

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：16301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05470

研究課題名(和文)全溶融地球の冷却と原始マントル成層構造

研究課題名(英文)Crystallization of the magma ocean and chemical stratification of the primordial mantle

研究代表者

野村 龍一(Nomura, Ryuichi)

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・特定助教

研究者番号：40734570

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,600,000円

研究成果の概要(和文)：地球形成期の巨大衝突によるマントルの全溶融とその後の結晶化による化学分化プロセスの実験的解明研究は、レーザー加熱式ダイヤモンドアンビル高圧実験装置が内包する技術的諸問題によりその進展が阻まれている。本課題では高温実験技術の高度化(ボロン添加ダイヤモンドヒーターの導入)および新しい高圧その場化学分析技術(X線ラミノグラフィー)を開発することによってこれらの技術的問題を解決する土台を作った。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to understand the chemistry of crystallizing magma ocean based on high-pressure experiments using diamond anvil cell. Aiming at solving technical problems which may be the cause of inconsistency on melting phase relations reported by various groups, we (1) have introduced X-ray laminography to construct high-pressure and high-temperature in-situ X-ray chemical imaging measurement system at BL47XU, SPring-8, (2) have developed an internal resistance-heating technique using boron-doped diamond heater. In addition, we have developed large-strain, torsional deformation apparatus at high pressures up to 135 GPa with a help of hard nano-polycrystalline diamond anvils.

研究分野：高圧地球科学

キーワード：地球・惑星内部構造 惑星起源・進化 地球化学 地殻・マントル物質 岩石・鉱物・鉱床学

## 1. 研究開始当初の背景

月を形成する巨大衝突の数値シミュレーション研究により、地球はその形成期、ほぼ全溶融を経験したと考えられている。その後の冷却に伴う溶融マンツルの結晶化・化学分化プロセスが原始マンツルの化学成層化を促し、地球化学で存在が示唆されている隠れた始原的リザーバーの形成に寄与したと考えられている。初期地球におけるマンツル化学進化についての実験的研究に関して、マンツル結晶化の際の晶出相順序や組成分化(固相-液相間元素分配)といった知識は、主にマルチアンビル高圧装置による約 30 GPa, 3000 K までの圧力温度範囲の実験データに基づいており、より高圧高温の実験データはダイヤモンドアンビル超高压装置を用いた半定量的なものに限られていた。

そこで本課題研究では、研究代表者が今までに培ってきたダイヤモンドアンビル装置によるマンツル物質融解実験と微小回収試料の化学分析技術(Nomura et al., 2011; 2014)を用い、実際に初期地球で起きた可能性がある超高压・超高温環境下(<136 GPa, <5400 K)で溶融マンツルの結晶化実験を行うことにより、初期地球のマンツル化学進化プロセスの解明を目指すことが当初の予定であった。

しかしながら近年、世界中の様々なグループによるレーザー加熱式ダイヤモンドアンビル装置を用いた融解実験において、地球マンツルのモデル組成であるパイロライト(Andrault et al., 2012; Tateno et al., 2014)や玄武岩組成(Andrault et al., 2014; Pradhan et al., 2015)について、晶出相順序や分配係数、融解温度について総合的でない実験データが報告されている。これらはレーザー加熱に付随する大きな温度勾配、輻射温度測定法における測温の不定性など、実験技術上の問題に起因する可能性が高い。そのため、実際に初期地球の化学進理解のための様々な実験データを取得する前に、これらの問題を解決することが早急の課題であった。

## 2. 研究の目的

本課題研究の目的は、レーザー加熱式ダイヤモンドアンビル装置が抱える様々な問題を、既存技術の高度化および新技術の導入によって解決することである。以下が実験技術上の問題点とその解決法である。

(1) 実験毎に異なるジオメトリのサンプルを用いることによる、輻射温度測定における温度の不確かさを補うため、その場環境で様々な圧力温度の融解相関係を一度に決定できる新たな実験系の開発

(2) レーザー加熱式ダイヤモンドアンビル装置に付随する大きな温度勾配の影響を排除した上で、マグマ結晶化に伴う晶出相順序や組成進化(分配係数)の実験データを取得すること

## 3. 研究の方法

(1) 2重エネルギーX線を用いた化学的イメージング法(Tsuchiyama et al., 2013; Nomura et al., 2014)を高圧その場実験系に最適化した上で導入する。

(2) 技術開発により、高圧試料の空間均質な加熱が可能な内部抵抗加熱式ヒーターの発生可能温度を向上させる。

## 4. 研究成果

(1) 大型放射光施設 SPring-8 のイメージングビームライン BL47XU にて、ラミノグラフィを用いた高圧その場化学イメージング手法を開発した(論文<sup>9</sup>)。この技術により、単一のサンプルに対し連続的に圧力温度を変えて融解相関係をその場決定可能な技術が確立した(論文<sup>8</sup>)。

(2) ボロン添加ダイヤモンドヒーターを導入することで高温均質加熱の可能性を探ったほか、レーザー加熱式ダイヤモンドアンビル装置による大きな温度勾配下での局所平衡な接触2相間組成データと従来のマルチアンビル高圧装置による融解相関係の精密な実験データ、熱力学を組み合わせることで、全マンツル圧力下でのマンツル物質の融解相図を構築することに思い立ち、第一歩として MgSiO<sub>3</sub>-CaSiO<sub>3</sub> 系相図を決定した(論文<sup>2</sup>)。

(3) 本研究で開発したイメージング技術が超高压変形実験にも応用可能である点を見出し、新たな装置開発に取り組んだ。結晶化していく固体側マンツルのダイナミクスの理解には、超高压下でのマンツル物質のレオロジー的性質の理解が必要不可欠であり、全マンツル圧力で超高压変形実験が可能な試験機の開発が求められていた。本課題では、回転式ダイヤモンドアンビル超高压変形実験装置の実験可能圧力を全マンツル圧力(135 GPa まで)まで向上させ、歪と応力のその場測定が可能な実験系を立ち上げた(論文<sup>5</sup>)。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計11件)

1 A step towards better understanding of behavior of organic materials at simultaneous high pressures and high temperatures

Nadezda Chertkova, Hiroaki Ohfuji, Ryuichi Nomura, Hirokazu Kadobayashi, and Tetsuo Irifune, High Pressure Research, 査読有, in press. doi: 10.1080/08957959.2018.1476506

2 Melting phase relations in the MgSiO<sub>3</sub>-CaSiO<sub>3</sub> system at 24 GPa

Ryuichi Nomura, Youmo Zhou, and Tetsuo Irifune (2017) Progress in Earth and Planetary Science, 査読有, 4, 34. doi: 10.1186/s40645-017-0149-2

3 Anvil design for slip-free high pressure deformation experiments in a rotational diamond anvil cell

Shintaro Azuma, Ryuichi Nomura, Kentaro Uesugi, Yuki Nakashima, Yohei Kojima, Shunta Doi, and Sho Kakizawa (2018) High Pressure Research, 査読有, 38, 23-31. doi: 10.1080/08957959.2017.1396327

4 Reconciling magma-ocean crystallization models with the present-day structure of the earth's mantle

Maxim D. Ballmer, Diogo L. Lourenço, Kei Hirose, Razvan Caracas, and Ryuichi Nomura (2017) Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 査読有, 18, 2785-2806. doi: 10.1002/2017GC006917

5 High-pressure rotational deformation apparatus to 135 GPa

Ryuichi Nomura, Shintaro Azuma, Kentaro Uesugi, Yuki Nakashima, Tetsuo Irifune, Toru Shinmei, Sho Kakizawa, Yohei Kojima, and Hirokazu Kadobayashi (2017) Review of Scientific Instruments, 査読有, 88, 044501. doi: 10.1063/1.4979562

6 高温高圧実験で探る地球深部始源的希ガスリザーバーの在処

角野 浩史, 貴志 智, 野村 龍一, 三部 賢治, 館野 繁彦, 鍵 裕之 (2017) 高圧力の科学と技術, 査読有, 27, 266-277. doi: 10.4131/jshpreview.27.266

7 ダイヤモンドアンビル装置を用いた地球深部物質の先端的研究

野村 龍一 (2017) 高圧力の科学と技術, 査読有, 27, 149-155. doi: 10.4131/jshpreview.27.149

8 高圧高温その場 X 線ラミノグラフィで切り拓く新しい超高圧地球科学

野村 龍一 (2017) SPring-8/SACLA 利用者情報, 査読無, 22, 22-25. <https://user.spring8.or.jp/sp8info/?p=34444>

9 High-pressure in situ X-ray laminography using diamond anvil cell

Ryuichi Nomura, Kentaro Uesugi (2016) Review of Scientific Instruments, 査読有, 87, 046105. doi:10.1063/1.4948315

10 Melting in the FeO-SiO<sub>2</sub> system to deep lower-mantle pressures: Implications for subducted Banded Iron Formations

Chie Kato, Kei Hirose, Ryuichi Nomura, Maxim D. Ballmer, Akira Miyake, Yasuo

Ohishi (2016) Earth and Planetary Science Letters, 査読有, 440, 56-61. doi:10.1016/j.epsl.2016.02.011

11 Low core-mantle boundary temperature inferred from the solidus of pyrolite

Ryuichi Nomura (2015) SPring-8 Research Frontiers 2014, 査読無, 74-75. [http://www.spring8.or.jp/ja/news\\_publications/publications/research\\_frontiers/html/rf14](http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/publications/research_frontiers/html/rf14)

〔学会発表〕(計19件)

1 (招待講演) ダイヤモンドアンビル装置を用いた高圧その場 X 線ラミノグラフィの開発と高圧地球科学への応用

野村 龍一, 東真太郎, 上杉健太郎, 入船徹男 (2018年1月8日[月]) 第31回日本放射光学学会年会・放射光科学合同シンポジウム, つくば国際会議場, 茨城.

