

# 砂れん上の底質移動に及ぼす海底勾配の効果と海浜の安定化機構

小野 信幸\*・入江 功\*\*・西岡 悟史\*\*\*

## 1. はじめに

従来海浜の安定化は、突堤や潜堤、離岸堤などの海岸保全施設で漂砂の移動を制御することで行われてきた。しかし最近の景観・生態学的に優れた海岸整備の要請から、自然海浜そのものを保全し、その高い防護機能を生かしていく努力がなされつつある。次世紀にかけて、地球温暖化に伴う海面上昇が危惧されている今日、従来のような高価な海岸構造物で海岸保全を施すのではなく、安価で自然海浜を生かす技術の発展が望まれる。そのためには、海浜が来襲する波に対してどのような機構で安定を保つのかを明らかにする必要がある。

同一特性の波のある初期勾配の海浜に長時間作用させた場合、海底勾配は徐々に変化し、最終的に一定の断面形状（平衡勾配）に落ち着く様子が観察される。沖浜帯では海底面に砂れんが形成され、その周辺では波による底質移動が常に生じている。その移動方向は底面が水平ならば通常沖向きである（砂村ら, 1978）。しかし、沿岸砂洲の沖側では海底勾配が急になって安定し、これが地形安定に大きく寄与していることを考えると、底面が勾配を有することが沖向き漂砂に寄与する重力の効果と釣り合うような、岸向きへの漂砂を発生させていると考えねばならない。

本研究では、海底勾配が大きくなった場合に底質移動が岸向きに転ずるような事があるのかを実験的に調べるものである。

## 2. 砂れん上の流れに関する固定床実験

### 2.1 実験方法

実験は図-1 に示す長さ 28 m, 幅 0.3 m, 高さ 0.5 m の二次元造波水路を用い、静水深  $h_0$  を 35 cm に設定して行った。水路端には勾配  $\tan \beta = 1/10$ , または  $1/20$  の斜面を設け、その上にモルタル製の固定床砂れんを敷き詰めた。固定床砂れんの形状は、図-2 の上段に示すような砂れん波長  $\lambda = 5.5$  cm, 波高  $\eta = 1.0$  cm の正弦波で模した

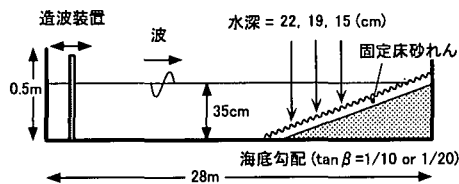


図-1 実験装置図

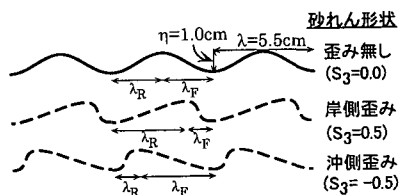


図-2 砂れんの形状

歪み無し砂れん及びその頂部を  $\lambda_F = \lambda/4$  となるように歪めたものを急峻部が岸側と沖側に向くように設置した 3 種類である。 $\lambda$  と  $\eta$  は中央粒径  $d_{50} = 0.16$  mm, 比重  $s = 2.65$  の砂により、水深  $h = 29$  cm, 波高  $H = 8$  cm, 周期  $T = 1.5$  s の波を作用させた場合に形成される砂れんの形状から定めたものである。本研究では、3 種の砂れん上の流れの測定を行った。また、歪み無し砂れんについては底質移動に関する実験も併せて行った。

#### (a) 流れの測定

流れ場の測定では、砂れん頂部上の水深が 15, 19, 22 cm の位置で鉛直方向に底面から 0.2~15 cm の間で 20 点（底面付近を密に、上方で粗く）を選び、水平流速の時間波形をレーザー流速計を用いて測定した。同時に、流速測定点の真上において容量式波高計により水面波形を測定した。これを、表-1 に示す 10 ケースの規則波について斜面勾配を  $1/10$  及び  $1/20$  の 2 種に変化させて行った。また、砂れんが歪みをもつ形状については、15 cm と 19 cm の 2 つの水深位置において測定した。

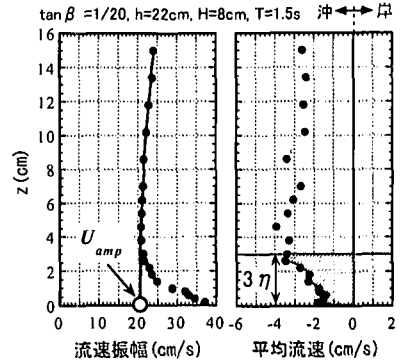
#### (b) 底質移動速度の測定

砂の重心移動速度の測定では、中央粒径  $d_{50} = 0.16$  mm

\* 正会員 工修 九州大学大学院 助手 工学研究科  
\*\* 正会員 工博 九州大学大学院 教授 工学研究科  
\*\*\* 学生会員 九州大学工学部建設都市工学科

表一 波の条件

沖波波高 $H_0$ (cm)	周期 $T$ (cm)	波形勾配 $H_0/L_0$	水深水深別 Ursell 数 $U_r$		
			$h=15$ cm	$h=19$ cm	$h=22$ cm
5	1.0	0.032	18.5	10.5	7.6
7	1.5	0.020	72.4	42.5	30.6
8	1.0	0.051	29.4	16.8	12.2
8	1.2	0.036	49.9	27.9	20.0
8	1.5	0.023	83.1	49.1	35.0
8	1.8	0.016	124.0	74.5	55.2
9	1.5	0.026	97.4	58.0	39.8
9	1.6	0.023	122.3	71.4	47.1
9	1.8	0.018	138.2	80.4	60.2
9	2.0	0.014	173.4	99.1	74.6



図一 底面流速振幅  $U_{amp}$  と底層平均流速  $U_{3\eta}$  の定義図

の砂を用いて (a) に述べた 3 点の位置において 2 つの砂れんトラフに 20 g ずつ計 40 g の砂を投入して波を 0.25~2 分間作用させた。その後、トラフ毎に沈殿した砂を回収して計量し、岸沖方向に分散した砂の重心位置を求め、その時間変化から底質の重心移動速度  $V_g$  を求めた。この測定は、沖波波高は 8.0 cm、周期は 1.5 s と 1.8 s の 2 つの規則波について図一 2 の歪み無し砂れん上でのみ行った。

2.2 歪み無し砂れん上の測定結果

本研究は、海浜断面上のある水深位置において、そこでの局所的勾配が変化する場合に影響を受けて変化する諸量を抽出し、これらが砂れん近傍の流れや底質の移動にどのように影響を与えるかについて調べるものである。以下では、砂れん形状に歪みが無い場合の実験結果について示す。

(a) 比較した諸量

砂れん上の砂移動は底層の流れと密接に関係している。図一 3 に、流速波形の測定データから求めた流速振幅  $u_{amp}(z)$  と一周平均流速  $U(z)$  (岸向き正) の鉛直分布の一例を示した。流速振幅は、砂れん頂部上で測定したため、縮流の効果により底面付近で急激に増大する。そのため、 $U_{amp}$  は図一 3 の左側に示すように、上層部の値から外挿して定めた。また、底面 ( $z=0$ ) から  $3\eta$  までを底層と仮定し、その層の平均流速  $U_{3\eta}$  を求め、これらの 2 つの量を底層部の流れの代表値として定義した。

浅海域の波形の非対称特性は、砂れんの峰の沖側と岸側に形成される渦の規模に大きな影響を与えることが知られており、海底勾配が変化した場合に最も変化する量と考えられる。本研究では、波形の上下非対称性を表す指標として Skewness ( $S_k$ )、前後非対称性を表す指標として Atiltness ( $A_t$ ) を用いた。これらは水面波形の測定値より以下のように算定した。

$$S_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\xi_i - \bar{\xi})^3 / \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\xi_i - \bar{\xi})^2 \right]^{3/2} \dots\dots\dots (1)$$

$$A_t = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (\xi_i - \bar{\xi})^3 / \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (\xi_i - \bar{\xi})^2 \right]^{3/2} \dots (2)$$

ここで、 $N$  はデータ数、 $\xi_i$  ( $i=1, \dots, N$ ) は水面変位、 $\xi = (\xi_{i+1} - \xi_i) / \Delta t$  ( $\Delta t$  はサンプリングの時間間隔) である。 $\bar{\xi}$ 、 $\bar{\xi}$  はそれぞれ、 $\xi$  と  $\xi$  の平均値である。

(b) 測定結果

図一 4 は底層流と波形非対称性の海底勾配による変化を示したものである。図中、黒印は勾配 1/20、白抜き印は勾配 1/10 のデータを示し、横軸は Ursell 数  $U_r (= HL^2/h^3; H$  は波高、 $L$  は波長) で、縦軸は上から波形の前後非対称度を表す Atiltness ( $A_t$ )、上下非対称度を表す Skewness ( $S_k$ )、底層の平均流速を無次元化した  $U_{3\eta}/U_{amp}$  及び、底質の重心移動速度を無次元化した  $V_g/U_{amp}$  である。図一 1 の (A)、(B) は底層の平均流速  $U_{3\eta}/U_{amp}$  に変化が見られたケースと見られなかったケースで分けており、それらは波形勾配  $H_0/L_0=0.02$  を境界として分けることができた。以下に海底勾配が急になった場合(海底勾配 1/20 → 1/10) について各項目の変化傾向の特徴を述べる。

波形の前後非対称度  $A_t$  は  $U_r$  が小さい条件では減少傾向であるが、 $U_r$  が大きい条件では増加傾向となり、その変化点は  $H_0/L_0$  により異なる。また、(A) に比べ (B) が若干変化の幅が大きい。

$S_k$  は全てのケースで減少傾向であるが (A) に比べ (B) は変化の幅が小さい。

$U_{3\eta}/U_{amp}$  は (A) では沖向き流速の絶対値が減少した方が、(B) ではほとんど変化が見られなかった。

$V_g/U_{amp}$  は波形勾配  $H_0/L_0=0.02$  より大きい場合 ( $H_0=8$  cm、 $T=1.5$  s) と小さい場合 ( $H_0=8$  cm、 $T=1.8$  s) の波の条件に対応したケースについて調べた。図より、海底勾配が急になると (A) では  $V_g/U_{amp}$  は沖向きから岸向きへ変化した、(B) では底層流  $U_{3\eta}/U_{amp}$  はほとんど変化していないが、 $V_g/U_{amp}$  の沖向きへの移動速度が小さくなった。

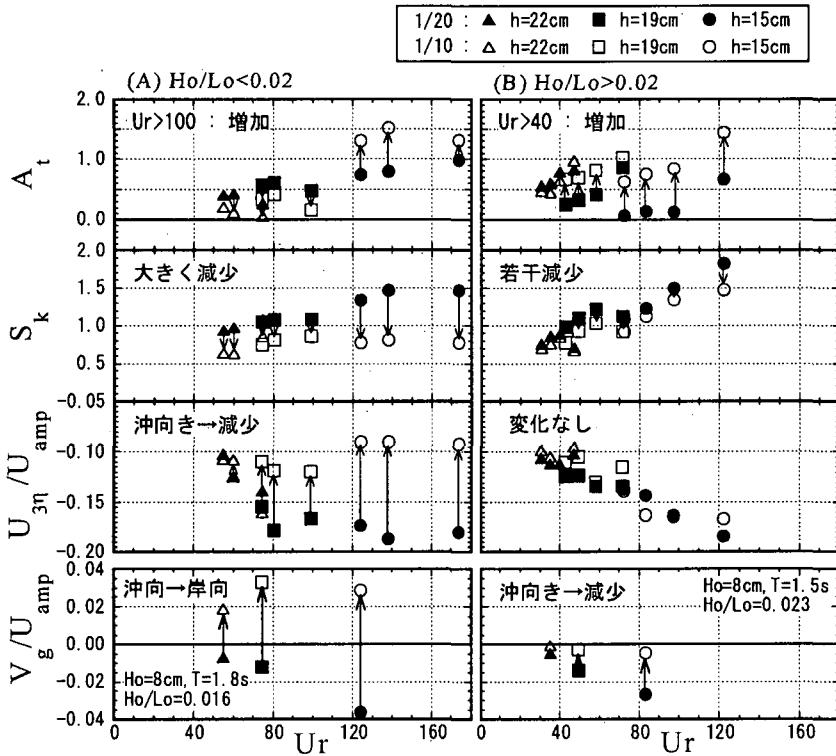


図-4 波形の非対称性, 底層流, 底質移動速度の測定結果

(c) 実験結果の考察

砂れん上の流れは、波によって砂れん頂部の岸側と沖側に生じる渦の非対称性と深く関連している。波形の上下非対称度  $S_k$  の増大は、砂れん頂部の岸側により規模の大きい渦を生じさせ、底層で沖向きの流れを強める性質を持つ。 $H_o/L_o < 0.02$  の場合の測定結果において、海底勾配が急になった場合に沖向きの流れが弱められたことは  $S_k$  の減少とよく対応している。しかし今回の実験では、底層流  $U_{3\eta}/U_{amp}$  は図-4 の (A) (B) どちらの条件においても常に沖向きであったが、底質移動速度  $V_o/U_{amp}$  は岸向きに転じる場合も見られた。また、 $H_o/L_o > 0.02$  の場合は、 $S_k$  や底層流  $U_{3\eta}/U_{amp}$  はほとんど変化していないが、波形の前後非対称  $A_t$  が著しく増加しており、これが底質を岸向きへ輸送する効果をもつものと思われる。

3. 底層流と底質移動特性の整理

3.1 砂れん上の底層流と底質移動の回帰分析

海浜断面が変化すると、主に海底勾配が変化し、たとえ波高・周期が等しい波が作用していたとしても、水面波形や流速波形の非対称度が変化する。ここでは、海底勾配の変化に伴う波形の非対称性の变化や底質移動量について整理した。

まず、図-4 の結果の内、底層流と底質移動速度が共に

測定されているデータを対象として、 $U_{3\eta}/U_{amp}$ ,  $V_o/U_{amp}$  が  $S_k$  と  $A_t$  の以下のような一次結合で表示できると仮定して回帰分析を行った。

$$U_{3\eta}/U_{amp} = a_{u0} + a_{u1}S_k + a_{u2}A_t \dots\dots\dots (3)$$

$$V_o/U_{amp} = a_{v0} + a_{v1}S_k + a_{v2}A_t \dots\dots\dots (4)$$

(3) 式の回帰係数は  $a_{u0} = -0.0235$ ,  $a_{u1} = -1.107$ ,  $a_{u2} = -0.00394$  であり、(4) 式の回帰係数は  $a_{v0} = 0.0709$ ,  $a_{v1} = -0.0838$ ,  $a_{v2} = -0.0433$  であった。係数の符号より、 $S_k$  の増大に対しては沖向きの寄与、 $A_t$  の増大に対しては岸向きに寄与することがわかる。図-5 に (3) (4) 式と実測値の対応を示した。

図-6 は、 $S_k$ ,  $A_t$  の変化が底層流や底質移動速度に及ぼす寄与の程度を調べるため、回帰分析に用いた諸量をそれぞれの平均値と標準偏差で標準化し (例えば、 $S'_k = (S_k - \bar{S}_k)/\sigma_{S_k}$ ,  $S'_k$  は  $S_k$  の標準化データ、 $\bar{S}_k$  は平均値、 $\sigma_{S_k}$  は標準偏差である)、その偏回帰係数  $\beta_{ui}$  と  $\beta_{vi}$  ( $i=1, 2$ ) を表示したものである。図より、 $(U_{3\eta}/U_{amp})'$ ,  $(V_o/U_{amp})'$  の変化は Skewness の寄与が大きいことがわかる。また、それぞれの係数の絶対値の比は  $\beta_{u2}/\beta_{u1} = 0.05$ ,  $\beta_{v2}/\beta_{v1} = 0.23$  となり、底層流に対する Atiltness の寄与はほとんどないが、底質移動に対してはその寄与がより顕著になる。

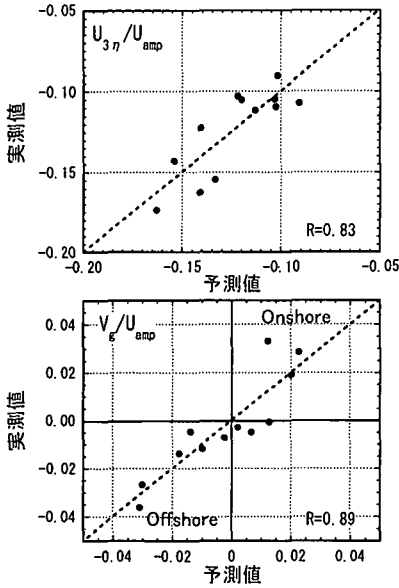


図-5 底層流と底質移動速度の回帰分析結果

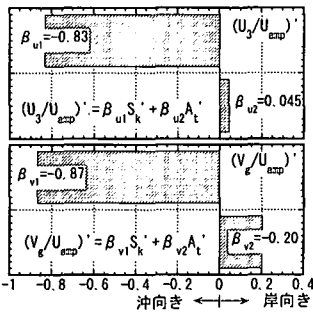


図-6 偏回帰係数の比較

3.2 砂れん形状の歪みの効果

砂れん上の流れや底質移動には、波形の非対称性とともにも砂れんの歪みも重要であると考えられる。そこで、底層流の測定は、図-2の中・下段に示すような、砂れんの波長と波高は等しく岸沖方向に歪みをもつ形状の砂れんについても行った。砂れんの歪み度は、図-2中の記号を用いて  $S_3 = (\lambda_R - \lambda_F) / \lambda$  と定義した。

図-7は、歪み度の異なる3つの砂れん上での底層流の測定結果について、底面での水粒子軌道径  $d_0$  を砂れん波長  $\lambda$  で除した量  $d_0/\lambda$  を横軸にとり表示したものである。図より、特に  $d_0/\lambda$  が小さい条件 ( $< 2$ ) では、 $U_{3\eta}/U_{amp}$  に対する砂れん歪みの影響が大きい。 $d_0/\lambda$  が大きい条件 ( $> 2$ ) では、 $S_3$  が 0 と 0.5 の砂れん上の流れはほぼ等しくなっている。また、 $d_0/\lambda$  が等しい条件における各形状の砂れんに対するデータのばらつきは、前節までに述べた海底勾配が変化したときの  $S_k$  や  $A_t$  の変化に

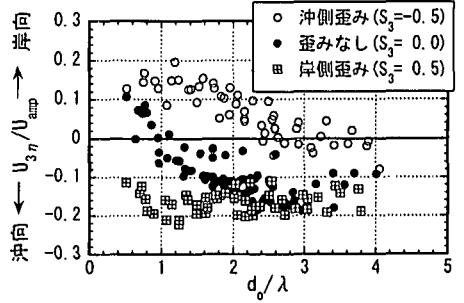


図-7 砂れん歪み度  $S_3$  が異なる場合の底層流の変化

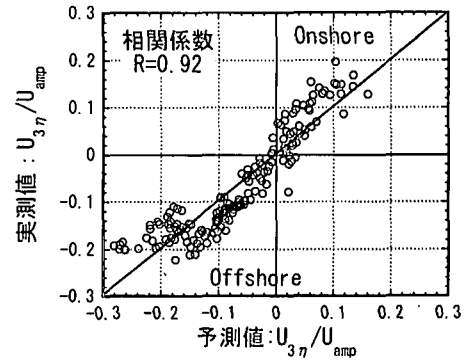


図-8 底層流の回帰分析結果

よる影響と考えられる。

全ての測定データを対象として、砂れん上の流れに対する回帰分析を行い、以下の回帰式が得られた。

$$\frac{U_{3\eta}}{U_{amp}} = 0.0245 - 0.044 \ln\left(\frac{d_0}{\lambda}\right) - 0.077 S_k - 0.24 S_3 \dots (5)$$

図-3に示すように、(5)式と実測値の相関係数は0.92であり、回帰式は砂れん上の底層流の特性をよく表している。底層流に対する海底勾配の効果は、 $S_k$  の変化に対して式中に考慮されており、海底勾配が急になると  $S_k$  が減少するため、沖向流速が弱まるといった性質を示す。

4. 沖浜帯の安定化に関する考察

海底勾配の変化による底質移動の特性が、移動床での海浜変形特性にどのように影響するかについて考察した。図-9の上段は、中央粒径  $d_{50} = 0.16 \text{ mm}$  の砂により、初期勾配  $1/30$  の模型海浜を作成し、これに有義波高  $H_{1/3} = 8 \text{ cm}$ 、有義周期  $T_{1/3} = 1.5 \text{ s}$  の波を120時間作用させた場合の断面形状である。図-9下段は、沖浜帯に位置する領域(上段の四角で囲んだ部分)の拡大図であり、120時間後の断面の一部を勾配  $1/5$  になるように掘削し、その後同じ波を30時間作用させた場合の断面変形の様子を示している。図中の破線で示す水深位置は、海底勾配

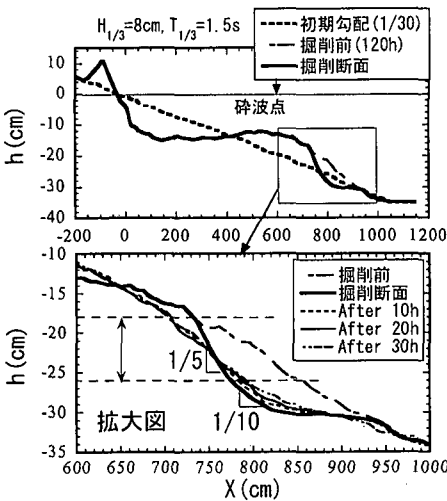


図-9 移動床の海浜断面形状

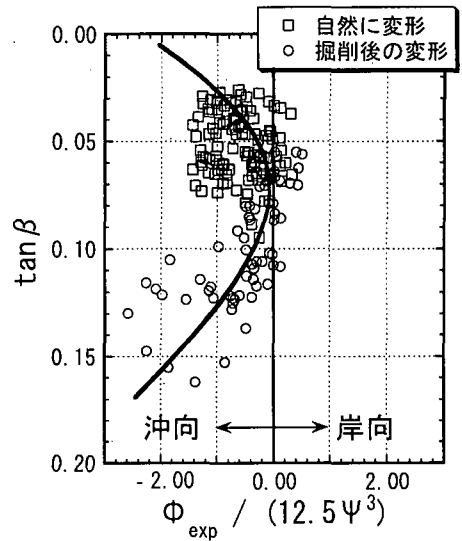


図-10 海底勾配による漂砂量の変化

が 1/30~1/5 の範囲で変化するので、この領域の海底勾配と漂砂量との関係を図-10 にプロットした。

図-10 の縦軸は海底勾配、横軸は無次元化した実測漂砂量  $\Phi_{exp} = (1-n)q/wd_{50}$  を Madsen ら (1976) の半周期平均漂砂量式 ( $=12.5 \Psi^3$ ) で除した量である (岸向き正)。ここで、 $q$  は地形変化から求めた岸沖漂砂量、 $w$  は底質の沈降速度、 $n$  は空隙率、 $\Psi$  はシールド数である。図は、海浜断面が初期勾配から自然に変形していくときのデータと、掘削後の変形時のデータを分けて表示した。

図中の  $\tan \beta = 0.03$  から 0.10 付近までは主に自然に変形する場合のデータであり、海底勾配の増加により沖向き漂砂量が減少する傾向が見られる。また、主に掘削後のデータで占められる  $\tan \beta$  が 0.10 以上では、勾配が大きいほど沖向きの漂砂量も大きい。両者のデータの中間に位置する  $\tan \beta = 1/10$  程度では漂砂量がゼロ近くまで減少している。

この移動床での現象から考察される沖浜帯の断面の安定化は、海底勾配が極度に大きければ、これを緩やかにする方向 (沖向き) への砂移動が生じ、重力の効果と今回の固定床実験から得られた諸量がバランスする状態にまで断面が変形する。一方、初期の勾配が非常に水平に近い状態であれば、水深の浅い場所と深い場所における砂移動量の差が蓄積されることにより海底が急勾配化する。その際増加する重力の効果とバランスするように働く要素として、波形の非対称性の変化 ( $S_k$  の減少と  $A_s$  の

増加) が生じていると考えられる。

### 5. まとめ

砂れん上の流れ場と砂の重心移動速度について海底勾配を変えて実験し比較した。海底勾配が急になると (1) 波形の上下非対称の減少により沖向き底層流が弱まり、これに加え、(2) 前後非対称の増加による底質を岸向きに転ずる。これらが重力の効果と作用し合い、沖浜帯の海浜断面は安定に近い状態となる。

### 参考文献

入江 功・小野信幸・村上啓介・橋本誠也・中村 聡 (1993): 歪み砂れんマットによる沖浜帯の岸沖漂砂の制御, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 561-565.  
 大塚行則・三村信男・渡辺 晃 (1984): 不規則波による二次元海浜変形と岸沖漂砂, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 321-325.  
 小野信幸・入江 功・高畑栄治 (1998): 海浜断面の安定化機構に関する実験, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 501-505.  
 砂村継夫・阪東浩造・堀川清司 (1978): 非対称砂れん上での砂移動機構と漂砂量に関する研究, 第 25 回海岸工学講演会論文集, pp. 250-254.  
 武若 聡・入江 功・深川孝之 (1996): 浅海域の水面波形と底面流速波形の非対称特性, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 146-150.  
 Madsen, O. S. and W. D. Grant (1976): Quantitative description of sediment transport by wave, Proc. 15th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1093-1112.