

新しい河床材料による河川の流砂問題研究の可能性

Feasibility of the use of New Bed Materials for study of Sediment Transport and Related Problems

建設省土木研究所 福岡 捷二 S.Fukuoka
建設省土木研究所 ○ 林 正男 M.Hayashi

1. はじめに

河川で生じている種々の水理現象（流れ、流砂、それ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、その多くは小型室内模型実験などの手段によるところが多く、実現象を十分な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、縮尺の影響により現象が現地と模型で異なることが起こり得る。このため、現地と模型で起こる流砂現象が相似となるように種々の工夫が試みられている。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_0/u_* を一致させれば、流砂の運動もほぼ相似になることが知られている¹⁾。しかし、河口域や砂河川などの移動床の水理問題を取扱う場合、現地の河床材料が小さく、模型縮尺に合わせ材料の粒径を決定すると、水の粘性の影響を無視することが出来ず、従来の方法では両者の相似性は極めて悪くなる¹⁾。このような場合、模型に用いる河床材料の比重や時間縮尺、模型の縦横比などを歪ませて、出来る限り現象が再現されるような工夫がなされているが、いまなお十分確立した技術となり得ていない。前報²⁾においては、従来用いられている移動床の相似条件 τ_* と ω_0/u_* を現地と模型で同一とした場合、どの程度現象の相似性が成立するかを、特に砂河川を対象とした模型実験によって検討した。

本研究では、河川と模型水路の水理現象が相似となる新しい条件を考察し、この条件の適合性を水理実験によって検討する。特に、比重の異なる新しい河床材料を用いることによって、砂河川の水理現象の再現の可能性と限界を明らかにする。

2. 新しい材料の流送特性

新しい河床材料として、ポリブチレン・テレフタレート(Polybutylene Terephthalate；以下本文ではPBTと称する。)、スラッジライト(Sludgelight)、石炭粉の三種を用いた。PBTは、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る。スラッジライトは、下水汚泥の焼却灰を1100℃～1500℃の高温にさら

表－1 用いた材料の特性量

し半溶融としたものを空冷却したものであって、0.3mm～5.0mm程度までの粒径を有し、一般的には軽量骨材として利用されている。今回使用した各材料の諸特性量は、表-1に示すとおりである。これらの河床材料を用いて実験を行い、それぞれの流送

	砂A	砂B	スラッジライトA	スラッジライトB	石炭粉	PBT
水中比重 : s	1.65	1.65	0.80	0.80	0.48	0.31
粒径 : d (cm)	0.10	0.07	0.085	0.10	0.10	0.10
沈降速度 : ω_0 (cm/s)	12.50	8.00	7.92	11.10	4.58	3.43
無次元限界掃流力 : τ_{*c}	0.036	0.036	0.035	0.035	0.040	0.042
空隙率 : λ	0.35	0.35	0.47	0.47	0.47	0.35
水中安息角 : ϕ^*	35.4	32.0	31.3	31.3	33.0	31.2
形状	(海砂)	(海砂)	球	球	鱗片状	円柱*

*直径=高さ

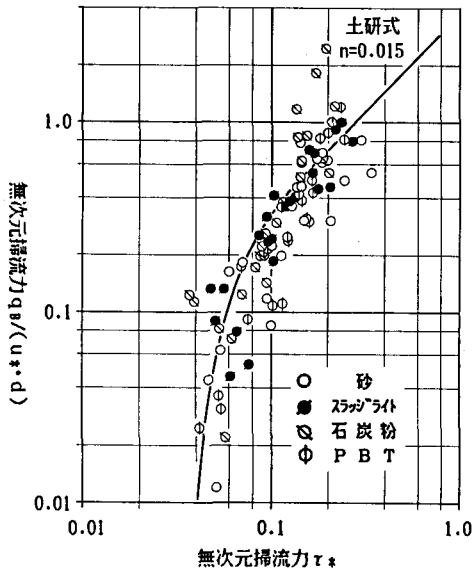


図-1 流砂量特性図

特性（流砂量，河床形態）の検討を行った。

-1. 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 $q_{B*} (= q_B / (u_* \cdot d))$ で評価し， τ_* に対して図示したものが，図-1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できることがわかる。

$$q_{B*} = 3.72 \cdot (\sigma/\rho - 1)^{-1} \cdot g^{-1} \cdot u_*^3 \cdot F(\tau/\tau_c) ; n=0.015 \quad (1)$$

