

混合砂海浜の断面変形と粒径別漂砂量に関する実験的研究

張 達平*・佐藤 慎司**・戸崎 正明***・田中 茂信****

1. ま え が き

来襲する波浪の特性に応じて、岸沖方向の土砂移動に伴う2次元海浜変形が生じ、その際に最終砕波点付近で中央粒径が最大値を持つことが報告されており、海浜を構成する土砂(混合砂)の分級が生じると言われている(例えば、Bascom, 1952; 加藤ほか, 1988)。しかし、2次元海浜変形に伴う混合砂の分級機構に関する研究はまだ少ない。これは、砕波帯の土砂移動に関する現地調査が非常に困難で、また、小規模な実験においては実験砂の粒径が現地換算すると大きくなり過ぎてこの問題を検討できないことによる(山本, 1977)。一方、田中ほか(1988)は沖浜帯における岸沖方向の粒径別移動限界および粒径別漂砂量について、混合掃流砂の捕砂による実験を行い算定式を見いだした。本研究では、混合砂の岸沖方向の分級機構の解明を目的として、大型2次元水路における実験を行って、地形測量と粒度分析から砕波帯を含む粒径別漂砂量の時空間的変動特性を調べ、粒径別漂砂量の特性と分級機構との関連性を検討した。

2. 実験方法

実験は大型2次元水路(幅2 m, 長さ150 m, 高さ5 m)内に海底勾配1/20の模型海浜を中央粒径 $d_{50}=1.56$ mm, ふるい分け係数 $S_0=3.08$ の混合砂(図-1)で作成して行った。ここで、ふるい分け係数は $S_0=(d_{75}/d_{25})^{1/2}$ で表わされる。波浪条件は $H_0=40$ cm, $T=3.3$ s (Case 1) と $H_0=50$ cm, $T=2.5$ s (Case 2) の2条件に設定された(表-1)。海底勾配、底質粒径をもとにSunamura and Horikawa (1974)により2次元変形のタイプ分類を行うと、Case 1はタイプII地形(中間型の波), Case 2はタイプI地形(侵食性の波)となる。波高、底面付近の流速の測定は砕波点、砕波帯内、砕波点の沖側の3ヶ所の合計5ヶ所で行い、同時に砂の移動状況に関するビデオ撮影を行った。粒径別漂砂量を求めるため、ケースごとに水平距離10 cm ピッチの地形測量、また、表面および波

の作用により砂が混合した深さまでを対象とした60ヶ所で、直径5 cm, 長さ15 cmの円筒容器を用いて底質を採集し粒度分析を行った。

3. 断面地形変化と分級の特性

図-2にはCase 1 ($H_0=40$ cm, $T=3.3$ s) とCase 2 ($H_0=50$ cm, $T=2.5$ s)における造波開始から1時間、3時間、8時間後の地形変化を示す。Case 1では、造波開始から1時間後には岸側が侵食され、静水汀線から $x=8.7$ m (第1砕波点の岸側)の位置では砂が堆積しBarが形成された。3時間後にはBar周辺と沖側が侵食され、その砂は岸の砕波帯へ移動して第2砕波点($x=5.3$ m)の付近に小規模なStepが形成された。さらに8時間後には第2砕波点の付近に大規模なStep, 汀線にBermが形成された。Barの位置はあまり変化しなかったが、汀線位置は $x=3.8$ mまで前進した。一方、Case 2

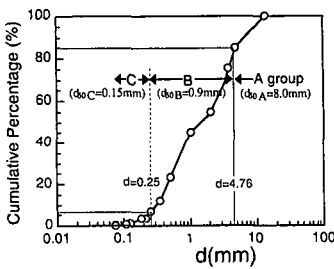


図-1 初期混合砂の粒度加積曲線

表-1 実験条件と地形結果

CASE	H_0 (cm)	T (s)	$H_0 T_0$	Initial Morphology	C^*	Resultant Morphology	Exp. time(hr.)	
1	1-1	40	3.3	0.024	1/20 slope	5.3	bar	0~1
	1-2	40	3.3	0.024	1-1		bar+step+berm	1~3
	1-3	40	3.3	0.024	1-2		bar+step+berm	3~8
2	2-1	50	2.5	0.051	1/20 slope	8.1	bar	0~1
	2-2	50	2.5	0.051	2-1		Double bar	1~3
	2-3	50	2.5	0.051	2-2		Double bar+berm	3~8

