

振動流下のシートフロー漂砂の流動特性

Sediment Transport in Sheetflow Regime under Oscillatory Flow

後藤仁志*・酒井哲郎**・酒井敦史***

By Hitoshi GOTOH, Tetsuo SAKAI and Atsushi SAKAI

Sediment transport in sheetflow regime under the oscillatory flow is investigated by both experimental and numerical approaches. Firstly, motion of sediment particle is traced by video film analysis, and the change of the velocity profile and concentration profile of sediment particles during half period of oscillation are displayed. Sediment concentration is estimated on the basis of the correlation between brightness of the image and the concentration. Secondary, the detail of sediment motion is investigated numerically by using distinct element method. The simulated velocity profile and the concentration profile of sediment particle shows the good agreement with experimental results. The simulated snapshots of sediment particles bring important information to understand the mechanism of sediment motion.

Key Words: *sheetflow, video-film analysis, distinct element method, velocity profile, concentration profile*

1. はじめに

シートフロー漂砂は、大量の土砂移動を伴う移動形態であり、その工学的重要性は広く認識されているが、高濃度の粒子流であることから計測が困難なこともあり、力学機構の解明は必ずしも充分とはいえない。このような状況を受けて、近年、シートフロー漂砂の内部機構を把握する上で鍵となる砂粒子濃度分布や移動速度分布などの特性の計測が行われるようになり、データの蓄積も徐々に進みつつある。この種の計測はビデオ画像解析に依存せざるを得ないのが現状であるが、ビデオ画像の詳細な解析には多大の労力を要し、効率的なデータの収集が難しい。本研究では、このような解析上の困難に対処するため、2つの面からのアプローチを試みる。第1には、ビデオ画像解析の効率化である。近年、ビデオインターフェイス内蔵のコンピュータの低価格化や特殊な画像解析機能を有するフリーウェアの出現などパーソナルコンピュータの画像処理環境は急速に整いつつある。例えば、砂粒子濃度分布の計測には静止画像に写った砂粒子を読みとる方法がよく用いられるが、これには多大の労力を要する。そこで、本研究ではビデオ画像の明暗を既製のソフトウェアで数量化し、明暗と濃度との相関関係を利用して濃度分布を求めることにより、砂粒子数を読みとる手間を軽減した。第2には、砂粒子の運動を詳細に追跡できる粒状体モデルによるシミュレーション

* 正会員 工博 京都大学講師 大学院工学研究科土木工学専攻
(〒606 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 工博 京都大学教授 大学院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

を活用して内部機構を推定しようとする『数値流砂力学』的なアプローチである。本研究では、個別要素法に基づく数値シミュレーションを実施して、ビデオ画像解析から得られた砂粒子濃度分布や移動速度分布と比較してシミュレーションの再現性を確かめるとともに、ビデオ画像処理では計測が困難な砂粒子の運動過程の詳細に関してシミュレーションデータに基づいて考察する。

2. シートフローの流動過程に関する実験

実験は、アクリル製U字管式振動流装置（図-1 参照）を用いて行った。通常のU字管式振動流装置ではU字管鉛直部の片側を大気に解放し、逆の側にピストン型の強制振動装置が取り付けられる場合が多いが、この場合には加圧時と減圧時の効率の違いにより正弦波形状からのずれが生じ易くなる。この装置では、加圧時と減圧時の効率の差を無くするため、U字管鉛直部の両側に強制振動装置を連結している。U字管鉛直部は電磁弁を介して圧縮空気が充満した空気室と接続され、電磁弁の開閉のタイミングをパーソナルコンピュータで制御して安定した正弦波型の振動流を維持できる。装置の水平部には長さ1000mmの計測区間があり、移動床設置用に計測区間以外の水平部よりも40mmだけ高さが大きく採られている。計測区間の流水断面は、64mm×54mmである。底質粒子には、粒径 $d=5.15\text{mm}$ 、比重 $\sigma/\rho=1.32$ の球状粒子（人工真珠の核）を用いた。流れの条件は、周期 $T=4.5\text{s}$ 、主流流速 $U=106.6\text{cm/s}$ の振動流で、田中・Thu¹⁾の方法で摩擦損失係数を算定して求めたShields数は、 $\Psi=0.619$ である。

