

洪水流出の模型実験について

石原 安雄・下島 栄一

ON THE HYDRAULIC SIMULATION OF FLOOD RUNOFF

By Yasuo ISHIHARA and Eiichi SHIMOZIMA

Synopsis

This paper describes the simulation technique of the runoff process by a hydraulic model, especially, in the viewpoint of the fact that the dominant runoff components during floods are supplied by the flows on and/or through the porous surface stratum of a river basin. The similitude is derived by the use of the dynamic equations in which both the gravity and the friction terms are dominant in comparison with other terms. After considering the practical problems in making a hydraulic model by the similitude, the possibility of the simulation is found out. The evaluation of the inevitable error resulted from such an approximate simulation is given comparing with the result which will be obtained by an assumed model satisfying the theoretical similitude.

1. はじめに

洪水災害を理解するうえで、豪雨による洪水の流出現象に関する知識がもっとも基礎となる重要事項であることはいまさら言うまでもない。この洪水流出に関する研究は、1932年 Sherman の単位図法¹⁾の発表以来、本格的に行なわれるようになったが、それが自然現象を対象とするものであるので、現地で観測された資料を研究の基礎資料としなければならないことは明らかである。

しかしながら、現地観測によって測定される資料は、流域内外の数地点における雨量と流域出口からの流出流量が主であって、流域内で発生している現象、すなわち、表面流、中間流、浸透、地下水流などが流域全体にわたってどのようなになっているかを測定することは非常に困難であり、ほとんど未知の状態といっても過言ではない。

一方、表面流、中間流、浸透など洪水流出に関係する要素をとり出し、実験室内で細かく研究²⁾、その結果を用いて流域全体の洪水流出を理論的に研究³⁾することも数多く行なわれ、多大な成果を収めているが、洪水の流出現象の全体を理解するうえで必ずしも十分とはいえない。こうしたことは、洪水流出が河川流域というかなり広い領域で起る現象であり、しかも現地における観測・測定に際してはかなりの危険を伴うことを考えると、ある程度やむをえないことである。しかしながら、何らかの手段によって洪水流出現象に関する理解を深めることが極めて重要であるという認識のもとで、われわれは河川の流域を構成する最小の単位と考えられるような小面積の支川流域を対象として、できるだけ忠実に流出現象を追跡することができるよう観測研究を実施している^{4), 5)}。さらに、これと並行して、実験室内にこの流域の模型をつくり、模型上で洪水流出現象を再現させようと研究を開始したが、本文はこのような洪水流出に関する水理模型実験の可能性について検討した結果についての報告である。

2. 相似条件に対する検討

一般に、水理模型実験やその他のシミュレーションは、元の事象についての基礎的な法則性はわかっているが、境界の条件や計算が非常に複雑なために、容易に解が求められないような場合に利用される。したが

って、いまの場合、洪水時に流域内で起っている現象についての基礎的な法則性が完全にわかっていない現状において、何を手掛りとして水理模型を構成すればよいかというもっとも困難な、しかも基本的な問題がある。しかし、逆にいうと、この模型実験によって洪水流出現象を理解しようとする目的からすると、この相似の条件を求めることがこの種の研究の目的ともいえるのである。

このような意味から、本研究では現地観測を実施中の滋賀県野洲川支川荒川流域を対象として行なったが、この流域は風化花崗岩からなるかなり急峻な地形の山地流域である。

(1) 相似条件

周知のように洪水流出現象について非常に多くの研究がなされている。ここで、少し雨水流出の経路を考えよう。降雨はまず地表を覆っている植生によって一部は遮断されるが、大部分は地表に落下する。地表に降った雨水は多孔質な表層(A層)にしみ込むが、一部は地面の凹地にたまる(凹地貯留)。それと同時に更に地中深く浸透して、やがて地下水面まで達して地下水を涵養する。地中に透水性の異なる地層境界面があると、一時的に地下水状の流れを生じ(遅い中間流の発生)、更に強い雨のときは、表層内に早い中間流が発生し、更にはその水面が地上に現われ、いわゆる表面流が発生する。洪水流出には遅い中間流や地下流は大きく関与しないで、主として流域の表面近傍を流れる雨水流が主体となるわけである。

したがって、洪水時の主要な成分のみを対象とすると、第1義的には、流域内で発生している水流のうちで、表面流、早い中間流および河道流の三つの状態の流れを対象とすればよいこととなる。

a. 基礎式

さて、これらの水流に対する基礎式は、Fig. 1 及び Fig. 2 の記号を用い、近似的に次の諸式で与えられる。

i) 早い中間流については Darcy 則が成立するとすると、

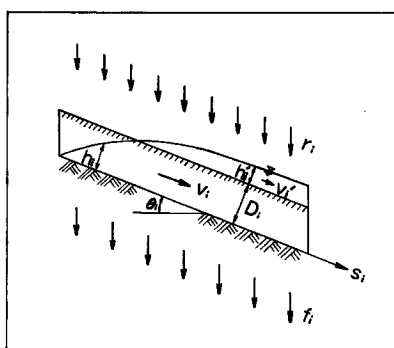


Fig. 1 Flow on mountain slope.

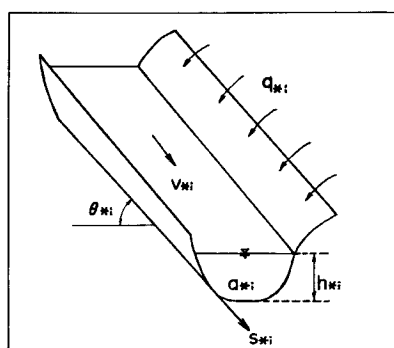


Fig. 2 Flow in channel.

$$\frac{v_i}{k_i} = \sin \theta_i - \frac{\partial h_i}{\partial s_i} \cos \theta_i \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\gamma_i \frac{\partial h_i}{\partial t_i} + \frac{\partial h_i v_i}{\partial s_i} = r e_i \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 v : 平均流速、 h : 水深、 k : 透水係数、 θ : 山腹斜面の傾斜角、 s : 山腹斜面に沿う長さ、 γ : 有効空隙率、 t : 時間、 r_e : 有効降雨強度、さらに、添字“ i ”は $i=m$ とおいたときが模型、 $i=p$ のときが実物に対するものを示す。

ii) 表面流については Manning 則が成立するとし、中間流の場合の記号に“ $'$ ”を付して相対応する量を示すこととすると、

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

$$\frac{\partial h_i'}{\partial t_i'} + \frac{\partial h_i' v_i'}{\partial s_i'} = r_{ei}' \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 n' : Manning の粗度係数。

