



JAEA-Research

2016-018

DOI:10.11484/jaea-research-2016-018

**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)

Study on Effects of Coupled Phenomenon on Long-term Behavior
for Crystalline Rock (FY2015)
(Contract Research)

市川 康明 木本 和志 松井 裕哉 桑原 和道 尾崎 裕介
Yasuaki ICHIKAWA, Kazushi KIMOTO, Hiroya MATSUI, Kazumichi KUWABARA
and Yusuke OZAKI

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

December 2016

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, 2016

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）

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
市川 康明*、木本 和志*、松井 裕哉、桑原 和道*、尾崎 裕介

（2016年10月26日 受理）

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・操業時はもとより、坑道埋戻し後の数千年～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、長期的な挙動を把握することは処分坑道の力学的安定性評価における重要な課題となっている。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して抽出された。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については、長期岩盤挙動研究のかねてからの課題でもある。

2015年度は、周波数帯域を20MHzまで拡張したレーザドップラ振動計を用い、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。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された。ここで得られた結果は、将来的に花崗岩の粘弾性理論によるモデル化や、マイクロクラック非破壊評価のための評価値を与える際に有用な情報であると考えられる。本研究の知見を利用するためには、今後、群速度の変動と亀裂や結晶粒といった媒体の微視的な性状との対応を明らかにする必要がある。

本報告書は岡山大学が日本原子力研究開発機構との委託研究により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

※ 技術開発協力員

* 岡山大学

**Study on Effects of Coupled Phenomenon on Long-term Behavior for
Crystalline Rock (FY2015)
(Contract Research)**

Yasuaki ICHIKAWA*, Kazushi KIMOTO*,
Hiroya MATSUI, Kazumichi KUWABARA* and Yusuke OZAKI

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

(Received October 26, 2016)

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 the chemical reaction of groundwater in a rock had an influence on the long-term behavior. An evaluation of the microcracks to have an influence on rock mechanical and chemical coupled phenomena is the issue the past long-term behavior for rock study.

In fiscal year 2015, using a laser Doppler vibrometer that extends a frequency band up to 20 MHz, and measuring the surface wave transmitted through the granite specimens were estimated group velocity. As a result, group velocity until 100 kHz ~ 500 kHz, revealed that tends to decrease while vibrating. Estimation of the group velocity from the group delay, by using the spatially averaged waveform has improved estimated frequency band and reliability. For this reason, the estimation of the group velocity from the group delay has also been shown to be easier than estimated by the wave number - frequency spectrum. As a result obtained, in the case of the modeling by the viscoelastic theory of the granite and a microcrack nondestructiveness evaluation, it is thought that it is useful information in the future. In order to use the knowledge of this study, there is a need to clarify the correspondence between the microscopic properties of the medium such as a crack and crystal grain and the change of the group velocity.

Keywords: Long-term Behavior, Crystalline Rock, Microcrack, Group Velocity

This work was performed by the Okayama University under contract with Japan Atomic Energy Agency.

※ Collaborating Engineer

* Okayama University

目 次

| | |
|---|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 1.1 長期岩盤挙動研究のこれまでの経緯..... | 1 |
| 1.2 結晶質岩における超音波伝播挙動 | 1 |
| 1.3 昨年度までの研究 | 2 |
| 1.3.1 水浸法による漏えい性界面波 (leaky Rayleigh wave) の計測 | 2 |
| 1.3.2 レーザドップラ振動計による計測..... | 2 |
| 1.4 今年度の研究 | 2 |
| 2. 超音波計測方法 | 4 |
| 2.1 実験供試体..... | 4 |
| 2.1.1 不規則面をもつ花崗岩供試体..... | 5 |
| 2.1.2 角柱花崗岩供試体 | 5 |
| 2.2 計測装置の構成と計測条件..... | 5 |
| 2.3 送受信センサー..... | 6 |
| 3. 計測結果 | 8 |
| 3.1 不規則面をもつ花崗岩供試体 | 8 |
| 3.2 角柱花崗岩供試体 | 10 |
| 4. データ解析方法 | 14 |
| 4.1 フーリエ変換の定義 | 14 |
| 4.2 位相スペクトルと群遅延 | 15 |
| 4.3 波形解析例..... | 16 |
| 5. 平均波形を用いた群遅延と位相速度 | 19 |
| 6. まとめ | 23 |
| 参考文献 | 23 |

Contents

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 1.1 Past process of the long-term rock mass behavior study | 1 |
| 1.2 Ultrasonic wave spread behavior in the crystalline rock..... | 1 |
| 1.3 Study until last fiscal year | 2 |
| 1.3.1 Measurement of the leaky Rayleigh wave by the water immersion method | 2 |
| 1.3.2 Measured by a laser Doppler vibrometer..... | 2 |
| 1.4 Study of this fiscal year | 2 |
| 2. Ultrasonic measurement method..... | 4 |
| 2.1 Test specimens | 4 |
| 2.1.1 Granite pieces with an irregular shaped surface | 5 |
| 2.1.2 Rectangular column granite specimen..... | 5 |
| 2.2 Constitution and condition of the measurement system | 5 |
| 2.3 Transmission and reception sensor | 6 |
| 3. Measurement result | 8 |
| 3.1 Granite pieces with an irregular shaped surface..... | 8 |
| 3.2 Rectangular column granite specimen | 10 |
| 4. Data analysis method..... | 14 |
| 4.1 Definition of the Fourier transform..... | 14 |
| 4.2 Phase spectrum and group delay..... | 15 |
| 4.3 Waveform analysis example | 16 |
| 5. Group delay and phase velocity using the average waveform | 19 |
| 6. Summary | 23 |
| References..... | 23 |

図リスト

| | | |
|-------|--|----|
| 図 2.1 | 不規則面をもつ花崗岩供試体..... | 4 |
| 図 2.2 | 角柱花崗岩供試体 | 4 |
| 図 2.3 | 超音波計測システムの構成 | 5 |
| 図 2.4 | 計測点の配置（不規則面をもつ花崗岩供試体の場合） | 6 |
| 図 2.5 | 計測点の配置（角柱花崗岩供試体の場合） | 7 |
| 図 3.1 | 計測した速度波形（不規則面つき供試体） | 8 |
| 図 3.2 | 計測した速度時刻歴波形（左）とそのフーリエ振幅および位相（右）（不規則面つき供試体） | 9 |
| 図 3.3 | 計測された全速度波形データのフーリエ振幅（不規則面つき供試体） | 10 |
| 図 3.4 | 計測した速度波形（角柱供試体） | 11 |
| 図 3.5 | 計測した速度時刻歴波形（左）とそのフーリエ振幅および位相（右）（角柱供試体） | 12 |
| 図 3.6 | 計測された全速度波形データのフーリエ振幅（角柱供試体） | 13 |
| 図 4.1 | 窓関数で初動部分を取り出した速度時刻歴波形（左）とそのフーリエ振幅および位相（右）（不規則面つき供試体） | 16 |
| 図 4.2 | 速度波形の波数-周波数スペクトル（不規則面つき供試体） | 17 |
| 図 4.3 | 群速度の周波数依存性（不規則面つき供試体） | 18 |
| 図 5.1 | 平均化した初動部近傍に窓関数を作用させた速度時刻歴波形（左）とそのフーリエ振幅および位相（右）（不規則面つき供試体） | 20 |
| 図 5.2 | 平均化した速度波形（不規則面つき供試体） | 21 |
| 図 5.3 | 平均化の後、窓関数を用いて初動部分を取り出した速度波形のフーリエ振幅（不規則面つき供試体） | 21 |
| 図 5.4 | 平均化した速度波形の波数-周波数スペクトル（不規則面つき供試体） | 22 |
| 図 5.5 | 平均化した速度波形から得られた群速度の周波数依存性（不規則面つき供試体） | 22 |

This is a blank page.

1. はじめに

1.1 長期岩盤挙動研究のこれまでの経緯

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变化の観察や、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が課題として抽出された。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については、長期岩盤挙動研究のかねてからの課題でもある。

1.2 結晶質岩における超音波伝播挙動

結晶質岩の長期的な力学挙動を予想するためには、対象とする岩の初期損傷状態や不均質性を正確に評価しておく必要がある。そのための簡便な方法として、超音波をはじめとする弾性波の利用が考えられる。固体中を伝播する弾性波は、亀裂などの損傷や結晶粒界の接合状態、結晶粒の弾性的性質に影響を受けることから、弾性波計測データには固体内部状態の情報が含まれる。しかしながら、花崗岩のような結晶質岩では、造岩鉱物の結晶サイズや方向、粒界面の状態やマイクロクラックといった各種不均質性とそのばらつきのため、弾性波の伝播挙動は非常に複雑になる。その結果、計測波形から有用な情報を抽出することは簡単でなく、計測波形の持つ特徴量を媒体の微視的構造と関連付ける方法は明らかでない。

本研究は、結晶質岩の損傷状態を非破壊的に評価する方法の構築に向け、多結晶不均質媒体中の超音波伝播のモデル化について基礎的な検討を行ったものである。具体的には、代表的な結晶質岩である花崗岩サンプルを用いて超音波計測を行い、超音波の伝播挙動である、表面波の群速度とその周波数依存性を調べた。その結果、花崗岩サンプルを透過可能な超音波の周波数帯について明らかにした。群速度の周波数依存性は、媒体を粘弾性理論に基づきモデル化するための基本的な物性を与えるために必要となる、有用なパラメータであるため、本研究の成果は将来的に、結晶質岩の粘弾性モデリングの定量性や信頼性を向上させることにも貢献しうると考えられる。

1.3 昨年度までの研究

昨年度までの研究では、花崗岩を透過する超音波伝播のモデル化を行う基本的な方針を見出すために、各種弾性波モード（縦波、横波、表面波）の位相速度や分散性、減衰、透過可能周波数帯域を調べるとともに、数値シミュレーション手法についても検討を行ってきた^{6),7),8)}。特に、昨年度行った実験的な検討は以下の通りである。

