

バーの海浜安定化機構に関する研究

福島雅紀*・山本幸次**・鳥居謙一***・李大俊光****

1. はじめに

1999 年 5 月に海岸法が改正されたことにより, 利用・環境面で優れた砂浜が防災施設として位置付けられ, 養浜による海岸保全が推進されてくるものと予想される。静的養浜または動的養浜のどちらを行うにしても, 利用を目的として設置された砂浜を安定に保持するためには養浜材の流出を最小限に抑えるべきである。養浜材は沿岸方向にも流出するが, 動的養浜の場合には沿岸方向への移動は前提条件となっている。また, 静的養浜の場合には基本的に沿岸方向への移動は考えないことから, 砂の冲向流出を抑制することのみを考える。

海浜安定化工法には, 沿岸漂砂の制御に主眼を置いたものと, 岸沖漂砂の制御に主眼を置いたものと大きく二つに分けられる。前者は, Silvester の対数螺旋の考え方に基づいて構造物を配置することで汀線形状を安定に保持するものである(土屋, 1990)。後者は, 沿岸砂州の発生限界式や海浜形状を表すパラメータに基づいた議論であり, 海浜を堆積性に変える方法として, 沖波波高を小さくすること, 底質粒径を粗くすること, 海底勾配を緩くすることなどが考えられる(加藤ら, 1989)。ここでは前述したように後者について述べるが, これまでの海岸保全施設は沖波波高の低減を主目的としてきた。最近では, 新しい考え方として BMS 工法などが試験施工されている(西村ら, 1999), 実用化に向けた研究が進められている段階にある。

本研究では, バーの海浜安定化機構を詳細に調べることで新しい海浜安定化工法を提案できるのではないかと考え, その安定化機構を大型 2 次元実験により調べた。その際, バーの効果を顕著に捉えるために, 発達したバーをそのままの形状で固定した場合の実験も行った。

2. 実験の概要

2.1 実験装置および実験の条件

実験は, 長さ 150 m, 幅 2 m, 高さ 5 m の水槽に中央粒

径 0.22 mm のほぼ均等な砂を用いて勾配 1/20 の模型海浜を設置して行った。沖側平坦床上的水深を 3.19 m とし, 時化を想定した有義波高および有義波周期を段階的に変化させる波浪(福島ら, 1999)を 3 時化分作用させた。Case 1 ではバーを固定せずに(以下, 自然海浜), Case 2 では岸沖方向 5 m にわたってバーを固定し(以下, バー固定海浜), 両ケースの海浜過程を調べた。各段階の不規則波の条件および継続時間は図-1 に示されている。1 回目の時化は初期海浜断面を作るために作用させるものとし, その後の海浜変形に注目した。

Case 2 でバーを固定した時間は, 造波開始後バーが最初に発達する 45 時間 20 分後とし, 固定した箇所は $14.2 \leq X \leq 19.2$ であった。ここで, X は汀線を原点に冲向を正とした岸沖方向距離とする。バーの固定にはセメントペーストを用い, 発達したバーがそのままの形で維持されるように表層 5 cm を固結させた。

両ケースとも 2 回目の時化が作用した後の静穏時に汀線付近に養浜を行った(130 時間後)。養浜断面形状としては, 後浜高を水面上 0.4 m, 前浜勾配を 1/10 とした。後浜天端法線を $X=0$ m とした結果, 汀線位置は初期位置から沖へ 4 m 移動した。後浜高は沖波波高 50 cm 以下の波が作用しても打ち上がらないような高さに相当する。

2.2 測定項目

実験では, 断面形状 ($-15 \leq X \leq 65$ にわたる水路中央部の地形), 浮遊砂濃度, 水平および鉛直方向流速, 沖および碎波帯内外の水面変動を測定した。なお各計測は, 波浪条件を変化させた直後, および最も静穏な波浪を作用させ終わる直前に行った。また, 蛍光砂調査も実施し

