

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03500

研究課題名(和文) 近接配置した複数の鉛直大口径管の潮流下における流力弾性現象の研究

研究課題名(英文) Study on the flow elasticity phenomena of multiple vertically placed large diameter bore pipes under the current.

研究代表者

藤原 智 (Fujiwara, Tomo)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：70511591

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：海底鉱物資源開発での利用が検討されている2本管のライザーシステムを対象として、近接配置された際に2本管がどのような挙動となるかを挙動計測実験と流体力計測実験によって実験的に示すとともに、実験結果を基にした挙動推定シミュレーションを作成した。その結果、2本管が近接配置された場合に発生し得る振動や運動が、並進運動、離合運動、回転運動、離合運動と回転運動の重畳した運動、の4つのパターンに分類できることを示し、これらを運動が重畳するケースを除いて挙動推定が可能となった。これらの成果は、2本管を用いたライザーシステムの安全性評価や基本設計に活用されることが見込まれる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの研究では1本の管の挙動を推定することは可能であったが、本研究により2本の管が近接配置された場合に、特有の運動が発生することを実験的に示した。また、従来のシミュレーション手法を応用した挙動推定手法を開発し、部分的ではあるが適用可能であることを示した。これらの成果は海底鉱物資源開発だけでなく、油・ガスの生産や洋上天然ガス生産システムなど海洋開発の分野において広く利用できることが見込まれる。また、線状構造物という観点であれば橋梁をつるすワイヤーや送電線なども含めて成果が利用できると思われる。

研究成果の概要(英文)：This project shows experimentally the behavior of two pipes when they were arranged close to each other by behavior measurement experiment and fluid force measurement experiment, taking the riser system of two main tubes whose application to the development of seafloor massive sulfide (SMS) was examined. In addition, the behavior estimation simulation based on the experimental result was made.

As a result, it was shown that vibration and motion which can be generated when two pipes were arranged close to each other can be classified into four patterns of (1) predominant translational motion, (2) approaching and separation, (3) torsional motion, and (4) superposition of approaching and separation and torsional motions. The numerical simulations can be estimated the behavior of two pipes except for the case where the motion is superimposed. These results are expected to be used in the safety evaluation and basic design of the riser system using two main pipes.

研究分野：船舶・海洋工学

キーワード：水中線状構造物 ライザー 水槽実験 渦励振 挙動推定手法 2円柱

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

海底鉱物資源は石油・天然ガスなどのエネルギー資源以外の海洋資源として、これまでも注目されてきたが、近年では政府の総合海洋政策本部より示され2013年に見直された「海洋基本計画」のなかで、海底熱水鉱床に関して、「国際情勢をにらみつつ、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よう、(中略)官民連携の下、推進する。」とあり、その注目度が増している<sup>1)</sup>。同計画に先立ち、(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)では日本近海にある海底熱水鉱床の採鉱及び集鉱を検討するプロジェクトが進められており、実際に採鉱試験機を投入し試掘を行うなど未来の商業生産へ向けた取り組みが進んでいる<sup>2)</sup>。

海底鉱物資源を産出するための採鉱方法としては、日産量等の開発条件を満足する手法として鉱物資源を細かく粉碎して、海水と混合したスラリーとして海上まで運搬するスラリー方式が有力と考えられる。スラリー方式を採用した場合、図1に示すライザーシステムの導入が見込まれており<sup>3)</sup>、これら揚鉱ライザーシステムでは、揚鉱管だけでなく浮体上で処理された揚鉱水を海底付近で排水するため、また海底に設置する採鉱機等の機器へ信号・動力を供給するためのアンビリカルケーブル等を含めて複数本で構成されるライザーシステムとなることが予想される。

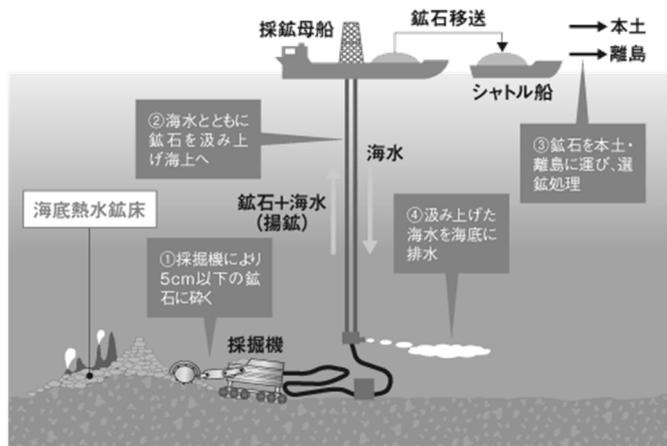


図1 海底熱水鉱床に用いられる揚鉱ライザーのイメージ

複数本のライザーを用いることはシステムの冗長性の観点からメリットがあるものの、複数本の近接配置された線状構造物が潮流中に設置されると、単独で設置した場合と比較して、縮流効果<sup>※)</sup>や伴流影響<sup>※※)</sup>が発生することにより流速が変化する。また、線状構造物近傍の流路の複雑化により流速及び流向が変化することで潮流中 VIV<sup>※※※)</sup>(Vortex Induced Vibration; 渦励振)挙動が変化する事が予想される。これらの現象は本課題研究代表者が研究代表者を務め、平成25-28年に実施した科研費研究「複数本で構成されるライザーシステムの VIV 抑制に関する研究」において研究を進め、その成果としてこれまで知られていた1本のライザー管の潮流中と異なる流力特性が2本で構成されるライザーシステムに生じていることを実験的に明らかにした。さらに同研究を遂行する中で2本の中心を中心とした回転運動が発生する可能性が実験的に示唆された<sup>4)</sup>。また、同研究を実施する過程で熱交換器内管群でも発生することがある近接配置された管同士の衝突運動がライザーシステムの安全性を検討する上で重要であることが分かった。

※) 縮流効果：管と管の間を潮流が通ることによって流路が狭くなり流速が早くなる現象

※※) 伴流影響：流体中に物体を配置することにより、物体の後ろ側の流入速度が低下する現象

※※※) VIV：流れ中に置かれた物体後方に周期的に渦を放出することで物体が振動する現象

### 2. 研究の目的

上述の研究背景および過年度実施課題で得られた知見を踏まえて本研究では複数本で構成されるライザーシステムに関して、研究期間である3年間で以下のことを明らかにすることを目的として研究を実施した。

- (1) 2本管に発生する回転・ねじり現象の発生条件および発生メカニズムの解明
- (2) 近接配置された管同士の衝突運動の発生条件および近接影響を考慮した流力特性の計測
- (3) 回転・ねじり現象および衝突運動に個々の管の VIV 挙動を含めた総合的な2本管挙動推定手法の開発

### 3. 研究の方法

- (1) 回転・ねじり現象の発生条件および発生メカニズムの解明

複数本ライザーの回転・ねじり現象および近接配置されたライザー管の衝突運動に関する関連論文を調査した。このなかで風による橋梁の振動現象や熱交換器内管群の振動現象といった海洋開発以外の分野についても幅広く調査を行い、複数本ライザーの振動現象との差異や類似点を検討した。

また、図2に示す2本の弾性模型管の挙動計測装置を用いて、近接配置された海底鉱物資源開発用のライザー管を模擬した挙動計測を行う

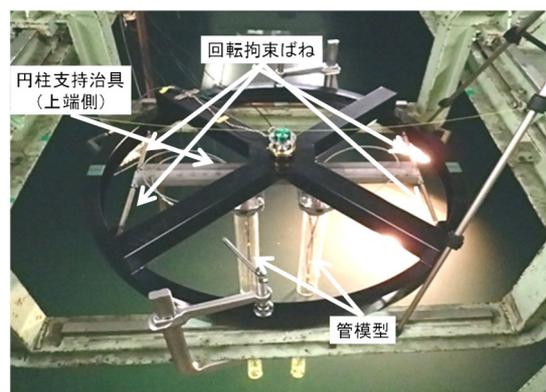


図2 2本管挙動計測試験装置の概要

た。試験では円柱間距離(P/D)を管同士が衝突する可能性がある P/D=2 から、固定された円柱を用いた実験において近接影響が報告されていない P/D=10 まで幅広い円柱間距離を対象として実験を行い、試験結果を解析した。

