

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成28年度研究進捗評価用〕

平成25年度採択分
平成28年3月16日現在

下部マントルの化学組成と初期地球の分化過程

Chemical composition of the lower mantle and
differentiation of the early Earth

課題番号：25220712

入船 徹男（IRIFUNE TETSUO）

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・教授



研究の概要

代表者らが進めてきた高温高压下での①超音波速度の精密測定、②高品質多結晶焼結体合成、③焼結ダイヤモンドを用いた相転移・密度決定、④世界最硬ヒメダイヤ合成、等の技術を発展させ、下部マントル領域での精密実験を可能にするとともに、これらの技術を用いて地球の体積の半分以上を占める下部マントルの化学組成を制約し、固体地球の分化過程の解明を目指す。

研究分野：地球惑星科学

キーワード：地球内部ダイナミクス、鉱物物性、超高压実験、下部マントル

1. 研究開始当初の背景

高温高压下での地球内部物質の相変化の詳細な決定と、それに伴う弾性波速度・密度の精密測定は、地球の体積の半分以上を占める下部マントルの化学組成を制約する上で重要である。ダイヤモンドアンビル装置（DAC）を用いた実験により、単純な組成の鉱物の相変化はほぼ明らかになっていたが、下部マントルの化学組成を制約するためには、より現実的な化学組成を用いた精密な実験に基づいて、これらの測定を行う必要がある。

代表者らのグループは、世界に先駆けて川井型マルチアンビル装置（KMA）と超音波法による弾性波速度測定技術を、マントル遷移層中部に対応する圧力温度条件（約 20GPa, 1700K）まで拡大するとともに、焼結ダイヤモンド（SD）を用いた KMA による超高压発生と応用においても、国際的に 1、2 を争う成果をあげていた。また、独自に開発した「世界最硬」ナノ多結晶ダイヤモンド（ヒメダイヤ）の大型化に成功し、それらの超高压科学への応用が開始されていた。

2. 研究の目的

本研究では、代表者らのグループによる高温高压下での①超音波速度の精密測定、②高品質多結晶焼結体の合成、③SD を用いた相転移・密度変化の決定、④独自のヒメダイヤ合成、という4つの先進的・独創的実験技術を更に発展させる。これらの技術に基づき、下部マントル領域に対応する温度圧力下で、複雑な化学組成を持つマントル及び沈み込

むスラブ関連物質の相変化、弾性波速度・密度測定、融解関係と元素分配挙動などの実験による精密な決定を行う。得られた実験データを、地震学など地球物理学的観測結果や地球化学的分析データなどと比較し、下部マントルの化学組成を制約するとともに、固体地球の分化過程の解明を目指す。

3. 研究の方法

超音波測定と KMA を組み合わせた弾性波速度測定を、マントル遷移層下部～下部マントル領域まで拡張する。また、測定に適した高品質多結晶焼結体の超高压合成技術の開発をおこなう。これによりマントル物質の高温高压下での弾性波速度の精密決定を行う。

SD アンビルを用いた KMA 実験により、マントルや沈み込むスラブを構成する物質の、下部マントル領域における相関係や密度変化を決定する。また、始源的隕石を用いた下部マントル圧力下での融解実験を行い、リキダス相や元素分配を決定する。

ヒメダイヤの DAC 及び KMA への本格的応用を開始し、上記の SD 利用 KMA では困難な、最下部マントル領域に対応温度圧力条件下での下部マントル関連物質の相関係・密度変化・融解関係の決定を行う。

以上のような実験データに基づき、PREM 等の地震波速度・密度変化プロファイルや地球化学的データを参照し、下部マントルの化学組成を制約する。また、得られた結果に基づき、固体地球の分化過程に関するシナリオを検討する。

4. これまでの成果

従来の限界を大きく超える、30GPa・2000K 程度までの下部マントル上部条件下での、弾性波速度測定技術を確立した。この技術に基づき MgSiO₃及び CaSiO₃ペロブスカイト、様々なガーネット等の主要高压相、及びパイロライトの弾性波速度精密決定を行った。この結果、マントル遷移層下部～下部マントル最上部領域がハルツバージャイトで説明可能なこと、下部マントルの上部はパイロライト的な化学組成が適当であるとの結果が得られた。

一方で、弾性波速度測定に供するため、高品質多結晶体の高压合成技術の開発を行った。この結果、世界初といえる「透明ナノ多結晶セラミックス」の超高压合成に成功し、材料科学など学際研究面においても重要となる予期せぬ成果も生まれている。

SD アンビルを用いた KMA 実験においては、最高 65GPa・2300K 程度までの急冷回収実験と放射光 X線その場観察実験技術に基づき、パイロライトや MgSiO₃-Al₂O₃系、及び MgSiO₃-FeSiO₃系の相関係や密度変化を、下部マントル領域で決定した。これらの結果も、下部マントル上部がパイロライト的であるとする上記の結果と調和的である。また始源的隕石を用いた融解実験により、下部マントルがパイロライトとペロブスカイトの中間的化学組成を持つことを示唆する結果が得られた。一方で、下部マントル領域に対応する圧力下で、新しい含水高压相 Phase H を発見した。

ヒメダイヤの DAC と KMA への応用に関しては、特に高压 X線吸収実験において、様々な成果があがっている。KMA への応用については、50GPa 程度までの圧力発生実験を行い、SD に比べて圧力発生効率や、高い X線透過率に基づくイメージングの点での優位性が明らかになった。更に、単結晶ダイヤモンドを用いた DAC 実験では、CO₂レーザー両面加熱による MgO の融点の正確な決定や、マルチメガバール領域における MgSiO₃ポストペロブスカイトの状態方程式の精密決定などについて、本研究の一環として重要な成果があがっている。

以上のような弾性波速度・密度に関する測定結果をもとに、下部マントルの最上部はハルツバージャイト的、また上部はパイロライト的な化学組成が最も適当であるとの結論を得ている。一方、これまでに得られた始源マントル物質の融解実験からは、下部マントル上部はパイロライト的、下部はペロブスカイト的である可能性も示唆される。

5. 今後の計画

下部マントル候補物質の弾性波速度測定を 35-40GPa 領域まで行うとともに、相関係・密度変化・融解関係などの実験を、下部

マントルのより深部に対応する条件で行う。SD を用いた KMA 実験で対応可能な高温高压実験は、80GPa 程度までと見込んでいる。従って最下部マントル領域に対応する温度圧力条件での実験は、主にヒメダイヤと単結晶ダイヤモンドを用いた DAC により、加熱方法の改善（外熱加熱法及び CO₂レーザー両面加熱法など）に基づき、従来に比べてより精度の高い実験を行う。

これらの追加実験により得られる結果と、これまでに得られた上記のようなデータを地震学的モデル等と比較する。これにより、下部マントルの化学組成をより強く制約するとともに、その分化過程についても成果の取りまとめを行う。

一方で、当初想定外であった様々な透明ナノ多結晶体の合成や、多様な手法によるそれらの弾性波速度測定、またヒメダイヤの応用に向けた新たな研究も、本研究により得られた成果を基に着手する予定である。

6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）
Sakai, T., Dekura, H., Hirao, N., Experimental and theoretical thermal equations of state of MgSiO₃ post-perovskite at multi-megabar pressures, **Sci. Rep.**, 6, 22652, 2016.

Irifune, T. and Tsuchiya, T., Phase Transitions and Mineralogy of the Lower Mantle, in **Treatise on Geophysics** 2nd edition (D. Price, ed.), Elsevier, p.p.33-60, 2015.

Liu, Z., Irifune, T., Greaux, S., Arimoto, T., Shinmei, T. and Higo, Y., Elastic wave velocity of polycrystalline Mj₈₀Py₂₀ garnet to 21 GPa and 2000 K, **Phys. Chem. Miner.**, 42, 213-222, 2015.

Nishi, M., Irifune, T., Tsuchiya, J., Tange, Y., Nishihara, Y., Fujino, K., Higo, Y., Stability of hydrous silicate at high pressures and water transport to the deep lower mantle, **Nature Geo.**, 7, 224-227, 2014.

Irifune, T., Isobe, F., and Shinmei, T., A novel large-volume Kawai-type apparatus and its application to the synthesis of sintered bodies of nano-polycrystalline diamond, **Phys. Earth Planet. Inter.**, 228, 255-261, 2014.

R.W.Bunsen メダル [European Geosciences Union : 2016 年 4 月 (予定)]

紫綬褒章 [日本国天皇 : 2015 年 4 月]

A.E.Ringwood メダル [Geological Society of Australia : 2014 年 7 月]

ホームページ

<http://www.grc.ehime-u.ac.jp/>