

# 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

酒井哲郎\*・後藤仁志\*\*・沖 和哉\*\*\*・高橋智洋\*\*\*\*

## 1. 緒 言

人工海浜の造成等で生じる自然海浜の粒度分布と異なる大量の土砂の投入は、現地の粒度分布に大きな影響を与え、粒度構成の変化は海浜地形自体にも変化をもたらすので、混合粒径漂砂は現地海浜を考える上で重要な課題と言える。さらに、近年、生態系を含む海岸環境への沿岸開発の影響評価に対する社会的要請が高まり、海浜の生物の生息環境要素としての底質粒径の制御の必要性が指摘されている。このように、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い。

混合砂の重要性は比較的早くから認識され、過去数十年にわたって基礎的研究が続けられてきたが(例えば、砂村, 1982; 田中ら, 1989), 海浜変形に寄与の大きいシートフロー漂砂を主対象とした研究はそれほど多くない。乾ら (1995) は、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を検討し、著者ら(後藤ら, 1996) は、細粗 2 粒径混合状態での粗砂の表層付近への上昇過程の実験と個別要素法によるシミュレーションを通じての物理機構の検討を行った。さらに、最近、Dibajinia ら (1998) は、表層付近の粗砂層の直下に細砂層が形成され、粗砂の移動抵抗を減少させるとともに、それより下層からの土砂供給を絶つ効果があるとの興味深い指摘を行っている。

シートフロー漂砂の鉛直分級過程については、著者らは既に基礎的検討を実施しているが(後藤ら, 1996), その際には振動流装置の移動床部の長さが十分に確保できず、長時間にわたり鉛直分級の進行過程を追跡できなかった。そこで、本研究では、新たに振動流装置を制作し、移動床端部に生じる砂面低下(洗掘)の影響を最小限に留めつつ、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する。一連の実験を通じて、砂粒子の移動速度分布、濃度分布、更には大粒径粒子の移動軌跡や粒度構成の経時変化など詳細な実験データが収集さ

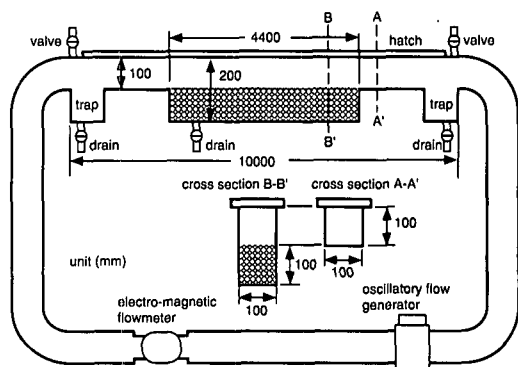


図-1 実験装置

れ、分級の物理機構に関して考察が行われる。

## 2. 実験の概要

実験には、図-1 に示す閉管路にプロペラ式の駆動システムを配した振動流装置を用い、球状粒子を敷き詰めた移動床でシートフロー漂砂を発生させた。振動流装置は、全長 12.0 m、水平部の総延長 10.0 m で、その中央部に 4.4 m の移動床部が配されている。水平部の流水断面は 10.0 cm × 10.0 cm であり、移動床部は深さ 10.0 cm の段落区間となっている。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、ここでは最も基本的な状況を対象として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  $d/\rho = 1.318$ )であり、粒径  $d = 5.15$  mm の基準粒子に対して、 $D = 9.88$  mm, 15.60 mm の大粒子を所定の混合率で投入した。振動流は周期  $T = 6.0$  s, 流速振幅  $U = 104.0$  cm/s, 田中ら(1993)の方法で摩擦損失係数を算定すると Shields 数  $\psi = 0.538$  である。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。

粒子の運動状況はアクリル製の装置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

\*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  
 \*\*\*正会員 工修 京都大学助手 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

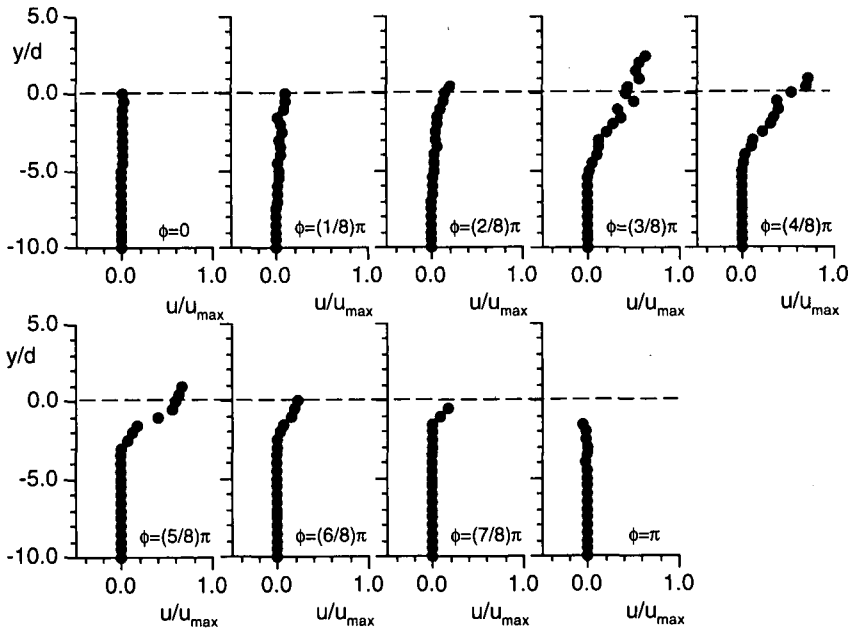


図-2 砂粒子移動速度

いてパーソナルコンピュータに画像を取り込み、データ処理を行った。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) を用いた簡易画像解析 (後藤ら, 1996) により行った。濃度分布の測定には、画像の二値化処理が必要なため、全ての粒子を同色に着色する方が都合がよい。一方、粒子の移動速度の測定には、個々の粒子の運動軌跡を視覚的に追跡する操作が必要で、この際に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用いる必要がある。このため、濃度分布解析と移動速度解析は、同一水理条件の下に撮影された別の画像を用いて行っている。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. 均一粒径細砂の運動特性

本研究では、粗砂の混合率が比較的少ない状況を対象としているので、細砂の流動特性が場の構造を大きく支配する。そこで、混合粒径の実験に入る以前の予備的検討として、均一細砂の運動特性を画像解析により検討した。

図-2は、砂粒子の移動速度の各位相における変化を示している。 $u_{max}$ は全位相を通じての最大速度である。主流速の変化は正弦波型で、位相  $\phi=0-(4/8)\pi$  が加速過程、位相  $\phi=(4/8)\pi-\pi$  が減速過程である。加速過程と減速過程で同レベルの主流速の位相 (例えば、 $\phi=(2/8)\pi$  と  $\phi=(6/8)\pi$ ) を比較すると、加速位相では、表層粒子の速

度はそれほど早くないものの、 $y/d=-7.0$  付近まで移動速度がゼロでない領域が広がっている。一方、減速位相では、表層付近に有意な速度を有した移動層が出現するが、下層へ向かうにつれて速度減衰が顕著で、加速位相で見られるような低速の移動層は存在せず、 $y/d=-2.0$  付近で移動速度はゼロとなっている。時間経過の順に見ると、位相  $\phi=0$  では、全層が停止状態にあるが、位相  $\phi=(1/8)\pi$  には低速ではあるが  $y/d=-5.0$  付近まで粒子の移動が生じており、加速過程に入ると急速に下に向かってシートフロー層が発達することが分かる。位相  $\phi=(2/8)\pi$  になると、表層付近の粒子が加速され、それに引きずられて下方の粒子が次第に加速されることから、速度分布は上に凸の形状を示している。さらに、位相  $\phi=(3/8)\pi$  になると、シートフロー層厚が急増し、上層を移動する粒子はより効率的に流体に加速され、上層での粒子間距離の増大に伴って、高速の流体が粒子層のより下方に進入し易くなり、下方の粒子も流体に直接加速されて、シートフロー層の発達が進められている。この位相の速度分布は、下層で上に凸、上層で下に凸の形状を有する変曲点型の分布となり、同様の傾向は位相  $\phi=(5/8)\pi$  まで維持されている。次に、位相  $\phi=(4/8)\pi$  になると、粒子の最高速度は位相  $\phi=(3/8)\pi$  より増加するものの、シートフロー層厚は減少している。減速位相に転じて、位相  $\phi=(5/8)\pi$  になると、分布形状自体は変曲点型を維持しているが、底層付近の粒子が停止・堆積し、シートフロー層厚が減少する。さらに位相が進むとその傾向は顕在化し、粒子の堆積とシートフロー層厚の減少が急

