

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630457

研究課題名(和文) 海底科学掘削用ドリルパイプのStick-Slip現象に関する数値解析

研究課題名(英文) Numerical procedure for Stick-Slip of the drill-pipe

研究代表者

勝井 辰博 (Katsui, Tokihiro)

神戸大学・海事科学研究科・准教授

研究者番号：80343416

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではドリルストリングに発生するStick-Slip現象を予測するための数値解析手法の開発を目的とした。Stick-Slip現象の問題は中立型遅延微分方程式を解く問題に帰着されるが、これを数値的に解くためには、初期履歴の設定およびドリルビットに作用する摩擦トルクの設定という2つの難点が存在する。初期履歴の設定の問題では連続条件に微小な擾乱を加えた初期履歴を与えることで安定なStick-Slipの数値解が得られることを示した。摩擦トルクに関してはトップドライブトルクの計測値から設定する方法を示した。これらの手法を用いればモデルレベルのStick-Slipは精度よく推定できることが分かった。

研究成果の概要(英文)：The present study investigated a numerical method to analyze the stick-slip of drill pipe by solving the NDDE (Neutral Delay Differential Equation) which is derived from torsional vibration equation. A small-scale model experiment was conducted in a water tank to observe the stick-slip phenomenon, and the result from the analytical model is evaluated with that obtained from the experiments. Additionally, the numerical model is applied for the actual drill pipe in operation. The solutions of the NDDE is depend on the initial history of the solution and some model parameters concerned with the frictional torque on drill bit. The present study investigated the effects of the initial history and the model parameters settings on numerical solutions in detail and presented an procedure to determine the appropriate settings of the initial history and the model parameters by reference to the measured top drive torque.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：海底科学掘削 ドリルパイプ Stick-Slip 中立型遅延微分方程式

### 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、生物学的調査を目的として行われる。我が国では国立研究開発法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC) が運用する地球深部探査船「ちきゅう」を用いて海底科学掘削が行われており、地震の発生メカニズムの解明などに役立てられている。海底科学掘削ではドリルストリングと呼ばれる鋼鉄製の円管を海底まで降下させ、上端部分を下方に荷重をかけながら回転させて海底下の地層を掘削し、コアと呼ばれる地層サンプルを回収していく。ドリルストリングの長さは場合によっては10,000mを超える長大管になるため、鋼鉄製とはいえその曲げおよび捩り剛性は相対的に小さくなり、運用時には時として大規模な変形を伴う。特に捩りに関しては掘削面とドリルビット (ドリルストリング先端に取り付けられた掘削刃) の間に作用する摩擦の影響などにより、ビットの回転速度が急激な変動を起こす Stick-Slip 現象が発生する場合がある。Stick-Slip が生じるとビットは停止 (Stick) と滑り (Slip) を繰り返し採取する海底下地層のサンプルコアの品質低下やビットの異常摩耗、破損等に繋がるためその予測や軽減法の確立が望まれていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、海底科学掘削時のドリルストリングに発生する Stick-Slip の発生予測法の確立を目指し、その数値解析手法の開発を目的とした。Stick-Slip はドリルストリングの捩り振動に伴う現象であり、基礎方程式は捩り振動方程式である。これに捩り振動方程式の一般解とドリルビットの回転運動方程式を考慮することで、ドリルビット部の回転変位の時間変化を解く常微分方程式が得られる。この微分方程式の数値解法を確立し、ドリルストリング実機の Stick-Slip の妥当な数値解を得ることが目標となる。本数値解析手法の難点は2点に集約できる。第1点は初期履歴の設定である。この微分方程式は回転変位およびその時間微分の時間遅れ項ともなう中立型遅延微分方程式と呼ばれるものであり、その求解には初期値ではなく、初期履歴の設定を必要とする。物理現象に即した初期履歴を設定することは困難であるため、解の初期履歴依存性を調査し妥当な初期履歴の設定法について検討した。第2点はドリルビットに作用する摩擦トルクの設定方法の問題である。この摩擦トルクは、掘削地層の状況によって変化するため、あらかじめこれを設定することは極めて困難である。そこで本研究では、この摩擦トルクに大きく関係すると推察されるトップドライブトルク (ドリルストリングを回転させるために必要な上端に作用させるトルク) に着目し、これの計測結果からドリルビットに作用する摩擦トルクを設定する方法について検討を行い適切な設定方法を構築することを目指した。

