



土木研究所資料

第九七五号

海浜変形の相似性に関する研究
—海浜移動床模型実験の相似律—

昭和五十年二月

建設省土木研究所鹿島試験所

土木研究所資料

第 975 号

海浜変形の相似性に関する研究
—海浜移動床模型実験の相似律—

昭和 50 年 2 月

建設省土木研究所鹿島試験所

海浜変形の相似性に関する研究

—海浜移動床模型実験の相似律—

山本晃一、野積 尚

目 次

1. 序 言	1
2. 海岸地形を決める要因に関する従来の研究	2
3. 筆者らの研究方針	5
4. 海岸地形の相似性についての理論的検討	6
〔1〕 はじめに	6
〔2〕 i_o の影響について	6
〔3〕 浮遊粒子の運動の相似性	8
〔4〕 底面近くを動く粒子の運動の相似性	12
〔5〕 三次元現象への拡張	20
〔6〕 結 論	22
5. 海岸地形の相似性についての実証的検討	24
〔1〕 はじめに	24
〔2〕 底面近くの粒子の運動に関する実証的検討	24
〔3〕 汀線に直角方向の海岸変形の相似性に関する実証的検討	48
(1) 沿岸砂州の発生	48
(2) 打上げ高	51
(3) 前浜勾配	55
(4) 砕波水深	57
(5) Bar 頂水深	57
(6) 汀線から Bar までの距離	57
(7) 汀線の前進後退について	58
(8) 結 論	59
6. S と i_o の効果についての実験的検討	82
〔1〕 はじめに	82
〔2〕 実験装置および方法	82
〔3〕 実験結果概要	82
〔4〕 海床変化におよぼす S および i_o の効果	85
7. 海床波の成因についての二、三の考察	92
〔1〕 はじめに	92
〔2〕 海床波の成因	92

(1) 砂の移動方向と海床変化	92
(2) 沿岸砂州の形成要因	101
(3) $1/2 L$ 波の形成要因	103
(4) $2 L$ 波の形成要因	104
8. 模型実験に対する二、三の考察	107
〔1〕 はじめに	107
〔2〕 海岸移動床実験用底質材料	107
〔3〕 河口模型実験の相似性	108
〔4〕 今まで行なった河口模型実験の反省	116
9. あとがき	119

1. 序 言

筆者らは、ここ数年河口模型実験、河口に関する研究を行ってきたが、模型の現象は現地の現象にどれだけ似ているのだろうか。あるいは、ある海岸で起った現象が他の海岸で適用できるのだろうかという疑問にいつも直面していた。特に河口模型実験においては底質材料の選定などにおいて、十分になっとくれないまま決め、模型の現象と現地の現象の相似性に対する信頼性が薄く、我々としてはなっとくしえないまま結論を出さざるを得ないことも多かった。

そこで筆者らは、今まで行われてきた海岸地形に関する文献をなるべく多く集め、それらの結果を整理し、海岸地形を決めるパラメーターの評価をこころみ、また補足の実験を行なった。

海岸地形の相似性を言う場合、汀線に直角方向の形と汀線に平行な方向の相似性が問題となるが、ここでは主に汀線に直角方向の海岸形状がどのような要因で決まるかを論じ、模型実験の信頼性、適用性、海岸同志の現象の相似性について論じてみたい。

本報告は、模型実験を行う場合における参考資料のためにとりあえずまとめたものであり、十分なる報告の見なおし、解析も行っていないが模型実験者の参考になれば幸いである。

2. 海岸地形を決める要因に関する従来の研究

ある初期形状を持った海岸に、ある一定の波を汀線に直角にあたえると、時間の経過とともに、海浜の変形が少なくなり、平衡断面形を形成すると言われている。この断面形は、砂の移動が無いということではなく、一周平均の砂の移動量が零ということで、汀線の前進、後退もなく安定した断面である。

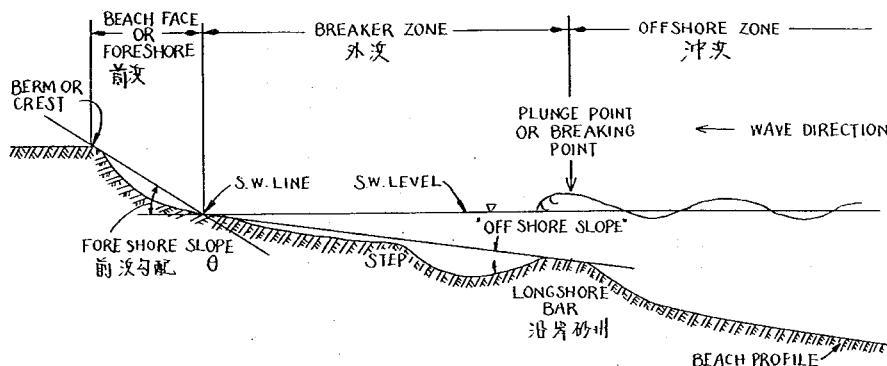


図1 SHORE PROFILE TERMINOLOGY

この海岸の平衡断面形に関しては、Johnson, J. W¹⁾ が汀線からの水平距離 x および水深 h を沖波波長 L_0 で割った無次元形であらわし、波の特性が平衡勾配におよぼす影響を明らかにし、波形勾配によってその形状が変わり、沖波の波形勾配 H_0/L_0 が 0.03 以上になると砕波点付近に沿岸砂州が発達し、これを暴風海浜 (Storm Beach) と名づけ、 H_0/L_0 が 0.02 以下になると沿岸砂州は発生せず、これを正常海浜 (Normal Beach) と名づけた。その後 L. Reector²⁾ は海岸地形を決める要因として、波の特性 (沖波波高 H_0 , 沖波波長 L_0 , 周期 T) と流体の特性 (粘性 ν , 密度 ρ , 比重 γ), 海底床砂の特性 (平均粒径 d_m , ふるい分け係数 $P_0 = \sqrt{d_{75}/d_{25}}$, 密度 ρ_s) と海浜の初期勾配, および波の作用時間を考え次元解析を行ない、次の結果を得た。

$$f\left(\frac{h}{x}, \frac{d}{d_m}, \frac{P}{P_0}, \frac{\nu T}{L_0 H_0}, \frac{L_0 g}{(H_0/T)^2}, \frac{\rho_s}{\rho}, P_0, i_0, \frac{H_0 t}{L_0 T}, \frac{x}{L_0}, \frac{d_m}{L_0}\right) = 0 \quad (1)$$

ここで最初の三つが、他の項の従属変数となる。(1)式において、 $L_0 g/(H_0/T)^2$ は H_0/L_0 の関数であり、粘性の影響は小さいとし、 ρ_s/ρ 一定、平衡海浜を考えて時間の項を落とし

$$h/x = f_1 \left(\frac{x}{L_0}, \frac{d_m}{L_0}, \frac{H_0}{L_0}, i_0, P_0 \right) \quad (2)$$

とし、彼の行なった資料を整理している。

また Saville, T は、大規模な実験（現地海岸と同スケール）を行ない、 H_0/L_0 が 0.025 以下でも海岸砂州の発生することを述べ、波の大きさそのものが海岸地形に影響をあたえると述べている。³⁾ その後岩垣雄一、野田英明らは、波のスケールと底質のスケールの比に注目し、海岸形状の変化に関係する因子として $d_m, \rho_s, \rho, \mu, L_0, H_0, T, t, g, i_0$ を考え、 $L_0 = \frac{g}{2\pi} T^2$ の関係より次元解析を行ない

$$h/L_0 = f \left(\frac{x}{L_0}, \frac{d_m}{H_0}, H_0/L_0, i_0, \frac{t}{T}, \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right), \frac{\nu}{d_m \sqrt{gH_0}} \right) \quad (3)$$

とした。平衡海浜、および底質の密度が同一の時には、時間項、比重比の項を落とす

$$h/L_0 = f \left(\frac{x}{L_0}, H_0/L_0, d_m/H_0, i_0 \right) \quad (4)$$

とし、Rector と形は違うが同様な無次元量が平衡海浜を支配するとし、多くの人の実験結果、彼らの実験結果整理し、沿岸砂州の発生に関する d_m/H_0 の効果を明らかにし図 2 の結果を得た。彼らの実験範囲内では i_0 の影響を受けず、 H_0/L_0

と d_m/H_0 が大きな影響要素となる。

なお岩垣らの研究の前に栗原らは、

$$h/L_0 = f \left(\frac{x}{L_0}, L_0/H_0, H_0/sd_m, i_0, S \right) \quad (5)$$

ここで $S = (\rho_s/\rho - 1)$

として、海浜形状について論じているが、 S そのものの効果については論じず、海床材料として石炭粉を使い、 H_0/Sd_0 の大きな場合の影響について述べている。⁵⁾

その後 Nayak⁶⁾ は比重の異なった底質材料 (Plastic, くるみ殻) を使い

$$h/L_0 = f \left(\frac{x}{L_0}, \frac{H_0}{L_0}, \frac{H_0}{Sd_m} \right) \quad (6)$$

で平衡海浜について論じ、沿岸砂州の発生、非発生に関して図 3 の結果を得ている。(6)式は(5)式に比し S が落ち次元解析には疑問の点がある。

また田中則男、新保修は、石炭粉と普通の砂の海岸地形の相異について興味ある結果を得ている。⁷⁾ 土木研究所においても須賀、松村、末吉^{8) 9)} が初期形状の影響や砂州高（波の打ち上げ高）について

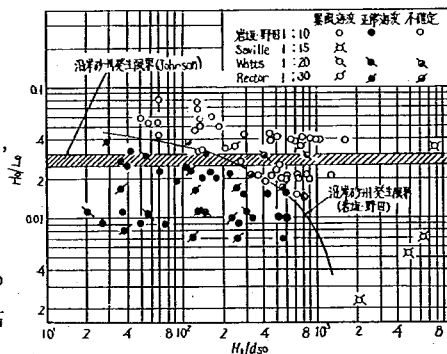


図 2 沿岸砂州発生限界

〔岩垣雄一・野田英明 1963〕

実験的研究を行なった。

そのほかにも多くの沿岸砂州に関する研究があるが、岩垣らの研究の後には、彼らの考えたパラメーターで実験資料を整理する方向にあるようだ。

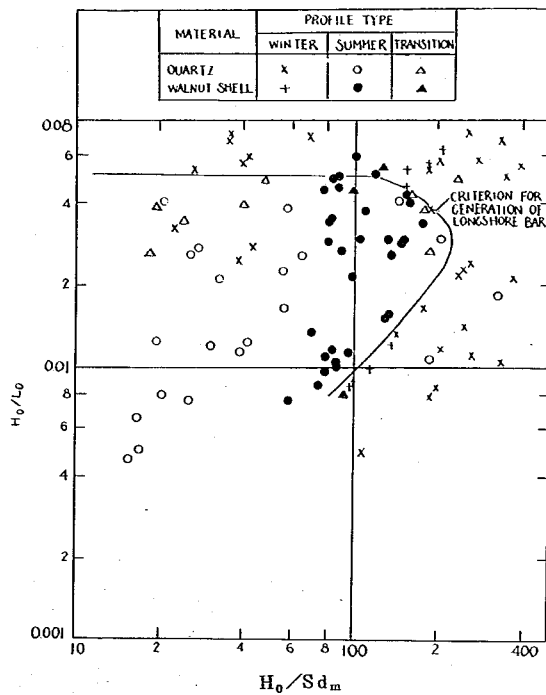


図3 CRITERION FOR GENERATION OF LONGSHORE BAR (proposed)

3. 筆者らの研究方針

①多くの平衡海岸に関する資料を、今までの研究成果に従って整理すると、一致しないことも多い。それは一つには測定の誤差にもとづくものであり、特に波の測定には誤差はつきものである。海岸が変形していく内に波の反射率も変わって、沖波相当波高が変化してしまうことも一つの原因である。Saville は実験中波高が、15%前後動くと言っている。³⁾それゆえ、資料はかなりの誤差を含んでいると考えられる。筆者らは測定値のバラツキをそのまま残し、なるべく多くの資料を集め、その傾向を把握するようにつとめた。

②実験は、ある特定の条件の中で行なわれている。実験の範囲を明確にし、実験結果を実験範囲外まで拡張して考えないこと。

③現象を支配する要因をさぐる時、次元解析が良く行なわれるが、この場合、海岸変形に影響する要因をすべて網らして次元解析を行うこと、影響の少ない項を落とす場合は、その物理的意味を良く考えること、無次元量の積と無次元量の積のパラメーターで資料がグラフ上で整理できるからと言って、1つのパラメーターを減らさないこと、単にグラフ上の操作にすぎないことがある。

④次元解析の背後には諸物理量間の完全方程式の存在が背景にある。完全方程式が知っている時には、次元解析をなるべく行なわず、方程式から出発すること、無次元量の物理的意味が明確になり、その大きさも理解しやすいためである。

⑤今までの研究成果を利用し、海岸地形の相似性について、統一的な把握を行なうようにつとめること。

4. 海岸地形の相似性についての理論的研究

[1] はじめに

海岸地形の相似性を言う場合、砂の移動限界水深より浅い所の海岸地形の相似性をここでは問題とする。

海底には、種々の成因の異なる海床波が存在する。小は、底面近くの水粒子の振動に起因すると言われる砂運、大は沿岸砂州のようにスケールの大きなもの。このほかにも、波の反射によって生ずる重複波に起因すると言われる波長 $1/2 L$ 位の海床波、⁷⁾ 二次波峯の発生に原因されると考えられる波長約 $2 L$ の海床波などがある。¹⁰⁾

の中で特に問題となるのは砕波に起因すると言われる沿岸砂州で、これは海岸汀線の前進、後退の問題と関連づけられて特に注目されてきた。

一般に暴風海浜になるような波が海岸に來襲すると、汀線は後退し、正常海浜になるような波が來襲すると、汀線は前進すると言われ、このような海浜を作る波に対して侵食波、堆積波などと言う言い方もされている。事実岩垣らの行なった実験の範囲ではこの関係が成立していた。しかし汀線の前進、後退は一つの海岸形状から、他の一つの海岸形状への移行によって表わせるものであり、侵食波堆積波と言う言い方は正しくない。たとえば初期海浜勾配 i_0 が非常に大きなものであれば、堆積波と言われる波が來ても汀線は後退するだろうし、また i_0 が非常に小さなものであれば侵食波と言われる波でも汀線は前進するだろう。沿岸砂州は砕波に起因すると言われ、平衡海浜では砂州から汀線までの距離のスケールは、砕波水深 h_b が大きく作用し、砕波点の位置によって、汀線の位置がある程度決まってしまうと考えられ、直接的には、暴風海浜を作るような波で汀線後退、正常海浜を作るような波で前進とは言えない。ここでは海浜形状の分類を

暴風海浜（沿岸砂州発生）

正常海浜（沿岸砂州非発生）

と定義する。

筆者らの研究の目的は、このような沿岸砂州や、砂運などの海床波が何によって決まるのか、相似性を決めるパラメーターは何かをさぐり、模型実験への適用、現地現象の把握をこころみることにあ

[2] i_0 の影響について

今海岸形状を岩垣らのように(4)式で表わした時、 i_0 の影響はあるのだろうか。

波は i_0 が異なれば、沖から海岸に向って來る波の変形の仕方が異なる。たとえば砕波水深にし

ても i_0 の影響を受け図4のごとくなり¹² 勾配のゆるい方が碎波水深が浅い。また碎波の形式も図5のごとく勾配 i_0 によって変化する。¹³⁾

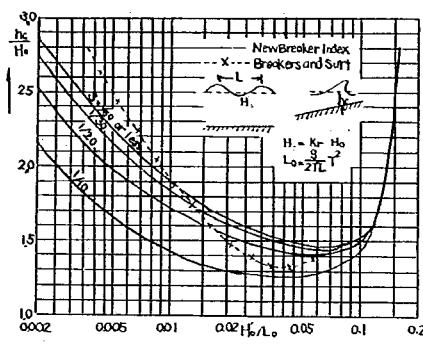


図4 碎波水深の変化 (合田による)

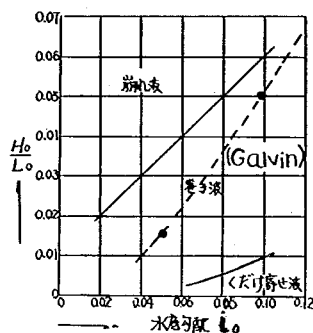


図5 碎波の形成の分類

このように碎波形式が変化することは、 i_0 の影響があると言えるかもしれない。しかし碎波点付近は、砂の移動が激しい所であり、波に応じて底床が変形するから i_0 の影響があるとは一概に言うこともできない。

碎波水深より深い所での波の変形は、極端に i_0 の大きな海岸でないかぎり、ほぼ浅水波として変形するものと思われ、 i_0 の影響を多くは受けないと思われる。碎波後の波の変形は、碎波点から汀線までの距離が近い場合には、碎波点の水の運動のエネルギーが大きいため底床が動かされて、碎波状態によって底床が変形していくと考えられ、 i_0 の影響は大きくないと思われる。しかし i_0 が小さい場合、碎波の運動スケールより汀線までの距離が長いので、碎波後の波がまたもとの正弦波に近いような波にもどり、二次碎波するような現象が模型実験などでは観測されている。

事実、尾崎¹¹⁾ は、 $i_0 = 1/80$ の実験を行ない、次のようなことを述べている。

- (1) 初期勾配 $1/80$ という緩勾配の場合でも沿岸砂州の発生限界に対しては、岩垣、野田の限界が適用できる。
- (2) 波形勾配が大で相対粒径 d_m/H_0 が小で、沿岸砂州の発生する(暴風海浜)の場合でも、砂州の位置は、急勾配断面の海岸に較べて、はるか沖側に発生し、また碎波後の波が緩勾配の長い磯波帯を進む間にエネルギーを失って汀線附近に到達する頃には破壊力を持たない。
- (3) 沿岸砂州が発生する場合、いわゆる暴風海浜がそのまま汀線附近侵食または汀線後退の欠陥型に結びつくとは限らない。

以上のことは前述した考えを支持しているように思える。平衡海浜は、初期形状が異なれば、異なった形を持つと考えられ、一つの独立変数と考えておいた方がよさそうである。

[3] 浮遊粒子の運動の相似性

海底が一つの形状から他の形状に変形する時、長さスケールの異なった場で相似な変形をするためには(たとえば現地と模型),

1) 水粒子の運動が長さスケールの異なった場で相似な運動をする。

ロ) 砂粒子(底質材料)の運動が長さスケールの異なった場でも相似な運動をする。

が十分条件である。

ロ)の条件は幾何学的な相似な海岸形状では、良く知られているように、エネルギーの消散と表面張力の影響を無視すれば、無歪の Froude 相似が条件として必要である。つまり、現地と模型とのスケールの比をサフィックス r で表わし、海岸形状の水平方向の長さのスケールを l とすると

$$\left. \begin{aligned} (H_0/L_0)_r &= 1 \\ (H_0/l)_r &= 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

が必要で、波形勾配を現地と模型で同一、幾何学的スケールと波のスケールの比を同一にしなければならない。

しかし波のスケールが小さくなると表面張力などの影響を受けフルードの相似則からずれてくる。Diephuis¹⁴⁾ は、模型が小さく、周期の短い波を使用すると、砕波水深 h_b に周期の効果が入ることを実験にて示し、図6の結果を得ている。これによれば H_0/L_0 の値が 0.04 の場合 $T > 1.0$ 秒であれば、砕波水深の相似性は成立している。このことから波形勾配 0.08 のように大きな波形勾配で実験するのでなければ、周期 1.5 sec 以上の波を対象とするかぎり、ほぼフルード則が成立し、流れの相似(水面変化の相似)が成立していると思われる。

沿岸砂州の形成には浮遊砂の影響が大きいと考えられるから始めに浮遊粒子の運動の相似性について考えてみよう。流れの場が相似である所に砂粒子(底質材料)が浮かんでいる時の、砂粒子の流れに対する動きが相似であれば、ロ)の条件は浮遊砂の運動については満足できる。よってここで水粒子の運動は1)の条件を満足した場の中(フルードの相似則)での粒子の運動について考えて見よう。幾何学的相似則が成立している時には、質量輸送速度、大スケールの乱れなどの相似も成立していると考えて良い。

浮遊砂の運動式はZ方向(水深方向)では

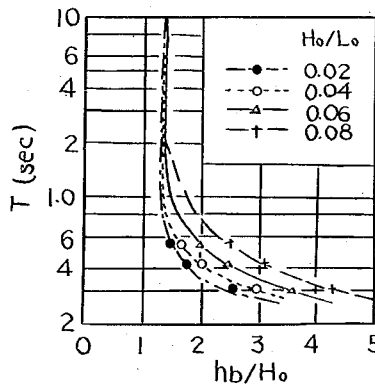


図6 砕波水深に及ぼす周期の効果(Diephuis より)

$$\begin{aligned} \rho_s \frac{\pi}{6} d^3 \frac{du_{sz}}{dt} = C_D \frac{\rho}{8} \pi d^2 (u - u_{sz})^2 - (\rho_s - \rho) g \frac{\pi}{6} d^3 \\ - \frac{1}{2} \frac{\pi}{6} d^3 \left(\frac{du_{sz}}{dt} - \frac{du}{dt} \right) + \frac{\pi}{6} \rho d^3 \frac{du}{dt} + \frac{3}{2} d^3 \sqrt{\pi \rho \mu} \\ \cdot \int_{t_0}^t \left[\frac{du}{dt_1} - \frac{du_{sz}}{dt_1} \right] / \sqrt{t - t_1} \cdot dt_1, \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

ここで左辺第一項は、水粒子と砂粒子の速度差にもとづく抗力、二項は重力の効果三項は付加質量による力、4項は流れの速度変化による圧力、5項はバセット項を表わす。ここで u_{sz} はZ方向の砂粒子の速度、 u は流体の速度、 d 砂の粒径、 μ 流体の粘性係数である。

(8)式を無次元化するために、代表速度 U_0 、 T を用いる。 U_0 としては沖波の最大水粒子速度などを取ればよい。

(8)式は

$$\begin{aligned} U_{sz}' = u_{sz} / U_0, \quad t' = t/T, \quad t'_1 = \frac{t_1}{T}, \quad u' = u/U_0 \text{ として} \\ \left(\rho_s + \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{6} d^3 \frac{U_0}{T} \frac{dU_{sz}'}{dt'} = C_D \frac{\pi}{8} \rho d^2 U_0^2 (u' - U_{sz}')^2 - \left(\rho_s - \rho \right) g \frac{\pi}{6} d^3 \\ + \frac{3}{2} \frac{\pi}{6} \rho d^3 \frac{U_0}{T} \frac{du'}{dt'} + \frac{3}{2} d^3 \sqrt{\pi \rho \mu} U_0 / T_0^{1/2} \\ \cdot \int_{t'_0}^{t'_1} \left[\frac{du'}{dt'_1} - \frac{dU_{sz}'}{dt'_1} \right] / \sqrt{t' - t'_1} dt'_1 \dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

速度スケール U_0 が異なる場合でも、粒子が相似な運動(長さスケール L_0)するためには(9)式の各項の比が模型と現地で同じでなければならない。よって

$$\begin{aligned} 1 = \left(\frac{3}{4} \frac{C_D}{(\rho_s/\rho + \frac{1}{2}) d} T U_0 \right)_r = \left(\frac{\frac{\rho_s}{\rho} - 1}{\rho_s/\rho + \frac{1}{2}} \frac{g T}{U_0} \right)_r = \left(\frac{3}{2} \frac{1}{(\rho_s/\rho + \frac{1}{2})} \right)_r \\ = \left\{ \frac{9 \sqrt{\pi \rho \mu} T_0^{1/2}}{(\rho_s/\rho + \frac{1}{2}) \pi d} \right\}_r \dots\dots\dots(10) \end{aligned}$$

ところで流れの相似性より、 $T_r = h_r^{1/2}$ 、 $U_{0r} = h_r^{1/2}$

$g_r = 1$ 、長さスケールの代長として沖波波高を取り、(10)式より無次元パラメータを求めると、

$$\left. \begin{aligned} S_r &= 1 \\ \left(\frac{C_D H_0}{d} \right)_r &= 1 \\ \left(\frac{\sqrt{\nu} (H_0/g)^{1/4}}{d} \right)_r &= 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

が必要となる。

ところで砂の沈降速度 W_0 と C_D の関係より、

$$C_D \propto \frac{S g d}{W_0^2} \dots\dots\dots (12)$$

(11) 式は

$$\left. \begin{aligned} S_r &= 1 \\ \left(\frac{\sqrt{g H_0}}{W_0} \right)_r &= 1 \\ \left(\frac{\sqrt{\nu} (H_0)^{1/4} g^{3/4}}{W_0^2} \right)_r &= 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

となる。ここで (11) 式に現われる C_D は、振動流中に置かれた粒子の抗力係数で時間的に変動するものであり、(11) 式で代用することは厳密には正しくないが、近似をあたえるものとして (12) 式を表わした。なお $C_D = \text{const.}$ とすると $\sqrt{g H_0}/W_0$ は H_0/d と同じ意味を持ち $d_r = H_{0r}$ となり岩垣らが沿岸砂州の形成に関して粒径効果として用いた無次元量と同じ意味を持つ。ただ $\sqrt{g H_0}/W_0$ は $Re = \frac{W_0 d}{\nu}$ の変化による C_D の変化を暗に含み、よりすぐれたパラメーターと考えられる。なおバセット項の効果は速度の 2 乗に比例するような抵抗則を適用する場合には余り大きくないと言われ、¹⁵⁾ (11) 式の $\sqrt{\nu} (H_0/g)^{1/4}/d$ は粒子の運動に影響が少ないと考えられている。また $\sqrt{\nu} (H_0/g)^{1/4}/d$ を 2 乗し d/H_0 を積すると $\nu/d\sqrt{g H_0}$ となり岩垣が示した粘性項と同一のパラメーターとなる。

浮遊砂の個々の粒子の運動から求まった無次元量は (13) 式およびフルード則より $(H_0/L_0)_r = 1$ であるが、平均的な粒子の運動から求めた場合について調べてみよう。ここでは砂粒子の濃度分布を平均的な粒子運動に代用する。

浮遊砂の濃度を m とし、 Z 方向の拡散係数を ϵ_z とすとし、 x 方向、 y 方向の拡散を無視すれば

$$\frac{\partial m}{\partial t} = W_0 \frac{\partial m}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial m}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (14)$$

となる。中間¹⁶⁾らは (14) 式から出発し、拡散係数を乱れの古典理論にならって $\epsilon_z = \beta b^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|$

を仮定し、 b を微小振幅波の水粒子の平均位置からの最大変化 $b = \frac{H}{2} \frac{\sinh k(z+h)}{\sinh kh}$ を取り u は

水粒子の移動速度を取り $u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh} \times \sin(kx - \sigma t)$ を取った。ここで $k = 2\pi/L$

$\sigma = \frac{2\pi}{T}$ である。また実験結果をも参照して $Z = -a$ で $\bar{m} = \bar{m}_a$ なる条件を入れて、

$$\bar{m}/\bar{m}_a = \exp \left[-\alpha (W_0/C) \cdot (L/H)^3 \cdot (h/L) \cdot f(n, k) \sinh^3 kh \right]$$

$$f(n, k) = \int_{na}^n (\sinh knh)^{-3} dn = \frac{1}{2hk} \left\{ \frac{\cosh knah}{\sinh^2 knah} - \frac{\cosh knh}{\sinh^2 knh} \right. \\ \left. + \log_e \left| \frac{\tanh(knah/2)}{\tanh(knh/2)} \right| \right\} \dots \dots \dots (15)$$

を得た。ここで $\bar{m}$, $\bar{m}_a$ は一周期の平均濃度, $n = (h+z)/h$, $na = (h-a)/h$, $k = \frac{2\pi}{L}$

C は波速であり, $\hat{U}_s$ は底面近くの水粒子最大速度, $\alpha = \frac{3}{\beta}$ については図7の結果を得ている。これ

によれば、濃度分布の相似性は、幾何学的形状の

相似性 $(h/L)_r = 1$, 水粒子の運動の相似性

$(H/L)_r = 1$ が成立していれば

$$(W_0/C)_r = 1 \rightarrow (W_0/\sqrt{gH})_r = 1 \dots (16)$$

が必要となる。¹⁸⁾

ところで(14)式において拡散係数には疑問があり、

特に底床面近くには、砂蓮などが存在し、こ

のような所での拡散係数は、砂蓮のスケール

から決まると考えられ、底面近くの濃度分布の相

似性が成立するためには、底面の幾何学的相似(砂蓮の形の相似)が必要と思われる。なお(9)式は時

間を波の周期で代表し、粒子はフルード則によって決まる時間縮尺で動いている。良く知られている

ように濃度分布の相似性が成立する時、底面変動の時間縮尺が、フルード則によって求まる時間縮尺

によって動くのは $(m_a)_r = 1$ が必要である。注1)

これらのことから、底面近くの砂の運動をより詳しく調べ、相似条件を検討してみよう。

注1) 底面変動の式は、

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)} \left(-\frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} \right) \dots \dots \dots (17)$$

である。(17)式より(11)を求めたのと同様な方法により、河床変動が相似であるためには、

$$t_{sr} = (1-\lambda)_r \cdot X_r \cdot h_r \cdot q_{srx}^{-1} = (1-\lambda)_r \cdot X_r \cdot h_r \cdot q_{syr}^{-1} \dots \dots \dots (18)$$

が必要である。 $\lambda_r = 1$, $X_r = h_r$ とすると

$$t_{sr} = h_r^2 \cdot q_{srx}^{-1} = h_r^2 \cdot q_{syr}^{-1} \dots \dots \dots (20)$$

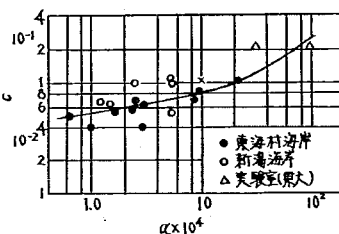


図7 α を評価するための関係図

$$q_{sx} = \int_0^h m u_x dy \text{ であるから} \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$q_{sxr} = \int_0^{h_r} m_r u_{xr} dy_r = m_r \cdot u_r \cdot X_r$$

ここで t_{sr} がフルード則より求まる時間縮尺 $t_{sr} = h_r^{1/2}$ であるためには

$$h_r^{1/2} = X_r^2 \cdot m_r \cdot u_r \cdot X_r \quad \dots\dots\dots (22)$$

であり、フルード則より $h_r = X_r$, $u_r = h_r^{1/2}$ であるので

$m_r = 1$ が必要である。

[4] 底面近くを動く粒子の運動の相似性

底面近くの水粒子の動きは、境界面の存在のために境界層が発達し、水粒子の動きは浅海波の理論からは求めることができない。この境界層の厚さを δ とする。境界層外縁の水粒子の速度は、

$$U_s = \hat{U}_s \sin \{ 2\pi (t/T - x/L) \} \quad \dots\dots\dots (23)$$

なる単振動型である。ここで $\hat{U}_s$ は境界層外縁の最大水粒子速度である。 δ の厚さは水深 h に比較して薄いから、浅海波の理論より、

$$\hat{U}_s = \pi H / T / \sinh(2\pi h / L) \quad \dots\dots\dots (24)$$

として良い。底面は水平床で、粗面、乱流境界層では、流体の粘性を考えなくて良いから、乱流境界層厚さ δ を決める要因は、底面の粗度に相当する d と $\hat{U}_s$ および周期に関する $\sigma = 2\pi/T$ のみに関係する。

$$g_1(\delta, d, \hat{U}_s, \sigma) = 0 \quad \dots\dots\dots (25)$$

滑面乱流および層流境界層では d が関係せず、粘性が関係し、粘性を表わすものとして粘性底層を表わす $\delta_\ell = (z\nu/\sigma)^{1/2}$ を使って

$$g_2(\delta, \delta_\ell, \hat{U}_s, \sigma) = 0 \quad \dots\dots\dots (26)$$

である。底面より z の水粒子速度を U_{sz} とすると

$$U_{sz} = \hat{U}_s \cdot f(z/\delta) \cdot k(t/T, x/\hat{U}_s \sigma) \quad \dots\dots\dots (27)$$

と考えられる。また $\hat{U}_{sz} = \hat{U}_s \cdot f(z/\delta)$ で、 $f(z/\delta)$ は δ , z , T , U_s , σ に関係するから、粗面乱流境界層では基本量を σ , d , $\hat{U}_s$ として

$$f(z/\delta) = g_2\left(\frac{\hat{U}_s}{\sigma d}, \frac{z}{d}\right) \quad \dots\dots\dots (28)$$

滑面乱流および層流境界層では、基本量を σ , δ_ℓ , $\hat{U}_s$ として

$$f(z/\delta) = g_3\left(\frac{\hat{U}_s}{\sigma \delta_\ell}, \frac{z}{\delta_\ell}\right) \quad \dots\dots\dots (29)$$

となる。この無次元量は、Lnoquet - Higgins の層流境界層の理論的検討¹⁹⁾ 梶浦の乱流境界層の理論的検討の結果²⁰⁾より求まる流速分布によると、Longuet-Higgins 層流境界層理論では、

$$f(z/\delta) = g_3\left(\frac{\hat{U}_s}{\sigma\delta_\ell}, \frac{z}{\delta_\ell}\right) \dots\dots\dots (30)$$

であり、梶浦の乱流境界層理論によると、滑面乱流では

$$f(z/\delta) = g_4\left(\frac{\hat{U}_s}{\sigma\delta_\ell}, \frac{z}{\delta_\ell}\right) \dots\dots\dots (31)$$

粗面乱流では

$$f(z/\delta) = g_5\left(\frac{\hat{U}_s}{\sigma z_0}, \frac{z}{z_0}\right) \dots\dots\dots (32)$$

となる。ここで z_0 は Nikuradse の相当粗度 k_s と $k_s = 30 \cdot z_0$ によって関係づけられているから $z_0 \propto d$ と考えられ、筆者が次元解析より求めた無次元量とは矛盾はない。

このような流れの場の中で、底面を動く粒子の運動の相似性を考えていこう。今代表粒速 U_0 として $z = d$ の所の流速を取ると浮遊砂の運動と同様に

$$\begin{aligned} & (\rho_s + 1/2) \rho \pi / 6 d^3 \hat{U}_s \cdot f(d/\delta) / T \cdot dU'_s / dt' = C_D \cdot \frac{\pi}{8} \rho d^2 \hat{U}_s^2 \cdot f^2(d/\delta) \cdot \\ & (U' - U'_s)^2 - \mu_s \left[(\rho_s - \rho) \frac{\pi}{6} g d^3 - C_L \frac{\pi}{\delta} \rho d^3 \hat{U}_s^2 \cdot f^2(d/\delta) \cdot \right. \\ & \left. (U' - U'_s)^2 + \frac{3}{2} \rho d^3 \frac{\hat{U}_s}{T} f(d/\delta) \frac{dU'}{dt'} + \frac{3}{2} d^2 \sqrt{\pi \rho \mu} \hat{U}_s \cdot f(d/\delta) / T^{1/2} \right. \\ & \left. \times \int_{t'_0}^{t'_1} [dU' / dt'_1 - dU'_s / dt'_1] / \sqrt{t' - t'_1} dt'_1 \dots\dots\dots (33) \right] \end{aligned}$$

ここで μ_s は底面粒子のまさつ係数

これより模型と現地の粒子の運動の相似条件は

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{(C_D - \mu_s C_L) T \cdot \hat{U}_s \cdot f(d/\delta)}{(\rho_s / \rho + 1/2) d} \right\}_r = \left\{ \frac{\rho_s / \rho - 1}{\rho_s / \rho + 1/2} \mu_s g \cdot T / \hat{U}_s \cdot f(d/\delta) \right\}_r \\ & = \left\{ \frac{1}{\rho_s / \rho + 1/2} \right\}_r = \left\{ \frac{\sqrt{\nu T}}{(\rho_s / \rho + 1/2) d} \right\}_r = 1 \dots\dots\dots (34) \end{aligned}$$

となる。

粗面乱流境界層の場合には、流れの相似性より、

$$\left(\frac{\hat{U}_s}{\sigma d} \right)_r = 1 \quad \dots\dots\dots (35)$$

が必要であり、これより(34)式は

$$(C_D - \mu_s C_L)_r = 1$$

$$\left(\mu_s \frac{g}{\sigma \hat{U}_s} \right)_r = 1$$

$$S_r = 1$$

$$\left\{ \sqrt{\frac{\nu}{\sigma d^2}} \right\}_r = 1$$

$$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \dots\dots\dots (36)$$

となる。(36)式の最終項の影響は小さいと考えられるからこの場合長さのスケール $(\hat{U}_s / \sigma d)_r = 1$ より $d \propto \hat{U}_s / \sigma \propto d_0$ である。

層流および滑面乱流では、流れの相似性より

$$\left\{ \frac{\hat{U}_s}{\sigma \delta \ell} \right\}_r = 1 \rightarrow \left(\frac{\hat{U}_s^2}{\sigma \nu} \right)_r = 1 \quad \dots\dots\dots (37)$$

$$\left(\frac{d}{\delta \ell} \right)_r = 1 \rightarrow \frac{d^2 \sigma}{\nu} \quad \dots\dots\dots (38)$$

が必要であり、これより(34)式は

$$\left\{ (C_D - \mu_s C_L) \frac{\hat{U}_s}{\sigma d} \right\}_r = 1$$

$$\left\{ \mu_s \frac{g}{\sigma \hat{U}_s} \right\}_r = 1 \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \dots\dots\dots (39)$$

$$S_r = 1$$

となる。長さのスケールは $\delta \ell \propto \hat{U}_s / \sigma \propto d_0$ となる。

粗面乱流境界層の場合、もし、現地と模型を浮遊砂の運動の相似則に合うように選ぶと $(\mu_s)_r \div 1$ C_L が C_D に比例すると考えられ、また C_D の値も一定と考えられるから(35)(36)は浮遊砂の運動より求まる条件を合わせれば、粘性の影響が小さい場合には満足する。層流境界層および滑面乱流境界層の場合 C_D は浮遊砂の場合の C_D と同じような値を持つと考えられず、粘性の影響が大きいと考えられ浮遊砂の運動に必要な相似条件を取った場合、底質の運動は相似になりえないと考えられる。

前述の論議は、底面が flat の場合であった。しかし底面の砂が動き出すと ripple が発生する。よって前述の論議は、砂が動き出す限界状態での論議、および、ripple が発生しない前浜領域で成立するものと考えられる。

底面粒子が動き出す限界状態では、一般に (21) 式の加速度項を落とし、右辺第1項、および第3項のみで限界状態を表わすことが多い。この項のみ取ると

$$\left\{ \frac{Sgd\mu_s}{(C_D + \mu_s C_L) \hat{U}_s^2 f^2} \right\}_r = 1 \quad \text{が必要である。}$$

よって粗面乱流境界層では、移動限界状態を同一にするには

$$\left\{ \begin{aligned} &\left\{ \frac{Sgd\mu_s}{(C_D + \mu_s C_L) \hat{U}_s^2} \right\}_r = 1 \\ &\left(\frac{\hat{U}_s}{\sigma_d} \right)_r = 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (40)$$

で十分である。(必要でない。)

層流および滑面乱流では、 $\hat{U}_s / \sigma \delta_\ell = \frac{1}{2} \hat{U}_s \delta_\ell / \nu$ であるから

$$\left\{ \begin{aligned} &\left\{ \frac{Sgd\mu_s}{(C_D + \mu_s C_L) \hat{U}_s^2} \right\}_r = 1 \\ &\left(\frac{\hat{U}_s \delta_\ell}{\nu} \right)_r = 1 \\ &\left(\frac{d}{\delta_\ell} \right)_r = 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (41)$$

これは堀川²¹⁾らが、移動限界水深を理論的に求めたものとほぼ同じ無次元量である。^{注2)}ただ層流の場合 $(d/\delta_\ell)_r = 1$ の項が無い。これが実験値に現われないのは、実験に限られた範囲のものであり、またばらつきの中に入ってしまうからだと思われる。なお樫木³¹⁾の理論では $(d/\delta_\ell)_r = 1$ の無次元量が必要である。

一般には現地でも模型でも、移動限界付近の境界層は乱流境界層であることが多く、この場合には浮遊砂粒子の運動と同一の無次元量を同じにすれば良い。また (36) 式の第4番目の無次元量の効果も小さいと思われる。ただ粘性の効果は、(36) 式の第1番目の無次元量に影響をあたえる恐れは残る。(河床砂の限界掃流力理論では $U_* d / \nu > 51.1$ で底面は粗面であるにもかかわらず、 $U_* d / \nu$ が 150 程度まで粘性の影響を受けている。³²⁾ 海床砂の場合、堀川らの実験および理論によれば $C_D + \mu_s C_L$ は粗面の場合、粘性の影響を受けていない。このことを考えると、実際には、粗面・乱流でも粘性の影響があるが、実験値のばらつきの中に入ってしまった、あるいは実験が特定の範囲で行なわれているのが、顕著に実験値にでてこない理由であろう。)

次にもう少し底質材料の動きが激しくなり、rippleが発生するような状態の相似性を考えてみよう。

rippleが形成されるとrippleによって底面近くの水粒子の運動は乱れ、場所的にも変化し、今までのように水粒子の動きの相似性を仮定し、その中で粒子の動きの相似条件を求めると言うような

方法は使えない。(底面の変動(リップル形成)と水粒子の動きの関係は相互的であり、最初から水粒子の動きを仮定することは ripple 形状を決めてしまうことになる。)よってここでは ripple が生成し、安定な形となった ripple がどんな要因によって形成されるか、次元解析によって無次元量をさがすことにする。

ripple の形成に関係する要因は、

ρ 流体の密度	}	流体の物理的特性
ν 流体の動粘性係数		
d_s 底質の代表粒径	}	底質の特性
ρ_s 底質の密度		
d_0 底面の水粒子の軌道長	}	底面近くにおける流れに関する特性
$\hat{U}_s$ 底面付近の水粒子の水平速度の振幅		
g 重力の加速度		
運動の場のポテンシャルを表わすもの		

である。よって ripple の特性Aは

$$A = f(\rho, \nu, d_s, \rho_s, \hat{U}_s, d_0, g) \quad (42)$$

となる。注3)

基本量として $g, \hat{U}_s, \rho$ を取ると

$$\pi_A = f\left(\frac{\hat{U}_s^2}{\nu g}, \frac{\hat{U}_s}{\sqrt{g d_s}}, S, \frac{\hat{U}_s}{\sqrt{g d_0}}\right) \quad (43)$$

基本量として g, d_0, ρ を取ると

$$\pi_A = f\left(\frac{\sqrt{g d_0} d_0}{\nu}, \frac{\hat{U}_s}{\sqrt{g d_0}}, S, \frac{d_s}{d_0}\right) \quad (44)$$