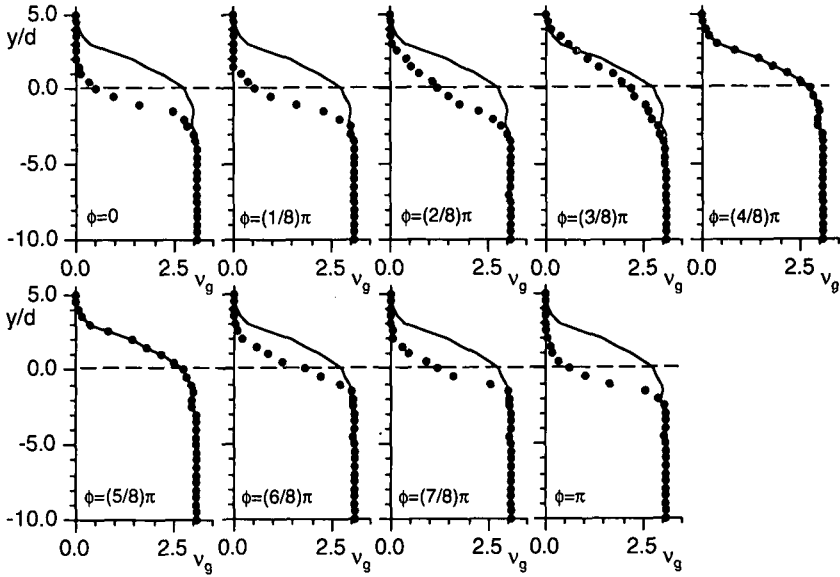


図-3 砂粒子数密度

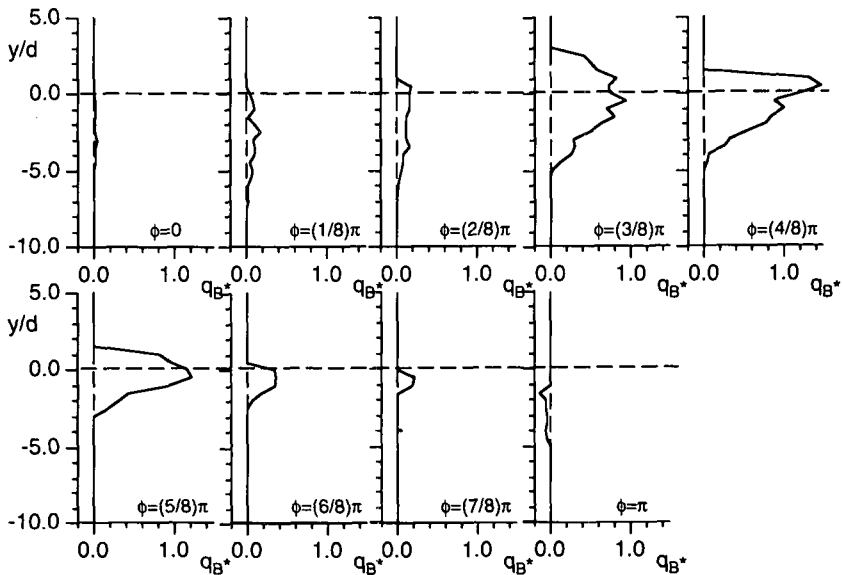


図-4 瞬間漂砂量の鉛直分布

激に進む。位相  $\phi = \pi$  では、僅かではあるが逆方向の移動が生じているが、全層的にほぼ停止状態にある。

図-3は、砂粒子数密度  $v_g$  の鉛直分布を示したものである。粒子数密度は、低層の堆積層で一様分布を示し、流動層に入ると急速に上方に向かって減少するという共通した特性を示している。なお、各図中の曲線は、位相  $\phi = (4/8)\pi$  における数密度分布を示している。粒子がほぼ全層的に停止状態にある位相でも  $y/d = 0.0$  の上下では数密度に勾配があり、分布は堆積層内でも一様ではな

い。これは、シートフロー層内では粒子の移動と停止が繰り返されるにつれて粒子の配列が不規則になり、初期状態から全く移動していない深層の粒子の配列よりルーズな構造が生じているためと解釈される。加速位相では、 $y/d = 0.0$  より上方の数密度の発達が見られ、位相  $\phi = (3/8)\pi$  になると、 $y/d = 3.0$  付近では、曲線(位相  $\phi = (4/8)\pi$  における数密度分布)を上回る数密度を示している。同様の顕著なシートフロー層の発達は、速度分布でも確認されており、加速効果によりシートフロー層の発

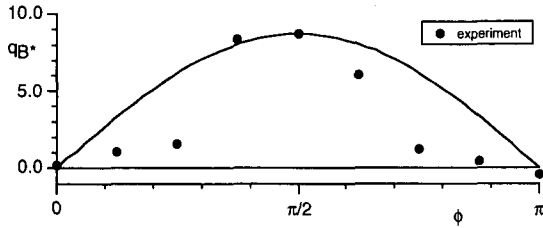


図-5 瞬間漂砂量

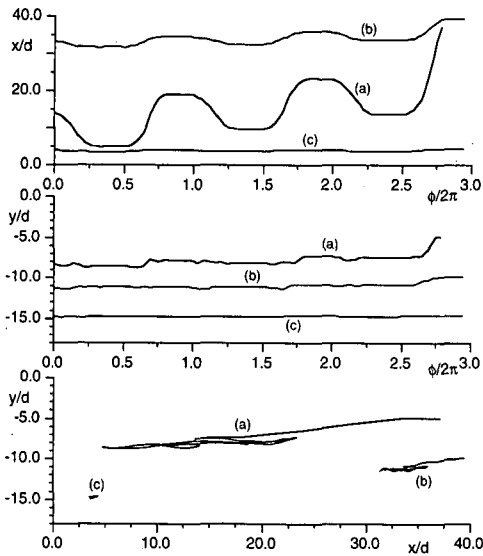


図-6 大粒子の浮上過程

達が促進されていることが分かる。減速位相に入ると、急速なシートフロー層の減衰が速度分布では顕著に見られたのに対して、数密度分布ではあまり傾向が明確ではない。このことは、先に述べた堆積層配列の不規則化とも関連していると思われるが、継続的検討を要する問題と考える。なお、図-2および図-3を比較すると、数密度分布がゼロでない高さでも粒子速度の記録のない場合があるが、粒子の移動速度の解析では、上層付近のサンプリング数が少ないため、データの有意性に問題があると判断して上層の粒子速度を表示していない。これに対して、画像処理では、より多くのサンプリングを機械的に行うことができるので、上層の点に関しても比較的信頼性のあるデータが得られたものと判断して全ての点に関して表示した。上層粒子の速度に関しては、今後データの補充を行う予定である。

図-4は、粒子移動速度と粒子数密度から計算された瞬間漂砂量 ( $q_{B*} = q_B / \sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd^3}$ ) の鉛直分布を示している。先に述べたように、上層付近の一部の点では粒子移動速度のデータがないので、その分若干ではあるが漂砂量が過小評価されている点に注意を要する。位相の順

に見ると、速度分布で確認された特徴と同様に、加速位相での下方への速やかな粒子移動の伝搬とそれに追隨して生じるシートフロー層の上方への発達、減速位相での速やかな堆積層の発達と表層付近での移動層の減衰が明瞭に現れている。

図-5は、図-4の分布を高き方向に積分して得られた瞬間漂砂量を示している。加速位相と減速位相で同レベルの主流速の位相 (例えば、 $\phi = (2/8)\pi$  と  $\phi = (6/8)\pi$ ) を比較すると、加速位相の方が漂砂量が多くなっており、この傾向は位相  $\phi = (3/8)\pi$  と  $\phi = (5/8)\pi$  間の比較で最も顕著である。結果として、加速による漂砂量の促進効果が明瞭に現れ、漂砂量時系列が前傾した形となっている (漂砂量の主流速に対する位相の進みとも解釈できる)。

## 4. 混合粒径漂砂の鉛直分級過程

### 4.1 大粒径粒子の浮上過程

粒径  $d = 5.15 \text{ mm}$  の基準粒子中に  $D = 15.60 \text{ mm}$  の大粒子を大粒子間相互の干渉が生じない程度の粒子間距離を隔てて混合し、鉛直方向にほぼ様な粒度分布となるように移動床を準備して実験を開始し、側壁付近の大粒子に関して、移動軌跡を追跡した。図-6は追跡結果の一例である。特に上層の粒子 (図中の (a)) は、主流方向 ( $x$ ) に振動しつつ、鉛直方向 ( $y$ ) 座標は次第に増加し、全体として右上がりの軌跡を示している。同様の傾向は粒子 (b) にも見られる。上昇過程で特徴的なことは、鉛直座標の増加が間欠的に生じ、あるレベルに留まって小刻みな変動を呈しつつほぼ水平に移動する過程と、短時間に鉛直方向に急上昇する過程とが繰り返すことである。より注意深く見ると、粒子 (a) の鉛直座標の獲得は、何れも加速過程初期に生じているが、この付近の位相では、全体に低速ではあるが深層までの粒子移動が生じていることが、粒子速度分布 (図-2) に示されている。加速位相で生じる比較的大きい層厚での流動化で大粒子が上下に振動しつつ移動し、大粒子底面にできた空隙に小粒子が滑り込んだ際に一気に大粒子が押し上げられるといった機構が介在するものと推測される。著者ら (後藤ら, 1996) は、同様のプロセスを個別要素法により数値的に再現して個々の粒子の回転速度をモニターし、粒子に作用するトルクが上昇の駆動力となる可能性を指摘している。本研究では、回転速度をモニターできないので、仮説の妥当性に関しては判断できないが、大粒子の回転の効果以外にも、先に述べたような単純な機構が大粒子を押し上げる可能性が想定できる。

### 4.2 鉛直分級の進行過程

粒径  $d = 5.15 \text{ mm}$  の基準粒子に対して、 $D = 9.88 \text{ mm}$ 、 $15.60 \text{ mm}$  の大粒子をそれぞれ 10% の割合で混合して、鉛直方向に様な粒度分布を有する移動床を準備し、分

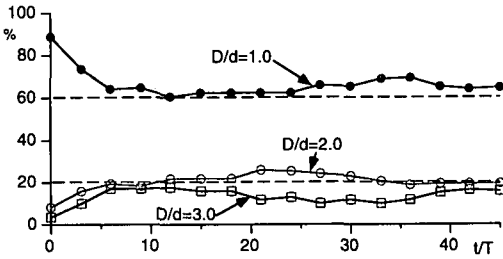


図-7 表層粒度構成の時間変化

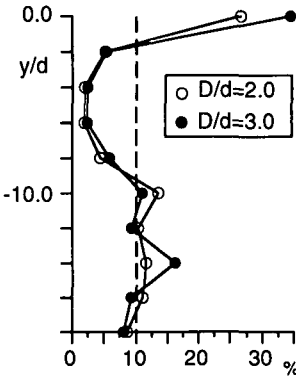


図-8 鉛直粒度構成

級の進行過程をモニターした。図-7は、移動床の上部から撮影した表層の状態を画像解析して得られた粒度構成の時間変化を示している。表層の分級は急速に進行し、10周期以内にはほぼ最終状態に近い粒度構成に移行していることが分かる。その後、最大粒径の粒子  $D/d=3.0$  の比率がいったん減少し、これに呼応するように粒子  $D/d=2.0$  の比率が増加して、再び40周期付近で両者とも元の状態に復帰するが、この原因は現時点では不明である。計測領域の大きさの影響（主流方向への場の不均質性）も危惧されるので、今後継続検討したい。

次に、45周期経過後に装置を停止して排水し、移動床上方のハッチを開き表層から順に粒子をサンプリングして粒度構成比率の変化を調べプロットしたのが、図-8である。粒子  $D/d=3.0$ 、 $D/d=2.0$  の何れに関しても、 $y/d=-2.0 \sim -8.0$  付近の層で粒度構成比率が減少し、その分が表層に浮上して、表層に大粒子が集積し、いわゆるアーミングが発生していることが理解できる。一方、 $y/d < -10.0$  の領域には初期の粒度構成に大きな変化はなく、本実験での交換層の厚さはほぼ基準粒子粒径の10倍程度と判断できる。この層厚は、均一粒径での粒子移動速度を計測した図-2で有意な移動速度が得られた領域よりやや大きくなっており、大粒子の影響で、基準粒子の流動層厚が増加する効果がある可能性を示唆している。これに関しても、今後、混合状態での大小両粒

子の速度分布に関して再度計測を実施して、真偽を確認したい。

## 5. 結 語

本研究では、4.4 mの移動床部を有する振動流装置を作成し、移動床端部に生じる砂面低下（洗掘）の影響を最小限に留めつつ、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た。

初めに、場の基本特性を明らかにするため、均一粒径の実験を行い、砂粒子の移動速度分布、濃度分布に関してデータを収集した。さらに、大粒径粒子の移動過程に関して、画像解析によって移動軌跡を追跡し、上昇と停滞を間欠的に繰り返す大粒子の運動特性を確認した。更には、表層粒度構成の経時変化と分級の収束状態での鉛直方向の粒度構成を調べて、交換層の厚さはほぼ基準粒子粒径の10倍程度と判断できることが分かった。

今後は、混合状態での大小両粒子の移動速度分布、数密度分布の計測や、分級の進行過程における粒度構成の鉛直分布の変化、さらには、分級の収束後に振動流1周期内で繰り返される大粒子と小粒子の干渉機構など、シートフロー混合漂砂の流動機構を理解するために必要なデータのさらなる収集に努力したい。

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、当時京都大学工学部学生・濱野哲夫君の熱心な協力を得た。以上、記して謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 乾 武史・Mohammad Dibajinia・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・豊田泰晴・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.
- 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.
- 田中 仁・吉竹豊尚・首藤伸夫 (1989): 波・流れ共存場における底質分級の数値計算, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 264-268.
- 田中 仁・Aung Thu (1993): 全ての flow regime に適用可能な波・流れ共存場抵抗則, 土木学会論文集, No. 467/II-23, pp. 93-102.
- Mohammad Dibajinia・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 Miller, M. C. (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.