

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13560

研究課題名(和文) 転位を含む多結晶体の弾性・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 containing dislocations;  
toward understanding of seismic images in the mantle

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) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：岩石非弾性は地震波の分散と減衰を引き起こすため重要であるが、転位が非弾性に与える影響はよく分かっていない。我々はボルネオール多結晶体を岩石アナログ物質として用い、転位による非弾性を室温近傍で実験的に調べた。その結果(1)ボルネオール多結晶体は差応力1MPa付近で拡散クリープから転位クリープへと遷移すること、(2)転位クリープさせた試料のヤング率は顕著に小さいこと、(3)転位による非弾性緩和の特性周波数は1MHzと100Hzの間にあること、(4)非弾性の測定中に転位が回復してヤング率も回復すること、がわかった。また(5)転位クリープ下で試料のヤング率をその場測定できる実験システムを開発した。

研究成果の概要(英文)：Rock anelasticity causes seismic dispersion and attenuation and hence plays an important role in the interpretation of seismological structures. Effects of dislocations on the rock anelasticity, however, have been poorly understood. We experimentally investigated the dislocation-induced anelasticity near room temperature by using borneol (organic polycrystal) as a rock analogue. We found that (1) deformation mechanism of borneol changes from diffusion to dislocation creep at the differential stress of about 1 MPa, (2) after the dislocation creep, Young's modulus was significantly reduced, (3) characteristic frequency of the dislocation-induced anelastic relaxation exists between 1 MHz and 100 Hz, and (4) the modulus recovered due to a dislocation recovery during the anelasticity measurement. (5) We further developed a new experimental system to measure anelasticity during the dislocation creep.

研究分野：固体地球科学

キーワード：転位 非弾性 地震波減衰 アナログ実験

1. 研究開始当初の背景

岩石非弾性は地震波の分散と減衰を引き起こす。このため、近年ますます高精度になってきた地震波速度・減衰構造の解釈には、岩石非弾性の解明が不可欠である。しかし、実験の難しさから、岩石非弾性については未解明の部分が多い。

岩石非弾性のメカニズムとしては、粒界すべりと転位運動の主に2つが提案されている。粒界は面欠陥として、転位は線欠陥として岩石中に普遍的に存在し、地震波伝播の際にすべり運動することでエネルギーを散逸させて、地震波の速度分散と減衰を引き起こす。粒界すべりについては、近年、実験データが増えて理解が大きく進んできているが、転位が非弾性に与える影響についてはわずかな実験データしかなく [1, 2]、よく分かっていない。転位密度は差応力の大きさの2乗に比例すると言われており、転位が非弾性に与える影響を解明することで、地球内部の差応力や変形が地震波構造に与える影響を明らかにすることができる。

2. 研究の目的

岩石非弾性の実験が難しい理由は、地震波に相当する低周波数かつ微小歪み ( $10^{-6}$ ) における弾性定数と減衰を、地球内部に相当する高温高压下で測定することが難しいからである。本研究では、岩石よりも融点の低いボルネオール多結晶体 (有機物) を岩石のアナログ物質として用いることで、岩石の高温高压状態に相当する状態を常温常圧近傍で再現することに着目し、転位が非弾性に与える影響を詳細に調べることが目指した。ボルネオール多結晶体については、粒界による非弾性がすでに詳細に調べられているため、そこからのずれとして転位の影響を調べることができる。

3. 研究の方法

まず、ボルネオール多結晶体の流動則を明らかにし、この物質が転位クリープする差応力や温度の条件を調べる。次に、この物質を転位クリープ下であらかじめ変形した実験試料を作成してその非弾性を測定し、転位が非弾性に与える影響を調べる。

4. 研究成果

(4-1) ボルネオール多結晶体の流動則

まず、この試料に転位を導入するための温度・差応力条件を調べるため、変形機構図 (差応力と歪速度  $d/dt$  の関係) の作成を行った。封圧 0.8 MPa、温度 40 と 50 において、様々な1軸圧縮応力下で変形し、流動則を求めた。その結果、50 で差応力が 1 MPa を上回ると、拡散クリープから転位クリープ ( $d/dt$  ) に遷移することが分かった (詳細は、成果 4-4 を参照)。転位クリープが生じたことは微細構造中の粒界移動の痕跡からも裏付けられた。

(4-2) 転位が非弾性に与える影響

決定した条件下で転位クリープさせた試料の非弾性を、 $10^{-4}$  -  $10^2$  Hz の帯域における強制振動実験によって測定した。拡散クリープ領域 ( $\sigma = 0.27$  MPa)、遷移領域 ( $\sigma = 1.3$  MPa)、転位クリープ領域 ( $\sigma = 1.9$  MPa) の3つの差応力条件を選び、小さい差応力条件から大きい条件へと順に変えて1つの試料を変形させ、各変形後の非弾性特性を測定した。非弾性測定では、1軸応力の正弦的な変化に対する1軸歪応答を測定する強制振動実験を行い、ヤング率と減衰 (非弾性特性) を求めた。その結果、高差応力下でのクリープ後ほどヤング率が減少し、減衰が増加した。図1には、拡散クリープ後に測定された非弾性を黒で、 $\sigma = 1.9$  MPa での変形直後の結果をピンクで示した。 $\sigma = 1.3$  MPa での変形直後の結果はこの間にくる。黒のデータは我々のグループの過去のデータ [3] ともよく整合し、粒界由来の非弾性を示していると考えられる。黒とピンクの差が転位由来の非弾性であると考えられる。

転位クリープ直後に検出された非弾性特性の変化は、10日~2週間程度かけて行った非弾性測定の間、拡散クリープ後の状態までほぼ完全に回復することも分かった。これらの結果から、転位クリープによって試料中に導入された転位によって非弾性が増大し、その転位が回復 (消滅) することで非弾性特性も回復したと解釈される。

(4-3) 転位による非弾性緩和の時定数

転位による非弾性緩和の時間スケールを制約するための実験を行った。転位クリープ領域 ( $\sigma = 1.9$  MPa) の差応力条件下で変形させた別試料のヤング率を、変形前後において、中心周波数が  $10^6$  Hz の超音波を用いて測定した。具体的には、試料中に超音波を伝播させて縦波と横波の速度を測定することでヤング率を求めた。その結果、 $10^6$  Hz では変形前後でヤング率が変化せず、どちらも非緩和ヤング率に一致することが分かった (図1)。

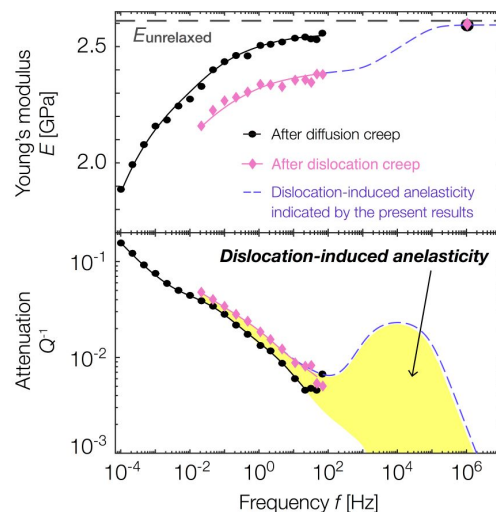


図1 転位が非弾性に与える影響を示すデータ

以上の結果から、本研究の多結晶体試料では、転位が引き起こす非弾性緩和の大部分は  $10^2 - 10^6$  Hz の帯域に存在していることが明らかとなった（図 1）。転位による非弾性緩和は 10%程度のヤング率の低下をもたらす強度を持ち、その時間スケールは粒界によるもの（図 1、黒のデータ）に比べて短かった。

#### （4-4）クリープカーブの解析

転位クリープのクリープカーブから得られる歪み速度は、載加直後に過渡的クリープで減速した後加速に転じその後さらに減速に転じる、という複雑な様相を呈し、定常状態に落ち着くことがなかった。この複雑なクリープカーブを理解し、定常状態での流動則を推測するために、転位密度を状態変数として含むモデルを作ってクリープカーブの解析を行った。

まずオロワンの関係式により、歪速度を転位密度と転位の速度に結びつけた。転位速度は差応力に比例すると仮定し、転位密度については、差応力で決まる平衡値と現在値の差に比例した速度で平衡値に近づくという時間発展則を仮定した。これらの式に、実験から得られた応力、歪み速度の時間変化を制約条件として用いることで、モデルに含まれる未知パラメータや転位密度の時間変化を決定した。

解析の結果、転位クリープ下では、試料の転位密度が半日ほどかけて増加し、その後減少に転じることが分かった。前半の転位密度の増加は、ある差応力下で転位密度の平衡状態に至る時定数が 10 時間程度であることを示しており、後半の減少は荷重一定の条件下でも試料のつぶれによって差応力が低下することに対応する。解析から得られた定常流動則は高い応力指数 ( $n=7$ ) を持つ。転位クリープ実験で定常クリープが捉えられなかった理由は、試料の形状変化による差応力の低下に歪み速度が非常に敏感に反応するためであることが分かった。

#### （4-5）転位クリープ下で非弾性を測定する新しい実験装置の開発

試料の転位クリープ中には（4-4）で得たような転位密度の変化が生じ、これに対応して試料の非弾性特性も変化すると予想される。このような変化を検出できれば、転位密度と非弾性の関係をより詳細に調べることが可能となるが、現状では転位クリープを行う装置と非弾性を測定する装置が異なるため、このような実験は不可能である。現状では非弾性測定の前に試料の除荷や冷却を行うため、その間に転位の回復なども生じている可能性がある。そこで、転位クリープ中の非弾性をその場測定できる新しい実験システムの開発を行った。

まず、試料を高差応力・封圧下で転位クリープさせる装置に、微小な振動応力を加えるための圧電アクチュエータを取り付けた。ま

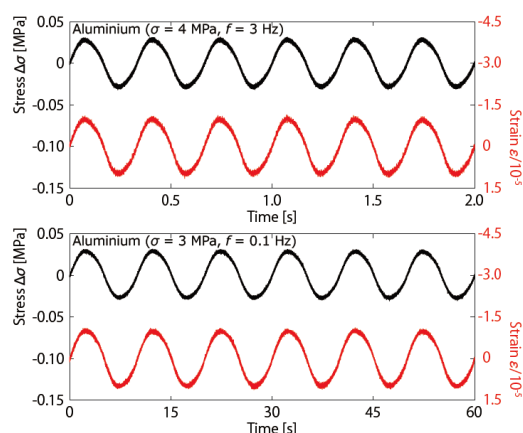


図 2 本研究で新たに開発した装置のブランクテストの結果。（上）差応力 4MPa 封圧 0.8MPa 下にあるステンレス試料に 3Hz 周期の強制振動を加えた結果。（下）差応力 3MPa 封圧 0.8MPa 下にあるステンレス試料に 0.1Hz 周期の強制振動を加えた結果。

た、微小振動の変位を高精度で測定できるレーザー変位計を取り付けた。実際に試料に加わる振動応力を正確に測定するためには、封圧容器中の内部ロードセルが重要であることも分かった。ブランクテストによって、高差応力下で、微小振幅の強制振動実験が行えることを確認した（図 2）。完成した装置を用い、転位クリープ下での岩石アナログ試料の非弾性をその場測定する予備実験を行い、実際にヤング率がゆっくりと減少する様子を捉えることに成功した。

#### （4-6）終わりに

本萌芽研究により、ボルネオール多結晶体の流動則を初めて明らかにし、拡散クリープ領域から転位クリープ領域にわたる広い差応力条件下で岩石の良いアナログ物質として用いることができることを示した（4-1）。転位を含むこの物質の非弾性を実際に測定してその影響を捉えることに成功し、転位による非弾性緩和の時定数を制約することができた（4-2、4-3）。さらに転位クリープ下で非弾性をその場測定するための新たな実験装置を開発し、実際に非弾性の時間変化を捉えることにも成功した（4-5）。

転位クリープ中の転位密度の時間変化の推定（4-4）に基づくと、非弾性のその場測定の結果（4-5）は、転位クリープ後の非弾性測定の結果（4-2、4-3）とよく整合し、本実験が転位の効果を正しく捉えられていることを示している。従って、本研究により転位が非弾性に与える影響を詳細に研究するための準備が整ったといえる。今後はさらに条件を様々に変えて系統的データを取得することにより、物理メカニズムの解明を目指す。

（4-1）～（4-4）の成果をまとめた論文は現在執筆中であり、今年度中に投稿予定である。（4-5）の成果については、さらに

多くのデータを取得して論文にまとめる予定である。本研究成果の学会発表では多くの研究者が関心を示し、佐々木勇人さん(研究協力者)は国内学会での学生優秀発表賞及び国際学会での Outstanding student award の計二つの賞を受賞した。

#### 引用文献

- [1] Guéven et al. (1989),  $Q^{-1}$  of forsterite single crystals, Phys. Earth Planet. Inter.  
[2] Farla et al. (2012), Dislocation damping and anisotropic seismic wave attenuation in Earth's upper mantle, Science.  
[3] Takei et al. (2014) Temperature, grain size, and chemical controls on polycrystal anelasticity over a broad frequency range extending into the seismic range. JGR

#### 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0件)

〔学会発表〕(計4件)

佐々木 勇人、武井 康子、マッカーシー クリスティーン、鈴木 彩子 転位が岩石非弾性に与える影響：アナログ多結晶体を用いた転位クリープ下での強制振動実験、日本地球惑星科学連合、連合大会、2018年05月20日、幕張メッセ(千葉県、千葉市)

Y. Sasaki, Y. Takei, C. McCarthy, A. Suzuki Effects of dislocations on polycrystal anelasticity AGU fall meeting (国際学会) 2017年12月、サンフランシスコ、USA  
本発表は Outstanding Student Award を受賞

佐々木 勇人、武井 康子、マッカーシー クリスティーン、鈴木 彩子 Effect of dislocation on rock anelasticity: Analogue experiment using organic polycrystals、JpGU-AGU joint meeting (国際学会) 2017年05月20日、幕張メッセ(千葉県、千葉市)

佐々木 勇人、武井 康子、マッカーシー クリスティーン、鈴木 彩子 転位が岩石非弾性に与える影響：アナログ物質を用いた実験的研究日本地球惑星科学連合、連合大会、2016年05月22日幕張メッセ(千葉県、千葉市)  
本発表は、学生優秀発表賞を受賞

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

#### 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

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし

(4)研究協力者 佐々木 勇人(SASAKI Yuto)  
東京大学・地震研究所・大学院生