

砕波帯を含む固定斜面上の波動場の特性に関する実験的研究

岩 垣 雄 一*・ 斐 義 光**

1. 序 論

海浜における底質の移動は、流体場現象と底質の両方の特性に支配される現象であるから、その移動現象を理解するためには、流体場の特性を明らかにするとともに、その流体場におかれた底質がどのような機構で移動するかを解明する必要がある。

本研究は、このような観点から、まず砂の移動が最も激しい砕波帯内の底面近傍の波動場の特性を来襲波の条件との関係から明らかにし、移動床における砕波帯内の漂砂量分布に関する従来の実験結果を説明しようとするものである。

海岸工学的に問題となる漂砂現象は、主として砕波帯において生じることから、砕波帯内の流体場の特性を明らかにすることはとくに重要であるが、現象が複雑であるために理論的に解析することが困難である。したがって、この種の研究は主として実験や観測にもとづいて行われてきている^{1),2),3)}。本研究は、実験水槽における固定斜面上、とくに砕波帯内の波動場の水理特性を明らかにしようとするものであり、ここでは砕波帯の底面近傍における水粒子速度と底面摩擦応力を熱膜型センサーを用いて測定することにより、砕波帯内の摩擦応力の分布傾向、水粒子速度と摩擦応力との関係、水粒子速度と摩擦応力の岸向き、冲向き方向の特性などを沖波波形勾配や斜面勾配を変えて検討した。さらに、砕波点よりも沖側において、かつて shear plate を用いて底面摩擦応力を測定した結果⁴⁾ についても同様の検討を行った。

2. 実験装置および方法

(1) 実験装置

実験は、長さ 30 m、幅 50 cm、深さ 75 cm の片面ガラス張り水槽の中にアルミ製の斜面を設置して行った。波高は、容量式波高計を一樣水深部に 1 台、水粒子速度および摩擦応力の測定点を含む砕波点近傍の斜面上に 4 台設置して測定した。波の水粒子速度は、DISA 社製 55R13 の熱膜流速計プローブをポイントゲージに取付

け、底面から 0.4 cm の高さにセンサーを設置して測定した。また底面摩擦応力は、DISA 社製 55R46 の熱膜型センサーを斜面と同一平面上に設置して測定した。なお、摩擦応力センサーは 10 cm 平方の亚克力板の中央部に固定されており、実験時におけるセンサーの取扱いが容易になるようにした。

実験の記録は、14 チャンネルのデータレコーダを用いて波高、水粒子速度、および底面摩擦応力を同時に記録した。

(2) 実験方法

流速センサーは摩擦応力センサーと同一鉛直線上で、かつできる限り底面に近い、底面から 4 mm の位置に設置し、規則波を用いて実験した。データの記録は、予備実験で検討しておいた波高記録の変動が比較的少ないと考えられる波をペン書きレコーダで確認しながら行った。なお、水粒子速度および底面摩擦応力の場所的分布は、センサーの位置を固定して、水深を変化させることによって測定した。

実験に用いた波の特性と水深をそれぞれ表—1 および表—2 に示す。ただし、添字は一樣水深部における量を表わしている。

表—1 実験条件 (斜面勾配 1/5)

T (sec)	H ₀ (cm)	h ₀ (cm)	h (cm)
1.07	11.90	36.0	9.5
1.21	6.70		
1.84	3.85	45.0	15.0

表—2 実験条件 (斜面勾配 1/30)

T (sec)	H ₀ (cm)	h ₀ (cm)	h (cm)
1.08	4.50	36.0	6.0
1.92	10.22	45.0	15.0

実験に用いた熱膜型センサーの較正は、図—1 に示すような単弦運動を行う振動平板を製作し、その振動平板に取付けた流速センサーおよび摩擦応力センサーの出力と、振動平板の運動にもとづく理論値とを対応づけることによって行った。一方、振動平板の変位は、2 本のステンレス線を用いることにより抵抗線式波高計と同様の

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室
** 正会員 工修 京都大学研究生 工学部土木工学教室

