花崗岩中の超音波伝播に与える造岩鉱物粒の影響に関する研究

岡山大学大学院　学生会員　○岡野　蒼　正会員　木本　和志

1. はじめに

地表付近および深層岩石の風化する要因の一つとして，岩石内外のき裂があげられる．結晶質岩を対象とする場合,風化に関して,き裂の影響は大きい[1)]．さらに,中国地方に広く分布する花崗岩に関しては,風化後のまさ土が自然災害において大きな被害をもたらしている．そのため，き裂の密度や配向性を，その場かつ非破壊的に得ることができれば，有用な情報を提供することができる．弾性波試験は，比較的簡単な装置で検査を行うことができる非破壊検査法の一つで，各種工業材料のき裂検出や評価にも利用されている．一方，岩石試料に対して弾性波試験を行う場合，弾性波の伝播挙動は，岩石の非均質性によって非常に複雑となり，き裂や損傷の評価を行うことは一般に簡単でない.特に,結晶質岩の場合,鉱物粒による散乱の影響が顕著であり，鉱物粒と弾性波の相互作用を理解することが，弾性波試験を適切に行うための前提条件となる．

本研究は，鉱物粒が弾性波の伝播・散乱挙動に与える影響を明らかにすることを目的とし，代表的な結晶質岩である花崗岩コア試料を用いて超音波透過試験を行ったものである．造岩鉱物粒の影響を詳しく調べるために，ここでは，レーザードップラー振動計(LDV)を用いて高い空間解像度で表面波を計測し,その伝播状況を可視化するシステムを構築した.また，計測した波形データを処理し，波動場の特徴量を波形観測点毎に算出して鉱物分布と対照することで，主要造岩鉱物が弾性波伝播に与える影響を調べる方法を考案した.その結果,石英とカリ長石が,弾性波の伝播に最も影響が大きいことを明らかにした．以下，これらの結果を順に報告する．

2　自動超音波計測装置と実験供試体

2．1　自動超音波計測装置

本研究で用いたLDV自動超音波計測システムの構成を**図 2-1**に示す．本計測システムの測定部は，試料位置を調整するためのステージ，超音波の受信に用いるレーザードップラー振動計(LDV),送信用の圧電超音波トランスデューサ(PZT)に高周波電圧を印加するためのパルサー/レシーバで構成されている．それらの測定装置は，プログラム制御を行うためのPCと,AD変換と波形収録を行うデジタルオシロスコープに接続，同期されている．計測には，送信に用いる横波圧電トランスデューサと，受信に用いるLDV を用いた．圧電トランスデューサは，横波を垂直入射および受信するためのもので，共振周波数は500kHz，圧電素子サイズは 10mm×10mm の矩形である.なお,レーザー光の試料表面へのフォーカスは,自動計測で繰返し行う必要がある作業の中で最も時間を要するものである．この作業を効率化するために，ここでは，LDV メーカ(電子技研工業株式会社)が製造したオートフォーカスユニット(AF-unit)を利用している．

2．2　実験供試体

図 2-2に実験に用いた，2つの角柱型花崗岩供試体(**No.1**，**No.2**)の外観を示す．この図には,送信センサーの取り付け箇所と，LDVによる計測範囲を示すためのxyz直交座標系の設定も示している．表-1に試料**No.1**と**No.2**の寸法を示す．本研究で用いた試料は露頭から採取した万成花崗岩であり,主要造岩鉱物は，カリ長石，斜長石，石英及び黒雲母の4種類である.鉱物の粒径は，数mmから数十mmと比較的粗粒な岩石である.LDVによる超音波測定では,十分な反射強度を得るため,試料表面に金属光沢をもつ厚さ約0.2mmのアルミテープを貼付している．

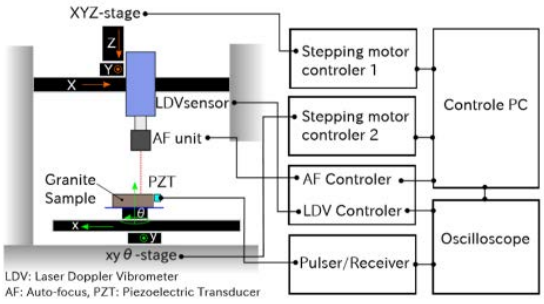

図 2-1: レーザードップラー振動計と 3 軸ステージによる自動超音波計測装置の構成

表-1：超音波計測に用いた供試体の寸法

供試体	花崗岩No.1	花崗岩No.2
J(mm)	69.2	55.9
K(mm)	105.7	118.3
L(mm)	50.9	30.5

キーワード　花崗岩，非破壊検査，カリ長石，石英
連絡先　〒700-8530　岡山市北区津島中 1-1-1　ＴＥＬ080-5345-9123

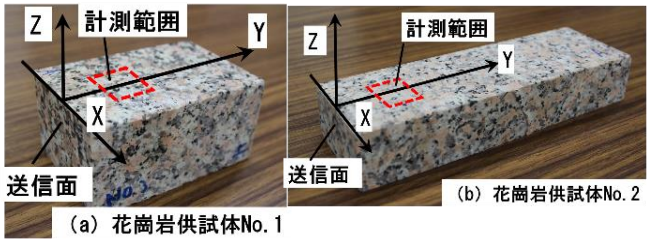

図 2-2：超音波計測に用いた供試体と計測面位置

3 表面波計測

3．1 計測システムと計測点の配置

花崗岩の計測における，超音波の送信位置と受信範囲を，**図 3-1** に示し，供試体寸法を記入した平面図，正面図，側面図に，送信センサーの位置と LDV 計測による計測範囲が，それぞれ青と黄色の四角で示してある．横波センサーは，センサー素子の上縁が試験体表面である z=0 ㎜に一致するように取り付けている．黄色で示した計測領域 S は，幅 W，高さ H の矩形領域で，試料端部の y=0㎜ 近傍では，レーザー光の十分な反射強度が得られない．加えて，送信センサーの入射ビームの範囲も考慮し，送信点から計測範囲までの距離は，δ_y=20㎜ と設定した．LDV による超音波計測は，矩形領域上に配置した一定間隔の正方格子点で行う．いま，x および y 方向の格子間隔をそれぞれΔx，Δy とすれば，x 軸方向に i 番目，y 軸方向に j 番目の格子点の座標は

$$(x_i, y_j) = \left(-\frac{W}{2} + \Delta x(i-1), \delta_y + \Delta y(\mathrm{j}-1)\right) \quad (1)$$

と表され，x，y 軸方向の格子点数N_xとN_y，計測範囲(W，H)の関係は

$$N_x = \frac{\mathrm{W}}{\Delta x} + 1, N_y = \frac{\mathrm{H}}{\Delta y} + 1 \quad (2)$$

となる．LDV によって位置(x_i, y_j)で得られた時刻歴波形を，$a_{ij}(t)$と表すことにすれば，S における計測の結果として，次のようなデータセット D(S)が得られる．

$$D(S) = \{a_{ij}(t) | i = 1,\cdots N_x, \mathrm{j} = 1,\cdots N_y, t \in [t_s, t_s + \mathrm{T}]\} \quad (3)$$

t_sはパルサー/レシーバからのトリガー信号で定められた時間原点から測った時刻を，T は計測時間範囲を表す．波形データ$a_{ij}(t)$は LDV からの出力であるため，物理的には速度の時刻歴波形を表し，時間に関するサンプリング間隔をΔt，サンプリング点数をN_tとすれば，サンプリング周波数f_sとの関係は

$$\Delta \mathrm{t} = \frac{1}{f_s} = \frac{T}{N_t} \quad (4)$$

となる．

3．2 計測条件

供試体 No. 1 と No. 2 に対する計測条件を以下に示す．

-範囲:(W,H) = (20,20)mm, δ_y= 20mm

-格子間隔:(Δx,Δy) = (0.5,0.5)mm

-格子点数:(N_x, N_y) = (41,41), N_x ×N_y = 1,681 点

・送信側の設定:

-印加電圧:300V

-印加電圧波形:矩形パルス (パルス幅 2μsec)

・受信側の設定:

-計測区間: t_s = -30μsec, T=100μsec,

-サンプリング間隔: Δt = 0.05μsec, (サンプリング周波数: f_s = 1/Δt = 20MHz, サンプリング点数: N_t = 2,000 点)

-ゲイン: 0dB

-平均化回数:Nave =2,048 回

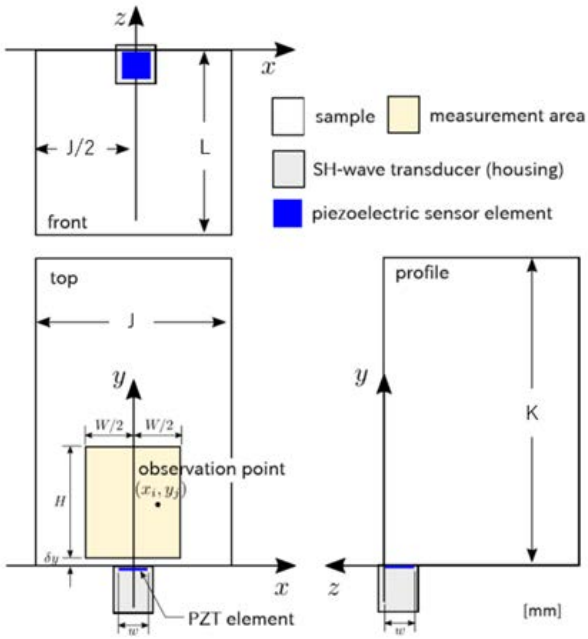

図 3-1：花崗岩試料表面にとった xyz 直交座標系と送信センサーと超音波計測領域の配置

3．3 計測結果

図 3-2 および**図 3-3** に，試料表面における超音波伝播挙動を実験によって可視化した結果を示す．これらの図は，z 軸方向の振動速度の空間分布を，1μ 秒ステップでスナップショットとして示したものである．なお，振動速度は一連の計測で得られた最大振幅で無次元化した値で示している．

3．3．1 角柱型花花崗岩供試体(No. 1)

入射した波は領域 S の右側(x>0) において，左側(x<0)に比べて速く進んでいるように見受けられる．

振幅は，14μ 秒では，領域 S の右側(x>0)に強い波が放射されているが，16μ 秒の段階になると領域 S の左側(x<0)に強い波が放射され，振幅値の面で大小が逆転される．

3．3．2　角柱型花崗岩供試体(No．2)

入射した波は領域Sの左側 (x<0) において，右側(x>0)に比べて速く進んでいるように見受けられる．振幅は，13μ秒から 15μ秒にかけて$(x, y) = (9,5)$mm 付近で大きな振幅の変動を生じている．

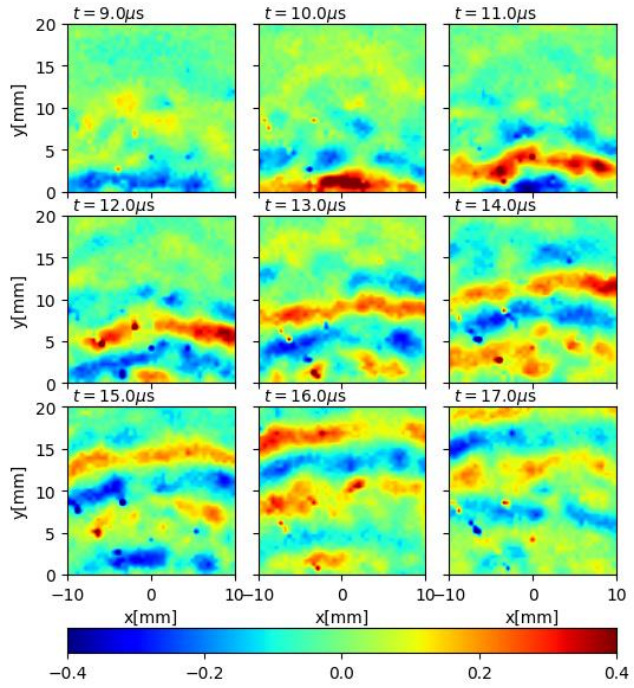

図 3-2：角柱型花崗岩供試体 No．1 で計測された表面振動のスナップショット(t =9～17μsec)

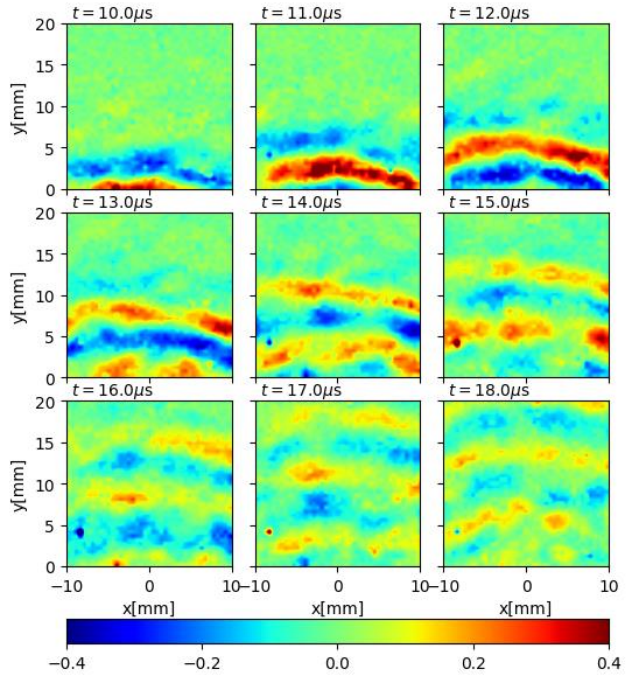

図 3-3：角柱型花崗岩供試体 No．2 で計測された表面振動のスナップショット(t =10～18μsec)

