

○ 名古屋大学工学部 正 員 松 林 寿 一 郎
名古屋大学工学部 正 員 高 木 不 折

まえがき 流出解析の手法として従来いわゆる lump モデルがよく用いられてきた。その中には、タンクモデル、貯留関数法をはじめとして、貯留-流出関係を基礎としたものがあり、主に実測データを用いて S-Q 関係を決めている。一方著者らはこれまでに、比較的遅い中間流出を対象として、斜面内飽和浸透流モデルを用いた解析を行ない、さらに、実流域に見られる斜面の分布を考慮して、個々の斜面からの流出量の合成による平均化特性を明らかにした。本研究ではその成果を基礎として、S-Q 関係が流域のどんな特性と関係し、斜面の分布によってどんな特性を示すかについて考察する。

流出の合成による平均化特性

使用した斜面浸透モデル(図-1)は1次元、Darcy 的飽和浸透流と考え、基礎式を次式のように無次元化し数値的に解析した。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\alpha \frac{\partial}{\partial x} \left\{ h \left(1 - \beta \frac{\partial h}{\partial x} \right) \right\} + r', \quad r' = \begin{cases} 1 & 0 < x < 1 \\ 0 & 1 < x \end{cases} \quad (1), \quad \alpha = \frac{k i r}{\gamma l}, \quad \beta = \frac{r r}{\gamma l i} \quad (2)$$

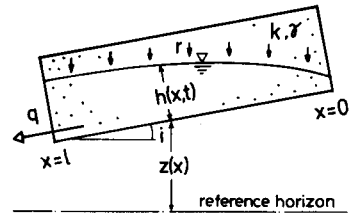


図-1 斜面浸透モデル

ここに、 α, β は現象を支配する無次元パラメータであり、(2)式に示すように斜面特性(k, i, γ, l)、降雨特性(r, r)から構成されており、1つの降雨現象に対し、個々の斜面では(2)式で計算される各々の(α, β)に対する現象が起っている。流域全体としての流出は、これらの斜面からの流出が合成されたものであり、ここでは各斜面からの流出量のEし合せと仮定した。すなわち、(α, β)なる斜面の全流域に対する面積比で(α, β)の分布 $P(\alpha, \beta)$ を定義し、(1)式の解から計算される無次元ハイドログラフ $q'(x; \alpha, \beta)$ を用いて合成流量 Q を

$$Q'(t) = \int q'(x; \alpha, \beta) P(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad \dots (3)$$

で与えた。(3)式中、分布 $P(\alpha, \beta)$ は実測データより対数正規分布的であることが判っており、取扱いの便利のため以下では $A = \ln \alpha, B = \ln \beta$ の形で取扱うことにする。

ところで、通常、流出解析においては、流域を1つのモデルで扱ってきた。ここで同様に各斜面よりの流出の合成流量(3)式と最も近い流出波形を生ずる、モデルのパラメータ(A^*, B^*)を求めることによって、流出過程における特性A, Bの平均化のようすを調べ

た。その結果を図-2に示す。この図は(A, B)が($\bar{A}, \bar{B}$)を中心として、分散 σ^2 で分布する場合の A^*, B^* を σ^2 との関係でプロットしたものである。

貯留量-流出量関係

個々の斜面のS-Q関係：最初まず流域の要素である個々の斜面のS-Q関係を検討する。図-4中の $\sigma = 0$ のものがその1例であるが、従来指摘されているS-Qとはかなり異なり特徴的なループを描いている。これは水深分布(図-3)から容易に理解できる。すなわち、降雨時($t < 1$)水深は斜面に平行に上昇するが、 $q'(t) = \alpha h' \left(1 - \beta \frac{\partial h}{\partial x} \right) \Big|_{x=1} = \alpha h a \quad \dots (4)$

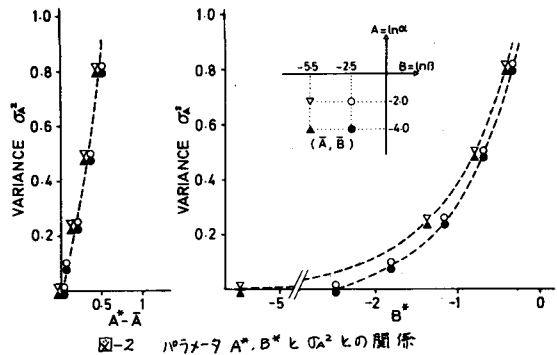


図-2 パラメータ A^*, B^* と σ^2 との関係

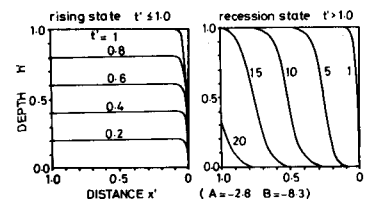


図-3 水深分布

であり、貯留量 S は $S = C \times h_a \times 1 \dots (5)$ と書けるから、 S' - S' 関係は線形的である。ここに h_a は下流端($x=1$)における水深であり、 C は、水深分布が完全には一様でなく、上流端で水深=0になっていることを考慮した補正係数であり、この例では $C=0.9$ で一定と見てもよい。一方、降雨終了後、現象は移流的となり、貯留量は減少するが、流量は一定、という期間がほぼ夜の間続き、最後に水塊の上端が下流端に達したとき、流量が急に減少しこのようなループを描くわけである。

流域全体の S - Q 関係：次に、これら個々の斜面の集まった流域全体の S - Q 関係を調べた。その結果の1例が図-4の $\alpha=0.5$ 、 0.9 の場合である。ところで、これらに対する、図-2の (A^*, B^*) より S - Q 関係を求めたものが図-5であるが、両者はほぼ一致し、合成ハイドログラフをよく近似するパラメータとして (A^*, B^*) の妥当性が確認された。さて、改めて図-4を見ると α が大きくなり、分布が広がるほど上昇時と低減時のループの開きは小さくなり、同一経路をたどるようになることがわかる。先に述べたように個々の斜面で立上り部の S - Q 関係は線形的であり、したがって全流域でも S - Q 関係が線形的であることは納得できる。しかし、低減部では、個々の斜面の S - Q 関係は1本の直線ではなく、またパラメータによってループも異なるが、多くの斜面からの流出の合成としては S - Q 関係が図のように低減部でも上昇部と同じ直線上をたどることは興味深い。

S - Q の関数形：次に、 α が大きい場合の S - Q 関係の関数形がパラメータの分布によってどのようになるかを検討してみよう。上昇・低減部で同じ経路をとることから、取扱いの簡単な上昇時について関数形を求める。個々の斜面での S' (4)式、 S' (5)式に面積率 $P(A)$ をかけて積分すると、合成流量 Q' 、合成貯留量 S' は次式で計算できる。

$$Q' = \int P(A) \exp(A) \cdot h_a \, dA = \exp\left(\bar{A} + \frac{\sigma^2}{2}\right) h_a \dots (6)$$

$$S' = \int C P(A) h_a' \, dA = C h_a' \dots (7) \quad \begin{matrix} E \bar{S}' \\ P(A) = N(\bar{A}, \sigma^2) \end{matrix}$$

$$\text{したがって、} \quad Q' = K' S', \quad K' = \frac{1}{C} \exp\left(\bar{A} + \frac{\sigma^2}{2}\right) \dots (7')$$

が得られる。以上は無次元量について考えれば、実次元量について調べるため Q' 、 S' をそれぞれ実次元にもどすと、結果は

$$Q = r A Q', \quad S = r b A S' \dots (8) \quad \text{となり、これを}$$

(7)式の Q' 、 S' に代入して整理すると、

$$Q = \frac{K'}{b} S = K S, \quad K = \frac{\bar{k} \bar{r}}{C \bar{r} b} \exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right) \dots (9)$$

となる。上式からわかるように、実次元の S - Q 関係も(7)式と同形に帰着するが、係数が斜面特性のみで決まり、流域毎の定数であるところが異なる。ところで、(9)式のように S - Q 関係が線形の場合、ハイドログラフは指数低減し、 K はその低減係数である。そこで、実測値による検討の1例として、長良川河戸流域で低減係数を求め、一方で(7)式に流域特性値を代入して K を求めて両者を比較した。図-6の低減から求めた中間流出に対する低減係数は $\lambda_2 = 0.31 \text{ day}$ であり、(9)式から得た 0.2 day と比較してほぼ近い値となっている。

あとがき 以上議論してきたとおり、複雑な流域を1つのパラメータの流出で置き換えられることが示されたが、これは現実に行なわれているlumpモデルによる流出解析を裏打ちするものである。また、このように流域の複雑さが増すほど、 S - Q 関係が線形に近くなり、かえって系としては単純に扱えることは興味深い。

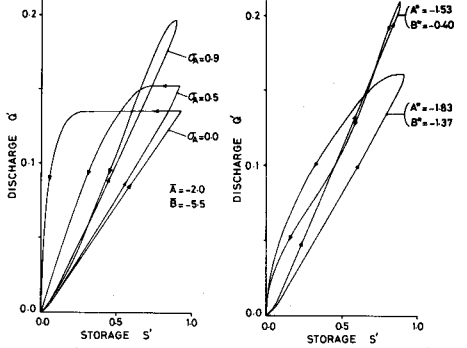


図-4 合成ハイドログラフの S - Q 図-5 A^*, B^* に対する流出の S - Q

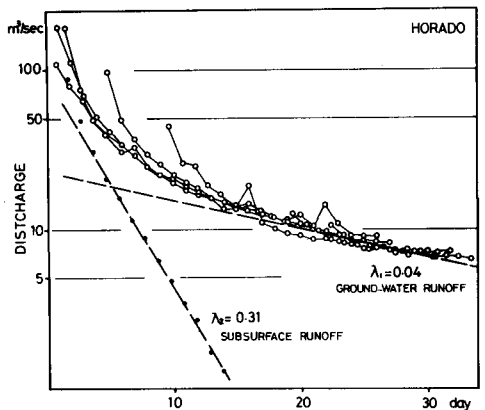


図-6 地下水流出・中間流出の低減 (洞戸流域)