

土 木 研 究 所 資 料

軽量河床材料の流送特性と 移動床模型実験の相似性に関する研究

昭和63年7月

建設省土木研究所
河川部河川研究室

Copyright © 1988 by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

軽量河床材料の流送特性と 移動床模型実験の相似性に関する研究

河川研究室 室 長 福岡 捷二
主任研究員 浅野 富夫
林 正男

要 目

本報告書は、砂河川、河口域を対象とした移動床模型実験について、河床材料として従来より使われている石炭粉に新しい材料3種を加え、それぞれの流送特性を検討するとともに、河床に生じる河床波が流れに与える抵抗に着目し、一つの相似則を提案、検討した結果を述べるものである。

キーワード：模型実験，相似則

目 次

1. はじめに	1
2. 移動床模型実験の相似則	2
2. 1 流れの相似則	2
2. 2 移動床流れの相似則	3
2. 3 流れの抵抗からの相似則	4
2. 4 移動床模型実験の時間縮尺	8
3. 新材料の特性	10
3. 1 実験目的	10
3. 2 新材料の特性	10
3.2.1 粒径	10
3.2.2 比重	11
3.2.3 沈降速度	11
3.2.4 水中安息角	11
3.2.5 空隙率	12
3. 3 材料の流送特性	13
3.3.1 実験方法	13
3.3.2 実験結果	13
(1) 予備実験	13
a)粗度係数の検討	13
b)河床形態の検討	16
c)流砂量の検討	17
(2) 流送特性把握実験	17
a)石炭粉の流送特性	21
b)スラッジライトの流送特性	22
c)P B Tの流送特性	24
d)ポリスチレンの流送特性	25

3.3.3	まとめ	26
	a)流砂量	26
	b)河床形態	26
	c)砂堆上の流れの抵抗	28
4.	流砂現象の相似性	29
4.1	実験目的	29
4.2	実験方法	29
4.3	実験結果	33
4.3.1	河床波の相似性	33
4.3.2	流砂量の相似性	34
4.3.3	流れの抵抗の相似性	34
4.3.4	流砂現象の相似性	34
5.	比重の異なる材料を用いた移動床模型実験の可能性	38
5.1	材料の限界	38
5.2	模型縮尺の決定	40
5.3	移動床実験の時間縮尺	42

1. はじめに

河川で生じる種々の水理現象（流れ、流砂、それにより生じる河床変動など）は、相互に影響し合い、複雑に変化する。このことは、河川の現象解明には総合的な見地に立った検討が必要であることを示している。流砂問題については、古くから研究がなされているが、洪水時の流砂現象の直接的な測定が困難なために、小型室内模型実験などの手段によるところが多く、実現象を十分に理解し得たとはいえない面がある。したがって、個々の水理現象はかなりの程度解明されてきているものの、河道全体に生じている現象の総合的な解明には至っていないのが現状である。このために、個々の現象の理解とともに河道全体として生じている流砂現象の解明を目指した大型模型実験による検討が不可欠である。しかし、大型模型実験においても、実河道をある縮尺に縮小し検討することから、水理現象の相似性に問題が残される。とくに模型において流砂現象を検討する場合、流れの相似性だけでなく、河床変動についてもその相似性が満足される必要がある。現地の河床材料が大きく、模型の縮尺に合わせ河床材料を縮小しても粒径が0.7mm以上となり、水の粘性の影響が重要とならない場合には、模型の河床材料として砂を用い、両者で無次元掃流力 τ_* と沈降速度・摩擦速度比 ω_*/u_* を一致させれば、流砂の運動もほぼ相似となることが知られている。しかし、河口域や砂河川などの水理現象を取り扱う場合、現地の河床材料が小さく、単純に模型縮尺に合わせて材料を縮小すると、水の粘性の影響、粒子レイノルズ数 $u_* \cdot d/\nu$ ； ν ：動粘性係数 が小さいことに起因する河床波が模型で生じ、河床形態、流砂量などの相似性が満足されず、また、沈降速度の相似性が満足されないことにより、土砂の流送形態が異なるなど従来の方法では両者の相似性は極めて悪くなる。

本報文では、現地の河床材料が小さい砂河川、河口域の水理現象を対象として模型の河床材料として砂よりも比重の軽い材料を用いた場合の相似条件を考察し、得られた条件の適合性を水理実験によって検討を行った。

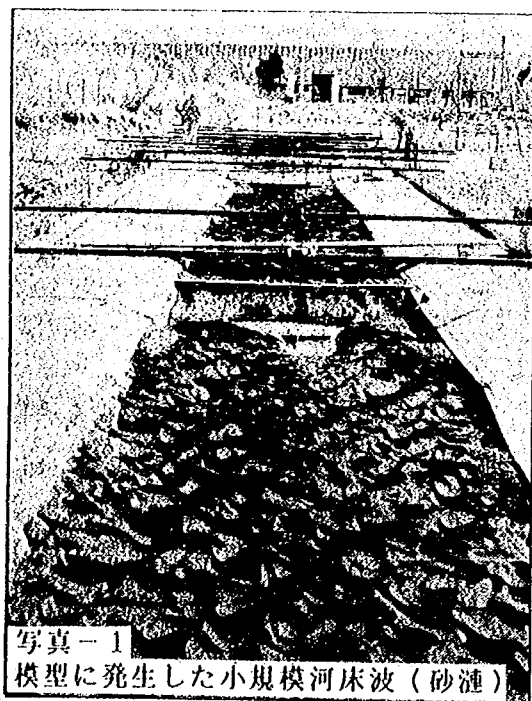


写真-1
模型に発生した小規模河床波（砂澁）

2. 移動床模型実験の相似律

模型実験は、現地に対して大きさを変えた模型を使って、実際に起こる現象を予測しようとするものであり、現地および模型に生じる現象が相似でなければならない。とくに流砂現象の解明を目指した移動床模型実験においては、流れに加えて、流砂現象をも相似としなければならない。そのためには模型が幾何学的に相似であることが必要であるとともに物理量の縮尺には一定の条件が必要で、それは現地と模型に対応する基礎方程式を相似とすることから決められる。ここで、従来から用いられている流れの相似則、流砂の相似則について述べる。

2. 1 流れの相似則

現地と模型の流れを支配している基礎方程式は、現象を一次元的なものとなせば、

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u_p}{\partial t_p} + \frac{\partial h_p}{\partial x_p} - i_p + \frac{\partial}{\partial x_p} \left(\frac{u_p^2}{2g} \right) + \frac{n_p^2 \cdot u_p^2}{R_p^{4/3}} = 0 \quad \dots (1)$$

$$\frac{\partial Q_p}{\partial x_p} + \frac{\partial A_p}{\partial t_p} = 0 \quad \dots (2)$$

が現地現象を支配する基礎方程式である。式(1)が流れの運動方程式、式(2)が連続式である。模型でも同様の式が成り立つ。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u_m}{\partial t_m} + \frac{\partial h_m}{\partial x_m} - i_m + \frac{\partial}{\partial x_m} \left(\frac{u_m^2}{2g} \right) + \frac{n_m^2 \cdot u_m^2}{R_m^{4/3}} = 0 \quad \dots (3)$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial x_m} + \frac{\partial A_m}{\partial t_m} = 0 \quad \dots (4)$$

ここで添字p, mはそれぞれ現地、模型を示し、uは流速、hは水深、xは距離、iは河床勾配、gは重力加速度、nは粗度係数、Qは流量、Aは断面積、tは時間である。

現地の流れと模型の流れが相似であるためには、上式の現地と模型に対応する各項の比が一定でなければならない。

$$\frac{\frac{1}{g} \frac{\partial u_p}{\partial t_p}}{\frac{1}{g} \frac{\partial u_m}{\partial t_m}} = \frac{\frac{\partial h_p}{\partial x_p}}{\frac{\partial h_m}{\partial x_m}} = \frac{i_p}{i_m} = \frac{\frac{\partial}{\partial x_p} \left(\frac{u_p^2}{2g} \right)}{\frac{\partial}{\partial x_m} \left(\frac{u_m^2}{2g} \right)} = \frac{\frac{n_p^2 \cdot u_p^2}{R_p^{4/3}}}{\frac{n_m^2 \cdot u_m^2}{R_m^{4/3}}} = \text{const} \quad \dots (5)$$

ここで、

$$\frac{u_p}{u_m} = u_r, \quad \frac{t_p}{t_m} = t_r, \quad \frac{h_p}{h_m} = h_r, \quad \frac{x_p}{x_m} = x_r, \quad \frac{n_p}{n_m} = n_r, \quad \frac{-i_p}{-i_m} = i_r \quad \dots (6)$$

とおくと式(6)は、次式となる。

$$\frac{u_r}{t_r} = \frac{h_r}{x_r} = i_r = \frac{u_r^2}{x_r} = \frac{n_r^2 \cdot u_r^2}{R_r^{4/3}} = \text{const} \quad \dots (7)$$

式(6)において径深 R と h とすれば物理量は6個あり、関係式は4個である。よって2つを選べば、あとはおのずから決まる。これがフルードの相似則であり、ここで水平縮尺 x_r 、鉛直縮尺 h_r を選べば、式より各水理量は、

$$\left. \begin{aligned} \text{流 量 } Q_r &= x_r \cdot h_r^{3/2} \\ \text{流 速 } u_r &= h_r^{1/2} \\ \text{河床勾配 } i_r &= x_r^{-1} \cdot h_r \\ \text{粗度係数 } n_r &= x_r^{-1/2} \cdot h_r^{2/3} \\ \text{時 間 } t_r &= x_r \cdot h_r^{-1/2} \end{aligned} \right\} \dots (8)$$

となる。

2. 2 移動床流れの相似則

人工的に粗度を与えることの出来ない移動床模型では、流れの相似則が満足されるためには、河床形態の相似が得られている必要がある。河床形態が流れに与える抵抗は平均流速 u と摩擦速度 u_* との比で表され、それを無次元表示すると次式で表される。

$$\phi = u/u_* = f_1(Re_*, \tau_*, h/d, B/h, s, K) \quad \dots (9)$$

上式の各項の内、河床抵抗(粗度)に大きく関係する小規模河床形態に対して最も支配的なのは、粒子レイノルズ数 $Re_* = u_* d / \nu$ 、無次元掃流力 $\tau_* = u_*^2 / [(\rho_s / \rho - 1) g d]$ 、水深・粒径比 h/d 、水中比重 $s = (\rho_s / \rho - 1)$ であると考えられ、 Re_* はその値が20以上(模型の河床材料の粒径が $d_m \geq 0.7 \text{ mm}$) の場合無視することが出来ることが従来の研究から知られている。

また、流砂の現象としては、流砂量および流送形態があり、これを相似とすることにより、河床変動現象も流れと同じ縮尺で相似とすることが出来るとされる。流砂量を表す関数の無次元表示は、

$$Q_b / (u_* \cdot d \cdot B) = f_2(u/u_*, \tau_*, \omega_o/u_*, h/d, B/h, s, K) \quad \dots (10)$$

で表され、 Re_* が無視出来れば、河床形態同様 τ_* と h/d を等しくすることによって相似性が満足される。流送形態の相似性は浮遊形態の流砂量が卓越する河道の場合重要となり、現象を決める重要な水理量として、摩擦速度 u_* と河床材料の沈降速度 ω_o の比がある。

したがって、

$$\left. \begin{array}{ll} \text{無次元掃流力} & \tau_{*r} = h_r \cdot I_r \cdot s_r^{-1} \cdot d_r^{-1} = 1 \\ \text{水深・粒径比} & (h/d)_r = 1 \\ \text{沈降速度・摩擦速度比} & (\omega_o/u_*)_r = \omega_{or} \cdot g_r^{-1/2} \cdot h_r^{-1/2} \cdot I_r^{-1/2} = 1 \\ \text{模型の粒子レイノルズ数} & Re_{*m} > 20 \end{array} \right\} \dots (11)$$

の条件を満足させるように模型の河床材料の粒径を決めることにより、現地と模型とで同じような河床形態が生じ、流れの相似則を満足し得ることとなる。

$$\text{模型の粒径} \quad d_m = d_p \cdot s_r \cdot h_r^{-1} \cdot I_r^{-1} \quad \therefore (h/d)=1 \text{より} \quad d_m = d_p \cdot h_r^{-1} \quad \dots (12)$$

しかし、本報文で対象とする砂河川、河口域では現地の河床材料が小さく、模型縮尺に合わせて河床材料を縮小した場合、粒子レイノルズ数 Re_* が小さくなり、現地で発生しない砂漣 (Ripple) が模型河床上で生じ、河床抵抗の相似性が満足されずフルードの相似関係、つまり流れの相似性までもが満足されないこととなる。

このような場合、模型に使用する河床材料の比重を軽くし、粒径を大きくすることにより、砂漣の発生を抑さえ現地の河床形態を再現しようとする手法が用いられる。この場合、河床変動の相似性を重視することから τ_* を現地と模型で一致するように、模型の粒径が設定し、 h/d は無視するものとする。これによりずれる流砂量などについては、フルードの時間縮尺とは別に現象が相似となる時間縮尺を決めて検討することができる。その時間縮尺については後で述べる。

これが従来手法であるが、河床材料の比重を歪ませ、粒径を歪ませた場合の流れに対する河床の抵抗 (粗度) の相似性が検討されておらず、流れの相似性が満足されるものかどうか疑問な点が残る。そこで、流れの抵抗に基づいた相似則について新たに提案する。

2.3 流れの抵抗からの相似則

移動床流れにおける河床抵抗 (粗度) は、河床の形状によって大幅に変化する。河床の形状としては、表-1 に示すように河床面の形状で、砂漣 (Ripple)、砂堆、遷移、平坦、反砂堆に分類される河床波と、流路の平面形状で、交互、網状などに分類される砂州がある。以下に各河床形態の定義を示す。

(1) 砂漣 (Ripple)

砂漣は、河床面近傍の物理量によって支配されるもっとも小規模な河床形態であって、粒子レイノルズ数 Re が 20 以下の場合に形成され、その波長、波高は粒径と密接な関係がある。砂漣の平面形状は三

表 1 河床形態一覽

名 称		形状・流れのパターン		備 考
		縦断面図	平面図	
小規模河床波	砂澁			粒子レイノルズ数が20以下で発生。波長・波高は粒径により決まる。
	砂堆			河床波と逆位相の水面形を伴う。波長・波高は水深により決まる。
	遷移			砂堆と平坦河床が混在する。
	平坦			
	反砂堆			河床波と同位相の水面形を伴う。 水深との関係で砂堆の移動は下流、停止、上流と変移する。
中規模河床波（砂州）	交互砂州			川幅・水深比と密な関係を持ち、小規模河床波と共存することもある。
	網状砂州			

次元的な不規則なものから頂と谷が流れと直角方向に一直線に並んだ比較的規則的なものまで各種ある。また、縦断形状には、上流側斜面勾配が緩やかで下流側斜面勾配がほぼ水中安息角をなす三角形形状から比較的対称的な正弦波形状まで各種ある。砂漣は平均流速に比べて遅い速度で下流に伝播する。

(2) 砂堆

砂堆は、砂漣より規模が大きく、その波長、波高は水深と密接な関係があり、河床波と逆位相の水面形を伴う河床形態である。

砂堆は、砂漣に比べて一般に規則的であり、その縦断形は上流側斜面勾配が緩やかで下流側斜面勾配がほぼ水中安息角の三角形形状をなす。砂堆は平均流速に比べて遅い速度で下流に伝播する。

(3) 反砂堆

反砂堆は、水面波と強い相互干渉作用を持って形成され、河床波と同位相の水面波を伴う河床形態である。反砂堆には、水流に応じて上流に移動、下流に移動もしくは移動しないの三通りの特性がある。反砂堆は一般に非定常性が強く、河床波の発達と衰退を繰り返す。反砂堆の縦断形状には三角形形状から正弦波形状までいろいろあり、後者は前者に比して大きなフルード数の時に形成される。

(4) 平坦河床

砂漣、砂堆、反砂堆および砂州を伴わない平坦な河床形態である。

(5) 遷移河床

砂漣や砂堆と平坦河床との遷移領域における河床形態であって、砂漣や砂堆、平坦河床が混在し、容易に変化する。

(6) 砂州

砂州は最も規模の大きい河床形態であって、その波長は水路幅と密接な関係がある。

砂州には湾曲部の凸岸などに見られる固定砂州や左右交互に周期的にあらわれる交互砂州などがある。

砂州の縦断形状はほぼ三角形形状で上流側斜面勾配は緩く、下流側斜面勾配は水中安息角にほぼ等しい。交互砂州は平均流速に比べて遅い速度で下流へ移動する。

流路の平面形状（砂州）による流れの抵抗は、河床波によるものに比べ小さく、その相似性は B/h を合わせる、つまり無歪模型とすることによりほぼ満足される。このことから、流れの抵抗としては、河床波によるものに注目して、相似則の提案をする。

移動床流れにおける河床波と河床抵抗との関係については、従来より種々の検討がなされてきたが、ここでは河床材料が砂の場合について導かれた岸・黒木の式を用いることとする。岸・黒木は河床抵抗を平均流速 u と摩擦速度 u_* との比で評価し、流速係数 ψ で表している。流速係数 ψ は水深粒径比 h/d

