

# 超深度マグマオーシャン形成に伴う初期地球マントルの大酸化イベントを超高圧実験により再現

国立大学法人 愛媛大学

国立大学法人 岡山大学

国立研究開発法人海洋研究開発機構

## 【今回の研究成果のポイント】

- ・形成直後の地球マントルの酸化状態<sup>(※1)</sup>は当時の地球表層が生命に適した環境であったかを推定する上で重要であるがよくわかっていなかった。
- ・惑星形成末期の巨大天体衝突によって生じるマグマオーシャン<sup>(※2)</sup>では、2価鉄の電荷不均化反応<sup>(※3)</sup>により3価鉄が生成し、より酸化的になることが示されていた。
- ・世界で初めて地球マントル<sup>(※4)</sup>と似た組成の試料を下部マントルに相当する圧力条件（23万気圧以上）で融解させ、2価鉄と3価鉄を定量的に測定する実験に成功した。
- ・この結果、地球の下部マントル上部（深さ660km-800km）に相当する圧力では現在の上部マントルよりも一桁以上多い3価鉄が生成することが明らかとなった。
- ・このような超深度マグマオーシャンから結晶化したマントルは現在よりもずっと酸化的であり、生命誕生以前の初期地球大気は二酸化炭素や二酸化硫黄に富み、原始生命にとってとても過酷な表層環境が形成したことが示唆された。

## 【概要】

愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センターの桑原秀治助教と入船徹男教授、海洋研究開発機構（JAMSTEC）高知コア研究所の中田亮一主任研究員、JAMSTECの門屋辰太郎 Young Research Fellow、岡山大学惑星物質研究所の芳野極教授の研究チームは、巨大天体衝突によって生じる深いマグマオーシャン中で生成する3価鉄の量を定める実験に成功しました。その結果、下部マントル圧力条件下では理論予測よりもはるかに効率よく2価鉄の電荷不均化反応によって3価鉄と金属鉄が生成することを明らかにしました。

本研究の結果は、地質記録から示唆されている 40 億年前より以前（冥王代<sup>(※5)</sup>）の非常に酸化的上部マントルを定量的に説明することができます。また、当時の火山ガス組成が二酸化炭素や二酸化硫黄主体であり、原始生命にとってとても過酷な表層環境が形成したことが示唆されました。今後、地質記録により、提案したマントル大酸化の詳細な検証が期待されます。本研究成果は、英国の科学雑誌「Nature Geoscience」に 5 月 5 日に掲載され、注目すべき研究として同誌の News & Views 欄でも紹介されます。

### 【詳細】

約 46 億年前に地球が形成して以降、生命は遅くとも約 39 億年前には誕生していたことが当時の堆積岩から示唆されています。しかし、生命誕生当時、またはそれ以前の地球表層環境については地質記録が乏しいため、理解がなかなか進んでいません。大気はその温室効果や紫外線などによる化学反応によって惑星表層環境に多くの影響を与えます。地球をはじめとした惑星大気は火山から供給されたガスによって形成されたと考えられており、火山ガス組成は上部マントルの酸化状態によって大きく異なります。したがって、生命誕生前の地球上部マントルがどのような酸化状態にあったのかを明らかにすることは生命誕生の謎を解明するうえで重要な手がかりを提供します。

数少ない地質記録からは地球上部マントルの一部が約 44 億年前にはすでに現在と同程度かそれ以上に酸化されていたことが示唆されています。こうした酸化を引き起こす原因として、惑星形成末期の巨大天体衝突によって生成するマグマオーシャン中で 2 価鉄の電荷不均化反応が起こり、3 価鉄が生成することでマントル全体が酸化することが最近提案されました。しかし、先行実験研究では、地球マントルと大きく組成が異なる試料を用いていました。また、実際の巨大天体衝突で生じたであろうマグマオーシャンと比べると低い圧力条件で実験が行われており、それら低圧での実験結果をより高圧へ延ばした予想値も圧力 20 万気圧以上では理論予測と大きく異なるという問題がありました。そのため、現実的なマントル組成の試料を用いたさらなる高圧下での実験的検証が必要でした。

愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センターの桑原秀治助教と入船徹男教授、海洋研究開発機構の中田亮一主任研究員、門屋辰太郎 Young Research Fellow、そして岡山大学惑星物質研究所の芳野極教授の研究チームは、深さ約 660~800 km に相当する下部マントル圧力条件におけるマグマオーシャンを再現する実験を試みました。そして、大型高圧発生装置と超高温実験に適した高圧セルを組み合わせ、先行実験研究よりも現実的なマントル組成と考えられるカンラン岩<sup>※6</sup> 組成の試料を金属鉄と共に熔融させることに成功しました。また、数十 $\mu\text{m}$  サイズの微小領域における酸化鉄の化学結合状態を分析することのできる大型放射光施設 SPring-8<sup>※7</sup> のビームライン BL27SU にて、実験回収試料の 2 価鉄と 3 価鉄の量を決定することに成功しました。実験結果は、下部マントル条件下ではこれまでの予想以上に 3 価鉄が 2 価鉄の電荷不均化反応により生成することを示しており、深いマグマオーシャンが形成されると現在の地球よりも酸化的な表層環境が形成することを明らかにしました。

本研究結果は地質記録から示唆されている冥王代の非常に酸化的な上部マントルの記録を定量的に説明することができ、この時代の地球表層は全球的に非常に酸化的であったことを示しました。また、当時の地球大気が二酸化炭素や二酸化硫黄から構成されていた可能性が高いことも示唆されました。こうした大気では生命が利用可能なアミノ酸などの有機分子の生成率はとても低く、原始生命にとっては非常に過酷な環境であったことが想像されます。一方で、現在の上部マントルの 3 価鉄の量は本研究で予想される冥王代の上部マントルの値よりも一桁程度低く、その後に降着したであろう金属鉄に富む小天体によって上部マントルの酸化状態が還元<sup>※8</sup>されたとする新しい仮説を提案しました。今後、地質学的な検証により、地球の上部マントルの酸化状態や大気組成の変遷に関する理解が進むことが期待されます。

