

# サンドパック潜堤の安定性と海岸侵食緩和機能

## Stability and Beach Erosion Control Performance of Submerged Sand Pack Breakwater

平松遥奈<sup>1</sup>・佐藤慎司<sup>2</sup>

Haruna HIRAMATSU and Shinji SATO

Laboratory experiments were performed on the stability and the erosion control performance of a submerged sand pack breakwater. Design criteria for the size and the shape of the sand pack were proposed in terms of  $B/d_o$  and  $F/W$ . Successive action of inertia force and drag force under a tilted broken wave was found to be critical for the stability. Erosion control performance was verified by a series of beach profile measurements in which the shoreline retreat and the decrease of beach sand volume were both mitigated by a submerged sand pack structure introduced at the bar location. Characteristics of local scour around the structure were also investigated by a wave basin experiment.

### 1. はじめに

海岸侵食が深刻な海岸では、沿岸の大規模構造物や長大な護岸などの構造物が沿岸の漂砂を遮断し、海岸過程の結果として暴浪時に出現していた沿岸砂州（バー）が消滅している事例も多い。沿岸砂州が消失すると、本来そこで碎波していた高波が碎波しないまま海岸に襲することになり、さらに急速な海岸侵食を引き起こすことになる。このような場における波浪制御施設としては、離岸堤や人工リーフが効果的であるが、沿岸砂州の形成領域のような大水深域を想定すると、施設が大規模になり、コストや生態系環境への影響などを検討する必要がある。

本研究では、低コストでより自然に近い素材を用いたサンドパックを用い、消滅した沿岸砂州の代替として、サンドパック潜堤を碎波点付近に施工するという海岸侵食対策を検討する。サンドパックとは、ジオテキスタイル製の袋体に現地地砂を充填したものである。海岸施設としての活用例は日本では少ないものの、海外ではメキシコで、4kmの長さのジオテキスタイルチューブが、汀線際に侵食対策として設置された事例（Alvarezら、2006）や、オーストラリアのゴールドコーストで、海浜安定化とサーフィン利用を目的として、サンドパックを用いた人工リーフを施工したという事例がある（Saathoffら、2007）。また、Pilarczyk（2000）では、海岸、海洋における様々なジオテキスタイルシステムの利用が整理されている。

本研究では、施工事例が少なく、設計手法が確立していないサンドパックが、潜堤の材料として有効であるかどうかを検討するため、実験により安定性の検討を行い、

設計基準を提案する。さらに、サンドパックを用いた潜堤を沿岸砂州が形成される位置に設置することにより、これが消滅した沿岸砂州の代替となり、海岸侵食対策となるかどうかについて移動床実験で検討する。

### 2. サンドパックの安定性

#### (1) サンドパックの最適サイズ

底面近傍のサンドパックに作用する波力を次式に示すモリソン式で評価する。

$$dF = \left[ C_D \frac{1}{2} \rho_w D u |u| + C_M \rho_w A \dot{u} \right] ds \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 $dF$ は部材軸方向の長さ $ds$ に作用する、部材軸と水粒子運動共通面における部材軸方向に直角方向の力、 $\rho_w$ は水の密度、 $D$ は部材の基準高さ、 $A$ は部材の基準断面積である。また、 $C_D$ と $C_M$ は、それぞれ、抗力係数と慣性力係数である。本研究ではこれらの係数の評価において、底面の存在を無視し、流れの中に孤立する円柱断面構造物に対する係数をそのまま用いることとする。

断面が楕円の柱状構造物に作用する抗力の最大値 $F_{Dmax}$ と慣性力の最大値 $F_{Imax}$ との比は次式で表すことができる。

$$\frac{F_{Dmax}}{F_{Imax}} = \frac{C_D}{\pi C_M} \frac{d_o}{B} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $B$ は部材の幅、 $d_o$ は底面付近における水粒子軌道長径である。式(2)より、 $F_{Dmax}/F_{Imax}$ は、 $B/d_o$ に反比例する。すなわち、水粒子軌道長径や波高に比べて、構造物の幅が大きいときには慣性力が卓越する。

碎波帯近傍を考えることにして、波高 $H$ を $H=\gamma h$  ( $\gamma=0.78$ )で与え、さらに長波近似を導入する。断面が円に近い柱状構造物として、 $C_D=1.2$ 、 $C_M=2.0$ とすると、式(2)は、

$$\frac{F_{Dmax}}{F_{Imax}} \cong \frac{C_D}{C_M} \frac{\gamma}{2\pi^2} \frac{\sqrt{gh}T}{B} \cong \frac{1}{42} \frac{\sqrt{gh}T}{B} \quad \dots\dots (3)$$

となる。ここで、 $h$ は水深、 $T$ は周期、 $g$ は重力加速度で

1 修士(工学) 西日本旅客鉄道株式会社  
2 フェロー 工博 東京大学大学院 教授 工学系研究科 社会基盤学専攻

ある。すなわち、構造物幅と局所波長の比が42より大きい場合には、慣性力が卓越することになる。

さらに、構造物の摩擦力は、構造物の重量に比例するため、抗力が卓越する条件では、構造物径が大きいほど安定であり、慣性力が卓越する条件では、安定性は構造物径によらない。したがって、抗力と慣性力が等しくなる構造物サイズより小さい構造物では抗力が卓越するので、大きい方が有利、これより大きい場合には慣性力が卓越するので、大きさよりも形状を工夫して、摩擦力を大きくすることが有利となる。

(2) サンドバックの安定領域

安定性に関する実験は、長さ35m、深さ0.8m、幅0.6mの二次元造波水路を用いて、1/30勾配の固定床で行った。一様水深部での水深は29cmとした。サンドバック模型は、布で作成した袋体に粒径0.3mmの砂を充填して、寸法の異なるサンドバック模型を5種類作成した。すべての模型の断面は楕円形状で、高さDは1.4cmである。長さが10cmの模型は、幅Bが2.2cmのS、3.6cmのM、4.5cmのLの3種類で、残りの2種類は断面がMと同じで長さが20cm、30cmのものである。サンドバックの断面積をAとして、単位長さ当たりの水中重量Wは、

$$W = (\rho_s - \rho)gA(1 - \varepsilon) \dots\dots\dots(4)$$

となる。ここで、 $\varepsilon$ は袋体内の砂の空隙率である。上式の水中重量は乾燥状態のサンドバックの重量から、砂粒部分の体積のみに作用する全浮力を引いたものに等しい。本研究で用いたサンドバックの空隙率は、MおよびLでは0.38~0.45であったが、Sサイズのバックでは細かな充填作業が困難で、空隙率は0.52であった。これらのサンドバック模型をh=15cmとh=6cmの位置に長手が波峰方向となるように置き、一様水深部の波高1.8~10.2cm、周期0.5~2秒の規則波を100波ずつ当て、挙動をビデオカメラで記録した。波高は容量式波高計を用いて一様水深部で計測した。

本研究で実施した条件に対して、抗力と慣性力のどちらが卓越するかについて、サンドバック径Bと水粒子軌道長径 $d_o$ で確認したところ、本研究の実験条件では、抗力と慣性力が同程度の大きさになる条件もあるが、ほとんどが、慣性力が卓越する条件であった。

サンドバックの挙動は、安定、回転、滑動に分類できる。波を100波当てた後、移動距離が10cm以下のものを「安定」、10cm以上移動した場合は、その挙動により、「回転」もしくは「滑動」と判断することとした。サンドチューブは波高が大きくなるにつれ、安定、滑動、回転の順で移動するようになる。ただし、h=6cmに置いたサンドバックでは「回転」は生じなかった。

全ての実験データに対して $B/d_o$ を横軸にとり、単位長

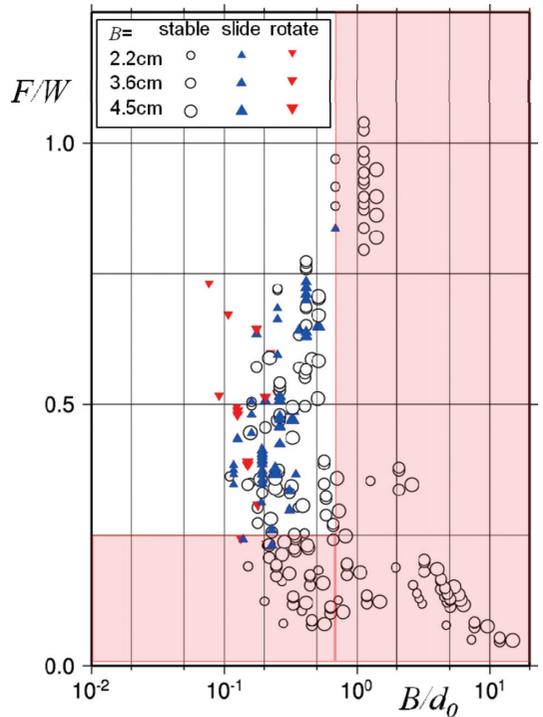


図-1 サンドバックの安定度 (彩色部が安定領域)

