

飛砂による海浜砂の損失を考慮した汀線変化モデル

三浦正寛*・宇多高明**・芹沢真澄***・小林昭男****

一般に潤沢な砂の供給が可能で、かつ陸向きに強風の作用を受ける海岸では、海岸線背後には広大な砂丘地が形成される。このため、海岸から飛砂による陸側への砂輸送は、海浜変形の一要因になると考えられる。そこで、本研究では、海岸線から内陸への飛砂による砂輸送を考慮するために飛砂量と浜幅を関連付けた飛砂量算定式を提案し、従来の汀線変化モデルに飛砂による土砂損失の項を取り入れた新しい汀線変化モデルを開発した。さらに、開発したモデルを新潟県の新潟海岸と千葉県幕張人工海浜に適用し、モデルの妥当性を調べた結果を得た。

1. はじめに

海風によって生じる飛砂は長い年月の間に背後地に広大な砂丘地を発達させる。特に冬季季節風の強い作用を受ける日本海側では、各地に広大な海岸砂丘の発達が見られる。このような砂丘の堆積土砂量はかなり大きいことを考慮すると、前浜が広く十分な砂の供給を行うことができ、しかも細砂で構成される海浜の長期的変化を論ずる際には、飛砂による砂移動を海浜変形要因として無視できないと考えられる。これには海浜から陸へと運ばれる飛砂を海浜砂の損失要因として定量的に評価し、それと海浜変形とを結び付けることが必要とされる。しかし、局所的な飛砂量の算定は行われることはあっても、広域の海浜変形と飛砂を同時に考えた研究はなされてこなかった。本研究では、このような予測を可能とするため飛砂による土砂損失を考慮した汀線変化モデルを開発する。

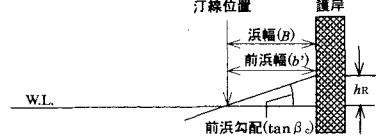
2. モデルの構成

飛砂量式については、Bagnold (1936) 以来多くの算定式が提案されているが、いずれも飛砂量を風速 u の 3 乗に比例するとしている。そこで本研究では、次の飛砂量算定式を導入する。

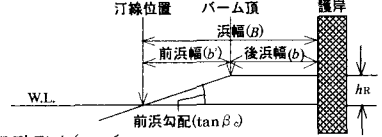
$$q = k_s u^3 \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 q は飛砂量、 k_s は飛砂量係数である。この式で計算される飛砂量は、飛砂の発生可能地点から風下方向に十分離れ、平衡状態に達した場所での飛砂量である。しかし実際の海浜では、飛砂量が平衡状態に達するほどの浜幅のない海浜も多い。堀川ら (1983) の現地観測によれば、飛砂が平衡状態に至るまでの距離として、飛砂発生開始地点から約 10 m が必要であるとしている。そこで本研究では、表面が湿潤条件下では飛砂が発生せず、乾燥した海浜上でのみ発生するとして、飛砂が発生し始

(a) 飛砂の発生なし ($B < b'$)



(b) 飛砂発生 ($0 < b < 10$)



(c) 飛砂発生 ($10 < b$)

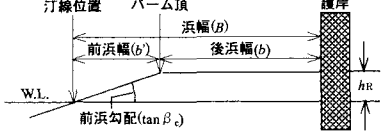


図-1 飛砂の発生条件

める地点をバーム頂部とし、図-1 に示す 3 条件を考える。図-1(a) は護岸前面の浜幅 (B) が前浜幅 ($b' = h_R / \tan \beta_c$) と同じかそれより狭く、後浜が全く存在しない場合で、この条件下では飛砂は発生しない。

$$q = 0 \quad B < b' \quad \dots \dots \dots (2)$$

一方、図-1(b) は護岸前面には後浜があるが、後浜幅 ($b = B - b'$) が飛砂量の平衡状態となる幅を満足しない条件 ($b < 10$ m) であり、このとき飛砂量を便宜上後浜幅の一次関数に比例すると考えて次式から算出する。

$$q = k_s u^3 (b/10) \quad 10 > b > 0 \quad \dots \dots \dots (3)$$

図-1(c) は後浜幅が十分広い場合 ($b > 10$ m) で、飛砂量は平衡状態に至るという条件より次式で算出する。

$$q = k_s u^3 \quad b > 10 \quad \dots \dots \dots (4)$$

式 (2) ~ (4) は風が海岸線に対して直角に吹く場合であるが、海岸線に対して斜めに風が吹く場合には飛砂量の岸沖方向成分のみが陸へと移動し、その分海浜から砂が消失する。この場合の飛砂量は次式から算出する。

$$Q_s = q \cos \alpha \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 α は海岸線に立てた法線と風向のなす角である。

