

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

平成 2 年12月

建設省土木研究所
河川部河川研究室

「Copyright © (1990) 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」

正 誤 表

以下の図において実線の注釈が抜けていました。

ページ	図番号	注 釈	ページ	図番号	注 釈	ページ	図番号	注 釈
P.68	図-5.6	$s = 1.65$ $d = 0.1\text{cm}$	P.69	図-5.7	$s = 1.65$ $d = 0.1\text{cm}$	P.71	図-5.10	$s = 1.65$ $d = 0.1\text{cm}$
P.74	図-5.13 石炭粉 A	$s = 1.65$ $d = 0.03\text{cm}$	P.74	図-5.13 石炭粉 B	$s = 1.65$ $d = 0.03\text{cm}$	P.74	図-5.13 石炭粉 C	$s = 1.65$ $d = 0.1\text{cm}$
P.84	図-5.21	$s = 1.65$ $d = 0.1\text{cm}$	P.85	図-5.23	$s = 1.65$ $d = 0.1\text{cm}$	P.85	図-5.24	$s = 1.65$ $d = 0.1\text{cm}$
P.86	図-5.25	$s = 1.65$ $d = 0.1\text{cm}$	P.86	図-5.26	$s = 1.65$ $d = 0.1\text{cm}$	P.92	図-5.28	$s = 1.65$ $d = 0.1\text{cm}$
P.92	図-5.29	$s = 1.65$ $d = 0.1\text{cm}$	P.93	図-5.30	$s = 1.65$ $d = 0.1\text{cm}$	P.106	図-6.7	$s = 1.65$ $d = 0.1\text{cm}$
P.106	図-6.8	$s = 1.65$ $d = 0.1\text{cm}$	P.107	図-6.9	$s = 1.65$ $d = 0.1\text{cm}$	P.107	図-6.10	$s = 1.65$ $d = 0.1\text{cm}$

文章について以下の点を修正します。

P.4～P.11

P.103 図-6.2

張り付けで対処しました。

P.144 上から7行目

誤

本検討を通して、砂澁と砂堆の領域区分の明確化、アッパーレジュームへの移行時の水理量、比重への差異が…

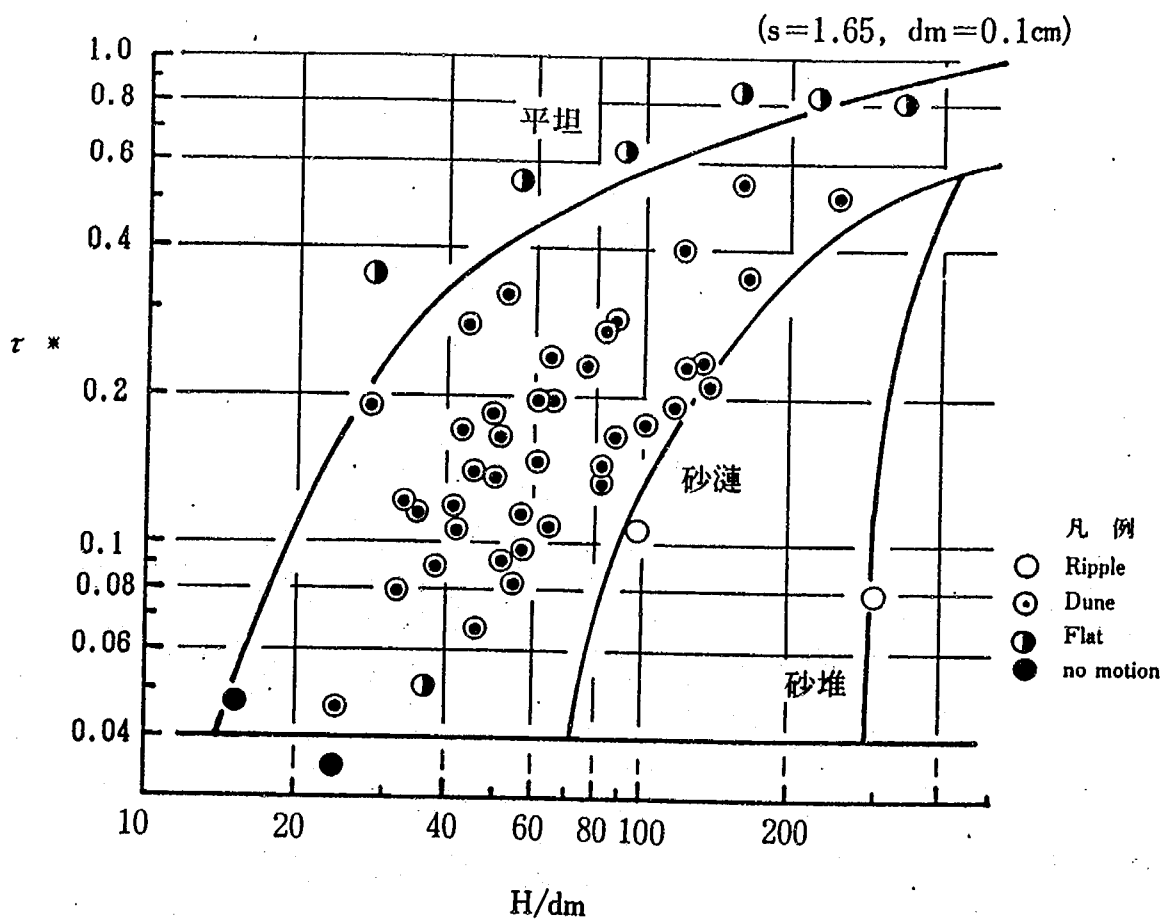
正

本検討を通して、砂澁と砂堆の領域区分、アッパーレジュームへの移行時の水理量、比重の差異が…

P.86 図-5.25および図-5.26で、縦軸の数値で 10^0 の位置がずれています。

P.91 図-5.27 河床波の領域区分図 (PBTの場合) → 正しい図面を以下に示します。
において、縦軸の数値が間違っている。

P.110 図-6.13および図-6.14で縦軸の数値、 10^{-2} の位置がずれています、消してください。



河川移動床模型実験材料としての 軽量材料の水理特性

河川研究室 室 長 山本 晃一
研究員 林 正男

要 旨

本報告書は、土木研究所において実施された軽量材料を用いた移動床に関する基礎実験資料を相似律の観点から整理し、通常の水中比重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したものである。

キーワード：軽量材料，流速係数，流砂量，相似律

は　じ　め　に

本資料は、建設省土木研究所において実施された軽量材料を用いた移動床に関する基礎実験資料を相似律の観点から再整理したものであり、また基礎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、土木研究所資料第2803号“河川模型実験の手引”の姉妹編となるものであり、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してある。

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 移動床の相似律	13
2.1 移動床流れを規定する物理量とその無次元化	13
2.2 流れの相似律	14
2.3 移動床流れの相似律	17
第3章 $s = 1.65$ のほぼ均一砂を持つ移動床の水理特性	21
3.1 河床波の分類とその特徴	21
3.2 流れの抵抗と河床形態	23
3.3 流砂量と河床形態	31
3.4 粒子レイノルズ数の影響	39
第4章 軽量材料の材料特性	47
4.1 粒径	47
4.2 比重	49
4.3 沈降速度	50
4.4 水中安息角	52
4.5 水中空隙率	52
4.6 まとめ	54
第5章 軽量材料の移動床の水理	56
5.1 石炭粉を用いた移動床の水理	56
5.1.1 実験ケースと実験条件	56
5.1.2 各ケースの河床状況と観測結果	56
5.1.3 まとめ	64
5.2 スラッジライトを用いた移動床の水理	80
5.2.1 実験ケースと実験条件	80
5.2.2 各ケースの河床状況と観測結果	81

5.2.3	まとめ	81
5.3	PBTを用いた移動床の水理	87
5.3.1	実験ケースと実験条件	87
5.3.2	各ケースの河床状況と観測結果	88
5.3.3	まとめ	90
5.4	ポリスチレンを用いた移動床の水理	94
5.4.1	実験ケースと実験条件	94
5.4.2	各ケースの河床状況と観測結果	94
5.4.3	まとめ	95
第6章	比重の違いが移動床の水理に及ぼす影響	100
6.1	小規模河床波の領域区分に及ぼす影響	100
6.2	河床波のスケールに及ぼす影響	102
6.3	流速係数 ψ に及ぼす影響	102
6.4	流砂量に及ぼす影響	108
6.5	砂州に及ぼす影響	108
Appendix A	河口砂州のフラッシュ実験から見た Upper Regime での流砂量に及ぼす s の効果	111
Appendix B	河床形態に及ぼす s および τ_* の差異による影響に関する検討	118
あとがき		144
付表	実験総括表	145
付表-1	石炭粉A	147
付表-2	石炭粉B	149
付表-3	石炭粉C	151
付表-4	スラッジライトA	155
付表-5	スラッジライトB	157
付表-6	PBT	159
付表-7	ポリスチレン	161

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
R_{c*}	；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 $= \sqrt{gHI_e}$
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_o	；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 $= u_*^2 / \text{sgd}_m$
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

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、実河道と、河道模型において検討の対象としている現象が相似にならなければならない。実河川の河床材料が大きく、模型の縮尺に合わせて河床材料を選定しても、その粒径が0.6mm以上であれば、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、実河川の河床材料が小さい場合、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すべてを相似に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、軽量材料を用いたりして実験を行う。しかし軽量材料の流送特性が十分に把握されておらず、模型実験で生じた現象をどの程度信頼すべきか、あるいは、どのような軽量材料を用いたら良いかなど河川移動床模型実験の問題点として残っている。そこで過去に土木研究所で行われた軽量材料を用いた基礎実験結果を収集、再整理し、通常の河川の河床材料である水中比重 $s = 1.65$ の場合の土砂の流送特性と比較し、また必要に応じて補足実験を行ってその相似性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のデータソースと実験者は、表-1.1に示すとおりである。

実験資料は、川幅水深比 B/H が3以上のものについて、流量 Q 、水深 H 、水路幅 B 、平均流速 V_m 、エネルギー勾配 I_0 、摩擦速度 u_* 、単位幅流砂量、河床波の波長 L_s 、波高 H_s 、水温 T 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。とりまとめた結果は巻末に付表として示している。

なお、摩擦係数 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。³⁾

表-1.1 本研究に使用されたデータソース

材 料	粒 径 cm	水中比重 s	担 当 者	実 験 年	文 献 名
石炭粉A	0.027	0.5	山本・坂野	1975	1)
石炭粉B	0.03	0.58	〃	1981	1)
石炭粉B'	0.032	0.50	山本・高橋	1988	
石炭粉C	0.1	0.58	福岡・浅野・林	1986~1987	2)
スラッジライトA	0.105	0.8	〃	〃	2)
スラッジライトB	0.12	0.8	〃	〃	2)
PBT	0.10	0.31	〃	〃	2)
ポリスチレン	0.151	0.05	〃	〃	2)
PBT	0.10	0.31	山本・林	1990	

1.3 実験施設と実験方法

1.3.1 石炭粉A, B'およびB'の場合

(1) 実験施設

• 石炭粉A

実験は、図-1.1の実験水路概略図に示した長さ 25m, 幅 0.6m の片面ガラス張水路において行った。流量は60°三角堰を用いて計算し、直下流の実験水路との取付け部は、整流のためのプールとした。水路上流端には、流れが片寄らないようにサンフレックス(フィルム層)を置いた。水路下流端ゲートより 2.5m 上流側には、石炭粉流出防止用として水路底から20cmの高さの固定床部を製作した。

• 石炭粉B

実験は、図-1.2に示す長さ 30m, 幅 0.6m の二次元両面ガラス張可傾水路で行った。流量は水路上流の量水槽に取り付けた直角三角堰を用いて計算し与えた。越流水深と流量の関係は、沼知、黒川、淵沢公式によって評価した。下流端の 3 m に高さ20cmの固定床部を作り、石炭粉は20cmの厚さに水路に敷きならした。なお下流には水位制御のための観音開きのゲートが取り付けられている。

• 石炭粉B'

実験は、石炭粉Bと同一の水路を用いて行った。下流端の 1 m に砂止め工を設置して固定床となっている。

(2) 実験方法

• 石炭粉A

実験は $d_m = 0.027\text{cm}$ と推測される石炭粉を、図-1.1に示す水路に、下流端の固定床部の所での石炭粉の厚さが20cmになるように、所定の勾配に敷きならして行った。河床の整形の際は、水路横断方向に高低差が生じないように、また場所的な締固めや湿潤の度合にも差が生じないように整形前に石炭粉を十分に湿らせ、均一に締固めるようにした。

流量は上流の三角堰からの越流水深を、所定の値に合わせることで与えた。この場合、流量に比較して量水槽の容量が大きいため、水位の安定に多少の時間を要するので、最初流す予定の流量に対する越流水深に合わせて、ポイントゲージを設定しておき、大略それに合うように流量調節用のバルブを開いた。そして水位が安定した時にポイントゲージをその水面に設定し直し、堰からの越流水深を計測してそれを通水流量とした。

下流端ゲートの操作は、水路下流で等流水深になるよう操作を行ったが、実際には完全な等流とはならなかった。

採砂は河床波が十分に発達し、流送土砂が平衡に達したと思われるころを見計って、水路下流端で流砂量に合わせて任意の時間布袋に採砂した。採砂終了後に図-1.1に図示した位置でポイントゲージを用いて水位測定を行った。以上の二項目の測定後、下流端ゲートを締め、上流量水槽に取り付いている流量調節用バルブを閉じた。この際河床波の形状に変化をきたさないように十分に注意した。その後水位測定と同位置で河床を 5 cm 間隔で横断測定を行った。

布袋に入った流砂量は次のようにして求めた。

1000cc のメスシリンダー内に採砂した石炭粉 (1000cm³以下) を入れ、その後水を補給し、ちょうど水面が 1000cc の位置にくるようにした。この際には気泡が入らないように気をつけた。メスシリンダー内にある石炭粉の体積は、

$$V_c + V_w = V_T = 1000 \text{ cm}^3 \quad \dots\dots\dots (1-1)$$

$$\rho_c V_c + \rho_w V_w = W \quad \dots\dots\dots (1-2)$$

(1-1) 式を (1-2) 式に代入して

$$\rho_c V_c + \rho_w (V_w - V_c) = W \quad \dots\dots\dots (1-3)$$

(1-3) 式より

$$V_c = \frac{W - \rho_w V_T}{\rho_c - \rho_w} \quad \dots\dots\dots (1-4)$$

ここで V_c はメスシリンダー内の石炭粉の体積、 V_w はメスシリンダー内の水の体積、 V_T は全体の体積、 ρ_c は石炭粉の密度、 ρ_w は水の密度、 W はメスシリンダーに入った水と石炭粉の重量である。

$\rho_c \approx 1.5 \text{ g/cm}^3$, $\rho_w \approx 1.0 \text{ g/cm}^3$ であるので、

(1-4) 式は

$$V_c = \frac{W - 1000}{0.5} \quad \dots\dots\dots (1-5)$$

となり、つまりメスシリンダー内の水と石炭粉の重さを計ることによって求めることができる。

● 石炭粉 B

実験は、図-1.2に示す水路に、 $d_m \approx 0.03 \text{ cm}$ の石炭粉を、厚さ 20cm で敷ならして行った。河床の整形方法は、水路両側に水路底より 20cm 高の整形面の線を引き、それを整形時の目安の高さとした。なお水路内に石炭粉搬入直後は締め固めが不十分、不均一のため、均一になるように、踏み固め、また水締めを行った。なお水路下流端には砂止めを設置したが、その砂止めで乱れが生じ異常洗掘が起こらないように上流側は、45度の傾斜をつけた。

実験の手順は次のごとくである。

- i) 河床整形
- ii) 初期河床高測定
- iii) 下流から給水して水路に湛水
- iv) 水位計の検定、検定方法は後述する。
- v) 実験開始、同時に固定床部より 8m の地点で河床高の時間変化を、計測技研製砂面測定器で測定する。
- vi) 等流水深となるように下流端ゲートの調節
- vii) 河床波が発達した所で、河床波の移動速度 V_s 、波長 L_s 、波高 H_s の測定と水位および流砂量測定。
河床が flat の場合は、上流での河床低下が実験測定範囲内に波及しないうちに測定を終了させた。
- viii) 測定終了後に下流ゲートを徐々に閉じ、同時に上流のバルブを閉め、河床を乱さないようにし、徐々に排水する。

ix) 排水後、縦断方向50cm間隔、横断方向10cm間隔に河床高測定を行う。

測定方法は次のごとくである。

①水位測定

水位は触針式水位計を図-1.2に示すように5m間隔に4台設置した。水位計の絶対高の設定は、下流端ゲートを閉め漏水がないようバテを詰め下流より給水して満水し、水の動きが止まった時に、その水位をポイントゲージとレベルを使って測定した。そしてその時の触針式水位計のロッドの下がりをつプリンターに記録させ、水位計の相対位置関係を求めた。

②河床高測定

河床高の測定は、図-1.2に示す測線0mから測線15m（下流端より6m～21m）の範囲で行った。その方法は、水路縦断方向5.0m間隔に水平に水系を張り、そこから河床までの高さを1mm目盛のスケールで横断方向に10cm間隔に測定した。さらに測線5mに砂面測定器を設置して、通水開始と同時に10秒間隔で計器を作動させ、定点での河床波発達の時間変化、河床波の波高を求めた。

③写真撮影

河床波の形状を調べるために、通水中側面より写真を撮影した。また通水後も河床の状態を写真撮影した。

④流砂量測定

流砂量は水路下流端に200メッシュ（0.074mm）の網で作った袋を用いて、浮遊砂と掃流砂と同時に採取した。採砂時間は10～30秒で流量によって時間を変え、1ケースにつき3回採取した。

流砂量の体積は石炭粉Aと同様な方法によって求めた。ただし、今回は、 $\rho_c = 1.58$ とした。

・石炭粉B'

実験は、図-1.2に示す水路に $d_m = 0.032\text{cm}$ の石炭粉を厚さ10cmで敷均して行った。実験の手順は以下のとおりである。

i) 石炭粉搬入、整形

調合した石炭粉は、搬入の際粒径が片寄らないよう十分注意し、搬入後は水締めを行いコテで仕上げた。

ii) 実験条件設定

量水槽（刃形堰）からの越流水深及び下流水深の設定を行った。なお、下流水深の設定位置は、砂止め工上流1.0mとした。

iii) 湛水

初期の河床形状が変化しない程度に、水路上、下流端より通水し、水路内に水を溜めた。

iv) 実験開始

流量と下流端水深を同時に調節し、設定した条件に合った時点を実験開始とした。

v) 河床波安定

水路の全区間で河床波が発生し、かつ規模（波高、波長等）が同程度となるという河床状況を河床波安定と定義した。

vi) 水位測定

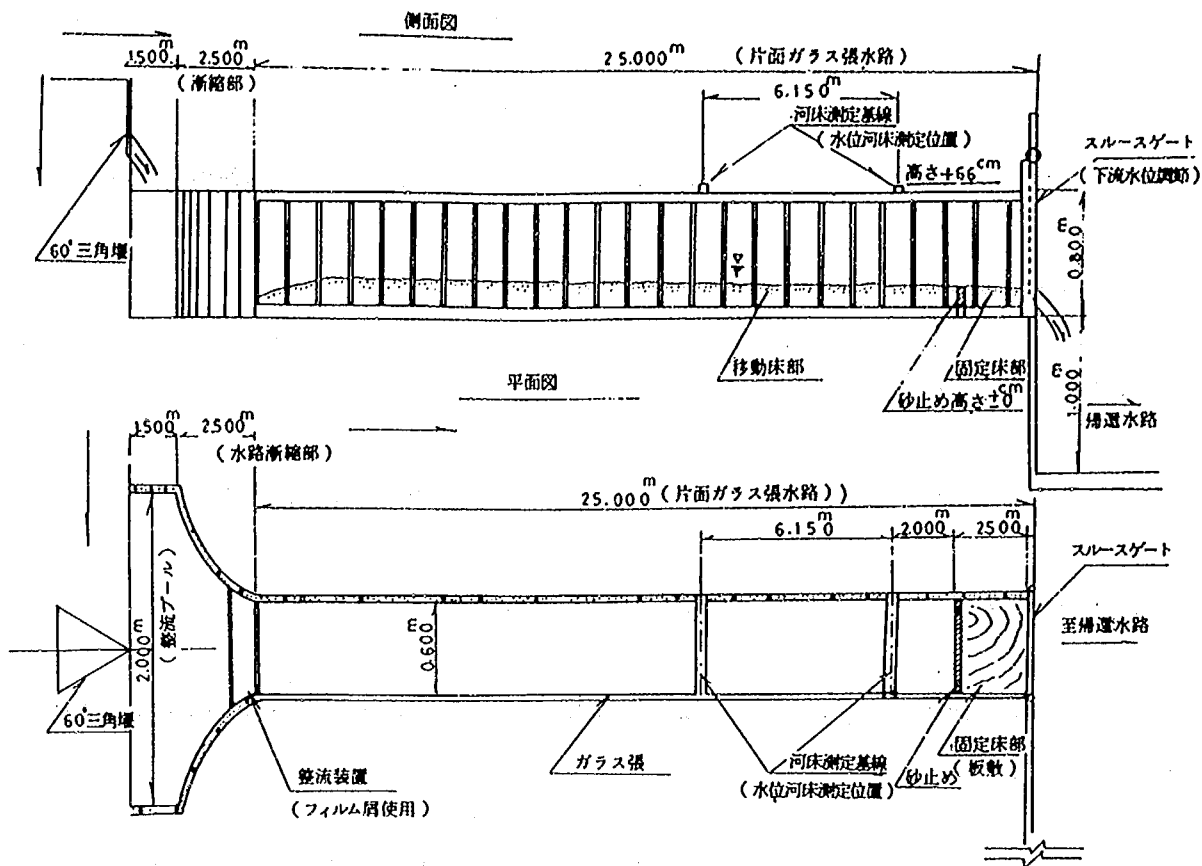


図-1.1 実験水路概略図¹⁾

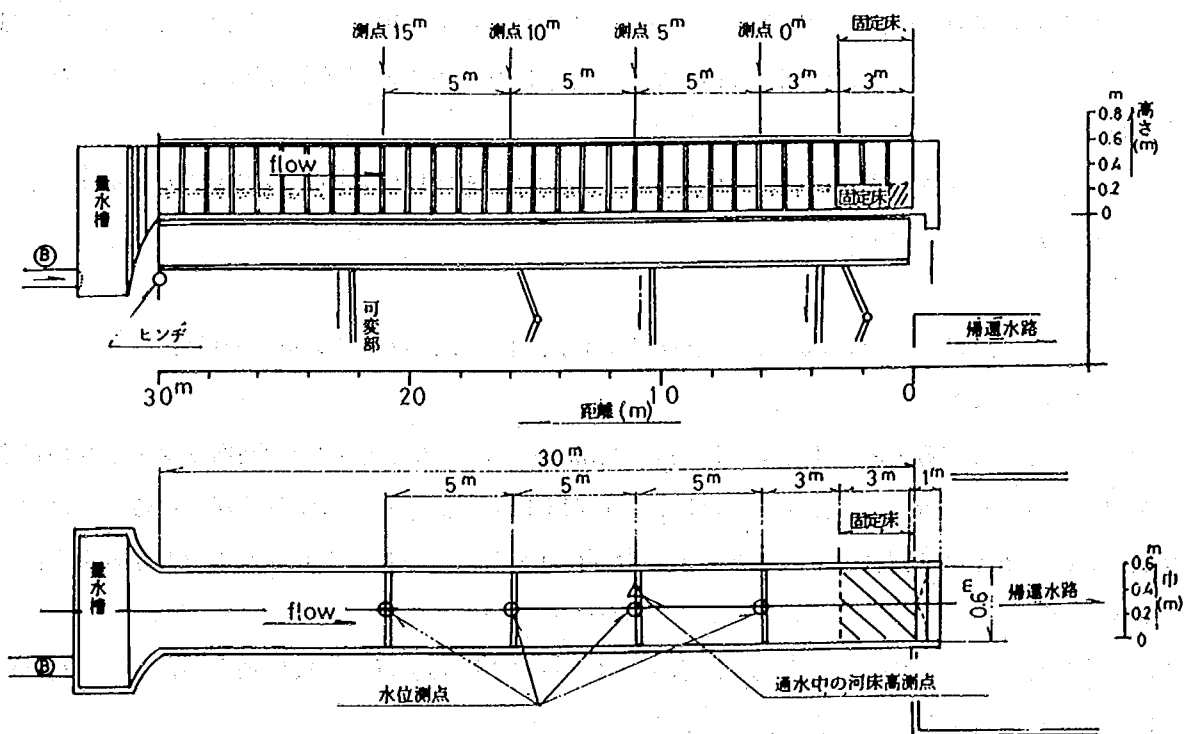


図-1.2 実験水路概要図¹⁾

v)の条件が満たされた時点で測定を開始した。測定はポイントゲージの目盛りをレベルで読みとる方法とし、砂止め工から2.0m間隔で22mまでの区間で実施した。

vii)流砂量測定

v)の条件が満たされた時点で水路下流端でプランクトンネットを用いて採取を行った。採取時間は流砂量を見計らって15秒～30秒の間で3回採取し、体積は石炭粉Aと同様な方法によって求めた。

viii)河床高測定

実験が終了し、水路内の水が引いた後実施した。測定は、水路壁天端から河床までの下がりをも1mm読みのスケールにて読み取った。

(3) 実験方法上の問題点

本実験の方法には次のような問題点を含んでいる。

i) 流砂量の非平衡性

流砂量と種々の水理量の関係を実験的に調べる場合、水路における各地点で流砂量が同一であることが好ましいが、本実験の場合、上流から給砂を行っておらず、水路内で流砂の連続性は成立していない。そのため、測定部上流にかなり長い区間石炭粉を敷きつめ、ここを流砂の補給区間としたが問題は残ろう。また河床波の発達状態も筆者らの主観的な判断にまかされ十分に発達した後に測定を行ったかどうかの合理的な判定がなされたわけではない。

ii) 流れの不等流性

水面勾配と河床勾配は、必ずしも近いものではなく不等流の資料が多い。これは測定部の平均的な水理量で流砂量を評価する場合、誤差を生ずる結果となる。

iii) 採砂時間

水路床に河床波が発生すると、流砂量は波動性を帯びる。この波動性を平均値するほど十分に長い時間採砂時間を取ったといえず、問題が残った。

iv) 水面勾配測定^⑧の誤差

水面勾配が1/1000より小さいと、測定区間の長さが短すぎ、水面勾配測定の精度が落ちた。

1.3.2 1986～1989年に行った石炭粉C、スラッジライト、PBT、ポリスチレンの場合²⁾

(1) 実験施設と実験方法

材料の流送特性を把握する実験の主なものは、図-1.3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。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、軽量材料を厚さ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。

①水位測定

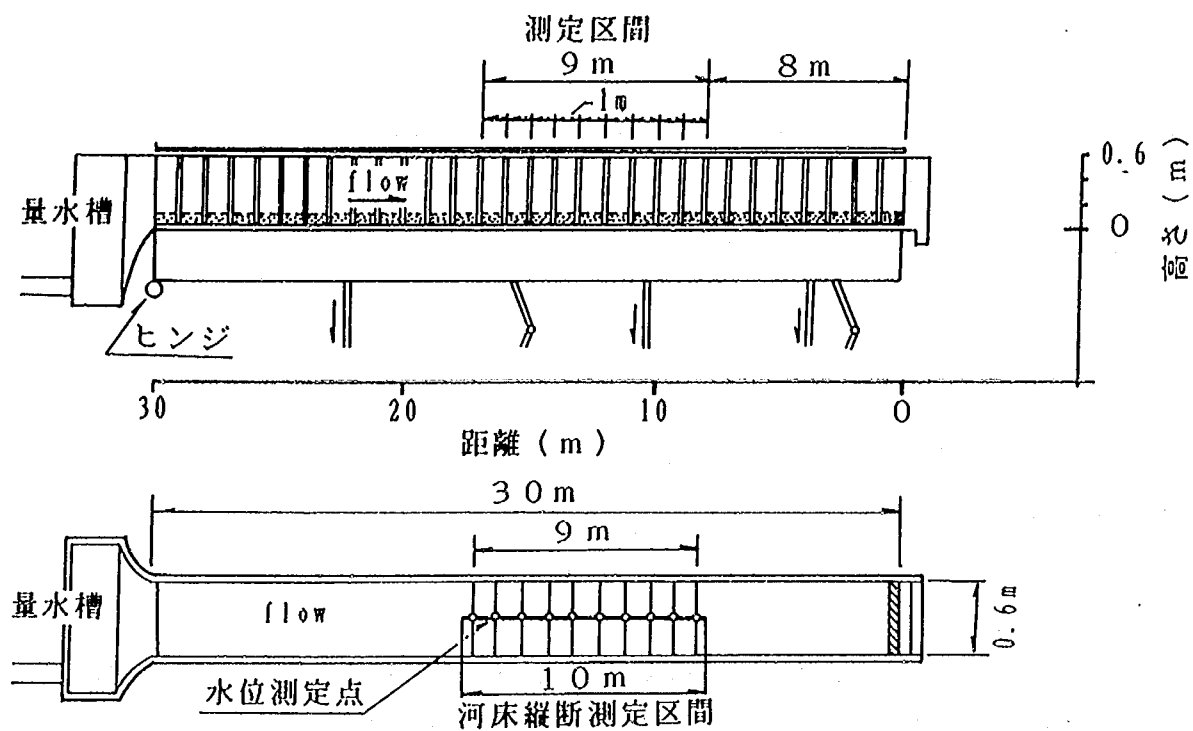


図-1.3 実験水路A概要図 ²⁾

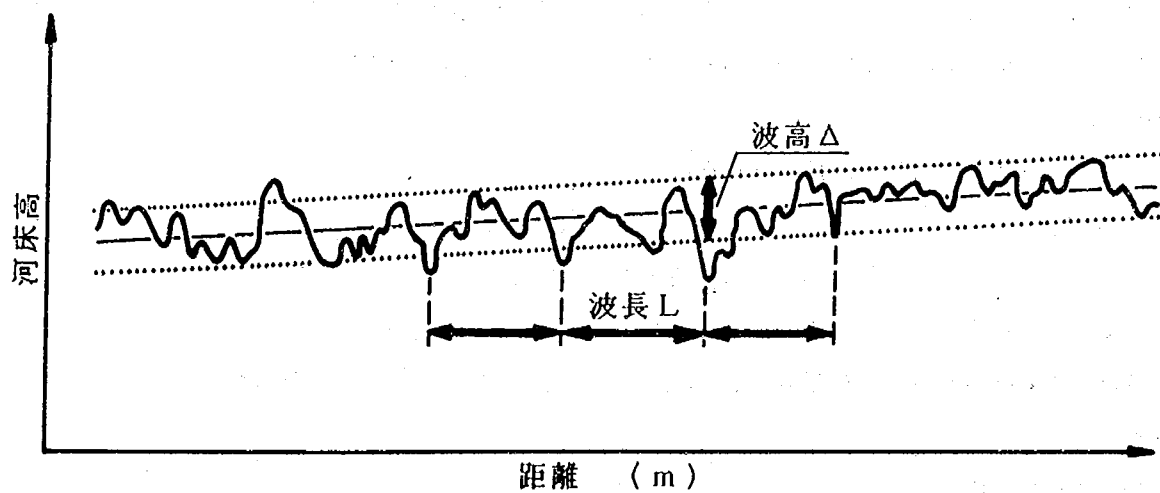


図-1.4 河床波高定義図

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-1.3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。

②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 3 cm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系からの深さを 1 mm目盛りの定規により読み取った。河床縦断も測定間隔 3 cm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。

③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。1 回の測定では 10 l 程度の流砂を回収した。

④給砂条件

給砂は、予備実験において給砂せずに実験を行って流砂量を測定し、本実験では、予備実験の流砂量と掃流力の関係に対応する流砂を給砂した。その後、流砂量が $n = 0.015$ とした場合の土研式とほぼ一致したので、設定水理条件に見合う流砂量を土研式を用いて計算し、それを給砂した。

⑤河床波の波高、波長測定

河床波の波高、波長は、水路中央部の河床高測定結果より、図-1.4のように定義するものとした。

さらに図-1.5に示す構造物水路を用いて水路幅を変えた場合 (35, 100, 120cm) の流砂実験も行った。水路幅は、水路内に木製水路を図-1.6のように製作して調整した。測定は次のように実施した。

⑥水位測定

測定は流れの状態が安定しているであろう水路中央付近 9 m を対象区間として、図-1.5に示す10断面で行った。水位の測定法は、幅 60cm の両面ガラス張の可変勾配水路と同様である。

⑦河床高測定

幅 60cm の水路を用いたのと同様の測定を行った。

⑧流砂量測定

構造物水路の場合は、水路の形状から水路末端において採取網を用いて採取できないので、水路末端から下流端ゲートの間にたまった土砂量を実験後全量採取し、その体積を通水時間 (約 1 時間)、水路幅で除して単位時間単位幅当りの流砂量 q_s を評価した。なお、通水初期は平坦河床となっている。

⑨給砂条件

幅 60cm の水路を用いたのと同様である。

⑩河床波の波高、波長測定

幅 60cm の水路の場合と同様である。

(2) 実験方法上の問題点

本実験の方法は次のような問題を含んでいる。

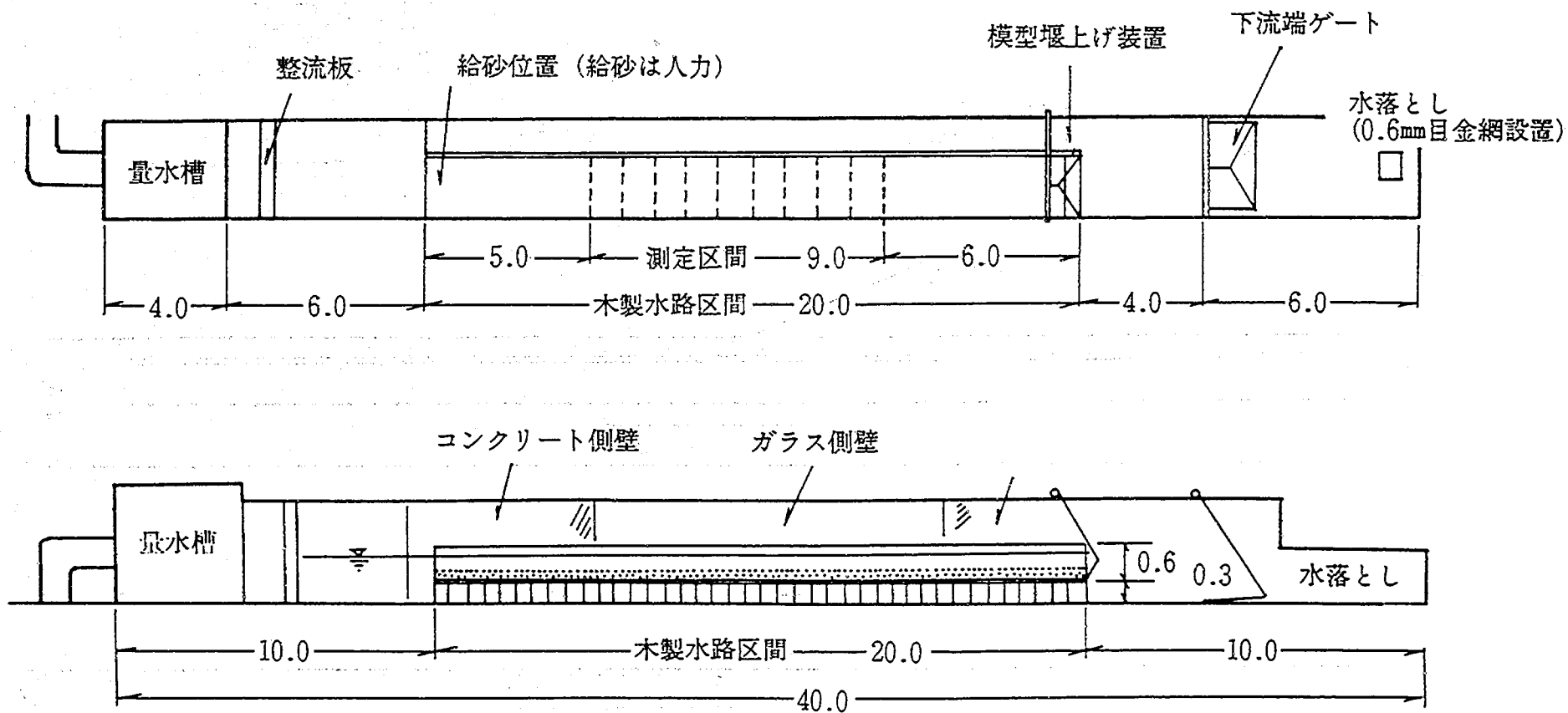


図-1.5 実験水路概要図 (単位m)

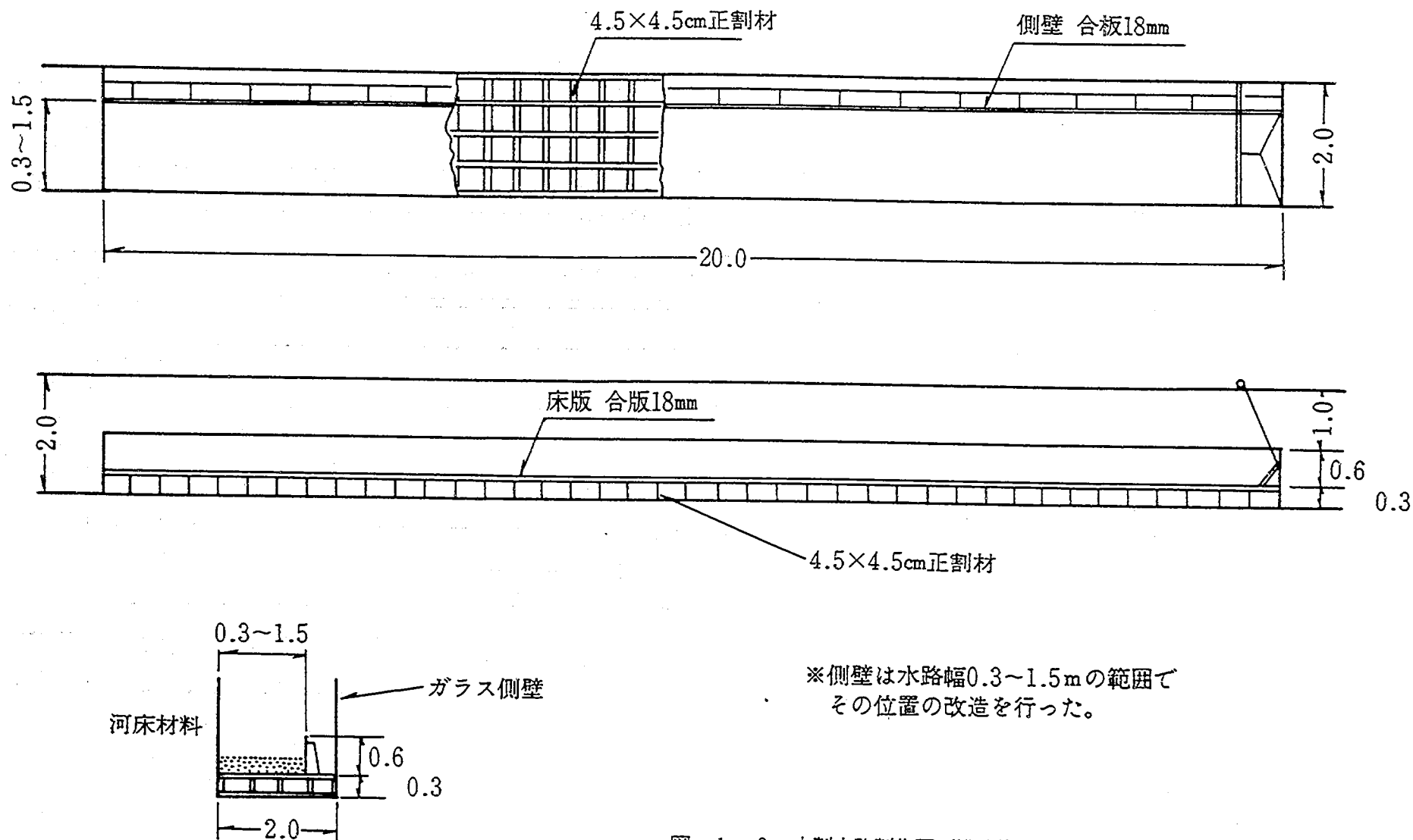


図-1.6 木製水路製作図(構造物水路内) (単位m)

i) 採砂地点と採砂法

図-1.3及び図-1.5に示すように実質的な採砂測定地点は、水理量測定区間末端よりそれぞれ 8m, 6m 下流である。水理量測定区間とその先の水路末端までの区間が等流状態であれば、この間の流砂の連続性が成立するが、完全に等流状態であったわけでは無く多少問題が残る。

さらに構造物水路の場合、水路の条件から平衡状態に達するまでの流砂量も含まれているため、流砂量の測定精度はさらに悪くなる。なお、構造物水路の場合 1 時間から 1 時間半の通水を行っている。

ii) 河床波の波高、波長の定義

川幅水深比 B/H が大きいと砂堆の波峯は水路の横断方向にほぼ平行とならず、三次元的な砂堆が発生し、うろこ状になることがある。この場合、本実験方法で定義した砂堆の波高、波長では、測線の位置によっては砂堆の波長、波高とも同一とならないので問題が残る。さらに、一波長をどう定義するかもかなり主観的な判断にまかされている。

1.3.3 1990年に行った P B T の場合

(1) 実験施設と実験方法

本実験は、小規模河床波の領域区分が s によって変わるものか P B T を用いて実験を行い、 $s = 1.65$ の場合と比較したものである。

実験は、図-1.3に示した長さ 30m、幅 60cm の両面ガラス張可傾水路を用いて行った。実験では、水路全面に P B T を厚さ 10cm に敷きならし、水を湛水させ締め固めた後に通水した。給砂は行っていない。測定は水位、河床高、河床形状写真撮影について実施した。

① 水位測定

水位は、河床形態が安定した時期に、下流から 25m の範囲について 5m 間隔に 6 点、ポイントゲージで測定した。

② 河床高測定

河床高は、水位を測定したと同じ断面において、横断形状測定を実施した。また、あわせて水路下流端から 6m~11m の区間について、水路中央の河床縦断形状を測定した。測定には 1mm 目盛りのスケールを用い、基準高からの垂直距離を計測した。

③ 写真撮影

写真は、河床形態が安定した時期に、下流から 5m~10m の区間を対象として、河床の状態および流況を撮影した。

④ 掃流力の評価

下流端より 6m と 21m の断面を対象として水位、平均河床高よりエネルギー勾配を求め、水深は 6, 11, 16, 21m の 4 断面の水均の平均値を用いて掃流力を評価した。

参考文献

- 1) 山本晃一, 坂野章, 1982: 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1815号
- 2) 福岡捷二, 浅野富夫, 林正男, 1988: 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
- 3) 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.

第2章 移動床の相似律

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、実河道と模型河道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。従って検討の対象としているものが何かによって相似条件が異なって来る。本章では流れの相似律、移動床の流れの相似律について述べる。

2.1 移動床流れを規定する物理量とその無次元化

移動床を持つ流れにおいては、流水の運動、土砂粒子の運動は河床面に生じる河床波に大きく影響され、逆に河床波は流水と土砂の運動によって形成され、河床波、流水の運動、土砂の運動は相互に作用をおよぼし合う。このような流れの場の状態量である河床波、流れの抵抗係数、流砂量を規定する物理量は、直線水路、長方形断面で側壁によって流れが拘束されている水路で底質材料がほぼ均一粒径で極端に偏平でなく、また流れの状態が定常流れであれば、次のような物理量によって規定されると考えられる。

水路の特性	水路幅 B , 勾配 I
流れの特性	水深 H
流体の特性	水の密度 ρ_w , 水の動粘性係数 ν
底質の特性	粒径 d , 密度 ρ_s
場の特性	重力加速度 g

従って移動床流れの状態量 λ は

$$\lambda = f(B, I, H, \rho_w, \nu, d, \rho_s, g) \quad (2-1)$$

となる。基本量として ρ_w , g , d を取り, $u_* = \sqrt{gHI}$ の関係を使うと流れの場の状態流量 λ の無次元量 π_λ は、次元解析の手法より

$$\pi_\lambda = f(\sqrt{gd} \cdot d/\nu, u_*^2/sgd, H/d, B/d, s) \quad (2-2)$$

となる。ここで $s = (\rho_s - \rho_w)/\rho_w$ である。

各項の無次元量を乗じたり、あるいは除したりすることによって上式は良く知られた無次元量の形で表現することができる。たとえば、 λ として流砂量 q_s , あるいは流速係数 ψ (平均流速 V_m を u_* で除した値) をとると、

$$q_s/u_* d \text{ or } \psi = f(Re_*, \tau_*, H/d, B/H, s) \quad (2-3)$$

となる。ここで、 $Re_* = u_* d/\nu$ (粒子レイノルズ数), $\tau_* = u_*^2/sgd$ (無次元掃流力) である。

もし、底質材料として通常の河川で見られる砂や砂利 (人工的に砕かれたものでない砂、および極端に偏平でない砂) を底質材料とし、水路の側壁が滑面であり、水路幅水深比 B/H が3以上、かつ砂州が生じるほど大きくなければ(2-3)式における s , B/H を除くことができる。なぜならば、 s はほぼ一定(1.6~1.7)であり、また側壁の影響も Williams, G. P.¹⁾の水路側壁が流砂量に及ぼす影響に関する実験的研究より、 B/H が3以上であれば、側壁の影響はほとんど考慮しなくて良いことが分かっているからである。

この場合 (2-3) 式は次のようになる。

$$q_s/u_* d, \text{ or } \psi = f(\text{Re}_*, \tau_*, H/d) \quad (2-4)$$

ただし、河床の三次元的形態（砂州等）および、それが流砂量、流れの抵抗に及ぼす影響を知るためには、 B/H を除くことができない。

なお (2-4) 式の三量のうち、一般に認められているように、 $q_s/u_* d$ 及び ψ に影響を与える効果としては τ_* , H/d が第一義的であり、 Re_* はそれを多少変形する第二義的な量であるという基本的な立場を本論では採ることとする。

以上述べたように移動床流れの無次元状態量 π_i を規定するものは、 Re_* , τ_* , H/d , B/H , s の五つの無次元量であるとした。この内二次元的流れを考えれば B/H の影響を考えなくて良い。二次元的流れの無次元状態量を規定する他の 4 量の力学的意味とその影響程度を明らかにするために、また移動床流れの無次元状態量を規定するものとして上述の無次元量は正しいものであるかを検証するために、移動床流れの部分現象を取り出して考察してみる。

2.2 流れの相似律

流れの運動方程式は、流体が非圧縮性であれば、Navier-Stokes の運動方程式および連続式が成立する。直角座標で重力場で考えれば、

$$\left. \begin{aligned} \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \nabla^2 u \\ \left\{ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \nabla^2 v \\ \left\{ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(wu)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} + \frac{\partial(w^2)}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \nabla^2 w - g \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-5)$$

となる。ここで x , y は水平方向、 z は垂直方向の座標であり、 u , v , w は x , y , z 方向の流速である。

上式において、長さスケールの異なった場合（たとえば、実物と模型）において流速分布が相似であるためには、それぞれの基礎式の各項の比が等しくなければならない。その条件は、実物と模型の比をサフィックス r で表わせば、

$$\begin{aligned} \left(\frac{u}{t} \right)_r &= \left(\frac{u^2}{x} \right)_r = \left(\frac{uv}{y} \right)_r = \left(\frac{uw}{z} \right)_r = \left(\frac{P}{\rho_w x} \right)_r = \left(\frac{\nu u}{x^2} \right)_r = \left(\frac{\nu u}{y^2} \right)_r = \left(\frac{\nu u}{z^2} \right)_r = g_r = 1 \\ \left(\frac{u}{t} \right)_r &= \left(\frac{vu}{x} \right)_r = \left(\frac{v^2}{y} \right)_r = \left(\frac{vw}{z} \right)_r = \left(\frac{P}{\rho_w y} \right)_r = \left(\frac{\nu v}{x^2} \right)_r = \left(\frac{\nu v}{y^2} \right)_r = \left(\frac{\nu v}{z^2} \right)_r \end{aligned}$$

$$\left(\frac{w}{t}\right)_r = \left(\frac{wu}{x}\right)_r = \left(\frac{wv}{y}\right)_r = \left(\frac{w^2}{z}\right)_r = \left(\frac{P}{\rho_w z}\right)_r = \left(\frac{\nu w}{x^2}\right)_r = \left(\frac{\nu w}{y^2}\right)_r = \left(\frac{\nu w}{z^2}\right)_r$$

$$\left(\frac{u}{x}\right)_r = \left(\frac{v}{y}\right)_r = \left(\frac{w}{z}\right)_r$$

となる。上式より

$$\left. \begin{aligned} (y/x)_r &= (z/x)_r = 1 \\ (v/u)_r &= (w/u)_r = 1 \\ (u/\sqrt{gx})_r &= 1 \\ (ux/\nu)_r &= 1 \\ (x/tu)_r &= 1 \\ (P/\rho_w u^2)_r &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (2-6)$$

となる。よって流体を水とすれば $\rho_{wr} = \nu_r = 1$ であるから $X_r = 1$ となり、縮尺を変えることができなくなる。つまりレイノルズ数 $(ux/\nu)_r = 1$ 、フルード数 $(u/\sqrt{gx})_r = 1$ を同時に満足させるためには、同一スケールの場合のみ可能であることになる。なお (2-6) 式は11個の物理量が関係し、一次量が3つであるから π 定理より 8 個の無次元量は、おたがいに、一つの関係で結ばれる。よって (2-6) 式の 1 つは他の無次元量の従属関数となる。

このように粘性の影響のある流れでは (2-3) 式の Re_* 項を無視して移動床流れの状態量を求められない。

流れのレイノルズ数 $V_m H/\nu$ が大きくなると流れは乱流場となり、(2-5) 式の粘性項の代わりにレイノルズ応力を考えなければならない。乱流場では、(2-5) 式は、

$$\left. \begin{aligned} \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \nu \nabla^2 \bar{u} - \left[\frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}'w'}{\partial z} \right] \\ \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \nu \nabla^2 \bar{v} - \left[\frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}'w'}{\partial z} \right] \\ \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \nu \nabla^2 \bar{w} - \left[\frac{\partial \bar{u}'w'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'w'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}^2}{\partial z} \right] - g \end{aligned} \right\} \quad (2-7)$$

である。ここで $u = \bar{u} + u'$ で $\bar{u}$ は時間平均流速、 u' は乱れ速度で、 v, w についても同様である。上式において、右辺第二項が第三項より小さく無視しえれば、前に行った方法と同様に

$$\begin{aligned} (y/x)_r &= (z/x)_r = 1 \\ (\bar{v}/\bar{u})_r &= (\bar{w}/\bar{u})_r = 1 \\ (\bar{u}/\sqrt{gx})_r &= 1, \quad (\bar{P}/\rho \bar{u}^2)_r = 1 \\ (\bar{u}^2)_r &= (\bar{u}'v')_r = (\bar{u}'w')_r = (\bar{u}'v')_r = (\bar{v}^2)_r = (\bar{v}'w')_r = (\bar{u}'w')_r = (\bar{v}'w')_r = (\bar{w}^2)_r = (\bar{u}^2)_r \end{aligned} \quad (2-8)$$

が、長さスケールの異なった場で相似な流れの条件となる。

ところで、 $V_m H/\nu$ の大きな乱流場では (2-8) 式の上から三項が成立すれば、四項の乱れ特性の相似条件はおのずから成立すると考えられている。このことを二つの例によって示してみよう。

○ 開水路せん断流場のレイノルズ応力

開水路のレイノルズ応力 $-\rho u'w'$ は $u_* k_s/\nu$ が大きければ

$$-\rho u'w' = \rho u_*^2 \left(1 - \frac{z}{H}\right) \quad (2-9)$$

であり、また Nikuradse によれば、粗面完全乱流場の開水路の流速分布形は、 $\bar{u}/u_* = f(z/k_s)$ であるから $(k_s/H)_r = 1$ なら、レイノルズ応力の相似性の条件が成立する。なお河床が平坦であれば $k_s \propto d$ であるので、 $(H/d)_r = 1$ であれば、レイノルズの相似条件が成立することになる。

なお、平坦河床の流速分布は、Nikuradse の実験によって、

$u_* k_s/\nu < 5$ なら、底面は粘性底層におおわれ、

$$\bar{u}/u_* = 5.5 + 5.75 \log(u_* k_s/\nu \cdot z/k_s) \quad (2-10)$$

$$V_m/u_* = 3.0 + 5.75 \log(u_* k_s/\nu \cdot H/k_s) \quad (2-11)$$

$u_* k_s/\nu > 70$ なら、完全粗面乱流状態で

$$\bar{u}/u_* = 8.5 + 5.75 \log \frac{z}{k_s} \quad (2-12)$$

$$V_m/u_* = 6.0 + 5.75 \log \frac{H}{k_s} \quad (2-13)$$

$5 < u_* k_s/\nu < 70$ なら底面の状態は滑面から粗面への遷移状態で

$$\bar{u}/u_* = f(u_* k_s/\nu, z/k_s) \quad (2-14)$$

$$V_m/u_* = f(u_* k_s/\nu, H/k_s) \quad (2-15)$$

となることが明らかにされている。なお $k_s \doteq d$ と言われている。

以上、完全粗面乱流の状態であるような流れでは、流れの平均的な性質がレイノルズ数に影響を受けないことが、経験的に明らかになっている。

○ 自由な乱れの相似性

河床面は、河床波が存在し、これによって流れのはく離が生じる。このようなはく離によって生じる乱れの統計的性質は構造物による後流の相似性の問題と似ている。このような後流の乱流構造は VD/ν が大きければ、いわゆる自己保存の状態にあり、乱れが下流に移っていく場合には、単に乱れの運動の長さ、時間および速度の尺度が変化するだけの状態となる²⁾。ここで D は流れの場の代表長さ (構造物の大きさ等)、 V は代表速度である。この場合、後流の流れの運動に関する長さ $l(x)$ 、速度 $\bar{u}(x)$ は、

$$l(x)/D \propto (X/D)^p, \quad \bar{u}(x)/V \propto (x/D)^{-q} \quad (2-16)$$

で表わすことができる。たとえば円柱の背後では $P = 1/2$, $q = 1/2$ である。

このように後流の乱流構造は、自己保存の状態にあり、また流速分布形が、形状のみによって決まると

いう経験的事実は、河床波近傍の流れの構造は、(2-8)式の上から三項が成立すれば、四項はおのずから成立するだろうことを推察させる。

以上、十分に乱れた乱流場であれば、流れの相似性は Re_* に直接的には影響を受けないと考えられる。

2.3 移動床流れの相似律

○ 浮遊砂運動の相似性

浮遊砂の運動は流れの乱流場で生じている。よって個々の粒子の運動の相似性により、その運動の統計的特性の相似性が重要である。ここでは統計的特性の一つである浮遊砂の平均濃度 C の分布の相似性について考えてみよう。

二次元の等流の場で考えると、 x 方向、 y 方向の拡散を無視しえるので、浮遊砂の濃度分布に関する基礎式は次式で示される。

$$\frac{d}{dz}(\epsilon z \frac{dc}{dz}) + w_0 \frac{dc}{dz} = 0 \quad (2-17)$$

水面および水底を通して物質の移動がないので、上式を積分すると次式となる。

$$\epsilon z \frac{dc}{dz} + w_0 c = 0$$

底面から a の距離の点の濃度を C_a とし $\frac{z}{H} = X, \frac{a}{H} = X_a$ とすれば、

$$C/C_a = \exp \left\{ - \int_{X_a}^X (w_0 H / \epsilon_z) dx \right\} \quad (2-18)$$

と表わされる。これより水深 H が異なった場合でも同一の濃度分布形になるためには、

$$(w_0 H / \epsilon_z)_r = 1, (x_a)_r = 1 \quad (2-19)$$

でなければならない。今 ϵ_z として運動量の渦動粘性係数を用いると、

$$\epsilon_z = u_* \cdot \kappa \cdot H \cdot X \cdot (1-X) \quad (2-20)$$

である。ここで κ はカルマン定数。これを (2-19) 式に代入すれば

$$(w_0 / \kappa u_*)_r = 1, (x_a)_r = 1 \quad (2-21)$$

が濃度分布の相似条件となる。ところで浮遊粒子の沈降速度 w_0 は、抗力係数を C_D とすると、

$$w_0^2 \propto \frac{1}{C_D} \text{sgd}$$

となる。よって上式は

$$\left(\frac{\text{sgd}}{C_D \kappa^2 u_*^2} \right)_r = \left(\frac{1}{C_D \kappa^2} \tau_*^{-1} \right)_r = 1, (X_a)_r = 1 \quad (2-22)$$

となる。

図-2.1は粒径と沈降速度の関係を示したものである。0.3cmぐらいまでは $w_0 \propto \sqrt{d}$ であり、 C_D は一定である。0.01cm以下では、 $w_0 \propto d^2$ に比例し、いわゆるストークスの沈降速度式が成立する。0.01cmから0.3cmは遷移領域である。

よって d が0.3cm以上であるなら、濃度分布の相似のためには、 $(\tau_*)_r = 1$ 、 $(X_a)_r = 1$ であれば良く、 d が0.3cm以下の場合には、 $(C_D \tau_*)_r = 1$ 、 $(X_a)_r = 1$ となる。

なお、 s が異なると、同一 $w_0/\kappa u_*$ でも粒径が異なるため、乱れに対する粒子の応答やまた仮想質量力の効果も異なるため、 s によって多少濃度の分布形に相違が生じると思われる。

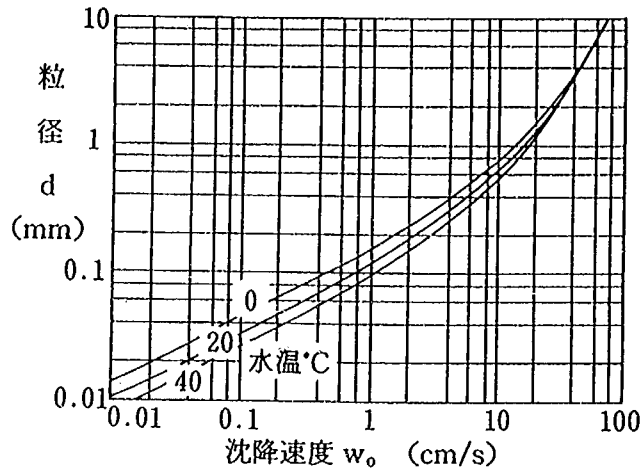


図-2. 1 砂粒の沈降速度と粒径の関係

○ 底面を動く粒子の運動の相似性

底面近くを動く粒子の運動式は底面が平坦な場合、

$$\begin{aligned} \rho^2 \frac{\pi}{6} d^3 \frac{du_s}{dt} = & C_D \frac{\rho_w}{8} \pi d^2 |u - u_s| (u - u_s) - \{ (\rho_s - \rho_w) \frac{\pi}{6} g d^3 - C_L \frac{\pi}{8} \rho d^2 |u - u_s| \cdot (u - u_s) \} \mu_s \\ & - \frac{1}{2} \rho_w \frac{\pi}{6} d^3 \left(\frac{du_s}{dt} - \frac{du}{dt} \right) + \frac{\pi}{6} \rho_w d^3 \frac{du}{dt} \\ & + \frac{3}{2} \rho_w d^2 \sqrt{\pi \nu} \int_{t_0}^t \left(\frac{du}{dt_1} - \frac{du_s}{dt_1} \right) \frac{1}{\sqrt{t - t_1}} dt_1 \end{aligned} \quad (2-23)$$

となる²⁾。ここで u_s ；粒子の移動速度、 μ_s ；粒子の摩擦係数、 C_D 、 C_L ；粒子の抗力および揚力係数である。

(2-23) 式の右辺第一項は、水粒子と砂粒子の速度差にもとづく抗力、二項は摩擦による抗力、第三項は仮想質量を加速させるため力、四項は粒子のまわりの流体の圧力勾配によって生じる力、五項はいわゆるバセット項で非定常な運動をしている粒子に作用する抵抗と定常な運動をしている粒子に作用する抵抗との相違に基因する項を表わす。なお、本来底面近くでは流れは速度勾配を持ち、また粒子の存在状態によって μ_s 等も変わり、(2-23) 式は正確には底面近くの粒子の運動を表現していないが、ここでは単に粒子に働く力としてどんなものがあるかを考えるためと考え、そのままにしておく。

今代表速度として $y = d$ の所の流速 u_d を取り, T を代表時間とし, $u_s' = u_s/u_d$, $t' = t/T$, $t_1' = t_1/T$, $u' = u/u_d$ とすると, (2-23) 式は,

$$\begin{aligned} (\rho_s + \frac{1}{2}\rho_w) \frac{\pi}{6} d^3 \frac{u_d}{T} \cdot \frac{du_s'}{dt'} &= \frac{\rho_w}{8} \pi d^2 u_d^2 |u' - u_s'| (u' - u_s') - [C_D - \mu_s C_L] \\ &+ (\rho_s - \rho_w) \frac{\pi}{6} g d^3 \mu_s + \frac{3}{2} \rho_w d^3 \frac{u_d}{T} \cdot \frac{du'}{dt'} \\ &+ \frac{3}{2} \rho_w d^2 \sqrt{\pi \nu} \cdot u_d / T^{1/2} \times \int_{t_1'}^{t'} \left[\frac{du'}{dt'_1} - \frac{du_s'}{dt'_1} \right] / \sqrt{t' - t'_1} \cdot dt'_1 \end{aligned} \quad (2-24)$$

上式より底面近くを動く粒子の運動の相似条件は

$$\begin{aligned} \left\{ \frac{(C_D - \mu_s C_L) \cdot T \cdot u_d}{(\rho_s / \rho_w + 1/2) d} \right\}_r &= \left\{ \frac{\rho_s / \rho_w - 1}{\rho_s / \rho_w + 1/2} \cdot \mu_s \cdot \frac{g T}{u_d} \right\}_r = \left\{ \frac{1}{\rho_s / \rho_w + 1/2} \right\}_r \\ &= \left\{ \frac{\sqrt{\nu T}}{(\rho_s / \rho_w + 1/2) d} \right\}_r = 1 \end{aligned}$$

となる。ところで d を代表距離スケールとすると, $T = d/u_d$ としえるので, 上式は以下のごとくになる。

$$\left. \begin{aligned} (C_D - \mu_s C_L)_r &= 1 \\ s_r &= 1 \\ (\mu_s g d / u_d^2)_r &= 1 \\ \left(\frac{u_d \cdot d}{\nu} \right)_r &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (2-25)$$

(1) より $u_* d / \nu$ が大きければ $u_d \propto u_*$ であり, また C_D , C_L , μ_s は $\frac{u_* d}{\nu}$ によってほとんど変化せず, パセット項の影響も無視しえるので³⁾

$$\begin{aligned} s_r &= 1 \\ (u_*^2 / s g d)_r &= 1 \end{aligned} \quad (2-26)$$

を満足させれば, ほぼ底面近くの運動の相似性が成立する。しかし $u_* d / \nu$ が小さい場合には $u_d / u_* = f(u_* d / \nu)$ であり, C_D , C_L も $u_* d / \nu$ によって変化するので

$$\left. \begin{aligned} s_r &= 1 \\ (u_*^2 / s g d)_r &= 1 \\ \left(\frac{u_* d}{\nu} \right)_r &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (2-27)$$

が必要となる。

なお移動限界掃流力を考える時には (2-23) 式の右辺の二項および三項のみを考えることが多い⁴⁾⁵⁾。この場合には, 移動限界時の u を u_c とすると,

$$\left\{ \frac{sgd\mu_s}{(C_D + \mu_s C_L)u_c^2} \right\}_r = 1 \quad (2-28)$$

となる。 $u_* d/\nu$ が大きければ、 C_D , C_L , μ_s は $\frac{u_* d}{\nu}$ によらず、 $u_c \propto u_{*c}$ であるから

$$\left(\frac{u_{*c}^2}{sgd} \right)_r = 1 \quad (2-29)$$

となり、限界状態で無次元掃流力 τ_{*c} は一定となる。なお、 s の効果は、 s が1.06から5ぐらいまでは、あまり大きくないが、流体が空気の場合 $s=1000\sim 2000$ となり、この場合には s によって τ_{*c} が変わることがわかっている⁹⁾。本来 s は独立の変数と考えるべきであり、2項、3項のみによって移動限界状態を表現することには問題が残ろう。

なお岩垣⁹⁾によれば、移動限界掃流力 τ_{*c} は R_{*c} がほぼ150を越えれば一定値となり R_{*c} の影響を受けなくなる ($s=1.65$ の場合、 $R_{*c}=150$ で移動限界掃流力状態になる粒径は0.3cm程度である。)

以上総合すると、通常の川砂や砂利を底質材料とする場合、流体の運動、浮遊砂の運動、底面を動く粒子の運動の無次元状態量を規定する無次元パラメータとして、 τ_* , R_{*c} , H/d の三量が必要であることがわかる。ただし R_{*c} が150以上 ($s=1.65$ の場合、 d が0.3cm以上) であれば、 R_{*c} は無次元状態量を規定せず、 τ_* , H/d の二量で表現しえることがわかる。

s が異なる場合には、 τ_* , R_{*c} , H/d の三量に加えて、 s が移動床流れの無次元状態量を規定するパラメータとして必要である。 R_{*c} の影響が見られなくなる値は、 s が異なると沈降速度が同一粒径でも変化するので、 s が小さくなるほどその値が大きくなると考えられる。

参考文献

- 1) Williams, G. P., 1970; Flume width and water depth effects in sediment-transport experiments, U.S. Geological Survey Professional Paper 562-H
- 2) Hinze, 1954; Turbulence, Mcgrow-Hill Book Company, pp.355~359
- 3) Rouse, H., 1936-37; Nomogram for the settling velocity of spherers, Report of the Commission on Sedimentation
- 4) 岩垣雄一, 1956; 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集第41号, pp.1~21
- 5) 栗原道徳, 1948; 限界掃流力に就いて, 九大流体力学研究所報告第4巻第3号
- 6) 土屋義人, 河田恵照, 1970; 飛砂による砂粒の運動機構, 京都大学防災年報13号B, pp.217~232

第3章 $s = 1.65$ のほぼ均一な砂を持つ移動床の水理特性

本章においては、軽量材料を用いた移動床実験結果と現地の実態との対応を検討する際の比較・判断の基とすべく、 $s = 1.65$ のほぼ均一な砂を持つ移動床での流れの抵抗・流砂量と小規模河床波の関係を文献(49)より、必要な所をとりまとめる。

3.1 河床波の分類とその特徴

移動床水路では、水理条件と粒径に応じて河床面に各種の河床波が発生し、これが流れの抵抗係数や流砂量に大きな影響を与える。それゆえ初めに河床形態の分類と、各種の河床波の形態の特徴について述べる。

ところで河床波の形態区分の方法は、本来河床波を発生させる要因の違いの視点から区分されるべきであるが、現在種々の河床波の成因が明確になっておらず、各種の河床波をそのスケールと形態の差によって区分せざるを得ない状態である。

ここでは、基本的には土木学会移動床流れと河床形状委員会の定義²⁾した河床波の分類と名称を使用するが、砂漣と砂堆の区分だけは別の方法によった。

〔1〕砂漣 (Ripples)

砂漣は河床面近傍の物理量によって支配される最も小規模な河床形態であって、その波長・波高は粒径と密接な関係があり、水深が砂漣のスケールより充分に大きい場合は平均水深のような物理量にはほとんど影響を受けない。砂漣の平面形状には、三次元的に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形状まで各種ある。砂漣は平均流速に比して遅い速度で下流に伝播する。なお砂漣はその特性からして閉管路でも発生する。

〔2〕砂堆 (Dunes)

砂堆は、砂漣よりも規模が大きく、その波長・波高が水深と密接な関係があり、河床波と逆位相の水面波を伴う河床形態である。砂堆は、砂漣に比べて一般に不規則であり、その縦断形状は、上流側斜面勾配が緩やかで、下流側斜面勾配が砂礫の水中安息角にほぼ等しい三角形形状をなす。砂堆は平均流速に比して遅い速度で下流に伝播する。なお砂堆は閉管路でも発生する³⁾⁴⁾。

〔3〕反砂堆 (Antidunes)

反砂堆は、水面波（重力波）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状態である。反砂堆には水流と砂れきの特性に応じて上流へ移動、下流へ移動、移動しないの三通りの場合がある。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、後者は前者に比し大きなフルード数の時形成される。シャープな頂を持った三角形形状の反砂堆は実験水路において観測されており、常に下流に移動する⁵⁾。反砂堆は、フルード数が大きくなると射流であるシュートと射流あるいは常流であるプールとを連結したような河床状態になるが、これを特にシュート・プールと呼んでいる。反砂堆は閉管路では発生しないと言われている。

る。

〔4〕平坦河床 (Flat Bed)

砂漣, 砂堆, 反砂堆及び砂州を伴わない平坦な河床形態である。

〔5〕遷移河床 (Transition)

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, 砂漣や砂堆の部分と平坦河床の部分からなる。

〔6〕砂州 (Bars)

砂州は, 最も規模の大きい河床形態であって, その波長は水路幅あるいは水深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 (Point Bars) や左右交互に周期的に現れる交互砂州 (Alternate bars), 川幅水深比の大きな時に現れるうろこ状砂州 (Multiple bars) などがある。

以上の河床の起伏を総称して河床波 (sand wave) と呼ぶ。また砂漣, 砂堆, 反砂堆の規模は砂州に比べて小さいので, 前者を小規模河床形態, 後者を中規模河床形態と言う。なお小規模河床形態と中規模河床形態は, ある水理量の範囲では共存可能である。これをまとめると図-3.1のごとくとなる。

ところで砂漣と砂堆の河床形態はかなり似ており, 前述の形態の特徴から区分しようとするとき迷うことが多い⁷⁰⁾。しかしながら砂漣と砂堆では, 3.2, 3.3で詳しく示すが, 流砂量及び流れの抵抗と水理量の関係がかなり違うので, 本論では流砂量と流れの抵抗に関する資料より, その資料が砂漣的特性を持つか, 砂堆的特性を持つかによってその河床波を区分することにした。この方法によると Re_* が20以上であり, また波長も長いので従来なら砂堆と見なされるものが砂漣と定義されることがある。

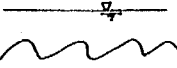
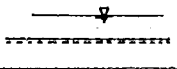
河 床 形 態			形状・流れのパターン		移動方向	河 床 波 の 特 性
			縦断図	平面図		
小規模河床形態	低水流領域	砂 漣		直線状 	下 流	河床波の移動速度は, 流水の速度よりも小さい。砂漣の波長は河床材料の粒径の約500~1,500倍である。
		砂 堆		曲線状 	下 流	河床波の上流側斜面は, 通常勾配の急な下流側斜面に比べると緩やかに傾斜している。砂堆の波長は水深の約4~10倍である。
		遷移河床		三日月状 舌 状 		発達初期段階にある小さな砂漣と砂堆が平坦河床の間に広がっている。
	高水流領域	平坦河床				多量の流砂が平坦な河床上を流れている。
		反砂堆			上 流 下 流	河床波と同位相の水面波と強い相互干渉をもつ河床波。
中規模河床形態		交互砂州			停 止 下 流	水流は水路内を曲がりくねって流れる。交互砂州の波長は水路幅の約5~16倍である。
		複列砂州			下 流	—
		うろこ状砂州			下 流	うろこ状砂州は B/H が非常に大きい領域で発生する。それは魚のうろこのように見える。

図-3.1 河床波の特徴と定義

3.2 流れの抵抗と河床形態

自由水面を持った移動床上には、流れの水理量変化に応じて種々の河床波が発生する。この河床波の形および大きさは、流れの抵抗と密接な関係がある。本節においては、中規模河床形態が生じない場合での小規模河床波と流れの抵抗との関係を記す。

流れの抵抗、流砂量、河床形態は、移動床流れの三つの側面であり、流速係数 ψ を予測するということは、同時に河床形態も予測することである。 ψ の関係式についてそれぞれの関係図が得られれば、その関係図は、河床形態をも示す図となる。

$$\psi \text{ or } q_s/u_* d = f(R_{o*}, \tau_*, H/d) \quad (3-1)$$

流速係数 ψ 、および無次元流砂量 $q_s/u_* d$ を規定すると考えられる $R_{o*}, \tau_*, H/d$ の三量の内、粒子レイノルズ数 R_{o*} は、

$$R_{o*} = \nu^{-1} (sg)^{1/2} \tau_*^{1/2} d^{3/2} \quad (3-2)$$

である。水温によって ν が変化するのでその影響を受けるが、 d と τ_* が定まれば、 R_{o*} はほぼ決まってしまう。そこで (3-2) 式の R_{o*} の影響を直接調べることをせず、粒径ごとに $q_s/u_* d$ あるいは ψ に対する τ_* と H/d の関係を調べることにし、 R_{o*} の影響は、粒径の違いによってそこで求められた関係がいかに異なるかを調べることにし、記述することにした。実用上もこの方が望ましいと思ったのもこの方法による理由である。

図-3.2～図-3.8は、粒径0.02, 0.03, 0.05, 0.1cmの移動床材料に対して流速係数 ψ が $\tau_*, H/d$ の変化に対してどう変わるかを河床形態が分かるように示したものである。ここで図中の実線の部分は文献9) 11) 12) 13) 14) 15) 16) 17) 18) 19) 20) 21) 22) 23) 24) 25) の実験データ、文献7) 26) 27) 28) 29) 30) 31) 32) の実河川資料を基にして描いたものであり、点線の部分は、実測資料が無い領域での推定線である。推定線は実測資料がある所の河床形状と ψ の関係、および各河床波ごとの ψ と $\tau_*, H/d$ の関係を詳細に分析し、そこで分かった経験的的法則性を資料の無い所にまで適用して描いたものである。

図の読み方を図-3.5, 図-3.6の $d=0.05\text{cm}$ の ψ と $\tau_*, H/d$ の関係図を用いて説明する。図-3.5の同一のシンボルが付された線、および図-3.6の数字が付された線は、相対水深 H/d がある値に固定された時、 τ_* の変化によって ψ がどう変わるかを示したものである。また、図中移動無しの平坦河床、砂漣、平坦、反砂堆と記されているのは、その付近の曲線群の河床形態を示すものである。これをより明確にするために、例を使って説明する。

図-3.5に示す $d=0.05\text{cm}$, $H/d=125$ の場合は、 τ_* が0.04以下では τ_* が移動限界無次元掃流力より小さいため、河床は河床材料が移動しない平坦河床のままの状態であるが、掃流力が大きくなると砂堆が発生し始め、抵抗が大きくなるため ψ の値が徐々に小さくなる。さらに τ_* が大きくなり τ_* が0.45程度になると砂堆は消滅し始め遷移河床となり、ついには平坦河床となって ψ は11程度から急に16程度に上昇する。さらに τ_* が大きくなると表面波が発生し始め、河床は反砂堆となり抵抗が増し ψ が減少することを示したものである。なお、 τ_* が0.1～0.3では砂堆の変わりに砂漣が発生することがあり、この場合の ψ は9程度となる(砂漣は H/d が小さい場合には発生しないが、この程度の値となると砂漣にもなりうるの

である。より H/d が大きい場合には、逆に τ_* が 0.5 以下では砂堆は発生しない)。

図-3.6に示す $d=0.05\text{cm}$, $H/d=1,000$ の場合は、 τ_* が 0.04 以下では砂の移動が無い平坦河床の状態であるが、0.04 を越えるとこの場合は相対水深 H/d が大きいので砂漣が生じる。 τ_* が 0.55 程度になると砂漣は消滅し始め、砂堆が発生し、 ψ は 11 程度から 8 程度に小さくなる。さらに τ_* が大きくなり $\tau_*=1.2$ 程度になると砂堆は消滅し始め、平坦河床へ移行し、 $\psi=8$ から 18 程度に急増する。さらに τ_* が大きくなれば反砂堆となり ψ は減少していく。

同一河床形態の ψ と τ_* の関係は、 H/d によって異なるが、同じような傾きを持った関係線であり、逆に同じような傾きを持った関係線は、同一の河床形態となっている。なお各河床形態の発生領域をより分かるように、 $d=0.05\text{cm}$ の場合の領域区分図を τ_* - H/d 平面上に示せば、図-3.9のごとくである。 H/d が 80~500 で τ_* が 0.04~0.4 の範囲では、砂堆と砂漣のどちらの河床波も生じる可能性があることが良く示されている。この領域区分図は、粒径が異なると、各河床波の発生領域が多少変化するので多少違ったものとなるが、基本的には、同様の区分図となる。

ところで河床形態の発生領域区分図には、 F_r - H/d 平面で表わしたもの、 I/s - H/d 平面で表わしたものの等多数あるが、 ψ と τ_* , H/d の関係が分かれば、図-3.9は他の平面に変換しうる。図-3.9は、Garde, R. J.³⁶⁾ (I/s - H/d 平面)、芦田・道上³¹⁾ (τ_* - H/d 平面)、Cooper, R. H. 等³⁸⁾ (F_r - H/d 平面) による領域区分と大略的には同様な結果をあたえるが、これらは粒径の違いの効果が入っていない。また H/d が 1000 以上の領域区分が明確になっていないこと、砂堆と砂漣の区分が成されていない等の欠点を持っている。なお F_r はフルード数で、 $F_r = V_m / \sqrt{gH}$ である。

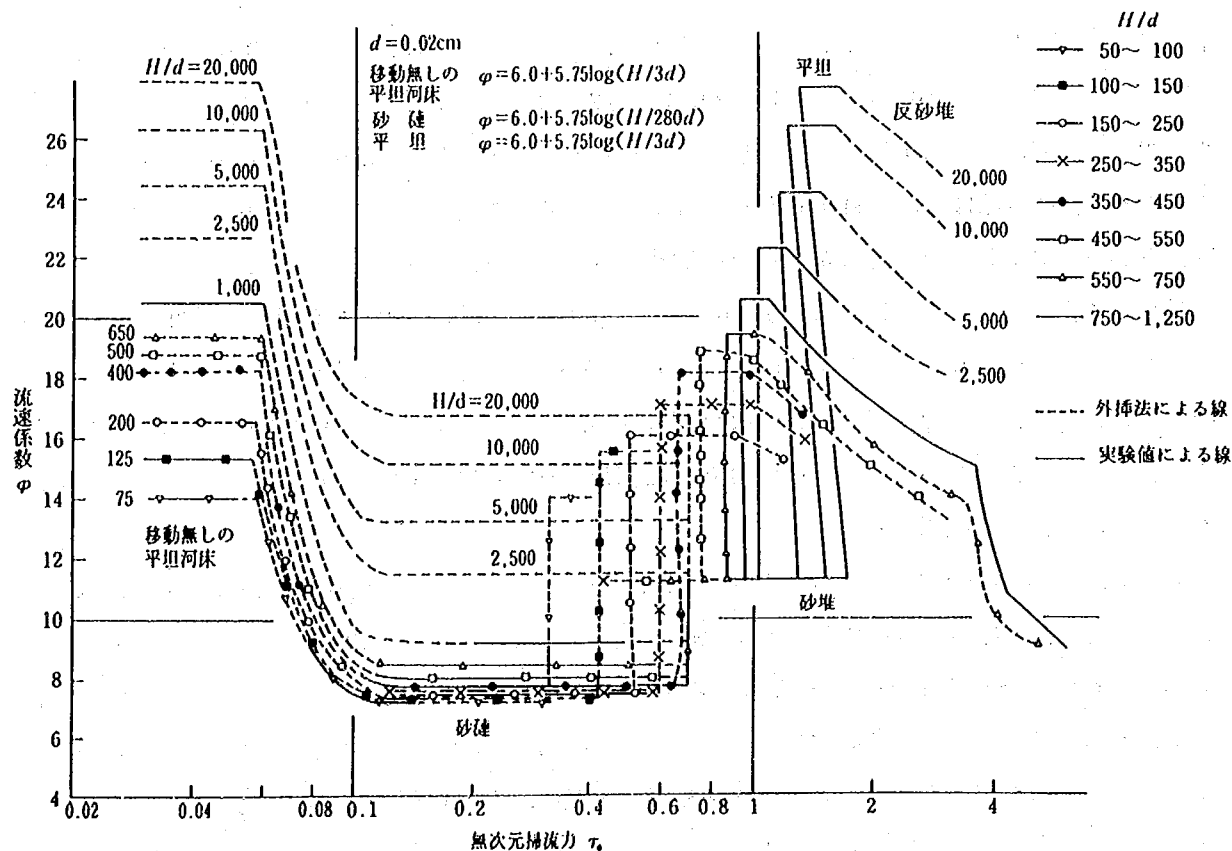


図-3.2 ψ と τ_* の関係 ($d=0.02\text{cm}$)

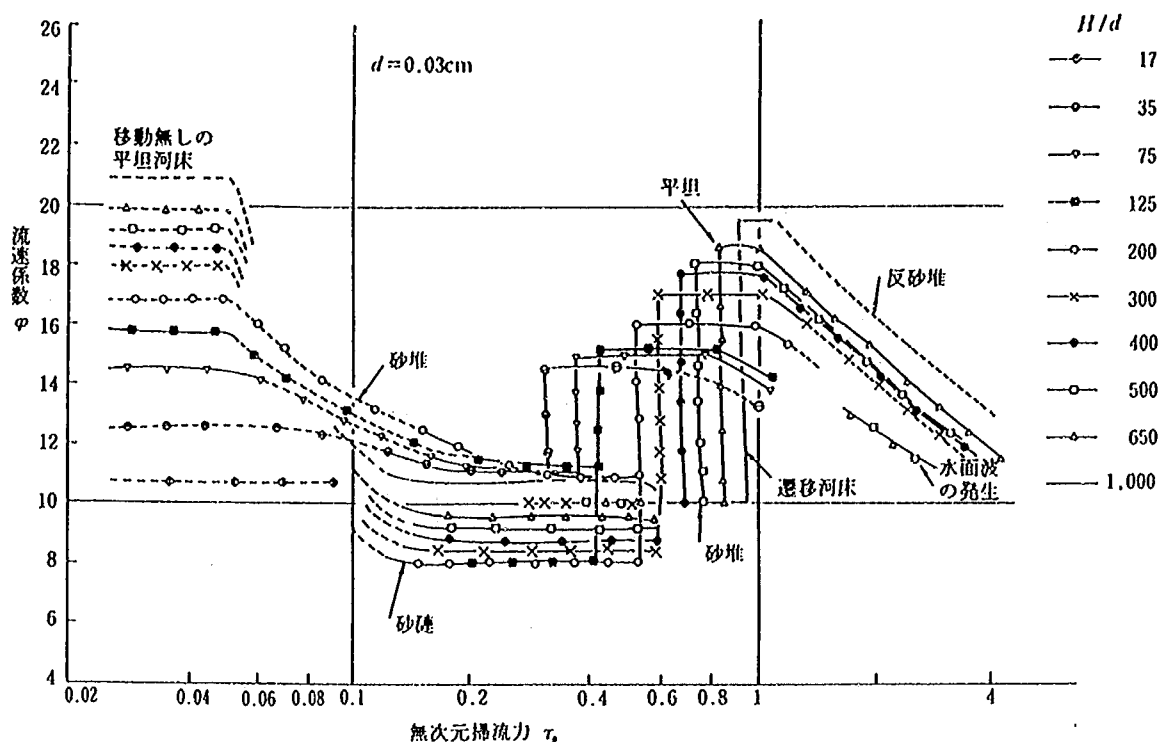


図-3. 3 ψ と τ_* の関係 ($d=0.03\text{cm}$, $H/d=10\sim1000$ の場合)

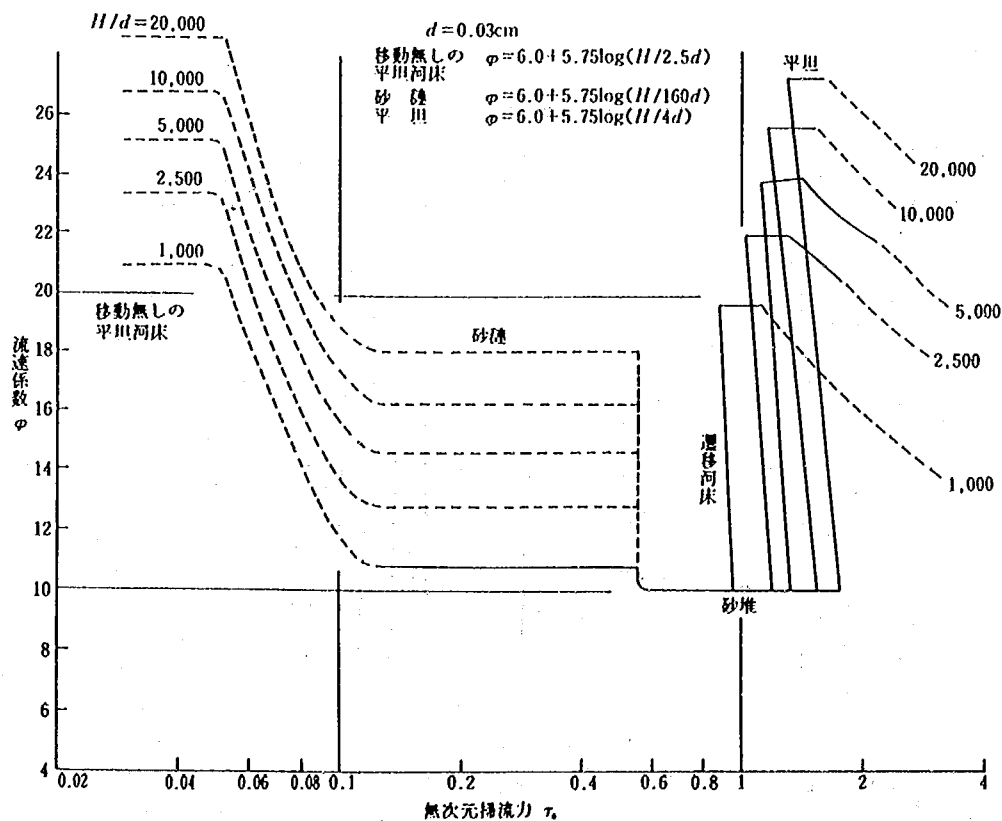


図-3. 4 ψ と τ_* の関係 ($d=0.03\text{cm}$, $H/d=1000\sim20000$ の場合)

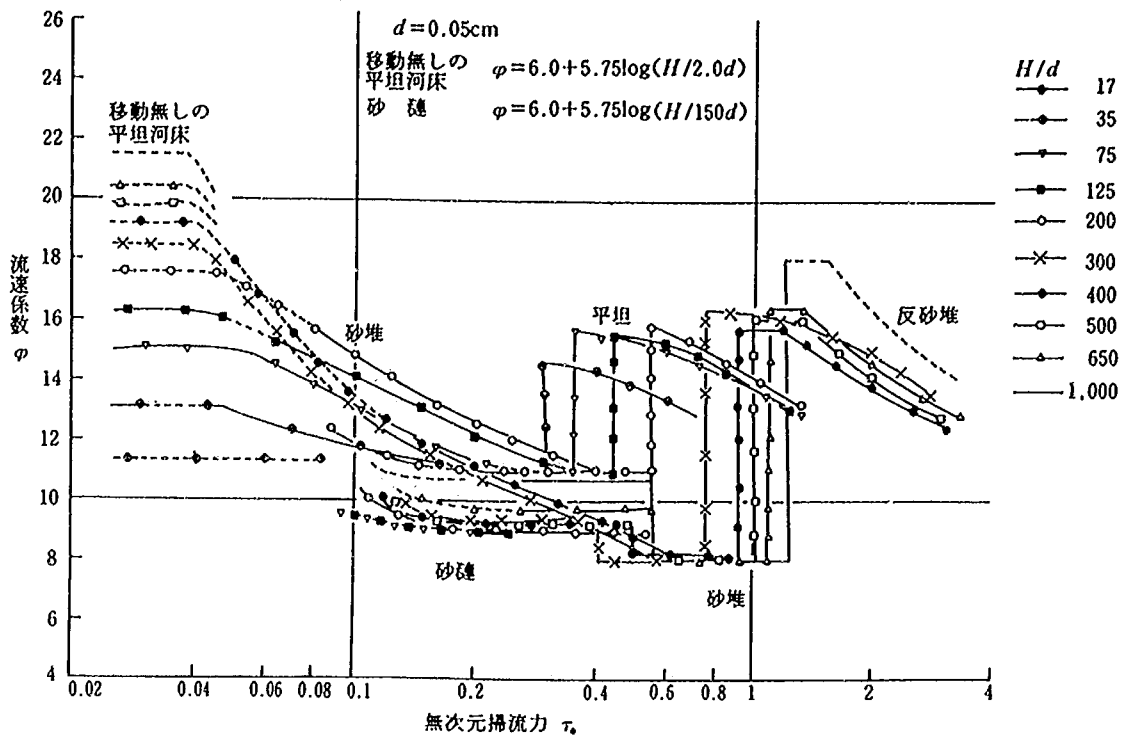


図-3. 5 φ と τ_* の関係 ($d=0.05\text{cm}$, $H/d=5\sim1250$ の場合)

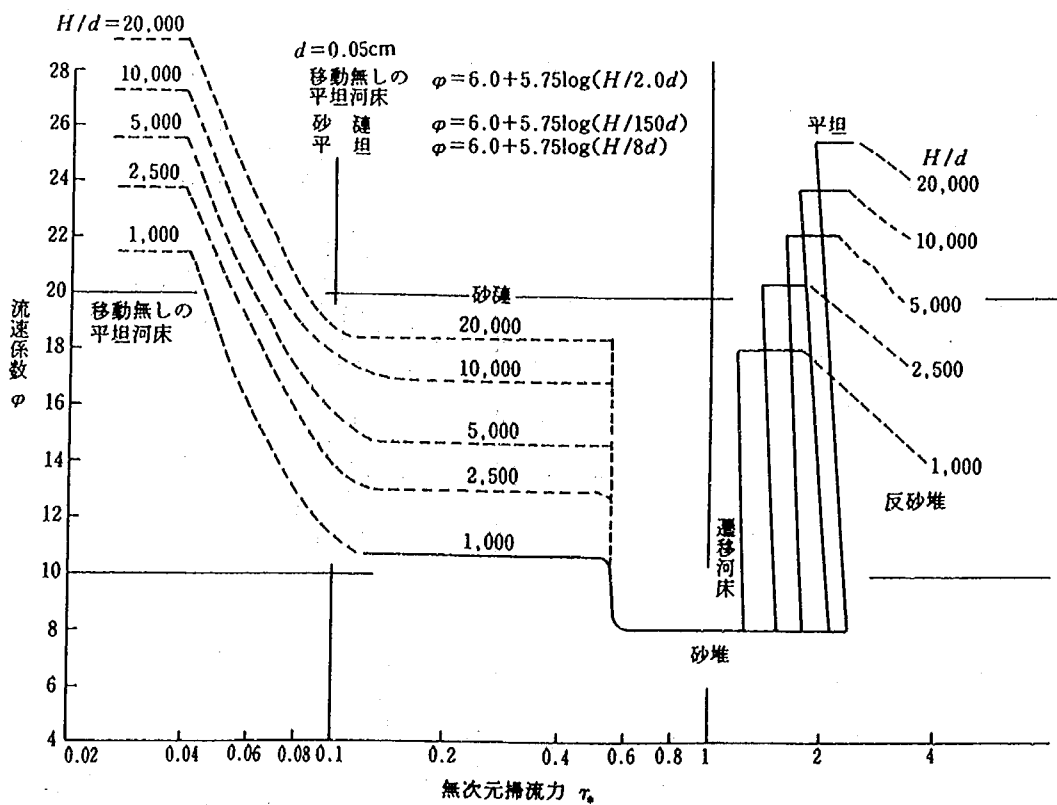


図-3. 6 φ と τ_* の関係 ($d=0.05\text{cm}$, $H/d=1000\sim2000$ の場合)

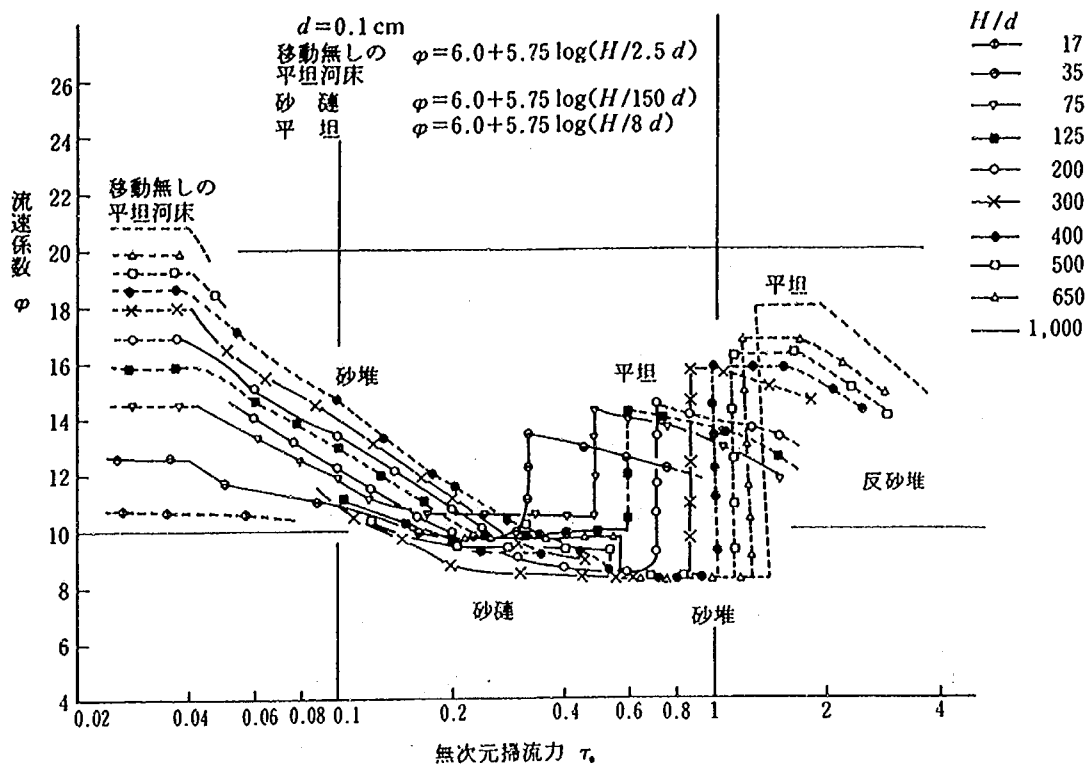


図-3.7 ψ と τ_* の関係 ($d=0.1 \text{ cm}$, $H/d=15 \sim 1000$ の場合)

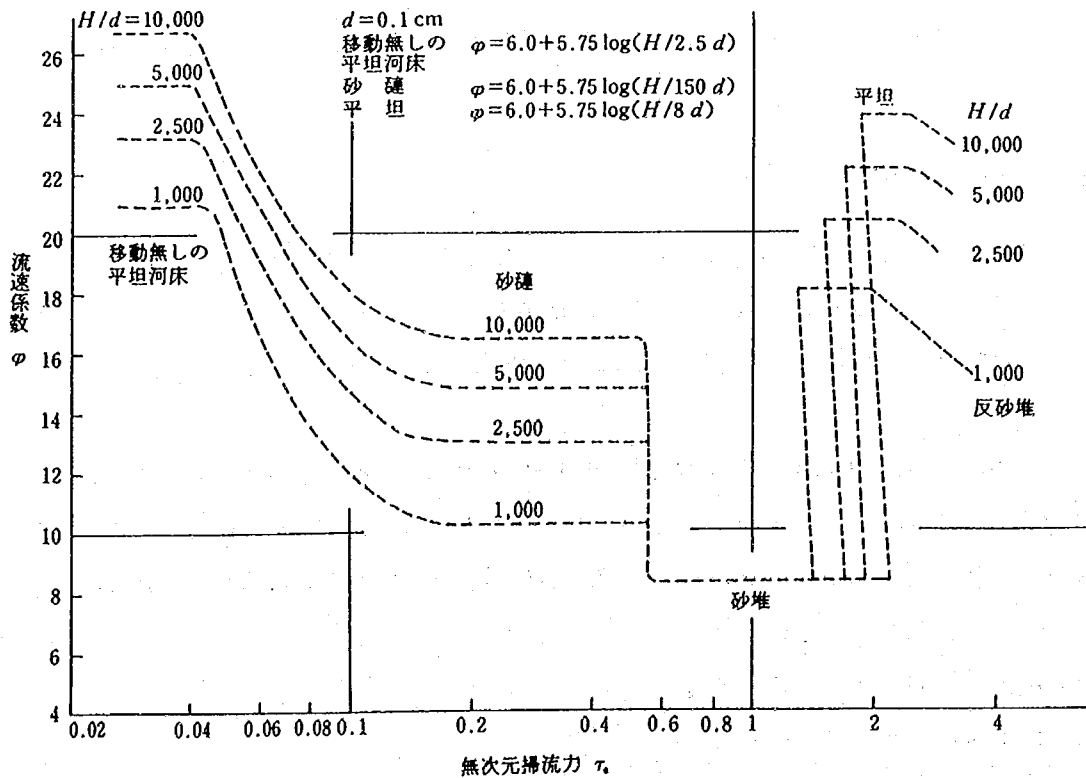


図-3.8 ψ と τ_* の関係 ($d=0.1 \text{ cm}$, $H/d=1000 \sim 10000$ の場合)

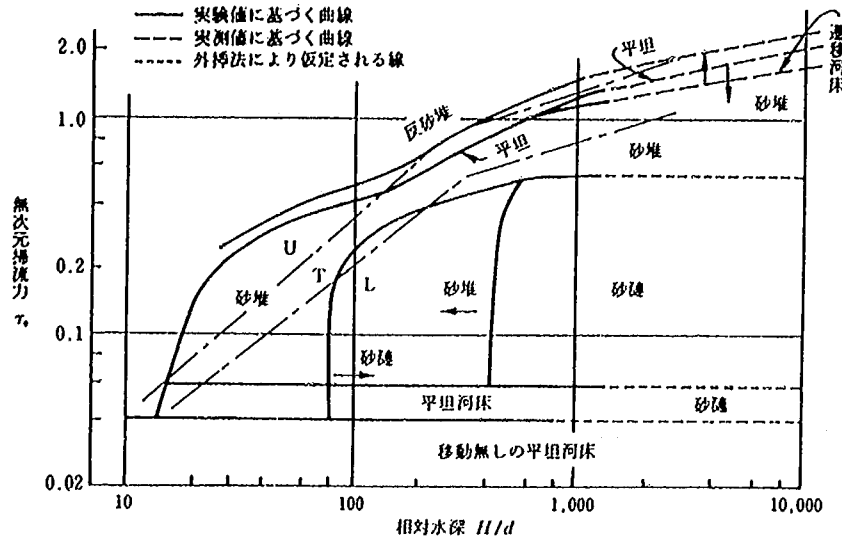


図-3. 9 小規模河床波の領域区分, $d=0.05\text{cm}$ の場合

参考のため、図-3.9には、芦田・道上による $\tau_* - H/d$ 平面での領域区分図を一点鎖線で示した。Uは Upper Regime, Tは遷移河床(Transition), Lは Lower Regime である。ただし F_r が0.8以上を Upper Regime としている。

次に流れの抵抗と河床形態との関係を述べ、実験資料の無い領域の ψ と τ_* , H/d の関係をどのように推定したかをより詳しく説明する。

(1) 底質材料の移動を伴わない平坦河床 (No Motion)

水路幅が十分に広く、流速の対数曲線型流速分布式が成立しえる場合には、Nikuradse の実験常数⁴⁰⁾を適用して

$$\psi = 6.0 + 5.75 \log_{10} H/C_1 d \quad (3-3)$$

と考えられる。ここで C_1 は Re_* の関数である。ただし、粗面乱流の状態 ($u_* k_s/\nu > 70$) では C_1 は一定値となる。ところでこの C_1 の値は、Nikuradse の実験結果をそのまま適用し、 $k_s=d$ として ψ を評価するよりも、移動床の実験結果を利用して評価した方が、より実態に近くなると考え、表-3.1の資料を使って求めることにした。

表-3.1の No.3 の $d=0.0541\text{cm}$ および、 $d=0.0586\text{cm}$ の場合の ψ の値は、河床の整形状態がよかったためか $C_1 \approx 1$ 程度とすると (3-2) 式に合うが、他の多くの資料では C_1 の値はこれより大きな値であった。資料の多さ等を総合的に判断して $\tau_* > 0.03$ で底質材料の移動の伴わない場合の C_1 の値は、

$d=0.02\text{cm}$ に対して	$C_1=3.0$
$d=0.03\text{cm}$ に対して	$C_1=2.5$
$d=0.05\text{cm}$ に対して	$C_1=2.0$
$d=0.1\text{ cm}$ に対して	$C_1=2.5$

と一定値とした。粒径0.3cm以上の場合は資料が少なく明確には述べられないが、一級河川の砂利を河床材料に持つ河川の流速係数の資料より $C_1=2.5$ とした。

粒径が小さいと、粒径が一定であっても τ_* の値が変わると R_{e*} 数が変化するため、 C_1 の値は多少変化するはずであるが、 C_1 を一定値としたのは、 τ_* が0.03から0.06の範囲では R_{e*} の変化は最大と最少で1.4倍しか変わらず、また水路床上に粘性底層⁴¹⁾が存在している場合の Nikuradse の実験式によれば、 $C_1 \propto 1/R_{e*}$ であるので ψ の値に寄与する R_{e*} の違いの効果は最大で0.8程度であり、 C_1 を一定値としても実用上問題が生じないからである。なお、水路床近くの流れの状態が遷移状態になるような R_{e*} の範囲では、 ψ に対する R_{e*} の影響はより小さくなる。

〔2〕砂漣 (Ripples)

H/d が500以上の場合の砂漣の波長 L_s および波高 H_s に対する粒径 d の比は

$$L_s/d \text{ or } H_s/d = f(\tau_*, R_{e*}) \quad (3-4)$$

であり、十分に発達した砂漣の場合、ある特定の粒径に対してこの比は、Yalin, M. S.⁴²⁾ や土木学会水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会²⁾ で指摘しているように、ほぼ一定となる。従って、河床面付近の凹凸は粒径 d に比例するので、相当粗度高 k_s も d に比例し、

$$\psi = 6.0 + 5.75 \log (H/C_2 d) \quad (3-5)$$

と推定される。ここで C_2 はある特定の粒径に対しては一定である。 H/d が500以上の実験資料より C_2 を求めると

$$d = 0.02\text{cm} \text{ に対して } C_2 = 280$$

$$d = 0.03\text{cm} \text{ に対して } C_2 = 160$$

$$d = 0.05\text{cm} \text{ に対して } C_2 = 150$$

$$d = 0.1 \text{ cm に対して } C_2 = 150$$

である。 H/d が500より小さい場合は、砂漣形状が水深の影響を受けるため、 C_2 の値は H/d の影響を受ける。 H/d が300以下では図-3.2, 3.3, 3.5に示すように、 ψ の値は H/d によってあまり変化しなくなり、 $d = 0.02\text{cm}$ および 0.03cm に対して8程度、 $d = 0.05\text{cm}$ に対して9程度の値となる。

〔3〕砂堆 (Dunes)

H/d が300以下で、 τ_* が0.5以下での ψ の値は、図-3.10に示すように砂堆の H_s が τ_* が増加するにつれて大きくなるため、形状抵抗が増加し、 ψ の値は小さくなるが、 τ_* が0.6より大きい場合は、 ψ の値は H/d の値によってあまり変化しない。この理由は、この領域の砂堆のスケールが H/d によらず水深に比例し、その形状抵抗損失が表面まさつ抵抗損失より十分に大きく、相当粗度 k_s が H に比例したものとなるためである。なお τ_* が0.6以上での砂堆河床の ψ の値は粒径によって多少変わり、 $d = 0.02\text{cm}$ で11.5、 $d = 0.03\text{cm}$ で10、 $d = 0.05\text{cm}$ および 0.1cm で8程度の値となっている。この原因は、粒径の小さい方が H_s/H が小さいためと言うより、波形勾配 H_s/L_s が小さいことによるらしい ($d = 0.05\text{cm}$ の場合 $H_s/L_s = 0.05$ である

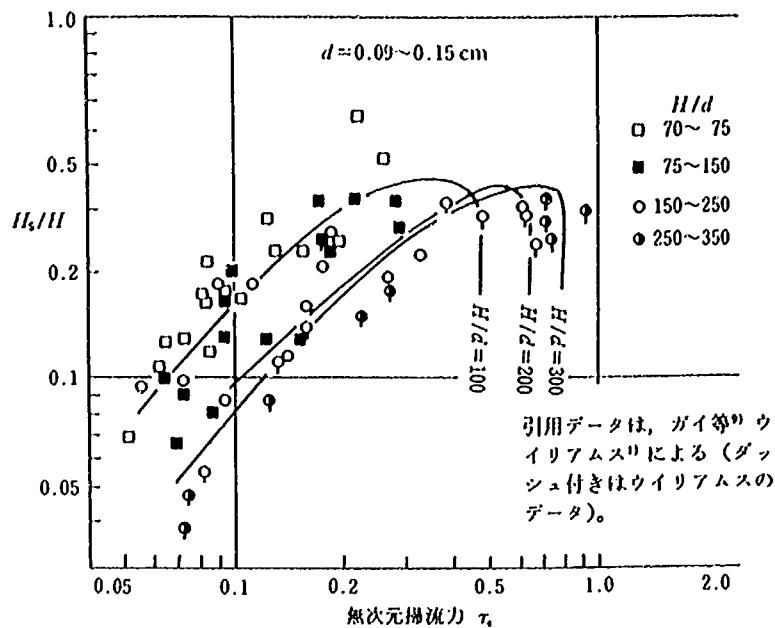


図- 3. 10 砂堆の相対波高 H_s/H と τ_* の関係, $d=0.09\sim0.15\text{cm}$ の場合

が, $d=0.03\text{cm}$ では $H_s/L_s=0.04$ となっている⁷⁾。

(4) 遷移河床 (Transition)

遷移河床における ψ の値は, 水深, 粒径が分かっている, その値を正確には予測することができない。なぜなら, 河床形態が砂堆から平坦河床の間で変化するからである。ある特定の H/d に対して平坦河床で最も小さな τ_* は, 砂堆河床で最も大きな τ_* より多少小さい。このことは同一の水位, 勾配において異なった単位幅流量を生じる可能性が有ることを示している。これが抵抗の多価性と言われる現象⁴²⁾である。

(5) 平坦河床 (Flat bed)

多量の土砂移動を伴った平坦河床の ψ は, この土砂移動によって, 土砂移動のない平坦河床の ψ とは多少異なった値となる。

H/d の小さい場合の ψ は実験資料より求め, H/d が大きく資料の無い所は

$$\psi = 6.0 + 5.75 \log (H/C_3 d) \quad (3-6)$$

と仮定し, H/d の大きな実験資料, また河川の実測資料も参考にして, C_3 の値を求めた。評価された C_3 の値は

$d=0.02\text{cm}$ に対して	$C_3=3$
$d=0.03\text{cm}$ に対して	$C_3=4$
$d=0.05\text{cm}$ に対して	$C_3=8$
$d=0.1\text{ cm}$ に対して	$C_3=8$

である。

なお、 C_3 は本来 R_{0*} によって変化するが、 H/d が1000以上で平坦河床の場合の τ_* の範囲である1.0~2.0では、粒径が一定であれば R_{0*} は最小と最大で1.4倍しか変わらず、〔1〕で述べたのと同様の理由によって、 C_3 を一定値としても実用上問題は生じない。

〔6〕反砂堆 (Antidune)

τ_* が増加するにつれて、水面波の発達と碎波が生じるようになるため流れの抵抗は増加し、 ψ は小さくなる。しかし、 H/d が1000を越える実験室資料は少なく、2000を越える資料は Rio Grande 川の観測例²⁰⁾を除けば無いようである。 H/d の大きな場合の ψ は前述の河川資料の整理結果⁷⁾を考慮しながら H/d が小さい場合の ψ と τ_* の関係が同様に成立するとし、 H/d が小さい場合の ψ と τ_* の関係式の傾きをそのまま H/d が大きい場合にも適用した。

以上、河床形態毎に ψ と τ_* 、 H/d の関係の推定法を示した。これより流れの抵抗と水理量の関係を河川で生じる水理量の範囲について、図-3.2~図-3.8に示し、流速係数 ψ を水深 H 、勾配 I 、粒径 d の三量で評価し得るようにした。

3.3 流砂量と河床形態

河床形態は流れの抵抗と密接な関係にあるのみならず流砂量とも強い関係がある。本節においては、この関係について述べる。

図-3.11~図-3.15は、粒径0.02, 0.03, 0.05, 0.1, 1.0cmの移動床の無次元流砂量 $q_s/u_* d$ が τ_* 、 H/d の変化に対してどう変わるかを、河床形態を併記して図示したものである。ここで、図中の実線の部分は、3.2で述べた実測資料を基にして描いたものであり、点線の部分は、実測資料の無い領域での推定線である。推定線は、実測資料がある所の河床波形態と $q_s/u_* d$ の関係を分析し、そこで分かった経験的事実を資料の無い所まで extrapolate 上げ、また粒径が異なっても同一の τ_* 、 H/d で河床形態が同じものであれば、 $q_s/u_* d$ と τ_* 、 H/d の関係がほぼ類似のものになるだろうとして描いたものである。ただし、 H/d が5000以上の場合の推定線は Einstein の流砂量理論⁴⁹⁾を採用して描いた。

図中の同一シンボルを付した線は、相対水深をある値に固定した時、 τ_* の変化によって、 $q_s/u_* d$ がどう変わるかを示したものである。河床形態が異なると土砂の運動形態が異なり、 $q_s/u_* d$ と τ_* 、 H/d の関係が変わるため、明確に曲線群が識別でき、曲線の勾配がほぼ同じである曲線群は、同じ河床形態となっている。

各河床形態と流砂量の関係は次のごとくである。

〔1〕砂漣 (Ripples)

3.2〔2〕で述べたように H/d がある程度大きいと、ある特定の粒径に対して十分に発達した砂漣の H_s/d はほぼ一定値となり、砂漣の相当粗度 k_s は $k_s=C_2d$ となる。つまり、河床近くの流速や乱れの強さは、水深によっては変化せず、 u_* と平均河床面からの高さ y のみに依存することになる。このことは、砂漣で

は流砂は河床近くのみで動くので、ある特定の粒径に対する無次元流砂量 $q_s/u_* d$ は τ_* のみに依存し、 H/d に影響を受けないことが推察される。事実、図-3.11～図-3.14に示すように

$$\begin{aligned} d=0.02\text{cm} \text{ 及び } 0.03\text{cm} \text{ に対して } & H/d=300 \\ d=0.05\text{cm} & \text{ に対して } H/d=450 \\ d=0.1\text{ cm} & \text{ に対して } H/d=600 \end{aligned}$$

以上であれば、 $q_s/u_* d$ は τ_* のみの関数となる。なお、 $d=0.1\text{cm}$ の場合には H/d が600を越える実測資料が無く推定値であるが、米国 East Fork 川の掃流砂観測資料³³⁾ ($d=0.1\sim 0.2\text{cm}$) を整理解析した結果⁴⁴⁾ は、図-3.14の H/d が600以上の $q_s/u_* d$ と τ_* の関係線に近い値となっており、この推定線は十分に実用に耐えるものと考えている。

この H/d が大きい場合の砂漣河床の流砂量式を、資料が十分にある0.02, 0.03, 0.05cmに対して示せば以下のようなものである。

$$\left. \begin{aligned} d=0.02\text{cm} \text{ に対して } q_s/u_* d &= 11.4 \tau_*^{5.4} \\ d=0.03\text{cm} \text{ に対して } q_s/u_* d &= 14.6 \tau_*^{4.6} \\ d=0.05\text{cm} \text{ に対して } q_s/u_* d &= 7.99 \tau_*^{4.25} \end{aligned} \right\} \quad (3-7)$$

H/d が小さい場合は、砂漣の形状が水深の影響を受けるので $q_s/u_* d$ は τ_* , H/d の両方の影響を受けることになる。 d が0.05cm以下では、 H/d が前述した値より大きな場合の $q_s/u_* d$ と τ_* の関係線と平行な関係線となり、その傾きは H/d が大きな場合とほぼ等しいが、 d が0.1cmになると傾きが緩くなる。なお d が0.06cm以上になると R_{e*} が10以上となって砂漣が発生しない³⁸⁾と言われるが、図3-14に示すごとく流砂量から見ると $d=0.1\text{cm}$ の場合でも、 d が0.06cm以下の砂漣の場合の $q_s/u_* d$ の τ_* , H/d の関係と似たような関係となっている。今まで砂堆として分類されてきたもののうちには、砂漣と見なすべきものが含まれていると思われる。 $d=0.1\text{cm}$ の砂漣の波長は、 L_s/d が1000程度であるので1 mにも達する。これが砂漣と見なされなかった大きな理由である。 d が0.06cm以上の砂漣と砂堆の区分は形態だけで明確に分類しえず、 ψ および $q_s/u_* d$ の値から総合的に判断する必要がある。

τ_* が0.06～0.15で $q_s/u_* d$ が 10^{-2} 以下の場合の砂漣河床の $q_s/u_* d$ は、平坦河床より実験を行った場合、砂漣が十分に発達しないので、 τ_* が大きく砂漣が十分に発達した $q_s/u_* d$ より大きくなることがある。この範囲の $q_s/u_* d$ は砂漣の発達過程の履歴の影響を受け、明確に(3-1)式の関係性を求められない。図-3.11～図-3.14において incomplete ripples と示した領域がそれに当る。

(2) 砂堆 (Dunes)

τ_* が0.6より大きく、また H/d がある程度大きい場合 ($H/d > 300$) には、 $q_s/u_* d$ と τ_* の関係には、 H/d の影響をほとんど受けていない。このことは底質材料を有効に動かす掃流力は、表面摩擦力によるものと考えられるので、砂堆による形状損失と表面摩擦損失の比が水深によってあまり変わらないと解釈することができる。

H/d が小さい場合 ($H/d < 300$) には、 H/d が大きな方が同一 τ_* に対して $q_s/u_* d$ は小さい値を持つ。これは H/d が小さいほど表面摩擦損失の割合が全損失に占める割合が大きく、 H/d が小さい方が有効掃流

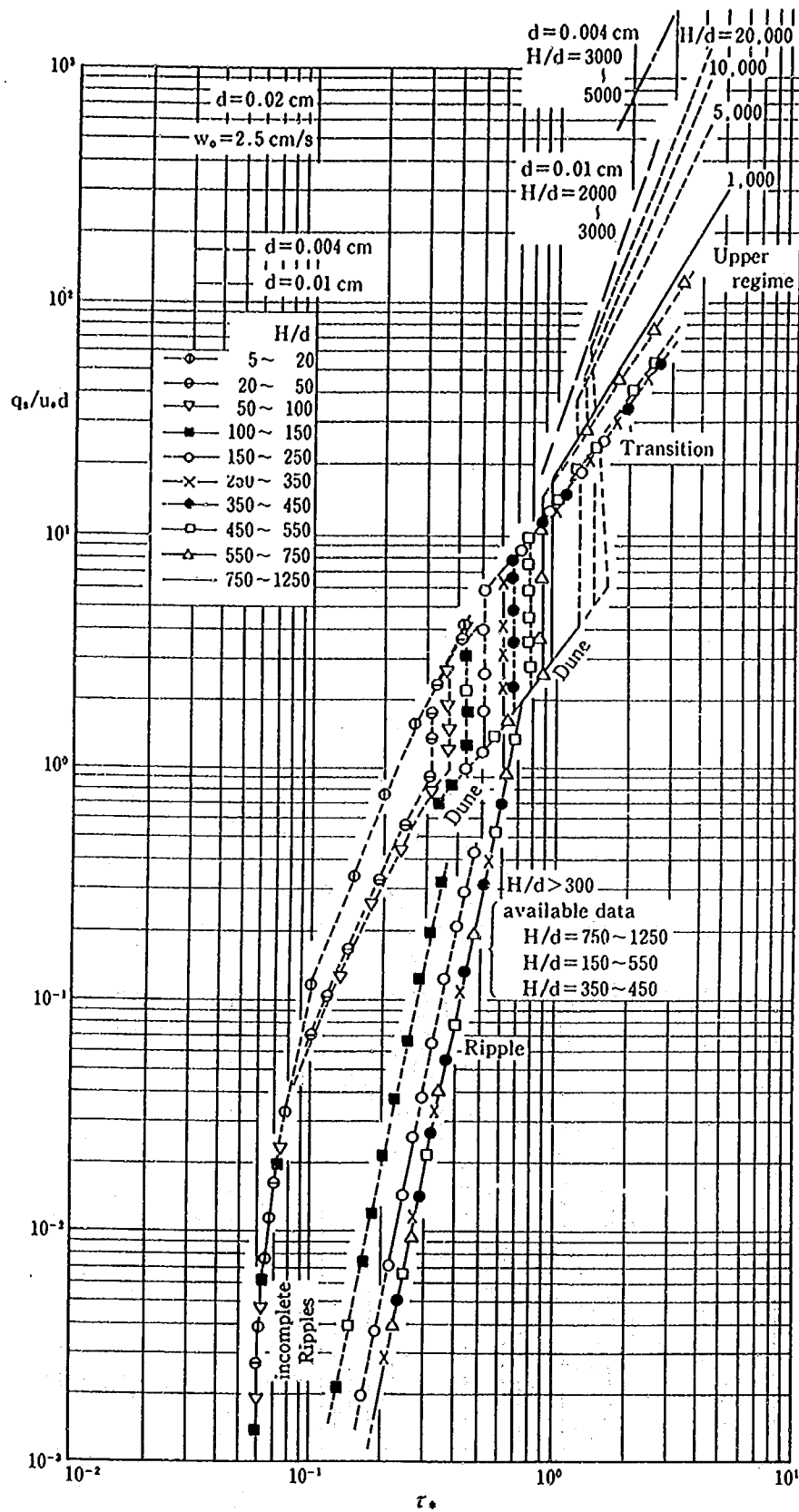


図-3. 11 $q_s / u_* d$ v. s. τ_* , $d = 0.02 \text{ cm}$ の場合

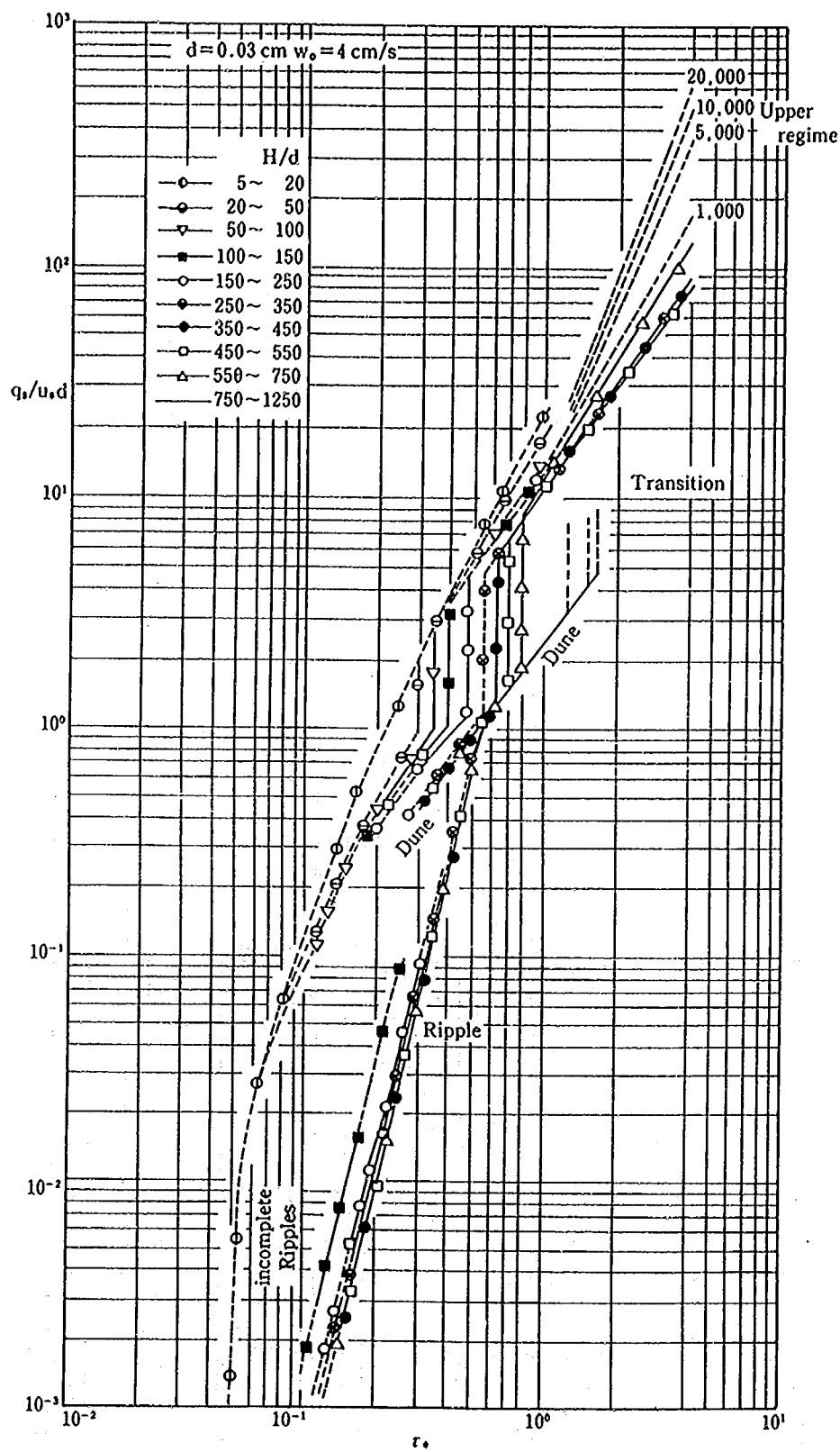


図-3. 12 $q_s / u_* d$ v. s. τ_* , $d = 0.03 \text{ cm}$ の場合

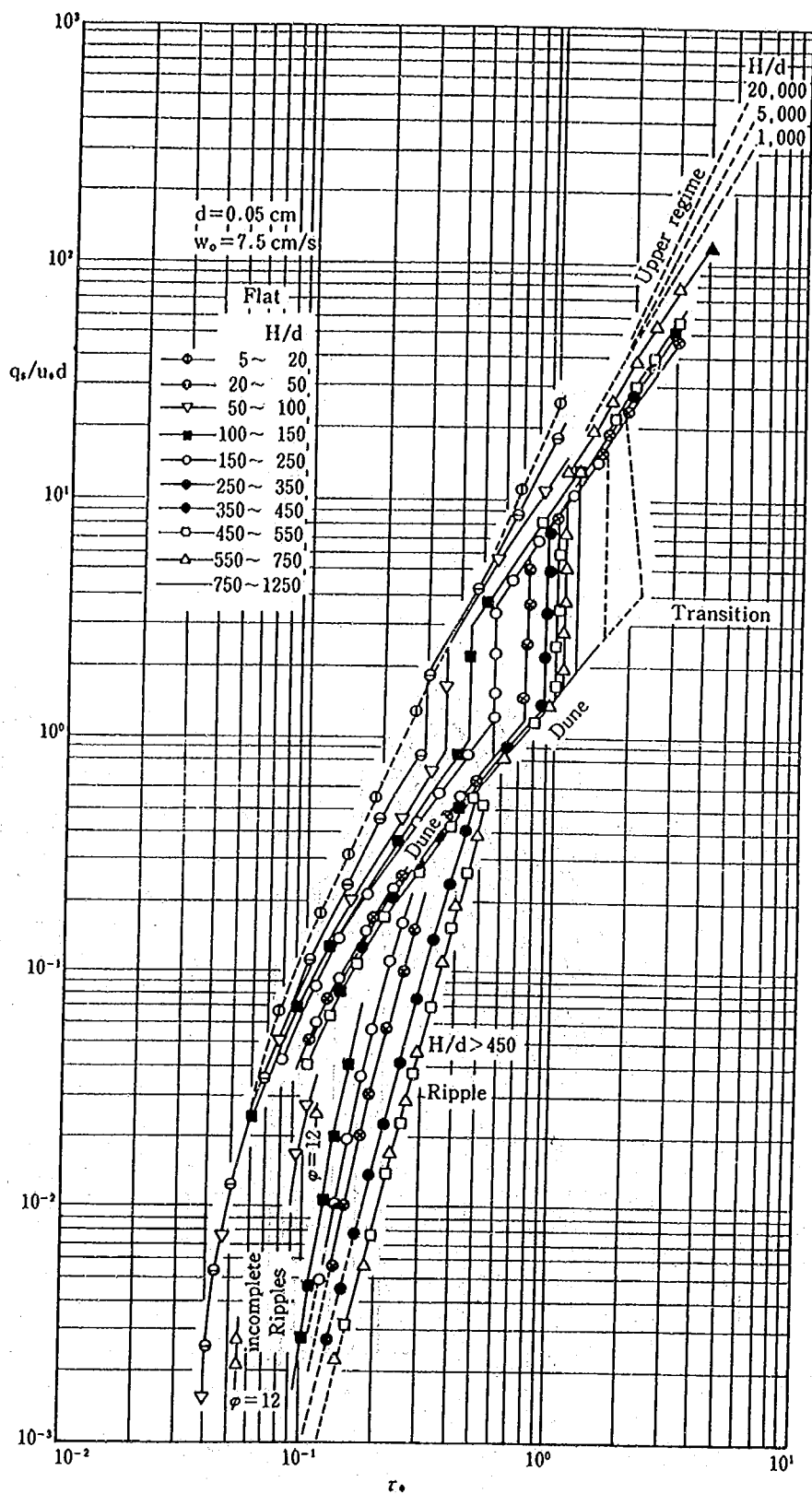


図-3. 13 $q_s / u_* d$ v. s. τ_* , $d = 0.05 \text{ cm}$ の場合

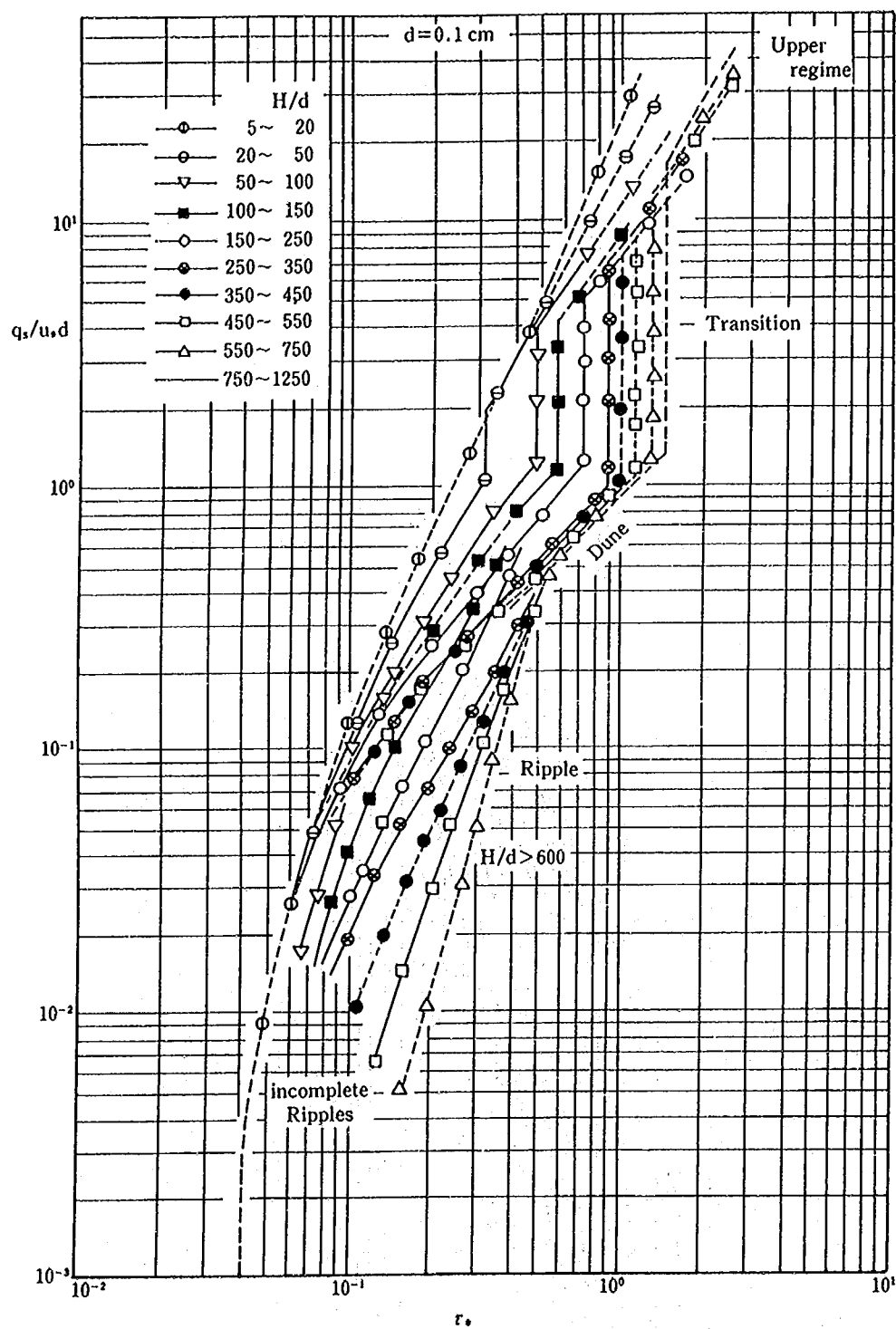


図-3. 14 $q_s / u_* d$ v. s. τ_* , $d = 0.1 \text{ cm}$ の場合

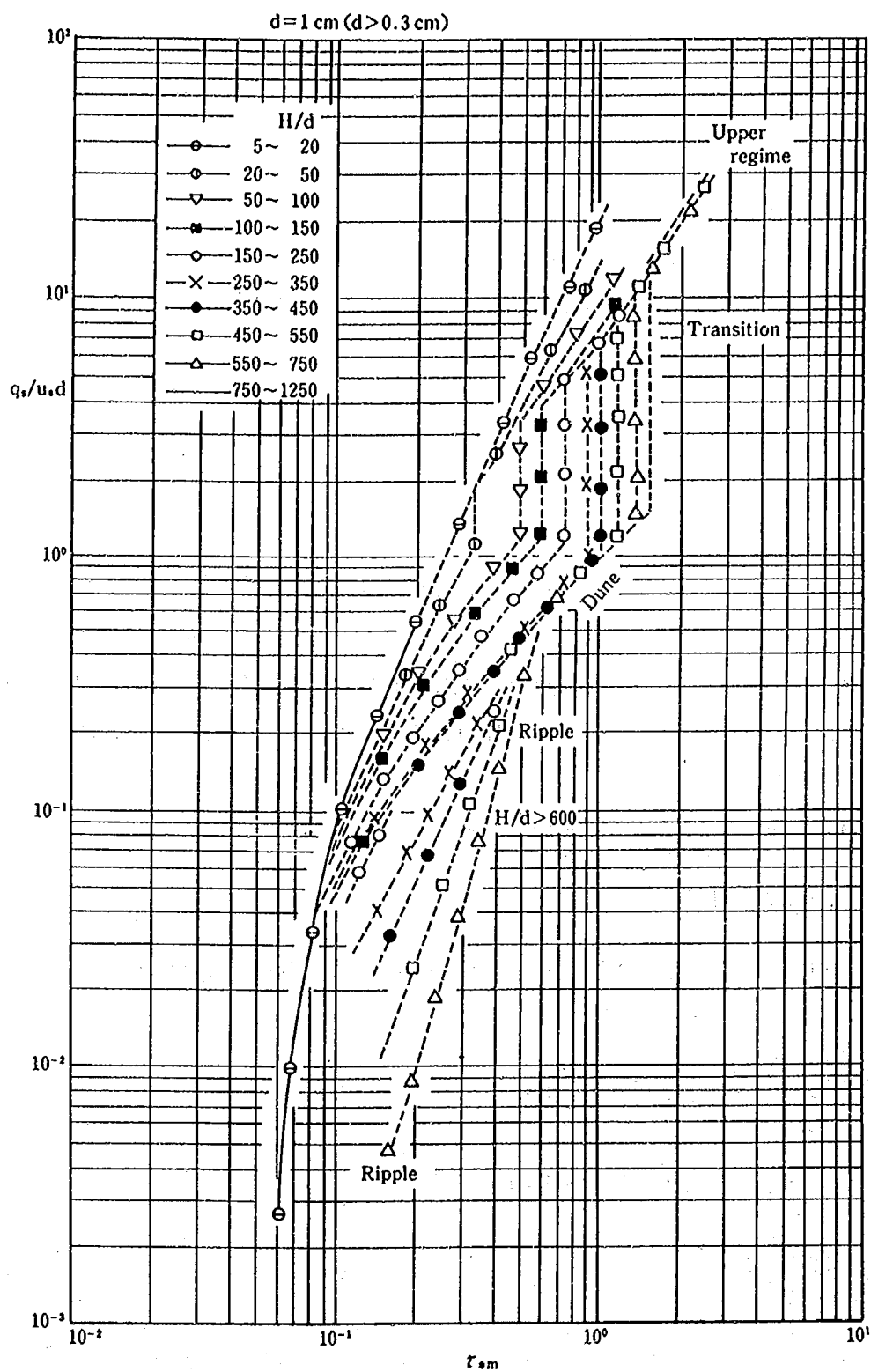


図-3. 15 q_s/u_*d v.s. τ_* , $d = 1 \text{ cm } (d > 0.3 \text{ cm})$ の場合

力が大きいことによると考えられる。

$d=0.05\text{cm}$ の場合に顕著に見られる現象であるが、 H/d が200前後で $q_s/u_* d$ と τ_* の関係が多少変わり、 H/d がこの値より小さい場合と大きい場合では曲線群の位置が多少ずれている。ちょうど $H/d=150\sim 250$ の場合は、どちらの曲線群の中にも入る。図-3.5に示されるように、 $H/d=200$ 前後の ψ と τ_* の関係線が2本有り、 ψ の値の大きな場合、図-3.13における $q_s/u_* d$ と τ_* の関係において H/d が小さい曲線群($q_s/u_* d$ の値が大きな曲線に対応している。このことは $H/d=200$ 前後で砂堆の形状が多少性質の異なったものとなっていると思われる。

(3) 遷移河床 (Transition)

遷移河床における $q_s/u_* d$ の値は、 τ_* 、 H/d が分かっている、河床形態が砂堆から平坦河床まで変化しうるので予測することができない。予測するためには、河床状態に関する情報量、つまり ψ の値が必要である。

ただし、たとえ ψ の値が分かっている、流砂量に関する実測資料の不足のため、いかに $q_s/u_* d$ を評価したら良いのかは、今のところ明確に示していない。

(4) 平坦河床及び反砂堆 (Upper Regime)

平坦河床および反砂堆での流砂量は、浮遊砂の占める割合が多いのでこれを考慮した考察が必要である。

H/d が1000以下の場合は、実測資料がある場合は資料を基に、無い場合は1000以下での平坦河床の流砂量および粒径の異なる場合の $q_s/u_* d$ と τ_* の関係を基に類推によって $q_s/u_* d$ と τ_* 、 H/d の関係図を描いたが、 H/d が1500以上の実測資料が少ないので、 H/d が大きな場合は、 $q_s/u_* d$ と τ_* 、 H/d の関係を以下のごとく評価することにした。

Einsteinの流砂量理論⁴³⁾によれば、全流砂量 q_s は次式に示される。

$$q_s/u_* d = 23.2 \cdot Ca / \rho s \cdot (Pr I_1 + I_2 + 1) \quad (3-8)$$

ここで u_*' はEinsteinによって定議された有効掃流力に対応する摩擦速度、 Ca は河床から $2d$ 離れた所の土砂濃度(重量)である。 I_1 、 I_2 、 Pr は以下の如くである。

$$I_1(\eta_0 \cdot \beta) = 0.216 \frac{\eta^{\beta-1}}{(1-\eta_0)^\beta} \int_{\eta_0}^1 \frac{(1-\eta)^\beta}{\eta} d\eta \quad (3-9)$$

$$I_2(\eta_0 \cdot \beta) = 0.216 \frac{\eta^{\beta-1}}{(1-\eta_0)^\beta} \int_{\eta_0}^1 \frac{(1-\eta)^\beta}{\eta} \ln \eta d\eta \quad (3-10)$$

$$Pr = 2.3 \log \frac{30.2 \times H}{d} \quad (3-11)$$

$$\beta = \frac{w_0}{0.4u_*'} \quad (3-12)$$

ここで $\eta_0 = 2d/H$ 、 $\eta = z/H$ 、 X は $u_*' d / 11.6\nu$ の関数、 w_0 は底質材料の沈降速度、 z は河床から垂直方向の距離である。

もし河床形態が平坦河床とすると、ある特定の粒径に対しては、河床近くの流速分布、乱れ特性は H/d の影響は少なく τ_* のみに関係すると考えられる。従って $u_*' = u_*$ と仮定し、(3-8), (3-9), (3-10), (3-11), (3-12) 式を使って、 $H/d \approx 1,000$ の場合の $q_s/u_* d$ と τ_* の関係線より、 Ca を求め、この Ca は H/d が大きくても、 τ_* が同じであるなら同じ値を持つと仮定して、 $q_s/u_* d$ を (3-8) ~ (3-12) 式より評価した。なお沈降速度は Rouse³⁴⁾ による水温 20℃ の値とした。評価された $q_s/u_* d$ は形状損失や浮遊砂によるカルマン常数の変化等を考慮していないので、精度良く流砂量を評価しているといえないが、河川工学上の種々の判断に役立つものと考えられる。

なお図-3.13 に見るごとく H/d が 300 以下では、同一 τ_* に対して H/d が大きくなるほど $q_s/u_* d$ が小さくなるが、300 以上では H/d が大きくなるほど逆に $q_s/u_* d$ が大きくなる。 H/d が小さい場合は、浮遊砂濃度が高く、これによって流速分布形の変化や土砂含みの流体の密度の増加等によって流砂量が多くなるものと思われる。

3.4 粒子レイノルズ数の影響 (水温の影響)

無次元流砂量 $q_s/u_* d$ および流速係数 ψ を規定すると考えられる Re_* , τ_* , H/d の三量の内、粒子レイノルズ数 Re_* は (3-2) 式で示したように水温によって ν が変化するのでその影響を受けるが、 d と τ_* に比べその影響は少ない。

図-3.16 には $\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$ (水温 20℃), $s = 1.65$ とした場合の Re_* と d , τ_* の関係を示したものである。同図左上には、水温が異なる場合、図中の各粒径ごとの Re_* と τ_* の関係線が、どれだけ横方向に位置がずれるかが分かるスケールを示してある。このスケールによって、水温が t ℃ の場合、 t ℃ に対するスケール上の位置と、20℃ の位置との距離を測り、20℃ の場合の Re_* と τ_* , d の関係線を上述の距離だけ横軸方向にその関係線の位置をずらせば、 t ℃ の場合の Re_* と τ_* , d の関係線が求まるものである。

ところで (3-1) 式の Re_* の $q_s/u_* d$ および ψ に対する影響は、底質が動くような水理量の場合であり、かつ Re_* が 150 程度以上 ($d > 0.3 \text{ cm}$) であれば、図-3.16 に示すように無次元限界掃流力が 0.06 とほぼ一定となり、粒子の抗力係数、揚力係数が Re_* の影響を受けなくなること、また沈降速度 w_o も図-3.17 に示すように $\sqrt{d}$ に比例し抗力係数が一定値となること、また底面の境界層も粗面乱流となること⁴⁰⁾等によって Re_* の影響はほとんど受けないものと思われる。これ以下の Re_* ($d < 0.3 \text{ cm}$) であれば、(3-1) 式の Re_* を無視し得ないと考えられる。そこで本節においては Re_* が移動床の水理に及ぼす影響について述べる。

(3-2) 式によると、 τ_* と d が定まっている場合、 Re_* は ν に反比例する。図-3.16 の左上の水温変化による影響スケールで示すように、水温が 20℃ から 40℃ に上昇すると Re_* が約 50% 増加、逆に 20℃ から 0℃ に下ると 50% 減少する。

良く知られているように、 Re_* は河床面近くの流速分布及び乱れ特性、境界層の厚さに影響を与える。また河床に存在する粒子の抗力係数、揚力係数及び粒子の相対沈降速度 w_o/u_* にも影響を与える。

上述した要因が、移動床流れの水理にどんな影響を与えるかを簡単に述べる。

(1) 限界掃流力

2 章で述べたごとく、 d が 0.3 cm 以下であれば、河床面近くの流速分布形、粒子の抗力および揚力係数等

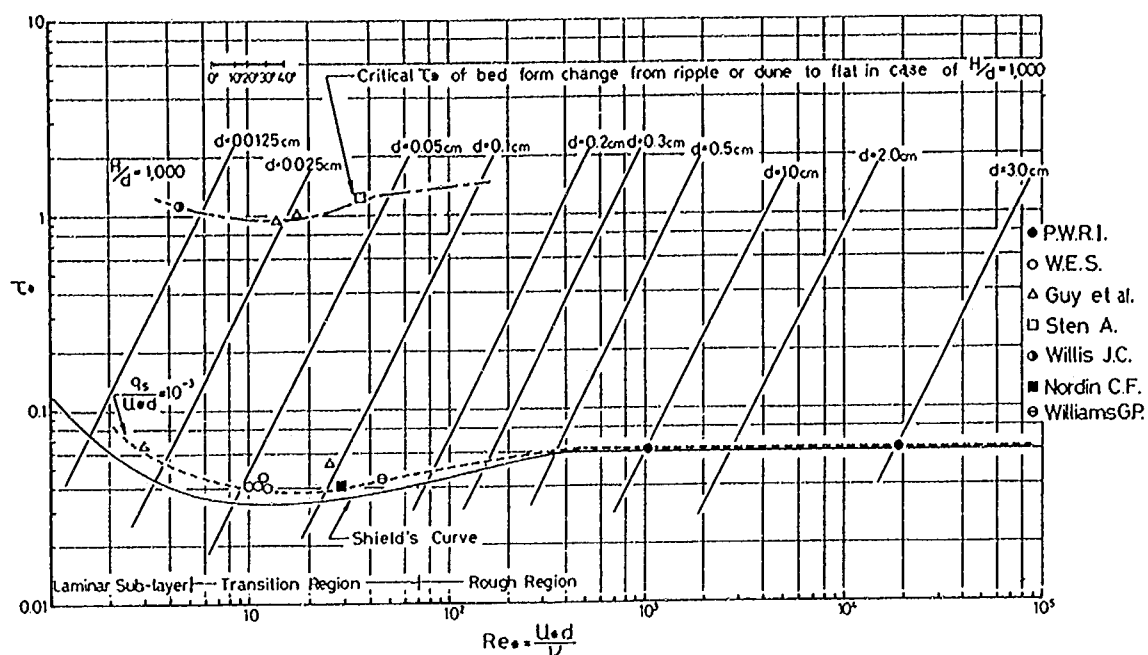


図-3. 16 Re_* , d , τ_* の関係

は Re_* によって変化する。それゆえ無次元移動限界掃流力は Re_* によって変化する。本報告で使われた資料を使って無次元流砂量 $q_s/u_* d = 10^{-3}$ に相当する τ_* の値(ほぼ τ_{*c} に近い値である。)を定めたものが、図-3.16に点線で示されている。これは各粒径ごとに、 $q_s/u_* d$ が 10^{-3} 付近の $q_s/u_* d$ と τ_* の関係を図示したものより、eye fitness によって $q_s/u_* d = 10^{-3}$ に相当する τ_* を求め、これを基にし、Shield の移動限界曲線³⁹⁾ 等も考慮して求めたものである。

同図より、Taylor, B. D.⁴⁵⁾ が述べたように、

同一水深、勾配、また河床が平坦で土砂移動量が

多くない、つまり限界掃流力より多少 τ_* が大きい所では、無次元限界掃流力の Re_* による変化同様、水温の低下は Re_* が 13 より小さければ q_s の減少、 Re_* が 13 から 300 では q_s の増加、300 より大きければ影響が無いことが良く理解しえる。

(2) 平坦河床上の抵抗係数

粗面管の抵抗係数に関する実験結果によれば、 Re_* が 70 以下で主流が乱れていれば、ある特定の H/d に対する ψ の値は、 Re_* によって変化する。 Re_* が 5 から 20 では、 ψ の値は Re_* が 70 より大きい場合より、1.0~1.3 程度大きくなり、5 以下では Re_* が小さくなるほど ψ は小さくなる。

本報告で使われた資料によると、平坦河床で土砂の多い場合(ただし $\tau_* = 0.8 \sim 1.5$)、特定の H/d に対しての ψ の値は粒径の小さいほど、つまり Re_* が小さいほど(ただし Re_* は 10~100 の範囲で)大きく、前

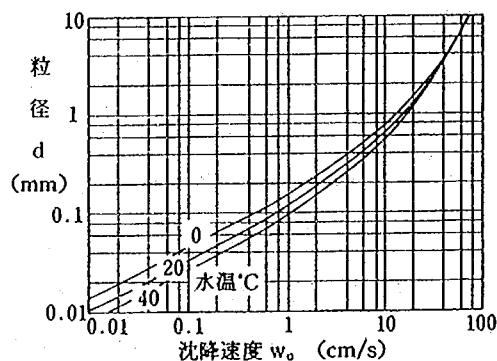


図-3. 17 砂粒の沈降速度と粒径の関係³⁴⁾

述の傾向と一致するが、土砂移動の無い平坦河床では、 ψ の値と粒径の間に明確な関係を見つけない。これは河床の整形条件が異なり砂粒の河床面での存在状態が違っていたためと思われる。

〔3〕砂漣における流れの抵抗と流砂量

砂漣河床における無次元流砂量 $q_s/u_* d$ は、以下に述べる H/d 以上では H/d に影響を受けない。

粒径0.02cm及び0.03cmに対して $H/d=300$

粒径0.05cm に対して $H/d=450$

粒径0.1 cm に対して $H/d=600$

また粒径が小さい程、同一の τ_{*t} , H/d という条件で $q_s/u_* d$ 及び ψ が小さい。このことは R_{e*} が小さい方が同一の τ_{*t} , H/d という条件の下で ψ , $q_s/u_* d$ が小さくなることを示す。これは Franco, J. J.⁴⁹⁾ による実験結果 ($d=0.023\text{cm}$, $s=1.65$ の底質材料を使った砂漣河床の流砂量は、同一 τ_{*t} , H/d の条件下では水温の低下は ψ と $q_s/u_* d$ を減少させる) と一致する。なぜこのようなことが起こるのか原因は良くわかっていない。

H/d が500以上の場合、砂漣から砂堆に移行する掃流力 τ_{*t} は0.6~0.7であるが、粒径0.01cmの場合 ($R_{e*} < 5$) は、砂漣から直接平坦河床に移行し、砂堆は生じない⁴⁹⁾ (筆者が行った粒径 $d=0.021\text{cm}$, $s=0.5$, $w_o=1\text{cm/s}$ の石炭粉の実験 ($R_{e*} < 7$) においても河床形態は砂漣から平坦河床に直接移行し、砂堆は生じなかった⁴⁷⁾)。土砂の移動形態を見ると砂漣河床においても浮遊砂が多く、土砂の移動形態が0.2mm以上の場合と異なっている。砂漣から平坦河床に砂堆を通さずに直接移行する原因は、このような土砂の移動形態の差によるものと思われるが、力学的な説明がついていない。

流砂量が小さい平坦河床 (限界掃流力より多少大きい掃流力) の状態から砂漣が発生する限界の掃流力に及ぼす R_{e*} の影響は資料が少ないのでほとんど分かっていないが、粒径が0.3mm以下であれば R_{e*} の変化 (水温の変化) によってこの限界の掃流力は変化するものと思われる。

〔4〕Lower regime から Upper regime への遷移限界掃流力 τ_{*t}

砂漣あるいは砂堆から平坦河床に変化する時の遷移限界掃流力は、 H/d のみならず R_{e*} によっても変化する。 $H/d=1,000$ の場合の τ_{*t} を本報告に使われた資料より求めたものが図-2.4に一点鎖線で示されている。これより τ_{*t} は水温が高くなると、 R_{e*} が10~20以下では低下、 R_{e*} が10~20以上では増加するだろうことが推測される。

〔5〕Upper regime における流砂量

Taylor と Vanoni⁴⁹⁾ は浮遊砂を持った平坦河床における水温変化が流砂量に及ぼす効果を次のように述べている。

“水温の変化が流砂量に及ぼす効果は、流砂量の少ない平坦河床 (限界掃流力より多少大きい掃流力の場) における場合と同じである。つまり R_{e*} が13以下では水温の増加は (流速、水深は同じ) 流砂量を増加させる。 R_{e*} が20から30においては水温の増加は流砂量を減少させる等々。”

しかしながら、筆者はこの結論には全面的に同意しえないものがある (もし流砂量という言葉が河床近

くの浮遊砂濃度、例えば河床から $2d$ 離れた所の浮遊砂濃度、におき変えるなら、正しいと思われる)。 τ_* が 1 より大きい場合の upper regime では、全流砂量に占める浮遊砂量は多く、水温の低下によって w_o が減少し、浮遊砂濃度の垂直方向の濃度勾配が減少する。これは Re_* が 13 以下においても水温の低下が全流砂量を増加させる一因になりうる。事実、 H/d が $1,000 \sim 2,000$ で τ_* が 1 より大きい場合では、 $d = 0.01\text{cm}$ の $q_s/u_* d$ は 0.02cm の $q_s/u_* d$ より大きい。つまり同一 τ_* 、 H/d では Re_* の小さい方が流砂量が多いだろうことを推察させる。水温の低下によって流砂量が増加するかしなないかは、底面近くの浮遊砂濃度の変化と浮遊砂濃度の垂直方向の濃度勾配の変化のどちらの効果が強いかにによって決まるものと考えられる。前者(底層濃度の変化)の効果は、小さい τ_* 、 H/d では浮遊砂の全流砂量に占める割合が小さいので強いものと思われる。

〔6〕砂漣の発生領域

無次元流砂量 $q_s/u_* d$ 、流速係数 ψ 、無次元形状特性 L_s/H 、 H_s/H 、 L_s/d 、 H_s/d 等は、3.2, 3.3 で示したように砂漣と砂堆では、 τ_* 、 H/d との関係がかなり異なる。本論では、砂漣と砂堆をそのスケールで区分するのではなく、実験データの特性が、砂漣的特性を持つか、砂堆的特性を持つかによって区分している。

砂漣と他の小規模河床波との区分を支配する無次元パラメーターは、無次元流砂量、流速係数と同様に (2-3) 式で表され、 $s = 1.65$ で砂州の影響を考えなければ、(2-4) 式で示される Re_* 、 τ_* 、 H/d の三量で区分される。

一般に砂漣は Re_* が $10 \sim 15$ 以下で発生すると言われているが砂漣の定義を前述したものとする、 $d = 0.05\text{cm}$ の場合、 $\tau_* = 0.2$ で $Re_* \approx 20$ 、 $\tau_* = 0.4$ で $Re_* \approx 27 \sim 28$ となるが、図-3.9 に示す $d = 0.05\text{cm}$ の場合の領域区分図を見ると、 H/d が 300 以上では砂漣が発生しており、 Re_* のみで砂漣の発生領域を区分するには無理があることが良く分かる。また粒径が 0.1cm でも H/d が 600 以上では砂漣的土砂移動量となっている。

小規模河床波の領域区分図は、粒径 0.3cm 以下では粒径毎に多少異なることが、3.2, 3.3 で明らかにされており、砂漣の発生領域は Re_* の影響を受ける。一般に H/d が 400 以下では、粒径の小さい方が、すなわち Re_* が小さい方が砂堆より砂漣になりやすい。このことは、粒径が同じでも水温の高い方が砂堆的特性を持つ小規模河床波が発生しやすいと判断される。すなわち粒径 0.05cm の場合の図-3.9 に示す砂堆と砂漣の混在域における小規模河床波は、水温の低い方が砂漣になりやすいと考えられる。¹¹⁾

τ_* が移動限界掃流力より多少大きい領域では、小規模河床波の発生なしに土砂の移動が生じる。その領域は、 $d = 0.02\text{cm}$ のように粒径が小さいと $Re_* < 5$ 以下であり、ほとんど移動が始まると砂漣が発達してしまう。 $d = 0.1\text{cm}$ のように粒径が粗粒になると Re_* が 20 程度までになる。 $d = 0.1\text{cm}$ の粗粒の場合、 H/d が小さい内は、平坦河床のまま土砂の移動が生じ、多少 τ_* が大きくなると砂堆が発生する。 H/d が大きい場合には、平坦河床から砂漣へ移行する。

つまり、土砂の移動を伴った平坦河床の存在領域は Re_* が 10 以下では非常に小さく、それ以上になると大きくなる傾向がある。

注1)

移動床の模型実験においては、現地河川が砂利河川の場合、模型縮尺に合わせて河床材料を縮小するが、模型の河床材料が0.6mm程度以下となると、現地では平坦あるいは砂堆河床であるものが、模型では砂澱が発生してしまい粗度や流砂量の相似性が崩れることがある。

土木研究所で行った河川移動床模型実験では、粒径 d_m が0.6～0.8mmの河床材料を使って実験を行ったところ、夏期においては砂澱が発生せず、河床変動の再現性や流れの再現性が良かったが、冬期においては河床面上に砂澱が発生し、粗度の増加、流砂量の低下となって、模型上での現地で生じるであろう現象の再現性が悪く、模型で生じた現象の解釈に苦しんだことがある。

参考文献

- 1) Williams, G. P., 1970 ; Flume width and water depth effects in sediment-transport experiments, U. S. Geological Survey Professional Paper 562-II.
- 2) 土木学会水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会, 1973 ; 移動床流れにおける河床形態と粗度, 土木学会論文集第210号, pp.65-91.
- 3) Laursen, E. M., 1956 ; The hydraulic of a storm-drain system for sedimenttransporting flow, Iowa Highway Research Board.
- 4) 奈良井修二, 1970 ; 河床形態の変動特性に関する研究(2) 京大防災研年報第13号(B), pp.285-298.
- 5) Task Force on Bed Forms in Alluvial channel of the committee on sedimentation, 1966 ; Nomenclature for bed forms in alluvial channels, Proc. of ASCE, Vol.92, Hy. 3, pp.51-66.
- 6) 白砂考夫, 1972 ; 河床波の発生について, 第16回水理講演会, pp.76-81.
- 7) 山本晃一, 1975 and 1976 ; 相似律の観点から見た移動床流れの水理〔I〕, 〔III〕, 土木研究所資料第1059号, pp.10-20, 第1154号, pp.16-18.
- 8) 上野鉄男, 宇民正, 1982 ; 砂漣と砂堆の発達過程に関する実験的研究, 土木学会論文集第318号, 1982, pp.75-84.
- 9) Guy, H. P., Simons, D. B., and Richardson, E. V., 1966 ; Summary of alluvial channel data from flume experiments, U. S. Geological Survey Professional Paper 462-I.
- 10) Gilbert, G. K., 1914 ; The transportation of debris by running water, U. S. Geological Survey Professional Paper 86.
- 11) U. S. Waterway Experimental Station, 1953 ; Studies of river bed materials and their movement with special reference to the Lower Mississippi River, Paper No. 17, Vicksburg, Miss.
- 12) Sten R. A., 1965 ; Laboratory studies of total load and apparent bedload, Journal of Geophysical Research, Vol.70, No.8, pp.1831-1842.
- 13) Williams, G. P., 1970 ; Flume experiments on the transport of a coarse sand, U. S. Geological Survey Professional Paper 562-B.
- 14) Nordin, C. F., 1976 ; Flume studies with fine and coarse sands U. S. Geological Survey Open File Report 76-762.
- 15) 吉川秀夫, 福岡捷二, 馬場享, 河野二夫, 1975 ; 大粒径砂礫の掃流砂量に関する研究, 第19回水理講演会, pp.1-6.
- 16) 木下良作, 1961 ; 石狩川河道変遷調査, 科学技術庁資源局資料36号, pp.73-138.
- 17) 井口昌平, 1973 ; 昭和47年度文部省科研費による“水資源の存在状態におよぼす人的影響に関する研究”報告書, pp.26-39.
- 18) 池田宏, 1973 ; 実験水路における砂礫堆とその形成条件, 地理学評論46-7, pp.435-451.
- 19) 佐藤清一, 吉川秀夫, 芦田和男, 1953 ; 河床砂礫の掃流運搬に関する研究, 建設省土木研究所報告第98号, pp.119-124.
- 20) Willis, J. C., Coleman, N. L., and Ellis, W. M., 1973 ; Laboratory study of transport of fine

- sand, Proc. of ASCE, Vol.99, Hy.3, pp.489-501.
- 21) Laursen, E. M., 1958 ; The total sediment load of streams, Proc. of ASCE, Vol.84, Hy.1, pp. 1-36.
 - 22) 安藝皎一, 1944 ; 河相論, 常磐書房
 - 23) 田中祐一郎, 1970 ; Antiduneに関する実験的研究, 京大防災研年報第13号B, pp.271-284.
 - 24) 玉井信行, 長尾哲, 三国史雄, 1978 ; 直線水路における複列砂礫堆と網状流路の形成について, 第22回水理講演会論文集, pp.264-274.
 - 25) 山本晃一, 深見親雄, 1978 ; 河川における土砂の移動機構に関する研究ノート, 土木研究所資料第1416号, pp.18-151.
 - 26) Culbertson, J. K., and Dawdy, D. R., 1964 ; A Study of fluvial characteristics and hydraulic variables, Middle Rio Grande, New Mexico, U. S. Geological Survey Water Supply Paper 1498-F.
 - 27) Hubbell, D. W., and Matejka, D. Q., 1959 ; Investigation of sediment transportation, Middle Loup River at Dunning, Nebraska, U. S. Geological Survey Water-Supply Paper 1076.
 - 28) Jordan, P. R., 1965 ; Fluvial sediment of the Mississippi River at St. Louis, Missouri, U. S. Geological Survey Water-Supply Paper 1802.
 - 29) Colby, B. R., 1955 ; Computation of total sediment discharge Niobrara River near Cody, U. S. Geological Survey Water-Supply Paper 1357.
 - 30) Beckman, E. W. and Furness, L. W., 1964 ; Flow characteristics of Elkhorn River near Waterloo, Nebraska, U. S. Geological Survey Water-Supply Paper 1498.
 - 31) Nordin, C. F., 1964 ; Aspects of flow resistance and sediment transport Rio Grande near Bernalillo, New Mexico, U. S. Geological Survey Water-Supply Paper 1498-H.
 - 32) Shastri Annambhotla, V. A., Sayer, W. W., and Robert H. L., 1972 ; Statistical properties of Missouri River bedforms, Proc. of ASCE, Vol.98, WW4, pp.489-510.
 - 33) Mahoney, H. A., Andrews, E. D., Emmett, W. W., Leopold, L. B., Meade, R. H., Myrick, R. M. and Nordin, C. H., 1976 ; Data for calibrating unsteady-flow-sedimenttransport models, East Fork River, Wyoming, U. S. G. S. Open-file Report 76-22.
 - 34) Rouse, H., 1936-37 ; Nomogram for the settling velocity of spheres, Report of the Commission on Sedimentation.
 - 35) 岸力, 黒木幹男, 1972 ; 移動床流れにおける河床形状と流体抵抗 (I), 北大工学部研究報告, pp.1-23.
 - 36) Garde, R. J. and Raju, R, 1963 ; Regime criteria for alluvial streams, Proc. of ASCE. Vol.89, Hy 6, pp.153-164.
 - 37) 芦田和国, 道上正規, 1972 ; 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文集第206号, pp.59-69.
 - 38) Cooper, R. H. and Peterson, A. W, 1972 ; Critical review of sediment transport experiments,

Proc. of ASCE, Vol.98, Hy 5, pp.827-842.

- 39) Shields, A, 1936 ; Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebewegung, Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin, Germany. 61.
- 40) Nikuradse, J., 1933 ; Strömungsgesetze in rauhen Rohren : Versuchsanstalt Deutsche Ingenieurwirtschaft, Forschungsheft 361.
- 41) Yalin, M. S., 1964 ; Geometrical properties of sand waves, Proc. ASCE, Vol.90, Hy.5, pp. 105-119.
- 42) Vanoni, V. A. and Brooks, N. H. 1957 ; Laboratory studies of the roughness and suspended load of alluvial streams, Rep. No.E-68.
Sedimentation laboratory, California Institute of Technology.
- 43) Einstein, H. A., 1950 ; The bed load function for sediment transportation in open channel flow, U. S. Dept. of Agriculture Tech. Bull. 1026.
- 44) 山本晃一, 1980 ; 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, pp.1-30.
- 45) Taylor, B. D., and Vanoni, V. A., 1972 ; Temperature effects in low transportation, flat bed flows, Proc of ASCE, Vol.98, Hy.12, pp.2191-2206.
- 46) Vanoni, V. A., 1974 ; Factors determining bed forms of alluvial streams, Proc of ASCE, Vol. 100, Hy.3, pp.363-378.
- 47) 山本晃一, 坂野章, 1982 ; 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.
- 48) Franco, J. J., 1968 ; Effects of water temperature on bed load movement, ASCE, Vol.94, WW3.
- 49) 山本晃一, 1988 ; 河道特性論, 土木研究所資料第2662号, pp.169-204.

第4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。

4.1 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、移動床の水理特性を検討するに当たっては、砂礫の粒径が測られる。ところで河床に存在する砂礫は球ではなく、偏平であったり、でこぼこしたりしている。このため粒径の測定法、定義法によって多少の違いが生じる。

粒径の定義としては、次の三つが一般に使用される。

(イ) d_s : Sieve Diameter 粒子がふるいを通過する直径

(ロ) 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) d_n : Nominal Diameter 与えられた砂礫と同一の体積を持つ球の直径

この三つのうち、流体の粘性、粒子の形状、粒子表面の粗さを暗に含み、流砂の運動機構と結びつけた d_{se} が一番重要さ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 (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) ふるい粒径に相当するものを用いることとする。

①石炭粉 (写真-4.1)

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。材料の形状は砂のような粒子状ではなく、薄い剥片状である。

●石炭粉 A : $d_m = 0.027\text{cm}$

公称 $d_m = 0.021\text{cm}$ 、 $s = 0.5$ といわれているものを用いたが、実験後ほぼ1年経過した時点でふるい分け試験を行ったところ平均粒径は 0.027cm であったため、この値を用いて整理を行うことにした。¹⁾

●石炭粉 B 及び B' : $d_m = 0.03\text{cm}$ 、 $d_m = 0.032\text{cm}$

本実験材料の粒度分布は図-4.1のとおりで、この粒度分布は実験中ほとんど変らなかった。²⁾

●石炭粉 C : $d_m = 0.10\text{cm}$

$0.09 \sim 0.11\text{cm}$ に粒度調整した平均粒径 0.10cm の均一材料である。

②スラッジライト (写真-4.2)

下水汚泥の焼却灰を $1100 \sim 1500^\circ\text{C}$ の高温にさらし半溶融したものを空冷却したものである。 $0.03 \sim 0.50\text{cm}$ の粒径を有し、一般には軽量骨材として利用されている。材料の形状はほぼ球形である。³⁾

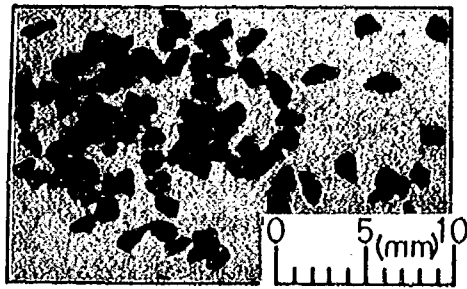


写真-4. 1 新材料写真 (石炭粉)



写真-4. 2 新材料写真 (スラッジライト)

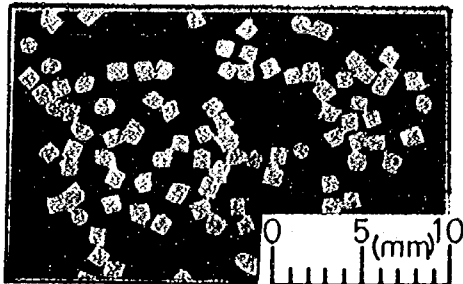


写真-4. 3 新材料写真 (PBT)

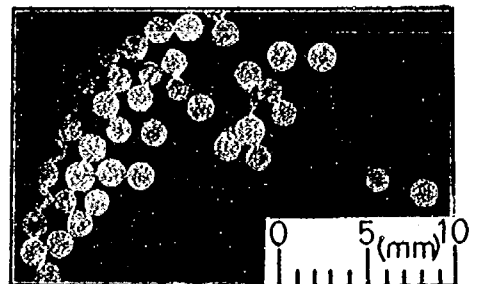


写真-4. 4 新材料写真 (ポリスチレン)

- スラッジライト A : $d_m = 0.105\text{cm}$

0.07~0.12cmに粒度調整した平均粒径0.105cmのほぼ均一材料である。

- スラッジライト B : $d_m = 0.12\text{cm}$

0.07~0.13cmに粒度調整した平均粒径0.12cmのほぼ均一材料である。

③ P B T (写真-4. 3)

(Polybutylemeterephthalate……本報告文ではPBTと称する)

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。³⁾

- PBT : $d_m = 0.10\text{cm}$

材料は円柱状の材料を裁断し製作したもので、径、高さ0.10 cmの均一粒径である。粒径はノギスで100個測定し確認した。

④ ポリスチレン (写真-4. 4)

(発泡ポリスチレン : Polystyrene……本報告文ではポリスチレンと称する)

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原料として利用されている。形状はスラッジライトと同じく球形である。

- ポリスチレン : $d_m = 0.151\text{cm}$

粒径はノギスで100個測定した。粒径は平均0.151cmである。

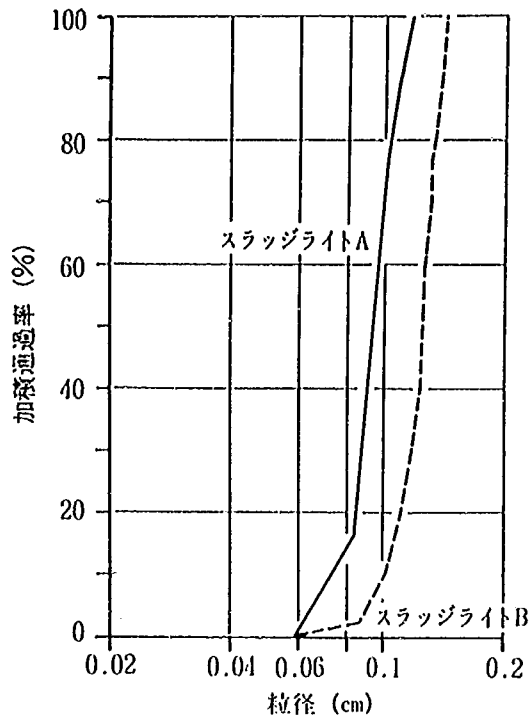
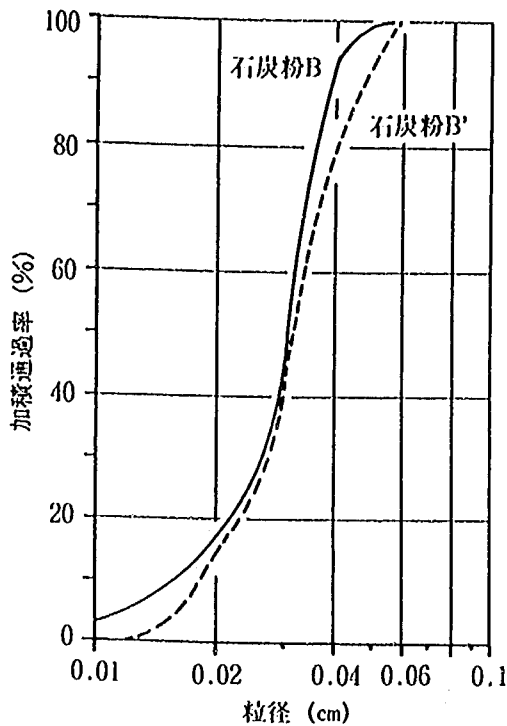


図-4. 1 石炭粉BおよびB' の粒度分布図 図-4. 2 スラッジライトAおよびBの粒度分布図

4.2 比重²⁾³⁾

①石炭粉

- 石炭粉A : 1.5

公称の値1.5をそのまま用いた。

- 石炭粉B : 1.58

JIS1202に従って3回の測定を実施して、その平均値を用いた。

- 石炭粉B' : 1.50

JIS1202に従って9試料について試験を行い、その平均値を用いた。

- 石炭粉C : 1.48

JIS1202に従って試験を行い検定した。

②スラッジライト

- スラッジライトA : 1.80

- スラッジライトB : 1.80

JIS1202に従って試験を行い検定したが、若干データのバラツキが多い。³⁾

③PBT

- PBT : 1.31

JIS1202に従って試験を行い検定した。

④ポリスチレン

- ポリスチレン : 1.05

JIS1202に従って試験を行い検定した。比重1.05はここでまとめた軽量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（1年以上）貯蔵したものでは、これより重い比重となる。

4.3 沈降速度²⁾³⁾

①石炭粉

- 石炭粉A：1.13cm/s
- 石炭粉B：1.25cm/s
- 石炭粉B'：1.32cm/s

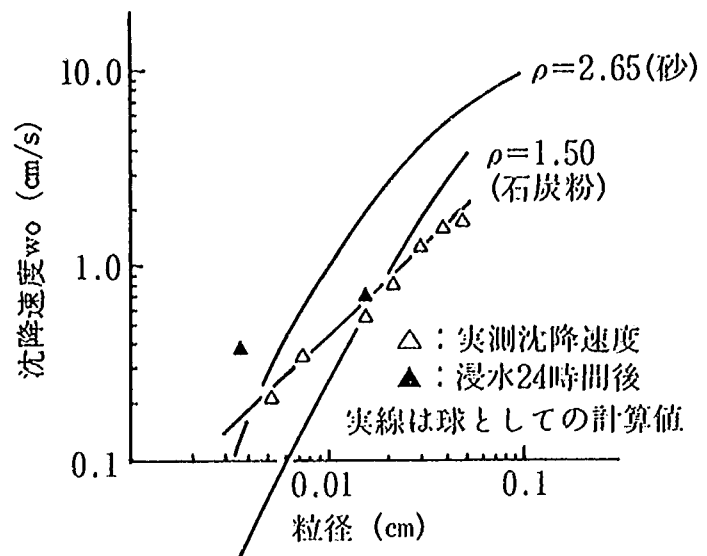


図-4.3 石炭粉の沈降速度

2,000cc容器的メスシリンダーを用い、その中に水温20℃の水を約35cmの水深になるまで注ぎ、その水中に石炭粉を沈降させ、種々の大きさの粒子についての沈降速度を求めた。なおここで使用した石炭粉は、乾燥させてからふるい分けを実施し、9種の粒径に分けてある。実際に沈降速度を求める時には、乾燥した粒子では表面張力等の影響を受けるので、石炭粒子を数分間水に浸してから実施している。さらに粒子が沈降し始めてから終速度に移行するまでの助走区間として水面から5cmを取り、沈降速度は水面下5cmから35cmの間の通過時間を測定して計算した。結果は図-4.3のとおりである。なお、石炭粒子を20℃前後の水に24時間浸した後に測定した結果も示している。²⁾

石炭粉A, B, B'の沈降速度は試験で得られた線より読取った値を用いた。

- 石炭粉C：4.16cm/s

径30cmの円柱形の容器に水を湛水させ、60cm区間の通過時間を測定した。測定した粒径は3種類である。測定においては、沈降速度が安定するための助走区間として30cmを取り、水面下30cmから90cmの間を通過する時間を求めた。沈降速度は100回の試験結果の平均値である。結果を図-4.4に示す。形状が剥片状であることからAllenの式で得られたものより遅い沈降速度となっている。石炭粉Cの沈降速度は本図より内挿して求めた。¹⁾²⁾

②スラッジライト¹⁾²⁾

- スラッジライトA：10.2cm/s
- スラッジライトB：12.0cm/s

径30cmの円柱形の容器に水を湛水させ、60cm区間の通過時間を測定した。スラッジライトは乾燥させ、ふるい分けを行い、3種類の粒径に分類し粒径毎の沈降速度を求めた。実際に沈降速度を求める時には、乾燥した粒子では表面張力等の影響を受けるので、粒子を数

分間水に浸してから実施している。さらに粒子が沈降し始めてから終速度に移行するまでの助走区間として水面から30cmを取り、沈降速度は水面下30cmから90cmの間の通過時間を測定して計算した。結果は図-4.4のとおりである。沈降速度は本図より内挿して求めた。¹²⁾

形状が球形であることから Allen の式とよく一致している。

③ PBT

- PBT : 3.43cm/s

石炭粉C、スラッジライトと同じ方法により測定した。得られた沈降速度を図-4.3にプロットしたが、粒径が1種類しかなく全体的傾向は分らないが Allen の式より遅くなっている。

④ ポリスチレン

- ポリスチレン : 1.71cm/s

前記の3材料と同じ方法で測定した。ポリスチレンは材料内部のガスが微量ずつながら洩れ、水中において材料に気泡が付着した形となることから、Allen の式より遅くなっている。

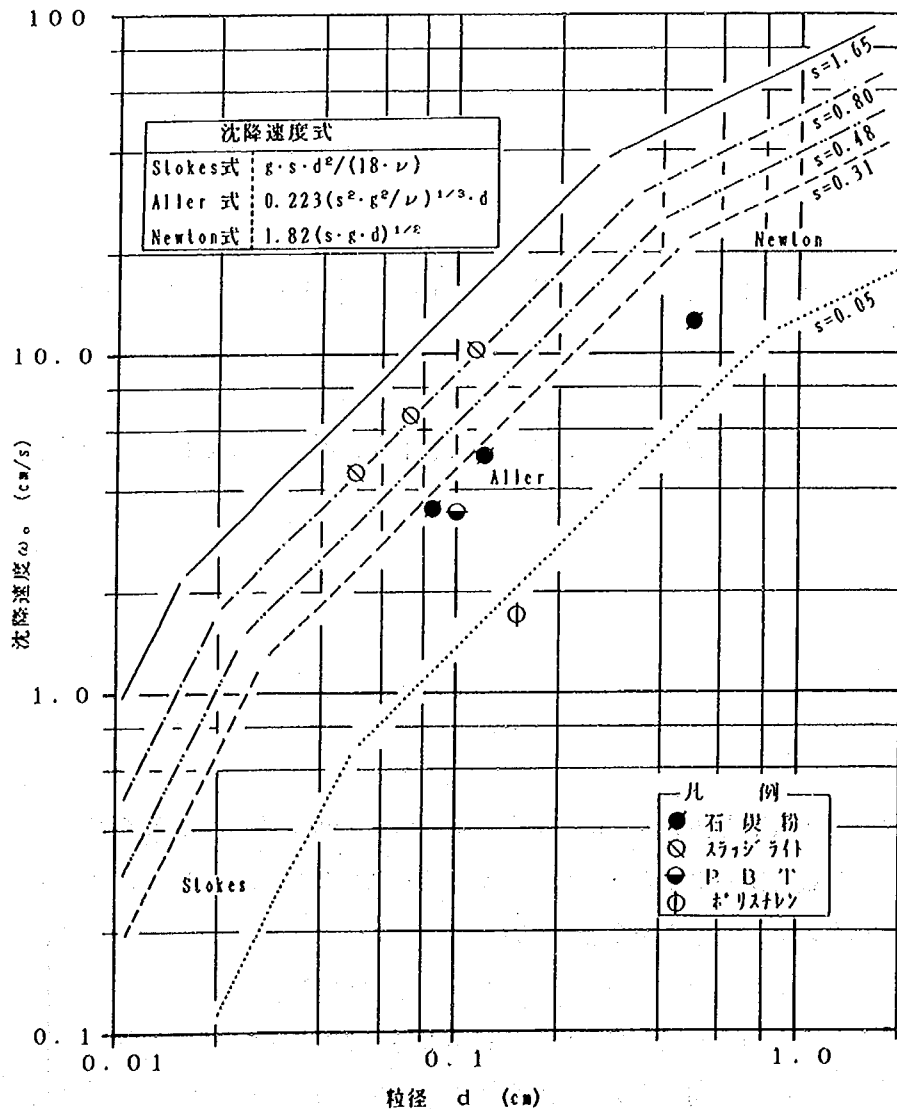


図-4.4 沈降速度特性図

4.4 水中安息角²⁾³⁾

①石炭粉

- 石炭粉A : 33.0°

本実験用材料と同一製造工程で作られた石炭粉の特性を田中, 新保³⁾が調べている。その報告の中で空中静止摩擦角 $=36^\circ$, 水中静止摩擦角 $=33^\circ$ としているのでこの値を採用した。

- 石炭粉B : 30.0°

あらかじめ湿らせた石炭粉を広口ビーカーの中で出来る限り先鋭な円錐状の山に積み, そこに石炭粉の山が水の勢いで崩れないように静かに水を注いで安定した形状としてその角度を求めた。

- 石炭粉B' :

- 石炭粉C : 33.0°

石炭粉Bと同じ方法で測定した。石炭粉Bに比べ大きい値となったが, これは粒径の違いによるものと考えられる。

②スラッジライト

- スラッジライトA : 31.3°

- スラッジライトB : 31.3°

石炭粉と同じ方法で測定したが, スラッジライトA, Bに違いはなかった。

③PBT

- PBT : 31.2°

前記の2材料と同じ方法で測定した。PBTの安息角はほぼスラッジライトと等しい。

④ポリスチレン

- ポリスチレン : 26.3°

前記の3材料と同じ方法で測定したが, ポリスチレンの水中安息角 26.3° は他の材料に比べ著しく小さな値である。

4.5 水中空隙率²⁾³⁾

①石炭粉

- 石炭粉A : 0.45

- 石炭粉B : 0.45

- 石炭粉B' : 0.50

水中の空隙率を知ることは, 実際の流砂量を把握する上で重要である。実施要領は, まず乾いた石炭粉の中に水を入れ, 水が石炭粒子間に侵入した量を測定することによって空隙率を求めた。実際の順序としては,

1. 乾いた石炭粉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. 石炭粉粒子間の空気を取り除くために攪拌する。
4. 水の見かけ量 V_1 を測定する。(図-4.5参照)

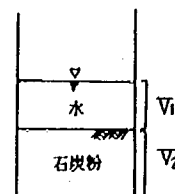


図-4.5 水中空隙測定状況図

5. 石炭粉の部分の体積 V_2 を測定する。

6. 従って水中空隙率 $\lambda = (V_w - V_1) / V_2$

である。これを数試験体について実施し、その平均値を用いた。

• 石炭粉 C : 0.47

上記と同じ方法で測定を行った。

②スラッジライト

• スラッジライト A : 0.47

• スラッジライト B : 0.47

石炭粉と同じ方法で測定を行った。スラッジライト A, B による違いはなく、石炭粉 C と同じ値であった。

③PBT

• PBT : 0.35

前記の 2 材料と同じ方法で測定した結果、0.35 の値を得た。この値は砂の空隙率とほぼ等しい値である。

④ポリスチレン

• ポリスチレン : 0.38

前記の 3 材料と同じ方法で測定した。ポリスチレンもまたその空隙率は砂とほぼ等しい結果となった。

4.6 まとめ

以上の結果を、表-4.1軽量材料の諸特性料として示す。

表-4.1 軽量材料の諸特性量

軽量材料 諸元	石炭粉 A	石炭粉 B	石炭粉 B'	石炭粉 C	スラッジ ライト A	スラッジ ライト B	PBT	ポリス チレン
d_s (cm) *	0.027	0.03	0.032	0.10	0.105	0.12	0.10	0.151
d_{sc} (cm) **		0.018(A) 0.019(s)		0.064	0.108	0.137	0.068	0.114
d_n (cm)							0.114	
水中比重: s	0.50	0.58	0.50	0.48	0.80	0.80	0.31	0.05
沈降速度*** W_o (cm/s)	1.13	1.25	1.32	4.16 (4.03)	10.2 (9.5)	12.0 (11.2)	3.43 (3.19)	1.71 (1.58)
水中安息角 ϕ (度)	33.0	30.0		33.0	31.3	31.3	31.2	26.3
空隙率: λ	0.45	0.45	0.50	0.47	0.47	0.47	0.351	0.38
形 状	剥 片 状				球 形		円柱****	球形

* PBT, ポリスチレンはノギスによる測定

** 石炭粉Bは上段 Allen の式, 下段ストークスの式で評価, 石炭粉C以下は () 内の沈降速度を用いて Allen の式で評価

*** () は0.93倍した沈降速度²⁾

**** 直径=高さ

注 1)

石炭粉A実験に用いた材料は日本原料株式会社によって製造されたものである。納品検査の時には確かに、 $d_m=0.021\text{cm}$, $W_o=1.0\text{cm/s}$, 比重1.5程度であったが、この石炭粉を使って移動床の実験を行っている内に細粒分が飛ばされ、粒径が大きくなったようだ。石炭粉A実験にはこのような問題があり実験結果の解釈に当っては参考程度に止めるべきものである。

注 2)

石炭粉C, スラッジライトA, B及び図-4.3の沈降速度実験は夏場(7月), 水道水を用いて行っている。残念なことに本実験では水温の測定がなされていない。水道水の夏場の水温は23~28°C程度と考えられるので、本実験結果は水温25°C前後の時の沈降速度を評価したことになる。水温25°Cの動粘性係数は $0.00813\text{cm}^2/\text{s}$, 20°Cでは $0.010038\text{cm}^2/\text{s}$ であるのでAllenの式によれば20°C換算の沈降速度は7%程度小さくなる。

本報告での沈降速度は、実験結果をそのまま使って整理してある。

参考文献

- 1) 田中則男, 新保修: 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 1973.3
- 2) 山本晃一, 坂野章, 1982: 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1815号
- 3) 福岡捷二, 浅野富夫, 林正男, 1988: 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

第5章 軽量材料の移動床の水理

本章では、これまでに行った軽量材料（石炭粉、スラッジライト、PBT、ポリスチレン）を用いた移動床の水理に関する基礎実験結果を河床材料毎に整理する。

5.1 石炭粉の移動床の水理

5.1.1 実験ケースと実験条件

石炭粉を用いた実験は、 $d_m=0.027\text{cm}$ 、 0.030cm 、 0.032cm 、 0.10cm の4種類の材料で、 $d_m=0.027\text{cm}$ では32ケース（C-1～C-32）、 $d_m=0.030\text{cm}$ では25ケース（C-33～C-57）、 $d_m=0.032\text{cm}$ で3ケース、 $d_m=0.10\text{cm}$ は31ケース（C-58～C-88）の全91ケース行っている。

石炭粉を用いた移動床模型実験の実験条件は表-5.1に示すとおりである。測定値及び河床状況の観察概要は付表-1, 2, 3にまとめた。

5.1.2 各ケースの河床状況と観察結果

91ケースの内、C-1～C-64の実験ケースの河床状況等の観察結果は次の通りである。

〔1〕 石炭粉A

実験C-1～C-7（初期河床勾配1/500）

C-1は2ℓ/sの流量を与えたが、水路幅60cmに比べて水深が2cm程度と浅いので、波長 $L_s=5.6\text{m}$ の交互砂州の発生がみられた。この交互砂州上には砂漣も見られ、中規模河床波と小規模河床波が共存していた。

C-2では、水深が4.14cmとなったので、この交互砂州が消滅し砂漣河床となったが、下流側は一部平坦河床となっていた。

C-3とC-4の2ケースは似たような状況を呈しており、側壁のガラス面から約10cmの範囲内に波長15cm～17cm、波高1cm前後の砂漣の発生が見られたが、水路中央部は平坦河床、もしくは波高の低い砂漣（5mm以下）が観測された。遷移河床に近い領域と思われた。

C-6は、両側壁に沿って一部かなり波長の長い河床波が観測されたが、全体としては平坦河床であった。

C-7は、波長15cm～17cmの砂漣河床であった。

表一5.1 石炭粉を用いた移動床模型実験の実験条件

実験名称：石炭粉A 河床材料：石炭粉 代表粒径：0.027cm
 水中比重：0.5 沈降速度：1.13cm/sec
 水路長：25m 水路幅：0.6m

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	実験 ケース	流量 Q (ℓ/s)	初期 河床勾配
C-01	2.0	1/500	C-12	25.9	1/200	C-23	3.4	1/1000
C-02	5.0	"	C-13	15.0	"	C-24	5.8	"
C-03	11.2	"	C-14	25.2	"	C-25	53.0	"
C-04	15.2	"	C-15	2.6	1/300	C-26	31.7	"
C-05	28.9	"	C-16	6.6	"	C-27	1.0	1/1000
C-06	50.3	"	C-17	9.0	"	C-28	4.3	"
C-07	17.0	"	C-18	13.9	"	C-29	7.0	"
C-08	4.4	1/200	C-19	15.0	"	C-30	41.3	"
C-09	9.5	"	C-20	17.0	"	C-31	20.3	"
C-10	18.4	"	C-21	25.2	"	C-32	52.4	"
C-11	19.1	"	C-22	2.2	1/1000			

実験名称：石炭粉B 河床材料：石炭粉 代表粒径：0.030cm
 水中比重：0.58 沈降速度：1.25cm/sec
 水路長：30m 水路幅：0.6m

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	実験 ケース	流量 Q (ℓ/s)	初期 河床勾配
C-33	2.26	1/770	C-42	14.14	1/770	C-51	2.86	1/ 770
C-34	2.26	1/550	C-43	16.97	1/770	C-52	6.20	1/ 770
C-35	2.26	1/200	C-44	16.97	1/500	C-53	8.10	1/ 770
C-36	2.26	1/200	C-45	16.97	1/200	C-54	33.0	1/1250
C-37	5.66	1/770	C-46	22.63	1/770	C-55	43.05	
C-38	8.49	1/770	C-47	23.55	1/770	C-56	52.55	
C-39	8.49	1/500	C-48	5.66	1/500	C-57	60.22	
C-40	8.49	1/200	C-49	5.66	1/200			
C-41	11.31	1/770	C-50	0.76	1/770			

実験名称：石炭粉B'

河床材料：石炭粉

代表粒径：0.032cm

水中比重：0.50

沈降速度：1.32cm/s

水路長：25m

水路幅：0.5m

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	実験 ケース	流量 Q (ℓ/s)	初期 河床勾配
B'-1	6.4	1/1400	B'-2	12.8	1/1400	B'-3	19.3	1/1400

実験名称：石炭粉C

河床材料：石炭粉

代表粒径：0.1cm

水中比重：0.58

沈降速度：4.16cm/sec

水路長：30m

水路幅：0.6m, 1.0m

実験 ケース	流量 Q (ℓ/s)	初期 河床勾配 及び 水路幅	実験 ケース	流量 Q (ℓ/s)	初期 河床勾配 及び 水路幅	実験 ケース	流量 Q (ℓ/s)	初期 河床勾配 及び 水路幅
C-58	2.62	1/960 B=0.6m	C-69	1.53	1/570 B=0.6m	C-80	8.91	1/750 B=0.6m
C-59	5.63		C-70	4.50		C-81	13.08	
C-60	7.90		C-71	8.76		C-82	16.73	
C-61	10.70		C-72	13.65		C-83	22.05	
C-62	13.17		C-73	4.42	1/960 B=1.0m	C-84	26.54	
C-63	15.01		C-74	13.83		C-85	25.00	
C-64	23.00		C-75	26.04		C-86	7.22	1/1500 B=0.6m
C-65	2.59	1/960 B=0.6m	C-76	41.30		C-87	8.43	1/1100 B=0.6m
C-66	7.84		C-77	3.30	1/750 B=0.6m	C-88	9.60	1/800 B=0.6m
C-67	14.83		C-78	4.53				
C-68	22.95		C-79	6.67				

実験C—8～C—14（初期河床勾配1/200）

C—8は、流量4.4ℓ/sを流して実験を行った。水深が2cm前後でC—1と同程度の川幅・水深比であったが、勾配が急なため流れが速く、河床は平坦で浮遊砂が多く、交互砂州はできなかった。実験では流砂量が多く、河床が低下して実験後には勾配が約1/300となっていた。

C—9は、C—8の実験後9.5ℓ/sを通水したものであるが、この場合も河床は平坦で浮遊砂が多く、通水後の河床勾配は約1/500となっていた。

C—10とC—11は、河床波を発生させることを目的に、水面勾配を緩くして実験を行った。

C—10では、極端にエネルギー勾配を緩くしたために流砂量は少なく、河床には高さ約2cm、波長9.5cmの河床波ができており、水路中央部付近の砂漣は二次的な河床波（河床波のクレスト線が、流れに直角方向にほぼ直線である河床波）となっていた。

C—11はC—10とほぼ同じ流量を流したが水深を小さくして流速を大きくした。河床波の状態は、測定部（下流ゲートより10.65m～4.5m間）の上下流で形状が異なる。中央付近より上流では砂漣の形状は、上流側の斜面勾配が緩く、下流側が急である通常の砂漣形状であったが、下流部では上流部の斜面勾配がかなり急な波形勾配の大きい砂漣が発生した。

C—12, 13, 14は砂漣から平坦河床に移行する限界の水量を求めようとして行ったものである。C—12は平坦河床、C—13は波長9cm、波高0.5cm位の砂漣河床であった。C—14は遷移河床あるいは平坦河床に近い状態の河床となった。

実験C—15～C—21（初期河床勾配1/300）

本実験は石炭粉の河床波の領域区分をより明確にするために行ったものである。

C—15は、流量が2.6ℓ/sと小さく、水深が浅いため($B/H \approx 30$)、交互砂州の発生がみられた。その波長は約10mで側壁沿いの砂州前線の段差は約1.5cmであった。本実験の水面勾配は、河床勾配に比べ急であったためか、上流のガラス面側に一部波長6cm位の河床波が見られた。

C—16は、通水中一部モルタル面側壁に沿って、波長10cm程度の砂漣が観測され、遷移領域かと思われたが、止水後の河床面をみると平坦河床と考えてよい状態であった。モルタル壁面沿いの砂漣は壁面近くの流速が小さいために出来た河床波であるが、その存在範囲は河床面のほんの一部であった。

C—17は、波長約17cm、波高約1.5cmの砂漣が出来ていたが、下流端近くは一部平坦河床となっていた。この下流側の平坦河床は、砂止めより下流の固定床部分の勾配が移動床の河床勾配に比べ急であったため生じたと思われる。

C—18は、水深を大きくとり流速を小さくして実験を行った。河床は砂漣で波長14cm、波高2.5cm程度と比較的大きな三次元的な強い河床形状であった。実験中の砂漣の発達過程を見ると、砂漣のクレスト下流で発生する渦により、砂漣の底の石炭粉が巻き上げられ、それにより波高を大きくしていた。そして波高が大きくなることにより、渦の規模も大きくなるというように渦と河床波の相互的な作用によって大きなスケールの砂漣が生じていた。なおこのケースは実験初期の砂漣の発達過程においては流砂量が多かったが、河床がほぼ平衡に達し、流砂量の測定を行うときには、その量は極端に少なくなっていた。その理由として、河床波の発生により、掃流力の大部分を河床波の形状損失に食われてしまったことにもよるもの

と思われる。

C-19は、河床面は平坦河床となり、C-20では砂漣河床となった。

C-21では平坦河床となった。

実験C-22～C-26（初期河床勾配1/1000）

C-22は2.2ℓ/sの流量を与えた。水深は2.2cm程度となり、波長9.4cmの河床波が発生したが、この河床波を砂漣というのか、砂堆というのか判断しかねた。

C-23からC-25の3ケースは、似たような状況を示し、河床波の波長は10cm前後であった。

C-26では、流速が大きく、遷移河床に近い領域であった。河床の一部は平坦河床になっていた。

実験C-27～C-32（初期河床勾配1/1000）

初期河床勾配はC-22～C-26と同じであるが、本実験では採砂も同時に行った。

実験C-27では1ℓ/sの流量に対して水深2.83cmであり、流速が小さい。河床波は波長16.6cmと長く、砂漣と言うより砂堆と考えた方がよい形状であった。流砂量はほとんどなく採砂不能であった。C-28でも前ケースと同様な河床形状となった。

C-29からC-32は波長10cm前後の砂漣河床となった。

〔2〕 石炭粉B

実験C-33～C-57

本実験ケースは、各ケース毎に河床を所定の勾配に整形して実験を行った。

実験C-33（初期河床勾配1/770）

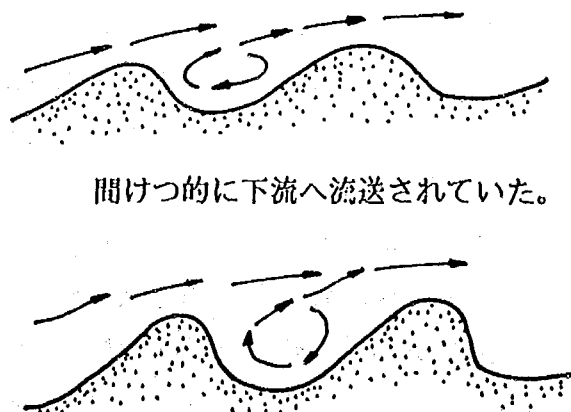
流量2.26ℓ/sを与えた実験である。掃流力が小さいため、実験初期は河床波の発達が緩慢であった。約40分後に全域に $L_s=20\text{cm}$ 、 $H_s=3.5\text{cm}$ 位の規模の砂漣が発達した。計測は2時間15分通水後に行った。

実験C-34（初期河床勾配1/500）

C-33と同流量で河床勾配を急とする。勾配を急としたことにより掃流力が増し砂漣の発達が顕著となる。砂漣は、波高が小さく波形勾配の小さいものと、波高の大きなものとがあり、前者は図-5.1(1)のように砂漣下流の渦は弱く、上流から流送される土砂は一部は浮遊し、一部は掃流状態となって移動する。後者は、渦による下向きの流れが強く、流れが河床に突き当たり、河床を掘り込むような形となり、間欠的に土砂を巻き上げている。

実験C-35、C-36（初期河床勾配1/200）

前記2ケースと同流量で河床勾配を急にする。



間欠的に下流へ流送されていた。

石炭粉B（実験C-34）

図-5. 1. (1) 河床形状図

水深が浅く $B/H \approx 40$ 前後位である。河床は C-35, C-36 共に平坦で約 5 分後に交互砂州が出来、下流へ流下していた。C-35 では、30 分通水したが、上流側は河床低下により水深が大となり砂澁が出来、中規模河床波と小規模河床波の共存が見られた。C-36 は、C-35 では通水時間が長すぎて測定時に等流水深となっていないと思われたので、再度、同一条件で通水したケースである。通水時間は 12 分とした。交互砂澁堆の波高は 1 cm で波長は約 4 m ($L_s/B \approx 7$) であった。

実験 C-37 (初期河床勾配 1/770)

$Q = 5.66 \text{ l/s}$ で 85 分通水する。通水して 20 分位は河床波はみられなかったが、その後ガラス面に沿って河床波が上流より発生し、約 20 cm 位の波長の河床波の発達を見た。水深は約 4 cm 位で、水深の約 5 倍の波長であるが、波高は 1 cm 前後と小さい。通水後の河床を見るとガラス面沿いには波長の長い河床波が出来ていたが、中央には $L_s \approx 1.1 \text{ cm}$, $H_s = 0.5 \text{ cm}$ の河床波が出来ている部分と平坦な部分とがあり、それらより判断して遷移河床の領域と思われた。また、水路全体を見ると波長 6 m 位の弱い単列の交互砂州も観測された。

実験 C-38 (初期河床勾配 1/770)

流量 $Q = 8.49 \text{ l/s}$ 、通水時間 24 分の実験である。C-37 と同様、両側のガラス面際では $L_s \approx 16 \text{ cm}$, $H_s \approx 1.5 \text{ cm}$ 位の河床波が存在していたが、水路中央に近づくにつれ $L_s \approx 10 \text{ cm}$, $H_s \approx 0.5 \text{ cm}$ と河床波の規模は小さく、水路中央は平坦河床となっていた。以上のように実験後の河床状態や実験中の流況等から判断して遷移河床の領域と考えられる。

実験 C-39 (初期河床勾配 1/500)

実験 C-38 と同一流量で勾配を急とする。河床勾配を C-38 より急としたため河床は平坦河床となり浮遊砂も多かった。

実験 C-40 (初期河床勾配 1/200)

C-38, C-39 と同流量で河床勾配を更に急にしたケースである。河床は平坦河床で流砂はほとんど浮遊状態で流送されていた。

実験 C-41 (初期河床勾配 1/770)

流量 $Q = 11.31 \text{ l/s}$ で 25 分通水する。実験初期で等流水深になるようゲート操作中、下流水深のわずかな変化で河床波の発生がみられたが、等流水深に設定後は平坦河床となっていた。水面に反砂堆時に生じる水面波が時々見られた。

実験 C-42 ~ C-47

C-41 で河床は平坦河床で upper regime となったが、C-42 から C-47 はそれより流量が大きく、河床勾配も 1/770 もしくはそれより急のため C-41 と同様河床は平坦で upper regime の河床形態を呈していた。

実験 C-48 (初期河床勾配 1/500)

流量 $Q = 5.66 \text{ l/s}$ とし、C-37 より河床勾配を急にしたケースである。C-37 より流砂量が多かったが、 $L_s = 15 \text{ cm}$, $H_s = 1.0 \text{ cm}$ 位の砂澁が生じていた。水路中央部は平坦な部分も見られたが、C-37 に比較して、より明確な砂澁が発生していた。

本ケース付近の水理量は、わずかな条件の変化により河床波の形状が変わる所である。

実験C—49 (初期河床勾配1/200)

$Q=5.66 \text{ l/s}$ とし、河床勾配をC—48よりさらに急にしたケースである。水深が2.5cmと浅く、河床勾配が急なため水面波の様子からみて反砂堆と思われた。また、下流水深の設定時にわずかなゲート操作により段波が生じ、その遡上に対応して河床の変化が見られたが流速が大きく掃流力も大のためその変化はすぐに消されて平坦河床となっていた。

実験C—50～C—53 (初期河床勾配1/770)

本ケースは、流量を徐々に大きくした場合、どのような河床波、流砂量になるか調べたものである。C—50は流量が0.76 l/s と小さく、掃流力も小さいため、河床面には波形勾配の小さい河床波が発生した。水路の上流部は河床は平坦のままであった。C—51, 52は波長15～16cmの河床波が発生した。河床波の形はかなり規則的なパターンであった。

実験C—54～C—57 (初期河床勾配1/1250)

本ケースは河床を1/1250に整形し、水深を22～24cmとし、流量を変化させたものである。本実験の目的は、相対水深 H/d が大きい場合に、流速が大きくなると、砂漣から砂堆、平坦と河床形態が変化して行くものか、あるいは砂漣から直接平坦河床に移行してしまうかを調べたものである。結果は砂堆を生じず、砂漣から平坦河床へ直接移行してしまった。

{ 3 } 石炭粉B'

実験B'—1

河床波の発達は、上流側から始まり徐々に下流へ延びこの河床波が全区間で見られるようになるのは通水を開始して約90分後であった。河床波の波高及び波長は、10.0m 地点付近の平均で見ると波高約1.5cm、波長約20.0cm程度となる。

ほぼ等流水深が得られている14.0m 地点までの河床は、初期河床に比べて4.0mm～5.0mm程度上昇しており、河床勾配は約1/1200とやや初期河床勾配より大きくなる。河床の横断形状に片寄った洗掘等はなかった。

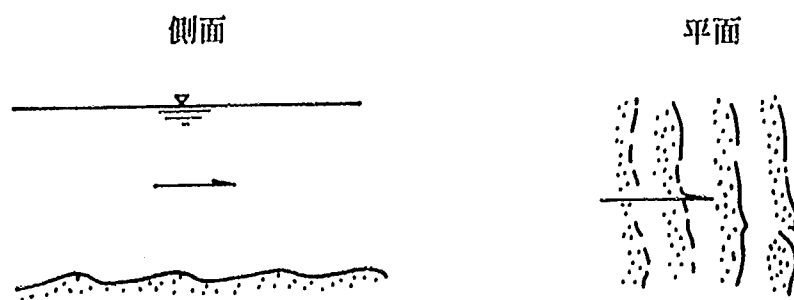
実験B'—2

河床波の発達は、上流側から徐々に下流へ移り、この河床波が全区間で見られるようになるのは実験開始後約45分で、波高、波長は10.0m 地点付近の平均で見ると3.5cm、20.0cmとなる。

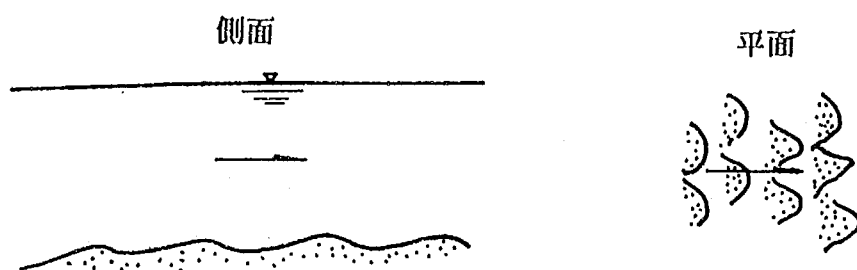
実験B'—3

河床波の発達は、実験開始後25分で水路全域に達した。ほぼ等流水深の得られる下流固定床部より18.0 m の区間は河床勾配で約1/1700となっていた。

河床波の波高及び波長は、10.0m 地点付近での平均で見ると約2.0cm、20.0cmの規模で、その平面形状は実験B'—2と同様であった。



石炭粉B' (実験B' - 1)



石炭粉B' (実験B' - 2)

図-5. 1. (2) 河床形状図

〔4〕 石炭粉C

石炭粉Cの実験は計21ケース行ったが、その内C-58～C-64の7ケースの観測結果を以下にまとめた。
実験C-58～C-64 (初期河床勾配1/960)

本実験は石炭粉を河床材料とした場合の河床形態、流送形態を把握するためのもので、段階的に流量を変化させ観察を行った。給砂は行わなかった。

実験C-58

水深2.22cm, 流量2.62 l/sで行った。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。

実験C-59

水深3.93cm, 流量5.63 l/sで行った。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。河床波は砂堆と判断した。

実験C-60

水深5.04cm, 流量7.90 l/sで行った。河床に砂堆と思われる河床波が発生した。河床材料の移動について今まで転動であったものが、河床波の前縁で舞い上がる移動が認められた。

実験C-61

水深6.44cm, 流量10.70 ℓ/sで行った。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い上がる跳躍状態となった。

実験C-62

水深7.36cm, 流量13.17 ℓ/sで行った。砂堆が発達し、前縁付近で舞い上がった材料が浮遊状態で運ばれる現象がみられた。

実験C-63

水深7.96cm, 流量15.01 ℓ/sで行った。C-62と変わりなく、わずかに波高が高くなった程度である。

実験C-64

水深10.32cm, 流量23.00 ℓ/sで行った。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い上がり、側壁からの観測では河床状況がはっきり判断できないほどであった。

5.1.3 まとめ

〔1〕 河床波の特性と領域区分

石炭粉A, B及びB'の河床状態は、相対水深 H/d の値がほぼ500を境として区分され、それぞれで、掃流力の大小でその状態を変えている。相対水深 H/d が500より大きい場合は、掃流力の小さい内は、土砂の動きはじめの時に波形勾配の小さい砂漣を発生させるが、それより掃流力が大きい場合には、砂漣のクレストがほぼ流れに直角方向である砂漣となり(写真-5.1), 徐々に掃流力が増すにつれてクレスト線が波形を示すように、ついには写真-5.2のように舌状砂漣 (lingoid ripple) となる。その波長 L_s は $d_m \approx 0.03$ cmの場合、15~18cm程度である。さらに掃流力が増すと砂漣の山が低くなり(写真-5.3) ついには平坦河床になってしまう。さらに掃流力が増すと水面および河床面が再び波動性を持ち反砂堆の河床となる。

相対水深 H/d が小さい場合は、掃流力の小さい内は前述のものと同じだが、砂漣が発達するに連れて、水深の影響を受け、写真-5.4に示すように、砂漣の山の部分がやや平坦な非常に平滑化された砂漣が発生し、その波長は筆者の観測した例では $d=0.03$ cmの場合30~40cmにおよぶものもあり、これを砂漣と呼ぶことにためらいを感じた。

砂漣の相対波長 L_s/d は図-5.2及び図-5.4に示すように300~650程度で、 $s=1.65$ の場合の半分から1/3程度であるが、波形勾配 H_s/L_s は0.9~1.8と大きめである。

中規模河床波は、石炭粉AおよびBを使っても発生し、斐伊川放水路流入部の移動床模型実験を行った際には、砂漣と多列砂州が共存した河床波が発生し、砂州の幅 B_s は通常の砂の場合と同様水深の100倍程度であった。このことは、石炭粉を使った模型実験においても、 B/H を模型と現地河川で同一とすれば、ほぼ同程度のスケールの砂州を発生することができることを示している。

石炭粉Cの場合は粒径 d が0.1cmと大きく、また相対水深 H/d が150以下であったこともあって発生した小規模河床波は砂堆であると判断された。砂堆の波長は、図-5.7に示すように水深の7~12倍程度で、砂堆の相対波高 H_s/H_m は図-5.8に示すように τ_* の増加するにつれて大きくなっている。

砂堆の形状は、写真-5.5のケースC-77(水深2.74m, $Q=3.30$ ℓ/s, $\tau_*=0.070$, $H/d=27$)に示すこ

とく、舌状の砂堆である。この砂堆のスケールは水深に応じて変化し、ケースC-82 (水深8.22cm, $Q = 16.73 \text{ l/s}$, $\tau_* = 0.218$, $H/d = 82$) のように水深が大きい場合は、写真-5.6に示すごとく水路内に交互に砂堆の底部が水路寄りに発生している。

なおケースC-70 ($H = 3.05 \text{ cm}$, $Q = 4.50 \text{ l/s}$, $\tau_* = 0.101$, $H/d = 30.5$, $B/H = 20$), ケースC-71 ($H = 4.36 \text{ cm/s}$, $Q = 8.76 \text{ l/s}$, $\tau_* = 0.157$, $H/d = 45$, $B/H = 14$) では、写真-5.7に見るように交互砂州の上に砂堆が共存する河床状態となっている。

図-5.9, 図-5.10は、石炭粉A, B, Cの河床形態を $\tau_* - H/d$ 平面図に示したものである。同図には、 $s = 1.65$ の場合の領域区分図を s の相違によって違いが生じるかを見るために示しておいた。これを見ると石炭粉Aでは、 $s = 1.65$, $d = 0.3 \text{ cm}$ の場合と比較すると Lower Regime から Upper Regime への移行 τ_{*t} に大きな差異が無いが、石炭粉Bでは同一 H/d に対して τ_{*t} が少し小さめの値となっている。なお、石炭粉A, Bでは、砂堆河床が生じている。

石炭粉Cの砂堆の発生領域は、 $s = 1.65$, $d = 1 \text{ cm}$ の場合の砂堆区分に相当する所にあり、 s の効果があるのかないのかは明らかでない。

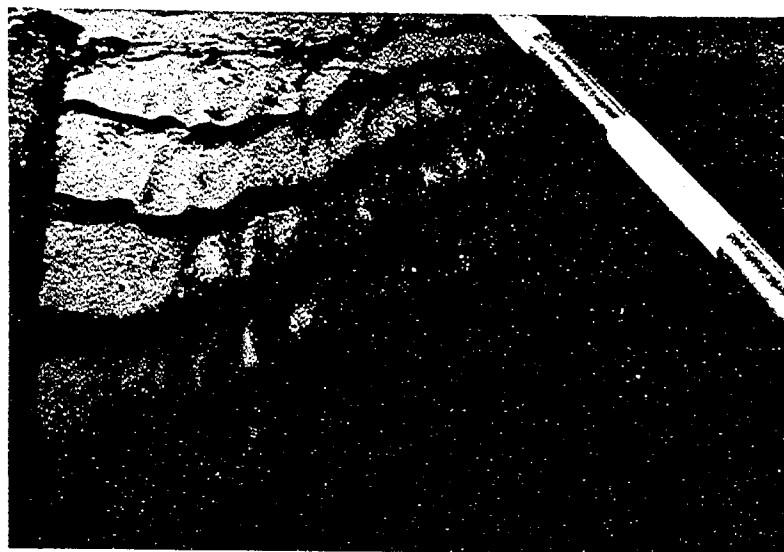


写真-5. 1 砂 漣



写真-5. 2 砂 堆

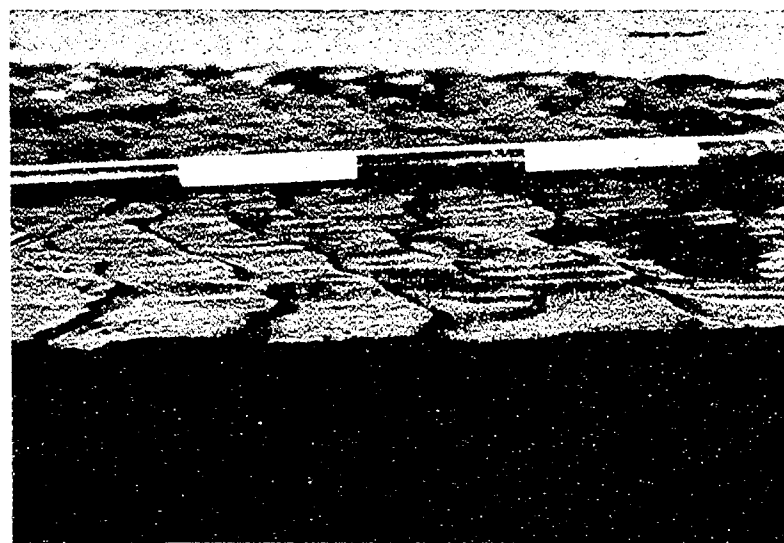


写真-5. 3 平波河床 (遷移河床)

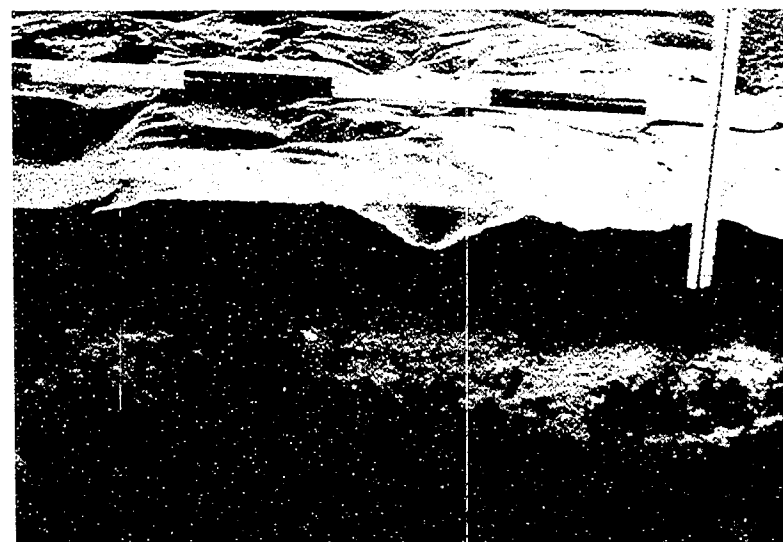


写真-5. 4 砂 漣

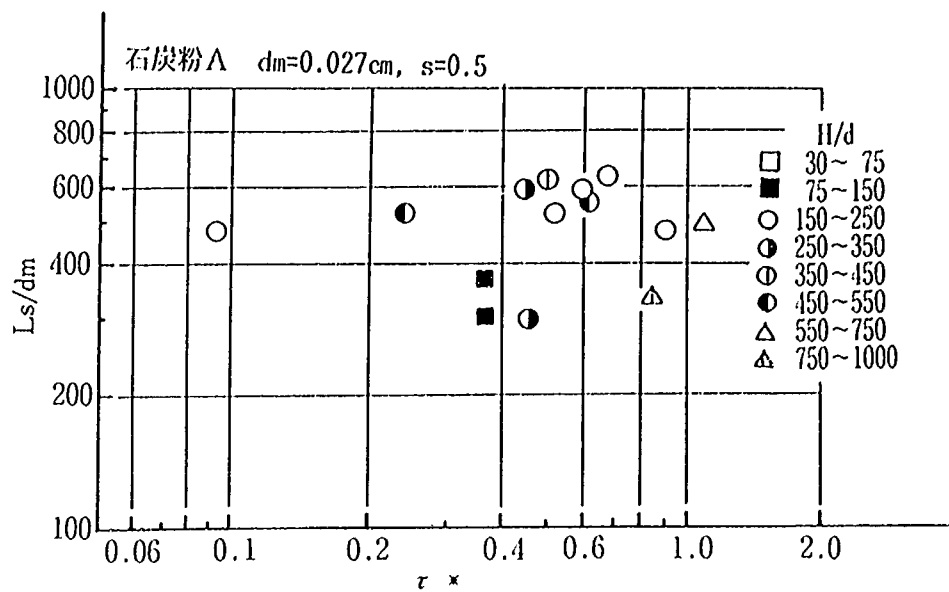


図-5. 2 L_s/d_m と τ^* の関係(石炭粉Aの場合)

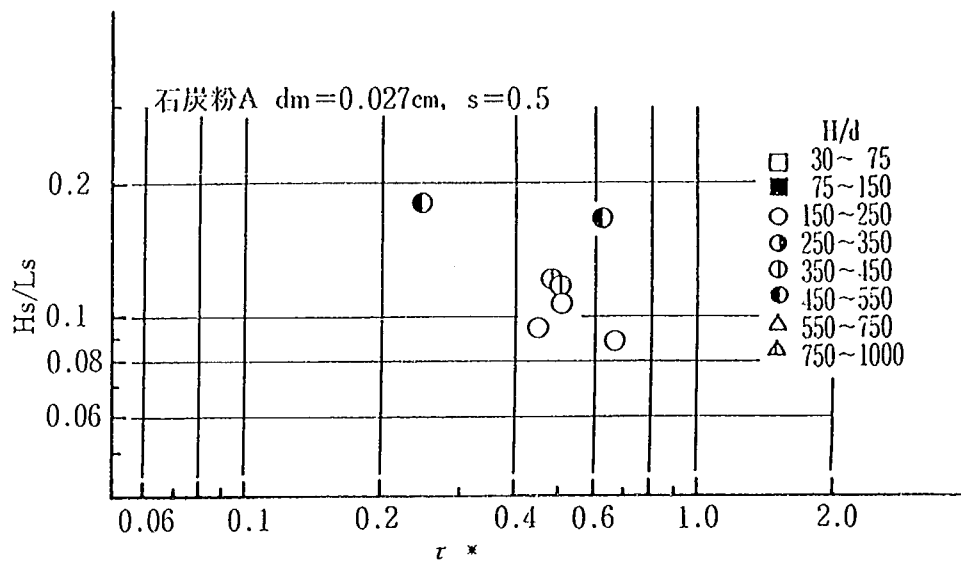


図-5. 3 H_s/L_s と τ^* の関係(石炭粉Aの場合)

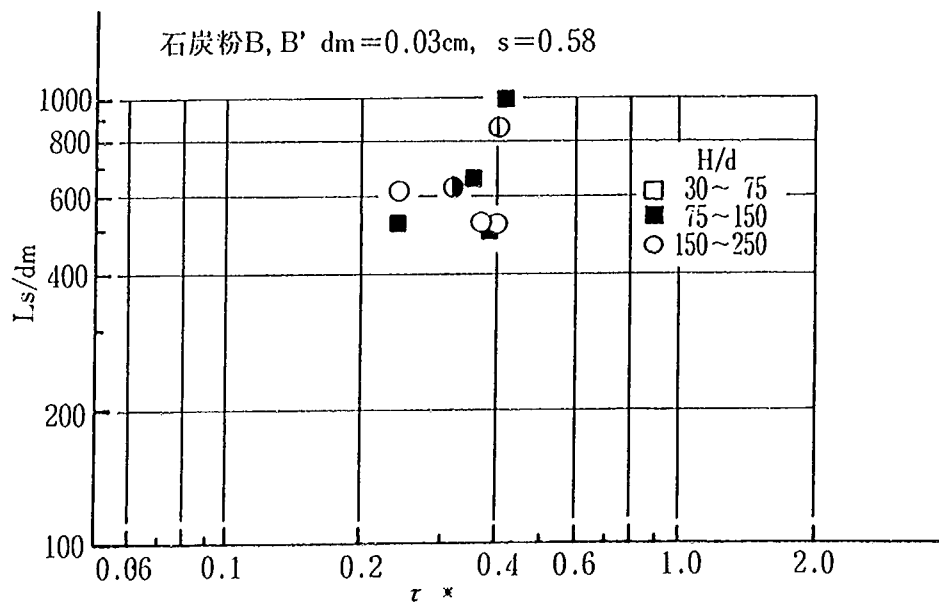


図-5. 4 L_s/d_m と τ^* の関係(石炭粉B, B' の場合)

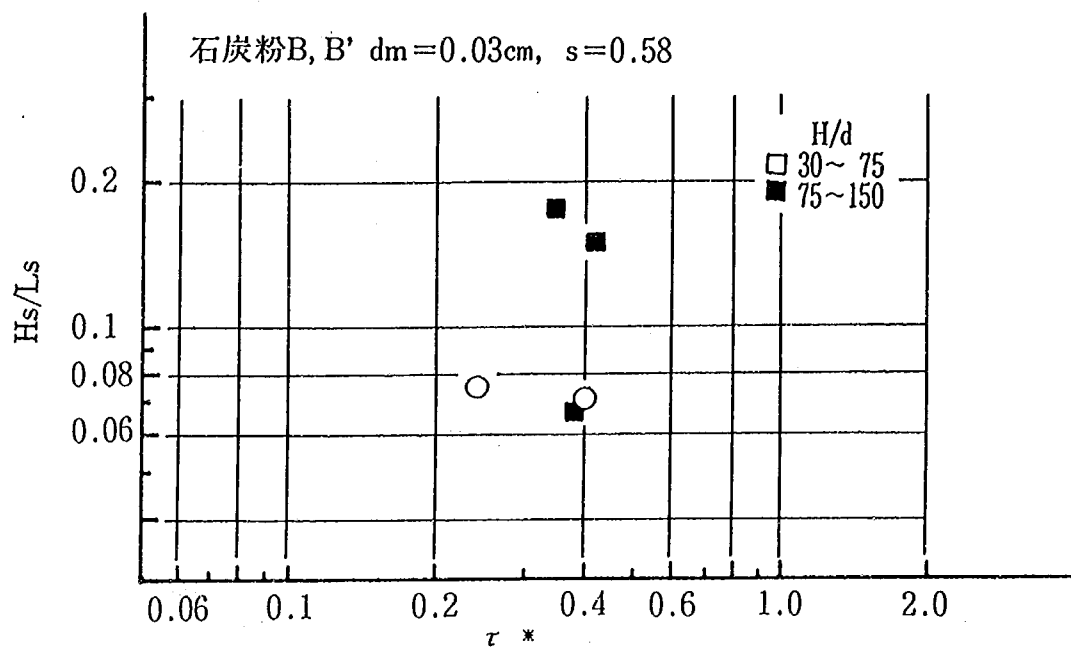


図-5.5 H_s/L_s と τ^* の関係 (石炭粉B, B' の場合)

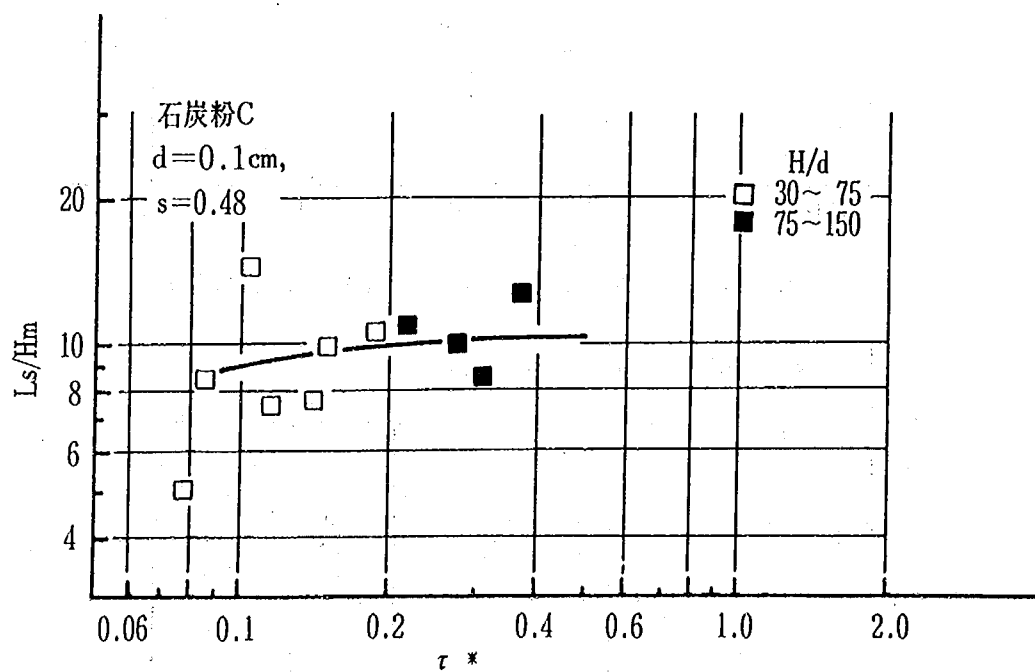


図-5.6 L_s/H_m と τ^* の関係 (石炭粉Cの場合)

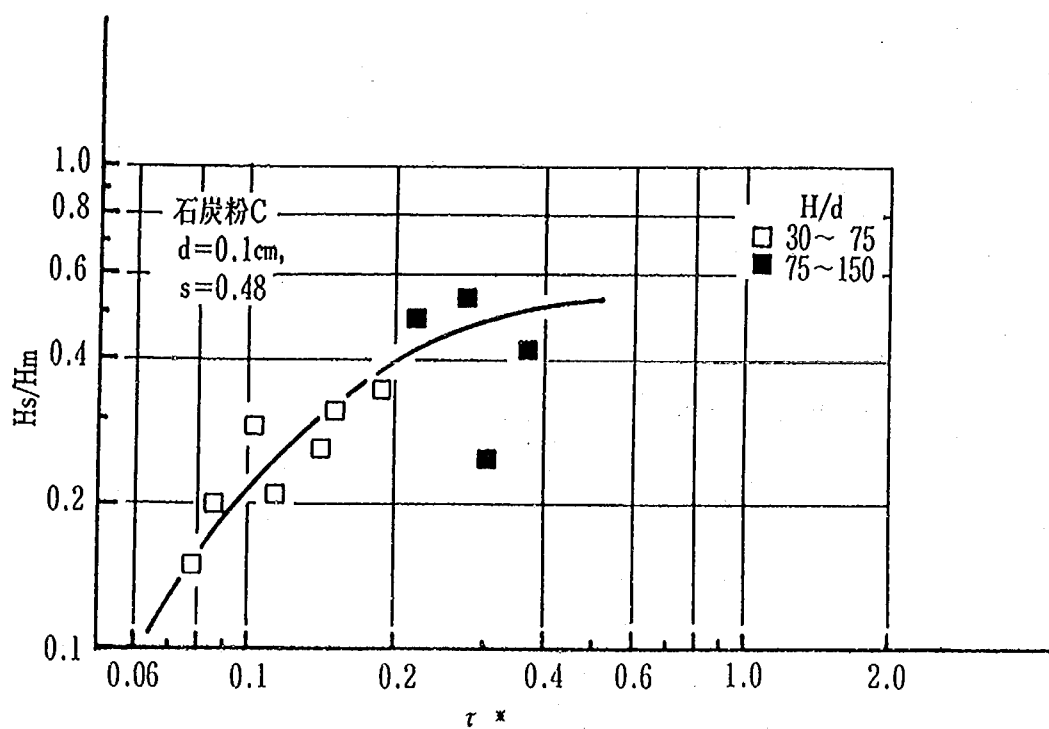


図-5. 7 H_s/H_m と τ^* の関係 (石炭粉Cの場合)

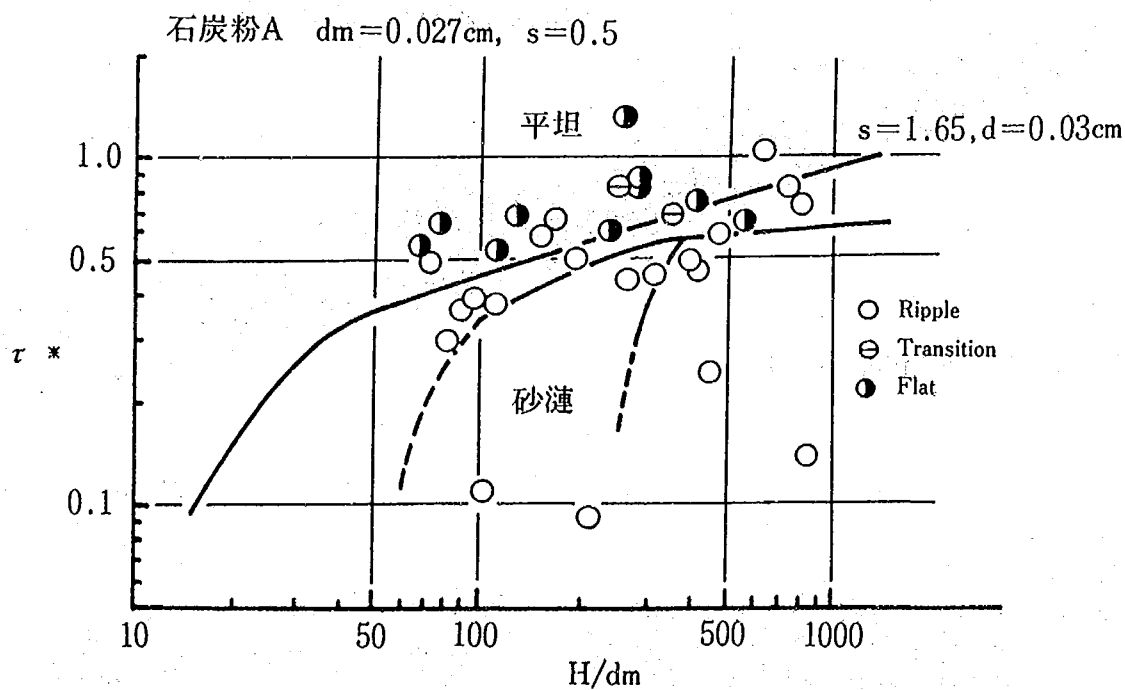
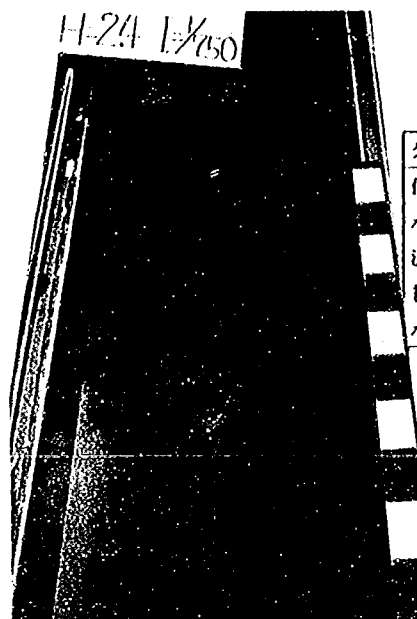
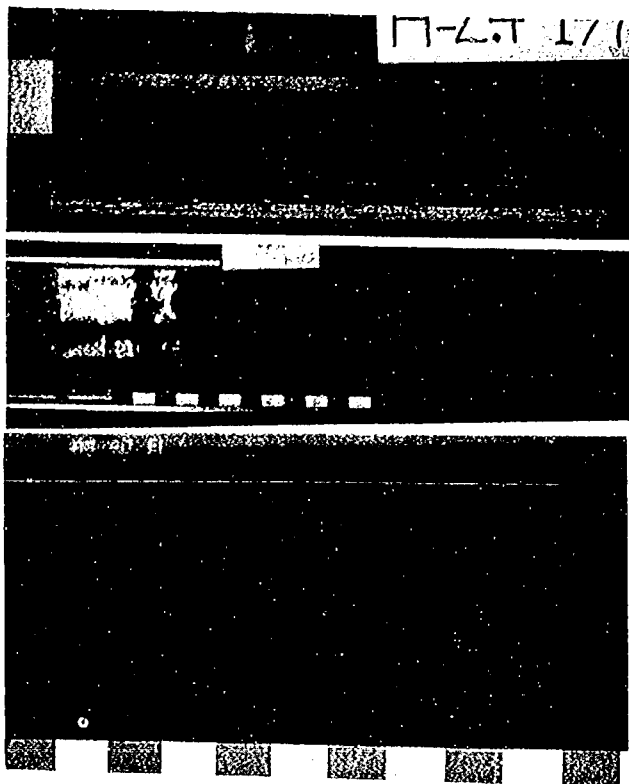
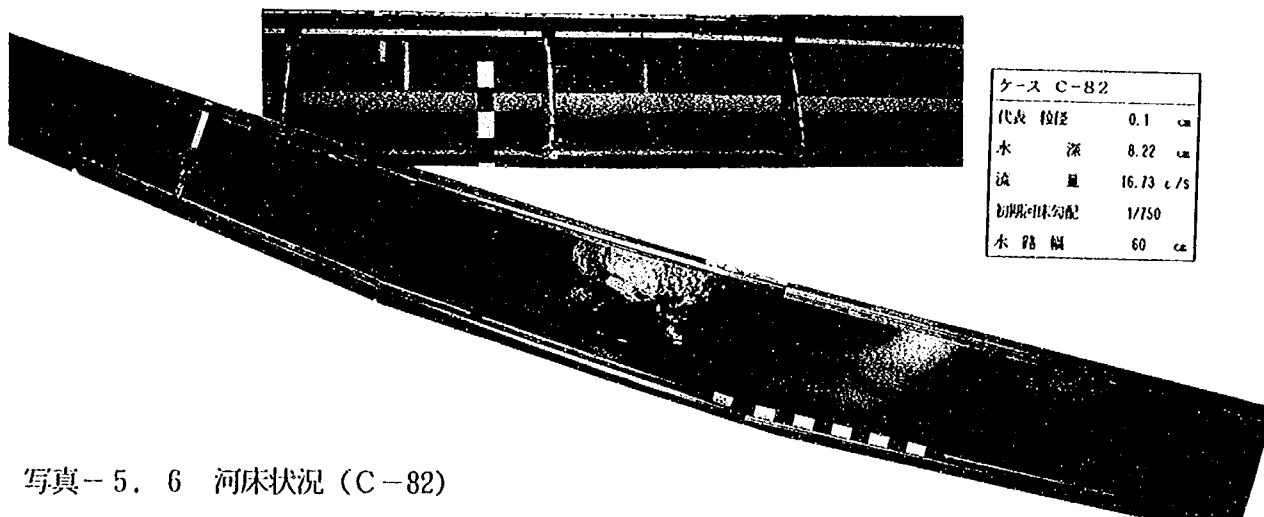


図-5. 8 河床波の領域区分図 (石炭粉Aの場合)



ケース C-77		
代表 粒径	0.1	cm
水 深	2.74	cm
流 量	3.30	l/s
初期河床勾配	1/750	
水路幅	60	cm

写真-5. 5 河床状況 (C-77)



ケース C-82		
代表 粒径	0.1	cm
水 深	8.22	cm
流 量	16.73	l/s
初期河床勾配	1/750	
水路幅	60	cm

写真-5. 6 河床状況 (C-82)

ケース C-71		
代表 粒径	0.1	cm
水 深	4.36	cm
流 量	8.76	l/s
初期河床勾配	1/570	
水路幅	60	cm

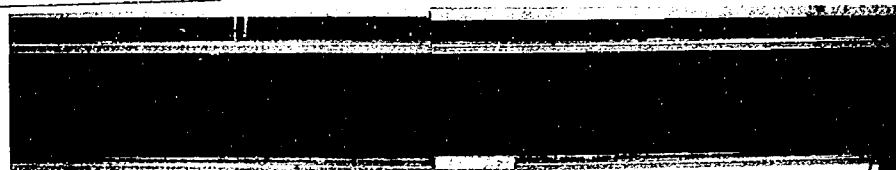
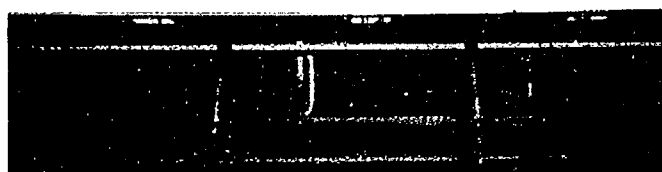


写真-5. 7 河床状況 (C-71)

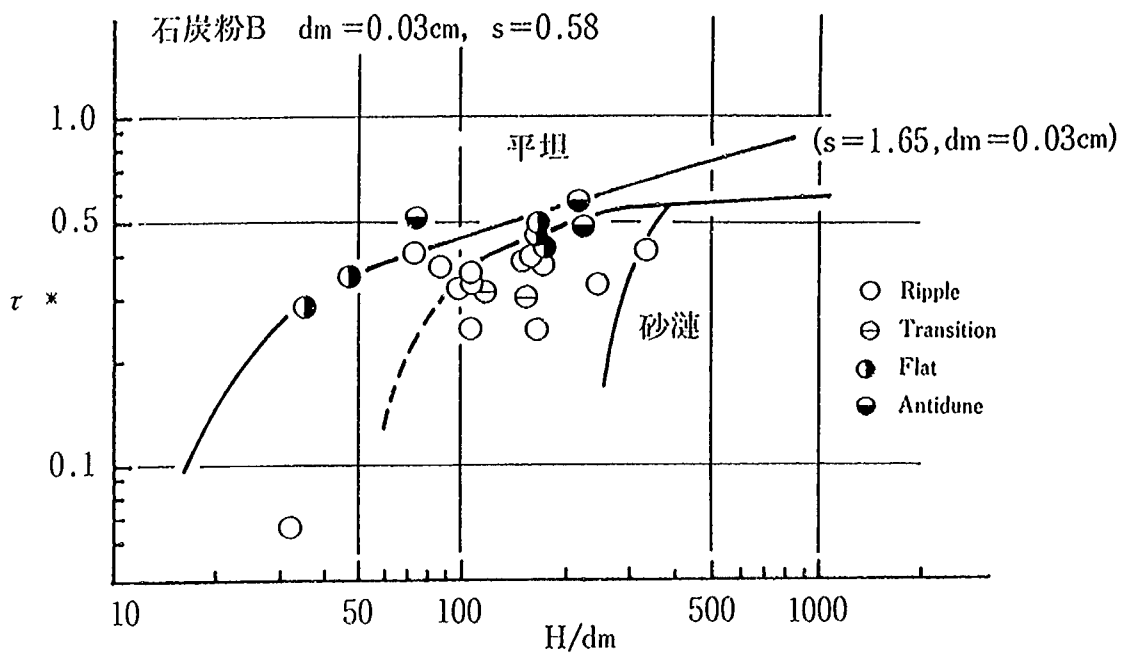


図-5. 9 河床波の領域区分図 (石炭粉B, B' の場合)

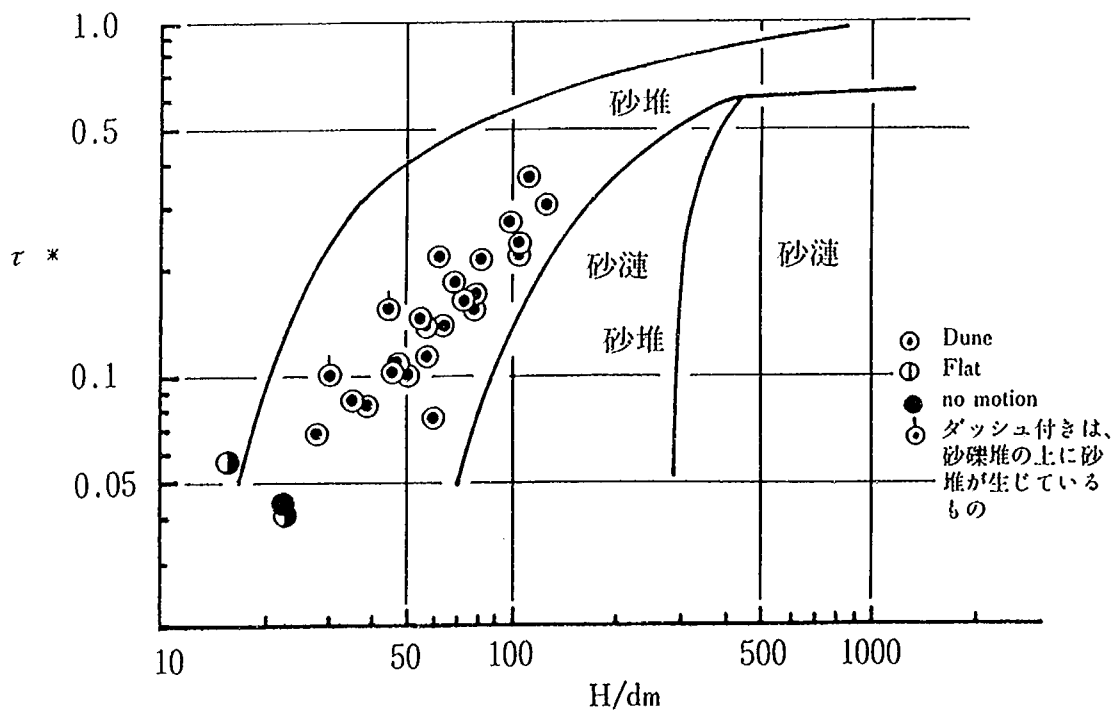


図-5. 10 河床波の領域区分図 (石炭粉Cの場合)

〔2〕 流れの抵抗係数

①底質の移動の伴わない平坦河床の場合、粒子レイノルズ数 Re_* が小さい石炭粉AおよびBは、図-5.11に示す τ_* と Re_* の関係図に示すように石炭粉の凹凸は層流圧層にかくれてしまう。このような場合は、流れの抵抗係数は表面がなめらかな水路の抵抗係数となる。開水路の抵抗係数と円管の抵抗係数は多少異なると考えられるが、図-5.12に示す Moody の図表を使って、流速係数 ψ を評価し得る。ここで管路の流れのレイノルズ数 Re の代わりに開水路の場合は、 $D = 4H$ であるので、

$$Re = 4 \cdot V_m \cdot H / \nu \quad (5.1)$$

とし、また $K_s = 2.5d$ 程度として τ_* を評価し、 $\psi = \sqrt{8/f}$ として求められる。

石炭粉Cの場合は、 $K_s = 2.5d$ 程度として、

$$\psi = 6.0 + 5.75 \log \left(\frac{H}{2.5d} \right) \quad (5.2)$$

より大略評価し得る。

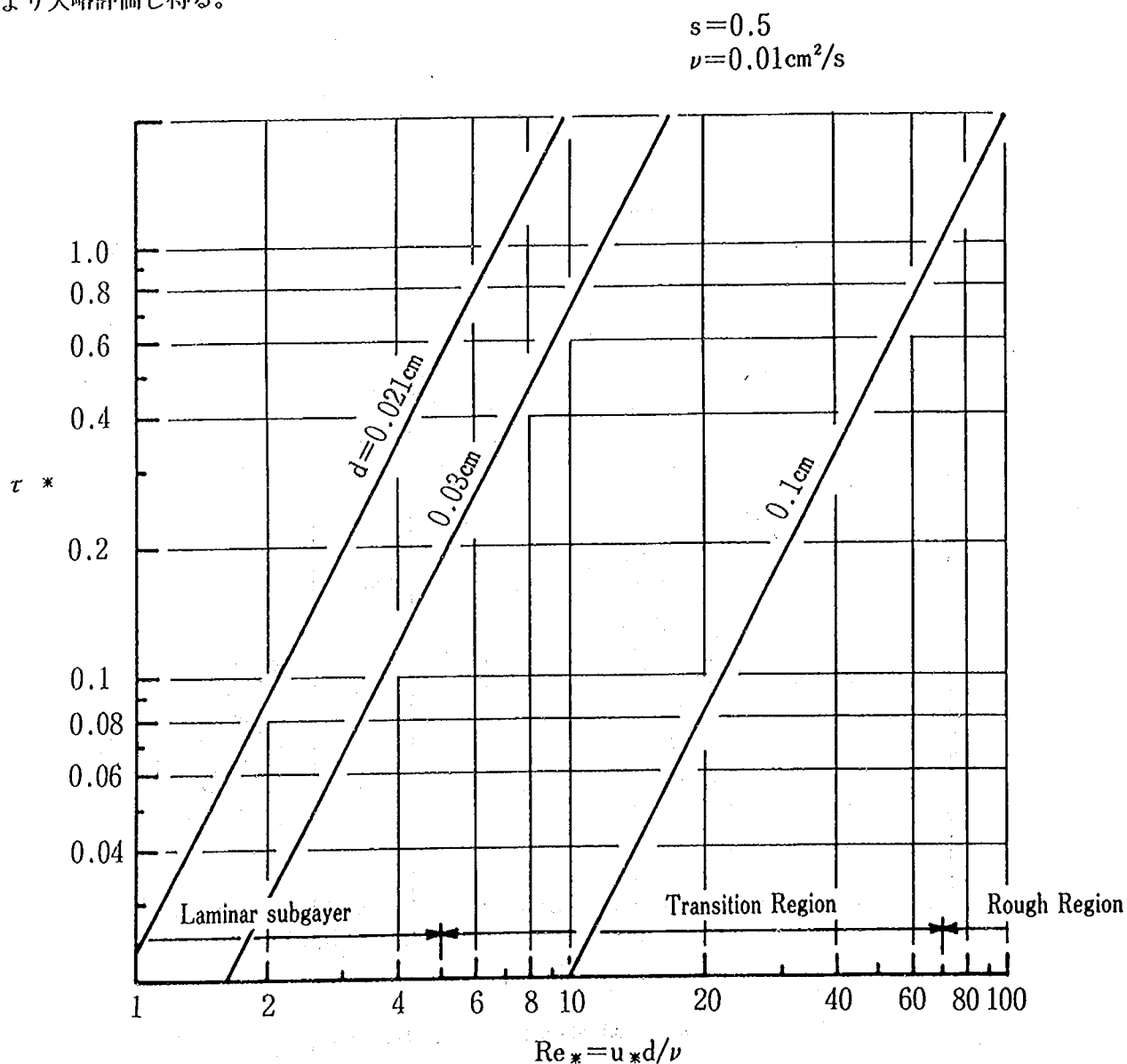


図-5.11 石炭粉の τ_* と Re_* の関係 ($s = 0.5$, $\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$)

②砂漣河床

砂漣河床は石炭粉AおよびBしか発生しなかった。以下については石炭粉AおよびBについて述べるものである。

相対水深が大きい場合 ($H/d > 100 \sim 200$)、砂漣の形状は、 H/d の影響を受けず、十分に発達した砂漣の L_s/d 、 H_s/d はほぼ一定値となる。従って十分に発達した砂漣の場合、 ψ の値は、

$$\psi = 6.0 + 5.75 \log (H/cd) \quad (5.3)$$

と推定される。 c の値は実験値から判断すると $c = (150 \sim 200)$ 程度と思われる。なお L_s/d は $500 \sim 600$ 程度である。

③砂堆

石炭粉A、Bについては $H/d = 200 \sim 800$ で砂堆が発生せず、掃流力が大きくなると砂漣から平坦河床へと直接遷移する。

石炭粉Cでは、 H/d が200以下について、 $s = 1.65$ 、 $d = 0.1\text{cm}$ の場合の ψ の値とほぼ一致している。

④平坦河床あるいは反砂堆

Upper Regime の場合の底層の状況は、図-5.12に示すように、石炭粉AおよびBについては層流底層から乱流底層への移行状態にあると考えられるので、 ψ の値は Re_* と H/d の両方の影響を受ける。実験結果より判断すると、 $H/d = 150 \sim 200$ で $\psi = 15 \sim 17$ 程度であり、

$$\psi = 6.0 + 5.75 (H/cd) \quad (5.4)$$

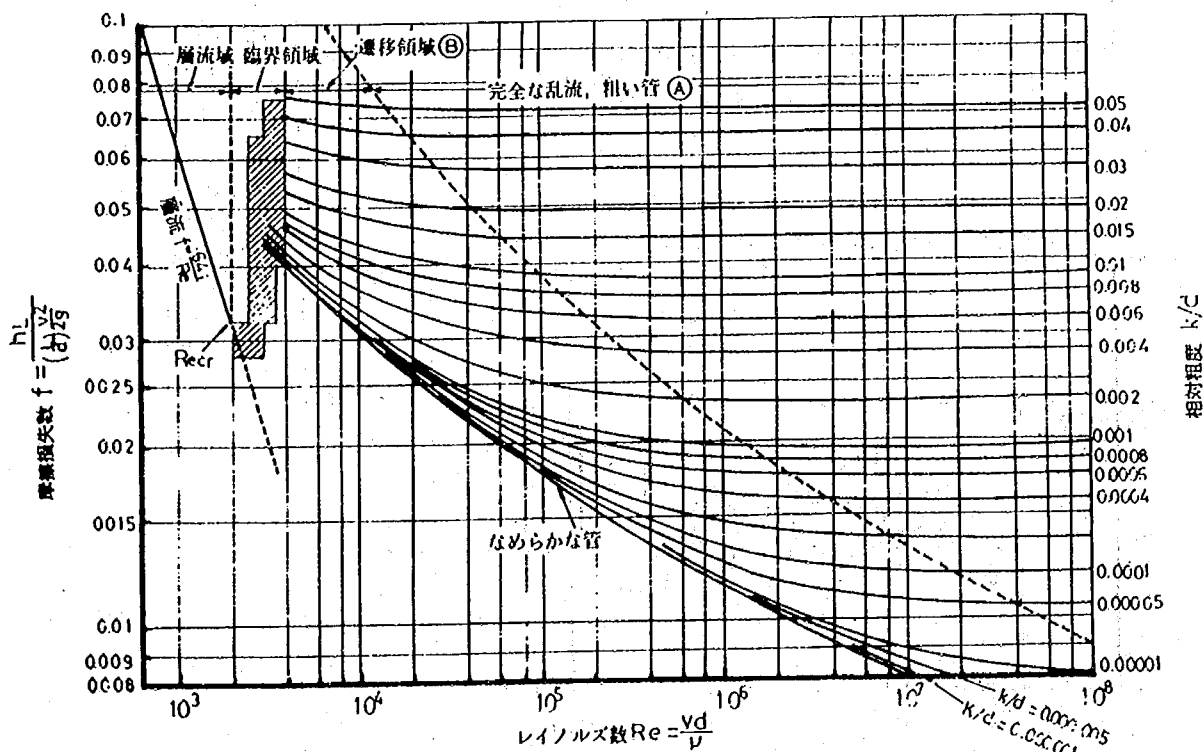


図-5.12 Moodyダイヤグラム

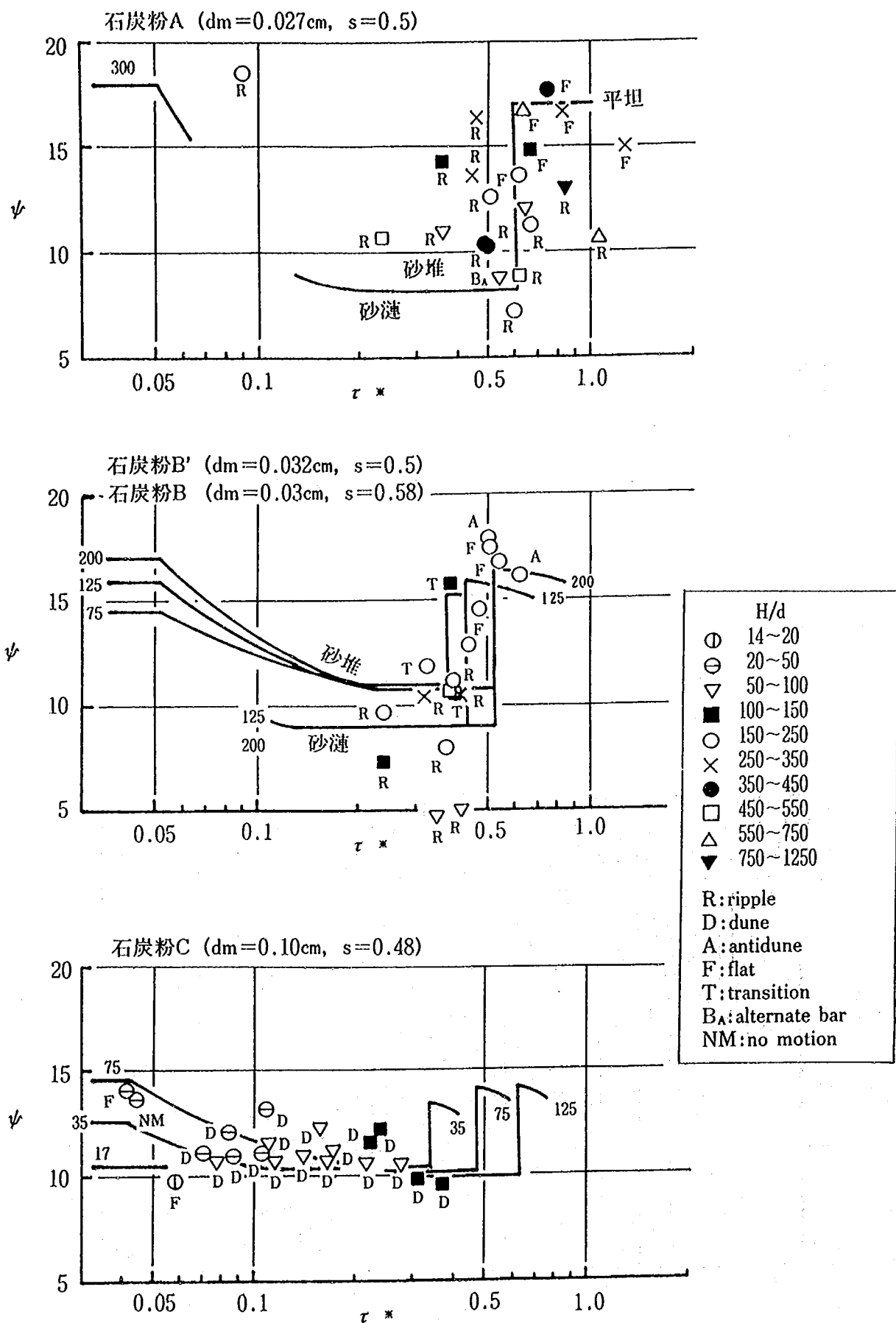


図-5.13 ψ と τ_* , H/d の関係 (石炭粉の場合)

として $c=3$ 位にしておけば良い値となっている。

反砂堆になると造波抵抗のため ψ の値が小さくなると思われるが、資料が無く ψ の値を推定し得ない。

石炭粉Cについては資料が無いのではっきりしたことは言えないが、 τ_* が小さい場合の平坦河床での ψ の値等から類推すると、平坦河床の ψ は $c=3$ 程度として評価すればそれほどの評価誤差は生じないと思われる。

〔3〕 流砂量

①石炭粉AおよびBの場合

砂漣河床の流砂量は H/d がある程度 (100以上) 大きければ、 H/d の影響を受けず、 $\tau_* > 0.15$ 以上で、

石炭粉Aの場合は

$$q_s/u_* d = 100 \cdot \tau_*^{5.0} \quad (5.5)$$

石炭粉Bの場合は

$$q_s/u_* d = 200 \cdot \tau_*^{5.0} \quad (5.6)$$

程度と推定される。 H/d が100以下では、水深の影響を受けるので、上式より流砂量が多いと考えられるが資料が無く評価し得ない。

平坦河床および反砂堆における流砂量は、 τ_* と H/d の影響を受けるが、資料が少なく、それを正確には評価し得ないが、山口らの実験³⁾は参考になる。彼らは、河口砂州の崩壊機構を検討するために、水路長25m、水路幅0.6m、高さ0.8mの片面ガラス張水路に砂州を形成し、これに上流から定流量を流下させ、50cm区間毎に水位、河床面高を測定し、流砂量の連続条件により q_s を求めている。この結果を Brown 公式に書き改めたのが図-5.17である。

$$q_s = c V_m^5 / s^2 d \quad (5.7)$$

の関係がほぼ成立する。なお Brown 公式は、

$$q_s/u_* d = K (u_*^2 / s g d)^2 \quad (5.8)$$

であり、 $\psi = V_m/u_*$ であるので、

$$q_s = K / \psi^5 / g^2 \cdot V_m / s^2 d \quad (5.9)$$

となる。 $\psi=15$ (upper regimeの予測値) とすると図-5.17の直線は $K=32$ となる。この結果は図-5.17における実験結果とほぼ一致している。upper regimeの流砂量は単に τ_* のみによって決まるものではなく、 H/d によって変わるが、移動床模型実験でよく行われる H/d の範囲 ($100 < H/d < 500$) では、

$$q_s/u_* d = (30 \sim 40) \cdot \tau_*^2 \quad (5.10)$$

位の流砂量になるものと思われる。

なお、 $s=1.65$ で $d=0.03\text{cm}$ の場合の upper regime の流砂量に比較すると石炭粉A、Bの流砂量は大きくなっている。これは、同一 τ_* 、 H/d でも u_*/w_o が石炭粉の方が大きく浮遊しやすいためであろう。

②石炭粉C

石炭粉Cの実験は $R_{e*}=14 \sim 41$ 、 $H/d=22 \sim 112$ の範囲で実験が行われ、河床形態は、土砂の移動が少ない場合の平坦河床および砂堆である。

図-5.16に示す流砂量を見ると $s=1.65$, $d=0.1\text{cm}$ の場合に比べ、流砂量が1割程度多いようである。この原因の一つは $s=1.65$ の場合に比して、同一 τ_* であれば u_* / w_o が倍程度大きく、掃流砂の一部が浮遊することであろう。

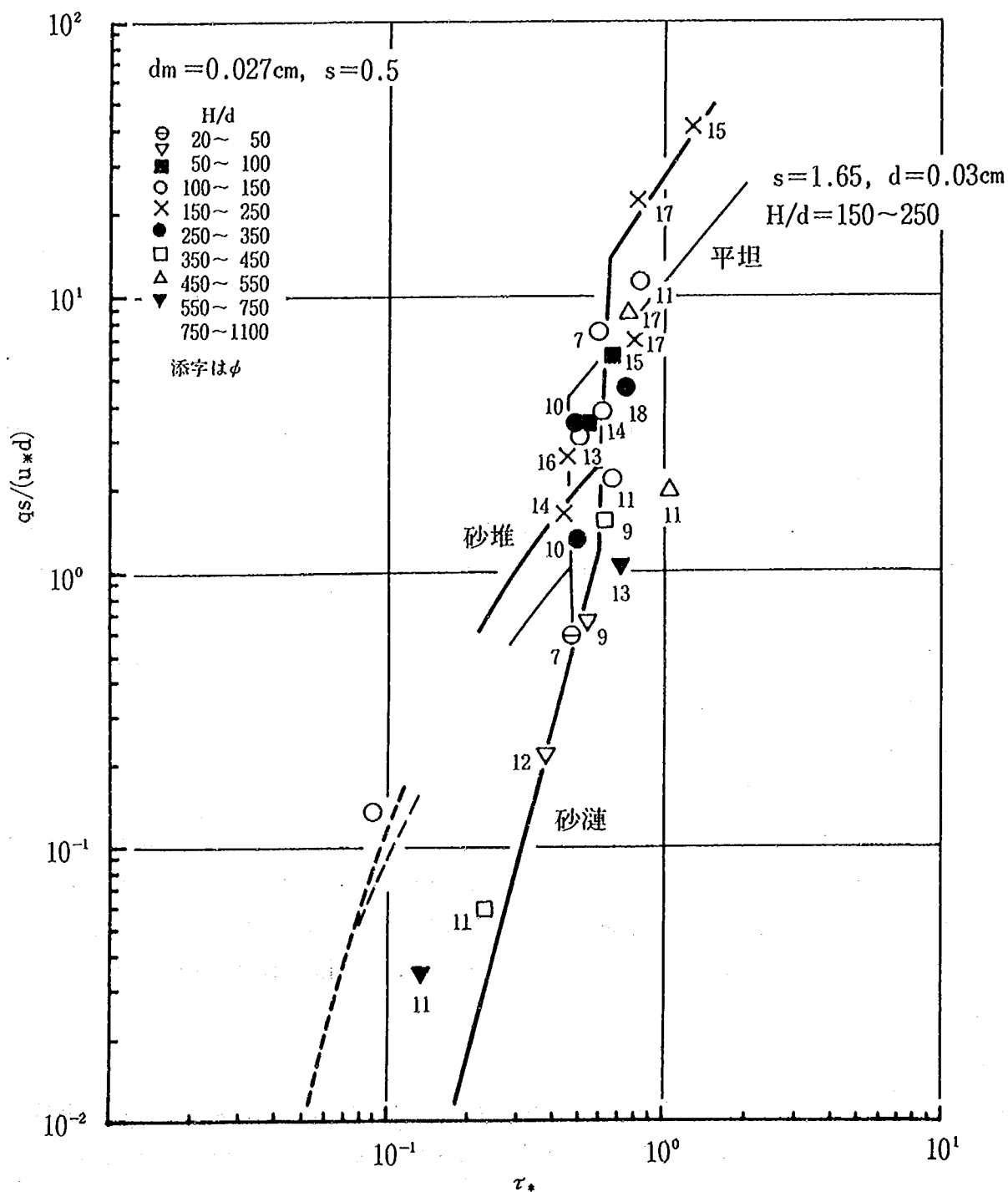


図-5.14 $q_s / (u_* d)$ と τ_* の関係 (石炭粉Aの場合)

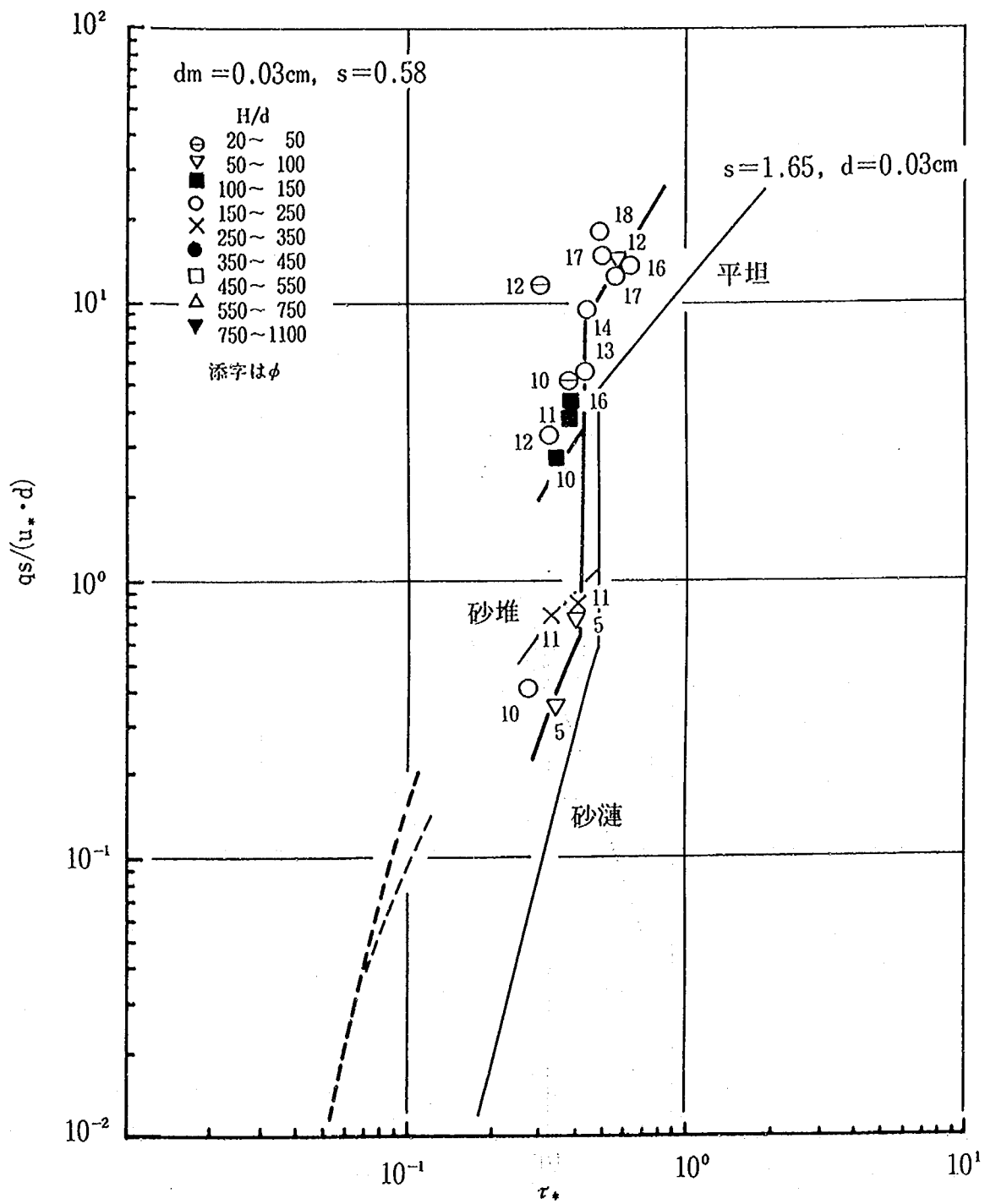


図-5. 15 $qs/(u_* \cdot d)$ と τ_* の関係 (石炭粉B, B' の場合)

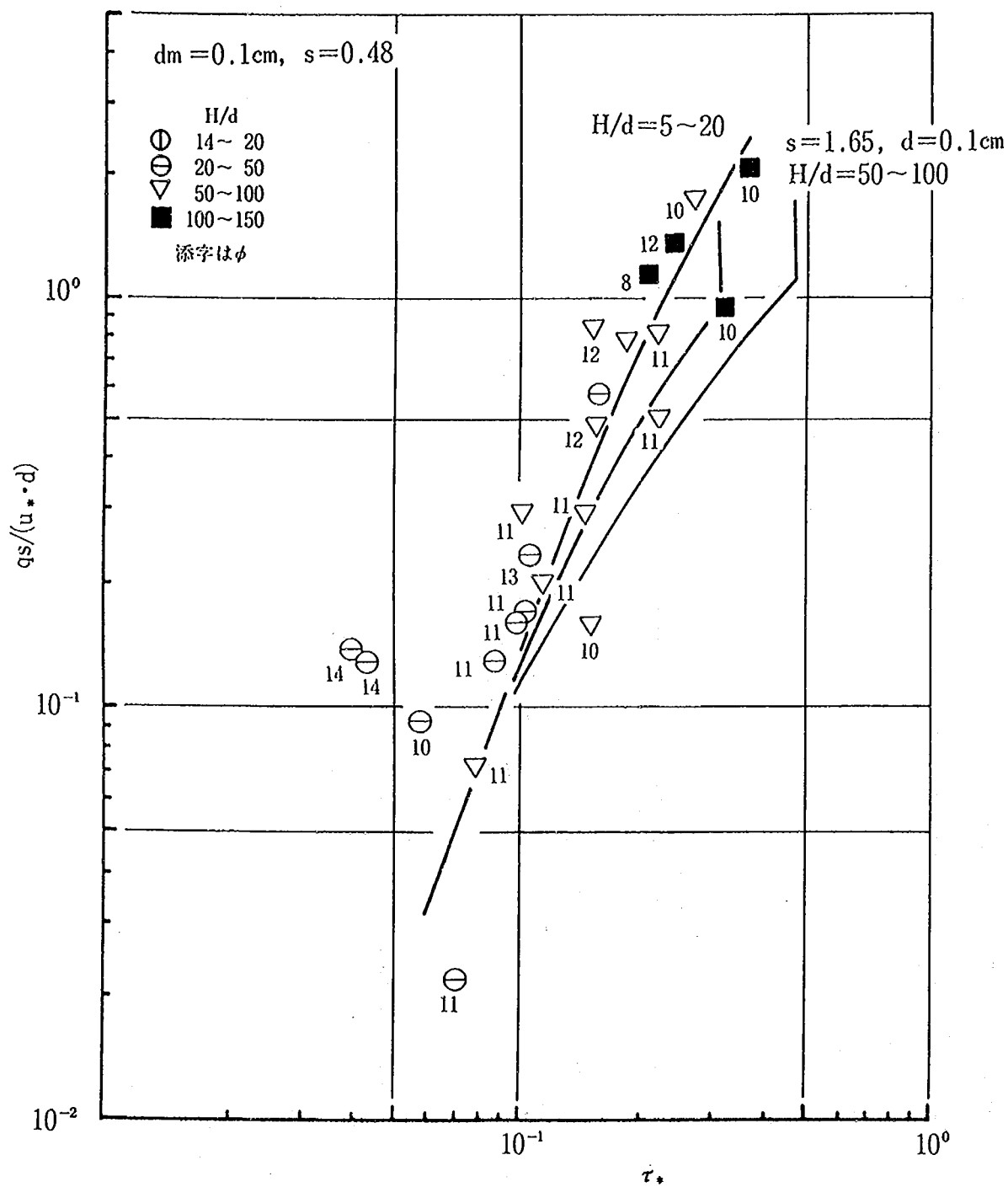


図-5.16 $q_s / (u_* \cdot d)$ と τ_* の関係 (石炭粉Cの場合)

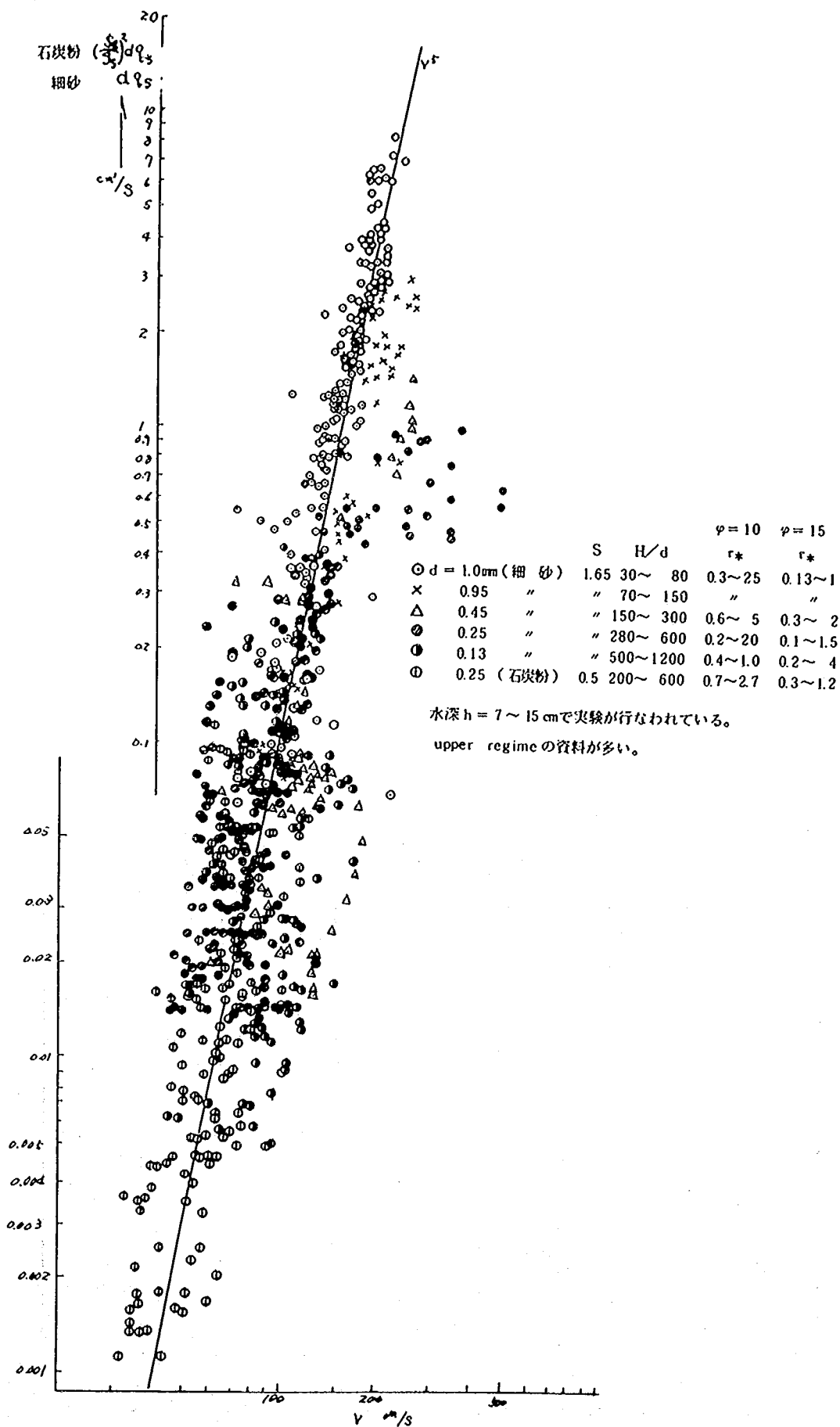


図-5.17 $qs \sim V$ 関係図

5.2 スラッジライトの移動床の水理

5.2.1 実験ケースと実験条件

スラッジライトを用いた移動床実験は、 $d_m=0.105\text{cm}$ と $d_m=0.12\text{cm}$ の2種類の材料でそれぞれ16ケース (Sℓ-1～Sℓ-16) と15ケース (Sℓ-17～Sℓ-31) の全31ケースを行っている。実験の水理条件は表-5.2の通りである。また、実験結果は付表-4, 5に整理した。