iii) 河道流についても Manning 則が成立するとし、添字“*”で諸量を表わすと、

$$\frac{n_{*i}^2 v_{*i}^2}{r_{*i}^{4/3}} = \sin \theta_{*i} - \frac{\partial h_{*i}}{\partial s_{*i}} \cos \theta_{*i} \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial a_{*i}}{\partial t_{*i}} + \frac{\partial a_{*i} v_{*i}}{\partial s_{*i}} = q_{*i} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 r_* : 径深、 a_* : 流水断面積、 q_* : 河道単位長を当りの山腹斜面からの流入流量。さらに、

$$h_{*i} = f(a_{*i}), \quad r_{*i} = g(a_{*i}) \dots\dots\dots (7)$$

とおけるものと仮定する⁷⁾。

次に、水平および鉛直方向の長さをそれぞれ x_i, z_i で表わし、さらに、実物および模型の両運動系における相対応する物理量の比、すなわち、相似比を添字“i”をとった記号で表わすことにする。たとえば、中間流の平均流速に対する相似比を次のように定義するのである。

$$v_m = v \cdot v_p$$

b. 相 似 比

(i) 空間スケールのひずみ

空間スケールの対応は3ヶであるが、ここでは水平(x)、鉛直(z)の両スケール比に限定して考えることにする。さて、 $x \neq z$ の模型は“ひずみ”模型といわれるが、“ひずみ度”を次のように定義しておく。

$$z = \varepsilon x \dots\dots\dots (8)$$

そうすると、基礎式に表われる model と prototype の正弦、余弦の比は以下のようである。

$$\frac{\sin \theta_m}{\sin \theta_p} = \varepsilon \sqrt{\frac{1 + \tan^2 \theta_p}{1 + \varepsilon^2 \tan^2 \theta_p}} = F_{n1}(\tan \theta_p, \varepsilon) \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{\cos \theta_m}{\cos \theta_p} = \sqrt{\frac{1 + \tan^2 \theta_p}{1 + \varepsilon^2 \tan^2 \theta_p}} = F_{n2}(\tan \theta_p, \varepsilon) \dots\dots\dots (10)$$

F_{n1}, F_{n2} は“ひずみ”のみならず位置の関数となり、一般には一定の値をとることができず、ひずみ模型での相似則の議論は不可能となる。特別の場合、すなわち (イ) $\sin \theta_i \approx 1, \cos \theta_i \approx 0$ (ロ) $\sin \theta_i \approx \tan \theta_i, \cos \theta_i \approx 1$ では可能性がありそうだが、(イ)のような急こう配は現実には不可能である。一方、(ロ)の緩こう配の場合、形式上は相似を論じることが可能だが、その際、基礎式の適合性について検討する必要がある。

さて、山地流域での流れ場のこう配はかなり大きなものと考えられるから、一般に言ってひずみ模型を用いることは、製作上の困難さ、また、人為的に相似の誤差を生じせしめる理由により、その評価ができれば別であるが、余り好ましい模型とはいえない。

(ii) 相似条件式

流出系の相似則を求めるには、次のように考えればよい。まず、中間流については、

$$\frac{v}{k} = \sin \theta = \frac{h}{s} \cos \theta \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{\gamma h}{t} = \frac{h v}{s} = r_e \dots\dots\dots (12)$$

また、表面流と河道流については、それぞれ次のようである。

$$\frac{v'^2 n'^2}{h_i'^{4/3}} = \sin \theta' = \frac{h'}{s'} \cos \theta' \dots\dots\dots (13)$$

$$\frac{h'}{t'} = \frac{h' v'}{s'} = r_{e'} \dots\dots\dots (14)$$

$$\frac{v_{*i}^2 n_{*i}^2}{r_{*i}^{4/3}} = \sin \theta_{*i} = \frac{h_{*i}}{s_{*i}} \cos \theta_{*i} \dots\dots\dots (15)$$

$$\frac{a_*}{t_*} = \frac{a_* v_*}{s_*} = q_* \dots \dots \dots (16)$$

なお、河道部の横断面の幾何形状を表わしてある式 (7) の関数形は、具体的に $f \propto a_*^{\alpha}$, $g \propto a_*^{\beta}$ のように a_* のべき表示でなくてはならぬ。

(iii) 時空間のスケール

式 (11)～式 (16) の条件式は、雨水流出における各プロセスを独立の状態として扱ったものであるが、一般に我々の興味の対象となるのは流域全体からの相似の議論であろう。すなわち、少なくとも“単位流域、”という立場に立てば、中間流、表面流、河道流という各部分系の相似性を同時に満足する必要が出て来る。結局、何を媒介にして全流域という高次元の相似へと拡張するかが問題となろう。ここで、次のような例を考えよう。 $\gamma_m = \gamma \gamma_p$, $k_m = k k_p$, $x_m = x x_p$, $t_m = t t_p$, $h_m(x_m, t_m) = h \cdot h_p(x_p, t_p)$, $r_{em} = r_e \cdot r_{ep}$ とし、降雨の時間スケールを場の現象スケール (t) と違った値 $\bar{t}$ を用いたと仮定する。簡単のために、 $\varepsilon = 1$ とすれば、中間流は、

$$\frac{\gamma h}{t} = \frac{k h}{x} = r_e \frac{r_e \left(\frac{t}{\bar{t}} t_p \right)}{r_e(t_p)}$$

の相似条件を満たす必要があるが、相似比は一定不変の値であるから、時間スケールは、 $t = \bar{t}$ でなくてはならぬ。表面流についても上述と同じである。河道流に関しては、表面流や中間流による横流入を受けるはずだから、結局、降雨の時間スケールは媒介にして、各プロセスの時間スケールは、同じものとなる。なお、具体的な議論は行なわないが、降雨の時間スケールの誤差が、相似律の誤差の評価を大いに複雑にすることをお付け加えておく。

(iv) ま と め

さて、時間についての議論を考慮すると、各プロセスの相似の同時性は、時間と空間の連続性と現象の連続性を媒介として求められよう。Table 1 は、流出現象の構成要素が満足しなければならない相似則を表わしている。得られた相似則は、現象が「抵抗」によって顕著に作用を受ける場合のみ適用されることは言うに及ばぬが、それと同時に、その相似則は基礎式からの数学による演繹の結果であり、模型における現象自体を決める物理的拘束性が入っていないことに注意すべきである。

Table 1 Relations between similarity ratios.

Condition	Distorted Model	Undistorted Model		
	$\sin \theta \doteq \tan \theta \quad \cos \theta \doteq 1$	$\sin \theta \gg \frac{\partial h}{\partial s} \cos \theta$	$\sin \theta \doteq \frac{\partial h}{\partial s} \cos \theta$	$\sin \theta \ll \frac{\partial h}{\partial s} \cos \theta$
Interflow	$v = x/t, \quad \gamma = 1$ $h = z = \gamma x^2 / tk$ $r_e = (\gamma x/t)^2 / k$	$v = k$ $h = r_e x / k$ $t = \gamma x / k$	$k = v = \gamma_e = x/t$ $h = x$ $\gamma = 1$	$v = (r_e k)^{1/2}$ $h = x (r_e / k)^{1/2}$ $t = \gamma x / (r_e k)^{1/2}$
Surface Flow	$h' = z, \quad \varepsilon = z/x$ $v' = r_e / \varepsilon$ $n' = z^{2/3} \varepsilon^{3/2} / r_e$	$h' = r_e t$ $v' = x/t$ $n' = r_e^{2/3} t^{5/3} / x$	$h' = x$ $v' = r_e = x/t$ $n' = x^{2/3} / r_e$	$h' = r_e t$ $v' = x/t$ $n' = r_e^{7/6} t^{13/6} / x^{3/2}$
Channel Flow	$h_* = z$ $a_* = f^{-1}(z)$ $v_* = r_e x^2 / f^{-1}(z)$ $r_* = g \{ f^{-1}(z) \}$ $n_* = g \{ f^{-1}(z) \}^{2/3} / f^{-1}(z) \varepsilon^{1/2} / r_e x^2$	$v_* = x/t$ $a_* = r_e x t$ $r_* = g(r_e x t)$ $n_* = g(r_e x t)^{2/3} t / x$	$h_* = x$ $a_* = f^{-1}(x)$ $v_* = r_e x^2 / f^{-1}(x)$ $r_* = g \{ f^{-1}(x) \}$ $n_* = f^{-1}(x) / g^{2/3} \{ f^{-1}(x) \} / r_e x^2$	$h_* = f(r_e x t)$ $a_* = r_e x t$ $v_* = x/t$ $r_* = g(r_e x t)$ $n_* = t f(r_e x t)^{1/2} / g(r_e x t)^{2/3} / x^{3/2}$

(2) 拘束条件

相似則の物理的な拘束を見出すため、一応ここでは、荒川流域を対象としつつ数学的な検討を行う。対象流域のこう配 (sine) は斜面部で 0.4~0.6, 河道部で 0.2~0.4 程度であり, $\sin \theta \gg \partial h / \partial s \cdot \cos \theta$ と考えてさしつかえない。このような流域の流出系は14ヶの物理量の比と10ヶの相似条件を持つ自由度4の系である。以下、各物理量の比を具体的に検討していく。

i) 粗度係数：実河川 (荒川) の河床には、自然状態で粒径数 10 cm の石が散在し、その間に 50% 粒径が 1~2 mm の砂が存在し常時流水しない部分は雑草が繁茂している⁸⁾。これより Manning の粗度係数は 0.03~0.08 (m-sec) 程度と予想される。模型部では粗度係数を 0.01 (m-sec) より小さくは作ることができないので、一応 same order として考えると、河道部粗度係数比 (n_*) は、

$$10 > n_* > 1/10 \dots\dots\dots (17)$$

となろう。一方、斜面部の表層の粗度は、実流域では不明であるが、仮に現地実験と考えられる Palmer⁹⁾ の実験における “low flow,” の抵抗係数 $n_p' = 0.2 \sim 0.4$ (m-sec) を目安にして 10^{-1} (m-sec) の order と考えておく。模型においては、後述する実験値を参考にすると 0.02 (m-sec) 程度であるので、一応 10^{-2} (m-sec) の order とすれば、表層の粗度係数比 (n') は、

$$1 > n' > 1/100 \dots\dots\dots (18)$$

となろう。しかし、抵抗を増大させるために針などを使用すると 10^{-1} (m-sec) の order 程度まで n_m' を上げることができるが¹⁰⁾、そのために異った特性の流水が現われる恐れがある。

ii) 透水係数、空隙率：現地における観測¹¹⁾ によると、表層内の雨水の伝播速度は 3 cm/sec 程度であり、空隙率を 50%, 平均勾配を 0.5 程度とすれば、透水係数は 3 cm/sec 程度となろう。一方、雨水流出における初期損失や不飽和浸透流などの問題を考えると、模型での表層が余り密なものだと異った現象が生じる恐れがあるので実流域のものと same order 程度が好ましかろう。よって、

$$10 > k > 1/10 \dots\dots\dots (19)$$

$$10 > \gamma > 1/10 \dots\dots\dots (20)$$

iii) 表層の厚さ：実流域の山腹斜面は、10~20 cm 程度の落葉層で覆われており、一方、模型部での表層形成は、最小数 mm 程度まで製作が可能だとする。 d をもって表層厚さの比とすれば、

$$d > 1/100 \dots\dots\dots (21)$$

を得る。しかし、表層厚さは、中間流の運動の場を決めるから、表層厚さの比は、水深の比と同一の値でなくてはならぬ。

iv) 降雨強度：これは降雨発生装置の給水能力と精度から決められるので、一応、以下のように定めておく。

$$10 > r_e \dots\dots\dots (22)$$

v) 時間スケール：これは、表層の場の定数と空間スケールから $t = x\gamma/k$ のように決り、また、降雨発生装置の応答特性や時間的な測定精度よりも拘束される。よって、次のようにしておく。

$$1 > t > 1/100 \dots\dots\dots (23)$$

ここで、上述の拘束条件式(17)~式(23)を、模型の縮尺が 1/10, 1/100, 1/1000 の場合に照合して相似の問題を考えてみる。Fig. 3~Fig. 5 は流出系の相似の可能性を図示したものである。図の見方は、次のようである。

少なくとも、 $r_e \sim t$ の domain で

$$R_1(t; x, n_* = 10) > r_e > R_1(t; x, n_* = 1/10) \dots\dots\dots (24)$$

$$R_2(t; x, n' = 1) > r_e > R_2(t; x, n' = 1/100) \dots\dots\dots (25)$$

$$r_e > R_3(t; \gamma, h = 1/100) \dots\dots\dots (26)$$

$$r_e > R_4(k, x, h = 1/100) \dots\dots\dots (27)$$

$$1 > t > 1/100 \dots\dots\dots (23)$$

ここに, $R_1 = g^{-1} \{ (n_* x / t)^{2/3} \} / x t$, $R_2 = n'^{3/2} x^{3/2} t^{-5/2}$

$$R_3 = h\gamma / t, \quad R_4 = kh / x$$

を満し, 同時に,

$$100x > k/\gamma > x \dots\dots\dots (28)$$

を満足するような物理量の比が求められるなら, その模型は相似の状態にあることになる(注)。 $x=1/1000$, x

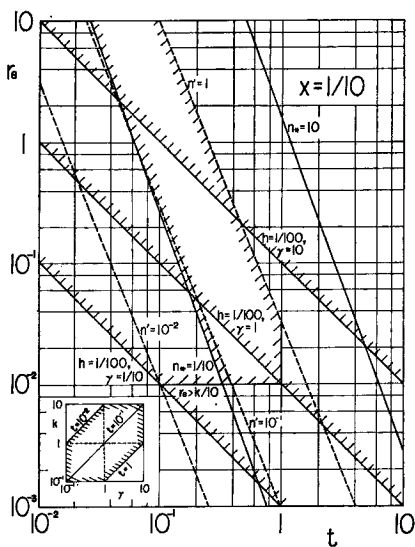


Fig. 3 Physical restrictive conditions of the similitude at $x=1/10$.

