II-65　直接流出の逓減機構について

京大防災研究所　正員　石原安雄
同上　正員　○下島栄一

1 はしがき：本文は，直接流出の逓減機構について論じたものである。まず，山腹表層内での雨水の挙動を理解するため，多孔質材料の雨水の貯留機構を調べ，貯留量と降雨強度の関係及び，貯留の逓減過程に関する特性を見い出す。次に，実河川流域のコンクリートで作られた幾何学的相似模型の表面に表層を模擬するために同じ多孔質材料を張り，その模型を用いて逓減流出に及ぼす表層貯留の影響を調べる。最後に，実験及び理論的考察により得られた知識に基づき，荒川流域の表層の役割，特に，直接流出の逓減特性に関して検討を加える。

2 多孔質材料の貯留機構

(2.a) 定常状態下の貯留量と降雨強度：一様であるが平面とそれに対して直角方向の性質が異なる多孔質材料(マット)を想定し，降雨強度(R)一定の定常状態下の層内で，対象点の含水比(M)と重力方向の浸透速度(V)の関係を $V = c\,(M - m(\theta, V))$ ……① と仮定する。ここに，m：付着水の含水比，θ：マット平面と水平面との交角，c：定数。一方，$\lim_{R\to+0} m(\theta,R) = m_{*0}(\theta)$ ……② とおき，また，$m(\theta,R) = m_{*0}(\theta) + m_*(R)$ ……③ と分離できると仮定すると，含水比と降雨強度の関係は，$M(\theta,R) = R/c + m_{*0}(\theta) + m_*(R)$ ……④ となる。さて，図-1はロードセルを介して吊られた1m×1m×1cmの多孔質材料に一定強度の降雨を与えた実験結果である。ここに，s：マット面に対して直角方向の貯留高，R：単位水平面当りの降雨強度。図-1は次式の様に表わしえる。

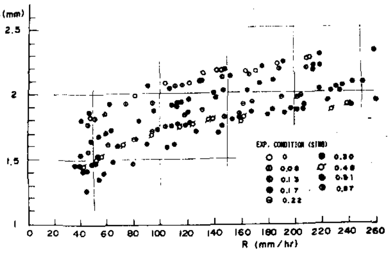

図-1

$s(\theta,R) = RT_* + s_{*0}(\theta) + (s_0 - s_{*0}(\theta))(1-e^{-\mu R})$ ……⑤ そして，各項の性質は次の様である。即ち，図-2は $s_{*0}(\theta)\sim\theta$ の関係であり，また，多少のばらつきはあったが，$T_* = 5.5\,sec$，$\mu = 1.6\times10^{-2}\,hr/mm$，及び，$s_0 - s_{*0}(\theta) = 0.43\,mm$ とθに無関係な量となった。式④,⑤を比較すると，$T_* = D/c$，

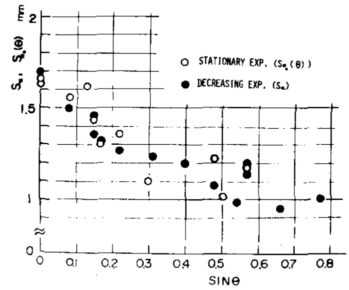

図-2

$s_{*0}(\theta) = D m_{*0}(\theta)$，$(s_0 - s_{*0}(\theta))(1-e^{-\mu R}) = D\cdot m_*(R)$，(但し，D：層厚) なる対応を得，また，$m(\theta,R)$ の分離(式③)の妥当性が判る。結局 多孔質材料内の浸透流の状態式は，$V = D/T_* \cdot [M - \{m_{*0}(\theta) + (m_0 - m_{*0})(1-e^{-\mu V})\}]$ ……⑥ となる。なお，右辺の $(m_0 - m_{*0})(1-e^{-\mu V})$ は降雨による付着水の増分とみなせる。

(2.b) 貯留量の逓減特性：図-3は，一定強度の降雨で定常状態になった時点で急に給水を止めた後の多孔質材料内の貯留量の変化を示す。詳細な観察によると逓減状態を3領域に分離でき，第(I)領域は雨水の連続した部分的流れ，第(II)領域は付着した雨水の不連続的流れ，第(III)領域は(II)に比べ変化が緩慢で蒸発も重要な要素となる，と考えられた。以下，詳しく各領域を検討する。第(I)と(II)領域の遷移点(τ)の貯留量(s_τ)は図-2の様であり，よって，式②の $s_{*0}(\theta)$ とほぼ同じ物理量とみなせる。このことは，上述の第(I)，第(II)領域の物理的論拠を与えよう。なお，第(II)領域を $t = -\frac{1}{\lambda}\ln\frac{s-s_\infty}{s_\tau - s_\infty} + \tau$ ……⑦ と表わすと，ほぼ $\lambda = 6\times10^{-2}\,1/min$，$s_\tau - s_\infty = 0.35\cos\theta\,mm$，$\tau = 4\,min$ となる。次に，第(I)領域については，(2.a)で求まった定常の状態式を非定常状態に拡張して考える。即ち，まず式⑤にて，Rを層内の或る時空間の浸透速度 $g(x,t)$ に，s/D を $M(x,t)$ に置換できる場合，層

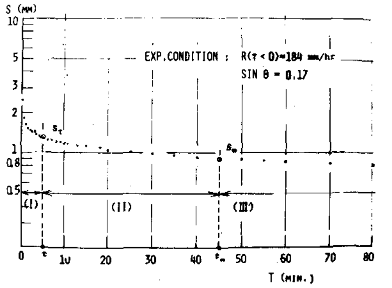

図-3

内の含水比や浸透速度は，$M = T_* q/D + m_{*0}(\theta) + (m_0 - m_{*0})(1 - e^{-\mu q})$ ……⑧ と連続式より，形式上，kinematic wave として伝播することになる。なお，伝播速度は $J(q) = \cos\theta / \{ \frac{T_*}{D} + \mu (m_0 - m_{*0}) e^{-\mu q} \}$ である。次に，マット全体を一体とみなし，式⑤がそのまま成立するとしたときは，

$dq/dt = -q\cos\theta / \{ T_* + \mu(s_0 - s_{*0}(\theta)) e^{-\mu q} \}$ ……⑨ が成立する。

図4は，貯留量の減少の様子を示す実験値と計算値との比較図である。これよりすると，降雨停止直後では，式⑧が成立すると考えられる。即ち，含水比が大で雨水の移動が連続的な場合，例へば，連続降雨中も含めて，現象はkinematic wave的と言えよう。

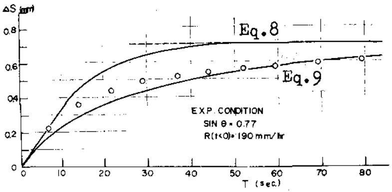

図-4

3 山地流域模型での逓減特性：野洲川上流の荒川上流域の1/100の表層被覆された幾何学的相似模型(18m²)に一定強度の降雨を与え，定常状態になった時点で急に給水を止め，流域下流端での流量逓減の特性を調べた。

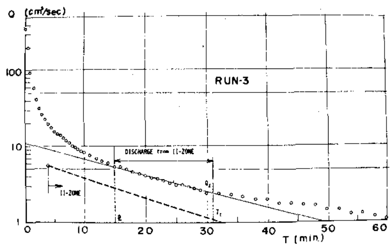

図-5

(3.a) 第(II)領域からの逓減：図5は実験例であるが，一般に降雨停止後15～30分の間では，$Q_{II}(t) = \hat{Q}_{II0} e^{-\lambda_{II}(t-\hat{\tau})}$ ……⑩ なる指数逓減を示すことが判った。なお，$\lambda_{II} = 4.9 \times 10^{-2}$/min. $\hat{\tau} = 15$min. $\hat{Q}_{II0} = 5.2$ cm³/sec 。さて，第(II)領域の雨水を入力とし，河道(C)及び斜面(S)の雨水伝播時間を一定として下流端流量を求めると，$Q(t) = 2\frac{V_c V_s}{\lambda}(s_\tau - s_\infty)(1 - e^{\lambda L_s/V_s})(1 - e^{\lambda L_c/V_c}) e^{-\lambda(t-\tau)}$ となる。但し，V_c, V_s；伝播速度，L_c, L_s；河道，斜面長 。$Q_{II}(t)/Q(t)$ は未知定数(V_c, V_s) を含むがほぼ一定値となり両者を等しくおくと，$L_c/V_c + L_s/V_s + \tau \fallingdotseq \hat{\tau}$ となるので，式⑩が第(II)領域に相当するとみなせる。

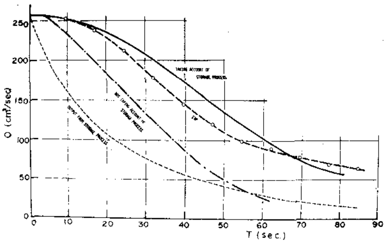

図-6

(3.b) 第(I)領域からの逓減：図6は停止直後の変化を示す。表層流の伝播速度は含水比の関数であるが，この場合の変動は高々数%であるので，一定とみなした貯留過程を考慮及び無視した計算値も同時に示されている。伝播速度の変動とsame orderでしか含水比の変化の影響が流量に及ぼさないことを考慮して実験値と計算値を比較すると，貯留過程を考えた方が適合性はよい様である。

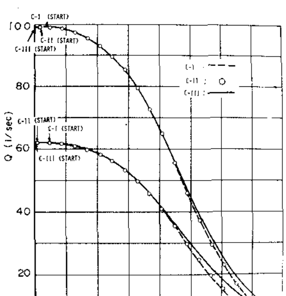

図-7

4 荒川(試験地)への適用：流域表面には5～10cmの腐植土層が在り，出水時には重要な流出成分の生起場になっている。ここでは，貯留過程の定数(ex. m_{*0}, μ, $s_\tau - s_\infty$, etc.)は未知数なので2で得られた値を用い，3と同じ方法の仮想実験を行った。図7はその結果で，C-I は貯留過程を無視，C-II は第(I)領域のみ，C-III は第(I)(II)領域を考慮している。(時間軸の移動に注意) これよりすると，C-I, C-II は形状に差異はなく，C-III はほぼ 30 l/sec を境にしてC-IIと差異が生ずることが判る。図8は観測hydrographより地下水流を分離した逓減hydrographであり，20～30 l/sec を境にして急に逓減がゆるやかになり，この様子はC-III とよく似ている。以上よりして，一応，直接流出の逓減部においては，不連続的な流れ形態をとる第(II)領域の貯留過程は重要な要素となるが，連続的流れ形態である第(I)領域の影響は比較的小さいであろうと推論できる。しかし，貯留式における定数選定の問題や第(I)及び第(II)領域の接続の方法など解明されねばならないが，同時に水収支的立場に立って，初期損失など損失過程を含めた詳細な流出解析により，本文で述べた貯留過程の位置ずけを一層明確にする必要がある。

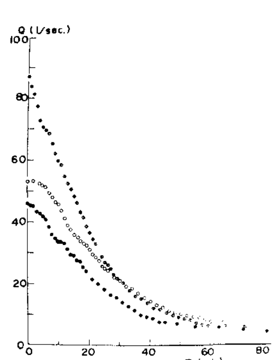

図-8

<参考文献> 石原・下島：河川流域における直接流出の逓減機構について，京大防災研年報(投稿中)
石原・小葉竹：山地流域における直接流出の生起過程，京大防災研年報，S44.