

混合粒径シートフロー漂砂におけるアーマコートの非定常特性

酒井哲郎* ・後藤仁志**・原田英治***
高橋智洋****・羽間義晃*****

1. 緒 言

混合粒径の漂砂の移動過程の解明は、単なる力学的関心事の域に留まるものではなく、養浜による大量の土砂投入が周辺海浜に与えるインパクトや海浜の生物の生息環境要素としての底質粒度構成の変化など、沿岸域の開発が環境に与える影響を論じる上でも不可欠なプロセスと言える。特に粗砂によって形成されるアーマコートは、底質移動に与える影響が大きく、その挙動の把握は海浜変形予測の上での重要な要素である。アーマコートの形成過程の研究は河川流砂を主たる対象に進んできたが、海浜では河川と異なり砂粒子に作用する外力が周期に変動し、砂粒子が移動と停止を周期的に反復する。このような状況では周期的破壊・形成を伴う複雑な非定常アーマリングが出現する。

混合砂の重要性は早くから認識されていたものの、砂粒子の運動特性に基づく微視的な輸送機構の検討が漂砂(特にシートフロー状態)に対して実施されるようになったのは近年のことである。乾ら(1995)による細粗混合比率の変化がシートフロー漂砂の発生領域に与える影響の検討、後藤ら(1996)による逆グレイディング(粗砂の表層付近への上昇過程)の実験および個別要素法によるシミュレーション、Dibajniaら(1998)による表層付近の粗砂層の直下の細砂層による粗砂の移動抵抗軽減効果の指摘など、物理機構の詳細な検討が続けられている。さらに、渡辺ら(1999)は、細粗2粒径混合砂のシートフロー状態を、アーマリング型、浮遊卓越型、掃流卓越型に分類し、個々のモードにおける土砂輸送特性を実験的に検討している。

本稿では、昨年度実施した鉛直分級の進行プロセスの継続的追跡(酒井ら, 1999)を更に深めて、分級の進行過程と平衡過程(完全発達状態)の双方におけるアーマコートの非定常的挙動をビデオ画像解析を通じて詳細に検討する。

2. 実験の概要

実験には、閉管路にプロペラ式の駆動システムを配したアクリル製振動流装置を用いた。装置は、全長 12.0 m、水平部の総延長 10.0 m(中央部に長さ 4.4 m、深さ 10.0 cm の移動床部)で、水平部の流水断面は 10.0 cm×10.0 cm である。駆動系は、閉管路に取り付けられたプロペラシステムで、電磁流量計からのフィードバック信号により正逆双方向の任意波形の流速変動が発生できるが、今回は正弦波型の振動流を発生させた。

実験に用いた粒子は人工真珠の核(比重 $\sigma/\rho=1.318$)であり、粒径 $d=5.15$ mm の基準粒子に対する大粒子 $D=9.88$ mm の混合率 $\gamma_D (=Vol_D/(Vol_D+Vol_d))$ は、0.05, 0.2 の 2 つのケースを設定した(Vol_D, Vol_d : 大粒子および基準粒子の占有体積)。振動流の条件については、i) 周期 $T=3.0$ s, 流速振幅 $U_{max}=56.0$ cm/s, Shields 数 $\psi=0.3$ および ii) 周期 $T=4.0$ s, 流速振幅 $U_{max}=72.0$ cm/s, Shields 数 $\psi=0.34$ の 2 つのケースを対象とした。なお、本実験の条件が既往の研究(例えば、Komer-Miller, 1974)で示されたシートフローの発生領域に入っていることは確認している。

砂粒子運動は移動床部の側方から 3CCD デジタルビデオカメラ(シャッタースピード 1/4000 秒)で撮影し、ビデオキャプチャーシステムを用いてパーソナルコンピュータに画像を取り込み処理した。濃度分布の測定は、フリーウェア NIH-Image(開発者: Wayne Rasband, National Institute of Health, USA)を用いた二値化処理画像の簡易解析(後藤ら, 1996)により行った。一方、粒子の移動速度の測定には、粒子の運動軌跡の視覚的追跡の際の誤判別を最小限にするために種々に着色した粒子を混合して撮影した画像を用いた。さらに、粒度構成の変化については、装置を停止させた後に、粒子層を直接サンプリングして、調査した。

3. 平衡状態の砂粒子輸送

図-1 に、アーマコートの平衡状態(振動流を作用させてから約 30 周期後の完全発達状態)における半周期内の数密度分布および砂粒子移動速度分布を、大粒子の混合

* 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 工修 京都大学大学院博士後期課程土木工学専攻
**** 正 会 員 工修 日立造船
***** 学生会員 京都大学大学院工学研究科土木工学専攻

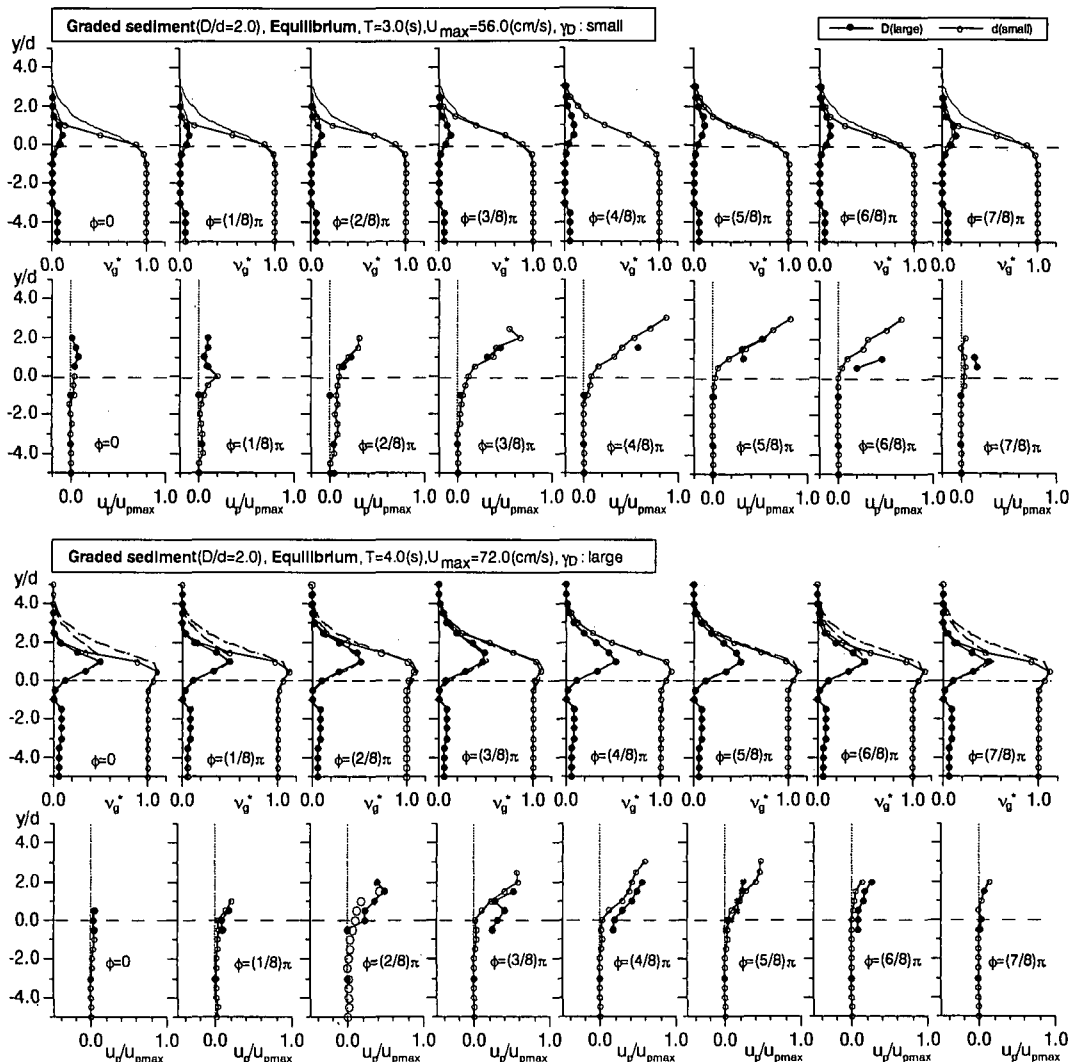


図-1 数密度分布および砂粒子移動速度分布（平衡状態）

率が異なる2つのケースについて示す。数密度分布においては、図中の●は大粒子 ($D=9.88$ mm) のみの数密度を、○は基準粒子 ($d=5.15$ mm) と大粒子の数密度の合計値を示している。また、数密度分布の各位相では、振動流の流速最大となる位相 $\phi=(4/8)\pi$ における大粒子及び基準粒子の数密度分布を破線で示している。一方、速度分布では、●は大粒子、○は基準粒子の平均移動速度を示している。

