

斜め遡上波によって形成される波打ち帯の流速場の測定

浅野敏之*・末富博文**・星倉淳一***・中村和夫****

1. はじめに

最近の実験・観測により沿岸漂砂量の極大値は従来言われてきた碎波点近傍のみならず、波打ち帯にも同じオーダーの極大値が存在することが明らかになり、注目を集めている(例えば, Kamphuis, 1991). 汀線の前進・後退の予測は, 海浜変形シミュレーションの陸側境界条件を決めることにつながり, きわめて重要な課題である. しかし, その外力である波打ち帯の流体運動の特性については未解明の部分が多く, 特に平面2次元でこれを調べた研究はほとんど見あたらない.

波打ち帯では, 波の遡上・流下に伴って没水と干出を繰り返すが, 流下時においても完全に底面が干出するのではなく, 実際には厚さ数ミリの薄い層状の流れが存在する. この流れは通常の流速計で測定できない薄いものであるため, これまで実験的説明がなされなかった対象であるが, 流速は大きく漂砂を議論する上では無視できない. また沿岸流に関する理論モデルでは, 時間平均値から沿岸流速を定義することにより, 1周期を通じて水深の存在しない波打ち帯では取扱いに支障が生じ, 便宜的に静水時汀線でこれを0とし本質的な議論はなされずに現在に至っている.

以上のことから本研究では, 斜め遡上波による波打ち帯の水粒子速度をトレーサー法によって測定し, その特性を調べることにする. すなわち, 上述の流下時の薄層流れも含め, 波打ち帯におけるジグザグ漂砂の外力となる平面2次元流速場を実験的に明らかにする.

2. 実験の概要

2.1 実験装置・実験方法

実験は図-1に示す長さ26.7m, 幅13m, 深さ1.2mの平面水槽を用いて行った. 造波板に対して $\theta=15^\circ$ の角度を持つ勾配 $S=1/7.5$ の1様勾配斜面を造成した. これはまず砂地盤の斜面を造り, 砂の自重と散水によって締め固めた後, 網鉄筋を敷いてその表面をコンクリート

モルタルで整形した. 模型海浜は十分な水準精度(測定対象部で最大 ± 2.5 mm)で造成した.

沖の1様水深部の水深は79cmと一定とした. 容量式波高計を沖波用に1本, 斜面上に50cm間隔で5本配置し, これを移動させることにより斜面上12.5cm間隔で水位変動記録を取得した. 波高計の配列方向は装置の都合上, 造波板と直角を成す方向とした. これは入射波の波向方向と一致しないが, その差は最大で初期入射角の 15° でありこの時の余弦の値は0.966であるから大きな誤差とはならない. 取得された水位データはAD変換され, 波高・周期・平均水位等が解析処理された. 遡上波のはい上がり幅は斜面上に描いたスケールより目測で求めた.

流速測定はトレーサー法によるものとし, 波打ち帯の流体運動に正確に追従できるトレーサーの形状を種々検討した. その形状によっては, 水深が小さくなると底面摩擦によって動きが止まったり, 碎波によって弾き飛んだり碎波前面で滑ったりすることが観察された. 検討の結果, ビデオ画像で判別できる大きさを持ち, 流下時の薄層流れにも追従できるものとして, 直径3cmの球形の蛍光着色を施した浮き(FLOAT-A), 厚さ2.5mmのベニヤ板で作成された直径11cmの円板(FLOAT-B)および厚さ6mmのベニヤ板で製作した対角線長が93mmの正八角形板(FLOAT-C)の3種類が採用された.

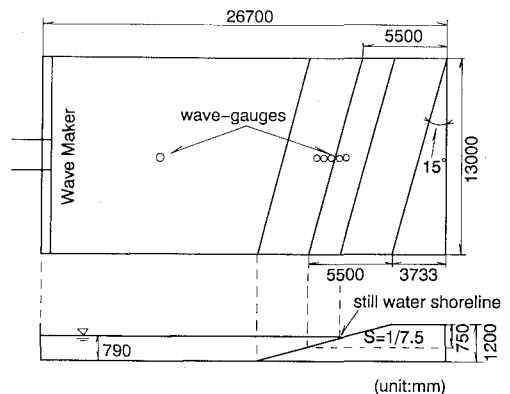


図-1 実験水槽

* 正会員 工博 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科
 ** 学生会員 鹿児島大学大学院工学研究科
 *** 運輸省第四港湾建設局
 **** 正会員 鹿児島大学技官 工学部海洋土木工学科

予備的な流速測定には $x-y$ 2成分が測定できる小型電磁流速計(受感部直径 5 mm)を援用した。測定は造波開始から 2分経過し定常性が確認されてから行った。沿岸流速の沿岸方向の一様性を検討したところ、下流に向かって流れはいくぶん加速され(最大 1割程度)、水槽下流端から 1 m の範囲では側壁の影響で沿岸流速成分は小さくなり沖向きの循環流となることが認められた。ただし、トレーサーによる測定は点計測とは異なり、ある範囲内を流されることが必要で、得られる結果は図-1 に示した測定範囲内の一区間の平均値となる。

沿岸方向を y 軸にとり、静水時汀線を原点として岸沖方向に x 軸をとる。静水時汀線を挟んで $3.6\text{ m} \times 3.6\text{ m}$ の波打ち帯領域を測定範囲とした。鋼材と着色ロープで座標検出用の 20 cm 間隔のメッシュ枠を水平に設置し、これをビデオ画面の中に入れて、水面上約 6 m の高さからトレーサーの動きを高速撮影することによって流速場を測定した(写真-1)。ビデオ画像の解析から、トレーサーの岸沖方向・沿岸方向のラグランジュ的な移動速度 u, v を求めた。

2.2 実験条件

実験条件の一覧を表-1 に示す。ここに T は入射波周期、 H_i は一様水深部における入射波高、 H_0 は換算沖波波高、 ξ は surf similarity parameter である。表中には碎波波高 H_b 、碎波地点 x_b 、遡上波のはい上がり幅 W_u および沿岸流速の最大値 V_{\max} について測定結果を示した。

表中 x_s は set-up 後の平均水位汀線の位置であるが、本実験では wave set-up の精度良い測定ができなかったので、2次元水槽(すなわち入射角 0)の結果ではある

表-1 実験条件

	T (s)	H_i (cm)	H_0 (cm)	H_b (cm)	x_b (cm)	x_s (cm)	θ (deg.)	W_u (cm)	V_{\max} (cm/s)	ξ
CASE-5	2.3	8.8	9.4	13.1	106	-26.1	10.1	100	55.7	1.25
CASE-6	2.0	9.1	9.9	12.0	104	-23.9	9.1	90	61.6	1.06
CASE-7	1.8	9.8	10.7	11.1	113	-22.1	8.5	80	69.0	0.91
CASE-8	1.5	10.7	11.6	12.9	113	-25.7	7.8	70	70.0	0.73
CASE-9	1.4	11.7	12.5	11.4	113	-22.7	7.6	65	59.1	0.66
CASE-10	2.0	3.8	4.1	4.2	75	-8.4	9.1	60	44.2	1.64
CASE-11	3.0	5.5	5.5	11.9	113	-23.7	12.1	105	30.8	2.13

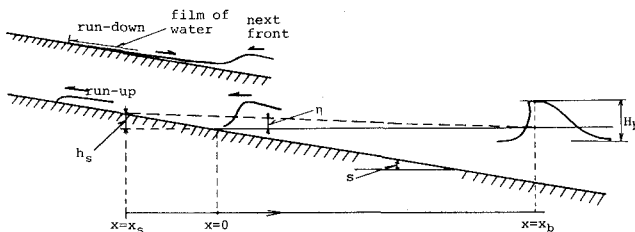


図-2 波打ち帯・碎波帯の諸元の定義図

が、次式に示す佐々木・佐伯(1974)の式から x_s の値を推定した。

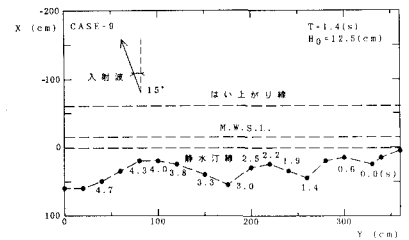
$$x_s/H_b = -(1.63 + 0.048/S) \dots\dots\dots (1)$$

上式で碎波波高 H_b には実測値を用いた。また表中 θ は Snell の法則で計算された静水時汀線での波向角である。図-2 に上述の記号の定義を図示した。

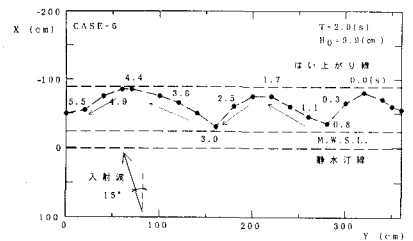
3. 実験結果および考察

図-3 はトレーサーの平面的な経路の測定例を示したものである。左上方に遡上したトレーサーは重力の効果で直角に近づく形で下方に流下し、この特性は入射波周期が大きくなるほど顕著となるようである。

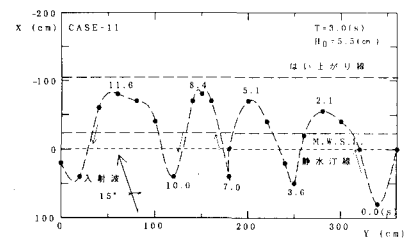
次にトレーサーの 1 周期間の沿岸方向移動距離から沿岸流速を算定した。図-4 は沿岸流速と波高の岸沖方向変化に関する結果の一例である。図中のデータにはトレーサーの区別も示している。円板・正八角形板では遡上領域の先端部で斜面上に打ち上がってしまうためデータが取得できないことがあり、また碎波点とそれよりやや岸側の領域では碎波時に発生する白い波頭でトレーサー



(a) $T=1.4\text{ s}$



(b) $T=2.0\text{ s}$



(c) $T=3.0\text{ s}$

図-3 汀線付近のトレーサーの移動状況

が見えなくなるため、取得データ数が少なくなっている。しかし、図よりトレーサーによる結果の差異はほとんど見られないため、以下の考察ではトレーサーを区別せず結果を示すことにする。この結果で注目されることは、静水時汀線より岸側の領域でも碎波帯内と同じオーダーの沿岸流速が得られていることである。なお、水深が非常に浅い領域では水位測定を行わなかったため、この付近で顕著となる wave set-up の特性を示す結果は得られていない。

以上より、波打ち帯を含めた全領域の沿岸流速分布を定量的に規定するものは、沿岸流速の最大値 V_{max} と、碎波点の位置 x_b 、平均水位汀線 (M. W. S. L.) x_s 、そこでの沿岸流速 V_s 、波のはい上がり幅 W_u と考えられる。以下にその特性を検討する。

図-5 は沿岸流速の最大値 V_{max} について実測値と水平拡散項を無視した Longuet-Higgins (1970) の理論による計算値を比較したものである。計算値において底面摩擦係数は水口ら (1979) の結果を考慮し $f=0.04$ とした。本測定はトレーサーを用いたラグランジェ計測であるが、既往の理論値とよく一致することがわかる。

図-6 は、Saville (1957) の打ち上げ高の算定図により

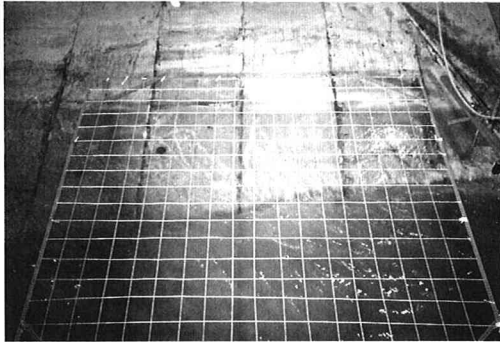
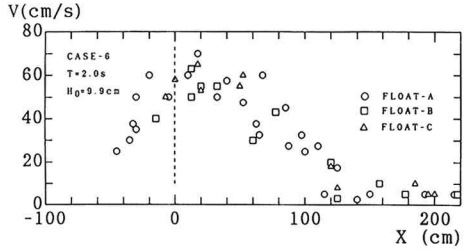
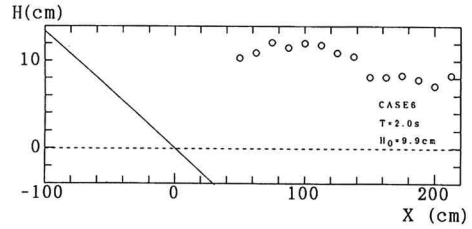
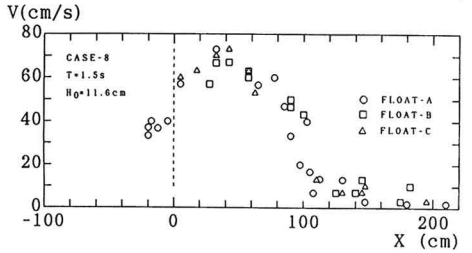
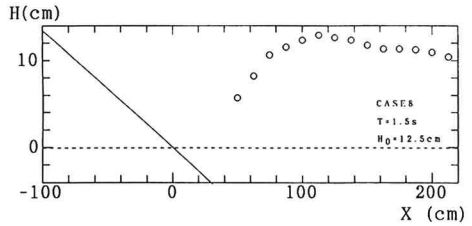


写真-1 実験状況



(1) CASE-6



(2) CASE-8

図-4 沿岸流速と波高変化の岸沖分布

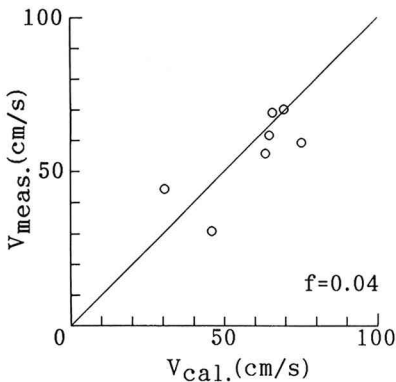


図-5 沿岸流速の最大値 V_{max} に関する実測値と計算値の比較

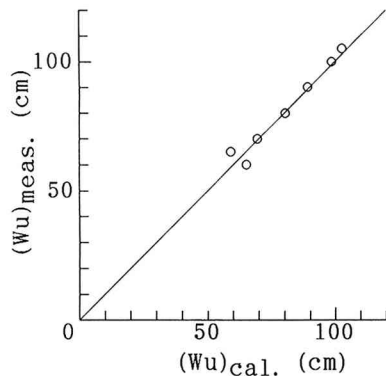


図-6 遡上波のはい上がり幅 W_u に関する実測値と計算値の比較

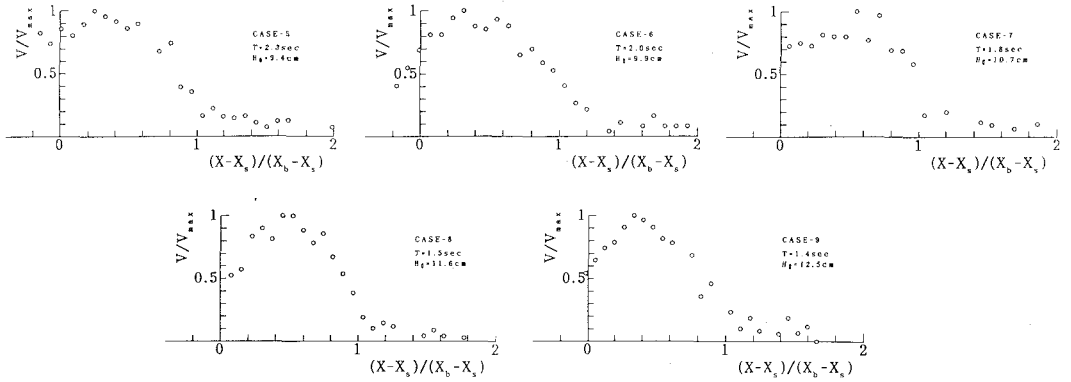


図-7 沿岸流速の岸沖分布

打ち上げ高 R_u を求め、はい上がり幅 $W_u = R_u/S$ で得られた計算値と実測値を比較したもので、斜め遡上波でも一次元の遡上波に対する既往の結果と同様な値となることわかる。

図-7は沖波波高 H_0 が 9.4~12.5 cm とほぼ一定の条件で周期 T を変えた時の沿岸流速 V の岸沖分布を調べたものである。縦軸の値には、岸沖方向に 10 cm ごとに区分した小区間での V の平均値を、 V_{max} で無次元化したものをプロットした。横軸は碎波点 x_b から平均水位汀線 x_s までの距離 $(x_b - x_s)$ で正規化した岸沖位置である。

図-8は、これら5ケースをまとめて示したもので、図中には Longuet-Higgins の理論から得られる沿岸流速分布も比較のため記入した。水平拡散項と底面摩擦項の比を表すパラメーター P は 0.4 とした。

従来のように汀線では V が 0 に漸近するという理解とは異なり、 V は静水時汀線 ($x=0$) ではもとより、セットアップ後の平均水位汀線 ($x=x_s$) においてもかなりの大きさを持つことがわかる。

図-9は、Visser (1984, 1991) の実験結果のうち斜面勾配が 1/10 の3ケースについて図-8と同様な形で整理したものである。この結果においても沿岸流速 V は横軸が 0 の点すなわち平均水位汀線 $x=x_s$ において 0 でない流速値 V_s を持つことがわかる。Visser は斜面勾配 1/20 の実験も行っているが、緩勾配の結果では上記の特性は顕著ではない。

図-7より、平均水位汀線の V_s/V_{max} の値は T が大きいほど大きく、これは波打ち帯幅の増加とともに沿岸流速の形成域が広がっていることに起因するものと考えられる。波打ち帯幅は、Hunt (1959) の式によれば surf similarity parameter ξ に比例する事が知られている。そこで図-7に示した沿岸流速分布のデータから平均水位汀線 $X=X_s$ での V_s/V_{max} の値を求め、これを ξ で整理した結果が図-10である。なお CASE=10, CASE-11 の

結果は汀線付近の流速値の精度にやや疑問があり、この図には示していない。図中には、Visser の沿岸流速分布のデータから取得した (V_s/V_{max}) の結果も併せてプロットした。Visser の実験では沖波が斜面となす入射角 θ_0 も実験ケースごとに異なる。一部の結果はデータの外挿によって $x=x_s$ の値を求めざるを得ず、結果は幾分ばらつ

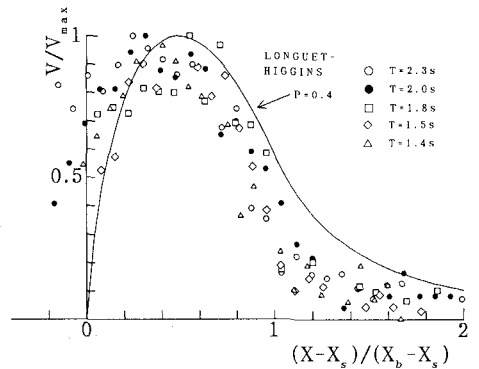


図-8 沿岸流速の岸沖分布

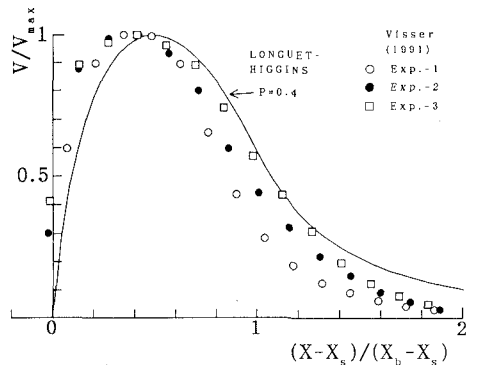


図-9 Visser (1991) が測定した沿岸流速分布

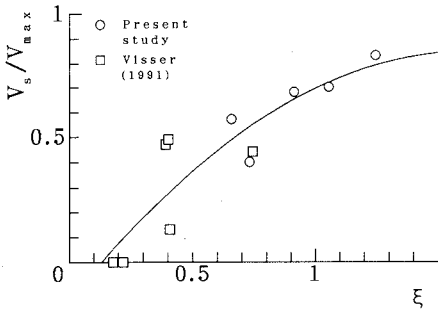


図-10 平均水位汀線での沿岸流速と surf similarity parameter との関係

いてはいるが、 $0 < \xi < 1.5$ の範囲で 2 次曲線を当てはめると、最小 2 乗近似として次式が得られた。

$$V_s/V_{max} = -0.155 + 1.22\xi - 0.375\xi^2 \dots\dots(2)$$

4. 結 論

(1) 従来ほとんど研究がなされなかった静水時汀線より岸側領域の斜め遡上波の流速場の特性をトレーサー法により明らかにした。遡上時には角度を持って入射した流体塊は、流下時には汀線に直角下方に流れようとし、この特性は入射波周期が大きいほど顕著である。

(2) 従来の沿岸流の流速分布に関する研究では、汀線で沿岸流速を 0 とした捉え方がなされてきたが、本研究結果から、静水時汀線ではもとよりセットアップを考慮した平均水位汀線においても沿岸流速は実質的に値を持ち、その値は波打ち帯の幅とともに大きくなるのが明らかになった。

(3) 平均水位汀線での沿岸流速値について本実験結

果および Visser の実験結果を整理したところ、surf similarity parameter によってその特性が記述できることがわかった。

今回の測定では遡上領域の先端付近ではトレーサー法によるデータの測得が容易ではなく、この領域での流速場については十分な解明ができなかった。またトレーサー法自体の精度も再検討する必要がある。今後は他の測定法を用いたより詳細な測定を行う必要がある。さらに数値解析モデル (浅野・中野, 1992) による結果との比較・検討も含め、引き続きこの課題の解明に努めたい。

参 考 文 献

浅野敏之・中野武 (1992): 斜め遡上波の数値解析, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 26-30.
 佐々木幹夫・佐伯 浩 (1974): 砕波後の波の変形に関する研究 (2), 第 21 回海岸工学講演会論文集, pp. 39-44.
 水口 優・小林敬一・奥山勝人・森田靖則 (1979): 沿岸流における粗度の効果に関する実験, 中央大学理工学部紀要, 第 22 巻, pp. 205-219.
 Hunt, I. A. (1959): Design of seawall and breakwaters, Proc. ASCE, Vol. 94, No. WW1, pp. 72-92.
 Kamphuis, J. W. (1991): Alongshore sediment transport rate distribution, Proc. of Coastal Sediment '91, pp. 170-183.
 Longuet-Higgins, M. S. (1970): Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, 2, J. Geophys. Res., Vol. 75, No. 33, pp. 6790-6801.
 Saville, T. Jr. (1958): Wave run-up on composite slopes, Proc. 6th Coastal Engrg. Conf., pp. 691-699.
 Visser, P. J. (1984): Uniform longshore current measurements and calculations, Proc. 18th Inter. Conf. of Coastal Engrg., pp. 2192-2207.
 Visser, P. J. (1991): Laboratory measurements of uniform longshore currents, Coastal Engineering, Vol. 15, pp. 563-593.