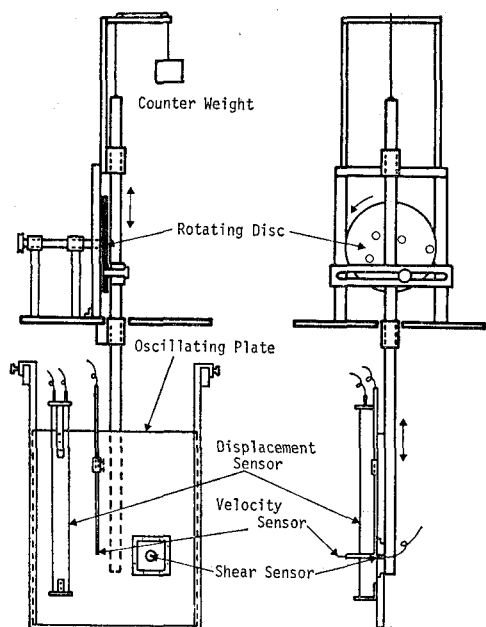


図-1 水粒子速度および摩擦応力に関する振動平板装置

原理で測定することができ、振動平板の周期は接続した無段変速モーターの回転数を変えることにより、また振動平板の振幅は回転板にあけた穴の位置を変えることにより、変化させることができる。なお、振動平板に関する流速 u および摩擦応力 τ_0 の理論値は変位を $\eta = a \cos \sigma t$ と置くと、次のようにあらわされる。

$$u = -a\sigma \sin \sigma t \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\tau_0 = \rho a \nu^{1/2} (2\pi/T)^{3/2} \cos \left(\sigma t + \frac{\pi}{4} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 ρ : 水の密度、 a : 振幅、 T : 周期、 σ : 角周波数 ($2\pi/T$)、 ν : 水の動粘性係数、である。

図-2 は、振動平板の変位の理論値と測定値との比較を示したものであり、counter weightを調節することにより振動平板の変位をほぼ単弦運動にすることが可能である。しかし、周期が短くなると、おもりの慣性力の影

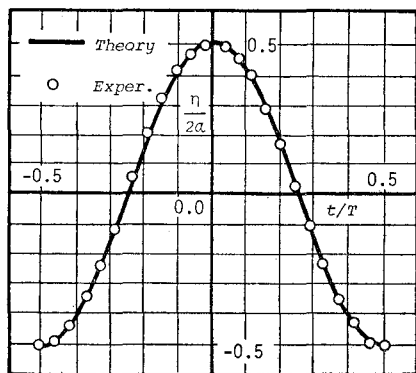
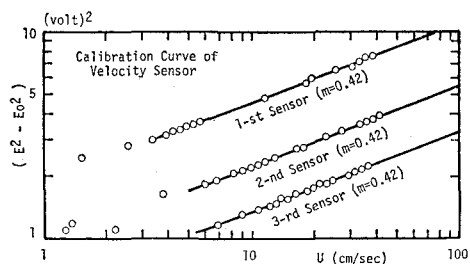


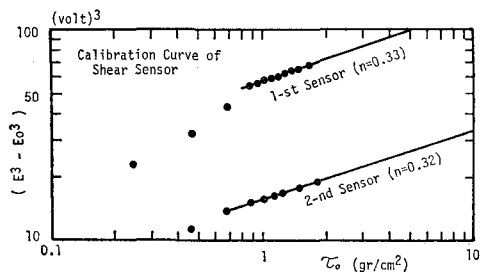
図-2 振動平板の変位

響が無視できなくなるために、振動平板が単弦運動をしなくなる。

図-3 (a) は、流速センサーの出力と振動平板の変位速度との関係を示す較正曲線の 1 例であり、図-3 (b) は、摩擦応力センサーの出力と振動平板に関して導かれる摩擦応力の理論値との関係を示す較正曲線の 1 例である。



(a) 熱膜型流速センサー



(b) 熱膜型摩擦応力センサー

図-3 較正曲線の 1 例

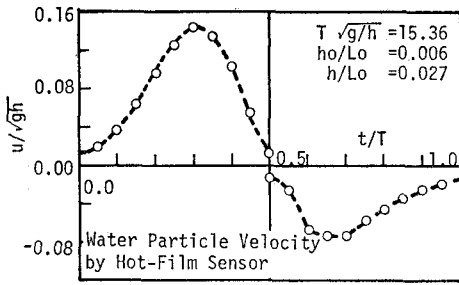
流速センサーの場合には、 U が 6 cm/sec 程度よりも小さい速度ではデータの散乱が著しいが、それよりも大きい値では良い対応関係を示すことがわかる。また、摩擦応力センサーの出力は、 τ_0 が 0.8 gr/cm² 程度よりも小さい範囲では、データの散乱が顕著であるが、それよりも大きい値では良い対応関係を示す。また、他の場合のそれぞれの較正関係も、ほぼ同様の結果を示した。なお、較正実験は水温が 0.4°C 変化するごとに行い、センサーの出力の誤差が 5% 以内になるようにした。

3. 実験結果および考察

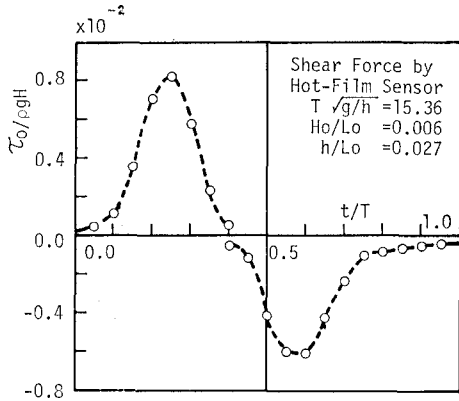
実験結果を記録の 1 周期の間の時間的变化について検討するとともに、変化の傾向をより明確にするために、水粒子速度ベクトルおよび底面摩擦応力ベクトルの絶対値を岸方向、沖方向に区別し、各位相での水粒子速度および摩擦応力の値を 2 乗して、それらの値を各方向別に総和したスカラー量についても検討した。

(1) 水粒子速度および底面摩擦応力の時間的变化

図-4 (a), (b) は、斜面勾配が 1/5 の場合の水粒子速度および底面摩擦応力の時間的变化を示す 1 例である。ここに示していない結果をも含めて考察すると、次のよ



図—4 (a) 水粒子速度の時間的変化の1例(斜面勾配 1/5)



図—4 (b) 底面摩擦応力の時間的変化の1例(斜面勾配 1/5)

うなことがいえる。① 底面摩擦応力の無次元量 $\tau_0/\rho g H$ (H : 波高, ρ : 水の密度, g : 重力加速度) の1周期間における時間的変化は, 砕波点および砕波後の場所であり激しくなり, 岸方向に生じる摩擦応力は沖方向のそれよりもはるかに大きい値となるが, 1周期間における出現時間は短い。この傾向は, 沖波波形勾配 H_0/L_0 が大きくなるにつれて顕著になる。② 無次元底面摩擦応力の最大値は, 砕波点近傍において, 線型理論で与えられる値よりも8~10倍程度大きくなり, 砕波によって混入した空気が底面近傍にまで十分達しない範囲の砕波帯内ではさらに大きい値となる。③ 斜面勾配が1/30の場合の結果は, 1/5の場合の結果に比べてとくに沖向き成分の時間的変化に特徴が見い出された。すなわち, 水粒

子速度および底面摩擦応力の沖方向の成分は岸向きに比較して変動が一定で継続時間が長くなる。この傾向については, 砕波点からの距離や波の条件を変えてさらに検討してみたい。

(2) 水粒子速度の岸・沖方向成分の割合

記録の1周期間における水粒子速度ベクトルの絶対値を岸方向, 沖方向に区別し, 水粒子速度の2乗値の岸方向成分の大きさを調べるために, 各位相での水粒子速度の2乗値の総和に対する比をとって, 次のように U_{on} を定義する。

$$U_{on} = \sum (u_{on})^2 / \{ \sum (u_{on})^2 + \sum (u_{off})^2 \} \cdots \cdots (3)$$

ここに, u_{on} は水粒子速度ベクトルの岸方向成分であり, u_{off} は沖方向成分である。

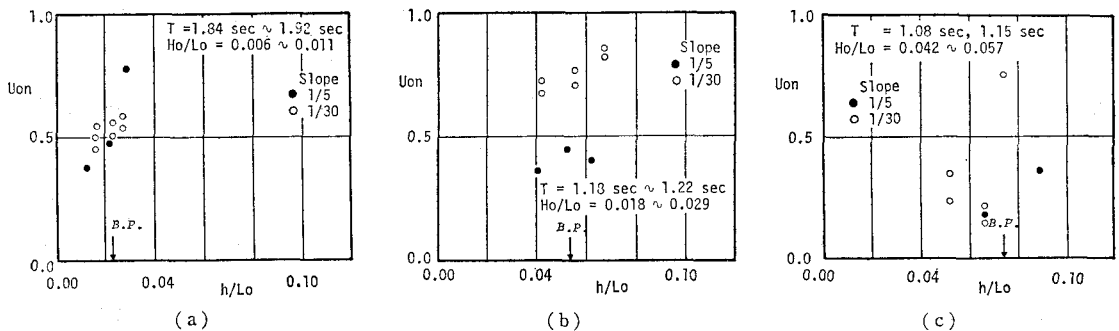
図—5 (a), (b), (c) は, 熱膜型センサーを用いて測定した U_{on} を縦軸にとり, 水深波長比 h/L_0 を横軸にとって沖波波形勾配別に示したものである。図中, ●印は斜面勾配が1/5の場合の結果であり, ○印は1/30の場合の結果である。また, B.P. は斜面勾配が1/30の場合の砕波点を示している。なお, 図中のデータは, 5波の波についての結果である。これらの結果からわかることは, U_{on} の分布傾向は沖波波形勾配と斜面勾配によって異なるということである。すなわち, H_0/L_0 が小さい場合には U_{on} の値が0.5よりも大きく, 水粒子速度は岸方向成分が卓越する。一方, H_0/L_0 が大きい場合には全く逆の傾向を示し, 水粒子速度の沖方向成分が卓越する。しかし, 図—5 (c) の斜面勾配1/30の場合のように, 砕波点において岸方向の水粒子速度が大きい値を示すこともある。また, 図—5 (b) より, H_0/L_0 が0.018~0.029程度の波の場合でも, 斜面勾配が急になると水粒子速度の沖方向成分が卓越することもある。

(3) 底面摩擦応力の岸・沖方向成分の割合

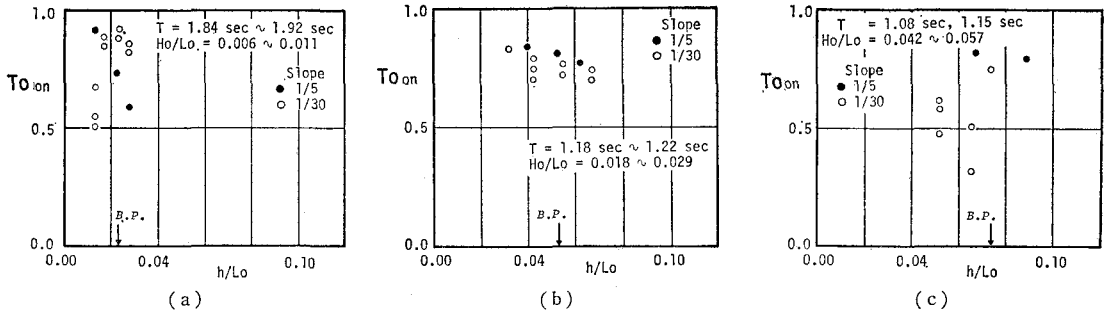
水粒子速度の岸・沖方向成分の割合を検討したのと同じように, ここでも底面摩擦応力の割合について次のような比を定義する。

$$T_{0on} = \sum (\tau_{0on})^2 / \{ \sum (\tau_{0on})^2 + \sum (\tau_{0off})^2 \} \cdots (4)$$

ここに, τ_{0on} は底面摩擦応力ベクトルの岸方向成分



図—5 沖波波形勾配による岸向き水粒子速度の2乗値の割合の分布傾向

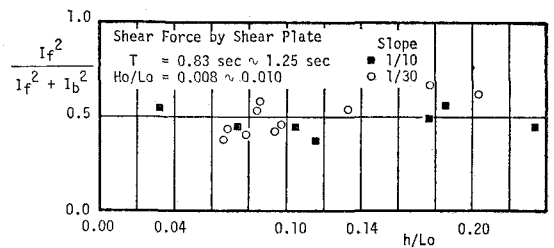


図—6 沖波波形勾配による岸向き摩擦応力の2乗値の割合の分布傾向

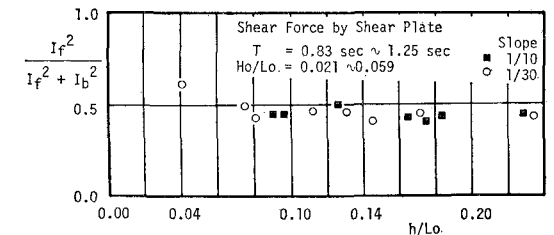
であり、 $\tau_{0\text{ off}}$ は沖方向成分である。

図—6 (a), (b), (c) は、熱膜型センサーを用いて底面摩擦応力を測定した結果にもとづいて、 $T_{0\text{ on}}$ を h/L_0 を横軸にとり、沖波波形勾配別に示したものである。図中の記号および矢印は 図—5 におけるのと同じである。 $T_{0\text{ on}}$ の場合も沖波波形勾配や斜面勾配によって分布傾向が異なる。すなわち、斜面勾配が 1/5 の場合には、いづれの波形勾配のときも $T_{0\text{ on}}$ の値は 0.5 より大きく、底面摩擦応力は岸方向成分が卓越する。しかしながら、図—6 (a) の黒丸のデータからわかるように、波形勾配が小さい場合には、水深波長比が大きくなるにつれて $T_{0\text{ on}}$ は 0.5 に近づく、すなわち、1 周期平均の底面摩擦応力は 0 に近づくという傾向を示している。一方、斜面勾配が 1/30 の場合には、波形勾配の大小によって $T_{0\text{ on}}$ の分布傾向は明らかに異なる。すなわち、図—6 (a) から、波形勾配が小さい場合には砕波点では $T_{0\text{ on}}$ の値が 0.5 よりもはるかに大きく、水深波長比がほぼ 0.01 の所では 0.5 に近い値となることから、結局波形勾配の小さい波が砕波する場合には砕波点付近では岸向きの摩擦応力が卓越するが、砕波点よりも少し岸側では 1 周期平均の摩擦応力は 0 に近づくものと考えられる。一方、図—6 (c) から、波形勾配が大きい場合には砕波点では $T_{0\text{ on}}$ の値が 0.5 よりも大きく、砕波直後の $h/L_0 = 0.06$ 付近では $T_{0\text{ on}}$ の値は 0.5 より小さくなり、さらに h/L_0 の値が小さくなるにつれて $T_{0\text{ on}}$ の値は 0.5 かあるいはそれよりも大きい値に変化するように思われる。言いかえると、波形勾配の大きい波が砕波する場合には、砕波点付近では岸向きの底面摩擦応力が卓越するが、砕波直後の $h/L_0 = 0.06$ 付近では沖方向成分が卓越し、 h/L_0 が小さくなるにつれて岸方向成分が卓越するようになる。

次に、図—7 (a), (b) は、砕波点よりも沖側の領域で、かつて shear plate を用いて測定した底面摩擦応力を、岸方向、沖方向別に総和し、その総和に対する岸方向成分の総和の割合を h/L_0 を横軸にとって、波形勾配が小さい場合と大きい場合について示したものである。図中、■印は斜面勾配が 1/10 の場合の結果であり、○印



(a) 沖波波形勾配が小さい場合



(b) 沖波波形勾配が大きい場合

図—7 岸向き摩擦応力の力積の2乗値の割合

は 1/30 の場合の結果である。また、 I_f および I_b は摩擦応力の力積の岸・沖方向成分であり

$$I_f = \int_0^{t_1} \tau_0(t) dt, \quad I_b = \int_{t_1}^{T_1} \tau_0(t) dt \quad \dots\dots\dots (5)$$

で表わされる。ただし、 τ_0 は底面摩擦応力であり、 t_1 は摩擦力が記録紙上で零線を切る時間、 T_1 は摩擦力の記録の周期である。図—7 (a) より、波形勾配が小さい場合は、 $h/L_0 = 0.10$ 付近を中心として摩擦応力の卓越する方向が逆転し、水粒子の運動の方向から考えると、 $h/L_0 = 0.10$ よりも大きい所では岸方向の運動が卓越し、 $h/L_0 = 0.10$ よりも小さくなるにつれて沖方向の運動が卓越して、結局 $h/L_0 = 0.10$ 付近では堆積作用が生じることになる。一方、大きい波形勾配の場合にもやはり $h/L_0 = 0.08 \sim 0.10$ 付近を中心として摩擦応力の卓越する方向が異なり、水粒子の運動の方向から考えると、 $h/L_0 = 0.08 \sim 0.10$ 付近では侵食が生じることになる。

(4) 水粒子速度と底面摩擦応力との関係

摩擦応力センサーの設置点から鉛直上方に 4 mm の高さに設置した流速センサーの記録から、水粒子速度と底

面摩擦応力との関係について、次のようなことがわかった。

斜面勾配が $1/5$ の場合、砕波帯の底面近傍の水粒子の運動は激しく、摩擦応力の測定結果から予想される底面近くの水粒子の運動と流速センサーによって測定した水粒子の運動は一致せず、1周期平均の水粒子速度と摩擦応力の卓越方向はむしろ逆の傾向を示している。一方、斜面勾配が $1/30$ の場合には、ほぼ一致した分布傾向を示すが、図-5 (a) および 図-6 (a) からわかるように、摩擦応力の岸方向成分の卓越する割合は水粒子速度のそれよりもかなり大きい。さらに、 $h/L_0=0.01\sim0.02$ 付近で T_{0on} および U_{0n} の値がともに 0.5 付近となることも興味ある傾向である。また、図-5 (c) および 図-6 (c) から、波形勾配が大きい場合には、砕波帯内の水粒子の運動は、砕波点以外ではすべて沖方向が卓越する。底面摩擦応力は砕波点では岸方向成分が卓越し、砕波直後で沖方向成分が卓越するが、さらに h/L_0 が小さくなると岸向き成分が卓越するように思われる。

このように、砕波帯内の水粒子速度の分布傾向は、とくに波形勾配が大きい場合には、底面摩擦応力の分布傾向と異なり、流速センサーを用いて測定した水粒子速度の分布傾向から底面近くの水粒子の運動を議論することは問題があるように思われる。

4. 結 論

固定斜面上における砕波帯内の水粒子速度および底面摩擦応力を熱膜型センサーを用いて測定することにより、砕波帯内の波動場の特性を検討した結果、次のことがわかった。

1) 砕波によって生ずる気泡が、底面にまで十分連行されない範囲の砕波帯内では、熱膜型センサーを用いて底面摩擦応力を測定することができる。

2) 無次元底面摩擦応力の最大値は、砕波帯内では、線型理論で与えられる 10^{-8} のオーダーよりもはるかに大きく 10^{-1} のオーダーにもなる場合がある。

3) 水粒子速度や底面摩擦応力の分布は、波の性質と斜面勾配によって異なり、水粒子の運動方向や底面摩擦応力の作用方向から、底質の移動特性が推定され、海浜断面における底質の侵食堆積場所を論じることができる。

今後は、移動床における実験を行い、本研究で得られた結果が、果たしてどの程度現象を説明することができるかを検討するとともに、固定床実験における砕波帯内の波動場をモデル化することにより、砕波帯内の水理量を定量的に評価するよう努めたいと考えている。

終りに、実験に際して協力して頂いた当時学部学生の村上雅一君（現森本組KK）に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Fisher, J., B. Johnson and M. E. McCormick: Time Dependent Shear Stress Beneath a Shoaling Wave, International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, Vol. 1, pp. 799~816, 1974.
- 2) 佐藤幸雄: 砕波点における底面流速と底質移動の関係について, 第 25 回海岸工学講演会論文集, pp. 241~245, 1978.
- 3) 堀川清司・堀田新太郎・水口 優・磯部雅彦: 砕波後の波に伴う流速場に関する現地観測, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 46~50, 1979.
- 4) 岩垣雄一・裏 義光: 波による水底斜面上の摩擦力に関する実験, 第 25 回海岸工学講演会論文集, pp. 38~41, 1978.