

広島大学工学部 正員 金丸昭治

〇 三島隆明

1. はしがき、有効な水利計画の立案に際して、まず流域における雨水の流動機構を明らかにし、さらに適確でしかも簡易な流出予測法を確立することが必要であることは周知のとおりである。筆者らは降雨終了後の流出現象に着目してその逓減変化と流域の特性量との相関を明らかにすることを目標とした研究を継続中であるが、本稿では、流出逓減曲線の双曲線近似の妥当性および双曲線式に含まれる係数 A_1 と流域特性との関係について理論的、実験的に考察した結果について述べる。

2. 理論的考察 単純モデル化した単位流域からの降雨終了後の流量減衰時における流出現象は(1)式のように表わされ、これを初期条件 $h(0, x) = \varphi(x) = \frac{D}{L}x$ および境界条件 $h(t, A_0t) = \psi(t) = 0$ のもとで解いた解は(2)式のようになることはすでに発表したとおりである。¹⁾

$$\frac{\partial h}{\partial t} + A_0 \frac{\partial h}{\partial x} = B_0 \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \quad \text{--- (1)}$$

$$h(t, x) = \frac{D}{L} \sqrt{\frac{B_0 t}{\pi}} \left\{ e^{-\frac{(L+x-A_0t)^2}{4B_0t}} - e^{-\frac{(L-x+A_0t)^2}{4B_0t}} \right\} - \frac{D}{L}(x-A_0t) \left\{ 1 - \Phi\left(\frac{L+x-A_0t}{\sqrt{2B_0t}}\right) - \Phi\left(\frac{L-x+A_0t}{\sqrt{2B_0t}}\right) \right\} \quad \text{--- (2)}$$

ここに、 h は垂直断面の水深、 t は時間、 x は流下方向の距離、 A_0 、 B_0 はそれぞれ例は移流速度および拡散係数で代表される流域の特性量、 D は流域末端の見掛け上の水深、 L は流域の長さ、 $\Phi(x)$ は累積分布函数である。また、(2)式を用いて誘導される無次元流量函数式 $Q/Q_0 = f(i, D/L, B_0/A_0D, A_0t/D)$ を用いて各種の流減状態について流量逓減変化を調べたところ、その変化は厳密には単純な函数で表わすことはできないが、解析対象期間をある程度限定すれば、(3)式のような双曲線によって近似できるようなのである。問題は近似式を使う場合に、その適合度をいかなる方法で判定するかという

$$Q/Q_0 = \frac{1}{A_1 \left(\frac{A_0t}{D}\right) + 1} \quad \text{or} \quad \frac{1}{A_1 t + 1} \quad \text{--- (3)}$$

$$E_1 = \sqrt{\frac{\sum \left\{ 1 - \frac{(Q/Q_0)_c}{(Q/Q_0)} \right\}^2}{N}} \times 100 \quad \text{--- (4)}$$

ことであるが、絶対的な判定より相対的な比較判定を主眼にするならば、(4)式で示されるような2乗平均相対誤差 E_1 (%)を用いて判定すれば良いと考えられる。ここに、 Q は流量、 Q_0 は減衰開始時の Q であり、 $(Q/Q_0)_c$ は最小2乗法によって求めた A_1 あるいは A_1 の値を(3)式に代入して求めた Q/Q_0 の値、 N は計算対象個数である。

そこで、 $Q/Q_0 = f(i, D/L, B_0/A_0D, A_0t/D)$ を用いて各ケースについて計算した流出変化曲線から曲線の変化率をも考慮して曲線の代表点を適当に抽出し、そのデータについて(3)式のような双曲線近似をした場合の $A_1 = A_1/(A_0/D)$ の値を最小2乗法で算出したものを流域のこう配 $i = 1/6$ の場合について示したものが図1である。図の横軸の D/L は減衰初期における流域の保水状態すなわち降雨条件の代表量であり、縦軸の $A_1 L/D$ の値は A_1 に比例する値で、集約化した流域特性の代表量と考えられる。また B_0/A_0D は降雨条件とも関連があるが、主に地形あるいは地質、地被状態を代表する量と考えられる。この図において例は $B_0/A_0D = 100$ の場合の変化を見てわかるように、流域の保水量が少ない状態すなわち降雨量が少なり場合には、 $A_1 L/D$ ひいては A_1 の値はほぼ一定になり、降雨の増大とともに漸増し、さらに大きくなると再び一定値に漸近する傾向がある。ところが、降雨量が

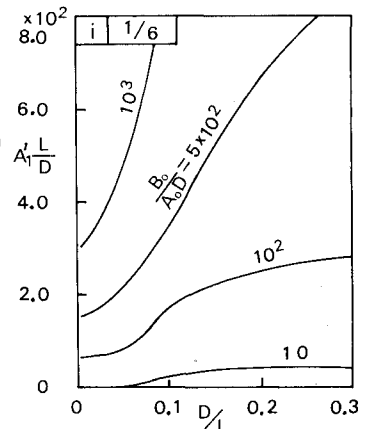


図 1

おける値よりも大きくなるものと思われるから、実際の流出現象における A_1 の値は降雨量の増加に伴って、例ば $B_0/A_0D=100$ の曲線のように一本の曲線をたどる延長形変化をする場合と、 $B_0/A_0D=100$ の曲線から $B_0/A_0D=500$ の曲線の方へ移っていく移行形変化をする場合との両方の形態が存在するものと考えられるが、いずれの形態になるかは主に降雨の時間的分布によって決まるものと思われる。なお図1に示した各ケースについて E_1 を計算した結果、 E_1 は5～30%の値になったが、これは曲線の抽出計算個数 N の数量不足などによって生じた誤差も含まれていることを考慮すれば、實際上理論流出曲線の双曲線近似は十分可能であるとみなしてよからう。