基本量として g, d_s, ρ を取ると

$$\pi_A = f\left(\frac{\sqrt{g d_s} d_s}{\nu}, \frac{\hat{U}_s}{\sqrt{g d_s}}, S, \frac{d_0}{d_s}\right) \quad (45)$$

なお、粒径 d_s の代わりに粒径 d_s の沈降速度 W_0 を代用し基本量として $g, \hat{U}_s, \rho$ をとると

$$\pi_A = f\left(\frac{\hat{U}_s^2}{\nu g}, \frac{\hat{U}_s}{\sqrt{g d_0}}, \frac{\hat{U}_s}{W_0}, S\right) \quad (46)$$

となる。これらの無次元量は、堀川^{16) 21)}らの示したものとは異なっている。この検討は5章(2)で述べることにして論議を進める。

(43)から(46)式で粘性の関与する無次元パラメーターは、ripple によって底面近くの流れは充分乱れ、流速分布は ripple 形状(λ, η)によって決まり、また ripple が完全に発達した領域では、底表面は粗面と考えられ、 ν は流れの分布に関係せず粘性の効果は小さい。粘性が関係するのは、水粒子速度と砂粒子速度の差による抗力に関する C_D であろう。もし C_D が一定と考えられ

るなら粘性の関与する無次元パラメーターは落して良い。ただ、ripple の発生限界付近においては境界層の違いによる ν の影響は残ろう。³³⁾ また底質材料が非常に細かい場合は ν の影響が残らう。底面近くの流速分布が、粘性の影響を受けず、ripple 形状によって決まると言うことは、底面のまさつ係数 $f_1 = \tau / \rho \hat{U}_s^2$ も ripple 形状を決める無次元パラメーターが同じであれば、模型と現地の f_1 は同一となると考えられる。Aとして底面のまさつ応力 τ_b を取れば、(46)式より $\pi_A = \tau_b / \rho \hat{U}_s^2$ となりより理解できよう。

Bognoldによると

$$\tau_b = f_1 \rho \hat{U}_s^2 \quad \text{として}$$

$$\left. \begin{array}{ll} d_0/\lambda < 2 & f_1 = 0.08 \\ d_0/\lambda < 2 & f_1 = 0.072 (d_0/2\lambda)^{-0.75} \end{array} \right\} \dots\dots (47)$$

としていて、 f は d_0/λ の関数となっている。(44)式において $A=\lambda$ とすると、 $\pi_A \cdot \hat{U}_s^2 / g d_0 = \lambda / d_0$ となり d_0/λ は(44)式(粘性項除く)右辺の各項が同じであれば、現地と模型で相似であり、(47)式より $f_{1,r} = 1$ となり、Bognoldの f_1 は我々の考えと矛盾しない。このことより、幾何学的スケールと波のスケールの比を同一とし、浮遊砂の相似性で述べた無次元量を同一とすれば(46)式の第二、第三、第四項の無次元量は現地と模型で同一となり、底面に存在するrippleによるエネルギー減衰の相似性(エネルギー loss による波高低下)もある程度相似していることがわかる。なお d_s のかわりに W_0 を取るとある程度 $\hat{U}_s / \nu_g$ による C_D の変化も取りこむことができ、(46)は(43)~(45)よりすぐれた表示法であろう。

次にAとして底面における浮遊砂の濃度 $\bar{m}$ (P. P. m)を取れば $\pi_A = \bar{m}$ より

$$\bar{m} \approx f \left(S, \frac{\hat{U}_s}{W_0}, \frac{\hat{U}_s}{\sqrt{g d_0}} \right) \dots\dots\dots (48)$$

となる。濃度と言うのは底面より距離 Z によって変るものであり、濃度を比較する時、その場所を決めておかなければならない。(48)式の基本量は $\hat{U}_s$, g , ρ であり長さのスケールは、 $\hat{U}_s^2 / g$ となる。よってこれに比例した $\alpha \cdot \hat{U}_s^2 / g$ の高さ Z_s の高さで計るのが一つの方法である。ただここで α は任意に選んで良い。たとえば α を $g d_0 / \hat{U}_s^2$ にすれば、 Z_s の高さは d_0 に比例したものになる。要するに $\bar{m}$ を比較する場合、その測定点は ripple 形状を決める要素から決められる長さスケールを基準としなければならない。

なおここで論議した $\bar{m}$ は、rippleが形成されない flat bed でも(48)式は成立するはずである。

さて〔4〕における論議において、代表時間として周期 T を取ってきた。これより底面近くの粒子の運動によって生ずる海底変化は、 T の縮尺で決まると考えて良い。もし $H_r = h_r$, $(H_0/L_0)_r = 1$, $(\sqrt{g H_0}/W_0)_r = 1$ なる条件下で実験を行なえば、底質粒子の運動の相似性に関する無次元パラメーターも現地と模型で同じとなり、 $t_r = h_r^{1/2}$ として良いことになる。

注2)

堀川らは, Longuest-Higgins,¹⁹⁾の層流境界層の理論的検討

梶浦²⁰⁾の乱流境界層の理論的検討結果を使い, 底面に存在する粒子に作用する力の釣り合を考えて次の結果を得た。

まず境界層の区分については Manohar²²⁾の^板振動版の実験結果を利用し

1) 滑面領域 $d/\delta_\ell < 0.153$

$$\left. \begin{array}{l} \text{層流: } (H_0/L_0) \left(\sinh \frac{2\pi h}{L} \right)^{-1} (H/H_0) < 556 (d/L_0) (d/\delta_\ell)^{-1} \\ \text{乱流: } (H_0/L_0) \left(\sinh \frac{2\pi h}{L} \right)^{-1} (H/H_0) > 556 (d/L_0) (d/\delta_\ell)^{-1} \end{array} \right\} \dots (49)$$

2) 粗面領域

$$\left. \begin{array}{l} \text{層流: } (H_0/L_0) \left(\sinh \frac{2\pi h}{L} \right)^{-1} (H/H_0) < 104 (d/L_0) (d/\delta_\ell)^{-1} \\ \text{乱流: } (H_0/L_0) \left(\sinh \frac{2\pi h}{L} \right)^{-1} (H/H_0) > 104 (d/L_0) (d/\delta_\ell)^{-1} \end{array} \right\} \dots (50)$$

とし, 粒子に働く力として, 水平加速度による力を無視し, 力の水平方向成分とまさつ力の釣り合を考えて, 全面移動限界(海底表面の第一層の砂がほとんど動き出す限界)を求めた。その結果によると, 限界状態では

層流および滑面乱流では

$$\text{sgd} \mu_s / \hat{U}_s^2 \text{ は } \hat{U}_s \delta_\ell / \nu \text{ の関数であり,}$$

粗面・乱流では

$$\text{sgd} \mu_s / \hat{U}_s^2 \text{ は } \hat{U}_s / \sigma_d \text{ の関数である。}$$

とし, 実験結果を比較している。図8は層流および滑面乱流, 図9は粗面乱流の場合, 図10はSが異なるものと比較したものである。図において点がぼらつくのは μ_s の違いによるものと思われる。

注3)

Yalin²³⁾は ripple 形状を決めるのに我々と同様に次元解析を行なっている。ただ彼の場合, 場のポテンシャルに関する g を考えていない。流体と底質材料の密度が異なっているから当然 g は考えなくてはならない。

また堀川¹⁸⁾は ripple の波長 λ , 波高 η は

$\hat{U}_s, d_0, d, W_0, \nu$ が関係するとして

$$\varphi_1(\eta/\lambda, \eta/d_0) = 0, \quad \varphi_2\left(\frac{d_0}{\lambda}, \frac{\hat{U}_s d_0}{\nu}, \frac{W_0 d}{\nu}\right) = 0 \quad \dots (51)$$

とし、図11, 図12の結果を得ている。彼らの結果によれば、我々が今まで述べてきた相似性に関する無次元量とは違ったパラメーターが ripple 形状を支配することになる。彼らは、渦のスケールが、ripple 形状を決めるとし、渦のスケールを決める $\hat{U}_s d_0/\nu$ が ripple 形状を支配するとしている。しかし渦のスケールは、 $\hat{U}_s d_0/\nu$ によって変化を受けないで ripple の形状だけに支配される領域であると考えられる。(渦の形の相似性は、物体の長さによって決められる。ストロークス数一定、形状係数一定の領域)

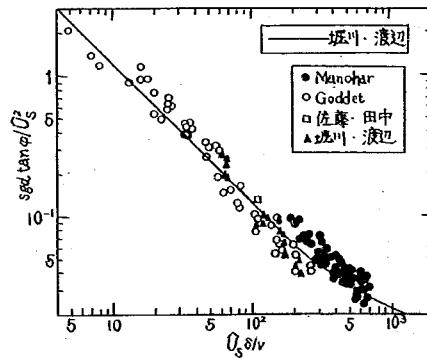


図8 全面移動限界条件一層流および滑面・乱流の場合〔堀川清司・渡辺晃 1966〕

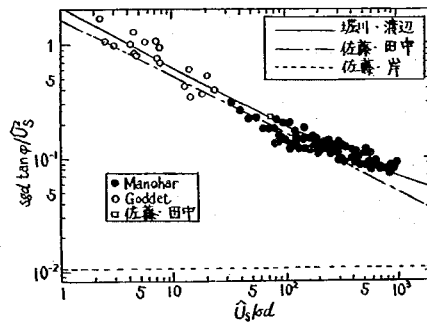


図9 全面移動限界条件 粗面・乱流の場合〔堀川清司・渡辺晃 1966〕

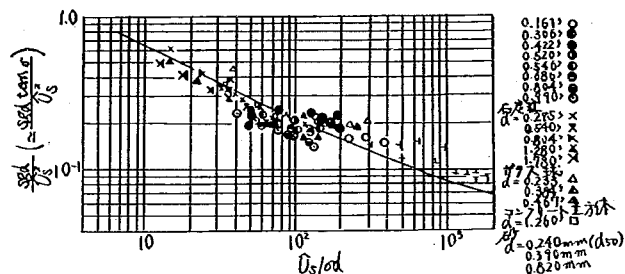


図10 Rance Warrenの実験結果との比較〔堀川清司・渡辺晃 1968〕

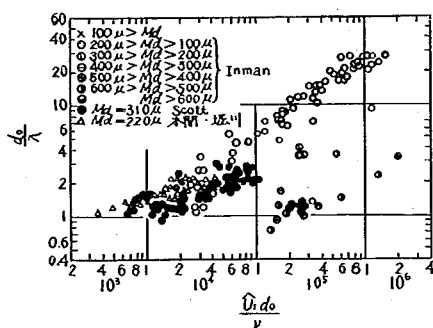


図11 波による砂れんの大きさ(Ⅱ)

〔本間仁・堀川清司 1963〕

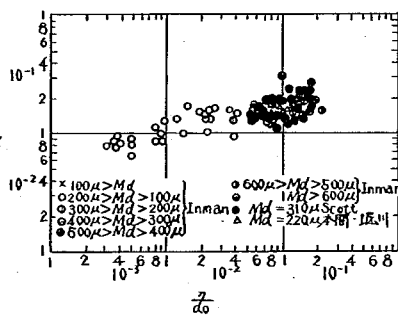


図12 波による砂れんの大きさ(Ⅰ)

〔本間仁・堀川清司 1963〕

[5] 三次元現象への拡張

今まで粒子の運動を二次元の場で考えてきた。この考え方は三次元の場合でも成立するはずであり、三次元現象においても、先に示した無次元量を同一にすれば良いことになる。これを今まで発表されている沿岸漂砂量公式と斉合性があるかを調べてみよう。

注1) で述べたように河床変形が相似であるためには、

$$t_{sr} = (1 - \lambda)_r \cdot X_r \cdot h_r \cdot q_{srx}^{-1} = (1 - \lambda)_r \cdot X_r \cdot h_r \cdot q_{syr}^{-1} \dots\dots\dots (52)$$

でなければならない。 $\lambda_r = 1$ $X_r = h_r$ として

$$t_{sr} = h_r^2 \cdot q_{sxr}^{-1} = h_r^2 \cdot q_{syr}^{-1} \quad \dots\dots\dots (53)$$

これより $q_{sxr} = q_{syr}$ でなくてはならない。

岩垣・榎木は、沿岸漂砂量を算定するにあたって、河川の流砂量公式と知られる Kalinske - Brown 型の公式が適用できるとし、沿岸流速として Putnam・Munk・Trayer のエネルギー理論から求めた式を用い

$$Q_x / \phi = 31.7 \left(\frac{E_x \cdot i^{2/3}}{\phi} \right)^{3/2} \quad \dots\dots\dots (54)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで, } \phi &= g^{1/2} (H_0/L_0)^{1/6} H_0^{3/2} i^{1/3} d (\sin 2\alpha_b)^{1/3} \cos \alpha_b \\ \phi &= (\rho_s - \rho) g^{3/2} d H_0^{1/2} L_b (H_0/L_0)^{1/6} (\sin \alpha_b)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (54) \\ E_x &= 1/6 \rho g (L_b H_b^2/T) \sin 2\alpha_b \end{aligned}$$

であり、 Q_x は沿岸漂砂量、 i は砕波点から汀線までの平均海底勾配、 b は砕波点での値、 α は波向を示す。

模型を歪ませず重力場で実験を行ない $(H_0/L_0)_r = 1$ とすると

$$\begin{aligned} \phi_r &= h_r^{3/2} \cdot d_r \\ \phi_r &= (\rho_s - \rho)_r \cdot d_r \cdot h_r^{3/2} \quad \dots\dots\dots (56) \\ E_{xr} &= h_r^{5/2} \end{aligned}$$

$$\text{よって } Q_{xr} = h_r^3 (\rho_s - \rho)_r^{-3/2} d_r^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (57)$$

$$\begin{aligned} q_{sxr} &= Q_{xr} \cdot h_r^{-1} \text{ であるから} \\ t_{sr} &= (\rho_s - \rho)_r^{3/2} \cdot d_r^{1/2} \quad \dots\dots\dots (58) \end{aligned}$$

となる。 $(\rho_s/\rho)_r = 1$, $(H/d)_r = 1$ とすると

$$t_{sr} = h_r^{1/2} \quad \dots\dots\dots (59)$$

となりフルード則と同一時間縮尺となり、今までの論議と矛盾しない。なお Q_x が波の沿岸方向成分 E_x に比例する場合 ($Q_x = \alpha E_x$) にも $t_{sr} = h_r^{1/2}$ となる。

なお沿岸付近の流れ (沿岸流、離岸流など) や、Wave set up はラジエーション応力によって生ずることが、理論的にも現象的にも確かめられているが、このラジエーション応力によって生ずる平均的な流れや、海面の上昇は、水深方向に平均値を用いた、運動量および質量保存を表わす基礎方程式より、現地と模型の幾何学的相似およびフルード相似、底面まさつ係数を現地と模型で同一にすれば、平均的な流れの相似性が成り立つことが証明しうる。よって幾何学的相似の条件下で浮遊砂運動の相似や、底面近くを動く粒子の相似性が成立するように底質を選べば、三次元現象も模型上で再現しうることになり、カブスや弧状 Bar. の形成を実験的に把握しようとする時、何を相似にしなければならぬかがわらう。

[6] 決 論

今まで述べたことをまとめると次のごとくである。

浮遊粒子の運動の相似性は

$$\left. \begin{aligned} (H_0/\ell)_r &= 1 \\ (H_0/L_0)_r &= 1 \\ S_r &= 1 \\ (\sqrt{gH_0}/W_0)_r &= 1 \\ \left(\frac{\sqrt{\nu} (H_0)^{1/4} g^{3/4}}{W_0^2} \right)_r &= 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (60)$$

で十分である。ここで (60) 式の 5 番目の無次元量の影響は小さいと考えられる。なお表面張力の影響を受けないためには、通常 1 秒以上の周期が必要である。

なお (60) 式が成立すれば、浮遊砂の濃度分布の相似性が成立する。

水平床の ripple の発生しないような場合の底面近くを動く粒子の運動の相似性は、境界層が粗面乱流なら

$$\left. \begin{aligned} (\hat{U}_s/\sigma_d)_r &= 1 \\ (C_D - \mu_s C_L)_r &= 1 \\ (\mu_s g/\sigma \hat{U}_s)_r &= 1 \\ S_r &= 1 \\ (\sqrt{\nu/\sigma d^2})_r &= 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (61)$$

で十分であり、5 番目の影響は小さい。

境界層が層流および滑面乱流では

$$\left. \begin{aligned} (\hat{U}_s^2/\sigma \nu)_r &= 1 \\ (d^2 \sigma/\nu)_r &= 1 \\ \{ (C_D - \mu_s C_L) \hat{U}_s/\sigma d \}_r &= 1 \\ \{ \mu_s g/\sigma \hat{U}_s \}_r &= 1 \\ S_r &= 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (62)$$

で十分である。

$(\mu_s)_r = 1$ および $(C_D - \mu_s C_L)_r = 1$ が成立すれば (この条件はあまり厳しいものではない。) (60) 式 (最終項除く) が成立する場では (61) 式 (最終項除く) は成立する。底質があまりに小さく、境界層が滑面の場合には、粘性の効果が強くなり、(60) 式 (最終項除く) が成立しても (62) 式は満足しない。

移動限界条件を同一にするには粗面乱流では,

$$\left. \begin{aligned} \left\{ \frac{S_g d \mu_s}{(C_D + \mu_s C_L) \hat{U}_s^2} \right\}_r &= 1 \\ (\hat{U}_s / \sigma_d)_r &= 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (63)$$

層流および滑面乱流では

$$\left. \begin{aligned} \left\{ \frac{S_g d \mu_s}{(C_D + \mu_s C_L) \hat{U}_s^2} \right\}_r &= 1 \\ (\hat{U}_s \delta_\ell / \nu)_r &= 1 \\ (d / \delta_\ell)_r &= 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (64)$$

で十分である。ここで $\delta_\ell = (2\nu/\sigma)^{1/2}$, (63)式は(60)式(粘性項除く)が満足していれば成立する。(64)式は(60)(粘性項除く)式が満足していても成立しない。

ripple 形状を相似にするためには,

$$\left. \begin{aligned} (\hat{U}_s^2 / \nu_g)_r &= 1 \\ (\hat{U}_s / \sqrt{g d_0})_r &= 1 \\ (\hat{U}_s / W_0)_r &= 1 \\ S_r &= 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (65)$$

が必要である。ここで(65)式の一発目の無次元量は, rippleの発生しているような領域では, 底表面は粗面と考えられ, 影響は小さいものと思われる。粘性項を小さいものとすれば(65)式は(60)式を満足すれば成立する。

なお底面のまさつ係数 f_1 , 底面近くの濃度 m も(65)式が成立すれば相似である。しかし粘性の影響は, 底質材料が非常に小さくなった場合, C_D が粘性の影響を受け, (60), (61), (63), (65)式において, 粘性を含む無次元量を一致させなければならず, 実際には相似性が成立しない恐れは残る。ただ d のかわりに W_0 で無次元量を表わした場合には, ある程度 ν の影響を含んだものとなろう。

なお, (60), (61)式において時間縮尺 $t_r \rightleftharpoons T_r$ である。

5. 海岸地形の相似性についての実証的検討

(1) はじめに

4章において、海岸地形の相似性を決めるパラメーターについて論じた。ここでは前章で述べた無次元パラメーターは、海岸地形の相似性を表わすパラメーターとして本当に適当か、また各パラメーターの内影響の大きいのはどのパラメーターかを、今まで発表されている資料等を使って実証的に検討してみたい。

(2) 底面近くの粒子の運動に関する実証的検討

底面近くの粒子の運動の内、移動限界状態ぐらゐの砂の動く所での相似性は、堀川らが行なった移動限界を表わす無次元量と筆者が求めた無次元量は、ほぼ同一であり、実験結果の裏付もあり、正しいものと思われる。しかし、底質の移動がより激しくなり、ripple が発生するような所で筆者が求めた無次元パラメーターは、本間・堀川¹⁶⁾ Yalin²³⁾ のものとは異なっている。よって筆者が求めた無次元パラメーターによって砂運や、底面濃度を表わすことができるか既存の資料を使って確かめてみる。

ここでは初めに (46) 式によって整理を行なってみる。今Aとして ripple の波長 λ 、波高 η を取ると

$$\frac{\lambda}{\hat{U}_s^2} = f_1 \left(\frac{\hat{U}_s^2}{\nu_g}, \frac{\hat{U}_s}{\sqrt{gd_0}}, \frac{\hat{U}_s}{W_0}, \frac{\rho_s}{\rho} \right)$$

$$\eta_g / \hat{U}_s^2 = f_2 \left(\frac{\hat{U}_s^2}{\nu_g}, \frac{\hat{U}_s}{\sqrt{gd_0}}, \frac{\hat{U}_s}{W_0}, \frac{\rho_s}{\rho} \right)$$

となるが、両辺に無次元量 $(\hat{U}_s / \sqrt{gd_0})^2$ の2乗を積して

$$\left. \begin{aligned} \lambda/d_0 &= f_3 \left(\frac{\hat{U}_s^2}{\nu_g}, \frac{\hat{U}_s}{\sqrt{gd_0}}, \frac{\hat{U}_s}{W_0}, \frac{\rho_s}{\rho} \right) \\ \lambda/\eta &= f_4 \left(\frac{\hat{U}_s^2}{\nu_g}, \frac{\hat{U}_s}{\sqrt{gd_0}}, \frac{\hat{U}_s}{W_0}, \frac{\rho_s}{\rho} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (66)$$

となる。(こうすると堀川らが表わした表現法と同一になり比較しやすい。) (66) 式によって Inman²⁴⁾, Scott²⁵⁾, 松梨・大味²⁶⁾, 堀川・渡辺, 田中⁷⁾, 新保の資料を整理してみる。ここで Inman の資料は実際の海で調査したものであり、 $\hat{U}_s$, d_0 は、他の資料より大きい。また Scott の実験は水平床に生ずる ripple でなく、傾斜床での実験結果で、 $\hat{U}_s$, d_0 を浅海波理論を求めたものであり、他の実験に比べ誤差が大きいと考えられる。また沈降速度は、測定されていないもの

は Rubey の式より求めた図13によった。²⁰⁾よって沈降速度は、水温等による粘性係数の影響や、砂の形状形数の違いにより2割ぐらいの差はあると思われる。なお詳しい実験条件、測定値は表1に示した。

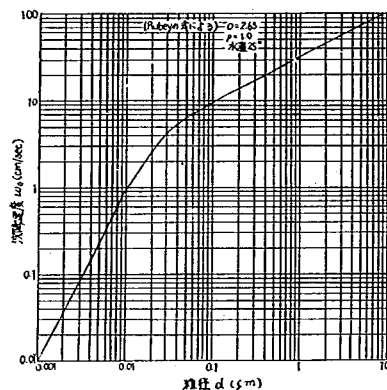


図13 砂粒の沈降速度と粒径との関係

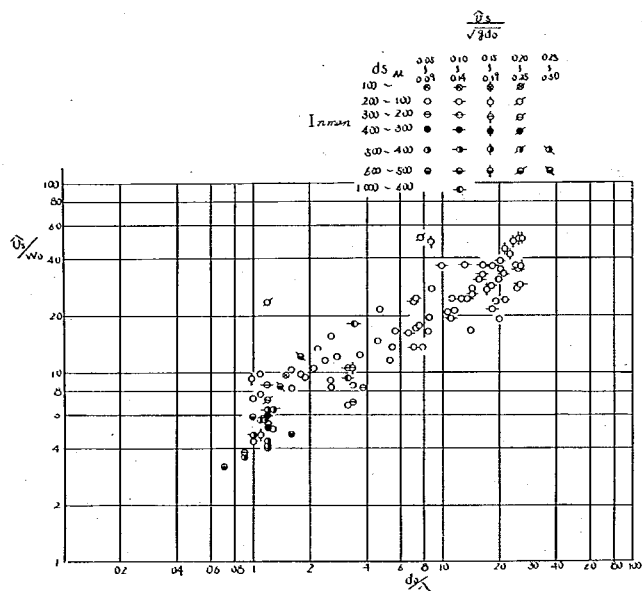


図14

Scoll

$d_n = 0.031 \text{ cm}$

$\frac{U_s}{\sqrt{g d_n}}$	0.15	0.20	0.26	0.30
	0.17	0.24	0.27	0.35

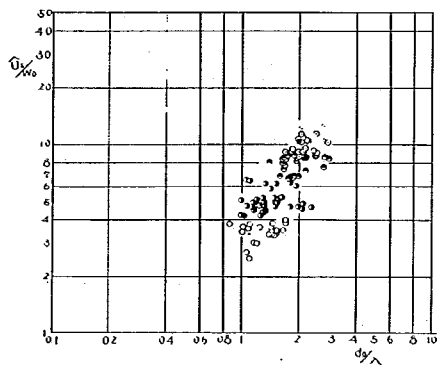


図 15

$d_{50} = 0.04 \text{ mm}$

$\frac{U_s}{\sqrt{g d_{50}}}$	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
	0.17	0.24	0.27	0.34	0.37

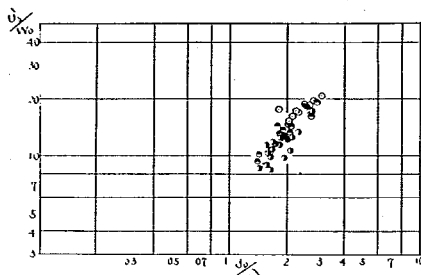


図 16

田中、新保

5 頁 第 3 頁 $J = 0.002$, $d_{50} = 0.021 \text{ cm}$, $W_0 = 10\%$

$\frac{U_s}{\sqrt{g d_{50}}}$	0.10	0.15	0.20	0.25
	0.14	0.17	0.24	0.30

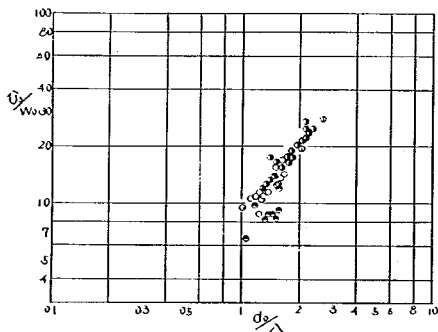


図 17

坂井、森田

4 頁 第 4 頁

$d_{50} = 0.054 \text{ cm}$, $W_0 = 11\%$

$\frac{U_s}{\sqrt{g d_{50}}}$	0.10	0.15	0.20	0.25
	0.14	0.17	0.24	0.30

$\beta = 1.21$
 $\gamma_r = 1.18$

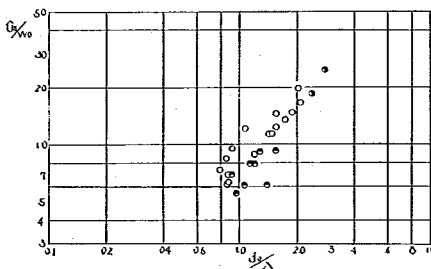


図 18

		$d_s/435$	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
d_s	M	0.01	0.14	0.11	0.21	0.21	0.20
100	100	0	0	0	0	0	0
200	100	0	0	0	0	0	0
300	100	0	0	0	0	0	0
400	100	0	0	0	0	0	0
500	100	0	0	0	0	0	0
600	100	0	0	0	0	0	0
700	100	0	0	0	0	0	0

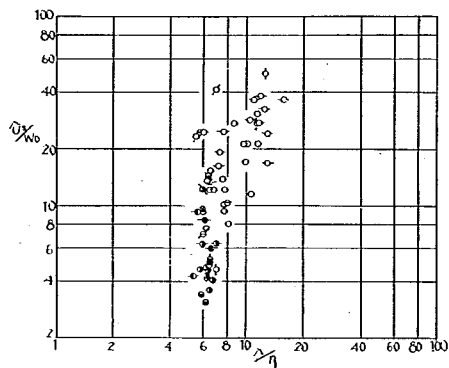


图 19

Scoll $d_s = 0.031 \text{ cm}$

$\frac{U_s}{\sqrt{d_s}}$	0.15	0.20	0.25	0.30
$\sqrt{d_s}$	0.17	0.21	0.21	0.35

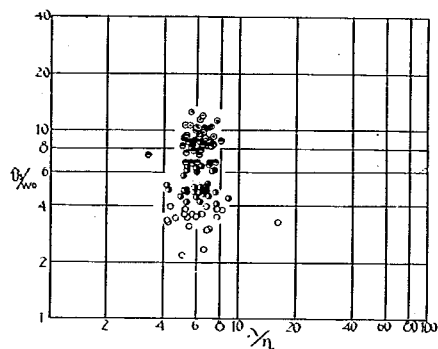


图 20

松梨 $d_{50} = 0.014 \text{ cm}$

$\frac{U_s}{\sqrt{d_s}}$	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
$\sqrt{d_s}$	0.11	0.24	0.21	0.34	0.31

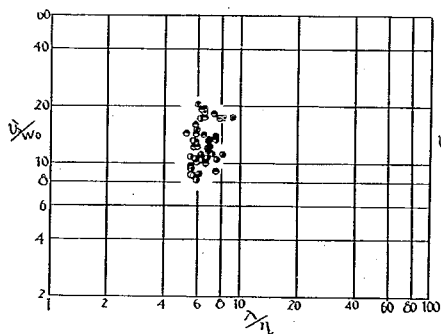


图 21

石炭粉 $d_s = 0.018 \text{ cm}$

$\frac{U_s}{\sqrt{d_s}}$	0.10	0.15	0.20	0.25
$\sqrt{d_s}$	0.14	0.17	0.24	0.30

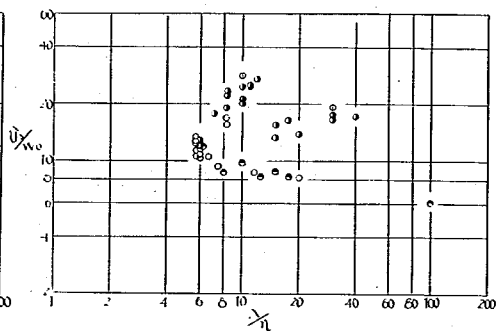


图 22

球状スロ-ル

$$ds = 0.034 \%$$

$$W_0 = 1.11 \%$$

$$\frac{\hat{U}_s}{\sqrt{ds}} \begin{matrix} 0.10 & 0.13 & 0.20 \\ 0.14 & 0.11 & 0.24 \end{matrix}$$

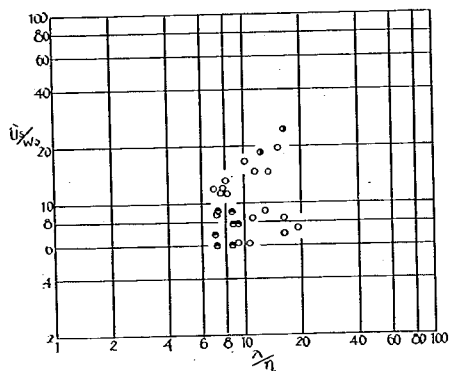


図 23

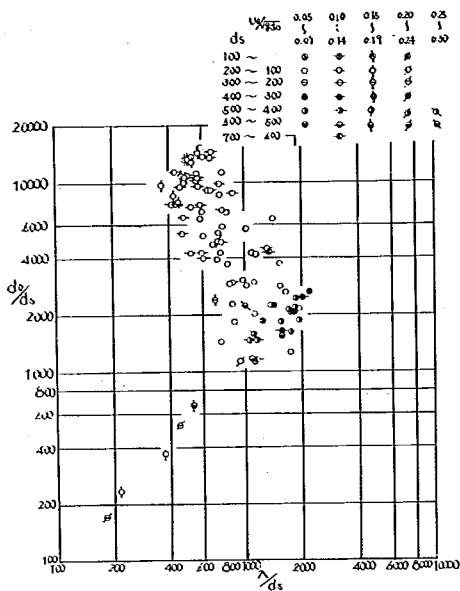


図 24

スロ-ル $ds = 0.031 \text{ cm}$

$$\frac{\hat{U}_s}{\sqrt{ds}} \begin{matrix} 0.15 & 0.20 & 0.23 & 0.30 \\ 0.17 & 0.24 & 0.27 & 0.33 \end{matrix}$$

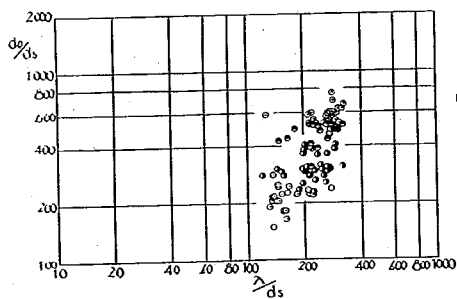


図 25

スロ-ル $ds = 0.014 \text{ cm}$

$$\frac{\hat{U}_s}{\sqrt{ds}} \begin{matrix} 0.15 & 0.20 & 0.25 & 0.30 & 0.35 \\ 0.17 & 0.24 & 0.27 & 0.34 & 0.37 \end{matrix}$$

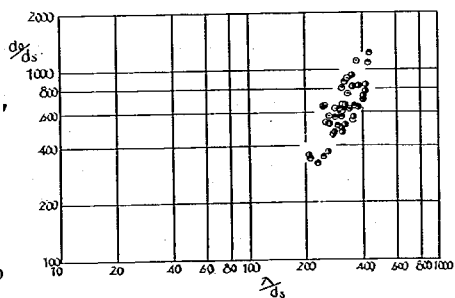


図 26

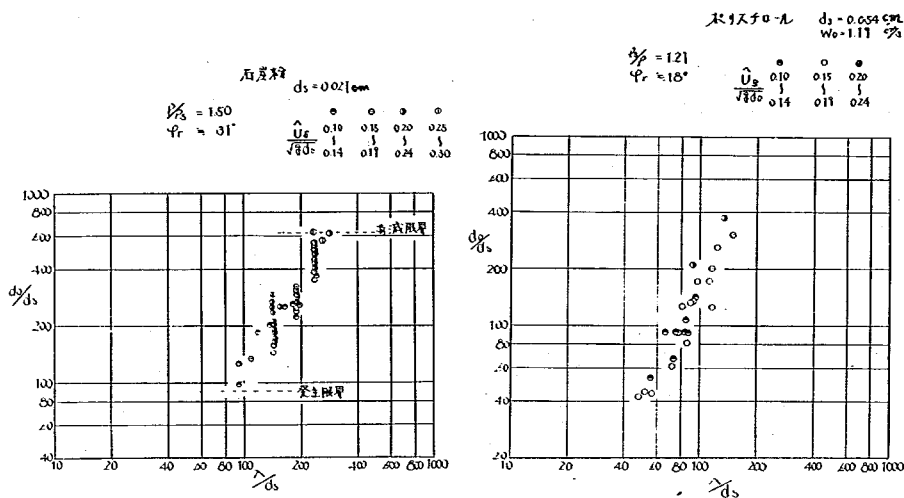


図 27

図 28

図 14 から図 18 は、横軸に d_0/λ 、縦軸に $\hat{U}_s/W_0$ として $\hat{U}_s/\sqrt{gd_0}$ をパラメーターとして示した。

Inman, Scott, 松梨・大味の資料をみると Inman の資料に比較して Scott の資料は少し下に、松梨・大味の資料は上に有るが、ほぼ同一の所に固まる傾向にある。粒径が違っても、ほぼ同一の所に固まることは、(66) 式を裏付けている。次に $\hat{U}_s/\sqrt{gd_0}$ の違いによる d_0/λ の変化は、あまりはっきりしないが、図面上で同一 $\hat{U}_s/W_0$ では $\hat{U}_s/\sqrt{gd_0}$ の大きな方が d_0/λ が小さいようである。 P_s/ρ の効果はポリステロール ($P_s/\rho = 1.21$)、石灰粉 ($P_s/\rho = 1.50$) が図面上で砂に比べて上の方に有り、同一 $\hat{U}_s/W_0$ に対して d_0/λ が小さく (砂波波長が長い) なるようだ。なお Inman の資料において d_0/λ が 2.5 以上になると、他の資料に比較して勾配 (d_0/λ の増加に対する $\hat{U}_s/W_0$ の増加) が変化しているように思える。この原因については後で述べたい。

図 19 から図 23 は、横軸に λ/η 、縦軸に $\hat{U}_s/W_0$ を取ったものである。この図をみると砂の場合ほぼ同一の場所に固まるが、石灰粉の場合点がちらばっている。この原因は、はっきりしないが、ripple が十分に発達しない内に測定が始められたのかも知れない。ripple の最大 Steepness η/λ は良く知られているように水中安息角に近づくと言われている。

砂の場合 $\eta/\lambda = 1/5.0$

ポリステロール $\eta/\lambda = 1/7$

石灰粉 $\eta/\lambda = 1/5.6$

であり、ポリステロールの安息角 18° 、石灰粉 31° 、砂 35° から 40° 位であると考えられ、

安見角が大きいほど η/λ が大きくなっている。

河床砂の流砂量を A. H. Einstein²⁹⁾ が、半理論的に求めた時、一つの砂粒子が Saltation する距離を粒径 d_s の約 100 倍飛ぶとして流砂量を求めている。砂蓮の波長も、砂粒子の飛ぶ距離と関係があると考えられる。この飛ぶ距離を表わすには (46) 式より (45) 式の方が分りやすい。A として λ を取ると

$$\lambda/d_s = f \left(\frac{\sqrt{gd_0 \cdot d_0}}{\nu}, \hat{U}_s/\sqrt{gd_0}, \rho_s/\rho, d_0/d_s \right) \dots\dots\dots (67)$$

となる。

図 24 から図 28 は横軸に λ/d_s , 縦軸に d_0/d_s を取ったものである。これによると d_0/d_s が 1,000 位までは、 d_0/d_s の増加につれて λ/d_s は増加傾向にあるが、 d_0/d_s が 1,000 を越えると、逆に λ/d_s は小さくなっていく。

$d_0/d_s < 1,000$ 位までは、Ripple の波長は、底面近くの水粒子の移動距離にほぼ比例するが、 d_0/d_s が 1,000 を越えると、砂粒子の飛ぶ距離が、 d_0 より小さくなるため、水粒子の運動に追従しえなくなり、砂粒子の飛距離が Ripple の波長を決めるものと思われる。なお d_0/d_s は砂粒子を動かそうとすると力とそれに抵抗する力の比と考えることができる。

この砂蓮の波長が $d_0/d_s > 1,000$ の時、河床に現われる砂蓮波長 λ_R

$$\lambda_R/d_s = 300 \sim 1,500 \dots\dots\dots (68)$$

とほぼ規模が同じであるのは興味深い³⁰⁾ d_0 が大きくなると (周期が長い) 一方向流れ (河川流) と同一な砂蓮発生機構を持つてくるのだろうか。 (ただ河川における Ripple は $d \cdot d/\nu < 20$ 以下で発生すると言われ³⁰⁾ この範囲では底面は完全粗面とは言えず、粘性底層の影響を受ける範囲であり、また 0.6mm 以上の d では Ripple は発生しないと言われている。一方海床にできる Ripple は底面の境界層が粗面と言われる領域で発生しているし、土研の実験では 1.4mm の底質でも発生している。発生機構が異なるのであろうか。^{注1)}) これが図 14 における勾配の違いとなって現われたのである。以上のことより、Ripple 形状を相似にするには $(\hat{U}_s/\sqrt{gd_0})_r = 1$, $(\hat{U}_s/W_0)_r = 1$, $(\rho_s/\rho)_r = 1$ にすれば、ほぼ相似な Ripple を形成しうることが分かった。

なお ρ_s/ρ の効果に関しては、砂蓮波長 λ に対する影響ははっきりしないが (石炭粉、ポリスチロールは、同一 d_0/d_s に対して λ/d_s が少し小さい。しかしこれが ρ_s/ρ の効果か、沈降速度に関係する ν の効果かはっきりしない。), 砂蓮の発生、消滅限界に関係するようだ。田中らの石炭粉の場合 $\hat{U}_s/W_0$ が 6 近くで発生し、28 近くで消滅している。砂の場合の発生と消滅限界は判らないが、資料としては 3 から 50 近くまで存在している。底面の境界層が乱流の場合には、砂蓮は移動限界を越えるとすぐに発生することが知られている。このことは砂蓮の発生限界を支配する無次元パラメータ

—として (63) 式を取れば良い。(63) 式を $Sgd_s \propto W_0^2$ と考えて変形すると

$$Sgd_s \tan \varphi / \hat{U}_0^2 \rightarrow (W_0 / \hat{U}_s)^2 \tan \varphi$$

$$\hat{U}_s / \sigma d_s \rightarrow \frac{\hat{U}_s^2}{W_0^2} \cdot \left(\frac{\sqrt{gd_0}}{\hat{U}_s} \right)^2 S$$

となり, $\hat{U}_s / W_0$, $\sqrt{gd_0} / \hat{U}_s$, S を同一にすれば砂蓮の発生限界は同一になる。境界層が層流の場合には ν を含んだ無次元量を同一にしなければならない。砂蓮の消滅限界を決める無次元量は, ν の効果は小さく $\hat{U}_s / W_0$, $\sqrt{gd_0} / \hat{U}_s$, S を同一にすれば良い。 S が小さいと同一 W_0 に対して d が大きくなり相対的に粒子の突出高が高くなり, 底面に働く力が大きく, Ripple の消滅が早くなるのであろう。もちろん浮遊運動に関する S の効果も, 石炭粉の消滅限界 $\hat{U}_s / W_0$ を小さくする原因であると思われる。この消滅現象は, 河床 Ripple の直接平滑に行く過程に対応したものと考えて良いだろう。($\hat{U}_s / W_0$ は河床の場合の U_*^2 / Sgd に対応している。)

次に $\bar{m}$ に関する相似性を検討してみよう。ここでは (48) 式を使わずに (45) 式によって資料を整理してみる。ただ, $\hat{U}_s / W_0$ と同様な意味を持つように $\hat{U}_s / \sqrt{gd_s}$ を $\hat{U}_s / \sqrt{Sgd_s}$ に変えて整理した。(沈降速度の判らない資料があるため。) 濃度測定点は $Z_s = 200 d_s$ とした。今手元にある資料によって $\bar{m}$ に対する $\hat{U}_s / \sqrt{Sgd_s}$ のグラフを書くと図 29 のごとくなる。ここで野田,³⁵⁾ 服部³⁶⁾ の資料は重複波の節の点における濃度であり $\hat{U}_s$, d_s は重複波の波高 H を使って計算した。濃度は測定法, あるいは Ripple のどこで測定するかで, つまり海床高をどこにするかで, かなりの誤差が出てこの図では (45) 式の関係をはっきりさせることができなかった。また $Z_s = 200 d_s$ としたためこの位置が水深の $1/3$ 近くにもなった資料があり, このような場所では, 水深 h の影響が入る。なお Farchild³⁷⁾ が, 同一底床材料, 同一初期底床勾配に同一波を当て, ただ水温だけを 53°F , 80°F の二つの場合で実験を行なっている。これによると水温 53°F の方が 80°F に比較して浮遊砂濃度が 50% 前後大きくなっている。これは ν の変化影響と考えられ, 底質材料が 0.022 cm であることから沈降速度がかなり変化したためと思われる。(45) 式で濃度を表わそうとする時 100 μ オークの d では $\sqrt{gd_0} \cdot d_0 / \nu$ にも影響を受けると考えるべきだろう。ただ (46) 式で表わす時には, 沈降速度の変化を $\hat{U}_s / W_0$ の中に組み込めるので, $\hat{U}_s^2 / \nu g$ の影響はかなり少なくなるものと思われる。

S の影響は図 29 でははっきりしないが Ripple 形態が変わらなければ同一 $\hat{U}_s / W_0$ に対して, S が小さいと d が大きいため $f \left(\frac{d}{\delta} \right)$ が大きくなり,^{注2)} 底質は動かされやすくなるため, 濃度も大きくなるものと思われる。なお Ripple が消滅すると底面近くの拡散能力が落ちるため, $\hat{U}_s / \sqrt{Sgd_s}$ の増加につれて m が一度低下するだろう。

m と $\hat{U}_s / \sqrt{Sgd_s}$ の関係はほぼ $m \propto \left(\hat{U}_s / \sqrt{Sgd_s} \right)^5$ となっている。

注 1)

文献 30) では次のように言っている。

“砂蓮と砂堆の領域を区分する重要な物理量は Yalin も示しているように砂粒レイノルズ数 $U_* d / \nu$ であると考えられる。Simon の研究において F_r 、あるいは τ_* の小さい値に対して砂蓮が形成され、これを増加すると砂堆に遷移し、その限界値が水路の規模によって変化すると述べられている事実や、砂蓮は砂の粒径が 0.6 mm 以上の場合にはほとんど形成されないといわれている事実は、砂蓮から砂堆への遷移が $U_* d / \nu$ で支配されると考えることによって理解できよう。”

ここで $\tau_* = U_*^2 / S g d$ である。……は筆者

この考えによれば、河床 Ripple は ν の効果があり、海床 Ripple と発生機構が異なると考えた方が自然である。しかし河床 Ripple 形成の実験範囲を広げれば、(水深増大) $U_* d / \nu > 20$ 以上、0.6 mm 以上で Ripple が発生するのではなからうか。実験室内での実験は、せいぜい水深数 10 cm で行なわれていることが多い。 $d = 0.6 \text{ mm}$ とし、 $\lambda_R / d = 1,000$ とすると $\lambda_R = 60 \text{ cm}$ にもなる。これぐらいの波長になると、水深の影響が強くなり、dune の領域に入ってしまうのではなからうか。また河床 Ripple もその波長が粒径に関係づけられると言うことは、十分に発達した河床 Ripple 形状では粘性には大きく支配されないと言うことを裏づけているようにも思える。粘

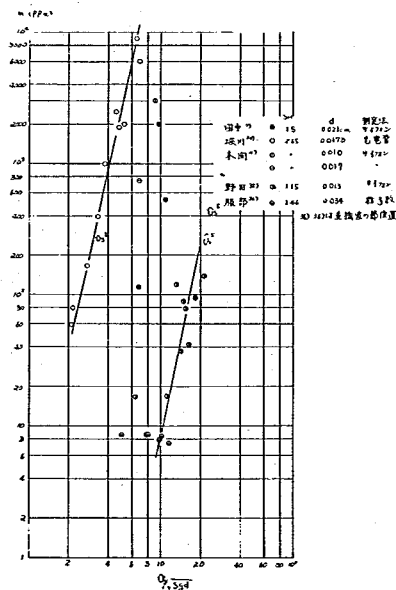


図 2.9

性が影響するとすれば底面の境界層の厚さと粒径の関係であり、球の抗力係数 C_D のレイノルズ数による変化である。Ripple と dune の領域区分の係数に境界層の厚さ C_D の変化が、一次的な要因になる特別な理由も見つからない。むしろ H/d が関係するのではなからうか。

今直線河道で、河床形態に関する要因をひろい出すと、

流体の特性	ρ, ν
底質の特性	ρ_s, d, σ
流れの強さ	u_*
水路の特性	H, B
場の特性	g

ここで σ は底質材料の標準偏差、 B は川幅

基本量として ρ, g, d とすると、河床の特性 λ は

$$\pi_\lambda = f \left(\frac{\sqrt{g d} \cdot d}{\nu}, \frac{u_*^2}{S g d}, H/d, B/d, S, d/\sigma \right) \quad (69)$$

(69) は一項、二項より、

$$\pi_\lambda = f \left(u_* d / \nu, \frac{u_*^2}{S g d}, H/d, B/d, S, d/\sigma \right) \quad (70)$$

$S, d/\sigma$ の一定の砂では Ripple は水深、川幅に関係しないと考えられ

$$\pi_\lambda = g(u_* d / \nu, u_*^2 / S g d) \quad (71)$$

と考えられる。ところで $u_* d / \nu$ は粘性底層と C_D に関する。一方 dune 河床形態では水深が関係し

$$\pi_\lambda = g_2(u_* d / \nu, u_*^2 / S g d, H/d) \quad (72)$$

となる。この右辺第一項は、 $u_* d / \nu$ が大きくなるので C_D が一定、粘性底層は粒径に比較して無視するほど小さくなるので、影響は少なく

$$\pi_\lambda = g_3(u_*^2 / S g d, H/d) \quad (73)$$

と考えて良いだろう。Ripple の区分は、Ripple と dune の影響要素の支配要因より $u_*^2 / S g d$ と H/d であると考えられる。遷移、平均、反砂堆も、水面との相互干渉の影響が多いから

$$\pi_\lambda = g_3(u_*^2 / S g d, H/d) \quad (74)$$

と考えられ、その領域区分は $u_*^2 / S g d, H/d$ で決まる。なお中規模砂州形態は、 B との関係が

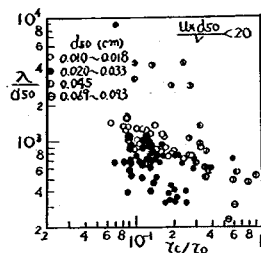


図 30 砂連の $\frac{\lambda}{d_{50}}$ と $\frac{\tau_c}{\tau_0}$ との関係

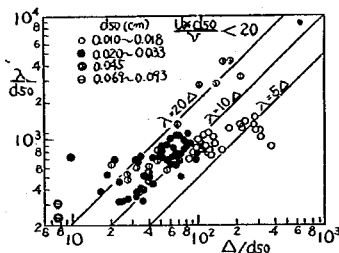


図 31 砂連の $\frac{\lambda}{d_{50}}$ と $\frac{\lambda}{d_{50}}$ との関係

強くなり,

$$\pi_1 = f(u_*^2/Sgd, H/d, B/d) \dots \dots \dots (75)$$

の関数と考えられ、小規模砂州形態と中規模砂州形態の区分は、 $u_*^2/Sgd, H/d, B/d$, or $u_*^2/Sgd, B/H, H/d$ の関数であろう。なお π_A として抵抗係数 f をとると、上述したパラメーターは、おのおのの河床形態での f を決めるパラメーターと考えることができる。これらのことは、今までの実験結果でほぼ裏づけられている。³⁰⁾ また π_A として q_s/u_*d を取ると、上述のパラメーターは単位幅流砂量が何に支配されるかがわらう。なお、浮遊砂が、底面から発生すれば、カルマン定数 κ は従属変数であるが、実河川のように Washload の発生源が底面から無い場合、カルマン定数 κ は一つの独立変数となる。

注2)

$f(d/\delta)$ は境界層が粗面乱流の時、梶浦²⁰⁾の理論で言う $\hat{C}$ (まさつ係数と考えて良い。)に相当する。梶浦の理論によれば、 $\hat{C}$ は $\hat{U}_s/\sigma Z_0$ の関数で図32で表わせる。なお $Z_0 \propto d$ であるから d が増加すると $\hat{C}$ が増加する。

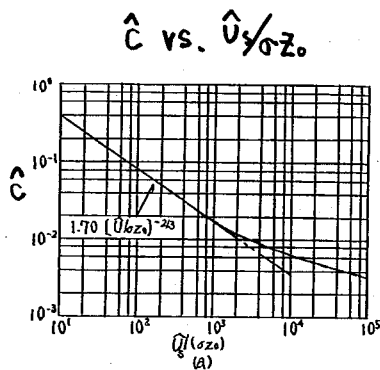


図 32

文献 25) SCOTT $d_b=0.031\text{cm}$ $W_0=4.1\text{cm/s}$

表 1 砂蓮形状の資料

(ここで d は水深)

X 附 25) SCOTT (δ=0.03)cm W=4.1cm/s S=1.65																				
H ₀	L ₀	T	H/L	d	λ	η	d/λ	d/δ _s	O ₀ g ₀	O ₀ N ₀	d/η	d/L ₀	d/L	H/H ₀ '	L	H	O ₀	d ₀	λ/d _s	λ/η
x30.49	x30.40			x2.54	x2.54	x2.54														
5.47	34.130	1.47 sec	0.016	15.24	6.50	1.09	1.50	313.87	0.21	5.00	5.73	0.0447	0.0889	1.042	171.56	5.72	20.51	9.70	209.68	5.96
"	"	"	"	16.00	8.64	1.63	1.09	303.55	0.21	4.84	5.77	0.0469	0.0910	1.034	175.86	5.68	17.94	9.41	278.71	5.30
"	"	"	"	20.32	4.47	1.02	1.73	250.00	0.19	3.98	7.60	0.0596	0.1043	0.9332	174.82	5.45	16.93	7.78	144.17	4.33
"	"	"	"	22.06	6.58	1.04	1.03	229.71	0.18	3.14	6.82	0.0670	0.1111	0.9772	205.76	5.36	14.94	7.09	212.26	4.33
"	"	"	"	10.72	4.58	1.04	1.08	409.35	0.24	6.52	12.20	0.0320	0.0789	1.111	147.87	6.10	26.79	12.69	202.26	6.03
"	"	"	"	10.92	7.07	1.70	1.04	409.35	0.24	6.32	7.46	0.0320	0.0739	1.111	147.87	6.10	26.79	12.69	292.58	5.94
"	"	"	"	11.00	7.75	1.52	1.21	363.55	0.23	4.34	6.18	0.0469	0.0910	1.034	175.86	5.68	17.94	9.41	250.00	5.10
"	"	"	"	14.51	6.35	1.09	1.46	278.39	0.20	4.75	8.49	0.0484	0.0721	1.030	177.36	5.65	17.43	9.25	204.84	5.23
"	"	"	"	22.06	5.03	0.89	1.41	229.71	0.18	3.64	7.77	0.0670	0.1111	0.9772	205.76	5.36	14.94	7.09	162.26	5.65
"	"	"	"	21.59	5.16	0.99	1.45	240.65	0.18	3.33	7.84	0.0633	0.1073	0.9860	201.21	5.41	15.71	9.46	166.45	5.21
"	"	"	"	21.59	5.16	0.99	1.46	240.65	0.18	3.33	7.84	0.0633	0.1073	0.9860	201.21	5.41	15.71	9.46	166.45	5.21
"	"	"	"	11.43	7.42	1.14	1.30	319.05	0.21	5.09	8.68	0.0335	0.0878	1.046	130.27	5.74	20.87	9.70	245.81	6.68
"	"	"	"	12.70	8.18	1.60	1.39	365.81	0.23	5.83	7.09	0.0372	0.0798	1.030	159.07	5.73	23.70	11.04	263.87	5.11
"	"	"	"	17.78	4.24	0.86	2.05	230.32	0.20	4.97	10.10	0.0521	0.0728	1.016	131.75	5.58	18.31	8.67	136.77	4.93
"	"	"	"	16.51	8.26	1.55	1.12	278.39	0.20	4.75	5.97	0.0484	0.0721	1.030	177.36	5.65	17.43	9.25	266.45	5.33
"	"	"	"	24.13	4.17	0.79	1.62	278.39	0.18	3.43	8.57	0.0708	0.1149	0.9674	210.01	5.32	14.26	6.77	135.16	5.30
"	"	"	"	22.06	5.64	1.09	1.25	228.71	0.18	3.64	6.50	0.0670	0.1111	0.9772	205.76	5.36	14.94	7.09	182.58	5.19
"	"	"	"	22.06	5.99	1.09	1.01	228.71	0.18	3.84	6.50	0.0670	0.1111	0.9772	205.76	5.36	14.94	7.09	225.48	6.41
"	"	"	"	16.51	4.72	0.76	1.76	278.39	0.20	4.75	12.17	0.0484	0.0721	1.030	177.36	5.65	17.43	9.25	152.26	6.21
"	"	"	"	15.24	8.26	1.42	1.18	313.87	0.21	5.00	6.35	0.0447	0.0888	1.042	171.56	5.72	20.51	9.70	266.45	5.82
"	"	"	"	17.78	6.65	1.12	1.31	250.32	0.20	4.97	7.76	0.0621	0.0762	1.016	191.95	5.58	18.31	8.67	214.52	5.94
"	"	"	"	11.74	4.20	1.04	1.31	382.26	0.23	6.09	11.39	0.0350	0.0775	1.072	154.10	5.80	24.77	11.85	220.00	5.76
"	"	"	"	11.43	7.09	1.70	1.33	370.65	0.23	6.22	7.12	0.0335	0.0783	1.078	149.80	6.03	25.52	12.11	279.32	5.35
"	"	"	"	16.51	7.11	1.09	1.30	278.39	0.20	4.75	8.49	0.0484	0.0721	1.030	177.36	5.65	17.43	9.25	229.35	6.52
"	"	"	"	15.24	7.49	1.19	1.30	313.87	0.21	5.00	8.18	0.0447	0.0888	1.042	171.56	5.72	20.51	9.70	241.61	6.27
"	"	"	"	17.05	7.01	1.12	1.02	236.00	0.21	4.21	6.37	0.0549	0.1003	1.004	187.93	5.51	17.26	7.13	226.13	6.26
"	"	"	"	24.13	4.24	0.71	1.60	278.39	0.18	3.43	7.44	0.0708	0.1149	0.9674	210.01	5.32	14.26	6.77	136.77	4.66
"	"	"	"	23.62	6.36	0.89	1.01	228.55	0.18	3.55	7.79	0.0673	0.1130	0.9732	207.03	5.34	14.59	6.89	221.29	7.71
"	"	"	"	23.62	4.72	0.79	1.47	223.55	0.18	3.55	8.77	0.0673	0.1130	0.9732	207.03	5.34	14.59	6.89	152.26	5.97
5.18	32.03	1.47	0.016	7.77	7.27	1.45	2.19	514.84	0.27	8.31	11.01	0.0218	0.0606	1.201	121.68	6.22	34.08	16.76	235.16	5.03
"	"	"	"	7.65	6.60	1.17	1.96	416.45	0.25	5.73	11.03	0.0236	0.0701	1.133	137.72	5.87	27.58	12.91	217.70	5.64
"	"	"	"	10.77	6.65	1.60	1.48	318.71	0.21	5.15	6.18	0.0413	0.0844	1.059	165.48	5.47	21.11	9.38	215.48	4.18
"	"	"	"	14.78	4.45	1.04	2.10	301.61	0.21	4.87	8.77	0.0436	0.0877	1.086	167.88	5.42	19.97	7.35	143.55	4.28

H ₀	L ₀	T	H ₀ /L ₀	d	λ	n	d/λ	d_0/d_s	$\sqrt{d_0/d_s}$	$\sqrt{d_0/d_s}$	d_0/n	d/L_0	d/L	H/H_0	L	H'	$\hat{U}_0$	d_0	n/d_s	n/n
13.10	230.43	1.97	0.016	17.51	0.61	1.12	0.86	209.35	0.19	3.86	6.63	0.0586	0.1033	0.9983	191.77	5.16	15.84	7.42	277.74	7.61
"	"	"	"	20.32	0.50	0.79	1.12	205.31	0.18	4.31	7.15	0.0601	0.1093	0.9932	194.82	5.14	15.61	7.31	209.68	8.23
"	"	"	"	22.62	0.49	0.79	1.54	208.39	0.17	4.37	6.53	0.0679	0.1139	0.9913	207.37	5.03	15.80	6.96	185.16	4.23
"	"	"	"	24.13	0.57	0.28	1.40	205.31	0.17	3.33	22.77	0.0714	0.1149	0.9894	210.01	5.02	15.64	6.38	147.42	16.32
"	"	"	"	24.13	0.52	1.07	1.41	205.31	0.17	3.33	5.96	0.0714	0.1149	0.9894	210.01	5.02	15.64	6.38	145.31	4.22
"	"	"	"	21.24	0.48	0.76	1.04	166.13	0.15	2.69	6.75	0.0724	0.1340	0.9901	223.13	4.87	11.01	5.15	159.68	6.51
"	"	"	"	25.05	0.22	0.84	1.10	160.00	0.15	2.42	5.54	0.1037	0.1445	0.9297	242.66	4.32	7.33	4.65	106.13	5.02
13.11	235.66	1.32	0.044	15.24	0.16	1.63	2.04	667.03	0.33	11.51	12.72	0.0517	0.0762	1.016	153.37	13.32	47.20	20.74	327.74	6.23
"	"	"	"	16.51	0.91	1.53	1.97	630.77	0.32	10.35	10.40	0.0560	0.1003	1.004	184.61	13.16	44.50	19.56	319.68	5.27
"	"	"	"	17.27	0.59	1.24	2.11	605.16	0.31	10.41	15.13	0.0595	0.1033	0.9988	167.18	13.05	42.67	18.76	286.77	7.17
"	"	"	"	21.03	0.14	1.14	1.75	515.81	0.29	8.27	14.03	0.0715	0.1158	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	274.84	8.02
"	"	"	"	21.03	0.14	1.14	1.75	515.81	0.29	8.27	12.59	0.0715	0.1158	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	257.74	5.80
"	"	"	"	22.62	0.64	1.24	1.73	482.70	0.28	8.30	12.07	0.0725	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	273.71	6.97
"	"	"	"	25.21	0.11	1.02	1.18	266.13	0.21	4.53	3.09	0.1833	0.1352	0.9132	243.33	11.77	18.77	8.25	227.35	6.97
"	"	"	"	30.27	0.84	0.76	1.26	208.06	0.20	4.10	9.71	0.1705	0.2008	0.9135	250.45	11.78	16.79	7.38	188.39	7.48
"	"	"	"	16.51	0.40	1.70	2.08	630.77	0.32	10.35	11.51	0.0560	0.1003	1.004	184.61	13.16	44.50	19.56	303.23	5.53
"	"	"	"	17.27	0.64	1.45	2.17	605.16	0.31	10.41	12.94	0.0585	0.1003	0.9988	167.18	13.05	42.67	18.76	273.71	5.76
"	"	"	"	18.54	0.13	1.24	2.19	574.84	0.31	9.89	14.37	0.0628	0.1073	0.9860	172.79	12.93	40.55	17.82	262.26	6.56
"	"	"	"	20.32	0.15	1.57	1.72	533.87	0.30	9.18	10.54	0.0637	0.1130	0.9932	177.82	12.76	37.65	16.55	311.27	6.15
"	"	"	"	20.32	0.60	1.30	2.51	533.87	0.30	9.18	12.73	0.0689	0.1130	0.9932	177.82	12.76	37.65	16.55	212.90	5.08
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.1214	0.9876	182.64	12.67	36.38	15.99	245.31	7.12
"	"	"	"	22.62	0.62	1.07	1.96	482.70	0.28	8.30	13.99	0.0775	0.							

H ₀	L ₀	T	H ₁	d	λ	τ	d _λ	d _{λs}	U _{√d₀}	U ₀ N ₀	d _λ	d _L	d _L	H ₁ H ₀	L	H	U ₀	d ₀	λ/d _s	λ/m
x30.48	x30.48			x2.54	x2.54	x2.54														
13.11	278.64	1.38	0.044	34.25	6.22	1.04	1.83	366.77	0.24	6.31	10.39	0.1076	0.1477	0.2601	214.67	12.15	25.36	11.37	200.65	5.18
"	"	"	"	27.37	6.50	0.74	1.87	372.26	0.25	6.75	12.34	0.0976	0.1410	0.2327	208.30	12.23	27.66	12.16	207.68	6.71
"	"	"	"	17.78	6.36	1.12	2.70	577.10	0.31	10.27	16.53	0.0603	0.1043	0.9932	170.47	12.02	42.12	18.51	221.27	6.13
"	"	"	"	17.78	6.37	1.35	2.03	577.10	0.31	10.27	13.71	0.0603	0.1043	0.9932	170.47	13.02	42.12	18.51	226.77	6.57
"	"	"	"	17.78	6.64	1.24	2.14	577.10	0.31	10.27	14.73	0.0603	0.1043	0.9932	170.47	13.02	42.12	18.51	278.71	6.77
"	"	"	"	17.05	8.35	1.30	2.07	557.68	0.30	12.07	13.35	0.0646	0.1092	0.9815	174.45	12.86	37.48	17.35	270.32	6.45
"	"	"	"	21.57	7.11	1.30	2.22	507.68	0.29	8.77	12.15	0.0732	0.1163	0.7653	184.85	12.66	35.76	15.30	227.35	5.47
"	"	"	"	20.32	5.14	1.70	1.31	533.37	0.30	7.18	7.74	0.0627	0.1130	0.9732	177.82	12.76	37.65	16.55	274.34	5.38
"	"	"	"	19.81	5.14	1.78	1.85	546.45	0.30	9.77	9.77	0.0672	0.1111	0.9772	178.31	12.81	38.55	16.74	274.34	5.28
"	"	"	"	22.35	6.64	1.17	1.77	472.70	0.28	8.48	13.06	0.0788	0.1135	0.7607	187.03	12.59	34.78	15.28	278.71	7.38
"	"	"	"	24.13	5.64	1.37	1.66	463.55	0.28	7.77	10.47	0.0818	0.1251	0.9520	172.87	12.48	32.67	14.37	278.71	6.31
"	"	"	"	25.40	5.08	0.77	2.72	445.48	0.27	7.66	14.24	0.0861	0.1236	0.7467	177.51	12.41	31.41	13.81	163.37	5.24
"	"	"	"	27.21	7.37	1.40	1.66	375.43	0.25	6.80	8.76	0.0970	0.1401	0.9335	208.49	12.24	27.87	12.26	237.74	5.26
"	"	"	"	32.51	7.37	0.77	1.63	360.77	0.24	6.21	11.30	0.1102	0.1476	0.9257	217.31	12.14	25.46	11.17	237.74	7.44
"	"	"	"	27.21	6.73	0.87	1.82	375.43	0.25	6.80	13.78	0.0970	0.1401	0.9335	208.49	12.24	27.87	12.26	271.10	7.56
5.47	326.44	1.45	0.017	8.13	8.76	1.55	1.40	474.17	0.26	8.07	7.80	0.0247	0.0648	1.168	125.50	6.41	30.17	15.32	232.88	5.65
"	"	"	"	5.08	8.31	1.14	2.45	475.16	0.32	11.08	18.70	0.0156	0.0573	1.228	78.97	7.07	48.46	21.55	234.17	7.73
"	"	"	"	6.60	9.71	0.44	4.65	486.45	0.30	7.60	23.41	0.0202	0.0578	1.226	114.52	6.73	37.38	13.18	126.13	6.11
"	"	"	"	4.57	8.77	1.55	2.71	767.35	0.34	12.60	15.37	0.0140	0.0477	1.327	74.37	7.27	51.66	23.85	203.55	5.67
"	"	"	"	16.51	9.76	0.87	2.34	284.17	0.21	4.66	15.17	0.0506	0.0752	1.017	173.42	5.75	17.08	0.31	121.27	6.48
"	"	"	"	14.73	7.71	1.70	0.78	413.87	0.22	5.14	5.71	0.0452	0.0887	1.042	165.82	5.72	21.08	7.73	317.68	5.83
"	"	"	"	20.32	4.95	0.66	1.70	243.87	0.17	3.97	11.45	0.0623	0.1063	0.7883	171.16	5.43	16.36	7.56	143.55	6.74
"	"	"	"	17.05	8.05	1.52	0.77	257.10	0.20	4.21	5.44	0.0584	0.1023	0.7785	186.22	5.48	17.25	7.77	267.68	5.30
"	"	"	"	27.18	4.06	0.74	1.47	172.26	0.17	3.15	7.05	0.0334	0.1257	0.9506	215.87	5.22	12.70	6.76	130.77	5.47
"	"	"	"	28.70	4.73	0.71	1.15	183.23	0.16	3.00	8.00	0.0330	0.1044	0.9445	220.07	5.17	12.27	5.48	157.03	6.74
"	"	"	"	28.78	4.33	0.71	1.18	183.23	0.16	3.00	8.00	0.0330	0.1044	0.9445	220.07	5.17	12.27	5.48	155.81	6.30
12.50	304.36	1.40	0.041	17.27	6.60	1.12	2.78	572.70	0.31	10.06	16.41	0.0563	0.1013	1.001	170.48	12.51	41.33	18.38	212.70	5.87
"	"	"	"	17.05	7.11	0.77	2.37	548.06	0.30	7.30	17.52	0.0627	0.1073	0.9240	177.54	12.33	38.11	16.77	227.35	7.33
"	"	"	"	21.57	5.57	0.81	2.76	477.10	0.28	8.43	17.02	0.0710	0.1147	0.7674	187.70	12.12	34.57	15.41	180.32	6.70
"	"	"	"	20.32	6.60	1.07	2.45	521.27	0.29	8.84	15.10	0.0668	0.1111	0.7772	182.70	12.22	36.25	16.16	212.70	6.77
"	"	"	"	20.32	7.71	1.42	1.63	521.27	0.29	8.84	11.39	0.0668	0.1111	0.7772	182.70	12.22	36.25	16.16	217.68	6.73
"	"	"	"	20.32	8.64	1.45	1.87	521.27	0.29	8.84	11.14	0.0668	0.1111	0.7772	182.70	12.22	36.25	16.16	278.71	5.76
"	"	"	"	21.57	8.64	1.35	1.78	477.10	0.28	8.43	11.41	0.0710	0.1147	0.7674	182.70	12.12	34.57	15.41	278.71	6.40

H_0	L_0	T	H/L_0	d	λ	n	d/λ	d/d_s	$U_0 \sqrt{g d_0}$	U_0/w_0	d_0/λ	d_0/L_0	d/L	H/H_0	L	H	U_0	d_0	λ/d_s	λ/n
130.49	130.49				1254	1254														
12.50	334.94	1.10	3.041	2487	3.38	1.35	1.63	441.94	0.27	7.47	10.15	0.0819	0.1251	0.2520	198.76	11.90	30.72	13.70	270.32	6.21
"	"	"	"	27.74	6.60	1.07	1.88	400.77	0.25	6.80	11.40	0.0919	0.1340	0.2401	208.51	11.75	27.87	12.43	212.90	6.06
"	"	"	"	31.78	7.37	1.02	1.52	361.61	0.24	6.13	10.77	0.1044	0.1445	0.2277	217.72	11.62	26.13	11.21	237.74	7.23
"	"	"	"	38.10	8.10	0.87	1.56	346.77	0.22	5.20	10.67	0.1253	0.1624	0.2186	234.61	11.48	21.33	9.51	176.77	6.85
"	"	"	"	41.71	8.83	0.64	1.30	290.32	0.21	4.76	13.58	0.1377	0.1733	0.2150	241.83	11.44	19.42	8.67	155.81	7.55

文献7) 田中・新保

 $d_s = 0.021 \text{ cm}$, $W_0 = 1.0\%$, $S = 0.5$

石灰粉

ϕ_0	T	$d_0 = \frac{D_0 T}{0.14}$	λ	η	$D_0 \sqrt{g d_0}$	$D_0 W_0$	$d_0 \lambda$	$\frac{D_0}{\eta}$	$\frac{\lambda}{\eta}$	$\frac{D_0}{d_s} (\times \frac{1}{21})$	$\frac{\lambda}{d_s} (\times \frac{1}{21})$	
6.50	1	2.07	2	0.02	0.14	6.50	1.04	10.50	100.00	98.57	84.24	
8.20	1	2.61	2	0.1	0.16	8.20	1.31	26.10	20.00	124.26	98.24	
8.75	1	2.78	2.3	0.2	0.17	8.75	1.21	23.35	11.50	132.86	107.53	
9.41	1	3.00	3.0	0.4	0.17	9.41	1.00	7.50	7.50	142.86	142.86	
10.41	1	3.31	"	0.5	0.18	10.4	1.10	6.62	6.00	157.62	"	
10.9	1	3.47	"	"	0.19	10.9	1.16	6.74	"	165.24	"	
11.6	1	3.63	"	"	0.19	11.6	1.23	7.38	"	175.71	"	
12.1	1	3.85	"	"	0.20	12.1	1.23	7.70	"	183.33	"	
12.8	1	4.03	"	"	0.20	12.8	1.36	8.16	"	194.29	"	
13.3	1	4.24	"	0.2	0.21	13.3	1.41	21.20	15.00	201.91	"	
13.9	1	4.43	"	0.15	0.21	13.9	1.48	22.53	20.00	210.75	"	
15.6	1	4.77	"	0.2	0.22	15.6	1.66	24.85	15.00	226.46	"	
16.5	1	5.25	3.5	0.2	0.23	16.5	1.50	26.25	17.50	250.00	186.66	
17.3	1	5.51	4.0	0.1	0.24	17.3	1.38	55.10	40.00	262.38	190.47	
16.6	1	5.29	3.0	"	0.23	16.6	1.76	52.70	30.00	251.90	142.95	
17.7	1	5.64	"	"	0.24	17.7	1.83	56.40	"	268.57	"	
19.3	1	6.15	"	"	0.25	19.3	2.05	61.50	"	292.86	"	
22.8	1.5	3.96	2.5	0.2	0.13	22.8	1.53	19.80	12.50	188.57	119.05	
23.6	"	4.23	3.0	0.2	0.14	23.6	1.41	21.15	15.00	201.43	121.95	
7.80	"	4.63	4.0	0.4	0.14	7.80	1.17	11.70	10.00	222.86	190.47	
10.50	"	5.02	"	0.6	0.15	10.50	1.26	8.37	6.67	239.05	"	
10.7	"	5.11	"	0.7	0.15	10.7	1.23	7.30	5.71	244.33	"	
11.4	"	5.45	"	"	0.16	11.4	1.36	7.77	"	259.52	"	
12.6	"	6.02	"	"	0.16	12.6	1.51	8.60	"	286.66	"	
12.8	"	6.11	"	"	0.17	12.8	1.53	8.73	"	290.75	"	
13.4	"	6.40	"	"	0.17	13.4	1.60	7.14	"	304.76	"	
14.2	"	6.78	"	"	0.17	14.2	1.70	7.67	"	322.86	"	
15.6	"	7.45	5.0	0.6	0.18	15.6	1.47	12.42	8.33	354.76	238.10	
14.9	"	8.07	"	0.6	0.19	14.9	1.61	13.45	"	384.28	"	
17.9	"	8.55	"	0.7	0.20	17.9	1.71	12.21	7.14	407.14	"	
19.0	"	9.08	"	0.6	0.20	19.0	1.82	15.13	8.33	432.38	"	
20.2	"	9.65	"	0.5	0.21	20.2	1.93	17.30	10.00	457.52	"	
21.3	"	10.18	"	0.5	0.21	21.3	2.04	20.36	"	484.76	"	

ϕ_0	T	$\phi_b = \frac{\phi_0 T}{0.272}$	λ	n	$\phi/\sqrt{g\phi_0}$	ϕ/w_0	ϕ/λ	ϕ/n	λ/n	$\frac{P}{\phi_0} (w_0^2/\lambda)$	$\lambda_0 (w_0^2/\lambda)$	
22.4	1.5	10.70	5.0	0.6	0.22	22.4	2.14	17.83	8.33	529.52	238.10	
23.2	"	11.08	"	"	"	23.2	2.22	18.47	"	527.62	"	
24.8	"	11.35	"	0.5	0.23	24.8	2.37	23.70	10.00	584.28	"	
25.0	"	11.74	5.5	"	"	25.0	2.17	23.88	11.00	568.57	241.91	
27.2	"	12.99	6.0	"	0.24	27.2	2.17	25.93	12.00	618.67	285.71	
28.1	"	13.42	5.0	"	0.25	28.1	2.68	26.84	10.00	639.05	288.10	
8.27	2.0	5.27	0.5	0.2	0.12	8.27	1.51	26.35	17.50	260.85	166.66	
8.79	"	5.60	4.0	0.5	0.12	8.79	1.40	11.20	8.00	266.66	190.47	
12.0	"	7.64	5.0	0.8	0.14	12.0	1.53	2.55	6.25	364.80	208.10	

文献2) 堀川・田中, $d_s = 0.054 \text{ cm}$, $W_0 = 1.19 \text{ cm/s}$ $S = 0.25$ $\mu \text{H} \times 4 = -1V$

d_0	U_0	λ	n	d_0/λ	d_0/d_s	$U/\sqrt{g d_0}$	U/W_0	d_0/n	T	λ/d_s	λ/n	
2.27	8.29	2.60	0.16	0.876	42.04	0.18	6.97	14.17	0.86	48.15	16.25	
2.41	8.80	0.07	"	0.785	49.63	"	7.39	15.06	"	56.85	17.17	
2.44	7.07	2.80	0.00	0.871	45.17	0.15	6.17	8.13	1.04	51.85	9.34	
2.43	7.09	2.78	0.26	0.877	45.00	0.15	6.17	9.35	"	51.48	10.49	
3.30	9.96	3.88	0.24	0.851	61.11	0.18	8.37	24.75	"	71.85	16.17	
4.00	9.56	"	0.05	"	61.11	"	9.40	"	"	"	11.07	
2.88	6.51	0.01	0.27	0.757	52.33	0.12	5.47	7.93	1.09	55.74	10.08	
3.64	8.22	0.77	0.56	0.918	67.41	0.19	6.91	6.50	"	70.52	7.67	
4.08	10.91	4.65	0.06	0.942	81.11	0.17	7.17	12.17	"	86.11	12.72	
5.00	10.47	4.17	0.58	1.20	72.57	0.15	8.80	8.62	1.50	77.22	7.17	
6.82	14.28	6.37	0.71	1.07	126.00	0.17	12.00	7.47	"	117.96	7.00	
6.85	14.04	4.39	0.56	1.56	126.85	0.18	12.05	12.23	"	81.30	7.84	
4.97	9.05	4.11	0.44	1.21	92.04	0.13	7.86	11.30	1.67	76.11	9.34	$\lambda = 1.50 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$
4.78	9.46	4.53	0.51	1.10	92.22	"	7.87	9.76	"	83.89	8.88	$\text{E.L.Z. } W_0 \text{ E 計算 T3.}$
5.82	10.94	4.58	0.62	1.27	107.78	0.14	9.17	9.09	"	84.31	7.07	
7.21	12.56	5.04	0.66	1.43	105.52	0.16	11.09	10.92	"	93.33	7.64	$0.21 W_0 S = 0.54 \times 10^2$
7.18	10.50	4.85	0.57	1.98	132.96	"	11.04	12.17	"	89.81	8.22	
9.00	17.47	6.12	0.53	1.52	172.22	0.18	14.70	17.75	"	114.33	11.55	$W_0 = 0.389 \times 10^3 \text{ Nos}$
9.01	17.51	4.90	0.06	1.70	172.41	"	14.71	25.86	"	70.74	13.61	$= 1.19 \text{ cm/s}$
11.94	22.43	4.77	0.90	2.40	220.93	0.21	18.86	27.83	"	72.04	12.43	$W_0 S = \left\{ \frac{4}{225} (1.65)^2 \frac{980^2}{1.5 \times 10^{-2}} \right\}^{1/2}$
4.77	7.16	4.71	0.65	1.06	72.41	0.10	6.02	7.68	2.17	87.22	7.25	
5.01	7.18	0.58	0.41	1.40	92.78	"	6.03	12.22	"	66.30	8.73	
7.58	10.87	4.87	0.56	1.55	140.47	0.13	9.10	10.54	"	90.56	"	$\times 0.021$
10.88	15.60	1.29	0.78	1.73	201.48	0.15	13.11	10.95	"	116.48	8.06	$= 3.06 \text{ cm/s}$
10.77	20.00	6.65	0.65	2.10	289.70	0.17	16.83	21.47	"	124.15	10.20	
16.42	23.54	8.05	0.53	2.04	364.07	0.17	17.78	30.98	"	147.07	15.17	
20.42	29.28	7.17	0.44	2.84	478.15	0.21	24.61	46.41	"	100.15	16.34	

文献 26) 松梨・大味 $d_s = 0.014 \text{ cm}$, $W_0 = 1.8 \text{ cm/s}$, $S = 1.65$

H	L	d	T	$\bar{v}_0$	d_0	λ	n	d_0/λ	d_0/d_s	$\bar{v}_0/\sqrt{g d_0}$	$\bar{v}_0/W_0$	d_0/n	d/L	λ/n	λ/d_s
5.14	191.25	15	1.53	20.17	9.93	5.66	0.777	1.74	702.14	0.21	11.21	12.33	0.079	7.10	904.29
5.21	171.61	"	1.33	20.13	10.23	5.606	0.777	1.82	230.71	0.20	11.18	11.90	0.080	6.28	900.43
7.14	129.69	"	1.07	26.16	8.91	4.440	0.843	2.01	636.43	0.28	14.63	10.58	0.116	5.27	317.14
7.43	105.45	"	0.87	33.04	7.16	3.554		2.58	254.29	0.35	18.36		0.143		253.36
6.57	141.25	"	1.13	25.40	9.14	5.100	0.787	1.77	652.86	0.27	14.51	11.64	0.106	6.43	354.25
6.28	136.97	"	"	23.35	8.40	4.314	0.733	1.85	600.00	0.26	12.77	11.46	0.110	5.89	303.14
7.72	97.43	"	0.87	31.62	8.76	4.834	0.527	1.31	455.71	0.34	17.57	15.62	0.152	8.17	345.29
6.01	191.25	"	1.53	23.58	11.49	5.000	0.667	2.30	820.71	0.24	13.10	17.23	0.079	7.80	357.14
5.71	161.61	"	1.33	21.78	9.23	4.560	0.680	2.42	659.29	0.23	12.10	13.57	0.093	6.71	325.71
6.36	129.69	"	1.07	25.13	8.56	4.426	0.577	1.93	611.43	0.27	13.76	15.04	0.116	7.41	316.14
5.71	122.29	"	"	19.63	6.47	3.994	0.723	1.63	977.86	0.24	10.91	9.25	0.125	5.52	255.29
8.87	95.43	"	0.87	28.03	8.06	5.784	0.633	2.16	575.71	0.33	16.16	12.78	0.151	5.90	246.71
5.71	141.25	"	1.13	22.08	7.94	4.020	0.670	1.93	567.14	0.25	12.27	11.55	0.106	6.00	287.14
"	89.43	"	1.53	22.41	10.92	5.000	0.633	1.83	780.00	0.22	12.45	10.11	0.079	5.56	314.29
4.29	171.61	"	1.33	17.24	7.30	5.766	0.677	1.94	521.43	0.20	9.58	10.78	0.080	5.66	267.00
9.14	231.00	20	"	37.27	15.79	5.234	0.667	3.02	1127.86	0.30	20.76	13.21	0.087	6.04	373.56
"	190.72	"	1.13	35.76	12.87	4.634	0.710	2.78	919.29	0.32	19.57	18.13	0.105	6.53	331.00
10.00	132.33	"	0.87	31.86	8.33	3.900	0.667	2.26	630.71	0.34	17.70	10.91	0.154	3.35	278.57
8.58	82.91	"	1.07	33.63	11.46	4.334	0.633	2.64	813.57	0.32	18.68	17.27	0.110	5.54	269.57
9.43	218.58	"	1.53	31.67	15.43	6.086	0.723	2.64	1102.14	0.26	17.59	16.72	0.092	6.59	304.71
7.15	197.06	"	1.33	31.40	13.30	4.920	0.800	2.70	950.00	0.22	17.44	16.63	0.102	6.15	351.43
7.71	106.97	"	1.13	20.19	7.27	4.566	0.570	1.59	519.29	0.24	11.22	12.75	0.147	3.10	326.14
11.43	104.50	"	0.87	27.02	7.47	3.600	0.610	2.08	535.00	0.32	15.01	12.22	0.192	5.90	257.14
9.72	132.51	"	1.07	25.72	8.76	4.234	0.720	2.07	626.71	0.28	14.29	12.17	0.152	5.83	362.43
7.15	247.77	"	1.53	35.35	17.23	6.134	0.950	2.81	1230.71	0.27	17.64	17.58	0.091	6.26	438.19
8.86	187.73	"	1.33	28.83	12.21	4.500	0.770	2.71	872.14	0.26	16.02	15.26	0.107	5.89	321.43
5.00	159.17	"	1.13	19.53	7.03	4.366	0.650	1.61	502.14	0.24	10.85	10.82	0.123	6.72	311.36
10.86	124.29	"	0.87	32.72	9.07	4.980	0.977	2.61	478.86	0.35	18.18	17.01	0.161	7.30	288.57
8.58	171.20	"	1.07	31.13	10.61	4.784	0.607	2.34	757.86	0.31	17.29	17.48	0.117	7.30	338.14
8.00	197.42	"	1.53	33.36	11.63	5.346	0.937	2.18	830.71	0.22	13.26	12.41	0.102	5.71	331.86
7.09	224.18	25	"	17.06	9.29	4.400	0.576	2.11	663.57	0.20	10.59	16.13	0.112	7.64	314.29
6.55	147.59	"	1.07	14.89	5.07	3.054	0.513	1.66	560.14	0.21	8.27	7.88	0.170	5.95	208.14
9.27	112.26	"	0.87	17.49	4.85	2.940	0.527	1.35	546.43	0.25	9.72	9.20	0.223	5.58	210.00

H	L	d	T	$\bar{U}_0$	d_0	λ	n	d_0/λ	d_0/d_s	$\bar{U}_0/\bar{u}_{00}$	$\bar{U}_0/W_0$	d/λ	d/L	λ/n	λ/d_s
6.00	197.06	25	1.33	15.89	6.73	4.406	0.717	1.53	480.71	0.20	8.83	9.39	0.127	6.15	314.71
6.82	167.41	"	1.13	17.04	6.24	—	—	—	445.71	0.22	9.63	—	0.150	—	—
9.55	165.57	"	"	23.53	8.61	4.100	0.603	2.10	615.00	0.26	13.29	13.28	0.152	6.80	292.86
6.55	217.80	"	1.33	18.58	8.02	5.074	0.807	1.58	572.36	0.21	10.53	9.94	0.118	6.29	362.43
5.46	235.13	"	1.53	15.76	7.68	5.006	0.900	1.53	543.57	0.19	8.76	8.53	0.105	5.56	357.57
6.82	147.59	"	1.07	15.50	5.28	5.666	0.643	1.44	577.14	0.22	8.61	8.21	0.170	5.70	261.86
8.73	112.26	"	0.87	16.47	4.56	3.226	0.427	1.41	325.71	0.25	9.15	10.68	0.223	7.56	230.43
9.55	"	"	"	10.02	4.99	3.480	0.527	1.40	356.43	0.26	10.01	9.47	0.223	6.60	243.57
8.73	167.41	"	1.10	22.19	7.99	4.300	0.753	1.86	570.71	0.25	12.33	10.61	0.150	5.71	307.14
7.64	153.52	"	1.07	19.24	6.56	3.926	0.677	1.67	463.57	0.24	10.69	9.69	0.153	5.80	280.43
7.36	212.80	"	1.33	21.29	8.02	5.320	0.777	1.70	544.29	0.23	11.23	11.61	0.118	6.85	380.00
7.64	258.23	"	1.53	24.13	11.76	5.854	0.993	2.01	540.00	0.22	10.41	11.84	0.097	5.90	418.14

文献 24) Immort

d ₀		U ₀		λ		n		d ₀ /λ		d ₀ /d _s		U ₀ /N ₀ d ₀		U ₀ /W ₀		d ₀ /n		d _s		W ₀		λ/n		λ/d _s	
x30.48		x30.48		x30.48		x30.48																			
2.2	67.06	1.2	06.58	1.60	48.77	0.30	8.14	1.2	1457.83	0.14	6.31	7.34	0.0460	5.8	6.0	1060.22									
"	"	"	"	1.75	53.04	0.25	7.62	1.3	1467.40	"	"	8.30	0.0457	"	7.0	1167.13									
0.15	4.57	2.4	12.17	0.14	4.27	0.020	0.41	1.1	234.36	0.13	4.67	7.47	0.0135	2.6	"	218.97									
"	"	"	"	0.15	4.57	0.025	0.76	1.0	371.54	"	9.38	6.01	0.0128	1.3	6.0	371.54									
0.13	3.96	"	"	0.14	4.27	"	"	0.9	167.96	0.20	9.31	"	0.0233	3.2	"	180.26									
2.8	26.34	1.3	09.62	2.30	70.10	0.38	11.58	1.2	2420.31	0.14	8.43	7.37	0.0344	4.7	6.1	2037.79									
1.3	03.62	1.2	06.58	1.05	32.06	0.16	4.88	"	665.30	0.17	5.23	8.12	0.0595	7.0	6.5	537.82									
0.38	11.58	0.7	21.34	0.33	10.06	0.065	1.68	"	523.98	0.20	7.11	6.37	0.0221	2.0	6.0	455.20									
2.6	16.53	1.0	30.48	2.05	62.43	0.31	9.45	"	1646.48	0.12	5.98	6.93	0.0398	5.1	6.6	1567.85									
0.1	14.49	0.3	24.33	2.60	79.25	0.40	12.19	"	2632.03	0.08	5.19	7.76	0.0359	4.7	6.5	2207.52									
2.9	28.39	0.9	27.43	3.00	91.44	0.48	14.63	1.0	1930.64	0.07	4.73	6.04	0.0470	5.8	6.2	1965.53									
2.2	67.06	0.6	17.31	"	"	"	"	0.7	1277.93	0.08	3.14	4.58	0.0525	6.3	"	1741.71									
2.3	70.10	"	"	2.53	77.11	0.39	11.39	0.9	1622.67	"	3.60	5.90	0.0432	5.5	6.5	1784.85									
3.2	97.64	0.3	24.33	2.72	82.71	0.44	13.41	1.2	2177.23	"	4.25	7.27	0.0448	5.6	6.2	1850.67									
3.5	106.63	1.3	09.62	3.45	105.16	0.65	19.87	1.0	1163.46	0.12	"	5.39	0.0718	9.1	5.3	1151.81									
2.0	60.76	1.2	06.58	0.59	17.78	"	"	3.4	2400.00	0.15	10.45	"	0.0254	3.5	"	707.87									
0.9	27.43	0.35	10.67	0.34	10.36	"	"	2.6	2285.93	0.07	8.21	"	0.0120	1.3	"	863.33									
1.5	45.72	0.4	12.17	0.48	14.63	"	"	3.1	3000.46	0.06	6.77	"	0.0147	1.8	"	981.33									
2.3	70.10	0.3	24.33	0.27	8.23	"	"	8.5	5231.34	0.09	16.25	"	0.0134	1.5	"	614.18									
0.5	15.24	0.2	6.10	0.33	10.06	0.035	1.68	1.5	1831.43	0.05	7.68	9.07	0.0031	0.63	6.0	1241.78									
4.1	124.77	0.1	94.49	1.38	57.30	0.30	9.14	2.2	2247.66	0.27	14.32	13.67	0.0356	6.6	6.3	200.58									
2.5	76.2	2.4	20.15	1.77	53.95	"	"	1.4	1574.38	"	12.17	8.34	0.0484	6.0	6.0	119.67									
9.0	274.32	2.2	67.06	2.30	85.34	0.15	15.24	3.2	4306.44	0.13	9.31	18.00	0.0637	7.2	5.6	1039.72									
4.1	124.77	1.3	09.62	1.20	36.58	"	"	3.4	1627.90	0.11	10.43	8.20	0.0276	3.8	8.0	1925.36									
2.4	73.15	0.7	21.34	1.52	46.33	0.22	6.71	1.6	2250.77	0.08	4.64	"	0.0325	4.6	6.9	1425.84									
2.9	28.39	0.9	27.43	0.35	25.91	"	"	3.4	2776.07	0.09	6.86	"	0.0277	4.0	"	872.37									
2.8	26.34	0.3	24.33	2.33	71.02	0.37	11.23	1.2	1867.50	0.09	4.20	7.57	0.0457	5.3	6.3	1354.05									
2.9	28.39	0.7	21.34	2.32	70.71	0.35	10.67	"	2129.38	0.07	4.03	8.28	0.0415	5.3	6.7	1700.86									
3.5	106.63	0.9	27.43	2.67	81.38	0.41	12.50	1.3	2469.44	0.08	4.99	3.53	0.0432	5.5	6.5	1820.80									
3.0	91.44	0.25	25.91	2.55	77.72	0.44	13.41	1.2	2072.47	0.07	4.63	6.82	0.0441	5.6	5.8	1760.96									
"	"	"	"	2.64	82.47	0.42	12.80	1.1	"	"	"	7.14	"	"	6.3	"	1824.72								
2.6	79.25	0.7	21.34	2.65	80.77	0.45	13.72	1.0	1541.33	0.08	3.44	5.73	0.0514	6.2	5.9	1571.40									
3.1	94.49	0.8	24.33	0.80	24.33	"	"	3.9	4256.31	"	8.13	"	0.0222	3.0	"	1098.20									

d ₀		U ₀		λ		n		d ₀ /λ	d ₀ /λ ₀	U ₀ /√d ₀ U ₀	U ₀ /√U ₀	d ₀ /n	d ₀	W ₀	λ/n	λ/λ ₀	
× 10 ⁻⁴		× 10 ⁻⁴		× 10 ⁻⁴		× 10 ⁻⁴											
0.5	106.63	1.2	36.53	0.22	6.71			15.9	7117.85	0.11	40.48		2.017	1.2		578.50	
0.3	24.38	0.35	10.67	0.72	21.85			1.1	2157.62	0.07	9.70		0.0113	1.1		1342.48	
1.0	30.43	0.5	15.24	0.39	11.37	0.06	1.33	2.6	2776.03	0.09	16.24	16.66	0.0109	1.0	6.5	1038.99	
3.0	91.44	0.8	24.38	0.26	7.52	0.045	1.37	11.5	8626.42	0.05	24.33	66.74	0.0106	"	5.3	747.17	
2.3	70.10	0.7	21.34	0.49	14.74	0.05	1.52	4.7	4431.19	"	21.34	46.12	"	"	3.8	1408.43	
1.5	45.72	0.4	12.17	0.41	12.50	0.06	1.33	3.7	4194.50	0.06	12.17	24.38	0.0109	1.1	6.3	1146.79	
1.0	30.48	0.35	10.67	0.54	16.46			1.8	2343.60	"	9.70		0.0107	"		1538.32	
2.1	64.01	0.5	15.24	0.35	11.58	0.05	1.52	5.5	5544.60	"	15.85	42.11	0.0113	"	7.6	1024.78	
2.2	67.06	0.7	21.34	0.29	9.34			7.6	5022.46	0.03	17.78		0.0114	1.2		775.44	
1.0	30.48	0.3	9.14	"	"			3.4	2802.36	0.05	8.31		0.0105	1.1	841.70		
4.5	137.16	1.0	36.43	0.23	7.01			7.5	1151.22	0.03	23.45		0.0123	1.3	569.72		
1.0	30.48	0.3	9.14	0.38	11.58			2.6	2839.22	0.05	9.14		0.0102	1.0	1124.27		
0.7	21.34	0.4	12.17	0.39	11.37	0.05	1.52	1.3	2041.21	0.08	12.17	14.04	0.0106	"	7.3	1121.70	
0.9	12.17	0.3	24.38	0.39	10.06	0.06	1.33	1.2	1132.25	0.22	23.22	6.66	0.0107	1.05	5.5	940.19	
3.3	100.85	1.2	36.53	0.25	7.62	0.016	1.49	13.2	3364.78	0.12	36.53	265.27	0.0102	1.0	15.6	747.06	
2.4	70.15	0.9	27.43	0.26	7.92	0.022	0.67	3.9	7171.67	0.10	27.43	109.18	"	"	11.7	776.47	
3.8	115.82	"	"	"	"	0.03	0.91	14.6	1354.50	0.03	"	127.27	"	"	8.7	"	
1.3	37.62	0.4	12.17	0.59	16.15	0.05	1.52	2.4	4737.74	0.06	11.61	26.07	0.0106	1.05	10.6	1323.58	
0.4	12.17	0.25	7.62	0.40	12.17			1.0	1132.25	0.07	7.26		0.0107	"		1137.25	
2.5	76.20	0.7	21.34	0.29	8.34			3.6	6990.33	0.03	19.40		0.0109	1.10	811.01		
3.0	91.44	1.2	36.53	0.30	9.14			10.0	5792.31	0.12	36.53		0.0104	1.00	878.85		
0.4	12.17	0.25	7.62	0.37	11.23	0.06	1.33	1.1	1183.50	0.07	7.62	6.66	0.0103	1.0	6.2	1035.15	
1.3	37.62	0.5	15.24	0.29	9.34			4.5	3702.30	0.03	14.51		0.0107	1.05	826.17		
1.4	42.67	0.4	12.17	0.26	7.12			5.4	3914.43	0.06	11.03		0.0109	1.10	726.61		
5.4	164.59	1.1	33.53	0.21	6.40			25.7	13715.33	0.03	27.34		0.0120	1.2	533.33		
2.2	67.06	0.7	21.34	0.30	9.14	0.03	0.91	7.3	5403.06	"	17.07	73.49	0.0124	1.25	10.0	707.10	
2.0	60.76	0.6	19.29	0.29	8.34	0.045	1.37	6.9	4725.58	0.07	19.55	44.50	0.0129	1.35	6.3	685.27	
2.9	83.09	0.9	27.43	0.25	7.62	0.025	0.76	11.6	7015.08	0.09	21.10	116.00	0.0126	1.30	10.0	104.76	
2.5	76.20	0.3	24.38	0.23	7.01	0.02	0.61	10.9	6457.33	"	20.32	124.72	0.0118	1.20	11.5	594.07	
5.1	155.45	1.5	45.72	0.25	7.62	"	"	20.4	33135.60	0.12	33.10	254.34	0.0114	"	12.0	683.42	
5.9	179.33	1.2	36.53	0.23	7.01	"	"	25.6	15370.09	0.09	30.43	274.80	0.0117	"	11.5	599.15	
1.0	30.48	0.4	12.17	0.61	12.59	0.075	2.29	1.6	2257.78	0.07	3.13	13.31	0.0135	1.50	3.1	1377.04	
5.6	170.61	1.4	42.67	0.25	7.62			22.4	3765.32	0.10	32.32		0.0124	1.20	12.0	614.52	

d_0	$\bar{D}_0$		λ		η		d_0/λ	d_0/d_s	$\sqrt{\eta/d_0}$	D_0/W_0	d_0/η	d_s	W_0	λ/η	λ/d_s	
	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$										
0.6	18.29	0.4	12.9	0.31	7.45	0.04	1.22	1.9	1440.16	0.09	9.03	14.99	0.0127	100	7.7	144.09
5.8	176.78	1.5	48.72	0.23	7.01			25.2	14470.16	0.11	35.17		0.0122	"		574.59
5.8	115.82	"	"	"	"			16.5	7871.70	0.14	46.58		0.0121	1.25		577.04
0.7	2134	0.4	12.19	0.34	10.36			2.1	1823.93	0.08	10.16		0.0117	1.20		889.47
1.7	5182	0.7	2134	0.30	9.14			5.7	4282.64	0.09	16.42		0.0121	1.30		753.37
"	"	1.0	4228	0.24	7.82			7.1	4247.54	0.14	23.45		0.0122	"		800.00
3.0	91.44	"	"	0.21	6.40			14.3	7747.15	0.10	25.40		0.0118	1.20		542.37
4.5	137.16	"	"	0.22	6.71			20.4	9909.13	0.08	17.05		0.0138	1.60		486.23
4.2	128.02	1.2	46.58	0.23	7.01			18.4	10241.60	0.10	28.14		0.0125	1.40		540.80
1.0	50.48	0.4	12.19	0.62	18.90	0.08	2.44	1.6	2650.43	0.07	10.16	1249	0.0115	1.20	7.7	1643.48
5.7	170.74	2.0	60.96	0.23	7.01			3.7	14240.78	0.15	48.77		0.0122	1.25		574.59
5.1	155.45	2.0	"	0.17	5.77	0.015	0.46	26.8	1170.73	0.16	50.80	647.93	0.0118	1.20	12.6	470.43
5.5	167.64	2.4	73.15	0.23	7.01			23.9	12895.98	0.18	48.77		0.0120	1.50		509.23
5.8	176.78	2.6	77.25	0.22	6.71			26.3	11172.42	0.19	51.13		0.0132	1.55		508.03
4.8	146.30	2.4	73.15	"	"			21.8	10757.95	"	45.72		0.0136	1.60		473.38
4.6	140.21	1.8	54.36	0.20	6.10			23.0	10068.99	0.15	42.20		0.0129	1.30		472.87
4.5	137.16	1.4	42.67	0.22	6.71			20.6	9458.31	0.12	25.10		0.0145	1.70		462.76
4.8	146.30	2.2	67.06	0.24	7.02			20.0	8558.56	0.18	50.48		0.0171	2.20		428.07
3.0	91.44	1.2	46.58	0.22	6.71			14.6	4578.42	0.12	24.29		0.0109	1.50		482.73
5.0	152.40	2.3	70.10	0.19	5.77			24.3	9707.01	0.18	46.89		0.0157	1.90		468.77
2.7	323.30	1.2	46.58	0.24	7.02	0.003	1.01	11.7	5379.08	0.13	19.25	81.49	0.0153	"	7.3	478.43
4.0	121.72	1.7	51.32	0.23	7.01	0.02	0.61	17.4	9916.83	0.15	27.27	199.87	0.0154	"	11.5	455.19
4.7	112.78	1.2	46.58	0.20	6.10			15.5	7724.66	0.11	21.52		0.0146	1.70		417.81
1.9	577.1	0.9	27.43	0.29	8.84	0.04	1.22	6.6	9923.77	0.12	16.14	47.47	0.0145	"	7.2	609.66
2.1	44.01	0.8	24.38	0.26	7.92	"	"	8.1	9211.18	0.10	14.84	52.47	0.0152	1.80	6.5	521.05
3.7	112.78	1.0	40.48	"	"	0.02	0.61	14.2	7468.87	0.13	16.93	134.89	0.0151	"	13.0	524.50
5.5	167.64	1.7	51.32	0.21	6.40	"	"	26.2	11404.08	"	28.79	274.82	0.0147	"	10.5	435.37
5.7	170.74	1.5	45.72	0.26	7.92	"	"	21.7	10727.04	0.11	24.06	"	0.0157	1.90	10.0	504.46
4.1	124.77	1.6	48.77	0.25	7.62	"	"	16.4	9121.90	0.14	42.51	204.87	0.0137	1.50	12.5	554.20
3.1	74.49	1.1	44.53	0.24	7.02	0.03	0.91	12.9	7620.16	0.11	24.84	103.84	0.0124	1.35	7.7	590.32
1.9	57.91	1.7	51.32	0.28	8.63	0.04	1.22	6.8	4747.87	0.22	41.46	47.47	0.0117	1.25	7.0	727.06
"	"	1.0	40.48	0.30	9.14	0.05	1.52	6.3	4826.83	0.13	24.88	58.10	0.0120	"	6.0	761.67
1.1	33.53	0.5	15.24	0.39	11.89	0.06	1.83	2.8	2366.31	0.28	12.17	18.82	0.0117	"	6.5	1016.24
2.1	124.77	1.0	40.48	0.22	6.71	0.02	0.61	13.6	10570.68	0.13	46.60	244.87	0.0118	"	11.0	523.64

表2 浮遊砂濃度の資料

T sec	H cm	h cm	L cm	D ₅₀ μ	d ₀ cm	W ₀ %	d ₅₀ cm	n/ε ₀	sinh $\frac{2\pi y}{\lambda}$	d ₀ μ	D ₅₀ μ	m	その他
1.50	10.7	39	351	22.15	10.58	1.0	0.021	0.108	1.011	504	6.92	115	文献7) 石炭粉 S=0.5
2.0	13.4	36	624	3067	19.5	"	"	0.0577	0.686	929	9.56	2000	d ₅₀ =0.021cm W ₀ =1.00%
2.25	15.8	40	770	3494	25.0	"	"	0.0506	2.631	1190	10.89	530	サイフォン
1.15	8	30	206	15.78	5.78	0.12	0.013	0.1456	1.384	445	11.42	17	文献35) S=0.15
1.15	10	30	206	19.73	7.23	"	"	0.1456	"	556	14.26	38	d ₅₀ =0.31cm
1.15	11.7	30	206	23.08	3.45	"	"	0.1456	"	650	16.69	42	砂じん発生せず
1.15	15.1	30	206	29.79	10.91	"	"	0.1456	"	839	21.55	140	重複波の節部分で
1.31	7.3	20	268	21.52	8.98	"	"	0.0746	0.8130	691	15.88	30	サイフォンに採水
1.31	8.5	20	268	25.06	10.46	"	"	"	"	805	18.14	95	
1.0	7.2	20	156	18.32	5.83	"	"	0.1232	1.234	448	13.26	120	
1.70	1.9	10	450	8.97	4.86	"	"	0.0222	0.3910	374	6.49	17	
1.70	4.4	10	450	20.78	11.25	"	"	0.0222	"	265	15.04	87	
1.0	8.8	30	156	14.95	4.76		0.013	0.1923	1.848	267	2.79	170	文献34) S=1.65
1.0	9.1	"	156	15.45	4.92		"	0.1923	"	276	2.82		光電管で濃度測定
1.3	11.8	"	264	25.60	10.60		"	0.1136	1.113	596	4.76	2900	
1.3	8.2	"	264	17.30	7.37		"	0.1136	"	414	3.32	400	
1.3	5.4	"	399	11.72	4.85		"	0.1136	"	272	2.14	60	
1.6	14.9	"	399	35.76	18.22		"	0.0752	0.8177	1023	6.66	6000	
1.6	11.6	"	399	27.84	14.18		"	"	"	797	5.18	2000	
1.6	8.6	"	399	20.64	10.52		"	"	"	591	3.84	1000	
1.6	5.0	"	399	12.00	6.11		"	"	"	443	2.23	30	
1.72	10.0	"	462	24.64	13.50		"	0.0649	0.7410	758	4.58	2500	
1.72	13.7	"	462	33.75	18.49		"	"	"	1038	6.28	9000	
1.30	16.5	30	264	35.81	14.32	1.0	0.01	0.1136	1.113	1422	8.90	3000	文献16) S=1.65
1.30	16.5	30	264	35.81	14.32		0.017	"	"	371	6.23	750	サイフォン
1.7	16.0	29.1	451	40.0	21.7		0.034	0.0646	0.738	638	10.22	8.5	文献36) S=0.46
1.7	12.0	29.1	451	30.0	16.3		"	"	"	479	7.67	8.6	Hは重複波高
1.7	8.0	29.1	451	20.0	10.8		"	"	"	318	5.12	8.5	重複波の節で粒子数測定
2.0	12.0	15.0	624	46.0	29.3		"	0.0240	0.4090	862	11.76	7.5	より m を求める
2.0	10.0	15.0	624	38.4	24.4		"	"	"	718	9.82	8.0	
2.0	8.0	15.0	624	30.7	19.6		"	"	"	576	7.85	8.7	

[3] 汀線に直角方向の海浜変形の相似性に関する実証的検討

海浜変形の相似性を言う場合、一定の波をある初期形状にあたえた時、その海浜変形過程が同一でなければならないが、ここでは最終平衡海浜の相似性を検討することによって代用する。

4章における検討によって最終海浜形状は

$$h/L_0 = f \left(x/L_0, H_0/L_0, \sqrt{gH_0}/W_0, S, \frac{\sqrt{\nu} (H_0)^{1/4} g^{3/4}}{W_0^2}, i_0 \right) \dots\dots (76)$$

と考えられる。ここで i_0 は初期形状を現わすものと考えておく。この結論は Rector²⁾、岩垣・野田⁴⁾らの考え方と同一の無次元量だが、 H/d のかわりに $\sqrt{gH}/W_0$ で表した方が、ある程度 ν の影響を含んだものと考えられるので、ここでは (76) 式によって実験結果を整理する。なお (76) 式における $\frac{\sqrt{\nu} (H_0)^{1/4} g^{3/4}}{W_0^2}$ の結果は、底質材料が小さく、底面の境界層が層流であったり、沈降速度が Stokes 則にのるような粒径より大きければ、無視して良いだろう。

この章において使用した資料は文献番号 2), 3), 4), 6), 7), 8), 9), 11), 25), 38), 39), 40), 50), 51), 52) と、土木研究所で行なった離岸堤に関する模型実験⁵³⁾での結果および筆者らが行なった実験結果である。沈降速度は測定してある資料は、その値を、測定の無いものは図13によった。なお周期が1 secより小さい資料、実験が屋外で行なわれたもので波高4 cm以下の資料は、風の影響が入るため除いた。また初期形状が、極端な資料は除いた。(たとえば、河口において波によって州が打上るかどうかを調べるような実験において、初期の河口水深の大きなもの。) 表3-2に整理結果を示しておいた。

(1) 沿岸砂州の発生

2章で述べたように、平衡海浜には、暴風海浜型、正常海浜型に分けられると言われるが、筆者らが多くの実験資料より、海浜を二つの形態に区分しようとする時、図2のような典型的な海浜は少なく、どちらに組入れるべきか困難を覚えることが多かった。

筆者らは Bar と言うものが、碎波と深く結びついている物と考え、碎波点近くに海床の凸部が存在するものは暴風海浜とみなすようにつとめ、碎波水深より十分深い所に存在する凹凸は碎波による Bar とは見とめず、暴風海浜とはみなさなかった。

なお海床を注意深く見てみると、波長 $\frac{1}{2}L$ の海床波⁷⁾ および波長 $2L \sim 3L$ の海床波が見られる。よって我々は河浜形状を次の5つの区分に分けることにした。

暴風海浜型

遷移海浜型

正常海浜型

2 L型

$\frac{1}{2}$ L型

$\frac{1}{2}$ L型は、入射波と反射波の干渉による部分重複波と密接に結びついている。この型は暴風と正常の二つの区分に入れるとすると正常海浜型に入ることが多い。

2 L型は、汀線に近いBarの背後の距離2 L~3 Lの所に、第二のBar時には第3のBarを作るもので、勾配が小さい、石炭粉を海床材料にした模型実験で良く見られる。筆者が行なった、最上川、千代川の河口模型実験では、石炭粉を使ったが、2 L型のBarの発生が見られた。この2 L型の海浜は、第一のBarから第2のBarに砕波点の移動が観測されることが多い。また2 L型と $\frac{1}{2}$ L型の共存型も見られた。図3 3に千代川河口模型実験に現われた2 L型の例、および図3 4に2 L型と $\frac{1}{2}$ L型の共存型を示す。S=1.65の砂においては1例(筆者の実験、6章で詳述)しか見られなかったが、砂の実験は初期勾配 $\frac{1}{10}$ ~ $\frac{1}{50}$ で行なわれていることが多く、 i_0 がゆるい場合には砂においても2 L型が現われる可能性がある。

2 L型の発生には初期形状の影響がかなり在るものと思われる。現地海浜は沖浜勾配が $\frac{1}{100}$ 位である所が多いが、このような海岸で二列のBarが良く見られる。この原因として、大きな波によって沖側のBarが生じ、その後の小さな波によって浜側にBarが生じたとも考えられるが、上述の2 L型のBarのように、一つの波によって二つのBarが生じたとも考えられる。図3 5は千代川河口西側の海岸の海浜形状だが、ほぼ2 LのBar間距離である。このほか、金沢海岸、石狩海岸等多くの海岸でみられる。(文献75には2 L型のBarと考えられるBarが写っている航空写真がある。石川県押水町海岸の写真で三列のBarが見られ、Bar間距離は沖130 m内側60 mぐらいである。)この2 L型のBarの発生原因は、はっきりしないが、これについては7章に述べてみたい。

図3 6から図3 9は、縦軸に H_0/L_0 、横軸に $\sqrt{gH_0}/W_0$ を取り、Sの違いごとに、海浜形状の分類を示したものである。この海浜型の判断は、海浜形状図がある資料は、その図より筆者らが前述した定義にしたがって判断したが、かなり主観の入るもので、原論文の判断とは異なっているものもあった。海浜形状図が無い文献(6, 39)は原論文の判断にまかせた。

図3 6はS=1.65の砂の場合で、点のばらつきが多く、明確に区分線を引くことができない。この原因としては波高の測定誤差(10数%が考えられる。)^{3) 54)} および初期形状の違い、 W_0 の不正確、 $\frac{\sqrt{g} H_0^{1/4} g^{3/4}}{W_0^2}$ の効果および実験時間の違い⁵⁴⁾などが原因だろう。図3 6の結果は、ほぼ岩垣らの領域区分と対応しているようである。

図3 7はS=0.45の石炭粉の場合で、領域区分は資料が少なくはっきりしないが、砂の場合とは区分線の位置が異なる。

図3 8はNayak⁶⁾が行なったS=0.39のくるみ殻の場合で $d_{50}=1.22$ mmと $d_{50}=0.915$ mmの資料で、判断はNayakによるものである。

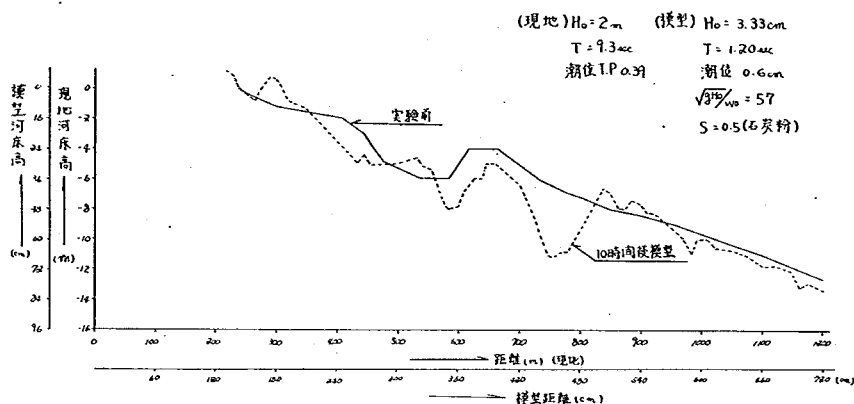


図 33 千代川河口模型における 2 L 型

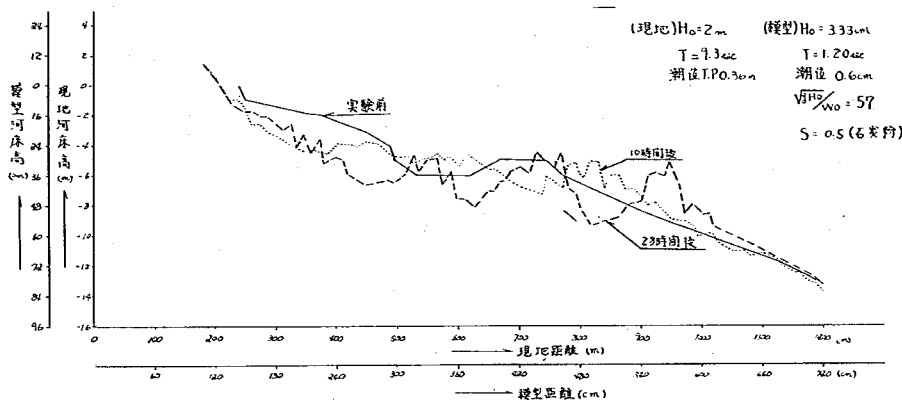


図 - 34 千代川河口模型における 2 L と $\frac{L}{2}$ 形の共存

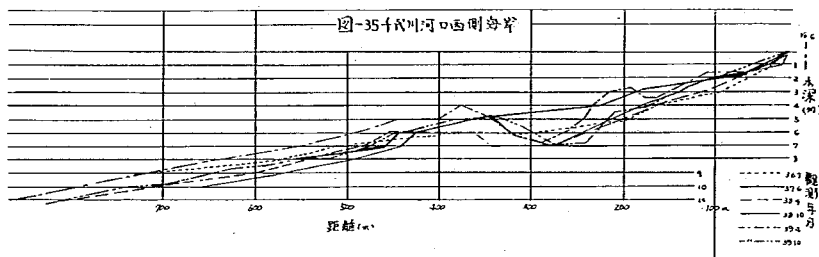


図 35 千代川河口西側海岸

図40は Nayak が行なった $S = 0.05$ のプラスチックの場合ですべて正常海岸と Nayak は判断している。

砂以外は、実験資料が少なく領域区分ははっきりしないが S が異なると領域区分がかなり異なってくることははっきりした。 S は浮遊砂の運動に大きく関係するから当然のことであろう。なお Nayak はプラスチックの場合浮遊砂が多く、スープ状になり、砕波も、Ripple も発生せず、波のエネルギーが吸収されたと言っている。

以上のことより、海岸形状の区分に関係する第一次の要因は H_0/L_0 、 $\sqrt{gH_0}/W_0$ 、 S であり、二次的要素として i_0 および $\sqrt{\nu}(H_0)^{1/4}g^{3/4}/W_0^2$ であることがわかった。

(2) 砂の打上げ高

砂の打上げ高に関しては、すでに篠原³⁸⁾や、Nayak⁶⁾、上森⁸⁹⁾、田中⁷⁾、Rector²⁾、須賀・松村・末吉⁸⁾⁹⁾が調べ、Rector 以外は、打上げ高 H_R を H_R/H_0 と H_0/L_0 の関係で調べている。それらの結果は、ほぼ同じで、 H_0/L_0 が大きくなるほど H_R/H_0 が小さくなっている。ここでは、手に入った文献をすべて使い今まで言われていることを確認しておくと同時に $\sqrt{gH_0}/W_0$ の影響を調べてみたい。

図40は、砂の場合で H_0/L_0 の低下にともなって H_R/H_0 は大きくなっている。なお Saville の資料は現地スケールの実験であり、この資料が、他の小スケール実験と大きくずれないことは、この図の現地海岸への適用に一つの根拠をあたえよう。

図41は石炭粉の場合で2L型の場合同一 H_0/L_0 に対して H_R/H_0 が小さくなっているのは、沖の Bar によってエネルギーが消散し、岸に到着するエネルギーが小さくなるためと考えられる。

図42、図43はクルミとプラスチックの場合で、資料はすべて Nayak のものである。

これによると、砂の場合が同一 H_0/L_0 に対して H_R/H_0 が一番大きく、石炭粉、くるみがその次でプラスチックが一番小さい。石炭粉が砂より小さくなることは、すでに田中・新保⁷⁾は述べているが、 $\sqrt{gH_0}/W_0$ の実験範囲が砂と石炭粉では異なっているので、石炭粉の方が小さいとは一概に言えないであろう。プラスチックが小さくなるのは、前にも述べたように、浮遊砂がスープ状になり波のエネルギーを吸収し、岸に到着するエネルギーが小さくなるためと思われる。なお波の打ち上げは、4章〔4〕で述べたように μ_s が異なれば、底面を動く粒子の運動が異なり、材料によって打上げ高の異なるのは μ_s の違いの影響もあると考えられる。

砂の動きやすさの指標と考えられる $\sqrt{gH_0}/W_0$ の効果は、この図でははっきりしないが(測定誤差、 W_0 が正確に計られていない。文献からの読み取り誤差、 $\sqrt{\nu} H_0^{1/4} g^{3/4}/W_0^2$ の効果、 i_0 の効果などが原因する。)同一実験者が行なった実験データを取り出してみると $\sqrt{gH_0}/W_0$ が大きくなると H_R/H_0 は小さくなる傾向が見うけられる。

これによって砂の打ち上げ高も、沿岸砂州の発生で述べたのと同じの無次元量が支配要因であることが確認された。なお砂の打ち上げ高は、波のはいり高とほぼ等しい。

表 3-1 記号一覧表

	文 献 名	初期 勾 配
○	38)	1/10 or 1/20
○	53)	1/15 or 1/40
○	8), 9)	1/10, 1/15, 1/20
○	4)	
○	7)	1/10, 1/20 および 鹿島海岸歪
○	52)	1/18, 1/30, 1/40
○	50)	1/30
○	5)	1/10, 1/16
○	39)	1/10
○	25)	
○	3)	1/15
○	11)	1/80
○	51)	1/20
○	2)	1/30
○	6)	
○	筆者	1/10, 1/50

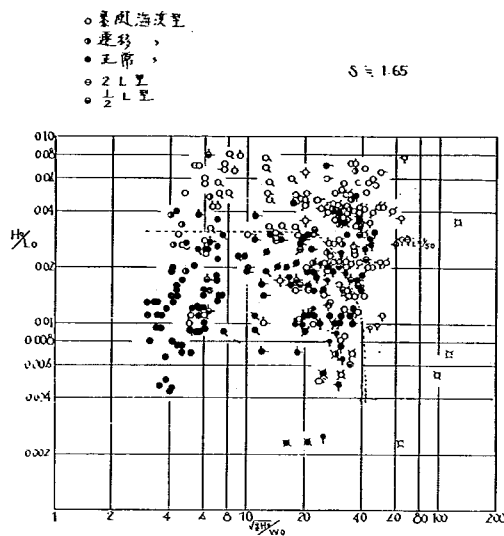


図 36 沿岸砂州発生限界 (砂)

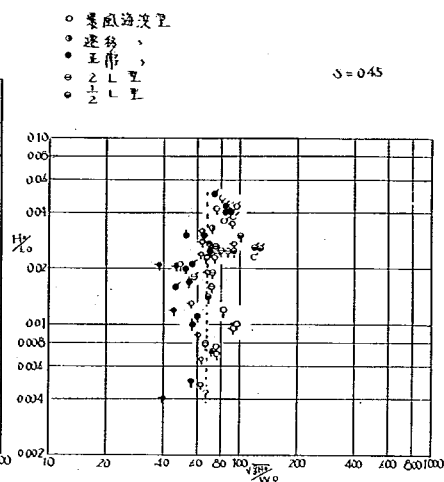


図 37 沿岸砂州発生限界 (石炭粉)

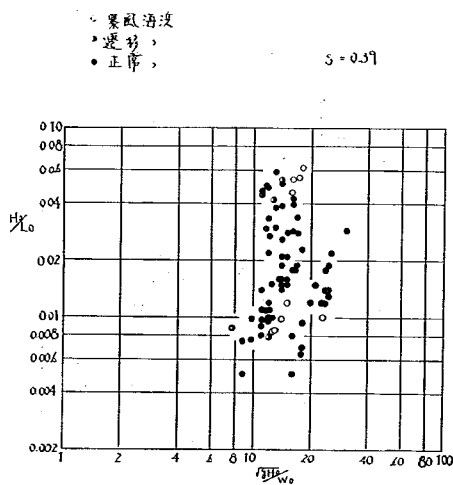


図 38 平衡砂州形状 (クルミ)

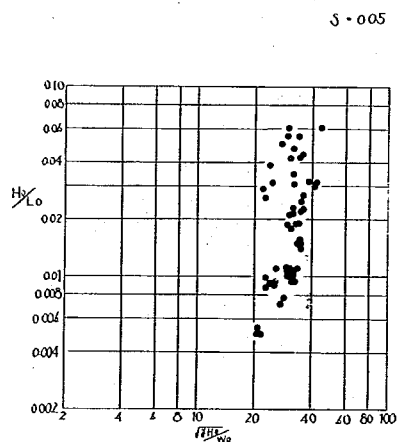


図 39 平衡砂州形状 (プラスチック)

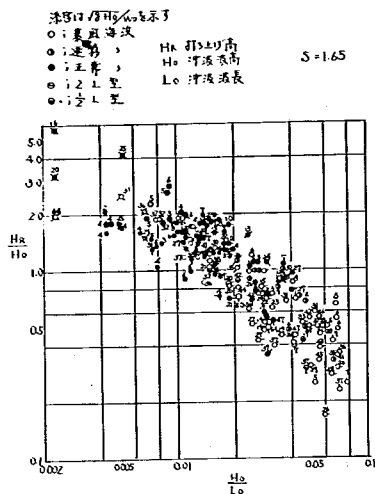


図 40 砂の打ち上げ高 (砂)

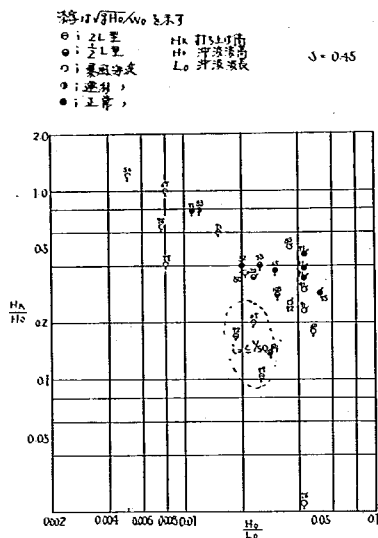


図 41 砂の打ち上げ高 (石炭粉)

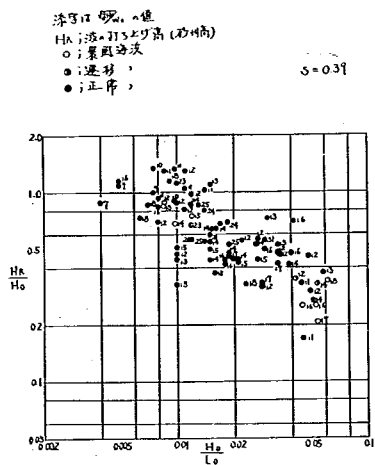


図 42 砂の打ち上げ高 (クルミ)

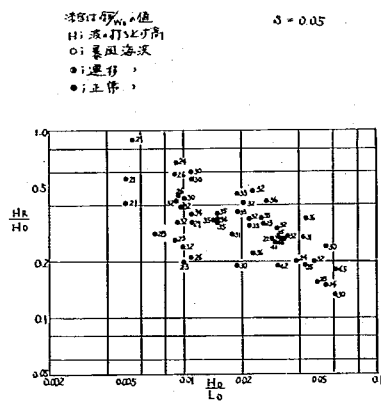


図 43 砂の打ち上げ高 (プラスチック)

(3) 前浜勾配

前浜勾配については、すでに Rector,²⁾ Nayak⁶⁾、田中、新保⁷⁾、岩垣、野田⁴⁾ が調べ、前浜平均勾配を θ とし、原論文を少し変形すると

$$\text{Rector は } \tan \theta \approx 0.30 (H_0/L_0)^{-0.10} \cdot (d_s/H_0)^{0.20}$$

とし

$$\text{Nayak は } \tan \theta = f(\sqrt{H_0/L_0} \cdot \sqrt{gH_0/W_0})$$

とし、 $\sqrt{H_0/L_0} \cdot \sqrt{gH_0/W_0}$ が大きくなるにしたがって $\tan \theta$ が小さくなるとしている。また岩垣は $i_0 = 1/10$ の時の $\tan \theta$ と H_0/L_0 、 d_s/H_0 の関係を調べ、 d_s/H_0 が 0.0056 ~ 0.042 の範囲と 0.00128 ~ 0.00242 の範囲では、 $\tan \theta$ と H_0/L_0 の関係が異なり、 $d_s/H_0 = 0.0024 \sim 0.0056$ を境とし、それ以下では $\tan \theta$ が小さくなることを述べている。なお $d_s/H_0 = 0.0024 \sim 0.0056$ は $\sqrt{gH_0/W_0}$ の 3.0 前後に当り、岩垣の言うように沿岸砂州の発生限界の急変する $\sqrt{gH_0/W_0}$ にほぼ等しい。

上述のことによると H_0/L_0 および $\sqrt{gH_0/W_0}$ が大きくなれば $\tan \theta$ は小さくなることを示している。

図 4.4 から図 4.7 は、前浜勾配 $\tan \theta$ と H_0/L_0 および $\sqrt{gH_0/W_0}$ の関係を示したものである。砂については H_0/L_0 の増加につれて $\tan \theta$ の減少の傾向が有り、また $\sqrt{gH_0/W_0}$ の小さい値が図の上部に集中し、 $\sqrt{gH_0/W_0}$ が小さくなると勾配の増加する傾向もわかる。図 4.8 は現地海岸の d_s と前浜勾配の関係である。粒径が 0.2mm ぐらいになると急激に前浜勾配が減少し $\tan \theta = 0.02$ 位までにもなっている。このような勾配は実験データに現われていない。今現地海岸で、前浜勾配を作った波の波高を 0.5m ~ 3m とすると、 $\sqrt{gH_0/W_0}$ は $d_s = 1\text{mm}$ に対して 33 ~ 54、 $d_s = 0.5\text{mm}$ に対して

$$54 \sim 90, \quad d_s = 0.2\text{mm} \text{ に対して } 130 \sim 218$$

となり、 d_s が 0.2mm では $\sqrt{gH_0/W_0}$ が 10^2 のオーダーとなり、図 4.4 で行なわれている実験範囲を越えている。もし実験範囲を $\sqrt{gH_0/W_0}$ を 10^2 のオーダーまで広げれば、 $\tan \theta$ が小さくなると考えられる。石炭粉において $\tan \theta$ が砂より小さいのは、一つには $\sqrt{gH_0/W_0}$ が石炭粉の方が大きいのが原因しよう。プラスチックにおいては、前浜勾配が H_0/L_0 によって変化が無い。

これによって、前浜勾配も、沿岸砂州の発生で述べたのと同じ無次元量が支配要因であることが確認された。

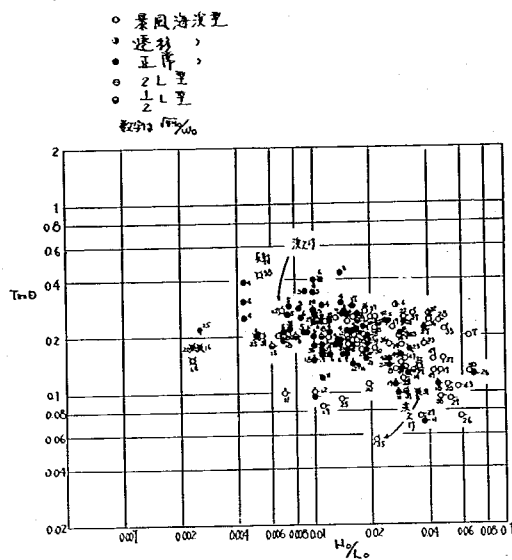


図 44 前浜勾配と波形勾配 (砂)

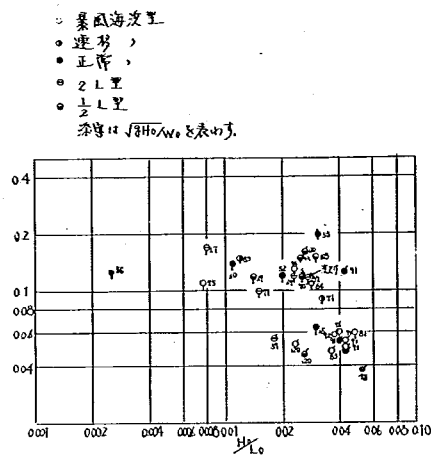


図 45 前浜勾配と波形勾配 (石炭粉)

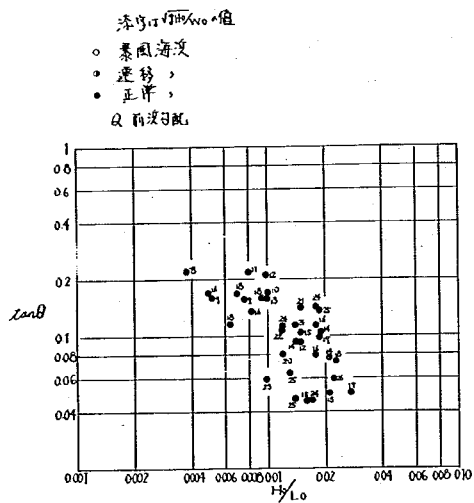


図 46 前浜勾配と波形勾配 (クルミ)

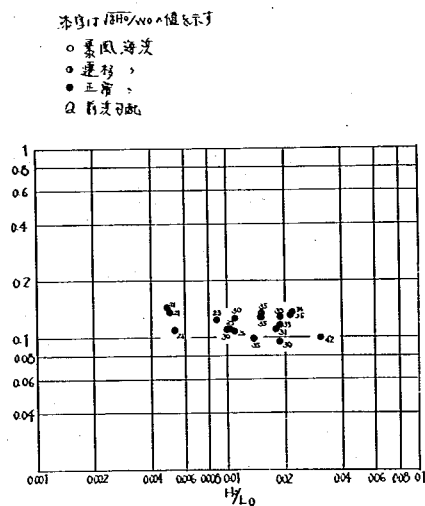


図 47 前浜勾配と波形勾配 (プラスチック)

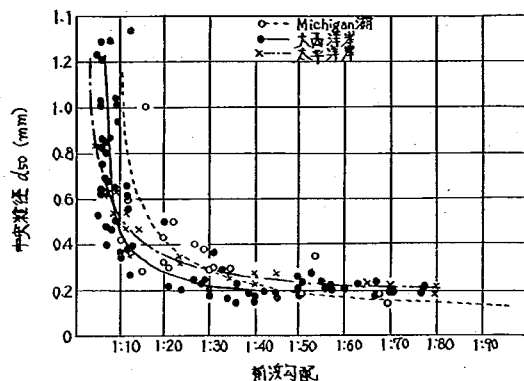


図48 中央粒径と前浜勾配との関係〔Beach Erosion Board 1961〕

(4) 碎波水深

碎波水深を図49, 図50に示す。合田¹²⁾による固定床の場合の碎波水深を勾配 $\frac{1}{80}$, $\frac{1}{90}$ の場合を示しておいた。

Saville のデータは碎波指標に良く合うが、他のデータは、碎波水深が大きめである。

(5) Bar 頂水深

Bar の形成が碎波と関係づけられるから Bar 頂水深は碎波水深と関係づけられる。図51, 図52に Bar 頂水深と波形勾配の関係を示しておいた。点のばらつきが大きく、 $\sqrt{gH_0}/W_0$ の影響ははっきりしない。図には合田の碎波指標¹²⁾も示しておいた。

(6) 汀線から Bar 頂までの距離

Bar 頂までの距離 l_1 について調べたのが図53, 図54である。縦軸は l_1/H_0 , 横軸は H_0/L_0 である。これを見てすぐ気がつくことは、(1)から(5)までの資料に比較して点のばらつきが大きいことである。同一 H_0/L_0 , $\sqrt{gH_0}/W_0$ に対して l_1/H_0 が大きく異なっている資料がある。これは初期形状の影響が強く残っているためと思われる。初期勾配の小さいデータは l_1/H_0 が大きくなっている。特に $i_0 = 1/80$ の尾崎¹¹⁾の資料は l_1/H_0 が7.0~8.0であり、 l_1 が長い。また同一初期形状に同一波形勾配の波を当てると、 $\sqrt{gH_0}/W_0$ が大きいほど l_1/h_0 が大きくなり、 H_0/L_0 が大きなほど小さくなる。

図55, 図56は h_1/l_1 と H_0/L_0 の関係を示したもので、初期勾配の影響があり、初期勾配の小さい方が h_1/l_1 が小さく、また $\sqrt{gH_0}/W_0$ が大きいほど h_1/l_1 が小さくなるのが分る。

このようにある実験系では初期海岸の影響を受けると言うことは、今まで言われている平衡海岸では初期形状の影響を受け無いと言うことと矛盾している。今までの実験が、初期勾配をせいぜい $\frac{1}{80}$ か $\frac{1}{90}$ 位にして比較したため有義な差を見つけられなかったとも考えられる。なお堀川・砂村・鬼頭

らは、平衡状態に達するまで実験室規模のスケールの実験で数百時間かかると言っている。⁵⁴⁾ 図54の初期勾配の影響は、平衡状態に達しない内にそれを平衡状態と判断したとも考えられるが、それだけでは説明がつかないように思われる。

なお現地海岸では、 h_1/l_1 は表4のごとくであり、 h_1/l_1 は0.01から0.015が多いが、これは沖浜勾配が $1/80 \sim 1/90$ と大きいために h_1/l_1 が小さくなったと言うより、 $\sqrt{gH_0}/W_0$ が現地では非常に大きいのが原因だろう。なぜなら i_0 の影響は沖浜勾配ではなく、砕波点から汀線の勾配が問題となるからである。現地でのBreaker Zoneの勾配が、沖浜勾配 i_0 と等しいとする根拠は少ない。

以上のことより、沿岸砂州までの距離 l_1/H_0 は第一次の要因として初期形状 $i_0, \sqrt{gH_0}/W_0$ 、 $H_0/L_0, S$ であり、二次的要素として $\frac{\sqrt{\nu} H_0^{3/4} g^{3/4}}{W_0^2}$ であると考えられる。

(1), (2), (3), (4), (5)に i_0 の影響の少ないのは、(1), (4), (5)は砕波に大きく関係し、砕波はあまり i_0 に影響を受けないからであり、(2), (3)は汀線に達する波のエネルギーに関係し、砕波点から汀線間のエネルギー損失は、汀線までの距離に大きくは関係しないと思われる。

なおトラフ型は、砕波点がはっきりしないので良くわからないが、 $\sqrt{gH_0}/W_0$ が大きくなると l_1/H_0 は大きくなるものと考えられる。

(7) 汀線の前進、後退について

筆者は、汀線の前進、後退を決める一番重要な要素は砕波点の位置であると思っている。砕波点と汀線が近い場合には、汀線に当る波エネルギーは強く、汀線は後退し、もし長ければ堆積あるいは停滞する。汀線の位置は(3)(6)で述べたように初期形状の影響を受けると考えられるが、砕波点から汀線までの最小可能距離(初期勾配の大きな海浜に波を当てた時の最終の砕波点と汀線の距離) L_{min} は、 i_0 の影響は少ないと考えられる。もし砕波点と汀線までの距離 L が

$L > L_{min}$ 堆積 or 停滞

$L < L_{min}$ 侵食

と考えられる。Bar頂は砕波点と関係が深く l_1 は $l_1 \propto L$ と考えて良い。(3), (6)においては点のばらつきが多くはっきりしたことは言えないが、 L_{min} は H_0/L_0 と $\sqrt{gH_0}/W_0$ の関係と考えられ、 $\sqrt{gH_0}/W_0$ が大きくなると L_{min}/H_0 は増大する傾向にある。

中村、大西、宮村⁶¹⁾は汀線の前進・後退をBar頂から汀線までの距離を X として図62のごとく示した。ここに $V_0 = \sqrt{1.781gh_b}$ で、 h_b は砕波水深、 h_1 はBar頂水深、である。汀線の前進・後退は $h_1/W_0 T$ と $X/V_0 T$ で決まり図中の破線(破線筆者)によって区分されるとした。この図で破線に対応する X の値が L_{min} に対応するものと考えられる。なお彼らの実験は i_0 が $1/80 \sim 1/90$ 、底質材料は $d_{50} = 0.3$ mm、および 0.24 mmの砂および $d_{50} = 0.82$ mmの水さい($S = 0.30$)で行ない、図62はすべての結果を示したものである。ところで、 h_1 および V_0 は H_0 とほぼ次の関係にある。

$$h_1 \propto H_0$$

$$V_0 \propto \sqrt{gH_0}$$

よって

$$h_1/W_0 T \propto \frac{\sqrt{gH_0}}{W_0} \cdot \sqrt{\frac{H_0}{L_0}}$$

$$X/V_0 T \propto X/H_0 \cdot \sqrt{\frac{H_0}{L_0}}$$

と考えられる。これによれば、同一波形勾配に対して $\sqrt{gH_0}/W_0$ が増加すれば、砕波点から汀線の距離が増加することが知れる。このような傾向は Watts⁵¹⁾ や Savill³⁾ の実験結果にも現われている。なお中村らの実験結果に i_0 や S , H_0/L_0 が明確に現われないのは実験範囲が限定されているためであろう。

図57と図58は縦軸に $\sqrt{gH_0}/W_0$ を横軸 h_1/l_1 , 図59, 60に横軸に l_1/H_0 を取った。点のばらつきが大きくはっきりしないが, $\sqrt{gH_0}/W_0$ が大きくなると Bar 頂から汀線までの距離が大きくなるようだ。

筆者は, L_{min}/H_0 は, $\sqrt{gH_0}/W_0$, H_0/L_0 が大きく関係していると考えている。なおトラフ型の場合でも $\sqrt{gH_0}/W_0$ が大きいほど, 汀線が後退するようだが, Bar 型に比較すれば, $\sqrt{gH_0}/W_0$ の効果が明りょうでない。図61に Watta の資料を示しておいた。 H_0/L_0 の小さい方が, 同一粒径でも汀線後退量が小さいのが良くわかる。

(8) 結 論

(1)から(7)の検討によって, 汀線に直角方向の海岸地形の相似性に関係する要因は, 一次要因として H_0/L_0 , $\sqrt{gH_0}/W_0$, S , および初期形状 i_0 であり, 二次要因として $\frac{\sqrt{\nu} H_0^{1/4} g^{3/4}}{W_0^2}$ であることが, ほぼ実証された。

波高は $\sqrt{H_0 L_0}$ の値
 ○ 暴風海波 ○ 2L 型
 ○ 遷移 ○ $\frac{1}{2}L$ 型
 ○ 正常
 L_0 砕波水深

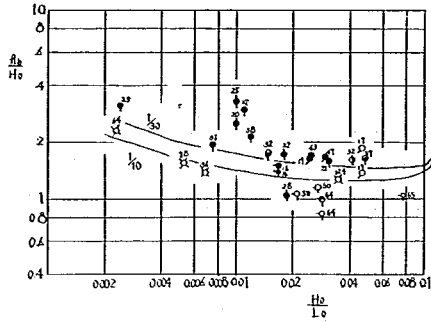


図 49 砕波水深と H_0/L_0 図 (砂)

波高は $\sqrt{H_0 L_0}$ の値

○ 暴風海波型
 ○ 遷移
 ○ 正常
 ○ 2L 型
 ○ $\frac{1}{2}L$ 型

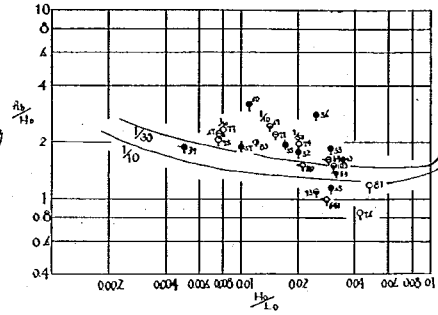


図 50 砕波水深と H_0/L_0 図 (石炭粉)

暴風海波のみ記入

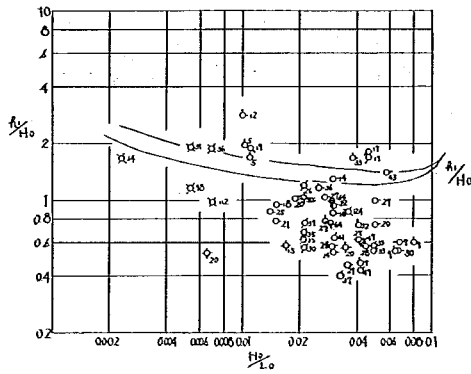


図 51 Bar 頂水深と H_0/L_0 図 (砂)

暴風海波のみ記入
 波高は $\sqrt{H_0 L_0}$ の値

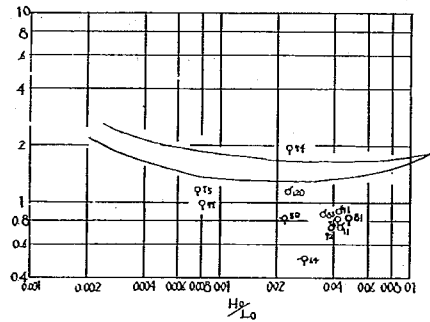


図 52 Bar 頂水深と H_0/L_0 図 (石炭粉)

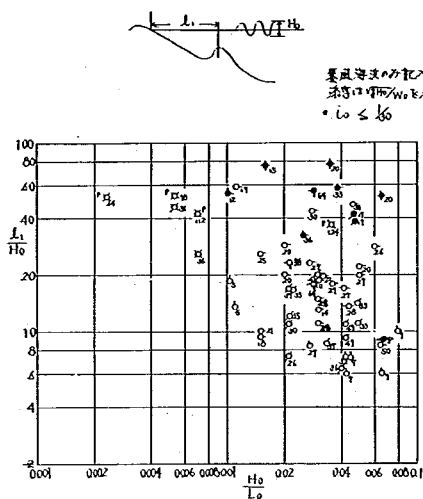


図 53 l_1/H_0 と H_0/L_0 図 (砂)

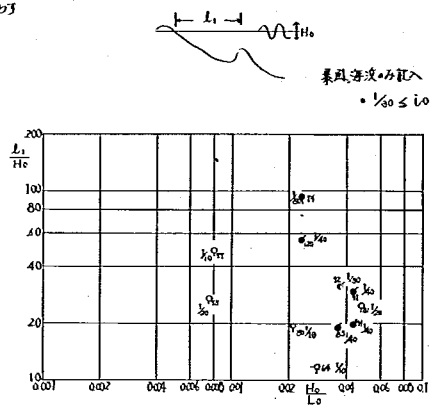


図 54 l_1/H_0 と H_0/L_0 図 (石炭粉)

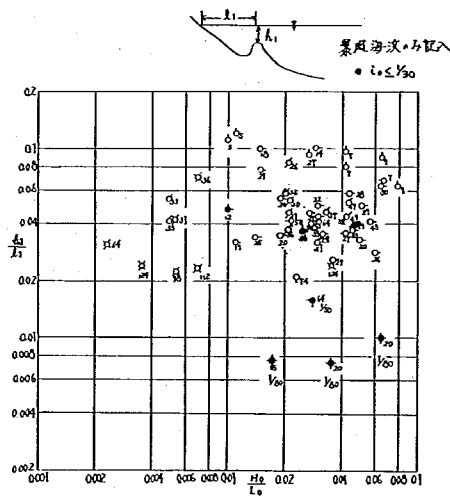


図 55 h_1/l_1 と H_0/L_0 図 (砂)

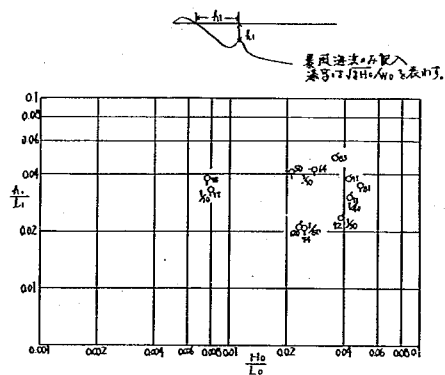


図 56 h_1/l_1 と H_0/L_0 図 (石炭粉)

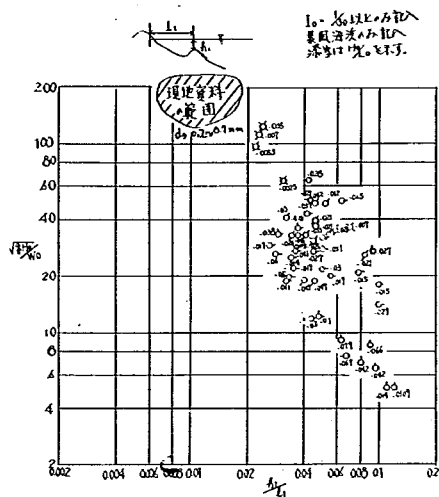


図 57 $\sqrt{gH_0}/W_0$ と h_1/l_1 図 (砂)

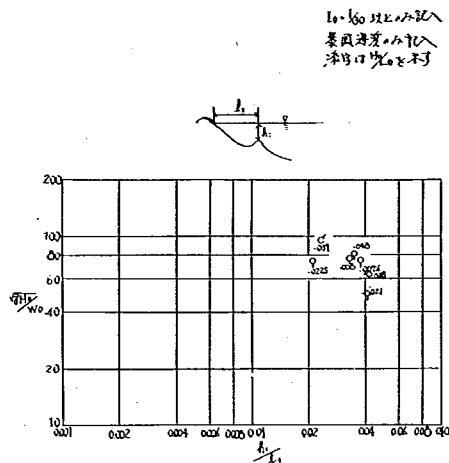


図 58 $\sqrt{gH_0}/W_0$ と h_1/l_1 図 (石炭粉)

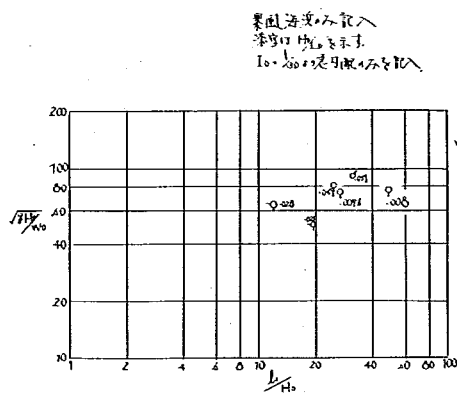


図 59 $\sqrt{gH_0}/W_0$ と l_1/H_0 図 (石炭粉)

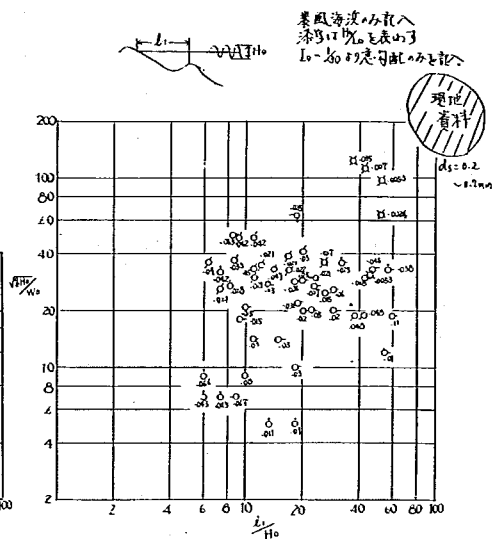


図 60 $\sqrt{gH_0}/W_0$ と l_1/H_0 図 (砂)

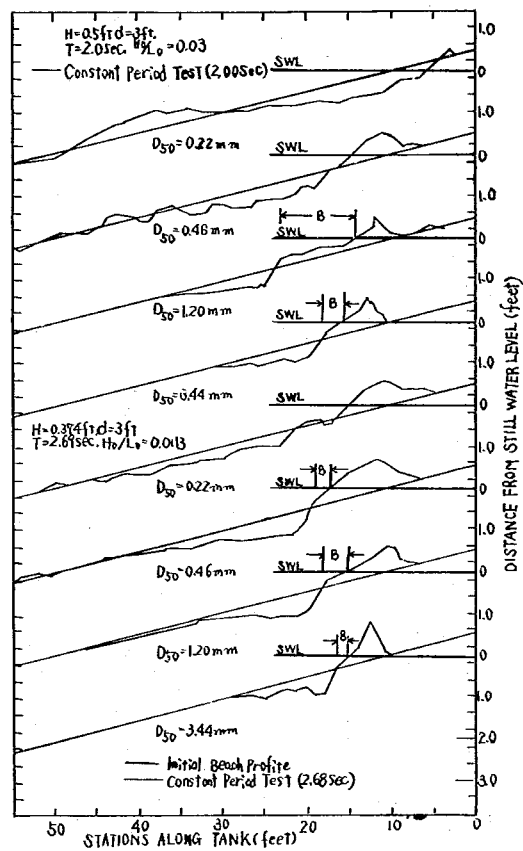


図 61 SCALE-MODEL-RELATIONSHIP

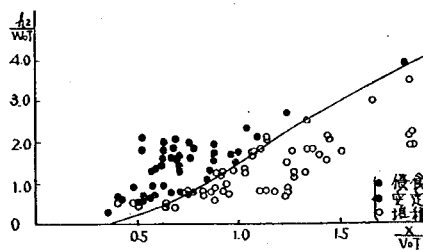


図 62 Sand bar に対する $\frac{h_2}{W_0 T} \sim \frac{X}{V_0 T}$ の関係

表 3-2 汀線に直角方向の海浜形状の相似性に関する資料

○ 文献 6) Naya K

実験NO	水深	河床材料	d50	H	H ₀	T	H ₀ /Wo	海浜分類	H ₀ /H	H ₀ /L ₀	経過時間		
1	13.72 ^{cm}	クルミ殻	1.22 ^{mm}	4.25 ^{cm}	7.27 ^{cm}	1.04	15.797	N	5.18	0.71	2.0433	15~3H	前実験の形状に90~180分の波を当てる。
2	"	"	"	4.21	7.97	1.48	11.626	N	3.96	0.998	2.0117	"	
3	10.67	"	"	4.05	3.74	"	11.170	N	"	1.06	0.0110	"	
4	"	"	"	4.88	4.97	1.03	12.898	N	2.66	0.736	2.0299	"	
5	"	"	"	4.08	2.62	1.62	11.170	N	4.57	1.298	0.0086	"	
6	12.19	"	"	4.57	4.07	1.61	11.626	N	5.18	1.275	0.0125	"	
7	"	"	"	4.88	5.17	0.94	13.295	N	2.74	2.531	0.0375	"	
8	"	"	"	7.44	7.57	1.10	16.122	N	3.66	2.483	0.0401	"	
9	9.14	"	"	3.17	2.72	1.52	9.673	N	"	1.343	0.0076	"	
10	"	"	"	3.72	4.82	0.92	11.626	N	1.22	0.319	0.029	"	
11	"	"	"	4.57	4.39	1.14	12.065	N	2.44	2.554	2.0217	"	
12	15.24	"	"	6.77	7.32	2.74	15.797	S	1.83	0.25	2.0531	"	
13	"	"	"	3.96	4.72	1.57	11.170	N	4.88	1.31	0.0097	"	
14	10.72	"	"	5.06	4.61	1.86	12.488	S	3.96	2.86	2.0355	"	
15	"	"	"	4.84	6.28	1.60	14.420	S	"	0.636	2.0156	"	
16	"	"	"	7.32	7.27	1.26	15.797	S	0.66	2.504	0.2791	"	
17	"	"	"	8.05	8.82	1.01	17.864	S	1.83	0.207	0.2558	"	
18	"	"	"	5.65	6.04	0.845	14.420	T	1.98	0.328	0.0539	"	
19	"	"	"	4.72	4.07	0.72	11.626	T	1.22	1.30	0.0503	"	
20	12.19	"	"	4.08	3.67	"	11.170	N	"	0.332	2.0455	"	
21	"	"	"	4.27	4.38	1.345	12.688	T	1.52	0.326	2.0419	"	
22	"	"	"	7.01	7.02	1.01	15.797	S	1.83	0.25	2.0457	"	
23	"	"	"	7.19	7.01	1.26	15.464	S	3.25	3.435	2.0283	"	
24	"	"	"	5.06	4.52	1.60	12.488	N	0.66	2.81	0.0113	"	
25	"	"	"	4.40	5.06	1.86	13.680	S	"	2.683	0.0099	"	
26	10.67	"	"	5.06	4.37	"	12.065	T	3.05	0.698	2.0081	"	
27	"	"	"	7.01	6.08	1.60	14.420	N	3.35	2.551	2.0152	"	
28	"	"	"	6.71	6.39	1.26	"	N	"	2.525	0.0253	"	
29	"	"	"	6.10	6.24	1.01	"	N	2.59	0.416	0.0392	"	
30	"	"	"	4.66	4.70	0.845	11.626	N	1.83	2.468	0.035	"	
31	"	"	"	"	3.99	0.72	"	N	"	2.458	0.0493	"	
32	9.14	"	"	3.41	3.70	"	11.170	N	0.61	2.155	0.0456	"	
33	"	"	"	4.66	3.84	0.845	11.626	N	1.83	2.456	0.0344	"	
34	"	"	"	4.27	4.27	1.01	12.065	N	2.49	2.572	0.0268	"	

試驗 No	水深	河床材料	d50	H	H ₀	T	H ₀ /W ₀	海床分類	波高 H ₀	H ₀	H ₀ /L	波長 L
35	9.14	"	"	4.60	4.33	1.26	10.586	N	0.45	1.01	0.035	1.5~2.0
36	"	"	"	4.88	4.10	1.50	11.526	N	0.66	2.892	0.0103	"
37	"	"	"	5.97	4.39	1.56	12.488	S	4.11	0.896	0.0289	"
38	15.24	"	"	7.02	5.43	"	14.776	S	4.88	0.768	0.0119	"
39	"	"	"	6.71	5.25	1.50	14.420	N	0.96	0.644	0.0156	"
40	"	"	"	8.23	8.32	1.26	13.785	N	0.51	0.421	0.0326	"
41	"	"	"	9.27	7.88	1.01	15.240	S	0.45	0.409	0.062	"
42	"	"	"	5.18	5.66	0.845	14.055	N	1.52	0.269	0.251	"
43	"	"	"	4.39	4.79	0.72	12.898	N	1.84	0.482	0.069	"
No 1	13.72 ^{cm}	石英	0.965 ^{cm}	10.06 ^{cm}	8.90 ^{cm}	1.86	6.910	N	8.23	0.925	0.0165	"
2	"	"	"	7.75	"	1.50	"	N	"	"	0.0223	"
3	"	"	"	6.10	6.07	1.26	5.788	S	7.21	1.155	0.02245	"
5	"	"	"	7.17	7.59	1.01	6.415	T	5.18	0.633	0.0476	"
6	"	"	"	6.10	6.50	0.845	6.218	S	0.45	0.506	0.0593	"
7	"	"	"	5.18	5.37	0.72	5.593	S	0.74	0.433	0.0704	"
8	12.19	"	"	0.90	4.27	"	4.801	S	1.07	0.25	0.053	"
9	"	"	"	0.45	0.63	0.845	4.445	S	2.74	0.758	0.0224	"
10	"	"	"	6.10	6.34	1.01	5.880	T	0.05	0.431	0.0398	"
11	"	"	"	7.01	6.33	1.26	6.018	S	4.88	0.715	0.0275	"
12	"	"	"	11.58	10.30	1.50	7.482	N	7.92	0.77	0.0258	"
13	"	"	"	7.92	6.34	1.86	6.018	N	6.71	1.01	0.0123	"
14	10.57	"	"	0.29	2.58	"	0.849	N	4.57	1.705	0.005	"
15	"	"	"	0.05	2.48	"	0.629	N	"	1.84	0.0046	"
16	"	"	"	"	2.64	1.60	0.749	N	4.11	1.556	0.0066	"
17	"	"	"	5.49	5.24	1.26	5.290	N	5.18	0.792	0.021	"
18	"	"	"	4.27	4.06	1.01	4.801	N	4.38	1.115	0.0274	"
19	"	"	"	2.74	2.98	0.845	4.057	T	0.05	1.04	0.0262	"
20	"	"	"	0.05	3.32	0.72	4.255	T	2.59	0.78	0.041	"
21	9.14	"	"	2.94	3.17	"	4.017	T	2.74	0.865	0.0372	"
22	"	"	"	0.66	0.84	0.845	4.626	N	0.65	2.794	0.0344	"
23	"	"	"	4.15	4.14	1.01	4.801	N	4.57	1.10	0.026	"
24	"	"	"	0.85	0.41	1.26	4.057	N	5.18	1.67	0.0126	"

実験No	水深	河床材料	d50	H	H ₀	T	H ₀ /W ₀	海床分類	波打立の高	H ₀	H ₀ /L ₀
25	"	"	"	0.84	0.22	1.60	4.057	N	0.25	1.044	0.008
26	"	"	"	0.10	4.08	1.06	4.625	N	0.49	1.315	0.0076
27	15.22	"	"	7.01	5.16	"	5.728	N	"	0.39	0.014
28	"	"	"	5.18	4.82	1.600	5.122	N	6.10	1.26	0.012
29	"	"	"	9.14	9.24	1.265	7.028	N	9.95	1.055	0.007
30	"	"	"	10.36	11.06	1.01	7.698	S	7.82	0.561	0.0074
31	"	"	"	5.99	6.34	0.845	5.880	S	2.90	0.457	0.0007
32	"	"	"	5.18	5.64	0.72	5.593	S	0.55	0.540	0.0077
No 1	18.72	石 英	0.127 ^{mm}	4.21 ^{cm}	4.61 ^{cm}	0.72	32.01	S	2.27 ^{cm}	0.475	0.0068
2	"	"	"	5.79	6.29	0.845	37.88	S	3.20	0.505	0.0065
3	"	"	"	8.63	9.02	1.01	45.02	S	4.72	0.524	0.0066
4	"	"	"	5.23	5.39	1.26	35.07	S	5.20	0.932	0.0028
5	"	"	"	4.43	4.22	1.60	30.93	N	7.55	1.80	0.0136
6	"	"	"	5.24	4.51	1.86	32.01	S	8.53	1.89	0.0034
7	12.19	"	"	9.02	7.66	"	41.33	S	0.98	1.29	0.014
8	"	"	"	8.23	7.32	1.60	40.49	N	"	1.33	0.0083
9	"	"	"	5.79	5.64	1.26	36.03	S	5.49	0.973	0.0028
10	"	"	"	7.62	7.95	1.01	42.15	S	4.27	0.538	0.00498
11	"	"	"	5.00	5.39	0.845	35.07	T	2.74	0.508	0.0034
12	"	"	"	0.90	4.27	4.72	30.93	T	2.59	0.606	0.0038
13	10.67	"	"	0.17	0.47	"	27.41	T	2.44	0.705	0.0027
14	"	"	"	0.96	4.24	0.845	32.93	N	2.90	0.685	0.0039
15	"	"	"	4.53	4.74	1.01	38.06	S	0.05	0.541	0.0039
16	"	"	"	4.27	4.06	1.26	29.80	S	5.33	1.315	0.0154
17	"	"	"	5.00	4.60	1.60	32.01	S	6.25	1.36	0.0115
18	"	"	"	7.32	5.95	1.86	35.96	S	7.01	1.18	0.0110
19	9.14	"	"	4.25	2.64	"	24.30	S	4.38	1.75	0.0069
20	"	"	"	6.71	5.64	1.60	34.03	S	"	2.355	0.014
21	"	"	"	0.47	0.21	1.26	27.41	T	0.96	4.232	0.013
22	"	"	"	4.27	4.27	1.01	30.93	T	4.11	0.965	0.0058
23	"	"	"	0.96	4.08	0.845	29.80	N	0.96	0.993	0.0072
24	"	"	"	0.25	0.29	0.72	27.41	S	0.20	0.97	0.0007
25	15.22	"	"	5.26	5.35	"	36.03	S	2.13	0.364	0.0023

実験No	水深	河床材料	d50	H	H ₀	T	1/8H ₀ W ₀	海浜分類	波打高さ	H ₀	H ₀ L ₀	継続時間
26	15.24	石 炭	0.137	8.95	7.89	0.825	41.33	S	2.74	0.362	0.067	15~3
27	"	"	"	8.95	8.93	1.01	44.51	S	2.90	0.325	0.0559	"
28	"	"	"	5.79	5.91	1.26	35.23	S	3.65	0.513	0.0209	"
29	"	"	"	9.02	8.41	1.60	43.74	S	5.71	0.798	0.021	"
30	"	"	"	4.88	4.30	1.86	30.73	S	8.23	1.92	0.0299	"
No 1	10.72	プラスチック	1.065 ^{mm}	8.96 ^{cm}	8.69 ^{cm}	1.36	41.15	N	2.13 ^{cm}	0.246	0.0301	"
2	"	"	"	6.40	5.80	0.99	35.34	N	2.29	0.336	0.0444	"
3	"	"	"	6.52	5.74	1.60	34.17	N	2.13	0.359	0.0149	"
4	"	"	"	5.79	5.90	1.86	"	N	"	0.362	0.011	"
5	12.19	"	"	5.28	5.21	1.90	31.50	N	1.68	0.322	0.0093	"
6	"	"	"	6.10	6.40	0.98	35.01	N	1.22	0.19	0.0426	"
7	"	"	"	2.66	4.01	0.72	27.55	N	2.51	0.152	0.0475	"
8	"	"	"	5.18	5.12	1.20	31.50	N	2.44	0.475	0.0229	"
9	"	"	"	5.97	5.05	1.82	"	N	1.22	0.241	0.0098	"
10	10.67	"	"	5.24	4.26	1.866	28.59	N	1.37	0.322	0.0071	"
11	"	"	"	4.27	3.58	1.52	26.47	N	2.13	0.53	0.007	"
12	"	"	"	5.43	5.17	1.26	31.50	N	"	0.412	0.0209	"
13	"	"	"	5.49	5.61	1.01	32.42	N	1.52	0.272	0.0362	"
14	"	"	"	3.17	3.39	0.84	25.34	N	0.91	0.27	0.0308	"
15	"	"	"	2.87	3.12	0.72	24.16	N	0.61	0.195	0.0336	"
16	9.14	"	"	4.94	3.83	1.86	27.55	N	1.07	0.278	0.0071	"
17	"	"	"	3.35	2.94	1.44	24.16	N	1.98	0.573	0.0091	"
18	"	"	"	5.79	5.06	1.26	32.42	N	1.83	0.342	0.0217	"
19	"	"	"	5.06	5.04	1.02	31.50	N	1.52	0.302	0.031	"
20	"	"	"	2.74	2.88	1.845	22.92	N	0.91	0.317	0.0289	"
21	"	"	"	2.19	2.38	0.72	21.51	N	0.61	0.257	0.0274	"
22	15.24	"	"	5.85	5.10	1.79	31.50	N	2.13	0.418	0.0092	"
23	"	"	"	4.75	4.43	1.60	29.59	N	2.44	0.55	0.0111	"
24	"	"	"	6.22	6.23	1.26	35.01	N	2.13	0.34	0.0254	"
25	"	"	"	9.63	10.24	1.04	44.55	N	1.33	0.179	0.0605	"
26	"	"	"	5.67	6.19	0.85	34.17	N	0.71	0.148	0.055	"
27	"	"	"	4.27	4.66	0.70	29.59	N	0.61	0.131	0.061	"
28	12.19	"	"	4.63	5.00	0.845	30.55	N	1.07	0.274	0.0415	"

実験No	水源	河床材料	d50	H	H ₀	T	$\sqrt{H_0}/W_0$	海浜分類	波の振幅高	H/H_0	H/L_0	継続時間	
29	"	"	"	6.77	4.51	1.26	46.84	N	2.74	0.416	0.0266	1.5~3	
30	"	"	"	5.00	4.45	1.60	29.59	N	2.55	0.597	0.0111	"	
31	9.14	"	"	4.45	4.75	"	25.47	N	1.68	0.448	0.0094	"	
32	18.72	"	"	7.92	7.89	1.26	49.96	N	2.18	0.271	0.0388	"	
33	"	"	"	4.88	5.30	0.845	41.54	N	1.07	0.201	0.0475	"	
34	"	"	"	4.08	4.28	0.72	29.59	N	"	0.238	0.0553	"	
35	15.24	"	"	5.97	5.24	1.80	41.50	N	2.04	0.489	0.0077	"	

実験No	水深	河床材料	d50	H ₀	T	H ₀ /L ₀	H ₀ /d50	V ₀ /H ₀	海床分類	波打位高	前決勾配	H ₀ /H ₀	継続時間
1	15.24	石英	0.935 ^{mm}	0.22 ^{cm}	1.20	0.0144	28.6	4.255	N	0.01	0.303	1.175	1.5~3
2	"	"	"	2.05	"	0.0113	26.4	3.629	N	0.51	0.238	1.275	"
3	"	"	"	2.11	"	0.0094	21.85	3.395	N	3.96	0.350	1.381	"
4	13.72	"	"	2.14	"	0.0095	22.25	"	N	4.11	0.333	1.225	"
5	"	"	"	2.51	"	0.0112	26.05	3.629	N	5.03	0.291	2.00	"
6	"	"	"	0.16	"	0.0141	32.7	4.057	N	5.44	2.187	1.79	"
7	"	"	"	4.05	1.00	0.026	42.0	4.626	S	4.11	0.233	1.015	"
8	"	"	"	4.05	"	0.0194	40.1	4.201	T	5.03	0.139	1.115	"
9	"	"	"	2.66	"	0.0113	27.5	3.749	N	2.66	0.213	1.36	"
10	12.19	"	"	1.97	"	0.0126	20.4	3.143	N	2.59	0.266	1.32	"
11	"	"	"	2.95	"	0.019	30.7	4.057	N	3.31	0.271	1.236	"
12	"	"	"	2.53	"	0.0155	26.7	3.629	N	3.20	0.222	1.24	"
13	"	"	"	0.32	1.20	0.0148	34.3	4.255	N	4.11	0.21	"	"
14	"	"	"	"	"	"	34.3	"	N	3.51	0.257	1.055	"
15	"	"	"	1.58	"	0.0084	19.5	3.143	N	2.59	0.278	1.375	"
16	"	"	"	2.15	1.00	0.0108	22.3	3.395	N	3.31	0.433	1.77	"
17	9.14	"	"	1.70	"	0.0109	17.6	3.143	N	2.74	2.400	1.61	"
18	"	"	"	2.41	"	0.0103	21.4	3.395	N	3.20	2.250	1.527	"
No 1	15.24	石英	0.52 ^{mm}	2.10 ^{cm}	1.20	0.0093	40.3	6.113	N	5.94	0.207	2.34	"
2	"	"	"	0.96	"	0.0043	18.5	4.002	N	1.98	0.305	2.06	"
3	"	"	"	2.81	"	0.0105	53.12	7.307	N	5.44	0.257	1.365	"
4	13.72	"	"	2.25	"	0.01	43.20	6.113	N	3.51	0.200	1.56	"
5	"	"	"	0.96	"	0.0043	18.35	4.002	N	1.52	0.386	1.575	"
6	"	"	"	0.04	"	0.0136	58.5	7.307	N	4.57	0.182	1.50	"
7	"	"	"	1.92	1.00	0.0123	36.9	5.660	N	3.35	0.157	1.746	"
8	"	"	"	2.31	"	0.0143	44.3	6.535	N	4.11	2.137	1.78	"
9	"	"	"	1.87	"	0.012	35.9	5.660	N	3.20	0.200	1.713	"
10	12.19	"	"	1.42	"	0.0091	27.3	5.167	N	3.66	2.208	2.53	"
11	"	"	"	1.16	"	0.0074	22.0	4.621	N	1.53	0.286	1.46	"
12	"	"	"	2.14	"	0.0107	41.1	6.113	N	3.51	0.164	1.64	"
13	"	"	"	1.92	1.20	0.0086	36.95	5.660	N	"	0.250	1.82	"
14	"	"	"	1.54	"	0.0069	29.7	5.167	N	2.90	0.218	1.775	"
15	"	"	"	0.97	"	0.0043	18.6	4.002	N	1.68	0.255	1.73	"

実験NO	水深	河床材料	d50	H ₀	T	H ₀ /L ₀	H ₀ /d ₅₀	$\sqrt{H_0}/W_0$	流速分類	床面形状	前縁勾配	H ₀ /H ₀	継続時間	
16	12.19	"	"	1.13	1.20	0.0078	21.7	4.621	N	2.59	0.260	2.27	15~3	
17	"	"	"	2.28	"	0.0198	53.5	6.732	N	4.34	0.211	1.56	"	
18	"	"	"	2.25	"	0.0145	43.3	6.113	N	4.81	0.267	1.69	"	
19	"	"	"	2.39	1.20	0.0129	55.5	6.922	N	4.42	0.175	1.53	"	
NO 1	15.24 ^{cm}	丸に穀	2.915	1.34 ^{cm}	1.20	0.0149	36.6	14.660	N	1.68 ^{cm}	0.10	0.501	"	
2	"	"	"	2.21	"	0.0098	24.2	11.695	N	1.07	0.213	0.932	"	
3	"	"	"	2.86	"	0.0098	9.4	7.656	N	0.76	0.216	2.887	"	
4	"	"	"	4.02	"	0.0179	44.0	15.737	N	1.68	0.114	0.417	"	
5	18.92	"	"	3.64	"	0.0152	39.8	15.312	N	1.37	0.05	0.377	"	
6	"	"	"	2.31	"	0.0131	25.2	12.502	N	1.07	0.156	0.462	"	
7	"	"	"	4.27	"	0.019	46.7	16.839	N	1.98	0.100	0.463	"	
8	"	"	"	5.05	"	0.0225	55.2	18.225	N	1.68	0.749	0.332	"	
9	"	"	"	2.32	1.0	0.0277	47.2	16.539	N	1.07	0.05	0.318	"	
10	"	"	"	3.21	"	0.0225	35.1	14.660	N	"	"	0.428	"	
11	"	"	"	1.55	"	0.010	17.0	9.884	N	"	0.172	0.832	"	
12	12.19	"	"	1.21	1.00	0.0078	13.3	8.840	N	1.22	0.156	1.005	"	
13	"	"	"	2.38	"	0.0131	26.1	12.502	N	2.59	0.074	1.07	"	
14	"	"	"	2.13	"	0.0225	34.2	12.978	N	1.07	0.077	0.438	"	
15	"	"	"	3.10	1.20	0.0138	33.9	"	N	"	0.09	0.443	"	
16	"	"	"	1.77	"	0.008	19.6	10.827	N	1.68	0.218	0.938	"	
17	"	"	"	3.95	"	0.0176	43.2	16.737	N	"	0.03	0.425	"	
18	9.14	"	"	1.15	1.01	0.0051	12.6	8.840	N	1.22	0.156	1.06	"	
21	"	"	"	2.94	1.00	0.0188	32.0	12.978	N	1.37	0.104	0.468	"	
NO 1	15.24 ^{cm}	丸に穀	2.915	1.34 ^{cm}	1.20	0.0137	63.5	25.106	N	1.68 ^{cm}	0.05	0.545	"	
3	"	"	"	1.44	"	0.0064	29.8	17.809	N	1.07	0.1169	0.74	"	
4	13.92	"	"	1.53	"	0.007	32.8	"	N	1.37	0.167	0.866	"	
5	"	"	"	2.30	"	0.0103	47.7	22.537	N	2.59	0.06	1.125	"	
6	"	"	"	2.99	"	0.0133	62.0	25.186	N	"	"	0.846	"	
7	"	"	"	4.60	1.00	0.0294	95.1	30.847	N	"	0.05	0.524	"	
10	12.19	"	"	2.90	"	0.0136	60	25.186	N	1.52	0.138	0.526	"	
11	"	"	"	2.58	"	0.0172	55.5	23.894	N	1.83	0.04	0.682	"	
13	"	"	"	2.23	1.20	0.0122	56.6	"	N	2.29	0.12	0.837	"	

實驗No	水深	河床材料	d50	H ₀	T	H ₀ /L ₀	H ₀ /d50	V ₃₀ /W ₀	海況分類	HR 波打比倍	前波勾配	H ₀ /H ₀	継続時間
14	"	"	"	2.27	1	0.0116	47.4	22.327	N	1.52	0.11	0.667	15~3
15	"	"	"	1.07	"	0.0047	22.6	15.727	N	1.22	0.167	1.12	"
16	9.4	"	"	1.27	1.00	0.0033	26.7	"	N	1.07	0.13	0.827	"
18	"	"	"	3.44	"	0.0221	71.3	26.415	N	0.15	0.06	0.0443	"
19	15.24	"	"	2.87	1.20	0.0135	59.3	23.874	N	2.27	0.12	0.778	"
20	13.72	"	"	2.80	1.00	0.0177	57.9	"	N	1.98	0.143	0.708	"
21	"	"	"	2.26	"	0.0145	46.7	21.072	N	1.37	0.14	0.606	"
22	"	"	"	1.46	"	0.0094	36.5	17.809	N	1.68	0.160	1.14	"
23	12.17	"	"	1.72	"	0.0123	38.6	19.509	N	1.07	0.08	0.558	"
No 1	15.24	7 ⁰ 7 ⁰ 7 ⁰ 7 ⁰	1.065 ^{cm}	3.21 ^{cm}	1.20	0.0143	30.1	34.740	N	1.07 ^{cm}	0.10	0.332	"
2	"	"	"	2.40	"	0.0107	22.5	27.627	N	0.76	0.13	0.313	"
3	"	"	"	1.20	"	0.0054	11.3	20.747	N	1.07	0.11	0.326	"
4	13.72	"	"	1.11	"	0.005	10.2	"	N	0.46	0.136	0.411	"
5	"	"	"	2.44	"	0.0185	22.25	27.627	N	0.07	0.132	0.132	"
6	"	"	"	3.25	"	0.0145	30.5	34.740	N	1.07	0.13	0.322	"
7	"	"	"	4.77	1.00	0.021	44.8	41.898	N	0.91	0.10	0.191	"
8	"	"	"	3.54	"	0.0227	33.1	36.225	N	0.76	0.13	0.216	"
9	"	"	"	1.74	"	0.0112	16.3	25.657	N	0.46	0.11	0.207	"
10	12.17	"	"	1.37	"	0.0083	12.25	23.422	N	"	0.12	0.256	"
11	"	"	"	2.77	"	0.0178	26.0	31.424	N	0.76	0.11	0.275	"
12	"	"	"	3.41	"	0.0219	32.0	34.740	N	1.07	0.13	0.312	"
13	"	"	"	3.35	1.20	0.0147	31.4	"	N	0.64	"	0.364	"
14	"	"	"	2.32	"	0.0103	21.8	27.627	N	0.97	0.11	0.426	"
15	"	"	"	1.10	"	0.0047	10.3	20.747	N	0.61	0.147	0.554	"
16	9.4	"	"	1.54	1.00	0.0077	14.4	23.422	N	0.30	0.11	0.172	"
17	"	"	"	3.00	"	0.0192	28.1	33.124	N	1.37	0.13	0.458	"
18	"	"	"	2.91	"	0.0186	27.3	"	N	1.07	"	0.366	"

[illegible]

[illegible]

表4 現地海岸の資料

江線~Bar頂 谷 Bar頂水深 谷								その他	
	h_1	h_2	h_1	h_2	b_1	b_2	沖波海底勾配		
鳥取港調査報告書(第2報) 文献57) 千代川西側海岸									
PI65N02	390	340	4.5	5.5	0.012	0.014	8.6/700 = 1/81	粒径は 0.25~0.40 mm 又、水深 4~6 m では $d_m = 1.0$ m m. 研波点 周期は 8~14 sec で $L_0 = 100 \sim 300$ m であるが H0.2 m で 9.3 sec $L_0 = 130$ m H0.4 m で 11.4 sec $L_0 = 200$ m 水深 5~6 m で $L = 50 \sim 100$ m (Baro存在す冰梁)	
----- S. 39.10									
NO 4	340	270	4.5	5.5	0.013	0.016	9.1/700 = 1/77		
NO 6	370	270	4.8	6.8	0.013	0.018	9.8/700 = 1/71		
NO 8	370	280	5.2	7.2	0.014	0.019	9.8/700 = 1/71		
NO 10	380	270	4.2	5.7	0.011	0.015	10/700 = 1/70		
NO 12 正常海波									
NO 14	170	240	3.5	4.7	0.021	0.028	10.3/700 = 1/68		
NO 16	220	130	3.2	4.3	0.015	0.020	9.7/700 = 1/72		
NO 18 正常海波									
NO 20	420	340	5.9	6.9	0.014	0.016	11.5/700 = 1/61		
NO 22	460	350	6.0	7.0	0.013	0.015	10.2/700 = 1/69		
千代川東側海岸									
NO 1	360	280	4.4	6.1	0.012	0.017	8/700 = 1/88		
NO 3	340	310	3.3	3.8	0.010	0.011	8.3/700 = 1/84		
NO 5	440	320	4.2	5.3	0.010	0.012	8.7/700 = 1/80		
NO 7	510	430	5.1	7.0	0.010	0.014	8.7/700 = 1/80		
NO 9	510	430	5.0	7.3	0.010	0.014	8.5/700 = 1/82		
NO 11	330	270	3.7	6.1	0.011	0.018	8/700 = 1/88		
NO 13	420	350	4.8	7	0.011	0.017	8.8/700 = 1/80		
NO 15	370	300	4.6	6.4	0.012	0.017	9.3/700 = 1/75		
NO 17	350	270	2.8	5.5	0.008	0.016	9.8/700 = 1/71		
NO 19	460	330	4.8	6.7	0.010	0.015	8.5/700 = 1/82		
千代川西側海岸									
----- S. 39.4 冬期波浪の影響を受けた地形									
NO 2	390	340	4.1	5.5	0.011	0.014	8.8/700 = 1/80		
NO 4	320	260	4.0	6.3	0.013	0.020	9/700 = 1/78		
NO 6	375	290	4.0	6.8	0.011	0.018	8.8/700 = 1/80		
NO 8	390	300	4.3	7	0.011	0.018	9.1/700 = 1/77		
NO 10	380	290	4.1	5.7	0.011	0.015	9.7/700 = 1/74		
NO 12	220	180	2.5	4.0	0.011	0.018	9.2/700 = 1/76		
NO 14	240	180	3.6	4.7	0.015	0.020	9.7/700 = 1/72		
NO 16	250	220	3.5	4.9	0.014	0.020	9.5/700 = 1/74		

	l_1	l_2	h_1	h_2	h_1/l_1	h_2/l_2	海底勾配	Bar間距離 l_1-l_2	
NO 18	430	330	6.6	7.9	0.015	0.018	$10/700 = 1/70$	290m	
	180	160	2	3	0.011	0.017			
	470	370	6.2	7.5	0.013	0.016			
NO.20	470	360	5.6	6.9	0.012	0.015	$10.5/700 = 1/67$		
NO 22	270	230	3.5	4.2	0.013	0.016	$9.6/700 = 1/73$	190m	
	460	350	5.4	7.2	0.012	0.016			
千代川東側海岸									
NO 1	350	280	4.3	6.1	0.012	0.017	$7.5/700 = 1/96$	180m	
	530	500	4.3	5.1	0.008	0.0096			
NO 3	330	240	2.7	3.4	0.008	0.010	$7.8/700 = 1/90$		
NO 5	430	360	3.8	5.5	0.009	0.013	$8/700 = 1/88$		
NO 7	330	290	3.1	4.0	0.009	0.012	$7.3/700 = 1/96$	220m	
	550	450	4.3	7.1	0.008	0.013			
NO 9	270	240	2.8	3.9	0.010	0.014	$7.7/700 = 1/91$	250m	
	520	420	4.3	7.7	0.008	0.015			
NO 11	125	100	1.2	1.9	0.0096	0.015	$7.8/700 = 1/90$	315m	
	440	395	3.7	4.8	0.008	0.011			
NO 13	475	375	3.8	6.0	0.008	0.013	$7.7/700 = 1/91$		
NO 15	440	340	4	6	0.009	0.014	$7.8/700 = 1/90$		
NO 17	190	175	1	1.6	0.005	0.0084	$7.7/700 = 1/91$	170m	
	360	290	2.5	4.4	0.0069	0.012			
NO 19	310	280	3.7	4.3	0.012	0.014	$9/700 = 1/78$	190m	
	500	375	6.0	7.3	0.012	0.015			
最上川河口調査 中間報告書 (本文編) 文献 67)									
S.43.6.27 測量 R.116									
NO 0	450	400	2.5	3	0.0056	0.0067	$8.2/700 = 1/85$		汀線では $d_m = 0.3 \text{ mm}$
NO 1	420	350	2.5	5	0.0060	0.0119	$8.5/700 = 1/82$		水深 2m では $d_m = 1 \text{ mm}$
NO 2	370	310	3	5	0.0081	0.0135	$8.6/700 = 1/81$		3m では $d_m = 0.8 \text{ mm}$
NO 3	500	440	4.8	5.8	0.0096	0.0116	$8.5/700 = 1/82$		4m では $d_m = 0.5 \text{ mm}$
NO 4	530	460	4.5	6.0	0.0085	0.0113	$8/700 = 1/88$		5m では $d_m = 0.3 \text{ mm}$
NO 5	240	150	2	4	0.0083	0.0167	$8.5/700 = 1/82$		10m では $d_m = 0.15 \text{ mm}$
	520	450	4	5.8	0.0077	0.0112	$8/700 = 1/88$		
NO 6	170	210	1.5	3.6	0.0088	0.0212			S.48.6.28 調査

河線とBar頂谷 Bar頂水深谷

	l_1	l_2	h_1	h_2	h_1/l_1	h_2/l_1	海底勾配	
NO 7	530	470	4	5.8	0.0075	0.011	$8/700 = 1/88$	
	200	110	2	4	0.010	0.020		
	520	400	3.5	5	0.0067	0.0096	$7.5/700 = 1/93$	
NO 8	190	120	2	4	0.0105	0.021	$7.5/700 = 1/93$	
	440	360	3	6	0.0068	0.014		

加賀海岸 S. 47.10 測量 (手取川 河口模型 実験資料より)								$l_1 - l_2$			
								河線での d_m	水深 m での d_m	Bar間距離	
NO 27	85	55	1.5	2	0.018	0.024	$8.5/700 = 1/82$	0.5	0.34	340	2 L 型の Bar にしては $l_1 - l_2$ が長すぎるようだ。
	425	340	5	7.6	0.012	0.018					
NO 29	120	100	2	3.3	0.017	0.0275	$8.8/700 = 1/80$			290	この影響による二段 Bar であろうか、沖 Bar で研波する。
	410	350	5	7.5	0.012	0.0183					
NO 4	90	50	1.5	2.3	0.017	0.026	$8.4/700 = 1/83$				
NO 0	120	60	2	3	0.017	0.025	$8.7/700 = 1/80$			300	なお 6 章で述べるが $l_1 - l_2$ の距離は h/l_1 と h/h_1 に関係し、現地では 2 L から 3.5 L となり可能性はある。
	420	260	4.5	6	0.011	0.014					
NO 502	430	310	4.8	7.5	0.011	0.017	$8.3/700 = 1/84$				
NO 504	140	75	2	3.3	0.014	0.024	$8.3/700 = 1/84$			290	
	430	340	4.7	8	0.011	0.019					
NO 506	65	25	1.3	2.2	0.020	0.034	$8.5/700 = 1/82$			385	
	450	340	5.2	7.2	0.012	0.016					
NO 508	450	390	4.5	7.8	0.010	0.017	$8.2/700 = 1/85$				
NO 510	135	100	2.0	4.0	0.015	0.030	$8/700 = 1/88$			355	
	490	410	4.3	7.2	0.0088	0.015					
NO 514	135	80	1.3	2.0	0.0096	0.015	$8.2/700 = 1/85$			305	
	440	370	4	6	0.0091	0.014					
NO 516	85	50	1	2	0.012	0.024	$8.3/700 = 1/84$			305	
	390	310	4	5.5	0.010	0.014					
NO 6	440	300	5.5	7	0.013	0.016	$8/700 = 1/88$				
NO 31	160	130	2.5	3.5	0.016	0.022	$8.5/700 = 1/82$			220	
	380	300	3.3	7.5	0.0087	0.020					
NO 33	170	100	2	4	0.012	0.024	$8.8/700 = 1/80$			230	
	400	300	4.2	7.2	0.011	0.018					
NO 35	220	155	2.5	3.8	0.011	0.017	$8.3/700 = 1/84$			250	

河床~Bar間 谷		Bar間水深 谷										Bar間距離	
	l_1	l_2	h_1	h_2	h_1/l_1	h_2/l_2	海底勾配	河床T ₀ cm	水深5mT ₀ cm	l_1-l_2			
NO 35	470	340	4.7	7.7	0.010	0.016							
NO 37	150	90	3	4	0.020	0.027	$87/100 = 1/80$						
	450	330	5	8	0.011	0.018						300	
NO 39	490	400	5	8	0.010	0.016	$85/100 = 1/82$					200	三列のBar 第2段と第3段 220m
北海道石狩湾 文献 56)													
	600	150	2	7	0.003	0.012	$1/220$	0.04cm					
	400	380	4	5	0.010	0.013	$1/140$	0.05					
鯨塚地区													
	250	200	3	4	0.012	0.015	$1/125$	0.034	0.02		260	= 3列 Bar	
	260	210	3	4	0.012	0.015	$1/140$				270	= 3列 Bar	
	530	480	4	6	0.0075	0.011	$1/140$	0.034					
樽川地区													
	290	230	3	4	0.010	0.014	$1/130$	0.022	0.02				
	330	260	3	5	0.0090	0.015	$1/140$	0.02			260	= 3列 Bar	
	280	200	3	4	0.011	0.014	$1/140$	0.024			270	= 3列 Bar	
北海道新川付近													
	180	160	1.5	2.5	0.008	0.014					200	三列のBar 第2段と第3段	
	200	180	1.5	2.0	0.008	0.010					180	の距離 220m $n=4m$	
最上川河口付近													
	400~500	300~500	2.5~5	3~6	0.006~0.01	0.01	$1/80 \sim 1/90$	0.03	0.025				
大湊川河口付近													
	600	500	5.5~6.5	7.7~8.3	0.009~0.011	0.013~0.014	$1/90 \sim 1/100$	0.02~0.04	0.2				
更岸地区 文献 59)													
	300	250	4	6~7	0.013			0.1~0.2	0.03				
甲殿海岸 文献 60)													
	130	95	3.0	4.5	0.023	0.035	$1/30 \sim 1/40$						

6. S と i_0 の効果についての実験的検討

[1] はじめに

5章において海浜変化の相似性を決めるパラメーターの効果について述べたが、模型実験によく使われる石炭粉と砂では、S の効果がどれだけあるか、5章でも明確でなかった。そこで本章では $\sqrt{gH_0}/W_0$, H_0/L_0 , H_0/ℓ を同一として砂と石炭粉で海床変化がどう異なるかを見ることにした。また初期勾配の影響についても検討を行ない海床波の形成原因について述べる。

[2] 実験装置および方法

実験は長さ70m, 幅6m, 高さ1mのコンクリート水路の中に二本並列に設置されている長さ35m, 幅0.7m, 高さ0.8mの片面ガラス張コンクリート水路で行なった。水路の一端には単ヒンジフラッター型の造波装置が設置されている。この造波装置は変速機で周期を、偏心位置を変えることによって波高を変えることができる。実験に用いた底質の特性は砂の場合 $d_{50} = 0.018\text{ cm}$, 石炭粉の場合 0.021 cm であって、それぞれの水中比重は1.65, 0.5である。また沈降速度は水温7℃でそれぞれ, 2.05 cm/S , 0.91 cm/S である。

表5 実験ケース一覧表

ケース	H_0	L_0	H_0/L_0	$\sqrt{gH_0}/W_0$	S	i_0
1	11.44 ^{cm}	505.4 ^{cm}	0.023	51.6	1.65	1/10
2	2.06	100.0	0.021	49.3	0.45	1/10
3	18.78	624.0	0.030	66.1	1.65	1/10
4	3.59	125.0	0.029	65.0	0.45	1/10
5	18.78	624.0	0.030	66.1	1.65	1/50
6	3.59	125.0	0.029	66.0	0.45	1/50

実験条件は表5のごとくで、Sおよび i_0 の効果調べることにした。波高は水深一定の水平床部である水路先端付近でポイントゲージを設置して測定し、Wiegelの表より沖波に換算した。

[3] 実験結果概要

まず初めに各ケースの海床変化のようすを概説しよう。

平面図 縦断 1/300
横断 1/100

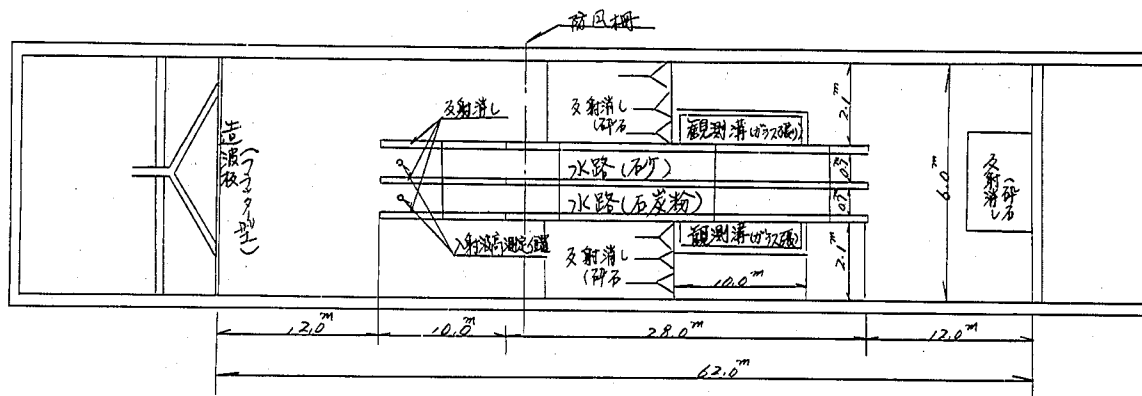


図64

縦断図 縦断 1/300
横断 1/100

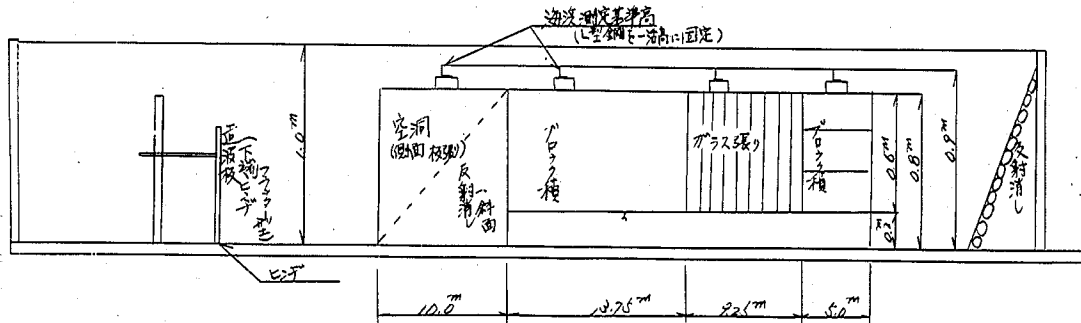


図63 実験施設図

○ケース1は底質は砂で $i_0 = 1/10$, $T = 1.8 \text{ sec}$, $H_0 = 11.44 \text{ cm}$, $H_0/L_0 = 0.023$ の波を当てたものである。このケースでは主に前浜と磯浜帯が欠壊されて、その土砂が砕波点から沖浜にかけて堆積し、明りょうなBarが生じている。実験開始後2時間までは汀線付近に堆積したが、その後、浜崖が生じ沖浜の堆積量が増加している。砕波は巻波型であり、砕波後の減衰がいちじるしい。砕波位置はほぼ一定していた。

○ケース2は底質を石炭粉とし、ケース1と同一波形勾配、同一 $\sqrt{gH_0}/W_0$ に近づけて行なったものである。このケースも、主に汀線が侵食され、浜がけが発生し、その石炭粉が砕波点を越えて沖浜に堆積した。またケース1に比べ、砕波後の波の減衰が少ない。なお初期勾配を $1/10$ にしたつもりであったが、どうも勾配をそれよりゆるめ $1/11$ に整形したようだ。

○ケース3、ケース4は、波形勾配 $H_0/L_0 = 0.029 \sim 0.030$ とし $\sqrt{gH_0}/W_0 = 65 \sim 66$ として、砂と石炭粉の違いを調べたものである。両ケースとも汀線の侵食が見られた。砂の場合砕波点に明りょうなBarが形成され、その位置もほとんど動かないが、石炭粉の場合砂ほど明りょうなBarが形成されなかった。

○ケース5は、ケース3と実験条件を同一に近づけ、 i_0 だけを $1/50$ としたものである。実験開始後0.5hrでは1次砕波のみであったが、その後4hrでは、第1次砕波が沖に発生し、それと共に2次砕波も見られた。目視観測によると砕波点の距離はほぼ2Lであった。10.5hrでは第2次砕波点4hr時より1.2m程前進し、それと共に土砂も運ばれ、第2次砕波点より岸側では水路の片側に土砂が堆積し水深2cmと浅くなり、もう片側は11cmと深く海床の3次元性が強くなった。これは波による質量輸送の非対称によるもので、浅くなった方は波がはい上るように斜面を登り、それが戻ることなく浅い部分を通り抜け、逆に深い部分は戻り流れが見られ、水路幅内で平面的な水の循環が見られた。この平面的な流れにより、砂の打ち上がりやうながされるようであり、戻り流れの集中という現象がないと砂は打ち上りにくいようである。(このような三次元的な流れは、 H_0/L_0 の小さいほど発生しやすいと考えられる。)この戻り流れの流速は速く 13 cm/S もあった。なお第1次砕波点より約2L沖合では砕波していないがBarの発生が見られる。その後第1次砕波点では時々砕波しないことがあった。22時間目に三次元的流れの発生していた場所で急激に打ち上がり水路を完全閉塞した。その後第1次砕波点の岸側でも三次元的な流れが発生し土砂の堆積を見たが、その後2次元の流れにもどり左右岸対称にもどった。このケースでは2次波峯の発生が見られ、主峯が2次波峰に追いつく点でBarが発生していた。

○ケース6は、波の条件はケース4と同じでただ勾配を $1/50$ としたものである。このケースでは最終的に初期汀線から $X/L_0 = 0.4$ 付近で打ち上がり2L型のBarの形成が見られた。なお砕波は1次砕波しか見られず、砕波点の動きも海床変化に応じて変化が大きい。

〔4〕 海床変化におよぼす S および i_0 の効果

海床変化の相似性を言う場合、その時間変化過程を問題としなければならない。石炭粉と砂の場合 S が異なるので時間縮尺はフルード則より求まる $t_r = H_{0r}^{1/2} = W_{0r}^{-1/2}$ と異なるが、底質移動におよぼす S の量的効果が分っていないので、ここではまず初めに t_{sr} がフルード則に従うと考えて砂と石炭粉の断面変化を比較してみる。沈降速度が石炭粉 0.91 cm/S 、砂 2.05 cm/S であるので、フルード則に従えば石炭粉の方が約2倍の速さで動くことになる。図71はケース1とケース2の同時時間に対応する断面比較図である。これを見ると石炭粉の方が汀線の後退が大きい、ほぼ相似な変化をしている。図72はケース3とケース4の比較だが、Barの位置、その高さ、Bar背後の土砂のたまりぐあいが良く似ている。ただ汀線の後退は石炭粉の方が大きい。図73、図74、図75はケース5と6の比較である。海床変化過程はBarの位置等に多少のずれがあるが、ほぼ相似である。ただ砂の31.5時間目において第一砕波点に生じた比高の大きなBarは前述したように3次元現象が現われてきたものであり、そのため汀線にまで達する波エネルギーが少なくなり、汀線が石炭粉よりかなり前進している。

以上のことよりまとめると次のことが言える。

1. 石炭粉と砂では S の違いにもかかわらず、我々の実験の範囲では、フルード相似で $\sqrt{gH_0}/W_0$ を同一にすればほぼ相似な海床変化であることが分かった。
2. 時間縮尺は S がちがってもフルード則から求まる時間縮尺 $t_{sr} = W_{0r}^{-1/2}$ と大きくはずれない。
3. 砕波後の波高減衰は砂の方が大きいようだ。

次に初期勾配の影響を見ると、勾配の緩いケース5、6と急な3、4を比較すると、 $i_0 = 1/50$ 場合には2L型のBarの発生が見られ、海床地形は複雑であり、砕波点が沖になるため、Barは沖で発生し、波は長い磯浜帯を通る間に元の波形に近くなり、2次砕波する。汀線に達する波の力が弱いため、汀線付近は底質を動かす能力は小さく、汀線より前で砂の打上げ現象が見られた。明らかに i_0 の影響は大きく、2L型のBarが発生すると汀線で波のエネルギーは小さくなり、打上げ高は小さくなる。

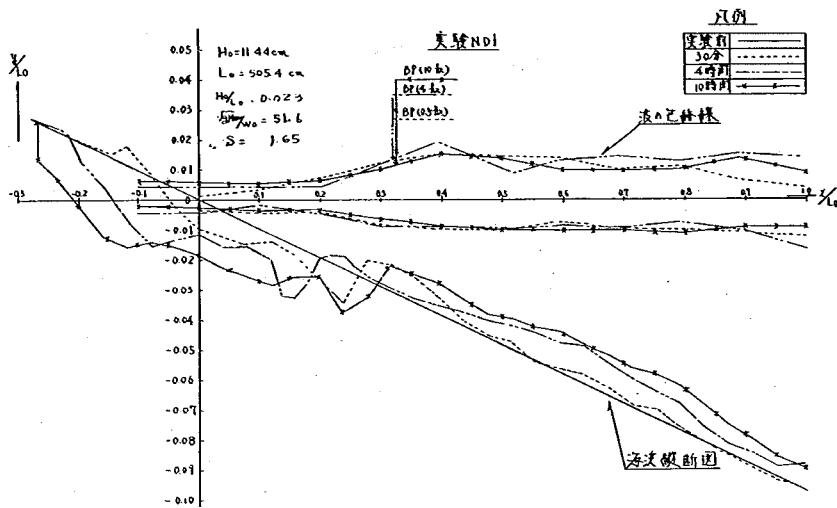


図 65 波高及び海岸線断面の時間的变化図

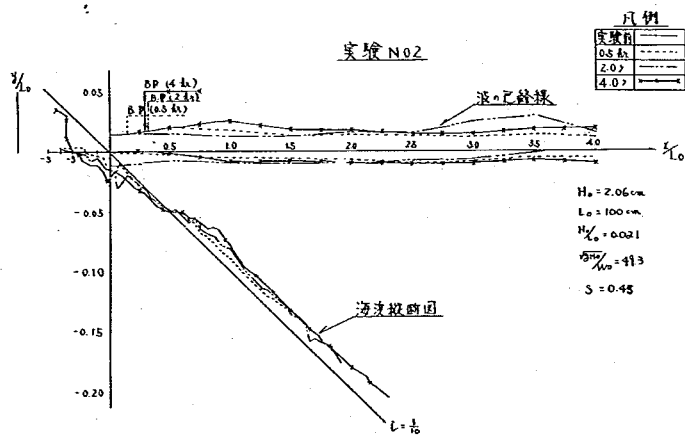


図 66 波高及び海岸線断面の時間的变化図

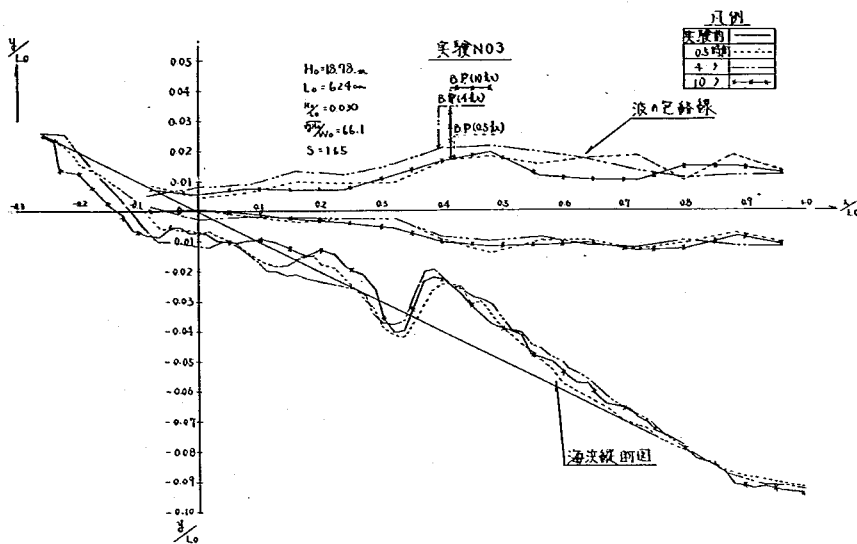


図 67 波高及び海浜縦断の時間的变化図

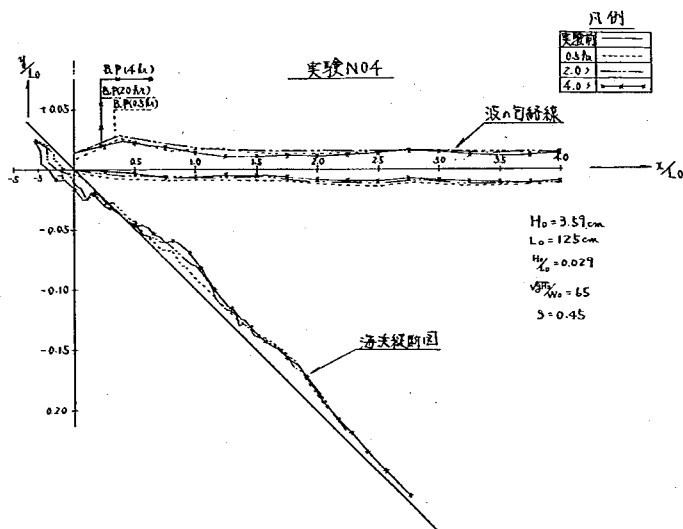


図 68 波高及び海浜縦断の時間的变化図

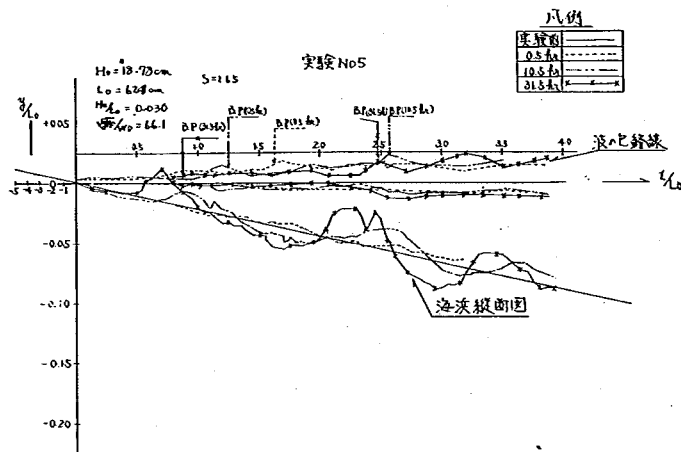


図 69 波高及び海浜縦断の時間的変化図

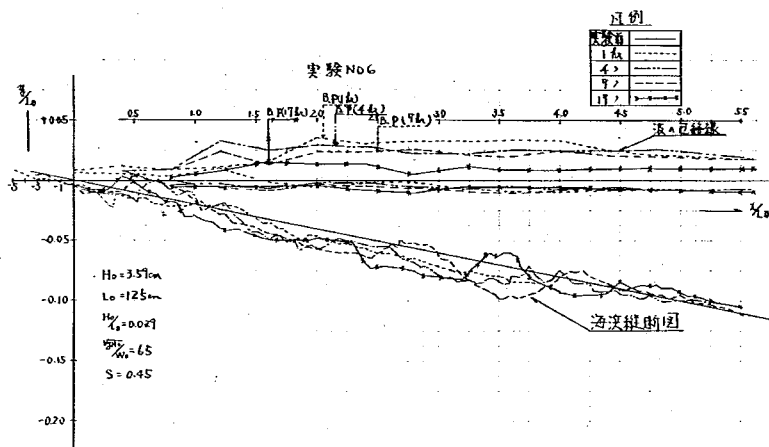


図 70 波高及び海浜縦断の時間的変化図

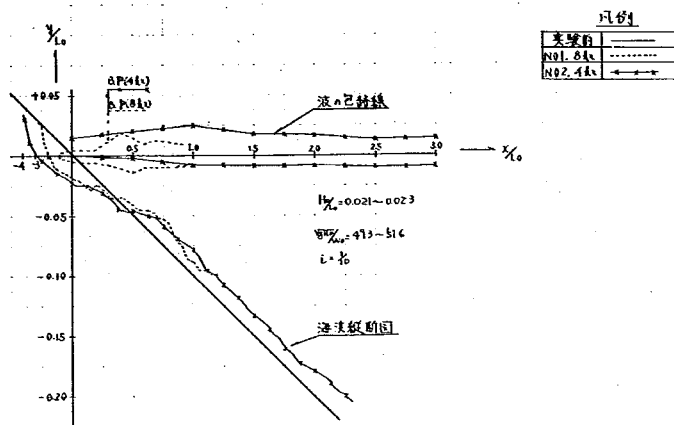


図 71 波高及び海岸線断面の時間的比較図

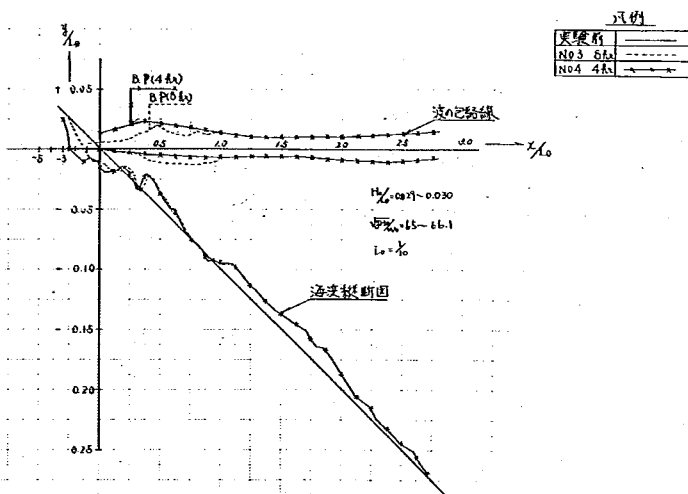


図 72 波高及び海岸線断面の時間的比較図

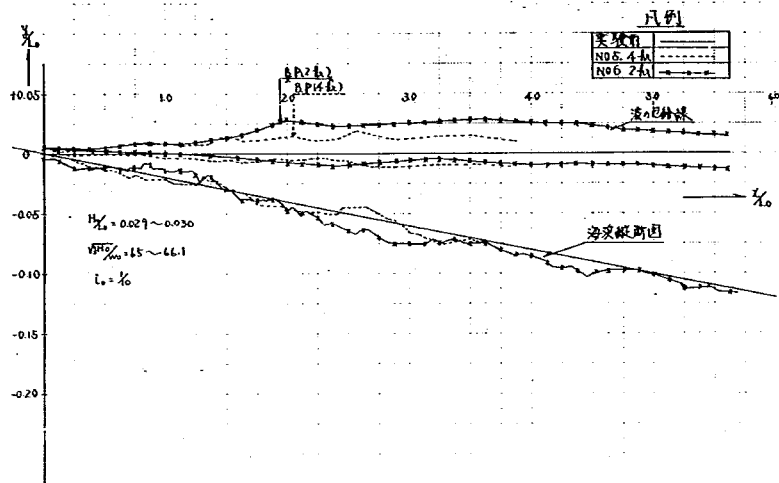


図 73 波高及び海岸縦断面の時間的比較図

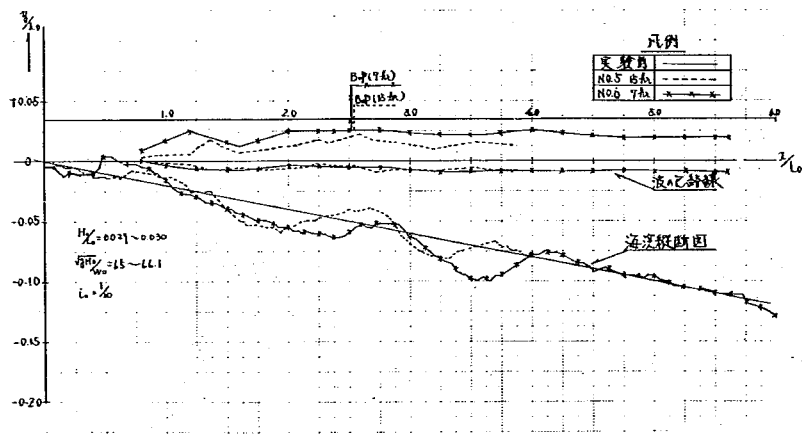


図 74 波高及び海岸縦断面の時間的比較図

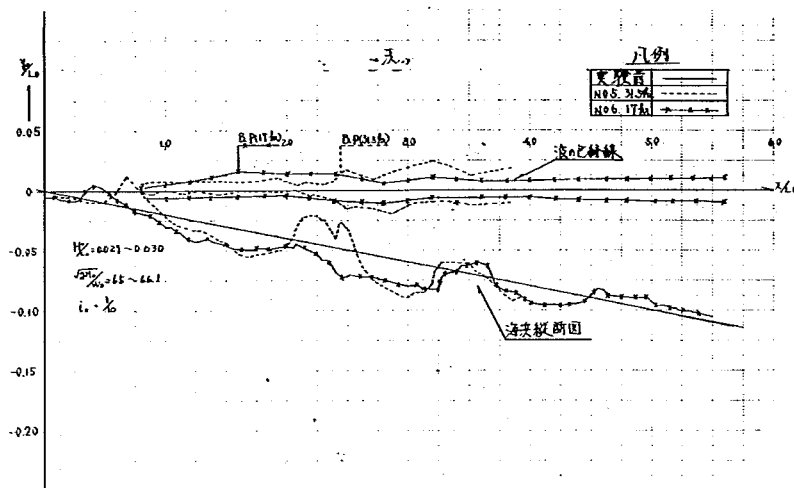


図 75 波高及び海岸縦断の時間的比較図

7. 海床波の成因についての二、三の考察

[1] はじめに

ここでは、2 L型のBar や1/2 L型のBar が、どんな原因で形成されるか、我々が実験を行なって観測したことを通して述べる。

[2] 海床波の成因

(1) 砂の移動方向と海床変化

今二次元的な場合(汀線に直角方向)で、海床の変化が大きくは変わらない時間スケールの場での単位時間当りの流砂量を考えてみよう。図76のように座標軸を取る。

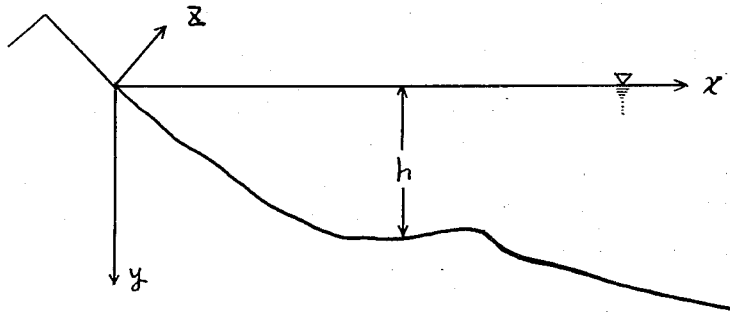


図76 座 標 軸

浮遊砂の濃度を $m(y, t)$ 、 y 方向の流速を $U(y, t)$ とすると単位幅、単位時間当りの流砂量は、

$$q_{sx} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h m(y, t) \cdot U(y, t) dy dt \quad (77)$$

$m(y, t) \cdot U(y, t)$ を時間平均と変動成分とに分け

$$m(y, t) = \bar{m}(y) + m'(y, t)$$

$$U(y, t) = \bar{U}(y) + U'(y, t)$$

としよう。ここで時間平均としては海床変化が大きくは変化しない時間内での平均とする。

(77)式は、

$$q_{sx} = \int_0^Z (\overline{m \cdot U} + \overline{m' U'}) dy \dots\dots\dots (78)$$

となる。これより土砂移動量は、質量輸送速度×平均濃度と、 m' と U' の時間平均の二つに分けて考えられる。底面近くでは特に(78)の $\overline{m' U'}$ の量が問題となる。

まず始めに質量輸送速度の分布形について考えてみよう。Longuest-Higging の理論, Eagleson, Dean⁷⁸⁾の実験, 野田の乱流境界層の理論⁸⁸⁾によると、有限な二次元水路で一定水深、底面平滑の場合、底面近くの質量輸送の方向はすべて岸向きになる。それでは勾配がついている場合にはどうなるのであろうか。これを調べるために6章で使った造波水路に $i_0 = 1/30$ にモルタルで勾配を作り、表6に示すような条件で波を当て、質量輸送のパターンを染料を投下して把握してみた。

表-6 実験条件 $i_0 = 1/30$ モルタル製

H cm	T sec	h cm	H ₀ cm	L ₀ m	H ₀ /L ₀	h _b cm
8.0	1.86	6.0	8.64	5.40	0.016	10.6
11.5	2.10	6.0	12.16	6.88	0.018	16.6
11.5	1.80	6.0	12.48	5.05	0.025	19.2
20.0	1.33	6.0	12.68	2.76	0.079	30.0
6.3	1.28	6.0	6.79	2.56	0.027	9.0
3.8	1.60	6.0	4.16	3.99	0.010	6.9
6.2	0.97	6.0	6.34	1.47	0.043	11.7
4.6	1.51	6.0	5.04	3.56	0.014	7.0

その結果は図77のごとくであり、堀川、砂村等⁷⁷⁾が $i_0 = 1/24$ で行なった実験結果と同一となった。なお砕波点より汀線側では流れが三次的となり、水路(幅80cm)の左右岸で流速分布が異なり、平面的な循環流の見られるものがあった。また砕波点には浮遊物の集積が見られた。このことより底面が平たんの際は、砕波点より沖では、底層で岸向きに流れ、砕波点より汀線よりでは沖向きに質量輸送があることがわかる。

ところで図77で示すような質量輸送のパターンは、海床に ripple などが存在する移動床の場合でも生じるのであろうか。図78-1から図78-10はScott²³⁾の測定結果、筆者が行なった実験結果を示したものである。この結果を見ると固定床の場合と異なって種々の質量輸送のパターンがあるが、このような複雑なパターンも分類すると基本的には三つの型に分けられそうだ。

I型; 底面には ripple は存在しないが、あっても η/λ の小さい場合で、 $\sqrt{gH_0}/W_0$ が小さい ($\hat{U}_s/W_0$ が小さいと同等) 場合である。このような場合には ripple による渦の発生は無く、平坦海床の場合と同様な質量輸送の分布となる。このような場合の土砂粒子の移動方向は

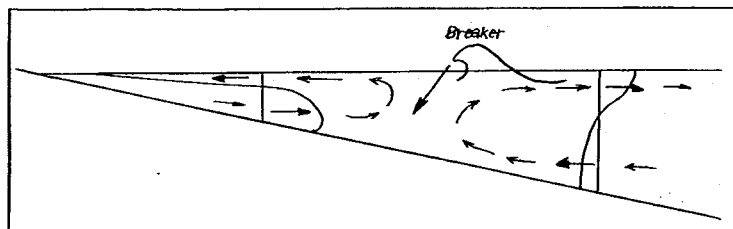


図 77 Flat bedの時の質量輸送パターン

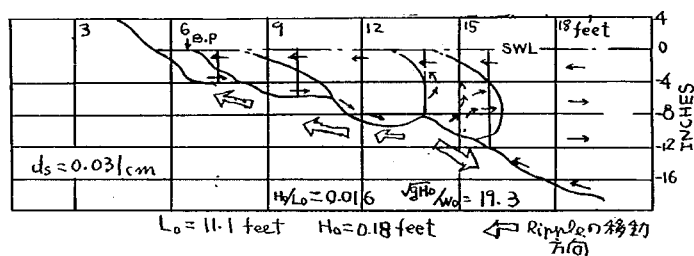


図 78-1 SCOTTの資料より質量輸送速度の分布

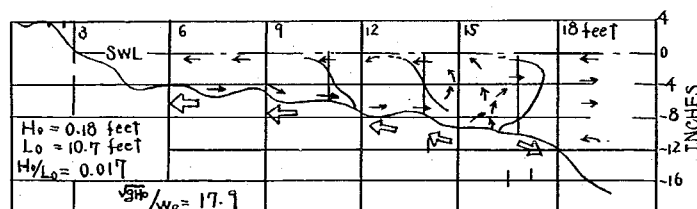


図 78-2

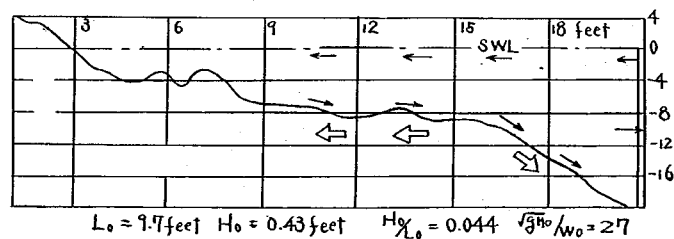


図 78-3

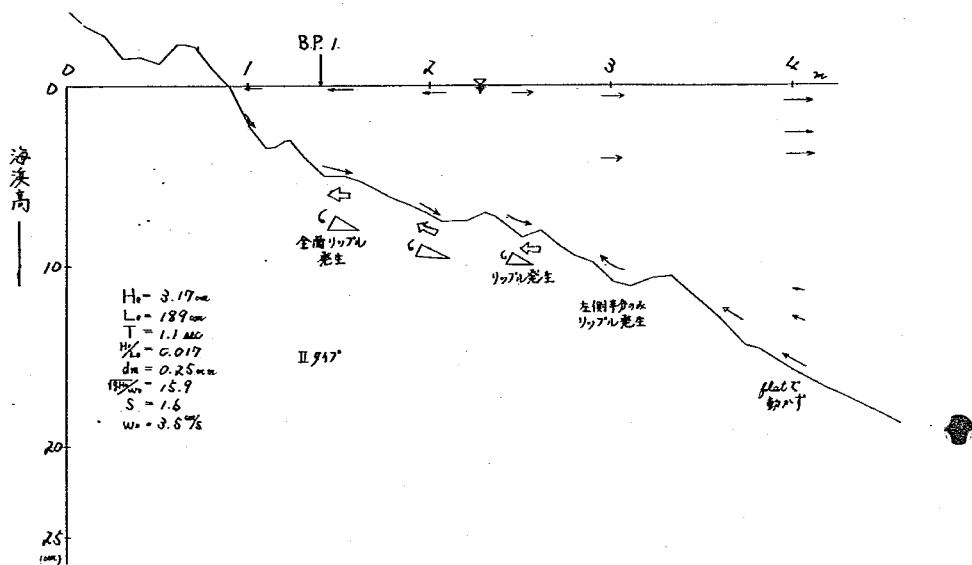


図 78-4

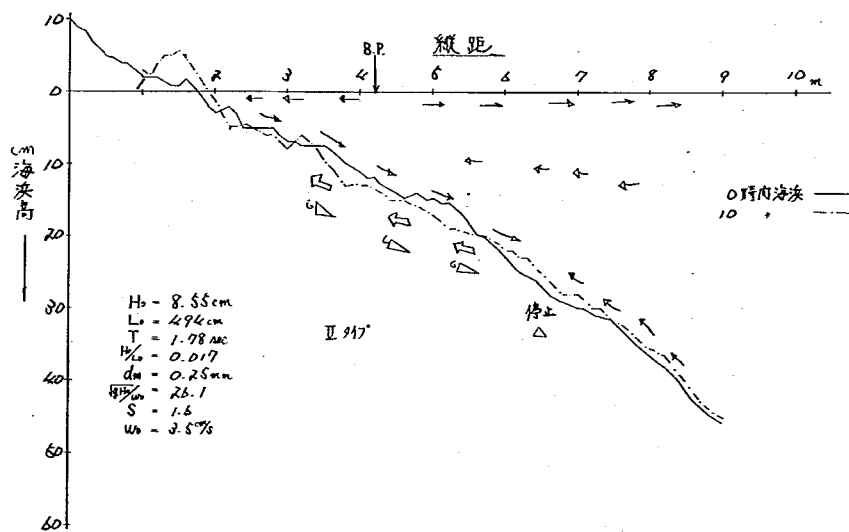


図 78-5

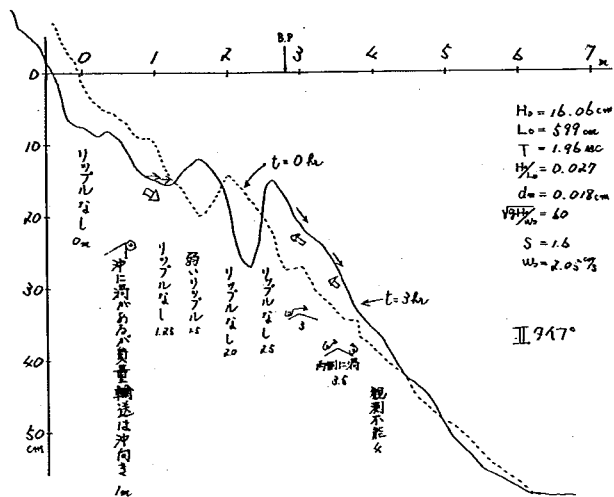


図 78-6

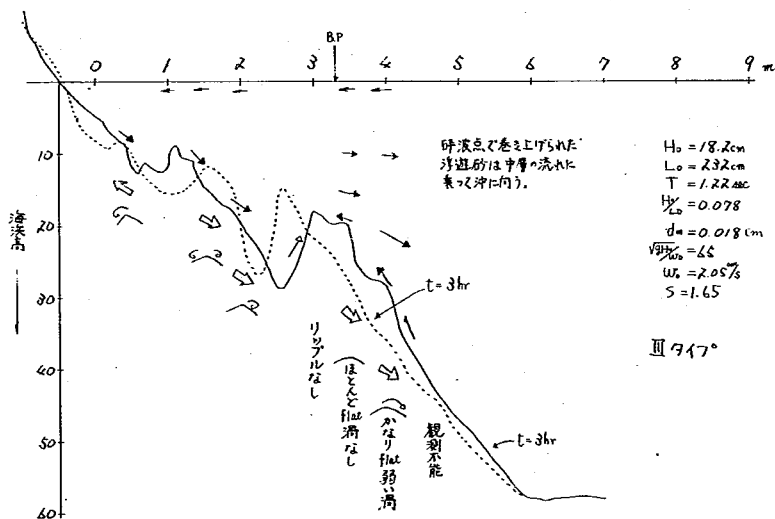


図 78-7

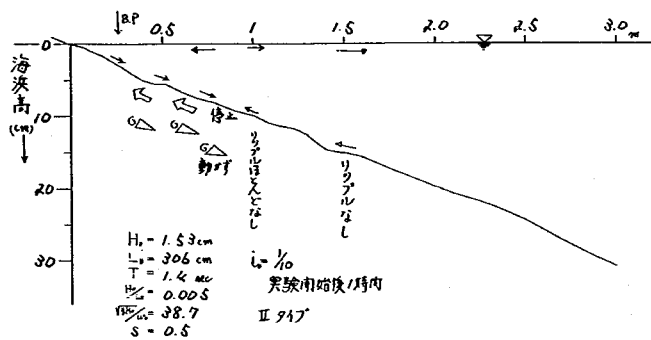


図 78-8

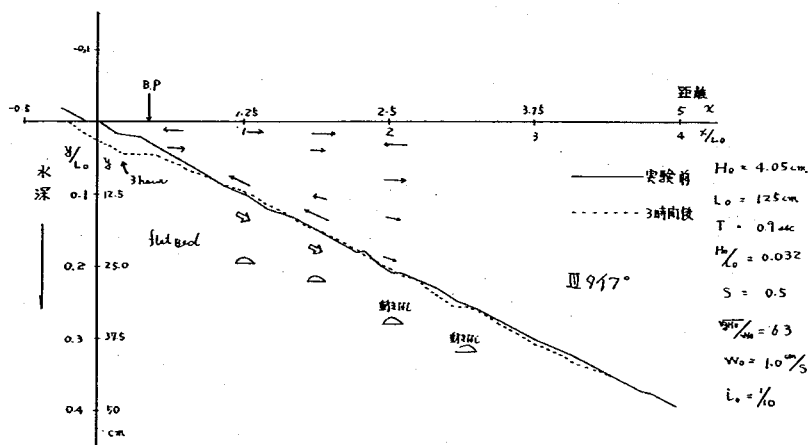


図 78-9

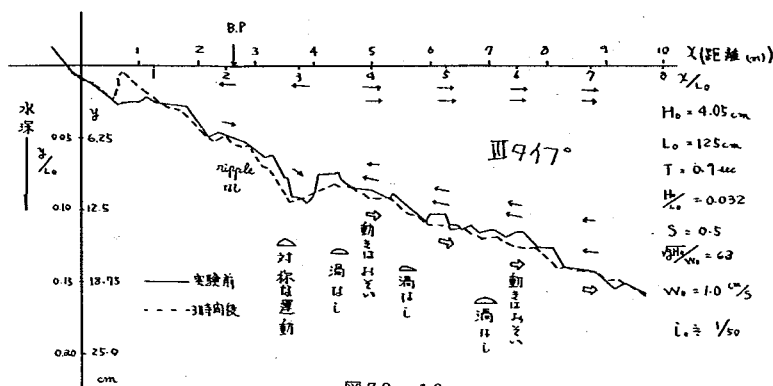


図 78-10

Eagleson⁵²⁾ の考え方は妥当なものであろう。なお砂 ($S=1.65$) の場合、ripple が発生限界近くでの τ/λ が大きいため、底質が動くと次の II 型に入ってしまう、ripple の発生しない場合のみに限るようだ。

II 型; $\sqrt{gH_0}/W_0$ が少し大きくなると、底面には明確な ripple が生じ、碎波点より少し沖側では、岸側に急斜面を持つ ripple が生じ、岸側の急斜面のみ、および岸側の方が強い渦が生じ、底面の質量輸送は沖を向き、ripple は岸向きに前進する。ある程度水深の深い所では、ripple はほぼ対称であり、 $\hat{U}_s/W_0$ が小さい時は、まだ flat であり、大きくなると尖がってきて両側で渦が発生する。この場所では底面の質量輸送速度は岸向きであり、ripple の移動速度は遅く、どちらかというといは沖向きである。

III 型; $\sqrt{gH_0}/W_0$ が大きくなると碎波点より少し沖側では、ripple は頂部が平らになり、両側に渦を生じたり、ripple 全体が左右に振動するようになり、渦の発生が無くなる。より $\sqrt{gH_0}/W_0$ が大きくなると ripple は消滅してしまう。このような場合の質量輸送の方向は岸向となり、ripple の動きは小さいが沖を向く。

このように質量輸送の方向、ripple の移動方向、土砂移動方向は、底床 ripple の形状と関連性があり、ripple がほぼ対称な形をしている場合には岸向きに流れ、非対称な場合には ripple の二つ斜面の内、急勾配の方向から流れる。(通常見られる非対称な ripple は岸側が急であり、底層の質量輸送は沖を向く。) この ripple の非対称性は、底面近くの水粒子の往復運動の非対称性と深い結びつきがあり、岸向きの流速の方が沖向きの流速より速いと、ripple は岸側の方が勾配が急になり、それによって片側のみで渦の発生が見られるようになる。渦の発生するのは急勾配の斜面の側であり、この渦の発生が、水粒子の行きと帰りの移動距離を異ならしめる。つまり岸向きの流れの時、水粒子は渦にまきこまれ、岸側に近づく。これが岸側の斜面だけに渦の発生する場合、

底層で質量輸送速度が沖を向く原因である。底質の移動方向は $\hat{U}_s/W_0$ が小さい内は、岸内きの流れによって掃流型式で運ばれる土砂が多く ripple は岸向きに前進する。(Scott の実験範囲 ($\sqrt{gH_0}/W_0 = 1.5 \sim 2.5$) では、岸向きと沖向きの速度差が大きくなほど ripple の前進速度は早い。) $\hat{U}_s/W_0$ が大きくなると、浮遊砂が多くなり、渦による急斜面上の砂の Lift up によって ripple の前進速度は遅くなるようだ。浮遊された底質は質量輸送に乗って沖に向い、沖向きの土砂移動が多くなる。

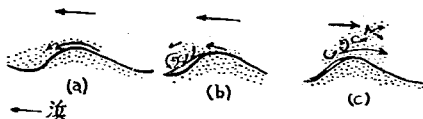


図 79 砂れん周辺の砂の移動

それではなぜ、水粒子往復運動の非対称性が生じるのであろうか。波が岸に近づくとき水深の影響を受け、微小振幅波から有限振幅波に変わることが良く知られている。有限振幅波としてストークス波を考え、二次の近似まで取ると波形 η 、および水平方向水粒子速度 u は、

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) + \frac{\pi}{8} \frac{H^2}{L} \frac{\cosh kh}{\sinh kh} (\cosh 2kh + 2) \cos 2(kx - \sigma t) \dots\dots\dots (79)$$

$$u = \frac{\pi H}{L} C \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \cos(kx - \sigma t) + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L}\right)^2 C \frac{\cosh 2k(h+z)}{(\sinh kh)^4} \cdot \cos 2(kx - \sigma t) \dots\dots\dots (80)$$

$$C = \frac{g}{k} \tanh kh \left[1 + \left(\frac{\pi H}{L}\right)^2 \frac{5 + 2 \cosh 2kh + 2 \cosh^2 2kh}{8 (\sinh kh)^4} \right] \dots\dots\dots (81)$$

である。 u の底面での岸向き最大速度を u_b 、沖向きの最大速度を u_s とすれば、

$$|u_b/u_s| = \frac{1/\sinh kh + 3/4 (\pi H/L)/(\sinh kh)^4}{1/\sinh kh - 3/4 (\pi H/L)/(\sinh kh)^4} \dots\dots\dots (82)$$

となり $|u_b| > |u_s|$ であり、岸向きの流速が早くなる。なお底面が勾配のある場合、波形はストークス波より、より尖った形となり⁸⁴⁾、水粒子の往復運動の非対称性はより進むと考えられる。これが波が岸に近づくとき、非線形性が増すと底面水粒子の速度が岸向きの方が速くなる原因であろう。

以上の考察から、ripple の移動方向、質量輸送の方向、 q_{sx} の方向は、波の非線形性を示すパラメーター、ripple の相似性を表わすパラメーターの重要さが認識されよう。この移動方向を示すパラメーターは、汀線に直角方向の海岸形状の相似性を表わすパラメーターが、ripple の相似、水粒子の運動の相似も表わしているから、同一のパラメーターとなる。よって ripple の生じる場合には粘性の影響は二次的と考えられるので、ripple の移動とか質量輸送の速度を A とすると、

$$A/W_0 = f \left(x/L_0, h/L_0, H_0/L_0, \sqrt{gH_0}/W_0, S \right) \quad (83)$$

となる。今水平床の場合を考えると、

$$A/W_0 = f \left(h/L_0, H_0/L_0, \sqrt{gH_0}/W_0, S \right) \quad (84)$$

となり、 S は一定とすると少なくとも三つの独立パラメーターによって底質の移動速度や質量輸送の速度を示す必要がある。今 W_0 の代わりに粒径 d を取ると、

$$\begin{aligned} \text{底質の移動方向} &= f_1 \left(h/L_0, H_0/L_0, H_0/d, S \right) \\ \text{or } f_2 \left(h/d, H_0/L_0, d/L_0, S \right) \end{aligned} \quad (85)$$

となる。佐藤、田中⁸⁶⁾、堀川、砂村、鬼頭⁸⁴⁾は移動方向を H_0/L_0 と d/L_0 で整理しているが、 h/d が大きく異なると問題は多い。富永、橋本⁸⁷⁾は、 $h/d = 2 \times 10^3$ の場合について図80の結果を得ている。彼らは土砂の移動を ripple 形態との関連でとらえ、波の非線形性を表わすアーセルのパラメーター HL^2/h^3 でとらえている。この図80によると波の非線形性が強くなると土砂移動の方向は沖向きになる。なお橋本氏の談によると、彼らの観測は水路に幅1mの移動床部分を作り測定部とし、測定部両端に設けた捕砂ますによって移動量を測った。

ripple は測定部両端に存る固定のための木材端から発生する渦に支配され ripple の移動は、ほとんど見られなかったと言う。事実彼らの実験結果では質量輸送の方向と、底質の移動方向は一致していた。この質量輸送方向の結果はⅡタイプの砕波点近くの沖向きの方向、沖における岸向きの方向と一致している。佐藤、田中⁸⁶⁾の実験は ripple が自由に動いたようで、質量輸送速度の方向と底質の移動方向が一致しないものである。タイプⅡの質量輸送速度のパターンの場合、砕波点より少し沖の底質移動の方向は $\sqrt{gH_0}/W_0$ が小さい時は掃流砂が卓越す

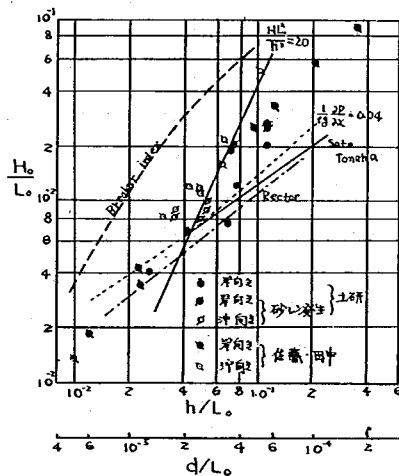


図80 移動方向 ($h/d = 2 \times 10^2$)

るため岸向きとなり、 $\sqrt{gH_0}/W_0$ が大きくなると浮遊砂が卓越し沖を向く。この移動方向の相違は、海浜形状に影響をあたえ、初期海浜形状が直線の場合、 $\sqrt{gH_0}/W_0$ が小さい内は沖浜は侵食され、前浜の方へ土砂移動を生じせしめ、 $\sqrt{gH_0}/W_0$ が大きくなると沖浜に土砂の堆積を生じせしめる。 i_0 の効果は、底質移動に斜面方向の重力効果を受けるほど、 i_0 が大きくなければ、波の非線型性の程度および砕破点の位置に変化をあたえるが、あまり大きくはないだろう。

図81は、破波点の背後か侵食されるAタイプと堆積するBタイプを示したものである。(ここでは2L型および h'/H_0 が小さい資料は除き、初期海浜形状が、ほぼ直線のみを選んだ。AタイプとBタイプは H_0/L_0 、 $\sqrt{gH_0}/W_0$ の影響を受けているのが判ろう。(文献⁵⁴⁾では H_0/L_0 と d/L_0 で区分している。)また H_0/L_0 が0.04、 $\sqrt{gH_0}/W_0$ が80~100でAタイプが現われているが、この範囲は質量輸送のパターンがⅢ型に入ると考えられ、土砂の移動形態が変わったためであろう。なお図78-7に示すようにⅢ型でもBタイプが生じている。これは中層を通して浮遊砂が沖方向に運ばれたためであろう。底質の移動方向におよぼすSの効果は明確ではないが、石炭粉と砂の場合では、rippleの消滅限界、および λ/η が同一 $\hat{U}_s/W_0$ 、 $\hat{U}_s/\sqrt{gd_0}$ に対して多少異なるため、移動方向が変化するような所では海床変化の相似が成立しないだろう。なお図81には $\sqrt{H_0/L_0} \cdot \sqrt{gH_0}/W_0 = 3.2$ の線を引いておいた。Aは $\sqrt{H_0/L_0} \cdot \sqrt{gH_0}/W_0$ がこの値より小さく、Bは大きくなっている。同一 $\sqrt{gH_0}/W_0$ に対して、 H_0/L_0 が大きくなると底面の $\hat{U}_s/W_0$ が増し、底質が動きやすくなるのが、図の直線の傾きとなると考えられる。(h'は水路水深)

図82にはScottおよび筆者らが測定した質量輸送分布のパターンが H_0/L_0 、 $\sqrt{gH_0}/W_0$ の変化によってどう変わるか調べたものである。これによると同一 H_0/L_0 に対してSの小さい石炭粉は小さい $\sqrt{gH_0}/W_0$ でⅢ型に入るようだ。これは石炭粉の方がrippleがflatであり、またrippleの消滅限界の $\sqrt{gH_0}/W_0$ も砂より小さいためであろう。なおⅢ型の質量輸送のパターンと図81の $\sqrt{gH_0}/W_0$ の大きい時の海床変動と密接な関係があることも分ろう。なお実験条件は表3に示しておいた。また質量輸送の方向は、 K_2MnO_4 を投下し、底層の質量輸送を調べたものである。

(2) 沿岸砂州の形成要因

沿岸砂州は砕波現象と密接に関係する。砕波の落下点は乱れエネルギーの集中心であり、エネルギー減衰の大きい所である。中村、白石、佐々木⁹⁰⁾によれば、 H_0/L_0 が大きいほど、波高減衰は大きく、したがって、エネルギー減衰が大きく、砕波の落下点での乱れエネルギーは集中し、砕波の落下点と落下点外との乱れエネルギーの差は大きい。それゆえ、落下点の底質は他の地点より動かされやすい。これが落下点が堀れ、Barを形成する原因となる。 $\sqrt{gH_0}/W_0$ が40以下の場合 $H_0/L_0 > 0.03$ でBarが形成されるのは、 $H_0/L_0 < 0.03$ に比較し、落下点に乱れエネルギーがより集中するためであろう。 $\sqrt{gH_0}/W_0$ が40以上では、 $\hat{U}_s/W_0$ が大きくなっているため、底質は動きやすくなっている。それゆえ $H_0/L_0 < 0.03$ でも落下点と落下点外との乱れエネルギーの少しの差でBarが形成されてしまうのであろう。なお筆者の観察によると、 H_0/L_0 の大きい時は、砕波に

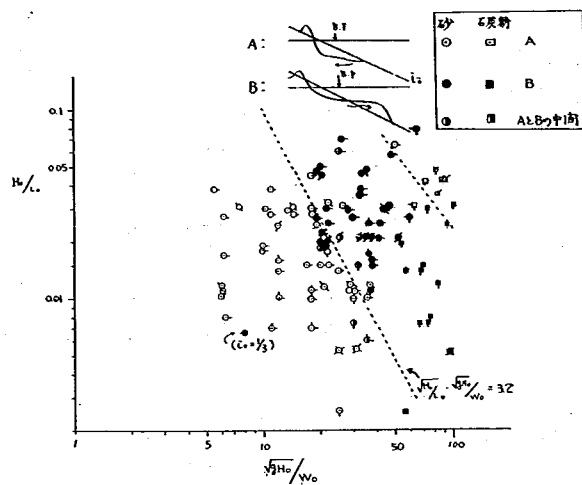


図 81 底質の移動方向と海浜形状

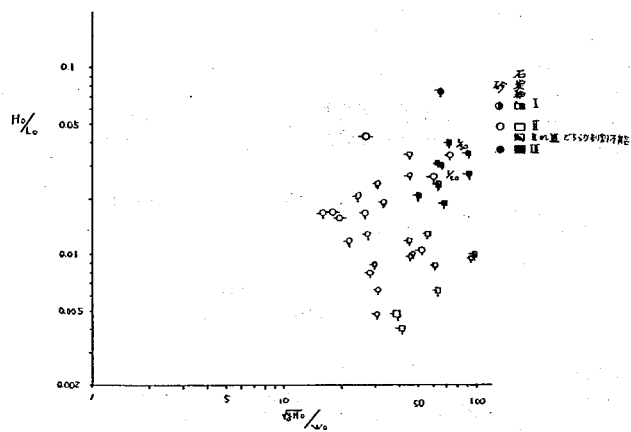


図 82 I, II, III型の区分

よって生じた回転渦は砕波の落下点に集中し、底面にまで達するが、 H_0/L_0 が小さい時は、回転渦は、波によって輸送され徐々にエネルギーを失う。このような渦の消散過程の違いが沿岸砂州を発生させるものと思われる。また筆者が行なった実験においては、巻波によって Bar が生じることが多かった。砕波形式の相違が Bar を作るという考え方は一般的で無い。

(3) $1/2 L$ 型 Bar の発生原因

$1/2 L$ 型の Bar は明らかに反射波による部分重複波の発生現象と関連がある。野田は、⁽⁸³⁾ この Bar の発生を部分重複波の質量輸送速度の分布を層流・乱流について理論的に求め、その質量輸送の方向から Bar

・ H_0/L_0 大の場合、砕波後の渦



・ H_0/L_0 小の場合、砕波後の渦

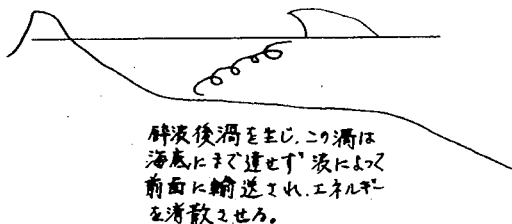


図 83

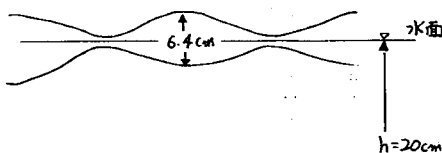
石炭粉 $w_0 = 1 \text{ cm/s}$

$H_{\text{max}} = 6.4 \text{ cm}$

$h = 20 \text{ cm}$

$T = 1.14 \text{ sec}$

ほぼ完全反射
ripple の発生有り



質量輸送の方向
動かず
軽いゴミが集中する。

$S = 1.6$

$d_m = 0.018 \text{ cm}$

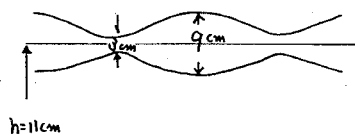
$w_0 = 2.05 \text{ cm}$

$h = 11 \text{ cm}$

$T = 1.64 \text{ sec}$

$H_{\text{max}} = 9 \text{ cm}$

$H_{\text{min}} = 8 \text{ cm}$



節側強い渦
節側強い渦

図 84 完全重複波下における底質移動のスケッチ

の発生点を求めている。しかしこの考え方は底面がflatである場合には良いと思われるが、rippleが発生したり、浮遊砂が多くなると疑問点が多い。たとえば筆者の観測した例を図84に示すが、質量輸送の方向と底質の移動方向は一致していない。

Bar 頂の発生点は、ripple が発生しているような場合で $\hat{U}_s/W_0$ が小さい時は掃流型式で土砂が節に集まり Bar 頂を作り、腹の部分は $\hat{U}_s/W_0$ が小さいので底質が動かず、取り残された形となり、節より Bar 頂が低い山を作る。多少 $\hat{U}_s/W_0$ が大きくなる腹の部分の底質も動き出し、山が低くなり、節のみに Bar 頂を作る。これより $\hat{U}_s/W_0$ が大になると浮遊砂が多くなり、また ripple も消滅し始め、底面水粒子の動きの少ない腹の部分に沈積する。このように Bar 頂の発生点は、底質の動きやすさや、ripple の発生消滅によって変わるから、海岸堤防の前面洗掘量を模型実験によって把握する場合、ripple 形状の相似性が合うような底質材量を選ぶ必要がある。つまり直立壁前面の海床変化を支配するパラメーターとしては、直立壁前面が水平の場合、

$$h/H_0 = f \left\{ x/L_0, H_0/L_0, \sqrt{gH_0}/W_0, h_0/H_0, S, t/T, \frac{\sqrt{\nu}(H_0)^{1/4} g^{3/4}}{W_0^2} \right\}$$

となる。ここで h_0 は初期水深である。なお最後の項は二次的であると考えられ、無歪のフルード模型で、底質を $(\sqrt{gH_0}/W_0)_r = 1$, $S_r = 1$ とすれば、ほぼ相似の海床変化となる。

ではなぜ浮遊砂が卓越しない場合、節方向に底質が移動するのであろうか。図84の観測例によると、水粒子が節に向かう時の方が、腹に向かう時より強い渦が生じている。これは渦を作る流れが節向きの方が強く、したがって掃流砂は節方向の方が多くなるのであろう。このような節方向と、腹方向の流速の違いを生じる原因は、はっきりしないが、7章(2)(1)で述べたような有限振幅波の二次のオーダーの項が原因するものと考えられる。なお重複波の有限振幅浅水波の理論によると、⁹⁵⁾底面近くの水粒子の移動速度は、加速時には、節に向かう流速の方が腹に向かう場合より速く、減速時には節に向かう流速より腹に向かう流速が大きい。

(4) 2 L型 Bar の発生原因

次に2 L型 Bar の発生原因について考えてみよう。波は岸に近ずくと、非線形性が強まり波形の対称性はくずれ水粒子の運動の対称も崩れてくる。このような現象の一つに二次波峯の発生がある。二次波峯現象は主峯と主峯間に高周波成分を持つ波が発生するもので、波の非線形性が強いと発生する。この発生限界はMicheが二次近似まで求めた波形の谷における曲率を0として求め、堀川⁸⁰⁾がMicheの式の妥当性を示している。その発生限界式は

$$H/L \geq 1/3 \pi \sinh^2 \left(\frac{2\pi h}{L} \right) \cdot \tanh \left(2\pi d/L \right) \quad \dots\dots\dots (86)$$

である。^{注1)}また合田は二次波峯の発生間隔を実験的に求め図85の結果を得ている。細井、石田⁸¹⁾は二次波峯の特徴を実験的に調べ、二次波峯は、基本波と基本波の2倍周波数を持つ波のかさね合わせと考えて発生間隔 λ_s を含め合田の結果と良い一致をみている。この二次波峯現象は2 L型の海床

波と深い結びつきがあり、細井、石田、平山⁸²⁾は、水平床でこの海床波の特性を $d_{50} = 0.15$ mm の砂を使って調べ、海床波の波長は λ_s に等しく、また海床波の発生領域は、Miche の二次波峰発生限界より広いことを述べている。なぜ 2 L 型になるかと言うと、波の非対称性が λ_s 間隔で変化し、⁸¹⁾ 底面水粒子運動に場所的違いを生じ、 λ_s 間隔に土砂の推積が生じ、図 85 より通常の実験範囲では λ_s は 2 L 前後になる。

図 86 は 2 L 型の海床波の時の底質の動き、質量輸送速度の方向を調べたものだが、質量輸送の方向や ripple 形状の場所的違いがあり、底層水粒子運動の非対称が、このような結果をもたらしたのであろう。

なお 6 章で行なった実験では Bar 頂は二次波峯の追いこし点に発生し、海床波の成長に伴って波の非対称はより強くなった。これは細井らの実験結果、二次波峯の発生点に Bar が発生すると言

う結論と異なるが、細井らの実験ではこの原因は明らかでない。(水平床と傾斜床の違いか?)

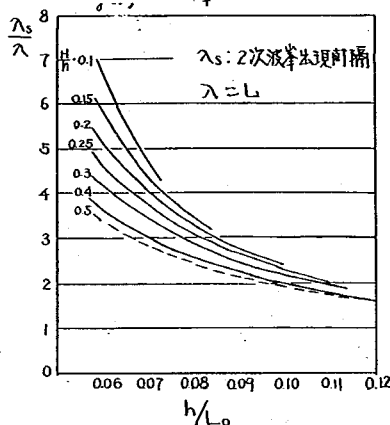


図 85 2 次波峯の出現間隔 (合田)

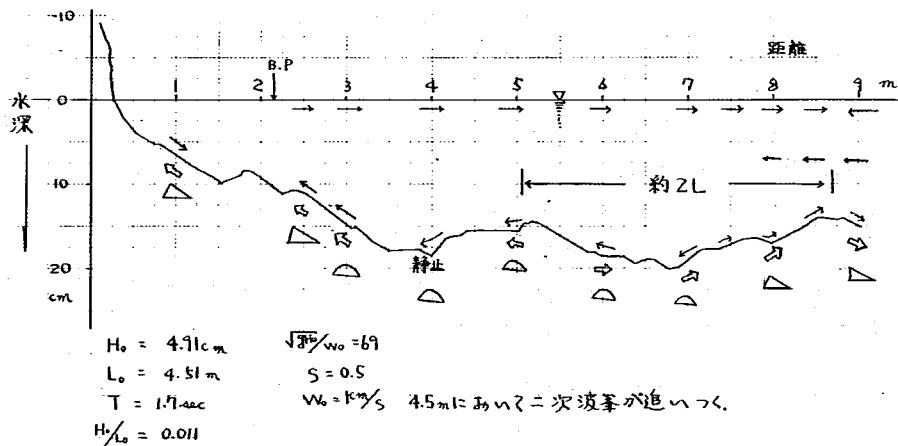


図 86 2 L 型の質量輸送と ripple の動き

$\hat{u}_s/W_0$ の最大が1.5前後であり、筆者の場合5.0以上であったことにより、質量輸送の方向、~~ripple~~ ^{たゞ}形状が変わったためと思われる。6章の実験例、文献⁷⁾、および現地海の2L型のBarを見ると、第一列が砕波点で第二列がそれより約2L沖になり、第二列で砕波することもあるようだ。このことを考えると現地のBar頂の発生点は、 $\hat{u}_s/W_0$ が大きいため追いつき点と考えると良いと思われる。勾配 i_0 が急な場合生じないのは水深が深くなり、底質が動きにくく、波の非線型性が弱いためである。

注1) Miche が求めた二次近似の水面形は

$$y = y_0 - \frac{a \sinh 2\pi/L(d-y_0) \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{T} t - \frac{2\pi}{L} x_0 \right)}{\sinh 2\pi d/L} - \frac{a^2}{4} \left(\frac{2\pi}{L} \right) \frac{\sinh \frac{4\pi}{L}(d-y_0)}{\sinh^2 \frac{2\pi d}{L}} \left[1 + \frac{3}{2} \frac{\cos 2 \left(\frac{2\pi}{T} t - \frac{2\pi}{L} x_0 \right)}{\sinh^2 2\pi d/L} \right] \dots\dots\dots (87)$$

であり、 $y_0 = 0$ 、 $x_0 = \frac{L}{T} t - \frac{L}{2}$ で $\frac{\partial^2 y}{\partial x_0^2} = 0$ として、1式を求めたものである。これによると二次波峰は主峰と同一速度で進み、実際の現象（二次波峰は主峰に追いつかれる。）に合っていない。堀川の考えている二次波峰と筆者らの観測した二次波峰は質的に違っているのだろうか。

注1) 補 足

この二次波峰の発生を石田昭、石田和生（浅海波の変形に関する研究、第28回土木学会年講1973）および土屋義人、安田考志（浅海における波の変形、第20回海講1973）において、浅海有限振幅波を波の基礎式から $K-dV$ 方程式の形に変形した式を数値計算することによって二次波峰の特性について述べている。

これによると二次波峰の発生は Ursell のパラメーターが重要な factor であり、また各波峰はそれぞれの波高に対応した位相速度で進行することなどが数値計算の結果よりわかっている。

8. 海岸移動床模型実験に対する二、三の考察

[1] はじめに

海岸構造物に対する海床、汀線の変化を調べるために移動床模型実験が良く行なわれるが、模型の再現性、相似性について、正しい認識がないと過まった結論や有為的な結論をみちびきやすい。ここでは前章までで述べたことを使って、どのように模型実験を考えるべきか、また筆者らが行なった最上、千代、手取河口模型実験を通して反省したこと、これから考えなくてはならないことを述べ、以後の実験者の手助けをしたい。²⁷⁾

模型実験は、数値計算と同様、海岸や港、河口の計画の助けとなる一手段にすぎず、計画そのものでないことにまず心しておかねばならないだろう。得てして模型実験にすべての計画がよりかかってしまっていることが多いようだ。模型の現象は現地現象の種々の相の単純化した特殊の場で行うにすぎないし、実験施設や予算などに伴う制約上、相似性に関する種々の問題点を含んでいる。それゆえ計画者は模型実験の全計画の中での正しい位置づけが必要であり、他の手段（基礎的研究成果、数値計算、現地資料からの読み取り、他海岸の経験）と有機的なつながりに注意をはらわなければならない。

実験として何を行なうか、どういう外力条件の場で行なうかは、個々の河および海の相によって変るものであり、計画の考え方や、知られている知識の変化によっても変るものである。正しい計画論上の考え方が無ければ、良い模型実験は行え得ず、むだな実験や、過まった結論を出してしまふ。

[2] 海岸移動床実験用底質材料

今まで行なわれている模型実験を見ると、模型の底質材料として次のような物が使われている。

普通の砂	$S=1.60 \sim 1.65$	文献 64), 69), 72), 76)
石炭粉	$S=0.5$	文献 67)
メサライト	$S=0.2$	文献 65)
スタイロン	$S=0.05$	文献 71)
コークス	$S=0.2$	文献 66)
塩化ビニール	$S=0.15$	文献 68)
おがくず	$S=0.08$	文献 70)

初期のところ（1960年以前）は現地の砂をそのまま使った実験が行なわれたが、野田⁶⁹⁾以降は、現地の砂の動きやすさと、模型の動きやすさを合わせようとして模型の材料の比重を小さくして実験が行なわれているが、種々の材質が使われる一方、 $S=1.65$ の砂を使っている実験も見られ、相似

性に関して混乱があるようだ。もちろん実験の目的によって重点が異なるから、どの材質が良く、どの実験が良かったとは言えないが、筆者としては、S が小さいスタイロン、塩化ビニール、おがくずはさけた方が良く考えている。(海床の相似性はほとんど成立しない。)一番良いのは $S=1.65$ の砂を使って $(\sqrt{gH_0}/W_0)_r = 1$ にすることだが、現地海床の底質材料は $0.02 \sim 0.03 \text{ cm}$ が多く、汀線で $0.05 \sim 0.07 \text{ cm}$ ぐらいが多い。一方模型の材料として使える粒径は 0.01 cm 位である。それゆえ縮尺が大きくならざるを得ず、二次元的な部分模型しかできなくなる。それゆえSの小さい材質を使わざるを得なくなるが、 $S=0.3 \sim 0.4$ までにとどめたい。