表-5.2 スラッジライトを用いた移動床模型実験の実験条件

実験名称：スラッジライト A 河床材料：スラッジライト 代表粒径：0.105cm
 水中比重：0.8 沈降速度：10.2cm/sec
 水路長：30m 水路幅：0.6m

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	実験 ケース	流量 Q (ℓ/s)	初期 河床勾配
Sℓ-01	0.94	1/440	Sℓ-07	16.60	1/440	Sℓ-13	1.88	1/440
Sℓ-02	1.80		Sℓ-08	21.26		Sℓ-14	5.60	
Sℓ-03	2.85		Sℓ-09	1.75		Sℓ-15	10.60	
Sℓ-04	5.60		Sℓ-10	5.69		Sℓ-16	16.60	
Sℓ-05	10.62		Sℓ-11	10.59				
Sℓ-06	12.51		Sℓ-12	16.60				

実験名称：スラッジライト B 河床材料：スラッジライト 代表粒径：0.12cm
 水中比重：0.8 沈降速度：12.0cm/sec
 水路長：30m 水路幅：0.35, 0.6m

実験 ケース	流量 Q (ℓ/s)	初期 河床勾配 及び 水路幅	実験 ケース	流量 Q (ℓ/s)	初期 河床勾配 及び 水路幅	実験 ケース	流量 Q (ℓ/s)	初期 河床勾配 及び 水路幅
Sℓ-17	3.85	1/500 B=0.6m	Sℓ-22	13.84	1/500 B=0.6m	Sℓ-27	10.05	1/1140 B=0.6m
Sℓ-18	5.33		Sℓ-23	20.52		Sℓ-28	11.50	1/750 B=0.6m
Sℓ-19	8.16		Sℓ-24	19.00		Sℓ-29	12.44	1/600 B=0.6m
Sℓ-20	10.58		Sℓ-25	24.85		Sℓ-30	3.06	1/500 B=0.35m
Sℓ-21	12.66		Sℓ-26	30.22		Sℓ-31	6.47	

本実験はスラッジライトを河床材料とした場合の河床形態、流送形態を把握するためのもので、段階的に流量を変化させ観察を行った。

5.2.2 各ケースの河床状況と観測結果

スラッジライトを用いた移動床実験の、粒径0.105cmを用いた実験16ケースの内、実験 S Ⅱ-1 ~ S Ⅱ-8 の8ケースの観測結果を以下にまとめた。

実験 S Ⅱ-1 (初期河床勾配1/500)

水深1.06cm, 流量0.94 ℓ/s で行った。河床材料の移動は認められず、河床は静止状態である。

実験 S Ⅱ-2 (初期河床勾配1/500)

水深1.60cm, 流量1.80 ℓ/s で行った。水路全体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。

実験 S Ⅱ-3 (初期河床勾配1/500)

水深1.69cm, 流量2.85 ℓ/s で行った。水路全体に薄いながらウロコ状の河床波の発生が認められた。材料の移動は水路幅全体にわたって認められ、河床面を転がり移動する転動状態であった。

実験 S Ⅱ-4 (初期河床勾配1/500)

水深3.12cm, 流量5.60 ℓ/s で行った。河床材料の移動が活発となり、砂堆の発達が認められた。また、砂堆の連なりから、短波長の交互砂州的な流れがみられた。

実験 S Ⅱ-5 (初期河床勾配1/500)

水深4.71cm, 流量10.62 ℓ/s で行った。河床形態は、砂漣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い上がる現象がみられた。

実験 S Ⅱ-6 (初期河床勾配1/500)

水深5.06cm, 流量12.51 ℓ/s で行った。河床形態は砂堆となった。

実験 S Ⅱ-7 (初期河床勾配1/500)

水深6.06cm, 流量16.60 ℓ/s で行った。河床形態は砂堆であり、河床材料の移動は転動であった。

実験 S Ⅱ-8 (初期河床勾配1/500)

水深7.12cm, 流量21.26 ℓ/s で行った。河床材料の移動が、転動から跳躍に変動した。河床形態は砂堆である。

5.2.3 まとめ

〔1〕河床波の特性と領域区分

スラッジライトの実験は $Re_* = 15 \sim 64$, $H/d = 12 \sim 110$, $\tau_* = 0.035 \sim 0.38$ の範囲で実験が行われている。河床形態は、流砂量の少ない場合 (τ_* が 0.1 以下) の平坦河床と砂堆である。代表的な河床波の形状としては、川幅水深比が13程度である S Ⅱ-11 ($H = 4.97\text{cm}$, $\tau_* = 0.135$, $H/d = 47$, $B/H = 12.7$) で、写真—5.8に示すように波高の低い単列砂州の上に砂堆が共存している。

S Ⅱ-16 ($H = 6.41\text{cm}$, $\tau_* = 1.75$, $H/d = 61$, $B/H = 9.4$) では、写真—5.9に示すように砂堆形状であるが、水路の左右に交互の砂堆の底部の位置があるような三次元的形態となっている。砂堆の相対波高 L_s/H_m は、 τ_* が 0.1 以下の場合、20以上のものがあり大きな値を持つものがあるが、 τ_* が 0.1 以上では 8 ~ 10 前後で $s = 1.65$, $d = 0.1\text{cm}$ の場合と同程度の値を持ち、 H_s/H_m も同程度の値となっている。

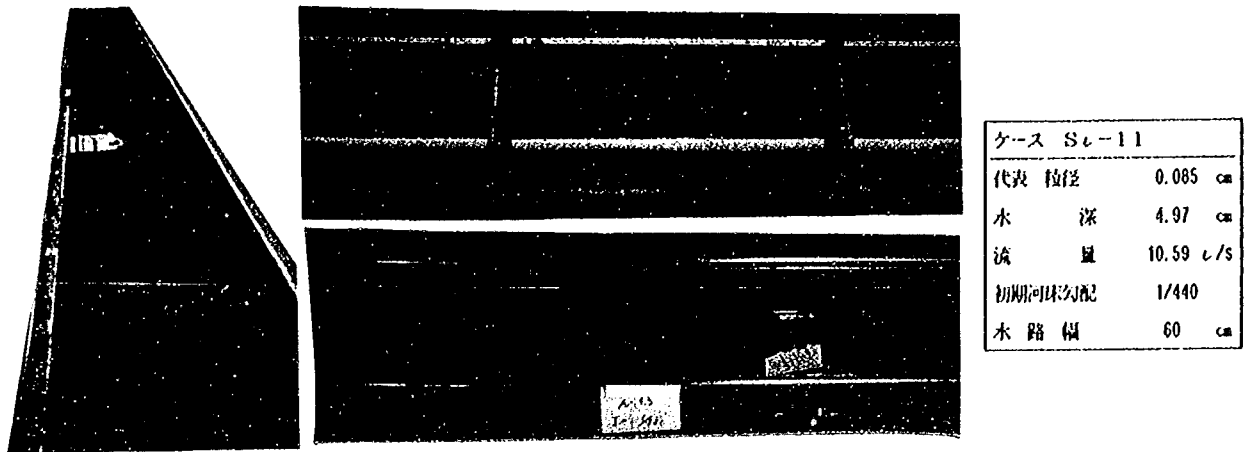


写真-5. 8 河床状況 (Sl-11)

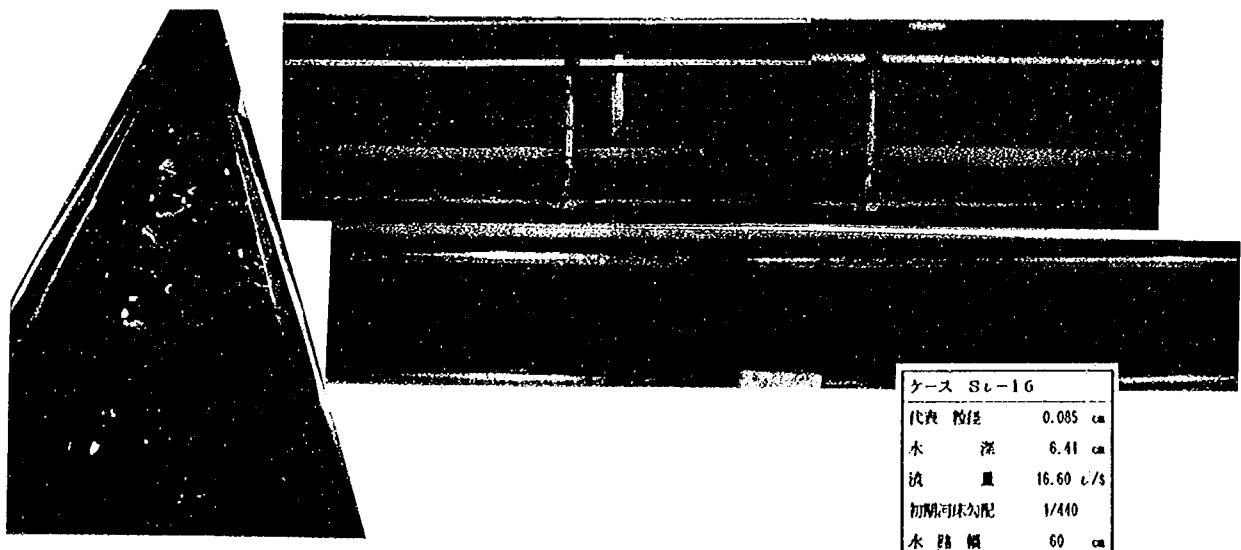


写真-5. 9 河床状況 (Sl-16)

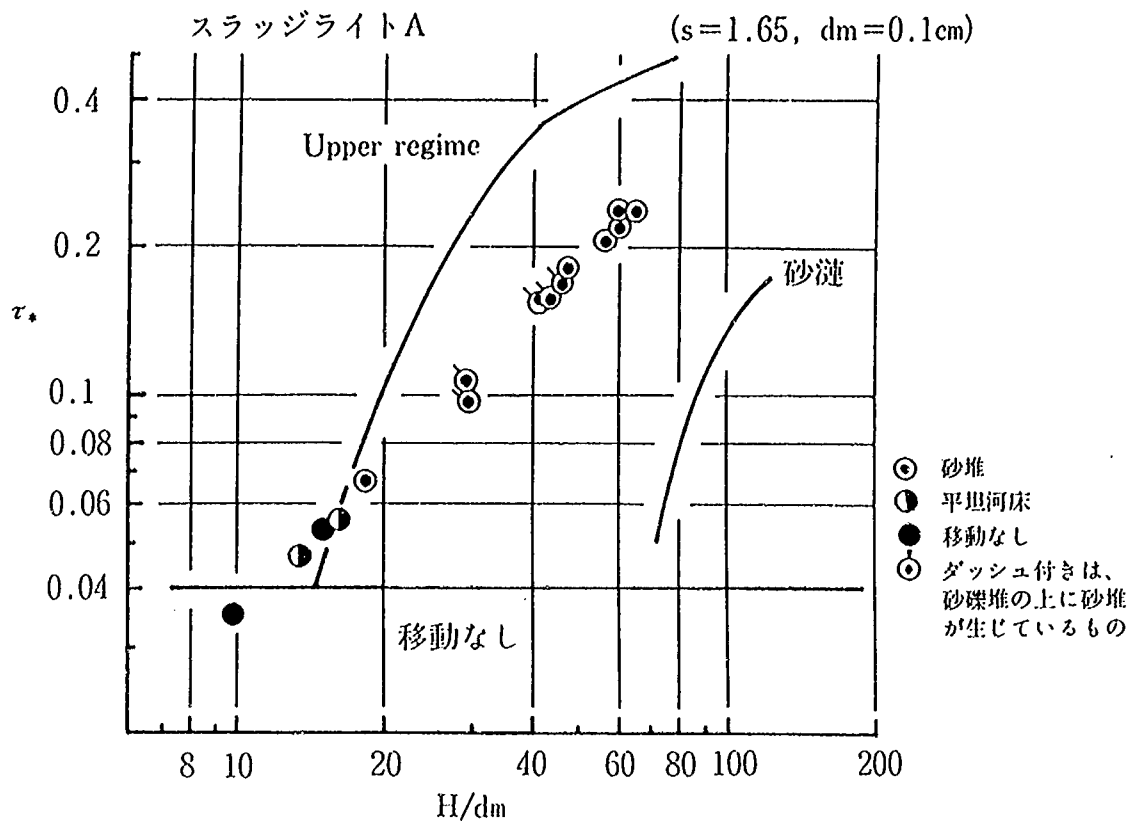


図- 5. 19 河床波の領域区分図 (スラッジライトAの場合)

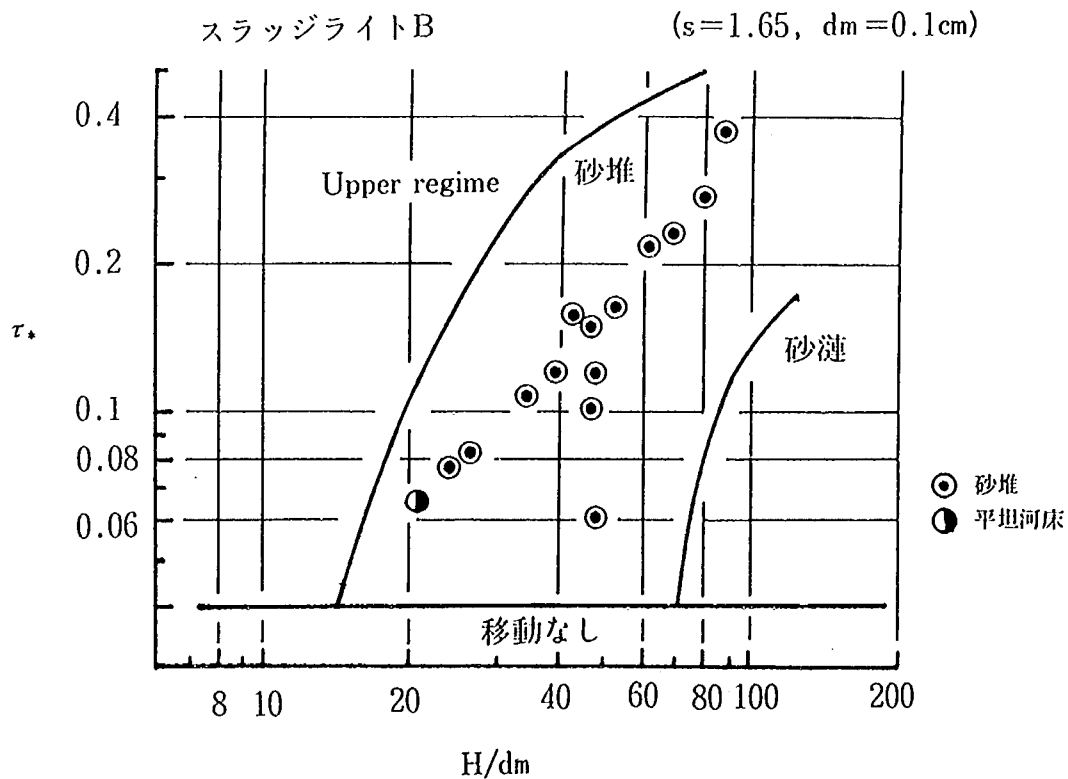


図- 5. 20 河床波の領域区分図 (スラッジライトBの場合) (s=1.65, dm=0.1cm)

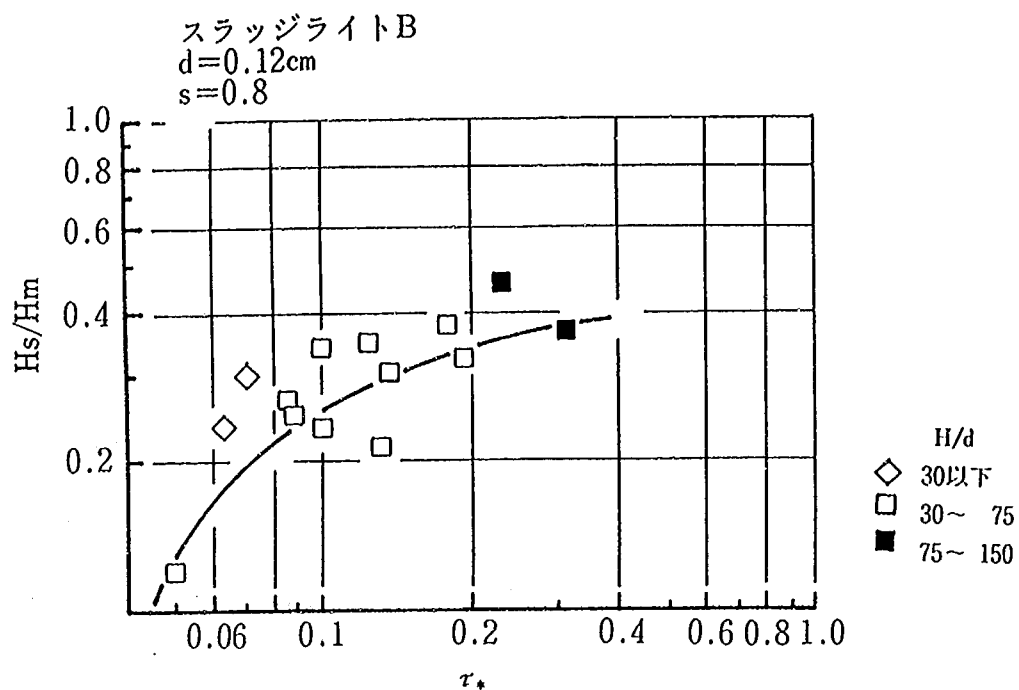


図-5. 21 H_s/H_m と τ_* の関係 (スラッジライトBの場合)

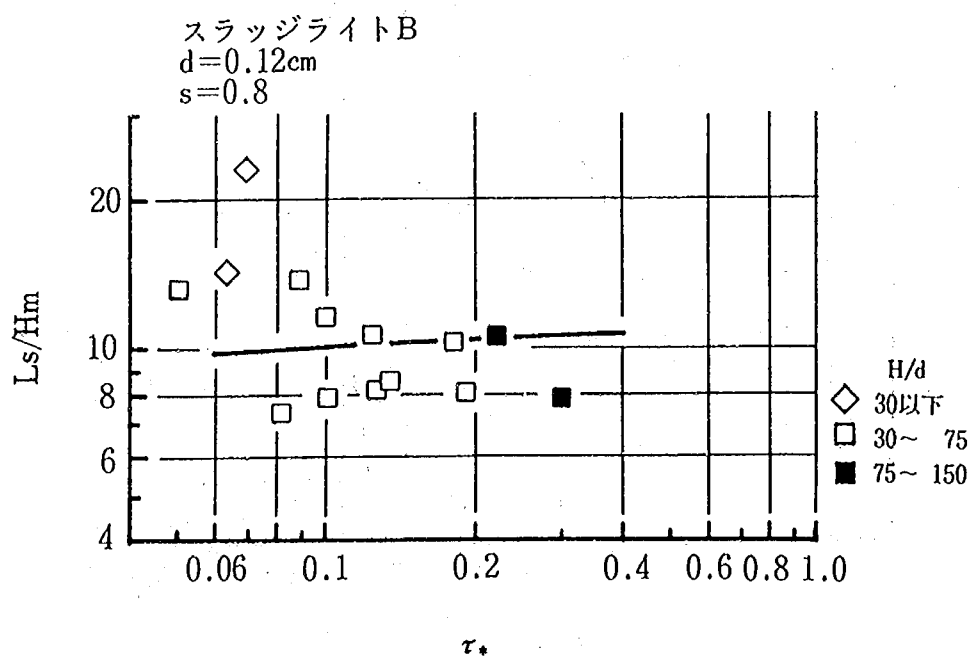


図-5. 22 L_s/H_m と τ_* の関係 (スラッジライトBの場合)

〔2〕 流れの抵抗係数

流速係数 ψ は、 $s=1.65$, $d=0.1\text{cm}$ の場合と同一 H/d , τ_* であれば、同様な値を持つが、スラッジライト A の砂堆河床は多少 ψ の値が大きめになっている。

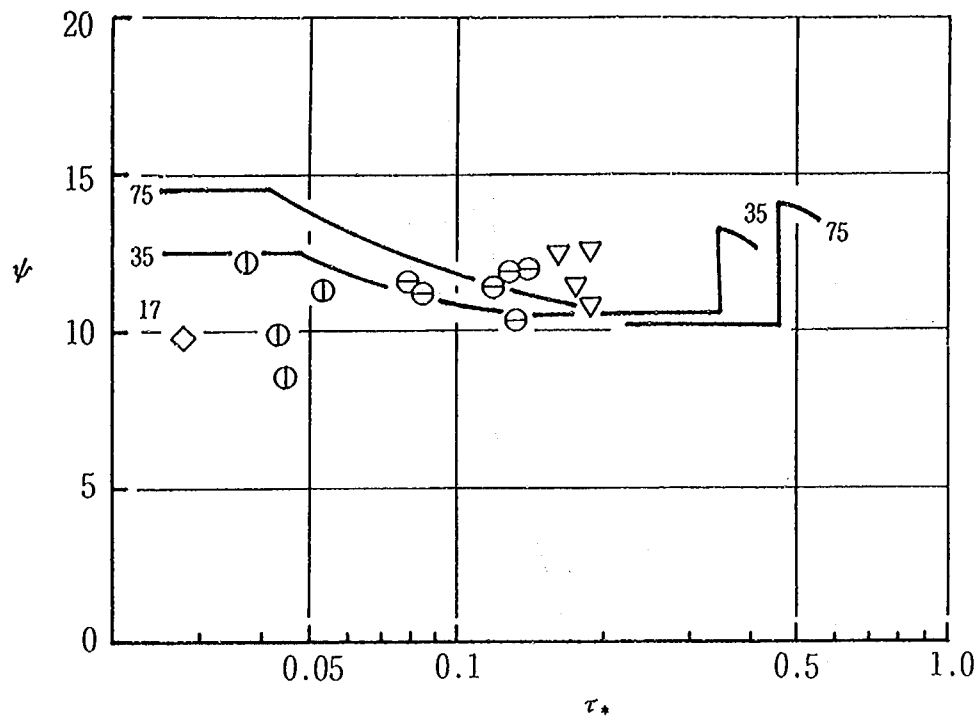


図-5.23 ψ と τ_* , H/d の関係 (スラッジライト A の場合)

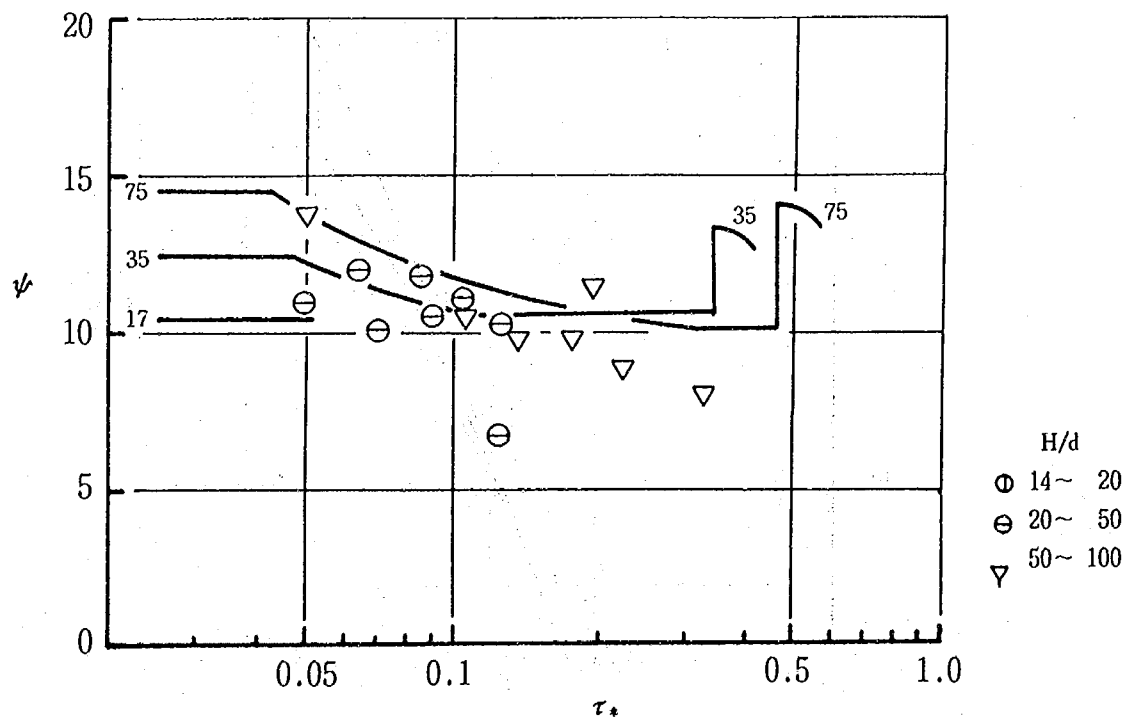


図-5.24 ψ と τ_* , H/d の関係 (スラッジライト B の場合)

〔3〕 流砂量

流砂量は、図-5.27, 図-5.28に示すように $s=1.65$, $d=0.1\text{cm}$ の場合に比し, 大きめである。

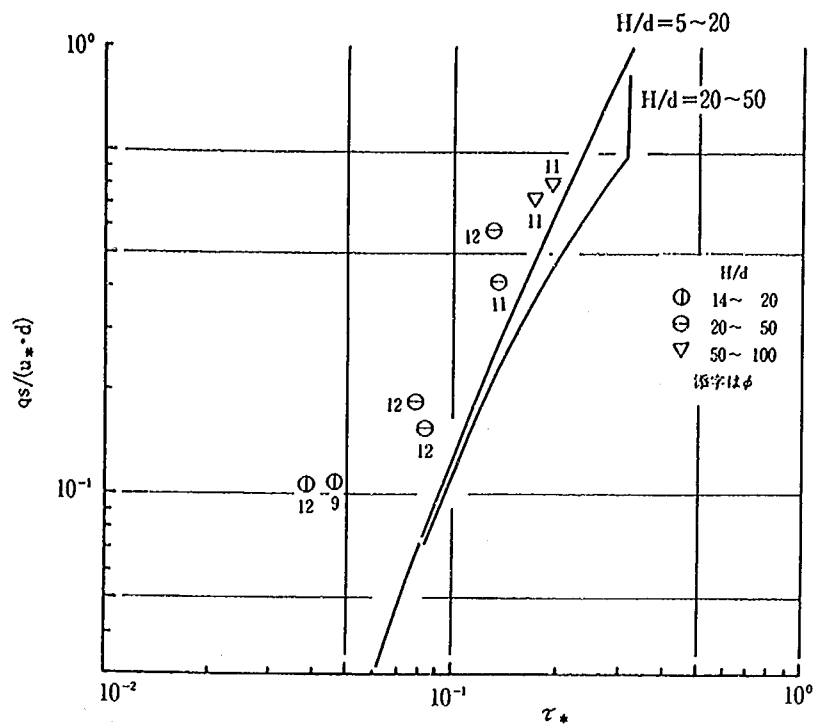


図-5. 25 $q_s/(u_* \cdot d)$ と τ_* の関係 (スラッジライトAの場合)

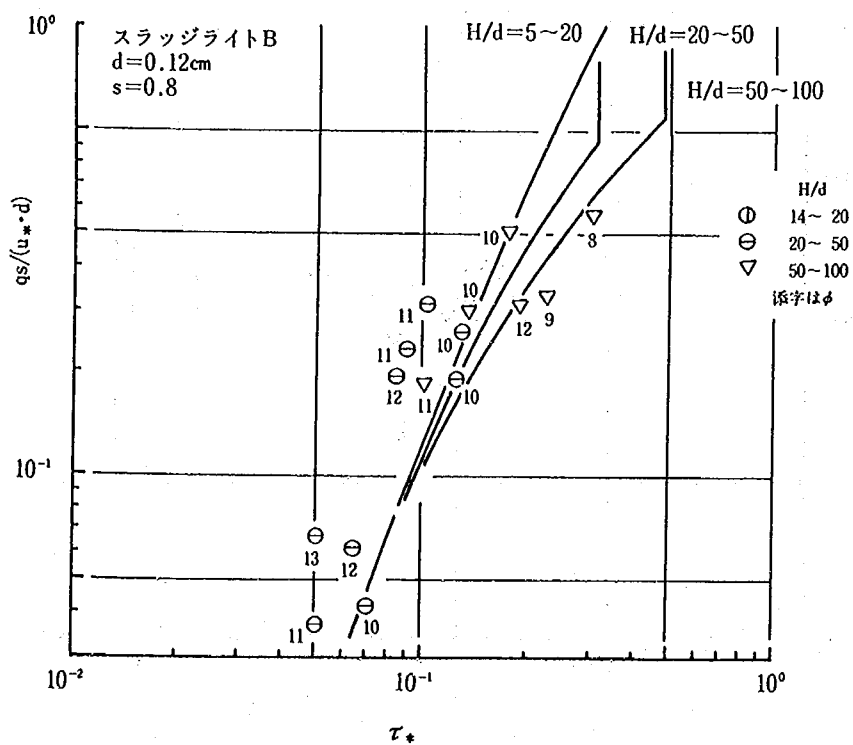


図-5. 26 $q_s/(u_* \cdot d)$ と τ_* の関係 (スラッジライトBの場合)

5.3 PBT を用いた移動床の水理

5.3.1 実験ケースと実験条件

PBT を用いた移動床模型実験は、 $d_m = 0.1\text{cm}$ の材料を用いて52ケース行った。その実験条件は表—5.3のとおりである。また、測定結果は付表—6にまとめた。P—01～P—35はPBTを河床材料とした場合の河床形態、流送形態を把握するためのもので、段階的に流量を変化させ観察を行った。P—01～P—13は給砂は行わなかった。P—14～P—35は $n = 0.015$ とした場合の土研式より q_s を評価して給砂した。P—36～P—52は小規模河床波の領域区分を明確にするために行ったもので、給砂は行わなかった。

表—5.3 PBT を用いた移動床模型実験の実験条件

実験名称：PBT 河床材料：PBT 代表粒径：0.10cm
 水中比重：0.31 沈降速度：3.43cm/sec
 水路長：30m 水路幅：0.6m, 1.2m

実験 ケース	流量 Q (ℓ/s)	初期 河床勾配 及び 水路幅	実験 ケース	流量 Q (ℓ/s)	初期 河床勾配 及び 水路幅	実験 ケース	流量 Q (ℓ/s)	初期 河床勾配 及び 水路幅
P-01	1.80	1/2,000	P-20	25.95	1/2,000	P-36	7.50	1/250
P-02	3.46	B=0.6m	P-21	40.20	B=1.2m	P-37	18.00	B=0.6m
P-03	4.85		P-22	2.10	1/1,300	P-38	3.40	1/500
P-04	6.40		P-23	3.30	B=0.6m	P-39	7.50	B=0.6m
P-05	10.05		P-24	3.42		P-40	12.00	
P-06	11.90		P-25	4.76		P-41	27.50	
P-07	14.06		P-26	6.36		P-42	72.00	
P-08	18.41		P-27	6.30		P-43	15.50	1/1,000
P-09	21.88		P-28	7.94		P-44	31.00	B=0.6m
P-10	25.46		P-29	7.97		P-45	51.00	
P-11	3.13	1/960	P-30	9.69	P-46	98.00		
P-12	5.83	B=0.6m	P-31	11.84	1/2,800 B=0.6m	P-47	125.00	1/1,500
P-13	9.39		P-32	12.87		P-48	84.00	B=0.6m
P-14	1.00		P-33	4.99		P-49	32.00	
P-15	3.14		P-34	5.65		P-50	63.30	
P-16	5.87				1/2,100	P-51	105.00	
P-17	9.27				B=0.6m	P-52	40.00	
P-18	4.66	1/2,000	P-35	6.39	1/1,680			
P-19	13.70	B=1.2m			B=0.6m			

5.3.2 各ケースの河床状況と観測結果

PBT を用いた実験は52ケースであるが、その内の27ケース（P-1～P-10、およびP-36～P-52）の観測結果を以下にまとめた。

実験P-1（初期河床勾配1/2000）

水深2.32cm，流量1.80 ℓ/sで行った。河床材料は移動せず，河床は静止状態である。

実験P-2（初期河床勾配1/2000）

水深3.62cm，流量3.46 ℓ/sで行った。河床材料は全幅的に移動を始めるが，河床波の形成に至らない。

実験P-3（初期河床勾配1/2000）

水深4.63cm，流量4.85 ℓ/sで行った。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。

実験P-4（初期河床勾配1/2000）

水深5.74cm，流量6.40 ℓ/sで行った。砂堆の発達が認められ，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である。

実験P-5（初期河床勾配1/2000）

水深8.35cm，流量10.05 ℓ/sで行った。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。

実験P-6（初期河床勾配1/2000）

水深8.18cm，流量11.90 ℓ/sで行った。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。

実験P-7（初期河床勾配1/2000）

水深10.13cm，流量14.06 ℓ/sで行った。河床材料の移動が転動から跳躍に変移した。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。

実験P-8（初期河床勾配1/2000）

水深11.57cm，流量18.47 ℓ/sで行った。砂堆が発達し，波高は5.2cmとなった。

実験P-9（初期河床勾配1/2000）

水深13.36cm，流量21.88 ℓ/sで行った。砂堆の波高は6.4cm，波長は75cmに発達した。

実験P-10（初期河床勾配1/2000）

水深13.11cm，流量25.46 ℓ/sで行った。砂堆前縁付近の河床材料が舞い上がり，部分的に水路床板が露出してしまった。参考値で波高8.1cm，波長120cmである。

実験P-36

水深2.8cm，エネルギー勾配約1/260で，ほぼ等流水深である。水路内には単列の砂礫堆が発達し，砂礫堆の表面はフラット河床であるが，洗掘部（水深の大きい範囲）には，長さ35cm，高さが約4cmの比較的小さめの砂堆が出来ている。

実験P-37

水深5.5cm，エネルギー勾配約1/350であり，水路勾配より緩勾配となっている。水路内には波長3m程

度の単列の砂礫堆が発達し、表面はフラット河床、また洗掘部分もフラットで砂堆は出来ていない。

実験 P-38

水深2.8cm, エネルギー勾配は約1/490でほぼ水路勾配に一致している。水路内全面に波長が30~50cm, 高さが2.0~3.5cmの比較的小さめの砂堆が出来ている。その形状は、かなり砂漣に近いようである。

実験 P-39

水深4.4cm, エネルギー勾配は約1/520でほぼ水路勾配に一致している。単列砂礫堆が発達し ($L \approx 2.5$ m), 砂礫堆の表面および洗掘部分にも全面に砂堆が出来ている。(波長約40~50cm, 高さ 3 ~ 5 cm)

実験 P-40

水深5.2cm, エネルギー勾配は約1/540で若干水路勾配より緩くなっている。P-39と同じように単列砂礫堆が発達し ($L \approx 2$ m), 砂礫堆の表面および洗掘部分にも全体に砂堆 (波長40~50cm, 高さ 3 ~ 5 cm) が出来ている。砂堆の大きさはP-39よりは大きめである。

実験 P-41

水深9.0cm, エネルギー勾配は約1/470でほぼ水路勾配と一致している。通水中の河床面は完全なフラットで、粒子は河床面とほぼ平行に流下する。実験終了時の止水中に流速が低下し、河床面にうすい砂堆(高さ 5 mm ~ 1 cm) が出来た。

実験 P-42

水深15.8cm, エネルギー勾配は約1/630で水路勾配より緩勾配になっている。これは流砂量が多く、上流の河床が低下したためと考えられる。通水中の河床面は完全なフラットで、粒子は河床面に沿って流下する。P-41の場合と同じように止水時に河床面にうすい砂堆が発生した。

実験 P-43

水深8.7cm, エネルギー勾配は約1/1010で水路勾配にほぼ一致している。全面に砂堆(波長約50cm, 高さ 3 ~ 6 cm) が発達している。

実験 P-44

水深12.0cm, エネルギー勾配は1/1000で水路勾配に一致している。P-43と同じように全面に砂堆が出来ている。大きさは波長約50cm, 高さは 3 ~ 6 cmである。

実験 P-45

水深15.7cm, エネルギー勾配は1/1000で水路勾配に一致している。全面に大きな砂堆が発達している。大きさは波長が 1 m ~ 1.5m, 高さは 4 ~ 7 cmである。

実験 P-46

水深22.8cm, エネルギー勾配は約1/930で水路勾配より若干急になっている。通水中の河床面の状態はフラットであるが、止水時に流量が少し減ると直に砂堆が発生した。したがって、フラットと砂堆の境界付近の条件のようである。

実験 P-47

水深9.6cm, エネルギー勾配は約1/3030で水路勾配よりかなり緩くなっている。これは21m 断面の水位が上下流に比べ若干低下傾向のためと思われる。全面に波長20~30cm, 高さ 2 ~ 4 cmの砂漣が出来ている。

実験 P-48

水深13.6cm, エネルギー勾配は約1/2000で水路勾配よりは若干緩くなっている。全面に砂堆が発生している。大きさは波長が約50cm, 高さは4～7cmでP-47に近い大きさである。

実験P-49

水深16.7cm, エネルギー勾配は約1/1590でほぼ水路勾配に一致している。全面に波長約50cm, 高さ5～8cmの砂堆が出ている。この大きさはP-48より若干大きめである。

実験P-50

水深24.7cm, エネルギー勾配は約1/1690でほぼ水路勾配に一致している。全面に波長約70cm～1m, 高さが5～8cmの大きな砂堆が発生している。

実験P-51

水深32.7cm, エネルギー勾配は約1/1370でほぼ水路勾配に一致している。通水中の河床面はフラットであるが、止水時に砂堆が発生した。

実験P-52

水深29.2cm, エネルギー勾配は約1/12,500で、砂漣河床にするために緩勾配にしたものである。全面に波長20cm, 高さ3～6cmの砂漣が出来ている。ただし水路幅が狭いためか、石炭粉の実験のような平面的に円みを帯びた砂漣は出来なかった。

5.3.3 まとめ

(1) 河床波の特性と領域区分

PBTの実験は、 $R_{c*}=12\sim35$, $H/d=15\sim327$, $\tau_*=0.034\sim0.82$ の範囲で行われている。代表的な砂堆の形状を写真によって示すと、水深の小さいP-23 ($H=4.04\text{cm}$, $\tau_*=0.119$, $H/d=40$, $B/H=15$) では、写真-5.10に示すような三次元的な砂堆となっているが、水深が大きくなるとP-09 ($H=13.4\text{cm}$, $\tau_*=0.21$, $H/d=133$, $B/H=4.5$) のように二次元的な砂堆となっている。

波堆の波長は図-5.28に示すように水深の10倍以上のものが多く、長めである。

砂漣は2ケースのみ発生したが、その波長は20～25cm程度であり、 $L_s/d=200\sim250$ と $s=1.65$ の場合と比較すると相対波長 L_s/d は4分の1程度と短い。

河床波の領域区分は、図-5.27に示すようであり $s=1.65$, $d=0.1\text{cm}$ の場合の領域区分とほぼ同じような τ_* , H/d で砂堆と平坦河床を区分し得る。

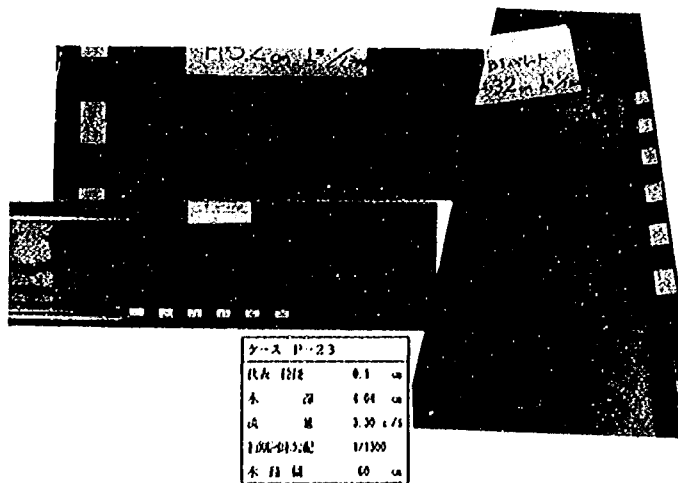


写真-5. 10 河床状況 (P-23)

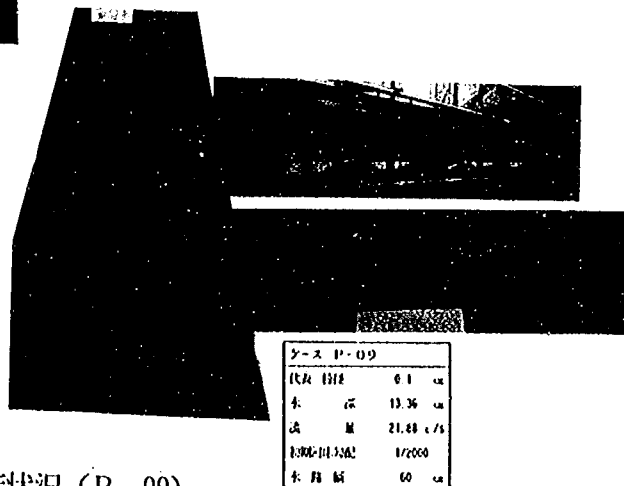


写真-5. 11 河床状況 (P-09)

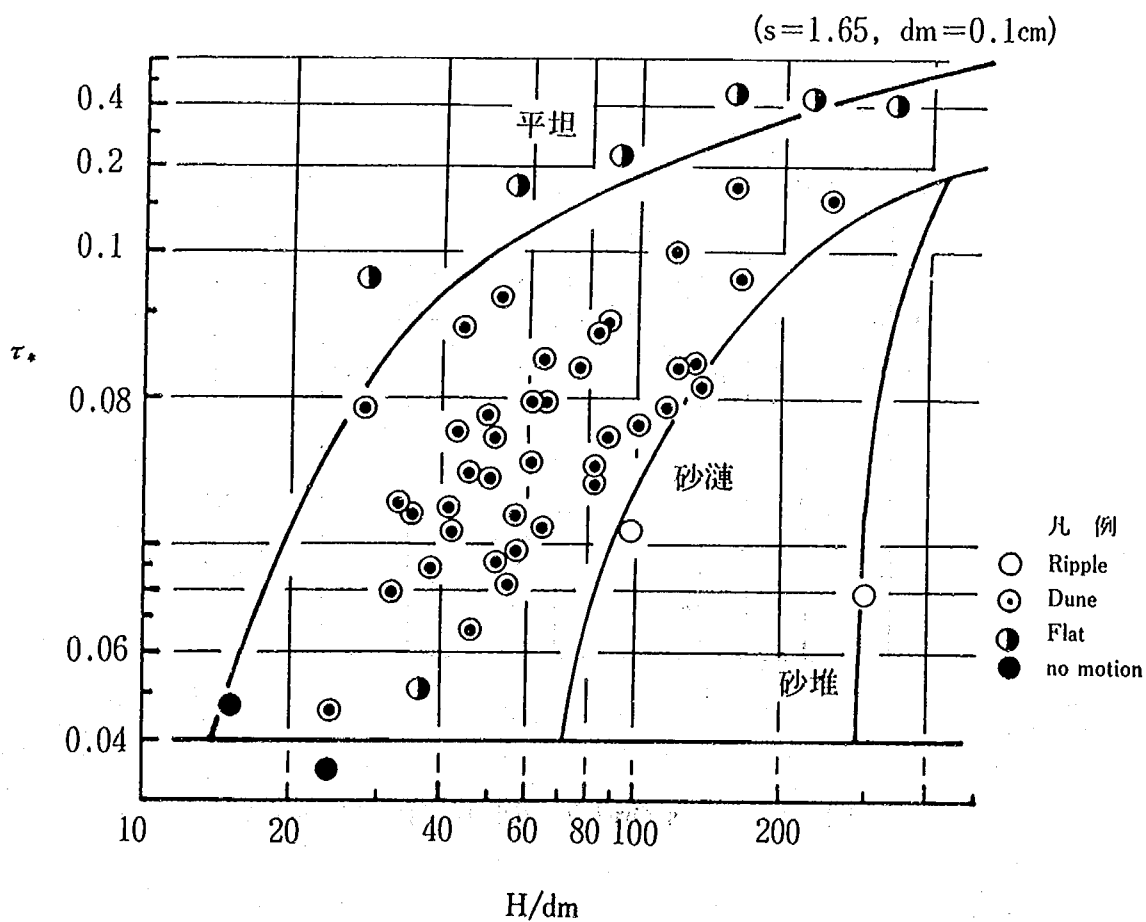


図-5. 27 河床波の領域区分図 (PBTの場合)

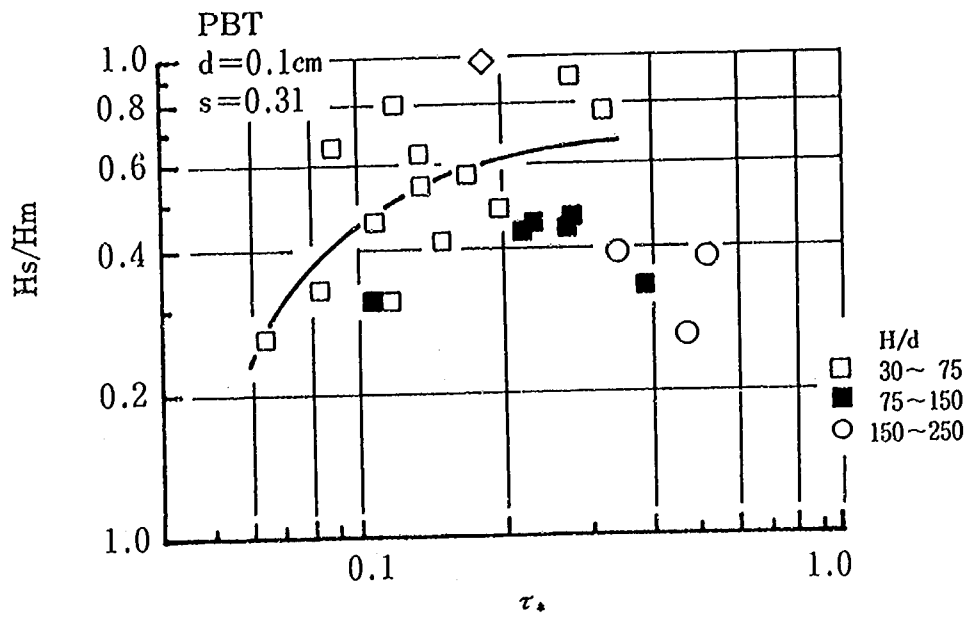


図-5. 28 H_s/H_m と τ_* の関係 (PBTの場合)

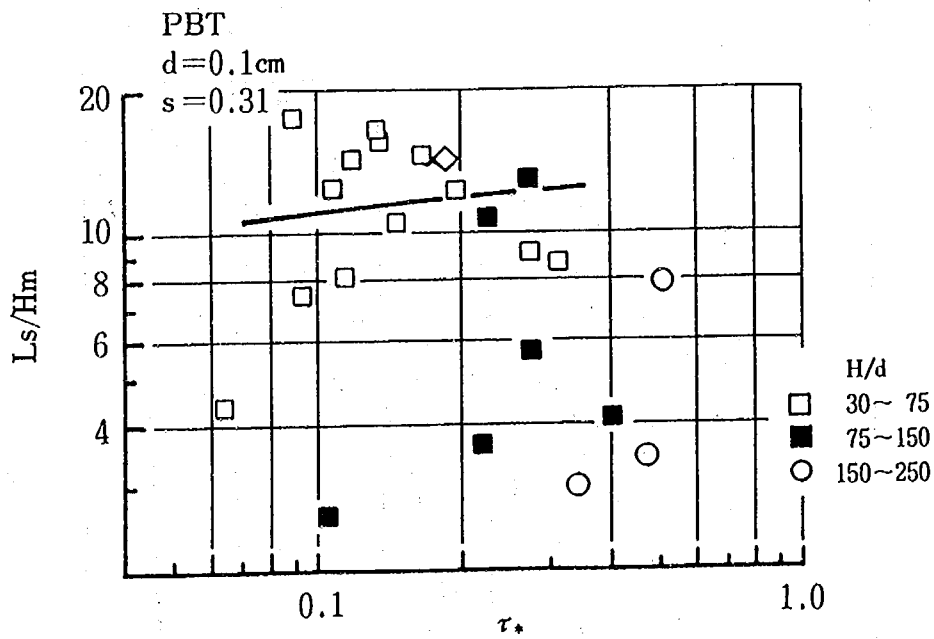


図-5. 29 L_s/H_m と τ_* の関係 (PBTの場合)

〔2〕 流れの抵抗係数

ψ の値は、底質材料の移動の少ない平坦河床の場合は、 $s = 1.65$ ， $d = 0.1\text{cm}$ の場合とはほぼ同様である。
砂堆の ψ もほぼ同様の値となっている。

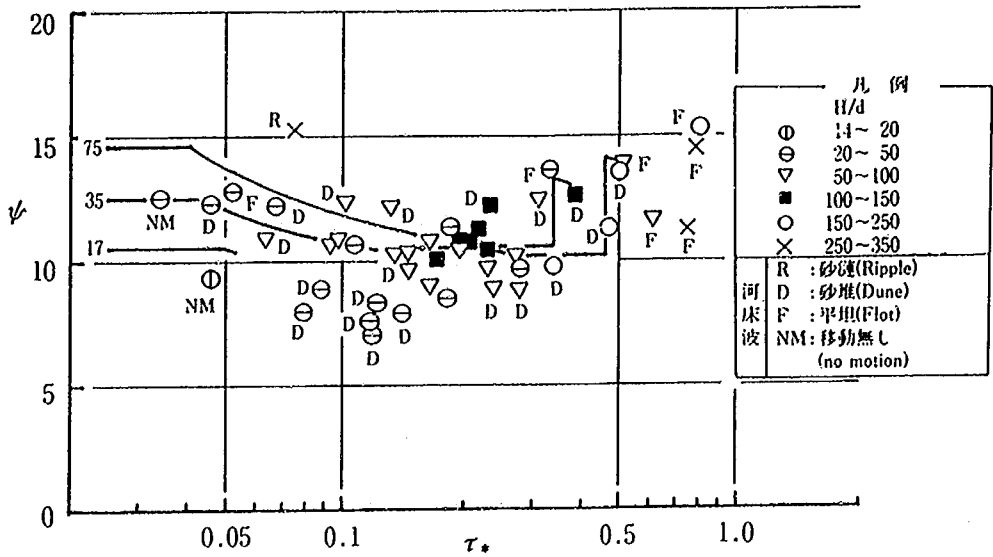


図-5.30 ψ と τ_* ， H/d の関係 (PBT の場合)

〔3〕 流砂量

無次元流砂量 $q_s/u_* d$ は $s = 1.65$ ， $d = 0.1\text{cm}$ の場合に比して2倍程度大きくなっている。

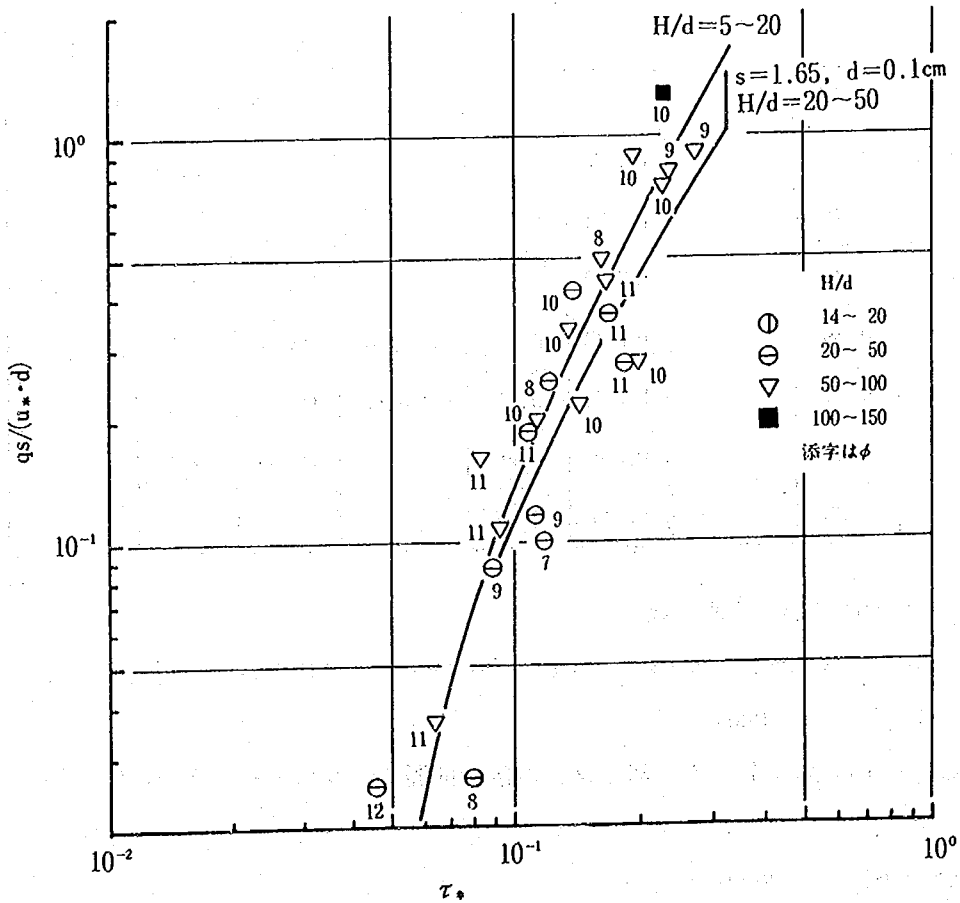


図-5.31 $q_s/(u_* \cdot d)$ と τ_* の関係 (PBT の場合)

5.4 ポリスチレンを用いた移動床の水理

5.4.1 実験ケースと実験条件

ポリスチレンを用いた実験は $d_m = 0.151\text{cm}$ の材料で38ケース行った。

本実験はポリスチレンを河床材料とした場合の河床形態、流送形態を把握するためのもので、段階的に流量を変化させ観察を行った。給砂は行わなかった。実験条件は表—5.4に、また実験結果は付表—7にまとめた。

表—5.4 ポリスチレンを用いた移動床模型実験水理条件

実験名称：ポリスチレン 河床材料：ポリスチレン 代表粒径0.151cm
 水中比重：0.05 沈降速度：1.71cm/sec
 水路長：30m 水路幅：0.3m, 0.6m, 1.2m

実験 ケース	流量 Q (ℓ/s)	初期 河床勾配 及び 水路幅	実験 ケース	流量 Q (ℓ/s)	初期 河床勾配 及び 水路幅	実験 ケース	流量 Q (ℓ/s)	初期 河床勾配 及び 水路幅
Po-01	0.1	1/2000	Po-14	2.40		Po-27	0.51	1/2000
Po-02	0.28	B=0.6m	Po-15	0.09	1/2000	Po-28	1.59	B=1.2m
Po-03	0.47		Po-16	0.24	B=0.3m	Po-29	3.12	
Po-04	0.81		Po-17	0.47		Po-30	5.04	
Po-05	1.05		Po-18	1.15		Po-31	0.58	1/4000
Po-06	1.47		Po-19	0.12		Po-32	1.67	B=0.6m
Po-07	1.83		Po-20	0.38		Po-33	3.21	
Po-08	2.40		Po-21	0.78		Po-34	5.01	
Po-09	3.29		Po-22	1.15		Po-35	2.51	1/8000
Po-10	0.29		Po-23	0.25	1/2000	Po-36	7.54	B=1.2m
Po-11	0.81		Po-24	0.76	B=0.6m	Po-37	14.49	
Po-12	1.48		Po-25	1.50		Po-38	22.22	
Po-13	2.39		Po-26	2.37				

5.4.2 各ケースの河床状況と観測結果

ポリスチレンを用いた実験38ケースの内、Po-01～Po-09のケースについて観測記録を以下にまとめた。

実験 Po—1 (初期河床勾配1/2000)

水深0.75cm, 流量0.10 ℓ/s で行った。河床材料の移動は弱く、波高数mm程度の河床波の発達が見られた。

実験 Po—2 (初期河床勾配1/2000)

水深1.11cm, 流量0.28 ℓ/s で行った。河床材料の移動は見られず、河床は前実験で形成された河床波がそのまま残った状態である。

実験 Po-3 (初期河床勾配1/2000)

水深1.60cm, 流量0.47 l/sで行った。河床材料の移動は見られなかった。

実験 Po-4 (初期河床勾配1/2000)

水深2.24cm, 流量0.81 l/sで行った。小規模河床波の発生はみられず, 中規模河床波である交互砂州が発達した。

実験 Po-5 (初期河床勾配1/2000)

水深2.76cm, 流量1.05 l/sで行った。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みられた。

実験 Po-6 (初期河床勾配1/2000)

水深3.36cm, 流量1.47 l/sで行った。砂堆が発達し, 前縁付近で河床材料が舞い上がる現象が見られた。砂堆の発達に伴い, 交互砂州は消滅した。

実験 Po-7 (初期河床勾配1/2000)

水深3.79cm, 流量1.83 l/sで行った。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。発達した砂堆の波高は4.6cm, 波長は35cm程度である。

実験 Po-8 (初期河床勾配1/2000)

水深4.06cm, 流量2.40 l/sで行った。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, 波長ともまちまちの値となった。

実験 Po-9 (初期河床勾配1/2000)

水深5.62cm, 流量3.29 l/sで行った。水面勾配が設定より緩くなったのか, 再び規則的な砂堆が形成された。

5.4.3 まとめ

(1) 河床波の特性と領域区分

ポリスチレンは, 水中比重 s が0.05であるため動きやすく, 実験は勾配が緩い条件で行われている。従って水面勾配の測定誤差が大きく, また実測された水位より求めたエネルギー勾配 I_e もその評価誤差の問題があることから, 掃流力による評価はしないことにした。実験条件の範囲はエネルギー勾配 I_e の評価誤差の問題もあって, 正確なことは言えないが, 流速等から判断して, $Re_* = 5 \sim 15$, $H/d = 5 \sim 109$, $\tau_* = 0.03 \sim 0.14$ で実験が行われている。

河床波の形態は, 写真-5.12に示す Po-07 ($H=3.79\text{cm}$, $V_m=8.05\text{cm/s}$, $H/d=25$) で生じた河床波のように, 水深の10倍程度の典型的な砂堆とみなされる河床波であるが, 水深が小さい Po-17 ($H=2.61\text{cm}$, $V_m=6.0\text{cm/s}$, $H/d=17.3$) では, 写真-5.13に見るように砂州の頂部が水面に平行になり, 河床波の形が典型的な砂堆とは異なったものも生じている。この形は石炭粉AおよびBにおいて, 相対水深の小さい場合に生じた河床波の形態 (写真-5.4) に似ている。

相対水深 H/d が46以上である Po-36 ($H=7.54\text{cm}$, $V_m=8.0\text{cm/s}$), Po-37 ($H=12.3\text{cm}$, $V_m=9.8\text{cm/s}$), Po-38 ($H=16.4\text{cm}$, $V_m=11.3\text{cm/s}$) の実験で生じた河床波の波長は, 水深に比例せず, 写真-5.14に示すように波長30~35cmの波長となっており, 河床波の波形勾配 H_s/L_s も大きく砂漣的性質となってい

る。砂漣とすると粒径に対する波長の比 L_s/d は200~230程度となる。図—5.32には写真に写されている河床波の代表的長さ(2~4波長の平均) L_s と水深 H の関係を示した。これより τ_* があまり大きくない場合には H/d が50以上では砂漣、それ以下では砂堆となるようである。

〔2〕流速係数

流速係数 ψ については、エネルギー勾配 I_0 が十分精度良く測定し得ていないので、評価し得ないが、河床波の形状等から判断すると、 $s=1.65$ の場合と同様な ψ の値を持つと思われる。

〔3〕流砂量

図—5.33に単位幅流砂量 q_s と平均流速 V_m の関係を表わした。 H/d が14~20, 20~50, 50~150の場合について q_s と V_m の関係の概略関係を曲線で示してある。本図によると H/d が14~20の場合、 V_m が4 cm程度で動き出し、 $H/d=20\sim50$ の場合については4.8 cm/s程度で動き出している。

平坦河床の場合の流速係数 ψ を図—5.12を使って ($D=4H$, $K_s=2.5d$ として) 評価すると

$$H/d=14\sim20 \text{ の場合 } \psi=10.8 \quad (5.11)$$

$$H/d=20\sim50 \text{ の場合 } \psi=13.1 \quad (5.12)$$

となる。従って、粒子の動き出す限界掃流力 τ_* はそれぞれ0.019, 0.018となり、 $s=1.65$ の場合よりもかなり小さな無次元移動限界掃流力 τ_{*c} となっている。

$H/d=50\sim150$ の場合は砂漣河床と考えられるので $\psi=9$ として無次元掃流力を計算してみると $\tau_*=0.14$ 程度となる。

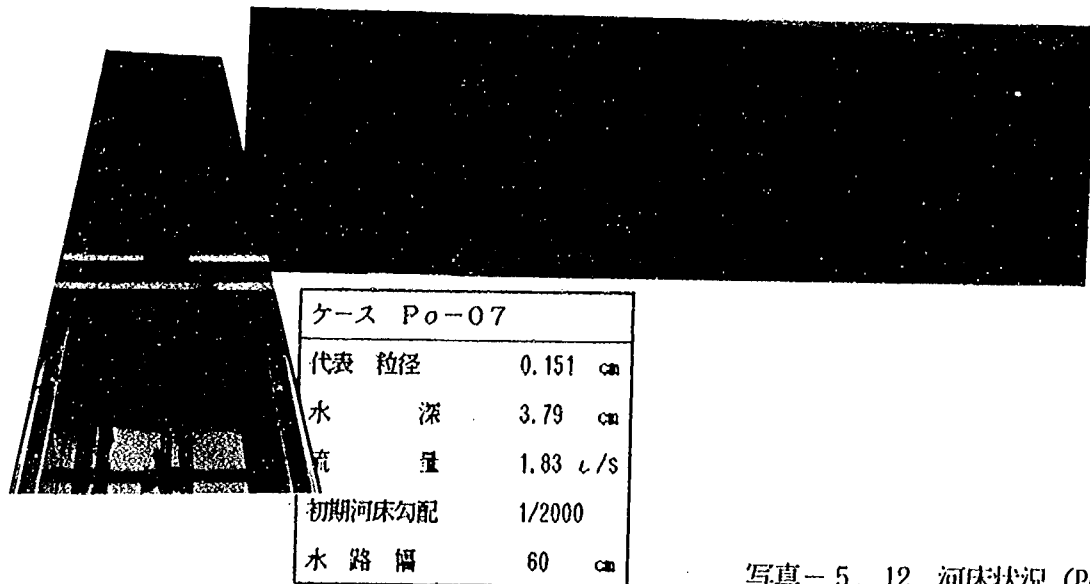


写真-5. 12 河床状況 (Po-07)

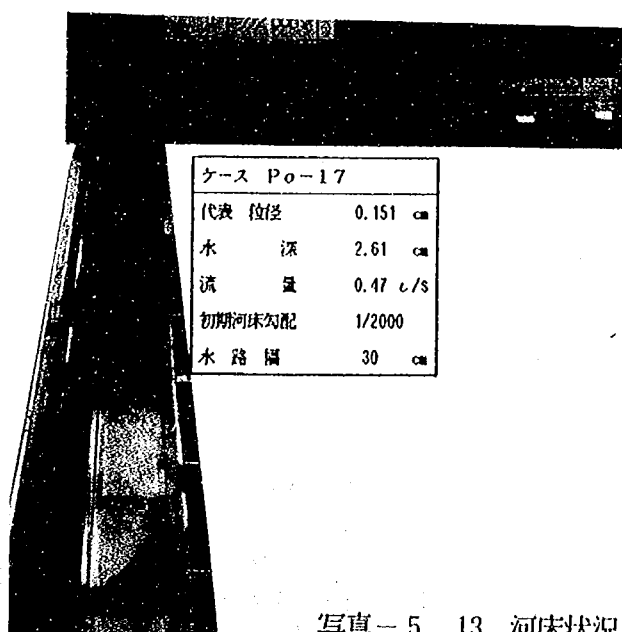


写真-5. 13 河床状況 (Po-17)



写真-5. 14 河床状況 (Po-36)

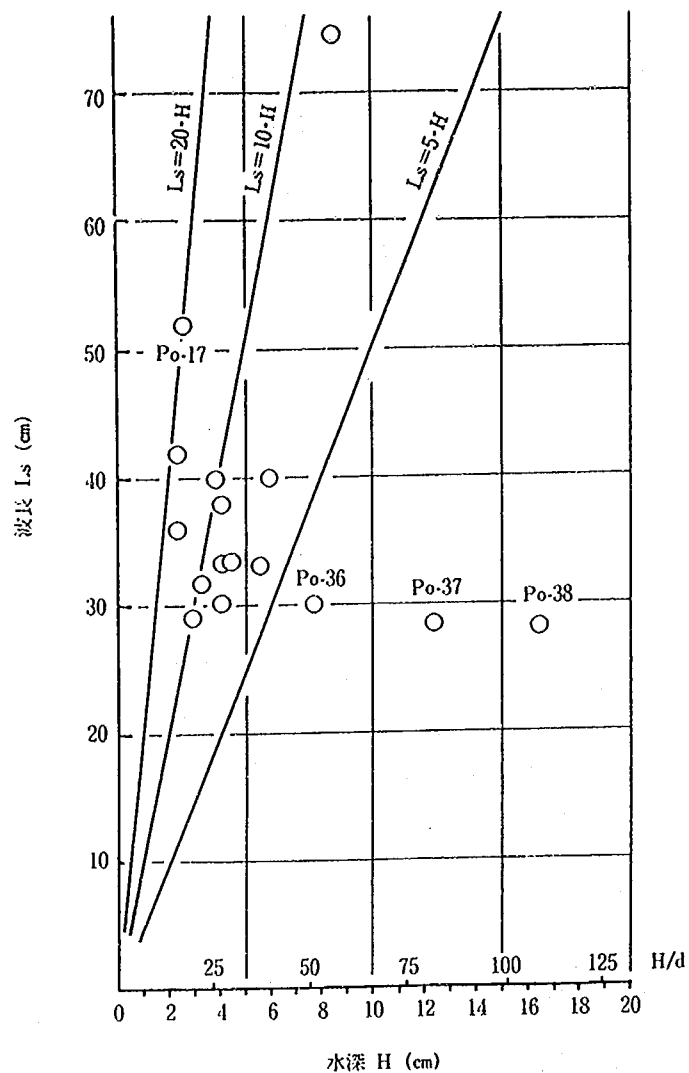


図-5.32 波長 L_s と水深 H の関係（ポリスチレンの場合）

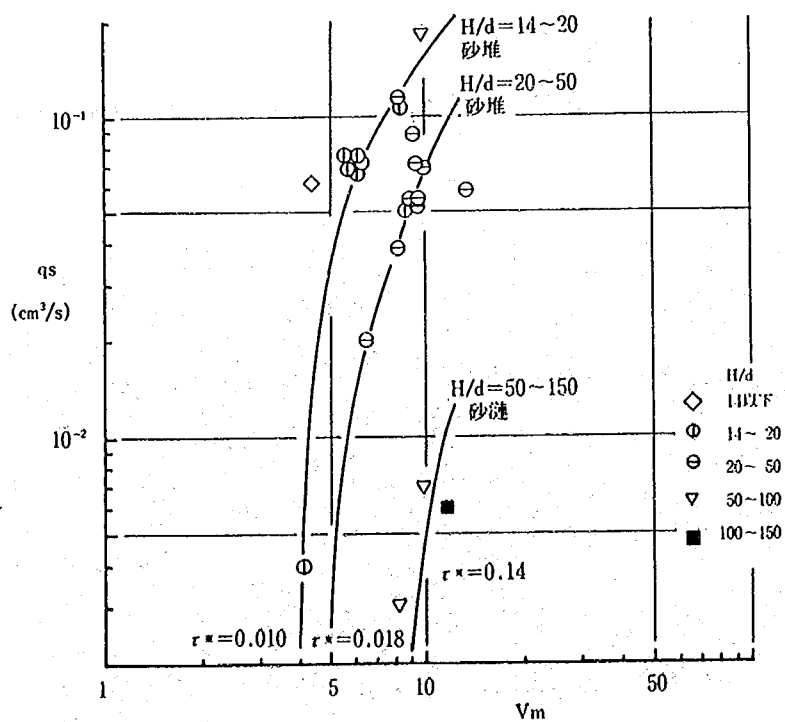


図-5.33 流砂量 q_s と V_m の関係（ポリスチレンの場合）

参考文献

- 1) 山本晃一, 坂野章, 1982; 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1815号
- 2) 福岡捷二, 浅野富夫, 林正男, 1988; 軽量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
- 3) 富永正照, 山口高志, 須賀亮三, 鶴木和男, 高橋隆, 1971; 久慈川河口水理模型実験報告書II, 土木
研究所資料第631号

第6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各軽量材料の水中比重は、表—6.1のとおりである。これらを砂の水中比重と比較すると、スラッジライトは約1/2, ポリスチレンは約1/30である。この水中比重の違いが流送特性にどのように影響しているか、砂 ($s=1.65$) の場合と比較して検討する。

なお、第4章で示したが、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無く、石炭粉は角ばっており、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ことを付記しておく。

表—6.1

	水中比重	代表粒径
石炭粉A	0.5	0.027cm
石炭粉B	0.58	0.03
石炭粉C	0.48	0.1
スラッジライトA	0.8	0.105
スラッジライトB	0.8	0.12
PBT	0.31	0.1
ポリスチレン	0.05	0.151

6.1 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波の領域区分がどの程度変わるのか検討する。

(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 (2-27) 式より

$$\tau_{*c} = f(R_{e*}, s) \quad (6-1)$$

と考えられる、ただし R_{e*} が150以上であれば、 τ_{*c} は R_{e*} の影響を受けない。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—3.16に示すように $s=1.65$ の場合は R_{e*} が2以下で無ければ、 τ_{*c} を大きく変えるものでなく、 $\tau_{*c}=0.04\sim0.06$ 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実験データが無いと、 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。しかし、本調査において $s=0.03\sim1.65$ 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 τ_{*c} の差異を認知し得るもので無く、 $\tau_{*c}=0.04\sim0.06$ 程度となっている。ただし $s=0.05$ のポリスチレンの場合は、 $\tau_{*c}=0.015\sim0.02$ 程度と推察され、限界掃流力が小さくなっている。

(2) 砂漣と砂堆の区分

砂漣と砂堆の区分は、3-5〔6〕で述べたようにそのスケールで区分すべきで無く、流砂量、流れの抵抗係数、波長と水深・粒径の関係が砂漣的特性を持つか、砂堆的特性を持つかによって区分すべきである。

この立場でみると今回検討の対象とした軽量材料を用いた移動床で発生した河床波は以下のとおりである。

- 石炭粉 A および B

H/d が 50 以上であれば、砂澁とみなされる。ただし H/d が 20 程度以下になれば、 R_{c*} が 10 以下でも水深の 5 ～ 10 倍程度の波長の砂堆となる可能性がある。

- 石炭粉 C

R_{c*} が 15 以上、かつ H/d が 100 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。

- スラッジライト

スラッジライトは R_{c*} が 15 ～ 110 かつ H/d が 12 ～ 110 の条件で実験を行っているので、小規模河床波は、すべて砂堆的特性を持っている。

- PBT

相対水深 H/d が 100 以下で τ_* が Upper Regime になるほど大きくなければ河床波は砂堆となるが、 τ_* が 0.1 程度で H/d が 100 以上では砂澁が発生している。

- ポリスチレン

R_{c*} は 10 以下の実験であるが、H/d が 40 以下では、砂堆的な河床波、40 以上では砂澁的特性を持っている。

以上のごとく砂澁と砂堆の区分は、 R_{c*} のみによって決まるものでは無く、 R_{c*} 、H/d、 τ_* および s の影響を受けるものと判断される。これらの影響程度については実験データが少ないので何とも言えないが、次のことは言えよう。

- 1) H/d が 30 程度以下で、 τ_* が小さくなく Upper Regime の河床波の発生しない領域では、 R_{c*} が 10 以下でも砂堆的な河床波が発生する。
- 2) $s = 1.65$ の場合 H/d が 300 以上であれば、 R_{c*} が 20 以上でも τ_* が 0.5 ～ 0.6 以下では砂澁的河床波となる。(大型水路 (幅 4 m, 長さ 100m) を用いた $s = 1.65$, $d = 0.1\text{cm}$ の実験で確認している)。
- 3) R_{c*} が小さい方が砂澁的河床波が発生する領域 (τ_* —H/d 平面で) が大きくなる。
- 4) 砂澁的河床波が発生する領域に対する s の効果は、資料が少なく明確になっていない。

〔3〕平坦河床への移行無次元掃流力 τ_{*f}

石炭粉の小規模河床波の発生領域区分を見ると、平坦河床への移行無次元掃流力 τ_{*f} は、 $s = 1.65$ の場合と比較するとそれほど大きくは変わらないようである。

ところで砂堆と平坦・反砂堆の Upper Regime を区分する重要な物理量はフルード数 F_r と言われている。 F_r は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} F_r &= \psi \cdot s^{1/2} \tau_*^{1/2} (H/d)^{-1/2} \\ &= \psi \sqrt{I_c} \end{aligned} \quad (6-2)$$

これよりフルード数 F_r から平坦河床への移行無次元掃流力 τ_{*f} が求まるとすると、s の異なる場合は、移行時の τ_{*f} と H/d の関係が変わることになる。しかし、実際には、同一 τ_* であれば、s の小さい材料の方が、小さいフルード数で Upper Regime へ移行しており、フルード数が移行限界を決める重要パラメータであると言う考え方は妥当性を失っている。むしろ、s が異なっても ($s = 0.3 \sim 1.65$ の範囲で) 移行限界掃流力 τ_{*f} は H/d によって決まっていると判断される。

6.2 河床波のスケールに及ぼす影響

(1) 砂漣

砂漣の波長、波高は粒径と密接な関係にある。砂漣の発生した石炭粉AとBの相対波長 L_s/d と波形勾配 H_s/L_s が $s = 1.65$ の場合とどの程度違いがあるかを、図-6.1, 図-6.2に示す。

これを見ると石炭粉AおよびBの L_s/d は $s = 1.65$ の場合に比べて、小さく、 $L_s \approx (300 \sim 600) \cdot d$ となっている。また H_s/L_s は $s = 1.65$ の場合に比べて、多少大きく $0.09 \sim 0.18$ となっている。PBT の場合は $L_s \approx (200 \sim 250) \cdot d$ 、ポリスチレンの場合は $L_s = (200 \sim 230) \cdot d$ であるので、 s が小さい方が L_s/d が小さくなる傾向にある。

(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 $s = 1.65$ の場合とどの程度の違いがあるかを見るために、図-6.3に $L_s/H_m - \tau_*$ の関係を粒径、材質が分かるように図示した。また図-6.4に H_s/H_m と τ_* の関係を示した。なお図-6.4の中の実線と波線は $s = 1.65$ の場合で粒径 $d_m = 0.04 \sim 0.06\text{cm}$ 、および $d_m = 0.09 \sim 0.15\text{cm}$ の場合の H_s/H_m と τ_* の関係が相対水深によってどのように変わるかを実験データより評価して求めた曲線である。

なお石炭粉Cは H/d が $25 \sim 130$ 、スラッジライトは H/d が $30 \sim 110$ 、PBT は H/d が $13 \sim 140$ のデータのみであり、 $s = 1.65$ の場合と比較する場合は、 $H/d = 100$ の場合の評価線と比較すれば良い。

図-6.3, 図-6.4より砂堆の相対波長 L_s/H_m は、データのバラツキが大きく、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が、PBT が多少大きめである。

相対波高 H_s/H_m については次のことが言える。 H/d が 100 以上では PBT が大きい。スラッジライト A, B, 石炭粉 C はほぼ同程度であるが $s = 1.65$, $d = 0.1\text{cm}$ の場合より大きい。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されよう。

なお参考のために $s = 1.65$ の場合の H_s/H_m と τ_* の関係におけるデータのバラツキ程度を示すために図-6.5には H/d の違いによる特性曲線の違いを、図-6.6には $d = 0.09 \sim 0.15\text{cm}$ の場合の実験データを示しておいた。

6.3 流速係数 ψ に及ぼす影響

砂漣河床の場合における流速係数 ψ に及ぼす影響については、5.1.3〔2〕で述べたので、ここでは、砂堆河床の場合の流速係数 ψ に及ぼす比重の影響について述べる。

図-6.7～6.10は ψ と τ_* の関係が比重の違いによってどの程度差異があるかを見るために、 H/d を $14 \sim 20$, $20 \sim 50$, $50 \sim 100$, $100 \sim 150$ に区分して示したものである。

これを見ると $H/d = 20 \sim 50$ では、PBT が他の材料に比較して ψ の値が小さくなっている。これは、PBT の相対波高 H_s/H_m が他の材料より大きめであることに原因している。しかしながら $H/d = 50 \sim 100$, $100 \sim 150$ では、差異は明確で無くなっている。これは H/d が 100 以上の場合、 H_s/H_m が他の材料と同程度の値となっていることと整合している。

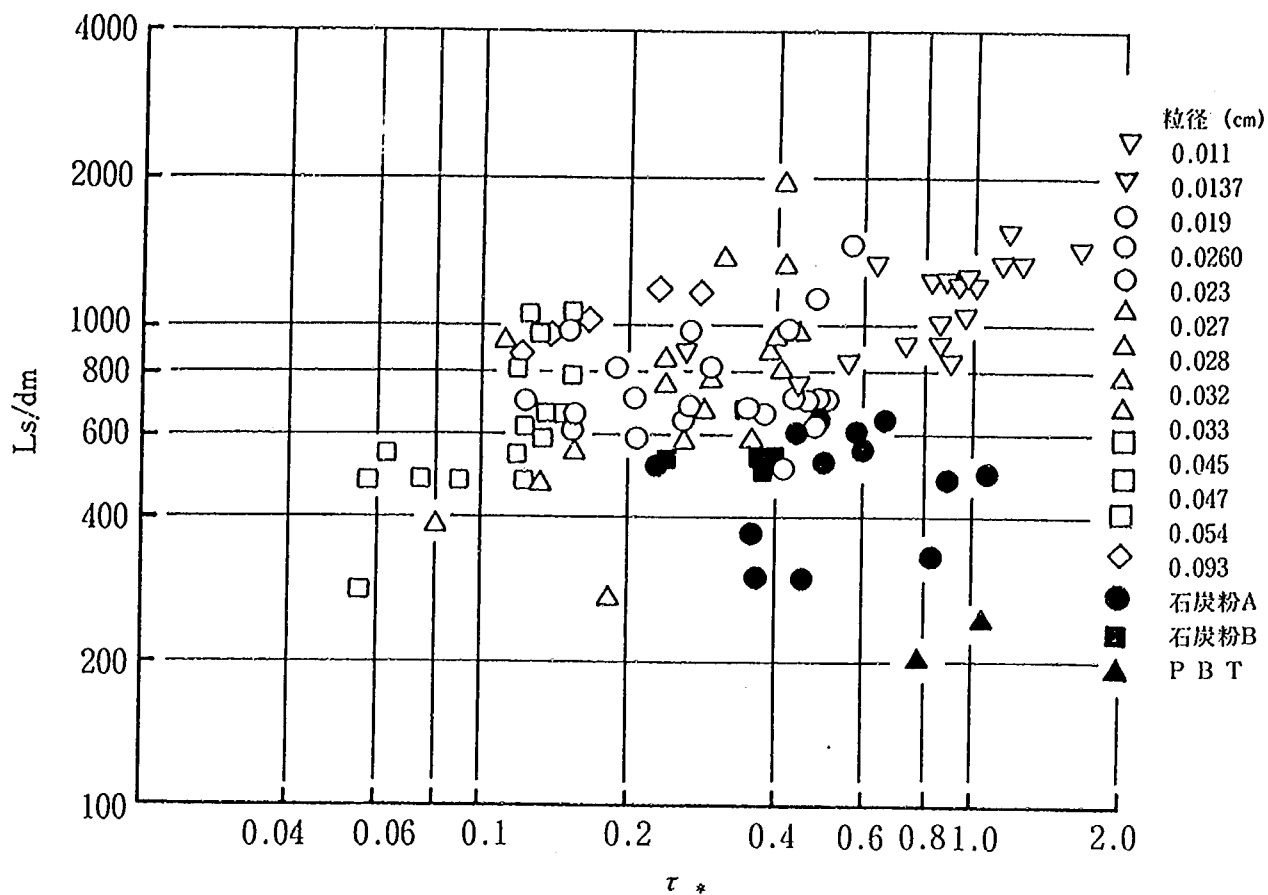


図-6. 1 L_s/dm と τ_* の関係 (砂の場合)

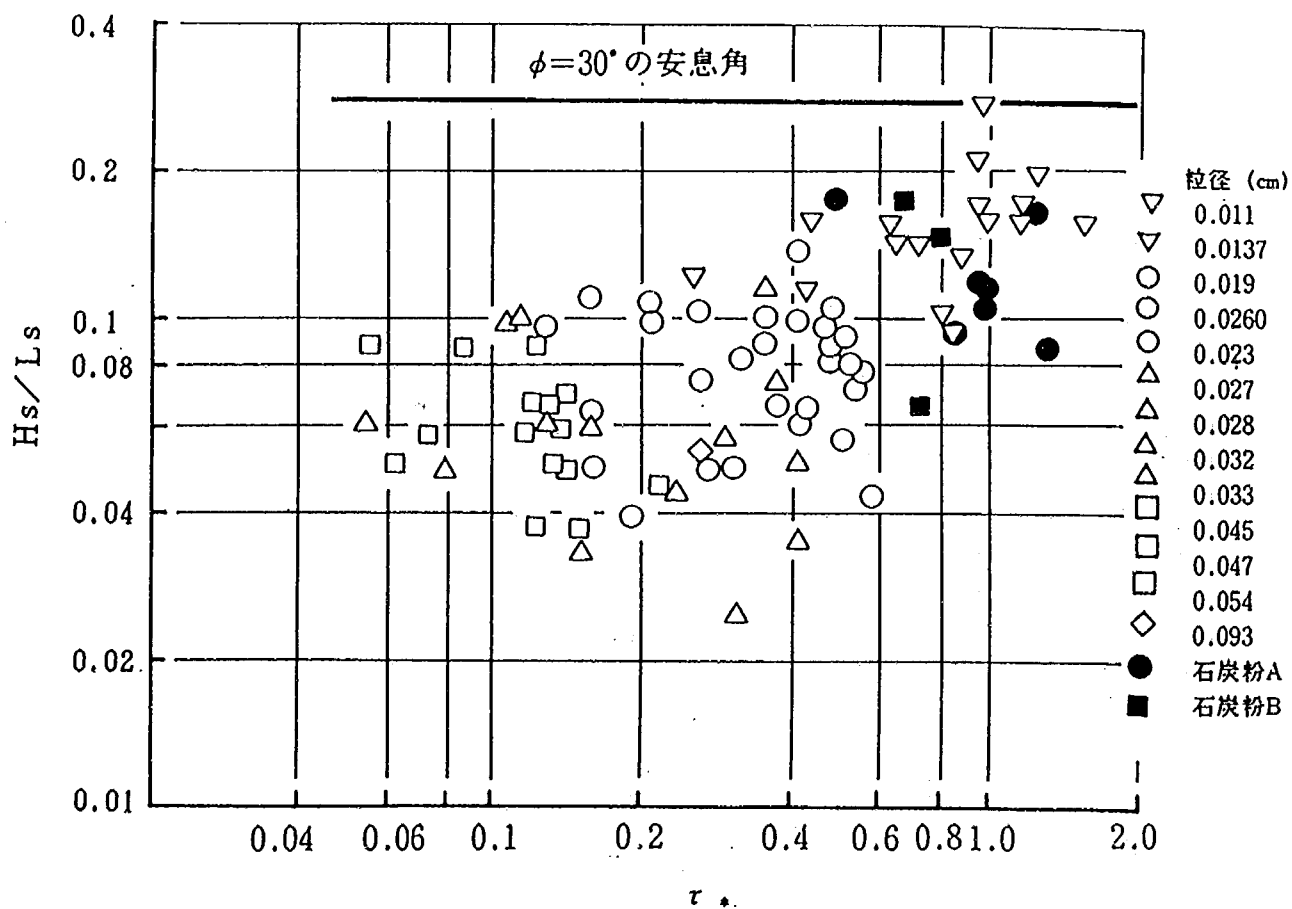


図-6. 2 H_s/L_s と τ_* の関係

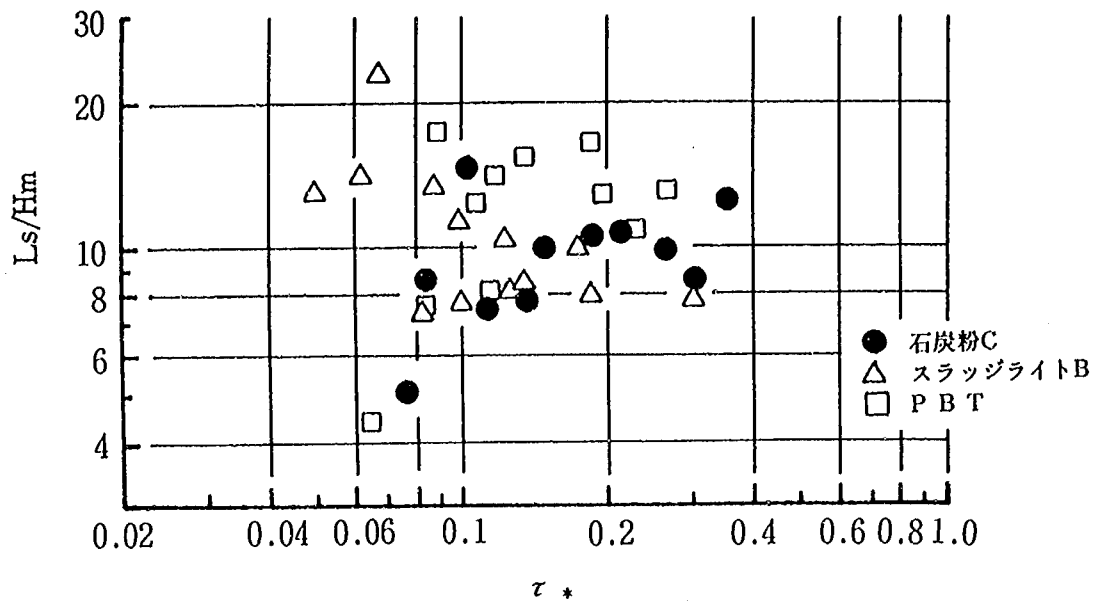


図-6. 3 L_s/H_m と τ^* の関係 (軽量材料の場合)

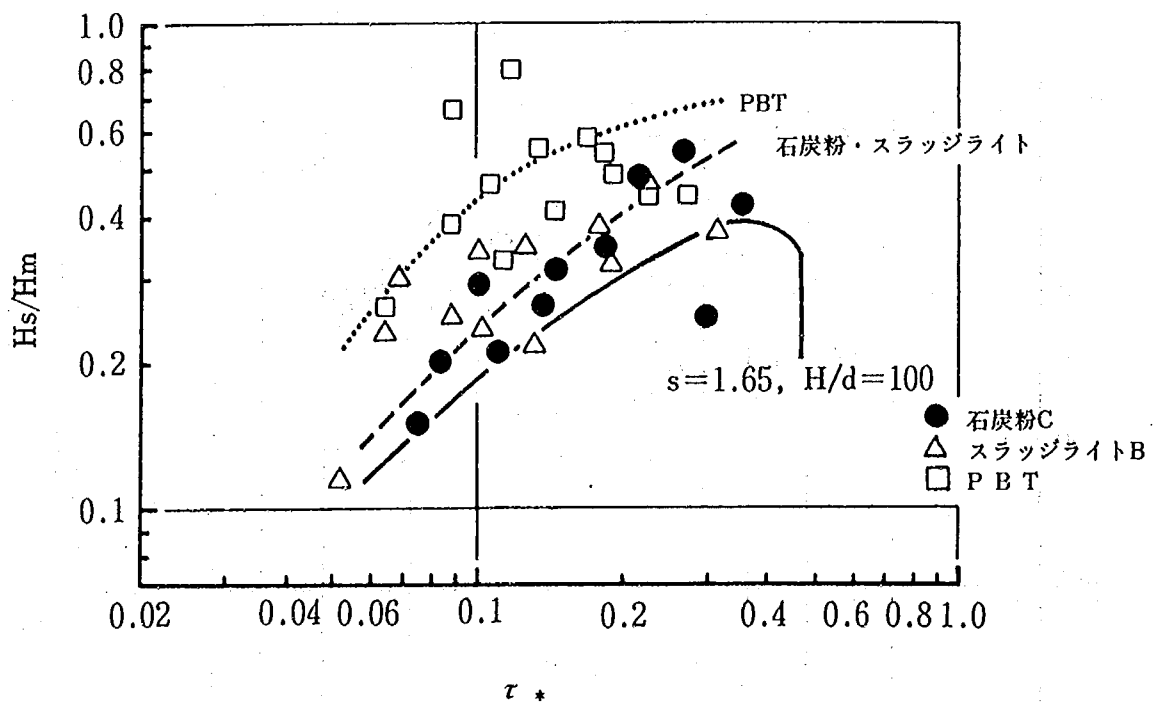


図-6. 4 H_s/H_m と τ^* の関係 (軽量材料の場合)

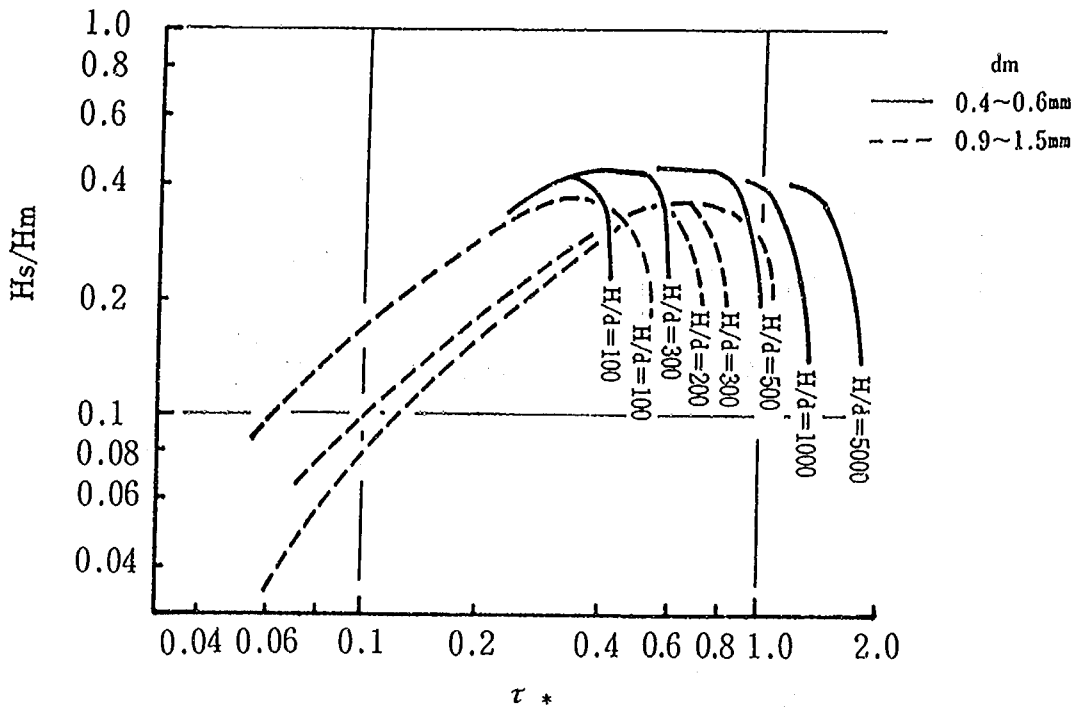


図-6. 5 H_s/H_m と τ_* の関係 (砂の場合)

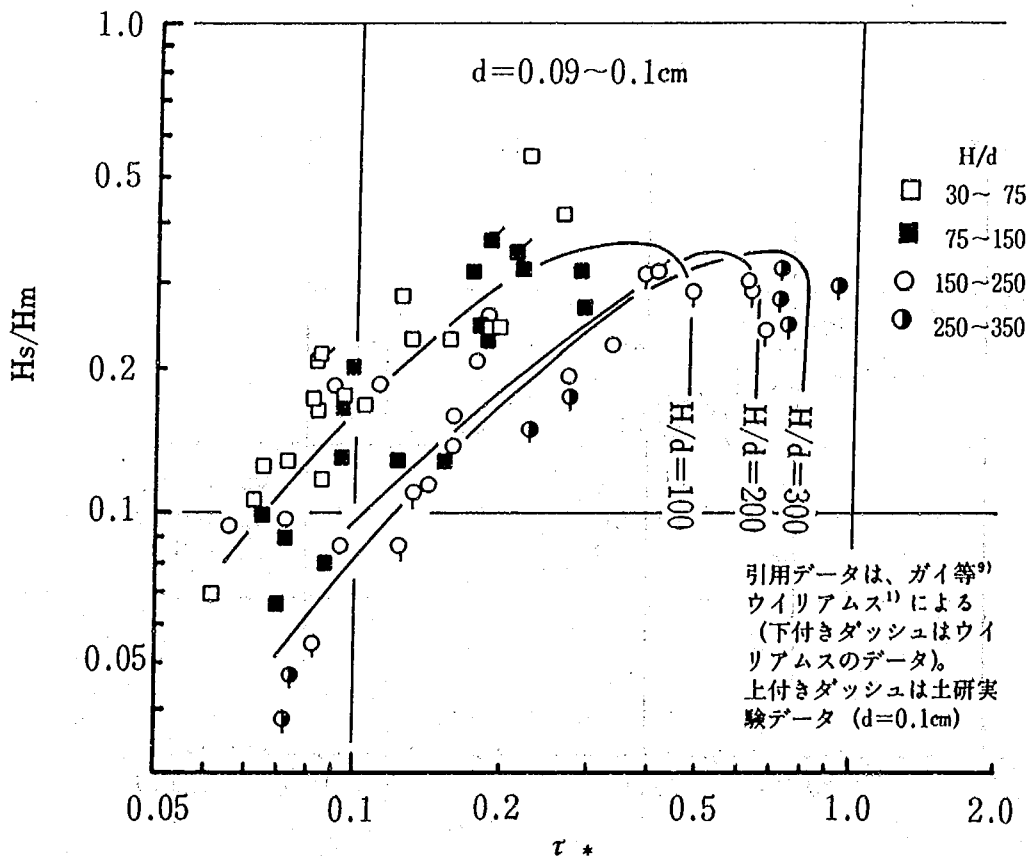


図-6. 6 H_s/H_m と τ_* の関係 (砂の場合)

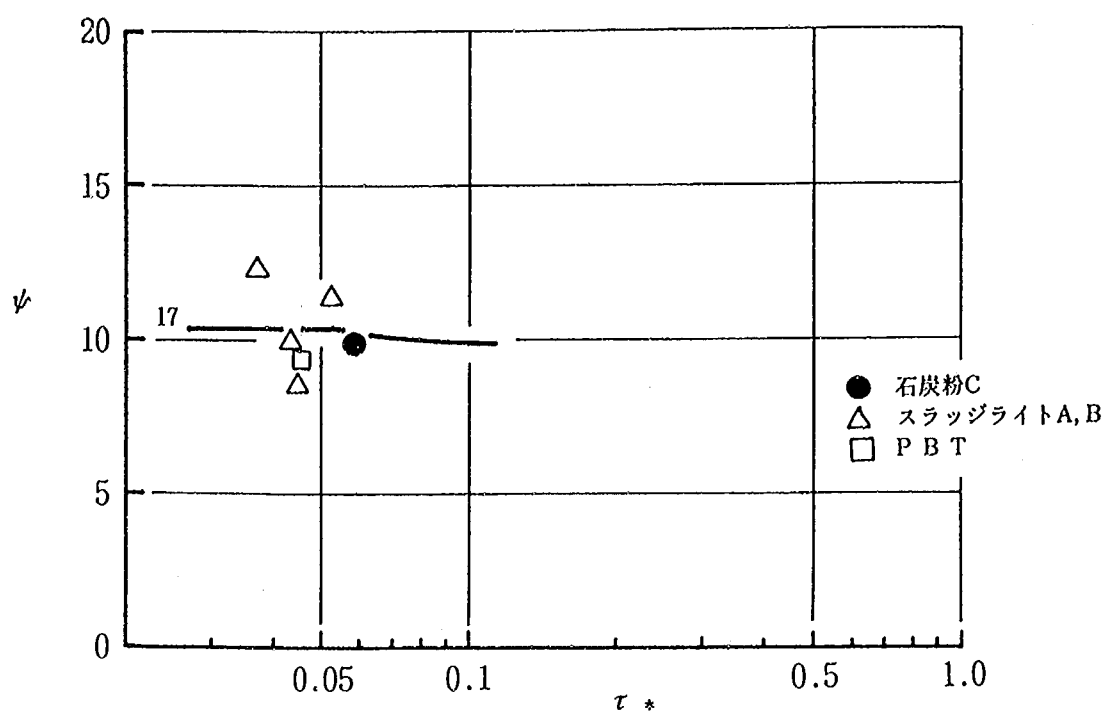


図-6. 7 ψ と τ^* , H/d の関係 (軽量材料, $H/d=14\sim20$ の場合)

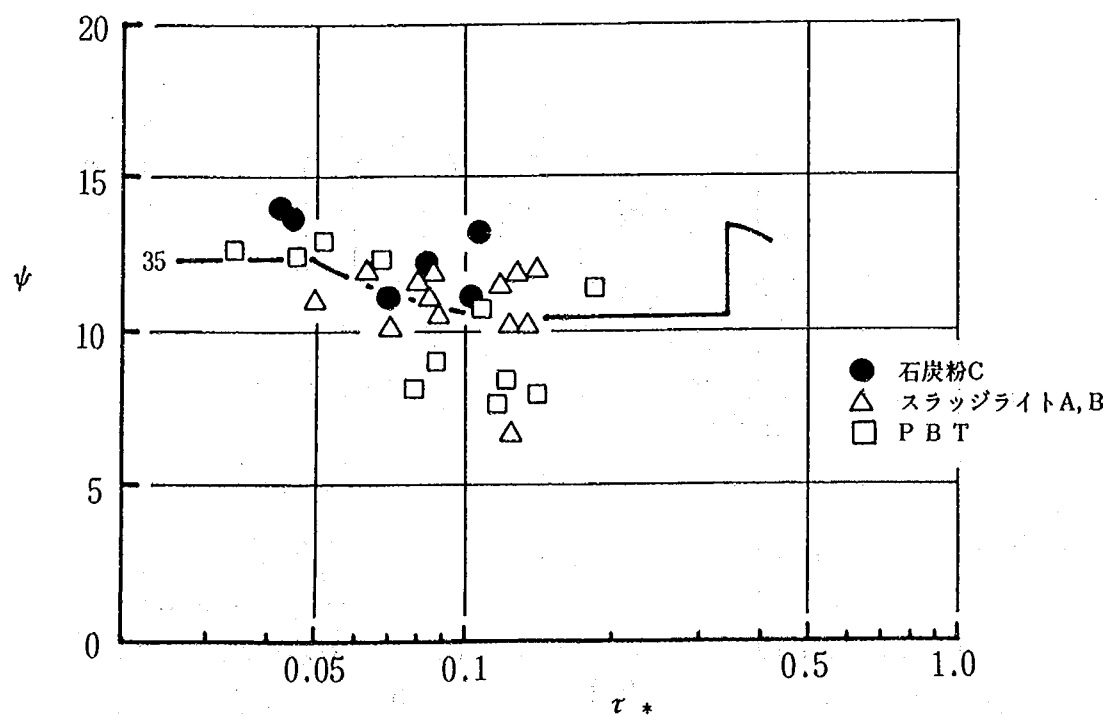


図-6. 8 ψ と τ^* , H/d の関係 (軽量材料, $H/d=20\sim50$ の場合)

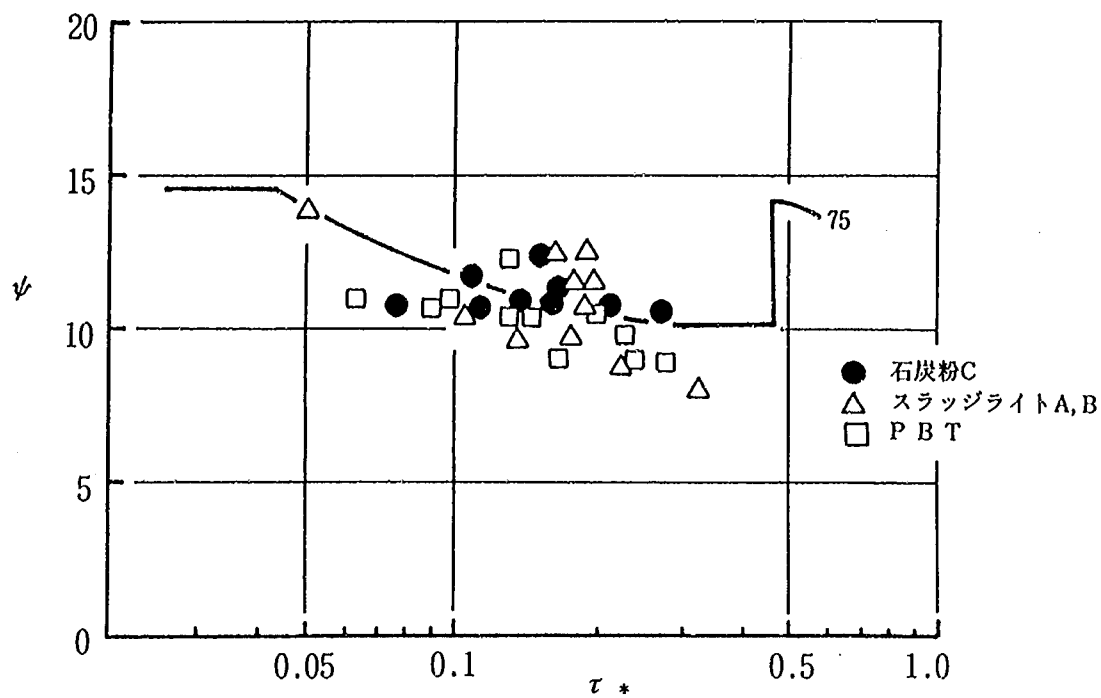


図-6.9 ψ と τ^* , H/d の関係 (軽量材料, $H/d=50 \sim 100$ の場合)

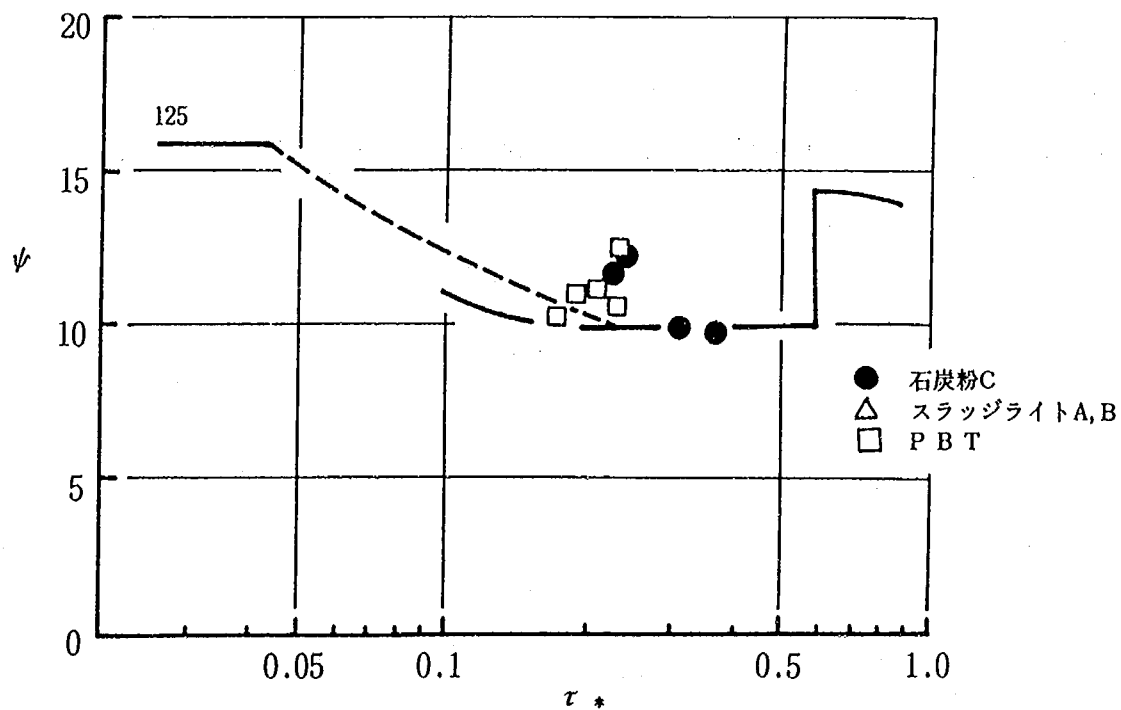


図-6.10 ψ と τ^* , H/d の関係 (軽量材料, $H/d=100 \sim 150$ の場合)

6.4 流砂量に及ぼす影響

図-6.11~6.14に $q_s/u_* d$ と τ_* の関係を $H/d=14\sim20$, $20\sim50$, $50\sim100$, $100\sim150$ の場合について示す。図中の実線は $s=1.65$ で $d=0.1\text{cm}$ の場合の $q_s/u_* d$ と τ_* の関係を示してある。本図より次のことが言えよう。

① $H/d=20\sim50$ の場合、スラッジライト A, B, 石炭粉, PBT の順に同一 τ_* に対して $q_s/u_* d$ が多少小さくなるようであるが、 $q_s/u_* d$ と τ_* の関係に対する s の影響は明確では無い。

② $H/d=50\sim100$ では、石炭粉、スラッジライト、PBT の $q_s/u_* d$ と τ_* の関係は、ほぼ同じようなものとなっているが、 τ_* が大きな所では石炭粉が多少大きめになっている。

③ $H/d=100\sim150$ では、 $s=1.65$, $d=0.1\text{cm}$ の場合の $q_s/u_* d$ に比べて、石炭粉 C, PBT の $q_s/u_* d$ がかなり大きな値となっている。

この原因として遊浮砂の影響が考えられる。今 $\tau_*=0.3$ とし、粒径を 0.1cm とすると、石炭粉 C の u_*/w_0 は 0.92 , PBT は 0.87 , 通常の砂は 0.56 となり、石炭粉 C, PBT は通常の砂に比較して浮遊しやすくなっている。

6.5 砂州に及ぼす影響

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所があるが、次のことは言えよう。

① 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 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 $4\sim15$ 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。

② 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_*-H/d 平面上に発生領域を示すほど無いので結局付けられないが、 $s=1.65$ の場合の τ_*-H/d 平面上の発生領域図と似ているようである。

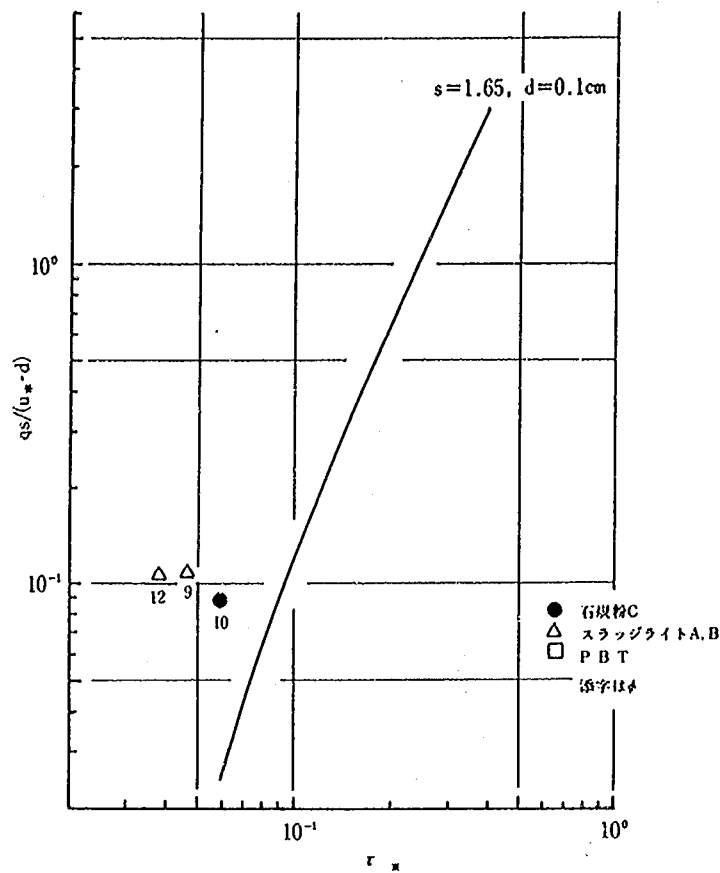


図-6.11 $q_s/(u_* \cdot d)$ と τ_* の関係 (軽量材料, $H/d=14 \sim 20$ の場合)

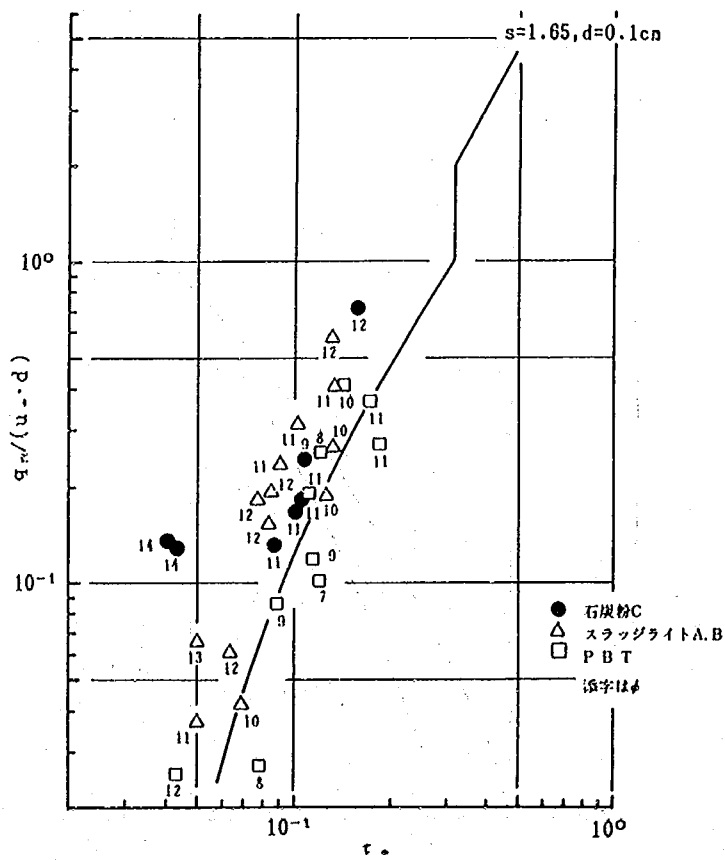


図-6.12 $q_s/(u_* \cdot d)$ と τ_* の関係 (軽量材料, $H/d=20 \sim 50$ の場合)

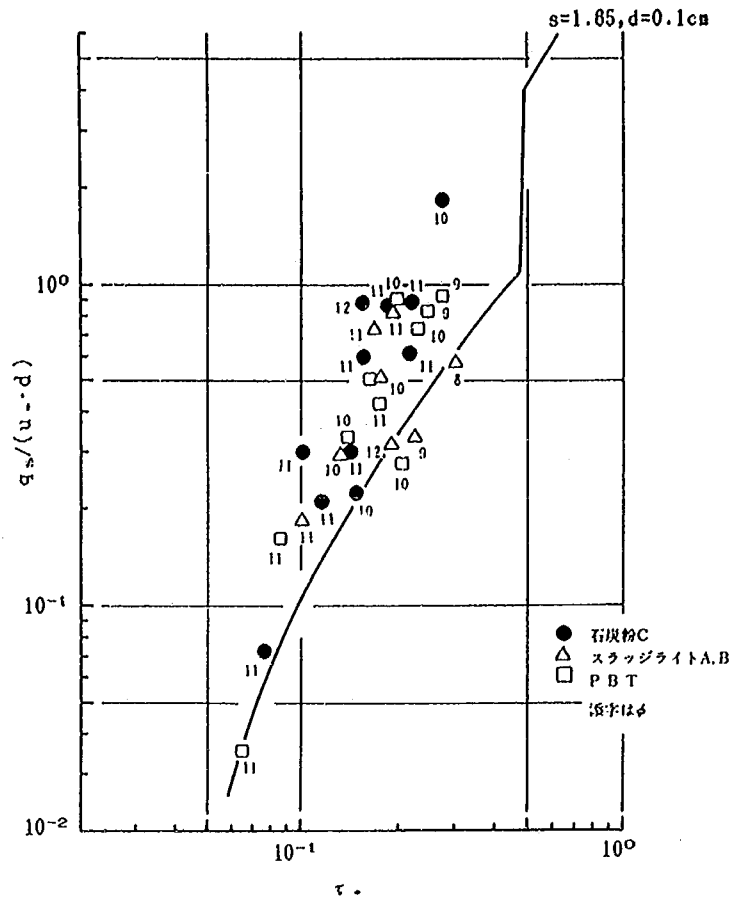


図-6. 13 $q_s/(u_* \cdot d)$ と τ_* の関係 (軽量材料, $H/d=50 \sim 100$ の場合)

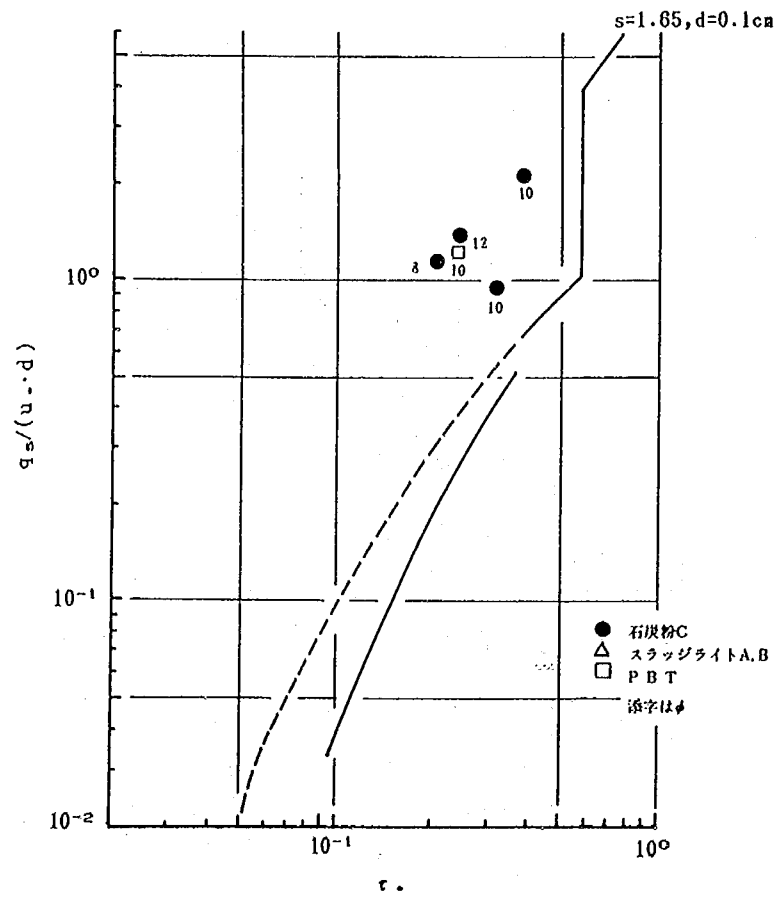


図-6. 14 $q_s/(u_* \cdot d)$ と τ_* の関係 (軽量材料, $H/d=100 \sim 150$ の場合)

Appendix A 河口砂州のフラッシュ実験から見た Upper Regime の流砂量に及ぼす s の効果

A.1 模型縮尺の考え方

北陸地方の小河川の河口処理に関する検討の一環として砂州の越流によるフラッシュに関する検討を移動床模型を使用して行った時に、通常の砂を用いたものと、石炭粉を用いたものと二つの実験を行い、比重の差異が砂州のフラッシュ現象にどのような影響をもたらすか検討した。

模型の縮尺は次のように考えた。

模型は無歪のフルード模型とする。この場合ある流量時に河床に働く無次元掃流力を現地と模型で同一になるように縮尺を決める。流速係数は、砂州のフラッシュ実験であるので Upper Regime の ψ となる。従って石炭粉と通常の砂を用いたものでは、 ψ の値が異なるが、その影響は大きくないと考えられるので、ある流量時に現地と模型で無次元掃流力を同一とするには、

$$(s \cdot d)_r = h_r \quad (A-1)$$

とすれば良い。現地の砂州部の底質材料の平均粒径は 0.63mm であり、模型に用いる材料は、図-A.1、図-A.2に示す平均粒径 $d_m = 0.18\text{mm}$ 、 $s = 1.65$ の砂と、 $d_m = 0.21\text{mm}$ 、 $s = 0.50$ の石炭粉であるので、その縮尺は、砂の場合

$$(s \cdot d)_r = h_r = \frac{(\rho_s/\rho - 1)_p}{(\rho_s/\rho - 1)_m} \cdot \frac{(d_m)_p}{(d_m)_m} = \frac{1.65}{1.65} \times \frac{0.63}{0.18} = 3.5 \quad (A-2)$$

石炭粉を用いた場合の縮尺は

$$(s \cdot d)_r = h_r = \frac{1.65}{0.5} \times \frac{0.63}{0.21} = 9.9 \quad (A-3)$$

となる。

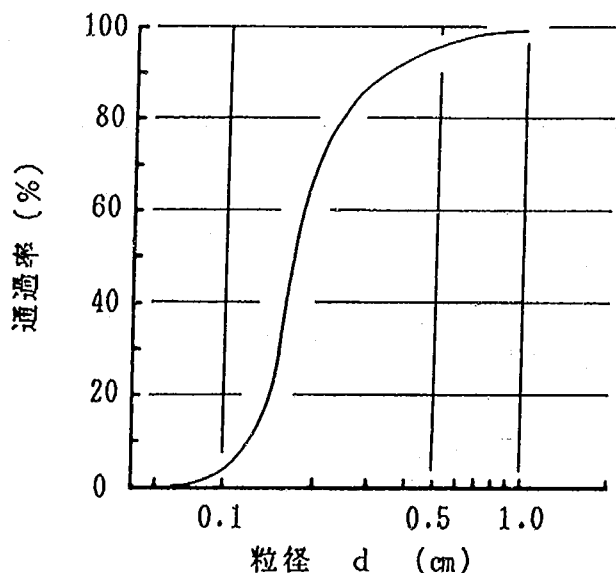


図-A. 1 粒度分布図 (砂)

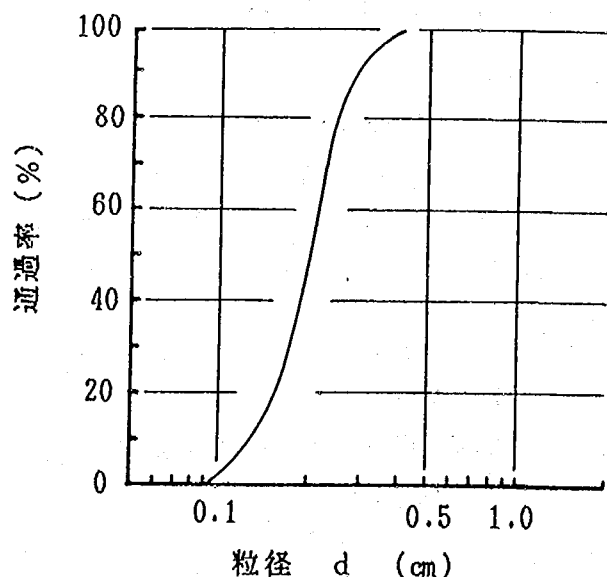


図-A. 2 粒度分布図 (石炭粉)

縮尺が決れば力学的相似は、フルードの相似則により次のようになる。

○砂を使用した場合

$$\left. \begin{aligned} x_r &= h_r = 3.5 & Q_r &= x_r \cdot h_r^{3/2} = 22.92 \\ u_r &= h_r^{1/2} = 1.87 & t_r &= x_r \cdot h_r^{-1/2} = 1.87 \\ \Lambda_r &= x_r \cdot h_r = 12.25 \\ i_r &= h_r \cdot x_r^{-1} = 1 \end{aligned} \right\} \quad (A-4)$$

○石炭粉を使用した場合

$$\left. \begin{aligned} x_r &= h_r = 9.9 & Q_r &= 308.38 \\ u_r &= 3.15 & t_r &= 3.15 \\ \Lambda_r &= 98.01 \\ i_r &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (A-5)$$

ところで移動床における時間縮尺は、河床変動速度から求める必要がある。

砂州部のフラッシュのように流れが射流になるような所では、 $s = 0.5$, $s = 1.65$ の場合も図-5.17に示したように、流砂量がほぼ Brown 式型に良く合うので、ここでは流砂量式として Brown 式型を使う。Brown 式型は、

$$q_s/u_* d = d \{u_*^2/sgd\}^2 \quad \dots\dots\dots (A-6)$$

であるから、

$$Q_{sr} = B_r \cdot q_{sr} = \frac{1}{s_r^2 d_r} \frac{h_r^5}{x_r^{3/2}} \quad \dots\dots\dots (A-7)$$

となる。

ところで河床高 Z の変化速度 $\partial z/\partial t$ は

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{1}{B} \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (A-8)$$

であるので

$$t_{sr} = (1-\lambda)_r \cdot h_r \cdot x_r^2 \cdot Q_{sr}^{-1} \quad \dots\dots\dots (A-9)$$

となる。(A-7) 式と (A-9) 式より

$$t_{sr} = (1-\lambda)_r \cdot s_r^2 \cdot d_r \cdot h_r^{-4} \cdot x_r^{7/2} \quad \dots\dots\dots (A-10)$$

となる。

空隙比 $(1-\lambda)_r = 1$ とすると、砂の場合 $s_r = 1$, $d_r = 3.5$, $h_r = x_r = 3.5$ であるので (A-10) 式より

$$t_{sr} = 1.87$$

となる。同様石炭粉の場合は $s_r = 3.3$, $d_r = 3.0$, $h_r = x_r = 9.9$ であるから、

$$t_{sr} = 10.38$$

となる。

以上のように砂の場合は、模型縮尺比を粒径比としたため、フルード相似則から求めた時間縮尺と同一となり、石炭粉の場合 s の効果が入るのでフルードの相似則から求めた時間縮尺と河床変動から求めた縮尺が異なる。

A.2 実験施設および実験概要

実験は図一A.3の実験水路平面図に示す幅3.0m、長さ46.8mの既設の複わん曲水路を一部改造し、現地計画放水路幅(45m)の一部を用いた部分模型で行った。この水路の上流端には幅1.5mの堰を有する量水槽があり、下流端は沈砂槽および水位調節用のゲートが取り付けられている。(なお水路床勾配は1/500となっている)。実験に用いた砂州形状は、現地河口および砂州の復元実験等から想定し、図一A.3の砂州形状縦断面図に示すような前浜勾配1/10、砂州幅60m(T.P. 0 m 幅)、砂州高がT.P.1.5mのときの砂州頂幅10mとし、砂州の河川側勾配を1/23.2にモデル化したものであり、これに計画高水ハイドログラフ($Q_{max}=270\text{m}^3/\text{s}$ 、計画河口幅45m)を流し、砂州のフラッシュと水位を検討した。なお、潮位および出発水位はT.P.0.75mとし、ハイドログラフは図一A.4に示す波形を用いて実験を行った。

実験は砂州整形後、下流からポンプで給水し、上流はゆっくりと流量調節用のバルブを開け、上下流の条件水位まで湛水し、水位が合ったところで実験開始とした。実験中の潮位は一定としたので、流量の増減と共にゲートも調節した。

実験中の測定は、水位、河床横断の時間変化の測定と流況の観察である。砂州のフラッシュは、越流を始めてから短時間の変化で終了するので、目視と写真撮影により観察を行い、砂州の水位、河床についても越流時、すなわち水位ピーク時と流量ピーク時はとくに時間間隔を細かに測定した。

●実験ケース

実験は、表一A.1に示す実験条件一覧表に示す条件で行った。実験2は石炭粉($d_m=0.21\text{mm}$)を用いたケースで、実験5は砂($d_m=0.18\text{mm}$)を用いてさらに模型の縮尺を大きくし、現地に近い条件で行ったケースである。

表一A.1 実験条件一覧表

実験番号	実験の種類	流量波形*	砂州高*	砂州幅*	砂州頂幅*	河床材料	粒 径	砂州条件	長さ 縮尺：時間
実験2	不定流 移動床	A波形 $Q_{max}=270\text{m}^3/\text{s}$	T.P.1.0m	60m	26.7m	石炭粉	$d_m=0.21\text{mm}$ $s=0.5$	完全閉塞	$h_r=9.9$ $t_r=10.38$
実験5	不定流 移動床	A波形 $Q_{max}=270\text{m}^3/\text{s}$	T.P.1.0m	60m	26.7m	砂	$d_m=0.18\text{mm}$ $s=1.65$	完全閉塞	$h_r=3.5$ $t_r=1.83$

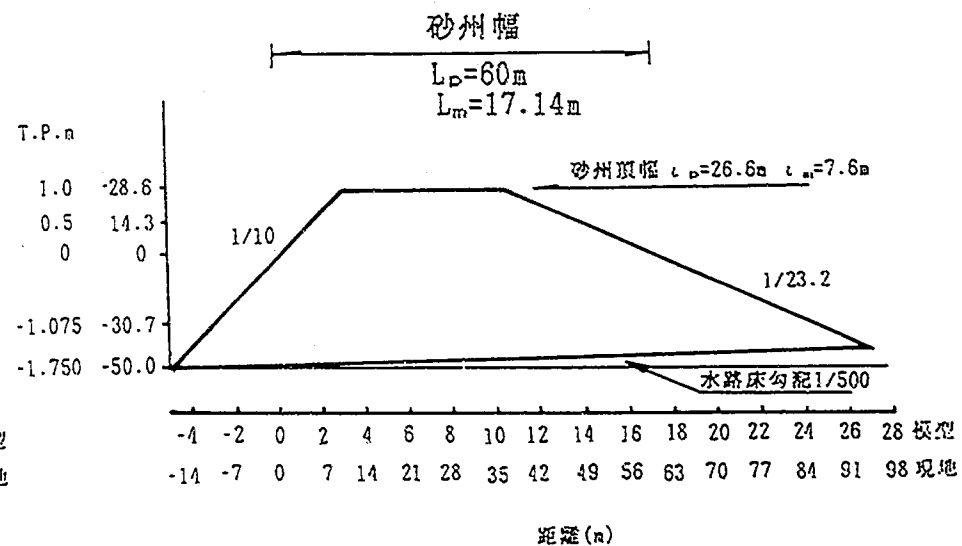
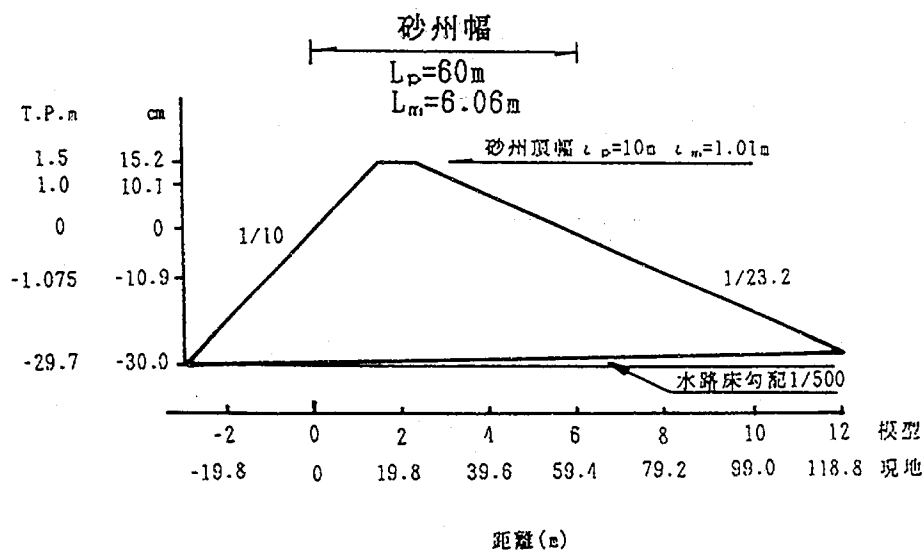
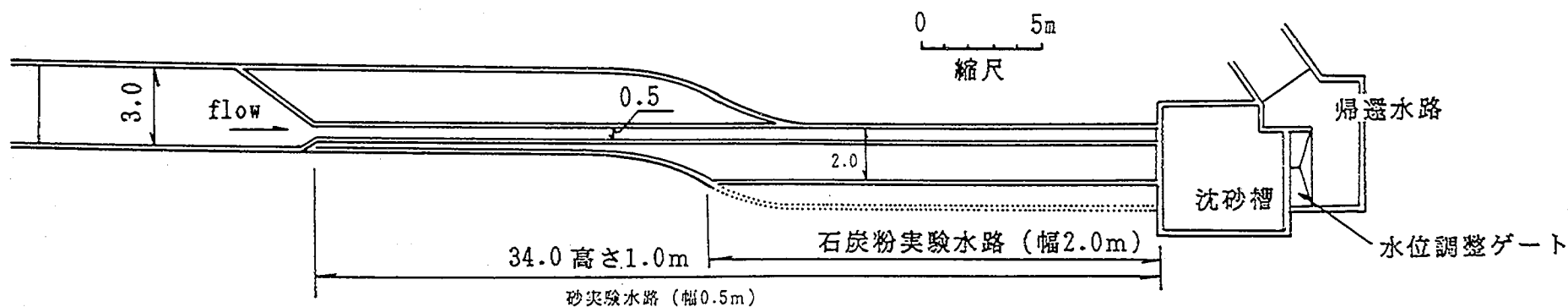


図-A. 3 実験水路概要図

A.3 実験結果とその考察

実験2及び実験5の水位時間変化、河床高時間変化を図-A-4～図-A.7に示す。各ケースの様子は以下のごとくである。

●実験2

砂州高を T.P.1.0m, 砂州頂幅を26.7mとした。水位のピークは1時間40分に現われており、その高さは T.P.1.40m と砂州高より約40cm高であった。また流量ピーク時の水位は T.P.1.22m である。

●実験5

本ケースは、砂を用いることにより縮尺を1/3.5と、より現地に近い条件にして行ったもので、他の条件は、実験2と同じである。実験開始37分後に水位が T.P.1.0m まで上昇し、43分で越流し始めた。50分後には水位のピークが見られ、その高さは、T.P.1.30m 位であった。時間的には砂の方が早かったが、これは砂州上流での貯溜量の相違により時間のずれが生じたもので、水位はあまり変らなかった。また砂州越流時には、反砂堆の上流への移動現象が43分～1時間45分の間にみられた。

そこで、砂州がフラッシュされ、水位が下降した。2時間20分～6時間の間は流量の増加もゆるやかなので、流砂量も少なく、水位変化もあまりないが、6時間以降流量の急激な上昇で流砂量も増大し、流量ピーク時の水位は、T.P.1.25m と実験2とほとんど変らなかった。河床高については、時間的変化の細部については相違があるが、大局的には石炭粉の実験と相似なものとなっていた。

以上の2つの実験を比較すると、越流による砂州のフラッシュが進む7時間位（現地換算時間）までは、両者の河床変動はほぼ相似であるが、その後は多少石炭粉の方が河床低下速度が早い。8時30分以降は、砂を用いた実験においてコンクリート床が露出してしまったので、比較検討がし得ない。

このことは Upper Regime の無次元流砂量 $q_s/u_* d$ と τ_* の関係は、 $s=1.65$, $d_m=0.018\text{cm}$ と $s=0.5$, $d_m=0.021\text{cm}$ の石炭粉は、ほぼ同一と関係であるが、多少石炭粉の方が同一 τ_* で、 $q_s/u_* d$ が大きいと判断される。

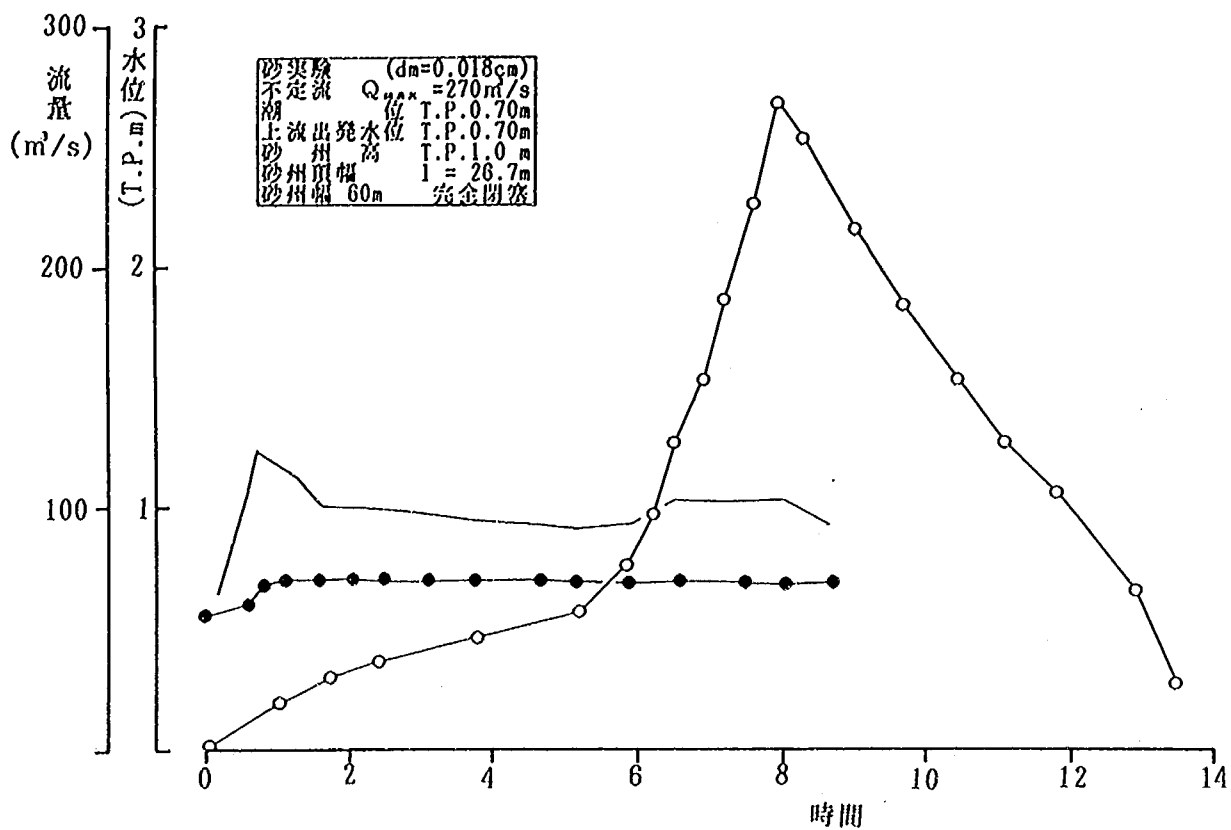


図-A. 4 水位時間曲線図 (実験5)

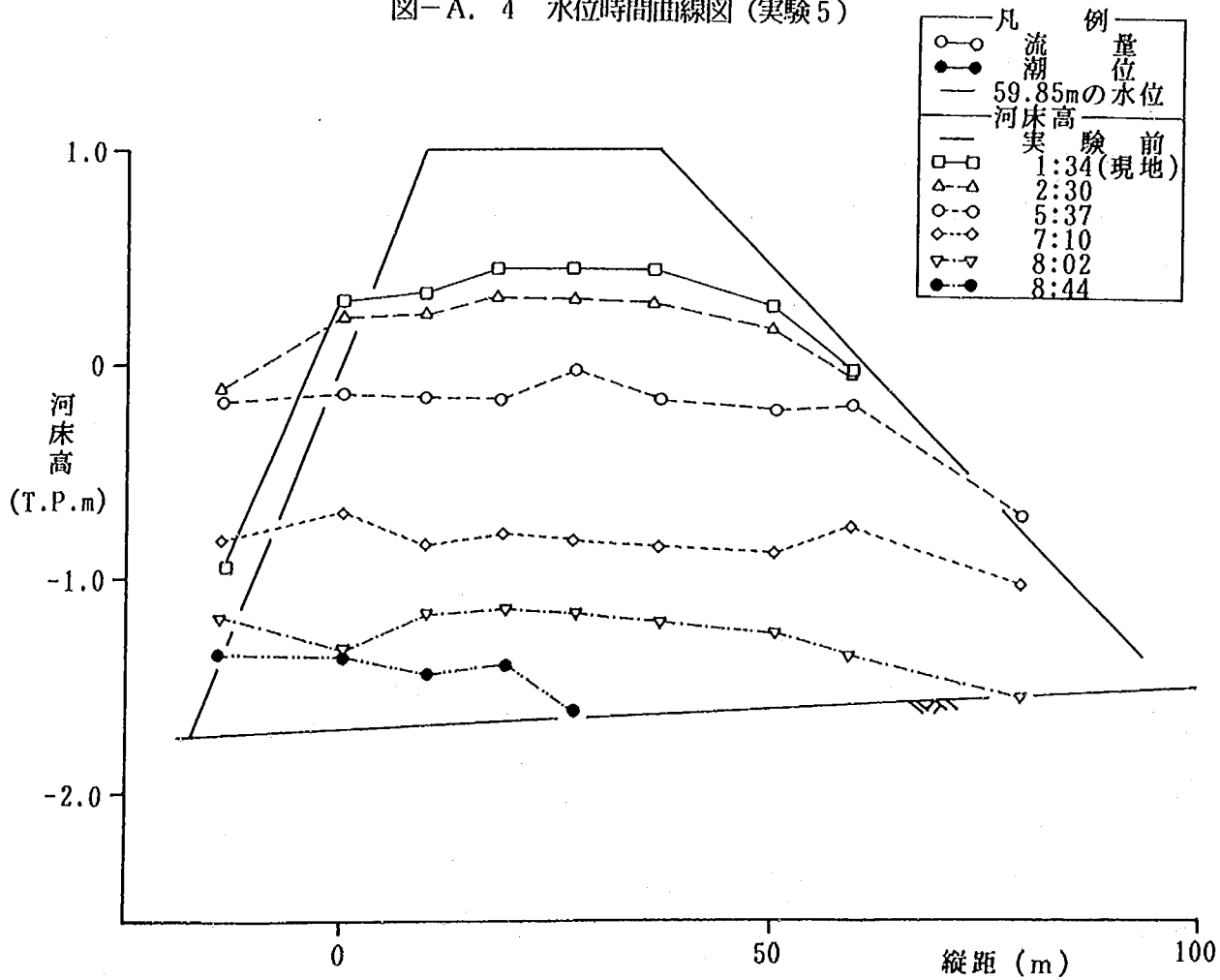


図-A. 5 河床高時間変動図

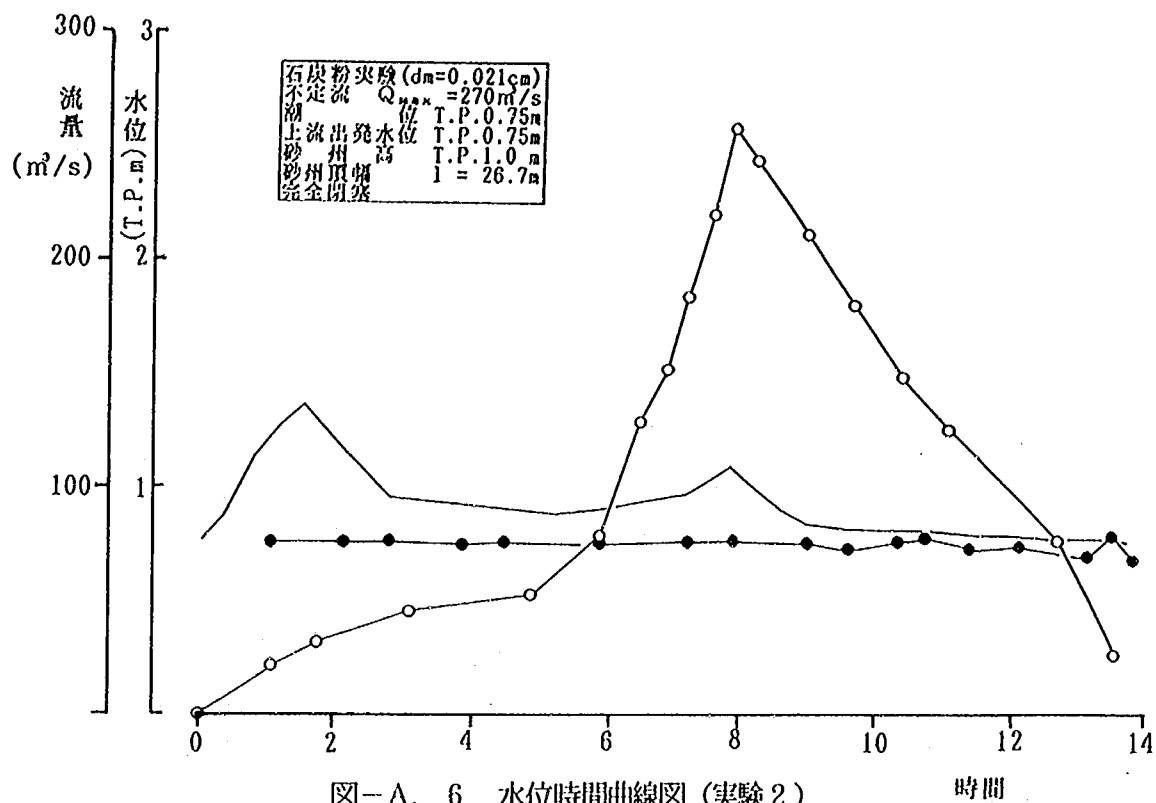


図-A. 6 水位時間曲線図 (実験2)

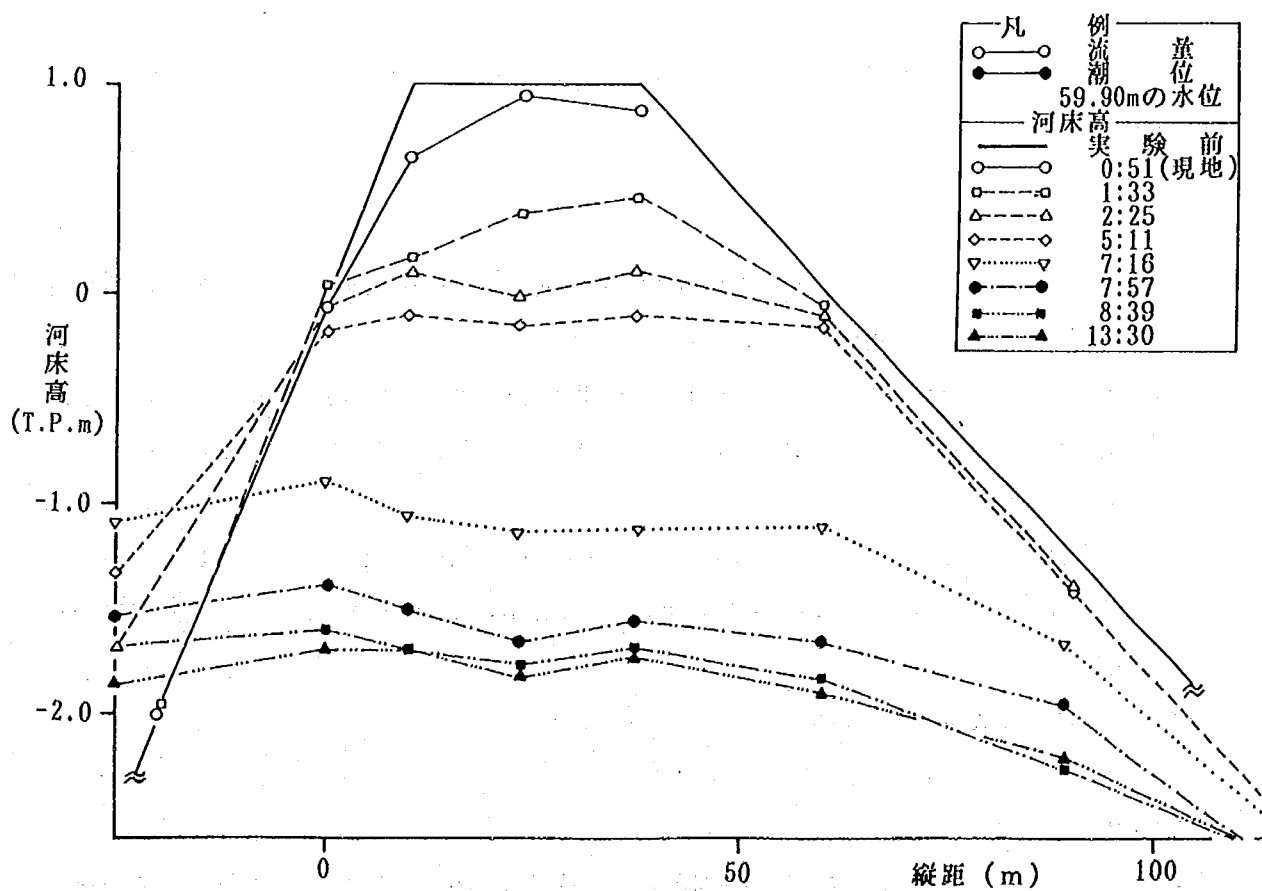


図-A. 7 河床高時間変動図

1. 検討目的

移動床模型実験を実施する場合には、流れの相似性のみでなく、河床変動（河床形態、流砂量、流送形態など）についてもその相似性を満足させる必要がある。移動床模型実験の相似性は、模型を水平、鉛直とも同じ縮尺の無歪みで製作した場合に現地の河床材料と模型の河床材料の粒径比も同じ縮尺に合せることによりほぼ満足されることが知られている。しかし、現地の河床材料の粒径や模型縮尺などから模型での河床材料の粒径が0.6mm以下となる場合には、模型実験において現地では発生しないと考えられる小規模河床波の砂漣が生じて河床の抵抗が大きくなり、流れの相似性および河床変動の相似性が満足されないことがある。このような場合の対策として次の2つの方法がある。一つは模型の水平縮尺と鉛直縮尺を違い、砂漣が生じないような水深、模型の材料の粒径を得るものである。一般に歪み模型と呼ばれるものがこれである。その歪度は鉛直縮尺と水平縮尺の比で表わされ、河川の模型実験では最大1.5～2.0程度におさえたいので、このような方法が適用しえる水理量の範囲はあまり広くない。もう一つの方法は、模型の河床材料の粒径を幾何学的相似条件を満たすように小さくする代わりに水中比重 s の小さな材料（以下軽量河床材料という。）を用いて、流砂の相似条件は満足させながら砂漣が発生しない程度に粒径を大きくする方法である。この方法の特徴は模型自体は無歪みであることであり、河川の平面形状などにより規定される河床変動については相似としやすく、またその解釈も容易である。

本検討は、軽量河床材料としてスラッジライト、石炭粉を用いた移動床実験を実施し、 s や τ_* の違いが河床形態に及ぼす影響について検討し、模型実験材料として石炭粉、スラッジライトの適用範囲について評価するものである。

2. 検討の方法

本検討では、実河川を縮尺を変えて再現した模型2種類を用いて、一方に砂を、他方に軽量河床材料を用いることによって、河床形態の再現性を検討する方法をとった。

使用した模型は図—B. 2. 1に示す建設省土木研究所の河川水理模型実験施設内に製作されている模型の内、縮尺1/20の模型Aと縮尺1/40の模型Bである。模型はどちらも水平縮尺と鉛直縮尺が等しい無歪み模型として製作されている。

検討では、模型Aに水中比重 $s = 1.65$ 、平均粒径1.0mmの均一砂を用いて、模型Bに $s = 1.65$ の砂と $s = 0.8$ のスラッジライト、 $s = 0.48$ の石炭粉の2種類の軽量材料を用いて、模型AとBとで生じる現象の差異について実験的に把握するものとした。

実験各ケースにおける各水理量の縮尺等を表—B. 2. 1に示す。

2.1 模型の概要

実験に使用した模型の平面図および標準断面図を図—B. 2. 2、図—B. 2. 3に示す。同河川の特徴として、河道幅に対して低水路幅が狭く、低水路幅、水深比が低水路満杯時で7程度と小さいことから中規模河床波はほとんど発生しない。河道の平面形の特徴としては、No.2840～No.2832に急湾曲部を形成

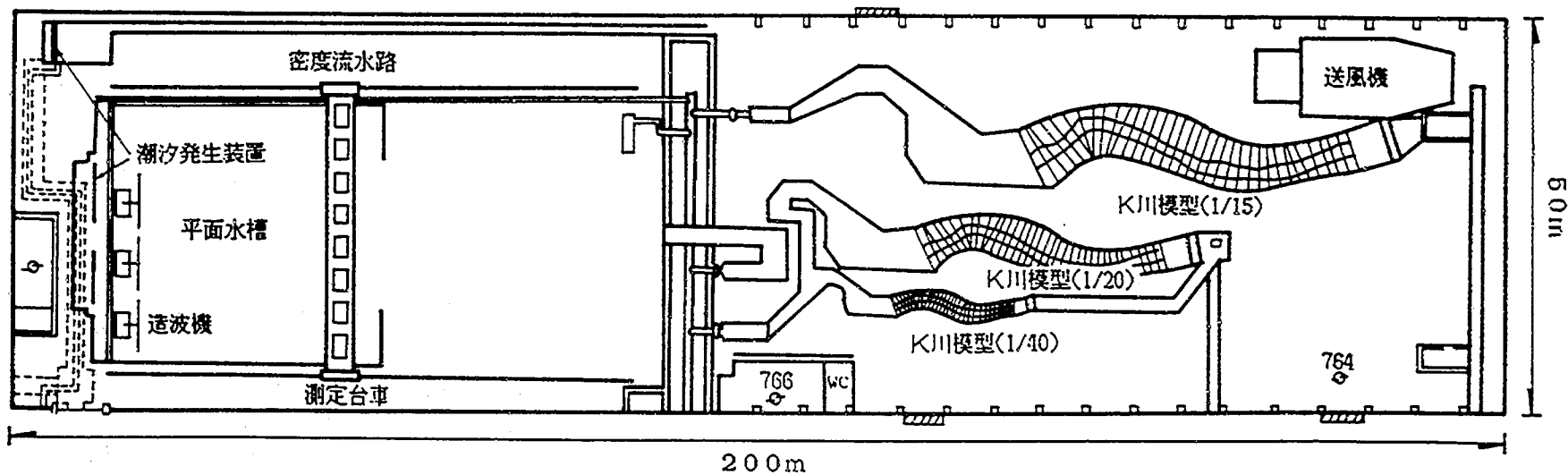


図-B. 2. 1 河川水理実験施設平面図

表-B.2.1 実験の水理量縮尺一覧表

模 型	実 験 ケース	河床材料	平均 粒径 d mm	実物に対する縮尺比							フルード則による縮尺比				模型水理量の無次元量					通水 時間 (分)
				水平 縮尺 x_r	鉛直 縮尺 h_r	断面積 A_r	勾配 I_r	川幅 B_r	水深*) H_r	距離 L_r	流速 U_r	時間 t_r	流量 Q_r	粗度 係数 n_r	水中 比重 s	平均 粒径 d mm	無次元*) 掃流力 τ_*	摩擦沈降*) 速 度 比 (w_o/u_*)	レイノ ルズ数*) Re_*	
A	ケース 1	砂	1.0	20	20	400	1	20	20	20	4.47	4.47	1788	1.65	1.65	1.0	0.06	4.54	34.7	120
B	ケース 2	砂	0.5	40	40	1600	1	40	40	40	6.32	6.32	10119	1.85	1.65	0.5	0.06	3.21	8.4	80
	ケース 3	スラッジライト	1.21												0.80	1.21	0.05	5.42	20.3	
	ケース 4	石炭粉	1.0												0.48	1.0	0.10	1.88	16.9	

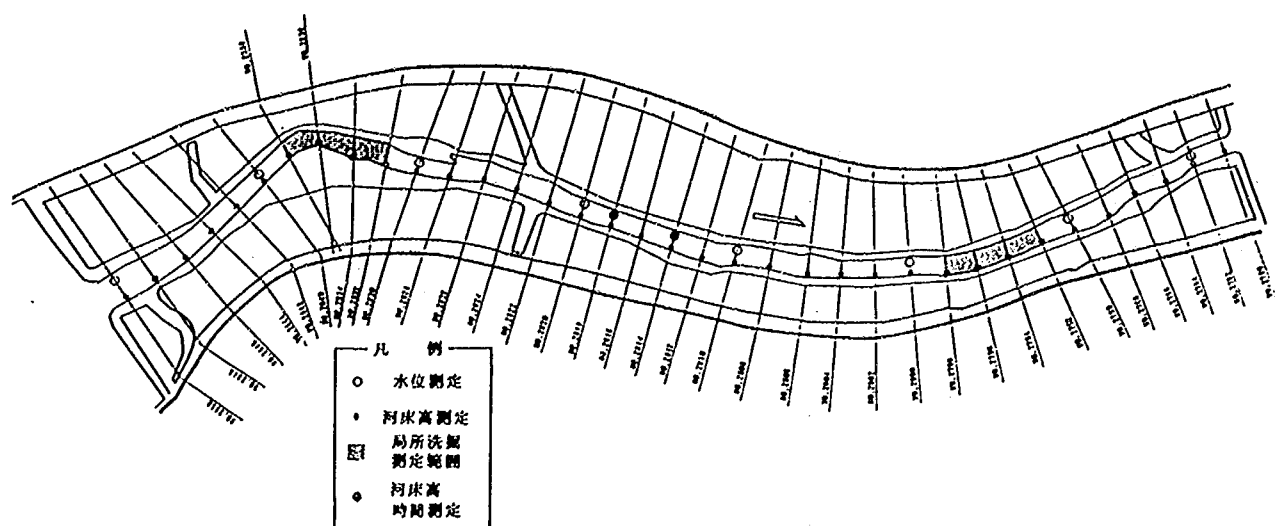


图-B. 2. 2 模型平面图

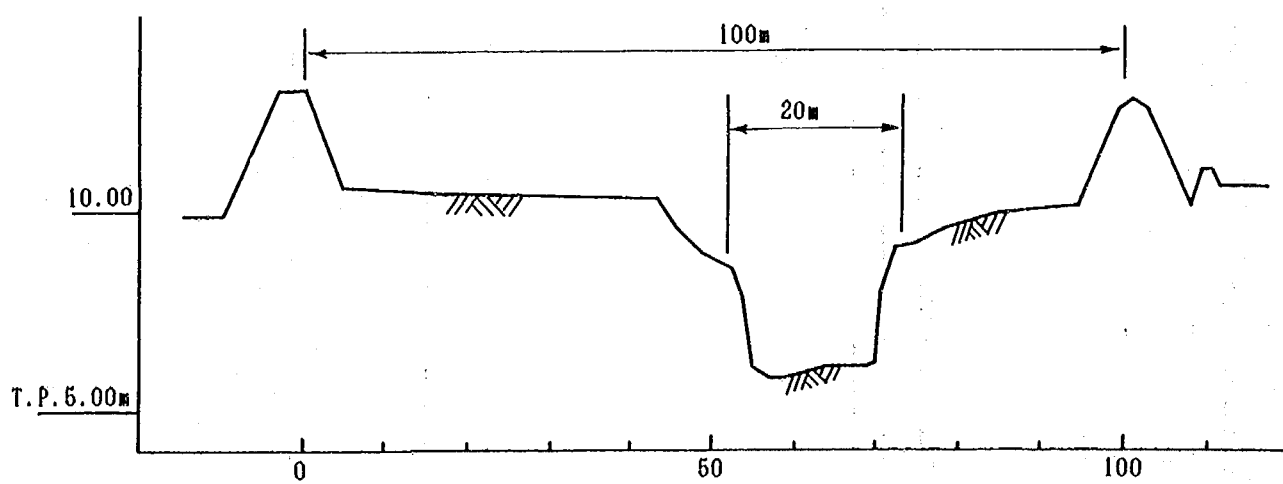


图-B. 2. 3 标准断面图

し、その下流ではほぼ直線に近い湾曲流路となっている。同河川において形成される河床形態は、ほぼ小規模河床波および流路の湾曲に伴う固定砂州である。

模型区間の諸量を記述すると以下のようなものである。

平均堤間距離	100m
平均低水路幅	25m
平均河床勾配	1/1500 (実験初期において同勾配で平坦河床に整形)
低水路満杯流量	85m ³ /s

2.2 各実験ケースの検討項目

表-B.2.2に実験条件および測定項目一覧表を示した。

表-B.2.2 実験ケース一覧表

模 型	実 験 ケース	実 験 条 件				測 定 項 目			
		河床材料	流 量 (m ³ /s)	通水時間 (min)	水位条件 (T.P.m)	水位測定	河 床 高 測 定	局所洗掘 測 定	流況観察
A	ケース 1	砂	85	120	9.00	○	○	○	○
B	ケース 2	砂	85	80	9.00	○	○	○	○
	ケース 3	スラッジライト				○	○	○	○
	ケース 4	石炭粉				○	○	○	○

各実験ケースにおける検討項目を記述すると以下のようなものである。

ケース 1：本ケースは他の実験との比較対象実験である。本ケースでは河床には砂漣は発生せず砂堆が発生すると考えられる実験である。

ケース 2：本ケースは、模型Aの $s = 1.65$ 、平均粒径 $d_m = 1.0\text{mm}$ の砂に対して、模型Bに $s = 1.65$ の砂を用いて、粒径を模型縮尺比で縮小し 0.5mm とすることにより、 τ_* 、 h/d が同じとなるようにしたものである。 τ_* 、 h/d が同一であるが、粒径が 0.6mm 以下となることから、砂漣が発生すると考えられ河床形態がケース 1 と異なると推定される実験である。この小規模河床波形態が河床変動にどのような影響を生じるかを見る実験である。

ケース 3：本ケースは、砂の水中比重 $s = 1.65$ に比べて水中比重が約半分の $s = 0.8$ であるスラッジライトを用いて無次元掃流力 τ_* は模型Aとほぼ同一とした。すなわち模型の河床材料の粒径を $d_m = 1.21\text{mm}$ としたものである。これによって砂漣が発生しない実験とするが、 s が異なることによって、ケース 1 とどの程度河床変動に差異が生じるかを見るために行うものである。

ケース 4：本ケースは、河床に砂漣を発生させない条件であるが、 s および τ_* がケース 1 と異なる場合の河床変動がどの程度異なるかを見るための実験である。

実験では河道全体を対象とした河床形態の観察、水位、河床高縦断、局所洗掘の測定を実施した。測定した断面、範囲は図-B.2.1に併記した。

3. 実験の結果とその考察

3.1 模型Aの河床形態（ケース1）

以降の検討の比較対象として実施したケース1，模型Aでの河床形態を述べる。本文中の数値は表一B.2.1に示した縮尺で現地換算した値であり，模型値は（ ）付で示した。

通水後の河床状況を図一B.3.1および写真一B.3.1に示した。本ケースでは流路の蛇行に伴う固定砂州と小規模河床波の発達が見られる。固定砂州は急湾曲部28.36kより上流と28.08kより下流に見られ，砂堆高が約60cm（3cm），長さが14～18m（0.7～0.9m）程度である。28.22k～28.10kでは小規模河床波が形成された。その波高は40～60cm（2～3cm）で波長が約10m（0.5m）程度であり，砂堆とも砂漣とも言えるが，河床波の勾配が緩やかであることや規模，形状などから河床に発生した河床波を砂堆と判断した。ただし，局所洗掘の生じている急湾曲部下流28.34k～28.32kに局所的に生じている細かい河床波は砂漣とした。急湾曲部である28.38k～28.32kと緩湾曲部の27.98k～27.92kでの等深線図を図一B.3.2と図一B.3.3に示した。急湾曲部では下流より28.35kの外岸に最大洗掘箇所を生じ，その下流に洗掘された土砂による固定砂州が発達する。最大洗掘箇所の河床高はT.P.3.86mであり，初期河床より2.3m程度低下している。緩湾曲部では著しい展所洗掘はなく，27.95kの外岸側にT.P.4.98m，初期河床から1.0m弱の洗掘箇所が認められる程度である。

3.2 河床形態に及ぼす s の効果（ケース1とケース2，3の比較）

無次元掃流力 τ_* を模型Aとほぼ同じとして模型Bを用いて行ったケース2，3についてケース1と比較，検討することによって河床形態に及ぼす s の効果を把握した。各ケースの河床状況を図一B.3.4，図一B.3.7および写真一B.3.2，写真一B.3.3に示した。

ケース2では，フルード則にのっとり，粒径を半分にし， τ_* ， H/d をケース1と同一となるようにしたが，小規模河床形態に差異を生じた。模型では28.40k～28.12kと27.94k～27.88kに河床波が発達し，その他の区間はほぼ河床材料の移動の無い平坦河床であった。

河道に発達した河床波は，波高約40cm（1cm），波長5m（0.125m）程度で，河床波の勾配は0.08であり，場所による違いはほとんどみられなかった。この河床波は砂漣と判断される。砂漣の発達した原因としては河床材料の粒径が0.5mmと細かいことのほか，実験時において流水の水温が10℃と低く，表一B.2.1に示した R_{c*} の値からも分かるように砂漣が発生しやすい条件にあったためである。

ケース3では，ケース1と同様な小規模河床波が発生した。河床形態について述べると急湾曲部より下流28.34k～28.22kに砂堆高100cm（2.5cm）で長さ26m（0.65m）と砂堆高60cm（1.5cm）で波長11m（0.275m）の固定砂州を形成し，その下流の28.22k～28.14kでは波高が20～30cm（0.5～0.75cm）で波長が約5m（0.125m）程度の小規模河床波を，さらに28.08kより下流では高さが40cm（1cm），長さが50m（1.25m）の砂州を形成している。ケース3で用いた軽量河床材料を現地粒径に換算すると，2.4cmとなる。模型に生じた小規模河床波の波高は粒径の8～12.5倍，波長は約200倍である。河床波の勾配は0.04～0.06とケース1に発達した河床波と同じである。河床波は形状，規模から砂堆と判断した。

図一B.3.10は平均河床高縦断を比較したものであるが，ケース2，3ともにほぼ再現されており，平

均的な河床変動には小規模河床波の違いはあまり影響しないと思われる。しかし、局所的な洗掘等では、図-B.3.5, 図-B.3.6に示すように河床形態の相違により著しくその形状が異なっており、河床形態を同じとすることの重要性がうかがい知れる。

3.3 河床形態に及ぼす τ_* の差異の影響 (ケース1とケース4の比較)

ケース4では、軽量河床材料として石炭粉を用いて、模型Bで検討を行ったが、無次元掃流力 τ_* が模型Aを用いたケース1に比べ大きく、河床材料の移動、河床波の発達も活発となった。河床波は河道全体に発達し、その形状、規模から砂堆と判断された。砂堆の大きさは急湾曲部を含む28.44k~28.30kで波高が60cm、波長が10m、それより下流では波高が20~60cm、波長が6~10mである。本ケースに用いた石炭粉は現地の粒径に換算すると1.16cmであり、模型Aの2cmと比較しだいぶ細かいことが知られる。河床波の波高は粒径の17~52倍であり、波長は517~862倍である。平均水深3mで整理するならば、波高は0.07~0.20倍、波長は2~3.3倍である。河床波の勾配は0.03~0.06でほぼ模型Aの河床波と等しい。河床形態を見るに材料の粒径の違いによるものか波高、波長が小さいものの、28.08kより上流ではほぼ河床形態が再現されている。しかし、固定砂州の形成は認められなかった。図-B.4.14は平均河床高縦断を比較したものであるが、流砂量が模型Aに比べて多くなり、上流の河床が低下し下流の河床に堆積する結果となってしまった。これは通水時間を流砂量の違いを考慮しないでフルードの相似則に合わせ決めたことによると思われる。局所的な洗掘等でも洗掘深が大きくなっている。しかし、洗掘の発生位置など平面形状に支配されている現象は、ほぼ再現される結果となった。

4. まとめ

今回実施した検討結果より、次のことが得られた。

- (1)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望ましい。
- (2) s が多少ことなっても、小規模河床波形態を一致させ、さらに無次元掃流力 τ_* ($=H \cdot I / (s \cdot d)$) を現地と同一とすることにより模型の相似性を良くすることができる。
- (3)無次元掃流力 τ_* を現地と同一とし得ない場合でも、小規模河床形態を現地とほぼ同一とすることによって局所洗掘の位置や平均河床高の変化などについては定性的に評価することが出来る。さらに流砂量を考慮した時間縮尺を検討することによって、定量的な評価もある程度可能と思われる。時間縮尺は以下のごとくである。

流砂量からの時間縮尺は

$$t_{sr} = q_{B*}^{-1} \cdot (1 - \lambda)_r \cdot h_r^{1/2} \cdot x_r \cdot d_r^{-1}$$

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

$$t_{sr} = h_r^{3/2} \cdot d_r^{-1}$$

となり、 $(\tau_{*r} = 1) = (d_r = h_r \cdot s_r^{-1})$ であることから、

$$t_{sr} = h_r^{1/2} \cdot s_r$$

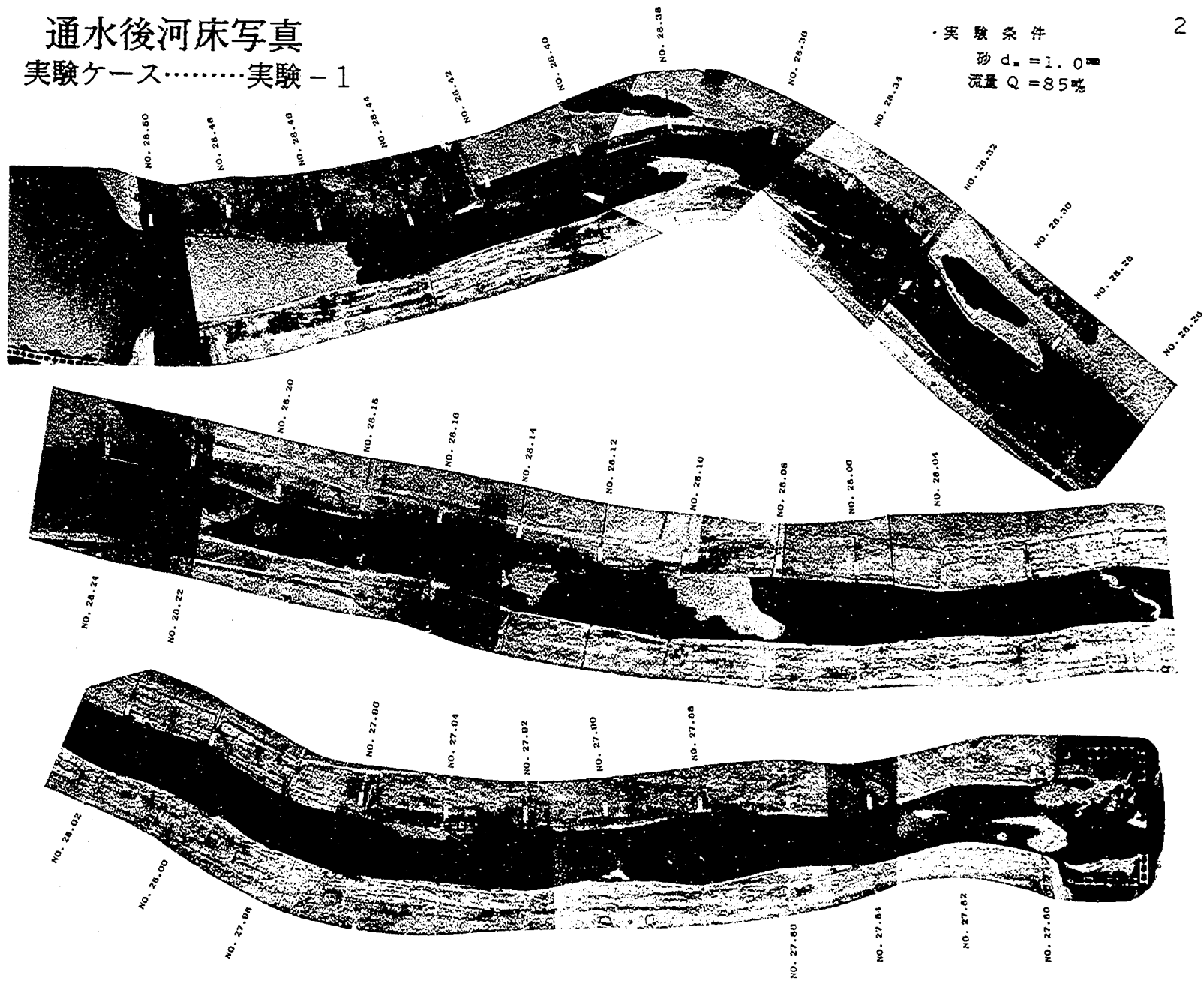
となる。

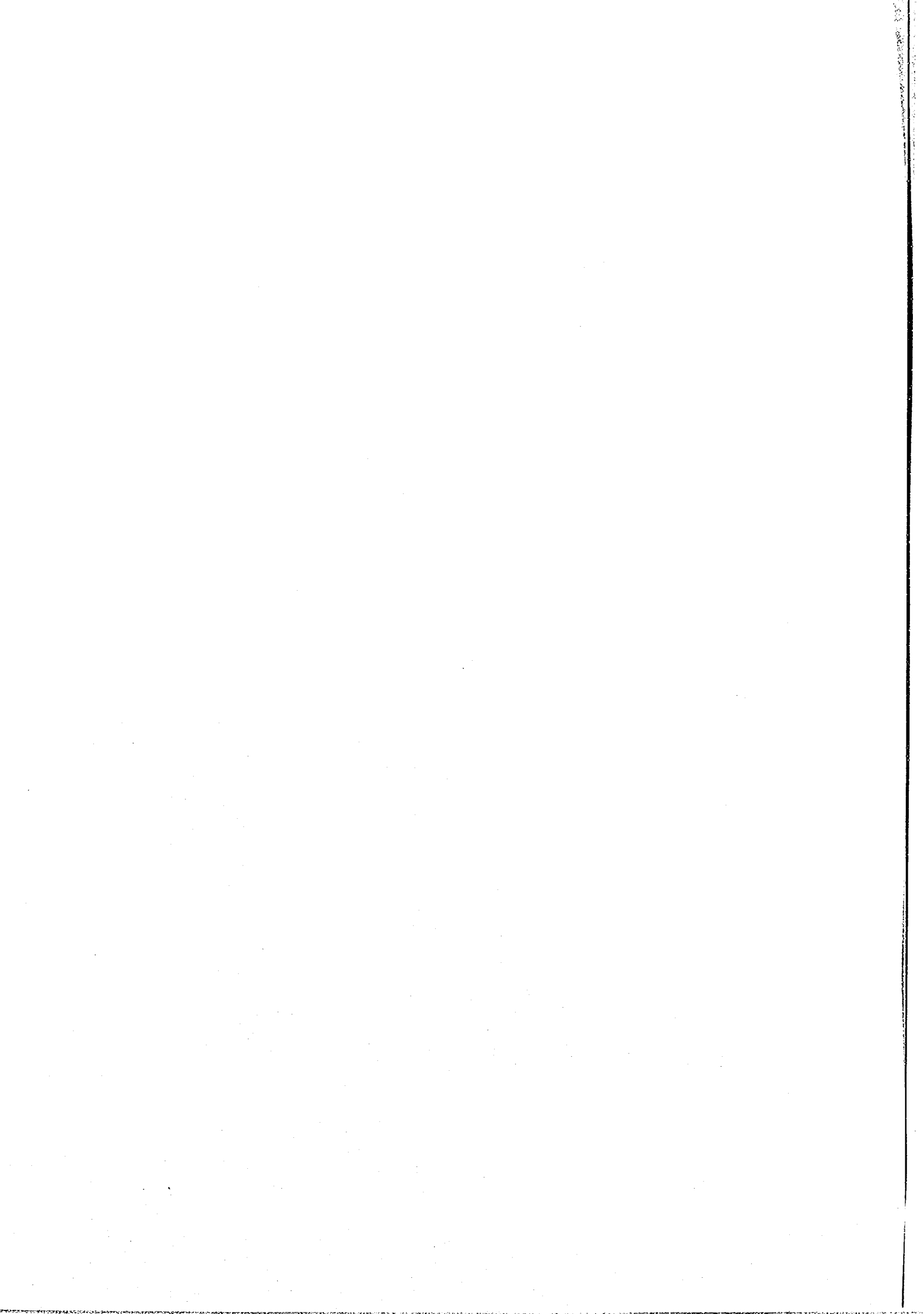
通水後河床写真 実験ケース………実験-1

実験条件

砂 $d_s = 1.0 \text{ mm}$
流量 $Q = 85 \text{ l/s}$

2





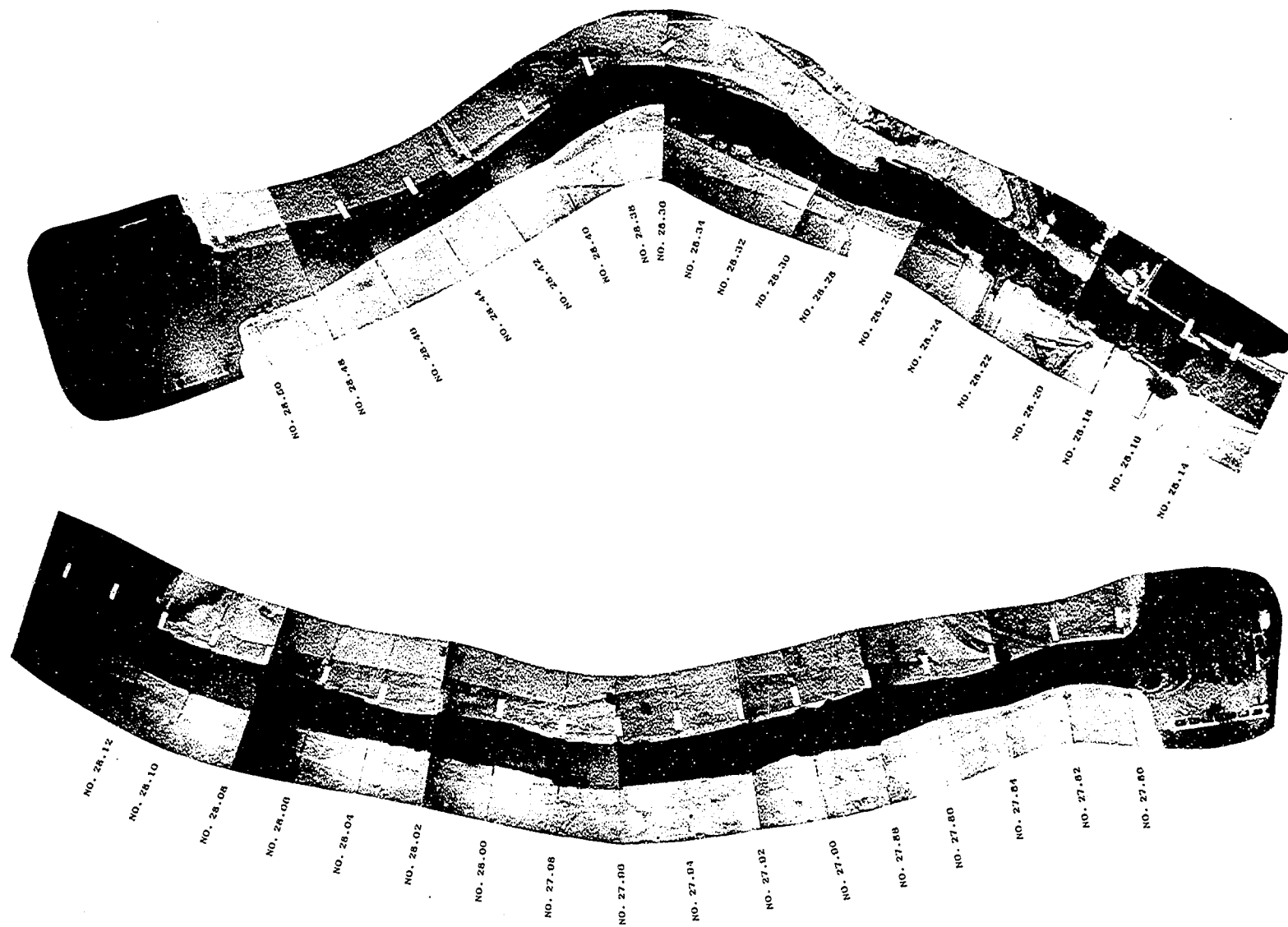
通水後河床写真
実験ケース……………実験－3

· 實驗條件

$$\text{例 } d_{\text{max}} = 0.5 \text{ m}$$

流量 $Q = 85$ 吨

6



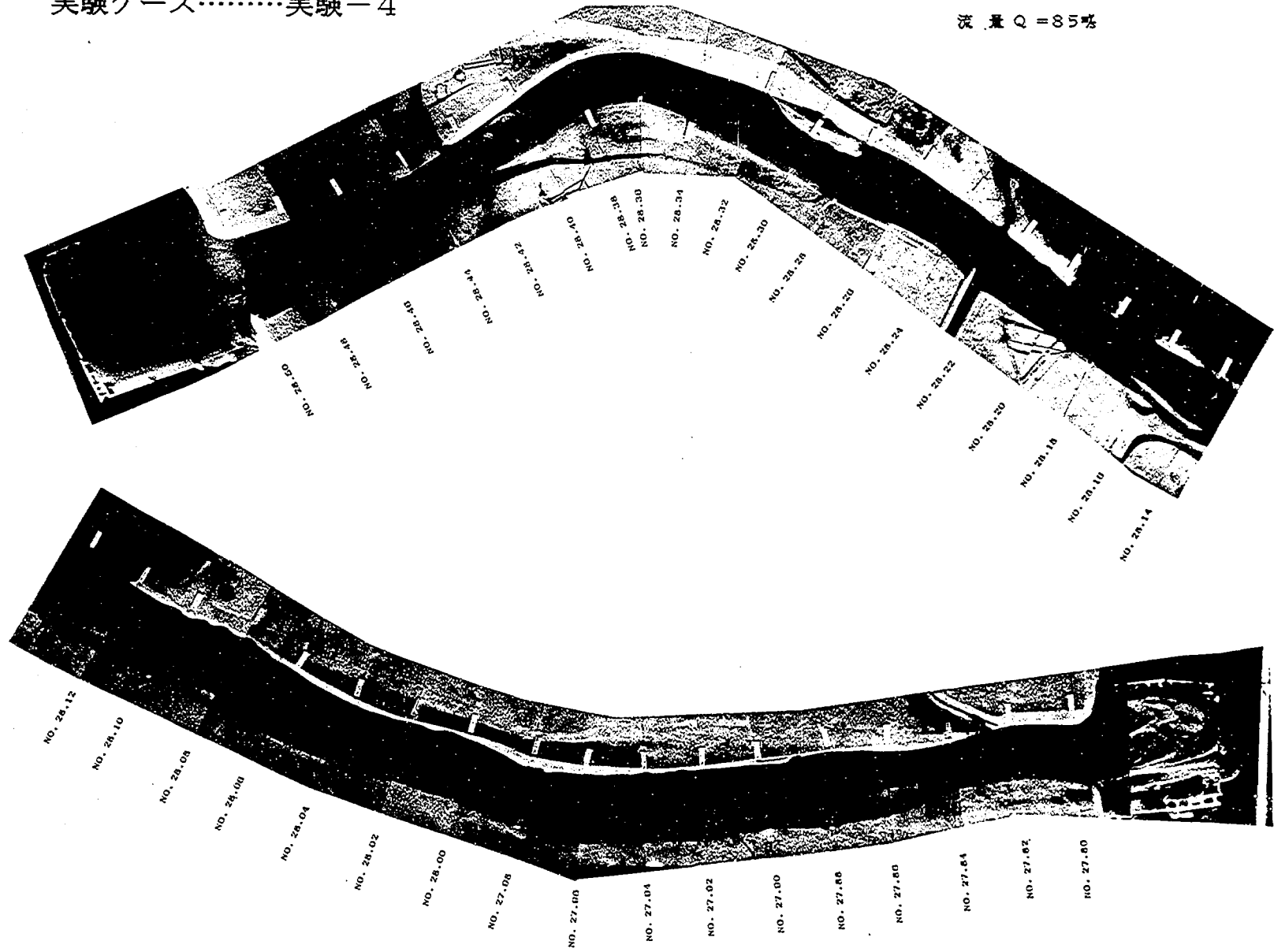
通水後河床写真
実験ケース……………実験－4

・ 実験条件

石炭粉 $d_m = 1.0 \text{ mm}$

流量 $Q = 85$ 吨

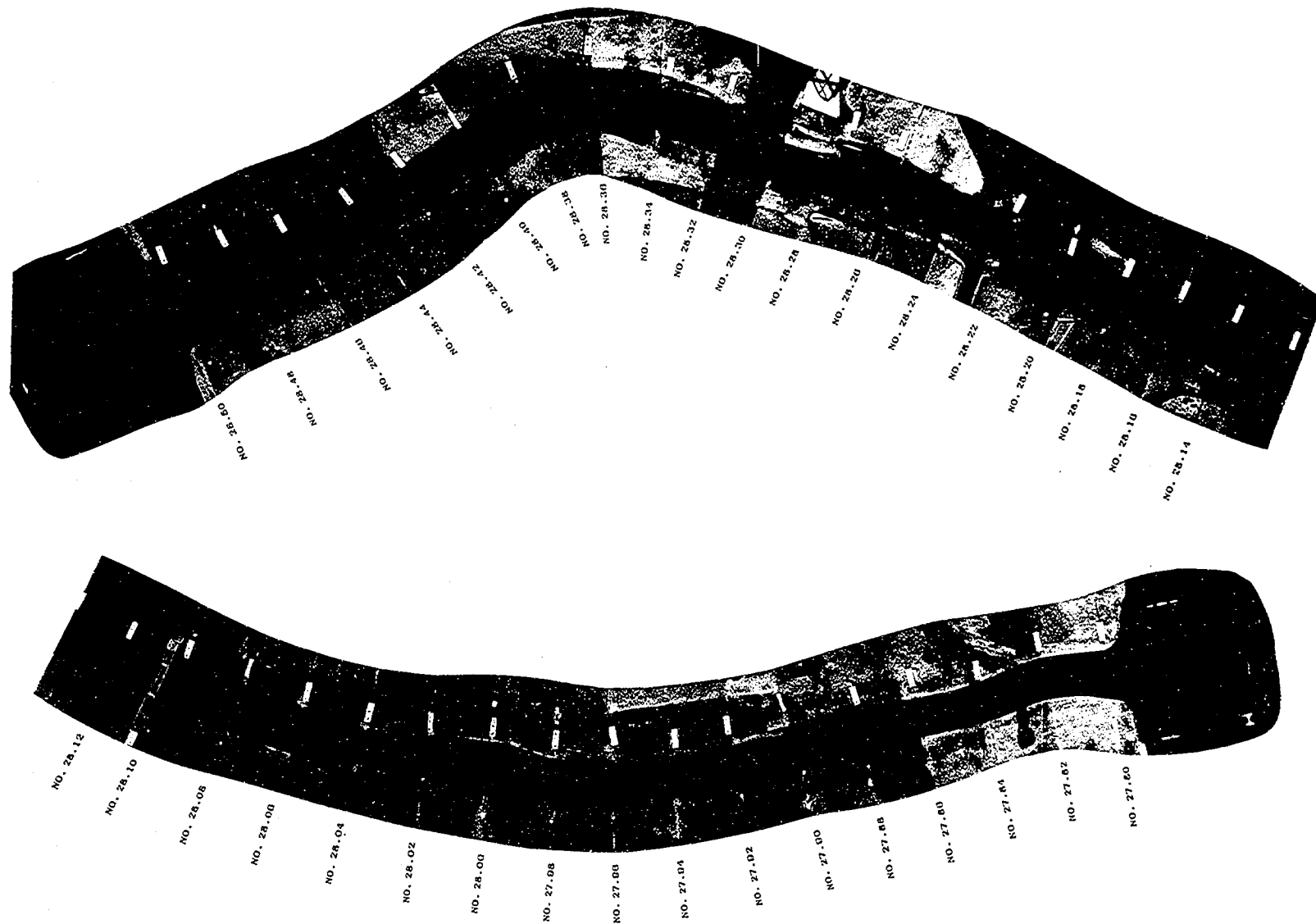
8

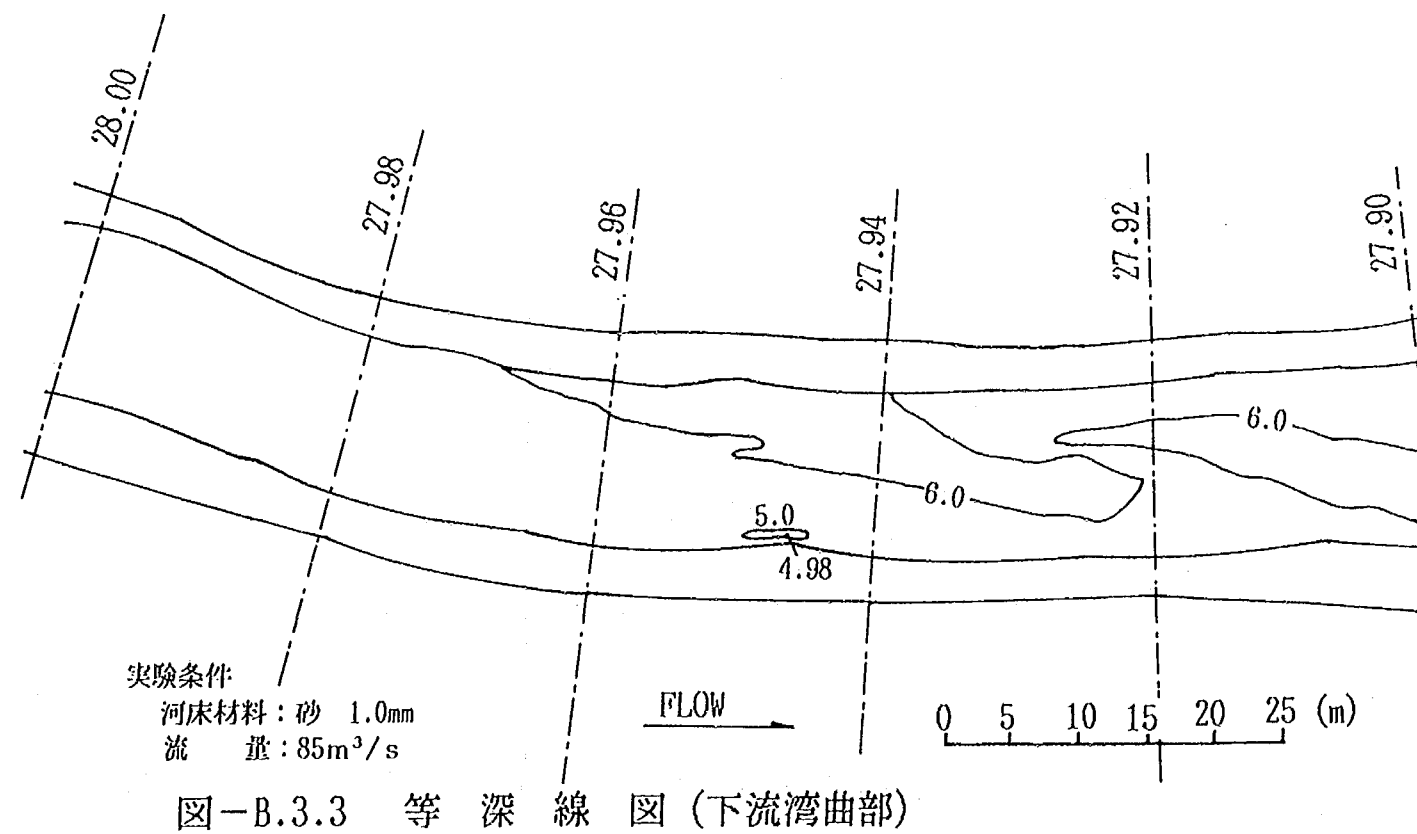
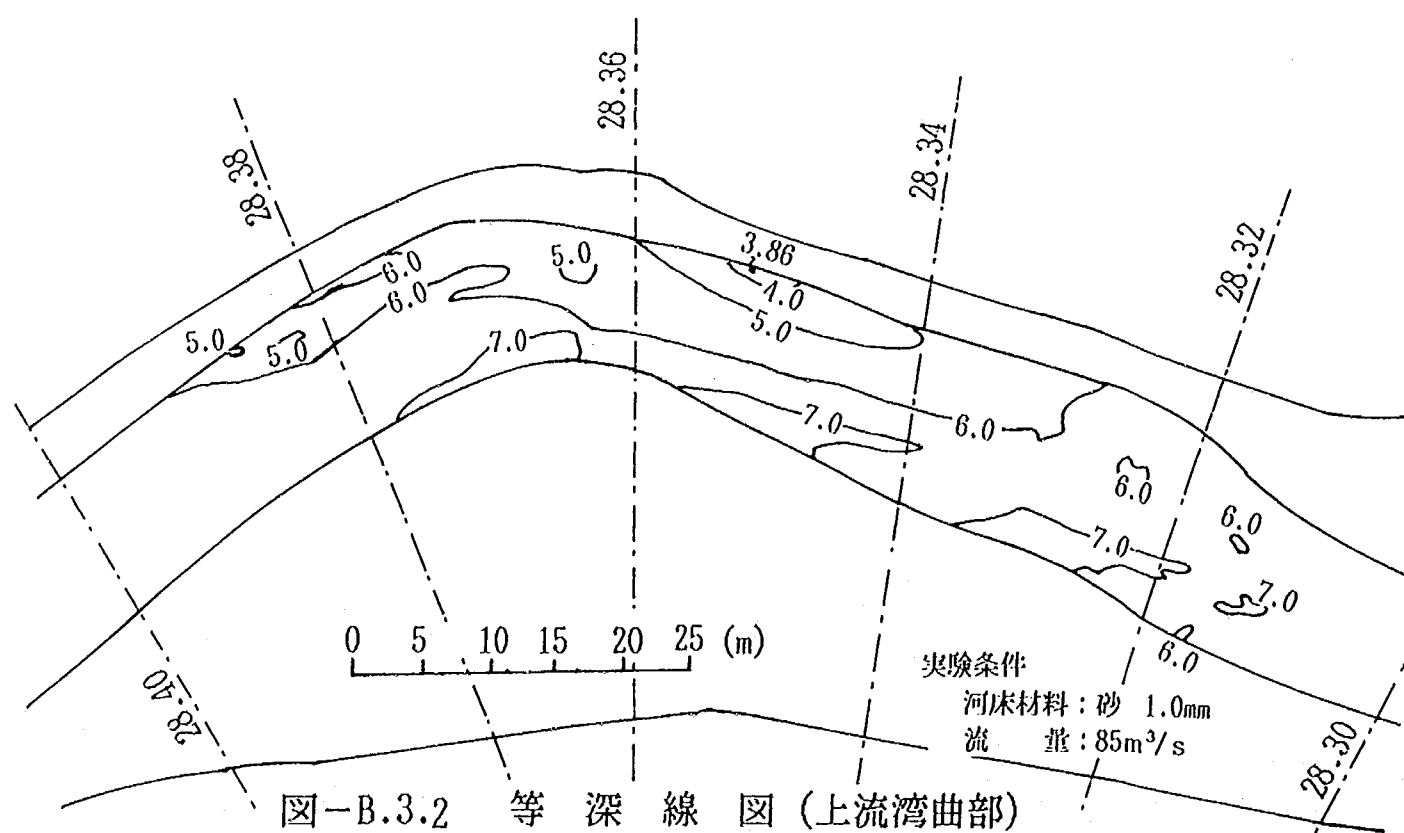
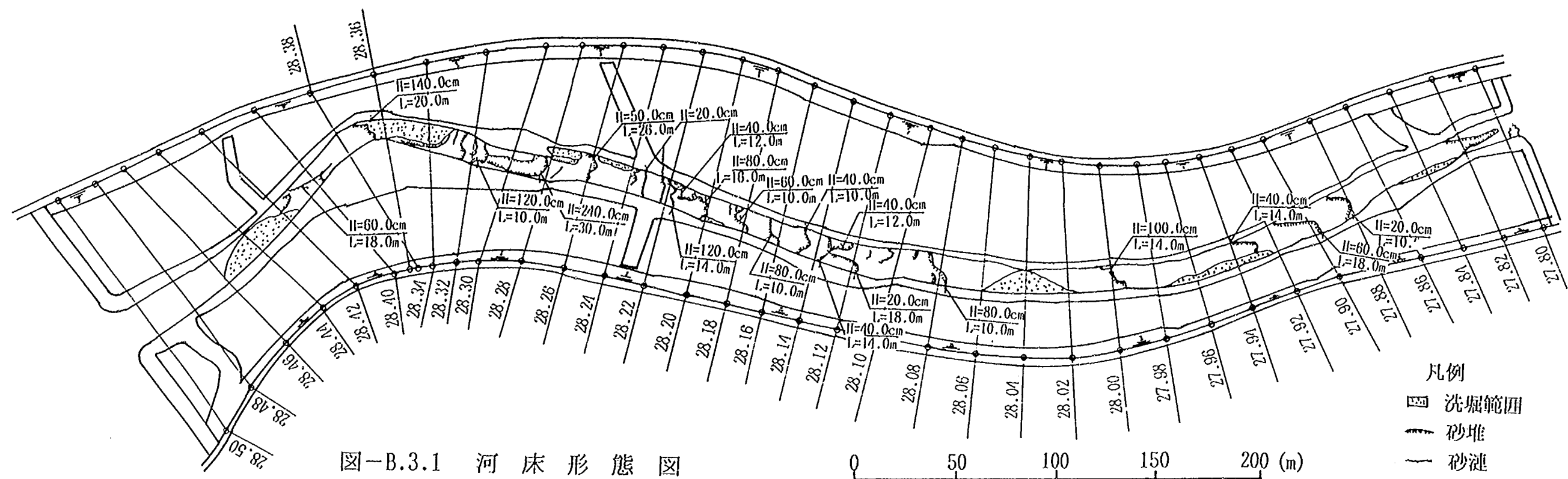


実験ケース……………実験－5

流量 $Q = 85$ 吨

— 131 —





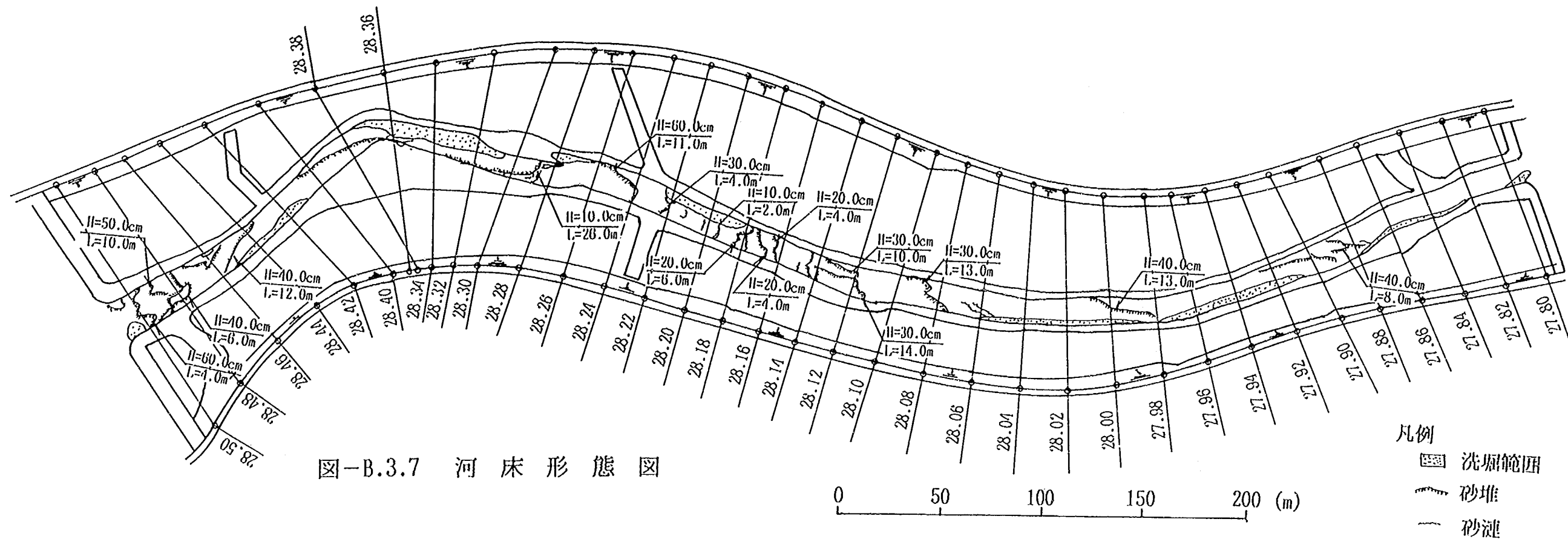


图-B.3.7 河床形態图

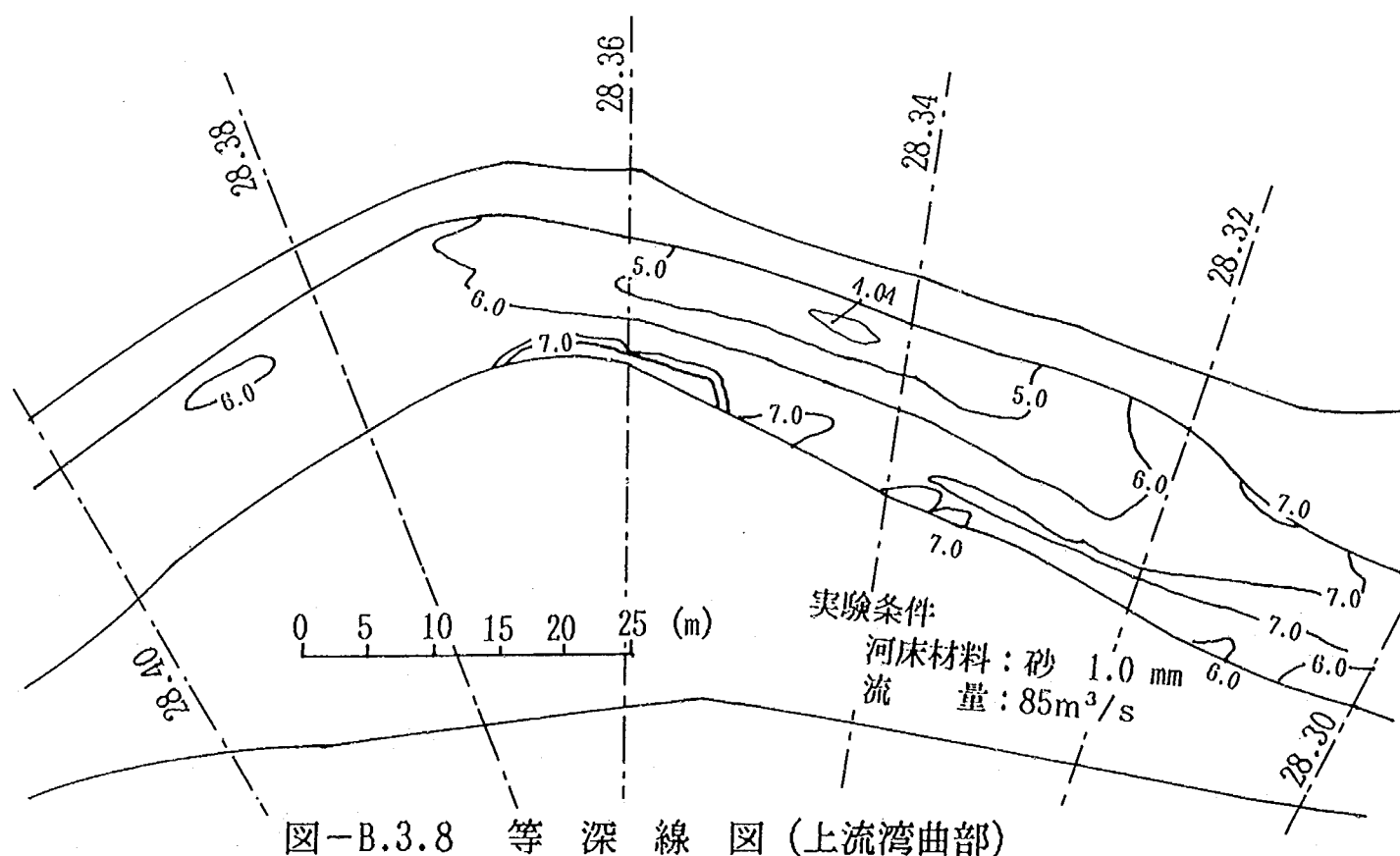


图-B.3.8 等深线图 (上流湾曲部)

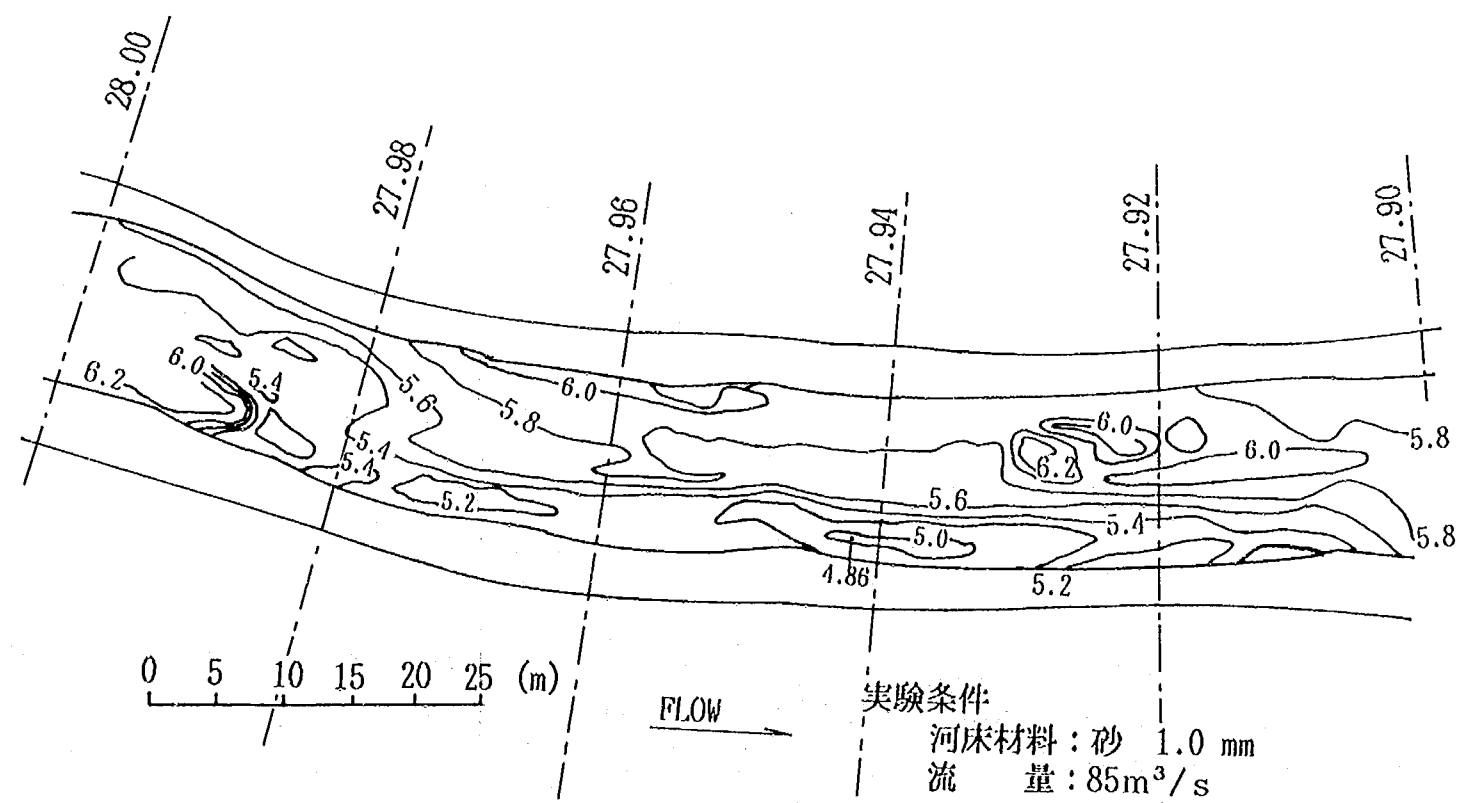


图-B.3.9 等深线图 (下流湾曲部)

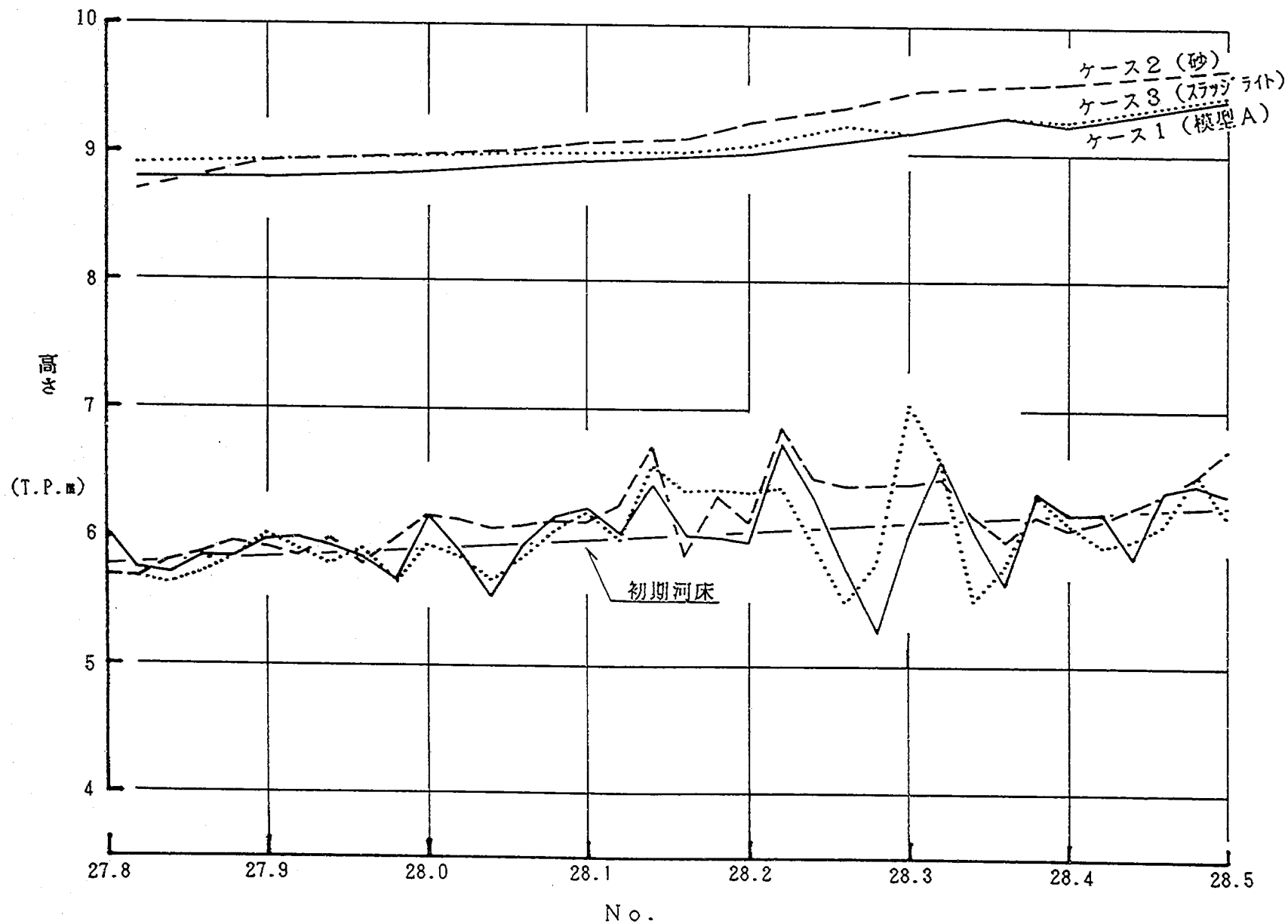
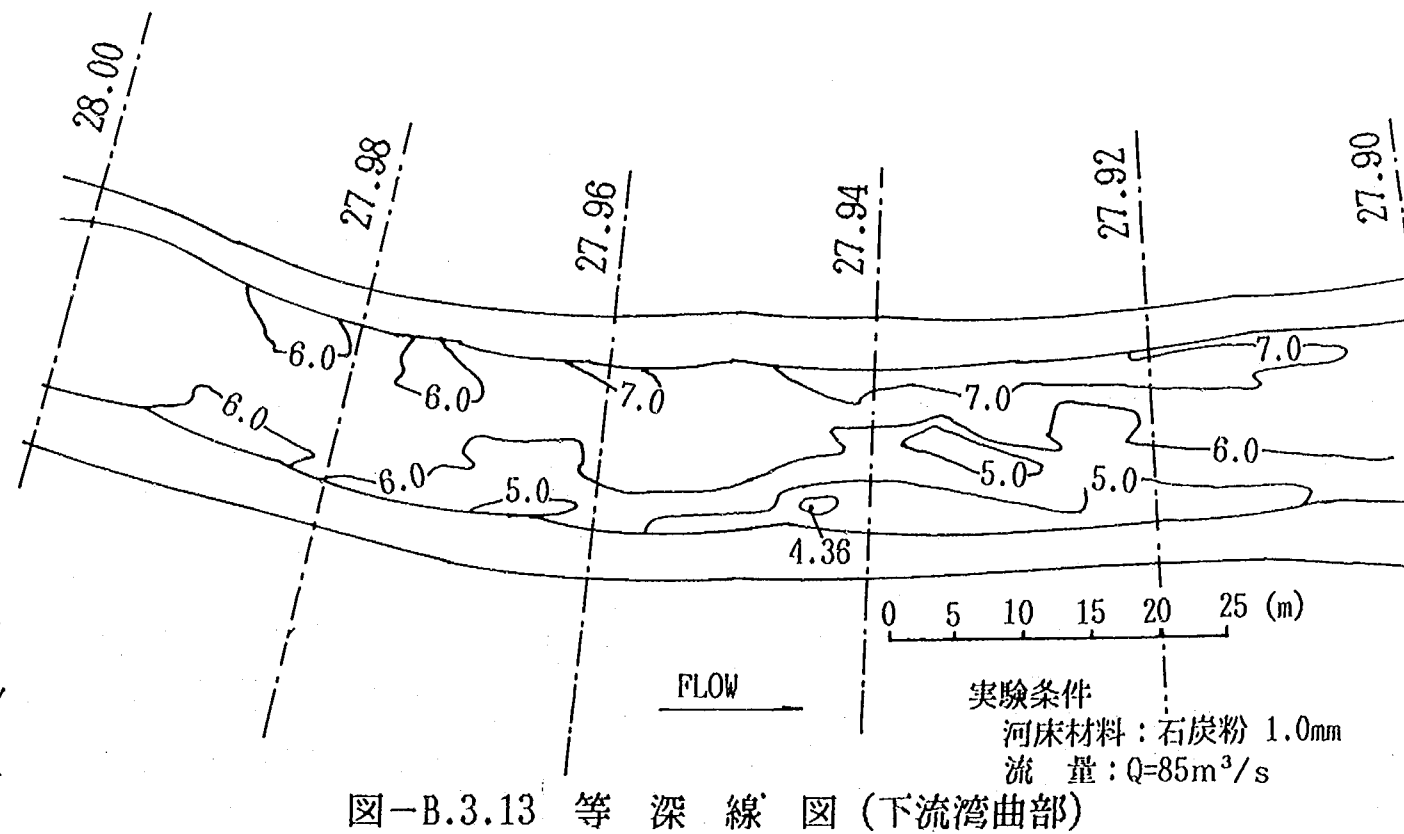
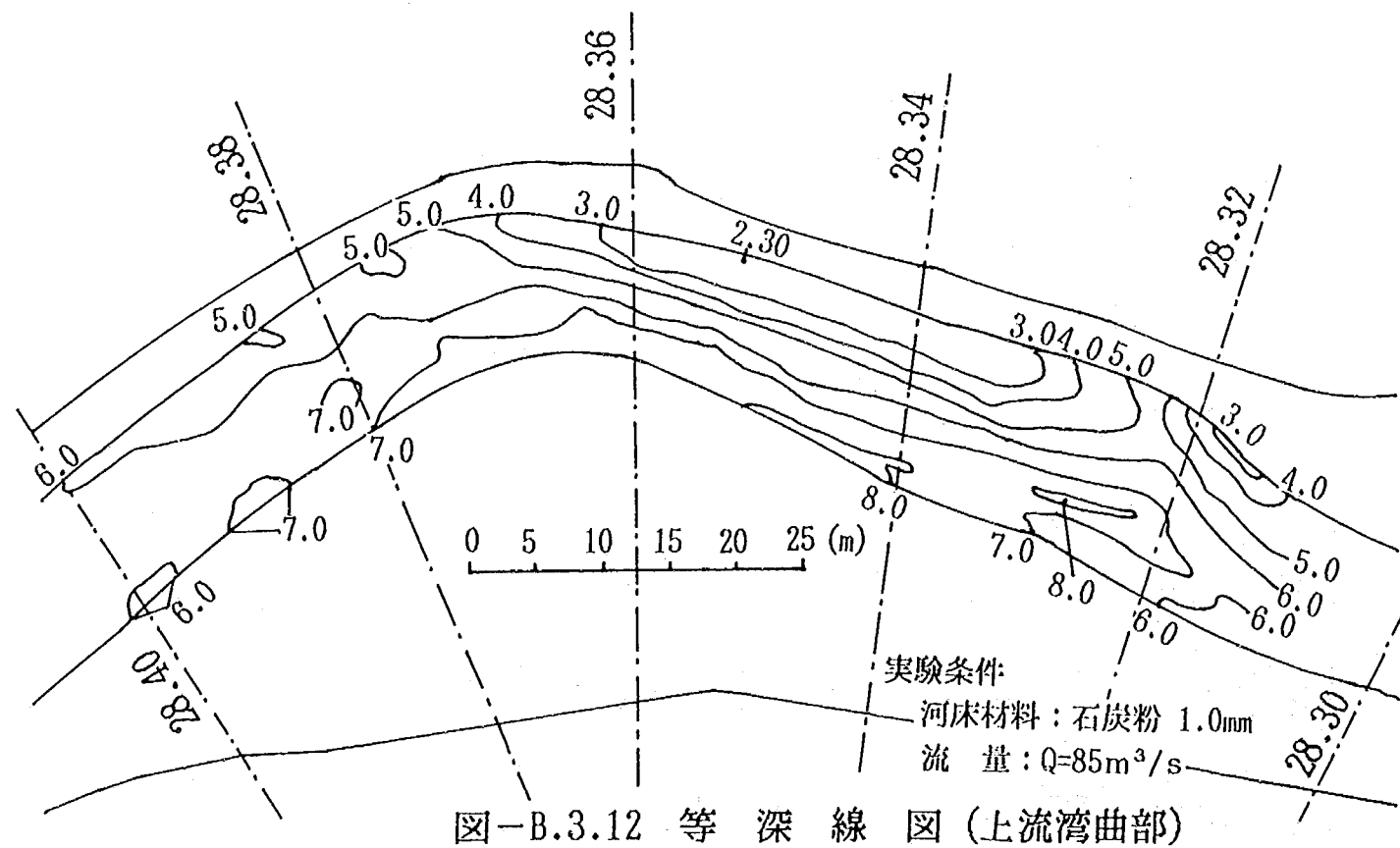
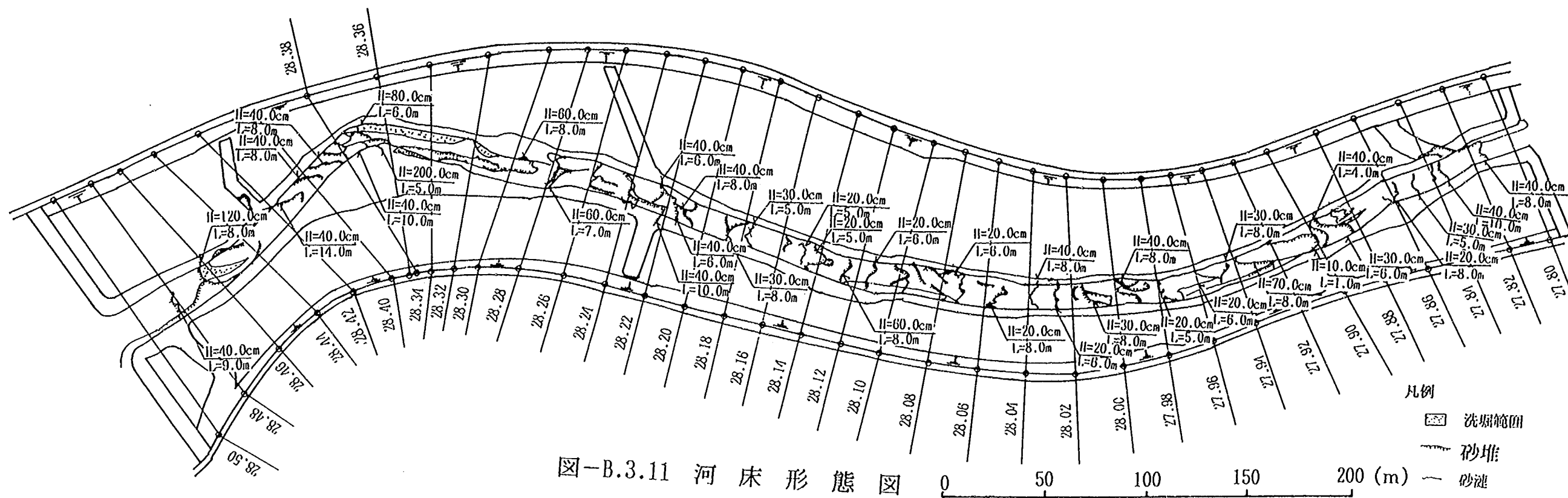


図-B. 3. 10 水位・平均河床高縦断面図



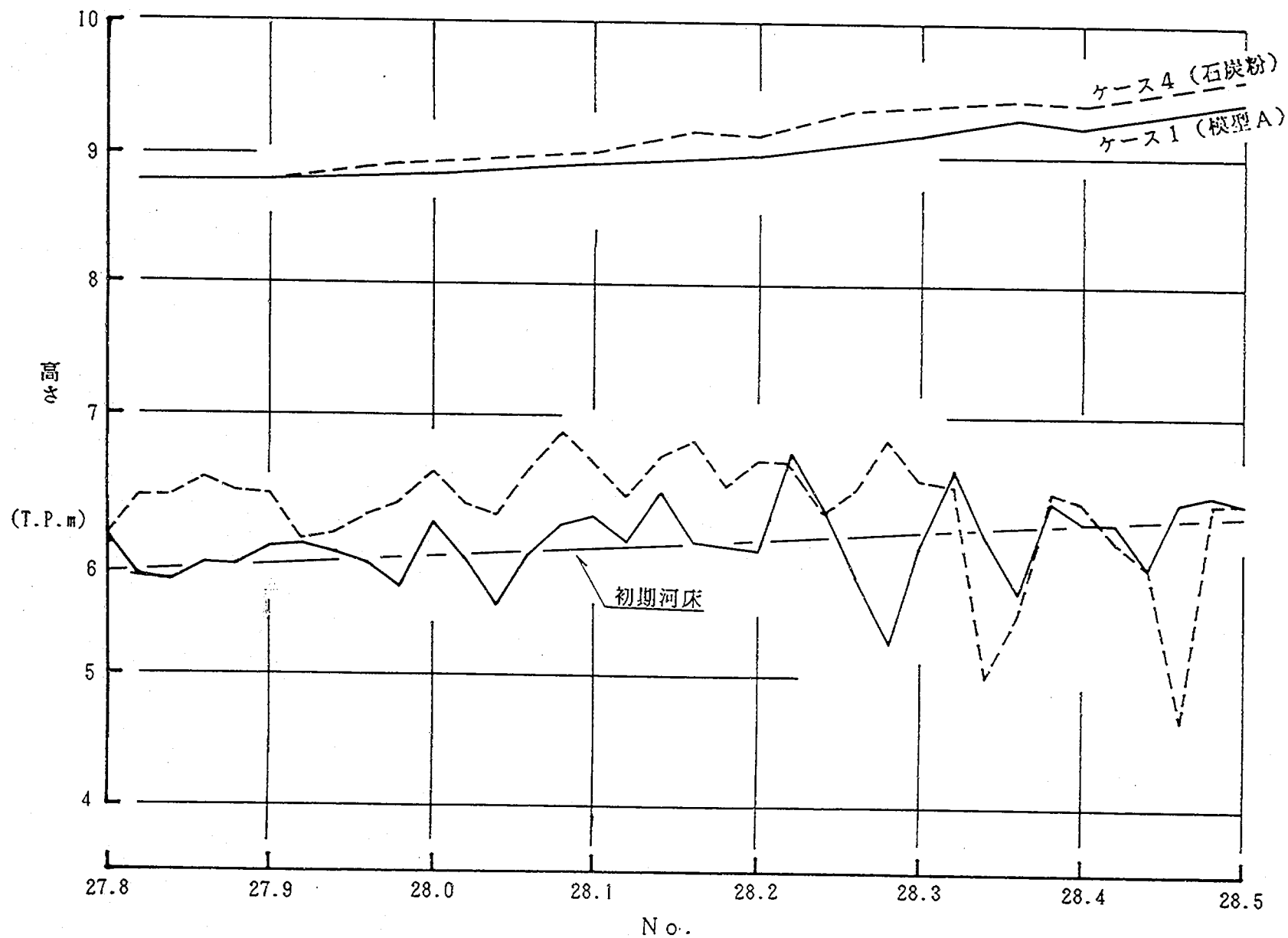


図-B. 3. 14 水位・平均河床高縦断面図

あとがき

本検討で使用した実験資料は、主に故浅野富夫氏が中心になって行った実験によるものです。これらは、土木研究所資料第2641号に報告されています。今回の報告書は、この資料に加え、既存の軽量骨材の移動床に関する資料、および補足の実験資料を加えて、模型実験者が使いやすい形に資料の整理法を変えました。また実験に使用した材料の粒径の再調査を行い訂正を行いました。

本検討を通して、砂漣と砂堆の領域区分の明確化、アッパーレジュームへの移行時の水理量、比重への差異が移動床の水理現象に及ぼす効果がかなり明らかになったと思います。今後も資料の集積が大切でしょう。

平成2年7月16日

付 表

実 験 総 括 表

- 付表－1 石炭粉 A
- 付表－2 石炭粉 B
- 付表－3 石炭粉 C
- 付表－4 スラッジライト A
- 付表－5 スラッジライト B
- 付表－6 P B T
- 付表－7 ポリスチレン

元データ記載文献及び資料

- ① 山本晃一、坂野章：河川移動床模型実験材料としての石炭粉の移動特性と
斐伊川模型実験への応用、土研資料第1815号、1982.3
- ② 共和技術株式会社：河床材料流送特性把握実験報告書、1987.10
- ③ “ ”：新材料の流送特性に関する実験報告書、1987.10

付表－1 石炭粉A 実験総括表

河床材料 石炭粉A 代表粒径 d =0.027cm 水中比重 S =0.5 沈降速度Wo =

実験 ケース	流量 Q (l/s)	水深 H (cm)	水路幅 B (cm)	平均流速 Vm (cm/s)	エネルギー 勾配 Ie	摩擦速度 U _* (cm/s)	単位幅 流砂量 q _* cm ³ /s/cm	水温 T (°C)	流速係数 φ	無次元 掃流力 r _*	水深 粒径比 H/d	無次元 流砂量 qs/u _* d	粒子レイ ノイズ数 Re _*	沈降速 度摩擦 速度比 Wo/U _*	水路幅 水深比 B/H	フルー ド数 Fr	河床波		$\frac{H_s}{H}$	$\frac{L_s}{H}$	$\frac{L_s}{d}$	$\frac{H_s}{L_s}$	河床形態	流送形態	データ 記載文 献番号 及び頁
																	波高 H _s (cm)	波長 L _s (cm)							
C-01	2.0	1.96	60	17.0	0.00324	2.50	0.04		6.80	0.470	23	0.593		0.444	30.5	0.388		12.5		6.38	463		alternate bars with ripples		① P. 10
C-02	5.0	4.14	"	20.1	0.00192	2.79	0.56		7.21	0.588	153	7.42		0.398	14.5	0.316		16		3.86	593		ripples		
C-03	11.2	5.14	"	36.3	0.00133	2.89	0.24		12.6	0.503	189	3.07		0.384	11.7	0.516	1.5	14	0.29	2.72	519	0.107	do.		
C-04	15.2	7.24	"	35.0	0.00094	2.58	0.116		13.6	0.440	267	1.66		0.430	8.3	0.416	1.5	16	0.21	2.21	593	0.0938	do.		
C-05	28.9	11.32	"	42.6	0.00052	2.40	0.503		17.7	0.737	419	4.69		0.463	5.3	0.404							flat		
C-06	50.3	16.08	"	52.1	0.00062	3.13	0.717		16.6	0.632	594	8.49		0.355	3.7	0.415							do.		
C-07	17.0	10.69	"	26.5	0.00062	2.55	0.229		10.40	0.490	395	3.32		0.435	5.6	0.259	2.0	16.7	0.19	1.56	619	0.120	ripples		
C-08	4.4	2.10	"	34.9	0.00407	2.89	0		12.1	0.632	78			0.384	28.6	0.769							flat		
C-09	9.5	3.64	"	43.5	0.00244	2.95	0.478		14.8	0.657	134	6.00		0.376	16.5	0.728							do.		
C-10	18.4	22.1	"	13.9	0.00081	1.32	0.001		10.5	0.132	818	0.034		0.841	2.71	0.094	2	9.5	0.09	0.43	352	0.211	ripples		
C-11	19.1	12.7	"	25.1	0.00065	2.84	0.116		8.8	0.610	469	1.51		0.391	4.73	0.225	2.5	15	0.20	1.18	556	0.167	do.		
C-12	25.9	7.11	"	60.7	0.00023	4.06	0.53		15.0	1.248	263	41.3		0.273	8.44	0.727							flat		
C-13	15.0	6.74	"	37.1	0.00164	3.29	1.01		11.3	0.81	249	11.3		0.337	8.90	0.456	0.5	9	0.07	1.34	333	0.0556	ripples,transition		
C-14	25.2	7.73	"	54.3	0.00141	3.27	1.98		16.6	0.80	286	22.3		0.339	7.76	0.624							transition or flat		
C-15	2.6	1.86	"	23.3	0.00395	2.68	0.129		8.7	0.544	69	0.663		0.414	32.3	0.546							alternate bars		
C-16	6.6	3.08	"	35.7	0.00231	2.64	0.635		13.5	0.527	114	3.37		0.420	19.5	0.650							flat partly ripples		
C-17	9.0	4.47	"	33.6	0.0020	2.96	0.514		11.3	0.661	165	2.16		0.375	13.4	0.508	1.5	17	0.34	3.80	630	0.0882	ripples		
C-18	13.9	12.3	"	18.9	0.00026	1.77	0.005		10.7	0.236	455	0.059		0.627	4.88	0.172	2.5	14	0.20	1.14	519	0.179	do.		
C-19	15.0	6.40	"	39.1	0.00129	2.84	0.830		13.7	0.611	237	3.80		0.391	9.38	0.494							flat		
C-20	17.0	10.7	"	26.5	0.00062	2.55	0.229		10.4	0.490	395	1.30		0.435	5.61	0.259	2.0	17	0.19	1.59	630	0.118	ripples		
C-21	25.2	7.73	"	54.3	0.00141	3.27	1.984		16.6	0.807	286	6.88		0.339	7.76	0.624							flat		
C-22	2.2	2.24	"	16.4	0.00189	2.04			8.02	0.288	824			0.544	26.9	0.350		9.4		4.20	348		ripple or dune?		
C-23	3.4	2.40	"	23.6	0.00196	2.15			11.0	0.359	88			0.516	25.0	0.487		8.0		3.33	296		ripples		
C-24	5.8	3.10	"	31.2	0.000156	2.18			14.3	0.360	114			0.512	19.4	0.566		10		3.23	370		do.		
C-25	53.0	10.49	"	43.1	0.00055	3.32			13.0	0.83	758			0.334	2.9	0.425		9.1		0.87	667		do.		
C-26	31.7	9.88	"	53.5	0.00086	2.89			18.5	0.629	364			0.384	6.1	0.544		12		1.21	444		transition partly flat		
C-27	1.0	2.83	"	5.89	0.00051	1.18			5.00	0.107	104			0.941	21.2	0.112		16.6		5.87	615		dune or ripple?		
C-28	4.3	2.61	"	27.5	0.0020	2.26	0.215		12.1	0.385	96	3.4		0.491	23.0	0.544		18.0		6.90	337		do.		
C-29	7.0	5.80	"	20.1	0.00021	1.09	0.004		18.5	0.090	214	0.138		1.018	10.4	0.267		12.9		2.22	478		ripples		
C-30	41.3	17.3	"	39.8	0.00083	3.75	0.20		10.6	1.064	640	1.96		0.296	3.5	0.306		13.3		0.77	493		do.		
C-31	20.3	8.44	"	40.1	0.00073	2.46	0.174		16.3	0.455	311	2.62		0.451	7.1	0.441		8.0		0.95	296		do.		
C-32	52.4	22.6	"	38.6	0.00043	3.09	0.083		12.5	0.719	836	1.01		0.359	2.7	0.259		9.4		0.42	348		do.		

付表－2 石炭粉B 実 験 総 括 表

河床材料 石炭粉B 代表粒径 d =0.03cm 水中比重 S =0.58 沈降速度Wo=1.25cm/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 一 勾 配 I e	摩擦速度 U。 (cm/s)	単 位 幅 流 砂 量 q。 cm ³ /s/cm	水 温 T (℃)	流速係数 ϕ	無 次 元 掃 流 力 r s	水 深 粒 径 比 H / d	無 次 元 流 砂 量 qs / u d	粒子レイ ノイズ数 Re, ×10 ⁴	沈 降 速 度 摩 擦 速 度 比 Wo / 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	流 送 形 態	デ ー タ 記 載 文 献 番 号 及 び 頁
																	波 高 H s (cm)	波 長 L s (cm)							
C－33	2.26	3.3	60	11.4	0.00183	2.43	0.0255	20	4.70	0.347	99	0.35	7.22	0.514	18.8	0.195	3.5	20	1.06	6.06	667	0.175	ripples		① P. 10
C－34	2.26	2.9	"	13.0	0.00246	2.64	0.0573	"	4.92	0.410	87	0.731	7.84	0.473	23.0	0.244	4.5	30	1.55	10.34	1000	0.15	do.		
C－35	2.26	1.6	"	23.5	0.00417	2.56	0.411	"	9.70	0.383	48	5.532	7.60	0.488	34.5	0.593	0	0	0	0	0		alternate bars with flat		
C－36	2.26	1.3	"	29.0	0.00425	2.32	0.796	"	12.49	0.318	39	11.44	6.89	0.539	44.4	0.812	0	0	0	0	0		do.		
C－37	5.66	3.8	"	25.2	0.00157	2.40	0.196	"	10.48	0.339	114	2.72	7.13	0.523	15.8	0.413	0.5	11	0.13	2.89	367	0.0454	transition		
C－38	8.49	5.1	"	28.0	0.00113	2.36	0.231	"	11.87	0.328	153	3.28	7.01	0.530	13.4	0.400	1.0	10	0.20	1.96	333	0.1	do.		
C－38	8.49	3.5	"	40.1	0.00188	2.55	0.334	"	15.72	0.381	105	4.37	7.57	0.490	17.0	0.685	0	0	0	0	0		do.		
C－40	8.49		"					"							23.3		0	0	0	0	0		antidune		
C－41	11.31	5.4	"	34.9	0.00141	2.73	0.450	"	12.79	0.437	162	5.49	8.11	0.458	11.3	0.480	0	0	0	0	0		flat		
C－42	14.14	5.3	"	41.0	0.00142	2.83	0.802	"	14.48	0.469	174	9.45	8.41	0.442	10.3	0.544	0	0	0	0	0		do.		
C－43	16.97	5.6	"	50.5	0.00167	3.02	1.13	"	16.73	0.537	168	12.5	8.97	0.414	10.9	0.682	0	0	0	0	0		do.		
C－44	16.97	5.6	"	50.9	0.00157	2.93	1.32	"	17.39	0.502	168	14.9	8.70	0.427	10.8	0.687	0	0	0	0	0		do.		
C－45	16.97		"					"							10.9		0	0	0	0	0		antidune		
C－46	22.63	7.2	"	52.4	0.0015	3.25	1.35	"	16.12	0.621	216	13.7	9.65	0.385	8.5	0.624	0	0	0	0	0		do.		
C－47	23.55	7.5	"	52.3	0.00116	2.92	1.57	"	17.92	0.499	225	17.9	8.67	0.428	8.0	0.610	0	0	0	0	0		do.		
C－48	5.66	3.5	"	26.8	0.00185	2.53	0.295	"	10.61	0.375	105	3.89	7.51	0.494	17.1	0.458	1.0	15	0.29	4.29	500	0.0667	ripples		
C－49	5.66	2.5	"	38.4	0.00400	3.11	1.366	"	12.35	0.565	75	14.6	9.24	0.402	24.3	0.776	0	0	0	0	0		flat or antidune		
C－50	0.76	0.95	"	13.3	0.00137	1.13			11.80	0.075	32			1.106	63.0	0.436							small ripples partly flat		
C－51	2.86	3.2	"	14.8	0.00132	2.03			7.34	0.242	107			0.616	18.8	0.264		15～16		4.69～5.0	500～533		ripples		
C－52	6.20	5.15	"	20.0	0.00125	2.51			7.99	0.369	172			0.498	11.7	0.281		15～16		2.91～3.11	"		do.		
C－53	3.10	4.7	"	28.7	0.00145	2.58			11.13	0.390	157			0.484	12.8	0.423		15～16		31.9～3.40	"		do.		
C－54	33.0	22.5	"	24.1				20			750				2.67	0.162	2	15.4	0.09	0.68	513	0.130	do.		
C－55	43.05	22.0	"	32.6				"			733				2.73	0.222	1.8	15.4	0.08	0.70	513	0.117	do.		
C－56	52.55	24.0	"	36.5				"			800				2.50	0.238	1.5	16.7	0.06	0.70	557	0.0898	do.		
C－57	60.22	22.8	"	44.0				"			760				2.63	0.294	0	0	0	0	0		do.		

河床材料 石炭粉B' 代表粒径 d m =0.032cm 水中比重 S =0.5 沈降速度Wo= cm/s

C－58	6.4	5.35	60	19.94	0.00084	2.09	0.0280	21	9.54	0.242	162	0.419	6.62		11.2	0.275	1.5	20	0.28	3.74	625	0.075	ripples	通水時間90分	
C－59	12.8	8.08	"	26.42	0.00077	2.46	0.0610	22	10.73	0.333	252	0.774	7.79		7.4	0.297	3～4	20	0.37～0.50	2.48	625	0.15～0.20	do.	" 45分	
C－60	19.3	10.8	"	29.81	0.00070	2.72	0.0690	22	10.96	0.409	338	0.792	8.62		5.6	0.290	2.0	28	0.19	2.59	875	0.071	do.	" 25分	

付表－3 石炭粉C 実 験 総 括 表

河床材料 石炭粉C 代表粒径 d =0.1cm 水中比重 S =0.48 沈降速度Wo=4.16cm/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 cm ³ /s/cm	水 温 T (℃)	流速係数 ϕ	無 次 元 掃 流 力 r _*	水 深 粒 径 比 H / d	無 次 元 流 砂 量 qs/u _* d	粒子レイ ノイズ数 Re _*	沈 降 速 度 摩 擦 速 度 比 Wo / U _*	水 路 幅 水 深 比 B / H	フルー ド 数 Fr	河 床 波		$\frac{Hs}{H}$	$\frac{Ls}{H}$	$\frac{Ls}{d}$	$\frac{Hs}{Ls}$	河 床 形 態	流 送 形 態	デー タ 記 載 文 献 番 号 及 び 頁
																	波 高 H s (cm)	波 長 L s (cm)							
C－61	2.62	2.22	60	19.67	1 / 1050	1.439			13.66	0.044	22.2			2.891	27.03	0.422							フラット(静止状態)	若干の掃流	② P. 25
C－62	5.63	3.93	"	23.88	1 / 990	1.972			12.11	0.083	39.3			2.10	15.27	0.385							砂堆	掃流	
C－63	7.90	5.04	"	26.12	1 / 960	2.268			11.52	0.109	50.4			1.834	11.90	0.372							"	跳躍、前縁で浮遊	
C－64	10.70	6.44	"	27.69	1 / 960	2.564			10.80	0.140	64.4			1.622	9.32	0.349							"	"	
C－65	13.17	7.36	"	29.82	1 / 930	2.785			10.71	0.165	73.6			1.494	8.15	0.351							"	跳躍、同上大	
C－66	15.01	7.94	"	31.51	1 / 970	2.832			11.12	0.171	79.4			1.46	7.56	0.357							"	"	
C－67	23.00	10.32	"	37.15	1 / 970	3.229			11.50	0.222	103.2			1.288	5.81	0.369							"	浮遊	
C－68	2.59	2.23	"	19.36	1 / 1091	1.415	0.018		13.68	0.043	22.3	0.127		2.94	26.9	0.414									② P. 28
C－69	7.84	5.45	"	23.98	1 / 1129	2.175	0.063		11.02	0.101	54.5	0.290		1.913	11.0	0.328									
C－70	14.83	10.53	"	23.47	1 / 1079	3.093	0.347		7.59	0.203	105.3	1.123		1.345	5.7	0.231									
C－71	22.95	7.87	"	48.60	1 / 1082	2.670	0.223		18.21	0.152	78.7	0.835		1.558	7.6	0.553									
C－72	1.53	1.58	"	16.14	1 / 566	1.654	0.015		9.75	0.058	15.8	0.091		2.515	38.0	0.410							フラット	全幅で若干の掃流	② P. 32
C－73	4.50	3.05	"	24.59	1 / 633	2.173	0.035		11.32	0.101	30.5	0.161		1.914	19.7	0.450							単列砂礫堆、砂堆	掃流(転動)	
C－74	8.76	4.36	"	33.49	1 / 578	2.719	0.185		12.32	0.157	43.6	0.680		1.53	13.8	0.512							"	転動、前縁で跳躍	
C－75	13.65	6.17	"	36.87	1 / 585	3.215	0.194		11.47	0.220	61.7	0.603		1.295	9.7	0.474							砂堆	跳躍、浮遊(大)	
C－76	4.42	2.26	100	19.56	1 / 1141	1.393	0.019		14.06	0.041	22.6	0.186		2.986	44.3	0.416							フラット	若干の掃流	② P. 34
C－77	13.83	4.67	"	29.62	1 / 898	2.258	0.053		13.12	0.108	46.7	0.235		1.842	21.4	0.438							砂堆		
C－78	26.04	7.86	"	33.13	1 / 1051	2.707	0.153		12.24	0.156	78.6	0.565		1.53	12.7	0.377							"	転動、跳躍、浮遊(大)	
C－79	41.30	10.34	"	39.94	1 / 907	3.42	0.449		11.95	0.238	103.4	1.344		0.803	9.7	0.397							"	"	
C－80	3.30	2.74	60	20.07	1 / 817	1.813	0.004		11.07	0.070	27.4	0.022		2.295	21.90	0.387		フラット					"	転動(全幅)	③ P. 17
C－81	4.53	3.45	"	21.88	1 / 839	2.007	0.026		10.90	0.086	34.5	0.130		2.073	17.39	0.376	0.7	29.1	0.20	8.43	291	0.0241	"	"	
C－82	6.67	4.56	"	24.38	1 / 921	2.203	0.039		11.07	0.103	45.6	0.177		1.888	13.16	0.365	1.3	66.1	0.29	14.50	661	0.0197	"	"	
C－83	8.91	5.51	"	26.95	1 / 776	2.638	0.101		10.22	0.148	55.1	0.158		1.577	10.89	0.367	1.7	55.6	0.31	10.09	556	0.0306	"	転動、砂堆前縁で若干の跳躍	
C－84	13.08	6.83	"	31.92	1 / 759	2.970	0.244		10.75	0.187	68.3	0.822		1.401	8.78	0.390	2.4	72.5	0.35	10.61	725	0.0331	"	"	
C－85	16.73	8.22	"	33.92	1 / 787	3.199	0.265		10.60	0.218	82.2	0.828		1.30	7.30	0.378	4.0	89.7	0.49	10.91	897	0.0446	"	転動、砂堆前縁で跳躍、浮遊	
C－86	22.05	9.87	"	37.23	1 / 753	3.584	0.618		10.39	0.273	98.7	1.724		1.161	6.08	0.379	5.3	97.9	0.54	9.92	979	0.0541	"	砂堆前縁で跳躍浮遊大	
C－87	26.54	11.09	"	39.89	1 / 621	4.183	0.861		9.54	0.372	110.9	2.058		0.995	5.41	0.383	4.7	139.5	0.42	12.58	1395	0.0337	"	"	
C－88	25.00	11.25	"	37.04	1 / 766	3.794	0.361		9.76	0.306	112.5	0.952		1.096	5.33	0.353	2.8	95.1	0.25	8.45	951	0.0294	"	"	
C－89	7.22	5.94	"	20.26	1 / 1526	1.915	0.014		10.58	0.078	59.4	0.073		2.17	10.10	0.266	0.9	29.9	0.15	5.03	299	0.030	"	転動(全幅)	
C－90	8.43	5.71	"	24.61	1 / 1049	2.310	0.046		10.65	0.113	57.1	0.199		1.80	10.50	0.380	1.2	42.7	0.21	7.48	427	0.0281	"	"	
C－91	9.60	5.73	"	27.92	1 / 851	2.569	0.077		10.87	0.140	57.3	0.300		1.61	10.47	0.373	1.5	44.1	0.26	7.70	441	0.034	"	転動、若干の跳躍	

〔メモ〕エネルギー勾配 I e について：

エネルギー勾配は水面勾配を用いた。水位測定はポイントゲージを用い、C－61～C－89については水路中央付近 9 m 区間の上流側、下流側の 2 点（水路幅の中央）で行い、C－89～C－91については水路中央付近の 9 m 区間で 1 m 間隔 10 点測定し、最小二乗法により算出した値である。

C－61～C－71は無給砂、C－72～C－91は予備実験のqsと U_{*} の関係より給砂。C－61～C－79は 11 月～1 月に実験、C－80～C－91は 9 月～10 月に実験。

表-3・1 無次元掃流力計算書

$s=0.31, d=0.001m$

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 _* cm ³ /s/cm	水温 T (°C)	流速係数 ϕ	無次元 掃流力 r _*	水深 粒径比 H/d	無次元 流砂量 qs/u _* d	粒子レイ ノイズ数 Re _*	沈降速 度摩擦 速度比 Wo/U _*	水路幅 水深比 B/H	フルー ド数 Fr	河床波		$\frac{Hs}{H}$	$\frac{Ls}{H}$	$\frac{Ls}{d}$	$\frac{Hs}{Ls}$	河床形態
																	波高 H _s (cm)	波長 L _s (cm)					
P-36 (1)	7.5	2.8	60	44.64	0.00387	3.259		4.0	13.70	0.349	28		20.76		21.43	0.952							単列砂礫堆 (L≒4m) 砂礫堆の表面はフラット河床 洗掘部に砂堆発生 (L≒35cm、H≒4cm)
P-37 (2)	18.0	5.5	"	54.55	0.00289	3.947		4.0	13.82	0.553	55		25.14		10.91	0.743							単列砂礫堆 (L≒3m) 砂礫堆の表面はフラット河床 深い部分もフラット
P-38 (3)	3.4	2.8	"	20.24	0.00203	2.360		5.0	8.58	0.183	28		15.52		21.43	0.386	2.75	40	0.98	14.29	400	0.07	全面に砂堆発生 (砂レンに近い形) (L≒30~50cm、H≒2~3.5cm)
P-39 (4)	7.5	4.4	"	28.41	0.00194	2.892		4.0	9.82	0.276	44		18.42		13.64	0.433	4	40	0.91	9.09	400	0.10	単列砂礫発生 (L≒2.5m) 砂礫堆の表面に砂堆発生 (L≒30~50cm、H≒3~5cm)
P-40 (5)	12.0	5.2	"	38.46	0.00186	3.079		4.0	12.49	0.612	52		17.61		11.54	0.539	4	45	0.77	8.65	450	0.09	単列砂礫堆発生 (L≒2m) 砂礫堆の表面に砂堆発生 (L≒40~50cm、H≒3~5cm)
P-41 (6)	27.5	9.0	"	50.93	0.00213	4.334		4.5	11.75	0.618	90		27.96		6.67	0.542							フラット河床 止水時にうすい砂堆発生
P-42 (7)	72.0	15.8	"	75.95	0.00159	4.962		4.5	15.31	0.810	158		32.01		3.80	0.610							フラット河床 止水時にうすい砂堆発生
P-43 (8)	15.5	8.7	"	29.69	0.00099	2.905		4.0	10.22	0.272	87		19.50		6.90	0.322	4	50	0.46	5.75	500	0.08	全面に砂堆発生 (L≒50cm、H≒3~5cm)
P-44 (9)	31.0	12.0	"	43.06	0.00100	3.429		4.0	12.56	0.387	120		21.84		5.00	0.397	4	50	0.33	4.17	500	0.08	全面に砂堆発生 (L≒50cm、H≒3~6cm)
P-45 (10)	51.0	15.7	"	54.14	0.00100	3.922		4.5	13.80	0.506	157		25.30		3.82	0.436	6	125	0.38	7.96	1250	0.05	大きな砂堆発生 (L≒1~1.5m、H≒4~7cm)
P-46 (11)	98.0	22.8	"	71.64	0.00108	4.912		4.5	14.58	0.795	228		31.69		2.63	0.479							フラット河床 止める直前に砂堆発生
P-47 (12)	12.5	9.6	"	21.70	0.00033	1.762		4.5	12.32	0.103	96		11.37		6.25	0.224	3	25	0.31	2.60	250	0.12	全面に砂堆発生 (L≒20~30cm、H≒2~4cm)
P-48 (13)	24.0	13.6	"	29.41	0.00050	2.581		4.5	11.39	0.220	136		16.65		4.41	0.255	6	50	0.44	3.68	500	0.12	全面に砂堆発生 (L≒50cm、H≒4~7cm)
P-49 (14)	32.0	16.7	"	31.94	0.00063	3.211		4.0	9.95	0.340	167		20.45		3.59	0.250	6.5	50	0.39	2.99	500	0.13	全面に砂堆発生 (L≒50cm、H≒5~8cm)
P-50 (15)	63.3	24.7	"	42.71	0.00059	3.779		5.0	11.30	0.470	247		24.86		2.43	0.275	6.5	85	0.26	3.44	850	0.08	大きな砂堆発生 (L≒70cm~1m、H≒5~8cm)
P-51 (16)	105.0	32.7	"	53.52	0.00073	4.837		5.5	11.06	0.770	327		31.82		1.83	0.299							フラット河床 止める時に砂堆発生
P-52 (17)	40.0	29.2	"	22.83	0.00008	1.513		5.5	15.09	0.075	291		9.95		2.05	0.135	4.5	20	0.15	0.68	200	0.23	全面にリップル発生 (L≒20cm、H≒3~6cm)

付表－4 スラッジライトA 実験総括表

河床材料 スラッジライトA 代表粒径 d =0.105cm 水中比重 S =0.8 沈降速度 Wo =10.2cm/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 cm ³ /s/cm	水温 T (℃)	流速係数 φ	無次元 掃流力 r _*	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 Wo/U _*	水路幅 水深比 B/H	フルー ド数 Fr	河床波		$\frac{H_s}{H}$	$\frac{L_s}{H}$	$\frac{L_s}{d}$	$\frac{H_s}{L_s}$	河床形態	流送形態	データ 記載文 献番号 及び頁
																	波高 H _s (cm)	波長 L _s (cm)							
Sℓ－01	0.94	1.06	60	14.78	1/450	1.519			9.73	0.028	10			6.715	56.60	0.445							フラット	移動なし	② P. 26
Sℓ－02	1.80	1.61	〃	18.63	1/450	1.872			9.95	0.043	15			5.449	37.27	0.469							フラット(静止状態)	若干の掃流	
Sℓ－03	2.85	1.96	〃	24.24	1/440	2.089			11.60	0.053	19			4.883	30.61	0.553							砂堆	掃流(転動)	
Sℓ－04	5.60	3.12	〃	29.92	1/430	2.667			11.22	0.086	30			3.825	19.23	0.541							波長の短い単列、砂堆	掃流	
Sℓ－05	10.62	4.71	〃	37.58	1/450	3.203			11.73	0.125	45			3.185	12.74	0.553							単列、砂堆	転動、前縁で跳躍	
Sℓ－06	12.51	5.06	〃	41.21	1/420	3.436			11.99	0.143	48			2.969	11.86	0.585							砂堆	〃	
Sℓ－07	16.60	6.06	〃	45.66	1/440	3.674			12.43	0.164	58			2.776	9.90	0.593							〃	〃	
Sℓ－08	21.26	7.12	〃	49.77	1/450	3.938			12.64	0.188	68			2.590	8.43	0.596							〃	前縁で若干の浮遊	
Sℓ－09	1.75	1.74	〃	16.76	1/455	1.936	0.022		8.66	0.046	17	0.108		5.269	34.4	0.406							フラット	全幅で若干の掃流(転動)	② P. 28
Sℓ－10	5.69	3.13	〃	30.30	1/450	2.611	0.041		11.62	0.083	30	0.107		3.907	19.2	0.547							砂堆及び単列	全幅で掃流、転動	
Sℓ－11	10.59	4.97	〃	35.51	1/437	3.338	0.147		10.64	0.135	47	0.419		3.056	12.7	0.509							〃	転動、前縁で跳躍	
Sℓ－12	16.60	6.48	〃	42.70	1/406	3.955	0.337		10.80	0.190	62	0.812		2.579	9.3	0.536							砂堆	〃	
Sℓ－13	1.88	1.45	〃	21.61	1/449	1.779	0.020		12.15	0.038	14	0.107		5.734	41.4	0.573							フラット	全幅で若干の掃流(転動)	② P. 31
Sℓ－14	5.60	3.14	〃	29.72	1/476	2.543	0.050		11.69	0.079	30	0.187		4.011	19.1	0.536							砂堆、単列(波長短)	全幅で掃流、転動	
Sℓ－15	10.60	4.55	〃	38.83	1/417	3.270	0.202		11.98	0.130	43	0.588		3.119	13.2	0.581							〃	転動、前縁で跳躍	
Sℓ－16	16.60	6.41	〃	43.16	1/436	3.796	0.293		11.37	0.175	61	0.735		2.687	9.4	0.545							砂堆	〃	

〔メモ〕エネルギー勾配について：
エネルギー勾配は水面勾配を用いた。水位測定はポイントゲージを用い、Sℓ－01～Sℓ－12については水路中央付近9 m区間の上流側、下流側の2点（水路幅の中央）で行い、Sℓ－13～Sℓ16については水路中央付近の9 m区間で1 m間隔（水路幅中央）10点測定し、最小二乗法により算出した値である。
Sℓ－01～Sℓ－13は無給砂、Sℓ－14～Sℓ－16は予備実験のq_sとU_{*}の関係を用いて給砂。実験は11月～1月に行っている。

付表－5 スラッジライト B 実 験 総 括 表

河床材料 スラッジライト B 代表粒径 d =0.12cm 水中比重 S =0.8 沈降速度Wo=12.0cm/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 _* cm ³ /s/cm	水 温 T (℃)	流速係数 φ	無 次 元 掃 流 力 τ _*	水 深 粒 径 比 H/d	無 次 元 流 砂 量 qs/u _* d	粒子レイ ノイズ数 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 床		H s H	L s H	L s d	H s L s	河 床 形 態	流 送 形 態	デ ー タ 記 載 文 献 番 号 及 び 頁	
																	波 高 H s (cm)	波 長 L s (cm)								
S ℓ -17	3.85	2.57	60	24.97	1/487	2.274	0.010		10.98	0.055	21	0.037		5.277	23.35	0.498		フラット					フラット	若干の掃流		③P. 16 P. 20 P. 346
S ℓ -18	5.33	3.34	"	26.60	1/497	2.566	0.013		10.37	0.070	28	0.042		4.677	17.96	0.465	1.0	76.7	0.299	22.96	767	0.0130	砂堆	転動（全幅）		
S ℓ -19	8.16	4.40	"	30.91	1/512	2.902	0.082		10.65	0.090	37	0.235		4.135	13.64	0.470	1.1	58.2	0.250	13.21	582	0.0189	"	"		
S ℓ -20	10.58	5.04	"	34.99	1/522	3.076	0.117		11.37	0.101	47	0.317		3.901	11.90	0.498	1.7	56.5	0.337	11.21	562	0.0301	"	"		
S ℓ -21	12.66	5.92	"	35.64	1/493	3.430	0.120		10.39	0.125	49	0.292		3.499	10.14	0.468	2.1	62.5	0.354	10.56	625	0.0336	"	"		
S ℓ -22	13.84	6.57	"	35.11	1/505	3.571	0.129		9.83	0.136	55	0.301		3.360	9.13	0.438	2.0	55.4	0.304	8.43	554	0.0361	"	転動、砂堆前縁の跳躍		
S ℓ -23	20.52	8.69	"	39.36	1/474	4.239	0.167		11.60	0.191	72	0.328		2.831	6.90	0.426	2.8	68.0	0.322	7.83	680	0.0412	"	砂堆前縁の跳躍、浮遊		
S ℓ -24	19.00	7.92	"	39.98	1/465	4.086	0.249		9.79	0.177	66	0.508		2.937	7.58	0.454	3.1	78.8	0.391	9.95	788	0.0393	"	"		
S ℓ -25	24.85	10.00	"	41.42	1/460	4.616	0.183		8.97	0.226	83	0.330		2.60	6.00	0.418	4.7	103.0	0.470	10.30	1030	0.0456	"	"		
S ℓ -26	30.22	11.15	"	45.17	1/372	5.420	0.367		8.33	0.317	93	0.564		2.214	5.38	0.432	4.1	97.0	0.368	7.80	870	0.0471	"	"		
S ℓ -27	10.05	5.94	"	28.20	1/1226	2.179	0.018		12.94	0.050	50	0.069		5.507	10.10	0.370	0.7	78.0	0.118	13.13	730	0.0090	"	転動（全幅）		
S ℓ -28	11.50	5.89	"	32.54	1/726	2.820	0.066		11.54	0.085	49	0.195		4.255	10.19	0.428	1.6	42.9	0.272	7.28	429	0.0373	"	"		
S ℓ -29	12.44	5.98	"	34.67	1/616	3.084	0.068		11.24	0.101	50	0.184		3.891	10.03	0.453	1.4	46.7	0.237	7.81	467	0.0300	"	転動、砂堆前縁の跳躍		
S ℓ -30	3.06	2.97	35	29.44	1/484	2.452	0.018		12.01	0.064	25	0.061		4.894	11.78	0.546	0.7	42.0	0.236	14.14	420	0.0167	"	転動	③P. 19 P. 20 P. 346	
S ℓ -31	6.47	5.46	"	33.86	1/436	3.503	0.110		9.67	0.130	46	0.262		3.426	6.41	0.463	1.2	44.1	0.220	8.08	441	0.0272	"	"		

〔メモ〕エネルギー勾配について：
エネルギー勾配は水面勾配を用いた。水位測定はポイントゲージを用い、水路中央付近の9 m区間で1 m間隔（水路幅中央）に10点測定し、最小二乗法により算出した値である。
n =0.015の場合の土研式よりqsを評価して給砂。実験は9月～10月に行なう。

付表-6 P B T 実 験 総 括 表

河床材料 PBT 代表粒径 $d = 0.100\text{cm}$ 水中比重 $S = 0.31$ 沉降速度 $W_o = 3.43\text{cm/s}$

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 _* cm ³ /s/cm	水温 T (℃)	流速係数 φ	無次元 掃流力 r _*	水深 粒径比 H/d	無次元 流砂量 qs/u _* d	粒子レイ ノイズ数 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 Fr	河床波		H _s H	L _s H	L _s d	H _s L _s	河床形態	流送形態	データ 記載文 献番号 及び頁	
																	波高 H _s (cm)	波長 L _s (cm)								
P-01	1.80	2.38	60	12.61	1/2290	1.009			12.50	0.034	23.8			3.399	25.21	0.261							フラット	移動無し	② P. 24	
P-02	3.46	3.52	"	15.93	1/2290	1.245			12.80	0.051	36.2			2.755	16.57	0.267							"	若干の掃流		
P-03	4.85	4.63	"	17.46	1/2220	1.430			12.21	0.067	46.3			2.899	12.96	0.259							砂堆	掃流（転動）		
P-04	6.40	5.74	"	18.58	1/1900	1.721			10.80	0.097	57.4			1.993	10.45	0.248							"	"（跳躍）		
P-05	10.05	8.35	"	20.06	1/1860	2.097			9.57	0.145	83.5			1.636	7.19	0.221							"	前縁で跳躍		
P-06	11.90	8.18	"	24.25	1/2000	2.002			12.11	0.132	81.8			1.713	7.33	0.271							"	"		
P-07	14.06	10.13	"	23.13	1/1860	2.310			10.01	0.176	101.8			1.485	5.92	0.232							"	跳躍（下）		
P-08	18.41	11.57	"	26.52	1/1950	2.411			11.00	0.191	115.7			1.423	5.19	0.249							"			
P-09	21.88	13.36	"	27.30	1/2050	2.527			10.80	0.210	133.6			1.357	4.48	0.239							"	跳躍、浮遊		
P-10	25.46	13.11	"	32.37	1/1820	2.657			12.18	0.232	131.1			1.291	4.58	0.286							"	"		
P-11	3.13	3.57	"	14.61	1/ 998	1.872	0.021		7.81	0.115	35.7	0.112		1.832	16.8	0.247							"	転動、前縁で跳躍	② P. 28	
P-12	5.88	5.16	"	18.99	1/1009	2.239	0.111		8.48	0.165	51.6	0.496		1.532	11.6	0.267							"	転動、跳躍前縁で浮遊		
P-13	9.39	6.10	"	25.66	1/ 995	2.451	0.216		10.47	0.198	61.0	0.881		1.899	9.8	0.332							"	"		
P-14	1.00	1.49	"	11.19	1/1016	1.199	0.0		9.33	0.047	14.9	0.0		2.861	40.3	0.293								フラット	移動無し	② P. 34
P-15	3.14	3.28	"	15.96	1/ 873	1.919	0.047		8.31	0.121	32.8	0.245		1.787	18.3	0.231								砂堆	転動、前縁で若干の跳躍	
P-16	5.87	4.56	"	21.46	1/1053	2.060	0.085		10.41	0.140	45.6	0.413		1.665	13.1	0.321								"	転動、跳躍、前縁で浮遊	
P-17	9.27	6.44	"	23.99	1/ 869	2.695	0.218		8.90	0.239	64.4	0.809		1.273	9.3	0.302								"	転動	
P-18	4.66	3.15	120	12.33	1/1278	1.554	0.004		7.93	0.080	31.5	0.026		2.207	38.1	0.222								"	若干の掃流	② P. 35
P-19	13.70	6.15	"	18.56	1/2152	1.674	0.018		11.09	0.092	61.5	0.108		2.049	19.5	0.239								"	全幅で掃流	
P-20	25.95	3.79	"	24.60	1/1684	2.262	0.097		10.88	0.168	87.9	0.429		1.516	13.7	0.265								"	砂砕堆前縁で跳躍	
P-21	40.20	12.14	"	27.60	1/1704	2.642	0.326		10.44	0.230	121.4	1.234		1.298	9.9	0.253								"	同上及び浮遊	
P-22	2.10	2.39	60	14.64	1/1687	1.178	0.003		12.43	0.046	23.9	0.025		3.027	25.10	0.302								"	若干の転動（全幅）	③ P. 18
P-23	3.30	4.04	"	13.61	1/1094	1.902	0.019		7.16	0.119	40.4	0.100		1.944	14.85	0.303	3.2	57.3	0.79	14.18	573	0.0558	"	転動、若干の跳躍		
P-24	3.42	3.82	"	14.92	1/1389	1.642	0.014		9.09	0.089	38.2	0.085		2.252	15.71	0.216	2.5	67.0	0.65	17.54	670	0.0373	"	"		
P-25	4.76	4.11	"	19.30	1/1238	1.804	0.033		10.70	0.107	41.1	0.183		2.047	14.60	0.244	1.9	51.5	0.46	12.53	515	0.0369	"	"		
P-26	6.36	4.37	"	24.26	1/ 836	2.263	0.082		10.72	0.169	43.7	0.362		1.640	13.73	0.371	2.5	63.9	0.57	14.62	639	0.0391	"	転動、砂堆前縁の跳躍		
P-27	6.30	5.00	"	21.00	1/1190	2.029	0.067		10.35	0.136	50.0	0.380		1.847	12.00	0.300	2.7	77.4	0.54	15.48	774	0.0349	"	"		
P-28	7.94	4.90	"	27.01	1/ 857	2.367	0.067		11.41	0.184	49.0	0.283		1.585	12.24	0.390	3.1	80.1	0.63	16.35	801	0.0387	"	"		
P-29	7.97	6.41	"	21.63	1/1334	2.124	0.046		10.19	0.148	61.4	0.217		1.782	9.77	0.279	2.5	65.0	0.41	10.59	650	0.0385	"	砂堆、前縁の跳躍、浮遊		
P-30	9.69	6.44	"	25.18	1/1061	2.439	0.067		10.28	0.196	64.4	0.275		1.568	9.32	0.316	3.1	83.0	0.48	12.89	830	0.0373	"	"		
P-31	11.84	7.69	"	25.66	1/1083	2.638	0.196		9.73	0.229	76.9	0.743		1.466	7.80	0.296	3.4	82.8	0.44	10.77	828	0.0411	"	"		
P-32	12.87	8.42	"	25.48	1/ 999	2.874	0.257		8.86	0.272	84.2	0.894		1.363	7.13	0.280	3.7	110.1	0.44	13.08	1101	0.0336	"	"		
P-33	4.99	5.47	"	15.02	1/2777	1.389	0.005		10.95	0.064	54.7	0.036		2.730	10.97	0.208	1.4	23.8	0.26	4.35	238	0.0588	"	転動（全幅）		
P-34	5.65	5.50	"	17.12	1/2134	1.589	0.025		10.77	0.083	55.0	0.157		2.369	10.91	0.233	2.1	41.0	0.33	7.45	410	0.0512	"	転動、若干の跳躍		
P-35	6.39	5.66	"	18.92	1/1585	1.871	0.037		10.06	0.115	56.0	0.198		2.013	10.60	0.253	1.8	46.1	0.32	8.14	461	0.0390	"	"		

〔メモ〕エネルギー勾配 1 e について:

エネルギー勾配は水面勾配を用いた。水位測定はポイントゲージを用い、P-01～P-13については水路中央付近9 m区間の上流側、下流側の2点（水路幅の中央）で行い、P-14～P-35については水路中央付近の9 m区間で1 m間隔（水路幅中央）10点測定し、最小二乗法により算出した値である。

P-01～P-13は無給砂、P-14～P-35は $n=0.015$ とした場合の土研式より q_s を評価して給砂。

P-01～P-21は11月～1月に実験、P-22～P-35は9月～10月に実験を行っている。

付表7 ポリスチレン 実 験 総 括 表

河床材料 ポリスチレン 代表粒径 d =0.151cm 水中比重 S =0.05 沈降速度Wo=0.171cm/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)	エネルギー配 l e	摩擦速度 U _∗ (cm / s)	単位幅 流 砂 量 q _∗ cm ³ / s / cm	水 温 T (° C)	流速係数 φ	無次元 掃 流 力 r _∗	水 深 粒 径 比 H / d	無次元 流 砂 量 q _s / u _∗ d	粒子レイ ノイズ数 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	流 送 形 態	デ ー タ 記 載 文 献 番 号 及 び 頁
																	波 高 H _s (cm)	波 長 L _s (cm)							
P o - 01	0.1	0.75	60	2.222							4.97				80	0.082							フラット、砂堆の発達	局所的に移動	② P . 23
P o - 02	0.28	1.11	"	4.204							7.35				54.05	0.127							砂堆	"	
P o - 03	0.47	1.60	"	4.896							10.60				37.5	0.124							"	"	
P o - 04	0.81	2.24	"	6.027							14.83				26.79	0.129							単列砂礫堆		
P o - 05	1.05	2.76	"	6.341							13.28				21.74	0.122							単列、砂堆	掃流、前縁で跳躍	
P o - 06	1.47	3.39	"	7.227							22.45				17.70	0.125							砂堆	掃流、若干の浮遊	
P o - 07	1.83	3.79	"	8.047							25.10				15.83	0.132							"	"	
P o - 08	2.40	4.06	"	9.852							26.39				14.78	0.156							"	掃流（跳躍）	
P o - 09	3.29	5.62	"	9.757							37.22				10.63	0.131							"	"	
P o - 10	0.29	1.45	"	3.333			0				9.60	0			41.4	0.088									② P . 28
P o - 11	0.81	2.35	"	5.745			0.068				15.56	0.412			25.6	0.120									
P o - 12	1.48	2.04	"	8.390			0.104				19.47	0.678			20.4	0.156									
P o - 13	2.39	4.20	"	9.484			0.071				27.81	0.405			14.3	0.148									
P o - 14	2.40	3.38	30	10.31			0.058				25.70	0.309			15.5	0.167									
P o - 15	0.09	0.74	"	4.054			0				4.90	0			40.5	0.151							砂堆	局所的掃流	② P . 35
P o - 16	0.24	1.80	"	4.444			0.062				11.92	0.453			16.7	0.106							"	転動	
P o - 17	0.47	2.61	"	6.003			0.074				17.28	0.413			11.5	0.119							"		
P o - 18	1.15	4.04	"	9.488			0.054				26.75	0.264			7.4	0.151							"		
P o - 19	0.12	0.88	"	4.545			0.0				5.83	0.0			34.2	0.155							単列砂礫堆の発生及び網状		② P . 38
P o - 20	0.38	2.28	"	5.556			0.075				15.10	0.445			13.2	0.118							単列砂礫堆		
P o - 21	0.78	2.91	"	8.935			0.050				19.27	0.301			10.3	0.167							砂堆及び水路下流で単列砂礫堆		
P o - 22	1.15	4.04	60	9.488			0.054				26.75	0.264			7.4	0.151							砂堆		
P o - 23	0.25	1.14	"	3.655			0.0				7.55	0.0			52.8	0.109							網状		② P . 38
P o - 24	0.76	1.98	"	6.397			0.073				13.11	0.523			30.3	0.145							単列砂礫堆		
P o - 25	1.50	3.11	"	8.039			0.113				20.60	0.683			19.3	0.146							同上及び砂堆		
P o - 26	2.37	4.08	120	9.681			0.070				27.02	0.371			14.7	0.153							砂堆		
P o - 27	0.51	1.10	"	3.864			0.0				7.28	0.0			109.7	0.118							網状		② P . 38
P o - 28	1.59	2.15	"	6.163			0.066				14.24	0.414			55.8	0.133							単列砂礫堆、上に砂堆		
P o - 29	3.12	3.13	"	8.307			0.039				20.73	0.203			38.4	0.150							砂堆		
P o - 30	5.04	4.34	60	9.677			0.056				28.74	0.249			27.7	0.148							"		
P o - 31	0.58	2.38	"	4.062			0.004				15.76	0.04			25.2	0.084							フラット		② P . 39
P o - 32	1.67	4.25	"	6.549			0.019				28.15	0.126			14.1	0.101							砂堆		
P o - 33	3.21	5.92	"	9.037			0.089				39.21	0.595			10.1	0.119							"		
P o - 34	5.01	8.39	"	9.952			0.182				55.56	1.030			7.2	0.110							"		
P o - 35	2.51	4.34	120	4.82			0.0				28.74	0.0			27.6	0.074							フラット		
P o - 36	7.54	7.77	"	8.037			0.003				51.46				15.4	0.093							砂澁		
P o - 37	14.49	12.27	"	9.841			0.007				81.26				9.8	0.090							"		
P o - 38	22.22	16.44	"	11.26			0.006				108.87				7.3	0.089							"		

〔メモ〕 P o - 01 ~ P o - 14 は無給砂、 P o - 15 ~ P o - 39 は n =0.015 の場合の土研式より q_s を評価して給砂。

河川移動床模型実験材料としての
軽量材料の水理特性

I S S N 0386 - 5878
土木研究所資料第 2905 号
平成 2 年 12 月 (1990)
山本晃一, 林 正男

要 旨

本報告書は, 土木研究所において実施された軽量材料を用いた移動床に関する基礎実験資料を相似律の観点から整理し, 通常の水中比重 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したものである。

キーワード: 軽量材料, 流速係数, 流砂量, 相似律

○

郵便はがき

3 0 5 - □ □

41円切手
をはって
下さい。

茨城県つくば市旭一番地

建設省土木研究所
河川部河川研究室 御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第 2905 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住 所)

氏 名