1.3.1 水浸法による漏えい性界面波（leaky Rayleigh wave）の計測

準非接触計測によりセンサーと試験体の安定したカップリングが可能な水浸法により、漏えい性界面波に励起されて水中に放射される、ヘッドウェーブの計測を行った。計測されるヘッドウェーブには、結晶粒による多重散乱効果が空間的に平均化された形で反映される。そのため、試料表面の応答を直接観察できない。また、送信点から観測点に到達する波動には、水中のみを伝わり試験片を経由せず、直接受信センサーに伝わるものが、大きな振幅を持って観測される。その結果、興味の対象となる波動と混在すること、その分離にも手間が必要となる。さらに、受信に用いるニードルハイドロフォンの指向性により、計測位置毎に受信感度が異なる可能性が排除できないことが大きな問題として残る。また、現有のハイドロフォンでは、100kHz 周辺の帯域が有効受信帯域でカバーされていないため、振幅だけでなく位相成分にもセンサーの特性が混入する可能性がある。以上のことから、水浸法のための計測では、供試体中の超音波挙動の実態を解明するためには十分でない。

1.3.2 レーザドップラ振動計による計測

以上のことを踏まえ、昨年度は、レーザドップラ振動計を用いた、花崗岩試料表面振動の直接観測にも着手した⁸⁾。この方法は、空間的に高い分解能で、完全非接触で計測が可能であるという利点がある。また、計測波形の振幅を速度に換算できるため、変形量や変位レベルの推定にも利用可能であり、さらに、計測可能な周波数帯域は、0.5Hz から 300kHz で、低周波側には実質的に制限がなく、高減衰材、低周波超音波計測に適している。

しかしながら、S/N 比が低くノイズの影響を受けやすいこと、試料表面の状態に影響を受けやすいこと、通常、振動面に垂直な速度成分のみが計測可能といった点が欠点といえる。昨年度は、レーザドップラ振動計による計測の結果より、表面波の群速度を得ることが可能であることを示した。一方で、計測結果の再現性、サンプルによる個体差の程度、高周波側の透過可能周波数の上限を調べるものが課題として残された。

1.4 今年度の研究

今年度は、レーザドップラ振動計の周波数帯域上限を 20MHz に拡張し、透過波解析に十分な帯域を確保した上で、昨年同様、表面波の計測と群速度推定を行った。また、昨年度の研究でも使用した花崗岩供試体に加え、不規則形状をした表面を有する花崗岩試験片を新たに用意し、試験片形状や大きさをはじめとする、サンプル間の個体差の現れ方をみるようにした。さらに、媒体の局所的不均質性に起因する群速度推定値の変動を抑えるために、複数の観測ラインをレーザドップラ振動計でスキャンして得た波形を平均化し、コヒーレントな

透過表面波成分を取り出して解析を行った。その結果、群速度は周波数に対して低減傾向にあること、100～500kHz程度の周波数において群速度推定が可能であることが示された。ここで得られた結果は、将来的に花崗岩の粘弾性理論によるモデル化や、マイクロクラック非破壊評価のための評価値を与える際に有用な情報であると考えられる。

2. 超音波計測方法

2.1 実験供試体

実験には次の2種類の花崗岩供試体を用いた。各々の供試体の外観は、図2.1、図2.2に示す通りである。なお、二つの供試体はいずれも同一の石切り場で採取した、万成花崗岩である。

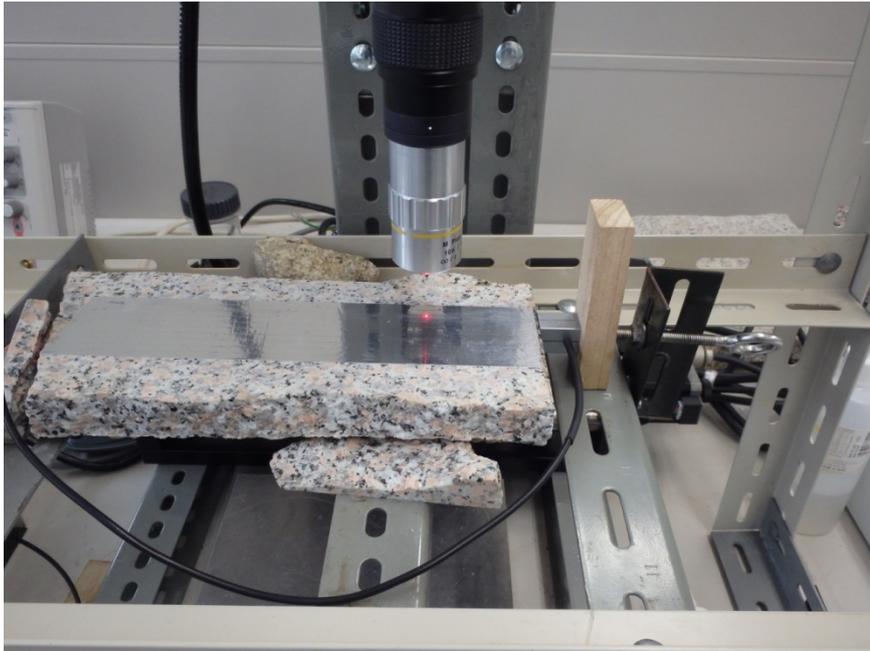
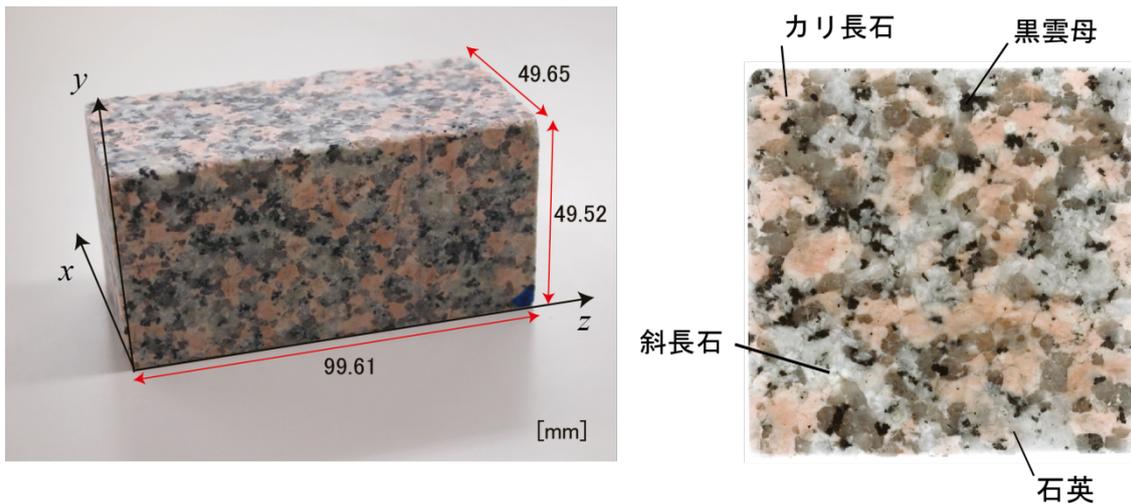


図 2.1 不規則面をもつ花崗岩供試体



(a) 供試体寸法

(b) 主要構成鉱物

図 2.2 角柱花崗岩供試体

2.1.1 不規則面をもつ花崗岩供試体

実験には、送信超音波センサーの設置面と、表面波計測を行う 2 面は機械加工により平滑化された、板状の花崗岩供試体を用意した。これら以外の面は採石されたままの状態、結晶粒サイズ程度の凹凸を持つ不規則な形状をした面となっている。不規則形状面では、超音波は散乱により振幅が大きく低下する。そのため、底面や側面を経由して観測点に至る波の振幅が低減され、周辺境界からの反射波により計測対象の表面波の波形が受ける影響を小さくすることができる。以上の理由により、本年度、不規則面をもつ花崗岩供試体（または「不規則面つき供試体」と記す）を用いた。

2.1.2 角柱花崗岩供試体

もう一方の供試体は、一辺が約 50mm の正方形断面である、高さ 100mm の小型の角柱花崗岩供試体（または単に「角柱供試体」と記す）である。これは、昨年度を含めこれまで継続的に実験に用いてきたものである。この供試体は 6 面すべてが機械加工により平滑化されているため、透過距離や観測面、伝播方向を変えた波形計測を一体の試験体で行うことができる。

2.2 計測装置の構成と計測条件

計測装置の構成を図 2.3 に示す。

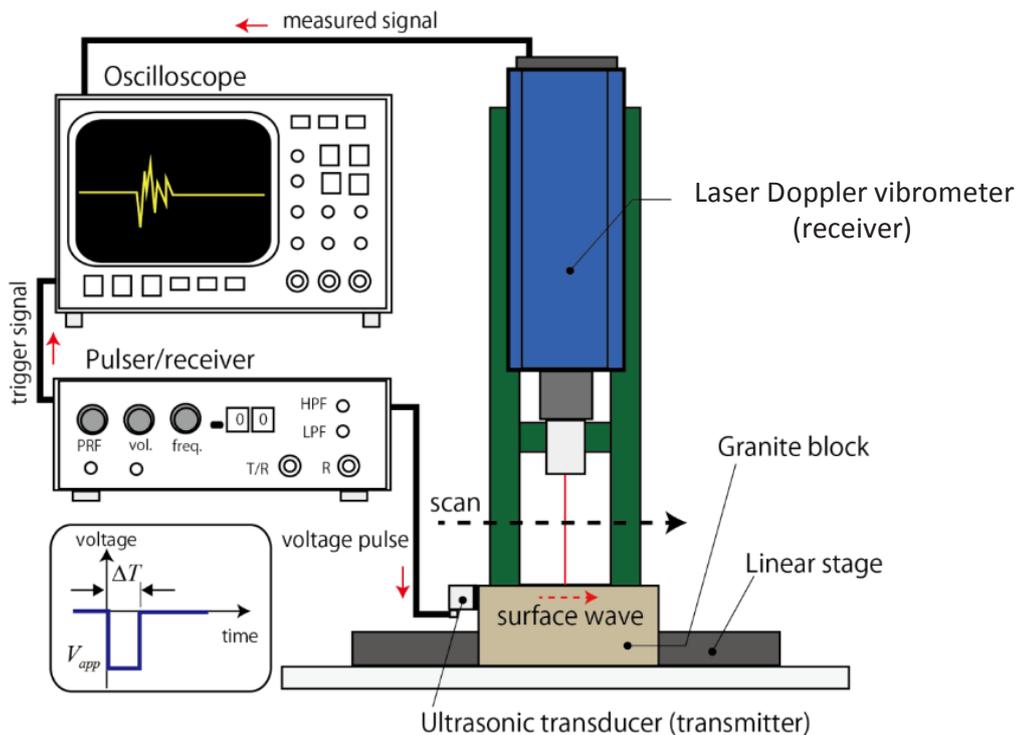


図 2.3 超音波計測システムの構成

各供試体は、送信センサーを取り付けた状態で、アングル材で作成した支持台に、表面波計測を行う面を上に向けた状態で水平となるよう固定した。レーザドップラ振動計は、1 軸リニアステージに取り付け、スキャン方向に 0.5mm 間隔で移動させ、各位置にて速度を計測した。