(2) 近接影響を考慮した流力特性の計測

回転・ねじり運動に関する考察、検討を行い、複数本ライザーに対して回転・ねじり運動が発生した際の流体力を計測可能とするための実験装置を製作、改造し、水槽実験を実施した。図3の上図に実験装置のイメージを示す。実験は海上技術安全研究所内の2次元水槽で実施し、計測された流体力は、流体力データベースを作成するための基礎データとした。

次に、ライザー管同士が衝突する方向に運動が発生した際の流体力を計測するため、上述の回転・ねじり運動の流体力計測装置に対して改造を行い、2本管が接近したり離れたりを繰り返す運動(離合運動)を再現した。図3の下図に実験装置のイメージ図を示す。さらに計測結果を基に衝突運動に関する考察、検討を行い、計測された流体力を基に流体力データベースを作成した。

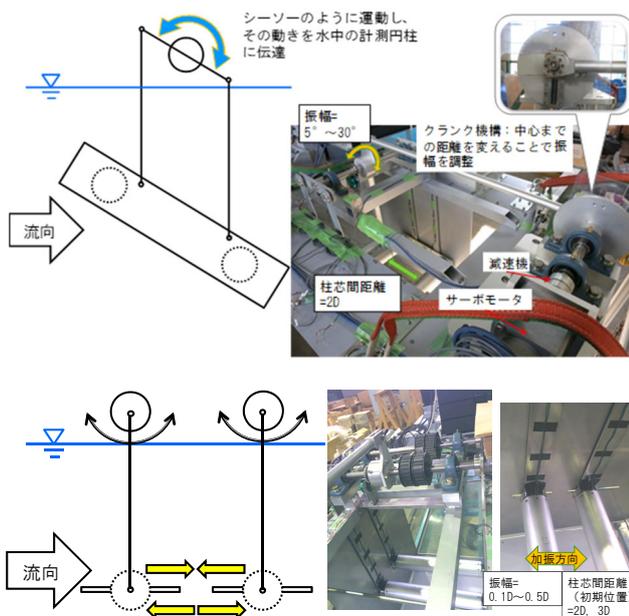


図3 2本管流体力計測実験装置のイメージ図  
(上図：回転方向加振装置、下図：水平方向の離合運動の強制加振装置)

(3) 2本管挙動推定手法の開発

2本管挙動推定手法を開発するために、既存の水中線状構造物の挙動推定プログラムの理論をベースに開発予定の挙動推定プログラムの基幹部を設計した。このなかで2本の挙動推定特有の挙動である管同士の接近や回転・ねじれといった運動モードを再現できるように設計した。加えて流体力計測試験結果を基に、2本円柱の流体力データベースを作成した。

次に、上記流体データベースを用いた2本管の挙動推定プログラムを更新し、挙動推定シミュレーションを行い、弾性模型を用いた挙動計測試験結果と比較することで精度の検証を行った。2本管挙動推定シミュレーションのモデルイメージを図4に示す。

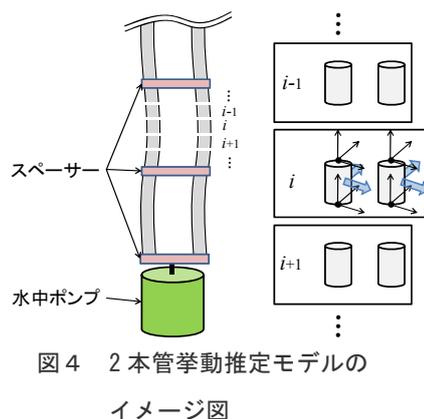


図4 2本管挙動推定モデルのイメージ図

#### 4. 研究成果

(1) 回転・ねじり現象の発生条件および発生メカニズムの解明

2本のライザーシステムの回転・ねじり現象を実験的に再現した実験によって、2本のライザー管が接近する振動を含めた複数の振動モードが発生する実験に於いて再現し、図5に示すような管の振動の軌跡を解析することにより、2本のライザー管が接近した場合、近接影響により挙動が変化することを示した。またこれらの結果を過去に実施した2本円柱の曳航時流体力計測結果と比較することで、柱芯間距離や流向をパラメータにした流体力の差異がライザー管の挙動に影響を与えていることを実験的に示した。