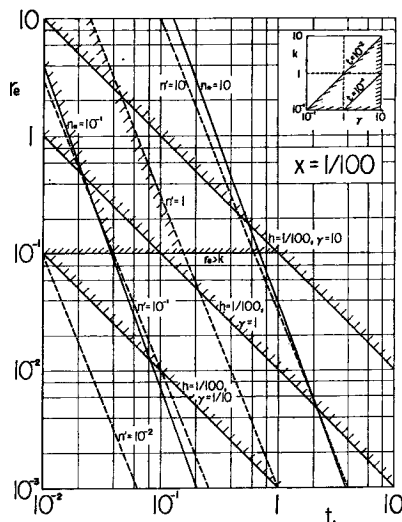


Fig. 4 Physical restrictive conditions of the similitude at $x=1/100$.

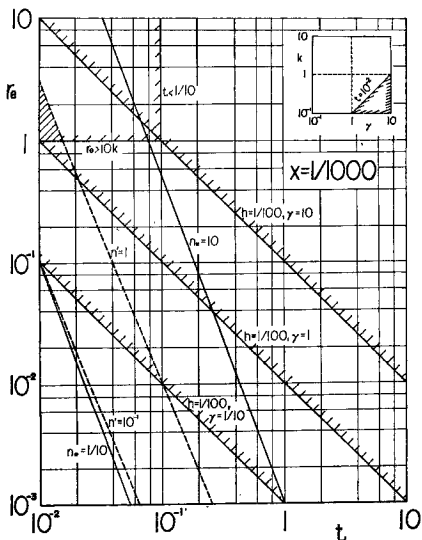


Fig. 5 Physical restrictive conditions of the similitude at $x=1/1000$.

(注) この議論では, 河道部流水の横断形状に関する幾何学的相似条件の一部, $r_e = x/t$ が緩和されている。これを含めた厳密な議論については, 土木学会第27回年次学術講演会講演集「洪水流出模型の構成とその精度について」を参照されたい。

$=100$ の場合、少なくとも式 (24), (25) と (27) を同時に満す領域がなく、今までの相似の議論は不可能となる。 $x=1/10$ については、 $r_e \sim t$ の domain でハッチを施した部分が一応の相似の可能性がある領域と考えることが出来る。なお、 $x=1/100, 1/1000$ の場合にも、粗度に関して、河道部はできるだけ滑らか (n_{*m} が小) に、斜面表層部は出来るだけ粗く (n_{*m}' が大) にすることが望ましいことがわかる。

3. 多孔質材料の水理学的特性

相似則を実現するには、流れ場を形成する必要がある。われわれは粗度についてはかなりの知識をもっているが、多孔質材料及びそれを運動場とした流水特性に関しては不明の点が多い。本実験は、模型の形成上、最も重要な問題の1つと考えられる実流域の多孔性の層内の流れを模擬するために、流水の抵抗特性の解明や材料選定などを目的としたものである。

(1) 実験方法

巾 25 cm 長さ 2 m の長方形水路の底部に各種の多孔性材料 (Table 2: 参照) を張り付け、上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 2 mm の穴に取り付けたビニールチューブを水路側壁に固定したガラス管 (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。

Table 2 Characters of porous materials.

KIND OF MATERIALS	THICKNESS (mm)	POROSITY (%)	MANNING ROUGHNESS COEFF. (m-sec.)
SF-10	10	92	0.025
SF-20	20	96	0.021
S-10	10	91	0.021
BC-200	4	—	0.014

(2) 実験結果とその考察

i) 層内の流れ

種々の多孔質材料で実験したところ、多くの材料で毛管上昇が数 mm におよび、水深は相似比のとり方とも関係するので、実流域の初期損失、貯留特性また不飽和流との対応を考えると、メニスカス効果の出来るだけ小さなものを探すことが必要となった。その結果、合成繊維で作ったマットが最適と考えられた。Fig. 6 は、実験の1例であり水深と流量との関係を示している。図からもわかるように、多孔質材料内の流れには必然的に毛細管現象も生じるので、流れ自体複雑であり、また、測定をも困難なものとしている。しかし、一応 Forchheimer 則に従うことが推定された (Fig. 7)。

$$i = \frac{1}{k} v + \alpha v^2 \quad \dots \dots \dots (29)$$

or

$$q = \left[-\frac{1}{k} + \sqrt{\frac{1}{k^2} + 4\alpha i} \right] ih \equiv K(k, \alpha, i) ih \quad \dots \dots \dots (30)$$

ここに、 i : エネルギーこう配、 k : 透水係数、 α : 定数。実際の流域では Darcy 則に従うか、Forchheimer 則に従うか直接測定が困難なため明らかではないが、上式中の K が物質定数の k, α とうこう配 i だけの関数であるので、特定の流域を対象とする限りは形式上 Darcy 則と類似と考えてよく、“等価透水係数”ともいふべき K を透水係数 k の代りに用いることが出来る。

ii) 表面上の流れ

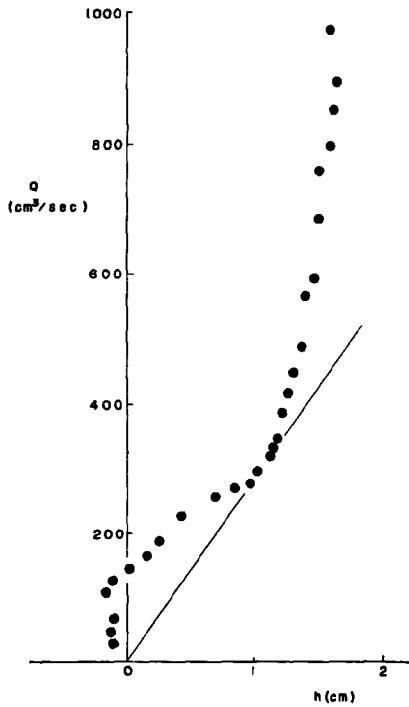


Fig. 6 Relation between the discharge Q and the flow depth h (SF-10, $\sin \theta = 0.385$).

