

シート・フロー状態の底質移動に関する研究

香取完和\*・渡辺晃\*\*・堀川清司\*\*\*

1. 緒 論

沖浜帯の海底には多くの場合砂漣が存在し、漂砂特に底質の浮遊に重要な役割を果たしている。砕波帯内でも砂漣がみられることがあるが、底面での水粒子運動が大きくなると砂漣は消滅し、シート・フロー状態の底質移動が卓越するといわれている<sup>1),2)</sup>。この状態では、底質の移動層厚は余り大きくないが、高濃度の底質移動が生じるので、砕波帯内の海浜変形を扱う際に重要と考えられる。

本研究は、このシート・フロー状態の底質移動に関し、振動流装置による実験結果に基づいて考察を加えたものである。はじめに、砂漣が消滅してシート・フロー状態に至る限界条件について扱う。次いで、シート・フロー状態での砂粒子の濃度と運動速度を論じ、その運動機構を考えると共に、漂砂量を評価する。

2. シート・フローの発生限界

(1) 実験装置と方法

実験室内でシート・フロー状態を得るためには、極めて動きやすい底質を用いるか、非常に大きな底面流速を発生させなければならない。Manohar<sup>3)</sup>は、底質をのせた平板を静水中で単振動させることにより、境界層の遷移や底質の移動限界、砂漣の発生・発達・消滅に対する実験を行なっているが、底質の運動に関しては圧力勾配と慣性力の等価性に問題があり、振動板による実験が実際の振動流下での現象を再現しうるのは疑問がある。

本研究では、実験全体を通じてピストン駆動式のU字管型振動流装置を用いた。観測部は断面 25 cm×25 cm、延長 2 m (総延長 7 m) で、周期 1~12 sec、最大流速 150 cm/s の単振動流れを起こすことができる。

表一に示すように、粒径や比重の異なる6種類の底質材料を用いて、シート・フロー状態の発生限界を調べた。底質を敷き均し、種々の振動流振幅のもとで徐々に周期を短かくして流速を増大させ、砂漣が発生・発達し

表一 底質材料の性質

| 底 質         | 粒 径<br><i>d</i><br>(cm) | 比 重<br>$\rho_s/\rho$ | 水中静止<br>摩擦角<br>(deg) | 水中動<br>摩擦角<br>(deg) | 沈降速度<br><i>w</i><br>(cm/s) |
|-------------|-------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------------|
| 豊 浦 標 準 砂   | 0.02                    | 2.66                 | 37.0                 | 24.4                | 2.6                        |
| 砂 A         | 0.05                    | 2.66                 | 35.9                 | 26.2                | 6.5                        |
| 相 馬 標 準 砂   | 0.07                    | 2.66                 | 34.4                 | 27.8                | 9.8                        |
| プラスチック粒 (2) | 0.2                     | 1.42                 | 36.9                 | 24.4                | 11.8                       |
| プラスチック粒 (4) | 0.4                     | 1.18                 | 36.2                 | 20.8                | 9.4                        |
| アンバーライト粒    | 0.03                    | 1.56                 | 22.4                 | 13.9                | 1.8                        |

て消滅する限界を視察により判定した。同様にシート・フロー状態より流速を減少させて、砂漣が再発生する限界も調べたが、両者に有意な差は認められなかった。

(2) 実験結果と考察

シート・フロー発生限界について、Dingler-Inman<sup>1)</sup>は、

$$\Theta \equiv \hat{U}^2 / s d g = 240 \dots\dots\dots (1)$$

で与えられると述べており、Komar-Miller<sup>2)</sup>は、

$$\Psi \equiv f_w \hat{U}^2 / 2 s d g = 4.4 (\hat{U} d / \nu)^{-1/3} \dots\dots\dots (2)$$

なる式を提案している。ここに、 $\hat{U} = 2\pi a_m / T$ : 境界層外縁流速の振幅、 $a_m$ : 振動流軌道振幅、 $T$ : 振動流周期、 $s$ : 底質の水中比重 (比重 -1.0)、 $d$ : 底質粒径、 $\nu$ : 水の動粘性係数、 $g$ : 重力加速度、 $f_w$ : Jonsson による摩擦係数であり、 $\Psi$  は Shields 数とよばれる無次元摩擦応力を意味する。式 (1) は現地データにも基いている点で貴重であるが、資料数が少ないため普遍性には疑問がある。また、Komar-Miller<sup>2)</sup> は、一部のデータを誤って用いているが、有効なデータの範囲では、ほぼ  $\Psi = 0.3 \sim 0.7$  で限界が与えられている。

今回の実験結果を Shields 数  $\Psi$  および Reynolds 数  $R_E = \hat{U} a_m / \nu$  の関係で示したものが、図一である。ただし、 $\hat{U}$  としては断面平均流速の振幅を用い、摩擦係数  $f_w$  の計算には底質粒径  $d$  を粗度高さとして用いた。底質が砂の場合 (粒径  $d = 0.2 \sim 0.7$  mm) には、限界 Shields 数は Reynolds 数には余り関係せず

$$\Psi \approx 0.5 \sim 0.6 \dots\dots\dots (3)$$

で与えられることがわかる。アンバーライト粒は比重が

\* 正会員 工修 (株) I N A 新土木研究所  
\*\* 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科  
\*\*\* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

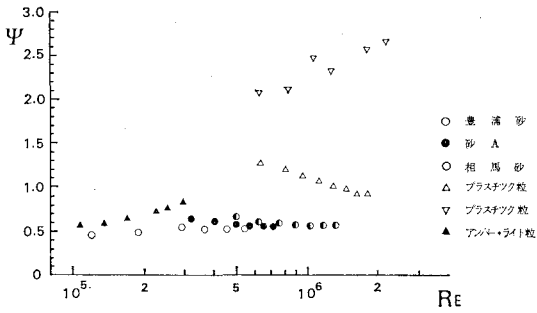


図-1 シート・フローの発生限界

極めて小さいにもかかわらず、砂と同程度の Shields 数でシート・フローとなる。これに比して、プラスチック粒の限界 Shields 数は極めて大きく、しかも Reynolds 数による変化が大きい。今回用いたプラスチック粒は円柱形をしており、しかも比較的大きいため、シート・フロー限界を得るには観測部で断面を縮小して大流速を得る必要があった。これらの点でプラスチック粒に対するデータは、やや信頼性に乏しい。

以上の結果より判断すると、通常の粒径の砂に対するシート・フロー限界は、式 (3) で与えられよう。より一般的な限界条件については、今後、更に検討する必要がある。

### 3. シート・フロー状態の底質濃度

#### (1) 実験条件と方法

粒径 0.2mm の豊浦標準砂を対象として、表-2 に示

表-2 実験ケースと条件

| Case | 軌道振幅<br>$a_m$<br>(cm) | 周期<br>$T$<br>(sec) | 流速振幅<br>$\bar{U}$<br>(cm/s) |
|------|-----------------------|--------------------|-----------------------------|
| 1-1  | 72                    | 3.6                | 127                         |
| 1-2  | 72                    | 4.2                | 108                         |
| 1-3  | 72                    | 4.8                | 95                          |
| 1-4  | 72                    | 5.4                | 87                          |
| 1-5  | 72                    | 6.0                | 76                          |
| 2-2  | 58                    | 3.4                | 108                         |
| 3-2  | 44                    | 2.6                | 108                         |
| 4-2  | 34                    | 2.0                | 108                         |

す 8 つの条件のもとで、シート・フロー状態で移動している底質の濃度を測定した。浮遊砂濃度の測定には光電式濃度計が用いられることが多いが、シート・フロー状態では底面の極く近傍を対象としなければならないため、高濃度であることと、濃度計自身による攪乱の点で適さない。そこで次の 2 つの方法によって濃度を測定した。

#### a) 写真撮影による濃度測定

表面を黒色に着色した銅板 (厚さ 0.1mm, 幅 1cm)

を、測定部壁面内壁から 1cm 奥に、流れと平行に鉛直に張り、測定部壁面とこの板の間 1cm を通過する砂粒子を、モータードライブカメラとストロボ装置を用いて撮影し、砂粒子の数を数える方法である。主に比較的上層の浮遊砂成分を測定することが目的である。

