

山地流域における降雨継続時間と浸透を表す流出パラメータの関係

中央大学大学院 学生会員 ○吉見 和紘
 中央大学大学院 学生会員 青木 慶
 中央大学 正会員 岡部 真人
 中央大学 フェロー会員 山田 正

1. はじめに

地球温暖化に伴い、ハイエトの変化が予想される中、精度の高い降雨予測、流出解析が可能であれば、現状の河川計画やダム利用方法に関する評価の精度向上の一助となる。既往の論文により、山田らが提案する単一斜面における降雨流出の基礎式の流出パラメータは、物理的パラメータを用いて表現できる事が知られている。しかしながら、広大な流域において、計算に必要となるデータを観測・測量で得る事は実質上不可能である。そこで、著者らは流域特性を考慮する事が可能な流出パラメータを、過去の水文諸量より逆推定する試みをしてきた。

本研究では、ダム流域である草木ダム流域を対象とし、過去の水文諸量より単一斜面における降雨流出の基礎式の流出パラメータ及び有効降雨の逆推定を行い、流域特性を考慮した有効降雨の決定手法を提案する。

2. 単一斜面における降雨流出の基礎式

2-1. 単一斜面における降雨流出の基礎式

著者らは従来から、単一斜面における降雨流出の基礎式を提案している。図-1に降雨流出機構の概念図を示す。以下にこの基礎式を示す。山地流域における降雨流出は様々な形態を取るとし、水深のべき乗で表現する一般化された運動則(1)式を用いる。連続式として(2)式を用い、(2)式と(1)式より単位幅流量 q についての(3)式を得る。

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

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

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

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

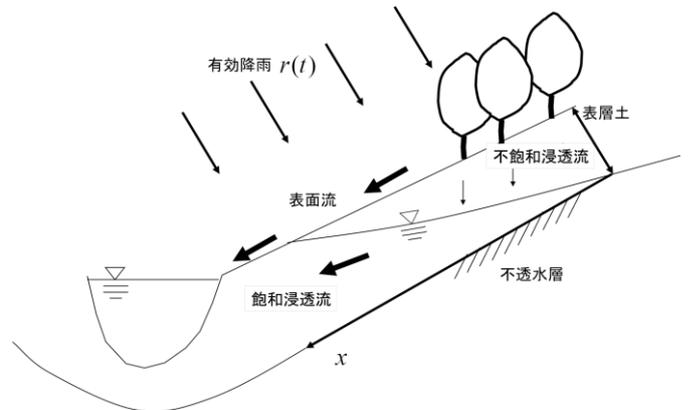


図-1 降雨流出機構の概要

流出寄与域(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。

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

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。

$$\frac{dq_*}{dt} = \frac{1}{1-\beta} \left(\frac{\alpha}{L} \right) q_*^\beta (r(t) - q_*) \quad (7)$$

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。

2-2. 流域特性を示すパラメータ α , m の物理性

著者らは、不飽和浸透理論と運動学的波理論の式展開を比較することで、(11)式及び(12)のように流域特性を表すパラメータ α , m を土壤・地形特性のみから決定できることを示している。

$$\alpha = \frac{k_s i}{D^{\gamma-1} w^\gamma} \quad (8)$$

$$m = \gamma - 1 \quad (9)$$

ここに、 k_s :飽和透水係数[cm/s], i :斜面勾配, D :表層土層厚[mm], γ :土壤の透水性を表す無次元パラメータ, w :有効空隙率である。

キーワード 単一斜面における降雨流出の基礎式, 有効降雨, 降雨継続時間, 流域時間特性関数, 遅れ時間
 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:03-3817-1807

E-mail:kazu-aknnny@civil.chuo-u.ac.jp

3. 有効降雨の表現

有効降雨の推定手法は、初期一括損失差引法、一定比・量差引法等これまで様々に提案されている。

本研究では、有効降雨をより簡易的、かつ流域特性を考慮して表現するため、降雨の遅れ時間及び浸透に関する流出パラメータを用いて有効降雨を定義している。以下に概要を示す。降雨の遅れ時間を考慮するため、(10)式に示す単位階段関数 (UnitStep) を乗じ、さらに浸透に関わる流出パラメータからなる指数関数系を乗じて有効降雨を表現している。

