

様 式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

科学研究費助成事業

研究成果報告書



平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25247087

研究課題名 (和文) 全熔融地球の実験的再現：初期地球内部の物質分化過程の解明

研究課題名 (英文) Experimental reproduction of whole melting Earth: elucidation of the internal differentiation processes of early Earth

研究代表者

村上 元彦 (Murakami, Motohiko)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：50401542

交付決定額 (研究期間全体)：(直接経費) 33,500,000 円

研究成果の概要 (和文)：レーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセル高温高压発生装置を用いた高温高压実験によって、地球深部における高温高压条件を再現し、ブリルアン散乱分光法およびラマン散乱分光法を併用して、地球深部物質の構造変化について研究を行った。この複合分光測定装置の開発によって、地球深部での固体の物性のみならず、融体の構造変化に対する知見を得ることに成功した。本研究成果は初期地球での物質進化に重要な制約を与えることが期待される。

研究成果の概要 (英文)：We carried out the experimental research on the structural changes of the deep mantle materials by using Brillouin scattering and Raman scattering measurement system in a laser diamond anvil cell high-pressure and high-temperature apparatus, which can achieve to reproduce the relevant condition to the deep Earth. By establishing the combined spectroscopic measurement system under high pressure and high temperature condition, we succeeded to obtain insight into the structural changes not only for the solid phases but also liquid phases under high-pressure and high-temperature condition. This result will give us the important information to constraint on the internal evolution of the early Earth.

研究分野：地球深部科学

キーワード：超高压

1. 研究開始当初の背景

近年の放射光を用いた研究によって地球深部における相平衡関係や地球深部物質の圧縮特性等が明らかになり、地球最深部の描像が全く新しく書き換えられつつある状況にある。しかしながら、現在の地球内部の様子をいかに詳細に理解しようとも、「いかにして現在の地球の基本構造ができあがったのか？」という地球の成り立ちに関する根源的な問いに対して答えを得る事は無い。

そして、その答えの一つは地球の物質分化を劇的に促した初期地球における大規模溶融状態(マグマオーシャン)の物質科学的理解にあると応募者は信ずる。現在の地球内部の層構造は、初期地球のマグマオーシャンからのダイナミックな分化過程を経て、その基本構造が形作られたと考えられており、地球史を通じて地球内部の物質分化をこれほど大規模に、かつ短期間に達成させたイベントは他にない。

また、近年の惑星形成理論からは、地球型惑星の形成期末期には、全溶融を被るような大規模な衝突イベントが起こり得るということも明らかになりつつある。従って、地球内部の物質進化史および地球の基本的層構造の成り立ちを理解する上で、全溶融状態の原始地球を実験的に再現し、溶融状態の地球深部物質の物性を明らかにすることは極めて重要である。本研究ではそのような観点に立って、マグマオーシャン深部でのマグマ自体の物性、特に構造の変化に注目してそのダイナミクスを明らかにする事を目指している。

マグマという「融体」の物性を取り扱う実験的困難さは、その温度条件の顕著な高さと、物性を抽出するために適したプローブの欠如にある。このようなマグマオーシャン深部に相当する超高压かつ超高温状態を実験室で再現する技術的困難さ、また固体の鉱物とは異なり規則的な結晶構造を持たない「融体」の物性を測定するプローブ技術の制限などから、これまで溶融状態の地球物質の物性を探る実験的研究は数万気圧程度の極めて低圧力に限られており、全溶融状態からの地球内部の物質分化過程の解明には程遠い現状にあった。

2. 研究の目的

研究代表者は上記の実験的困難さを克服するために、固体、液体等の状態に依らず物質の構造や弾性的性質を光学的な手

法により測定可能なブリルアン散乱分光法の有用性に着目し、ダイヤモンドアンビルセル高压発生装置と組み合わせることで、ごく最近、SiO₂ (Murakami & Bass, PRL, 2010) および MgSiO₃ ガラス (Murakami & Bass, PNAS, 2011) の 200 万気圧を超える超高压力条件での音速測定に成功し、100 万気圧を超える圧力で、これまで予想されていなかった超高密度化を伴う構造変化が起こることを発見した。

しかし、融体のアナログ物質としてのガラスの高压力下での挙動が、直接メルトへと適用できるかどうかは自明ではない。また音速測定の結果だけからは、例えば配位数変化や結合等の構造を規定する基本的なパラメータを定量的に決定できないという問題が依然として存在する。これらの問題を解決するために応募者は、融体からの構造の情報を定量的に抽出することが可能なラマン散乱分光法の有用性、および近年飛躍的に発展を遂げた炭酸ガスレーザーによる加熱手法に着目し、珪酸塩メルトの超高压力条件での「直接その場物性測定技術」として、炭酸ガスレーザー加熱式ダイヤモンドアンビル装置を用いた、ブリルアン散乱分光法とラマン分光法の複合測定という手法を着想するに至った。本手法を採用することで、下部マントル深部までの融解現象を実験的に再現することが可能になり、珪酸塩メルトの構造変化や高密度化現象をその場観察することができる。

一方で、レーザー加熱式ダイヤモンドアンビル装置(LHDAC)を用いた高温高压実験では、近年、地球中心部の温度圧力条件を達成することに成功はしたが、超高温発生技術の問題から、下部マントル深部から地球中心部の条件における融解実験を実現することは依然として非常にチャレンジングな課題といえる。また、レーザー加熱の安定性という問題からLHDACにおける実験では、特に地球浅部の低圧力条件での融解現象を正確に捉えることが難しいと言える。このようなLHDACの実験条件の守備範囲の優位性とデメリットに着目し、低圧力条件においては、温度の安定性や試料サイズに優位性を持つマルチアンビルプレス装置を用いた超音波法によって、また下部マントル深部から地球中心部における超高压力条件下では、高強度レーザー誘起衝撃波発生装置を用いた時間分解 X 線シャドウグラフ法によって全溶融地球を実験的に再現し、メルトの構造変化を捉えるという着想に至った

3. 研究の方法

本研究では、そのような実験的困難をこれまで応募者の培ってきた超高温高压実験技術と極限状態下での物性測定技術を最大限発揮して克服を目指すものであり、発生温度圧力条件の問題と、メルトからの構造の情報を有効に引き出すプローブの問題を解決する実験測定技術として、圧力の増加に応じて「マルチアンビル装置を用いた超音波法」+「レーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセル装置を用いたブリルアン散乱及びラマン散乱複合分光測定」+「高強度レーザー誘起衝撃波圧縮装置を用いたX線シャドウグラフ法」を採用し、それぞれの手法の優位性が最も発揮できる条件において、融体からの直接物性測定を行うという方法論を提案するに至った。

4. 研究成果

1) 高温高压その場弾性波速度測定システムの温度測定系の改良を行った。温度測定系の焦点系光学系にトリプレットレンズを用いて、従来の光学系での温度測定システムでは測定できなかった低温状態(～1200K)の測定を可能にし、さらに高温でプランクの式へのフィッティング悪化を劇的に改善することで、極めて精度の高い温度測定システムを構築した。2) 高压条件での試料の融解状態での弾性波速度測定及びラマン散乱同時測定システムを構築した。CO₂ レーザーによる加熱光学系を用いて、ダイヤモンドアンビルセル内での高压試料を加熱し融解させた状態でのブリルアン散乱およびラマン散乱分光同時測定できるシステムを構築した。3) 構築したシステムを用いて、超高压力条件でのH₂O、アンモニア液体の弾性波速度測定に成功した。4) 鉄を含有する下部マントルの主要構成鉱物であるプリジマナイト相の弾性波速度測定を最下部マントル圧力条件まで行い、下部マントルの鉱物学的モデルの構築を行った。この結果より、鉄の影響で下部マントル中部付近に弾性波の大きな傾向の変化があることを実験的に実証し、この傾向の変化によって下部マントルの地震学的モデルをより再現可能であることが分かった。5) ペロブスカイト相-ポストペロブスカイト相転移における弾性波速度変化を圧力100万気圧程度まで測定し、ある実験条件でのみ合成されたポストペロブスカイト相だけが極めて大きな速度ジャンプを生成することを発

見した。6) ZrO₂ ガラスの超高压力条件での弾性波速度測定を行った。

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)

M. Murakami, A.F. Goncharov, N. Hirao, R. Masuda, T. Mitsui, S.-M. Thomas, C.R. Bina
High-pressure radiative conductivity of dense silicate glasses with potential implications for dark magmas.

Nature Communications, 5:5428 (2014)
doi:10.1038/ncomms5428 査読有

〔学会発表〕(計9件)

M. Murakami, Structure of silicate glass under ultrahigh-pressure,
Goldschmidt2013, Firenze (Italy), 8/27, 2013

〔図書〕(計1件)

M. Murakami, Wiley, Physics and chemistry of the deep earth. Chapter 6, Chemical composition of the Earth's lower mantle: constraints from elasticity. 2013, p.185-212

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<http://epms.es.tohoku.ac.jp/minphys/murakami/Welcome.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村上 元彦 (Murakami Motohiko)

東北大学 理学研究科 教授

研究者番号: 5 0 4 0 1 5 4 2

(2) 研究分担者

坂巻 竜也 (Sakamaki Tatsuya)
東北大学 理学研究科 助教
研究者番号：3 0 6 3 0 7 6 9