

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)

Study on Effects of Coupled Phenomenon on Long-term Behavior
for Crystalline Rock
(Joint Research)

木本 和志 市川 康明 松井 裕哉

Kazushi KIMOTO, Yasuaki ICHIKAWA and Hiroya MATSUI

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 Decommissioning and Radioactive Waste Management

November 2017

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 (<http://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, 2017

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)

日本原子力研究開発機構 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

木本 和志*、市川 康明*、松井 裕哉

(2017 年 9 月 6 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、微視亀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と考えられる。

上記を踏まえ、微視的亀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。2016 年度は、既往の研究成果を踏まえ、円柱状の花崗岩コアサンプルを用い、速度異方性の有無を調べるための超音波計測を行った。超音波計測は、円筒の直径方向を透過する縦波、横波および表面波について行った。その結果、縦波に関しては、著しい速度異方性が認められること、横波および表面波には、方向による群速度の有意な変化は認められるものの、異方性のタイプが特定できるほどの明確な傾向は認められなかった。また、表面波計測の結果を、透過波と反射波成分に分離して検討を行った結果、結晶粒に起因した散乱は至る所で発生しているが、特に強い散乱波が局所的かつ限られた場所で発生することが分かった。マイクロクラック密度や配向性と群速度異方性や散乱強度の具体的な関連は、現段階では明らかでなく、この解明が、今後超音波によるマイクロクラック評価を行うための重要な課題と言える。

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

**Study on Effects of Coupled Phenomenon on Long-term Behavior for
Crystalline Rock
(Joint Research)**

Kazushi KIMOTO*, Yasuaki ICHIKAWA* and Hiroya MATSUI

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

(Received September 6, 2017)

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

In Fiscal Year 2016, several kinds of elastic wave velocity were measured using ultra sonic sensors and laser Doppler vibrometer to evaluate the anisotropy of different elastic wave in granite. The velocity measurements were carried out focused on transmitted wave and surface wave. The results showed that strong anisotropy was observed in transmitted P-wave velocity while weak anisotropy was observed in transmitted S-wave and group velocity estimated by surface velocity measurement. In addition, data obtained from surface velocity measurement was partitioned into transmitted and reflected waves and analyzed them in detail. It resulted that elastic wave due to mineral particles to compose granite was dispersed; however, significant dispersion was only observed at specific location.

For the future study, understanding of the relationship between density and anisotropy of micro cracks also anisotropy and strong dispersion of group velocity is important subject to estimate the geometrical distribution of micro cracks in granitic rock.

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

This work has been performed in Japan Atomic Energy Agency as a joint research with Okayama University.

* Okayama University

目 次

1. はじめに	1
2. 超音波計測実験	2
2.1 実験供試体	2
2.2 超音波センサー	3
2.3 送受信点の配置	5
2.4 計測システムの構成と計測条件	6
3. 実験結果と考察	7
3.1 縦波計測結果	7
3.2 横波計測結果	10
3.3 レーザー振動計による表面波計測結果	13
4. まとめと今後の課題	17
参考文献	18

Contents

1. Introduction of the collaboration study	1
2. Overview of measurements of several kinds of elastic waves	2
2.1 Core samples	2
2.2 Ultrasonic sensor	3
2.3 Arrangement of the measuring points	5
2.4 Measurement system and measurement conditions	6
3. Results and discussions	7
3.1 Longitudinal wave	7
3.2 Transverse wave	10
3.3 Surface wave	13
4. Summary and future subjects	17
References	18

図表リスト

図 2.1	花崗岩コアサンプル	2
図 2.2	実験に用いた接触型圧電探触子	3
図 2.3	レーザードップラー振動計 (LDV) の外観と仕様	4
図 2.4	計測点位置の配置 (T は送信子, R は受信素子を表す)	5
図 2.5	超音波計測システム全体の構成	6
図 3.1	透過法による縦波の計測結果 (試料 A) (振幅値の単位は V)	7
図 3.2	透過法による計測で得られた縦波の時間波形 ((a),(b)) と周波数スペクトル ((c),(d))	8
図 3.3	縦波透過波の群速度と透過方向の関係 (試料 A)	9
図 3.4	透過法による横波の計測結果 (試料 A) (振幅値の単位は V)	10
図 3.5	透過法による計測で得られた横波の時間波形 ((a),(b)) と周波数スペクトル ((c),(d))	11
図 3.6	横波透過波の群速度と透過方向の関係 (試料 A)	12
図 3.7	レーザ振動計により計測した表面波の時刻歴 (透過方向 $\theta=0^\circ$ 、試料 A)	14
図 3.8	レーザ振動計により計測した表面波の時刻歴 (透過方向 $\theta=90^\circ$ 、試料 A)	14
図 3.9	$\theta=0^\circ$ 方向に伝播する表面波の周波数と波数の関係 (試料 A)	15
図 3.10	表面波の群速度と周波数の関係 (試料 A)	16
図 3.11	表面波の群速度と周波数の関係 (試料 B)	16
表 2.1	接触型圧電超音波探触子の仕様	3

1. はじめに

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いる。高レベル放射性廃棄物の地層処分のための坑道においては、建設から操業を経て、埋め戻し後の数千年～数万年という長期の力学的安定性が要求される。岩石や岩盤の時間依存的性質を把握することは坑道の長期の力学的安定性を評価する上で重要な課題となる。このため、日本原子力研究開発機構と岡山大学では、長期岩盤挙動を予測し評価する手法を確立することを目標として、これまで、顕微鏡下において花崗岩供試体の応力緩和試験により微小亀裂（マイクロクラック）の進展を観察するとともに、この現象をモデル化・解析する手法の開発等を行ってきた^{1),2),3)}。また、長期岩盤挙動に影響を及ぼす因子として、力学のみならず化学にも着目し、水浸載荷下における鉱物の化学的変化の観察や、石英の圧力溶解現象の観察についてもモデル化・解析手法の開発を行ってきた^{4),5)}。これまでの研究により、応力緩和に伴う鉱物レベルにおけるマイクロクラックの観察に基づき、この現象を定式化することで、長期挙動を予測する手法が確立されつつある。一方で、長期挙動に影響を及ぼす因子として岩石中の地下水の化学的な反応が重要であることも明らかになり、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、この連成現象にも影響を及ぼすマイクロクラックの評価が課題として抽出された。

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することが可能である反面、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、検査結果の解釈は一般に簡単ではない。花崗岩をはじめとする結晶質岩では、結晶粒の異方性や、結晶界面の接合具合、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りうる。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していると考えられる。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出来れば、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性能評価にも有用な情報を提供することのできる新たな技術の開発につながると考え、花崗岩コアサンプルを用いた超音波計測と信号解析を行ってきた。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、高い信頼性を持って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有意な変化が現れること、超音波による微視的な性状推定への可能性があることを明らかとした⁶⁾。しかしながら、一連の変化が、マイクロクラックの特徴を反映したものであるか否かはいまだ明確に示されておらず、この点の解明が、超音波によるマイクロクラック非破壊評価の実現に向けた重要な課題として残されている。

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、応力場の影響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年度は、共同研究の初年度として、花崗岩コアサンプルにおける超音波の散乱源の精確な特定と、群速度異方性の評価を試みた。以下、実施した実験の概要と得られた結果及び知見を報告する。

2. 超音波計測実験

2.1 実験供試体

図 2.1 に、超音波計測実験に用いた二つの円柱花崗岩コア供試体を示す。これらの供試体は、いずれも岡山県岡山市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。これら鉱物の粒径は、数 mm から数十 mm 程度と比較的粗粒な花崗岩である。

二つの試料（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（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。

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、試料上面にアルミ箔を貼り付けた状態を示している。

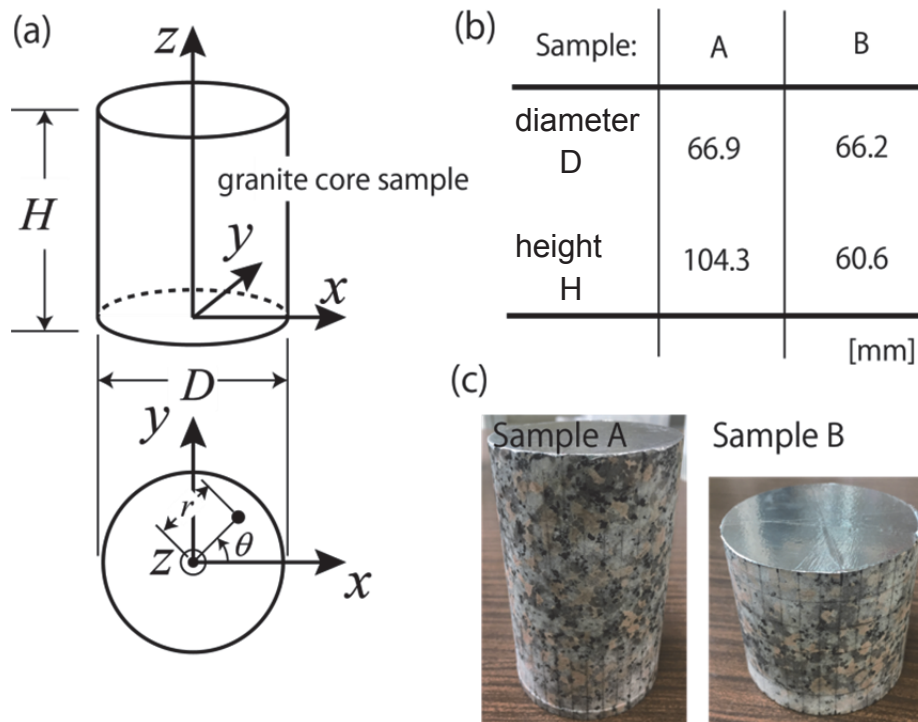


図 2.1 花崗岩コアサンプル

- (a) 計測点位置を参照するための座標系
- (b) サンプルのサイズ
- (c) 2つのコアサンプルの外観

2.2 超音波センサー

本研究では、供試体直径方向を透過する縦波（P 波）と横波（S 波）および、試験体上面に沿って伝播する表面波（R 波）を計測する。縦波、横波の計測は、接触型の圧電探触子（トランスデューサー）を用い、透過法によって行った。このために用いた探触子の外観を図 2.2 に示す。いずれの探触子も、非破壊検査に用いられる標準的なもので、その仕様は表 2.1 に示す通りである。

PZT Ultrasonic Transducers:

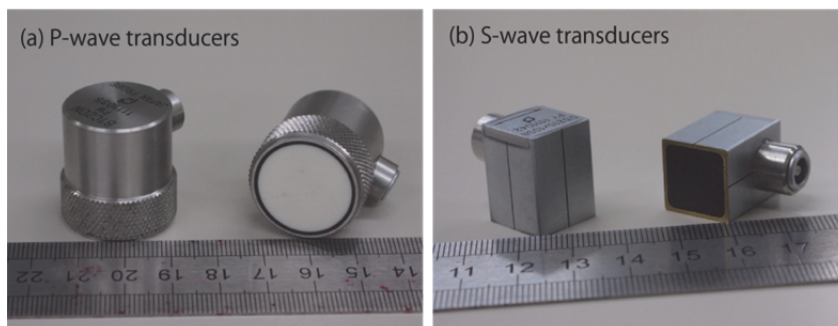


図 2.2 実験に用いた接触型圧電探触子
((a) 縦波垂直探触子、(b) 横波垂直探触子)

表 2.1 接触型圧電超音波探触子の仕様

モード	共振周波数	帯域幅	振動子形状	振動子サイズ	メーカー	型式
P波	1MHz	広帯域	円	φ20mm	ジャパン・プローブ	B1C20N
S波	0.5MHz	狭帯域	矩形	10 × 10mm ²	ジャパン・プローブ	Z10x10SH_N

一方、表面波の計測では、上述の圧電型横波探触子を送信に、受信にはレーザードップラー振動計（LDV）を用いた。ドップラー振動計の外観と仕様を図 2.3 に示す。

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-雑音比（S/N 比）で劣るものの、岩石試料に対する超音波計測を目的とした場合、計測可能な周波数帯域は 0.5Hz から 20MHz と、低周波側、高周波側とも十分な帯域を持つことが大きなメリットである。また、非接触計測であることから、試料あるいは LDV センサーヘッドをアクチュエータで移動させ、空間的に精確かつ密に計測を行うことで、弾性波の速度分散特性を実験的に調べることができる。



- ・ 形式 : Melectro V100 (電子技研工業)
- ・ レーザー光源 : He-He ガスレーザーCW (波長:632.8nm)
- ・ 速度レンジ : 2m/s/V
- ・ 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 (LDV) の外観と仕様

2.3 送受信点の配置

透過法による P、S 波計測、LDV による R 波計測のためのセンサー配置を図 2.4 に示す。この図は、T は送信子 (transmitter)、R は受信子 (receiver) を示している。図 2.4 (a) に示すように、P 波と S 波の計測では、送受信センサーを対向させ、円筒コアサンプルの直径方向を透過した超音波の計測を行った。透過方向 θ は、 10° 間隔で $0\sim 360^\circ$ まで変化させ、全周方向から計測を行っている。

一方、LDV による表面波計測では、送信用の圧電型横波探触子を供試体上面 ($z=H$) の縁に取り付けて鉛直動を励起する (図 2.4 (b) を参照)。LDV による計測位置 (x, y) は、供試体を 2 軸ステージで移動させることで調整し、供試体直径方向に 0.5mm 間隔で、 $r=-30\sim 30\text{mm}$ の範囲で振動速度の鉛直方向成分を計測した。なお、表面波の透過方向は $\theta=0, 30, 60, 90, 120$ および 150° の 6 方向について、サンプル A,B に対して計測を行った。

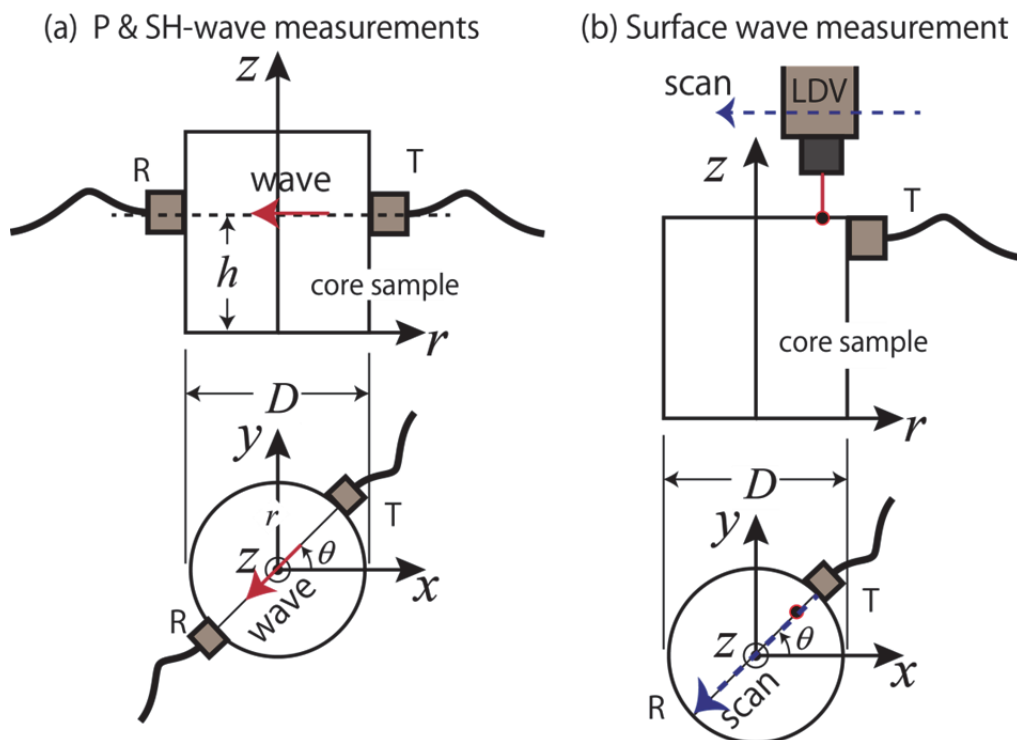


図 2.4 計測点位置の配置 (T は送信子, R は受信素子を表す)

(a) 圧電センサーによる縦波および横波の透過波計測

(b) レーザードップラー振動計を用いた表面波計測

2.4 計測システムの構成と計測条件

前節で述べた超音波計測に用いたシステムの構成を図 2.5 に示す。図 2.5 (a) は、測定系全体の様子を示したもので、左側に計測に用いるパルサーレシーバやオシロスコープが、右側には供試体とセンサーの設置状況が示されている。また、圧電探触子は、本実験のために作成した治具を用い、任意の高さと方向に取り付け可能となっており、図 2.5 (b) はその様子を示したものである。また、超音波計測は、以下の条件で行った。

(a) 圧電探触子による送受信条件

- 印加電圧：400V
- 印加電圧波形：1 μ s スクエアパルス
- サンプルング周波数：8MHz
- 計測時間範囲：250 μ s
- 平均化回数：2,048 回
- ゲイン：0dB

(b) レーザー振動計による計測の条件

- サンプルング周波数：10MHz
- 計測時間範囲：200 μ s
- 平均化回数：4,096 回
- ゲイン：0dB

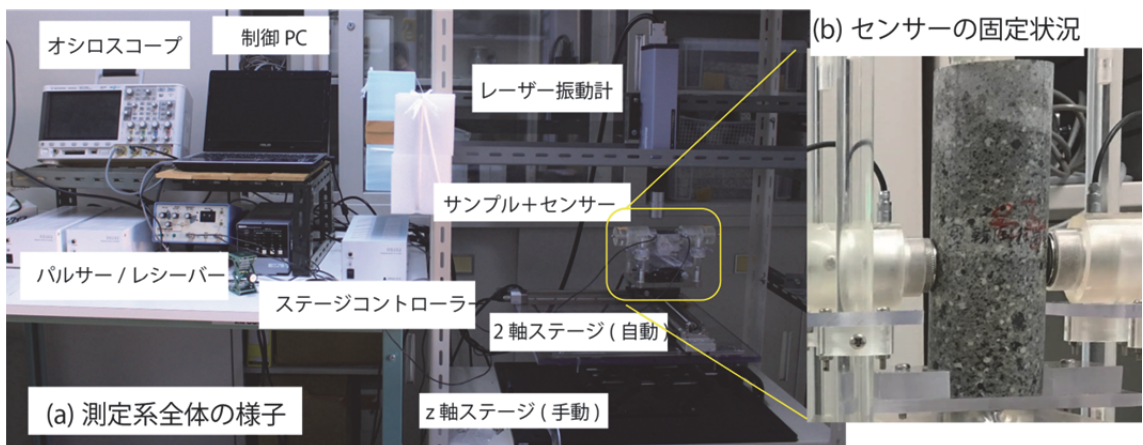


図 2.5 超音波計測システム全体の構成

3. 実験結果と考察

3.1 縦波計測結果

図 3.1 に、透過方向 θ を 10° ずつ変化させ、計 37 方向に対して取得した縦波波形を示す。この図は、試料 A による計測結果を、横軸を時間 (μs)、縦軸を θ (deg) として波形の振幅値 (V) をカラー表示したものである。以降、コア長が長く両端境界の影響がほぼ無視できる試料 A の結果を示すこととする。

同図から、縦波の到達時間は方向によって変化し、概ね 0° 、 180° 、 360° の方向で早く、それと直交する 90° 、 270° の方向で遅くなっていることがわかる。また、速い速度で透過する方向は振幅も大きく、遅い方向では減衰により振幅が比較的小さくなっている。一方、継続時間には明らかな差は見られない。

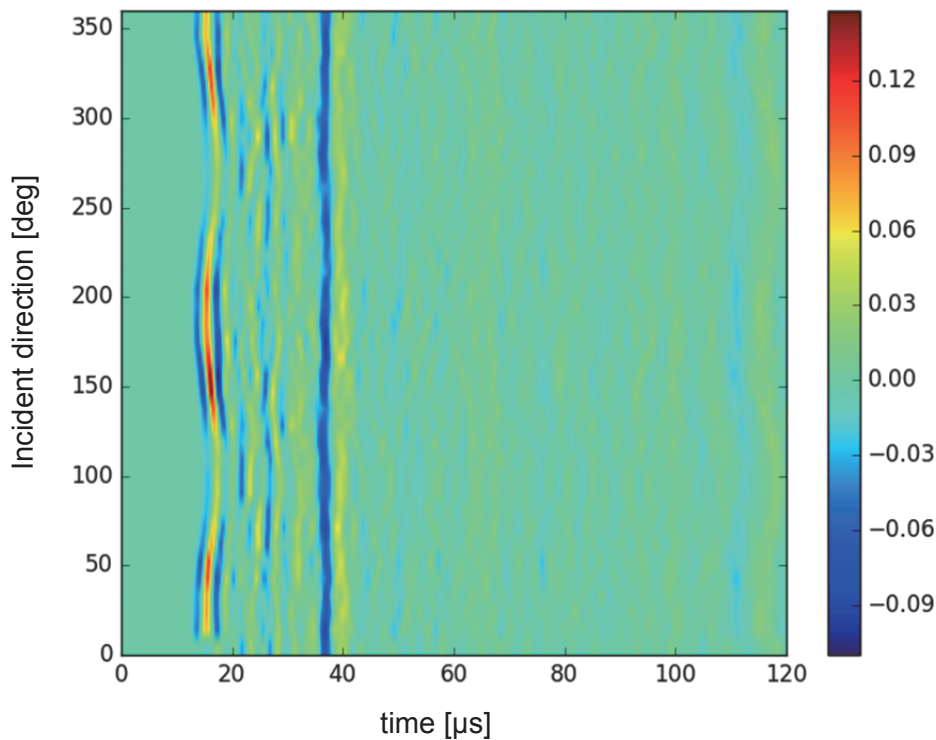


図 3.1 透過法による縦波の計測結果（試料 A）（振幅値の単位は V）

図 3.2 (a)、(b) に、 $\theta=100^\circ$ と 200° において得られた計測結果を、横軸を時間、縦軸を振幅とした時刻歴波形として示す。これらは、透過波振幅が小さい場合と大きい場合の典型的な波形であり、縦軸のスケールは互いに異なっている。いずれの波形も初めに大きな振幅の波群が観測され、その後、比較的小さな振動が観測時間全体に渡って継続している。 $\theta=100^\circ$ の場合は、初動部分の振幅が伝播途上に受けた散乱の結果、後続の波群の振幅値と同程度になっていることが確認される。なお、これらの波形の周波数成分に関しては、図 3.2 (c) および (d) に示したようであり、周波数帯域の点で方向による違いはほとんど認められない。

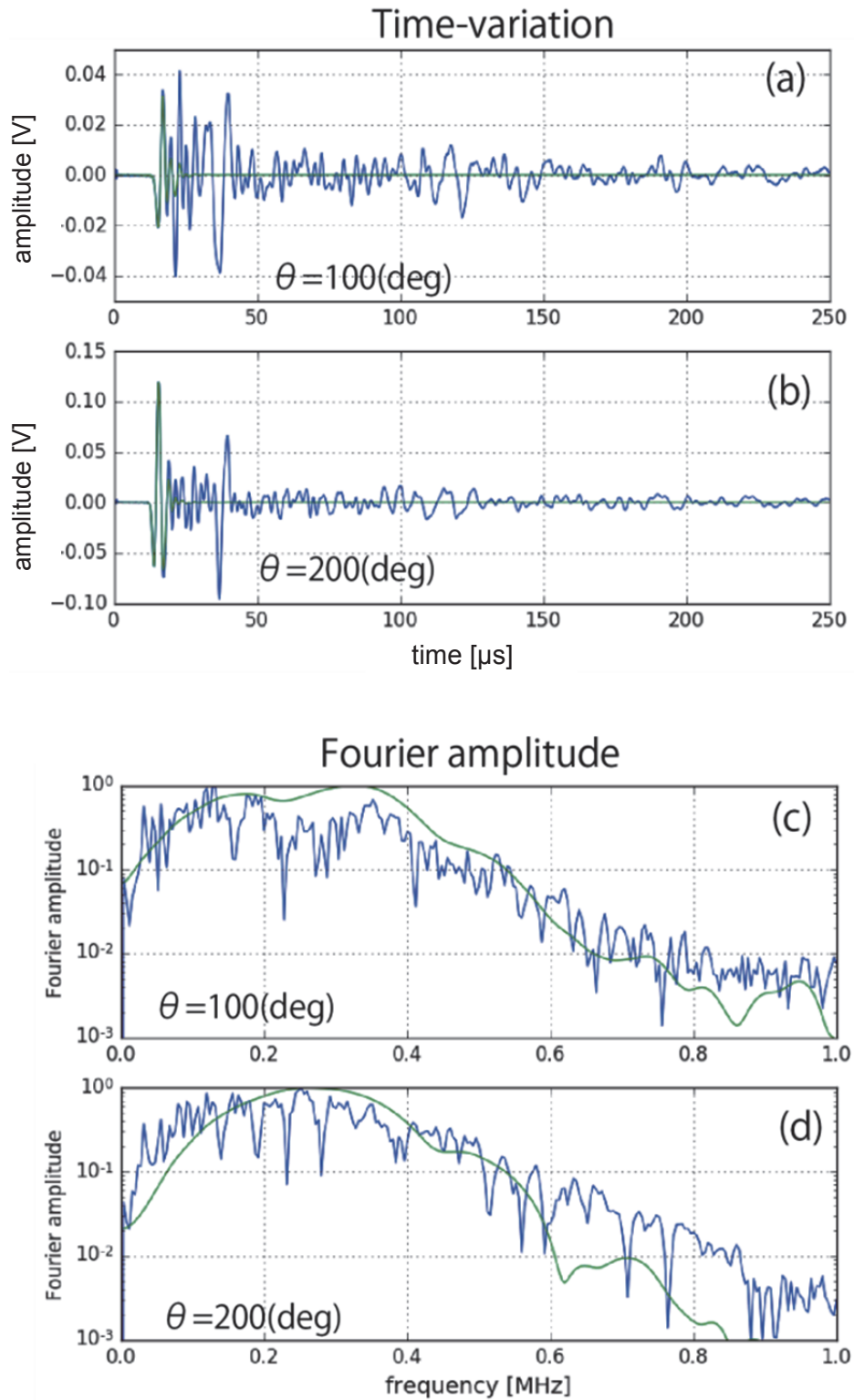


図 3.2 透過法による計測で得られた
縦波の時間波形 ((a), (b)) と周波数スペクトル ((c), (d))
((a) と (c) は透過方向が 100° 、(b) と (d) は 200° の場合。いずれも試料 A の計測結果)

計測で得られた波形データから群速度を得るために、波形の初動部分のみを取り出し、群遅延時間の計算を行った。初動部分の切り出しには **Butterworth window** を用いた。図 3.2 のグラフの緑の実線は、切り出された時刻歴波形とそのフーリエ振幅を示したものである。この方法によって得られた群速度と透過方向の関係を図 3.3 に示す。群遅延時間と群速度の計算は、参考文献 6) に示される方法で行った。群速度は、平均約 4.6km/s で、最大および最小が 4.9 と 4.3km/s 程度となっており、明らかな速度異方性を示している。また、速度値の最大、最小は 90° 毎に現れ、このことは、試料が弾性波に対して直交異方性体として応答していることを示唆している。

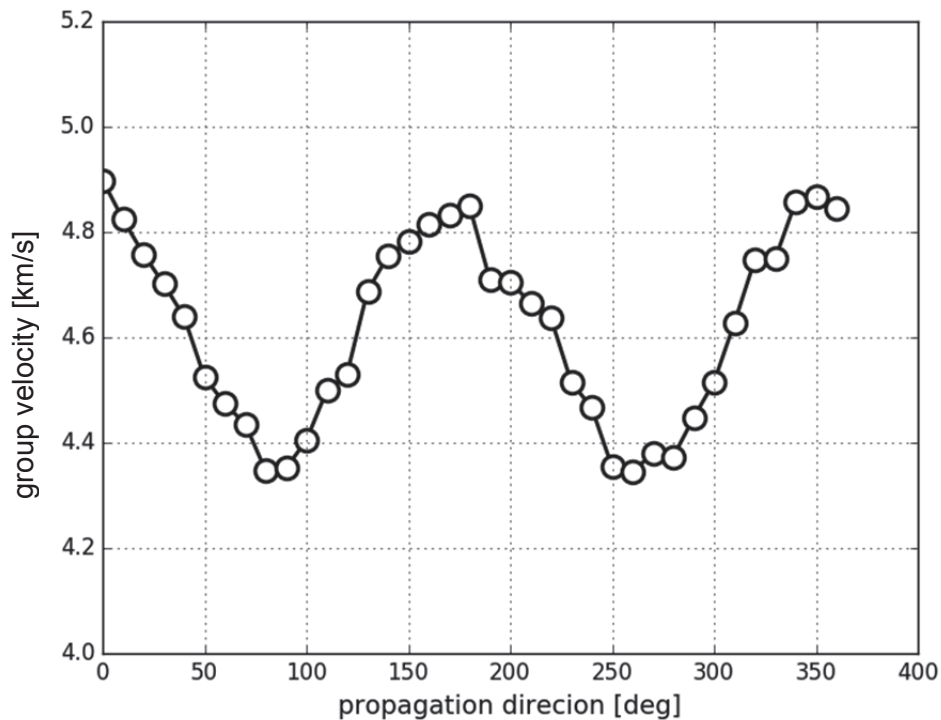


図 3.3 縦波透過波の群速度と透過方向の関係（試料 A）

3.2 横波計測結果

圧電探触子を用い、試料 A において計測した横波の全波形を図 3.4 に示す。図の横軸、縦軸は縦波の結果（図 3.1）と同じであり、速度波形の振幅値をカラー表示している点も同様である。ただし、図中のカラーバーに示される通り、振幅値のカラーコーディングは振幅値の範囲が縦波と異なることから同一ではない。横波の場合、到達時刻の方向依存性は若干認められるものの、縦波と比べ顕著でない。

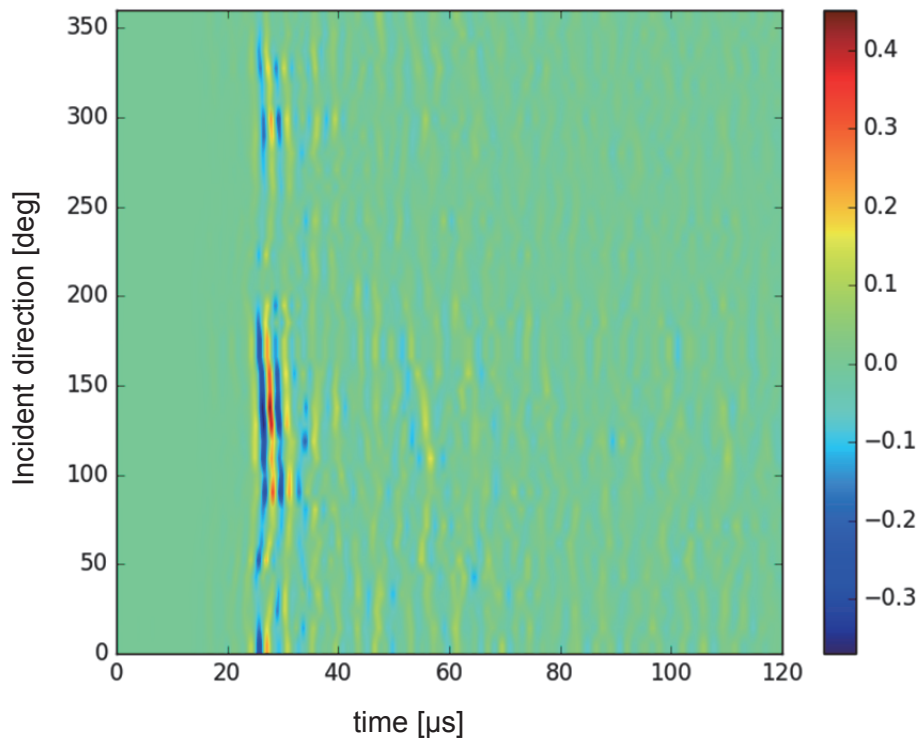


図 3.4 透過法による横波の計測結果（試料 A）（振幅値の単位は V）

一方で、図 3.5 (a)、(b) に、 $\theta=100^\circ$ と 200° 方向の時間波形、(c)、(d) に周波数スペクトルを示す。これらのグラフからも明らかなように、振幅値の透過方向による増減は大きく、 $\theta=100^\circ$ 方向の透過波振幅は、 200° 方向のそれと比べて $1/2$ 程度となっており、この差は、縦波の場合よりも明らかに大きい。散乱減衰によるものと考えられるが、透過速度の低下がほとんど見られないことや、速度が大きい方向で必ずしも透過波振幅が大きくなることもあり、原因については今のところ不明である。なお、図 3.5 において緑の実線で示した部分を Butterworth window によって取り出し、群遅延時間から群速度を求め、透過方向の関数として示すと図 3.6 のようになる。群遅延時間と群速度の計算は、前節同様、参考文献 6) に示される方法で行った。縦波について作成した同様の図（図 3.3）と比較すると、群速度について強い異方性は認められないことがわかる。

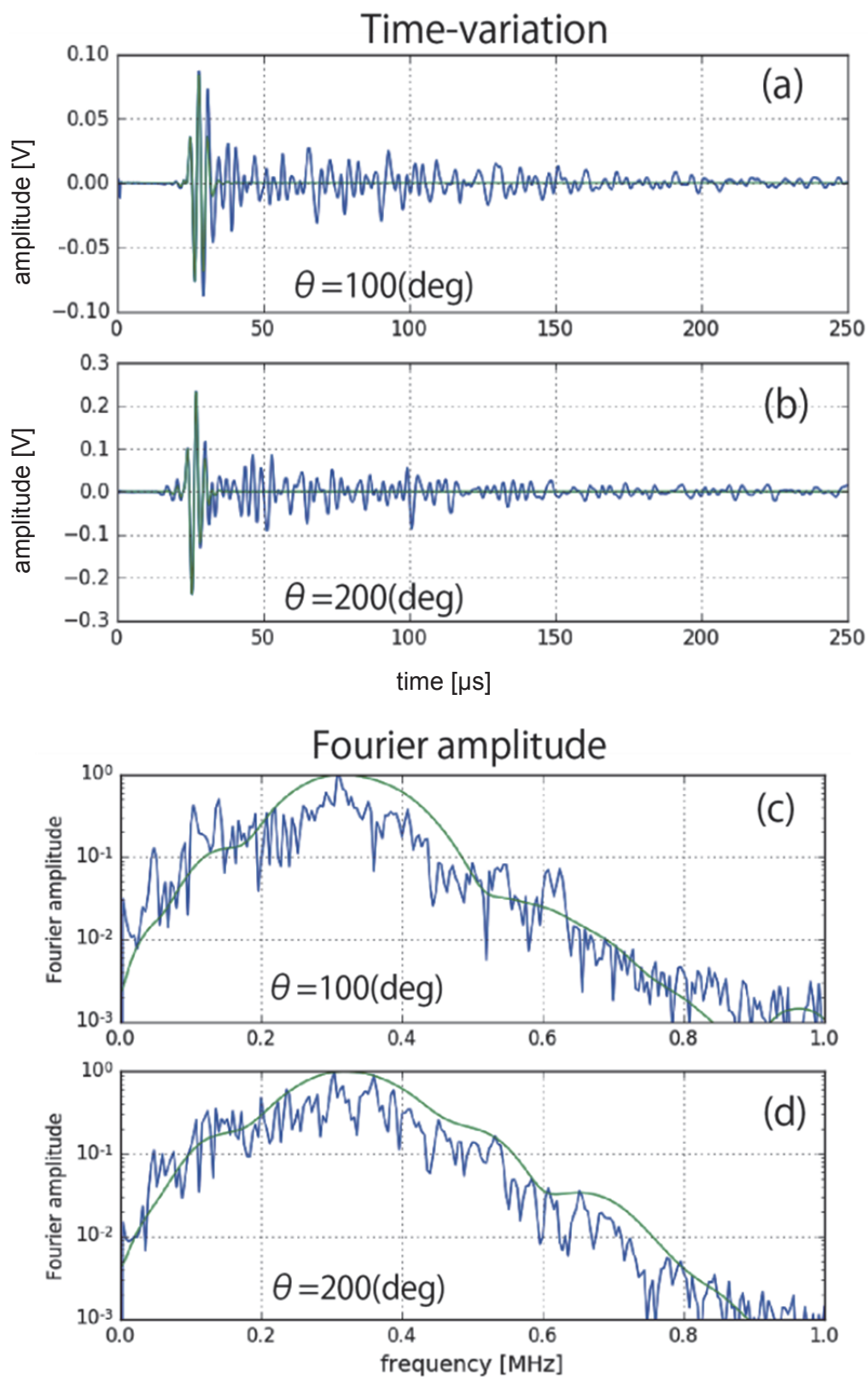


図 3.5 透過法による計測で得られた
横波の時間波形 ((a), (b)) と周波数スペクトル ((c), (d))
((a) と (c) は透過方向が $\theta = 100^\circ$ 、(b) と (d) は 200° の場合。いずれも試料 A の計測結果)

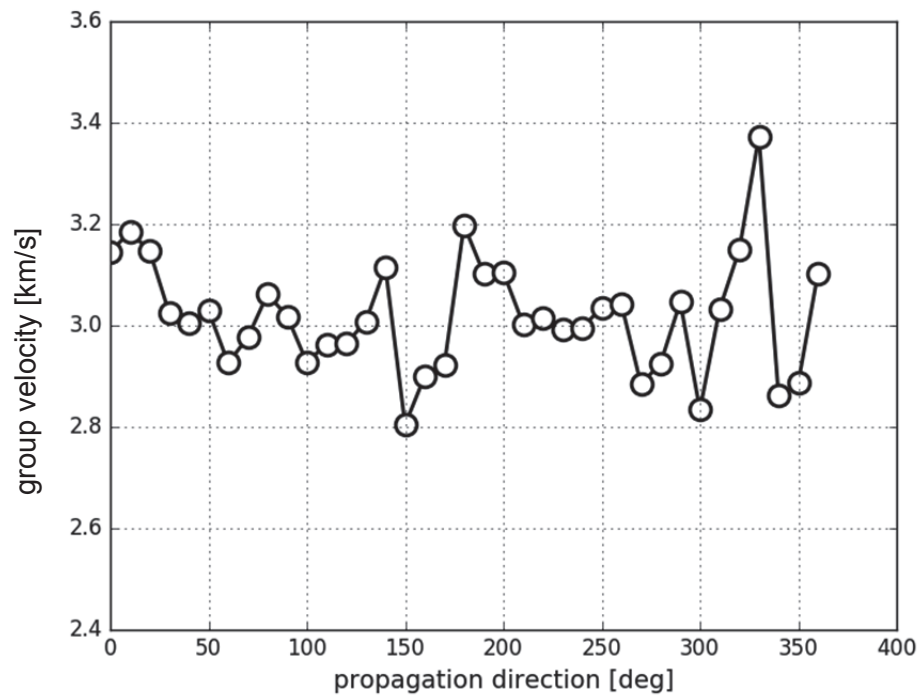


図 3.6 横波透過波の群速度と透過方向の関係（試料 A）

3.3 レーザー振動計による表面波計測結果

レーザードップラー振動計（LDV）による計測は、それぞれのサンプルについて、透過方向 $\theta=0^\circ$ から 150° まで、 30° の間隔で測線を取り、各測線において 0.5mm 間隔で速度波形を取得した。測定結果を図 3.7、図 3.8 に示すが、ここに、横軸は時間、縦軸は計測位置（動径距離 r ）を表し、 $r<0$ が入射点側、 $r=0$ が試料の中心点に相当する。

図 3.7 および図 3.8 の上段 (a) は、試料 A について、 $\theta=0^\circ$ と 90° の方向で得られた振動速度の時刻歴波形を示したものである。(b)、(c) については後述する。

これらの図に示されるように、コーダ波（主要動のあとに続く震動部分）の他には、ほぼ直線的な時間遅れを持って現れる表面波が観測されており、長方形の試料^⑥ではなく、円筒形の試料を用いても、伝播速度推定に必要な波形データが得られることが分かる。ただし、 $\theta=0^\circ$ の方向では、入射点付近では大きな速度振幅が得られているものの、図 3.7 (a) に示される時空間波形の乱れは、 $\theta=90^\circ$ の場合に比べて明らかに大きく、伝播途上で強い散乱を起こすことが示されている。

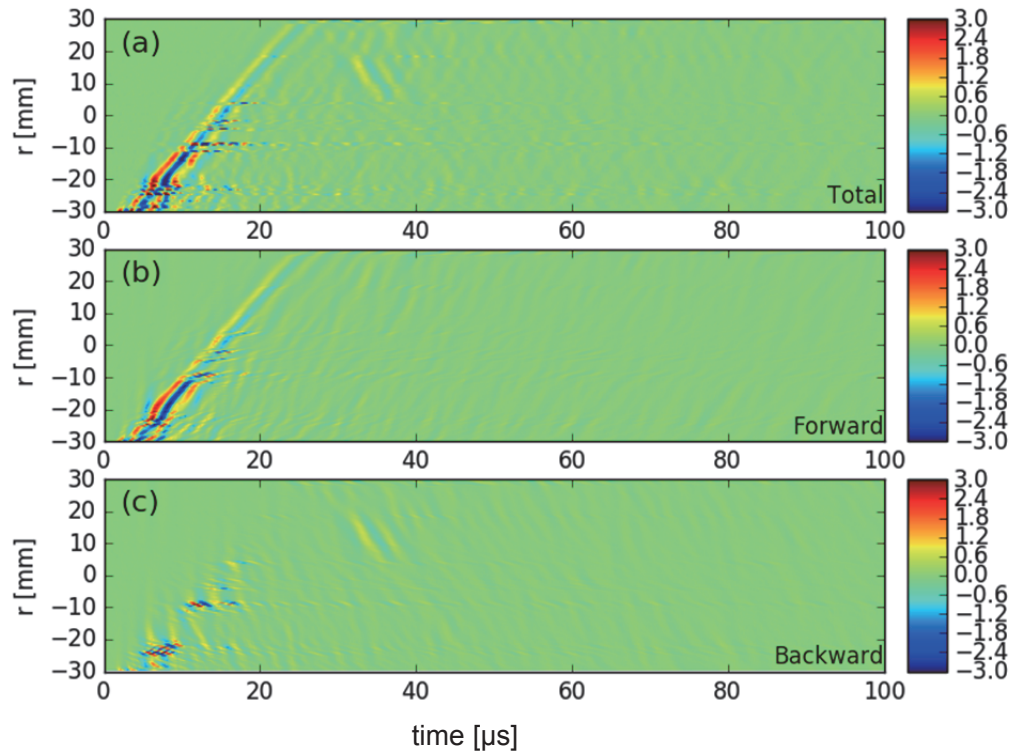


図 3.7 レーザー振動計により計測した表面波の時刻歴（透過方向 $\theta=0^\circ$ 、試料 A）
（横軸を時間、縦軸を計測位置の r 座標とし、振動速度（cm/s）を示す。）

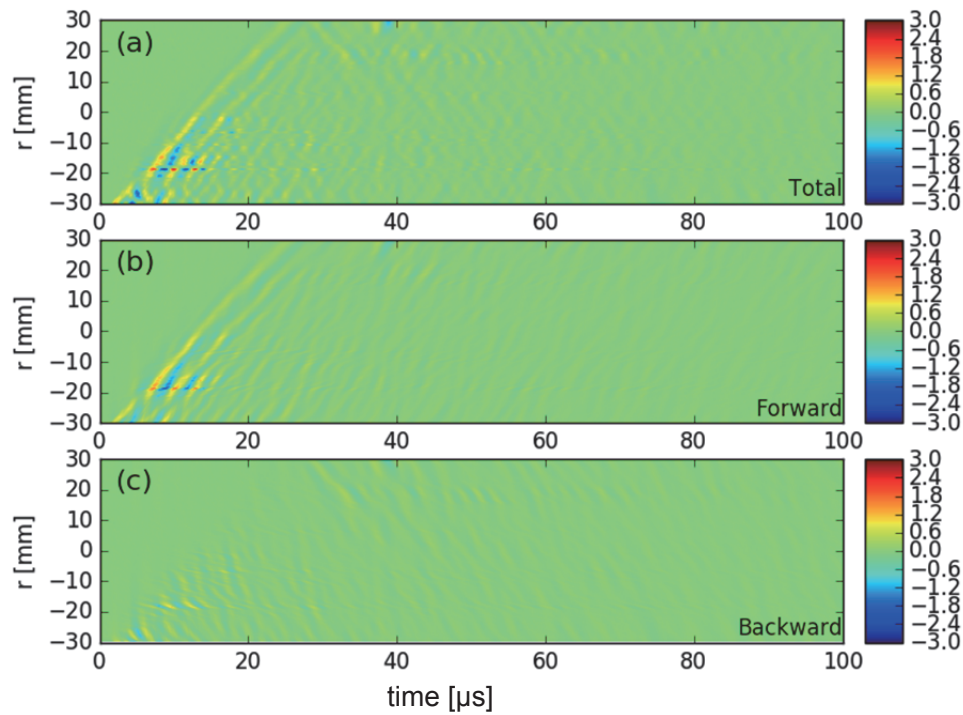


図 3.8 レーザー振動計により計測した表面波の時刻歴（透過方向 $\theta=90^\circ$ 、試料 A）
（横軸を時間、縦軸を計測位置の r 座標とし、振動速度（cm/s）を示す。）

同じ計測結果を、時間 t および空間変数 r についてフーリエ変換し、周波数-波数平面に 2 次元信号として表示すると図 3.9 のようになる。これより、LDV により計測された波形には、周波数がおよそ $0.1 \sim 0.6 \text{ MHz}$ 、波数（波長）が $0.05 \sim 0.2 [\text{mm}]$ （ $5 \sim 20 [\text{mm}]$ ）の成分が透過することが分かり、過去の計測結果や結晶粒系（最大 $10 \sim 20 \text{ mm}$ 程度）と比べても妥当な結果と言える。

波数-周波数スペクトル（図 3.9）を用いれば、 $r > 0$ 方向（入射方向）への進行波成分と、 $r < 0$ 方向（反射方向）への後方散乱波成分を分離することができる。具体的には、波数と周波数が異符号のスペクトル成分は前者を、同符号の成分は後者にあたる。よって、各々を個別に逆フーリエ変換すれば、入射および反射方向成分の時刻歴波形を得ることができる。図 3.7 と図 3.8 の (b) と (c) は、それぞれ、このようにして得られた入射と反射波成分を表示したものである。

ここで、反射波成分（図 3.7 (c) と図 3.8 (c)）についてみれば、強弱に変動はあるものの、反射波が至る所で発生していることが分かる。これは、結晶粒による不均質性を反映した結果である。一方、図 3.7 (b) では、局所的に強い散乱波が発生している場所（例えば、 $r = -10$ や -25 mm 付近）があることに気付く。また、このような強い散乱源を境に、透過波成分（図 3.7 (b)）が、段階的に振幅を低下させる様子も見て取ることができる。これは、散乱強度が周辺より高いことから、き裂や空洞状の欠陥の存在を示唆していると考えられる。

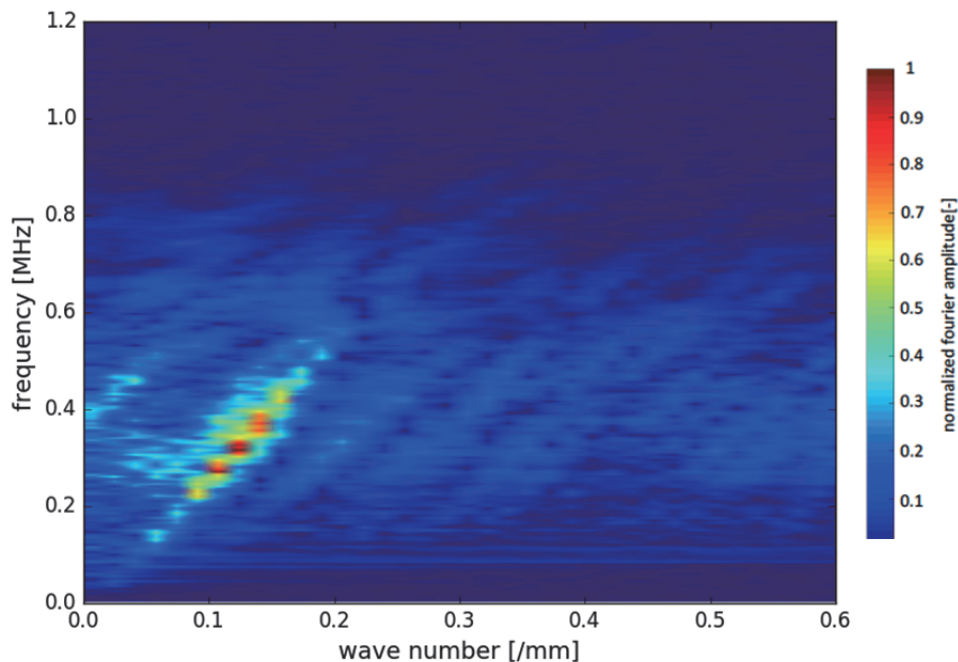


図 3.9 $\theta = 0^\circ$ 方向に伝播する表面波の周波数と波数の関係（試料 A）

最後に、LDV 計測結果から算出した群速度を周波数の関数として図 3.10 と図 3.11 に示す。これらは、 $-25 \leq r \leq 25$ の範囲で得られたデータから、入射方向への進行波成分を抽出し、その群遅延の空間勾配を周波数毎に計算することで得たものである。なお、表面波速度は、横波の速度よりも小さいことが知られているため、3.0km/s 以上の値となる周波数では、信号成分が小さく十分な精度で群速度が推定できていないことを意味する。この点を踏まえれば、表面波の群速度の伝播方向による変化は、試料 A で 2.7~3.0km/s 程度、試料 B では 2.6~2.9km/s 程度と言え、方向による群速度の変動は図 3.6 に示した透過した横波と同程度であることがわかる。また、表面波群速度の異方性（方向依存性）についても、横波同様、明確な傾向は見られない。

