

海浜流の速度分布について

佐々木幹夫*

1. はじめに

海浜流に関する研究は数多く、ラディエーションストレスの概念を用いた理論的研究も相当の成果を収めているが、波と流れの場は複雑で理論解析の過程で設定された仮説の中には未だに検証されていないものもある。近年、瞬間的な流速変動の測定結果を用いた波と流れの場に関する研究もみられ、沿岸流の理論モデルの実験的な検討が可能な段階に達しつつある(田中(1980), 水口(1980) 等等)。しかし、一方、離岸流に関する観測例は沿岸流ほど多くなく、離岸流速についての測定例は少なく、海浜循環流の理論の妥当性を定量的に検討できる段階に達していない。本研究はこのような点に着目し、海浜流、とくに、離岸流と向岸流の観測を行ない、鉛直ならびに岸沖方向の速度分布を明らかにし、海浜流の理論モデルに関する検討を行なおうとするものである。

2. 実験装置および方法

実験は幅 5m, 長さ 6m, 深さ 40cm の平面水槽を用いて行なった。底面勾配部は、 $\tan \beta = 1/11$ に傾斜させた鉄板床よりなり、鉄板床面をペンキ塗装で白地にし、座標線を 10cm 間隔に入れ、この座標を基準に流れの場の平面座標を考え実験を行なった。波はフラッター型造波機で起こし、造波板は波が汀線に直角に入射するように置かれている。

流況調査はトレーサーとして過マンガン酸カリウムを用い、20cm 間隔に染料を投入し、その拡散状況を水槽上方 2.3m にカメラを設置し、モータードライブ、インターパロメータでシャッター間隔を調節し、撮影を行なった。

離岸流の発生位置は目測により求めたものと写真撮影で判定したものの両者がある。離岸流の発生位置が近寄っている場合以外は両者の値には差がなかった。

波高は、抵抗線式波高計を用いて測定を行なった。

流速は、超小型可逆プロペラ式流速計(計測技研製プロペラ径 5mm)を用いて、鉛直方向および汀線方向の各点の測定を行なった。汀線方向の速度分布測定の際に

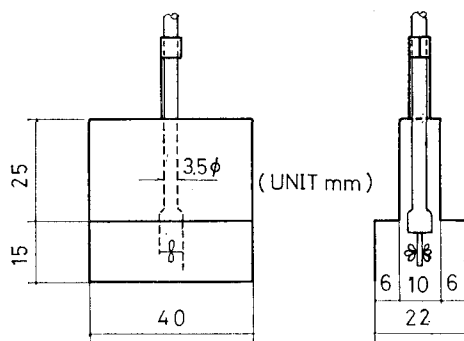


図-1 流速計カバー

一部 図-1 に示すカバーを付けて実験を行なった。流速はアナログ電圧をデータレコーダに記録させ、サンプリング周波数 S.F.=20Hz で AD 変換して、流速の 1 波形平均と入射波の周期と同じ時間 (1/20 秒単位) 平均の値より求めた。これらの平均値がほぼ同じ値に落ち着き始めた点より 15~40 個の平均値を流速の定常成分として導出した。

実験は表-1 に示す 17 ケースについて行なった。前述の流速計を用いて流速を測定したのは Case 16, 17 である。

表-1 実験条件

Case	周 期	沖波波高	砕波波高	砕波水深	波形こう配
	T (s)	H_0 (cm)	H_B (cm)	h_B (cm)	$(H_0/L_0) \times 10^{-3}$
1	3.76	2.62	2.90	4.27	1.19
2	2.98	3.10	3.50	4.72	2.24
3	2.45	3.75	5.35	4.55	4.00
4	2.18	5.70	7.00	7.73	7.69
5	2.97	3.20	3.80	3.91	2.33
6	2.10	5.62	6.33	5.64	8.17
7	2.00	5.73	6.21	5.64	9.18
8	1.93	5.43	6.21	4.55	9.34
9	1.83	5.99	8.31	8.36	11.47
10	1.73	5.68	8.01	6.45	12.17
11	3.00	4.11	5.61	5.25	2.63
12	2.52	4.57	5.62	5.90	4.61
13	2.53	4.71	6.26	4.5	4.72
14	2.53	5.12	6.09	6.54	5.13
15	4.00	2.35	2.73	5.64	0.94
16	3.95	1.97	3.66	5.18	0.81
17	3.02	1.98	4.49	5.18	1.39

* 正会員 工博 八戸工業大学助教授 工学部 土木工学科

3. 実験結果および考察

(1) 離岸流の発生間隔と循環パターン

実験によると、海浜流には砕波点近傍で流れが起きているものと、砕波点を遠く過ぎ、相当の沖合いにまで広がっているものがある。これは離岸流が砕波線を突き切ってどの程度の沖までに達するかによって決まる。図-2に前者の離岸流を、図-3に後者の離岸流を示す。

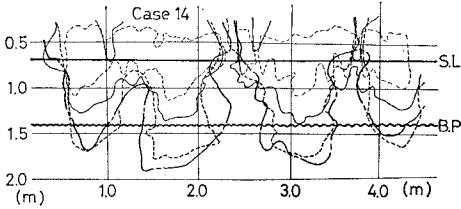


図-2 純循環型離岸流

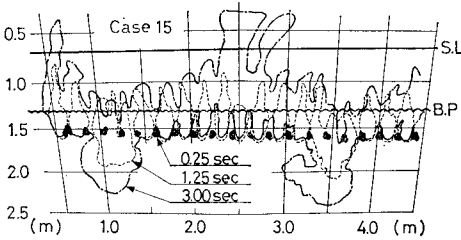


図-3 噴流型離岸流

図より、すでに尾崎等 (1976) が指摘している次のような点が言える。(1) Y_r^* ($= Y_r/x_B$, Y_r : 離岸流の発生間隔, x_B : 静水汀線から砕波点までの距離) の値により循環流の沖方向の規模が決まる。すなわち, Y_r^* が大きくなると砕波帯の幅の倍以上の沖合いにまで流れが広がる。(2) Y_r^* の値が小さい速度場の離岸流は幅が広く、循環セル内の約半分を占めているが, Y_r^* が大きくなると幅は狭くなる。(3) 離岸流の中にある染料雲の単位時間当りの移動距離は Y_r^* が大きいほど明確になる。

本実験の循環流を、堀川・佐々木他 (1975) の海浜流発生領域区分でみるとエッジ波領域 ($I_{r0} \geq 1$, $I_{r0} = \tan \beta / (H_0/L_0)^{1/2}$) の海浜流が多い。尾崎等の実験ではエッジ波領域の海浜流で図-3に示すような離岸流が観測されていない。この点興味深いものがある。本実験で観測された Y_r^* を I_{rB} で示したものが図-4である。図では離

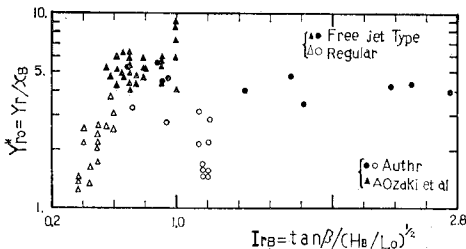


図-4 離岸流の発生間隔

岸流のタイプを Bowen 型と噴流型に区分して示したが、一部佐々木・尾崎の分類に従った値もあるが、本実験では、 $Y_r^* = 3.3$ で噴流型離岸流が観測された。エッジ波領域の海浜流の場合において、 Y_r^* の値が 1 に近い間隔で発生した離岸流はやがて消滅し、 Y_r^* の大きい海浜流速場が起る・発達していく現象が観測された。同様のことを不安定領域の海浜流について尾崎等が指摘している。これはエッジ波領域の海浜流の発生がエッジ波に強く支配されている (後述)、海浜の循環特性に合わなければ発達することはないことを意味していよう。したがって、エッジ波領域に対しても不安定理論が適用され得ることになる。

佐々木・尾崎によると海浜流が存命し得る Y_r^* ($Y_r^* = Y_r/x_B$, x_B : 平均汀線から砕波点までの距離) の値は $Y_r^* \leq 1.35$ となるが、本実験では、 $Y_r^* \geq 1.46$ なる値のエッジ波領域海浜流が定常に達した。離岸流の発生はエッジ波に強く関係しており、定常に達した段階においても離岸流の位置はほとんど変わらなかったが、この点を詳細に観測したのが表-1 示したケース 14 と 15 で、とくに、ケース 15 に関しては染料の投入地点、投入時間を色々変えて (18 種類) 観測を行なってみた。その結果、エッジ波領域の海浜流においては入射波の第 1 波目が打ち上がった時点で沿岸流とみれる汀線方向の流体輸送が現われており、以後、波の入射によって離岸流の位置もほとんど変わらずに循環流が形成されていくことがわかった。

図-5 は $h/h_B = 1.12$ の汀線方向の波高分布を示したものである。図より、第 1 波目の波高は汀線方向にほぼ一様で、2 波目には離岸流地点が小さく、向岸流地点が大きい分布で、5 波目以降同様の分布が続き、定常に達

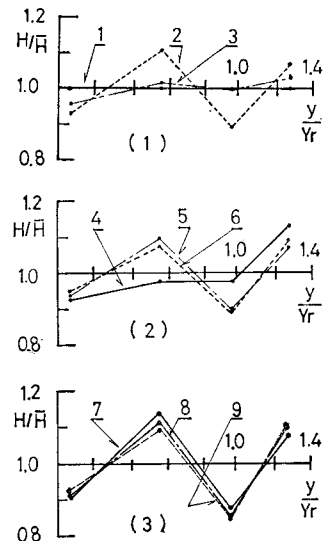


図-5 入射波第 1 波目からの汀線方向波高分布

していくことがわかる。5波目で汀線方向の波高分布の形が定着するが離岸流速は5, 6波の入射で定常に達することはない(後述)。

(2) 速度分布

本実験で用いたプロペラ流速計は $\pm 3 \text{ cm/s}$ 以下の流れには応答しない。したがって、流速 u' が平均流速 u で、 $u' = A \sin \sigma t + u$ ($\sigma = \text{周波数}(2\pi/T)$) で表わされるとすれば、半周期間の平均値が精度良くなる条件は ① $u/A \approx 0$, ② $|3/A| \ll 1$ で、この場合の誤差は $1/2 \cdot (3/A)^2$ となる。 $|\bar{u}/A|$, $3/A$, が大きくなれば精度は悪くなり、最大 $\pm 3 \text{ cm}$ の誤差となる。

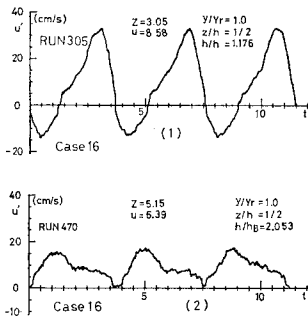


図-6 流速測定例

図-6 はアナログ出力させた電圧を AD 変換し、これをプロッターに出力させて、波形を再生したものである。図-6 (1) は離岸流の流心、深さ $z=3.05 \text{ cm}$ の流速で、振幅 A が大きく、波形の積分が可能であることがわかる。図-6 (2) は振幅約 7 cm/s の波動流速に $u=6.39 \text{ cm/s}$ の離岸流速が重なっている場合の流速波形で、 u' が正になる(沖向き)現象で、 u' が 3 cm/s 以下になる時間がある程度続いている。この場合、第1波目が入射してから第12~40波目間の平均値が 6.39 cm/s であるが、 $|u'| < 3.0 \text{ cm/s}$ となる場合、 $u'=0$ とした場合の同様の平均値が 6.32 cm/s となり、その差は前の値の1%である。平均流成分が小さくても、 $|u|$ が 3 cm 以下の時間が短かければ、実流速の平均計算が可能であることがわかる。

図-7 は離岸流速の測定結果である。図より、離岸流が急速に成長し、4~6波目の入射時で加速度 $\partial u/\partial t$ が

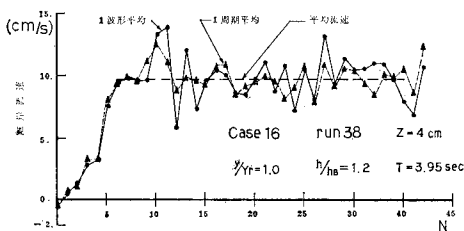


図-7 離岸流の発生・発達

最大で、約10波目付近からは定常成分と思われる値のまわりを変動していくことがわかる。この傾向は他の測点でもほぼ同じであるが、定常値に達するまでの時間は沖側ほど遅く、 $h/h_b=2.0$ 付近では15波前後の入射まで待つことになる。また、離岸流間の中央付近でも同じ傾向にある。Case 16の場合、砕波点付近では6波の入射で約 10 cm/s 程度に達するので、離岸流発生時の加速度は 0.42 cm/s^2 となる。これは、田中・和田(1980)が観測している沿岸流の初期加速度 0.47 cm/s^2 とほぼ同じ値となっている。

汀線方向の速度分布を調べるのに、沿岸流成分を拾わないように流速計にカバー(図-1)を付けて測定したところもあるが、カバーを付けたと無い場合よりも値がやや小さくなる傾向があった。

図-8~10に $Y/Y_r=4.16$ の離岸流と向岸流の速度分布を示す。ここに、横軸の x は原点を静水汀線に、沖向きを正に取った座標である。図-10の汀線方向の速度分布は流速計にカバーを付けて測定した結果である。図より次のことが言える。

$Y/Y_r=4.16$ の循環流の場合

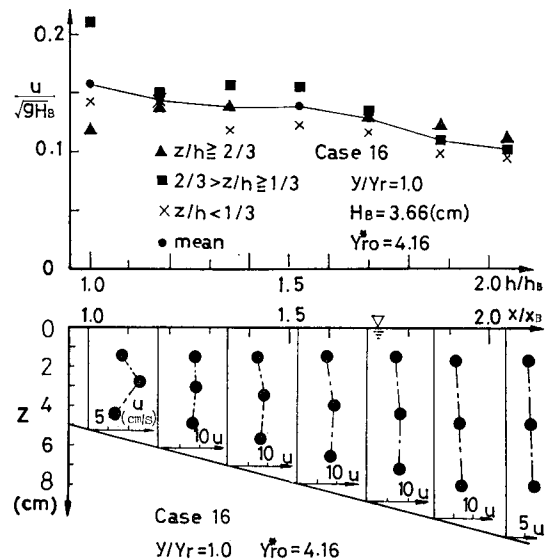


図-8 離岸流速の測定結果

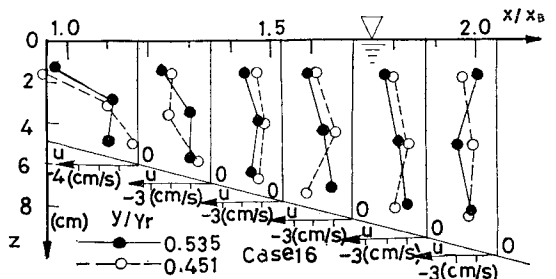


図-9 向岸流速の測定結果

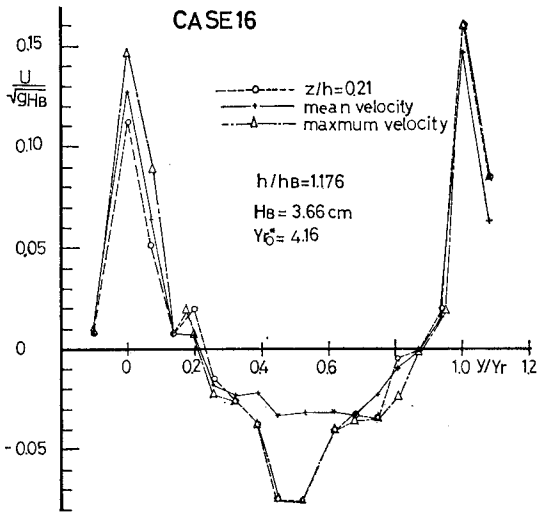


図-10 汀線方向の流速分布

(1) 鉛直方向の速度分布: 離岸流速は $h/h_B=1.0\sim 1.5$ では中間層の流速が上下層より大きく、水深方向には一様でないが(図-8), $h/h_B=1.5$ 以深では各層の速度差はなくなり水深方向にほぼ一様な分布となる。一方、向岸流速は全般的に上層の流れ(岸向き)が速く、砕波点近傍になると上層と中下層との速度差が著しくなる。(図-9)しかし、離岸流速と同様、 $h/h_B=1.5$ 以深ではほぼ一様とみなせる。向岸流速の鉛直分布形は泉宮・堀川(1981)が幅0.8mの二次元水槽で観測した定常流速の鉛直分布形に似ており、したがって、戻り流れ、波による質量輸送および海浜流が重なり合っ出来た分布形状と考えられる。ここに、海浜流を分布形状生成の因子に組み入れたのは、向岸流の定常成分が離岸流発生時よりも大きくなるからである。

(2) 岸沖方向の速度分布: 離岸流速は砕波点を過ぎても急な減速はなく、 $h/h_B=0.2$ 付近で、砕波点における流速の55~65%の落ち込みである(図-8)。Bowen(1969), Leblond・Tang(1974), Tam(1973), 佐々木・尾崎(1979)などの理論との定性的な傾向の一致がみられる。堀川・佐々木他(1974, 図-10)の現地観測と傾向は同じであるが、Sonu(1973, Fig. 1)の現地観測とは一致しない。これはSonuの観測した波と流れの場合は Y_r^* の値が小さく、図-2に示したような Y_r^* の小さい速度場になっているためではないかと推測される。

(3) 汀線方向の速度分布: $h/h_B=1.2$ 付近における離岸流と向岸流の非対称性は著しく、向岸流は離岸流の2割強の強さ(図-10, +印実線)となり、離岸流の幅 l_r は $Y_r/2$ (循環セルの規模)の4割となる。佐々木・尾崎の理論では $Y_r^*=4.0$ の速度場の砕波線上で、向岸流が離岸流の6~7割の強さ、離岸流の幅が $Y_r/2$ の4割強となるので、離岸流の相対幅に関しては理論ときお

よその一致はみられる。しかし、離岸流と向岸流の非対称性は実験値の方が著しく理論とは掛け離れている。

汀線方向の速度分布において、理論より実験の向岸流が小さく出ているのは水深平均の取り方に起因するのではないかと思われる。図-8, 9の鉛直分布より上層の流速は中・下層の流速に比べ離岸流の流心上では遅いか同程度で、向岸流の流心に近づくにつれ速くなり、向岸流の流心上では数倍の速さになることがわかる。これは波による質量輸送の影響で、 $z=0$ (静水面)付近で最大(田中・和田(1980))になるものと思われる。したがって、向岸流の水深平均の際には $z=0$ 付近の流速を組み入れるべきであろう。図-10の沿岸分布を各鉛直断面の最大値(Δ 印)でみると、離岸流と向岸流の対称性がやや戻り、向岸流は離岸流の強さの5割程度となり佐々木・尾崎の理論に近くなる。

4. おわりに

本論文では、波を汀線に直角に入射させ、主に、エッジ波領域の海浜流を平面水槽で再現させ、離岸流の発生と発生間隔との関係、離岸流及び、向岸流の鉛直、岸沖および汀線方向の速度分布を測定した。その結果、次のようなことが明らかになった。① エッジ波領域の海浜流の発生は確かにエッジ波に関係しているが、 Y_r^* の値が1.35~1.46以下の発生間隔の場合には、離岸流はやがて消滅し、新たな海浜流系統が発達し、定常に達する。② 海浜流の速度の鉛直分布は $h/h_B=1.0\sim 1.5$ では一様でなく、離岸流速は中、下層の方が速いが、向岸流速は上層の方が速い。又、沖方向の速度は Y_r^* が大きいと緩やかに減速する分布となり、理論と傾向が一致する。汀線方向の速度分布は離岸流の相対幅が佐々木・尾崎の理論と一致する傾向にあるが、離岸流と向岸流の非対称性の定量的な一致はみられなかった。③ 向岸流速の水深平均は静止水面付近の流速が大きな影響を及ぼす。④ 汀線および岸沖方向の速度分布は Y_r^* の値により分布形状が異なる。

本論文において、自由噴流型の離岸流については十分な議論ができた。今後は Y_r^* の小さいBowen型離岸流の速度分布も詳細に測定しようと考えている。

最後に、本研究遂行に当り、熱心な協力を頂いた加藤直吉君、為田稔君、また図面の整理作成に多大なる協力を頂いた高田徹匠君他、本学4年目学生諸君に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 佐々木幹夫・尾崎 晃: 自由噴流型と純循環流型の離岸流, 土木学会論文報告集, No. 288, pp. 95~106, 1979.
- 2) 泉宮尊司・堀川清司: 砕波帯における定常流に関する実験的研究, 第28回海講論文集, pp. 34~38, 1981.
- 3) 田中寛好・和田 明: 海浜流の発生機構に関する研究, 第27回海講論文集, pp. 153~157, 1980.