

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

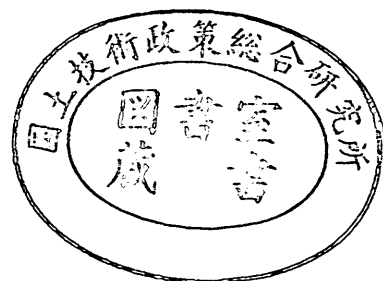
---

VOL. 20

NO. 2

JUNE 1981

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第20巻 第2号 (Vol. 20, No. 2), 1981年6月 (June 1981)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 混成防波堤のマウンド形状による衝撃砕波力の発生と対策について  
.....谷本勝利・高橋重雄・北谷高雄..... 3  
(Experimental Study of Impact Breaking Wave Forces on a Vertical-Wall Caisson of Composite Breakwater  
.....Katsutoshi TANIMOTO, Shigeo TAKAHASHI and Takao KITATANI)
2. マルチセルラーケーソンの水理特性に関する実験的研究  
.....谷本勝利・原中祐人・富田英治・村永 努・鈴木諭司..... 41  
(A Hydraulic Experimental Study on Multi-celler Caisson Breakwaters  
.....Katsutoshi TANIMOTO, Suketo HARANAKA, Eiji TOMIDA,  
Tsutomu MURANAGA and Satoshi SUZUMURA)
3. 蛍光砂を用いた砕波帯内における局所的砂移動の観測  
.....灘岡和夫・田中則男・加藤一正..... 75  
(Field Observation of Local Sand Movements in the Surf Zone Using Fluorescent Sand Tracer.....Kazuo NADAOKA, Norio TANAKA and Kazumasa KATO)
4. 地盤の圧密沈下による斜杭の曲げに関する実験的研究 (第2報)  
—野外実大実験— .....高橋邦夫..... 127  
(Experimental Study on the Bending of Batter Piles due to Ground Settlement (2nd Report) —Field Experiment— .....Kunio TAKAHASHI)
5. 大型タンカーの接岸力に関する研究.....上田 茂..... 169  
(Study on Berthing Impact Force of Very Large Crude Oil Carriers  
.....Shigeru UEDA)
6. 港湾内貨物流動に関する研究 (第1報) .....溝内俊一・稲村 肇..... 211  
(A Study on the Cargo Flows in Port (1st Report)  
.....Toshikazu MIZOUCHI and Hajime INAMURA)
7. 土砂輸送用パイプの摩耗に関する研究 —ライニング材としてのポリウレタン  
エラストマの耐摩耗性— .....岡山義邦・村上幸敏・浜田賢二..... 271  
(Studies on the Wear of Slurry Pipelines —Evaluation of the Wear Resistance of Polyurethane Elastomers—  
.....Yoshikuni OKAYAMA, Yukitoshi MURAKAMI and Kenji HAMADA)

### 3. 螢光砂を用いた碎波帯内における局所的砂移動の観測

灘岡和夫\*・田中則男\*\*

加藤一正\*\*\*

#### 要 旨

碎波帯内の局所的な砂移動の実態の把握、および砂移動量の定量的測定を目的として、螢光砂を用いた現地観測を行った。観測の方法は、螢光砂を点源として投入し、その回りの半径 10 m 程度の円周上の 16 等分点上で一定時間々隔でコア・サンプルの採取を行い、同時に、砂移動の外力となる波や流れのデータを投入点付近に設置した電磁流速計によって記録しておく、というものである。

ここで報告する内容は、1980年の2月29日～3月2日と、同年の9月1日の2回にわたり、茨城県の阿字ヶ浦海岸で行った調査結果に基づくものである。これらの調査から得られた主な結論は以下の通りである。

- i) 砂粒子の運動を確率過程としてとらえて、波動の存在に基づく波の進行方向への一粒の砂粒子の平均移動速度  $D$  なる量を導入し、測定データを整理したところ、これが波に基づく流速変動の skewness と密接に関連することが明らかになった。
- ii) 平均流の方向への砂粒子の平均移動速度  $V_s$  は、今回の調査の範囲では、平均流速  $\bar{V}$  の 1~2% 程度であった。一方、混合層厚が碎波々高に比例するという関係を仮定すれば、 $V_s$  の碎波帯内での平均値  $\bar{V}_s$  は沿岸流速  $\bar{V}_i$  と、摩擦係数  $C_f$  を介して、 $\bar{V}_s \cong C_f \bar{V}_i$  なる関係を持つことが示される。この関係を用いて、先の 1~2% という値がオーダー的にはほぼ妥当なものであることを示した。
- iii) 螢光砂の混合層厚は、その点の波高の約 8% 程度となる。ただし、混合層厚はリップルの有無にも密接に関連し、リップルのある場合には混合層厚は増大する。
- iv) 三色の螢光砂を一色ずつ時間をずらして投入したところ、混合層厚や鉛直濃度分布形は三色とも同様なパターンを示し、投入時間をずらした効果はほとんど現われなかった。このようなことから、螢光砂の埋没過程には、数分以下の時間スケールでかなりの規模の鉛直混合が介在しているものと推察された。
- v) 本調査方法による測定データから、局所的な漂砂量を算定する方法を示した。具体的には、時間積分法を応用したものと二層モデルを応用した方法について検討したが、同一の外力条件に対して後者の方が安定した値が得られた。また、算定結果を Bijker<sup>9)</sup> の漂砂量公式による計算値と比較したところ、ほぼ同程度の値であった。

\* 水工部 漂砂研究室

\*\* 水工部 漂砂研究室長

\*\*\* 水工部 主任研究官 (海浜流解析担当)

## Field Observation of Local Sand Movements in the Surf Zone using Fluorescent Sand Tracer

Kazuo NADAOKA\*

Norio TANAKA\*\*

Kazumasa KATOH\*\*\*

### Synopsis

In this paper, the results of field observations using fluorescent sand tracer are presented which are conducted to make clear characteristics of local sand movements in the surf zone and to calculate its transport rate.

Fluorescent sand tracer of about 10 kilograms were injected at the center of a circle having the diameter of 20 meters. At sixteen fixed points along the circle, core samples of more or less 20 centimeters long of bed materials were taken by 15 minutes of time intervals during 2 to 5 hours after the injection of tracer. At the same time, wave and current data are obtained by electromagnetic current meter near the injection point. Each core samples were divided into several layers of 2 centimeters thick. Concentration of tracer in each layer was detected under ultra-violet light.

The main results of these observations are as follows.

- 1) Considering sand particle movement as random process, the concept "drift velocity D" is introduced, which is referred as mean shift velocity of a sand particle on the direction of wave propagation under wave motion. It is found out that D is correlated with the skewness of velocity fluctuation of wave motion.
- 2) The mean drift velocity  $V_s$  of a sand particle on the direction of mean current is 1 to 2% of the mean current velocity  $\bar{V}$ . This value is presumed to be reasonable from the relation  $\bar{V}_s \cong C_f \bar{V}_i$ , which can be derived assuming proportionality between the mean disturbance depth of sand and the breaking wave height, where  $\bar{V}_s$ ,  $\bar{V}_i$  and  $C_f$  are mean value of  $V_s$  in the surf zone, mean long-shore current velocity and bottom friction factor, respectively.
- 3) The mixing depth of sand is nearly 8% of local wave height. It becomes, however, larger at the location where sand ripples exist.
- 4) Considerable mixing of sand particles takes place in the sea bed with the characteristic time scale of less than several minutes.
- 5) Two methods are presented to calculate the local sand transport rate using data obtained from proposed investigation procedure. They are the application of so-called "the time integration" and "the spatial integration methods". It is demonstrated by the presented field observation data that the latter method is more advantageous. The values calculated from these methods and Bijker's formula (1971) show good agreement.

---

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

\*\* Head of Littoral Drift Laboratory, Hydraulic Engineering Division.

\*\*\* Senior Research Engineer, Hydraulic Engineering Division.

## 目 次

要 旨 .....	75
1. 序 論 .....	79
2. 観測方法および観測項目・観測概況 .....	79
2.1 観測方法 .....	79
2.2 調査対象領域および海象・気象条件 .....	80
2.3 観測項目 .....	80
2.4 観測概況 .....	85
3. 波・流れ等の外力と螢光砂の移動特性との関連 .....	95
3.1 螢光砂の移動方向 .....	95
3.2 螢光砂の移動速度 .....	99
3.3 螢光砂の水平拡散 .....	101
4. 螢光砂の鉛直混合層厚について .....	102
4.1 混合層厚とリップルの有無の関連 .....	102
4.2 混合層厚と波高の関連 .....	104
5. 螢光砂の鉛直混合過程について .....	105
6. 局所的漂砂量の測定手段としての螢光砂調査の可能性の検討 .....	107
7. 結 論 .....	109
参考文献 .....	110
付 録 .....	111

## 1. 序 論

近年、港湾・海岸構造物の計画および建設等に関連して海浜変形の定量的な予測を行う必要性がますます大きくなってきている。かつては、海浜変形予測といえば、移動床模型実験によるのが常であった。しかし、最近では電子計算機の性能の飛躍的向上や、移動床模型実験では scale effect が不可避であること、などを背景として数値シミュレーションによる海浜変形予測が多少試みられるようになってきている。

海浜変形の数値シミュレーションは、その取扱ひ方の違いから、一次元モデルと二次元モデルに大きく分かれる。このうち一次元モデルは、Pelnard-Considère<sup>1)</sup>に始まるいわゆる one-line theory に基づくもので、初期の頃の単純な条件下での解析的モデルから、最近では、波の屈折・回折・反射の効果を含んだ複雑ないくつかの数値シミュレーションモデルへと発展してきている。(これらについては Le Mehaute ら<sup>2)</sup>が要領よくまとめている。)我が国においても、いくつかの数値シミュレーションモデルが提案されており<sup>3),4),5)</sup>、現在では実務面での現地海岸への具体的な適用例が二・三見られるようになってきている。

一方、二次元モデル(水深モデルとも呼ばれる)では、一次元モデルが線的情報——通常、汀線位置の変化——を得ることを目的とするのに対し、面的情報——各点での水深の変化——を得ることを目的とする。この場合には、対象海域をメッシュに分割し、各メッシュ点での漂砂量を何らかの方法で評価し、それを漂砂に関する連続式に代入することにより地形変化が計算される。この種のアプローチによるシミュレーションモデルの例としては、Fleming et al.<sup>6)</sup> や宇多・橋本<sup>7)</sup>などによるものがあるが、未だ満足な結果は得られていない。その大きな理由の一つとしては、その依拠すべき局所的漂砂量公式が、現在のところ十分信頼を得る段階に到達していないということがあげられる。

このようなことから、局所的漂砂量に関する研究は、海岸工学の分野で非常に重要なテーマの一つとして位置づけられており、その実態の解明が急がれている。しかし、砂移動の外力となる波や流れの研究に比べると、砂移動そのものに関しては、室内実験による議論が主で、現地での実測に基づく議論は浮遊砂濃度に関するもの(例えば、<sup>8),9)</sup>)を除いてはほとんど行われていない。そ

の大きな理由は、現地での、特に碎波帯内での砂移動の測定が非常に困難であるということによっている。例えば、サンドトラップによってある点での漂砂量を測定しようとする試みがいくつか行われているようであるが、河川の場合のような一方向流と異なり、往復流の下では、トラップ自身が周辺の流れ場を乱すことによる影響を避けられないため、あまり良い結果は得られないようである。

本報告では、このような状況を踏まえて、碎波帯内の局所的砂移動の測定手段として螢光砂を使用する測定方法を示した。螢光砂によって砂の移動パターンを把握しようとする試みは、1950年代に Zenkovitch<sup>10)</sup>らによって始められたものであるがその後の例を見ても、多くの場合、調査対象とする空間スケールは、通常 2~3 百メートルから数キロメートルのオーダーで、局所的な砂移動を把握する目的で、螢光砂を用いた例はほとんどない。特に、本論文で述べるような、碎波帯内での螢光砂の局所的移動特性をその点の波や流れなどの外力特性と密接に関連づける試みは、著者らの知る限りでは行われていないようである。また、Russell<sup>11)</sup>以来、螢光砂調査を漂砂量の定量的測定手段として用いることもよく行われるようになったが、これらは全て沿岸漂砂量を対象としたものであって、局所的漂砂量を測定する手段として報告された例はない。

本報告で述べる内容は、1980年の2月29~3月2日(以後第1回目と呼ぶ)と9月1日(以後第2回目と呼ぶ)の二回にわたって、茨城県の阿字ヶ浦海岸で行った調査結果に基づくものである。まず、2.で測定方法と測定時の海象・気象条件等について述べた後、3.から5.までで、局所的な砂移動の実態について興味あるいくつかの観測結果について報告した。また、6.では、今回のような螢光砂調査の結果から局所的な漂砂量を算定する方法について示した。

## 2. 観測方法および観測項目・観測概況

### 2.1 観測方法

ここでは観測方法の概略について説明する。まず、図-1に示すように、測定対象地点に半径  $R$  の円を設定する。この半径の大きさは、その内側において空間的な非一様性が無視出来るような範囲内で、波の水粒子の軌道半径より十分大きくとる必要がある。ここでは第1回目の観測で  $R=10$  m、第2回目で  $R=8.75$  m とした。こ

の円の中心付近には、図-1 に示すように電磁流速計（图中、EMC と略記されている）を設置しておき、測定期間中の流速記録（水平方向二成分）をとった。

次に、この円の中心点で螢光砂を投入し、その後 15 分間隔で、前もって目印として鉄パイプを打設しておいた円周上の 16 地点でコア・サンプルを採取した。サンプリングは、8 人のダイバーが、1 人あたり 2 地点を受け持って、次のような手順で行った。まず、内径 34 mm、

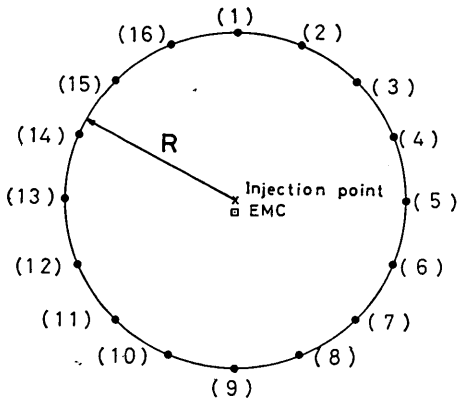
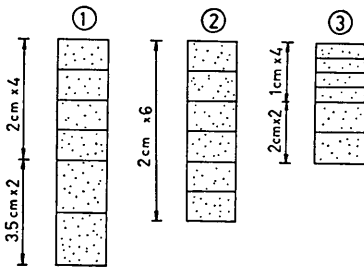


図-1 螢光砂調査の概略図

表-1 層区分形態



	月 日	地 点	区分形態
1 回 目	2/29	A	①
		B	①
	3/ 1	A	②
		B	②
	3/ 2	A	②
		B	③
2 回 目	9/ 1		②

肉厚 3 mm、長さ約 130 cm のアクリルパイプないしは塩ビパイプを砂中に 20~30 cm 程度押し込む。次に、パイプ中の残りの部分を全て海水で満たし、パイプの上端をゴム栓で塞ぐ。そうした後、パイプを上方に引き上げるとパイプ中の砂を保持したままで回収できる。回収後は、ただちにパイプを陸上へ運搬するが、運搬中にパイプ内の砂が抜け落ちるのを防ぐため、パイプの下端もゴム栓で塞ぐようにした。

陸上に運搬した試料は、2 cm（場合によっては、1 cm、3.5 cm——表-1 参照）の厚さで層状に分割し、表層から 6 層までをサンプルとして取得した。これらのサンプルは、各々を袋詰めして室内に持ち帰り、暗室内で直径 8 cm の大きさに薄く広げた状態でブラックライトを照射し、表面に見出される螢光砂を肉眼でカウントした。

### 2.2 観測対象領域および海象・気象条件

観測は、茨城県の阿字ヶ浦海岸で行われた。この海岸は、全長が約 12 km のほぼ直線的な海岸で、図-2 に示すように元来は南端が cliff によって仕切られた型の、いわゆる semi-bounded coast であるが、現在はその北端部に、日本原子力（株）東海発電所の専用港および日立港が築造されている。1 回目と 2 回目の観測領域は、図-2 においてそれぞれ ① と ② の記号で示されているが、これから分かるように、二つの観測領域は約 1.2 km しか離れていない。したがって、底質粒径などの海浜特性はほぼ同じと見てよい ( $d_{50} \approx 0.22 \text{ mm}$ )。ただし、第 1 回目の観測時期が冬期であるのに対して、第 2 回目が夏期であるため、砕波帯内の平均的な海底勾配は若干異なっており、前者が約 1/70、後者が約 1/50 であった。

図-3 と 図-4 は、それぞれ第 1 回目と第 2 回目の螢光砂調査中およびその前後の沖波、風、潮位の記録を示したものである。図-3 で A、B とあるのは、後述するように、螢光砂調査の行われた場所の違いを表わしている。ここで示した沖波の記録は、図-2 に示すように、観測領域の沖合、水深約 30 m の地点に設置されている超音波式波高計による定常観測の記録である。また、潮位記録は、日立港の DL (TP -0.89 m) を基準にして示してある。

### 2.3 観測項目

螢光砂調査そのものの手法等については、2.1 にその概略を示したが、ここでは、調査内容の詳細および第 1 回目と第 2 回目の調査内容の主要な相違点について述べる。

1) 調査地点——第 1 回目は surf zone と swash zone

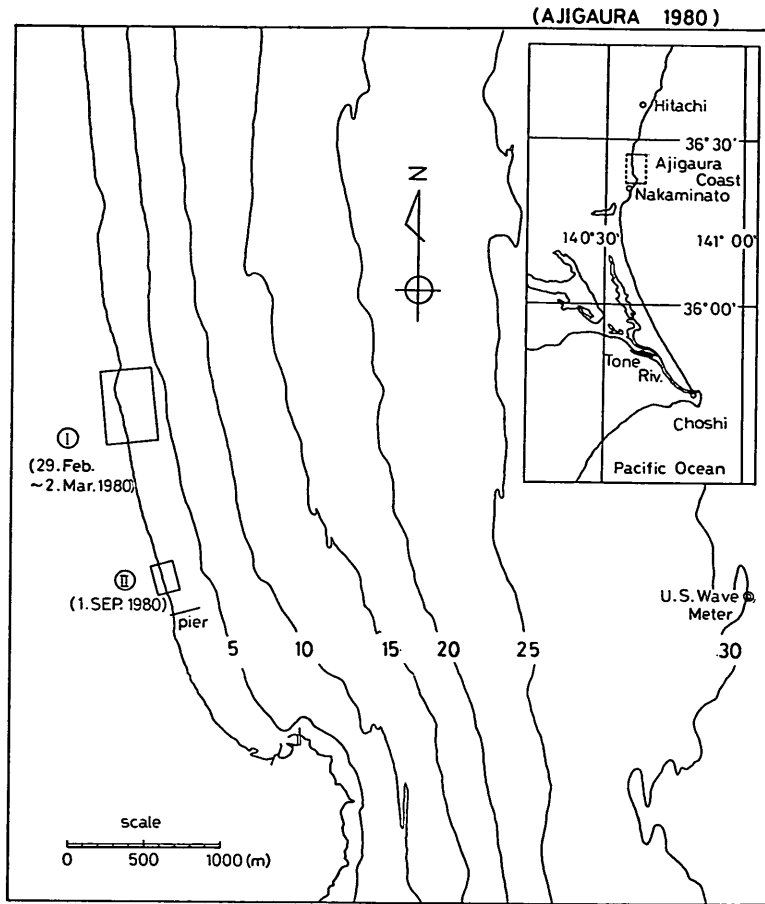


図-2 調査対象領域

でそれぞれ一地点について行った。これらの観測地点は、図-5 でそれぞれ A, B の記号を付して示してある。(今後、各々をA地点, B地点と称することにする。) 一方第2回目では、図-6 に示すように surf zone 内の一地点で行われた。

2) 調査回数——第1回目では、図-3 に示すように、A地点とB地点各々について3回ずつ、合計6回行った。一方、第2回目の調査は1回だけしか行っていない。しかし、後述するように第2回目では1回の調査で3色の蛍光砂を投入しており、その意味では、3回の調査を行ったとも言える。

3) 調査時点と潮位の関係——図-3, 図-4 に示すように、surf zone 内での蛍光砂調査は、1回目・2回目ともにほぼ高低潮位時に行われた。一方、swash zone 内の調査(B地点)は、ほぼ高高潮位時に行われた。

4) 使用蛍光砂——第1回目では、同一地点で3日続けて観測を行ったため、1日ごとに色の異なる蛍光砂を使用した。一方第2回目の調査では、緑・赤・黄橙の3色の蛍光砂を使用し、この色の順番で1時間おきに投入した。これは、5. で詳しく述べるが、投入時点をずらすことによって、砂輸送の時間的なプロセスを探ることをねらったものである。なお、蛍光砂は調査対象領域から採取された代表的粒径( $d_{50} \approx 0.22 \text{ mm}$ )の自然砂を用いて作製した。

5) 蛍光砂投入量——第1回目の2月29日のA地点の調査時のみ20 kg、その他ではすべて10 kgとした。なお投入にあたっては、フロックの形成を防ぐために、前もって中性洗剤の溶液に浸しておいた蛍光砂を、ビニール袋に詰めてダイバーが投入地点まで搬入し、周囲とほぼ同レベルになるまで砂中に埋め込んだ後、ナイフで



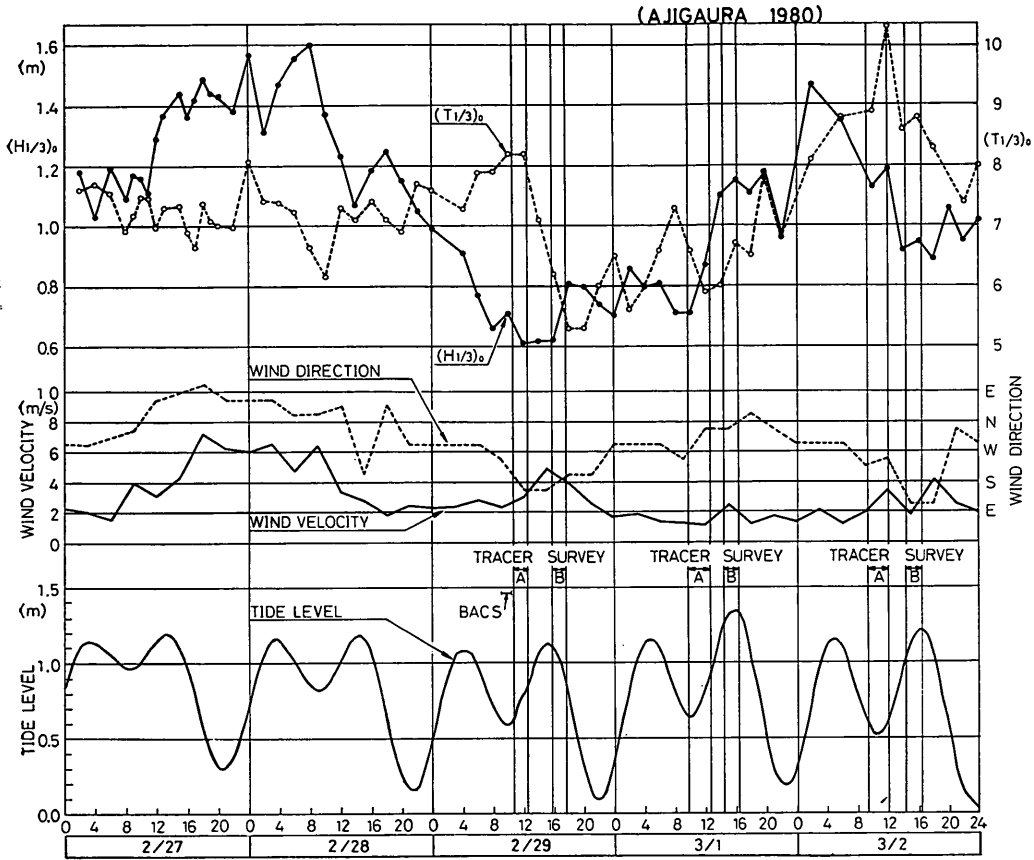


図-3 観測期間中の海象・気象条件 (第1回目)

ビニール袋を静かに切り取るにより投入した。

6) サンプルング継続時間——第1回目は、1時間55分ないしは2時間50分とした。第2回目では、緑投入後5時間5分とした。したがって、最も継続時間の短くなる黄橙の場合でも、3時間5分の継続時間となっている。

7) BACSによる海浜流の測定——第1回目の調査では、2月29日の9:08~9:48に、海浜流の平面的パターンと蛍光砂調査地点の相対的位置関係を把らえる目的で、BACS (Balloon Camera System) によるフロート追跡を行った。

8) リップルの有無の確認——第2回目では、蛍光砂調査を行った翌日の9月2日に、調査地点付近に10人程度のダイバーをいっせいに投入し、リップルの有無およびその平面的パターンを確認した。

9) 格子点上のコア・サンプル——第2回目の調査で

は、後に図-17に示すような型の格子点上で、赤の蛍光砂の投入35分後に、一度だけコア・サンプルを採取した。

10) コア・サンプルの粒径データ——第2回目の調査では、各サンプルの粒径に関するデータも取得した。ただし、サンプル数がかなり多く(約2000)、粒径の値そのものを得るには、かなりの労力を必要とする作業となるため、ここでは、次の様な処理を行った。すなわち、まず粒径を前もってランク別けして、粒径の小さいものから順に各ランクに番号を付けておき、各サンプルの粒径を、対応するランクの番号によって表現するようにした。また、いくつかのランクの粒径の砂が混っているような場合には、各々のランクの番号の平均値をもって粒径データとした。表-2に、ここで設定した粒径のランクを示す。なお、各々のサンプルのランク別け作業は、前もって各ランクの粒径の標準サンプルを作製して