最終的にドリルストリング実機の Stick-Slip の再現計算を実施し、計測結果と比較することによって本手法の妥当性についての検証を行うことを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 定式化

Stick-Slip はドリルパイプの捩り振動に伴う現象であることから、捩り振動方程式を基礎として表現できる。パイプ長さ  $L$ 、密度  $\rho$ 、断面二次極モーメント  $I_p$ 、せん断剛性率  $G$  として、パイプ上端から鉛直下向きに  $z$  軸を取り、計算の簡略化の為に波動伝播速度  $c=(G/\rho)^{0.5}$  を用いて無次元化すると、捩り振動方程式は(1)式となる。パイプ上端を  $z=0$ 、ビット (底面) を  $z=L$ 、 $\phi$  をパイプ各断面の捩れ角とする。(1)式にパイプ上端とビットの境界条件を与え、パイプ上端の回転数を  $\Omega(t)$  として掘削面からビットに作用する摩擦トルクを  $T_1$  とすると、ビットの回転運動方程式で表現できる。上下端の境界条件に(2)式のダランベールの解法を用いて一般解を導出する。 $\beta'(t)=\omega(t)$  とすると(3)式が得られ、これは遅延微分方程式の一種であり、中でも導関数遅延も伴う特殊型から中立型遅延微分方程式 (NDDE) と呼ばれる。(3)式から得られる  $\omega(t)$  の解と境界条件および(2)式より、ビットの回転速度は(4)式となる。

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

$$\phi(z,t) = \alpha(t-z) + \beta(t+z-1) \quad (2)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{d\omega(t-2)}{dt} - \frac{d\Omega(t-1)}{dt} + \frac{T_1(\Omega(t-1) - \omega(t-2) + \omega(t))}{J} + \frac{-\omega(t) - \omega(t-2) + \Omega(t-1)}{J} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t}(1,t) = \omega(t) - \omega(t-2) + \Omega(t-1) \quad (4)$$

回転トルクを  $T_z$  として無次元化を行い、境界条件および(2)式を用いると、求める回転トルクは(5)式となる。(4)および(5)式を数値計算で求め、計測データとの比較検証に用いる。

$$T_z = -\Omega(t) + 2\omega(t-1) \quad (5)$$

$$T_1 = \frac{C\xi}{\sqrt{\xi^2 + \varepsilon^2}} \left( 1 + h \cdot \exp \left( -\frac{\sqrt{\xi^2 + \varepsilon^2}}{\Delta} \right) \right) \quad (6)$$

本解析法においてドリルビットに作用する摩擦トルク  $T_1$  は Balanov がクーロン摩擦で表現した(6)式を用いた。(6)式はビットの無次元回転速度  $\xi$  と四つの変数  $C, \varepsilon, h, \Delta$  で構成される。(6)式を図示したものを Fig.1 に示す。

(6)式中の諸変数は摩擦トルクの正確な推定のために適切に設定する必要があるが、これら変数は掘削地層に依存する変数と定義されており設定が困難である。本研究では実海域での掘削作業中も計測可能な回転トルクをもとに諸変数の設定を行う手法を検討した。数値解の妥当性評価と解析精度向上のため数値解の比較検証の対象として模型実験を実施し Stick-Slip データを収集した。

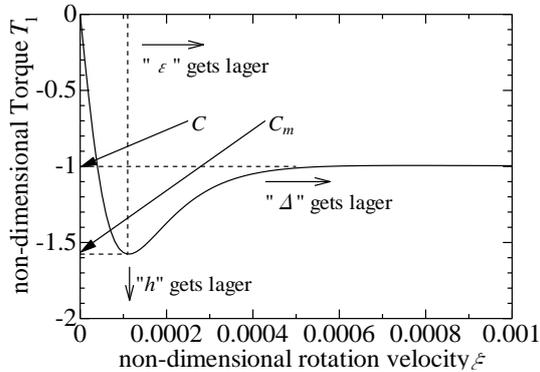


Fig.1 Model of non-dimensional torque acting on drill bit.

