

混合砂の分級過程に関する実験的研究

張 達平*・山本幸次**・佐藤慎司***・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、その際に海浜を構成する土砂（混合砂）の分級が生じるとともに、最終砕波点において中央粒径が最大値を持つ岸沖方向の粒度分布特性を示すと言われている（例えば、Bascom, 1952）。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困難なこと、実験室においては現地スケールに近い模型実験を行わないと、実験砂の粒径が小さくなり過ぎて分級機構を検討できないことによる（山本, 1977）。本研究では、侵食性と堆積性の波浪が交互に作用する条件での2次元海浜変形に伴う混合砂の岸沖方向の分級機構を明らかにすることを目的として、大型2次元水路を用いて実験的検討を行った。

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、片面ガラス張り）内に1/20の海底勾配の模型海浜を中央粒径 $d_{50} \approx 2$ mm、ふるい分け係数 $S_0 \approx 3.08$ 、偏わい度 $S_k = 0.44$ の混合砂で作成し、表-1に示す様に侵食性の波と堆積性の波を交互に作用させて実験を行った。ここで、ふるい分け係数は $S_0 = (d_{75}/d_{25})^{1/2}$ で、偏わい度は $S_k = (d_{75} \cdot d_{25}) / (d_{50})^2$ で表わされる。波高、底面付近の流速、濃度の測定、およびポリピンを用いた採水を行う点を砕波点、砕波帯、砕波点の沖側の5ヶ所（図-3a, 4aを参照）とし、さらに、砂の移動と砕波による乱れに関するビデオ撮影を行った。ポリピンによる採水法については、底面から20, 50, 80 cmの高さで、それぞれ1 lの量の水を採水した。採水に要した時間は測点によって異なり、数秒から数十秒程度であった。また、底質採取と粒度分析により土砂の粒度分布特性を検討した。底質の採取位置については、各ケースで地形変化の生じる範囲の22ヶ所とし（図-1を参照）、直径5 cm、長さ15 cmの円筒容器

を用いて行った。さらに、ケースごとに地形表面から溝を掘って地層トレンチから砂の移動痕跡を調べた。

3. 実験結果

(1) 地形変化の特性

図-1に本実験の地形経時変化を示す。造波開始から4時間後のCase 1-1（入射波高 $H_0 = 70$ cm、砕波波高 $H_b = 86$ cm、周期 $T = 3.0$ s、侵食性の波）では岸側が侵食を受けて、水路の岸側の壁から $x = 23$, 27 mでは砂が堆積し2段barが形成されている。ここでは、barの頂部水深がその岸側のtroughの水深より小さければbarと定義する。時間とともに2段barは発達しながら沖へ約2 m移動した（Case 1-2）。Case 2では設定波浪はCase 1より周期を $T = 4$ sと大きくし、入射波高を $H_0 = 60$ cmと小さくした（堆積性の波）。岸側の侵食域が堆積域となり、barの位置は岸（ $x = 27$ m）へ移動し、汀線付近に小規模なbermが形成された（Case 2-2）。Case 1と同じ侵食性の波を用いたCase 3では2段barが発達しながら、barの位置は $x = 30$ mに移動した。汀線付近の地形とbarの位置はあまり変化しなかったが、砕波帯 $x = 12 \sim 22$ mの範囲はCase 1より侵食の深さが大きくなった。Case 4ではCase 2と同じ堆積性の波で、より大規模なbermとstepが形成されて、汀線はさらに $x = 13$ mまで前進した。

Case 1～4の地形変化から、侵食性の波では岸側が侵食され、その沖側の砕波点付近で堆積しbarとして発達することがわかる。堆積性の波ではbarが岸へ移動し、berm, stepが形成される。結局、侵食・堆積を繰り返し

表-1 実験条件と地形分類

CASE	H_0 (cm)	H_b (cm)	T (s)	H_0/L_0	Initial Morphology	C^*	Resultant Morphology	Exp. time (hr.)
1 1-1	70	86	3.0	0.050	1/20 slope	8.4	bar	0～4
1-2	70	87	3.0	0.050	1-1	8.4	bar	4～10
2 2-1	60	76	4.0	0.024	1-2	5.9	bar+berm	10～20
2-2	60	76	4.0	0.024	2-1	5.9	bar+berm	20～45
3 3-1	70	87	3.0	0.050	2-2	8.4	bar+berm	45～55
3-2	70	87	3.0	0.050	3-1	8.4	bar+berm	55～65
4 4	60	77	4.0	0.024	3-2	5.9	bar+berm+step	65～110

* (Calculated according to Sunamura and Horikawa (1974) as $i = 1/20$, $d_{50} = 2$ 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 建設省土木研究所海岸研究室研究員
 *** 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 工修 建設省土木研究所海岸研究室長

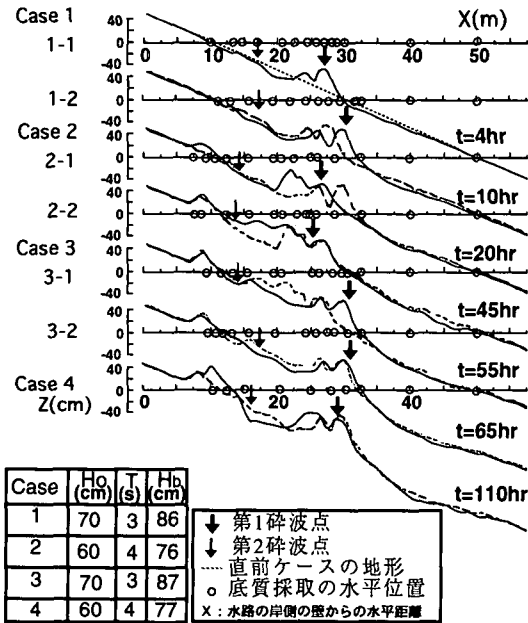


図-1 地形変化

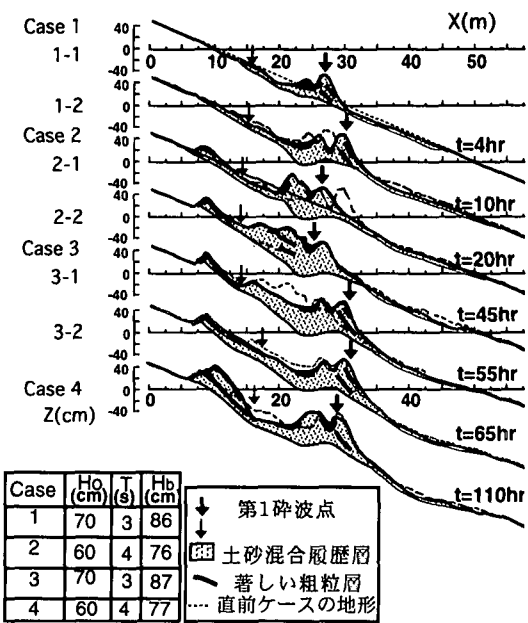


図-2 土砂混合履歴層と粗粒層の分布

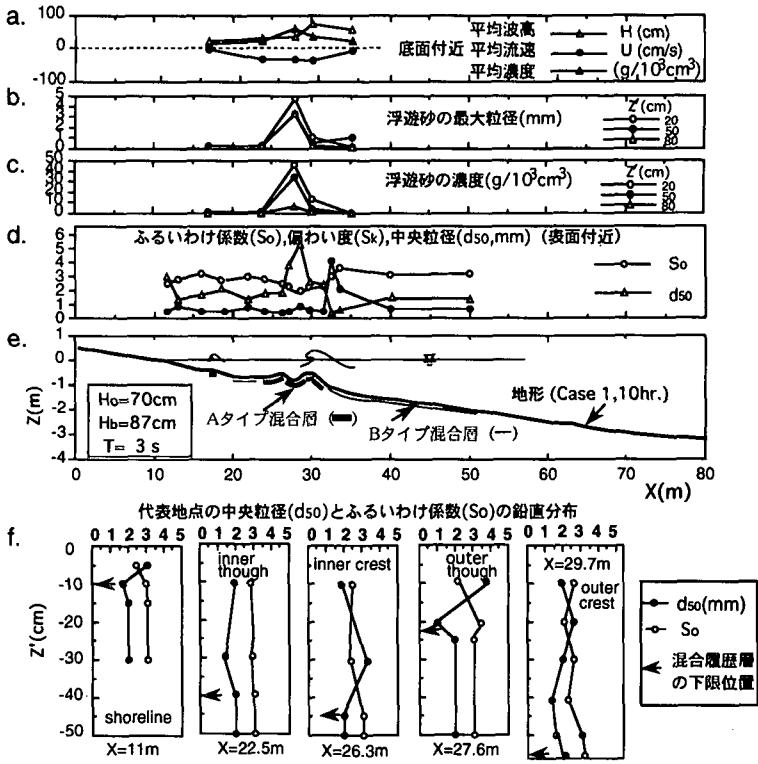


図-3 波、流れ、濁度と浮遊砂・底質の粒径特性と侵食性地形との関係 (Case 1)

ながら、地形変化の著しい範囲は $x=14\sim30$ m までの碎波帯に集中し、碎波帯の沖側の bar の位置があまり変化しなくなり、汀線付近の侵食がされにくくなる。水路の壁面から観察した結果、地形変化は碎波帯での渦と発達と関連していると見られた (Zhang ら, 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、inner trough に大規模な底面到達斜降渦を形成し、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。第 1、第 2 碎波点の沖側では、底面まで到達する乱れはなく、地形変化も少ない。

図-2 に著しい粗粒層と土砂混合履歴層 (一度でも混合を経験した層) を示した。trough, berm, step が形成される位置では粗い粒径の砂が表面を覆う傾向がある。ほかの均一な粒径の実験結果 (例えば, Kraus・Larson, 1988) と比べると、このため、例えば、汀線付近は粗い粒径の底質で覆われ、Case 3 のような侵食性の波に対しても侵食されにくくなると考えられる。bar は波の条件により移動するので bar の位置の底質については明瞭な

傾向が見られない。土砂混合履歴層の厚い範囲は碎波帯に集中しており、時間とともに厚くなり、その最大厚さは 61 cm で、碎波波高の 7~8 割程度である。土砂混合履歴層の沖合いの限界位置は沖合い地形変化の限界位置とはほぼ一致している。

(2) 波、流れ、濃度と浮遊砂・底質の粒径特性

図-3 に侵食性の波による Case 1 の波、底面での平均流速、濃度と浮遊砂・底質の粒径特性を示す。 $x=28$ m の trough の位置では、採水器に捕捉された浮遊砂の最大粒径 (図-3b) と浮遊砂の濃度 (図-3c) が最大となり、表面付近の底質のふるい分けが最も良く中央粒径も最も大きい (図-3d)。図中 z' は底面から鉛直上向きにとった座標である。第 1、第 2 碎波点の沖側ではいずれも粒径が小さい。図-3f から代表地点の鉛直分布特性をみると、中央粒径 d_{50} とふるい分け係数 S_0 が初期値 ($d_{50}=2$ mm, $S_0=3.08$) に戻り始める深さは矢印に示している土砂混合履歴層の下限と対応している。土砂混合履歴層の中では異なる波の履歴作用で d_{50} 及び S_0 が鉛直方向に変化している。全体的な変化傾向から見ると、表面に近いほど汀線付近と trough では粒径が大きくなる。また、

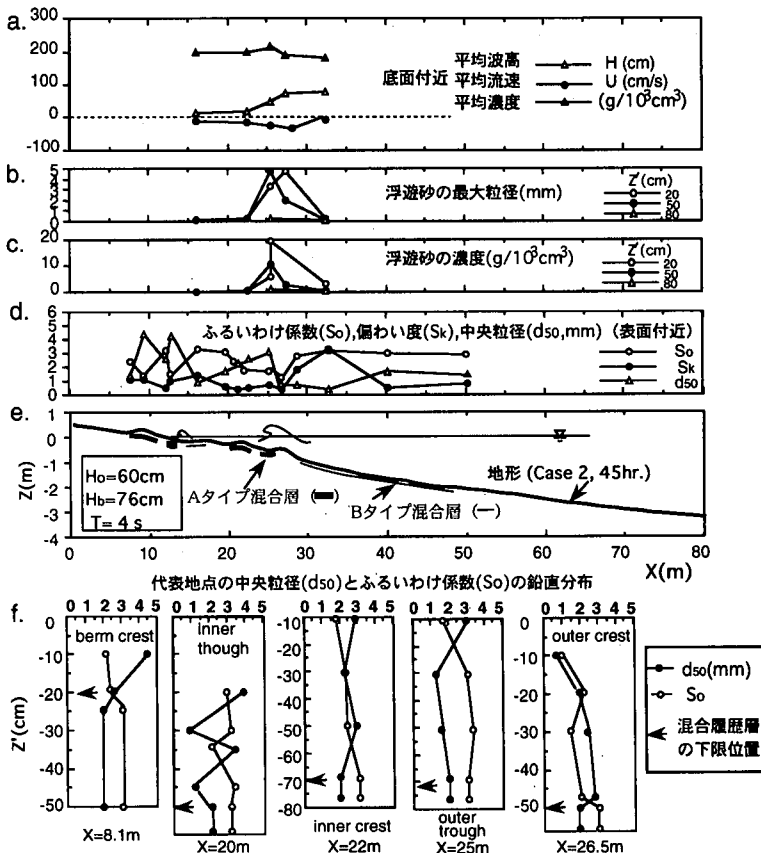


図-4 波、流れ、濁度と浮遊砂・底質の粒径特性と堆積性地形との関係 (Case 2)

表面に近いほどふるい分けが良くなる。

図-4に堆積性の波による Case 2 の波、底面での平均流速、濃度と浮遊砂・底質の粒径特性を示す。 $x=25$ m 付近の trough の位置では、沖向きの流速が最大であり (図-4a)、採水器に捕捉された浮遊砂の最大粒径 (図-4b) と浮遊砂の濃度 (図-4c) が最大となり、表面付近の底質のふるい分けも良く中央粒径も大きい (図-4d)。中央粒径が最も大きくてふるい分けも良い場所は他に berm, step の位置である。Case 1 と同じように第 1, 第 2 砕波点の沖側では粒径が小さい。また、土砂混合履歴層の中の代表地点の鉛直方向の粒径特性も Case 1 とほぼ同様となっている。

(3) 底質の移動機構と分級の進行

水路側面から土砂移動特性を観察した結果、土砂の混合過程には、表層に粗粒分が集積するタイプ(Aタイプ)と表層に細粒分が集積するタイプ(Bタイプ)の2種類が存在することがわかった (図-3e, 図-4e)。ここでは、ある波の作用によりある場所での底質が移動・混合する

層を混合層と定義する。観察によれば、Aタイプ混合層では攪乱された混合砂のうち細粒の底質が粗粒の底質の間に埋めるとともに、海底表面では渦や流れにより細粒の底質が運びさらされ、結果として表層に粗粒の底質が残されることがわかった (図-5a)。Bタイプ混合層では波の作用により攪乱された混合砂のうち、粗粒の底質が砕波点付近に一方向的に移動し、拡散状態となっている比較的細粒の底質が堆積して形成されることが観察よりわかった (図-5a)。

Aタイプ混合層は、砕波による底面到達渦 (斜降渦, 水平渦, backwash 渦) により形成された trough と step, また, swash zone にある強い流れにより形成された berm の発達する位置にみられ、ここでは小粒径の砂は運びさらされ大粒径の砂が多く残され、分級も良くなると考えられる。bar crest は Aタイプ混合層であるが、その両側の地形が低いので, trough のような大きい粒径の砂は堆積しにくいと見られた。Bタイプ混合層は渦が底面に到達してない第 1, 第 2 砕波点の沖側にみられ (図-5b), ここでは強い乱れがなく、また、ここに運ばれるものは細粒分が多い。したがって、時間がたつと、Aタイプの所では大粒径の割合が大きくなり、Bタイプの所では小粒径の割合が大きくなることが考えられる。波の条件の変化により砕波による渦が発達する位置と流速場が変化するので、これらの混合層は破壊されたり埋められたりするため、図-2に示したような著しい粗粒層が形成されることがある。

(4) 底質の粒度特性の変化

中央粒径とふるい分け係数の経時変化特性を調べた (図-6a, b)。砕波帯内の底質粒径とふるい分け係数は波の条件と地形変化により時間的に変動する。inner trough と outer trough と berm と step の位置では、粒度特性の変動が大きく、粒径も大きい。第 1 砕波点の沖側 (たとえば, $x=40, 50$ m) と第 2 砕波点の沖側 ($x=12\sim 18$ m) は粒度特性の変動が小さく、粒径も小さい。また、ふるい分けについては outer trough のふるい分け係数は 2 より小さくかなり良く淘汰されている。berm と step の所でもふるい分けは良い。第 1 砕波点の沖側の $x=40, 50$ m におけるふるい分け係数は大きな変化がない。

次に、中央粒径の経時変化と混合層の厚さの経時変化との関係を検討する。図-6c により Aタイプ混合層は波の条件と場所により厚さが変化する (2~16 cm) が、Bタイプ混合層はあまり変化せず薄い層である (0.5~1.5 cm)。Aタイプ混合層は侵食性の波の条件では trough の所では最も厚く、堆積性の波の条件では step の所でも最も厚くなる。混合層の厚さの変化傾向は乱れの強度と流体場の特性と関係があると考えられる。また、中央粒径と混合層の厚さを比較すると、両者の経時

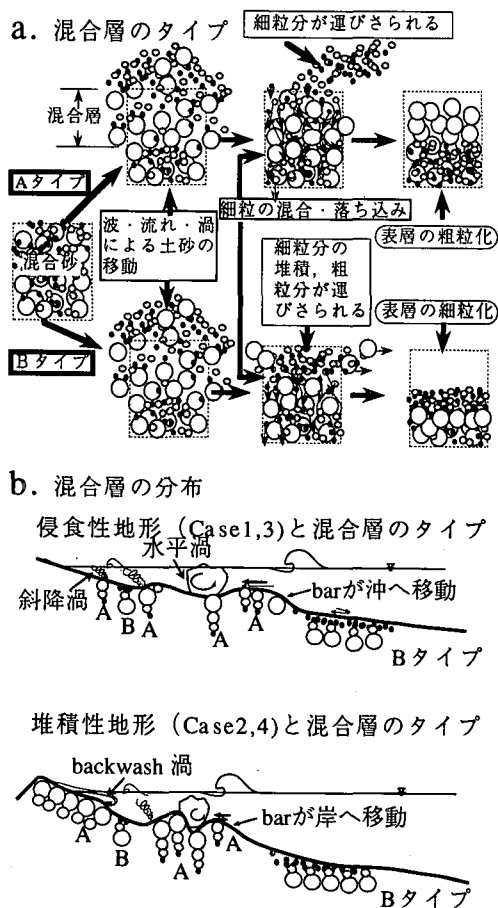


図-5 混合層のタイプと位置の模式図

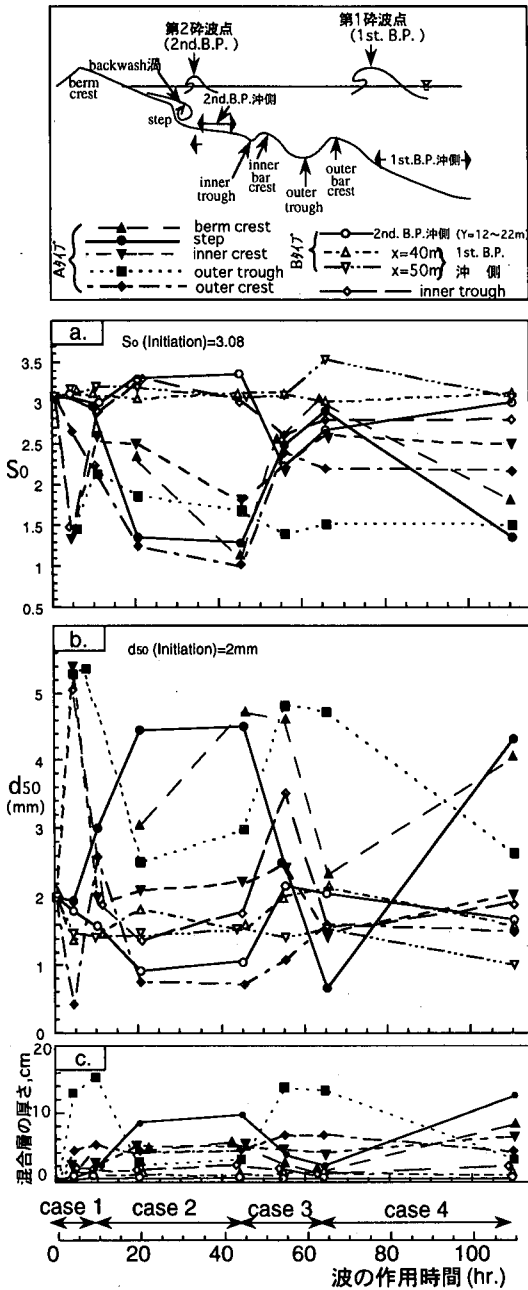


図-6 ふり分け係数, 中央粒径と混合層の厚さとの経時変化

変化は良好に対応する関係がある。例えば, A タイプ混合層の厚さの増加傾向 (図-6c) と対応して, Case 1, 3 の outer trough, outer bar crest では, また, Case 2, 4 の step, berm では中央粒径 d_{50} が時間とともに大きく

なる傾向が見られる (図-6b)。

一方, 石田・喜岡 (1984) によると石川海岸では多段砂州の trough の部分だけが極端に大きな粒径 ($d_{50}=3.0\sim 3.5$ mm) で, その他はほぼ一様ですべて細砂 ($d_{50}=0.2$ mm) である。また, 加藤ら (1988) は岸沖方向ふり分けは, 時化時に生じ, bar 領域では $d_{50}=0.18$ mm, trough 領域では $d_{50}=0.5$ mm, step 領域では $d_{50}=0.3$ mm と報告している。本実験によると, 全体的に trough と berm と step の位置では, 粒径が大きい。この結果はこれらの現地調査結果及び張ら (1994) の実験結果と一致している。

4. 結 論

2 次元海浜変形に伴う混合砂の岸沖方向の分級機構について大型 2 次元水路を用いて実験を行った。土砂混合履歴層, つまり, 分級が起こる範囲は砕波帯に集中しており, その最大厚さは砕波波高の 7~8 割程度であることが分かった。また, 地形変化の過程で形成された trough, step, berm などの位置では砕波による強い乱れの影響で表面が粗粒化する。これは一つの重要な原因として, bar の位置が固定化されやすく, 汀線付近の侵食がされにくくなる現象が観察された。さらに, 第 1, 第 2 砕波点の沖側では, 表面に細粒分が集中するという分級機構が明らかになった。今後は粒径別漂砂量の評価法を検討していく必要がある。

参 考 文 献

- 石田 昭・喜岡 渉 (1984): 石川海岸における多段砂州の現地観測, 土木学会第 39 回年次学術講演会講演概要集, pp. 191-192.
- 加藤一正・藤田誠・柳島慎一・村上裕幸・末次広児 (1988): bar・trough 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.
- 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.
- 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.
- Bascom, N. W. (1952): The relationship between sand size and beach face slope, Trans. AGU, Vol. 32, No. 6. pp. 57-68.
- Kraus, N. C. and M. Larson (1988): Beach profile change measured in the tank for large waves 1956-1957 and 1962, Technical Report CERC-88-6, 39 p.
- 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.