

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340127

研究課題名(和文)地震学への応用を目指した岩石の非弾性特性の研究

研究課題名(英文) Study of rock anelasticity for seismological application

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円、(間接経費) 3,870,000円

研究成果の概要(和文)：多結晶体の非弾性ではマックスウエル周波数 f_m (=弾性定数/粘性)によるスケーリング則が知られているが、その有効性は規格化周波数 f/f_m が10の4乗より低い帯域で実験的に確認されたのみで、地震波に相当する帯域($f/f_m = 10$ の6乗から9乗)で成り立つかどうか分らなかった。本研究では、アナログ物質を用いて多結晶体の非弾性を $f/f_m = 10$ の8乗まで測定し、地震波を含む $f/f_m = 10$ の4乗以上の帯域では f_m による単純なスケーリング則が成り立たないことを明らかにした。このずれは、温度の上昇、粒径の増大、不純物の添加によって生じる非弾性緩和の促進によることも分かった。

研究成果の概要(英文)：Recent experimental studies have shown that anelasticity of polycrystalline materials is subject to the Maxwell frequency (f_m) scaling: $1/Q(f_n)$ with $f_n=f/f_m$. However, the applicability of this scaling to the seismic waves has not been guaranteed because f_n in the laboratory is usually much lower than that of the seismic waves ($6 < \log_{10}(f_n) < 9$). By using polycrystalline organic borneol as an analogue to mantle rock, we measured anelasticity up to $\log_{10}(f_n) = 8$ and found that this scaling is not fully applicable at $\log_{10}(f_n) > 4$. A closer examination showed that each of the relaxation spectra obtained under various temperature, grain size, and chemical composition can be represented by the superposition of a background subject to the Maxwell frequency scaling and a peak centered at $\log_{10}(f_n) \sim 3$. Significant increases of the peak amplitude and width with increasing temperature, grain size, and impurity content result in failure of the Maxwell frequency scaling at $\log_{10}(f_n) > 4$.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：非弾性 地震波減衰 多結晶体 粒界滑り アナログ物質

1. 研究開始当初の背景

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、岩石の非弾性特性の解明が不可欠である。しかし、地震波の周波数帯域で強制振動実験を行う必要があるため、高温高圧下で行うことが難しく、岩石の非弾性特性については未知の部分が多い。このため、本研究では、有機物（ボルネオール）の多結晶体を岩石のアナログ物質として用い、多結晶体に普遍的な非弾性の振る舞いを調べている。

これまでの研究から、多結晶体の非弾性にあたえる温度 T ・粒径 d ・メルト量 p ・化学組成 C の影響は、これらのファクターがマックスウエル周波数 f_m (= 弾性定数 / 粘性) に与える影響としてとらえることができることが分かった。つまり非弾性を表す減衰スペクトル $Q^{-1}(f)$ は、周波数 f を f_m で割った規格化周波数 f/f_m のみの関数として表すことができる； $Q^{-1}(f, T, d, p, C) = Q^{-1}(f/f_m)$ 。しかし、このようなスケーリング則の成立が確認できているのは、規格化周波数 f/f_m が 10^{-4} 以下の範囲のみであり、地震波の帯域に相当する $f/f_m = 10^6 - 10^9$ の範囲で成り立つかどうか分らなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、岩石のアナログ物質を用いて従来よりも高い規格化周波数における非弾性データを取得し、マックスウエル周波数を用いたスケーリング則の適用限界を調べることである。最終的には、地震波に応用できる非弾性のスケーリング則を確立することが目的である。

3. 研究の方法

(1) 実験装置開発

規格化周波数 f/f_m の高いデータを取得するためには、より高周波数(f が大)、より低温(f_m が小)、より大粒径(f_m が小)で非弾性データを取得することが望ましい。このため、

高速のレーザー変位計と低温インキュベータを用いて、強制振動型の非弾性実験装置を新たに開発した。本研究の目的に合致した高精度の非弾性実験装置を完成させるにあたり、以下に述べるような工夫を行った。

強制振動実験では、装置の共鳴などの影響により100Hz以上での測定が難しく、100Hzから超音波を用いた100kHz以上での測定まで3桁以上の帯域がデータの空白域になってしまう。しかし、超音波帯域から得られる弾性定数と、強制振動実験から得られる100Hzでの弾性定数の差から、この空白域における非弾性緩和強度の積分値を知ることが出来る。超音波実験における弾性定数の測定制度は非常に高いが、強制振動実験において弾性定数を高精度で測定することは難しい。本研究では、裁荷点を試料の中心軸に可能な限り一致させて曲げ変形を最小限に押さえることと装置剛性の改善により、ヤング率の測定誤差を2%まで改善できた。また、規格化周波数の高い領域では、減衰が小さいため、減衰測定にも高い精度が要請される。これについても、計測器自体の持つ微小な時間遅れを実測して補正することにより高周波側の減衰の測定精度を大幅に改善できた。

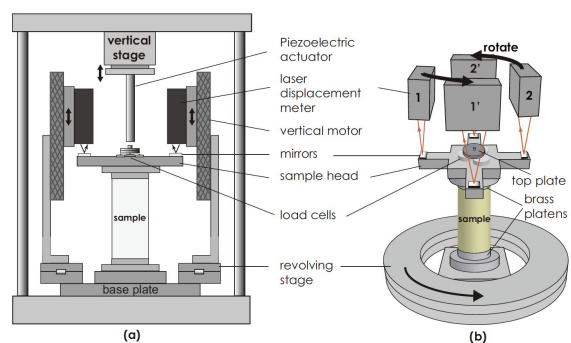


図1 本研究で開発した実験装置。Top plateは小さなxyステージになっており、裁荷点の位置を調節することができる。4箇所のミラーで読んだ変位が等しくなるように裁荷点の位置を調整する(つまり裁荷点を試料の中心軸に一致させる)ことで、ヤング率の測定精度が格段に改善できることが分かった。

(2) 減衰とヤング率の測定精度

上述したように、計測器自体の持つ時間遅れの補正により、 $Q=2000$ のステンレスバネの減衰を測定することに成功した(図2a)。また、長さの異なるアクリル試料のヤング率を測定し、端面拘束の影響による数% - 10%の長さ効果を正しく検出できることを確認した(図2b)。

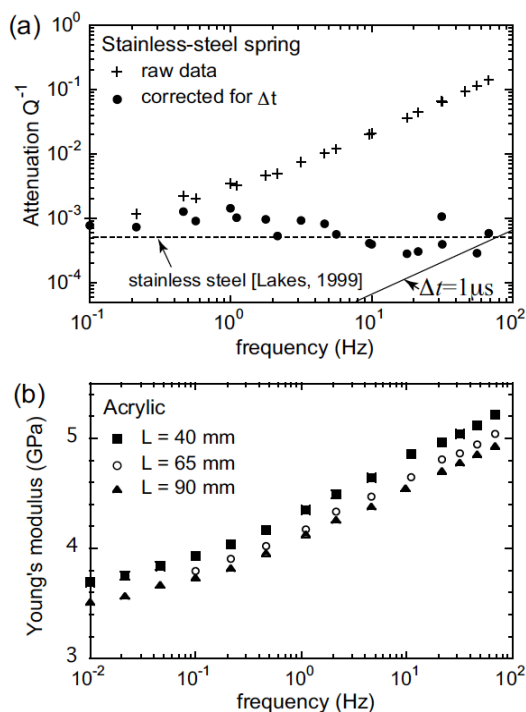


図2 (a)ステンレスバネの小さな減衰測定に成功した。1 Hz 以上の高周波では、計測機器自体の持つ微小な時間遅れを補正することが極めて重要となることがわかる。(b)長さの異なる三つのアクリルサンプルを用いてヤング率を測定し、端面拘束の効果を検出することに成功した。

(3) 粒径の大きな試料の作成

空隙はヤング率が低下させるため、ヤング率を精密に測定するためには空隙のない試料の作成が重要となる。これまでの実験で行ってきた大気圧下での粒成長が空隙の増大を伴うため、本研究では封圧下で粒成長させる方法を開発し、空隙のない様々な粒径の試料を作ることができるようになった。

4. 研究成果

完成した実験装置を用いて、多結晶体試料のヤング率と減衰スペクトルを、温度、粒径、化学組成を系統的に変えて測定した。その結果、規格化周波数が高い帯域(地震波帯域を含む)での非弾性の振る舞いは、マックスウエル周波数 f_M による単純なスケーリング則のみではとらえきれないことが分かった(図3)。特に、不純物による多結晶体の非弾性の促進が、マックスウエルスケーリング則からの予想よりも(つまり、粘性への影響から予想されるよりも)はるかに大きいことが分かった。不純物には、多結晶体の融点を大きく低下させる働きがあるため、この実験結果は、多結晶体はその融点に近づいたことで非弾性緩和が促進されたとも解釈できる。上部マントルでは岩石が融点に近い温度にあり、このような場所での地震波速度構造の解釈には、融点近傍での多結晶体の非弾性特性を理解することが重要になると考えられる。