3. 実験的考察 実験に使用した模型斜面は下流端を網止めし、下流端より50cm間隔に横断方向の水深を平均して取り出すようにしたマノメータ取出口を有する透明塩化ビニール製で $\lambda=1/6$ のこう配を有する水路上に樹齢20年程度の杉林の表層部より切り出した枯葉堆積層を含む表層土をセプトしたものであり、寸法は長さ6m、幅55cm、層厚43cm(上層厚6cm、下層厚37cm)である。また現状における上下各層の平均透水係数はそれぞれ $7.3 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 、 $6.5 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ である。実験はこのような斜面に斜面上方約1mの高さにセプトしたスプレーノズル列による人工降雨装置により約2年間降雨流出を繰り返した後に行なったものであるが、降雨強度 $r=5 \sim 40 \text{ mm/hr}$ 、降雨継続時間 $T=2 \sim 3 \text{ hr}$ の降雨を1週間周期で降らせてそれぞれ定常化した後の流量減衰部の流量変化 Q/Q_0 をその逆数 Q_0/Q の形で表わしたものが図2である。この図からわかるように Q_0/Q の変化のうち $r > 29 \text{ mm/hr}$ における変化は大体 $t \leq 24 \text{ hr}$ 、 $24 < t \leq 76 \text{ hr}$ 、 $t > 76 \text{ hr}$ の3段階にわかれており、各段階はそれぞれ中間流出時、地下水流出時、および不飽和流出を主体とした地下水流出時、および2期に対応しているものと思われる。また $r < 29 \text{ mm/hr}$ の場合には $t=76 \text{ hr}$ 程度で2分され、それぞれ地下水流出時、および2期に対応しているようである。これらの各流出のうち中間流出時および地下水流出時1期における Q_0/Q の変化についてはグラフ上からも直線的变化傾向が強いことがうかがわれるが、各期間について(3)式のような双曲線で近似した場合の誤差 E_1 を(4)式によって計算した結果は表1に示すとおりである。表中の太枠で示した部分が対象となる E_1 であり、降雨強度の増加に伴って大きくなる傾向はあるが、全体的には $E_1 < 20(\%)$ である。ところが、 $Q/Q_0 = e^{-A_1 t}$ および $Q/Q_0 = 1/(A_1 t + 1)^2$ で近似した場合の誤差を(4)式の形で計算した結果によるといずれの場合も90%以上の値になった。このことから、各期間における流出曲線の近似式としては(3)式のような双曲線式が妥当であろう。また、図3は r に対する A_1 の変化を示したものであり、中間流出が発生すると考えられる $r=29 \text{ mm/hr}$ あたりで移行が始まる移行形変化をすることがわかる。このようにして求まる $r \sim A_1$ の関係曲線が流域特性を表わすことになり、各種の斜面状態について比較実験あるいは実測資料を解析してければ、流域の数量的評価あるいは流出変化の予測も比較的容易に行なうことができよう。

4. おわりに 以上に流出曲線の双曲線近似に関する適合性と流域特性の集約化された代表量 A_1 の性質について若干の考察を行なったが、今後さらに降雨条件を変えて実験を行なう予定である。また、現在実際の河川流出資料についても同種類の検討を行っておりその結果については講演時に述べる予定である。

参考文献 1) 金丸・三島, 山腹斜面からの流出に関する一考察, 土木学会第28回年講概要集, 昭.48.10

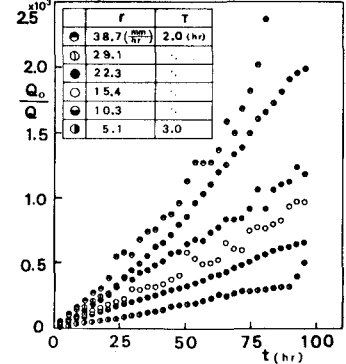


図 2

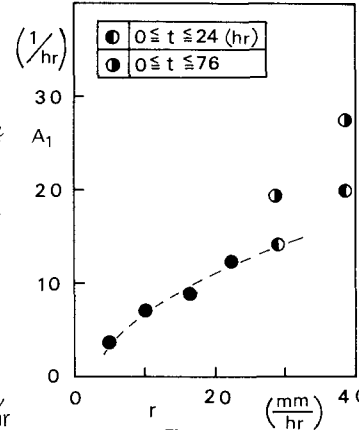


図 3

r	0 ≤ t ≤ 24 (hr)	0 ≤ t ≤ 76 (hr)
38.7 (mm/hr)	18.1 (%)	29.2 (%)
29.1	20.1	15.6
22.3	14.7	10.9
15.4	8.7	9.9
10.3	8.8	7.0
5.1	12.1	11.1

表 1 E_1 の値