大粒子混合率の大きいケースを見ると、数密度分布には、 $y/d=1.0$ 付近にピークを有する大粒子の分布域が全位相を通じて存在しているが、これはアーマコートの発達を示すものである。より詳細に見ると、流速反転直後の位相 ($\phi=0$) では $y/d=2.0$ 付近は全て大粒子で覆われているが、流速の増大とともに大粒子が移動するとその

間隙から基準粒子が浮上して大粒子の分布域より上方に有意な基準粒子の分布が見られるようになる（位相 $\phi=(4/8)\pi$ で顕著）。この基準粒子の分布域は流速の減少とともに縮小して、流速反転前（位相 $\phi=(7/8)\pi$ ）には基準粒子の大半が大粒子の間隙に落ち込んで表層は再び大粒子で覆われる。一方、大粒子混合率が小さいケースでは、平衡状態でも表層を完全に被覆するには不十分な数の大粒子しか表層に存在しないので、表層付近に大粒子の分布域のピークは存在するものの、全位相を通じて大粒子と基準粒子が表層付近に共存する。

移動速度分布を見ると、大粒子混合率の大きいケースについては、加速位相では大粒子の平均速度が基準粒子より大きく、水流に加速されて移動する大粒子によってその下方の基準粒子が間接的に加速され次第に速度を増

大させる様子が読みとれる。減速位相初期にはアーマコートの上方に一部の基準粒子が残留しており、これらの粒子は水流から直接運動量を獲得するので大粒子より移動速度が大きくなるが(位相 $\phi=(5/8)\pi$)、大粒子の下方に落下すると基準粒子は急速に減速する(位相 $\phi=(6/8)\pi$)。一方、大粒子混合率が小さいケースでは、大粒子を介しての基準粒子への速度伝達機構は明確ではなく、基準粒子が水流に直接加速されるものと考えられる。このことは、速度分布の位相別変化において大粒子と基準粒子の速度の有意な差が加速位相では見られないことから明らかであり、大粒子混合率の大きいケースとの端的な相違点である。

図-2に、底面近傍流速の大小および大粒子混合率の大小の組み合わせを変えた4つのケースにおける半周期間の基準粒子の漂砂量の位相別変化を示す。漂砂量は、同一水理条件の下の基準粒子のみの均一砂での位相別漂砂量 q_{uni} で規格化して表示しているの、縦軸の1.0を基準に均一砂と比較した漂砂量の増減が示されている。すべてのケースに共通して、加速期の初期に基準粒子の漂砂量が均一砂と比較して減少することが示されている。底面近傍流速および大粒子混合率がともに小さいケース($T=3.0$ s, $U_{max}=56.0$ cm/s, γ_D : small)では、均一砂との相違がもっとも少なく底面流速のピーク($t/T=0.5$)付近では $q_{gs}/q_{uni}=1.0$ 付近を推移する。これに対して、底面近傍流速が小さく、大粒子の混合率が大きい場合($T=3.0$ s, $U_{max}=56.0$ cm/s, γ_D : large)では、底面流速のピーク付近でも $q_{gs}/q_{uni}<1.0$ となっており、アーマリングの効果で漂砂量が抑制される。底面近傍流速の大きいケースでは、大粒子混合率の大小の関わらず共通した傾向が見られる。すなわち、加速期初期は抑制($q_{gs}/q_{uni}<1.0$)、ピーク付近では均衡($q_{gs}/q_{uni}=1.0$)、減速期で促進($q_{gs}/q_{uni}>1.0$)という大略的傾向である。加速期初期の抑制は、先にも述べた大粒子の離脱抵抗による基準粒子の移動抑制効果(いわゆるアーマリング)に起因する。ピーク付近での均衡は、大粒子の間隙を抜けて上方に移動した基準粒子数が多数であったために、ピーク位相付近ではアーマコートの存在が基準粒子の漂砂量に影響を与えないことを示しているものと考えられる。さらに、減速期の促進傾向は、大粒子の慣性により小粒子も停止し難くなり、均一の場合なら流速の減少に伴って急速に減少するはずの漂砂量の減少傾向に歯止めがかかったような状態となっているものと考えられる。以上のように位相別の漂砂量を詳細に見ることにより、『アーマコート=移動抵抗増加=漂砂量抑制』という単純な図式が成立しないことが理解できる。

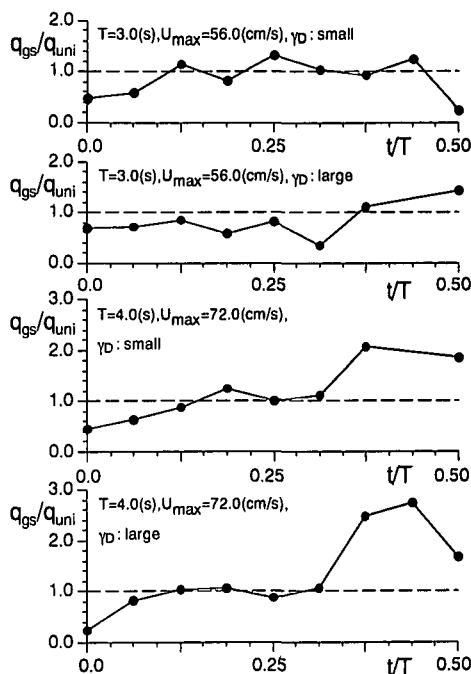


図-2 位相別漂砂量(平衡状態)

4. アーマコートの発達過程の砂粒子輸送

図-3に、砂粒子移動速度の位相別変化を示す。アーマコートの発達過程およびアーマコートが十分に発達した平衡状態を比較するため、基準粒子の均一砂での結果と大粒子混合率と振動流の条件の異なる2つのケースの発達過程および平衡状態を表示した(平衡状態の速度分布は、図-1中のものと同一である)。本稿で対象とするアーマリングは鉛直分級に起因するものであるため、発達過程では大粒子の混合率の如何によらず大粒子の表層被覆は不完全である。したがって、発達過程では大粒子混合率が大きい場合でさえも表層に大粒子と基準粒子が混在し、基準粒子の運動は大粒子にさほどには妨げられない。このような状況下では、大粒子、基準粒子ともに水流から直接加速されて運動するプロセスが主体で、大略的には加速期初期を除いて大粒子と基準粒子間の有意な速度差は生じない。

一方、平衡状態に達すると、鉛直分級による大粒子に表層への集積が進むので、大粒子混合率が高いケースでは、表層のかなりの部分が大粒子で被覆される。従って、加速期初期では、大粒子の被覆効果により基準粒子加速が抑制される典型的なアーマリングが生じる。底面近傍流速の増加に伴って表層を被覆する大粒子が移動を開始するとそれに引きずられるようにして基準粒子が加速され、大粒子の運動の活発化によって生じるアーマコートの綻びから一部の基準粒子が抜け出し、水流から直接加