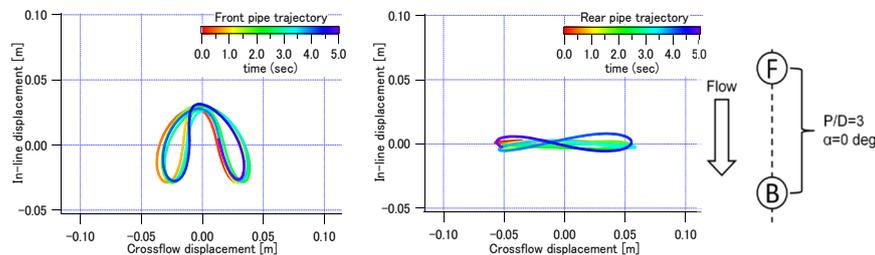


図5 2本管の挙動(円柱間距離(P/D)=3)、左図：上流側円柱、右図：下流側円柱

加えて円柱間距離と2本管の流向に対して成す角度をパラメータとして、2本管の挙動の相対的な関係を $\alpha$ 。並進運動(2本管があまり相対距離を変えずに同じ位相で振動する運動)、 $\beta$ 。離合運動、 $\gamma$ 。回転運動、 $\delta$ 。離合運動と回転運動が重畳した運動、の4つのパターンに分類した。その結果を図6に示す。この結果より、サイドバイサイド配置(流向に対して2本の管が平行に並ぶ)では2本管は離合運動が卓越し、タンデム配置(流向に対して直列に並ぶ)や斜めの

配置では離合運動と回転運動が重畳した運動が卓越することを実験的に示した。

(2) 近接影響を考慮した流力特性の計測

流向に対して2本の管がタンデム配置になるとき特に回転運動が発生しやすく、流行に対して並列に並んだときには逆に回転運動は発生しづらいことが流体力的に明らかになった。また、流向に対して2本の管がサイドバイサイド配置になるとき特に衝突運動が発生しやすく、タンデム配置においても回転運動と同時に衝突運動が発生することを流体力的に明らかになった。これら結果は(1)で示した挙動計測試験結果と同じ傾向であり、流場中の2本管の弾性挙動に対して流体力が支配的であることを示している。図7に流体力計測試験結果の一部として、VIVの発生の有無やその振動振幅の大小を決定するパラメータである付加慣性係数と線形減衰係数を示す。なお、図中では参考として1本だけの管が受ける流体力計測結果も併せて示している。回転運動時の2本管の受ける流体力を1本だけの管と比較すると、付加慣性係数、線形減衰係数ともに大きく変化していることが分かり、また上流側と下流側でも大きく異なっておることを実験的に示した。

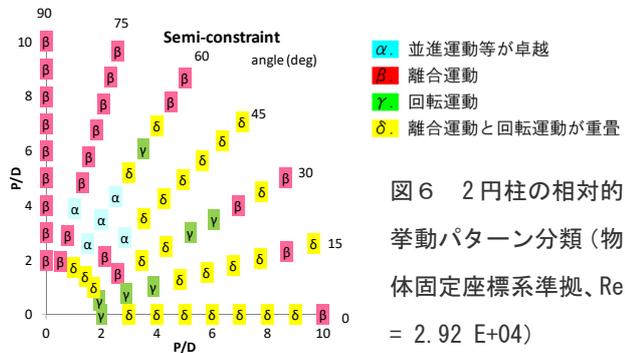


図6 2円柱の相対的挙動パターン分類 (物体固定座標系準拠、 $Re = 2.92 \times 10^4$ )

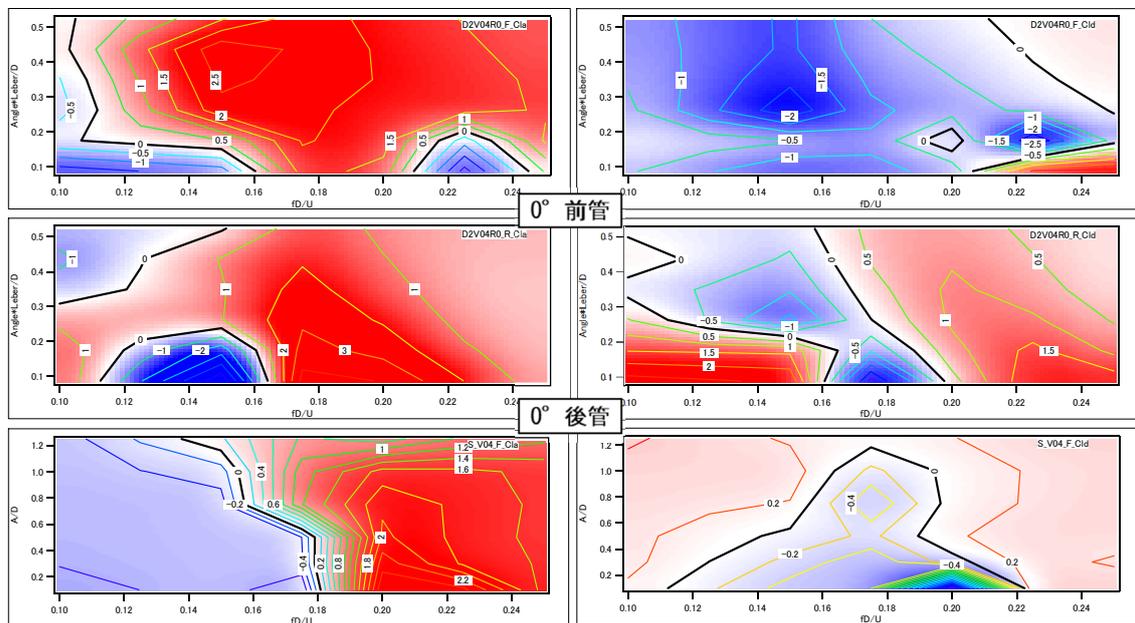


図7 流体力計測結果の一例、 $P/D=2$ 、 $Re = 2.92 \times 10^4$ 、左側：付加慣性係数、右側：線形減衰係数  
(上：2本円柱回転方向加振時の上流側計測結果、中：2本円柱回転方向加振時の下流側計測結果、下：1本だけの計測結果(参考値))

(3) 2本管挙動推定手法の開発

衝突運動と離合運動の流体力データベースを作成し、プログラム内の流体力データベースを更新し、これに併せて過年度の科研費研究によって得られた成果である並進運動の流体力データベースと回転運動および離合運動の流体力データベースを選択して適用するための挙動判別式を作成し、2本管の挙動推定プログラムに流体力データベース切り替えの機能を追加した。これら成果により、2本の管に発生する可能性がある①並進、②回転、③離合の3つすべての運動モードのカバーした流体力データベースを整備した。流体力データベースのイメージを図8に示す。このデータベースでは、挙動推定シミュレーションの進行に合わせて、その時刻における2本管が成す角度や振動振幅などのパラメータを基に適当な流体力の値を多次元内装によって算出する。

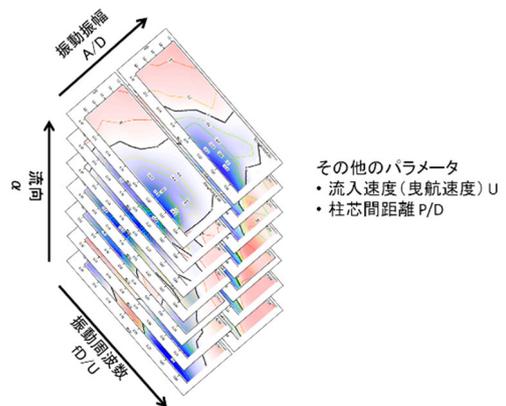


図8 流体力データベースのイメージ

次に上述の流体力データベースを用いて作成した挙動推定プログラムの計算結果の一例とし

て、タンデム配置の結果を図9に示す。計算では、2本管の振動が並進運動から開始して、振幅の発達と互いの位相情報を基に、運動が回転運動に変化しており、この結果は(1)で示した挙動計測実験の結果とも一致している。これにより2本管同士の距離や流向をパラメータとしたときに発生し得る3つの運動モードを判別し、単一の運動モードが卓越している場合はその振幅などを推定することが可能であることを示した。ただし、3つに分けた運動モードが重畳して発生することが挙動計測試験および流体力計測の結果から示されたため、この複数の運動モードが重畳した挙動を推定することが今後の課題となる。

