

底質粒度構成に応じた局所縦断勾配の算定法

野 志 保 仁* ・ 小 林 昭 男** ・ 熊 田 貴 之***
宇 多 高 明**** ・ 芹 沢 真 澄*****

作用波浪エネルギーレベルの低い千葉県検見川浜と岡山県の高島, 波浪エネルギーレベルの高い神奈川県小田原海岸を選び, 海浜縦断形の局所海底勾配と底質の関係を調べた。縦断形の局所勾配を, 海浜底質の粒径毎の平衡勾配と, その含有率より計算する方法を開発した。ふるい目毎の各粒径に対する平衡勾配への寄与は, 粒径毎の含有率によって表すことができる。平衡勾配と粒径の間でベキ乗則を仮定して現地データを分析した結果, ベキはほぼ 1 に近い値として定まることから, 平衡勾配と粒径の間にはほぼ線形関係が成立することが分かった。本研究の考え方では, 不規則波を成分波に分けて合成するのと同じ analogy が成立する。

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観察される (宇多; 1997, 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され, 勾配急変点を境に縦断形が二つ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観察される共通的现象である。

海浜構成材料と勾配の関係については古い研究の歴史がある。例えば, 粒径変化に伴う前浜勾配の予測手法として, Bascom (1951), Taney (1961), Wiegel (1964), King (1972) などが有名であり, さらに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, d_{50} に対する勾配を算定するものである。しかしながら, 筆者らは多くの

海岸踏査の経験より, d_{50} が実海岸の混合粒径砂の粒度構成を真に代表できるかどうかについては疑問と考えるようになった。 d_{50} が同一でも, 広い粒径分布と狭い粒径分布の底質が同じ勾配になる保証はないと考えられるからである。そしてこのような考え方に基づく限り, 海浜底質に応じた縦断勾配の正確な予測は困難と考えられる。しかしこのような視点に立った研究はほとんど例がない。本研究では, 前浜だけでなく, 外浜も含めて海浜底質の粒度構成に応じた局所縦断勾配の予測手法について検討した。

2. 粒度構成と局所縦断勾配の関係

実海岸において, 水深毎の縦断勾配と粒度構成の関係を調べるために, 作用波浪エネルギーレベルの低い千葉県検見川浜と岡山県の高島, 波浪エネルギーレベルの高い神奈川県小田原海岸を選んで海浜縦断形状と底質の調査を行った。検見川浜と高島については今回新たに現地調査を行った。また小田原海岸においては, 宇多ら (1997) の報告に示されたデータを再度分析した。

千葉県検見川浜は東京湾最奥部に位置する人工海浜である (図-1)。海浜は図-2 に示すように, 沿岸方向に 1300 m の長さを持ち, 砂浜の両端には延長 593 m の曲突堤が設置されている (熊田ら, 2001)。現地調査は 2003 年 6 月 15 日, 図-2 に示す No. 1~No. 3 測線上において, 海浜縦断測量と砂の採取を行った。岸沖方向の測量範囲



写真-1 検見川浜の堆積域

- | | |
|----------------|--------------------------|
| * 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 博(工) | (株)水圏科学コンサルタント 技術部 |
| **** 正 会 員 工 博 | (財)土木研究センター審議役 なぎさ総合研究室長 |
| ***** 正 会 員 | 海岸研究室(有) |

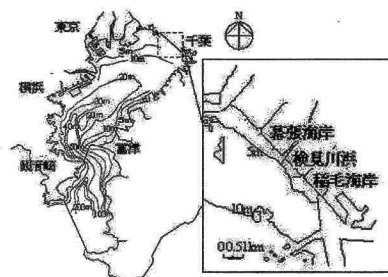


図-1 千葉県検見川海岸の位置

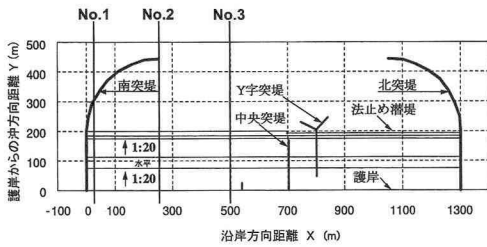


図-2 検見川浜の計画平面図

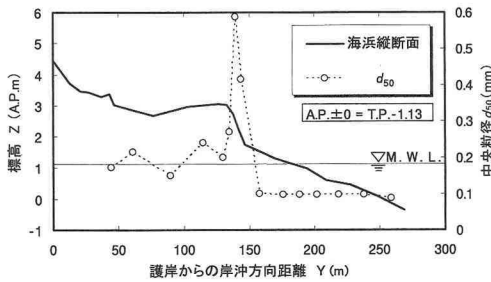
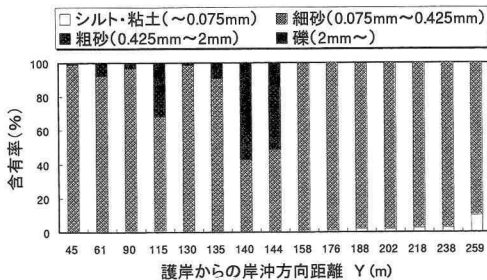
図-3 堆積域の縦断面形と d_{50} の岸沖分布

図-4 堆積域の粒度構成図

は、バーム ($Z=A.P. 2.5\text{ m}$) から干潮時における人の膝付近 ($Z=A.P. 0\text{ m}$) までとした。測量基準点は背後の直立護岸位置に設定し、採取砂は乾燥後ふるい分け分析を行った。

図-3には、とくに勾配変化の顕著な堆積域 (No.1) の縦断面形と、 d_{50} の岸沖分布を示す。 $Y=150\text{ m}$ にある勾配変化点を境に、急勾配部分では d_{50} が大きく、沖合の緩勾配部分では d_{50} が小さいという特徴が見出せる。図-4には対応する粒度構成図を示す。勾配変化点 ($Y=150\text{ m}$) を境に、岸側では礫・粗砂の成分が周辺より多く、沖側では細砂の含有率が高い。これは岸沖漂砂による分級現象によってもたらされたと考えられる。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堆積し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。同様に他の2測線においても岸沖方向の粒径分級が確認され、水深が深くなるに従い細粒化が

見られた。なお、検見川浜は沿岸漂砂による粒径分級も顕著に発生しており (熊田ら, 2001)、現地調査によれば堆積域と侵食域では全体の粒度構成も異なることも確認された。

岡山県高島の調査は2003年11月9日に行った。高島は、百間川河口沖にある南北約440 m、東西約125 mの細長い島であり、島の東側には広大な高島干潟を有している。この島は花崗岩でできているため、島の周辺には風化花崗岩砂 (マサ) でできた砂浜がある。一方、高島干潟ではシルト・粘土からなる広大な干潟が広がる。すなわち、高島はマサで構成された浜と、シルト・粘土で構成された干潟での勾配変化および粒径の分級現象が顕著に見られる海浜である。当海岸へ作用する年間平均波浪は、永井ら (2000) によれば有義波高が $H_{1/3}=0.32\text{ m}$ 、有義波周期が $T_{1/3}=3.6\text{ s}$ である。

現地調査は、図-5に示すように高島の北東に位置する海浜の全長約440 mを沿岸方向に3等分した中央2測線 (北側: 測線A, 南側: 測線B) において、検見川浜と同様海浜縦断面測量と砂採取を行った。岸沖方向の測量範囲は、バーム付近から干潮時 (大潮) の汀線付近までを対象とした。マサで構成された海浜砂は、ふるい分け分析した。シルト・粘土で構成された干潟の砂は、ふるい分け分析に加え沈降分析も行った。

