

II-117 雨水流出シミュレーションの基礎に関する実験的研究

京大防災研究所 正員 石原安雄
京大防災研究所 正員 ○下島栄一

本研究は、雨水流出現象の水理模型によるシミュレーションを行うための基礎的研究である。流出過程は必ずしも同次元ではないが、降雨・遮断・表層部の貯留・流れ（中間流、表面流、河道流など）浸透などの要素により構成される。ここでは、洪水流出に対して支配的と考えられる「流れ」を対象とする。また、「流れ」の現象を支配する力学的要素は種々あるが、特に顕著に作用すると推測できる重力項と摩擦力項を抽出し、抵抗という dominant factor からみた model と prototype との運動系の相似性を論ずる。

1. 多孔性物質の内部および表面における流れの抵抗則

山腹斜面表層という中間流・表面流の運動場を模擬するために、多孔性材料を用いて、流水の抵抗特性を実験的に検討した。

1-1 実験方法

巾 25cm, 長さ 2m の

長方形水路に多孔性物質

(表-1)を張り付け、上

表-1 材料特性

種類	厚さ	空隙率	Manning抵抗係	会社名
SF 10	10mm	92%	0.025m-sec	日建工学 K.K.
SF 20	20mm	96%	0.021m-sec	
S 10	10mm	91%	0.021m-sec	
BC 200	4mm	-	0.014m-sec	日本バーク

流端より段階的に流量一定の給水を行なった。水深の測定は、下流端水路床の内径 2mm の穴に取付けたビュール管と水路側壁の固定したガラス管（注射器）に結び付け、流れが定常状態になった時点で、ガラス管の水面変化をポイントゲージでおさえた。

1-2 実験結果とその考察

図1は、水深と流量の関係を示したものである。多孔性物質内の流れには、毛細管現象も支配的なので流れ自体複雑であって測定を困難なものにしてゐる。が、一応 Darcy 形式の取扱いが出来るつきの Forchheimer の抵抗則に従っていることが推定される。

$$q = \left[\frac{1}{k} + \frac{1}{k} + 4\alpha i \right] / 2\alpha i \cdot i h = K(k, \alpha, i) i h \quad (1-1)$$

ここで、 i : エネルギー勾配, k : 透水係数, α : 定数

流量の増大とともに凹凸の多い表面に流れ出た流水の水深・流量の関係は、数学的に連続性を示しながら、流れ場や流れの遷移域を脱す。遷移域の流れは、表層内流れ（Forchheimer則）を示す直線の延長上に凹凸表面の平均的位置に仮想基準面を取り、その面を固定床のように考えた際の Manning 抵抗則に漸近することが認められる。図2は、その様子を示したものである。また、凹凸のない均一な厚さをもった多孔性物質（BC.200）の場合には、表面部を仮想基準面によることが

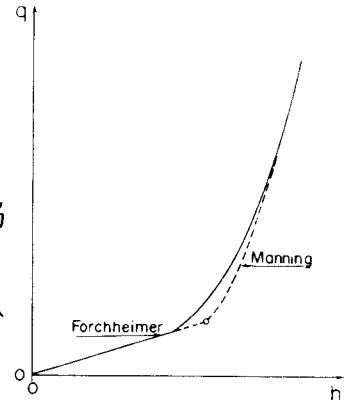


図-1 多孔性物質の表面付近における流れ特性

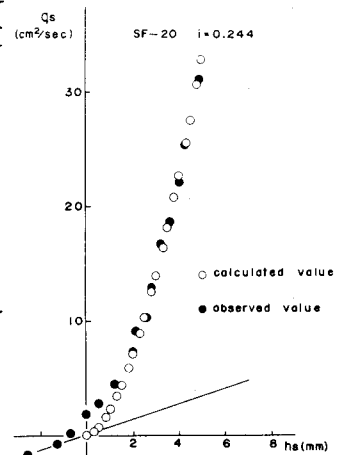


図-2 仮想基準面に原点を移動させたときの水深・流量の関係

できるという結果を得た。図3に於て、遷移域の流況特性を、基準面を原点として換算したManning粗度係数と、そのReynolds数との関係を示したものである。いずれの場合にも、Reynolds数がほぼ800~1000に達して、一定粗度係数の状態へ移行してゐる。この事実は、流体力学的にも興味があり、また、遷移域の流況とある関数(例えば、直線)で近似すれば、出水解析への応用も可能である。なお、漸近の様子は種々であるが、これは、遷移域の複雑さ、それに伴う流れの複雑さ、基準面決定の不正確さ、およびhystrsis現象の問題等にも起因しよう。

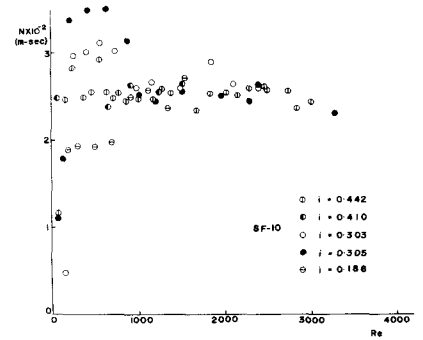


図3 Manning粗度係数とReynolds数との関係

2. 抵抗からみた相似則

雨水流出現象は、山腹斜面・河道という運動場の伝播過程とみなせる。それゆゑ、少なくとも単位流域という観点に立つと、時空間と現象の連続性を考慮し、中間流・表面流・河道流という現象の部分系と統合化した形で運動系の相似を論じなければならぬ。また、雨水の挙動を支配するもの、運動方程式と質量保存式であるから、これら2つの微分方程式に基づいて、両系の物理量の変換群が誘導される。

さて、運動方程式でdominant factorを抽出し、抵抗則としてManning流速式を用いると、表面流および河道流の運動方程式は、それぞれ次のように表わされる。

$$\frac{n_i'^2 v_i'^2}{h_i'^{4/3}} = \sin \theta_i' - \frac{\partial h_i'}{\partial x_i'} \cos \theta_i' \quad (2-1)$$

$$\frac{n_{*i}^2 v_{*i}^2}{R_{*i}^{4/3}} = \sin \theta_{*i} - \frac{\partial h_{*i}}{\partial x_{*i}} \cos \theta_{*i} \quad (2-2)$$

ここで、 $i' = \begin{cases} m & \text{model} \\ p & \text{prototype} \end{cases}$ であり、また、連続の式は同様である。

$$\frac{\partial h_i'}{\partial t_i'} + \frac{\partial h_i' v_i'}{\partial x_i'} = q_{*i}' \quad (2-3)$$

$$\frac{\partial h_{*i}}{\partial t_{*i}} + \frac{\partial h_{*i} v_{*i}}{\partial x_{*i}} = q_{*i} \quad (2-4)$$

中間流の場合、流水抵抗が流速に比例(Darcy則)すると考え、運動の式、連続の式のそれぞれは、

$$\frac{v_i'}{R_i} = \sin \theta_i' - \frac{\partial h_i'}{\partial x_i'} \cos \theta_i' \quad (2-5)$$

$$q_i \frac{\partial h_i}{\partial t_i} + \frac{\partial h_i v_i}{\partial x_i} = q_{*i} \quad (2-6)$$

となる。ここで、 λ, α, Z ; それぞれ流れ方向、水平方向、鉛直方向、 h : 水深、 A : 断面積、 R : 径深、 v : 流速、 n : Manning粗度係数、 f : 透水性係数、 γ : 空隙率、 γ_e : 降雨強度、 t : 時間、 θ : 流れの水平面となる角、 q : 河道部への横からの流入強度と表わす。また、両運動系の物理量の比と以下の様に、suff. λ の同一文字で記す。

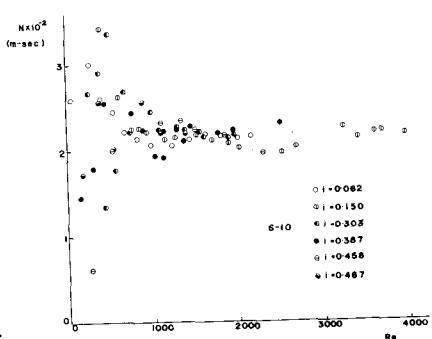


図4 Manning粗度係数とReynolds数との関係

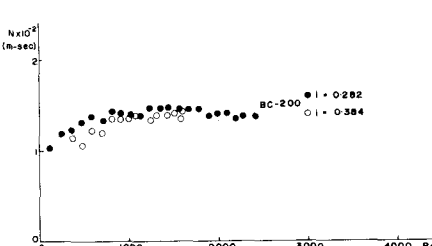


図5 Manning粗度係数とReynolds数との関係

$$f_m = f \cdot f_p \quad f: \text{物理量}, \quad f: \text{相似比} \quad (2-7)$$

なお、河道部横断面幾何学形状を表わすため、径深(Q)、断面積(A)、水深(h)を用いて、 $h_* = f(h)$, $V_* = g(Q)$ という関数形を導入しておく。表2に、式(2-1)~(2-7)の関係式から求められた相似則を示したものである。この表中の ε は、歪みを表わしている。($\varepsilon = z/x$)

