

平成 28年 3月 4日  
愛媛大学  
高輝度光科学研究センター

スーパーアース深部物質の圧縮挙動を高圧実験と理論計算のコラボレーションにより解明  
～論文が Nature 出版の Scientific Reports に掲載～（記者説明会の開催）

愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター（GRC）の境毅（さかい たけし）助教，出倉春彦（でくら はるひこ）助教，高輝度光科学研究センターの平尾直久（ひらお なおひさ）研究員からなる研究チームがスーパーアース深部に存在するとされるポストペロブスカイト相の高温高圧下における圧縮挙動を高圧実験および理論計算の双方から解明することに成功しました。

本研究はイギリス Nature 出版のオンラインジャーナル Scientific Reports の 3 月 7 日版において発表されます。

つきましては，下記のとおり記者説明会を開催しますので，取材くださいますようお願いいたします。

記

日 時：平成 28 年 3 月 7 日（月） 14 時～15 時

（説明会の終了後，ご希望の方には GRC 実験室等をご案内いたします）

場 所：愛媛大学 理学部総合研究棟 14 階 共通会議室 \* 別紙参照

（車で来学の場合，理学部入構ゲートのインターフォンにて，会見に出席する旨をお伝えください）

発表者：境 毅（GRC 助教）

出倉 春彦（GRC 助教）

入船 徹男（GRC 教授・センター長）

【研究の概要】

地球のマントルの最深部 2700–2900 km の深さにはポストペロブスカイト相と呼ばれる鉱物が存在します。近年，太陽系の外側で多く見つかった地球の数倍の質量をもつスーパーアースと呼ばれる惑星では，その内部圧力も地球と比べて非常に大きくなるため，この相がスーパーアース内部の大部分を占めていると予想されています。しかし，地球マントル最深部の温度圧力（～4000 度，136 万気圧）を大きく超えるような圧力での密度（体積）の変化を表す式（状態方程式）に関する実験的あるいは理論的研究はほとんど行われておらず，スーパーアースマントル深部におけるこの鉱物の圧縮挙動についてはよく分かっていませんでした。

今回の研究では，大型放射光施設 SPring-8 において従来の実験的研究の約 2 倍の圧力である 265 万気圧まで精密な密度データを取得して，状態方程式を確立しました。さらに，実験とは独立して理論計算も並行して行い，従来の理論的研究の 6 倍の圧力に相当する 1200 万気圧 5000 度までの密度データを取得しました。実験的および理論的に決定した状態方程式を比較すると非常によい一致を示し，理論と実験で極めて整合性の高いモデルを構築することに成功しました。今回の成果により，スーパーアースマントル内部構造のみならず地球マントル最深部の理解が深まることが期待されます。

（詳しくは，別添資料をご参照ください。）

別添資料

- ・研究成果の説明
- ・説明会地図

本件に関する問い合わせ先

愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

境毅 089-927-8156, sakai.takeshi.mf@ehime-u.ac.jp

入船徹男 089-927-9645, irifune@dpc.ehime-u.ac.jp

# 地球マントル・スーパーアースの深部物質の圧縮挙動を解明

国立大学法人 愛媛大学  
公益財団法人 高輝度光科学研究センター

## 【概要】

愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター（GRC）の境毅助教，出倉春彦助教，高輝度光科学研究センター（JASRI）の平尾直久研究員らの研究グループは，スーパーアース<sup>※1</sup>深部に存在するとされる鉱物であるポストペロブスカイト相<sup>※2</sup>の高温高圧下における圧縮挙動を高圧実験および理論計算の双方から解明することに成功しました。

地球のマントルの最深部 2700–2900 km の深さにはポストペロブスカイト相と呼ばれる鉱物が存在し，地震波を用いた観測により，周辺に比べて特異な性質を示す領域として注目されています。一方で，近年太陽系の外側で多数の発見がなされている地球の数倍の質量をもつスーパーアースと呼ばれる惑星では，その内部圧力も非常に高いため，ポストペロブスカイト相がその大部分を占める主要な相となることが予想されています。しかし，このポストペロブスカイト相について，地球マントルの最深部の圧力（136 万気圧）を大きく超えるような圧力での密度（体積）の変化を表す式（状態方程式<sup>※3</sup>）に関する実験的あるいは理論的研究はほとんど行われておらず，スーパーアースマントル深部におけるこの鉱物の圧縮挙動についてはよく分かっていませんでした。

今回の研究では，レーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセル<sup>※4</sup>（図1）による高温高圧発生技術と大型放射光施設 SPring-8<sup>※5</sup> のビームライン BL10XU 設置の高温高圧その場 X 線回折実験装置とを組み合わせることで，従来の研究の約 2 倍の圧力である 265 万気圧まで精密な密度データを取得することに成功しました（図2）。この密度データを解析することにより，数百万気圧まで適用可能な状態方程式を確立しました。

一方，理論計算に基づいた状態方程式の決定を実験とは完全に独立に行いました。ポストペロブスカイト相が安定に存在できるとされる温度圧力範囲を完全に網羅する 1200 万気圧・5000 度まで（従来の理論的研究の 6 倍に相当（図2））の密度データを計算し，実験的に決定した状態方程式と比較すると，非常によい一致を示しました。このような非常に高い温度圧力範囲まで密度データを取得した本研究により，数百万気圧の圧力条件でも理論と実験で極めて整合性の高いモデルを構築することに初めて成功しました。高温高圧実験と理論計算で調和的な今回の研究成果により，スーパーアースマントル内部構造のみならず地球マントル最下部の理解が深まることが期待されます。

## 【掲載論文】

題名：Experimental and theoretical thermal equations of state of MgSiO<sub>3</sub> post-perovskite at multi-megabar pressures

邦訳：マルチメガバール（数百万気圧）圧力領域における MgSiO<sub>3</sub> ポストペロブスカイト相の高温状態方程式の実験的および理論的決定

著者：境毅（GRC），出倉春彦（GRC），平尾直久（JASRI）

掲載誌：Scientific Reports (Nature 出版社オンライン総合科学誌)

電子版発行日：2016 年 3 月 7 日予定

## 【研究の背景】

地球のマントルの最深部 2700–2900 km の深さにはポストペロブスカイト相と呼ばれる鉱物が存在します。この相はマントル最深部の高温高压条件（120 万気圧 2500 度以上）でのみ存在し、この相で主に構成されているマントル最下層は D”層と呼ばれ、地震学的にも周辺に比べて特徴的な性質を示す領域として注目されています。一方で、近年地球の数倍の質量をもつスーパーアースと呼ばれる惑星が太陽系の外側で多く見つかっています。地球よりも大きなこのような惑星では、その内部の圧力も非常に高くなります。よって、地球ではマントル最深部にのみ存在するポストペロブスカイト相も、スーパーアースのマントルではその大部分を占める主要な相となることが予想されています。マントルの主要な構成物質が惑星深部の高温高压状態においてどのような密度や硬さを持っているのかを知ることは、地球惑星内部の運動（ダイナミクス）や進化を考える上で最も基本的な情報となります。したがって、温度と圧力による密度（体積）の変化を表す式である状態方程式を決定することは非常に重要です。しかし、地球マントルの最深部の圧力（136 万気圧）を大きく超えるような圧力でのポストペロブスカイト相の状態方程式に関する実験的あるいは理論的研究は行われていないため、スーパーアースマントル深部圧力におけるこの鉱物の圧縮挙動についてはよく分かっていませんでした。また従来の報告では、この相の高压下における熱膨張率が、実験および理論研究の間で矛盾しており問題となっていました。

## 【研究の成果】（研究手法と成果）

愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター(GRC)の境毅助教と高輝度光科学研究センター(JASRI)の平尾直久研究員は、レーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセル（図 1）による高温高压発生と大型放射光施設 SPring-8 における高温高压その場 X 線回折実験を組み合わせることで、従来の研究の約 2 倍の圧力である 265 万気圧までの実験を行い、高温高压下での精密な密度データを取得することに成功しました（図 2）。この密度データを解析することにより、数百万気圧まで適用可能な状態方程式を確立しました。

一方、GRC の出倉春彦助教は状態方程式の第一原理計算<sup>\*6</sup>を実験とは完全に独立に行いました。ポストペロブスカイト相が安定に存在できるとされる温度圧力範囲を完全に網羅する 1200 万気圧 5000 度まで（従来の理論的研究の 6 倍に相当（図 2））のデータを取得し、理論に基づいた状態方程式を決定しました。実験的および理論的に決定した状態方程式を比較すると、地球の核–マントル境界相当の温度圧力条件（100–140 万気圧、~4000 度）では両者の密度差が 0.1%以内であり、実験・理論の間で非常によい一致を示すことが明らかとなりました（図 3）。この結果は、本研究により理論と実験で極めて整合性の高いモデルを構築することに初めて成功したことを意味します。さらに、従来の報告では高压下における熱膨張率について実験結果と理論計算結果の間に矛盾がありましたが、本研究によりその矛盾を完全に解消しました。

また、今回の研究で得られた非常に広い温度圧力範囲の密度のデータを用いることで、高圧縮極限（無限の圧力）における状態を記述するパラメータを決定することに成功しました。これにより、実験圧力範囲を超えた圧力領域へと密度データを外挿した際にその結果が熱力学的に矛盾するという問題を解消することができました。本研究で実験的に決定した状態方程式は少なくとも 300 万気圧までは適用可能であると考えられます。この圧力領域は地球の約 3 倍の質量をもつスーパーアースの核–マントル境界に相当する圧力です。実験的および理論的状态方程式は 300 万気圧、5000 度までの条件においても、両者は 0.8%以内で一致します。また 1000 万気圧までそれらを外挿してもその差は数%以内に収まります。実験・理論間で矛盾のない今回の成果は、ポストペロブスカイト相の状態方程式の決定版として地球科学分野のみならず太陽系外の惑星を対象とした惑星科学分野でも今後広く利用されることが期待されます。

## 【今後の展望】

スーパーアースのマンツルの主要構成物質であるポストペロブスカイト相の状態方程式が決定されることにより、スーパーアースマンツル内部のある地点がどの程度の温度だった場合にどの程度熱膨張して密度が軽くなるのか、あるいは圧力によってどの程度圧縮されて重くなるのか、といったことが分かることとなります。それにより、マンツルの対流ひいてはプレートテクトニクスといった地球に見られる現象のスーパーアースでの有無に対する理解が進むことが期待されます。

地球のマンツルではありえないような広範囲の温度圧力条件で実験を行うことで、今回初めて実験と理論で整合性のある統一的なモデルが確立されました。本研究で確立された状態方程式の微分特性として得られる体積弾性率（硬さ）や熱膨張係数、そして比熱といった熱力学的性質の知見を基にすることで、地球のマンツル最下部の理解もさらに深まると期待されます。

## 【成果のポイント】

- 従来の研究と比べ、圧力範囲を実験研究では2倍、理論研究では6倍まで拡張した。
- 数百万気圧まで適用可能な密度の温度圧力依存性の式（状態方程式）を確立した。
- 理論的研究と実験的研究との間にあった矛盾を解消した。
- 地球はもとよりスーパーアース内部の構造をより正確に推定することを可能にした。

## 【用語解説】

### （※1）スーパーアース

観測技術の近年の発展に伴い、太陽系の外部に多くの惑星が観測されている。発見された太陽系外惑星の中には、地球と同様に岩石を主体とするがその質量が地球のそれよりも数倍大きいものも見つかり、それらは「スーパーアース」と呼ばれている。

### （※2）ポストペロブスカイト相

地球のマンツルは、深さによって上部マンツルおよび下部マンツルの二つに大別される。下部マンツルを構成する主要な物質はブリッジマナイトと呼ばれる鉱物である。ポストペロブスカイト相とは、ブリッジマナイトがマンツル最深部（深さ 2700-2900 km）の温度圧力条件下においてその結晶構造が変化した物質のことである。

### （※3）状態方程式

物質の温度・体積（密度）・圧力の間に成り立つ関係式のこと。物質の種類毎に異なる。惑星を構成する物質の状態方程式を知ることが、惑星の内部構造を制約するうえで鍵となる。

### （※4）レーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセル

先端を平らに研磨した2個の単結晶ダイヤモンド製のアンビルに力を加え、その間に挟んだ試料に高い圧力を発生させるものがダイヤモンドアンビル装置である。ダイヤモンドの透明性を利用して高圧力下の試料にレーザーを照射し、実験室において高温高圧状態を作り出す実験装置がレーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセルである。

### （※5）大型放射光施設 SPring-8

兵庫県の播磨科学公園都市にある世界最高の放射光を生み出す理化学研究所の施設で、その運営管理は公益財団法人高輝度光科学研究センターが行っている。SPring-8の名前は Super Photon ring-8GeV に由来する。放射光とは、電子を光とほぼ等しい速度まで加速し、電磁石によって進行方向を曲げたときに発生する、細く強力な電磁波のこと。SPring-8では、この放射光を用いて、ナノ

テクノロジー，バイオテクノロジーや産業利用まで幅広い研究が行われている。

(※6) 第一原理計算

実験データや経験的なパラメータを一切用いず，対象を支配する方程式を直接解く計算手法の総称のこと。本研究では現代物理学の基礎をなす量子力学における支配方程式を精度良く解く方法を用いた。近年の計算機の性能向上およびシミュレーション技術の進歩により，この手法を用いた高精度の理論予測が可能になったことで，実験と相補的な役割を担っている。

<<問い合わせ先>>

愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

Tel : 089-927-8197, Fax : 089-927-8167

助教 境 毅

E-mail: [sakai.takeshi.mf@ehime-u.ac.jp](mailto:sakai.takeshi.mf@ehime-u.ac.jp), TEL: 089-927-8156

助教 出倉 春彦

E-mail: [dekura.haruhiko.mf@ehime-u.ac.jp](mailto:dekura.haruhiko.mf@ehime-u.ac.jp), TEL: 089-927-8408

高輝度光科学研究センター

研究員 平尾 直久

E-mail: [hirao@spring8.or.jp](mailto:hirao@spring8.or.jp), TEL: 0791-58-2750

<<関連分野の研究者>>

東北大学大学院理学研究科地学専攻

教授 大谷 栄治

E-mail: [ohtani@m.tohoku.ac.jp](mailto:ohtani@m.tohoku.ac.jp), TEL: 022-795-6662

東京大学大学院理学系研究科附属地殻化学実験施設

名誉教授 八木 健彦

E-mail: [yagi@eqchem.s.u-tokyo.ac.jp](mailto:yagi@eqchem.s.u-tokyo.ac.jp), TEL: 03-5841-4624

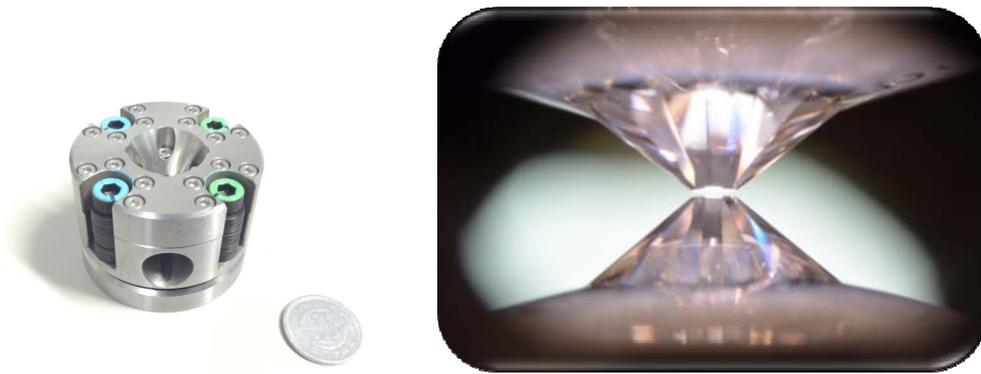


図1. レーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセル。装置全体（左）と装置内部の対向する2つのダイヤモンド（右）。2 mm 程度の大きさの2つのダイヤモンドの先端（今回使用した先端径サイズは35 および100 ミクロン（1 ミクロンは1000 分の1 ミリ））で試料を挟むことで高圧力を発生し、さらにレーザー光を照射することで同時に高温を発生することができる。

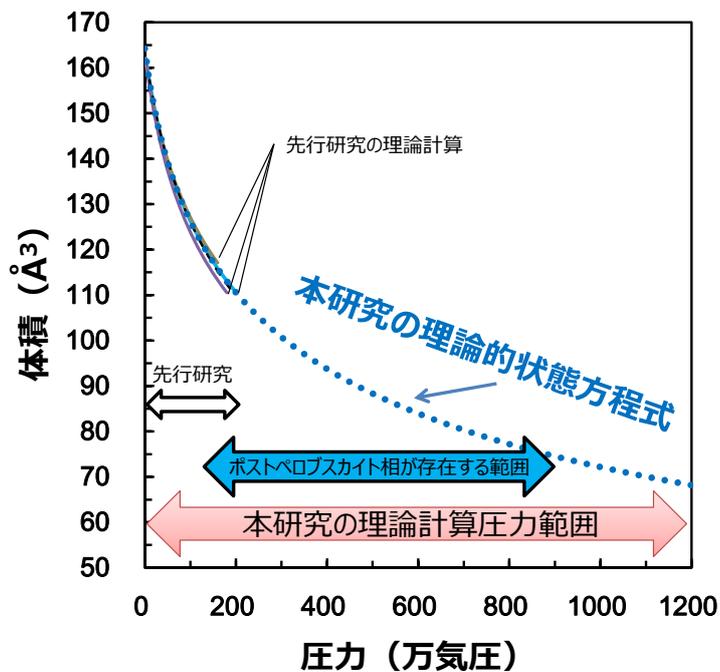
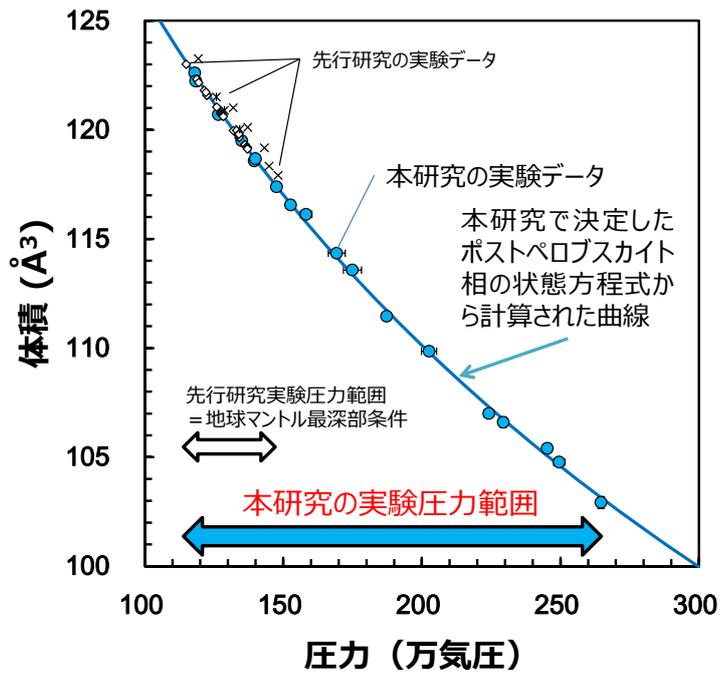


図 2. 本研究と先行研究の実験（上）および理論計算（下）の温度圧力範囲の比較。

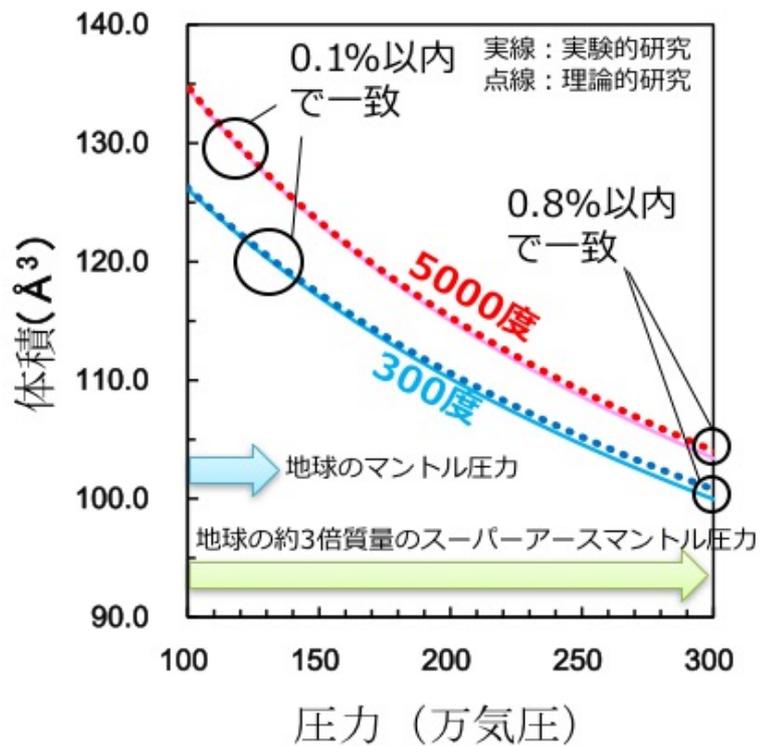


図3. 本研究において決定した実験的状態方程式（実線）と理論的状態方程式（点線）から導かれる高温高压下の体積の比較。