レーザドップラ振動計で計測されたデータは、デジタルオシロスコープ上で 2048 回加算平均したのち、時刻歴波形として保存した。このようにして取得した波形は、計測終了後に PC へ転送し、波形処理とデータの可視化を行った。超音波探触子の駆動は、スクエアパルサーを用い、振幅 400V、継続時間 1 μ s の矩形パルスを印加することによって行った。オシロスコープでの計測は、サンプリング周波数を 25MHz (サンプリング間隔 0.04 μ s) とした。波形計測時間範囲は、送信センサーから最近傍と最遠方の両方観測点において、主要な波動成分が含まれるように設定した。

2.3 送受信センサー

送信センサーは供試体側面に固定し、表面波によって生じる鉛直動をレーザドップラ振動計 (Melectro V100-S) により、速度時刻歴として計測した。受信点 (レーザー光の照射位置) は、送信点から約 5mm 離れた、センサー中心軸上の点から順に、0.5mm の間隔とした。不規則面つき供試体では、図 2.4 に示すように 90mm の範囲で 181 点、角柱花崗岩供試体の場合は、図 2.5 に示すように 80mm の範囲で 161 点計測し、これを 1 測線とした。このような計測の測線を 5mm 間隔で配置して、計 7 測線について計測を行った。なお、送信センサーは、測線上に中心軸が来るように常に設置した。すなわち、次の測線への移動変更の際には、送信センサーの位置も移動させた。試料の局所的性状によらない、超音波伝播特性を見出すことを試みた。

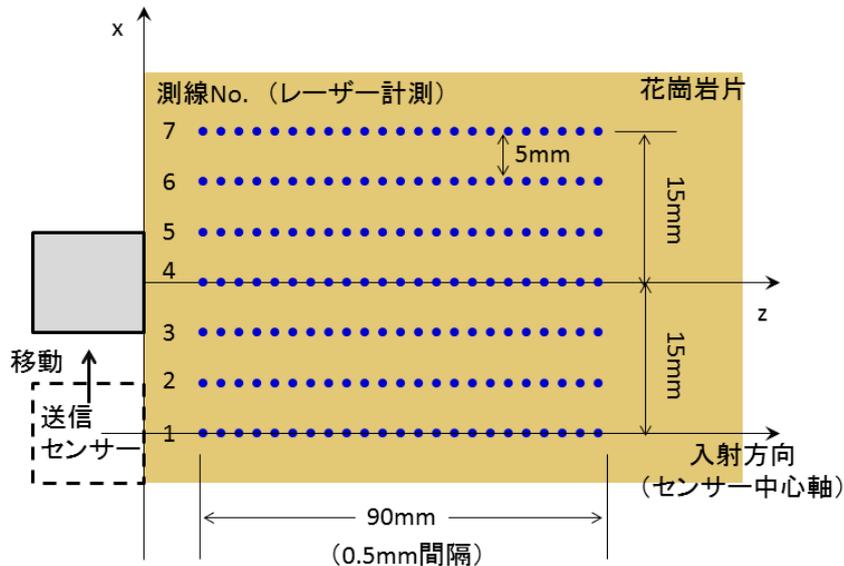


図 2.4 計測点の配置 (不規則面をもつ花崗岩供試体の場合)

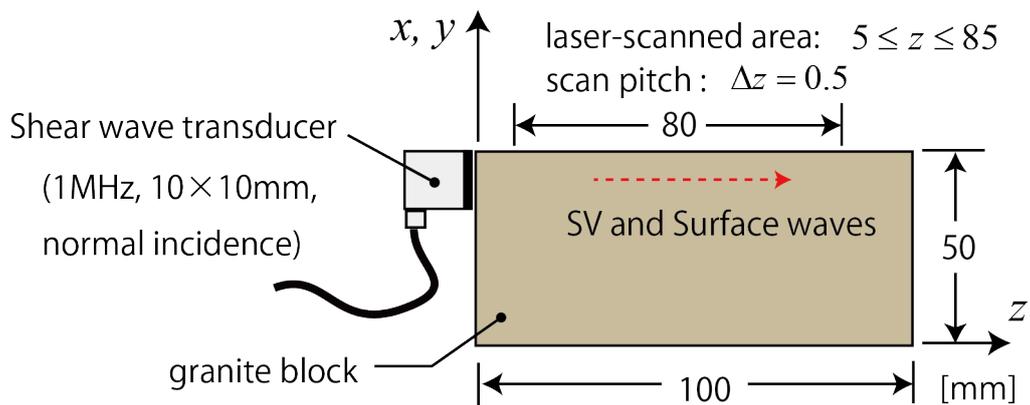


図 2.5 計測点の配置（角柱花崗岩供試体の場合）

送信センサーには、接触型の横波、垂直入射の超音波探触子（公称中心周波数 1MHz、振動子サイズ 10mm×10mm）を用い、供試体端面から鉛直動を加えた。これにより、供試体内部に SV 波が励起される。SV 波は、自由表面との相互作用によりレーリー波となって伝播する。供試体表面近傍では、レーリー波以外にも縦波（P 波）が伝播するのが観測されるが、P 波による鉛直動は SV 波や表面波に比較して小さい。

レーザドップラ振動計の帯域は、本年度の機能拡張により 0.5Hz～20MHz となり、送信超音波の周波数に比べて十分に広い帯域を持っている。ただし、周波数帯域の上限を 20MHz まで拡張したことにより、速度分解能は 2m/s/V となった。なお、機能拡張前（帯域：0.5Hz～300kHz）は 0.02m/s/V であった。従って、低周波領域の測定感度は今回の計測で低下していることに注意が必要である。

3. 計測結果

本章では、計測した速度波形について概観しその特徴について述べる。波形解析方法と考察は、第4章および第5章に記した。

3.1 不規則面をもつ花崗岩供試体

測線 No.2 ($x=-10\text{mm}$) において得られた全観測波形を図 3.1 に示す。この図は、横軸に送信時刻からの経過時間 (μs) を、縦軸に観測点の座標 z (mm) をとり、速度 (mm/s) をカラー表示したものである。 $z>0$ 方向への進行波は、このプロットにおいて右肩上がりのラインとなって現れる。

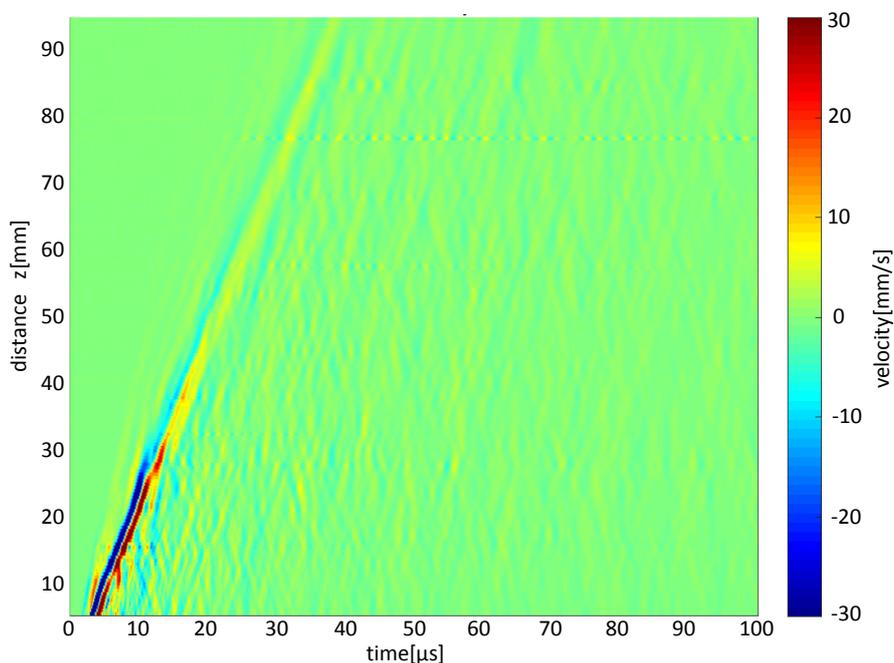


図 3.1 計測した速度波形（不規則面つき供試体）

初動部分に着目すると、 $z=30\text{mm}$ 付近までは大きな振幅をもつ波が伝わるが、この点を境に速度振幅が当初の $1/3$ 程度まで低下する。 $z>30\text{mm}$ では、遠方まであまり大きな波形変化を生じることなく表面波が伝わる様子が見られる。また、大きな振幅を持つ表面波に先立ち、振幅の小さな縦波が観測されている。初動部分の通過後は、結晶粒による多重散乱や供試体裏面において散乱された波動（コーダ波）が、顕著な振幅低下を見せることなく継続する。コーダ波は、カラープロット上で、右肩上がりの縞状のパターンと、右下がりのものが混在する。これは、前方および後方散乱波の両方が存在し、本プロットで視認しうる程度の距離を伝わることを意味している。なお、例えば $z=77\text{mm}$ 付近では、周辺観測点との挙動が不連続になっているかのようなパターンがみられる。この結果は、決して特異なデータや計測ミスではなく、他の計測ラインや異なるサンプルでも発生する。この正確な原因は現状確定できないが、孤立した造岩鉱物が、表面波の透過方向に変形しやすい結晶軸方向を向けて存在し、ある種の共振現象

が励起されたことの結果であることが疑われる。

図 3.2 に観測点位置 $z=15$ 、 30 、 45mm の 3 点における、速度時刻歴波形と、その周波数スペクトル（フーリエ振幅）を示す。速度時刻歴は縦軸のスケールがグラフ毎に異なるが、横軸は共通である。周波数スペクトルは、フーリエ振幅を絶対値で規格化して常用対数で表示している。周波数スペクトルには、参考のためにアンラップした位相（rad）も赤線で表示している。観測波形の周波数成分に着目すると、 $z=15\text{mm}$ では 1.5MHz 程度にもピークがみられ、有意な信号成分が含まれていると判断される。 1MHz 以上の周波数成分は、観測点までの距離に応じて減衰し、最終的には 2 ケタ程度小さくなる。また、 1MHz 以下の成分についても座標 z の増加に応じて、高周波側から次第に振幅を減じ、ピーク周波数も低周波側へシフトする。

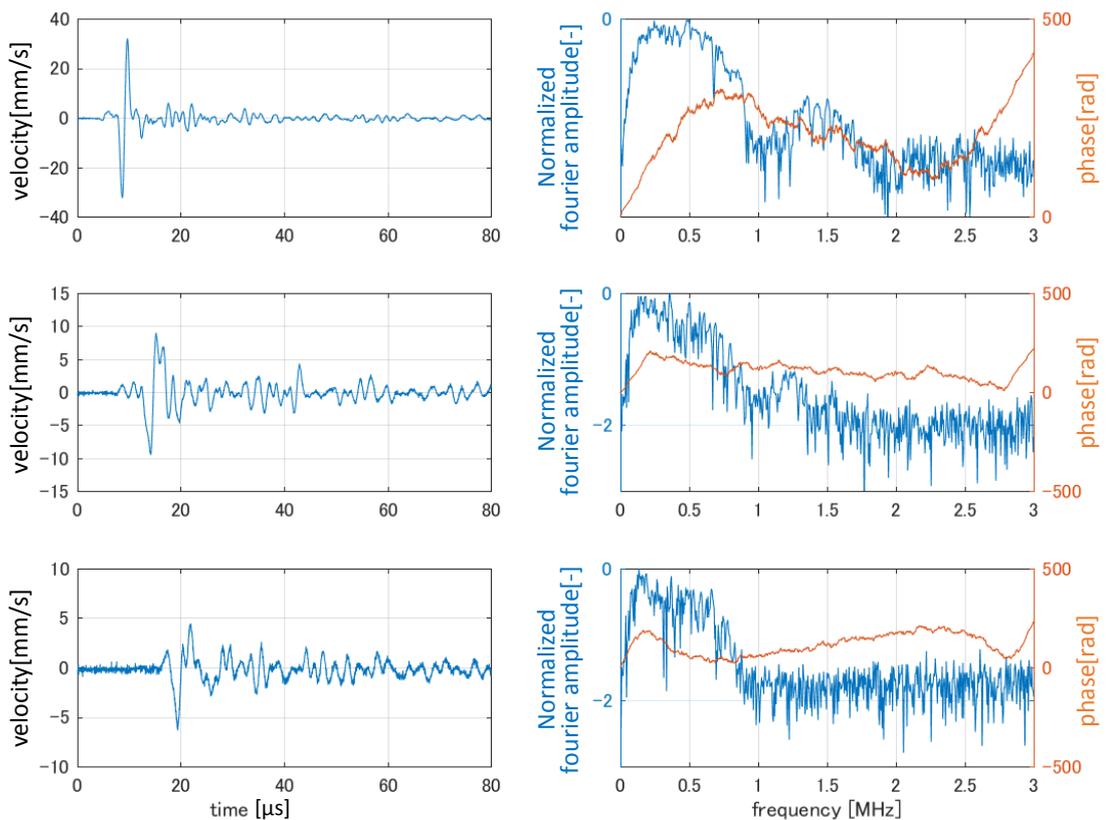


図 3.2 計測した速度時刻歴波形（左）とそのフーリエ振幅および位相（右）（不規則面つき供試体）

フーリエ振幅は最大値で無次元化したものを常用対数で示す。計測点位置は上から $(x, z)=(-10, 15)$ 、 $(-10, 30)$ 、 $(-10, 45)\text{mm}$ 。

図 3.3 に、横軸に周波数、縦軸を観測点位置 z として、測線 No.2 で得られた全データの周波数スペクトル（フーリエ振幅）を示す。

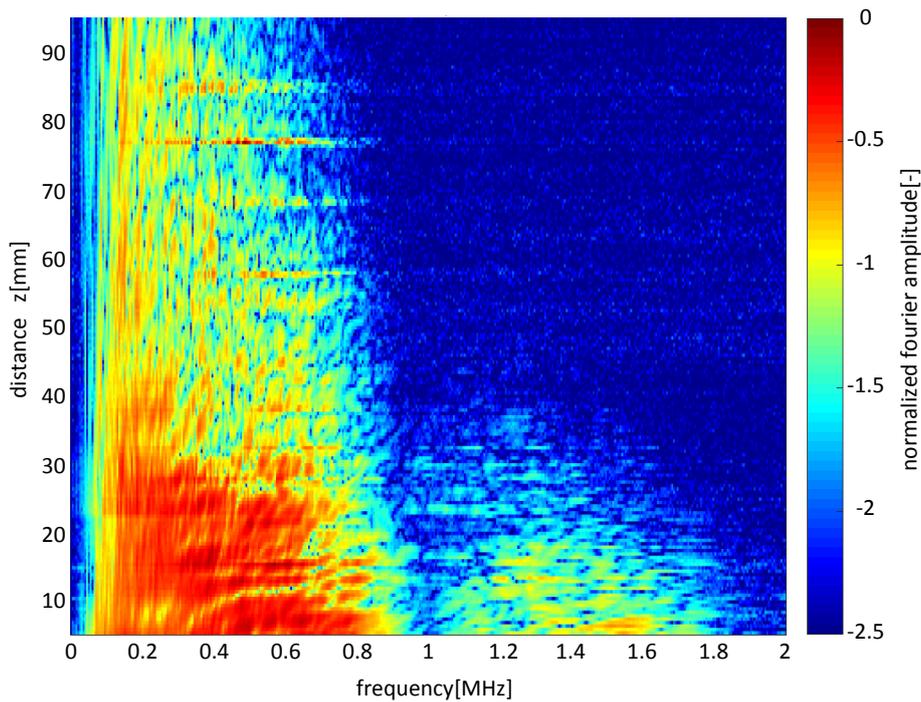


図 3.3 計測された全速度波形データのフーリエ振幅（不規則面つき供試体）
フーリエ振幅値を最大値で無次元化し、常用対数スケールで表示。

ここでも、フーリエ振幅は最大値で無次元化し常用対数スケールで示している。 $z=30\text{mm}$ 付近を境に、 1MHz 以上の周波数成分はほぼ消失しており、このことが時間域における速度波形振幅の急激な低下の原因と考えられる。また、観測点距離の増加につれ、 1MHz 以下の成分も漸減傾向にある。ただし、ピーク周波数は、 $100\sim 200\text{kHz}$ 程度で下げ止まり、これは、入射波に含まれる周波数成分の下限と、高周波成分の減衰がバランスすることによると考えられる。なお、図 3.1 でも指摘した、観測点位置に対して不連続に変化する部分は、水平方向の縞状のパターンとしてここで明瞭にみることができ、一つの測線内においてもまれな現象でないことが分かる。

3.2 角柱花崗岩供試体

図 3.4 に、測線 No.4 で得られた全観測波形を示す。ここでも、最初に到達する P 波、最大の振幅を示す表面波、最後にコーダ波が観測されている。観測点距離の増加に対する、波形変化の傾向も、測線 No.2 の図 3.1 と類似しており、 $30\sim 40\text{mm}$ 程度の距離を境に、振幅が大きく低下し、その後、大きな変化なく主として表面波が伝播する。なお、この供試体では、端面からの反射波と考えられる振動が現れている。

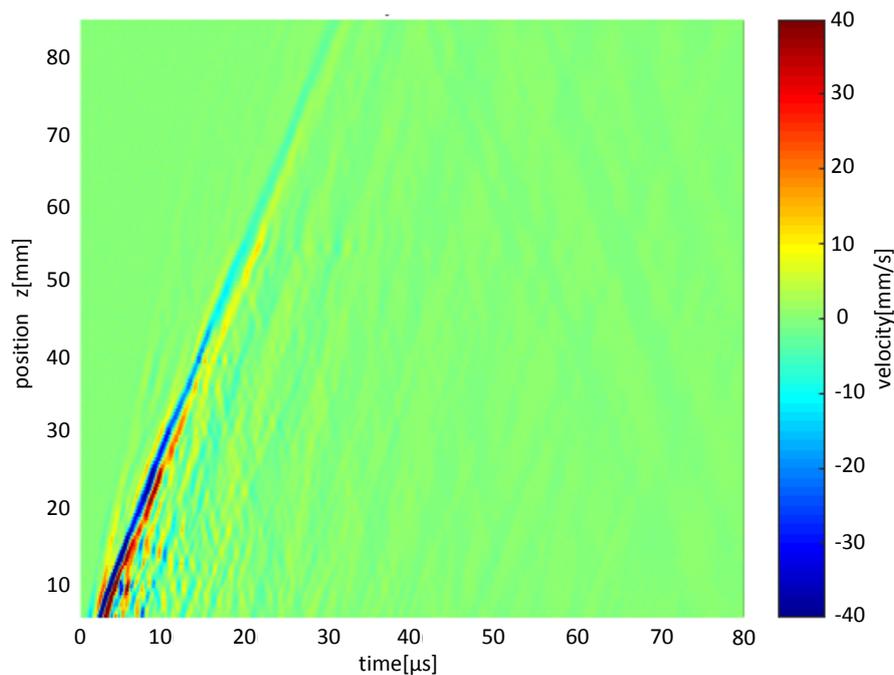


図 3.4 計測した速度波形（角柱供試体）

図 3.5 に、 $z=20$ 、 40 および 50mm で得られた速度波形の時刻歴と周波数スペクトルを示す。これらのグラフの縦軸、横軸は図 3.2 と同じである。距離 z に応じたピーク周波数の低周波化と、帯域幅減少の傾向は、不規則面つき供試体と同様である。ただし、 $500\text{kHz}\sim 1\text{MHz}$ 程度の信号成分は、角柱供試体の方が、より長い伝播距離において保持されている。最後に、図 3.6 に測線 No.4 で得られた全波形データのフーリエ振幅を示す。この場合、信号の周波数帯域、振幅とも観測点距離に対してほぼ単調に低減することがここでも確認される。なお、昨年度はレーザドップラ振動計の帯域制限から明らかでなかったが、 $300\text{kHz}\sim 1\text{MHz}$ 程度の周波数成分も、 40mm 程度の距離までは十分に到達していることがわかる。また、ピーク周波数が $100\sim 200\text{kHz}$ 周辺で下げ止まることも、不規則面つき供試体の場合と同様である。

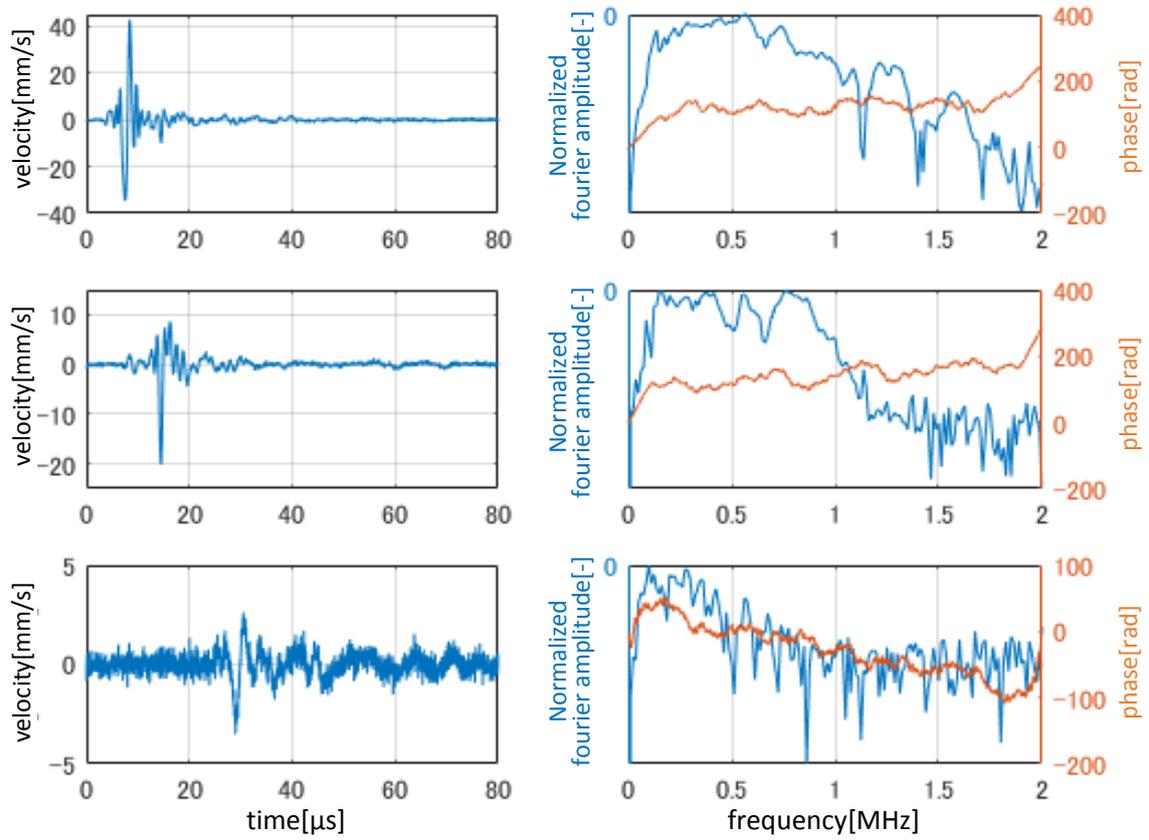


図 3.5 計測した速度時刻歴波形（左）とそのフーリエ振幅および位相（右）（角柱供試体）
 フーリエ振幅は最大値で無次元化したものを常用対数で示す。計測点位置は上から $(x, z) = (0, 20)$ 、 $(0, 40)$ 、 $(0, 80)$ mm。

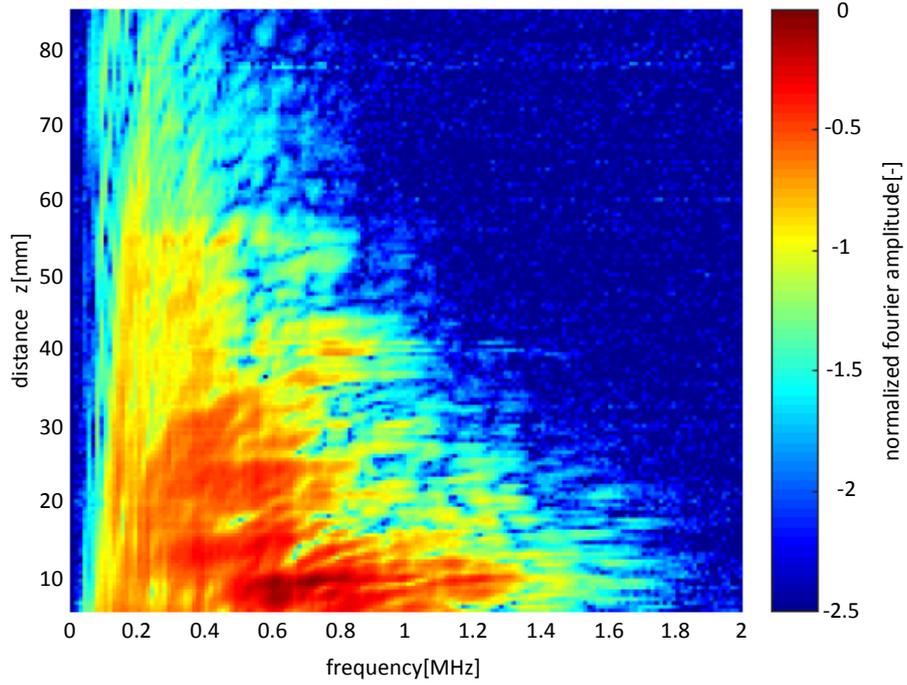


図 3.6 計測された全速度波形データのフーリエ振幅（角柱供試体）
 フーリエ振幅値を最大値で無次元化し、常用対数スケールで表示。

4. データ解析方法

4.1 フーリエ変換の定義

本研究における、空間変数（観測点座標 y ）と時間変数(t)に関するフーリエ変換の定義は以下の通りとする。

$$\bar{f}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{i\omega t} dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{2\pi i \nu t} dt \quad (1)$$

$$\tilde{f}(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-ikx} dx = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i \xi x} dx \quad (2)$$

ここに、 $k=2\pi\xi$ は波数を、 $\omega=2\pi\nu$ は角周波数を表す。波数 k （あるいは ξ ）は波長 λ と

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \xi = \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

の関係にあることから、空間に関するフーリエ変換から波長に、時間に関するフーリエ変換により周波数に応じた信号のスペクトル強度が得られる。波数と周波数の関係 $\omega=\omega(k)$ は、分散関係式と呼ばれ、媒体の性質によって異なる。非分散性媒体の場合、角周波数と波数は線形関係にあり

$$\omega = kc \quad (4)$$

と書くことができる。ここに c は、周波数、波数によらない位相速度を表す。一般の媒体の場合、速度の次元をもつ、

$$c_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{dv}{d\xi} \quad (5)$$

は、群速度と呼ばれ、物理的には波動によるエネルギーの輸送速度を意味する。位相速度は、等位相面の進行速度であることから、波動場の位相を $\phi(\mathbf{x},t)$ に対して、

$$d\phi = \frac{d\phi}{dx} dx + \frac{d\phi}{dt} dt = 0 \quad (6)$$

より、

$$c = \frac{ds}{dt} = -\frac{d\phi}{dt} / \frac{d\phi}{dx} \quad (7)$$

で与えられる。ここに、 \mathbf{x} は波動の進行方向にとった座標を表す。従って、位相が

$$\phi = \phi(x,t) = kx - \omega t \quad (8)$$

で与えられるとき、位相速度は

$$c = \frac{\omega}{k} = \frac{v}{\xi} \quad (9)$$

で求められる。位相速度と群速度の関係は、群速度の逆数を積分し

$$\int_0^{\omega} c_g^{-1} d\omega = \int_0^{\omega} \frac{dk}{d\omega} d\omega = k(\omega) = \frac{\omega}{c} \quad (10)$$

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{\omega} \int_0^{\omega} c_g^{-1} d\omega \quad (11)$$

と得ることができる。速度の逆数は **slowness** と呼ばれる。

$$s = c^{-1}, \quad s_g = c_g^{-1} \quad (12)$$

とおけば、両者の関係は、

$$s = \frac{1}{\omega} \int_0^\omega s_g(\omega') d\omega' = \langle s_g \rangle(\omega) \quad (13)$$

あるいは、

$$\omega_2 s_2 - \omega_1 s_1 = \int_{\omega_1}^{\omega_2} s_g(\omega') d\omega' \quad (14)$$

となることが示される。

4.2 位相スペクトルと群遅延

位相関数 ϕ を (x, t) の代わりに (x, ω) の関数と考え、 $\phi = \phi(s, \omega)$ と表す。これは、フーリエ変換域における位相とみる立場であるため、 ϕ は位相スペクトルと呼ばれることがふさわしい。いま、位相スペクトル ϕ は、周波数軸上でアンラップされているとして、 ϕ を ω で微分すれば、

$$t_g = \frac{d\phi}{d\omega} = -t + \frac{dk}{d\omega} x \quad (15)$$

は、明らかに時間の次元を持つ。これは群遅延と呼ばれる。さらに、群遅延を x で微分すれば、

$$\frac{dt_g}{dx} = \frac{dk}{d\omega} = c_g^{-1} \quad (16)$$

と、群速度（あるいは **group slowness**）との関係が得られる。以上より、

$$c_g = c_g(x, \nu) = \left(\frac{dt_g}{dx} \right)^{-1} = \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial \omega} \right)^{-1} = 2\pi \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial \nu} \right)^{-1} \quad (17)$$

が導かれ、位相から群速度を求めるための式が得られる。この式を用いれば、群速度を位置 x と周波数 ω の関数として得ることができる。しかしながら、2 階の微分演算が必要な点が、数値計算上の問題となる。特に、位相スペクトルは連続であるとは限らず、微分可能でない点が存在する。そのため、微分計算にあたり、何らかの正則化が必要となる。なお、観測によって得た速度波形 $v(y, t)$ から位相スペクトルを算出するには、 $v(y, t)$ の時間に関するフーリエ変換を計算し、その位相角を求めアンラップするだけでよい。

一方、式(1)から群速度を求める場合、速度波形の時間と空間に関する 2 次元フーリエ変換を計算し、 $v(x, t)$ の波数-周波数スペクトルを計算する。得られた波数-周波数スペクトルから、波数と周波数の関数関係（グラフ）が特定できる場合、その勾配が群速度を表す。この方法では、微分計算が一度で済むことが利点である。しかしながら、波数-周波数関係の正確な同定は必ずしも容易でなく、前者の方法に比べて明らかな優位性がある訳ではない。また、空間のフーリエ変換を行うことから、観測点の配置は離散フーリエ変換のためのサンプリング条件に制約さ

れる。例えば、試料に柔らかい材料が介在する場合、局所的に波長が短くなることから、この長さにサンプリング間隔が制約されるが、空間的な計測解像度を上げることは、時間に関する場合に比べて多くの困難を伴うことから、計測条件も考慮して、群速度の算出方法を選択する必要がある。

本研究では、群速度の周波数依存性を求めることに適した、群遅延を利用する前者の方法を用い、計測波形から周波数毎に群速度を求める。その際、位相スペクトルの位置に関する変化は一次関数で近似し、位相スペクトルの非正則性に伴う問題を回避する。

4.3 波形解析例

不規則面を持つ花崗岩供試体の測線 No.1 において得られた、波形データの解析例を以下に示す。

図 4.1 は、速度波形にガウス窓関数を作用させ、表面波成分を中心とした初動部分を取り出したものである。これにより、主要動前後の成分が取り除かれ、同図の右側に示したように、周波数スペクトルが平滑化される。

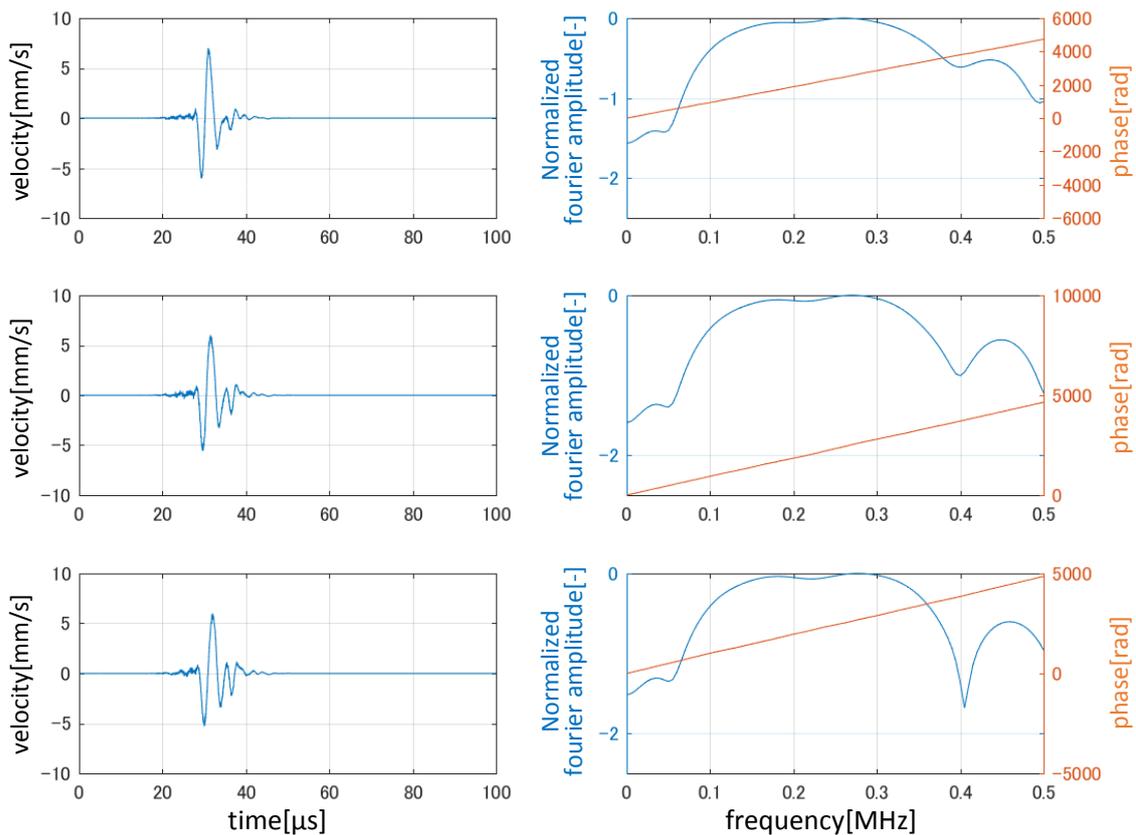


図 4.1 窓関数で初動部分を取り出した速度時刻歴波形（左）とそのフーリエ振幅および位相（右）（不規則面つき供試体）

フーリエ振幅は最大値で無次元化したものを常用対数で示す。計測点位置は上から $(x, z) = (-15, 75)$ 、 $(-15, 76)$ 、 $(-15, 77)$ mm。

さらに、アンラップされた位相はほとんど直線的な変化を示しており、群遅延は 500kHz 程度の間で、ほとんど一定になることが期待できる。なお、ここでは、観測点距離が 1mm ずつ異なる点で得られた波形を示しているため、互いに非常によく似た形をしている。ただし、400kHz 近傍のフーリエ振幅の低下具合は、位置によって異なり、波形形状が完全に一致しているわけではないことがわかる。

図 4.2 に、窓関数を適用した後、2重フーリエ変換を行い計算した、速度波形の波数-周波数スペクトルを示す。スペクトル強度の高い領域は、ほぼ直線状に分布している。しかしながら、与えられた周波数に対応するピーク波数周辺線形スケールでもみても明らかな程度の広がりがあり、この結果から波数-周波数関係を正確に決め、群速度の周波数依存性を調べることは容易でないといえる。そのため、ここでは、白の実線で示したようなスペクトルピークを直線近似し、その傾きから群速度を求めた。これは、群速度の周波数依存性は無いと仮定した場合である。

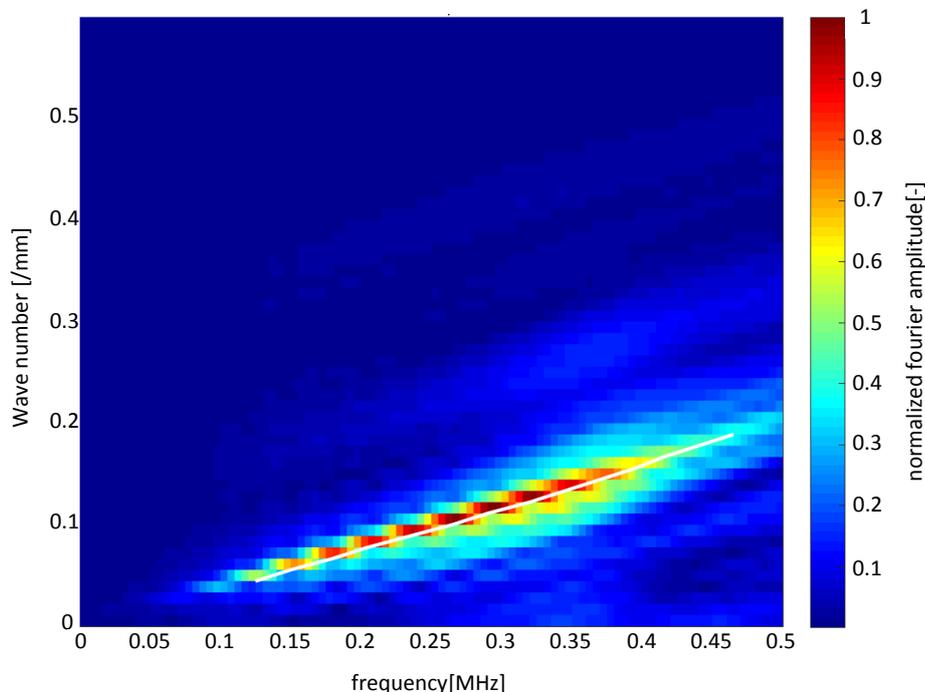


図 4.2 速度波形の波数-周波数スペクトル（不規則面つき供試体）

最大値で無次元化した周波数スペクトルを示す。白の実線は、群速度の計算のために仮定した波数-周波数の関係を示す。

最後に、群遅延から周波数毎に求めた、群速度を図 4.3 に示す。100~400kHz の帯域で、ほぼ一定の群速度となっているが、若干の振動がみられることがわかる。また、低周波側では、群速度が大きく増加する部分がある。群速度は周波数ゼロでは無限大となることから、この傾向は妥当といえる。一方、波数-周波数スペクトルから算出した群速度には、かい離がある。これは、帯域が 300kHz 程度の狭い範囲でしか信号成分が得られておらず、波数-周波数関係、特に傾きを正確に判定することが難しいことによる。

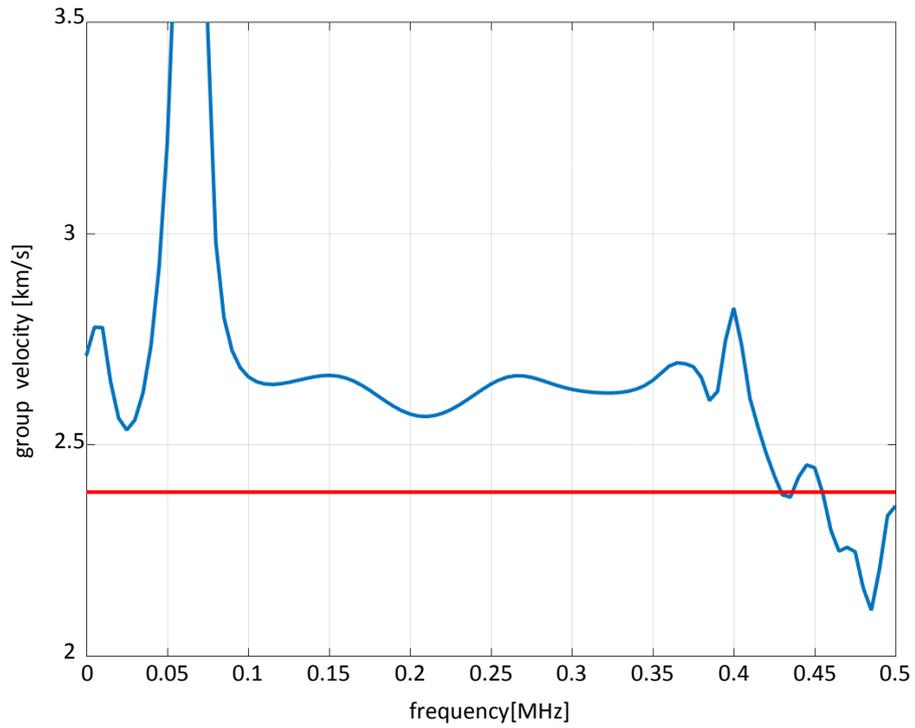


図 4.3 群速度の周波数依存性（不規則面つき供試体）

青の実線は、群遅延から計算した結果を示す。赤の実線は波数-周波数スペクトルから計算した結果（一定値）を比較のために示したもの。測線 No. 1 のデータを使用。

5. 平均波形を用いた群遅延と位相速度

本章では、すべての測線（No.1～7）で得られた速度波形を加算平均し、その結果から算出した群速度の周波数依存性を示す。はじめに、図 5.1 に平均化の後、窓関数を作用させて得られる速度波形と、その周波数スペクトル（振幅および位相）を示す。これらの波形の観測点位置（z 座標）は、図 4.1 の場合と同様である。したがって、図 5.1 の波形は、図 4.1 の波形も考慮して得られた平均波形である。図 4.1 と図 5.1 を比較すると、到達時間はほとんど変化なく、全体的な形状にも類似性が認められる。一方、図 5.1 に示した 3 種類の波形は、互いに非常によく似た形状をしており、このことは、フーリエ振幅として見た場合も同様である。よって、z の変化にたいして、波形はほとんど形状を変えずに時間軸上を移動していることを意味し、互いの到達時間差から表面波伝播速度を決めることが、平均化しない場合の波形を用いるよりも有利な条件で行うことができることを示している。ここで、平均化および窓関数処理を行って得られた全波形を、図 5.2 に示す。図 3.4 の結果と比べると、速度波形は時間、空間的により滑らかに推移するようになっていくことがわかる。このことは、周波数スペクトルについても同様である。図 5.3 に示すように、窓関数と波形加算の効果により、フーリエ振幅の変動は周波数方向にも空間的にもより連続性がよくなっている。さらに、空間変数についてもフーリエ変換を行い、波数-周波数スペクトルにすると、その結果は図 5.4 のようになる。図 4.2 と比較すると、スペクトル強度の高い領域がより集中し、波数-周波数関係の特定が若干容易な分布になっている。

これらの結果を用いて、群速度を求めた結果を図 5.5 に示す。500kHz 程度まで群速度が正しく同定されており、波形加算処理を行わない場合の結果（図 4.3）よりも広い周波数範囲で群速度が求められている。その結果、群速度は周波数に対して、振動しながら減少する傾向にあることがわかる。また、400kHz 程度までの群速度値は、図 4.3 と図 5.5 でおよそ一致し、周波数-波数スペクトルから求めた結果との整合性もよくなり、より高い精度で群速度の推定が行われているものと判断できる。以上のことから、空間的に平均化したデータを用いることで、供試体を透過均質媒体と見立てたときの群速度としてより妥当な値が求められるといえる。

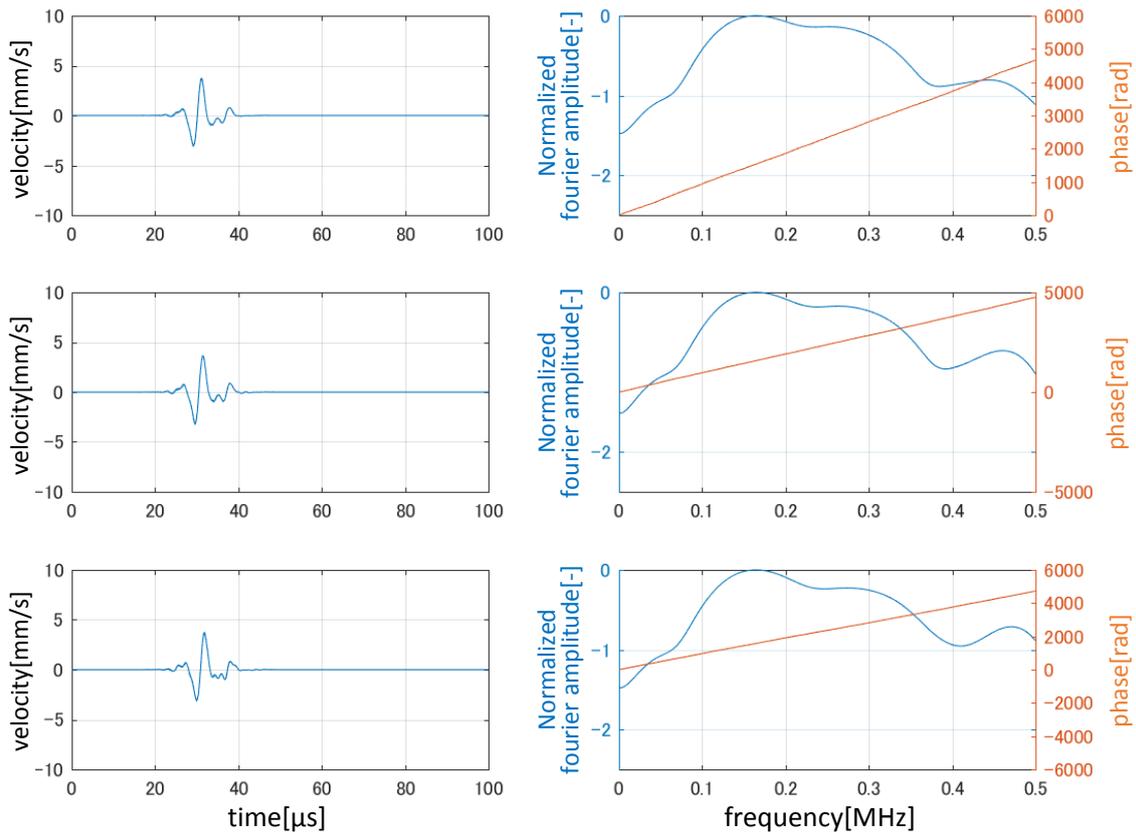


図 5.1 平均化した初動部近傍に窓関数を作用させた速度時刻歴波形（左）とそのフーリエ振幅および位相（右）（不規則面つき供試体）
 フーリエ振幅は最大値で無次元化したものを常用対数で示す。計測点位置は上から $z=75, 76, 77\text{mm}$ 。

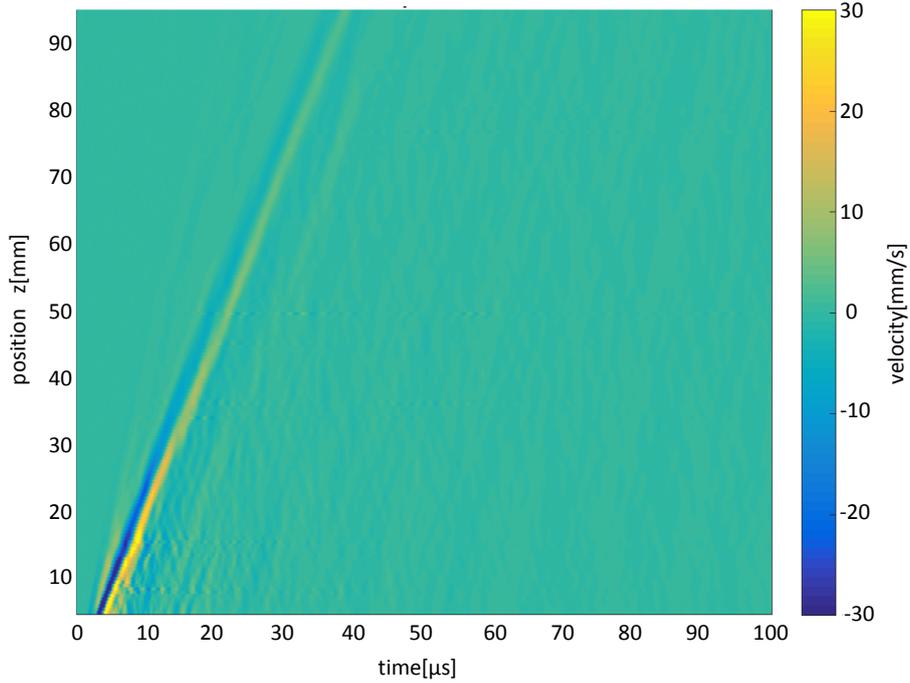


図 5.2 平均化した速度波形（不規則面つき供試体）

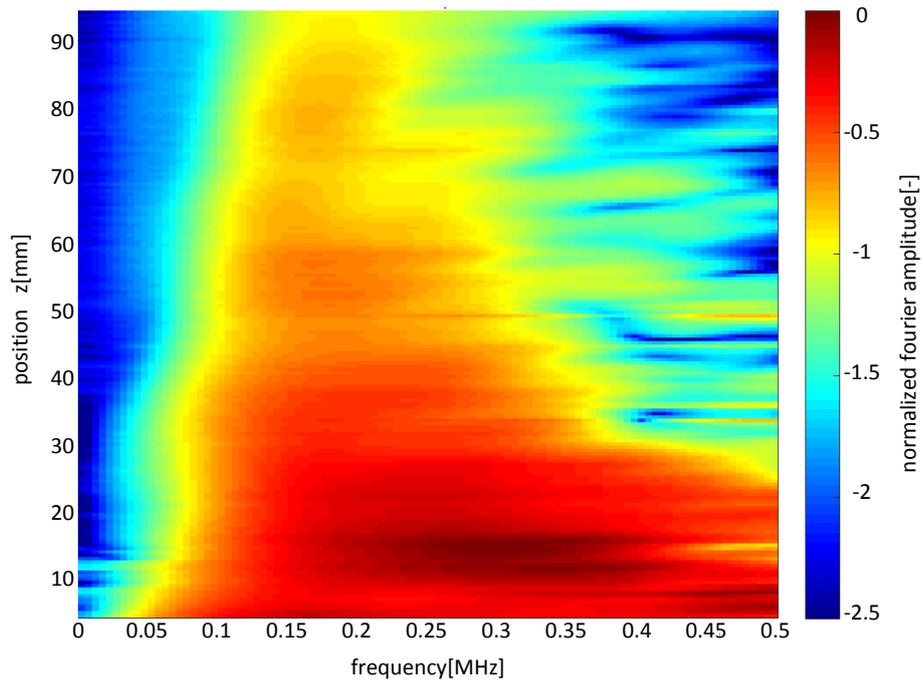


図 5.3 平均化の後、窓関数を用いて初動部分を取り出した速度波形のフーリエ振幅（不規則面つき供試体）

フーリエ振幅値を最大値で無次元化し、常用対数スケールで表示したもの。

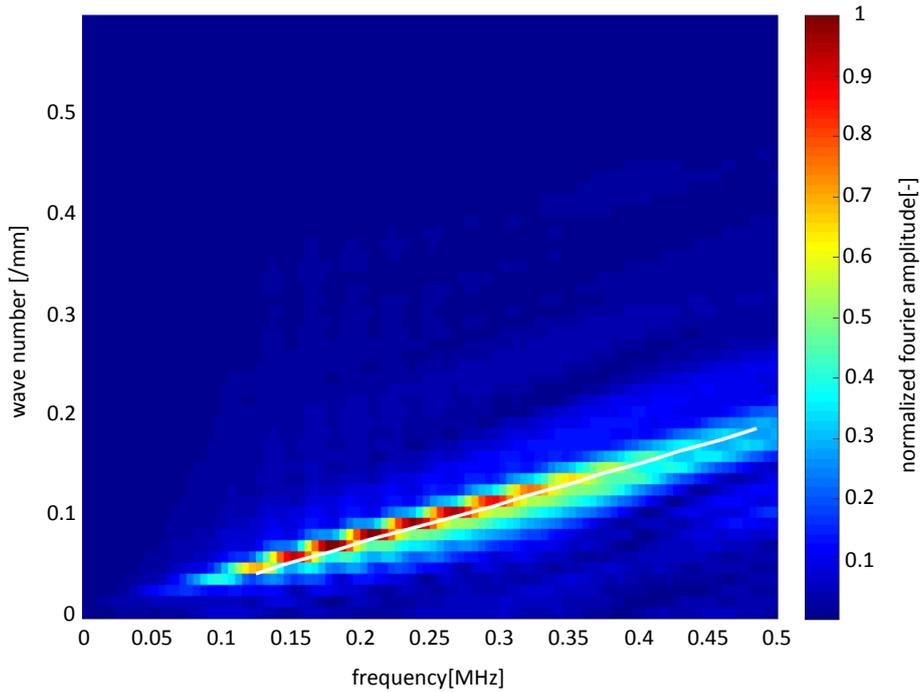


図 5.4 平均化した速度波形の波数-周波数スペクトル（不規則面つき供試体）
 最大値で無次元化した周波数スペクトルを示す。白の実線は、群速度の計算のために仮定した
 波数-周波数の比例関係を示す。

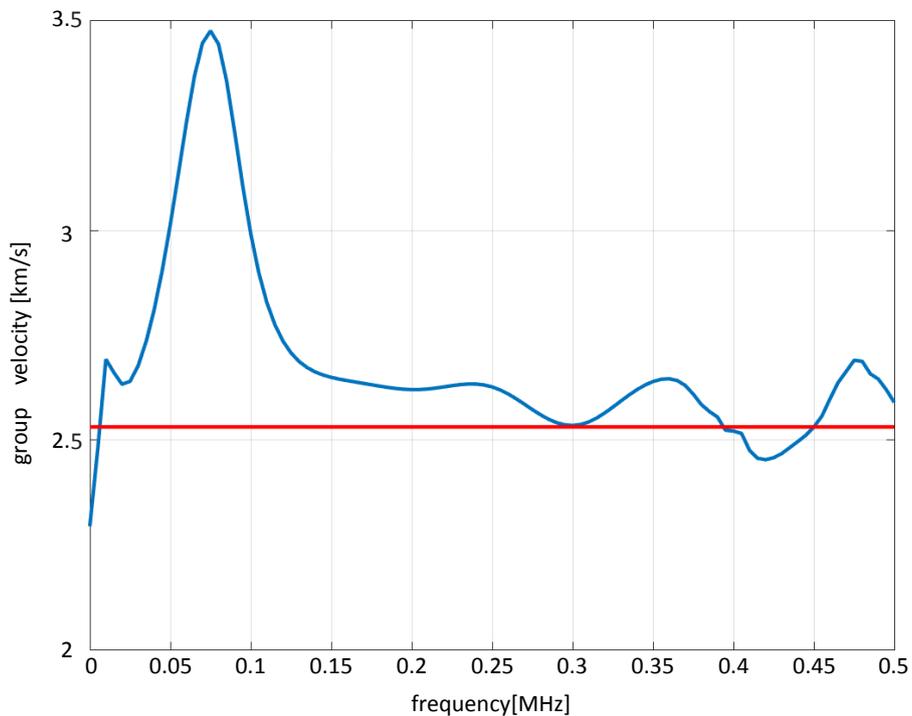


図 5.5 平均化した速度波形から得られた群速度の周波数依存性（不規則面つき供試体）
 青の実線は群遅延から計算した結果を示す。赤の実線は波数-周波数スペクトルから計算した結
 果（一定値）を比較のために示したものの。

6. まとめ

今年度は、周波数帯域を 20MHz まで拡張したレーザドップラ振動計を用い、花崗岩供試体を透過する表面波の計測を行った。計測した速度波形は周波数解析を行い、波形信号に含まれる波長および周波数帯を調べた。また、群遅延スペクトルを経由し、群速度を周波数の関数として求めた。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された。本研究の結果は、花崗岩の粘弾性理論によるモデリングに有用な知見を与えられと考えられる。ただし、今後、超音波計測結果を利用した、粘弾性モデリングを実現するためには、縦波あるいは横波の群速度を求め、周波数依存性のある弾性係数に換算する必要がある。また、位相速度の虚数成分を求めるため手法開発も必要となる。一方、本研究の知見を、結晶質岩の非破壊評価に利用するためには、群速度の変動と亀裂や結晶粒といった媒体の微視的な性状との対応を明らかにする必要がある。

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, 佐藤稔紀, 丹野剛男, 引間亮一, 真田祐幸: “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 (2012 年度) (委託研究)”, JAEA-Research 2013-045, 2014, 69p.
- 7) 市川康明, 木本和志, 佐藤稔紀, 真田祐幸, 桑原和道: “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 (2013 年度) (委託研究)”, JAEA-Research 2014-027, 2015, 25p.
- 8) 市川康明, 木本和志, 佐藤稔紀, 桑原和道, 高山裕介: “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 (2014 年度) (委託研究)”, JAEA-Research 2015-025, 2016, 31p.

This is a blank page.

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 |
| 比透磁率 ^(b) | (数字の) | 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 ^(e) | 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 | 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 |
| 光照射量 | ルーメン | lm | cd sr ^(e) | cd |
| 放射線量 | グレイ | Gy | J/kg | m ² s ⁻² |
| 放射線当量, 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 | ジュール毎立方メートル | J/m ³ | m kg s ⁻³ A ⁻¹ |
| 電表面積 | 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 |
| 放射線輝度 | 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=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa |
| 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 |
| バイン | 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 ⁴ cd m ⁻² |
| フオト | ph | 1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx |
| ガリ | Gal | 1 Gal=1cm 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=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T |
| エルステッド ^(a) | Oe | 1 Oe _e =(10 ³ /4π)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 | 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=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ) |
| マイクロン | μ | 1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m |

