

2 粒径混合砂を用いた大型海浜断面実験と粒径別漂砂量の算出

田中正博* ・井上 亮** ・佐藤 慎司*** ・磯部 雅彦****
渡辺 晃***** ・池野 正明***** ・清水 隆夫*****

1. はじめに

漂砂源近傍の海岸や養浜工が実施された海岸は広い粒度分布の底質で構成されることが多く、その変形を精度よく評価するためには、異粒径砂礫で構成される海浜の変形機構を理解する必要がある。本研究では現地スケールでの現象把握を目的として、大型造波水路を用いた海浜断面実験を実施した。これまでに山本ら (1998) によって同種の大型水路実験が行われているが、粒度分布の広い砂を使用しているため、地形変化と分級過程の特徴を把握するにとどまっている。本研究では粒径別漂砂量を精度よく算出するために、条件をより単純化して、粒径分布が双峰型の細粗 2 粒径砂を用いた実験を行い、地形変化と分級過程を定量的に解釈することとした。

2. 実験方法と実験ケース

幅 3.4 m, 深さ 6 m, 長さ 205 m の大型造波水路に中央粒径 0.27 mm の細砂と 0.84 mm の粗砂を 7:3 の割合で混合した砂で勾配 1/30 の砂面をつくり、沖側の水深を 4.5 m として海浜断面変形実験を行った。図-1 に混合砂の粒径加積曲線を示す。入射波は規則波で、堆積性波浪 ($H_0=0.34$ m, $T=3.5$ s) を 38 時間作用させた後、整地せずに侵食性波浪 ($H_0=1.0$ m, $T=3.5$ s) を 20 時間作用させた (表-1)。

機器による計測は清水ら (1996) にならい、外力・地形変化・浮遊砂濃度に関して行った。配置は図-2 および図-3 に示す通りである。外力は、容量式波高計 16 台、電磁流速計 12 台および 3-D 超音波ドップラー流速計 4 台を水路の側壁際固定点および移動台車に設置し、地形変化に対応するよう十分な頻度で測定した。地形は移動台車に取り付けた砂面計で水路内 4 測線を計測した。浮遊砂濃度は、浮遊砂濃度計、採水装置各 13 台で計測し、

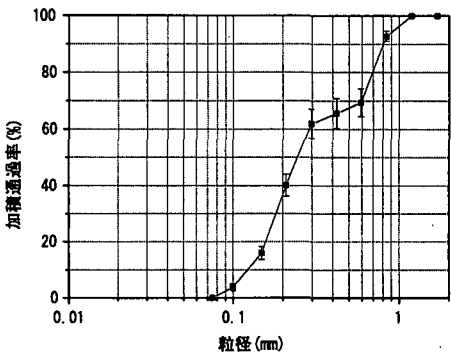


図-1 実験に用いた砂の粒度分布

表-1 実験ケース

実験 ケース	波浪 条件	海底 勾配 $\tan \beta$	換算沖波 波高 H_0 (m)	周期 T (s)	作用 時間 t (hr)
CASE I	堆積型	1/30	0.34	3.5	38.0
CASE II	侵食型	after-1	1.00	3.5	20.0

また遡上計 2 台を配置した。

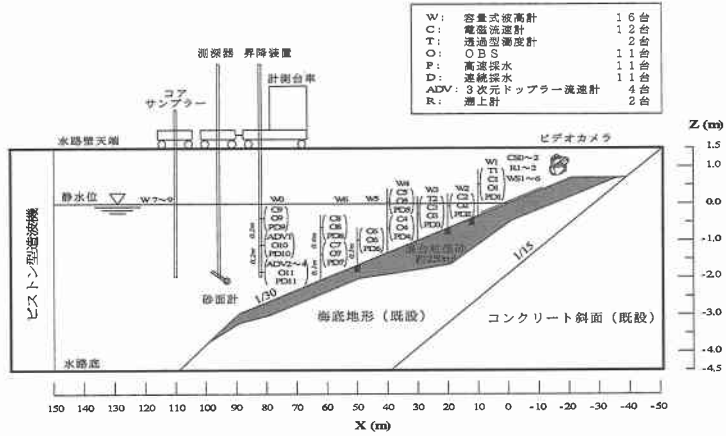
さらに分級過程を定量的に調べるために、コア試料を採取して分級の進行状況を測定した。コア試料採取は、砂面計による砂面高計測の直後に毎回実施し、図-3 に示すように岸沖方向最小 2.5 m 間隔で 1 回当たり 25 本程度採取した。採取方法は、地盤内に内径 52 mm のポリカーボネード製中空円筒を専用打込み機で履歴を受けていない層まで貫入させ、上部に水を充填し栓をした後に引き抜く方式とした。さらに砂の移動方向を確認するために、底質の一部を 3 色の着色砂で置換し、その後の移動状況を追跡した。採取したコア試料は、専用押し出し機を用いて表面から 0.5~10 cm ごとに切断し、1 本のコア試料から平均で 20 個程度の試料を得た。試料は、乾燥後、0.5 mm のふるいを用いてふるい分けし、粗砂、細砂それぞれの重量を計測した。

