

混合砂礫海岸における底質の分級と断面変形

吉田 英 治*・荒木 進 歩**・出口 一 郎***・池田 智 大****

広い粒度分布を持つ海岸では、粒径ごとに異なる移動形態をとることや、異粒径粒子間の相互作用のために漂砂移動、底質の篩い分けおよび水深変化に不明点が多い。そこで、時々刻々変化する来襲波が作用する現地海岸において、構成粒子の篩い分けや水深変化を検討するために実測を行った。また、水理実験による細粗 2 粒径混合砂の篩い分けの検討も行った。その結果、侵食過程にある現地海岸において、細砂の離岸方向移動による表層の粗粒化、および離岸方向へ移動中の細砂の表層への堆積が見られた。したがって、侵食域では表層が削り取られて界面が更新されるだけでなく、同時に細砂の離岸方向移動を伴うことを確認した。

1. はじめに

現地海岸における粒度は必ずしも均一ではなく、広い粒度分布を有する場合が多い。一般に、海浜変形を予測する際には、粒径を中央粒径 d_{50} などの一つの値で代表して摩擦係数、せん断力等を決定し、漂砂量を求めることが行われる。粒度分布が狭い海岸では、すべての粒子が同じ移動形態(浮遊 or 掃流 or シートフロー)をとる場合が多く、妥当な結果が得られると考えられる。しかし、粒度分布が広い海岸では、細砂は浮遊状態、粗砂は掃流状態など異なるモードの移動が生じ、粒径の違いにより移動方向が異なることがある。このような場合には、粒径別漂砂量がよく用いられ、またそれによる粒径別の水深変化計算を繰り返し行うことにより、水深変化を予測することも行われている(例えば、佐藤ら, 2000; 田中ら, 2001; Dibajnia ら, 2001)。しかし、摩擦係数や式中に含まれるパラメータなど、まだまだ不明点が多い。

そこで本研究では、広い粒度分布を持つ現地海岸において、時々刻々変化する来襲波を受け、構成粒子がどのように篩い分けられ、水深変化が生じているかを検討するため、現地実測を行った。また、混合率の異なる細粗 2 粒径砂を用いた実験を行い、粒径ごとの漂砂移動および粒子の篩い分けに関する検討を行った。

2. 混合砂礫海岸での現地実測

(1) 現地実測の概要

現地実測は、図-1 に示す淡路島南東部の成ヶ島(拡大図中の丸印付近、東側海岸)において、2001 年 9 月 6 日、11 月 1 日、12 月 22 日および 2002 年 3 月 8 日の計 4 回にわたり実施した。調査項目は深浅測量と底質採取であるが、2001 年 12 月 22 日および 2002 年 3 月 8 日は来襲波浪の測定もあわせて行った。深浅測量は岸沖方向に設定した 3 測線上において 2 m 間隔で行った。底質採取は各

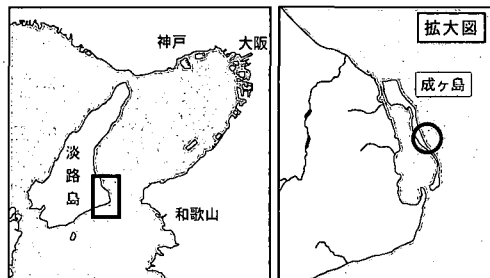


図-1 現地実測実施場所(成ヶ島)

測線上に設定した 2~5 m 間隔の地点において、表層から深さ 40~60 cm までを 5~20 cm 間隔で行った。採取した底質は乾燥させた後、粒度組成を調べた。また、来襲波浪の測定は測線の延長上、水深 1.2 m の地点に圧力式波高計を設置して行った。

なお、成ヶ島の海岸の底質は、主に粒径 $d_{50}=25.4$ mm の大礫、 $d_{50}=9.52$ mm の礫、および $d_{50}=0.42$ mm の細砂の 3 種類で構成されている。これは、波の影響をほとんど受けていないと考えられる汀線より岸側約 40 m の地点での底質採取の結果からも確かめられている。

(2) 来襲波の特性

圧力式波高計により測定した波浪は実測実施日のものであり、底質の移動に寄与した波浪であるとは言えない。そこで、実測実施日に測定した波浪データを、関西国際空港(株)MT 局(以後、関空 MT 局と略)で毎正時に測定されている気象海象記録と比較し、相関を調べた。図-2 に、2001 年 12 月 22 日午前 11 時から 23 日午前 7 時にかけて成ヶ島で測定された有義波高と、同時期に関空 MT 局で測定された有義波高 H_s の比較を示す。また、表-1 には同時期に関空 MT 局で測定された風向データを示す。北から西寄りの風が吹いた 12 月 22 日 11 時から 18 時の間は両者の有義波高に差が見られるが、風向が東寄りに変化した 22 日 19 時以降はほぼ一致しており、相関が高い。したがって、風向によっては相関が低くなるが海象条件はほぼ同じであると考え、圧力式波高計を

* 修(工) 三菱商事 環境・開発プロジェクト本部
** 正会員 博(工) 大阪大学助手 大学院工学研究科
*** 正会員 工 博 大阪大学教授 大学院工学研究科
**** 大阪大学大学院 工学研究科

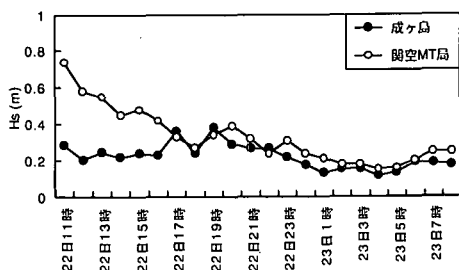


図-2 成ヶ島および関空 MT 局で測定された波高の比較

表-1 関空 MT 局で測定された風向

22日11時	22日12時	22日13時	22日14時	22日15時	22日16時	22日17時
WSW	NW	NW	W	W	NNW	NNW
22日18時	22日19時	22日20時	22日21時	22日22時	22日23時	23日 0時
NNW	NNE	NE	ESE	ENE	E	E
23日 1時	23日 2時	23日 3時	23日 4時	23日 5時	23日 6時	23日 7時
E	SE	E	ENE	E	NNW	WNW

設置していない間の来襲波浪は関空 MT 局の波浪データを用いて検討した。

(3) 来襲波浪と海浜断面の関係

図-3 の下欄に、2001 年 9 月 6 日から 2002 年 3 月 8 日にかけての測線 2 および 3 の断面形状の変化を示す。各測線とも、2001 年 9 月 6 日から 12 月 22 日にかけて岸沖方向測点 10 m より沖側において侵食され、大きいところで 60 cm 程度の水深変化が生じている。また、9 月 6 日の岸沖方向 20 m 付近にあったバームは、11 月 1 日以降はほぼ消失している。しかし、12 月 22 日から 2002 年 3 月 8 日の間では水深変化はほとんど見られず、平衡状態にあったと考えられる。なお、同図上欄の表層の底質粒径分布については後述する。

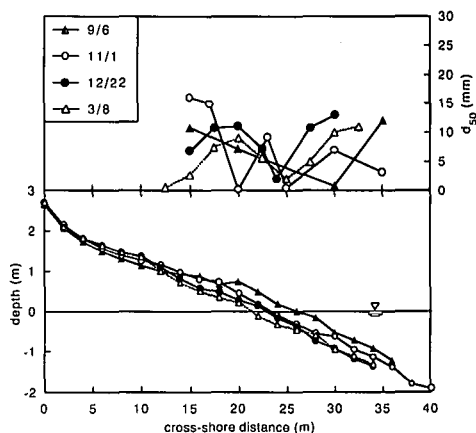
図-4 に、 $d_{50}=9.52$ mm の礫、および $d_{50}=0.42$ mm の細砂に対して次式で表される Sunamura・Horikawa (1974) の C_s パラメータの時系列を示す。

$$C_s = \frac{H_0}{L_0} (\tan \beta)^{0.27} \left(\frac{d}{L_0} \right)^{-0.67} \dots \dots \dots (1)$$

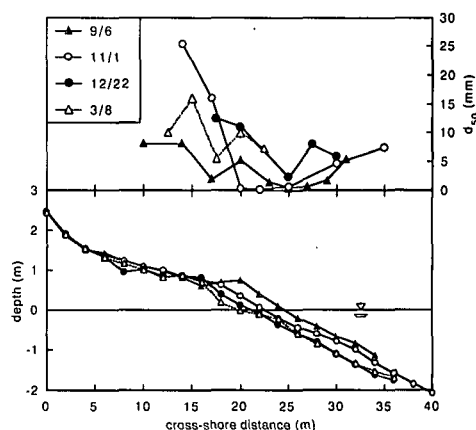
ここに、 $\tan \beta$ は海底勾配であり、9 月 6 日の断面形状から平均の海底勾配を用いた。また、波高および周期は、それぞれ関空 MT 局で測定された有義波高および有義周期を用いて算出した。図中には、堆積の目安である $C_s=6$ を点線で、また侵食の目安である $C_s=18$ を一点鎖線で示す。 $d_{50}=9.52$ mm の礫に対する C_s 値は期間中ほぼ 6 以下であり、向岸方向に移動したか、あるいは移動が生じなかったと考えられる。一方、 $d_{50}=0.42$ mm の細砂に対する C_s 値は 18 を大幅に超えた時期が何度もあり、これらの時期に海浜断面が侵食を受けたと考えられる。

(4) 構成堆積層の変化とその機構

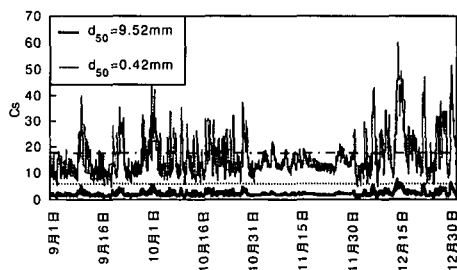
図-3 の上欄に、測線 2 および 3 の表層で採取された



(a) 測線 2



(b) 測線 3

図-3 断面形状および表層の中央粒径 d_{50} の岸沖方向分布図-4 侵食過程における C_s 値の経時変化

底質の中央粒径 d_{50} の分布を示す。2001 年 9 月 6 日から 12 月 22 日にかけて侵食傾向にあることは前述の通りであるが、この過程において、表層の底質に関して以下のことが読み取れる。

- ・侵食過程初期 (11 月 1 日) には、汀線付近 (岸沖方向 20 m 付近) 表層が極端に細粒化した
- ・侵食作用が弱まり、平衡状態になった時点 (12 月 22

日)以降は汀線付近の表層が粗粒化した

前述のように、侵食過程の高波浪時においては $d_{50}=9.52\text{ mm}$ の礫および $d_{50}=0.42\text{ mm}$ の細砂に対する C_s 値がそれぞれ堆積型および侵食型に属するため、砂礫の篩い分けが生じたと考えられる。そこで、各底質採取地点における鉛直方向の粒度分布から、砂礫の分級機構を検討する。

図-5に、測線2の20 m地点での鉛直方向の粒度構成を示す。この地点では9月6日から11月1日にかけて約20 cm、11月1日から12月22日にかけても約20 cmの水深変化が生じているので、対応する水深変化の分だけ鉛直方向にずらして図示している。

11月1日の表層の底質は前述のように細砂が主要な構成粒子となっており、9月6日の深さ20 cmでの粒度構成とは大きく異なっている。また、11月1日の深さ10 cmでの底質は、9月6日の深さ20 cmまたは40 cmの粒度構成と比較すると粗粒化していることが分かる。12月22日の表層には細砂は見られず、粗粒化している。この粒度分構成は11月1日の深さ10 cmでの粒度構成か

ら細砂分を除いたものと考えることができる。

したがって、この地点では以下のような漂砂移動により、篩い分けが生じたと考えられる。この期間は侵食過程であるが、図-4に示したように離岸方向に移動するのは細砂のみで、 $d_{50}=9.52\text{ mm}$ 以上の礫は向岸方向への移動を生じる、あるいは移動しない。すなわち、細砂の離岸方向移動により侵食が生じたと考えることができる。このことから、侵食域では単に表層が削り取られて低層が露呈するだけでなく、細砂が離岸方向に移動することにより表層が相対的に粗粒化すると考えられる。一方、11月1日の時点では細粒化しているが、この時期は侵食過程において細砂が離岸方向に移動する過渡期であり、離岸方向に移動過程にある細砂が、表層付近の礫の上に覆い被さった状態であると考えられる。

図-6に、測線3の20 m地点での鉛直方向の粒度構成を示す。この地点では9月6日から11月1日にかけて約30 cm、11月1日から12月22日にかけて約20 cmの水深変化が生じている。図-5に示した測線2の20 m地点と同様に、侵食過程の過渡期にあたると思われる11月

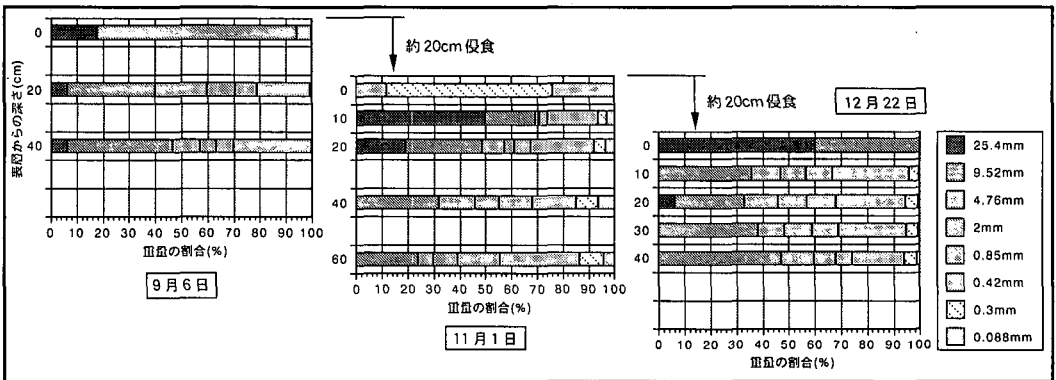


図-5 鉛直方向粒度構成の変化(測線2, 20 m地点)

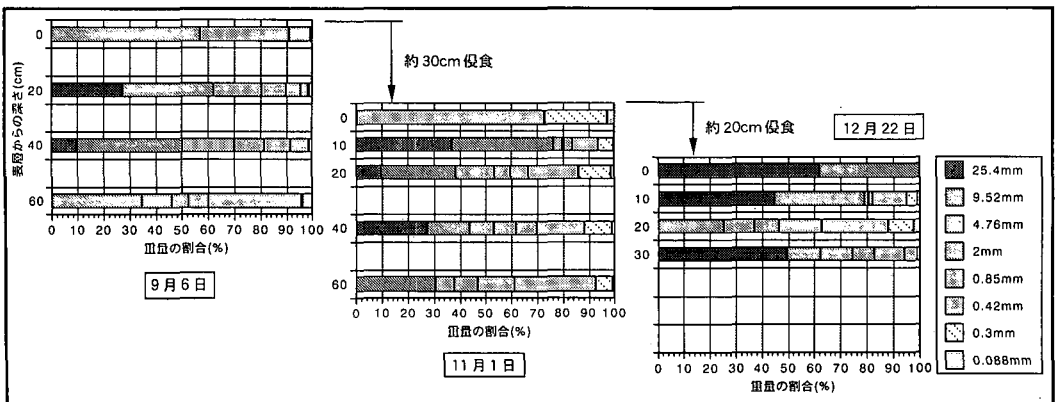
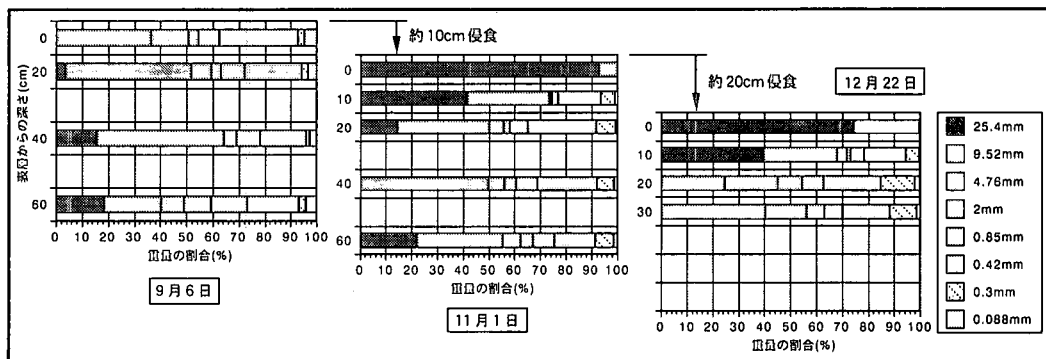


図-6 鉛直方向粒度構成の変化(測線3, 20 m地点)



図一 鉛直方向粒度構成の変化 (測線3, 17m 地点)

1日の表層は細砂が主要な構成粒子であり、9月6日の深さ20cmでの粒度構成とは大きく異なっている。しかし、侵食作用が弱まりつつある12月22日には、細砂は離岸方向に移動したと考えられ、表層が粗粒化している。したがって、この地点においても侵食域では界面が更新されるだけでなく、細砂の離岸方向移動を伴うことが確認できる。

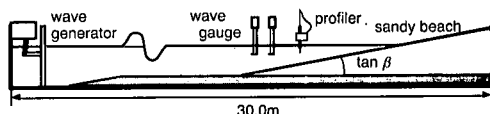
図一に、測線3の17m地点での鉛直方向の粒度構成を示す。この地点では9月6日から11月1日にかけて約10cm、11月1日から12月22日にかけて約20cmの水深変化が生じている。図一および図六に示した地点とは異なり、11月1日の表層に細砂は存在せず、 $d_{50}=25.4$ mmの礫が主要な構成粒子となり粗粒化している。この $d_{50}=25.4$ mmの礫の起源は明らかではないが、9月6日の表層および深さ20cmに存在した細砂が消失し、11月1日の表層に細砂が存在しないこと、また断面変形も15m地点より沖側で生じていることから、細砂の離岸方向移動は17m地点付近から生じたと考えられる。

また、図示しないが、測線2および3の25mおよび30m地点の11月1日以降の表層の粒度構成に含まれる細砂はわずかであるため、11月1日に汀線付近の表層にあった細砂は底質採取地点よりも沖側にまで移動した可能性もある。

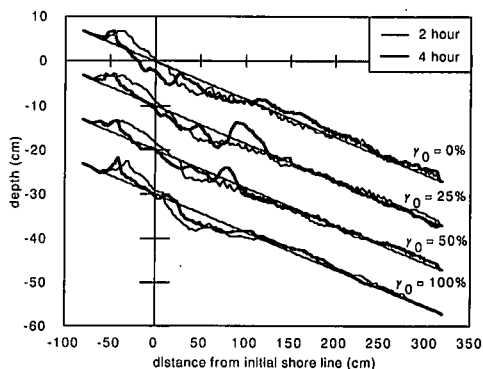
3. 波の履歴を考慮した混合砂礫海浜での底質の分級に関する水理実験

(1) 実験装置および実験方法

混合砂礫海浜の変形に関する断面2次元実験は、図一八に示す2次元造波水路内に、細砂(珪砂, 中央粒径 $d_{50}=0.09$ mm)および粗砂(篩分けした川砂, 中央粒径 $d_{50}=0.5$ mm)を粗砂混入率 $\gamma_0=0\%$ (細砂のみ)、25%, 50%, および100%(粗砂のみ)の割合で、勾配 $\tan\beta=0.09$ の固定床斜面上に厚さ7cmに敷き詰めて混合砂礫海浜を作製した。



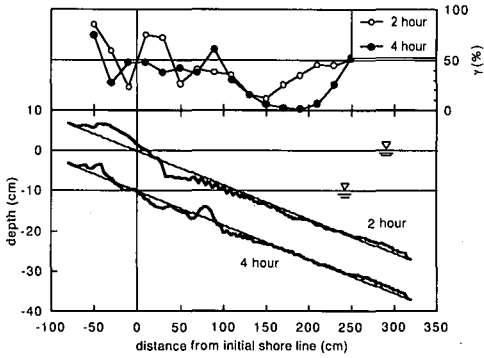
図一八 実験水槽



図一九 粗砂混入率の違いによる断面変形の差異

まず、細砂、粗砂の双方に対して侵食性となる波(入射波高 $H_0=8.0$ cm, 周期 $T=1.0$ s)を2時間作用させた後、細砂、粗砂の双方に対して堆積性となる波(入射波高 $H_0=5.0$ cm, 周期 $T=2.0$ s)を2時間作用させた。また確認のために、堆積性波浪を作用させた後に侵食性波浪を作用させた実験も行った。さらに、上記の諸元を波高および周期とする規則波に加え、上記の諸元を有義波高および有義周期とする不規則波による実験も含め、合計16ケースの検討を行った。

侵食性波浪または堆積性波浪を2時間作用させた後には、光学式砂面計により断面形状を測定するとともに、表層(5mm)の底質を岸沖方向20cm間隔で採取し、粒度分布を調べた。また、入射波高の測定には容量式波高計を用いた。



図一10 断面変形および粗砂混入率の変化 ($\gamma=50\%$)

(2) 粗砂混入率による断面形状の差違

図一9に、規則波実験による堆積性波浪作用後(2時間後)および侵食性波浪作用後(4時間後)の断面変形を粗砂混入率 γ_0 ごとに示す。堆積性波浪を2時間入射させた後は、粗砂混入率の違いにより汀線変動に若干の相違が見られるが、断面形状に大きな違いはなく典型的な堆積形状を示している。しかし、その後2時間の侵食性波浪作用後は、粗砂のみの $\gamma_0=100\%$ のケースを除きバームが消失傾向にある。また、 $\gamma_0=25\%$ および 50% のケースではbarが形成されている。ただし、変形後の汀線位置は、細砂のみの $\gamma_0=0\%$ のケースでは後退しているのに対し、粗砂が混入している $\gamma_0=25\%$ および 50% のケースでは汀線付近が大きく侵食されることはなく、汀線位置もあまり変化していない。したがって、粗砂を混入することが侵食や汀線の変動を抑制する結果となった。成ヶ島の海岸では汀線の後退が見られたが、広い粒度分布により汀線変動が抑制された結果である可能性もある。

(3) 波の履歴を考慮した底質の分級とその機構

図一10に、規則波実験により粗砂混入率 50% の初期地形に堆積性波浪を2時間入射させ、その後、堆積性波浪を2時間入射させたケースでの断面変形および粗砂混入率 γ の岸沖分布を示す。2時間の堆積性波浪入射後は粗砂の向岸方向への移動が卓越しており、後浜および汀線付近では粗粒化が生じている。その後、2時間の堆積性波浪を入射させた後では、後浜部分の粗砂は入射波の作用を受けず、移動しなかった。一方、汀線付近に存在していた粗砂および細砂は、侵食性波浪の作用により離岸方向へと移動するが、粗砂はbar付近に堆積し、細砂は浮遊して沖合まで移動したため、barより沖側で堆積した。したがって、barの沖側では細粒化が生じている。粗砂混入率が 25% のケースでも同様の結果が得られた。

4. まとめ

本研究では、混合粒径砂で構成される成ヶ島の海岸において海浜断面変形、底質の粒度分布および来襲波浪について調査し、混合粒径砂海岸での漂砂移動およびそれに伴う底質の分級について解析を行った。また、bi-modal sandを用いた水理実験を行い、波の履歴を考慮した断面変形と岸沖方向の粒度分布特性について検討した。これらの検討から得られた結果を以下にまとめる。

1) 成ヶ島の海岸は2001年9月から12月にかけて侵食されたが、その過程において汀線付近で次の2つの粒度構成が見られた。

- ・細砂の離岸方向移動により表層が粗粒化する
- ・離岸方向移動中の細砂が表層に堆積する。

ただし、後者は侵食過程の過渡的な現象であり、侵食が進行すると見られなくなる。これらのことから、侵食域では表層が削り取られて界面が更新されるだけでなく、同時に細砂の離岸方向移動を伴うことが確認できた。

2) 水理実験から、堆積性波浪により汀線付近に堆積した粗砂および細砂は、その後の侵食性波浪により離岸方向へ移動するが、粗砂はbar付近に堆積し、細砂は浮遊して沖合まで移動することが分かった。実験スケールの問題はあるものの、成ヶ島の海岸においても離岸方向に移動した細砂が沖合へ流出した可能性があり、構成堆積層の変化は、細砂の移動による影響が大きいと考えられる。

成ヶ島海岸での現地実測は現在も継続中であり、堆積過程を含め、年間での底質移動特性を調査する予定である。また、関西国際空港(株)にはMT局で測定された気象海象記録を提供して頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 佐藤慎司・田中正博・樋川直樹・渡辺 晃・磯部雅彦 (2000): 混合砂の移動機構に基づくシートフロー漂砂量算定式の提案, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 486-490.
- 田中正博・小林 博・佐藤慎司・渡辺 晃・磯部雅彦 (2001): 断面地形表層粗細混合率を考慮した海浜変化計算, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 506-510.
- Mohammad Dibajnia・橋村嘉之・喜岡 涉 (2001): 混合粒径漂砂量算定式の新たな提案, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 501-505.
- Sunamura, T. and K. Horikawa (1974): Two dimensional shore transformation due to waves, Proc 14th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp. 920-938.