* 正会員 工修 (株)水城ネットワーク
** 正会員 工博 (財)土木研究センター理事 なぎさ総合研究室長
*** 海岸研究室(有)
**** 正会員 工博 日本大学助教授理工学部海洋建築工学科

式(5)から飛砂量を計算するとともに波による沿岸漂砂量を計算し、次の汀線変化モデルの連続式から汀線変化を算出する。

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -\frac{1}{h} \left(\frac{\partial Q_x}{\partial x} - Q_{in} \right) - \frac{Q_s}{h} \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 Q_{in} は河川などからの土砂流入量である。

3. モデルの検証

(1) 新潟海岸への適用

a) 新潟海岸の概要

モデルの妥当性を調べるために現地海浜への適用を行った。対象海浜の第1は新潟海岸である。図-2には新潟海岸の位置を示す。新潟海岸では、過去数千年間にわたって信濃川などからの供給土砂が沿岸漂砂により運ばれ堆積するとともに、飛砂が内陸へ運ばれた結果、新潟市から角田岬までの間に最高標高約50 mの海岸砂丘が

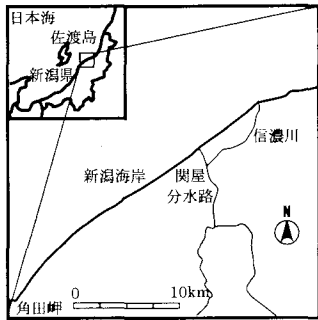


図-2 新潟海岸の位置

発達している。しかしながら、近年では大河津分水路通水に伴う流出土砂量の減少や、新川・巻漁港の建設に伴う沿岸漂砂阻止に起因する海岸侵食が発生している(宇多, 2004)。また冬季の季節風が陸向きに吹くため、飛砂による土砂損失も無視できないと推定される(佐藤ら, 1999)。

そこで海岸線から内陸へ運ばれる飛砂量について、その積分された結果としての海岸砂丘の発達状況を調べた。図-3には国土地理院のDEMデータから作成した砂丘の標高図を示す。また図-4はこの標高図から読み取った砂丘高(h_s)と砂丘幅(B_s)の沿岸分布、さらに図-5は砂丘の断面積(V)の沿岸分布である。これらによれば、四ツ郷屋の東約2 km 地点から西で砂丘の規模が急激に増大している。同じ季節風的作用下ではこのような違いが起こることは考えにくい。この原因として、図-3に示すように、四ツ郷屋の西側の海岸線の角度は、新川以東と比較して約20°反時計回りに傾いていることが考えられる。

b) 汀線変化予測

砂丘の発達を考慮した汀線変化モデルを新潟海岸に適用した。計算対象は、沿岸方向に20 kmの海岸線とし、宇多ら(1998)の展開座標を用いた。まず初期条件として、信濃川からの供給土砂量については、大河津分水路からの流出土砂量が約 $5.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ と推定される(土屋ら, 1994)ので、通水前はこの量が信濃川から流出していたと仮定する。また、河口デルタの左半平面での発達を考えれば流出土砂量は1/2となり、さらに信濃川から角田岬までの距離(25 km)に対し人工化が進んだ関屋分

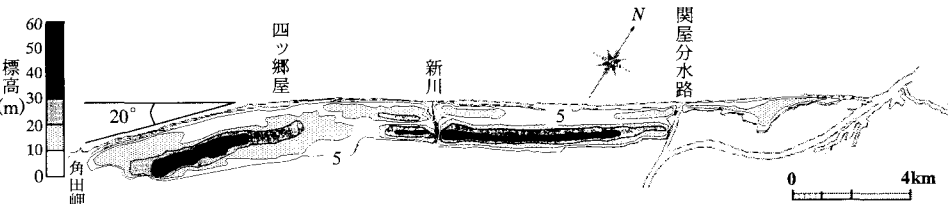


図-3 DEMデータより作成した砂丘形状

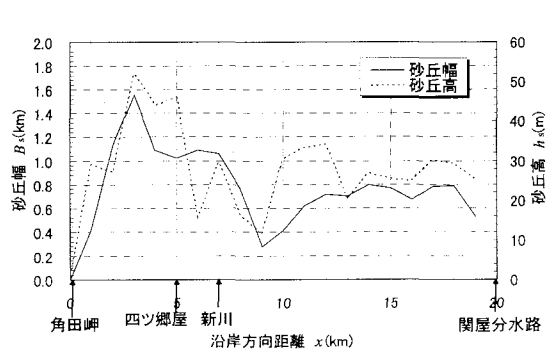


図-4 砂丘幅と砂丘高の沿岸方向分布

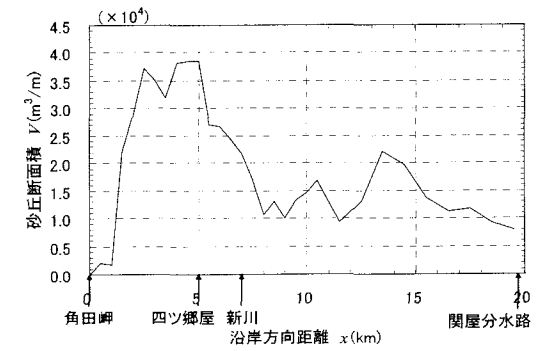


図-5 砂丘断面積の沿岸方向分布

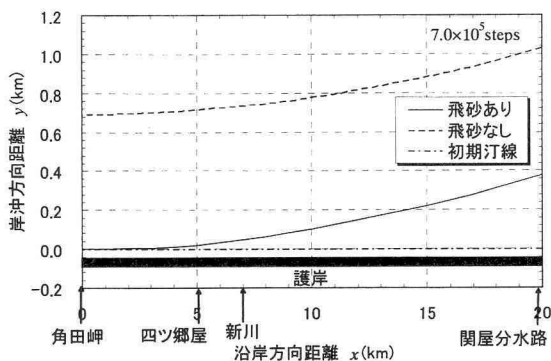


図-6 汀線変化予測

水路以東(5 km)を計算区域から外し、距離の短縮率を考へる。境界条件は、海岸線の短縮量を考慮して関屋分水路から $2.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ の土砂が沿岸漂砂として流入すると仮定し、角田岬では $Q_x = 0$ の条件を与える。また実際の海岸線は曲率を有しているが、展開座標のもとで直角入射条件での河口デルタの発達問題としてとらえた。

入力条件として、前浜勾配 ($\tan \beta_c$) は $1/10$ 、バーム高 (h_R) は 2 m 、波による地形変化の限界水深は 8 m 、入射波高 (H) は 1 m とし、風向は冬季季節風の WNW、風速 (u) は 10 m/s の一定とした。ここでは風向 (α) を一定方向に固定し、また初期汀線も展開座標を考え直線としてしているが、実際の海岸線では角度の差があるため、関屋分水路より東 15 km に位置する四ツ郷屋までの区間では飛砂量係数 k_s を 2.0×10^{-6} とし、海岸線方向が大きく変わる四ツ郷屋以西では 6.0×10^{-6} とした。計算時間は飛砂量と流出土砂量が平衡状態となる $7.0 \times 10^5 \text{ steps}$ (約400年) とした。

図-6 には飛砂の有無の場合を比較した汀線変化計算の結果を示す。飛砂損失を考慮すると河口デルタの発達は遅くなり、全域で汀線前進量が小さくなる。図-7 は図-6 の汀線変化計算の結果において、飛砂の有無による前浜面積の差に漂砂の移動高 (10 m) を乗じて算出した飛砂量の沿岸方向分布である。これによれば、土砂供給源より離れるほど飛砂量が多くなるという結果が得られた。この飛砂量分布は定性的であるが、図-5 の砂丘断面積が西部で大きいという傾向を説明している。

