

機関番号：16301

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21740381

研究課題名 (和文) 高圧下における部分溶融したかんらん岩の弾性波速度測定技術の開発

研究課題名 (英文) Technical development of elastic wave velocity measurement on partially molten peridotite at high pressures and high temperatures

研究代表者

河野 義生 (KONO YOSHIO)

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・グローバル COE 助教

研究者番号：20452683

研究成果の概要 (和文)：「高圧下における部分溶融したかんらん岩の弾性波速度測定技術の開発」のために、(1)過去の研究(最大 1400°C)以上の高温条件下における弾性波速度測定技術の開発、(2)溶融した岩石を封入した状態での弾性波速度測定方法の開発、(3)測定周波数が弾性波信号強度に及ぼす影響の評価、の3点について主に研究を行い、圧力最大 5 GPa、温度最大 1700°C 条件下において部分溶融したかんらん岩の弾性波速度測定に成功した。

研究成果の概要 (英文)：Technical development of elastic wave velocity measurement on partially molten peridotite was conducted mainly for following three issues: (1) Development of elastic wave velocity measurement at temperatures higher than previous studies (up to 1400 °C), (2) Development of elastic wave velocity measurement for capsulated molten sample, (3) Investigation for the effect of ultrasonic frequency on elastic wave signal from partially molten peridotite. As a result, I succeeded to develop elastic wave velocity measurements on partially molten peridotite up to 5 GPa and 1700 °C.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：弾性波速度測定

科研費の分科・細目：地球惑星科学・岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：弾性波速度、高温、溶融、かんらん岩、上部マントル

1. 研究開始当初の背景

高温高圧条件下におけるマントル構成物質の弾性波速度測定実験は、地震学的観測結果と組み合わせ、地球内部の構造・状態を理解するために重要な研究である。特に近年では、地震学研究により、沈み込み帯のウェッジマントルや上部マントル最下部に地震波速度の低速度異常領域が報告されている。これら低速度異常の原因として、上部マントルにおけるマグマの存在が予想されているが、そのような地震波速度の低速度異常を解

明するために必要なマグマやそれを含む部分溶融したかんらん岩の弾性波速度はほとんど理解されていないのが現状である。

マントル構成物質の弾性波速度は、マルチアンビル装置+超音波法(例えば、Li et al., 1998)やダイヤモンドアンビルセル+ブリリアン散乱法(例えば、Sinogeikin et al., 2006)により測定が行われてきた。しかしながら、上部マントルを理解する上で必要不可欠な部分溶融したかんらん岩の弾性波速度測定は、主に高温での弾性波速度測定の困難

さとメルトを封入した状態での弾性波速度測定 of 困難さの 2 点の技術的問題のためほとんど研究が行われていないのが現状である。マルチアンビル装置、ダイヤモンドアンビルセルを用いた弾性波速度測定では、圧力の面では上部マントルを十分満たす条件下での実験がすでに行われているが、温度については低温条件下での測定にとどまっている。例えば、上部マントル条件下における弾性波速度測定研究を行っている代表的な研究グループとして、アメリカ Stony Brook 大学のグループがあるが、温度の面では 1000°C までの弾性波速度測定にとどまっている。近年、研究代表者を含む愛媛大学のグループにより最大 1400°C までの高温条件下での弾性波速度測定実験を報告しているが、かんらん岩の部分熔融開始温度（圧力 3 GPa において約 1550°C）よりも依然低温条件にとどまっているのが現状である。

一方、部分熔融状態におけるかんらん岩の弾性波速度測定について、過去に数例報告例があるが（例えば、Murase & Kushiro, 1979）、1GPa 以下の地殻圧力条件に相当する低压条件下のみの測定である。より高压条件下では、部分熔融したかんらん岩のかんらん石-メルトの二面角が減少するなどの現象が報告されており、上部マントルの地震波速度構造を議論するためにはその温度圧力条件下における部分熔融したかんらん岩の弾性波速度測定実験を行う必要がある。さらに過去の実験では、弾性波速度を決めるために必要な試料の長さを直接測定しておらず、熔融のように体積が大きく変化する際の弾性波速度を精確に決定するためには、試料の長さを直接測定する必要がある。近年、放射光施設 SPring-8 において、マルチアンビル型高压発生装置を用いた超音波弾性波速度測定と放射光 X 線を用いた精確な試料長の決定を行っており、この実験手法を用いることにより部分熔融したかんらん岩の試料長を精確に測定することが可能であると考えている。

以上のように過去の研究では、上部マントルに相当する高温高压条件下での弾性波速度測定は行われておらず、上部マントルの地震波速度低速度異常を解明するためには、そのような高温高压条件下での弾性波速度測定技術を開発し、部分熔融したかんらん岩の弾性波速度測定を行う必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、マルチアンビル型高压発生装置、放射光 X 線、超音波弾性波速度測定法を組み合わせた実験により、高温高压条件下における部分熔融したかんらん岩の弾性波速度測定技術の開発を行うことを目的とする。そのために、(1) 過去の研究（最大 1400°C）以上の高温条件下における弾性波速度

測定技術の開発、(2) 熔融した岩石を封入した状態での弾性波速度測定方法の開発、(3) 測定周波数が弾性波信号強度に及ぼす影響の評価、について研究を行った。

3. 研究の方法

高温高压実験はマルチアンビル装置を用いて行った。高温高压条件下において、マルチアンビル装置の内部で超音波弾性波速度測定を行うために、弾性波を発信・受信するための振動素子をアンビルの背面に設置した。P 波、S 波速度を同時に測定するために、10°Y-cut のニオブ酸リチウム振動素子を使用した。パルス発生器から出力された電気信号は、振動素子により弾性波信号に変換され、その後アンビル内部を透過し高压実験セル内部、最終的に試料に伝搬する。高压実験セル内部で反射した弾性波は、振動素子により再度電気信号に変換され、それをデジタルオシロスコープで観察した。弾性波伝搬時間は、試料両端で反射した P 波、S 波の到達時間差より決定した。また、SPring-8 における放射光 X 線と組み合わせた実験においては、高温高压条件下における試料長の変化を X 線ラジオグラフィ法により直接決定した。

(1) 過去の研究（最大 1400°C）以上の高温条件下における弾性波速度測定技術の開発のために、高压実験セル内部の構成について改良を行った。過去の研究の最高温度である 1400°C までの実験を行ったものは、断熱材が弾性波発信・受信振動素子方向には配置されていないため、試料が 1400°C 以上の高温の際に、アンビルを通して振動素子とその接着部も高温になり、弾性波信号が弱くなる問題があった。そのため、高压実験アセンブリーを改良し、特に振動素子を低温に保持するための改良を行った。

(2) 熔融した岩石を封入した状態での弾性波速度測定方法の開発のために、試料を封入する材質の選定を行った。試料封入剤として、グラファイト、BN、アルミナを使用し、それぞれの材料を用いて弾性波速度測定テストを行った。

(3) 測定周波数が弾性波信号強度に及ぼす影響の評価のために、従来から使用されている大きさ（径 3.2 mm、厚さ 0.05mm）の振動素子だけでなく、より厚さの厚い振動素子を用いて、低周波数条件下でのテストを行い、周波数が弾性波信号強度に及ぼす影響を評価した。

4. 研究成果

(1) 過去の研究（最大 1400°C）以上の高温条件下における弾性波速度測定技術の開発

従来の研究では、ヒーターを直接加圧

用 2 段目アンビルに接続していたため、振動素子を貼り付けたアンビル自体も高温になり、弾性波測定が行えなくなる問題があった。そこで、本研究では、ヒーターを高圧セルアセンブリー内部にのみ配置し、その周りを断熱材で覆うことにより、試料が高温の条件下においても、弾性波速度測定用の振動素子を低温に維持する改良を行った。改良後の最終的な設計として、7.4 mm 長のグラファイトをヒーターに使用し、加圧アンビルとヒーターの間に 2 mm 厚の LaCrO_3 を断熱材として使用した。またヒーターに電流を伝搬させるための電極として、タンタルリングを使用した。その結果、従来の弾性波速度測定の限界温度 (1400°C) よりも高い 1700°C の高温条件下での弾性波速度測定に成功した (図 1)。図 1 において、試料両端から反射した P 波信号 R1, R2 が 1700°C の高温まで非常に明瞭に観察され、P 波速度の決定が可能である。この最高 1700°C の弾性波速度測定可能温度はマントルを構成するかんらん岩や玄武岩などの岩石が溶融開始する温度よりも高い温度であり、この技術によりかんらん岩が部分融点する高温条件下での弾性波速度測定を可能にした。

