

鉛直浸透機構を考慮した降雨流出モデルのロバスト性に関する研究

中央大学 学生会員 ○清水 雄太
 中央大学 学生会員 吉見 和紘
 中央大学 フェロー会員 山田 正

1. はじめに

地球温暖化の影響により、将来の雨の降り方、規模が変化することが予測されている。このような背景の中で河川計画を立案して行く際に、降雨流出モデルを用いて既往洪水の再現計算、また、将来起こりうる降雨を想定して予測計算を行う。その中で近年の短時間で集中的に降る降雨や短時間で多量の雨が降るような降雨、大災害をもたらすような未曾有の降雨等の様々な降雨による降雨流出を再現・予測できる降雨流出モデルは重要である。ここで重要なのは降雨流出を再現計算する際に、洪水毎に推定したパラメータではなく、過去に定められたパラメータで再現・予測できることである。そのモデルでは同じモデル構造、同じパラメータである程度の精度で降雨流出を概ね再現するが重要である。その性質を降雨流出モデルのロバスト性という。降雨流出モデルのロバスト性を評価することは、そのモデルの汎用性の高さを評価することになる。

本論文では、山田らが提案した鉛直浸透機構を考慮した単一斜面における降雨流出の基礎式¹⁾に着目し、利根川流域にある草木ダム流域を対象に、過去に発生した降雨イベントを用いてモデルのロバスト性の評価をすることを目的とする。

2. 流出計算手法

山田らは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²⁾。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。本論文では上述の降雨流出モデルを対象とする。

(1) 単一斜面における降雨流出の基礎式

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。一般化した運動則を(1)式、連続式を(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。

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

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

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

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

ここに、 v : 断面平均流速[mm/h], h : 湛水深[mm], $q(t)$: 単位幅流量[mm²/h], $r(t)$: 有効降雨強度[mm/h], m : 流出パラメータ, α : 流出特性を表すパラメータである。また、流出パラメータ α, 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。

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

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。

$$q(x, t) \cong x q_*(t) \quad (8)$$

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。

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

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

(9)式は単一斜面における斜面流出を表す基礎式となる。

キーワード 単一斜面における降雨流出の基礎式、鉛直浸透機構、ロバスト性、Nash-Sutcliffe 係数

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部 TEL. 03-3817-1805

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

(2) 鉛直浸透機構を考慮した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} : 流出成分発生の際値[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。 α_{nm} 、 β_{nm} : 単一斜面における降雨流出の基礎式の α_0 、 β 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。また図-1 に鉛直浸透を考慮した単一斜面における降雨流出の基礎式概念図を示す。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。

3. 評価手法

(1) 適用流域・対象降雨イベントの概要

適用流域としては、利根川水系の渡良瀬川上流 78km 地点に位置する多目的ダムである草木ダム流域を対象とする。流域面積は 254km² であり全体的に山地流域と

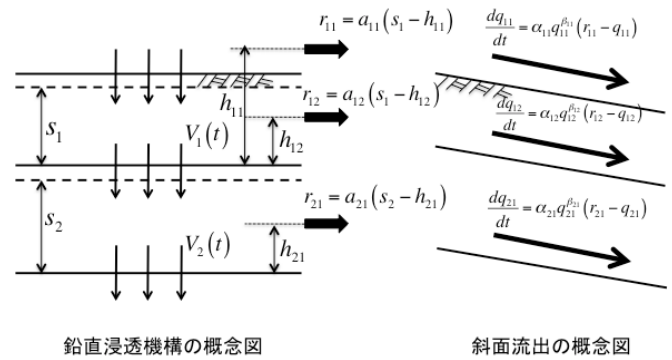


図-1 鉛直浸透機構を考慮した単一斜面における降雨流出の基礎式概念図。

言える。研究に用いる降雨イベントは草木ダム流域で1978年から2003年までに発生した降雨イベント19イベントである。本論文では、1イベントを降雨開始時間から降雨終了時間の96時間後をまでを1イベントと定義する。

