

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料  
〔平成31（2019）年度研究進捗評価用〕

平成28（2016）年度採択分

令和元（2019）年5月16日現在

研究課題名（和文）高圧液体の挙動と初期地球進化

研究課題名（英文） Behaviour of liquids under high pressure  
and the early evolution of the Earth

課題番号：16H06285

研究代表者

廣瀬 敬 (HIROSE KEI)

東京大学・大学院理学系研究科・教授



研究の概要：主にレーザー加熱式ダイヤモンドセルを使った超高压高温実験を行い、初期地球の  
主役である液体の挙動（結晶化・元素分配・密度・価数・音速・熱伝導率）を解明することによ  
って、地球内部の初期進化を理解することを目指す。

研究分野：高圧地球科学、地球深部物質学

キーワード：初期地球、高圧、元素分配、マグマオーシャン、コア形成

1. 研究開始当初の背景

(1) 「現在の地球」にはまだ多くの謎がある。それを理解するには、地球形成時の一連の大イベントと初期の進化を理解することが重要である。

(2) 「初期地球」の主役であった高圧高温下下の液体の振る舞いや物性は未だ明らかにされていない。

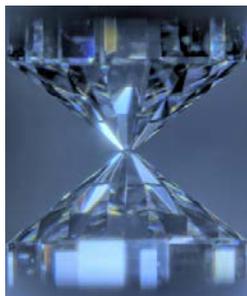
2. 研究の目的

(1) 研究代表者らがこれまで培って来た、超高压・超高温発生技術と高圧下の物性測定技術を用いて、高圧下で液体シリケイト・金属鉄合金の結晶化・元素分配・密度・価数・音速・熱伝導率を明らかにする。

(2) 得られた実験データに、理論計算結果やシミュレーションも組み合わせ、マントルとコアの初期進化、および地球史を通じた進化を理解する。

3. 研究の方法

本研究は、レーザー加熱式のダイヤモンドアンビルセル（DAC、写真）を用いた高圧高温実験が主となる。同装置を用いた静的圧縮実験によって、現在

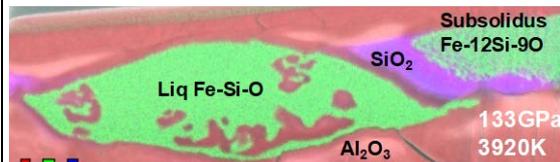


すでに地球中心の圧力温度を上回る極限環境での実験が可能である。高圧下の液体の結晶化と固体-液体間の元素分配を調べる実験は主に大学の実験室で行う。一方、液体の密度・価数・音

速・熱伝導率を高圧下で測るには放射光エックス線を使う必要がある。本研究では、SPring-8のビームラインBL10XUでX線回折・ラミノグラフィ（3次元イメージング）・X線吸収微細構造（XAFS）測定を、BL43LXUではX線非弾性散乱測定をおこなっている。

4. これまでの成果

(1) 高温のマグマオーシャン中でシリケイトから分離したコアの金属は当初多くのSiとOを含んでいたはずである。われわれのFe-Si-O合金の結晶化実験は、そのような液体コアは冷却とともに固体SiO<sub>2</sub>を結晶化し、それによってコアはその化学組成を地球史を通じて大きく変化させてきたことを示した(Hirose et al., 2017)（下図）。



(2) 多くのSiO<sub>2</sub>を結晶化させた後の現在のコアはSiとOに乏しい=他の軽元素を多く含むことを意味する。水素の金属鉄-シリケイト間の分配実験、第一原理計算による水素を含む液体鉄・固体鉄の密度と音速は、水素がコアの主要な軽元素であることを示す。また、このことは地球集積時にすでに大量の水が地球に運ばれてきていたことを意味する。

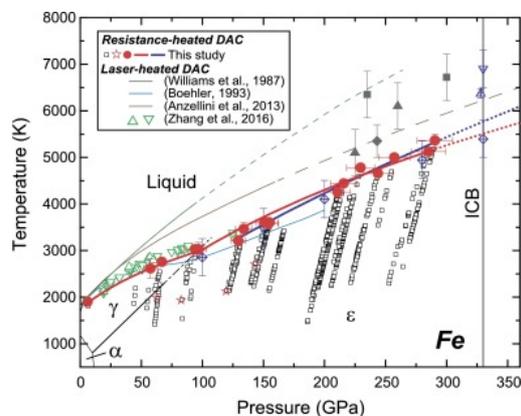
(3) 高いコアの熱伝導率ゆえに、熱対流に代わる液体コアの対流メカニズム（=地球磁場形成メカニズム）が問題になっていたが、

本研究では、液体コアからの  $\text{SiO}_2$  の析出が組成勾配を生み、それが初期地球から対流を駆動してきたことを見出した(Hirose et al., 2017)。

(4) 地球深部には成因が不明の構造がいくつも見られる。本研究では、①下部マントル深さ約 1,000km で沈み込むスラブを滞留させているのは、初期地球にマグマオーシャンから結晶化し、高粘性ゆえに対流から孤立し現在でも残っているブリッジマナイトのブロック BEAMS(Ballmer et al., 2017)、②下部マントル中位(深さ 1,200–1,800km)の地震波散乱体は、コアから結晶化し、現在はマントル中で密度中立している  $\text{SiO}_2$  のブロック(Helffrich et al., 2018)と考えられる。これら地球深部の構造は、マントルの初期進化・地球史を通じたコアの化学進化の「副産物」と理解することができる。

(5) マグマオーシャンの結晶化の実験を行い、約 60wt% 固化が進むまでブリッジマナイト単独の固体層が形成されること、マグマが Si に乏しく Fe に富む組成へと進化していくことを明らかにした。この結晶化プロセスを考慮した第一原理計算を行い、マグマオーシャンから最初に結晶化したブリッジマナイトは深さ 2,500km 以深では軽いこと(マグマが重い)、さらに 50% まで固化が進むと密度逆転は深さ 1,300km で起こることを明らかにした(Caracas et al., 2019)。

(6) 純鉄は融点が高くこれまで実験が困難とされていたが、本研究では液体純鉄の密度と音速、融解温度(Sinmyo et al., 2019)の測定に大きな成功を収めた(下図)。後者では抵抗加熱式 DAC を用いた加熱法を改良し、鉄の融解曲線を静的圧縮実験として初めて 290GPa まで行って、コアの温度が従来の推定値よりも数百度低いことを明らかにした。また、鉄-軽元素系の状態図を系統的に作成し(Mashino et al., 2019 など)、コアの化学進化と現在の組成の制約に大きく貢献した。



6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)研究代表者は二重線、研究分担者は一重下線、連携研究者(平成29年度(2017年度)まで)は点線を付してください。

(1) Hirose, K., Morard, G., Sinmyo, R., Umemoto, K., Hernlund, J., Helffrich, G., Labrosse, S., Crystallization of silicon dioxide and compositional evolution of the Earth's core, *Nature*, 543, 99–102, doi:10.1038/nature21367, 2017.

(2) Ballmer, M., Houser, C., Hernlund, J., Wentzcovitch, R., Hirose, K., Persistence of strong silica-enriched domains in the Earth's lower mantle, *Nature Geoscience*, 10, 236–240, doi:10.1038/ngeo2898, 2017.

(3) Helffrich, G., Ballmer, M., Hirose, K., Core-exsolved  $\text{SiO}_2$  dispersal in the Earth's mantle, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 176–188, <https://doi.org/10.1002/2017JB014865>, 2018.

(4) Caracas, R., Hirose, K., Nomura, R., Ballmer, M.D., Melt-crystal density crossover in a deep magma ocean, *Earth and Planetary Science Letters*, 516, 202–211, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.03.031>, 2019.

(5) Sinmyo, R., Hirose, K., Ohishi, Y., Melting of iron to 290 gigapascals determined in a resistance-heated diamond-anvil cell, *Earth and Planetary Science Letters*, 510, 45–52, 2019.

(6) Mashino, I., Miozzi, F., Hirose, K., Morard, G., Sinmyo, R., Melting experiments on the Fe–C binary system up to 255 GPa: Constraints on the carbon content in the Earth's core, *Earth and Planetary Science Letters*, 515, 135–144, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.03.020>, 2019.

ホームページ等  
<http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~hirose/>