

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

---

VOL. 24      NO. 2      JUNE 1985

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第24巻 第2号 (Vol. 24, No. 2) 1985年6月 (June 1985)

## 目 次 (CONTENTS)

1. An Effective Stress Analysis of Liquefaction at Ishinomaki Port during 1978 Miyagi-ken-oki Earthquake  
..... Susumu IAI, Hajime TSUCHIDA and W. D. Liam Finn..... 3  
(1978年宮城県沖地震の石巻港における液状化現象の有効応力解析  
..... 井合 進・土田 肇・W. D. Liam Finn)
2. 不規則波に対する消波ブロックの安定性に関する実験的考察  
..... 谷本勝利・原中祐人・山崎一雄.....85  
(Experimental Study on the Stability of Wave Dissipating Concrete  
Blocks against Irregular Waves.....Katsutoshi TANIMOTO,  
Suketo HARANAKA and Kazuo YAMAZAKI)
3. 砂れん上の底質の浮遊過程を考慮した漂砂観測法に関する実験的研究  
..... 入江 功・寺崎賢次・加藤一正... 123  
(Laboratory Study on the Observation Methods of Sediment Transport  
as Focussed on Suspension of Sediment above Sand Ripples  
..... Isao IRIE, Kenji TERASAKI and Kazumasa KATOH)
4. 底質の移流沈降過程を入れた航路・港内埋没の予測  
..... 入江 功・栗山善昭... 157  
(Prediction of the Rate of Sedimentation in Channels and Basins by  
Considering the Deposition Process Due to Convective Move of Bed  
Materials..... Isao IRIE, Yoshiaki KURIYAMA)
5. 波力発電ケーソンに設置されたウェルズタービンの出力計算法  
——波エネルギーに関する研究 第4報——  
..... 高橋重雄・鈴木諭史・明瀬一行... 205  
(Turbine Power of Pneumatic-type Wave Power Extractors Utilizing  
Caisson Breakwaters  
——A Study on Development of Wave Power, 4th Report——  
..... Shigeo TAKAHASHI, Satoshi SUZUMURA and Kazuyuki MYOSE)
6. 淡塩二層密度界面の抵抗と混合特性.....中野 晋・鶴谷広一・一戸秀久... 239  
(Friction and Entrainment at the Interface of Two-Layered Stratified  
Flow ..... Susumu NAKANO, Hiroichi TSURUYA and Hidehisa ICHINOHE)

7. コンクリートかさ上げの付着特性……………林 洋介・佐藤勝久… 275  
(Bond Characteristics of Concrete Overlays  
…………… Yousuke HAYASHI and Katsuhisa SATO)
8. 飽和砂地盤上の盛土の破壊振動実験と円形すべり安定解析  
……………上部達生・北澤壮介・檜垣典弘… 305  
(Shaking Table Tests and Circular Arc Analysis for Large Models  
of Embankment of Saturated Sand Layers……………Tatsuo UWABE,  
Sosuke KITAZAWA and Norihiro HIGAKI)
9. 土砂輸送パイプの摩耗に関する研究 (第2報)  
——大口径ポリウレタンライニング管の耐摩耗性に関する現地実験  
(苫小牧, 岸和田)——……………岡山義邦・浜田賢二・釜場和宏・中村裕二… 361  
(Study on the Wear of Slurry Pipelines (2nd Report)——Field Tests  
on Wear Resistance of Large Polyurethane Lined Pipe——  
……………Yoshikuni OKAYAMA, Kenji HAMADA, Kazuhiro UKEBA  
and Yuji NAKAMURA)

### 3. 砂れん上の底質の浮遊過程を考慮した漂砂 観測法に関する実験的研究

入江 功\*・寺崎賢次\*\*・加藤一正\*\*\*

#### 要 旨

波、流れの下での漂砂の定量的特性を明らかにすることは、海浜変形を予測するために重要なことである。そのためには、漂砂の機構を十分把握し、最も適した漂砂量測定法を開発する必要がある。

本研究は、室内実験により、漂砂の機構を調べ、その定量的測定法を検討したものである。まず、波による浮遊砂の濃度分布特性について、特に底面の砂れん近傍に重点を置いて調べた。これより、浮遊砂濃度の鉛直分布、底面の砂れん近傍の浮遊砂平均濃度が、水理学的パラメータにより一意的に表示できることを示した。次に水路内の波の進行方向に定常流を加え、岸沖方向の浮遊漂砂量の測定法について検討した。岸沖方向の漂砂においては、底面の砂れん頂部より砂れんの波高程度だけ上の位置より上方の領域では、浮遊砂濃度の時間平均値と平均流速の積で浮遊砂量が求まるが、それより下方の領域ではこれが困難であった。一方、沿岸方向の漂砂については、水面から底面までの浮遊砂濃度分布の表示法が明らかになったので、これに沿岸方向の平均流を掛け合わせるにより漂砂量が求められるものと考えられた。

以上の室内実験と、既往の漂砂観測法の事例を踏まえて、現地用の漂砂量測定装置を試作した。

---

\* 水工部 漂砂研究室長

\*\* 水工部 漂砂研究室

\*\*\* 水工部 高潮津波研究室長

### 3. Laboratory Study on the Observation Methods of Sediment Transport as Focused on Suspension of Sediment above Sand Ripples

Isao IRIE\*

Kenji TERASAKI\*\*

Kazumasa KATO\*\*\*

#### Synopsis

For the prediction of topographic change of sea bottom in the field, clarifying the quantitative characteristics of sediment transport in prototype scale is essential.

The present paper deals with laboratory study to find out the most appropriate method of quantitative observation of sediment transport to be applied in the field. Tests were carried out for two components of sediment transport, that is, onshore/offshore transport and alongshore transport.

In the onshore/offshore transport, the rate of sediment transport can be simply obtained by multiplying the time-averaged values of concentration of suspended sediment and orbital velocity so long as it is measured in the layer beyond a certain level above the crests of sand ripples, however, it is very difficult in the layer below that level. According to the tests, the height of the level above the ripple crests was almost the same as the height of sand ripples.

In the alongshore transport, characteristics of sediment suspension was examined in detail and vertical distribution of sediment concentration including the zone adjacent to the surface of sand ripples were examined and it was correlated with hydrological parameters such as the Shields Number.

Based upon the finding of the above tests and the review of various experiences in the past, an equipment to measure the rate of sediment transport in the field is developed.

---

\* Chief of the Littoral Drift Laboratory, Hydraulic Engineering Division

\*\* Member of the Littoral Drift Laboratory, Hydraulic Engineering Division

\*\*\* Chief of the Storm Surge and Tsunami Laboratory, Hydraulic Engineering Division

## 目 次

要 旨 .....	123
1. は し が き .....	127
2. 波による浮遊砂濃度分布特性に関する実験 .....	127
2.1 実験方法及実験ケース .....	127
2.2 実 験 結 果 .....	130
3. 波の進行方向に流れが存在する場合の浮遊砂の特性に関する実験 .....	138
3.1 実験方法及び実験ケース .....	138
3.2 実 験 結 果 .....	138
4. 漂砂の定量的観測法に対する考察 .....	152
4.1 室内基礎実験から判明したこと .....	152
4.2 既往の漂砂観測法の検討 .....	152
4.3 現地用漂砂量観測法に要求される条件 .....	153
5. 結 論 .....	156
参考文献 .....	156

## 1. はしがき

海浜の変形を定量的に予測するには、波、流れの下での漂砂の定量的特性を明らかにする必要がある。そのため、漂砂の機構を十分把握し、最も適切な方法で漂砂量を測定することが重要と思われる。漂砂の機構については、従来室内実験的に多くの研究<sup>1)</sup>がなされ、実際の海岸過程を考察するための指針として、多くの知見が得られてきた。しかし実際の海岸では、現象の縮尺が室内と異なるばかりでなく、波の非定常性、それに伴う碎波特性、長周期波の漂砂現象に対する寄与等、複雑な現象が重なり合って発生している。現地でのそのような厳しい条件での漂砂の定量的特性を把握するには、これらの複雑な外力特性と相関づけができるように十分精度の高いデータが測得されねばならない。しかも海浜の変形は荒天時の漂砂にも大きく影響されるものと思われるので、その観測方法は荒天時にも使用に耐え得るものでなければならない。現地海岸における漂砂の定量観測には過去にも多くの試みがなされてきたが、上記のような条件を満足する観測法はいまだ見出されていない。

筆者らは、昭和60年度に概成する波崎観測栈橋において漂砂の定量的観測を行う方法について、室内の基礎的実験により検討してきた。本観測栈橋は、荒天時においても直接海上から種々の海象の観測ができるものであ

る。

まず波の下での浮遊砂濃度分布について、特に砂れん上の浮遊砂濃度に着目して調べ、これらがいかなる水理学的諸量で表示し得るかを検討した。この浮遊砂の濃度分布特性を底面の砂れん上まで含めて明らかにし、平均流との積により漂砂量を求めることの可能性を検討した。特に波による軌道粒子の運動方向と砂の移動方向とが一致し、振動する漂砂から正味の漂砂を識別する必要がある岸沖漂砂については、実験水路内で波の進行方向と同一方向の流れを起し、それらを識別する方法について検討した。

以上の室内の基礎実験の結果から、現地用漂砂量測定装置の具備すべき条件を明らかにした。さらに、既往の漂砂観測法を再検討した後、現地用の漂砂量測定装置を試作した。

## 2. 波による浮遊砂濃度分布特性に関する実験

### 2.1 実験方法及び実験ケース

実験は、図-1に示す長さ25m、幅1m、高さ0.6mの片面ガラス張りで波と流れが同時に発生できる水路で行った。水路は、鋼製隔壁で二分され、水路岸側端には、消波のため直径2~3cmの碎石が、1:3の勾配で置かれている。波は、フラップ型規則波造波機によって発生し、流れは廻流パイプ、スクリーンを通じて循環させる

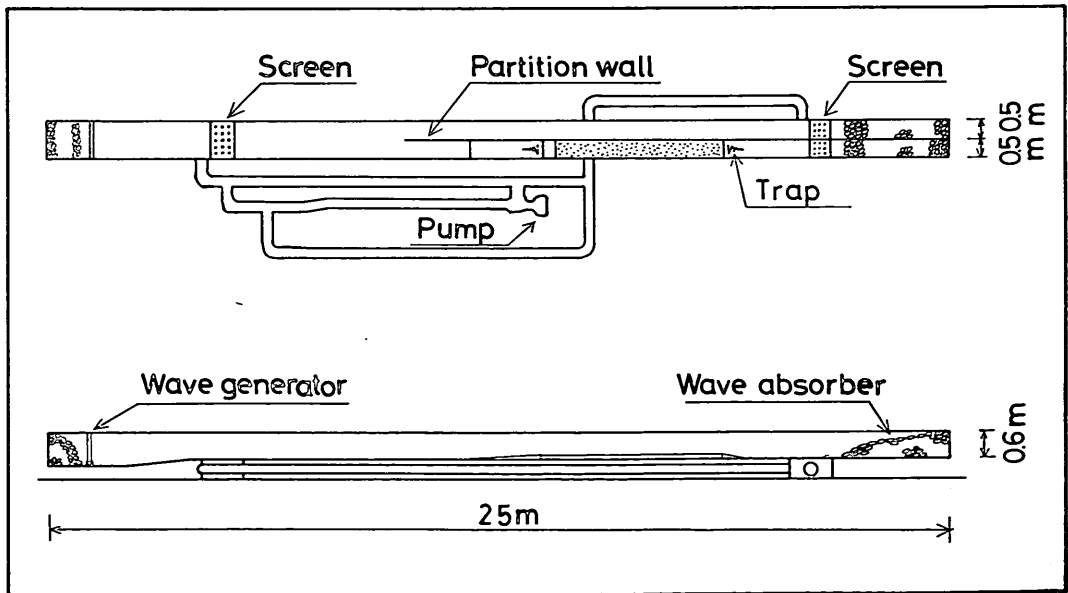


図-1 実験水路

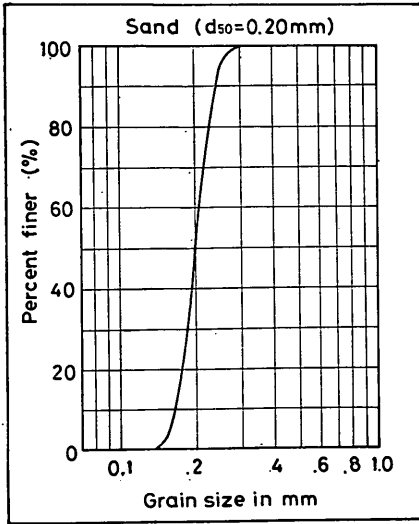


図-2 底質の粒径加積曲線

ようになっている。流れの強さはポンプの回転数により調整した。移動床は、二分されている水路のガラス面側に造波機の岸側14mの位置から4.5mの区間にわたって10cmの厚さで水平に砂を敷きならして造った。実験に用いた底質は、図-2に示す豊浦産の標準砂で、中央粒径 $d_{50}=0.2\text{mm}$ 、比重 $\sigma_s=2.65$ であった。波による変動流速測定には、室内用2成分電磁流速計を用いた。流速計の検出部は、直径1.3cmの球状をしており、時定数0.1s以下、測定可能最大流速3.0m/sである。

浮遊砂濃度の測定には、サイフォンによる採水法及び濁度計を同時に用いた。採水法は、図-3に示す両面ラッ

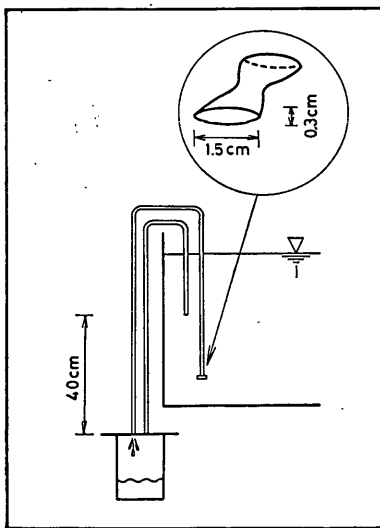


図-3 浮遊砂の採水方法

パ型の吸い込み口、採水管、密閉型ビーカー、圧力補正管から構成される。圧力補正管は、波の峯と谷の通過時の吸い込み流速の差をできるだけ小さくするために用い

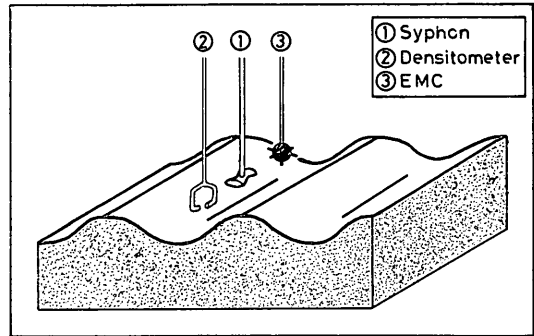


図-4 測定器の設置状態

表-1 実験ケース (波による浮遊砂濃度の測定)

Case	$h(\text{cm})$	$T(\text{s})$	$H(\text{cm})$	$d_{50}(\text{mm})$	$\lambda(\text{cm})$	$\eta(\text{cm})$
B-1	35.0	1.2	15.0	0.2	5.5	0.7
B-2	"	"	14.0	"	4.0	0.7
B-3	"	1.6	15.0	"	8.0	1.2
B-4	"	"	12.0	"	6.5	1.2
B-5	"	"	10.0	"	6.5	1.0
B-6	"	2.0	12.0	"	10.0	1.2
B-7	"	"	10.0	"	9.0	1.2
B-8	"	"	8.0	"	8.5	1.2
B-9	"	1.68	14.0	"	8.5	1.2
B-10	"	"	11.5	"	8.0	1.2
B-11	"	"	8.5	"	6.5	1.0
B-12	30.0	1.56	12.0	"	7.5	1.1
B-13	"	"	10.0	"	7.0	1.2
B-14	"	"	7.5	"	6.0	0.7
B-15	25.0	1.42	10.0	"	7.0	1.0
B-16	"	"	8.0	"	6.0	1.0
B-17	"	"	6.0	"	4.0	0.7
B-18	20.0	1.27	8.0	"	5.5	0.7
B-19	"	"	6.5	"	4.5	0.6
B-20	15.0	1.1	6.0	"	4.0	0.7
B-21	"	1.1	5.0	"	4.0	0.5
C-1	35.0	1.6	14.0	0.07	6.5	1.0
C-2	"	"	10.0	"	6.0	0.9
C-3	30.0	"	13.0	"	6.0	0.7
C-4	25.0	"	10.0	"	6.5	1.0
C-5	"	"	5.0	"	5.0	0.8
C-6	12.0	0.95	5.4	"	3.5	0.5