	ひすみ模型	ひすまない模型		
	$\sin\theta \gg \tan\theta \quad \cos\theta \approx 1$	$\sin\theta \gg \frac{2}{3}\cos\theta$	$\sin\theta \approx \frac{2}{3}\cos\theta$	$\sin\theta \approx \frac{2}{3}\cos\theta$
中間流	$v = x/t$ $h = z = \delta x^2 / (tk)$ $r_e = (\delta x/t)^2 / k \quad \delta = 1$	$v = k$ $t = \delta x/k$ $h = r_e x/k$	$k = v = r_e = x/t$ $h = x$ $\delta = 1$	$h = x(r_e/k)^{1/2}$ $v = (r_e k)^{1/2}$ $t = \delta x / (r_e k)^{1/2}$
表面流	$h_* = z$ $v_* = r_e / \varepsilon$ $n_* = z^{3/2} \varepsilon^{3/2} / r_e$	$h_* = r_e t$ $v_* = x/t$ $n_* = r_e^{3/2} t^{3/2} / x$	$v_* = r_e = x/t$ $h_* = x$ $n_* = x^{3/2} / r_e$	$v_* = x/t$ $h_* = r_e t$ $n_* = r_e^{3/2} t^{3/2} / x^{3/2}$
河道流	$h_* = z$ $a_* = f^{-1}(z)$ $v_* = q_* x / f^{-1}(z) = r_e x^2 / f^{-1}(z)$ $r_* = g(f^{-1}(z))$ $n_* = g(f^{-1}(z))^{2/3} f^{-1}(z) \varepsilon^{1/2} / r_e x^2$	$v_* = x/t$ $a_* = r_e x t$ $r_* = g(r_e x t)$ $n_* = g(r_e x t)^{2/3} / x t$	$h_* = x$ $v_* = r_e x^2 / f^{-1}(x)$ $a_* = f^{-1}(x)$ $r_* = g(f^{-1}(x))$ $n_* = f^{-1}(x) g(f^{-1}(x)) / r_e x^2$	$a_* = r_e x t$ $r_* = g(r_e x t)$ $h_* = f(r_e x t)$ $v_* = x/t$ $n_* = t f(r_e x t)^{2/3} g(r_e x t) / x^{3/2}$

表-2 相似律

3. 幾何学的模型流域における相似性

ここで、2. で得られた $\sin\theta \gg \frac{2}{3}\cos\theta$ の場合の相似律に基づき、具体的な問題と論じる。

3-1 modelの構成

縦横とも縮尺1/100のモデル製の流域模型(野洲川左支川荒川上流部、現地面積0.84km²)の1部分の小流域(図6のB流域7.0.18km²)の斜面部は、多孔性材料(S-10)を張り付け表層を形成した。

3-2 実験条件と実験結果

流域模型に、26.5mm/hrの一定強度の降雨を与え、定常状態になってから下限26.5mm/hr, 上限93.5mm/hr, 周期5分の正弦関数形の降雨を与えた。その結果 peak流出強度90mm/hr, peakの遅れ時間30秒という相似則のindexを得た。一、実流域の中小出水の場合、peakの遅れ時間は、30分程度であり、又、林内降雨強度2mm/hr以下については全部浸透し、残部5%が表層水の流出に因与するものと判明している。二、よ、現地での観測値を用い、実験のpeak降雨強度(R_m)に代した=現地降雨(V_p)が求められる。

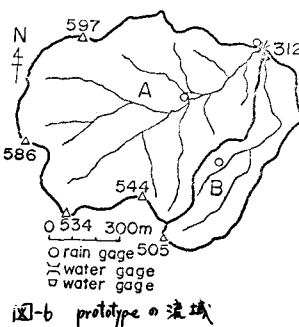


図-6 prototypeの流域

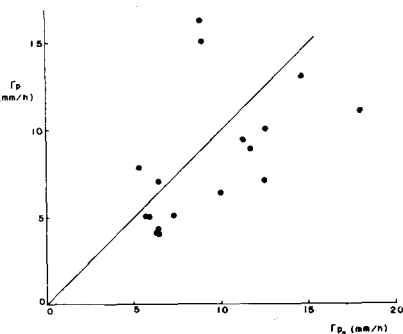


図7 V_{p0} と V_p の関係

$$V_p = Q_p / Q_m \cdot k \cdot z / \delta \cdot R_m / 0.05 + 2 \quad (3-1)$$

二、 Q_p, Q_m は、それぞれ現地、模型における peak 流出流量。また、 $k_m \approx 3, k_p \approx 3, \delta_m \approx 0.9, \delta_{p0} \approx$

なることが判っている。図7は、逆算的に求めた現地降雨(Y_p)と観測降雨(Y_p)との関係を示したものである。観測精度上から、近似的に $Y_{p0} \approx Y_p$ とみなせ、森林性の強い現象となっている。そのゆえ、 $R \propto Y_e$ となり、 Y_e は一意的に求まらない。

3-3 相似性の検討

先に求まる相似比は、任意の値をとることができず、ある拘束条件に支配される。[粗度係数]、河道部で、 $N_{xm} \sim N_{xp}$ と考えると、 $1/10 \leq N_x \leq 10$ となり、斜面部粗度は、 $N'_m \sim 10^{-2} (\text{m-sec})$ であり、(表1②)、prototypeは、Palmerの実験より、 $N'_p \sim 10^{-1} (\text{m-sec})$ となるから、 $1/100 \leq n' \leq 1$ と得る。[空隙率・透水係数] は、現象の再現のため、 $\delta_m \sim \delta_p$ 、 $k_m \sim k_p$ が必要と考えられ、また、降雨発生装置時間応答特性と実流域の peak の遅れ時間とを考慮すると、 $\tau = \delta x / a$ の関係より、[時間比] は $1/100 \leq t \leq 1$ と満す必要がある。[表層厚] については、実流域での $5 \sim 10 \text{ cm}$ の表層の存在と数 mm の多孔性材料が得られりと仮定すれば、 $h > 1/100$ の条件を得る。[降雨強度] については、現在の降雨給水能力からすると、 $Y_e \leq 10$ となるが、これは確定した拘束条件ではない。

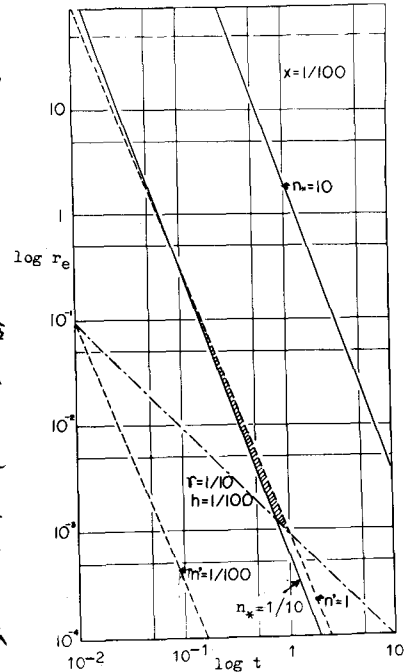


図-8 相似比の拘束条件

さて、図8のハッチは、上の拘束条件を満足すると考えられる実現可能な領域である。3-2の具体例について考えると、領域の1境界である $N_x = 1/10$ と $t = 1/60$ との交点から、 $Y_e > 45$ が必要となり、現在の装置だと不可能になる。なお、抵抗を増大とせよという観点から、 n' の境界線の上への移動による領域拡大は可能である。現在の装置を用いる場合、 $Y_e \leq 10$ 、 $N_x > 1/10$ であるから、少なくとも $t > 1/34$ を満す k_m 、 δ_m の材料選定が必要となる。なお、中間流・河道流のみを対象とすることができると比較的小出水の場合、次の相似比が成立する。

$k=1$, $x=1/100$, $\delta=1.8$, $t=1/60$
また、 $N_{xp}=0.03 \sim 0.08 (\text{m-sec})$ 、 $N_{xm}=0.02 (\text{m-sec})$ とすれば、中間流に対する有効降雨強度比は、 $Y_e = 2.3 \times 10^2 \sim 1.22 \times 10^3$ となり、本実験の peak 降雨強度 93.5 mm/h は、実流域の $3.5 \text{ mm/h} \sim 10.2 \text{ mm/h}$ の降雨に対応することがわかる。空間的スケールの問題、hysteresis 現象に起因する問題等も考えられるが、以上のことから、降雨発生装置給水能力の増大、および、表層表面抵抗の増大などが検討できる、シミュレーションの可能性が見い出される。

(参考文献)

- 石原、長尾、小葉竹；荒川流出試験地の流域特性；京大防災研年報オ11号、昭和43。
- 石原、小葉竹；山地流域における直接流出の生起過程；京大防災研年報オ12号、昭和44
- 下島；雨水流出シミュレーションの基礎に関する実験的研究；京大修士論文、昭和46。