

一様海浜における離岸流の発生と沿岸境界条件

土屋 義人*・河田 恵昭**・芝野 照夫***
Dadang Ahmad S.****・穴倉 知広*****

1. 緒 言

離岸流がなぜ発生するかについては、これまで数多くの理論的な研究が行われ、また、水理実験や現地観測が実施されてきた。理論的取扱いは、強制外因説と自励内因説に大別されるようであるが¹⁾、前者では何らかの外的要因によって沿岸方向の radiation stress の分布を導入しており、また、後者では線形化した方程式系から線形増幅率や固有値を求めているのが実情である。

一方、水口²⁾は、水理実験で発生する離岸流は、強制外因説でないメカニズムで発生するという保証はないと述べている。この観点からは、自励内因説そのものに疑問が生ずるほか、強制外因説の引き金となる要因が、これまでの水理実験で必ずしも保証されていないなどの問題が生じてこよう。

以上のことから、本研究ではつぎの2点に注目して、水理実験を行い、新しい知見を得ようとするものである。すなわち、その1つは、基礎方程式の分岐解に対応するような離岸流が実在するのかということである。このため、沿岸方向に一樣な波動場が保証された水理実験を実施し、離岸流の発生機構を詳しく検討する。つぎに、これまでほとんど重要視されていなかった沿岸方向の境界条件の影響について考察する。水理実験においては、ほとんどの場合、平面水槽の幅は離岸流間隔の数倍以内であって、当然そこには側方境界の影響も介入するはずである。離岸流の理論の展開においても、沖方向の境界条件以外これらは考慮されていない。

2. 離岸流に関する実験

2.1 実験装置および実験方法

a) 実験装置

実験は図-1に示す扇形水槽内に作った模型海浜を用いて行った。この海浜は沿岸方向の長さ4.75m、沖方向の長さ12m(一樣勾配1/20の傾斜部分8mと一樣水

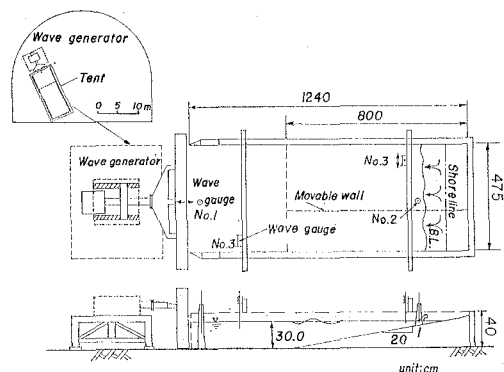


図-1 実験水槽と実験装置の概略図

深部分4m)であり、底面はモルタル仕上げの滑面で、傾斜部および側壁とも白ペンキを塗布し、前者には25cm間隔で基準用の格子線を描いている。傾斜部の製作精度は十分保証されており、局所的に数点で2mm程度の凹凸があるにすぎず、波長スケールでは十分一樣勾配として取扱える。なお、傾斜海浜部の沿岸方向の幅はペンキを塗った合板で任意に変えられるように工夫した。また、風の影響を除去するため、模型海浜全体をテントで覆った。

造波機は、長さ5mの造波板をもつピストンタイプのものであり、実験前にポテンショメーターの微調整を行い、造波波形が対称となることを確認している。また、離岸流の特性を調べるために、直径5cm、長さ4.5mのパイプに12.5cmごとに先端に注射針をもつコックを取りつけたものを汀線付近に設置し、赤色の過マンガン酸カリウム溶液を注入した。ついで、その先導波の波峰線を写真撮影するために、水面より約2mの位置で2台の同期カメラを汀線に平行に配置した。

波高の測定は、水平支持台上を沿岸方向あるいは沖方向に一定速度で走行するマイコン制御の可動台車に容量式波高計を取りつけて行った。さらに、図-1に示すNos. 1~3の各点でエッジ波の有無を確認するために、容量式波高計を設置し、10min程度の記録をスペクトル解析した。

b) 実験方法

* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

** 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所

*** 正会員 工博 福井工業大学助教授 建設工学科

**** 学生員 工修 京都大学大学院 工学研究科

***** 学生員 京都大学大学院 工学研究科

実験は、滑面・固定床の条件で行い、入射波はすべて直角入射である。波の諸元は、今回の実験では入射波の波高が沿岸方向に変化しない条件を付加しており、いわゆる不安定領域を対象とすることから、本造波機の造波特性も考慮して、この領域とその近傍に対応している。実験は、まず沿岸方向に波高の分布が一樣であることを確認するために、造波開始直後の先導波の波峯線が汀線に平行に入射することを、目視および写真撮影することによって確めた。この場合、沖側の一樣水深部に大きな数 mm の小れきを一層敷いて波高減衰させ、波峯線が汀線に十分平行になるように微調整を行った。表-1 は実験条件をまとめて示したもので、離岸流間隔などの実験値を合わせて載せてある。

2.2 実験結果

a) 波高分布

写真-1 は、先導波の波峯線が汀線と平行であることを示す 1 例である。また図-2 は、この場合の波峯線の汀線直前における直線性を示したもので、その凹凸の最大値は沖波波長の 4% で、十分一樣であるといえる。つぎに、所定の周期の入射波にエッジ波などの周期の長い波が混在していないことを確かめるために、図-1 の Nos. 2 と 3 (任意地点) の波高計による記録をスペクトル解析した。その結果、当然のことながら規則波の周波数とその倍周波数が現われたが、低周波数側では全実験ケースにわたって、エッジ波に対応するような周波数は存在しなかった。

b) 離岸流

本実験は波高・周期の異なる 10 ケースを対象として実施したが、いずれも離岸流の発生が認められた。模型海浜内の静水域に規則波が入射し、離岸流が発生・発達して定常状態に至るまでの過程は、一般につぎのよう

表-1 実験条件および実験結果

Run No.	水深 h_0 (cm)	相当沖波高 H_0' (cm)	周期 T (sec)	砕波水深 h_b (cm)	離岸流間隔 S_R (cm)
1-1	30.24	5.40	0.994	6.65	237
1-2	30.29	3.75	1.045	4.60	152
1-3	30.06	2.70	0.994	3.2	88
2-1	30.02	6.18	0.798	7.25	166
2-2	30.02	4.47	0.798	5.45	147
2-3	29.75	3.09	0.798	3.8	74
3-1	30.06	5.55	0.600	9.65	102
3-2	29.93	4.44	0.599	3.45	134
4-1	30.16	5.70	0.666	6.25	137.5
4-2	30.16	4.35	0.883	4.75	162.5

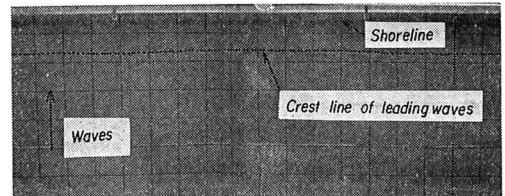


写真-1 造波開始直後の先導波の波峯線

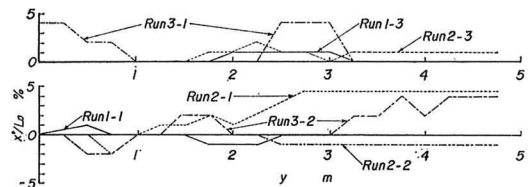
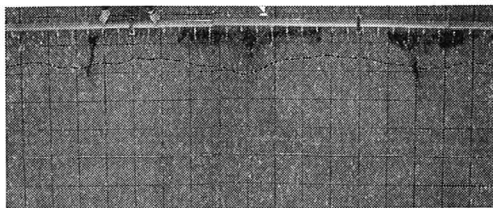
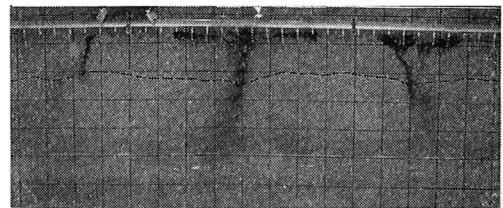


図-2 先導波の波峯線の直線性

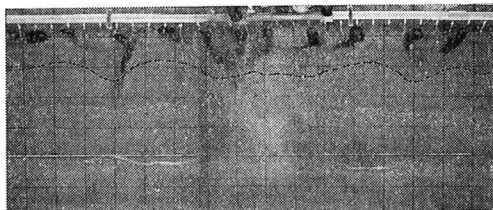
ある。造波開始直後では、写真-1 に示したように、先導波の波峯線は十分汀線に平行である。しかし、この状態は長く続かず、数波目から最大そ上線に小さな凹凸が見られ、surf zone 内の波の波峯線にも徐々に凹凸が現



(a) 3 sec 後 (Run 2-1)



(b) 8 sec 後 (Run 2-1)



(c) 8 sec 後 (Run 3-2)



(d) 18 sec 後 (Run 3-2)

写真-2 離岸流の発達状況と波峯線の平面形状

われてくる。この間、そ上域で斜面の表面に付着した気泡がそ上域に混入したが、この気泡はそ上線が凹になっている部分へと集中していく傾向にあった。この気泡の動きから、この部分に弱い沖向きの流れが発生していると推定された。しかし、この流れの発生位置は沿岸方向に徐々に変化し、ほかの流れと合流してやがて離岸流となって発達していく様子が、気泡の動きから観察された。各実験ケースにおいて染料の拡散状況を写真撮影したもののうち、代表的な数例を写真-2に示す。また、離岸流の流況および砕波点付近の沿岸方向の波高分布をまとめて図-3に示す。図中には、汀線と砕波線および砕波後の波峯線の平面形状も示してあり、また、図中の数字は撮影開始後の経過時刻(単位: sec)を表す。ここでは、まず離岸流の発生位置と沿岸方向の波高分布との対応について検討し、ついで離岸流の特性について述べる。

i) 離岸流と波高分布: 写真-2 および 図-3 から、一般的傾向として、離岸流の発生する位置で波峯線の遅れ(沖側に凸状になる)が見られ、離岸流の流速が大きいほど顕著である。これは、入射波と離岸流との干渉によって、離岸流の流頭付近で波高が大きくなり、砕波点

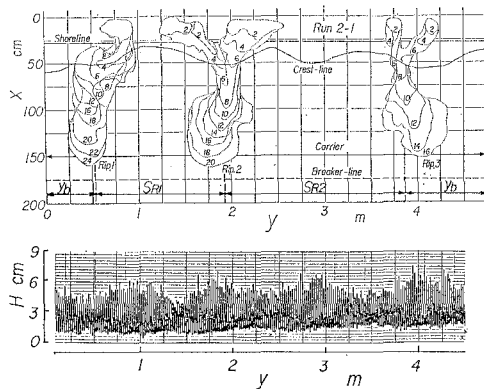
が沖側に移動することによって考えられる。つぎに、砕波点より若干沖側の沿岸方向の波高分布と離岸流の発生位置との対応について検討しよう。

まず、図-3(a)の Run 2-1 では、沿岸方向の波高が極大であるところと離岸流の発生位置との対応が見出される。つぎに、Run 3-2 では、Rip. 1 で極小となり、Rip. 2 で極大および Rip. 3 では波高に顕著な変化は認められない。後者の場合、離岸流頭が砕波点のかなり沖にあるため、波高の計測点とそれらの関係が微妙に変化することによるものであろう。なお、これら以外の実験ケースにおいても、波高の極大・極小となる位置と離岸流の発生位置にそれほど明白な関係は存在しないようであった。

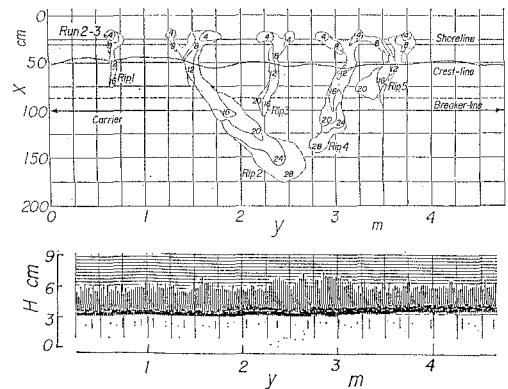
ii) 離岸流の特性: 本実験ケースにおける離岸流の特性は、以下のようである。なお、離岸流の発生モードは2つに大別されるが、これについては4.で述べることにする。

(1) Run 1-1: 水槽の中心軸より 30cm 程度ずれた位置を対称軸として、2本の離岸流が発生しており、両者は沖に向うにつれて互に離れるパターンを示す。

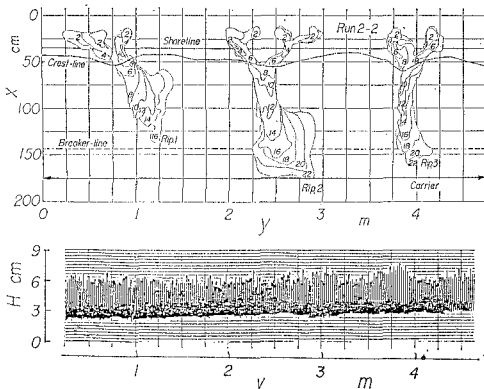
(2) Run 1-2: ほぼ対称に3本の離岸流が発生して



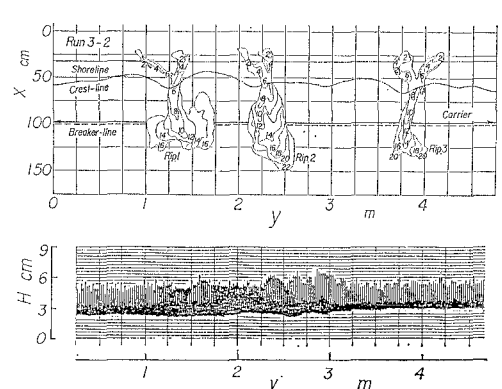
(a) Run 2-1



(c) Run 2-2



(b) Run 2-3



(d) Run 3-2

図-3 離岸流の経時変化と沿岸方向の波高分布

いる。このうち、中央の離岸流は碎波点の沖で沿岸方向に広がる傾向を示すものの、ほかの2本の離岸流はいずれも側壁方向に向かうため、循環流セルとはなっていない。

(3) Run 1-3: 3本の離岸流の発生がみられる。これらの先端はいずれも碎波帯外に出ており、そのうち2本は典型的な循環流セルを形成している。なお、その2重構造も観察された。

(4) Run 2-1: 図-3 (a) にみられるように、3本の離岸流が発生しているが、間隔は相違している。離岸流頭は碎波点付近にとどまっている。

(5) Run 2-2: ほぼ対称の位置に3本の離岸流の発生が見られる。ただし、そのうちの1本は斜行し、その先端は碎波点よりやや岸側で停止している。

(6) Run 2-3: 小さいものを含めて5本の離岸流が発生しているが、Run 1-3と同様に碎波帯幅も狭く、流れのパターンも類似している。

(7) Run 3-1: 水槽の中心軸より50cm程度ずれた位置を対称軸として、2本の離岸流が発生している。碎波帯幅が193cmと全実験ケースでもっとも大きく、離岸流頭はいずれも碎波点より岸側にとどまっている。

(8) Run 3-2: 図-3 (d) に示すように、3本の離岸流が発生しているが、左右の間隔はかなり非対称である。離岸流頭で沿岸方向に両側に拡散し、再び岸に向かい、全体としてきのこ状の形を示している。

3. 離岸流の発生機構

ここでは、本実験における離岸流の発生過程の観察結果に基づいて、その発生機構を考察する。まず、模型海浜内の静水域に、所定の周期で沿岸方向に一樣な波高分布をもつ規則波が海浜部へ入射すると、その質量輸送によって、汀線に向かう流れが発生する。一方、沖方向の radiation stress の勾配と水面勾配がバランスを取ろうとして、碎波点では wave set-down、汀線では wave set-up が発生しよう。したがって、質量輸送は汀線付近で行く手をさえぎられてとどまらざるを得なくなる。このような状況が長く続けば、汀線の水位は徐々に増加する一方となろう。しかし、実際には何らかの戻り流れとなって沖へ帰って行くことになる。

今回対象とした汀線直角方向から入射波がある場合は、質量輸送が沿岸方向に何ら分布を持たず、そのまま沖方向へ戻る流れが1つ考えられる。これはこの海浜系の自明解に対応するものであろう。本実験では、先導波の波高分布は、沿岸方向にほとんど一樣になっていたの、波高分布に基づく radiation stress は、ごく初期の段階では存在しないことになる。このような条件で離岸流が発生すれば、これは明らかに外力の非一様性に基くものではなく、事象に内在する不安定性に依存するもので

あろう。熱対流における熱量の補給と離岸流における質量輸送とのアナロジーが成立すれば、上述した自明解のほかに分岐解に対応するものが存在するはずである。さらに、この実験結果では、離岸流は純循環流型となっており、分岐解のもつ二重周期性と対称性を満足していることがわかる。しかし、このような過程で離岸流が発生すれば、ただちに波動場が変化することは容易に想像できる。実験で数波の先導波の後に離岸流が発生し、その後すぐに汀線付近で波峯線が凹凸になるのが観察されたが、まさにこれを裏付けている。一度パターンが決まると波動場がこれによって規定されるので、離岸流のパターンはかなり安定したものになるであろう。実験においても初期の離岸流の位置は、時間的にほとんど変化しなかった。

4. 沿岸境界条件の影響

離岸流に関する水理模型実験を行う場合、実験装置によって、模型海浜の沿岸方向の長さが制約される場合が多い。その結果、離岸流の特性、とくにその間隔が沿岸境界条件によって変化することが考えられる。そこで、ここでは、水槽の幅を4.8mから2.5mまで段階的に変化させて、この点に関して検討する。

図-4はRuns 4-1および4-2における水槽の幅と離岸流の本数との関係を示したものである。ただし、図-5の模式図にあるように、モードAとモードBに区別して扱っている。これは両端部が振動モードによって節となるか腹となるかの相違であって、この実験の場合にはそれら両者の発生が観察された。図-4から、

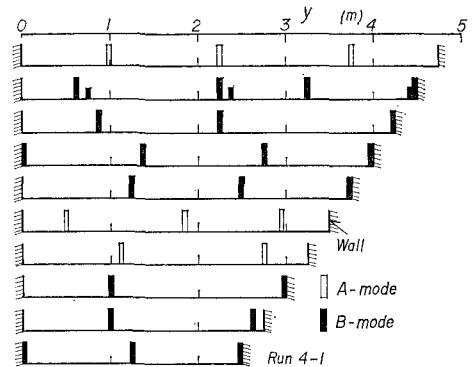


図-4 水槽の幅と離岸流の発生位置

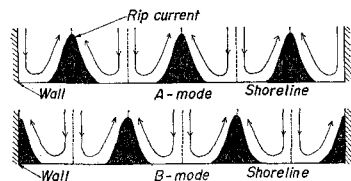


図-5 離岸流の発生モードの模式図

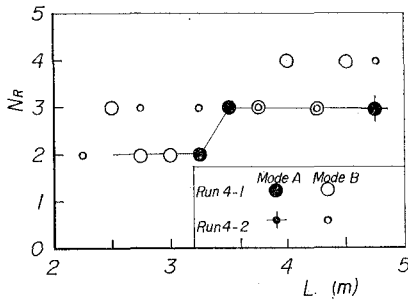


図-6 水槽の幅と離岸流の本数との関係

Run 4 のシリーズでは、離岸流は最大3本発生しているが、幅を変化させた場合、離岸流の発生位置はほとんどの場合若干変化し、不安定解としての分岐解の特徴を示しているといえよう。

図-6には、水槽の幅と離岸流の本数との関係を示す。モード A では、水槽の幅の変化につれて離岸流の発生本数は階段状に変化するのに対して、モード B では明確な関係は見出されない。これは側壁に沿った、あるいはその近傍の沖方向の流れを離岸流とするかどうかによって依存するためであって、現在のところその判定は不可能に近い。

そこで、離岸流間隔に及ぼす側壁の影響を表わすため

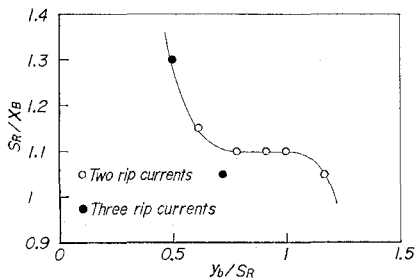


図-7 離岸流間隔に及ぼす側壁の影響

に、縦軸に無次元離岸流間隔 (S_r/x_B) および横軸に無次元側壁距離 (y_b/S_r) の関係をまとめたものが図-7である。ここに、 y_b は図-4に示すように側壁とこれに一番近い離岸流の間隔の平均値であって、実験値はすべてモード A のものを選んである。これから、 y_b/S_r 約 0.5 以下では、離岸流の間隔が側壁のために大きくなる傾向を示し、約 1 以上では、側壁との間にモード B に応するような流れが発生し、いずれも沿岸方向の境界の対影響を受けるようになる判断される。このように、沿岸境界条件の離岸流間隔に及ぼす影響はかなり大きく、したがって、離岸流の発生機構を理論的に検討する場合には、この境界条件を導入することが必要であろう。

5. 結 語

ここでは、いわゆる海浜流系の不安定領域を中心として、離岸流の発生とその沿岸境界条件に関する実験を行った結果を述べたが、その要点は次のようである。

まず、一様海浜勾配上に沿岸方向に一樣な波高分布をもつ波が入射すると、離岸流が発生するが、それは海浜流系の分岐解として考えられる。さらに、離岸流間隔に及ぼす沿岸境界条件の影響に関しては、そこに発生する離岸流のモードは2つあり、碎波帯幅との比で表した発生間隔は、離岸流と側壁の平均距離と離岸流間隔との比で表されることがわかった。このような考察は、離岸流の理論とともに進められるべきであることはいうまでもなく、その分岐解の誘導については次の機会に述べよう。

参 考 文 献

- 1) 佐々木民雄：海浜流の数値予測、海浜変形予測に関するシンポジウム、土木学会海岸工学委員会、pp. 1~9, 1978.
- 2) 水口 優：海浜流発生メカニズムについて、第21回水工学に関する夏期研修会講義集、pp. B-3-1~31, 1985.