

# 海浜循環流速の断面分布について

佐々木 幹夫

## 1. はじめに

海浜流に関する研究は数多いが、離岸流速に関する測定例は Sonu (1968), 佐々木 (1982)<sup>2)</sup>, 等々数えるしかない。今、海浜循環流の各種理論の妥当性を検討しようとしても、実験・実測を含め、データ不足のため、定量的な判断を下すには至らない。離岸流の観測例が沿岸流ほど多くない原因は流れの場が複雑であるからで、一つの観測データのなかに多くの支配因子の挙動が絡みあって現われている。実験や実測で着目した因子の影響を単独に取り出すことは容易なことではないが、海浜流の研究の進展にとって、必要なことは、理論や仮説に関する実験の検討、および、より全体的現象把握のためのデータの蓄積にあると思われる。

これまでの海浜流速の観測にはトレーサーやフロート追跡による方法が多かったが、オイラー空間で現象をみる場合にはオイラー的観測方法が適している。著者は前 (1982)<sup>2)</sup> にプロペラ流速計を用いて離岸流と向岸流の観測を行ったが、波と流れの場、とくに、浅海域では、静止水面付近の流速が無視されないことを指摘した。田中・和田 (1980)<sup>4)</sup> は沿岸流の発生機構を調べるために入射第1波目の1周期間の平均流速を測定した結果、静止水面付近の流速が最大になることを明らかにしている。本実験では前回測定できなかった静止水面付近の流速を測定し、水深、沖および沿岸方向の速度分布を明らかにしてみる。

## 2. 実験条件

実験に用いた水槽は長さ 6m, 幅 5m, 深さ 0.4m で沖方向に長くとり、底面勾配部は  $\tan \beta = 1/11$  に傾斜させた鉄板床よりなる。鉄板床面にはペンキ塗装を施し縦横 10cm 間隔に座標線を画いた。フラッター型造波機で起こした波が汀線に直角に入射するよう造波板を置いた。流速の測定は直径 5mm の可逆型プロペラ流速計で行った。波高は抵抗線式波高計を用いて測定した。波高は一部電磁オシロに結びオシログラフペーパーより読み取ったものもあるが、大部分は、流速データと同様、

データレコーダーに記録した後、サンプリング周波数  $S.F = 20 \text{ Hz}$  で AD 変換して求めた。

実験は表-1 に示す条件で行った。ここに  $T$ : 波の周期,  $H_0$ : 沖波高,  $H_0/L_0$ : 沖波波形勾配,  $h_B$ : 砕波水深,  $H_B$ : 砕波波高,  $X_B$ : 平均砕波帯幅,  $Y_r$ : 離岸流発生間隔,  $Y_r^*$ : 無次元離岸流発生間隔である。

表-1 実験条件

| $T$<br>(sec) | $H_0$<br>(cm) | $H_0/L_0$             | $h_B$<br>(cm) | $H_B$<br>(cm) | $X_B$<br>(cm) | $Y_r$<br>(cm) | $(= Y_r^*/X_B)$ |
|--------------|---------------|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|
| 3.70         | 2.66          | $1.25 \times 10^{-3}$ | 4.91          | 4.56          | 59            | 240           | 4.07            |

## 3. 実験結果および考察

堀川・佐々木他 (1975) の海浜流発生区分で本実験で発生させている海浜流をみると、表-1 より、 $I_{r0} = 2.57$ , ここに  $I_{r0} = \tan \beta / (H_0/L_0)^{1/2}$  であるのでエッジ波領域の海浜流となる。砕波のタイプは Battjes (1974) の surf similarity parameter  $I_{r0}$  によると plunging ( $3.37 > I_{r0} > 0.5$ ) であるが、みかけ上、collapsing に近い砕波をする。

流速の測定は汀線方向、沖方向および水深方向にそれぞれ測点を設け行った。汀線方向の測点は離岸流と離岸流の間を等分割し、 $\Delta y^* = 0.083$  毎に 13 地点と  $y^* = 1.042$  の計 14 地点、ここに  $y^* = y/Y_r$ ,  $y$ : 離岸流発生地点からの沿岸方向距離、で定義する無次元距離、沖方向には、 $h/h_B = 0.630, 0.870, 1.037, 0.130, 1.222, 1.315, 1.407, 1.500, 1.630, 1.833, 2.167$  に測点を取り、ここに、 $h$  は水深、これらの線上の点の鉛直方向に、図-1 に示すように、 $z/h = 0, 0.25, 0.5, 0.75$  の 4 点を選び、ここに、 $z$  は静止水面からの鉛直下向きの距

