

京大防災研究所 正員 ○石原安雄
同 上 正員 小栗竹重機

洪水流出現象には山腹斜面における降雨損失と河道網系における合流伝播との2つの過程が存在する。本文は後者について考察したものである。一般に洪水流出における河道の役割については、*rational* 式における洪水到達時間の算定、単位図法における *lag time* の算定、あるいは立神法における集中面積図の作成などにみられるように、極めて重要であるにもかかわらず、従来ほとんど研究されておらず「高橋ら」¹⁾の研究以外みよべき成果はないようである。本研究は河道網系における洪水の伝播合成過程を単純化して、単純な分れ過程と線型合流過程で表わせるとし、いわゆる1次元多段過程として取扱ったものである。

1. 河道網系の分離と構成

流域を Horton-Strahler 流の order 解析を行なうと、多数の 1st order の部分と higher order の部分に分けられる。ここで 1st order における洪水流出を上流の斜面過程に含めることにすると、問題は higher order の部分の取扱ひである。例えば図-1に示す *i*-th order の河道(上下流端で $(i-1)$ th order の河道が合流)を考えると、この区間への支川流入は $(i-2)$ th order 及びそれより低次の支川のみが流入する。したがって、上で仮定した洪水の伝播合成過程より、図示のように、上流端からの流入洪水を下流に運ぶ役割の部分と、その下流端で合流する $(i-1)$ th order の支流の主河道としての役割とに近似的に分けて考えることができる。

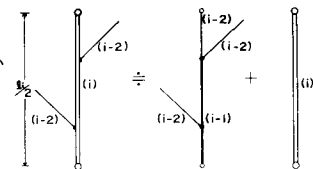
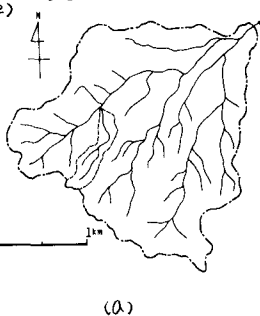


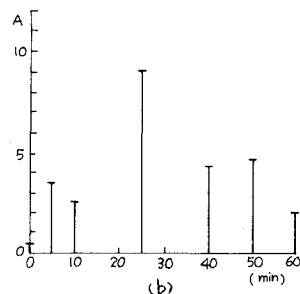
図-1 河道系の分離

2. 河道網系における洪水の合成過程の実例²⁾

上述の仮定を検討するために、野洲川支流荒川流域(4.42 km²)の洪水とその上流部に設定した梅ヶ谷試験流域(0.184 km²)の洪水について検討した結果が図-2である。(a)図は実測平均流速 47 cm/sec から推定した伝播速度 75 cm/sec を一定とし、梅ヶ谷の面積を1とし、最小単位の子流域を 2nd order (梅ヶ谷の order) としたとき、上述の仮定によって求めた一種の集中面積図である。(c)図は一点鎖線で示した梅ヶ谷での実測値(面積は倍してあるが)を(b)図によって合成した結果(破線)と実測値(実線)とを比較したもので、ていねいに除いて全体としてよい一致を示しており、上述の仮定の妥当性を示している。

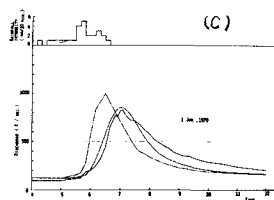


(a)



(b)

図-2 荒川流域における検討例



(c)

3. 1次元多段過程

流域地形の統計則によれば、分岐比に関する $1/4$ 則、合流数に関する $3/4$ 則が成立し、したがって統計的平均として、一般に *i*-th order の河道に流入する $(i-1)$ th order の河道の数は3本となり、したがって図-3に示すように、河道網系における洪水の形成過程を1次元多段過程とみなすことができる¹⁾。

図-3において、*i*-th order の河道を対象とし、この河道に直接付随しているいわゆる子流域を図-1で説明したように $(i-1)$ th order の小流域とみなすと、図-4のように表わすことができる。この図において U を流域の移動速度、 l_i を *i*-th order の河道長、 V_i を同じ河道での洪水の伝播速度、 $1: p_1: p_2$ を平均

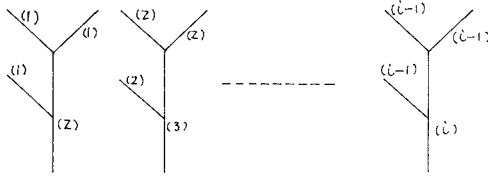


図-3 1次元多段階過程

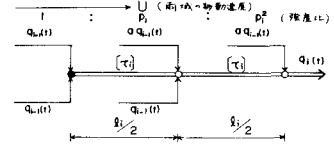


図-4. i th order での合流状況

降雨強度比、 $q_i(t)$ を単位量の降雨に対する単位面積当りの流出量、 a を面積比とすると、次式が成立する。

$$q_i(t) = \left\{ A_i \cdot Z(\alpha_i) + B_i \cdot Z(\tau_i + \alpha_i) + C_i \cdot Z(\alpha_i) \right\} * q_{i-1}(t) \quad (i=2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

$$\alpha_i = \frac{L_i}{Z \cdot U}, \quad \tau_i = \frac{L_i}{Z \cdot V_i}, \quad A_i = \alpha P_i^2 / F_i, \quad B_i = (1+a) P_i / F_i, \quad C_i = Z / F_i, \quad F_i = Z + (1+a) P_i + \alpha P_i^2$$

また、 $Z(\beta)$ は時間変換を表わすオペレータで、一般に、 $Z(\beta) f(t) = f(t-\beta)$ である。つぎに(1)式の $\{$ 内の変換オペレータを H_i で表わし、1st order の小流域での単位降雨を $r_0(t)$ 、変換オペレータを H_1 とおき、多段階過程であることを考慮し、ラプラス変換によって演算子法で表現すると結局次式をうる。

$$Q_n(s) = G_n(s) \cdot G_{n-1}(s) \cdots G_i(s) \cdots G_2(s) \cdot G_1(s) \cdot R_0(s) \quad (2)$$

$$\text{すなわち、} Q_n(s) = \mathcal{L}[q_n(t)], \quad R_0(s) = \mathcal{L}[r_0(t)], \quad G_i(s) = \mathcal{L}[H_i], \quad G_i(s) = A_i e^{-Z \alpha_i s} + B_i e^{-(\tau_i + \alpha_i) s} + C_i e^{-Z \alpha_i s}, \quad (i=2, 3, \dots, n)$$

4. 洪水ハイドログラフの2, 3 の特性

(2)式の解を求める方法は、多くの独立確率変数の和の確率密度関数を計算する方法と同じであるので、 $q_n(t)$ を確率密度関数とみなすと、 $r_0(t)$ 、 $\mathcal{L}[G_i(s)]$ および $\mathcal{L}[G_i(s)]$ の平均値を $\mu_0, \mu_1, \mu_i (i=2, 3, \dots, n)$ 、分散を $\sigma_0^2, \sigma_1^2, \sigma_i^2$ とすると、 n の値が大い場合には $q_n(t)$ は中心極限定理によって $N(t_m, \sigma^2)$ の正規分布に近づくことになる³⁾。すなわち、 $t_m = \mu_0 + \mu_1 + \mu_2 + \dots$ 、 $\sigma^2 = \sigma_0^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots$ となる。

$$t_m \doteq \mu_0 + \mu_1 + \sum_{i=2}^n \left\{ D_i(\tau_i - \alpha_i) + Z \alpha_i \right\} = \mu_0 + \mu_1 + \sum_{i=2}^n \left\{ D_i \tau_i + (Z - D_i) \alpha_i \right\} \quad (3)$$

$$(q_n)_{\text{peak}} \doteq (12\pi)^{-1/2} \cdot \sigma_0^2 + \sigma_1^2 + \sum_{i=2}^n E_i(\tau_i - \alpha_i)^2 \Big)^{-1/2} \quad (4)$$



図-5. D_i, E_i と P_i との関係

$$\text{すなわち、} D_i = \left\{ 4 + (1+a) P_i \right\} / F_i, \quad E_i = \left\{ a(1+a) \left\{ 12 + (1+a) P_i + \alpha P_i^2 \right\} P_i^3 + 2(1+a) \left\{ Z + (1+a) P_i \right\} P_i + 8a(Z + \alpha P_i^2) P_i^2 \right\} / F_i^3$$

D_i, E_i と P_i との関係は図-5 のようになり、またこの場合の流域平均降雨の重心(平均値)の位置 t_r は、(3)式と同じ精度で、 $t_r \doteq \mu_0 + \sum_{i=2}^n (Z - D_i) \alpha_i$ で与えられる。よって、(3)、(4)式より次の特性が導かれる。

- ① 上流側ほど強い雨が降る場合 ($P_i < 1$) には、一樣降雨と比較して、出水ピークは大きいが遅く現われる。
- ② 逆に下流側に強い雨が降ると ($1 < P_i < 2$ 程度)、出水ピークは小さく早い。
- ③ 流域平均降雨分布の重心の位置とハイドログラフのそれとの相対的位置関係は雨域の初動速度に関係しない。

さらに、図-3 に示す構造は1つの流域内ではいろいろと変化があるが、その影響は(3)、(4)式の誘導過程から分るように、(4)式中の σ_0^2 を除く他の分散が大きくなることであって、 $(q_n)_{\text{peak}}$ の低下となる。

1) 高橋孝良：出水系とその機構，石原廉次郎 編「水工水理学」，昭47年。

2) 石原・小栗竹：小流域とそれを包む流域からの洪水ハイドログラフの相互関係について，土木学会関西支部，昭49年度，講演集。

3) 石原・小栗竹：河道系における洪水の集中過程，10回災害科学統合シンポジウム，昭和48年10月。