マサで構成された海浜とシルト・粘土で構成された干潟の状況を写真-2に示す。海浜北端部付近から南向き

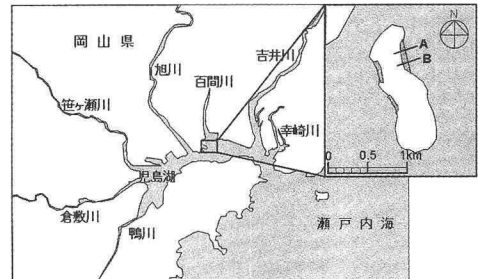


図-5 岡山県高島の浜の位置



写真-2 高島の浜の干潟面と前浜の違い

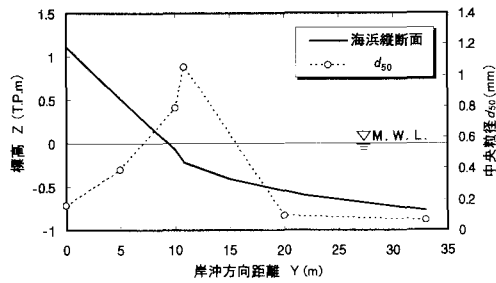
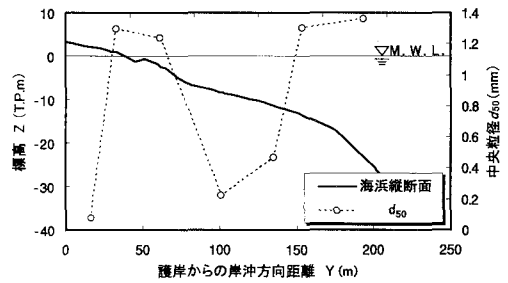
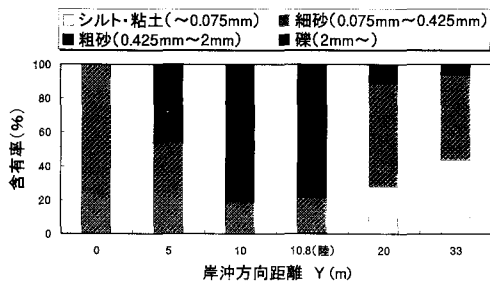
図-6 測線 B の縦断面形と d_{50} の岸沖分布図-9 小田原海岸の縦断面形と d_{50} の岸沖分布

図-7 測線 B の粒度構成図

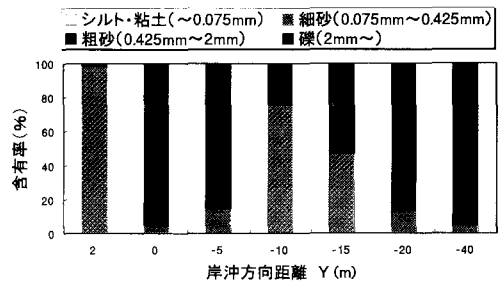


図-10 小田原海岸の粒度構成図

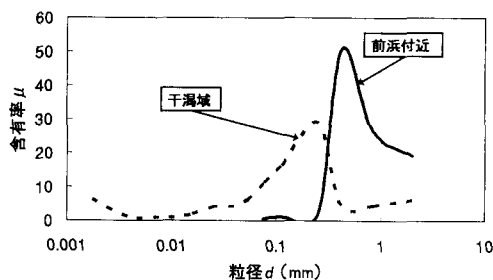


図-8 測線 B の粒径レンジ

に撮影したものであるが、マサからなる海浜とその沖の干潟面とはきれいに分かれ、両者の境界はほぼ直線的である。この理由は、後述するように海浜を構成する細砂と、干潟を構成する主としてシルト・粘土からなる底質の平衡勾配が異なり、細砂では約 $1/8$ 勾配で安定するのにに対し、潟土では安定勾配が約 $1/50$ と緩やかなためである。

図-6 に代表として測線 B の縦断面形と中央粒径 (d_{50}) の岸沖分布を示す。 $Y=11$ m の勾配変化点を境に、マサで構成された d_{50} の大きい部分では急勾配であり、シルト・粘土で構成された d_{50} の小さい干潟域では緩勾配である。図-7 には粒度構成図を示す。勾配変化点の岸側では礫・粗砂を多く含み、沖側では細砂とシルト・粘土の含有率が高い。これほど顕著な勾配変化が生じたのは、図-8 に示すように急勾配と緩勾配を構成する粒径レンジが大きく異なるためと考えられる。

