

斜面上で砕波する波の底面流速に関する実験的研究

渡 辺 晃*. 磯 部 雅 彦**. 野 沢 是 幸***. 堀 川 清 司****

1. 緒 言

海浜過程等の海岸工学上の問題において、砕波帯での諸現象が重要な部分を占めていることには異論がないであろう。著者らは昨年度、二次元海浜変形における岸沖漂砂量について検討したが¹⁾、その際に砕波帯内の流速場を知ることの必要性を痛感した。砕波帯での流速場についても、二次元実験あるいは現地観測の資料に基づいて研究を進めており、その成果を報告したが^{2),3)}、漂砂現象との関連を論じるには、底面極く近傍での測定資料はまだ乏しい。底面流速に着目した研究は、佐藤⁴⁾によっても報告されている。しかし、砕波点のみを対象としているため、総合的な現象の把握にはやはり不充分である。

本研究の目的は、水槽実験により砕波帯内外の底面近傍流速を実測し、その資料に基づいて、波動流や定常流の成分と海浜形状や波浪条件との関連を明らかにすることにある。このために二次元水槽実験を行ない、種々の条件のもとでの底面流速を熱膜流速計により測定し、微小振幅波理論や流れ関数法による計算値と比較検討した。解析はまだ充分とはいえないが、現在までに得られた結果を以下に報告する。

2. 実験の方法

実験は幅 80 cm、高さ 100 cm、長さ 23 m の二次元造波水槽を用いて行なった。海浜地形としては、図-1

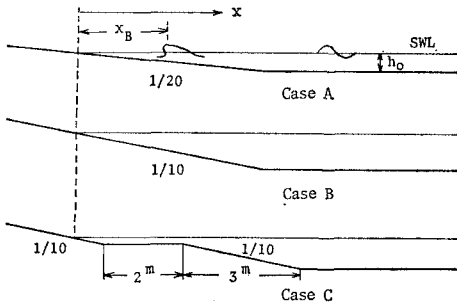


図-1 海浜形状模式図

に示すように 1/20 および 1/10 の一様勾配斜面 (Case A, B) ならびに勾配 1/10 の斜面間に長さ 200 cm の水平部をもつ地形 (Case C: 以下簡単のためステップ地形とよぶが、海浜地形分類上のステップ地形とは同義でない。) の 3 種類を選んだ。それぞれに対する実験ケースと条件を、表-1~3 に示す。

波高の測定には容量式波高計を 2 本用い、一様水深部と流速測定位置の波形を記録した。一方、流速の測定には I 型プローブを取り付けた熱膜流速計を用いた。底面流速としてどの高さでの流速を対象とするかが問題であるが、底面境界層厚などを考慮した上で、実験全体を通じて常に各位置の底面上 5 mm の高さで測定した。

条件を設定し造波開始後、定常状態に達した段階で水面波形と流速を測定・記録した。各測点あたりの記録時間は約 90 sec である。原則として各ケースの測定前後に流速計のキャリブレーションを行ない、その出力感度誤差が $\pm 5\%$ 以上の時には、そのケースの測定を無効とし

表-1 実験ケース (A) (1/20 勾配斜面)

Case 番号	沖側一様部水深 h_0 (cm)	周 期 T (sec)	換算沖波高 H_0' (cm)	砕波帯幅 X_B (cm)	砕波形式
A-1	24.8	0.80	2.0	47	P
A-2	"	"	3.2	82	S~P
A-3	"	"	4.9	112	S
A-4	"	1.00	2.0	57	P
A-5	"	"	4.0	102	P
A-6	"	"	7.5	172	S
A-7	"	1.24	1.8	62	P
A-8	"	"	3.9	102	S~P
A-9	"	"	7.0	162	S~P

表-2 実験ケース (B) (1/10 勾配斜面)

Case 番号	沖側一様部水深 h_0 (cm)	周 期 T (sec)	換算沖波高 H_0' (cm)	砕波帯幅 X_B (cm)	砕波形式
B-1	44.9	0.80	2.2	23	P
B-2	"	"	3.6	38	P
B-3	45.0	"	4.7	48	S~P
B-4	44.9	1.00	2.6	33	P
B-5	"	"	4.6	53	"
B-6	"	"	7.5	84	"
B-7	44.8	1.24	2.6	35	"
B-8	"	"	4.9	63	"
B-9	44.9	"	8.6	88	"

* 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 東京大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 東京電力(株)

**** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

表-3 実験ケース (C) (ステップ地形)

