

令和 6 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：2020～2022

課題番号：20H02004

研究課題名（和文）差応力がソリダス近傍の多結晶体の非弾性に与える影響と微量メルトの観測可能性

研究課題名（英文）Effect of deviator stress on polycrystal anelasticity at near solidus temperatures and seismological observability of very small amount of melt

研究代表者

武井 康子（Takei, Yasuko）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・教授

研究者番号：30323653

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,800,000円

研究成果の概要（和文）：様々な差応力下で多結晶体を变形し、低周波物性（非弾性）を強制振動実験によってその場観察できる新しい実験装置を開発した。低周波物性が重要なのは、地震波速度に影響を与える粒界状態に敏感なためである。岩石アナログ物質として有機物多結晶体を用いて実験を行い、高温の系では応力集中が十分早く緩和するため封圧がなくても粒界クラックの発生が抑制されることを示した。液相が有効封圧を低下させるという考え方は破壊理論に基づくものであり、本研究のような高温の系には単純には適用できないことがわかった。また、転位クリープ領域であっても転位よりも粒界滑りが非弾性の主要なメカニズムであることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震波による構造探査は、地球内部の状態を解像度良く調べることのできる手法である。しかし近年、高温の地球内部では地震波速度が岩石非弾性の影響を大きく受けることがわかり、非弾性の理解の遅れがネックとなっており、得られた地震波構造の解釈が難しくなった。非弾性の理解が遅れている原因は、高温かつ低周波での岩石物性測定が技術的に困難で、実験データが少ないことにある。岩石アナログ物質を用いた実験は岩石より低温での実験を可能にするため、この困難を解決するために有効である。本研究は、新しい装置を開発して差応力下での非弾性測定を可能としたものである。手法の開発とその得られた結果には重要な学術的意義がある。

研究成果の概要（英文）：We developed a new experimental apparatus which deforms a polycrystalline sample at various stresses ranging from diffusion to dislocation creep regimes and can measure anelastic properties by in-situ forced oscillation tests. Anelastic properties are important to clarify the effect on seismic properties, which are sensitive to grain boundary properties. We conducted several deformation experiments by using polycrystalline borneol as a rock analogue, and investigated the effect of stress on grain boundary properties. We could clarify that at high homologous temperature, stress concentration at grain boundary can be relaxed by slow loading rate comparable to the Maxwell time, and microcracking can be suppressed even without confining pressure. The effective confining pressure theory based on the fracture theory cannot be applied to predict the effect of melt phase on the seismic properties. We could also clarify that effect of dislocations on anelasticity is small and undetectable.

研究分野：固体地球科学

キーワード：岩石非弾性 粒界滑り 転位 粒界クラック メルト 地震波減衰

## 1. 研究開始当初の背景

高温下では地震波速度が岩石非弾性によって大きく低下し得ることが Jackson et al (2002) によって実験的に示され、岩石非弾性の重要性が認識された。しかし、1000 以上の高温を必要とする岩石非弾性の実験は難しく、その解明は遅れていた。本研究代表者らは、岩石のアナログ物質として有機物多結晶を用いた非弾性測定実験を行い、ソリダス近傍にある多結晶体では粒界無秩序化(プレメルティング)によって粒界滑りが促進され、大きな非弾性緩和が生じることを見出した。海洋上部マントルで得られた地震波速度と温度の関係はアナログ物質の実験結果からの予測とよく一致し、マントル岩においてもソリダス近傍でプレメルティングが生じていることが示唆された。このように、岩石非弾性では粒界が重要な役割を果たしていることが明らかになったが、ソリダス近傍での温度による粒界の無秩序化以外にも、差応力や不純物なども粒界構造に大きな影響をあたえることが予想されるが、これらについては未解明であり、その解明が重要課題となった。特に差応力の影響を考える際には、液相の存在が有効封圧を変えて大きく影響する可能性がある。現時点の理解では、微量のメルト相の有無は地震波速度に影響を与えないとされているが、差応力下では地震学的に検出可能な効果を与える可能性があり、重要である。

ソリダス近傍での粒界無秩序化の発生がごく最近まで見過ごされてきた理由は、低周波帯域での力学物性測定が実験的に困難なため、ごく最近まで測定されてこなかったためである。高温の岩石の弾性はもっぱら MHz 以上の超音波で測定されてきたが、高周波物性は粒界状態には敏感でない。地震波速度に影響を与える粒界物性の解明には、地震波帯域のような低周波での測定が必要となる。そこで本研究では、差応力が粒界の状態に与える影響を、低周波帯域でのその場強制振動実験によって調べることが目標とした。「低周波帯域でのその場強制振動実験」は実験的にも新しい試みであり、新しい装置と実験手法の開発も本研究目的の一つとなる。

上述したように、これまでの研究から粒界滑りが岩石非弾性の主要なメカニズムとして注目されるようになった。一方で、鉱物内に存在する転位の移動が非弾性を引き起こすことが Minster and Anderson により予想されており、粒界滑りと並ぶ重要なメカニズムであると考えられている。しかし、転位が岩石非弾性に与える影響に関しては実験データが少なく未解明である。本研究で開発する差応力下での非弾性その場測定実験装置は、転位が非弾性に与える効果を調べる実験も可能にする。本研究と同じ岩石アナログ物質を用いた先行実験としては、Sasaki et al (2019) が転位によって大きな減衰ピークが生じるとの予想を得たが、この結果はマイクロクラックの存在や装置と試料のカップリングに不確実性があり、その場実験による検証が必要である。本研究が目標とする差応力が粒界構造に与える影響を調べる実験は、転位クリープ領域においては転位の効果を調べる実験でもあるため、粒界滑りと転位という2つの代表的メカニズムの相対的な重要性を調べることも可能になる。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究では、差応力が粒界の状態に与える影響を明らかにし、岩石非弾性に与える差応力の影響を明らかにする。

(2) 本研究では、転位が多結晶体の非弾性に与える影響を明らかにし、「粒界滑り」と「転位の運動」という2つの主要な非弾性メカニズムの相対的な重要性を明らかにする。

(3) 差応力が粒界に与える効果は、メルト相の有無によってどのような影響を受けるかを明らかにする。この結果に基づき、上部マントルに広く存在すると予想される微量メルトの地震学的な検出可能性を議論する。

## 3. 研究の方法

本研究では、有機物の多結晶を岩石のアナログ物質として用い、多結晶体に様々な大きさの差応力を加えて変形し、低周波帯域でのその場強制振動実験を行って粒界の状態や転位の効果を調べる。このための実験装置を開発する。差応力による粒界の状態変化のメカニズムとしては、応力集中による粒界クラックが考えられる。粒界クラックの発生条件を理論的に検討した結果、それまで Goetze 基準として知られていた封圧と差応力の相対的な大きさのみならず、応力の載荷速度が粒界への応力集中に大きな影響を与えることがわかった。そこで、載荷速度に注目した実験も行うこととする。

## 4. 研究成果

### 4-1. 開発した装置

本研究で開発した新しい実験装置を図1に示す。

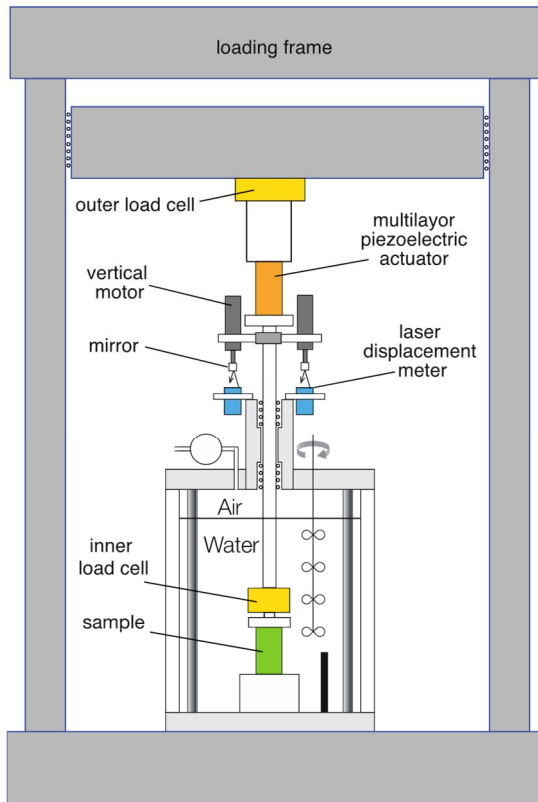


図 1

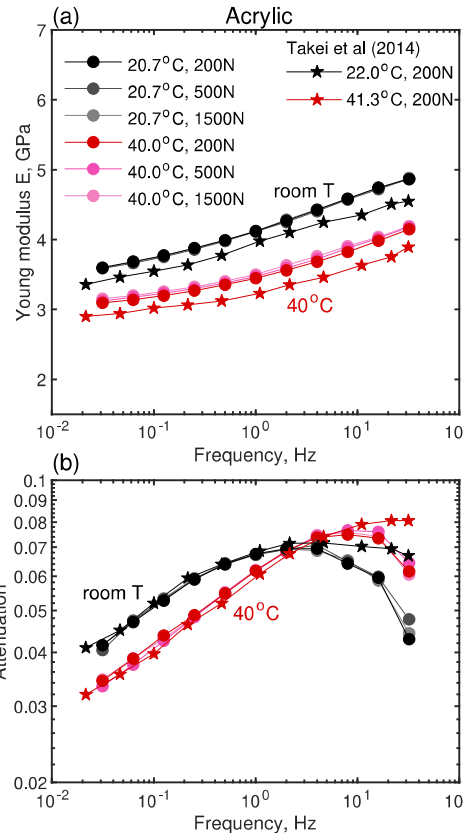


図 2

汎用の万能試験機のピストンに積層圧電アクチュエーターを直列に配置し、この圧電アクチュエーターに正弦波電圧を印加することで試料の強制振動実験を行うことができる。また、微小な振動的変位を高精度で測定するために、汎用試験機の変位計とは独立に、レーザー変位計（分解能 3 nm）による変位計測も行う。Takei et al (2014)で開発された非弾性装置では装置のラインメントを手動で調整する必要があったが、本装置では载荷用のピストン軸を三軸セルのリニアプッシュで支えることで、ラインメントが自動的に保たれる。これにより、試料が大変形を行う間に繰り返し非弾性測定を行い試料のヤング率と減衰を測定することができる。本装置にはこのようなメリットがある一方で、リニアプッシュの摩擦というデメリットがあることもわかった。封圧をかけない場合には摩擦は小さいが、微小な摩擦であっても三軸セルのフレームの変形を生じてレーザー変位計による変位測定に影響を及ぼす。摩擦は常に一定というわけではないため、摩擦の影響を比較的大きく受ける減衰データには長期的安定性が得られないことがわかった。一方、ヤング率の測定結果は摩擦の影響を受けないため、時間的に安定なデータが得られ、試料の非弾性のその場観察が可能になった。

この装置の亚克力を用いたキャリブレーション結果を図 2 に示す（丸印）。先行研究の装置での測定結果（星印）に比してヤング率の絶対値が系統的に 5%程度大きい、周波数依存性や温度依存性がよく一致していることがわかる。また、減衰に関してよく一致していることがわかる。また、測定結果は荷重にほとんど依存しない。

#### 4-2、実験結果およびその考察

(1) まず、差応力载荷に伴う応力集中が粒界に与える影響を調べるため、载荷速度を大きく変えた実験（毎秒 1N の場合と、毎秒 1/30 N の場合）を行った。初期差応力は拡散クリープが支配的となる 0.26MPa、最終差応力は転位クリープが支配的となる 2MPa とした。実験の結果、载荷速度が毎秒 1N の場合であっても 1/30 N の場合であっても、差応力 2MPa までの载荷に伴うヤング率の変化は検出されず、粒界クラックが進展しないことがわかった。この結果は、粒界での応力集中の緩和がこれらの载荷速度に比べて早いことを意味している。毎秒 1N での载荷の場合に、载荷に要する時間が試料のマックスウエル緩和時定数に近いことから、本結果は理論的観点でも納得できる結果である。

(2) さらに 2MPa の差応力を長時間維持すると、加速クリープが生じて歪み速度が数倍程度大きくなる。この加速クリープ時にはヤング率が徐々に低下し、最終的に数%程度低下することがわかった。この加速クリープは、封圧下では抑制されることが先行研究によりわかっており、また本研究から载荷速度に依存しないこともわかったため、载荷に伴う一時的な応力集中とは異