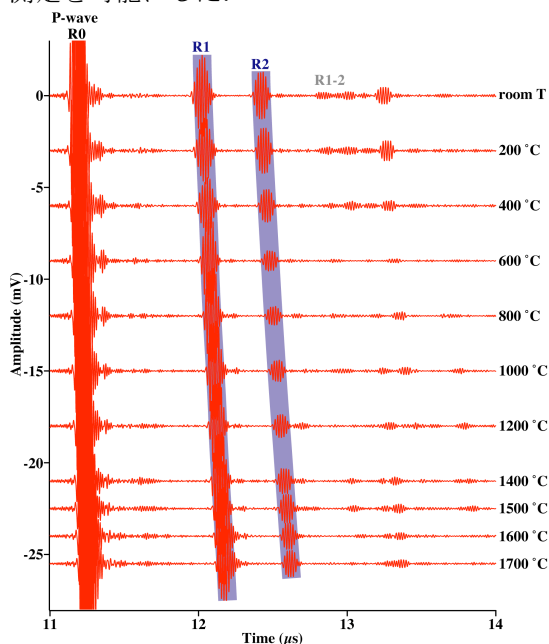


図 1. 温度上昇に伴う P 波信号変化.

(2) 溶融した岩石を封入した状態での弾性波速度測定

(1) で開発した非常に高温条件下での弾性波速度測定技術を用い、4 wt.% の玄武岩を含むかんらん岩試料を部分溶融させた状態での弾性波速度測定実験テストを行った。溶融した玄武岩メルトを封入するために、カプセル材として、

グラファイト、BN、アルミナを用いたテスト実験を行った。すべてのカプセル材料において、溶融した玄武岩メルトの封入に成功したが、グラファイトにおいては、かんらん岩試料と音響インピーダンスの値が近いため、弾性波速度測定に問題が生じた。一方、アルミナと BN を組み合わせたカプセルにおいては、アルミナ、BN 共にかんらん岩と明らかに異なる音響インピーダンスを持つため、弾性波速度測定が可能であった。4 wt.% の玄武岩を含むかんらん岩試料についての実験の結果、玄武岩部分が完全に融解する 1400°C 以上の高温条件下においても P 波信号を得ることに成功した。一方、S 波については、 1300°C 以下の部分溶融度の小さい状態では S 波信号は観察されたが、玄武岩部分が完全に溶融する 1400°C 以上では S 波信号を得ることは出来なかった。玄武岩の量を変えた実験も行った結果、ある一定のメルト量以上の溶融状態においては弾性波速度測定が不可能であることが観察された。これは、溶融度が大きい状態では試料中の弾性波減衰が大きくなるため、弾性波信号が得られなくなることが原因であると推測される。試料中における弾性波強度の減衰は、 $-\pi Lf/Qv$ (f : 周波数, L : 試料長, Q : 減衰係数, v : 弾性波速度) に比例すると考えられ、部分溶融度が上昇するに従って Q^{-1} の値が大きくなると予想される。しかしながら、 Q^{-1} の値は測定試料固有の物性のため、部分溶融した岩石の弾性波速度測定を行うために、 Q^{-1} の値の上昇に伴う弾性波信号強度の減衰は不可避である。そこで、本研究では、 Q^{-1} にかかる係数である f (周波数) の値を小さくすることにより、弾性波信号の減衰を小さくする試みを行った。

(3) 測定周波数が弾性波信号強度に及ぼす影響の評価

従来の研究で用いられてきた 60 MHz (P 波), 40 MHz (S 波) のみでなく、より低周波数の 20 MHz より 60 MHz まで 10 MHz おきにデータを収集し、超音波周波数の変化が測定に及ぼす影響を検討した。その結果、試料背面から反射した弾性波の強度は明らかに周波数に依存することが観察された (図 2)。試料背面から反射した P 波, S 波信号の強度は、低周波数下では強く高周波数下では低下することが観察された。特に、メルト量の比較的多い条件下においては、従来用いていた 40 MHz 下において S 波信号は観察されなかったが、20 MHz 条件下においては S 波信号を得ることに成功した。

これら観察された試料背面からの弾性波強度の周波数依存性は、試料中の弾性波減衰の影響を表していると考えられ、部分熔融試料のような Q^{-1} の値が大きいと予想される試料においては、周波数依存性にかかる係数 ($-\pi L/Qv$) が大きくなり、その結果、周波数増加と共に弾性波強度は強く低下したと考えられる。

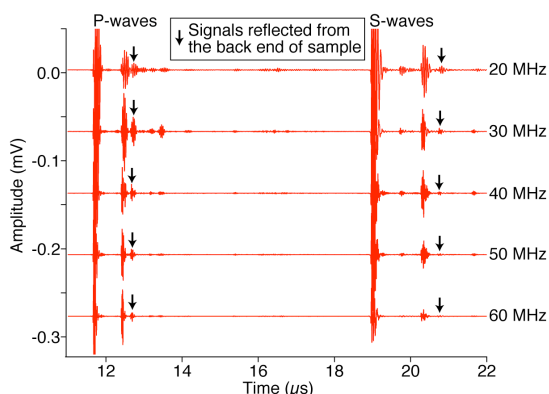


図 2. 周波数変化に伴う試料を伝搬した信号の強度の変化。

(4) 部分熔融したかんらん岩の弾性波速度変化

(1)-(3)の課題を克服する技術を開発することにより、部分熔融したかんらん岩の弾性波速度を測定する技術を開発することに成功した。そこで、開発した技術を用い、玄武岩を含むかんらん岩試料について、圧力約 3 GPa、温度最大 1500°C条件下において部分熔融したかんらん岩の弾性波速度測定を行った。

図 3 に、圧力約 3 GPa において加熱した際のかんらん岩の P 波、S 波速度、ポアソン比の変化を示している。部分熔融温度（約 1300°C）以下の低温条件下においては、温度上昇とともに、P 波、S 波速度はほぼ直線的に低下し、ポアソン比はほぼ一定であった。これは過去の研究における固体のかんらん岩の P 波、S 波速度温度依存性測定結果と調和的である。一方、部分熔融開始温度以上の高温条件下においては、P 波、S 波速度共に温度上昇に伴い急激に低下し、ポアソン比は急激に増加した(図 3)。玄武岩の熔融に伴う弾性波速度低下を見積もると、P 波速度の低下は 4%と小さいのに対し、S 波速度は 11%もの大きな低下が観察された。その結果、ポアソン比は 15%もの大きな増加をすることが明らかとなった。

以上のように、本課題で開発した部分熔融したかんらん岩の弾性波速度測定技術により、これまで技術的な困難さよりほとんど研究されてこなかった岩石の熔融が弾性波速

度に及ぼす影響を測定することが可能になった。今後、本課題で開発した技術を用いて部分熔融した岩石の弾性波速度データを集集することにより、観測されている上部マントルの地震波速度低速異常を読み解き、上部マントルのどこに、どの程度の量のマグマがどのような状態で存在するのかを明らかにすることが可能であると考えられる。上部マントルにおけるマグマの量や分布を明らかにすることは、日本列島のような火山孤の活動の議論に必要不可欠であると考えられ、そのために本課題で開発した技術は大きく貢献すると期待される。

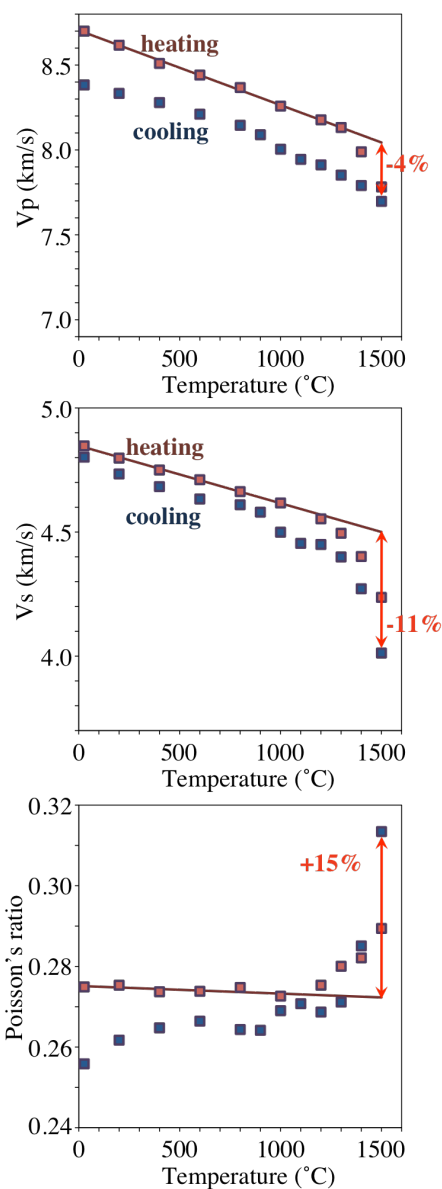


図 3. 圧力 3 GPa において部分熔融したかんらん岩の P 波、S 波速度、ポアソン比変化。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

1. Kono, Y., A. Yamada, Y. Wang, T. Yu, and T. Inoue (2011), Combined ultrasonic elastic wave velocity and microtomography measurements at high pressures, *Review of Scientific Instruments*, 82, 023906, 査読有.
2. Kono, Y., T. Irifune, Y. Higo, T. Inoue, and A. Barnhoorn (2010a), P-V-T relation of MgO derived by simultaneous elastic wave velocity and in situ X-ray measurements: A new pressure scale for the mantle transition region, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 183, 196-211, 査読有.
3. Kono, Y., S. Gréaux, Y. Higo, H. Ohfuji, T. Irifune (2010b), Pressure and temperature dependences of elastic properties of grossular garnet up to 17 GPa and 1650 K, *Journal of Earth Science*, 21, 782-791, 査読有.
4. 河野義生 (2010), 高温高压下における MgO の弾性波速度, X 線回折同時測定による圧力決定, *高压力の科学と技術*, 20, 262-268, 査読有.
5. Kono, Y., M. Nakamoto, and T. Irifune (2010c), Elastic properties of sintered diamonds with and without Co binder, *Journal of Physics: Conference Series*, 215, 012134, doi:10.1088/1742-6596/215/1/012134, 査読有.
6. Kono, Y., M. Ishikawa, Y. Harigane, K. Michibayashi, and M. Arima (2009), P- and S-wave velocities of the lowermost crustal rocks from the Kohistan arc: Implications for seismic Moho discontinuity attributed to abundant garnet, *Tectonophysics*, 467, 44-54, 査読有.

[学会発表] (計 5 件)

1. 河野義生, 井上徹, 入船徹男, 肥後祐司, 高压下における部分熔融したかんらん岩の弾性波速度測定, 日本地質学会 117 年学術大会, 2010 年 9 月 20 日, 富山.
2. Y. Kono and T. Irifune, Unified pressure scales of MgO, Au, and NaCl, and its implications for the phase transition boundaries in the mantle transition region, *Western Pacific Geophysical Meeting*, 2010 年 6 月 22 日, 台北.
3. 河野義生, 石川正弘, 有馬眞, コヒスタン古島弧から見た島弧モホ面近辺の地震学的構造, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 2010 年 5 月 26 日, 幕張.
4. 河野義生, 入船徹男, Unified phase transition boundaries of Mg₂SiO₄ polymorphs at the mantle transition region, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 2010

年 5 月 26 日, 幕張.

5. Kono, Y., M. Nakamoto, and T. Irifune, Elastic properties of sintered diamonds with and without Co binder, *Joint Airapt-22 & HPCJ-50 International Conference*, 2009 年 7 月 28 日, 東京.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河野 義生 (KONO YOSHIO)

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・グローバル COE 助教

研究者番号: 20452683

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし