

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 17 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287123

研究課題名(和文) 東北沖地震後の地殻変動を予測する岩石の遷移挙動レオロジーの実験的研究

研究課題名(英文) Experimental research on the transient rheology of rocks for the understanding of post-seismic deformation of the Tohoku Oki Earthquake

研究代表者

武藤 潤 (Muto, Jun)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40545787

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、今まさに進行中の東北沖地震後の余効変動を予測するための岩石のレオロジー特性を、高温・高圧岩石変形試験により解明することである。この目的を達成するため、東北大学のガス圧試験機および固体圧試験機の改良を行い、高い応力測定精度で岩石のレオロジー特性の測定を行うことのできる試験機を整備した。これらを用いて、下部地殻深部や上部マントルを構成する岩石の流動変形実験を行い、粘性流動特性とそれに及ぼす流体の効果を明らかにした。また実験的に得られている遷移流動特性を使用した2次元余効変動解析を行い、東北沖地震後の余効変動解析に適応可能な遷移過程を含む不均質レオロジーモデルを構築した。

研究成果の概要(英文)：The objective of the study is to conduct deformation experiments of lower crust and upper mantle rocks to illuminate their rheological properties predicting the postseismic deformation of the Tohoku-oki earthquake. To this end, we conducted the reinvention of furnaces of a gas confining medium apparatus and improvement of the resolution of stress measurement in a solid confining medium apparatus in Tohoku University. Using those apparatuses, we conducted deformation experiments of various rocks composing of subduction zone mantle wedge and deeper portion of plate boundary, and clarified the properties of viscous flow with the special emphasis on the role of fluid. In addition, we conducted a two-dimensional analysis of the post-seismic deformation using experimentally obtained rheological properties of transient phases and constructed a heterogeneous rheology model including the transient process applicable to the postseismic deformation of the Tohoku earthquake.

研究分野：岩石レオロジー

キーワード：東北沖地震 レオロジー 余効変動 粘弾性緩和 余効すべり 上部マントル 下部地殻

1. 研究開始当初の背景

3.11 東北地方太平洋沖地震(以下、東北沖地震と略記)による東北地方沿岸部の地盤沈下はいつ回復するだろうか?これまでの Mw9 級地震後の余効変動観測からは、マントルや下部地殻などの低粘性領域で起こる流動(粘弾性緩和)よりゆっくり回復すると考えられている。しかし、東北日本弧の様な冷たい沈み込み帯で大規模な流動は起こるのであるか?その遷移流動挙動を予測する岩石力学的でデータは乏しく、沿岸部の回復がどの程度の時空間スケールで起こるのかという問いには答えられない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、今まさに進行中の東北沖地震後の余効変動を予測するための岩石のレオロジー特性を、高温・高圧岩石変形試験により解明することである。以上から、研究の3カ年で、東北沖地震余効変動解析に適用可能な遷移過程のレオロジーモデルを構築する。

3. 研究の方法

2の目的を達成するため、以下の2方法の研究方策で沈み込み帯を構成する岩石の変形実験を行う。1)東北大学既設のガス圧試験機を、世界最高水準となるアセノスフェア温度条件を安定的に発生可能なものに改良する。2)上部マントル圧力条件を生成できる固体圧変形試験機を改良し、応力測定精度を向上する。以上の2試験機を用いて、沈み込み帯プレート境界や東北日本弧深部の主要鉱物の変形特性を調べる。また、地震による応力擾乱を模した実験を行い、載荷直後の遷移過程とその後の定常過程の力学挙動を詳細に測定する。回収試料の微細組織観察から、レオロジー特性を解明する。

4. 研究成果

固体圧変形試験機の応力測定精度向上を目指し、流動強度の圧力依存性の低い金属試料を用いて、ガス圧試験機との強度の比較を行った。固体圧試験機により計測された流動強度は、全般にガス圧試験機のそれより大きい。その差は Holyoke and Kronenberg (2010) により提唱された固体塩アセンブリの歪量5%における校正値と等しい。一方、様々な変形温度と歪量での強度から、マスターカーブを作成することにより、歪量や温度に依存せず、固体圧変形試験機の力学データから、応力測定精度の高いガス圧試験機の強度を復元する事が可能になった。Holyoke and Kronenberg (2010)では、歪量5%の結果のみしか推定できなかったが、本研究により弾性領域・降伏領域といった応力-歪曲線の全体を復元することが可能になり、固体圧試験機でも変形時の歪硬化・軟化など降伏後の挙動も高精度に復元することに成功した。これらを用いて、定常挙動だけではなく、遷移挙動や

反応による歪軟化挙動を明らかにすることが可能になった。

得られた固体圧試験機のアセンブリを用いて、沈み込む海洋プレート深部に相当する温度圧力条件下でかんらん岩試料の熱水変形実験から、プレート境界深部レオロジーに及ぼす化学反応の効果を調べた。その結果、かんらん岩と水が反応して滑石と呼ばれる含水鉱物が形成され、変形の進行とともに試料の強度が劇的に低下することが明らかになった。実験を行った剪断歪速領域において、得られた最小強度は40 MPaであったことから、天然のゆっくりとしたひずみ速度ではさらに強度低下が進むことが予測される。断層近傍のプレート構成岩石であるかんらん岩に熱水が加わることがプレート境界断層の強度を大きく低下させる可能性があることを明らかにした。

下部地殻での粘弾性緩和現象の担い手である斜長石の流動特性を明らかにするために、固体圧変形試験機を用いて、水を含まない斜長石(アノーサイト)多結晶を用いた変形実験を行った。出発物質のアノーサイトは真空下で焼結した合成試料であり、これに水を付加して、様々な封圧とひずみ速度下での変形実験から、流動強度の低下を調べた。実験条件は、封圧0.8~1.4 GPa, 温度900, 歪速度 $10^{-4.5} \text{ s}^{-1}$, 10^{-5} s^{-1} である。これまでに得られた応力-歪曲線から、水を加えたすべての料において降伏後歪軟化することが明らかになった。一方、無水の試料では差応力が1000 MPa以上で脆性挙動を示す。一定歪速度(10^{-5} s^{-1})下での強度とフュガシティ(封圧)の関係から、歪軟化した試料の強度は封圧に依存せず、Rybacki et al. (2006)によるwetアノーサイトの変形実験から得られた構成則の見積もりよりも低い。これらの事実は、アノーサイトの構成則において、フュガシティの効果による弱化的程度が予測より大きい、もしくはRybacki et al. (2000)のように強度フュガシティに依存しない可能性を示唆する。ただし、いずれの場合もこれまで報告されている構成則の見積もりより、本結果による強度は低いことから、構成則のパラメータに経高がある可能性を強く示唆する。また同一条件でも時間、あるいは変形量の増加とともに強度が低下する傾向が見られた。実験後の回収試料の赤外分光測定からは、変形部は含水量が増加していることが明らかになった。これによりドライの試料が含水することで強度が1/10程度まで減少する可能性が明らかになった。

東北大学既設のガス圧試験機ヒーターを改良し、国内最高温度である1000度を超える温度での実験を行うことを目的として、既存の圧力容器の改良とヒーターの作成を行った。圧力容器はこれまでの国内でのガス圧試験機のものより、大型にし、高圧シール部を試料高温部から距離を取った。またヒーターは、これまでのカンタル線に比べて、より

