

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 30 日現在

機関番号：82706
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21760676
 研究課題名（和文） 実海域掘削データを用いたドリルパイプ変動軸応力推算による掘削効率向上に関する研究
 研究課題名（英文） Research on improvement of drilling efficiency by estimating a dynamic stress utilizing actual drilling data
 研究代表者
 井上 朝哉（INOUE TOMOYA）
 独立行政法人海洋研究開発機構・地球深部探査センター・技術研究副主幹
 研究者番号：10359127

研究成果の概要（和文）：
 実海域掘削データの継続的な取得を行うために、地球深部探査船「ちきゅう」船上に掘削データ取得装置の構築を行った。そして、得られた実海域掘削データをもとに、実際にドリルパイプに作用した変動軸応力の推算、および理論計算値との比較を行った。また船体動揺のドリルパイプへの伝搬抑制機器であるコンペンセータの性能評価も合わせて実施した。これらにより得られた知見をもとに、掘削計画時のドリルパイプ強度検討、並びに運用条件策定を進める。

研究成果の概要（英文）：
 Drilling data acquisition system was established onboard the scientific drilling vessel Chikyu to acquire the actual drilling data continuously. Utilizing the drilling data, evaluation of dynamic stress actually exerted on the drill pipe was examined, and consideration was conducted by comparing with the theoretical stress. In addition, evaluation of the performance of the heave compensator, which is equipment to mitigate the propagation of vessel heave motion to the drill pipe, was conducted. The knowledge and drilling data contribute to the strength evaluation and the drilling criteria plan for actual drilling programs of the Chikyu.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：海洋掘削

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：掘削データ，変動軸応力，ドリルパイプ，コンペンセータ

1. 研究開始当初の背景

(1) 海洋掘削

資源探査に加え、地球科学の研究を目的とした海洋掘削も行われている。海洋掘削は、ドリルパイプ下部に付けたドリルビットにある適切な荷重を掛けて、船上で上部ドリルパイプ

を回転させ、この回転をドリルビットに伝播させて掘削を行う。地球深部探査船「ちきゅう」が目指す前人未到大深度掘削を実現し、効率的に掘削を行うためには、ドリルパイプ強度評価、およびビット挙動制御の両面での技術的検討が必要である。

(2) ドリルパイプ強度評価

ドリルパイプ上部には大きな懸垂荷重が掛かっており、更に掘削作業中に変動軸応力が発生することによりドリルパイプの破断を惹起する恐れがある。このため、変動軸応力を考慮した強度評価が重要となる。しかし、長大な水中線状構造物であるドリルパイプの模型実験は難しいため、解析結果の検証は進んでいない。そこで、実海域データを取得し、実際に作用している変動軸応力の考察を行い、ドリルパイプ強度評価および操業計画に活かすことが有効な手段である。

(3) ビット挙動の制御および把握

①コンペンセータ

掘削効率の向上に加えて、科学掘削の目的であるコア採取率を高めるためには、地層状態の適切な把握やコアビットの改良など掘削機器以外の要素も含め多岐に亘るが、ドリルビットの挙動を制御するという面で掘削機器の性能に依る部分も大きい。このドリルビットの挙動とは上下運動と回転運動となる。つまり、ドリルビットの現象で言うと各々、ビット接地圧変動と **Stick-Slip** や **Bit Whirling** となる。これらを抑制するために種々の機器や機能が装備されている。その代表的な機器の一つはデリック頂部に搭載したヒープ・コンペンセータである。コンペンセータは船体動揺のドリルパイプへの伝搬抑制を図る機器であり、ビット接地圧変動低減およびドリルパイプ変動応力低減に寄与する。

②ドリルビット挙動の把握

掘削面に位置するドリルビットの挙動を知ることが、ビット挙動制御の第一となる。特に、掘削パラメータであるドリルパイプ回転速度やビット接地圧変動、更には掘削深度の **Stick-Slip** 惹起への影響などを知ることが重要である。

2. 研究の目的

(1) 掘削データ取得装置構築

掘削作業中にドリルパイプに実際に作用している応力や、掘削機器性能評価を目的とする継続的な掘削データの取得を目指し、「ちきゅう」船上に実海域掘削データ取得装置の構築を行う。

(2) 変動軸応力推算

取得したデータの統計解析により、船体動揺に対する張力変動の応答関数および分布を得る。そして、実際に作用した変動軸応力の推算を行い、理論値との比較を行い、従来の解析手法の検討を行い、ドリルパイプ強度評価に活かす。

(3) コンペンセータ性能考察

ビット接地圧変動低減およびドリルパイプ変動応力低減はコンペンセータの性能に依存する。また、パッシブ・コンペンセータの

性能を基に制御を行うアクティブ・コンペンセータの今後の制御開発のためにも、現状のコンペンセータの性能を把握することが重要である。そこで、実海域データよりその性能の考察を行い、有効性を確認するとともに今後の改良への提言を行う。

(4) Stick-Slip 現象考察

ドリルパイプ回転の伝播方程式を遅延微分方程式で定式化し、自励回転の特徴を捉える。また、接地面での摩擦に影響を受けるため、接地面の摩擦モデルを構築し、それを用いて **Stick-Slip** 現象モデルの構築を行う。

3. 研究の方法

(1) 掘削データ取得装置構築

「ちきゅう」においては、掘削作業、ライナー降下やBOP設置作業など通常作業は全て、掘削制御・情報システム (**DCIS : Drilling Control Instrumentation System**) を用いて行う。そのため、掘削機器の作動状態や掘削パラメータ、船体動揺など掘削操業に必要な情報は **DCIS** にて監視されており、操業に応じて必要なデータを抽出して操作卓の画面に表示する。そこで、データ取得装置を構築し、それを **DCIS** に繋ぎ、実海域掘削中の掘削データの取得を行う。なお、データ取得サンプリングレートは取得データ数に影響を受けるため、1Hzのサンプリングレートを確保できるよう30項目程度に絞る。

(2) 掘削データによる操業把握

取得した掘削データを一日程度の長期レンジで俯瞰することで作業内容の把握ができる。その上で、目的に応じて統計解析に用いるに適したデータの抽出を行う。なお、この際、実操業において機器センサーの異常状態、また異常作動の確認も行う。

(3) 変動軸応力推算

ドリルパイプ張力に相当する吊り荷重、それを惹起する船体動揺の1時間の時系列データを抽出する。変動張力をより正確に把握し、考察するために、ドリルパイプが海底に設置せず吊り下げた状態である **Hung-Off** 時におけるデータを抽出し、考察する。後に、通常掘削時について考える。図1にサンプルデータを示す。

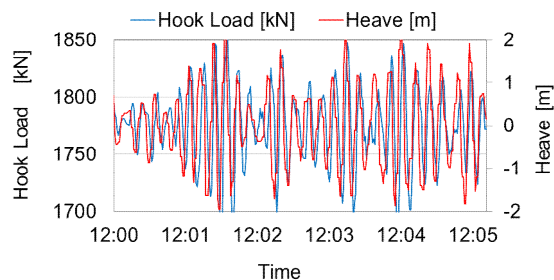


図1 掘削データ (Hook Load/Heave)

吊り荷重および船体動揺の時系列データは定常ランダム過程とみなすことができるとして、両振幅有義値とゼロアップクロス平均周期の統計解析を行う。そして、計測された変動張力を、ドリルパイプの質量および上下揺加速度から簡易推算できる変動張力から考察する。

(4) コンペンセータ性能考察

コンペンセータの性能把握としては、振幅および位相の観点から評価が必要となる。このためには時系列データ取得が必須となる。得られた時系列掘削データから、船体動揺、コンペンセータ位置を抽出する。これらから、船体動揺およびドリルパイプ上端の上下動揺を得ることができる。

ドリルパイプ変動軸応力と同様に、時系列データは定常ランダム過程とみなすことができるとして、運動振幅有義値の統計解析を行う。船体動揺のドリルパイプ上端の上下運動の振幅有義値よりコンペンセータの振幅追従性能が得られる。また、時系列データから相互相関関数を求め、相互相関が強くなる位相差を得ることができ、これによりコンペンセータの時間応答特性が得られる。

4. 研究成果

(1) 掘削データ取得装置構築、および掘削データ取得

「ちきゅう」船上に掘削データ取得装置を構築し、実海域掘削作業中に掘削データの取得を行った。実海域掘削データ自体が非常に貴重なデータであり、このデータの検証を進めている。得られたデータより、ドリルパイプ変動軸応力やコンペンセータ性能考察を行うとともに、得られた掘削データを長期レンジで俯瞰することで、機器の不備を知ることができ、機器の保守に活用した。

(2) 変動軸応力推算

図1に示した通り、掘削データより、変動張力は船体動揺により惹起され、その振幅は船体動揺の大きさに依存することが確認できた。そこで先に示した手順にて計測された変動軸応力と解析による変動軸応力の比を取り考察を行う。結果を図2に示す。この比が1.0を超える場合は、計測値が推算値より大きいことを示す。図から分かる通り、推算値より小さいことが多いが、大きな応力が作用している場合も限定的ではあるが観察され、従来の検討が必ずしも安全とは言えない。また、比が大きくばらついており、長大なドリルストリングにおいては動的影響や撓みなどストリング全体形状の影響が大きいことを暗示している。なお、図2は、ドリルストリング長が3,600-5,000mの時の掘削作業中に得られたデータから得られたものである。この時のドリルストリング縦振動の固有周期は4-5秒程度であることから、波浪周期

から外れており、固有周期の影響はないと考えられる。

実海域データによる変動軸応力の考察を踏まえて、ライザー掘削およびライザーレス掘削両方で現在計画されている科学掘削におけるドリルパイプ強度検討を行った。そして、この強度検討を踏まえて、ドリルパイプ購入および運用条件の策定などを進めており、「ちきゅう」の実運用への大きな貢献が実現できた。

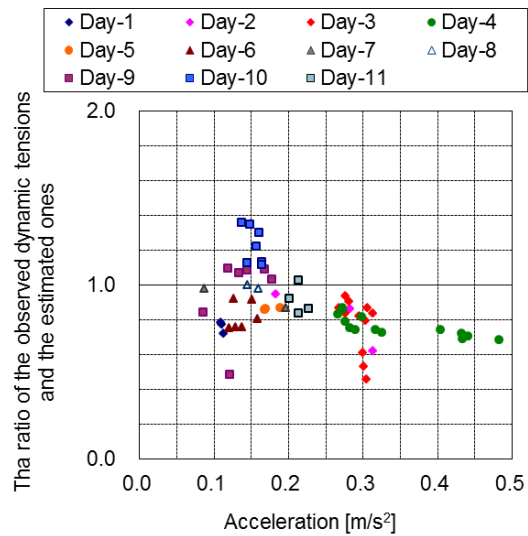


図2 変動軸応力の計測値と計算値の比

(3) コンペンセータ性能考察

コンペンセータ性能考察に関する実海域データの顕著な2例を図3に示す。図に船体動揺、コンペンセータ運動、これらより求めたドリルパイプ上端運動を示す。

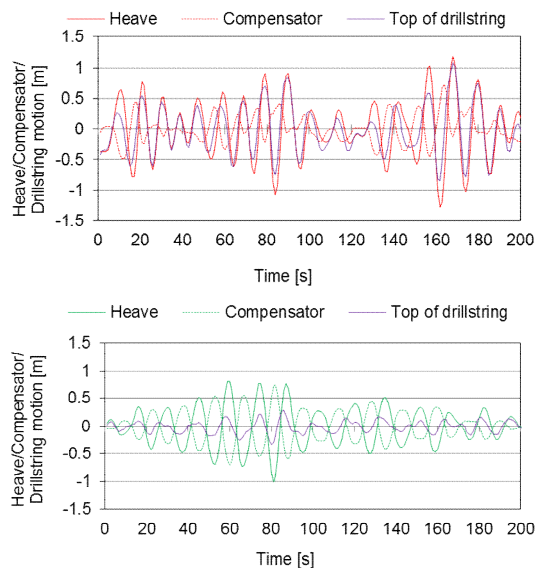


図3 コンペンセータに関する掘削データ

図3上図の状態においては、ドリルパイプ上端の運動が船体動揺と非常に近いことが分かる。すなわち、コンペンセータの性能が芳しくないことを示す。実際に、振幅追従の観点からの船体動揺用の伝搬抑制は20%程度であった。

一方、図3下図の状態においては、船体動揺と逆向きに同程度の振幅にてコンペンセータが動いており伝搬抑制が実現できていることが分かる。実際に、振幅追従の観点からの船体動揺用の伝搬抑制は70%程度の高いものであった。

これは図3上図においては船体動揺振幅が比較的大きく、コンペンセータの追従性が損なわれたと類推できる。特に、160-170 ses近傍においては、位相差も見られ、これが追従性低下の一因となっている。

コンペンセータの性能を評価する上で、振幅追従性に加えて位相差も重要となる。そこで、船体動揺とコンペンセータ運動の相互相関関数を解析し考察を行った。相互相関関数を図4に示す。図中の赤線 (Day-3AM) が図3上図、緑線 (Day-6PM2) が図3下図に相当するものである。図4から、Day-3AMにおいては、1秒以上の位相差があることが分かる。一方、Day-6PM2においては位相差が小さく、0.5秒以下である。

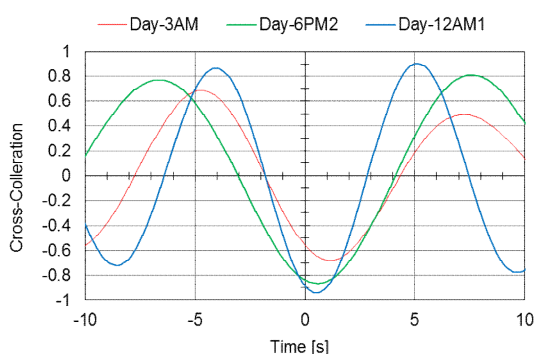


図4 相互相関関数

コンペンセータは高い伝搬抑制性能を持つことが確認された一方で、状況によっては、振幅追従性、時間応答を意味する位相差の観点から芳しくない状態も散見された。今後より多くのデータを取得し、性能把握を進める予定にしている。

(4) Stick-Slip 解析

船上よりドリルパイプ上端に与える回転のドリルビットへの伝播を波動方程式より導出し、ドリルビットと掘削面の摩擦モデルを考え、捻り振動についてモデル化を行った。導出したビット挙動モデルは、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 (Neutral Delay Differential Equation) と呼ばれる特殊な方程式にて表現した。

ある掘削パラメータにおけるビット回転挙動解析結果を、図5に示す。ビット回転数が大きく振れ、Stick-Slip現象を起こしていることが分かる。

このモデル化を用いて、初期検討として、実海域の掘削データをもとにWOB変動や摩擦モデルのパラメータなどを推測し、掘削作業中のStick-Slip現象の有無、および発生程度について考察を行った。この結果、掘削深度が大きくなるほど、Stick-Slipが発生し易いことを示した。

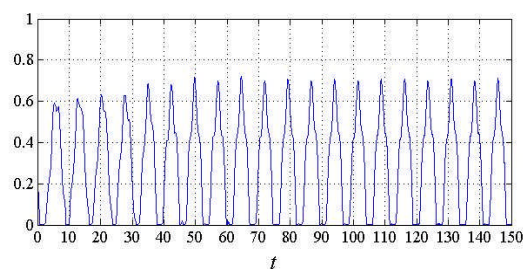


図5 ドリルビット回転挙動解析結果例

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1件)

① 井上朝哉、中立型遅延微分方程式を用いたドリルストリングの捻り振動モデルによるStick-Slip表現に関する研究、日本船舶海洋工学会論文集、査読有、第10巻、2010、213-220

[学会発表] (計5件)

① Tomoya Inoue, Kazuyasu Wada, Eigo Miyazaki, Tsuyoshi Miyazaki、SCIENTIFIC DRILLING PROGRAM OF DRILLING VESSEL CHIKYU AND DRILLING DATA ACQUISITION FOR FUTURE TECHNICAL DEVELOPMENT、International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAEE2011)、2011年6月21日、Rotterdam(The Netherlands)

② 井上朝哉、和田一育、千賀英敬、「ちきゅう」の実海域掘削データに基づくパッシブ・ヒープ・コンペンセータの性能に関する考察、日本船舶海洋工学会、2010年11月15日、神戸

③ 井上朝哉、中立型遅延微分方程式を用いたドリルストリングの捻り振動モデルによるStick-Slip表現に関する研究、日本

船舶海洋工学会、2009年11月5日、大阪

- ④ Tomoya Inoue、Masahiko Ozaki, Kazuyasu Wada、Observations on Dynamic Tensions of Drill String during Drilling Operations of Scientific Drilling Vessel Chikyu、2009年10月28日、Biloxi(USA)
- ⑤ 井上朝哉、尾崎雅彦、和田一育、「ちきゅう」による実海域掘削データに基づくドリルストリング張力変動について、海洋工学シンポジウム、2009年8月6日、東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 朝哉 (INOUE TOMOYA)
独立行政法人海洋研究開発機構
地球深部探査センター
研究者番号：10359127