

降雨流出現象における非線形性及び有効降雨の逆推定に関する研究

中央大学大学院 学生員 ○呉 修一 中央大学大学院 学生員 土屋 修一
水資源開発公団 正会員 佐藤 直良 中央大学理工学部 正会員 山田 正

1.はじめに：著者らはこれまでに山地流域における降雨流出計算手法を提案してきた．また，降雨流出現象において見られる非線形性の特性について調べると共にハイドログラフからの有効降雨の逆推定が可能であることを，ハイドログラフをガンマ分布形の関数で与えることによって示した．今回の論文では降雨流出現象における非線形性を流出率の観点から見るとともに実測流量データを用いても有効降雨の逆推定が可能であることを示す．

2.単一斜面における降雨流出の基礎式の導出：様々な流出形態に対応させるため一般化された運動則を(1)式とし，連続式は(2)式で表す．(1)式を(2)式へ代入し q について整理すると(3)式の Kinematic Wave 方程式が得られる．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]， $r(t)$ ：有効降雨量[mm/h]， α ， m は流域の流出特性を表すパラメータである．直接流出は流出寄与域(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，(4)式の変数分離形の近似式が仮定できる．ここに， q_* ：流出高[mm/h]である．斜面長 L の末端で考え $x=L$ とすると(3)式は(5)式の常微分方程式に変形できる．

$$v = \alpha h^m, \quad q = vh = \alpha h^{m+1} \quad (1), \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \quad (2), \quad \frac{\partial q}{\partial t} + a q^{\frac{m}{m+1}} \frac{\partial q}{\partial x} = a q^{\frac{m}{m+1}} r(t) \quad (3), \quad q(x, t) \cong x q_*(t) \quad (4)$$

$$\frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (r(t) - q_*) \quad (5), \quad a = (m+1) \alpha^{\frac{1}{m+1}}, \quad a_0 = a L^{\beta-1} = (m+1) \alpha^{\frac{1}{m+1}} L^{\frac{-1}{m+1}} \quad (6), \quad \beta = \frac{m}{m+1} \quad (7), \quad \alpha = \frac{k_s \sin i}{D^{\gamma-1} w^\gamma},$$

$$\gamma = m+1 \quad (8), \quad \beta = \frac{m}{m+1} = \frac{\gamma-1}{\gamma} \quad (9), \quad r(t) = q_*(t) + \frac{1}{a_0 q_*(t)^\beta} \frac{dq_*(t)}{dt} \quad (10), \quad v = \frac{1}{n} i^{\frac{1}{2}} h^m \quad (11), \quad a_0 = (m+1) \left(\frac{\sqrt{i}}{nL} \right)^{\frac{1}{m+1}} \quad (12)$$

(5)式は一般化された単一斜面からの降雨流出を表す基礎式となる．山田(2003)は(3)式の Kinematic Wave 方程式と鈴木(1984)，窪田(1988)らの不飽和浸透理論とを比較することにより(8)，(9)式のように流出パラメータを土壌，地形特性より決定できることを示した．ここに，図-1 初期流出高と流出高の関係 D ：表層土層厚[cm]， i ：斜面勾配， k_s ：飽和透水係数[cm/s]， w ：有効空隙率， γ ：透水性を表す無次元パラメータである．

3.流出パラメータの物理特性：流出形態が飽和ダルシー則，Manning 則，層流表面流，不飽和浸透流であるとして β の値を推定する．運動則が飽和ダルシー則であるとすると(1)式中の $m=0$ より(7)式を用いて $\beta=0$ ，Manning 則であるとすると $m=2/3$ より $\beta=0.4$ ，層流表面流であるとすると $m=2$ より $\beta=0.7$ ，不飽和浸透流であるとすると γ の値は土質，土壌条件によって3～10までの幅広い値をとるので(9)式より $\beta=0.6 \sim 0.8$ となる．以上より流出パラメータ β は0～1位の値をとることがわかる．

4.降雨流出現象における非線形性の特性：山田(2003)は降雨流出現象における非線形性の特性を集中定数系方程式(5)式を各種条件で解くことにより示した．その概要を図-1,2,3に示す．図-1は降雨流出現象における土壌の初期水分量に対する非線形性であり，初期流出高のわずかな違いがピーク流出高では大きな違いとなることを示した．図-2は降雨強度に対する非線形性であり，単純に降雨強度を2倍にしても流出高は2倍ではなく3倍近くになっている．図-3は斜面長に対する非線形性であり，線形理論では斜面長は流出高に寄与しないが，斜面長の変化に伴い流出高が非線形的に変化していることがわかる．

5.流出率における非線形性の特性：流出率は流域の水文諸量の中でも最も重要な項目の一つであり，端的に流域の流出特性を表す値である．ここでは集中定数系方程式に様々な降雨を与え求めた流出高を降雨終了後48時間積分したものを総流出量として流出率を求めた．流出パラメータとしては山田(2003)が用いた土壌，地形特性と同様に斜面長 $L=10$ [m]，表層土層厚 $D=20$ [cm]，勾配 $i=20^\circ$ ，飽和透水係数 $k_s=0.0035$ [cm/s]，有効空隙率 $w=0.42$ ，透水性を表す $\gamma=5$ ，初期流出高

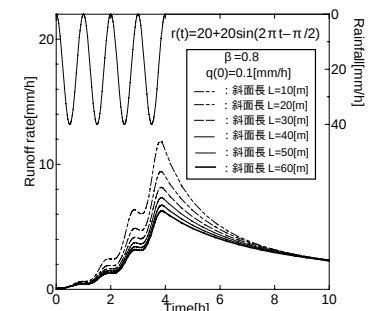
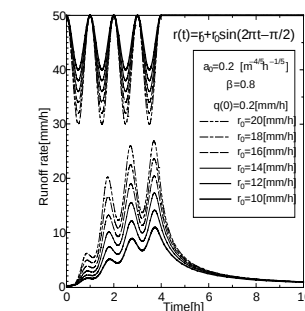
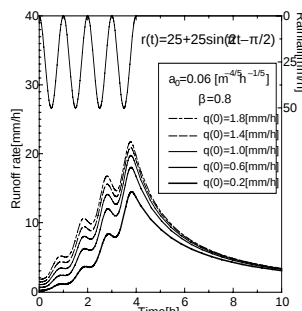


図-1 初期流出高と流出高の関係

図-2 降雨強度と流出高の関係

図-3 斜面長と流出高の関係

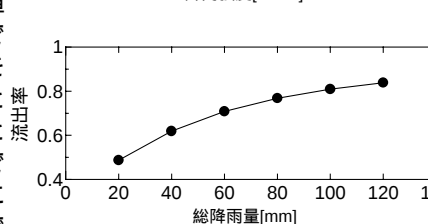
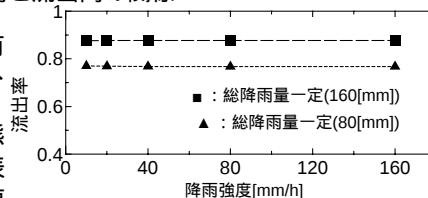


図-4 降雨強度と流出率の関係

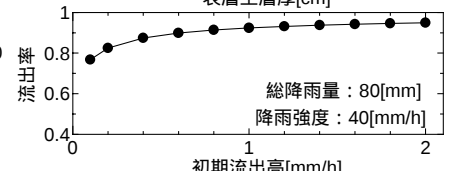
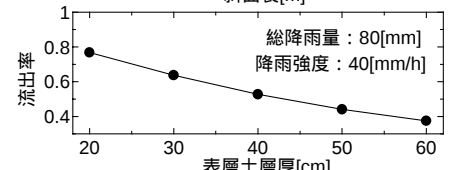
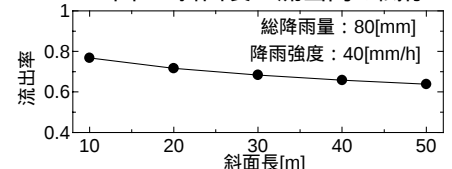


図-5 土壌，地形特性と流出率の関係

キーワード：非線形性，降雨流出計算手法，有効降雨，流出率

連絡先：〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部土木工学科 Tel03 - 3817 - 1805

$q_{*0}=0.1$ [mm/h] を基本として決定した．降雨強度及び総降雨量を変化させた場合を図-4 に示す．図-4 より総降雨量の線形増加に伴い流出率が非線形的に増加していることがわかる．また，降雨強度を変化させた場合流出高ピーク値は大きく変化するが，流出率は全く変わらない事がわかった．次に初期流出高，斜面長及び表層土層厚を変化させた時の流出率を図-5 に示す．各種土壌，地形条件の違いでも流出率が大きく異なることがわかる．

以上，図1～5より降雨流出現象において単一斜面における土壌，地形特性及びインプットとしての降雨形態のわずかな違いによりアウトプットとしての流出高はそれぞれ大きく変化することがわかる．

6. ハイドログラフからの有効降雨の逆推定：本論文において提案している降雨流出計算を行うためにも，土壌の保水能力を評価する上でも有効降雨の算定は不可欠である．山田ら(1981,1983,1985)は土壌の保水能分布の時間変化，空間分布を考慮した統計分布モデルと呼べる有効降雨の算定手法を提案している．今回は実測ハイドログラフからの有効降雨の逆推定を試みる．用いるデータとしては吉野(1983)が東京都多摩ニュータウンにて行った散水実験のデータを用いる．

6.1 散水実験概要：実験対象地としては多摩ニュータウン内の粗造成地にスプリンクラーを用い全体を均一に散水した．粗造成地は 20[m] × 20[m] の勾配約 3° の粗い裸地である．土壌特性は盛り土のため関東ローム，砂，粘土，礫の混合土であり，かなり強く締め固めが行われている．かなりの広範囲において表面流の発生が確認されている．

6.2 散水実験結果：散水実験結果の代表的なハイドログラフを 2 ケース図-6,7 に示す．図-6 は散水実験開始以前に無降雨日が続くため，流出高の増加は非常にゆるやかで流出開始も遅い．図-7 は図-6 の 1 日後に行ったため土壌が湿潤で流出開始が早く，流出高の増加も急である．

これらの実測流出高データを用いて有効降雨の逆推定を行う．

6.3 有効降雨の逆推定：降雨流出を表す基礎式である集中定数系方程式(5)式を変形すると降雨関数である(10)式を表現することができる．(10)式中の微分項は実測流出高データを数値補間することにより計算した．また運動則は表面流が発生しているため Manning 則(11)式を用い， a_0, β は(12),(7)式で決定される．ここに， n ：Manning の粗度係数である．粗度係数は吉野(1983)が求めた 0.1 の値を用いた．この時，抵抗則を表現する流出パラメータ m の値は Manning 則を用いているため 2/3 の値を用いたが初期部分で非常に大きな値を示してしまった(図-6,7-A)，しかし神田ら(1979)によると表面流が薄層流であるとするとき $m=1 \sim 2$ の値をとる．そこで抵抗則 m を 2/3, 2, 5 に変えて降雨の逆推定を行った．求めた結果を図-6-A, B, C 及び図-7-A, B, C に示す．抵抗則が $m=2/3$ の時の有効降雨は初期及びハイドログラフ逡減部に非常に大きな正負の値を示すが， $m=2, 5$ の時はかなり適正の形状をとり，実測ハイドログラフとほぼ同形の形状を示した．求めた有効降雨のほうが散水強度より遅く小さく現れ，徐々に増加していることがわかる．この形状は $m=5$ に近づく程，上下逆にすると Horton, Philip らの浸透量を表現したものとほぼ同形と見える．このように，実測流出高データを用いて有効降雨の逆推定が可能であることを示したと考える．また，薄層流である表面流の抵抗則については $m=2/3$ では無く 2～5 位の値を取らなければならない可能性を示したと考える．

7. まとめ：本論文は降雨流出過程に現れる非線形現象の特性について述べると同時に，実測ハイドログラフから有効降雨を逆推定できることを示した．ここで得られた知見を述べる．1) 単一斜面での運動則を一般化しつつ集中化した流出計算手法を提案した．2) 降雨流出現象における非線形性の特性について解明した．3) 流出率は総降雨量，土壌，地形特性によって大きく変化することがわかった．4) 実測ハイドログラフから有効降雨の逆推定が可能であることを示した．

謝辞：本研究において降雨の逆推定を行うにあたり，散水実験より得られた貴重なデータを土木研究所(現香川大学教授)吉野文雄先生より頂いた．ここに，深甚なる感謝の意を示す．

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) 吉野文雄：現地実験による表面流出の研究，土木学会論文報告集，第 330 号，pp. 59-68, 1983. 3) 神田徹，喜久里政宏：土木学会水理講演会論文集，Vol. 23, pp. 339-346, 1979

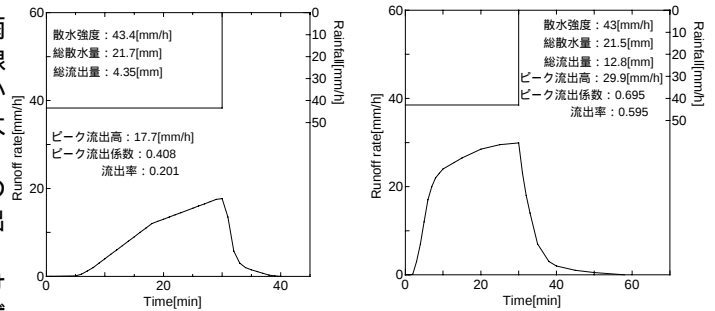


図-6 散水実験結果

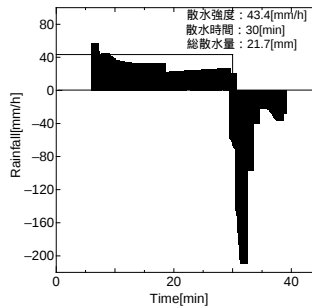
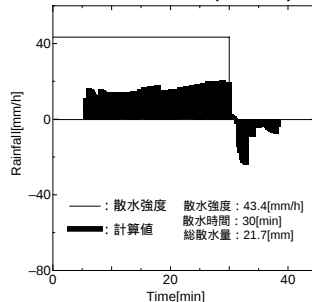
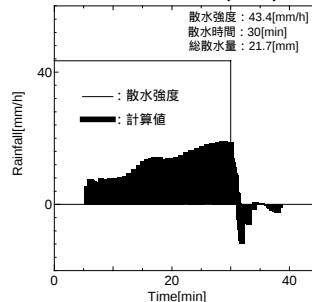
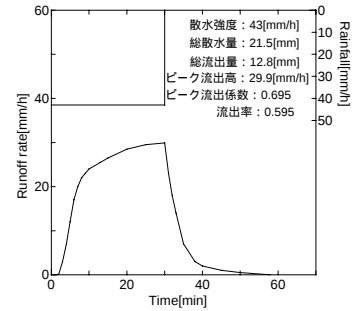
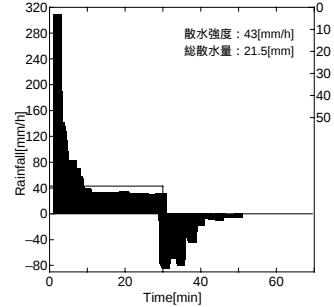
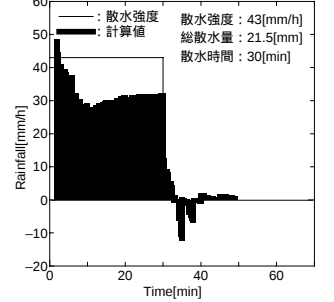
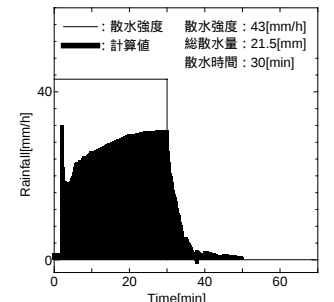
図-6-A 降雨の逆推定より求めた有効降雨($m=2/3$)図-6-B 降雨の逆推定より求めた有効降雨($m=2$)図-6-C 降雨の逆推定より求めた有効降雨($m=5$)

図-7 散水実験結果

図-7-A 降雨の逆推定より求めた有効降雨($m=2/3$)図-7-B 降雨の逆推定より求めた有効降雨($m=2$)図-7-C 降雨の逆推定より求めた有効降雨($m=5$)