

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：82706

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2019～2023

課題番号：19KK0110

研究課題名（和文）計算科学と観測技術の融合が解き明かす乱泥流の長距離輸送機構に関する統合的理解

研究課題名（英文）Dynamic mechanism of turbidity current for long-distance sediment transport through integration of numerical science and high resolution measurement technique

研究代表者

西浦 泰介（Nishiura, Daisuke）

国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門(数理科学・先端技術研究開発センター)・グループリーダー代理

研究者番号：60509719

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、共同研究の相手方であるスイス工科大学ローザンヌ校の水工学研究室（EPFL-LCH）が有する高精度超音波計測技術を用いて初期・境界条件が管理可能な水槽実験設備を利用し、粒子懸濁液の速度場、濃度場を計測する手法を確立を模索することで、乱泥流の運動メカニズムを明らかにすることを目標として研究を実施した。また、実験結果をもとに、研究者らが有する粒子-流体相互作用を考慮したシミュレーション技術の高度化を図り、乱泥流の長距離土砂輸送メカニズムについて包括的な説明手法を提案することを検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海底乱泥流は、長らく不明であった「海底砂泥互層」の形成過程を説明するものとして、地質学の分野で盛んに研究が進められ解明が必要とされてきた。近年わが国が推し進めている海底資源開発に必要な海洋インフラの整備事業に対しても、乱泥流による潜在的な被害リスクは大いに存在しており、海底構造物に与える乱泥流の被害リスクを正確に見積もる技術を早期に確立する必要がある。EPFLと研究代表者らの研究グループで「高精度流体計測」と「大規模シミュレーション」という得意分野を互恵する関係を構築することができた。また若手研究者の長期滞在の機会が得られたことで、今後の継続的な研究交流の機会を構築することができた。

研究成果の概要（英文）：This research was conducted in collaboration with the Laboratory of Hydraulics at the Swiss Ecole Polytechnique Fedrale de Lausanne (EPFL-LCH).

The experimental research was proceeded using water tank apparatus that allows controlling the initial and boundary conditions and ultrasonic velocity measurement technique owned by the collaborative research partner. As a result, 1) methods for measuring the velocity and concentration fields of particle suspensions were established. Then, 2) the movement mechanism of turbidity currents was partially clarified.

In addition, based on the experimental results, 3) the house code simulation technology that takes into account particle-fluid interactions is improved. Then, 4) a comprehensive method for explaining the long-distance sediment transport mechanism of turbidity currents was proposed.

研究分野：地盤工学

キーワード：乱泥流 粒子懸濁液 密度流 粒子-流体相互作用 数値解析

様式 F-19-2

1. 研究開始当初の背景

海底乱泥流は、長らく不明であった「海底砂泥互層」の形成過程を説明するものとして、地質学分野で盛んに研究が進められてきた。図-1のように、地震や海水位変動といったイベントを契機として海底で土粒子が巻き上げられ、密度の不均衡が生じると、粒子を含んだ懸濁液は斜面下方に流れ出す。一旦発生した流れは雪だるま式に巨大化し、大陸棚、海底谷をはるかに超え、深海平原にまで土砂が運搬されることになる。

乱泥流による土砂運搬は地球規模の有機物循環を促すものであり、堆積層によって形成される級化が進んだ層構造（タービダイト）は石油や天然ガス等の賦存域となる。日本近海でも発見が相次いだメタンハイドレートも乱泥流起源のタービダイト層に多く賦存しており、乱泥流の研究は資源開発研究の側面も有する。

これまでの研究から認識されつつあることの一つは、乱泥流が海底環境においてレアではなく普遍的なイベントであるということである。広域に設置された観測網による研究では、乱泥流のきっかけが潮位変動や洪水/融雪時の河川からの土砂流入など、頻発する軽微な環境変化に起因することが分かってきた。

したがって、近年わが国が推し進めている海底資源開発に必要な海洋インフラの整備事業に対しても、乱泥流による潜在的な被害リスクは大いに存在する。そのため、海底構造物に与える乱泥流の被害リスクを正確に見積もる技術を早期に確立する必要性が有る。

2. 研究の目的

本研究では、乱泥流の運動メカニズムを包括的に理解することを目的として、最新の計測技術やシミュレーション技術を総動員し、乱泥流の速度、濃度、粒子径分布等の内部構造や土砂の運搬・堆積作用の詳細を明らかにすることを目的とした。

これまで、海底乱泥流は実フィールドや水理実験によって実態把握が試みられてきたが、特に、乱泥流が粒子を含み不透明になること、流動過程に運搬、堆積といった粒子懸濁液特有の物理作用が生じることが既存の可視化手法や計測技術の適用を困難にし、その運動メカニズム解明への道を閉ざしてきた。EPFLが有する超音波による流速計測技術（UVP）は、近年確立された画期的な技術であり、上記の問題を解決するものである。UVP計測技術は流体の透明/不透明を問わず流体中の速度を計測することが可能である。

一方、自然界において大規模に進行する乱泥流の運動特性を理解するために、研究代表者は近年大規模数値シミュレーション手法を開発してきた。計算機性能の進歩と並列計算アルゴリズムの開発により、計算効率とそれに伴う解像度・規模は飛躍的な進化を遂げており、実測だけですべてをカバーすることが難しい物理量の詳細情報を実スケールの乱泥流に対しても所得可能にしている。しかしながら、現象を正しく再現する精度については、実実験との検証を実施して、その品質を担保することが重要となる。

本研究では、UVP計測技術を用いた水路実験との前例のない直接比較検証に基づき、信頼性のある懸濁流シミュレーション技術を確立することで、乱泥流の全体像を解き明かすことにチャレンジする。

3. 研究の方法

上記の背景・目的の下、本研究では、EPFLが持つ超音波流体計測技術をもとに（i）粒子懸濁液中の速度場、濃度場、粒子径分布を同時計測する基盤技術を開発し、（ii）粒子-流体間で生じている相互作用を適切に評価し、モデル化を進める。その上で、（iii）開発された計測技術を利用した乱泥流の水路実験を実施し、適切に制御された環境の中で生じる乱泥流の運動メカニズムを整理する。その後、観測結果をもとに研究代表者らが開発を進める（iv）大規模粒子-流体連成解析により運動性を評価し、最終的に（v）乱泥流の発達から減衰に至る一連のプロセスを再現し、実フィールドで生じる流れに対して適切な説明を加える手法を確立する。

4. 研究成果

2019年度は、乱泥流を模擬した粒子懸濁液の連続注入による水槽実験（図-2）の結果整理を進め、乱泥流の速度分布（図-3）を明らかにしたうえで、底面から受けるせん断抵抗力と斜面方向の重力が釣り合うことで内部の構造が保存したまま下方への流動を生じさせていることを明らかにした。この事実は、乱泥流が長期運動するメカニズムに深く関係すると考えられる。また、独自開発を進めている解析コードをもとに EPFL で実

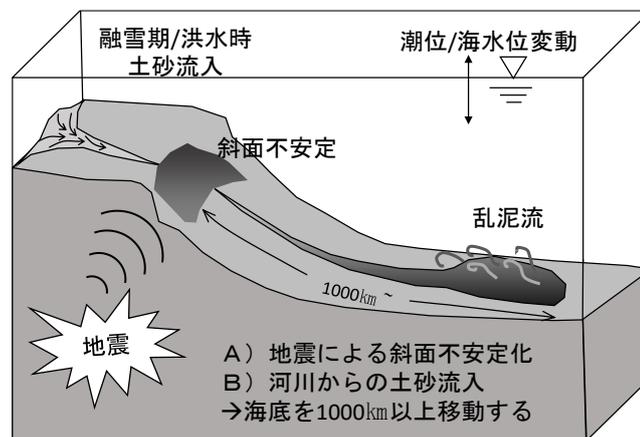


図-1 乱泥流の概念図

施された津波を模擬した水槽実験の再現を試みた。その結果、実験室で生成された流れの波高分布や流れ内部の速度構造などを適切に表現できることが明らかになり、検討結果は次年度以降に実施する粒子-流体の相互作用を取り入れた連成解析の足掛かりとすることができた。

2020年度は乱泥流を模擬した粒子懸濁液の連続注入による水槽実験の結果整理(図-2)を進め、乱泥流が流動中の懸濁粒子の堆積過程を整理し、物理法則に従って粒子が運搬され堆積するメカニズムを明らかにした(図-4)。乱泥流の流動中の可視化を目指した手法の開発に取り組んだ。適切な粒子、流体を選定することにより、高精度で流体の内部可視化ができることが確認され、次年度以降に実施する、粒子-流体の相互作用整理のための水槽実験の足掛かりとすることができた。

2021年度は、乱泥流を模擬した粒子懸濁液の連続注入による水槽実験の結果をまとめ、乱泥流運動中の堆積過程の時空間発展に関する成果を国際ジャーナルに投稿し、採択・掲載された。加えて、乱泥流の長期継続運動メカニズムの解明に向け、連続注入可能な実験環境を準備し観測のための環境を整えた。また、粒子-流体の相互作用整理のための数理アルゴリズムの修正を進める中で、その高精度化を実現した。

2022年度は、乱泥流を模擬した粒子懸濁液の連続注入を可能にする水槽模型実験装置の作成を行った(図-5)。実験装置をもとに同比重の塩水密度流と粒子懸濁液の流動過程を観測し、運動性の際を検討した。また、粒子-流体の相互作用整理のための数理アルゴリズムの改良を並行して進めた。加えて、コロナ化で直接の訪問等が叶わなかったものの、EPFLの水工学研究室と定期的に研究交流を行い、2023年度に実施する研究内容について議論を行った。

2023年度は、乱泥流を模擬した粒子懸濁液の連続注入を可能にする水槽模型実験装置をもとに同比重の塩水密度流と粒子懸濁液の流動過程を観測し、運動性の整理を行った。また種々の粒子の物性や濃度がその運動に与える影響を評価・検討した(図-6,7)。また、粒子-流体の相互作用理解のためのためのアルゴリズムの改良と解析コードへの実装を進めた。加えて、コロナ禍で中断していた共同研究機関とのEPFL直接訪問を行うとともに、EPFLの水工学研究室において研究者が一定期間滞在し現地にて計測技術の確認と今後の研究方針について具体的な議論を行った。

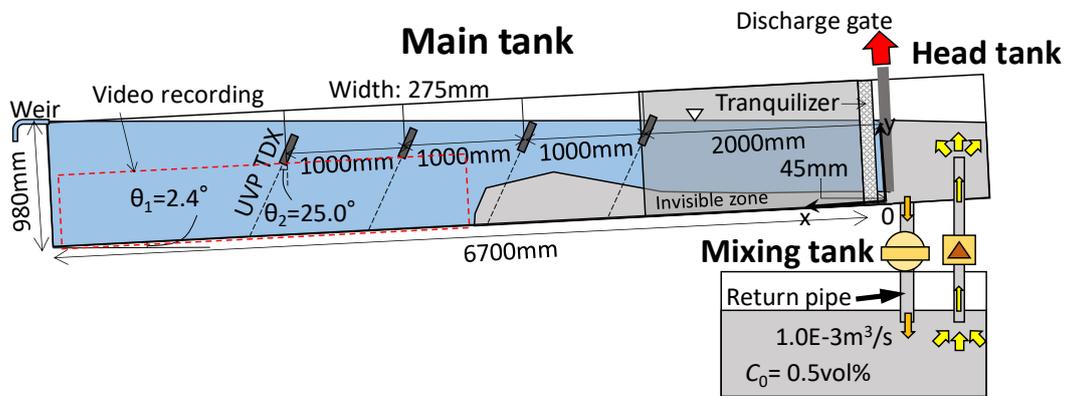


図-2 研究相手先 (EPFL) の実験水槽模式図

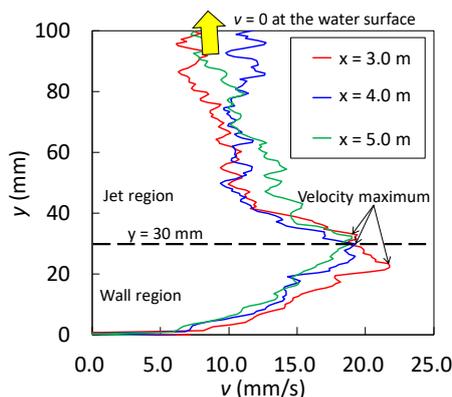


図-3 UVP 計測による流速分布

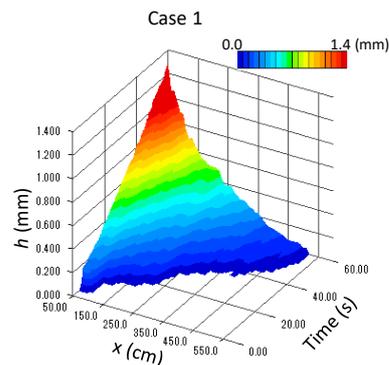


図-4 乱泥流堆積物の時空間分布

研究期間全体において、乱泥流を模擬した粒子懸濁液の連続注入による水槽実験の結果をまとめ、乱泥流運動中の堆積過程に関する成果を国際ジャーナルに投稿し、掲載された。また、乱泥流の長期継続運動メカニズムの解明に向け、連続注入可能な実験環境を整備し、乱泥流の観測を行った。また、粒子-流体の相互作用整理のための数理アルゴリズムの高度化を進め、現実的なマシンタイムで現象の再現解析が可能であることを確認した。また、共同研究の相手先であるEPFLと数多くのWebミーティングを行う中で研究の方向性や将来に向けた目標設定を定めた。コロナ禍の影響で2020-2022年度までは現地での交流は難しかったものの、2023年前半には研究者らがEPFLに訪問し現地にて研究の具体的な内容の議論を行った。またEPFLの研究者も日本に滞在し、実験環境の確認や力学理論の議論を進めた。2023年度には若手研究者がEPFLに長期間滞在し、研究の発展性について共同研究者と議論を進め、継続的な共同研究関係の熟成を行うことができた。

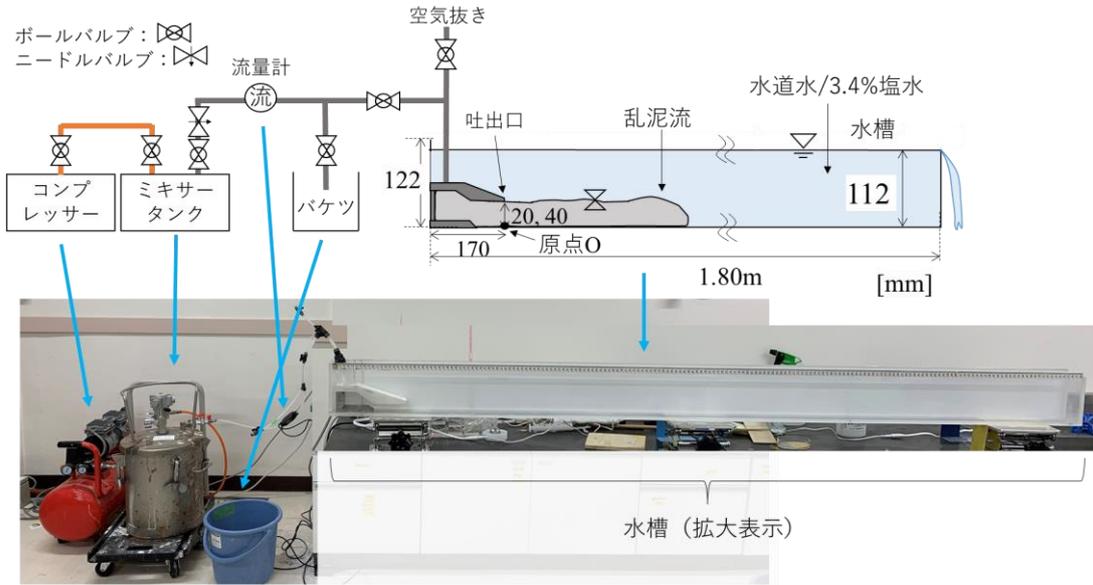


図-5 連続注入式実験水槽の模式図

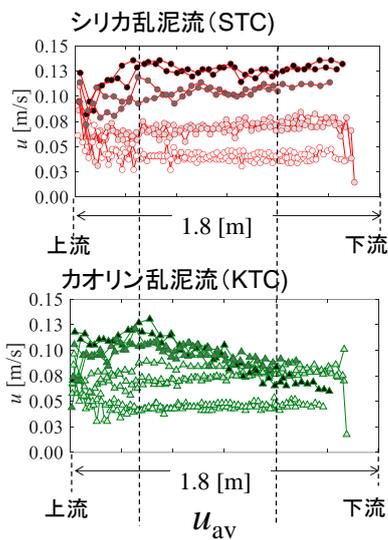


図-6 土粒子や濃度による先端速度

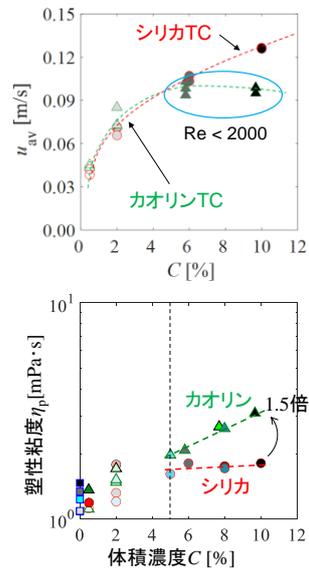


図-7 土粒子の濃度・先端速度、濃度・粘度関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nomura Shun, De Cesare Giovanni, Furuichi Mikito, Takeda Yasushi, Sakaguchi Hide	4. 巻 37
2. 論文標題 Spatio-temporal deposition profile of an experimentally produced turbidity current with a continuous suspension supply	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Sediment Research	6. 最初と最後の頁 299 ~ 306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijsrc.2021.11.004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hitomi Jumpei, Nomura Shun, Murai Yuichi, De Cesare Giovanni, Tasaka Yuji, Takeda Yasushi, Park Hyun Jin, Sakaguchi Hide	4. 巻 136
2. 論文標題 Measurement of the inner structure of turbidity currents by ultrasound velocity profiling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Multiphase Flow	6. 最初と最後の頁 103540 ~ 103540
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103540	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Nomura Shun, De Cesare Giovanni, Furuichi Mikito, Takeda Yasushi, Sakaguchi Hide	4. 巻 35
2. 論文標題 Quasi-stationary flow structure in turbidity currents	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Sediment Research	6. 最初と最後の頁 659 ~ 665
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijsrc.2020.04.003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Daisuke Nishiura, Davide Wuthrich, Mikito Furuichi, Shun Nomura, Michael Pfister, Giovanni De Cesare	4. 巻 -
2. 論文標題 Numerical Approach in the Study of Tsunami-like Waves and Comparison with Experimental Data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 29th International Ocean and Polar Engineering Conference	6. 最初と最後の頁 3166-3173
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Davide Wuthrich, Daisuke Nishiura, Shun Nomura, Mikito Furuichi, Michael Pfister, Giovanni De Cesare	4. 巻 -
2. 論文標題 Experimental and Numerical Study on Wave-Impact on Buildings	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 E-proceedings of the 38th IAHR World Congress	6. 最初と最後の頁 6047-6056
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3850/38WC092019-0377	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 西浦 泰介, Davide Wuthrich, 古市 幹人, 野村 瞬, Michael Pfister, Giovanni De CESARE
2. 発表標題 Numerical Approach in the Study of Tsunami-like Waves and Comparison with Experimental Data
3. 学会等名 The 29th International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Davide Wuthrich, Shun Nomura, Daisuke Nishiura, Mikito Furuichi, Michael Pfister, Giovanni De Cesare
2. 発表標題 Experimental and Numerical Study on Wave-Impact on Buildings
3. 学会等名 38th IAHR World Congress (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 透明懸濁液、及びその利用	発明者 大島逸平、西浦泰介、野村瞬、古市幹人	権利者 国立研究開発法人海洋研究開発機構
産業財産権の種類、番号 特許、2021-138637	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	野村 瞬 (NOMURA Shun) (20705701)	東京海洋大学・学術研究院・准教授 (12614)	
研究分担者	古市 幹人 (FURUICHI Mikito) (50415981)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門 (数理科学・先端技術研究開発センター)・グループリーダー (82706)	
研究分担者	大島 逸平 (OSHIMA Ippei) (40851845)	東北大学・流体科学研究所・助教 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関