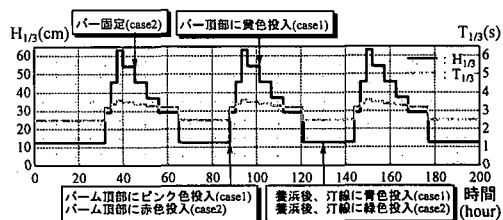
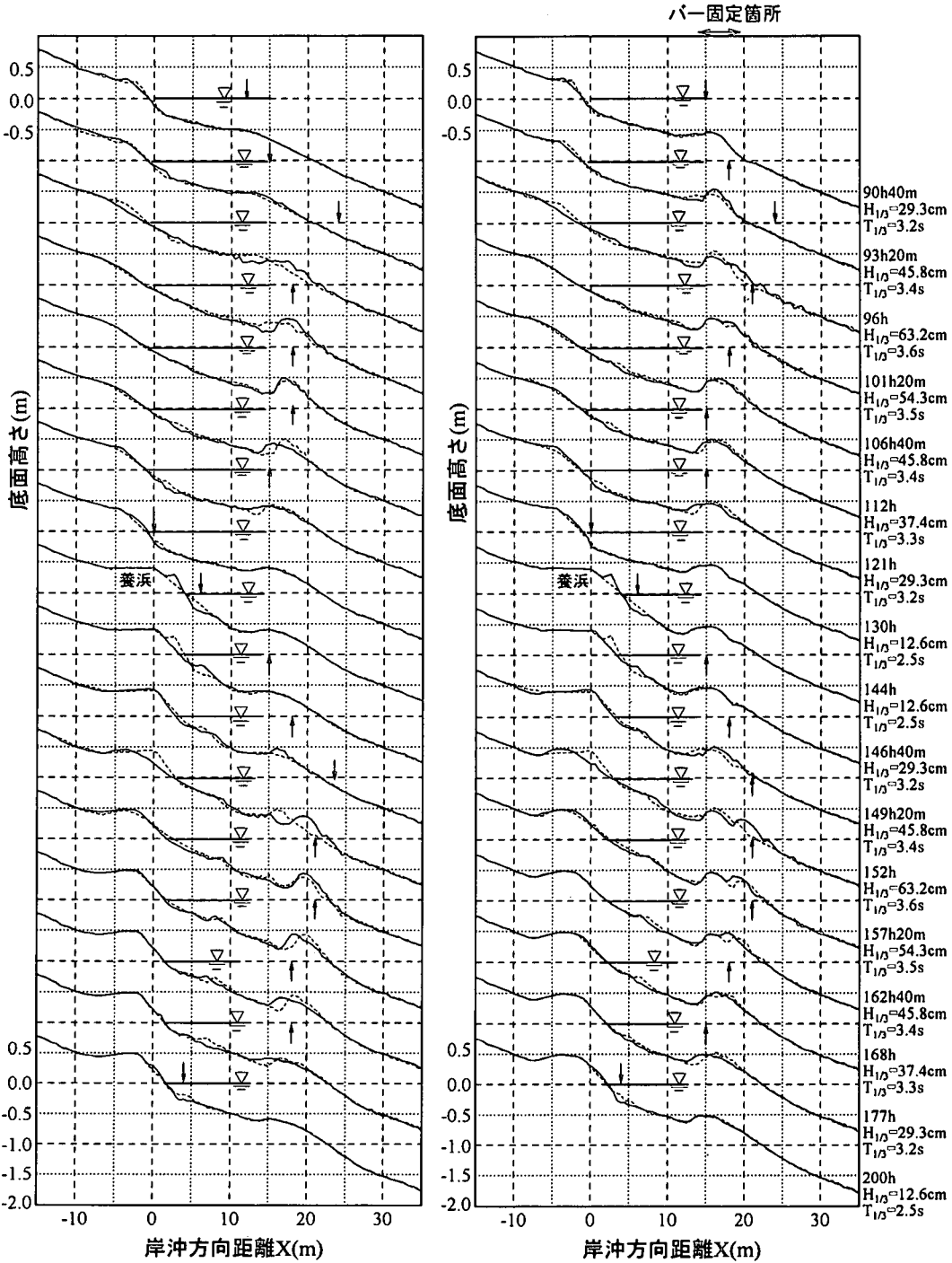


図-1 実験条件(波浪, 養浜, 蛍光砂投入)

* 正会員 工博 建設省土木研究所河川部海岸研究室研究員
** 正会員 建設省土木研究所河川部海岸研究室研究員
*** 正会員 工修 建設省土木研究所河川部海岸研究室長
**** 学生会員 筑波大学大学院理工学研究科



(a) 自然海浜 (Case 1) (b) パー固定海浜 (Case 2)

図一 断面形状の経時変化 (破線…波作用前の地形, 実線…波作用後の地形)

た。
水面変動に関しては、初期汀線から沖向に 3 m 間隔に設けた 10 点で計測を行った。浮遊砂濃度および流速の測定は、 $X=9, 15, 21$ m の測点で行い、その測定には後方

散乱式濁度計および電磁流速計を用いた。流速計と濁度計のプロープは底面上約 5, 25, 45 cm に設置され、3 点同時計測が行われた。各測定のサンプリング間隔は 0.05 秒とし、100 波以上の波を収録できるように約 7 分間の

計測を行った。

バーム、パー、養浜砂の挙動を調べるために、図-1に示す時間に色の異なる蛍光砂を投入した。投入方法は、模型海浜の砂を蛍光砂で置換する形で行った。蛍光砂は模型海浜を構成している砂を蛍光塗料で着色したものであり、投入量は約 0.06 m^3 とした。蛍光砂投入後は、波浪条件を変える際に約 70 cm^3 (フィルムケース 2 杯分程度) の表層土砂を採取し、その中に含まれる蛍光砂の数をカウントした。各採取は $-15 \leq X \leq 36$ の区間において 3 m ごとに行った。

3. 自然海浜とパー固定海浜との比較

3.1 地形変化

図-2は、自然海浜とパー固定海浜について断面形状の経時変化を比較したグラフである。波浪条件および造波開始時からの経過時間が、(b) 図の右側に記されている。最上段に点線で描かれた地形は、1 時化が作用し 32 時間の静穏状態が継続した後 (88 時間後) の断面形状である。実線で描かれた地形は、点線で描かれた 88 時間後の地形に不規則波 ($H_{1/3}=29.3 \text{ cm}$, $T_{1/3}=3.2 \text{ s}$) を 2 時間 40 分間作用させた後の地形である。図中の水面位置に記述された上向きおよび下向きの矢印は、計測された波高分布のピーク位置であり平均的な碎波位置を表す。

前浜付近 ($-5 \leq X \leq 5$) の地形に注目すると、自然海浜とパー固定海浜とではほぼ同様な変形が生じているように見える。静穏時にはバームが形成され急勾配化し、高波浪時にはバームが消滅し緩勾配化している。養浜後の形状は多少異なり、パー固定海浜ではより多くの砂が堆積している。

外浜 ($5 \leq X \leq 20$) の地形については、パー固定位置の周辺以外は両海浜で同様な変形が生じている。パー固定海浜においても、高波浪時には砂が固定されたパーを越え沖に流出し、その後の高波浪減衰期および静穏期に再びパーを越えて岸側に戻ってくる。養浜後の挙動は前浜同様多少異なり、自然海浜に比べパー固定海浜では沖への砂の流出が減少しているように見える。自然海浜ではパー頂部の位置が沖に 3 m 程度移動し $X=20 \text{ m}$ の位置にパーを形成しているのに対して、パー固定海浜では一部の砂が沖に移動するのみであることから、そのように判断される。

3.2 岸沖漂砂量

図-3は、2, 3 回目の時化の高波浪最盛期における岸沖漂砂量 Q を自然海浜とパー固定海浜とで比較した結果である。岸沖漂砂量は、図中に示された期間の地形変化量から算出され、岸向を正として表示されている。両海浜とも江線付近と碎波点 (下向矢印) やや岸側で大きな沖向き漂砂量を確認できる。自然海浜について養浜前後