* Calculated according to Sunamura and Horikawa (1974) as $i=1/20$, $d_{50}=1.56$ mm

* 正会員 理博 建設省土木研究所海岸研究室 受け入れ研究員
** 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室 主任研究員
*** 正会員 建設省土木研究所海岸研究室
**** 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室長

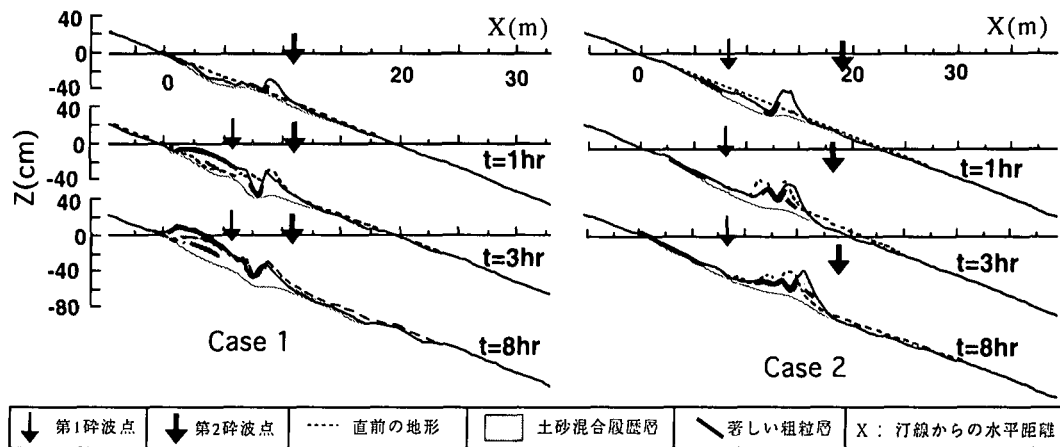


図-2 地形変化と粗粒層の分布

では、造波開始から1時間後では岸側が侵食され、 $x=13$ m の位置に Bar が形成された。3時間後では2段 Bar、8時間後では第2碎波点の付近に小規模な Step が形成され、汀線にはわずかに Berm が形成された。バーの位置と汀線位置はあまり変化しなかった。図-2 には著しい粗粒層とビデオ撮影により確認された土砂混合履歴層（一度でも混合を経験した層）も示した。Trough, Berm, Step が形成される位置では粗い粒径の砂が表面に集積する傾向があり、碎波帯外では、細粒分の砂が表面を覆うという分級現象が見られた。水路の壁面から観察した結果、著しい粗粒層は碎波帯での渦の発達と関連していると推察できる (Zhang ほか, 1994)。すなわち、沖側の Bar で碎波した波は Trough の底面まで到達する大規模な水平渦、また、岸側の第2碎波点で碎波した波は小規模な底面到達斜降渦を形成していた。Berm では砂を掃流させる強い swash、また、Step では強い backwash 渦が見られた。碎波帯外では、底面まで到達する乱れはなく、細粒分の砂が堆積しやすくなった。この結果は張ほか (1994, 1995) の実験結果と一致している。

汀線付近の底質を観察したところ、Case 1 では細粒分を多く含んでいるが、Case 2 ではあまり含んでいないことが確認された。波の特性により細粒分の含有率と土砂混合履歴層の厚さは異なることが分かる。また、Case 1 の粗粒層は厚く、ほぼ碎波帯全体に分布しており、Case 2 よりよく発達していることが分かる。

4. 粒径別漂砂量の特性

4.1 粒径別漂砂量の推定と粒径集団

混合砂の岸沖方向の分級機構を定量的に解明するために、ケースごとに水平距離 10 cm ピッチの地形測量と 60ヶ所で波の作用により砂が混合した深さまでにわたって採集した底質の粒度分析を行って、その結果から、粒

径別漂砂量 (Q_{di}) を次の式で推定した。

$$Q_{di} = (1 - \lambda) \int_{x_0}^x \frac{\Delta Z_{di}}{\Delta t} dx, \quad (\Delta Z_{di} = h_s \cdot F_{di} - (h_s - \Delta z) \cdot F_{d0})$$

