JAEA-Research
2019-005
DOI:10.11484/jaea-research-2019-005

結晶質岩を対象とした連成現象が長期挙動におよぼす影響に関する研究（2）および（3）（共同研究）

Study on Effects of Coupled Phenomenon on Long-term Behavior for Crystalline Rock in Fiscal Year 2017 and 2018 (Joint Research)

市川 康明　木本 和志　松井 裕哉

Yasuaki ICHIKAWA, Kazushi KIMOTO and Hiroya MATSUI

核燃料・バックエンド研究開発部門
東濃地科学センター
地層科学研究部

Geoscientific Research Department
Tono Geoscience Center
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

October 2019

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（https://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2019

JAEA-Research 2019-005

結晶質岩を対象とした連成現象が長期挙動におよぼす影響に関する研究（2）および（3）（共同研究）

日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門
東濃地科学センター 地層科学研究部
市川　康明*、木本　和志*、松井　裕哉

（2019 年 7 月 8 日　受理）

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、処分坑道周辺岩盤の力学的安定性は、建設・操業時はもとより、埋め戻し部分の状態変化を可能な限り小さくするため閉鎖後にわたって維持されることが重要である。一方、坑道周辺の岩盤は、長期的にはクリープや応力緩和などの力学的な時間依存性挙動を示すことが知られており、その挙動を把握・評価できる技術の構築が地層処分の技術的信頼性向上のための課題の一つとなっている。

岩盤の変形や破壊に関わる力学的な挙動は、微視き裂の進展が起点となっている。さらに、地層処分のような千年以上の時間スケールの長期挙動では、瞬間的な弾性挙動に対して化学的要因が微視亀裂の進展に寄与する割合が大きく、岩盤の長期挙動メカニズムの理解には、応力と化学反応による連成現象の理解が重要である。

上記を踏まえ、微視的き裂の進展に着目した室内実験および化学反応も考慮できるような数値解析による研究を通じ、一般性の高い岩盤の長期挙動メカニズムに関する知見を得ることを目的とした研究を、岡山大学との共同研究として 2016 年度より開始した。2017 年度および 2018 年度の研究では、2016 年度までの研究成果を踏まえ、2 次元的に多点での表面波計測が可能な自動計測システムを構築するとともに、微視的構造特性の評価の観点から弾性波に関する幾つかのパラメータを算出した上で、それらの有用性について予察的な検討を実施した。

本報告書は、岡山大学と日本原子力研究開発機構との共同研究に基づき実施した研究成果に関するものである。

東濃地科学センター：〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64
＊ 岡山大学

JAEA-Research 2019-005

Study on Effects of Coupled Phenomenon on Long-term Behavior for Crystalline Rock in Fiscal Year 2017 and 2018 (Joint Research)

Yasuaki ICHIKAWA*, Kazushi KIMOTO* and Hiroya MATSUI

Geoscientific Research Department, Tono Geoscience Center,
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development
Japan Atomic Energy Agency
Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received July 8, 2019)

It is important to evaluate the mechanical stability around the geological repository for high-level radioactive waste, during not only the design, construction and operation phases, but also the post-closure period over several millennia. The rock mass around the tunnels could be deformed in response to time dependent behaviors such as creep and stress relaxation. On the other hand, it was revealed that the chemical reaction of groundwater in a rock had an influence on the long-term behavior. Therefore, an evaluation of the microcracks to have an influence on rock mechanical and chemical coupled phenomena is the issue to understand the past long-term behavior of the rock mass. In view of above points, this study has started as a joint research with Okayama University from 2016.

This report summarize the results of the joint research performed in fiscal year 2017 and 2018. Based on the research results obtained in fiscal year 2016, automatic measurement system was developed, which can collect very large data on surface elastic wave propagation in a short time, also the applicability of various kinds of parameters derived from measured elastic wave data was examined.

Keywords: Crystalline Rock, Microcrack, Surface Wave, Transmitted Wave

This work has been performed in JAEA as a joint research with Okayama University.

* Okayama University

目　次

1.　研究の概要 ･･ 1

2.　2017 年度（平成 29 年度）の研究成果 ･･････････････････････････････････ 3
2.1　散乱源の同定方法 ･･ 4
2.2　実験供試体 ･･ 4
2.3　超音波センサー ･･ 5
2.4　計測条件 ･･ 6
2.5　計測結果 ･･ 7
2.6　表面波伝播の面的な計測による散乱源の同定 ･･････････････････････････ 10
2.6.1　実験方法 ･･ 10
2.6.2　実験結果 ･･ 11
2.7　まとめ ･･ 13

3.　2018 年度（平成 30 年度）の研究成果 ･･････････････････････････････････ 14
3.1　自動超音波計測装置の開発 ･･ 14
3.2　表面波計測 ･･ 16
3.2.1　実験供試体と計測点の配置 ･･････････････････････････････････････ 16
3.2.2　計測結果 ･･ 19
3.3　速度および振幅変動分布の解析 ･･････････････････････････････････････ 24
3.4　まとめ ･･ 31

参考文献 ･･ 32

Contents

1. Outline of the joint research ····· 1

2. Summary of the joint research in FY2017 ····· 3
2.1 Identification method of the source of the dispersion of elastic wave ····· 4
2.2 Core samples ····· 4
2.3 Ultrasonic sensor ····· 5
2.4 Measurement conditions ····· 6
2.5 Measurement results ····· 7
2.6 Identification of the source for the dispersion of elastic wave ····· 10
2.6.1 Measurement method ····· 10
2.6.2 Results ····· 11
2.7 Achievement in FY2017 ····· 13

3. Summary of the joint research in FY2018 ····· 14
3.1 Development of automatic ultrasonic velocity measurement system ····· 14
3.2 Surface elastic velocity measurement ····· 16
3.2.1 Core samples and arrangement of measurement points ····· 16
3.2.2 Measurement results ····· 19
3.3 Analysis on the variation distribution of the elastic velocity and amplitude ····· 24
3.4 Achievement in FY2018 ····· 31

References ····· 32

1. 研究の概要

高レベル放射性廃棄物の地層処分のための坑道は、建設・操業時はもとより、坑道埋め戻し後の数千年～数万年という長期の力学的安定性を維持できることが望ましいが、坑道を掘削する対象である岩石や岩盤は、クリープや応力緩和などの時間依存的挙動を示すことが知られており、長期的な力学的安定性評価における課題となっている。一方で、岩石中の地下水の化学的な反応も長期挙動に影響を及ぼすことが明らかになってきており、力学と化学の連成現象をモデル化・解析する手法を開発することが重要な課題と考えられている。さらに、この連成現象にも影響を及ぼす岩盤・岩石中に内在するマイクロクラックの評価も、長期岩盤挙動研究のかねてからの課題である。

上記の観点から、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構と岡山大学は、第 3 期中長期計画の開始年度である 2015 年度（平成 27 年度）から、一般的な結晶質岩が有する岩石中のマイクロクラックを含む不均質を把握・評価する手段として、非破壊でデータ取得が可能な弾性波を利用する手法の開発を開始した。具体的には、弾性波測定手法の適用性を予察的に検討するため、周波数帯域を 20MHz まで拡張したレーザードップラー振動計 (LDV : Laser Doppler Vibrometer)を用い、花崗岩供試体を透過する表面波の計測と群速度の推定を行った [1)]。その結果、群速度は 100kHz ～ 500kHz まで、振動しながら減少する傾向にあることを明らかにした。群遅延からの群速度推定は、空間的に平均化した波形を用いることで信頼性、推定可能周波数帯域が向上し、波数-周波数スペクトルによる推定よりも容易であることも示し、これらの結果から、弾性波を用いて結晶質岩が有する岩石中のマイクロクラックを含む不均質を把握・評価できる可能性が得られたと判断し、2016 年度（平成 28 年度）から共同研究として研究開発を継続している。

岩石試料に含まれるマイクロクラックの発生原因を厳密に特定することは非常に難しい。しかしながら、クラックの発生には、発生時の応力場の影響があり、コアサンプルスケールでは、応力場の方向はほぼ一様と考えられる。そのため、クラック分布には発生当時の応力場に応じた配向性があると予想され、超音波を用いて散乱場の強度や速度の異方性を調べることで、クラックの密度や配向性に関する情報が得られると期待できる。このため、2016 年度（平成 28 年度）は、共同研究初年度として、花崗岩コアサンプルの群速度の異方性評価を試みた。異方性の評価については、レーザー振動計を使った表面波計測だけでなく、実体波（縦波，横波）の計測を行い、伝播速度の方向による変化を調べた。この結果、コアサンプルの弾性波速度異方性が、実体波の縦波と横波の測定結果のみならず、表面波の群速度データからも調べられることを示した [2)]。

上記 2015 年度および 2016 年度の研究により、花崗岩コアサンプルを用いた超音波計測と信号解析の基本的な方法、特に、レーザードップラー振動計を用いて、空間的に高密度な超音波計測を行い、岩石試料を伝播する表面波の周波数帯域や群速度を同定できること、同時に、群速度や信号の周波数帯域幅は試料の性状に応じて変化が現れることを示し、超音波による結晶質岩の微視的性状推定への可能性があることを明らかにした。しかし、一方で、超音波で計測可能な音響的性質の変化が、どの程度マイクロクラックとの相互作用に起因したものであるかは明確でなく、この点の解明が、マイクロクラックの超音波非破壊評価を実現する上での重要な課題として残されていた。

上記を勘案し、2017 年度（平成 29 年度）の研究では、レーザードップラー振動計によって表面波計測を行った結果を用い、き裂によると思われる局所的な強い散乱源を抽出する方法の開発を行った。さらに、強い散乱波の発生位置と対応する鉱物種の関係を調べ、石英による散乱が大きいことを明らかとした。また、レーザー振動計による 2 次元的（面的）な計測を行い、花崗岩試料の表面を伝播する波動場の可視化を行った。その結果、圧電トランスデューサによって試料内部に励起された超音波は、局所的な散乱を起こすだけでなく、より大きなスケールで顕著なゆらぎを示すことを明らかにした。

2018 年度（平成 30 年度）は、これまでに得られた研究成果をさらに発展させ、波動伝播モデリングに有用な情報を効率よく取得することができるよう、装置の改良と波形処理技術の開発を行った。具体的には、これまでマニュアル計測で行っていた LDV 振動計による波形取得を、自動ステージと LDV、オシロスコープおよび PC 制御して連携させることで、数千から数万点の計測が可能なように計測システムの自動化を行った。次に、開発した計測システムを用いて取得した波形データを処理し、波形観測点毎に振幅や初動到達時間の変動を求めて空間マップとして表示する方法を考案した。その結果を花崗岩試料表面の鉱物分布状況と対照することで、カリ長石内で音速が大きく振幅が小さいのに対し、石英の部分では逆に音速は低く大きな振幅を持つことを示した。このことが波動伝播経路と振幅にゆらぎを起こし、非均質材特有の波動伝播挙動につながることが明らかとなった。

以降、2017 年度および 2018 年度の研究成果について詳述する。

2．2017 年度（平成 29 年度）の研究成果

超音波を用いた岩石コアの非破壊検査は、比較的安価な装置で容易に実施可能である。一方で、岩石材料が示す種々のスケールでの異方性や非均質性のため、検査結果の解釈は通常簡単でない。花崗岩をはじめとする結晶質岩では、結晶粒の異方性や、結晶界面の力学的な接合状況、結晶粒スケールのマイクロクラックによる散乱等により、岩石内部での波動伝播挙動が非常に複雑なものとなる。これらの要因のうち、マイクロクラックによる散乱は、岩石試料の風化や緩み、応力や熱履歴に起因した損傷を反映すると考えられる。したがって、超音波を用いた非破壊評価で、マイクロクラックの密度や配向性を推定することができれば、高レベル放射性廃棄物の地層処分における天然バリアの数値モデル開発や、バリア材の性能評価にも役立つと考えられる。

本研究ではこの点に着目し、花崗岩コアサンプルを用いた超音波計測とその信号解析を行ってきた[1),2)]。特に、レーザードップラー振動計を用い、空間的に高密度な超音波計測を行い、岩石試料を伝播する表面波の周波数帯域や群速度を同定できることを示してきた。同時に、群速度や信号の周波数帯域幅は試料の性状に応じて変化が現れることを示し、超音波による結晶質岩の微視的性状推定への可能性があることを明らかとした。しかしながら、超音波で計測可能な音響的性質の変化が、どの程度マイクロクラックとの相互作用に起因したものであるかはいまだ明確でなく、この点の解明が、マイクロクラックの超音波非破壊評価を実現する上での重要な課題として残されている。

超音波に対する散乱体としてみたときのマイクロクラックの特徴は、以下の3点が挙げられる。

- マイクロクラックが開口している場合、波長に比べて小さなものであっても強い散乱源となりうる。特に、き裂面に対して超音波が鉛直に入射する場合は、強い後方散乱波の発生が予想される。
- き裂からの散乱波の放射パターンは、き裂サイズに応じて変化し、クラックによる散乱は局所的な現象であるものの、散乱波自体は広い範囲で観測される。ただし、多結晶材中のクラックによる散乱波も同様な放射パターンを示すか否かはこれまで明らかにされておらず、実験により直接的な検証を行うことが望まれる問題である。
- 方向の揃ったき裂が周期的に配置されている場合や、試料表面付近のき裂では、き裂間やき裂と試料表面間での多重散乱により、散乱波が増幅されることや、定在波モードに近い散乱場が形成されることも考えられる。

2017年度の研究では、これらの点に注意を払いつつ、 レーザードップラー振動計によって表面波計測を行った結果を用い、き裂によると思われる局所的な強い散乱源を抽出する方法の開発を行った。

2.1 散乱源の同定方法

計測した波形データから、き裂によると思われる強い散乱源を以下に述べる方法で同定することを試みる。

超音波の送信点から受信点までの距離を x とし、実験により時間 t の関数として計測された波形を $v = f(x,t)$ と表す。この波形には、送信点から遠ざかる $x > 0$ 方向への進行波成分 $f^{+}(x,t)$と、$x < 0$ 方向へ近づく進行波成分 $f^{-}(x,t)$ が混在している。$f^{-}(x,t)$は，$f^{+}(x,t)$ によって生じる後方散乱波であると考えることができ、$f(x,t)$ から $f^{-}(x,t)$ を分離することで、どの程度の散乱波がどの位置で発生しているかを調べることができる。なお、$f^{+}(x,t)$ と$f^{-}(x,t)$ への分解は、x と時間 t に関するフーリエ変換を利用して行うことができる。また、開口き裂によって生じる後方散乱波 $f^{-}(x,t)$ は、入射波 $f^{+}(x,t)$とき裂面上で同位相になっている。そのため、時間 t に関する内積を

$$\langle f, g \rangle = \int f(x,t) g(x,t) dt$$

で定義し、f^{+}とf^{-}の間で

$$C(x) = \frac{\langle f^{+}, f^{-} \rangle}{\langle f^{+}, f^{+} \rangle^{1/2} \langle f^{-}, f^{-} \rangle^{1/2}}$$

の計算を行うことで得られる値 $C(x)$ を位置 x の関数として示せば、き裂による散乱が起きている場所で、$C(x)$ は鋭いピークを示すと考えられる。また、$C(x)$と位置 x に存在する鉱物種の対応を調べることで、各種の造岩鉱物がどのように散乱に寄与するかに関する情報を得ることができる(以下、本節では、$C(x)$ を反射強度関数と呼ぶ)。

2.2 実験供試体

図 2.1 に超音波計測実験に用いた花崗岩コア供試体を示す。供試体は、いずれも岡山県北区の石切り場で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、石英および雲母の四種類である。肉眼で区別しうる鉱物粒の粒径は、数mmから数十mm程度と比較的粗粒な花崗岩である。

図 2.1(a) は、超音波の送受信位置を表すために利用するデカルト座標(x,y,z)と円筒座標系(r,θ,z)を表す。また、二つの供試体(AおよびB) の直径 D と高さ H は、同図(b) に示した通りであり、(c) は供試体の外観を示している。また、図 2.1 (c) の写真において、円柱の側面に見られる格子は、円筒座標系において指定された点で計測を行うために記入したものである。なお、この写真では、レーザー振動計による計測で十分なレーザー光の反射強度を得るため、試料上面にアルミホイルを貼り付けた状態を示している。

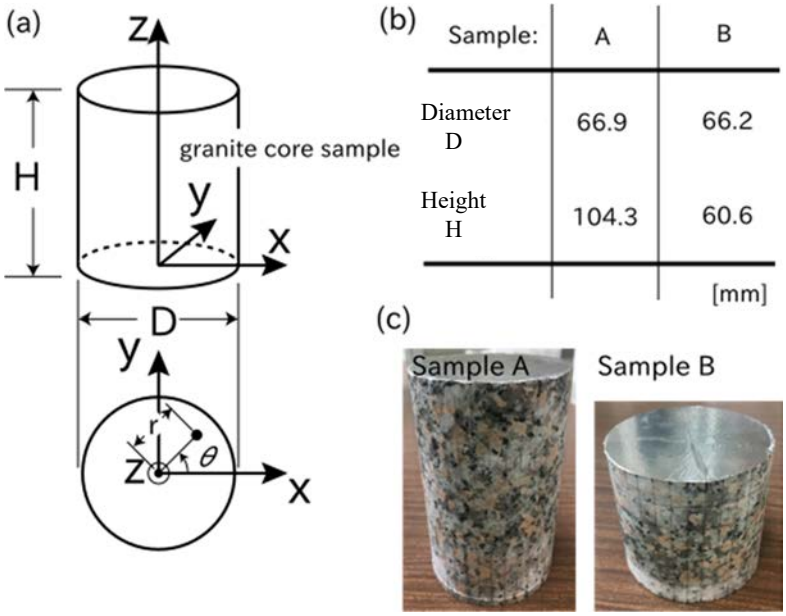


図 2.1　円柱実験供試体
（ (a) 送受信点位置を示すための座標系、 (b) サイズ、 (c) 供試体の外観 ）

2.3 超音波センサー

供試体上面（円形部）を直径方向に透過する表面波を起振するために、接触型の横波圧電トランスデューサ（探触子）を用いた。探触子の周波数は 0.5MHz（狭帯域）であり、その外観を図2.2に示す。一方、受信には、レーザードップラー振動計 (LDV) を用いる。ドップラー振動計の外観と仕様は図2.3に示す通りである。LDV による計測は、圧電型探触子による計測との比較で、信号ー雑音比 (S/N比) で劣る。しかしながら、非接触による計測を高い空間分解能（最高 0.2 mm 程度）で行うことができ、周波数帯域も 0.5 Hz から 20 MHz と、低周波から高周波側まで十分な帯域を持つことから、今回の計測に適したものと言える。また、送信に接触型の横波センサーを用いる理由は、鉛直動を直接試験体表面に加えることで強い表面波を励起し、LDV 計測により観測可能な信号強度を得るためである。

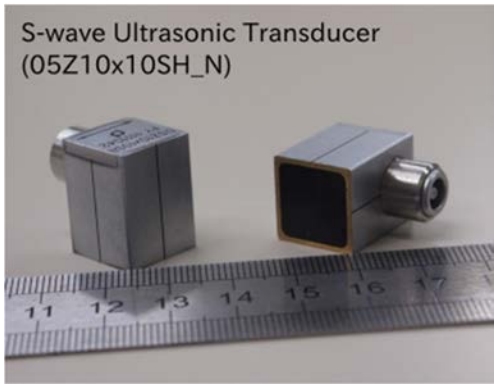


図 2.2　超音波の励起に用いた垂直横波探触子
（ 05Z10x10SH_N、素子サイズ10×10mm^2（矩形）、周波数0.5MHz 狭帯域 ）

・型式：Melectro V100 (電子技研工業)
・レーザー光源：He-Ne ガスレーザー CW(波長 :632.8nm)
・速度レンジ：2m/s/volt
・測定周波数範囲：0.5Hz~20MHz

図 2.3　レーザードップラー振動計の外観と仕様

2.4 計測条件

上に示した装置を用い、以下の設定により試料表面の超音波振動計測を行った。

- サンプリング周波数：10MHz
- 計測時間範囲　　：200 μsec
- 平均化回数　　：4,096 回
- ゲイン　　： 0 dB
- 印加電圧　　：400V （矩形パルス）

これらの設定は、波形収録に用いるデジタルオシロスコープと、送信用の圧電超音波探触子の加振に用いるパルサー・レシーバ側の設定であり、レーザードップラー振動系内部の処理系に関するものは含まれていない。

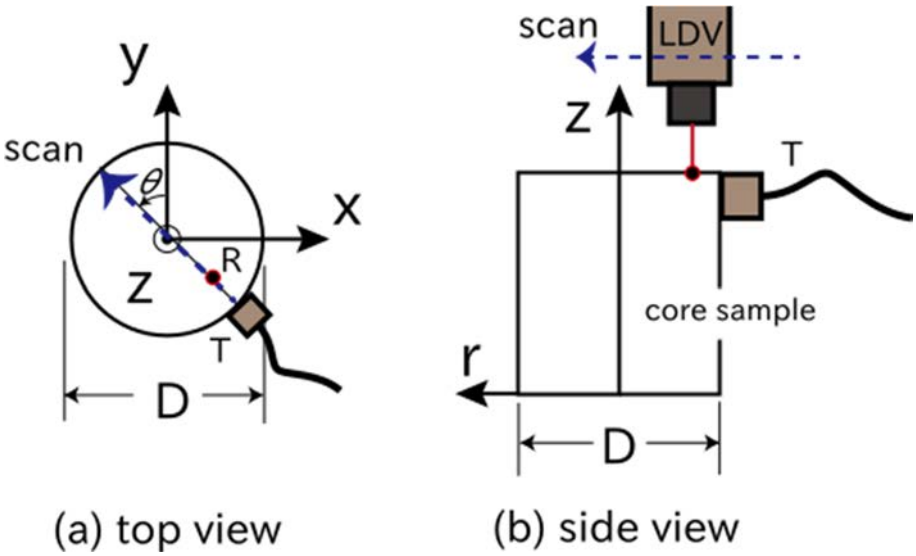


図 2.4　送受信点の配置
（ (a) 平面図、(b) 側面図 ）

2.5 計測結果

レーザードップラー振動計による振動速度波形の計測は、サンプル A、B について透過方向 $\theta = 0°$ から150 °まで，30° の間隔で測線をとり、各測線上 0.5 mm 間隔で行った。各側線上での計測は、図2.4に示すように、送信センサーを $r < 0$ 側に固定し，$|r| < 30mm$ の範囲で試料上面部の鉛直振動成分の時刻歴を計測した。

図2.5と図2.6の上段 (a) は、計測結果の一例として、試料 A について$\theta = 0$ °と90 °方向で得られた速度時刻歴波形を示したものである。ここに、横軸は時間、縦軸は計測位置（動径距離r）を表し、$r = 0$ が試料の中心点に相当する。なお、 $\theta = 0$ °は、伝播途上で超音波が強い散乱を受けるケース、$\theta = 90°$方向は顕著な散乱を起こすことなく伝播するケースの代表例である。また、これらの図には、中段 (b) と下段 (c) に、観測波形 $v = f(x,t)$ をフーリエ変換により入射成分 $f^{+}(x,t)$ と反射波成分 $f^{-}(x,t)$ に分離した結果もそれぞれ示してある。

ここで，反射波成分（ 図 2.5、2.6 の下段 (c) ）について見れば、反射波が至る所で発生しており、結晶粒による不均質性が観測波形に反映されていることが明らかである。また、局所的に強い散乱波が発生している場所（例えば，図 2.5 の $r = -10$ や $-25mm$ 付近）があり、き裂や空洞状欠陥の存在する可能性を示唆している。

