

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14587

研究課題名（和文）掘削パラメータを用いた地下/海底下原位置有効強度計測手法の実験的検証

研究課題名（英文）Experimental verification for strength evaluation under seafloor based on drilling parameter

研究代表者

濱田 洋平（HAMADA, Yohei）

国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(高知コア研究所)・副主任研究員

研究者番号：80736091

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、地下/海底下の現場応力下の強度断面を直接的に測定する手法を開発することを目的として、掘削時に取得される回転数、トルクの記録から算出される掘削等価強度と岩石の強度比からその関係式を実験的に導出した。乾燥・常圧での掘削実験の結果、掘削等価強度(EST)と岩石の一軸圧縮強度の間におおむね1:1の比例関係が認められた。これは、実験条件での掘削では、振動や孔内くずれの影響がないために、バックグラウンドトルクが生じず、掘進のエネルギーが岩石の靱性と一致しているためと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

掘削パラメータから地層の物性値を抽出する試みは古くより行われてきており、掘削オペレーションではMSEとして広く利用されている。しかしこのMSEは掘削状況の評価として利用されており、実際の岩石の強度とともにパイプの振動やドリルビットの摩耗状況を反映するため、岩石のみの情報を抽出できていなかった。本研究で整備されたESTと岩石強度の関連性により、掘削深度までの連続的な原位置強度が得られることで、地球科学において利用される様々な地下モデリングに大きな制約を与えることができるようになる。特に、試料回収が難しい大深度の岩盤(例えばマントル)などの強度測定には、本手法が有用となったと考える。

研究成果の概要（英文）：In order to develop a method to directly measure the strength cross-section under in-situ stress in the subsurface/seafloor, we experimentally derived an equation that relates the equivalent strength of excavation (EST) to the strength ratio of rock, which is calculated from the rotation speed and torque records obtained during excavation. The results of drilling experiments under dry and ambient pressure showed a roughly 1:1 proportional relationship between the equivalent strength of drilling (EST) and the uniaxial compressive strength of rock. This is because the energy of drilling under the experimental conditions is consistent with the toughness of the rock, since there is no background torque due to the absence of vibration and borehole collapse effects.

研究分野：地球科学

キーワード：掘削等価強度 Equivalent strength

## 1. 研究開始当初の背景

IODP 南海トラフ掘削計画など種々の掘削研究において、海底下岩盤の強度は主要なターゲットとみなされている。他方、間隙水圧や原位置有効強度は深さ方向に連続的に測定された例は極めて少なく、IODP 南海トラフ掘削においても C0002 孔の 2 例にとどまっている。近年、掘削試料を必要とせずに、ボーリング掘削時に取得される「掘削パラメータ」を利用し、地層の強度物性値に変換する数値計算手法(掘削等価強度[Equivalent strength: EST])が提案され、南海トラフをはじめ様々な地質帯へ応用されている。一方で、南海トラフ C0002 掘削孔における掘削試料を用いた実験的手法による強度推定と比較すると、EST は過大な値を示している。これは、EST 算出時に掘削速度などの影響を考慮できていないためと考えられており EST と真の原位置強度の間にはそれらの影響を考慮した修正項が必要であると考えられる。このために、現時点で EST はあくまで原位置の岩石強度の相対値として用いられ、EST は地質解釈への利用にとどまっている。地震発生帯をはじめ、大深度の掘削では掘削コアの回収率が一般的に低く、EST 以外での原位置強度測定は難しい。そのため、EST - 原位置強度の正確な相関関係の作成が望まれている。

## 2. 研究の目的

上記研究背景から、本研究では、1) 高速摩擦試験機を用いた掘削模擬実験による原位置有効強度と EST の相関関係の解明、つまり、現状で EST が強度を過大評価している原因の究明と、強度の絶対値へと変換するための変換係数を決定すること、および 2) IODP Exp.348 で得られた、プレート沈み込み帯浅部のスロー地震発生帯における原位置有効強度分布の決定を目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 高速摩擦試験機を用いた掘削模擬実験

EST と岩石の原位置強度との正確な相関関係を明らかにするため、試験機を用いた模擬掘削実験を行う。海洋研究開発機構・高知コア研究所設置の高速せん断試験機 (図 1) に、新たに掘削環境を模したドリルビットを作成し、鉛直応力、回転速度を制御しながら掘削実験を行う。試料ホルダ部を改良し、新たに給水タンク、増圧機を導入することで流体圧を制御しながらの掘削実験も試みる。かつ実際の掘削環境に近い流水型のシステムを構築する。本試験機は垂直荷重 100 kN、水圧 50MPa で設計されており、この流体制御システムの追加のみで実際の掘削環境(海底下 1000 m)を再現することが可能である。様々な強度帯における EST - 原位置強度の相関を網羅するため、半遠洋性堆積物、珪藻土、天然の付加体試料(白亜系四万十帯砂岩・泥岩)や標準岩石試料であるベレア砂岩などの実験試料について、常圧条件・原位置条件での掘削実験を実施する。水圧と垂直応力をそれぞれ 0-30 MPa の間で、回転速度を 1-10 RPM の間で変化させ、各条件での計測トルク、掘進速度から EST を算出する。加えて、上記試料について、各水圧条件下での三軸せん断強度(実験における原位置強度)を高知コア研究所設置の三軸強度試験機を用いて測定する。これにより、同試料・同条件での EST と強度を測定し、EST - 原位置強度の相関の確認及び相関式の作成を行う。各掘削条件ごとの EST-原位置強度の相関図を作成・重ね合わせて重回帰分析を行うことで、EST-原位置強度の変換式を作成する。



図 1: 掘削実験に用いた高速せん断試験機  
実際の掘削環境を模した掘削実験に使用する回転式試験機。(海洋研究開発機構に設置)

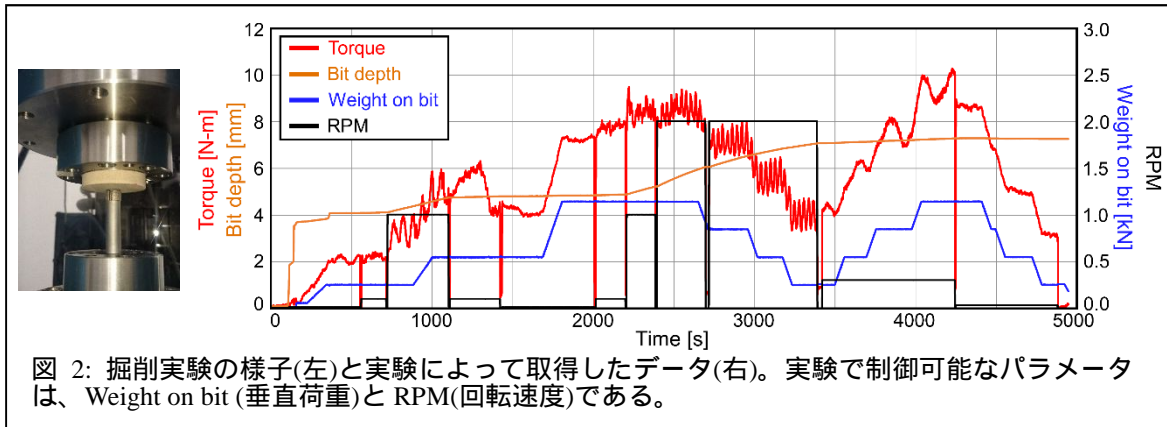
### (2) 沈み込み帯の原位置強度プロファイルの推定

IODP Exp. 358 C0024 孔では、現生付加体の主要な構成要素(被覆堆積物、付加体、浅部プレート境界断層)を貫いている。またこの掘削孔では、地球深部探査船「ちきゅう」そのものを使った大規模な掘削実験も行われている。この掘削パラメータのデータを基に、まずは Hamada et al. (2018c) に基づき、原位置の間隙水圧を反映した EST プロファイルを計算する。その後、1) で作成される EST と原位置強度の変換から、浅部スロースリップ領域・浅部プレート境界断層部の原位置有効強度プロファイルを作成する。また、地震発生帯の強度分布を合わせて議論すべく、IODP Exp. 343 JFAST で掘削された、日本海溝プレート境界先端部についても強度の推定を実施する。

## 4. 研究成果

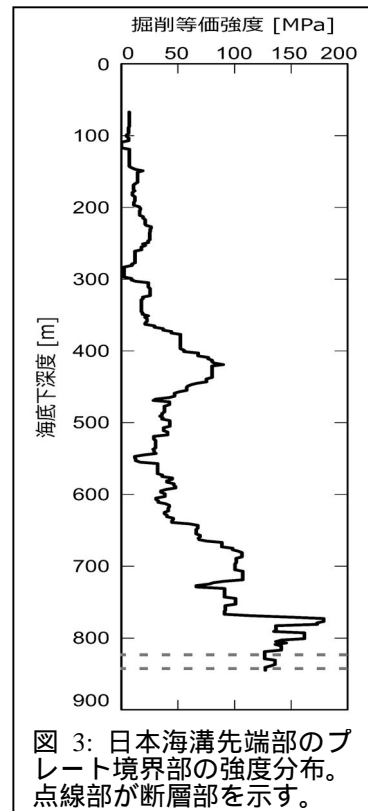
高速せん断試験機のホルダに適合したステンレス製のドリルビットを用意し、標準岩石(イン

ド砂岩、玄武岩、珪藻土など) に対し、垂直応力をそれぞれ 0.2-2.0 kN (1.6-16.2MPa 相当) の間で、回転速度を 0.001-10 RPM の間で変化させ、各条件でのトルク、掘進速度を測定した。掘削実験によって得られた時系列データを図 2 に示す。RPM ビット深さ(掘進距離) ビット荷重 回転速度(RPM)のデータを重ねて表示している。これを用いて、掘進に使用するエネルギー( $U_s$ )とビットと岩石間の摩擦エネルギー( $E_f$ )、振動やビットと壁の摩擦による掘進に寄与しないエネルギー消費をそれぞれ算出した。種々の岩石についてこのエネルギー比率を算出したところ、 $E_s/U_s$  2%となった。これは海洋掘削の際に得られた 1-5%と比して同等の値であり、この実験系が実際の掘削を模擬していることが示唆された。この記録された掘削データを基に EST を算出し、各岩石の一軸強度と相関を取った。その結果、インド砂岩における EST は 90.5MPa であり、岩石の一軸強度、106.8MPa と近い値を示した。珪藻土や軟堆積物に関しては、EST は各々 1.5 MPa、8.4 MPa となり、実際の強度 2.0 MPa、0.3 MPa と比べると誤差が大きくなった。これは、軟堆積物等の軟らかい物質になると、掘削時の摩擦、振動などによる誤差が大きくなったためと考えられる。強度 - 掘削データの文献値と今回の結果から、EST と岩石の強度にはおよそ 1:1 の関係があることが示された。



得られた成果を基に、IODP Exp. 358 南海トラフ掘削と、Exp 343 日本海溝掘削で得られた掘削パラメータを用いて、南海トラフ付加体や日本海溝プレート境界部の強度分布の算出を行った。Exp. 358 の海底下約 3100m にわたる掘削パラメータからは、付加体深部にわたる強度分布が復元された。Hamada et al. (2018)で報告した強度分布を延伸し、別の掘削プロジェクトで得られた掘削パラメータについても、連続的な強度を算出可能であることが示された。図 3 には日本海溝の強度分布の算出結果を示す。日本海溝のプレート境界断層部(図 3 点線部)では、プレート境界直上の遠洋性堆積物からの強度弱化が見られたものの、一方で、先行研究(Ujiie et al., 2013)で報告されたほどの低強度部は確認されず、また 370-450m、760-810m には、検層からは確認されなかった高強度帯も検出された。これは岩相に寄らず高強度を持つ深度が存在していることを示唆しており、特にプレート境界直上の高強度帯は、断層の母岩としての機能を持っている可能性もある。

参考文献:Ujiie, K., et al., 2013, Low coseismic shear stress on the Tohoku-Oki megathrust determined from laboratory experiments, Science, 342, 6163, 1211-1214  
Hamada et al., 2018, Continuous depth profile of the rock strength in the Nankai accretionary prism based on drilling performance parameters, Scientific reports, 8-1.



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hirose, T., Hamada, Y., Tanikawa, W., Kamiya, N., Yamamoto, Y., Tsuji, T., Kinoshita, M., Heuer, V., Inagaki, F., Morono, Y., Kubo, Y.	4. 巻 126
2. 論文標題 High Fluid Pressure Patches beneath the Decollement: A Potential Source of Slow Earthquakes in the Nankai Trough off Cape Muroto.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021JB021831	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 該当する

1. 著者名 Kameda, J., and Hamada, Y	4. 巻 4
2. 論文標題 Stick-slip behavior of a clayey crustal fault	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research.	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.4.013211	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kameda Jun, Hamada Yohei	4. 巻 47
2. 論文標題 Cohesional Slip on a Plate Subduction Boundary During a Large Earthquake	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020GL088395	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 -

1. 著者名 Yabe Suguru, Fukuchi Rina, Hamada Yohei, Kimura Gaku	4. 巻 72
2. 論文標題 A new method for the empirical conversion of logging data to clay mineral fraction in the Nankai accretionary prism	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-020-01303-1	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 -

1. 著者名 Kameda Jun, Yohei Hamada	4. 巻 11
2. 論文標題 Influence of biopolymers on the rheological properties of seafloor sediments and the runout behavior of submarine debris flows	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-81186-8	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0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

#### 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
---------	---------