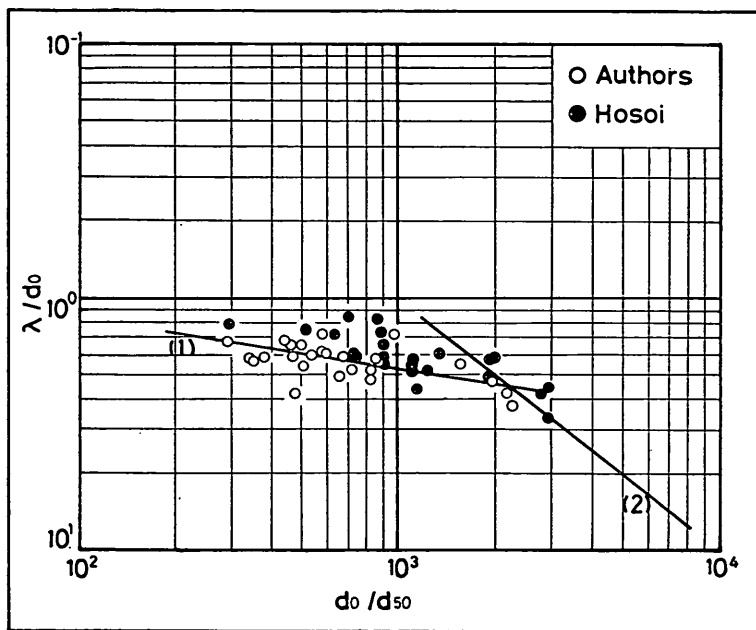


図-5 砂れん波長 $\lambda$

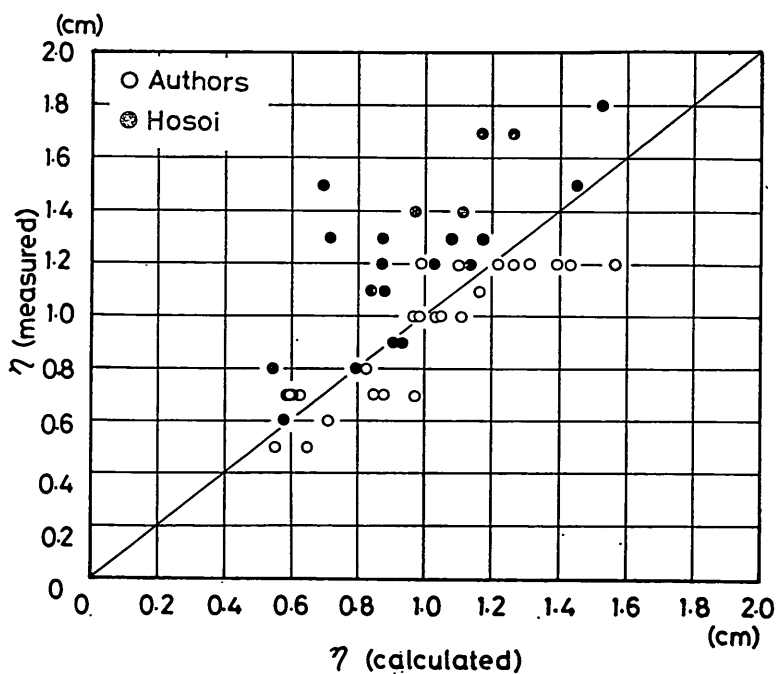


図-6 砂れん波長 $\eta$ の実測値と計算値

ている。この方法での吸い込み流速は、4.4cm/sであり、管内流速は66cm/sであった。濁度計は、その濃度検出部の検出面が2mmφ、検出面間隔が1cmの透過光量減衰方式のもので、応答性は0.05秒であった。測定に際しては、図-4に示すように、流速計、採水ノズル、濁度計を水路幅方向に5cm間隔で設置した。採水ノズルによる採水量は1回あたり約300ccとし、採水時間は150sかかった。流速計、濁度計のデータは、データレコーダに収録し、サンプリング間隔0.017秒でAD変換した。

表-1に実験ケースを示す。

### 2.2 実験結果

#### (1) 砂れんのスケール

浮遊砂濃度は、砂れんのスケールに大きく関係しているものと思われる。したがって砂れん近傍も含めた浮遊砂濃度を調べるに際し、砂れんのスケールについて整理してみた。

図-5は、金子<sup>2)</sup>にならい、実験による砂れん波長 $\lambda$ と水粒子軌道の大きさ $d_0$ との比 $\lambda/d_0$ と、 $d_0$ と底質粒径との比 $d_0/d_{50}$ との関係を示したものである。図中には、細井ら<sup>3)</sup>の結果も黒丸で示してある。図中の実線は、金子が提案している式

$$\lambda/d_0 = 2.1(d_0/d_{50})^{-1/5} \quad (1)$$

および、 $d_0/d_{50} > 1000$ の領域における式

$$\lambda = 1000d_{50} \quad (2)$$

を示したものである。

砂れんの波長 $\lambda$ は、 $d_0$ が一定とした場合、底質粒径が小さくなると減少する傾向を示している。今回の実験で得られた $\lambda$ 及び細井らの $\lambda$ は、金子の提案した(1)式と良い相関がみられた。

砂れんの波高については、本間ら<sup>4)</sup>が次式を提案して

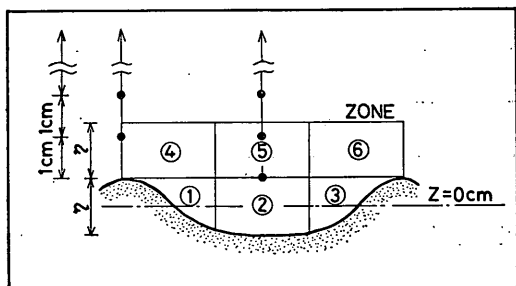
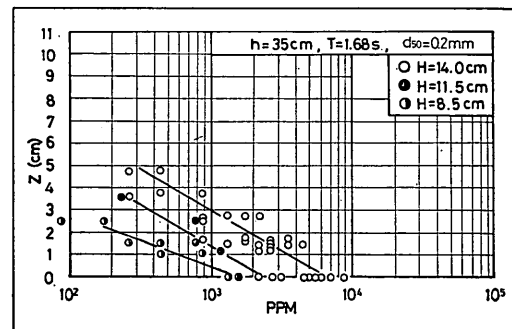
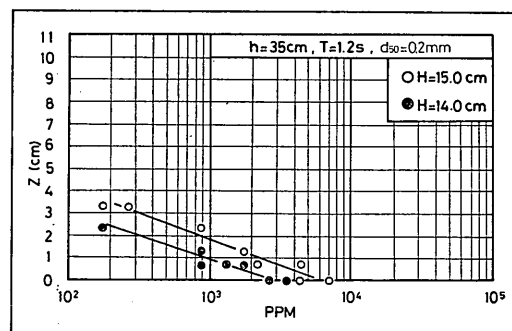
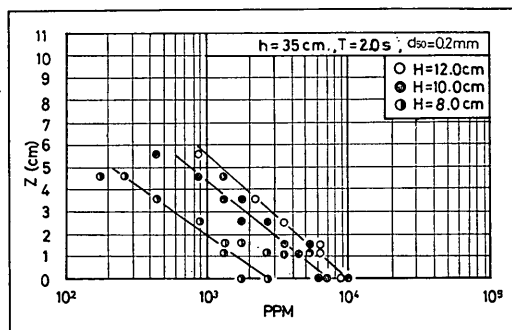
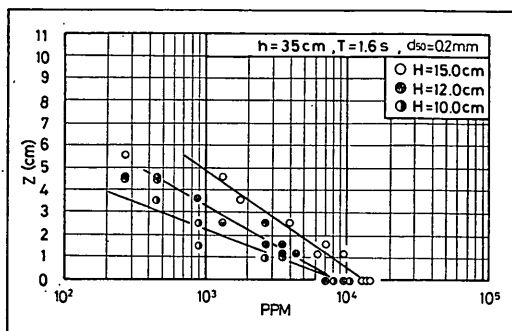


図-7 浮遊砂濃度測定点

図-8 (1) 浮遊砂濃度分布 ( $d_{50}=0.2\text{mm}$ )

砂れん上の底質の浮遊過程を考慮した漂砂観測法に関する実験的研究

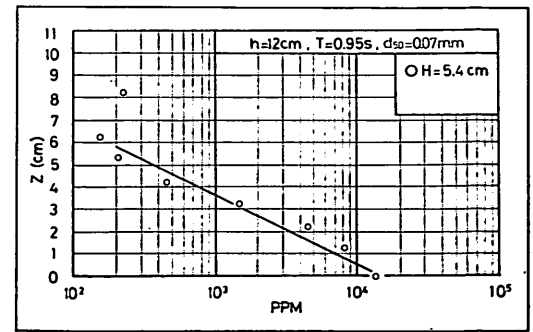
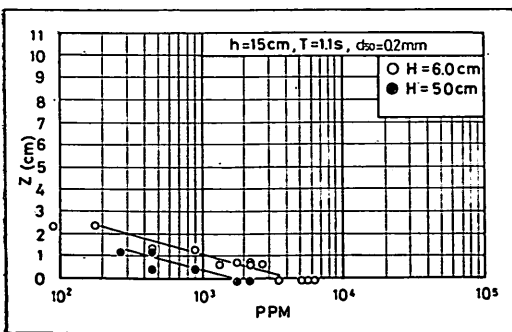
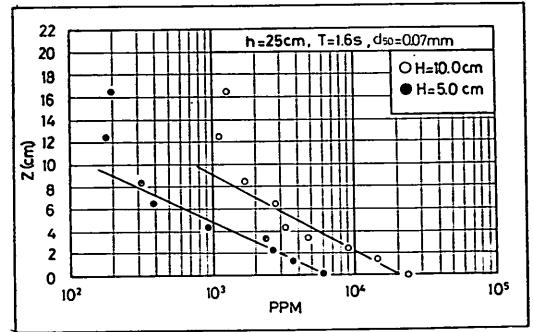
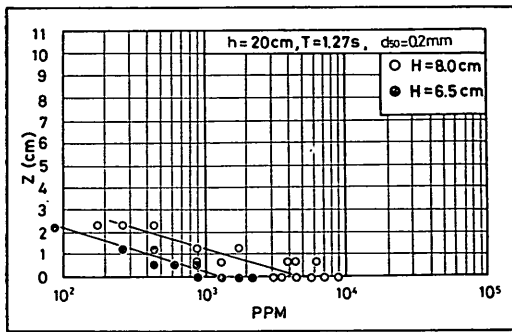
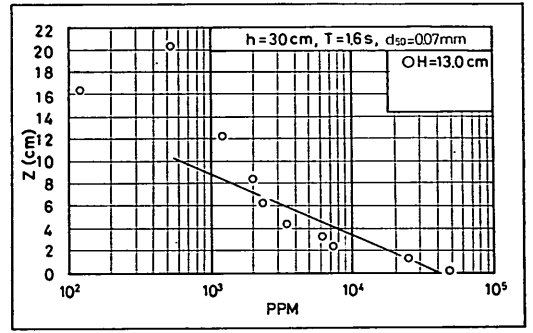
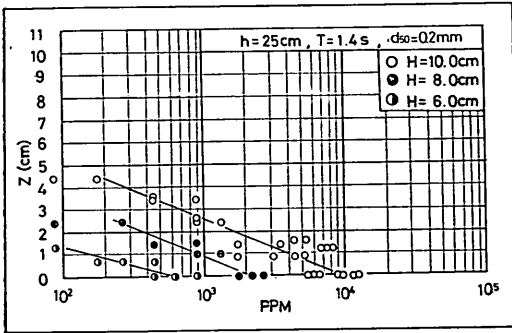
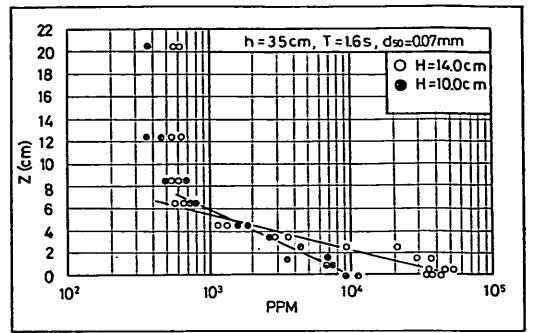
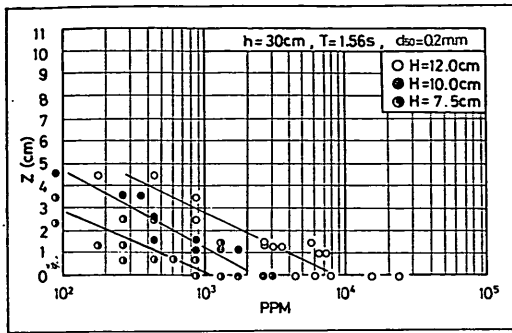


図-8 (2) 浮遊砂濃度分布 ( $d_{50}=0.2\text{mm}$ )

図-9 浮遊砂濃度分布 ( $d_{50}=0.07\text{mm}$ )

いる。

$$\eta = 0.175(\lambda/d_0)^{0.19}\lambda \quad (3)$$

この式から求まる  $\eta$  と、実測値の  $\eta$  との関係を、図-6 に示した。これによれば、今回の実験の方が大き目に出ているように思われるが、(3)式の適用条件を与える底質粒径の定義にある程度の幅があることを考えれば、両者は比較的良い対応をしていると考えてよいであろう。すなわち、今回の実験における砂れんは、特に特異な状況にはなかったことがわかる。

(2) 砂れん近傍の浮遊砂濃度の特性

浮遊砂濃度は、底面の砂れん近傍が最も高く、この部分の底質が波、流れの下での漂砂現象を大きく支配する。したがって、漂砂の定量的測定には、この砂れん近傍の浮遊砂濃度を定量的に表現する方法を明らかにする必要がある。砂れん近傍の浮遊砂は、波により変動する流れの影響で、砂れんの下流側に形成される組織渦に巻き込まれた底質により大部分成り立っている。川又<sup>9)</sup>は、沢本<sup>9)</sup>らの砂れん周辺の組織渦の拡散理論にもとづき、砂れんの頂部より上方へ  $\eta$  ( $\eta$  は砂れんの波高)の範囲が渦層であることを示した。

そこで、図-7に示すように、この渦層に対し、砂れん一波長区間を6つに区分し、各領域内の図心の位置で採水ノズルで採水することにより、浮遊砂の平均濃度を求めた。そしてこの組織渦層内の濃度と上方水中の浮遊砂濃度とがいかなる関係にあるかを調べることにした。上方水中の浮遊砂濃度も採水ノズルより測定した。

図-8(1)~(2)に測定結果を示す。図において、 $z=0\text{cm}$ での浮遊砂濃度が、図-7の①, ②, ③における濃度の面積荷重平均値に相当する。 $d_{50}=0.2\text{mm}$ の標準砂を用いた実験では、浮遊砂濃度分布はほとんどの場合が、片対数グラフで、直線分布となった。興味深いことは、複雑な運動をしている砂れん近傍の浮遊砂濃度 ( $z=0\text{cm}$ ) は、上方の水中の濃度と共に片対数直線分布線上にあることであろう。実験ケースが限られているので、このような関係がすべての場合に成立するとは言い難いが、図-8(1)~(2)に見られる傾向から判断して、砂れん近傍の浮遊砂濃度 ( $z=0\text{cm}$ ) は、近似的に上方水中の濃度分布曲線を、図-7の  $z=0\text{cm}$  の位置まで外挿することで求められるのではないと思われる。

図-9は、底質が  $d_{50}=0.07\text{mm}$  の珪砂を用いた場合の浮遊砂濃度分布を示したものである。図-8の標準砂と異

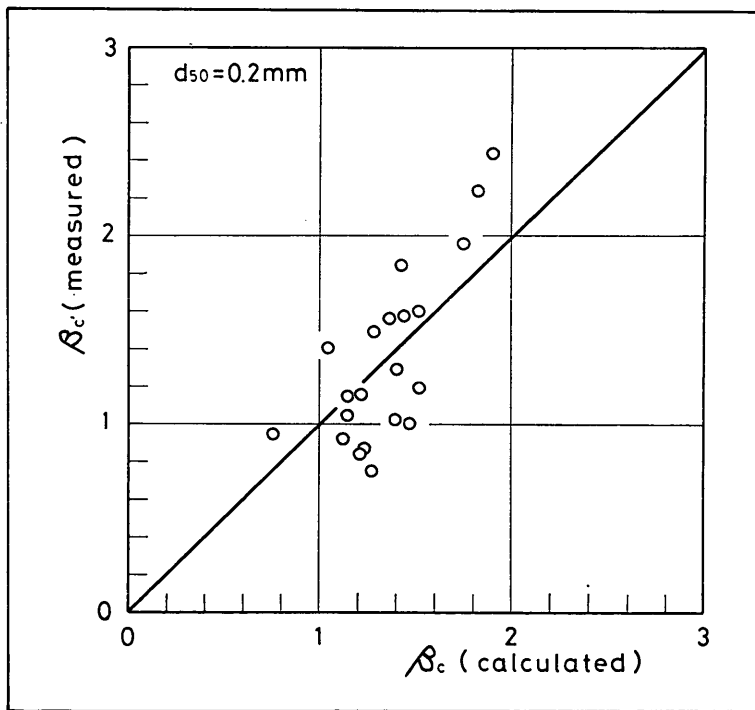


図-10 濃度分布こう配の測定値と計算値

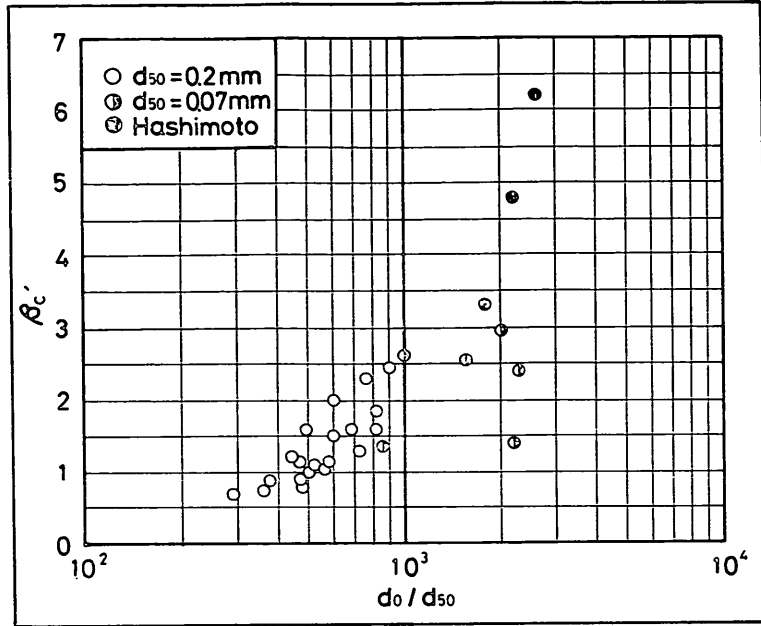


図-11 濃度分布こう配と  $d_0/d_{50}$  との関係

なる点は、水中上方において、濃度がほぼ変化しなく  
 っており、いわば「く」の字型の分布をしていること  
 であろう。これは、珪砂の中に微細な粒子が含まれて  
 おり、これが流体中の乱れにより上方へ巻き上げられ  
 た分が現れているものであろう。しかし、これらの成分  
 の全体に占める割合は非常に少なく、大部分を構成  
 する  $d_{50} = 0.07\text{mm}$  の珪砂は、図のように直線分  
 布で表示され、やはり砂れん近傍の濃度は、水中の濃  
 度と同様直線分布で表示できそうである。

(3) 浮遊砂濃度分布の水理学的諸元による表示

浮遊砂の濃度分布が、どのような水理学的諸元によ  
 り表示し得るかを調べてみた。

Skafel ら<sup>7)</sup>は、浮遊砂濃度分布が片対数グラフ上  
 で直線で近似的に表示できるとし、次式のような実験  
 式を提案している。

$$\bar{C} = \bar{C}_a \exp \left[ -\frac{1}{\beta_c} \cdot (y-a) \right] \quad (4)$$

$$\beta_c = \frac{1}{w} v^* \beta_1 a_m \quad (5)$$

ここに、

$a$ : 基準点高さ (=  $3.0 d_{50}$ )

$\bar{C}_a$ : 基準点高さ  $a$  での浮遊砂濃度

$w$ : 底質の沈降速度 (=  $g(s-1)d_{50}^2/18\nu$ )

$s$  は底質比重,  $\nu$  は動粘性係数

$v^*$ : 摩擦速度 (=  $\sqrt{f_w/2} u_b$ )

$f_w$  は Jonsson の粗度係数,  $u_b$  は底面最大  
 流速

$a_m$ : 水粒子軌道振幅

さらに、 $\beta_1$  は浮遊砂濃度分布の勾配に関する実験定  
 数であり、Skafel らは以下のように求めている。

$$\beta_1 = 8.7 \left( \frac{v^* d_{50}}{\nu} \right)^{-2.2} \quad (6)$$

Skafel らの提案式に今回の実験条件を代入して求め  
 た浮遊砂濃度の勾配  $\beta_c$  と、今回の実験で実際に測定  
 された濃度勾配  $\beta_c'$  とを比較した所、両者は一致しな  
 かった。そこで両者が一致するように実験定数  $\beta_1$  の係  
 数を調整した結果、以下ようになった。

$$\beta_1 = 29.0 \left( \frac{v^* d_{50}}{\nu} \right)^{-2.2} \quad (7)$$

経験定数  $\beta_1$  を上式のように修正した後の  $\beta_c$  と  $\beta_c'$  と  
 の関係を図-10に示した。ばらつきはあるものの、両  
 者は比較的良い対応を示している。 $\beta_1$  に対し、(7)式  
 のような修正が必要であった理由は明らかでないが、少  
 くとも、浮遊砂の濃度分布勾配が(5)式で表示できる  
 ことは確かのようなのである。

次に、浮遊砂濃度分布の勾配の実験値  $\beta_c'$  と砂れん  
 形状を定める要因である  $d_0/d_{50}$  との関係を図-11に  
 示した。図中の白丸、半黒丸、黒丸は、それぞれ  $d_{50} = 0.2$

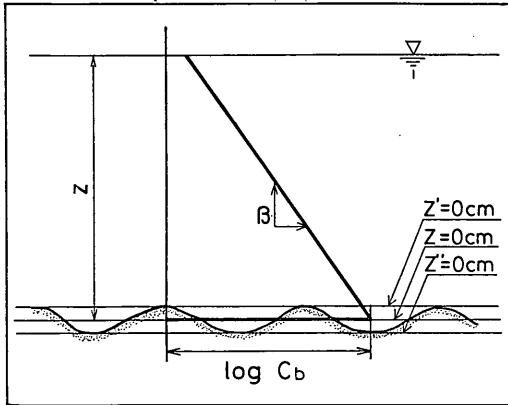


図-12 濃度分布概念図

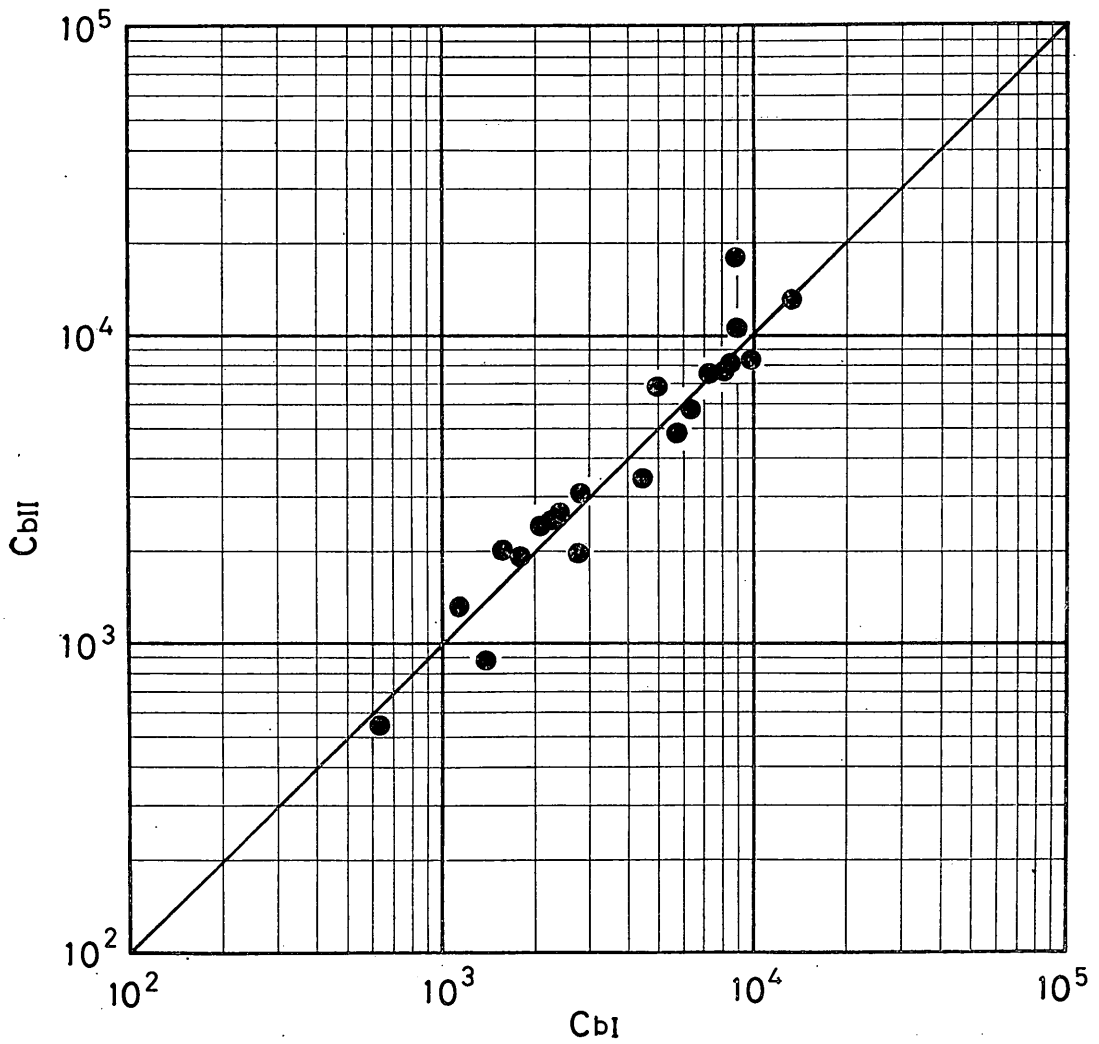


図-13 濃度分布外挿値  $C_{bI}$  と組織渦層内平均濃度  $C_{bII}$  との関係

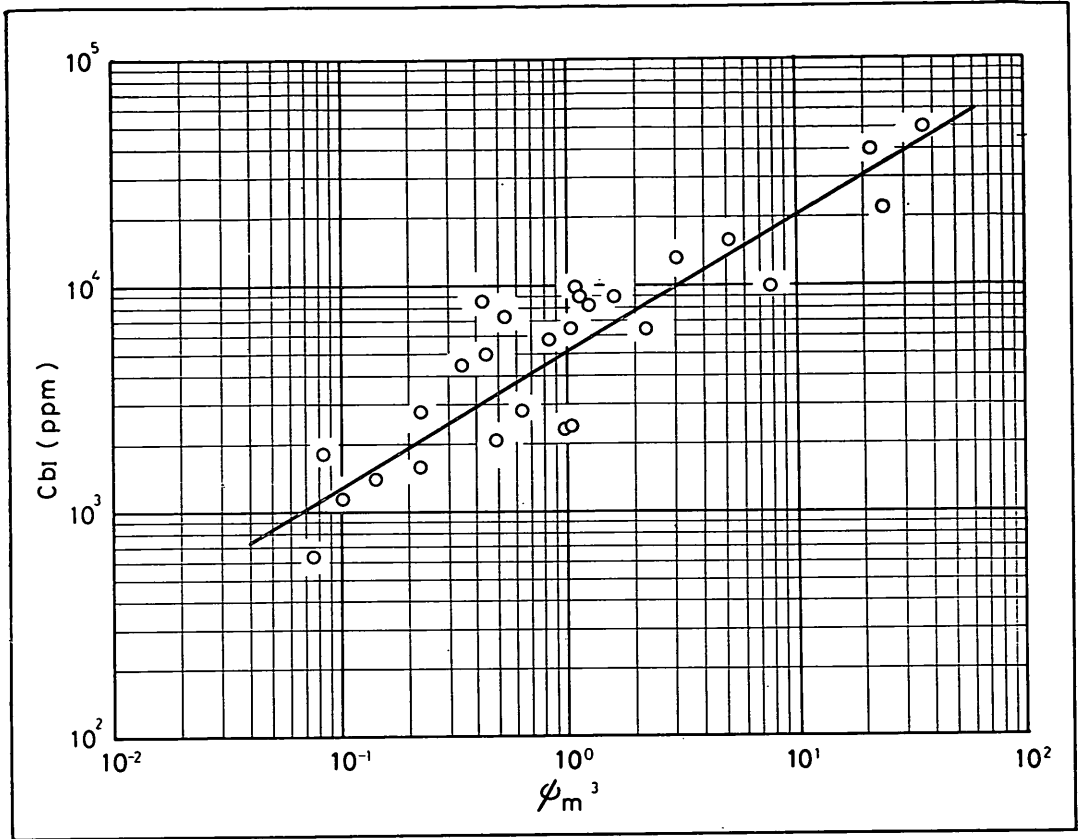


図-14 濃度分布外挿値  $Cb_I$  とシールド数の関係

mm,  $d_{50}=0.07$  mm および橋本ら<sup>9)</sup>の振動流による結果を示している。橋本らの場合は、 $d_{50}=0.27$  mm の底質を用いている。この図より、底質の粒径に対して波のスケールが大きくなるにつれ、浮遊砂の濃度分布が急勾配の分布をなすことがわかり、漂砂現象のスケールが大きくなるにつれ、浮遊状態で移動する量(浮遊漂砂量)が重要になることを示している。

図-10の結果より、浮遊砂濃度分布の勾配は、(5)式で表示し得ることがわかった。また、図-8、図-9より、上方水中の浮遊砂濃度分布曲線上に、底面の砂れん近傍での濃度の値も存在すると近似的に考えることができた。すなわち、図-12に示すような関係があるものと考えられた。ここでは、今少し、このことを調べてみることにする。図-8、9において、浮遊砂濃度分布曲線を外挿して $z=0$  cmでの濃度を $Cb_I$ とする。次に、図-7に示す組織渦層内①、②、③の平均濃度を $Cb_{II}$ とする。 $Cb_I$ と $Cb_{II}$ との関係は、図-13のようになる。両者は非常に相関度が高いことから、組織渦層内の平均濃度 $Cb$ と、

水中の浮遊砂濃度勾配 $\beta$ との関係が、図-12のように表されることが確認できる。

この砂れんによる組織渦層内の浮遊砂の濃度は、砂れんの上流側から掃流状態で運ばれてきた底質が、下流側の組織渦に巻き込まれることにより発生するものである。川又、柴山ら<sup>9)</sup>は、Brownの式と同様の考え方に立ち、組織渦内に巻き込まれる底質量が、シールド数の3乗で表され得るとした。

本実験により、浮遊砂濃度鉛直分布を $z=0$  cmに外挿することにより求めた $Cb_I$ と、実験条件を代入して求めたシールド数、すなわち

$$\Psi_m = f_w u_b^2 / 2(s-1)gd_{50} \quad (8)$$

の3乗との関係を示したのが図-14である。

ただし、

$f_w$ : Jonssonの粗度係数

$u_b$ : 底面における水粒子速度の最大値

$s$ : 底質の比重

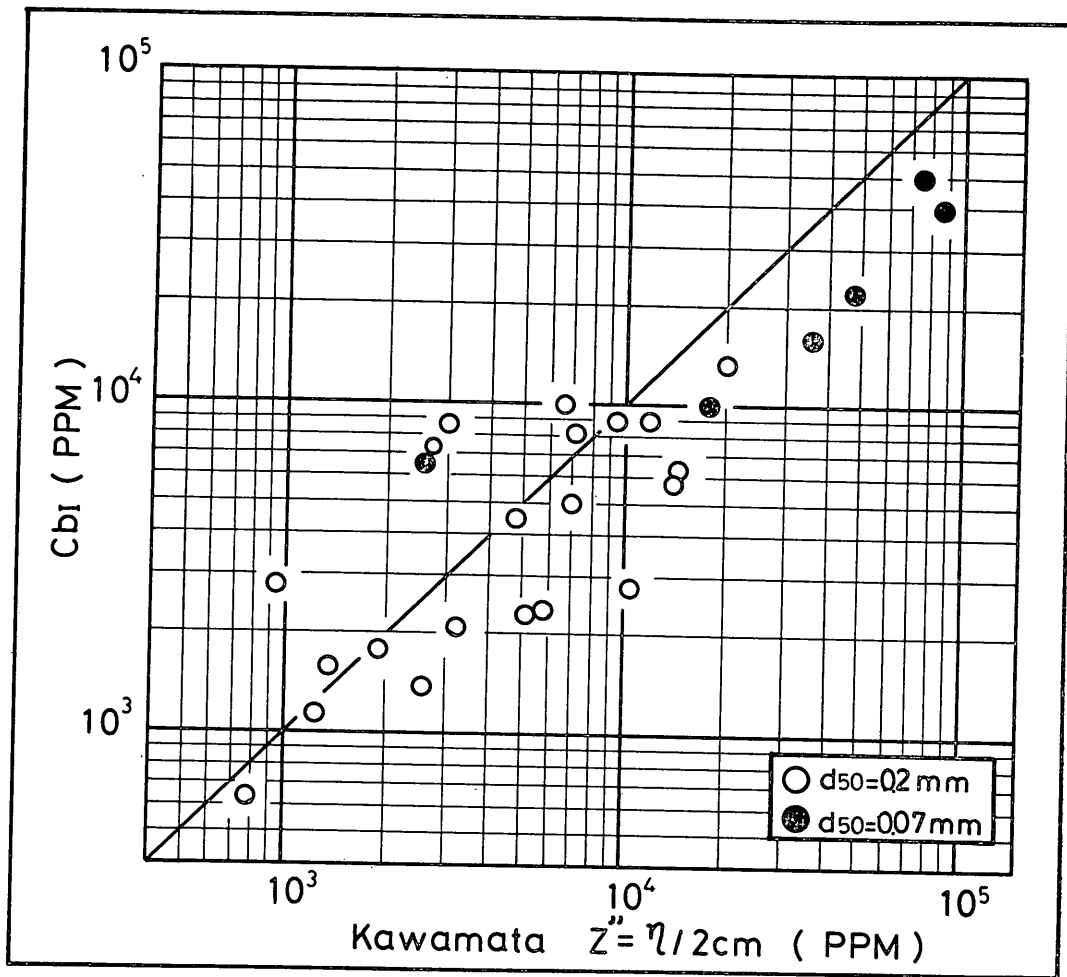


図-15 濃度分布外挿値  $C_{bI}$  と川又の結果  $C$  との関係

$g$ : 重力の加速度

$d_{50}$ : 底質の粒径

である。図のように、砂れん近傍の浮遊砂濃度  $C_{bI}$  とシールド数との間には十分高い相関が見られるようである。この関係を式で表すと、

$$C_{bI} = 5000(\phi_m^3)^{0.6} \quad (9)$$

となる。

砂れん近傍の浮遊砂濃度分布について、川又は次式を与えている。

$$C/C_a' = A\gamma\phi_m^3 \quad (10)$$

ここに、

$$C_a' = \rho_s g d_{50} / a_m$$

$$\gamma = (z''/z_0'')^{-w/K\alpha^*u_{bm}^*}$$

$$A = 600$$

$$z_0'' = 0.029 d_0$$

$$u_{bm}^* = \sqrt{\frac{f_w}{2}} u_b$$

$$K = 0.4$$

$$\alpha^* = 1$$

$$\rho_s g = 2.65$$

であり、 $z''$ は、砂れんの谷を基準点としている。また、 $\phi_m$ を求めるときの  $f_w$ は、粗度高さ  $k$ を  $k = d_{50}$ とし、 $u_{bm}^*$ を求めるときの  $f_w$ は、 $k = 30z_0$ として求めた。

上式に、今回の実験条件を入れて  $C(z'' = \eta/2)$ 、すなわち  $z = 0$  cm) を求め、今回の砂れん近傍の濃度  $C_{bI}$  との関係を示したのが 図-15 である。両者の対応は非常に



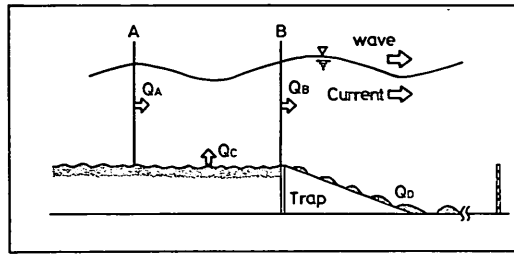


図-16 トラップ形状

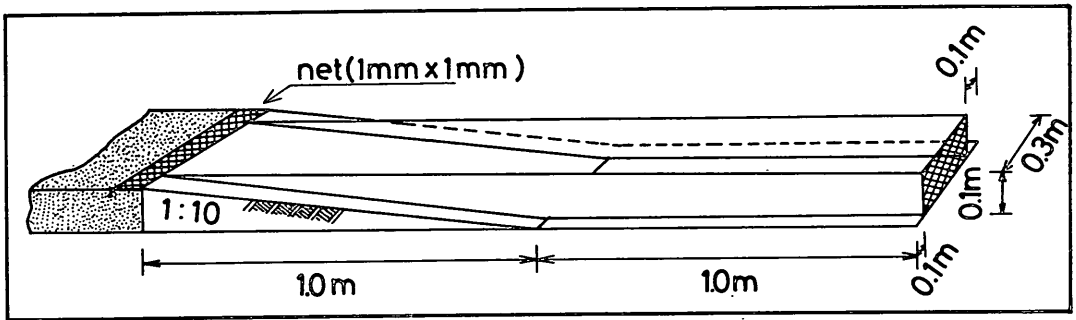


図-17 実際に用いたトラップ

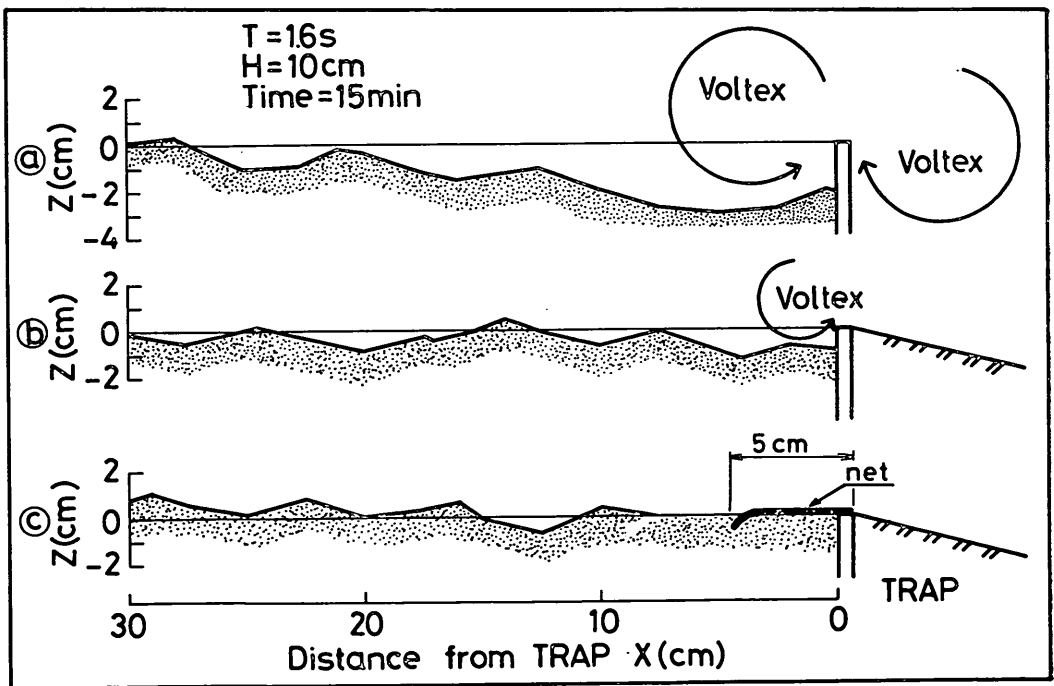


図-18 トラップ前面の地形 ( $h=35\text{cm}$ ,  $T=1.6\text{s}$ ,  $H=10\text{cm}$ )

良く、浮遊砂の濃度分布を外挿して  $z=0\text{cm}$  の位置で求めた砂れん近傍の濃度  $C_{0I}$  が、妥当なものであることがわかる。

以上のように、室内実験によれば、図-12 に示すように、水中の浮遊砂濃度の分布と砂れん近傍での浮遊砂濃度とが、比較的簡単な方法で表わし得ることが明らかとなり、漂砂の現地観測法にもこれらの考えが適用され得るであろう。

### 3. 波の進行方向に流れが存在する場合の浮遊砂の特性に関する実験

#### 3.1 実験方法及び実験ケース

岸沖方向の漂砂において、波により振動運動をする漂砂の中から岸沖の漂砂量を識別して測定する方法を検討するため、実験水路内で、波の進行方向に定常流を起こし、岸沖方向の波と流れが共存する場合での全漂砂量を測定した。そして、この全漂砂量が、浮遊砂を測定することでのどの程度評価できるのか、全漂砂量に占める浮遊砂量の割合などについて検討した。そのため、図-16 に示すようなトラップを、水路内水平移動床の岸側端に設置した。図において、断面Aから入って来る漂砂量  $Q_A$  と、断面Bから出て行く漂砂量  $Q_B$  と、AB 間で生じた地形変化量  $Q_C$  との間には、次のような関係がある。

$$Q_B - Q_A = Q_C \quad (11)$$

さらに、断面Bを通過した漂砂量  $Q_B$  は、トラップに捕砂された量  $Q_D$  に等しいと考えることができる。

$$Q_B = Q_D \quad (12)$$

したがって、

$$Q_A = Q_D - Q_C \quad (13)$$

で表される。ここで、 $Q_D$  及び  $Q_C$  は測定可能な値であるから、 $Q_A$  を求めることができる。実際に用いたトラップを図-17 に示す。トラップはアクリル板で製作し、長さ1mの斜路部（上面に粗度をつけるため、砂をラッカースプレーで吹きつけた）と、長さ1m、幅0.3m、深さ0.1mの水平床部で構成される。トラップ背後には、捕えた砂が岸側に出ないように目の細かな金網を取り付けた。トラップ前面の金網の長さは、図-18 に示すように、周期1.6秒、波高10cmの波を作用させ、その地形変化から定めた。この金網は、砂の乱れ防止に有効であった。

実験ケースは、表-2 に示す12ケースである。水深、周期、底質粒径をそれぞれ  $h=35\text{cm}$ 、 $T=1.6$  秒、 $d_{50}=0.2\text{mm}$  と固定し、波高  $H$  と流れ  $U_s$  を変化させた。

### 3.2 実験結果

#### (1) 波と流れが共存する場合の流速分布

波と流れが共存する場合において、正味の漂砂量を測定する方法を検討するため、水路内で波の進行方向に定常流を発生させ、これに波を作用させることにより平均流の流速分布、浮遊漂砂量の鉛直分布を調べた。

まず、波は作用させず、定常流のみ発生させたときの流速分布を、水路の長手方向及び側面から見た場合について示したのが、図-19及び図-20である。図-20の流速分布は水路中央におけるものである。水路内の流れは、側壁の影響をかなり受けている。以後の実験ケースの表示においては、水路中央部において、流速の一樣となる高さでの流速をとり、 $U_s = 5\text{cm}$ 、 $10\text{cm}$ 、 $12.5\text{cm}$  と示

表-2 実験ケース（波と流れが共存する場合での漂砂量の測定）

Case	$h$ (cm)	$T$ (s)	$H$ (cm)	$U_s$ (cm/s)	$d_{50}$ (mm)	$Q_A$	$q_s$
A-1	35.0	1.6	14.8	0.0	0.2	○	
A-2	"	"	13.4	"	"	○	
A-3	"	"	11.1	"	"	○	
A-4	"	"	13.7	5.0	"	○	○
A-5	"	"	11.8	"	"	○	○
A-6	"	"	10.0	"	"	○	○
A-7	"	"	13.3	10.0	"	○	○
A-8	"	"	11.6	"	"	○	○
A-9	"	"	9.9	"	"	○	○
A-10	"	"	12.8	12.5	"	○	○
A-11	"	"	11.2	"	"	○	○
A-12	"	"	9.5	"	"	○	○

○測定

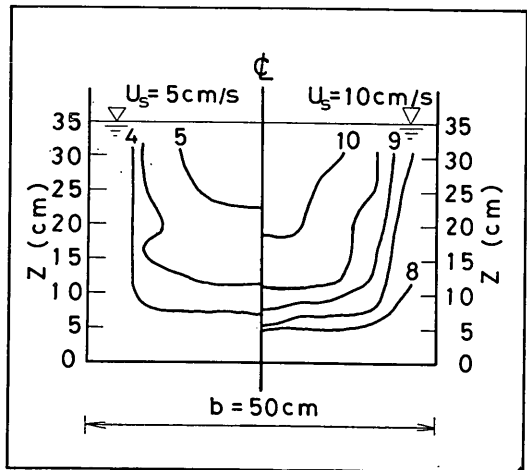


図-19 流れの断面分布 ( $U_s=5, 10\text{cm/s}$ )

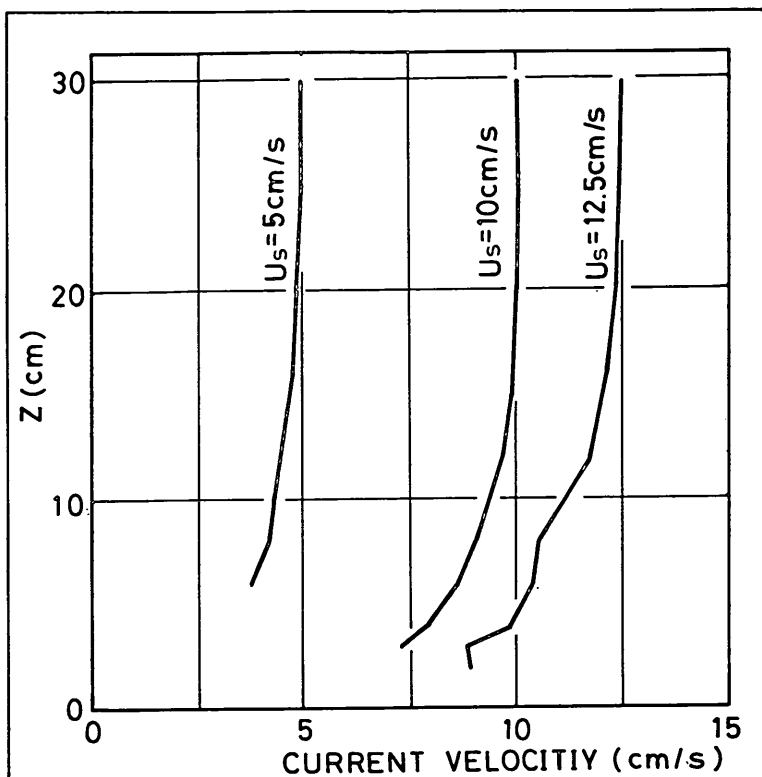


図-20 水路中央における流れの鉛直分布 ( $U_s=5, 10, 12.5$  cm/s)

すことにする。

図-21は、各ケースにおけるトラップ沖側端から沖向きへかけての実験中の波高分布を示したものである。図のように、すべてのケースにおいて部分重複波が発生し、その反射率は各ケースにより異なるものの、平均約9%であった。図中右側端に示す、A、Bの位置が、図-16に示した断面A、Bの位置に相当する。漂砂量算定断面Aは、すべてのケースで、部分重複波の腹近くに相当していた。

波と流れを共存させた場合、波高は流速に依って変化した。図-22は、流速  $U_s$  の定常流と共存する波高の変化を示したものである。流速の増大と共に波高は減少しているのがわかる。

図-23は、波に流れが加わった場合の平均流速の鉛直分布を、砂れん頂部を  $z'=0$  cm として表したものである。図中の白丸、黒丸は各々に砂れんの峯上、谷上での測定結果を示している。平均流の測定は、図-4に示す要領で電磁流速計を用いて各高さにおいて変動流速を測定し、0.017秒でデータサンプルをおこない平均値を求め

た。図によれば、同じ定常流  $U_s$  を発生させた場合でも、波高によって底面近くの平均流が変化しているように見える。しかし、これが実際に変化したのか、それとも底面組織渦に対する電磁流速計の応答能力の相違などの他の理由によるものかは、この実験の範囲では明らかにすることができなかった。

#### (2) 砂れんの形状及びスケール

図-16において、 $Q_C$ の算定のため、断面A、B間の底面形状を測定した。測定結果を図-24(1)~(4)に示す。測定は、水路横断方向に5cm間隔で設置した測線に沿って、砂れんの峯と谷の高さを測定することによった。図中の実線は、全漂砂量  $Q_D$  測定直前の地形を示し、破線は、実験終了直後の地形を示している。また、実験開始前の砂れんの空部を水路横断方向に点線で結んでおいた。砂れんの空がほぼ直線上に並んでいる様子から、砂れんの二次元性が保たれていると考えられる。

図-24から、各波高ごとに、砂れんの波高を整理したのが図-25である。各ケースごとに砂れんの波高のばらつきは大きい、砂れんの高さ  $\eta = 1.5 \sim 2.0$  cm 程度で

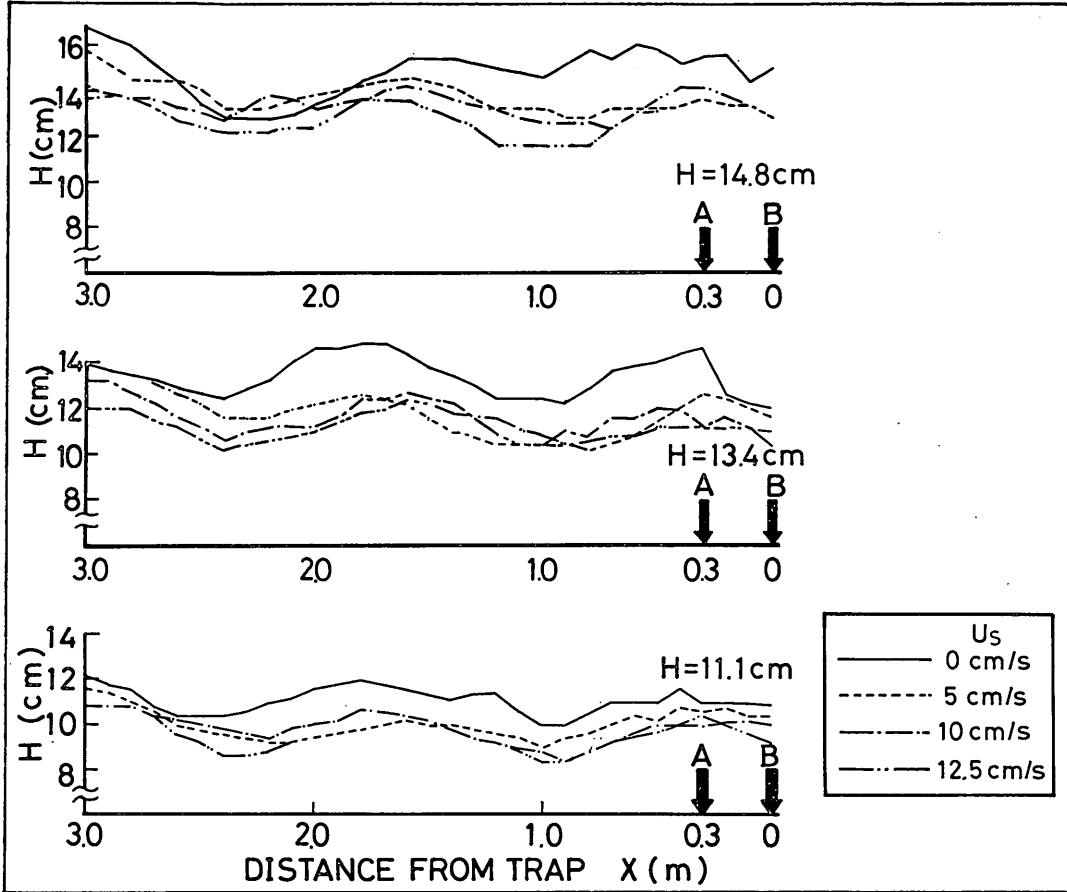


図-21 波高分布

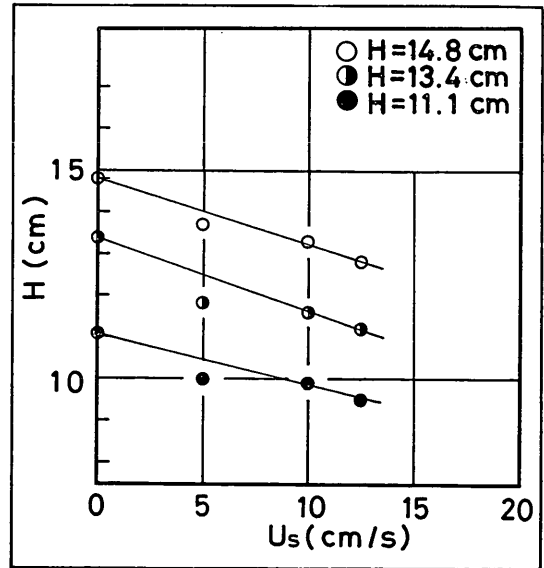


図-22  $U_s$  に対する波高の変化

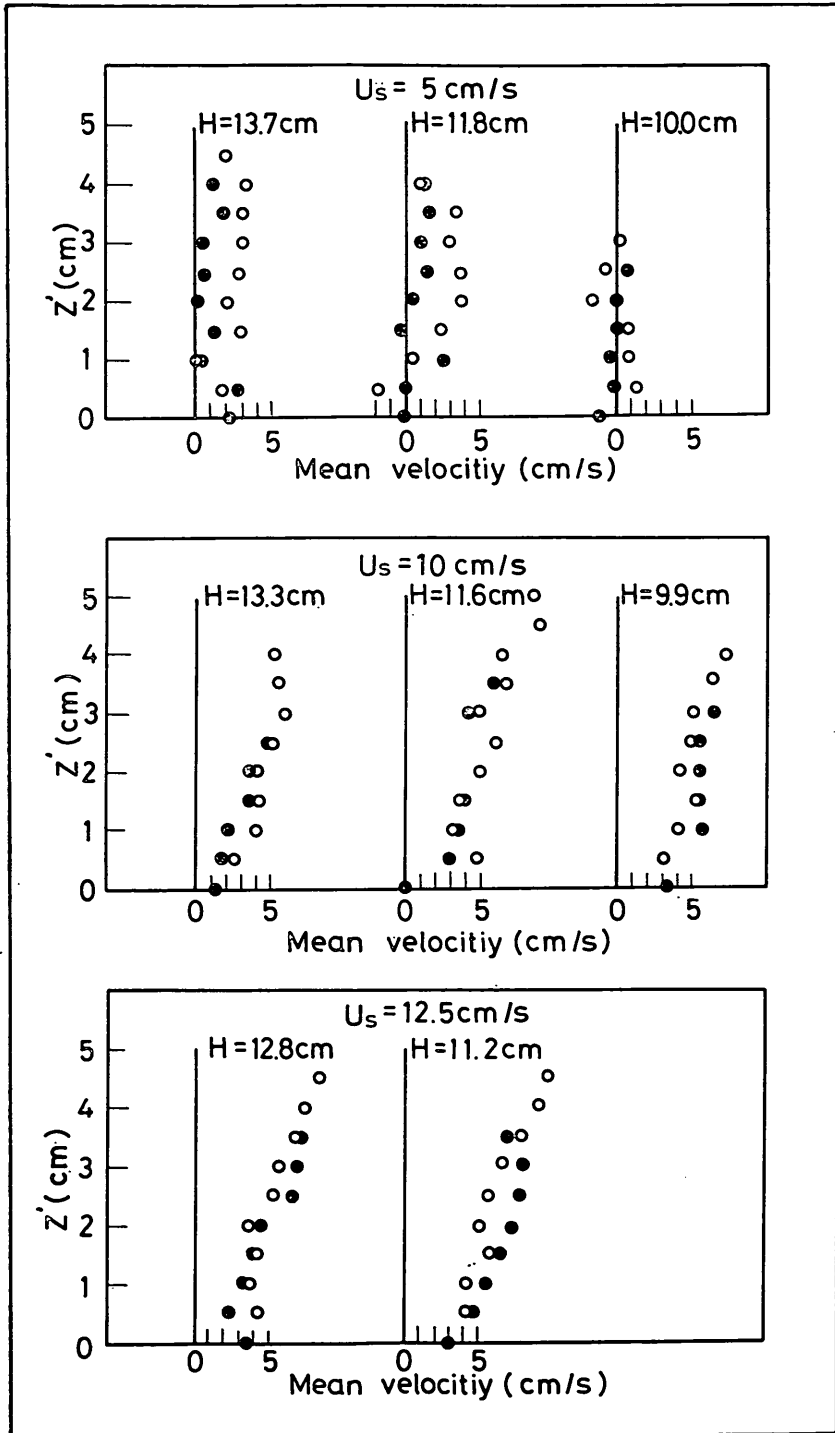


図-23 平均流速の鉛直分布 ( $U_0 = 5 \text{ cm/s}$ ,  $10 \text{ cm/s}$ ,  $12.5 \text{ cm/s}$ )

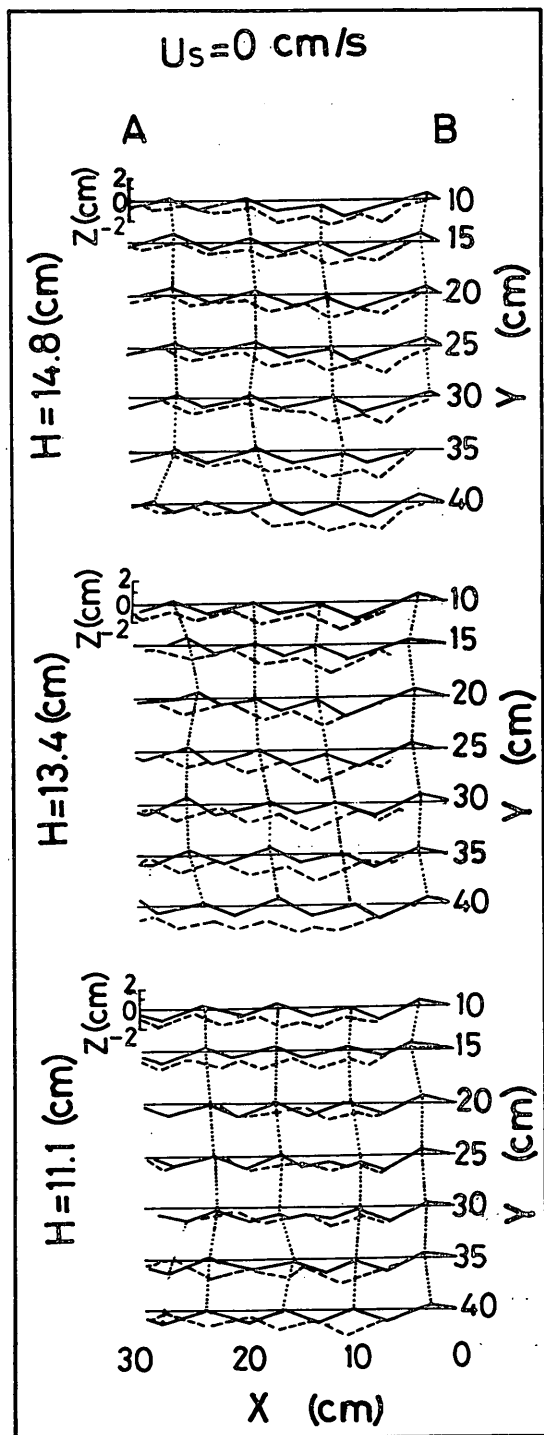


図-24(1) 底面形状 ( $U_s = 0 \text{ cm/s}$ )

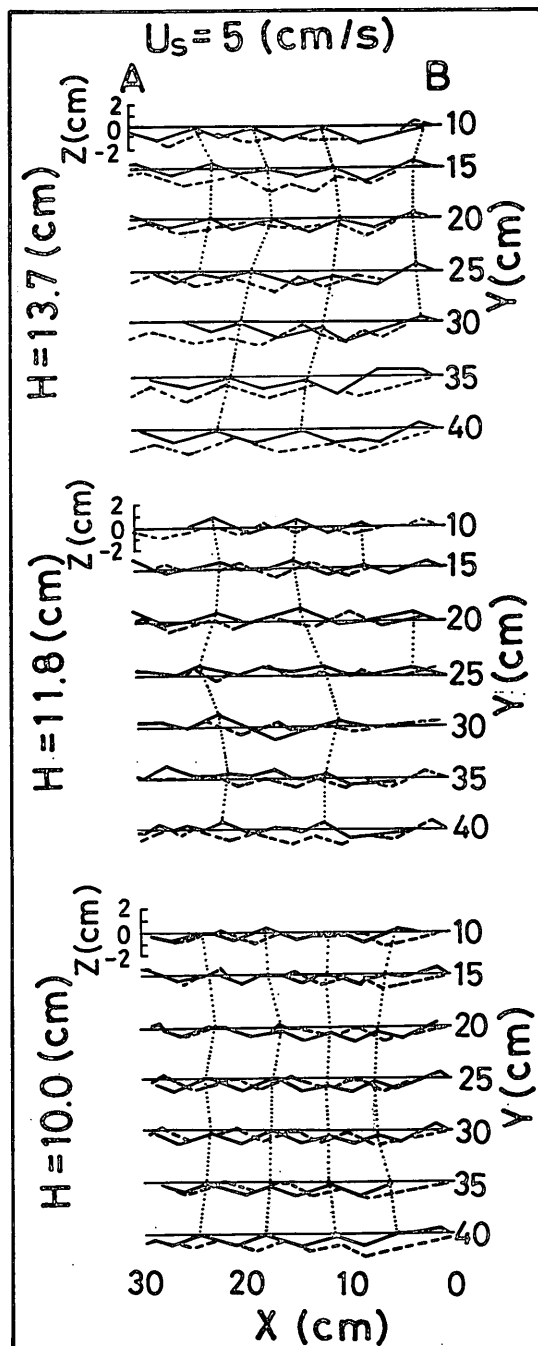


図-24(2) 底面形状 ( $U_s = 5 \text{ cm/s}$ )

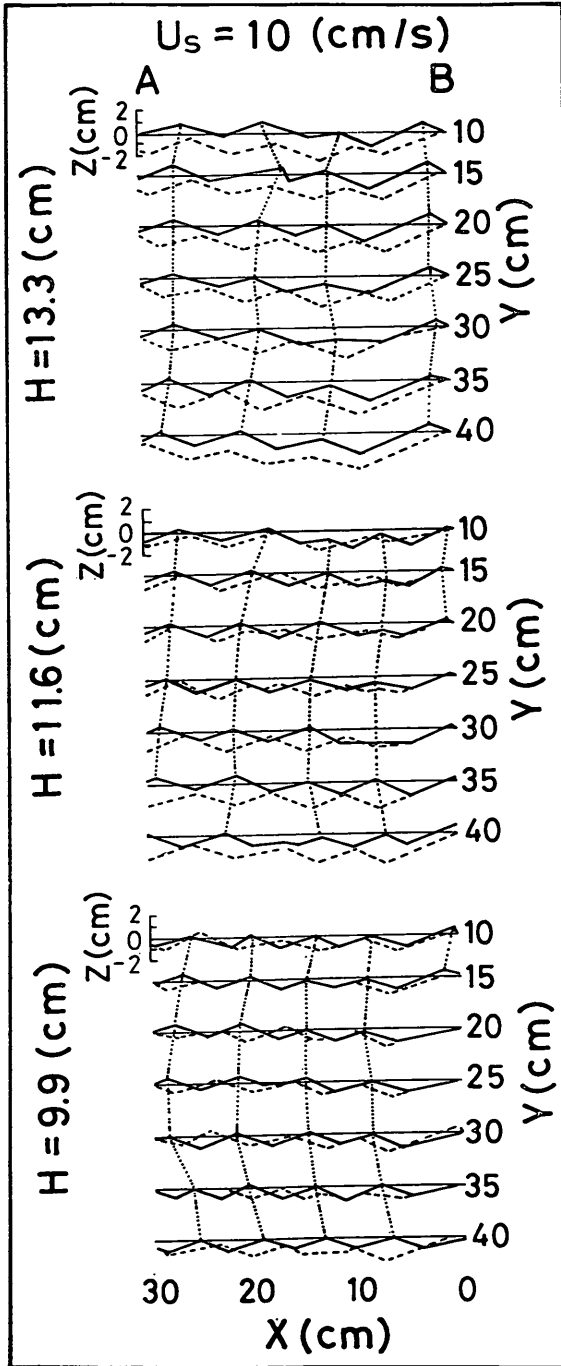


図-24(3) 底面形状 ( $U_s = 10 \text{ cm/s}$ )

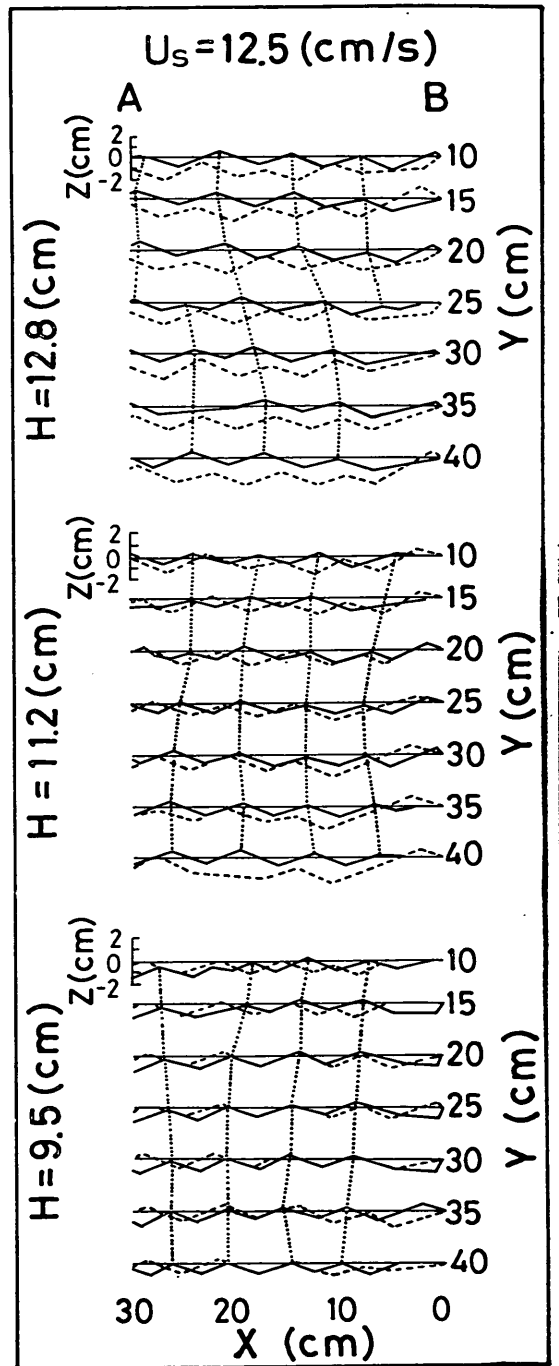


図-24(4) 底面形状 ( $U_s = 12.5 \text{ cm/s}$ )

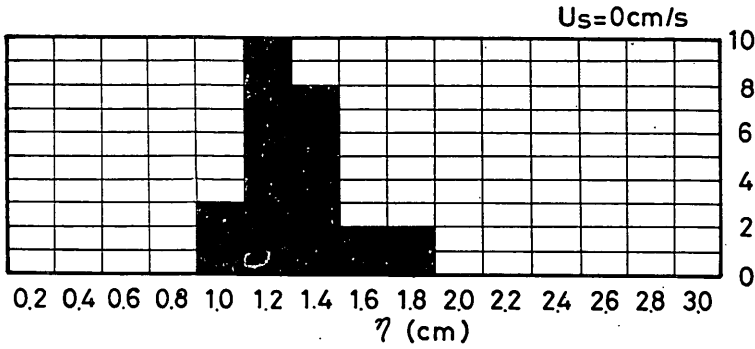


図-25(1) 砂れん波高  
( $U_s = 0 \text{ cm/s}$ )

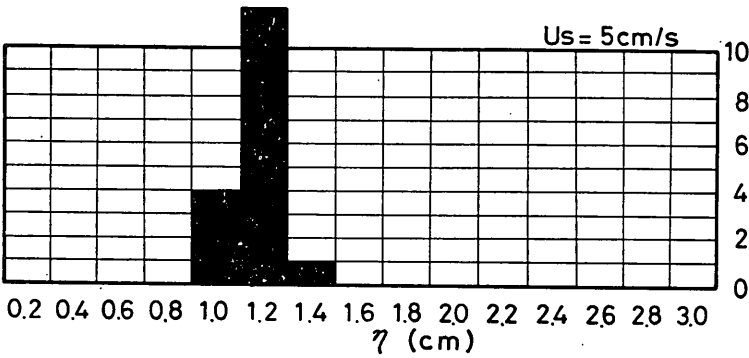


図-25(2) 砂れん波高  
( $U_s = 5 \text{ cm/s}$ )

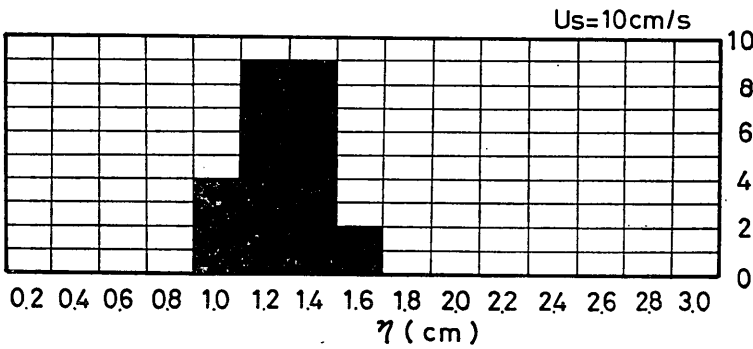


図-25(3) 砂れん波高  
( $U_s = 10 \text{ cm/s}$ )

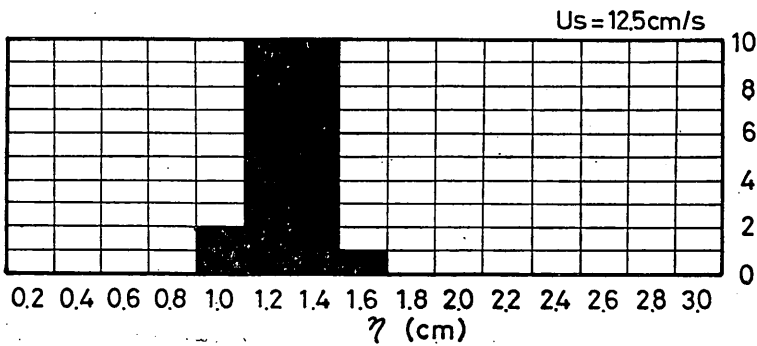


図-25(4) 砂れん波高  
( $U_s = 12.5 \text{ cm/s}$ )



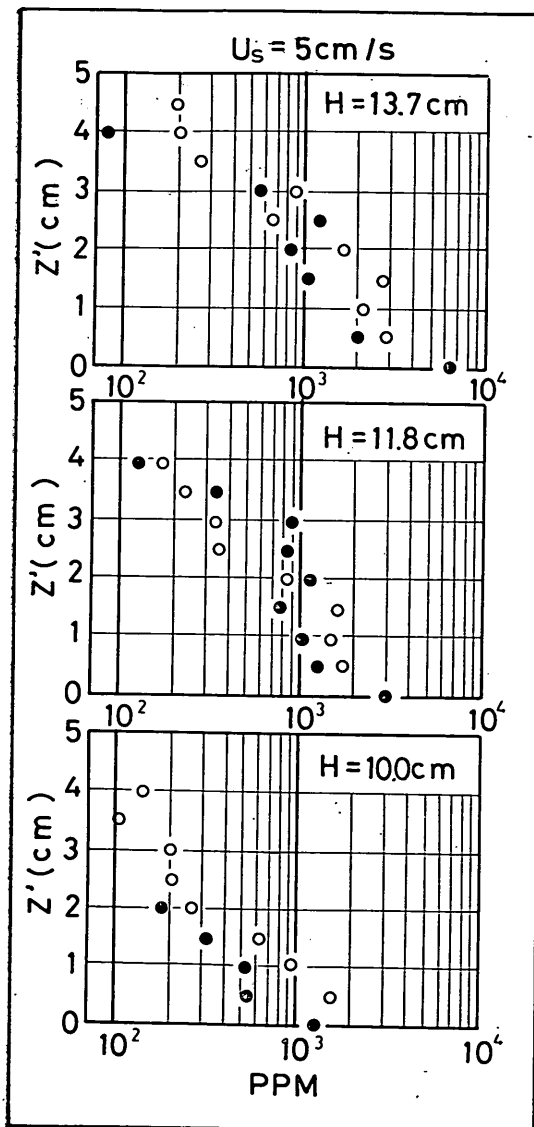


図-26(1) 浮遊砂濃度分布 ( $U_s = 5 \text{ cm/s}$ )

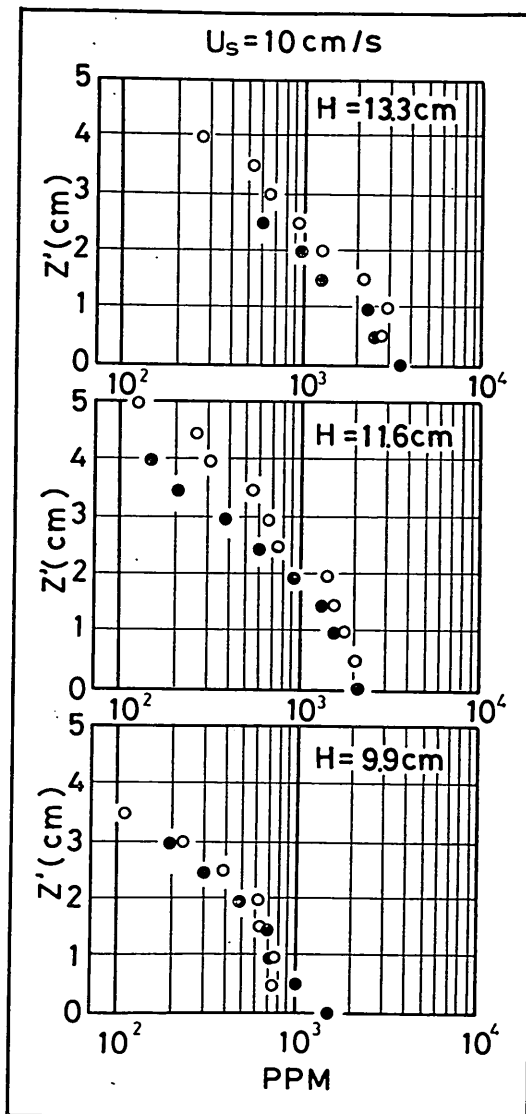


図-26(2) 浮遊砂濃度分布 ( $U_s = 10 \text{ cm/s}$ )

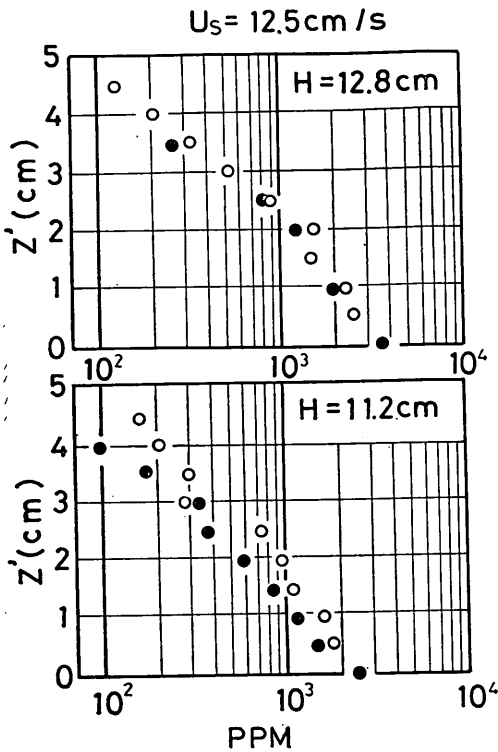


図-26(3) 浮遊砂濃度分布 ( $U_s=12.5\text{ cm/s}$ )

あることがわかる。

(3) 浮遊砂の濃度分布

図-16の断面Aにおいて採水ノズルにより、測定した浮遊砂濃度の鉛直分布を図-26(1)~(3)に示す。図中の白丸、黒丸は、それぞれ砂れんの峯上、谷上での測定値を

示している。浮遊砂濃度は、流れが共存する場合でも、片対数グラフ上ではほぼ直線状の分布を示している。また、砂れんの谷上、峯上での測定値の相違は、谷上における方がやや小さめに見えるが、それほど明確な差異は認められない。

浮遊砂の濃度は、本実験の定常流の流速の範囲では、定常流の影響が小さいようである。

波と流れの共存する場合の浮遊砂濃度についての経験式としては、いくつかのものがあるが、ここでは、底面濃度の定義が今回の研究と類似した Bijker<sup>18)</sup>の方法による濃度式で、検討してみる。

Bijkerによれば、浮遊砂の濃度分布は、

$$C = C_b \exp(-wz/\epsilon) \quad (14)$$

で表されるものと仮定し、底面における浮遊砂濃度を次式で表している。

$$C_b = \frac{Bd_{50}}{6.34k} \cdot \exp \left[ \frac{-0.27 \cdot \Delta \cdot d_{50} \cdot Ch^2}{\mu V^2 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{\xi M_b}{V} \right)^2 \right\}} \right] \quad (15)$$

ここに

- $\epsilon$ : 鉛直方向拡散係数
- $w$ : 底質の沈降速度
- $B$ : 経験定数 ( $\approx 5.0$ )
- $k$ : 底面粗度深さ
- $\Delta$ : 見掛の底質比重 ( $= 1.65$ )
- $\mu$ : リップル係数
- $Ch$ : シェジューの係数
- $V$ : 平均流速で、これは断面平均流速を計算した
- $\xi = Ch\sqrt{f_w/2g}$

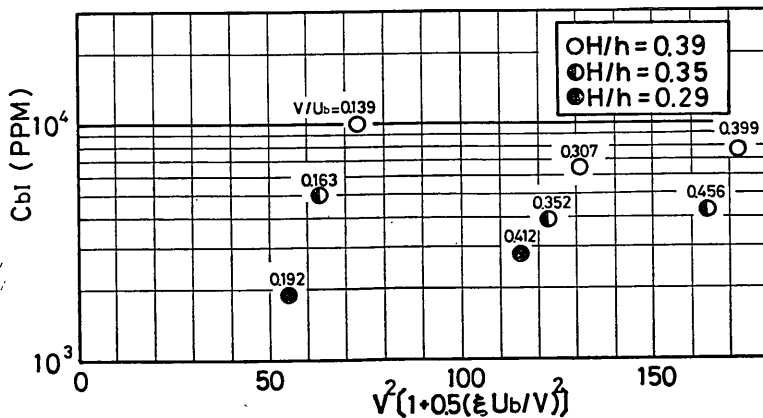


図-27 濃度分布外挿値  $C_{bI}$  に対する流れの影響

$f_w$  は Jonsson の粗度係数  
 $u_b$ : 底面における水粒子最大速度

$$= \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{1}{\sin h \left( \frac{2\pi h}{L} \right)}$$

である。

このうち、波、流れに関係する量は、

$$V^2 [1 + \frac{1}{2} (\xi \cdot u_b \cdot / V)^2]$$

であるので、本実験の範囲内で、この値と水中の浮遊砂濃度分布曲線を底面まで外挿して求めた濃度  $C_{bI}$  との関係を示したのが、図-27である。Bijker の式によれば図の横軸が増大すれば、 $C_{bI}$  は増加する関係にあることになるが、今回のデータでは、減少または増大の両方の傾向を示し、有意な傾向は見出せない。すなわち、図-26(1)~(3)に示す流れの範囲では、流れの浮遊砂に対する効果はほとんど無かったものと考えられる。

(4) 浮遊漂砂量の鉛直分布

ある特定の空間を通過する浮遊漂砂量は、その位置に

おける流速及び濃度の瞬時値、 $u(t)$ 、 $c(t)$  が時間連続的に測定されておれば、次のように表される。

$$\begin{aligned} \phi_s &= \frac{1}{wd} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot c(t) dt \\ &= \frac{1}{wd} \cdot \bar{u} \cdot \bar{c} \end{aligned} \quad (16)$$

ここに、 $w$ 、 $d$ 、 $T$  は、それぞれ浮遊砂の沈降速度、粒径及び波の周期であり、浮遊漂砂量は無次元化して示したものである。

浮遊漂砂量はまた、流速と濃度の時間平均値により、

$$\begin{aligned} \bar{\phi}_s &= \frac{1}{wd} \cdot \frac{1}{T^2} \int_0^T u(t) dt \cdot \int_0^T c(t) dt \\ &= \frac{1}{wd} \cdot \bar{u} \cdot \bar{c} \end{aligned} \quad (17)$$

としても表される。

そこで、本実験では、これらの浮遊漂砂量の表示方式が、どの程度的確に浮遊漂砂量を表示するものであるか

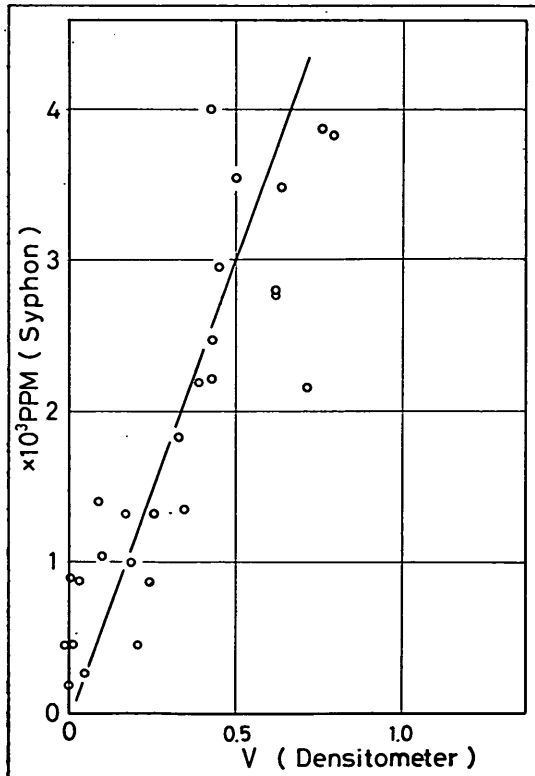


図-28 検定曲線 (採水深度と濁度計出力電圧)

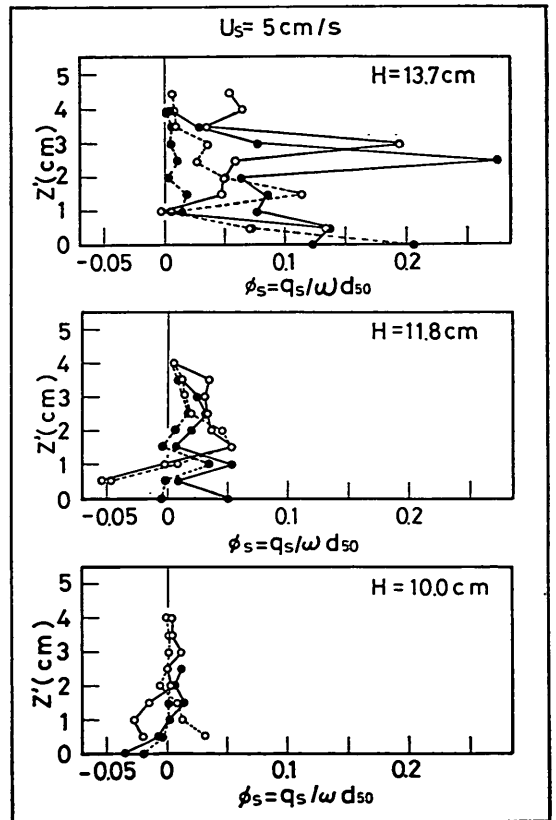


図-29  $\phi_s$  と  $\bar{\phi}_s$  の鉛直分布 ( $U_s = 5 \text{ cm/s}$ )

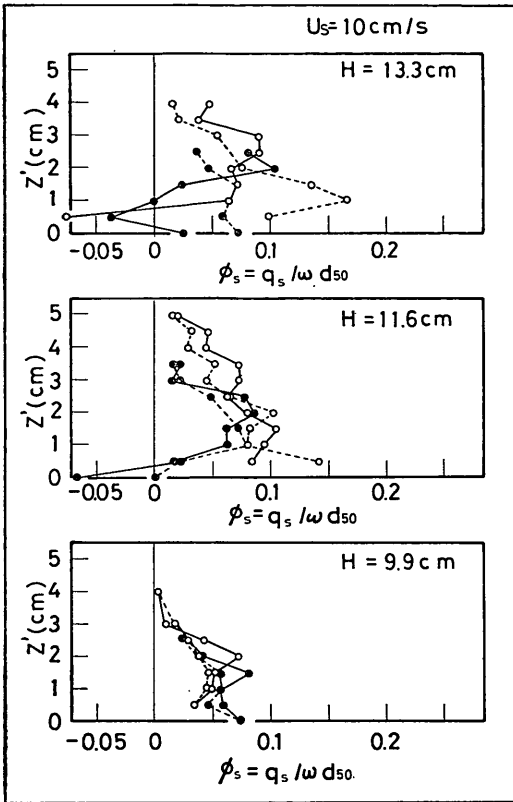


図-30  $\phi_s$  と  $\bar{\phi}_s$  の鉛直分布 ( $U_s=10\text{cm/s}$ )

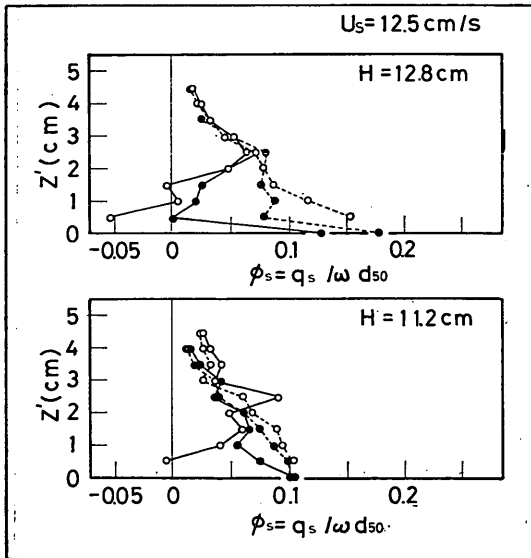


図-31  $\phi_s$  と  $\bar{\phi}_s$  の鉛直分布 ( $U_s=12.5\text{cm/s}$ )

を検討した。

浮遊砂濃度の瞬時値  $c(t)$  の測定には、光学式濁度計を用い、図-4に示す方法で採水ノズルによる絶対量に対し較正した。図-28にその結果を示す。浮遊砂濃度と出力電圧との間には、直線関係が成立していると考えられる。測定値の記録はデータレコーダに収録し、0.017秒のサンプリング間隔でAD変換した。流速  $u(t)$  は電磁流速計により測定し、同様の処理を施し、 $\bar{u}\bar{c}$  を計算した。

図-29, 30, 31は、それぞれ  $U_s=5, 10, 12.5\text{cm/s}$  の場合について、波高を3段階に変えたときの  $\phi_s$  及び  $\bar{\phi}_s$  の鉛直分布を示したものである。図中、波、流れの進向方向に  $\phi_s, \bar{\phi}_s$  の正の値を取っており、 $z'=0\text{cm}$  を砂れんの峯の高さとした。また、実線が  $\phi_s$ 、破線が  $\bar{\phi}_s$  を示し、白丸は砂れんの峯の位置で、黒丸は砂れんの谷の位置で測定されたことを示す。

$\phi_s$  は、流速と浮遊砂濃度の瞬時値の積を示すわけであるから、より真の浮遊砂量を表すものと考えられることができる。したがって、 $\phi_s$  と  $\bar{\phi}_s$  が一致するという事は、浮遊漂砂量が、 $\bar{c}\bar{u}$  で表示できるということであり、両者が一致しないということは、その領域では浮遊漂砂量が  $\bar{\phi}_s$  では表示できないことを示すものである。

図-29の  $U_s=5\text{cm/s}$  の場合には、流れが小さいため、 $\phi_s$  と  $\bar{\phi}_s$  との相違は明らかではないが、図-30の  $U_s=10\text{cm/s}$  になると、 $\bar{\phi}_s$  すなわち図中の破線は、底面へ近くなるにつれて一方的に増大する傾向が強い。しかし  $\phi_s$  すなわち実線は、 $z'=1.5\sim 2\text{cm}$  を境にして、それより下方では急激に減少する傾向が見られる。このことは、波が大きいほど顕著である。さらに図-31の  $U_s=12.5\text{cm/s}$  の場合も同様に  $z'=2\text{cm}$  を境にして、それより上方では  $\phi_s$  と  $\bar{\phi}_s$  とはほぼ一致しているが、それ以下では、両者が大きくなっており、 $\phi_s$  が急激に減少する傾向を示している。

以上のことから、本実験の範囲では、 $z'=1.5\sim 2\text{cm}$  を境にして、それより上のみが、浮遊漂砂量が浮遊砂濃度の平均値と、流速の平均値で表示でき、浮遊モデルによる漂砂の数値シミュレーションも比較的容易にできるものと思われるが、 $z'=1.5\sim 2\text{cm}$  以下の層においては、 $\bar{u}\bar{c}$  のみでしか表示できず、数値シミュレーションなどによる取り扱いが非常に困難であることを示している。

この底面近くにおいて、 $\phi_s$  と  $\bar{\phi}_s$  とが一致しない理由は、砂れん周辺の底質移動状況を模式的に示した図-32と、種々の高さにおける水粒子速度と浮遊砂濃度の時間変化を示す図-33に明瞭に見ることができる。図-33は、砂れんの峯の位置で測定し、位相平均した結果である。

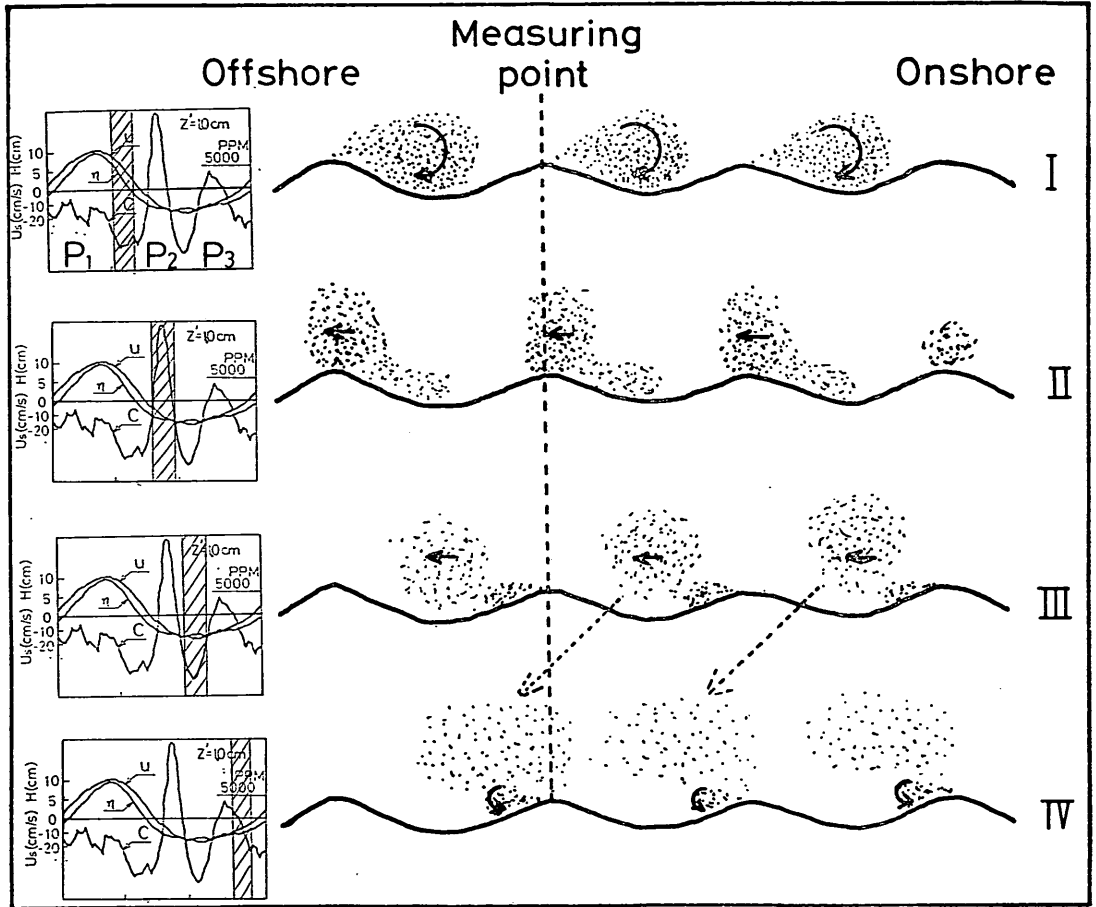


図-32 底質移動状況

図-33の一部を図-32に示し、図中I~IVの位相における底質移動状況を模式的に示した。図-32, 33に示したように、波の一周期の間に光学式濁度計の記録(図中のcの曲線)に、 $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ なる3つのピークがあり、それらの消長の様子が位相によって異なっていることがわかる。図-33のI~IVの位相に従って、これら $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ の挙動を説明すると以下ようになる。

- (I) 波の峯が測定点を通過している場合で、岸向きの強い流れにより、砂れんの岸側に組織渦が発達し、多量の底質を渦の中に巻き入れている。
- (II) 波の峯が通過し、谷の通過にさしかかった場合である。これまで砂れんの岸側に巻き込まれていた底質が、沖向きへ砂れんの頂部を越えて移動するため、図-33の $z'=0.5\sim 1.5\text{cm}$ の高さの箇所で著しいピーク $P_2$ が現れている。それ以上高い位置で

は、 $P_2$ は全く現れていない。

- (III)  $P_2$ のピークが通過し、さらに沖向きの流れの位相が続いている。図-32より、この状態は、測定点より岸側の砂れんにより巻き込まれた浮遊砂量が測定点に達する直前の状況にあることがわかる。この浮遊砂雲が測定点を通過するとき、図-33の $P_3$ が現れる。この $P_3$ は、 $z'=3.5\text{cm}$ の高さまで現れることがわかる。
- (IV)  $P_3$ をつくった浮遊砂雲が去り、流れの位相はやがて岸向きに転じようとする場合である。この状態から流れが岸向きに転ずれば、まず、砂れんの沖側の組織渦に巻き込まれた浮遊砂雲が測定点を通過する。これは、底面近くにしか現れない。続いて、 $P_3$ のピークをつくって沖側に去っていた浮遊砂雲の残留分が、岸向きの流れに乗って再び測定点を通過す

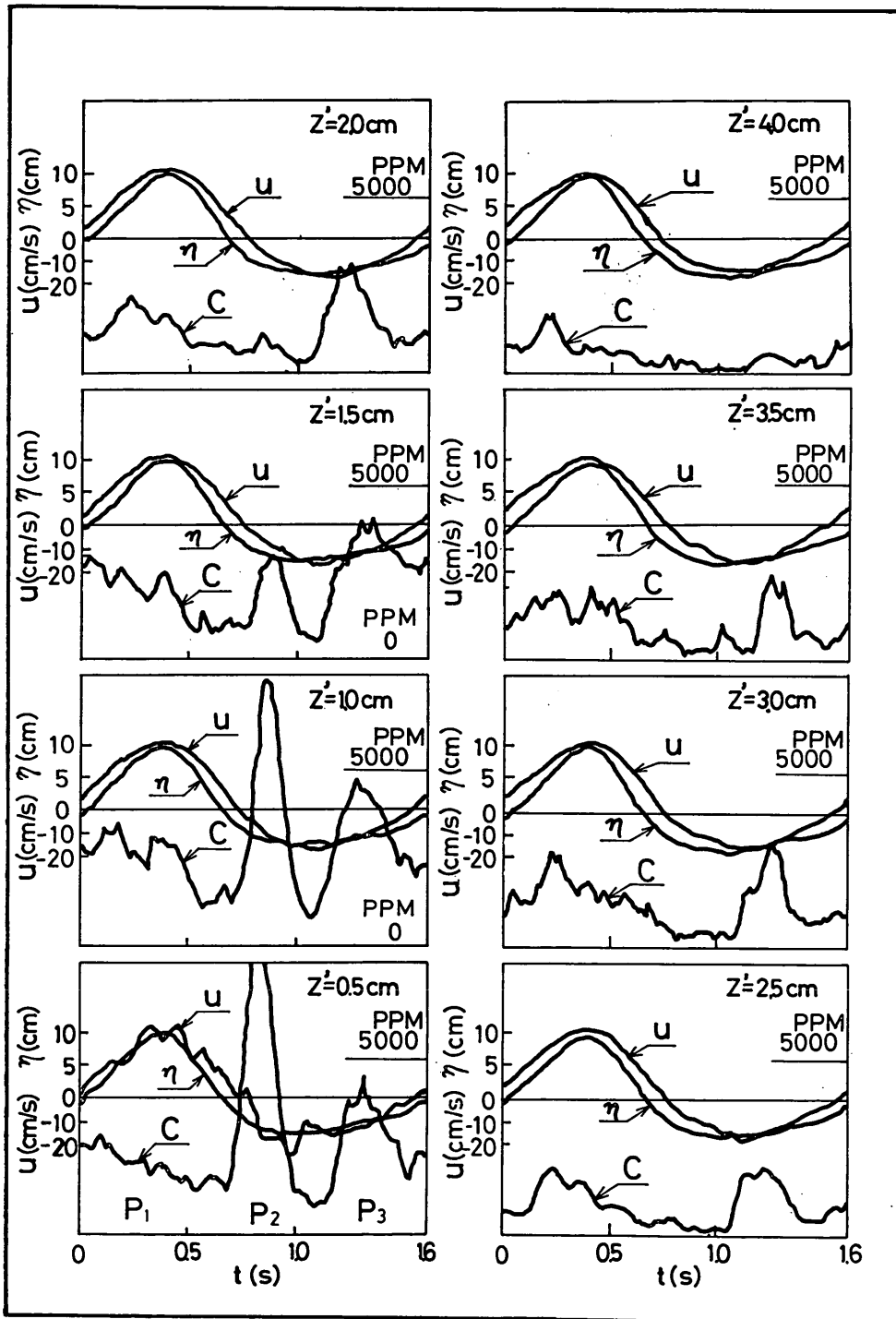


図-33 一周期間の水粒子速度  $u$ ・浮遊砂濃度  $C$ ・表面波形  $\eta$  の時間変化 ( $U_s = 10$  cm/s)

る。この影響は、相当高い位置まで及ぶはずである。図-32によれば、IV→Iに転ずる位相で、 $P_1$ が認められ、しかも $z'=4.0\text{cm}$ においても明瞭に見られる。この $P_1$ が、上記の残留浮遊砂雲によるものであろう。また図-33において、 $P_1$ のピークが、 $z'=0.5\sim 1.5\text{cm}$ において、一足早い別のピークと重なっているのがわかる。これは、砂れんの沖側に生成した浮遊砂雲によるものであろう。

以上の結果より次のことがいえる。

- (a)  $z'=0.5\sim 1.5\text{cm}$ の間では、測定点の位置における砂れんの下流側に巻き込まれた浮遊砂雲の影響を直接受ける。しかも、流れが沖向きの位相のとき著るしい浮遊砂が通過し、岸向きの位相のときははるかに少い。
- (b) 測定点より1つ隣の砂れんで形成された浮遊砂雲の影響は、 $z'=3.5\sim 4.0\text{cm}$ の高さまで及んでおり、多分に浮遊砂としての性質が強い。

結局、図-30, 31において、 $z'=1.5\sim 2.0\text{cm}$ 以下の層で、 $\phi_s$ と $\bar{\phi}_s$ とが大きく異なった理由は、 $z'=1.5\sim 2.0\text{cm}$ 以下の層において、測定点の位置の砂れんにより形成された組織渦に巻き込まれた著しく濃度の高い浮遊砂が沖向きの流れの位相のときだけ現れるためであることがわかる。

この $z'=1.5\sim 2.0\text{cm}$ の高さは、図-25に示す砂れんのスケールと対比してみたとき、砂れんの高さ $\eta$ と、同程度の値であることがわかる。川又は、砂れんの頂部より $\eta$ の高さの範囲を渦層と考えたが、今回の検討結果によれば、この渦層が、 $\phi_s$ と $\bar{\phi}_s$ とが一致しない領域に

相当するものと思われる。この $\eta$ の厚さの渦層の浮遊漂砂量を、 $\phi_s$ により求めたとしても、砂れん表面を掃流状態で移動する量は測定できない。この掃流砂も含めた全漂砂量を知るには、どうしても、海底断面変化の測定など、別の方法により求めざるを得ない。

- (5) 砂れんの頂部から $\eta$ までの高さを境にして、それより上側と下側の漂砂量の割合。

図-16において、断面Aを通過する全漂砂量は $Q_A$ であった。ここで、砂れんの頂部より $\eta$ だけ高い位置より上の領域を通過する漂砂量を $q_s$ 、下の領域を通過する漂砂量を $q_b$ とすれば、

$$Q_A = q_s + q_b \quad (18)$$

(13)式より、

$$q_b = Q_D - Q_C - q_s \quad (19)$$

ここで、 $Q_D$ 、 $Q_C$ 、 $q_s$ を表-2のA-4~A-12のケースについて求め、 $q_s$ と $q_b$ との比 $q_s/q_b$ を求めたのが図-34である。 $U_s=0\text{cm/s}$ のときの波高を同図の右上に示しておいた。測定値に相当のばらつきが認められるが、全体的に $|q_s/q_b| \approx 1$ の周辺に分散し、流速 $U_s$ の増大と共に、 $q_s$ の割合が増大する傾向を示しているように思われる。先にも述べたように、 $q_s$ は岸向き、 $q_b$ は沖向きの移動量を示す。ここで示されているのは、 $q_s$ と $q_b$ との比の絶対値であることに注意する必要がある。今回の実験の範囲では、砂れんの頂部より $\eta$ の高さ以上の領域で測定される浮遊漂砂量と下の領域を通過する漂砂量 $q_b$ は、ほぼ同程度の割合となっている。

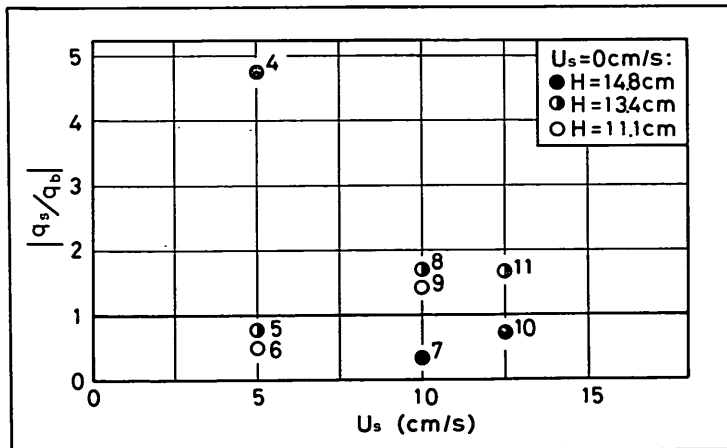


図-34  $q_s$ と $q_b$ の比の絶対値と $U_s$ との関係

#### 4. 漂砂の定量的観測法に対する考察

##### 4.1 室内基礎実験から判明したこと

漂砂を定量的に測定するためには、漂砂の機構を十分に把握し、最も適切な測定法を用いる必要がある。これを検討するため、水平移動床による二次元実験を実施した。この実験より明らかになったことは以下の通りである。

- (1) 本実験の範囲内では、浮遊砂の濃度分布は片対数グラフ上で直線勾配をなす。底質移動の最もはげしい底面の砂れん近傍の浮遊砂濃度は、上方の水中の浮遊砂濃度分布曲線を底面 ( $z=0\text{cm}$ ) まで外挿した値で近似的に求めることができる。
- (2) 浮遊砂濃度分布の勾配、底面の砂れん近傍の浮遊砂濃度は、Skafelらの用いたパラメータやシールド数等により一意的な表示が可能である。
- (3) 波の進行方向に定常流を起こして浮遊漂砂量の鉛直分布を調べた結果、砂れんの頂部より $\eta$  (砂れんの波高) だけ上の位置を境にして、それより上方では浮遊砂の平均濃度と平均流速との積で、岸沖方向の浮遊漂砂量が計算できるが、それより下方では、濃度と流速の同時測定値の積の時間積分に依らなければ浮遊漂砂量は測定できない。また、これにより浮遊漂砂量を求めたとしても、砂れん上を掃流されて移動する底質が測定されない限り、全漂砂量は測定できない。

以上の結果をもとに、実験室規模での漂砂量測定法を岸沖方向の漂砂と沿岸方向の漂砂に分けて考察すると、

- (1) 岸沖方向の漂砂は、砂れん頂部より $\eta$ だけ上の位置より上方の領域において、岸沖方向に振動する流れがあるにも拘らず、平均流と平均濃度により浮遊漂砂量が測定できる。
- (2) しかし、砂れん頂部より $\eta$ だけ上の位置から底面までの間の漂砂量は、計測器による測定が困難であり、結局岸沖方向の海底断面の変化等から全漂砂量を求め、 $\eta$ より上の浮遊漂砂量を差引くことにより計算する以外に方法がないようである。
- (3) 沿岸方向の漂砂は、浮遊砂の濃度分布を水面から底面まで与えることができるので、沿岸方向の平均流の鉛直分布が測定できれば、漂砂量が計算できる。岸沖方向の漂砂において、砂れん頂部上 $\eta$ より上では、岸沖方向に振動流があるにも拘らず、平均流と平均濃度により浮遊漂砂量が測定できた。これより、沿岸方向の漂砂の場合には、沿岸方向に振動流の成分があっても、平均値の積で漂砂量を求める

ことができるであろう。

室内実験規模でのこれらの漂砂量測定法を現地の漂砂観測に適用するには、さらに種々の問題が解決されねばならない。

柴山・堀川ら<sup>9)</sup>は、波動水路、振動流水槽、現地海岸での観測結果に基づいて砂移動形式を分類し、シールド数の増大に伴い、砂れんのスケールは増大するが、それがある値以上になると砂れんのスケールは縮小し、やがてシートフローとなって消滅することを示した。実際の現地の海底が、これらのうちどの状態にあるのかは現在の所不明である。もし、荒天時の海底が砂れんもないシートフローの状況下であれば、本研究の対象とした現象とは大きくかけ離れたものとなり、漂砂量の測定法については別途検討すべきものである。さらに、本研究が対象としてきたのは、沖浜帯における漂砂である。砕波帯内に入れば、砂れんの存在状況も異なってくることになり、また、砕波の乱れにより、水中の鉛直拡散係数も、沖浜帯のそれとは相当に異なったものとなるであろう、

以上のように、本研究の成果から現地の漂砂の定量観測法に言及するには、未だ、越えねばならないハードルが多く存在する。

そこで、次節において、今一度、既往の漂砂の現地調査法を振り返り、今回の室内実験の成果と合わせて、現時点で考え得る最も望ましい漂砂量測定法を検討することにする。

##### 4.2 既往の漂砂観測法の検討

従来の漂砂観測法は、次のような種類に分けることができる。

###### A トレーサー技術によるもの

- (1) ラジオアイソトープトレーサー (R・I トレーサー) を用いる方法<sup>10)</sup>

波の静穏なときに所定の水深に R・I トレーサーを投入し、荒天時の通過毎にその拡散状況を、検知器を直接舟から海底に下ろして放射能を計ることにより追跡する。砂浜港建設時代の初期の昭和30年代半ば頃から盛んに用いられ、今日も用いられている完全移動限界、表層移動限界の概念を生み出している。これらは、現地観測から得られた唯一の移動限界公式である。ただし、トレーサー自体が放射能を有するため、現在ではこの方法を用いることが非常に困難になった。

- (2) 蛍光砂トレーサーを用いる方法<sup>12)</sup>

環境問題が浮かび上がり、上記の R・I トレーサーが用いられなくなったため、新たに開発されたトレーサーである。やはり、波の静穏時に所定の位置に投入し、時化の通過後底質を採取してその中の蛍光砂粒の数を数



え、蛍光砂分布の移動状況を把握する。赤、橙、緑の3色が主体で、同時に3色を投入しても各トレーサーの移動が区別できるなどの特徴を有するため、これまでも頻繁に用いられてきた。構造物の砂の透過問題や、埋没原因の把握など、現地での定性的な漂砂機構の把握にきわめて有効な手段である。しかし、この方法により漂砂の定量的観測にはいくつかの難点がある。その一つは、現地の波浪特性が時々刻々に変化しているため、蛍光砂トレーサーが埋没堆積し、実際の底質移動の集積結果と異なる可能性があるからである。今一つは、定量観測のため同時に多くの点をサンプリングする必要があるが、これを頻繁に実施するには種々の制約があることである。また、蛍光トレーサーの波の攪乱作用が水深によって異なるため、蛍光砂の分布の移動が底質移動と必ずしも一致しないという考え方もあるようである。

#### B 固定された観測機器による方法。

##### (1) 捕砂竿、捕砂器による方法<sup>13)</sup>

いずれも比較的古くから使用され、浮遊砂の鉛直分布、漂砂の卓越移動方向などを把握するのに用いられた。手軽であり荒天時にも使用に耐え得ることから教多く用いられた。しかし浮遊砂や掃流砂の相対値はつかめても、絶対値をつかむのは困難である。

##### (2) 超音波等の砂による減衰を利用する方法<sup>14)</sup>

超音波を水中に発射し、浮遊砂からの反射波を受けてそのパルスの減衰率から浮遊砂濃度を検出し、ドップラー効果を利用してその移動速度を測定するものである。現地に適用した事例が数例あるが、漂砂の定量観測の目的は十分果たしていない。その第一の原因は、砕波によって生ずる気泡の影響による超音波の減衰と、浮遊砂による減衰との区別が困難なことであろう。同様の考え方で、密封型 R・I を用いた例もあるが、十分な成果は上がっていないようである。

##### (3) 採水による方法<sup>15)16)</sup>

荒天時に採水して浮遊砂濃度を求め、現地の浮遊砂量の特徴の把握を試みた例はいくつかある。採水量が十分でない、濃度の測定精度が落ちるばかりか、浮遊砂の沈降速度が測定できなくなり、水理学的解析に支障をきたすことになる。

採水ノズルを、荒天時に測定点まで持って行くことができれば、この方法は有力のように思われる。ただし、この方法による測定結果は、あくまで時間平均値であり、漂砂の機構をくわしく観測するには限界がある。

##### (4) 光学的濁度計による方法<sup>17)</sup>

最近、この目的に合った波長のセンサーが開発され、諸外国でもこの方法が目下の所最も優れていると考えら

れている。時間的追従性に優れているため、現象把握に適している。ただし、この方法には基本的難点がある。それは、この測定原理が、光を利用するものであるため、浮遊砂の濃度が大きくなると、検定曲線が直線性を保てなくなる。また、波の大きさにより浮遊している砂の粒径も変化し、濁度計の検定能力も変化する。このため、定量精度を上げるための別の工夫が必要である。

以上のように、今日まで用いられてきた漂砂観測法にも一長一短があり、仲々決定的なものは無いようである。しかし、個々の観測法の特長を生かして、より完全な観測に組み立てることは可能であろう。

例えば、安全性がかなり評価されている光学式濁度計により、浮遊砂の挙動を詳細に観測し、この方法の欠点である定量性の不足を、採水ノズルにより補う方法が考えられる。こうして精度の高い浮遊砂濃度を求めることができれば、安定度の高い電磁流速計により流速と組み合わせることにより、漂砂量を測定することが考えられる。

#### 4.3 現地用漂砂量観測法に要求される条件

漂砂の定量測定に関する室内実験では、浮遊砂濃度を精度良く測定することに主眼を置いたが、現地の漂砂量観測においても、以下の理由により浮遊漂砂量の測定に依ることが重要である。

(1) 現地における漂砂が、短周期波、長周期波、潮汐などの外力によりいかなる機構で支配されているかということも現在なお未解明のままである。したがって、これらの外力と、時系列的に同じレベルの精度で漂砂量が測定されねばならない。

(2) ある一点を通過する漂砂量は、その地点での波、流れ、水深などの条件で一意的に定まるものではなく、それより流れの上手における漂砂の影響を多分に受けている。したがって、例えば、測定したい地点に蛍光砂を投入し、その移動から局所的漂砂量を求めるような方法では、その地点で実際に生じている漂砂量を求めることはできない。浮遊砂濃度を測定する方法であれば、この問題は解決される。

(3) 砕波帯から沖浜帯にかけて、現地での漂砂も、シートフローから、砂れんを有する移動に至るまで種々異なるものと考えられるが、現状では未解明のままである。浮遊砂濃度の測定精度を上げ、流速を安定的に測定することで漂砂量の測定をすると共に、測得値の時間的変化から漂砂の機構についても探る必要がある。

浮遊砂濃度を精度良く測定する方法としては、先に述べた採水法と光学式濁度計との組み合わせが考えられる。これにより、

- (1) 碎波による乱れなど、浮遊砂濃度の瞬時の変化は、光学式濁度計が受け持ってくれる。
- (2) 光学式濁度計の浮遊砂濃度に対する感度が、濃度の絶対値、浮遊不純物の混在などによって変化することに対しては、採水ノズルにより校正できる。
- (3) 浮遊砂の粒度特性は、採水サンプルを分析することにより求めることができる。

室内実験により、漂砂の定量観測法について検討してきた結果と、上に述べた光学式濁度計と採水ノズルおよび電磁流速計とを組み合わせた漂砂量の測定方法とを前提とした場合、漂砂量測定の方法は以下のようになる。

- (1) 電磁流速計を、海浜流の鉛直分布が測定可能な数

- だけ鉛直方向にセットする。
- (2) 光学式濁度計は、水中の浮遊砂の濃度分布が求められるように、十分な数のセンサーを鉛直方向にセットする。
- (3) 採水ノズルは、浮遊砂濃度の絶対値の相違による光学式濁度計センサーの感度が校正できるよう鉛直方向に2つ以上配置する。
- (4) 浮遊砂濃度と流速の瞬時値を連続的に観測した後、(16)、(17)式で与えられる  $\phi_s$ ,  $\bar{\phi}_s$  を求める。
- (5) 岸沖方向の漂砂に対しては、底面近くで  $\phi_s$  と  $\bar{\phi}_s$  が著しく異なることがあれば、その領域は、 $\bar{\phi}_s$  による浮遊漂砂量の計算対象から外す。
- (6) 沿岸方向の漂砂は、 $\bar{\phi}_s$  により求めることができ

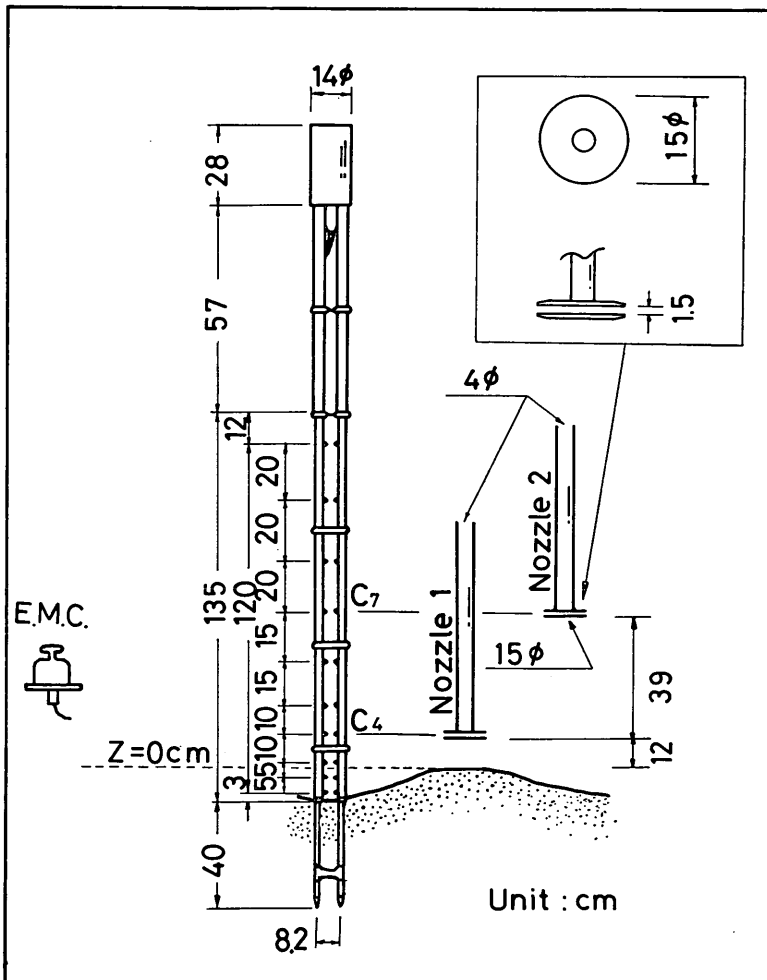


図-35 現地用漂砂量測定装置

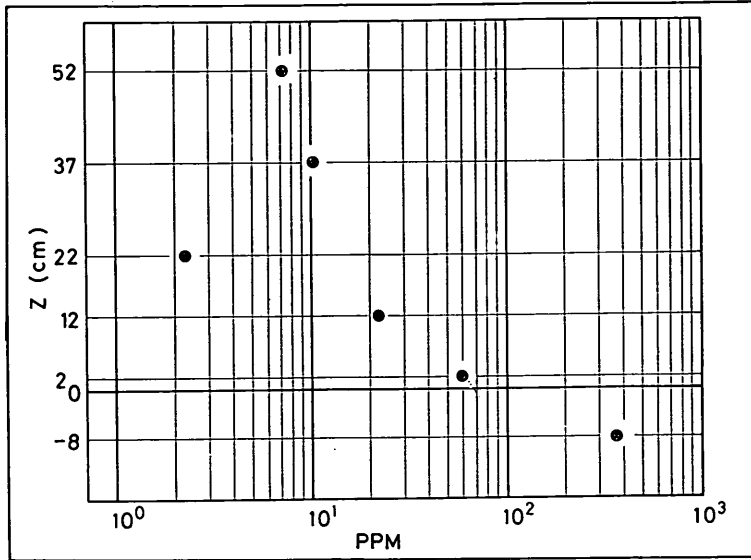


図-36 現地海岸での浮遊砂濃度分布

る。

- (7) (5), (6)において,  $\bar{\phi}_s$  で漂砂量が求まる場合については, 底質の移流拡散を考えた漂砂の数値シミュレーションのデータとして用いられる。
- (8) 岸沖方向の漂砂において,  $\phi_s \neq \bar{\phi}_s$  となる底面近くの層の漂砂量については, 海底断面変化の同時観測等により別途補完が必要である。
- (9) 一点での漂砂量は, 周辺の漂砂の影響を考えずに定まり難い。したがって, 周辺の海底地形, 波浪条件, 流況等を同時に把握することに努める必要がある。

以上の考察に基づいて試作した漂砂量測定装置を図-35に示す。本装置を用いて茨城県鹿島郡波崎町須田浜に建設されている観測栈橋を利用して観測を行った。測定は, 昭和59年11月26日~12月1日の6日間の内29日と30日の2日間行っている。ここでは, 11月30日の結果の一例を述べる。観測中の波は, 鹿島港気象海象観測結果によれば,  $(H_{1/3})_0$  で0.6m,  $T_{1/3}$  で8.5秒であった。測定点は, 沖浜帯に位置していた。濃度は, 図中左側の光学式濃度計と図中右側のポンプによる採水法の2つの方法を同時に作動させ測定した。光学式濃度計は, 鉛直方向に10組の発光部と受光部を持ち, その間を砂粒子が通過すれば出力電圧が変化するようにしている。また, センサーの配置は, 底面近くでその間隔が小さく, 上方で間隔が大きくなっている。

センサー番号は, 底面近くを1番とし上方を10番としている。採水法は, ポンプにより海水を200lくみ上げその中に含まれる砂の量を測定した。採水ノズルは, 吸い込み流速を出来るだけ小さく, また全方向に対し同じ流速で吸い込む事のできるものでなければならない。そこで, 今回製作したノズルは, Antsyferov<sup>16)</sup>の方法を参考に直径15cmの丸い鉄板2枚を1.5cmの間隔で固定したディスクタイプとした。この方法においては, ポンプとノズル間を結ぶ直径4cmの吸い上げ管の管内流速が93.6cm/sに対し, 吸い込みが16.6cm/sとなっている。

濃度計と採水ノズルは, 栈橋に取り付いている上下移動可能なハシゴに取り付け, 水深3.5mの地点に設置した。

設置状態は, 図でみられるように, 採水ノズルの高さが濃度計センサーの4番と7番の高さに対応し, 4番に対応するノズルが底面から12cmの高さに位置していた。

図-36は, 濃度計の平均出力電圧を採水による濃度で補正し算出した重量濃度の鉛直分布を海底を $z=0$ cmとして表したものである。濃度は, 濃度計センサー4番と7番の出力電圧と採水による浮遊砂濃度との関係から算出している。

浮遊砂濃度は,  $z=2$ cmで約60ppmを示し,  $z=52$ cmで1.7ppmを示している。この値は, 実験室で得られた値に比べかなり小さい。その原因としては, 水深3.5mに対し $(H_{1/3})_0$ が0.6mと小さく静穏な状態であったた

めであろう。

浮遊砂濃度測定時の海底の砂れん形状は、場所により異なり測定点近くでは岸沖方向に直角に $\lambda = 7 \text{ cm}$ ,  $\eta = 1.5 \text{ cm}$ , と $\lambda = 50 \text{ cm}$ ,  $\eta = 15 \text{ cm}$ の2種類が確認できた。

以上から、現地海岸における浮遊砂濃度は、水深に対し波高が小さいにも拘らず、砂粒子は底面よりかなり上方まで舞い上げられていることがわかる。

## 5. 結 論

本研究で得られた結果を要約すると以下のようになる。

- (1) 室内実験規模での波による水平移動床での底質移動においては、浮遊砂濃度分布は片対数グラフ上で直線勾配をなし、その分布曲線を底面まで外挿することで、底面の砂れん近傍での平均濃度を求めることができる。
- (2) 浮遊砂濃度分布の勾配、底面の砂れん近傍の浮遊砂濃度は、Skafelらの用いたパラメータや、シールド数により一意的に表示が可能である。
- (3) 岸沖方向の漂砂は、砂れん頂部より $\eta$  (砂れんの波高) だけ上の位置から上方の領域において、岸沖方向に振動する流れがあるにも拘らず、平均流と平均濃度により浮遊漂砂量が求まる。
- (4) しかし、砂れん頂部より $\eta$  だけ上の位置から下の領域では、漂砂量の計測器による測定は困難であり、海底断面形状の二次元的変化などから別途評価する必要がある。
- (5) 沿岸方向の漂砂は、浮遊砂の濃度分布を水面から底面まで与えることができるので、沿岸方向の平均流の鉛直分布を与えることができれば、漂砂量が計算できる。
- (6) 本実験結果及び既往の現地用漂砂観測手法を再検討した結果、光学式濁度計と採水ノズル、流速計の組み合わせによる浮遊漂砂量測定法を用いることが有効であることがわかった。
- (7) 室内実験、漂砂観測の既往例の検討結果をもとに、現地用漂砂量測定装置を試作した。

(1985年3月30日受付)

## 参 考 文 献

- 1) たとえば、砂村継夫・阪東浩造・掘川清司：非対称砂れん上での砂移動機構と漂砂量に関する実験的研究，第25回海岸工学講演会論文集，1978，pp. 250～254

- 2) 金子 新：振動流中で形成されるサンド・リップルの波長，第27回海岸工学講演会論文集，1980，pp. 207～210
- 3) 細井正延・木田三次：進行波による底質の浮遊機構について，第20回海岸工学講演会論文集，1973，pp. 327～331
- 4) 本間 仁・掘川清司・鹿島遼一：波による浮遊砂に関する研究，第11回海岸工学講演会論文集，1964，pp. 159～168
- 5) 川又良一：砂れん床近傍での浮遊砂濃度と浮遊漂砂量，第29回海岸工学講演会論文集，1982，pp. 218～222
- 6) 沢本正樹・山下俊彦・北村 匡：砂漣上の乱れ強度分布と浮遊砂濃度分布，第28回海岸工学講演会論文集，1981，pp. 232～236
- 7) Skafel, M. G. and B. G. Krishnappan: Suspended sediment distribution in wave field, Journal of waterway, Port and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 2, May, 1984, pp. 215～230
- 8) 橋本 宏・辻本剛三・早川典生：大規模砂漣上の流速分布と浮遊砂濃度，第29回海岸工学講演会論文集，1982，pp. 244～248
- 9) 柴山知他・掘川清司・欠吹信喜・半田真一：二次元海浜変形予測手法の実験による検討，第29回海岸工学講演会論文集，1982，pp. 249～253
- 10) たとえば、佐藤昭二：港湾建設計画に関連した漂砂の研究——特にアイソトープによる漂砂調査及び研究，付表及び付図——港湾技研資料，No. 5, 1963, 233p
- 11) 佐藤昭二・田中則男・入江 功・平原淳次：蛍光砂による漂砂観測，第4回港湾技術研究所研究発表会講演概要，1966年11月，pp. 39～52
- 12) たとえば、灘岡和夫・田中則男・加藤一正：蛍光砂を用いた碎波帯内における局所的砂移動の観測，港湾技術研究所報告，第20巻，第2号，1981，pp. 75～126
- 13) Antsyferov, S. M., T. Basinski and N. V. Pykhov: Measurements of coastal suspended sediment, Coastal Engineering, Vol. 7, 1983, pp. 145～166
- 14) たとえば、入江 功・天坂三明：漂砂の連続的な現地観測について，——海底地形変動に関する一考察——，港湾技術研究所報告，第10巻，第2号，1971，pp. 53～96
- 15) 入江 功：現地海岸での浮遊砂量について，第22回海工学講演会論文集，1975，pp. 313～317
- 16) 文献13)と同じ
- 17) 加藤一正・田中則男：碎波帯内の浮遊砂に関する現地観測，第30回海岸工学講演会論文集，1983，pp. 224～228
- 18) Bijker E. W: Sedimentation in channels and trenches, Proc. 17th Conf. on Coastal Eng., 1980, pp. 1708～1718