ここで λ は底質の空隙率 ($=0.4$)、 t は時間、 x は岸沖距離、 h_s は波の作用により砂が混合した層の厚さ、 F_{di} は波作用後の粒度分析による対象粒径の体積比、 F_{d0} は波作用前の体積比、 Δz は底面高の変動量である。ここで、底質の質量保存と底質の空隙率が不変であると仮定している。

図-3 には Case 1 を例として混合砂を 13 の粒径範囲に分けて、波作用から1時間の粒径別岸沖漂砂量分布を示した。漂砂量は粒径と方向と時間を問わず Trough の前後で最大値をとることが分かる。漂砂量の特性は岸沖距離により異なり、大きく Bore 領域、Trough 前面、Bar 領域、碎波帯外という4つの領域に分けられる (図-3 の下部)。また、漂砂量の向き (“+”：岸、“-”：沖) と地形変化を示す $Q_{di}/\Delta x$ の特性 (“+”：堆積、“-”：侵食) をみると、それぞれの領域では、粒径別漂砂量の向きと $\Delta Q_{di}/\Delta x$ の特性は粒径ごとに異なり、図-3 の太線 ($d > 4.76$ mm)、中線 ($0.25 \text{ mm} < d < 4.76$ mm)、細線 ($d < 0.25$ mm) に示しているように3つの粒径集団に分けられるようである。この粒径集団区分と各集団 (Group) の中央粒径は図-1 の上部にも示している。さらに、水路側壁から土砂移動特性を観察した結果、大粒径の砂は主に掃流形式で、小粒径の砂は主に浮遊形式で、その中間の粒径の砂は両者の混合形式で移動していることが観察された。

4.2 粒径別漂砂量の時空間変化

図-4~6 に Case 1 の各粒径 Group の 0~1 hr、1~3 hr、3~8 hr の時間帯の時間平均の粒径別岸沖漂砂量分布を示す。図-7~9 に Case 2 の粒径別漂砂量分布を示す。まず、粒径別漂砂量の分布特性と分級現象との関係

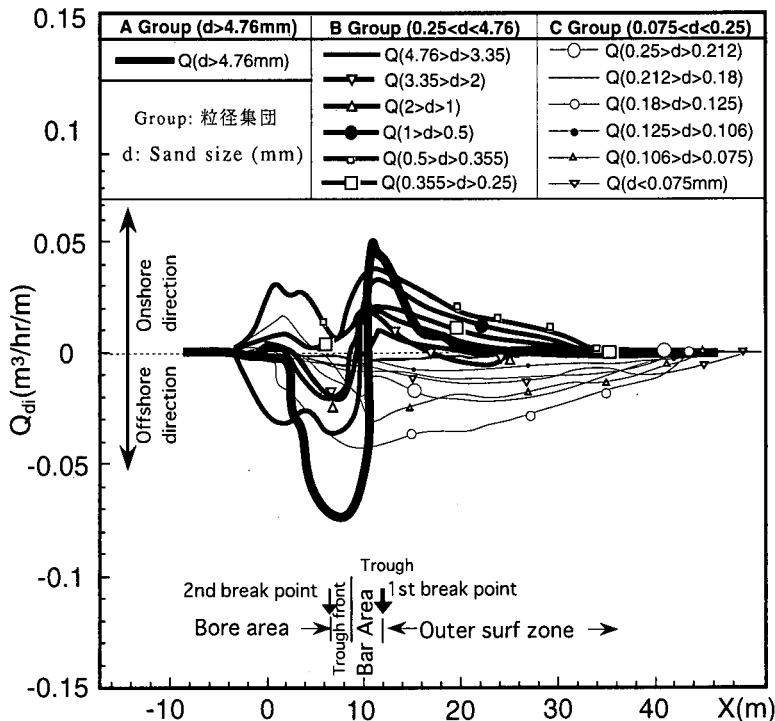


図-3 時間平均の岸沖粒径別漂砂量分布 (Q : 岸向き漂砂量が正, Case 1)

について、例として、図-4 に示している Case 1 (0~1 hr.) をみると、A Group, B Group, C Group ごとに漂砂量の向き、大きさ、ピークの位置、 $\Delta Q_{di}/\Delta x$ の特性はかなり異なることが分かる。砕波帯外では、A Group と B Group の漂砂量の向きは岸 (+) であり、侵食となるが ($\Delta Q_{di}/\Delta x$: -) が、C Group の漂砂量の向きは沖 (-) であり、堆積となる ($\Delta Q_{di}/\Delta x$: +)。また、Trough では、A Group の $\Delta Q_{di}/\Delta x$ が最も大きく堆積であるが (B Group の漂砂量のピーク位置は A Group より 1 m 沖にずれている)、C Group は侵食となっている。これは、3 章で述べたように Trough が形成される位置では粗い粒径の砂が表面に集積する傾向があり、砕波帯外では、細粒分の砂が表面を覆うという分級現象が生じることと定性的に整合している。さらに、3 章で述べたように Berm, Step, Trough 位置では砕波による強い乱れがあることが観察されたので、砕波による乱れにより小粒径の砂は浮遊形式で砕波帯外に拡散し運びされ、大粒径の砂が多く残されることが考えられる。それぞれの粒径 Group の漂砂量は、砂の移動形式、乱れの強度、流体場の特性と関係があることが再確認された。

次に、各粒径集団の漂砂量分布の時間変化について、Case 1 の漂砂量の向きについて述べる。図-4 (Case 1, 0~1 hr.), 5 (1~3 hr.), 6 (3~8 hr.) を比較すると、時間と共に、Trough の岸側では A Group, B Group の漂

砂量の向きは沖から岸へ変化するが、C Group の漂砂量の向きは変化していない。また、方向を問わずそれぞれの Group の漂砂量の絶対値について、図-4 (Case 1, 0~1 hr.), 6 (3~8 hr.) を比較すると、A Group はやや増加し、B Group は 1/3 程度に減少し、C Group は 1/10 程度に減少する。さらに、Case 2 の図-7 (Case 2, 0~1 hr.), 8 (1~3 hr.), 9 (3~8 hr.) を比較すると、侵食性の波であるのに、汀線付近では A Group, B Group の漂砂量の向きは沖から岸へ変化し、また、図-9 の 3~8 hr. ではやや堆積傾向を示している。波の作用時間とともに漂砂量が減少していくことは、均一粒径底質を用いた海浜変形実験でも指摘されているが、混合粒径底質を用いた今回の実験では、さらに、大粒径の底質より小粒径の底質の方が漂砂量の減衰率が高いことが明らかとなった。この原因としては、分級の結果としてアーモークトが形成・発達し、地形変化がしにくくなると同時に、小粒径となっている C Group の底質が特に動きにくくなったためと考えられる。

波浪条件による粒径別漂砂量の違いについて述べる。図-4 (Case 1) と図-7 (Case 2) とを比較すると、0~1 hr. の間には大きな違いは見られないが、1 hr. 以降の漂砂量分布にはかなりの相違が見られる。特に Bore 領域における C Group の漂砂量に注目すると、図-5 (Case 1) では岸向きなのに対し、図-6 (Case 2) では沖向きとなっ

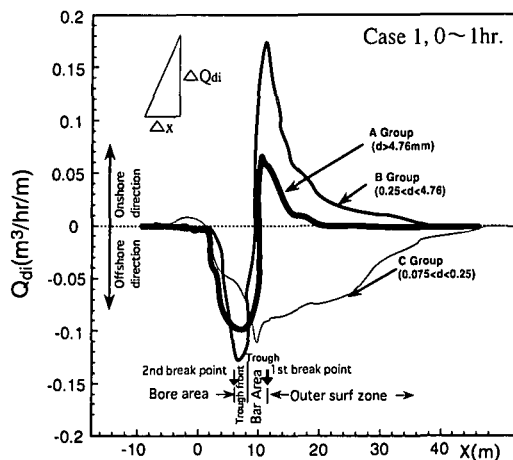


図-4 時間平均の粒径別漂砂量分布 (case 1, 0~1 hr.)

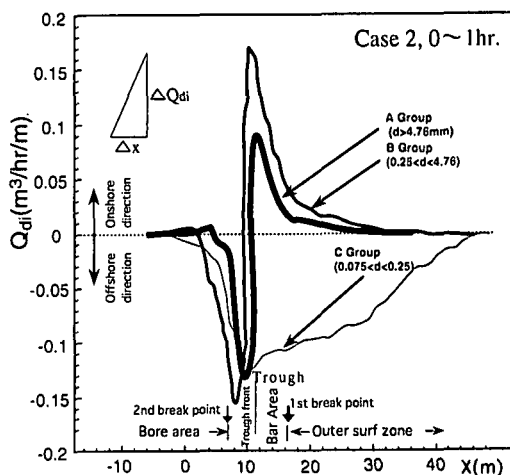


図-7 時間平均の粒径別漂砂量分布 (case 2, 0~1 hr.)

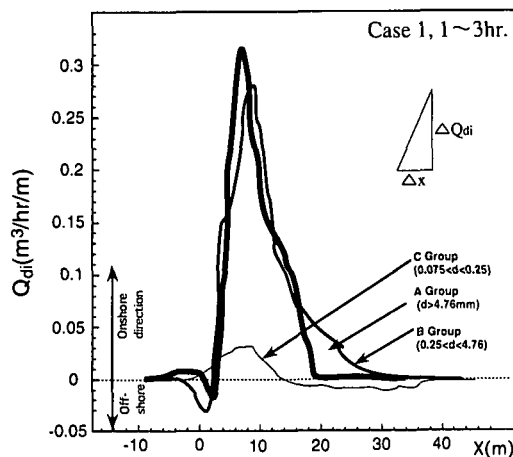


図-5 時間平均の粒径別漂砂量分布 (case 1, 1~3 hr.)

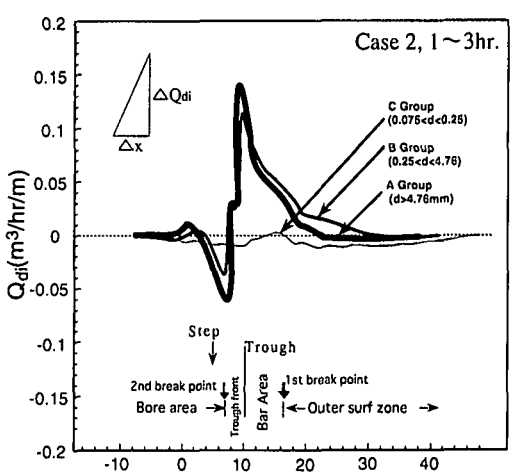


図-8 時間平均の粒径別漂砂量分布 (case 2, 1~3 hr.)

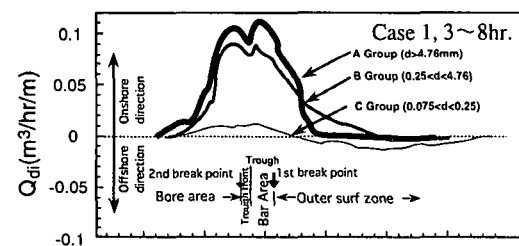


図-6 時間平均の粒径別漂砂量分布 (case 1, 3~8 hr.)

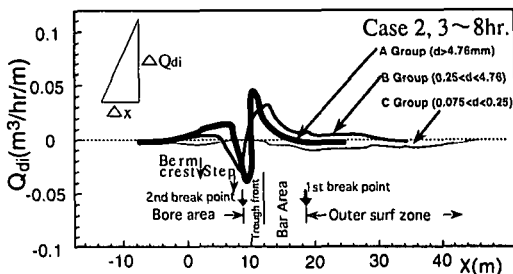


図-9 時間平均の粒径別漂砂量分布 (case 2, 3~8 hr.)

ている。各粒径集団ごとの中央粒径は図-1に示すように、 $d_{50A}=8.0$ mm, $d_{50B}=0.9$ mm, $d_{50C}=0.15$ mmであった。これらから各GroupごとのSunamura and Hori-kawa (1974) のC値を計算すると、Case 1では、 $C_A=1.8$, $C_B=7.7$, $C_C=25.5$ となり、Case 2では、 $C_A=2.7$, $C_B=11.5$, $C_C=38.3$ となる。このC値のみから判断する

とC Groupの砂はCase 1, Case 2どちらにおいても侵食性の地形変化を示すことになり、碎波帯内での漂砂の卓越方向は沖向きとなることが予想される。実験において、Case 1で岸向きの漂砂が観察されたのは、混合砂ゆえの現象と考えられる。この原因としては、碎波により

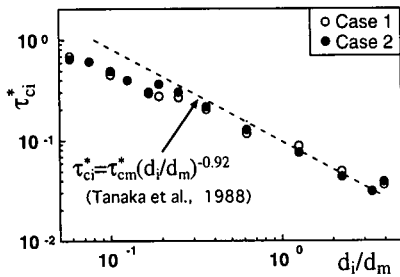


図-10 粒径別移動限界シーلز数

浮遊した底質の卓越輸送方向が、粒子間衝突の影響などにより大粒径底質の卓越方向である岸向きとなったことや、沈降した細粒分が地盤表面を覆う粗粒間隙からアーマールコート下部へ沈降し、再浮遊されにくい状態となったことなどが考えられる。

4.3 粒径別移動限界

図-3 から沖合いの粒径別移動限界位置、また、その位置に対応する水深を地形測量から調べ、粒径別移動限界シーلز数 (τ_{ci}^*) を次の式で計算した。

$$\tau_{ci}^* = u^*{}^2 / (sgd_{ci})$$

ここで、 u^* は Jönsson (1966) の摩擦係数を用いて得られる波による摩擦速度の最大値である。ただし、摩擦速度の算定に際しては、平均粒径 d_m をもって相当粗度とし、底面水粒子速度の算定には微小振幅波理論を用いた。 s は砂の水中比重、 g は重力加速度、 d_{ci} はある粒径範囲の砂の平均粒径、図-10 中に示した関係式の τ_{cm}^* は平均粒径に対する移動限界シーلز数である。移動限界シーلز数は粒径が大きいくほど、小さくなり、その範囲は 0.03~0.7 であった(図-9)。実験結果から計算して得られた値(○、●印)の分布は、破線で示す田中ほか(1988)の混合掃流砂の捕砂実験による結果とほぼ一致している。

5. 結 論

大型 2 次元水路実験を行い、Trough, Berm, Step が形成される位置では粗い粒径の砂が表面に集積する傾向

があり、碎波帯外では、細粒分の砂が表面を覆うという分級現象を確認した。地形測量と底質の粒度分析から、粒径別漂砂量を推定し、碎波帯を含む粒径別漂砂量の時空間変動特性を検討した。本実験の条件では、粒径別漂砂量は、砂の移動形式、漂砂の向きと漂砂量の変化傾向の観点からみると、A, B, C という三つの Group に分けられることがわかった。実験によれば A, B Group はアーマールコートを形成・発達させ、海浜の安定化に役立つが、C Group は沖側に流出してしまうことが分かった。この結果、海岸の外から養浜材料を搬入する場合には、養浜材料の選定にあたっては、A, B Group に相当するような粗い粒径の含有率が高い混合砂を選択するのが望ましいと言える。今後は養浜材の選定条件については本研究の成果を踏まえ、一般化に向けた検討を行う必要がある。

参 考 文 献

- 加藤一正・藤田 誠・柳島慎一・村上裕幸・末次広児 (1988): パー・トラフ地形変化と底質特性の変動, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 332-336.
- 田中 仁・片山祐貴・加賀正之・須賀寛三 (1988): 混合砂海浜における漂砂量則, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 307-311.
- 山本晃一(1977): 波によるふり分け作用, 第 24 回海岸工学講演会論文集, pp. 142-145.
- 張 達平・田中茂信・山本幸次 (1994): 大型 2 次元水路による海浜砂の分級機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 361-365.
- 張 達平・山本幸次・佐藤慎司・田中茂信 (1995): 混合砂の分級過程に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 351-355.
- Bascom, N. W (1952): The relationship between sand size and beach face slope, Trans. AGU, Vol. 32, No. 6. pp. 57-68.
- Jönsson, I. G. (1966): Wave boundary layer and friction factors, Proc. 10th Coastal Eng. Conf., pp. 127-148.
- Sunamura, T. and K. Horikawa (1974): Two-dimensional beach transformation due to waves, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 920-938.
- Zhang, D. P., T. Sunamura, T. Shigenobu, and K. Yamamoto (1994): Longshore bars produced by breaker-induced vortex action, Proc. of Coastal Dynamics '94, Spain, ASCE, pp. 29-43.