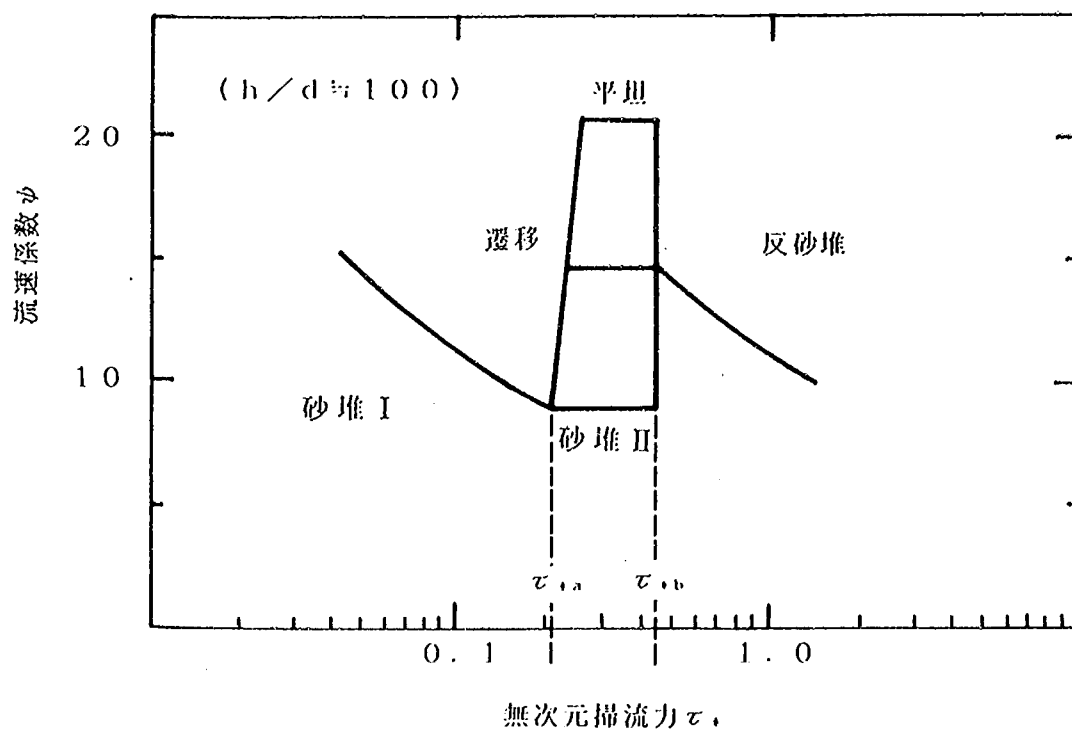


図-1 河床抵抗特性図

と τ_* の関数として、 h/d が一定値の場合、 ϕ と τ_* の間に図-1 に示すような関係が成立するとし、各領域ごとに関係式を提案している。

①砂堆河床 I

$$\phi = 2.4 (h/d)^{1/3} \tau_*^{-1/3} \quad \dots (13)$$

②砂堆河床 II

$$\phi = 8.9 \quad \dots (14)$$

③遷移河床

$$\phi = 1.1 \times 10^3 (h/d)^{-3/2} \tau_*^3 \quad \dots (15)$$

④平坦河床

$$\phi = 6.9 (K_0/K)^{1/2} (h/d)^{1/3} \quad \dots (16)$$

ただし K_0 : 清水流におけるカルマン定数 (=0.4)

K : 流砂を伴った流れにおけるカルマン係数

⑤反砂堆河床

$$\phi = 2.8 (h/d)^{3/10} \tau_*^{-1/3} \quad \dots (17)$$

ここで、各種の河床波の発生領域は次の式で表される。

① 遷移河床が発生し始める限界

$$i/s = 0.02 (h/d)^{-1/2} \quad \dots (18)$$

$$\tau_{*a} = 0.02 (h/d)^{-1/2} \quad \dots (19)$$

② 反砂堆が発生し始める限界

$$i/s = 0.07 (h/d)^{-3/5} \quad \dots (20)$$

$$\tau_{*b} = 0.07 (h/d)^{-2/3} \quad \dots (21)$$

流速係数 ϕ とマンニングの粗度係数 n との関係は

$$\phi = h^{1/6} / (g^{1/2} \cdot n) \quad \dots (22)$$

となることから、現地と模型で流速係数 ϕ を等しくすることによりフルードの相似則で示される粗度係数の縮尺が満足されることとなる。現地の河床形態が砂堆 I の領域にあるとして、式(13)より、流速係数 ϕ の相似条件を解くと、

$$\text{砂堆 I} \quad \phi_r = h_r \cdot i_r^2 / (s_r^2 \cdot d_r) = 1 \quad \dots (23)$$

となり、この条件で移動床の各水理量を求めると以下ようになる。

$$\text{河床材料粒径} \quad d_r = s_r^{-2} \cdot h_r^{-1} \cdot i_r^{-2}$$

$$\text{無次元掃流力} \quad \tau_* = h_r \cdot i_r \cdot s_r^{-1} \cdot d_r^{-1} = s_r \cdot i_r^{-1}$$

$$\text{沈降速度・摩擦速度比} \quad (\omega_o / u_*)_r = \omega_{or} \cdot g_r^{-1/2} \cdot h_r^{-1/2} \cdot i_r^{-1/2} = 1 \quad \dots (24)$$

$$\text{水深・粒径比} \quad (h/d)_r = h_r \cdot d_r^{-1} = s_r^2 \cdot i_r^{-2}$$

これより、模型を無歪み ($h_r = x_r, i_r = 1$) として、模型の河床材料に現地と比重の等しい材料 ($s_r = 1$) を用いる場合、移動床流れの相似則 ($\tau_{*r} = 1, (h/d)_r = 1$) を満足させることにより流れに抵抗の相似則も満足されることが知られる。しかし、模型の河床材料として比重の軽い材料を用いた場合には、従来の相似則と相反する結果となる。つまり比重の軽い材料を用いた場合には、移動床流れの相似性を満足させても、フルードの相似則で示す粗度係数の縮尺が満足されないこととなり、流れの相似性が成り立たないこととなる。また、流れの床抵抗の相似則を満足させた場合も、 $\tau_{*r} \neq 1, (h/d)_r \neq 1$ となることから、流砂量の相似性が満足されないこととなる。このような場合、先にも述べたようにフルードの相似則による時間縮尺とは別に、模型と実河道における河床変動量が相似となるように時間縮尺を決め、河道の変動状況を調べることが出来る。

2.4 移動床模型実験の時間縮尺

移動床模型における時間縮尺は、河床変動の相似性から求められる。

断面平均の河床変動量の式

$$\frac{\partial z}{\partial t_s} + \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{1}{B} \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0 \quad \dots (25)$$

ここに、 λ ：空隙率、 Q_s ：流砂量、 t_s ：流砂に対応する時間である。

これより移動床模型実験の時間縮尺は、

$$t_{sr} = h_r (1-\lambda)_r \cdot x_r^2 \cdot Q_{sr}^{-1} \quad \dots (26)$$

となる。ここで、 $Q_{sr} = q_{b*r} \cdot u_{*r} \cdot d_r \cdot x_r$ とおけば式(26)は

$$t_{sr} = q_{b*r}^{-1} (1-\lambda)_r \cdot h_r^{1/2} \cdot x_r \cdot d_r^{-1} \quad \dots (27)$$

となる。流砂量の相似性については、移動床流れの相似則で述べたように、 τ_* と h/d を実河道と模型とで等しくすれば、 $(1-\lambda)_r = 1$ 、 $d_r = h_r$ 、 $(\tau_{*r} = 1)$ と $(q_{b*r} = 1)$ となり、流砂量も流れと同じ縮尺で相似とすることができる。しかし、現地の河床材料が小さく、模型の河床材料に比重の軽い材料を用い粒径を大きくする場合、 τ_* を合わせても h/d が、 ϕ を合わせた場合は τ_* 、 h/d とも等しくならないことから、模型条件に見合った時間縮尺を求める必要がある。

3. 新材料の特性

3.1 実験目的

移動床模型実験の相似律の検討を受けて、数種類の比重の異なる材料を用いて流砂現象の相似性について検討を行うに先立ち、用いる河床材料の特性を把握する。

3.2 新材料の特性

模型の河床材料としては従来より使用されてきた石炭粉に加えて、新しい河床材料として、スラッジライト(Sludgelight)、ポリブチレン・テレフタレート(Polybutylene terephthalate; 本報文では以後PBTと称する。)、発泡ポリスチレン(Polystyrene; 本報文では以後ポリスチレンと称する。)を用いた。

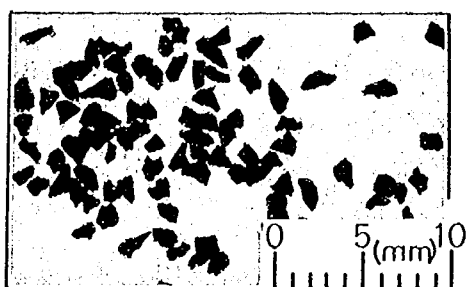


写真-2 新材料写真(石炭粉)

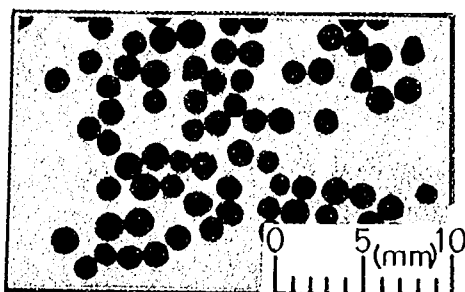


写真-3 新材料写真(スラッジライト)

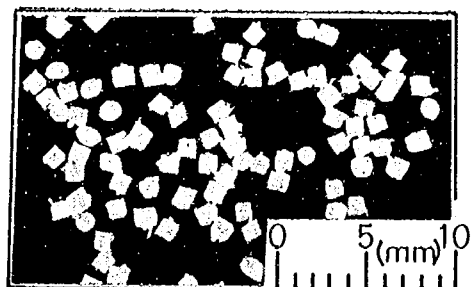


写真-4 新材料写真(PBT)

3.2.1 粒径

・石炭粉

従来から砂河川や河口域の水理現象の検討において使用されてきたもので、一般には濾過材として使用されている。今回は、公称粒径 $0.9\sim 1.1\text{mm}$ 、平均 1mm の均一材料を用いた。材料の形状は砂のような粒子状でなく、薄い剝片状である。

・スラッジライト

下水汚泥の焼却灰を $1100^{\circ}\text{C}\sim 1500^{\circ}\text{C}$ の高温にさらし半熔融したものを空冷却したものであって、 $0.3\text{mm}\sim 5.0\text{mm}$ 程度までの粒径を有し、一般には軽量骨材として利用されている。今回は、 $0.7\sim 1.2\text{mm}$ に粒度調整したAタイプと $0.7\sim 1.3\text{mm}$ に調整したBタイプの材料を用いた。実験のデータ整理では、粒径の平均値(Aタイプ 0.85mm 、Bタイプ 1.0mm)を用いた。材料の形状はほぼ球形である。

・PBT

飽和ポリエステル的一种で、構成する分子鎖中にポリエステル結合を含む結晶性樹脂であり、円柱状の材料を裁断し製作したもので、径、高さ 1.0mm の均一粒径である。

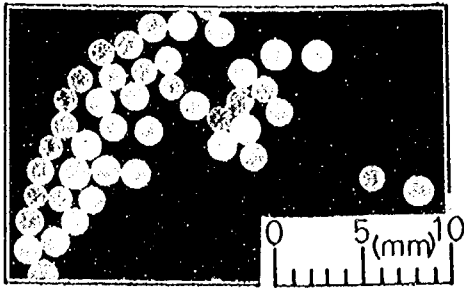


写真-5 新材料写真(ポリスチレン)

• 発泡ポリスチレン

一般には断熱材、包装材料などの発泡材成形品を製造する材料として利用されている。粒径は、ほぼ均一の公称1.58mmである。形状はスラッジライトと同じく球形である。

3.2.2 比重

比重はJIS1202に従って試験を行い検定した。

- 石炭粉 : 今回の材料の比重は、1.48であり、従来より使用しているもの（比重1.58）よりも軽い結果となった。
- スラッジライト : 比重は平均1.80であり、若干バラツキが多い。
- PBT : 比重は1.31であり、公称1.30とほぼ等しい結果となった。
- ポリスチレン : 比重は1.05で、今回の材料の中で一番軽いものである。ただし、材料内にガスが入っていることから長時間（一年以上）貯蔵したものでは、比重はこれより重くなる。

3.2.3 沈降速度

沈降速度は、径30cmの円柱形の容器に水を湛水させて60cm区間の通過時間を測定し求めた。測定結果を図-2に示す。

- 石炭粉 : 形状が剥片状であることから、Allerの式で得られた値よりも遅い結果となった。
- スラッジライト : 形状が球形であることから、Allerの式とよく一致している。
- PBT, ポリスチレン : どちらも粒径が種類しかなく、全体的傾向はわからないが、どちらもAllerの式より遅くなっている。

3.2.4 水中安息角

水中安息角は、湿潤状態の材料を広口ビン内に出来るだけ尖鋭な円錐状に積み、静かに水を注いで安定した形状の角度を測定した。

- 石炭粉 : 安息角は33.0° と従来使用している石炭粉の30.0° に比べ大きい値となった。これは粒径の違いによると考えられる。
- スラッジライト : 安息角は31.3° でAタイプ、Bタイプとも違いはなかった。
- PBT : 安息角は31.2° でスラッジライトとほぼ等しい値である。
- ポリスチレン : 安息角は26.3° と他の材料に比べ著しく小さい値である。

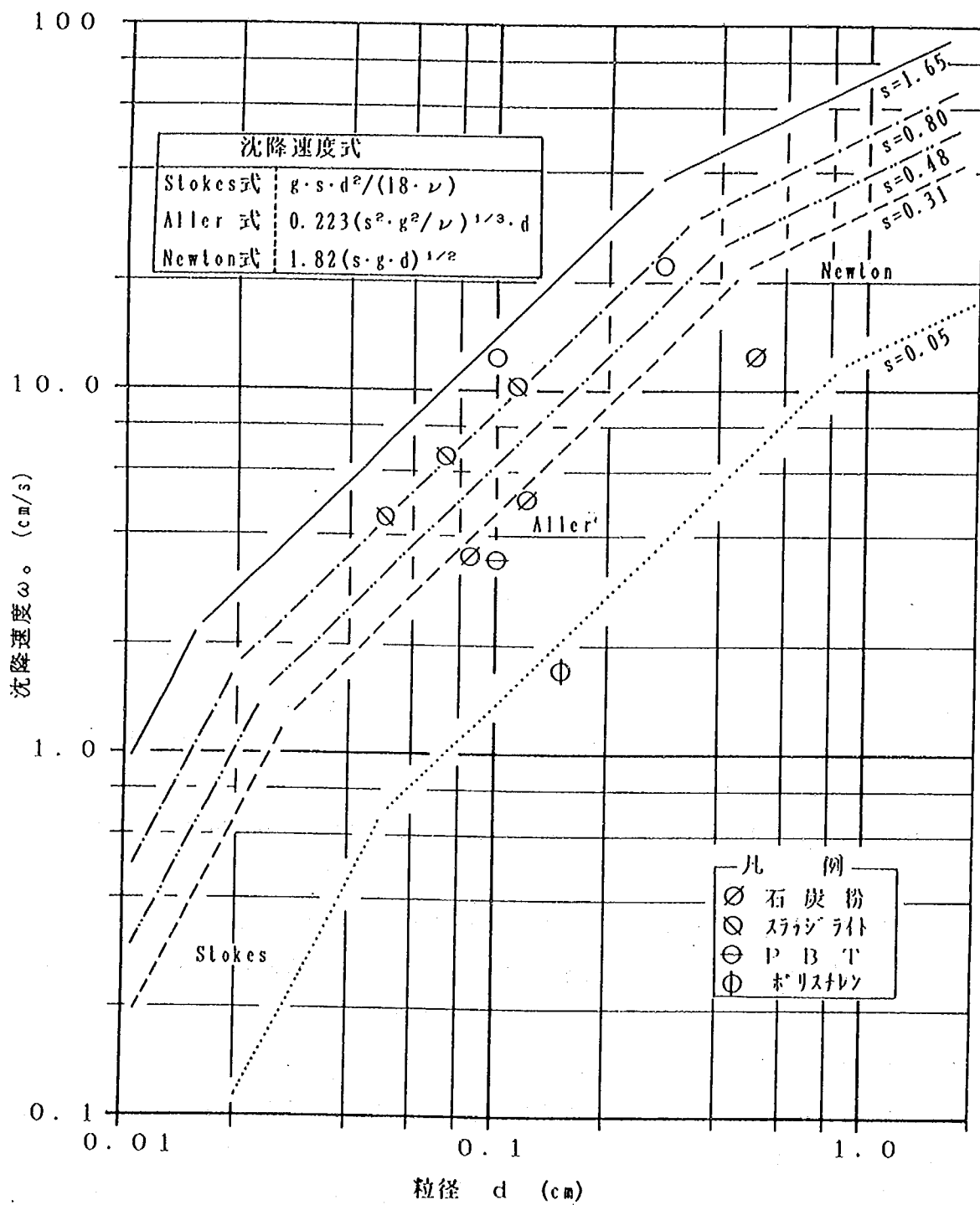


図-2 沈降速度特性図

3.2.5 空隙率

空隙率は、材料が水中にある場合のものを求めた。

測定は、乾いた河床材料の中に一定量の水を入れて、水が材料の粒子間に侵入した量を測定することによって空隙率を計算する方法を用いた。実際の順序としては、

- 1 乾いた河床材料をビーカーに入れる。(適当な量)
- 2 一定量の水を同一ビーカー内に入れる。($V_w = 100\text{cc}$)
- 3 材料粒子間の空気を取り除くためにかくはんする。
- 4 水に見掛け体積 V_1 を測定する。(図-3 参照)
- 5 材料部分の見掛け体積 V_2 を測定する。
- 6 次式により水中空隙率を求める。

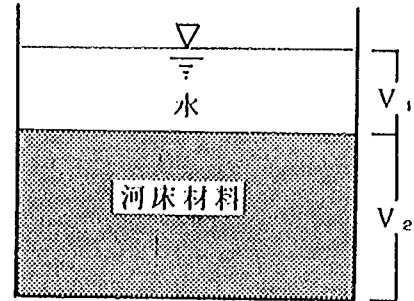


図-3 空隙率測定略図

$$\text{水中空隙率 } \lambda = (V_w - V_1) / V_2 \quad \dots (28)$$

- ・石炭粉 : 得られた λ は、0.47で、従来の石炭粉の $\lambda = 0.45$ とほぼ一致している。
- ・スラッジライト : λ は石炭粉と同じ0.47であった。A, Bによる違いはなかった。
- ・PBT : λ は0.35と、砂の空隙率と同じである。
- ・ポリスチレン : λ は0.38とほぼ砂の空隙率と等しい値である。

これら、各材料の特性量をまとめ表-2に示す。

表-2 新しい材料の諸特性量

	スラッジライトA	スラッジライトB	石炭粉	PBT	ポリスチレン
水中比重 : s	0.80	0.80	0.48	0.31	0.05
粒径 : $d(\text{cm})$	0.085	0.10	0.10	0.10	0.151
沈降速度 : $\omega_0(\text{cm/s})$	7.92	11.10	4.58	3.43	1.71
無次元限界掃流力 : τ_{*0}	0.035	0.035	0.040	0.042	0.046
空隙率 : λ	0.47	0.47	0.47	0.35	0.38
水中安息角 : $\phi(\text{度})$	31.3	31.3	33.0	31.2	26.3
形状	球	球	剥片状	円柱*	球

