

令和 3 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02951

研究課題名(和文) 部分溶融の前駆現象を含む岩石非弾性モデルを用いた上部マントル低速度域の再解析

研究課題名(英文) Reanalysis of seismic low velocity zones based on a pre-melting model.

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) 9,700,000円

研究成果の概要(和文)：岩石アナログ物質を用いた粘弾性実験のデータと、粒界の熱力学モデルに基づいて、上部マントルにおいても粒界ブレメルティングの発生が期待されることを示した。粒界ブレメルティングの効果を含んだ新しい非弾性モデルを海洋上部マントルに適用し、メルトが全くなくてもブレメルティングによってリソスフェアアセノスフェア構造が作られることを示した。さらに、メルト相が非弾性に与える影響を定量的に解明し、メルト相の影響も含むより一般的な非弾性モデルを完成した。さらに不純物が非弾性に与える影響を測定し、ブレメルティング効果との差異を調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、メルトが全くなくてもブレメルティングによってリソスフェアアセノスフェア構造が作られることが示された。この成果は、上部マントルにおける地震波低速度域の存在を、僅かな量のメルトしか存在しないとする地球化学的観測結果と整合的に理解することを可能にするという点で非常に大きな意義がある。また、地震波特性という高周波域から、粘性という長いタイムスケールまでの超広帯域での岩石物性を、室内実験データに基づいて予測した点にも、大きな学術的進歩がある。

研究成果の概要(英文)：Thermodynamic model of grain boundary developed for binary eutectic system predicts shows that the pre-melting occurrence can be expected in the Earth's upper mantle. Based on the realistic volatile distribution and solidus profile obtained from a model of fractional decompression melting, we have shown that even when the oceanic upper mantle is melt free, geotherm sufficiently approaches the solidus at various plate ages, causing the lithosphere-asthenosphere system. We further clarified the quantitative effects of melt on anelasticity and developed a new anelasticity model which can be applied to a region with relatively large melt fraction (several percent). We also measured the impurity effects on anelasticity, and examined the similarities and differences between impurity effects and pre-melting effects.

研究分野：固体地球科学

キーワード：premelting 粘弾性 非弾性 地震波減衰 地震波低速度域 アセノスフェア

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

上部マントルに存在するマグマ発生域の周辺では地震波の低速度・高減衰域が観測されるが、これらは岩石の部分溶融によるものであると考えられてきた。一方で、地球化学的研究からは、マントル部分溶融域に存在し得るメルトは、体積分率で0.1%程度かそれ以下のごく僅かなものであることが報告された(McKenzie, 2000, Chemical Geology)。これまで、岩石の部分溶融が地震波速度や減衰に及ぼす影響については、メルト相が存在することによる直接的な影響のみを仮定して、多孔質媒質の弾性論等によって評価されてきたが、メルト分率が非常に小さい場合には地震波速度への影響も非常に小さいため、地震学的観測と地球化学的観測を統合的に説明することは困難であった。この問題を解決するためのカギを握ると思われてきたのが、メルトがなくても粒界滑りなどにより低速度・高減衰を生じ得る「岩石非弾性」である。本研究代表者らは、有機物の多結晶体を岩石のアナログ物質として用いる独自の研究手法により、融点(ソリダス)近傍における多結晶体の非弾性を詳細に研究した。その結果、多結晶体の非弾性が、ソリダス直下のメルトの存在しない温度から徐々に増大し、弾性波速度の低下と減衰の増大を生じることを見出した(Takei et al. 2014, JGR; Yamauchi & Takei, 2016, JGR)。本研究代表者らによって初めて見出されたこの「部分溶融の前駆現象」は、ソリダス温度でごく僅かな量のメルトしか生じない試料であっても大きな振幅を持つため、地震学的な観測結果を地球化学的制約条件のもとで統合的に理解することができる。実際、海洋リソスフェア内の横波速度がカンラン岩の無水ソリダス直下の温度で急激に低下するという観測結果が報告されており、本研究代表者らの実験結果から得た新しい非弾性モデルは、この観測結果を、定性的にも定量的にも初めて説明することができた。このような部分溶融の前駆現象は固体地球科学の分野では知られていなかったが、この現象は物質科学の分野で知られている「粒界プレメルティング」に相当すると考えられる (Takei, 2017, Annual Review EPS)。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、研究代表者らの得た新しい非弾性モデルを上部マントルの地震波速度・減衰構造に適用し、地球内部における粒界プレメルティングの発生を考慮して地震波構造の再解析と再解釈を行う。具体的には、メルトが殆ど存在しないとされる古い海洋マントルのリソスフェア・アセノスフェア境界の地震波不連続面、メルトが存在する海嶺直下の地震波構造、水が多く存在するマントルウエッジの地震波構造の再解析・再解釈を目指す。各分野で現在得られている地震学的構造、温度構造、岩石ソリダスなどの理解が、新しい非弾性モデルを用いてどの程度統合的に説明できるかを定量的に調べる。

(2) 本研究で用いる「非弾性モデル」は、実験データを定式化しただけの「経験式」のことである。その理解のためには、非弾性特性に大きな影響を与える粒界プレメルティング現象の「物理モデル」が不可欠となる。これまでに実験から得られた非弾性の理解に比較して、物理モデルに基づく理解は遥かに遅れている。本研究では、物質科学の分野で開発されている粒界プレメルティングの熱力学モデルを固体地球科学の分野に紹介し、このモデルに基づいて非弾性特性を解釈することを目指す。

(3) 岩石アナログ物質を用いた非弾性測定実験を行い、非弾性モデルをさらに改良する。体積分率1%以上のメルト相が非弾性に与える影響と、メルト相がネットワーク状につながることの力学的影響は未解明であり、新たな実験を行ってこれを解明する。

(4) 地震波への応用で重要となるのは、規格化周波数 (f/f_M , f_M はマックスウエル周波数) が地震波の規格化周波数 ($\sim 10^6$) 以上となる帯域での非弾性である。このような高規格化周波数帯域の非弾性は微量不純物の影響を受け易く、試葉のロットの違いによっても変わるため、制御が難しい事がわかってきた。そこで、微量な不純物による非弾性特性の違いを調べて、実験の再現性を高めることを目指す。この実験から得られる情報は、粒界の物理化学的状態や非弾性の物理メカニズムを明らかにする上でも重要な基礎データとなる事が期待される。

3. 研究の方法

(1) 太平洋下の海洋マンツルの温度構造を年代の関数として与え、研究代表者らの得た新しい非弾性モデルを適用してこの海洋プレート内の地震波速度構造、減衰構造、粘性構造を予測する。予測された地震波速度構造を地震学の結果と比較する。

(2) 物質科学の分野で開発された、フェーズフィールドモデルを用いた粒界の熱力学モデルに着目する。このモデルを二成分共融系に拡張した Tang et al (2006, Phys. Rev. Lett.) の理論を、本研究が岩石アナログ物質として用いるボルネオール・ジフェニルアミン二成分共融系に応用する。また、現象論的な熱力学モデルであるフェーズフィールドモデルを、他の統計物理的モデルと比較してその長所や短所を明らかにし、一般的な岩石の系への拡張性を議論する。

(3) 部分熔融岩のアナログ物質としてボルネオール+ジフェニルアミン二成分共融系を用い、メルトが非弾性に与える影響を解明する。メルトの体積分率の大きい (1%以上) 試料を複数作成し、強制振動実験によって融点以下から融点以上までの広い温度範囲での非弾性特性を測定する。メルト量の小さい場合についての既存のデータ (Yamauchi and Takei 2016, JGR) を本実験結果と合わせる事で、非弾性に与えるメルトの影響を明らかにする。得られた結果を半経験的な実験式の形で定式化し、地球内部の地震波構造に応用する。本実験ではまた、二段階粒成長法を開発し、部分熔融前にジフェニルアミン相が孤立して存在する試料を作成する。これを用いて、部分熔融によってつながったメルトネットワークが出現することの力学的効果を明らかにする。得られた結果は部分熔融岩の力学物性を扱う既存のモデルの妥当性を議論するのに重要である。

(4) 岩石のアナログ物質として用いているボルネオール多結晶体について、ロットの異なる複数のサンプルを作成して粒成長実験や非弾性測定実験を行い、ロットによる違いを明らかにする。また、製薬会社の協力のもと、用いたボルネオールサンプルを再結晶法や再沈殿法によって精練 (高純度化) し、精練後のサンプルの粒成長実験や非弾性測定実験を行う。精練の前後で粒成長速度や非弾性特性がどのように変化したかを調べ、ボルネオール多結晶体の粒界物性に対する不純物の影響を議論する。本研究で解明した不純物の効果を、(3) のジフェニルアミンが与えた効果と比較し、共通点、相違点を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 粒界プレメルティングモデルのリソスフェア・アセノスフェアシステムへの応用 (Yamauchi and Takei, 2020, G-Cubed に公表)

① まず、太平洋下の海洋上部マンツルの温度構造 (ジオサーム) を、McKenzie et al (2005, EPSL) の方法によってプレート年代の関数として計算した。粒界プレメルティング効果はソリダスの約 90%以上の温度で発生するため、海洋上部マンツルにおける岩石ソリダスが重要な役割を果たす。岩石ソリダスは揮発性物質によって低下するため、水や二酸化炭素の分布が重要である事がわかった。そこで本研究では、海嶺下における減圧分別熔融モデルを解いて水や二酸化炭素分布の予測を行った。(2) に述べるフェーズフィールドモデルの重要な成果として、粒界プレメルティングの発生時には粒界組成がメルト組成に近づく事がわかったため、本研究では粒界への揮発性元素の吸着を考慮した新しい分別熔融モデルを開発した。その結果、海嶺下でメルトが完全に取り去られた場合は、海洋マンツルのソリダスが海嶺下のジオサームに一致するという結果を得た。また、海嶺下でのメルトの取り去りが不完全な場合は、それよりも低くなるという結果を得た。メルトが完全に取り去られる場合には、海嶺直下以外ではジオサームがソリダスを超えることはないため、海洋マンツルにはメルトが一切存在しない。しかし、どの年代でもある程度以上深部ではジオサームがソリダスに十分近づくため、プレメルティング効果によって地震波の低速度・高減衰域、低粘性域が生じ、観測されるようなリソスフェア・アセノスフェアシステムが作られる事がわかった (図 1)。

② 予測された地震波構造を、リソスフェア・アセノスフェアシステムに対する様々な地震学的観測結果と比較した。その結果、まず、周期 100 秒程度の表面波を用いた観測結果はよく説明する事がわかった。周期 10 秒程度の実体波を用いた観測からは、リソスフェア・アセノスフェア境界 (LAB) 付近で地震学的不連続面が検出されている。本研究の結果、不連続の存在がやそのシャープネスの上限値を粒界プレメルティングによって説明できることがわかった。しかし、本研究で予測された不連続面の深さは観測値よりもやや深く、また横波速度低

下の振幅も観測値よりも有意に小さい事がわかった。さらに、リソスフェア・アセノスフェアシステムに関する地震学的観測結果について、表面波による観測結果と実体波による観測結果は整合せず、両方の観測結果を同一のモデルで説明する事が難しいことを指摘し、地震学分野への問題提起を行った。

プレメルティングによる低速度&低粘性

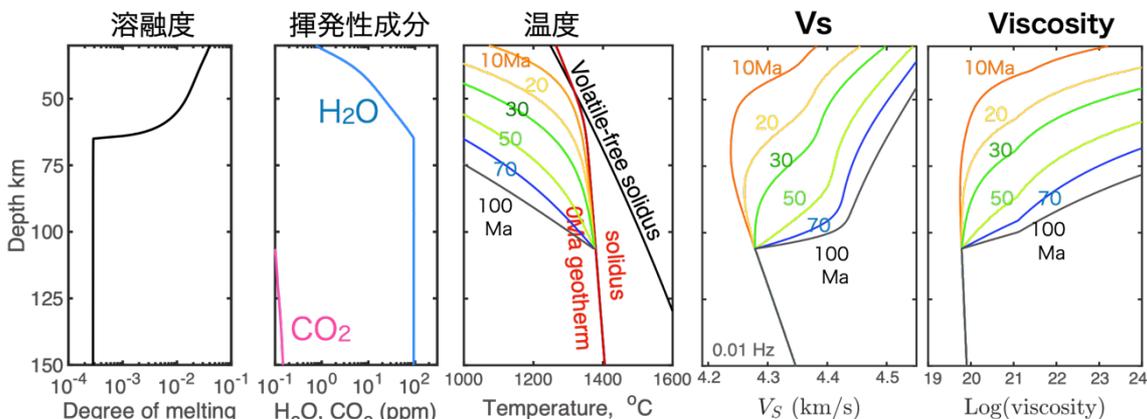


図1, 新しい非弾性モデルの海洋上部マントルへの応用(Yamauchi&Takei, 2020, G-cubed) . リッジ直下(年代=0Ma)で減圧分別溶融が起こり、生じたメルトが完全に抜けた場合の結果を示す。(左から、溶融度分布、分別溶融後の揮発性成分分布、分別溶融後のソリダス(赤線)とジオサーム(色はプレート年代を示す)、周期10秒の実体波の横波速度分布、粘性分布。ジオサームがソリダスに近づくと、プレメルティングが発生し、横波速度が急激に低下する。

(2) 融点近傍の非弾性へのフェーズフィールドモデルの応用(Takei, 2019, JGRに公表)

- ① フェーズフィールドモデルを用いた粒界の熱力学モデルが物質科学の分野で開発された。フェーズフィールドモデルでは、体積のある「相」に加えて、体積を持たない「界面」のエネルギーを含めた自由エネルギーを導入する。界面の持つ過剰エネルギー(ペナルティ)は通常は状態量(化学組成など)の空間勾配の2乗として与えられるが、Kobayashi et al(1998, Physica D)は、「結晶度」を秩序パラメータとして導入し、そのペナルティを空間勾配の2乗ではなく1乗の絶対値とすることで、局在化した粒界を持つ多結晶体をフェーズフィールドモデルによって再現できることを示した。Kobayashi 等の理論に基づいて Tang et al. (2006, Phys. Rev. Lett.)が開発した二成分共融系の粒界モデルを用いて、熱力学平衡状態における粒界の化学組成と無秩序度を温度の関数として計算し、共融点近傍においてこれらが急激に変化する「プレメルティング現象」の発生が予告されることを確認した(図2)。粒界の無秩序化が生じると粒界エネルギーは減少するが、低温では無秩序化に多くのエネルギーを要するため無秩序化は生じない。しかし融点直下では(無秩序化した)メルト状態と(秩序の高い)固体状態の化学ポテンシャルが近いこと、無秩序化によって粒界エネルギーを下げる事で系全体の自由エネルギーを最小にできる。彼らのモデルを用いて行った予測は、ボルネオール・ジフェニルアミン系の力学データを定性的によく説明する事がわかった。
- ② Tang et al. (2006, Phys. Rev. Lett.)モデルのマントルへの適用可能性を明らかにするため、本研究では、固液界面と粒界、1成分系と2成分系をそれぞれ同様にモデル化してその振る舞いを系統的に比較し、粒界の無秩序化に対する第2成分の役割を明らかにした。その結果、図2に示すように、第2成分の存在下では、共融点近傍で粒界組成がメルトの組成に近づき、プレメルティングの発生温度を大きく低下させている事がわかった。同様のメカニズムはマントル岩にも適用できるため、地球の上部マントルにおいてもプレメルティングの発生が期待される。従って彼らのモデルは地球科学分野でも有用であるが、知られていない。既存の文献は、基礎方程式の導出方法の詳しい説明がないため、他の複数の文献や基礎的教科書に戻る必要があり読みにくい。またモデルに含まれる現象論的パラメータの推定方法も述べられておらず、独自に決定する必要がある。これらの基礎的及び実用的情報を新たに含めた上で、彼らのモデルを紹介する論文を地球科学の雑誌に発表した(Takei, 2019, JGR)。

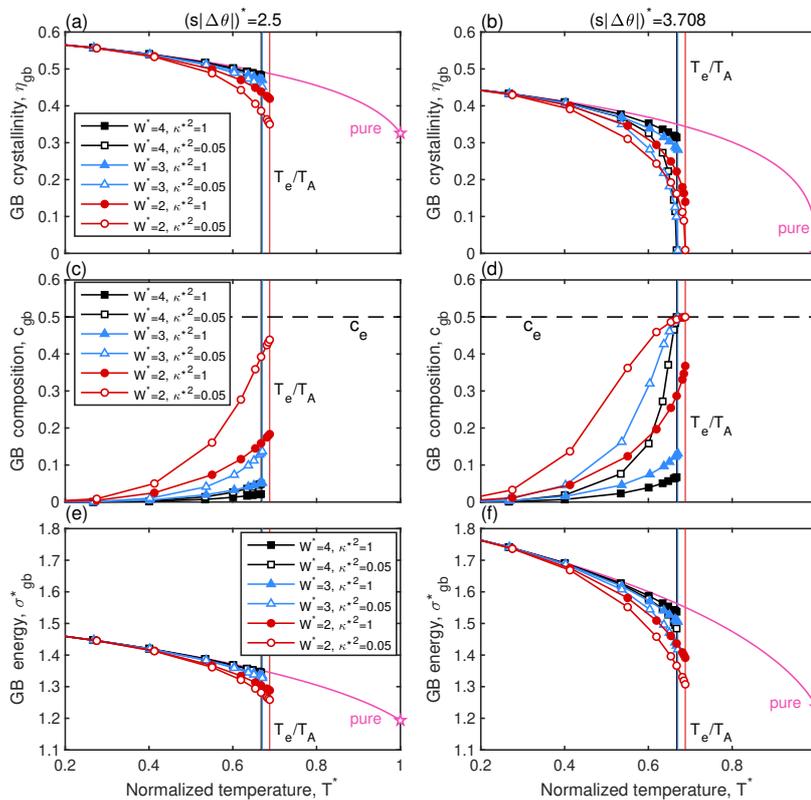


図2
ミスオリエンテーションの異なる2つの粒界について、(上段)粒界秩序の度合い、(中段)粒界組成、(下段)粒界エネルギーを温度の関数として求めた結果を、第2成分の存在しない場合の結果(ピンク線)と比較した図(Takei, 2019, JGR)。モデルパラメータを様々に振って計算を行った結果。共融点直下で第2成分の粒界への吸着が生じること(中段)や、粒界の無秩序化が生じること(上段)がわかる。ミスオリエンテーションが大きいほどその傾向が顕著である事がわかる(右列)。

(3) メルトが非弾性に与える影響の解明(論文執筆中)