以下 (11) 式を有効降雨関数とする。

$$U(x) = \begin{cases} 0 & (x < 0) \\ 1 & (x \geq 0) \end{cases} \quad (10)$$

$$r(t) = R(t) \cdot U(t-d) \cdot (1 - e^{-f(t-d)}) \quad (11)$$

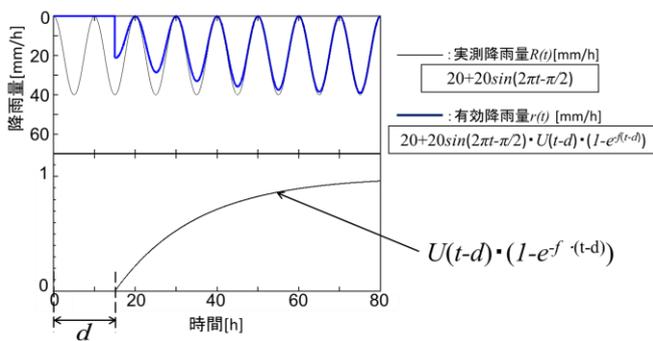


図-2 本研究における有効降雨の概念

ここに、 $R(t)$: 実測の時間降雨データ、 d : 降雨開始から流出開始までの遅れ時間 [hour]、 f : 浸透に関する流出パラメータ [1/hour] である。

図-2に本研究における有効降雨の概念を示す。実現象では、降雨開始から流出開始までには、タイムラグがあり、その時間は洪水以前の土壌水分量や流域の土壌特性から決まると考えられる。

本研究では、このタイムラグと浸透に関する流域特性を流出パラメータとし、(11)式で示す有効降雨関数を定義した。

また、後ほど詳細を述べるが、本研究において推定の対象とするパラメータは、有効降雨関数の遅れ時間を表現する d 、浸透に関する流出パラメータ f である。

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 200km^2 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事が示されている。

よって、本研究では土壌地形特性値は空間的に一律に分布していると仮定して検証した。

4-1. 検討対象流域

対象流域は流域面積 254km^2 の利根川水系草木ダム流域であり、パラメータの推定に使用した降雨データは、1985年6月から2009年8月までの総降雨量 100mm 以上の降雨イベント 24 ケースである。

4-2. 流出パラメータの推定

(7) 式中の α 、 β 及び斜面長 L は既往の研究により、土壌地形特性から物理的に与えられる事が知られている。本研究では、(8)式に示す α の土壌・地形特性を示すパラメータ、斜面長 $L = 30[\text{m}]$ 、抵抗則 (流出パラメータ) $m = 4$ 、表層土層厚 $D = 200[\text{mm}]$ 、有効空隙率 $w = 0.42$ 、飽和透水係数 $k_s = 0.01[\text{cm/s}]$ 、斜面勾配 $i = 15^\circ$ とする。

先にも述べたように、実測流量データより逆推定する流出パラメータは降雨開始から流出までの遅れ時間 d 及び土壌の浸透に関するパラメータ f である。

逆推定をするにあたり、流出開始までの流出高ハイドログラフの微小な変動が、逆推定の結果に大きな影響を及ぼさないように、ハイドログラフ立上りまでの流出高を平坦化し、一定値とした。また、基底流出をハイドログラフ立上り時の流出高から、計算対象時間まで一定値をカットして逆推定を行った。

図-3、図-5に、降雨開始から終了までの遅れ時間 d 及び浸透に関する流出パラメータ f を草木ダム流域において推定した結果を示す。

図-3に示すように、初期流量と推定した遅れ時間 d の関係にはばらつきがある。また、遅れ時間 d が限りなく 0 に近い値を取る降雨が存在する。これは、逆推定に使用した実測流出高データの微妙な変動に反応した推定結果であると思われる。物理現象の中で、山地を流れる雨水の多くが、降った直後に流量観測地点に到達するとは考えにくいいため、限りなく 0 に近い値を取る場合に関しては、遅れ時間 d の推定に関して検証の余地があると言える。また、図-4の累積降雨量と累積損失雨量の関係からもわかるように、草木ダム流域では、降雨開始から流出開始までの累積降雨量は、 $30\text{mm} \sim 50\text{mm}$ 前後であり、遅れ時間 d が 0 を取りうるような降雨は考えにくい。

図-5に示すように、降雨継続時間とパラメータ f の関係に着目すると、降雨継続時間が長くなるに連れてパラメータ f の値が指数関数的に減少する傾向

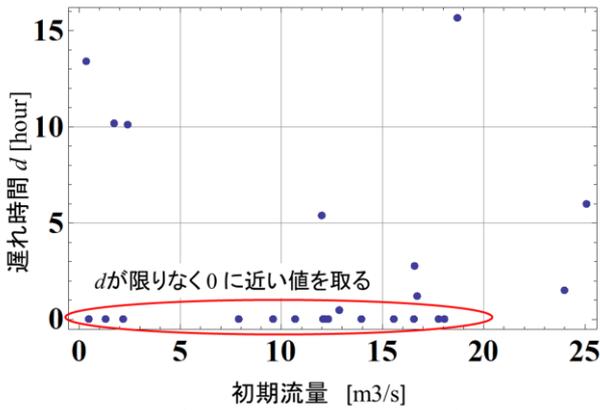


図-3 初期流量と遅れ時間の関係

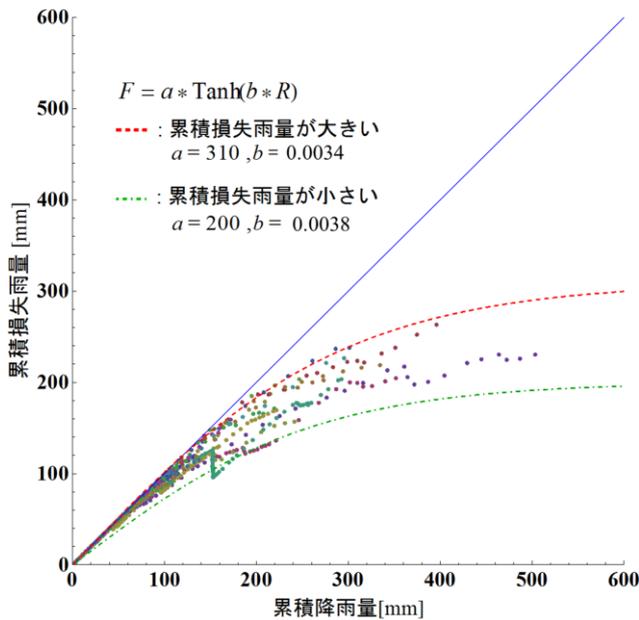


図-4 草木ダム流域における
累積降雨量と累積損失雨量との関係

にある事がわかった。また、パラメータ f の取りうる値は、0.01~0.2 である事がわかった。

4-3. 流域特性を考慮した有効降雨

この結果を受け、著者らは、1つの降雨イベントにおいても同様な関係にあると仮定し、以下のような検証を行った。(12)式に示すように、浸透に関する流出パラメータ f は流域特性を考慮した時間の関数であるとし、(12)式のような指数関数系を定義し、降雨継続時間-パラメータ f の関係を回帰した。これにより、これまで洪水毎に1つの値を定めてきたパラメータ f を、流域固有の時間の関数として定める事が可能となった。

$$f(t) = e^{-at} + b \quad (12)$$

このときの a, b は回帰するときのパラメータであり、流域固有の値である。

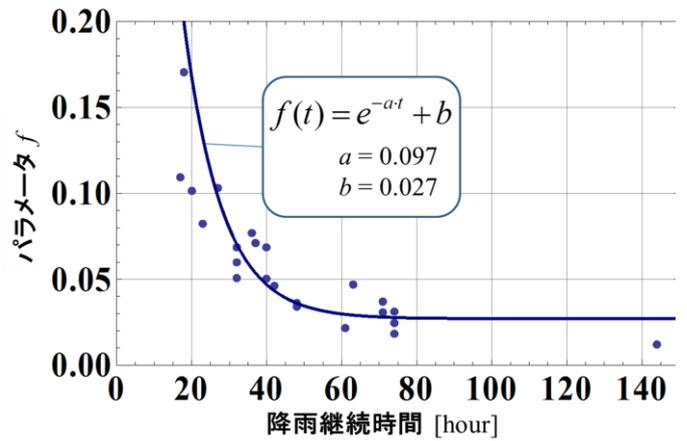


図-5 一雨における降雨継続時間と
パラメータ f との関係

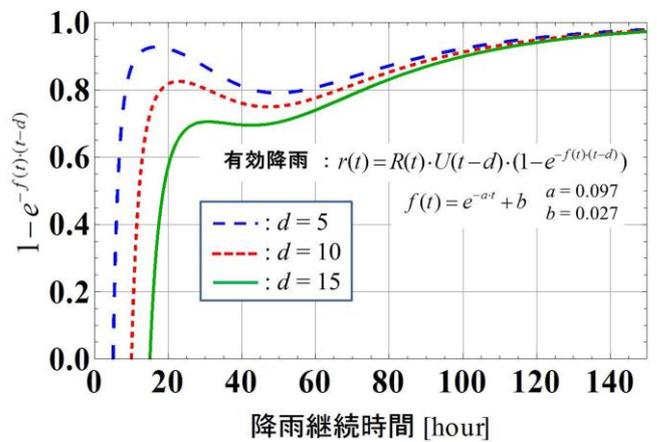


図-6 降雨継続時間と指数関数系との比較

草木ダム流域の場合は、 $a = 0.097, b = 0.027$ である。以上より、(11)式中の指数関数部分は、以下のように置き換える事が可能となり、二重指数関数系で表現できる。ここに、流域時間特性関数と定義する。

$$1 - e^{-f(t-d)} \rightarrow 1 - e^{-f(t)(t-d)}$$

図-6に示すように、遅れ時間 d が長くなるにつれ、流域時間特性関数は流出開始から緩やかに立ち上がるようになり、流域時間特性関数の最初のピーク値は減少する。

5. 流出計算結果

先に述べたように、浸透に関する流出パラメータ f は、降雨継続時間との関係から、流域時間特性関数として定義可能である事を示した。また、降雨開始から流出開始までの遅れ時間 d は、実測流出高データの微小な変動に影響を受け、精度良く推定出来な

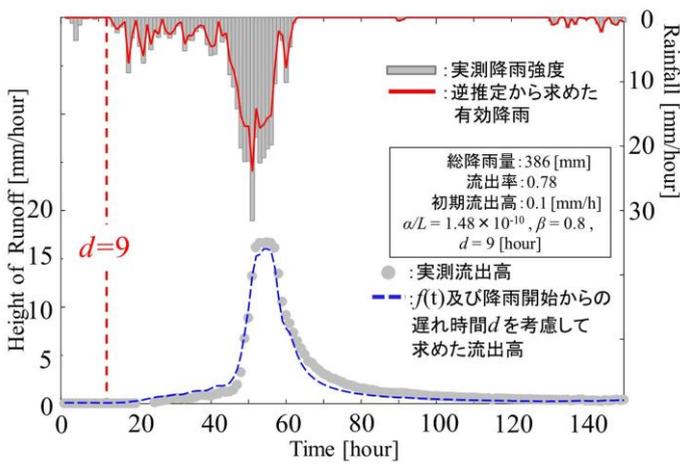


図 7-1 逆推定から求めた流出高ハイドログラフ(Case1)

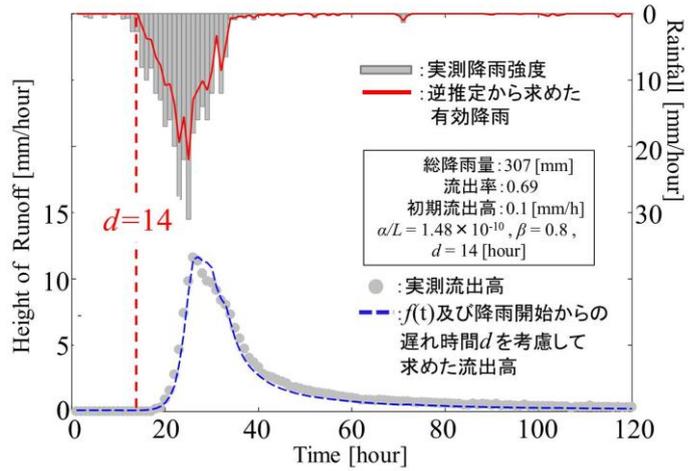


図 7-2 逆推定から求めた流出高ハイドログラフ(Case2)

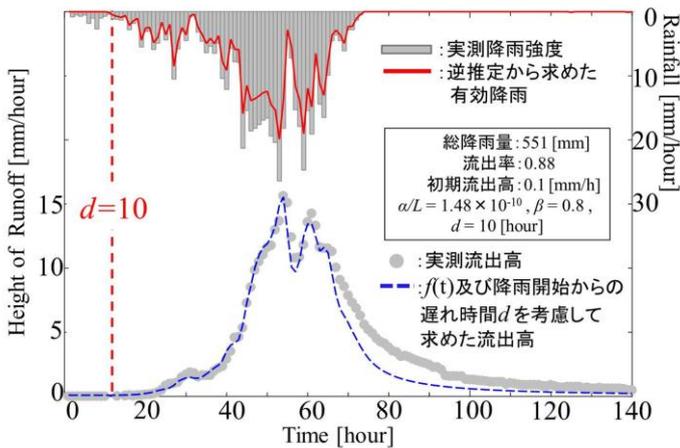


図 7-3 逆推定から求めた流出高ハイドログラフ(Case3)

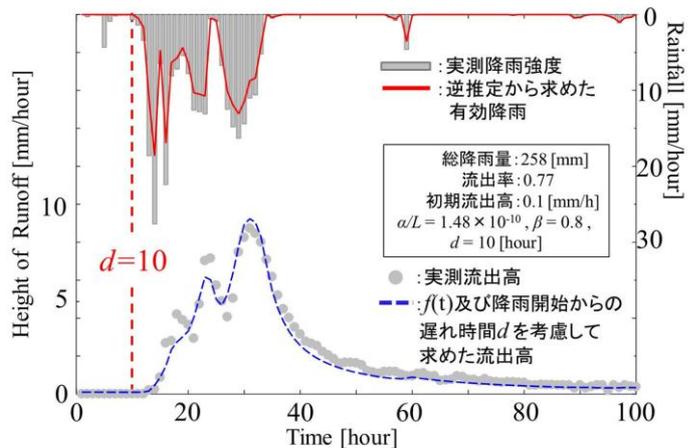


図 7-4 逆推定から求めた流出高ハイドログラフ(Case4)

い事を示した。以上より、遅れ時間 d に関しては、実測流出高データと実測降雨データの関係から、人為的に値を与え、流出計算を行った。24の降雨イベントで計算を行った。その内、代表的な4つの洪水の計算結果を図7-1, 2, 3, 4にを示す。どの再現計算においても、ハイドログラフ逡減部の流出高を過小に推定する傾向があるが、ハイドログラフの立上り、ピーク値及びピーク発現時間の再現性は極めて良好である事がわかった。

6. 結論

本研究では、実測流出高から有効降雨を逆推定した。また、降雨継続時間が長くなるにつれて、浸透に関する流出パラメータが指数関数的に減少する事を示し、流域時間特性関数を定義した。さらに、遅れ時間と土壌特性から、有効降雨波形を決定出来る事を示し、ハイドログラフの再現性が良好である事を示した。以下に得られた知見を列挙する。

- 1) 降雨継続時間が長くなるにつれて、浸透に関する流出パラメータが指数関数的に減少する事を示した。
- 2) ハイドログラフ逡減部の流出高を過小に推定する傾向があるが、ハイドログラフの立上り、ピーク値及びピーク発現時間の再現性は極めて良好である。
- 3) 1~2つの山を持つ流出高ハイドログラフの波形での再現性は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，土木学会水理講演会論文集，Vol. 47, pp. 259-264, 2003
- 2)呉修一：中央大学博士論文 降雨流出モデルの普遍的適用にむけた物理的アプローチ, 2008年3月
- 3) Kure,S and Yamada,T. : A STUDY ON THE NONLINEARITY OF RUNOFF PHENOMENA AND ESTIMATION OF EFFECTIVE RAINFALL , APHW,2004