

Theoretical and experimental study on quantitative assessment of seismic attenuation

(地震波減衰の定量的評価に向けた理論的・実験的研究)

藤澤和浩

1. はじめに

地震学的観測値を解釈し地球内部の温度や組成、相を推定するために、地球内部物質の力学物性の解明が重要である。地震波エネルギーの散逸を示す観測値である減衰(Q)の解釈には、非弾性という、弾性と粘性の中間的な物性の寄与を明らかにする必要がある。多結晶体で生じる非弾性の原因としては、粒界でのせん断応力の緩和により散逸が生じる粒界すべり [Ke, 1964] が有力視されている。しかし、すべりを担う格子欠陥の運動の理論から出発して非弾性の温度・粒径依存性の定量的な評価式を得ることは極めて困難である。このため、温度・粒径依存性に経験的な制約を与えるための非弾性測定実験の必要性が認識されてきた。超音波(~ 1 MHz)伝播による物性測定実験は以前から行われてきたが、非弾性は一般に強い周波数依存性を持つので、実験は地震波(≤ 10 Hz)と同じ周波数帯域で行う必要がある。近年ようやく、ねじり型周期変形実験装置によるオリビン多結晶体の非弾性測定 [Jackson et al., 2002] が行われ、せん断変形に関して 1 mHz - 1 Hz で温度・粒径を系統的に変えたデータが得られるという進展があった。本研究では、縦変形型周期変形実験装置(縦変形——せん断変形とは独立な、体積変形を含む変形)を新規に開発し、アナログ多結晶体試料を用いて実験を行った。また、粒界すべりの理論モデルを開発し、体積変形で生じる散逸の大きさとせん断変形で生じる散逸の大きさの比を見積もった。

2. 縦変形型周期変形実験装置の開発と実験結果

開発した装置(図1)では、試料・ロードセル・圧電アクチュエータを鉛直方向に直列に配置する。アクチュエータにより一軸応力を印加して試料を縦変形させる。周期変形試験を行い、 \sin 関数に従って時間変化する負荷と変位の位相差から Q を決定した。本装置では 0.1 mHz - 50 Hz の広帯域で測定を行った。地震波伝播と同様に応力-歪の線形性が成り立つ範囲で実験を行うためには、歪振幅を 10^{-5} 以下に抑えることが要請され

る。このような微小振幅であっても正確に位相差を決定するために、本装置では、分解能が $0.01 \mu\text{m}$ のレーザー変位計を用いて試料変位を計測した。

負荷 p , 変位 u から、 Q と J_1 (コンプライアンスの実部) が求められる (S : 試料断面積, L : 試料高さ):

$$\begin{cases} Q^{-1} = \tan\{\text{phase}(p) - \text{phase}(u)\} \\ J_1 = \frac{S \cdot u_{\max}}{4L \cdot p_{\max}} \cos\{\text{phase}(p) - \text{phase}(u)\} \end{cases} .$$

分散関係 [Liu et al., 1970] を満たす点から、 Q 測定値の信頼性が示された。

アナログ多結晶試料 (図 2) は、有機物粉体の焼結により作成した。この有機物は、細粒 ($\sim 1 \mu\text{m}$) の多結晶が作成可能であるので、粒径依存性の解明に利用できる。また、別の有機物との共融系 [Takei, 2000] を部分熔融させると、力学物性の異なる物質 (流体) が混在した多結晶を作成できる。

実験の結果 (図 2), 1mHz 以下では、温度が高いほど Q^{-1} が大きく、周波数依存性 ($Q \propto f^\alpha$) に関しては $\alpha \approx 1$ であった。この結果は、粘性の寄与で説明できる。一方、 $10 \text{Hz} - 1 \text{mHz}$ では、温度依存性はほとんどなく、 $\alpha \approx 0$ であった。この実験結果は、非弾性が熱活性化過程に従うため生じる温度依存性と周波数依存性の関係 (図 3) と整合的である。熱活性化過程では、温度変化により Q^{-1} スペクトルが周波数領域上で平行移動するので、 $\alpha = 0$ の帯域に含まれる周波数での Q は温度依存性を示さない。温度変化でスペクトルの高さ変化を生じる過程の有無は定かでないが、実験結果から、本研究の試料では高さ変化は生じなかったことがわかった。

3. 体積変形において生じる散逸の大きさの理論予想

流体など力学物性の異なる物質が混在する多結晶では、巨視的に等方的な応力を印加し体積変形させた場合であっても、粒界に法線応力のみならずせん断応力がはたらき、粒界すべりにより散逸を生じることが予想される。体積変形で散逸が生じる系を地震波が伝播すると、P波減衰とS波減衰の比 Q_p/Q_s が、従来、観測値の解析で仮定されてきた 2.25 を下回る (ポアソン比 0.25)。本研究では、 Q_p/Q_s の計算手法を開発し、体積変形で生じる散逸の影響がどれほど現れるのかを固体粒子+流体ポア系 (図 4) に関して検討した。

Q_p/Q_s の導出のポイントは、散逸帯域より高周波数の非緩和状態・低周波数の緩和状態での弾性波速度という、理論計算可能な量を用いる点にある。微視的なメカニズムが不明であるため周波数の関数として Q_p, Q_s を計算することが不可能である粒界すべりのような素過程であっても、 Q_p/Q_s を求めることができる。

計算した結果 (図 5), P波伝播時に流体ポアが効率よくつぶれ粒界で大きなせん断応力がはたらくようなポア配置である場合に、 Q_p/Q_s は 2.25 を大きく下回った。このことは、微視的にはせん断変形で散逸を生じる素過程であっても、巨視的な体積変形の際に、観測で捕捉可能な大きさの散逸を起し得ることを示唆している。

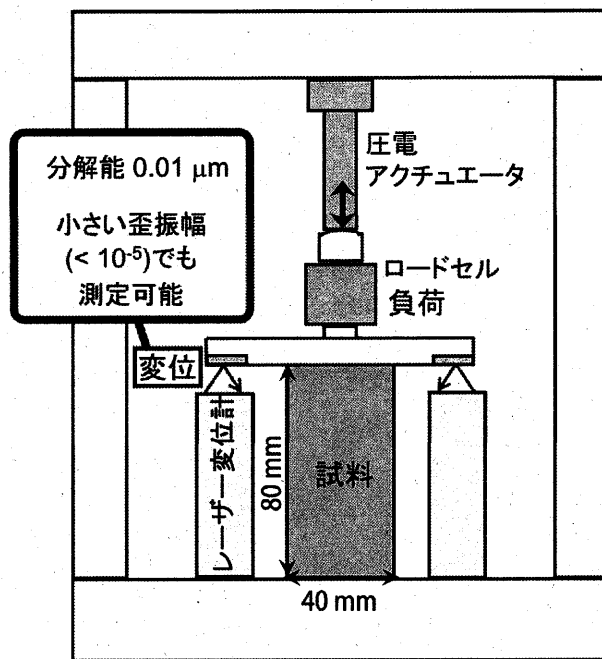


図 1: 縦変形型周期変形実験装置の概略図

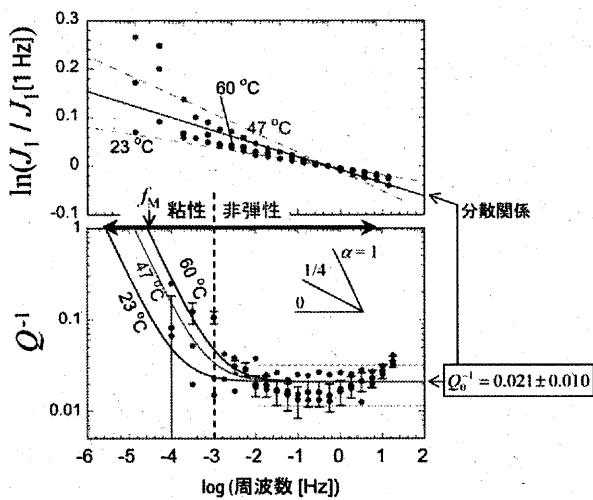


図 2: アナログ多結晶試料の実験結果

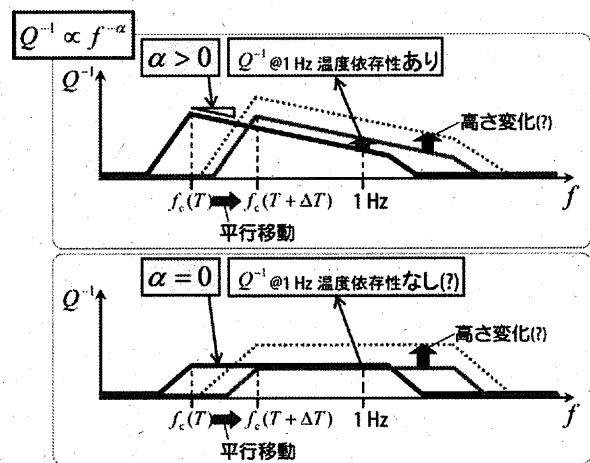


図 3: 温度依存性と周波数依存性の関係

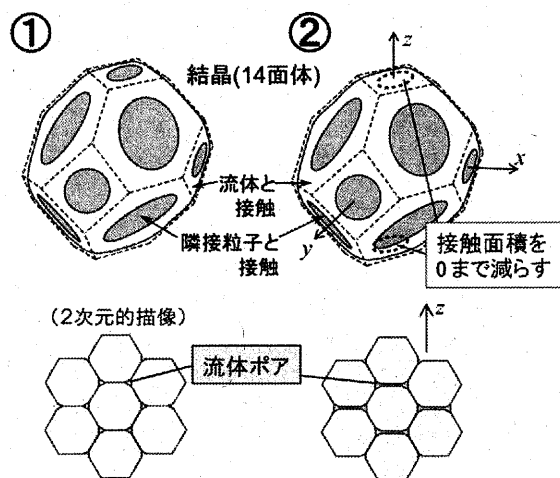


図 4: 理論計算に用いた固体粒子+流体ポア系モデル

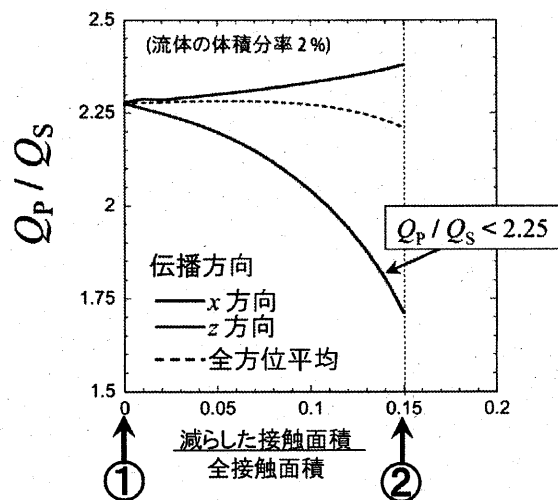


図 5: Q_P/Q_S の計算結果