## (2) 模型試験

Stick-Slip の特性把握および数値解析法の妥当性評価を目的に模型実験を実施し、評価項目はビットの回転速度、パイプ上端の回転数と回転トルクである。それらが計測可能な小型のドリルパイプ模型によりパイプ上端での回転速度やビットにかかる荷重(WOB : Weight on Bit)を変えて Stick-Slip を計測した。本実験装置の概略図を Fig.2 に示す。パイプの形状、材質等を Table 1 に示す。本模型実験ではサーボモータでパイプ上端を一定速度で回転させ回転速度と回転トルクを計測した。また、パイプ上端とビットに搭載したジャイロセンサーにて三次元各方向の回転角速度を 90[sec]の間サンプリング周波数 100[Hz]で計測した。実験条件は WOB が 3500[kg]と 3000[kg]の二通り、パイプ上端の回転角速度が約 0.5[rad/sec]と約 1.0[rad/sec]の 2通りの計 4条件であり、それぞれを Case 1~4 として模型実験を実施した。本模型実験は水槽底面より約 80[cm]の高さまで水を張った水槽内で実施した。ビットの回転速度とパイプ上端の回転トルクの計測例として Case 1 をとりあげ Fig. 3 に示す。

Table 1 Specifications of drill pipe model.

Material	Teflon	
Young's modules	0.5	[GPa]
Length	970.0	[mm]
Outer diameter	19.05	[mm]
Inner diameter	15.88	[mm]
Specific weight	3.50	[kg]

## (3) 数値解析法

(6)式中の諸変数を実機で計測可能なパイプ

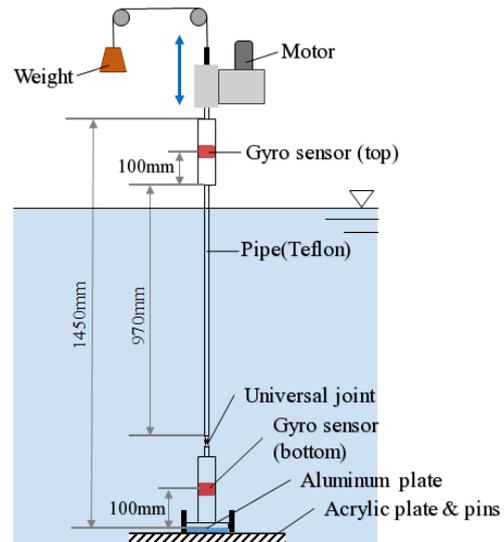


Fig.2 Experimental set up.

上端の回転トルクから推定するため、まずは模型実験の計測データから推定する手法を検討する。回転トルクは平均値と振幅によりおおよそ特徴付けられ、それに基づいた変数設定を試みた。まず回転トルクの平均値に注目する。回転トルクがある平均値を基準に振動していると実験結果から読み取れる。加えて Fig.1 から変数  $C$  が高速回転時の支配要素であることから、回転トルクの平均値と変数  $C$  の相関を調査した結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 を見ると回転トルクの数値解の平均値は変数  $C$  に線形依存するとわかる。したがって変数  $C$  は回転トルクの平均値から決定できることが分かった。次に回転トルクの振幅に注目する。実験結果から同 WOB では回転トルクの振幅が同程度と読み取れる。加えて Fig.1 から  $C_m/C$  がトルク変動を表すことから、回転トルクの振幅と  $C_m/C$  の相関を調査し、結果を Fig. 5 に示す。Fig. 4 と同様に回転トルクの振幅は  $C_m/C$  に線形依存することがわかる。これにより、 $C_m/C$  は回転トルクの振幅から決定できる。ここで、 $C_m/C$  は変数  $\varepsilon, h, \Delta$  で構成された値であり、回転トルクの振幅から  $C_m/C$  を一意に決定できても変数  $\varepsilon, h, \Delta$  は直接的に決定できない。先行研究によって変数  $\varepsilon$  は非常に小さな値であるべきということからパイプ上端回転角速度の 10%で(6)式が極値を取るよう変数  $\varepsilon$  を設定した。加えて最も影響の低い変数  $\Delta$  については一定値で与えることにした。変数  $C, \varepsilon, \Delta$  が決定したうえで、 $C_m/C$  が所定の値をとるように変数  $h$  を決定して解析を行った。

本数値解析法では初期履歴の設定も重要な課題である。(3)式を解くには  $-2 < t < 0$  での  $\omega(t)$  をあらかじめ初期履歴として設定する必要がある。一方で適当に初期履歴を設定してしまうと(3)式は  $t=0, 2, 4, 6, \dots$  において解関数が不連続となる。

任意の時刻  $t$  において不連続を生じない初期履歴は(7)式から求められる  $\omega(0)$  を  $-2 < t < 0$

一定値で与えればよい。これを  $\omega_c$  と定義する。初期履歴を  $\omega_c$  に設定して NDDE を解くと、ドリルビットの回転角速度はドリルストリング上端回転各速度と全く同値になり Stick-Slip が起こらないことがわかった。一方、初期履歴を  $\omega_c$  よりも相当大きく設定すると計算直後の数秒間は異常変動を計算し、その後は高周波変動を含んだ数値解が得られると分かった。これらの結果から初期履歴は  $\omega_c$  と同値ではないが非常に近い値で設定すると模型実験結果によく一致する Stick-Slip が計算されることが確認できた。

$$\frac{d\omega(-2)}{dt} - \frac{d\Omega(-1)}{dt} + \frac{T(\Omega(-1)) - 2\omega(0) + \Omega(-1)}{J} = 0 \quad (7)$$

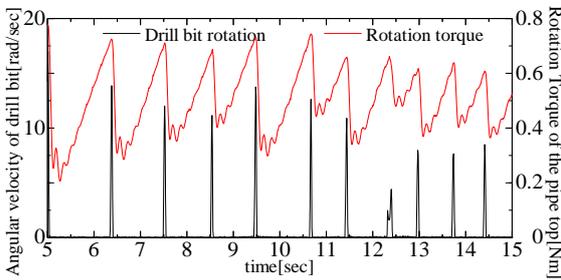


Fig.3 Measured drill bit rotation and rotation torque.

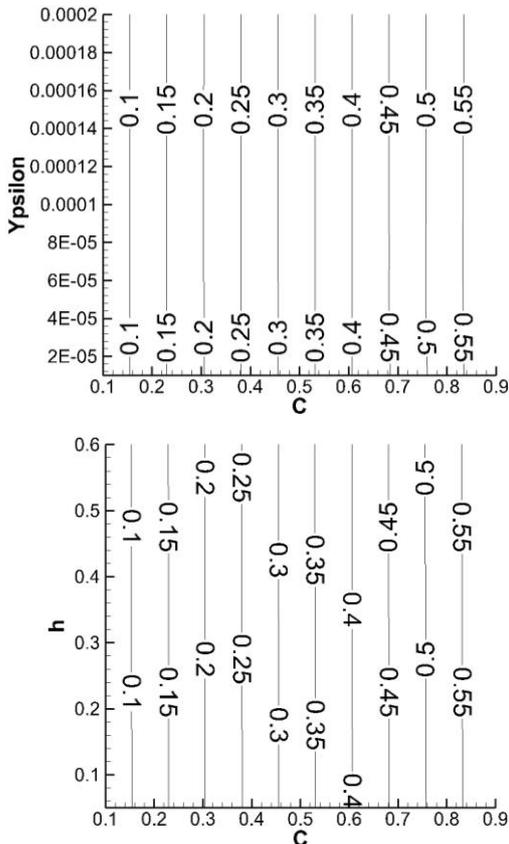


Fig.4 Contour lines of calculated torque average with the various frictional model parameter setting.

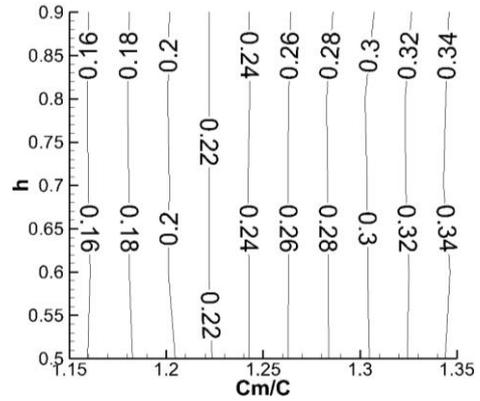
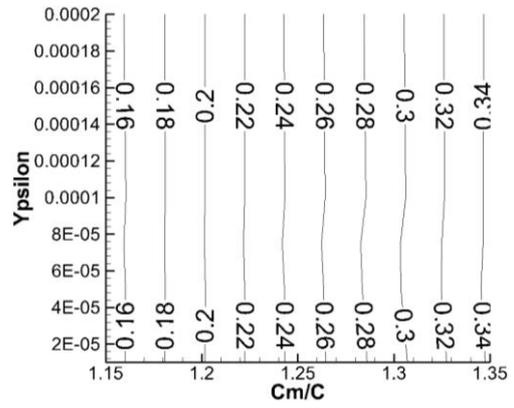


Fig.5 Contour lines of calculated torque variation with the various frictional model parameter setting.

#### 4. 研究成果

##### (1) 計測結果と数値解析結果の比較

上記手法で摩擦トルクの諸変数と初期履歴を設定し、模型実験で用いたドリルパイプ模型と同条件で Stick-Slip の数値計算を実施した。Case 1 の数値計算結果と模型実験の計測結果の比較を Fig. 6 に示す。これを見ると、スリップ速度、周期、トップドライブトルクのいずれも両者はよく一致することが分かる。これにより本研究で示した Stick-Slip の数値解析手法の妥当性が示されたと考える。これを受けて、本手法をドリルストリング実機の Stick-Slip の数値解析を実施した。

実海域の掘削操業で計測されたパイプ上端の回転数と回転トルク、ビットの回転速度データを参考に数値解の妥当性を検証する。Fig. 8 に実海域掘削時のドリルストリングのトップドライブトルクとドリルビット回転数の計測結果を示す。これによりドリルストリング上端の回転トルクの平均値は約 10[kNm]、変動量は約 10[kNm] (最小 : 5[kNm], 最大 : 15[kNm]) である。ビットの回転速度の計測は 10 秒もしくは 20 秒毎に計測されており、回転速度に大きな変動が確認できるが、数値解のサンプリング周期よりもはるかに大きいので、正確な比較には利用できない。前述した実海域条件の回転トルクの特徴を用いて諸変数を設定し数値解析を行った。実海域でのドリルストリングの運転条件を

Table 2 に、数値解析結果を Fig. 7 に示す。実機条件は Slip が生じている時間が模型実験条件に比べて長く、トップドライブトルクの波形もステップ上になるなど模型の場合とは相当異なることが分かる。計測結果と比較すると、トルクの変動や平均値がよく一致しているのに対して、ドリルビットの回転速度の変動の計算結果が計測結果に比べてかなり大きく見積もられている。

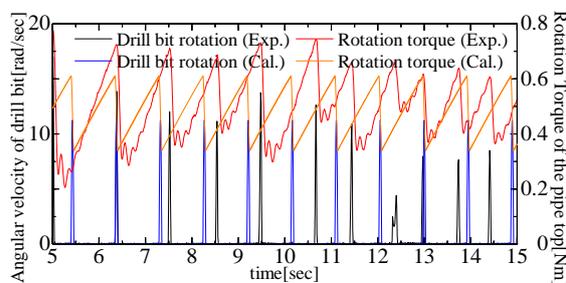
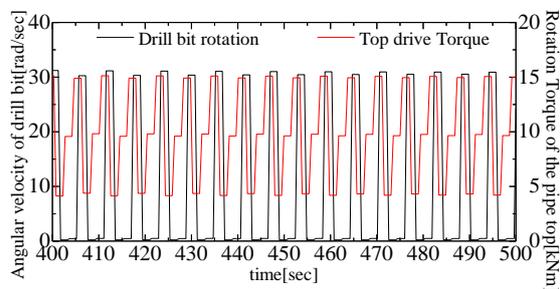


Fig. 6 Comparison of drill bit rotation and rotation torque.

Table 2 Calculation conditions.

Length	3200	[m]
Surface rotation speed	100	[rpm]
Young's modules	83	[GPa]
Outer diameter	139.7	[mm]
Inner diameter	113.9952	[mm]
Density	7840	[kg/m <sup>2</sup> ]



( $C=56.3$ ,  $\varepsilon=0.315$ ,  $h=0.515$ ,  $\Delta=3.0$ ,  $Cm/C=1.30$ )

Fig. 7 Calculated drill bit rotation and rotation torque.

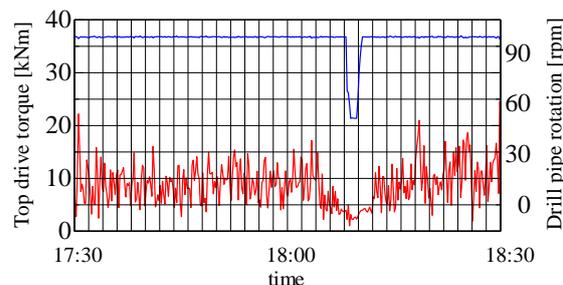
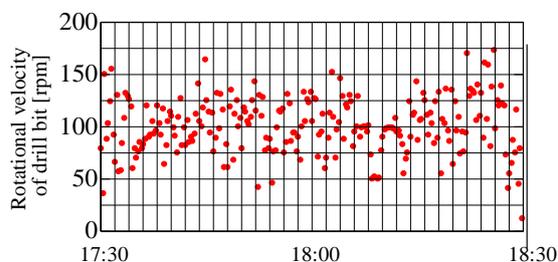


Fig. 8 The measured drill bit rotation and top drive torque during an actual drilling operation.

## (2)まとめと今後の検討予定

本研究では海底科学掘削の効率的運用の実現のために、ドリルストリングに発生する Stick-Slip 現象を予測するための数値解析手法の開発を目的とした。Stick-Slip 現象の問題は中立型遅延微分方程式を解く問題に帰着されるが、これを数値的に解くためには、初期履歴の設定およびドリルビットに作用する摩擦トルクの設定という 2 つの難点が存在する。初期履歴の設定の問題では初期履歴と得られる数値解の関係を精査し、連続条件に微小な擾乱を加えた初期履歴を与えることで安定な Stick-Slip の数値解が得られることを示した。また、摩擦トルクに関してはトップドライブトルクの計測値から摩擦トルクを設定する方法を示した。これらの手法を用いれば模型レベルの Stick-Slip は精度よく推定できることが分かった。一方で実機のドリルストリングに本手法を適用すると、計測結果に比べてドリルビットの回転速度の変動が過大に計算されることが分かった。今後、ドリルストリングに作用する流体力の影響やドリルストリングの変形の影響などを考慮した手法の確立が望まれる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① 勝井辰博, 坂本竜一, 明石雅成, 井上朝哉 : ケーブルと海底の接触を考慮したクローラ型 ROV の可動領域推定法, 日本船舶歌謡工学会論文集, 査読有, 第 24 号, pp.275-281, 2016.
- ② Tomoya Inoue, Tokihiro Katsui, Junya Ishiwata, Miki. Y. Matsuo, C. K. Rheem : Estimation of Stick-Slip Characteristics by simulation with Actual Drilling Data, Proceedings of the ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 査読有, CD-ROM, 2016.
- ③ 井上朝哉, 勝井辰博, 石渡準也 : 実計測データによるドリルパイプ下端のドリルビット挙動および Stick-Slip 発生に関する考察, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第 22 号, pp.571-573, 査読なし, 2016.
- ④ 泉谷健太, 勝井辰博, 井上朝哉, 山本美希, 林

昌奎：海底摩擦の変動を考慮したドリルパイプの Stick-Slip の数値解析, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第 21 号, pp.147-150, 査読なし, 2015.

- ⑤ Tomoyo Inoue, Tokihiro Katsui, Yoshitomo Mogi, Tomoya Inoue, C. K. Rheem, Miki. Y. Matsuo : Experimental Investigation of the Stick-Slip Phenomena of the Drill Pipe, Proceedings of the ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 査読有, CD-ROM, 2015.
- ⑥ 泉谷健太, 勝井辰博, 井上朝哉, 山本美希, 林昌奎: ドリルパイプの Stick-Slip 現象に関する数値解析, 第 25 回海洋工学シンポジウム講演論文集, 査読なし, CD-ROM, 2015.
- ⑦ Tomoya Inoue, Tokihiro Katsui, Kohtaro Ujiie, Junya Ishiwata : Utilization of Surface Drilling Data for Estimation of Sediment Properties in Scientific Drilling of Tohoku Earthquake Zone, Proceedings of the ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 査読有, CD-ROM, 2015.
- ⑧ Tomoya Inoue, Tokihiro Katsui, Miki. Y. Matsuo, Hide Sakaguchi, C. K. Rheem : Consideration of Hydrodynamic Effect on Drill Pipe Stick-Slip, Hydroelasticity in Marine Technology, 査読有, pp.433-442, 2015.
- ⑨ 茂木克興, 勝井辰博, 井上朝哉, 泉谷健太 : ドリルパイプの Stick-Slip 現象に関する模型実験, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第 19 号, pp.529-532, 査読なし, 2014.

[学会発表] (計 8 件)

- ① Tomoya Inoue, Tokihiro Katsui, Junya Ishiwata, Miki. Y. Matsuo, C. K. Rheem : Estimation of Stick-Slip Characteristics by simulation with Actual Drilling Data, ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Busan, Korea, 2016 年 6 月 19 日~24 日.
- ② 井上朝哉, 勝井辰博, 石渡準也 : 実計測データによるドリルパイプ下端のドリルビット挙動および Stick-Slip 発生に関する考察, 平成 28 年度日本船舶海洋工学会春季講演会, 福岡県福岡市, 2016 年 5 月 26 日~27 日.
- ③ 泉谷健太, 勝井辰博, 井上朝哉, 山本美希, 林昌奎 : 海底摩擦の変動を考慮したドリルパイプの Stick-Slip の数値解析, 平成 27 年度日本船舶海洋工学会秋季講演会, 東京都目黒区, 2015 年 11 月 15 日~16 日.
- ④ Tomoya Inoue, Tokihiro Katsui, Miki. Y. Matsuo, Hide Sakaguchi, C. K. Rheem : Consideration of Hydrodynamic Effect on Drill Pipe Stick-Slip, Hydroelasticity in Marine Technology, Split, Croatia, 2015 年 9 月 16 日~9 月 19 日.
- ⑤ 泉谷健太, 勝井辰博, 井上朝哉, 山本美希, 林

昌奎 : ドリルパイプの Stick-Slip 現象に関する数値解析, 第 25 回海洋工学シンポジウム, 東京都千代田区, 2015 年 8 月 6 日~8 月 7 日.

- ⑥ Tokihiro Katsui, Yoshitomo Mogi, Tomoya Inoue, C. K. Rheem, Miki. Y. Matsuo : Experimental Investigation of the Stick-Slip Phenomena of the Drill Pipe, ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, St. John's, Canada, 2015 年 5 月 31 日~6 月 5 日.
- ⑦ Tomoya Inoue, Tokihiro Katsui, Kohtaro Ujiie, Junya Ishiwata : Utilization of Surface Drilling Data for Estimation of Sediment Properties in Scientific Drilling of Tohoku Earthquake Zone, ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, St. John's, Canada, 2015 年 5 月 31 日~6 月 5 日.
- ⑧ 茂木克興, 勝井辰博, 井上朝哉, 泉谷健太 : ドリルパイプの Stick-Slip 現象に関する模型実験, 平成 26 年度日本船舶海洋工学会秋季講演会, 長崎県長崎市, 2014 年 11 月 20 日~21 日.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等 : なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

勝井辰博 (KATSUI TOKIHIRO)  
神戸大学・大学院海事科学研究科・准教授  
研究者番号 : 8 0 3 4 3 4 1 6

### (2) 研究分担者

井上朝哉 (INOUE TOMOYA)  
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  
研究者番号 : 1 0 3 5 9 1 2 7