3. 実験結果と考察

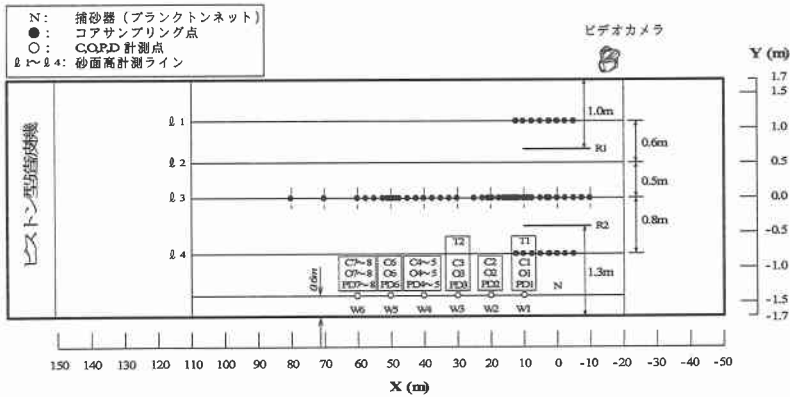
(1) 地形変化と分級

図-4 および図-5 にそれぞれ CASE I および CASE

* 正 会 員 修(工) 東京大学大学院博士課程社会基盤工学専攻
** 学生会員 東京大学大学院修士課程社会基盤工学専攻
*** 正 会 員 工 博 東京大学教授 社会基盤工学専攻
**** フェロー 工 博 東京大学教授 新領域創成科学研究科環境工学専攻
***** 正 会 員 工 博 東京大学教授 社会基盤工学専攻
***** 正 会 員 工 博 (財)電力中央研究所主任研究員 水理部
***** 正 会 員 工 修 (財)電力中央研究所上席研究員 水理部



図一2 計測機器の配置



図一3 計測機器の配置およびコア試料採取位置

II の地形変化と分級過程を示す。両図中 2 本ずつ描画されている実線は、当該時刻および前計測時における砂面形状である。なお、砂中の混合率分布は、隣接する 2 本のコア試料分析より得られた混合率の鉛直分布を、砂表面からの深さに応じて岸沖方向の距離で線形補完し求めたものである。CASE I では $X=15\text{ m}$ 付近に発生したバー (1 h) が、岸側へ移動するにつれて粗粒化するとともに (6.6 h)、汀線付近のバームに取り込まれる (15 h)。その後もバームは表面を粗砂に覆われて成長していく (30 h, 38 h)。一方、CASE II では、沖合に生じたバー (3 h) が成長しながら沖側に移動し (7.2 h)、ある程度の規模になるとバー頂部の水深を保つようにバーはさらに沖側に移動する (13 h, 20 h)。またバーの沖側斜面には細砂が、岸側斜面には粗砂が堆積している様子が確認できる。

(2) 波高と戻り流れの分布

図一6 および図一7 は、それぞれ図一4 および図一5 に対応する地形を計測した後、波作用再開直後の波高およ

び平均流速の計測結果である。CASE I では、バーの岸向き移動に伴って碎波点も岸向きに移動するが、その後バームの成長とともに再び碎波点は沖に移動している。また碎波帯内における戻り流れの流速は 10 cm/s 程度以下であった。一方 CASE II では、碎波点はバーの沖向き移動に対応してほぼ単調に沖向きに移動している。戻り流れ流速の分布はバーの成長度合いで変化する。即ち、バーが未発達な 3.2 h までの時間では、 20 cm/s 程度の戻り流れが汀線極く近傍を除く碎波帯全域で発達している。これに対し、バーが発達した 7.2 h 以後では、碎波点直ぐ岸側のトラフの部分で 50 cm/s を越える極めて強い戻り流れが発達するものの、その他の領域では、戻り流れがほとんど発達しない。これは、バーの発達により、碎波形式が強い巻き波型碎波に変化したためと考えられ、これに応じて波高の岸沖分布も変化した。バー直後で急激な波高減衰が生じるようになっている。