Case 番号	沖側一様 部水深 h_0 (cm)	周 期 T (sec)	換算沖波 高 H_0' (cm)	碎波帯幅 X_B (cm)	碎波形式
C-1	34.9	0.80	2.49	219	S(P)
C-2	34.2	"	3.15	242	P(P)
C-3	"	1.00	3.65	242	"
C-4	37.6	"	4.00	236	S(P)
C-5	36.0	"	4.38	260	P(P)
C-6	37.8	"	6.13	278	"
C-7	34.5	1.24	3.13	250	P(?)
C-8	37.8	"	3.77	215	S(P)
C-9	36.2	"	4.44	262	P(?)
C-10	37.8	"	7.44	280	P(P)
C-11	36.2	1.50	4.51	262	P(S~P)
C-12	39.2	"	6.43	282	P(P)

て実験をやり直した。また、碎波点位置と碎波形式を目視により観察した。表-1~3中の碎波帯幅 X_B は、碎波点と静水汀線位置間の水平距離である。ただし碎波点としては、plunging 型碎波の場合は波の前面の傾斜が 90° となる点を取り、spilling 型碎波では波峰に気泡の生じ始める地点を選んだ。表中の碎波形式で、Pは plunging 型、Sは spilling 型、S~Pは両者の中間の碎波を意味する。なお、ステップ地形の場合には、水平段部のほぼ沖側端で碎波するように、水深と入射波高を調整した。表-3中()内は、岸側斜面での二次碎波の碎波形式であり、?は現象が微小で判定不可能であったことを示す。

3. 実験結果と考察

(1) データの解析法

各測点に対してデータレコーダ上に記録された水面波形と底面流速変動は、入射波の波形と共に、サンプリング間隔 0.02 sec で 80 sec 分を AD 変換して処理した。それらの時間波形は、特に碎波帯内においては一波毎に変動し、また碎波直後では流速波形に乱れの影響が顕著にあらわれる。今回の解析では乱れ成分までは議論しないものとし、入射波の時間波形を基準として1周期分を40等分した各位相に対する水位と流速変動の位相平均を求め、以下の解析にはそれを用いた。

このようにして求められた水位 η と流速 u の時間変

化の例を図-2に示す。これらは Case A-6 に対するもので、図中の実線が位相平均された実測値を表わす。なお図中の x^* は、静水汀線より沖向きにとった測定点座標 x を碎波帯幅 X_B で割った無次元距離である。静水位よりはかられた水位 η の変動をみれば、沖側で正弦的であった波形が次第に峰の尖った波形に変形していく様子や、より汀線近くで平均水位が上昇していることが明らかである。一方同じく実線で示された流速変動記録からもわかるように、今回用いた I 型熱膜プローブでは流速の絶対値のみが記録され、その方向は直接判別できない。そこで、Dean⁵⁾ により提案された流れ関数法を適用して水面波形より流速変動を求め、それとの対応により流速の正負等を判定することにした。

ここで用いた流れ関数法は、昨年報告したように Dean の方法に若干の改良を加えたものである²⁾。実測水面波形にこの方法を適用して求めた流速 u の時間変化が図-2に点線で示されている。またそれに対応する水面波形 η が平均水位を基準として同じく点線で示されている。実測水面波形との差は、計算上の誤差もあるが、その主たる原因は平均水位の変化によるものと解釈される。流速変動については、碎波帯内外に存在する質量輸送や戻り流れ等の定常流成分を考慮すると、実測流速の正負を計算値のそれと単純に一致させて扱うことはできない。また、実測の水面波形と流速変動を比較すると、他のケースをも通して特に碎波点近傍では流速の位相遅れが存在するように見うけられる。ここではこの位相遅れは無視し、定常流流速を変動パラメーターとして、実測流速と計算流速間の一周期二乗平均誤差が最小となる条件を求め、それより定常流速を推定した。このようにして求めた定常流流速を考慮して実測流速の正負を判定し、更に定常流流速成分を差引いて補正を加えたものが、図中に一点鎖線で示されている。碎波点以深($x^* \geq 1.0$)での補正流速と流れ関数法による計算流速との一致はかなり良い。汀線に近づくと、計算流速と実測流速の一致は必ずしも充分でないが、これは主に乱れ成分や鉛直流速の影響と推測される。全体としては合理的な補正がなされているといえよう。

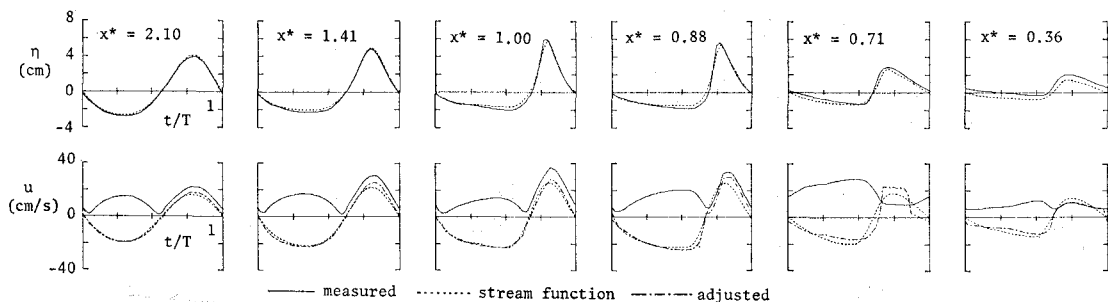


図-2 水位と流速の位相変化 (Case A-6)

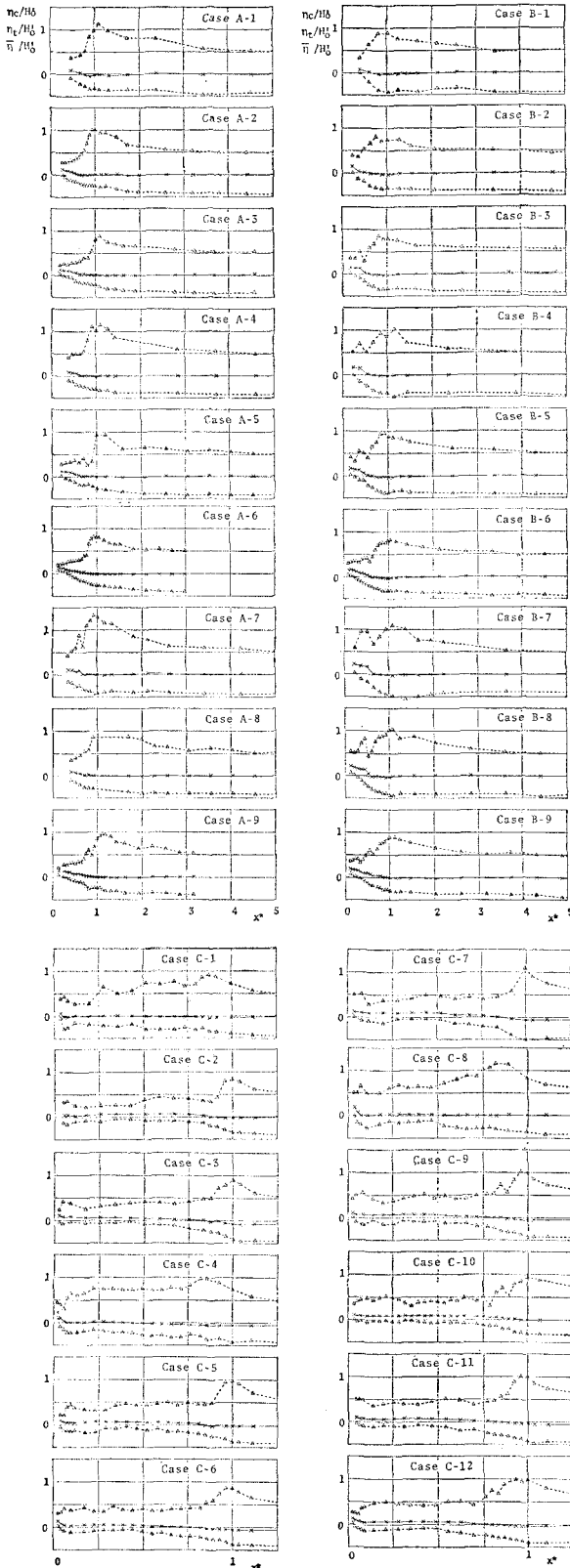


図-3 波頂・波谷高と平均水位 (---△---: 波頂高と波谷高, —×—: 平均水位)

このようにして求められた定常流速やそのまわりに変動する波動流速成分について以下に議論をすすめる。ここで示した例によれば、評価された定常流や波動流の流速値は完全なものとはいえずある程度の誤差を含んでいることは明らかであるが、多数の実験ケースの結果を総合的に検討することにより、少なくとも定性的な結論は導き出せるものと期待される。

(2) 水面波形の振幅と平均水位

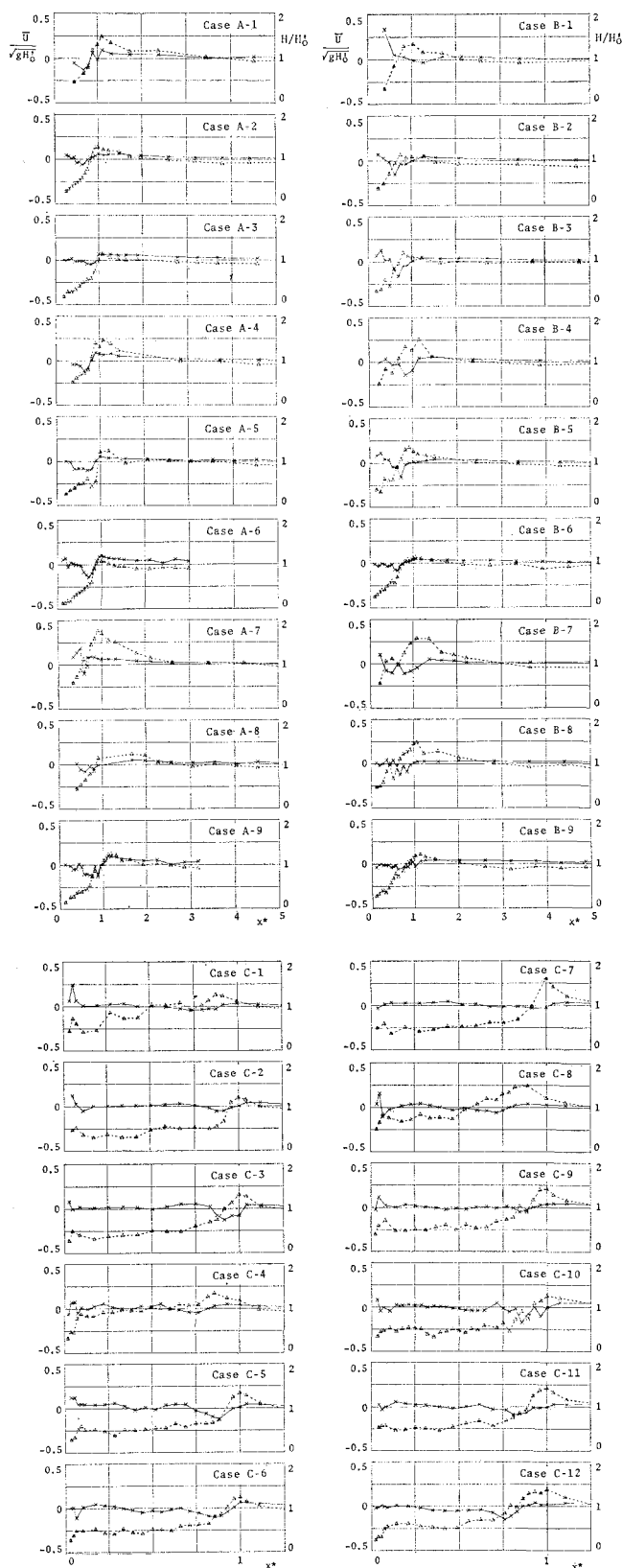
流速について議論する前に、水位変動の場所的分布をみておこう。図-3には、静水位よりの波頂高 η_c 、波谷高 η_t および平均水位 $\bar{\eta}$ が、無次元距離 $x^* = x/X_B$ に対して示されている。(ただし、Case C のステップ地形については、静水汀線より水平ステップ部沖側端までの距離で x を除したものを x^* とした。) 勾配 1/20 (Case A), 勾配 1/10 (Case B) の結果をみると、砕波点まで増大した峰高が砕波直後に急減しており、特に plunging 型砕波の場合には砕波直後に波頂高の極小が現われている。また平均水位の変化は波高変化とよく対応している。一方、ステップ地形 (Case C) の場合にも、沖側斜面上では波高の浅水増加に伴ない平均水位が低下し、砕波後に水位上昇がみられる。汀線近くの二次砕波に伴う水位上昇も明瞭にあらわれている。

(3) 定常流速

図-4には、(1)で述べた方法により求められた定常流速成分 $\bar{U}$ (岸向きに正) の分布が、波高 H の変化と共に沖波波高 H_0' を用いて無次元化された量として示されている。定常流速はその推定方法に起因してばらつきが大きく、十分な信頼性を有するとはいえない。したがって定量的な議論はできないが、概略次のことが指摘されよう。

- i) 砕波帯外での定常流速は一般的に小さい。砕波直前までは常に岸向きの定常流が存在する。その値は測定範囲内で 0.5~2 cm/sec 程度のオーダーで、砕波点に近づくにつれて徐々に増大する。
- ii) 砕波直前からは比較的急速に減少し、砕波帯内に負の極大値があらわれる。この沖向き定常流の極大値は 4~5 cm/sec 以上の値にも達する。
- iii) 更に汀線に近づくと、沖向き定常流は減小し、再び岸向き定常流があらわれる場合も多い。
- iv) これらの傾向は、ステップ地形における二次砕波に対してもあらわれる。

このように底面近傍に定常流成分が顕著にあらわれ、砕波帯外では岸向き、砕波帯内では汀線近くを除いて沖向きとなることは、堀川ら⁶⁾によっても報告されており、砕波帯外の沖向き流速に限れば Bijker ら⁷⁾の報告もある。これは、堀川ら⁶⁾も指摘しているように、底面近傍で砕波点に向かい、砕波点近くで上昇し



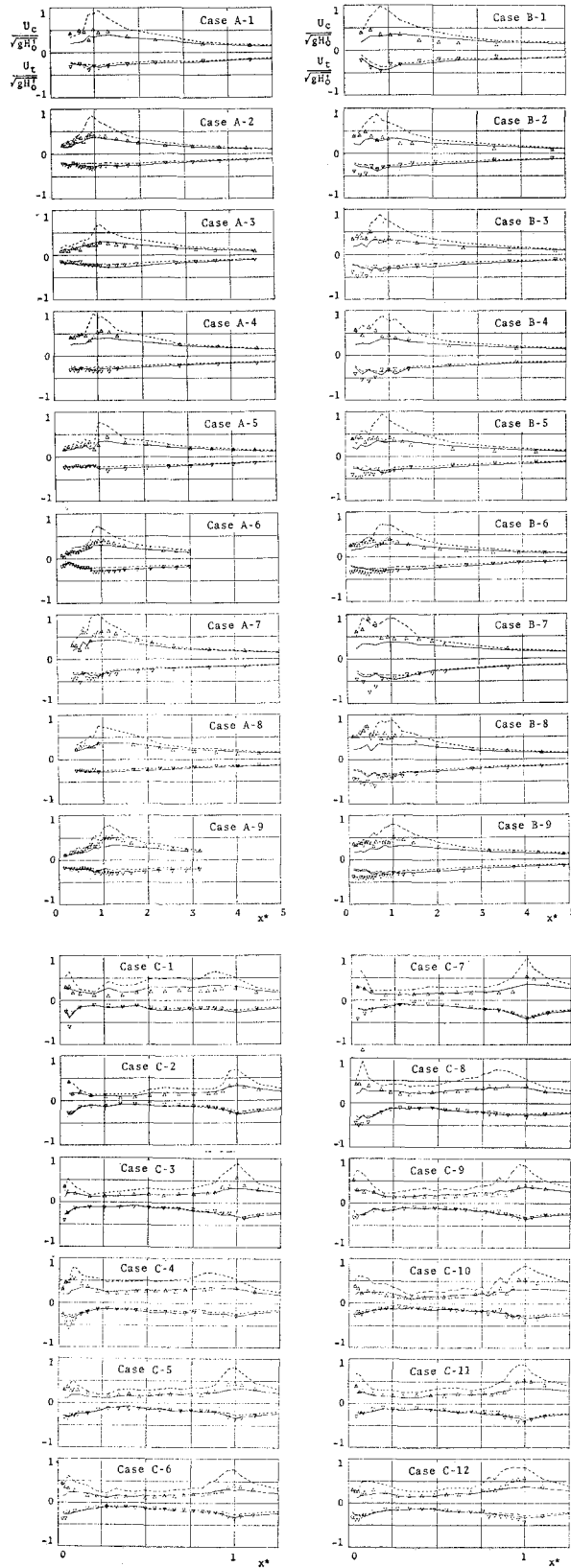
図—4 波高と定常流流速 (---△---: 波高, —×—: 定常流流速)

て上層で碎波点から遠ざかる定常的な2つの逆向きの循環流が存在していることを強く示唆する結果である。上記 iii) によれば、汀線より更にもう一つの循環流が存在することも推測される。

(4) 波動流速の振幅

次に、定常流速を除きたいゆる波動流速成分について述べる。図—2 に一点鎖線で示したように正負を判定して定常流成分を補正した流速変動の正負の極大値をもって、岸向きと沖向きの流速振幅 U_o , U_i と定義する。図—5 には、それを $\sqrt{gH_0'}$ で除して無次元化した値を Δ および ∇ 印で示してある。また、流れ関数法による計算値が実線で、波頂あるいは波谷の振幅の2倍の波高をもつ正弦波を仮定して微小振幅波理論より求めた値が点線で示されている。それらの比較から次のことがいえる。

- i) 微小振幅波理論は、碎波点より充分沖側では当然ながら合理的な値を与えるが、碎波点に近づくにつれて実測値との差異が大きくなり、碎波点では岸向き流速を倍程度に過大評価してしまう。碎波後の波の岸向き流速についても同様に過大評価する傾向にあり、それはステップ地形の場合に特に顕著にあらわれている。沖向き流速振幅に関しては、碎波帯内外を通じて、実測値との一致はかなり良好である。
- ii) 流れ関数法による沖向き流速の推定値は、微小振幅波理論によるものと大差なく実測値とよく合致する。碎波点の極く近傍を除けば、岸向き流速振幅についても実測値との適合度のよい値が得られる。特に碎波しおわった波の岸向き流速に対しては、微小振幅波理論に比し極めて良い推定値を与えることが、特に Case C の結果より明らかである。
- iii) しかしながら、碎波点および碎波直前直後の波の流速振幅は相当程度に過小評価してしまう。この傾向は特に、水底勾配が急で周期が長い場合に顕著である。碎波前後のように水面波形の変形速度が大なる条件では、そもそも保存波の仮定に基づいている流れ関数法は少なくとも直接的には適用できないと推論されよう。碎波の波峯下の水平流速分布が流れ関数法で十分に推定できるという岩垣・酒井⁸⁾の報告とは反する結果であり、今後、流速の時間変化や乱れの影響まで含めて詳細に検討する必要がある。



る。

なお、紙面の都合で説明を割愛したが、クノイド波およびストークス波理論の適用性についても検討を行った。これらの有限振幅波理論は砕波帯外の流速に対しては、アーセル数で判定される一様水深としての適用条件に応じてそれぞれ良い推定値を与えるが、砕波帯内では殆ど適用不可能であることがわかった。

4. 結 語

斜面上の砕波帯内外での底面流速に関し、実験水槽内での実測データに基づいて検討を加えた。流速の測定方法や解析の方法にはまだ改良の余地があるが、底面近傍の定常流速の特性や、流れ関数法の適用性と問題点について、ある程度まで把握することができた。得られたデータに更に詳細な検討を加えると共に、より精度の高いデータを集積することにも努め、底面流速の定量的評価法の確立をはかりたい。

参 考 文 献

- 1) 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回海講論文集，pp. 172~176, 1979.
- 2) 磯部雅彦・福田直利・堀川清司：砕波帯における流速場に関する二次元実験，第26回海講論文集，pp. 41~45, 1979.
- 3) 堀川清司・堀田新太郎・水口 優・磯部雅彦：砕波後の波にともなう流速場に関する現地観測，第26回海講論文集，pp. 46~50, 1979.
- 4) 佐藤幸雄：砕波点における砕波の底面流速に関する研究，第24回海講論文集，pp. 40~44, 1977.
- 5) Dean, R. G.: Stream function representation of nonlinear ocean waves, J. Geophys. Res., Vol. 70, pp. 4561~4572, 1965.
- 6) 堀川清司・砂村継夫・鬼頭平三・品川正典：海浜変形に関する実験的研究(第一報)——波による斜面上の net flow pattern について——，第27回年講講演概要集，II, pp. 95~98, 1972.
- 7) Bijker, E. W., J. P. Th. Kalkwijk and T. Pieters: Mass transport in gravity waves on a sloping bottom, Proc. 14th Conf. Coastal Eng., pp. 447~465, 1974.
- 8) 岩垣雄一・酒井哲郎：Stream Function Theory による斜面上の砕波の水粒子速度の表現について，第21回海講論文集，pp. 27~32, 1974.

図—5 波動流速成分の振幅 (▲: 岸向き, ▽: 沖向き流速の振幅実測値, —: 流れ関数法, ----: 微小振幅波理論値)