

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03491

研究課題名（和文）海底掘削用ドリルパイプの実海域動的挙動推定法の開発と実機データによる検証

研究課題名（英文）Estimation of dynamic behavior of drill pipe for scientific drilling and its validation using measured data in actual drilling operation

研究代表者

勝井 辰博（Katsui, Tokihiro）

神戸大学・海洋底探査センター・教授

研究者番号：80343416

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 7,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、実海域での海底科学掘削用ドリルパイプの動的挙動を推定する手法を開発することを目的としたものである。ドリルパイプの振動に起因するドリルビット部の大規模回転変動を表すStick-Slip現象とマグナス効果の影響で海流中で回転するドリルパイプに大規模な曲げ変形が発生する現象に着目し、Stick-Slipについては振動方程式に基づいて導かれた中立型遅延微分方程式の数値解法を用い、マグナス効果を考慮したドリルパイプの曲げ変形については、FEMの一種である絶対接点座標法を用いて求めた。得られた結果と実機の計測結果を比較したところ妥当な精度で一致が見られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

長大管の振動の問題は海底掘削のみならず、陸上での掘削においても問題となる現象である。この問題の数値解法における難点は掘削面での境界条件が不定となるため、従来法での求解がでないことにある。本研究では計測可能な上端回転トルク、船体動揺データなどから合理的に掘削面での境界条件を定めて数値解を求め、計測結果と妥当な一致をみている。NDDEを解くこの手法では初期履歴条件を設定する必要があるが、安定的な数値解を得るための初期履歴の与え方についても考察を行っている。また、マグナス効果による大規模曲げ変形についても実機スケールで推定可能な手法を示しており、海底科学掘削の効率的運用に資する。

研究成果の概要（英文）：The Stick-Slip and large bending deformation due to Magnus effect are troublesome problems which happens in scientific drilling. In order to clarify the mechanism of Stick-Slip and large deformation, it is necessary to develop a reliable numerical model to estimate drill pipe motion for various drilling conditions. Stick-Slip was estimated using a numerical procedure to solve NDDE (Neutral Delay Differential Equation) and large bending deformation due to Magnus effect was estimated using ANCF (Absolute Nodal Coordinate Formulation). The boundary condition at the drill bit part for NDDE equation is estimated from measured top drive torque and calculated Stick-Slip motion was agreed well with measured data of actual drilling. On the other hand, the hydrodynamic forces on drill pipe for calculating bending deformation of the drill pipe are estimated from model experiments and CFD. The estimated bending deformation of the actual drill pipe varied depending on the ocean current conditions.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：海底科学掘削 実海域データ ドリルパイプ Stick-Slip マグナス効果 中立型遅延微分方程式 絶対接点座標法

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

海底科学掘削は海底下の地質学的な調査を目的として実施される。海底下を掘って円筒状のパイプに抜き取った地質試料をコア試料と呼び、これを解析することによって巨大地震・津波の発生メカニズムの解明、海底下に生息する微生物の調査、過去の地球環境を探る研究などが進められている。将来的にはマントル掘削を目指しており、そのための技術開発が継続的に行われている。コア試料の取得にあたって重要なことは品質の良いコア、すなわち不連続や崩れのないコアを取得することである。しかしながら、最大で 10,000m にもおよぶ長大なドリルパイプは相対的な剛性が低下するため、大規模な伸縮、曲げ変形、捩じり振動が発生することが分かっている。このため掘削条件によってはドリルパイプが破損する危険性が生じたり、品質の良いコアの採取が困難になる場合がある。海底科学掘削には巨額の費用が必要となるため、できる限り効率的な掘削が求められることから、上記のような大変形や振動問題を事前、あるいは掘削中にいち早くに把握し、掘削の失敗がないように操業することが求められる。しかしながら、船上では掘削の状態をリアルタイムでモニタリングすることが通常は困難であるため、シミュレーション等によってドリルパイプの動的挙動を把握することが求められていた。

2. 研究の目的

本研究ではドリルパイプの動的挙動としてパイプの捩じり振動に起因するドリルビットの回転速度の大規模変動を表す **Stick-Slip** とマグナス効果に起因するドリルパイプの大規模曲げ変形の 2 つに着目し、これら予測するための数値シミュレーション法の開発を目的としている。この手法では実際の掘削時に常時計測が可能な船上データを援用することによって予測精度を高めるとともに、開発されたシミュレーション法の推定結果とドリルパイプ実機を用いて実海域における掘削時に計測されたデータとの比較を行うことによって、シミュレーション法の有用性を検証する。

3. 研究の方法

(1) ドリルパイプに発生する **Stick-Slip** 現象の数値解析法

**Stick-Slip** 現象の解析の基礎となるのは(1)式に示す梁の捩じり振動方程式である。

$$\frac{\partial^2 \phi(z, t)}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \phi(z, t)}{\partial z^2} \quad (1)$$

ドリルパイプの長さは  $L$  [m]、密度は  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]、断面2次モーメント  $I$  [m<sup>4</sup>]、せん断剛性  $G$  [Pa] とし、(1)式はすでに長さ  $L$ 、振動伝播速度  $c = (GI/\rho)^{0.5}$  [m/s] と周期  $T = L/c$  [sec] で無次元化されている。ドリルパイプの長手方向は  $z$  軸としている。ドリルパイプ上端と下端の境界条件は(2)および(3)式となる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t}(0, t) = \Omega(t) \quad (2)$$

$$J \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}(L, t) = - \frac{\partial \phi}{\partial z}(L, t) + T_1 \quad (3)$$

(2)式は上端回転数が与えられることを、(3)式は下端において慣性モーメント  $J$  のドリルビットが海底からの摩擦トルク  $T_1$  とパイプからの捩じりトルクによって回転することを表している。(1)式の偏微分方程式は一般解が知られており、任意関数を  $\alpha$  および  $\beta$  を用いて(4)式のように書くことができるから、

$$\phi(z, t) = \alpha(t - z) + \beta(t + z - 1) \quad (4)$$

最終的には(3)式に示した中立型遅延微分方程式を解く問題に帰着できる。

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{d\omega(t-2)}{dt} - \frac{d\Omega(t)}{dt} + \frac{T_1 - \omega(t) - \omega(t-2) + \Omega(t-1)}{J} \quad (5)$$

なお関数  $\omega$  は  $\partial\beta(t)/\partial t$  と定義されており、(3)式を解くことで求めるべき解  $\phi$  を求めることができる。(5)式を解くためには海底からドリルビットが受ける摩擦トルクを決める必要がある。これについては、摩擦トルクがドリルビットの回転速度  $\dot{\phi}$  に依存する **Balanov** モデル(6)式が知られている。しかし、模型スケールのドリルパイプでは(6)式はよく機能するものの、実機スケールでは同調が発生してドリルビットの回転振幅が課題となってしまうことが分かった。加えて、(6)式のモデルは4つのモデルパラメタによって定義されており、掘削条件に応じてこれらをどのように定めるのかという新たな問題を生じることも難点となることが分かった。

$$T_1(\xi) = - \frac{C\xi}{\sqrt{\xi^2 + \epsilon^2}} \left( 1 + \text{hexp} \left( - \frac{\sqrt{\xi^2 + \epsilon^2}}{\Delta} \right) \right) \quad (6)$$

そこで、摩擦トルクとして(7)式に示すような周期関数を用いることを試みた。トルク平均、変動振幅、変動周期の3つをモデルパラメタとする単純な関数であるが、実海域掘削時に計測され

る上端回転トルク、船体の動揺振幅、周期などとの直接的相関のあるパラメータを用いることにより、計測データベースのパラメータ設定が簡単になることが分かった。また、トルクの変動周期がドリルパイプの捩じり振動の固有周期に一致しなければ数値解が同調することはなく安定的な数値解析も可能であることが分かった。

$$T_1(t) = -T_{Av} + T_{Am}\sin(\omega_T t) \quad (7)$$

## (2) マグナス効果によるドリルパイプの大変形解析

ドリルパイプの変形シミュレーションには絶対節点座標法(ANCF)を用いた。全体座標系  $O-XYZ$  におかれた節点を  $A, B$  とする長さ  $l$  の梁要素に、要素座標系  $o-xyz$  を設定する。絶対座標系の原点から要素内の任意点  $P$  までの位置ベクトルは次式となる。ここで  $\mathbf{S}$  は形状関数、 $\mathbf{e}$  は梁要素両端の節点座標ベクトルである。

$$\mathbf{r} = \mathbf{S}\mathbf{e} \quad (8)$$

梁要素の密度を  $\rho$ 、体積を  $V$  とすると(8)式より運動エネルギー  $T$  は次式で示される。ここで  $\mathbf{M}$  は質量マトリックスである。

$$T = \frac{1}{2} \int_V \rho \dot{\mathbf{r}}^T \dot{\mathbf{r}} dV = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{e}}^T \left( \int_V \rho \mathbf{S}^T \mathbf{S} dV \right) \dot{\mathbf{e}} = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{e}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{e}} \quad (9)$$

