

## 45. 鉛直浸透機構を考慮した流出計算手法の パラメータの妥当性に関する研究

清水 雄太<sup>1\*</sup>・吉見 和紘<sup>1</sup>・永田 喜大<sup>1</sup>・山田 正<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中央大学理工学研究科都市環境学専攻（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）

<sup>2</sup>中央大学理工学部都市環境学科（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）

\* E-mail: shimi-yu@civil.chuo-u.ac.jp

降雨流出機構を解明するための研究は従来から精力的に行われてきた。本論文では単一斜面における土壌・地形特性に基づく降雨流出計算手法に鉛直浸透機構を考慮した新しい流出計算手法を議論する。本来、モデルを用いて再現計算を行う際、雨の降り方が異なる様々な降雨イベントに対して、ある程度の再現計算をすることが出来るパラメータが存在する。しかし、本計算手法ではそのパラメータが明確ではない。そこで本論文では、再現計算に用いるパラメータの決定、妥当性の検討について述べた物である。また、パラメータ決定に関しても既存の水文データを用いて統計的な観点、降雨形態の観点から再現計算に用いるパラメータを決定、妥当性の検討を行った。

**Key Words :** runoff, lumped model, multi-layer flow, short term runoff

### 1. はじめに

IPCC第五次報告によると、近年、計画規模を超える降雨発生頻度が増加している。降雨流出計算を行い、降雨流出を再現することは、治水対策の観点から見てとても重要である。しかし、降雨流出現象を表現する降雨流出モデルはこれまでも精力的に研究されてきたが、それらのモデルは普遍的にハイドログラフを再現し得るに至っていない。山田らはそれらの問題を背景に、流域の最小スケールを単一斜面とし、Kinematic Wave法を適用した物理モデルを提案した。また、山田らはそのモデルに鉛直浸透機構を考慮することにより、従来モデルより再現性の良いモデルを提案した。本来、モデルを用いて再現計算を行う際、雨の降り方が異なる様々な降雨イベントに対して、ある程度の再現計算をすることが出来るパラメータが存在する。しかし、本計算手法ではそのパラメータが明確ではない。そこで本論文では、実測の降雨イベントから本計算手法を用いて様々な降雨イベントを計算するために妥当なパラメータを決定、妥当性を評価することを目的とする。

### 2. 単一斜面における降雨流出の基礎式の概要

山田らは従来から流域の最小スケールを単一斜面とし、斜面流下方向流れを Kinematic Wave とし単一斜面における一般化した降雨流出の式を提案している。以下にその概要を示す。連続式を(1)一般化した運動則を(2)式に示す。(1),(2)式を  $q$  について整理すると(3)式を得られる。

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

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

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

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

ここに、 $v$  : 断面平均流速[mm/h],  $h$  : 水深[mm],  $q(t)$  : 単位幅流量[mm<sup>2</sup>/h],  $r(t)$  : 有効降雨強度[mm/h],  $m$  : 流出パラメータ,  $\alpha$  : 流出特性を表すパラメータである。また、流出パラメータ  $\alpha$ ,  $m$  に関しては斜面流として土壌内の流れを対象とする場合は、(6), (7)式のように土壌・地形特性から決定される。

$$\alpha = \frac{k_s i}{D^{\gamma-1} w^\gamma} \quad (6), \quad \gamma = m+1 \quad (7)$$

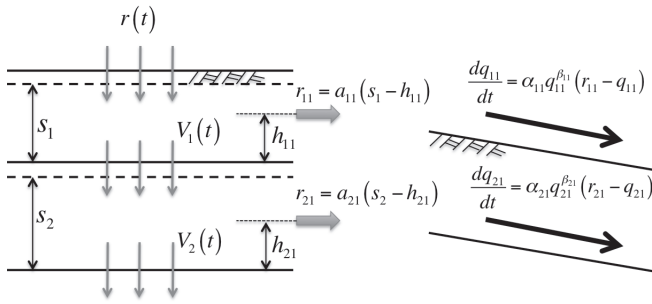


図-1 Type-A の層構造の概念図

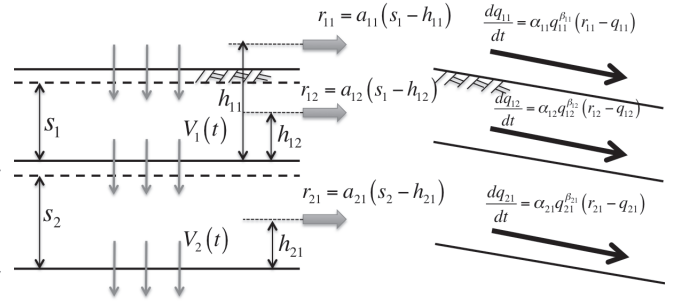


図-2 Type-B の層構造の概念図

ここに  $i$ : 斜面勾配,  $D$ : 表層土層厚[mm],  $k_s$ : 飽和透水係数[mm/h],  $w$ : 有効空隙率である. 山田らは, 直接流出は斜面近傍から発生し, その流出量は斜面長に比例し(8)式のような変数分離形の近似式が成立することを示した.

$$q(x, t) \approx xq_*(t) \quad (8)$$

ここに,  $q_*(t)$ : 流出高[mm/h]. 直接流出は斜面末端で発生すると考え, 斜面長を  $L$  とし, (3)式に代入, 整理すると(9)式になる.

$$\frac{dq_*(t)}{dt} = a_0 q_*^\beta (r(t) - q_*) \quad (9)$$

$$a_0 = aL^{\beta-1} = (m+1) \left( \frac{\alpha}{L} \right)^{\frac{1}{1+m}} \quad (10)$$

(9)式は単一斜面における斜面流出を表す基礎式となる.

### 3. 鉛直浸透機構を考慮した流出計算手法の概要

#### (1) 流出計算手法の概要

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. そのため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, 斜面多層流れを多層構造として扱う必要がある.

そこで山田らは, 以下に示す新しい流出計算手法を用いて再現性の向上を試みた. まず, 山腹斜面が複数の層で構成されていると考え,  $n$  層目における鉛直浸透について考える.  $n-1$  層目から  $n$  層目への浸透量  $V_{n-1}(=b_{n-1}s_{n-1})$ ,  $n$  層目から  $n+1$  層目への浸透量  $V_n(=b_ns_n)$  と各層における流出に寄与する雨量の連続関係から(11)式を得る.

$$\frac{ds_n}{dt} = V_{n-1} - r_{nm} - V_n \quad (11)$$

各層の流出に寄与する降雨量は(12)式に示すように土層内水位  $s_n$  が各層の保水力を表す土層内の側方成分までの高さ  $h_{nm}$  を超えた時点で発生する.

$$\begin{cases} r_{nm} = 0 \\ r_{nm} = a_{nm}(s_n - h_{nm}) \end{cases} \quad (12)$$

さらに, (12)式中の  $r_{nm}$  を(13)式中の基礎式に斜面流出に寄与する降雨として与えることで一連の斜面計算が行われる.

$$\frac{dq_{nm}}{dt} = \alpha_{nm} q_{nm}^{\beta_{nm}} (r_{nm} - q_{nm}) \quad (13)$$

ここに,  $n$ : 層数,  $m$ : 各層における側方成分の数である. また,  $s_n$ : 各層の土壌内水位[mm],  $a_{nm}$ ,  $b_n$ : 各側方成分浸透成分の比例定数[1/h],  $h_{nm}$ : 流出成分発生の閾値[mm],  $r_{nm}$ : 斜面流出に寄与する雨量[mm/h],  $V_n$ : 鉛直浸透量[mm/h]である.  $\alpha_{nm}$ ,  $\beta_{nm}$ : 単一斜面における降雨流出の基礎式の  $a_0$ ,  $\beta$  にそれぞれ対応する,  $a_{nm}$ ,  $b_{nm}$ : 各側方成分, 鉛直浸透成分の比例定数. この鉛直浸透機構は, 降雨が流出に寄与するまでの遅れ時間や損失雨量を表現することが出来る. 鉛直浸透機構における各層の側方成分は, 流出に寄与する降雨量として(13)式の入力降雨として与えられる.

#### (2) 使用モデル構造

本論文では図-1, 2 に示すように, 検証に用いた構造を Type-A (図-1), Type-B (図-2) と定義し使用する.

#### (3) パラメータの推定

パラメータの推定に関しては Gauss-Newton 法を用いることで, 実測降雨から層構造を問わず全てのパラメータを同時に推定した. Gauss-Newton 法は収束性ニュートン法より良いため, 目的関数が平方和になる最小化問題では, 解を求めるためにかかる時間を Gauss-Newton 法を用いることで節約することが出来る.

### 4. 対象流域と計算手法

#### (1) 対象流域の概要

対象流域は, 利根川水系の渡良瀬川上流域 78km 地点に位置する草木ダム流域である. 流域面積は 254km<sup>2</sup> であり, 流域の地形は全体的に山地流域である. 今回用いるデータは 1978 年から 2003 年までに対象流域内で発生した降雨イベント 20 ケースであり, 1 イベントの定義

は、降雨発生 5 時間前まで無降雨であり、かつピーク流量発生時間から 96 時間後までを 1 イベントとする。

## (2) 計算手法

本論文では、既往の降雨イベントのデータから Gauss-Newton 法より流出パラメータを推定し、推定したパラメータを用いて統計的な視点、降雨特性の違いからパラメータを決定し再現計算を行い、再現計算の結果から決定したパラメータの妥当性の検討を行った。

## 5. パラメータ推定結果と再現計算に用いるパラメータの決定

既存のデータを用いて推定したパラメータ結果から、各パラメータの分散、平均を表-1 に示す。推定したパラメータのうち、鉛直浸透に寄与するパラメータ  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{21}$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  の値は、 $a_{11}$  は 0.4~0.7,  $a_{12}$  は 0.2~0.55,  $a_{21}$  は 0.1~0.6,  $b_1$  は 0.01~0.14,  $b_2$  は 0.01~0.1, 斜面流出に寄与するパラメータ  $\alpha_{11}$ ,  $\alpha_{12}$ ,  $\alpha_{21}$ ,  $\beta_{11}$ ,  $\beta_{12}$ ,  $\beta_{21}$  の値は、 $\alpha_{11}$  は 0.08~0.23,  $\alpha_{12}$  は 0.02~0.25,  $\alpha_{21}$  は 0.03~0.2,  $\beta_{11}$  は 0.45~0.65,  $\beta_{12}$  は 0.43~0.63,  $\beta_{21}$  は 0.45~0.66 となり、既往の研究で示されている  $a_s$ ,  $\beta_s$ ,  $a_0$ ,  $\beta$  と比較した結果、いずれのパラメータも推定された範囲が妥当であり、洪水毎にパラメータが大きく変化することはなかった。また、その中で Type-A 構造と Type-B 構造でのパラメータの違いを比較した。表-1 から Type-A 構造の方が、ばらつきが小さいことがわかる。表-1 を見ても  $b_2$  を除く他の全てのパラメータのばらつきは Type-B 構造に比べて Type-A 構造の方が小さいことがわかる。これは層のパラメータを推定する際に、Type-B 構造の方が推定するパラメータ数が多いので Type-A に比べてパラメータのばらつきが多くでたと考えられる。再現計算に用いるパラメータは統計的な観点から、推定したパラメータの平均値を用いて計算するケース(ケース 1)、総降雨量が最大のイベントから推定されたパラメータを用いて計算するケース(ケース 2)とする。ケース 1, 2 のパラメータは表-2 に示す。

## 6. 再現計算結果

図-3 に Type-A と Type-B のモデル構造を用いて、ケース 1 とケース 2 のパラメータを用いて再現計算した結果の一例を示す。Type-A 構造、Type-B 構造に関しては、いずれもハイドログラフの適合度は良好であることがわかる。各パラメータの平均値をパラメータとして決定したケース 1 と、総降雨量が最大のイベントを用いて推定されたパラメータを使ったケース 2 を比較すると、各パラメータの平均値を用いるケース 1 よりも、総降雨量が最大の

表-1 各構造における推定したパラメータの分散・平均

| Type-A構造      |             |             | Type-B構造      |             |             |
|---------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
|               | 分散          | 平均          |               | 分散          | 平均          |
| a11           | 0.001419698 | 0.566069781 | a11           | 0.002899425 | 0.603189176 |
| a21           | 0.005480985 | 0.14089797  | a12           | 0.018807571 | 0.334917879 |
| b1            | 0.002212941 | 0.313876408 | a21           | 0.030105577 | 0.252181352 |
| b2            | 0.001475976 | 0.064854653 | b1            | 0.002447386 | 0.105088033 |
| $\alpha_{11}$ | 0.00078209  | 0.146915256 | b2            | 0.001076103 | 0.045700689 |
| $\alpha_{21}$ | 0.001491604 | 0.091746035 | $\alpha_{11}$ | 0.001740442 | 0.160949933 |
| $\beta_{11}$  | 0.00134896  | 0.759895304 | $\alpha_{12}$ | 0.003791844 | 0.083965121 |
| $\beta_{21}$  | 0.000951495 | 0.772934815 | $\alpha_{21}$ | 0.04392566  | 0.1752074   |
|               |             |             | $\beta_{11}$  | 0.003962647 | 0.581914635 |
|               |             |             | $\beta_{12}$  | 0.00625248  | 0.560128704 |
|               |             |             | $\beta_{21}$  | 0.00510567  | 0.562360133 |

表-2 再現計算に用いるパラメータ

| Type-A        |          |          | Type-B        |          |          |
|---------------|----------|----------|---------------|----------|----------|
|               | ケース1     | ケース2     |               | ケース1     | ケース2     |
| a11           | 0.566070 | 0.555215 | a11           | 0.632984 | 0.638072 |
| a21           | 0.140898 | 0.043384 | a12           | 0.249816 | 0.281844 |
| b1            | 0.313876 | 0.304677 | a21           | 0.141953 | 0.162687 |
| b2            | 0.064855 | 0.004424 | b1            | 0.106910 | 0.133143 |
| $\alpha_{11}$ | 0.146915 | 0.177548 | b2            | 0.036803 | 0.000000 |
| $\alpha_{21}$ | 0.091746 | 0.219241 | $\alpha_{11}$ | 0.140874 | 0.123453 |
| $\beta_{11}$  | 0.759895 | 0.753345 | $\alpha_{12}$ | 0.109021 | 0.195126 |
| $\beta_{21}$  | 0.772935 | 0.748107 | $\alpha_{21}$ | 0.041958 | 0.030820 |
|               |          |          | $\beta_{11}$  | 0.620604 | 0.629996 |
|               |          |          | $\beta_{12}$  | 0.609511 | 0.617938 |
|               |          |          | $\beta_{21}$  | 0.606769 | 0.624971 |

イベントからパラメータを決定したケース 2 の方が再現性が良いことがわかる。このことの要因に関してはまだ検討しておらず、総降雨量と再現計算の精度の関係は今後の検討していくべき項目である。

各構造毎に比較しても Type-A 構造、Type-B 構造ともにハイドログラフの適合度は良好であり、再現性は良いことがわかる。ハイドログラフの構成成分に関しても層の数が Type-B より少ない Type-A は、ハイドログラフの立ち上がりからピークまでは最も上の層から発生すると考えられる流出成分で構成され、逓減部は主に 2 層目から発生すると考えられる流出成分で構成されている。一方で、層の数が多い Type-B は、ハイドログラフの立ち上がりからピークまでは、主に 1 層目と 2 層目から発生したと考えられる流出成分から構成され、逓減部は主に最も深い層から構成されている。本流出計算手法では、モデル構造によってハイドログラフの構成成分が異なり、補間し合うためモデル構造が異なっても再現精度は良好である。つまり、モデル構造に関わらず再現性は良いことがわかる。

その他の 19 イベントに関しても Type-A 構造、Type-B 構造とケース 1、ケース 2 のパラメータを用いて再現計算を行った。本論文では再現精度を Nash-Sutcliffe 係数(NS 値)を用いて評価した。NS 値を用いてモデルの再現精度を評価する際は、NS 値が 1 に近いものほどモデルの再現精度は良いとされている。NS 値はそれぞれ Type-A 構造、ケース 1 のパラメータを用いて再現計算した結果の NS 値は平均で 0.85、Type-A 構造、ケース 2 のパラメータを用

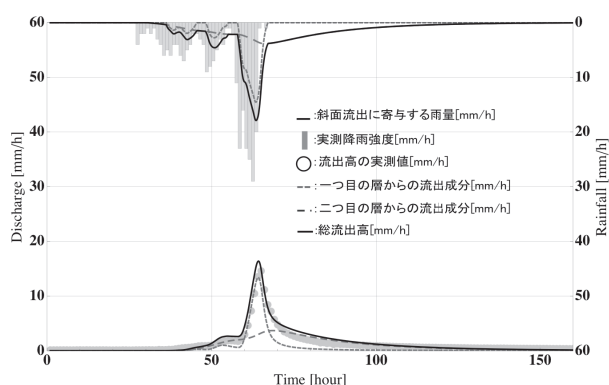


図-3(a) Type-A 構造による再現計算結果(ケース 1)

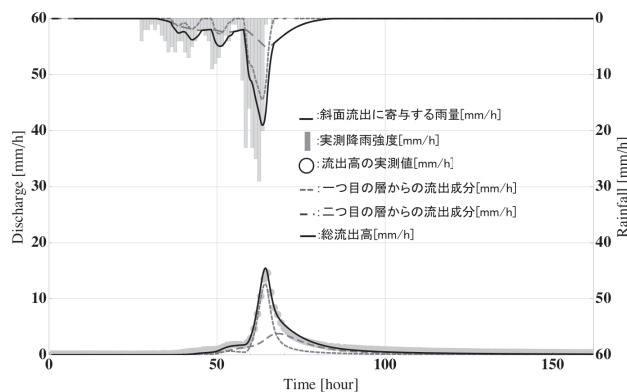


図-3(b) Type-A 構造による再現計算結果(ケース 2)

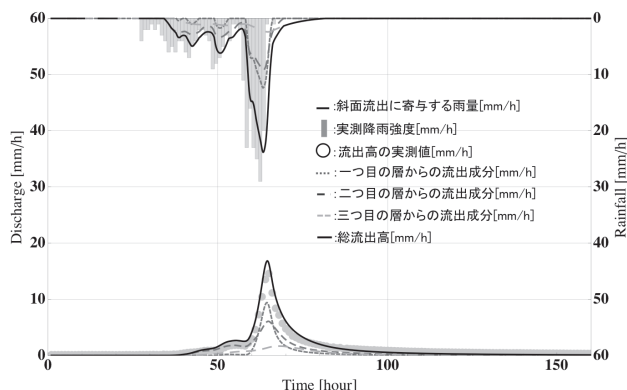


図-3(c) Type-B 構造による再現計算結果(ケース 1)

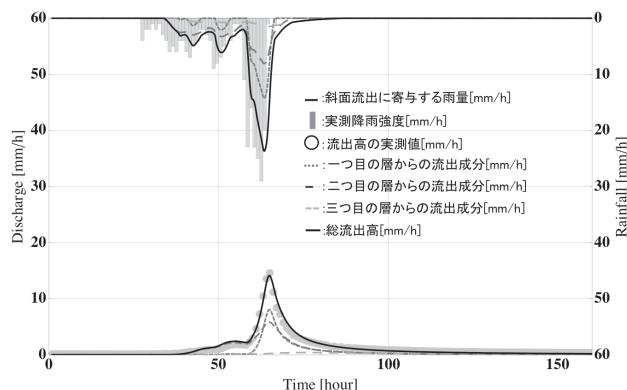


図-3(d) Type-B 構造による再現計算結果(ケース 2)

いて再現計算した結果の NS 値は平均で 0.88, Type-B 構造, ケース 1 のパラメータを用いて再現計算をした結果の NS 値は平均で 0.91, Type-B 構造, ケース 2 のパラメータを用いて再現計算をした結果の NS 値は平均で 0.93 となり, どのモデル構造, どのケースのパラメータで計算してもモデルの再現精度は良好であることがわかった。また, 降雨流出計算をする際に再現精度を評価するための重要な指標となるピーク値に関しても, 20 ケースの再現計算結果のピーク値と実測値の差と実測値の比は, 最大で約 10%となり, ピーク値の再現精度は良好である。つまり, 本論文で再現計算に用いたパラメータは草木ダム流域内で発生する降雨イベントを再現計算する当たって妥当なパラメータであることがわかった。

## 6. まとめ

本研究では, 山田らが従来から提案している流出計算手法に, 鉛直浸透機構を考慮したモデルの再現性と, 再現計算に用いるパラメータの決定と妥当性の評価を行った。以下にその知見を示す。

1)Type-A 構造と Type-B 構造を用いて統計的な観点から決定したケース 1 のパラメータと, 総降雨量が最大の降雨イベントからパラメータを決定したケース 2 を用いて再現計算した結果, ハイドログラフの適合度は良

好であり, モデルの再現精度は良いと言える。

- 2)ケース 1, ケース 2 のパラメータで 20 ケースの降雨イベントでそれぞれ再現計算を行い, その結果を NS 値を用いて再現精度を評価した結果, モデルの構造に関わらず, NS 値の平均は 0.85~0.93 となったことから, 本流出計算手法によるハイドログラフの波形の再現精度は良好であることがわかった。
- 3)降雨流出計算の再現精度を評価する際の重要な指標となるピーク値の再現精度は良好であり, 20 ケースの再現計算結果のピーク値と実測値の差と実測値の比は, 最大で約 10%となり, ピーク値の再現精度は良好であることがわかった。
- 4)以上の結果から, モデル構造に関わらず本流出計算の再現精度は良く, 本研究で決定したパラメータはケース 1, 2 のいずれも流出計算をするに対して妥当なパラメータであることがわかった。

## 参考文献

- 1)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, 土木学会水工学論文集, Vol.49, pp.169-174, 2005.
- 2)吉見和紘, 山田正: 鉛直浸透機構を考慮した流出計算手法の長短期流出解析への適用, 土木学会水工学論文集 Vol. 70, pp. 367-372, 2014.