神奈川県小田原海岸では、過去に海浜縦断面形と底質採

取が行われ、粒度特性が調べられている。小田原海岸は、相模湾に面した西湘海岸と総称される海岸の一つであり、永井ら (1997) によれば、年間平均有義波波高は $H_{1/3}=1.5$ m、有義波周期が $T_{1/3}=7.6$ s である。小田原海岸には森戸川河口沖の規模の大きな海底谷が迫る。

図-9 に小田原海岸森戸川東側の縦断面形と d_{50} の岸沖分布を示す。勾配の緩い $Y=20$ m 付近および $Y=120\sim 160$ m 付近の d_{50} は小さく、急勾配を形成している $Y=40\sim 80$ m および $Y=180\sim 240$ m 付近では d_{50} が大きい。他の 2 海岸に比べ勾配も急であり d_{50} も大きい。図-10 には対応する粒度構成図を示す。全体に礫の含有率が高く、シルト・粘土は全く含まれていない。

3. 底質粒度構成に応じた局所縦断勾配の算定法

上述の現地データを踏まえ、底質粒度構成に応じた局所縦断勾配の算定法を提案する。本手法は、対象海岸の海浜縦断面地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条件とする。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: $d=0.075, 0.11, 0.25, 0.425, 0.85, 2$ mm) 毎の粒径の砂の含有率が得られる。従来の研究 (熊田ら, 2001; 宇多ら, 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。

次に、砂の粒度構成を考慮するために、ふるい目毎の

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、サンプリング位置での局所縦断勾配 $\tan \beta$ と考える (式 (3))。

$$\tan \beta^{(K)} = a(d^{(K)})^b \quad (K=1, 2, \dots, 6) \quad \dots\dots\dots (1)$$

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

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

具体的な計算方法は、まず式 (2) の未知数 a および b を決定するために、最小自乗法を用い、式 (4) により実測の海浜勾配 $\tan \beta'$ と計算で算出した平衡勾配 $\tan \beta$ の差の自乗である残差 R が最小となる 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) によって算出し、 $d^{(K)}$ に対する $\tan \beta^{(K)}$ と $\mu^{(K)}$ を式 (3) に代入して海浜底質の粒度構成に応じた $\tan \beta$ を算出する。

$$R = (\ln[\tan \beta] - \ln[\tan \beta'])^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

なお、Sunamura (1984) は粒径特性に加えて波浪諸元を導入して無次元化を行っているが、本手法の基本となる式 (3) においては、とくに波浪諸元を導入していない。その理由は以下のとおりである。まず、上述の3海岸の調査結果をもとに Sunamura (1984) に従い波浪諸元を含んだ場合の海浜勾配との相関 (図-11) と、粒径と海浜勾配との相関 (図-12) を比較した。波浪諸元は、通年の平均的な安定勾配を予測することを目的としているため、前述の年間平均有義波波高と周期を用い、合田・佐藤 (1972) に従い砕波波高を算定した。この結果、波浪を含んだ場合の相関の決定係数は $R^2=0.4235$ と非常

に低いのに対し、波浪諸元を含まない場合、決定係数は $R^2=0.7629$ と高まった。熊田ら (2001)、宇多ら (2001) でも同種の分析を行ったが、縦断勾配は波浪への依存性は極めて低いことが示されている。波浪は熊田ら (2003) の概念に従えば、海浜を変形させるエネルギーであり、縦断勾配の決定要因にはなり得ないと考えられる。したがって、本手法では縦断勾配に大きく依存するのは粒径のみとし、式 (2) の a は次元係数として取り扱った。

4. 実海岸への適用

本手法を調査・分析した3海岸へ適用した。まず、図-13に検見川浜の堆積域・中立位置・侵食域の測量結果と、本手法による計算結果 $\tan \beta$ (図中の○印での局所海浜勾配) を示す。計算結果は、実海岸の局所勾配をよく再現できている。堆積域においては、勾配変化点を境とした $Y=130\sim 150$ m 付近の急勾配斜面、および $Y=150\sim 250$ m 付近の緩勾配斜面を非常によく再現できている。中立位置も、岸沖分級により沖に向かい徐々に緩やかになる縦断勾配をよく再現している。侵食域でも、沿岸漂砂によって侵食した部分 ($Y=20\sim 110$ m) の局所勾配をうまく計算できていることが分かる。

図-14に高島の測線Bの測量結果と本手法の計算結果を示す。計算は、マサで構成された急勾配 ($Y=0\sim 11$ m) および干潟面の緩勾配を ($Y=11\sim 32$ m) をよく再現している。

図-15に小田原海岸の測量結果と本手法の計算結果を示す。小田原海岸は急勾配の海浜であるために勾配の精度が図のみでは分りにくいが、図中に計算での局

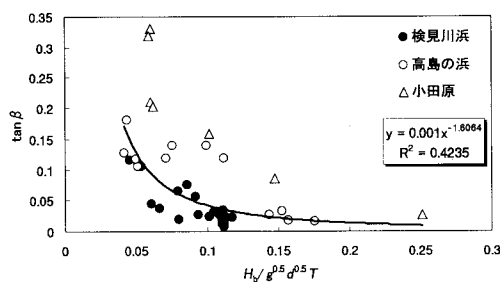


図-11 海浜勾配と波浪との相関 (砂村の式による)

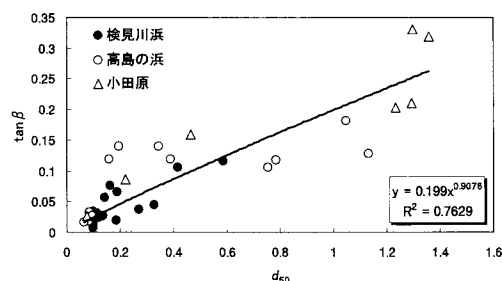


図-12 海浜勾配と粒径との相関 (本研究)

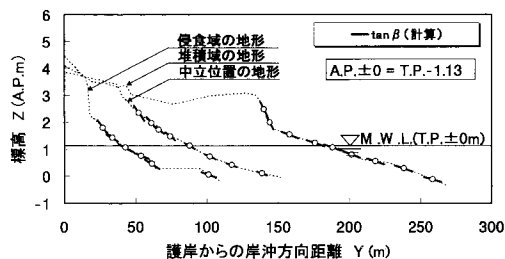


図-13 検見川浜の縦断形における局所勾配の比較

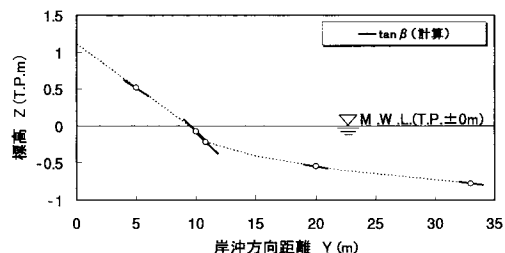


図-14 高島の浜の縦断形における局所勾配の比較

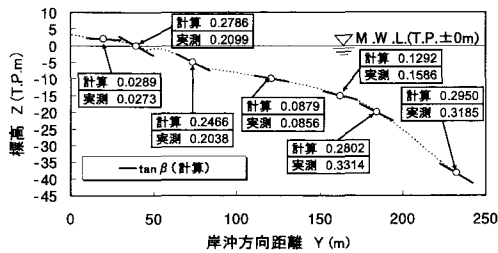


図-15 小田原海岸の縦断形における局所勾配の比較

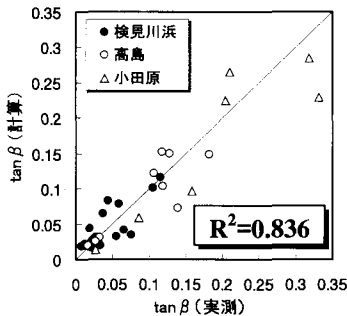


図-16 計算と実測の比較

表-1 $\ln a$ と b の値

対象海岸	未知数	$\ln a(1/\text{mm}^b)$	b
検見川浜 (2003.6.15)		-2.07	0.94
岡山 (2003.11.9)		-1.81	1.04
小田原 (1996.12)		-1.67	0.78
全体		-1.84	1.03

$\ln a$: 式 (2) の $\ln a$, b : 式 (2) の b

所勾配の値および実測の局所勾配を記入した。計算と実測の値の誤差が小さく、緩勾配の部分 ($Y=0\sim 40\text{ m}$, $120\sim 170\text{ m}$) および急勾配の部分 ($Y=40\sim 80\text{ m}$, $180\sim 240\text{ m}$) をよく再現している。

さらに、本手法の一致度を分かりやすく比較するために、縦軸に計算、横軸に実測の海浜勾配を示したのが図-16である。決定係数 R^2 が 0.836 と非常に高い値を示しており、計算と実測の局所勾配の値はよく一致していることが分かる。

以上の結果から、波浪の大小に関係なく、本手法が従来の手法よりも高精度に局所縦断勾配を予測することが可能なことが明らかになった。本手法では、局所縦断勾配を予測する際に d_{50} を用いるのではなく、砂の粒度構成を考慮する必要性を強調している。粒度の成分を考え、それぞれの寄与度を線形的に重ね合わせれば任意の海浜縦断勾配を算定できるという点は、不規則波の扱いと全く同様である (合田・佐藤, 1972)。

粒径毎の平衡勾配を算出する式 (2) の $\ln a$, b を表-1 に示すが、波浪の極端に異なる 3 海岸において、 $\ln a$, b

は非常に近い値を示している。このことから本手法に用いた式はかなり高い普遍性を持つと考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下に要約する。

- ① 粒径変化に伴う縦断勾配の予測には、従来のように海浜底質を d_{50} で代表させるのではなく、海浜底質の粒度構成 (粒径とその粒径毎の含有率) を考慮する必要がある。
- ② 縦断形の局所勾配は、海浜底質の粒径毎の平衡勾配とその含有率により計算できる。ふるい目毎の粒径 $d^{(K)}$ に対する平衡勾配 $\tan \beta^{(K)}$ への寄与を粒径毎の含有率 $\mu^{(K)}$ によって表すと、 $\tan \beta = a(d)^b$ および $\ln[\tan \beta] = \sum \mu^{(K)} \ln[\tan \beta^{(K)}]$ ($K=1, 2, \dots, 6$) となる。ここに定数 a , b は 3 海岸の平均で、 $\ln a = -1.84(1/\text{mm}^b)$, $b = 1.03$ である。
- ③ 平衡勾配は粒径のみに依存し、波浪諸元への依存性はきわめて低い。
- ④ 本手法の結果は、熊田ら (2004) の粒度組成の 3 次元変化を考慮した等深線変化モデルの入力データに組み込むことが可能なので、3 次元の意味での粒径分級と海浜縦断形予測への応用が可能である。

参考文献

- 宇多高明 (1997): 「日本の海岸侵食」, 山海堂, 442 p.
- 宇多高明・石川仁恵・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・前原海岸の事例一, 地形, 第 22 巻, pp. 217-226.
- 宇多高明・高橋 豊・青木 豊・加藤憲一 (1997): 西湘海岸の海浜堆積物の分布特性—森戸川河口沖の海底谷周辺に着目して—, 地形, 第 18 巻, pp. 37-52.
- 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.
- 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・野志保仁 (2004): 粒度組成の 3 次元変化を考慮した等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 441-445.
- 合田良實・佐藤昭二 (1972): 「海岸・港湾」, 396 p.
- 永井紀彦・佐藤和敏・菅原一晃 (2002): 港湾空港技術研究所資料, No. 1017, 278 p.
- 永井紀彦・佐藤和敏・菅原一晃・川口浩二 (1997): 港湾技研資料, No. 926, 269 p.
- 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, 570 p.
- 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.
- Wiegel, R. L. (1964): Oceanographical Engineering, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 532 p.