*直径 = 高さ

3.3 材料の流送特性

今回用いる材料の流送特性として、河床形態、流砂量、河床抵抗の特性把握を行った。

3.3.1 実験方法

材料の流送特性を把握する実験は図-4に示す長さ30m、幅60cmの両面ガラス張りの可変勾配水路を用いて行った。流量は水路上流に設けた三角堰を用いて計算し、設定越流深となるようにバルブにより調整した。越流水深と流量の関係図を図-5に示す。下流には観音開き式のゲートが取り付けられており、それにより等流水深となるように下流水位を調整した。

実験では、河床材料を厚さ10cmに敷き均し、水を湛水させ締め固めを行った後に通水を行った。給砂は予備実験により求め、毎分毎に水路上流側で与えた。

測定は水位、河床高および流砂量について実施した。

• 水位測定

測定は流況が安定しているであろう水路中央付近9mを対象区間とし、図-4に示す10断面で行った。水位の測定は各断面に設置したポイントゲージの針先端を水面に接触させ、その目盛りをレベルにより読むことにより行った。

• 河床高測定

測定は水位の測定と同じ断面においての河床横断と、測定対象区間の河床中央の縦断を通水終了後に行った。河床横断は、測定間隔3cmで行い、急変点などは適宜追加した。測定は各断面に水平に張られた水糸からの深さを1mm目盛りの定規により読み取った。河床縦断も測定間隔3cmで行い、測定は河床高に合わせたポイントゲージの目盛りをレベルにより読み取った。

• 流砂量測定

測定は、河床波が十分に発達し流送土砂が平衡に達したところに、水路下流に設けた採取器により行った。測定は精度面から通水中5回実施し、その最大、最小のデータを除く3データの平均とした。

河床材料の流送特性を検討した実験ケースは表-3に示すとおりである。

3.3.2 実験結果

(1) 予備実験

a) 予備実験-1 (粗度係数の検討)

本実験は、各河床材料を河床材料とした場合の粗度係数を検討したもので、流量は任意とし、給砂は行わなかった。これより得られた粗度係数は表-4のとおりであり、以後の実験ではこの粗度係数を用いて逆算した流量を初期流量として与え、実験条件に合うように調整した。

粗度係数の逆算は次式により、得られた各断面間の粗度係数の平均値を用いた。

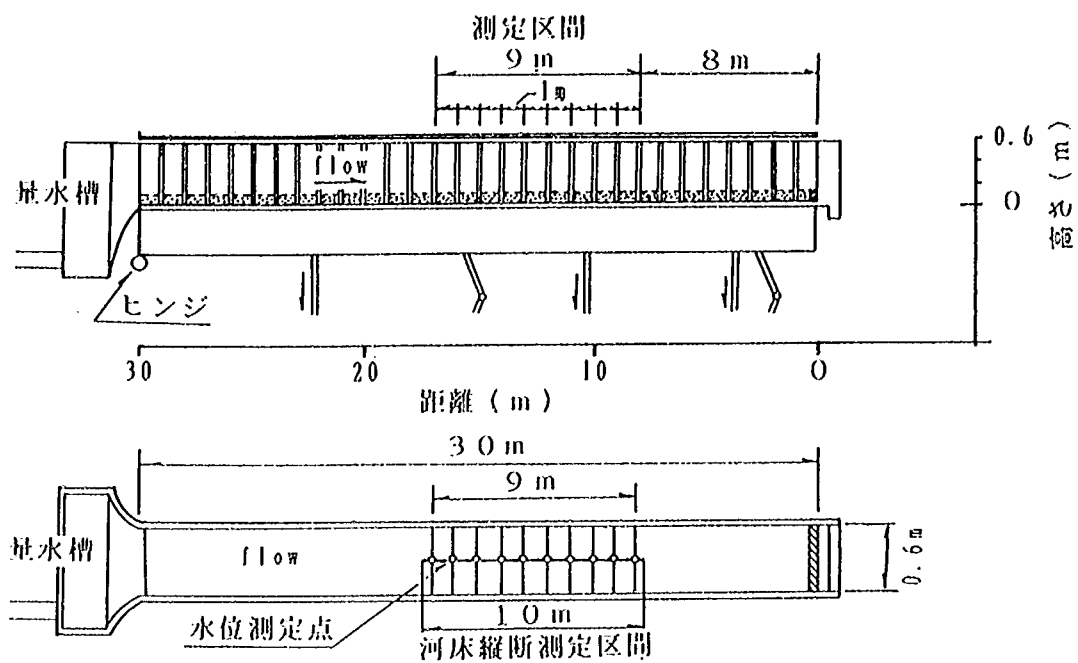


図-4 実験水路A概要図

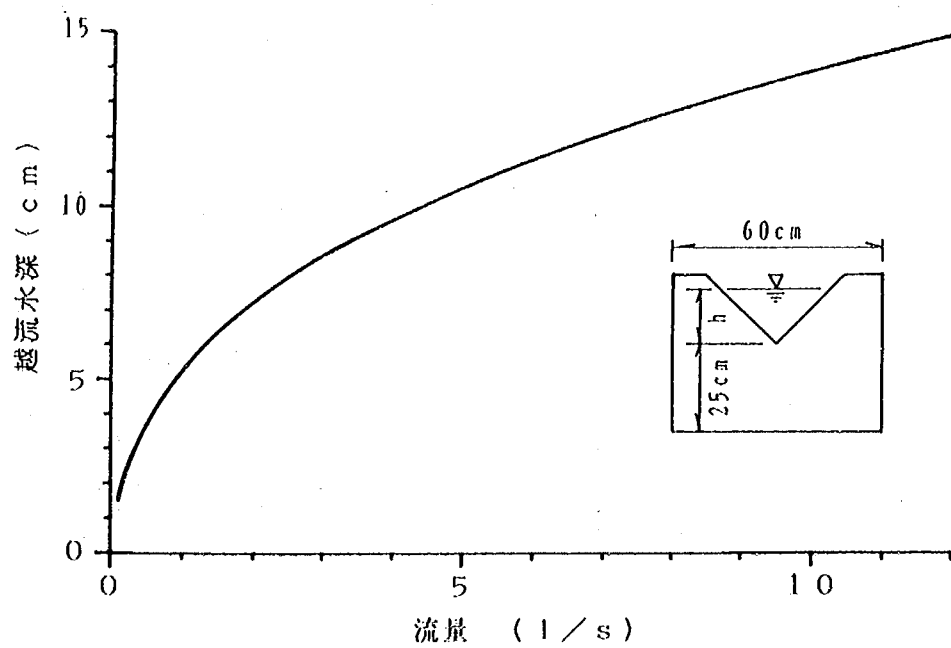


図-5 H~Q曲線(実験水路A)

表 3 実験条件一覧表

実験ケース	河 床 材 料	水 深 h (cm)	河 床 勾 配 I	無次元掃流力 τ_*
予備実験 - 1 (粗度係数の検討)				
Y - 1 - 1	石 炭 粉		1/ 620	
Y - 1 - 2	スラッジライト A		1/ 440	
Y - 1 - 3	P B T		1/2000	
Y - 1 - 4	ポリスチレン		1/2000	
予備実験 - 2 (河床形態の検討)				
Y - 1 - 1	石 炭 粉	2.5 ~ 10.0	1/ 960	0.05 ~ 0.20
Y - 1 - 2	スラッジライト A	1.0 ~ 7.0	1/ 440	0.03 ~ 0.23
Y - 1 - 3	P B T	2.7 ~ 15.0	1/2000	0.04 ~ 0.24
Y - 1 - 4	ポリスチレン	0.6 ~ 4.5	1/2000	0.04 ~ 0.30
予備実験 - 3 (流砂量の検討)				
Y - 1 - 1	石 炭 粉	2.5 ~ 10.0	1/ 960	0.05 ~ 0.20
Y - 1 - 2	スラッジライト A	1.5 ~ 6.0	1/ 440	0.05 ~ 0.20
Y - 1 - 3	P B T	1.5 ~ 6.0	1/ 960	0.05 ~ 0.20
Y - 1 - 4	ポリスチレン	1.0 ~ 4.0	1/2000	0.07 ~ 0.26
流送特性把握実験				
K 1	石 炭 粉	2.2 ~ 7.2	1/ 750	0.06 ~ 0.20
K 1'		5.9	1/1020 ~ 1/ 613	0.06 ~ 0.10
K 2	スラッジライト B	2.4 ~ 8.0	1/ 500	0.06 ~ 0.20
K 2'		5.6	1/1632 ~ 1/ 979	0.06 ~ 0.10
K 3	P B T	2.4 ~ 8.1	1/1300	0.06 ~ 0.20
K 3'		5.5	1/2688 ~ 1/1613	0.06 ~ 0.10
K 4	ポリスチレン	1.0 ~ 4.0	1/2000	0.07 ~ 0.26
K 4'		2.0 ~ 8.0	1/4000	0.07 ~ 0.26
K 4''		4.0 ~ 16.0	1/8000	0.07 ~ 0.26

表 4 粗度係数一覧表

ケース	河床材料	H (cm)	水路勾配	Q (l/s)	粗度係数
Y 1 - 1	石炭粉	2.2	1 / 620	2.30	0.015
Y 1 - 2	スラッジライト	2.5	1 / 440	4.00	0.014
Y 1 - 3	P B T	4.2	1 / 2000	4.50	0.017
Y 1 - 4	ポリスチレン	2.7	1 / 2000	1.40	0.024

$$n^2 = 2 \left(\left(h_2 + \frac{u_2^2}{2g} \right) - \left(h_1 + \frac{u_1^2}{2g} \right) \right) / \left(\left(\frac{u_1^2}{R_1^{4/3}} + \frac{u_2^2}{R_2^{4/3}} \right) \Delta x \right) \quad \dots (29)$$

• 添字の1は下流断面, 2は上流断面の水理量を示す。

• 石炭粉

水路全体に砂澱と判断される波長の短い河床波が発生している。波高は各断面の最深・最浅河床高の差の平均と仮定すれば, 0.8cm程度である。逆算される粗度係数は, 砂澱が河道全体に生じており, また波長が短く, 波高が小さいことから断面毎のパラツキが少なく, 平均 $n=0.015$ である。この値は足立の提案する式から求められる平坦河床時の粗度係数とほぼ等しい値であり, 生じている河床波の抵抗は小さいことが知られる。

$$\text{平坦河床の粗度係数 } n = 0.0404 \cdot d^{1/9} = 0.013 \quad (\text{足立の式}) \quad \dots (30)$$

• スラッジライト

石炭粉同様の砂澱が水路全体に発生している。波高は0.7cmであり, 石炭粉より小さいものである。逆算される粗度係数もパラツキは小さく, 平均は $n=0.014$ である。

• P B T

水路全体に砂堆が形成される。波高は1.3cm程度であり, 逆算される粗度係数にそれほどのパラツキはなく, 平均で $n=0.017$ であった。

• ポリスチレン

水路全体に大規模な砂堆が発達する。波高は2.4cm程度とP B Tに比べても大きく, その影響で逆算される粗度係数に大きなパラツキが出ている。平均値も $n=0.024$ と河床波の抵抗の大きな事が知られる。

b) 予備実験-2 (河床形態の検討)

本実験は, 各材料の河床形態, 流送形態の特性を把握しようとしたもので, 段階的に流量を変化させ観察を行った。このときも給砂は行わなかった。結果を表-5にまとめ示すとともに, 小規模河床波区

表-5. 1 各材料の河床形態

石 炭 粉	スラッジライト
Y 1-1 (水深2.22cm, 流量2.62, 勾配1=1/1050, $\tau_* = 0.033$) 若干の河床材料の移動はあるものの、河床波の発生は認められず、河床は平坦（静止状態）と判断された。	Y 2-1 (1.06, 0.94, 1/450, 0.034) 河床材料の移動は認められず、河床は静止状態である。
Y 1-2 (3.93, 5.63, 1/990, 0.062) 河床材料の移動は水路全幅で認められ、河床にウロコ状の河床波が発生した。河床波は砂運と判断した。	Y 2-2 (1.60, 1.80, 1/450, 0.053) 水路全幅で若干の河床材料の移動が認められるものの、河床波の発生はなく、平坦（静止状態）と判断された。
Y 1-3 (5.04, 7.90, 1/960, 0.082) 河床に砂堆と思われる河床が発生した。河床材料の移動について今まで転動であったものが、河床波の前縁で舞上る流れが認められた。	Y 2-3 (1.96, 2.85, 1/440, 0.066) 水路全体に薄いながらウロコ状の河床波（砂運）の発生が認められた。材料の移動は水路幅全体に渡って認められ、河床面を転がり移動する転動状態であった。
Y 1-4 (6.44, 1070, 1/960, 0.105) 砂堆が発達し、波高が大きくなった。河床材料の移動も転動状態からときどき舞上る跳躍状態となった。	Y 2-4 (3.12, 5.60, 1/430, 0.106) 河床材料の移動が活発となり、砂運の発達も認められた。また、砂運の連なりから、短波長の交互砂州の流れが見られた。
Y 1-5 (7.36, 13.17, 1/930, 0.124) 砂堆が発達し、前縁付近で舞上がった材料が浮遊状態で運ばれる現象が見られた。	
Y 1-6 (7.96, 15.01, 1/970, 0.128) Y1-5と変わりなく、わずかに波高が高くなった程度である。	
Y 1-7 (10.32, 23.00, 1/970, 0.167) 河床材料が浮遊状態で流送される。砂堆の発達が著しく、砂堆前縁で河床材料が舞上がり、側壁からの観測では河床状況ははっきり判断できないほどであった。	Y 2-5 (4.71, 10.62, 1/450, 0.154) 河床形態は、砂運から砂堆への遷移状態らしく、どちらとも判断できなかった。河床波の前縁付近で河床材料が舞上る現象が見られた。
	Y 2-6 (5.06, 12.51, 1/420, 0.177) 河床形態は砂堆となった。
	Y 2-7 (6.06, 16.60, 1/440, 0.198) 河床形態は砂堆であり、河床材料の移動は転動であった。
	Y 2-8 (7.12, 21.26, 1/450, 0.234) 河床材料の移動が、転動から跳躍に変移した。河床形態は砂堆である。

表-5. 2 各材料の河床形態

P B T	ポリスチレン
Y 3-1 (2.38, 1.80, 1/2290, 0.034) 河床材料は移動せず、河床は静止状態である。	Y 4-2 (1.11, 0.28, 1/4000, 0.037) 河床材料の移動は見られず、河床は前実験で形成された砂運がそのまま残った状態である。
Y 3-2 (3.62, 3.46, 1/2290, 0.051) 河床材料は全幅的に移動を始めるが、河床波の形成までは至らない。	Y 4-3 (1.60, 0.47, 1/5710, 0.037) 河床材料の移動は見られなかった。
Y 3-3 (4.63, 4.85, 1/2220, 0.067) 河床材料は活発に移動を始め、河床に薄いながら砂堆が形成される。	Y 4-4 (2.24, 0.81, 1/7270, 0.041) 小規模河床波の発生は見られず、中規模河床波である交互砂州が発達した。
Y 3-4 (5.74, 6.40, 1/2220, 0.097) 砂堆の発達認められ、砂堆前縁付近で河床材料の跳躍が見られた。波高は1.9cm、波長は25.3cm程度である。	Y 4-1 (0.75, 0.10, 1/2160, 0.046) 河床材料の移動は弱く、波高数mm程度の砂運の発達が見られた。
Y 3-6 (8.13, 11.90, 1/2000, 0.132) 河床形態は砂堆であり、前縁付近で河床材料の跳躍が見られた。砂堆の波長は65cm程度である。	Y 4-5 (2.76, 1.05, 1/3640, 0.100) 水路全域で河床材料の移動が活発となり、先に形成された交互砂州上に砂堆の発達が見られた。
Y 3-5 (8.35, 10.05, 1/1860, 0.145) 河床材料の移動はまだ転動状態であり、砂堆前縁付近で跳躍が見られた。波高は1.7cm、波長は35cmである。	Y 4-6 (3.39, 1.47, 1/4000, 0.110) 砂堆が発達し、前縁付近で河床材料が舞上る現象が見られた。砂堆の発達に伴い、交互砂州は消滅した。
Y 3-7 (10.13, 14.06, 1/1860, 0.176) 河床材料の移動が転動から跳躍に変移。砂堆は波高31cm、波長48cmに発達し、前縁付近で河床材料が浮遊状態で流送されるようになった。	Y 4-7 (3.79, 1.83, 1/3640, 0.140) 河床材料の移動形態が、転動から躍動に、そして若干の浮遊へと変移した。発達した砂堆の破高は4.6cm、波長は35cm程度である。
Y 3-8 (11.57, 18.47, 1/1950, 0.191) 砂堆が発達し、波高は5.2cmとなった。	Y 4-8 (4.06, 2.40, 1/2500, 0.180) 河床形態が遷移領域にかかるのか、砂堆の形状が不規則となり、波高、波長ともまちまちとなった。
Y 3-9 (13.36, 21.88, 1/2050, 0.210) 砂堆の波高が6.4cm、波長が75cmに発達した。	Y 4-9 (5.62, 3.29, 1/2500, 0.240) 砂堆II、もしくは反砂堆となったのか規則的な砂堆が形成された。
Y 3-10 (13.11, 25.46, 1/1820, 0.232) 砂堆前縁付近での河床材料が舞上がり、洗掘が大きくなり、部分的に水路床版が露出してしまった。参考値で波高8.1cm、波長120cmである。	

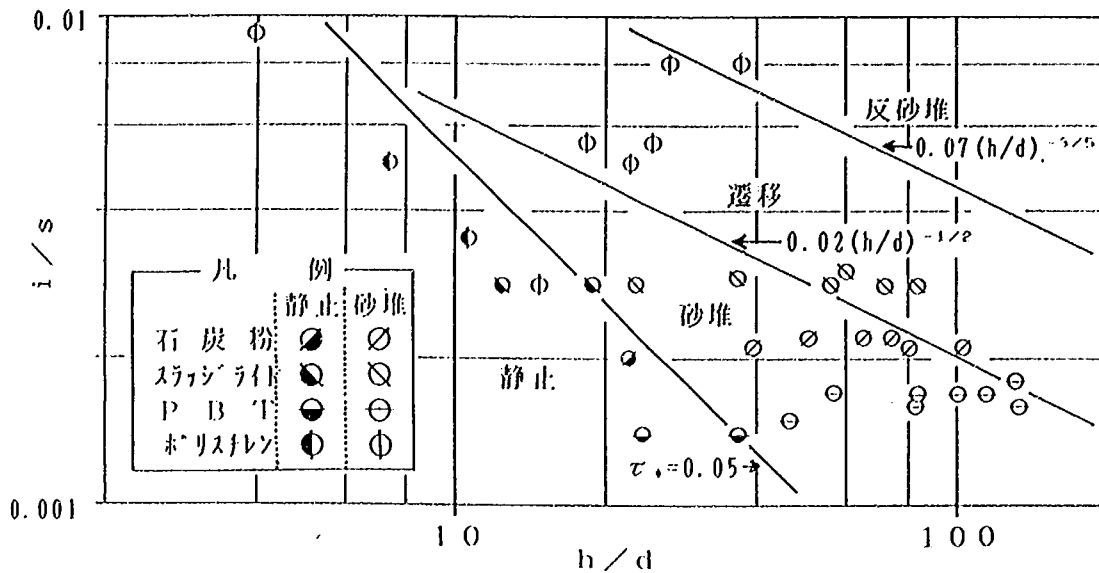


図-6 小規模河床形態区分図

分図(Garde-Raju)にプロットした。これより実験範囲($0.05 \leq \tau_* \leq 0.20$)では河床形態が同じ領域に属すること、そして限界無次元掃流力 τ_* が材料に係わらずほぼ等しいことが知られた。

c) 予備実験-3 (流砂量の検討)

本実験は、実験での給砂量を把握しようとしたもので、各材料について四種の水理量で検討を行った。各材料、各水理量の流砂量を表-6に示すとともに無次元流砂量 q_{B*} で評価し、 τ_* と相関を図-7に示す。これより、流砂量がほぼ土研式($n=0.015$)で表されることが知られた。

(2) 流送特性把握実験

予備実験の結果を受けて、実験範囲を τ_* が0.05以上0.20以下として、各材料について

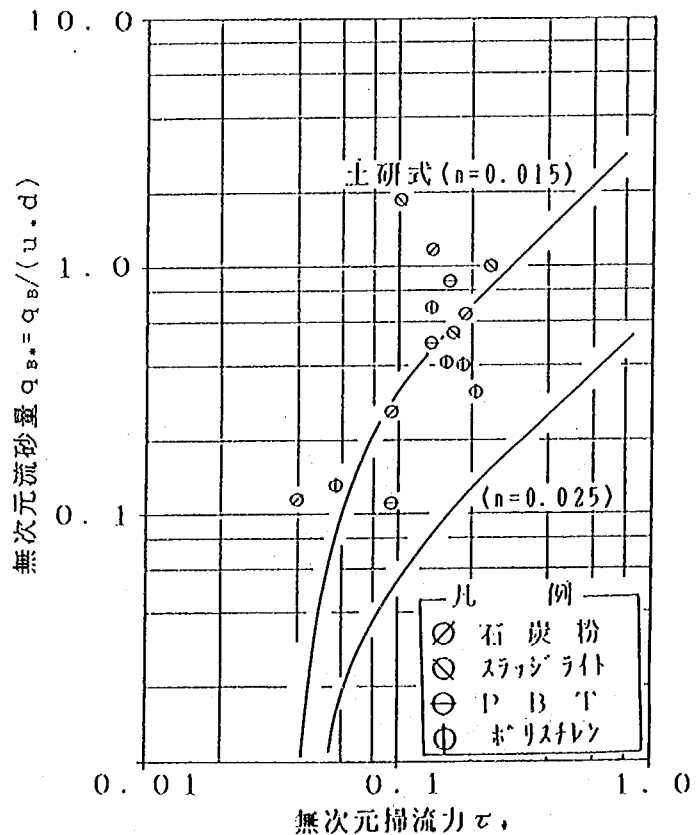


図-7 流砂量特性曲線

表-6 流砂量測定結果

ケース	河床材料	H (cm)	I	τ_*	$q_b(\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm})$	
					測定	平均
Y3-1-1	石炭粉	2.23	1/1143	0.037	0.000 0.020 0.016	0.018
Y3-1-2		5.45	1/1117	0.092	0.074 0.060 0.056	0.063
Y3-1-3		7.85	1/1065	0.140	0.239 0.218 0.213	0.223
Y3-1-4		10.53	1/1907	0.104	0.270 0.335 0.435	0.345
Y3-2-1	スラックライト	1.74	1/452	0.057	0.024 0.021 0.020	0.022
Y3-2-2		3.13	1/459	0.100	0.044 0.033 0.047	0.041
Y3-2-3		4.97	1/450	0.162	0.186 0.126 0.130	0.147
Y3-2-4		6.48	1/432	0.220	0.292 0.400 0.319	0.319
Y3-3-1	P B T	1.49	1/1016	0.047	0.000 0.000 0.000	0.000
Y3-3-2		3.57	1/987	0.116	0.018 0.026 0.019	0.021
Y3-3-3		5.16	1/1009	0.165	0.099 0.113 0.120	0.111
Y3-3-4		6.10	1/982	0.200	0.215 0.198 0.235	0.216
Y3-4-1	ホウシル	1.45	1/2586	0.074	0.019 0.000 0.000	0.000
Y3-4-2		2.35	1/2027	0.153	0.038 0.091 0.076	0.068
Y3-4-3		2.94	1/3027	0.128	0.111 0.107 0.094	0.104
Y3-4-4		3.90	1/2481	0.208	0.046 0.060 0.068	0.058

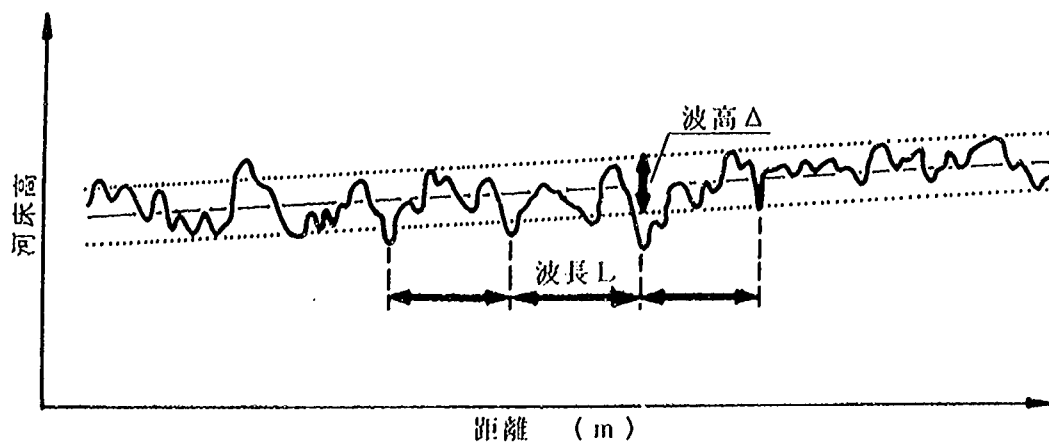


図-8 河床波高定義図

τ_* と河床形態，流砂量，河床抵抗の特性の把握を行った。実験では，河床勾配を一定とした実験($i/s = \text{一定}$)のみでなく，水深・粒径比 h/d を一定とした実験も行い，水理条件の違いによる特性の違いをも把握した。上流からの給砂は予備実験-3の結果を受けて，土研式($n=0.015$)により求めた量を毎分毎に行った。

結果を各材料毎に τ_* と河床形態（発生した河床波の波高，波長），流砂量，河床抵抗（流速係数 $\phi = u/u_*$ ）の相関について述べる。このとき，河床波の波高，波長は図-8のように定義した。

a) 石炭粉の流送特性

図-9は河床波の波高 Δ を水深 h で無次元化し，Yalin の表示に合わせ，相対掃流力 τ_o/τ との相関をとったものである。これより，石炭粉に生じる河床波の波高は Yalin の表示式において，その係数が 1.0~0.4 の幅をもつものの，ほぼ

$$\Delta/h = 0.7 \cdot (1 - \tau_o/\tau) \quad \dots (31)$$

で表されると知られる。

図-10は流砂量を摩擦速度 u_* と河床材料の粒径 d により無次元化して， τ_* との相関をとったものであり，図には，土研式($n=0.015$)を実線で示すが，

今回の実験結果では石炭粉の流砂量はほぼ破線で示すラインで表されるようである。

$$q_{B*} = 158 \cdot \tau_*^{2.8} \quad \dots (32)$$

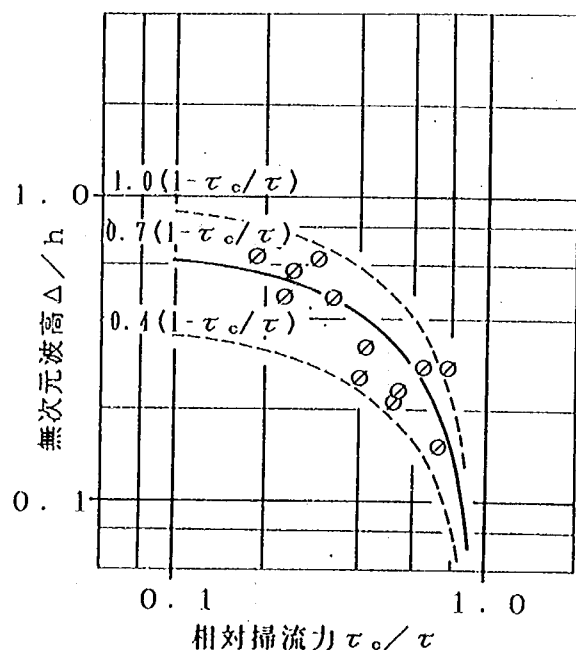


図-9 無次元波高特性曲線（石炭粉）

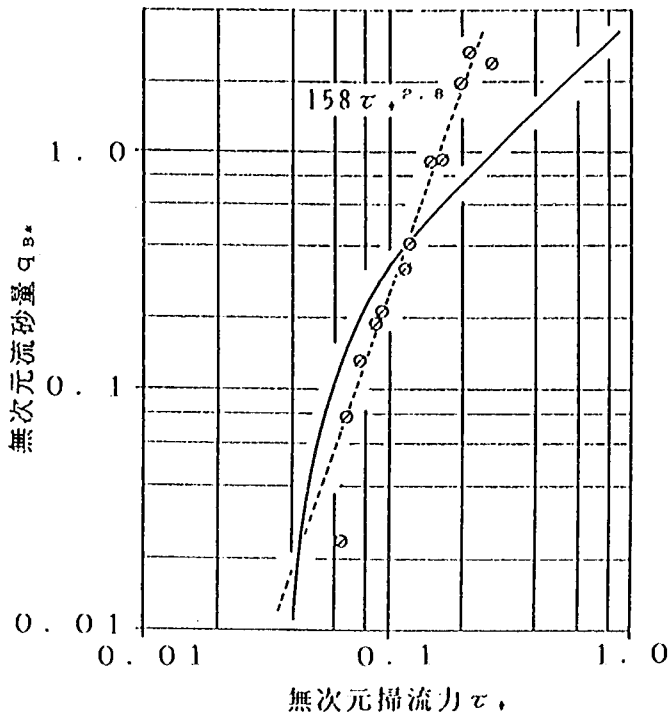


図-10 流砂量特性曲線（石炭粉）

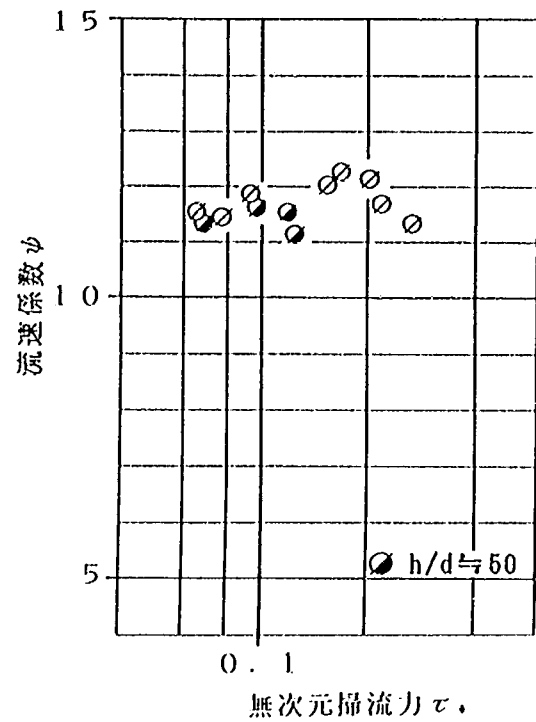


図-11 $\psi \sim \tau_*$ 相関図（石炭粉）

図-11は流速係数を τ_* について整理したもので、バラツキがあるもののほぼ一定値と判断される。

水深・粒径比 h/d を等しくした実験の流速係数のみについてみた場合、その傾向がはっきり表れている。

$$\psi \approx 11.5 \quad \dots (33)$$

b) スラッジライトの流送特性

図-12は河床波波高 Δ を水深 h で無次元化し検討したものである。図よりスラッジライトに発生する河床波の波高は、ほぼ

$$\Delta/h = 0.6 \cdot (1 - \tau_{c0}/\tau) \quad \dots (34)$$

で表せることが知られる。

図-13は無次元流砂量 q_{B*} について整理したもので、ほぼ土研式($n=0.015$)に沿ってデータがプロットされている。

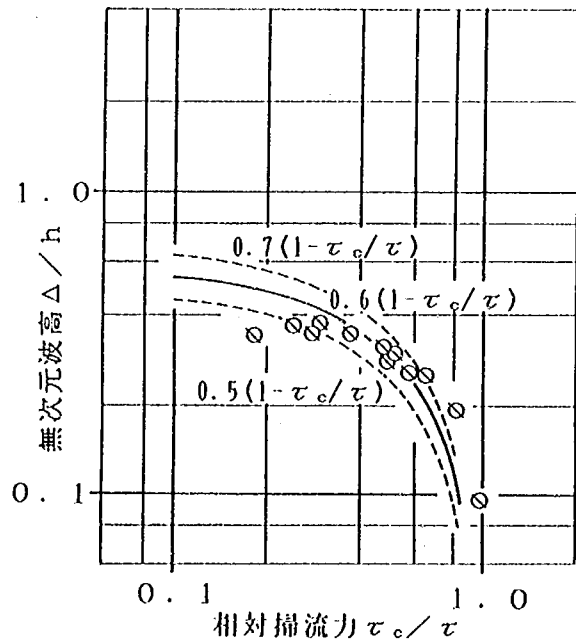


図-12 無次元波高特性曲線（スラッジライト）

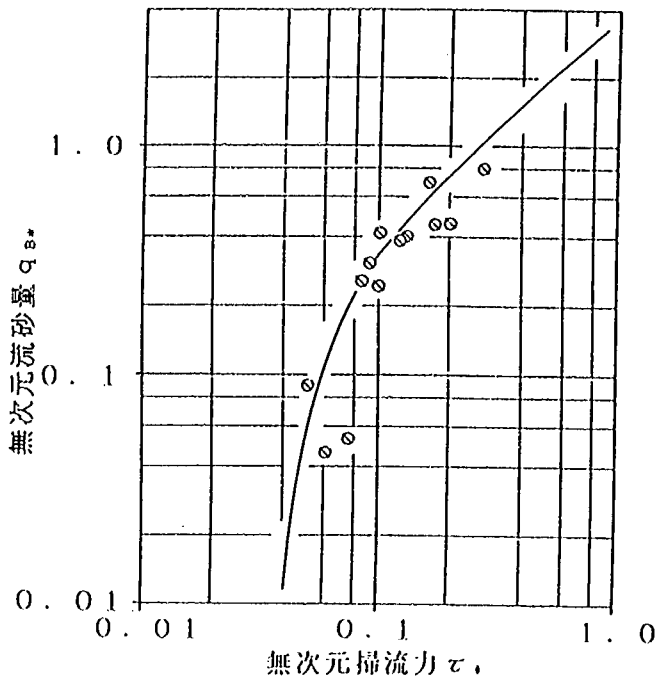


図-13 流砂量特性曲線 (スラッジライト)

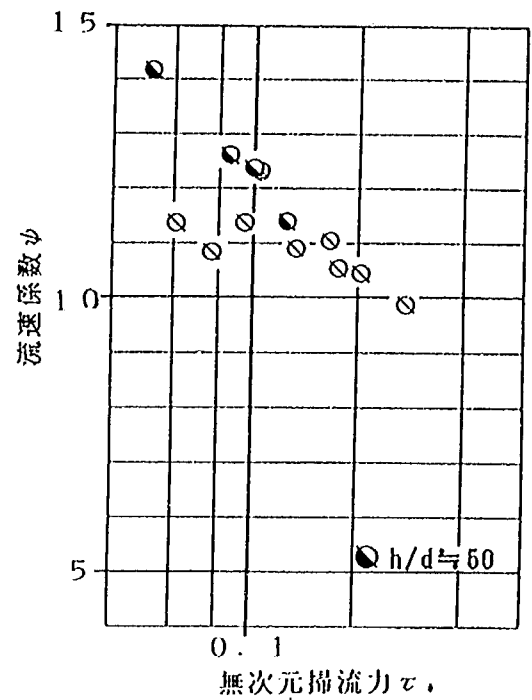


図-14 $\psi \sim \tau_*$ 相関図 (スラッジライト)

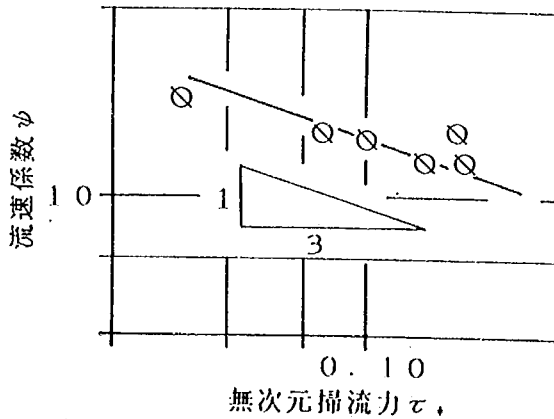


図-15 $\psi \sim \tau_*$ 相関図 ($h/d = 50$)

