

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23760450

研究課題名(和文)沿岸域における波浪下の流動化砂質底面のダイナミクス

研究課題名(英文)Dynamics of the fluidized granular bed under nearshore ocean waves

## 研究代表者

猿渡 亜由未 (Saruwatari, Ayumi)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00563876

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は海底砂の浮遊、輸送量を支配し海底地形変化をもたらす原因となるにもかかわらずこれまで直接測定することのできなかつた波浪下の流動化底面内部における砂粒子の輸送現象の可視化計測法を新たに開発するものである。本計測法を用いた水理実験を通して、流動化底面の力学的性質と、流動化底面近傍における渦や乱れの発生、発達、輸送過程の特徴を明らかにすることを目的としている。

研究成果の概要(英文)：A new technique for visualizing a granular flow with high number concentration is developed in this study. Although suspension and transport of the bottom particles are one of the important features determining morphological conditions under the ocean waves, there is no sufficient model to predict sediment transport because of the difficulty of the direct measurement of the flow field around the granular bottom. This technique enable us to visualize the flow field inside of the fluidized granular bed. Dynamics of the sediment transport and generation of the vorticity and turbulence near the fluidized bed are investigated by the laboratory experiments using this technique.

研究分野：海岸工学

キーワード：屈折率整合 粒子底面 可視化計測 流動化 浮遊粒子

### 1. 研究開始当初の背景

海底の砂質底面は波浪と同じ周期で振動する振動性せん断流の作用を受け流動化し、高数密度の砂粒子と水の混相流体を形成する。海底面は流動化すると力学的な性質が変化し、流れに応答して容易に移動できるようになる。海底砂が移動すると海底地形が変化するが、海底地形は沿岸域における波浪下の流速場や生物の生息環境を決定する重要な要素の一つである事から海岸環境の保全と適切な海岸利用の為に海底地形変化を正確に予測する事が重要となる。現在、海底砂の輸送量は漂砂量式により予測されている。これは海底面における水平せん断力から定義されるシルズ数が限界シルズ数を越えた時に海底砂が浮遊し輸送されるという仮定に基づいたものであり、緩勾配方程式やブシネスク方程式等から求めた海底面の水平流速をインプットとして漂砂量が予測される。漂砂量の予測精度向上を目指し、せん断流強度から海底砂のピックアップレートをモデル化しようとする実験的、理論的研究が行われてきたにも関わらず、現在も漂砂量を十分な精度で予測できない事はよく知られている。この原因としてこれまで漂砂予測の際に次の二つの要因が考慮されてこなかった事が考えられる。

《1》流動化に伴い海底砂の数密度が変化した時の粒子底面のせん断流に対する局所力学応答の変化。

《2》海底砂の浮遊・輸送量と粒子底面内における局所的な乱れ強度との関連性。

これらが考慮されてこなかった理由は、これまで底面近傍の高数密度で砂粒子が存在するような混相乱流場を詳細に計測する方法が無く、超音波流速計や間隙水圧計、濁度計等により大まかな流れの特徴を知る事しかできなかった為である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、海底砂の浮遊・輸送量を支配し海底地形変化をもたらす原因となるにも関わらずこれまで直接測定する事のできなかった波浪下の流動化(=液状化)底面内部における砂粒子の輸送現象の3次元可視化画像計測法を開発すると共に、流動化底面の力学的性質を明らかにし、波浪条件をインプットとして流動化底面内で発生発達する乱れ強度と海底砂の輸送フラックスを評価・予測するモデルを構築する事である。本研究で提案する可視化計測法を用いて海底面下の地下の粒子の運動を計測する事により初めて粒子同士、粒子-流体間の相互作用を経由した海底面下での乱れの発達機構を解明し、定量化する事ができる。

### 3. 研究の方法

(1)高数密度の砂粒子と液相との混相流れの3次元可視化計測法を開発した。砂粒子の浮遊や底面の流動化を伴う流れ場の画像計測を行おうとする場合、実験水槽壁面以外の面に