高温下での使用が可能なモリブデン線ワイヤーによるヒーターを作成した。これらを3ゾーンのヒーター構造と温度コントローラを作成することにより、大型化した压力容器内を効率的に過熱する事のできる3ゾーンヒーターとモリブデン線のヒーター制御に対応した温度調整機を作成した。特に、压力容器の大型化により、容器内部の熱対流が激しくなることが想定されるが、3ゾーン制御により、試料周辺部のみ過熱することが容易になる。3) 压力容器を持ち上げ、フィードスルーや信号線などが多く存在する下部のスペース拡大による試料アセンブリの平易化。压力容器を持ち上げ、フレームと一体化させることで、その下部に試料アセンブリの際に用いることのできるスペースを確保した。これにより、压力容器下部にある内部荷重計・微小変位計・ヒーター線などの結線やアクチュエータとの結合が容易かつ安全に行うことが可能になった。これを用いて、1000 を超える高温実験に成功した。

東北沖地震後の余効変動から東北日本弧の不均質レオロジー特性を明らかにするために、2次元有限要素法を用いて余効変動解析を行った。Iinuma et al. (2015) による余効変動観測データを東北沖地震本震すべりの最大域を通る2次元に投影したものを作成し2次元FEMで粘弾性緩和解析を行った。この測線は岩手・宮城内陸地震震源域付近の東北大学の観測点も含む。特に鳴子カルデラ周辺では、局所的な伸張と沈降を観測している。海底の西向きの水平変位を粘弾性緩和で説明し、さらに陸域の東向き変位を過大評価しないという拘束条件のもと、2次元FEMで、観測を説明するようなレオロジーモデルを構築した。東北日本島弧-海溝系のレオロジー不均質として、火山直下の低粘性帯やリソスフェア-アセノスフェア境界などの含んだ我々のモデルは、第四紀火山である鳴子火山周辺で観測された局所的(20 km以下)な沈下などの余効変動をうまく再現することに成功した。低粘性領域の幅や上端深さを変えた計算を行い、その幅、粘性率、上端深さなどを推定した。その結果、東西幅10 km、上端深さ10 kmの領域に粘性 3×10^{18} Pas程度の低粘性領域を仮定とすると沈降を再現できる。低粘性領域の粘性率を大きくする、もしくは上端深さを深くすると沈降量が足りなくなり、東西幅を大きくすると沈降域が背弧側に拡大する。低粘性領域の形状は、鳴子周辺の稠密地震観測(Okada et al., 2014EPS)や電磁波観測(Ogawa et al., 2014EPS)から見られる鳴子火山直下に垂直に存在する速度・比抵抗異常帯の形状とも一致し、鳴子火山の火道に存在するマグマなどの低粘性物質を見ている可能性がある。Takeuchi (2015 Bull. Volcanol.)によるコンパイルによれば、噴火前のマグマの粘性は、斑晶の割合や含水量にはそれほど依存せず、メルトのシリカ量に強く依存し、流紋岩質の鳴子火山の場

合は、 $10^6 \sim 10^7$ Pas は取りうる。従って、今後も稠密なデータとレオロジー・岩石学火山学的なモデリングを組み合わせる火山帯の粘弾性特性を調べていく必要がある。

また粘弾性モデルと逆解析により推定された余効すべりは、本震の破壊領域の下限付近にピークを持ち、微小繰り返し地震で推定されたすべり量と調和的であった。以上から、非常に局所的な余効変動観測からレオロジーの不均質性を評価できる可能性を示唆するとともに、プレートカップリングの回復を詳細に評価するためには東北日本弧のレオロジー不均質を考慮する必要性を示した。これらの結果により、岩石のレオロジーを考慮した東北地方のレオロジーモデルを提唱することに成功した。

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)

Katsuyoshi Michibayashi, Yumiko Harigane, Yasuhiko Ohara, Jun Muto, and Atsushi Okamoto (2014), Rheological properties of the detachment shear zone of an oceanic core complex inferred by plagioclase flow law: Godzilla Megamullion, Parece Vela back-arc basin, Philippine Sea, Earth Planet. Sci. Lett., 408, 16-23.

Ken-ichi Hirauchi, Jun Muto (2015) Observations of the slow rupture process in synthetic fault gouges. Earth Planets Space, 67:25, doi:10.1186/s40623-015-0199-x.

Masaaki Miyahara, Eiji Ohtani, Ahmed El Goresy, Yangting Lin, Lu Feng, Jian-Chao Zhang, Philippe Gillet, Toshiro Nagase, Jun Muto, Masahiko Nishijima (2015) Unique large diamonds in a ureilite from Almahata Sitta 2008 TC3 asteroid. Geochimica Cosmochimica Acta, 163, 14-26, doi:10.1016/j.gca.2015.04.035.

Jun Muto, Tsurugi Nakatani, Osamu Nishikawa, Hiroyuki Nagahama (2015) Fractal particle size distribution of pulverized fault rocks as a function of distance from the fault core. Geophys. Res. Lett., 42, doi:10.1002/2015GL064026.

Yasuo Yabe, Jun Muto, Mako Ohzono, Yusaku Ohta, Takeshi Iinuma (2015) Rheological Structure beneath NE Japan Inferred from Coseismic Strain Anomalies Associated with the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw9.0). International Association of Geodesy Symposia, doi: 10.1007/1345_2015_135.

Masanori Kido, Jun Muto, Hiroyuki Nagahama (2016) Method for correction of differential stress calculations from experiments using the solid salt assembly in

a Griggs-type deformation apparatus. Tectonophysics, 672-673, 170-176, doi:10.1016/j.tecto.2016.02.011.

Bunichiro Shibazaki, Tomomi Okada, Jun Muto, Takumi Matsumoto, Takeyoshi Yoshida, Keisuke Yoshida (2016) Heterogeneous stress state of island arc crust in northeastern Japan affected by hot mantle fingers. Journal of Geophysical Research, Solid Earth, 121, doi:10.1002/2015JB012664.

Jun Muto, Bunichiro Shibazaki, Takeshi Inuma, Yoshihiro Ito, Yusaku Ohta, Satoshi Miura, Yoshihiko Nakai (2016) Heterogeneous rheology controlled postseismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake. Geophysical Research Letters, 43, doi:10.1002/2016GL068113.

Ken-ichi Hirauchi, Kumi Fukushima, Masanori Kido, Jun Muto, Atsushi Okamoto (2016) Reaction-induced rheological weakening enables oceanic subduction. Nature Communications, doi: 10.1038/ncomms12550.

〔学会発表〕(計4件)

武藤 潤・芝崎 文一郎・飯沼 卓史・西村 卓也 (2015) 地震間-地震後の東北日本弧における垂直変動のモデル化：レオロジー不均質の効果. 日本地球惑星科学連合、幕張、5月26日.

木戸 正紀・武藤 潤・長濱 裕幸 (2015) Griggs 型高温高压変形試験機の応力測定値の較正. 日本地球惑星科学連合、幕張、5月26日.

Jun Muto, Bunichiro Shibazaki, Takeshi Inuma, Yoshihiro Ito, Yusaku Ota, Yoshihiko Nakai (2016) Testing rheological heterogeneity of the NE Japan by two-dimensional analysis of post-seismic deformation of the Tohoku-oki earthquake. International Symposium on Crustal dynamics 2016, Takayama, 2016/7/19.

Jun Muto, Bunichiro Shibazaki, Takeshi Inuma, Yoshihiro Ito, Yusaku Ota, Yoshihiko Nakai (2016) Afterslip estimate by heterogeneous rheology in post-seismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake. AOGS 2016 Peking, 2016/8/1.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：

種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<http://dges.es.tohoku.ac.jp/kozo/>
<http://muto.nornir.co/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

武藤 潤 (MUTO, Jun)
東北大学・大学院理学研究科地学専攻・准教授
研究者番号：40545787

(2)研究分担者

平賀 岳彦 (HIRAGA, Takehiko)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号：10444077

飯沼 卓史 (IINUMA, Takeshi)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地震津波海域観測研究開発センター・研究員
研究者番号：10436074

大園 真子 (OHZONO, Mako)
北海道大学大学院理学研究院・附属地震火山研究観測センター・講師
研究者番号：10623837

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

()