

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20340117

研究課題名（和文） 液相を含む多結晶体の流動特性および地震波特性に対する実験的・理論的研究

研究課題名（英文） Experimental and theoretical approach to the viscoelastic properties of partially molten polycrystalline aggregates.

研究代表者

武井 康子（TAKEI YASUKO）

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：30323653

研究成果の概要（和文）：本研究では、メルトを含む（および、含まない）多結晶体の非弾性特性を実験・理論の両面から明らかにし、地震学へ応用した。また、地球内部の差応力がメルトの分布形状に大きな影響を与えることを、実験と理論から明らかにし、実際のリソスフェア・アセノスフェア境界における地震学的観測データへ応用した。

研究成果の概要（英文）：Viscoelastic properties of partially molten (and melt-free) polycrystalline aggregates were investigated experimentally and theoretically, and applied to the seismic waves. Occurrence of stress-induced melt redistribution was demonstrated by experimental and theoretical approaches and was applied to the seismological observation at the Lithosphere-Asthenosphere boundary.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2010年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
年度			
年度			
総計	9,400,000	2,820,000	12,220,000

研究分野：理学

科研費の分科・細目：固体地球

キーワード：固体地球物理学・地殻マントル物質・地震波減衰・非弾性・部分熔融岩石・粒界すべり・多結晶体

1. 研究開始当初の背景

(1) 地球内部の3次元速度構造から地球内部の温度分布や流体分布を定量的に推定するためには、温度や流体が弾性波速度に与える影響を定量的に見積もる必要がある。このためには、岩石の非弾性特性の解明が不可欠であるが、地震波帯域での実験を高温高压下で行うことは難しく、非弾性特性については未知の部分が多い。

(2) 地殻深部やマントルに存在する流体は、その存在形状によって地震波速度に与える影響が大きく変わる。流体の存在形状は、場の

応力状態や変形状態により大きく変化することが予想されるが、そのメカニズムは未知であるため、地球内部の流体形状を予測することができない。

2. 研究の目的

(1) 流体を含む（および含まない）多結晶体の非弾性特性を、実験と理論の両面から明らかにすること。

(2) アナログ物質（有機物多結晶体）を用いた変形実験により、流体の形状変化の法則性を解明し、地震波速度やマントルダ

イナミクスへの影響を調べる。

(3) (1), (2) の結果を用いて、実際の地球内部における流体相の量や存在形状を地震学的な観測から調べる方法を具体的に提案すること。

3. 研究の方法

(1) 目的 (1)、(2) の達成のため、部分熔融岩石のアナログ物質を用いた変形実験を行う。目的 (1) の非弾性の実験は、10-0.1 mHz の範囲の強制振動型微小振幅変形実験装置を完成して行う。目的 (2) の変形実験は、既存の一軸圧縮型変形装置を改良して行う。ポスドク研究員(マッカーシー・クリスティーン) を約二年雇用し、研究代表者と二人体制で実験を行う。

(2) 目的 (1)、(2) では、また、液相を含む(あるいは含まない)多結晶体の非弾性と粘性のモデル化も必要になる。

(3) 実際の地球への応用は、地震学的観測のグループと協力して行う。

4. 研究成果

(1) 岩石のアナログ物質を用いた強制振動型の変形実験を、10-0.1 mHz の広帯域かつ微小歪 (10^{-6}) で行うことの出来る実験装置を完成した(図1)。このアナログ物質(有機物の多結晶体)は融点が 204°C であるため、26°C がオリビン結晶体の 1100°C に相当する(規格化温度 0.6)。

