

令和 3 年 5 月 21 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01648

研究課題名（和文）鉛直動揺する揚鉱管内の固液二相流の流路保全に関する研究

研究課題名（英文）Study on Flow Assurance for Hydraulic Transport of Large Solid Particles in Vertically Oscillating Pipes for Subsea Mining

研究代表者

正信 聡太郎（Masanobu, Sotaro）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・海上技術安全研究所 海洋開発系・系長

研究者番号：80373413

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）：海底熱水鉱床等の鉱物資源開発において、深海底で掘削された鉱物を洋上の採鉱母船にスラリー移送する揚鉱ユニットが検討されている。本研究では、静止した鉛直揚鉱管内の脈動スラリー流、及び波浪中で上下動揺する採鉱母船に接続された鉛直揚鉱管内のスラリー流を対象とした圧力損失推定手法を構築して、大粒径固体粒子のスラリー移送試験を通じて、当該手法の有効性を検証した。これにより、上下動揺時もしくは脈動状態での鉛直揚鉱管内のスラリー流量と圧力損失の関係を明らかにするためのフローライン分析が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大粒径固体粒子のスラリー流を対象として、鉛直動揺時もしくは脈動状態での鉛直揚鉱管内におけるスラリー流量・圧力損失の関係を実用的に評価することが可能となった。本研究成果は、海底熱水鉱床開発における揚鉱ユニットの設計や運用に活用することができるだけでなく、コバルトリッチクラストやマンガン団塊といった他の海洋鉱物資源の揚鉱にも適用できる。

研究成果の概要（英文）：The lifting system is a promising method to convey the ore excavated at the seafloor to the production support vessel for subsea mining. In the present study, we focused on the pulsating slurry flow in a static vertical pipe and the flow in a vertical pipe oscillating in the axial direction. We developed the mathematical model to predict the pressure loss in the pipe, and validated the model by a comparison with experimental data.

研究分野：海洋工学

キーワード：海洋鉱物資源 スラリー移送 鉛直動揺管 脈動流 Flow Assurance

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、新しい金属鉱物資源として海底熱水鉱床が注目されている。我が国においても、伊豆・小笠原海域及び沖縄海域で海底熱水鉱床が発見されており、平成 25 年 4 月に閣議決定された海洋基本計画に基づき、平成 30 年代後半以降に民間企業が参画する商業化を目指したプロジェクトが開始されることを目標に開発が推進されている。海底熱水鉱床が発見されている海域は水深が深く(700~2,000m)、黒潮や台風の通過もある荒れた海域であるため、安全で確実に採鉱できるシステムを開発する必要がある。

(2) 海底熱水鉱床の採鉱システムは、採掘ユニット・揚鉱ユニット・採鉱母船ユニットから構成され、揚鉱ユニットとしては効率等を踏まえライザー管(揚鉱管)及びポンプを用いたスラリー移送方式が検討されている。平成 29 年度には、経済産業省からの委託を受けて(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構が実施している採鉱・揚鉱パイロット試験事業において、世界初となる実海域での海底熱水鉱床の連続揚鉱に成功した。パイロット試験の成功により、スラリー移送方式による揚鉱は技術的に可能であることが実証されたが、実際の商業規模での運用を考えたとき、長大な揚鉱管の径やポンプの性能をどのように選定するのか、配管内で大粒径の鉱石が閉塞しないためにはどのようなオペレーションが必要か等、解決すべき流路保全分析に関する課題は残されている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、上下動揺する鉛直配管を対象として、ポンプの性能変化を考慮した、スラリー流量と圧力損失の推定手法を構築することである。具体的には、海底熱水鉱床開発における揚鉱ユニットを対象として、採鉱母船が上下動揺したときの鉛直揚鉱管内のスラリー流量及び圧力損失を、ポンプ特性を考慮して評価できるプログラムを開発し、模型試験結果と比較・検証することで、プログラムの精度検証を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) ポンプ性能評価

当初は、大粒径固体粒子を用いたスラリー移送試験を実施してポンプ性能を評価するためのデータを取得する計画であったが、予算上の制約等もあり、利用できるレベルの試験データを取得することができなかつたため、過去に実施されたマンガン団塊に関する研究を参考にして、スラリー移送時のポンプ揚程及び動力を求めるためのポンプ性能評価モデルを構築した。

#### (2) フローライン分析

本研究では、十分発達した固定鉛直配管内の脈動状態でのスラリー移送、及び十分発達した上下動揺する鉛直配管内のスラリー移送を対象とした。過去に構築した、定常状態でのスラリー移送による圧力損失を推定する手法(JSPS 科研費 25289323) [1]をベースとして、圧力損失の時間平均成分と、脈動周期もしくは動揺周期で変動する成分を推定するための定式化を行った。

具体的には、スラリー流において、変動成分が時間平均成分に比べ十分小さいという仮定を設け、管内のスラリー濃度、固体粒子の抗力係数及び付加質量係数を一定とすることにより、圧力損失を推定可能なスラリー流の一次元数学モデルを構築した。時間平均成分については、研究代表者らが過去に構築した定常スラリー流での圧力損失推定手法を用いた。変動成分については、固定鉛直配管内の脈動状態でのスラリー移送では、固相・液相間の相互作用を考慮したモデルを構築するとともに、単純な均質流モデルの適用可能性についても考察した。上下動揺する鉛直配管内のスラリー移送については、脈動流での検討結果を踏まえ、均質流モデルを用いた考察を行った。

構築した圧力損失推定手法を検証するために、スラリー移送試験を実施した。試験装置は実機の縮尺 1/10 程度(管内径:26mm)とした。試験装置の概略を図 1 に示す。試験に供した模擬鉱石は、アルミナビーズ(密度 3,682kg/m<sup>3</sup>、粒径 4mm; A4)、ガラスビーズ(密度 2,553kg/m<sup>3</sup>、粒径 4mm; G4)であった。脈動周期もしくは管動揺周期は、採鉱母船の波浪中動揺特性を踏まえ、1.26~5.06s(実機スケールで 4~16s)とした。

### 4. 研究成果

#### (1) ポンプ性能評価

スラリー移送試験(定常状態の他に脈動状態、鉛直動揺状態を含む)で計測されたポンプの電流値から推定される動力とスラリー流量の関係を図 2 に示す。本来であれば、ポンプ性能の評価ではモータのトルクや回転数が必要となるが、本研究では当該データの取得は困難であったため、電流値から動力を簡易推定した。スラリー密度が増加すると若干ではあるが、動力の上昇が確認され、定性的にはスラリー流の一般的傾向と同じであるが、過去にマンガン団塊の研究で検討された推定結果からは大きな乖離が認められる。今後、直接モータのトルクや回転数を計測す

る等して、詳細に検討していく必要があると考えられる。

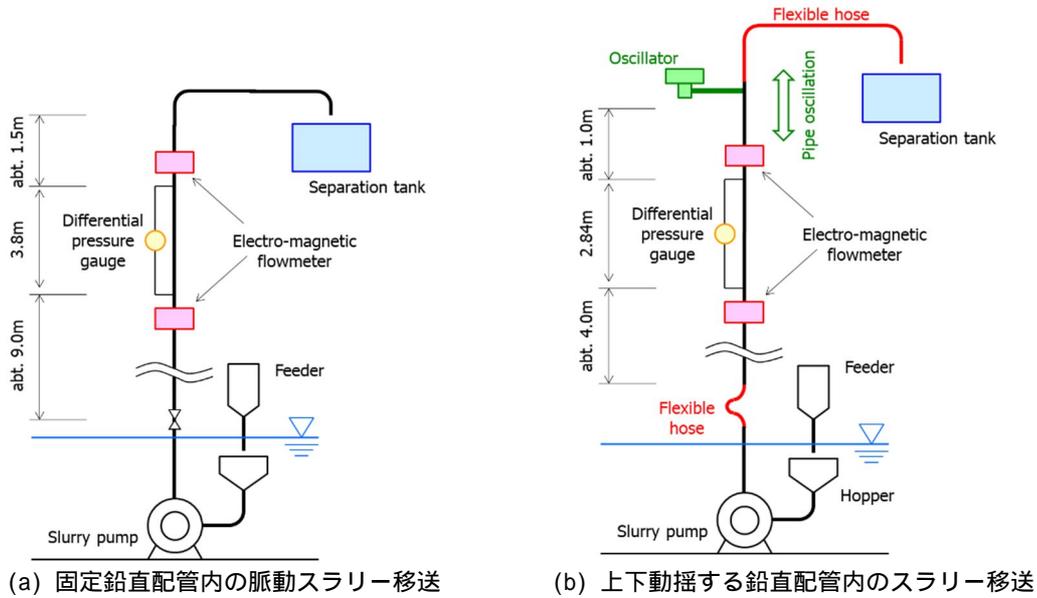


図1 スラリー移送試験装置

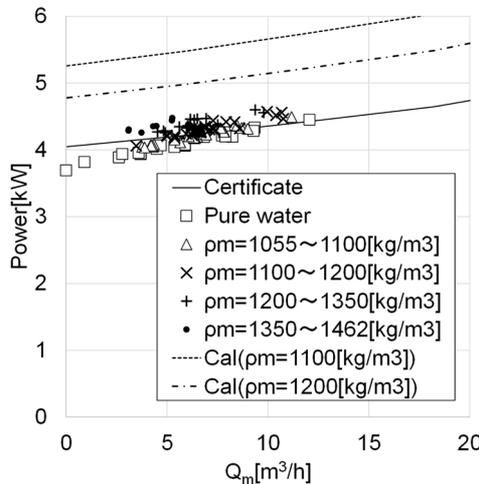


図2 ポンプ性能試験結果

## (2) フローライン分析

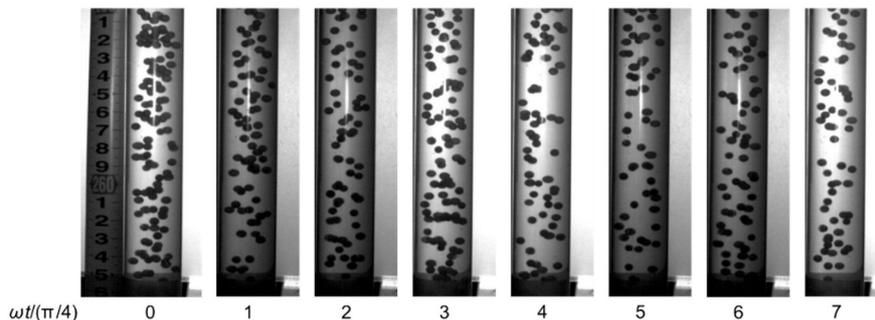
### 固定鉛直配管内の脈動状態でのスラリー移送評価

試験中の模擬鉱石の移送状況を図3に示す。本試験では、管内の固体粒子濃度は一周期を通じて大きく変化していないことが確認された。

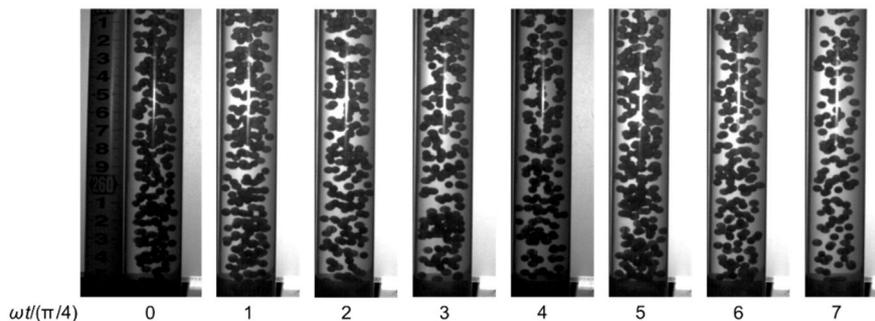
推定結果と試験結果の比較例を図4及び図5に示す。時間平均成分については、4kPa/mまでは推定結果は試験結果と良い一致を示しているが、それを超えると10%程度過大に推定している。一方で、水流速については全体として良い一致を示しており、最大誤差は2%程度であった。水流速の推定で誤差が小さくても、当該誤差が管内のスラリー濃度の推定に大きく影響するため、簡便な次元モデルであることを考慮すると、10%程度の推定誤差は妥当な結果であると考えられる。脈動周期変動成分については、全体として推定結果は試験結果と良い一致を示しているが、スラリー体積濃度が8%を超えるケースでは若干の乖離が確認される。水流速の変動成分については推定結果と試験結果は良い一致を示していたことから、この乖離は、時間平均成分と同様、管内のスラリー濃度の推定精度に起因していると考えられる。以上より、本研究で構築した推定式が固定鉛直配管内の脈動状態における圧力損失の推定に適用できることがわかる。

さらに、上述の固相・液相間の相互作用を考慮したモデル(相互作用モデル)を用いて、海底熱水鉱床とマンガン団塊を対象とした実機スケールでの計算を行った(図6)。比重の大きい海底熱水鉱床の圧力損失が最も大きく、海水のみを移送した場合に比べると、時間平均成分、変動成分それぞれ3.9倍、1.2倍(脈動周期4s)となっている。変動成分は、脈動周期が長くなると減少している。時間平均成分に対する変動成分の比は、海底熱水鉱床、マンガン団塊、海水のみでそれぞれ22%、33%、70%(脈動周期4s) 6.0%、9.4%、18%(脈動周期18s)となっており、揚鉱ユニットの設計では、脈動流中における変動圧力損失を無視できないことが示唆された。つぎに、相互作用モデルと均質流モデルによる推定結果の違いについて考察した。図7に、均質流モデルによる推定結果に対する相互作用モデルによる推定結果の比とスラリー体積濃度の関係を

示す。この結果より、均質流モデルは圧力損失を過小評価し、スラリー体積濃度が増加するに従って、過小評価の度合いは増していることがわかった。

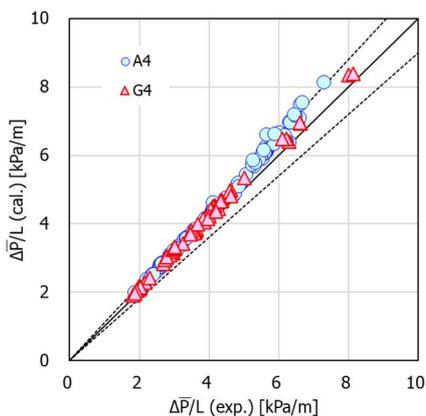


(a) アルミナビーズ, 脈動周期 1.26s, 管内水平平均流速 2.8m/s, 振幅比 0.09, スラリー体積濃度 0.04

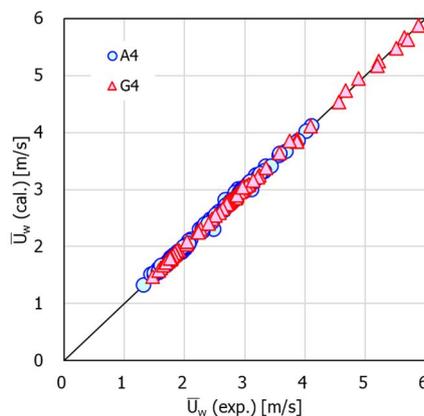


(b) アルミナビーズ, 脈動周期 1.26s, 管内水平平均流速 2.8m/s, 振幅比 0.10, スラリー体積濃度 0.09

図3 脈動流中の固体粒子の移送状況

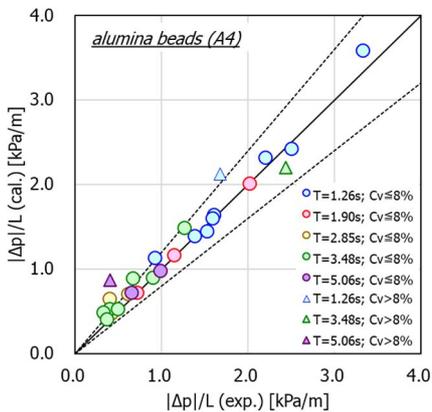


(a) 圧力損失 (点線は±10%)

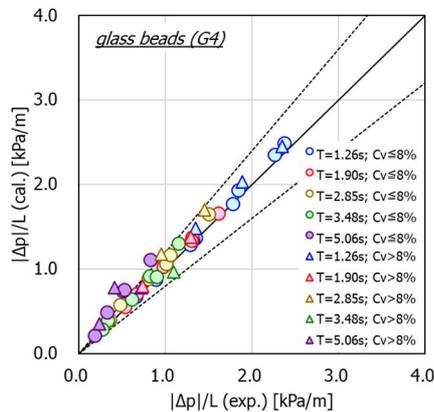


(b) 水流速

図4 推定結果と試験結果の比較 (時間平均成分)



(a) 圧力損失: A4 (点線は±20%)



(b) 圧力損失: G4 (点線は±20%)

図5 推定結果と試験結果の比較 (脈動周期変動成分)

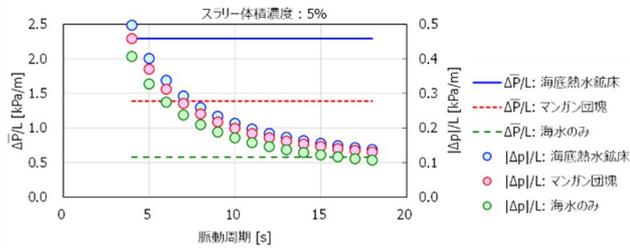


図6 揚鉦時の圧力損失の推定結果

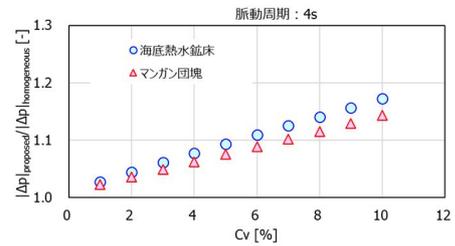
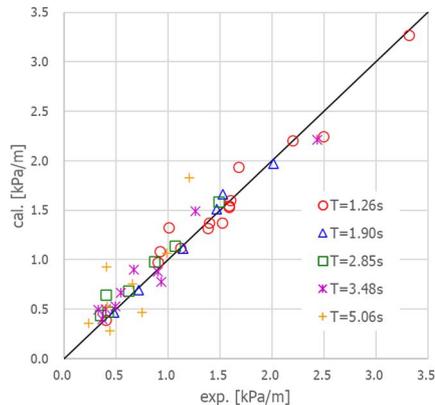
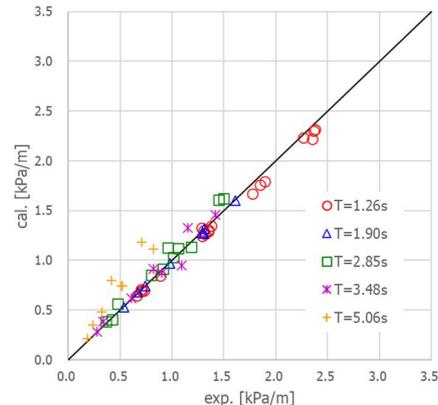


図7 モデルの違いによる比較 (脈動周期変動成分)

一方で、均質流モデルによる圧力損失の評価で使用するスラリー流速を、試験で計測された管内水流速に置き換えると(この仮定は、低濃度領域では実用上、問題ない)、図8に示すように、均質流モデルによる推定でも十分有効であることがわかる。



(a) アルミナビーズ (A4)



(b) ガラスビーズ (G4)

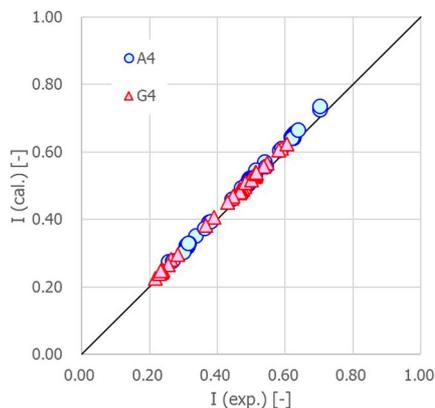
図8 均質流モデルによる推定結果と試験結果の比較 (圧力損失：脈動周期変動成分)

上下動揺する鉛直配管内のスラリー移送評価

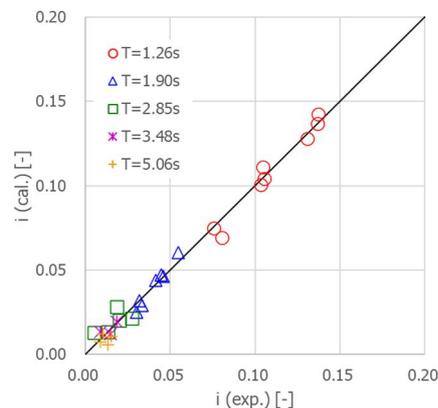
脈動流での検討結果を踏まえ、均質流モデルによる圧力損失推定を行って、次式で表される水力勾配の形で整理した。

$$I = \frac{\Delta\bar{P}}{\rho_w g L}, \quad i = \frac{|\Delta p - \rho_w \ddot{x}_{Pipe} L|}{\rho_w g L}$$

ここで、 $I$ ：水力勾配の時間平均成分、 $i$ ：水力勾配の変動振幅、 $\Delta\bar{P}$ ：圧力損失の時間平均成分、 $\Delta p$ ：圧力損失の変動成分、 $\rho_w$ ：流体密度、 $g$ ：重力加速度、 $L$ ：配管長さ、 $x_{Pipe}$ ：配管動揺である。推定結果と試験結果の比較例を図9に示す。本結果から、脈動流の場合と同じ仮定を設けることによって、均質流モデルによる推定でも十分有効であることがわかる。



(a) 時間平均成分  $I$



(b) 変動振幅 (G4)  $i$

図9 動揺管内スラリー移送における水力勾配

< 引用文献 >

[1] Masanobu, S., Takano, S., Fujiwara, T., Kanada, S., Ono, M., and Sasagawa, H., Study on Hydraulic Transport of Large Solid Particles in Inclined Pipes for Subsea Mining, J. Offshore Mech. Arct. Eng., Vol.139, No.5, 2017

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sotaro Masanobu, Satoru Takano, Shigeo Kanada, Masao Ono	4. 巻 143
2. 論文標題 Pressure Loss Due to Hydraulic Transport of Large Solid Particles in Vertical Pipes Under Pulsating Flow Conditions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering	6. 最初と最後の頁 061801 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4050593	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5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 高野慧、正信聡太郎、金田成雄、小野正夫、笹川広紀
2. 発表標題 大粒径粒子の脈動スラリー流移送に関する研究
3. 学会等名 令和元年度 日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masanobu, S., Takano, S., Kanada, S., Ono, M., and Sasagawa, H.
2. 発表標題 Experimental Investigation of Large Particle Slurry Transport in Vertical Pipes with Pulsating Flow
3. 学会等名 ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2020) [査読有] (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荒木元輝、正信聡太郎、大橋訓英
2. 発表標題 船用CFDソルバーを用いた直管圧損計算
3. 学会等名 平成30年 日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高野慧、正信聡太郎、金田成雄、小野正夫、笹川広紀
2. 発表標題 鉛直動揺管におけるスラリー移送に関する実験的研究
3. 学会等名 令和2年 日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masanobu, S., Takano, S., Kanada, S., and Ono, M.
2. 発表標題 Experimental Investigation of Large Particle Slurry Transport in Vertically Oscillating Pipe for Subsea Mining (査読有)
3. 学会等名 ASME 2021 40th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2020) [査読有:採択済] (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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	荒木 元輝  (Araki Motoki)  (00711350)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・海上技術安全研究所 海洋開発系 深海技術研究グループ・主任研究員   (82627)	
研究分担者	高野 慧  (Takano Satoru)  (90636820)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・海上技術安全研究所 海洋開発系 深海技術研究グループ・主任研究員   (82627)	

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
---------	---------