

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360368

研究課題名(和文)実海域掘削データ融合シミュレーションの構築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 establishing surface drilling data-integrated simulation

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・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) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：海洋掘削においては、ドリルパイプ強度、およびStick-Slipなどのドリルビット挙動の2つの問題があり、これらを評価・表現するための数理モデルを構築した。しかし、本質的に重要な解析条件を未知として含んでいるため、暫時解析に留まる。そこで、暫時解析結果を拡張子、未知の解析条件を掘削データで表現する式を導出した。そして、船上で得られる掘削データを活用して未定解析条件を決定し再度数理モデルを解く、掘削データ融合シミュレーション手法の構築を行った。

研究成果の概要(英文)：Drill pipe strength evaluation and bit motions including stick-slip are primarily important problems in offshore drilling. Analytical models and evaluation methods for the above were established. However, it contains essentially important analytical conditions and parameters, and there are defined tentatively for the analysis. Equations expressing the unknown conditions and parameters with drilling data therefore are newly derived by expanding the analytical results. Finally, this research suggested a drilling data-integrated simulation which is analysis method with analytical conditions and parameters determined by the surface drilling data acquired onboard drillship.

研究分野：海洋工学

キーワード：掘削データ Stick-Slip Whirl Motion ドリルパイプ疲労強度

1. 研究開始当初の背景

(1) 海洋掘削

海洋掘削は、図1のように船上よりドリルパイプを降下し、その下部に付けたドリルビットに適切な荷重を掛け、船上でドリルパイプ上端を回転させて掘削を行う。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であり、ドリルパイプ強度評価、およびドリルビット挙動把握の2つを適切に行う必要がある。

ドリルパイプ強度検討の上で編成計画がなされ、さらに、操業中にドリルパイプ強度管理ならびにドリルビット挙動の適切な把握のもとに、掘削作業を行うことが必須となる。しかし、ドリルパイプの強度や挙動解析を行う際、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な状況である。

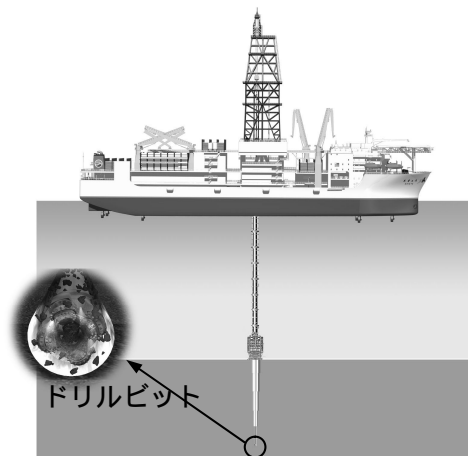


図1 海洋掘削

(2) ドリルパイプ強度問題

船体動揺により発生し強度問題を引き起こす変動張力に関する研究が行われているが、長大な水中線上構造物であるドリルパイプの模型実験は難しく、検証は進んでいない。そこで、地球深部探査船「ちきゅう」にて実海域掘削データを取得し、コンベンセータの基本性能や変動張力の推算を行ったところ、計算値と大きな差異を生じる場合があることが分かった。これは、本質的に重要である解析条件の正確な設定が困難であることから、得られる解析結果が実際の現象と一致しないという問題を提起している。また、掘削作業を継続するためにはドリルパイプの疲労強度の評価が必要であるが、陸上掘削を想定したと思われる静的傾斜時における応力を用いた評価手法が一般的である。海洋掘削における疲労強度評価を適切に行うためには、船体動揺の発現確率を加味した評価手法の確立が必要である。

(3) ドリルビット挙動問題

掘削作業中に、ドリルビットと掘削地層の

摩擦により Stick-Slip が発生することがある。特に、海洋掘削においては、船体動揺により生じるドリルパイプの変動張力の伝播によって掘削面でのドリルビット接地圧変動が生じ、Stick-Slip を惹起し易い状況である。Stick-Slip はドリルビットの摩損を惹起し、掘進速度の低下やビット交換作業発生など掘削効率が低下する。更に、掘削地層を破壊するため、コアに亀裂が生じたり、コアが粉碎し回収率が低下したりし、科学掘削の第一義であるコア採取が適切に行えない。