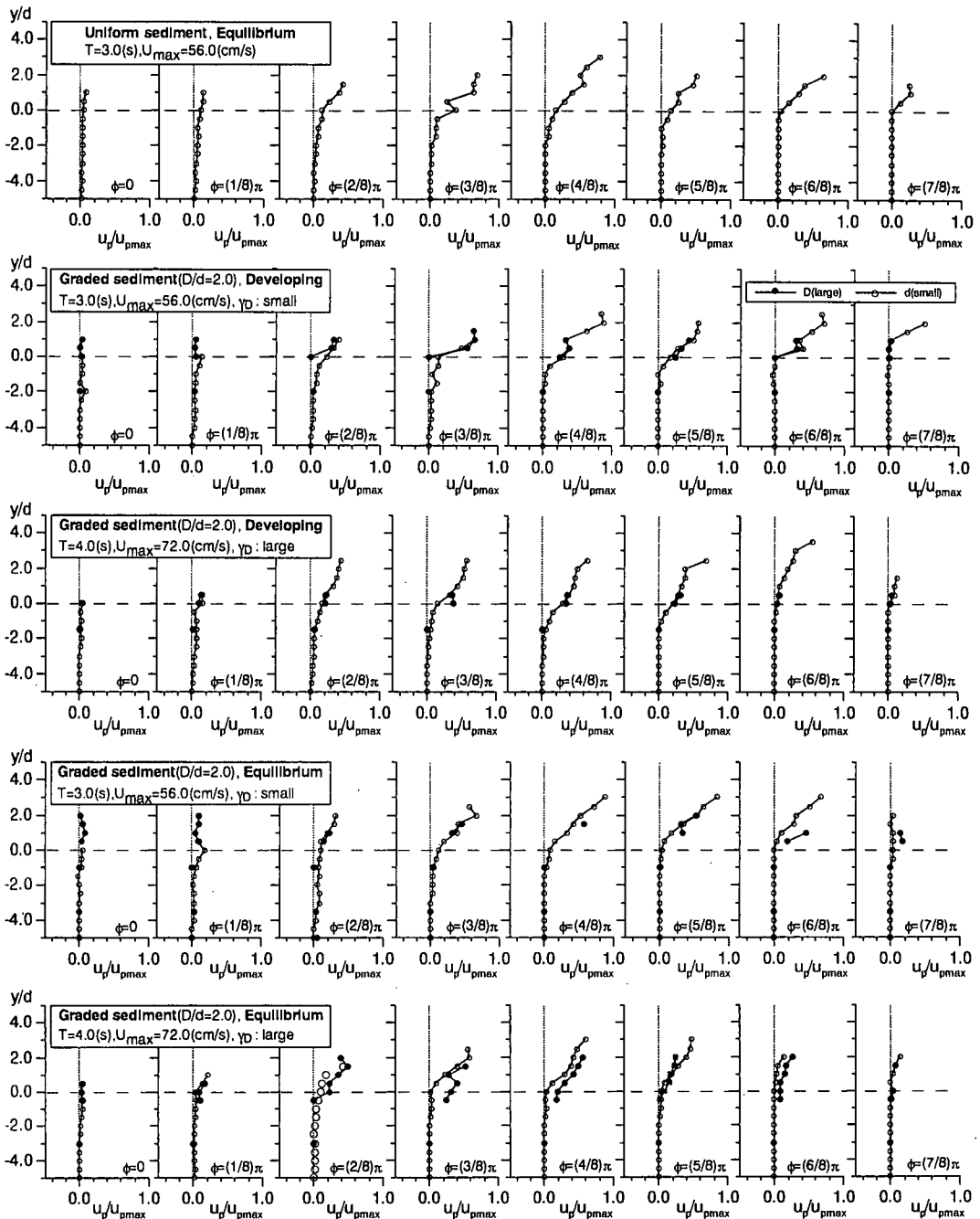


図-3 砂粒子移動速度分布 (進行過程および平衡状態)

速されて急速に速度を増加させる。減速期に入ると、大粒子は慣性の効果が大きいので停止し難く、減速期相後半で基準粒子を引きずり、基準粒子の停止を阻止することにも貢献する。以上のような特性は、底面近傍流速および大粒子混合率がともに大きいケース ($T=4.0$ s, $U_{\max}=72.0$ cm/s, y_D : large) で顕著である。これに対し、底面近傍流速および大粒子混合率がともに小さい

ケース ($T=3.0$ s, $U_{\max}=56.0$ cm/s, y_D : small) では、大粒子の表層被覆率が平衡状態でも比較的小さく、上記のような傾向は顕著ではなく、平衡状態でも発達過程と類似した速度分布の位相変化特性を示す。

図-4 は、大粒子混合率の異なる2つのケースにおけるアーミングの進行過程での大粒子体積占有率の鉛直分布を示したものである。 $y/d < -0.4$ の領域では、大粒

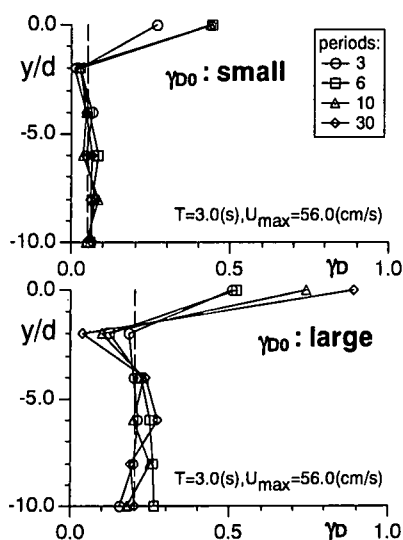


図-4 鉛直分級の進行過程

子の体積占有率は初期混合率付近の値を保持し続けており、この領域の大粒子は上昇せず、アーミングの形成には関与していないことが理解できる。大粒子混合率が低いケースでは、比較的初期に表層直下の大粒子の上昇が完了して6周期以降は鉛直分布にほとんど変化が見られない。これに対して、大粒子混合率が大きいケースでは、初期に顕著な大粒子の上昇が生じる点では大粒子混合率が小さいケースと共通しているが、表層付近の大粒子の体積占有率は漸増を続け、30周期付近の平衡状態に漸近する。

5. 結 語

本研究では、振動流装置を用いて、数十周期にわたる鉛直分級の進行プロセスを継続して追跡し、分級の進行過程と平衡過程（完全発達状態）の双方におけるアーマコートの非定常的挙動をビデオ画像解析を通じて詳細に検討した。

大粒子混合率が大きい場合には、平衡状態のアーマコートの表層被覆率は大きくなるが、アーマコートの形成には大粒子混合率が小さい場合より長時間を要する。アーマコートの生成は表層下方の層からの大粒子の供給（逆グレイディング）により成されているが、大粒子が増加すると表層のアーマコートの成長に伴って逆グレイディングの駆動力である粒子表層せん断力が見かけの上で低下するので（緩いアーミングの作用）、アーミングの進行も緩やかに推移するものと考えられる。

進行過程の基準粒子の速度分布の構造は、大略的には均一粒径のものと相違なく、アーミングの効果が小さい進行過程では、基準粒子は主として水流に直接動かされているものと考えられる。一方、大粒子混合率が大きいケースでアーミングが平衡状態に達すると、基準粒子の移動速度分布と大粒子の速度分布に遅れが生じ、加速位相初期には基準粒子の運動を抑制し、減速位相では慣性の効果で基準粒子の運動を促進するという大粒子の特性が確認された。このように、平衡状態においても位相別のアーマコートは動的で、『アーマコート=移動抵抗増加=漂砂量抑制』という単純な図式は成立しない。

ここで得られた結果は、2粒径混合状態という理想化（単純化）された状態においてのものであるが、それでもアーミングの特性は複雑で、細粗混合比の変化により漂砂量すら影響を受ける。今後は更に粗砂の混合率が大きい場合や、3粒径以上の粒径階が存在する場合など、より一般的な混合砂についてもデータの収集を進めるとともに、粒状体型の数値移動床の活用も念頭に、混合砂の流送特性を普遍的説明に努力したい。

本研究の遂行にあたり、文部省科学研究費（基盤研究B(2)『漂砂量の数値予測のためのシートフロー漂砂シミュレーターの開発』、代表者：酒井哲郎）の補助を受けた。さらに、実験およびデータ解析の過程で、京都大学工学部・野澤敦司君の熱心な協力を得たことを記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 乾 武史・Mohanmmad Dibajnia・磯部雅彦・渡辺 晃 (1995): 細粗混合砂のシートフロー漂砂量の算定式について, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 521-525.
- 後藤仁志・酒井哲郎・豊田泰昭・砂田哲也 (1996): 振動流下の混合漂砂の鉛直分級機構, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 456-460.
- 酒井哲郎・後藤仁志・沖 和哉・高橋智洋 (1999): 混合粒径シートフロー漂砂の鉛直分級過程の可視化実験, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 516-520.
- 砂村継夫 (1982): 浅海域の岸沖漂砂量に関する実験的研究, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 239-243.
- 渡辺 晃・磯部雅彦・Mohanmmad Dibajnia・田中正博・植村勇仁 (1999): 非対称振動流作用下における混合粒径砂の移動機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 521-525.
- Mohanmmad Dibajnia・高沢大志・渡辺 晃 (1998): 混合粒径砂における移動層厚と漂砂量に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 481-486.
- Komar, P. D. and M. C. Miller (1974): The initiation of oscillatory ripple marks and development of plane-bed at high stresses under waves, Jour. Sedimentary Petrology, Vol. 45, No. 3, pp. 697-703.