なお、7.25 h および 19.9 h の $X=60\text{ m}$ で波高が低くなっているが、これはバーによる反射波の影響であると

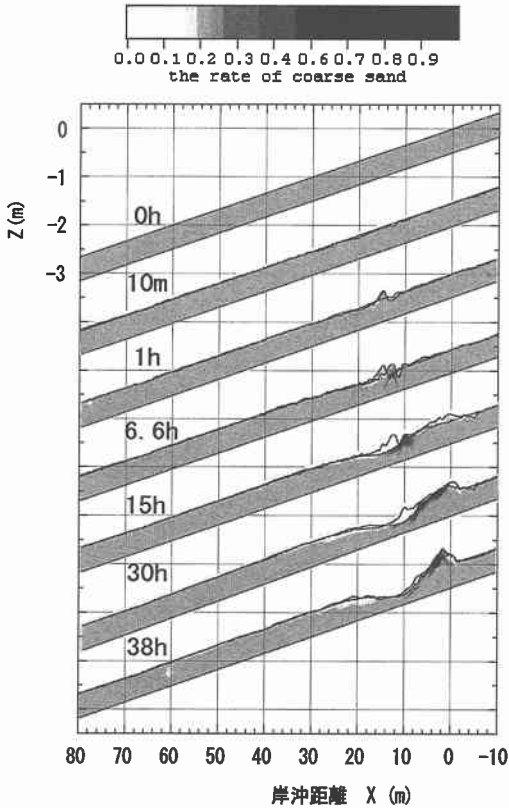


図-4 地形変化と粗砂混合率の分布 (CASE I : 堆積性)

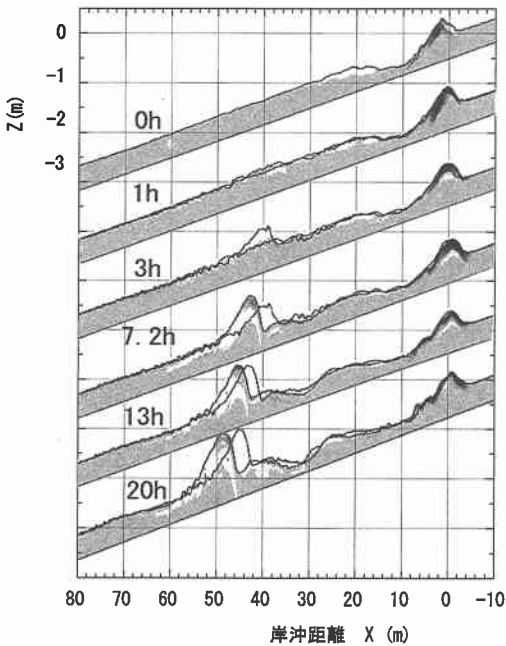


図-5 地形変化と粗砂混合率の分布 (CASE II : 侵食性)

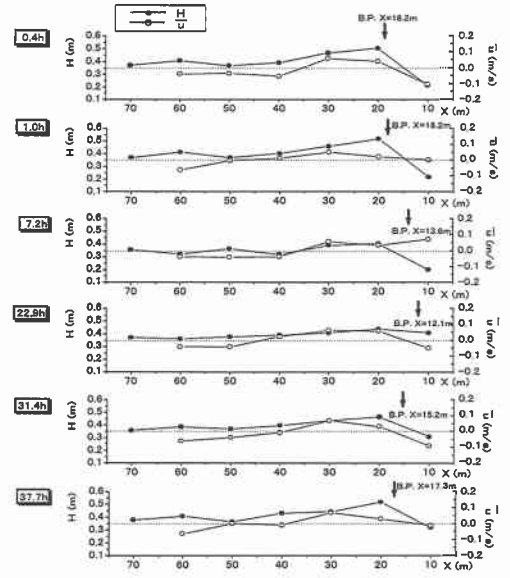


図-6 波高・戻り流れの変化 (CASE I : 堆積性)

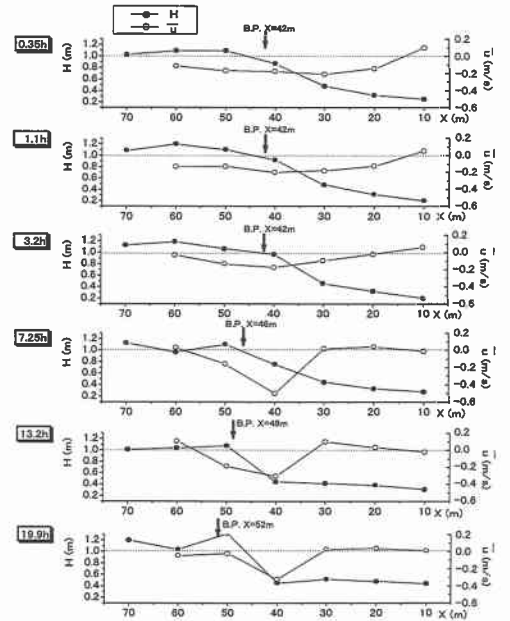


図-7 波高・戻り流れの変化 (CASE II : 侵食性)

考えられる。ちなみに沖側入射波分離用の波高計データから求めたバー発達時の反射率は約21%であった。

(3) 粒径別漂砂量

a) 粒径別漂砂量の算定

漂砂量は、単位時間あたりある断面を通過する砂粒子の体積で定義される。ある岸沖断面位置 X より岸側に存在する粗砂および細砂の単位幅あたりの体積 V_o 、 V_f は、

地盤の間隙率 λ および粗砂の混合率 p を用いて以下のよう
に表現できる。ただし、いずれも間隙部分を除外した
体積で表示している。

$$V_c(X, t) = \int_{X_0}^X \int_{Z_b}^{Z_0} p(1-\lambda) dZ dX \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$V_f(X, t) = \int_{X_0}^X \int_{Z_b}^{Z_0} (1-p)(1-\lambda) dZ dX \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $Z_0(m)$ は基準面高さ、 $Z_b(m)$ は砂表面高さ、 X_0
は岸側の地形変化限界点の座標である。

式(1)および(2)中で用いる粗砂混合率 p および間隙
率 λ の設定については、混合率 p には図-4および図-5
の値を用いればよいが、間隙率 λ は直接求められない
ため、混合率や地形変化から合理的に決定する必要がある。

今、砂移動の限界水深 (CASE II で $X=80$ m 程度) 以
深の $X=100$ m を越える移動はないとすると、 $X=100$
m より岸側の砂粒子体積の総量 $V_T (=V_c(100, t) + V_f(100, t))$
は保存されるはずである。図-8は砂粒子
の総体積 V_T の変化を示したものである。間隙率が
CASE I 開始前の初期混合率に対する間隙率(λ_0)から変
化しないとした場合には、図-8中の×印で示すように
砂粒子総体積が5%程度減少した。この原因としては、地
形測定の実誤差、土砂の混合や地形変化に伴う間隙率の変
化などが考えられる。砂粒子体積の推定誤差が大きいま
までは粒径別漂砂量の推定値が不合理なものとなるた
め、本研究では以下の要因を考慮しできるだけ合理的な
間隙率の設定を行うこととした。

- i. 分級の進行による間隙率の変化(λ_1): 十分締固ま
った状態の試料について、混合率と間隙率の相関分析
を実施し、両者の関係を表す近似曲線を求め、混合
率によって間隙率が変化することを考慮した。
- ii. 新たな堆積域における間隙率の増加(λ_2): 新たな堆
積域では、砂が十分に締固まっていなかったため、間隙
率が増加する。間隙率の増加は、メスシリンダーを
用いた実験より、定率で2割とした。
- iii. 波浪の作用による締固め(λ_3): 波浪圧力の作用およ
び漂砂による混合に伴い地盤全体が徐々に締固めら
れると考えられるため、 V_T の推定値が保存されるよ
うに砂層厚に応じて間隙率を定率で減少させた。

粒径別漂砂量の評価には、これらすべての要因を取り
込んだ間隙率を用いた。図-8を見ると、分級や海浜変形
の進行に伴う間隙率の増加は、波による締固めによる間
隙率の減少に比べて小さいが、無視できない量であるこ
とがわかる。

粒径別漂砂量 $q_c, q_f(m^2/s)$ (岸向きを正) は次式で表さ
れる。

$$q_c(X) = \frac{\partial V_c(X, t)}{\partial t}, \quad q_f(X) = \frac{\partial V_f(X, t)}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (3)$$

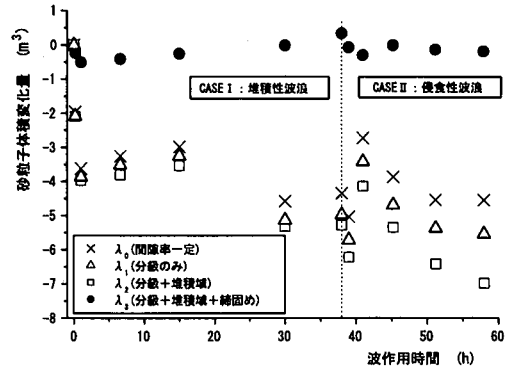


図-8 砂粒子総体積量の変化

同式による粒径別漂砂量の計算結果を図-9~12に示
す。CASE I, CASE II とも波作用開始直後は地形変化が
大きく、漂砂量がそれ以降と比べて1オーダー大きく
なった。そこで、図-9, 10の10 min~1 hおよび図-11,
12の0~1 hでは1/10を乗じた漂砂量値を示してある。

b) 粒径別漂砂量に関する考察

粒径別漂砂量の分布 (図-9~12) を地形変化・分級の
進行状況 (図-4, 5) と併せて考察する。

まず漂砂帯 (漂砂移動の範囲) の幅をみると、CASE I
(堆積性)、CASE II (侵食性) とも粗砂に比べて細砂の方
がより沖側まで漂砂帯が広がっていることがわかる。ま
た粒径別漂砂量の岸沖分布形状は、CASE II では粗砂と
細砂で形状がほぼ一致しているに対して、CASE I では
形状が大きく異なっている。これは、CASE I では、粗砂、
細砂それぞれの中央粒径に対する Sunamura and Hori-
kawa (1974) の C パラメタは粗砂で6程度、細砂で13程
度であり、粗砂については堆積型、細砂については中間
型の海浜変形パターンが対応するのに対し、CASE II で
はどちらも侵食型となったためと考えられる。

粒径別漂砂量の絶対値について、CASE I では粗砂と
細砂でほぼ等しい (図-9, 10) のに対して、CASE II で
は粗砂・細砂の初期構成比 (3:7) にほぼ比例した大き
さになっている (図-11, 12)。これは、CASE I では掃
流移動が卓越するためアーミング効果が顕著に現れる
のに対し、CASE II では碎波による渦によって砂が巻き
上げられ移動する浮遊砂移動が卓越するためと考えられ
る。

さらに地形変化と分級過程および粒径別漂砂量分布を
時間を追って考察する。CASE I では、当初粗砂、細砂と
もに岸向きに移動し、 $X=15$ m 付近にバーが形成され
る。その後バーが岸向きに移動し、汀線付近のバームに
取り込まれる間、粗砂はなお岸向きに移動するが、 $X=$
 $10 \sim 30$ m における細砂は沖向きに移動する。また表面が
粗砂で覆われた汀線付近では細砂の漂砂量が減少する

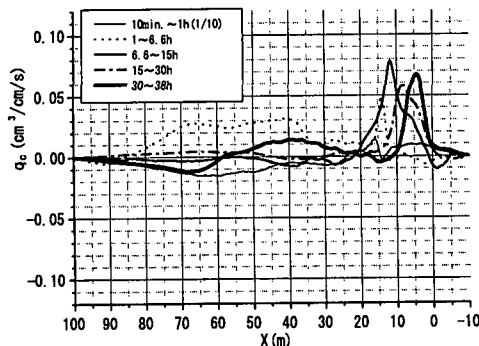


図-9 粗砂漂砂量分布の推移 (CASE I : 堆積性)

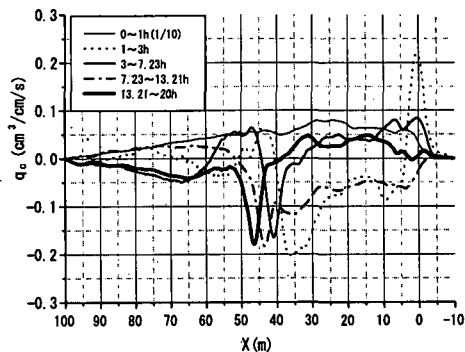


図-11 粗砂漂砂量分布の推移 (CASE II : 侵食性)

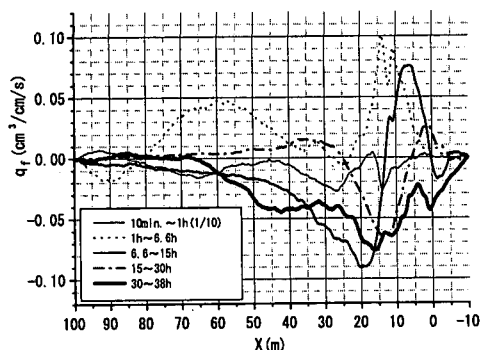


図-10 細砂漂砂量分布の推移 (CASE I : 堆積性)

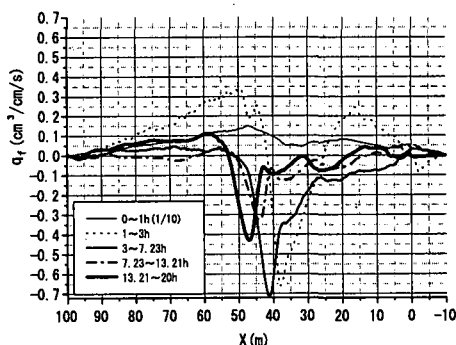


図-12 細砂漂砂量分布の推移 (CASE II : 侵食性)

が、これは粗砂によるアーミング効果であると考えられる。CASE II では、まず粗砂・細砂ともに沖向きに移動してバーを形成し、その後のバーの沖向きへの移動に伴ってトラフ部分の砂がバーに取り込まれ、その岸側にステップ地形が形成される。この過程では、バーの岸側に粗砂が、沖側には細砂が堆積する形で分級が進行する。また、汀線部では、初期の段階ではバームを越えて粗砂が岸側に打ち上がるが、次第にこの打ち上げ量は減少するとともに汀線付近の粗砂の移動方向は沖向きに変わり、前浜は急峻化する (7.2 h)。

このように、砂の移動形式や C パラメタの違いにより、細粗砂間の干渉機構が大きく異なり、粒径別漂砂量の岸沖分布特性が変化することが定量的に解明された。

4. おわりに

堆積性および侵食性の規則波条件下において、細粗2粒径の混合粒径砂を対象とした現地スケールの大型水路実験を行い、地形変化と分級過程を定量的に捉えた。特に、コア試料の分析結果から土中の混合率分布の経時変化を明らかにし、さらに地形変化量と結びつけて粒径別漂砂量を算出する方法を構築した。今回の成果をもとに

して今後は侵食性海浜の回復過程や不規則波条件下の実験も視野に入れていきたいと考えている。

最後に、今回の実験 (LAMBDA-I) は東京電力 (株) と (財) 電力中央研究所の共同研究の一環として、東京大学と横浜国立大学を含めた4者で実施されたものである。横浜国立大学の岡安章夫助教授、片山裕之助手、宇野喜之氏、後藤宏志氏ならびに電力中央研究所の森信人氏には、実験の計画から実施まで絶大なるご支援を頂き、衷心より感謝いたします。また、計測機器を快くご提供いただいた東工大、建設省土研、運輸省港研および五洋建設 (株) 技研の方々に謝意を表します。

参考文献

- 山本幸次・張 達平・佐藤慎司・田中茂信 (1998): 海岸における底質の分級に関する研究, 土木研究所資料, 第3592号, pp. 46-58.
- 清水隆夫・池野正明・岡安章夫・栗山善昭・佐藤慎司・島田昭昭・清水琢三・武若 聡・西隆一郎 (1996): 不規則波による大型海浜断面変形実験と外力場の多点同期計測, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 491-495.
- Sunamura, T. and K. Horikawa (1974): Two dimensional shore transformation due to waves, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 920-938.