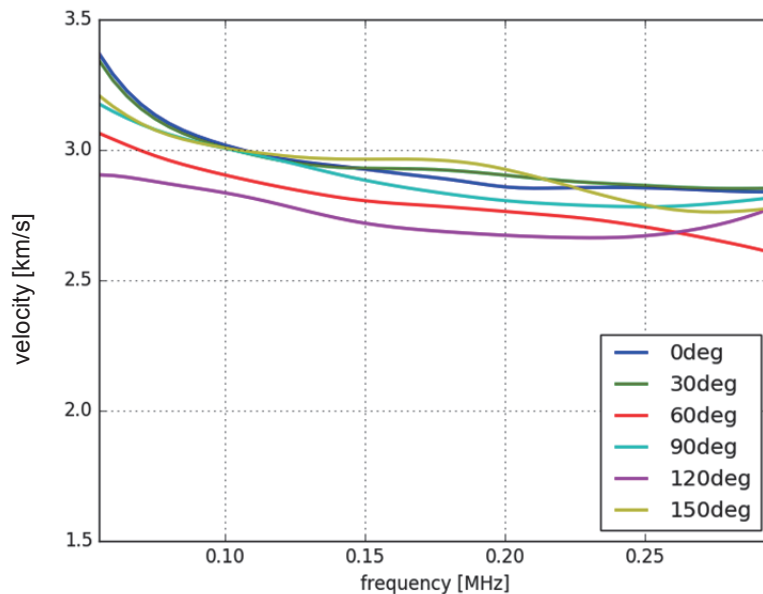


図 3.10 表面波の群速度と周波数の関係（試料 A）

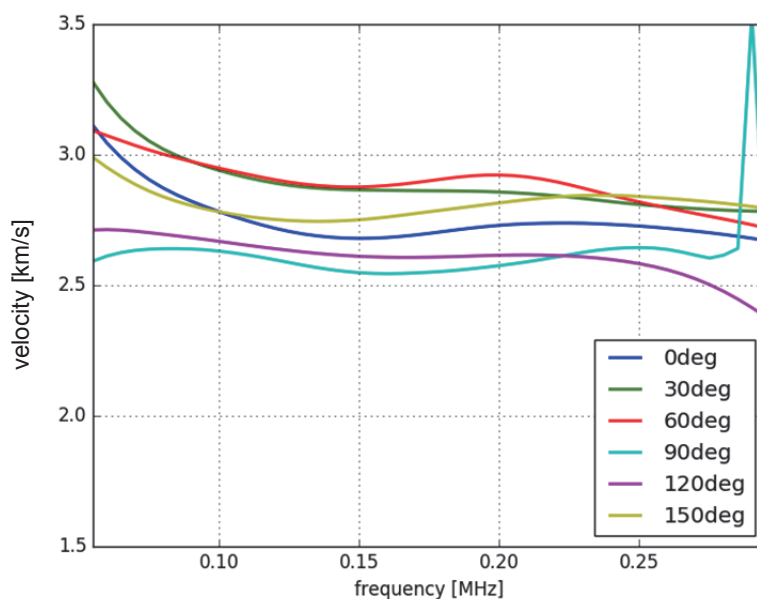


図 3.11 表面波の群速度と周波数の関係（試料 B）

4. まとめと今後の課題

円柱状の花崗岩コアサンプルを用い、速度異方性の有無を調べるための超音波計測を行った。超音波計測は、円筒の直径方向を透過する縦波、横波および表面波について行った。その結果、透過した縦波に関しては、花崗岩が一般的に有する直交異方性に起因すると思われる著しい速度異方性が認められることが明らかとなった。一方、透過した横波および表面波には方向による群速度の有意な変化が認められるものの、異方性のタイプが特定できるほどの明確な傾向は認められなかった。表面波計測の結果を、透過波と反射波成分に分離して検討を行った結果、結晶粒に起因した散乱は至る所で発生しているが、特に強い散乱は局所的かつ限られた場所で発生することが分かった。このことは、減衰や速度異方性への影響因子は、結晶粒とき裂・空洞状の欠陥の 2 種類があることを示唆し、今後、散乱波の放射パターンを調べ、散乱強度や指向性の影響を定量化することで、異なるタイプの不均質性（結晶粒とき裂）を非破壊的に評価することができると考えられる。

最後に、マイクロクラック密度や配向性と群速度異方性や散乱強度の具体的な関連は、現段階では明らかでなく、この解明が今後、超音波によるマイクロクラック評価を行うための重要な課題と言える。強い散乱波と弱い散乱波の成因を詳しく調べることは、この課題解決に向けた次の一歩になると考えられる。

参考文献

- 1) 市川康明, 瀬野康弘, 中間茂雄, 佐藤稔紀: “結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価のための理論的研究 (委託研究)”, JAEA-Research 2008-005, 2008, 60p.
- 2) 市川康明, 瀬野康弘, 平野享, 中間茂雄, 松井裕哉: “結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価のための理論的研究 (委託研究)”, JAEA-Research 2008-090, 2008, 52p.
- 3) 市川康明, 崔定海, 平野享, 松井裕哉: “結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価のための理論的研究 (委託研究)”, JAEA-Research 2009-027, 2009, 48p.
- 4) 市川康明, 崔定海, 丹野剛男, 平野享, 松井裕哉: “結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価のための理論的研究 (2009 年度) (委託研究)”, JAEA-Research 2011-007, 2011, 91p.
- 5) 市川康明, 丹野剛男, 引間亮一, 真田祐幸, 松井裕哉, 佐藤稔紀: “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 (2010 年度) (委託研究)”, JAEA-Research 2012-003, 2012, 34p.
- 6) 市川康明, 木本和志, 松井裕哉, 桑原和道, 尾崎祐介: “結晶質岩を対象とした連成現象が長期挙動に及ぼす影響 (2015 年度) (委託研究)”, JAEA-Research 2016-018, 2016, 23p.

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량	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	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	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)	°C		K
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	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
酸素活性化	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のみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。

(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
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎平方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ 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	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	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
	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 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm 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=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm 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。
ベレル	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	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 =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe Δ (10 ³ /4 π) 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「 Δ 」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=1 cGy=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	f	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	cal	1 cal=4.1858 J (「15℃」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

