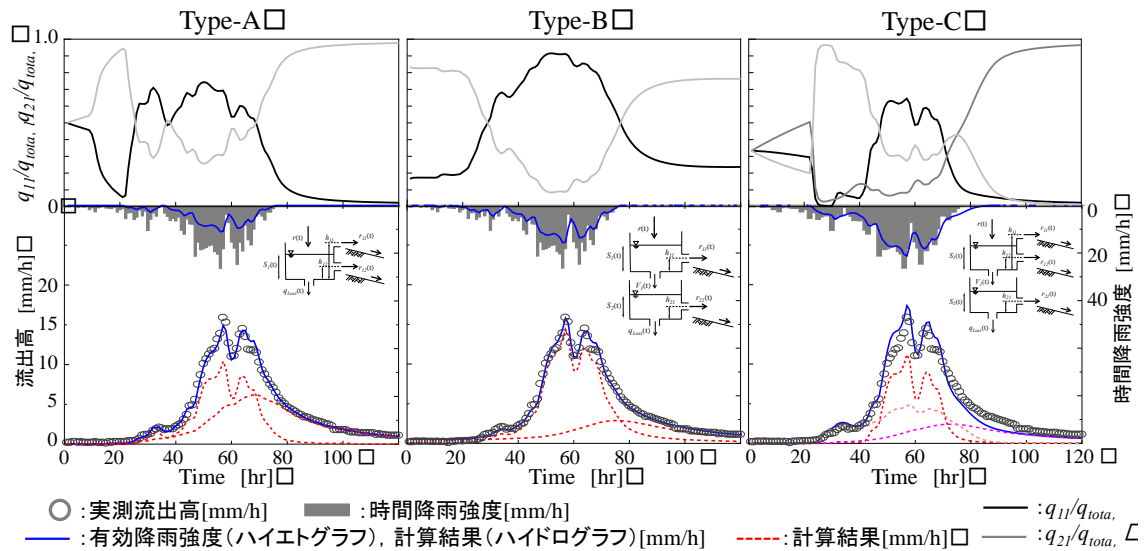


図-4 Type-A, B, Cにおいて推定されたハイドログラフ及び総流出量に対する各流出成分の時系列

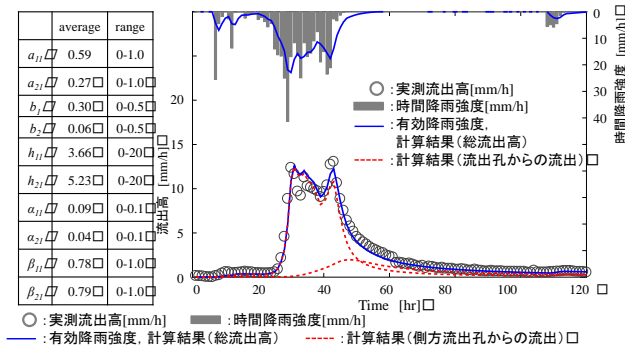


図-5 左表：5つの洪水で推定したパラメータの平均値，右図：パラメータの平均値を用いてType-Bの手法を用いて再現計算した洪水ハイドログラフ。

の流出孔から流出が最も多く、次いで2層目の流出孔からの流出が多い。また、ハイドログラフの立ち上りは2層目の流出孔からの流出量が卓越している。これは実現象で考えると、土中に浸透した雨が貯留されていた土壌内の水分を押し出すような機構が考えられる。ハイドログラフの形状に着目すると、一つ目のピーク値及び逓減部の再現性が良くない。これは推定した際の各パラメータの初期値設定が問題であると考えられる。

(6) 再現計算結果

検証した5つの洪水において推定されたパラメータの平均値を取り、それを流域の最適なパラメータとして再現計算を行った。結果を図-5に示す。

再現計算を行った洪水は、ハイドログラフの形状が2峰性であり、既存モデルでは再現の難しい洪水の一つである。ハイドログラフの適合度は立ち上り、ピーク値、逓減部の全ての部分で良好である。以上より、Type-Bの流出モデルの再現性が高い事を示した。

5. まとめ

本研究は、単一斜面における降雨流出の基礎式に準線形貯留型モデルの鉛直浸透機構を取り込み、斜面内多層流れを考慮した降雨流出計算手法を提案したものである。ここで得られた知見を以下に示す。

- (1)山田が理論的に導出した準線形貯留型モデルを降雨流出過程の鉛直浸透機構に用いることにより、斜面内多層流れを考慮した降雨流出計算手法を提案した。
- (2)雨量損失を考慮した準線形貯留型モデルを鉛直浸透機構に取り込む事により、既存流出モデルの入力降雨を有効降雨ではなく実測降雨とすることが可能となった。
- (3)Type-A,B,Cの3タイプの鉛直浸透機構を組み込んだ降雨流出計算手法を検証した結果、Type-Bの再現計算において、ハイドログラフの立ち上り、ピーク値、逓減部の再現性が極めて良好である事を示した。

参考文献

- 1) 山田正:山地流出の非線形性に関する研究, 土木学会水工学論文集, Vol.47,pp.259-264,2003.
- 2) 志村光一, 大原憲明, 松本浩志, 山田正:水理計算に基づく大規模河道網の洪水流出特性に関する研究, 水文・水資源学会誌, Vol.14,No.3,pp.217-228,2001.
- 3) 鈴木雅一:山地流域の基底流出逓減特性(I), 日林誌, Vol.66,pp.174-182,1984.
- 4) 鈴木雅一:山地流域の基底流出逓減特性(II), 日林誌, Vol.66,pp.211-218,1984.
- 5) 窪田順平, 福嶋義宏, 鈴木雅一:山腹斜面における土壌水分変動の観測とモデル化(II)ー水収支および地下水発生域の検討ー, 日林誌, Vol.70,No.9,pp.381-389,1988.
- 6) 呉修一, 山田正, 吉川秀夫:表面流の発生機構を考慮した斜面多層降雨流出計算手法に関する研究, 水文・水資源学会誌, Vol.49,pp.169-174,2005.
- 7) 吉見和紘, 岡部真人, 山田正:利根川上流域における降雨形態の違いが流出現象に与える影響に関する研究, 土木学会地球環境研究論文集, Vol.20,2013.
- 8) 吉見和紘, 山田正:利根川上流域における降雨パターンに着目した洪水流出解析とダムの治水効果の評価, 土木学会水工学論文集, 2013.
- 9) S Kure, T Yamada : Theoretical Derivation of the Conceptual Rainfall-Runoff Models, J.Japan Soc.Hydrol.and Water Resour.Vol.22,No.5(2009) pp.386-400.
- 10) 菅原正巳 : 流出解析法, 共立出版, 1972.