

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22740328

研究課題名(和文) 下部地殻部分溶融体のレオロジーと弾性波速度に関する実験的研究

研究課題名(英文) Experimental research on rheology and seismic wave velocity properties of partially molten lower crustal rocks

研究代表者

武藤 潤 (Muto, Jun)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40545787

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では下部地殻の主要鉱物である斜長石多結晶体を用いて、メルトの存在に伴う流動特性の変化と水の効果を高圧岩石変形実験により調べた。含水下での流動強度は、メルト量の増加に伴い減少する。また、外部から加える水の量と歪速度に依存し、流動強度と変形機構は変化する。軟化が見られた実験で加えた水の量は、これまで地球物理学的観測から報告されている下部地殻での含水量の下限値に等しい。また軟化した試料の実験後の含水量は、天然の塑性変形した斜長石中の含水量にほぼ等しい。これらの事実は、含水下で、下部地殻中に存在する含水量と溶け込む水の量を決め、下部地殻の変形特性と流動強度を決めていることを示唆している。

研究成果の概要(英文)：In order to estimate the effect of melt and water on the rheological behavior of the lower crust, high pressure and temperature deformation experiments were conducted using Griggs type solid medium apparatus. Increases in the melt content decreases flow strengths under the presence of water. The flow stress decreases with increasing the water content added to the sample and decreasing strain rate. This indicates that the flow strength of anorthite aggregates is determined by the amount of water contents introduced into the aggregate. The water content required to cause weakening was consistent with the lower bound of water contents in the lower crust estimated by geophysical observations. The water contents left in the weakened samples measured after deformation experiments are consistent with naturally deformed feldspars. This indicates that the amount of water in the lower crust controls the rheological behavior of lower crustal rocks.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地質学

キーワード：下部地殻 レオロジー 部分溶融 岩石変形 地震波速度

1. 研究開始当初の背景

近年、測地学観測、およびモデリング技術の進展に伴い、下部地殻での歪集中や地震発生後の応力緩和、さらには地殻変動とマントル流動のカップリングなど、下部地殻のレオロジーが、リソスフェアのダイナミクスに大きな影響を持つことが分かってきた(たとえば、Jackson et al., 2004, *Geology*; Burgmann & Dresen, 2008, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*)。特に、下部地殻中において、地震波トモグラフィによる低速度域の存在と地震発生帯との関連性が指摘されている(図 1a)。たとえば Iio et al. (2009, *Phys. Earth Planet. Inter.*) は、新潟中越地震の余震分布から、下部地殻中の断層深部延長に低速度帯が存在し、これが断層の深部延長へ一致することから、この歪集中帯の存在が、断層上部延長へ応力集中を引き起こし、地震発生の引き金になった可能性を指摘した(図 1b)。東北大グループによる詳細な地震波トモグラフィの結果から、下部地殻領域の低速度域の原因として、水の存在が示唆されている(たとえば Hasegawa et al., 1991, *Nature*; 長谷川ほか, 2007 *地学雑誌*など)。このような観測結果に基づき、Iio et al. (2009PEPI) は、下部地殻中での水の存在による歪集中がその上部への応力集中を引き起こす可能性を指摘した。また、野外に産する下部地殻岩石中では、水に加え、部分熔融(メルト)の痕跡も認められ、そのレオロジカルな影響が指摘されている(メルトにより律速される粒界すべり: Zavada et al., 2006 *J. Geophys. Res.*)。上記の可能性は指摘されて久しいが、どの程度の流体(水・メルト)が、どの程度地震波特性およびレオロジー(粘性率)を変化させるであろうか?この問いに対する答えは、下部地殻物質に対して、定量的には明らかになっていない。

2. 研究の目的

本研究は、下部地殻中での温度・圧力条件を再現することの出来る Griggs 試験機を用

いて、メルトを含む下部地殻岩石(特に斜長石多結晶およびガブロ組成岩石)を対象として、高温高压下での変形実験を行う。また高压下での弾性波速度測定システムを構築し、下部地殻岩石のレオロジー特性、弾性波速度特性への亀裂、水、メルト、粒径などの影響を詳細に調べることを目的とする。本研究で得られるデータは、地球物理学的観測やジオダイナミクスモデリングに定量的な岩石力学的解釈を与え、地震発生の被害予測に貢献することが期待される。

3. 研究の方法

本研究では、下部地殻のレオロジー・地震波速度特性における水、メルトの影響や圧力の影響を定量的に調べるために、下部地殻岩石の変形実験と弾性波速度測定を行う。回収した試料は、走査型電子顕微鏡(SEM)や、赤外分光計(FTIR)を使い、その組織(粒径、粒界構造、転位組織など)や含水量を調べる。特に、変形に伴う、粒界構造、メルト分布、格子定向配列などを詳細に調べ、これらの微細組織と実験から得られるレオロジー・地震波速度特性と比較して、下部地殻物性に対するこれらの微細組織の影響を調べる。

4. 研究成果

実験試料

下部地殻の変形特性を明らかにするために斜長石の多結晶を合成した。灰長石単成分の組成をもつガラス粉末を真空中で焼結することで、微細な灰長石多結晶を作成した。灰長石 100 からなる微細ガラス粉末(粒径約 2, 3 μm)を冷間加圧成形し、円筒状圧粉体($\phi 10$ mm, 高さ 30 mm 程度)を作成した。その後、得られた圧粉体を、真空下で焼結した。

実験条件

斜長石多結晶の変形実験には、東北大大学既存の固体圧変形試験機を用いた。本試験機を用いることで、下部地殻に相当する温度・圧力を発生することが可能になる。実験には、塩(NaCl)を厚媒体に使った Muto et al.

(2010JGR) と同様のアSEMBリを用いて軸圧縮試験を行った。ドライの実験には、真空焼結した試料をそのまま使い、ウェットの実験には、Rybacki et al. (2006)と同様に 0.15 wt% H₂O を加えウェット試料とした。

実験には、An + H₂O の安定領域を外れない(Matthews and Goldsmith, 1984)ように下記の順番で、温度、圧力を上げた。

また下部地殻岩石の弾性波速度測定には、当初計画した固体圧試験機より静水圧性の高いガス圧試験機を用いた。下部地殻岩石である斑レイ岩を用いて、大気圧-200MPa までで圧力を変化させて弾性波速度を測定した。

結果

本研究では下部地殻領域での岩石の変形特性に及ぼす水の効果を明らかにするために、無水の人工 アノーサイト多結晶体に、最大 0.5 wt%の水を導入させながら流動特性を調べた。作成した多結晶体試料を用いて剪断変形実験を行った。剪断歪速度約 10⁻⁴/s でドライ（無水試料そのまま）及び 0.1-0.3 wt%の水を加えた実験では、差応力が 1000 MPa まで達する。一方、0.5 wt%の水を加えたときのみ、顕著な弱化が見られた。その強度低下量は、歪速度の現象に伴い大きくなり 10⁻⁵/s では、差応力 50 MPa となる。シリカメルトを 1%以下含む長石多結晶体で同様の条件で実験を行った。外部から 0.5 wt%の水を添加し流動強度を比較した。含水下で 40 時間保持した場合は、ピーク強度 600MPa で降伏した後、50MPa まで著しい歪軟化を示した。

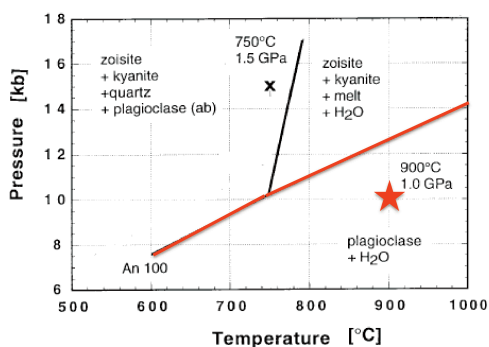


図 1. 長石+水の相図

回収試料の微細組織観察から、添加した水が少ないほど破碎流動が卓越することが明らかになった。0.5 wt%の水を添加した試料では塑性変形が卓越しており、歪の局所化も認められた。0.1wt%の水を加えて破碎流動が卓越した試料の含水量は、赤外分光法面分析から、最大で 130 ppmH₂O であった。一方、0.5 wt%の水を添加し、剪断歪が局所化している領域では最大 550ppm H₂O の水が含まれていた。また、この試料内では破碎している領域も見られ、含水量は 250 ppm H₂O 程度であった。このように、微小試料内においても、含水量の不均質性によって、脆性変形から塑性流動までの変形機構の遷移が認められた。従って、天然の断層帯においても、水の非平衡な拡散に伴い、変形挙動が変化することが推察できる。

これまでに報告されているガス圧試験機を使った灰長石の構成則 (Rybacki et al., 2006JGR) から、実験条件下(900°C、1 GPa、10⁻⁵/s)、での流動強度は 800 MPa と見積られる。過去の長石の構成則と比べて、メルトの少ないものでは 5 倍、メルトありでは一桁近く強度が低いことが明らかになった。またこれまでに固体圧試験機を使い行われてきた長石の変形実験結果 (例えば、Stunitz et al., Tullis and Yund,) からは、ガス圧試験機により得られた構成則から推定される強度より低い。これらの事実は、実際の下部地殻条件においては、ウェットな長石の流動強度はメ

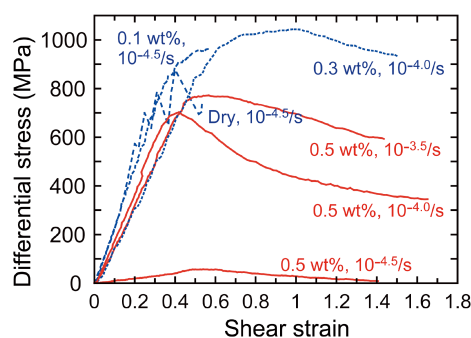


図 2. 長石の応力-ひずみ曲線

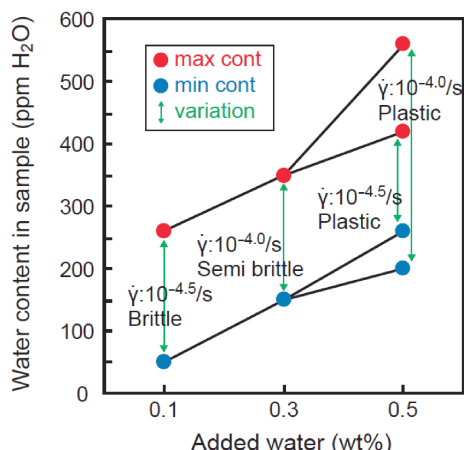


図 3. 外部からの加えた水の量と試料中の含水量による変形機構

ルトの存在に関係なく、ガス圧試験機によって得られた構成則による予測より低くなる可能性を示唆している。これは地震後の余効変動や内陸活断層への応力集中機構にも大きな影響を及ぼすと考えられる。

内陸地震断層周辺の地震波トモグラフィーおよびマグネトテルリック法からは、震源断層直下の下部地殻中では、それぞれ2~3%および0.5~7%の含水量が推定されている (Nakajima et al., 2010EPS; Yoshimura et al., 2009GRL)。この含水量は、メルトの存在の有無によらず、下部地殻岩石の何かを引き起こす十分な量である。一方、天然の変形した長石試料の含水量測定からは、最大0.2%の含水量が報告されている (Fukuda et al., 2011Tectonophysics)。このことは、実験によって見られた周囲に存在する含水量および多結晶体中に溶け込む水の両方で下部地殻のレオロジーが決定することを示唆している。

また斑レイ岩の弾性波速度測定から、封圧の上昇に伴い、大気圧から100MPaまでは、急激に弾性波速度が増加したが100MPa以上では弾性波速度の上昇率は一定でゆるやかになった。弾性波速度と封圧は下記の関係をもつことが知られている： $V = \sqrt{V_0^2 + AP}$ 、ここで、 P は圧力 [MPa]、 V 、 V_0 はそれぞれ圧力 P 下および大気圧下での弾性波速度[km/s]である。圧力依存性 μ は、岩石中のクラッ

クの接触面を反映していることが知られている。本研究でも、横軸 $\log P$ 、縦軸 $\log(V^2 - V_0^2)$ とし、その傾きから圧力依存指数 μ の変化を求めた。加圧時において20MPa程度までは、 μ は大きな値を示すが、それより高圧では一定の傾きである。すなわち μ が一定となっている。斑レイ岩の低圧 (100MPa以下) では、 μ は2/3程度の値となる。一方、それより高圧側では、1/2より小さくなる。

アスペリティの接触理論から、 μ 値より、接触状態を推定することが出来る。 μ 値の変化から、低圧側では、アスペリティは点接触状態であったものが、高圧側でアスペリティが塑性的に接触し、クラックが閉じたことが推定される。高圧化でクラックが閉じた後の弾性波速度は、Hacker and Abers (2) による岩石鉱物の組成から決まる弾性波速度に一致することが明らかになった。このことは、本研究から求められた封圧と弾性波速度の関係から、100MPaより低圧下での弾性波速度を推定することができ、この関係式より地殻深部でのメルトや流体などの不均質性の推定が可能である。

まとめ

本研究では下部地殻の主要構成鉱物である斜長石多結晶体を用いて、メルトの存在に伴うクリープ強度の変化および水の効果を調べた。メルトの有無によらず、ドライの斜長石は強度が高いことが明らかになった。一方、水の存在下で、外部から加える水の量とひずみ速度に依存して、流動強度は変化する。外部から加えた水の量は、これまで報告されている下部地殻条件での含水量の下限値に等しい。また斜長石多結晶体中に残された水の量は、天然の塑性変形した斜長石中の含水量にほぼ等しい。これらの事実は、含水下で、斜長石多結晶体中の周

囲に存在する含水量と溶け込む水の量を決め、下部地殻の強度を決めていることを示唆している。また下部地殻岩石の弾性波速度測定から、弾性波速度の圧力依存性から、岩石中でのクラックや粒界の接触状態の推定が可能となった。

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 10 件)

- ① Takashi Iidaka, Jun Muto, Kazushige Obara, Toshihumi Igarashi, Bunichiro Shibasaki (2014), Trench-parallel crustal anisotropy along the trench in the fore-arc region of Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi:10.1002/2013GL058359 (査読有) .
- ② Kazuhei Kikuchi, Kazutoshi Abiko, Hiroyuki Nagahama, Hiroshi Kitazato, and 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) .
- ③ Jun Muto, Bunichiro Shibasaki, Yoshihiro Ito, Takeshi Inuma, Mako Ohzono, Takumi Matsumoto, and Tomomi Okada (2013), Two-dimensional viscosity structure of the northeastern Japan islands arc-trench system, *Geophys. Res. Lett.*, 40, doi:10.1002/grl.50906 (査読有) .
- ④ Mako Ohzono, Yusaku Ohta, Takeshi Inuma, 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) .
- ⑤ 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. *Geophys. Res. Lett.* 39, L21303, doi:10.1029/2012GL053228 (査読有) .
- ⑥ 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) .
- ⑦ Jun Muto, Greg Hirth, Renee Heilbronner & Jan Tullis (2011) Plastic anisotropy and fabric evolution in sheared and recrystallized quartz single crystals. *J. Geophys. Res.*, B02206, doi:10.1029/2010JB007891 (査読有) .
- ⑧ Kumi Onuma, Jun Muto, Hiroyuki Nagahama & Kenshiro Otsuki (2011) Electric potential changes associated with nucleation of stick-slip of simulated gouges. *Tectonophysics*, 502, 308-314, doi.org/10.1016/j.tecto.2011.01.018 (査読有) .
- ⑨ Jun Muto (2011) Rheological structure of northeastern Japan lithosphere based on geophysical observations and rock mechanics. *Tectonophysics*, 503, 201-206, doi.org/10.1016/j.tecto.2011.03.002 (査読有) .
- ⑩ Kazutaka Takahara, Jun Muto & Hiroyuki Nagahama (2010) Skin depth of electromagnetic wave through fractal crustal rocks. *Trans. IEE Jpn.* 130, 258-264, doi:10.1541/ieejfms.130.258 (査読有) .

[学会発表] (計 7 件)

- ① Jun Muto, Bunichiro Shibazaki, Yoshihiro Ito, Takeshi Iinuma, Mako Ohzono, Takumi Matsumoto, Tomomi Okada (2013) Rheological structure of the NE Japan island arc-trench system and viscoelastic stress relaxation after the 2011 Tohoku Oki Earthquake. International Symposium of Rock Mechanics. 2013/8/23, 仙台.
- ② Jun Muto, Jun-ichi Fukuda and 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, 2012/9/25, 仙台.
- ③ Hideaki Kaneko, Jun Muto and Hiroyuki Nagahama (2012) Fabric evolution of single crystals of synthetic quartz sheared at low temperature. Achievements of G-COE Program for Earth and Planetary Dynamics and the Future Perspectives, 2012/9/25, 仙台.
- ④ Jun Muto and Mako Ohzono (2011) Rheological structure of the northeastern Japan toward precise modeling of post-seismic relaxation of the Mw 9.0 Tohoku earthquake. American Geophysical Union, Fall Meeting 2011/12/9, サンフランシスコ、米国.
- ⑤ Yu Nakamura, Jun Muto, Hiroyuki Nagahama, Ichiko Shimizu, Takashi Miura and Ichiro Arakawa (2011) Physical processes of quartz amorphization due to friction. American Geophysical Union, Fall Meeting 2011/12/6, サンフランシスコ、米国.
- ⑥ Jun Muto (2010) Rheological structure of Northern Honshu, Japan: Fault reactivation

and post-seismic creep. The ERI International Symposium on “Subduction systems: structure, seismicity and geodynamics” 2010/10/11, 東京.

- ⑦ Jun Muto (2010) Rheology of the island arc crust based on current understanding on rock deformation. Tohoku University GCOE symposium “Dynamic Earth and Heterogeneous Structure” 2010/7/15, 仙台.

[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/>

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・助教

研究者番号 : 40545787