

局所勾配算定式の適用範囲と底質特性の新しい評価指標

野志保仁*・小林昭男**・宇多高明***
芹沢真澄****・熊田貴之*****

前浜・外浜を含む局所縦断勾配を、 d_{50} ではなく底質粒度組成から計算する野志らの方法の精度を高めるとともに、適用範囲を明確化するために、神奈川県海の公園と相模川河口左岸・根府川海岸の礫海岸において新たに現地観測を行い、野志らの手法の妥当性を検討した。この結果、 $\tan \beta^{(K)} = 0.16d^{(K)} (d^{(K)} \leq 2 \text{ mm})$, $= 1/3 (d^{(K)} \geq 2 \text{ mm})$ という式が導かれ、 $d^{(K)}$ の適用条件が明らかになった。また d_{50} に代わる新しい海浜底質特性の評価指標として最多粒径集団を代表する粒径 d_p が提案された。

1. はじめに

実海岸では、沿岸方向の粒径分級にとどまらず、岸沖方向の粒径分級もしばしば観察される(熊田ら, 2003)。例えば、東京湾最奥部に位置する千葉県検見川浜では、南曲突堤付近の堆積域において粗粒土砂が堆積した前浜の急勾配斜面と、細粒土砂が堆積した緩勾配斜面とが組み合わせられ、勾配急変点を境に二つにきれいに折れた縦断形が観察される(写真-1)。このような縦断形の場所的な変化は干潟周辺の海浜でしばしば観察される共通的現象である。

このような勾配と粒径の関係については過去に多くの研究が行われてきた。例えば、粒径に応じた前浜勾配の計算手法としては、Bascom (1951), Taney (1961), Wiegel (1964), King (1972) などが有名であり、さらには底質特性と勾配の関係に加えて波浪諸元を取り入れた Sunamura (1984) の式も知られている。これらは、いずれも底質特性が中央粒径(d_{50})で代表できるとして d_{50}

に対する勾配を算定するものである。これに対し、野志ら(2004)は前浜だけでなく外浜も含めた局所縦断勾配を海浜底質の d_{50} ではなく底質の粒度組成から予測する手法を提案し、前手法よりも正確な縦断勾配予測が可能であることを示した。しかし、野志ら(2004)の手法は、現地海岸において適用可能な粒度組成範囲を示していない。

そこで本研究では、人工海浜である神奈川県海の公園と、野志ら(2004)の調査で不足していた海浜を構成する砂の粗い海岸として相模川河口左岸・根府川海岸の礫海岸において新たに現地観測を行い、野志ら(2004)の手法を適用してその妥当性を検討するとともに、式の適用限界を明らかにする。さらに野志らの手法によって得られた式の特長をもとに d_{50} に代わる新しい海浜底質特性の評価指標を提案する。

2. 実海岸における局所縦断勾配の算定

(1) 局所縦断勾配の算定法

野志ら(2004)の手法の妥当性を再確認するために、野志ら(2004)の調査した3海岸(検見川浜、高島の浜、小田原海岸)のほかに、野志ら(2004)の調査で不足していた海浜構成材料の粗い海岸を含む神奈川県海の公園・相模川河口左岸および根府川海岸の3海岸において新たに現地調査を行った。

野志らの手法は対象海岸の海浜縦断形測量と岸沖方向の各点で底質採取を行い、粒度分析を行うことを前提としている。粒度分析の結果から、水深別に粒径加積曲線が得られ、ふるい目(例えば JIS 規格: $d = 0.075, 0.11, 0.25, 0.425, 0.85, 2 \text{ mm}$) 毎の粒径の砂の含有率が得られる。従来の研究(宇多ら, 2001; 熊田ら, 2001)から、海浜勾配は粒径の累乗に比例することが明らかにされているので、ふるい目の粒径を $d^{(K)}$ とすると、 $d^{(K)}$ に対応する平衡勾配 $\tan \beta^{(K)}$ は式(1)と仮定できる。対数表示では式(2)となる。

$$\tan \beta^{(K)} = a(d^{(K)})^b (K: \text{粒径数} = 1, 2, \dots, n) \dots (1)$$

$$\ln(\tan \beta^{(K)}) = \ln a + b \ln(d^{(K)}) \dots \dots \dots (2)$$

次に、砂の粒度構成を考慮するために、ふるい目毎の



写真-1 千葉県検見川浜の南突堤付近の堆積域

* 学生会員 日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻
** 正会員 工博 日本大学助教授理工学部海洋建築工学科
*** 正会員 工博 (財)土木研究センター理事なごき総合研究室長
**** 正会員 海岸研究室(有)
***** 正会員 博(工) (株)水圏科学コンサルタント技術部

粒径 $d^{(K)}$ に対する平衡勾配 $\tan \beta^{(K)}$ への寄与を粒径毎の含有率 $\mu^{(K)}$ によって考慮する。すなわち、式(2)の粒径 $d^{(K)}$ に対する平衡勾配 $\tan \beta^{(K)}$ の平均値を、底質採取位置での局所縦断勾配 $\tan \beta$ と考える手法である(式(3))。

$$\ln(\tan \beta^{(K)}) = \sum \mu^{(K)} \ln(\tan \beta^{(K)}) \dots \dots \dots (3)$$

具体的な計算方法は、まず式(2)の未知数 a および b について、実測値をもとに最小自乗法により係数 a 、 b を算定する。次に、ふるい目毎の粒径 $d^{(K)}$ に対する平衡勾配 $\tan \beta^{(K)}$ を式(2)より算出し、 $d^{(K)}$ に対する $\tan \beta^{(K)}$ と $\mu^{(K)}$ を式(3)に代入することで海浜底質の粒度組成に応じた $\tan \beta$ を算出する。以上、本研究では野志ら(2004)にならい平衡勾配は粒径のみに依存するとする局所縦断勾配算定式から局所縦断勾配を算出した。

(2) 実海岸への適用

図-1は調査対象の海の公園の位置図である。海の公園は金沢漁港の北に位置する人工海浜である。2004年12月15日、図-1に示す測線において海浜縦断測量および底質採取を行った。海浜縦断測量では勾配変化点ごとに標高を測量し、底質採取は測量地点間の midpoint で行った。採取砂は乾燥後ふるい分け分析を行った。図-2には図-1に示す測線の縦断形と中央粒径(d_{50})を示す。海の公園は $Y = 18\text{m}$ 付近の勾配変化点を境に急勾配斜面と緩勾配斜面との2断面を有している海浜である。急勾配付近の d_{50} は緩勾配付近の d_{50} に比べて比較的大きい値を示している。図-3は調査測線の粒度組成図である。勾配変化点を境に岸側の急勾配斜面上では粗砂・礫の含有率が高く、沖側の平坦な海底面では細砂の含有率が高くなっていることがわかる。これは岸沖漂砂による粒径の分級作用に起因すると考えられる。すなわち、波の往復運動から発生する岸沖漂砂により、沈降速度の速い粗粒砂は岸側に残されて急勾配を形成したが、沈降速度の遅い細粒砂は沖側まで移動し緩勾配を形成したと考えられる。

図-4に海の公園の縦断形と式(3)より算出した計算結果 $\tan \beta$ (図中の○印での局所海浜勾配)を示す。計

算結果は岸側の急勾配斜面と沖側の平坦面付近の局所縦断勾配を比較的よく再現している。しかし、 $Y = 5\text{m}$ 付近の局所勾配は実海岸の局所勾配よりも緩く予測されている。この原因として、調査時が干潮時であったことと陸風が吹いていたことが考えられる。すなわち、後浜にある粒径の細かい砂が陸風により前浜に運ばれ表層を覆っていたために、計算結果が実測の局所縦断勾配よりも緩く予測されたと考えられる。

図-5は第2の観測地の相模川河口左岸の位置を示す。図-5に示す左岸河口砂州において2004年9月15日に底質採取と前浜勾配の測量を3地点で行った。写真-2は相模川河口左岸砂州の付け根付近での観察状況である。写真-2からわかるように、この場合の前浜勾配は1/8と比較的急勾配であった。2人の観察者の間に白く見えるdry beachは細砂が局所的に堆積したものであるが、砂州の実質部分を構成する砂の粒径は大きく、表面から約10cm厚での掘削調査によれば、海浜を構成する砂は礫を含む粗砂であった。

図-6は第3の観測地の根府川海岸の位置を示す。根

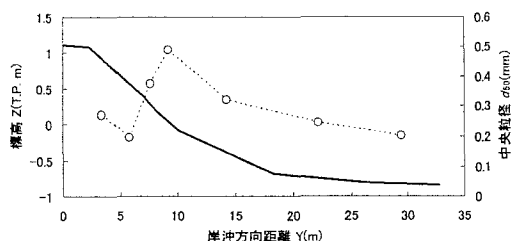


図-2 縦断形と d_{50} の岸沖分布(海の公園)

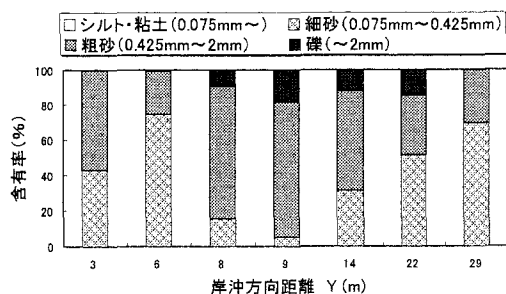


図-3 岸沖方向の粒度組成図(海の公園)

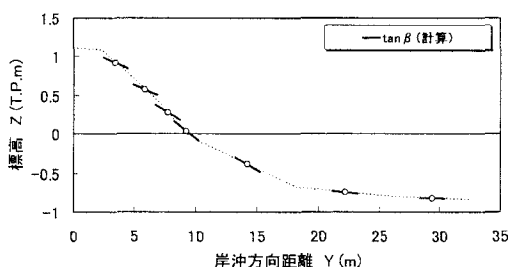


図-4 実測と計算の局所縦断勾配の比較(海の公園)

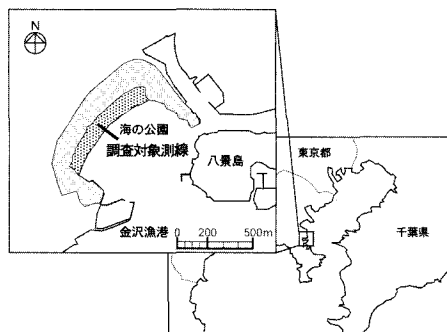


図-1 神奈川県海の公園の位置

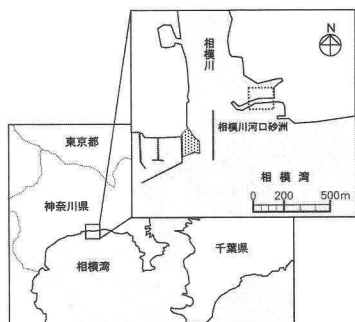


図-5 神奈川県相模川河口左岸砂州の位置

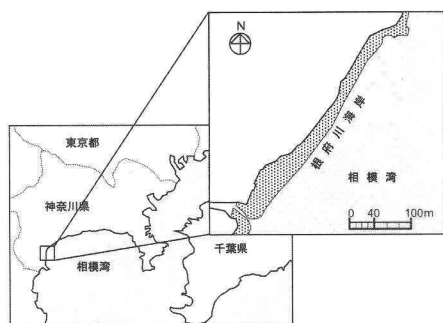


図-6 神奈川県根府川海岸の位置

府川海岸は急深な相模湾に面した礫浜である。写真-3は2004年9月15日の調査時、根府川海岸をほぼ北向きに望んだもので、海岸には大量の礫が堆積し、前浜勾配は非常に急であった。勾配の測定状況を示すのが写真-4である。ポールによる測定によると、前浜勾配は約1/3である。また海浜構成材料は写真-5のように粒径2cm以上の礫のみである。写真-2に示す相模川河口での粗砂（一部礫含む）からなる海浜材料と、根府川海岸の礫浜とで前浜勾配が全く異なることが明らかである。すなわち、海浜を構成する砂が粗い砂の場合は急勾配を形成し、細かい砂で構成された海浜は緩勾配を形成するという現象が写真から視覚的に明瞭に観察できる。

以上の調査結果をもとに3海岸それぞれの局所縦断勾配を野志ら（2004）の手法により算出した。図-7は、野志らの計算結果に今回新たに調査を行った3海岸の計算結果を加えたものである。実測と計算の局所縦断勾配はよく一致していることがわかる。また、今回の調査で得られた粗砂を中心とした海浜（相模川河口左岸）と礫海岸（根府川海岸）といった急勾配斜面での計算と実測の局所勾配の一致度は高く、野志ら（2004）の手法が細砂で構成された海浜や干潟域だけではなく、礫海岸などの急勾配斜面で安定している海浜においても適用可能であることが確認された。さらに海浜を構成する砂の異なる6海岸において決定係数 R^2 は0.82と非常に高い値を示しており、野志らの手法の妥当性が再確認された。



写真-2 相模川河口左岸砂州の付け根付近の海浜



写真-3 根府川海岸を北向きに望む

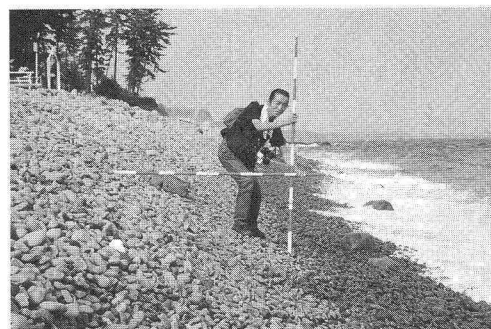


写真-4 根府川海岸の前浜勾配（約1/3）

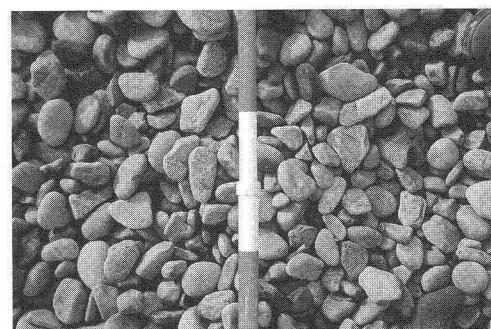


写真-5 根府川海岸を構成している海浜材料

3. 局所縦断勾配算定式の適用範囲

野志ら（2004）の提案した局所縦断勾配算定式の適用範囲を明らかにするために、小田原海岸、高島の浜、根

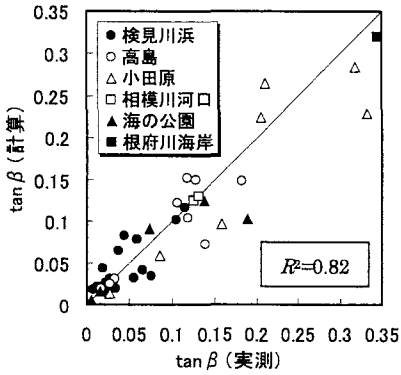
図-7 実測と計算の $\tan \beta$ の比較

表-1 粒径範囲の変化に伴う決定係数の比較

岡山県高島の浜			小田原海岸		
最大粒径(mm)	最小粒径(mm)	決定係数 R^2	最大粒径(mm)	最小粒径(mm)	決定係数 R^2
19	0.00157	0.797	37.5	0.075	0.855
9.5	0.00157	0.797	26.5	0.075	0.855
4.75	0.00157	0.799	19	0.075	0.508
2	0.00157	0.802	9.5	0.075	0.873
2	0.00383	0.798	4.75	0.075	0.891
2	0.00763	0.794	2	0.075	0.914
2	0.01075	0.792	相模川河口左岸・根府川海岸		
2	0.0151	0.788			
2	0.0258	0.782	最大粒径(mm)	最小粒径(mm)	決定係数 R^2
2	0.0403	0.774	19	0.075	-45.889
2	0.0557	0.774	9.5	0.075	-45.889
2	0.075	0.754	4.75	0.075	-0.510
			2	0.075	0.996

府川海岸・相模川河口において、計算で用いる粒径範囲 ($d^{(K)}$ の値) を変化させ実測と計算の局所勾配の一致度を決定係数 R^2 で比較した。小田原海岸では粒径 0.075 mm～37.5 mm (小田原海岸の最大粒径)、根府川海岸・相模川河口では粒径 0.075 mm～19 mm、高島の浜においては干潟域を含んでいるため沈降分析の結果も含め 0.00157 mm～19 mm の範囲内で粒径を変化させ R^2 の比較を行った。表-1 に粒径範囲を変化させたときの最小・最大粒径の値とその条件で計算を行った場合の決定係数 R^2 の比較結果を示す。

高島の浜においては最大粒径 2 mm、最小粒径 0.00157 mm のときに R^2 は最大となった。最小粒径を細かくすると R^2 が高まることから、計算で考慮すべき最小粒径は沈降分析の可能な範囲までと考えられる。小田原海岸においては最大粒径を 2 mm としたとき R^2 が最大となった。また、根府川海岸・相模川河口においても同様に最大粒径が 2 mm のときに R^2 は最大値を示す。このことから、野志らの手法を適用する場合、最大粒径を 2 mm までとし、なるべく細かい粒径砂まで考慮することで実測と計算の局所勾配の一致度がよくなることがわかる。すなわち、局所縦断勾配算定式の適用範囲の最大粒径は 2 mm であり、最小粒径は沈降分析が可能な範囲までということが明らかとなった。

また、このときに最小自乗法によって求められた式 (2) の $\ln a$ および b の値を表-2 に示す。表-2 から全海岸において $\ln a$ 、 b は近い値を示し、6 海岸全体に適用した場合の b は 0.94 とほぼ 1 に近いことから、式 (1) の粒径毎の平衡勾配を求める式は全体での計算結果の $\ln a$ の値を実数に変換し、式 (4) のように簡単な式で表すことができる。

$$\begin{aligned}\tan \beta^{(K)} &= 0.16 d^{(K)} & d \leq 2 \text{ mm} \\ &= 1.3 & d \geq 2 \text{ mm} \dots \dots \dots (4)\end{aligned}$$

以上の結果から、本研究で提案する粒径毎の平衡勾配算定式 (式 (4)) および局所縦断勾配算定式 (式 (3))

表-2 6 海岸における $\ln a$ および b

	$\ln a$ (1/mm ^b)	b
① 検見川浜 (2003.6.15)	-2.07	0.94
② 岡山 (2003.11.9)	-1.81	1.04
③ 小田原 (1996.12)	-1.67	0.78
④ 相模川河口 (2004.9)	-1.99	0.81
⑤ 根府川海岸 (2004.9)	-2.20	0.85
⑥ 海の公園 (2004.12.15)	-1.83	0.76
全 体	-1.90	0.94

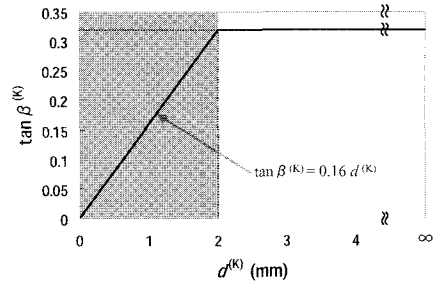


図-8 粒径と局所縦断勾配の関係

の適用範囲を考慮すると、粒径と局所縦断勾配の関係は図-8 のようになると考えられる。すなわち、粒径毎の持つ平衡勾配は 2 mm 以上では約 1/3 の一定値となり、粒径が細くなるにつれて粒径毎の平衡勾配が緩くなる。

4. 局所勾配算定式の特性把握

本研究で提案した粒径毎の平衡勾配の簡易算定式 (4) の特性を把握するために、海浜構成材料の淘汰度を変化させ局所縦断勾配を算出した。まず、含有率がピークとなる粒径値 (以後 d_p 値と呼ぶ) を固定し、粒径毎の含有率のみを変化させた仮想海浜材料を 3 ケースつくり、さらにその 3 ケースの d_p 値を変化させた 3 パターン ($d_p = 0.11$ mm, 0.25 mm, 0.425 mm) の仮想海浜材料をつくった。そして、 d_p 値を変化させた 3 パターンの仮想海浜材料において式 (4) を適用し、式 (3) からそれぞれの局所縦断勾配を算出し淘汰度の変化によって計算結果がどのような変化するかを調べた。

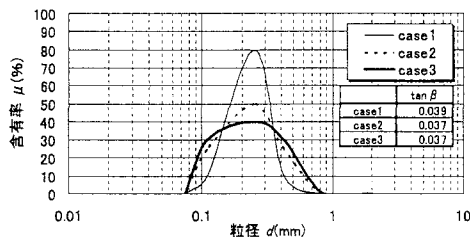


図-9 3ケースの粒径のスペクトル ($d_p=0.25$ mm) と局所勾配の計算結果

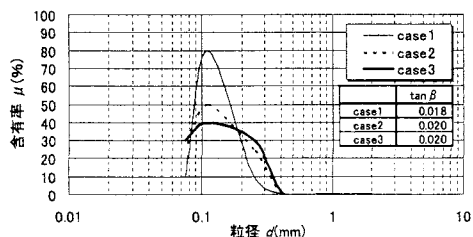


図-10 3ケースの粒径のスペクトル ($d_p=0.11$ mm) と局所勾配の計算結果

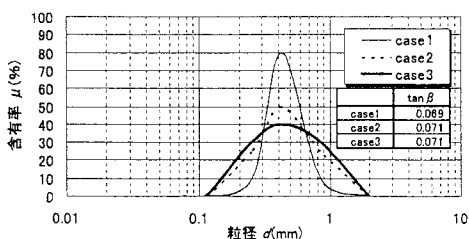


図-11 3ケースの粒径のスペクトル ($d_p=0.425$ mm) と局所勾配の計算結果

図-9に d_p 値を0.25 mm とし含有率を変化させた3ケースの粒径のスペクトルと局所勾配の計算結果を示す。ケース1, 2, 3の局所勾配は粒径のスペクトルの形が異なるにもかかわらず、0.037付近の非常に近い値を示している。図-10には d_p 値を0.11 mm と小さくした場合に含有率を変化させた3ケースの粒径スペクトルと局所勾配の計算結果を示す。 d_p 値が0.25 mm の時と同様に局所勾配は淘汰度の変化にあまり関係なく非常に近い値を示している。図-11は d_p 値を0.425 mm と大きくした場合の粒径スペクトルと局所勾配の計算結果である。 d_p 値を大きくしても3ケースの局所勾配の値は、0.07付近で近い値を示していることがわかる。

以上の d_p 値を変化させた3パターンの計算結果から、局所勾配を決定する最も大きい要素は d_p 値であると考えられる。すなわち、実海岸の勾配を決定するのは海浜を構成する砂の淘汰度にほとんど関係なく、含有率の最も高い粒径集団を代表する d_p 値によって決定されと考えられる。野志ら (2004) の手法のように粒度構成を考慮することで局所縦断勾配を精度よく予測することは可能であるが、本手法で提案する d_p 値から局所縦断勾配を

簡易に予測することも可能と考えられる。このことから、粒径と勾配の観点から見た場合、実海岸において海浜底質特性を簡易に代表する場合、一般的に使用されている d_{50} ではなく d_p 値を用いることがより有効であると考えられる。

5. ま と め

本研究で得られた結果を以下に要約する。

- ①野志ら (2004) の調査した海岸に加え、さらに3海岸において調査および解析を行った結果、野志ら (2004) の示した局所縦断勾配の算定式の妥当性を再確認した。
- ②局所縦断勾配算定式の適用範囲を調べた結果、適用範囲は最大粒径を2 mm までとし、なるべく細かい粒径砂まで考慮することで実測と計算の局所勾配の一致度がよくなることが明らかとなった。
- ③調査を行った6海岸において式 (2) の $\ln a$ および b の値は非常に近い値を示しており、 b はほぼ1であることから式 (2) の粒径毎の平衡勾配を算出する式を $\tan \beta^{(K)} = 0.16d^{(K)}$ という簡易式で表すことができる。
- ④本研究で提案した式 (4) の特性から、実海岸の勾配は d_p 値が支配的であり、粒径と勾配という観点から見た場合、海浜底質特性を簡易に代表する場合は d_{50} ではなく本研究で提案する d_p 値を用いることが有効である。
- ⑤本研究で提案する粒径と局所縦断勾配との関係を利用し、深浅図から逆に粒径分布を予測することにも応用可能と考えられる。

参 考 文 献

- 宇多高明・石川仁憲・清野聡子・渡辺宗介・芹沢真澄・三波敏郎 (2001) : ポケットビーチの端部付近での離岸堤建設に起因する海浜変形, 千葉県鴨川市東条・前原海岸の事例, 地形, 第22巻, pp. 217-226.
- 熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄・小林昭男 (2003) : 混合砂による養浜時縦断形予測モデル, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 596-600.
- 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・三波俊郎・星上幸良 (2001) : 千葉県検見川浜の海浜変形と3次元 Hsu モデルによる変化予測, 海岸工学論文集, 第48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.
- Bascom, W. N. (1951) : The relationship between sand size and beach-face slope, Am. Geophy. Union Trans., Vol. 32, pp. 866-874.
- King, C. A. M. (1972) : Beaches and Coasts, Edward Arnold, London, 570p.
- Sunamura, T. (1984) : Quantitative predictions of beach-faces slope, Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 95, pp. 242-245.
- Taney, N.E. (1961) : Geomorphology of the South Shore of Long Island, NY Beach Erosion Control Board Technical Memorandum No. 129, U.S. Army Corps of Engineers Beach Erosion Control Board, Washington D.C., 50 p.
- Wiegell, R. L. (1964) : Oceanographical Engineering, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 532p.