-2. 河床形態

今回の実験結果を小規模河床波の区分図に表わすと，図-2のようである。これより，河床波が砂澱・砂堆の領域に属するデータを用いて，河床波の波高 Δ を水深 h で無次元化し検討を行った結果が図-3に示されている。波高・水深比 Δ/h は Valin の表示式において係数を $1/4 \sim 1$ とした曲線の範囲にある。

$$\Delta/h = (1/4 \sim 1) \cdot (\tau_c/\tau) \quad (2)$$

各材料別にデータを見た場合，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 $Re_* (= u_* \cdot d/\nu; \nu$ 動粘性係数) で整理したのが図-4である。

過去実施された砂のデータを合わせプロットしているが，比重の違いによる差はほとんど認められない。粒子レイノルズ数 Re_* が50以下，20以上においては，

$$L = (7 \sim 10) \cdot h$$

の範囲にある。

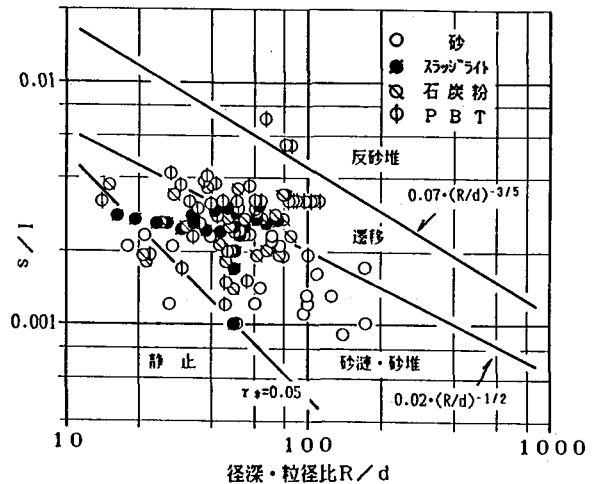


図-2 小規模河床波区分図

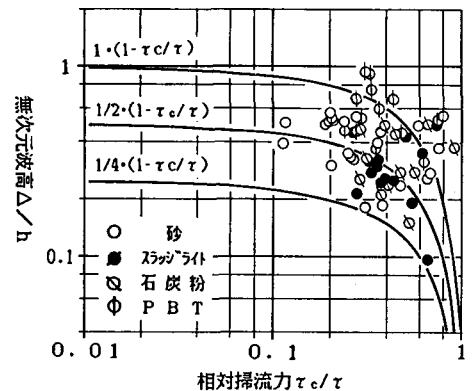


図-3 無次元波高特性図

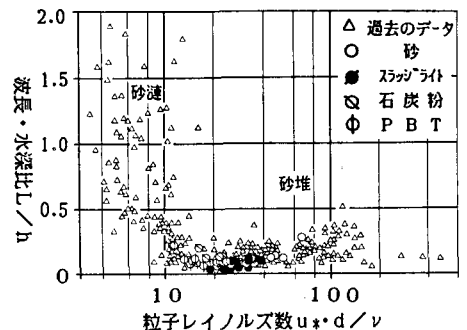


図-4 砂澱・砂堆分類図

3. 現地河道と模型河道の相似条件

流砂現象において最も重要とされる無次元量は、無次元掃流力 τ_* と沈降速度、摩擦速度比 ω_o/u_* である。流れに対し、フルードの相似則を適用しさらに τ_* と ω_o/u_* を現地と模型で一致させると、多くの場合現地で起こる現象は模型でよく再現することができる。この時の相似条件は、

τ_* に関して

$$R_r = S_r \cdot d_r \quad (4)$$

ω_o/u_* に関して

$$R_r = \omega_{or}^2 \quad (5)$$

であり、式(4)と式(5)より

$$S_r \cdot d_r \cdot \omega_{or}^{-2} = 1 \quad (6)$$

で与えられる。

しかし、砂河川や河口部の河道を対象とする場合、現地の河床材料が小さいため、模型に砂を用いると粒径が小さくなりすぎ、粒子レイノルズ数 Re_* が20以下となり、河床にRipplが発生する。このため、現地と模型の河床形態が異なり、水位が相似にならないことが起こる。このような場合、比重の軽い材料を用いることによって、河床形態と流砂運動を相似にする試みが行われる。しかし、河床形態が同一領域にあっても流れの抵抗が異なれば、やはり水位が相似とならないことになり、模型実験による実現象の再現性に不満が残る。そこで、新しく河床形態を同一とし、さらに流れの抵抗も一致させる相似条件を検討することにする。

移動床流れの抵抗式として河床形態ごとに表現されたものは幾つか提案されているが、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³⁾を用いることにすると、河床形態が砂漣・砂堆の領域では

$$\psi = 2.4 \cdot (R/d)^{1/6} \cdot \tau_*^{-1/3} \quad (\tau_* \leq \tau_{*a}) \quad (7)$$

となると、ここに、

$$\tau_{*a} = 0.02 \cdot (R/d)^{1/2} \quad (8)$$

は小規模河床波の区分図においての遷移領域との境界線を表わす。

式(7)について現地と模型の比が1となる条件を求め、 $\tau_{*r} = R_r \cdot I_r / (s_r \cdot d_r)$ 、 $I_r = 1$ を考慮すると、

$$\psi_r = [R_r / (s_r \cdot d_r)]^{-1/6} = 1 \quad (9)$$

が得られる。これより、砂漣・砂堆領域の相似条件は

$$R_r = s_r^2 \cdot d_r \quad (10)$$

となる。また、幾何形状に関する相似条件を無歪とすれば、次の条件を満足させる必要がある。

$$B_r \cdot H_r^{-1} = 1, \quad R_r \cdot H_r^{-1} = 1 \quad (11)$$

次に岸・黒木の式(7)が砂以外の材料についても、適合性をもつかどうか検討を行う。

図-5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 ψ と τ_* の関係を片対数で示したものである。砂とスラッジライトにおいては $\psi \propto \tau_*^{-n}$ 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されそうにない。次に、各材料のデータの中より径深・粒径比 R/d がほぼ等しいデータを抽出して、両対数を用いてプロットし直したものが図-6である。この図より河床材料ごとの違いがよりはっきりと読みとれる。これより抵抗則は、砂、スラッジライトのグループと石炭・PBTのグループに明確に分けられることがわかる。岸らの(7)式を念頭において砂・スラッジライトについて ψ を τ_* の $-1/3$ 乗で基準化し、 R/d に対してブ

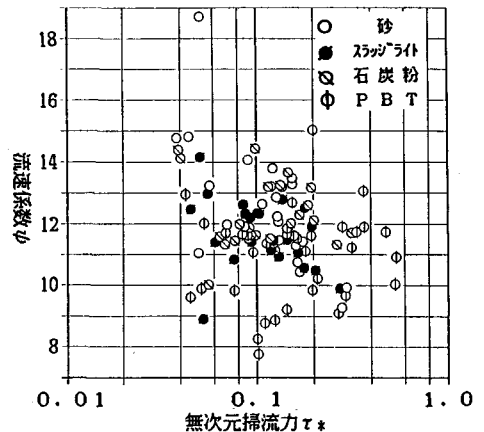


図-5 $\psi \sim \tau_*$ 関係図

ロットしたのが図-7である。同図より砂，スラッジライトとも R/d の $1/6$ 乗に比例することが知られる。が，両者の係数は等しくなく，図より砂は2.4，スラッジライトは2.9となる。すなわち，砂・砂堆領域においての抵抗則はそれぞれ次式で表わされる。

$$\text{砂} \quad ; \quad \psi = 2.4 \cdot (R/d)^{1/6} \cdot \tau_*^{-1/3} \quad (7)$$

$$\text{スラッジライト} ; \quad \psi = 2.9 \cdot (R/d)^{1/6} \cdot \tau_*^{-1/3} \quad (12)$$

一方，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，データのバラツキは大きい，平均値は13である。

$$\text{石炭粉，PBT} \quad ; \quad \psi \approx 13 \quad (13)$$

この原因として，石炭粉とPBTの Re_* が17～24，11～19と砂，スラッジライトの23～66，21～32に比べ小さいことが考えられる。

4. 流砂現象の相似性

流砂現象の相似性の検討として，ここでは力学的・幾何学的相似条件として式(6)と式(11)または，式(10)と式(11))

を満足させた幅の異なる二本の水路を用いて，一方を現地河川に，他方を模型にみたてて実験を行った。実施した実験ケースは表-2に示すとおりであり， τ_* と ω_o/u_* を一致させた実験Aシリーズと河床抵抗，河床形態を一致させた実験Bシリーズからなる。

実験Aシリーズでは， τ_* と ω_o/u_* の相似性を満足させる，つまり式(6)を満足す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を選んだ。これより，それぞれの組合せについて相似関係が満足されれば，現地の河床材料である砂に対して，今回用いた比重の小さい材料すべてが現地との相似性が成立することとなる。それぞれの組合せの各水理量の縮尺は表-3に示すとおりである。実験条件は $\tau_*(=R/l/(s \cdot d))$ を一致させることから，水深と水面勾配で与え，設定値になるように流量を調整した。(大型模型実験では，予備通水を行い得られた粗度係数より，流量を歪ませて与えることとなる)。

表-2 実験ケース一覧表

実験Bシリーズでは，河床抵抗(流速係数 ψ)の相似性を満足させるため，2.で述べたように同様の流送特性を持つ砂とスラッジライトを用いた。実験は式(10)を満足させた条件で行ったB-1と，式(7)，式(12)で示された係数の違いを考慮して得られる式を満足させたB-2からなる。それぞれの水理量の縮尺は表-3のとおりである。

実験条件は流速係数 ψ ，つまり粗度係数 n を相似とすることから，流量をフルード則に合せ与えた。図-8は対比する実験結果より， τ_{*r} ， $(\omega_o/u_*)_r$ ， $Q_r/H_r^{5/2}$ ， $q_{B* r}$ ， ψ_r ， $(\Delta/h)_r$

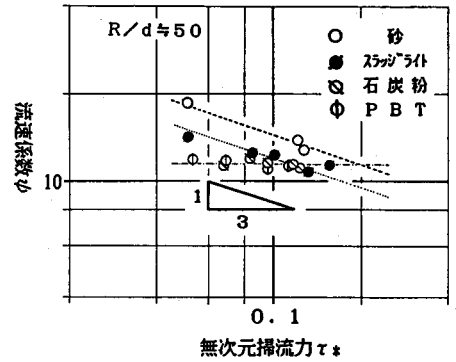


図-6 $\psi \sim \tau_*$ 関係図

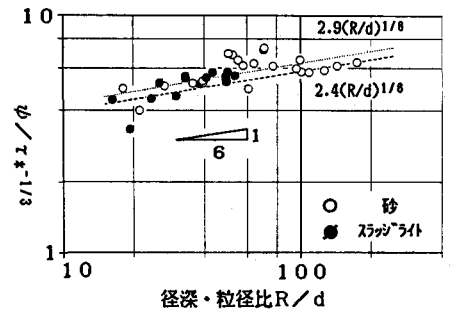


図-7 $\psi \sim R/d$ 関係図

実験	河床材料	B(cm)	l	τ_*	B/H	H/d	ω_o/u_*
A-1	砂 A	145	1/440	0.05~0.20	10~40	40~150	4.5~2.2
	スラッジライトA	60				15~70	4.4~2.1
A-2	砂 B	150	1/570	0.05~0.20	10~40	50~200	3.1~1.6
	石炭粉	60				15~60	2.9~1.4
A-3	石炭粉	100	1/960	0.05~0.20	10~40	20~90	2.9~1.4
	PBT	60				15~60	2.9~1.4
B-1	砂 A	150	1/500	0.12, 0.21	9.15	103, 171	2.8, 2.2
	スラッジライトB	35		0.06, 0.10		24, 40	5.1, 4.0
B-2	砂 A	72	1/500	0.06, 0.10	9.15	49, 82	4.0, 3.1
	スラッジライトB	35		0.06, 0.10		24, 40	5.1, 4.0

表-3 水理量縮尺一覧表

実験ケース	B_r	H_r	I_r	s_r	d_r	τ_{*r}	$(\omega_o/u_*)_r$	$Q_r=H_r^{5/2}$	ϕ_r
A-1	145/60	1	2.06	1.18	1.00	1.01	9.08	—	
A-2	150/60	1	3.44	0.70	0.96	1.10	9.88	—	
A-3	100/60	1	1.55	1.00	1.08	1.03	3.59	—	
B-1	150/35	1	2.06	1.00	2.08	0.54	38.02	0.90	
B-2	72/35	1	2.06	1.00	1.00	0.79	6.07	1.00	

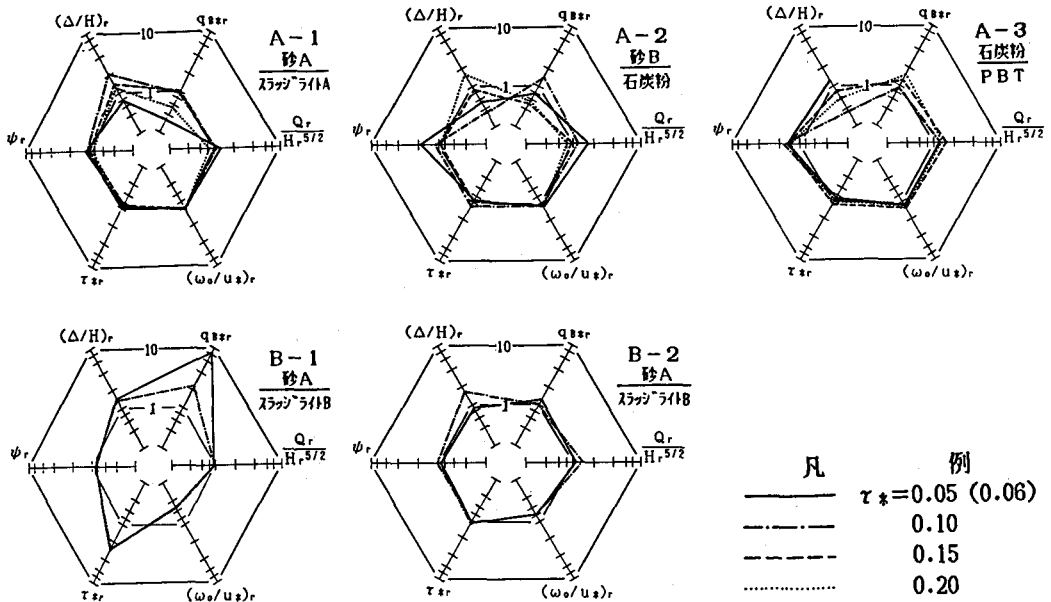


図-8 流砂現象相関図

の6項目について調べたものである。添字 r は、現地と模型の水理量の比を表わし、 τ_{*r} 、 $(\omega_o/U_{*})_r$ は実験条件を、 q_{Bsr} 、 $(\Delta/h)_r$ は流砂現象を、 $Q_r/H_r^{5/2}$ は流量比をフルード則の縮尺で割ったもので ψ_r とともに流れの相似性を代表させている。同図において、全ての項目が1となることが理想である。これらの観点から各図、各材料間について次のことが言える。

①A-1：砂A（現地）・スラッジライトA（模型）

実験シリーズAでは、 τ_{*r} 、 $(\omega_o/U_{*})_r$ を1とする条件で行っており、その条件が十分に満足されていることがわかる。また、この組合せでは、河床形態、河床抵抗の違いがなく、流量の縮尺 Q_r は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、 τ_* が一致しているわりに流砂量は等しくない。（無次元流砂量比 q_{Bsr} ）。また無次元波高比 $(\Delta/h)_r$ でわかるように、砂Aに比べスラッジライトAの方が波高が低くなっている。このことから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0.05の場合、砂Bを用いた河床ではほぼ静止した状態になるのに対し、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。 τ_* が大きい場合、砂の流速係数が12～13となり、石炭粉とほぼ一致する。しかし、無次元流砂量比 q_{Bsr} 、無次元波高比 $(\Delta/h)_r$ をみると、各 τ_* ごとにその傾向が異なり、流砂現象の相似性は悪い。

③A-3：石炭粉・PBT

PBTの河床抵抗が石炭粉の河床抵抗より大きく、 $\psi_r = 1.4$ となっている。結果、流量比 Q_r もフルード則の縮尺 $H_r^{5/2}$ より大きくなっている。無次元波高比 $(\Delta/h)_r$ より石炭粉に比べ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みられる。流砂現象の相似性としては、無次元流砂量比 q_{Bsr} がほぼ1付近にあることから良いと言えるだろう。

しかし、②より石炭粉が砂に対して相似性が悪いことが知られ、PBTも同様に砂に対しての相似性は悪いと推察される。

④B-1：砂A・スラッジライトB

本ケースでは、式(10)を適用していることから、係数の違いにより $\psi_r = 0.89$ 、 $\tau_{*r} = s_r = 2.06$ の条件と

なる。図より、その条件が十分に満足されていることが知られる。 ϕ_r が若干ずれているものの、流量比 Q_r には影響が少なく、ほぼフルード則の縮尺 $H_r^{5/2}$ と一致している。無次元流砂量比 $q_{B*}r$ は τ_{*r} を歪ませていることから一致しないものの、無次元波高比 $(\Delta/h)_r$ は τ_{*r} 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。

⑤B-2：砂A・スラッジライトB

係数の違いを考慮した場合、相似条件は無次元掃流力 τ_{*r} についての相似条件の式(4)とほぼ一致した。この時に ω_o/u_{*r} の相似性は考慮していないが、河床形態が砂堆の領域では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、砂河川の水利現象が十分に再現されたと言える。

6. 結論

- (1) 移動床模型実験用の比重の軽い材料の流送特性、抵抗特性が明らかとなった。
- (2) 今回用いた河床材料において、模型実験で十分使用できると判断された材料は、スラッジライトである。ただし、石炭粉、PBTについても流れの抵抗がほぼ $\phi \approx 13$ あることから、現地の流れの抵抗がこの程度の値を有する流れであれば模型実験材料として使用できる。
- (3) 砂河川の流砂現象を再現するためには、模型の河床材料として比重の軽い材料を用いなければならない場合が多い。このとき、従来の相似条件、 τ_{*r} と ω_o/u_{*r} を一致させる手法よりも、河床形態を同一とし、かつ流れの抵抗を一致させる手法の方が実現象の再現性が高い。

7. 今後の課題

今回の研究により、河床形態が砂堆領域の場合について、比重の異なる材料を用いた移動床実験の相似条件が得られ、砂河川、河口域の流砂現象の解明への糸口がみつかった。今後の検討としては、

- (1) 石炭粉・PBT利用の可能性の検討：模型実験に使用できる比重の限界の把握
- (2) スラッジライトの抵抗特性の把握：遷移領域・平坦・反砂堆領域での適合性
中規模河床形態の相似性の検討
河口域の水利現象の再現性の検討

を行う予定である。

<参考文献>

- 1) 吉川秀夫編：流砂の水理学，丸善，1985
- 2) 福岡捷二，浅野富夫，林正男：新しい河床材料を用いた移動床模型実験の有効性，
第31回水理講演会論文集，1987
- 3) 岸力，黒木幹男：移動床流における河床形状と流体抵抗（I），北海道大学工学部研究報告，1972