現地の底質材料が小さい場合には、どうやっても、模型と現地では相似性を合わせることはむずかしいことを心しておくべきで、相似性の検討は、検証実験を行ない、合わない所、合う所を把握しておくべきだ。(検証実験と言っても、現地資料が無い所が多く、何が合っているのか判らない所が多いが。)この場合の検証項目は実験の目的によって異なるが、汀線の前進や、後退、沿岸砂州位置などであろう。

模型に歪を付ける実験は(69)72)76)で行なっているが、歪を付けることはなるべく避けたい。ただ沿岸砂州と汀線の距離が問題となる場合には、 ℓ_1/H_0 に応じて $(\frac{Y}{X})_r = (\frac{H_0}{\ell_1})_r$ として模型に歪をつけることも考えられよう。ただ二段および三段 Bar が形成されているような緩い勾配の所では歪をつけることは避けた方がよい。

[3] 河口模型実験の相似性

ここでは海岸移動床模型実験として、多くの要素を含んだ河口模型実験について述べてみたい。筆者は、最上川、千代川、手取川と模型実験を行なう中で、模型に対する考え方、河口計画の考え方とも変わってきたが、今河口模型実験というものをどういう風な取らえ方をしているかを述べ、今後の参考にしたい。

まず初めに、河口処理計画と言うものをどう考えているかを述べる必要がある。これが無ければ、模型実験の位置づけができなくなる。(文献 91)に筆者の考えている河口処理計画を記しておいた。筆者は今のところ、この考え方にそって河口模型実験河口計画を取扱っている。)

模型実験は処理計画の中での、砂州のフラッシュ、河口維持水深、波による砂州の発達、洪水時の水位、河口構造物による周辺汀線の変化の検討のために、模型上で現地に起ると予想されることを再現し、計画の手助けとするものである。

個々の検討項目を順に述べてみよう。

○動的河口水深

河口の水深は、波が無ければ洪水によって決まると考えて良い。⁷³⁾この水深は河床の動的平衡計算をすることによって求めることができる。模型実験を行なう場合には、計算によって予想される水深

を把握しておいて導流堤幅などを決めた後に実験を行なった方が、実験ケースを減ずることができる。(手取川で計算によって動的平衡水深を把握したのち導流堤幅などを決め実験を行なった。) 通常は計算だけで良いと思われるが、河口近くで湾曲があり、導流堤や河道の一方だけの局所的な洗掘や、推積が予想される場合には、模型実験はその把握に非常に有効である。(千代川河口模型実験では、導流堤内の片側の洗掘、片側の推積の傾向を模型実験より把握し、河道法線、導流堤の方向を修正した。)

実験はフルード模型で、 H/d (水深/粒径), S を同一とすれば良いが、(最上川模型実験では $S = 0.5$ の石炭粉で良い結果を得ている。²⁷⁾) 河道の動的平衡水深は粒径, S によらないから,⁷³⁾ ある程度粒径が相似律と合わなくても良いだろう。むしろ水位が合うように粗度の相似が成立するようにしたい。なお浮遊砂が多いと考えられる場合には ($V/W_0 \approx U_*^3/W_0$) を模型と現地で同一にしたい。

参考までに石炭粉の粗度 n を過去の実験例から述べておく。($d = 0.021 \text{ cm}$)

長良川模型	$n = 0.0152$	水深 $12 \sim 15 \text{ cm}$
大淀川模型	$n = 0.0182$	水深 $12 \sim 15 \text{ cm}$
淀川模型	$n = 0.018$	水深 15 cm
千代川模型	$n = 0.022$	水深 $8 \sim 9 \text{ cm}$

○砂州フラッシュ、洪水時の水位

砂州のフラッシュを把握するには、水位と流砂量の相似が成立しなければならない。模型の底質材料が大きく粘性の効果を考えなくて良い場合には、 H/d , U_*^2/sgd , S を模型と現地で同一とすれば良いが、フルード模型で行なえば、 H/d , S を同一にすれば、 $(U_*^2/sgd)_r = 1$ はおのずから成立する。しかしこのような条件は現地の砂がよほど大粒径か、模型を大縮尺にしなければ成立しない。改善の策としては、浮遊砂の濃度分布の相似性と、ある程度流砂量の相似性を表わすと考えられる $U_*^3/W_0 \approx \sqrt{H}/W_0$ を模型と現地で一致させたい。この場合および相似律によって求まる無次元量を同一にできない時には、特に検証実験を行なって、流砂量の相似性(河床変動の相似性)から求まる時間縮尺を求める必要がある。^{27) 注1)} 通常は、時間縮尺等を流砂量の相似が成立するように選んでも、水位の相似が成立せず、砂州のフラッシュ、洪水時の水位を模型実験で求めることは困難である。

なお河道の模型の場合、歪模型が行なわれるが、砂州のフラッシュのような三次元現象や射流現象の入る実験では避け方がよい。流れが一次元現象と考えられる場合には歪模型も良いだろう。

○海部の土砂と推積形状

洪水時、河口より出た土砂がどのように推積するかを調べるのは、現地では塩水と淡水による密度流現象が有るので、相似にすることはできない。ただ洪水時には河口近くの主流のポテンシャルコア近くまでの推積形態は、水平方向の拡散が密度差にあまり影響を受けないと思われるのであ

る程度相似にすることができると考えられる。この場合 V/W_0 を模型と現地で同一としたい。

○砂州の発生

河口にできる砂州の発生のしかたは大別して二つの形態がある。^{74) 27)}

1つは、二次元的な砂州の発生で、洪水後の河口前面の浅瀬に、波によって砂が打ち上げられるもので、砂の移動は主に汀線に直角方向である。(二次元砂州)

1つは、三次元的な砂州の発生の仕方、河口水深がある程度深い場合に現われる。この砂州は汀線(砂州)を回る漂砂が砂州を延長し、

流れと砂州を回る波の力が釣合う所(流速が遅くなる所)に砂を deposit するもので、波が強いと州は河口内に入り込むようになり、流れが強いと海側に延びる。特に波が強いときには、砂州の①点を削り取り、波は河川側に奥まで入り回折波によって州はD型のような鎌型になり、開口部をむしろ広げることもある。流れが強いときには波は河口内に入らず、州を削った土砂はB型のように堆積する。波と流れがうまく釣合うとC型のように州が延びる。(三次元砂州)

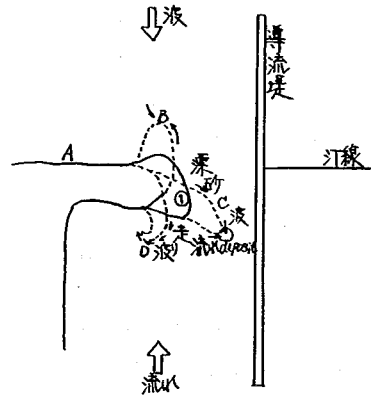


図 87

二次元砂州の場合には、流れの影響は少なく、フルード模型で $\sqrt{gH_0}/W_0$,

H_0/L_0 , S が同一になるように底質材料を選べば良い。しかし一般には現地底質材料は 0.02 ~ 0.05 が多く S を同一に実験することは不可能に近く $\sqrt{gH_0}/W_0$ と H_0/L_0 を同一にしたい。ただし S は 0.05 より小さい物は避けた方がよい。二次元の波浪水路によって砂州高などを調べるのも実験が容易なので良いだろう。

三次元砂州の場合、河川流の流速は、塩水くさびや、潮汐による入退潮の影響を受けるので、模型で現象を再現することは簡単なことではない。日本海側に在る最上川河口砂州を再現させた時には、塩水くさびの厚さを考えて、河川流量を五倍にしてやったところ現地砂州とほぼ同様な砂州を作ることができた。⁷⁴⁾ (現地の冬期流量 160 m³/s を模型に与え、波を種々に変化させた時、現地で冬期現われる C 型の砂州がどうしてもできず、むしろ開口幅は広がり、D 型の砂州になってしまった。その後密度流効果にきずき、流量を約 5 倍にしたところ C 型の砂州を模型上に再現することができた。最上川においては河口で淡水層の厚さが 1 m 前後であり、水深が 5 m であるので流量を増やして現地表面流速を模型上で再現したことになる。なお $\sqrt{gH_0}/W_0$ は汀線付近で、模型と現地はほぼ同一で

あり、 $S=0.5$ の石炭粉を使っている。）

太平洋側のように潮汐による入退潮のある場合には、実験で河口砂州を再現するには潮位発生装置を持った模型で行なわなければならない、非常に困難である。

○導流堤内の波による土砂の堆積

導流堤内の土砂の堆積状況は、塩水くさび、入退潮、河川流による流れによる波の変形、密度流による質量輸送速度の相似性が成立しないことにより厳密には相似性が成立しない。しかし導流堤幅が広い場合や、導流堤の形状が複雑な場合には導流堤内で場所的に波高分布が異なり、定常的な海浜流が発生し思わぬ土砂の堆積を見ることが在り、この場合には、三次元模型実験が必要であろう。（千代川河口模型実験において、左岸防波堤による思わぬ海浜流が発生し、導流堤内に土砂の堆積を誘発していた。⁷⁷⁾）また導流堤先端を絞ったり、先端を曲げて、導流堤内の波高を低下させ、砂州の発生を防いだり砂州高を小さくする場合にも三次元的模型実験が有効である。この場合、河川流の影響は平常時にはそれほど大きくないと考えて河川流量を零あるいは平常時流量を流して導流堤内の土砂の堆積状況を見るしかないであろう。模型はフルード模型で H_0/L_0 、 $\sqrt{gH_0}/W_0$ 、を同一にし、できれば S も同一にしたい。

なお導流堤先端を、ある程度の深い水深まで延ばし、導流堤内水深がある程度深ければ、導流堤内に砂州の発生を見ることがないが、どの程度の水深なら発生しないだろうかを見るのは、現象が二次元的であるので、二次元波浪水槽によって調べることも有効であろう。ただ河川流や密度流、潮汐流の存在は現象を複雑にしている。筆者は千代川河口導流堤の計画に当って、どの程度の水深なら砂州の発生を見ないかを二次元波浪水槽を使って調べてみたが、種々の問題点が発生し、その結果を有効に利用することができず、他河川の例で判断せざるを得なかった。ここに参考のために、その結果を概略する。

実験装置は図63に示す6章で行なった実験装置を使ったが、次の点を改良した。水路末端に水位調節用ゲートを取りつけ水位を一定にたもつようにした。（この水路は古く、水路からの漏水があり、水位が少しずつ下がる。そのため6章の実験では、そのたびに給水ポンプで補給していた。今回は給水を続け余剰水をゲートから排出した。）海床は1:50の勾配とし、河道部は水平床として10mを取った。現地と模型の縮尺は沈降速度の比より1/25とした。また河道部の末端はOpenとし、ここから出た波は反射しない条件とした。（実河道でも反射は少なくエネルギーは河道を上る内に消散されてしまう。）各ケースの実験中の状況を述べると

イ) 実験Ⅵ1 ($H_0=16.57\text{ cm}$, $T=2.28\text{ sec}$, $H_0/L_0=0.0204$)

本ケースは波高が三ケース中最大のもので、実験初期において碎波点はかなり沖合に出現し、碎波点より河道側に実験開始30分後には1/2 L間隔位に砂堆の発生が見られた。0.5hから1hにかけて0m附近と5m附近のBar頂が高くなった結果、5m附近で一次碎波を始め、碎波後また元の波形にもどって0m附近で二次碎波を始めた。2時間目位には13m附近にも碎波点が発生

0 m 附近は三次砕波点となった。三次砕波後は波高減衰が大きく河床の動きも少なかった。3 時間目以降は海床の動きは少なく 10 時間目とほとんど変わらない。そのほか気付いた点を述べると、実験初期に $1/2 L$ 型の海浜形状が観測されたが、時間の経過と共に $2 L$ 型の移行が見られた。そして三次砕波点より河道側の土砂の動きは、表層、中層、底層とも沖側へ移動していた。このことは、河道部末端から実質的な質量輸送があったことになる。砕波型式は、一、二次砕波点は崩れ波型式であったが、三次砕波は巻き波型となった。実験中二次波峰が観測され、主峰が二次波峰を追い越す点、即ち二次波峰と主峰が重なる点で Bar の存在が見られた。

ロ) 実験 42 ($H_0 = 1.272 \text{ cm}$, $T = 2.07 \text{ sec}$, $H_0/L_0 = 0.019$)

実験初期に 41 と同様 $1/2 L$ 間隔に砂堆の発生が見られたのは前ケースと同様であったが、河道側から沖側への土砂移動が顕著であった。実験を開始して 1 時間後には 1 m 附近とその沖 6 m 附近の 2 ケ所に砕波点が見われ、更に 14 ~ 15 m 附近の波高が高く $1/2 L$ 間隔に出来ていた砂堆はしだいに $2 L$ 間隔に移行していた。実験開始して 3 時間目には、二次砕波点の位置がかなり河道内へと移り (-2.4 m) その附近に高い砂州の形成が見られた。また一次砕波点附近はあまり変化がなかったがここにも砂州の形成が進み、更に 14 ~ 15 m 附近にも砂州が出来始めた。3 時間 40 分には二次砕波点附近で静水面近くまで堆積され、それ以上河道側の波高は小さく土砂の移動は少ない。4 時間目位での砂州間の土砂の動きを見ると図 88 のような動きが見られた。4 時間目以降の石炭粉の動きはほぼ上図のような状況であったが、徐々に砕波点の位置は河道側へ移動していた河道内 (二次砕波点附近) の砂州は 10 時間までに打上がらなかったがこれは、河道内の砂州頂を越える波は砂州頂を掃くようにけずり取り、5 時間時をピークに上流に進むにつれて砂州頂は低くなっていった。砂州の打ち上げには三次元的な流れが必要なようでもし河道端が Open でなかったら、もどり流れが生じ、それがどちらかに片より砂州の打上げをうながしたと思われる。10 時間目までで海浜の変化が激しかったので、更に波だけを与え観測を行なった。10 ~ 17 時間で徐々

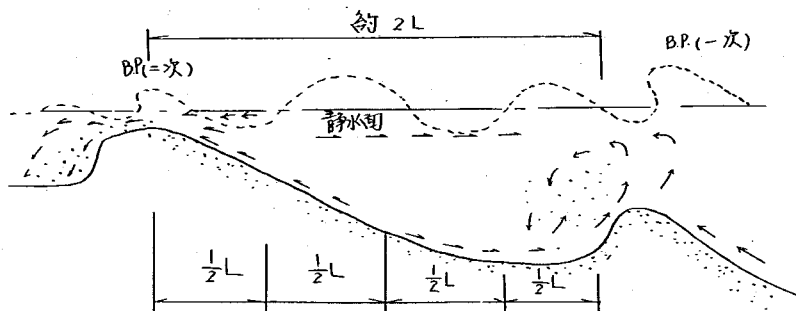


図 88

に砕波点は前進し、一次砕波点では巻き波砕波となり、砕波後のエネルギーの減衰が著しかった。その為河道内の砂州の前進は止まり、二次砕波の現象も見られなくなった。10時間目で5m附近に在った砂州は17時間目までに2m附近まで前進しその砂州頂も高くなって20時間目にはほぼ静水面近くまで堆積したが、その後、砂州頂を越える波により前進し、厚みも増し、30時間目には-2mまで前進していた。

ハ) 実験Ⅲ ($H_0 = 8.64 \text{ cm}$ $T = 1.86 \text{ sec}$ $H_0/L_0 = 0.016$)

実験初期において砕波点より河道寄りで底層土砂の動きが沖側に向いていること、 $1/2$ L型の砂州の発生があることは前2ケースと同様であった。また $1/2$ L型は2L型への移行が見られた。2時間目位で砂州頂が高くなると砂州間の動きは実験Ⅱ同様で河道内砂州に近い附近の土砂は底面表層とも、砂州方面に動き、砂州と次の砂州の中央附近は動きが少なく、更に沖合の砂州に近い所は、沖合砂州方向の移動が見られた。ただし表層の浮遊砂については沖側へと移動していたが、波高が小さいため浮遊砂が少なく底面近くの掃流砂の移動が砂州形成に支配的であった。砕波型式は海浜の変形につれ崩れ波型、巻き波型、両者の混合型とその都度変化していた。

以上の実験結果は次のことをおしえている。

波高が大きいかからと言って必ずしも打上がるかどうかは判らない。質料輸送速度の違いが砂州形成におよぼす効果は大きく、河川流、密度流、潮汐流を無視した二次元水路の実験結果をそのまま信じることには疑問が残る。また波高の違いは海床形状をかなり変え、実河口のように種々の波高が来襲し、時間的変化のある場合の現象を一種の波だけで把握することに疑問が残る。その他河川からの流出土砂の影響等を考えるとこの結果をそのまま使用すべきでないと考えらるべきであろう。筆者の現時点での河口維持水深の把握は他河川の経験にたよっている。^{注2)}

○汀線の変化

河口構造物による汀線の変化等を見るには、フルード模型で $H_0/L_0 \cdot \sqrt{gH_0}/W_0$ をまず同一にし、なるべくなら S も同一にしたい。この実験は、相似性の論議と同時に、どんな波を模型にあてえるかの方がより重要である。現地河口は種々の波によって形成されるのにもかかわらず模型は、一方向、一種の波しかあたえないことが多い。また河川流出土砂量の把握もなければならぬし、全体的な漂砂の方向と量の把握も必要となり、模型で再現するのはむづかしい。汀線変化も把握しようとする、どうしても模型は小縮尺になり、相似性に疑問がでてくる。現地資料の解析、他河川からの類推が一つの答えとならざるを得ないだろう。

なお漂砂の移動方向が一方に卓越するような場での模型実験の場合には、汀線に平行な漂砂が問題となり、二次元的汀線の前進、後退をあまり問題としないなら、模型実験は有効である。

○波による構造物周辺の洗掘

構造物に波が当たると一部反射し $1/2$ L型のBarが発生しやすいが、7章で述べたように底質の選定をややまると洗掘される所に堆積が生ずることがあり、なるべくなら $\sqrt{gH_0}/W_0$ 、 S を模型と

$H_0 = 16.57 \text{ cm}$ $T = 2.28 \text{ sec}$ $L_0 = 8.11 \text{ m}$ $H_0/L_0 = 0.0204$
 水深 60 cm $\beta = 0.5$ $\sqrt{g/w_0} = 12.7$

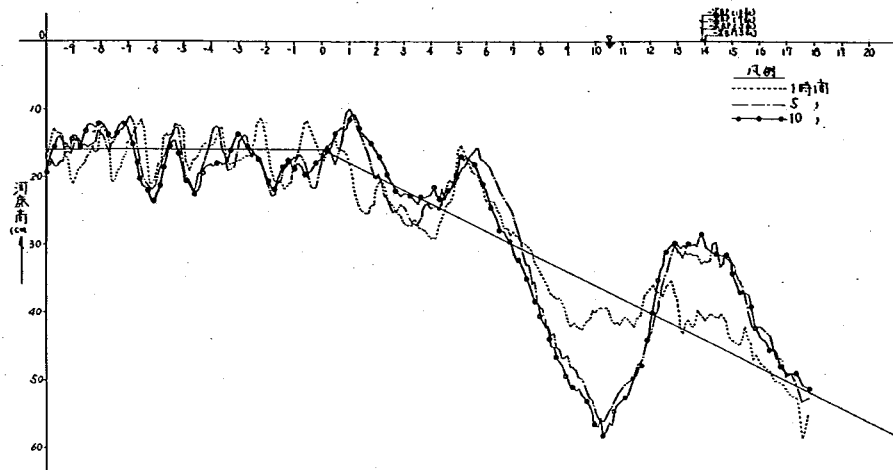


圖 89 海浜縦断变化図 (実験No. 1)

$H_0 = 12.72 \text{ cm}$ $T = 2.07 \text{ sec}$ $L_0 = 6.68 \text{ m}$ $H_0/L_0 = 0.019$
 水深 60 cm $\beta = 0.5$ $\sqrt{g/w_0} = 11.1$

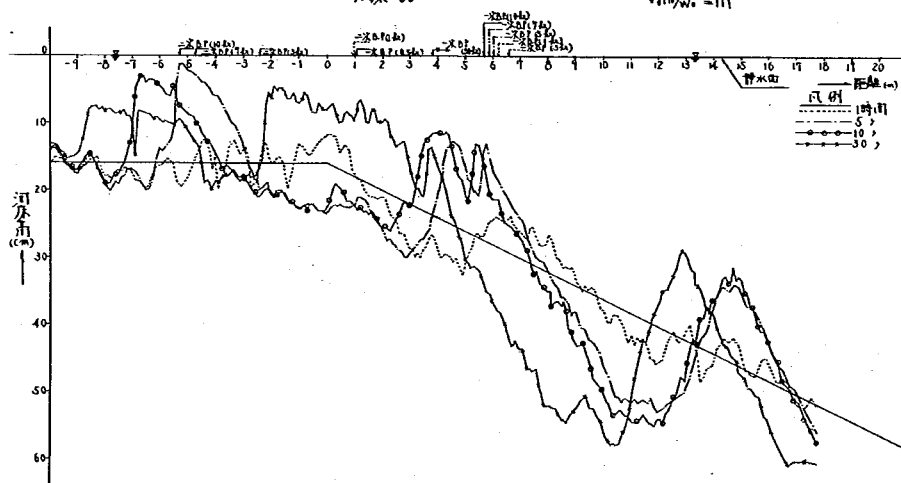


圖 90 海浜縦断变化図 (実験No. 2)

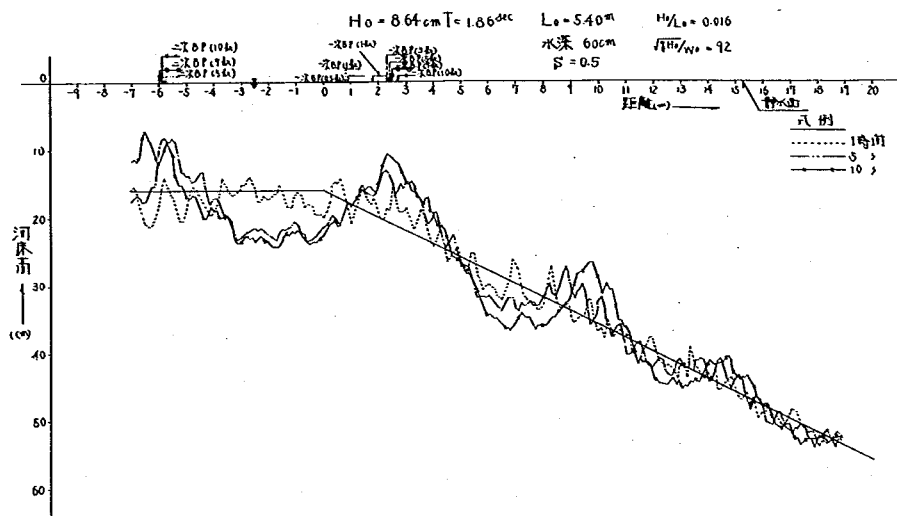


圖 91 海浜縦断变化图 (実験No. 3)

現地で同一としたい。

[4] 今まで行なった河口模型実験の反省

イ) 底質材料を決めてから模型の縮尺を決めないで、逆に模型の縮尺を決め、それに合うように底質材料をさがした。実際には底質材料として石炭粉しかなく相似性に疑問が残った。

ロ) 全実験を一つの模型で行なおうとした。それゆえ河道の現象と海の現象と同一縮尺の実験を行なわざるを得なくなった。河床砂と海床砂の粒径が大きく変る所では別々の実験施設で行なうか、底質材料を変えることが必要である。(手取川には、河道部は現地の粒径の1/60の混合砂を使い、海部は石炭粉で行った。)

ハ) 実験前の数値計算によって、ある程度の導流堤の形状を決めておくべきである。そのためには、模型製作前にすくなくとも6ヶ月間の検討期間がほしい。現状の模型実験の依頼体制は、年度末に集中し、十分な検討なしに模型を作らざるをえなくなっている。すくなくとも依頼者は、模型相似律の検討、河口の動的水深の把握、現地資料の取りまとめぐらひは行なった後に、実験を依頼しなければ良い結果を得ることはできない。

ニ) 模型実験結果の位置づけが明確でなかった。最上川、千代川、手取川と実験を進めるにつれて模型実験の位置が下がり、現地資料や、他河川の例の位置が上がってきた。模型実験結果をなるべく限定してつかうように心がけるべきである。

注1)

時間縮尺を決める場合、流砂量公式から求まる時間縮尺を参考にしてから、検証を行なった方がよい。この場合流砂量式として何を選んだら良いかが問題になる。筆者の経験によると砂州のフラッシュのように浮遊砂の多い場合、流砂量式としてBrown式が良いようだ。

図92は山口氏⁹³⁾の実験結果をBrown公式型に書き訂めたものだが、流砂量 q_s は平均流速を U_m とすると

$$q_s = \alpha \frac{U_m^5}{S^2 d}$$

となっている。この実験は急勾配水路に河床砂を敷き、その河床変動量から q_s を求めたものであり、浮遊砂も含むものである。実験は水深5~15cmで行なわれ、現地水深に比べて一オーダー小さいので、この結果をそのまま現地流砂量と比較できないが、流速4m近くまで行なわれており貴重な資料と言える。なおBrown公式は

$$q_s / U_* d = K \{ U_*^2 / S g d \}^2$$

であり、 $\varphi = U_m / U_*$ とすると

$$q_s = K / \varphi^5 g^2 \cdot U_m^5 / S^2 d$$

となり、実験式と形が同じになる。なお実験式において $\varphi = 15^{30)}$ とすると $K \approx 31.7$ 、 $\varphi = 10^{30)}$ とすると $K \approx 4.18$ となる。通常言われている $K = 10$ 前後である。なお筆者が大淀川の河口模型実験結果を計算機でシミュレートした時 $K = 5$ が良く合ったことをつけ加えておく。⁹⁾

注2)

全国の導流堤先端水深と、その河床変動を調べた結果は表7である。ここで維持可能とは、河床高があまり変化しない場合である。しかし、これは河口部の底質が動かず浅くならないということではなく、1年ぐらいいは導流堤内にそれほどたまりず、多少浅くなくても洪水によってはき出されると考えるべきである。これより、先端水深が4~5mあれば、その水深は維持でき、2~3mでは浅くなることがあり、1mでは砂州の発生を見ると考えられる。

表7

河川名	先端水深	粒 径	
遠賀川	4m	0.7mm	ほぼ維持可能
大淀川	5m	0.5~1mm	"
肝属川	2m	0.7mm	維持不能
千代川	3~4m	0.5mm	ほぼ維持可、時々浅くなる。
高津川	3~4m	砂利まじり1mm以下	"
相模川	1.5m	0.6mm	維持不能
利根川	3m	0.5~2mm	河口前面で少く動く
那珂川	5~6m	1mm	維持可能
鳴瀬川	2~3m	0.3mm	先端で2m位になることあり
旧北上川	5m	0.5~3mm	維持可能
岩木川	4m	0.5mm	ほぼ維持可能
円山川	6m	0.3mm	維持可能
渡川	11~12m	1~5mm	"
日高川	2m		維持不能
関川	2~2.5m	1~3mm	維持不能

○導流堤が無いが三次元的砂州ができ河口水深変らぬ河川

河川名	最狭部水深	粒 径	
最上川	5m	0.5mm	川幅狭くなると浅くなる。
江の川	5~6m	0.7mm	
米代川	5~6m	0.5mmの砂中に5mm礫まじる。	
旧北上川	5~6m		
阿賀野川	5m	0.5mm	
川内川	7m	1mm	
荒川	3~4m	5mm以下の砂 砂利まじる	

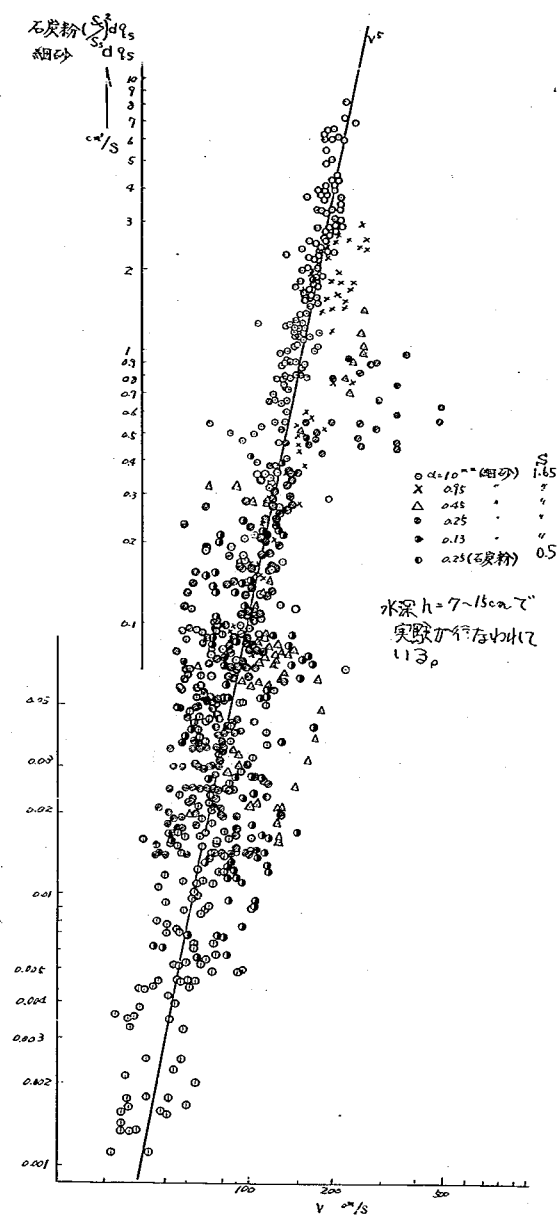


図 92 $g_s \sim V$ 関係図

9. あとがき

本研究は、海岸地形の相似性と言っても、沖方向には底質の移動限界水深ぐらゐの所、汀線方向には、構造物による影響を生じるような領域を取りあつたものである。本研究を通じて、このような中規模スケールの現象を、ripple とか、移動限界水深とかいう小規模スケールの現象と統一的に把握できたと感じている。なおこれより大規模な海岸地形の相似性に関しては、地形学、地質学、地理学的なアプローチの仕方が必要になってくるであろう。工学的に現地海岸を見る時、このような大スケール現象の中で中規模スケール現象を見ているのだという観点が常に必要である。

本研究の工学的発展の課題としては次のようなことが残っている。

- 1) 海岸の侵食対策として、5[4]で述べた L_{min} の影響要素との関係をより明確化すること。碎波点の人工的コントロール（たとえば潜堤）による侵食防止の可能性を含んでいる。
- 2) 現地海岸に打ち寄せる波の時間変化が、海岸地形におよぼす効果。
- 3) $\sqrt{gH_0}/W_0$ を現地相当の値まで出せる実験施設を作り、現地現象をより解明すること。
- 4) 潮位変動が海岸変形におよぼす影響を明らかにすること。
- 5) 混合粒径底質材料の波によるふるい分け現象を把握し粒度分布の効果を明らかにすること。

本研究に当っては次の人達がかかわった。5章[3]および6章の資料整理、最初の取りまとめは野積が行い、山本が加筆訂正した。その他の章の取りまとめは、山本が行なった。なお資料整理に当っては、本試験所臨時職員 池田富美江さんにも助力を受けた。実験に当っては建設技術研究所 古賀興一氏には大くの労をかけた。外国の文献の収集に当っては海岸研究室長 橋本宏氏の助力による所が多かった。また底質の移動現象等についても教えられる所が多かった。深く感謝するしだいである。

1974年11月末日

山 本 晃 一
野 積 尚

参 考 文 献

- 1) Johnson, J.W. : Scale effects in Hydraulic Models Involving Wave Motion, Trans. Amer. Geophy. Union, Vol 30, 1949,
- 2) Rector, R. L. : Laboratory Study of Equilibrium Profiles of Beaches, Beach Erosion Board, T.M. 41, 1954,
- 3) Saville, T. Jr. : Scale Effects in Two Dimensional Beach Studies, Trans. IAHR 7th General Meeting. pp. A3-1 to A3-10 1957
- 4) 岩垣雄一, 野田英明 海岸変形の試験における縮尺効果の研究, 第8回海岸工学講演会 1961
- 5) 栗原道徳・篠原謹爾・椿東一郎・吉岡益男; 波による海浜の砂移動, 第3回海岸工学講演会 1956
- 6) Nayak I.V. : Equilibrium Profiles of Model Beachs, University of California Technical Report HEL-2-25, 1970
- 7) 田中則男, 新保 修 ; 移動床模型実験用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 41 Mar. 1973
- 8) 須賀堯三, 松村圭二, 末吉一成; 河口二次元砂州に関する実験的考察, 第27回土木学会年次講演会 1972
- 9) 須賀堯三, 末吉一成; 河口二次元砂州に関する実験昭和47年度土木関係報告 建設省土木研究所 1973
- 10) 本論文, 5章および6章
- 11) 尾崎 晃; 海浜平衡勾配における初期勾配の影響について, 第28回土木学会年次講演会 1973.
- 12) 合田良実; 碎波指標の整理について, 土木学会報告集, 第180号, 1970
- 13) Galvin, C. J. : Breaker Type Classification on Three Laboratory Beaches, Journal of Geophysical Research. Vol. 73, 12, 1968
- 14) Diephuis, J. G. H. R. : Scall Effects Involving the Breaking of Waves, Proc. 6th Conf. on Coastal Eng., 1958
- 15) 土屋義人, 渡戸健介, 青山俊樹; 水流による砂れきの Saltation の機構(1), 京大防災研究所年報第12号B, 1969
- 16) Homma. M, Horikawa K; Suspended Sediment due to Wave Action, Proc. of 8th Conference on Coastal Engineering 1963
- 18) 野田英明; ぐみ崎漁港の漂砂に関する実験(その1) 京大防災研年報第9号 1966
- 19) Longuest-Higgins, M. S. ; The Mechanics of the Boundary

- Layer Near the Bottom in Progressive Wave, Coastal Eng. 1958
- 20) Kajiura, K.: On the bottom friction in an Oscillatory Current, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 42, No. 1 1964
- 21) 堀川清司, 渡辺 晃; 波による砂移動に関する一考察, 第13回海岸工学講演会講演集 1966
- 22) Manohar, M.; Mechanics of Bottom Sediment Movement due to Wave Action, Beach Erosion Board, Tech. Memo No. 48, Aug. 1954
- 23) S. Yalin, R. C. H. Russell; Similarity in Sediment Transport due to Waves, Proc. of 8th Conference on Coastal Engineering 1963
- 24) Douglas L. Inman; Wave-Generated Ripples in Nearshore Sands, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 100, 1957
- 25) Theodore Scott; Sand Movement by Waves, Beach Erosion Board Tech. Memo. No. 48 1954
- 26) 松梨順三郎, 大味啓介; 波による底質の変形について, 第11回海岸工学講演集 1964
- 27) 須賀亮三, 山本晃一; 河口部水理模型実験の問題点, 第18回水理講演会講演集 1974
- 28) 水理公式集
- 29) H. A. Einstein: The Bed Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows, Department Agriculture Soil Conservation Service Technical Bulletin 1950
- 30) 水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会; 移動床流れにおける河床形態と粗度, 土木学会論文報告集 No. 210 1973-2
- 31) 樺木 享; 漂砂の移動限界流速および限界水深に関する再考, 第13回海岸工学講演集 1966
- 32) 岩垣雄一; 限界掃流力に関する基礎的研究, 土木学会論文集 41号 1956
- 33) 野田英明, 井保武寿; 波による海底砂の移動限界と砂れんの発生, 第11回海岸工学講演集 1964
- 34) 本間 仁, 堀川清司, 鹿島達一; 波による浮遊砂に関する研究, 第11回海岸工学講演集 1964
- 35) 野田英明; 波による底質の浮遊, 第14回海岸工学講演集 1967
- 36) 服部昌太郎; 重複波による底質の浮遊機構, 第16回海岸工学講演集 1969
- 37) J. C. Fairchild; Suspended Sediment Sampling in Laboratory Wave Action, Tech. Memo. No. 115 Beach Erosion Board 1959

- 38) 篠原謹爾, 椿東一郎, 斉藤 隆; 漂砂と波の特性に関する研究, 第5回海岸工学講演集
1958
- 39) Yuichi Iwagaki and Hideaki Noda; Laboratory Study of
Scale Effect in Two-Dimensional Beach Processes, Proc. of
8th Conference on Coastal Engineering 1963
- 40) Edward K. Noda, A.M. ASCE; Equilibrium Beach Profile
Scale-Model Relationship, Journal of A.S.C.E. Hy. Div. 4 Nov.
1972
- 50) I. J. Popov; Experimental Research in Formation by
Waves of Stable Profiles of Upstream Faces of Earth
Dams and Reservoir Shores, Coastal Engineering
1961 Vol. 2,
- 51) George M. Watts; Laboratory Study of Effect of Varying
Wave Periods on Beach Profiles, Beach Erosion Board
Tech. Memo. No. 53 1954
- 52) P. S. Eagleson, B. Glennie, and J. A. Draucup; Equilibrium
Characteristics of Sand Beaches, Journal of A.S.C.E.
Hy. Div. 1 Jan. 1963
- 53) 松任海岸離岸堤に関する模型実験報告書等, 実験は横田敏雄 林 敏夫, 佐久間襄, 橋本 宏
等が行なったようだ。
- 54) 堀川清司, 砂村継夫, 鬼頭平三; 波による海浜変形に関する一考察, 第20回海岸工学講演集
1973
- 54) 合田良実; 造波水路における波浪実験の二, 三の問題点について, 第15回海岸工学講演集
1968
- 55) 堀川清司; 海岸工学, 東京大学出版会より再図原論文はBeach Erosion Board
1961
- 56) 北陸地方建設局; 河口に関する研究, 第27回建設省技術研究発表会 1973
- 57) 建設省金沢, 鳥取および酒田工事事務所での調査資料
- 58) 北海道開発局; 石狩湾の自然条件について 1970
- 59) 北海道開発局土木試験所; 更岸地区幹線排水路河口処理模型実験 1973
- 60) 上森千秋; 高知海岸の漂砂浜について, 第14回海岸工学講演集 1967
- 61) 中村 充, 大西亮一, 宮村長生; 離岸堤による海岸変形について, 第19回海岸工学講演集
1972

- 62) 細井正延, 石田 昭, 平山秀夫, 進行波によるduneの発生に関する研究; 土木学会第25回
年次講演会 1970
- 63) 橋本 宏, 山下 忠, 山口定徳, 高木守夫; 河口導流堤に関する研究, 昭和47年度土木関係
経費報告 建設省土木研究所 1973年6月
- 64) 久宝 保, 田中要三; 海部川河口閉塞処理に関する模型実験, 海岸工学講演集 1958
- 65) 上月 武, 後藤 哲; 更岸地区幹線排水路河口処理模型実験, 北海道開発局土木試験所
1973
- 66) 樺木 享; 益田港河口閉塞に関する模型報告書, 島根県土木部港湾課 1967
- 67) 須賀堯三, 山本晃一; 最上川河口模型実験報告書, 土木研究所資料第887号 1974
- 68) 野田英明; ぐみ崎漁港の漂砂に関する実験(その1)
京大防災研年報 第9号 1963
- 69) 松尾春雄; 利根川河口の防波堤, 導流堤, 船路浚渫及砂州の消長に関する模型実験 土建所報
4号 1938
- 70) 吉川秀夫, 塚本義昭; 五ヶ瀬川改修計画に伴う水理学的諸問題の検討, 土研所報122号
1964
- 71) 吉川秀夫, 須賀堯三; 放水路の河道計画に関する研究, 土研報告第127号 1966
- 72) 市川 武, 佐藤正大, 遠藤泰司, 前田 建, 野口雄三; 田子の浦海岸の侵食対策に関する研究
第20回海岸工学講演集 1973
- 73) 山本晃一, 野積 尚; 河口近くの河道特性, 第29回土木学会年次講演会講演集 1974
- 74) 山本晃一; 河口現象把握の問題点, 土木技術資料Vol 15-12 1973
- 75) 田中則男, 沢本正樹; 砂浜港湾周辺における海浜変形, 港湾技研資料4180 1974
- 76) 佐藤昭二, 田中則男, 入江 功, 平原淳次; 港湾埋没に関する移動床模型の再現性, 港湾技術
研究所報告 第9巻第1号 1970
- 77) 山本晃一, 野積 尚; 千代川河口処理計画報告書, 土木研究所資料第974号 1975
- 78) Ippen Editor; Estuary and Coastline Hydrodynamics,
Mc Graw-Hill Book Company pp108~113
- 79) 堀川・砂村・鬼頭・品川; 海浜変形に関する実験的研究, 第27回土木学会年講 1972
- 80) Kiyoshi Horikawa; Secondary Wave Crest Formation,
土木学会論文集第66号 1960
- 81) 細井正延, 石田 昭; 二次波峯現象における非線形性の効果, 第17回海岸工学講演集
1970
- 82) 細井正延, 石田 昭, 平山秀夫; 進行波によるduneの発生に関する研究, 第25回土木学会
年講 1970

- 83) 野田英明；波動境界層における質量輸送と海底の洗掘，第17回海岸工学講演集 1970
- 84) 岩垣雄一；クノイド波の実用化，1972年水工学に関する夏期研修会講義集 Bコース
- 85) 杉江正夫，川口 毅；部分重複波によるSand Waveに関する研究，第18回海岸工学論文
集 1971
- 86) 佐藤昭二，田中則男；水平床における波による砂移動について，第9回海岸工学講演集
1962
- 87) 富永正照，橋本 宏；波による水平床での砂の移動特性，第25回土木学会年次講演会
1970
- 88) 野田英明；波動による乱流境界層の発達，第16回海岸工学講演集 1969
- 89) 上森千秋；河口吐口の閉塞とその処理に関する研究，高知大学農学部紀要9 1963
- 90) 中村 充，白石英彦，佐々木泰雄；碎波による波の変形に関する研究，第13回海岸工学講演
集 1966
- 91) 山本晃一；河口導流堤計画に関する一試論，土木技術資料Vol 17 No 1 予定 1975
- 92) Tadjbaksh, I. and J. B. Keller: Standing Surface Waves of
finite amplitude, Jour. Fluid Mech. Vol 8. 1960
- 93) 久慈川河口水理模型実験報告書Ⅱ；1971
富永正照，山口高志 他
- 94) 山本晃一；出水時の砂州フラッシュ機構の検討法，土木技術資料Vol 14-8 1972
- 95) 水理公式集昭和46年改訂版 P 82