#### b) 電気抵抗式濃度計による測定

一方、濃度の極めて濃い底面極く近傍の濃度を測定するために、新しく濃度計 (図-2) を開発した。この濃度計の原理は、水と砂の電気抵抗の違いに着目したもの

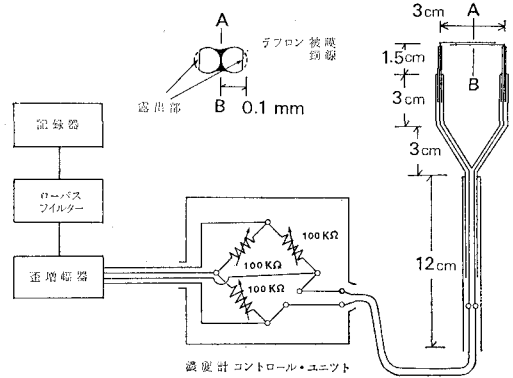


図-2 電気抵抗式濃度計

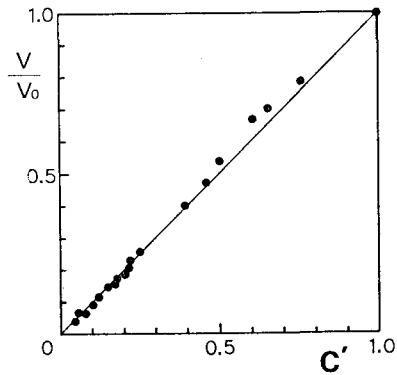


図-3 濃度計の検定結果

で、正負の電極間に砂が混入すると、その混入の割合によって電極間の電気抵抗が変化することを利用したものである。その出力特性を 図-3 に示す。ここで、 $C'$  は水中で静止している底質状態を 1.0、清水を 0.0 とした相対濃度であり、 $V$  は出力電圧、 $V_0$  は  $C'=1.0$  に対する出力である。濃度に対する直線性は実用上満足でき、極めて高濃度まで測定可能であることがわかる。また、センサーが小さいので運動の場を乱すことも少ないという長所を有する。

#### (2) 実験結果と考察

##### a) 上層での底質濃度

写真撮影により得られた比較的上層での平均濃度の鉛直分布を、図-4(a), (b) に示す。 $y$  は静止時底面より

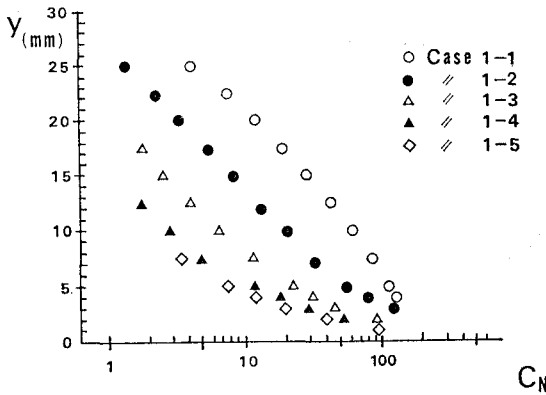


図-4(a) 上層での平均濃度分布 (軌道振幅一定)

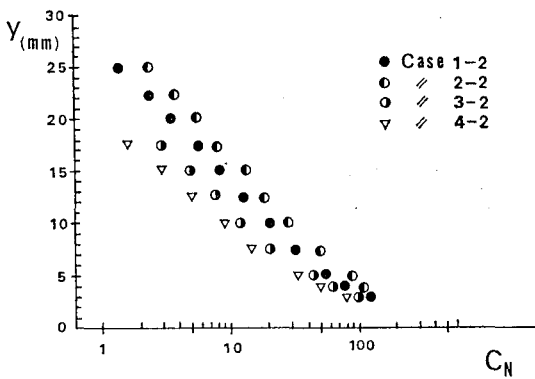


図-4(b) 上層での平均濃度分布 (流速振幅一定)

の高さ,  $C_N$  は各高さで, 水平断面  $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ , 鉛直長  $1\text{mm}$  の直方体中の砂粒子数の 1 周期平均値である. ( $C_N=1.0$  は質量濃度  $167\text{mg/l}$  に相当する). 軌道振幅が一定の場合, 流速振幅が大きくなる程, 底面剪断力が増大し浮遊砂量も増加する (図-4(a)). また, 流速振幅が一定でも周期が短くなると, 底面に発生する乱れが充分発達する前に流れが逆転してしまうためか, 舞い上がり高さが低くなるようである (図-4(b)). 静止時底面上  $7\text{mm}$  より上層では, いずれのケースともほぼ指数分布に従って, 平均濃度が変化している.

一方, 各高さでの濃度の位相変化の例を図-5(a), (b) に示す.  $\theta=0^\circ$  は流速の方向逆転時,  $\theta=90^\circ$  は最大流速時の位相を表わす. 全 8 ケースの結果から判断すると, 底面近くの濃度と平均流速の時間変化は比較的位相が近いが, 周期が長くなるほど濃度の位相が進む傾向にある. また, 上層にいくほど, 濃度の位相遅れが生じる.

#### b) 底面近傍での底質濃度

電気抵抗式濃度計により測定された底面極く近傍での濃度の鉛直分布が, 図-6(a) に半周期間にわたって示されている. ここで,  $C'$  は前述のように, 静止砂中の砂量に対する相対濃度である. 静止時底面高 ( $y=0$ ) より

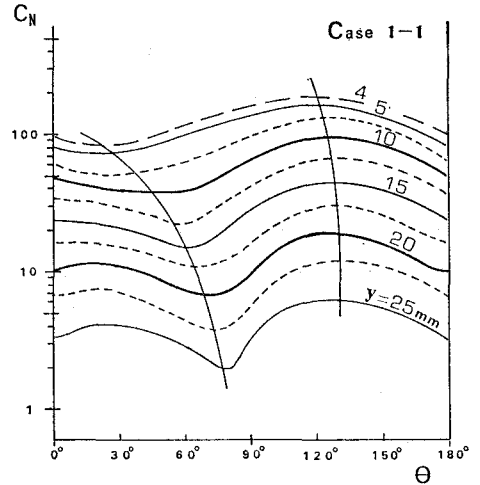


図-5(a) 上層濃度の位相変化 (Case 1-1)

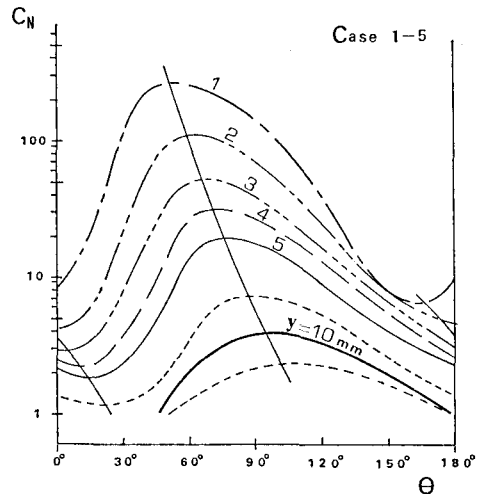


図-5(b) 上層濃度の位相変化 (Case 1-5)

り下層の移動層中の濃度までが計測されている. なお, これはケース 1-1 に対するものであるが, 他のケースについても, 定性的にはほぼ同様の変化を示す.

静止時底面高を中心として, 上下  $3\sim 5\text{mm}$  の範囲が, 濃度の変化が大きいといえよう. 流速の反転時 ( $\theta=0^\circ$ ) よりやや遅れて底面近傍の濃度変化量が最小になり, 最大流速時 ( $\theta=90^\circ$ ) 前後で濃度変動量が最大になる.  $\theta=90^\circ$  と  $120^\circ$  の場合, 初期底面より下層の濃度分布に変曲点がみられるが, これは底面近くに生じる強い渦の効果によるものと思われる. 流速の減速時には, 巻き上げられていた砂が次第に沈降している様子うかがえる.

## 4. 砂粒子の移動速度

### (1) 実験方法

濃度測定と同一条件のもとで, 砂粒子の移動速度を測

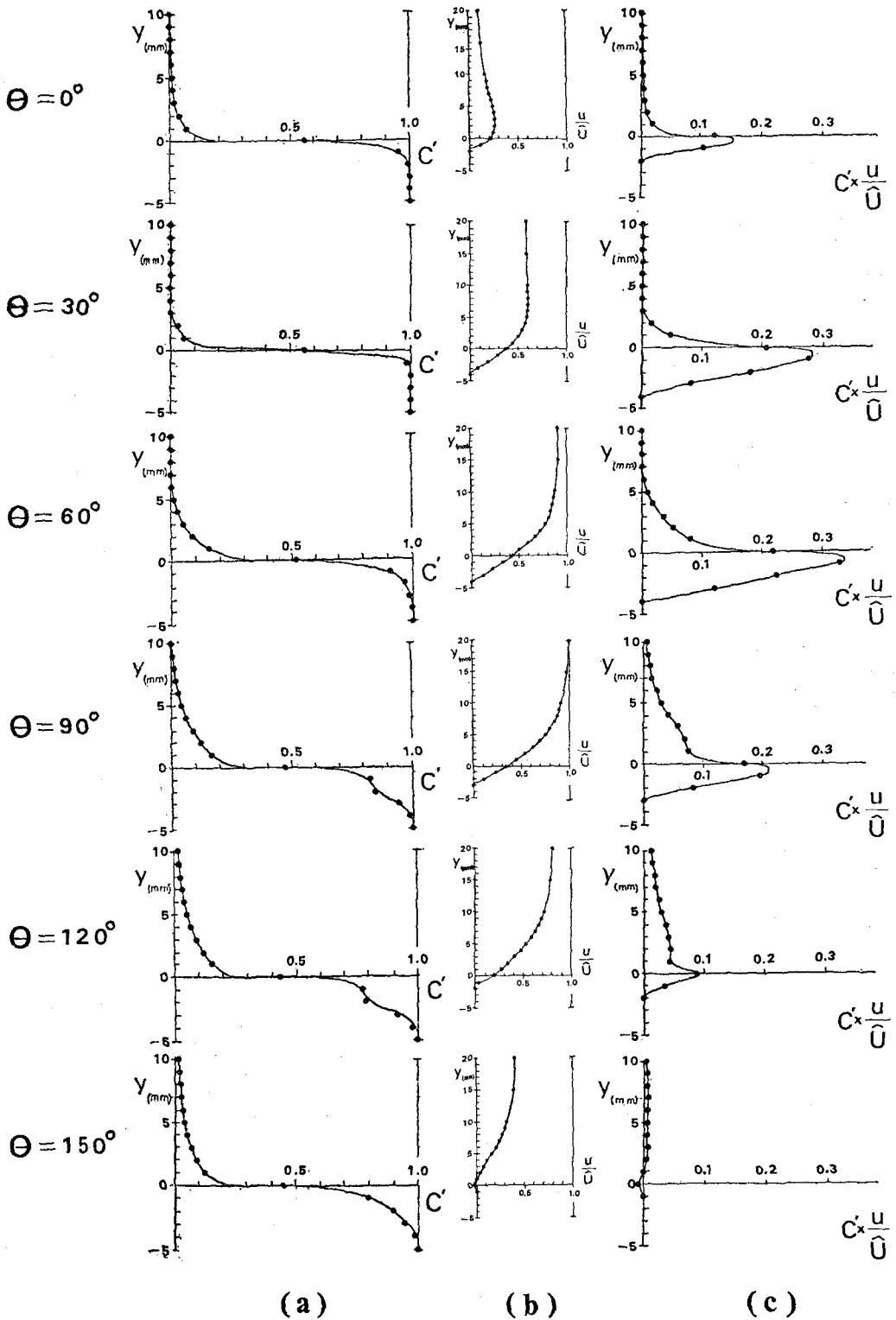


図-6 シート・フロー状態の底質濃度 (a), 移動速度 (b), 移動量 (c) の鉛直分布と位相変化

定した。移動速度は、モータードライブカメラを用いて種々のシャッタースピードで運動中の砂粒子を連続撮影し、粒子の運動軌跡長を測定することにより求めた。

## (2) 実験結果と考察

半周期間の砂粒子速度分布変化(ケース 1-1)が図-6(b)に示されている。砂粒子速度分布は、振動流境界層内の流速分布と極めて似た変化を示す。すなわち、初期底面より約 2 cm 以上の上層では振動流の主流流速とほぼ一致するが、下層に行くに従って速度振幅は減少し、また、位相の進みを生じる。初期底面下の移動限界点付近での位相進みは、約  $45^\circ$  となると推定された。ただし、初期底面下では、水平方向の速度成分は単振動をするのではなく、1 周期間のある位相の間のみ有意な水平速度をもつ間欠的な運動をするようである。

## 5. 漂砂量の推定

以上のようにして測定された砂粒子の濃度と速度の積をとることにより、図-6(c)に示す各位相の底質砂移動量分布が求まる。初期底面近傍の厚さ 1 cm 以下の層の寄与が非常に大きいといえよう。また、流速の加速時の方が減速時よりも砂移動フラックスが大きい。

更に、この砂移動量を鉛直方向ならびに時間的に積分することにより、半周期間の漂砂量を求めることができる。今回の実験ケースのうち、6 ケースについて半周期( $\theta=0^\circ\sim 180^\circ$ )間の漂砂量を求めた。さて、Madsen-Grant<sup>4)</sup>は振動流のもとでの掃流砂について考察し、半周期平均の漂砂量を算定する式として次式を提案した。

$$\Phi \equiv \bar{q}_s / wd = 12.5 \Psi^3 \quad (4)$$

ここで、 $\Phi$ : 無次元漂砂量、 $\bar{q}_s$ : 半周期平均漂砂量、 $w$ : 底質の沈降速度、 $d$ : 粒径であり、 $\Psi$  は式(2)で定義した Shields 数である。浮遊砂の場合でも無次元漂砂量  $\Phi$  が Shields 数と密接に関連することは、柴山・堀川<sup>3)</sup>、渡辺・利穂・堀川<sup>9)</sup>等によって報告されている。

図-7 は、今回の実験結果を Madsen-Grant<sup>4)</sup>の提案した関係と比較したものであり、図中の直線が式(4)の関係を表わしている。なお、Madsen-Grant の用いた Kalkanis と Abou-Seida のデータもプロットしてあるが、これらのデータは静水中の水平単振動板を用いて得られたものである。シート・フロー条件で得られた今回のデータが式(4)と予想以上に良い一致を示している。ただし、測定精度上の問題もあり、また実験条件も限られているので、まだ一般的な結論に達するには至っていないと思われる。

## 6. 結 語

本研究で扱ったシート・フロー状態の底質移動は、工学的にも重要であるにも拘らず、これ迄ほとんど研究が

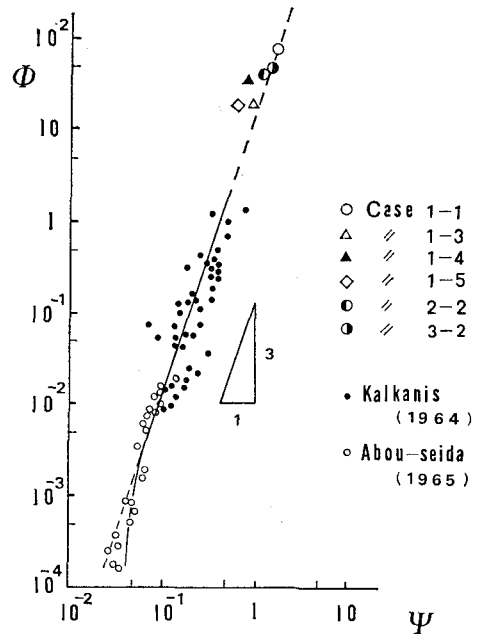


図-7 半周期平均の底質移動量

なされていなかった問題である。今回開発した電気抵抗式濃度計により、極めて高濃度の底質濃度がある程度測定可能になり、シート・フロー状態の砂移動の機構を知る上で貴重なデータを得ることができた。今後、測定方法にも改良を加え、更に実験資料を充実させて、より定量的な議論を進めて行く予定である。

最後に、電気抵抗式濃度計の製作にあたり、種々のご助言を賜った中央大学理工学部 服部昌太郎教授、また実験にあたり協力を惜しまなかった東京大学大学院学生、榊山勉・利穂吉彦の両君に感謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) Dingler, J. R. and Inman, D. L.: Wave-formed ripples in nearshore sands, Proc. 15th Conf. on Coastal Eng., pp. 2109~2126, 1976.
- 2) Komar, P. D. and Miller, M. C.: The initiation of oscillatory ripple marks and the development of plane-bed at high stresses under waves, Jour. Sedimentary Petrology, Vol. 45, No. 3, pp. 697~703, 1974.
- 3) Manohar, M.: Mechanics of bottom sediment movement due to wave action, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 75, 121 p., 1955.
- 4) Madsen, O. S. and Grant, W. D.: Sediment transport in the coastal environment, Proc. 15th Conf. on Coastal Eng., pp. 1093~1112, 1976.
- 5) 柴山知也・堀川清司: 沖浜帯における波による漂砂機構, 第34回土木学会年次学術講演会概要集 2, pp. 661~662, 1979.
- 6) 渡辺 晃・利穂吉彦・堀川清司: 二次元海浜変形と岸沖漂砂量分布, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 172~176, 1979.