

令和 3 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：特別推進研究

研究期間：2016～2020

課題番号：16H06285

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

研究代表者

廣瀬 敬 (Hirose, Kei)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：50270921

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 462,730,000円

研究成果の概要(和文)：初期地球の主役である「液体」の挙動から、液体コアの化学組成はその形成直後から大きく変化してきたことを見出した。それに伴ってコア中の対流が駆動され、初期地球から地球磁場が維持されてきたことを明らかにした。また、地球深部に観測される、いくつもの構造や地震波速度異常は、マントルとコアの化学進化の副産物であることがわかった。さらに、水素は高圧下で強い親鉄性を示すことから、地球形成時に運ばれてきた水のほとんどがコアに分配され、マントル・地表にはわずかな量だけが残されたことが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、地球の誕生、地球磁場の形成・維持、マントルの化学進化、地球深部の構造の成因、などの地球惑星科学の大きなテーマに関して、重要な示唆に富む。また、長期間にわたる惑星磁場と海の保持は、地球に限らず、太陽系内外の惑星・衛星における生命の起源と進化にとっても重要である。また本研究で開発された「液体の密度の精密決定法」は、あらゆる液体に適用可能であり、材料科学などへ広く応用されることが期待される。

研究成果の概要(英文)：From the behavior of liquids that played leading roles in the early Earth, we found that the chemical composition of the liquid core has changed to a large extent since its formation. It has driven core convection and geodynamo, resulting in the formation and preservation of the Earth's magnetic field. We also found that enigmatic structures and seismic velocity anomalies observed in the deep Earth are by-products of the chemical evolution of the mantle and core. Furthermore, since hydrogen was found to be strongly siderophile (iron-loving) under high pressure, most of the water transported during Earth accretion was distributed into the core, leaving only a small amount in the mantle and on the surface.

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

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 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」の主役であった高压高温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。

(3) 地球形成時に地球はマグマオーシャンに覆われていたとされる。マグマオーシャン固結時こそ、固体地球の出発点である。出発点を知ることは現在の地球の理解にもつながる。

(4) コアとマンツルの分離(コアの形成)は初期地球における最大のイベントである。それを理解することは、コアの進化の理解にとって重要である。

(5) 熱伝導率の高いコアの対流メカニズム、またそれに伴う地球磁場の形成と維持のメカニズムは、コアの「新しいパラドックス」とされている。

### 2. 研究の目的

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压下の物性測定技術を用いて、高压下で液体シリケート・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。得られた実験データに、理論計算やシミュレーションも組み合わせて、以下の3つの問題を理解する。

(A) マグマオーシャンの結晶化とマンツルの初期成層構造

(B) コアとマンツルの分離

(C) コアの結晶化と地球磁場

### 3. 研究の方法

本研究は、主にレーザー加熱式のダイヤモンドアンビルセル(DAC、右写真)を用いた高压高温実験によって、高压下にある「液体」の結晶化・元素分配・密度・価数・配位数・音速・熱伝導率を解きあかし、上記の研究目的にある3つの問題の理解を目指した。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。



(1) 結晶化と元素分配については、高压下で融解させた試料を回収し、収束イオンビーム(FIB)装置を用いて、試料の加熱スポットの断面を正確に切り出したのち、電子線マイクロアナライザー(EPMA)と北大に設置されている二次イオン質量分析法(SIMS)によって元素定量分析を行った。これらの実験で得られたデータを基に結晶化の熱力学モデルを構築した。また、新たに得られたコア-マンツル間の水素の分配と地球の成長を同時に扱ったシミュレーションを行い、地球・その他の岩石惑星への水輸送とコア中の水素量について検討した。

(2) 液体の密度は、放射光施設 SPring-8 のビームライン BL10XU で取得した X 線回折(XRD) データから得られる。シグナルが弱い、得られる密度の不確かさが大きいという従来の問題を克服し、超高压下でも誤差 1% 以下で決定することに成功した(以下、研究成果 6 を参照)。また第一原理計算によっても、液体鉄合金の密度・縦波速度を求めた。これらを観測と比較してコアの軽元素組成を検討した。

(3) 価数・配位数の決定は、シリケートガラス中に微量含まれる親鉄元素について行った。放射光施設 SPring-8 のビームライン BL01B1・BL10XU、Photon Factory, KEK のビームライン BL4A において、高压下で X 線吸収微細構造(XAFS)スペクトルを得て、そこから酸素との原子間距離を求めることによって、タングステンなどの親鉄元素の価数と配位数を決定、コア形成時におけるコア-マンツル間の分配への影響を考察した。

(4) 液体の音速は、SPring-8 のビームライン BL35XU と BL43LXU で得られる、X 線非弾性散乱(IXS)スペクトルから高压高温その場で測定された。上記(2)同様、観測と比較してコアの軽元素組成を検討した。

(5) 液体金属の熱伝導率は、その電気抵抗率を高压高温下で測定し、Bloch-Grüneisen の法則から熱伝導率に変換することによって得られた。各軽元素の効果(不純物抵抗)をそれぞれ定量化し、コアの熱伝導率を推定した。

### 4. 研究成果

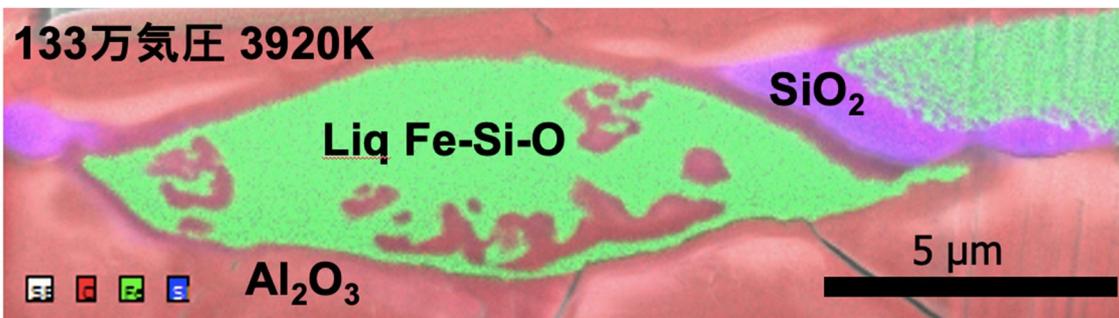
本研究は、初期地球の主役である「液体」の挙動(結晶化・元素分配・密度・価数・配位数・音速・熱伝導率)を高压下で解明することにより、地球内部の初期進化を理解することを主眼とした。われわれは、液体コアの化学組成はその形成直後から大きく変化してきたことを見出し、それに伴ってコア中の対流が駆動され、初期地球から地球磁場が維持されてきたことを明らかに

した。また、地球深部に観測される、いくつかの構造や地震波速度異常は、マントルとコアの化学進化の副産物であることがわかった。さらに、水素は高圧下で強い親鉄性を示すことから、地球形成時に運ばれてきた多くの水のほとんどがコアに分配され、マントル・地表にはわずかな量だけが残されたことが明らかになった。以下に、6つの重要な成果につき詳しく述べる。

### 1) 液体コアの化学組成はその形成直後から大きく変化してきた

初期の地球はマグマの海(マグマオーシャン)に覆われ、その中をコアを作った金属鉄が雨粒のように落下していったとされる。コアとマントル間の親鉄元素の分配に基づいた近年のコア形成モデルはどれも、3,000ケルビンを超える高温のマグマオーシャンと金属鉄が化学平衡に至り、マントルの主要元素であるSiとOが多量に溶融金属鉄中に取り込まれることがわかっている。つまり、「地球形成直後のコア」は多くのSiとOを含んでいたはずである。

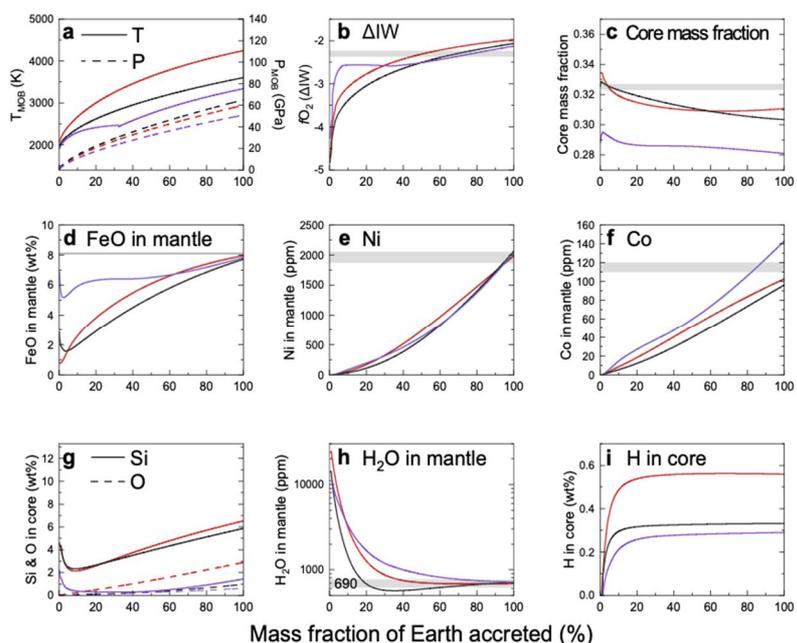
われわれ Hirose et al. (2017 Nature)のFe-Si-O合金の結晶化実験は、そのような液体コアは冷却とともにSiO<sub>2</sub>を結晶化し(下図)、その結果コアはその化学組成を地球史を通じて大きく変化させてきたことを示した。さらに Helffrich, Hirose et al. (2020 GRL)はMgを含んだ液体Fe-Si-O-Mgの結晶化実験を行い、SiO<sub>2</sub>のみならず、コアからシリケートメルト(マグマ)も析出することを見出した。現在のコア-マントル境界の温度が4,000Kであるとすると、現在までに析出したSiO<sub>2</sub>+シリケートメルトの総量はコアの4wt%にも達する。



### 2) 現在のコアの主要な軽元素は水素

コアの密度は鉄よりも8%も小さいことから、コアに「軽元素」が多量に含まれていることが知られている(下記6も参照)。上記1の結果は、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、つまり「他の軽元素」がコアに存在することを意味する。本研究では、コアがマントルから分離したとされる高圧高温下(典型的には50万気圧/3,500K)で、含水マグマオーシャン(シリケートメルト)と溶融鉄合金間の水素の分配実験を行い、シリケートメルト中のおよそ50倍の水素が金属鉄に入ることを示した(Tagawa et al., 2021 Nature Commun.)。

この結果を用いて、地球の集積(成長)とコア形成を同時に扱ったシミュレーションを実施し、現在のマントル中の水と海水の量を説明する複数のモデルを得たところ(右図)一定の割合で原始地球に水が輸送されてきた場合、モデルの違いによらず、コアには0.3-0.6wt%の水素が含まれていることがわかった。これは、純鉄と比べたコアの密度欠損の3-6割を説明する量である。このことは、地球集積時に海水の30-70倍の水が地球に運ばれてきたことを意味する。さらに

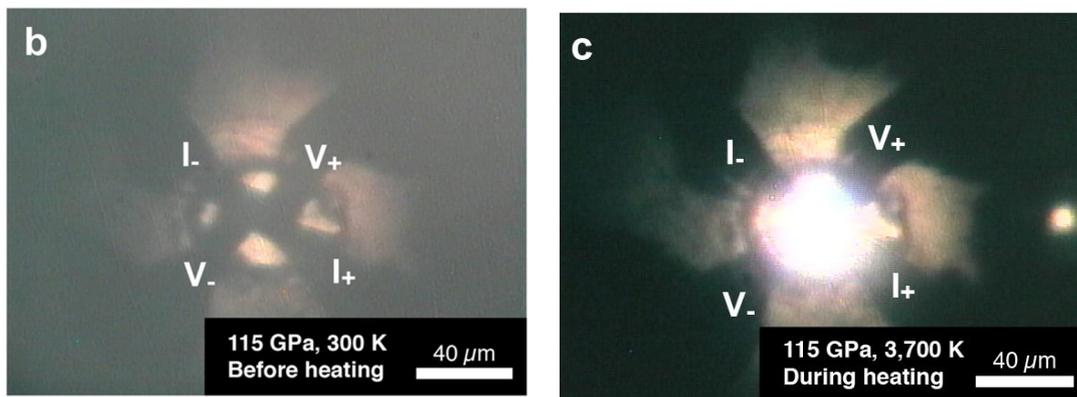


第一原理計算によっても、水素を含む液体鉄は外核の地震波観測データをよく説明することを示し、水素がコアの主要な軽元素であることを確認した(Umemoto and Hirose, 2020 EPSL)。

### 3) 初期地球から、コアの対流は組成勾配によって駆動され、地球磁場が維持されてきた

われわれの過去の実験 (Gomi et al., 2013 PEPI; Ohta et al., 2016 Nature) が従来の推定値よりも3倍高いコアの熱伝導率を得たことから、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 (熱対流だとするとコアの冷却スピードが速すぎ、マントルが全溶融していた時代が20億年間も続いた必要がある)。これはP. Olsonによって「新しいコアのパラドックス」と呼ばれている。

本研究では、熱伝導率異方性(Ohta et al., 2018 Front. Earth Sci.)や固体・液体の熱伝導率の差 (Suehiro, 2020 PhD thesis) を考慮しても、コアの熱伝導率が十分に高く、熱対流が困難であることを示した。電気抵抗率(熱伝導率)の測定を下図に示す(左が高圧下加熱前、右が加熱中)。代わりに、上記1に示したように、液体コアからのSiO<sub>2</sub>+シリケートメルトの析出が、コア最上部に組成勾配を生み、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 Nature; Helffrich, Hirose et al., 2020 GRL)。地球磁場がいつから存在するかについては古地磁気学において論争が続いているが、われわれの発見はコア形成後間もない頃より地球磁場が存在していたことを示唆している。



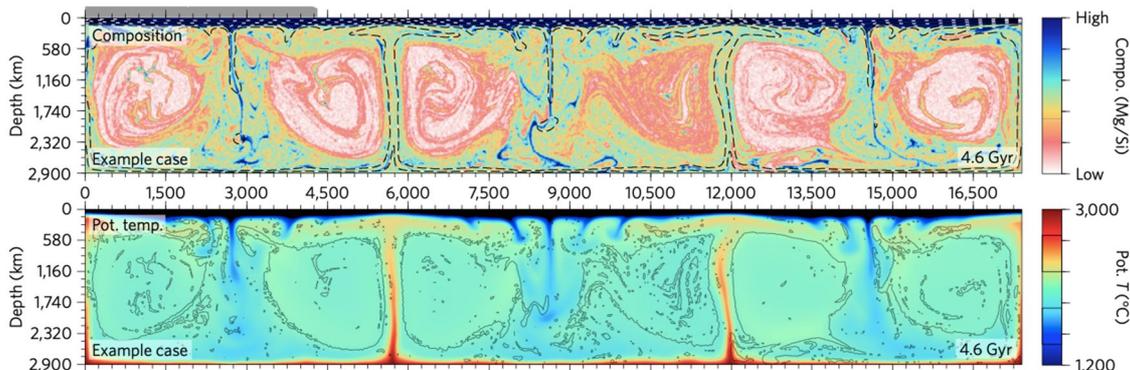
### 4) コアからマントルへの物質移動メカニズムの解明

コアとマントルの境界部から上昇してくるとされる高温のブルームに由来する、ホットスポットのマグマの化学組成分析から、コア物質のマントルへの付加が繰り返し指摘されてきたが、そのメカニズムについてはこれまで明らかにされていなかった。上記1に示した、コアから析出したSiO<sub>2</sub>+シリケートメルトは低密度であるため、その後マントルへ付加される。現在のコア-マントル境界の温度が4,000Kであるとする、初期地球から現在までにコアからマントルへ付加された総量はマントルの1.5wt%にもなり、これがコアからマントルへの主要な物質移動メカニズムであることがわかった。さらに、コア由来のシリケートメルトにはさまざまな微量元素が含まれることから、コアに特徴的な同位体比を持つ元素がマントル側へと輸送され、マントルの同位体組成にも大きな影響を与える。これにより、例えば、ホットスポットのマグマの低い<sup>182</sup>W/<sup>184</sup>W同位体比を説明することができる(Helffrich, Hirose et al., 2020 GRL)。

### 5) 地球深部に観測される構造の多くは、マントルとコアの化学進化の「副産物」

地球科学において、地球内部の構造の成因解明は、第一級の研究テーマである。地球深部には成因が不明の構造がいくつも観測される。われわれの過去・最新の研究でも示されているように (Murakami et al., 2012 Nature; Wakamatsu, 2021 PhD thesis) 下部マントルはMgSiO<sub>3</sub>成分に富む(上部マントルに比べてMg/Si比が低い)可能性が指摘されてきた。本研究では、マントル深部にまで及んだマグマオーシャンが60%程度固結するまでMgSiO<sub>3</sub>ブリッジマナイト単独の結晶化が続き(Caracas et al., 2019 EPSL)、その際に形成されたブリッジマナイトのブロック(BEAMS)は高粘性ゆえに対流から孤立し現在でも下部マントルに残されている可能性が高いことを示した(Ballmer et al., 2017 Nature Geoscience) (下図、上パネル=組成分布図の赤部分がBEAMS、下パネル=温度分布図)。沈み込む海洋プレート(スラブ)が下部マントルの深さ約1,000km付近で滞留するケースが多いことが最近の地震学的観測から明らかになっているが、鉦物物理学的には深さ1,000km付近でスラブの沈み込みが妨げられる明確な理由がなく、その原因は謎とされていた。高粘性のBEAMSがスラブの沈み込みを妨害することにより、このようなスラブの運動も説明できる。

本研究では、この 下部マントルの BEAMS 以外にも、 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  $\text{SiO}_2$  ブロック (Helfrich et al., 2018 JGR)、 マントルの底の超低速度域 (ULVZ) は、同じくコアから析出したシリケートメルト (Helfrich, Hirose et al., 2020 GRL)、 E'層 (外核最上部の低速度層) は外核最上部で  $\text{SiO}_2$  が現在析出している領域 (Helfrich et al., submitted)、 および F層 (外核最下部の低速度層) は外核最下部で鉄合金が結晶化している領域 (Bonati, 2021 PhD thesis)、 と説明することができた。すなわち、これら地球深部の構造は、マントルの初期進化、もしくは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。

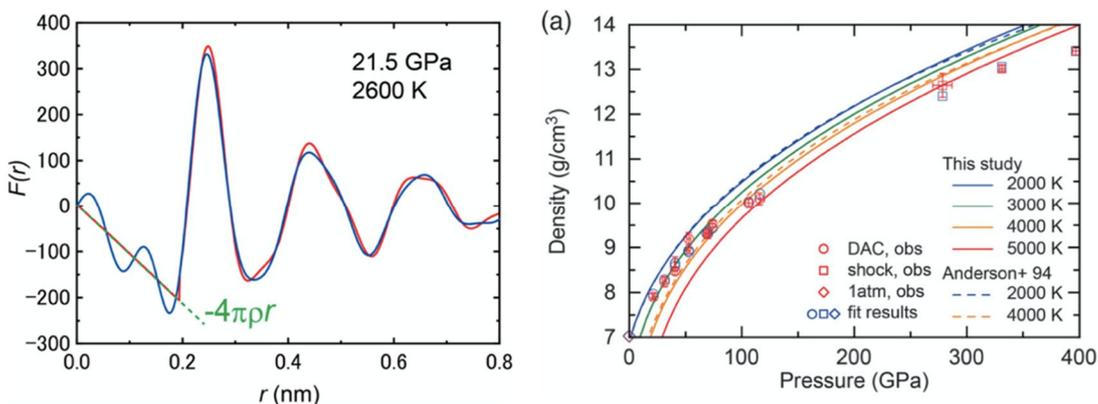


## 6) コアの化学組成解明に向けた液体鉄の密度・地震波速度測定

地球科学における、もう1つの大きなテーマが「コアの軽元素組成の制約」である。上記2でも述べたように、1952年にF. Birchによって、液体鉄に比べ、観測される外核の密度・縦波速度がそれぞれ小さい・速いことが報告されて以来、外核には多くの「軽元素」が存在するとされている。しかし、ほぼ70年が経過した現在でも、コアの軽元素組成は未解明である。上記1と2に示したように、本研究ではコア(外核)の軽元素組成解明の鍵となる成果を得た。それらに加え、超高压下での液体鉄の密度・地震波速度測定に成功した。コアの主成分である液体鉄のこれらは、軽元素組成を制約するためのリファレンスとして極めて重要である。

下図に示すように、本研究 Kuwayama et al. (2020 PRL) では、高压下 XRD 測定による液体鉄の密度データと、同じく高压下 IXS 測定による縦波速度データを組み合わせることにより、外核全域の条件で適用可能な、圧力-温度-密度-縦波速度-グルナイゼン係数の状態方程式を得た。XRD 法は固体の結晶の密度を決定するのに汎用的な手法である。一方液体の場合は、シグナルが弱い上、XRD シグナルを取得できる回折角にも限界がある。ゆえに、フーリエ変換した分布関数も不完全なため、得られる密度の不確かさが大きいとされていた。本研究では、原子のごく近傍には他の原子が存在しないという当然の制約を満たすようにデータを補填すると、不完全な分布関数からも正確に密度が得られることを示し、液体鉄の密度を 116 万気圧・4,350 K まで誤差 1% 以下で決定することに成功した(下図左、distribution function  $F(r)$  の  $r < 0.2$  の領域の傾きから密度が得られる。青線はデータ補填前、赤線は補填後。補填によりほぼ直線 = 密度誤差の小さいデータ、が得られている)。

Kuwayama et al. (2020 PRL) の結果によれば、外核は液体鉄よりも「どの深さでもほぼ一様に」8%程度密度が小さく、4%速度が速い。このことは、「液体鉄の圧縮率をほとんど変化させない軽元素」が外核中に存在することを示している。このことは、主要な軽元素の特定に大きな意味を持つ(コアの温度次第で、上記2で議論した水素、もしくは酸素がこの条件を満たす)。外核・内核それぞれの軽元素組成をより狭い範囲に制約するため、特に水素を含む鉄合金の測定を今後さらに充実させる必要がある。



## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計129件（うち査読付論文 127件 / うち国際共著 83件 / うちオープンアクセス 21件）

1. 著者名 Tagawa Shoh, Sakamoto Naoya, Hirose Kei, Yokoo Shunpei, Hernlund John, Ohishi Yasuo, Yurimoto Hisayoshi	4. 巻 12
2. 論文標題 Experimental evidence for hydrogen incorporation into Earth's core	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-021-22035-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Ozawa, K., Hirose, K., Kuwayama, Y., Takahashi, Y.	4. 巻 18
2. 論文標題 The pressure-induced local structural change around tungsten in silicate glass	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geochemical Perspectives Letters	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ohta Kenji, Hirose Kei	4. 巻 8
2. 論文標題 The thermal conductivity of the Earth's core and implications for its thermal and compositional evolution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 National Science Review	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/nsr/nwaa303	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kuwayama Yasuhiro, Morard Guillaume, Nakajima Yoichi, Hirose Kei, Baron Alfred Q.R., Kawaguchi Saori I., Tsuchiya Taku, Ishikawa Daisuke, Hirao Naohisa, Ohishi Yasuo	4. 巻 124
2. 論文標題 Equation of State of Liquid Iron under Extreme Conditions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.124.165701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Helffrich George, Hirose Kei, Nomura Ryuichi	4. 巻 47
2. 論文標題 Thermodynamical Modeling of Liquid Fe Si Mg O: Molten Magnesium Silicate Release From the Core	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GL089218	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Umemoto Koichiro, Hirose Kei	4. 巻 531
2. 論文標題 Chemical compositions of the outer core examined by first principles calculations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 116009 ~ 116009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2019.116009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nishida Keisuke, Shibazaki Yuki, Terasaki Hidenori, Higo Yuji, Suzuki Akio, Funamori Nobumasa, Hirose Kei	4. 巻 11
2. 論文標題 Effect of sulfur on sound velocity of liquid iron under Martian core conditions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-15755-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nakajima Yoichi, Kawaguchi Saori I., Hirose Kei, Tateno Shigehiko, Kuwayama Yasuhiro, Sinmyo Ryosuke, Ozawa Haruka, Tsutsui Satoshi, Uchiyama Hiroshi, Baron Alfred Q. R.	4. 巻 125
2. 論文標題 Silicon Depleted Present Day Earth's Outer Core Revealed by Sound Velocity Measurements of Liquid Fe Si Alloy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JB019399	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Inoue Hayato, Suehiro Sho, Ohta Kenji, Hirose Kei, Ohishi Yasuo	4. 巻 543
2. 論文標題 Resistivity saturation of hcp Fe-Si alloys in an internally heated diamond anvil cell: A key to assessing the Earth's core conductivity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 116357 ~ 116357
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2020.116357	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okuda Yoshiyuki, Ohta Kenji, Hasegawa Akira, Yagi Takashi, Hirose Kei, Kawaguchi Saori I., Ohishi Yasuo	4. 巻 547
2. 論文標題 Thermal conductivity of Fe-bearing post-perovskite in the Earth's lowermost mantle	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 116466 ~ 116466
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2020.116466	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Caracas Razvan, Hirose Kei, Nomura Ryuichi, Ballmer Maxim D.	4. 巻 516
2. 論文標題 Melt-crystal density crossover in a deep magma ocean	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 202 ~ 211
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2019.03.031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sinmyo Ryosuke, Hirose Kei, Ohishi Yasuo	4. 巻 510
2. 論文標題 Melting curve of iron to 290 GPa determined in a resistance-heated diamond-anvil cell	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 45 ~ 52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2019.01.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kusakabe Mayu, Hirose Kei, Sinmyo Ryosuke, Kuwayama Yasuhiro, Ohishi Yasuo, Helffrich George	4. 巻 124
2. 論文標題 Melting curve and equation of state of $\text{-Fe7N3}$ : Nitrogen in the core?	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 3448 ~ 3457
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JB015823	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Mashino Izumi, Miozzi Francesca, Hirose Kei, Morard Guillaume, Sinmyo Ryosuke	4. 巻 515
2. 論文標題 Melting experiments on the Fe-C binary system up to 255 GPa: Constraints on the carbon content in the Earth's core	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 135 ~ 144
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2019.03.020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yokoo Shunpei, Hirose Kei, Sinmyo Ryosuke, Tagawa Shoh	4. 巻 46
2. 論文標題 Melting Experiments on Liquidus Phase Relations in the Fe S O Ternary System Under Core Pressures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 5137 ~ 5145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019GL082277	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hirose, K., Tagawa, S., Sinmyo, R., Morard, G., Ohishi, Y., Genda,	4. 巻 46
2. 論文標題 H. Hydrogen limits carbon in liquid iron	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 5190-5197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Okuda Yoshiyuki, Ohta Kenji, Sinmyo Ryosuke, Hirose Kei, Yagi Takashi, Ohishi Yasuo	4. 巻 520
2. 論文標題 Effect of spin transition of iron on the thermal conductivity of (Fe, Al)-bearing bridgmanite	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 188 ~ 198
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2019.05.042	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Oka, K., Hirose, K., Tagawa, S., Kidokoro, Y., Nakajima, Y., Morard, G., Coudurier, N.	4. 巻 104
2. 論文標題 Fiquet, G., Melting in Fe-FeO to 204 GPa: implications for oxygen in Earth's core	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 1603-1607
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tateno Shigehiko, Ozawa Haruka, Hirose Kei, Suzuki Toshihiro, Kawaguchi Saori, Hirao Naohisa	4. 巻 46
2. 論文標題 Fe2S: the most Fe-rich iron-sulfide at the Earth's inner core pressures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 11944 ~ 11949
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019GL085248	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Helffrich George, Ballmer Maxim D., Hirose Kei	4. 巻 123
2. 論文標題 Core-Exsolved SiO2 Dispersal in the Earth's Mantle	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 176 ~ 188
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017JB014865	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Badro James, Aubert Julien, Hirose Kei, Nomura Ryuichi, Blanchard Ingrid, Borensztajn Stephan, Siebert Julien	4. 巻 45
2. 論文標題 Magnesium Partitioning Between Earth's Mantle and Core and its Potential to Drive an Early Exsolution Geodynamo	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018GL080405	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Wakamatsu Tatsuya, Ohta Kenji, Yagi Takashi, Hirose Kei, Ohishi Yasuo	4. 巻 45
2. 論文標題 Measurements of sound velocity in iron-nickel alloys by femtosecond laser pulses in a diamond anvil cell	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics and Chemistry of Minerals	6. 最初と最後の頁 589 ~ 595
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00269-018-0944-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tateno Shigehiko, Hirose Kei, Sinmyo Ryosuke, Morard Guillaume, Hirao Naohisa, Ohishi Yasuo	4. 巻 103
2. 論文標題 Melting experiments on Fe-Si-S alloys to core pressures: Silicon in the core?	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 742 ~ 748
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2138/am-2018-6299	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Helffrich George, Shaha Anat, Hirose Kei	4. 巻 103
2. 論文標題 Isotopic signature of core-derived SiO <sub>2</sub>	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 1161 ~ 1164
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2138/am-2018-6482CCBYNCND	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tateno Shigehiko, Hirose Kei, Sakata Shuhei, Yonemitsu Kyoko, Ozawa Haruka, Hirata Takafumi, Hirao Naohisa, Ohishi Yasuo	4. 巻 123
2. 論文標題 Melting Phase Relations and Element Partitioning in MORB to Lowermost Mantle Conditions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 5515 ~ 5531
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JB015790	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ozawa Keisuke, Anzai Miyuki, Hirose Kei, Sinmyo Ryosuke, Tateno Shigehiko	4. 巻 45
2. 論文標題 Experimental Determination of Eutectic Liquid Compositions in the MgO-SiO <sub>2</sub> System to the Lowermost Mantle Pressures	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 9552 ~ 9558
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018GL079313	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ohta Kenji, Nishihara Yu, Sato Yuki, Hirose Kei, Yagi Takashi, Kawaguchi Saori I., Hirao Naohisa, Ohishi Yasuo	4. 巻 6
2. 論文標題 An Experimental Examination of Thermal Conductivity Anisotropy in hcp Iron	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontiers in Earth Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/feart.2018.00176	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hirose Kei, Morard Guillaume, Sinmyo Ryosuke, Umemoto Koichio, Hernlund John, Helffrich George, Labrosse Stephane	4. 巻 543
2. 論文標題 Crystallization of silicon dioxide and compositional evolution of the Earth's core	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 99 ~ 102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/nature21367	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ballmer Maxim D., Houser Christine, Hernlund John W., Wentzcovitch Renata M., Hirose Kei	4. 巻 10
2. 論文標題 Persistence of strong silica-enriched domains in the Earth's lower mantle	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nature Geoscience	6. 最初と最後の頁 236 ~ 240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/ngeo2898	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hirose Kei, Sinmyo Ryosuke, Hernlund John	4. 巻 358
2. 論文標題 Perovskite in Earth's deep interior	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 734 ~ 738
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aam8561	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Mori Yuko, Ozawa Haruka, Hirose Kei, Sinmyo Ryosuke, Tateno Shigehiko, Morard Guillaume, Ohishi Yasuo	4. 巻 464
2. 論文標題 Melting experiments on Fe-Fe 3 S system to 254 GPa	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 135 ~ 141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2017.02.021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Suehiro, S., Ohta, K., Hirose, K., Morard, G., Ohishi, Y.	4. 巻 44
2. 論文標題 The influence of sulfur on the electrical resistivity of hcp iron: implications for the core conductivity of Mars and Earth	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 25-31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017GL074021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ohta Kenji, Yagi Takashi, Hirose Kei, Ohishi Yasuo	4. 巻 465
2. 論文標題 Thermal conductivity of ferropericlase in the Earth's lower mantle	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 29 ~ 37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2017.02.030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kawaguchi Saori I., Nakajima Yoichi, Hirose Kei, Komabayashi Tetsuya, Ozawa Haruka, Tateno Shigehiko, Kuwayama Yasuhiro, Tsutsui Satoshi, Baron Alfred Q. R.	4. 巻 122
2. 論文標題 Sound velocity of liquid Fe-Ni-S at high pressure	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 3624 ~ 3634
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2016JB013609	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Okuda Yoshiyuki, Ohta Kenji, Yagi Takashi, Sinmyo Ryosuke, Wakamatsu Tatsuya, Hirose Kei, Ohishi Yasuo	4. 巻 474
2. 論文標題 The effect of iron and aluminum incorporation on lattice thermal conductivity of bridgmanite at the Earth's lower mantle	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 25 ~ 31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2017.06.022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Gomi Hitoshi, Hirose Kei, Akai Hisazumi, Fei Yingwei	4. 巻 451
2. 論文標題 Electrical resistivity of substitutionally disordered hcp Fe-Si and Fe-Ni alloys: Chemically-induced resistivity saturation in the Earth's core	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 51 ~ 61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2016.07.011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ozawa Haruka, Hirose Kei, Yonemitsu Kyoko, Ohishi Yasuo	4. 巻 456
2. 論文標題 High-pressure melting experiments on Fe-Si alloys and implications for silicon as a light element in the core	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 47 ~ 54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2016.08.042	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計44件 (うち招待講演 19件 / うち国際学会 43件)

1. 発表者名 Kei Hirose
2. 発表標題 SiO <sub>2</sub> and molten silicate release from the core; implications for dynamo and material transport from the core to mantle
3. 学会等名 2019 AGU Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kei Hirose, Shoh Tagawa, Yasuhiro Kuwayama, Ryosuke Sinmyo and Guillaume Morard
2. 発表標題 Hydrogen Limits Carbon in Liquid Iron
3. 学会等名 2019 AGU Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kei Hirose, Shoh Tagawa, Naoya Sakamoto, Yasuo Ohishi and Hisayoshi Yurimoto
2. 発表標題 Core-mantle partitioning of hydrogen
3. 学会等名 2019 AGU Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 廣瀬 敬
2. 発表標題 超高压実験で見る地球中心核 (コア)
3. 学会等名 JpGU (Japan Geoscience Union) Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kei, Hirose
2. 発表標題 Exsolution of SiO <sub>2</sub> crystals and silicate melt from the liquid core: Implications for the origins of mid-lower mantle scatters and the ultra-low velocity zone above the CMB
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kei Hirose
2. 発表標題 Chemical Evolution and the Present-Day Composition of the Liquid Outer Core
3. 学会等名 Gordon Research Conference 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ozawa, K.
2. 発表標題 Evaluation of thermobarometry for spinel lherzolite fragments in alkali basalts
3. 学会等名 EGU General Assembly 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kei Hirose
2. 発表標題 Earth & Planetary Interiors High P-T Experiments & Calculations
3. 学会等名 Gordon Research Conference 2016 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kei Hirose, G. Morard, R. Sinmyo & J. Hernlund
2. 発表標題 Crystallization of SiO <sub>2</sub> in the core and the mechanism of early dynamo
3. 学会等名 CIDER 2016 Community Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kei Hirose et al.
2. 発表標題 Hydrogen in the core?
3. 学会等名 AGU 2016 Fall meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

廣瀬研究室ホームページ  
<http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~hirose/>

## 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大石 泰生 (Oishi Yasuo) (20344400)	公益財団法人高輝度光科学研究センター・回折・散乱推進室・主席研究員  (84502)	
研究分担者	ハーンルンド ジョン (Hernlund John) (30723712)	東京工業大学・地球生命研究所・教授  (12608)	
研究分担者	小澤 一仁 (Ozawa Kazuhito) (90160853)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授  (12601)	
研究分担者	A l f r e d B a r o n (Alfred Baron) (90442920)	国立研究開発法人理化学研究所・放射光科学研究センター・グループディレクター  (82401)	
研究分担者	舘野 繁彦 (Tateno Shigehiko) (30572903)	東京工業大学・地球生命研究所・研究員  (12608)	
研究分担者	K J o s e p h (Kirschvink Joseph) (80721258)	東京工業大学・地球生命研究所・特任教授  (12608)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	木村 純一 (Kimura Jun-Ichi) (30241730)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門・上席技術研究員  (82706)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	太田 健二 (Ohta Kenji) (20727218)	東京工業大学・理学院・准教授  (12608)	
研究協力者	梅本 幸一郎 (Umemoto Koichiro) (60726991)	東京工業大学・地球生命研究所・研究員  (12608)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
フランス	Institut de Physique du Globe de Paris	Institut de Mineralogie	Universite de Lyon	
米国	University of California Berkeley	Geophysical Laboratory		
スイス	ETH Zurich			