

第II部門

振動水槽を用いたリップル形成過程の数値シミュレーション

京都大学工学部	学生員	○田崎 拓海
京都大学工学研究科	正会員	原田 英治
京都大学工学研究科	正会員	五十里 洋行
京都大学工学研究科	正会員	後藤 仁志

1. はじめに

砕波による底質輸送は大きな自由表面を伴った複雑な固液混相現象であり、砕波帯以浅での底質輸送機構の理解はいまだ十分とはいえない。そこで本研究では、振動流下における ripple の形成過程を対象に、DEM-MPS 法による数値シミュレーションを行う。別途実施した実験結果と比較することで数値シミュレーションの妥当性を検討した上で、ripple の形成過程を計算力学的観点から検討する。

2. 実験概要

図-1 の左に実験の模式図を示す。堆積層は比重 2.65、粒径 1mm のアルミナ球で形成し、水深は堆積層表面から 0.01m とした。振動台を通じ、水槽に

$$x = -A \sin(2\pi f)$$

で表される正弦波を与えた。($A = 0.01\text{m}$, $f = 2.0\text{Hz}$)

3. 計算手法

本研究では固相と液相を異なる離散空間で解く、オーバーラップ型の DEM-MPS 法¹⁾を用いた。数値シミュレーションの計算領域を図-1 の右に示す。

(1) 液相計算手法

流体計算には MPS-HS-HL-ECS-GC-DS 法²⁾を用いた。また、重み関数には Wendland 関数を採用した。液相の運動量保存則は下記の通りである。

$$\rho \frac{D\mathbf{u}_l}{Dt} = -\nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u}_l - \frac{\mathbf{F}_{drag}}{\varepsilon}$$

ここに、 $\mathbf{F}_{drag}$: 流体抗力である。下付き添え字 l , s は固相の物理量を表す。

(2) 固相計算手法

固体粒子には以下の運動方程式を用いた。固体粒子は周囲流体から相互作用力として流体抗力を受ける。また浮力に相当する圧力勾配力を考慮した。

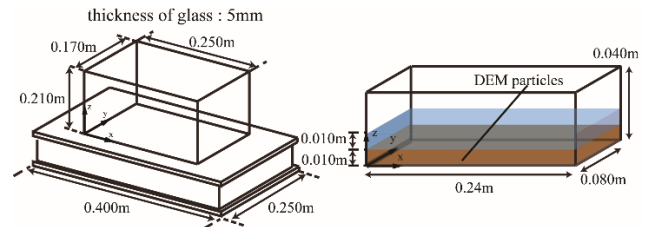


図-1 実験模式図(左)と計算領域(右)

$$\sigma V_s \frac{d\mathbf{u}_s}{dt} = \mathbf{F}_{drag} \frac{V_s}{1-\varepsilon} - \nabla p V_s + \sigma V_s \mathbf{g} + \mathbf{F}_{colp}$$

ここに、 σ : 固体粒子密度, V_s : 固体粒子体積, $\mathbf{F}_{colp}$: 固体粒子間作用力である。

(3) 固液相互作用力

固液相互作用力は固体の体積率によって2つの式を使い分ける。

$$\mathbf{F}_{drag} = \beta(\mathbf{u}_l - \mathbf{u}_s)$$

$$\beta = \begin{cases} \frac{\varepsilon^2 \mu_l}{K} + F_{ch} \frac{\varepsilon^3 \rho}{\sqrt{K}} |\mathbf{u}_l - \mathbf{u}_s| & (\varphi \geq 0.4) \\ \frac{3}{4} C_D (1-\varepsilon) \varepsilon^{-1.65} \frac{\rho}{d_s} |\mathbf{u}_l - \mathbf{u}_s| & (\varphi < 0.4) \end{cases}$$

ここに、 ε : 間隙率, K : 浸透率, C_D : 抗力係数, φ : 固体粒子の粒子数密度比である。 F_{ch} は実験的に求められる値であり、本研究では Pahar and Dhar³⁾の提案する値を参考にした。

4. 実験結果と数値シミュレーションの比較

図-2 に実験と数値シミュレーションの堆積層表面形状と水面形状の比較を示す。実験値は撮影した瞬間画像から堆積層表面形状、水面形状を読み取った。振動開始から時刻 $t = 3.0\text{s}$ では実験と数値シミュレーションで同様の堆積層表面形状がみられるが、時刻 $t = 7.0\text{s}$ では数値シミュレーションにおいて実験と比較して緩やかな凹凸が形成されている。水面形は概ね同様の形状が確認できるが、数値シミュレーションでは波高が僅かに低い傾向にある。

Takumi TAZAKI, Eiji HARADA, Hiroyuki IKARI, and Hitoshi GOTOH

tazaki.takumi.38n@st.kyoto-u.ac.jp

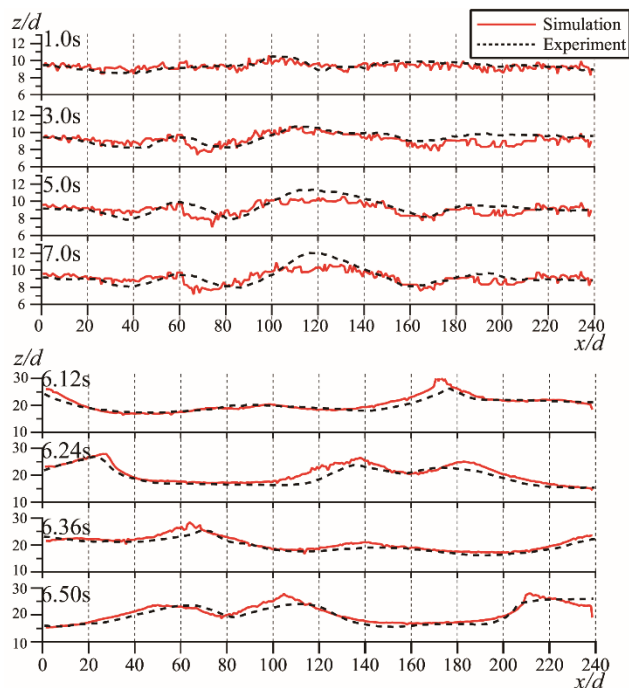


図-2 堆積層表面形状(上)と水面形(下)の時間推移

5. ripple 形成過程の検討

図-3にDEM粒子の振動に対する相対速度の絶対値、作用流体抗力と圧力勾配力の振動(x 軸)方向成分を示す。DEM粒子は周囲流体の流れ場から受ける流体抗力と水面勾配に起因する圧力勾配力を受け、大きな移動速度を有していることが分かる。また、堆積層内部では流速が痩せていることが確認できる。

図-4 に堆積層を $z/d = 5.0$ 毎に二分し、上部と下部の流速、DEM 粒子移動速度、作用流体抗力、圧力勾配力の振動(x 軸)方向成分の平均値を示す。堆積層上部の間隙流は大きな速度を持ち、堆積層上部に大きな流体抗力が作用することが分かる。その結果、堆積層上部が大きな移動速度を持つ。堆積層表面の ripple 形成は主として表面付近の粒子の移動によるもので、流体抗力が大きく貢献していることが分かる。

6. おわりに

本研究では、一定周期で振動する水槽内で観測される ripple の形成過程を検討するため、高精度 3D-DEM-MPS による数値シミュレーションを実施した。また、別途実施した実験結果と比較することによりモデルの妥当性を示した。堆積層表面における凹凸の形成を作用する流体抗力、圧力勾配力の観点から考察し、これらの ripple 形成への貢献の重要性が明らかとなった。

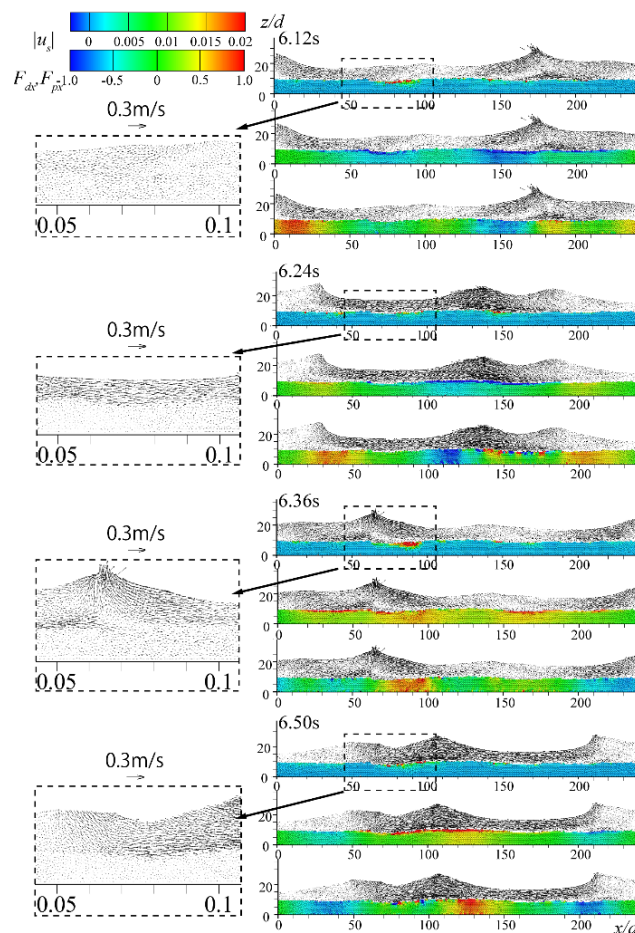


図-3 瞬間画像(各時刻上から、移動速度、流体抗力、圧力勾配力。また、左破線枠内は流速ベクトルを示す)

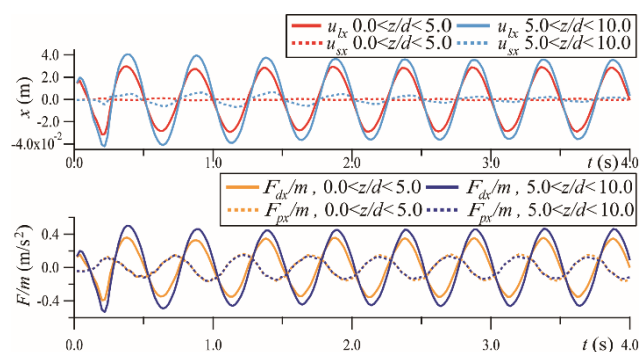


図-4 各層の流速、移動速度、作用力の時間推移

参考文献

- 1) 後藤仁志, 林稔, 安藤怜, 鷺見崇, 酒井哲郎: 砂礫混合層を伴う混相流解析のための DEM-MPS 法マルチスケールリンクの開発, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.26-30, 2003.
- 2) 後藤仁志: 粒子法 連続体・混相流・粒状体のための計算科学, 森北出版, 2018.
- 3) G. Pahar, A. Dhar : Modeling free surface flow in porous media with modified incompressible SPH, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol.68, pp.75-85, 2016.