4　速度および振幅変動分布の解析

4．1　解析方法

計測結果の振幅や速度の差を定量化するために，| x |≦10㎜にある全ての測線で得られた結果を加算した平均波形：

$$\bar{a}_j(t) = \frac{1}{N_x}\sum_{i=1}^{N_x} a_{ij}(t), \qquad (j = 1, \ldots N_y) \tag{5}$$

を合成する．

平均波形$\bar{a}_j(t)$と観測波形$a_{ij}(t)$の差は，観測領域内を伝播する透過波の平均的な挙動と，個々の観測点で生じる応答の差を表す．$a_{ij}(t)$と$\bar{a}_j(t)$の差や相関に基づく波形特徴量を適切に定義してその空間分布を調べれば，弾性波によって検知しうる花崗岩の不均質性が空間的にどのように分布しているかを見ることができる．不均質性の評価に適した特徴量を見出すための試みとして，ここでは，次の 3 つの量について，空間的な変動の様子を計測波形を使って調べてみる．

$$C_2(x_i, y_j) = 1 - \frac{\|a_{ij}\|}{\|\bar{a}_j\|} \tag{6}$$

$$C_\infty(x_i, y_j) = 1 - \frac{max_t\{a_{ij}\}}{max_t\{\bar{a}_j\}} \tag{7}$$

$$C_v(x_i, y_j) = \arg max_t \left\{ \frac{\langle a_{ij}(s+t),\ \bar{a}_j(s)\rangle}{\|a_{ij}\|\ \|\bar{a}_j\|} \right\} \tag{8}$$

ここに，〈・，・〉は関数内積：

$$\langle f(t), g(t)\rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t)ds \tag{9}$$

を，‖・‖は式 (9) に対応する 2 乗ノルム

$$||f||^2 = \langle f(t),\ g(t)\rangle \tag{10}$$

を意味する．$C_2(x_i, y_j)$は，位置(x_i, y_j)で観測された波形$a_{ij}(t)$の 2 乗ノルムが，平均波形よりも大きい場合に負の，小さい場合には正の値をとるように作られたものである．$C_\infty(x_i, y_j)$も，振幅値に関する指標であることは共通するが，こちらは波形$a_{ij}(t)$の最大値を，平均波形の最大値と比較してその大小で正負が切り替わるように定義している．一方，式(8)で与えられる$C_v(x_i, y_j)$は，$a_{ij}(t)$と$\bar{a}_j(t)$の正規化された相互相関関数を計算して，そのピーク値を与える時間を指標値とするものである．式(8)右辺に示された相関関数のとり方より，C_v>0 のとき$a_{ij}(t)$は平均より早く，C_v<0 の場合は平均よりも遅れて弾性波が到達することを表すものである．これを図 4-1 と 4-2 に示す．ここでC_v, C_2とC_∞が正の値をとる鉱物は，音響的に高剛性な媒体として，また，C_v, C_2とC_∞が負の値をとる鉱物は，音響的に低剛性な媒体としてみなすことができる．

4．2 解析結果

4．2．1　角柱型花花崗岩 No．1

図 4-1 をみると，到達時間に関する指標C_vは，正の値をとる A の範囲(黒)には，周囲よりも早い弾性波速度をもつ鉱物が存在すると考えらる．試料のスキャナ画像と照合すれば，この領域には主に石英とカリ長石があるが，表面下のカリ長石の存在が影響していると考えられる．一方，振幅に関する指標C_2とC_∞では，C_∞がより大きな正の値をとる傾向にある．これは，計測時間範囲$[t_s, t_s+T]$を，送信面 y=0 からの距離によらず一定としているため，観測点位置が離れるにつれ，一定の計測時間範囲に到達する波動成分が少なくなることが原因と考えられる．これをふまえてみると，負の値をとる B の範囲(赤)では石英が多く存在する部分である．A の範囲は B に比べると大部分が正の値をとっているように見受けられる．C の範囲(黒点線)に大きな正の値があるが，送信センサーの入射ビームの範囲から外れているためと考えられる．

4．2．2　角柱型花崗岩供試体 No．2

図 4-2 をみると，到達時間に関する指標C_vは，正の値をとる D の範囲(黒)には，主としてカリ長石があることが分かる．さらに，x=±10mm 付近では，ほとんどの領域で負の値をとるが，E(赤点線)にカリ長石が特に大きな正の値を示している箇所が存在する．しかしながら，これが計測誤差かは不明である．一方，振幅に関する指標C_2とC_∞では，C_∞がより大きな正の値をとる傾向にあるが，この原因は，4.2.1 と同様である．負の値をとる F(赤)の範囲は，石英が存在している．D の範囲は，負の値もとるが大部分が正の値をとる傾向にある．G(黒点線)は大きな正の値をとるが，4.2.1 と同様である．

上記の結果より，カリ長石でC_v, C_2とC_∞が正の値をとる傾向があり，石英でC_v, C_2とC_∞が負の値をとる傾向があることが分かった．

5　まとめ

本研究では，供試体を 2 次元的にスキャンし，得られた超音波波形を可視化するとともに，振幅や速度の変動と造岩鉱物の対応について検討を行った．その結果として，主としてカリ長石からなる部分は，音響的に高剛性な媒体として，石英部分は低剛性な媒体として超音波に応答する傾向があるということが分かった．石英とカリ長石は音響異方性のタイプは異なるものの，密度と弾性波速度には互いに大きな違いはない．そのため，石英の部分で音速や剛性の低下は，き裂や音響的に柔らかい介在物の存在が予想され，花崗岩試料の損傷評価や波動伝播モデリングにおいて重要な意味を持つ結果が得られたと考えられる．

今後の課題としては，鉱物分布との相関がより明確な波動場の特徴量を考案すること，薄片観察を行い，鉱物種だけでなく結晶方位やマイクロクラックと特徴量の相関を調べることがあげられる．

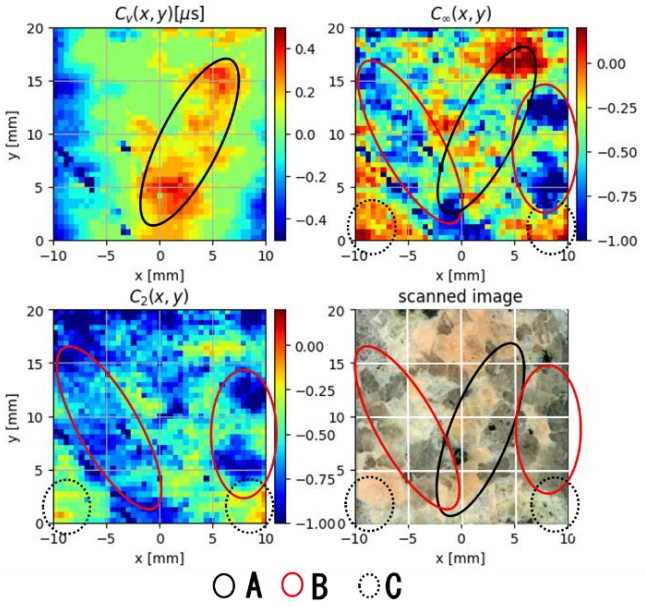

図 4-1：角柱型花花崗岩 No.1 の初動波群の到達時間と振幅に関する平均波形からの偏差指標 Cv,C2,C∞と計測面に存在する鉱物粒の分布状況

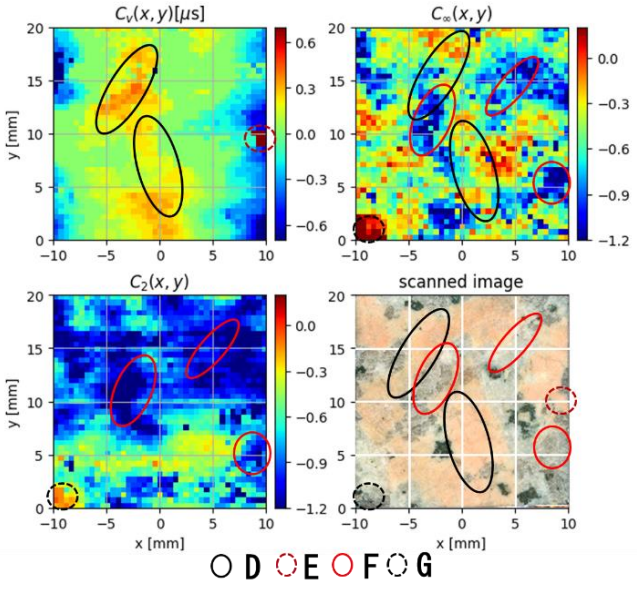

図 4-2：角柱型花花崗岩 No.2 の初動波群の到達時間と振幅に関する平均波形からの偏差指標 Cv,C2,C∞と計測面に存在する鉱物粒の分布状況

参考文献

1)大島洋志『土木地質学』土木工学社，2000 年，pp．11-30