

降雨特性と有効降雨の関係に関する研究

中央大学大学院学生会員 ○山上 訓広
 中央大学大学院学生会員 吉見 和紘
 中央大学理工学部フェロー会員 山田 正

1.はじめに

降雨流出機構を明らかにする事は水資源の確保、洪水・土砂災害の対策を考える際に重要な知見となる。しかし、降雨特性や地形特性が空間的に分布しているため、降雨流出現象は一般に複雑である。流出解析を行う上で流出に寄与する降雨、すなわち、有効降雨の決定は必須であるが流出現象は非線形現象であり、有効降雨を決定することは難解である。本研究は有効降雨を適切に与えるべく、降雨形態が有効降雨の推定に与える影響を明らかにすることを目的としている。

2. 本研究における降雨流出計算の概要

2-1. 流出計算及び対象流域の概要

著者らは本研究において雨水が河川に至るまでの過程の斜面流出計算及び、雨水の河川流出に寄与する有効降雨の推定を行った。対象流域は利根川水系神流川流域の下久保ダム流域(流域面積323km²)とし、降雨流出再現計算を行った。

2-2. 有効降雨の算定

山田・山崎¹⁾は従来から有効降雨の算定手法として流域土壌の保水能の分布を求め保水能の理論を提案している。以下、山田・山崎¹⁾の保水能の理論の概要について述べる。降雨開始後土壌特性によって決まるある値まで雨水は毛細管力に支えられ保水される。もしくは、窪地に貯留し直接流出に寄与しない。このある値を保水能 h_c と定義する。また流域での保水能分布を $S(h_c)$ とする。このとき、有効降雨量 $r_e(t)$ 及び累積損失雨量 $F(R)=\int r_e dt$ は保水能分布を用いて(1)、(2)式の様に表示することが出来る。この第一種Volterra型積分方程式はラプラス変換を用いる事で解を得る事が出来、保水能分布 $S(R)$ に関して(3)式の解を得る。ここでディラックのデルタ関数 $\delta(R)$ の物理的意味は流域の不浸透面積部分の割合である。本研究は山地流域を対象としているため、降雨損失量を表現するとして(4)式を用いた。このようにして求めた保水能分布より累積降雨量に応じた流出への寄

$$r_e(t) = r(t) \int_0^R S(h_c) dh_c \quad (1)$$

$$F(R) = R - \int_0^R (R - h_c) S(h_c) dh_c \quad (2)$$

$$S(R) = -\frac{d^2 F}{dR^2} + \left[1 - \frac{dF}{dR} \Big|_{R=0} \right] \delta(R) \quad (3)$$

与率は(5)式に示す様に算出される。

$$F = a * \text{Tanh}(b * R) \quad (4)$$

$$f_1(t), f_2(t) = \int_0^{R(t)} S(h_c) dh_c = 1 - \frac{4ab}{(e^{-bR} + e^{bR})^2} \quad (5)$$

2-3. 単一斜面における降雨流出計算の基礎式の導出

単一斜面における降雨流出の基礎式の導出を行っており、以下に理論の概要について述べる。(6)式は斜面流下方向を対象とした一般化された単一斜面からの降雨流出を表す4元連立常微分方程式である。表面流、中間流、鉛直浸透流及び湛水深に関する常微分方程式からなる。表面流と中間流を連結する鉛直浸透流に関しては、山田²⁾が従来から提案しているGreen-Ampt理論に基づく鉛直浸透流を用いる。高棹タイプとHortonタイプの表面流発生機構を考慮する。(6)式に示す4元連立常微分方程式を解くことにより斜面からの流出計算を行う。ここでそれぞれ、 r_e :有効降雨強度[mm/hour], a_0, β :流出パラメータ, q_s :表面流流出高[mm/hour], q_* :中間流流出高[mm/hour], q_0 :鉛直浸透流[mm/hour], θ_s :土壌の飽和水分量, θ_i :土壌の初期水分量, h_s :湛

$$\left. \begin{aligned} \frac{dq_s}{dt} &= a_s q_s^{\beta_s} (r_e - q_0 - q_s) \\ \frac{dq_*}{dt} &= a_0 q_*^{\beta_*} (q_0 - q_*) \\ \frac{dq_0}{dt} &= (r_e - q_0) \frac{q_0 - k_s}{h_s + h_k} - \frac{q_0}{\theta_s - \theta_i} \frac{(q_0 - k_s)^2}{k_s (h_s + h_k)} \\ \frac{dh_s}{dt} &= r_e - q_s - q_0 \end{aligned} \right\} (6)$$

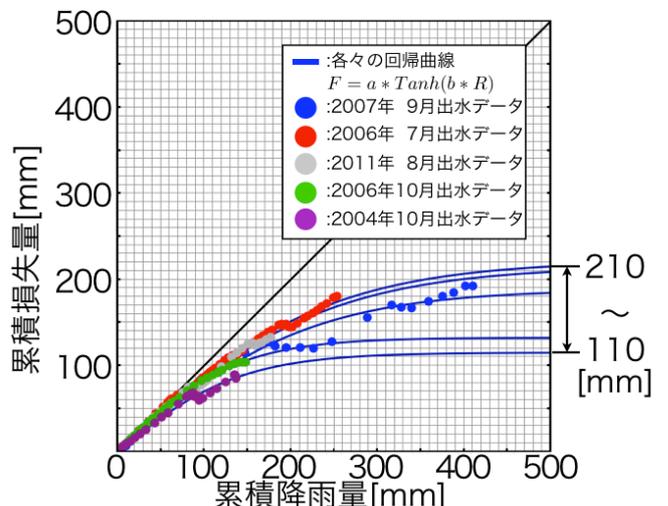


図-1 累積降雨量と累積損失量、及び各々の回帰曲線[近年5出水]

キーワード：降雨流出，有効降雨，保水能

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：yamagami-kunihiro@civil.chuo-u.ac.jp

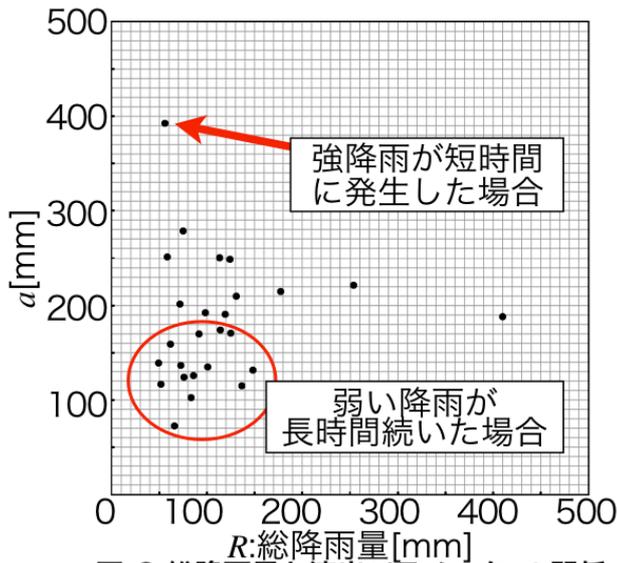


図-2 総降雨量と流出パラメータaの関係

水深[mm], h_k : 湿潤線での毛管負圧水頭[mm]である。

3. 有効降雨パラメータの推定

流出計算対象流域の下久保ダム流域で得られた2002年から2012年における25出水イベントを抽出し、流域平均降雨強度及び流量データから有効降雨に関するパラメータを回帰した。

3-1. 有効降雨パラメータの推定結果

有効降雨を決定するパラメータa, bの推定結果を図-1に示す。回帰させる式は山地流域において用いられる $F=a*\tanh(b*R)$ を用いた。ここにF: 累積損失雨量[mm], R: 累積降雨量[mm]である。総降雨量と有効降雨パラメータaの回帰結果を図-2に示す。図中の円内のデータが示す様に、弱い降雨が長く続いた場合、損失雨量が小さいことを明らかにした。しかし短時間の出水イベントの損失雨量には幅がある。総降雨量が少ない降雨のパラメータaは、その降雨形態によって大きく影響を受け幅を持ったと考えられる。また、回帰結果から流出パラメータa, bには反比例の関係にある事が分かった。

4. 降雨形態及び総降雨量が有効降雨パラメータaの推定に与える影響

回帰させる出水イベントの降雨形態及び総降雨量の大小が有効降雨パラメータaの推定に与える影響について検証を行った。総降雨量の大きい10出水イベント(パターン1)及び、総降雨量の小さい10出水イベント(パターン2)からa及びbの推定、有効降雨量の算出を行い、斜面流出計算結果と実測流量から出した実測流出高と比較することで流出計算の精度を評価した。一例として平成17年洪水の計算結果を図-3に示す。図-3の計算結果のピーク流出高着目すると、パターン1のパラメータを用いた計算結果の方が実測値

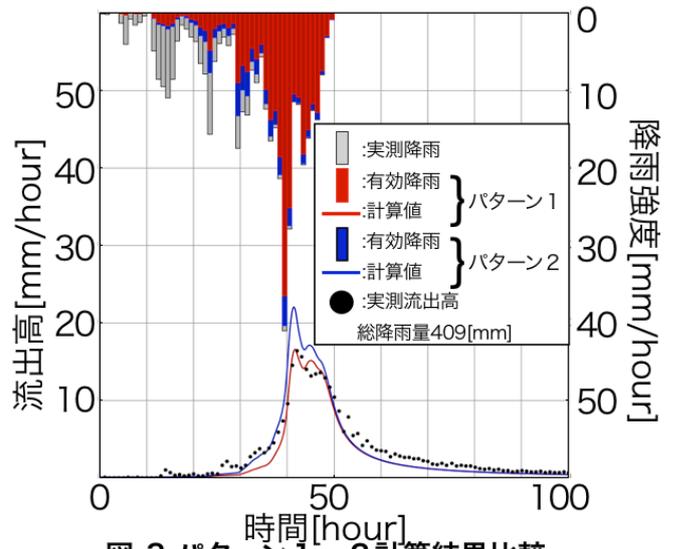


図-3 パターン1・2計算結果比較

に近いことが分かる。この時、推定した浸透に関する流出パラメータaは190[mm]である。降雨開始時に極めて少量ずつではあるが河川へ流出している。総降雨量の大きい出水データから推定した有効降雨に関するパラメータを用いることで実測流出高を再現出来ることを示した。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- ・流出パラメータaの値は総降雨量ではなくその降雨形態によって大きく影響を受ける事を示し、弱降雨が長時間継続した場合50~150[mm]の値を取る事を示した。
- ・流出パラメータaとbは反比例の関係にある事を示した。
- ・総降雨量の大きい出水データから推定した流出パラメータを用い流出計算を行い、流出高ハイドログラフの立ち上がり時、ピーク時、逓減時において概ね実測値を再現出来ることを示した。

謝辞

本研究は文部科学省(課題番号: 24656297)の支援を受けている。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1)山田正, 山崎幸二: 流域における保水能の分布が流出に与える影響について, 土木学会水理講演会論文集, Vol. 27, pp. 385-392, 1983.
- 2)呉修一, 山田正, 吉川秀夫: 有効降雨の推定に関する研究, 土木学会論文集B, Vol. 65 No. 3, 231-245, 2009.
- 3)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, Vol49, pp. 169-174, 2005.

キーワード: 降雨流出, 有効降雨, 保水能

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: yamagami-kunihiro@civil.chuo-u.ac.jp