(2) 幕張人工海浜への適用

a) 幕張人工海浜の概要

前節の結果は、河口デルタの発達に伴う動的安定海浜の場合であったが、次に静的安定海浜(ポケットビーチ)におけるモデルの適用性を調べるため、千葉県幕張人工海浜を対象とした数値計算を行った。幕張人工海浜は、図-8 に示すように東京湾奥部に位置し、南西方向に向いた人工海浜である。人工海浜の建設は1979年に行われ、全長は約 1.2 km である。東京湾奥部に位置し

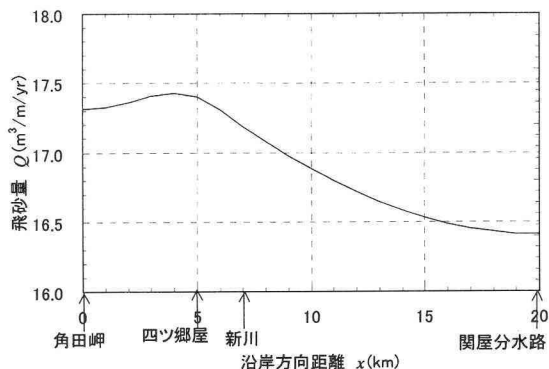


図-7 飛砂量の沿岸方向分布

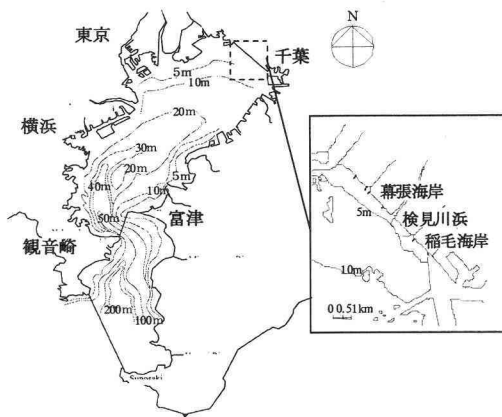
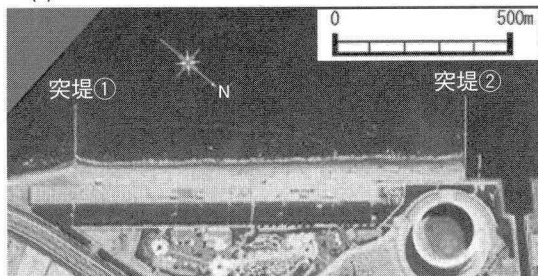


図-8 幕張人工海浜の位置

(a) 1997年



(b) 2004年

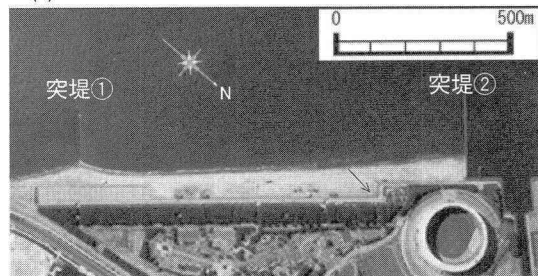


図-9 幕張人工海浜の空中写真

ているため、海岸に入射する主な波は南西方向からの風波である。

図-9は1997年と2004年撮影の幕張人工海浜の空中写真である。人工海浜背後に黒く見えるのは飛砂防止のための保安林である。この人工海浜は南東端と北西端にある長さ250 mの突堤①、②で区切られたポケットビーチである。突堤①の背後で汀線近傍まで張り出した長方形区域は駐車場である。また突堤②の陸側には円形ドーム(野球場)があるが、この周辺では護岸線が海側に約45 m突出しており、このため南東側と比較して護岸突出部ではその分浜幅が狭まっている。

b) 飛砂状況の現地調査

海浜の北西端付近ではほぼSSW方向の風により海浜砂が飛砂により運ばれ背後地で障害が発生している。2004年8月21日、この状況を現地調査によって調べた。写真-1は、海浜背後の管理用通路から海側を望んだものであるが、飛砂により小規模な砂丘が形成され、砂丘背後には海側から運ばれた飛砂の堆積が見られる。写真左下に見えるのが管理用通路と海浜とを分けるフェンスであるが、その前面に小高い山ができていいる。飛砂はフェンスの内側にとどまらず外側にまではみ出している。このため踏査時には写真-2のように重機により砂がかけ集められていた。写真-3は砂が排除された後の状況である。さらに図-9(b)に矢印で示す護岸隅角部では写真-4のように大量の飛砂が通路にまで運ばれてきていた。以上のように、幕張人工海浜では飛砂が背後地へと運ばれることは単にそれが障害となるだけではなく、貴重な養浜材の損失にも繋がる恐れがあることから、海浜の維持管理上も問題となっている。

c) 汀線変化解析

図-9より汀線形状を読み取って定量化したのが図-10である。1997年にはほぼ直線状であった汀線が、2004年には突堤①の付け根では波の遮蔽効果により変化が小さいものの、突堤からの沿岸距離が増加すると汀線の後退が著しくなり、突堤による波の遮蔽域の外側の $x=200$ mの付近では、最大15 mの汀線後退量が生じた。海浜の大部分で汀線の後退が目立っており、汀線の前進域は突堤②近傍の200 m区間に限られる。全体的に見れば汀線の後退域の面積 $8.3 \times 10^3 \text{ m}^2$ に対し、前進域の面積は $3.5 \times 10^3 \text{ m}^2$ と平面的に見ると土砂収支は成立せず欠損量が多い。この原因には写真-1～写真-4に示したように、対象区域からの飛砂による損失や細粒土砂の沖へ損失が考えられる。両者の区分には詳細な測量が必要とされるが、ここではこのようなバックデータがないことから、全量が飛砂に起因すると考えて検討を進める。

図-11は、1997年から2004年までの汀線変化量と、1997年の空中写真をもとに風下方向に測った浜幅の沿岸

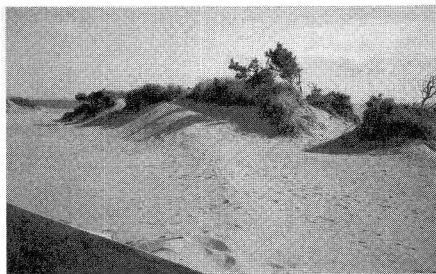


写真-1 幕張人工海浜に形成された砂丘背後での砂の堆積



写真-2 フェンスと背後の遊歩道に堆積した砂の除去作業



写真-3 フェンス前面・背後の堆砂を除去した後の状況



写真-4 護岸隅角部に堆積した飛砂

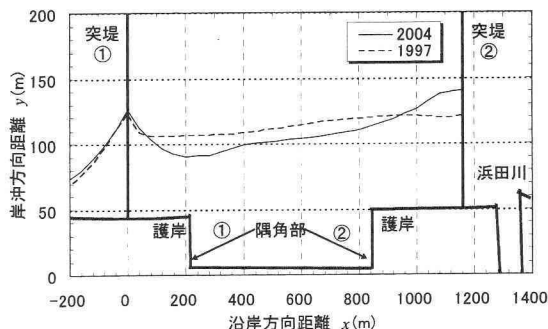


図-10 護岸形状と汀線変化

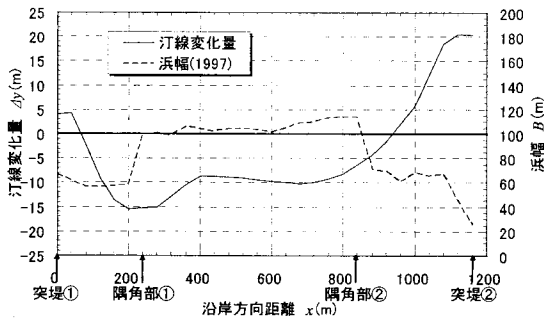


図-11 汀線変化量と風下方向に測った浜幅の分布

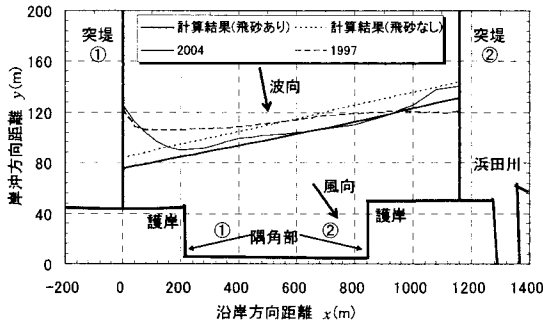


図-12 汀線変化予測

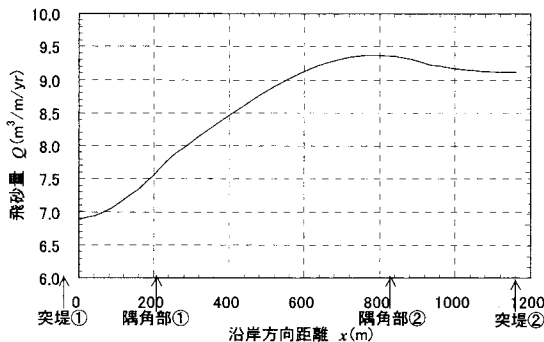


図-13 飛砂量の沿岸方向分布

分布である。汀線は突堤による波の遮蔽域を除くほぼ全域で後退しているが、浜幅が広い区域ではとくに後退が著しい。

d) 汀線変化予測

1997年から2004年までは再養浜や沖への土砂流出はないという条件で計算を行った。まず初期汀線については1997年の汀線として、作用波高は宇多ら(1994)を参考として0.33 mとし、波向については2004年の空中写真から読み取った汀線と座標軸とのなす角より 3° とした。バーム高と前浜勾配は、野志ら(2004)による検見川浜の測定値より2.2 m, $1/25$ とした。波による地形変化の限界水深は芹沢ら(2003)より4.0 mとした。また漂砂量係数は0.5とおいた。風のデータに関しては、気象庁アメダス観測データより年平均風速として風速が4.2

m/s, 風向が $S26.5^\circ W$ とした。さらに飛砂量係数は 1.0×10^{-6} とした。

図-12には飛砂の有無の場合の汀線変化予測の結果を示す。飛砂を考慮した計算結果は、飛砂を考慮しない汀線変化予測結果よりも沿岸方向全域にわたって汀線が後退し、2004年の汀線形状との一致度が高いことが分かる。図-13には飛砂量の沿岸分布を示すが、飛砂量の最大値は隅角部②付近であり、このことは写真-4に示した隅角部での大量の飛砂の堆積をよく説明している。

4. 結 論

飛砂量の計測実験や現地観測は過去に数多くなされてきたが、本研究のように飛砂と海浜変形を直接結び付けた実用的研究は現在までにされていないのが現状であった。本研究では、飛砂による海浜からの土砂損失を考慮した汀線変化モデルを開発し、新潟海岸と幕張人工海浜に適用した。新潟海岸では、河口より最も離れた角田岬付近で飛砂量が大きくなる現象が、また幕張人工海浜では浜幅が最も広い護岸隅角部で飛砂量が最大となる現象がモデルで説明可能となり、現地海浜での状況を定性的ではあるがかなりよく説明できた。今後はさらに定量化を進めたいと考えている。

謝辞：本研究では、海岸研究室(有)の三波俊郎、日本大学大学院の野志保人、(株)水域ネットワーク酒井和也各氏にお世話になった。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 宇多高明(2004)：海岸侵食の実態と解決策，山海堂，p. 304。
- 宇多高明・堀越信雄・林 順一(1994)：入り組んだ湾奥部での人工海浜計画上の留意点—東京湾を例として—，海岸工学論文集，第41巻，pp. 591-595。
- 宇多高明・住谷勉夫・矢澤 肇・大谷靖郎・厚坂祐次(1998)：展開座標を用いた汀線変化モデルによる親沢鼻砂嘴の地形変化予測，海岸工学論文集，第45巻，pp. 541-545。
- 佐藤肇司・大谷靖郎・橋本 新・堀口敬洋(1999)：新潟海岸における飛砂の実態と防砂フェンスの機能，海岸工学論文集，第46巻，pp. 496-500。
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼(2003)：等深線変化モデルの拡張による x - y メッシュ上の水深変化の計算法，海岸工学論文集，第50巻，pp. 476-480。
- 土屋義人・山下隆男・斉藤正勝(1994)：河口デルタの拡大・縮小に起因する海浜変形(1)―寺泊・野積海岸での河口デルタの形成―，京都大学防災研究所年報，第37号B-2，pp. 539-568。
- 野志保人・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・熊田貴之(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。
- 堀田清司・堀田新太郎・久保田 進・香取完和(1983)：トレンチトラップによる飛砂量の現地観測，海岸工学論文集，第30巻，pp. 303-307。
- Bagnold, R. M. (1936)：The movement of desert sand, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, Vol. 157, pp. 211-235。