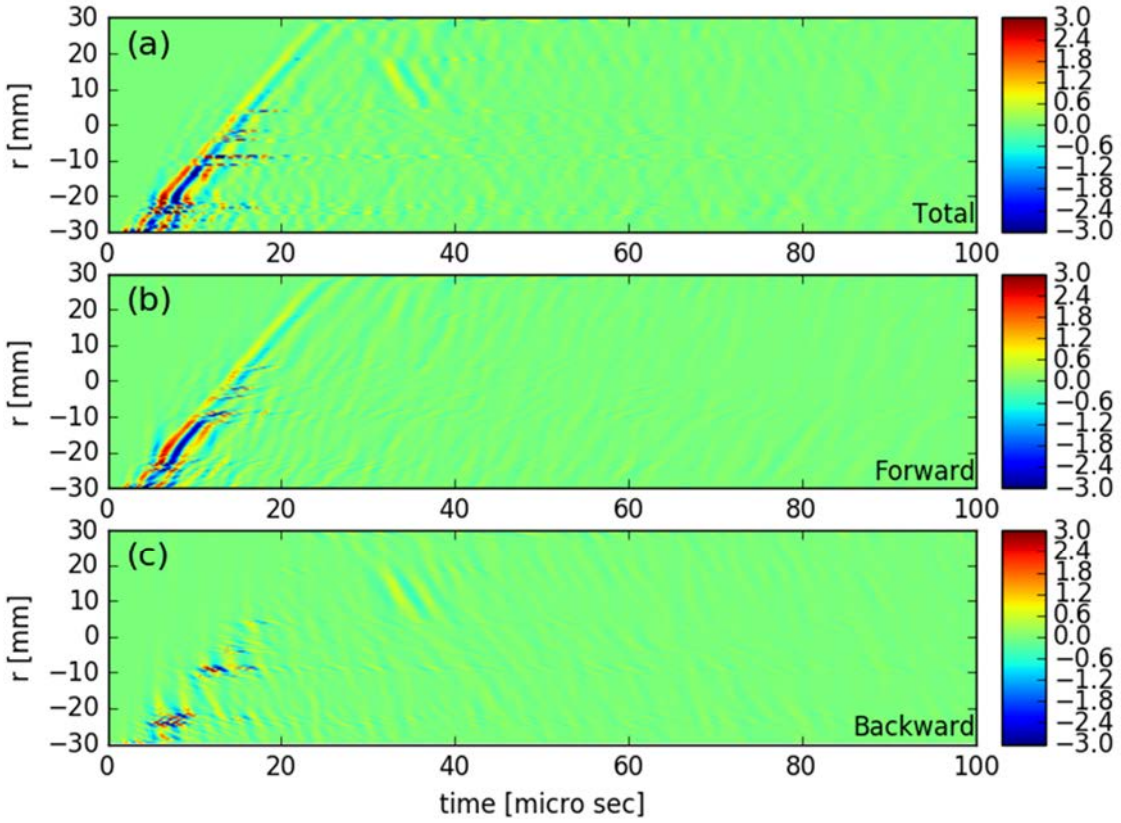


図 2.5　速度波形の計測結果（サンプル A、$\theta = 0$ °方向）

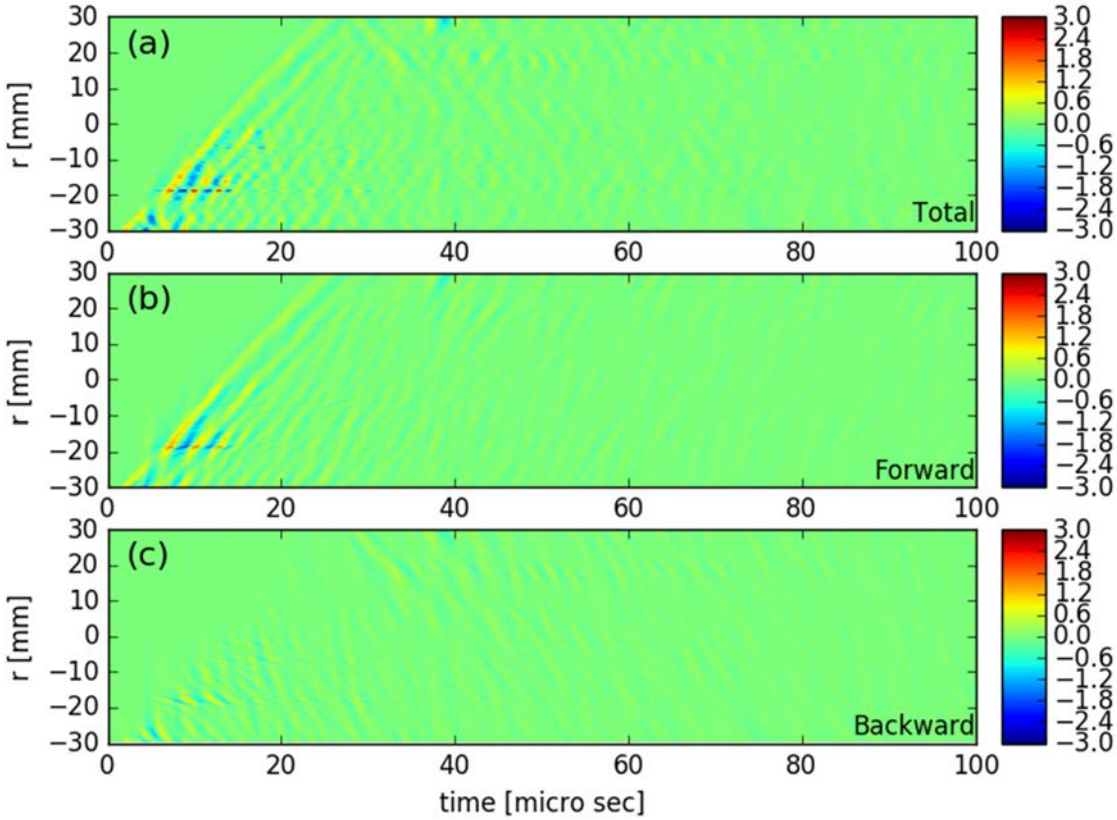


図 2.6　速度波形の計測結果（サンプル A、 $\theta = 90$ °方向）

図 2.5、2.6 に示した結果から、反射強度関数 $C(x)$ を計算した結果を図 2.7 と図 2.8 に示す。ここで、反射強度関数のグラフの背景色は、赤がカリ長石、黒が黒雲母、白が斜長石、水色が石英を表す。

反射強度関数は、計測範囲のほぼ全体に分布して多数のピークを示す。これらのピークのうち、特に鋭いものは、散乱源の延長が短いことを表し、き裂による散乱と思われる部分である。一方、裾野が広く比較的緩やかなピークは、散乱体延長が相応に長いか、あるいは側線から外れた散乱体からの影響と考えられる。ここで、透過方向による反射強度関数の違いを見ると、$\theta = 0$ °の場合、$\theta = 90$ °の場合よりも鋭いピークが多く、ピーク値も大きいことが分かる。さらに、鉱物種の関係を見ると、$\theta = 0$ °方向では、石英の部分に鋭いピークが多く現れている。特に図 2.9 に示すように、$C(x)$ が 0.3 を超えるものは、全て石英の場所で得られているため、石英中のき裂が反射強度関数の値に現れていると考えられる。このことは、別途実施した薄片観察結果と整合するが、薄片観察結果では、カリ長石にもへき開性のき裂が多数見られることが確認されている。しかしながら、カリ長石と反射強度の相関は、$\theta = 0°$ と90 °以外の方向や、試料 B に対する結果を含めてほとんど認められず、カリ長石内のき裂は、力学的には閉口したき裂となっていることが示唆される。ただし、超音波によって発生する動的な応力は非常に小さいことを考慮すれば、今回の結果は、ほぼ無応力状態でのものであると理解すべきことに注意が必要である。

外力や熱応力のある状態では、鉱物種によらずき裂が開口する可能性はあり、その場合は、超音波の挙動にも変化が起きると予想される。このことは、人為的に温度や応力を制御できる場合、それらの諸条件と反射強度関数の変化を見ることで、試料の状態を評価することができる可能性があることを意味する。

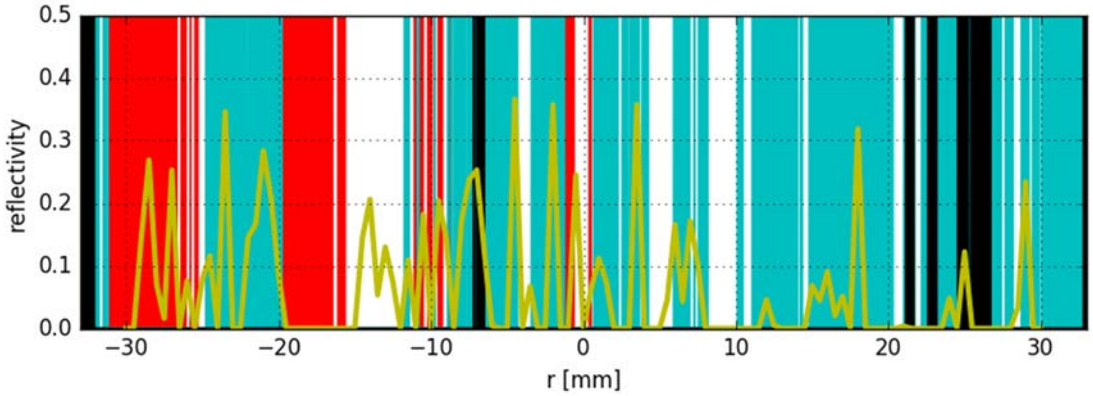


図 2.7　反射強度関数 $C(x)$ と鉱物種（サンプル A, $\theta = 0°$ 方向）
赤:カリ長石、白:斜長石、黒:雲母、水色:石英

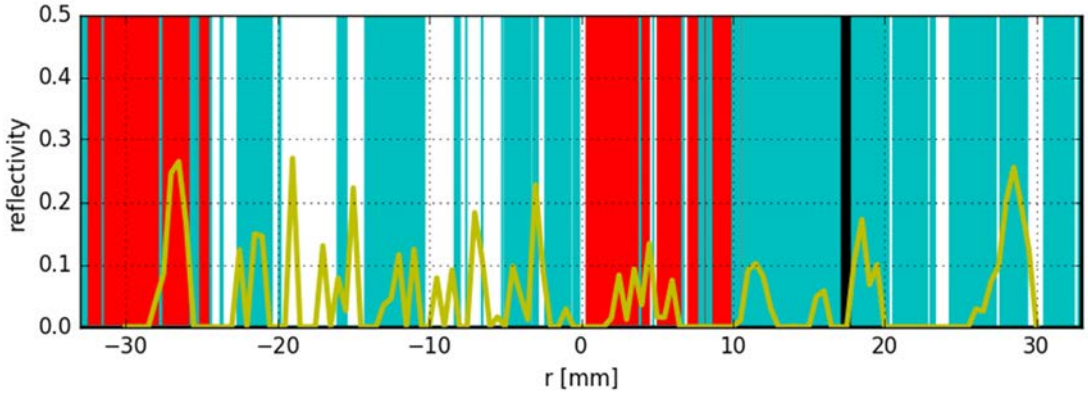


図 2.8　反射強度関数 $C(x)$ と鉱物種（サンプル A, $\theta = 90°$方向）
赤:カリ長石、白:斜長石、黒:雲母、水色:石英

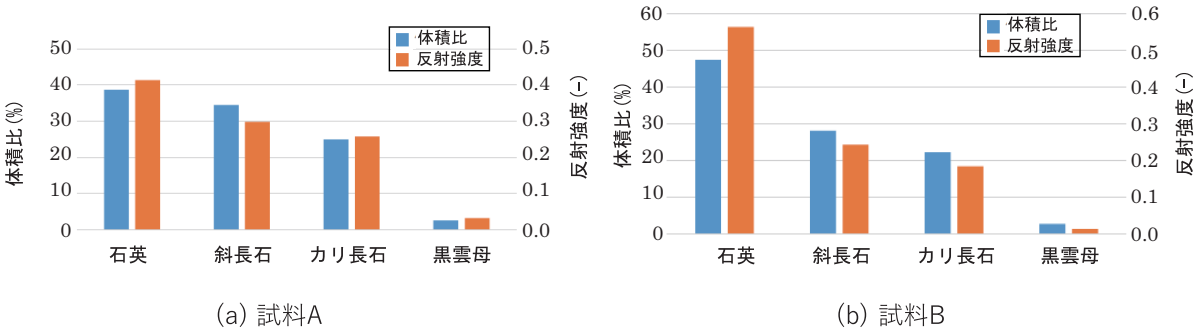


図 2.9　反射強度関数$C(x)$の値と鉱物種の関係（体積比は、各側線上の鉱物分布量から推定）

2.6 表面波伝播の面的な計測による散乱源の同定

前節では、反射強度関数を用いて強い散乱源を特定し、鉱物種との関係を調べることが可能であることを示した。その際、超音波は側線上を一次元的に伝播するとの前提で反射強度関数の計算を行っているが、実際には、媒体の不均質性により、超音波の送信源が 1 次元的な場合も、発生する波動場は 1次元的でない。そのため、進行波成分の方向による分解は完全でなく、反射強度関数が最大値である 1 に近い値を取ることは期待できない。従って、散乱源の空間的な分布についてより詳しく調べるには、2 次元的な計測を行うことが必要である。

本節では、試料表面の矩形領域を LDV でスキャンして取得した一連の時間波形から、試料表面の運動状態を面的に再構成し、花崗岩試料の表面に生じている波動場の挙動を予察的に調べた結果について述べる。

2.6.1 実験方法

(1) 実験供試体

実験には、図 2.10 に示す角柱状の花崗岩試料を用いた。この図には、計測点位置を示すための (x, y, z) 座標系を併せて示してある。測定は、レーザー振動系による測定面は試料上面（$z = 0$）にとり、青の破線で囲んだ領域:

$$A = \{-10 \le x \le 10[mm], 0 \le y \le 50[mm]\}$$

において、1mm 間隔で格子状に計測点を配置して行った。

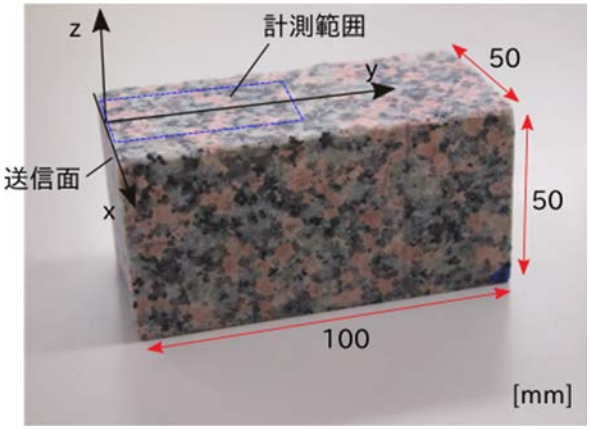


図 2.10　測定に用いた花崗岩供試体

(2) 計測システム

図 2.11 に計測システムの構成を示す。送信に用いた圧電探触子、受信に用いるレーザー振動系は前節に示したものと同じである。試料は、x, y 方向に可動する2軸ステージ上に固定し、レーザー振動系との相対位置を調整することで、試料表面の計測領域 $\{A\}$ を1mmステップで走査した。このとき、送信センサーは $y = 0$ の面に固定し、横波探触子で鉛直動を与えることにより試料表面近傍を伝わる表面波を励起する。送信圧電探触子への印加電圧や、受信時のゲイン、平均化回数の設定も前節と同様である。

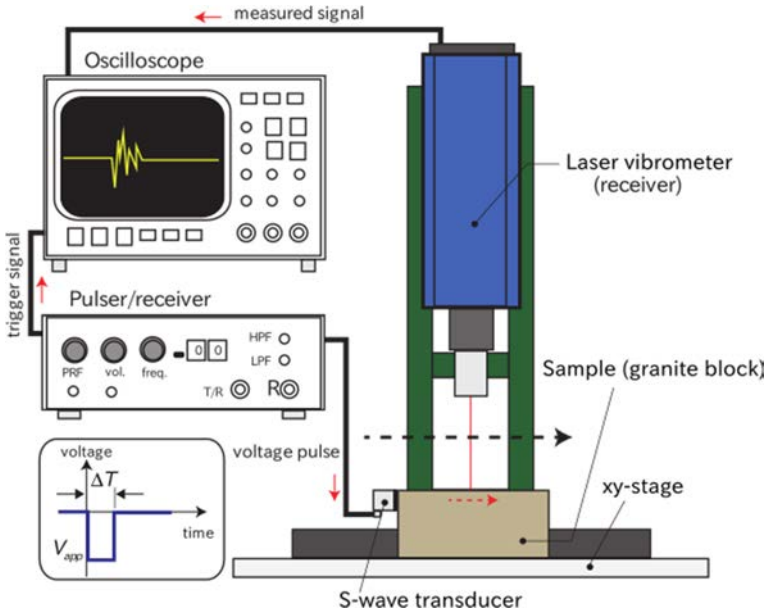


図 2.11　表面波の面的計測を行うための実験装置構成

(3) 計測面の状態

図 2.12に、試料表面のスキャナーイメージを計測領域 $\{A\}$ の部分について拡大したものを示す。計測範囲内には、4 つの主要造岩物粒が全ての種類で多数含まれており、その意味で十分な範囲をカバーしている。なお、結晶粒のなかには、計測点間隔の1mmより小さなものも含まれているが、本試料を伝播する超音波は、概ね 500 kHz、波長は 5mm程度が高周波側の上限であることから、これに対して十分な時空間的な解像度を持つようにスキャンステップとサンプリングレートを決定した。

2.6.2 実験結果

図 2.13 に、計測結果の一部を示す。この図は、時刻 5.0 から20 μsec における波動場の空間的な進展を、スナップショットとして示したものである。送信センサーは、$y = -3, -5 < x < 5mm$の位置にあり、この範囲が加振されることによって発生した超音波が $y > 0$ の方向に進行していく様子が示されている。

この図に見られるように、時刻 $t = 7.5\,\mu sec$ では、送信源から広がった波が、計測領域を横断するように波面を形成して $y > 0$ 方向へ進展するが、波面形状は複雑に波打ち、振幅値にも大きなゆらぎが見られる。このような波面形状と振幅のゆらぎは、結晶粒の影響を反映したものであり、ここで用いた周波数帯の超音波では、一定距離を伝播した後も、平面あるいは球面波状の場が形成されないことを示している。また、波動場の進展を詳しく観察すると、いくつかの場所で、局所的に特異な応答を示す箇所があることに気づく。例えば、図 2.13 の $(x, y) = (6mm, 0mm)$ 付近では、大きな振幅が局所的かつ長時間に渡って観測されている。これは、き裂と試験体表面の間で、多重反射が断続的に励起されることによって生じたものである。図2.11を参照すれば、この部分は、5 mm 程度の大きなカリ長石と石英の境界にあたり、石英内部、あるいは石英とカリ長石の境界で反射された波が、近傍の試料表面との間で多重反射を起こした可能性が想定される。また、時刻 $12.5\,\mu sec$ のスナップショットを見ると、$(x, y) = (5mm, 19mm)$付近でスポット状に大きな振幅を示す箇所がある。この箇所は、図には示されて

いないが、他の時間でも、繰り返し同様な応答を見せる。この付近には、石英粒に挟まれるように斜長石の層が入っており、斜長石－石英間の音響的性質の差か、両者の粒界に生じたき裂に起因した散乱と思われる。同様に、$(x, y) = (2mm, 15mm)$ 付近にも石英に挟まれた長石の薄層があり、この付近で生じた反射波が、時刻 7.5 と $10\ \mu sec$ のスナップショットにも現れている。この部分の反射波は、大きな振幅値をもつ透過波成分が通過する直後のために見えにくくなっているが、ここを境に$y > 0$ の方向へ進む波が左右ふた手に分かれるよう伝播していく。この原因は、斜長石層が障害となりその背後に超音波が伝わりにくくなることにあると考えられる。なお、当初は、黒雲母はへき開性のある層状鉱物で異方性も非常に強いことから、雲母も強い散乱源の一つになると考えていたが、計測結果を見る限りその影響はほとんど見られない。このことは、雲母の総量が少ないことも一因と考えられるが、明確な理由は不明である。また、特異な散乱を起こす部位は、ここに示した観測結果ではごく少数に思われるが、入射波の方向によっては異なる部位で同様な挙動が生じると予想される。さらに、試料内部で起きる局所的な散乱は、必ずしも表面で観測されると限らないことも考えると、実際に観測されるよりも遥かに多くの場所で同様な応答が生じていると考える必要があり、そのために、500 kHz からMHz　程度の高周波数成分の波はほとんど伝播しない可能性が高いと推察される。

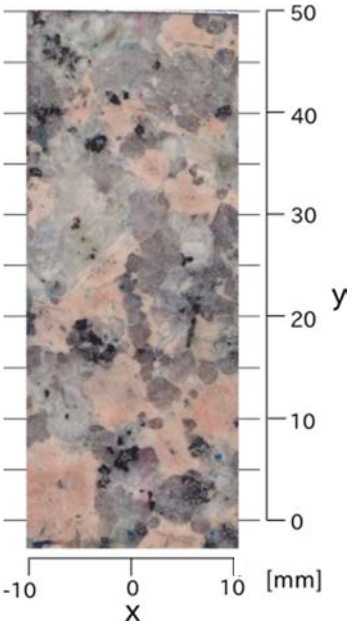


図 2.12　計測範囲と花崗岩試料表面の状況

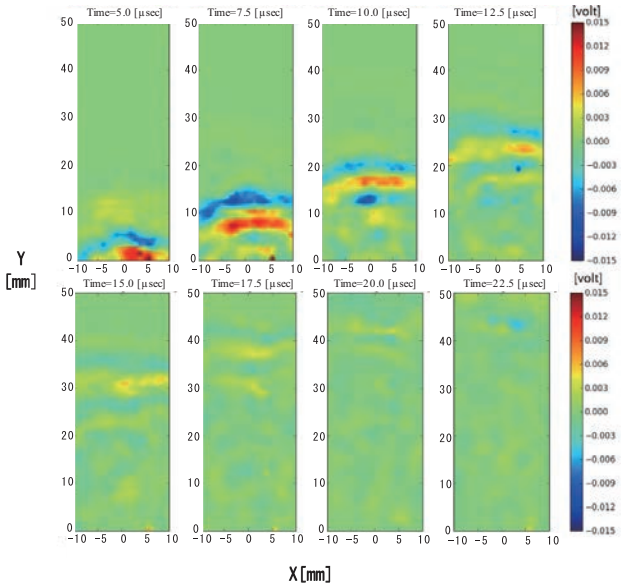


図 2.13　計測した表面振動のスナップショット

2.7 まとめ

花崗岩試料の表面近傍を伝播する超音波の挙動を、レーザードップラー振動計を用いて計測し、強い散乱源として応答する部位について調べた。その結果、1 次元的な走査による計測波形から反射強度関数を算出し、そのピーク位置を調べることで、石英による散乱の効果が大きいことが明らかとなった。さらに、面的（ 2 次元的）な走査による計測結果から、結晶粒の影響により、透過波の波面は波打ち、振幅にも大きなゆらぎが生じることが今回はじめて明らかとした。このことは、岩石コア中を伝播する超音波は、均質材の波動伝播モデルでは定量的な挙動の再現が困難であること示唆する。また、面的な計測結果においても、局所的な散乱には石英が関与することが確かめられ、特に長石と石英の界面近傍での散乱が重要であることが分かった。

一方、主な今後の課題としては、実験で観測された挙動を再現できる数値波動解析モデルを開発することが、現象をより定量的に理解し予測や非破壊評価へ利用するために必要となること、レーザー振動計による面的な計測は多くの情報を得ることができる反面、計測に高い労力を要するためこの点の効率化が必要であること、の二つが挙げられた。

3．2018 年度（平成 30 年度）の研究成果

平成30年度は、2.6 節で示した課題のうち、波動伝播モデリングに有用な情報を効率よく取得することができるように装置の改良・高度化と波形処理技術の開発を行った。具体的には、これまでマニュアル計測で行っていた LDV 振動計による波形取得を、自動ステージと LDV 、オシロスコープおよび PC 制御して連携させることで、数千から数万点の計測が可能なように計測システムの自動化を行った。次に、開発した計測システムを用いて取得した波形データを処理し、波形観測点毎に振幅や初動到達時間の変動を求めて空間マップとして表示する方法を考案した。

3.1 自動超音波計測装置の開発

2018 年度の研究で開発した LDV 自動超音波計測システムの構成を図 3.1 に示す。本計測システムの測定部は、試料位置を精密に調整するためのステージ、超音波振動の受信に用いるレーザードップラー振動計(LDV：図2.3)、送信用の圧電超音波トランスデューサ(PZT：図 2.2)に高周波電圧を印加するためのパルサー/レシーバーによって構成されている。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。

圧電トランスデューサは、横波を垂直に送信・受信するためのもので、共振周波数は 500 kHz、圧電素子サイズは 10 mm × 10 mm の矩形である。試料位置の調整に用いるステージは、$x-y$ 直交 2軸と鉛直方向を回転軸とするθ軸の3軸自動ステージで、x, y 方向のストロークは、ともに 300 mm、θ方向は 360°回転可能なものである。ステージ上面は、自作の軽量バイスを取り付けたテーブルになっており、コアサイズ程度の試料を固定することができる。3 軸ステージ自体は、十分な重量のあるブレッドボードに取り付け、ステージの駆動によって生じる慣性力で移動をしないように設置されている。超音波振動の検出(受信)に用いるLDV は、アルミフレーム上にマウントされた直交 $\mathrm{x, y, z}$ の 3軸自動ステージに取り付けられており、試料とLDV がレーザー光のフォーカスと試料面の計測範囲をスキャンするために適切な相対位置となるよう移動させることができる。LDV を移動させるための xyz −3 軸ステージ、試料位置調整の $xy\theta$ −3 軸ステージは、ともに 4 軸まで制御可能なステッピングモーターコントローラーで駆動され、モーターコントローラーを介したステージの制御や各種のパラメータ設定は、全てコントローラに接続されたPC から行うことができる。入射超音波の励起は、圧電超音波トランスデューサを超音波探傷試験用のパルサー/レシーバーで電圧パルスを印加して駆動することで行う。本研究で用いるパルサー/レシーバーは、最大 400 V の矩形波パルス電圧一波を印加することができるもので、パルス幅は 100 kHz から 20 MHz の圧電トランスデューサに適合するように設定することができる。

なお、パルサー/レシーバーはその名称が示すとおり、ダイプレクサーと増幅回路が内蔵されており、超音波信号受信機としても利用できるが、本研究では LDV を受信に用いるため、パルサー/レシーバーのレシーバー機能は、超音波の伝播状況を別途接続した圧電トランスデューサで確認する際にだけに用いている。

LDV は非接触計測が可能であるだけでなく、周波数帯域が 0.5 Hz から 20 MHz と非常に広く、地盤材料の弾性波、超音波試験で用いられる周波数帯を十分にカバーできることが大きな利点である。さらに、ビーム径も20 μm と非常に小さく、金属や鉱物中を伝播するkHz からMHz オーダーの超音波波長に対しては、十分に高い空間解像度を持つ。これらの理由により、LDV は時空間的に高密度な超音波計測を行うために非常に適した特徴を有していると言える。

一方、LDV 計測の欠点としては、十分な受光感度を得るためにレーザー光を計測点毎に精確にフォーカスさせる必要があること、計測面がレーザー光に対して十分な反射強度を有する状態であることが挙げられる。さらに、十分な強度の反射光が得られる場合も、超音波波形の信号−雑音比は圧電トランスデューサよりも低く、多数の波形を平均化することではじめて目的とする信号成分を観測できるのが普通である。花崗岩試料の表面は、機械研磨されて平滑な状態であっても、透明や半透明、黒色の鉱物が含まれるためレーザー光を十分な強度で反射しない。そのため本研究では、試料表面に金属光沢をもつアルミホイルを貼付して計測を行う。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、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トーカスユニット(AF–unit) を利用した。AF ユニットは、それに内蔵されたレンズ位置をモーター制御し、反射レーザー光の受光量が最大となる状態を自動的に探索することのできる装置である。

計測システムを構成する以上の装置は、超音波計測のために次のようにして連携して動作する。計測時には、はじめに、PC からのコマンド送信によって、LDV のオートフォーカスユニットが駆動され、レーザー光を観測点位置にフォーカスさせる。オートフォーカスユニットの動作終了を待ち、次に、LDV からの超音波信号を、オシロスコープを介して PC からのコマンド制御で取り込む。この間、パルサー/レシーバーは、常時一定の繰り返し周波数で圧電トランスデューサを駆動しており、駆動タイミングを知らせるトリガー信号がオシロスコープに送信されている。オシロスコープは、トリガー信号によってパルサー/レシーバーと同期され、指定された回数の波形を平均化の後、AD 変換して PC へ波形データを転送する。オシロスコープとPC は、USB 接続によって通信を行うが、波形データの容量は 1 波形あたり数十kB と大きくない。また、リアルタイムでの波形表示はオシロスコープが担当するため、AD 変換から PC への波形取り込みまでの時間的な負荷はほとんど無視できる程度である。波形の取り込み終了後は、ステッピングモーターコントローラーを PC から制御して試料位置を予め指定された次の計測点に移動させる。移動後は、計測開始時からの作業を、AF ユニットによるフォーカシングから波形収録まで同様にして行う。これらの作業を繰り返して行うことで、指定された座標位置全ての点で超音波信号の受信を行う。

ここで開発したシステムは、一分間に 2点 ～ 6点程度での計測が可能であり、数時間から半日程度の計測で数千波形規模のデータ収集が可能となっている。

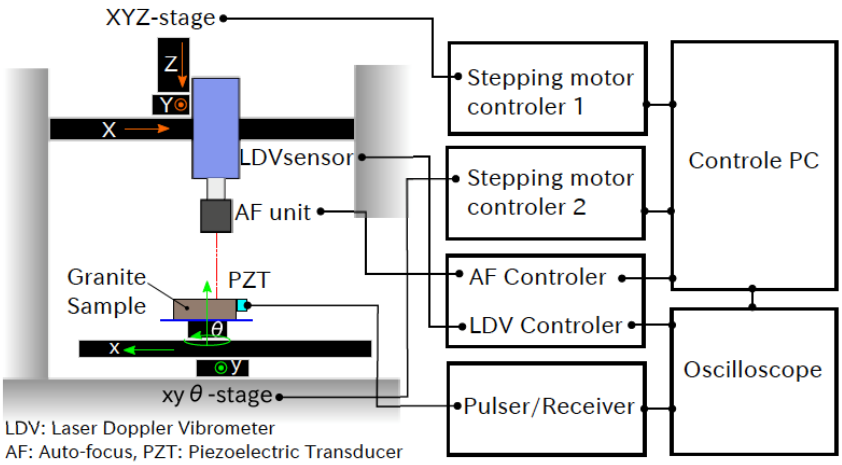


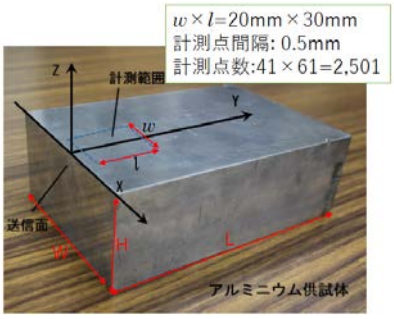
図 3.1　レーザー振動計と3軸ステージによる自動超音波計測装置の構成

3.2 表面波計測

3.2.1 実験供試体と計測点の配置

図 3.2 に、前節までに述べた試験システムを用いた実験に使用した万成花崗岩試料と、比較のために用いた等方・均質弾性体と考えられるアルミニウム供試体の外観を示す。図の左側では、送信センサーの取り付け箇所と、LDV による概略的な計測範囲を示すための xyz 直交座標系を、右側には各供試体に対する測定条件をそれぞれ示している。送信に用いた超音波センサーは、前述の通り、横波、垂直入射、共振周波数 500 kHz の圧電トランスデューサで、振動方向は図中に示した座標系の z 軸、すなわち鉛直方向である。このように、試料表面に対して鉛直に上下動を励起することで、z 軸方向に振動しながら y 軸の方向に伝播する強い表面波を透過させることが意図されている。

