

非対称砂漣上の浮遊過程における一方向流と水圧変動の役割

酒井哲郎*・後藤仁志**・松原隆之***・高橋智洋***

1. 緒 言

漂砂現象は、波・流れ、漂砂、海底床形態の 3 者相互作用系において生じるため、本来なら移動床形態別の運動機構の議論は、サブシステム間の相互作用を念頭に行われる必要がある。しかし、波・流れの変化に対する海底床の応答は海底床の変化に対する波・流れの応答よりも十分に遅く、波 1 周期程度の短時間での土砂輸送機構を論じるには、波・流れを既知とした one-way のアプローチが有効である。

この場合、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 (例えば, Shibayama & Horikawa; 1982), 個々の土砂移動形態における漂砂輸送が論じられる。

ところが現実の海浜では、波浪の伝播に伴い生じる海底床作用水圧の変動が海底地盤内間隙水圧の時間的変動を誘起して、これが海底床表層付近の砂粒子の移動抵抗に影響を与える。すなわち、海底地盤内に形成される間隙水圧分布は、海底床表層付近の砂粒子に作用する付加的外力 (見かけの変動揚力) を生じさせ、海底床表層粒子のせん断抵抗が変化する。せん断抵抗の変化は、砂粒子の離脱率 (pick-up rate) に影響して、結果的に漂砂量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。また、特に砂漣の形状変化とその結果として砂漣床上的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。さらに、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。

続いて昨年度、著者ら (酒井・後藤ら, 1997) は、それ以前の検討を踏まえて、振動流・水圧変動共存場における非対称砂漣上の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、砂漣の非対称性に起因する浮遊砂雲の移動軌跡の非対称性と地盤内間隙水圧変動に起因する底面境界付近の漂砂量の非対称性による浮遊砂雲初期含有浮遊砂量の非対称性の 2 つの要因が介在した土砂輸送機構についての仮説を提案した。

本研究では、この仮説を検証する目的で、同一の幾何的形狀を有する非対称砂漣上で、振動流場、振動流・一方向流共存場、振動流・水圧変動共存場の 3 つの場を生起させ、個々の場で浮遊砂濃度分布の位相変化を計測し、計測結果に基づき、浮遊砂雲の特性を含む土砂輸送機構の観点から、一方向流や水圧変動の果たす役割について考察を加える。

2. 実験及び解析の概要

実験には、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同時加減圧振動流装置を用いた。この装置は、任意波形の水圧変動・振動流共存場における砂地盤の挙動を再現可能であるが、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、 $u_b = 29.0 \text{ cm/s}$ 、一方向流速は、 $u_c = 1.0 \text{ cm/s}$ 、水圧振幅は $p/\rho g = 0.5 \text{ m}$ 、周期は $T = 6 \text{ s}$ であり、実験に使用した底質材料は粒径 $d = 0.025 \text{ cm}$ 、比重 $\sigma/\rho = 2.65$ の均一砂である。Shibayama & Horikawa (1982) による海底床形態の領域区分や酒井・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。

砂漣上の浮遊過程の理解には、剥離渦の周期的放出に伴う組織的な浮遊砂輸送が鍵であり、各位相における濃度分布の空間的な構造を一望できる計測法が不可欠である。この点に配慮して、浮遊砂濃度の推定は、光学式濃

* フェロー 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

度計による点計測の反復ではなく、画像解析（画像の明暗と浮遊砂濃度の相関を用いる方法）で行った。

撮影された各位相の画像は、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に取り込まれ、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が推定された（酒井・後藤ら，1997）。

3. 振動流・水圧変動共存場での砂連上の浮遊過程

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を図一1, 2に示す。振動流は右向きを正、水圧変動は加圧を正とした正弦波型を対象とし、一方向流についても右向きを正とする。画像解析は、1周期を8分割して実施し、図中には、振動流・一方向流共存場、振動流場、振動流・水圧変動共存場の同位相の濃度分布を比較しつつ表示した。図中の各位相における矢印は流れと圧力の作用方向を模式的に示している。形成された砂連の位相平均的形状は緩やかな非対称性（波長 33.1 cm, 波高 4.9 cm）を示し、クレストに対して左側が急斜面、右側が緩斜面となっている。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。

