

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 11 日現在

機関番号：84502
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2009 年度 ～ 2011 年度
 課題番号：21740384
 研究課題名（和文） 下部マントル条件下に至る弾性波速度測定法の開発
 研究課題名（英文） Development of elastic wave velocity measurement system under the condition of lower mantle
 研究代表者
 肥後 祐司（HIGO YUJI）
 財団法人 高輝度光科学研究センター・利用研究促進部門・研究員
 研究者番号：10423435

研究成果の概要（和文）：本研究では下部マントル構成鉱物の弾性波速度を高精度で測定するために、川井型高压発生装置、放射光 X 線及び超音波法を組み合わせた弾性波速度測定技術の開発を行なった。研究の結果、下部マントル最上部に相当する～30GPa・1873K までの高温高压条件下で、下部マントル構成鉱物の多結晶体の弾性波速度測定に成功した。

研究成果の概要（英文）：In this study, I have developed techniques for precise measurements of elastic wave velocities for polycrystalline sintered bodies of high-pressure phases at pressure up to 30GPa and temperature up to 1873K, equivalent to those of the upper most lower mantle, by a combination of Kawai-type multi-anvil apparatus, ultrasonic interferometry, and synchrotron radiation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

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：下部マントル・超音波・弾性波速度

1. 研究開始当初の背景

地球は地震波速度の変化から、地殻・マントル・核の 3 つに大別される。このうち下部マントルは地下 660km～2890km の部分を指し、地震波速度が緩やかに増加し、地震波速度の地域的变化が小さく、比較的均質な領域として知られているが、地球全体の約 50% の体積を占める下部マントルは、マントル対流やマントルプレュームの主な舞台であり、地球全体のダイナミクスを理解する上で、下部マントルの物理状態や化学組成は欠かせないファクターである。

特に、地震波速度構造は現在最も精度良く観測されている物理量であり、地球内部の物質の状態及び化学組成を推定する場合、地震波速度と直接比較できる高温高压条件下での鉱物の弾性波速度は非常に重要である。

従来の高温高压条件下における実験では、試料の長さ、密度の見積もりができず、弾性波速度や弾性定数の算出が不可能であった。そこで、放射光 X 線その場観察実験技術を組み合わせることで、高温高压条件下での試料の長さや密度の測定を可能にし、実際のマントル遷移層に相当する高温高压条件下で、高

圧鉱物の弾性波速度を明らかにしてきた。しかし、より高圧下では、試料の小型化に伴う技術的な困難さから、下部マンツルの温度圧力条件下での実験はいまだ行われていない。

2. 研究の目的

本研究課題では、実験可能な条件を下部マンツルに相当する、30GPa・1600°Cを超える条件まで、引き上げることを目的としている。マンツルの化学組成については、地球化学的研究から、pyrolite や piclogite と称される化学組成モデルが提案されてきた。両者のモデルでは化学組成（特に SiO₂）に大きな違いがあり、未だいずれの化学組成モデルが妥当であるか明らかになっておらず、地球深部科学上の最重要研究課題の一つである。そこで本研究では、高温高圧下での弾性波速度データと地震波速度データとの直接比較することにより、下部マンツルの化学組成の解明をめざす。

3. 研究の方法

(1) より高圧下で弾性波速度測定をするためには、試料の小型化とそれに伴う超音波エコーの弱化は避けられない。そこで、信号を分岐する方向性結合器と低ノイズアンプを超音波エコー測定システムに導入することによって、微弱な超音波エコーでの弾性波速度の測定を可能にする。また、超高分解能X線CCDカメラに拡大レンズ系を組み合わせることで、サブミクロンオーダーで試料長の変化を捉え、小型試料においても高精度な弾性波速度の見積もりを可能にする。

(2) 下部マンツル条件の圧力発生を可能にするために、アンビル先端サイズ 3.0mm (TEL=3.0) を用いた超音波測定用セルの開発をおこなう。これに伴い、試料サイズも直径・長さともに 1.0mm 程度となり、弾性波速度の必要な測定精度 (<0.5%) を確保するためには振動子のより高周波数化やこれに伴うノイズ対策、試料長測定精度の向上などを上記の超音波測定システムの開発と並行して行う。

4. 研究成果

高温高圧実験は大型放射光施設 SPring-8 の BL04B 設置の SPEED-1500 川井型マルチアンビル装置を用いた。第2段アンビルには切欠き 3mm のフジロイ製 TF-05 超硬アンビル、もしくは 30GPa 以上の高圧下の実験では焼結ダイヤモンドアンビル (14mm 角) を採用した。ヒーター材にはX線の透過性に優れた TiB₂+BN を用いた。超音波測定には第2段アンビルに貼り付けた LiNbO₃ の超音波発振子を 40~90MHz の高周波信号で駆動して超音波を発生させ、圧媒体内部からの反射エコーはデジタルオシロスコープを用いて観察した。今回、

1mm 以下の微小試料からの超音波エコーを捉えるために、入力信号の増幅器及び、入出力信号の分離装置を導入した。さらに高分解能 CCD カメラによる X 線ラジオグラフィ像を用いて、高温高圧条件下での試料長さを直接決定した。試料には GE 社製の Lucalox-Al₂O₃ 焼結体を用いた。発生圧力は、エネルギー分散法による圧力標準物質 (MgO) の X 線回折パターンから格子定数の決定をおこない、報告されている状態方程式 (例えば、Jamieson et al. (1982)) を用いて圧力を決定した。

超硬アンビルを用いた結果、下部マンツルに相当する圧力 27GPa・温度 1600°C までの高温高圧条件下において、弾性波速度測定に成功した。図 1 に高温高圧下での Al₂O₃ の P 波速度の測定結果を示す。圧力上昇とともに P 波速度は増加し、温度の上昇とともに P 波速度が低下する様子が明瞭に確認できた。弾性率の温度圧力依存に対する 1 次フィッティングの結果、体積弾性率 (Ks)、剛性率 (G) 及びその圧力・温度依存 (dK/dP、dG/dP、dK/dT、dG/dT) は Ks=254.6 GPa、G=162.1GPa、dK/dP=4.07、dG/dP=1.67、dK/dT=-0.018 GPaK⁻¹、dG/dT=-0.020GPaK⁻¹ となった。これは過去に 3GPa 以下の低圧下で測定された結果 (Ks=253.1GPa、G=162.8GPa、dK/dP=4.00、dG/dP=1.74; Kung et al., 2000、dK/dT=-0.019GPaK⁻¹、dG/dT=-0.021GPaK⁻¹; Goto et al., 1989) と非常に良く一致している。

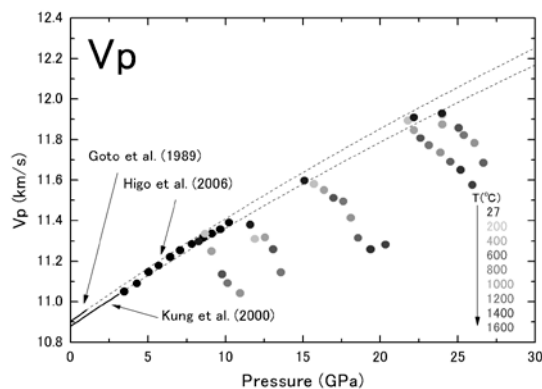


図 1 Al₂O₃ 多結晶体の高温高圧下における P 波速度変化と過去の研究の比較

今後、本研究で開発したシステムを用いて下部マンツル構成鉱物の弾性波速度の精密測定をおこなうと、下部マンツルの温度分布や化学組成が高精度で推定が可能であり、地球の化学的進化やダイナミクスに重要な知見が得られると期待される。

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 16 件)