さあたりの最大波力/水中重量との対応関係を表したのが図-1である。ここで、単位長さあたりの波力をF、単位長さあたりの水中重量をWと表すこととする。サンドバックに作用する波力を算定する際、 $C_D$ 、 $C_M$ は、断面形状を円柱と見なして $C_D=1.2$ 、 $C_M=2.0$ とした。また、慣性力が卓越する場合、加速度の大きさが重要であることから、流速波形の前傾化を考慮するために、佐藤ら(1990)にならない、流速波形の三次までのフーリエ成分の振幅と位相を碎波帯内の相対岸沖位置 $x/x_p$ から推定し最大加速度の算定に用いた。図-1を見ると、滑動または回転が起こり、不安定となるのは、 $B/d_o$ が小さい範囲に集中しており、 $B/d_o > 0.7$ の範囲は安定と言える。さらに、 $B/d_o > 0.4$ では、移動限界を与えるF/Wの下限値が0.7程度であるが、 $B/d_o < 0.4$ では、0.25程度まで下がる。以上より、 $F/W < 0.25$ または $B/d_o > 0.7$ を安定領域(図-1の彩色部)とすれば、波力に対して安定なサンドバックを設計できる。ただし、 $F/W < 0.25$ が小さい領域で不安定となるのは空隙率を小さくできなかったSサイズのものが多く、MサイズおよびLサイズについては $F/W < 0.35$ または $B/d_o > 0.5$ を安定領域としても差し支えないようである。袋体のアスペクト比を2.5以上とし、空隙率を0.4程度まで高めれば、安定領域がさらに広がるものと考えられる。

前述のように、抗力は構造物径に比例して大きくなるのに対し、慣性力と摩擦力は重量に比例するため、抗力が

卓越する条件下では、サンドバックは大きければ大きいほど安定である。しかし、慣性力が卓越する条件下では、サンドバックを大きくすると、慣性力と摩擦力の両方が大きくなるため、単純に大きければ有利というわけではない。しかしながら、前傾化した波浪のもとでは特に、図-2に示したように最大加速度の作用直後に最大流速が作用し、慣性力と抗力の連携作用も安定性に影響していることを考えると、抗力の低減も安定性を増すのに一定の効果があり、断面積を大きく、平坦な形状にするほど、バックの安定性が増す傾向にあるものと考えられる。

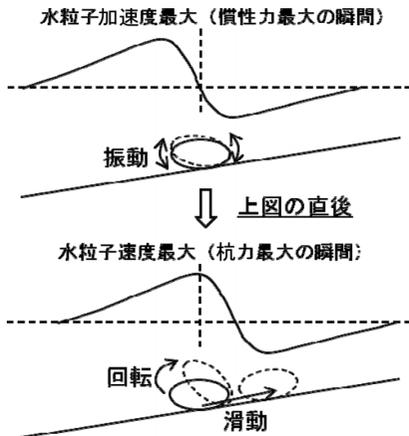


図-2 慣性力と抗力の連携作用

### 3. サンドバック潜堤の海岸侵食緩和機能

#### (1) 時間変動波浪による海浜断面変形

移動床実験は、長さ35m、深さ0.8m、幅0.15mの二次元造波水路で行った。一様水深部での水深は30cmとし、1/10勾配の模型海浜を粒径0.24mmの砂で製作した。砂村・倉田(1981)にならない、特性の異なる規則波をサイクリックに作用させて、海浜断面の変形を追跡した。実験条件を表-1に示す。ここで波高は一様水深部での波高である。各ケースにおいて、Sunamura・Horikawa(1974)でタイプIまたはIIの波を暴浪時の波、タイプIIIの波を静穏時の波と呼ぶことにする。実験はいずれのケースにおいても、初期勾配1/10の海浜に静穏時の波を1時間作用させた後、暴浪時の波(作用時間:1時間)と静穏時の波(作用時間:5時間)とを交互に3サイクル作用させて、一定の時間ごとに海浜縦断地形と波高分布を測定した。1ケース当たりの造波時間は19時間である。

潜堤設置の効果を見るため、サンドバックや土砂を追加しないケース(A-1, B-1, C-1)、バーが形成される位置に、2で述べたMの大きさのサンドバック9本を写真-1のような形状の潜堤として、7時間後に追加するケース

(A-2, B-2, C-2)、同様にバーが形成される位置にサンドバックのかさ体積と同量の養浜を行うケース(A-3, B-3, C-3)の3種類を、それぞれの波浪条件で行った。ここで、サンドバックや養浜を追加したバーの形成位置というのは、1時間から2時間までの暴浪時において形成されたバーの最大の高さの位置から沖方向に約18cmの範囲とした。海浜縦断地形の計測は、約30分ごとに、レーザー変位センサを用いて行った。ケースBの地形変化を図-3に示す。図中で、B-2では7hrにサンドバック潜堤を設置し、B-3では同時刻に養浜を実施している。

海岸侵食緩和機能は、汀線位置の変動と汀線付近の土砂量の変動を指標として評価した。ここで、汀線付近の土砂量は、サンドバックの平均設置位置である初期汀線から90cm沖側の位置よりも岸側の土砂量として算出した。図-4はすべてのケースの汀線変化と汀線付近の土砂量変化を示したものである。汀線後退や土砂量減少は、暴浪の作用する7hr~8hr, 13hr~14hrに著しいが、サンドバック潜堤を導入したケース(ケースA-2, B-2, C-2)では、これらが緩和されていることがわかる。本研究の実験ではほぼすべての条件で、サンドバック潜堤は、暴浪時の汀線後退を抑制し、潜堤の岸側に土砂をとどめることで、海岸侵食を緩和する効果があることが分かった。

#### (2) サンドバック潜堤周辺の平面的な地形変化

現地への適用を想定して、沿岸漂砂卓越条件での侵食緩和機能や、端部や開口部における局所洗掘対策を検討するため、平面水槽で移動床実験を実施した。長さ6.5m、幅11mの平面造波水槽を用いて、1/20勾配の模型海浜を粒径0.3mmの砂で製作して行った。一様水深部での水深は23cmとした。サンドバックを用いた潜堤を汀線から

表-1 実験条件

ケース	暴浪時の波			静穏時の波			追加するもの
	波高 (cm)	周期 (s)	C値	波高 (cm)	周期 (s)	C値	
A-1	5.8	1	7.16	3.0	1.5	2.84	なし
A-2							サンドバック
A-3							養浜砂
B-1	7.0	1	8.64	3.0	1.5	2.84	なし
B-2							サンドバック
B-3							養浜砂
C-1	8.7	1	10.74	3.0	1.5	2.84	なし
C-2							サンドバック
C-3							養浜砂



写真-1 サンドバック群を用いた潜堤

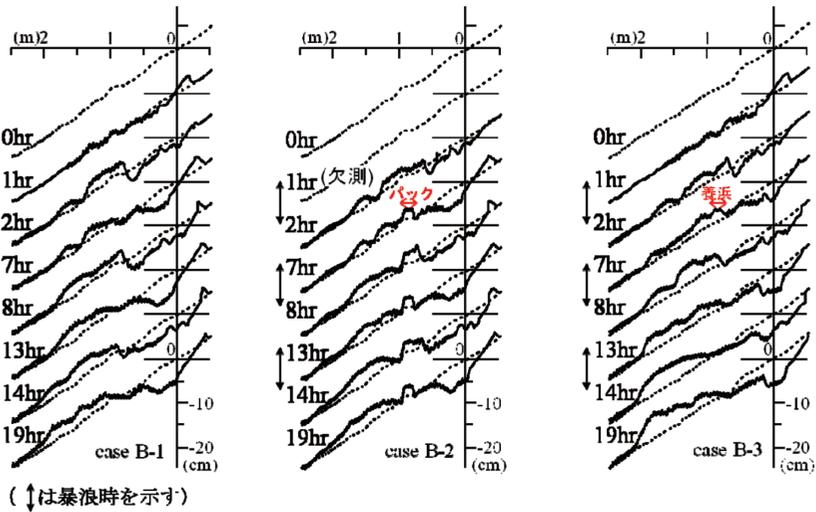


図-3 地形変化（ケースB）

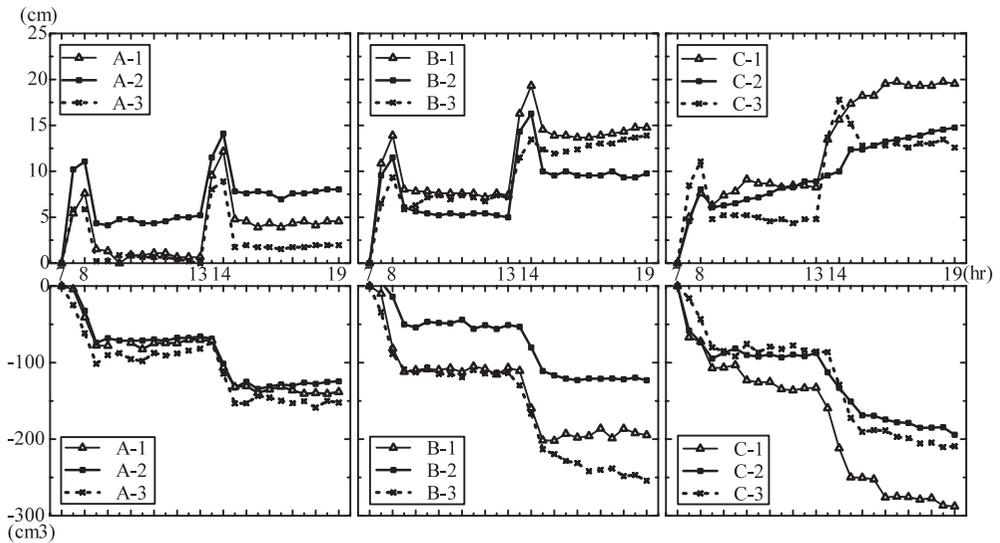


図-4 海岸線変化（上段）と汀線付近の土砂量変化（下段）

100cmの位置に写真-2のように並べる．1つの潜堤の大きさは、長さ20cm、幅10cm、高さ3cmである．予備実験で潜堤すぐ岸側で洗掘が進むことが確認されたため、左端と右端の潜堤には、洗掘対策として、潜堤本体より岸側にそれぞれ4cmまたは8cm離して、サンドバック2本を並べた．沿岸方向、岸沖方向にx軸、y軸をとり、それぞれ右向き、沖向きを正とする．サンドバック潜堤と洗掘対策用のサンドバックは $x=140\sim 220\text{cm}$ 、 $y=118\sim 138\text{cm}$ の範囲に設置した．地形計測は $x=0\sim 360\text{cm}$ 、 $y=0\sim 194\text{cm}$ の範囲で行った．

一様水深部の波高3cm、周期1.5秒、波向き左側から20度の斜め入射規則波を3時間作用させた後のサンドバック付近の地形変化を示した図-5を見ると、全体的に汀線付近

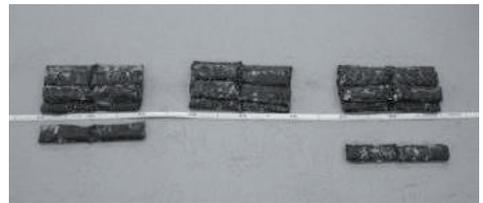


写真-2 サンドバック群を用いた潜堤配置

の堆積が進んでいるが、サンドバック潜堤の背後で堆積が著しい．潜堤の漂砂制御機能の効果が明確に表れたと言える．ただし、サンドバック潜堤周辺には局所的な洗掘も観察された．洗掘の範囲と程度を詳細に検討するため、サンドバック潜堤の位置する $x=156\text{cm}$ 、 $186\text{cm}$ 、 $216\text{cm}$ の海浜

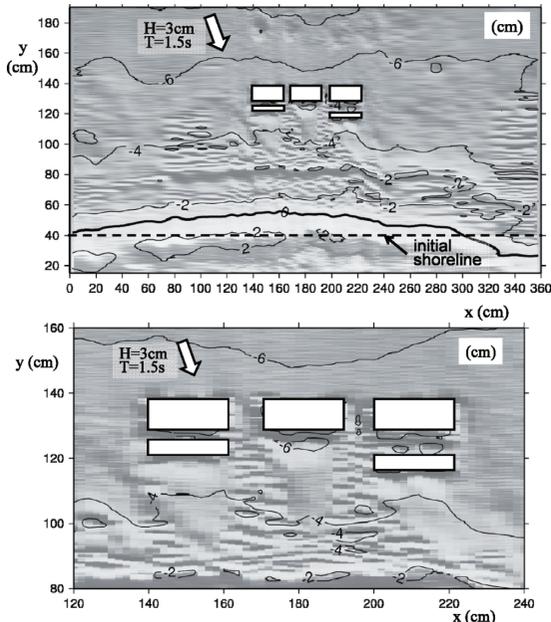


図-5 3時間後の地形（上図）と潜堤付近拡大図（下図）

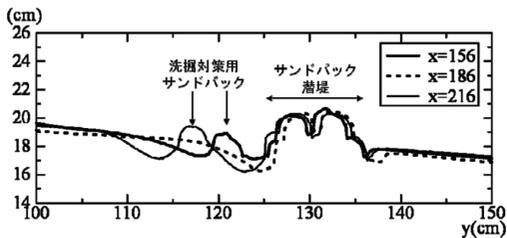


図-6 サンドバック潜堤付近の海浜縦断地形

縦断地形を図-6に示す。同図を見ると、サンドバック潜堤の背後が洗掘しており、最も小さいのは $x=156\text{cm}$ で、 $x=186\text{cm}$ と $x=216\text{cm}$ の洗掘は同程度である。洗掘が予想される場所にあらかじめサンドバックを設置することで、洗掘を緩和することができたものと考えられる。

#### 4. おわりに

本研究では、沿岸砂州を代替するサンドバック潜堤について、安定性と侵食緩和効果について固定床および移動床実験において検討し、以下の結論を得た。

- (1) サンドバックに作用する波力をモリソン式で評価し、サンドバックの断面幅と水粒子軌道長径の比が重要なパラメータであることを示した。また、本研究の実験条件では慣性力が卓越しており、碎波帯内での流速波形の前傾化を考慮することにより評価した流体力によりサンドバックの安定領域を提示することができた。安定性に対して有利となる最適サイズがあるが、碎波帯の前傾化した波浪のもとでは、慣性力と抗力の連携作用も考慮する必要がある。
- (2) サンドバック潜堤は、潜堤の岸側に土砂をとどめ、沖向き漂砂を抑制することで、暴浪時の汀線後退を抑制し、静穏時の汀線の前進を促すことが分かった。さらに、汀線付近の土砂量の暴浪時における急激な減少を防ぐことも分かった。
- (3) 沿岸漂砂卓越条件における侵食緩和性能や三次元的な洗掘等の現象を見るため、平面造波水槽にサンドバック潜堤を設置し、斜めから波を入射させ、地形変化を検討した。その結果、サンドバック潜堤の侵食緩和機能を確認するとともに、潜堤背後に生じる局所的な洗掘がサンドバックの配置を工夫することで軽減できることを確認した。

ジオテキスタイル袋材の耐波強度に関する検討を進めるとともに、実験条件を増やすこと、現地スケールでの検討を行うことが今後の課題である。

#### 参考文献

- Alvarez, E., R. Rubio, H. Ricalde (2006) : Shoreline restored with geotextile tubes as submerged breakwaters, *Geosynthetics Magazine*, Vol. 24, No. 3, 8p.
- Saathoff F., H. Oumeraci, S. Restall (2007) : Australian and German experiences on the use of geotextile containers, *Geotextiles and Geomembrances*, 25, pp.251-263.
- Sunamura, T. and K. Horikawa (1974) : Two-dimensional beach transformation due to waves, *Proc. 14th Conf. on Coastal Eng., ASCE*, pp. 920-938.
- Pylarczic, K. W. (2000) : *Geosynthetics and Geosystems in Hydraulic and Coastal Engineering*, Aa Balkema, 913p.
- 佐藤慎司・鈴木秀典 (1990) : 碎波帯における底面流速変動波形の評価法, *海岸工学論文集*, 第37巻, pp. 51-55.
- 砂村継夫・倉田雄司 (1981) : 時間的に変化する波浪を用いた海浜変形に関する二次元実験, *第28回海岸工学講演会論文集*, pp. 222-226.