3.1 振動流場における浮遊過程

はじめに、砂連形状に起因する浮遊砂輸送の非対称性について検討するため、振動流場における浮遊過程の特性を確認する。なお、振動流場では、流速波形が正逆対称であるから、流れと土砂との相互作用の結果として非対称砂連が生じないことは言うまでもないが、ここでは後述する一方向流の影響や水圧変動の影響を論じる際の基準とするため、砂連形状（流れ場の底面境界条件）の非対称性に起因する流れ場の非対称性が浮遊砂輸送に与える影響を抽出する目的で、現実には存在しない仮想的な状況での計測を行った。すなわち、振動流・水圧変動共存場において形成された非対称砂連上に振動流のみを作用させて浮遊砂濃度を測定した。

位相 $\phi=0$ （流れが左から右に転流する瞬間に対応）に、クレスト左側に見られる高濃度部は、クレスト左側の急斜面に形成された剝離渦に取り込まれた砂粒子が転流に伴う剝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。位相 $\phi=\pi/4$ には、右向きの流れに乗って移動してきた浮遊砂雲の濃度重心は、クレストを越えて下手側に隣接する砂連の緩斜面上に達する（図中には解析対象とした砂連の上手側に隣接する砂連から移動してきた浮遊砂雲に対応する高濃度部（図中の C）が見られる）。また、緩斜面側のクレスト付近の高濃度部（記号 SF で表示）は、上手側の急斜面上に局所的に発生した sheetflow 状の流動が

クレストを越えて放出されることに対応したものと考えられる。右向き振動流速が最大となる位相 $\phi=(2/4)\pi$ では、浮遊砂雲は更に下手側に移動して、浮遊砂が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 状の流動に対応する高濃度部が見られる。

減速に転じた後の位相 $\phi=(3/4)\pi$ では、緩斜面上に形成された剝離域の膨張（剝離渦の放出分離の前段階）が生じることに対応した緩斜面上の高濃度部の発達が見られる。これ以後、浮遊砂雲はさらに発達し、転流が生じる位相 $\phi=(4/4)\pi$ には砂連から分離されて上昇するが、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。

流れが左向きに加速される位相 $\phi=(5/4)\pi$ には、クレスト下手側の急斜面上に生じる sheetflow 状の噴き出しと剝離域内に留まる浮遊砂に対応した高濃度部が確認され、位相 $\phi=(6/4)\pi$ には、この高濃度部は更に顕在化する。なお、この位相では剝離渦は急斜面上に形成されるため渦のスケールが緩斜面上より大きく、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、浮遊砂雲に対応する高濃度部が急斜面上に明確に表れている。

3.2 振動流・水圧変動共存場における浮遊過程

振動流・水圧変動共存場における等値線のパターンは、振動流場の場合と類似したものとなっている。このことは、流れ場と浮遊砂雲の移動過程が基本的には砂連形状の非対称性によって決まり、水圧変動が直接的には浮遊砂雲の移動軌跡に影響を与えないことを示しているものと推察される。

位相 $\phi=(3/4)\pi$ の緩斜面側底面付近についてより詳細に比較すると、振動流における等値線は、振動流・水圧変動共存場の等値線よりも上方に押し上げられている。緩斜面の剝離域に滞留する浮遊砂は、急斜面上を sheetflow 状に流動して輸送されてきたものであるが、振動流・水圧変動共存場で急斜面上の輸送は加圧時に生じ、表層地盤は見かけ上の負の揚力を受けて砂移動が抑制されるために漂砂量は減少し、その結果、sheetflow 状の噴き出し量や剝離域に滞留する浮遊砂量も減少する。濃度等値線に見られた相違は、このことによるものと考えられる。一方、位相 $\phi=(7/4)\pi$ には、振動流・水圧変動共存場における等値線が、振動流の等値線よりも上方に押し上げられている（位相 $\phi=(3/4)\pi$ と逆の関係）。このことは、緩斜面上での sheetflow 状流動が減圧時に生じ、表層地盤が見かけ上の揚力を受けて砂移動が促進されるために漂砂量が増大することに対応している。この影響、すなわち浮遊砂雲の初期含有浮遊砂量の相違は、これに続く位相の濃度分布にも影響を及ぼし、位相 $\phi=(2/4)\pi$ では浮遊砂雲の濃度重心の濃度に顕著な相違が見られ

oscillation-current coexisting

oscillation

oscillation-waterpressure change coexisting

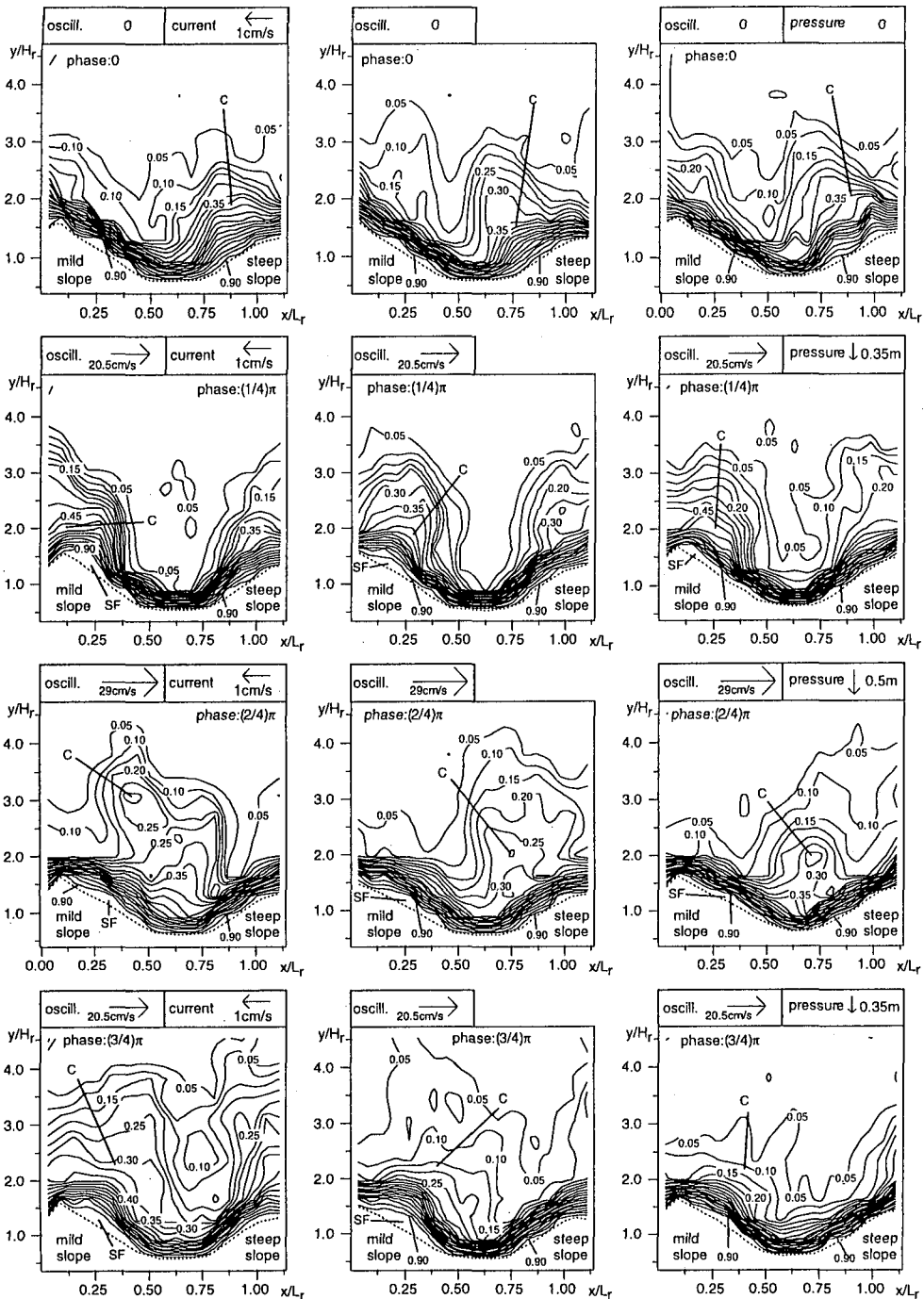


図-1 浮遊砂濃度の空間分布 (1)

る。

3.3 振動流・一方向流共存場における浮遊過程

本研究で対象とした一方向流は、振動流の流速振幅の3.5%程度の僅かな流速であるが、浮遊過程に与える影響

は必ずしも小さくない。一方向流速は、移動床状態の振動流・水圧変動共存場で得られたのとはほぼ同一形状の砂鏈が得られる条件を試行錯誤的に決定したものである。ところで、現実の波浪場では流速波形の非対称性が漂

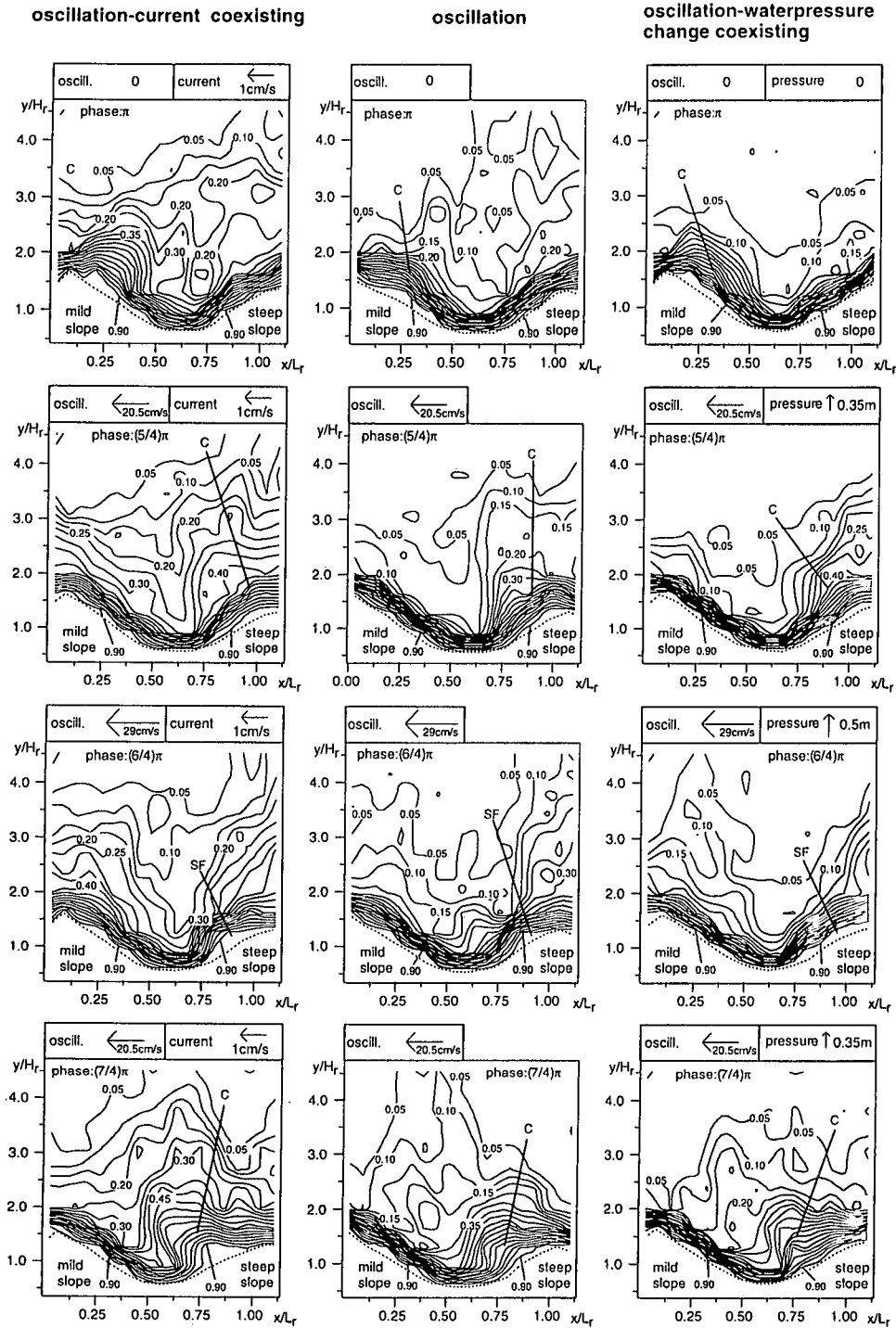


図-2 浮遊砂濃度の空間分布 (2)

砂の非対称性に強く影響するとの認識から、これまでも多くの研究が行われてきた（例えば、早川・辻本ら，1984；佐藤・堀川，1984）。これら一連の研究では、流速波形の非対称性により net として冲向きの砂移動が生

じ、砂澱は岸側背面が急斜面、沖側背面が緩斜面となる結果が得られている。この場合、一方向流は戻り流に相当するから沖に向かう流れとなり、砂澱の緩斜面・急斜面の関係は、本研究で対象とする振動流・一方向流共

