

振動流・水圧変動共存場における砂漣上の浮遊過程

酒井 哲郎*・後藤 仁志**・松原 隆之***

1. 緒 言

漂砂は波・流れの状況に応じて種々の移動形態で輸送されるため、形態ごとにモデル化される。このことは、物理的背景の明確なモデルにより漂砂量を推定することを考えると、水理条件と漂砂の移動形態の関係の把握が不可欠になることを意味している。

問題をさらに複雑化させるのは、漂砂系の相互作用系としての特性である。漂砂移動の結果として形成される海底床形態は、波・流れにとつての底面境界を構成することとなるから、波・流れ場は海底床形態の影響を受けて大きく変化する。波・流れ場の変化により漂砂移動にも変化が生じ、さらにその変化の影響が累積されて海底床形態を変化させる。波・流れ、漂砂、海底床形態の3者相互作用系の包括的理解は重要ではあるが、波・流れが変化した際の海底床の変化速度は海底床が変化した際の波・流れの変化速度よりも充分に遅く、系全体を概略的に理解する上では、波・流れを既知とした one-way のアプローチが有効となる。このことから、Shields 数すなわち波・流れによる底面せん断力を基準に海底床形態を分類し、Shields 数を座標軸とした個々の小領域において支配的な土砂移動形態（例えば、Shibayama & Horikawa, 1982）に基づき漂砂の輸送を論じる方法が従来より一般的であった。

ところで、波浪の伝播に伴い生じる海底床作用水圧の変動は、海底地盤内間隙水圧の時間的変動を誘起し、海底地盤内に形成される間隙水圧分布の影響で海底床表面付近の砂粒子に作用する付加的外力（見かけの変動揚力）の影響で海底床表面粒子のせん断抵抗が変化して、漂砂移動にもその影響が波及する。酒井・後藤ら（1995）は、このような観点から、水圧変動・振動流共存場において振動流の流速振幅および水圧の変動振幅を変化させながら、個々の水理条件で生じる海底床形態と底質粒子の運動形態の特性を実験的に検討し、水圧変動の付加的作用が海底床形態に有為な変化を生じさせることを指摘し

た。

後藤・酒井ら（1995）は、場の特性が比較的単純な平坦床における砂粒子の移動開始に地盤内間隙水圧分布の変動が与える影響に関して検討し、転動離脱モデルによる解析を行った。酒井・後藤ら（1995）は、特に砂漣の形状変化とその結果として砂漣床上の土砂輸送に生じる変化に注目して、個々の海底床形態における漂砂の移動特性に関して観察を行った。

本研究では、従来の著者らの検討を踏まえて、振動流・水圧変動共存場で観察される非対称砂漣上の浮遊砂輸送に関する定量的把握を目的とする。具体的には、浮遊砂濃度分布の位相変化をビデオ画像解析により計測して、振動流・一方向流共存場における非対称砂漣上の浮遊過程との対応を念頭に置きつつ、浮遊砂雲の特性を含む土砂輸送機構の観点から考察を加える。

2. 実験及び解析の方法

2.1 実験の概要

実験は、図-1 に示す同時加減圧振動流装置を用いて行われた。この装置は、密閉型の砂層水槽の両端に連結された閉管路に振動流発生用のプロペラと水圧制御用のシリンダーを配したもので、水圧変動・振動流共存場における砂地盤の挙動を再現できる。ここでは、微小振幅波における進行波を想定して、流速変動および水圧変動の波形は同位相の正弦波とした。

実験の流速振幅は、 $u_b = 29 \text{ cm/s}$ 、水圧水頭振幅は

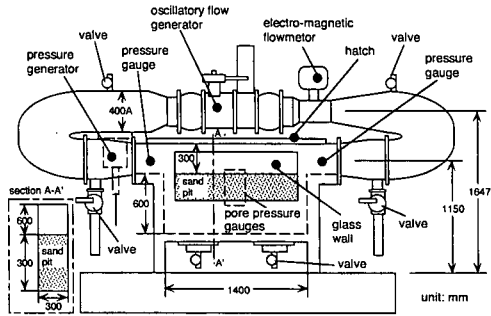


図-1 同時加減圧振動流装置

* 正 会 員 工博 京都大学教授 工学研究科土木工学専攻
 ** 正 会 員 工博 京都大学助教授 工学研究科土木工学専攻
 *** 学生会員 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻

$p/\rho g = 0.5$ m, 周期は $T = 6$ s であり, 実験に使用した底質材料は粒径 $d = 0.025$ cm, 比重 $\sigma/\rho = 2.65$ の均一砂である。既往の研究における海底床形態の領域区分 (例えば, Shibayama & Horikawa, 1982) や酒井・後藤ら (1995) の実験によると, この条件下では 2 次元砂漣が形成される。実験に際しては, 平坦床から始めて, 2 次元砂漣が発生・発達して平衡状態に達して安定するまで装置の予備的運転を行い, 平衡形状に達した砂漣上で, 一般用 8 mm ビデオカメラを用いて浮遊過程を撮影した。

2.2 解析方法

浮遊砂濃度の推定は, 撮影された画像の明暗と浮遊砂濃度の相関を用いる方法で行った。砂漣上の浮遊過程は, 剥離渦の放出に伴う組織的な浮遊砂輸送を特徴とするため, 時空間的な構造をとらえることが重要となるが, この方法は, 撮影範囲の濃度分布を一挙に推定できるので, 光学式濃度計による点計測の繰り返しにより濃度分布を

推定する方法より有利である。

撮影された各瞬間の画像は, ビデオインターフェイス内蔵のパーソナルコンピュータ Power Mac 7500/100 に取り込まれた。一般用 8 mm ビデオデッキの一時停止モードでは静止画にノイズが入るため, 連続再生しながら画像取り込みを行う必要がある。当然のことながら, 画像の解像度はサンプリング率と CPU の性能に依存することとなるが, 今回のケースでは, サンプリング間隔 1/30 秒で濃度分布の解析が可能な程度の解像度の画像が取り込めた。

ここでは, 画像処理ソフトウェア NIH Image を利用した簡易画像解析により, 浮遊砂相対濃度分布を推定することとした。一連の処理過程を図-2 に示す。取り込まれた画像は, 高濃度部ほどより黒く表示されるように, 画像の階調の反転 (図-2(a)) とグレースケール化による前処理を行う。次に, 閾値を調整して画像を白黒に二値化し (図-2(b)), 解析対象領域を選択し (図-2(c)), 濃度計測用等間隔グリッドを画像に張り付けて (図-2(d)) 保存する。以上で, NIH Image を利用した解析の準備が整ったこととなる。NIH Image は指定領域内の黒い部分の面積を自動計測するコマンドを有しており, ポインタをグリッドに沿って移動させながら各グリッドにおける計測を効率的に実施できる。一連の計測を終了し, 最後にグリッドセルの面積を用いて規格化すると浮遊砂相対濃度の空間分布が得られる。

3. 振動流・水圧変動共存場での砂漣上の浮遊過程

3.1 浮遊砂濃度の空間分布

図-3 は, ビデオ画像解析によって得られた浮遊砂の相対濃度分布図である。振動流は右向きを正, 水圧変動は加圧を正として, 正弦波型で与えることとする。図中の各位相における矢印は流速ベクトルと圧力の作用方向を模式的に示している。形成された砂漣の位相平均的形状は緩やかな非対称性 (波長 $L_r = 33.1$ cm, 波高 $H_r = 4.9$ cm) を示し, クレストを境に左側が急斜面, 右側が緩斜面となっている。

位相 $\phi = 0$ は流れが左から右に転流する瞬間に相当するが, クレスト左側に高濃度部が見られる。これは, クレスト左側の急斜面に形成された剥離渦に取り込まれた砂粒子が転流に伴う剥離渦の分離放出に追従して上昇すること (いわゆる浮遊砂雲の発生) に対応したものと考えられる。なお, 図中には浮遊砂雲の重心位置の概略を記号 C で示した。位相 $\phi = \pi/4$ では, 浮遊砂雲は右向きの流れに乗って移動し, 濃度重心はクレストを越えて下手側に隣接する砂漣の緩斜面上に達する (図中には解析対象とした砂漣の上手側に隣接する砂漣から移動してきた

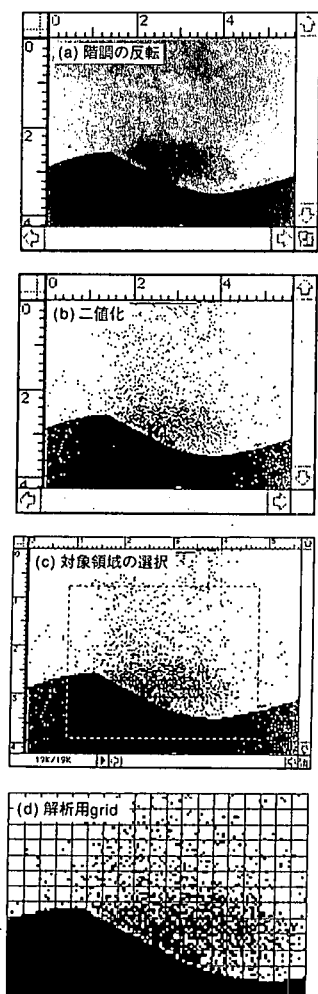


図-2 画像解析の流れ

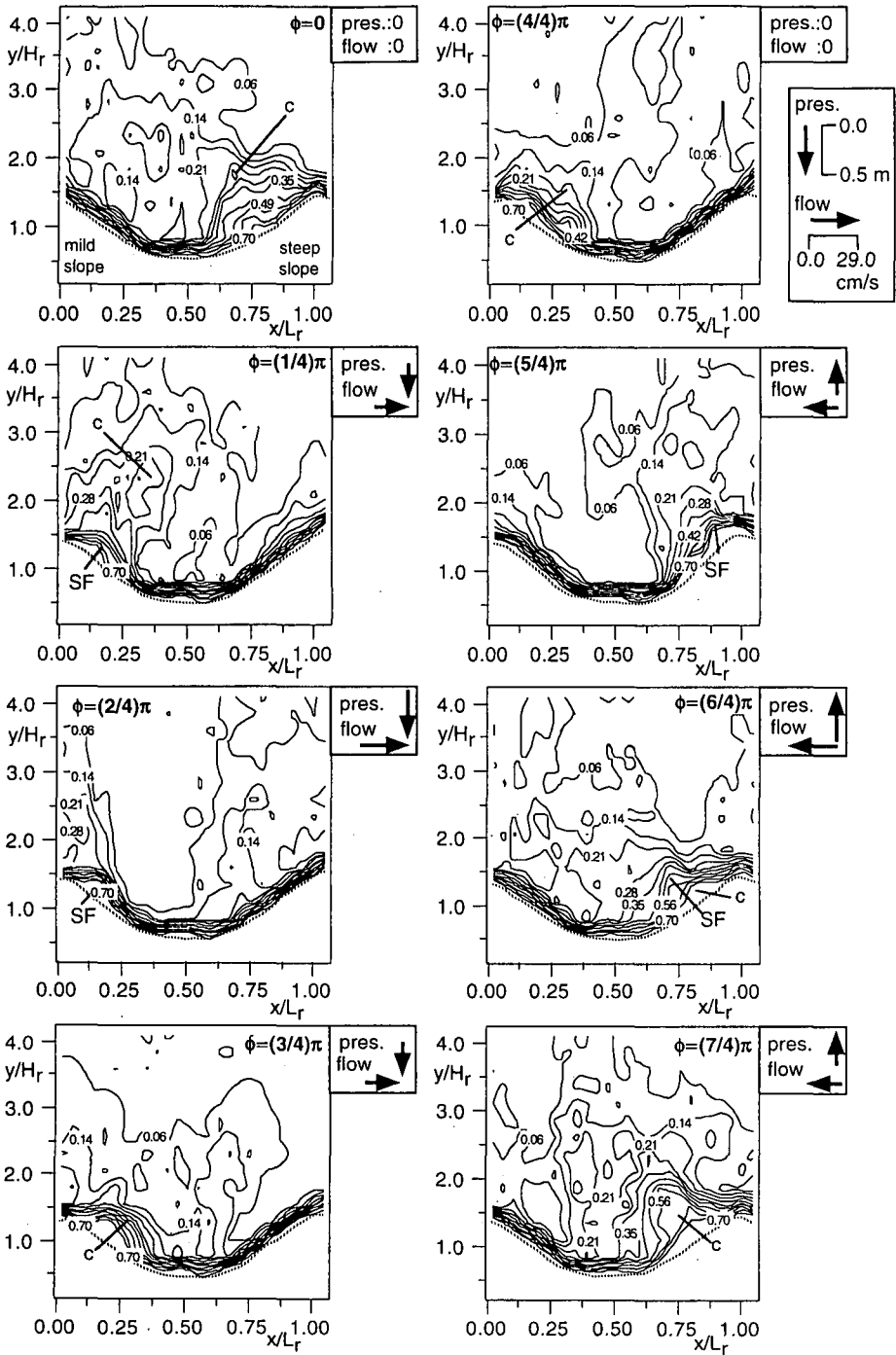


図-3 浮遊砂濃度の空間分布

浮遊砂雲に対応する高濃度部（記号Cで表示）が見られる）。また、緩斜面側のクレスト付近に高濃度部（記号SFで表示）が見られるが、これは、上手側の急斜面上を移動してきた sheetflow（平坦床における sheetflow とは異なった砂漣表面における局所的な層状流動）がクレスト

から放出されることに対応したものと考えられる。なお、この sheetflow の存在は観察からも確認されている。

位相 $\phi=(2/4)\pi$ では右向き振動流速が最大となるが、浮遊砂雲は更に下手側に移動して広範囲に拡散している。この位相でもクレストから放出される sheetflow に

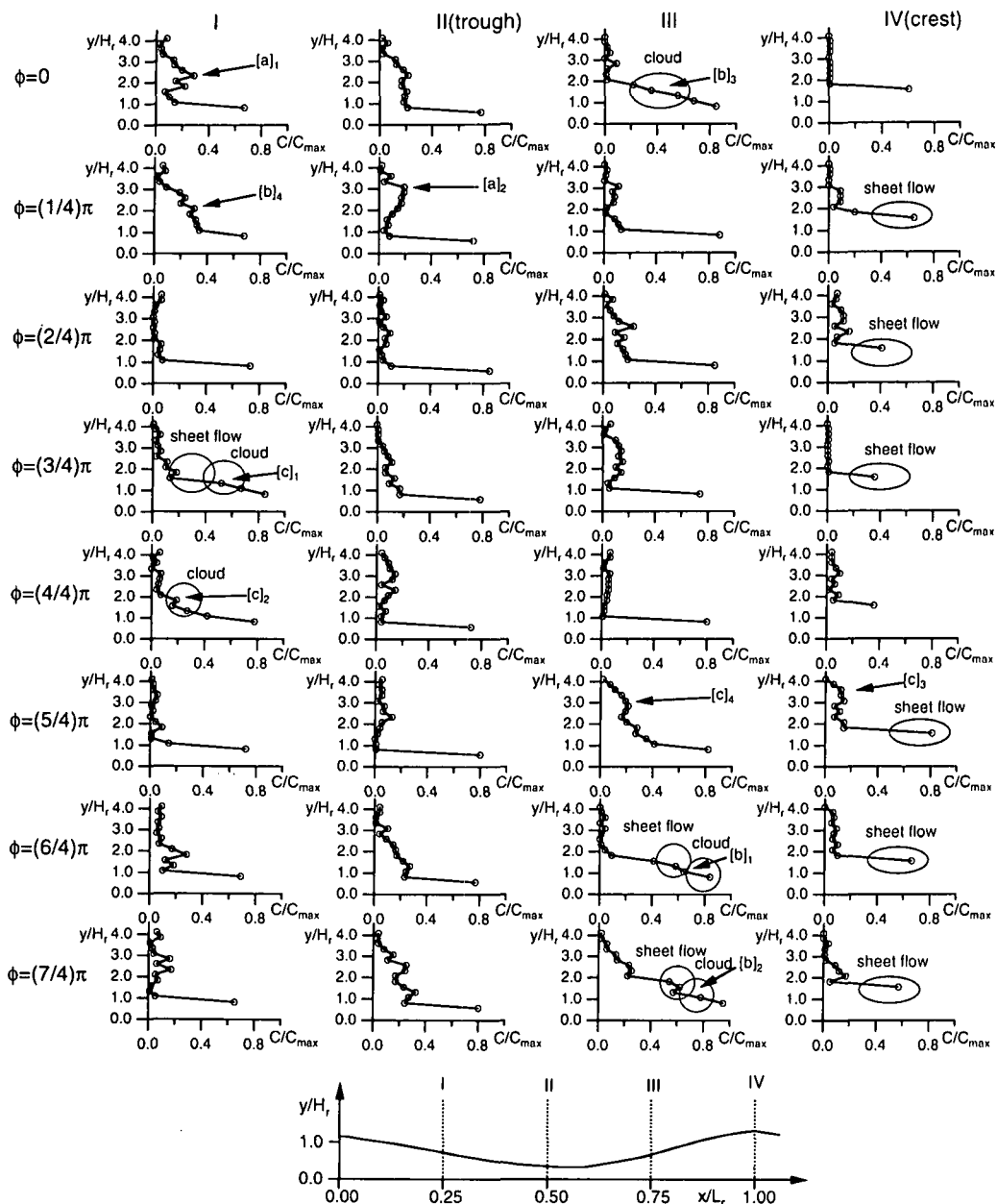


図-4 浮遊砂濃度の鉛直分布

対応する高濃度部が見られる。観察によると緩斜面のクレスト付近に小さな剝離域が存在し、クレストから放出された sheetflow の一部が剝離渦に取り込まれることが確認されているが、濃度等値線では sheetflow による高濃度部との判別は不可能である。

位相 $\phi=(3/4)\pi$ では、右向き振動流速の減少に伴い sheetflow 状の噴き出しは弱まる。緩斜面上に発達する高濃度部は、剝離渦の放出分離すなわち浮遊砂雲に対応したものと判断される。この位相で発生した浮遊砂雲は転

流が生じる位相 $\phi=(4/4)\pi$ には更に上昇するが、急斜面上で発生する浮遊砂雲と比較すると規模が小さく、高濃度部の広がりも狭い範囲になっている。

位相 $\phi=(5/4)\pi$ には流れは左向きに加速されており、クレスト下手の急斜面には sheetflow 状の噴き出しに対応した高濃度部が確認される。位相 $\phi=(6/4)\pi$ には、sheetflow 状の噴き出しが更にトラフ側(左側)に広がっているのが分かる。この位相で特徴的な点は、剝離域により sheetflow が押し上げられる様子(図中に SF で示す

等値線の屈曲部)が見られることである。この位相では剥離渦は急斜面上に形成されるためスケールが緩斜面上の剥離渦より大きく、等値線に与える影響がそれだけ顕著である。更に位相 $\phi=(7/4)\pi$ には、急斜面上に浮遊砂雲に対応する高濃度部が明確に表れている。

3.2 砂粒子濃度の鉛直分布

図-4は、砂漣のクレスト(断面IV)、トラフ(断面II)および両者の中点(断面I, III)における浮遊砂濃度の鉛直分布を示したものである。図中には、sheetflow 状の噴き出しおよび浮遊砂雲に対応したものと考えられる濃度分布の発達箇所を示すとともに、濃度の浮遊砂雲の移動に対応した高濃度部の移動を記号 ($\phi=(3/4)\pi$ でのI断面の $[c]_1$ は、 $(4/4)\pi$ では同断面の $[c]_2$ に、 $(5/4)\pi$ ではIV断面の $[c]_3$ とIII断面の $[c]_4$ に移動する)で示している。また濃度が sheetflow と浮遊砂雲のいずれによるのかを示すため、図中に sheetflow, cloud と表示している。

急斜面上に位置する断面IIIでは、浮遊砂雲によるもの以外に sheetflow 状の噴き出しによるものと判断される濃度の高まりが位相 $\phi=(6/4)\pi$ と $\phi=(7/4)\pi$ とに明確に見られるが、緩斜面上に位置する断面Iでは、位相 $\phi=(3/4)\pi$ で sheetflow に相当する部分が僅かに見られる程度で、緩斜面上における sheetflow 状の噴き出しの強度が急斜面上に比べてかなり弱いことが理解できる。