なるメカニズムでの空隙の成長や粒界のダメージによるものではないかと推測された。このヤング率の低下は、実験後の試料の超音波測定と顕微鏡下での構造観察では検出されないが、試料の粒界拡散クリープ粘性には低下として現れる。このため、粒界の原子レベルでの構造に何らかのダメージがあったことが考えられる。この結果はまた、本研究でおこなった低周波でのその場観察が、これまでの超音波や顕微鏡のみでの観察では見逃してしまうような試料内の状態変化を検出できることを示しており、重要な意義がある。

(3)(2)で報告した実験では、加速クリープが生じる前の段階では、転位クリープが生じているにもかかわらずヤング率の低下は起こっていない。このことから、転位が非弾性に与える影響は本実験では検出できないほど小さいということが結論された。これをさらに検証するため、新たな試料を作成して転位クリープ領域での変形実験を行い、加速クリープが生じる前に試料の変形を修了することで転位クリープ中も変形後も試料のヤング率に変化がないことを確認した。

(4)本研究の結果はさらに他の物質へ一般化する必要があるが、少なくとも本研究に用いた物質では転位クリープ領域であっても転位よりも粒界滑りが非弾性の主要なメカニズムであることを示しており、非常に重要な結果であるといえる。また本研究により、高温の系では封圧がなくても応力集中が緩和して粒界クラックの発生が抑制されることを示すことができた。液相が有効封圧を低下させるという考え方は破壊理論に基づくものであり、本研究のような高温の系には単純には適用できない。従って、微小メルトの効果については、少なくとも有効封圧理論で予想されるような大きな効果はないと言える。ただし、(2)で報告した粒界へのゆっくりとしたダメージについては、封圧そのものが重要であるのか有効封圧が重要であるのか未解明であり、今後さらに検討する必要がある。

(5)以上の成果に加えて、不純物が粒界滑り特性に与える影響について、本研究で使用した有機物多結晶の場合についての詳細な報告を論文公表した(Takei, 2022)。また、差応力がない場合には微量メルトの有無が粘性や非弾性(地震波速度を含む)に与える影響が無視できる程小さいことを実験的に実証した論文も公表した(Yamauchi and Takei, 2024)。

#### 引用文献

- Jackson, I., Fitz Gerald, J. D., Faul, U. H., Tan, B. H. (2002). Grain-size-sensitive seismic wave attenuation in polycrystalline olivine. *Journal of Geophysical Research*, 107(B12), 2360. <https://doi.org/10.1029/2001JB001225>
- Minster, J.B., Anderson D. L., (1981) A model of dislocation-controlled rheology for the mantle, <https://doi.org/10.1098/rsta.1981.0025>
- Sasaki, Y., Takei, Y., McCarthy, C., Rudge, J. F. (2019). Experimental study of dislocation damping using a rock analogue. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124, 6523-6541. <https://doi.org/10.1029/2018JB016906>
- Takei, Y., F. Karasawa, H. Yamauchi (2014), Temperature, grain size, and chemical controls on polycrystal anelasticity over a broad frequency range extending into the seismic range, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, <https://doi.org/10.1002/2014JB011146>
- Takei, Y. (2022). Effect of impurities on polycrystal anelasticity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127. <https://doi.org/10.1029/2021JB023224>
- Yamauchi, H., Takei, Y. (2024). Effect of melt on polycrystal anelasticity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129, <https://doi.org/10.1029/2023JB027738>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Takei Yasuko	4. 巻 127
2. 論文標題 Effect of Impurities on Polycrystal Anelasticity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	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） 10.1029/2021JB023224	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 Yamauchi Hatsuki, Takei Yasuko	4. 巻 129
2. 論文標題 Effect of Melt on Polycrystal Anelasticity	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 1,29
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2023JB027738	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4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yasuko Takei
2. 発表標題 Partial melting and pre-melting in the upper mantle
3. 学会等名 JPGU 2022（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷部功将、武井康子
2. 発表標題 部分熔融岩の粒界割れに関する理論的・実験的研究
3. 学会等名 JPGU 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hatsuki Yamauchi and Yasuko Takei
2. 発表標題 Seismic discontinuity at lithosphere-asthenosphere boundary predicted from laboratory-based anelasticity model
3. 学会等名 JPGU 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷部功将、武井康子
2. 発表標題 多結晶体非弾性における転位の効果
3. 学会等名 JPGU2024
4. 発表年 2024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

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