

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420459

研究課題名(和文) 結晶質岩における超音波減衰メカニズムの解明と均質化モデルの提案

研究課題名(英文) A study on ultrasonic attenuation mechanism in crystalline rock core sample

研究代表者

木本 和志 (Kimoto, Kazushi)

岡山大学・環境生命科学研究科・准教授

研究者番号：30323827

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、結晶質岩中を伝播する弾性波の伝播メカニズムを解明することを目的とした実験と解析を行った。実験には、円柱状の花崗岩コア供試体を用い、圧電センサーとレーザードップラー振動計により縦波、横波、表面波の透過波形を計測した。その結果、花崗岩供試体は無視できない直交異方性を示すこと、コアサンプル程度の透過距離であれば、500kHz程度までの低周波超音波帯域の弾性波が位相コヒーレントな成分として透過することが明らかとなった。また、減衰に影響を及ぼす散乱は試料内各所で起きるが、特に強い散乱波はごく限られた位置においてのみ観測され、マイクロクラックが散乱減衰に重要な役割を果たすことが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In this study, ultrasonic measurements and the signal processing were carried out aiming to understand the elastic wave propagation characteristics in a highly heterogeneous crystalline rock core samples. For the ultrasonic measurements, PZT and laser Doppler vibrometer were used. With the measurement setup, longitudinal (L), shear(S) and Rayleigh surface(R) waves transmitted through a cylindrical granite samples were measured. It was shown as the result, that the granite core behaves as an acoustically orthotropic material which can support a ballistic waves having the frequency components up to 500kHz. Another important finding is that the grain boundaries act as a relatively weak scatterer while strong scattering occurs at more sparsely distributed micro cracks.

研究分野：非破壊検査

キーワード：結晶質岩 超音波 表面波 散乱 減衰

1. 研究開始当初の背景

岩石や金属材料にみられる多結晶質材料では、結晶粒界やマイクロクラックと弾性波の相互作用により著しい減衰が生じる。このことは、弾性波の減衰量に、結晶粒やクラック分布密度等に関する情報が含まれることを意味する。しかしながら、計測した減衰量から被検査材の損傷状態をはじめとする微視構造を定量的に評価することは容易ではない。その原因の一つは、弾性波の減衰が多数の結晶による多重散乱の結果として起きるため、結晶粒の大きさや形、物性等、多数の影響因子が弾性波伝播に与える影響を理論的に見通すことが非常に困難なことにある。もう一つには、材料を構成する個々の結晶粒について、形状や物性を3次元的に直接計測することは、実験室レベルでも現実的でなく、理論および数値波動解析のためのモデル構築にも困難が伴うことが挙げられる。このことから、結晶質岩における複雑な弾性波伝播挙動を解明するためには、微視構造に起因した多重散乱現象を考慮しつつも、シミュレーションやパラメータ決定が容易な、単純化された非均質媒体における波動伝播モデルを得ることが課題となる。

2. 研究の目的

本研究は、結晶質岩における弾性波の伝播挙動を定量的に評価・予測するための一連の計測および解析手法を提案するものである。結晶質岩は、弾性波の減衰が著しく、周波数応答も非常に複雑である。そのため、弾性波を使った非破壊評価が難しく、コアサイズのサンプルについても、損傷度を定量的に評価できる十分な信頼性を持つ方法はこれまで提案されていない。これは、検査に使用する弾性波の周波数帯に応じた主要減衰メカニズムや、計測波形の解釈や伝播挙動予測に利用可能な技術が十分整備されていないことによる。そこで本研究では、コアサンプルを透過する超音波を、レーザー振動計により精密に計測することで、1MHz程度までの低周波超音波領域における弾性波の主たる減衰要因を特定する。また、群速度と音響異方性の評価を行い、実際には微視的に非均質な岩を、マクロな等価均質媒体とみなすことのできる、周波数帯と分散特性を明らかにする。

3. 研究の方法

(a) 計測システム構築

初めに、精密な超音波計測を行うための、計測システムの構築を行う。具体的には、レーザードップラー振動計により、試料表面を走査するためのx,y,z軸の自動ステージを持つ3軸スキャナシステムを作成する。次に、接触型探触子を保持し、岩石コアサンプル表面に定置するためのホルダ機構を自作し、縦波、横波および表面波のマルチモードな計測を行うための機構を加える。なお、計測試料には、典型的な粗粒結晶質岩で、岡山市近傍で

豊富に産出される万成花崗岩を、円柱状に成形して用いる。円柱状の試料を用いる理由は、超音波の透過方向を平面内(円柱長手軸断面内)で任意に変化させるためである。なお、超音波透過方向の調整には、手動回転ステージを用いて行ない、探触子の設置方向を1度刻みで変化させられるようにする。

(b) 透過波計測と異方性評価

以上の装置を用いて、縦波および横波それぞれの透過波形を計測する。その際、透過方向を0度から10度刻みで360度まで変化させ、円柱試料を全周方向から透過波計測を行う。これにより、花崗岩試料の音響異方性と、基本的な岩石物性である縦波および横波速度の評価を行う。

(c) 表面波計測と散乱源の特定

最後に、円柱試料の平坦に仕上げた上面側に表面波を励起し、直径方向へ伝播する表面波をレーザードップラー振動計で計測する。その結果を解析することで、表面波の構造的な分散性の有無と、群速度の評価を行う。さらに、試料において特に強い散乱を起こす部位を調べることで、弾性波の主たる減衰要因を特定する。

以上の結果を踏まえ、花崗岩を透過均質媒体とみなすことができる周波数帯を見出す。

4. 研究成果

本研究のために開発した超音波レーザースキャナシステムを、図1に示す。ここで、図1の左側は超音波計測システムの構成を、右側は、円柱供試体とそれに取り付けたトランスデューサの様子を示している。この図にあるように、試料とトランスデューサのホルダは、回転及び並進ステージ上におかれ、入射方向を変化させつつ、レーザー振動計による平面的なスキャンを実施することができる。これが特徴である。

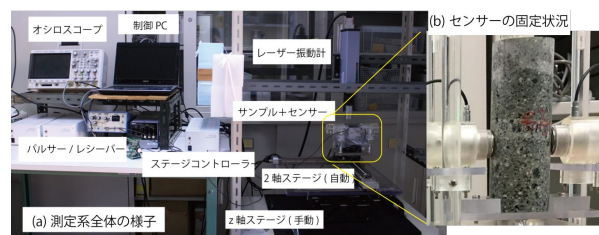
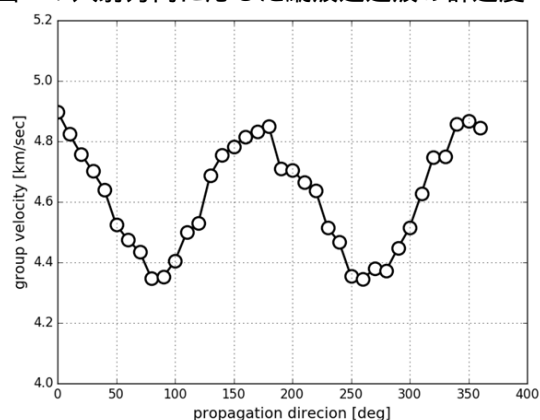


図1: 円柱花崗岩試料のための圧電センサおよびレーザー振動計超音波計測システム。

上記の装置を用いて、縦波および横波の透過波計測を行った。その結果、約500kHzまでの帯域では、多重散乱効果による波形の乱れは大きいものの、5cm程度の距離を位相の揃った波(ballistic成分)として透過させることができることが分かった。また、透過方向毎に伝播時間を測ったところ、顕著な異方性が見られた。一例として縦波の場合について群速度を算出すると、図2のようであった。このように、花崗岩供試体は弾性波速度が正

弦波的に変動し、概ね直交異方性体として扱う必要があることを示している。

図 2：入射方向に応じた縦波透過波の群速度



の変化。

最後に、レーザー振動計によって行った表面波計測の結果を、図 3 に示す。この図は、横軸を時間、縦軸を計測点位置（試料中心からの距離）としたときの、速度振幅の変化をカラー表示したものである。なお、計測点位置の座標が 33mm の地点は、超音波の送信点に相当する。この結果より、線形的な時間遅れを持って到達する表面波が卓越し、その後ろには、多重反射に起因したコーダが続くことが分かる。注目に値するのは、位置 10mm や 25mm にあり、これらの位置では波形に顕著な乱れがある。これは、周辺と比べて強い散乱が発生していることを意味する。このことは、計測結果においてコーダ波は随所で発生しているものの、その振幅値は相対的に小さく、一方、大きな減衰につながる強い散乱波はごく限られた地点でのみ起きていることを意味する。なお、図 3 に示した結果をフーリエ変換し、波数-周波数平面に表示すると、図 4 のようになる。この結果から、超音波の構造的な分散は見られず、多重散乱によって発生したコーダが、周波数は 500kHz 程度まで、波長は 1mm 程度以上の広い周波数-波長成分から構成されることが明らかとなった。

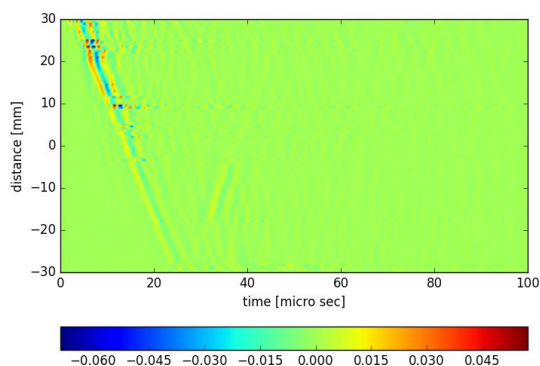
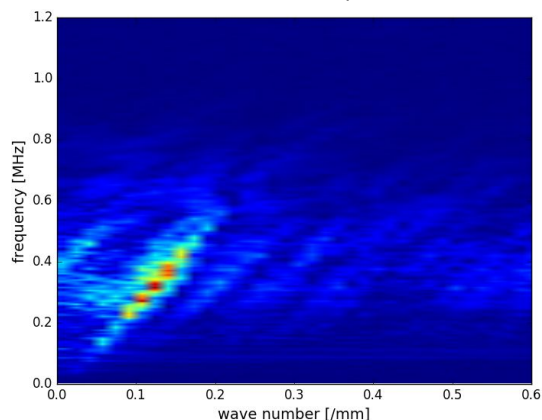


図 3：表面波計測結果。横軸を時間、縦軸を計測点位置として振動速度をカラー表示。

図 4：計測結果から得られた、表面波の波数-



周波数スペクトル。

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 1 件)

- (1) K. Kimoto, Y. Ichikawa, "A finite difference method for elastic wave scattering by a planar crack with contacting faces", Wave Motion Volume 52, 2015, pp.120-137 (査読有)。

〔学会発表〕(計 2 件)

- (1) 松井裕哉, 尾崎裕介, 木本和志, 市川康明, "表面波計測による結晶質岩の物性評価に向けた基礎的検討", 材料学会 第 66 回年次学術講演会 2017 年 5 月 27 日, 名城大学。
- (2) 木本和志, 佐藤忠信, "岩石材料中を透過する波動の位相特性", 土木学会 第 20 回応用力学シンポジウム, 2017 年 5 月 21 日, 京都大学。

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6．研究組織

(1)研究代表者

木本 和志 (KIMOTO, Kazushi)
岡山大学環境生命科学研究科・准教授
研究者番号：30323827

(2)研究分担者

()
研究者番号：

(3)連携研究者

西山 哲 (NISHIYAMA, Satoshi)
岡山大学環境生命科学研究科・教授
研究者番号：00324658

(4)研究協力者

()