

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24244077

研究課題名(和文) 東北日本弧プレート境界面の力学特性解明を目指した実験的研究

研究課題名(英文) Experimental study on mechanical properties of plate interface of the northeastern Japan subduction zone

研究代表者

長濱 裕幸 (Nagahama, Hiroyuki)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60237550

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 27,400,000円

研究成果の概要(和文)：2011年東北沖地震とその余効変動機構を解明するために、沈み込み帯を構成する岩石類の変形実験を行った。ガス圧試験機による摩擦実験から、石英ガウジの摩擦不安定性は、ガウジ中の内部構造を反映したエネルギー比に依存する。また、蛇紋岩などの破壊伝播速度は、岩石種の摩擦特性と垂直応力に依存するため、スロースリップはプレート境界の物質科学・力学的応力状態を反映している可能性がある。固体圧変形試験機を用いた島弧下部地殻条件を模した変形実験から、長石多結晶体の変形機構および強度は、外部から添加された水の存在によって大きく影響を受ける。さらに、東北日本島弧・海溝系とプレート境界のレオロジーモデルを提案した。

研究成果の概要(英文)：In order to reveal the mechanism of the 2011 Tohoku Oki earthquake and subsequent post-seismic deformation of the northeastern Japan, we have conducted deformation experiments of a wide variety of rocks composing subduction zones. By the friction experiments using gas rig, frictional stability of quartz gouge is observed to be correlated to energy ratio of the gouge controlled by internal structure of gouges. Moreover, rupture velocity of serpentinites and olivine gouges depends on their frictional coefficients and normal stress, implying that the slow slip in subduction zones illuminates the stress state of the plate boundary. By the shear experiments using Griggs rig, deformation mechanisms and creep strengths of feldspars are significantly reduced by the presence of water added externally into the samples under the lower crustal condition. We also proposed rheological models of the NE Japan island arc-trench systems and plate boundary causing the 2011 Tohoku Oki earthquake.

研究分野：構造地質学

キーワード：東北地方太平洋沖地震 沈み込み帯 プレート境界地震 レオロジー 余効変動 岩石力学 固体圧岩石変形試験機 ガス圧岩石変形試験機

1. 研究開始当初の背景

2011年東北地方太平洋沖地震(M9、以下では東北沖地震と略記)の特徴は、破壊領域が広大であったことに加え、固着しているとは思われていなかった海溝寄りの広範な領域で30~50mもすべったことである。その後に行われた数値シミュレーションは、プレート境界の摩擦パラメータに適切な不均質性を仮定すれば、1000年に一度の巨大地震発生を再現することが可能であることを示唆した。しかし、これらの摩擦パラメータに関しては、実験的裏付けがほとんど無いのが実情である。また日本海溝を中心として東北日本-関東周辺では、現在、大規模な余効変動が発生している。余効変動において、粘弾性緩和は岩石の粘弾性特性に大きく影響を受けるが、今後の推移の予測に資する様々な岩石の流動特性に関する知識は少なく東北日本島弧-海溝系のレオロジー構造も不明な点が多い。

2. 研究の目的

本研究計画は、東北大学が所有する2台の岩石変形試験機(ガス圧・固体圧式)を相補的に駆使し、沈み込み帯の広範な温度圧力条件下におけるプレート境界および島弧-海溝系を構成する岩石の摩擦、破壊、および塑性(粘性)流動特性を明らかにすることを目的とする。

上記の目的のため、ガス圧試験機をサーボ制御化へと改良することで、摩擦パラメータを推定する実験を行う。さらに、固体圧試験機を相補的に用いて、沈み込み帯深部の非地震性変形挙動を再現する実験を行う。3カ年の研究期間内において、1)ガス圧変形試験機の載荷・間隙圧制御システムをサーボ化し、2)摩擦実験を行い、摩擦特性、とくに摩擦不安定性現象を明らかにし、3)固体圧変形試験機を使い、2)よりさらに深部に相当する条件下で剪断変形実験を行い、摩擦-塑性流動変形の機構が遷移する温度・圧力条件および塑性流動変形機構を調べる。

3. 研究の方法

本研究は東北日本プレート境界および島弧深部における岩石の変形特性を調べることを目的とし、東北大に現有する1)ガス圧試験機の載荷・間隙圧制御システムをサーボ制御へと改良することで、静水-静岩圧に近い高間隙水圧下で、摩擦の安定性(速度依存性)を調べ、2)固体圧変形試験において高応力測定精度のアセンブリを開発し、摩擦-塑性遷移物理条件および塑性流動特性を調べる。1)から、プレート境界地震発生領域における岩石の摩擦特性を、2)から余効変動(非地震性)領域の力学特性を高精度で決定する。試料には、プレート境界を構成する岩石で、これまで摩擦物性データがない堆積岩類、蛇紋岩類やかんらん岩などを対象とする。以上をまとめ、沈み込み帯物質の変形特性を明ら

かにすることで、今後の東北沖での地震発生サイクルや余効変動解析に用いることができるような力学データを出すことを念頭におき実験を行った。

4. 研究成果

沈み込み帯を構成する岩石の摩擦挙動を明らかにするために、研究費を用いて既設のガス圧変形試験機の改良を行った。プレテック社製同試験機専用サーボシステム一式(間隙圧兼封圧調整器、油圧装置、ピストン変位・軸力サーボ制御装置、間隙圧・封圧サーボ制御装置)を購入し、サーボ制御に改良した。これにより、極めて多彩なピストン変位、軸力、封圧、間隙圧の制御を高速・高精度かつ安定的に制御することが可能になった。

ガス圧試験機を用いて、沈み込み帯を構成する岩石の中で、データの少ないかんらん岩や蛇紋岩の模擬断層ガウジを用いて摩擦実験から、破壊伝播速度が剪断応力に反比例、垂直応力に比例することを明らかにした。特に垂直応力の減少に伴い、ラブチャー速度は遅くなり、短期的Slow slip event (SSE)と同程度の低ラブチャー速度になることを明らかにした。このことは、沈み込み帯深部プレート境界において、脱水により生成した高間隙圧流体の存在と弱い断層物質(蛇紋岩類など)の存在が、ゆっくりとした破壊(スロー地震など)を引き起こしている可能性を示唆している。

さらに、チャートなど石英岩類の非晶質化による断層弱化機構の解明を目指し、摩擦の素過程であるアスペリティの剪断運動を模擬した摩擦実験を行った。ラマン分光を用いたガウジの分析から、石英単結晶のSiO₄四面体6員環ネットワーク構造が、摩擦によって、3もしくは4員環をなす非常に歪んだ構造になることが明らかになった。このような歪んだ結晶構造は量子化学的に非常に不安定であり、水の存在下で容易に含水化し非晶質化することから、含水シリカの形成が、チャートなどの石英岩類の速度弱化を引き起こす可能性を指摘した。本研究は、ラマン、赤外分光などを用いることで、摩擦による断層ガウジの非晶質・含水過程を量子化学的に初めて解明することに成功した。

東北沖地震を引き起こしたプレート境界構成物質の摩擦の不安定性を調べるために、ガス圧試験機を用いて摩擦実験を行った。石英を使った模擬断層ガウジの実験から、摩擦の不安定性と封圧との関係、ガウジ量との関係を明らかにした。また、歪ゲージを用いて石英ガウジの載荷応力緩和中のエネルギー比を求めた。ガウジの載荷中はエネルギー比が徐々に小さくなりやがて一定値を保つこと、エネルギー比に乱れが生じる時期(歪量)が摩擦の不安定を引き起こす時期(歪量)と一致することを明らかにした。以上から、断層ガウジの変形はRowe (1962)によるエネルギー比一定の法則に従い進展することを示した。またエネルギー比は内部摩擦角に依存すること

から、摩擦の不安定と同時に起こるエネルギー比の乱れは内部摩擦角の変化を象徴している。これにより、これまで定性的に議論されてきた断層ガウジの組織発達と摩擦の不安定性に関する過去の摩擦実験の結果（例えば、Ikari et al., 2011）をエネルギー論的に証明することに成功した。

地震後の余効変動を左右する沈み込み帯-島弧岩石の粘性挙動を明らかにするために、地殻深部-マントル条件を発生することの出来る固体圧試験機における差応力決定精度を向上させるためのアセンブリを改良した。強度が封圧に依存しない金属試料を用いて、固体圧試験機とガス圧試験機で得られた様々な温度・封圧・歪速度・歪量の強度を比較することで、固体圧試験機の応力較正則を構築した。これにより日本海溝などの冷たい沈み込み帯深部の高圧・低温条件においても固体圧試験機を用いて詳細なレオロジー実験が可能になった。

さらに固体圧変形試験機を使って、島弧下部地殻の主要構成鉱物である長石の流動に対する水の効果を調べた。特に加える水の量が増加することで、脆性破壊から局所的な塑性変形が卓越し、強度が大きく低下する（無水試料の強度の1/10程度）ことが明らかになった。また電子線後方散乱解析法により、長石多結晶体の変形機構を明らかにした。実験において、長石多結晶体の塑性変形が見られた含水量は、下部地殻のレオロジーにおいて、地震波トモグラフィや比抵抗探査などから推定されているものとほぼ等しいことから、このような下部地殻での高間隙圧・含水領域は、周囲の局所的な塑性変形を促進する可能性を指摘し、水の拡散現象が地殻深部岩石の変形挙動を大きく左右する可能性があることを明らかにした。

沈み込み帯構成物質の弾性波速度特性を明らかにするために、ガス圧試験機を用いた岩石の弾性波速度測定システムの構築を行った。圧電素子をガス圧試験機内に配置し、透過法にて測定するシステムを構築することで、間隙圧を制御した弾性波速度測定が可能になった。得られたシステムを用いて沈み込み帯を構成する堆積岩類の弾性波速度測定を行い、弾性波速度の有効圧依存性を検討した。既報のフラクタル接触理論を援用することで、岩石の弾性波速度の圧力依存性から、岩石中での亀裂面の接触状況を推定できる可能性を指摘した。

これまで報告されている東北日本弧の地温構造や地震発生層の厚さ、および岩石力学実験から決められた各種鉱物の構成則などを使い、余効変動解析において重要な東北日本島弧-海溝系の粘性構造を提唱した。得られたモデルは通常の測地学的手法で仮定される1次元成層粘弾性構造に比べ、東北日本弧は島弧に直交する方向に著しい粘性率の不均質性を持つことを示した。東北沖のプレートカップリングを詳細に評価するための東北沖地震余効変動の定量的解析において、レオロジー不均質構造を考慮す

る必要があることを指摘した。

東北沖地震を引き起こしたプレート境界断層の特性を知るためレオロジーモデルを構築した。地球物理学的観測からは、本震の震源付近とM7級の宮城県沖地震アスペリティー付近に沈み込んだ海山の存在が推定される。温度構造より、プレート境界上部は島弧および海洋地殻物質の脆性変形に支配され、深部では海洋地殻の塑性変形が起きていると考えられる。海洋地殻の堆積層はwet石英および粘土、海山はハンレイ岩の摩擦・破壊強度で代表し、間隙圧が深度とともに岩圧に近づいていくことも考慮して、強度エンベロープを作成した。宮城県沖地震の震源域は石英の延性領域にあり、M7級アスペリティーの実体は海山である可能性が高い。M9震源の深さでは断層強度が岩相に大きくは依存しないため、プレート上面における流体の乏しい領域を中心に巨大なアスペリティーが形成されたと考えられる。

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 18 件)

Yuka Kobayashi, Yumi Yasuoka, Yasutaka Omori, Hiroyuki Nagahama, Tetsuya Sanada, Jun Muto, Toshiyuki Suzuki, Yoshimi Homma, Hayato Ihara, Kazuhito Kubota, Takahiro Mukai (2015) Annual variation in the atmospheric radon concentration in Japan. Journal of Environmental Radioactivity, 146, 1-9 (査読有) .

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. Geophysical Research Letters, 42, doi:10.1002/3015GL064026 (査読有) .

Ken-ichi Hirauchi, Jun Muto (2015), Effect of stress state on slow rupture propagation in synthetic fault gouges, Earth Planet Space, 67, 25, doi 10.1186/s40623-015-0199-x (査読有) .

Ichiko Shimizu (2014), Rheological profile across the NE Japan interplate megathrust in

the source region of the 2011 Mw9.0 Tohoku-oki earthquake, *Earth, Planets and Space*, 66:73, doi: 10.1186/1880-5981-66-73 (査読有) .

Koseki Hayashi, Yumi Yasuoka, Hiroyuki Nagahama, Jun Muto, Tetsuo Ishikawa, Yasutaka Omori, Toshiyuki Suzuki, Yoshimi Homma, Takahiro Mukai (2014) Normal seasonal variations for atmospheric radon concentration: a sinusoidal model. *Journal of Environmental Radioactivity*, 139, 149-153 (査読有) .

Tetsuro Sato, Norihiro Nakamura, Kazuhisa Goto, Yuho Kumagai, Hiroyuki Nagahama, Koji Minoura (2014), Paleo magnetism reveals the emplacement age of tsunamigenic coral boulders on Ishigaki Island, Japan, *Geology*, 42, 603-606, doi:10.1130/G35366.1 (査読有) .

Katsuyoshi Michibayashi, Yumiko Harigane, Yasuhiko Ohara, Jun Muto, 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 and Planetary Science Letters*, 408, 16-23 (査読有) .

Yoko Ohtomo, Takeshi Kakegawa, Akizumi Ishida, Toshiro Nagase, Minik T. Rosing (2014), Evidence for biogenic graphite in earthy Archean Isua metasedimentary rocks. *Nature Geo- science*, 7, 35-28, doi:10.1038/ngeo 2025 (査読有) .

Takashi Iidaka, Jun Muto, Kazushige Obara, Toshihumi Igarashi, Bunichiro Shibazaki (2014), Trench-parallel crustal anisotropy along the trench in the fore-arc region of Japan, *Geophysical Research Letters*, 41, doi:10.1002/ 2013GL058359 (査読有) .

Kazuhei Kikuchi, Kazutoshi Abiko, Hiroyuki Nagahama, Jun Muto, (2014) Self-affinities analysis of fault-related folding. *Episodes*, 37, 308-311 (査読有) .

Momoko Hirata, Jun Muto, Hiroyuki Nagahama (2014) Experimental analysis on Rowe's stress-dilatancy relation and frictional instability of fault gouges. *Episodes*, 37, 303-307 (査読有) .

Takahiro Yajima, Kazuhito Yamasaki, Hiroyuki Nagahama (2013), Geometry of stress function surfaces for an asymmetric continuum, *Acta Geophysica*, 61, 1703-1721 (査読有) .

Yusuke Kawada, Takahiro Yajima and Hiroyuki Nagahama (2013), Fractional-order derivative and time-dependent viscoelastic behaviour of rocks and minerals, *Acta Geophysica*, 61, 1690-1702 (査読有) .
Jun Muto, Bunichiro Shibazaki, Yoshihiro Ito, Takeshi Iinuma, Mako Ohzono, Takumi Matsumoto, Tomomi Okada (2013), Two-dimensional viscosity structure of the northeastern Japan islands arc-trench system, *Geophysical Research Letters*, 40, doi:10.1002/grl.50906 (査読有) .

Kazuhei Kikuchi, Kazutoshi Abiko, Hiroyuki Nagahama, Hiroshi Kitazato, Jun Muto (2013), Self-affinities of landforms and folds in the Northeast Honshu arc, Japan, *Acta Geophysica*, 61, 1642-1658, doi: 10.2478/s11600-013-0151-z (査読有) .

武藤 潤, 大園 真子 (2012) 東日本太平洋沖地震後の余効変動解析に向けた東北日本弧レオロジー断面. *地質学雑誌特集号(東北地方太平洋沖地震 - 統合的理解に向けて -)* 118 , 323-333, doi:10.5575/geosoc.2012.0026 (査読有) , 平成24年日本地質学会研究奨励賞受賞.

Mako Ohzono, Yusaku Ohta, Takeshi Iinuma, Satoshi Miura, Jun Muto (2012), Geodetic evidence of viscoelastic relaxation after the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake. Earth Planets and Space, 64, 759–764, doi:10.5047/eps.2012.04.001 (査読有) .

Yu Nakamura, Jun Muto, Hiroyuki Nagahama, Ichiko Shimizu, Takashi Miura, Ichiro Arakawa (2012), Amorphization of quartz by friction: Implication to silica-gel lubrication of fault surfaces. Geophysical Research Letters, 39, L21303, doi:10.1029/2012GL053228 (査読有) .

〔学会発表〕(計 80 件)
下記は 3 年間で代表的なもののみをあげる

Masanori Kido, Jun Muto, Hiroyuki Nagahama (2014), Development of calibration law for measured differential stresses using Griggs-type solid medium apparatus. Asia Oceania Geosciences Society 11th Annual Meeting, 札幌, 2014/7/31.

Momoko Hirata, Jun Muto, Hiroyuki Nagahama, Kenshiro Otsuki (2013), The friction experiments using simulated fault gouge: Rowe's constant energy ratio. American Geophysical Union 2013 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2013/12/10.

Jun Muto, Jun-ichi Fukuda, Hiroyuki Nagahama (2012), Effect of crustal fluids on plastic deformation of polycrystalline anorthite. Achievements of G-COE Program for Earth and Planetary Dynamics and the Future Perspectives. Sendai, Japan, 2012/9/12.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕(計 0 件)

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

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

長濱 裕幸 (NAGAHAMA, Hiroyuki)
東北大学大学院理学研究科・教授
研究者番号：60237550

(2) 研究分担者

武藤 潤 (MUTO, Jun)
東北大学大学院理学研究科・助教
研究者番号：40545787

長瀬 敏郎 (NAGASE, Toshiro)
東北大学学術資源公開センター・准教授
研究者番号：10237521

清水 以知子 (SHIMIZU, Ichiko)
東京大学大学院理学系研究科・助教
研究者番号：40211966