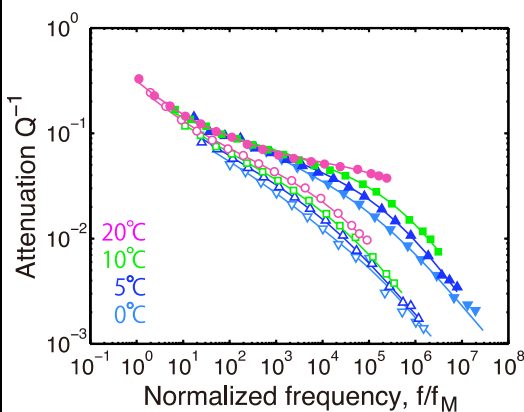


図3、得られた減衰データから、一部抜粋して示す。シンボルの色と形が実験温度(20、10、5、0)を表す。白抜きは純粋ボルネオール、中塗りは不純物として少量のジフェニルアミンを混ぜたボルネオールのデータ。横軸は、マックスウエル周波数で規格化した周波数を示す。低い規格化周波数では全てが一本の曲線に収束してゆくが、高い規格化周波数では大きくばらけている。特に、不純物入りの高温のデータが大きな減衰を示している。

また、今回の強制振動実験の最高周波数 46.4 Hz で測定されたヤング率と超音波実験により測定された非緩和ヤング率はかなり近い値になり、強制振動実験によって捉えきれなかった非弾性緩和は 3.1%以下であった。このことは、本実験で得られた減衰スペクトルを用いて、地震波に適用する際に重要と考えられている「純粋に弾性的な挙動から非弾性的な挙動へ移り変わる様子」に近い状態を観察できることを示している。

岩石のアナログ物質を用いて得られた以上の成果と、マントル岩を用いた Jackson et al 2002、2004 の結果にはかなりの共通点を見出すことが出来る。このため、本研究をさらに進めて多結晶体に普遍的な非弾性の振る舞いを解明することで、高い規格化周波数帯域でのメカニズムやスケーリング則の解明を目指したい。

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)

Y. Takei, K. Fujisawa, C. McCarthy, 2011, Experimental study of attenuation and dispersion over a broad frequency range: 1. The apparatus J. Geophys. Res., 116, B09, B09204, doi: 10.1029/2011JB008382. 査読あり

C. McCarthy, Y. Takei, T. Hiraga, 2011, Experimental study of attenuation and dispersion over a broad frequency range: 2. The universal scaling of polycrystalline materials, J. Geophys. Res. 116, B09207, doi:10.1029/2011JB008384. 査読あり

C. McCarthy, Y. Takei, 2011, Anelasticity and viscosity of partially molten rock analogue: Toward seismic detection of small quantities of melt, Geophys. Res. Lett., 38, L18306, doi:10.1029/2011GL048776. 査読あり

[学会発表](計 5 件)

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, O-okayama, Tokyo, Feb. March 1, 2014. 招待講演

Y. Takei, Experimental study on anelasticity of polycrystalline material for seismological application, CIDER Workshop on Seismic Attenuation in the Earth's Mantle, Lamont-Doherty Earth Observatory, New York, USA, May 9-10, 2013. 招待講演

Y. Takei, F. Karasawa, Experimental study on anelasticity of polycrystalline material for seismological application. AGU fall meeting, San Francisco, USA, 7th Dec. 2012. 招待講演

Y. Takei, C. McCarthy, F. Karasawa, Anelasticity of polycrystalline material over a broad frequency range. Joint Symposium of Misasa 2012 and Geofluid-2, Misasa, Tottori, Japan, 19th March, 2012. 招待講演

Y. Takei, C. McCarthy, Effect of partial melting on seismic wave velocities and attenuation, IUGG 2011, Melbourne, Australia, 30th June, 2011. 招待講演

[図書](計 1 件)

Y. Takei, 2013, Elasticity, anelasticity, and viscosity of a partially molten rock. In Physics and Chemistry of the Deep Earth (ed. S. Karato), pp. 66–93. John Wiley & Sons, Ltd. 査読あり

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