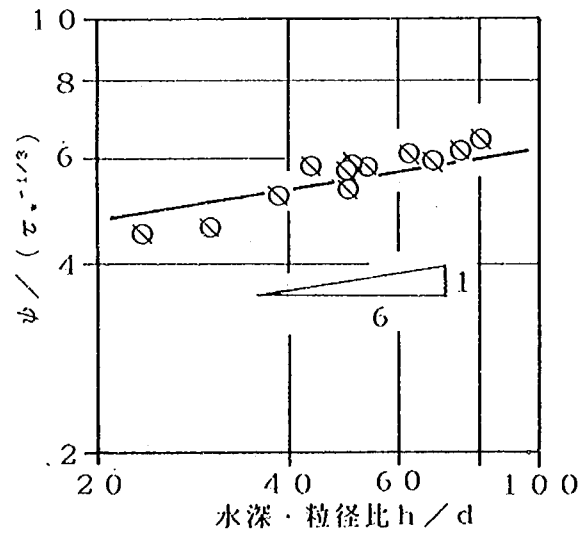


図-16 $\psi / \tau_*^{-1/3} \sim h/d$ 相関図

図-14は流速係数を整理したものであるが、 τ_* についてある相関があることが知られる。図-15は水深・粒径比 h/d の等しいデータを用いて再整理したもので、流速係数が τ_* の $-1/3$ 乗に比例することがわかった。図-16はそれをもとに、流速係数をさらに $\tau_*^{-1/3}$ で整理し、 h/d についてプロットしたものである。これからスラッジライトの流速係数

の式として次式が得られた。

$$\phi = 2.9 \cdot (h/d)^{1/3} \cdot \tau_*^{-1/3} \quad \dots (35)$$

c) PBTの流送特性

PBTの河床に生じる河床波の波高は、Yalinの表示式において1.4~0.7の間にデータがバラついて

$$\Delta/h = (1.4 \sim 0.7) \cdot (1 - \tau_c/\tau) \quad \dots (36)$$

無次元流砂量 q_{B*} は他の材料と同様に土研式付近にプロットされる。

図-19は流速係数を τ_* について整理したものであるが、バラツキが大きく相関は認められないが、データの中から h/d の等しいデータについてみると、流速係数はほぼ

$$\phi \approx 11.5 \quad \dots (37)$$

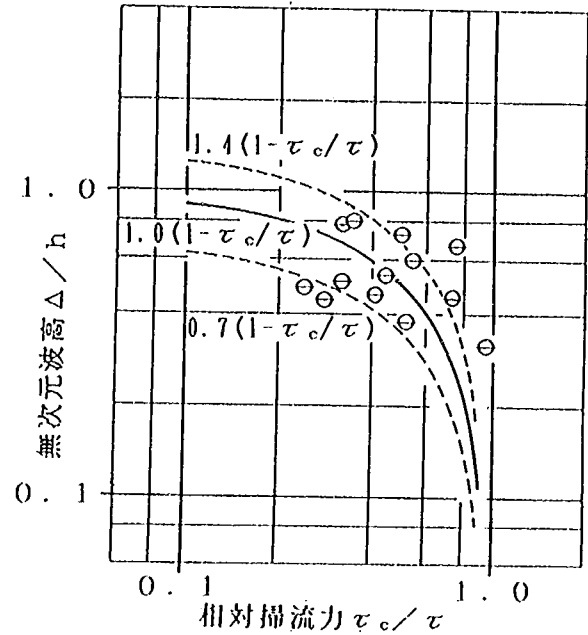


図-17 無次元波高特性曲線 (PBT)

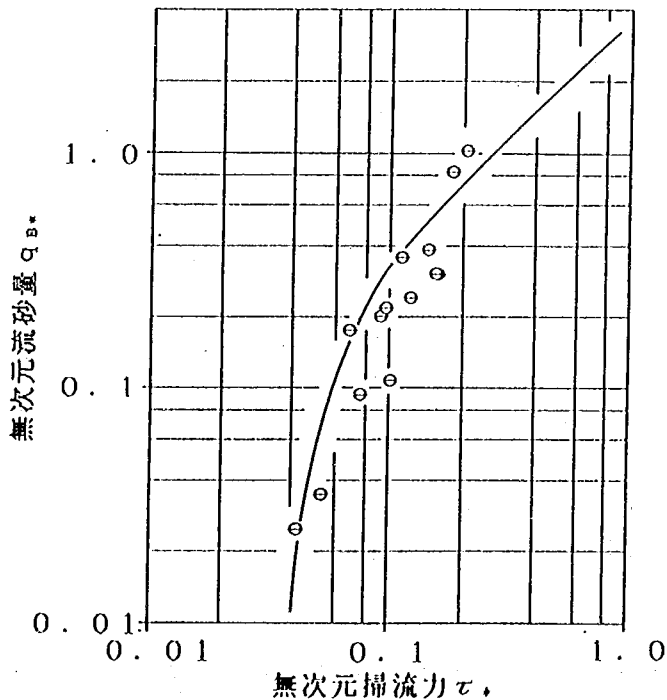


図-18 流砂量特性曲線 (PBT)

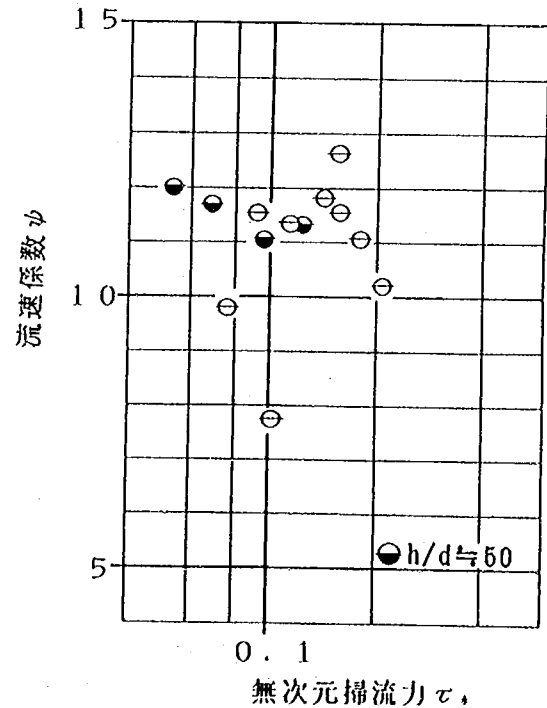


図-19 $\phi \sim \tau_*$ 相関図 (PBT)

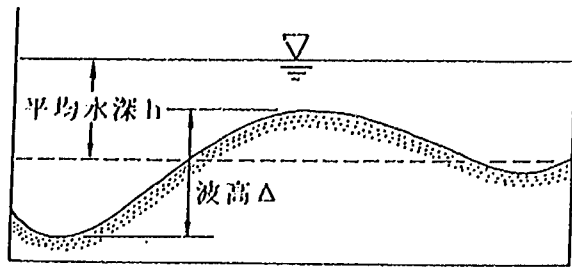


図-20 河床波高定義図

で表されるようである。

d) ポリスチレンの流送特性

本実験では、河床縦断の測定を行わなかったことから、河床波波高を図-20の定義で求めた。河床波波高・水深比 Δ/h は他の材料と比べ大きく、分散の範囲も広い。

$$\Delta/h = (2.5 \sim 0.4) \cdot (1 - \tau_c/\tau) \quad \dots (38)$$

無次元流砂量 q_{B*} も河床に生じる河床波の波高が τ_* について大きくバラつくことに起因してか、バラつきが多く、土研式($n=0.015$)に比べ小さい傾向を示す。

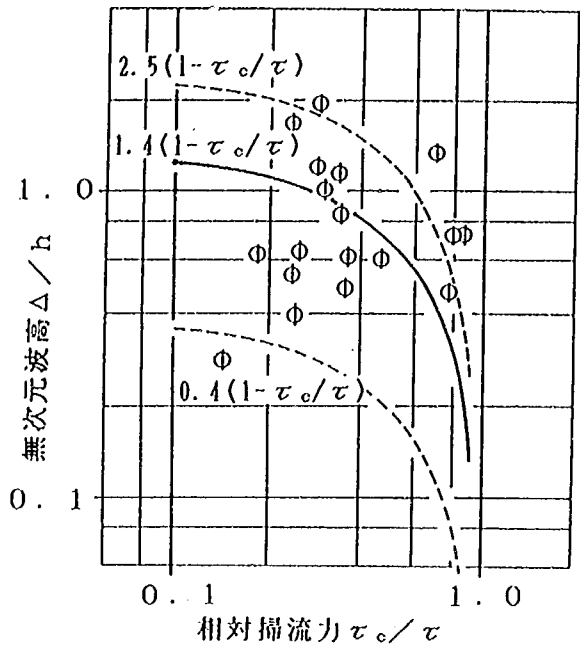


図-21 無次元波高特性曲線(ポリスチレン)

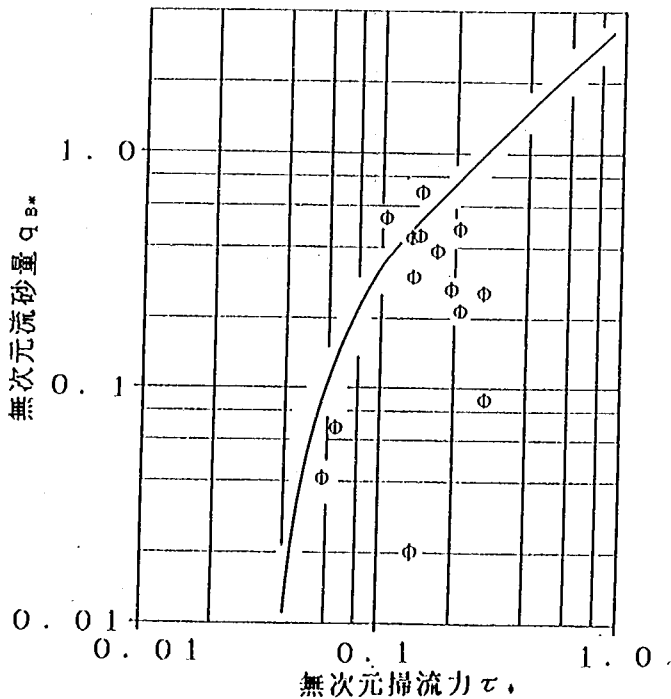


図-22 流砂量特性曲線(ポリスチレン)

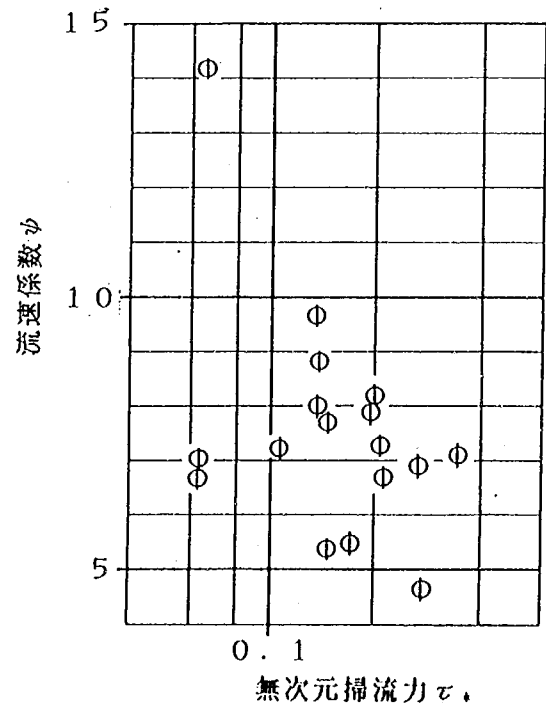


図-23 $\psi \sim \tau_*$ 相関図(ポリスチレン)

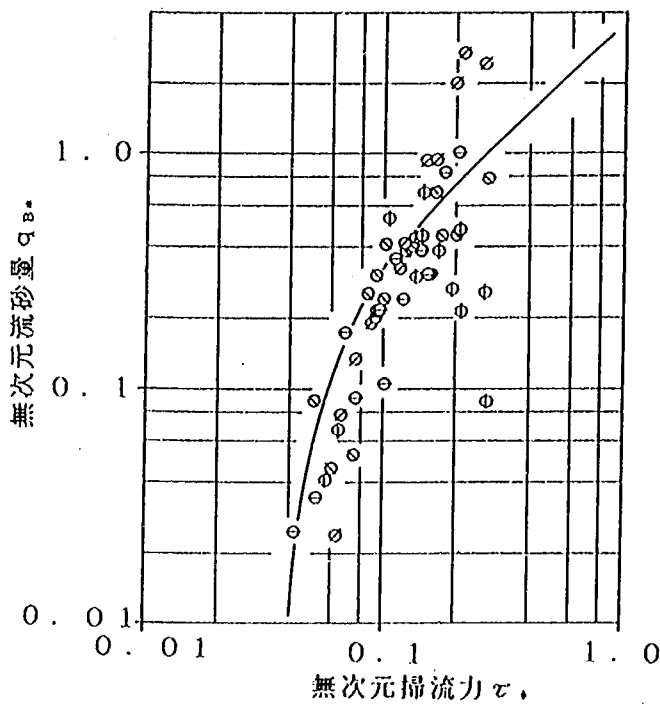


図-24 流砂量特性曲線

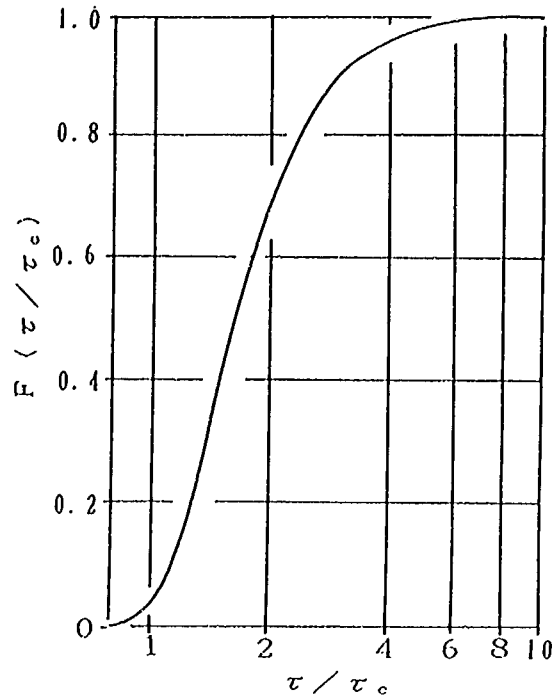


図-25 $F(\tau/\tau_0)$ 関数

図-23は流速係数を整理したものであるが、同様に大きなバラつきがあるが、その平均はほぼ

$$\phi \approx 7.1 \quad \dots (39)$$

で表される。

3.3.3 まとめ

今回用いた材料より流砂量、河床形態、河床抵抗について、比重の違いによる影響の把握を行う。

a) 流砂量

新しい材料を河床材料とする水路の流砂量を、無次元流砂量 $q_{B*} = q_B / (u_* d)$ で評価し、 τ_* に対して図示したものが図-24である。いずれの材料についても土研式($n=0.015$)のまわりにプロットされる。これより、 τ_* が0.05から0.20の範囲においては河床材料の比重に係わらず、実用上は土研式で表現出来ることがわかる。

$$q_{B*} = \phi \cdot u_*^2 \cdot (\sigma/\rho - 1)^{-1} g^{-1} \cdot d^{-1} \cdot F(\tau/\tau_0) \quad \dots (40)$$

ここに、

$$\phi = 0.623 \cdot (40 \cdot n)^{-3.5} ; \quad n < 0.025 \quad \dots (41)$$

である。 $F(\tau/\tau_0)$ は図-25に示す関数である。

b) 河床形態

波高、波長を図-8のように定義し、河床波の波高、波長について検討を行った。図-26は河床波の

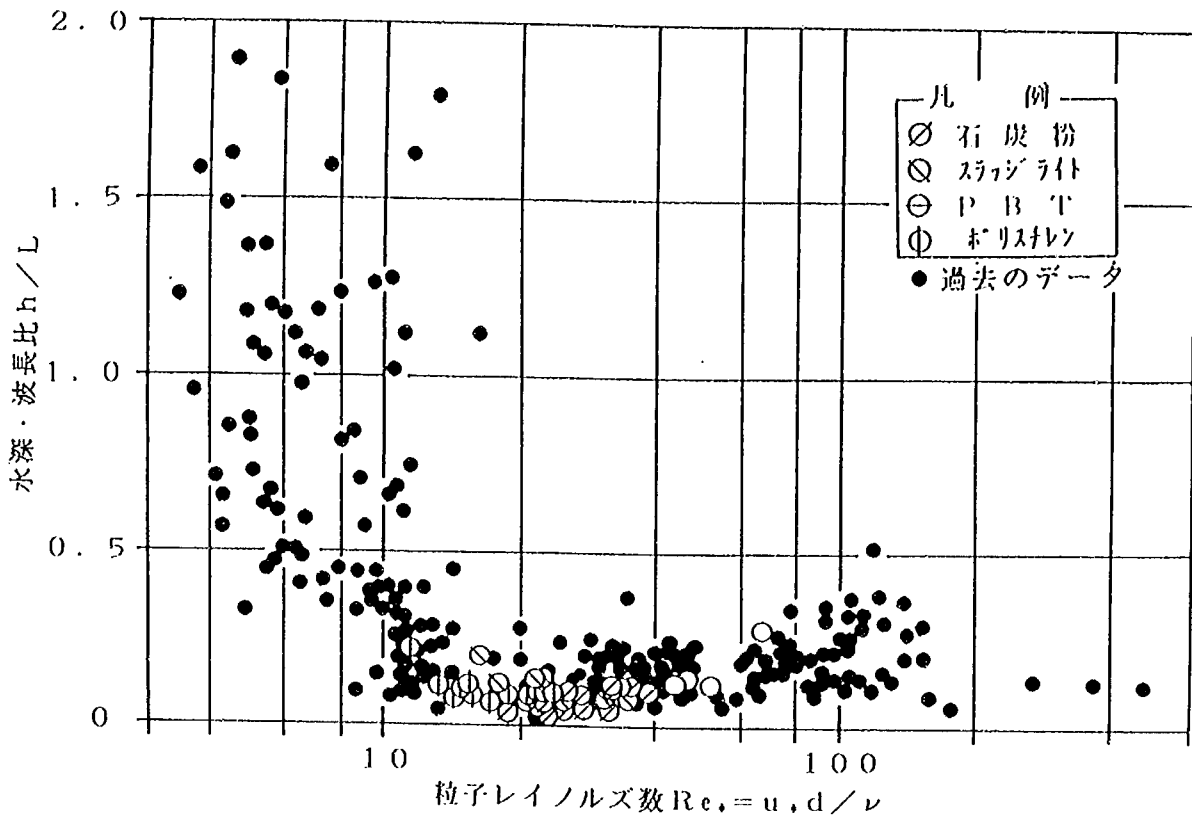


図-27 河床波波长特性図

波高 Δ を水深 h で無次元化し、相対掃流力 τ_0/τ について相関を取ったもので、波高・水深比 Δ/h はYalinの表示式において係数を0.4~2.5とした曲線の範囲にあることが知られる。

$$\Delta/h = (0.4 \sim 2.5) \cdot (1 - \tau_0/\tau) \quad \dots (42)$$

また、各材料について見た場合、河床材料の比重が小さくなるにつれて波高・水深比 Δ/h が大きくなる傾向が認められる。

次に波長 L を水深 h で無次元化し、粒子レイノルズ数 Re で整理したのが図-27である。過去に実施された砂のデータ(●)を合わせプロットしているが、比重の違いに差はほとんど認められない。水深・波長比 h/L は粒子レイノルズ数 Re が20以上、50以下においては、0.1~0.14程度の値をとることから、逆に河床に発生する河