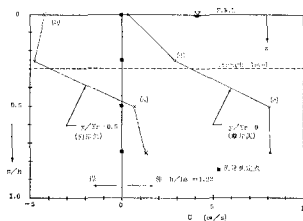


図-1 鉛直方向の測定点と平均流速観測例

\* 正会員 工博 八戸工業大学助教授 土木工学科

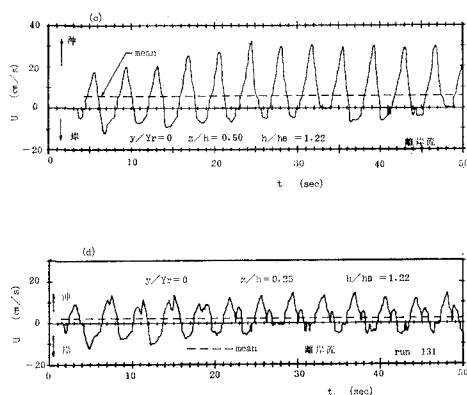
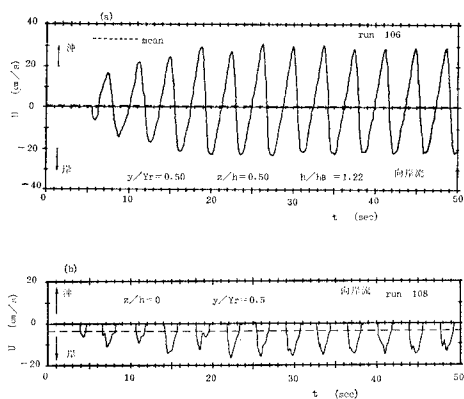


図-2 流速測定例

離, 総計 616 点で流速測定を行なった. 図-1 に示したように砕波点付近では  $z/h=0$  だけでなく,  $z/h=0.25$  の点も波の谷のレベル以上になり, プロペラ流速計が一時的に水面より上になる場合がある. プロペラの回転はプロペラの羽がすべて水面より上になった時に停止するが, そうでない (一枚でも水に漬っている) 場合には水に漬っている部分だけで応答し, 流れを拾ってしまう. したがって, 本プロペラ流速計で得られた流速は流速計を置いた点の上下 5 mm の範囲の流れを表わしていることになる. 図-2 に流速の測定例を示したが 図-1 の図中に示した (a)~(d) は 図-2 の (a)~(d) 図に示した流速に対応していることを意味したものである. 図-2 (d) に示した流速データはプロペラの中心が谷より上に位置するものの, 羽が水面に引っかかっているため水面上を冲向きに流れる水粒子の運動を拾っている状態を表わしている.

本流速計は  $\pm 3 \text{ cm/s}$  以下の流れには応答しない. したがって, 波と流れの場の水粒子速度の振幅が  $3 \text{ cm/s}$  より十分に大きければ平均流の成分は流速データの積分によって得られる. 図-2 に示した ---- は図に示した範囲内の平均値を示したもので振動流の振幅との関係で  $3 \text{ cm/s}$  以下に反応しない流速計でもそれ以下の平均流成分を取り出せることが理解されよう.

図-3 (a) (b) は流速と水位の移動平均を示したもので, 時間幅は波の周期  $T=3.7 \text{ sec}$  である. 図の横軸は, 時間  $t$  を第 1 波目の波形の中央が通過した時を  $t/T=1$  として設定している. 図-3 (b) より第 1 波目の入射初期の移動平均水位の変動が大きいのは入射波と異なる水位変動があるためと思われる. 図-3 (a) (b) より 10 波目以降同じ値のまわりを変動しているの, 本実験ではこの付近で定常に達したものと解釈して測定データを整理した. 定常に達するまでの時間は離岸流および平均水位ともに同じといえる. 図には示していないが, 定常に達する時間は砕波点に近い (砕波帯外の場合) ほど早

く, 砕波点近傍ではおおよそ 8 波目で定常値に達するが, 砕波点から遠ければそれだけ遅く定常値に達し,  $h/h_B=2.0$  付近ではおおよそ 12 波目で定常状態に入る. これは, 離岸流の発生が砕波点以浅にあることを意味している. 本実験で観測している波と流れの場は佐々木 (1982)<sup>2)</sup> の実験で明らかにされた速度場とほぼ同じといえる. したがって, この場合も入射当初から汀線近傍でエッジ波が強く作用しているものと思われる. 砕波による質量輸送が海浜流の発生, 発達にどれだけ強く関与しているかは今回の実験で明らかにすることはできなかったが, 定常に達する時間は, 上層と中・下層の速度変動をみるかぎり, 上層の方が中・下層より長くなる傾向にあった.

定常成分は流速データを波の周期と同じ時間幅で平均し 図-3 (a) のような図を作成し, この図より前述の到達時間を求めこの点より約 35 波目付近の値までの平均を定常成分として導出した. 佐々木 (1982) によるとこのような定常成分の算出には, 入射波の周期と同じ時間平均を用いても, 流速データそのものの波形における一

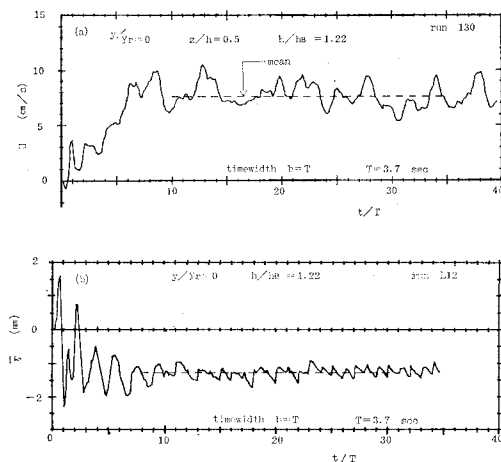


図-3 発生発達時の離岸流速と水位の移動平均

周期間の平均を用いても大差ないことを示している。個々の値の差はわずかにあるが全体の傾向は同じなので、本実験では佐々木(前述)の研究に基づき、入射波の周期と同じ時間平均値だけを取扱った。

図-4 は離岸流速の鉛直分布を、図-5 は向岸流速の分布を示したものである。図-5 より離岸流の中では、砕波点付近を除けば、下から上まで全水深にわたって沖向きの水粒子の輸送になっていることがわかる。砕波点近傍の上層の平均値が岸向きを示しているのは、砕波による影響で、 $h/h_B=0.63$  では  $z=0$  付近で沖向きの値を示していることから、 $h/h_B=1.037$  から  $h/h_B=0.87$  の点にかけて、上層が岸向きの小さい渦構造の流れが構成されていることも考えられる。Plunging 型の砕波なので巻き波の砕波の強さが流れの発生の中で保存されているとも言える。離岸流の中での上層の岸向きの輸送は離岸流が弱ければ汀線近くまで広がる傾向にある(図示省略)。砕波点以浅の波谷の位置  $\eta_i$  は  $\eta_i/h \approx 0.7$  であり砕波点以深では  $\eta_i/h \approx 0.25$  となっているので、鉛直方向の流速の強弱を図-4 だけで判断することはできない。図-4 より、離岸流の中で波谷より上の位置での速度成分が沖向きになっているのは、波の峰が近づき、プロベラ流速計が水に漬り、流速計が流れを捨いはじめたとき沖向きの流れが卓越していると解釈した方がより合理的である。したがって、離岸流のなかでは水面以上の流速は水面付近でも沖向きになっているものと解釈される。以上より、図-4 の  $h/h_B=1.222$  以深の  $z/h=0.5$  と  $0.75$  の流速にほとんど差がないことを考えると、離岸流のなかでは、水面以下の流速は水深方向にほぼ一様な分布をしているのではないかと考えられる。これは佐々木(1982)が波の谷以下の流速を測定した結果一様な分布形を得たことと一致している。

図-5 より砕波点付近では  $z/h=0.25$  で最大になっているが、これは砕波による質量輸送が大きく影響していると考えられる。砕波点近傍では表層の岸向きの流体輸送が卓越しているものとすれば、 $z/h=0$  と  $z/h=1/4$  では同程度の岸向きの流速でも、 $z/h=0$  ではプロベラ流速計が流れを捨う時間は  $z/h=1/4$  の点の場合よりも短

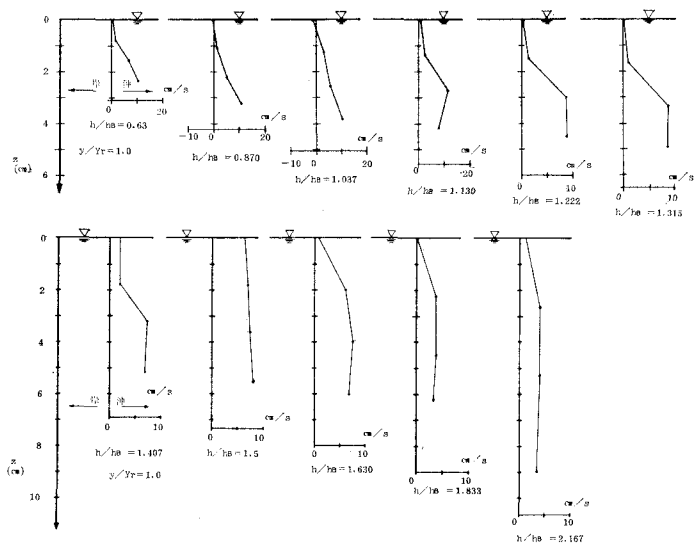


図-4 離岸流速の鉛直分布

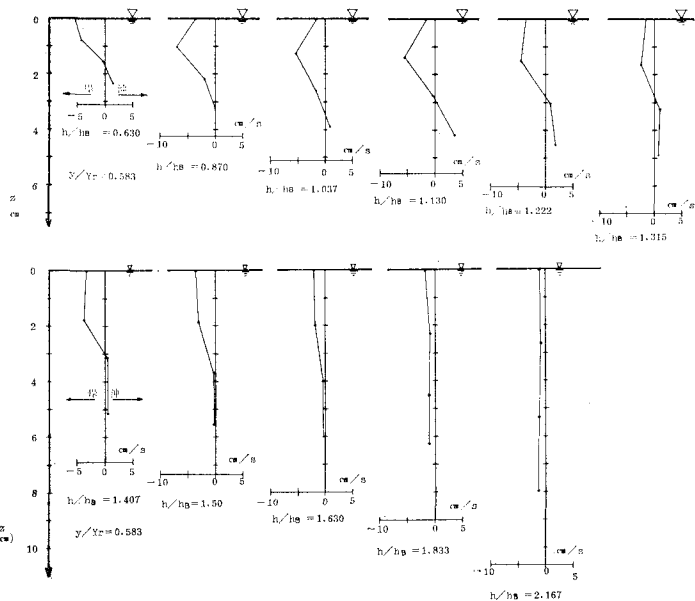
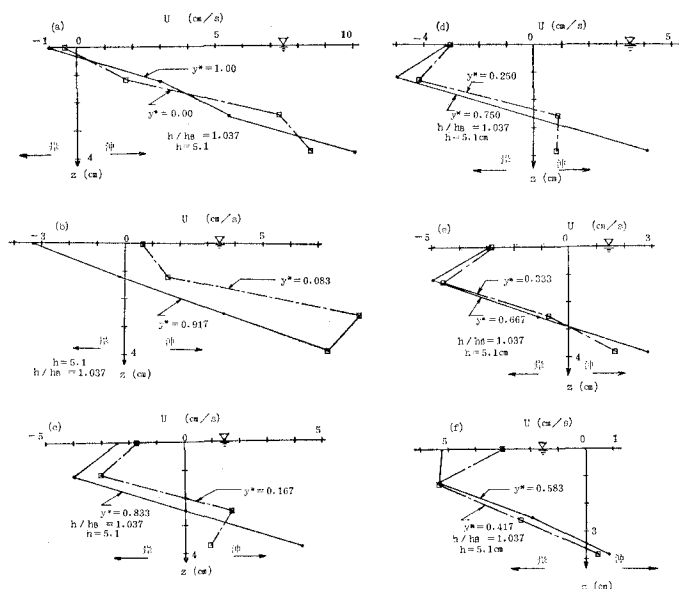


図-5 向岸流速の鉛直分布

く、したがって図-2 (b) に示したように、一周期間の平均値は小さくなることになる。したがって、形式上は、一周期間の平均流速の分布形は図-5 に示すような形となる。

泉谷・堀川(1981)は2次元水槽のなかで定常流の観測を行ない戻り流れ最強地点での鉛直分布形を明らかにしているが、この速度分布に岸向きの成分を加えると図-5 の  $h/h_B=0.630$  における速度分布になる。したがって、向岸流発生地点のこの付近の速度場は、戻り流れと波による岸向きの流体輸送と海浜循環流による岸向きの流れが重なり合っている速度場と理解されよう。



図—6 海浜循環流速の鉛直分布

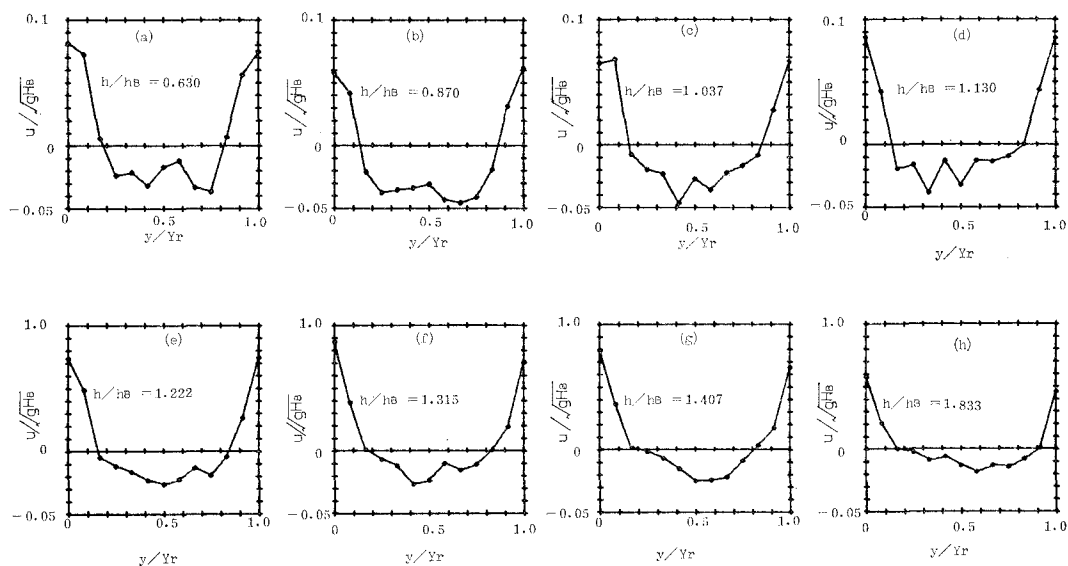
図—6 は  $h/h_B=1.037$  すなわち、砕波直前の断面の流速の鉛直分布を示したものである。図—6 において (a)~(f) にはそれぞれ2つの流速の鉛直分布を示した。無次元距離  $y^*$  の値は異なるが同じ流れの場の流速と考えたものである。これら2つの流速の分布が近寄っているほど対をなす同じ速度場の循環セルが形成されていることになる。すなわち、 $y^*=0, 1$  に離岸流、 $y^*=0.5$  に向岸流、 $y^*=0.25, 0.75$  がセルの中央であり、図より (b) 図、すなわち離岸流のごく近い流況を除けば  $h/h_B=1.037$  の断面ではまったく対をなす対称な循環流が形成されていることがわかる。(a) 図は本実験水槽で発生

した2つの離岸流の鉛直分布を示したもので、(c)~(f) 図の上層の速度と比較してわかるように、波による岸向きの質量輸送が離岸流によって大幅に弱まっていることがわかる。この分布形は前述泉宮・堀川が示した強い戻り流れの場の分布形と相似の関係にあり、したがって、強い離岸流が形成する鉛直分布と言ってよい。(c)~(f) 図の各点の流速の分布形は相似の関係にあり、 $y^*$  の値が0.5に近いほど岸向き(負の値)にシフトされているとみられる。(a)~(f) 図は離岸流と向岸流の発達状況が良く観測されている。

図—7 は循環流速の沿岸分布を示したもので、各図に示した値は水深方向に測定して得た4点の定常流成分の単純な算術平均でこれを水深方向の平均値として採用してみたものである。図より砕波点近傍 (b) (c)

図では向岸流速は離岸流速の6割程度で、相対的に大きく、他は離岸流速の4割程度の向岸流速である。佐々木・尾崎の理論では向岸流は離岸流の6~7割の強さであるから、砕波点付近では一致するが、他では実験値の方が小さくなる傾向にある。この点、理論の改善が必要かどうかは、鉛直方向にさらに多くの測点を設け、水深方向の流速平均値の精度を上げてからの判断になろう。ただ、図よりわかるように、離岸流の幅は循環セルの規模(汀線方向の大きさ)の3~4割となっており、佐々木・尾崎の理論に近い点は興味深い。

図には示していないが図—7に示した二つの離岸流の



図—7 循環流速の沿岸分布

平均値の沖方向の変化を見ると,  $h/h_B=1.1\sim 1.2$  で最大値をとり,  $h/h_B=2.0$  で砕波点付近の流速の6割程度の落ち込みとなる.  $Y_r^*=4.07$  (本実験) の流れの場において, 離岸流速が砕波帯外で最大になる点は佐々木・尾崎の理論との定性的一致がみられるが, 最大流速地点は実験の方が砕波点にやや寄り過ぎる傾向にある. 離岸流速の砕波帯外での緩やかな減速は Le Blong・Tang (1974), Tam (1973) の理論でも示されているが, これらは砕波点を過ぎてからの加速, すなわち, 砕波帯の外で流速が最大になるような現象は説明できない. Bowen (1969) の線形理論も同じことが言えるが, 彼の非線形項を入れた数値解ではこの点の傾向がわずかに説明できる.

#### 4. おわりに

本論文では, 波を直角に入射させ, エッジ波領域の海浜流を平面水槽で再現させ, 離岸流と向岸流の鉛直, 岸沖および沿岸方向の速度分布を明らかにしてみた. 実験条件は表-1に示した一つだけである. これは, 海浜循環流の流れの場を測定するには3方向に測点を設け, 多数の点の測定を必要とし, かつ測定およびデータ処理には膨大な時間を費やしているからである. 測定はプロペラ流速計を用いたが, この流速計は横方向からの流れにも応答する. 本実験で得た海浜流の流れの場に, カバー(横方向からの流れを遮断する)付プロペラ流速計を入れてみたところ, 結果は付けない場合に比べ大差なかった. このことから, これらの工夫は一切やめて流れの場の測定を行ってみた. また, 本プロペラ流速計だけで精度良いデータを得るため, 入射波の周期は長い波にした.

本研究は静止水面上を含む多数の点での流速の測定により, 海浜循環流の3方向の速度分布を明らかにするこ

とを目的としたもので, 以下の点がわかった.

① 海浜流は第1波目が入射してから8~10波目で定常に達するが, 砕波点から沖側に離れるほど定常に達するまでの時間は長く,  $h/h_B=2$  付近ではおおよそ12波目前後で定常に達する. 同様のことが平均水位の変動にも言える. 上層と中・下層の流れの発達状況を比べると上層の方が2~3波目くらい遅く定常に達する傾向にある.

② 離岸流のなかでは砕波点付近を除いて, 全水深にわたって沖向きの流れとなっている.

③ 離岸流と向岸流の非対称性は実験の方が理論(佐々木・尾崎)よりも著しい.

実験と理論との定性的一致は多くみられたが定量的な一致はそれほどでもなかった. この点, 理論モデルの検討が必要かとは思われるが, より正確な判断はもっと多くの観測を待つことになろう.

最後に, 本研究遂行に当たり, 熱心な協力を頂いた本学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: 自由噴流型と純径環流型の離岸流, 土木学会論文報告集, No. 288, pp. 95~106, 1979.
- 2) 佐々木幹夫: 海浜流の速度分布について, 第29回海講演文集, pp. 356~359, 1982.
- 3) 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回海講演文集, pp. 34~38, 1981.
- 4) 田中寛好・和田 明: 海浜流の発生機構に関する研究, 第27回海講演文集, pp. 153~157, 1980.
- 5) Bowen, A. J.: Rip currents, I, Theoretical investigations, J. Geophys. Res., Vol. 74, pp. 5467~5478, 1969.
- 6) Tam, C. K. W.: Dynamics of rip currents, J. Geophys. Res., Vol. 78, pp. 1937~1943, 1973.
- 7) Sonu, C. J.: Comment on paper by C. K. W. Tam, Dynamics of Rip Currents, J. Geophys. Res., Vol. 78, pp. 8887~8889, 1973.