

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287102

研究課題名(和文) 融点近傍にある多結晶体の弾性・非弾性の研究：マントル地震波構造の理解を目指して

研究課題名(英文) Elasticity and anelasticity of polycrystalline material at near solidus temperatures for seismological application

研究代表者

武井 康子 (Takei, Yasuko)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：30323653

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,100,000円

研究成果の概要(和文)：部分溶融が多結晶体の物性に与える影響は、これまで知られてきたような、メルトが生じたことによる直接的な影響に加えて、ソリダス直下の固体状態においても、減衰が顕著に増大し、また粘性の活性化エネルギーが顕著に増大することがわかった。しかも、融点で微少なメルトしか生成しない試料でもこの固体状態での変化は大きく、メルトによる直接的な影響を遥かに凌ぐ。本研究の成果は、上部マントルにおける地震波低速度域の存在を、メルトが非常に少ないことを示唆する地球化学の結果と整合的に説明するものとして重要である。本実験結果は、太平洋下上部マントルで実際に検出された融点直前の急激な速度低下をほぼ定量的に説明する。

研究成果の概要(英文)：Present experimental studies by using a rock analogue (organic polycrystals) has revealed that polycrystal anelasticity is significantly enhanced from just below the solidus temperature in the absence of melt (Takei et al, 2014; Yamauchi and Takei, 2016). Importantly, the amplitude of this 'pre-melting effect' is large even for the samples which can produce very small amounts (-0.4-0.5 %) of melt at the solidus temperature (Yamauchi and Takei, 2016). Therefore, the newly recognized effect can remove the difficulty to explain the seismic observations without melt or with very small amount of melt indicated by the thermal and geochemical studies. Using the temperature and seismic structures of the Pacific mantle, Priestley and McKenzie (2006, 2013) captured a steep reduction in  $V_s$  just below the dry peridotite solidus. The new anelasticity model including the pre-melting effect can explain this steep reduction qualitatively and almost quantitatively (Yamauchi and Takei, 2016).

研究分野：固体地球科学

キーワード：非弾性 地震波低速度域 地震波減衰 プレメルティング

### 1. 研究開始当初の背景

火山の深部に存在しているはずの部分溶融領域を地震波トモグラフィーによって捉える試みが長年にわたってなされ、予想された深さに、地震波の低速度領域が存在することがわかった。ところが、このような領域は火山のない地域の下にも広く存在する。また、噴出したマグマの化学分析から、部分溶融領域に存在するメルトは体積分率にして 0.1% 程度のごく僅かな量であることもわかった。これまでの室内実験の結果では、地震波速度を低下させるためにはメルトが必要であり、メルトがない、あるいはごく僅かしかないと、地震波トモグラフィーで捉えられた数%もの速度低下を説明できない。このため、地震学と地球化学の結果を統合的に理解することができなかった。

### 2. 研究の目的

地震波速度の低下や高減衰を生じるためにはメルトが必要であるという従来の理解は、室内実験によって得られたものである。しかし、地震波の周期は 1-100 秒程度であるのに対して、室内実験に用いる波の周期は数マイクロ秒～数ナノ秒と、地震波に比べて 6 桁以上も短い。本研究は、この周期の違いが上記の矛盾の原因ではないかと考え、波の速度や減衰を 10 桁以上の周期にわたって調べる実験を行うことを目的とした。具体的には、融点より十分低い温度から部分溶融に至るまでの温度範囲において、多結晶体の弾性・非弾性特性を温度と周波数の関数として系統的に明らかにする（非弾性とは、弾性の周波数依存性のこと）。そして、融点に達した場所のみでなく、上部マントル全体の地震波速度・減衰構造を、融点近傍にある固体の振る舞いとして統一的に解釈することを目指した。

### 3. 研究の方法

低周波帯域での非弾性の測定は難しいため、本物の岩石に対するデータは非常に限られている。本研究では、有機物多結晶体（ボルネオール・ジフェニルアミン共融系）を岩石のアナログ物質として用いることにより、融点近傍にある多結晶体の非弾性を室温近傍で測定する。我々が独自に開発した装置（図 1）を用いた強制振動実験によって、広帯域（50 - 0.0001 Hz）での弾性定数（ヤング率）と減衰を高精度で測定することができる。さらに、超音波実験による高周波（1 MHz）のヤング率と減衰、そしてクリープ実験による粘性のデータも取得する。これらは、非弾性のスケーリング則やメカニズムの解明に重要な役割を果たす。本実験装置では得られるヤング率の精度が高いため、実験の空白域となる 50 Hz - 1 MHz での非弾性緩和強度を、1 MHz と 50 Hz におけるヤング率の差から求めることができる。

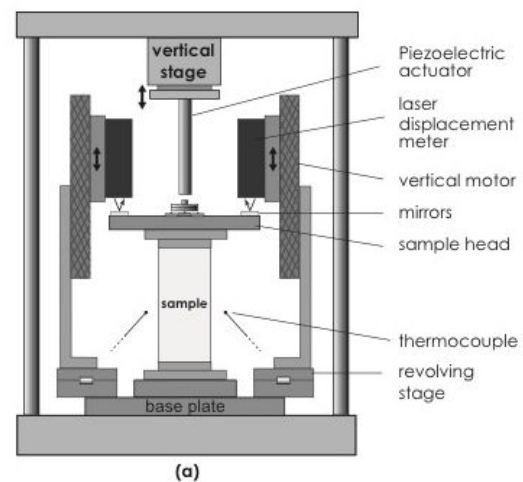


図 1、本研究で使用した非弾性測定装置

### 4. 研究成果

(1) 部分溶融が多結晶体の物性に与える影響は、これまで知られてきたような、メルトが生じたことによる直接的な影響に加えて、ソリダス直下の固体状態においても、ソリダス規格化温度が 0.94 以上程度で非弾性緩和が顕著に増大し、また粘性の活性化エネルギーが顕著に増大することがわかった（図 2、

図 3)。しかも、融点で微少なメルトしか生成しない試料でもこの固体状態での変化は大きく、メルトによる直接的な影響を遙かに凌ぐ。粒界拡散クリープ粘性から計算したマックスウエル周波数によるスケーリング則は、高規格化周波数帯域においても部分的に有効であることから、この部分溶融前の非弾性促進のメカニズムが「拡散律速の粒界滑り」の促進にあることが推測され、粒界で何らかの構造変化が生じていることが示唆される。物質科学の分野では、ソリダス直前の粒界無秩序化が理論的に予想されており、このような無秩序化による粒界拡散係数の増大によって非弾性と粘性が促進されたものと考えられる。

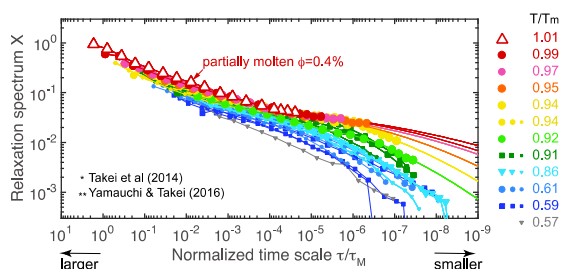


図 2、マックスウエル周波数により規格化した周波数に対してプロットした減衰スペクトル。規格化周波数の低い帯域ではスペクトルが一本のカーブを描くが、規格化周波数の高い領域では、特にソリダス( $T_m$ )直下で減衰が顕著に増大している。

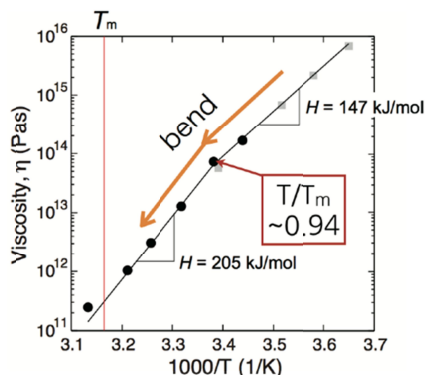


図 3、粘性のアレニウスプロット。ソリダス( $T_m$ )直下の温度で、活性化エネルギーが顕著に増大していることがわかる。

(2) 超音波実験では(1)で述べた融点前の影響は捉えられず、メルトが生じたことによる効果のみが捉えられた(図 4)。超音波実験で捉えられた変化は、この物質の濡れ角から理論的に予想される多孔質媒質効果の大きさとよく一致し、低周波での非弾性が多孔質媒質効果以外のメカニズム(すなわち、粒界滑り)によるものであることを支持する結果となった。

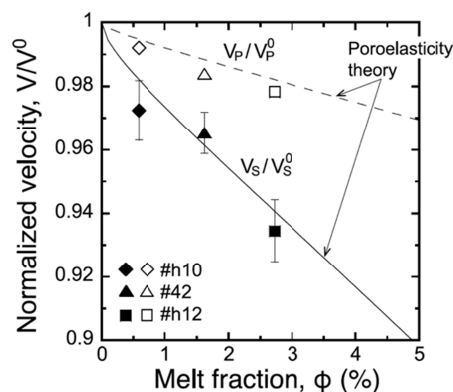


図 4、超音波実験の結果。多孔質媒質理論の予想とよく一致する。

(3) 本実験結果に基づき、多結晶体の非弾性を、規格化時定数 $\tau/\tau_m$ と規格化温度 $T/T_m$ の関数としてパラメータ化した。太平洋下の上部マントルでは、融点直前の急激な地震波速度低下が実際に観測されている(Priestley and McKenzie, 2013)。フィッティングを行った結果、報告された速度低下は、本研究から得られた非弾性モデルによってほぼ定量的に説明できることがわかった(図 5)。

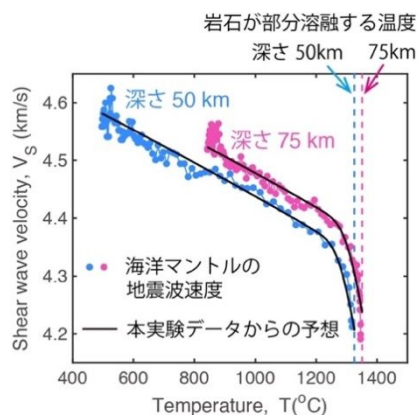


図 5、海洋マントルの深さ 50 km と 75 km で

得られた温度と横波速度の関係（カラーシンボル。Priestley and McKenzie, 2013）。黒線は、本実験結果から得られた非弾性モデルによるフィッティングの結果。

(4) 本研究の成果は、上部マントルにおける地震波低速度域の存在を、メルトが非常に少ないことを示唆する地球化学の結果と整合的に説明するものとして重要である。本研究の結果を用いると、地震波速度構造から見積もられるメルト量は、これまで考えられてきたものよりも遥かに少ないものになる。今後は、さらなる実験による非弾性モデルの改良と、本研究で提案された新しい非弾性モデルを用いた地震波構造の再解析が重要となる。

#### 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 3 件)

- (1) Y. Takei, Effects of Partial Melting on Seismic Velocity and Attenuation: A New Insight From Experiments, Annual Review Earth Planet. Sci. vol45  
doi:10.1146/annurev-earth-063016-015820 (in press). 査読あり
- (2) Yamauchi, H., Y. Takei, Polycrystal anelasticity at near-solidus temperatures, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121, 7790-7820, 2016. 査読あり
- (3) Takei, Y., F. Karasawa, and H. Yamauchi, Temperature, grain size, and chemical controls on polycrystal anelasticity over a broad frequency range extending into the seismic range, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119, 5414-5443,

2014. 査読あり

〔学会発表〕(計 9 件)

- (1) Y. Takei, H. Yamauchi, Origin of asthenosphere inferred from polycrystal anelasticity, JpGU-AGU joint meeting, 幕張メッセ、千葉県千葉市、20<sup>th</sup> May, 2017
- (2) H. Yamauchi, Y. Takei, Experimental study of polycrystal anelasticity at near-solidus temperatures and its seismological applications, JpGU-AGU Joint Meeting, 幕張メッセ、千葉県千葉市, 20<sup>th</sup> May, 2017
- (3) Y. Takei & H. Yamauchi, Enhancement of Polycrystal Anelasticity Just Before Partial Melting: Experimental Evidence and Implications for Seismic Low Velocity Zones AGU fall meeting, San Francisco (USA), Dec. 12-17, 2016
- (4) H. Yamauchi, Y. Takei, Enhancement of polycrystal anelasticity just before partial melting: Experimental details and Parameterization, AGU Fall Meeting, San Francisco, (USA), Dec. 12-17, 2016
- (5) Y. Takei, H. Yamauchi, Effect of partial melting on the seismic velocity and attenuation: polycrystal anelasticity at near-solidus temperatures INI workshop of Melt in Mantle, Cambridge (UK), 8th June, 2016
- (6) Y. Takei, Effect of partial melting on seismic velocity and attenuation: poroelasticity and anelasticity, Gordon

Research Conferences, Mount Holyoke  
College (USA), 9th June, 2015

- (7) Y. Takei, Enhancement of Polycrystal Anelasticity Just Before Partial Melting: Experimental Evidence and Implications for Seismic Low Velocity Zones, Norman International Symposium, ホテル大観荘, 宮城県松島町, 5<sup>th</sup> March, 2015
- (8) 武井康子, 山内初希, 柄澤史也, 多結晶体の非弾性特性の実験的研究～上部マントル地震波構造の定量的解釈を目指して～地球惑星合同大会, パシフィコ横浜, 神奈川県横浜市, 5月1日, 2014
- (9) Y. Takei, F. Karasawa, H. Yamauchi, Experimental study of attenuation and dispersion of a polycrystalline material from purely elastic to viscous behavior: towards seismological application. Geofluid-3 東京工業大学, 東京都目黒区, Feb. 28 - March 3, 2014

## 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・教授  
研究者番号 : 30323653