

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04610

研究課題名（和文）掘削データ融合によるインテリジェント掘削システムの開発

研究課題名（英文）Development of Intelligent Drilling System with Drilling Data Integrated Analysis

研究代表者

井上 朝哉（INOUE, Tomoya）

国立研究開発法人海洋研究開発機構・研究プラットフォーム運用開発部門・主任技術研究員

研究者番号：10359127

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,000,000円

研究成果の概要（和文）：地球深部探査船「ちきゅう」船上にて、掘削制御システムから掘削データを取得・伝送し、プログラム言語環境にて読み込むリアルタイム解析システムを構築した。一方で、掘削データを用いたドリルビット挙動、掘削地層特性、ドリルパイプに作用する応力の推算手法の構築を行った。そして、前述のシステムに組み入れて、科学掘削中などにデモンストレーションを行い、その有効性を確認した。ケーブル内蔵ドリルパイプ開発に向けて、シミュレーションおよび実験による多段式非接触信号電力同時伝送の基礎特性把握を行った。更に、実ドリルパイプにコイルを装備した実環境での伝送試験を実施し、実現性の評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海洋掘削において得られる限られた情報である掘削データの直接的な活用を図り、掘削データを活用したリアルタイム解析システムの基盤技術を創出したことは大きな意義をなす。その中で、船上掘削データから掘削地点の情報であるドリルビット挙動や掘削地層特性を示唆する情報の創出を図り、その可能性を得た。また、本研究で得た多段非接触信号電力同時伝送の基本特性は、本研究が対象としたケーブル内蔵ドリルパイプのみならず、他分野での活用が期待される。

研究成果の概要（英文）：We have developed a real-time analysis system integrated with drilling data acquired from the drilling control system on board the scientific drilling vessel “Chikyu”. On the other hand, we have established the methods to estimate the motions of drill bit, characteristics of drilling formation, and stress exerted on the drill pipe using the drilling data. And by incorporating it into the system described above, we demonstrated the real-time simulations during operations, and confirmed its effectiveness. To develop a drill pipe with built-in cable, we carried out simulations and fundamental experiments to understand the fundamental characteristics of multi-stage contactless signal and power simultaneous transmission. Furthermore, we conducted a preliminary experiment using full-scale actual drill pipe was equipped with a coil to observe the characteristics of multi-stage contactless signal and power simultaneous transmission in an actual operational environment.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：掘削データ融合解析 Stick-Slip 多段式非接触信号電力同時伝送

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

海洋掘削は、船上よりドリルパイプを降下し、その下部に付けた掘削刃であるドリルビットに適切な荷重を掛け、そして、船上にてドリルパイプ上端を回転させることで掘進する。つまり、ドリルビットを適切に回転させることが海洋掘削の第一義となる。このため、多岐に亘る外力下でのドリルパイプ強度推定やドリルビット挙動などの掘削状態の把握が重要となるが、本質的に重要な解析条件の設定が困難であるため、数値モデルでの表現が困難である。また、操業中にこれらの直接的な情報を得ることができないのが現状である。

掘削作業中に得られる船上掘削機器の作動データである掘削データを用いて、これらのドリルパイプに作用する応力や掘削状態に繋がる情報を得ることが、海洋掘削における事故防止や掘削効率低減に貢献できるものである。更に、ドリルビットの状態をより正確に知る方法の考案が望まれる。

2. 研究の目的

(1)本研究の第一の目的は、本研究の基盤となる船上掘削データ取得システムと掘削データを用いた解析システムの開発である。地球深部探査船「ちきゅう」船上にて、掘削制御システムから掘削データを取得し、リアルタイムで伝送する。そして、多様なプログラム言語環境で読み込み、リアルタイムの掘削データを入力とする掘削データ融合解析システムを開発する。

(2)本研究の第二の目的は、掘削データを活用しドリルビット挙動や掘削地層情報などの掘削状態の把握である。これは掘削効率の向上や抑留防止は勿論のこと、地層特性の把握という科学掘削の目的の一つを地層サンプル回収せずとも実現する可能性を示唆するものである。また、船上掘削データを元にしたドリルパイプに作用する外力の推算やドリルパイプの累積疲労を推算することで、ドリルパイプ破断事故を未然に防げる。

(3)本研究の第三の目的は、船上掘削データを用いた推算に加えて、ドリルパイプやドリルビットの状態をより正確に知るための基盤技術の検討である。その最も有効な手段は、通信ケーブルを内蔵した新たなドリルパイプ開発を行い、ドリルビットやドリルパイプにセンサーを付けて、リアルタイムで挙動データを得ることである。そこで、通信ケーブル内蔵ドリルパイプ開発に向けた、データ通信および電力伝送の基本特性の把握を行う。

3. 研究の方法

(1)「ちきゅう」船上の掘削制御システムは、各掘削機器の PLC(Programmable Logic Contriller)、およびこれらを統合的に管理する SDI PLC より構成されている。このシステムの中核となる SDI にアクセスし、掘削データの取得を行う。このため、セキュリティを考慮して OPC による仮想データサーバ構築を行い、そこからデータ取得を行うシステムの構築を行う。そして、取得した掘削データを UDP で伝送し、Matlab、C、Python などの複数のプログラム言語環境にて読み込めるインターフェイスを構築する。

(2)掘削データを用いた、ドリルパイプ強度評価および掘削状態把握の両面での解析モデルを構築する。前者は、ドリルパイプの最大応力および累積疲労の両面からの強度把握を図る。掘削作業中に生じる多岐に亘る応力を分類し、その量重による最大応力算出手法の検討を行う。そして、それらの各応力を、船上掘削データを用いて推算する手法を構築する。また、疲労強度の観点では、船体動揺を加味した応力の発現確率をもとにした累積疲労被害度算出手法の検討を実施し、船上掘削データから応力発現を推算する手法を構築する。

後者は、ドリルビット挙動および掘削地層状態の二つの面での把握を図る。ドリルパイプ上端に与えた観点の下端への伝搬解析によりドリルビット挙動を推算する。この際、掘削地層の摩擦特性が重要となる。そこで、掘削地層の摩擦特性の掘削データによる推算を行う。掘削データの一つである掘削トルクに着目する。掘削トルクは、掘削地点のトルクに加えて、孔壁や流体との摩擦トルクも含むため、これらを適切に評価し除去する手法の構築を行う。数値計算での推算のみならず、掘削データからの評価を目指し、掘削作業中にドリルビットを Bottom-Up させた掘削模擬など、作業方法を含めて手法を検討する。掘削データより推算した掘削地層の摩擦特性は、地層のせん断応力を与えるものであり、これは、科学掘削の目的の一つとなる。

その上で、(1)で開発したリアルタイムでの掘削データ融合解析システムに組み入れることで、リアルタイムでのドリルパイプ強度や掘削状態把握などのデモンストレーションを行う。

(3)石油掘削業界にてケーブル内蔵ドリルパイプ(Wired Drill Pipe)のコンセプトが考案されている。ドリルパイプは両端のネジである Tool Joint で繋がれるため、一貫したケーブルを配置することができず、Tool Joint の Pin 部先端と Box 部底に環状ケーブルを配置し、誘導電通を行う。このため、接続部にて減衰が生じるが、大深度掘削においては、数百段に及ぶ接続となるため、この減衰特性の把握が重要である。また、通信のみならず給電の可能性を図ることが期待さ

れる。そこで、基本特性として、多段式非接触伝送試験を行い、伝送特性（減衰特性）の把握を行う。この際、水中環境、鉄環境など、外周環境による影響の考察を行う。そして、電力と通信の同時伝送試験を行い、その基本特性を得る。最後に、実際のドリルパイプを加工し、コイルを配置して多段非接触信号電力同時伝送試験を実施し、基本特性を得る。

4. 研究成果

(1)地球深部探査船「ちきゅう」において、掘削機器の統合的制御・監視を行う装置から、リアルタイムで船上掘削データを取得する装置の構築を行った。掘削機器は各々、PLC(Programmable Logic Controller) を有しており、更に、それらを統合的に制御・管理する上位制御 PLC がある。運用安全面でアクセス領域に懸念が生じるため、仮想サーバを構築し、それを介して、上位制御 PLC のアクセスを行う手法を適用した。サーバ負荷を鑑みて、取得データ種類は250程度、サンプリングレートは1Hzとした。

掘削データの事後活用のみでなく、リアルタイムでの解析を行うことを一つの目的としているため、掘削データをUDPにて伝送するシステムを構築した。そして、伝送された掘削データを、代表的なプログラム言語であるC言語、Python、およびMatlabにて読み込むインターフェイスソフトを作成し、リアルタイム解析システムを構築した。

(2)掘削データを用いたドリルパイプ強度監視手法の構築に向けて、最大応力および累積疲労の観点からのドリルパイプ強度検討手法の検討を行った。最大応力の観点では、作業中に生じる多岐に亘る応力を分類し、その畳重による最大応力算出手法の検討を行った。ドリルパイプに作用する外力は、静的軸応力、変動軸応力、曲げ応力、捻じり応力、Hoop Stress などである。船上掘削データのうち吊り荷重から静的軸応力と変動軸応力が直接得られ、掘削トルクから捻じり応力が得られる。一方、曲げ応力は、船体動揺やライザー角データと、それらをパラメータとして事前解析を行う曲げ応力データベースを用いて推算する。更に、Hoop Stress は、ある作業時のみに作用するため、その作業を行う機器の作動情報をもとに推算する。

疲労強度の観点では、船体動揺を加味した、ライザー掘削時のライザーとドリルパイプの接触解析による応力発現による累積疲労被害度算出手法を構築した。船体動揺やライザー角度は掘削データに含まれており、FEAによる曲げ応力データベースを構築することで、応力発現がえら得る。こうして、船上掘削データをもとにした最大応力推算および累積疲労推算の両面を備えたドリルパイプ強度監視システムを構築し、船上でデモンストレーション実行を行った。

ドリルビット挙動については、船上掘削データを境界条件とした回転振動伝搬によるドリルビット回転挙動の定式化を行った。ドリルストリングが全長に亘り均一の断面および物性をもつと仮定し、ドリルストリング長を L 、断面二次モーメントを I 、密度を ρ 、および剪断弾性係数 G とし、長さ、時間、およびトルクで無次元化すると、変位角 φ の支配方程式を得る。そして、ダランベールの解法を用い、ドリルストリング上端と下端の境界条件を課し、 $\omega(t)$ を $\partial\beta(t)/\partial t$ と定義すると、次式が得られる。

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{d\omega(t-2)}{dt} - \frac{d\Omega(t-1)}{dt} + \frac{T(\omega(t) + \omega(t-2) + \Omega(t-1)) - \omega(t) - \omega(t-2) + \Omega(t-1)}{J}$$

これは、遅延を伴う常微分方程式であり遅延微分方程式の一種であり、初期値問題ではなく、初期履歴問題となる。その中でも導関数の遅延も伴う特殊型のため、中立型遅延微分方程式と呼ばれる。ここで、上端の回転速度は掘削データより得られるが、摩擦トルクを与える T が未知であり、本式を解くためには情報が不足する。そこで、ドリルパイプに回転とトルクを与える掘削機器のトルクを用いて、掘削地層の摩擦特性推算を試みた。このトルクには、掘削地層とドリルビットの摩擦トルクに加えて、ドリルパイプと掘削孔壁、ライザー、および流体との摩擦トルクも含む。そこで、掘削作業中にドリルビットを Bottom-Up させた掘削模擬を行うことで、これらの摩擦トルクの除去を試みた。図1に、ある科学掘削における、船上で計測された掘削トルクと掘削面での摩擦トルクを示す¹⁾。

模型試験結果による検証を行い、数理モデルの有効性を確認するとともに、摩擦トルクの非線形性組入、ドリルパイプと掘削孔壁などとの摩擦特性の把握など、ドリルビット部の未定境界

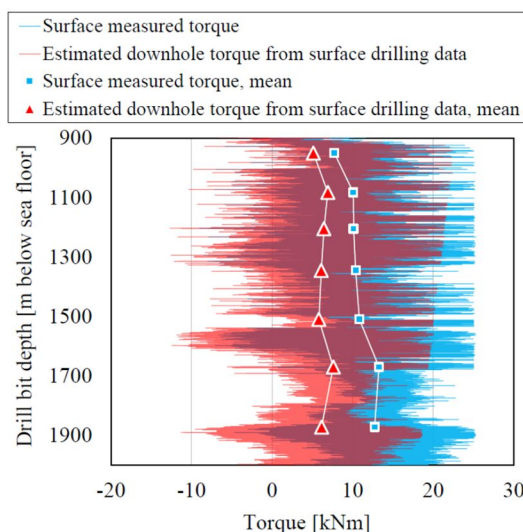


図1. 船上掘削データから推算した掘削地層摩擦トルク特性¹⁾

条件の同定における更なる課題を認めた。また、この掘削地層の摩擦特性は、科学掘削の目的の一つである掘削地層のせん断応力を与えるものであり、これまで得ることが出来なかった有益な情報の創出と言える。そこで、掘削地層推算プログラムを展開して、掘削データをリアルタイム入力データとした解析プログラムを開発した。そして、(1)で開発を行ったリアルタイム解析システムに組み入れ、掘削中にリアルタイムで掘削地層摩擦特性を得られるシステムを構築し、科学掘削航海中にデモンストレーション実行を行った¹⁾。
 更に、別途開発を進めてきた掘削地質予測プログラムなどを組み入れて、同様に科学掘削航海中に、リアルタイムでのデモンストレーションを行う²⁾など、掘削データを活用したリアルタイム解析システムの基盤技術を創出し、その展開を図った。

(3)ケーブル内蔵ドリルパイプにおける問題点の一つは、数百段に及ぶ非接触面での伝送である。図2の左図に示すような、コイルおよびコンデンサから構成される共振器結合を用いた結合部が多段で構成される伝送路伝送路においては、各結合部のインピーダンスのばらつきが伝送効率に影響を与える。従って、高い伝送効率を有する非接触信号伝送を行うために、各共振器結合のインピーダンスを精度高く保つ必要があるが非現実的である。そこで、伝送路を図2の右図のように同軸線路に結合部を周期的に装荷した構造を考える。これにより、接続点における構造を共振器結合ではなく、単にシリーズのインダクタンスと見なす事で全体として周期的に装荷された同軸線路が構成され、結合部のインピーダンスのばらつきに対して敏感であった伝送特性が緩和され、多段の結合部から成る伝送路の実現が期待できる。

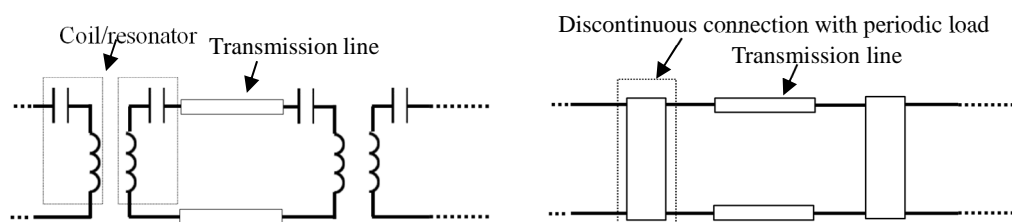


図2. 多段式非接触通信（左：共振器結合，右：周期的数集荷構造）³⁾

第二の困難さは、海水と鋼鉄に囲まれている使用環境である。海水によって電界が影響を受け、鉄の大きな透磁率と導電率、および大きな損失係数により磁界が影響を受け、非接触給電特性の著しい低下が生じる。そこで、銅膜と導電率が極めて小さいフェライト層の被覆により、損失の抑制を図る。これにより、電磁界はほとんど損失を受けずにフェライト中に進入することができる。とりわけ、磁界はその高透磁率によってフェライト中に閉じ込められ、フェライト面に平行に走り、銅層まで到達しないので、銅表面を流れる電流による損失が低減できる。
 こうして考案した伝送システムを対象に、電磁界シミュレーションを行い、伝送基本特性を推算した。そして、数段での非接触通信試験を行い、シミュレーションの検証を行った。更に、鉄の透磁率と損失係数に起因する非接触通信特性低下、および海水環境において問題となる塩化ナトリウムのイオン伝導による電界への影響に起因する性能低下の影響の考察を行った³⁾。

得られた非接触通信伝送基本特性をもとに、信号に加えて電力も同時に伝送する、非接触信号電力同時伝送への展開を進めた。電力および信号の同時伝送では、各々を分離するため、ダイプレクサを用いた。非接触通信試験と同様に、電磁界シミュレーションおよび数段での基本試験を実施し、基本特性を得た。
 最終段階として、実ドリルパイプを用いた特性試験を実施した。実管ドリルパイプのツールジョイントのピン頂部およびボックス底部に、コイルを装備する溝やケーブル路となる孔を設ける、ガンドリル加工を行った試験用ドリルパイプを製作し、ガンドリル加工ドリルパイプの溝



図3. Tool joint の Pin 部に設けたガンドリル加工へのコイル装着⁴⁾

に装着できるコイルを作成した。コイルを格納するケースをアルミで製作し、対のコイルと相対する面以外のアルミケース壁面には、フェライト層を添付した。そして、図 3 に示す通り、コイルをガンドリル加工ドリルパイプに装着して、ドリルパイプの接続ねじである Tool Joint を定格トルクにて嵌合し、信号または電力のみの伝送試験、および、信号電力同時伝送試験を実施した。図 4 に、信号または電力の単一の伝送特性試験結果およびシミュレーション結果を示す。実線で示された試験結果および破線で示されたシミュレーション結果の傾向は大凡一致しており、提案した理論が妥当なものであることがわかる。この結果を用いて、大深度掘削時の数百段に及び多段式非接触信号伝送および信号電力同時伝送特性、並びに、実ドリルパイプに装備する上での工学的知見を得て、実現性の評価を行うとともに課題の抽出を行った⁴⁾。

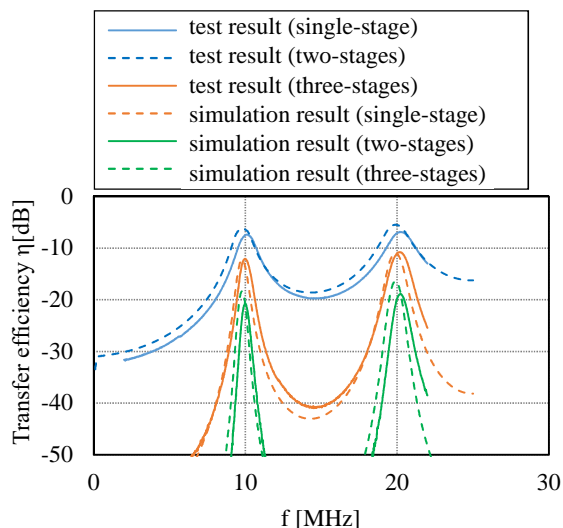


図 4. 実管ドリルパイプを用いた非接触伝送試験とシミュレーション結果⁴⁾

<参考文献>

- 1) Tomoya Inoue, et al., : Attempt of Lithology Prediction from Surface Drilling Data with Machine Learning for Japan Trench Fast Drilling Program, SPE/EAGE Europec, 2019.
- 2) 井上 朝哉, 石渡 隼也, 田原淳一郎: 機械学習を用いたリアルタイム掘削状態識別の試行, 日本船舶海洋工学会秋季講演会論文集, 2019.
- 3) 井上 朝哉, 石渡 隼也, 栗井 郁雄: 通信給電機能付きドリルパイプの開発に向けた多段式非接触給信号伝送技術の基礎研究, 日本船舶海洋工学会秋季講演会論文集, 2018.
- 4) 井上 朝哉, 石渡 隼也, 栗井 郁雄: 通信給電機能付きドリルパイプの多段非接触信号電力同時伝送に関する検討, 日本船舶海洋工学会秋季講演会論文集, 2019.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kaneko Tatsuya, Wada Ryota, Ozaki Masahiko, Inoue Tomoya	4. 巻 29
2. 論文標題 WOB Estimation during Ultra-deep Ocean Drilling by Use of Recurrent Neural Networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers	6. 最初と最後の頁 123 ~ 133
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2534/jjasnaoe.29.123	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 Inoue Tomoya, Sugiyama Daisuke, Shimotomai Takayuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Machine Learning Approaches to Anomaly Detection of Top Drive Torque Causing Drill Pipe Failure	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/OMAE2018-77882	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 Tomoya Inoue, Junya Ishiwata, Ryota Wada, Junichiro Tahara	4. 巻 -
2. 論文標題 Attempt of a Real-Time Drilling State Identification with Machine Learning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering	6. 最初と最後の頁 -
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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 平岩達也, 石崎俊雄, 井上朝哉, 石渡隼也, 粟井 郁雄
2. 発表標題 周期回路理論に基づいた海底掘削ドリルへの非接触通信システム
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井上朝哉
2. 発表標題 機械学習による掘削トルクの異常検知の試み
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会秋季講演会論文集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 INOUE TOMOYA, ISHIWATA JUNYA AWAI IKUO
2. 発表標題 Fundamental study of multi-stage contactless power transfer applying to drilling operation
3. 学会等名 MTS/IEEE Oceans and Techno-Ocean (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井上 朝哉, 粟井 郁雄, 石渡 隼也
2. 発表標題 通信給電機能付きドリルパイプの開発に向けた水中非接触給電特性の基礎的検討
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Tomoya Inoue, Ryuta Tanaka, Junya Ishiwata
2. 発表標題 Attempt of Lithology Prediction from Surface Drilling Data and Machine Learning for Scientific Drilling Programs
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2019年大会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上 朝哉, 石渡 隼也, 田原 淳一郎
2. 発表標題 機械学習を用いたリアルタイム掘削状態識別の試行
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会秋季講演会論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上 朝哉, 石渡 隼也, 粟井 郁雄
2. 発表標題 通信給電機能付きドリルパイプの多段非接触信号電力同時伝送に関する検討
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会秋季講演会論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上 朝哉, 石渡 隼也, 粟井 郁雄, 平岩 達也
2. 発表標題 通信給電機能付きドリルパイプの開発に向けた多段式非接触給信号伝送技術の基礎研究
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会秋季講演会論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomoya Inoue, Ryuta Tanaka, Junya Ishiwata
2. 発表標題 Attempt of Lithology Prediction from Surface Drilling Data with Machine Learning for Japan Trench Fast Drilling Program
3. 学会等名 SPE/EAGE EUROPEC (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 給電装置	発明者 井上朝哉, 石渡隼也, 粟井郁雄	権利者 株式会社リュー テック, 海洋研 究開発機構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2017-040772	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 ドリルパイプ多段接続体	発明者 粟井郁雄, 井上朝 哉, 石渡隼也	権利者 株式会社リュー テック, 海洋研 究開発機構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-032395	出願年 2020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	田原 淳一郎 (Tahara Junichiro) (30280366)	東京海洋大学・学術研究院・准教授 (12614)	