続いて弾性力を考える。ひずみエネルギー  $U$  は次式で表される。

$$U = \frac{1}{2} \int_0^l \{EA\varepsilon_l^2 + EI\kappa^2\} dx \quad (10)$$

ここで  $E, A, I, \varepsilon_l, \kappa$  をそれぞれヤング率、梁の断面積、断面二次モーメント、軸ひずみ及び曲率とする。(10)式を節点座標  $\mathbf{e}$  で微分して、弾性力  $\mathbf{Q}_k$  を得る。

$$\mathbf{Q}_k = \frac{\partial U}{\partial \mathbf{e}} = \mathbf{K}\mathbf{e} \quad (11)$$

ここで  $\mathbf{K}$  は剛性マトリックスである。以上より、ドリルパイプの梁要素の運動方程式は次式で表される。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{e}} = \mathbf{Q}_e - \mathbf{Q}_k \quad (12)$$

ここで、 $\mathbf{Q}_e$  は重力、浮力、流体力を考慮した外力項である。本研究では陰解法であるニューマーク  $\beta$  法を用いて(12)式の運動方程式を解く。

流体力には回転円柱に作用する抗力  $F_D$  と揚力  $F_L$  を設定する。詳細は後述とするが、抗力係数  $C_D$  と揚力係数  $C_L$  は模型実験の計測値から定義し、回転比  $\alpha (= \omega/u)$  に応じて決定することにした。ここで  $\omega$  は回転速度、 $u$  は流体速度である。また、実験の計測値にない回転比の  $C_D$  と  $C_L$  は CFD の結果を使用している。ここで、 $\mathbf{Q}_e$  は重力、浮力、流体力を考慮した外力項である。本研究では陰解法であるニューマーク  $\beta$  法を用いて式(12)の運動方程式を解く。流体力には回転円柱に作用する抗力  $F_D$  と揚力  $F_L$  を設定する。詳細は後述とするが、抗力係数  $C_D$  と揚力係数  $C_L$  は模型実験の計測値から定義し、回転比  $\alpha (= \omega/u)$  に応じて決定することにした。ここで  $\omega$  は回転速度、 $u$  は流体速度である。また、実験の計測値にない回転比の  $C_D$  と  $C_L$  は CFD の結果を使用している。

## 4. 研究成果

### (1) Stick-Slip の数値解析結果と実海域での計測結果の比較

ドリルビット部に海底面から作用する摩擦トルクのモデルパラメータの設定にあたっては、船上で観測が可能なドリルパイプの上端回転トルクから決定している。Fig.1は海洋研究開発機構が所有する地球深部探査船「ちきゅう」の実海域掘削時に計測したドリルビット部の回転数とドリルパイプの上端回転トルクである。ともに大きく変動していることがわかる。Fig.1を見てもわかるように、ドリルパイプ上端回転数が139rpmであるのに対してドリルビットの回転数は50rpmから200rpmの間で変動しており、いわゆるStick-Slipが発生している。そのときの上端回転トルクは同様に5kNmから20kNmの間で大きく変動している。ドリルビット部の回転数のサンプリング周期は30-45secと大きいために精度のよい周波数解析は難しいが、上端回転トルクの

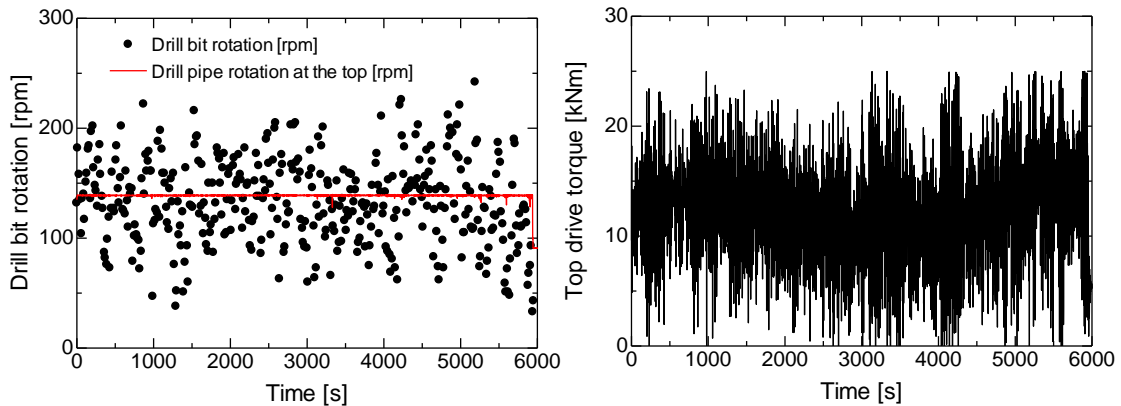


Fig. 1 The measured drill bit rotation and top drive torque during an actual drilling operation of Chikyu.

サンプリング周期は1secであるため十分な精度での周波数解析が可能である。その結果をFig.2に示している。これによると上端回転トルクのFFT解析結果には2つのピークがあることがわかる。1つ目の周期は6-7秒付近にもう1つは15秒付近にある。

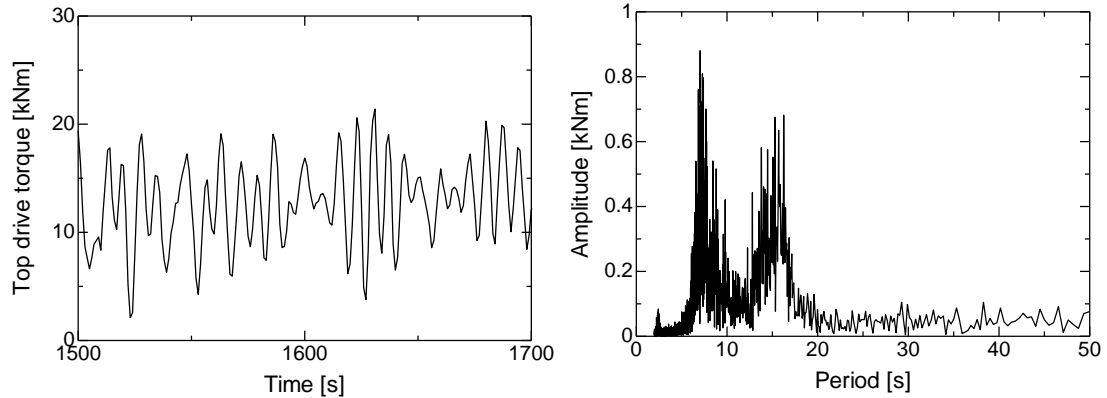


Fig. 2 The measured top drive torque and FFT result.

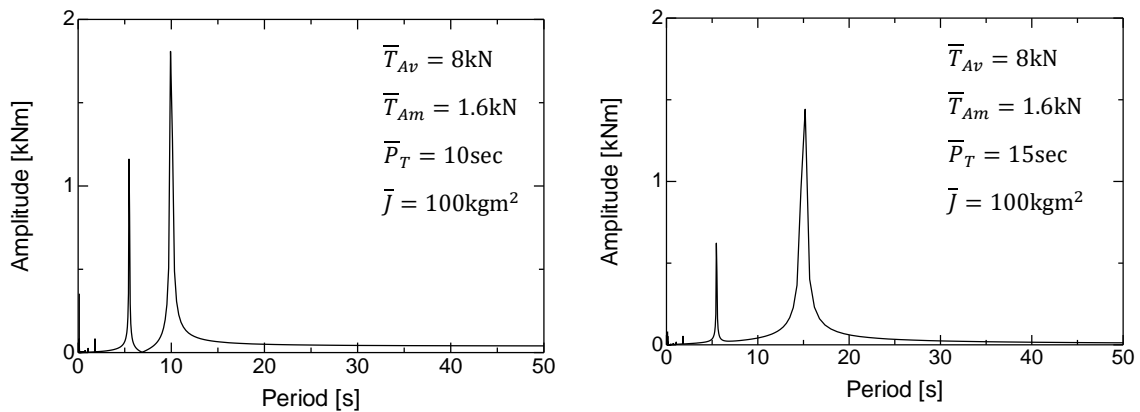


Fig. 3 FFT results of calculated top drive torque.