(4) 船上掘削データの活用

掘削作業は、船上掘削データを監視して行われるが、大深度掘削で問題となるドリルパイプ強度やドリルビット挙動に関する情報を得ることができずに操業するのが通常である。しかし、船上掘削データには、掘削状態を示す情報が含有されているため、船上掘削データとシミュレーションを融合した新たな手法の構築により、操業への有益な情報の導出が期待できる。

2. 研究の目的

(1) ドリルパイプ累積疲労および最大応力

ドリルパイプ強度の観点で重要となるのが最大応力と疲労強度である。最大応力を得る上で、重要であり最も難題であるのが船体動揺により生じる変動軸応力である。そこで、実際に作用する変動軸応力を、船上掘削データを用いてリアルタイムで算出する手法の構築を行う。

疲労強度の評価手法は、石油業界においても十分に確立されていないのが現状であり、本研究において、まず推算手法の確立を目指す。事前に疲労強度評価を行った上で掘削計画を行うが、実操業中に、ドリルパイプの累積疲労を把握することは事故防止の観点から有益であることは勿論である。そこで、疲労評価手法と船上掘削データを融合させてリアルタイムで累積疲労をモニタリングする手法の確立を行う。

(2) Stick-Slip 現象

ドリルビット挙動の中で問題となる現状である Stick-Slip の抑制を目指した研究が進められている。本研究では、時間遅れを含む定式化によって数理モデルの示す現象が豊富になることに着目し、ドリルビットの挙動を遅延微分方程式による定式化を行う。しかし、数理モデルにおいては、正確な設定が困難である掘削地層状態や孔壁との接触などの解析条件を含んでいるため、数値シミュレーションのみで、実際に発生している Stick-Slip を表現することは出来ない。そこで、掘削作業中に得られる掘削データから未知の解析条件を設定し、それをドリルビット数理モデルにフィードバックする計測融合シミュレーション手法の構築を行う。

3. 研究の方法

(1) ドリルパイプ累積疲労推算手法の構築およびモニタリング

ドリルパイプの疲労に影響を及ぼす応力として、曲げ応力と変動軸応力がある。これらの応力の発現確率を、船体動揺の発現確率や掘削作業に伴い変化するドリルパイプ位置を考慮した上で推算し、それをもとに累積疲労を推算する手法を確立する。

船上でドリルパイプの累積疲労を監視することが重要であるが、ドリルパイプに作用する応力を直接計測することは物理的に不可能である。そこで、変動軸応力は、掘削機器の吊り荷重 (Hook Load) から推算する。また、曲げ応力については、事前解析により応力データベースを構築しておき、船上で得られる船体動揺や掘削操業状態の情報をもとに、応力振幅や発現頻度をリアルタイムで逐次推算し、累積疲労を算出する。

(2) Stick-Slip 数理モデルと船上掘削データの融合

Stick-Slip を把握するために新たに構築した遅延微分方程式による定式化を用いて、摩擦モデルを仮定してシミュレーションを行う。しかし、掘削地層の摩擦特性や孔壁との摩擦などの掘削状態の把握の困難さから、本質的に重要である解析条件の正確な設定が困難であり、実際の現象を表現するのは難しい。そこで、ドリルビット回転挙動数理モデルにおいて、シミュレーションを行う上で重要なパラメータである摩擦トルクを未定パラメータとして定義する。一方、船上掘削データから摩擦トルクを推算する数理モデルを構築する。そして、掘削データより算出した摩擦トルクをドリルビット回転挙動数理モデルにフィードバックして、Stick-Slip シミュレーションを行う手法を構築する。この手法の有効性を、模型試験にて確認する。

大深度掘削を実現するために重要となるドリルパイプ強度およびドリルビット挙動把握の両面において、船上掘削データと解析を融合させたシミュレーション手法の構築を図る。

4. 研究成果

(1) ドリルパイプ累積疲労および最大応力の評価手法および船上掘削データを融合したモニタリング手法

掘削中のドリルパイプには船体動揺による変動軸応力が繰り返し応力として作用する。更に、船体動揺や傾斜により生じる曲げ応力が、ドリルパイプ回転の掘削作業により繰り返し応力として作用する。船体動揺の発現確率ならびに掘削操業に伴うドリルパイプ高さ位置の変化を考慮して、繰り返し応力の発現確率の算出により累積疲労を評価す

る手法を構築した。手順は以下の通りである。

- 1) 掘削で用いる実管ドリルパイプの疲労試験結果をもとに、平均応力を考慮して修正した、S-N 曲線を得る。
- 2) ドリルパイプ降下中の高さ位置および船体傾斜に対する曲げ応力分布を求める。
- 3) 最大傾斜の発現確率 (極値分布) およびその最大傾斜時 (極値) における各々の傾斜発現確率を求める。
- 4) 上記 2)3)より、曲げ応力長期予測 (発現確率) を得る。
- 5) ドリルパイプ縦振動 RAO を算出する。
- 6) 船体上下揺の発現確率を求める。
- 7) 上記 5)6)より、変動軸応力の長期予測 (発現確率) を得る。
- 8) 上記 1)4)7)より、累積疲労被害度を算出し、疲労評価を行う。

地球深部探査船「ちきゅう」の掘削操業計画においては、この手法を元に疲労強度評価を行い、編成計画や操業計画を立案した。

構築した評価手法において、船体動揺の発現確率、ドリルパイプ位置、並びに平均応力は、船上掘削データより得ることが出来る。そこで、船上掘削データと事前応力解析データベースを融合して発現応力の推算を行った。実掘削操業におけるシミュレーション結果例を図 2 に示す。発現応力が得られれば累積疲労の算出が可能であり、今後、本シミュレーション手法を適用し、船上にモニタリング装置を構築すれば、リアルタイムでの監視が可能となる。

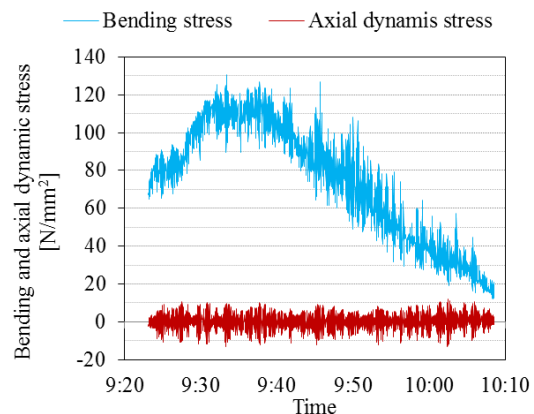


図 2 曲げ応力と変動軸応力の時系列発現

(2) 船上掘削データを融合した Stick-Slip シミュレーション

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うことで Stick-Slip の表現を以前の研究で行った。しかし、これは、Stick-Slip の特徴を表現することはできるが、未知の条件である摩擦モデルを含んでいるため、実際に発生している Stick-Slip の適切な評価は出来ない。そこで、本研究では、このモデルを拡張し、

Stick-Slip が生じた場合のトルク変動の上部への伝達を考え、船上で取得することができるドリルパイプ上端でのトルク変動を算出する式を未知の摩擦特性を含んだ式で導出した。これにより、船上掘削データで得られるドリルパイプを回転させる回転トルクと摩擦特性を仮定して得られるトルク数理モデルを融合することで、未知の解析条件である摩擦特性を推算することができる。そして、得られた摩擦特性をもとに、Stick-Slip 解析を行う、掘削データ融合シミュレーションが可能となる。

この手法の有効性を確認するために、模型試験を実施した。実験では、ドリルパイプ模型下部の回転挙動およびドリルパイプ上端のトルクを計測した。図3に、ドリルパイプ上部回転トルク計測値、および計測トルクと合うよう摩擦特性を定めた際のトルク計算値を示す。これにより、未知の解析条件であるドリルビットと掘削地層の摩擦特性が得られる。そして、得られた摩擦特性を用いて Stick-Slip 解析を行った。図4に数値解析結果と実験計測結果を示す。掘削データ融合シミュレーションにより、実際の Stick-Slip 特性を表現できたことが分かる。実際のドリルパイプは長大であり、模型試験と比べて複雑な挙動を示すことも考えられるとともに、孔壁との摩擦など模型試験では表現できない別の外乱要因も存在することから更なる検討が必要ではあるが、本研究で示した掘削データ融合シミュレーションが、実際に発生している Stick-Slip を適切に表現できる可能性を十分に示唆できるものである。

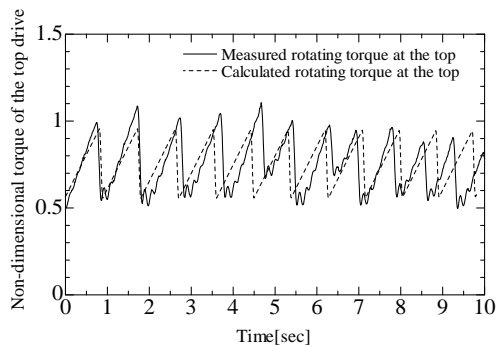


図3 掘削トルク

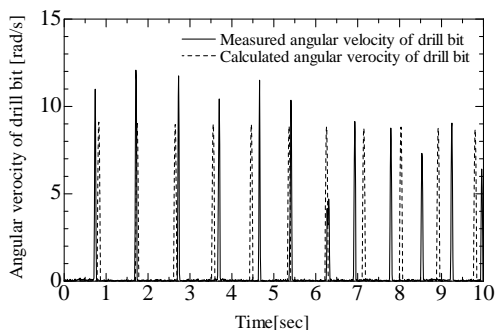


図4 掘削データを融合した Stick-Slip シミュレーション結果

(3) 船上掘削データを活用した掘削状態監視および地層特性把握

掘削データ融合の Stick-Slip シミュレーションにおいて、ドリルパイプ上部回転トルクよりドリルビットと掘削地層の摩擦特性を推算した。この摩擦特性は掘削地層特性と密接に関係する。科学掘削の一つの目的である掘削地層特性を、地層サンプルを採取せずに得ることができれば非常に有益なことである。科学掘削においては、掘削全長に渡って地層サンプルを採取するコアリングを行うことが難しく、スポットでの取得に留まる。また、分析は当然、掘削作業の後となる。もし、掘削データを用いて、掘削全長に渡りリアルタイムで、地層特性が得られれば、科学的に有益であるのみでなく、ドリルパイプの抑留防止など運用面でも有益である。

東北太平洋沖地震源で取得した掘削データを用いて、前述の Stick-Slip シミュレーションで導出した数理モデルにて、地層特性の一つである剪断応力を算出した。その結果と、実際に得られた地層サンプルを用いた実験による得られた剪断応力、並びに掘削孔内に設置したセンサーのデータから算出した剪断応力とを比較すると非常に一致を示した。図5に結果の例を示す。これは、掘削データ融合シミュレーションの新たな可能性を示すものと言える。

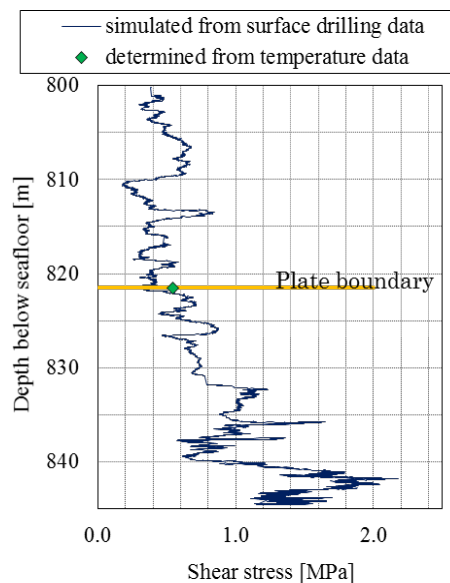


図5 船上掘削データを活用した掘削地層の剪断応力推算

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)

[学会発表](計11件)

Tomoya Inoue, Tokihiro Katsui, Kohtarou Ujii, and Junya Ishiwata, Utilization of

Surface Drilling Data for Estimation of Sediment Properties in Scientific Drilling of Tohoku Earthquake Zone, Proceedings of the ASME 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE), 2015 June 4, St John's, Canada

氏家恒太郎、井上朝哉、掘削トルクデータに基づいた高速剪断強度断面の作成、日本地質学会第121年学術大会、2014年9月14日、鹿児島大学郡元キャンパス、鹿児島県、鹿児島市

Tomoya Inoue, Koji Sakura, Toshihiko Fukui, and Masanori Kyo, Fatigue Strength Evaluation of Drill Pipe for Challenging Scientific Drilling Operations, IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference, 2014 August 25, Bangkok, Thailand.

Tomoya Inoue, Tokihiro Katsui, Chang-Kyu Rheem, Zengo Yoshida, and Miki Y Matsuo, Preliminary Study on Stick-Slip in Drillstring with Analytical Model Expressed with Neutral Delay Differential Equation, the ASME 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE), 2014 June 10, San Francisco, USA

井上朝哉、氏家恒太郎、勝井辰博、片岡翔、石渡隼也、船上掘削データからみた東北沖地震震源域掘削、平成26年度日本船舶海洋工学会春季講演会、2014年5月27日、仙台国際センター、宮城県、仙台市

Tomoya Inoue, Masanori Kyo, Koji Sakura, and Toshihiko Fukui, Fatigue Strength Investigation of Drill Pipe for Challenging Scientific Deep Drilling and Utilization of Drilling Data to Estimate Cumulative Fatigue, Offshore Technology Conference, 2014 May 5, Houston, USA

井上朝哉、林昌奎、吉田善吾、許正憲、掘削作業に伴うドリルパイプのVIVおよび自励回転であるDrill Pipe Whirlに関する実験的研究、平成25年度日本船舶海洋工学会秋季講演会、2013年11月22日、大阪府立大学I-site なんば、大阪府、大阪市

Tomoya Inoue, Masanori Kyo, and Koji Sakura, Fatigue Strength Evaluation of Drill Pipe for Challenging Deep Drilling Project - Japan Trench Fast Drilling, The Proceedings of the twenty-third International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), 2013 July

3, Anchorage, USA

Tomoya Inoue, Chang-Kyu Rheem, and Masanori Kyo, Experimental Study on the Characteristics of VIV and Whirl Motion of Rotating Drill Pipe, the ASME 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE), 2013 June 13, Nantes, France

井上朝哉、勝井辰博、実海域掘削データのドリルパイプ疲労累積推算への活用について、平成25年度日本船舶海洋工学会春季講演会、2013年5月27日、広島国際会議場、広島県、広島市

井上朝哉、許正憲、佐倉弘持、「ちきゅう」による東北地方太平洋沖地震源掘削におけるドリルパイプ疲労強度検討について、平成24年度日本船舶海洋工学会秋季講演会、2012年11月26日、東京大学柏キャンパス、千葉県、柏市

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・主任技術研究員
研究者番号：10359127

(2) 研究分担者

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

山本 美希 (YAMAMOTO, MIKI)
独立行政法人海洋研究開発機構・
数理科学・先端技術研究分野・研究員
研究者番号：50514296