- (1) M. Matsui, E. Ito, D. Yamazaki, T. Yoshino, X. Guo, S. Shan, Y. Higo, K. Funakoshi, Static compression of $(\text{Mg}_{0.83}\text{Fe}_{0.17})\text{O}$ and $(\text{Mg}_{0.75}\text{Fe}_{0.25})\text{O}$ ferropericlae up to 58 GPa at 300, 700, and 1100 K, *Amer. Mineral.*, 査読有, 97(1), 176-183, 2012.
- (2) T. Yoshino, E. Ito, T. Katsura, D. Yamazaki, S. Shan, X. Guo, M. Nishi, Y. Higo, K. Funakoshi, Effect of iron content on electrical conductivity of ferro-periclae with implications for the spin transition pressure, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 116, B04202, 2011.
- (3) H. Terasaki, Y. Shibazaki, T. Sakamaki, R. Tateyama, E. Ohtani, K. Funakoshi, Y. Higo, Hydrogenation of FeSi under high pressure, *Am. Mineral.*, 査読有, 96(1), 93-99, 2011.
- (4) D. Yamazaki, E. Ito, T. Katsura, K. Yoshino, S. Zhai, H. Fukui, A. Shatskiy, X. Guo, S. Shan, T. Okuchi, Y. Tange, Y. Higo, K. Funakoshi, Phase boundary between perovskite and post-perovskite structures in MnGeO_3 determined by in situ X-ray diffraction measurements using sintered diamond anvils *Am. Mineral.*, 査読有, 96(1), 89-92, DOI: 10.2138/am.2011.3499, 2011.
- (5) T. Kawazoe, Y. Nishihara, T. Ohuchi, N. Nishiyama, Y. Higo, K. Funakoshi, T. Irifune, In situ stress-strain measurements in a deformation-DIA apparatus at P-T conditions of the upper part of the mantle transition zone, *Amer. Miner.*, 査読有, 96(11-12), 1665-1672, 2011.
- (6) M. Nishi, T. Kubo, T. Kato, A. Tominaga, K. Funakoshi, Y. Higo, Exsolution kinetics of majoritic garnet from clinopyroxene in subducting oceanic crust, *Phys. Earth Plane. Inter.*, 査読有, 189(1-2), 47-55, 2011.
- (7) S. Ono, T. Kikegawa, Y. Higo, In situ observation of a garnet/perovskite transition in CaGeO_3 , *Phys. Chem. Mine.*, 査読有, 38(9), 735-740, 2011.
- (8) Y. Kono, T. Irifune, Y. Higo, T. Inoue, and A. Barnhoorn, 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. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 査読有, 183(1-2), 196-211, 2010.
- (9) Y. Kono, S. Gréaux, Y. Higo, H. Ohfuji and T. Irifune, Pressure and temperature Dependences of Elastic Properties of Grossular Garnet up to 17 GPa and 1650 K, *J. Earth Sci.*, 査読有, 21(5), 782-791, 2010.
- (10) M. Nishi, T. Kubo, T. Kato, A. Tominaga, A. Shimojyuku, N. Doi, K. Funakoshi, Y. Higo, Survival of majoritic garnet in diamond by direct kimberlite ascent from deep mantle, *Geophysical Research Letters*, 査読有, 37, L09305, doi:10.1029/2010GL042706, 2010.
- (11) A. Yokoyama, M. Matsui, Y. Higo, Y. Kono, T. Irifune, and K. Funakoshi, Elastic wave velocities of silica glass at high temperatures and high pressures. *J. Appl. Phys.*, 査読有, 107(12), 123530, 2010.
- (12) Y. Nishihara, K. Funakoshi, Y. Higo, N. Tsujino, T. Kawazoe, T. Kubo, A. Shimojuku, H. Terasaki and N. Nishiyama, Stress relaxation experiments of olivine under Earth's deep upper mantle conditions, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 査読有, 183(1-2), 164-174, doi:10.1016/j.pepi.2010.07.006, 2010.
- (13) D. Yamazaki, E. Ito, T. Yoshino, X. Guo, S. Shan, M. Nishi, Y. Higo, K. Funakoshi, Preliminary Reports on in situ X-ray Observation of "Post-Perovskite" in CaRuO_3 , *Journal of Physics: Conference Series*, 査読有, 215, 012096, 2010.
- (14) E. Ito, T. Yoshino, D. Yamazaki, S. Anton, S. Shan, X. Guo, Y. Higo, K. Funakoshi, High Pressure Generation and Investigation of the Spin Transition of Ferropericlae $(\text{Mg}_{0.83}\text{Fe}_{0.17})\text{O}$, *Journal of Physics: Conference Series*, 査読有, 215, 012099, 2010.
- (15) K. Funakoshi, Y. Higo, Y. Nishihara, High-pressure Two-dimensional Angle-dispersive X-ray Diffraction Measurement System Using a Kawai-type Multianvil Press at SPring-8, *Journal of*

Physics: Conference Series, 査読有, 215, 012027, 2010.

(16) Y. Higo, Y. Kono, T. Inoue, T. Irifune and K. Funakoshi, A system for measuring elastic wave velocity under high pressure and high temperature using a combination of ultrasonic measurement and the multi-anvil apparatus at SPring-8. J. Synchrotron Rad., 査読有, 16(6), 762-768, 2009.

〔学会発表〕(計 44 件)

(1) 肥後祐司, 舟越賢一, 入船徹男, 下部マントル条件下における超音波法による弾性波速度測定技術の開発, 第 52 回高圧討論会, 沖縄, 2011 年 11 月 11 日

(2) 肥後祐司, 舟越賢一, 岡本義弘, 河野義生, 入船徹男, 下部マントル条件に至る弾性波速度測定技術の開発, 第 51 回高圧討論会, 仙台, 2010 年 10 月 21 日

他は省略

〔その他〕

ホームページ等

http://www.spring8.or.jp/ja/facilities/research_utilization/research_utilization/structure1/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

肥後 祐司 (HIGO YUJI)

(財)高輝度光科学研究センター・利用研究
促進部門・研究員

研究者番号: 10423435