

I S S N 0386—5878

土木研究所資料第3111号

土 木 研 究 所 資 料

河川移動床模型実験材料としての 軽量材料の水理特性〔Ⅱ〕

平成4年3月

建設省土木研究所
河川部河川研究室

「Copyright © (1992) 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。」

河川移動床模型実験材料としての 軽量材料の水理特性〔Ⅱ〕

河川研究室 室長 山 本 晃 一
佐々木 克 也

要 旨

本報告書は、土木研究所資料第2905号“河川移動床模型実験としての軽量河床材料の水理特性”にとりまとめられている材料以外に、新しい3種の軽量材料を用いて実施した基礎実験結果を整理し、軽量材料毎の流砂特性をとりまとめたものである。

キーワード：軽量材料，流速係数，流砂量

記号一覧表

B	；水路幅
d	；粒径
F_r	；フルード数 $= V_m / \sqrt{gH}$
g	；重力加速度
H	；水深
H_m	；平均水深
H_s	；河床波の高さ、河床波のクレストの高さと底の高さの差
I_e	；エネルギー勾配
I	；水路の勾配
I_b	；河床勾配
K_s	；相当粗度
L_s	；河床波の波長
Q	；流量
R	；径深
Re_*	；粒子レイノルズ数 $= u_* d / \nu$
S	；粒子の水中比重 $= (\rho_s - \rho_w) / \rho_w$
u_*	；摩擦速度 $= \sqrt{g H I_e}$
u_{*c}	；土砂の移動限界時の摩擦速度
V_m	；平均流速
V_s	；河床波の進行速度
$u_{(z)}$	；河床面より距離 z の流速
W_0	；沈降速度
ν	；動粘性係数
ρ_s	；粒子の密度
ρ_w	；水の密度
τ_*	；無次元掃流力 $= u_*^2 / s g d_m$
τ_{*c}	；無次元移動限界掃流力
ψ	；流速係数 $= V_m / u_*$
κ	；カルマン係数

は じ め に

本資料は、土木研究所資料第2905号“河川移動床模型実験材料としての軽量材料の水理特性”にとりまとめられている材料以外に、新しい3種類の軽量材料（珪砂、イシカワライト、パミスター）を用いて実施した基礎実験結果を整理したものであり、基礎実験資料集として利用しやすいように図表としてとりまとめたものである。

本資料は、四国地方建設局四国技術事務所において実施した軽量河床材料の流砂特性を把握するための基礎実験結果をもとに軽量材料毎に整理したものであり、移動床の相似律および $S = 1.65$ のほぼ均一砂を持つ移動床の水理特性については土木研究所資料第2905号で述べられていることから割愛し、新しい軽量材料の材料特性と軽量材料の移動床の水理特性をとりまとめ、通常の水中比重 $S = 1.65$ の材料との差異と、従来から使用されている軽量材料との差異を明らかにしたものである。

目 次

はじめに

第1章 研究目的と方法	1
1.1 研究目的	1
1.2 資料の収集、整理方法	1
1.3 実験施設と実験方法	2
第2章 新軽量材料の材料特性	4
2.1 粒径	4
2.2 比重	4
2.3 沈降速度	6
2.4 水中安息角	7
2.5 水中空隙率	8
2.6 まとめ	8
第3章 新軽量材料の移動床の水理	9
3.1 珪砂を用いた移動床の水理	9
3.2 イシカワライトを用いた移動床の水理	16
3.3 パミスターを用いた移動床の水理	21
第4章 比重の違いが移動床の水理に及ぼす影響	26
4.1 小規模河床波の領域区分に及ぼす影響	26
4.2 河床波のスケールに及ぼす影響	27
4.3 流速係数 ψ に及ぼす影響	28
4.4 流砂量に及ぼす影響	28
4.5 砂州に及ぼす影響	29
あとがき	39

第1章 研究目的と方法

1.1 研究目的

実河川に起こる現象を水理模型実験によって検討するためには、実河川と河道模型とにおいて検討の対象としている現象が似たものとならなければならない。実河川の河床材料が大きい場合、河床材料の粒径を模型の幾何学的縮尺と同様に縮小し、その粒径が0.6 mm以上であれば流砂の運動もほぼ相似となり、実河道と河道模型とでは同じような河床形態が生じることが知られている。しかし、実河川の河床材料の粒径が小さい場合、単純に模型縮尺に合わせて河床材料を縮小すると、河床形態、流砂量、土砂の流送形態等の相似性が得られなくなる。この場合、模型で生じる現象と実河川の現象の全てを相似させることができないので、模型を用いて検討する項目の内、重要である項目の現象が相似となるように歪模型を用いたり、軽量河床材料を用いて実験を行う。このような観点から、土木研究所資料第2905号“河川移動床模型実験材料としての軽量材量の水理特性”では、過去に土木研究所で行われた軽量材料（石炭粉、スラッジライト、PBT、ポリスチレン）による基礎実験結果を移動床の相似律の観点から整理し、通常の水中比重 $S=1.65$ の材料との差異を明かにした上で、河川移動床模型実験の模型縮尺決定のための資料として使えるようにとりまとめた。

四国地方建設局四国技術事務所においても独自の軽量材料（珪砂、イシカワライト、パミスター）を入手し、流砂特性を把握する実験を行っていることから、このデータを再整理して軽量材料の移動床の水理についてとりまとめ、水中比重 $S=1.65$ の材料の土砂の流送特性と比較するとともに、従来からの軽量材料との差異を明確にすることにした。

1.2 資料の収集、整理方法

本研究に使用された資料は表-1.

表-1.1

1に示すとおりである。

四国地方建設局で行われた実験は、土木研究所資料第2641号“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”のとりまとめ

材 料	粒 径	水中比重	実 験 者
珪 砂	0.074 cm	1.58	四国技術事務所
イシカワライト	0.087	0.59	“
パ ミ ス タ ー	0.25	0.38	“

方に準拠し、予備実験、流送特性実験、流砂現象の相似性検討実験の3項目で行われている。予備実験では、無次元掃流力 τ_* に応じた粗度係数 n を実験により算出し、本実験で目標とする τ_* を模型上で得るための初期流速を算定するとともに、河床形態を観察し、 τ_* に応じた流砂量の検討を行い本実験での給砂量を求めている。流送特性実験では、無次元掃流力 τ_* に応じた河床形態（河床波の波長 L_s 、波高 H_s ）、流砂量 q_{B*} および流速係数 ψ の特性を検討している。流砂現象の相似性検討実験では、無次元掃流力 τ_* と摩擦速度沈降速度比 u_*'/W_0 を現地と模型とで一致させる実験手法を用いて、現地の河床材料を珪砂とし、模型の河床材料を軽量材料（イシカワライト、パミスター）として相似

性を検討するための実験が行われている。

しかし、粗度係数は小規模河床波の形態の遷移で変化すること。すなわち、無次元掃流力 τ_* の増加にともない小規模河床波の形態が変わり、流速係数 ψ の値も変化することから、水理量の変化にともなう小規模河床形態の領域の変化をとらえることが、軽量材料の移動床の水理特性を検討する上で重要なものとなる。また、移動床模型実験においては、現地と模型との小規模河床形態を一致させることが相似性のよい結果となることから、この観点にたった軽量材料の移動床の水理特性の把握が重要である。このことから、水中比重 $S = 1.65$ の材料の土砂の流送特性と、従来から使用されている軽量材料との比較を行うことによって、新軽量材料の水理特性を検討するものとした¹⁾。

実験資料は、流量 Q 、水深 H 、水路幅 B 、平均流速 V_m 、エネルギー勾配 I_e 、摩擦速度 u_* 、単位幅流砂量 q_B 、河床波の波長 L_s 、波高 H_s 、の一次資料を求め、これより流速係数 ψ 、無次元掃流力 τ_* 、水深粒径比 H/d 、粒子レイノルズ数 Re_* 、摩擦速度沈降速度比 u_*/W_0 、川幅水深比 B/H の二次水理量を求め、さらに河床形態についてとりまとめた。

なお、摩擦速度 u_* は側壁の影響を考慮せず水深をそのまま使用して評価した。これは B/H が3以上ではその影響が小さいと考えられるからである²⁾。

1.3 実験施設と実験方法

1.3.1 実験施設

3種類の軽量材料を用いた実験は、図-1.1実験装置概略図に示した長さ20m、幅1.5mのコンク

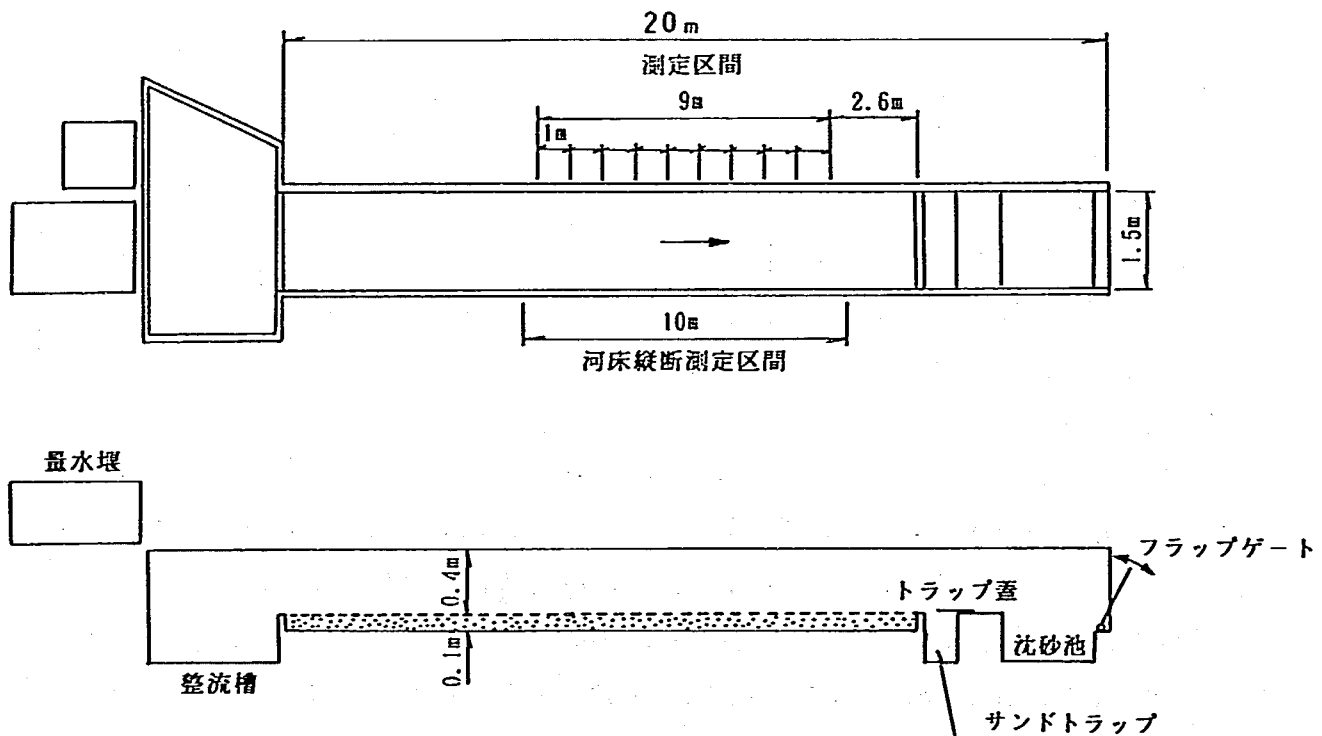


図-1.1 実験装置概略図

リート水路において行った。実験施設の概略は、上流より大小2個の量水堰、整流槽、実験水路、流砂量測定用サンドトラップ、沈砂池、水位調節用のフラップゲートで構成されている。

1.3.2 実験方法

実験の手順および測定方法は次のごとくである。

① 河床整形

水路側壁に設けた基準線（河床勾配4種類）間を木ゴテ、角材により平坦に整形した。整形は水締めを行い実施した。

② 実験条件の設定

流量は上流量水槽（刃形堰）からの越流水深により設定した。等流状態の設定は下流端ゲートにより操作を行い等流水深になるよう操作し、等流状態の確認は水位測定区間の上下流端の水位差が1mm以内に納まれば設定終了とした。

③ 給砂条件

給砂は予備実験から得られた流砂量測定結果を基に、掃流力に対応する流砂を給砂した。

④ 河床形態観察

河床材料の移動状況、小規模河床形態の状況を観察し、写真撮影も併せて行った。

⑤ 水位測定

測定は状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、1m毎に10断面で横断方向1点について行った。

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で読むことによって行った。

⑥ 流砂量測定

測定は河床波が十分に発達し、流送材料が平衡に達した時点で、水路下流に設けた流砂量測定用トラップにより行った。また、掃流力が大きく砂粒子の跳躍距離が長くなり、トラップ設置位置を越える場合では、沈砂池にトラップを追加して測定した。

⑦ 排水

通水終了後、河床面を乱さないようにフラップゲートおよび水路ドレンにより静かに排水した。

⑧ 河床高測定

測定は水位の測定と同じ断面において河床横断と、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で行った。測定は予め毛書きした測定台の水平基準線からの深さを1mm目盛りの定規により読み取った。河床縦断も河床センターを測定間隔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。

第2章 軽量材料の材料特性

本章では軽量材料の粒径、比重、沈降速度、水中安息角、水中空隙率等の材料特性について整理する。

2.1 粒 径

河床の砂礫の移動は、その大きさに大きく依存する。それゆえ、移動床の水理を検討するに当たっては粒子の粒径が測られる。ところで、河床に存在する土砂粒子は不規則な形状を持っているので、粒子の大きさを示す特性長として直径をとる必要がある。

粒径の定義としては、次の3つが一般に使用される。

(イ) ふるい直径； d_s ：Sieve Diameter

粒子がふるいを通す直径

(ロ) 等価直径； d_{se} ：Sedimentation Diameter

同一流体条件の下で、同一の最終沈降速度を持つ同一比重の球の直径

(ハ) 名目直径； d_n ：Nominal Diameter

与えられた砂礫と同一の体積を持つ球の直径

この3つのうち、流体の粘性、粒子の形状、粒子表面の粗さを暗に含み、流砂の運動特性と結びついた d_{se} が一番重要性を持つものであろう。しかし、実際には測定のしやすさから粒径によって d_s 、 d_n などの測定が行われている。

一般には測定の手間、測定装置の関係上、

粒径 $d < 0.074 \text{ mm}$ では、 d_{se} を測定 (JIS A 1204 による。)

$0.074 \text{ mm} < d < 100 \text{ mm}$ では、 d_s を測定 (JIS A 1102 による。)

$d > 100 \text{ mm}$ では、 d_n

が推定され d_{se} 、 d_s 、 d_n の差が小さいとして粒度分布が把握される。

本論においての粒径は、測定の簡易性から上述の(イ)ふるい直径に相当するものを用いることとする。

① 珪砂： $d_m = 0.074 \text{ cm}$ (3号) (写真-2.1)

愛知県瀬戸市産の天然砂で $0.03 \sim 0.12 \text{ cm}$ に粒度調整された均一な材料である。

② イシカワライト： $d_m = 0.087 \text{ cm}$ (写真-2.2)

石川県金沢市より産する天然軽石 (流紋岩系天然ガラス) を砕いた剥片状の材料で、 $0.59 \sim 1.14 \text{ mm}$ に粒度調整した均一材料である。

③ パミスター： $d_m = 0.25 \text{ cm}$ (写真-2.3)

鹿児島県より産する天然軽石 (凝灰岩系天然ガラス) で粒度調整された均一な材料である。

2.2 比 重

各材料とも JIS A 1109 に従い2回の測定を実施して、その平均値を用いた。

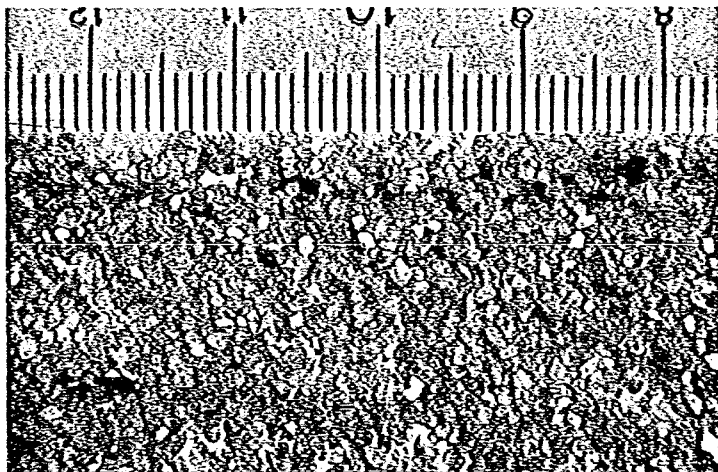


写真-2.1 珪砂

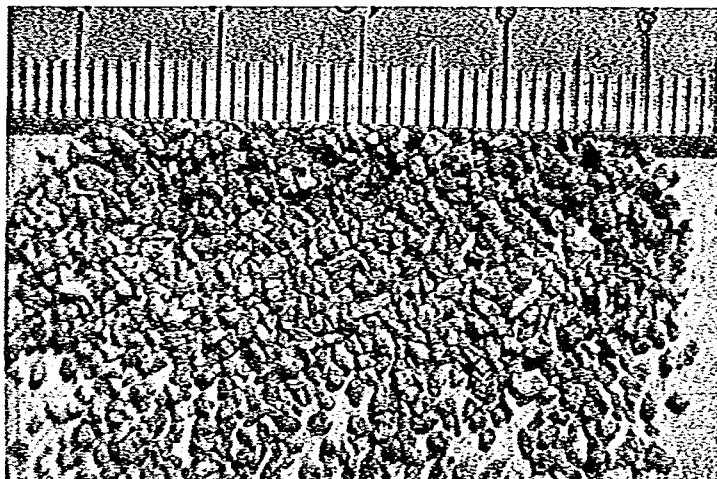


写真-2.2 イシカワライト

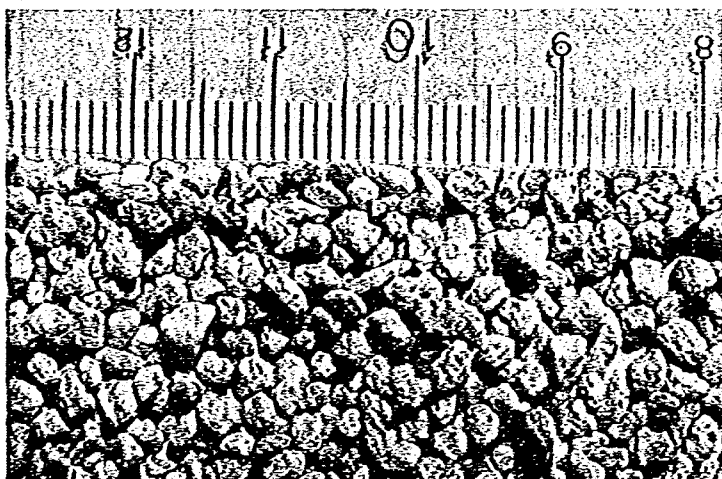


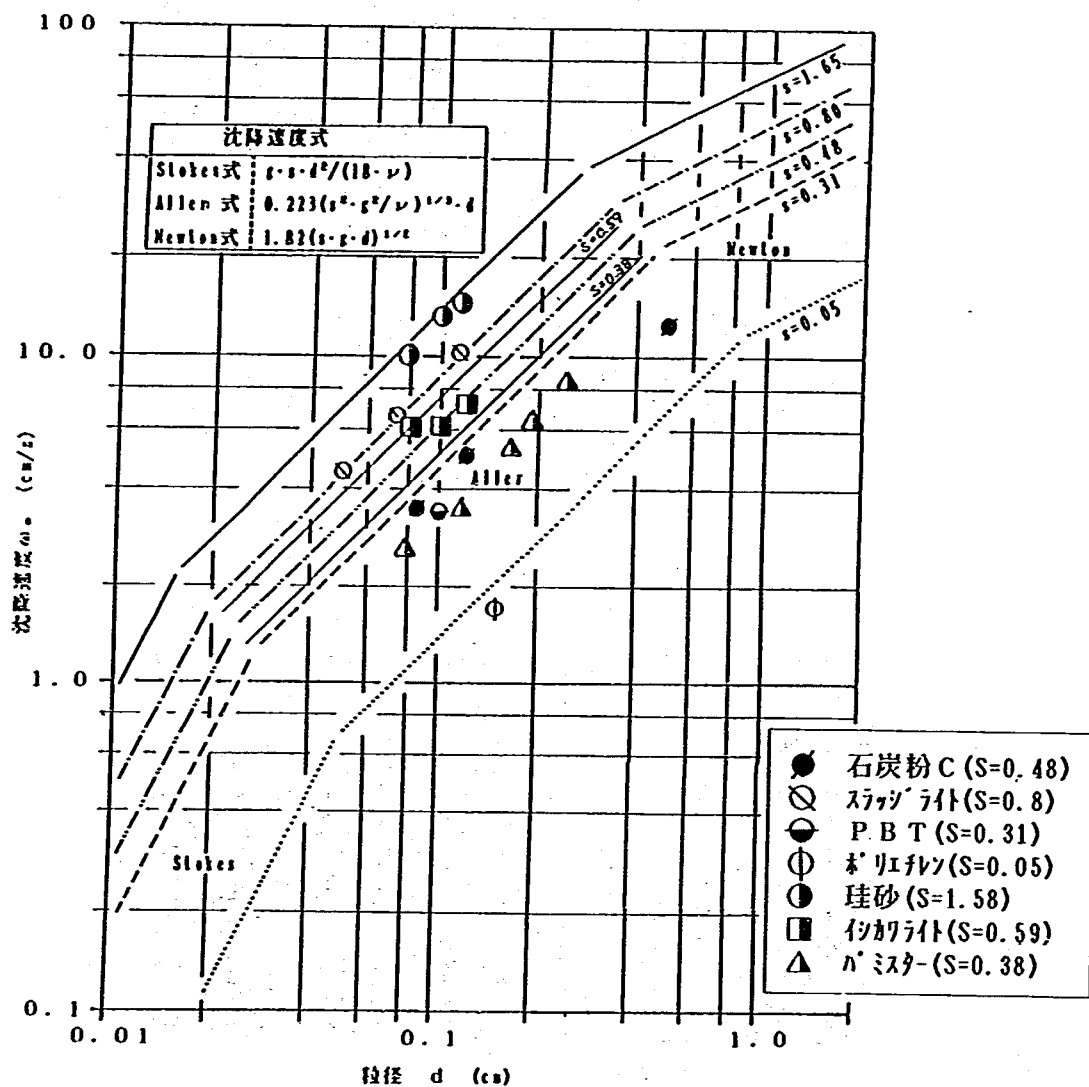
写真-2.3 パミスター

- ① 珪砂：2.58
- ② イシカワライト：1.59
- ③ パミスター：1.38

2.3 沈降速度

沈降速度は、縦約50cm、横約50cm、高さ約120cmの容器に水を湛水させて、約60cm区間の通過時間を測定し求めた。試験時の水温は測定していないが、珪砂・イシカワライトは2月に、パミスターは8月に水道水を用いて測定している。2月の水温は10℃、8月の水温は22℃程度と考えられるため、水温20℃の動粘性係数 $\nu = 0.0101 \text{ cm}^2/\text{s}$ と比較すると水温10℃では $\nu = 0.0131 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、水温22℃では $\nu = 0.010 \text{ cm}^2/\text{s}$ となるため、水温20℃の沈降速度に換算すると珪砂・イシカワライトで9%程度速くなり、パミスターで0.5%程度遅くなる。

なお、試験結果を過去に行われた軽量材料と比較できるように図-2.1に示す。



この結果から珪砂は Allen の式とほぼ一致するが、イシカワライト・パミスターは Allen の式より沈降速度が遅い。これは形状が球形でなく抵抗係数 C_D が球より大きいためと判断される。

なお、図-2.2 に石炭粉の粒径別の沈降速度を表した。この時の水温は 20°C である。

- ① 珪砂：8.8 cm/s (9.59 cm/s)
 - ② イシカワライト：5.85 cm/s (6.38 cm/s)
 - ③ パミスター：8.4 cm/s (8.36 cm/s)
- () は水温 20°C の換算沈降速度である。

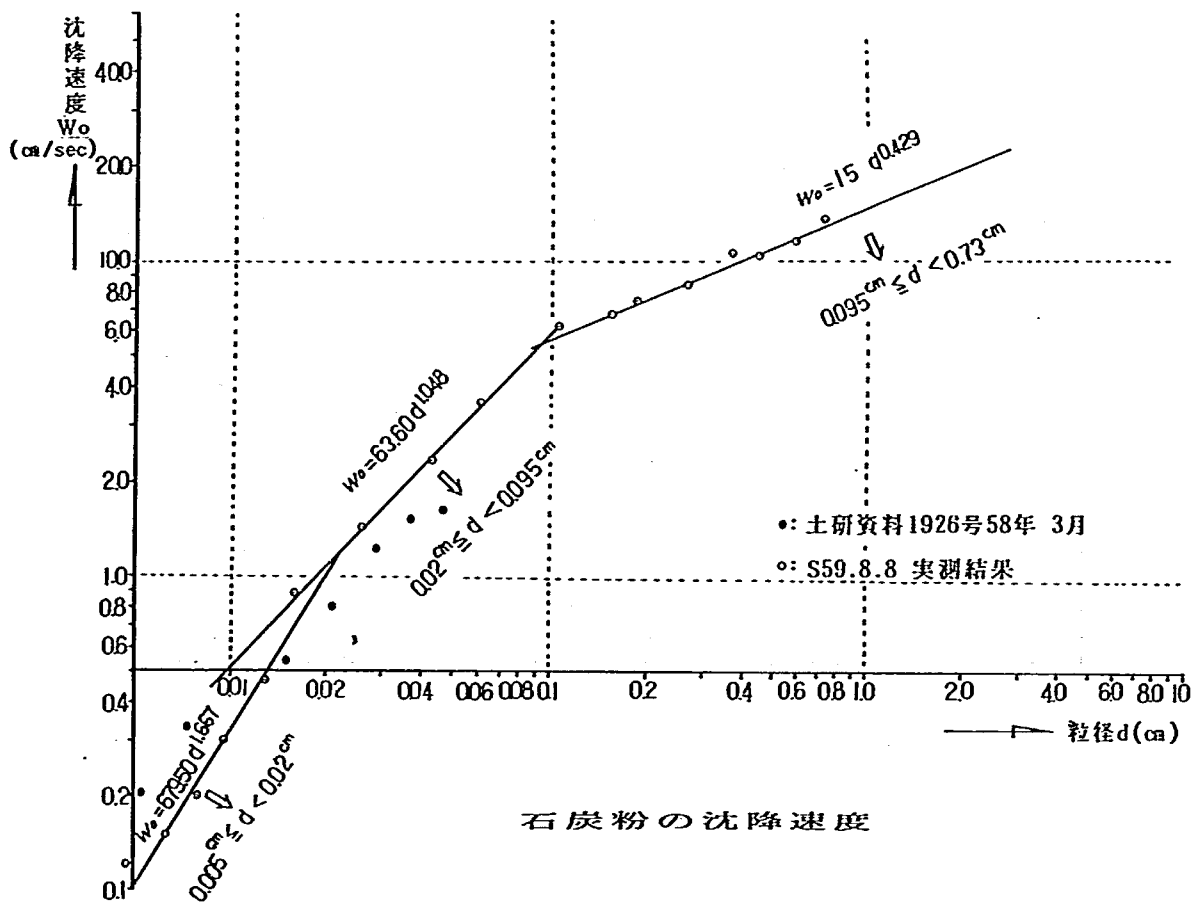


図-2.2 石炭粉の沈降速度

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でき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。

- ① 珪砂：32度
- ② イシカワライト：30度
- ③ パミスター：27度

2.5 水中空隙率

空隙率は材料が水中にある場合のものを求める。

測定は、表乾状態の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浸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。

- ① 珪砂：0.46
- ② イシカワライト：0.54
- ③ バミスター：0.50

2.6 まとめ

以上の結果を表－2.1 軽量材料の諸特性量として示す。

表－2.1 軽量材料の諸特性量

諸 元 \ 軽量材料	珪 砂	イシカワライト	バミスター
粒 径： $d_s(d_m, \text{cm})$	0.074	0.087	0.25
水中比重： S	1.58	0.59	0.38
沈降速度： $W_0(\text{cm/s})$ (水温20℃換算値)	8.80 (9.59)	5.85 (6.38)	8.40 (8.36)
水中安息角： ϕ (度)	32	30	27
空 隙 率： λ	0.46	0.54	0.50
形 状	剥片状	剥片状	剥片状

第3章 軽量材料の移動床の水理

1.2で述べたように実験は予備実験、流送特性把握実験、流砂の相似則検討実験、移動床流れの相似則検討実験の項目で行われている。

予備実験ではイシカワライトで8ケース、パミスターで8ケースの実験を行っている。流送特性把握実験では、イシカワライトで16ケース、パミスターで16ケースの実験を行っている。流砂の相似則検討実験ではイシカワライト4ケース、珪砂8ケース、パミスター4ケースの実験を行っている。移動床流れの相似則検討実験では、イシカワライト4ケース、珪砂8ケース、パミスター4ケースの実験を行っている。実験ケースは表-3.1に示すとおりである。

軽量材料毎の実験数は、珪砂16ケース、イシカワライト32ケース、パミスター32ケースである。測定値及び河床状況の観察概要を実験別・軽量材料別に総括したものを付表-1.1～付表-3.4にとりまとめた。

3.1 珪砂を用いた移動床の水理

3.1.1 実験ケースと実験条件

珪砂を用いた実験は、粒径0.074cmの材料で16ケース行っている。実験の水理条件は表-3.2のとおりである。また、実験結果を付表-1.1、付表-1.2に整理した。

表-3.2 珪砂を用いた移動床模型実験の水理条件

実験名称：珪砂 軽量材料：珪砂 代表粒径：0.074cm
 水中比重：1.58 沈降速度：8.8cm/sec
 水路長：20m 水路幅：1.5m

実験ケース	流量 Q (l/s)	初期 河床勾配	実験ケース	流量 Q (l/s)	初期 河床勾配
A1-2-1	33.00	1/1,100	B1-2-1	127.90	1/1,100
A1-2-2	72.92		B1-2-2	224.75	
A1-2-3	130.00		B2-2-1	72.92	
A1-2-4	206.85		B2-2-2	130.00	
A2-4-1	33.00		B3-4-1	245.48	
A2-4-2	72.92		B3-4-2	277.32	
A2-4-3	130.00		B4-4-1	206.85	
A2-4-4	206.85		B4-4-2	224.00	

表-3.1 実験ケース一覧表

ケース No	河床材料	河床勾配	材 料 特 性			測 定 項 目			
			代表粒径 cm	水中比重	沈降速度 cm/s	水位	河床形態	流砂量	河床高
予 備 実 験	Y-1-1 Y-1-2 Y-1-3 Y-1-4 Y-1-5 Y-1-6 Y-1-7 Y-1-8	イシカワライト	1/1,100	0.087	0.59	5.85	○	○	○
	Y-3-1 Y-3-2 Y-3-3 Y-3-4 Y-3-5 Y-3-6 Y-3-7 Y-3-8	バミスター	1/1,100	0.25	0.38	8.40	○	○	○
	K-1-1 K-1-2 K-1-3 K-1-4	イシカワライト	1/1,100	0.087	0.59	5.85	○		○ ○
	K-1-5 K-1-6 K-1-7 K-1-8		1/500	0.087	0.59	5.85	○		○ ○
	K-1-9 K-1-10 K-1-11 K-1-12		1/1,600	0.087	0.59	5.85	○		○ ○
	K-1-13 K-1-14 K-1-15 K-1-16		1/2,100	0.087	0.59	5.85	○		○ ○
	K-3-1 K-3-2 K-3-3 K-3-4	バミスター	1/1,100	0.25	0.38	8.40	○		○ ○
	K-3-5 K-3-6 K-3-7 K-3-8		1/500	0.25	0.38	8.40	○		○ ○
	K-3-9 K-3-10 K-3-11 K-3-12		1/1,600	0.25	0.38	8.40	○		○ ○
	K-3-13 K-3-14 K-3-15 K-3-16		1/2,100	0.25	0.38	8.40	○		○ ○
流 送 特 性 把 握 実 験	A1-1-1 A1-1-2 A1-1-3 A1-1-4	イシカワライト	1/1,100	0.087	0.59	5.85	○		○ ○
	A1-2-1 A1-2-2 A1-2-3 A1-2-4	珪砂 A	1/1,100	0.074	1.58	8.80	○		○ ○
	A2-3-1 A2-3-2 A2-3-3 A2-3-4	バミスター	1/1,100	0.25	0.38	8.40	○		○ ○
	A2-4-1 A2-4-2 A2-4-3 A2-4-4	珪砂 B	1/1,100	0.074	1.58	8.80	○		○ ○
流砂の相似則検討実験	B1-1-1 B1-1-2 B2-1-1 B2-1-2	イシカワライト	1/1,100	0.087	0.59	5.85	○		○ ○
	B1-2-1 B1-2-2 B2-2-1 B2-2-2	珪砂 A	1/1,100	0.074	1.58	8.80	○		○ ○
	B3-3-1 B3-3-2 B4-3-1 B4-3-2	バミスター	1/1,100	0.25	0.38	8.40	○		○ ○
	B3-4-1 B3-4-2 B4-4-1 B4-4-2	珪砂 B	1/1,100	0.074	1.58	8.80	○		○ ○
移動床流れの相似則検討実験									

3.1.2 まとめ

(1) 河床波の特性と領域区分

珪砂の実験は $R_{*s} = 16.8 \sim 41.5$ (水温を測定していないため 20°C と仮定), $H/d = 88.6 \sim 471.4$, $\tau_* = 0.045 \sim 0.275$ の範囲で実験が行われている。河床の形態は、流砂量が少ない場合 ($\tau_* = 0.05$ 以下) の平坦河床と砂堆である。実験での河床形態は、写真-3.1 ケース A 1-2-3 ($H = 19.73$ cm, $\tau_* = 0.145$, $H/d = 266.6$, $B/H = 7.6$) に示すようにほとんどが砂堆であるが、ケース B 3-4-1 ($H = 32.02$ cm, $\tau_* = 0.252$, $H/d = 432.7$, $B/H = 4.7$) の写真-3.2 のように、 $H/d = 400$ 程度以上になると砂堆の上に砂澁が共存する。

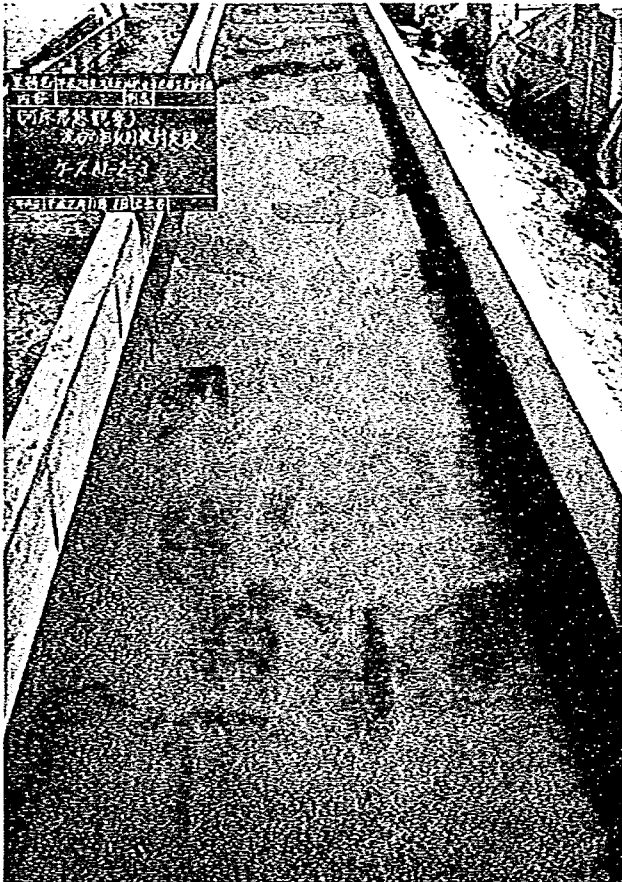


写真-3.1 ケース A 1-2-3

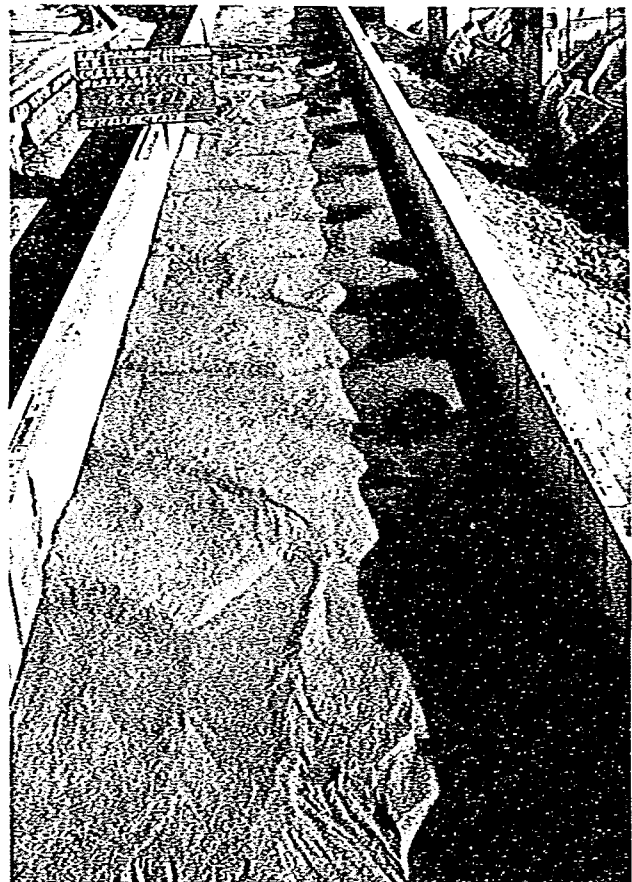


写真-3.2 B 3-4-1

河床波の領域区分は図-3.1に示すとおりで、 $S = 1.65$, $d = 0.1$ cm の場合で評価し得る。

砂堆の相対波高 H_s/H_m と τ_* の関係についても図-3.2に示すとおり $S = 1.65$, $d = 0.1$ cm と同程度の値となっている。

砂堆の相対波長 L_s/H_m と τ_* の関係について図-3.3に示す。この図より相対水深 H/d が小さいほど L_s/H_m が大きくなる傾向にある。このため、 $S = 1.65$, $d = 0.1$ cm の砂について実験資料を基に L_s/H_m と τ_* の関係を H/d 別に表し、その特性を見るものとした (図-3.6)^{3) 4)}。図-3.6に示すように、 $S = 1.65$, $d = 0.1$ cm の場合においても H/d が小さいほど L_s/H_m が大きく、 τ_* が増すこ

とにより L_s/H_m は小さくなる傾向となっている。このことから、 L_s/H_m は H/d の影響を受けていると判断できる。

(2) 流れの抵抗係数

図-3.4 の ψ と τ_s の関係図に示すように、流速係数 ψ は $S=1.65$ 、 $d=0.1\text{ cm}$ の場合と同様な値となっている。なお、 $\psi=12$ 、 $\psi=13$ の資料は ψ が評価値より 1～2 大きくなっていると考えられる。

(3) 流砂量

流砂量は図-3.5 に示すように $S=1.65$ 、 $d=0.1\text{ cm}$ の H/d で評価し得る。なお、 $\psi=12$ 、 $\psi=13$ の資料は $q_s/(u_*d)$ が大きめであるが、 $\psi=10$ とするとほぼ $S=1.65$ 、 $d=0.1\text{ cm}$ の場合と一致する。

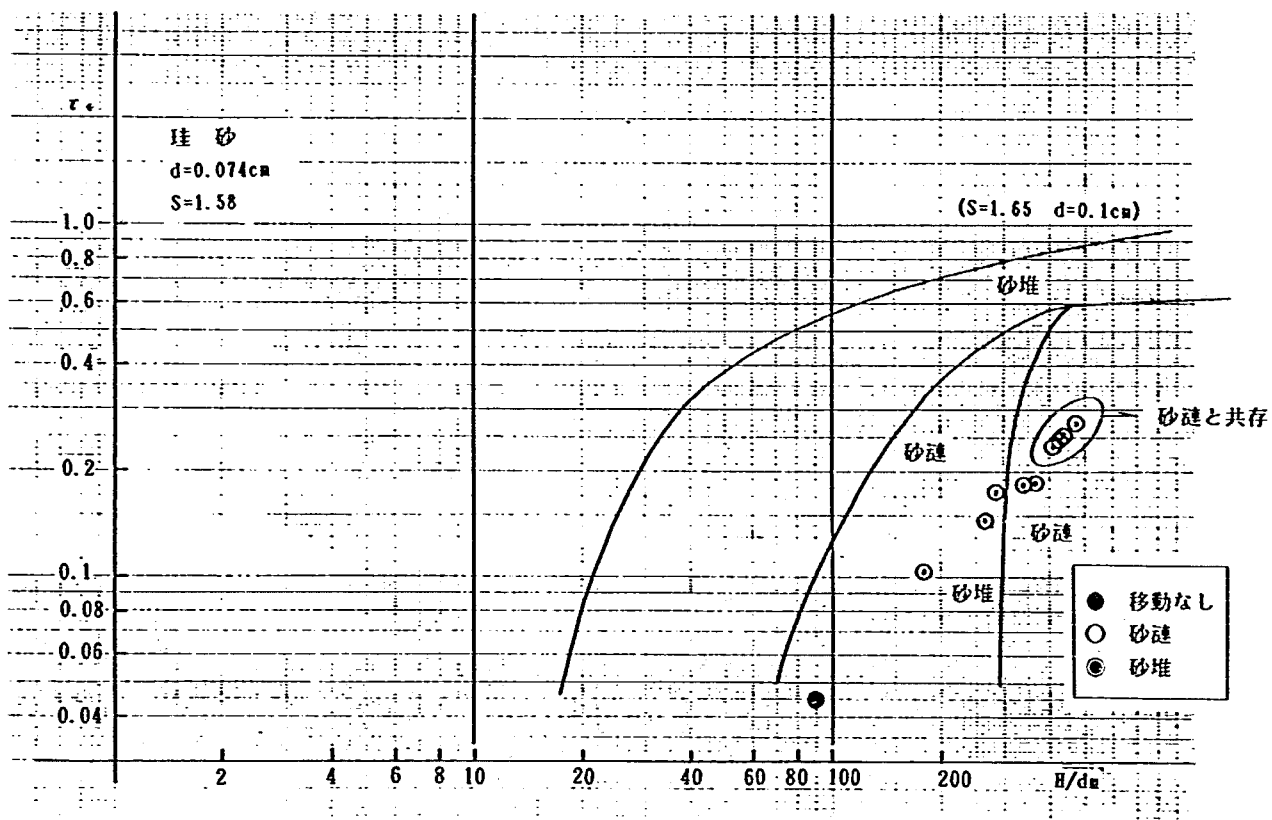


図-3.1 河床波の領域区分図（珪砂の場合）

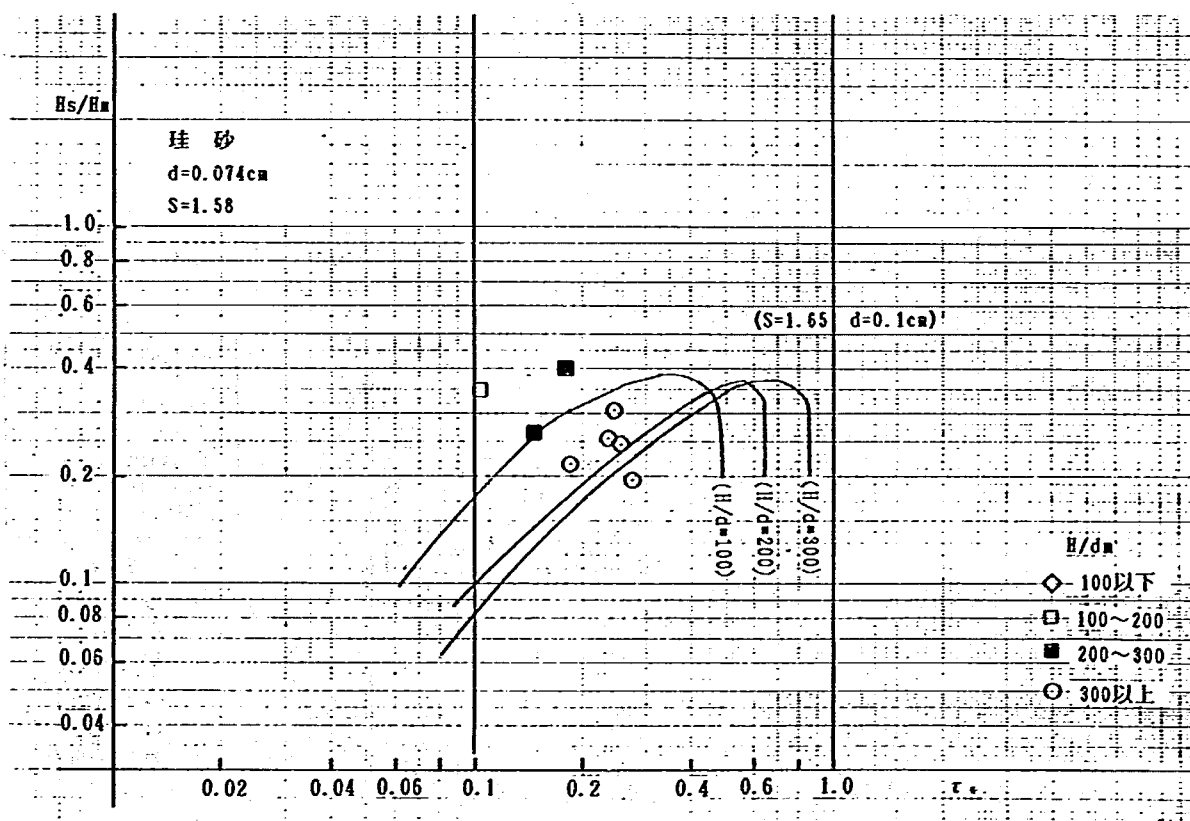


図-3.2 H_s/H_m と τ_* の関係（珪砂の場合）

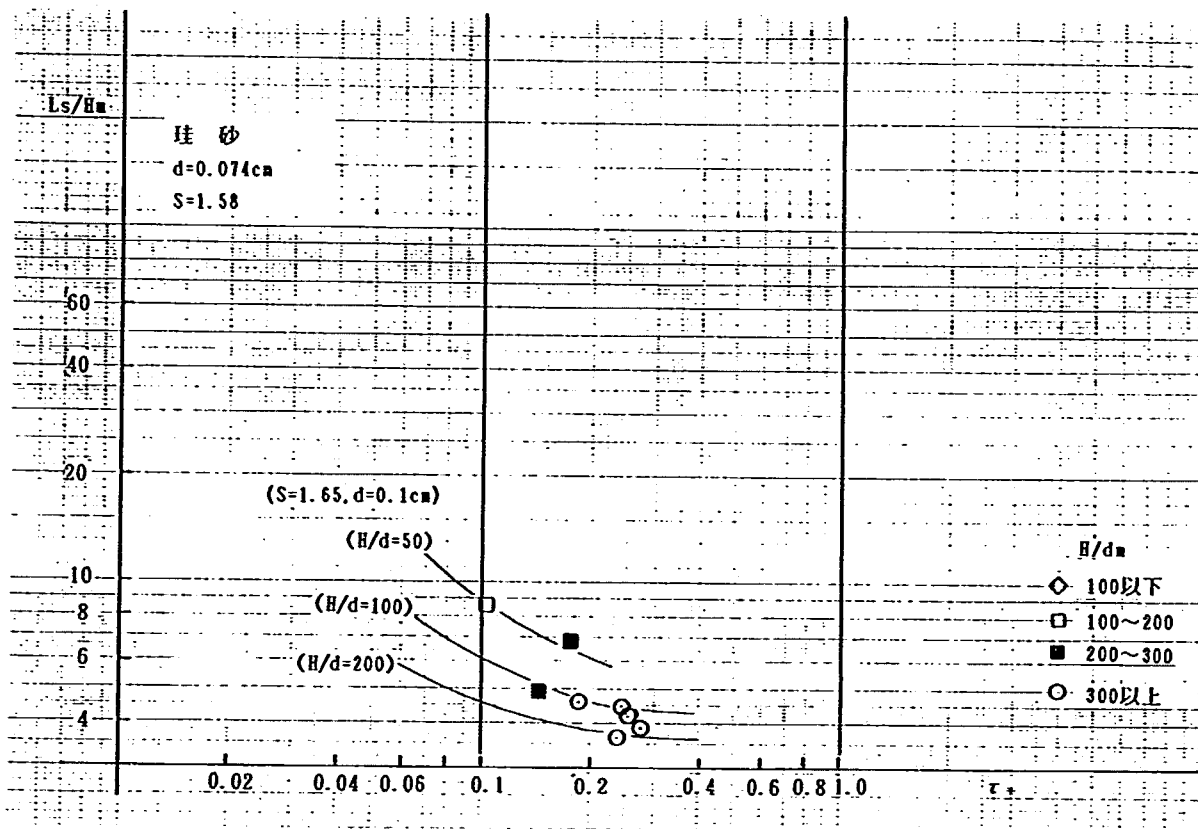


図-3.3 L_s/H_m と τ_* の関係 (珪砂の場合)

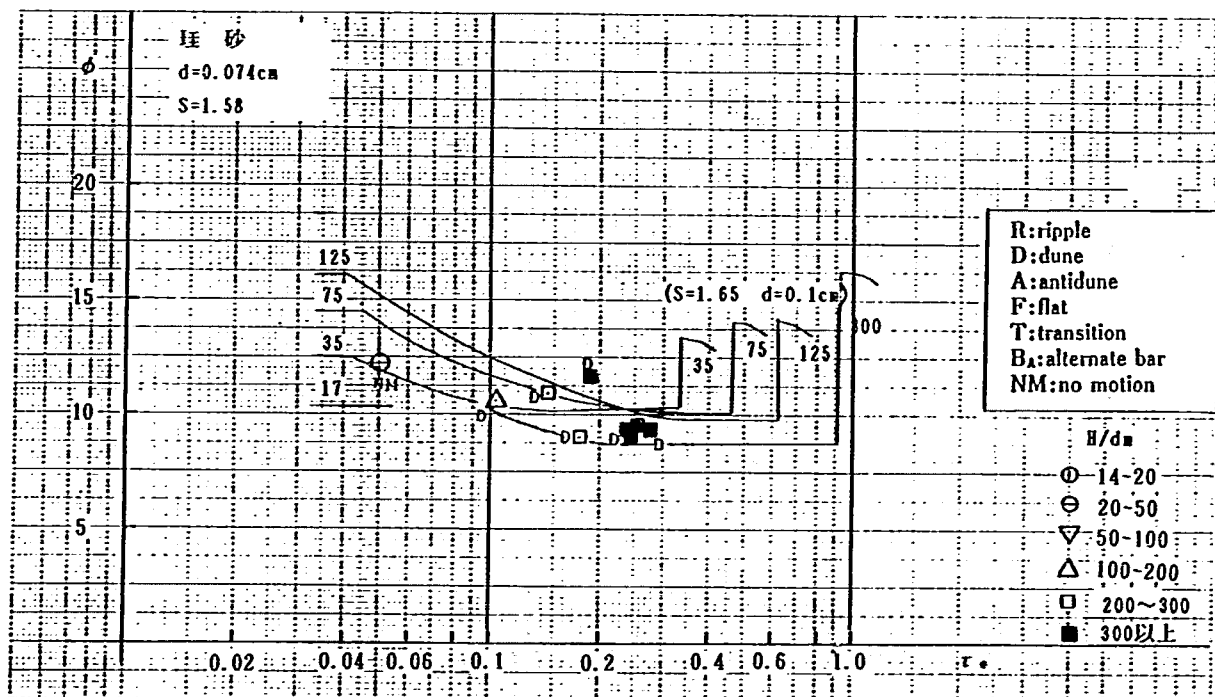


図-3.4 ψ と τ_* , H/dの関係 (珪砂の場合)

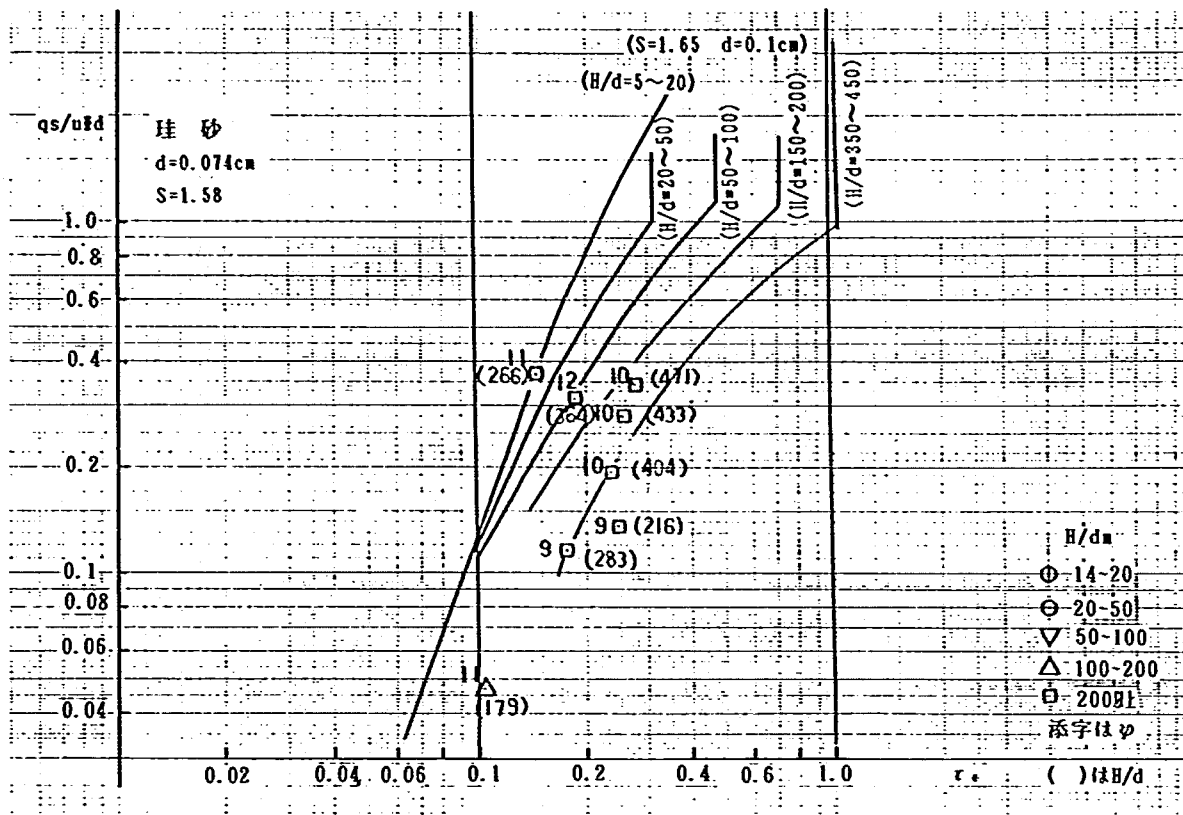


図-3.5 $q_s/(u_* d)$ と τ_* の関係 (珪砂の場合)

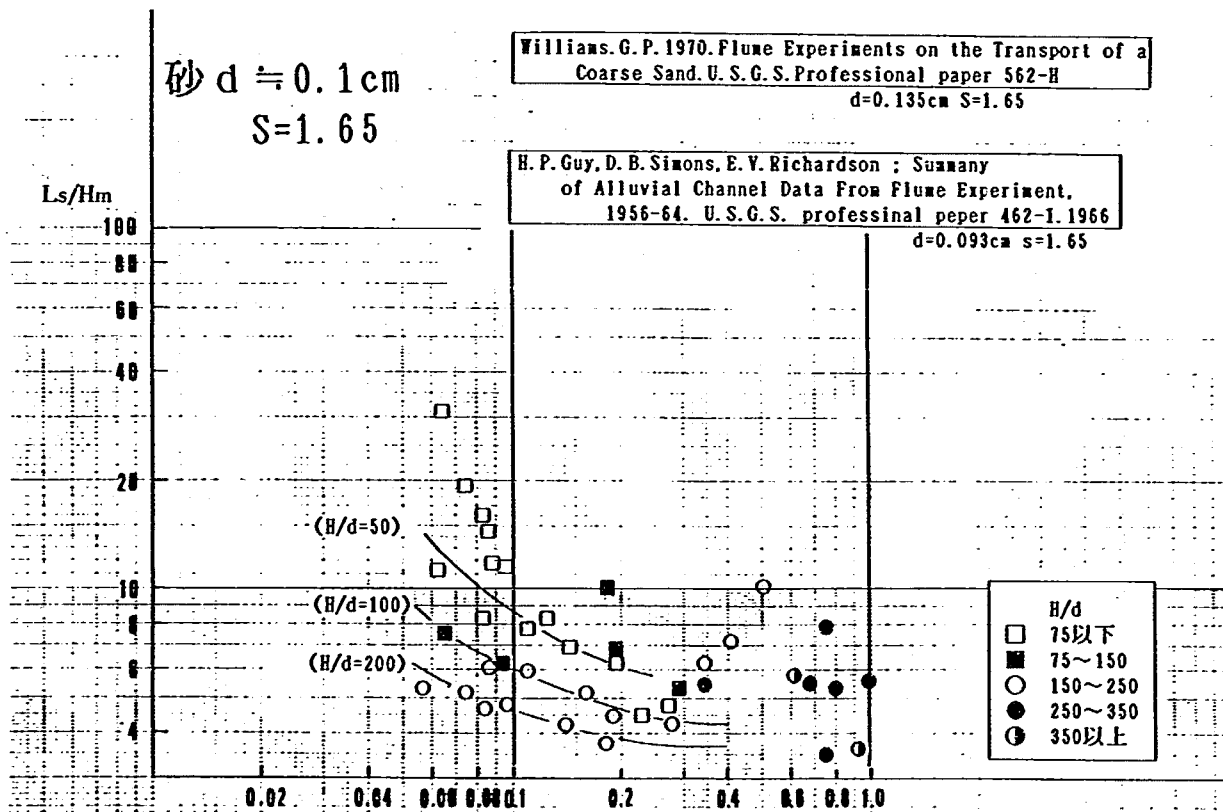


図-3.6 L_s/H_m と τ_* の関係

3.2 イシカワライトを用いた移動床の水理

3.2.1 実験ケースと実験条件

イシカワライトを用いた実験は、粒径 0.087 cm の材料で 32 ケース行っている。実験の水理条件は表 - 3.3 のとおりである。また、実験結果は付表 - 2.1, 付表 - 2.2, 付表 - 2.3, 付表 - 2.4 に整理した。

給砂は Y-1-1 ~ Y-1-7 では行わず、それ以外のケースでは $n = 0.020$ とした場合の土研式より q_s を評価して給砂を行った。

表 - 3.3 イシカワライトを用いた移動床模型実験の水理条件

実験名称：イシカワライト 軽量材料：イシカワライト 代表粒径：0.087 cm
 水中比重：0.59 沈降速度：5.85 cm/sec
 水路長：20 m 水路幅：1.5 m

実験ケース	流 量 Q (l/s)	初 期 河床勾配	実験ケース	流 量 Q (l/s)	初 期 河床勾配
Y-1-1	4.80	1/1,100	K-1-9	12.12	1/1,600
Y-1-2	7.06		K-1-10	36.44	
Y-1-3	8.50		K-1-11	48.42	
Y-1-4	13.20		K-1-12	72.04	
Y-1-5	15.50		K-1-13	19.32	1/2,100
Y-1-6	25.30		K-1-14	50.23	
Y-1-7	38.70		K-1-15	77.20	
Y-1-8	51.00		K-1-16	103.77	
K-1-1	9.40	1/1,100	A1-1-1	9.40	1/1,100
K-1-2	23.71		A1-1-2	23.71	
K-1-3	34.15		A1-1-3	34.15	
K-1-4	48.59		A1-1-4	48.59	
K-1-5	2.55	1/500	B1-1-1	12.08	1/1,100
K-1-6	8.93		B1-1-2	20.46	
K-1-7	16.80		B2-1-1	12.08	
K-1-8	25.62		B2-1-2	20.46	

3.2.2 まとめ

(1) 河床波の特性と領域区分

イシカワライトの実験は $Re_* = 10.8 \sim 29.8$ (水温を 20 °C と仮定), $H/d = 15.3 \sim 247.6$, $\tau_* = 0.031 \sim 0.232$ の範囲で実験が行われている。河床の形態は、無次元掃流力 τ_* が 0.05 以下の移動なしの平坦河床と、0.05 以上の砂堆である。河床波の形状としては、写真 - 3.3 ケース K-1-7 ($H =$

3.88 cm, $\tau_* = 0.151$, $H/d = 44.6$, $B/H = 38.7$) に示すように交互砂州が形成される場合もある。
 写真-3.4 ケース K-1-16 ($H = 21.54$ cm, $\tau_* = 0.183$, $H/d = 247.6$, $B/H = 7.0$) に示すように,
 $H/d = 250$ 程度以上になると砂堆の上に砂澁が共存する。

河床波の領域区分は、図-3.7 に示すように $S = 1.65$, $d = 0.1$ cm の場合の領域区分とほぼ同じように τ_* と H/d で区分し得る。

H_s/H_m と τ_* の関係を図-3.8 にとりまとめた。 H_s/H_m は $S = 1.65$ の場合より大きくなっている。

L_s/H_m と τ_* の関係は図-3.9 に示すように、交互砂州が形成され L_s/H_m が大きい値のものもあるが、 H/d が小さいほど L_s/H_m が大きくなる傾向にある。

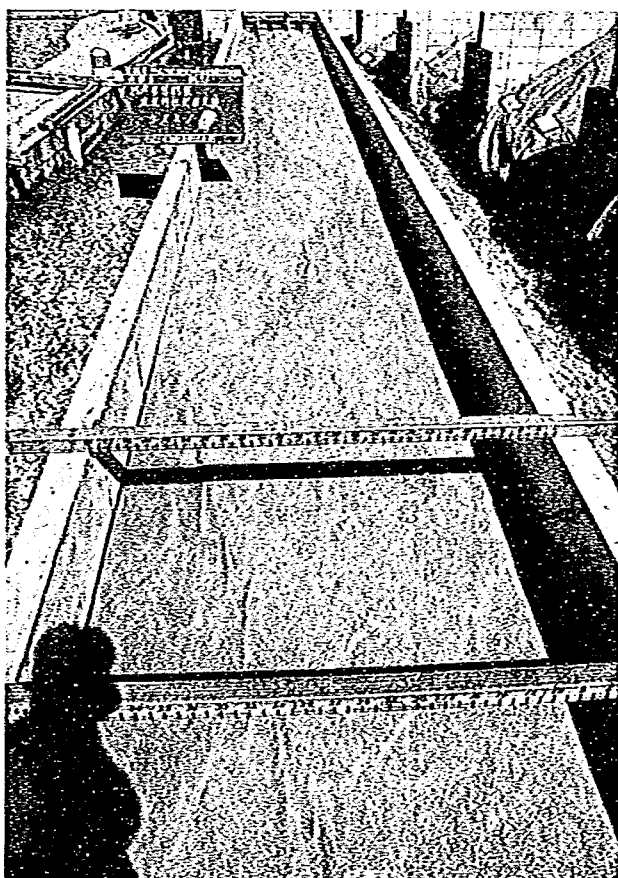


写真-3.3 ケース K-1-7



写真-3.4 ケース K-1-16

(2) 流れの抵抗係数

図-3.10 の ψ と τ_* の関係図に示すように、流速係数 ψ は $S = 1.65$, $d = 0.1$ cm の場合とほぼ同様な値となっている。

(3) 流砂量

流砂量は図-3.11 に示すように $S = 1.65$, $d = 0.1$ cm に比べ大きめである。

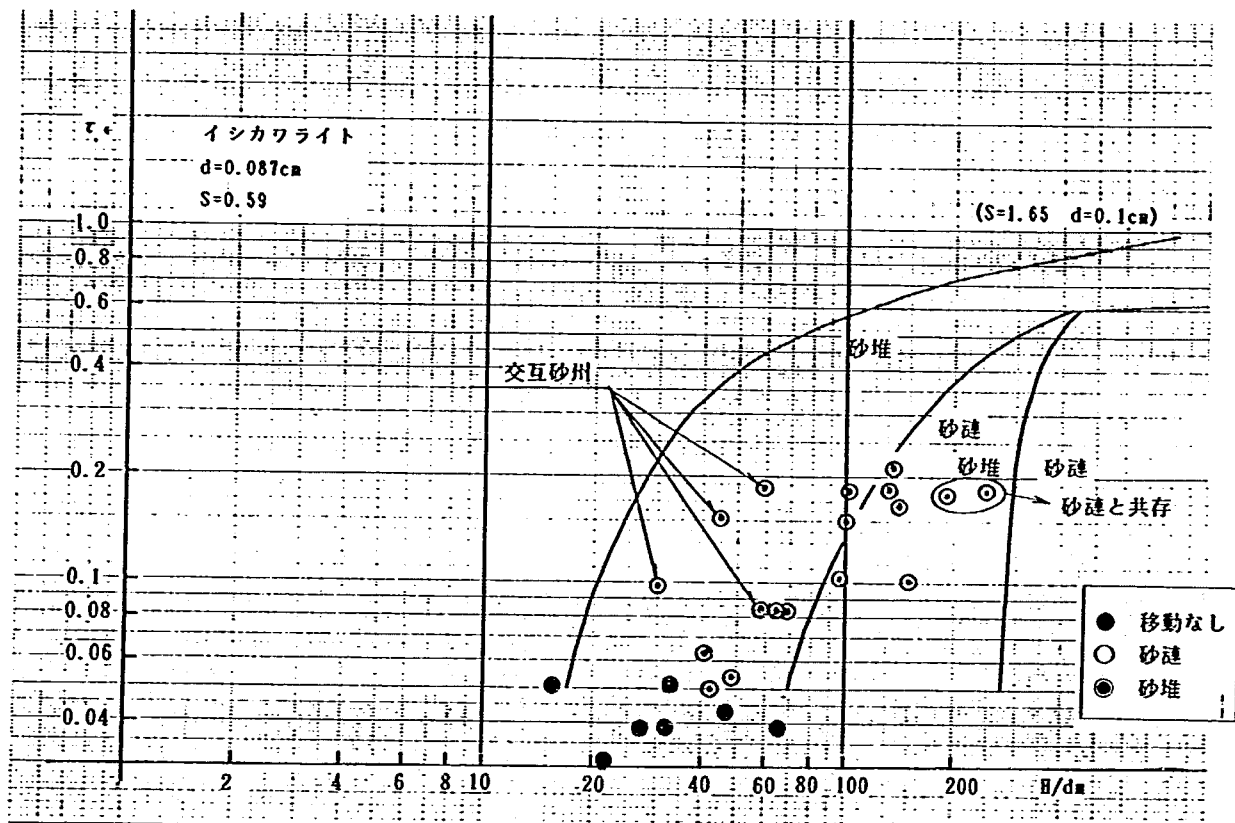


図-3.7 河床波の領域区分図 (イシカワライトの場合)

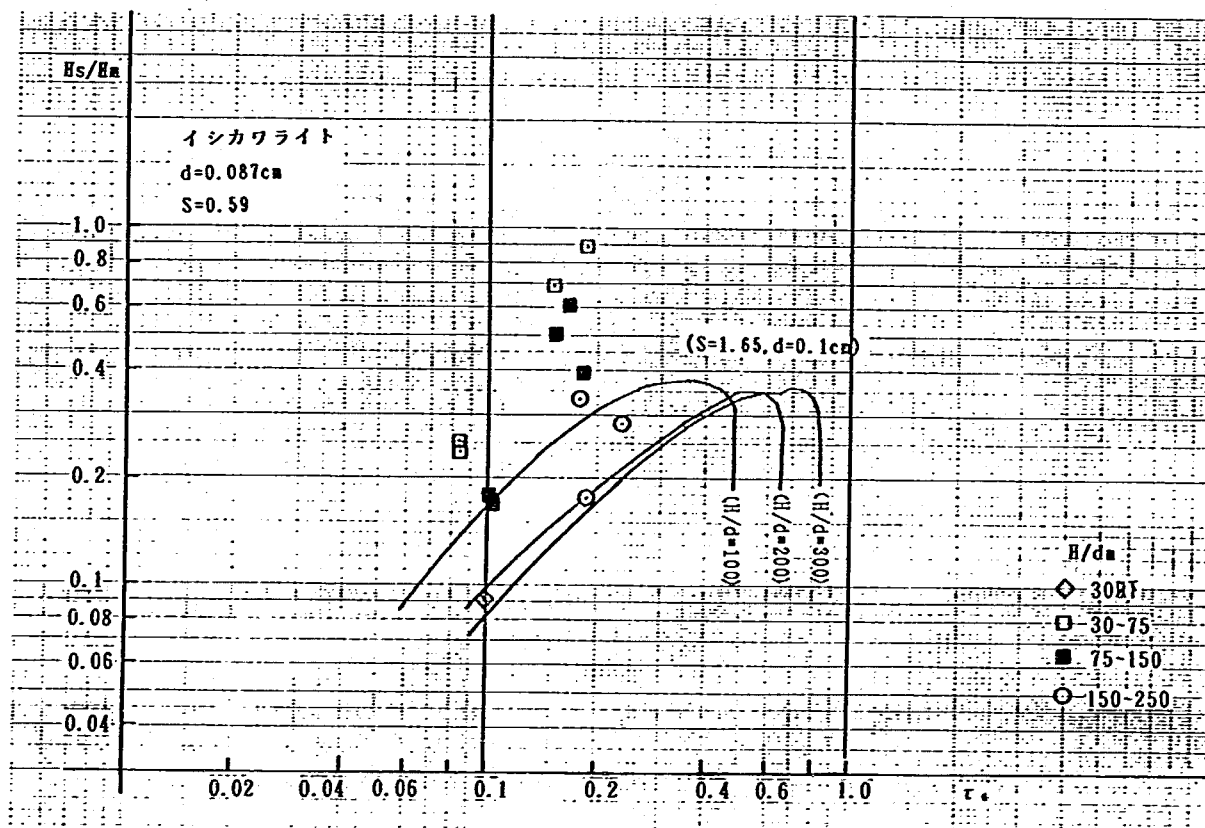


図-3.8 H_s/H_m と τ_* の関係 (イシカワライトの場合)

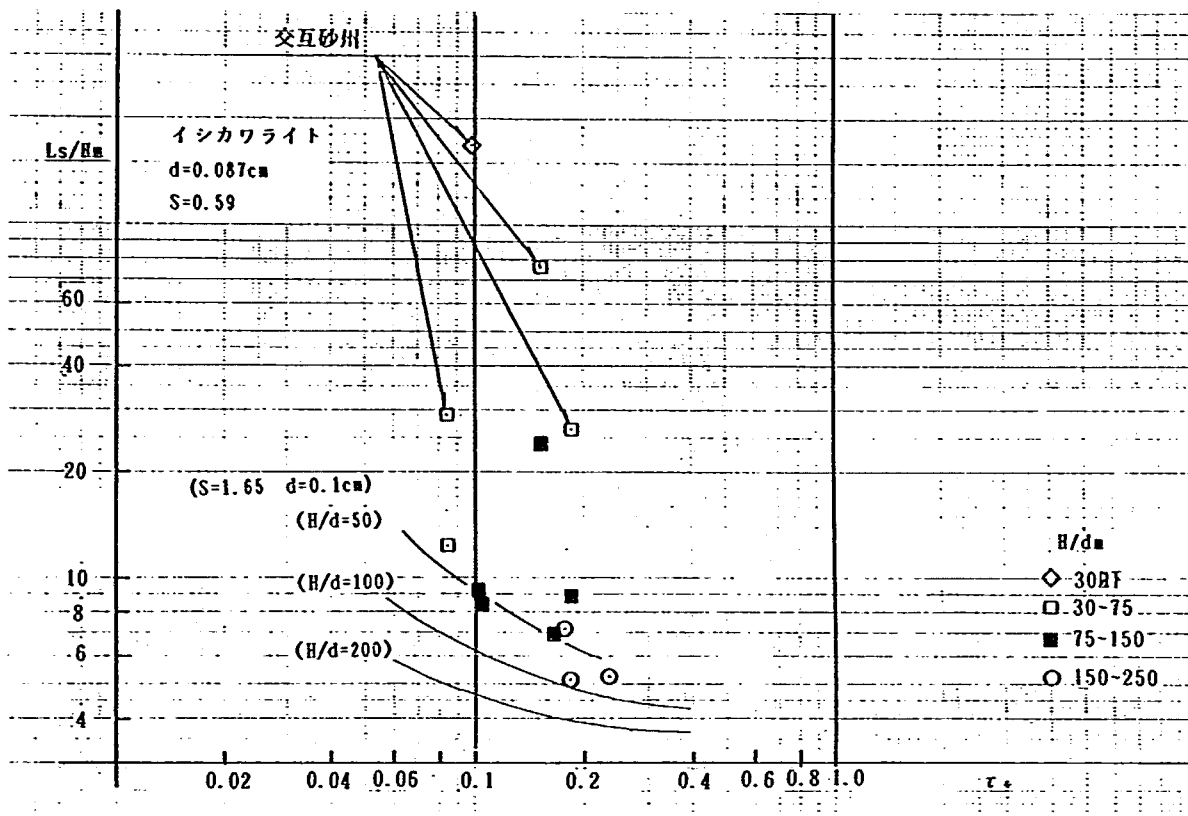


図-3.9 L_s/H_m と τ_* の関係 (イシカワライトの場合)

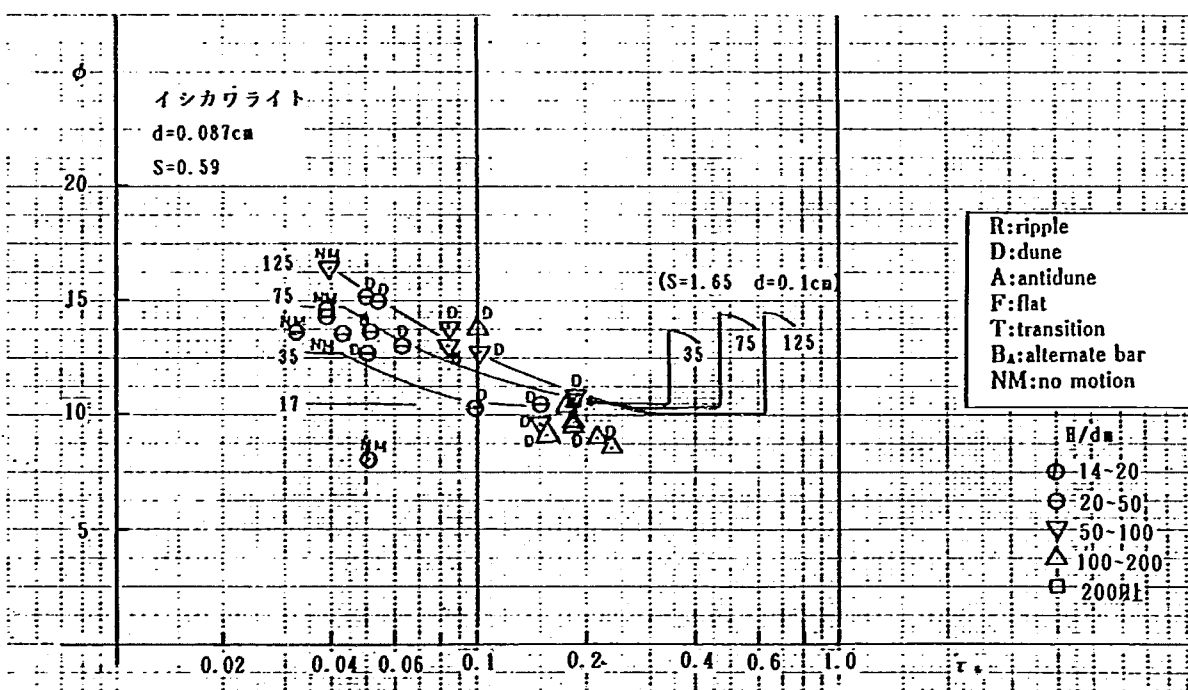


図-3.10 ψ と τ_* , H/d の関係 (イシカワライトの場合)

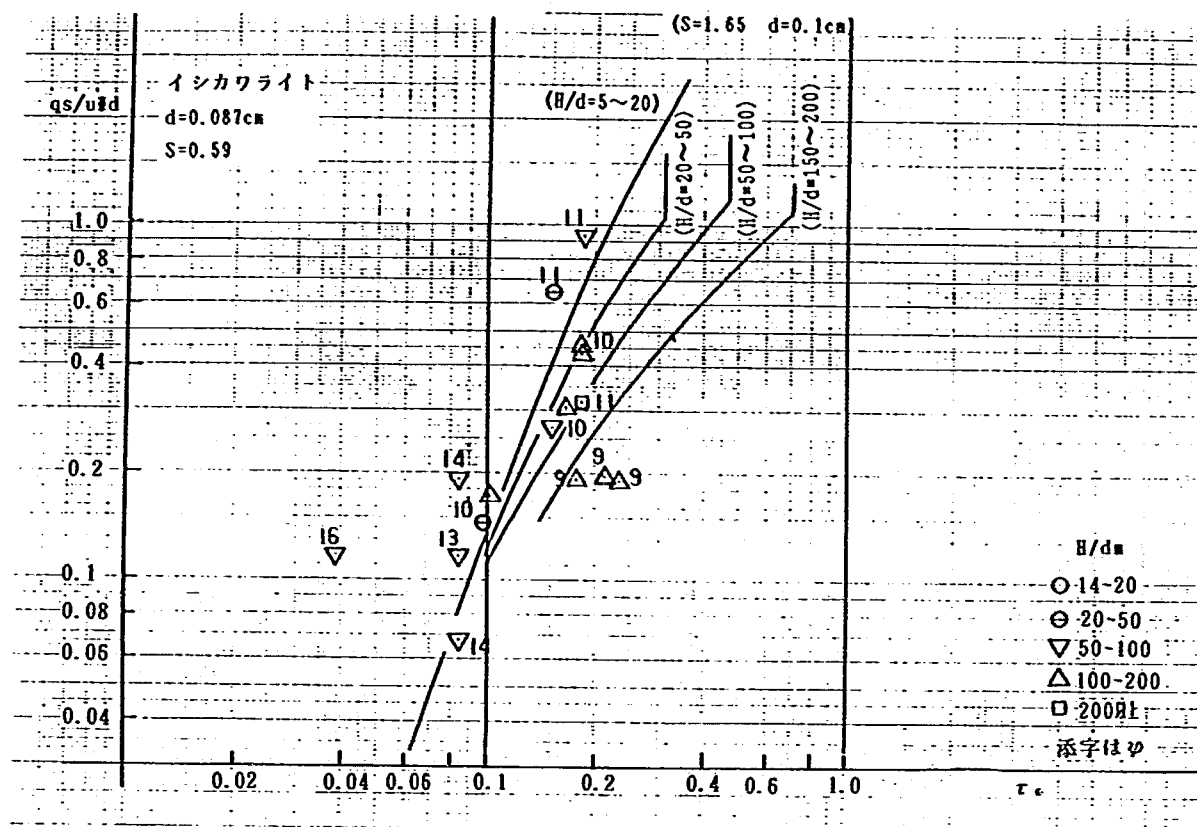


図-3.11 $q_s/(u_*d)$ と τ_* の関係 (イシカワライトの場合)

3.3 パミスターを用いた移動床の水理

3.3.1 実験ケースと実験条件

パミスターを用いた実験は、粒径0.25cmの材料で32ケース行っている。実験の水理条件は表-3.4のとおりである。また、実験結果は付表-3.1、付表-3.2、付表-3.3、付表-3.4に整理した。

表-3.4 パミスターを用いた移動床模型実験の水理条件

実験名称：パミスター 軽量材料：パミスター 代表粒径：0.25cm
 水中比重：0.38 沈降速度：8.4cm/sec
 水路長：20m 水路幅：1.5m

実験ケース	流量 Q (t/s)	初期 河床勾配	実験ケース	流量 Q (t/s)	初期 河床勾配
Y-3-1	8.61	1/1,100	K-3-9	30.19	1/1,600
Y-3-2	14.44		K-3-10	72.34	
Y-3-3	19.04		K-3-11	124.48	
Y-3-4	26.32		K-3-12	166.79	
Y-3-5	30.91		K-3-13	42.21	1/2,100
Y-3-6	53.49		K-3-14	107.72	
Y-3-7	84.00		K-3-15	169.50	
Y-3-8	123.52		K-3-16	214.85	
K-3-1	19.79	1/1,100	A2-3-1	19.79	1/1,100
K-3-2	48.51		A2-3-2	48.51	
K-3-3	88.46		A2-3-3	88.46	
K-3-4	123.64		A2-3-4	123.64	
K-3-5	7.06	1/500	B3-3-1	25.09	1/1,100
K-3-6	22.71		B3-3-2	31.06	
K-3-7	39.87		B4-3-1	25.09	
K-3-8	67.32		B4-3-2	31.06	

3.3.2 まとめ

(1) 河床波の特性と領域区分

パミスターの実験は $R_{*} = 40.8 \sim 109.8$ (水温を20℃と仮定), $H/d = 12.1 \sim 149.2$, $\tau_* = 0.028 \sim 0.207$ の範囲で実験が行われている。パミスターの粒径は0.25cmと大きく、また相対水深 H/d が150以下であるため発生した小規模河床波は砂堆と判断された。

河床波の形状としては、写真-3.5 ケースK-3-8 ($H=9.56$ cm, $\tau_* = 0.193$, $H/d = 38.2$, $B/H = 15.7$) と写真-3.6 ケースK-3-12 ($H=30.84$ cm, $\tau_* = 0.199$, $H/d = 123.4$, $B/H = 4.9$) に示すように、砂堆のスケールは水深に応じて変化している。

河床波の領域区分は、パミスターの粒径が0.25 cmであるため、 $S=1.65$ 、 $d=0.1\text{cm}$ の場合と一概に比較することはできないが、概ね図-3.12に示すように砂の領域区分とほぼ同じように τ_* と H/d で区分することができるものと考えられる。

H_s/H_m と τ_* の関係は図-3.13に示すとおり $S=1.65$ 、 $d=0.1\text{cm}$ と同じように τ_* が増加するにつれて H_s/H_m は大きくなるが、 $S=1.65$ に比べ大きめである。

L_s/H_m と τ_* の関係は図-3.14に示すとおり H/d が小さいほど L_s/H_m が大きくなる傾向にある。

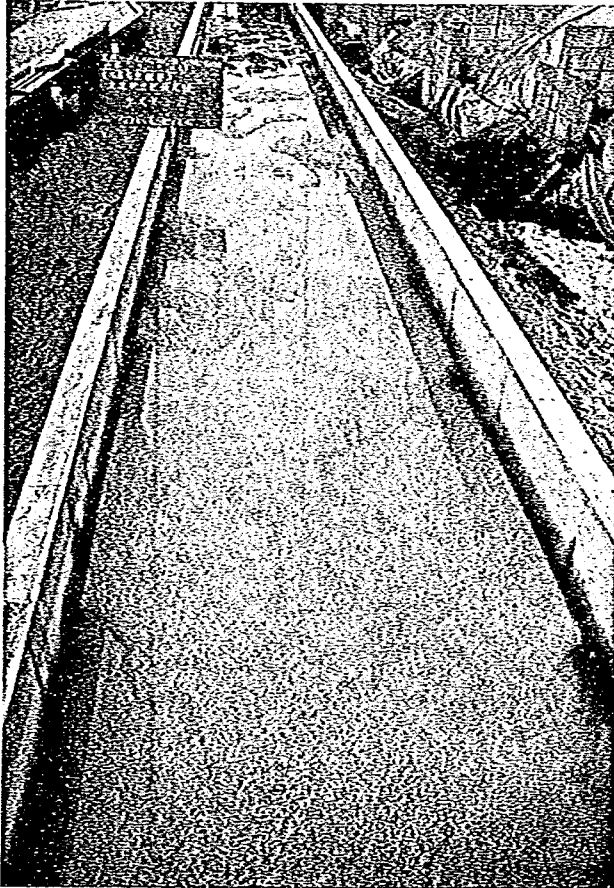


写真-3.5 ケースK-3-8

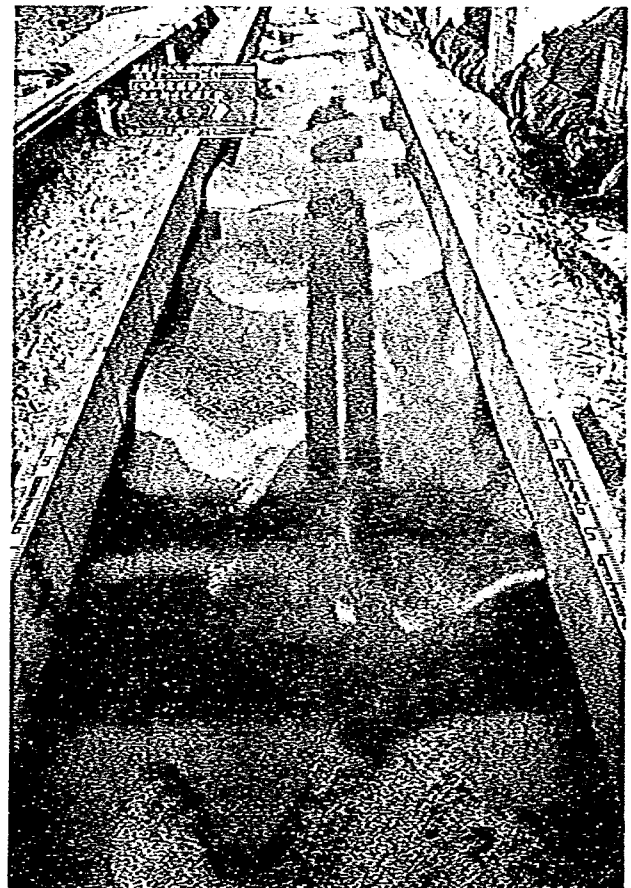


写真-3.6 ケースK-3-12

(2) 流れの抵抗係数

図-3.15に示すように、流速係数 ψ は $S=1.65$ 、 $d=0.1\text{cm}$ の場合と同様な値となっているが、比較粒径が相違しているため、参考にとどめたほうがよい。

(3) 流砂量

流砂量は図-3.16に示すように $S=1.65$ 、 $d=0.1\text{cm}$ の場合に比べて2倍程度大きくなっている。

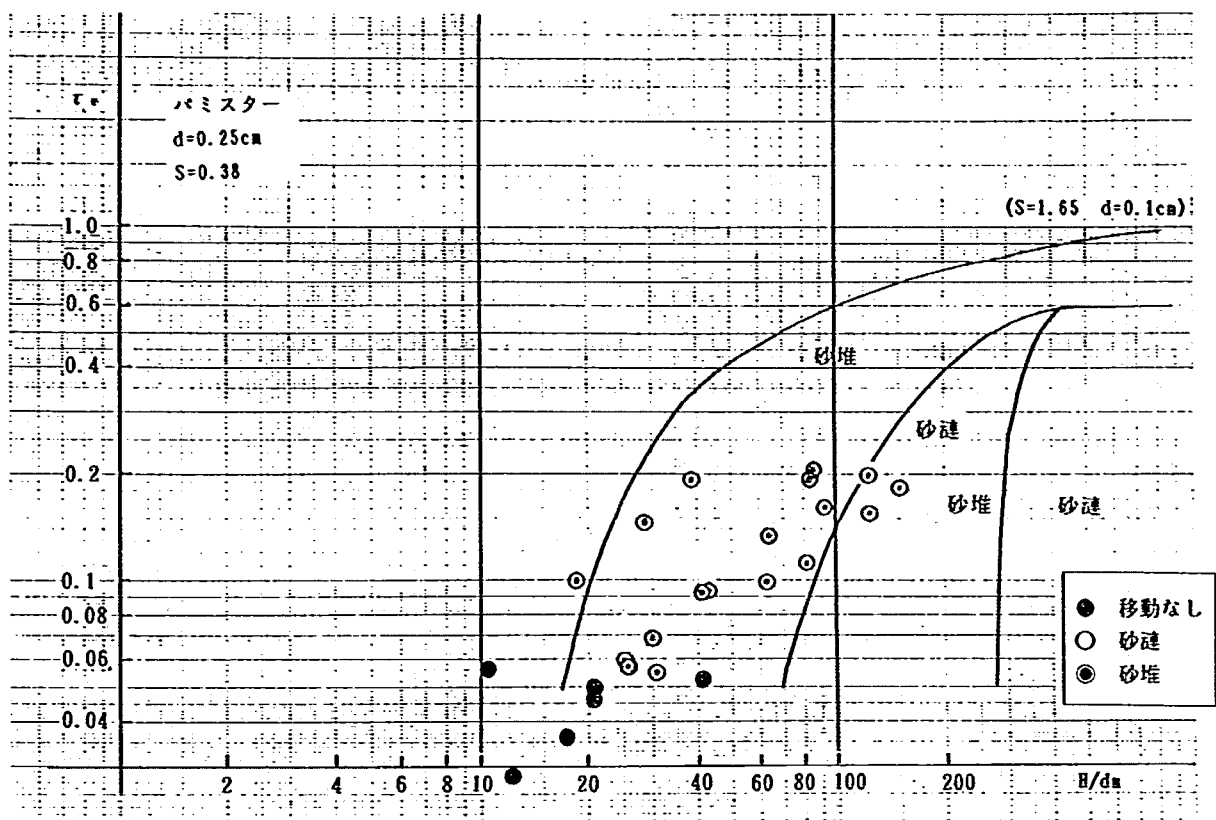


図-3.12 河床波の領域区分図 (バミスターの場合)

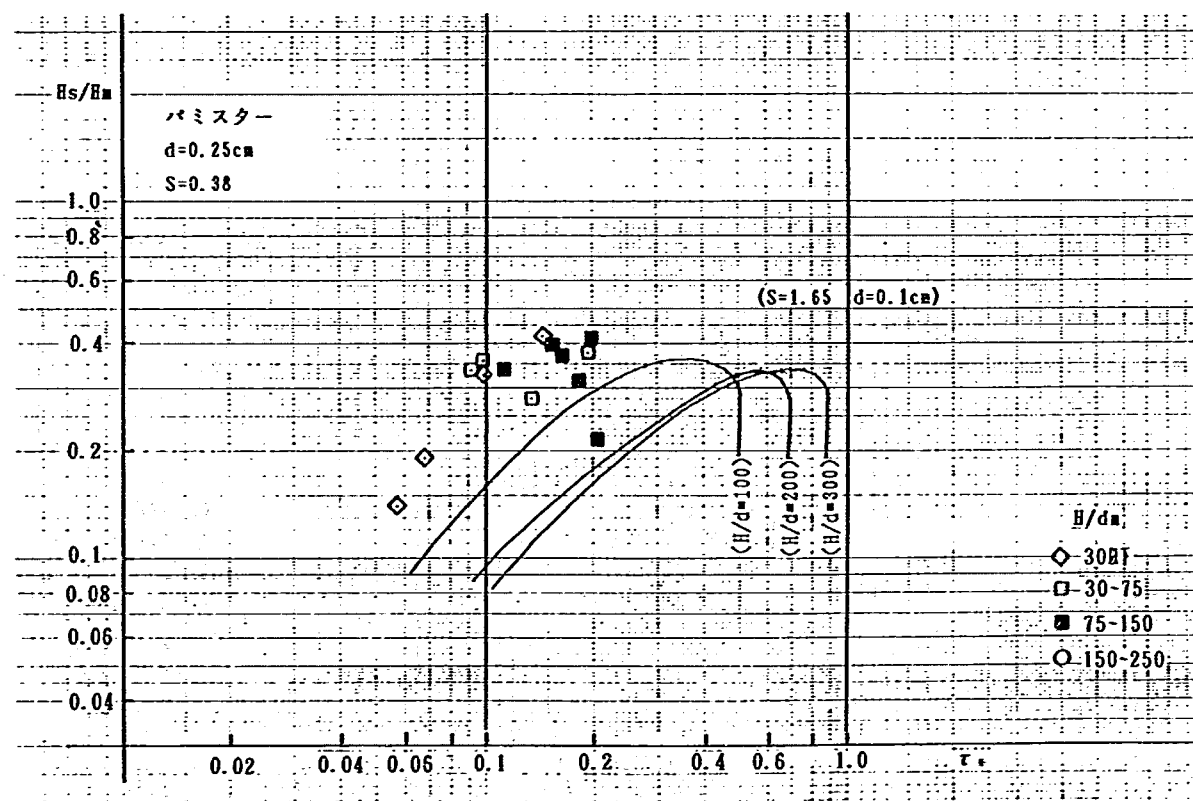


図-3.13 H_s/H_m と τ_* の関係 (バミスターの場合)

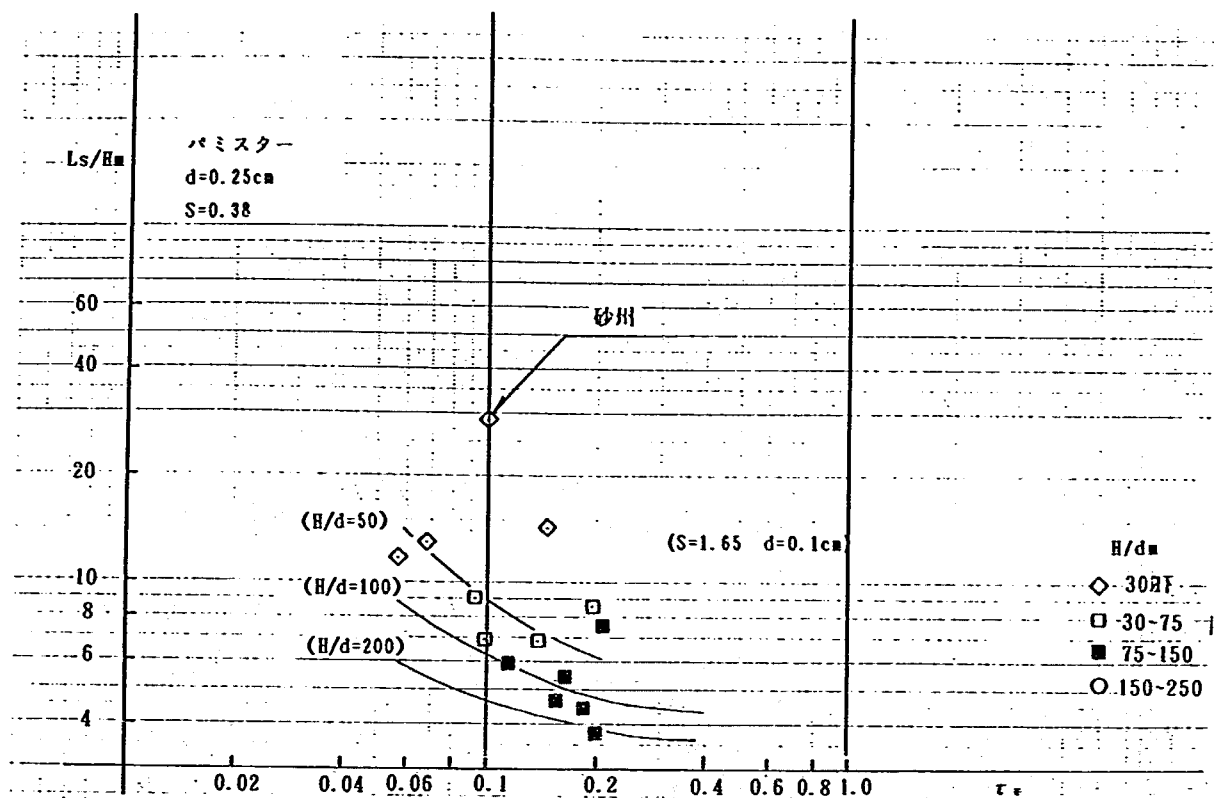


図-3.14 L_s/H_m と τ_* の関係 (パミスターの場合)

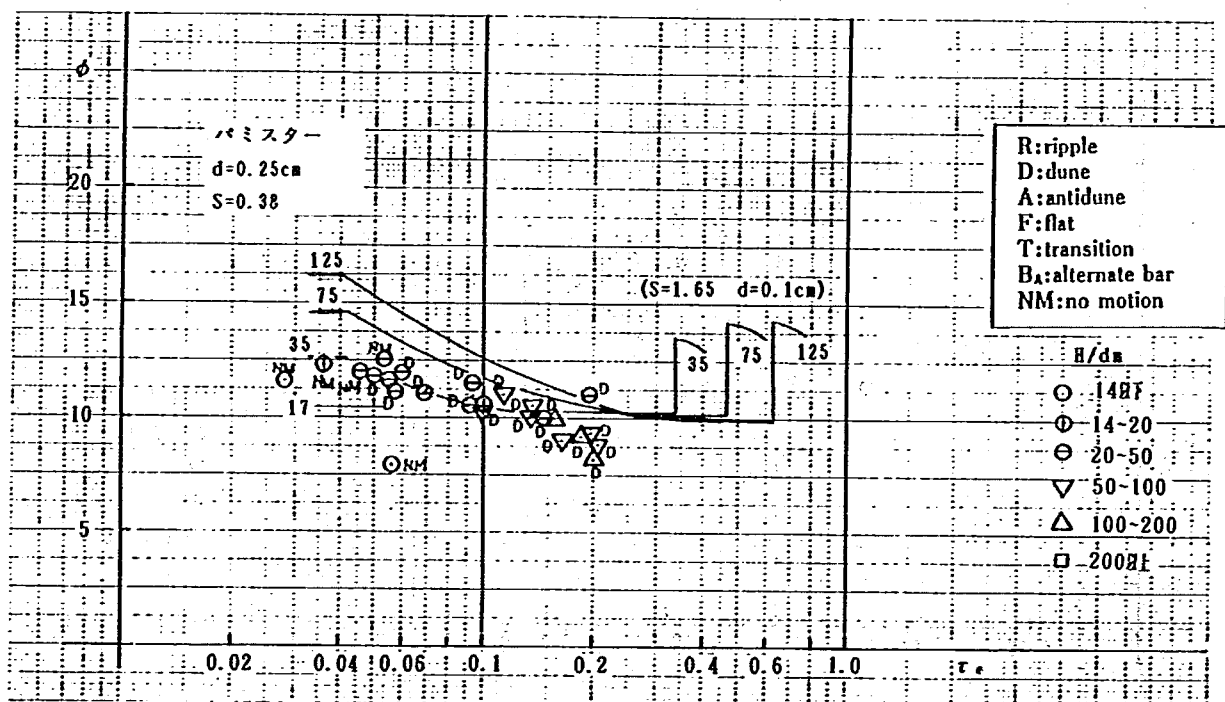


図-3.15 ψ と τ_* , H/d の関係 (パミスターの場合)

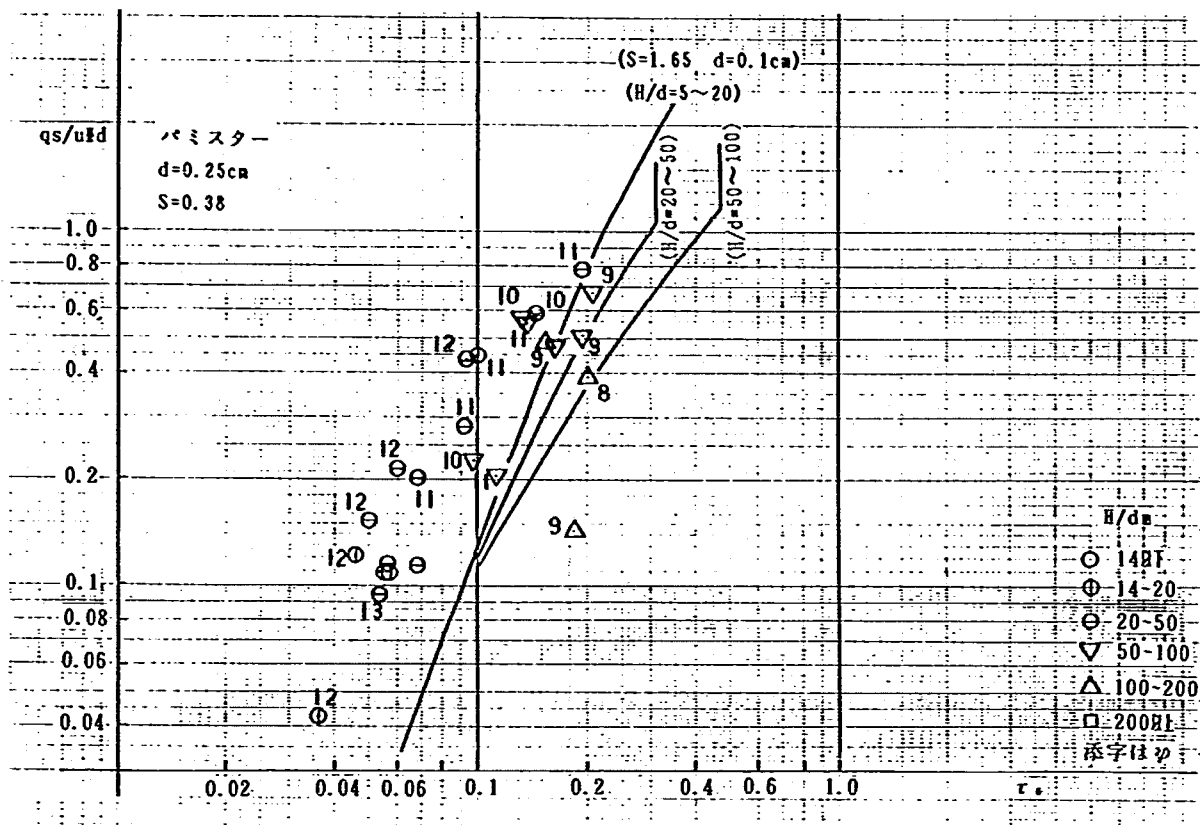


図-3.16 $q_s/(u_*d)$ と τ_* の関係 (パミスターの場合)

第4章 比重の違いが移動床の水理に及ぼす影響

移動床模型実験に用いた新しい軽量材料と、従来から使用されている軽量材料との差異を明らかにするとともに、通常の水中比重 $S = 1.65$ の材料の場合と比較して検討する。

過去に実施された軽量材料と、今回新しく実施した軽量材料の水中比重は表-4.1に示すとおりである。

なお、これらの底質材料は、すべてが球状の粒子からなるのではなく、石炭粉は角張っており、PBTは円柱状、スラッジライト・ポリスチレンは球状、珪砂・イシカワライト・バミスターは剥片状である。各底質材料の流送特性の差異の原因には、比重の違いのみならず、この形状の違いの影響も含まれている。

表-4.1 各軽量材料の水中比重と代表粒径

材 料	粒 径	水中比重
珪 砂	0.074 cm	1.58
イシカワライト	0.087	0.59
バ ミ ス タ ー	0.25	0.38
石 炭 粉 A	0.027 cm	0.50
石 炭 粉 B	0.03	0.58
石 炭 粉 C	0.10	0.48
スラッジライトA	0.105	0.80
スラッジライトB	0.12	0.80
P B T	0.10	0.31
ポ リ ス チ レ ン	0.151	0.05

4.1 小規模河床波の領域区分に及ぼす影響

ここでは S の違いによって小規模河床形態の領域がどの程度変わるのかを検討する。

(1) 移動限界掃流力

土砂が動き出す無次元限界掃流力 τ_{*c} は、

$$\tau_{*c} = f(R_{e*}, S) \quad \text{..... (4.1)}$$

と考えられる。

R_{e*} が150以上であれば、 τ_{*c} は R_{e*} の影響を受けないが、本検討では対象の軽量材料の実験をこの値以下で行っているので、 R_{e*} の影響を受けることになる。しかし、 R_{e*} の影響は図-4.1に示すように $S = 1.65$ の場合は R_{e*} が2以下でなければ τ_{*c} を大きく変えるものでなく、 $\tau_{*c} = 0.04 \sim 0.06$ の範囲に入っている。従って実験精度の問題もあって多量のデータが無いと、 τ_{*c} に対する R_{e*} の影響を有意な差としては認知し得ない。

S の影響は、 S が異なると流速変動に対する底質材料の応答特性が異なるので影響は無いとは言えないが、本調査において $S = 0.38 \sim 1.58$ の範囲では、資料数の少なさや測定誤差等の問題もあって S の違いによる R_{e*} の差異を認知し得るものでないが、 $\tau_{*c} = 0.04 \sim 0.06$ 程度となっている。

(2) 砂澁と砂堆の区分

砂澁と砂堆の区分は、波高、波長のスケールで区別するべきでなく、流砂量、流れの抵抗係数、波長と水深・粒径の関係が砂澁的特性を持つのか、砂堆的特性を持つのかによって判断するべきである。この立場でみると、今回対象とした軽量材料を用いた移動床実験で発生した河床波は以下のとおりである。

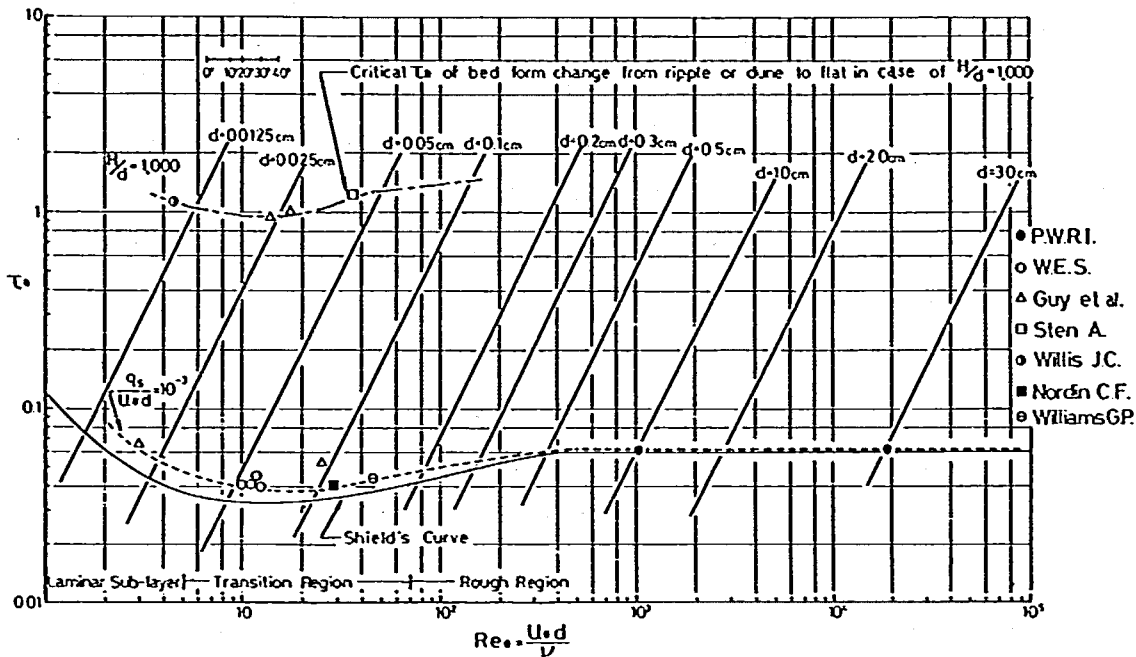


図-4.1 Re_* , d , τ_* の関係

① 珪砂

H/d が 400 程度以下までは砂堆であるが, $\tau_* = 0.2 \sim 0.3$ で $H/d = 400$ 程度以上になると砂堆の上に砂澁が共存し, 砂澁的河床波となっている。

② イシカワライト

$H/d = 100$ 以下では砂堆的河床波であったものが, $\tau_* = 0.2$ 程度・ $H/d = 250$ 程度で砂澁と共存するようになっている。

③ バミスター

$Re_* = 15$ 以上, かつ H/d が 100 程度以下ということもあって, 小規模河床波はすべて砂堆的特性を持っている。

以上のように, 今回の移動床実験は砂堆的特性を持つ領域内での実験が多かったが, S が異なっても ($S = 0.59 \sim 1.65$) H/d が 300 程度以上で $\tau_* = 0.5 \sim 0.6$ 以下であれば, $Re_* = 20$ 以上でも砂澁的河床波が発生することがいえる。

4.2 河床波のスケールに及ぼす影響

(1) 砂澁

4.1 で述べたように H/d が 300 程度以上で $\tau_* = 0.5 \sim 0.6$ 以下であれば, $Re_* = 20$ 以上でも砂澁的河床波が発生する。砂澁は砂堆の上面に共存した形となっており, 砂澁のスケールは写真から判断すると珪砂, イシカワライトともに L_s/d_m は 200 程度である。

(2) 砂堆

砂堆の波高は水深と密接な関係を持っている。砂堆の波長, 波高が過去に実施された軽量材料と

また、 $S = 1.65$ の場合とどの程度の違いがあるのかを以下に述べる。

図-4.2に L_s/H_m と τ_* の関係を材質がわかるように図示した。図-4.2からは砂堆の相対波長 L_s/H_m のデータのバラツキが大きく、水中比重の差によって差異があるかどうかは明確にし得ない。これは、砂の場合(図-3.6)、珪砂の場合(図-3.3)、イシカワライトの場合(図-3.9)、パミスターの場合(図-3.14)の L_s/H_m と τ_* の関係からわかるように、 L_s/H_m が H/d の影響を受け H/d が小さいほど L_s/H_m が大きくなる傾向にあるためである。そこで L_s/H_m と τ_* の関係を H/d 別に整理したものが図-4.4~図-4.8である。この図より L_s/H_m の S による相違が認められず、 S が異なっても L_s/H_m は H/d の影響を受け、 $S = 1.65$ の場合と同じ程度の値となっている。

図-4.3には H_s/H_m と τ_* の関係を示した。なお、図-4.3では、珪砂については $H/d = 100 \sim 300$ までの値をプロットし、イシカワライト・パミスターについては H/d が150以下の値をプロットしたので、 $S = 1.65$ との比較はそれぞれの H/d で比較するとよい。

図-4.3より相対波高 H_s/H_m についてはデータのバラツキがあるものの、 $S = 1.65$ の場合よりも大きめである。このことは S が小さいほど相対波高 H_s/H_m が大きめになると判断できよう。

(3) 平坦河床への移行無次元掃流力 τ_{*f}

今回の実験では、各軽量材料とも平坦河床へ移行するまでのケースがなく明確に判断し得ないが、平坦河床への移行無次元掃流力 τ_{*f} は、 $S = 1.65$ の場合と比較して大きくは変わらないと考えられる。これは、 S が異なっても($S = 0.3 \sim 1.65$ の範囲で)移行無次元掃流力 τ_{*f} は H/d によって決まっていると判断されているからである。

4.3 流速係数 ψ に及ぼす影響

図-4.9~4.12は流速係数 ψ と無次元掃流力 τ_* の関係が比重の違いによってどの程度差異があるのかを見るために、 H/d を14~20, 20~50, 50~100, 100~150に区分して示したものである。

この図より、珪砂、イシカワライト、パミスターとも多少のバラツキはあるものの、 $S = 1.65$, $d = 0.1$ cmの場合と同様な値となっている。

4.4 流砂量に及ぼす影響

図-4.13~4.16に $q_s/(u_*d)$ と τ_* の関係を $H/d = 14 \sim 20$, 20~50, 50~100, 100~150の場合について示す。図中の実線は $S = 1.65$, $d = 0.1$ cmの場合の $q_s/(u_*d)$ と τ_* の関係を示している。

珪砂についての流砂量は $S = 1.65$, $d = 0.1$ cmの H/d で評価し得る。イシカワライトの流砂量は $S = 1.65$, $d = 0.1$ cmに比べ大きめである。パミスターの流砂量は $S = 1.65$, $d = 0.1$ cmの場合に比べて2倍程度大きくなっている。この原因として、浮遊砂の影響が考えられる。今 $\tau_* = 0.3$ とし、粒径を0.1 cmとすると、イシカワライトで u_*/W_0 は0.69, パミスターは0.95, 通常の砂は0.56となり、イシカワライト、パミスターは通常の砂に比べ浮遊しやすくなっている。

4.5 砂州に及ぼす影響

砂州については写真-3.3 ケースK-1-7 ($H=3.88\text{ cm}$, $\tau_* = 0.151$, $H/d=44.6$, $B/H=38.7$) で交互砂州が形成されている。砂州の形態や発生領域に及ぼす影響については実験資料も少ないので明確には言えないところがあるが、次のことは言えよう。

砂州のスケールは、単列砂州の場合には川幅 B が、多列砂州の場合は水深が規定し、この関係には S は関係しない。すなわち単列砂州の場合、砂州長 L_s は川幅の 4～15 倍程度となり、多列砂州の場合は H/d が 30 以上では、水深の 100 倍程度の砂州幅 B_s となる。

砂州の発生領域に及ぼす S の効果については、実験資料が τ_* と H/d の平面上に発生領域を示すほどのデータ数が無く結論付けられないが、 $S=1.65$ の場合の τ_* と H/d の平面上の発生領域と似ているようである。

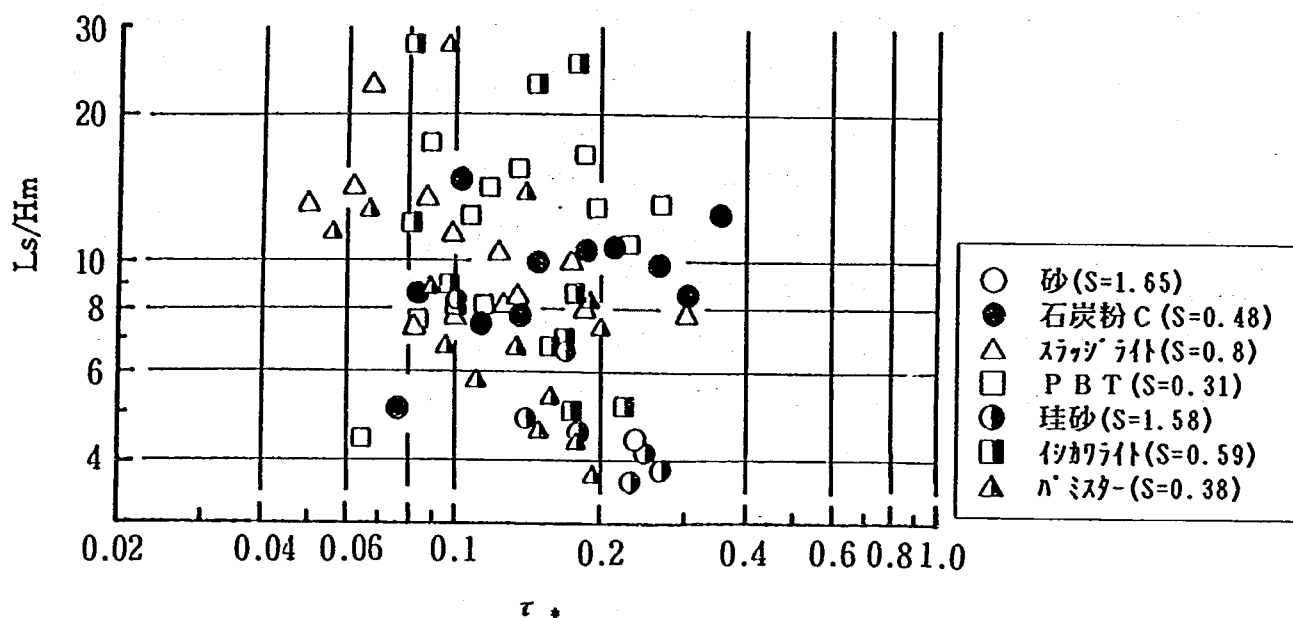


図- 4.2 L_s/H_m と τ_* の関係 (軽量材料の場合)

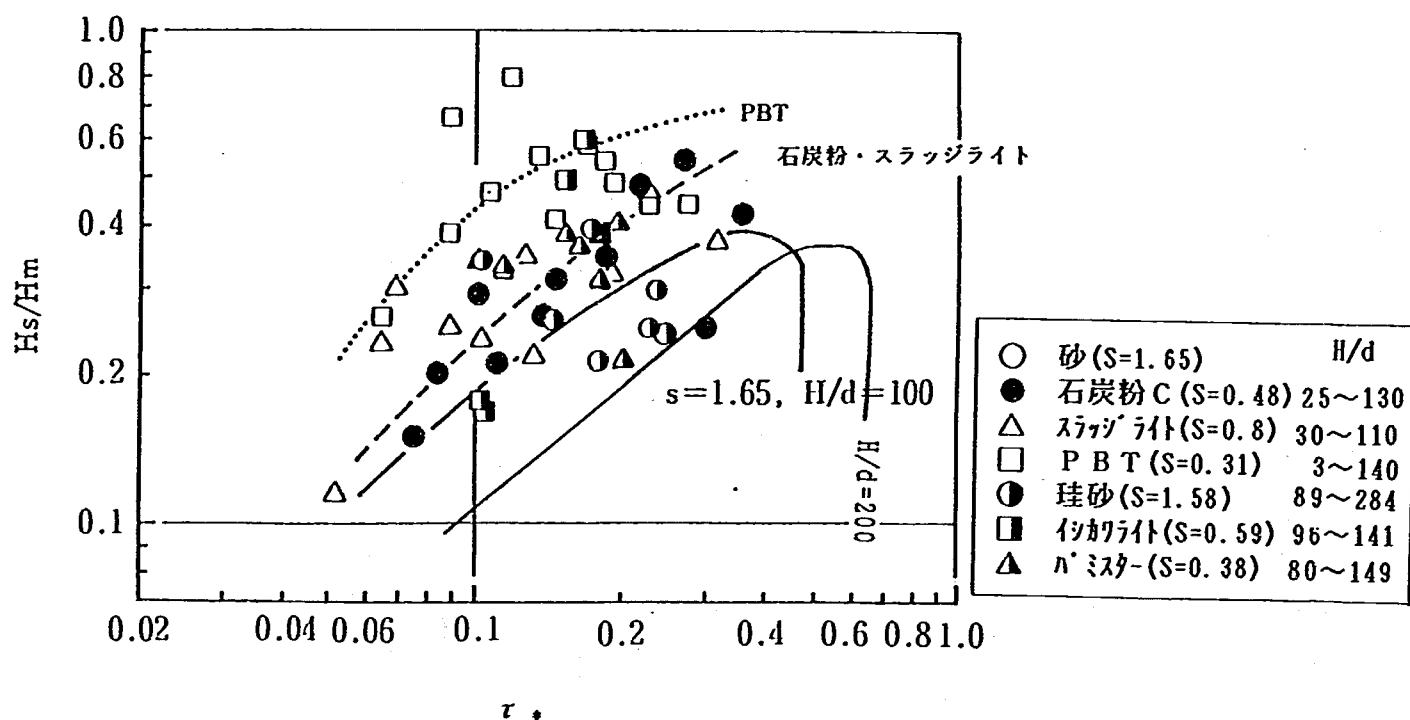


図- 4.3 H_s/H_m と τ_* の関係 (軽量材料の場合)

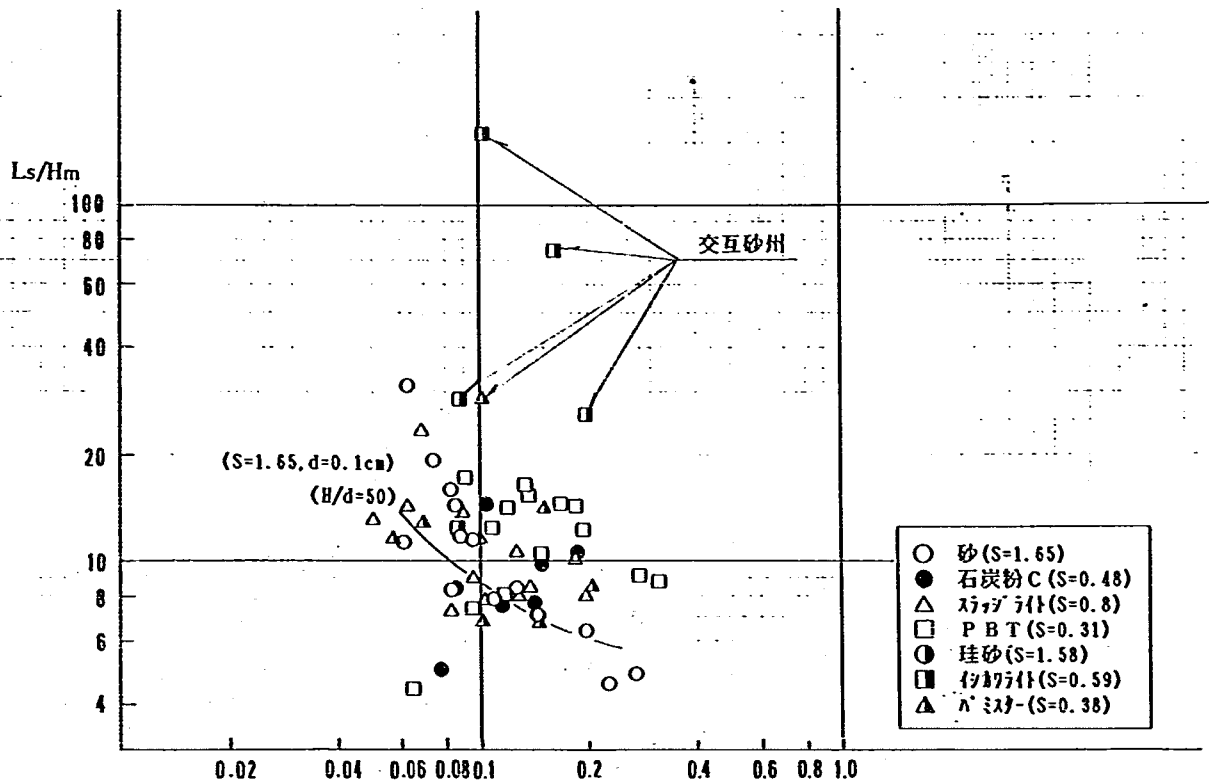


図-4.4 L_s/H_m と τ_* の関係 ($H/d=75$ 以下の場合)

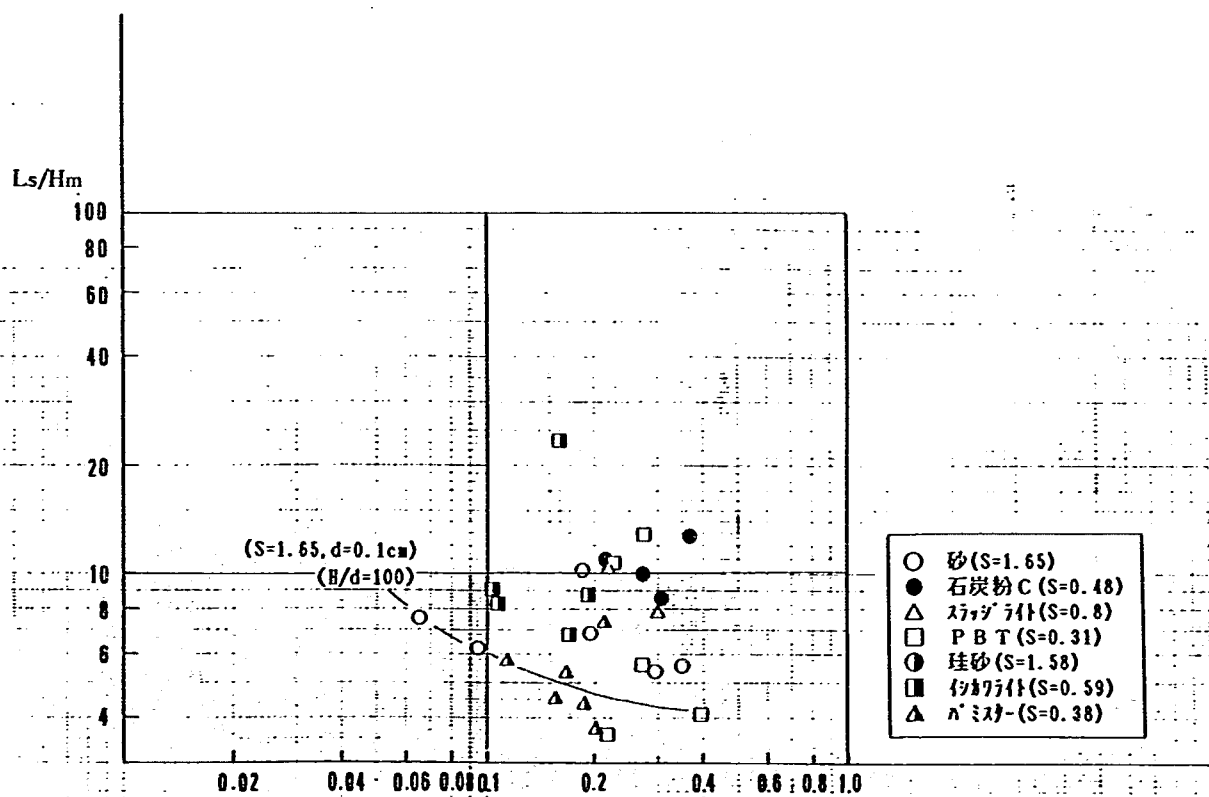


図-4.5 L_s/H_m と τ_* の関係 ($H/d=75 \sim 150$ の場合)

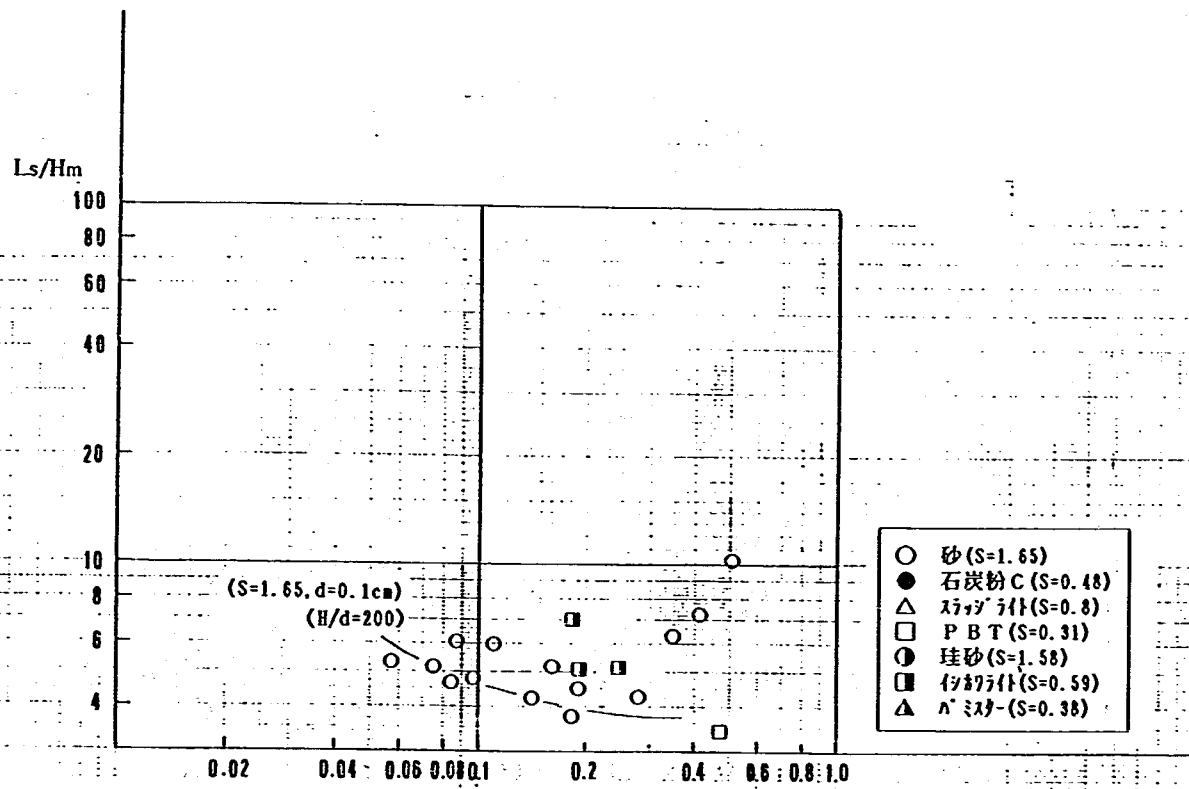


図- 4.6 L_s/H_m と τ_* の関係 ($H/d = 150 \sim 250$ の場合)

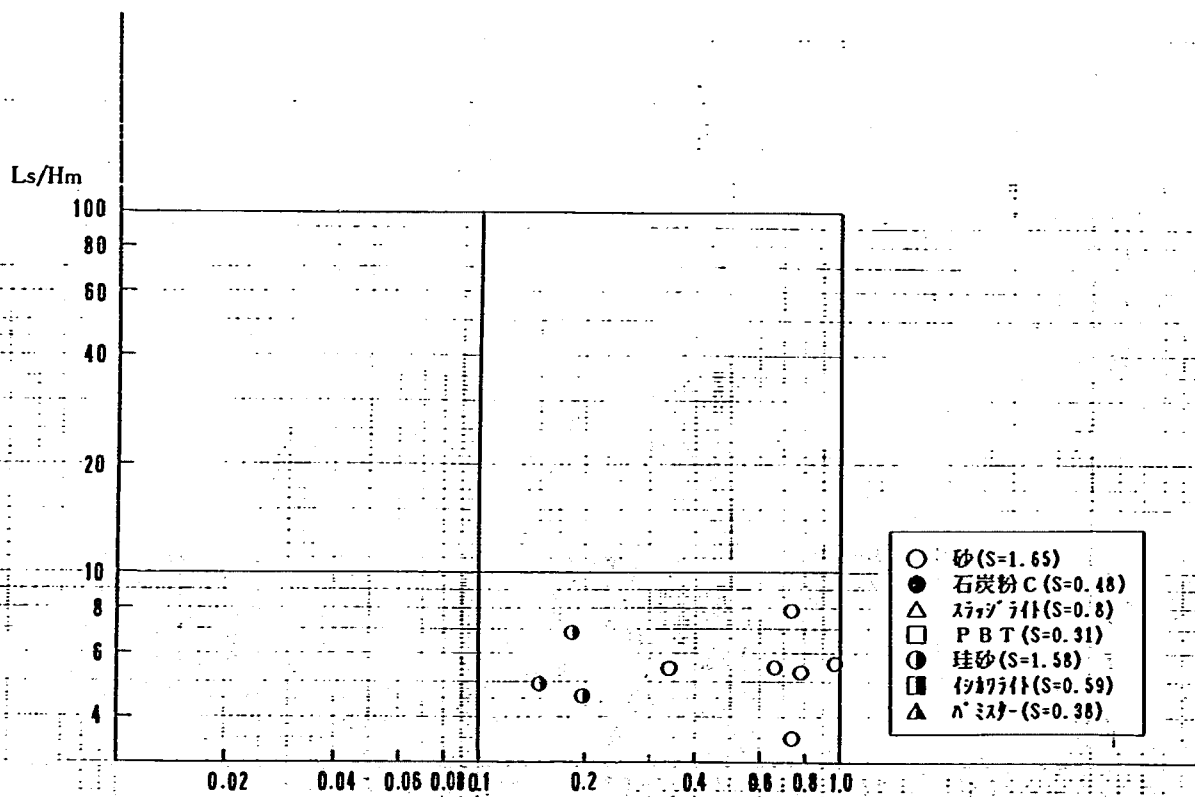


図- 4.7 L_s/H_m と τ_* の関係 ($H/d = 250 \sim 350$ の場合)

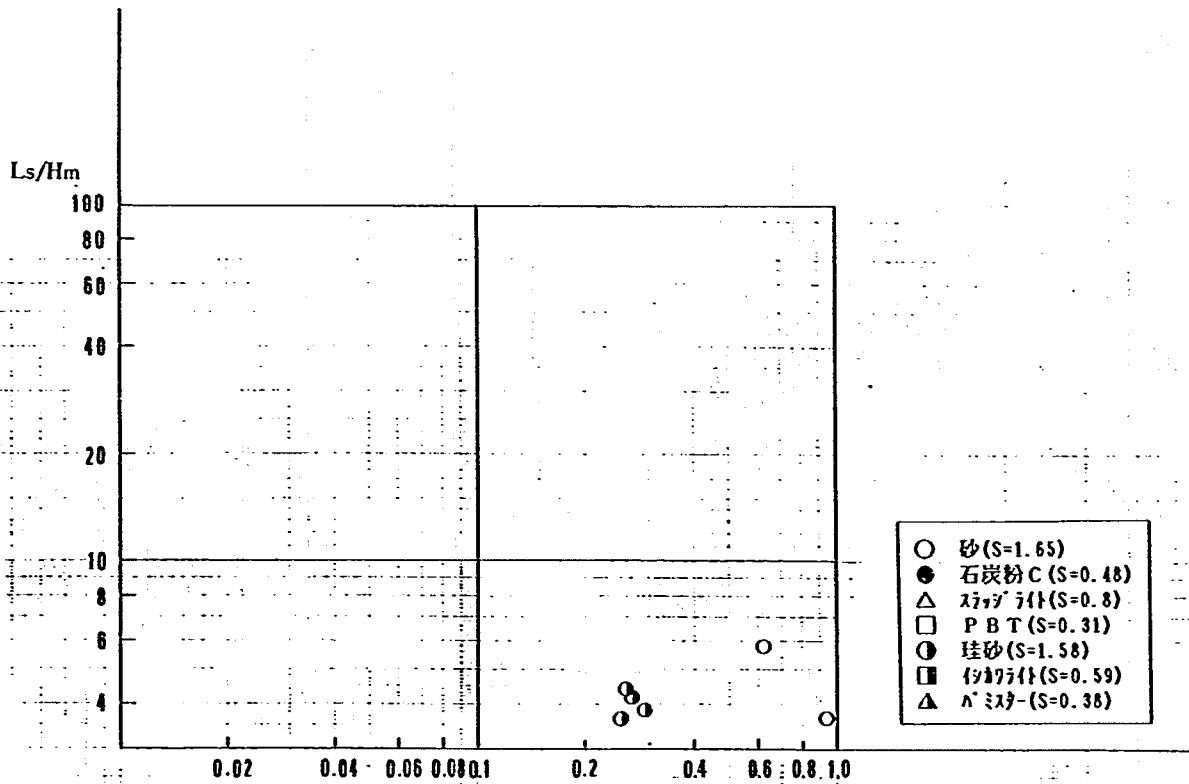


図-4.8 L_s/H_m と τ_* の関係 ($H/d = 350$ 以上の場合)

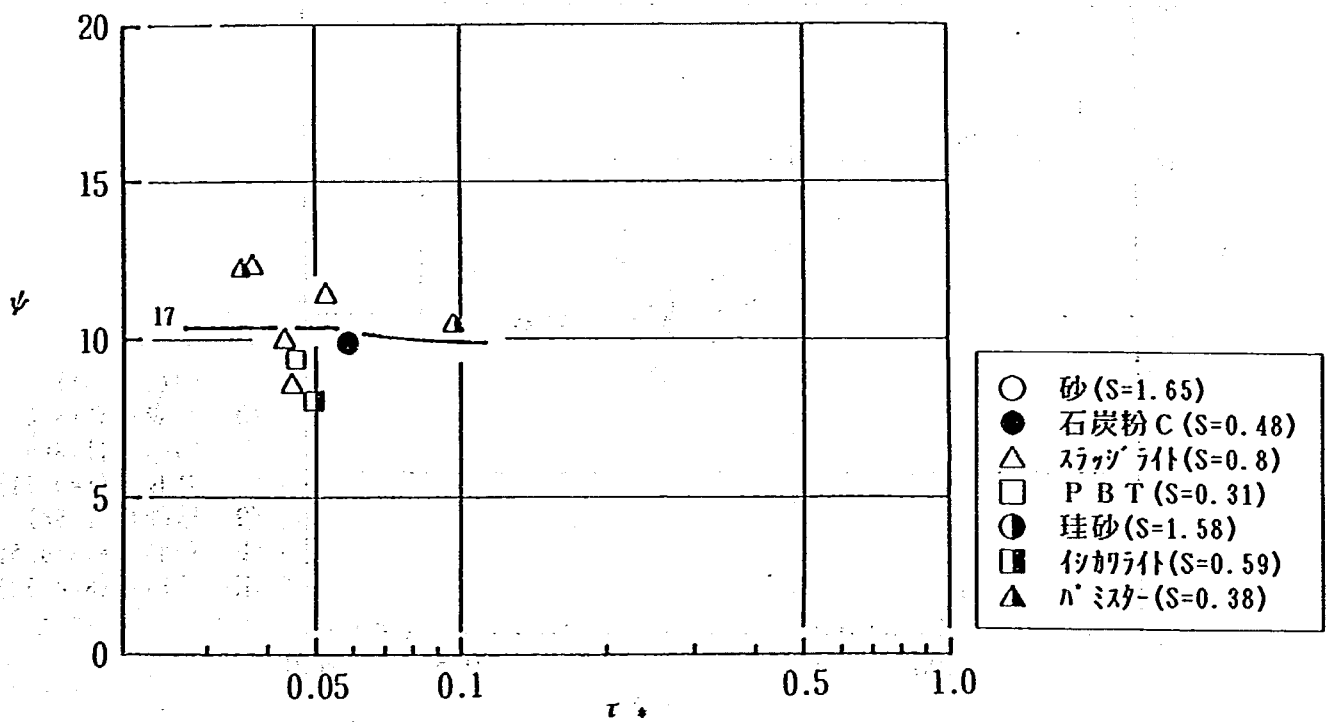


図-4.9 ψ と τ_* , H/d の関係 (軽量材料, $H/d=14 \sim 20$ の場合)

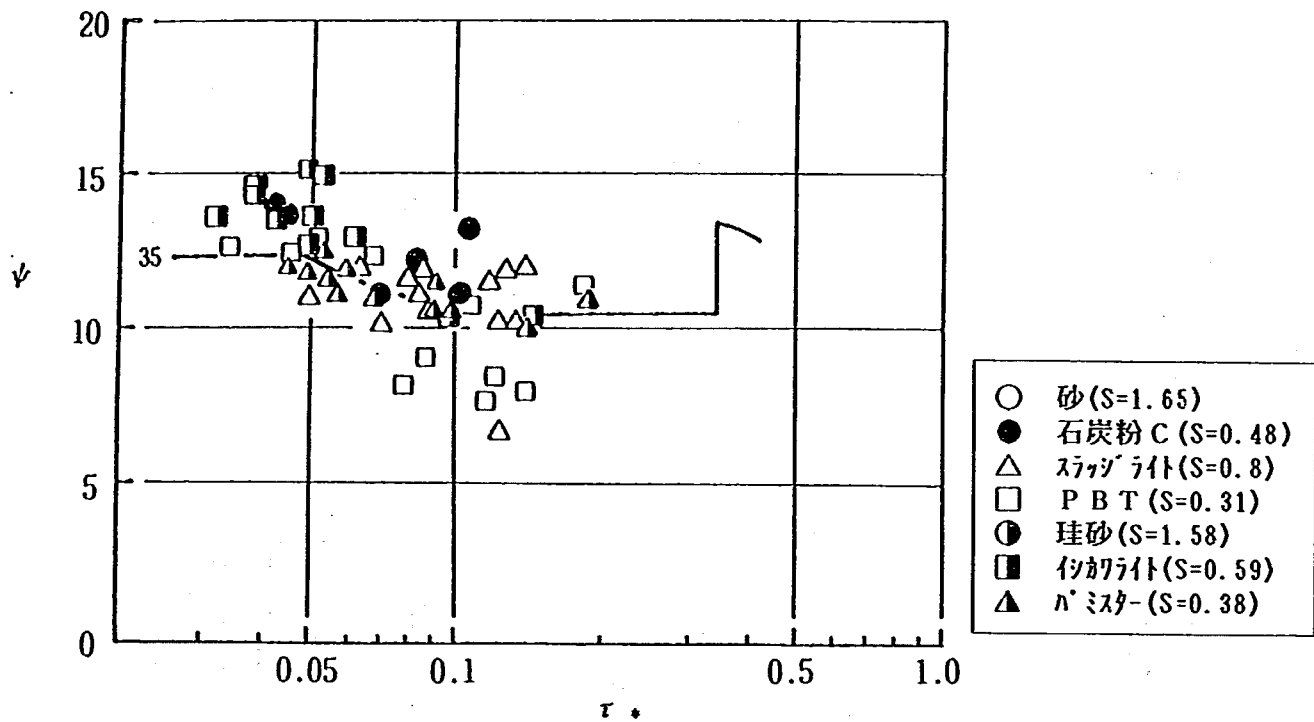


図-4.10 ψ と τ_* , H/d の関係 (軽量材料, $H/d = 20 \sim 50$ の場合)

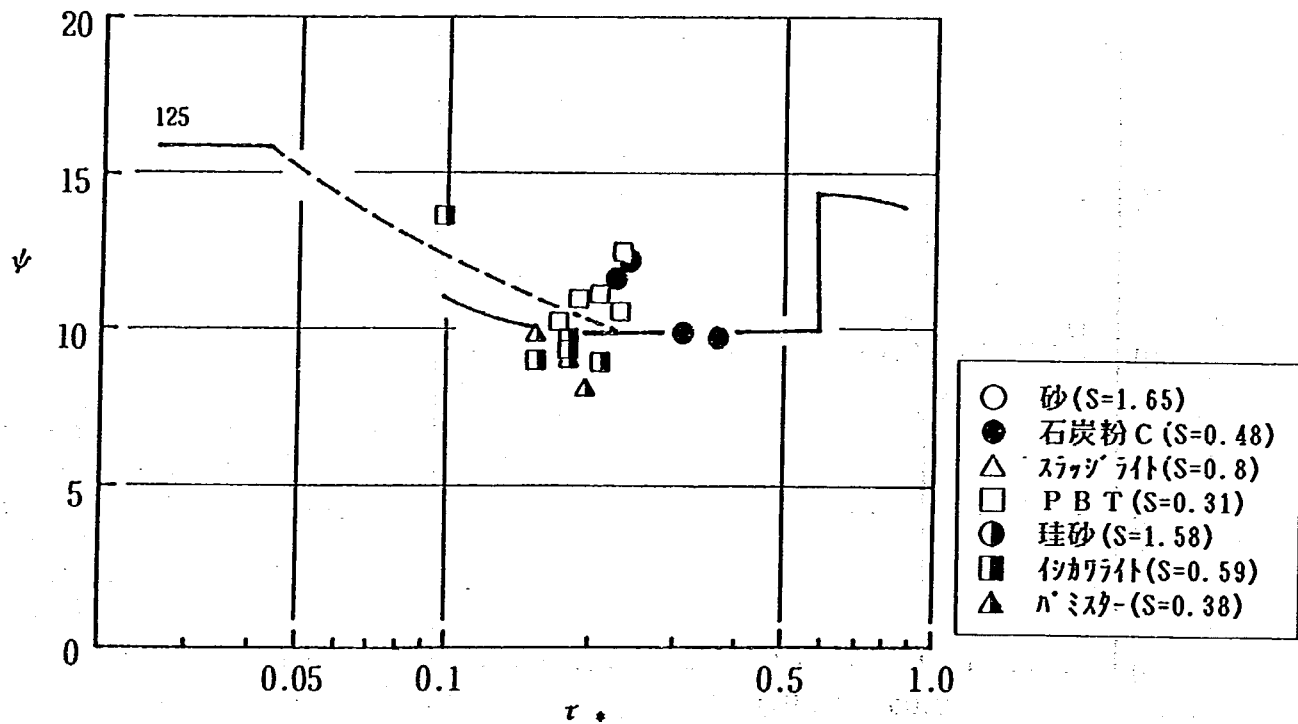


図-4.11 ψ と τ_* , H/d の関係 (軽量材料, $H/d = 50 \sim 100$ の場合)

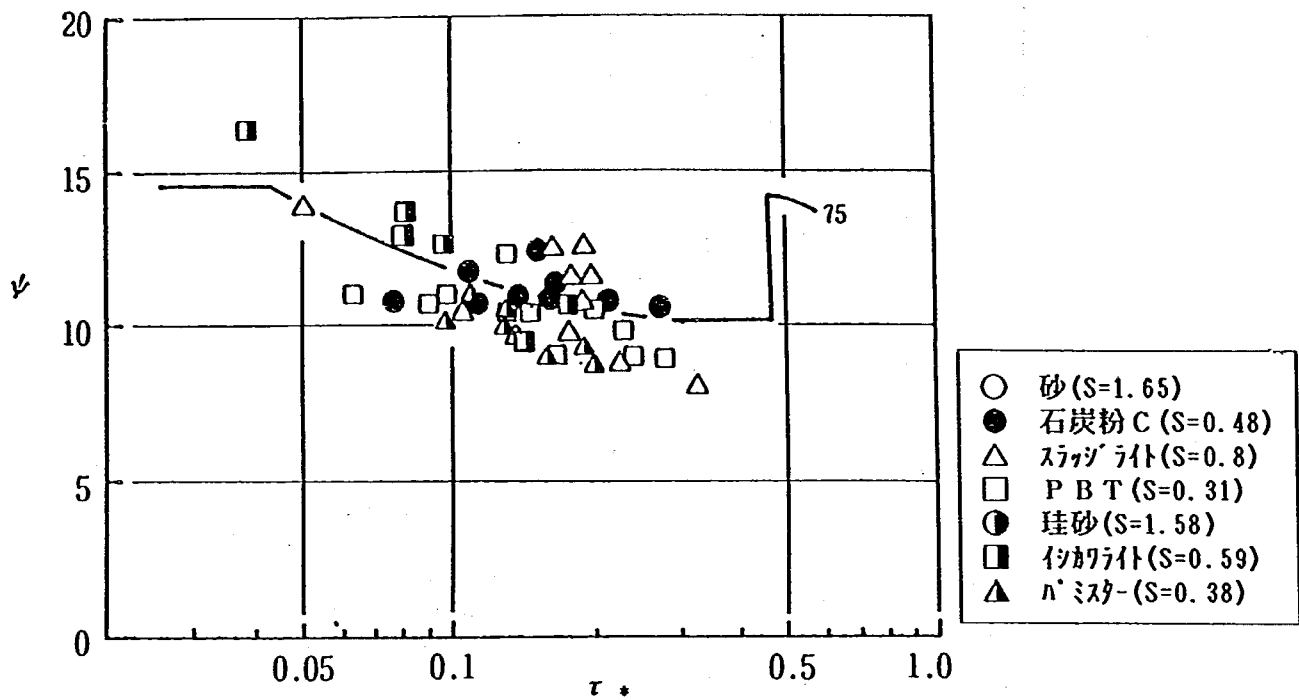


図-4.12 ψ と τ_* , H/d の関係 (軽量材料, $H/d = 100 \sim 150$ の場合)

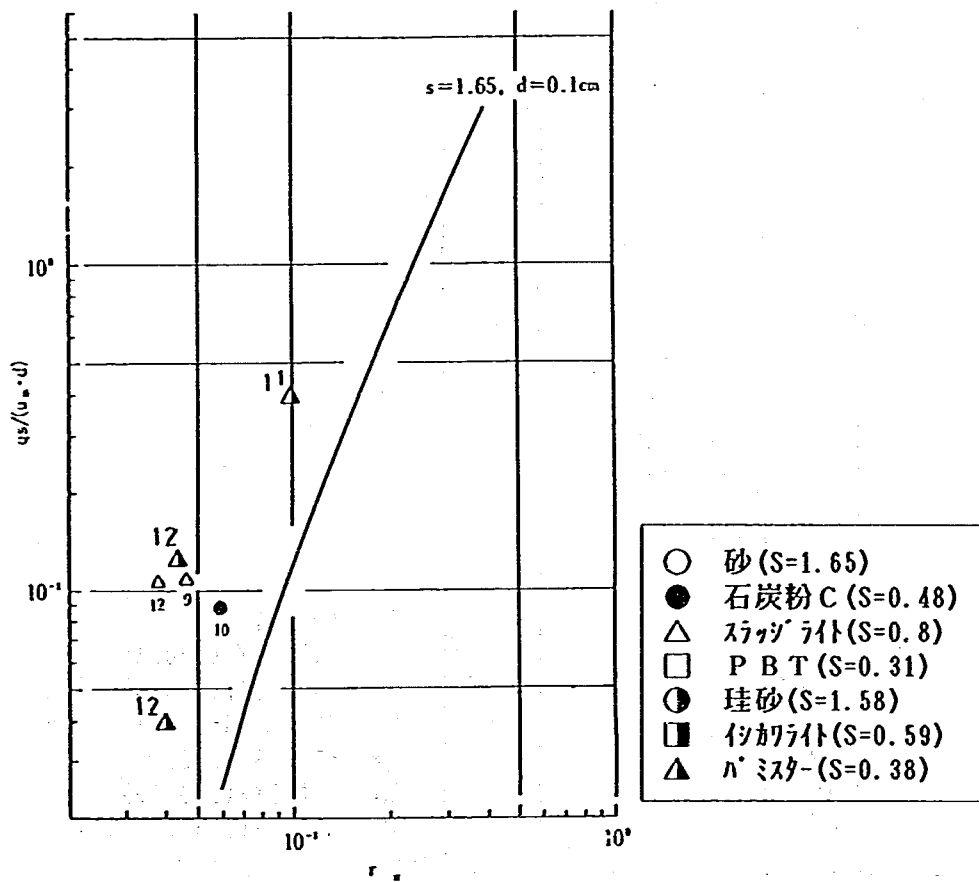


図-4.13 $q_s/(u_* \cdot d)$ と τ_* の関係 (軽量材料, $H/d = 14 \sim 20$ の場合)

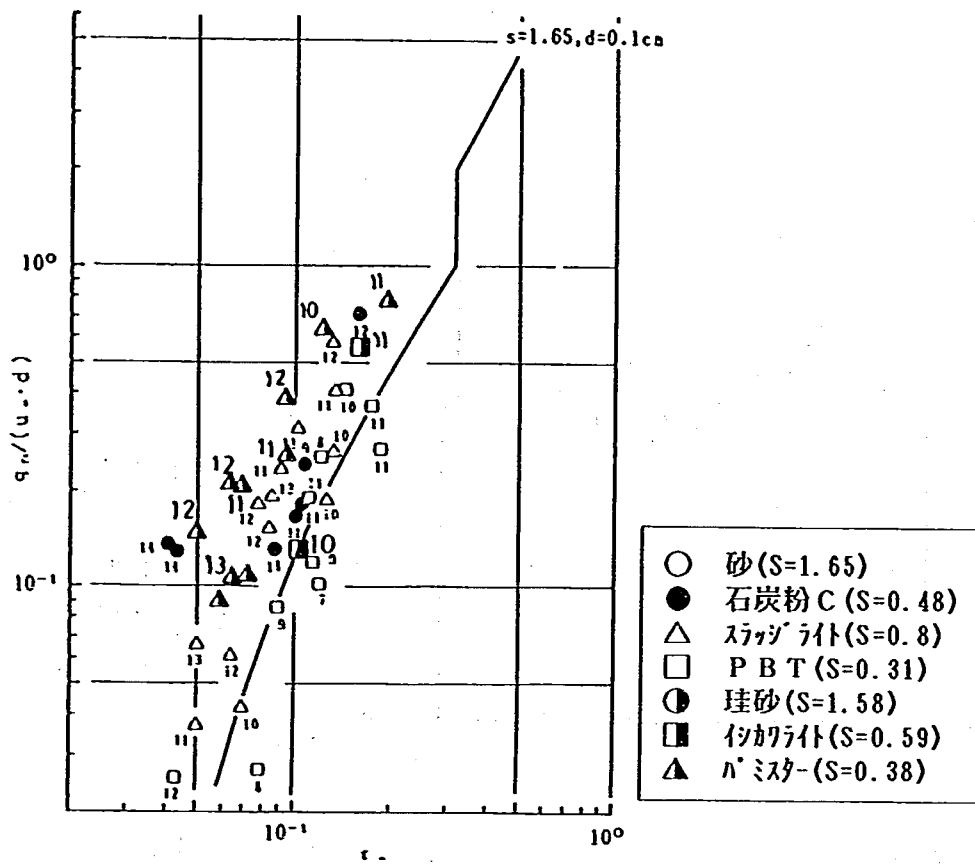


図-4.14 $q_s/(u_* d)$ と τ_* の関係 (軽量材料, $H/d = 20 \sim 50$ の場合)

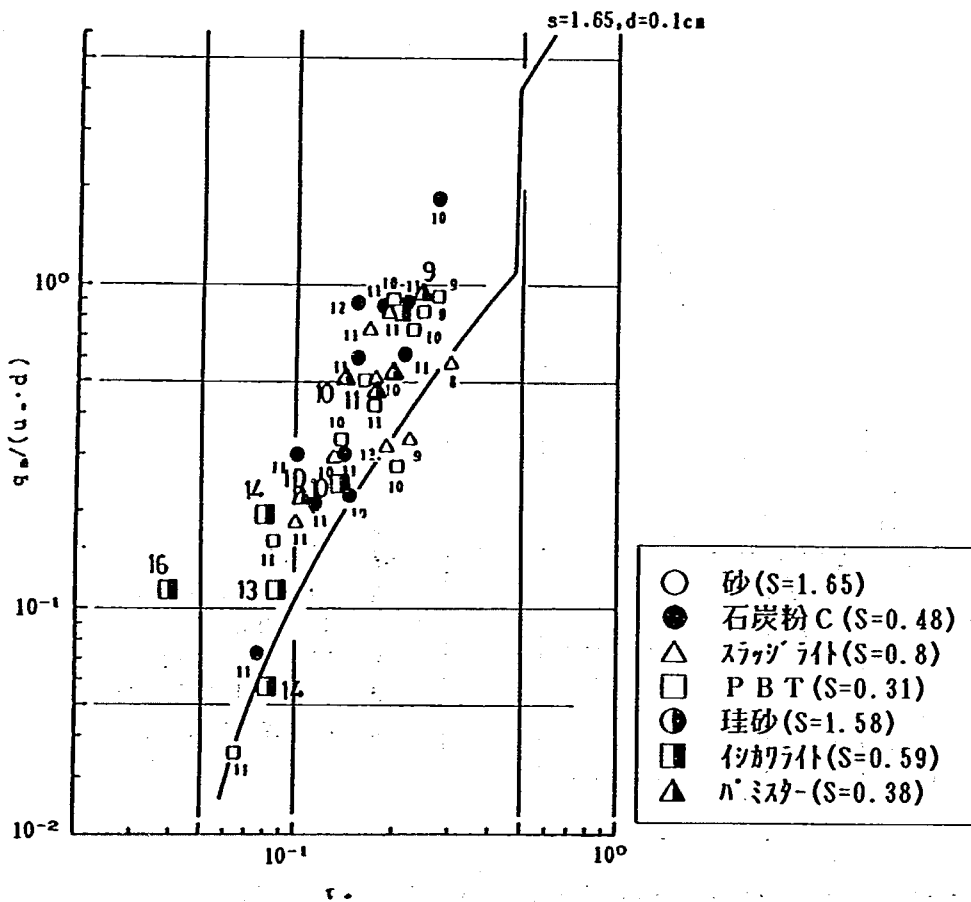


図-4.15 $q_s/(u_* d)$ と τ_* の関係 (軽量材料, $H/d = 50 \sim 100$ の場合)

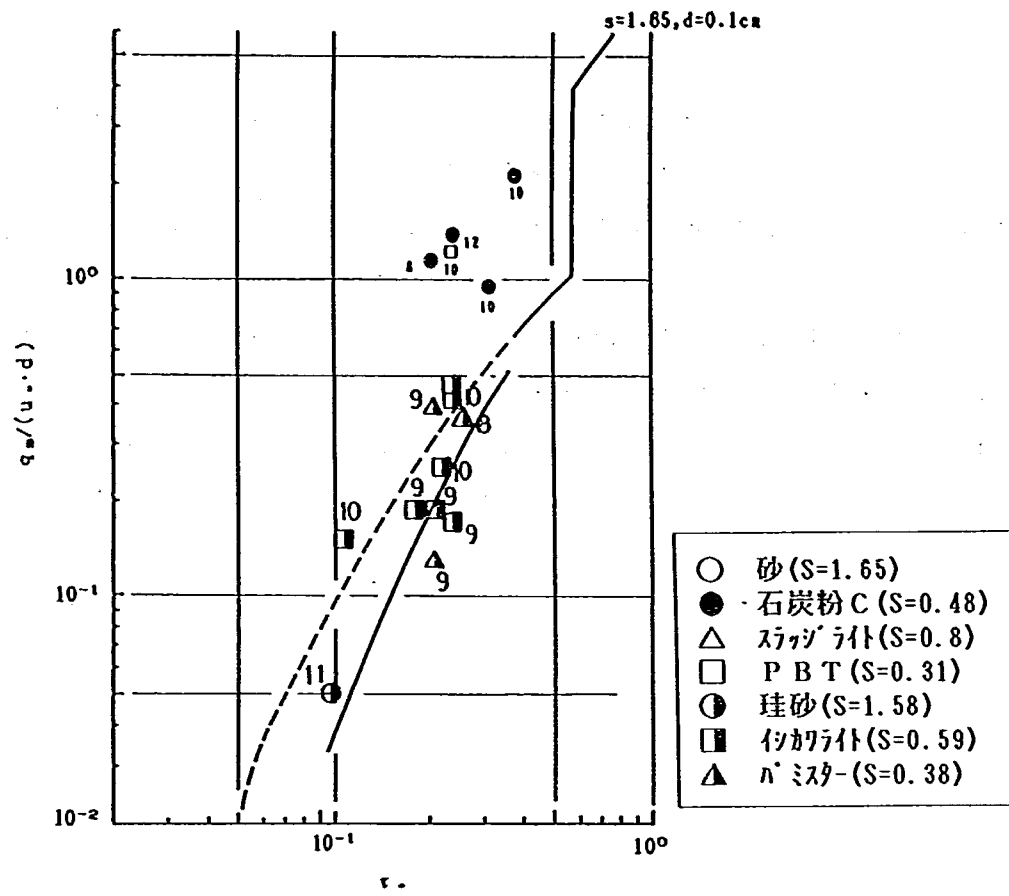


図- 4.16 $q_s/(u_* d)$ と τ_* の関係 (軽量材料, $H/d = 100 \sim 150$ の場合)

参考文献

- 1) 山本晃一, 林 正男, 1990 ; 「河川移動床模型実験材料としての軽量材料の水理特性」,
(土木研究所資料第2905号)
- 2) 田中則男, 新保 修, 1973 ; 「移動床模型実験底質材料としての石炭粉の特性について」,
(港湾技術研究所報告 Vol. 12, No 1)
- 3) Williams, G. P. ; "Flume width and water depth effects in sediment-transport experiments,
U.S. Geological Survey Professional Paper 562-H
- 4) Guy, H. P., Simons, D. B., and Richardson, E. V., 1996 ; "Summary of alluvial channel
data from flume experiments." U.S. Geological Survey Professional Paper 462-1

あ と が き

本資料は、土木研究所資料第2905号“河川移動床模型実験材料としての軽量材料の水理特性”でとりまとめられている材料以外に、新しい軽量材料を用いた移動床実験の結果を整理したものである。

本検討を通じて、河川模型実験で現地河川の粒径が小さく、軽量材料を使用する場合の基礎資料として参考となれば幸いである。また、今後もさらに軽量材料を使用した基礎実験結果のデータの蓄積が望まれる。

実験データは、四国技術事務所が中心となり行ったものであり、その貴重なデータを拝借してとりまとめた。四国技術事務所の皆様には大変ご迷惑をおかけするとともに、お世話になりました。ここに記して深く感謝するものである。

平成4年3月

付表 実験総括表

付表-1 珪砂

付表-2 イシカワライト

付表-3 パミスター

付表-4 流砂量関連報告書概要(1970年以降)

付表-1.1 実験総括表

河床材料 珪砂, 代表粒径 $d = 0.074 \text{ cm}$, 水中比重 $S = 1.58$, 沈降速度 $W_o = 8.80 \text{ cm/s}$

実験ケース	流量 Q (l/s)	水深 H (cm)	水路幅 B (cm)	平均流速 V_m (cm/s)	エネルギー 勾配 I_e	摩擦速度 U_* (cm/s)	単位幅 流砂量 q_* ($\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$)	水温 T ($^{\circ}\text{C}$)	流速係数 ψ	無次元 掃流力 τ_*	水深 粒径比 H/d	無次元 流砂量 q_s/u_*d	粒子レイ ノルズ数 Re_* ($\nu = 0.01$)	沈降速 度摩擦 速度比 W_o/U_*	水路幅 水深比 B/H	フルー ド数 F_r	河床波		$\frac{H_s}{H}$	$\frac{L_s}{H}$	$\frac{L_s}{d}$	$\frac{H_s}{L_s}$	河床形態
																	波高 H_s (cm)	波長 L_s (cm)					
A1-2-1	33.00	6.56	150.0	33.54	0.00081	2.27	0.003	—	14.8	0.045	88.6	0.016	16.8	3.877	22.9	0.418	—	—	—	—	—	—	移動ナシ
A1-2-2	72.92	13.27	"	36.63	0.00092	3.45	0.012	—	10.6	0.104	179.3	0.047	25.5	2.551	11.3	0.321	4.6	114.0	0.347	8.59	1,541	0.040	砂堆
A1-2-3	130.00	19.73	"	43.93	0.00086	4.08	0.112	—	10.8	0.145	266.6	0.370	30.2	2.157	7.6	0.316	5.2	96.0	0.264	4.87	1,297	0.054	砂堆
A1-2-4	206.85	25.63	"	53.80	0.00084	4.60	0.106	—	11.7	0.185	346.4	0.312	34.0	1.913	5.9	0.340	5.6	116.5	0.218	4.55	1,574	0.048	砂堆・砂澁が共存
A2-4-1	33.00	6.56	"	33.54	0.00081	2.27	0.003	—	14.8	0.045	88.6	0.016	16.8	3.877	22.9	0.418	—	—	—	—	—	—	移動ナシ
A2-4-2	72.92	13.27	"	36.63	0.00092	3.45	0.012	—	10.6	0.104	179.3	0.047	25.5	2.551	11.3	0.321	4.6	114.0	0.347	8.59	1,541	0.040	砂堆
A2-4-3	130.00	19.73	"	43.93	0.00086	4.08	0.112	—	10.8	0.145	266.6	0.370	30.2	2.157	7.6	0.316	5.2	96.0	0.264	4.87	1,297	0.054	砂堆
A2-4-4	206.85	25.63	"	53.80	0.00084	4.60	0.106	—	11.7	0.185	346.4	0.312	34.0	1.913	5.9	0.340	5.6	116.5	0.218	4.55	1,574	0.048	砂堆・砂澁が共存

付表-1.2 実験総括表

河床材料 珪砂, 代表粒径 $d = 0.074 \text{ cm}$, 水中比重 $S = 1.58$, 沈降速度 $W_o = 8.80 \text{ cm/s}$

実験ケース	流量 Q (l/s)	水深 H (cm)	水路幅 B (cm)	平均流速 V_m (cm/s)	エネルギー 勾配 I_e	摩擦速度 U_* (cm/s)	単位幅 流砂量 q_* ($\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$)	水温 T ($^{\circ}\text{C}$)	流速係数 ψ	無次元 掃流力 τ_*	水深 粒径比 H/d	無次元 流砂量 q_s/u_*d	粒子レイ ノルズ数 Re_* ($\nu = 0.01$)	沈降速 度摩擦 速度比 W_o/U_*	水路幅 水深比 B/H	フルー ド数 F_r	河床波		$\frac{H_s}{H}$	$\frac{L_s}{H}$	$\frac{L_s}{d}$	$\frac{H_s}{L_s}$	河床形態
																	波高 H_s (cm)	波長 L_s (cm)					
B1-2-1	127.90	20.96	150.0	40.68	0.00099	4.52	0.039	—	9.0	0.178	283.2	0.117	33.4	1.947	7.2	0.284	8.4	140.5	0.401	6.70	1,899	0.060	砂堆・砂澁が共存
B1-2-2	224.75	30.78	"	48.68	0.00093	5.30	0.054	—	9.2	0.245	415.9	0.138	39.2	1.660	4.9	0.280	9.4	137.5	0.305	4.47	1,858	0.068	砂堆・砂澁が共存
B2-2-1	72.92	13.27	"	36.63	0.00092	3.45	0.012	—	10.6	0.104	179.3	0.047	25.5	2.551	11.3	0.321	4.6	114.0	0.347	8.59	1,541	0.040	砂堆
B2-2-2	130.00	19.73	"	43.93	0.00086	4.08	0.112	—	10.8	0.145	266.6	0.370	30.2	2.157	7.6	0.316	5.2	96.0	0.264	4.87	1,297	0.054	砂堆
B3-4-1	245.48	32.02	"	51.11	0.00092	5.37	0.112	—	9.5	0.252	432.7	0.281	39.7	1.639	4.7	0.289	7.9	132.5	0.247	4.14	1,791	0.060	砂堆・砂澁が共存
B3-4-2	277.32	34.88	"	53.00	0.00092	5.61	0.144	—	9.4	0.275	471.4	0.348	41.5	1.569	4.3	0.287	6.8	135.0	0.195	3.87	1,824	0.050	砂堆・砂澁が共存
B4-4-1	206.85	25.63	"	53.80	0.00084	4.60	0.106	—	11.7	0.185	364.4	0.312	34.0	1.913	5.9	0.340	5.6	116.5	0.218	4.55	1,574	0.048	砂堆
B4-4-2	224.00	29.87	"	49.99	0.00092	5.19	0.074	—	9.6	0.235	403.6	0.194	38.4	1.696	5.0	0.292	7.6	108.5	0.254	3.63	1,466	0.070	砂堆・砂澁が共存

付表-2.1 実験総括表

河床材料 イシカワライト, 代表粒径 $d = 0.087 \text{ cm}$, 水中比重 $S = 0.59$, 沈降速度 $W_o = 5.85 \text{ cm/s}$

実験ケース	流量 Q (l/s)	水深 H (cm)	水路幅 B (cm)	平均流速 V_m (cm/s)	エネルギー 勾配 I_e	摩擦速度 U_* (cm/s)	単位幅 流砂量 q_* ($\text{cm}^3/\text{s/cm}$)	水温 T ($^{\circ}\text{C}$)	流速係数 ψ	無次元 掃流力 τ_*	水深 粒径比 H/d	無次元 流砂量 q_s/u_*d	粒子レイ ノルズ数 Re_*	沈降速 度摩擦 速度比 W_o/U_*	水路幅 水深比 B/H	フルー ド数 F_r	河床波		$\frac{H_s}{H}$	$\frac{L_s}{H}$	$\frac{L_s}{d}$	$\frac{H_s}{L_s}$	河床形態
																	波高 H_s (cm)	波長 L_s (cm)					
Y-1-1	4.80	1.90	150.0	16.84	0.00083	1.24	—	—	13.6	0.031	21.8	0.000	($\nu=0.01$) 10.8	4.718	78.9	0.390	—	—	—	—	—	—	細粒分のみが移動するが, 河床波の発生は認められず, 河床は平坦(静止状態)である。 移動ナシ
Y-1-2	7.06	2.35	"	20.03	0.00086	1.40	—	—	14.3	0.039	27.0	0.016	12.2	4.179	63.8	0.417	—	—	—	—	—	—	Y-1-1と同様である。 移動ナシ
Y-1-3	8.50	2.77	"	20.46	0.00071	1.39	—	—	14.7	0.039	31.8	0.0018	12.1	4.209	54.2	0.393	—	—	—	—	—	—	Y-1-1と同様である。 移動ナシ
Y-1-4	13.20	3.65	"	24.11	0.00070	1.59	—	—	15.2	0.050	42.0	0.025	13.8	3.679	41.1	0.403	—	—	—	—	—	—	水路横断方向にほぼ波高の様な砂堆と思われる河床波が発生。 砂堆の背面(上流側)で全河床が移動するが, 下流側は細粒分のみが移動する。
Y-1-5	15.50	4.19	"	24.66	0.00066	1.65	—	—	14.9	0.054	48.2	0.025	14.4	3.545	35.8	0.385	—	—	—	—	—	—	波長 $L_s \approx 1.8 \text{ m}$, 波高 $H_s \approx 8 \text{ cm}$ の砂堆が発生。
Y-1-6	25.30	5.89	"	28.64	0.00073	2.05	—	—	14.0	0.084	67.7	0.191	17.8	2.854	25.5	0.377	—	—	—	—	—	—	さらに波高が大きな砂堆が発生。 $L_s \approx 1.5 \text{ m}$, $H_s \approx 36 \text{ cm}$ 。 砂堆前縁下流側に発生するラセン流により, 縦断方向にくぼみ(縦筋)が発生。また, ラセン流により河床材料が舞上がり, 直下流の水面がかん欠的に盛り上がる。砂堆
Y-1-7	38.70	8.80	"	29.32	0.00051	3.02	—	—	9.7	0.182	101.1	0.452	26.3	1.937	17.0	0.316	—	—	—	—	—	—	Y-1-6とほぼ同様である。 $L_s \approx 1 \text{ m}$, $H_s \approx 39 \text{ cm}$ 。 砂堆
Y-1-8	51.00	11.75	"	28.94	0.00092	3.26	—	—	8.9	0.211	135.1	0.197	28.4	1.795	12.8	0.270	—	—	—	—	—	—	さらに波高が大きな砂堆が発生。 $L_s \approx 1 \text{ m}$, $H_s \approx 57 \text{ cm}$ 。 砂堆

付表-2.2 実験総括表 河床材料 イシカワライト, 代表粒径 $d = 0.087 \text{ cm}$, 水中比重 $S = 0.59$, 沈降速度 $W_o = 5.85 \text{ cm/s}$

実験ケース	流量 Q (l/s)	水深 H (cm)	水路幅 B (cm)	平均流速 V_m (cm/s)	エネルギー 勾配 I_e	摩擦速度 U_* (cm/s)	単位幅 流砂量 q_s ($\text{cm}^3/\text{s/cm}$)	水温 T ($^{\circ}\text{C}$)	流速係数 ψ	無次元 掃流力 τ_*	水深 粒径比 H/d	無次元 流砂量 q_s/u_*d	粒子レイ ノルズ数 Re_* ($\nu = 0.01$)	沈降速 度摩擦 速度比 W_o/U_*	水路幅 水深比 B/H	フルー ド数 F_r	河床波		$\frac{H_s}{H}$	$\frac{L_s}{H}$	$\frac{L_s}{d}$	$\frac{H_s}{L_s}$	河床形態
																	波高 H_s (cm)	波長 L_s (cm)					
K-1-1	9.40	2.86	150.0	21.91	0.00091	1.60	0.001	-	13.7	0.051	32.9	0.006	13.9	3.656	52.4	0.414	-	-	-	-	-	-	移動ナシ
K-1-2	23.71	5.54	"	28.53	0.00078	2.06	0.012	-	13.8	0.084	63.7	0.068	17.9	2.840	27.1	0.387	1.4	70.5	0.253	12.73	810	0.020	砂堆
K-1-3	34.15	8.61	"	26.44	0.00090	2.76	0.064	-	9.6	0.151	99.0	0.267	24.0	2.120	17.4	0.288	4.4	206.5	0.511	23.98	2,374	0.021	砂堆
K-1-4	48.59	11.25	"	28.79	0.00083	3.03	0.113	-	9.5	0.182	129.3	0.430	26.4	1.931	13.3	0.274	4.4	99.0	0.391	8.80	1,138	0.044	砂堆
K-1-5	2.55	1.33	"	12.78	0.00199	1.60	0.000	-	8.0	0.051	15.3	0.000	13.9	3.656	112.8	0.354	-	-	-	-	-	-	移動ナシ
K-1-6	8.93	2.60	"	22.90	0.00193	2.22	0.028	-	10.3	0.098	29.9	0.143	19.3	2.635	57.7	0.454	2.4	417.0	0.923	160.38	4,793	0.006	砂堆
K-1-7	16.80	3.88	"	28.87	0.00199	2.76	0.156	-	10.5	0.151	44.6	0.651	24.0	2.120	38.7	0.468	2.7	296.0	0.696	76.29	3,402	0.009	砂堆
K-1-8	25.62	5.13	"	33.29	0.00187	3.07	0.247	-	10.8	0.187	59.0	0.925	26.7	1.906	29.2	0.470	4.6	137.0	0.897	26.71	1,575	0.034	砂堆
K-1-9	12.12	4.04	"	20.00	0.00054	1.47	0.000	-	13.6	0.043	46.4	0.000	12.8	3.980	37.1	0.318	-	-	-	-	-	-	移動ナシ
K-1-10	36.44	8.33	"	29.16	0.00063	2.28	0.003	-	12.8	0.103	95.7	0.014	19.8	2.566	18.0	0.323	1.4	69.5	0.168	8.34	799	0.020	砂堆
K-1-11	48.42	12.23	"	26.39	0.00070	2.89	0.077	-	9.1	0.166	140.6	0.305	25.1	2.024	12.3	0.241	7.4	85.0	0.605	6.95	977	0.087	砂堆
K-1-12	72.04	16.39	"	29.30	0.00073	3.42	0.056	-	8.6	0.232	188.4	0.190	29.8	1.711	9.2	0.231	4.6	85.5	0.281	5.22	983	0.054	砂堆・砂澁が共存
K-1-13	19.32	5.65	"	22.80	0.00036	1.40	0.014	-	16.3	0.039	64.9	0.117	12.2	4.179	26.5	0.306	-	-	-	-	-	-	移動ナシ
K-1-14	50.23	10.87	"	30.81	0.00048	2.25	0.034	-	13.7	0.101	124.9	0.172	19.6	2.600	13.8	0.299	1.9	99.0	0.175	9.11	1,138	0.019	砂堆
K-1-15	77.20	16.63	"	30.95	0.00055	2.99	0.050	-	10.4	0.178	191.1	0.192	26.0	1.957	9.0	0.242	5.5	119.0	0.331	7.16	1,368	0.046	砂堆・砂澁が共存
K-1-16	103.77	21.54	"	32.12	0.00044	3.03	0.083	-	10.6	0.183	247.6	0.313	26.4	1.931	7.0	0.221	3.8	111.0	0.176	5.15	1,276	0.034	砂堆・砂澁が共存

付表-2.3 実験総括表 河床材料 イシカワライト, 代表粒径 $d = 0.087 \text{ cm}$, 水中比重 $S = 0.59$, 沈降速度 $W_o = 5.85 \text{ cm/s}$

実験ケース	流量 Q (l/s)	水深 H (cm)	水路幅 B (cm)	平均流速 V_m (cm/s)	エネルギー 勾配 I_e	摩擦速度 U_* (cm/s)	単位幅 流砂量 q_s ($\text{cm}^3/\text{s/cm}$)	水温 T ($^{\circ}\text{C}$)	流速係数 ψ	無次元 掃流力 τ_*	水深 粒径比 H/d	無次元 流砂量 q_s/u_*d	粒子レイ ノルズ数 Re_* ($\nu = 0.01$)	沈降速 度摩擦 速度比 W_o/U_*	水路幅 水深比 B/H	フルー ド数 F_r	河床波		$\frac{H_s}{H}$	$\frac{L_s}{H}$	$\frac{L_s}{d}$	$\frac{H_s}{L_s}$	河床形態
																	波高 H_s (cm)	波長 L_s (cm)					
A1-1-1	9.40	2.86	150.0	21.91	0.00091	1.60	0.001	-	13.7	0.051	32.9	0.006	13.9	5.500	52.4	0.414	-	-	-	-	-	-	—
A1-1-2	23.71	5.54	"	28.53	0.00078	2.06	0.012	-	13.8	0.084	63.7	0.068	17.9	4.272	27.1	0.387	1.4	70.5	0.253	12.73	953	0.020	砂堆
A1-1-3	34.15	8.61	"	26.44	0.00090	2.76	0.064	-	9.6	0.151	99.0	0.267	24.0	3.188	17.4	0.288	4.4	206.5	0.511	23.98	2,791	0.021	砂堆
A1-1-4	48.59	11.25	"	28.79	0.00083	3.03	0.113	-	9.5	0.182	129.3	0.430	26.4	2.904	13.3	0.274	4.4	99.0	0.391	8.80	1,338	0.044	砂堆

付表-2.4 実験総括表 河床材料 イシカワライト, 代表粒径 $d = 0.087\text{ cm}$, 水中比重 $S = 0.59$, 沈降速度 $W_o = 5.85\text{ cm/s}$

実験ケース	流量 Q (l/s)	水深 H (cm)	水路幅 B (cm)	平均流速 V_m (cm/s)	エネルギー勾配 I_e	摩擦速度 U_* (cm/s)	単位幅流砂量 q_* ($\text{cm}^3/\text{s/cm}$)	水温 T ($^{\circ}\text{C}$)	流速係数 ψ	無次元掃流力 τ_*	水深径比 H/d	無次元流砂量 q_s/u_*d	粒子レイノルズ数 Re_* ($\nu = 0.01$)	沈降速度摩擦速度比 W_o/U_*	水路幅水深比 B/H	フルード数 F_r	河床波		$\frac{H_s}{H}$	$\frac{L_s}{H}$	$\frac{L_s}{d}$	$\frac{H_s}{L_s}$	河床形態
																	波高 H_s (cm)	波長 L_s (cm)					
B1-1-1	12.08	3.45	150.0	23.34	0.00094	1.78	0.003	—	13.1	0.063	39.7	0.017	15.5	3.287	43.5	0.401	—	—	—	—	—	—	移動ナシ
B1-1-2	20.46	5.08	"	26.85	0.00085	2.06	0.021	—	13.0	0.084	58.4	0.116	17.9	2.840	29.5	0.381	1.2	147.5	0.236	29.04	1,695	0.008	砂堆
B2-1-1	12.08	3.45	"	23.34	0.00094	1.78	0.003	—	13.1	0.063	39.7	0.017	15.5	3.287	43.5	0.401	—	—	—	—	—	—	移動ナシ
B2-1-2	20.46	5.08	"	26.85	0.00085	2.06	0.021	—	13.0	0.084	58.4	0.116	17.9	2.840	29.5	0.381	1.2	147.5	0.236	29.04	1,695	0.008	砂堆

付表-3.1 実験総括表 河床材料 バミスター, 代表粒径 $d = 0.25\text{ cm}$, 水中比重 $S = 0.38$, 沈降速度 $W_o = 8.40\text{ cm/s}$

実験ケース	流量 Q (l/s)	水深 Q (cm)	水路幅 B (cm)	平均流速 V_m (cm/s)	エネルギー勾配 I_e	摩擦速度 U_* (cm/s)	単位幅流砂量 q_* ($\text{cm}^3/\text{s/cm}$)	水温 T ($^{\circ}\text{C}$)	流速係数 ψ	無次元掃流力 τ_*	水深径比 H/d	無次元流砂量 q_s/u_*d	粒子レイノルズ数 Re_* ($\nu = 0.01$)	沈降速度摩擦速度比 W_o/U_*	水路幅水深比 B/H	フルード数 F_r	河床波		$\frac{H_s}{H}$	$\frac{L_s}{H}$	$\frac{L_s}{d}$	$\frac{H_s}{L_s}$	河床形態
																	波高 H_s (cm)	波長 L_s (cm)					
Y-3-1	8.61	3.03	150.0	18.94	0.00089	1.63	—	—	11.6	0.028	12.1	0.0031	($\nu = 0.01$) 40.8	5.153	49.5	0.348	—	—	—	—	—	—	ほんのわずかの粒子(軽量分)のみ移動するが、河床波の発生は認められず、河床は平坦である。 移動ナシ
Y-3-2	14.44	4.27	"	22.54	0.00080	1.83	—	—	12.3	0.036	17.1	0.042	45.8	4.590	35.1	0.348	—	—	—	—	—	—	わずかの粒子が転動状態で移動するが、河床波の発生は認められない。(静止状態)。 移動ナシ
Y-3-3	19.04	5.11	"	24.84	0.00085	2.07	—	—	12.0	0.046	20.4	0.122	51.8	4.058	29.4	0.351	—	—	—	—	—	—	わずかの粒子が転動状態で移動するが、河床波の発生は認められない。(静止状態)。 移動ナシ
Y-3-4	26.32	6.24	"	28.12	0.00092	2.37	—	—	11.9	0.060	25.0	0.215	59.3	3.544	24.0	0.360	—	—	—	—	—	—	砂堆が発生 ($H_s \approx 12\text{ cm}$, $L_s \approx 1.1\text{ m}$)。
Y-3-5	30.91	7.34	"	28.07	0.00088	2.52	—	—	11.1	0.068	29.4	0.202	63.0	3.333	20.4	0.331	—	—	—	—	—	—	砂堆の規模が急に大きくなった。 ($H_s \approx 20\text{ cm}$, $L_s \approx 1.2\text{ m}$)。 砂堆
Y-3-6	53.49	10.54	"	33.83	0.00084	2.95	—	—	11.5	0.093	42.2	0.437	73.8	2.847	14.2	0.333	—	—	—	—	—	—	砂堆背面に縦筋が発生。 ($H_s \approx 20\text{ cm}$, $L_s \approx 1.4\text{ m}$)。 砂堆
Y-3-7	84.00	15.69	"	35.69	0.00081	3.53	—	—	10.1	0.134	62.8	0.534	88.3	2.380	9.6	0.288	—	—	—	—	—	—	縦筋に発生するラセン流による巻き上げ量が大きくなった。また、巻き上がった砂の落下距離もイシカワライト、珪砂と較べて長い(約2m)ようである。 $H_s \approx 75\text{ cm}$, $L_s \approx 1.4\text{ m}$ 。砂堆
Y-3-8	123.52	20.76	"	39.67	0.00089	4.26	—	—	9.3	0.195	83.0	0.512	106.5	1.972	7.2	0.278	—	—	—	—	—	—	$H_s \approx 110\text{ cm}$, $L_s \approx 2.0\text{ m}$ 。 砂堆

付表-3.2 実験総括表 河床材料 バミスター, 代表粒径 $d = 0.25\text{ cm}$, 水中比重 $S = 0.38$, 沈降速度 $W_0 = 8.40\text{ cm/s}$

実験ケース	流量 Q (l/s)	水深 H (cm)	水路幅 B (cm)	平均流速 V_m (cm/s)	エネルギー勾配 I_e	摩擦速度 U_* (cm/s)	単位幅流砂量 q_* ($\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$)	水温 T ($^{\circ}\text{C}$)	流速係数 ψ	無次元掃流力 τ_*	水深粒径比 H/d	無次元流砂量 q_*/u_*d	粒子レイノルズ数 R_{*+} ($\nu = 0.01$)	沈降速度摩擦速度比 W_0/U_*	水路幅水深比 B/H	フルード数 F_r	河床波		$\frac{H_s}{H}$	$\frac{L_s}{H}$	$\frac{L_s}{d}$	$\frac{H_s}{L_s}$	河床形態
																	波高 H_s (cm)	波長 L_s (cm)					
K-3-1	19.79	5.19	150.0	25.42	0.00092	2.16	0.083	-	11.8	0.050	20.8	0.154	54.0	3.889	28.9	0.356	-	-	-	-	-	-	移動ナシ
K-3-2	48.51	10.43	"	31.01	0.00084	2.93	0.206	-	10.6	0.092	41.7	0.281	73.3	2.867	14.4	0.307	3.5	94.0	0.336	9.01	376	0.037	砂堆
K-3-3	88.46	15.69	"	37.59	0.00083	3.57	0.490	-	10.5	0.137	62.8	0.548	89.3	2.353	9.6	0.303	4.4	107.0	0.280	6.82	428	0.041	砂堆
K-3-4	123.64	21.40	"	38.52	0.00092	4.39	0.732	-	8.8	0.207	85.6	0.666	109.8	1.913	7.0	0.266	4.6	161.0	0.215	7.52	644	0.029	砂堆
K-3-5	7.06	2.60	"	18.10	0.00203	2.28	0.062	-	7.9	0.056	10.4	0.108	57.0	3.684	57.7	0.359	-	-	-	-	-	-	移動ナシ
K-3-6	22.71	4.65	"	32.56	0.00202	3.04	0.340	-	10.7	0.099	18.6	0.449	76.0	2.763	32.3	0.482	1.5	130.5	0.323	28.06	522	0.012	砂堆
K-3-7	39.87	7.18	"	37.02	0.00193	3.69	0.545	-	10.0	0.146	28.7	0.592	92.3	2.276	20.9	0.441	3.0	101.0	0.418	14.07	404	0.030	砂堆
K-3-8	67.32	9.56	"	46.95	0.00192	4.24	0.825	-	11.1	0.193	38.2	0.779	106.0	1.981	15.7	0.485	3.6	82.0	0.377	8.58	328	0.044	砂堆
K-3-9	30.19	7.61	"	26.45	0.00068	2.26	0.061	-	11.7	0.055	30.4	0.109	56.5	3.717	19.7	0.306	-	-	-	-	-	-	移動ナシ
K-3-10	72.34	15.38	"	31.36	0.00060	3.01	0.171	-	10.4	0.097	61.5	0.227	75.3	2.791	9.8	0.255	5.5	106.5	0.358	6.92	426	0.052	砂堆
K-3-11	124.48	22.94	"	36.18	0.00067	3.90	0.458	-	9.3	0.163	91.8	0.470	97.5	2.154	6.5	0.241	8.3	123.5	0.362	5.38	494	0.067	砂堆
K-3-12	166.79	30.84	"	36.05	0.00061	4.30	0.421	-	8.4	0.199	123.4	0.391	107.5	1.953	4.9	0.207	11.1	116.5	0.360	3.78	466	0.095	砂堆
K-3-13	42.21	10.05	"	28.00	0.00050	2.22	0.052	-	12.6	0.053	40.2	0.094	55.5	3.784	14.9	0.282	-	-	-	-	-	-	移動ナシ
K-3-14	107.72	20.11	"	35.71	0.00054	3.26	0.167	-	11.0	0.114	80.4	0.205	81.5	2.577	7.5	0.254	6.7	118.5	0.333	5.89	474	0.057	砂堆
K-3-15	169.50	30.16	"	37.47	0.00049	3.80	0.463	-	9.9	0.155	120.6	0.488	95.0	2.211	5.0	0.218	11.9	140.0	0.395	4.64	560	0.085	砂堆
K-3-16	214.85	37.30	"	38.40	0.00047	4.13	0.149	-	9.3	0.183	149.2	0.144	103.3	2.034	4.0	0.201	11.6	163.5	0.311	4.38	654	0.071	砂堆

付表-3.3 実験総括表 河床材料 バミスター, 代表粒径 $d = 0.25\text{cm}$, 水中比重 $S = 0.38$, 沈降速度 $W_o = 8.40\text{cm/s}$

実験ケース	流量 Q (l/s)	水深 H (cm)	水路幅 B (cm)	平均流速 V_m (cm/s)	エネルギー勾配 I_e	摩擦速度 U_* (cm/s)	単位幅流砂量 q_* ($\text{cm}^3/\text{s/cm}$)	水温 T ($^{\circ}\text{C}$)	流速係数 ψ	無次元掃流力 τ_*	水深粒径比 H/d	無次元流砂量 q_*/u_*d	粒子レイノルズ数 Re_* ($\nu = 0.01$)	沈降速度摩擦速度比 W_o/U_*	水路幅水深比 B/H	フルード数 F_r	河床波		$\frac{H_s}{H}$	$\frac{L_s}{H}$	$\frac{L_s}{d}$	$\frac{H_s}{L_s}$	河床状態
																	波高 H_s (cm)	波長 L_s (cm)					
A2-3-1	19.79	5.19	150.0	25.42	0.00092	2.16	0.083	-	11.8	0.050	20.8	0.154	54.0	4.074	28.9	0.356	-	-	-	-	-	-	移動ナシ
A2-3-2	48.51	10.43	"	31.01	0.00084	2.93	0.206	-	10.6	0.092	41.7	0.281	73.3	3.003	14.4	0.307	3.5	94.0	0.336	9.01	1,270	0.037	砂堆
A2-3-3	88.46	15.69	"	37.59	0.00083	3.57	0.490	-	10.5	0.137	62.8	0.548	89.3	2.465	9.6	0.303	4.4	107.0	0.280	6.82	1,446	0.041	砂堆
A2-3-4	123.64	21.40	"	38.52	0.00092	4.39	0.732	-	8.8	0.207	85.6	0.666	109.8	2.005	7.0	0.266	4.6	161.0	0.215	7.52	2,176	0.029	砂堆

付表-3.4 実験総括表 河床材料 バミスター, 代表粒径 $d = 0.25\text{cm}$, 水中比重 $S = 0.38$, 沈降速度 $W_o = 8.40\text{cm/s}$

実験ケース	流量 Q (l/s)	水深 H (cm)	水路幅 B (cm)	平均流速 V_m (cm/s)	エネルギー勾配 I_e	摩擦速度 U_* (cm/s)	単位幅流砂量 q_* ($\text{cm}^3/\text{s/cm}$)	水温 T ($^{\circ}\text{C}$)	流速係数 ψ	無次元掃流力 τ_*	水深粒径比 H/d	無次元流砂量 q_*/u_*d	粒子レイノルズ数 Re_* ($\nu = 0.01$)	沈降速度摩擦速度比 W_o/U_*	水路幅水深比 B/H	フルード数 F_r	河床波		$\frac{H_s}{H}$	$\frac{L_s}{H}$	$\frac{L_s}{d}$	$\frac{H_s}{L_s}$	河床状態
																	波高 H_s (cm)	波長 L_s (cm)					
B3-3-1	25.09	6.42	150.0	26.05	0.00085	2.30	0.066	-	11.3	0.057	25.7	0.113	57.5	3.652	23.4	0.328	0.9	76.0	0.140	11.84	304	0.012	砂堆
B3-3-2	31.06	7.40	"	27.98	0.00087	2.52	0.071	-	11.1	0.068	29.6	0.114	63.0	3.333	20.3	0.329	1.4	96.0	0.189	12.97	384	0.015	砂堆
B4-3-1	25.09	6.42	"	26.05	0.00085	2.30	0.066	-	11.3	0.057	25.7	0.113	57.5	3.652	23.4	0.328	0.9	76.0	0.140	11.84	304	0.012	砂堆
B4-3-2	31.06	7.40	"	27.98	0.00087	2.52	0.071	-	11.1	0.068	29.6	0.114	63.0	3.333	20.3	0.329	1.4	96.0	0.189	12.97	384	0.015	砂堆

付表-4 流砂量関連報告書（1970年以降）

土木研究所において実施された土砂に関する基礎実験報告書について下記に示す。

(1/2)

資 料 名	刊行年月	著 者	内 容
建設省流砂観測資料集 土木研究所資料第625号	1971. 3	土 屋 昭 彦 星 畑 国 松 馬 場 洋 二 池 辺 豪 栗 山 真由子	21の実河川における掃流砂および浮遊砂の実測値を河川毎にとりまとめたもので、採取資料がそのまま分かるように観測測線別の流砂計算表に表している。 また、観測地点の横断形状や採取地点の河床材料の流度分布、採取砂の粒度分布を記載している。
相似律の観点から見た 移動床流れの水理 -Sedimentationに関する 基本資料集- 土木研究所資料第1059号	1975. 10	山 本 晃 一	移動床流れの相似律について検討し、U.S.G.S., 東大, Gilbert, 土研で実施した移動床実験の結果を用い河床形態の領域区分と河床波の特性・発生原因について述べている。また、従来の流砂式の問題点について明らかにし、河床波の進行速度と流砂量の関係についてまとめている。
相似律の観点から見た 移動床流れの水理(Ⅱ) -ほぼ均一粒径河床材料 を持つ実河川の場合- 土木研究所資料第1074号	1976. 2	山 本 晃 一	土木研究所資料第1059号の補足として砂礫堆の発生域と移動速度を明らかにしている。また、 H/d が大きい実河川の均一砂のデータから河床波の領域区分、河床の抵抗、流砂量を調べ実験室資料と実河川資料の統合化を行っている。
相似律の観点から見た 移動床流れの水理(Ⅲ) -実河川の移動床の水理 に関する基礎資料集- 土木研究所資料第1154号	1976. 8	山 本 晃 一	実河川データを補充し、 ψ と r_s の関係、 qs/u_*d と r_s の関係について述べている。また、 $d > 0.02\text{cm}$ のほぼ均一砂を持つ場合の移動床の水理総括として領域区分、河床の抵抗、流砂量について明らかにしている。
混合粒径砂の流送実験 資料集 土木研究所資料第1390号	1978. 3	深 見 親 雄 葛 西 俊 彦	実河川の河床縦断形状と砂礫の分級、砂礫の移動形態と分級について述べ、混合粒径砂礫の流砂量、混合粒径砂礫と小規模河床波の関係と問題点について述べている。また、1974～1976年に行った混合粒径の粒径別流砂量についてとりまとめている。
河川における土砂の移動 機構に関する研究ノート -混合粒径河床材料 の移動特性- -中規模河床波と 小規模河床波の共存- 土木研究所資料第1416号	1978. 7	山 本 晃 一 深 見 親 雄	I 編・混合粒径河床材料を持つ移動床の水理として、河床材料と河川に働く営力の関係、実河川の観測資料より見た土砂の移動特性、実験資料より見た混合粒径材料の移動特性についてとりまとめている。 II 編・中規模河床波を含めた河床形態領域区分として、砂礫堆と小規模河床波とが共存する場合の河床形態の形成領域についてとりまとめている。

資 料 名	刊行年月	著 者	内 容
河川における土砂の移動機構に関する研究ノート (Ⅱ) 土木研究所資料第1543号	1980. 2	山 本 晃 一	ほぼ均一な粒径を河床材料に持つ河川における土砂輸送量と流れの抵抗を、水深、勾配、河床材料の平均粒径の三量を用いて予測する方法について述べている。 また、混合砂の土砂動態について、実際河川資料、室内実験資料を用いてとりまとめ、河川の平面形態区分における川幅水深比の役割について述べている。
河川移動床模型実験材料としての石炭粉の移動特性と斐伊川模型への応用 土木研究所資料第1802号	1982. 3	山 本 晃 一 坂 野 章	石炭粉の移動床についての基礎的な実験結果をとりまとめ、石炭粉の流送特性として河床形状と抵抗係数、流砂量についてまとめている。その結果をいかに斐伊川移動床模型へ応用したかについて述べ、相似性についてまとめている。
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 土木研究所資料第2641号	1988. 7	福 岡 捷 二 浅 野 富 夫 林 正 男	砂河川、河口域を対象とした移動床模型実験で、模型河床材料として従来から使われている石炭粉に新しい3種（スラッジライト、PBT、ポリエチレン）を加え、それぞれの流送特性を検討し、河床に生じる河床波が流れに与える抵抗に着目した相似則について述べている。
河川移動床模型実験材料としての軽量材料の水理特性 土木研究所資料第2905号	1990. 12	山 本 晃 一 林 正 男	過去に実施された軽量材料を用いた移動床に関する基礎実験結果を相似律の観点から整理し、通常の水中比重 $S = 1.65$ の材料との差異を明らかにし、河川移動床模型実験を行う場合の縮尺決定に利用できるようにとりまとめている。
粗砂・細砂を河床材料に持つ河川の河床波・粗度・流砂量 土木研究所資料第2944号	1991. 3	山 本 晃 一 西 尾 正 博	粗粗砂 ($d = 1.64 \text{ mm}$) を用いた大規模な二次元実験を行い、$R_e = 20$ 以上で H/d が大きい場合の河床形態について述べるとともに、既往実験の実験結果、実河川の観測データを解析し、粗砂・細砂を河床材料に持つ河川の河床形態の変化過程を予測している。

河川移動床模型実験材料として
の軽量材料の水理特性〔Ⅱ〕

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第3111号
平成4年3月(1992)

山本晃一，佐々木克也

要 旨

本報告書は，土木研究所資料第2905号“河川移動床模型実験としての軽量河床材料の水理特性”にとりまとめられている材料以外に，新しい3種の軽量材料を用いて実施した基礎実験結果を整理し，軽量材料毎の流砂特性をとりまとめたものである。

キーワード：軽量材料，流速係数，流砂量



郵便はがき

切手をは
て下さい。

305-□□

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
行

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第 3111 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3111号