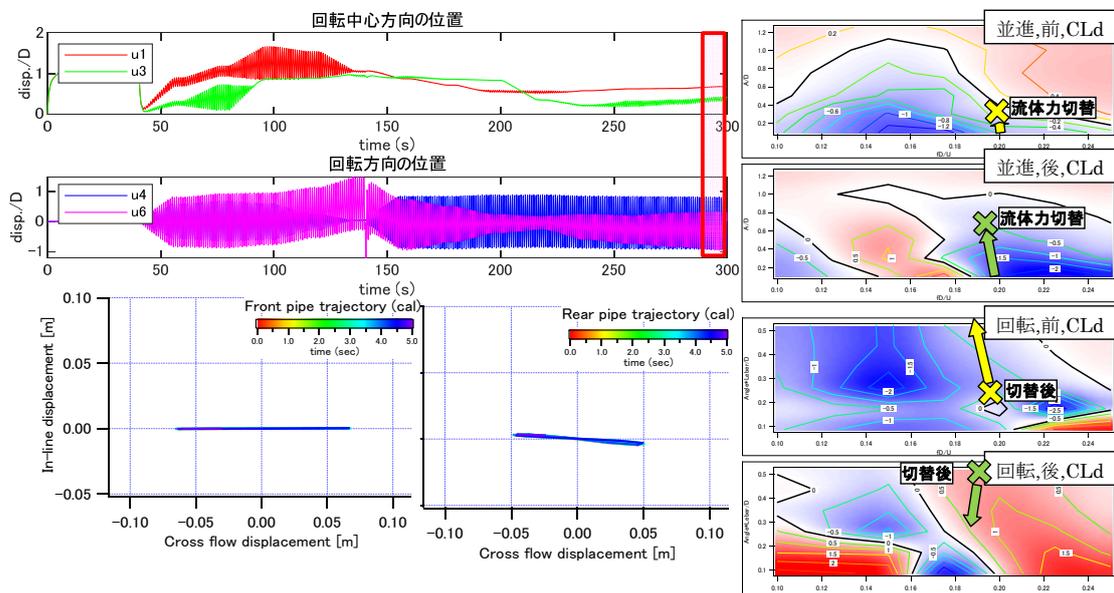


図9 挙動推定プログラムの計算結果 ( $P/D=3$ ,  $St=0.2$ ,  $\alpha=0^\circ$  から計算開始)

(左上図: 2本管の挙動の時系列データ、左下図: 2本管挙動の軌跡、右側: 計算で参照した流体力データベース (図中矢印は計算の進行とともに変動した流体力の参照値の変遷を示している))

<引用文献>

- 1) 総合海洋政策本部 海洋基本計画について  
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/kaiyou/kihonkeikaku/>
- 2) JOGMEC HP 「海底熱水鉱床開発計画第1期最終報告書」の取りまとめ  
[http://www.jogmec.go.jp/news/release/news\\_10\\_000021.html](http://www.jogmec.go.jp/news/release/news_10_000021.html)
- 3) JOGMEC HP 資源ライブラリ [http://www.jogmec.go.jp/library/contents9\\_02.html](http://www.jogmec.go.jp/library/contents9_02.html)
- 4) JSPS KAKENHI Grant Number 26289343  
<https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-26289343/>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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	和田 良太  (Wada Ryota)  (20724420)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・講師   (12601)	
研究分担者	尾崎 雅彦  (Ozaki Masahiko)  (30529706)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・特任教授   (12601)	
研究分担者	正信 聡太郎  (Masanobu Sotaro)  (80373413)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員   (82627)	