また、剥離渦の分離放出による浮遊砂雲の生成過程でも緩斜面上に位置する断面Iと急斜面上に位置する断面IIIでは明確な相違が見られる。緩斜面上(断面I)では、浮遊砂雲の生成過程の対応する位相 ($\phi=(3/4)\pi \sim (4/4)\pi$) でもそれほど顕著な高濃度部の押し上げは見られないが、急斜面上(断面III)では浮遊砂雲に対応する濃度上昇が観測される位相も $\phi=(6/4)\pi \sim 0$ と緩斜面上より長く、高濃度部の押し上げも緩斜面上より顕著である。

3.3 砂漣上の土砂輸送特性

振動流・水圧変動共存場における砂漣上の土砂輸送過程では、図-5に模式的に示す輸送機構が考えられる。実験で観察される砂漣の非対称形状は左向き流れの下手側に急斜面、上手側に緩斜面であり、剥離渦のスケールは急斜面上で大きく、緩斜面上で小さくなる。急斜面上の剥離渦は右向きの土砂輸送に寄与する浮遊砂雲となり、緩斜面上の剥離渦は左向きの土砂輸送に寄与する浮遊砂雲を生じる。浮遊砂雲の含有土砂量は剥離渦の大きさに関係するから、浮遊砂雲による net の輸送は右向きに生じることとなる。

一方、sheetflow 状の輸送については、以下のような非対称性がある。左向きの流れが生じる際には水圧変動の減圧期となり、砂層表面に見かけ上の揚力の作用して砂粒子移動が促進され、しかも緩斜面上を流動することから重力の抵抗も少なく、漂砂量が増大する。逆に、右向

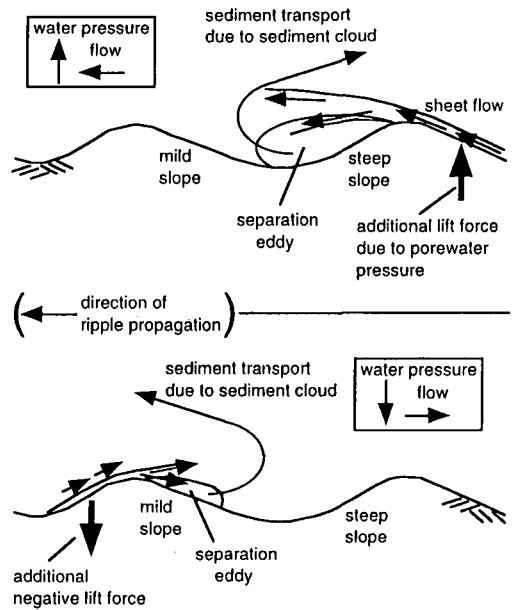


図-5 土砂輸送機構の模式図

きの流れでは、水圧変動の加圧期に相当するため砂層の移動抵抗が増加し、しかも急斜面上であることから重力の抵抗も大きく、漂砂量が減少する。従って、sheetflow の net の輸送は左向きに生じる。

振動流・水圧変動共存場における砂漣の伝播方向は、これら2つの機構の強弱により決定されるが、本実験の条件では、sheetflow の寄与が大きく、砂漣は徐々に左方向に移動した。

4. 結 語

本研究では、振動流・水圧変動共存場で観察される非対称砂漣上の浮遊砂輸送に関する定量的把握を目的として、浮遊砂濃度分布の位相変化をビデオ画像解析により計測して、浮遊砂雲と sheetflow の共存状態における土砂輸送機構について考察を加えた。水圧変動の影響により非対称性が増大すると考えられる sheetflow 状の土砂輸送が、net の土砂輸送方向にも影響を与えており、振動流・一方向流共存場における非対称砂漣上の浮遊過程とは異なった土砂輸送機構の存在が示唆された。

参 考 文 献

- 後藤仁志・酒井哲郎・柏村真直・田中博章 (1995): 被圧海底地盤内の間隙水圧を考慮した底質の移動限界, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 496-500.
- 酒井哲郎・後藤仁志・柏村真直・川崎順二 (1995): 波圧変動の海底床形態に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 486-490.
- Shibayama, T. and K. Horikawa (1982): Sediment transport and beach transformation, Proc. 18th ICCE, pp. 1439-1458.