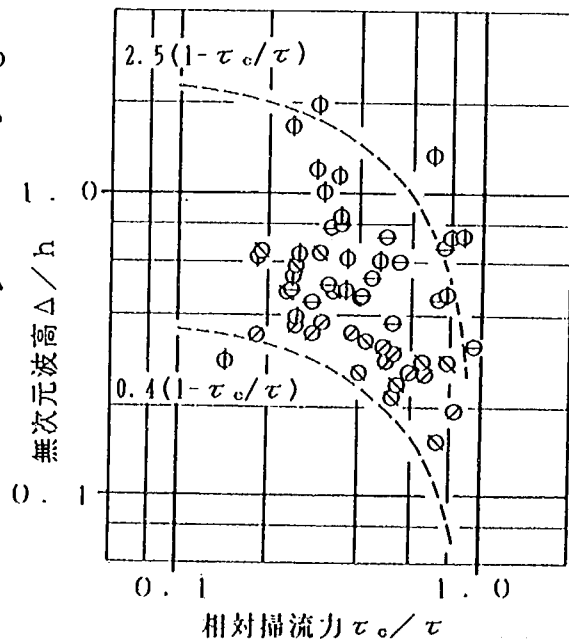


図-26 無次元波高特性曲線

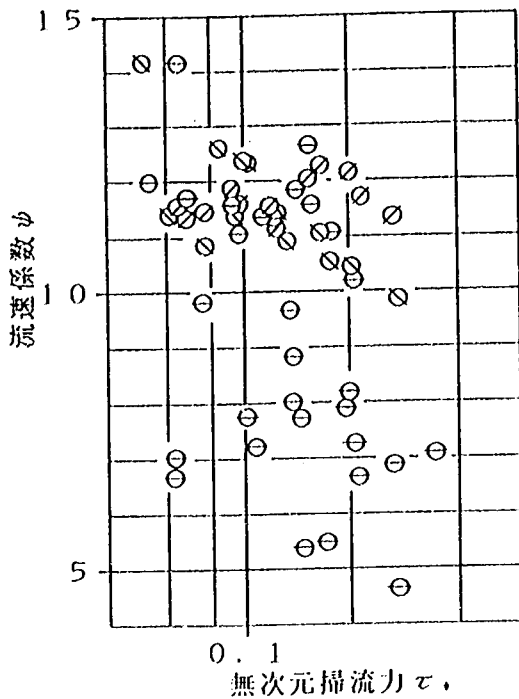


図-28 $\phi \sim \tau^*$ 相関図

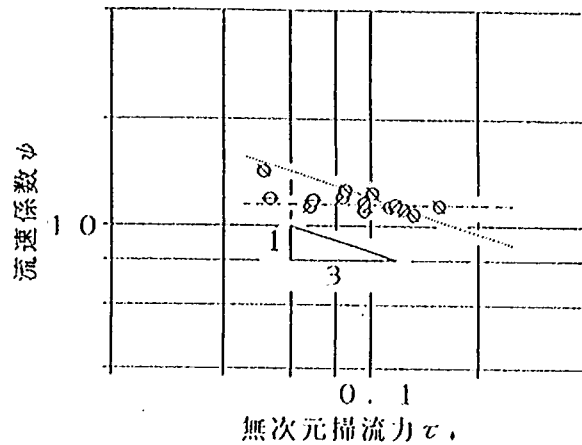


図-29 $\phi \sim \tau^*$ 相関図 ($h/d \approx 50$)
床波の波長は、水深の7~10倍と言え。

$$\text{波長 } L = (7 \sim 10) \cdot h \quad \dots (43)$$

c) 砂堆上の流れの抵抗

図-28は河床形態が砂漣・砂堆の領域にあるすべてのデータについて、流速係数 ϕ と τ^* の関係を片対数で示したものである。

スラジライトのみにおいて $\phi \propto \tau_*^{-1/3}$ の傾向が認められる。が、他の材料には一般的な関係は見出せそうにない。次に、各材料のデータの中より径深・粒径比 h/d がほぼ等しいデータを抽出して、両対数にプロットし直したのが図-29である。この図より河床材料ごとの違いがはっきりし、抵抗則は、スラジライトのグループと石炭粉・PBTのグループとに分かれることがわかる。ポリスチレンについては h/d が等しい条件での実験を実施しておらず、検討からはずれているが、図-28よりポリスチレンの流速係数は他の材料と比べ著しく小さく、さらに別のグループと考えられる。

・スラジライト

岸・黒木の式がほぼ適用可能で、流速係数 ϕ は砂同様に τ_* の $-1/3$ 乗に、そして水深・粒径比 h/d の $1/6$ 乗に比例する。

$$\phi = 2.9 \cdot (h/d)^{1/6} \cdot \tau_*^{-1/3} \quad \dots (35)$$

・石炭粉・PBT

石炭粉の流速係数は12~14の幅で一定値を示し、PBTの流速係数は、バラツキが大きいが平均値は石炭粉とほぼ等しい11.5程度である。

$$\text{石炭粉} \cdot \text{PBT} \quad \phi \approx 11.5 \quad \dots (37)$$

・ポリスチレン

ポリスチレンの流速係数は4~8と小さい値を示し、その平均はほぼ6.2程度である。

$$\text{ポリスチレン} \quad \phi \approx 7.1 \quad \dots (39)$$

4. 流砂現象の相似性

4.1 実験目的

ここでは従来から用いられている相似則と新たに提案した相似則について検討, 比較を行い, 流砂現象を再現するための相似則の把握を行った。

4.2 実験方法

今回用いた相似則の一つは, 従来から用いられているもので, 2-2で述べたように, 河床形態の領域を現地と模型で等しくした上で, 河床形態, 河床変動の相似性を支配すると考えられる無次元掃流力 τ_* および沈降速度・摩擦速度比 ω_o/u_* を現地と模型で一致させるものである。比重の異なる材料を用いる場合, 水深/粒径比 h/d は無視されることとなる。相似条件は

$$\tau_{*r} = h_r \cdot i_r \cdot s_r^{-1} \cdot d_r^{-1} = 1 \quad \dots (10)$$

$$(\omega_o/u_*)_r = \omega_{or} \cdot h_r^{-1/2} \cdot i_r^{-1/2} \quad \dots (12)$$

である。これより両式を満足させる材料の条件式として,

$$\omega_{or}^2 / (s_r \cdot d_r) = 1 \quad \dots (44)$$

が得られる。実験はシリーズAとして, この条件を満足させる材料の組合せとして, 今回用いた材料の中より, 砂A—スラッジライトA, 砂B—石炭粉, 石炭粉—PBT, そしてPBT—ポリスチレンの組み合わせを選び, 水路縮尺を次式で与えた。

$$\text{無次元掃流力 } \tau_{*r} = 1 \text{ より } h_r = s_r \cdot d_r \quad \therefore d_m = d_p \cdot h_r^{-1} \cdot s_r \quad \dots (45)$$

これらは図-30に示すような関係を取り, それぞれの組み合わせについて相似関係が満足されれば, 今回用いた比重の軽い材料すべてが現地の河床材料である砂に対して相似性が成立することとなる。

もう一方は, 2-3で提案したもので, 流れの抵抗(流速係数 ϕ)を現地と模型で一致させるもので, 河床形態の領域を現地と模型で一致させるだけでなく, 河床に生じる河床形態による流れの抵抗を相似にするものである。流れの抵抗は τ_* と h/d の関数として表

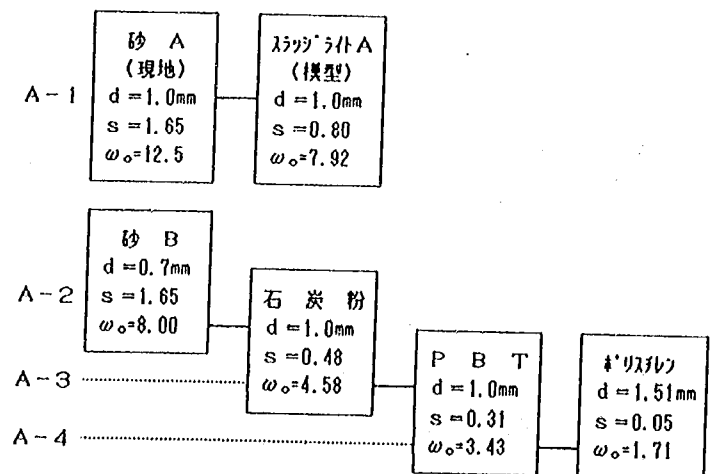


図-30 実験Aシリーズ相関図

表 - 7 実験条件一覧表

実験ケース		河 床 材 料	水路幅 B (cm)	水 路 勾 配 I	水 中 比 重 s	代 表 粒 径 d (cm)	無次元 掃流力 τ_*	水路幅 水深比 B/h	水 深 粒径比 h/d	沈降速度 摩擦速度比 ω_o/u_*
A	1	砂 A	145	1/440	1.65	0.100	0.05	40	36	4.5
							0.10	20	73	3.2
							0.15	13	109	2.6
							0.20	10	145	2.2
	1	スラッジライトA	60	1/440	0.80	0.085	0.05	40	18	4.4
							0.10	20	35	3.1
							0.15	13	53	2.5
							0.20	10	70	2.2
A	2	砂 B	150	1/570	1.65	0.070	0.05	46	47	3.1
							0.10	23	94	2.2
							0.15	15	141	1.8
							0.20	11	188	1.6
	2	石 炭 粉	60	1/570	0.48	0.100	0.05	44	11	2.9
							0.10	22	27	2.1
							0.15	15	41	1.7
							0.20	11	55	1.5
A	3	石 炭 粉	100	1/960	0.48	0.100	0.05	43	23	2.9
							0.10	22	46	2.1
							0.15	14	69	1.7
							0.20	11	92	1.5
	3	P B T	60	1/960	0.31	0.100	0.05	40	15	2.9
							0.10	20	30	2.1
							0.15	13	45	1.7
							0.20	10	60	1.5
A	4	P B T	120	1/2000	0.31	0.100	0.05	39	31	2.9
							0.10	19	62	2.1
							0.15	13	93	1.7
							0.20	10	124	1.5
	4	ポリスチレン	30	1/2000	0.05	0.151	0.05	40	5	2.8
							0.10	20	10	2.0
							0.15	13	15	1.6
							0.20	10	20	1.4
B	1	砂 A	150	1/500	1.65	0.100	0.12	15	99	2.8
							0.21	9	173	2.2
	1	スラッジライトB	35	1/500	0.80	0.100	0.06	15	24	5.1
							0.10	9	40	4.0
	2	砂 A	72	1/500	1.65	0.100	0.06	15	50	4.0
							0.10	9	83	3.1
	2	スラッジライトB	35	1/500	0.80	0.100	0.06	15	24	5.1
							0.10	9	40	4.0

表-8 水理量縮尺一覧

実験ケース	水路 幅比 B_r	水路 勾配比 I_r	水中 比重比 s_r	代表 粒径比 d_r	無次元 掃流力比 τ_r	沈降速度 摩擦速度比 $(\omega_o/u_*)_r$	流量 縮尺 Q_r	流速 係数比 ψ_r
A-1	2.41	1	2.06	1.18	1.00	1.02	9.08	—
A-2	2.50	1	3.44	0.70	1.00	1.10	9.88	—
A-3	1.67	1	1.55	1.00	1.00	1.03	3.59	—
A-4	4.00	1	6.20	0.66	1.00	1.04	32.0	—
B-1	4.29	1	2.06	1.00	2.08	0.54	38.0	0.89
B-2	2.06	1	2.06	1.00	1.00	0.79	6.07	1.00

されることから、比重の異なる材料を用いた場合、 τ_* 、そして h/d の相似性自体は満足されないこととなる。その相似条件は対象を砂堆領域とすると次式で表される。

$$\psi_r = (u/u_*)_r = (h/d)_r^{1/3} \cdot \tau_{*r}^{-1/3} \quad \dots (46)$$

実験はシリーズBとして、流れの抵抗の相似性を満足させることから模型に用いる河床材料に砂と同様の流送特性を持つ材料として、流送特性把握実験の結果を受けてスラッジライトを選んだ。

実験は式(25)を満足させた条件

$$\text{砂堆 I} \quad \psi_r = 1 \text{ より } h_r = s_r^2 \cdot d_r \quad \therefore d_m = d_p \cdot h_r^{-1} \cdot s_r^2 \quad \dots (47)$$

で行ったB-1と、砂の特性式(13)式とスラッジライトの特性式(35)式の係数の違いを考慮して得られた式

$$h_r = K_r^0 \cdot s_r^2 \cdot d_r \quad \dots (48)$$

K_r : 砂の係数とスラッジライトの係数の比 (2.4/2.9)

を満足させた条件で行ったB-2からなる。

実験ケースは表-7に示すとおりであり、それぞれの水理量の縮尺は表-8に示す。

実験は図-4で示した長さ30m、幅60cmの変勾配水路と図-31に示す長さ30m、幅2mの水路内に設けた幅を変えられる水路を用い、相似条件に合わせ水路の幅を変えて行った。

流量は各水路の上流に設けられた堰を用いて、計算した設定越流深となるようにバルブにより調整した。越流水深と流量の関係図を図-5および図-32に示す。可変勾配水路下流には観音開き式ゲートが、他方には堰上げゲートが取り付けられており、それにより等流水深となるように下流水位を調整した。

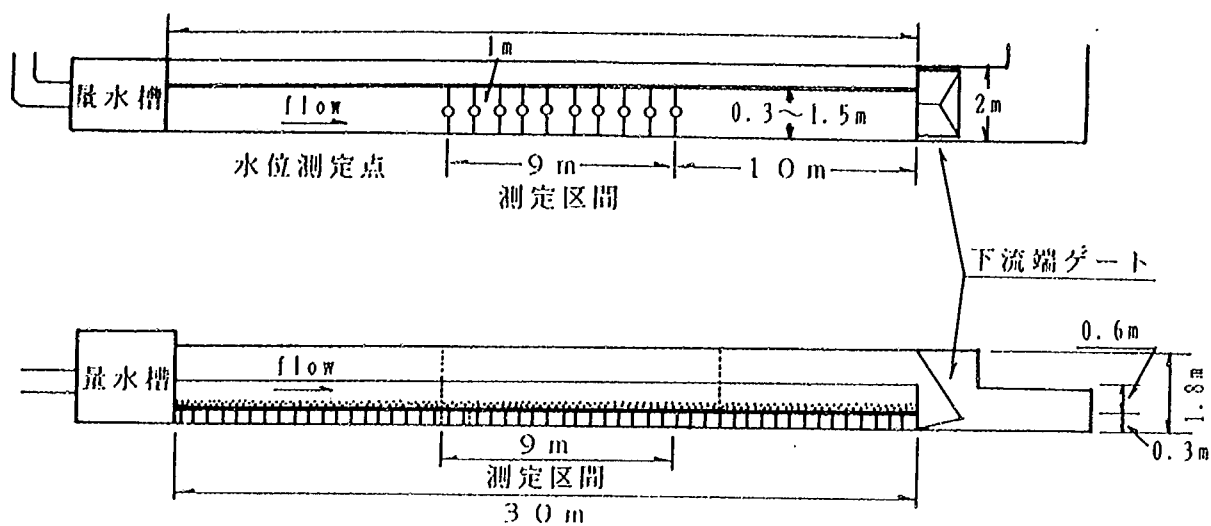


図-31 実験水路B概要図

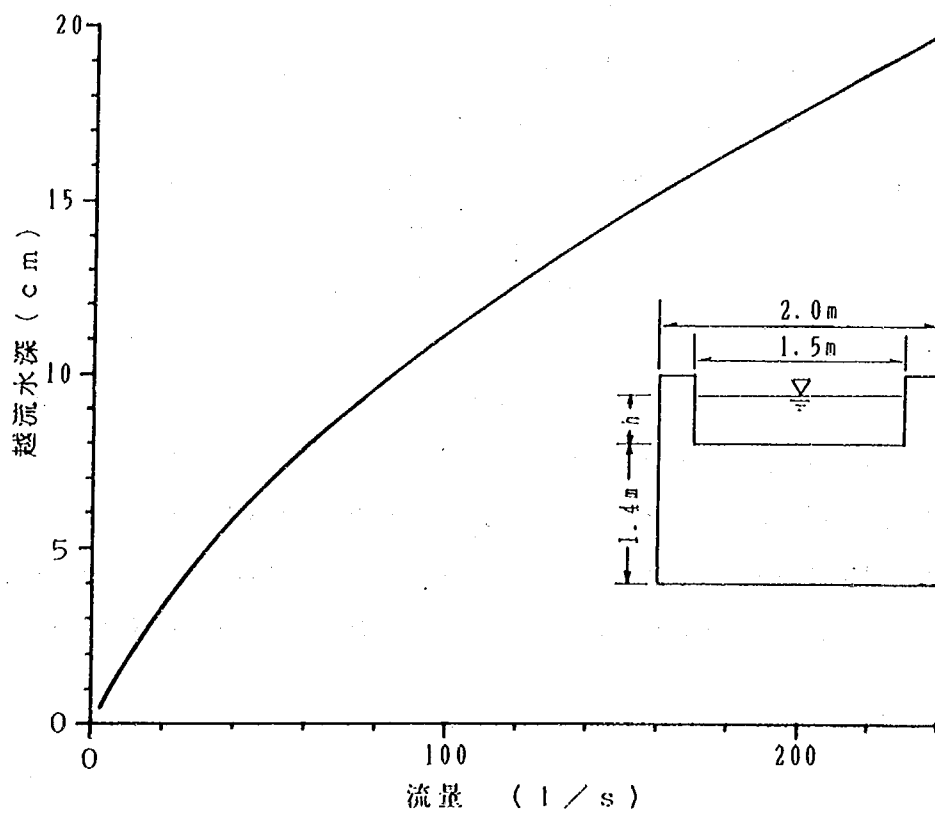


図-32 H~Q曲線(実験水路B)

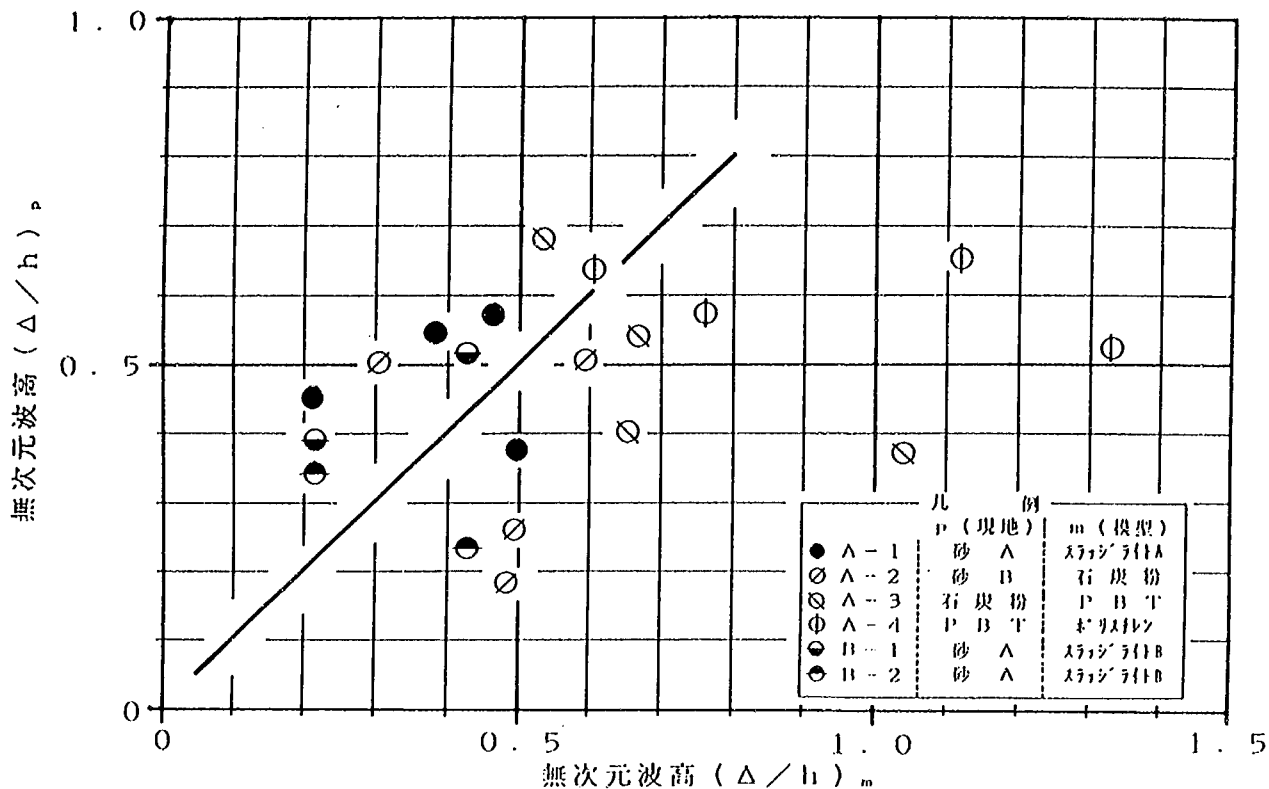


図-33 無次元波高相関図

実験では、河床材料を平均厚10cmで敷き均し、水を湛水させ締め固めを行った後に通水し行った。給砂は土研式 ($n=0.015$) により得られた量を水路上流から与えた。

測定は水位、河床高および流砂量について実施した。各測定内容は流送特性把握実験に準拠するが、河床高について、今回は河床縦断の測定を実施しなかった。

4-3 実験結果

4.3.1 河床波の相似性

河床に生じている小規模河床波の相似性について、図-33に示すような定義のもとで河床波波高 Δ を平均水深 h で無次元化し検討を行った。図-34は現地と見なした実験pと模型と見なした実験mの相関を見たものである。これより、砂とスラッジライトとの対応では、比重の重い砂に生じる河床波の方がスラッジライトに比べて無次元波高が大きくなることが分かる。しかし、砂と石炭粉、石炭粉とPBT、そしてPBTとポリスチレンの対応では逆に比重の軽い材料に生じる河床波の無次元波高が大きくなる傾向になっている。

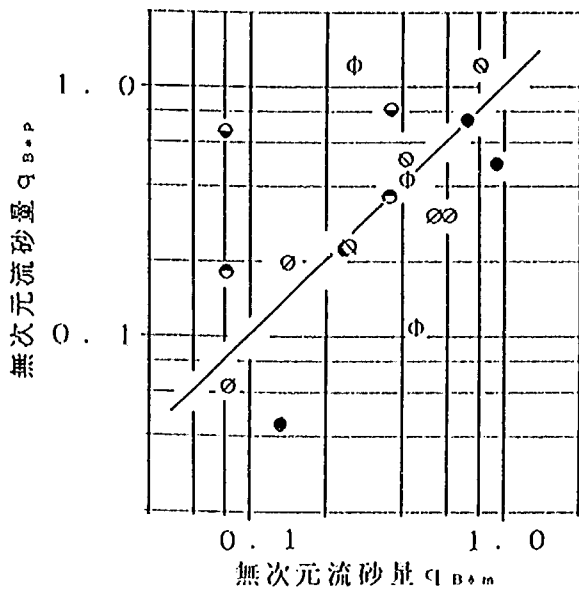


図-34 無次元流砂量相関図

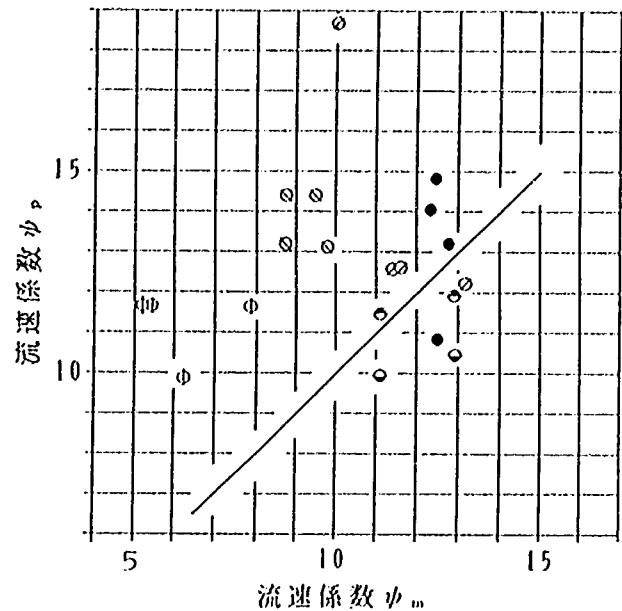


図-35 流速係数相関図

4.3.2 流砂量の相似性

各材料の流砂量特性については、2-3の流送特性の検討で述べたとおり、ほぼ等しい特性を有している。しかし、図-35に示すように実験個々の対応を検討した場合バラツキがみられる。とくに実験B-1では $\tau_{*r} \neq 1$ としていることから、流砂量のずれは大きい。

4.3.3 流れの抵抗の相似性

図-36は各材料間の流れの抵抗の一致の程度を示したものである。これより、石炭粉とPBT, PBTとポリスチレンの対応が著しく悪いことが知られ、これらの材料についてはさらに検討が必要である。実験シリーズAでは、その実験条件を τ_* で与え、流れの抵抗の相似性を無視していることから、バラツキが大きくなっている。また、流れの抵抗を重視した実験Bシリーズでも、特性式の係数の違いを考慮していないB-1では $\phi_r \approx 0.8$ 程度の値を示している。

4.3.4 流砂現象の相似性

これまで個々に検討してきた流砂現象（流砂量、河床形態、河床抵抗）について、さらに総合的に検討し現象を最もよく再現し得る条件の検討を行う。図-37は対比する実験結果より、水理現象を代表する無次元量6項目を選択し、相関を示したものである。ここで取上げた無次元量は、実験条件としての τ_{*r} , $(\omega_0/u_*)_r$, ϕ_r の3項目、流れの相似性として流量比をフルード則の流量縮尺で割った $Q_r/h_r^{5/2}$, そして実験により得られた流砂現象の相似性として、無次元流砂量 $q_{B*r} (= q_{Br}/(u_{*r} \cdot d_r))$ と無次元波高 $(\Delta/h)_r$ である。添字rは現地と模型の水理量の比を表わす。同図においてすべての項目が1とな

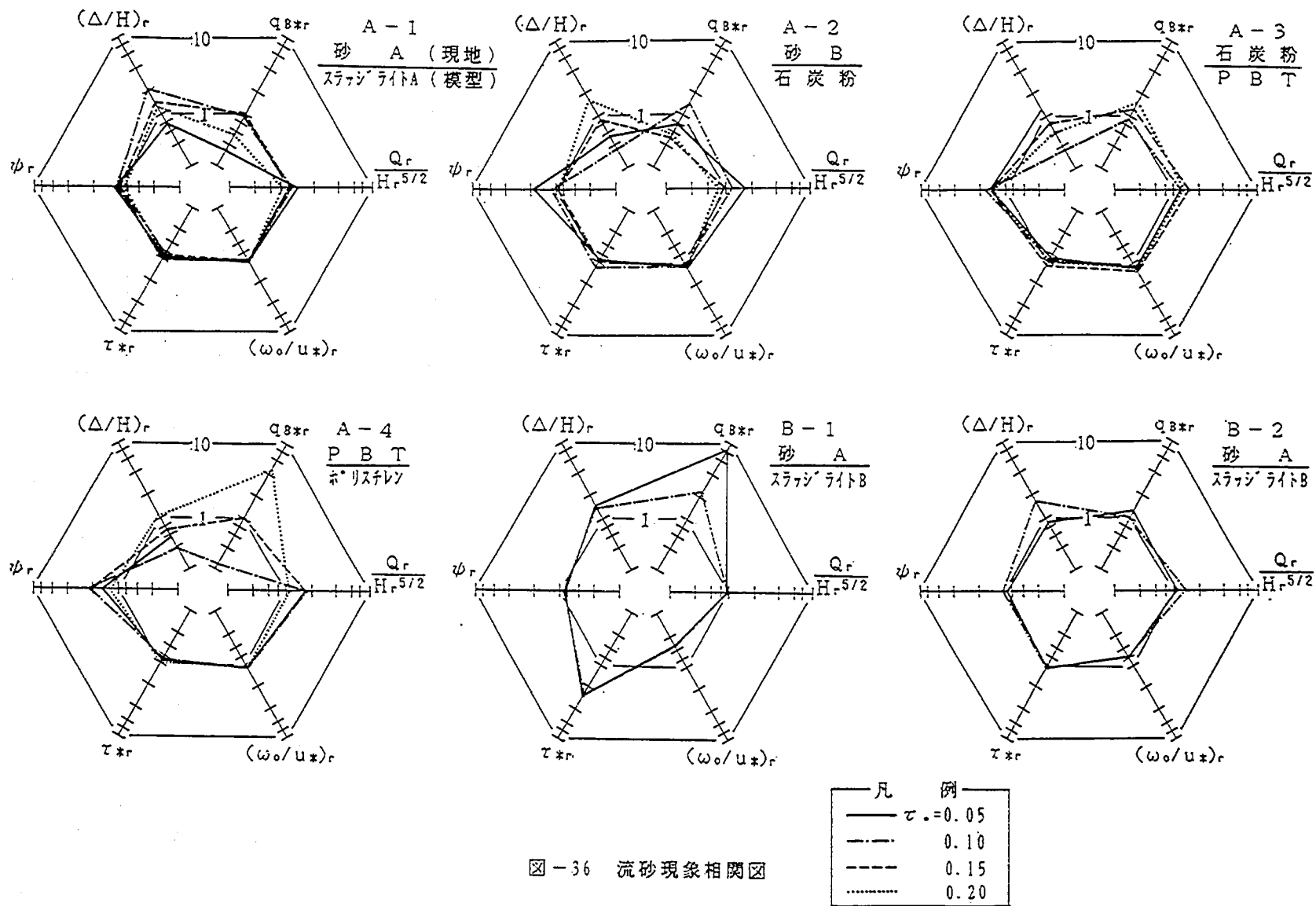


図-36 流砂現象相関図

ることが理想である。これらの観点から見て次のことが言える。

①A-1: 砂A (現地)・スラジライトA (模型)

実験Aシリーズでは、 τ_{*r} 、 $(\omega_0/u_*)_r$ を1にする条件で行っており、水理現象の相似性は他の4項目によって評価される。砂AとスラジライトAを用いた実験では、実験条件が十分に満足されていることが分かる。流速係数 ϕ_r の項で評価されるように、この組合せでは流れの抵抗の相似性がほぼ満足され、結果、流量の比 Q_r もほぼフルード則での縮尺 $h_r^{5/2}$ と一致している。しかし、無次元流砂量比 $q_{b* r}$ を見た場合、 τ_* が一致しているわりに相似性が悪いことが知られる。この原因として無次元波高比 $(\Delta/h)_r$ に見られる河床波の波高の違い、すなわち、砂Aに比べスラジライトAの方が波高が低くなっていることが考えられる。このことから砂AとスラジライトAについて、 τ_* および ω_0/u_* を合せる条件においては流砂現象の相似性はあまり良いとは言えない。

②A-2: 砂B・石炭粉

τ_* が小さい0.05の場合、砂Bを用いた河床はほぼ静止した状態になるのに対して、石炭粉を用いた河床では河床波が発達することから、流砂現象は再現されていないと言える。 τ_* が大きい場合、砂の流速係数が11~12となることから、石炭粉の流速係数とほぼ一致する。しかし、無次元流砂量比 $q_{b* r}$ と無次元波高比 $(\Delta/h)_r$ をみると、各 τ_* 毎にその傾向が異なることから、流砂現象の相似性は極めて悪いと言える。

③A-3: 石炭粉・PBT

PBTの河床抵抗にバラツキが大きく、今回の実験では石炭粉の河床抵抗より大きな抵抗となり、その比 ϕ_r は1.4となっている。結果、流量比 Q_r もフルード則の縮尺 $h_r^{5/2}$ とは異なっている。無次元波高比 $(\Delta/h)_r$ より石炭粉に比べてPBTを用いた河床に生じる河床波の波高が高いことが知られ、河床抵抗の増加の原因と見られる。

流砂現象の再現性は無次元流砂量比 $q_{b* r}$ がほぼ1付近であることから、②に比べては良いと言える。しかし、②において石炭粉が砂に対して相似性が悪いことが知られており、これよりPBTも同様に砂に対しての相似性は悪いものと推察される。

④A-4: PBT・ポリスチレン

実験条件として与えた τ_{*r} 、 $(\omega_0/u_*)_r$ はほぼ1となっているが、先の材料の特性で述べたように、PBTとポリスチレンでは、流れの抵抗特性が異なることから、 ϕ_r は1.5~2.0となっている。これに伴い、流量の比 Q_r もフルードの相似則と大きくずれる結果となる。また、無次元流砂量も、PBTとポリスチレンではその特性が異なり、その比は、 τ_* の増加に伴い大きくなっている。これらより、PBTとポリスチレンの相似性は極めて悪いと言える。

⑥B-1: 砂A・スラッジライトB

本ケースでは、式(23)および式(47)を適用し、流速係数 ϕ を実験条件として、流量をフルード則の縮尺に合せ与えていることから、水理現象の相似性は ϕ_r 、 $Q_r/h_r^{5/2}$ を除く4項目で評価される。しかし、本ケースでは、係数の違いを考慮していないことから ϕ_r は1.0とはならず、 $\phi_r \approx 0.8$ の実験値となった。無次元掃流力比 τ_{*r} は式(24)で示したように $\tau_{*r} = s_r$ で歪み、 $\tau_{*r} = 2.08$ となっている。無次元流砂量比 q_{B*r} は τ_{*r} が歪むことから一致しないものの、無次元波高比 $(\Delta/h)_r$ は τ_{*} の違いによらず1.4程度の値を示し、流砂現象の相似性は良いと言える。

⑥B-2: 砂A・スラッジライトB

係数の違いを考慮した場合、相似条件式(48)において $K_r \approx s_r^{-1}$ となり、式(45)とはほぼ一致する結果となった。このときに ω_r/u_{*} の相似性は考慮していないが、今回の実験条件においては流送形態がどちらも掃流状態であったことから、その影響は無視される。こうして実施した実験の結果、全ての項目がほぼ1となり、砂河川の水理現象が十分に再現できたと言える。

流砂現象を再現するための相似条件の検討として、実験A-1と実験B-1、B-2について比較すると、どの場合についても河床形態の領域が一致していれば、河床形態の平面的形状はほぼ再現されること、形成される河床波の波高については比較してスラッジライトの波高が低いことなど現象の違いは認められず、従来から用いられてきた相似条件と今回新たに提案した相似条件による流砂現象の再現性の優劣については、今回の検討結果からははっきりとした結論は得られなかった。

5. 比重の異なる材料を用いた移動床実験の可能性

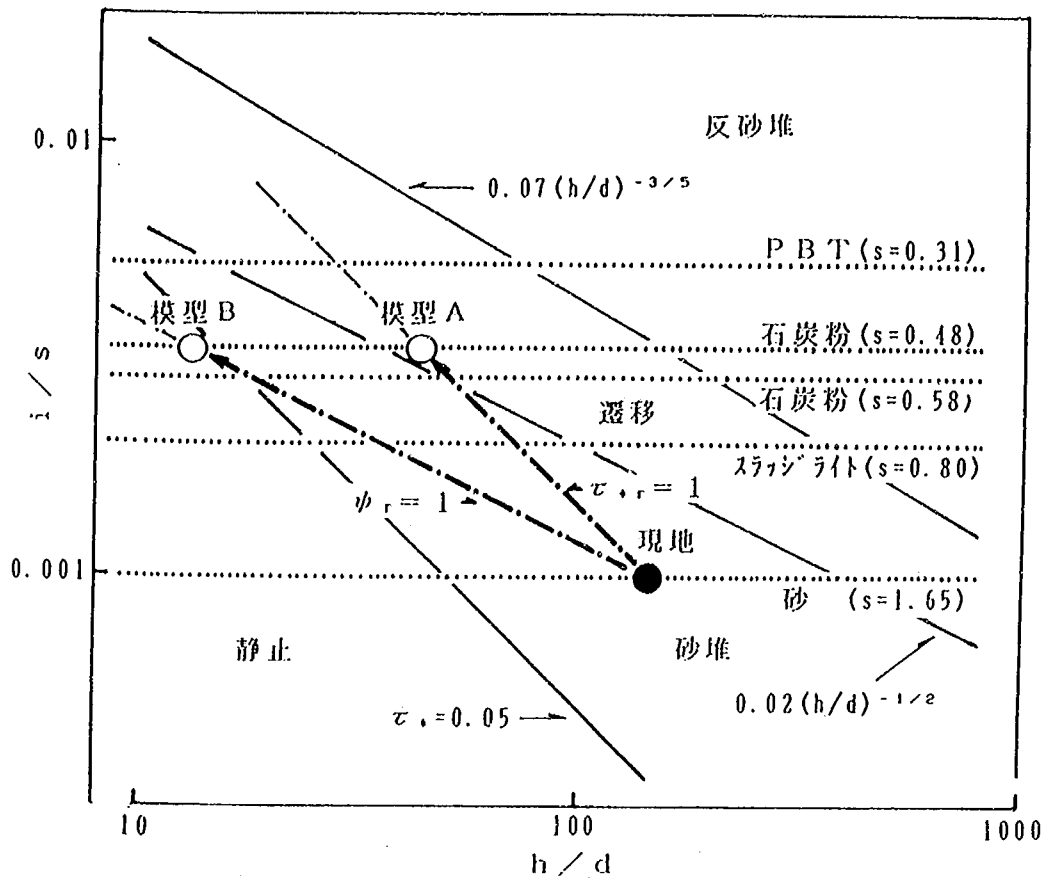


図-38 相似則の適用限界

5.1 材料の限界

現地の河床材料の細かい砂河川、河口域などの水理現象を検討する場合、現地と比重の等しい材料を模型縮尺に合わせて小さくすると、現地では無視される水の粘性が模型では無視出来なくなり、水理現象の相似性を著しく悪くする。このような場合、模型の材料に比重の異なる材料を用いて水理現象を再現しようとする方法がとられる。

これまでの章では、その再現するための方法、相似条件について考察し、実験を行った結果を述べてきた。それより、比重の異なる材料を用いる場合の相似条件として、従来から用いられてた移動床流れの相似則からの条件（無次元掃流力 τ_* を相似とする。）

$$\left. \begin{array}{l} \text{無次元掃流力} \quad \tau_{*r} = h_r \cdot I_r \cdot s_r^{-1} \cdot d_r^{-1} = 1 \\ \text{沈降速度・摩擦速度比} \quad (\omega_o/u_*)_r = \omega_{or} \cdot g_r^{-1/2} \cdot h_r^{-1/2} \cdot I_r^{-1/2} = 1 \\ \text{模型の粒子レイノルズ数} \quad Re_{*m} > 20 \end{array} \right\} \dots (49)$$

と、新たに流れの抵抗からの相似則を解き、砂堆領域について

$$\left. \begin{aligned} \text{河床材料粒径} \quad d_r &= s_r^{-2} \cdot h_r^{-1} \cdot i_r^{-2} \\ \text{無次元掃流力} \quad \tau_* &= h_r \cdot i_r \cdot s_r^{-1} \cdot d_r^{-1} = s_r \cdot i_r^{-1} \\ \text{沈降速度・摩擦速度比} \quad (\omega_o / u_*)_r &= \omega_{or} \cdot g_r^{-1/2} \cdot h_r^{-1/2} \cdot i_r^{-1/2} = 1 \\ \text{水深・粒径比} \quad (h/d)_r &= h_r \cdot d_r^{-1} = s_r^2 \cdot i_r^{-2} \end{aligned} \right\} \dots (50)$$

の条件を提案した。

このどちらを使用するにおいても、その適用範囲を把握する必要がある。図-38は●が現地の条件とした場合に模型の河床材料として石炭粉($s=0.48$)を考え、相似条件①、②から模型A、模型Bの条件(○印)を求めたものである。この場合、模型Aでは模型の河床形態は遷移河床の領域に入ってしまう、河床形態が再現されないこととなる。また、模型Bでも河床形態が静止領域となり、河床材料が移動せず、時間縮尺を歪ませても水理現象が再現されない。

このように、相似条件①、②それぞれに適用範囲、限界がある。相似条件①の限界は図で示したように模型の河床形態が遷移の領域になってしまう場合である。

①の限界は

$$\tau_* = \tau_{*m} = 0.02 \cdot (h_m/d_m)^{1/2} \dots (51)$$

より

$$(h_m/d_m)_0 = (\tau_*/0.02)^2 \dots (52)$$

が得られ、式以下の h/d となる場合河床形態は再現されない。

相似条件②の限界は、図で分かるように模型の τ_{*m} が0.05以下となり、河床材料が移動しない、静止状態となってしまう場合である。

②の限界は

$$\tau_{*m} = \tau_{*p} \cdot s_r^{-1} = 0.05 \dots (53)$$

より

$$s_r = \tau_{*p}/0.05 \quad \therefore s_p = 1.65, \quad s_{m0} = 0.0825/\tau_{*p} \dots (54)$$

が得られ、式以上に比重を歪ませた材料を用いた場合水理現象は再現出来ないこととなる。

さて、相似条件についての限界について述べてきたが、模型実験を行うにあたりもう一つの制約がある。これは、模型実験において比重に異なる材料を用いることとなった要因である砂澱の発生、水の粘性の影響である。つまり、模型の河床材料として用いる材料の粒径限界である。この限界としては、粒径のみの議論から出される限界と、粒子レイノルズ数から出される限界である。

粒子のみの議論から出される限界は簡単である。つまり、模型の河床材料として砂を用いる場合の限

界粒径が他の材料でも限界であるとするもので、

$$\text{限界粒径 } d_{m0} = 0.03 \text{ cm} \quad \dots (55)$$

としている。

粒子レイノルズ数からの出される限界粒径は、

$$\tau_{*m} = h_m \cdot I_m \cdot s_m^{-1} \cdot d_m^{-1} = 0.05 \quad \dots (56)$$

$$Re_m = (g \cdot H_m \cdot I_m)^{1/2} \cdot d_m / \nu = 20$$

$$\nu = 0.0101 \quad \dots (57)$$

の連立式を解いた、

$$d_{m0} = (8.33 \cdot 10^{-4} / s_m)^{1/3} \quad \dots (58)$$

より得られる。これは、河床材料が移動する場合に、砂漣が発生しない条件であり、もし、現

地の τ_* が大きい場合、式の右辺の定数0.05を模型で生じる τ_* の最小値に代え、解くことにより、その

模型に使用可能な材料の粒径を得ることが出来る。図-39に τ_{*m} と限界粒径の関係を示す。

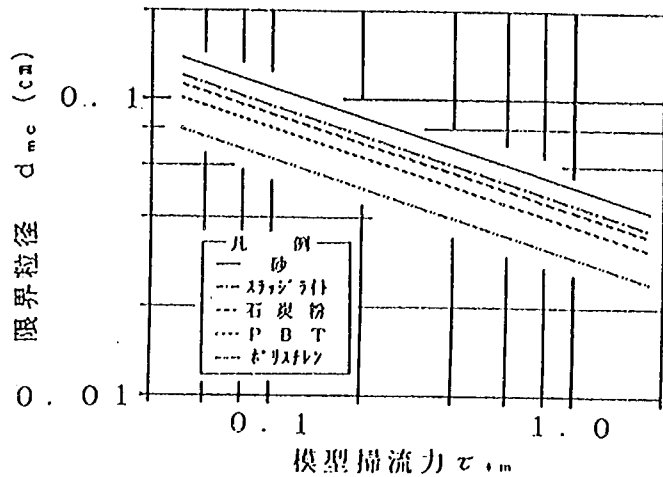


図-39 河床材料の粒径の限界

5. 2 模型縮尺の決定

模型実験においては、適用する相似条件に応じた限界を把握し、その中で模型縮尺等を決定することとなる。

それでは、ここで例をあげて模型の縮尺の決定順序を追ってみよう。

(例) 水深5m, 河床勾配1/5000, 河床材料 $d_p = 0.1 \text{ cm}$ の河川の模型実験を行う場合の、模型で使用可能な材料と模型縮尺を求めよ。

まず現地の河川の無次元掃流力 τ_* を求める。

$$\tau_* = h \cdot I / (s \cdot d) = 500 \cdot 1/5000 / (1.65 \cdot 0.1) = 0.606$$

次に、この水理条件で河床形態がどの領域に属するのか検討する。

$$\tau_{*a} = 0.02 \cdot (h/d)^{1/2} = 1.414$$

$$\tau_{*b} = 0.07 \cdot (h/d)^{2/3} = 20.47$$

$$\tau_* < \tau_{*a}$$

これより、河床形態は砂堆の領域である。

それでは、相似条件①, ②の限界を把握し、模型実験に使用出来る材料を選定する。

相似条件①から限界の水深・粒径比 $(H_m/d_m)_0$ を求める。

$$(h_m/d_m)_0 = (\tau_*/0.02)^2 = (0.606 / 0.02)^2 = 918.09$$

現地の h_p/d_p が5000であることから、その比約0.2が粒径を歪ませることの出来る限界となる。

また、相似条件①は $\tau_{*r} = 1$ とすることから模型を無歪みとし、 $I_r = 1$ とすると、使用出来る材料の比重限界が逆算される。

$$s_{m0} = \{(h_m/d_m) \cdot I_m\} / \tau_* = (918.09 \cdot 1/5000) / 0.606 = 0.303$$

これから、模型の河床材料は水中比重が0.303以上のものとなる。今回の材料の中では、ポリスチレンを除く材料が使用出来ることとなる。

それでは、相似条件②からも限界比重 s_{m0} を求めてみよう。

$$s_{m0} = 0.0825 / \tau_{*p} = 0.0825 / 0.606 = 0.136$$

これより、どちらの相似条件においてもポリスチレン以外の材料を用いて模型実験が出来ることが分かった。

それでは、次に模型の河床材料の粒径を求める。(図-39参照)

相似則①では、 $\tau_* = 0.606$ が最小無次元掃流力として、 $\tau_* = 0.606$ で粒子レイノルズ数 Re_* が20となる粒径を求めた。

$$d_{m0} = \{(20 \cdot \nu)^2 / (g \cdot \tau_* \cdot s_m)\}^{1/3} \quad \therefore \nu = 0.0101$$

$$\text{スラッジライト} \quad d_{m0} = 0.044 \text{ cm}$$

$$\text{石炭粉}(s=0.58) \quad d_{m0} = 0.049$$

$$\text{石炭粉}(s=0.48) \quad d_{m0} = 0.052$$

$$\text{P B T} \quad d_{m0} = 0.061$$

相似則②では、 $\tau_{*r} = s_r$ となることから、模型の最小無次元掃流力 $\tau_{*m} = \tau_{*p} \cdot s_r^{-1}$ として粒径を求めた。

$$\text{スラッジライト} \quad d_{m0} = 0.056$$

$$\text{石炭粉}(s=0.58) \quad d_{m0} = 0.070$$

$$\text{石炭粉}(s=0.48) \quad d_{m0} = 0.079$$

$$\text{P B T} \quad d_{m0} = 0.106$$

それぞれの相似条件にそって得られた粒径を代入して模型縮尺を求める。

相似条件① $h_r = s_r \cdot d_r$ では、

$$\text{スラッジライト} \quad h_r = (1.65/0.80) \cdot (0.1/0.044) = 4.7$$

$$\text{石炭粉}(s=0.58) \quad h_r = (1.65/0.58) \cdot (0.1/0.049) = 5.8$$

$$\text{石炭粉}(s=0.48) \quad h_r = (1.65/0.48) \cdot (0.1/0.052) = 6.6$$

$$\text{P B T} \quad h_r = (1.65/0.31) \cdot (0.1/0.061) = 8.7$$

相似条件② $h_r = s_r^2 \cdot d_r$ では、

$$\text{スラッジライト } h_r = (1.65/0.80)^2 \cdot (0.1/0.056) = 7.6$$

$$\text{石炭粉}(s=0.58) \quad h_r = (1.65/0.58)^2 \cdot (0.1/0.070) = 11.6$$

$$\text{石炭粉}(s=0.48) \quad h_r = (1.65/0.48)^2 \cdot (0.1/0.079) = 15.0$$

$$\text{P B T} \quad h_r = (1.65/0.31)^2 \cdot (0.1/0.106) = 26.7$$

これより、模型の河床材料にP B Tを用いて、模型縮尺を $h_r=25$ 程度にすることによって水理現象の検討が出来そうである。

模型縮尺	$h_r = 25$
流 量	$Q_r = 3125$
流 速	$u_r = 5$
河床勾配	$I_r = 1$
粗度係数	$n_r = 1.16$
粒 径	$d_r = 0.88$
比 重	$s_r = 5.32$

5.3 移動床実験の時間縮尺

移動床模型実験を行う場合、考慮しなければならない量に時間がある。固定床模型実験においては、模型の粗度係数をフルード則に合わせ調整出来ることから、時間縮尺はフルード則により決められる。しかし、移動床実験では粗度係数の調整が出来ないことと流砂現象（流砂量）の再現からフルードの相似則によらず、別の時間縮尺を用いることとなることは、さきに述べたとおりである。それでは、本報文で提案してきた相似条件①、②についての時間縮尺を求める。

相似条件①では、無次元掃流力 τ_* を合わせることから、模型の粗度係数はフルードの相似則によるものと一致しない。

流砂量からの時間縮尺

$$t_{sr} = q_{B+r}^{-1} (1-\lambda)_r \cdot h_r^{1/2} \cdot x_r \cdot d_r^{-1} \quad \dots (59)$$

ここで、 $(\tau_{*r}=1) \Leftrightarrow (q_{B+r}=1)$, $(1-\lambda)_r=1$, $x_r=h_r$ とすれば

$$t_{sr} = h_r^{3/2} \cdot d_r^{-1} \quad \dots (60)$$

となる。相似条件①では、 $d_r = h_r \cdot s_r^{-1}$ であることから、

$$t_{sr} = h_r^{1/2} \cdot s_r \quad \dots (61)$$

となり、比重の歪みが時間縮尺に係ることとなる。ただし、現地と模型で流砂量式が異なる場合はそれを考慮しなければならない。

相似条件②では、流速係数 ϕ を一致させ、粗度係数の相似条件を満足させることから流れにおける時間縮尺はフルードの時間縮尺に等しくなる。

流砂量からの時間縮尺

相似条件②では、流速係数を一致させるために無次元掃流力 τ_* を現地と模型で歪ませている。このことから、相似条件②の条件 $d_r = H_r \cdot s_r^{-2}$ を式(65)に代入すると、

$$t_{sr} = q_{B*r}^{-1} (1 - \lambda)_r \cdot H_r^{1/2} \cdot \chi_r \cdot d_r^{-1} \quad \dots (62)$$

$$t_{sr} = q_{B*r}^{-1} \cdot H_r^{1/2} \cdot s_r^2 \quad \dots (63)$$

となり、 q_{B*r} が s_r^2 と等しければ、流砂量からの時間縮尺もフルードの時間縮尺に一致する。

先の例題について、時間縮尺を求めると、

$$\text{流れの時間縮尺 } t_r = H_r^{1/2} = 5$$

であり、流砂量式として土研式($n=0.015$)を用いると、

$$q_{B*P} = 3.72 \times 0.606 \times 1.0 = 2.26$$

$$q_{B*M} = 3.72 \times 0.114 \times 0.928 = 0.394$$

となり、

$$q_{B*r} = 5.474$$

となる。これより、

$$\text{流砂量の時間縮尺 } t_{sr} = 24.64$$

が求められる。

また、流砂量式としてBrownの式を用いると、

$$q_{B*P} = 10 \times 0.606^2 = 3.67$$

$$q_{B*M} = 10 \times 0.114^2 = 0.130$$

となり、

$$q_{B*r} = 28.23$$

となる。これから求まる時間縮尺は

$$t_{sr} = 5.01$$

となる。

実験においては流れの時間縮尺 t_r と流砂量の時間縮尺 t_{sr} が等しいことが望ましいが、両者の値が異なる場合、実験の目的より、時間縮尺を選定する。また、相似条件①、相似条件②においてのそれぞれに考慮される粗度係数、流砂量ともに不確定要素が多く、予備実験を実施して現象を最も良く再現する時間縮尺を求めることが賢明である。

軽量河床材料の流送特性と
移動床模型実験の相似性に
関する研究

ISSN 0386-5873
土木研究所資料 第2641号
昭和63年7月(1988年)
福岡捷二, 浅野富夫
林 正男

要旨

本報告書は, 砂河川, 河口域を対象とした移動床模型実験について, 河床材料として従来より使われている石炭粉に新しい材料3種を加え, それぞれの流送特性を検討するとともに, 河床に生じる河床波が流れに与える抵抗に着目し, 一つの相似則を提案, 検討した結果を述べるものである。

キーワード: 模型実験, 相似則

郵便はがき

305-□□

40円切手
をはいて
下さい

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

河川研究室 御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第 2641 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属(住所)

氏 名 印

土木研究所資料第2641号