Fig.1の掘削条件と同条件で実施した数値解析結果を示す。Fig.3はドリルパイプ上端回転トルクの計算結果である。右の図はドリルビットに作用する摩擦トルクの変動周期を上端回転トルクの計測結果に見られた2つのピーク周期のうち大きい方と同じ15秒に設定したときの計算結果、左は10秒に設定したときの計算結果である。これを見ると観測結果と同様に上端回転トルクの計算結果は2つのピーク周期をもち、そのうちの1つはドリルビットに作用する摩擦トルクの変動周期として与えたものに一致する。一方、計算結果に表れるもう1つのピーク周期は、与える摩擦トルクの変動周期に関わらず一定で、概ね6秒付近にピーク周期がある。このことは、6秒付近のピーク周期はドリルパイプが持つ固有周期と考えられ、その周期は計測結果と概ね一致している。したがって、ドリルビットに作用する摩擦トルクの周期としては、観測されたトップドライブトルクのピーク周期からドリルパイプの固有周期ではないものを選べばよいことが分かる。また、平均トルクや変動振幅についてはドリルパイプ長さや観測される上端回転トルクの変動周期から海水影響分を推定して除去することで与えることができる。

Fig.4には上記の条件のもとで計算された、ドリルビットの回転数の計算結果を黒い実線示している。同時にドリルパイプの上端回転トルクについても赤の実線で示している。この計算結果と、計測結果であるFig.1を比較すると、ドリルビットの回転数は概ね100-200rpmで変動しており、比較的良好に一致していることがわかる。

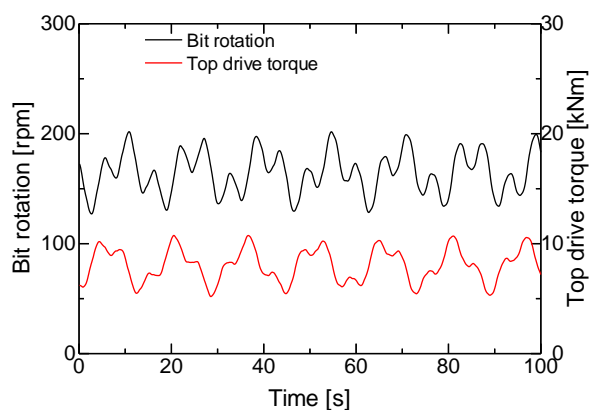


Fig.4 Calculated drill bit rotation and top drive torque.

## (2)ドリルパイプ模型を用いた変形計測試験と ANCF シミュレーション結果の比較

下端を拘束した条件でドリルパイプ模型の大変形を計測するため、大阪大学の曳航水槽にて 3.155 [m]のテフロンパイプを使用して試験を実施した。曳引車にドリルパイプ模型を取り付けて曳航し、流体とドリルパイプの間に相対速度を発生させることで模型に抗力と揚力が作用する。ドリルパイプ模型の変

形を回流水槽実験と同様にカメラを 2 台設置して 3 次元的に解析する。また、模型の下端は拘束しているため、拘束部で力が作用し検力計では模型に作用する流体力を正確に測定できない。そこで、過去にドリルパイプ模型にアルミパイプを使用して、下端を拘束せずに模型実験した際の測定結果を用いることにした。測定結果の  $C_D$  と  $C_L$  を回転比  $\alpha$  でまとめた結果から両者を推定する近似線を作成し、回転比に応じて決定した。

ANCF によって計算されたドリルパイプ模型の変形と計測結果の比較(流速 0.3[m/s], 回転数 350[rpm])を XZ 平面, YZ 平面図で Fig.5 に示す。模型長が長尺のためドリルパイプ模型の下端の水平面内運動を拘束しても変形がよく確認できる。また、数値シミュレーション結果が計測結果を妥当な

精度で再現していることがわかる。変形のない回転円柱模型を用いて計測した抗力係数と揚力係数を回転比の関数としてまとめ、各実験条件でドリルパイプに作用する流体力を推定しても本手法を用いてドリルパイプ模型の変形を精度よく計算することができることが分かった。

### (3)実機ドリルパイプの曲げ変形シミュレーション

掘削中のドリルパイプの変形を予測するために実機サイズのシミュレーション結果を示す。実海域の海流データとしては JCOPE-T 海洋モデリングシステムから四国南部(北緯 32° 22.0095'E, 134° 57.9930'E)の海流データを取得し、これを用いた。海流データより深度による流速分布と真北を 0 [度]とした流れの方向分布を抽出してシミュレーションに条件として入力した。

曳航水槽実験で用いた  $C_D$ 、 $C_L$  では回転比が 0 から 3 程度になっている。しかし、水深の深い実海域では海流の速度が小さいために回転比が 30 程度になることがわかった。そこで、過去に行われた一様流中に置かれた回転円筒に作用する流体力の CFD 解析結果を援用して各回転比に対する  $C_D$ 、 $C_L$  を求めるための近似曲線を求めた。

ドリルパイプの長さを 3,000 [m]、内径を 0.113 [m]、外径を 0.139 [m]、密度を 7840 [kg/m<sup>3</sup>]、回転数を 120 [rpm]で x 方向からみて時計回りに回転していると設定した。X 方向を流体の流れ方向 0 度、Y 方向を 90 度に合わせたシミュレーション結果を Fig.6 に示す。深さ 2000 [m]までは約 80 度の方向に抗力が作用し、マグナス効果で発生する揚力によってもドリルパイプが大きく変形することが Y 方向の変位からわかる。このように、ドリルパイプの変形は長手方向に複雑な形状となるため、回転によって破壊や疲労強度の低下等の問題が発生することが予測される。先に示した Stick-Slip の発生予測とも併せて、本研究で示したドリルパイプの動的挙動推定法を用いることで、掘削条件、モニタリングデータなどから効率的な海底科学掘削の運用に資することが可能であると考えられる。

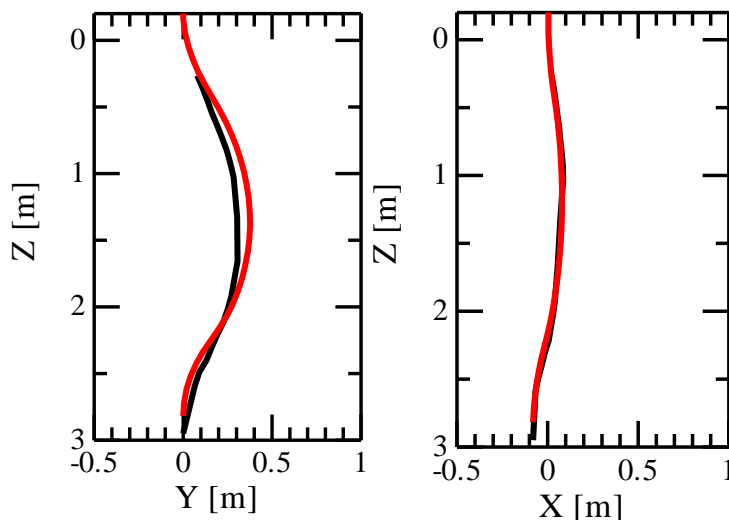


Fig.5 Comparison of drill pipe model deformation. (Y:Lift Direc., X:Drag Direc.)

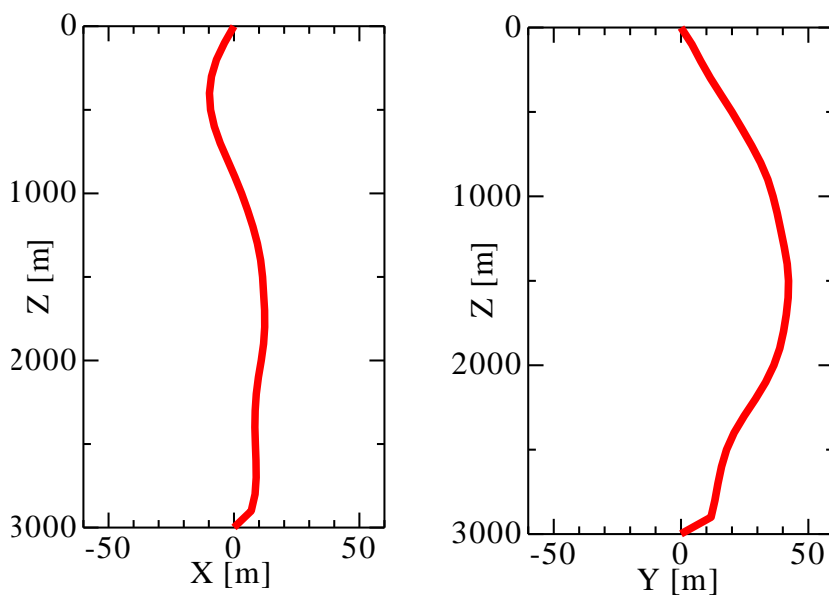


Fig.6 Calculated deformation of 3,000m size drill pipe rotating 120rpm under ocean current which is shown in Fig. 10.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3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<br>Tokihiko Katsui, Tomoya Inoue, Daisuke Sogawa, Yusuke Notani   | 4. 巻<br>-            |
| 2. 論文標題<br>The Characteristics of Numerical Solution of NDDE to Solve the Drill Pipe Stick-Slip                                    | 5. 発行年<br>2019年      |
| 3. 雑誌名<br>Proceedings of the ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2019 (Accepted) | 6. 最初と最後の頁<br>CD-ROM |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>なし  | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>-            |

|  |                      |
|--|----------------------|
| 1. 著者名<br>Tomoya Inoue, Hiroyoshi Suzuki, Tokihiko Katsui, Keita Tsuchiya, Yusuke Notani   | 4. 巻<br>-            |
| 2. 論文標題<br>Experimental and Numerical Study of Motion of Rotating Drill Pipe owing to Magnus Effect                                | 5. 発行年<br>2019年      |
| 3. 雑誌名<br>Proceedings of the ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2019 (Accepted) | 6. 最初と最後の頁<br>CD-ROM |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>なし  | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>-            |

|   |                      |
|---|----------------------|
| 1. 著者名<br>鈴木 博善, 土屋 慶太, 井上 朝哉, 勝井 辰博, 千賀 英敬, 永石 雄飛, 野谷 勇介 | 4. 巻<br>-            |
| 2. 論文標題<br>ドリルパイプの水中挙動に関する実験的・数値的研究                       | 5. 発行年<br>2018年      |
| 3. 雑誌名<br>平成30年日本船舶海洋工学会秋季講演会論文集                          | 6. 最初と最後の頁<br>CD-ROM |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>なし                             | 査読の有無<br>無           |
| オープンアクセス<br>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<br>-            |

|   |                      |
|---|----------------------|
| 1. 著者名<br>Tokihiko Katsui, Tomoya Inoue, Kenta Izutani, Yuhi Nagaishi, Chang-Kyu Rheem, Miki Y. Matsuo                  | 4. 巻<br>-            |
| 2. 論文標題<br>Considerations on Numerical Procedure for Stick-Slip Analysis of Drill String                                | 5. 発行年<br>2017年      |
| 3. 雑誌名<br>Proceedings of the ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2017 | 6. 最初と最後の頁<br>CD-ROM |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>なし   | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>-            |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>福田聡太, 永石雄飛, 勝井辰博, 井上朝哉, 鈴木博善   | 4. 巻<br>25            |
| 2. 論文標題<br>ドリルパイプ模型のStick-Slip現象の計測と数値解析 | 5. 発行年<br>2017年       |
| 3. 雑誌名<br>日本船舶海洋工学会講演会論文集                | 6. 最初と最後の頁<br>665 669 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし           | 査読の有無<br>無            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>鈴木 博善, 土屋 慶太, 井上 朝哉, 勝井 辰博, 千賀 英敬, 永石 雄飛, 野谷 勇介 |
| 2. 発表標題<br>ドリルパイプの水中挙動に関する実験的・数値的研究                        |
| 3. 学会等名<br>平成30年日本船舶海洋工学会秋季講演会                             |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Tokihiro Katsui, Tomoya Inoue, Kenta Izutani, Yuhi Nagaishi, Chang-Kyu Rheem, Miki Y. Matsuo      |
| 2. 発表標題<br>Considerations on Numerical Procedure for Stick-Slip Analysis of Drill String                     |
| 3. 学会等名<br>ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2017 (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2017年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>福田聡太, 永石雄飛, 勝井辰博, 井上朝哉, 鈴木博善  |
| 2. 発表標題<br>ドリルパイプ模型のStick-Slip現象の計測と数値解析 |
| 3. 学会等名<br>平成29年 日本船舶海洋工学会 秋季講演会         |
| 4. 発表年<br>2017年                          |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|               | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                     | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                                      | 備考 |
|---------------|---|--|----|
| 研究<br>分担<br>者 | 井上 朝哉<br><br>(Inoue Tomoya)<br><br>(10359127) | 国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球深部探査センター・主任技術研究員<br><br><br><br>(82706) |    |