螢光砂を用いた碎波帯内における局所的砂移動の観測

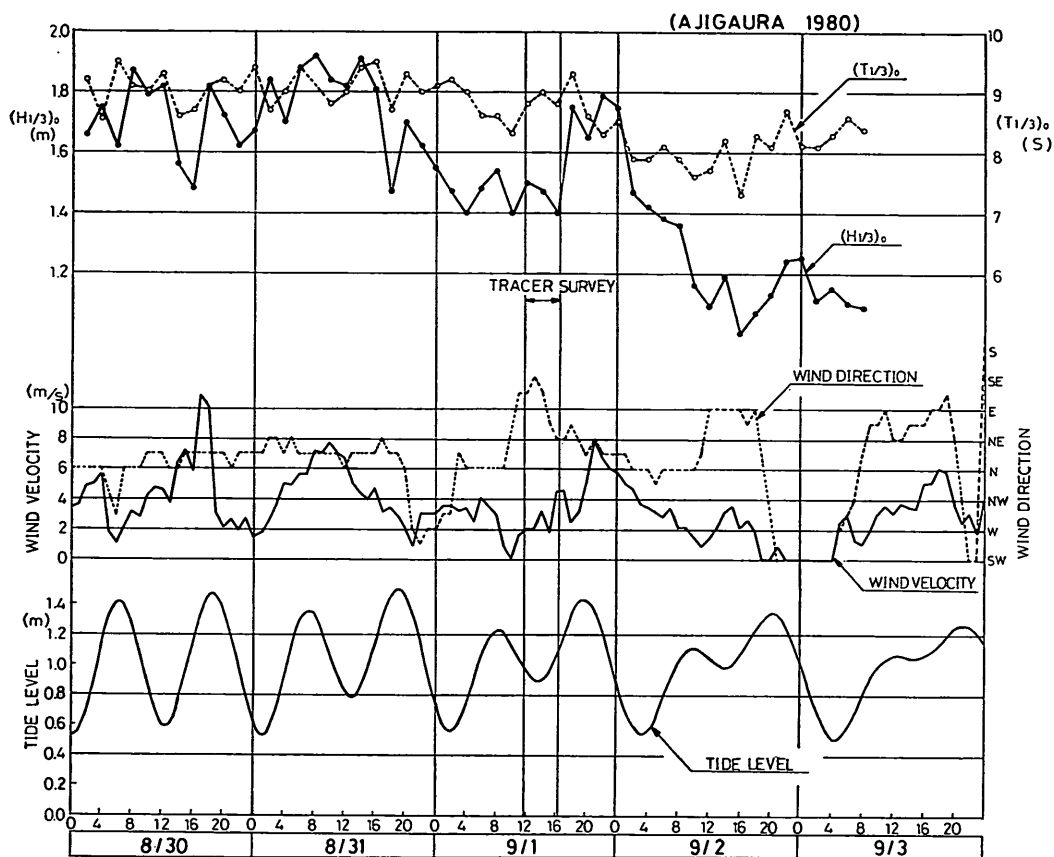


図-4 観測期間中の海象・気象条件 (第2回目)

表-2 粒径のランク別け

ラ ン ク	粒径の範囲 (mm)
1	~0.105
2	0.105~0.25
3	0.25 ~0.59
4	0.59 ~0.84
5	0.84 ~1.41
6	1.41 ~2.0
7	2.0 ~

おき、それと肉眼で比較することにより行った。

11) 螢光砂カウント数の濃度値への変換——データ処理の過程で濃度データが必要となる場合があるので、

螢光砂カウント数  $N$  (ここではサンプルを直径 8 cm, 厚さ 1.5 mm の薄い円板状に広げたときの表面に検出されるカウント数) から濃度値 (重量濃度)  $C$  へ変換する較正曲線を作成した。図-7 にその結果を示す。ここで、同一の重量濃度であっても、サンプル中の自然砂の粒径が異なれば、螢光砂カウント数が違ってくる可能性がある。そこで、ランク 2 とランク 5 の砂および平均粒径 0.24 mm, ふるいわけ係数 1.2 の砂の三種類の砂に対して、カウント数の違いをチェックしてみた。その結果、 $C = 400$  ppm の場合、カウント数  $N$  はそれぞれ 36.6 個, 38.9 個および 38.3 個 (10 回の読取値の平均) であった。したがってここでは、自然砂の粒径の差によるカウント数の違いは無いものとして取扱った。

12) 電磁流速計の設置——電磁流速計は、専用の架台に取付けて、センサーが砂面から 5~20 cm の位置にくるように設置した。このときの設置方位の計測は、第

BACS 29.FEB.1980 AJIGAURA 9:08~9:48

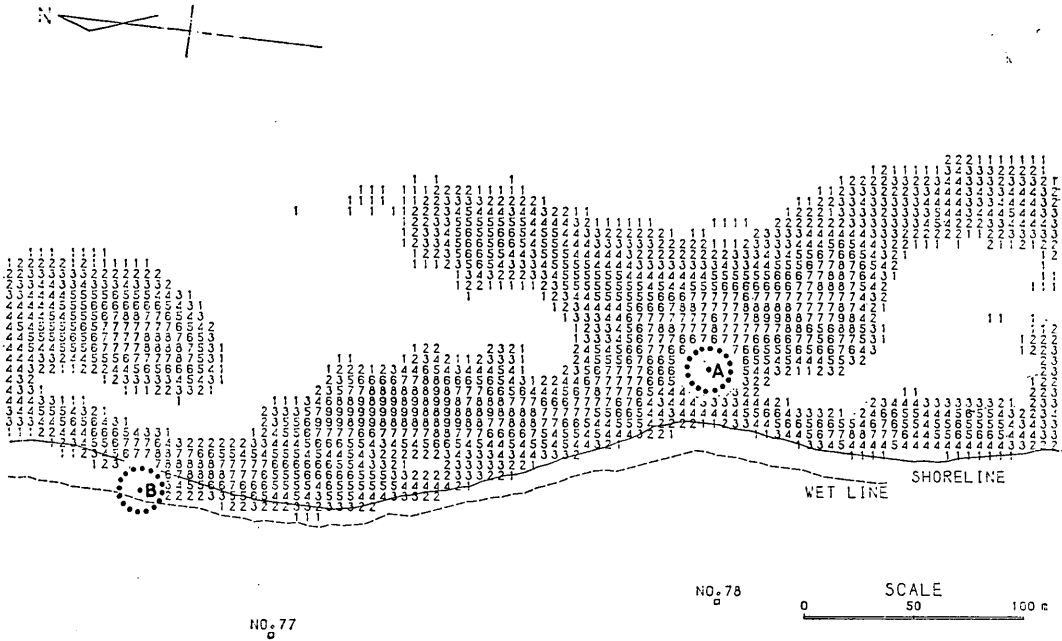


図-5 第1回目の調査領域と螢光砂調査地点および碎波発生確率

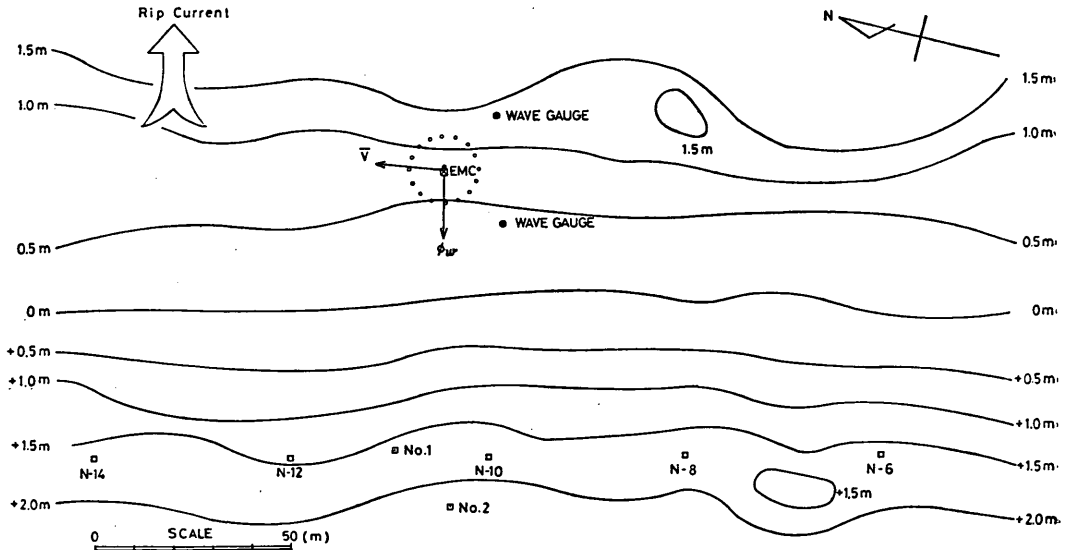


図-6 第2回目の調査領域と螢光砂調査地点

蛍光砂を用いた碎波帯内における局所的砂移動の観測

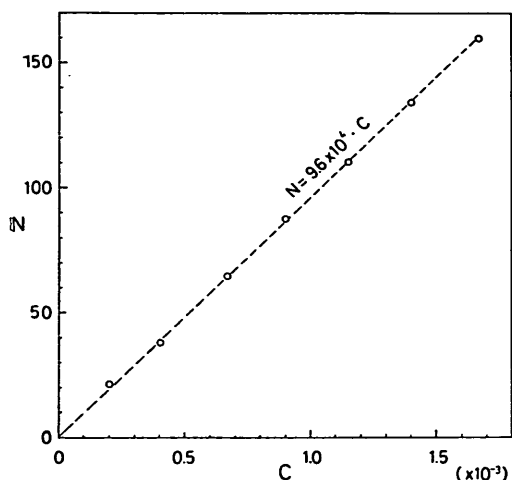


図-7 蛍光砂カウント数  $N$  から重量濃度  $C$  への変換のための検定直線

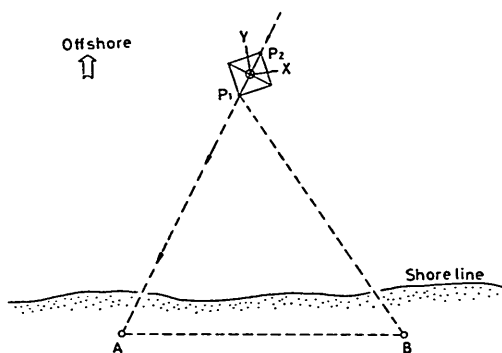


図-8 電磁流速計の設置方法の説明図

1 回目の調査ではダイバーが水中用磁石を用いて行った。しかし、その後、この方法では測定精度がかなり低くなることが判明したので、第2回目の調査では、図-8に示すような方法で設置方位を決定した。まず、電磁流速計を架台に固定した時の、架台に対する相対的な固定角度を計測しておく。次に、図-8の  $P_1$ ,  $P_2$  で示すような架台の二点に目印用のピンを付けておき、架台の設置終了後、図の矢印の方向に  $P_1$ ,  $P_2$  とが同一線上にくるように見通す。その見通し線上の陸上部の点Aにポールを設置すれば、この点と別に前もって適当に定めておいた点Bによって三角測量により点  $P_1$  の位置が決定される。さらに、角度  $\angle P_1AB$  の値から架台の設置方位が計算されるので、それと先に求めておいた架台に対する電磁流速計の相対的固定角度から、電磁流速計の設置方位が決

定される。なお、第1回目の流速データの処理に際しては、波の主方向が汀線に直角になっていたものと仮定し、測定された軌道流の方向が、汀線に直角となるように設置方位を修正して取扱った。

13) 波高の測定—第1回目、第2回目とも現地用容量式波高計により、調査地点付近の波高を測定することを試みた。しかし、第1回目では電気回路の故障により、また第2回目では油質汚物のセンサーへの付着による出力低下が原因で、2回とも測定は失敗した。したがって、波高等に関する値は、ここではすべて電磁流速計のデータから推定した。

以上述べたことに基づいて、特に第1回目と第2回目の調査内容の主な相違点に関する事柄を表-3にまとめて示した。

表-3 第1回目と第2回目の調査内容の主な相違点

	第1回目	第2回目
調査日	1980年2月29日～3月2日	同年9月1日
調査地点	surf zone と swash zone でそれぞれ一地点。(図-5 参照)	surf zone 内の一地点。(図-6 参照)
調査回数	各々の調査地点について3回ずつ、合計6回。	1回。
使用蛍光砂	一日ごとに色の異なる蛍光砂を使用。	三色の蛍光砂を使用。緑・赤・黄橙の順で一時間おきに投入。
蛍光砂投入量	20 kg/1回ないしは10 kg/1回。	10 kg/1色。
サンプリング継続時間	1時間50分ないしは2時間50分。	緑投入後、5時間5分。
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>BACSによるフロート追跡により、海浜流の平面的パターンを把握した。</li> <li>電磁流速計の設置方位の計測精度が低い。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>sand rippleの有無およびその平面的パターンを確認した。</li> <li>各サンプルの粒径に関するデータも取得した。</li> <li>格子点上でのコア・サンプルも採取した。</li> </ul>

2.4 観測概況

(1) 海浜地形および海浜流等の状況

a) 第1回目の調査時の状況

図-5に見られるように、第1回目の調査時には、明

瞭なカスプ地形が存在していた。そのため、海底地形、海浜流ともにカスプ地形と密接に関連した形となっている。同図には、BACS によって得られた 47 枚の空中写真から求めた碎波発生割合も示してある。ここでいう碎波発生割合とは、波群中の碎波するものの割合という意味ではなく、対象地点が写真の画面の中に入っている空中写真の枚数を  $N_1$  とし、その中で海面に白い泡立ちが認められるものの枚数を  $N_2$  としたとき、 $10 \times N_2 / N_1$  で計算される値のことである。この碎波発生割合の平面的パターンから、海底地形の概略を知ることができる。すなわち、カスプの突出部の前方には浅瀬があり、反対に湾入部の前方には深みの部分が存在する。さらに沖側には、リップチャンネルと見られる深みの部分がやや左斜めになって存在していることが分る（特にA点の左側は明瞭）。

図-9 は、BACS によるフロート追跡の結果から得られた、海浜流の平面的パターンを示している。フロートは、A 点付近およびその沖合でその大部分が投入され、一部のものが B 点の沖合で投入された。同図を見ると、A 点の右上方に循環流が形成されており、フロートの一

部は循環流の右端あたりに存在するとみられるリップカレントによって、左上方の沖合に向かって流れている様子が分かる。また、A 点の左側には、カスプの湾入部に向かっていく流れがあり、B 点の右上方には、A 点の右側の湾入部前方の場合と同様に左斜め上方に向かって流れるリップカレントが存在している。これらのリップカレントの位置は、先述の 図-5 でみられる深みの部分に対応している。

A 地点は、ちょうどカスプの突出部の前方に位置するが、この付近の流れの状況は、フロートの動きから分るように流向の一定しないふらついた流れとなっていて、流速自体も小さい。このような状況は、A 地点に設置された電磁流速計の記録からもうかがえる。図-10・a~c はそれぞれ 2 月 29 日、3 月 1 日および 3 月 2 日の一分間平均流向・流速の時間的変化を示している。これから、いずれの測定日においても流向がかなりふらついており、流速は 10~20 cm/s 程度であることが分る。

一方、swash zone 内に設定された B 地点では、図-11・a~c に示すように、流向はかなり一定している。流速は 20~40 cm/s 程度であるが、A 地点に比べて相対

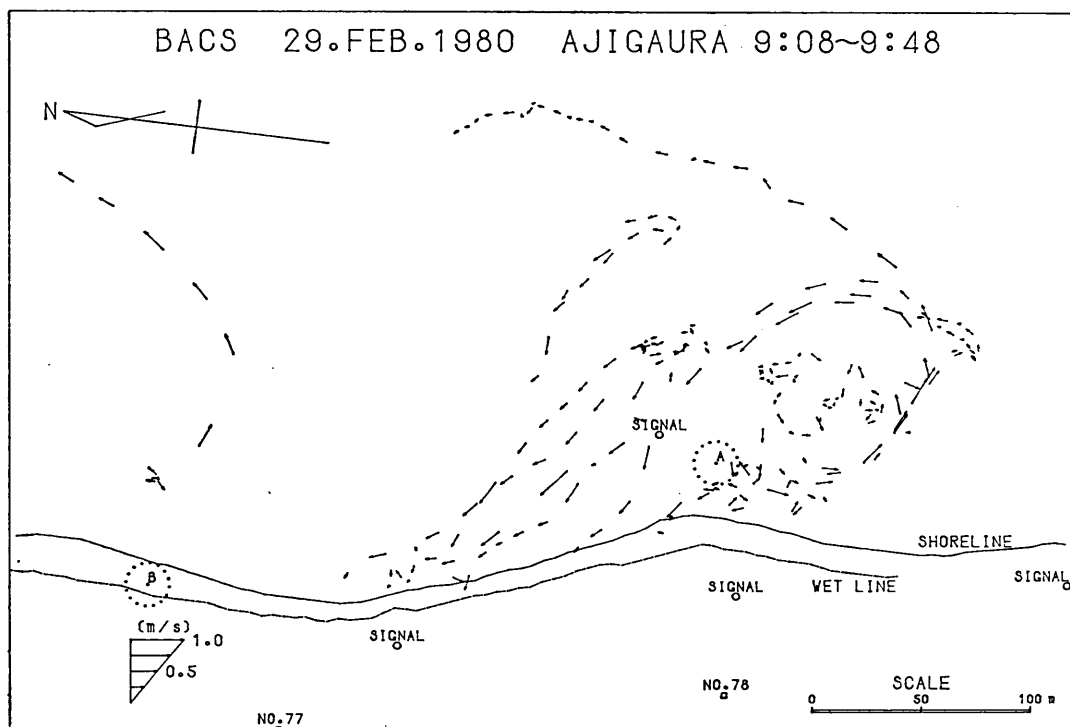


図-9 第 1 回目の調査時の海浜流の平面的パターン (BACS によるフロート追跡)

螢光砂を用いた碎波帯内における局所的砂移動の観測

29.FEB.1980. SOUTHERN POINT START TIME 8:54

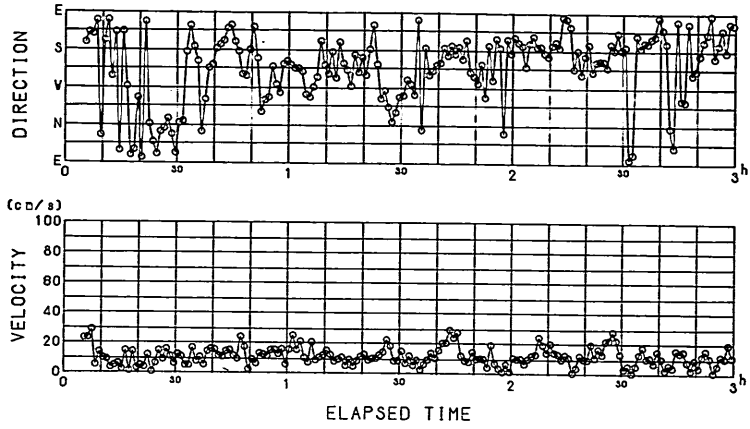


図-10・a 1 分間平均流速・流向の時間変化 (1 回目 2/29, A 地点)  
1.MAR.1980. SOUTHERN POINT START TIME 9:27

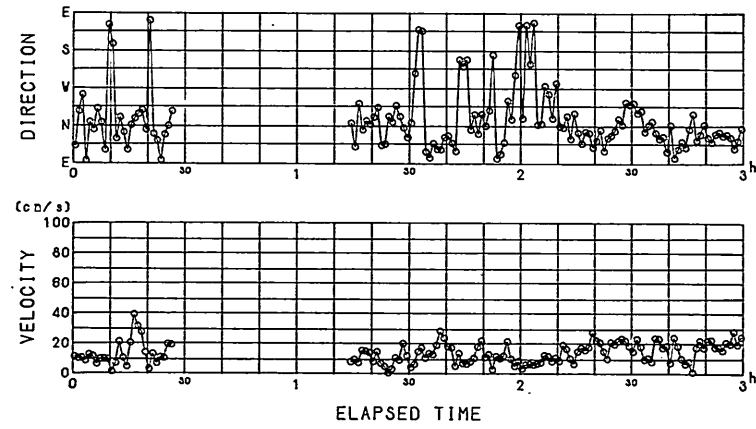


図-10・b 1 分間平均流速・流向の時間変化 (1 回目 3/1, A 地点)  
2.MAR.1980. SOUTHERN POINT START TIME 9:13

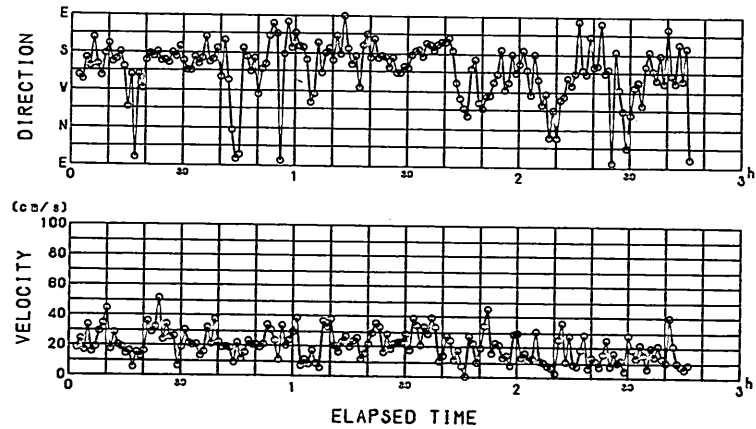


図-10・c 1 分間平均流速・流向の時間変化 (1 回目 3/2, A 地点)

29.FEB.1980. NORTHERN POINT START TIME 14:40

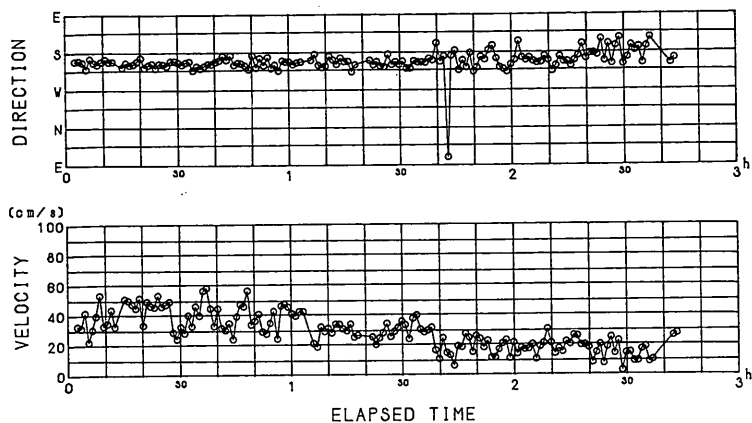


図-11.a 1分間平均流速・流向の時間変化(1回目 2/29, B地点)

1.MAR.1980. NORTHERN POINT START TIME 14:23

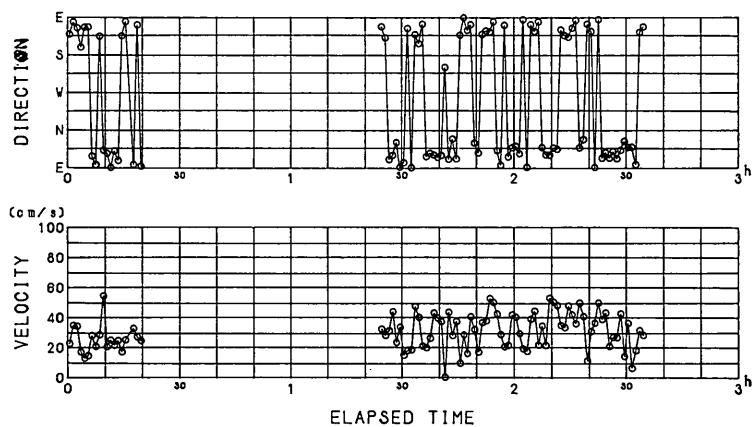


図-11.b 1分間平均流速・流向の時間変化(1回目 3/1, B地点)

2.MAR.1980. NORTHERN POINT START TIME 13:45

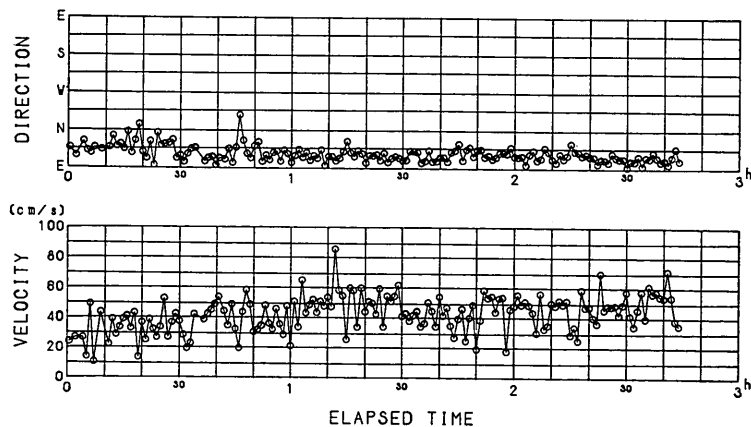


図-11.c 1分間平均流速・流向の時間変化(1回目 3/2, B地点)

螢光砂を用いた碎波帯内における局所的砂移動の観測

的に潮位変化の影響を大きく受けるため、トレンド成分がかなり存在している。

b) 第2回目の調査時の状況

第2回目の調査時には、第1回目の時ほど明瞭ではないがやはりカスプ地形が形成されており、調査地点も第1回目のA地点同様、カスプの突出部の前方に設定された。ただ、流れの状況はかなり異なっており、図-12に示すように、流向はかなり一定しており、流速の値も50 cm/s程度とかなり大きな値となっている。第2回目ではBACSによるフロート追跡調査は行わなかったため、海浜流の平面的パターンは明らかではないが、目視によれば測定点の数10m左方にリップカレントが発生してお

り、測定点はちょうどその離岸養流の中に位置していたものと考えられる(図-6参照)。なお、図-6中の等深線は9月1日に実施した深浅測量に基づくもので、TP基準で示されている。

(2) 碎波形式、碎波帯幅

碎波形式は、第1回目、第2回目ともに plunging breaker であった。碎波帯幅は、第1回目では、図-5で示される碎波発生割合の状況からみて120m程度、第2回目では目視の結果から150m程度と考えられる。

(3) 螢光砂調査結果の一覧

図-13~15は、第1回目と第2回目の調査結果の一次処理データから、波や流れの外力と螢光砂のデータを相

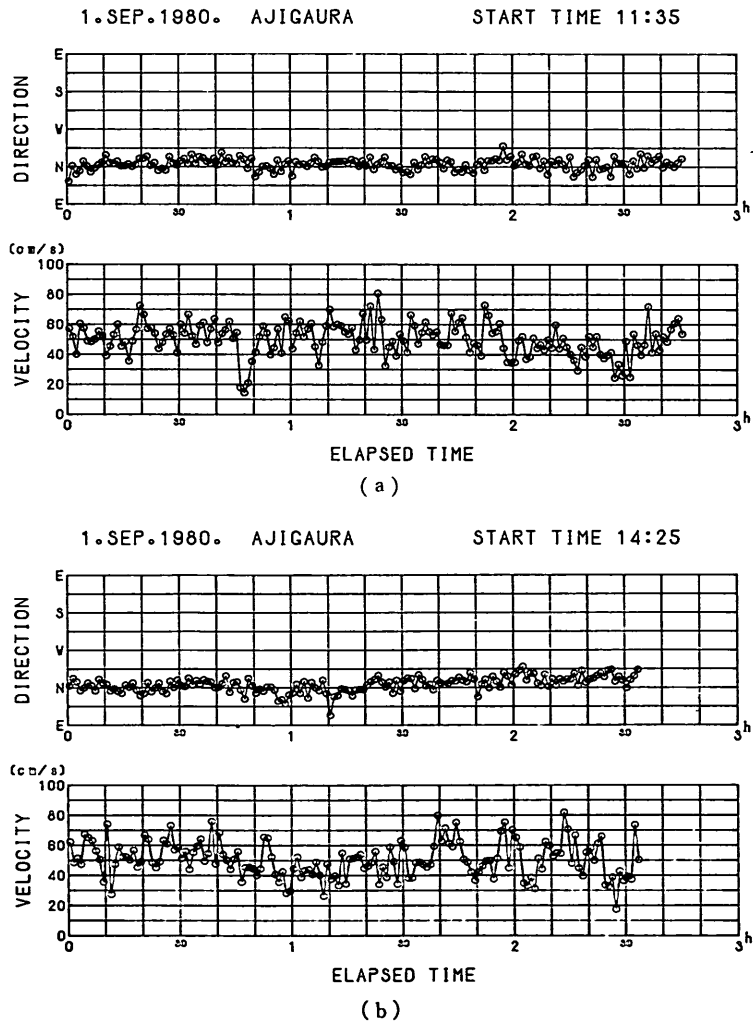


図-12 1分間平均流速・流向の時間変化(2回目)



互に対応をつけた形で示したものである。このうち、**図-13, 14** は、それぞれ、第1回目の調査のA地点とB地点の結果を示し、**図-15** は第2回目の調査結果を示している。

図の上段には、主として波や流れなどの外力を表わす特性量の時間的変化が示されている。各変数の意味は次のとおりである。

- $|\bar{u}|$  ; 平均流速の絶対値。
- $H_{u,1/3}$ ; 後述する  $\phi_w$  の方向の流速変動の有義波高。
- $T_{u,1/3}$ ; 同上の有義周期。

$\gamma^*$  ; long-crestedness。波向きの集中度を示すパラメーターで、波動による流速変動を  $u, v$  で表わすとき、次式で定義される<sup>12)</sup>。

$$\gamma^{*2} = \frac{(\bar{u}^2 + \bar{v}^2) - \sqrt{(\bar{u}^2 - \bar{v}^2)^2 + 4\bar{u}\bar{v}^2}}{(\bar{u}^2 + \bar{v}^2) + \sqrt{(\bar{u}^2 - \bar{v}^2)^2 + 4\bar{u}\bar{v}^2}}$$

この  $\gamma^*$  の値が0に近づくほど波峰線は長くなり、逆に1に近いほど、波がランダムな方向から入射して波峰線が短くなるという状況に対応している。

$\phi_w$  ; 波動による流速変動の主方向 (principal

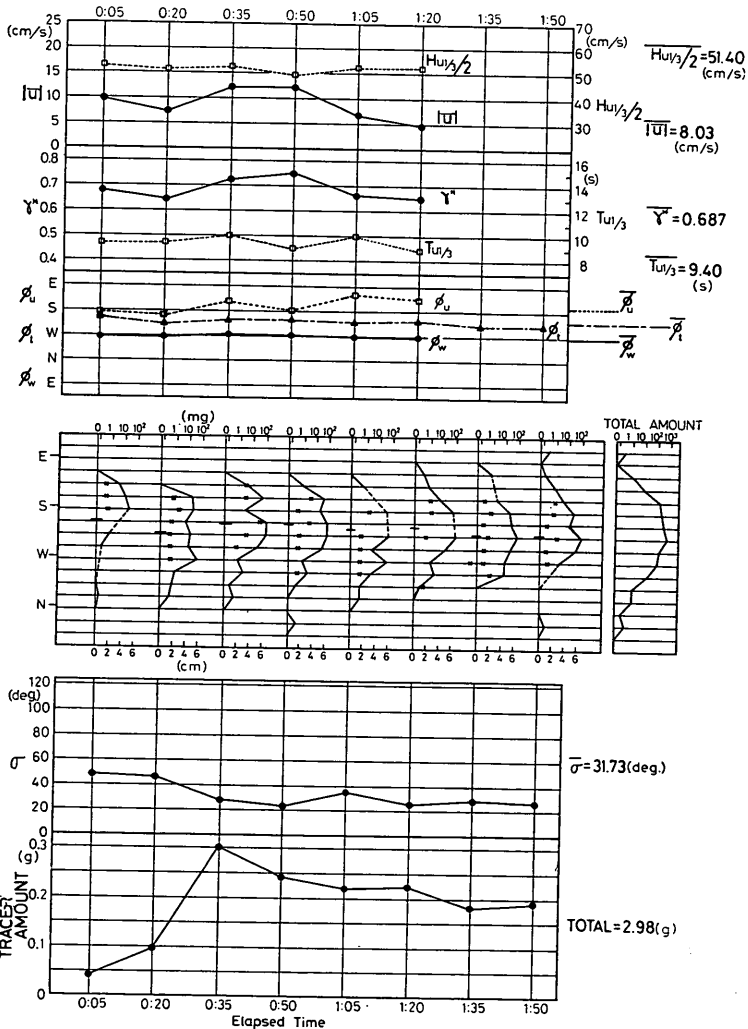


図-13-a 第1回目A地点、2月29日の調査結果の一覧

螢光砂を用いた碎波帯内における局所的砂移動の観測

direction) で、次式で定義される<sup>12)</sup>。

$$\tan 2\phi_w = \frac{2\bar{uv}}{u^2 - v^2}$$

$\phi_w$  ; 平均流ベクトルの方向。

$\phi_e$  ; 螢光砂の円周上での平均位置を示す方向。ただし、3月1日のB地点の場合には、螢光砂が全円周上で検出され、このため平均位置の算出が不可能になるので、第一のピークと第二のピーク位置を示す方向をそれぞれ  $\phi_{e1}$  と  $\phi_{e2}$  の記号で

示している。

なお、 $\phi_e$  を除くこれらの変数の値は、螢光砂の各サンプリング時刻の直前の15分間の流速データ ( $Dt=0.1$  s) から、その平均値として計算した値である。

図の中段では、折線で円周上の各点の螢光砂重量の分布を示している。この螢光砂重量は、螢光砂の読取値から図-7で示した検定値を用いて各層の重量濃度を求め、それからさらに自然砂の比重を2.65、空隙率を0.4として各層内に含まれる螢光砂重量を算出し、それらを合計した値である。また、第1回目の調査結果を示す図-

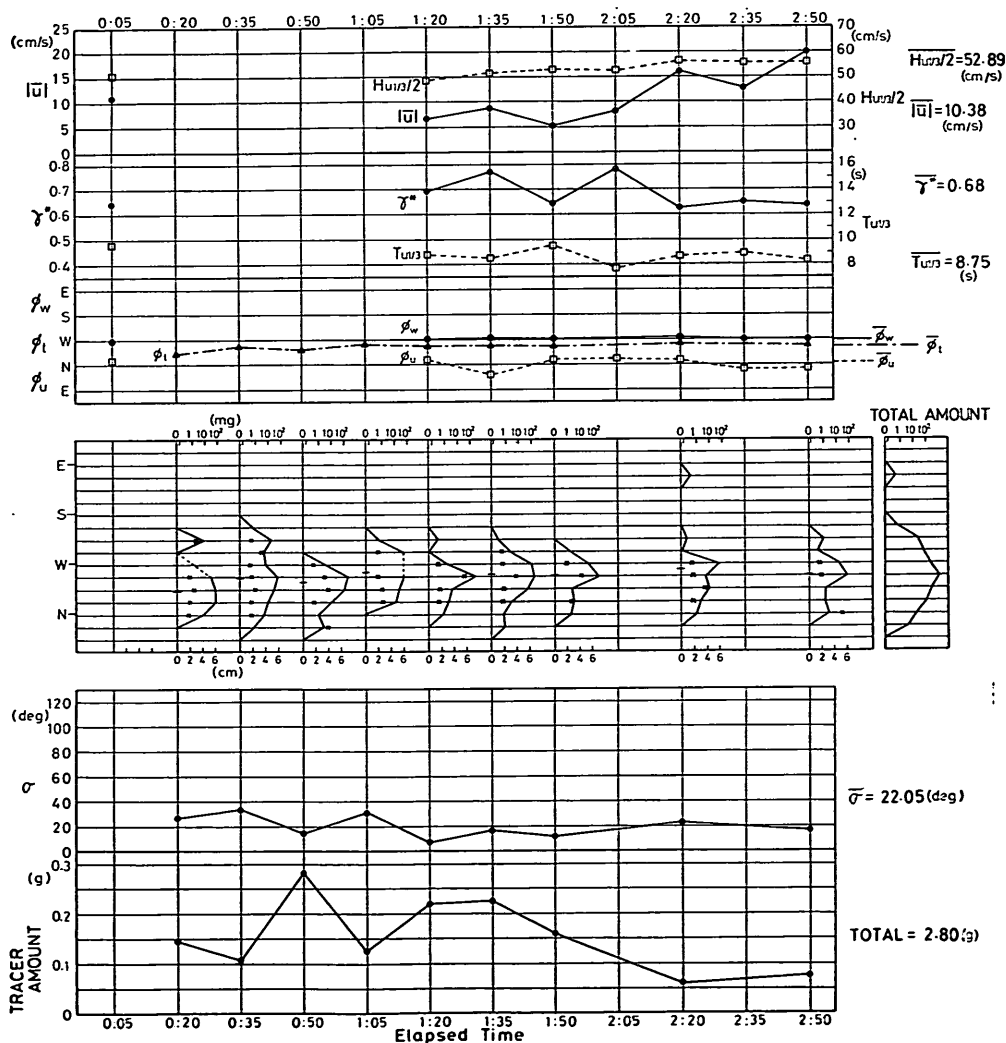


図-13・b 第1回目A地点、3月1日の調査結果の一覧

13, 14 では、×印で螢光砂の埋没深さも示してある。(第2回目の結果は、5. で詳しく述べる。) この埋没深さの定義には、Kraus<sup>13)</sup> の提案した 80% cut-off の深さを採用した。この 80% cut-off 深さとは、螢光砂濃度の鉛直分布形において、その深さから上方の部分の面積が全体 80% のになるような深さのことである。この埋没深さの計算に際しては、螢光砂のカウント数の 6 層の合計値が 10 以上になるものを有効サンプルとし、計算の対象とした。なお、図-13, 14 で螢光砂重量分布を示す折線の一部が、実線ではなく破線になっているものがある

が、それはその部分が欠測であったことを意味する。

図の下段に示されている  $\sigma$  は、円周上の螢光砂の平均位置 ( $\phi_i$ ) の回りの螢光砂分布の標準偏差を、対応する角度で表わしたものである。ただし、3月1日のB地点については  $\phi_{11}$  の回りの標準偏差を示している。最下段には、中段で示した円周上の各点の螢光砂重量を合計した値を示している。

以上の各変数の値は、螢光砂投入直後の 5 分後の値から、以後 15 分間隔で示されているが、中には値が抜けているところはいくつかある。これらはすべて、何らか

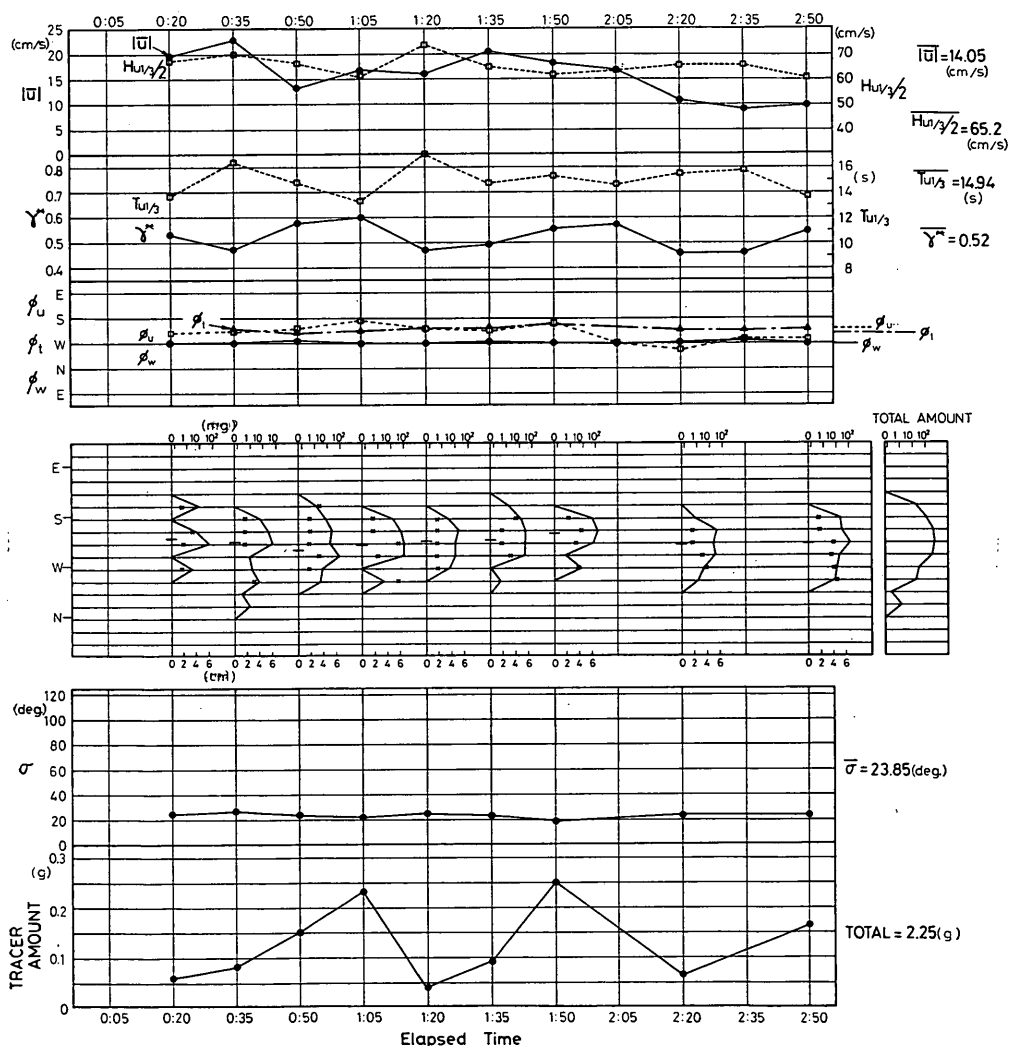


図-13.c 第1回目A地点, 3月2日の調査結果の一覧

蛍光砂を用いた碎波帯内における局所的砂移動の観測

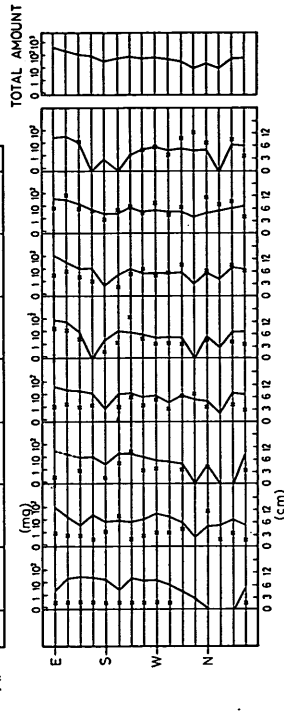
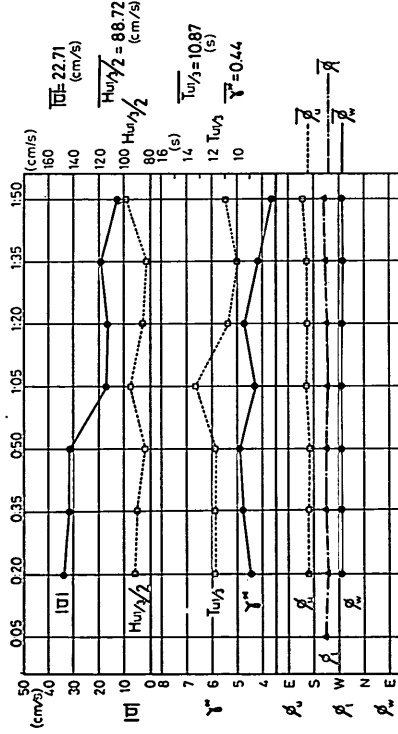
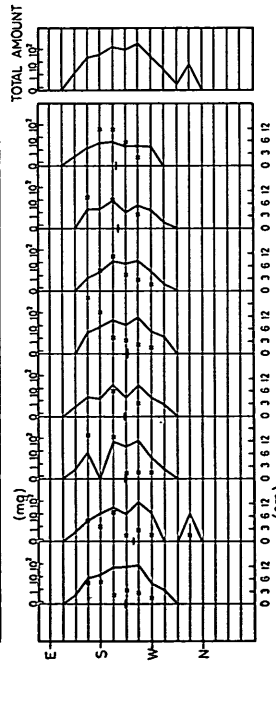
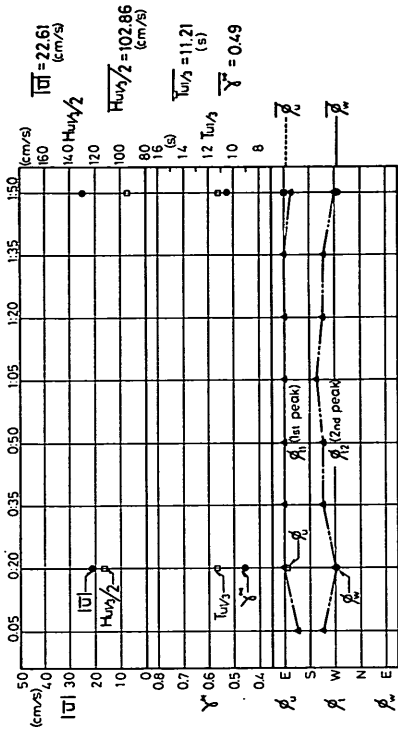


図-14・a 第1回目B地点, 2月29日の調査結果の一覧

図-14・b 第1回目B地点, 3月1日の調査結果の一覧

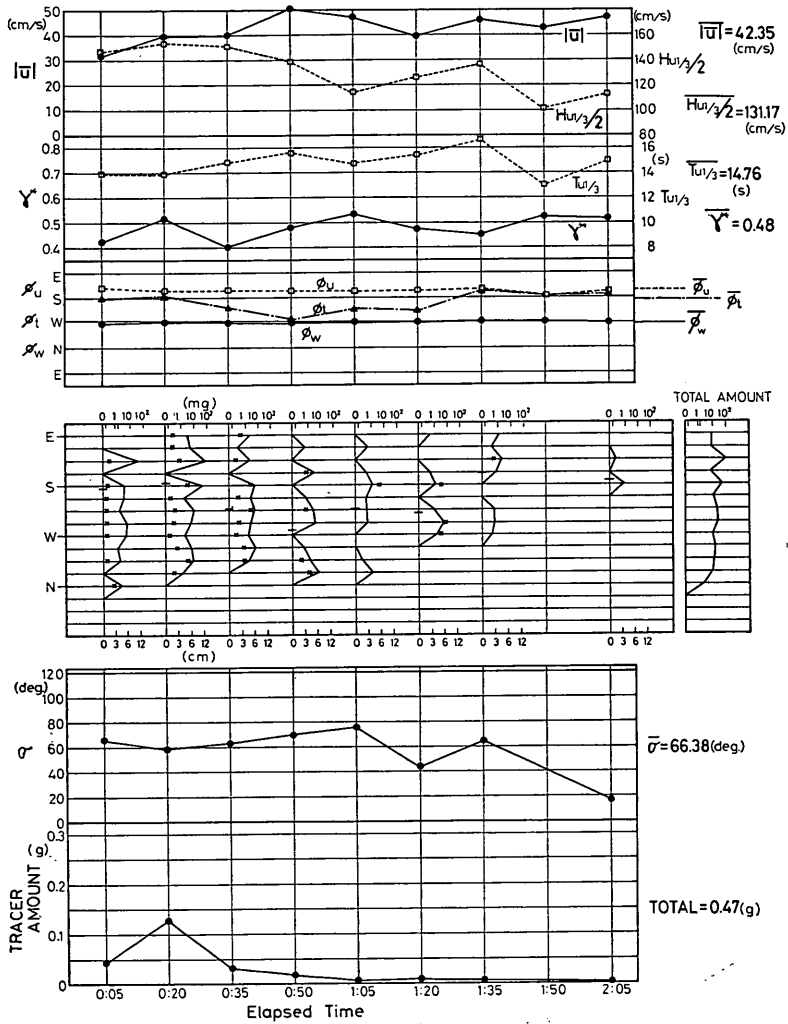


図-14.c 第1回目B地点, 3月2日の調査結果の一覧

蛍光砂を用いた碎波帯内における局所的砂移動の観測

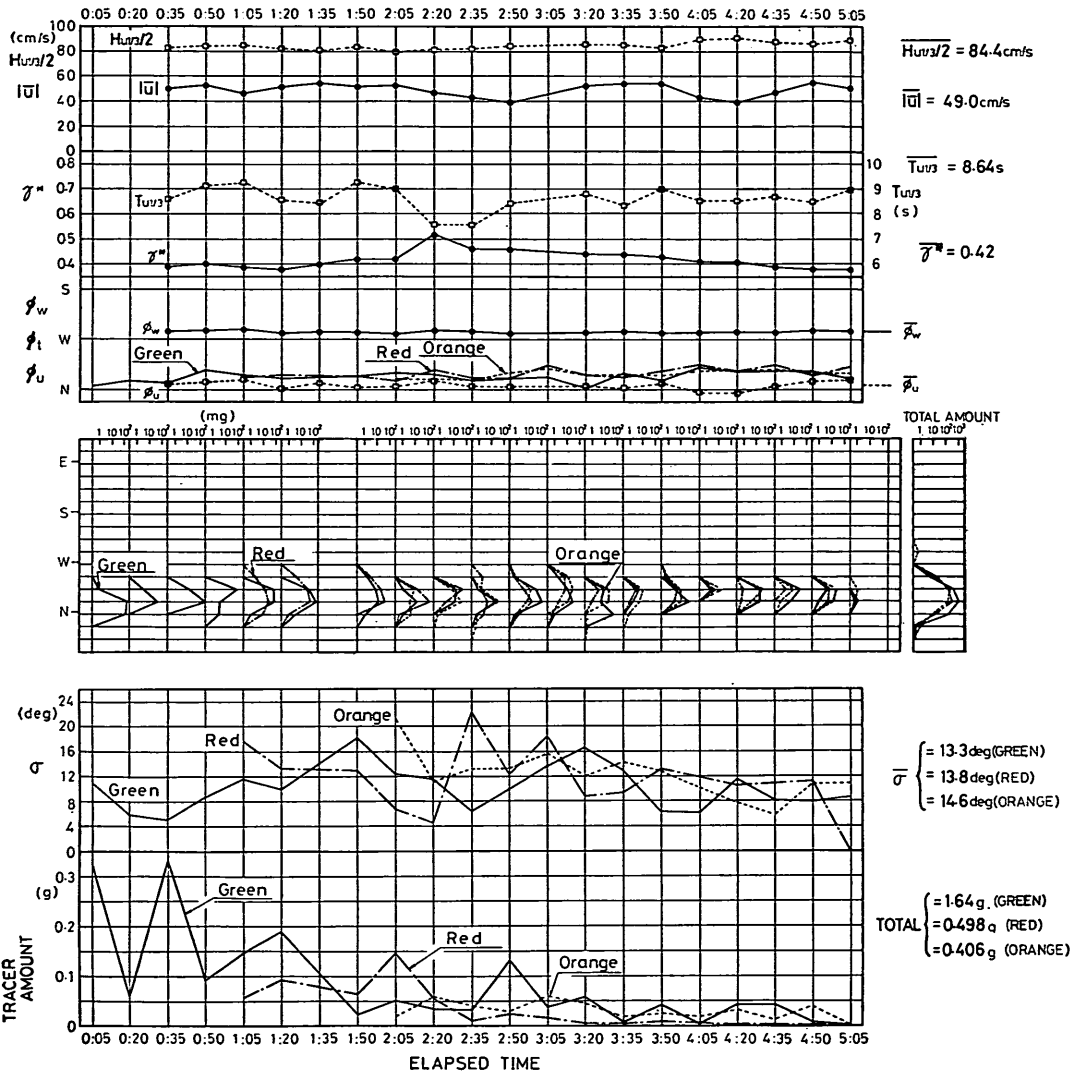


図-15 第2回目の調査結果の一覧

の理由でその点が欠測となっていることを意味する。

なお、蛍光砂の生データは、グラフ化してこの報告の最後に付録として記載した。

3. 波・流れ等の外力と蛍光砂の移動特性との関連

3.1 蛍光砂の移動方向

(1) surf zone の場合

二次元的な拵がりを持つ場での砂移動を問題にする際には、砂の輸送量の絶対値だけではなく、その方向特性

も非常に重要となる。しかし、従来の取扱いでは、この方向特性については、直接的な形ではあまり問題とされていないようである。たとえば、Fleming & Hunt<sup>9)</sup> は、二次元海浜変形シミュレーションモデルにおいて、その基本となる局所的漂砂量公式として砂が平均流の方向に輸送されるという考え方の式を用いており、砂の移動方向は平均流の方向によってそのまま決定されるという取扱いをしている。

方向特性に関するこのような単純な取扱いが、妥当性を欠くものであることは、図-16、図-17 によって明瞭

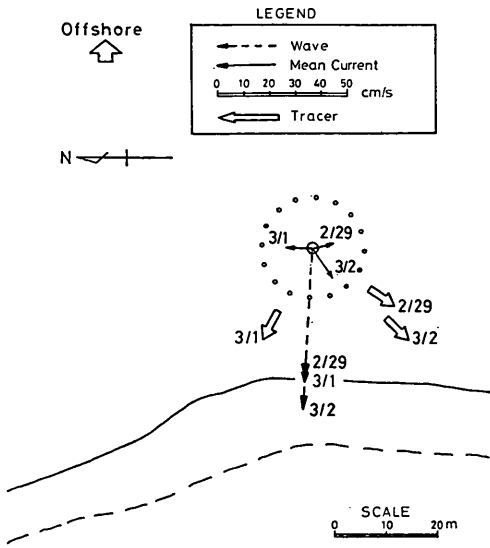


図-16 波・流れの方向と蛍光砂の平均移動方向  
(第1回目, A地点)

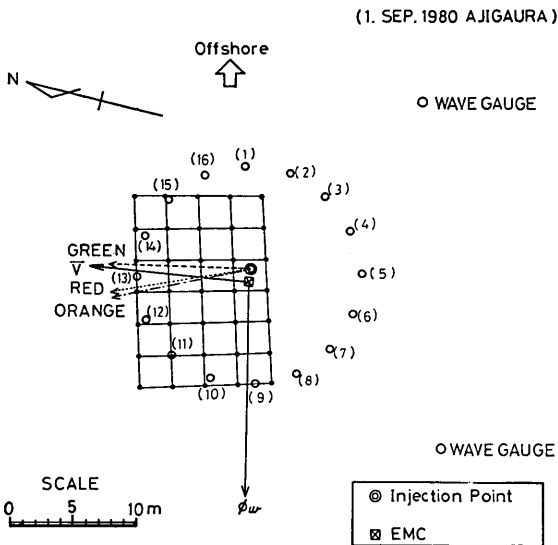


図-17 波・流れの方向と蛍光砂の平均移動方向  
(第2回目)

に示されている。図-16, 17 は後述する 3.2 の方法によって求めた蛍光砂の流下方向と平均流の方向および波に伴う軌道流の方向を示している。特に第1回目の結果を示している図-16では、蛍光砂は平均流の方向からかなりはずれていることが分かる。

沿岸域での漂砂問題の取扱に際しては、通常「沿岸漂砂」と「岸・沖漂砂」(「たて漂砂」ともいう)に分けて論じられることが多い<sup>14)</sup>。また、「岸・沖漂砂」と言う場合、暗に波が岸沖方向に、すなわち汀線に直角に入射するという状況が前提とされている。もちろん、沿岸流が卓越しているような自然海岸ではこのような把らえ方は有効である。しかし、リップ・カレントなどの存在する場合や海岸構造物の付近では、波と流れがそれぞれ任意の角度で存在しており、漂砂を単純に沿岸方向と岸沖方向に分けて把らえるのは、やや形式的にすぎると思われる。

そこで、ここでは図-18のように座標軸をとって考えることにする。すなわち、波の進行方向(これが本質的な意味での岸・沖漂砂の生じる方向である)とそれに直角方向に新たに  $\xi, \eta$  軸をとって考える。

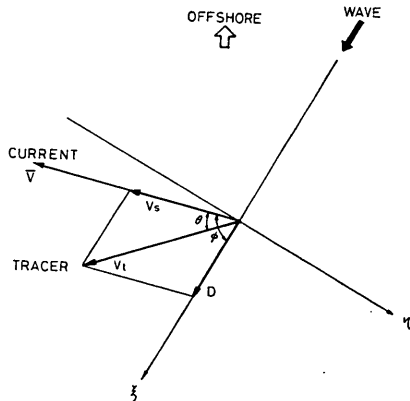


図-18 座標軸のとり方および記号の定義

ここで、次に今回の調査で得られた蛍光砂データの意味について考えてみる。ここで得られるデータは、 $t=t_0$  である量の蛍光砂を中心点に投入した後の、時刻  $t=t$  における円周上のある地点での蛍光砂の濃度である。これを別の側面から見ると、時刻  $t=t_0$  に中心点  $(\xi_0, \eta_0)$  にあった一粒の砂粒子が、時刻  $t=t$  において円周上のある位置  $(\xi, \eta)$  に存在する確率、すなわち遷移確率密度

$$f(\xi, \eta, t_0 | \xi, \eta, t) \quad (1)$$

を求めることに等しい。すなわち、ここでは砂粒子の運動のランダム性を直接反映したデータが得られる。

このようなランダム性を有する微粒子の運動は、たとえば Brown 運動の取扱いに見られるように、数学的には確率過程の一種である拡散過程(連続マルコフ過程)として把らえることができる。この拡散過程において

は、遷移確率密度  $f$  に関し、次式で示すようないわゆる二次元の Fokker-Planck の方程式(あるいは Kolmogoroff-Feller の前向き方程式とも呼ばれる) が成り立つ<sup>15)</sup>。

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial \xi} [a_1(\xi, \eta)f] - \frac{\partial}{\partial \eta} [a_2(\xi, \eta)f] \\ & + \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} [b_{11}(\xi, \eta)f] + 2\frac{\partial^2}{\partial \xi \partial \eta} [b_{12}(\xi, \eta)f] \\ & + \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} [b_{22}(\xi, \eta)f] \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $a_i(\xi, \eta)$ ,  $b_{ij}(\xi, \eta)$  は、それぞれ漂速 (drift velocity) および拡散係数と呼ばれる量で、次式で定義される。

$$\begin{aligned} a_1(\xi, \eta) = & \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (p - \xi) \\ & \times f(\xi, \eta | p, q, \tau) dp dq \end{aligned} \quad (3 \cdot a)$$

$$\begin{aligned} a_2(\xi, \eta) = & \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (q - \eta) \\ & \times f(\xi, \eta | p, q, \tau) dp dq \end{aligned} \quad (3 \cdot b)$$

$$\begin{aligned} 2b_{11}(\xi, \eta) = & \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (p - \xi)^2 \\ & \times f(\xi, \eta | p, q, \tau) dp dq \end{aligned} \quad (3 \cdot c)$$

$$\begin{aligned} 2b_{12}(\xi, \eta) = & \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (p - \xi)(q - \eta) \\ & \times f(\xi, \eta | p, q, \tau) dp dq \end{aligned} \quad (3 \cdot d)$$

$$\begin{aligned} 2b_{22}(\xi, \eta) = & \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (q - \eta)^2 \\ & \times f(\xi, \eta | p, q, \tau) dp dq \end{aligned} \quad (3 \cdot e)$$

ただし、式 (2), (3) では、遷移確率密度  $f$  に関して定常性を仮定している。したがってこの場合式 (1) は、

$$f(\xi_0, \eta_0 | \xi, \eta, t - t_0) \quad (4)$$

の形になる。

拡散過程では、粒子の初期存在確率と遷移確率密度  $f$  が与えられれば、粒子の運動は確率的な意味で完全に決定される。そこで、結局問題となるのは、遷移確率密度  $f$  に関する特性量  $a_i(\xi, \eta)$  と  $b_{ij}(\xi, \eta)$  を実際の物理過程に関与するパラメーターと如何にして結びつけるかということに帰着する。今の場合、砂粒子の平均的な移動方向について注目しているから、直接問題となるのは、 $\xi$  方向、 $\eta$  方向それぞれについての平均移動速度  $a_1(\xi, \eta)$ ,  $a_2(\xi, \eta)$  である。ただここで注意しなくてはならないのは、拡散係数  $b_{ij}(\xi, \eta)$  が空間的に変化する場合には、その変化率が見かけの移流速度として現われてくることである。このことは、次のような単純な場合を例にとって考えれば簡単に理解できる。いま、一次元の場合を考えて、さらに、 $a_1=0$ ,  $b_{11}=\kappa\xi$  という状況を設定してみる。

これらの値を先の式 (2) に代入すると、次式が得られる。

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \kappa \frac{\partial f}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \kappa \xi \frac{\partial f}{\partial \xi} \right) \quad (5)$$

これは、移流速度  $-\kappa$ , 拡散係数  $\kappa\xi$  を有する一次元の拡散方程式に他ならない。すなわち、拡散係数の空間的な変化率の逆符号の値が見かけ上の移流速度として現われることが分る。この拡散係数の非一様性は、通常あまり問題とはならないが、碎波帯内の場合には、岸沖方向の非一様性が大きく、さらに構造物がある場合には、その周辺の非一様性も大きくなるから、無視出来ない問題となる。

しかし、今回の調査結果を処理する上においては、円周内部の一様性を仮定せざるを得ないので、以下の議論では、上記のような拡散係数の非一様性に関わる問題は、無視することにする。そうすると、砂の移動方向は次式の形で簡単に表わせる。(記号は 図-18 参照)。

$$\tan(\phi - \theta) = -\frac{a_2}{a_1} \quad (6)$$

次に、式 (6) の右辺の  $a_1$  と  $a_2$  について考えてみる。式 (3・a), (3・b) から明らかなように、 $a_i$  は単一砂粒子の  $i$  方向への単位時間当りの平均的移動量、すなわち平均輸送速度を表わしている。この平均輸送速度に寄与する物理的要素は、平均流に基づく輸送速度

$$\bar{V}_s = (V_s \cos \phi, V_s \sin \phi) \quad (7)$$

と、 $\xi$  方向すなわち波の進行方向への波の流速変動と砂粒子濃度の時間変動の相関の存在 (すなわち岸・沖漂砂) に基づく輸送速度  $D$  である。(図-18 参照) これより、

$$a_1 = V_s \cos \phi + D \quad (8 \cdot a)$$

$$a_2 = -V_s \sin \phi \quad (8 \cdot b)$$

となり、けっきょく次式が得られる。

$$\tan(\phi - \theta) = \frac{V_s \sin \phi}{V_s \cos \phi + D} \quad (9)$$

なお、ここで  $D$  の符号としては、波の進行方向へ向うものを正にとっている。

一方、 $a_1$  の値は、後の 3.2 で述べるような方法で今回の現地観測データから算定することができ (式 (11)), さらに  $V_s$  も計算できるから (式 (15)), これらの値を用いて式 (8・a) から  $D$  の値を算出することができる。そこで本節では、砂粒子の平均移動方向を決定づける上で重要な意味をもち、同時に、岸・沖漂砂の問題に密接に関連しているこの  $D$  の値について検討してみる。

岸・沖漂砂の問題は、最近かなり注目されるようにな



っているが、現象の複雑さから、その実態の解明はあまり進んでいない。特に、ここで問題となる碎波帯内の岸・沖漂砂については、ほとんど分っていない状態である。しかし、碎波点より沖側については、最近いくつかの研究が報告されている。例えば砂村ら<sup>16)</sup>は、浮遊砂の場合には、ripple の存在によって沖向きに輸送されるとして、ripple のスケールならびに浮遊砂の平均濃度等と結び付けて、沖向き浮遊砂量式を提案している。一方、野田ら<sup>17)</sup>は、掃流砂の場合には、流速変動の非対称性が大きく影響し、輸送方向は常に岸向きになることを示した。また、上述の砂村らの浮遊砂量式と組合せて、全漂砂量について議論し、その輸送方向が、浮遊砂と掃流砂の相対的割合と流速変動の非対称性などによって決まるとした。

碎波帯内においては、ripple は存在しないのが一般的であるから、浮遊砂に関する砂村らの取扱い方は、碎波帯内には適用できない。しかし、掃流砂に関する野田らの議論は、定量的な面は別として、ある程度碎波帯内にも適用できると考えられる。すなわち、少なくとも掃流砂が卓越する状況においては、流速変動の非対称性を表すパラメータとして skewness ( $S$ ) を用いて、

$$D \sim S \quad (10)$$

という関連性が期待できる。そこでいま、現地観測データから、先に述べた方法で  $D$  を計算し、その値と、流速記録より算定した skewness の値の関連を調べてみた。その結果を 図-19 に示す。ここで、縦軸の変数としては、 $D$  を流速変動の有義波高  $H_{u1/3}$  で無次元化したもの

を用いている。また、図中のポイントに矢印で範囲を示しているものがあるが、これは第 1 回目の調査では 2.3 で述べたように、電磁流速計の設置方位の計測に問題があったため、波の主方向が汀線に直角になるように方位を決め、誤差分を見込んでそれから  $\pm 10^\circ$  の設置方位の場合の計算値を示したものである。なお、2月29日の値の計算では、後述するように  $V_s$  の値に問題があったため、3月1日と2日の  $V_s/\bar{V}$  の値の平均値に2月29日の  $\bar{V}$  の値をかけて  $V_s$  を推定した。

図-19 によると、ほぼ skewness の増大に対応して  $D/H_{u1/3}$  の値も増加していく様子がうかがえる。ただ、第1回目の結果に比べて、第2回目の値は相対的に低くでてきている。第1回目と第2回目の状況で大きく異なるものは、その外力特性で、第2回目の方が平均流速および変動流速ともかなり大きな値となっている。このことから、第2回目では、底面せん断力がかかなり大きくなり、そのため相対的に浮遊砂の割合が増加し、その結果  $D/H_{u1/3}$  の値が小さくでてきたものと考えられる。

(2) swash zone の場合 (第1回目, B地点)

この場合には、run-up 距離が円の半径と同程度となるため\*、先と同じような取扱いをすることはできない。しかも、swash zone 内に半径 10 m もの円を設定すれば、円内の非一様性、特に岸沖方向の非一様性が大きく影響するから、(1) で用いたような円内の一様性の仮定は使用できない。そこでここでは、逆に、このような岸沖方向の非一様性の現われ方を螢光砂調査の結果から検討してみることにする。

Swash zone での3回の螢光砂調査は、2.3 で述べたように、ほぼ高高潮位時に行われたが、各々の調査時の平均潮位は異なっていて、2月29日、3月2日、3月1日の順に高くなっている。したがって、螢光砂調査は相対的に見れば、この順で swash zone のより岸側で行われたことになり、上述の岸沖方向の非一様性の効果を見ることができ。さて、先の 図-5 あるいは 図-9 の中で、前浜部分に shoreline と付記した実線の曲線と、wet line と付記した破線の曲線があるが、これらは両方とも2月29日の9:08~9:48 に行った BACS による空中写真から読みとったもので、次の様な意味の曲線である。すなわち、前者は、run-up 波の back-wash が引続く

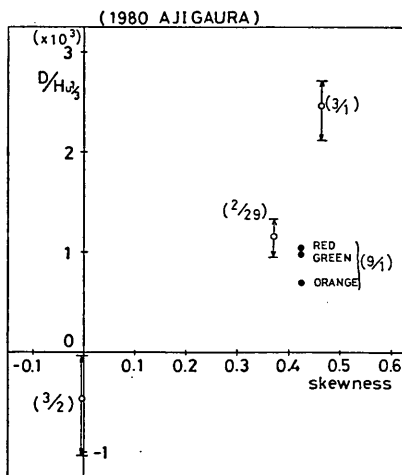


図-19  $D$  と skewness の関係

\* この run-up 距離を Hunt 式を用いて概算してみると、次のようになる。

2月29日	6.3 m
3月1日	8.4 m
3月2日	10.3 m

run-up 波の up-rush とがぶつかる平均的な line を示し、後者は、空中写真で見て、白く乾いて見える部分と浸って黒っぽく見える部分の境界線を示している。この二つの曲線は、swash zone の領域と B 地点の相対的位置関係を示す上で非常に重要である。しかし、B 地点の螢光砂調査時には、BACS による空中写真撮影は行っていないので、ここでは、空中写真撮影時の潮位と各々の調査時の潮位の差と前浜勾配 (1/18) の値から計算される距離だけこれらの線を平行移動させることによって、これらの曲線の位置を推定した。その結果が、図-20 に示されている。

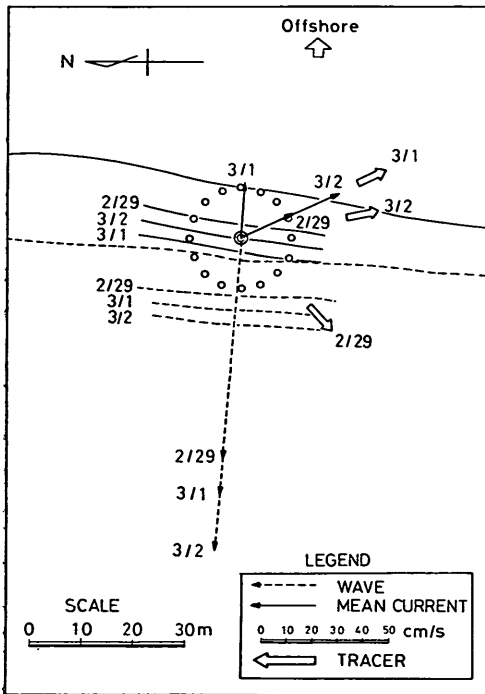


図-20 波・流れの方向と螢光砂の平均移動方向 (第1回目, B地点)

これを見ると、shoreline の位置と投入点の位置関係が各調査日ごとにかかなり異なっていることが分る。すなわち、2月29日では投入点は shoreline の岸側に位置するのに対し、3月1日では逆に沖側になっている。また、3月2日の投入点はほぼ実線付近になっている。

同図には、3.2 で示す方法によって計算された螢光砂の平均移動方向が記されているが、その岸沖方向の成分を見ると、上述の投入点の相対的位置関係が螢光砂の移動方向に密接に関連していることが理解される。すなわ

ち、螢光砂は、shoreline の岸側では岸向きの平均移動方向、沖側では逆に沖向きの平均移動方向となっていることが分る。なお、図中に示されている平均流の方向は全て沖向きの成分をもっているが、これは、run-up 波の up-rush 時の水深に比べ、back-wash 時の水深がかなり小さいことによるものと考えられる。

また、沿岸方向には、平均流・螢光砂ともに、おおむね沖に向かって右側に流れている。これは、カズブ地形の場合に生じる湾入部に向う流れと砂移動パターン<sup>18)</sup>に対応したものであると考えられる。

### 3.2 螢光砂の移動速度

螢光砂の平均移動速度は次の様にして算出した。すなわち、3.1 で述べたように、螢光砂の濃度  $C(\omega, t)$  は、時刻  $t$  に円周上の  $\omega$  の方向の位置に螢光砂粒子が存在する確率に対応している。またこのとき、螢光砂粒子は、トラベリングタイム  $t$  で、 $\xi, \eta$  方向にそれぞれ  $R \cos \omega, R \sin \omega$  ほど移動したとみなせるから、移動速度としてはそれぞれの方向に  $(R \cos \omega)/t, (R \sin \omega)/t$  を有していることになる。したがって、 $\xi, \eta$  方向の平均移動速度  $u_m, v_m$  は、その確率平均をとって次式で表わすことができる。

$$u_m = \frac{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} C(\omega, t) \frac{R \cos \omega}{t} d\omega dt}{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} C(\omega, t) d\omega dt} \quad (11)$$

$$v_m = \frac{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} C(\omega, t) \frac{R \sin \omega}{t} d\omega dt}{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} C(\omega, t) d\omega dt} \quad (12)$$

したがって、螢光砂の平均移動方向  $\theta$  と平均移動速度  $V_i$  は、次式で表わせる。

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{v_m}{u_m} \right) + \phi - 2\pi \quad (13)$$

$$V_i = \sqrt{u_m^2 + v_m^2} \quad (14)$$

これより、平均流方向への平均移動速度  $V_s$  は、

$$V_s = V_i \frac{\sin(\phi - \theta)}{\sin \phi} \quad (15)$$

となる。

螢光砂の平均移動方向、 $\xi$  方向への平均移動速度については、3.1 で既に述べたので、ここでは平均流方向への平均移動速度について検討する。

表-4 は、上式によって計算された平均移動速度  $V_i$  の値を、平均流速  $\bar{V}$  の値とともに示したものである。また、同表には、式 (15) で計算される平均流方向への平

表-4 蛍光砂の平均移動速度

月日		$V_t$ (cm/s)	$V_s$ (cm/s)	$\bar{V}$ (cm/s)	$V_s/\bar{V}$ (%)
2/29	A	(0.326)*	(0.301)*	8.0	(3.76)*
	B	1.121	0.978	22.7	4.35
3/1	A	0.298	0.167	10.4	1.61
	B	0.284	(-15.05)**	22.6	(-66.6)**
3/2	A	0.230	0.282	14.0	2.01
	B	0.618	0.680	42.4	1.61
9/1	緑	0.687	0.691	49.0	1.41
	赤	0.606	0.598	49.0	1.22
	黄橙	0.385	0.379	49.0	0.77

\* サンプルング継続時間が不足しているため信頼性が劣る。

\*\* 電磁流速計の設置方向の決め方に問題がある。

表-5 平均移動速度に関する他の研究者の報告例

報告者	$V_s$ (cm/s)	$\bar{V}$ (cm/s)	調査海岸
橋本・宇多 <sup>19)</sup>	2 ~ 8	20~40	阿字ヶ浦海岸
Kraus et al. <sup>13)</sup>	0.2 ~ 1.6	20~50	同上
Komar et al. <sup>20)</sup>	0.03~0.65	7~60	カリフォルニア El Moreno Beach Silver Strand Beach

平均移動速度  $V_s$  の値、およびそれと平均流の比  $V_s/\bar{V}$  の値も示してある。表中、2月29日のA地点の値の一部がカッコ付きで示してあるが、これは、この場合のサンプルング継続時間が、他のA地点の観測時と比べて、1時間も短かったため(図-13参照)、計算上移動速度がかなり大きくなり、その意味で信頼性に欠けるものと考えられるためである。また、3月1日のB地点の一部にも、カッコ付きで示した値があり、かなり不合理な数値となっているが、これは電磁流速計の設置方向の決め方に問題があったためと思われる。

表-4を見ると、 $V_s$ の値は、各ケースでかなり異なった値を示しているが、平均流速  $\bar{V}$  との比で見るとあまり大きな違いはなく、一部のものを除けば、 $V_s/\bar{V}$  は、ほぼ1~2%の値になっていることが分る。表-5は、今

回の観測結果と比較するために、同じ阿字ヶ浦海岸で行われた橋本・宇多<sup>19)</sup>の調査結果と Kraus・Farinato・堀川<sup>13)</sup>の調査結果、および他の海岸で行われた代表的な調査例として Komar & Inman<sup>20)</sup>の結果をあわせて示したものである。ただし、これらの報告例では、すべて空間的な蛍光砂の分布の重心の移動速度として平均移動速度を求めており、対象としている空間スケールも数10~数100mとかなり広がっている。これらの報告例と今回の結果を比較すると、Komarらの結果とは、だいたい同じオーダーの値となっているが、同じ阿字ヶ浦海岸での調査例である橋本らや Krausらの結果と比べると、ここでの値はやや小さくなっている。

そこでここでは、少し別の側面から  $V_s/\bar{V}$  の値について検討してみることにする。後述するような、空間積分法によれば、蛍光砂の碎波帯全体にわたる平均埋没深さを  $\bar{b}$ 、同じく平均移動速度を  $\bar{V}_s$  とし、碎波帯幅を  $S_B$  とするとき、沿岸漂砂量  $Q_i$  を

$$Q_i = \bar{b} \bar{V}_s S_B \quad (16)$$

で求めることができる。

さて、蛍光砂の平均埋没深さ  $\bar{b}$  は、4.2で述べるように、碎波々高  $H_b$  に主として支配されると考えられるので、ここでは次のように仮定する。

$$\bar{b} = \alpha H_b \quad (17)$$

ここに、 $\alpha$  は比例定数である。

また、蛍光砂の平均移動速度  $\bar{V}_s$  も、沿岸流速  $\bar{V}_i$  との間に次のような関係を仮定する。

$$\bar{V}_s = \beta \bar{V}_i \quad (18)$$

ここでは、 $\bar{V}_i$  の算定式として Longuet-Higgins による沿岸流速公式<sup>21)</sup>を用いる。

$$\bar{V}_i = \frac{5\pi}{8} \frac{\tan \beta}{C_f} u_m \sin \alpha_b \cos \alpha_b \quad (19)$$

ここに、 $\tan \beta$ ; 海底勾配、 $C_f$ ; 摩擦係数、 $u_m$ ; 碎波点での最大水平軌道流速、 $\alpha_b$ ; 碎波角、である。

いま、碎波々高と碎波水深  $h_b$  に関して、良く用いられる

$$H_b = \gamma h_b \quad (20)$$

という関係を仮定し、さらに長波近似を採用すれば、

$$u_m = \frac{H_b}{2} \sqrt{\frac{g}{h_b}} = \frac{\gamma}{2} C_b \quad (21)$$

となる。これらの関係をすべて先の式(16)へ代入すると、

$$Q_i = \frac{5\pi}{16} \alpha \beta \cdot \frac{\tan \beta}{C_f} \gamma H_b C_b \sin \alpha_b \cdot \cos \alpha_b \cdot S_B \quad (22)$$

となり、さらに、

螢光砂を用いた砕波帯内における局所的砂移動の観測

$$S_D \cdot \tan \beta \cong h_b = \frac{H_b}{\gamma} \quad (23)$$

の関係から、

$$\begin{aligned} Q_i &= \frac{5\pi}{16} \cdot \alpha \beta \frac{1}{C_f} H_b^2 \cdot C_b \cdot \sin \alpha_b \cdot \cos \alpha_b \\ &= \frac{5\pi}{2\rho g} \frac{\alpha \beta}{C_f} \cdot P_{ts} \end{aligned} \quad (24)$$

ここに、

$$P_{ts} = \frac{1}{8} \rho g H_b^2 C_b \sin \alpha_b \cdot \cos \alpha_b$$

である。

式 (24) は、CERC 公式

$$Q_i = K P_{ts} \quad (25)$$

と同形になっている。Shore-Protection Manual<sup>22)</sup> によれば、上式中の係数  $K$  は、

$$K = 4.01 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$$

であるから、これと式 (24) の係数とを等しいと置けば、次式が得られる。

$$\frac{\alpha \beta}{C_f} = 0.0526 \quad (26)$$

いま、仮に  $\alpha$  の値として、Madsen<sup>23)</sup> にならって、 $\alpha = 0.0505$  を用いれば、けっきょく次式を得る。

$$\bar{V}_s = 1.04 C_f \bar{V}_i \quad (27)$$

ここで、 $C_f$  の値としてよく用いられる値  $C_f = 0.01$  を上式に代入すれば、 $\bar{V}_s/\bar{V}_i$  は約 1% となる。これは今回の測定結果とほぼ同じ値である。このようなことから、今回の測定結果は、先述の Kraus らの測定例と比べて必ずしも不合理な値とは言えないと考えられる。

### 3.3 螢光砂の水平拡散

砕波帯内での砂粒子の運動を特徴づけるためには、その平均的移動速度だけでなく、その回りの拡散に関する特性も知る必要がある (3.1 の式 (2) 参照)。しかし、今回の調査方法では、砂の移動方向や移動速度に関する特性は明確に把握されるものの、拡散特性については十分把握しきれない面がある。というのは、この方法では、平均移動方向に直角方向の拡散に関する情報しか得られず、このため二次元的な拡散に関する特性を、各々の成分に分解にした形で把握することができないからである。したがって、各ケース間の拡散特性を、相互に、比較することはかなり困難になる。そのため、ここでは、定量的な議論は避け、やや大まかな観点から測定結果をながめてみることにする。

表-6は、図-13~14 で示した円周上の螢光砂の分布の標準偏差  $\sigma$  の平均値と、波動の long-crestedness  $\gamma^*$ 、

表-6 螢光砂の拡散幅

月 日		$\sigma$ (deg.)	$\gamma^*$	$H_{1/8}^2/(2T_{1/8})$ (cm <sup>2</sup> /s)
2/29	A	31.7	0.69	55.5
	B	29.9	0.440	—
2/ 1	A	22.1	0.68	61.9
	B	106.2	0.49	—
3/ 2	A	23.9	0.52	43.4
	B	66.4	0.48	—
9/ 1	緑	13.3	0.42	210.4
	赤	13.8	0.42	210.4
	黄橙	14.6	0.42	210.4

それに波動による拡散効果を表わすパラメーターとして  $H_{1/8}^2/(2T_{1/8})$  の値 (以後これを拡散係数と呼ぶ) を示したものである。これをもとに、まず surf zone 内の測定点の結果について検討してみる。

9月1日の調査では、2.4の(1)で述べたように平均流の流向のふらつきが小さく、しかも、螢光砂は波の進行方向にほぼ直角に移動しているから、 $\gamma^*$  で示されるような波向きの分散の効果は、拡散幅にはあまり影響しないと思われる。したがって、この場合には波動運動による拡散効果が、他の要因に比べて  $\sigma$  の値に対して支配的な影響をもっていると考えられる。加えて波動による拡散係数は9月1日の値が最も大きく、しかも螢光砂の平均流下方向が波向きに対してほぼ直角であるから、円周上の螢光砂分散値としては波動の影響が最もよく現われる形になっている。したがって、第1回目の調査時における  $\sigma$  の値に対する波動運動の拡散効果のきき方は、第2回目のときより小さいものと考えられる。しかるに、第1回目での  $\sigma$  の値は、逆に第2回目の値の倍前後大きくなっている。これは次のような理由によるものと思われる。

- i) 平均移動方向が、波の進行方向に近くなっているため、波向きの分散の影響を受け、 $\gamma^*$  の値自体も大きい。
  - ii) 2.4の(1)で述べたように、平均流の流向がかなりふらついている。
  - iii) 平均移動速度が9月1日に比べてかなり小さいため、砂粒子の拡散時間が大きくなっている。
- 次に swash zone 内の測定点の結果について考える。

この場合には、2.4の(1)で述べたように、平均流の流向は三日ともかなり一定している。また  $\gamma^*$  の値も比較的小さく、三日間を通じてほぼ同じとなっている。しかし、それにもかかわらず  $\sigma$  の値はかなり異なっている。これは、3.1の(2)で述べた、螢光砂の投入点の相対的位置関係に密接に関連しているものと思われる。すなわち、投入点がより岸側にあるとき(2月29日)には、 $\sigma$  の値は比較的小さいが、投入点が shoreline 付近にあるとき(3月2日)や shoreline より沖側になる場合(3月1日)には、 $\sigma$  の値はかなり大きくなる。特に投入点が最も沖側で、最終砕波点が一番近くなっている3月1日の場合には、全円周上で螢光砂が検出されている。したがって、swash zone の場合には、拡散特性に関しても、移動方向の特性と同様、岸沖方向の非一様さがかなり大きくなっていることが分る。

#### 4. 螢光砂の鉛直混合層厚について

##### 4.1 混合層厚とリップルの有無の関連——第2回目の調査結果から——

図-21 は、第2回目の調査結果から螢光砂濃度の鉛直

分布型を示したものである。ここで、図の横座標の値は、濃度分布型の積分値が1になるように標準化した螢光砂濃度を用いている。また、図中のカッコでくくった数値は、その点の有効サンプル数を示し、四角で囲んである数値は2.4(3)で80% cut-off 深さとして定義したその地点の埋没深さの平均値を示している。なお、以下においてはこの埋没深さを混合層厚と見なして議論を進める。

この図から、螢光砂は、No. 11 のポイントに近いほど、すなわち岸に近づくほど(図-17 参照)混合層厚が大きく、逆に No. 14 に近いほど小さくなっていることが分る。

一方、図-22 はコア・サンプルから得られた粒径データから、その平均値  $\bar{d}$  と変動幅  $d_{rms}$  の鉛直分布形を各ポイント別に示している。ただし、横軸の目盛は、上が  $\bar{d}$ 、下が  $d_{rms}$  に対応するものである。これから、No. 6 と7および No. 12 と13の間付近を境にして、その沖側と岸側では、粒径あるいは粒径の変動幅のレベルが大きく異なっていることが分る。

図-23 は、螢光砂調査を行った翌日に、ダイバーによ

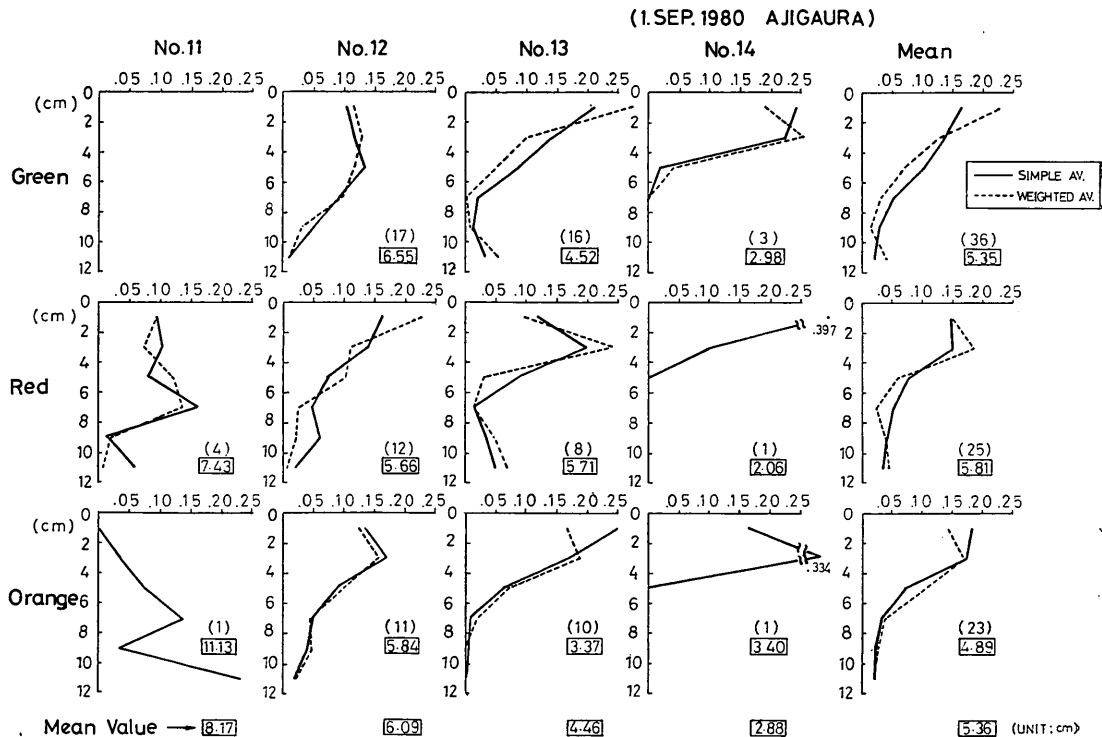


図-21 螢光砂濃度の鉛直分布形(第2回目)

螢光砂を用いた碎波帯内における局所的砂移動の観測

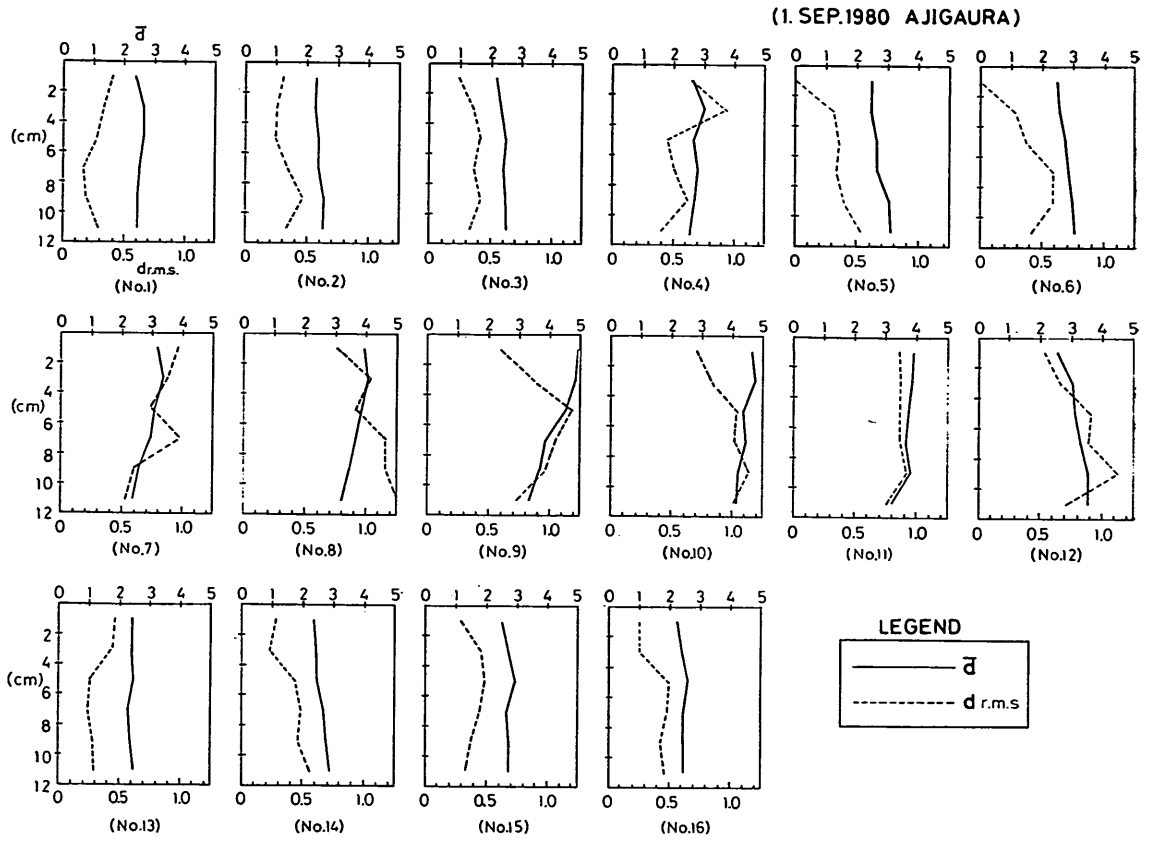


図-22 粒径の平均値  $\bar{d}$  と変動幅  $d_{rms}$  の鉛直分布形

( 17:00 2. SEP. 1980 AJIGaura )

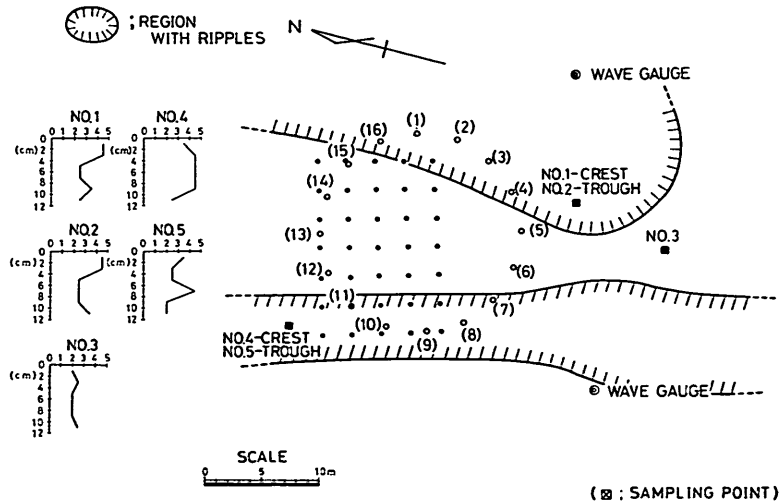


図-23 リップルの存在領域

って確認されたリップルの存在する範囲を示している。同図にはまた、リップルの crest と trough の位置のコア・サンプルと、リップルのない flat bed の部分でのコア・サンプルから得られた粒径データの鉛直分布も示してある。これを見ると、リップルの存在する部分としない部分の粒径分布の現われ方の違いがはっきり分かる。すなわち、リップルの存在する場合には、粒径が全体的に大きく、粒径の散らばりも大きい、リップルがない場合には、粒径がかなり小さくなり、しかも一様になっている。このことから、図-22 で示した粒径分布の岸側と沖側の大きな違いは、リップルの存在の有無に対応していたことが分かる。なお、9月2日に確認されたリップルは、波長 30~100 cm 程度、波高 5~15 cm 程度であった。これから求まる波高と波長との比率は、Inman<sup>24)</sup> の報告したリップルの波形勾配の平均的な値である 0.15 という値から考えて、ほぼ妥当な数値である。また、この状況でリップルが存在し得ることは、たとえば以下に示すように Manohar<sup>25)</sup> のリップルの発生・消滅限界式からも確認できる。

$$\frac{u_{b \max}}{\left(\frac{\rho a}{\rho} - 1\right)^{0.4} g^{0.4} \nu^{0.2} d^{0.2}} \begin{cases} = 9.23 \text{ (発生限界)} \\ = 20.90 \text{ (消滅限界)} \end{cases} \quad (28)$$

(ここに、 $u_{b \max}$ ; 底面最大水粒子速度、 $\rho a/\rho$ ; 底質の比重、 $\nu$ ; 動粘性係数、 $d$ ; 底質の粒径で単位は ft。) これに、9月1日での  $u_{b \max} = 84.4 \text{ cm/s}$  の値、および  $\rho a/\rho = 2.65$ 、 $\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$  を代入し、 $d$  の値として 図-22 から判断して 0.7 mm の値を入れると、上式の値は 18.8 になってリップルの発生限界と消滅限界の間になりリップルが存在し得ることが分かる。(なお  $d = 0.22 \text{ mm}$  とすれば、上式の値は 23.7 となって消滅限界を越えてしまう。)

このようなことから、図-22 で示した No. 12, 13 付近の粒径分布の大きな違いは、リップルの存在の有無を反映したものであり、結局、最初に述べた混合層厚の岸沖方向の変化はこのリップルの存在の有無に関連したものであることが理解された。

Kraus et al.<sup>19)</sup> は、混合層厚が碎波点付近と最終碎波点付近でピーク値を示すことを報告し、その原因として、これらの地点では底質のかく乱作用が強いためと推察している。しかし、最終碎波点付近では底質粒径がかなり粗くなるのが一般的で、その場合には上記の例のようにリップルが存在する可能性が増える。したがって、最終碎波点で混合層厚が増加するメカニズムとしては、単にかく乱作用の増加ということだけでなく、リップル

の存在による混合層厚の増大ということも考慮する必要がある。

#### 4.2 混合層厚と波高との関係

混合層厚の値そのものは、後述する二層モデルによる漂砂量の算定 (6. 参照) で、螢光砂の平均移動速度とともに直接必要となる量であり、その意味でも非常に重要な量である。

この混合層厚に関しては、これまでにいくつかの測定例が報告されている。King<sup>26)</sup> は、英国のいくつかの海岸の調査結果から、混合層厚がおよそ碎波々高の 4% 程度となることを示した。しかし、その後 Otvos<sup>27)</sup> や Williams<sup>28)</sup> は、これよりかなり高い 20~40% という値を報告している。また逆に、ごく最近の測定例では、75~150 cm 程度の碎波波高でわずか 1 cm 程度といった報告もある (Gaughan<sup>29)</sup>)。このような現地観測での測定例とは別に、Madsen<sup>23)</sup> は、砂層内の円弧すべりによる砂層の崩壊という観点から理論的に検討し、碎波点での混合層厚が碎波々高の 11% 程度の値になることを示している。

図-24 は、図-21 と同様に、第 1 回目の調査での螢光砂濃度の鉛直分布を示したものである。また 表-7 は、各ケースの混合層厚の値をまとめて示したものである。表中には波高  $H_{1/3}$  が示されているが、これは流速変動の振幅 ( $H_{u_{1/3}}/2$ ) の値から長波近似を用いて算定した波高である。

表-7 によると、混合層厚  $b$  は  $H_{1/3}$  の 8% 前後の値となっている。上述の報告例は、すべて碎波々高との関

表-7 螢光砂の混合層厚および波高との比

月 日		$b$ (cm)	$H_{1/3}$ (cm)	$b/H_{1/3}$ (%)
2/29	A	2.48	32.3	7.68
	B	4.71	—	—
3/ 1	A	2.42	32.9	7.36
	B	4.44	—	—
3/ 2	A	2.57	36.0	7.14
	B	2.80	—	—
9/ 1	緑	5.35	60.3	8.87
	赤	5.81	60.3	9.64
	黄 橙	4.89	60.3	8.11

( $b$ : 混合層厚)

螢光砂を用いた碎波帯内における局所的砂移動の観測

(1980. AJIGAURA)

(29. Feb.)

(1. Mar.)

(2. Mar.)

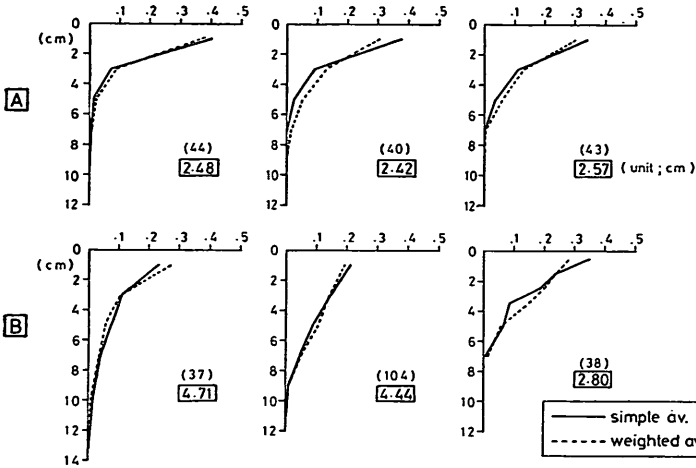


図-24 螢光砂濃度の鉛直分布形 (第1回目)

連で議論しており、今回のように局所的に見た波高と混合層厚の関連という観点から整理されたものがほとんどないので、単純な比較はできないが、オーダー的には、King および Madsen の値に近くなっているといえよう。

5. 螢光砂の鉛直混合過程について

ここでは、螢光砂の鉛直混合過程について第2回目の調査結果から具体的に検討してみる。この鉛直混合を明らかにすることは、螢光砂の混合層厚が決定されるメカニズムを知る上においても重要である。

図-25 は、各色の螢光砂の埋没深さの時間変動を示している。これから、かなりの部分が、色の違いに無関係にほぼ同じようなパターンで変動していることが分かる。

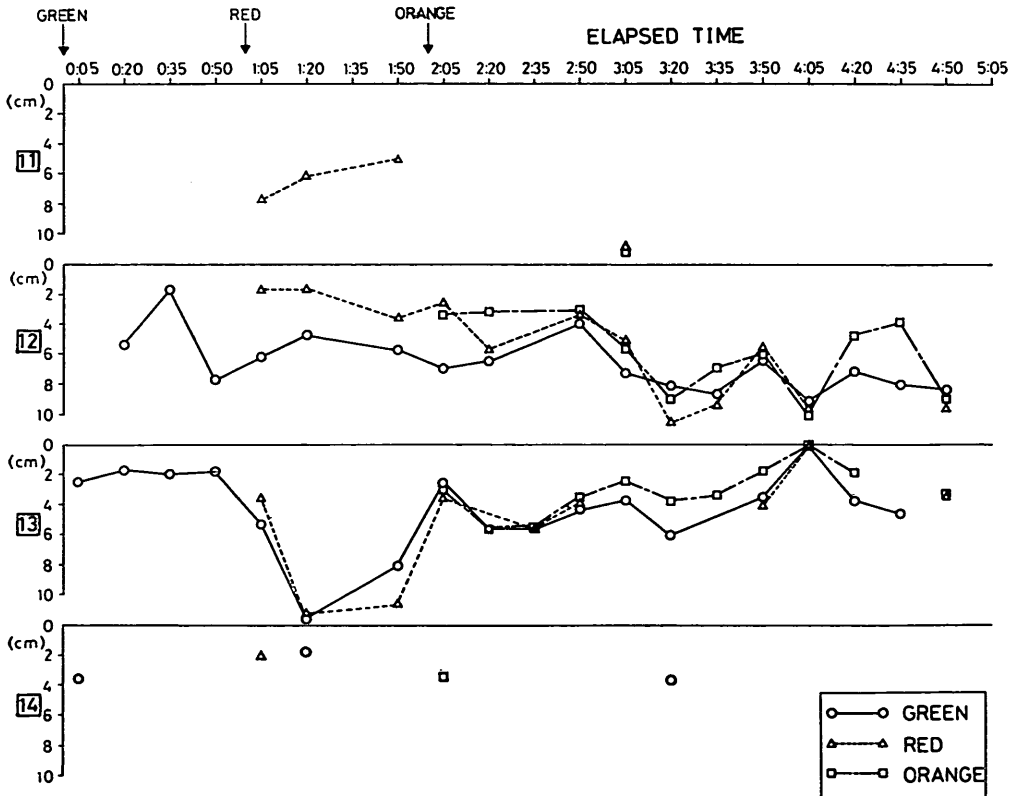


図-25 螢光砂の埋没深さの時間変動 (第2回目)



またこのような傾向は、リップルが存在しないとみられる No. 13 のポイントの方がよりはっきりとでている。

また、図-26 は、三色のトレーサー相互の鉛直分布形の相関を示している。ただし、この場合の相関の値は次式で計算されたものである。

$$\rho_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^6 \bar{c}_{il} \bar{c}_{jl}}{\left\{ \sum_{l=1}^6 \bar{c}_{il}^2 \right\}^{1/2} \cdot \left\{ \sum_{l=1}^6 \bar{c}_{jl}^2 \right\}^{1/2}} \quad (29)$$

ここに、 $\bar{c}_{il} = \log_{10} c_{il}$  である。ただし  $c_{il} = 0$  のときは  $\bar{c}_{il} = 0$  とした。また、 $c_{il}$  とは  $i$  番目の色の蛍光砂の第  $l$  層目の濃度を意味している。ここで、濃度として対数をとったものを用いているのは、濃度の極端な値に  $\rho_{ij}$  の値がひっぱられるのを防ぐためである。

図-26 によれば、鉛直濃度分布形の相関も比較的高く、特に No. 13 のポイントではかなり高い相関が得られていることが分る。

このような傾向は、格子点上で一度行われたサンプリングの結果(図-27)からもうかがえる。図-27 では、各

格子点の下側に測定値が示されているが、その上段が緑、下段が赤の値を示し、各々の左側の値が蛍光砂検出量 (mg)、右側のカッコでくくった数値が埋没深さ (cm) を示している。これを見ても、(C)-(3), (4) および (D)-(3) の格子点を除く全ての点で、ほぼ同じ埋没深さになっていることが分かる。

これらのことから、蛍光砂の鉛直混合過程には、投入時点を1時間ずつずらした効果は現われず、三色の蛍光砂の砂層内への埋没過程には、かなりの mixing が何らかの機構で行われているものと考えられる。また、図-25 によれば、蛍光砂の埋没深さは、投入後5分ですでに2~4 cm の値を示すことが分る。このことから、上述の mixing のプロセスを特徴づける時間スケールは、数分以内であると推察される。

このような鉛直混合を説明するものとして、砂層の円弧すべりによる力学的不安定性について述べている Madsen<sup>23)</sup> の理論が、一つの有力な手がかりになると考えられる。しかし、これについては、今後、砂面の時間変動を詳細に把らえたり、直接砂面付近の現象を観察す

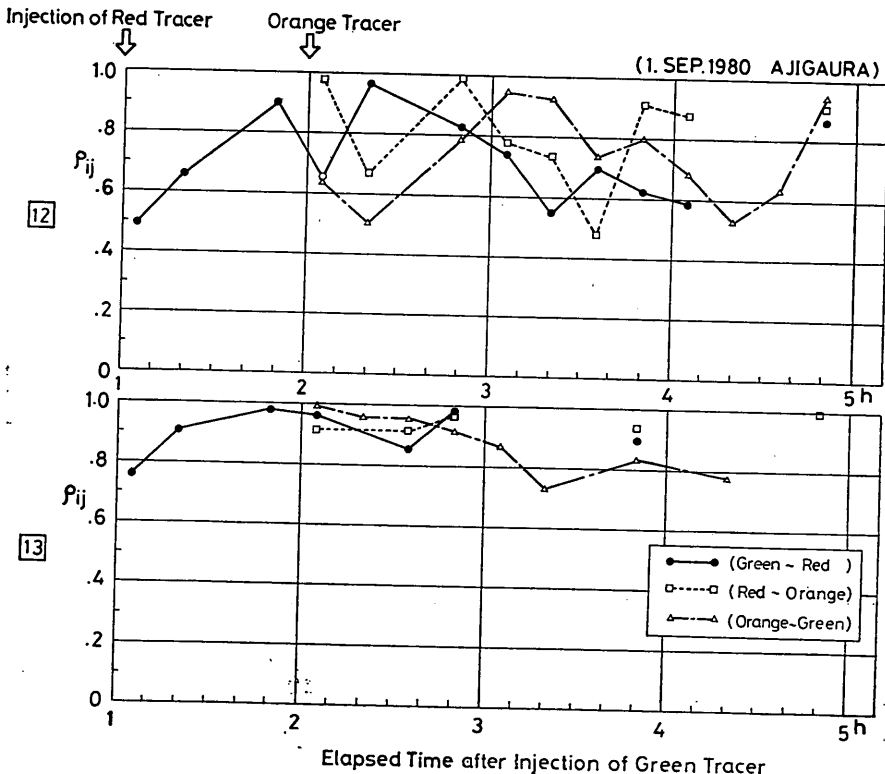


図-26 蛍光砂の鉛直濃度分布形の三色相互の相関 (第2回目)

螢光砂を用いた碎波帯内における局所的砂移動の観測

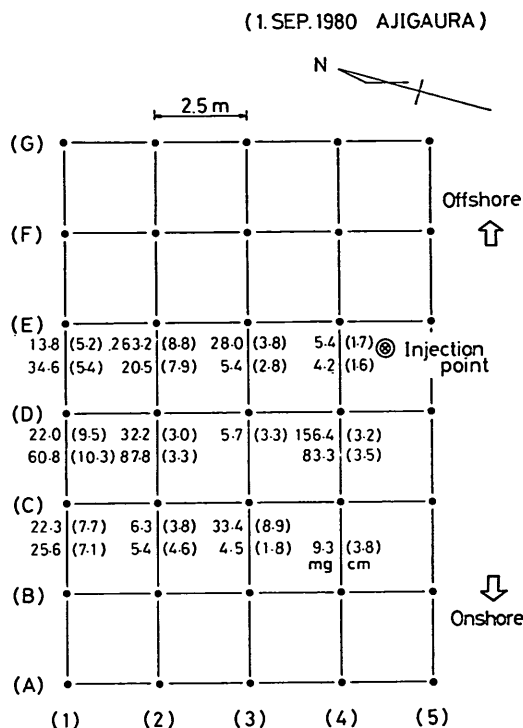


図-27 格子点上でのサンプリング結果

るといったことが必要であろう。

6. 局所的漂砂量の測定手段としての螢光砂調査の可能性の検討

螢光砂等のトレーサーを用いて砂の輸送量を測定する方法は、1960年代に英国のHRSで主として河川を対象に開発されたものである<sup>80),81),82)</sup>。このトレーサーを用いる主だった方法には、次の三つがある。

1. 定常希釈法 (steady dilution method)
2. 時間積分法 (time integration method)
3. 空間積分法 (spatial integration method)

沿岸漂砂量の測定にこれらの方法を応用する試みは、すでにいくつか行われている。具体的に例をあげると、定常希釈法は、Russell<sup>11)</sup>によって英国の海岸に適用され、時間積分法は、Kadib<sup>83)</sup>によってエジプトの北岸の漂砂量測定に應用されている。また、空間積分法は、Komar & Inman<sup>80)</sup>によって、カリフォルニア海岸での漂砂量測定に用いられている。

これらは、すべて沿岸漂砂量の測定を目的としたものであるため、いずれにしてもここで問題としている局所

的漂砂量の測定にはそのままの型では使えない。そこでここでは、新たに、二次元的拡がりをもった場での局所的漂砂量の測定方法として使用できるように、先の方法の一部を修正することを試みた。具体的に使用したのは、時間積分法と空間積分法である。

(1) 時間積分法による漂砂量算定式の誘導

まず、螢光砂と周囲の自然砂の運びは全く同じであるという条件——(仮定 1)——から、次式が成立する。

$$c(r, \omega, z, t) = \frac{\bar{q}(r, \omega, z, t)}{\bar{Q}(r, \omega, z, t)} = \frac{q_n(r, \omega, z, t)}{Q_n(r, \omega, z, t)} \quad (30)$$

ここに、 $c(r, \omega, z, t)$ : 螢光砂の自然砂に対する濃度、 $\bar{q}(r, \omega, z, t)$ : 螢光砂の flux、 $\bar{Q}(r, \omega, z, t)$ : 漂砂量、 $q_n, Q_n$ ; それぞれ  $\bar{q}, \bar{Q}$  の径方向の成分。なおここでは、円筒座標  $(r, \omega, z)$  を用いている。

次に、 $r=R$ の円周上での螢光砂の質量保存関係から、

$$M = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_{-(h+b)}^{\bar{\eta}} R \cdot q_n(R, \omega, z, t) dz d\omega dt \\ = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_{-(h+b)}^{\bar{\eta}} R \cdot c(R, \omega, z, t) \cdot Q_n(R, \omega, z, t) dz d\omega dt \quad (31)$$

が成立つ。(ここに、 $M$ ; 螢光砂投入量、 $\bar{\eta}$ ; 平均水位、 $h$ ; 水深、 $b$ ; 混合層厚)。

ここで  $\bar{Q}$  が平面的に一樣で——(仮定 2)、さらに  $\bar{Q}$  の時間変動成分が  $c$  の変動と無相関であると仮定すると——(仮定 3)、上式は次のように書ける。

$$M = \int_{-(h+b)}^{\bar{\eta}} \bar{Q}_z(z) \int_0^\infty \int_0^{2\pi} c(R, \omega, z, t) R \cos \omega dt dz \\ + \int_{-(h+b)}^{\bar{\eta}} \bar{Q}_r(z) \int_0^\infty \int_0^{2\pi} c(R, \omega, z, t) R \sin \omega dt dz \quad (32)$$

ここで、 $\bar{Q}_z, \bar{Q}_r$  は、 $\bar{Q}$  の定常成分を  $\xi, \eta$  方向に分解したものである。

次に、上式の  $\int_0^\infty \int_0^{2\pi} c(R, \omega, z, t) R \cos \omega dt dz$  の部分が  $z$  によらず一定であると仮定すると——(仮定 4)、

$$M = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} c(R, \omega, z, t) R \cos \omega dt dz \cdot \bar{Q}_z \\ + \int_0^\infty \int_0^{2\pi} c(R, \omega, z, t) R \sin \omega dt dz \cdot \bar{Q}_r \quad (33)$$

ここに、

$$\bar{Q}_z = \int_{-(h+b)}^{\bar{\eta}} \bar{Q}_z(z) dz, \quad \bar{Q}_r = \int_{-(h+b)}^{\bar{\eta}} \bar{Q}_r(z) dz \quad (34)$$

いま、式 (33) において、その右辺第二項がゼロとなるような  $\xi, \eta$  軸を選んだとすると、結局次式を得る。

$$Q = \bar{Q}_i = \frac{M}{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} c(R, \omega, z, t) R \cos \omega d\omega dt} \quad (35)$$

上式により、漂砂量  $Q$  は、螢光砂投入量  $M$  と円周上の濃度変化から計算できることが分る。ここで、この算定式の導出過程に設けたいくつかの仮定について若干触れておく。まず第一の仮定は、實際上ほとんど問題ない。第二の仮定も、調査地点と円の大きさを適切に決めればそれほど重要ではない。問題は、第三と第四の仮定にある。まず第三の仮定は、具体的には、螢光砂が水平方向の拡散効果によって円内から流出することがないということを仮定している。したがって第三の仮定が妥当性を持つには、平均流あるいは波動による drift がある程度存在していて、それによる砂の移流効果は他の水平方向の拡散効果に比べて卓越しているという状況が必要とされる。最後の仮定は、螢光砂が円周にまで達する間、十分な鉛直混合が行われることを仮定している。すなわち、投入点での情報（たとえば投入の仕方など）が、螢光砂が円周の位置まで流下する間に十分失われている必要がある。このためには、砂の鉛直拡散効果が移流効果に比べて十分卓越していることが必要である。

要約すると、ここでは、砂の水平拡散効果が、移流効果に比べて十分小さく、逆に鉛直拡散効果は十分大きいといった状況を仮定している。

(2) 空間積分法（二層モデル）の応用

このモデルでは、螢光砂の混合層厚を  $b$ 、トレーサーの空間分布の重心の移動速度を  $V_a$  とするとき、単位幅当りの漂砂量  $Q$  は次式で与えられる。

$$Q = bV_a \quad (36)$$

上式の  $V_a$  は、個々の螢光砂の移動速度の空間的平均値に他ならないが、今の場合時間的平均値  $V_i$  (式 (14)) が得られているので、これで代用することを考える。したがって、式 (36) は次式となる

$$Q = bV_i \quad (37)$$

この場合問題となるのは、一つには混合深さがわずかに 10 m 程度の流下距離で、十分その飽和状態に達するかということである。しかし、5. で述べたように、砂層内での螢光砂の鉛直混合はかなり活発に行われているので、この点についてはあまり問題はなさそうである。今一つは、 $V_s$  を  $V_i$  で置き換えた時の精度上の問題である。この場合は、主として、砂粒の平均的な step length と円周の半径  $R$  との比が重要となり、この比が 1 より

十分小さければこの問題は重要でなくなると考えられる。しかし、この step length に関する情報は漂砂に関しては存在しないので、これ以上立ち入った検討はできない。

(3) 計算結果

ここでは、波や流れなどの外力の状態が時間的にほぼ一定な状況で、引続き 3 回の螢光砂調査が行われた第 2 回目の調査結果から、この 2 つの計算方法に基づいてそれぞれの漂砂量を計算してみた。

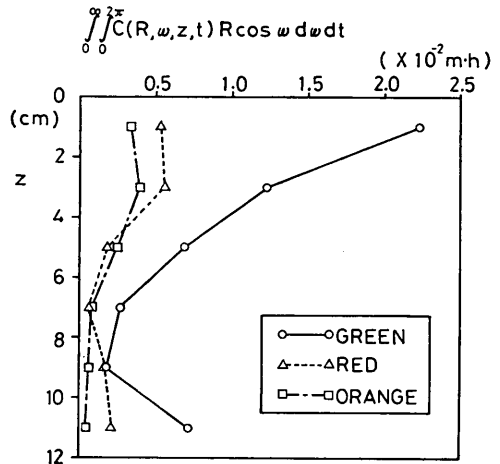


図-28 時間積分法における（仮定 4）のチェック

表-8 漂砂量の計算値

	時間積分法		二層モデル	
	Q	Qの平均流方向の成分	Q	Qの平均流方向の成分
緑	0.43	0.43	1.32	1.33
赤	1.46	1.44	1.27	1.25
黄橙	1.84	1.81	0.68	0.67

(単位: m<sup>3</sup>/h/m)

図-28 は、時間積分法における（仮定 4）をチェックしてみたものである。各色の平均埋没深さは 5 cm 前後（図-21）であるが、この範囲で横軸の値を見ると、赤と黄橙については比較的一様性が成り立っているようにみえるが、緑の場合の一様性は全く見られない。そこで、ここでの漂砂量の計算には、各色の平均埋没深さで浅の値の平均値を用いた。その結果と、二層モデルによる計算結果を 表-8 に対比させて示す。

最初に述べたように、第2回目の調査では、調査時間中外力条件がほとんど変化していない。したがって、漂砂量の値としては、ほぼ同程度の値になることが期待される。この点から表-8の結果を見てみると、二層モデルの結果の方が相対的に安定した結果になっていることが分かる。ただ値そのものは両方とも同程度のオーダーの値になっている。

ここで参考のため、従来の漂砂量公式を用いて漂砂量を算出してみる。ここで使用したのは Bijker<sup>34)</sup> による算定式で、これは、Van de Graaff et al.<sup>35)</sup> によって、(岸沖方向の積分値が CERC 式の傾向と良く一致するという意味で) その有効性が指摘されているものである。ただ値そのものは、CERC 式の 5 割前後の値となるようである。以下に計算結果を示す。ただし、同式では底面粗度  $k_s$  の値を必要とするため、ここでは  $k_s=1\text{ cm}$ ,  $5\text{ cm}$ ,  $10\text{ cm}$  の 3 ケースについて計算を行った。

$$Q \begin{cases} =0.277 & (k_s=1\text{ cm}) \\ =0.850 & (k_s=5\text{ cm}) \\ =1.066 & (k_s=10\text{ cm}) \end{cases} \quad (38)$$

(単位:  $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ )

これらの値を 2 倍したものと、表-8 の値を比較すると、ほぼオーダー的に同程度の値となっていることが分る。

以上のことから、ここで示した二つの漂砂測定法は、比較的良好な結果を与えるということが分った。この二つの方法のうちでは、二層モデルの方が、計算値が比較的安定していること、計算式自体にあまり多くの仮定を含まないこと、などの有利な点があり、優れているように思われる。

## 7. 結 論

本報告では、2 回にわたる現地観測の結果に基づいて、砕波帯内の局所的砂移動の実態、および局所的な砂移動量の現地観測の結果について述べた。このうち前者の目的に関しては、主として砂の動きを波や流れの外力特性との関連で把握することに主眼を置いて検討した。以下に本報告の主な内容を要約して述べる。

### (1) 螢光砂の移動方向と移動速度

i) 砂粒子の運動を確率過程としてとらえて、波動の存在に基づく波の進行方向への一粒の砂粒子の平均移動速度  $D$  なる量を導入し、測定データを整理した。この結果、これが波に基づく流速変動の skewness と密接に関連することが明らかになっ

た。

ii) 平均流の方向への螢光砂の平均移動速度  $V_s$  は、平均流速  $\bar{V}$  の 1~2% 程度であった。一方、混合層厚が砕波々高に比例するという関係を仮定すれば、 $\bar{V}_s$  は沿岸流速  $\bar{V}_i$  と摩擦係数  $C_f$  を介して、 $\bar{V}_s \approx C_f \bar{V}_i$  なる関係を持つことが導びける。この関係式を用いて先の 1~2% という値がオーダー的に妥当なものであることを示した。

### (2) 螢光砂の混合層厚

螢光砂の平均混合層厚は、その点の波高のほぼ 8% 前後の値となった。ただし、混合層厚はリップルの有無にも密接に関連し、リップルが存在する場合には混合層厚は増大する。

### (3) 螢光砂の鉛直混合過程

三色の螢光砂を一時間ずつずらして投入したところ、投入時刻をずらした効果はほとんど現われず、混合層厚の時間変化のパターンや鉛直濃度分布形などは、かなり似通った形で検出された。このことから、砂層内での鉛直混合はかなりの規模で生じていることが明らかとなった。また、このときの鉛直混合を特徴づける時間スケールは、数分以下であることが理解された。

### (4) 局所的漂砂量の算定

本調査法による測定データから局所的な漂砂量を算定する方法を示した。具体的には、時間積分法を応用したものと二層モデルを応用した方法について検討したが、後者の方が同一の外的条件に対して安定した値が得られ、局所的漂砂量の算定方法としてより優れているものと考えられる。また、算定結果を Bijker の漂砂量公式<sup>34)</sup> による計算値と比較したところ、ほぼ同程度の値であった。

本報告中に述べた第1回目の調査では、第二港湾建設局横浜調査設計事務所、鹿島港工事事務所および茨城県三浜港湾事務所の方々から心まかな御協力を頂いた。心から感謝の意を表する次第である。また第2回目の調査は、海岸研究会(代表者、堀川清司東大教授)の合同現地観測の一環として行ったものであるが、その際にも会員の諸氏からさまざまな方面において熱心な御協力を得た。なお、現地観測の準備・実施ならびに螢光砂の読取作業、さらには調査結果の整理・図化作業等については、漂砂研究室近藤隆道技官、赤石正賢技官および寺崎賢次技官の努力に依るところが大きかった。

(1981年3月31日交付)

参 考 文 献

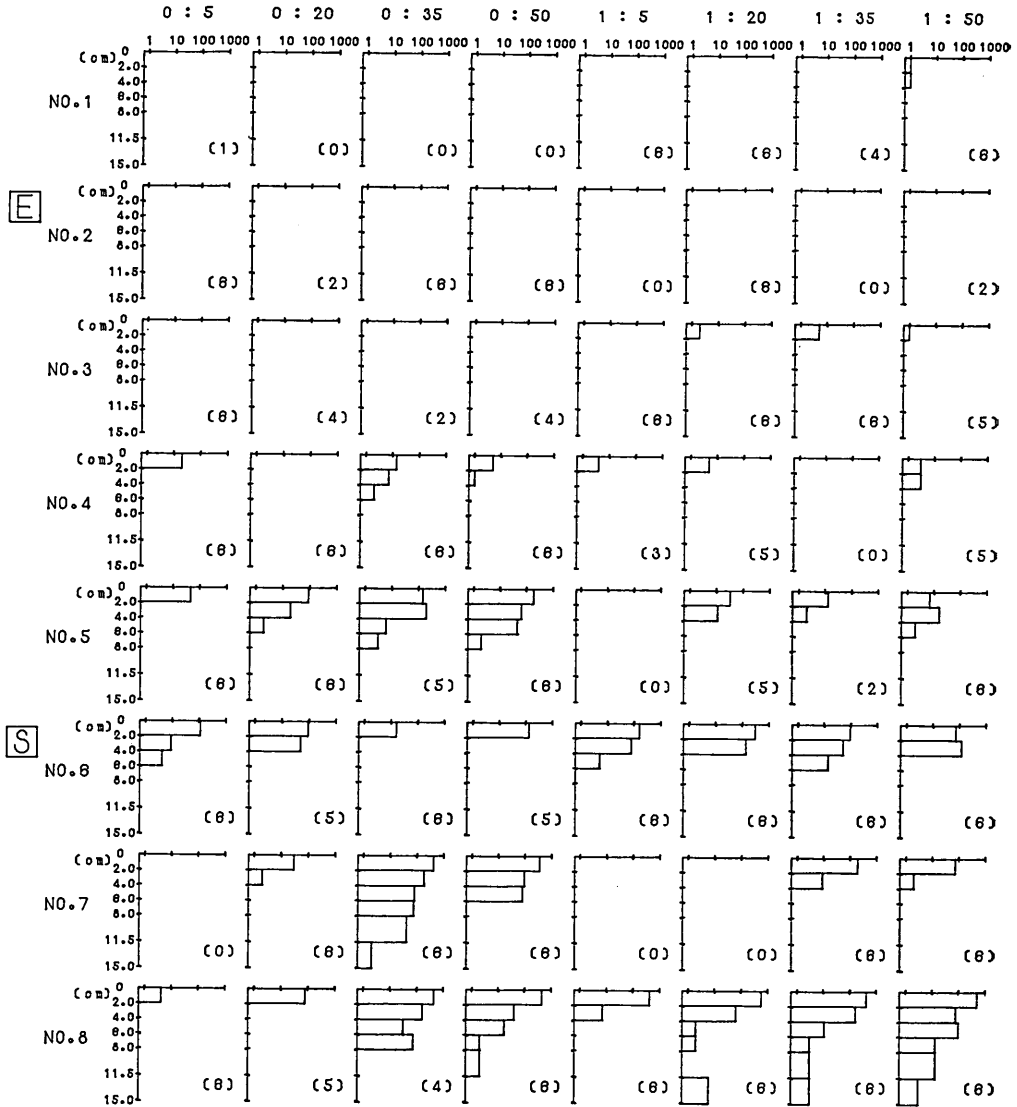
- 1) Pelnard-Considère, R.: Essai de Théorie de l'Évolution des Formes de Rivages en Plages de Sable et de Galets, 4th Journées de l'Hydraulique, Les Energies de la Mer, Question III, Repport No. 1, 1956.
- 2) Mehaute, B. L. and Soldate, M.: Mathematical modeling of shoreline evolution, Miscellaneous Rept. No. 77-10, CERC, 1977.
- 3) 橋本 宏: 離岸堤による隣接海岸への影響予測モデル, 第 21 回海岸工学講演会論文集, 1974 年, pp. 181~185.
- 4) 松岡道男・越智 裕: 汀線変化予測モデルの適用性の検討, 第 26 回海岸工学講演会論文集, 1979 年, pp. 220~224.
- 5) 小笹博昭・Brampton, A. H.: 護岸のある海浜のてい線変化数値計算, 港湾技術研究所報告, Vol. 18, No. 4, 1979 年, pp. 77~104.
- 6) Fleming, C. A. and Hunt, J. N.: Application of a mathematical sediment transport model, Proc. 15th Coastal Eng. Conf., 1976, pp. 1184~1202.
- 7) 宇多高明・橋本 宏: 海岸構造物周辺の海浜流と地形変化の特性, 第 23 回水理講演会論文集, 1979 年, pp. 181~186.
- 8) Kana, T. W.: Surf zone measurements of suspended sediment, Proc. 16th Coastal Eng. Conf., 1978, pp. 1725~1743.
- 9) 田中則男・加藤一正・灘岡和夫: 碎波帯内における浮遊砂濃度分布——2, 3 の興味ある観測例について——, 第 26 回海岸工学講演会論文集, 1979 年, pp. 182~186.
- 10) Zenkovitch, V. P.: Emploi des luminophores pour l'étude du mouvement des alluvions sablonneuses, Bulletin C.O.E.C., 10 (5), 1958.
- 11) Russell, R. C. H.: The use of fluorescent tracers for the measurement of littoral drift, Proc. 7th Coastal Eng. Conf., 1960, pp. 418~444.
- 12) Nagata, Y.: The statistical properties of orbital wave motions and their application for the measurement of directional wave spectra, Jour. of Oceanographical Soc. of Japan, Vol. 19, No. 4, 1964, pp. 169~181.
- 13) Kraus, N. C.・Farinato, R. S.・堀川清司: 沿岸漂砂量に関する現地観測——岸沖方向分布および時間変動について——, 第 27 回海岸工学講演会論文集, 1980 年, pp. 245~249.
- 14) 岩垣雄一・樫木 亨: 海岸工学, 共立出版, 1979 年, p. 316.
- 15) 例えば, 堀 淳一: ランジユバン方程式, 岩波書店, 1977, p. 90.
- 16) 砂村継夫・阪東浩造・堀川清司: 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 年, pp. 250~254.
- 17) 野田英明・松原雄平: 岸・沖向き漂砂量に関する研究, 第 27 回海岸工学講演会論文集, 1980 年, pp. 197~201.
- 18) Bagnold, R. A.: Beach formation by waves: some model experiments in a wave tank, Jour. Inst. Civ. Eng., Vol. 15, 1940, pp. 27~52.
- 19) 橋本 宏・宇多高明: 螢光砂を用いた漂砂の現地観測, 第 22 回海岸工学講演会論文集, 1975 年, pp. 335~338.
- 20) Komar, P. D. and Inman, D. L.: Longshore sand transport on beaches, Jour. Geophys. Res., Vol. 75, No. 30, 1970, pp. 5914~5927.
- 21) Longuet-Higgins, M. S.: Longshore currents<sup>S</sup> generated by obliquely incident sea waves, 1, Jour. Geophys. Res., Vol. 75, No. 33, 1970, pp. 6778~6789.
- 22) U.S. Army, Coastal Engineering Research Center: Shore protection manual, U.S. Government Printing Office, Vol. 1, 1973, p. 4-101.
- 23) Madsen, O. S.: The stability of a sand bed under<sup>T</sup> the action of breaking waves, MIT Report, No. 182, 1974.
- 24) Inman, D. L.: Wave-generated ripples in nearshore sands, Beach Erosion Board, U.S. Army Corps of Engineers, Tech. Memo. No. 100, 1957.
- 25) Manohar, M.: Mechanics of bottom sediment movement due to wave action, Beach Erosion Board, U.S. Army Corps of Engineers, Tech. Memo., No. 75, 1955.
- 26) King, C. A. M.: Depth of disturbance of sand on sea beaches by waves, Jour. Sediment. Petrol., Vol. 21, No. 3, 1951, pp. 131~140.
- 27) Otvos, E. G.: Sedimentation-Erosion cycles of single tidal periods on Long Island Sound beaches, Jour. Sediment. Petrol., Vol. 35, No. 3, 1965, pp. 604~609.
- 28) Williams, A. T.: An analysis of some factors involved in the depth of disturbance of beach sand by waves, Marine Geology, 11, 1971, pp. 145~158.
- 29) Gaughan, M. K.: Depth of disturbance of sand in surf zone, Proc. 16th Coastal Eng. Conf., 1978, pp. 1513~1530.
- 30) Crickmore, M. J. and Lean, G. H.: The measurement of sand transport by means of radioactive tracers, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, Vol. 266, 1962, pp. 402~421.
- 31) Crickmore, M. J. and Lean, G. H.: The measurement of sand transport by the time integration method with radioactive tracers, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, Vol. 270, 1962, pp. 27~47.

- 32) Crickmore, M. J.: Measurement of sand transport in rivers with special reference to tracer methods, *Sedimentology*, 8, 1967, pp. 175~228.
- 33) Kadib, A. L. A.: Rate of sediment motion using fluorescent tracer, *Proc. 13th Coastal Eng. Conf.*, 1972, pp. 985~1003.
- 34) Bijker, E. W.: Longshore transport computations, *Proc. ASCE, Jour. Waterways, Harbors and Coastal Eng. Div.*, WW4, 1971, pp. 687~701.
- 35) Van de Graaff, J. and Van Overeem, J.: Evaluation of sediment transport formulae in coastal engineering practice, *Coastal Eng.*, Vol. 3, No. 1, 1979, pp. 1~32.

## 付 録

ここに示す図は、螢光砂の生データをグラフ化したものである。図中、southern point あるいは northern point とあるのは、それぞれ A 地点、B 地点を意味する。また、第 1 回目の結果では、図中の棒グラフの右下に数字がカッコ付きで示されているが、これはその点のサンプル取得数を示している。例えば、[4] となっていれば表層から 4 層サンプリングされたことを表わしている。第 2 回目の結果では、図中に 3 種類の線が使われているが、これらは、実線が緑、点線が赤、破線が黄橙の螢光砂のサンプリング結果に対応している。

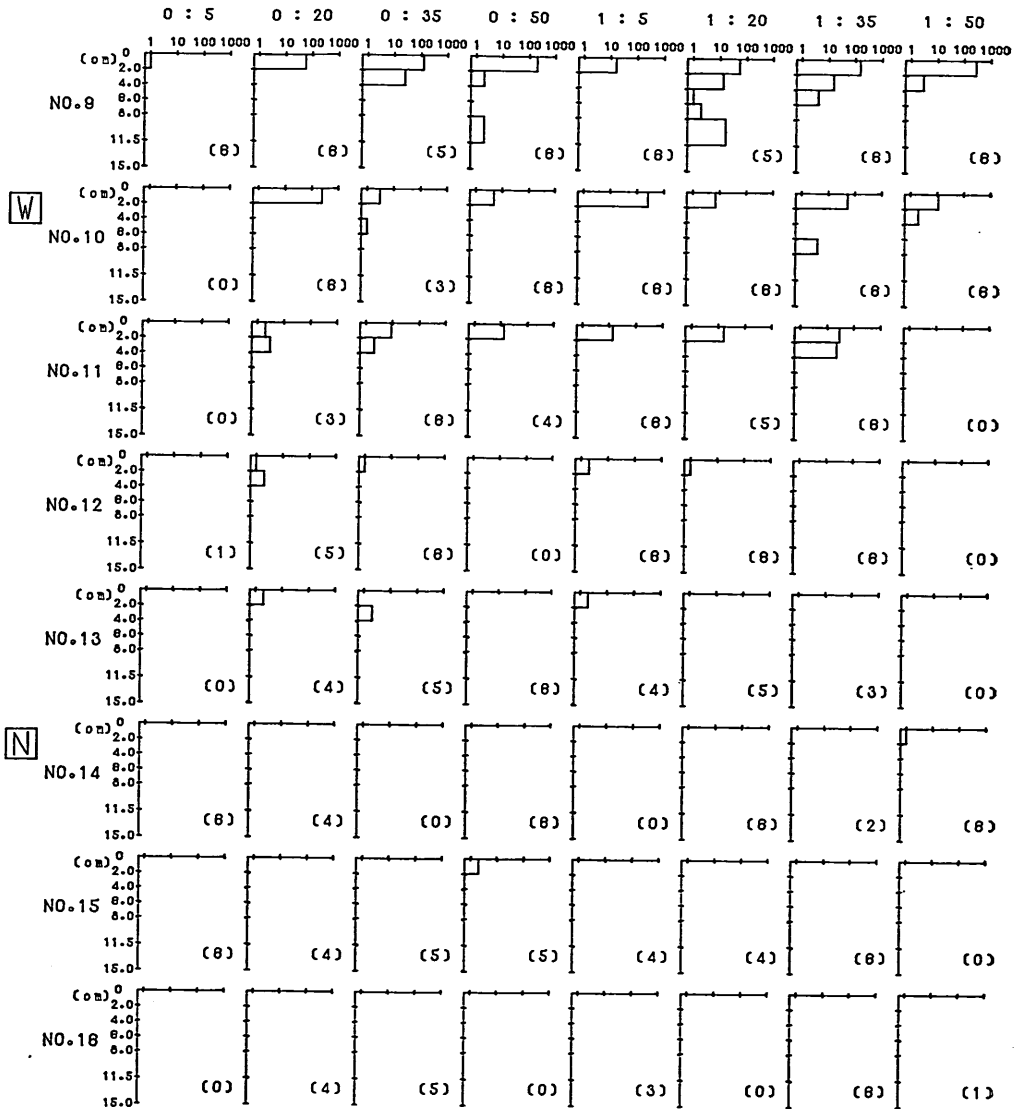
29.FEB.1980 AJIGaura SOUTHERN POINT  
INJECTION TIME 10:34 (PART 1)



付図-1

螢光砂を用いた砕波帯内における局所的砂移動の観測

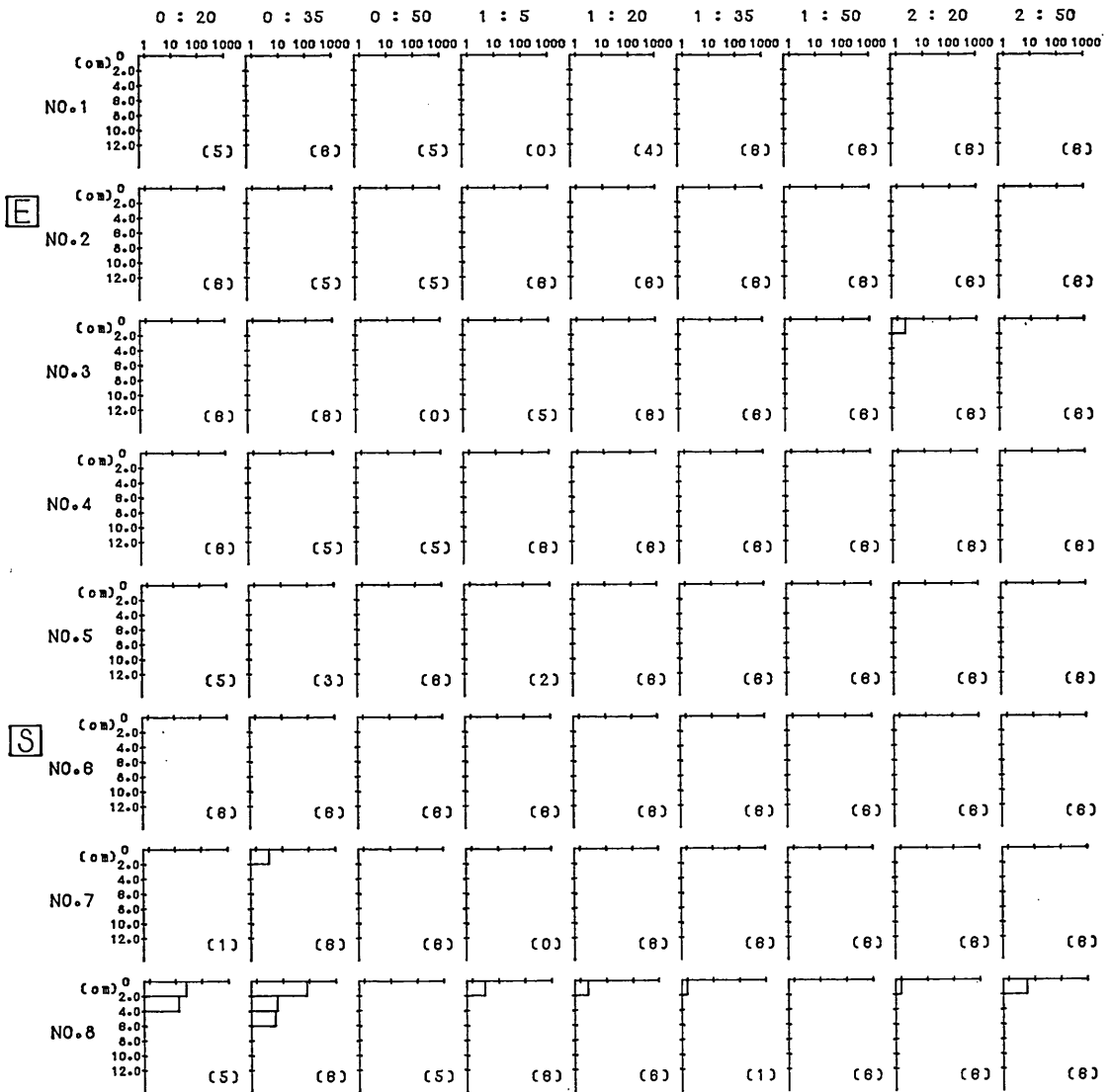
29.FEB.1980 AJIGAURA SOUTHERN POINT  
INJECTION TIME 10:34 (PART 2)



付図-2



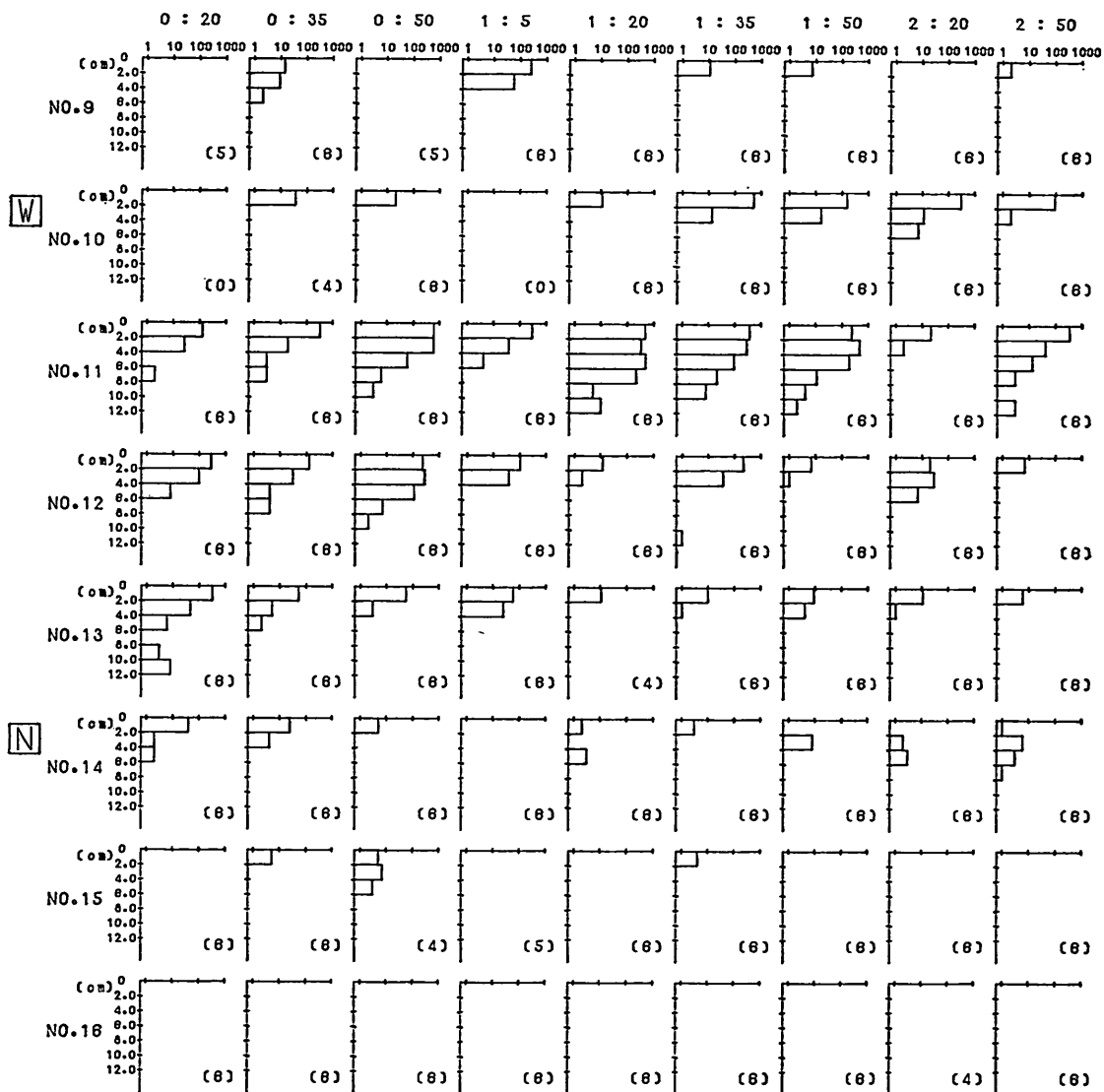
1.MAR.1980 AJIGaura SOUTHERN POINT  
INJECTION TIME 9:40 (PART 1)



付図-3

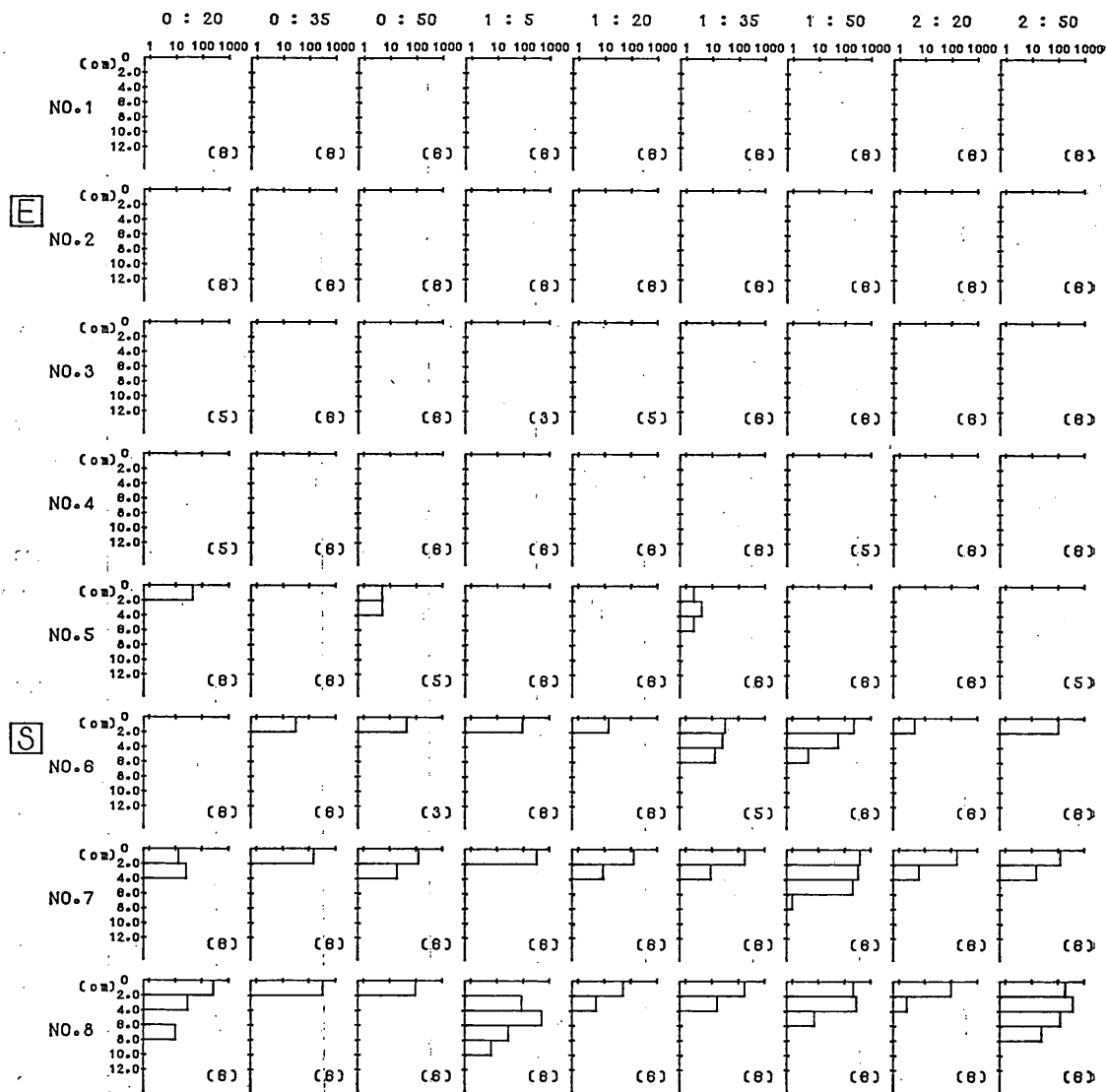
螢光砂を用いた碎波帯内における局所的砂移動の観測

1. MAR. 1980 AJIGAURA SOUTHERN POINT  
INJECTION TIME 9 : 40 (PART 2)



付図-4

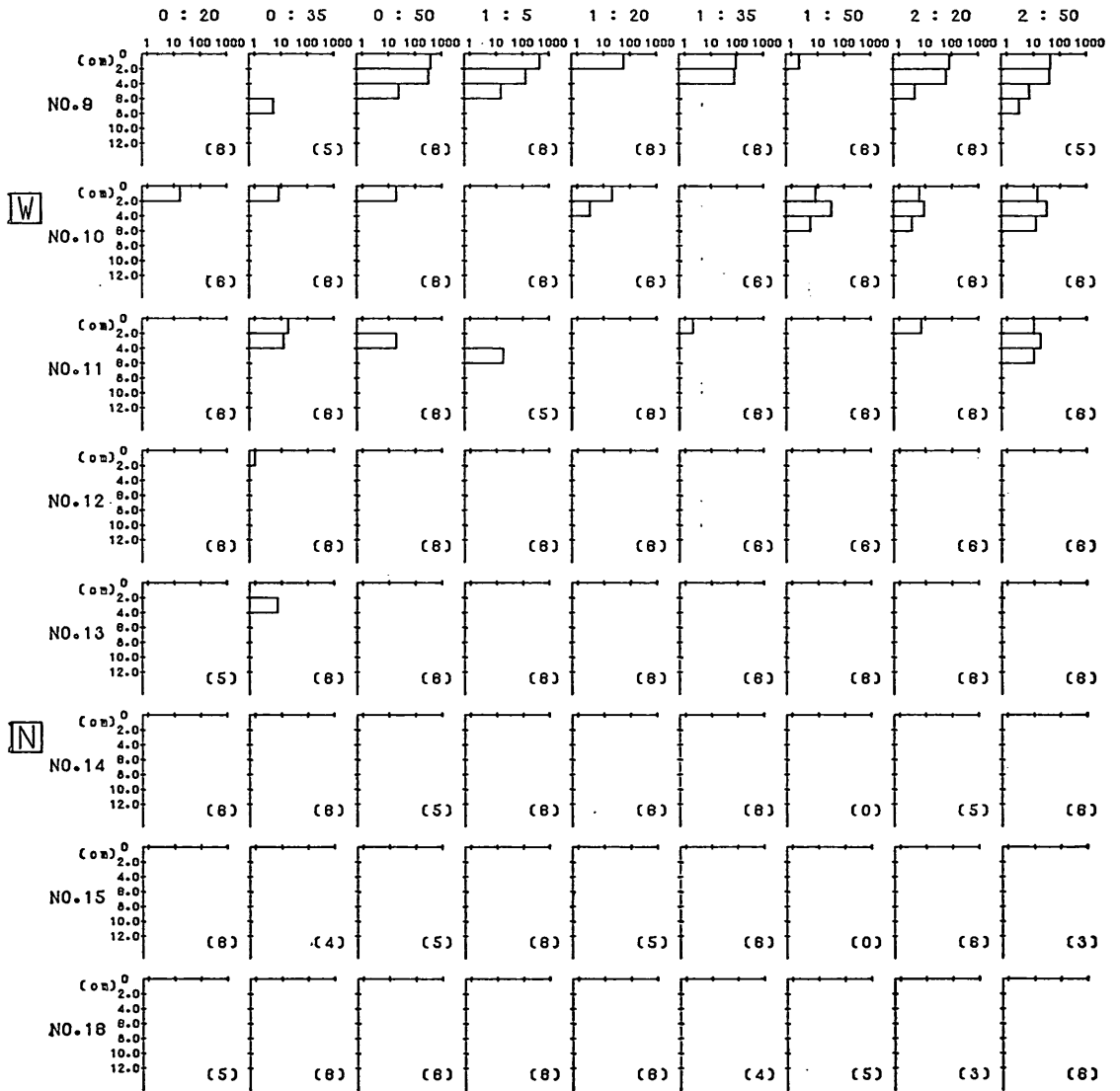
2.MAR.1980 AJIGaura SOUTHERN POINT  
INJECTION TIME 9:10 (PART 1)



付図-5

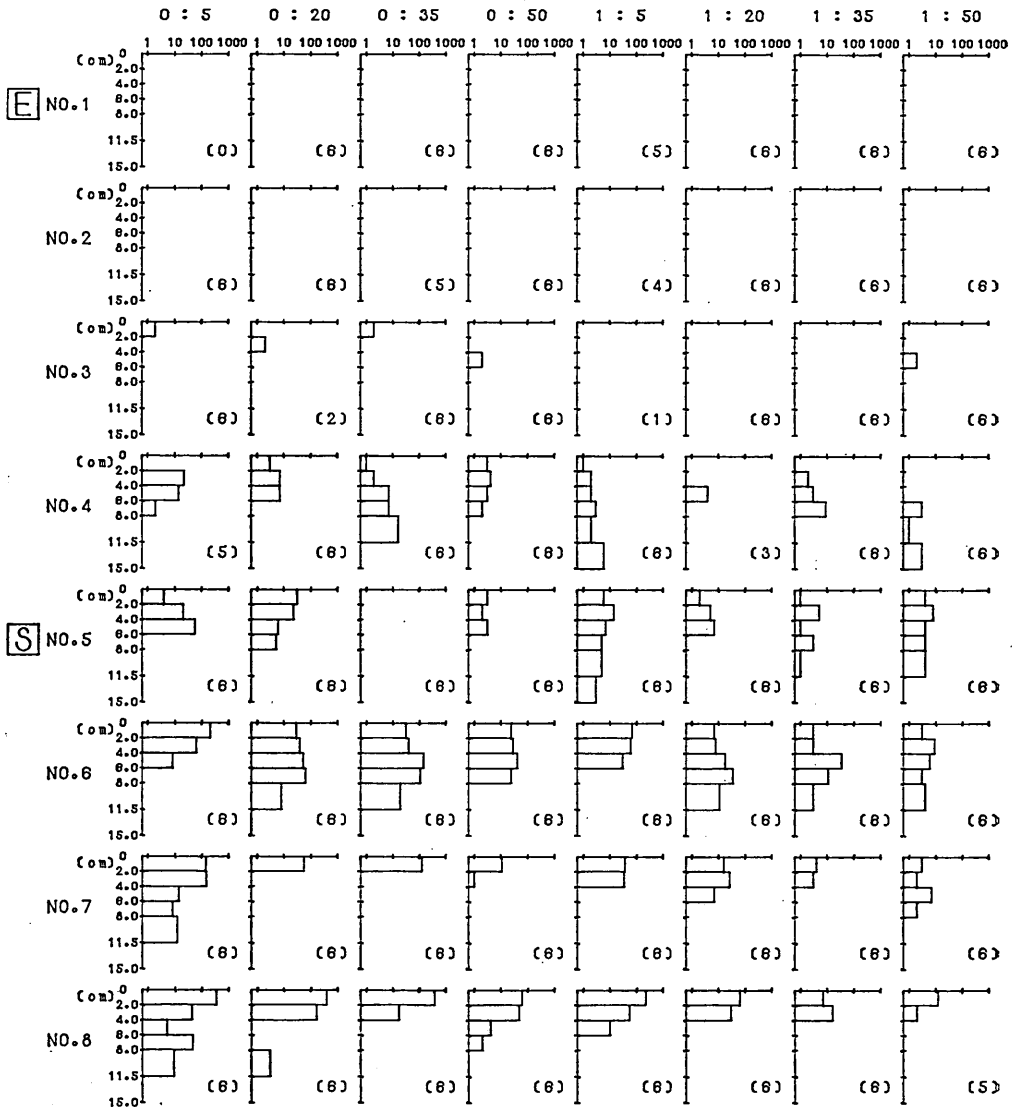
螢光砂を用いた碎波帯内における局所的砂移動の観測

2.MAR.1980 AJIGAURA SOUTHERN POINT  
INJECTION TIME 9 : 10 (PART 2)



付図-6

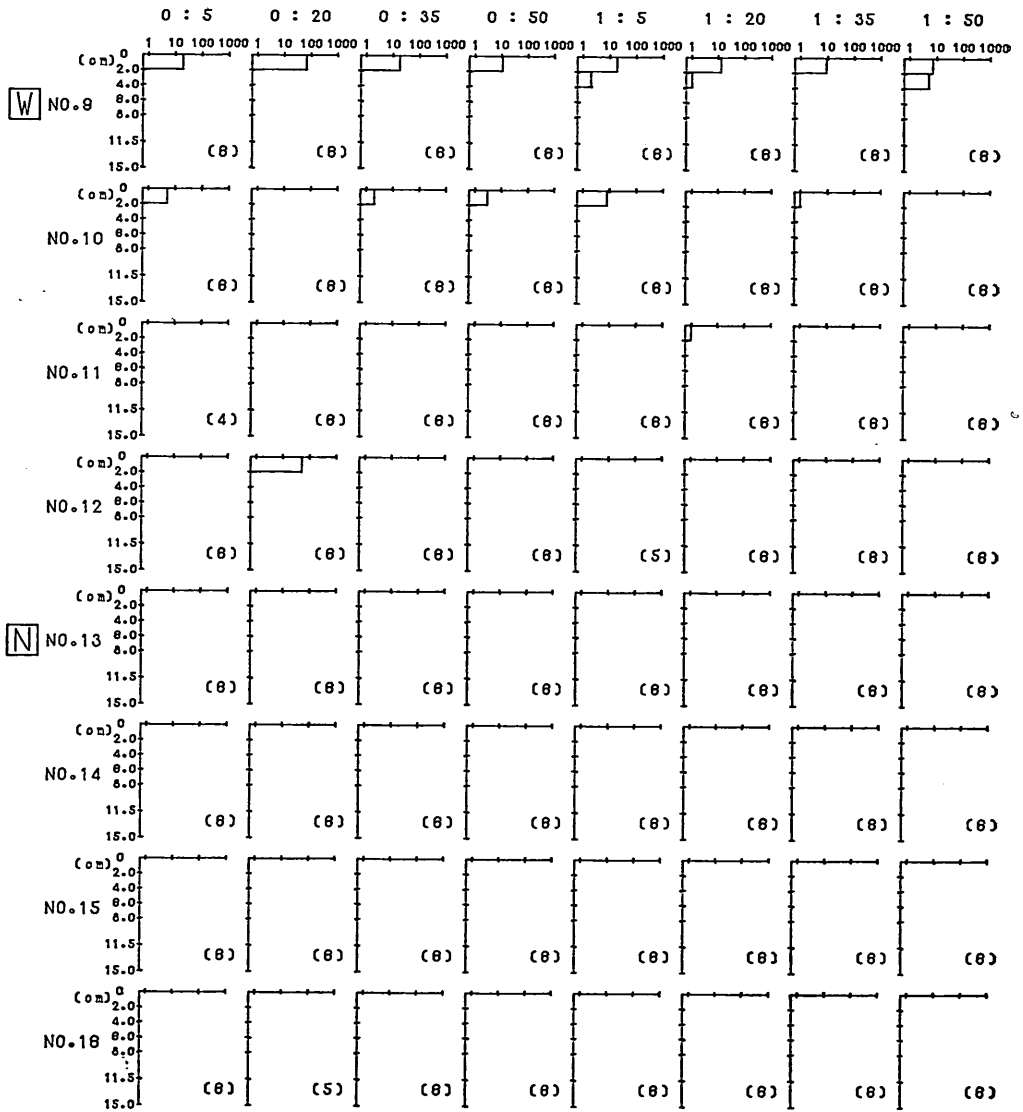
29.FEB.1980 AJIGAURA NORTHERN POINT  
INJECTION TIME 15:43 (PART 1)



付図-7

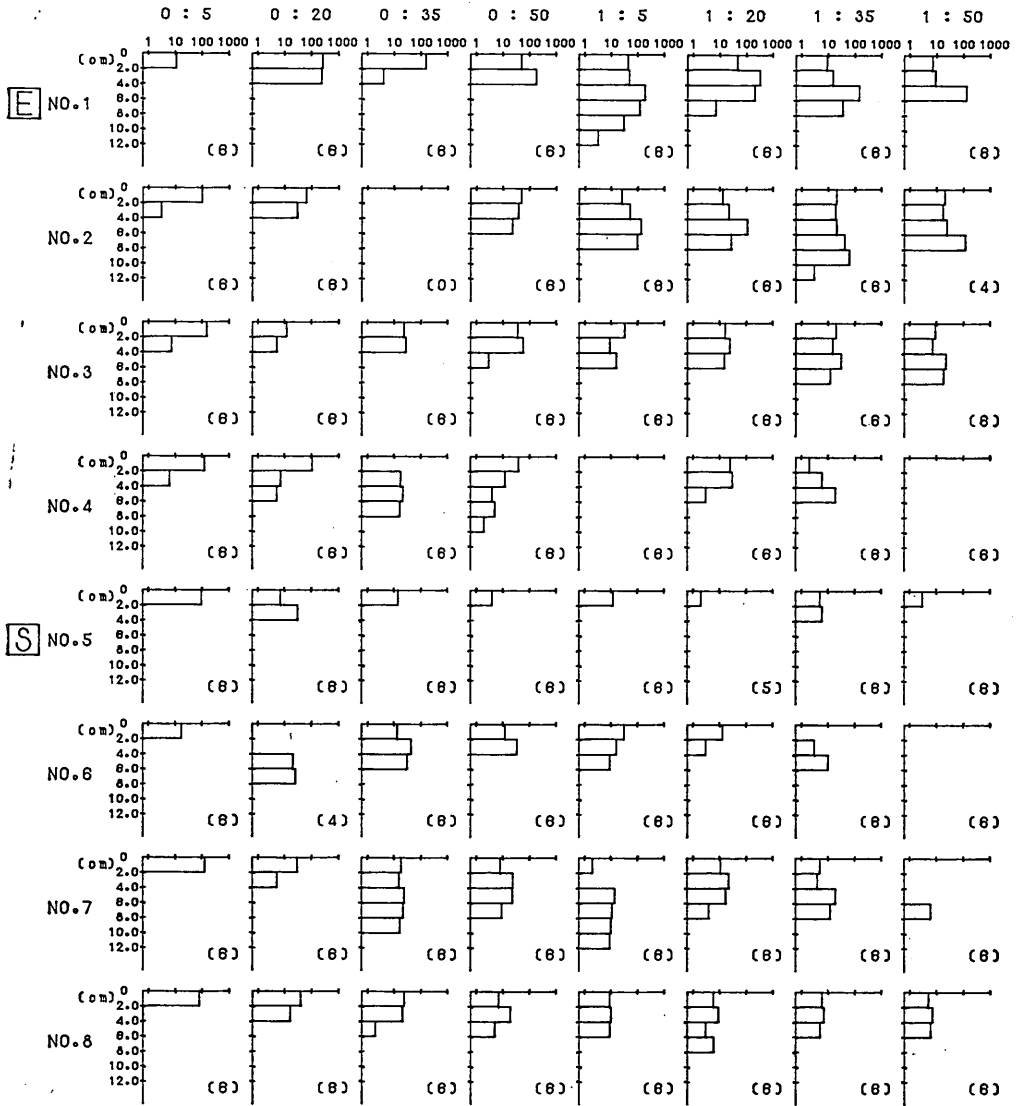
螢光砂を用いた碎波帯内における局所的砂移動の観測

29.FEB.1980 AJIGaura NORTHERN POINT  
INJECTION TIME 15:43 (PART 2)



付図-8

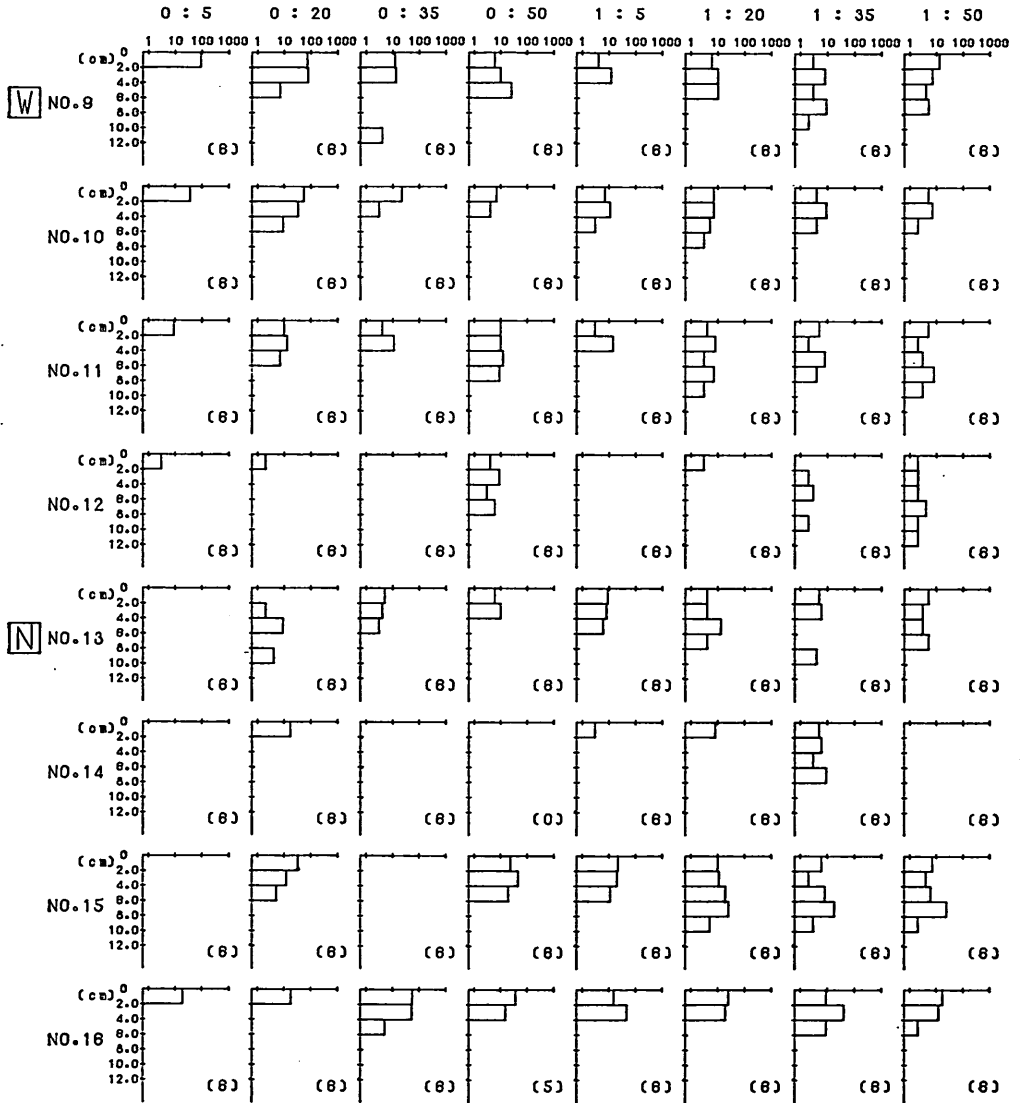
1. MAR. 1980 AJIGAURA NORTHERN POINT  
INJECTION TIME 14:20 (PART 1)



付図-9

螢光砂を用いた碎波帯内における局所的砂移動の観測

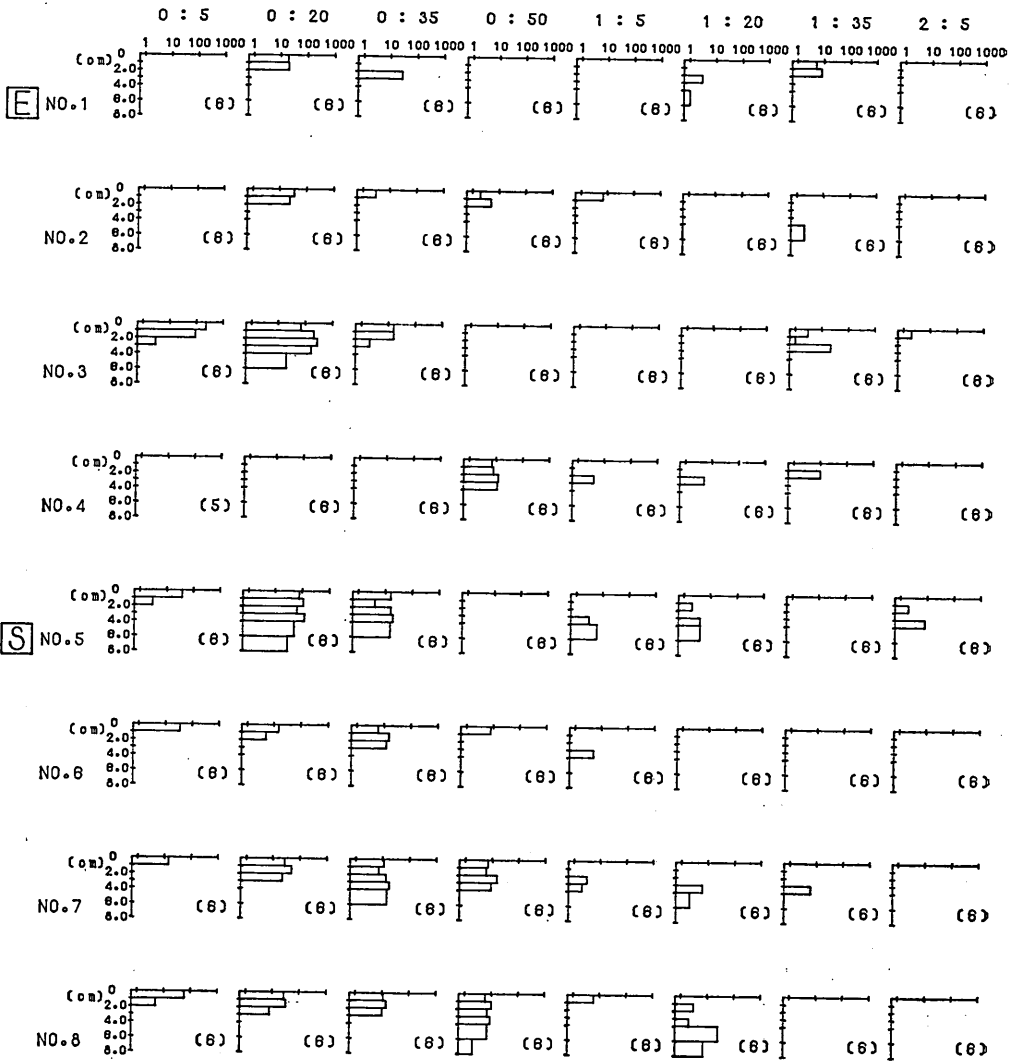
1.MAR.1980 AJIGAURA NORTHERN POINT  
INJECTION TIME 14:20 (PART 2)



付図-10



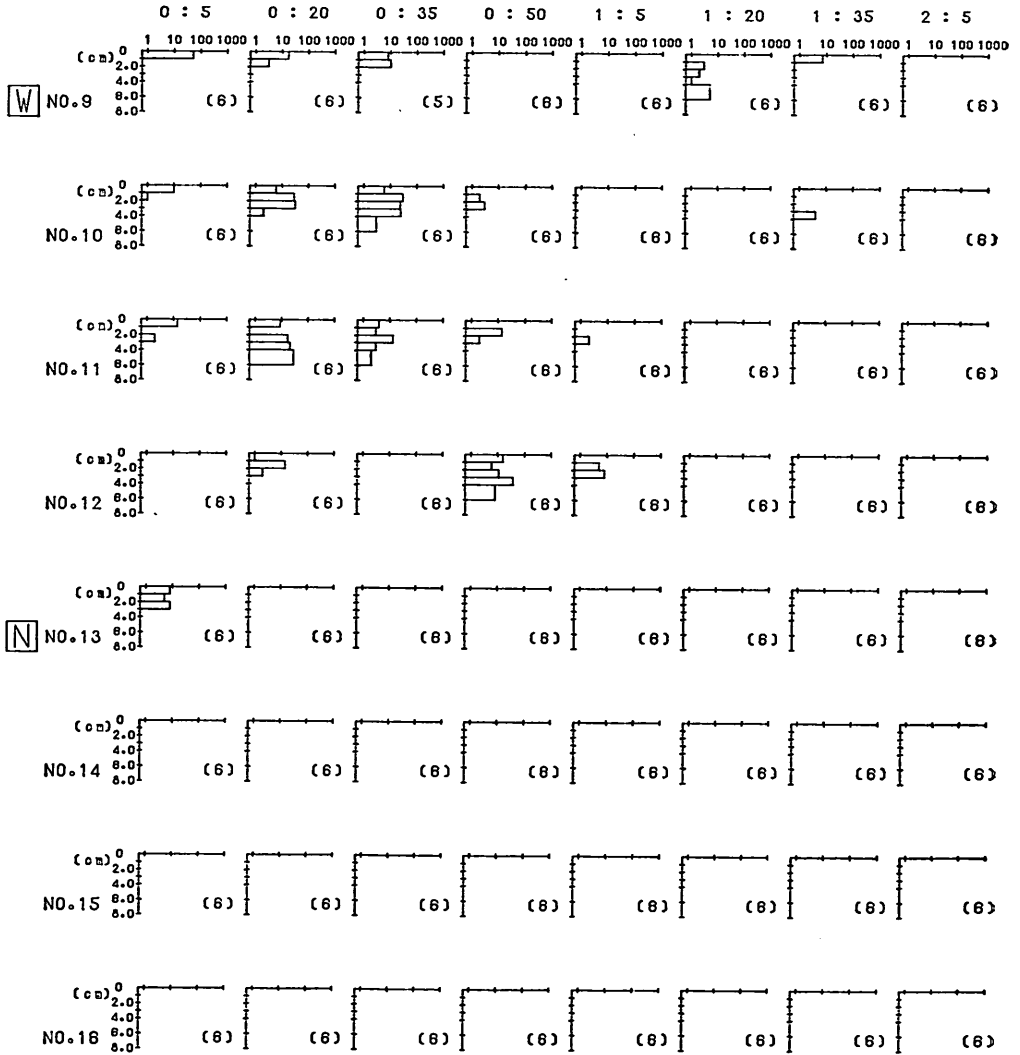
2. MAR. 1980 AJIGaura NORTHERN POINT  
INJECTION TIME 14:15 (PART 1)



付図-11

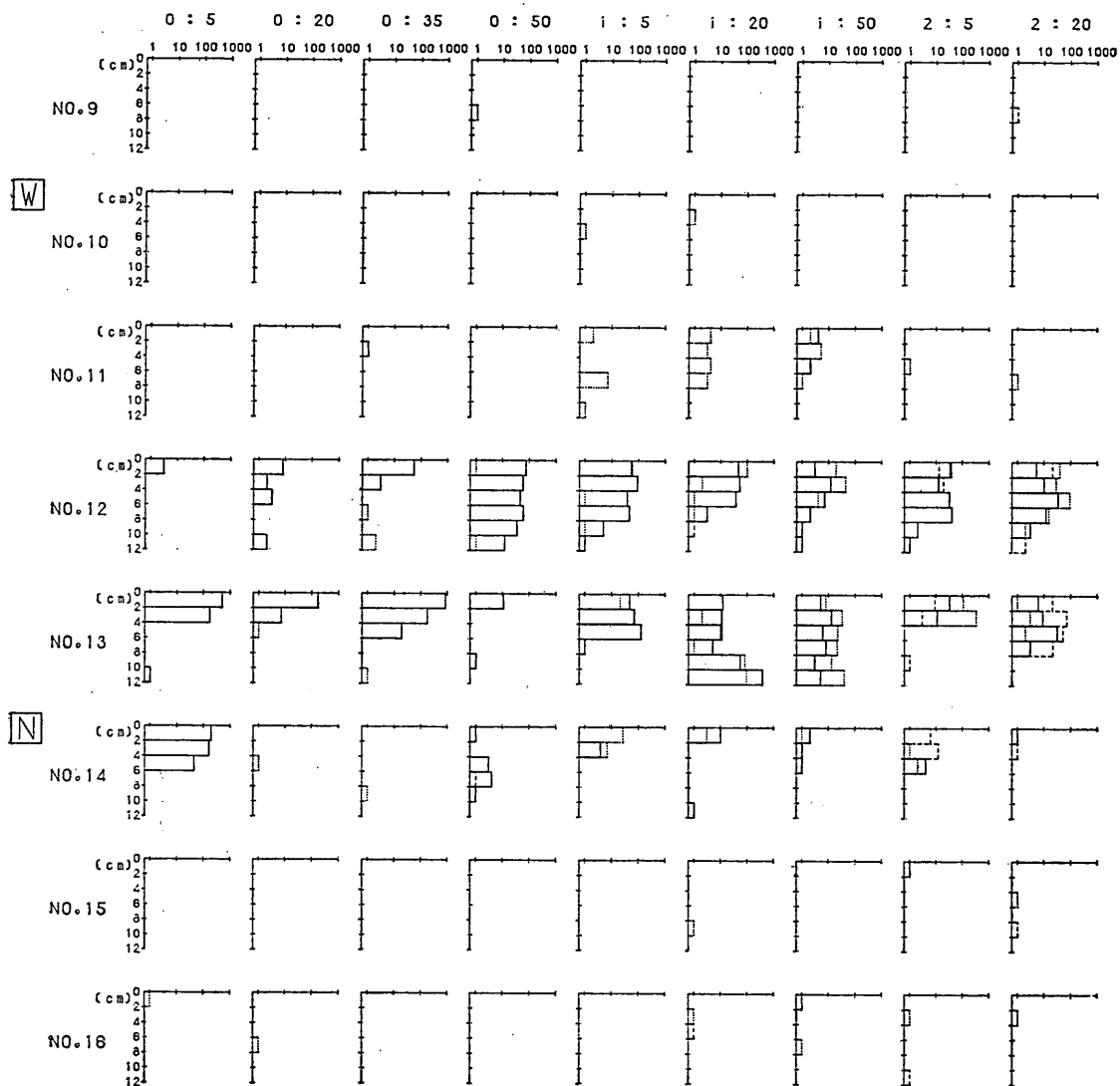
螢光砂を用いた碎波帯内における局所的砂移動の観測

2. MAR. 1980 AJIGAURA NORTHERN POINT  
INJECTION TIME 14:15 (PART 2)



付図-12

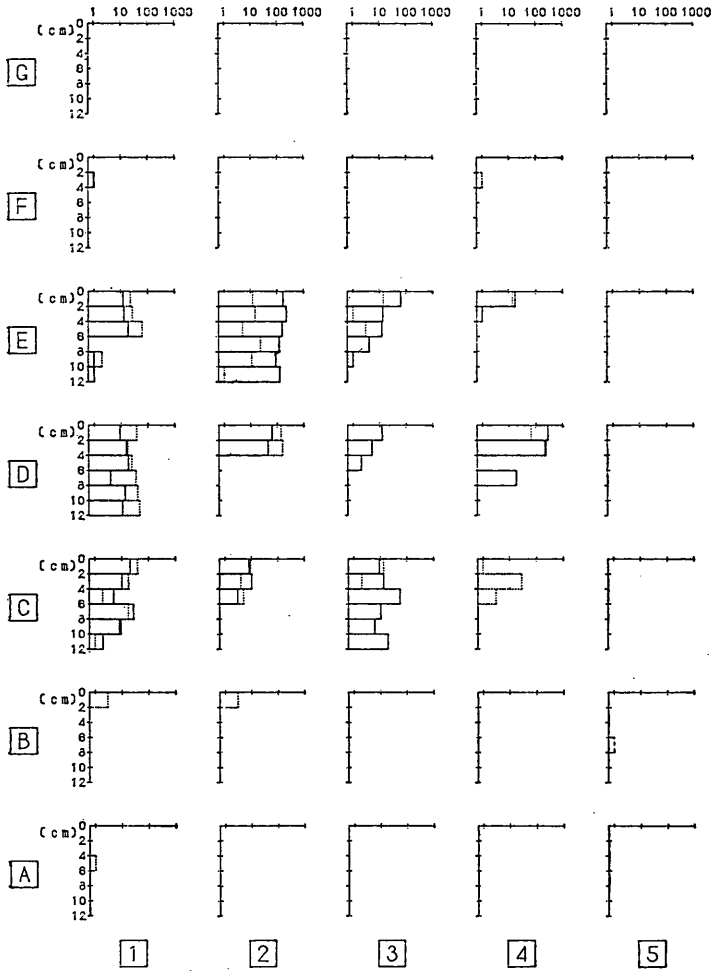
1. SEP. 1980 AJIGaura COAST.



付



1. SEP. 1980 AJIGAURA COAST



付図-14