2 (招待講演) 高圧 in-situ 結像型 X 線顕微ラミノグラフィの地球深部科学への応用

野村 龍一 (2017年11月29日[水]) 第14回 X 線結像光学シンポジウム, 筑波大学大学会館国際会議室, 茨城.

3 Development of rotational diamond anvil cell for ultra-high pressure deformation experiments

野村 龍一, 東真太郎, 上杉健太郎, 入船徹男 (2017年11月10日[金]) 第58回高圧討論会, 3B13, 名古屋大学, 愛知.

4 高圧実験から探るマグマオーシャンの冷却分化過程

野村 龍一 (2017年8月27日[日]) 「核-マントルの相互作用と共進化」第一回若手研究集会, 東京大学地震研究所2号館第2会議室, 東京.

5 Development of rotational diamond anvil cell for ultra-high pressure deformation experiments

Ryuichi Nomura, Shintaro Azuma, Kentaro Uesugi, Tetsuo Irifune (August, 2017) AIRAPT 26, Beijing, China.

6 高圧実験から制約する核-マントルの化学: 経過報告

野村 龍一, 桑原 秀治, 國本 健広, 東真太郎 (2017年3月27日[月]) 新学術領域研究平成28年度成果発表会, 海洋研究開発機構 (JAMSTEC) 横浜研究所三好記念講堂, 神奈川.

7 High-pressure rotational deformation apparatus to 135 GPa

Ryuichi Nomura, Shintaro Azuma, Kentaro Uesugi, Yuki Nakashima, Tetsuo Irifune,

Toru Shinmei (2017年3月1日[水]) 第4回 PRIUS シンポジウム, 愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター, 愛媛.

8 High-pressure rotational deformation apparatus to 135 GPa  
Ryuichi Nomura, Shintaro Azuma, Kentaro Uesugi, Yuki Nakashima, Tetsuo Irifune, Toru Shinmei (November, 2016) 2016 International Conference on the Earth's Deep Interior, Wuhan, China.

9 放射光 X 線ラミノグラフィーの超高压変形実験その場観察への応用  
野村龍一, 東真太郎, 上杉健太郎, 中島悠貴, 入船徹男, 新名亨 (2016年10月28日[金]) 第57回高压討論会, 3B09, 筑波大学 大学会館, 茨城.

10 (受賞講演) ダイヤモンドアンビル装置を用いた地球深部物質の先進的研究  
野村龍一 (2016年10月26日[水]) 第57回高压討論会, 筑波大学 大学会館, 茨城.

11 ダイヤモンドアンビルセルを用いた高压その場 X 線ラミノグラフィー撮像法の開発  
野村龍一, 上杉健太郎 (2016年5月23日[月]) 日本地球惑星科学連合 2016 年度連合大会, 幕張メッセ, 千葉.

12 ダイヤモンドアンビルセルを用いた高压その場 X 線ラミノグラフィー撮像法の開発  
野村龍一 (2016年3月28日[月]) 新学術領域研究 平成 27 年度成果発表会, 東京大学 地震研究所, 東京.

13 地球深部の構造と進化: 今までに分かったこととこれから目指すこと~大型放射光/中性子線施設を用いた実験的研究~  
野村龍一 (2016年3月11日[金]) 物性物理学・一般物理学分野の展開と大型研究計画, 日本学術会議, 東京.

14 抵抗加熱式ダイヤモンドアンビルセルを用いた液体鉄合金の XAFS 測定  
野村龍一 (2016年2月23日[火]) 第3回 PRIUS シンポジウム, 愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター, 愛媛.

15 ダイヤモンドアンビルセルを用いた高压その場 X 線ラミノグラフィー撮像法の開発  
野村龍一, 上杉健太郎 (2015年11月11日[水]) 第56回高压討論会, JMS アステールプラザ, 広島.

16 High-pressure in situ x-ray laminography using diamond anvil cell  
Ryuichi Nomura, Kentaro Uesugi (November 4, 2015) The Earth's Mantle and Core: Structure, Composition, Evolution, Ehime,

Japan.

17 Core formation and metal-silicate partitioning

野村龍一 (2015年10月16日[金]) Strategies on geochemical studies in "Core-Mantle Evolution", 新潟大学, 新潟.

18 (招待講演) パイロライトソリダス温度から推定される低いコア-マントル境界温度  
野村龍一 (2015年9月12日[土]) 地球惑星科学研究会・高压物質科学研究会・機能性材料ナノスケール原子相関研究会 合同研究会, 九州大学 筑紫キャンパス C-CUBE, 福岡.

19 超高压下での分配実験: 今できることとこれからできるようにすること

野村龍一 (2015年8月7日[金]) キックオフシンポジウム, 愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター, 愛媛.

〔その他〕

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/ryuichinomura85/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野村龍一 (NOMURA, Ryuichi)

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・特定助教

研究者番号: 40734570