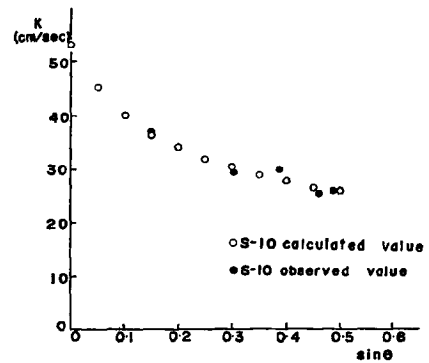


Fig. 7 Relation between equivalent coeff. of permeability K and the bottom slope $\sin \theta$.

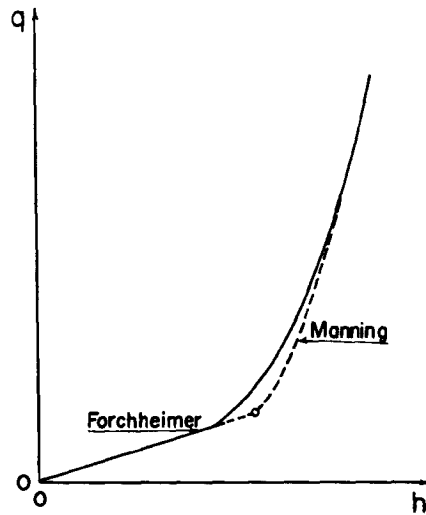


Fig. 8 Schematic figure for illustrating the relation between the discharge per unit width q and the flow depth h .

さて、流量の増加とともに激しい凹凸の多孔質材料の表面より出始めた流水は、水深と流量の関係をほぼ連続的に示しながら流れ場や流れの遷移域を脱する。遷移域の流れは、表層内の流れ（Forchheimer 則）を示す直線の延長上に（Fig. 8: 参照）、表面の凹凸の平均的な位置を基準面にとり、その面を固定床のように考えた場合の Manning の抵抗則に漸近することが認められた。Fig. 9 は、その様子を示したものである。他の材料に比べ薄く、密で、均一な厚さをもつ BC-200 については、水深と流量の曲線の急変化点（遷移開始点）と基準面とは、ほとんど一致するという結果を得た。この事実は凹凸の面的不規則さをもつ材料の基

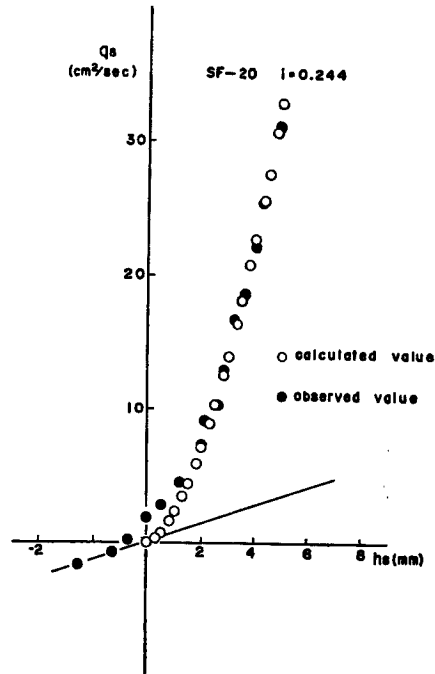


Fig. 9 Relation between the discharge per unit width q and the flow depth h based on the position of mean surface of the porous material.

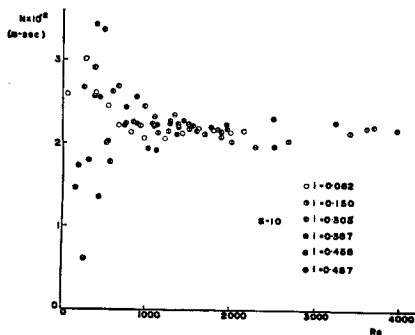


Fig. 10 Relation between Reynolds No. and Manning roughness coeff. based on the position of mean surface of the porous material.

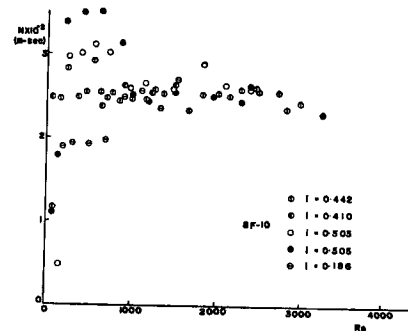


Fig. 11 Relation between Reynolds No. and Manning roughness coeff. based on the position of mean surface of the porous material.

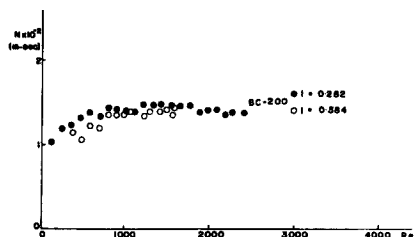


Fig. 12 Relation between Reynolds No. and Manning roughness coeff. based on the position of mean surface of the porous material.

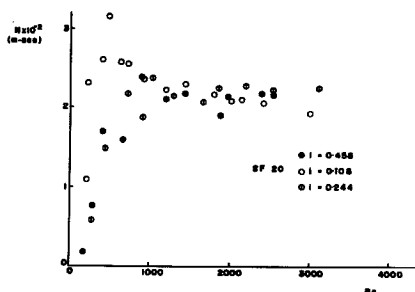


Fig. 13 Relation between Reynolds No. and Manning roughness coeff. based on the position of mean surface of the porous material.

準面の選定を明確に示していると思われる。Fig. 10~Fig. 13 は遷移域の流れの様子を調べるため、基準面より上部の流れ関にする Manning の粗度係数と Reynolds 数 (L : 基準面からの水深, U : 基準面より上部の平均流速) との関係を示したものである。いずれの場合にも Reynolds 数が 800~1000 程度を境にして粗度係数が一定の状態に移行しているようである。移行の様子は複雑であるが、それは、遷移域や流れの複雑さ、hysteresis 現象の問題や基準面の決定に関する不正確などに起因しよう。しかし、遷移域の流れをある関数 (例えば、直線) で近似すれば、出水解析への応用も可能であろう。

4. 水理模型の実現性

(1) 模型の製作

本研究に用いた流域模型の対象である実流域は、琵琶湖へ流入する野洲川中流部の左支川である荒川の最上流域で面積 0.84 km^2 の小流域である (Fig. 14: 参照)。模型の縮尺については、実流域の面積、模型としての意義や製作上の模型の大きさの制限を考え、とりあえず $1/100$ としたが、第2章2節で述べたようにこの縮尺の場合、相似の実現はかなり厳しいものと考えられる。この流域模型はモルタル仕上のひずみのない幾何学模型であり、Fig. 14 の梅ヶ谷流域 (0.18 km^2) に相当する部分に前章で述べた S-10 の多孔質材

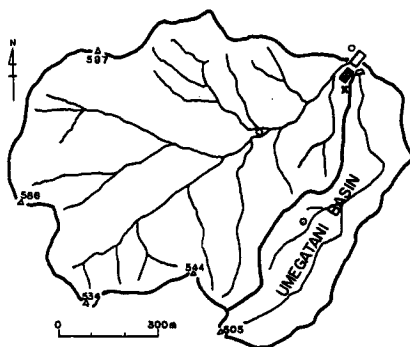


Fig. 14 Topographical outline of the Ara river basin.