粒子群の挙動の撮影には、計測部の側方に設置された8mmCCDビデオカメラ（撮像速度 30コマ/秒）が用いられ、粒子群の瞬間像はビデオインターフェイスを通じてパーソナルコンピュータ PowerMacintosh 7100/80AV に転送されて解析された。

ここで主として用いる画像解析ソフトウェアは、米国、National Institutes of Health のDr. Wayne Rasbandにより開発されたフリーウェア NIH-Image である。NIH-Image は医学・生物学領域の画像解析を目的に開発されたもので、細胞数のカウントや細胞の面積の自動計算など粒子群の静止画像の解析に利用可能なコマンドを有している。前処理として、ビデオから取り込まれたフルカラーの画像を NIH-Image で処理できるようにグレースケールに変換する。次に、NIH-Image を起動させて変換された画像を二値化（画面上では粒子を黒色、流体を白色に）する。二値化処理では粒子の縁（粒子と流体の境界）を決定する必要があるが、個々の粒子周辺の輝度分布により粒子の縁の位置は輝度の域値の設定に依存する。そこで、以下の方法でキャリブレーションを実施した。まず、撮影された画像の内の1枚をグラフィックソフトウェアに読み込み、個々の粒子位置を判読して実サイズの粒子（黒色）を張り付けて真の粒子占有面積が黒色で表示された画像データを作成する。作成された画像データを NIH-Image で解析して粒子占有面積を計算し、これと撮影された画像の解析結果を比較して検定値を求める。なお、粒子周辺の輝度分布の特性は照明条件にも依存し画像全体で一様ではないため、解析対象領域を鉛直方向に層状分割し、各層に対して検定値を求めた。

粒子移動速度に関しては、連続する瞬間像を並列表示してフレーム間の粒子の移動軌跡を視覚的に判断し、移動距離を測定する方法で求めた。なお、個々の粒子の判読の容易さ

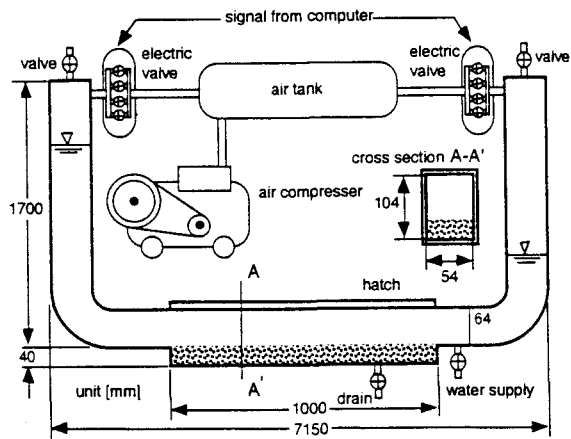


図-1 U字管式振動流装置

に配慮して、種々に着色された粒子が混合された底質を用いて撮影された画像を解析対象とした。

3. シミュレーションモデルの概要

3.1 シミュレーションの背景

シートフロー漂砂は沿岸域における集合流動の代表的な移動形態である。すなわち、シートフロー漂砂では砂粒子間の干渉が支配的で、ミクロな視点からの移動機構の解明には砂粒子間の干渉の理解が不可欠である。後藤・酒井ら^{2, 3)}は、このようなシートフロー漂砂の粒状体の特性に着目し、砂層表層に一定のせん断力が作用する場合（定常状態）を対象にCundall and Strack⁴⁾の個別要素法に基づくシミュレーションを実施した。その後、後藤・酒井ら⁵⁾は、砂層表層のせん断力が急増・急減する場合（階段関数的変化）の砂粒子群の応答特性に関して同様のシミュレーションを実施して砂粒子群の運動の緩和過程を検討した。非定常性には、(i) 水流が砂粒子を直接加速する効果（砂粒子運動の促進効果）と、(ii) 水流の流速変化に対する砂粒子群の応答遅れの効果（緩和過程としての砂粒子運動の抑制効果）の2つの面がある。後藤・酒井ら⁵⁾の研究は後者のみを扱ったものであったが、本研究では、非定常運動を直接計算することで2つの効果を含む状態のシミュレーションを実施する。砂粒子運動の非定常過程の直接計算は、小田・重松ら⁶⁾によって波動場を対象として行われているが、波動場では主流方向に1波長分の計算領域を確保する必要があり、粒子数が膨大となる。本研究では振動流場を対象に計算領域の側方境界には周期境界を導入して計算を効率化した。

3.2 個別要素法の概要

個別要素法は、砂粒子間の相互作用を弾性スプリングと粘性ダッシュボットで表現し、各砂粒子の運動方程式を陽解法で解いて砂粒子運動を追跡する方法である。ここでは、砂粒径の幅を隔てて鉛直に立てられた2枚の平板間に拘束された均一径 d の剛体球群を解析対象とする。

砂粒子 i の並進および回転の運動方程式は、

$$\rho \left(\frac{\sigma}{\rho} + C_M \right) A_3 d^3 \frac{du_{pi}}{dt} = \sum_j \left\{ -f_n \cos \alpha_{ij} + f_s \sin \alpha_{ij} \right\}_j + \frac{1}{2} \rho C_D \sqrt{(U - u_{pi})^2 + v_{pi}^2} (U - u_{pi}) A_2 d^2 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\sigma}{\rho} + C_M \right) A_3 d^3 \frac{dv_{pi}}{dt} = \sum_j \left\{ -f_n \sin \alpha_{ij} + f_s \cos \alpha_{ij} \right\}_j - \frac{1}{2} \rho C_D \sqrt{(U - u_{pi})^2 + v_{pi}^2} v_{pi} A_2 d^2 - \rho \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) A_3 d^3 g \quad (2)$$

$$\frac{\pi d^5}{32} \frac{d\omega_{pi}}{dt} = \frac{d}{2} \cdot \sum_j \{ f_s \}_j \quad (3)$$

で与えられる。ここに、 x, y ：斜面方向の座標軸とそれに直交する座標軸、 ρ ：水の密度、 σ ：砂粒子の密度、 C_M ：付加質量係数（ $C_M=0.5$ ）、 A_2, A_3 ：砂粒子の2次元・3次元形状係数（球を想定し、 $A_2=\pi/4, A_3=\pi/6$ ）、 d ：砂粒径、 u_{pi}, v_{pi} ：砂粒子 i の x, y 方向の移動速度、 f_n, f_s ：砂粒子 i, j 間の法線(n)および接線(s)方向の作用力、 α_{ij} ：砂粒子 i, j の接触角、 C_D ：抗力係数（ $C_D=0.4$ ）、 U ：主流方向（ x 方向）の流速、 g ：重力加速度、 ω_{pi} ：砂粒子 i の角速度である。これらの運動方程式が逐次数値積分され、砂粒子群の運動が追跡される。

砂粒子の接触状況は逐次検査され、接触状態にある砂粒子間には接触面の法線方向および接線方向に弾性スプリング（ばね定数 k_n, k_s ）および粘性ダッシュボット（減衰定数 η_n, η_s ）を導入して砂粒子間相互作用力を考慮する。ここでは非粘着性の粒子を解析対象としているので、法線方向には引っ張りに抵抗しないジョイントを、接線方向には一定の限界を越える力が作用すると滑動するジョイントをそれぞれ

れスプリング・ダッシュポットと直列に配置した。

本研究で扱う振動流場では主流方向の場の一様性が保障されているので、計算の効率化を図るために側方は周期境界とした。また、底面境界については計算対象粒子と同一の粒子から成る粗面固定床とした。計算に用いた砂粒子は、実験と同様のもの、1段の配列要素数5個で15段にわたって積み上げた後、最下層の粒子5個を固定し、表層粒子の離脱の容易さに配慮して表層の5個の粒子の内1個を取り除いて、合計74個の粒子の運動を解析した。

予備計算（パッキング）を粒子群がほぼ静止状態となるまで行い、パッキングの完了後に、流れを作用させて砂粒子群の運動を追跡した。振動流場の流速分布については簡単のため、主流速が全位相を通じて対数流速分布に従うものとしたが、砂粒子と流体との相互作用が活発な底面近傍に限れば1次近似的には妥当な仮定であると考えられる。また、本研究では、シートフロー漂砂の流動機構に最も支配的な粒子間干渉に焦点を当てて、流れ場を既知として砂粒子運動を追跡するいわゆる one-way の解析を行った。なお、モデル定数については既往の研究を参考に、 $k_n=9.45 \times 10^6 \text{ N/m}$, $k_s=2.36 \times 10^6 \text{ N/m}$, $\eta_n=0.4 \text{ Ns/m}$, $\eta_s=0.2 \text{ Ns/m}$, $\mu=0.5$, $e_{n\max}=7.5 \times 10^2 \text{ N}$, $e_{s\max}=3.5 \text{ N}$, $\Delta t=2.0 \times 10^{-5} \text{ s}$ と与えることとした。

4. シートフロー漂砂の非定常流動過程

砂粒子移動速度分布の位相別の変化に関して、実験結果と計算結果を併示したのが、図-2である。位相の表示は、正弦波型で変動する底面近傍流速を対象にしているので、位相 $\pi/12$, $(3/12)\pi$, $(5/12)\pi$ が加速期, $(7/12)\pi$, $(9/12)\pi$, $(11/12)\pi$ が減速期, 流速ゼロを経た（転流した）直後が位相 $(13/12)\pi$ となる。なお、移動速度の表示は最大速度で規格化している。

計算結果は全ての位相を通じて実験結果と概ね良好な一致を示しているが、詳細に見ると、計算では加速期の終わり近く位相 $(5/12)\pi$ で最大移動速度が得られるのに対して、実験では位相 $(7/12)\pi$ で最大移動速度が記録されている。更に、計算では砂粒子群が加速を受ける位相では顕著に上方に分散し、減速に転じて落下するという移動層厚の変動が明瞭に見られるが、実験では、計算と同様の移動層厚の増減傾向は定性的には認められるものの、計算と比べてさほど顕著ではない。実験ではデータ処理に要する労力の制約からサンプリング数に限度があり、希に上方に大きく跳躍するような砂粒子を捕捉できなかった可能性もあるので、

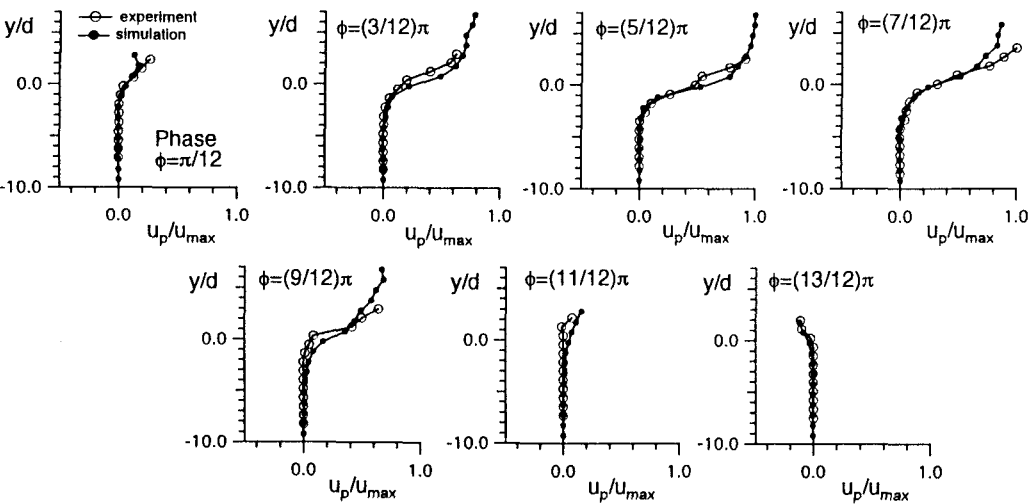


図-2 砂粒子移動速度の位相別変化

更なるデータの蓄積が課題である。また、計算結果について、同じ大きさの底面近傍流速が作用する加速・減速位相間（例えば、 $(3/12)\pi$ と $(9/12)\pi$ で）と比較すると、加速期の方が移動速度が大きくなっており、移動速度分布に非対称性が見られる。このような非対称性は、流体が砂粒子を直接加速する効果によるものと考えられるが、この点に関しては数密度分布の特性をも加味して後述する。

次に、砂粒子数密度の鉛直分布の位相別の変化に関して、実験結果と計算結果を併示したのが、図-3である。位相の表示は、図-2と同様である。加速位相で数密度分布が上方に発達し、減速に転じて砂粒子が落下し数密度分布が減衰するという基本的な特性は、実験結果と計算結果でともに一致している。計算結果を見ると、加速期には $y/d=3.0\sim4.0$ 付近に分布のピーク（角状の突起；図中に太線矢印で表示）が発達し、これが減速初期まで維持されている。同様のピークは実験にも見られる（図中に細線矢印で表示）が、計算結果ほど顕著ではない。また、計算結果では特に加速期、減速期で分布の推移に顕著な差が見られる。すなわち、加速期の位相 $(3/12)\pi$ では明瞭なピークを伴う分布となっているのに対して、減速期の分布の減衰は速やかで位相 $(9/12)\pi$ （底面近傍流速は $(3/12)\pi$ と等大）のピークはさほど明瞭ではない。また、数密度分布にも速度分布と同様の加速、減速位相についての非対称性が認められる。

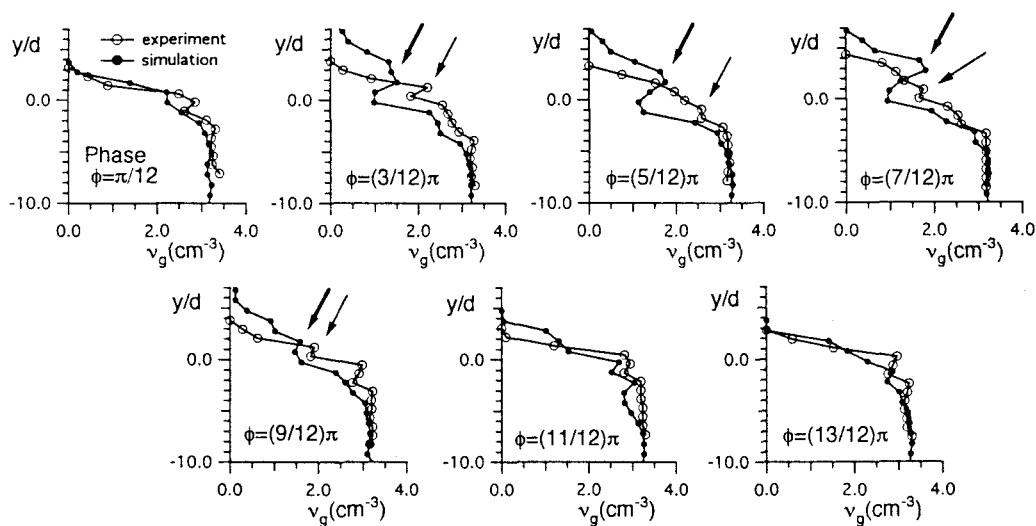


図-3 砂粒子数密度の位相別変化

以上のことから、次のような加速、減速の特性が考えられる。まず、砂粒子は加速初期に加速度の直接的な作用で上方に分散して砂粒子間距離を増加させ（粒子間衝突頻度が減少することによりエネルギー損失を減らして）、水流による加速を効率的に受けて速度を増加させる。これに対して、減速期には分散状態にあった砂粒子が落下して粒子間距離が急減することにより砂粒子の運動エネルギーが粒子間衝突により失われて速やかな砂粒子速度の減衰が生じる。速度分布に見られる加減速時の非対称性は、このような理由から生じるものと考えられる。図-4は、計算から求められた各位相における砂粒子の分散状態を示したものであるが、加速初期（位相 $(3/12)\pi$ から $(5/12)\pi$ ）の速やかな分散状態への遷移と減速初期（位相 $(7/12)\pi$ から $(9/12)\pi$ ）の速やかな落下による分散領域の縮小とが明瞭に示されており、砂粒子移動速度分布や数密度分布に見られた非対称性のメカニズムが、砂粒子の分散状態と関連していることを裏付ける結果となっている。

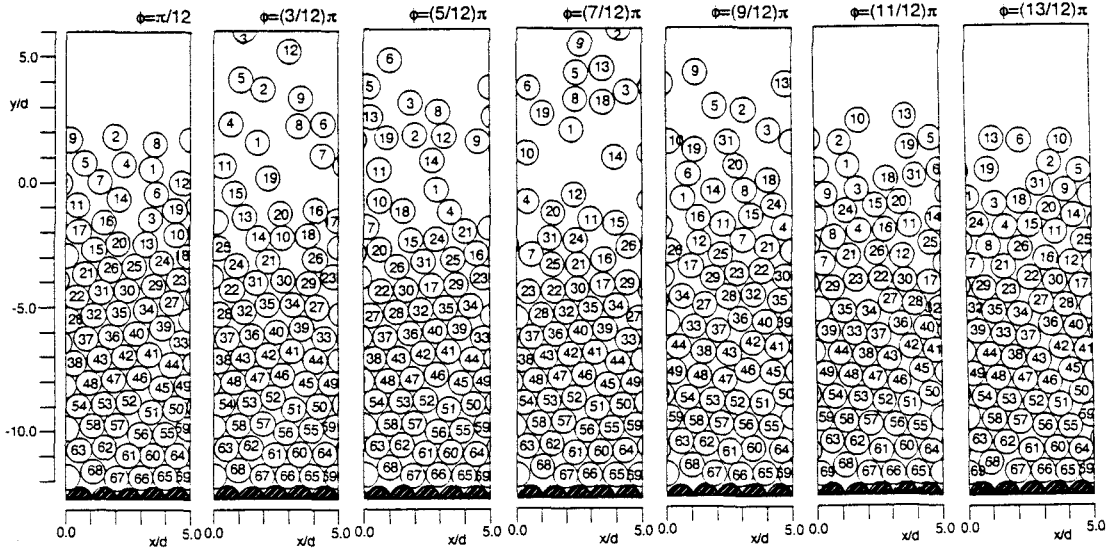


図-4 砂粒子運動のsnapshots

5. おわりに

本研究では、振動流下のシートフロー漂砂の力学機構の理解を目的として、ビデオ画像解析による砂粒子の速度分布および数密度分布の計測と個別要素法による砂粒子群の流動過程の数値シミュレーションを実施した。実験結果の基本的な特性はシミュレーションと良好に一致し、シミュレーション結果の妥当性が示された。砂粒子の運動過程を詳細に追跡できる個別要素法の特性を生かして、砂粒子速度分布や数密度分布に見られる加速期・減速期の特性の相違に関して考察し、加速期、減速期に見られる分布の非対称性が砂粒子の分散状態と関連していることを明らかにした。最後に、本研究の遂行にあたり、(財)河上記念財団からの研究助成を受けたことを付記して、謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 田中 仁・Aung Thu : 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, 1993.
- 2) 後藤仁志・酒井哲郎・富永圭司 : 粒状体モデルによるシートフローの流動過程の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.371-375, 1994.
- 3) 後藤仁志・酒井哲郎 : 表層せん断を受ける砂層の動的挙動の数値解析, 土木学会論文集, No. 521/II-32, pp. 101-112, 1995.
- 4) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L.: A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique 29, No. 1, pp.47-65, 1979.
- 5) 後藤仁志・酒井哲郎・豊田泰晴 : 表層せん断力の急増減に対するシートフローの動的応答, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.471-475, 1996.
- 6) 小田一紀・重松孝昌・和田一斗 : 波による底質粒子の移動過程に関する数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 536-540, 1995.