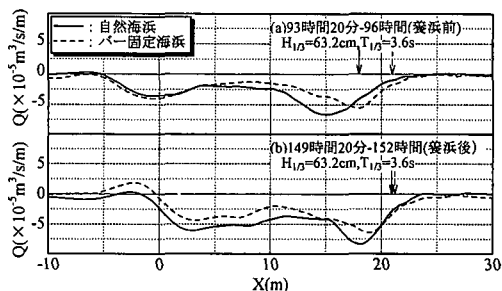


図-3 高波浪最盛期における岸沖漂砂量

の沖向漂砂量を比較すると、養浜後は養浜前の $1.5 \sim 2$ 倍の沖向漂砂が発生している。前浜勾配が $1/20$ から $1/10$ と急勾配化したことが原因と考えられ、波浪条件に応じて変形した砂浜に何らかの変化を加えると、土砂の移動が活発になると考えられた。これは室内実験を行う際に、初期の一樣勾配が急激に変形する状況と類似している。

一方、パー固定海浜では養浜前後の沖向漂砂量の差が小さく、パーが常時存在することで海浜が安定化したことがわかる。ここでは高波浪時の結果のみを示したが、他の期間においてもほぼ同様な傾向が得られている。

3.3 浮遊砂濃度、流速および浮遊砂フラックス

図-4は、碎波帯内の $X=9 \text{ m}$ における底面から約 5 cm の位置で計測された岸沖方向流速 (u) と浮遊砂濃度 (c) を用いて、 $\bar{u}$, $\bar{c}$, $\overline{u \cdot c}$ を求め (岸向きを正), その経時変化を示したグラフである。ここで、上付きバーは時間平均を表す。また、地形変化から算出した岸沖漂砂量 Q の $X=9 \text{ m}$ における経時変化も示した。

Q については、3.2 節で高波浪最盛期の岸沖分布図を示したが、それ以外のほとんどの波浪条件においてもパー固定海浜の沖向漂砂量の方が自然海浜のそれに比べ小さくなる傾向があった。また、沖向漂砂量のみでなく極端に大きな岸向漂砂量も減少していることを確認できる。浮遊によって沖向に運ばれる土砂量に係る $\overline{u \cdot c}$ について見ると、 Q と同様に漂砂量の絶対値が減少しており、自然海浜に比べ、パー固定海浜では変形が生じにくくなるのがわかる。また、戻り流れに相当すると考えられる $\bar{u}$ や砂の巻き上げ量に相当すると考えられる $\bar{c}$ も減少傾向である。

図-5は、図-4の $\overline{u \cdot c}$ のグラフの中で自然海浜とパー固定海浜の違いが最も大きく現れた時間の u , c の時系列データについて、それらの変動特性、相関および位相差を比較したグラフである。このとき、作用波は $H_{1/3}=63.2 \text{ cm}$, $T_{1/3}=3.6 \text{ s}$ であった。

(a) 図を見ると、波による振動成分と考えられる周波数 $0.2 \sim 0.3 \text{ Hz}$, 周期にして $3.3 \sim 5$ 秒の振動成分が卓

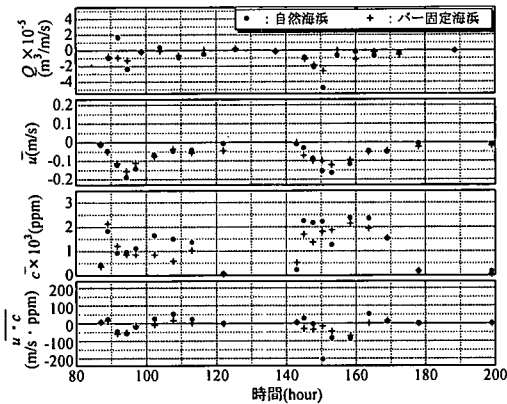


図-4 $X=9\text{ m}$ 地点における Q , $\bar{u}$, $\bar{c}$, $\overline{u \cdot c}$ の経時変化

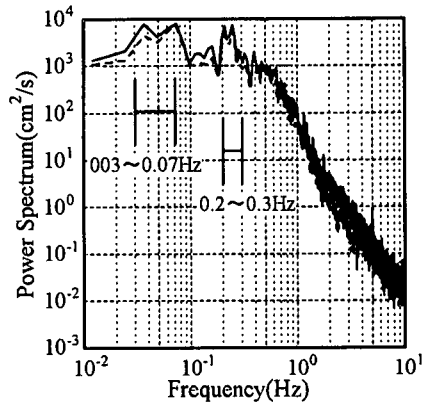
越している。また、周波数 $0.03 \sim 0.07\text{ Hz}$ 、周期にして $14 \sim 33$ 秒の長周期成分が卓越していることも確認できる。これは戻り流れに相当すると考えられ、実験中の観察からもこの程度の周期を有する流れが発生している様子が確認されている。また、バー固定海浜の長周期成分の方が自然海浜のそれよりも多少小さくなっている。

(b) 図を見ると、(a) 図で波と戻り流れの振動成分と考えられた周波数帯にほぼ一致する $0.05 \sim 0.07\text{ Hz}$ 、 $0.2 \sim 0.3\text{ Hz}$ の振動成分が卓越している。自然海浜とバー固定海浜とを比較すると、周波数 0.05 Hz 以下の長周期成分がバー固定海浜では小さくなっている。

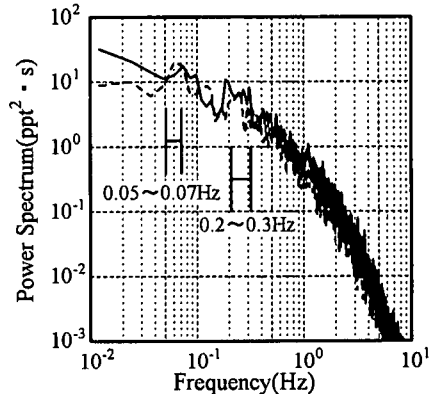
u と c との相関について見ると、卓越した振動成分が確認された周波数帯において、バー固定海浜では 0.6 程度の相関となっており、自然海浜のそれよりも大きな値となっている。これは、 u と c との位相差が、バー固定海浜ではある程度の意味を持つが、自然海浜ではあまり意味を持たないことを意味する。バー固定海浜の u と c との位相差は、周波数 $0.2 \sim 0.3\text{ Hz}$ では約 $\pi/4$ ずれており、岸向流速のピークに $\pi/4$ だけ位相が遅れて砂が巻き上がることを意味する。周波数 $0.05 \sim 0.07\text{ Hz}$ では位相のずれはほとんどなく、岸向流速のピークと砂の巻き上がりと同時に発生することとなる。自然海浜では岸沖方向流速と浮遊砂濃度との相関がほとんど見られないのに対して、バー固定海浜ではそれらの相関が大きくなり、流速のピークと砂の巻き上げられるタイミングが一定の位相差で生じるようになると考えられる。

3.4 蛍光砂調査

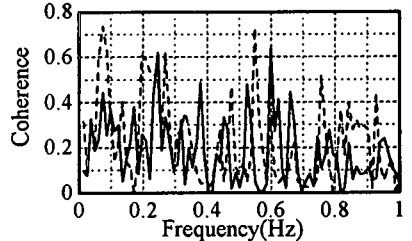
図-6 は、Case 1 でバー頂部に投入した蛍光砂の分布の経時変化を示す。縦軸は、各時間にカウントされた全蛍光砂数により無次元化された各地点の蛍光砂カウント数である。造波開始 101 時間 20 分後に矢印の位置に投入された蛍光砂が沖向および岸向に移動する様子を確認できるが、時間経過とともに砂の鉛直方向への混合が生じ、



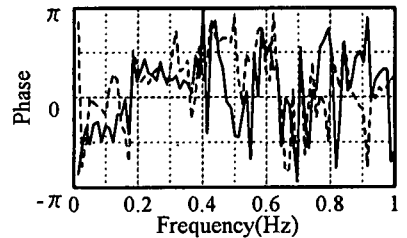
(a) u のパワースペクトル



(b) c のパワースペクトル



(c) u と c との相関



(d) u と c との位相差

— : 自然海浜 ---- : バー固定海浜

図-5 $X=9\text{ m}$ 、底面上 5 cm における u と c の変動特性、相関および位相差 (150 時間後)

分布形として明確な特徴を抽出するには至らなくなる。この傾向は、バームや汀線に投入した蛍光砂についても

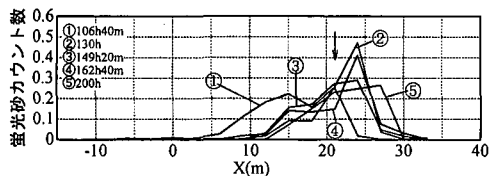


図-6 蛍光砂の岸沖方向分布の経時変化 (Case 1, バー頂部)

同様であった。ただし、各部に投入された砂の移動範囲はある程度理解され、バームや汀線上の砂はバーよりも沖に移動すること、バー頂部の砂は汀線付近まで戻りバームを形成することなどが確認された。

4. 海浜の防護性能

打ち上げ高や消波率は防護性能を評価する上で重要である。安定化工法を適用した結果、海浜が防護上安全でなくなのは避けなければならない。

図-7 は、各波浪条件における最大打ち上げ高を波形勾配により整理した結果である。自然海浜とバー固定海浜とで打ち上げ高に大きな差は見られず、海浜過程においてバーが常時存在することは防護上問題ではないことがわかる。実線は人工海浜の設計に使用される沖波波形勾配と打ち上げ高の関係である（海岸保全施設築造基準連絡協議会, 1987）。実験結果は一般的な設計で使用される打ち上げ高よりも高くなっている。これは、不規則波作用時における最大打ち上げ高を計測したためと考えられるが、海浜過程の途中で打ち上げ高が予想以上に高くなる可能性も否定できない。これについては、今後詳細に調べる必要がある。

図-8 は、打ち上げ高が最も高くなった 2 回目の時化の高波浪最盛期の波高分布を示す。両者に大きな差は見られず、消波の面でも問題がないことがわかる。また、反射率はバー固定海浜においても 1～2 割程度と自然海浜と同程度の値となった。

5. 結 論

主要な結論は以下のようによまとめられる。

①大型 2 次元実験により、バーを固定した場合の海浜過程を明らかにした。その結果、バーの海浜安定化機構

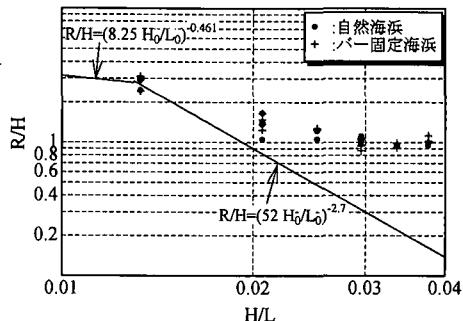


図-7 沖波波形勾配と打ち上げ高の関係

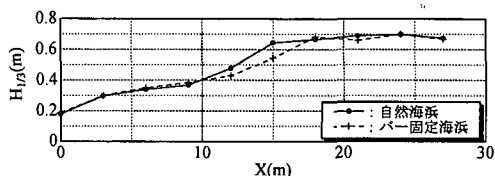


図-8 波高の岸沖分布 ($H_{1/3}=63.2$ cm, $T_{1/3}=3.6$ s)

には底面付近の岸沖方向流速と浮遊砂濃度の位相差が関与している。また、戻り流れ等の長周期成分の減少も関与している可能性がある。

②新しい海浜安定化手法として、岸沖方向流速（戻り流れ）と砂の巻き上がりの位相差を制御する構造物の可能性を示唆した。

③バーを固定した場合の打ち上げ高および消波特性は、バーを固定しない場合とほぼ等しい。

参 考 文 献

- 海岸保全施設築造基準連絡協議会編 (1987): 海岸保全施設築造基準解説, pp. 235-242.
- 加藤一正・村上裕幸・栗山善昭・藤田 誠 (1989): 面的防護方式における汀線変動特性の検討, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 429-433.
- 土屋義人 (1990): 安定海浜の形成と海岸侵食制御について—安定海浜工法とは?—, 第 22 回海岸工学講演会論文集, (社) 全国海岸協会, pp. 11-26.
- 西村 晋・宇多高明・国栖広志 (1999): 南九十九里浜 BMS 工法の侵食防止効果と地下水特性の現地調査, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 691-695.
- 福島雅紀・山本幸次・佐藤慎司 (1999): 時間変動波浪を用いた海浜変形実験, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 556-560.