料を張り付けている。なお、本模型は、京都大学防災研究所宇治川水理実験所内の河川災害総合基礎実験施設の山地部に設置されている¹²⁾。

(2) 実模型と理想模型

現実の模型（実模型）では相似則を必ずしも満足しない。いま、相似の状態にある模型を理想模型と考え、両模型の解を理論的に比較して模型を検討する。

さて、雨水の伝播過程を考えると、中間流や表面流といった斜面部での現象と河道部における現象によって構成される。しかし、全流域からの立場からすると必ずしも各要素は同等なものとは考えられないから、次のように考えてみよう。流出系においてどの要素が卓越しているかを考え、その系でのみ相似性を考え、残りの系は相似とは無関係な雨水伝播を行なうとし、実模型を理想模型に対する誤差的なものとするなら、その誤差評価を行うことにより、一応の実流域と実模型とにおける現象の対応がつくと思われる。ここで、Fig. 15 のようなモデルを考えると、実模型における物理量を直接実流域のものと関連づけができないので、理想模型を設定し実模型との対応を推定して、間接的に実流域の物理量を知るという方法論が明確になる。なお、以上の過程からの実流域の現象の推定は、最適な実模型の設定を媒介にして考えねばならぬことは言うに及ばぬと思う。

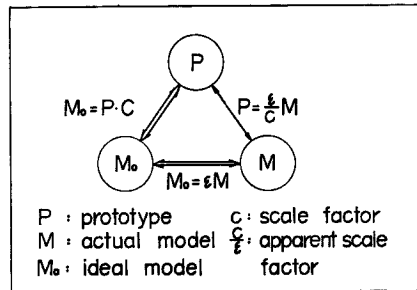


Fig. 15 Schematic figure for illustrating relation between the prototype and the model.

次の問題としては、何を基準にして各要素の重要性を決めるかである。その指標としては、雨水が斜面、河道を伝播するに要する時間（おくれ時間）¹³⁾を用いるとよいようである。本研究の対象となっている小流域では、斜面上の伝播時間の方が河道部の伝播時間よりかなり大きいとみなされるので、河道部の効果が無視出来そうである。具体例として次のようなものを考えてみよう。斜面上の流れは実模型、理想模型で等しく、ただ河道部に関して実模型では相似条件を満たさない、具体的には粗度が相似状態にない場合について。さて、斜面からの流入条件は両模型とも同じであるから、河道部での水量を同時刻、同位置で対応させ、理想模型に添字“0”をつけ、流水断面積、流量について求めてみる¹⁴⁾と、

i) 中間流からの河道流では、

$$\frac{a_{*}}{a_{*0}} = \left(\frac{n_{*}}{n_{*0}} \right)^{p_c} \left[\frac{r_{em}(\bar{t}_j, T_s)}{r_{em}(\bar{t}_0, T_s)} \right]^{p_c} \quad (31)$$

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{r_{em}(\bar{t}_j, T_s)}{r_{em}(\bar{t}_0, T_s)} \quad (32)$$

ここに、

$$r_{em}(\bar{t}_j, T_s) = \frac{1}{T_s} \int_{t_j - T_s}^{\bar{t}_j} r_{em}(\xi) d\xi, \quad q(t, t - \tau_j) = q(\bar{t}_j) = \frac{1}{t - \tau_j} \int_{\tau_j}^t q(\xi) d\xi$$

$$\bar{t}_j = t - \theta_j(t - \tau_j), \quad 1 > \theta_j > 0$$

で、 $q(t)$: 時刻 t における斜面からの流入強度、 T_s : 斜面伝播時間、 $j = "0,"$ or non $"0,"$ を示す。

ii) 表面流による河道流では、

$$\frac{a_*}{a_{*0}} = \left(\frac{n_*}{n_{*0}} \right)^{p_c} \left[\frac{r_{em}(\bar{t}_j, T_{sj}')}{r_{em}(\bar{t}_0, T_{s0})} \right]^{p_c} \dots\dots\dots (33)$$

$$\frac{Q_*}{Q_{*0}} = \frac{r_{em}(\bar{t}_j, T_{sj}')}{r_{em}(\bar{t}_0, T_{s0})} \dots\dots\dots (34)$$

ここに,

$$\begin{aligned} \overline{r_{em}(\bar{t}_j, T_{sj}')} &= \frac{1}{T_{sj}'} \int_{t_j - T_{sj}'}^{t_j} r_{em}(\xi) d\xi \\ \overline{q'(t, t - \tau_{sj}')} &= q'(\bar{t}_j) = \frac{\sqrt{\bar{t}}}{n'} \left\{ \int_{t_j - T_{sj}'}^{t_j} r_{em}(\xi) d\xi \right\}^{\frac{5}{3}} = \frac{\sqrt{\bar{t}}}{n'} \{ T_{sj}' \overline{r_{em}(\bar{t}_j, T_{sj}')} \}^{\frac{5}{3}} \\ \bar{t}_j &= t - \theta_{sj}'(t - \tau_{sj}'), \quad 1 > \theta_{sj}' > 0 \end{aligned}$$

で, $q'(t, T_{sj}')$ は i) の $q(t, T_s)$ に対応する。なお, $p_c = 3/2z_0 + 3$, $r_* = K_* a_*^{2z_0}$, $K_* = x^{1-2z_0}$ とする。

さて, $|n_*/n_{*0} - 1| \gg |r_{em}/r_{em0} - 1|$ とおくと, 流水断面積については, $a_*/a_{*0} \approx (n_*/n_{*0})^{p_c}$ となりかなり大きな誤差が予想されるが, 河道流量については, 比較的 1 に近い値をとりそうである。

以上のような誤差の問題, また, 次下とも関連するが場の定数や降雨の推定並びに設定にともなう誤差の問題¹³⁾ など, 一般的な理論の展開が必要であろう。

(3) 模型の構成

(i) 構成手順

本研究の対象の流出系は自由度 4 の運動系であるが, 模型の形成に際し, 何を独立量に, 何を従属量にした方がよいかを決めること, また, それに関連するが, 実流域においてどの物理量が推定可能かを知ることは, 重要な問題である。

さて, 斜面部表層を形成するに際し, 多孔質材料の透水係数, 空隙率を従属変数的に変化させることの困難さを考えると, むしろ, 推定可能な r_m, k_m を独立変数として与え, それより決る r, k を独立量とみなし, これを拘束条件として他の相似比を決めた方が実際のであろう。一方, 表層部の表面粗度については表面の粗さを変化させることが可能であるので, ある程度可変と考えればよく, 従属変数として考えた方がよい。

さて, Table 3 は, 実流域においてかなりの精度で確定できる量および 模型において固定される量と可

Table 3 Properties of the physical values in the prototype and the model, and of scale factors.

Prototype	Model	Scale Factor
$\underline{x_p}$	$\underline{x_m}$	$\underline{x}$
$\underline{t_p}$	$\underline{t_m}$	$\underline{t}$
$\underline{r_{ep}}$	$\underline{r_{em}}$	$\underline{r_e}$
$\underline{k_p}$	$\underline{k_m}$	$\underline{k}$
$\underline{\gamma_p}$	$\underline{\gamma_m}$	$\underline{\gamma}$
$\underline{n_p'}$	$\underline{n_m'}$	$\underline{n'}$
$\underline{n_{*p}}$	$\underline{n_{*m}}$	$\underline{n_*}$
= estimable value	= fixed value — variable value	= fixed value — variable value

変量とを示している。これより、特定の模型を対象にすると、 x は固定されるので、 t , r_e , n_* の3つの相似比が可変となるが、第2章より n_{*m} をできるだけ小さくして n_* の値を小さく設定することが有利である。以上のことを考慮して以下の手順に従えばよい。

i) 実用できるような表層を模型に設置する。

ii) n_* は既知量であるから、 r_e と t を $n_* = g(r_e x t)^{2/3} x^{-1} t$ の関係に従って変化させ、中間流出のみが発生していると思われるときの hyetograph $r_{ep} \sim t_p$ 曲線を用いて実験的に hydrograph $Q_m \sim t_m$ を求め、

$$Q = v_* a_* = r_e x^2$$

で決められる相似比 Q と t を用いて $Q_m/Q \sim t_p/t$ に変換して、実測値をもっとも適合する組合せとして r_e , t を決定する。

iii) $t = \gamma x/k$ の関係より γ/k が決まる。一方、 γ_m/k_m は既知であるから γ_p/k_p が求まる。

iv) ii) で決った r_e , t を用いて、表面流出の生じているより大きな出水に対して実験を行ない hydrograph $Q_m \sim t_m$ を求め、これを実流域の $Q_p \sim t_p$ と比較し、両 hydrograph に差異を生ずるときの $Q_p \sim t_p$ の限界を推定し、それに対応する模型での表層厚さを実験的に求めていく。

v) 各種の洪水のピーク流量の到達時間とその間の有効降雨強度との関係より n_p' をほぼ推定し、

$$n_m' = n_p' \cdot r_e^{2/3} \cdot t^{5/3} x^{-1}$$

の値を目安にして、iv) で求めた表層表面に適当な人工粗度をつけ、大出水に対して実験を行ない、実測値と実験値とが対応するように試行錯誤的に n_m' を決定する。

vi) n_m' が求まると、 n_p' は以下のようにして求まる。

$$n_p' = n_m' r_e^{-2/3} t^{-5/3} x$$

vii) $n_* = g^{2/3}(r_e x t)t/x$ より n_* を推定し、check の意味で n_{*m} より n_{*p} を求める。

viii) すでに求めた D_m , r_e , t を用い、iii) を参考にして、

$$\gamma_p = \gamma_p \frac{D_m}{D_p} \frac{1}{r_e t}, \quad k_p = k_m \frac{\gamma_p}{\gamma_m} \frac{t}{x}$$

より γ_p , k_p が求まる。

なお、Fig. 16 は上述の手順をフローチャートにしたものであるが、これは1つの例であるから必ずしも別の方法がないわけではない。

以上のようにすることによって、実流域における諸定数を決定しながら模型が構成されることとなり、当初の目的である。流域の内部で何が起こっているかを、模型実験を完成する過程において調べることができるものと思う。

(ii) 模型構成に関する問題点

洪水流出に直接貢献する降雨分を有効降雨と呼ぶと、これは実際の降雨から、遮断量、表面貯留量、浸透量を差し引いたものに相当する。

これらのうち、遮断量は模型上部に金網を張ることによって模擬することができるが、土湿不足の充足分、凹地貯留、浸透については現在のところ模擬する方法を見出していない。

したがって、いまのところは、いわゆる初期損失と浸透損失は、現地観測結果を解析して、観測降雨から a priori に差し引くことができるものと考えている。よって、上述の議論においても、この有効降雨に対する洪水の hydrograph も観測による hydrograph から分離されているものとしている。

(iii) 構成例¹⁶⁾

流域模型に 26.5 mm/hr の一定強度の降雨を与え、定常状態になってから、下限 26.5 mm/hr 上限 93.5 mm/hr、周期5分の正弦関数的な降雨を与えた。その結果は、ピーク流出強度 90 mm/hr、降雨と流量とのピークの遅れ時間 30 秒であった。なお、表面流は全く発生していない。

一方、実流域の中小出水の場合、ピークの遅れ時間は 30 分程度である。

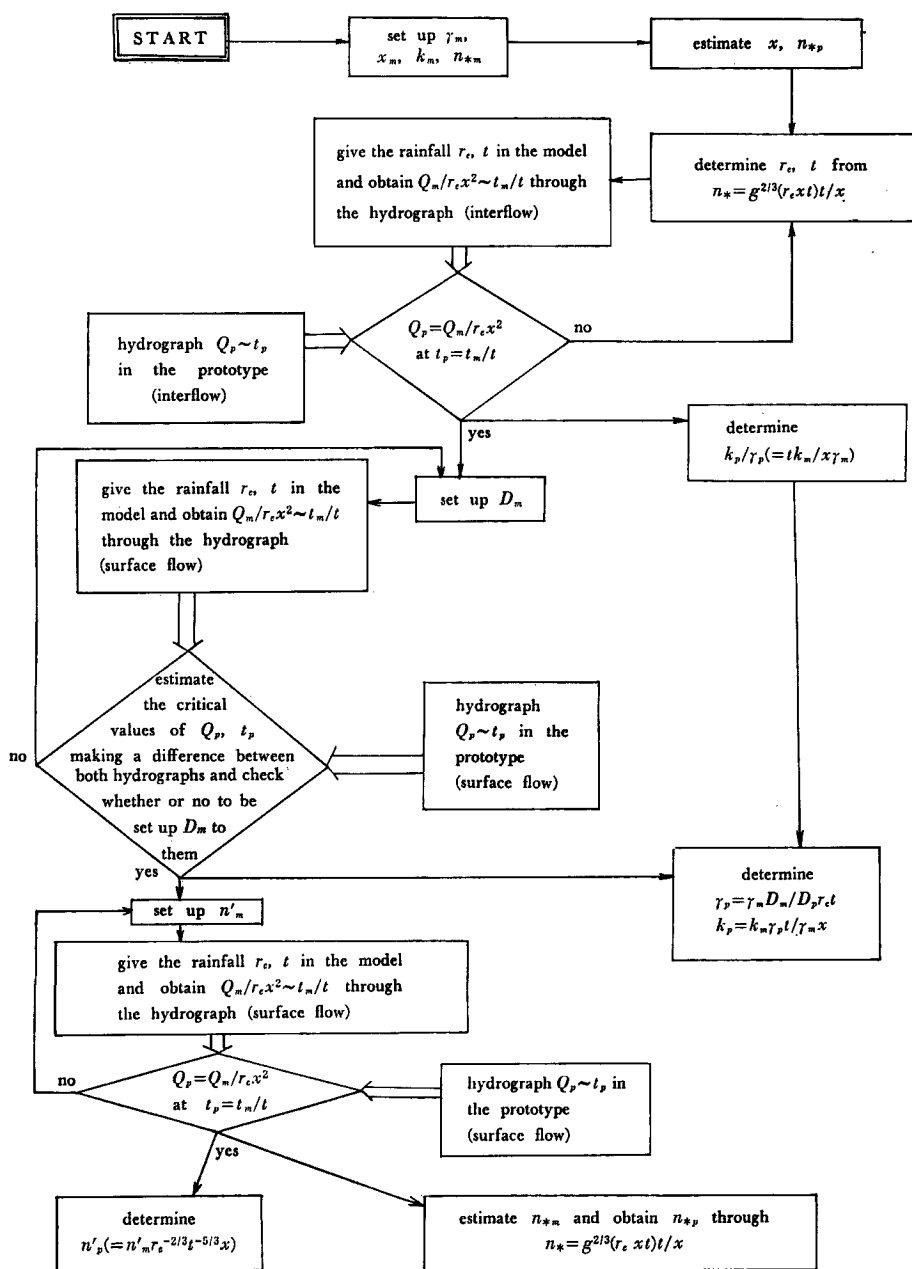


Fig. 16 Process of making a hydraulic model.

さて、中間流、河道流のみを対象とすることができる比較的小出水の場合、本実験において、 $x=1/100$, $t=1/60$ が成立する。実流域において、林内降雨 2 mm/hr 以下では全部浸透し、残部の 5% が表層水の流出に関与するという観測結果より、 $n_{*p}=0.03\sim0.08$ (m-sec), $n_{*m}=0.02$ (m-sec) とすると、模型での 100 mm/hr の降雨強度が現地の 82~440 mm/hr の降雨に相当するという結果を得る。また、 $\gamma_m=0.9$, $k_m=3$ cm/sec, $t=1/60$, $x=1/100$ とおくことにより、 $k_p/\gamma_p=5.6$ cm/sec を得るが、これらの議論の是非は、今

後の研究、検討によらなければならない。

5. む す び

以上、洪水流出では、表面流、早い中間流、河道流といった「流れ」が支配的な要素であり、また、それらの要素では「抵抗」が顕著な力学的因子であろうという立場に立って、水理模型による雨水過程のシミュレーションの可能性を検討してきた。

本研究の対象となった縮尺 1/100 の流域模型では、流域全体から眺めた相似の条件は非常に厳しいものとなり、そこに可能性を見い出すには、「流れ」の中でも支配的な要素を抽出して誤差論の見地から相似の問題を扱わねばならないことがわかった。その際、模型構成に関して表層に用いる多孔質材料は、実流域のものと same order の透水係数、空隙率を有するものを選ぶべきであり、その表層表面粗度はできるだけ粗く、河道部の粗度はできるだけ滑らかにする必要がある。

さて、完全な相似模型は恒等写像とも考えられる実流域以外にはないのだから、われわれは、近似的なシミュレーションから必然的に生じる誤差の評価の重要性を再認識すべきであろう。このような立場に立てば、scale effect の問題にも対応することができるかも知れないし、また、その途上で、最適模型ともいえるべき実模型の構成の方法論も見い出されるかも知れない。

今後、このような立場に立って研究を進めてゆくつもりである。最後に、図面作成に助力いただいた文部技官中村行雄 稲葉正喜両氏に感謝します。

参 考 文 献

- 1) Sherman, L. K.: Streamflow from Rainfall by the Unit-Graph Method, Eng. News Record, Vol. 108, 1932, pp. 501-505.
- 2) たとえば、岩垣雄一・末石富太郎：横から一様な流入のある開水路の不定流について，土木学会誌，第 39 巻，第 11 号，昭和 29. 11，pp. 575-583.
- 3) たとえば石原藤次郎・石原安雄・高棹琢馬・頼千元：由良川の出水特性に関する研究，京都大学防災研究所年報，第 5 号 A，昭和 37. 3，pp. 147-173.
- 4) 石原安雄・小葉竹重機：山地流域における直接流出の生起過程，京都大学 防災研究所年報，第 12 号 B，昭和 44. 3，pp. 247-259.
- 5) 石原安雄・小葉竹重機：荒川流出試験地における水収支について，京都大学 防災研究所年報，第 14 号 B，昭和 46. 3，pp. 131-141.
- 6) 末石富太郎：特性曲線法による出水解析について，土木学会論文集，第 29 号，昭和 30. 12，pp. 77-87.
- 7) 上田年比右：雨水流出に関する基礎的研究，昭和 36. 8，pp. 19-32.
- 8) 石原安雄・長尾正志・小葉竹重機：荒川流出試験地の流域特性，京都大学防災研究所年報，第 11 号 B，昭和 43. 3，pp. 103-114.
- 9) Palmer, V. J.: Reterdance Coefficients for Low Flow in Channels lined with Vegetation, Trans. AGU, Vol. 27, 1946, pp. 187-197.
- 10) たとえば，高棹琢馬・岸本貞男：雨水流出の実験的研究，京都大学 防災研究所年報，第 4 号，昭和 36. 3，pp. 132-154.
- 11) 前 出 4)
- 12) 矢野勝正・石原安雄：河川災害総合基礎実験施設について，京都大学防災研究所年報，第 12 号 B，昭和 44. 3，pp. 237-246.
- 13) たとえば，高棹琢馬：流出機構，水工学シリーズ，67-03，1967.
- 14) 前 出 13)
- 15) 下島栄一：雨水流出模型の相似律とその精度について，土木学会関西支部年次講演会(投稿中)昭和 47.
- 16) 前 出 4)