

# 平衡海浜の形成過程と養浜材の粒径に関する研究

目黒嗣樹\*・山本幸次\*\*・福濱方哉\*\*\*

「砂浜」の管理において、砂浜の経時的な挙動・最終的な形状および底質の粒度組成を予測することは、侵食対策を計画する際に重要である。特に、養浜を行う場合には、混合砂を用いることが想定され、波の作用後の平衡形状をもとに養浜断面の設計を行う必要がある。本研究では、大型水路において中礫～シルトの混合砂を用いて、中央粒径 $d_{50}$ に対して侵食性の波を長時間作用させる移動床実験を実施した。この実験により、混合砂海浜の平衡形状の形成過程は、バー形成、バー発達、バーム形成、バーの岸側への移動、前浜の急勾配化の順であること、前浜形成に寄与する粒径の閾値が存在し、それ以下の粒径は沖浜形成に寄与することを明らかにした。

## 1. はじめに

1999年5月に改正「海岸法」が公布され、防護・環境・利用の調和した海岸保全を推進することが義務づけられた。そして、防護・環境・利用において、優れた性能をもつ「砂浜」も海岸保全施設として指定・管理できるようになった。海岸保全施設の技術上の基準・同解説(2004年6月)では、「養浜を行う場合、養浜材には、対象海岸に存在している砂に近い粒度組成を持つ材料を用いることが基本である」とされている。しかし、養砂材の確保は必ずしも容易ではなく、対象海岸と異なる粒度分布をもつ混合砂が用いられる場合がある。また、養浜後の静穏時の岸沖方向断面形状の照査について「対象海岸と異なる粒径の養浜材を用いる場合には平衡海浜形状を参考にして推定する」とされている。これらのことから、海岸保全施設としての「砂浜」を設計するにあたって、砂浜の経時的な挙動、平衡状態の形状、混合粒径の砂の移動特性、についての知見が必要となっている。

これまでの、混合砂の海浜変形について検討されてきてはいるが、実験については現地スケールに近いものを実施する必要がある。大型水路において混合砂を用いたものは、田中ら(2000)、張ら(1995, 1996)などと少数である。また、これらの実験において、平衡形状についてはふれられていない。本研究では、大型水路による中礫～シルトの混合砂を用いた移動床実験を実施して、混合砂海浜の平衡形状の形成過程と砂浜の形成に寄与する土砂の粒径を調べた。また、Kriebelら(1991)が示したDeanの平衡海浜断面形や野志ら(2004)が提案した粒径集団を考慮した局所勾配の算定と実験結果の比較を行った。

## 2. 実験条件

実験は、長さ135 m、幅2 m、深さ5 mの大型水路内に、図-1に示すような中礫～シルトからなる中央粒径 $d_{50} = 0.62$  mm、平均粒径 $d_m = 1.21$  mm、淘汰係数 $S_0 = 1.70$ の混合砂を用いて、 $\tan \beta = 1/20$ の一樣勾配斜面の模型海浜を製作して(図-2)、波浪を作用させた。

波浪は、波高0.6 m、周期3.5 sの規則波とし、通算78時間作用させた。なお、Sunamura・Horikawa(1974)の海浜縦断面の変化分類指標( $C_s$ 値)は、中央粒径で $C_s = 14.29$ 、平均粒径で $C_s = 9.09$ となり、侵食型の断面変化が生じる実験条件である(表-1)。

実験では、地形測量、沖波計測、碎波波計測、底質採取を数回実施したほかに、ガラス側面から1時間ごとに

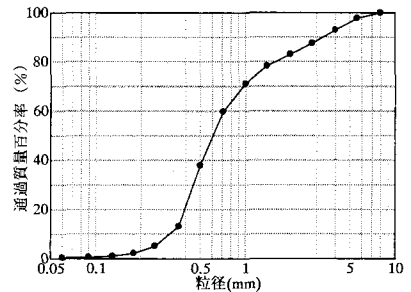


図-1 実験に用いた砂の粒度分布

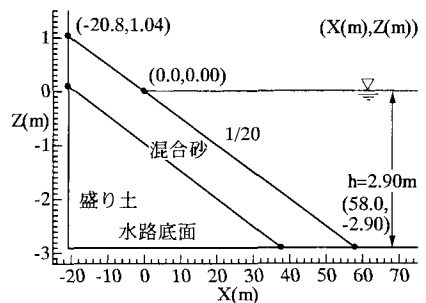


図-2 模型海浜の諸元

\* 正会員 修(L) 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究室研究官(元海岸研究室)  
 \*\* 正会員 博(T) 国土交通省国土技術政策総合研究所 海岸研究室主任研究官  
 \*\*\* 正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所 海岸研究室長

表-1 実験条件

初期 勾配	沖波波高	沖波周期	沖波波長	波形勾配	中央粒径	中央粒径 に対する $C_s$ 値
	$H_0$ (m)	$T_0$ (s)	$L_0$ (m)	$H_0/L_0$	$d_{50}$ (mm)	
0.05	0.06	3.50	19.11	0.03	0.62	14.29

目視によりうちあげ高, 砕波位置, 汀線位置, バーム高, 前浜勾配の計測を行った。

3. 実験結果

(1) 平衡断面形成過程

図-3に8時点(2, 10, 20, 36, 42, 54, 66, 78時間後)の地形を示す。この図より, 地形変化過程は次のようであったことがわかる。2時間後までに  $x = 12 \sim 14$  m 付近にバーが発達し, 典型的なバー地形が形成された。10時間後までに,  $x = 2 \sim 8$  m 付近が侵食され凹形となるとともに, バーは大きくなり, 2つコブの形となった。20時間後までには,  $x = -4 \sim 0$  m 付近にバームが発達した。

20時間後以降は, 砕波位置とバーが岸方向へ徐々に移動した。また,  $x = 30$  m より沖側に土砂が堆積して棚の

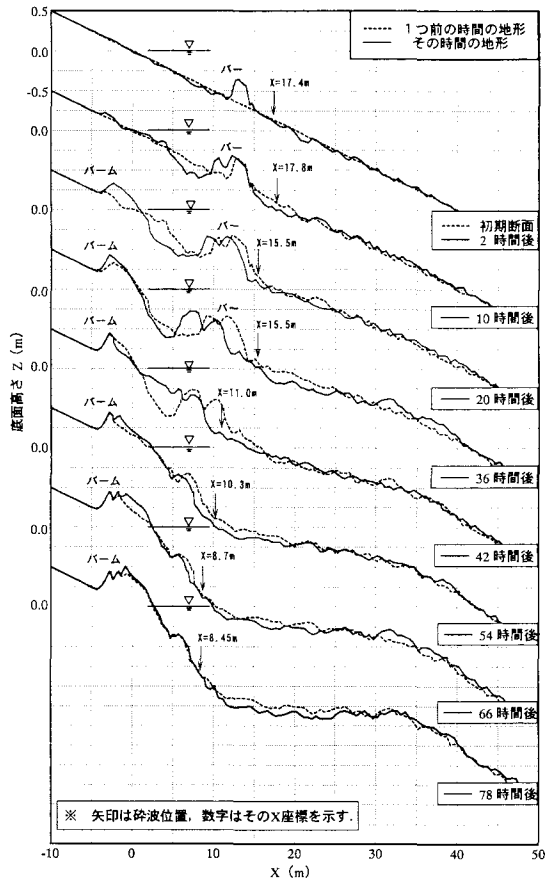


図-3 断面の経時変化

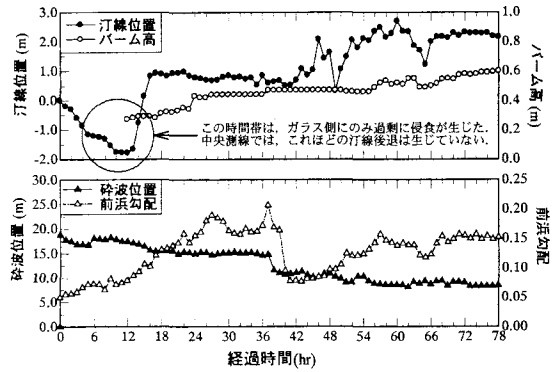


図-4 汀線位置, バーム高, 砕波位置, 前浜勾配の経時時間変化

ような形となっていた。20時間後の地形と36時間後の地形を比較して, バーが岸方向へ移動したことや沖側への土砂の堆積が確認できる。また, このときの汀線位置については, 図-4より, ほぼ一定であったことがわかる。42時間後には, バーが前浜と同化した。このような20時間後から42時間後までの地形変化過程には, 顕著な土砂の分級現象が関係しているように観察された。それは, バー頂部の土砂のうち粗いものが岸方向に移動し,  $x = 2 \sim 8$  m 付近の前浜とバーの間の凹部分に転がり落ちて重なるように堆積し, 細かいものは, 巻き上げられて浮遊するというものであった。

42時間後以降, 54時間後までは, 前浜に粗い土砂がうちあがり,  $x = -2 \sim 2$  m 付近に堆積しバームが高くなり, 前浜は急勾配化した。沖側は, 細かい土砂が堆積して沖浜が発達した。66時間後には, 地形変化が小さくなった。その後, 78時間後までに, 汀線位置, 砕波位置, 前浜勾配, バーム高がほとんど変化していないことが図-4より確認できる。これらのことは, 鳥居ら (2003) の報告と同様であり, 78時間後の地形は, 設定波浪に対する平衡形状 (安定形状) であると判断した。

ところで, 図-3より, 造波10時間後までの断面地形は  $C_s$  値による地形分類と一致する。しかし, 10時間以降は, 分級作用が強く影響したと考えられる地形変形が生じ, 78時間後の地形は, 前浜部分は急勾配, 沖浜部分は平坦となっており,  $C_s$  値による分類にあてはまらない。

(2) 表層底質の粒度

図-5に, 2時間後と78時間後の地形の表層底質粒度 (中央粒径  $d_{50}$ ) の縦断分布を示す。この図より, 2時間後では汀線付近とバーの部分が粗くなっていることがわかる。また, 粗くなっている部分は, 淘汰係数も高くなっている。78時間後の中央粒径  $d_{50}$  の分布は汀線付近の前後で各々ピークをもつ2つ山の形となっている。このとき, 中央粒径  $d_{50}$  に関係なく淘汰係数は, 1.2~1.4程

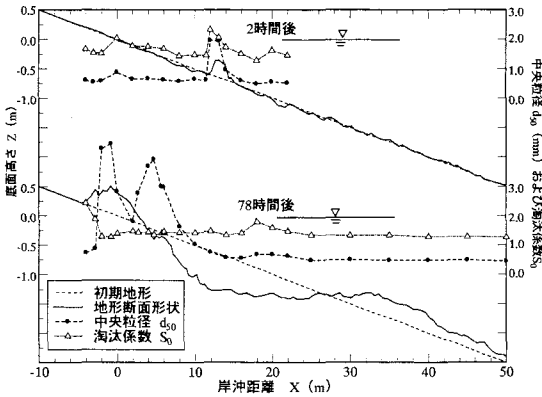


図-5 表層の中央粒径

度であり、分級がよく進んだことがわかる。また、中央粒径 $d_{50}$ の縦断変化が2つ山を持つ特徴は、堀川(1991)に示されているように、現地海浜の表層粒度の特徴と一致しているものと考えられる。

(3) 地形を構成する土砂

図-6に、78時間後の前浜( $x = 0\text{ m}$ ,  $4\text{ m}$ )と沖浜部分( $x = 30\text{ m}$ ,  $40\text{ m}$ )の表層土砂の粒径加積曲線(印あり実線)示している。この図から、前浜と沖浜それぞれの土砂が、約 $1.0\text{ mm}$ 以上と以下で分かれていることがわかる。

また、78時間後の地形の前浜部分、沖浜部分において柱状採泥を実施した。その結果を図-7および図-8示す。図-7から、前浜部分の土砂のうち、攪拌を受けていない層(初期の粒度分布の土砂)より上に堆積した土砂は、そのほとんどが $1.0\text{ mm}$ 以上であることがわかる。ただし、層によっては、最大で十数%の、 $1.0\text{ mm}$ 以下の土砂が含まれていた。また、また、図-8より、沖浜部分の土砂のうち、攪拌を受けていない層より上に堆積した土砂は、そのほとんどが $1.0\text{ mm}$ 以下の土砂で構成されており、どの層においても $1.0\text{ mm}$ 以上の土砂は0~5%の範囲であった。つまり、今回の実験においては、 $1.0\text{ mm}$ を閾値として、前浜は $1.0\text{ mm}$ 以上の粒径土砂で構成されており、沖浜は、 $1.0\text{ mm}$ 以下の粒径土砂で構成されたことになる。

一方、測量結果をもとに、水深が一番深くなったものを取り出し、それを結んだ線を初期地形から攪拌を受けた部分として、攪拌を受けた部分の断面積、前浜部分の断面積、沖浜部分の断面積を図-9のように算定した。攪拌を受けた部分の断面積に対して、前浜部分、沖浜部分の断面積は、それぞれ34%、60%であった。これは、初期粒度(図-6、印なし実線)に占める $1.0\text{ mm}$ 以上と以下の質量割合(3:7)と近い値である。また、前述のように前浜を構成している土砂のうち最大で十数%の

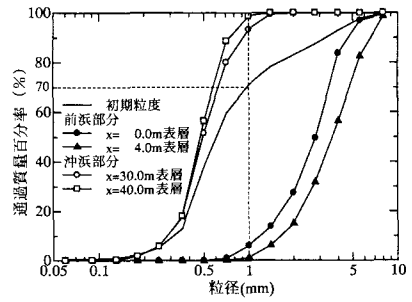


図-6 前浜と沖浜の粒度分布

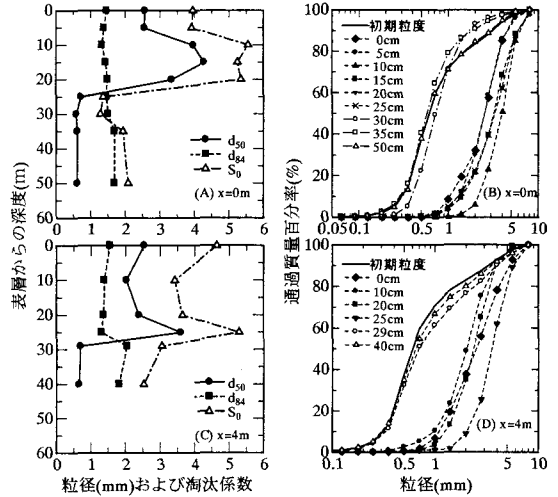


図-7 78時間後の鉛直方向粒度分布(前浜部分)

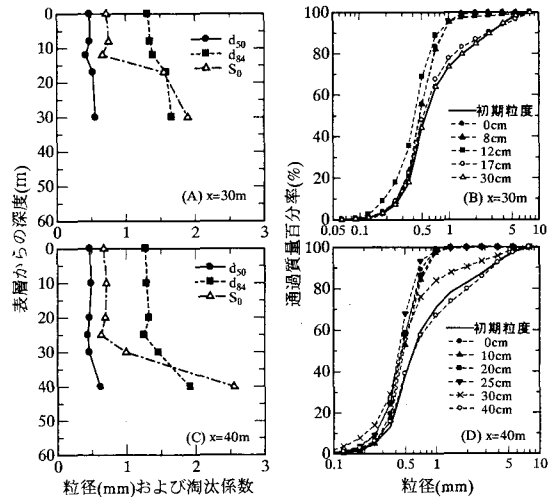


図-8 78時間後の鉛直方向粒度分布(沖浜部分)

$1.0\text{ mm}$ 以下の土砂を含む層が存在していたのに対し、沖浜を構成している土砂のうち $1.0\text{ mm}$ 以上の土砂を含む割合が少ないことを考慮すると、3:7の比率にもっと近くなることも考えられる。これらのことから、攪拌

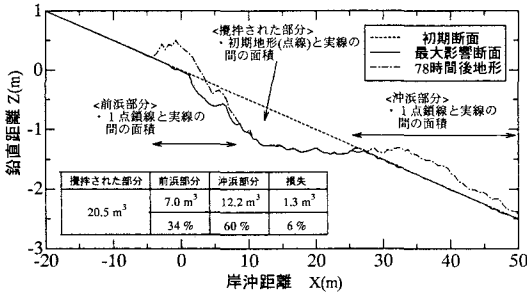


図-9 土砂移動の概算

をうけた土砂のうち1.0 mm 以上のほとんどすべてが前浜形成に寄与したものと考えられる。

ただし、この結果は、水路中央の1測線の測量結果のみから算定したものであるほか、断面積の損失が6%生じているなど空隙率の変化などが考慮されていない。このため、初期地形と最終地形で断面積(土砂量)が保存されていない。したがって、今後、空隙率などを考慮した検討が必要である。

4. 平衡海浜断面形の算定

(1) 平衡海浜断面形

78時間後の地形と、Kriebelら(1991)が示したDeanの平衡海浜断面形との比較を行った。ここでは、山本・佐藤(1999)が、混合砂の地形変化の特徴は、中央粒径 $d_{50}$ を用いておおおそ推定できるとしていることを参考に $d_{50}$ を用いて算定する。ここでは、鳥居ら(2003)が行ったのと同様に、模型縮尺を1/10と想定して、D-1(粒径は実験スケール、波浪条件を10倍の現地スケールで断面形を算定し、1/10スケールでグラフ化)、D-2(粒径および波浪条件を10倍の現地スケールで断面形を算定し、1/10スケールでグラフ化)、D-3(すべて実験スケールのまま算定し、グラフ化)について図-10に示す。

この図からわかるように、どれも実験の断面形に一致していない。これは、鳥居ら(2003)が報告しているよ

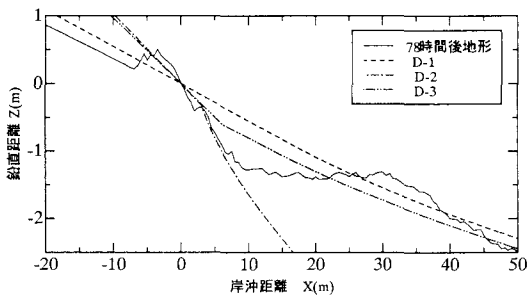


図-10 Deanの式による算定

うに、粒径と波浪との縮尺の問題があると考えられる。また、本実験では、分級が進んだ結果、前浜と沖浜で構成している土砂の粒径に差があったことから、初期粒度の中央粒径 $d_{50}$ を用いて地形全体を推定しようとするに多少無理があると考えられる。さらに、1/20の一樣斜面を初期断面とした水路実験であるため、岸沖方向以外からの土砂供給がないため、Deanの平衡断面のような状態までには土砂量が不足しているとも考えられる。このことは、鳥居ら(2003)が行った水路実験においても初期勾配から変化したものに土砂を供給して行った結果がDean式とほぼ一致したとの報告から推察される。

(2) 局所勾配

野志ら(2004)の底質の粒度構成を考慮した局所勾配の算定式、山下ら(2003)が提示した粒径を考慮したDean式の適用方法を用いて局所勾配を求め実験値と比較した。また、野志ら(2004)が提案した局所勾配の算定に用いる実験の地点別底質粒径の構成図を図-11に、算定結果を表-2および図-12に示す。

この結果から次のようなことが言える。

- ①底質粒径の粒度構成を考慮した局所勾配の算定式(1)は、 $x = 40\text{m}$ 地点のように砂が主成分の地点であればよく一致するようである。ここで、 $\tan \beta$ は勾配、 $d$ は粒径、 $a$ および $b$ は定数である。前浜部分のように礫が主成分となると、実験値よりも急勾配に評価してしまう可能性がある指摘できる。ただし、定数 $a$ 、 $b$ については、野志ら(2004)に示されている平均値 $\ln a = -1.84$ 、 $b = 1.03$ を用いた。したがって、礫を多く含

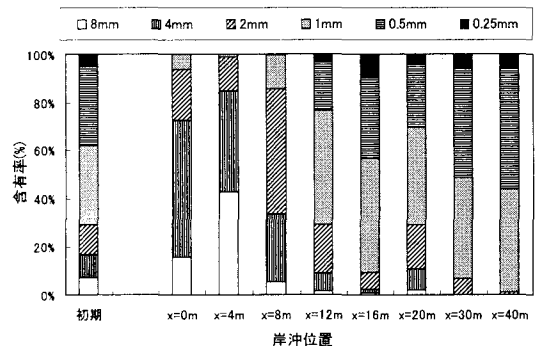


図-11 78時間後表層の粒度組成

表-2 局所勾配の算定結果

X(m)	0	4	8	12	16	20	30	40
水深(m)	—	0.29	0.84	1.28	1.33	1.32	1.40	1.76
$d_{50}$ (mm)	2.813	3.682	1.632	0.751	0.546	0.672	0.493	0.476
局所勾配(実験)	0.116	0.143	0.192	0.065	0.025	0.011	0.001	0.095
局所勾配(計算)	0.555	0.742	0.369	0.188	0.121	0.189	0.104	0.093
D-3	0.150	0.161	0.130	0.052	0.041	0.048	0.038	0.033

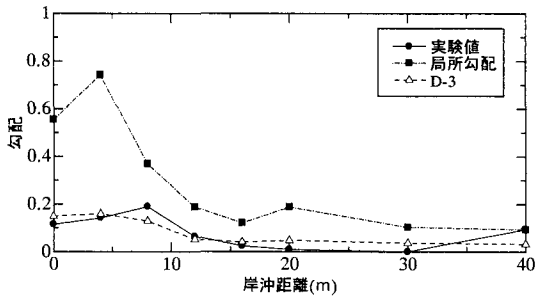


図-12 局所勾配の比較

む場合について、定数を再計算する必要がある可能性がある。

$$\ln(\tan \beta) = \sum (\ln a + b \ln [d^{(K)}]) \quad (K=1, 2, \dots) \quad \dots \dots \dots (1)$$

② D-3 (波浪も粒径も実験値のまま) のケースは、 $x = 25 \text{ m}$ ,  $30 \text{ m}$  地点の非常に緩い勾配の部分を除けば、実験値と計算値がおおむね適合性している。したがって、およその勾配を求める際に適用できるものと考えられる。ただし、D-3の  $x = 12 \sim 40$  の勾配は、その地点の中央粒径  $d_{50}$  を用いてのその地点の水深に前後  $\pm 5 \text{ cm}$  の2地点の位置 ( $x$  座標) を求めることによって算定したものである。

5. おわりに

本研究によって得られた主要な知見は次の通りである。

(1) 侵食性波浪の作用によって、混合砂海浜が平衡形状へ移行する過程を明らかにした。その概略は、バー形成、バー発達、バーム形成、バーの岸側への移動、前浜の急勾配化の順であった。

(2) 10時間後までの地形は  $C_s$  値による分類と一致していたことから、初期の中央粒径を使った  $C_s$  値により予測できる。しかし、10時間以降は、強く分級作用が影響したと考えられる地形変形が生じ、最終的な地形形状は前浜部分はバームの発達やバーの同化により急勾配化し、沖浜部分は平坦となっており、 $C_s$  値による分類にあてはまっていない。したがって、短時間の造波 (実験、計算) では、混合砂海浜の変形過程を十分に説明できない。特に、分級作用による地形変化についてさらに検討する必要であると考えられる。

(3) 本実験において、攪拌を受けた土砂のうち  $1.0 \text{ mm}$  以上のものほとんどすべてが前浜形成に寄与していたことから、前浜形成に寄与する粒径の閾値が存在し、それ以下の粒径は沖浜形成に寄与することがわかった。したがって、今後、この閾値を明らかにすることによって、効率的な養浜材の選定することが可能となると考える。

(4) 今回の実験における平衡海浜断面形は、Dean式では、再現できなかった。鳥居ら (2003) の実験においても、初期断面から長時間造波後の地形では、Dean式による予測と一致しておらず、砂を補充して造波を継続した後の地形は、Dean式による予測と一致している。したがって、今回の実験結果の断面形は、沿岸漂砂がほとんど生じない静的な養砂を想定した場合の平衡断面形状であると推察される。

参考文献

田中正博・井上亮・佐藤慎司・磯部雅彦・渡辺晃・池野正明・清水隆夫(2000)：2粒径混合砂を用いた大型海浜断面実験と粒径別漂砂量の算出，海岸工学論文集，第47巻，pp. 551-555。  
 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. 461-465。  
 張達平・佐藤慎司・戸崎正明・田中茂信(1996)：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43巻，pp. 481-485。  
 鳥居謙一・福島雅紀・山本幸次(2003)：平衡海浜断面形の形成過程とその波浪応答性に関する研究，海岸工学論文集，第50巻，pp. 536-540。  
 野志保仁・小林昭男・熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄(2004)：底質粒度構成に応じた局所縦断勾配の算定法，海岸工学論文集，第51巻，pp. 406-410。  
 堀川清司(1991)：[新編] 海岸工学，東京大学出版会，p. 241。  
 山下陸男・林健太郎・朴柱显(2003)：底質粒径の時空間変化を考慮した海浜変形予測について，海岸工学論文集，第50巻，pp. 541-545。  
 山本幸次・佐藤慎司(1999)：養浜により造成した海浜の断面変形に関する実験的研究，土木技術資料，42-5，pp. 56-61。  
 Kriebel, D. L., N. C. Kraus and M. Larson (1991)：Engineering methods for predicting beach profile response, Coastal Sediments'91. ASCE, New York. pp. 557-571。  
 Sunamura, T. and K. Horikawa (1974)：Two dimensional beach transformation due to waves, Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 920-938.