送信位置と受信範囲の正確な関係は，図 3.3 に示すが，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をそれぞれ青と黄色で示している。横波センサーは 10 mm×10 mm の矩形素子を持つため、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 A は、本研究では、幅 W、高さ H の矩形領域としている。これは、後述する実験結果を示す際の容易さを考慮したものであり、実際には、計測領域の形状自体は、3 軸ステージのストロークの範囲で任意に設定することができる。LDV による超音波計測は、計測領域上に配置した一定間隔の正方格子点で行うが、試料端部の $y = 0mm$ 近傍では、レーザー光の十分な反射強度が得られないことから、例えば、最初に実施した図 3.2 の花崗岩供試体 A では、計測範囲 は送信面から $\delta y = 1.5mm$ 程度離れた位置から始まるように設定されている（花崗岩供試体 B、Cについては 20 mm 程度離れた位置から計測を開始）。

<table>
<tr><td> 

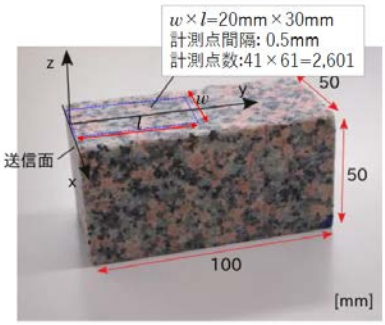
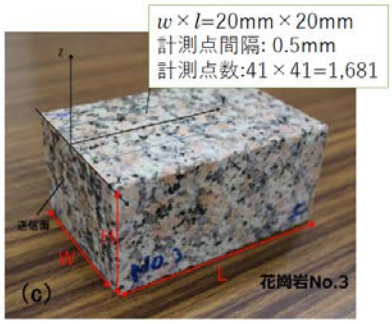
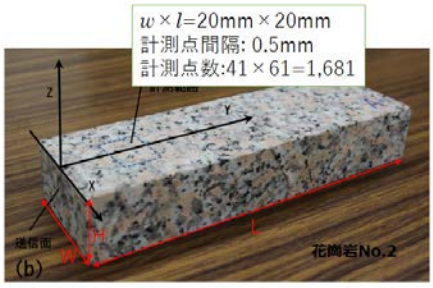
100mm(L)×150mm(W) ×50mm(H)</td><td>送受信条件
・送信側
印加電圧：300V
電圧波形：矩形パルス
パルス繰返し周波数：1kHz
センサー：横波（垂直 0.5MHz、10×10mm）
・受信側
計測時間：100μsec
サンプリング間隔：Δt=0.05μsec
サンプリング周波数：fs=20MHz
サンプリング点数：Nt=2000 点
平均化回数：N_{ave}=1024 回</td></tr>
<tr><td colspan="2">アルミニウム供試体</td></tr>
<tr><td> 
</td><td>送受信条件
・送信側
印加電圧 ：400 V
電圧波形 ： 矩形パルス （ 2 μsec ）
パルス繰返し周波数 ：10 kHz
センサー：横波（垂直 0.5 MHz 、10×10 mm）
・受信側
計測時間 ：100μsec
サンプリング間隔 ：Δt = 0.05 μsec
サンプリング周波数 ：fs = 20 MHz
サンプリング点数 ：Nt = 2000 点
平均化回数 ：N_{ave} = 2048 回</td></tr>
<tr><td colspan="2">花崗岩供試体 A</td></tr>
<tr><td> 
</td><td>送受信条件
・送信側
印加電圧 ：400 V
電圧波形 ：矩形パルス （ 2 μsec ）
パルス繰返し周波数 ：10 kHz
センサー ：横波（垂直 0.5 MHz 、10×10 mm）
・受信側
計測時間 ：100μsec
サンプリング間隔 ：Δt = 0.05 μsec
サンプリング周波数 ：fs = 20 MHz
サンプリング点数 ：Nt = 2000 点
平均化回数 ：N_{ave} = 2048 回</td></tr>
<tr><td colspan="2">花崗岩供試体 B</td></tr>
<tr><td> 
</td><td>送受信条件
・送信側
印加電圧 ：400 V
電圧波形 ：矩形パルス （ 2 μsec ）
パルス繰返し周波数 ：10 kHz
センサー ：横波（垂直 0.5 MHz 、10×10 mm）
・受信側
計測時間 ：100 μsec
サンプリング間隔 ：Δt = 0.05 μsec
サンプリング周波数 ：fs = 20 MHz
サンプリング点数 ：Nt = 2000 点
平均化回数 ：N_{ave} = 2048 回</td></tr>
<tr><td colspan="2">花崗岩供試体 C</td></tr>
</table>

図 3.2　測定に用いた試料と測定条件一覧

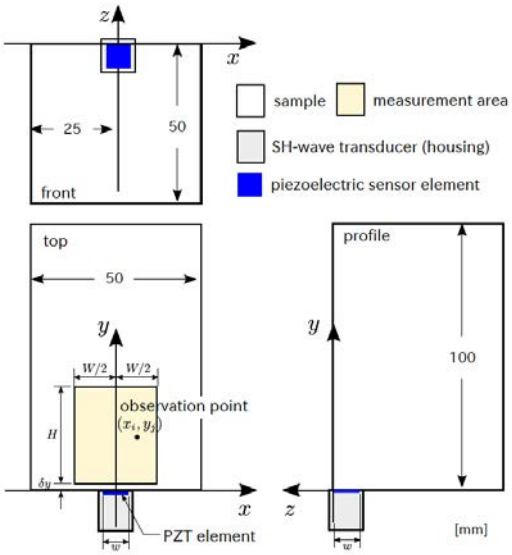


図 3.3　花崗岩試料表面にとった xyz 直交座標系と送受センサーと超音波計測領域の配置

x および y 方向の格子間隔をそれぞれ $\Delta x, \Delta y$ 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

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

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

$$N_x = \frac{W}{\Delta x} + 1\,, N_y = \frac{H}{\Delta y} + 1 \tag{2}$$

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、A における計測の結果として、次のようなデータセット $D(A)$ が得られる。

$$D(A) = \{a_{ij}(t) \mid i = 1, \cdots N_x, j = 1, \cdots N_y, t \in [t_s, t_s + T]\ \} \tag{3}$$

ここで、t_s はパルサー/レシーバー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。また、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ている。式(3) では，時間変数 t を連続量として扱っているが、実質的には、時間はオシロスコープのサンプリング間隔 Δt で離散化されているため、時間に関するサンプリング点数を N_t とすれば、サンプリング間隔 Δt と、サンプリング周波数 f_s が

$$\Delta t = \frac{1}{f_s} = \frac{T}{N_t} \tag{4}$$

の関係で与えられることとなる。

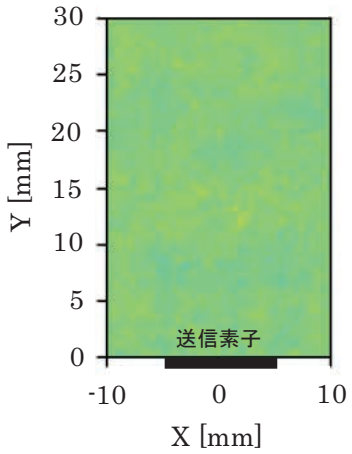
3.2.2 計測結果

図 3.4 ～ 3.7 に、LDV による計測データを用い、試料表面における波動場の伝播挙動を可視化した結果を示す。これらの図は、z 軸方向の振動速度分布を $1\,\mu sec$ステップでスナップショットとして示したものである。一連のプロットは、横軸が x 座標, 縦軸が y 座標を表し、計測領域A 全体の様子をカラーマップとして示している。なお、速度振幅値は、データ$D(A)$ 全体での最大値によって無次元化している。ここでは、計測領域 A の下方から入射された超音波が、全体としては $y > 0$ の方向に向かって次第に伝播する様子が示されている。

特徴的なことの一つは、図 3.5 ～ 3.7 の花崗岩試料については、入射波の波面が、どのような場所と時刻においても、図 3.4 の等方・均質弾性体であるアルミニウムブロックの結果で見られるような平面波的でも球面波的でもなく、一定した形状を示さないことである。

図 3.5 の花崗岩試料 A の結果を例として見ると、振幅に関しても、$17\,\mu sec$程度の段階では、領域 A の右方向 $(x > 0)$ に強い波が放射されているが、その後の時刻では、左方向に大きな振幅をもつ波が唐突に現れるように見える。しかしながら、左方向に進む強い波も、$21\,\mu sec$ 頃には再び右方向への波に振幅値の面で大小が逆転される。これらの強い波動成分が通過した後は、振幅は小さいながら各点での振動が継続し、ここに表示した$t = 30\,\mu sec$ までの間では、振動が完全に消失する様子は見られない。このような挙動は、非均質材に特徴的な挙動であると考えられる。ただし、進行方向や振幅値のゆらぎは、必ずしも結晶粒程度のスケールをもつ訳ではなく、むしろ、結晶の集合体を単位として生じているように見える。

なお、いくつかの場所では、強い振動が、周囲との相関なく非常に局所的な範囲で長時間継続している。均質材であれば、このように局所的に特異な振動が発生することはなく、散乱源が局所化されていても散乱波は周囲に放射されて広範囲に伝わる（図 3.4 ）。その点、図 3.5 ～ 図 3.7 に示した結果には、散乱波が周囲に放射される様子はほとんど見られない。この理由としては、試料表面に貼付したアルミホイルと試料の間にトラップされた微細な気泡の共振振動による可能性や、試料表面付近に、損傷が進行して顕著に軟化した微小な領域が存在することに起因する可能性が考えられるが、現時点では明確でない。



計測範囲と送信素子の位置（アルミニウムブロック）

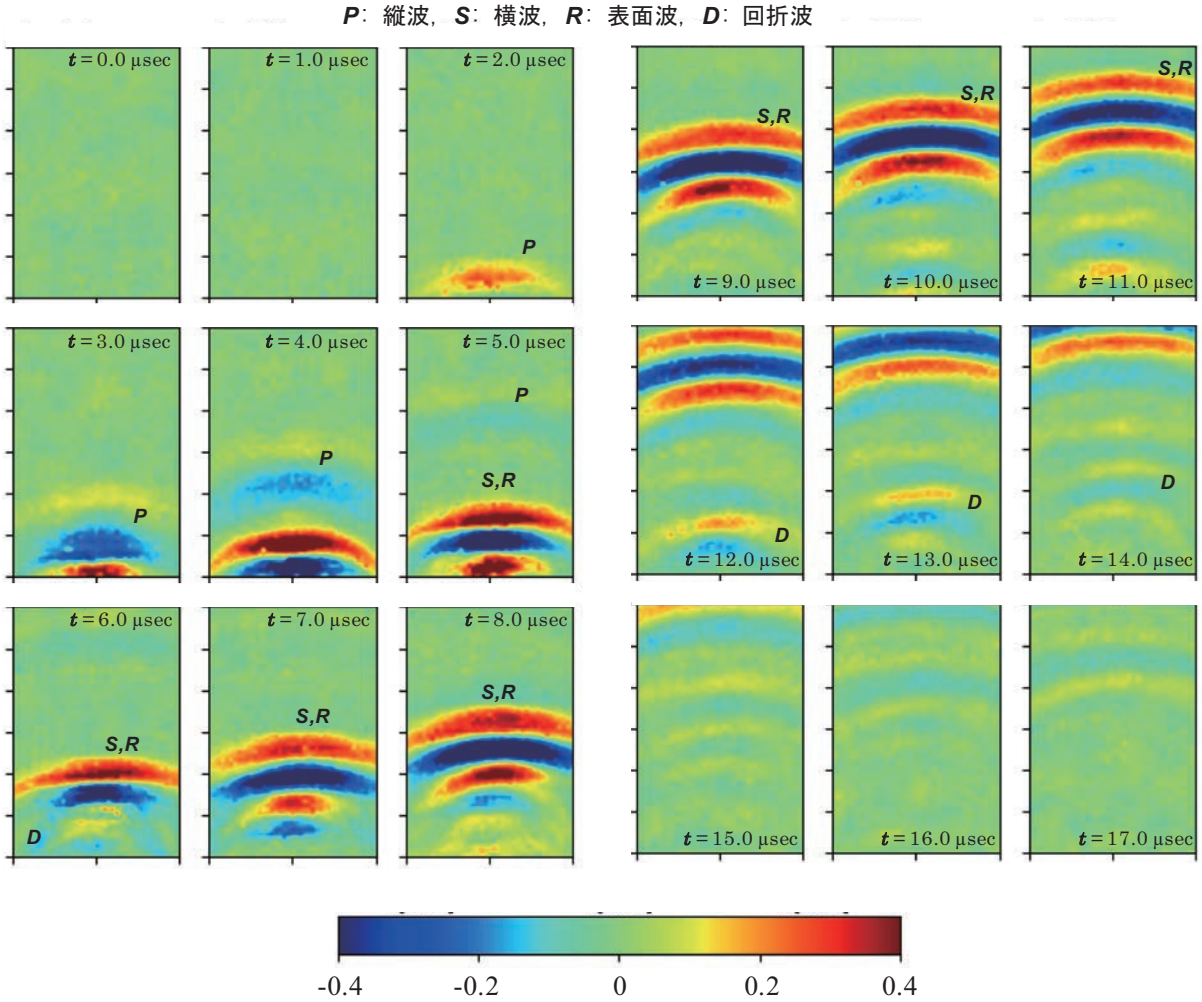
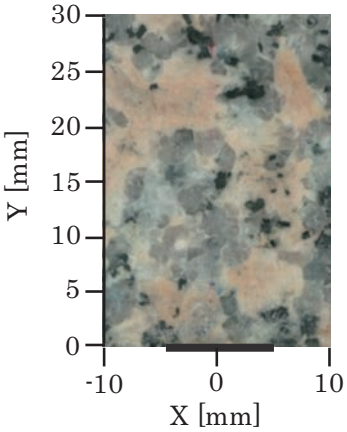


図 3.4　アルミニウムブロックで計測された表面振動のスナップショット（t ＝ 0 ～ 17 μsec）
（速度振幅を最大値で無次元化して表示）



計測範囲とその範囲内の供試体表面スキャナー画像

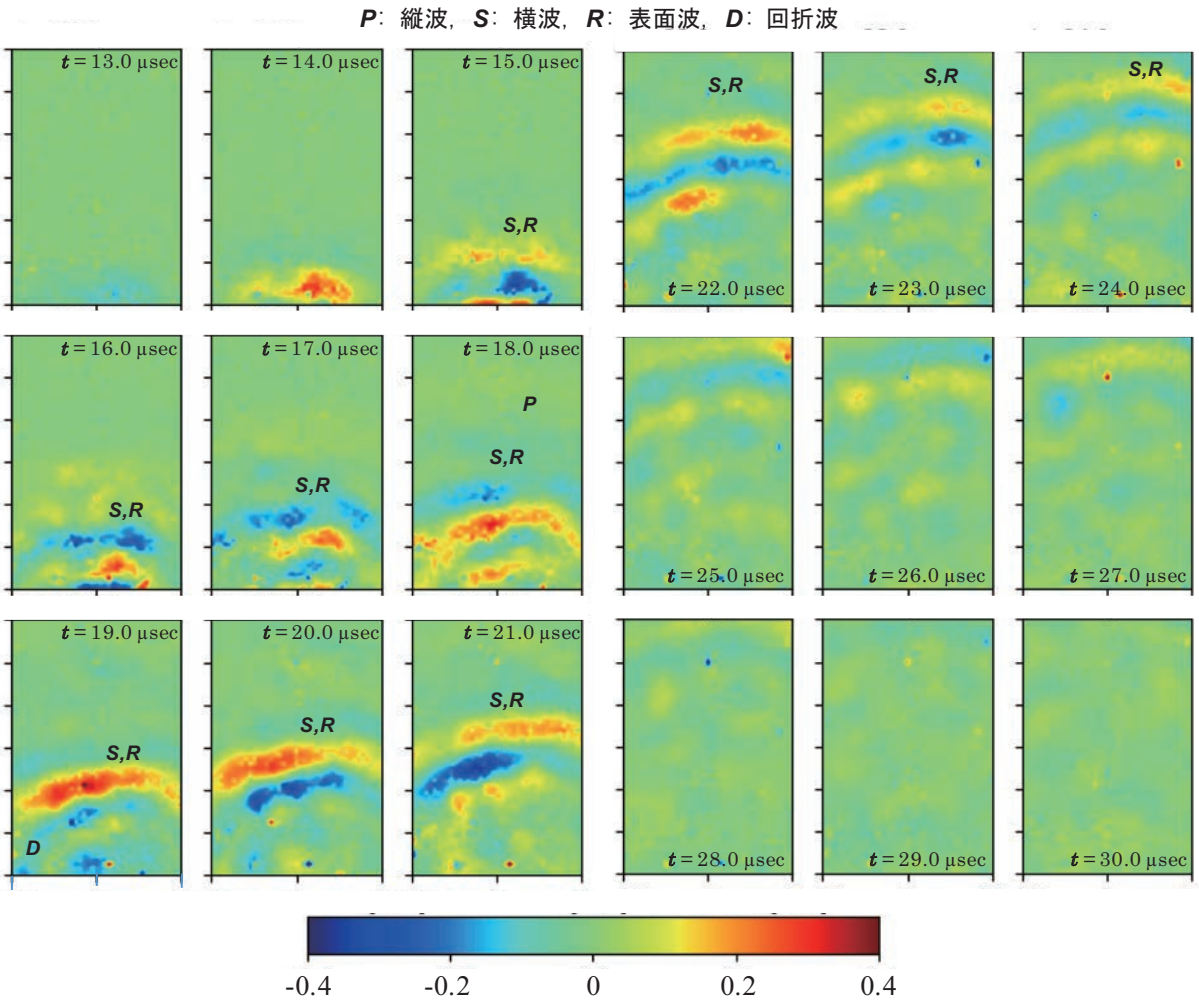
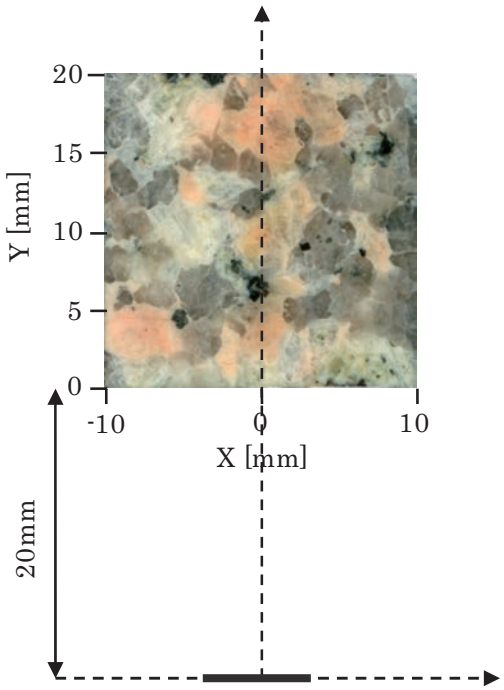


図 3.5　花崗岩供試体 A で計測された表面振動のスナップショット（t = 13 ~ 30μsec）
（速度振幅を最大値で無次元化して表示）



計測範囲とその範囲内の供試体表面スキャナー画像

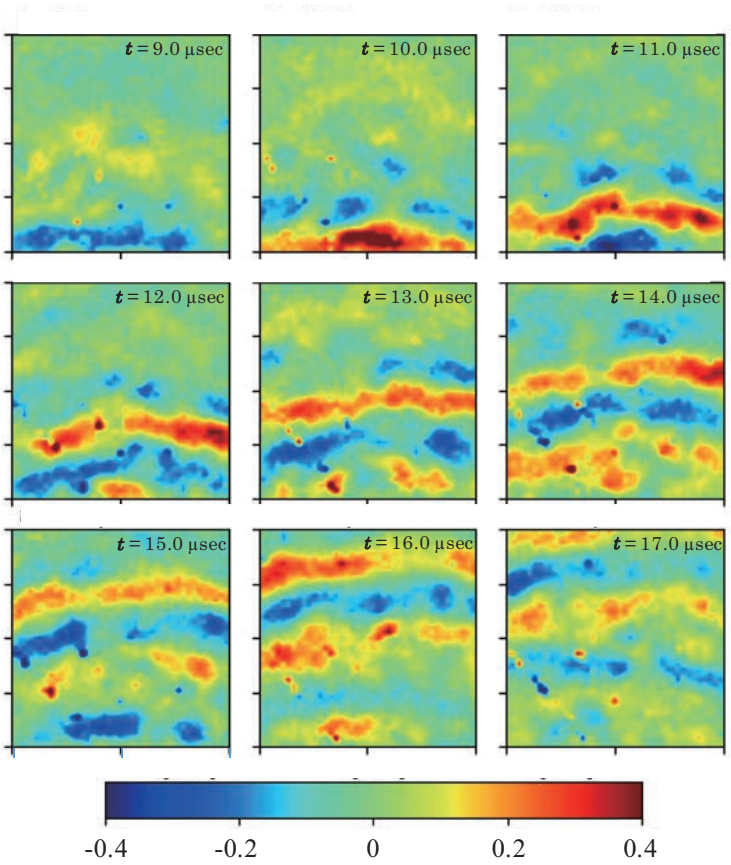
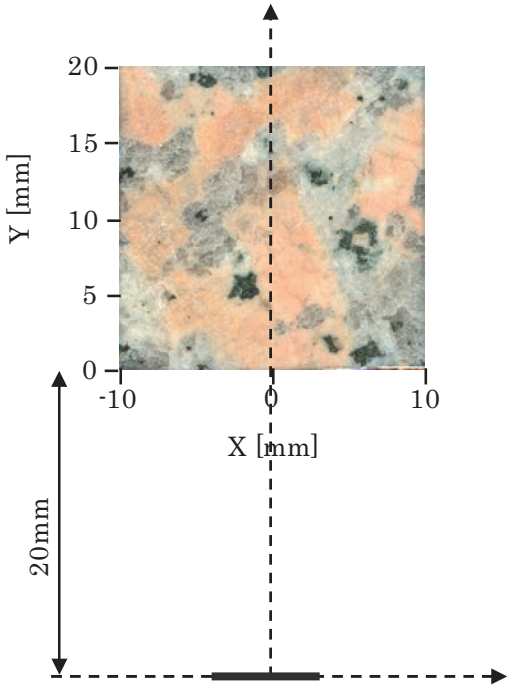


図 3.6　花崗岩供試体 B で計測された表面振動のスナップショット（t = 9 ~ 17 μsec ）
（速度振幅を最大値で無次元化して表示）



計測範囲とその範囲内の供試体表面スキャナー画像

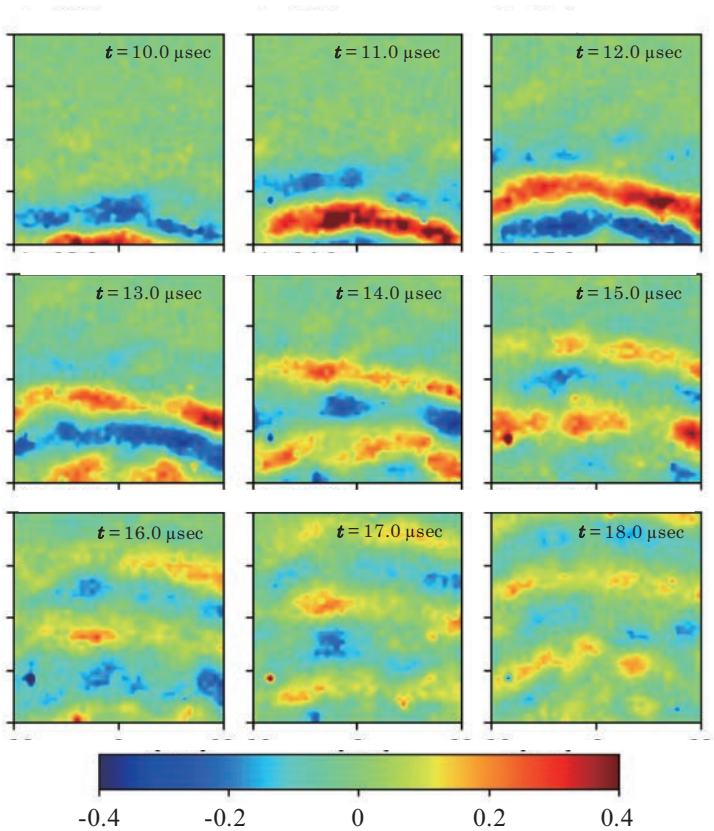


図 3.7　花崗岩供試体 C で計測された表面振動のスナップショット（ $t = 10 \sim 18\,\mu sec$ ）
（速度振幅を最大値で無次元化して表示）

3.3 速度および振幅変動分布の解析

前節で示したような LDV 計測波形データを、花崗岩試料における波動伝播メカニズムの解明に役立てるためには、鉱物粒の分布や状態と波動場の特徴量を関連付ける方法が必要とされる。そのような手法の開発につなげるべく、2018 年度は、超音波伝播速度や振幅の空間的変動を評価し、鉱物分布との相関を調べる方法について検討した。

図3.8 は、花崗岩供試体 B について、x 座標一定の測線で得られた波形データを走時プロットとして示したものである。これらのプロットは、横軸を時間、縦軸を y 座標として、一つの測線上で得られた速度波形を、全観測波形の最大値で無次元化し、カラーコーディングして表示したものである。時間軸に対して、右上の方向へ直線的な時間遅れを伴いながら現れる波群は、位相の揃った $y > 0$ 方向への透過波成分を表し、その傾きは位相速度に相当する。

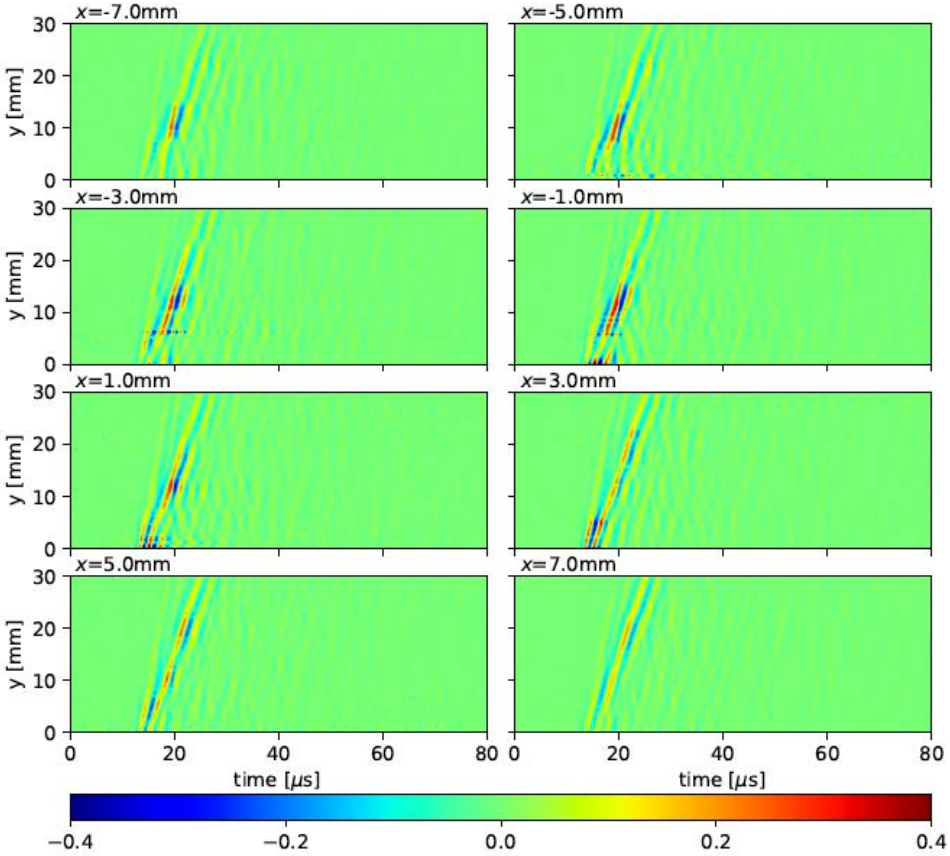


図 3.8　x = 一定の側線上で得られた超音波波形を示す走時プロット
（花崗岩供試体 A ）

図 3.8 に示した走時プロットでは、x 座標が -7 ～ +7mmまで変化した場合も、測線位置によらず、概ね同程度の時刻に透過波の主要動が到達するが、振幅の大小は測線や透過距離 y によって変動があることが分かる。速度振幅の空間的な変動周期は、y 軸方向へ長さが数 mmかそれ以上の長さのものが多数の点で見られ、これは、構成鉱物の音響インピーダンス差に起因したものであると考えられる。

ここで、測線による結果振幅や速度の差を定量化するために、$|x| \leq 5.0mm$にある全ての測線で得られた結果を加算した平均波形:

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

を合成する。このように定義した平均波形を走時プロットとして表示すると、図 3.9 のようになる。これらの平均波形では、コヒーレントな位相をもつ波動成分が強調されるとともに、振幅の空間的な変動が滑らかになる。その結果、波群の到達時間もより明瞭に観察できるため、$\bar{a}_j(t)$の振幅ピークから概算した超音波の到達時刻 t_{of} と、位置 y の関係:

$$c = \frac{dy}{dt_{of}} \tag{6}$$

より位相速度を推定すると、最初に到達する波群の速度は約 6 km/s、第 2 波は約 3 km/s となり、前者は縦波、後者は横波あるいは表面波と判断できる。平均波形 $a_j(t)$ 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。

これは、波動媒体としての花崗岩における不均質性の現れとみなすことができるため、$a_j(t)$ と $a_{ij}(t)$ の差や相関に基づく波形特徴量を適切に定義し、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。さらに、定義した特徴量の空間変動を引き起こす要因と、岩石試料の性状を関連付けることができれば、弾性波データから岩石試料の性状を調べることや、逆に試料の性状から予想される弾性波の伝播挙動を予測する際に役立てることができる。そのような、不均質性の評価に適した特徴量を見出すための最初の試みとして、ここでは、次の3つの量について、空間的な変動の様子を調べてみる。

$$C_2\left(x_i, y_j\right) = 1 - \frac{\|a_{ij}\|}{\|\,\bar{a}_j\|} \tag{7}$$

$$C_\infty\left(x_i, y_j\right) = 1 - \frac{max_t\{a_{ij}\}}{max_t\{\,\bar{a}_j\}} \tag{8}$$

$$C_v\left(x_i, y_j\right) = \arg max_t\left\{\frac{\langle a_{ij}(s+t), \bar{a}_j(s)\rangle}{\|a_{ij}\|\|\,\bar{a}_j\|}\right\} \tag{9}$$

ここに、$\langle\cdot,\cdot\rangle$ は関数内積:

$$\langle f(t), g(t)\rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t)ds \tag{10}$$

を、$\|-\|$は、式 (9) に対応する 2 乗ノルム:

$$|f|^2 = \langle f(t), f(t)\rangle \tag{11}$$

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、$C_v(x_i, y_j)$ 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(9) 右辺に示された相関関数のとり方より、$Cv > 0$ のとき$a_{ij}(t)$ は平均より早く、$Cv < 0$ 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。

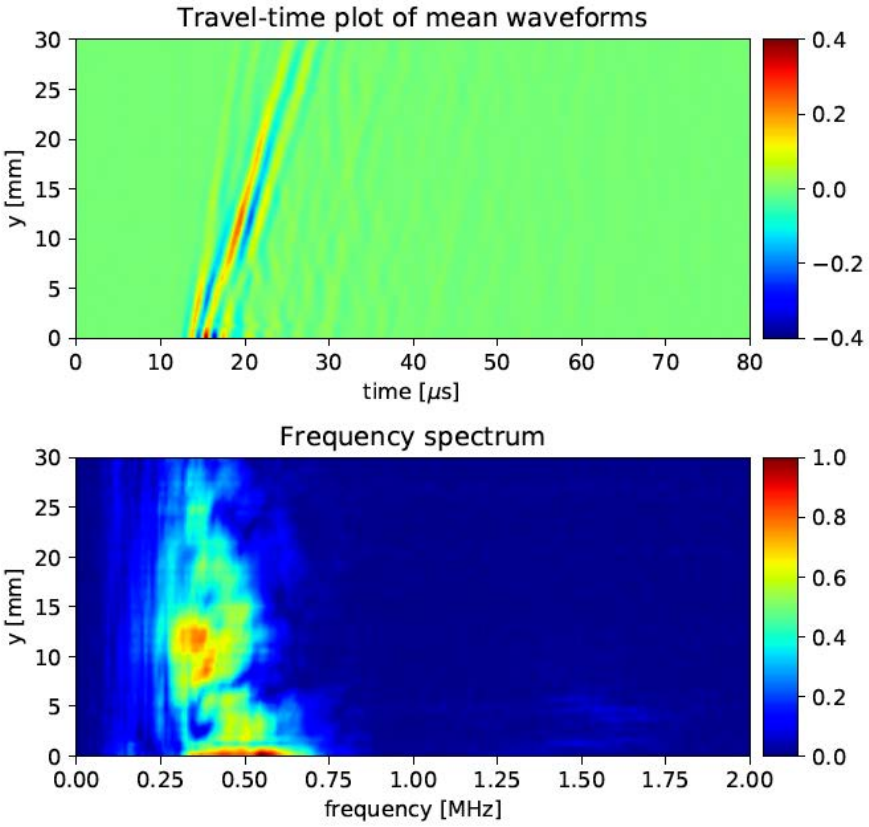


図 3.9　$x = -5 \sim 5mm$ の範囲で観測された波形から得られた平均波形の走時プロット
（花崗岩供試体 A ）

図 3.10 ～図 3.12 は、花崗岩供試体について、これら3 種類の指標値を計測波形データ$D(A)$全て用いて計算した結果を、各供試体の計測範囲 のスキャン画像とともにカラーマップとして示したものである。

先ほどと同様、花崗岩供試体 A を例として検討すると、はじめに、到達時間に関する指標 C_v について見ると、$x = \pm 10mm$ 付近では、ほとんどの領域で負の値をとることに気づく。これは、送信振動子の占める範囲が $|x| \leq 5.0mm$ であるため、観測点位置が y 軸から遠ざかるにつれ、必然的に初動の到達時間が y 軸近傍の観測点に比べて遅れるためである。このことを踏まえて、C_v を見ると、$x > 0$ の側では、一貫して早い時刻に透過波が到達し、$x < 0$ ではそれよりも遅れ比較的ゆっくりと超音波が伝播していることが読み取れる。また、特に指標値が大きな値をと

る$(x, y) = (5mm, 10mm)$ 近傍は、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れ、試料のスキャナー画像と照合すれば、この領域には主としてカリ長石や黒雲母があることが分かる。

一方、振幅に関する指標 C_2 と C_∞ では、$y < 15mm$ の範囲では両者にほとんど差が見られず、$y > 15mm$ の領域では C_∞ がより大きな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。スキャナー画像に示された鉱物分布状況と、 C_2 および C_∞ を比較すると、これらの指標値は主として石英が占める部分で小さく、カリ長石の多い部分で大きな値をとる傾向がある。図 3.11、3.12 の花崗岩供試体 B 、C でも同様の傾向が見られることから、石英の剛性がカリ長石に比べて小さいことが示唆される一方、表 3.1に示すように単結晶の石英とカリ長石の剛性等の差は僅かであり、弾性波速度はあまり大きな差はない。

従って、C_2 および C_∞ の分布は、石英粒の集合が弾性波に対して欠陥の無い単結晶石英よりも低い剛性を持って応答していることを示しており、結晶粒界や粒内に力学的な意味での微小き裂が他の鉱物よりも多く含まれていることが示唆される。

なお、石英粒の集合体が存在することによって弾性波速度が低下するならば、花崗岩中を長距離に渡って伝播した弾性波は、早い伝播速度を持つ表面波と、遅い速度の表面波に分離して観測されるという興味深い挙動を示す可能性がある。また、工学的には、弾性波速度の遅い領域を集中的に計測することで、花崗岩の損傷分布や損傷の進行をモニタリングできる可能性があることを意味するという点で意義をもつ知見と言える。

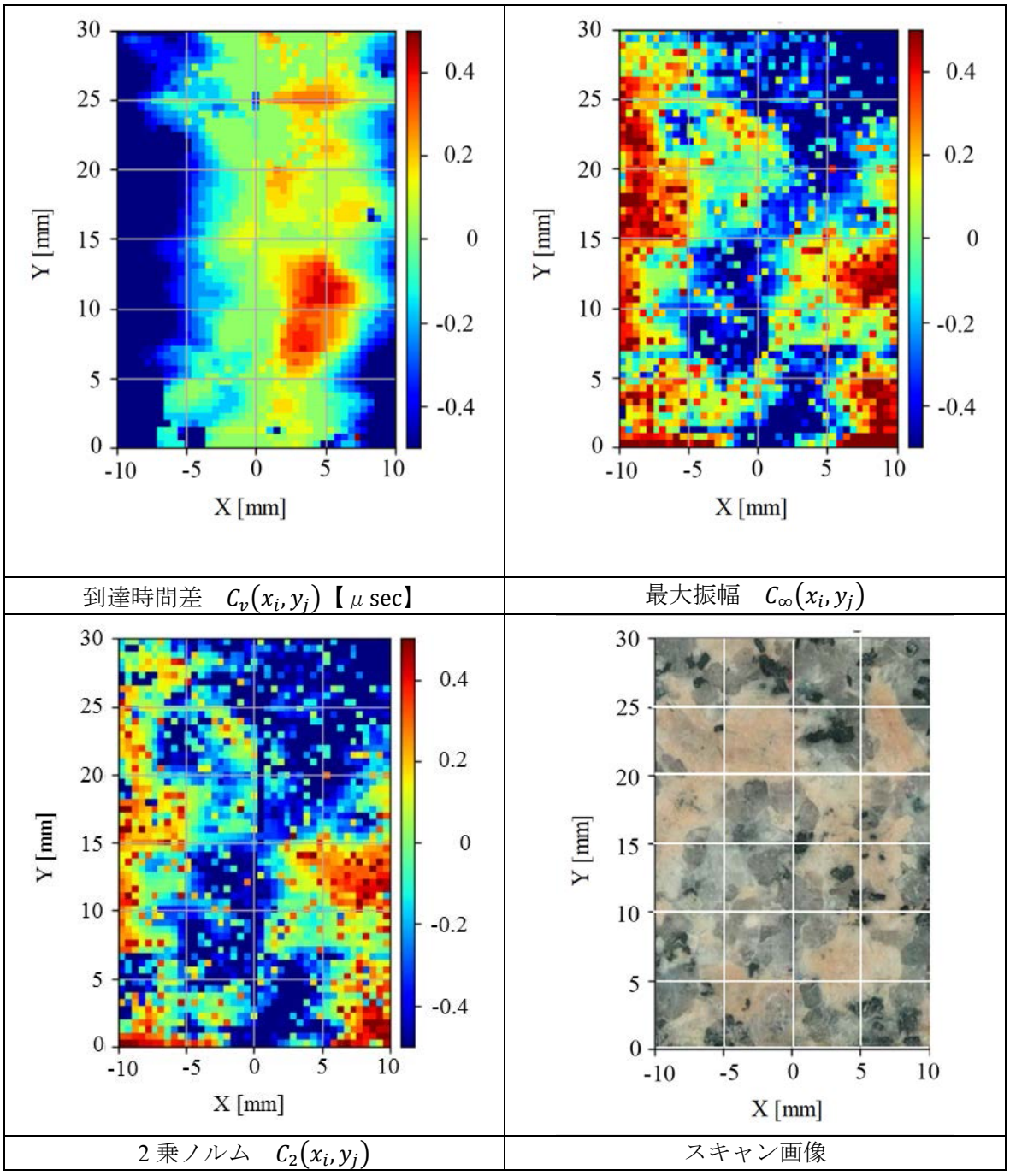
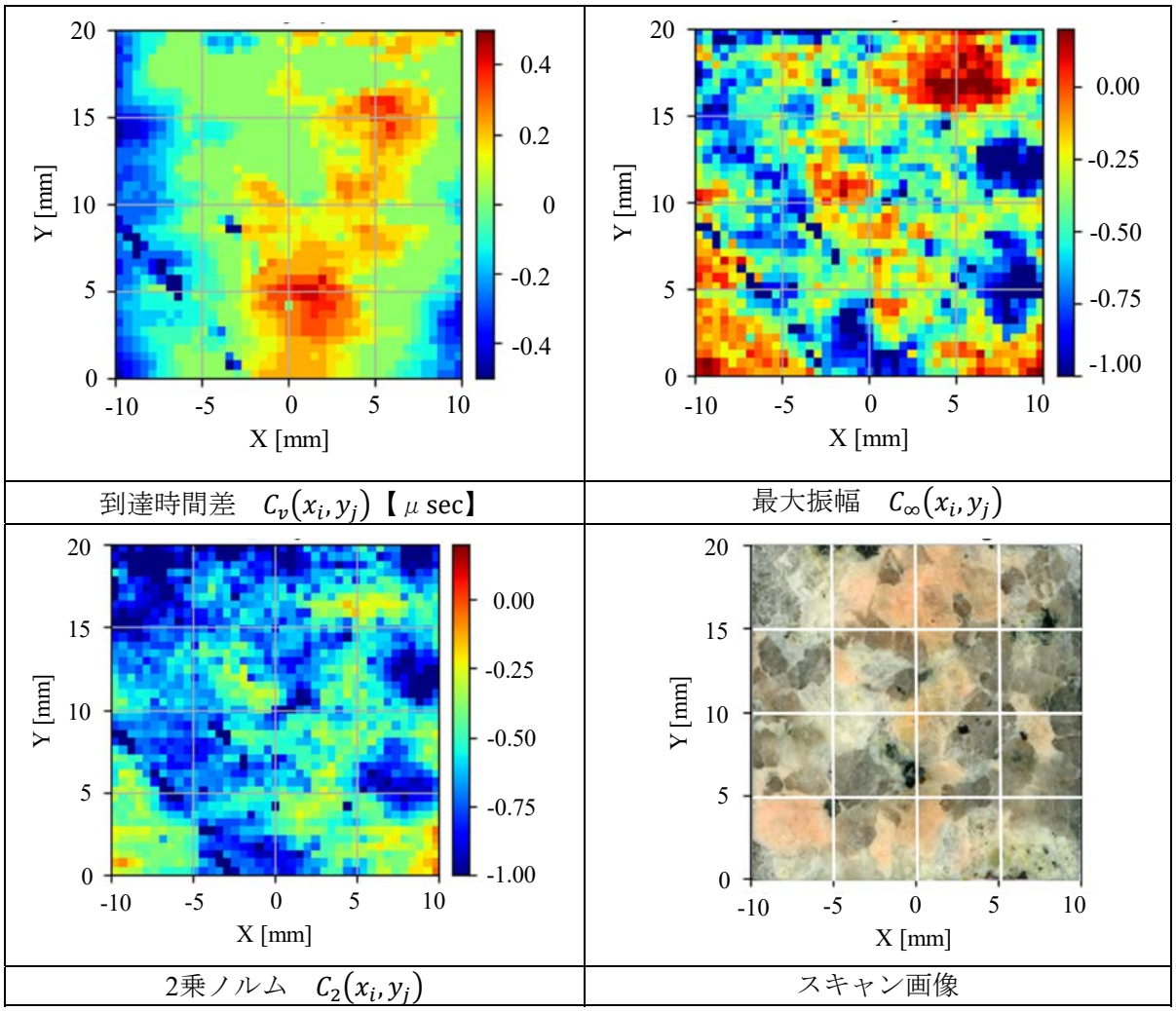
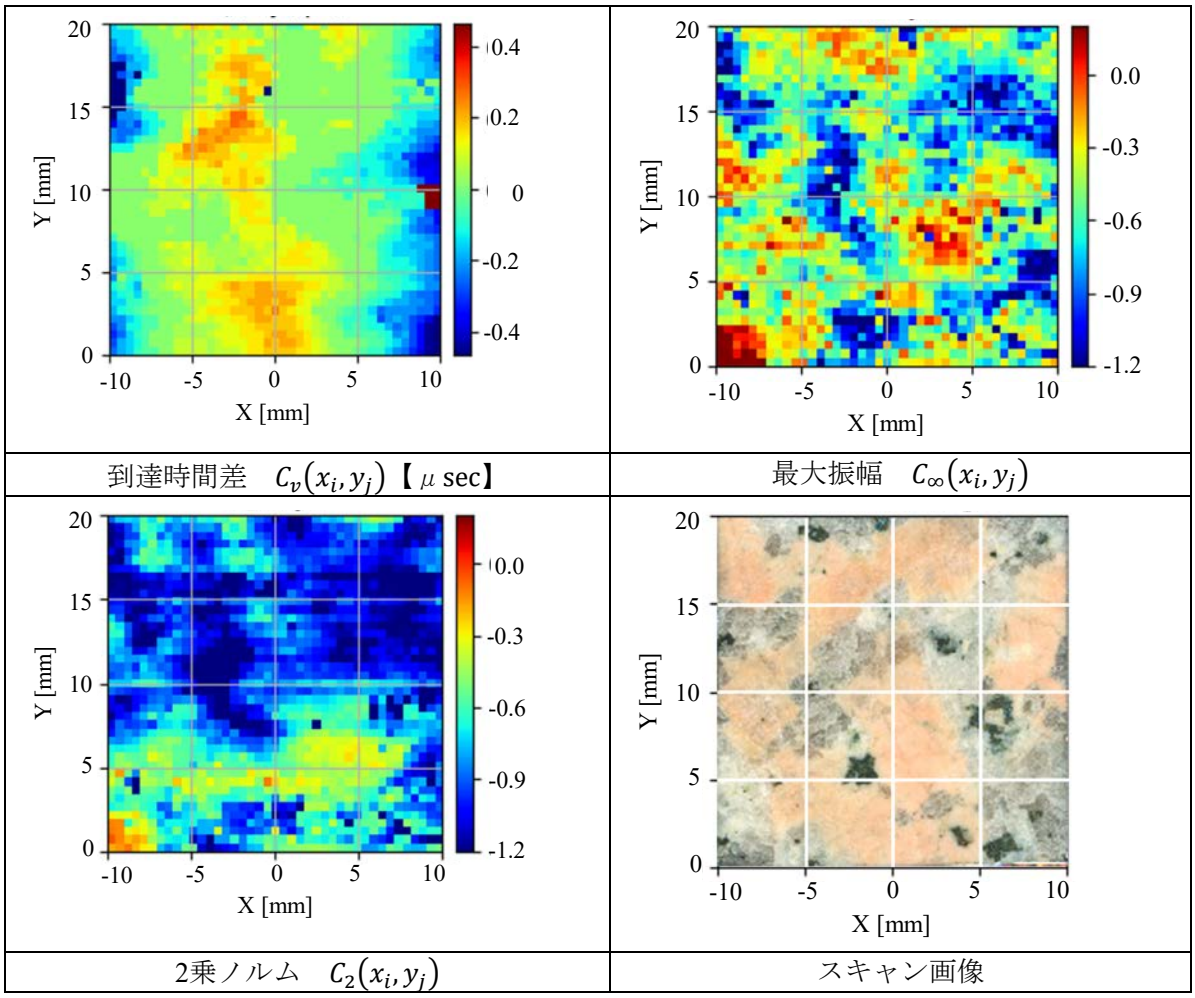


図 3.10　初動波群の到達時間と振幅に関する平均波形からの偏差指標 C_v, C_2, C_∞ と計測面に存在する鉱物粒の分布状況（花崗岩供試体 A）



到達時間差　$C_v(x_i, y_j)$【μ sec】	最大振幅　$C_\infty(x_i, y_j)$
2乗ノルム　$C_2(x_i, y_j)$	スキャン画像

図 3.11　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 C_v, C_2, C_∞ と計測面に存在する鉱物粒の分布状況（花崗岩供試体 B）



到達時間差　$C_v(x_i, y_j)$【μ sec】	最大振幅　$C_\infty(x_i, y_j)$
2乗ノルム　$C_2(x_i, y_j)$	スキャン画像

図 3.12　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 C_v, C_2, C_∞ と計測面に存在する鉱物粒の分布状況（花崗岩供試体 C）

表 3.1　稲田花崗岩の材料定数[3)]

材料定数	ヤング率(GPa)	ポアソン比
雲母	76.60	0.200
石英	87.50	0.109
長石	84.90	0.299

3.4 まとめ

2018 年度は、レーザードップラー振動計(LDV)を受信センサーとし、試料表面の超音波振動を 2 次元的に走査して弾性波伝播挙動を可視化する自動計測システムの構築を行った。ここで開発したシステムでは、指定された座標位置での弾性波計測を順次自動的に行い、数千波形規模のデータセットを数時間から半日程度の所要時間で取得することができるようになった。これは、計測点間隔を 0.5 mm とした場合、50 mm 角程度の正方形領域における波動伝播状況を可視化できることを意味する。

花崗岩は強い非均質のある多結晶質材料であるため、散乱波が発生直後の波形や指向性を保ったまま伝播することが期待できない。また、散乱源となる音響的性質の不均一性は至るところに存在することから、散乱波の発生や伝播状況に関する情報を得るには、散乱源のごく近傍で、詳細な計測を行う必要がある。花崗岩のような不均質材における波動伝播を十分な精度で再現できる理論モデルや数値解析モデルは、現時点では存在しないため、波動場の詳細を計測によって明らかにすることは、今後波動問題としての理論解析や数値解析を進める際にも、モデリング上の仮定の根拠や、モデルの精度評価を行うための情報を提供することができる。そのような計測は、超音波非破壊検査の分野で広く用いられる圧電トランスデューサでは難しく、本研究のように LDV を始めとするレーザー非接触計測が今のところ最も現実的な手法と言える。

2018 年度の研究における LDV による 2 次元自動スキャン計測結果から得られたデータの有用性に関して言えば、多数の波形を正確に計測できるようになり、伝播距離に応じた波動場の平均的動きを解析が可能となった。このことは同時に、局所的な波動場が平均的挙動からのどの程度乖離しているかを定量化できることを意味するため、本年度の研究では、各計測点での振幅と初動到達時間に関する偏差指標を定義し、実際に計測した波形データから評価を行った。その結果、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ことが明らかとなった。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、音響的に柔らかい介在物の存在すなわち、微小き裂が予想され、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、鉱物や微小き裂の分布状態との関連がより明確で、同時に音響的な不均質性を高いコントラストで再構成できる指標関数を考案することが重要な課題の一つとなり、そのような指標として、具体的には、局所的な弾性波速度を用いることが考えられる。過去の本研究では、試料全体での平均的な群速度を求め、試料間で比較を行うといった検討は実施したが、局所速度の評価と空間変動に関する検討は、十分な質と量の波形データ取得が困難であったため、これまで実施していない。局所速度を速度異方性と鉱物種との対応と併せて取得することで、試料の性状評価や、弾性波モデリングに有用な多くの知見を提供することができると考えられ、今回開発した LDV 計測システムはその効果的な手段になると期待される。

一方、計測手法に関する課題としては、送受信条件とセンサー仕様を最適化し、透過距離の影響を受けにくい形で試料の局所的応答を計測する方法を開発することが挙げられる。花崗岩は散乱減衰の強い材料であるため、計測結果は入射波、散乱波とも伝播距離に影響を受けやすい。特に、高周波数成分は散乱源のごく限られた範囲でしか観測できない。これまでの計測は、1 MHz 以上の周波数成分の挙動はほとんど調べることができていないが、高周波成分は試料の局所的な状態に対して敏感に反応すると予想されることから、その計測と特徴の理解は、花崗岩中の波動伝播挙動や不均質部との相互作用の理解を進める上で大きな貢献につながると考える。

参考文献

1)市川康明，木本和志，松井裕哉，桑原和道，尾崎裕介：結晶質岩を対象とした連成現象が長期挙動におよぼす影響に関する研究　2015 年度（委託研究），JAEA-Research 2016-018, 2016, 23p.

2)木本和志，市川康明，松井裕哉：結晶質岩を対象とした連成現象が長期挙動におよぼす影響に関する研究（共同研究），JAEA-Research 2017-009, 2017, 18p.

3)市川康明：長期岩盤挙動評価のための微視的観点による基礎的研究，JNC-TJ7400 99-005, 1999, p.41.

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度[a]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の）　1	1
比透磁率[b]	（数字の）　1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト[g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ s\ A$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ s\ A$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ s\ A$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（X 線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\ s\ A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

表５．SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 $hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	1 L=1 l=1 $dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	1 t=10^3 kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10^{-19}J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10^{-27}kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10^{11}m

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10^5Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	1 b=100fm^2=$(10^{-12}cm)^2$=$10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デシベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10^{-7} J
ダイン	dyn	1 dyn=10^{-5}N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm^{-2}=0.1Pa s
ストークス	St	1 St =$1cm^2\ s^{-1}$=$10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm^{-2}=10^4cd m^{-2}
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm^{-2} =10^4lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm s^{-2}=$10^{-2}ms^{-2}$
マクスウエル	Mx	1 Mx = 1G cm^2=10^{-8}Wb
ガウス	G	1 G =1Mx cm^{-2} =10^{-4}T
エルステッド[a]	Oe	1 Oe ≙ $(10^3/4\pi)$A m^{-1}

(a) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10^{10}Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10^{-4}C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10^{-2}Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10^{-2}Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10^{-9}T
フェルミ		1 フェルミ=1 fm=10^{-15}m
メートル系カラット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10^{-4}kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー），4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年）