おける高数密度の粒子群の挙動は通常見る事はできない。砂のモデルとして透明な粒子を用いたとしても粒子表面における光の屈折、乱反射により撮影画像から対象の粒子の位置を正しく特定することはできない(図-1, 経路1)。一方固液両相の屈折率が一致するときは光は粒子表面においても直進する為、任意の粒子の位置の特定が可能となる(図-1, 経路2)。本研究では砂と水の代わりに個体としては低屈折率材料であるシリカ又はシリカゲル(屈折率1.42程度)及び粒子と屈折率が等しくなるように濃度を調整したヨウ化ナトリウム水溶液(屈折率は濃度に依存して1.333-1.496の範囲で変化)を用いることにより底面の高数密度粒子群の可視化計測を可能とした。

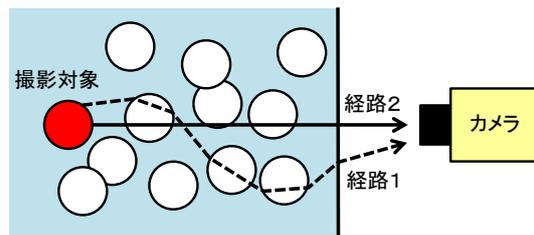


図-1: 高数密度粒子流れ可視化の概念図。液相と粒子の屈折率が異なる時(経路1)と等しい時(経路2)の光の経路。

(2) 屈折率を整合させた粒子と液相を用いて流れ場の下で流動化、浮遊した底面粒子群の粒子速度並びにその近傍の流体速度の可視化計測を行う。流れ場は二重円筒内に発生させた定常せん断流及びU字型振動流装置内に発生させた振動せん断流を与えた(図-2, 図-3)。流速場は液相に対する中立粒子を追跡することにより、また粒子速度は透明化した底面粒子群の一部に混入させた着色したシリカゲル粒子をトレーサーとして追跡することにより速度を計測した。それぞれの水槽前面に設置した高速カメラにより撮影された連続画像を基に、Particle Tracking Velocimetry (PTV)、Particle Image Velocimetry (PIV) もしくはPTVとPIVを組み合わせてより高精度に流速を測定することが可能なSuper-Resolution PIV (SR-PIV)を行う事により速度場の計測を行った。

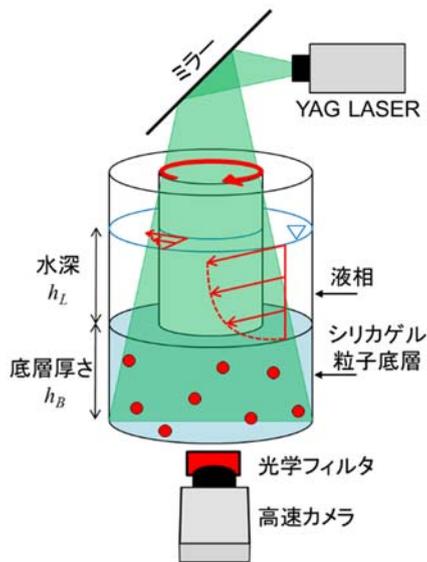


図-2：二重円筒型定常流発生装置

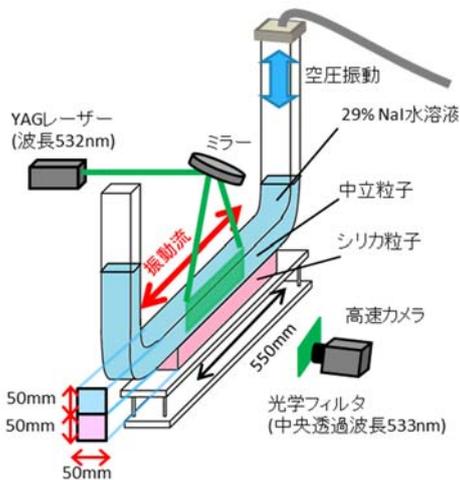


図-3：U字型振動流発生装置

#### 4. 研究成果

(1) 粒子の浮遊や粒子底面の流動化に伴い形成される高数密度粒子流れの可視化計測に成功した。壁面から離れた場所における底面内部の流速を画像計測により測定したのは世界的に見ても例がない。

(2) 本計測法を用いて定常せん断流中における底面粒子の運動を測定し、粒子底面最深部の静止している層から流動化層、粒子浮遊層に渡る粒子数密度、粒子速度、流速、乱れエネルギーの鉛直プロファイルを得る事ができた (図-4)。粒子底面は初期底面レベルである  $z=0$  の近傍で流動化し、粒子と流体の混相流が掃流状態で運動した。粒子速度と流体速度は底面近傍で滑らかに変化した。この流速の遷移領域を本研究では“mixing layer”と定義し、その厚さと流れの条件との関係を調査した (図-5)。円筒の回転速度が増加しても mixing layer 内のせん断応力は変化しないものの回転速度の増加に伴い mixing layer

厚さが増加した。また Mixing layer 厚さは底面がフラットな場合よりも粒子底面上の方が厚くなった。これは流動化底面の発生により底面における流速勾配が減少し、底面せん断応力の減少をもたらしていることを意味する。また、得られた流速から乱れエネルギーの鉛直プロファイルを求めたところ、粒子底面を有する流れ場においては流動化により生じた初期底面レベル以下の領域において乱れエネルギーのピークが表れた。即ちこの様な流れ場の場合底面以下からの粒子層内に大きな乱れのソースが存在し得る事が明らかとなった。

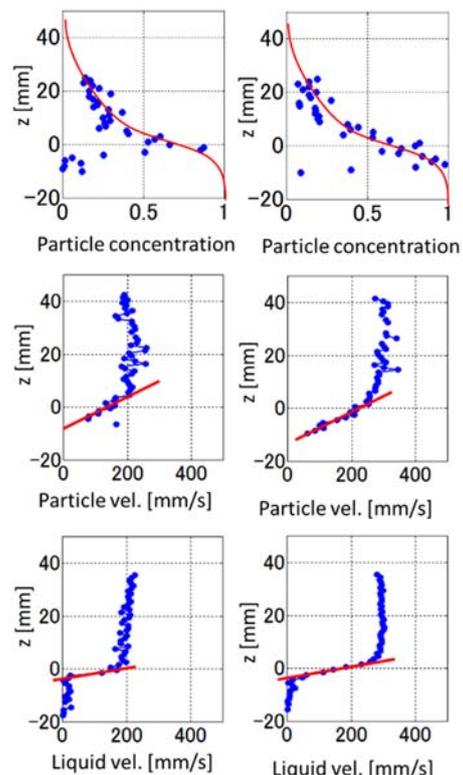


図-4：一方向定常流を与えた時の粒子濃度 (上)、粒子速度 (中)、流体速度 (下) の鉛直プロファイル。円筒回転速度 150rpm (左) と 200rpm (右) のケース。

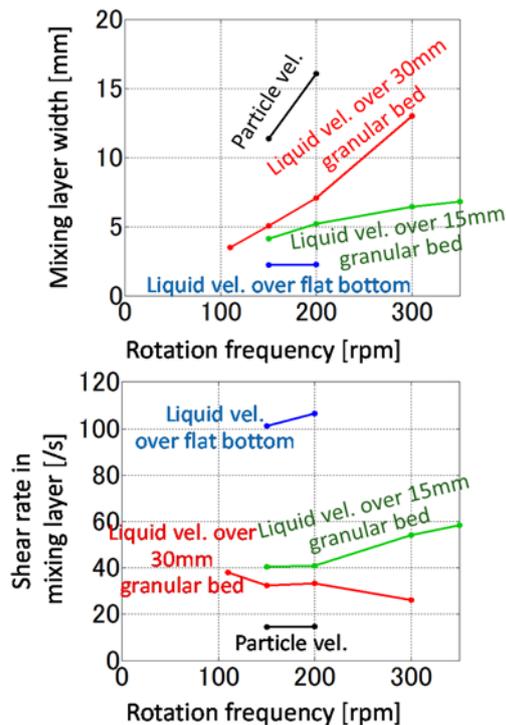


図-5: Mixing layer 厚さ(上)及びその中で生じるせん断速度(下)と円筒回転速度との関係。

(3) 振動せん断流中における乱れの生成量と輸送量は底面の流動化と粒子の浮遊、そして粒子底面が有する浸透性による効果が複雑に影響し合っ決定されるものである。本研究では底面の浸透性と粒子の浮遊の効果の切り分けを行う為に、振動流下の底面の条件を①フラットな平板、②粒子底面、③粒子同士を接着して動かなくした浸透性を有する固定粒子底面の三種類に変化させて実験を行った。底面上の水平流速プロファイルと比較してみると、底面直上の流速勾配、即ち底面に働くせん断応力は①>③>②の順に小さくなっていった。また波浪境界層厚も底面の条件に依存して変化し③の厚さは①よりも常に薄くなる事が確認された。これは底面の浸透性により流速の遷移層が下方へと押し下げられたことに起因するものと考えられる。また、平均流速勾配の減少は底面で発生する渦度の減少をもたらした。底面近傍の高渦度の領域は境界層厚に依存し、これもまた①に比べ③では薄化した。底面近傍で発生した乱れの上方向への輸送には浮遊粒子の存在が大きく寄与していることを確認した。浸透性を有する底面③上では大きな乱れが発生するものの、境界層外への乱れの輸送は顕著ではない。一方②の底面近傍では底面下の流動化層全体で乱れが発生し、浮遊粒子の影響によりそれが即座に上方の流れ場へと供給された。

(4) 砂の輸送をもたらす波浪の条件を決定する為に日本沿岸域における典型的な波浪条件を調べた。これは波浪推算モデル Simulating Waves Nearshore (SWAN) を用いて日本沿岸

に來襲する波浪を過去 10 年間に渡り再現することにより行った。本計算により得られた波浪条件に基づき本研究の実験条件は決定されている。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

[1] 猿渡亜由未, 岡義久 (2015) 底面の浸透性と粒子の浮遊により振動流中に発達する乱れの特徴, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 71, (査読有, 登載決定済)

[2] 岡義久, 猿渡亜由未 (2015) 高数密度粒子群を含む流れ場の画像計測, 論文報告集, 土木学会北海道支部, 70, B49 (査読無)

[3] 米子佳広, 猿渡亜由未 (2014) 波と共存する流れ場による波浪エネルギーリソースの応答, 論文報告集, 土木学会北海道支部, 69, B-62. (査読無)

[4] 丸山利幸, 猿渡亜由未 (2014) 日本周辺の春季 7 年間の波浪追算に基づく波浪エネルギーリソース, 論文報告集, 土木学会北海道支部, 69, B-63. (査読無)

[5] A. Saruwatari, D. M. Ingram, L. Cradden (2013) Wave-Current Interaction Effects on Marine Energy Converters, Ocean Engineering, 73, 106-118. (査読有)

[6] 猿渡亜由未, 田島悠, 米子佳広, 齊藤樹 (2013) 津軽海峡の潮流エネルギーリソースに海流が与える影響, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 69, 1296-1300. (査読有)

[7] 猿渡亜由未, 丸山利幸 (2013) 北海道沿岸における冬季の波浪エネルギー賦存量評価, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 69 (2) 91-96. (査読有)

[8] 齊藤樹, 猿渡亜由未 (2013) 屈折率整合を用いて可視化された粒子群の速度の画像計測法, 論文報告集, 土木学会北海道支部, 69, B-60. (査読無)

[9] 猿渡亜由未, 長塚雄介 (2012) 塩分濃度計を用いた Swash Zone 地下浸透流の輸送拡散過程の計測, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 68 (2), 1097-1102. (査読有)

[10] 松崎亘, 猿渡亜由未 (2012) 粒子-流体相互作用による乱れの発達に関する可視化計測, 論文報告集, 土木学会北海道支部, 68, B-57. (査読無)

[11] 長塚雄介, 猿渡亜由未 (2012) 汀線近傍

における波浪下の地下水流れ計測, 論文報告集, 土木学会北海道支部, 68, B-70. (査読無)

[12] 松崎亘, 猿渡亜由未 (2011) 乱流中の底面粒子流れの乱流拡散に関する研究, 論文報告集, 土木学会北海道支部, 67, B-53. (査読無)

[13] 長塚雄介, 猿渡亜由未 (2011) 砕波下における粒子底面内からの流体の輸送に関する可視化実験, 論文報告集, 土木学会北海道支部, 67, B-57. (査読無)

[学会発表] (計 12 件)

[1] 岡義久, 底面の浸透性と粒子の浮遊により振動流中に発達する乱れの特徴, 第 62 回海岸工学講演会, 2015/11/11-2015/11/13, タイム 24 ビル (東京, お台場) (発表決定済)

[2] 岡義久, 高数密度粒子群を含む流れ場の画像計測, 平成 26 年度年次技術研究発表会, 2015/1/31-2015/2/1, 室蘭工業大学 (北海道室蘭市)

[3] 米子佳広, 波と共存する流れ場による波浪エネルギーリソースの応答, 平成 25 年度年次技術研究発表会, 2014/2/1-2014/2/2, 札幌コンベンションセンター (北海道札幌市)

[4] 丸山利幸, 日本周辺の春季 7 年間の波浪追算に基づく波浪エネルギーリソース, 平成 25 年度年次技術研究発表会, 2014/2/1-2014/2/2, 札幌コンベンションセンター (北海道札幌市)

[5] 米子佳広, 津軽海峡の潮流エネルギーリソースに海流が与える影響, 第 61 回海岸工学講演会, 2013/11/13-2013/11/14, 九州大学 (福岡県福岡市)

[6] 丸山利幸, 北海道沿岸における冬季の波浪エネルギー賦存量評価, 第 38 回海洋開発シンポジウム, 2013/6/27-2013/6/28, 米子コンベンションセンター (鳥取県米子市)

[7] 齊藤樹, 屈折率整合を用いて可視化された粒子群の速度の画像計測法, 平成 24 年度年次技術研究発表会, 2013/2/2-2013/2/3, 函館高専 (北海道函館市).

[8] 長塚雄介, 塩分濃度計を用いた Swash Zone 地下浸透流の輸送拡散過程の計測, 第 37 回海洋開発シンポジウム, 2012/6/27-2012/6/28, 函館国際ホテル (北海道函館市)

[9] 松崎亘, 粒子-流体相互作用による乱れの発達に関する可視化計測, 平成 23 年度年次技術研究発表会, 2012/2/2-2012/2/3, 北海道立道民活動センターかでの 2・7 (北海道札幌市).

[10] 長塚雄介, 汀線近傍における波浪下の地下水流れ計測, 平成 23 年度年次技術研究発表会, 2012/2/2-2012/2/3, 北海道立道民活動センターかでの 2・7 (北海道札幌市).

[11] 松崎亘, 乱流中の底面粒子流れの乱流拡散に関する研究, 平成 23 年度年次技術研究発表会, 2012/2/2-2012/2/3, 北海道立道民活動センターかでの 2・7 (北海道札幌市).

[12] 長塚雄介, 砕波下における粒子底面内からの流体の輸送に関する可視化実験, 平成 23 年度年次技術研究発表会, 2012/2/2-2012/2/3, 北海道立道民活動センターかでの 2・7 (北海道札幌市).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

猿渡 亜由未 (SARUWATARI, Ayumi)  
北海道大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号: 00563876

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし