II－19　洪水流出の基本型に関する考察

京都大学工学部　正員　工博　石原藤次郎
京都大学防災研究所　正員　工修　○高棹琢馬

洪水流出の解明は，降雨から流量への変換系の構造を明らかにすることであり，その構造が Stochastic であることはうたがいない。したがって，洪水流出の解明の方向は変換系を構成する等質な集団の発見とその特性の把握，さらに進んでは系に含まれる確率変量のくり入れに向けられるべきであろう。また，出水理論は実験的，観測的な事実にたつべきことはいうまでもない。最近明らかにされた実験，観測には二つの重要な成果がある。一つは Palmer や，われわれの実験による表面流の Manning 抵抗則の成立，一つは昨年発表された Dreibelbis の活性帯（Zone of major hydrologic activity）の発見である。これは別項にも述べたが，土湿変化が地表面から12 inch（とくに7 inch）までで顕著であり，それより以下の層での土湿変化が極めて小さいということである。われわれがすでに発表した中間流出理論のなかで活性帯と同等の意味での表層の存在を指摘していたが，Dreibelbis の観測結果はこれを実証することになろう。以下では，以上二つの実験，観測事実から演繹される出水機構，とくにその根底となる基本的な出水のパターンとその意義について説明する。

1．基礎的関係：表層が存在する山腹斜面の水流（中間流）については，Darcy 則と連続条件から，一般山地では十分成りたつ近似解として

$$\gamma H = Re(t) - Re(t - x/f) \quad \text{-----}(1) \qquad x - x' = f(t - t') \quad \text{-----}(2)$$

が得られる。ここに，γ は有効空隙率，H は水深，Re は累加雨量，$f = k/\gamma \sin\theta$ で，k は透水係数，$\sin\theta$ は勾配であり，x'，t' は表層内水流の特性曲線の出発する場所的，時間的位置である。一方，表面流については，対象地点の流量変化と変換系の時間的変化は

$$K\, dQ^p/dt = fn\left(r_f(t) - \partial\tau/\partial t\; r_f(\tau),\ \delta(t)\right) \quad \text{---}(3) \qquad \partial\tau/\partial t = 1 - \frac{\partial}{\partial t}\left\{K(L - \xi_0(\tau))^p\, r_{fm}^{\,p-1}\right\} \quad \text{----}(4)$$

で表わされる。ここに，$K = (n/\sqrt{\sin\theta})^p$ で，n は Manning の粗度係数，$p = 0.6$ であり，Q は対象地点の流量，r_f は表面流に付加される実質的な有効降雨強度，τ と t は表面流の特性曲線の出発時刻と到着時刻，$r_{fm} = \int_\tau^t r_f\, dt/(t-\tau)$，$L$ は流域の代表流下長であり，$\xi_0(t)$ は(1)と(2)式から得られる表面流の発生起場で，$Re(t) - Re(t - \xi_0/f) = \gamma D$ -----(5) で表わされ，D は表層厚である。なお，系変化を表わす $\partial\tau/\partial t$ の(4)式は擾乱域(D.D)で成立する関係であって非擾乱域（U.D）では0である。また，$\delta(t)$ は未知かあるいは偶然的な確率変量であるが，以下では等質な変換系の発見とその特性を明らかにするために，出水過程中におけるその平均値が0，すなわち $\overline{\delta(t)} = 0$ として記述を進めるが，将来こうした確率変量の出水理論へのくりこみが必要となろう。

2．変換系；(1)～(5)式の関係が降雨から流量への変換系の構造を規定するが，出水現象のようにある量（状態）からある量（状態）への移行すなわち変換事象には，その基礎方程式の性質に応じて Linear time invariant or variant（LTI or LTV），Nonlinear time invariant or variant（NTI or NTV）の四つの系があることは周知の通りである。ところで出水現象においては，変換系は(3)式から非線型であることが直ちにわかり，また，

流域の被覆特性（表層または活性帯の有無）に応じてつぎの三つの型が存在する。

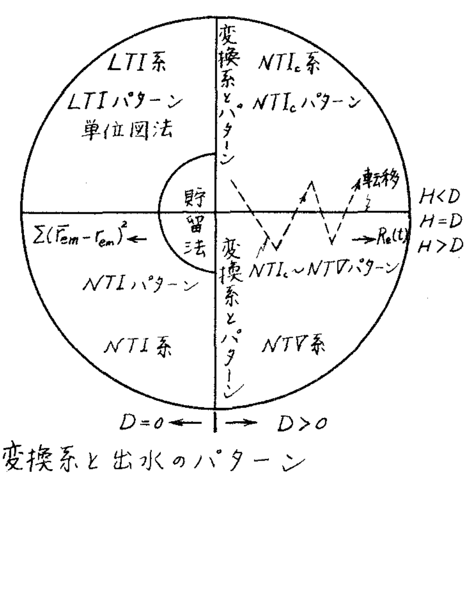
被覆特性			変換系
$D=0$	$:\ \xi_0=0$	$r_f=r_e$	NTI
$D>0$	$:\ \xi_0=0$	$r_f=\overline{r_a}=A_e r_a A^{-1}$	NTI_c
	$:\ \xi_0=fn(t,r)$	$r_f=r_e+\overline{r_a}$	NTV

ここに，r_eは過剰降雨強度で$r-l$であり，rは降雨強度，lは浸透能 $A_e=2NL_dH$で，Nは単位面積当りの水みち（がり）の数，L_dは水みちの平均流下長，Hは(1)および(2)式で表わされる表層内水深，r_aは水みちへの横単位面積当りの浸出強度，$\overline{r_a}$は平面的な意味での単位面積当りの浸出強度，$\overline{r_a}=(\overline{r_a})_{max}$である。ここで，$NTI_c$とは表面流出が生じない$Re(t)-Re(t-\Delta t)<\gamma D$の場合を意味する。以上のように，降雨から流量の変換には，生起場と有効降雨の性質に応じて三つの等価な系が存在することがわかるが，その場合，系の時間的変化と非線型効果を示す$\partial\tau/\partial t$が系構造の支配因子であり，また$t-\tau$が変換演算子であって，これが本質的な意味でのおくれ（Lag）を意味する。

3．出水のパターンとその特性：変換系によって，つぎの三つの基本的な出水のパターンが存在することになる。

変換系	水文量	出水のパターン
NTI	$\xi_0(\tau)=0,\ F=A,\ Q_e=Q_s$	NTI
NII_c	$\xi_0(\tau)=0,\ F=A,\ Q_e=Q_i$	NTI_c
$NTI_c\rightarrow NTV\dashrightarrow NTI_c$	$\left\{\begin{array}{l}\xi_0(\tau)=0,\ F=A,\ Q_e=Q_i,\ (NTI_c)\\ \xi_0(\tau)=fn(t,r),\ F=(1-Lr(\tau))A,\ Q_e=Q_s(NTV)\end{array}\right.$	$NTI_c\sim NTV$

ここに，添字 e，i，s はそれぞれ直接流出，中間流出，表面流出を意味し，Fは出水現象の生起場であって，$Lr(\tau)=\xi_0(\tau)/L$である。以上から想定される出水系を示したものが右図であって，実山地における出水の変換系はNTI，NTI_c，NTVのいづれかに属し，また出水のパターンは，NTI，NTI_cあるいは図に点線で示したように(6)式において$\xi_0(\tau)=L$とおいた転移条件によって$NTI_c\rightarrow NTV\rightarrow\dashrightarrow NTI_c$と系が転移する$NTI_c\sim NTV$のいづれかである。つぎに各パターンの特性について簡単にふれておこう。前述のように，系の非線型性と時間的変化は$\partial\tau/\partial t$に支配される。NTIでは非線型性は著るしく大きい。NTI_cではr_fの時間的変動が小さくなり，したがって非線型性も弱く$\partial\tau/\partial t$が1に近づく。$NTI_c\sim NTV$では系に転移が生じて出水機構は著るしく複雑である。また，図には，現存の代表的な解析法である単位図法と貯留法の成立範囲を示してあるが，それらが，特定の場合にしか成りたたないことを指摘しておこう。こうした問題や，パターン認識と出水の解析法，予知法との関連，さらにはそれが，出水機構解明の根幹である点等を実例を挙げて講演時に述べるつもりである。



変換系と出水のパターン