

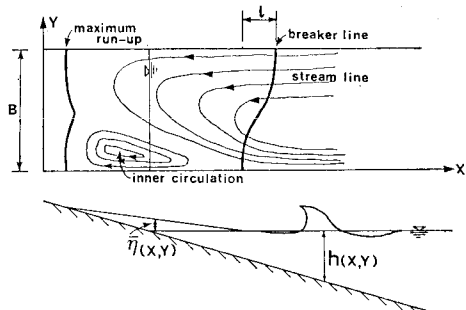
地形性海浜循環流の成因および構造に関する実験的研究

和田 崇之*・水口 優**

1. はじめに

砕波帯付近に発生する海浜循環流に関する研究は、循環流が地形変化や浮遊物質の移流などに大きく寄与することから、近年、数多くの研究発表がなされている。海浜循環流の発生機構については、強制型と自由型に大別される[Mizuguchi & Horikawa (1976)]。強制型海浜循環流は、波の場所的分布に起因する radiation stress の場所的变化によって発生するものである。現在まで、室内実験における波高の平面分布の発生原因として、入射波と斜行波との干渉[堀川・丸山 (1976)]、入射波とエッジ波との干渉[Harris (1969)]などの報告がなされているが、海底地形の汀線方向の変動に起因する入射波の屈折による波の場の変動に対する室内実験に基づく基礎的な研究は無く、循環流モデルの数値シミュレーションによる研究が主体となっている[例えば、Noda (1974)]が、その計算結果を検証する報告も少ない。

本研究は、砕波帯付近の地形を沿岸方向に変動させることにより強制的に循環流を発生させ、その流速の三次元分布、並びに砕波帯近傍の波高、波向き、および平均水位の上昇量の平面分布を精密に測定し、循環流の構造を明らかにする(室内実験における海浜循環流の模式図を図一1に示す)。さらに、地形の非一様性による砕波点の沿岸方向の変動量と循環流速との関係に興味ある成果を得たので、ここに報告する。



図一1 室内実験における海浜循環流模式図

2. 実験設備および方法

実験は、中央大学理工学部土木工学科水理実験棟内の造波水槽を用いて行った。水槽は、長さ 30m、幅 0.8m、深さ 0.7m の片面ガラス張りであり、水槽の一端にはフラップ型造波装置が、他端には鉄製斜面が勾配 1/15 で設置されている。なお、水槽上部にはモーター走行式の測定用台車が備えられている。

実験地形は、過去の実験報告に関する研究報告[例えば、Noda (1974)]を参考にして、図一3の実線で示されるような等深線形状をもつものとした(文末注)。

実験地形は、長さ 180cm、幅 80cm、厚さ 0.3cm の耐水ベニヤ板を重ね合わせ、石膏で整形し、表面をペンキ塗装し、座標を 5cm 間隔で書き入れたものを鉄製斜面上に固定した。

表一1 実験条件

CASE No.	周 期	換算沖波高	換算沖波波形勾配	一様水深部深
	T (s)	H_0' (cm)	H_0'/L_0	h_t (cm)
1	1.001	5.66	0.0363	36.6
2	0.957	4.38	0.0283	36.6
3	0.889	5.86	0.0501	36.6
4	0.850	5.84	0.0501	34.6

実験は、表一1に示す条件で4ケースについて行った。CASE-1 と CASE-2 は同一周期において入射波高の相違による効果を、CASE-3 と CASE-4 は、同一地形において汀線位置を変化させ、その効果を明らかにすることを目的としたものである。諸条件の決定にあたっては、砕波型が plunging 型になり、かつ最大 run-up が実験斜面上端を越えないことを考慮し、なおかつ水槽内一様水深部において水槽断面方向に波高分布が無いことを確認して決定した。本実験における条件は、Battjes が提案した surf similarity parameter I_r による分類[堀川・佐々木・堀田・桜本 (1975)]では、不安定領域にあたるものの、本実験では強制的に循環流を発生させているため、この分類にはあてはまらない。

波形の測定は、3本の容量式波高計を汀線方向に 10

* 正会員 工修 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻(現北日本港湾コンサルタント K.K.)

** 正会員 工博 中央大学助教授 理工学部土木工学科

cm 間隔で測定用台車にとり付け、波高計の先端を底面に着けて測定を行うことにより、波の場所的な位相差と平均水位の上昇量をも合せて測定できるようにした。測定は沿岸方向に $Y=5\text{cm}$ の測線から 10cm 間隔で $Y=75\text{cm}$ の測線まで行い、岸沖方向には、砕波帯内は 5cm 間隔で、砕波帯外は 10cm 間隔で行った。

流速の測定は、CASE-1 と CASE-2 では染料（ウォーターブルー）溶液を投入し、その拡がり状況をモータードライブカメラで 0.20s 間隔でコマ取りしたものから読みとり、CASE-3 と CASE-4 においては split 型熱膜流速計 1 式を用いて行った。熱膜流速計による測定は、センサー部を測定用台車にとり付け、静水面下 3cm 、 5cm では岸沖方向流速 u ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) と沿岸方向流速 v ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) を、底面上 1cm では u のみについて行った。ただし、split 型熱膜流速計では流速の正逆判定可能成分は一方のみであるため、同一地点にて u と v を別々に測定した。流速計のキャリブレーションは、水槽上の測定用台車に流速計センサーをとり付け、台車の速度を $60\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}\sim 2.5\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ の間で約 $5\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ づつ変化させることにより行った。なお、測定中に流速計の出力低下のおそれがあるため、キャリブレーションは測定点 100 点ごとに行った。また、流速と波形の同時測定が困難であることから、これらは別々に測定した。

測定記録は、アナログデータレコーダーに 70 波分のデータを連続入力した。なお、測定は場が充分定常に達したと考えられる造波後 50 波目より始めた。

3. 解析方法

解析は、アナログデータをサンプリング周波数 100Hz で A-D 変換し、電算処理した。本研究でのデータ解析は、波高については 50 波分の平均波高 H (cm) とし、平均流速および波形データより求められる平均水位の上昇量については、50 波分の時間平均より求められる値 U ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)、 V ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)、 $\bar{y}$ (cm) を用いた。波の平均周期 T (s) は、沖波波形データよりゼロアップクロス法により求めた。

波峰線の平面分布は、沖波波形データのゼロアップ点と岸側の各測定点での波峰通過時間との差を求め、隣接測定点間の波峰通過時の時間差 λ (s) を求めることにより、測定点間の平均波峰移動速度 c ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) を求め、図-2 に示す方法で波峰の位置を算出した。

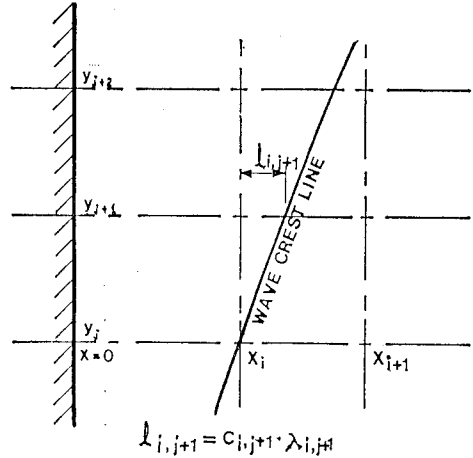


図-2 波峰線算出方法説明図

4. 実験結果と考察

海浜循環流は三次元現象であり、1 ケースにつき多量のデータが得られたため、紙面の都合上、CASE-4 の解析結果のみを図-3～図-9 に示す。図-4～図-9 中の破線は最大波高点を連ねた砕波線を示し、一点鎖線は平均水位の上昇量より求められる平均汀線を示す。なお、本実験では内部循環流の発生が認められたが、発生位置の水深が浅いため、流速計では測定できなかった。

図-3 の破線は波峰線の進行状況を示したものである。その分布状況は、通常の屈折現象で見られる、水深が深い場所の波ほど速く進む現象とは異なっている。その原因として循環流の影響が考えられ、結果として、砕波角は沿岸流としての流れを維持、増幅するような値をとる。

循環流の発生が見られない造波後 3～5 波の波峰進行

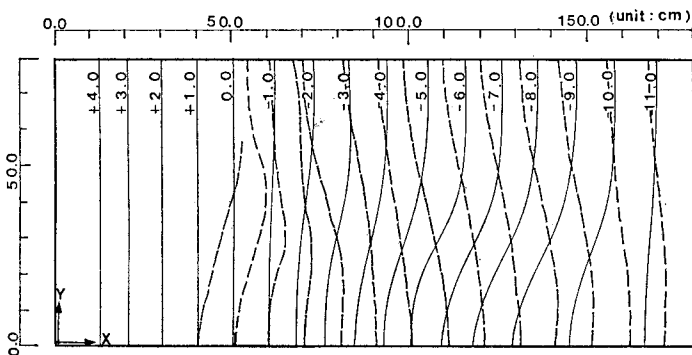


図-3 地形および波峰線図

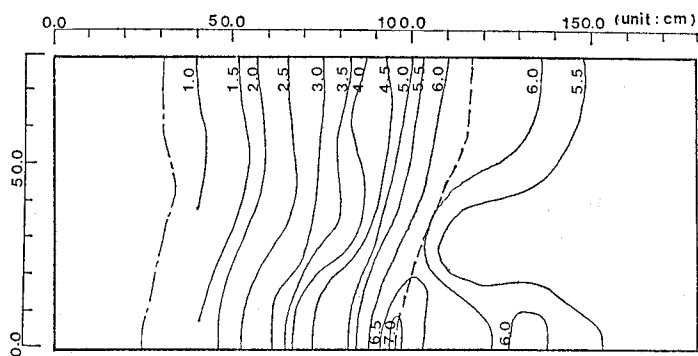


図-4 波高分布図

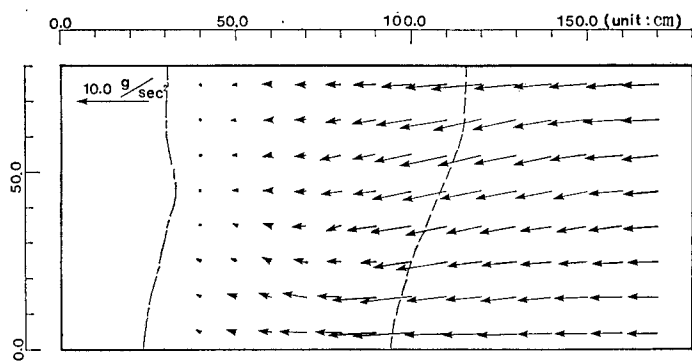


図-5 Radiation 応力分布図

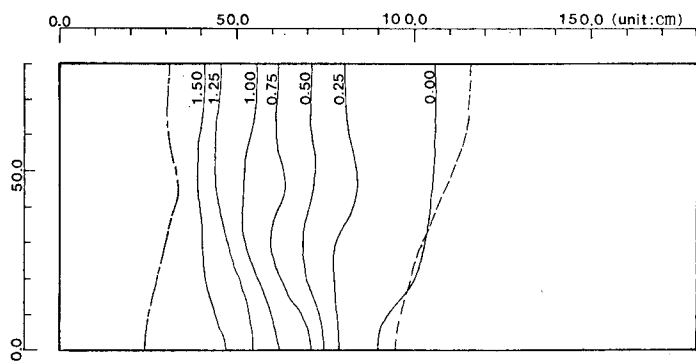


図-6 平均水位上昇量分布図

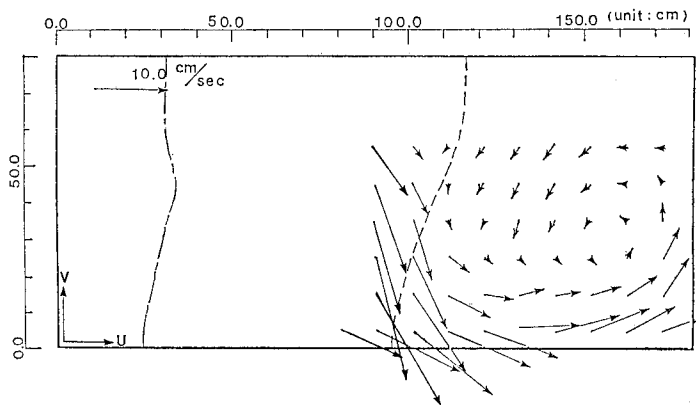


図-7 流速ベクトル図(静水面下 3 cm)

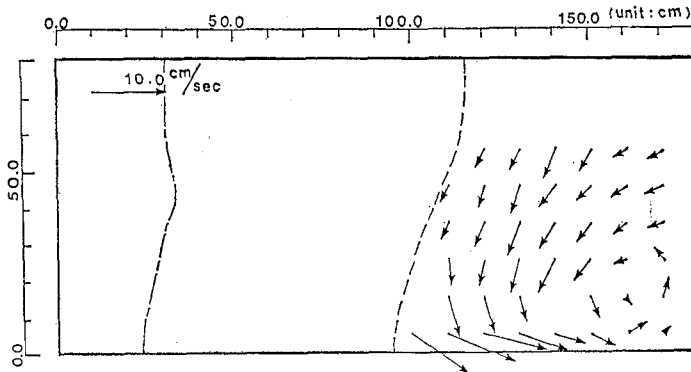


図-8 流速ベクトル図 (静水面下 5 cm)

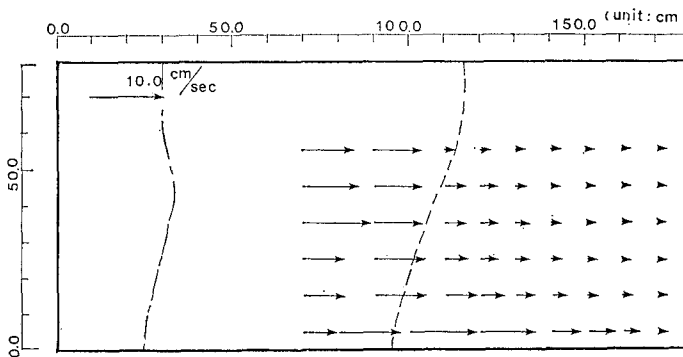


図-9 岸沖流速図 (底面上 1 cm)

状況をカメラで撮影した結果は、ほぼ静水汀線に平行であった。

図-4 は波高分布図である。最大波高は、地形の凹部で見られる。ということは、屈折による分散よりは流れによる屈折による集中の結果としての波高増大が卓越していると言えよう。砕波後の波高は、ほぼ水深に比例して減少しているが、平均水位の上昇量を考慮した波高水深比 γ の値は 1.2~1.5 とバラついている。

図-5 は式 (2) で示される radiation 応力 S の値、およびその方向を示したものである。

$$S = \frac{1}{8} \rho g H^2 \left(2 \frac{c_g}{c} - \frac{1}{2} \right) \dots\dots\dots (1)$$

その分布は主たる循環としての地形の凸部から凹部へむかう沿岸流と、副次的な内部循環の存在とよく対応している。

図-6 は平均水位の上昇量を示す図である。その量は主たる循環にのみ対応する平面的な分布をもつ。

図-7~図-9 は表記の水深での流況を示したものである。全て砕波点近傍で速い流れが見られる。また鉛直方向に流速分布が存在するのが認められる。特に底面近くでの岸沖流速は、砕波帯内ではほぼ一様に冲向きである。radiation 応力との対応では、radiation 応力が小さな

部分より沖へ向う流れ (離岸流) が発生しているのが確認できる。

表-2 最大流速 $|U|$

CASE	$ U $	h_B	l
1	14.5 cm·s ⁻¹	4.9 cm	10 cm
2	13.0	"	5
3	14.3	"	15
4	15.1	5.4	20

循環流のケースごとの最大流速は表-2 に示すとおりである。循環流の特性、または規模を示す量として、surf similarity parameter I_r や無次元離岸流間隔 Y_r^* などが提案されているが、いずれも現地観測場での値であると共に、既にのべたように本実験への適用には問題が残る。そこで、著者らは砕波点の沿岸方向の変動に着目し、最大流速との関係を明らかにすることを試みた。その結果を 図-10 に示す。横軸には 図-1 に示す砕波点の沿岸方向変動全振幅 l と水槽幅 B との比 l/B をとり、縦軸には最大流速 $|U|$ と波高最大点での長波近似による波速 $\sqrt{gh_B}$ との比 $|U|/\sqrt{gh_B}$ をとったものである。その結果は明らかに砕波点の沿岸方向の変動量と、循環流の最大流速との間には正の相関が見られる。

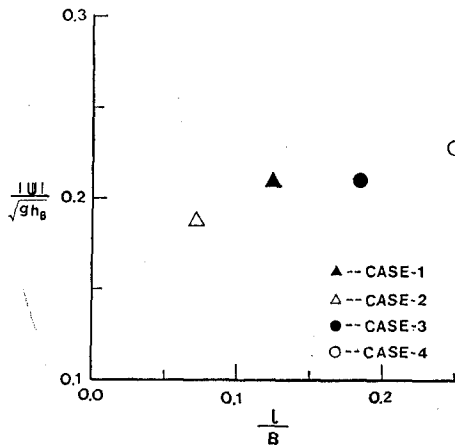


図-10 砕波点変動量と循環流速との関係

5. 結 論

以上、海浜循環流に関する実験の解析結果より、次のことが結論される。

本実験における海浜循環流の発生においては、砕波点付近の地形変動による入射波の屈折効果は結果的には無視しうる。その結果、循環流の発生は地形の沿岸方向の変動に伴う砕波角の形成、および砕波線の変動によるものと考えられる。ということは、波と流れとの干渉は波高変化を通じては循環流の発生に対して否定的である〔水口(1980)〕が、波向きの変化を通じては、流れの発生および安定に寄与していることになる。

構造的には、(1) 離岸流の岸側に、入射波とその離岸流の干渉の結果と見られる内部循環が発生すること、(2) 流速には鉛直分布が存在し、循環流は表面で著しく、底面摩擦、底質移動を考える際にはその分布状況について考慮すべきであること、(3) 離岸流速は砕波点付近で最大の値を示し、その後、沖に向うに従い流速は減少す

る。その現象は、水面付近よりも底面に近いほど著しいこと、(4) 循環流の最大流速は、入射波周期、波高および地形によって変化するが、砕波点の汀線方向変動勾配と良い相関があることなどが明らかになった。

最後に、本研究を行うに当たり、貴重な御助言をいただいた中央大学理工学部土木学科の服部昌太郎教授、並びに実験に際し協力してくださった方々に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 堀川清司・佐々木民雄・堀田新太郎・桜本 弘 (1975): 海浜流に関する研究 (第3報), 第22回海講, pp. 127~134.
- 2) 堀川清司・丸山康樹 (1976): 室内実験におけるリップカレントの発生について, 第23回海講, pp. 464~469.
- 3) 水口 優 (1980): 海浜循環流のメカニズムに関する基礎的研究, NERC Rep., No. 12, 115 p.
- 4) Harris, T. F. W. (1969): Nearshore circulations; Field observations and experimental investigations of an underlying cause in wave tanks, Symp. Coastal Eng., South Africa.
- 5) Mizuguchi, M. and K. Horikawa (1976): Physical aspects of wave-induced nearshore current system, Proc. 15th Conf. Coastal Eng., pp. 607~625.
- 6) Noda, E. K. (1974): Wave-induced nearshore circulation, Jour. Geophys. Res., Vol. 79, pp. 4097~4106.

注) 実験に用いた地形を式で表すと次のようになる。

$X > 220 \text{ cm}$ 勾配 1/15 の一様斜面

$X < 30 \text{ cm}$ および $170 \text{ cm} < X < 220 \text{ cm}$

勾配 1/11.3 の一様斜面

$30 \text{ cm} < X < 170 \text{ cm}$

$$h(X, Y) = \frac{X}{11.3} + \frac{X}{46.7} \sin^2 \frac{\pi X}{140} \sin^5 \frac{\pi(Y+80)}{160} + \alpha$$

ただし、 h : 水深 (cm), α : 一様水深部水深に依る定数である。