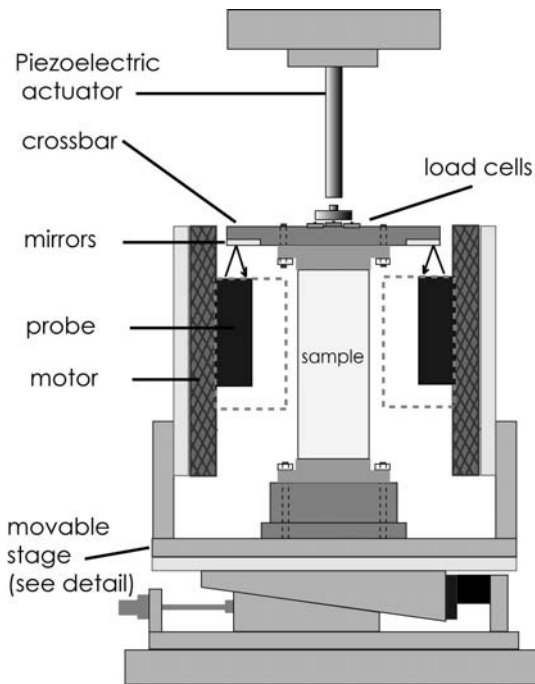


図1 本研究で製作した実験装置

(2) 岩石のアナログ物質を用いて、ヤング率 E と減衰 Q^{-1} を、周波数、温度、粒径、メルト体積分率の関数として系統的に調べた。その結果、多結晶体の減衰スペクトルは、メルトを含む場合も含まない場合も、マクスウェル周波数 f_M (E_0 を非緩和ヤング率、 h を粘性とすると、 $f_M = E_0/h$) で規格化された無次元周波数 f/f_M のみの関数として、 $Q^{-1}(f/f_M)$ と表される相似則が成り立つことが分かった。即ち、多結晶体の非弾性特性は粘性と非常に密接な関係があり、温度、粒径、メルト体積分率は全て粘性への影響を通して間接的に影響を与えるということが分かった。(図2)

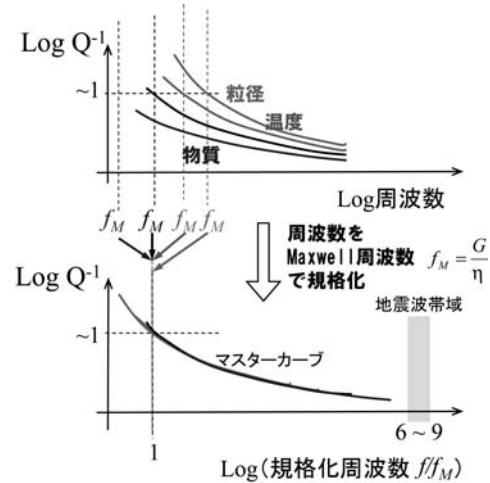


図2 得られた相似則を概念的に示した図

本研究で得られたマスターカーブ $Q^{-1}(f/f_M)$ は、メルトがない場合については、実際のマントル物質であるオリビン多結晶体を用いた実験のマスターカーブと一致し、多結晶体の非弾性特性の持つ普遍性を明らかにした。本実験結果を一般化してマントル条件に外挿し、マントルにおける地震波減衰を予想した(図3)。

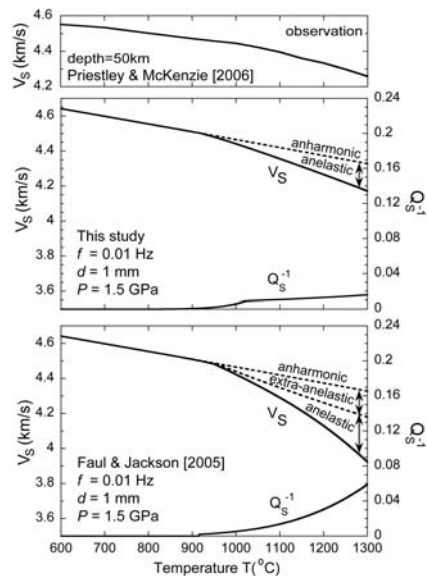


図3 地球内部の地震波速度と減衰(観測値と予想)

(3) (2)の結果は、多結晶体の非弾性メカニズムとして、拡散に律速される粒界すべりを強く示唆する。そこで、多結晶体の弾性や粘性の計算に用いられる「粒子状モデル」を拡張して、メルトを含まない場合について、拡散に律速される粒界すべりのモデル化を行い、実験から得られたマスターカーブ $Q^{-1}(f/f_M)$ の詳細な形状を再現することができた。また、実験周波数よりもさらに高周波でのマスターカーブの形状や、相似則の適用限界なども議論することができるようになった。(図 4)

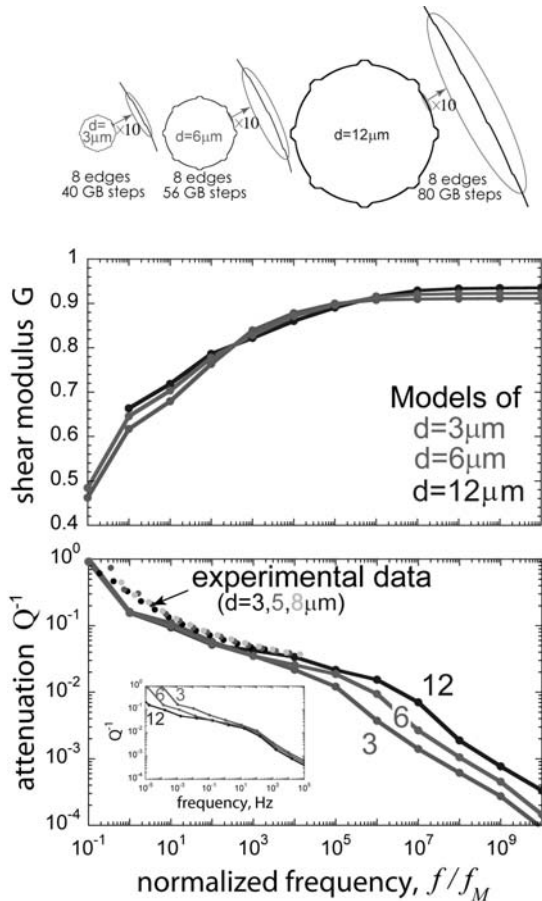


図 4 モデルから得られた弾性率の分散と減衰を実験結果と比較した図。規格化周波数の大きいところで相似則が破れていることも分かる。

(4) アナログ物質を用いた部分熔融物質の変形実験を行い、超音波の横波を用いた内部構造のその場観察を行った。その結果、差応力下で内部構造が異方的になることを観察できた。この異方性の大きさと向きは、差応力の大きさと向きに良く一致することが分かった。

(5) 部分熔融岩石の力学構成則を導出し、ミクロな内部構造がマクロな弾性や粘性に与える影響を定量的に明らかにした。その結果、粘性はミクロな内部構造に敏感であり、微量の流体の存在が粘性に大きく影響し得ることや、差応力下で生じる粒子スケール

での構造の異方性が粘性の強い異方性を生じることが分かった。得られた構成則を、固液二相系のダイナミクスを記述する運動方程式系と連立して解き、粘性に異方性があると、せん断変形と流体移動に相互作用が生じ、流体による変形の潤滑などが起こることを示した(図 5)。これまで流体移動の研究は等方的な媒質においてのみなされてきたが、媒質の異方性を考慮することで、変形と流体移動の描像が大きく変わる可能性があることを指摘した。

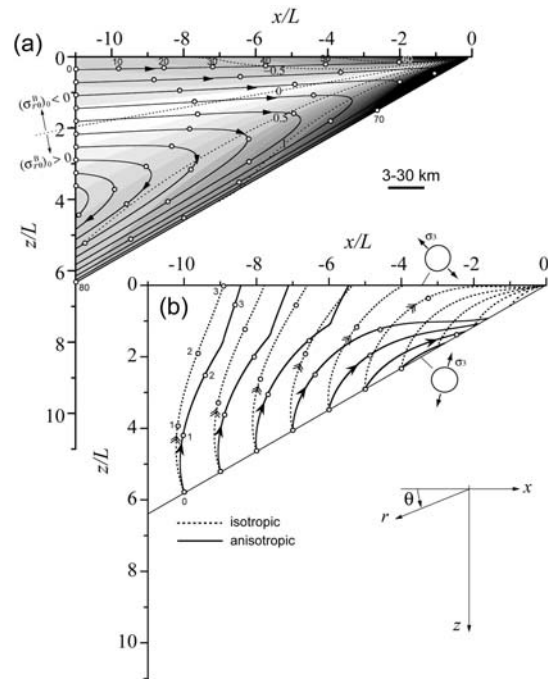


図 5 マントルウエッジ中の固体の流線 (a) とメルトの流線 (b)。Spiegelman and McKenzie (1987) で提案された近似を用いて計算した。粘性を等方的と仮定して求めたメルトの流線 (b の点線) に対して、粘性の異方性を考慮して求めた流線 (b の実線) は、沈み込むプレートの上面のせん断応力が最も集中した領域に吸い込まれていることが分かる。応力と粘性の異方性の向きの関係は、実験から得られたものを仮定した。

(6) 所属する研究所の地震学グループと共同で、マントル部分熔融層におけるメルトの存在形態を調べる研究を行い、メルトが静水圧下での平衡形状から大きく外れた水平互層構造になっていることを示した。具体的には、リソスフェア・アセノスフェア境界 (LAB) での SP および PS 変換波を用いて、上部マントルにおいて地球化学的に予想されるメルト分率 (1%以下程度) を仮定すると、LAB における SP 変換波の大きな振幅が説明できないが、このような少ないメルト分率であっても、メルトの多い領域と少ない領域が水平互層になった異方的構造を考えれば観測結果が説明

できることを示した。さらに、これとは独立な観測量からこの結果を検証するための具体的な方法を提案した。

(7) 差応力による流体形状の変化を、地球において重要となる「転位クリープ」の領域で調べるため、岩石のアナログ物質の変形機構を調べた。その結果、本アナログ物質が、オリビン結晶とよく似た(拡散クリープ、転位クリープ領域からなる)変形機構図を持つことを明らかにできた。

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 7 件)

① Y. Takei, Stress-induced anisotropy of partially molten rock analogue deformed under quasi-static loading test, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 115, 2010, B03204, doi:10.1029/2009JB006568

② Kawakatsu, H., P. Kumar, Y. Takei, M. Shinohara, T. Kanazawa, E. Araki Seismic Evidence for Sharp Lithosphere-Asthenosphere Boundaries of Oceanic Plates, *Science*, 査読有, 324, 2009, 499-502.

③ Y. Takei and S. Hier-Majumder, A generalized formulation of interfacial tension driven fluid migration with dissolution/precipitation, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 査読有, 288, 2009, 138-148

④ Y. Takei and B. K. Holtzman, Viscous constitutive relations of solid-liquid composites in terms of grain boundary contiguity: 3. Causes and consequences of viscous anisotropy. *J. Geophys. Res.*, 査読有, 114, 2009, B06207, doi:10.1029/2008JB005852

⑤ Y. Takei and B. K. Holtzman, Viscous constitutive relations of solid-liquid composites in terms of grain boundary contiguity: 2. Compositional model for small melt fractions. *J. Geophys. Res.*, 査読有, 114, 2009, B06206, doi:10.1029/2008JB005851

⑥ Y. Takei and B. K. Holtzman, Viscous constitutive relations of solid-liquid composites in terms of grain boundary contiguity: 1. Grain boundary diffusion control model, *J. Geophys. Res.*, 査読有 114 2009 B06205, doi:10.1029/2008JB005850

⑦ Fujisawa K & Y. Takei, A new experimental method to estimate viscoelastic properties from ultrasonic wave transmission measurements, *Journal*

of Sound and Vibration, 査読有 323, 2009, 609-625

[学会発表] (計 8 件)

① C. McCarthy, Y. Takei, and T. Hiraga Experimentally determined anelastic and plastic behavior of melt-free and melt-bearing Earth analogue materials: Implications for grain and phase boundary dynamics. AGU fall meeting, 2010, Dec. 17th, サンフランシスコ, USA

② Yasuko Takei and C. McCarthy, A granular model for anelasticity due to grain boundary sliding. AGU fall meeting, 2010, Dec., 13th, サンフランシスコ, USA,

③ 武井康子, マッカーシー・クリスティーン、粒界すべりのモデル化：地震波の速度分散と減衰の理解にむけて、日本地震学会秋季大会, 2010, 10月27日, 広島国際会議場(広島市)

④ マッカーシー・クリスティーン、武井康子, 低周波実験による部分熔融サンプルの非弾性特性, 日本地震学会秋季大会, 2010, 10月27日, 広島国際会議場(広島市)

⑤ Yasuko Takei, C. McCarthy, and K. Fujisawa, Experimental study on the viscoelastic property of polycrystalline aggregates over a broad frequency range, WPGM, 2010, 24th June, 台北(台湾)

⑥ 武井康子, 粒界に存在する流体が岩石物性やダイナミクスに与える影響, 日本地球惑星科学連合 2010 連合大会, 2010, 5月24日 幕張メッセ(千葉市)

⑦ Y. Takei and B. Holtzman, On the importance of viscous anisotropy in shear-induced melt segregation and organization, EGU, 2010, 3rd May, Vienna (Austria).

⑧ C. McCarthy, K. Fujisawa, Y. Takei, Experimentally determined attenuation and modulus in Earth analogue materials over a wide range of frequencies, AGU fall meeting, 2009, Dec. 17, San-Francisco.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武井 康子 (TAKEI YASUKO)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号: 30323653

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: