

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 25 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02359

研究課題名（和文）非定常マグナス効果によるドリルパイプのダイナミクスに関する研究

研究課題名（英文）Study on Dynamics of Drilling Pipe by Unsteady Magnus Effect

研究代表者

鈴木 博善（Suzuki, Hiroyoshi）

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00252601

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：潮流中で回転するドリルパイプの水中挙動の構築に関し、1）斜航回転円柱周り流れの可視化、流体力計測、2）ドリルパイプの運動に関する模型実験および模型スケールでのANCF法による計算、3）実機スケールでのANCF法による計算、4）地球深部探査船「ちきゅう」でのドリルパイプの変位計測、5）計算で得られた情報の実運用へのフィードバックの観点から研究を実施した。この結果、斜航回転円柱周り流れの性質を知ることができ、ドリルパイプの水中挙動推算方法がほぼ確立できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、ドリルパイプの水中挙動推定法の確立を目指した。この結果、ある程度の精度でドリルパイプの水中挙動を予測することができるようになった。本来、操業中のライザーレス掘削では、まったく知ることのできなかったドリルパイプの水中挙動がある程度“見える”ようになったと考えられ、今後の海洋掘削の安全化、効率化に寄与できると考えられる。さらに、ドリルパイプの変形量が推定できるようになることは、ドリルビットに付加される掘削荷重（WOB）の予測にも用いることができると考えられるため、海洋掘削に対する貢献ひいては我が国の海洋開発に対する意義は大きいものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Research was conducted to construct the underwater behavior of a rotating drill pipe in a tidal current in terms of 1) visualization of flow around a rotating oblique cylinder and measurement of hydrodynamic forces, 2) model experiments and model-scale calculations of drill pipe motion using the ANCF, 3) actual-scale calculations using the ANCF, 4) drill pipe displacement measurements on the deep earth exploration vessel "Chikyu," and 5) feedback of information obtained from calculations to actual operations. 5) Feedback of the information obtained from the calculations to the actual operation. As a result, the characteristics of the flow around an oblique rotating cylinder were obtained, and a method for estimating the underwater behavior of drill pipes was almost established.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：ドリルパイプ 水中挙動 ANCF CFD

## 1. 研究開始当初の背景

近年、石油やガスの探査は勿論、海底鉱物やメタンハイドレートなどの新たな資源探査、および地震の発生メカニズム解明などの科学調査を目的とし、海洋掘削が盛んに行われ、その重要度が増している。海洋掘削には、海底と船体とをライザー管で繋ぎ、その中にドリルパイプを通して掘削を行うライザー掘削と、ドリルパイプを直接、海中に降下させ掘削を行うライザーレス掘削の2つがある。ライザーの稼働限界水深の問題から、大水深の掘削や浅深度掘削はライザーレス掘削にて行われ、一方、ライザー掘削を行う場合でも、防噴装置(BOP)やライザー管を設置するまではライザーレス掘削が行われる。

ライザーレス掘削では、ドリルパイプが直接外環境に曝されるため、ドリルパイプの挙動は多岐に亘り複雑となる。更に、大深度掘削では、ドリルパイプの長大化に伴い、その挙動はより複雑になるとともに、ドリルパイプの固有周期が船体動揺の卓越周期に近づくため、大きな動的挙動の発生が想定され、従来の掘削では大きな問題を惹起しなかったドリルパイプのダイナミクスが掘削操業へ影響を及ぼす。また、潮流中で発生する渦励振は、ドリルパイプの回転により、その特性が固定管に生じる渦励振と異なり複雑である。更に、潮流中のドリルパイプには回転により所謂マグナス効果と呼ばれる揚力が発生しドリルパイプが歪曲する。これらのドリルパイプのダイナミクスは、掘削操業を阻害する一因になることは勿論、ドリルパイプ損傷・破断の遠因となった例もある。掘削効率向上や事故防止のためには、ドリルパイプの挙動把握が重要であるが、実際に掘削作業中に監視できるのは、全長数千mに及ぶドリルパイプの僅か上端30m程度である。この上端30mのドリルパイプ変動や挙動から、水中のドリルパイプの歪曲や挙動を推察することは現状では不可能である。このため、数値解析を活用してドリルパイプの挙動推算への期待が高い。

## 2. 研究の目的

本研究は、潮流中のドリルパイプの全体挙動の予測法の確立を目指し、以下の研究を行う。

- A) 数千メートルにおよぶ超長大管の流力弾性問題含む時系列運動解析法の開発あるいは現有プログラムの高度化
- B) 変形しながら回転するドリルパイプに作用する3次元的な非定常流体力の同定・モデル化
- C) 実機ドリルパイプの歪曲の計測とそれによる数値解析精度の検証

## 3. 研究の方法

本研究を達成するためには、以下について調査、研究を行う。

- I) 模型実験(1): 斜航回転円柱周り流れの可視化、流体力計測
- II) CFDによる斜航回転円柱周り流れの計算
- III) 模型実験(2): ドリルパイプの運動に関する模型実験
- IV) 模型スケールでのANC法による計算、計算法の評価・改良
- V) 地球深部探査船「ちきゅう」でのドリルパイプの変位計測
- VI) 実機スケールでのANC法による計算の実施、計算精度の検証
- V) で実施した実機計測に対応したANC法による計算を実施し、計算精度検証を行う。
- VII) 計算で得られた情報の実運用へのフィードバック

## 4. 研究成果

<斜航回転円柱周り流れの可視化、流体力計測>

Fig.1に可視化結果を示す。斜航角 $45^\circ$ 、一様流速を $1[m/s]$ 、円柱の回転数を0あるいは $120[rpm]$ とした場合である。これを見ると、円柱後流では、双方の場合ともカルマン渦に起因すると考えられる渦流れが観察される。円柱が無回転の場合は、円柱の上下方向に緑色に輝くミストが見えるが、回転時には、回転方向(下方向)に流れが引きずられていることがわかる。ただし、円柱の斜航時と直進時で、流場に大きな差はみられなかった。次に、流体力係数の計測結果をFig.2に示す。算出した流体力係数は、法線方向流体力係数 $C_{DN}$ 、揚力係数 $C_L$ 、法線方向流体力係数 $C_{DT}$ をとし、定義は以下の通りである。

$$C_{DN} = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho u_n^2 S}, \quad C_L = \frac{F_z}{\frac{1}{2}\rho u_n^2 S}, \quad C_{DT} = \frac{F_y}{\frac{1}{2}\rho u_t^2 S}$$

ここで $u_n$ は法線方向の流速、 $u_t$ は接線方向の流速、 $S$ は法線方向の投影面積である。 $u_n$ と $u_t$ は斜航角を $\theta$ とし、以下で計算した。

$$u_n = U_\infty \cos \theta, \quad u_t = U_\infty \sin \theta, \quad U_\infty: \text{一様流速}$$

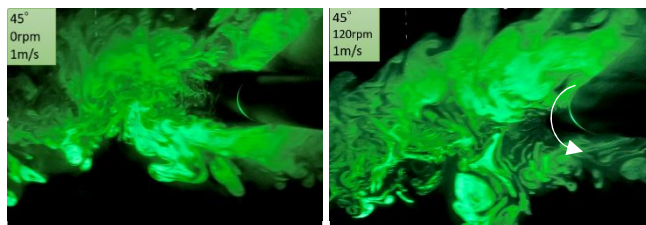


Fig. 1 Flow visualization around oblique rotating circular

さらに、回転比とは、(回転比) =  $\frac{\text{円柱の周速度 } r\omega}{\text{法線方向流速 } u_n}$  である。

$C_{DN}$  は角度ごとに若干の変化が見られるが回転比によらずほぼ一定の値になっている。 $C_L$  に関しては回転比が増加すると  $C_L$  も増加するという先行研究 (HOERNER “FLUID-

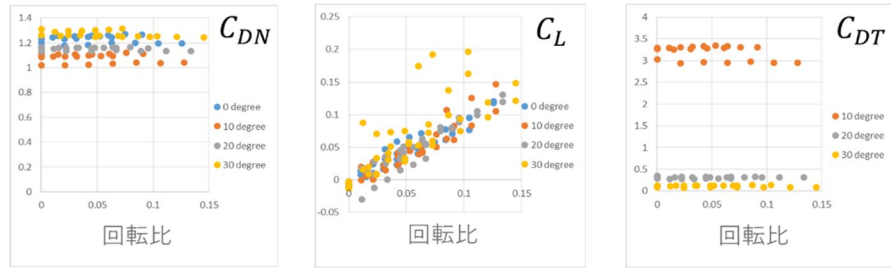


Fig. 2 Hydrodynamic coefficients of oblique rotating circular cylinder

DYNAMIC LIFT” 1985)同様の結果が確認できた。一方で  $C_{DT}$  は回転比により変化は見られないが、斜航角ごとに異なる値をとることがわかった。

< ドリルパイプの運動に関する模型実験および模型スケールでの ANC 法による計算 >

大阪大学船舶海洋試験水槽にて模型実験を行った。潮流が存在する中で掘削を行うドリルパイプの水中挙動を模擬するために、曳引車に水深約 3m の仮設の水底を取り付け、これにガイドとなる円筒を装着し、その中に模型ドリルパイプを挿入することで、掘削時の下端条件を満足させることにした。Fig.3 に実験装置の概要を示す。模型ドリルパイプの水中挙動の観測および計測のため、2 台の水中カメラを装置側方 (側方カメラ)、後方 (後方カメラ) に設置した。座標系は、静止時の模型ドリルパイプと水面の交点を原点とし、鉛直下向きを  $z$ 、曳引車の進行方向の逆方向を  $x$ 、これらの外積方向を  $y$  とした。

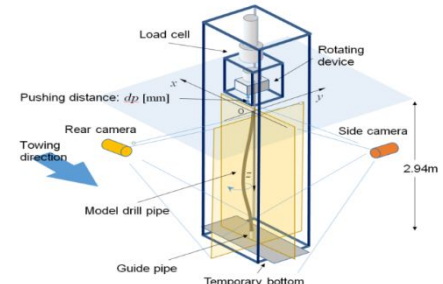


Fig. 3 Experimental equipment with temporary bottom

側方カメラ、後方カメラで取得した画像を画像解析することで模型ドリルパイプの座標 (変位量) を得ることにした。模型ドリルパイプは、長さ 1.405[m] と 1.75[m] の 19.05φ テフロン管をつなぎ 3.155m の模型ドリルパイプを作成した。

試験では、一様流速 (曳航速度)、模型ドリルパイプの回転数を変更しながら計測を行った。本計測では、これに加え、模型ドリルパイプの押し込み量も変更することにした。実際の掘削では、ドリルビットに印加する重量 (Weight on Bit: WOB) が重要な操業パラメータとなる。本計測でも WOB の変更を考えるが、現在、ドリルパイプ長手方向 ( $z$  方向) の力を計測するすべがないため、今回は模型ドリルパイプの押し込み量を変更することにした。ここで、模型ドリルパイプを設置した初期状態での模型ドリルパイプ上端位置から模型ドリルパイプ上端を下方に移動させた場合の移動距離を押し込み量  $dp$  とする。静止状態では、 $dp$  が大きいほど、WOB が大きい状態を模擬することができるものの、一様流中、回転状態では、模型ドリルパイプが撓むた

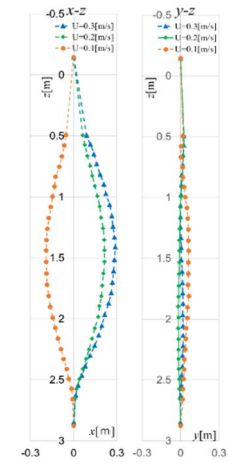


Fig. 4 Underwater behavior of drill pipe model in uniform flow

め、ガイドパイプ基部に模型ドリルパイプ先端が接触しているのかは不明である。このような問題も有するが  $dp$  として 3 種類を選択した。

以上のようにして得た模型ドリルパイプの変位計測結果を示す。まず  $dp=115$ [mm] の場合の無回転時の解析結果を Fig.4 に示す。

模型ドリルパイプを回転させない場合、揚力

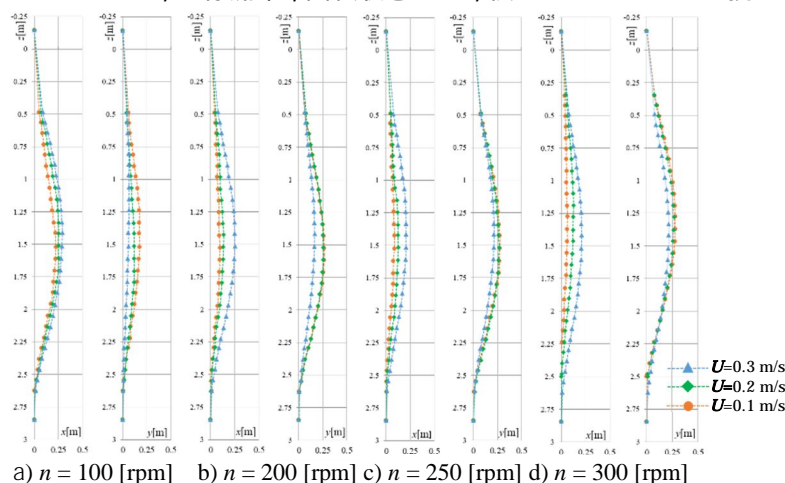


Fig. 5 Underwater behavior of rotating drill pipe model in uniform flow ( $dp = 115$  [mm])



は発生しないので、流体抵抗による  $x$  方向の変位が発生するのみである。  $U=0.3[m/s]$  のときの変形量と、初期状態の変形量の絶対値はほぼ同一であることが観察される。流速がある場合では、  $U=0.2[m/s]$  の時より  $U=0.3[m/s]$  の時のほうが変位の最大値は大きい。

次に、押込み量  $dp$  を  $115[mm]$  とし、一様流速  $U$ 、回転数  $n$  を変化させた場合の結果を Fig.5 に示す。この場合、静止状態では、模型ドリルパイプ下端はガイドパイプ底部に接触するが、どの回転数どの一様流速の条件で接地しなくなるかは、計測器の都合で定かではない。

これらの実験結果に基づき、ANC 法 ( ANCF : Absolute Nodal Coordinate Formulation ) を用いた模型ドリルパイプの変形推定を行った。模型ドリルパイプの水中挙動の数値計算を行うには、回転する模型ドリルパイプの各部で発生している抵抗とマグナス効果による揚力などを推定する必要がある。回転する模型ドリルパイプの一部は、斜航・傾斜した回転円柱と考えられるので、これの周りの流れに CFD を適用して解くことで、斜航角・傾斜角に対する流体力の分布を求め、これから模型ドリルパイプに作用する流体力を推算した。 Fig.6 は、回転なしの場合、 Fig.7 は、回転時の流体力の分布である。

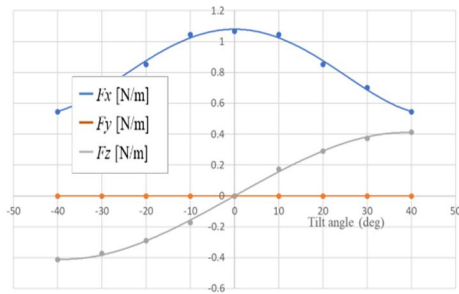


Fig. 6 Hydrodynamic force distribution with respect to tilt angle of drill pipe model in non-rotation case

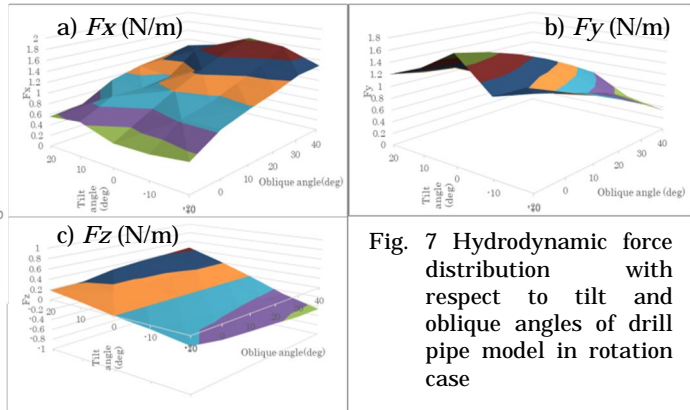


Fig. 7 Hydrodynamic force distribution with respect to tilt and oblique angles of drill pipe model in rotation case

以上を適用し、模型ドリルパイプの水中挙動推算を実施する。計算上、模型ドリルパイプの長さは、 $4.155m$  とした。実際の模型ドリルパイプより  $1m$  長いことになる。模型ドリルパイプの全長のうち、上部は、押込量に応じた長さが気中、下端  $1.0[m]$  は地中に埋まっている状態を模擬している。地中では地盤との間に摩擦力を考慮しておらず、 $x$  方向、 $y$  方向の変位および速度、傾き、曲率およびこれらの時間微分を拘束しているのみである。

本論文における計算では現時点で、押込量を表現することが難しく、実験と同様の計算を行うには、変位ではなく WOB を与える必要があるが WOB と押込み量の関係は不明である。一方で、計測では、装置を設置した初期状態で、模型ドリルパイプの自重に相当する力で回転装置に懸架されている状態であると推察される。すなわち、WOB は  $0$  である。そこで、下端での反力  $N$  が模型ドリルパイプの重量をどの程度支持するかを変化させ、模型ドリルパイプの変位がどのように変化するかを調査することにした。静的反力比を  $N_R$  と書くことにし、 $N_R = (1m \text{ 分の水中重量}) / (\text{気中部分の重量} + \text{水中部分の水中重量})$  と定義、これを変化させた。

無回転での実験時、 $U=0.3[m/s]$  で  $dp=0[mm]$  の場合では、模型ドリルパイプはハングオフ状態となった。実験では  $dp=115[mm]$  を与え、ガイドパイプからの抜けを回避できたので、計算でもこの状態を模擬した。この時、模型ドリルパイプ全長  $4.155[m]$  のうち、 $0.145[m]$  が気中、 $3.010[m]$  が水中、残りの  $1.0[m]$  は地中である。地中  $1.0[m]$  の模型ドリルパイプの分の重量を補償する  $N_R$  は約  $23\%$  となる。この場合は、静止状態では、模型ドリルパイプがガイドパイプ底部を押している状態である。流体力などによって模型ドリルパイプにたわみが生じ、下端が少なくとも  $115[mm]$  上昇しなければ、模型ドリルパイプ下端がガイドパイプ底部に接した状態となる。これらをもとに計算を行った。この場合、水中最下点での反力が  $0$  になるときの下端での  $N_R$  は約  $23\%$  となる。

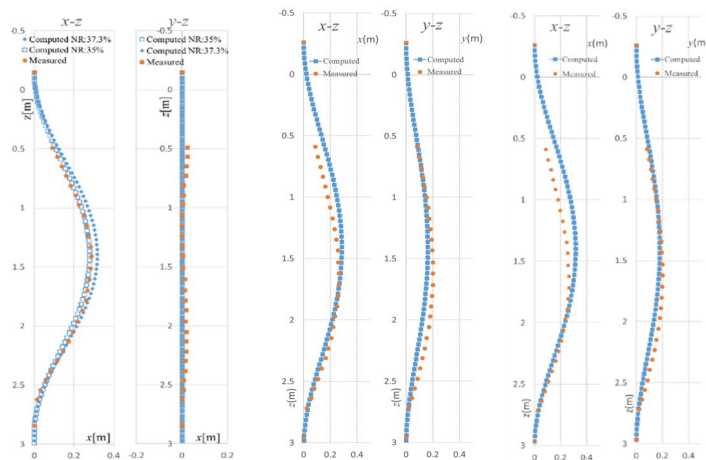


Fig. 8 Computed underwater behavior of drill pipe model without rotation ( $U=0.3 \text{ m/s}$ )

a)  $N_R = 22.5\%$  b)  $N_R = 25\%$   
Fig. 9 Computed underwater behavior of drill pipe model ( $U = 0.3 \text{ m/s}$ ;  $n = 250$ )

ところが、この場合は、少なくとも静止時、WOB が作用していることは明白であり、これより大きな  $N_R$  となると予想される。したがって、適宜  $N_R$  を変更しながら計算を行うこととした。この結果を Fig.8 に示す。 $N_R=37.3[\%]$  のとき下端の上昇量が 111[mm] となり、実際の押込量 115[mm] に近づくことがわかった。逆に、ドリルパイプ模型の主流方向変位が一致するのは、 $N_R=35[\%]$  のときであり、下端の上昇量は約 63[mm] となる。 $N_R=35[\%]$ 、 $37.3[\%]$  のいずれの場合でも、標準の  $N_R$  より大きいから、計測では、ガイドパイプ基部に模型ドリルパイプ重量の約 10 数 $[\%]$  の反力（すなわち WOB）が発生しているものと考えられる。

次に、模型ドリルパイプが回転している場合の計算結果を示す。このとき、 $N_R$  を 20.0 $[\%]$ 、22.5 $[\%]$ 、25 $[\%]$ 、27.5 $[\%]$  および 30 $[\%]$  と変化させて計算した場合、 $N_R$  が 22.5 $[\%]$  場合、計算値と計測値の模型ドリルパイプの最大変位の誤差が最も小さかった。比較のため、 $N_R=22.5[\%]$  の場合と 25 $[\%]$  の場合の模型ドリルパイプの計算による変位を Fig.9 に示す。

$N_R=22.5[\%]$  の場合、計算を実施したうちでは計算結果と計測結果の変位の差の絶対値が最も小さくなる。成分で比較した場合、計算値の  $y$  方向変位（揚力に関係）は計測値よりも小さく、 $x$  方向変位（抵抗に関係）は大きく推定されることがわかる。さらに、これらの変形が最大となる点は、 $x$ 、 $y$  方向ともに計測値よりも上の位置となる。一方、 $N_R=25[\%]$  の場合、 $x$  方向の変位は  $N_R=22.5[\%]$  の場合と比べ大きくなる。 $y$  方向変位も大きくはなるが、 $x$  方向ほどではない。 $N_R=25[\%]$  の場合、計測で言えば、模型ドリルパイプ上端を少し押し込んだことに相当するが、単に、 $x$ 、 $y$  方向の変位が増加するのみである。無回転時の計算では、模型ドリルパイプの変形をほぼ推定できたのに対し、回転時は、その推定精度が劣るように見受けられる。回転時と無回転時の流体力の差は、本研究の主眼であるマグナス効果による揚力であり、流体力の推定精度がまだ不十分であることが示唆される。

#### < 実機スケールでの ANC 法による計算の実施 >

以上のように実施した模型ドリルパイプの水中挙動推定法を拡張し、1500m と 4000m の実機ドリルパイプを想定した計算を行った。ただし、それぞれ、77m、198m は、掘削中の状態を模擬するためドリルパイプが海底地盤中に挿入されていると仮定している。ただし、実機ドリルパイプは外径 0.140[m]、内径 0.1134[m] の鋼鉄製を仮定しており、そのヤング率は 210[GPa]、ポアソン比は 0.3 であり、全域 1[knot] の潮流が作用し、ドリルパイプの回転数は 50[rpm] とした場合である。この結果を Fig.10 に示す。この結果を見ると、4000[m] ドリルパイプの変位が 1500[m] のそれより小さく、奇異に感じる。さらに、4000[m] ドリルパイプの計算はかなり不安定で、収束解を得ることが困難であった。いずれにしても、後述するように実機ドリルパイプの変位量は、今回得ることができなかったため、これ以上の評価は難しい。

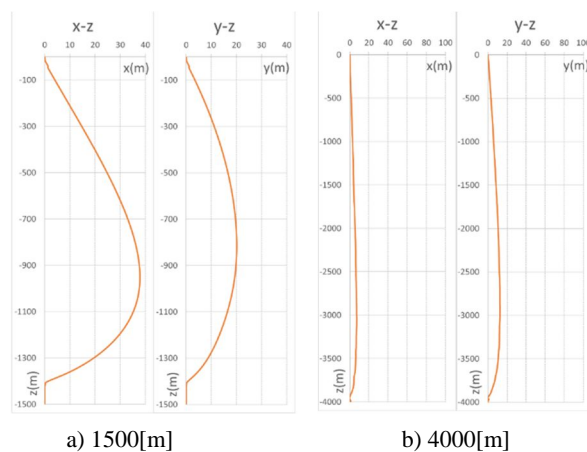


Fig. 10 Computed underwater behavior of drill pipe

#### < 「ちきゅう」での既計測データの抽出、解析 >

本研究初年度終盤に発生した新型コロナウイルス感染症の世界的大流行のため、2 年度目以降に計画していた地球深部探査船「ちきゅう」でのドリルパイプ実機の変位計測は、計画自体が頓挫してしまった。このような状況の中、「ちきゅう」から、ドリルパイプ下端にセンサーを装備する掘削同時検層のデータ、および掘削機器の性能確認の一環として計測した掘削機器データ、ドリルパイプ振動データ、船体挙動データ、潮流データ等を取り出し、これを解析することにより、ドリルパイプの変形量の抽出を試みた。残念ながら、優位なデータを得ることができなかった。

#### < 実機スケールドリルパイプの変形量推定の妥当性の検証 >

上記のように、ドリルパイプ実機の変位計測あるいは、関連データからの変位推定が実施できなかったため、前述のように、計算は行ったものの、その妥当性の検証は実施することができなかった。

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 Suzuki Hiroyoshi, Inoue Tomoya, Katsui Tokihiro, Wada Ryota, Tsuchiya Keita, Notani Yusuke, Ishida Keita, Koga Taito	4. 巻 32
2. 論文標題 Experimental and Numerical Studies on Behavior of Rotating Drill Pipe Model in Uniform Flow	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Offshore and Polar Engineering	6. 最初と最後の頁 285 ~ 295
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.17736/ijope.2022.mt32	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3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 鈴木博善, 井上朝哉, 古賀太斗, 小笹卓海
2. 発表標題 風洞における模型ドリルパイプの挙動計測
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会令和3年度秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoya INOUE
2. 発表標題 EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF MOTION OF ROTATING DRILL PIPE OWING TO MAGNUS EFFECT
3. 学会等名 ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroyoshi Suzuki
2. 発表標題 Experimental and Numerical Studies on Behavior of Rotating Model Drill Pipe in Uniform Flow
3. 学会等名 Proceedings of the Thirty-second(2022) International Ocean and Polar Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2022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	井上 朝哉  (INOUE TOMOYA)  (10359127)	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・主任研究員   (82706)	

	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 協力者	土屋 慶太  (TSUCHIYA KEITA)		
研究 協力者	石田 啓太  (ISHIDA KEITA)		
研究 協力者	HANNY TUN  (HANNY TUN)		
研究 協力者	古賀 太斗  (KOGA TAITO)		
研究 協力者	THANT ZIN HTUN  (THANT ZIN HTUN)		

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