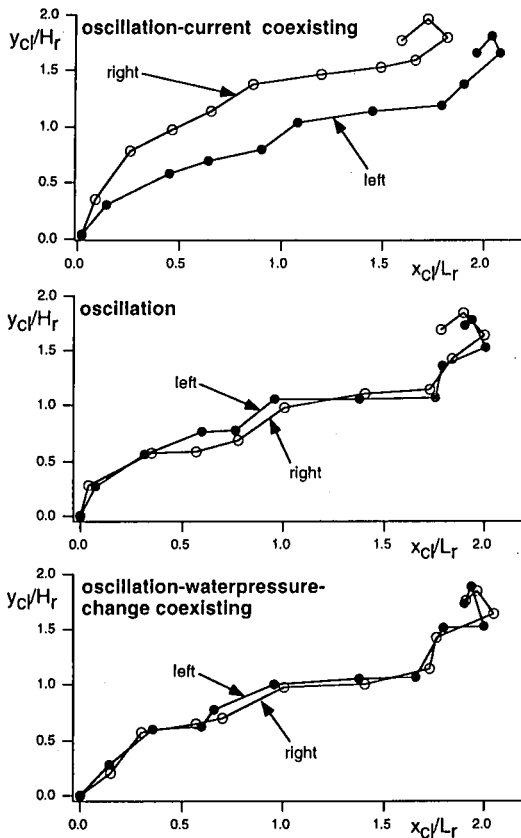


図-3 浮遊砂雲の移動軌跡

存場に形成された砂漣とは逆向きとなる。これに対して、一方向流のみの作用下で形成される非対称砂漣では、一方向流の下手側が急斜面となることが知られており、本研究で見られた砂漣の非対称性と定性的には一致する。本研究で対象としたのが振動流であり、既往の多くの研究で対象とされた流速波形の非対称性の影響が無いことから、一方向流速は小さいにもかかわらず、一方向流の影響が砂漣形状の非対称性に支配的となったものと考えられる。

位相 $\phi = (2/4)\pi \sim (6/4)\pi$ にかけて、振動流・一方向流共存場の濃度等値線は、振動流場より上方に位置しており、浮遊砂の上方への拡散が活発であることが分かる。特に、振動流場と比較した場合の顕著な相違は、位相 $\phi = (2/4)\pi$ に現れる。すなわち、浮遊砂雲の濃度中心の高さが振動流・一方向流共存場では、振動流場より上方にあり、剝離域から分離した渦が急激に上昇して、浮遊砂雲に含まれていた浮遊砂を効率的に上方に輸送していることが理解できる。この急激な上方への浮遊砂輸送の影響がその後の位相の等値線の上方への押し上げに大きく貢献しているものと推察される。これに対して、位相 $\phi = (7/4)\pi \sim (1/4)\pi$ にかけての振動流・一方向流共存場の濃

度等値線は振動流場と明確な相違が見られない。この間は、緩斜面上に形成された浮遊砂雲の輸送した浮遊砂が濃度の維持に貢献する位相に相当する。緩斜面上の浮遊砂雲は小規模であり、濃度等値線の押し上げに貢献した急斜面上の浮遊砂雲とは対照的に、濃度の維持に対する貢献も小さいことが理解できる。

3.4 浮遊砂雲の移動軌跡

対象とした3つの場で浮遊砂雲の濃度重心の移動軌跡を50周期にわたり追跡し、平均的軌跡を求めたのが、図-3である。これまでの議論でも明らかなように、水圧変動の影響は、浮遊砂雲の移動軌跡自体には顕著な影響を与えず、振動流場と振動流・水圧変動共存場では移動軌跡に大きな相違は生じない。一方、一方向流速は僅かな値であるにも関わらず、流れ場への影響は顕著で、左右の浮遊砂雲の軌跡は大きく異なる。一方向流速と逆向きとなる場合は、一方向流に押し戻されて水平方向の移動距離は小さくなるが、発生初期の上昇速度は速く、大量の浮遊砂を効率的に上方に輸送できることが分かる。一方、一方向流と同方向の浮遊砂雲は水平方向移動距離は長いものの、鉛直方向の浮上高さは小さく、初期含有浮遊砂量が少ないことを考えると浮遊砂輸送への貢献は小さいものと考えられる。

4. 結 語

本研究では、同一の幾何的形狀を有する非対称砂漣上で、振動流場、振動流・一方向流共存場、振動流・水圧変動共存場の3つの場を生起させ、個々の場で浮遊砂濃度分布の位相変化を計測して、土砂輸送機構について考察した。今後は、ここで得られた特性を普遍的に説明できる数値モデルを構築し、流速波形の非対称性の効果を含む種々の非対称性が土砂輸送に与える影響を系統的に検討したい。

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): 波圧変動の海底底形態に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 486-490.
- 酒井哲郎・後藤仁志・松原隆之 (1997): 振動流・水圧変動共存場における砂漣上の浮遊過程, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 491-495.
- 佐藤慎司・堀川清司 (1984): 非対称振動流下における砂漣上の砂移動に関する実験的研究, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 286-290.
- 早川典生・辻本剛三・森下憲治 (1984): 砂漣上の渦運動による浮遊砂機構, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 291-295.
- Shibayama, T. and K. Horikawa (1982): Sediment transport and beach transformation, Proc. 18th ICCE, pp. 1439-1458.