- ① メルトを比較的多く(1%以上)含む系の非弾性測定を行い、メルトの少ない場合の結果(Yamauchi and Takei, 2016, JGR)と合わせる事でメルトが非弾性に与える影響を定量的に明らかにできた。この結果を用いて、メルトの効果も含む拡張された非弾性モデルを完成することができた。この拡張によって、沈み込み帯や火山直下などにも応用することができる一般性の高い非弾性モデルが完成した。
- ② 二段階粒成長法により、孤立した第2相を持つ二成分共融系試料の作成に成功した。この試料を用いて、ソリダス直下の温度でのプレメルティングによる力学物性の変化と、ソリダス温度においてつながったメルト相が発生した事による力学物性変化をそれぞれ独立に測定した。その結果、Takei & Holtzman (2009, JGR)で予測されたような繋がったメルトによる粘性の急激な低下は検出されず、Takei & Holtzman (2009, JGR)のモデルの見積もりが過剰であったことを指摘したRudge (2018, JGR)の理論が正しいことを確認した。また、部分溶解を経験した系に対してYamauchi and Takei (2016, JGR)で検出した非弾性のヒステリシスは、固化したメルト相ネットワークの存在が原因で生じたのではなく、粒界構造自体にヒステリシスがあるということも明らかにできた。

(4) 不純物が非弾性に与える影響の解明(論文執筆中)

ロットの異なる複数のボルネオール試薬を用いてボルネオール多結晶を作成し、非弾性特性を測定した。その結果、減衰スペクトルにロットによるばらつきがある事がわかった。この原因を明らかにするため、ボルネオール試薬を再結晶法によって精錬し、精錬後の試料について非弾性測定を行った。その結果、精錬後には非弾性特性のばらつきが無く、精錬前のばらつきはボルネオール試薬に含まれる不純物の存在によるものである事がわかった。本研究代表者等がこれまでに公表したボルネオール試料の非弾性特性は、再結晶精錬後の試料の特性に近い。また、再結晶精錬後の高純度ボルネオール試料にジフェニルアミンを混合して二成分共融系試料を作成し、非弾性特性を測定した結果、公表済みの結果(プレメルティングによって解釈した振る舞いを含む)を非常によく再現する。これらのことから、公表済のデータについては不純物の影響が無視できると結論する事ができる。以上の成果は、現在論文に執筆中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yasuko Takei	4. 巻 124
2. 論文標題 Phase-Field Modeling of Grain Boundary Premelting	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research Solid Earth	6. 最初と最後の頁 8057--8076
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2019JB017632	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Y. Takei	4. 巻 45
2. 論文標題 Effects of partial melting on seismic velocity and attenuation: A new insight from experiments	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Annu. Rev. Earth Planet. Sci.	6. 最初と最後の頁 447 470
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1146/annurev-earth-063016- 015820	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hatsuki Yamauchi and Yasuko Takei	4. 巻 21
2. 論文標題 Application of a Premelting Model to the Lithosphere-Asthenosphere Boundary	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geochemistry, Geophysics, Geosystems	6. 最初と最後の頁 1--25
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020GC009338	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 2件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Y. Takei, H. Yamauchi, A. Tsunoda
2. 発表標題 Rock anelasticity due to grain boundary preempting
3. 学会等名 JPGU-AGU joint meeting, Makuhari（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Takei
2. 発表標題 Rock anelasticity in the upper mantle
3. 学会等名 Symposium in Honor of Y. Gueguen, ENS, Paris (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Takei
2. 発表標題 Experimental and theoretical approaches to grain boundary premelting: a possible origin of asthenosphere
3. 学会等名 EGU, Vienna, Austria (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 角田明博、武井康子、山内初希
2. 発表標題 粒界熱力学モデルによるに成分共融系の粒界プレメルティング
3. 学会等名 JpGU 2019, 幕張
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Yamauchi, Y. Takei
2. 発表標題 Experimental study of the effects of partial melting on anelasticity: toward quantitative interpretations of seismic high attenuation
3. 学会等名 JPGU-AGU joint meeting, Makuhari (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Takei
2. 発表標題 Grain boundary disordering just before partial melting
3. 学会等名 AGU fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	山内 初希 (Yamauchi Hatsuki)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------