

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560612

研究課題名(和文) 掃流砂に関する準直接数値解析法の拡張と応用

研究課題名(英文) Extension and application of quasi-Direct Numerical Simulation to Bedload Sediment Transport

研究代表者

WELLS John C. (Wells, John C.)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：60301644

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：(1) リップルを扱う数値シミュレーションの検証のための小規模回転ドラム実験を執行し、その動画を解析した。得られたデータは粒子レイノルズ数の低い領域($Rep < 2.5$)にも貢献した。また、水槽の半径は既存研究と比べて4倍以上小さいため、細かな数値解析の条件には合わせやすく、検証データを得るためにより妥当である。

(2) 研究期間中に提案された、接近・接続する粒子同士の間には発生する潤滑力の簡単な「サブグリッドモデル」に対して、無視されていた慣性力の影響を定量的に見積もった。

(3) 自由水面を含む掃流砂現象に適用可能な粒子に働く力の理論式を初めて導いた。

研究成果の概要(英文)：(1) To provide benchmark data for numerical simulations of sediment ripple formation, we executed a small-scale rotating drum experiment and analyzed video recordings. The resulting data provided previously unavailable data for particle Reynolds number less than 2.5, i.e. in the "hydraulically smooth" regime. Also, the drum was more than 4 times smaller than in previous research, which will allow easier comparison with highly-resolved numerical simulations

(2) We provided a theoretical estimate of the importance of fluid inertia in the gap between colliding particles, which has been neglected in earlier modelling and analysis of immersed particle rebound.

(3) We developed integral relations that will be applicable to precisely compute the force on a solid particle near a free surface and other fixed or moving solid bodies.

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：砂リップル 数値シミュレーションの検証 潤滑論 粒子同士衝突 流体力 固体液体相対作用

1. 研究開始当初の背景

2010年まで、掃流砂のオイラーラグランジュ法の数値計算はだんだんと発展してきた (e.g. Schmeckle, 1998; Gotoh, 2000; Drake & Calantoni, 2001). せん断応力を支配する粒径スケールの乱流渦を初めて再現できたのは Truong, Wells, & Nguyen (2007, *Proc. Intn'l Conf. River, Coastal, and Estuarine Morphodynamics*) の 1500 個の球 (粒子レイノルズ数 $Re_p=18$) を周期領域内で追跡するシミュレーションであった。掃流砂量が 300 倍ほど増加する応力の範囲でも Meyer-Peter Mueller の公式とよく合った。我々はこのように粒径スケールの乱流渦をとらえる掃流砂の乱流シミュレーションを「準直接数値解析」と呼ぶことにしている。しかしいくら計算メッシュを細かく分解しても接近・接続する粒子同士の間には発生する「潤滑力」はとらえられない事実に対して必要な「サブグリッド」モデルを導入する準直接数値解析の例は発表されていなかった。上記の粒子レイノルズ数 $Re_p=18$ は粗度の「遷移領域」となり、リップルが観察されない条件となる。上記のように粒子を一個一個追跡することが困難なため、Nguyen & Wells (2009, *Ann J. Hydr. Eng JSCE*, 53) は河床材料を連続体として扱う Large Eddy Simulation を適用し、リップルの形成・発展の再現に成功した。しかし既存の研究にはこのような細かな移動床シミュレーションの検証に妥当な、つまり十分に細かな、実験データは不足していた。

2. 研究の目的

上記当初の問題点に対して、本研究は準直接数値解析 (以下「qDNS」) など掃流砂の細かな乱流シミュレーションの発展に貢献することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究は下記の方法を採用した。
 (1) リップルを扱う数値シミュレーションの検証のための小規模回転ドラム実験を執行し、その動画を解析した。
 (2) 準直接数値シミュレーションに必要な接触力モデリングに関わる理論的な検討を行った。
 (3) 準直接数値シミュレーションの将来発展に必要な粒子と自由水面との相対作用に適用できる理論を立て、自由気液界面を追跡する数値シミュレーションを執行した。

上記 (1) の実験は、Fig.1 のような直径 19.0cm 円型水槽を採用し、低床に厚み 2 cm の砂 ($\phi 400 \mu\text{m}$) をおき、水深 15 cm まで

水を入れた。回転を開始しても砂が動かないように徐々に回転を速めて、水がタンク・砂と共に剛体運動をするまで一定の角速度 ω_0 で運転する。そして 2 秒の間、角速度を $\Delta\omega$ だけ大きくすることで角速度 ω_1 まで加速させる。水の回転はすぐ加速できないため、砂床では相対速度が生じる。 $\Delta\omega$ が十分大きければ砂粒が動き、リップルの形成が始まる。

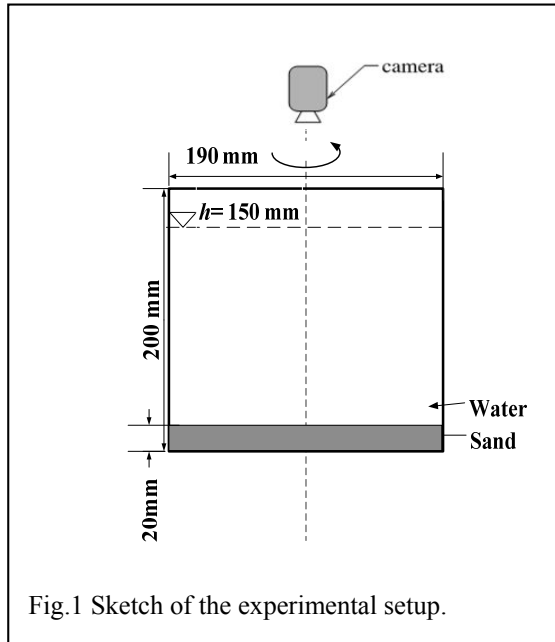


Fig.1 Sketch of the experimental setup.

上記 (2) (3) の細かな方法については、下記の実験結果に合わせて記述する。

4. 研究成果

(1) (学会発表)
 リップルの形成が確認された条件は Fig.2 で示している。

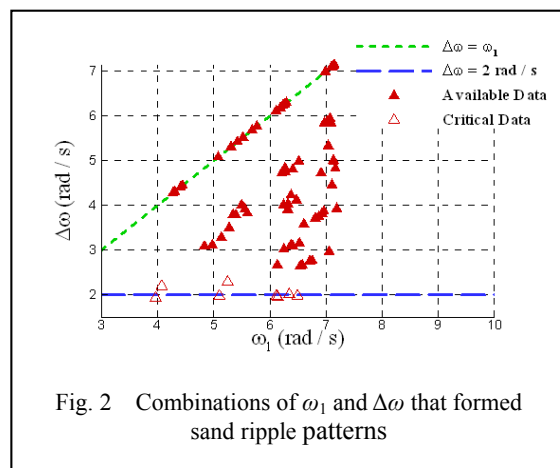


Fig. 2 Combinations of ω_1 and $\Delta\omega$ that formed sand ripple patterns

Fig.3 は回転を速めてから約 20 秒後の写真である。中心にリップルが形成しない領域があり、その半径を r_0 、その半径におけるリップルの波長を λ_0 とおく。観察の結果、リップル数 n は時間的に減ることがあったが、クレ

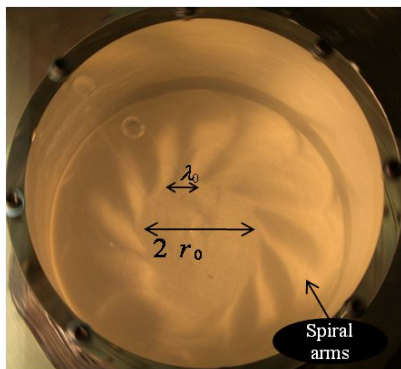
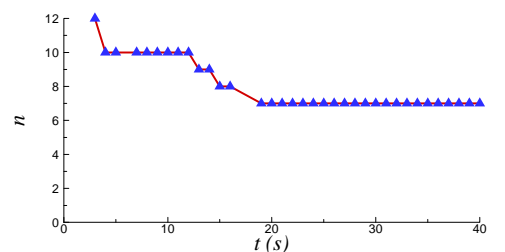
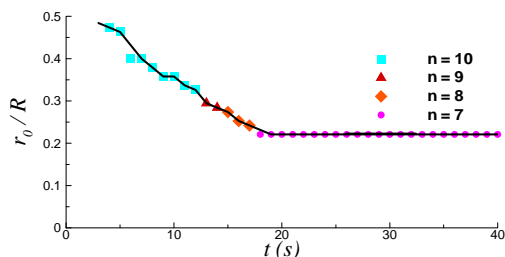


Fig. 3 An example of spiral-ripple pattern ($\Delta\omega = 4.26 \text{ rad s}^{-1}$, $\omega_1 = 4.26 \text{ rad s}^{-1}$)

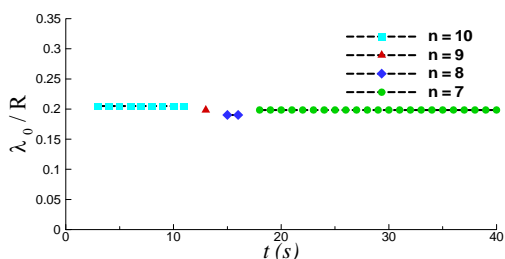
ストは途中で分岐したり合併したりしなかった。Fig.4 は実験中のリップル数などの時間的な変化の例である。 λ_0 は実験中ほぼ変化しないことがわかる。一方で n は r_0/R とともに増加し、Faller (1991)が提案したレイノルズ数との関係は Fig.5 にて示している。既存の研究に対して、今回得られたデータは粒子



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Development of ripple patterns with time. Development of a) the number of the spiral arms n ; b) non-dimensional circular patch radius r_0/R divided by different n ; and c) smallest wavelength λ_0 ($\omega_0 = 0$, $\Delta\omega/\omega_c = \omega_1/\omega_c = 2.84$).

レイノルズ数の低い領域 ($Re_p < 2.5$) にも貢献することがわかる。また、今回の水槽の半径は既存研究と比べて 4 倍以上小さいため、細かな数値解析の条件には合わせやすく、検証データを得るためにより妥当である。

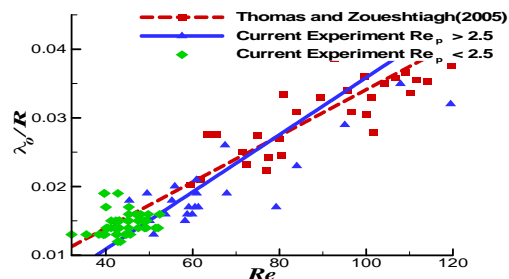


Fig. 5 The wavelength λ_0/R at the edge of the central granule patch as a function of the Reynolds number defined by Faller: $Re = \frac{n\Delta\omega l}{\nu}$, Compared with Thomas & Zoueshtiagh (2005)'s results.

(2)

研究期間中、接近・接続する粒子同士の間には発生する潤滑力の簡単な「サブグリッドモデル」は Kempe & Frohlich (2012 J. Fluid Mech v. 709) によって提案された。粒子同士の間がメッシュ刻みの 2 倍以下になると、単純に Taylor (1924)の理論結果を適用している。また突起接触部の弾性力による反発のモデルとして、Barnocky & Davis (1988)のように、液体のない衝突の場合の反発係数を採用している。モデルの検証として Gondret *et al.* (2002; Phys. Fluids 14(2)) が観察したガラス版から跳ねかえたボールベアリングの軌跡と比較した結果、計算結果は実測値と非常によく合っていた。

しかしそれだけ簡単なモデルをより複雑な条件に適用できるかどうかを判断するため、より詳細な検討が期待される。具体的に下記の課題が残されている。潤滑論を適用する際、粒子同士の隙間に基づくレイノルズ数 Re_g が 1 と比べて十分小さいと仮定されが、上記の検証計算の跳ねかえの最も弱いケースにおいても $Re_g=3.0$ の条件下でも潤滑論のモデルが適用された。もしその条件の拡張がを当化されたら喜ばしいが、その根拠・適応条件について解析をするべきだ。具体的に Re_g の増加に伴い慣性力の影響が増え、その影響を定量的に見積もる必要がある。その課題に対して、強い反発を仮定し、粒子が x から $x-dx$ まで接近する段階 (Fig.6 において A->A') と $x-dx$ から x まで離れる段階 (B->B') になす仕事の和を解析した。Navier-Stokes 式の加速度項の両方が相対速度の 2 乗に比例する結果になった。仮に、離れる軌跡上の速さが接近した軌跡上の同じ x の速さに等しいとすると慣性力による A->A' と B->B' の仕事の和が

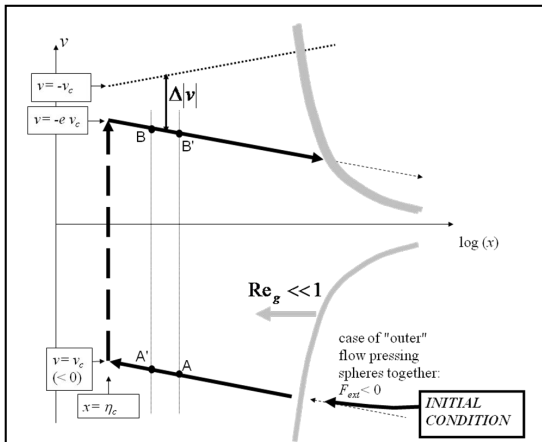


Fig. 6 Phase plot of the trajectory of a sphere starting from the initial condition at lower right and rebounding from a rough wall with asperity summits at a height η_c above the reference level.

ゼロとなり、運動エネルギーへの貢献がない。その結論、慣性力の仕事への影響は速さ損部 Δv に比例するという結果を得た。

(3)

今後の土砂水理・水工学に向けて、エネルギーの高いイベントにおける河岸浸食の解明および予測がまさに重要な課題となる。そういったアプリケーションに対して、本研究で着目した個体粒子の追跡に加えて、自由水面および地下水面の追跡が必要となり、雑誌論文（学会発表、）で発表した多相フロントトラッキング技術は有効となる。また自由水面を含む場合、個体粒子と水面との相対作用の解明が重要である。それに対して、学会発表、は適用可能な理論式を初めて導いた。

5. 主な発表論文等 (研究代表者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

T.V. Vu, G. Tryggvason, S. Homma, J.C. Wells, H. Takakura "A Front-Tracking Method for Three-Phase Computations of Solidification with Volume Change" *J. Chem Eng Japan* (2013) v.46 (no. 11), pp. 726-731 (DOI 10.1252/jcej.13we169) 査読有り

〔学会発表〕(計 7 件)

Truong V. Vu, G. Tryggvason, John C. Wells, H. Takakura, "Three-phase computations of solidification with volume change" ICMF 2013 (Jeju S. Korea, 2013/5/25)

John C. Wells "Kinematical and Dynamical Effects of Vorticity at a Free Surface" IUTAM Symposium on Vortex Dynamics, 九州大学医学部百年講堂 (福岡県) 2013/03/12

J.C.Wells, Estimating subsurface flow from data at a free liquid surface, The 62nd National Congress of Theoretical and Applied Mechanics NCTAM 東京工業大学 (東京都) 2013/3/8.

Truong V. Vu, G. Tryggvason, John C. Wells, H. Takakura, "Numerical simulations of solidification with volume change by a front-tracking method" Conference on Computational Physics ニチイ学館神戸ポートアイランドセンター (兵庫県) 2012/10/16)

John C. Wells "Integral Relations, Kinematic And Dynamic, between the Flow at a Liquid Surface and the Subsurface Flowfield." European Fluid Mechanics Conference (Rome, Italy 2012/9/11)

Yan Cui, J.C. Wells: Experimental Study of Ripple Formation, *Proc. River Flow 2012* (San Jose, Costa Rica 2012/9/7).

John C. Wells "Theoretical Relations Between Quantities at a Water Surface and the Instantaneous Subsurface Flowfield". International Congress of Theoretical and Applied Mechanics ICTAM (Beijing, China 2012/8/22)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

WELLS, John C.
立命館大学・理工学部・教授
研究者番号：603060301644