(2) ロバスト性の評価手法

本研究では、山田らの提案した鉛直浸透機構を考慮した単一斜面における降雨流出の基礎式を対象にロバスト性を評価するが、その評価手法としては、対象降雨イベント19ケースを用い対象モデルのそれぞれの降雨イベントに対する最適なパラメータセットを19セット推定する。次にそのパラメータセットを用い、推定に用いた降雨イベント以外の18ケースの降雨流出を再現計算する。その結果をNash-Sutcliffe係数(以下NS値)を用いて再現精度を評価した。その結果から再現計算をするのに最も妥当なパラメータを決定する。同様のことを一般的に広く用いられているタンクモデル、貯留関数法、また、山田らが従来から提案している単一斜面における降雨流出の基礎式で行い、NS値を指標に再現精度の比較を行い、ロバスト性を評価した。

4. 草木ダム流域における流出パラメータの推定

既往の研究より流域面積 200km² 程度のダム流域スケールでは、河道の効果を考慮しなくても、計算結果に大きな影響を及ぼさないことが示されている。よって、本研究では河道計算は行わず、草木ダム流域の末端の流量を流出計算により直接算出している。

(1) 流出パラメータの推定

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法は計算するのが困難な2

階微分が不要なため、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節約することができる。

(2) パラメータの推定結果と再現計算に用いるパラメータの決定

過去のイベントから推定した19セットの流出パラメータからそれぞれのパラメータの推定した。また、推定結果の一例のハイドログラフを図-2に示す。図-2に示すように Gauss-Newton 法で推定した最適なパラメータを用いて流出計算を行なったためハイドログラフは立ち上がり、ピーク値、通減部いずれの適合度も良好であった。また、他の18ケースに関しても、同様の精度でハイドログラフを描くことが可能である。先述したように降雨流出モデルのロバスト性とは、1つのパラメータセットで様々な降雨流出をある程度の精度で再現できるということであるが、推定したパラメータの値が大きくばらつくと、それらのパラメータで他の降雨流出を再現した時に良い精度で再現できるとは考えにくく、ロバスト性が高いとは評価できない。そこで、本流出計算手法のロバスト性を評価する1つの手段として、推定したパラメータのばらつきの程度を分散の値から評価した。表-1に本流出計算手法によって得られたパラメータの分散を示す。表-1が示すように鉛直浸透に寄与するパラメータ、斜面流出に寄与するパラメータの分散は小さいことがわかる。既往の研究と比べても、分散の値からパラメータのばらつきは小さいと考えることができる。よって、本流出計算手法で推定したパラメータは、降雨の違いによる影響はほとんどなく、パラメータの値はほとんど変化しないことがわかった。

(3) 本流出計算手法の斜面計算の効果

図-1にもあるように、本流出計算手法は鉛直浸透機構と斜面流出に寄与する降雨量を表す概念的な部分と斜面計算を行なう物理的な部分で構成される。タンクモデルとは異なり斜面計算を行なうことにより遅れ時間や、土壌特性から斜面計算に用いるパラメータを決定することができる。また、中でも遅れ時間は降雨開始時間と降雨流出開始時間の差を表すパラメータであり、このパラメータを精度良く表すことは重要である。図-3に本流出計算手法におけるピーク流量と遅れ時間の関係を示す。ここで言う遅れ時間とは斜面流出に寄与する雨のピークの発

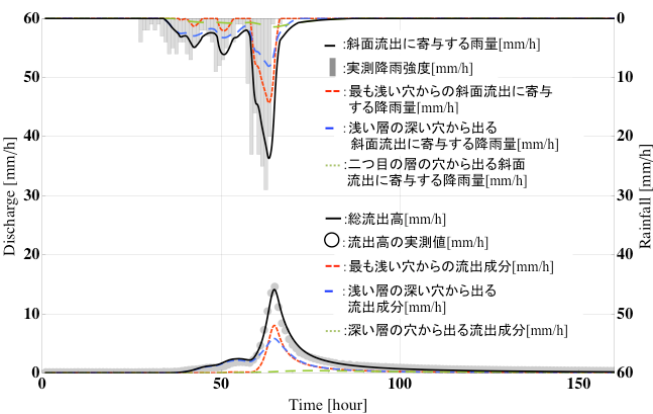


図-2 過去の降雨イベントから推定したパラメータによるハイドログラフの一例.

表-1 本計算手法によって得られたパラメータの分散.

鉛直浸透に寄与するパラメータ					
	a_{11}	a_{12}	a_{21}	b_1	b_2
分散	0.003	0.019	0.030	0.002	0.019

斜面流出に寄与するパラメータ					
	α_{11}	α_{12}	α_{21}	β_{11}	β_{12}
分散	0.002	0.004	0.044	0.004	0.007

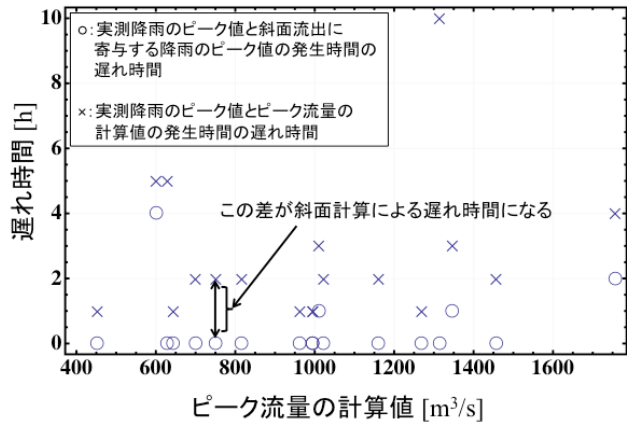


図-3 本流出計算手法におけるピーク流量と遅れ時間の関係.

生時間と実測の最大降雨強度発生時間との差 τ_1 、流出高のピークの計算値と実測の最大降雨強度発生時間との差 τ_2 のことを示す。流域面積が 200km^2 以上の草木ダム流域において降雨のピークが発生してからすぐに流域の末端まで流出のピークが到達するとは考えにくい。図-3に示すように、雨のピークが発生してから斜面流出に寄与する降雨のピークが発生するまでの遅れ時間はほとんど無いが、斜面計算によって実際には発生していると考えられる遅れ時間を表すことができる。図-3が示すように τ_1 と τ_2 の差から斜面計算による遅れ時間がわかる。以上のことから、本流出計算手法は、斜面計算をすることによって、遅れ時間を表現できると考えられる。

5. 再現計算結果

先に述べたように、草木ダム流域を対象に過去の降雨イベント 19 ケースを用いて流出パラメータを 19 セット推定した。そのパラメータセットを用いて 1 つのパラメータセットに対して推定したケース以外のケースを再現計算した(19×18 の 342 ケース)。次に再現計算の結果から流出モデルの再現精度を検証する。再現精度の検証には先述したように NS 値を用いる。NS 値は降雨流出計算の検証に用いられる指標であり、NS 値が 1 に近い程モデルの再現精度は良いとされており、NS 値が 0.7 以上でモデルの再現精度が良いとされる。図-4 に本流出計算手法によるピーク流量と NS 値の関係を示す。342 ケースの NS 値の平均値は 0.82、分散は 0.013 となった。図-4 に示すように、ピーク流量が大きくなるにつれ NS 値は 1 に近くなり、再現精度が良くなることがわかる。以上の結果から、19 ケースの降雨流出を最も精度よく再現できるパラメータセットを 1 セット見つけ、同様のことをタンクモデル、貯留関数法、山田らの提案した単一斜面における降雨流出の基礎式に関しても行なった。その再現計算結果のハイドログラフの一例を図-5 に、その再現計算結果から得られる NS 値の平均と分散を表-2 に示す。表-2 に示す通り、本流出計算手法の NS 値の平均値が 0.92 となり最も再現計算の精度が良いことがわかる。また、NS 値の分散も 0.0029 となることから、変化はほとんどなく、どのケースも NS 値が 1 に近く再現精度は良いことがわかる。他の流出モデルでの再現計算結果に関しては、タンクモデル、単一斜面における降雨流出の基礎式での再現精度は良好であると言える。しかし、貯留関数法も含めたそれらのモデルに比べ本流出計算手法は遅れ時間、鉛直浸透機構をそれぞれ良く表現できるため、再現精度に違いがあると考えられる。以上のことから、本流出計算手法は 1 つのパラメータセットで様々な降雨流出を概ね再現できることがわかった。

6. まとめ

以下に得られた知見をまとめる。

- 1) 本流出計算手法はタンクモデルに比べて降雨流出の遅れ時間を良く表すことができたことがわかった。
- 2) 草木ダム流域において、過去の 19 ケースの降雨で推定したパラメータの分散から本流出モデルの流出パラメータは降雨によってほとんど変化しないことがわかった。

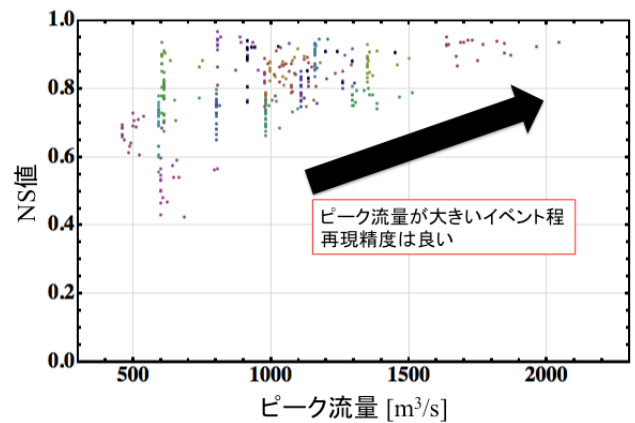


図-4 本流出計算手法における再現計算によって得たピーク流量と NS 値の関係。

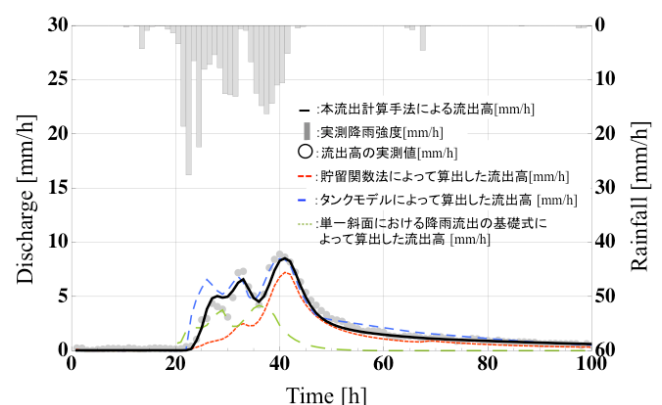


図-5 本流出計算手法、タンクモデル、貯留関数法、単一斜面における降雨流出の基礎式による再現計算結果の一例。

表-2 4 つの流出モデルの NS 値の平均と分散。

	NS値の平均	NS値の分散
本計算手法	0.92	0.0029
単一斜面における降雨流出の基礎式	0.80	0.0220
タンクモデル	0.79	0.0205
貯留関数法	0.54	0.6087

- 3) 草木ダム流域において 1 つのパラメータセットで様々な降雨流出を概ね再現できることがわかった。
- 4) 以上から本流出計算手法は、草木ダム流域において、ロバスト性が高いと評価できる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.