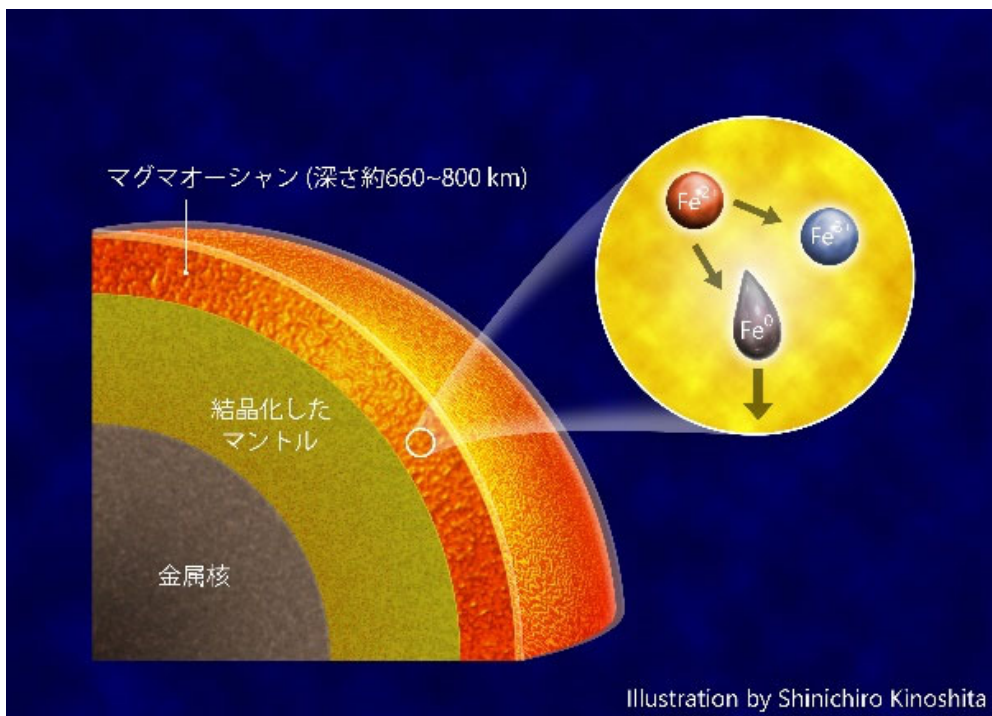
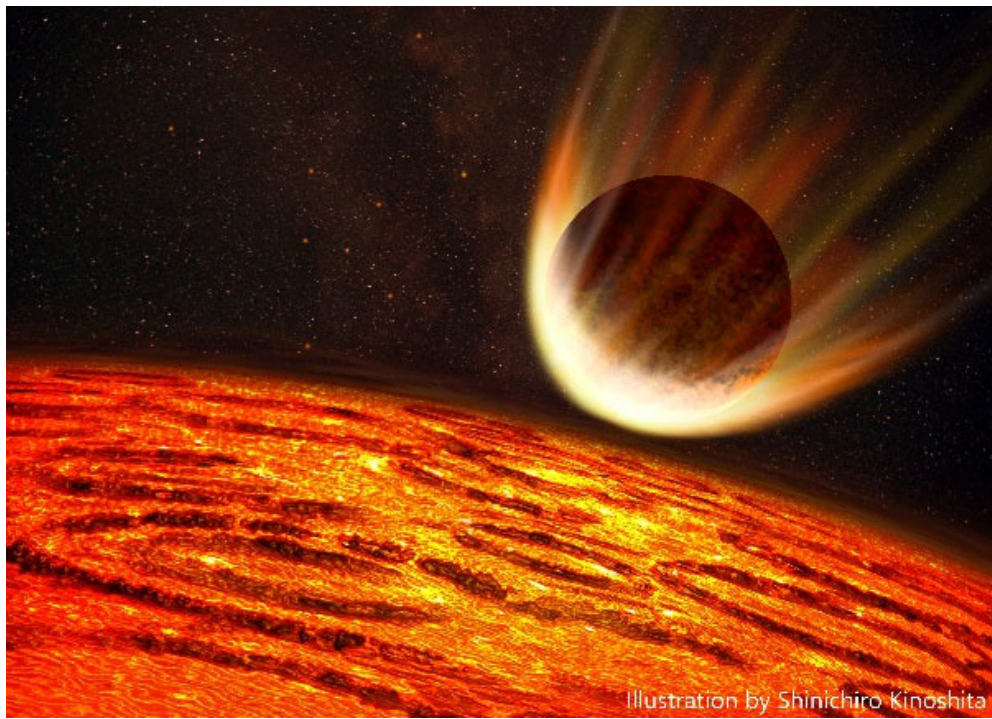


図1. 巨大天体衝突の想像図(上)と2価鉄の不均化反応によるマグマオーシャン酸化メカニズムの概要(下)。2価鉄( $\text{Fe}^{2+}$ )の不均化反応により生成した金属鉄がマグマオーシャンから取り除かれ、3価鉄( $\text{Fe}^{3+}$ )の割合が増加し、マントルが酸化する。

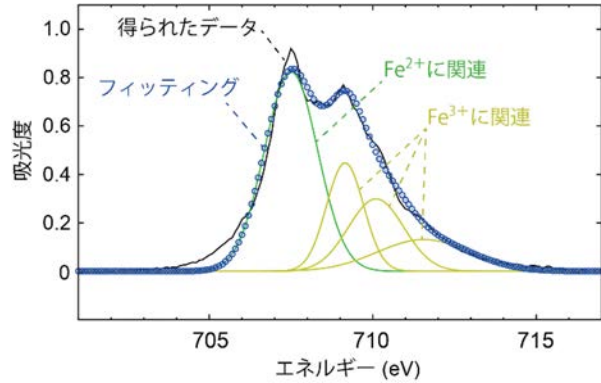
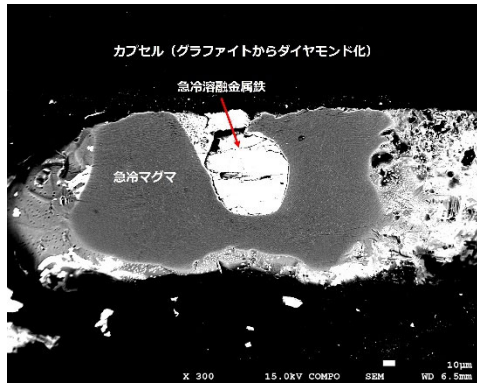


図2. 28万気圧、2600℃の条件にて溶融した急冷カンラン岩試料組織と急冷した溶融カンラン岩試料の鉄価数分析測定結果の例。

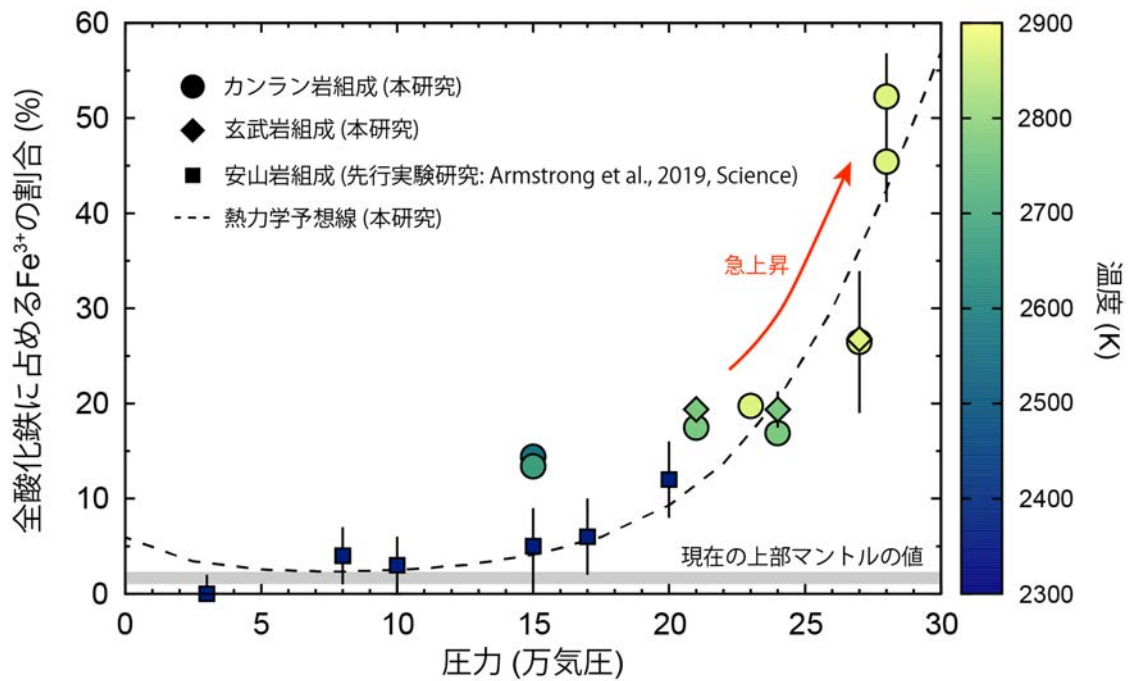


図3. 本研究から明らかとなった金属鉄共存化におけるマグマ中の酸化鉄に占めるFe<sup>3+</sup>の割合の変化。下部マントル圧力条件（23万気圧以上）では、2価鉄の電荷不均化反応の効率が非常に高くなる。

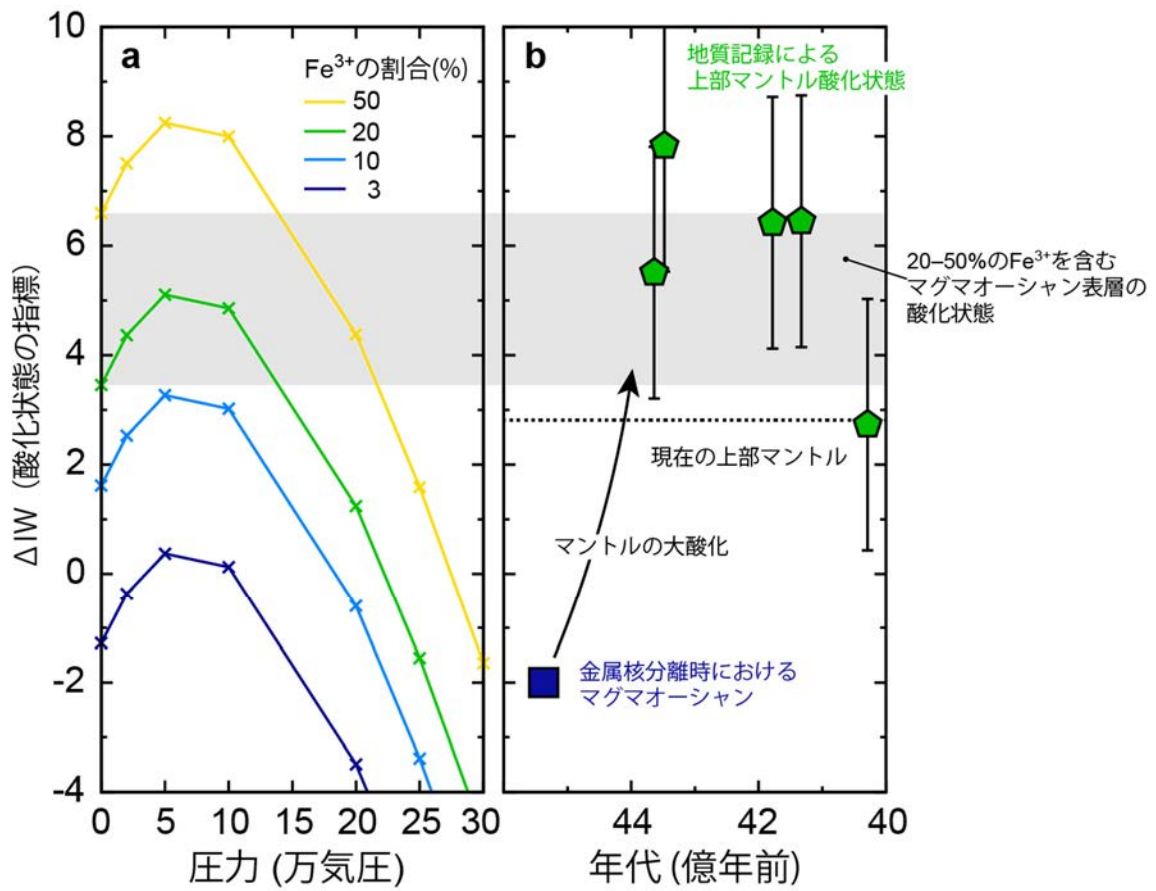


図4. 本研究から明らかとなったマグマオーシャン表層の酸化状態と地質記録との比較。20~50%のFe<sup>3+</sup>を含むマグマオーシャン表層の酸化状態は冥王代の非常に酸化的な上部マントルを説明することができる。

## 【用語解説】

### 酸化状態 (※1)

酸化の度合いを表し、化学結合した原子が電子を損失し、電荷がプラスになるほど酸化していることを意味する。酸化鉄の場合、 $O^{2-}$  1 個と結合する 2 価鉄( $Fe^{2+}$ )と  $O^{2-}$  1.5 個と結合する 3 価鉄( $Fe^{3+}$ )という電子状態の異なる 2 種類が存在する。

### マグマオーシャン(※2) :

惑星形成期には原始惑星やそれよりも小さい月や火星サイズの微惑星と呼ばれる岩石天体が多く存在し、それらの巨大天体衝突や二酸化炭素に富む分厚い大気の温室効果によって惑星表層は全球的にマグマの海で覆われていたと考えられている。

### 地球マントル(※3) :

地球マントルは最も多く含まれる鉱物の種類に対応して、上部マントル (深さ約 60~410 km)、マントル遷移層 (410~660 km)、下部マントル (660~2900 km) の 3 つの領域に区分される。

### 電荷不均化反応(※4) :

鉄の不均化反応では 2 価鉄が電子状態の異なる 2 種類の鉄( $Fe^{3+}$  と金属鉄  $Fe^0$ )に分かれる。

### 冥王代 (※5) :

地球誕生から約 40 億年前までの時代を指す。この時期に大気や海洋が形成され、生命が誕生したと考えられている。また、この時期に形成年代を示す岩石をはじめとした地質記録はほとんど存在しない。

### カンラン岩(※6) :

カンラン岩は上部マントルの主要な岩石であり、その主要鉱物であるカンラン

石の化学組成は $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$ で表される。マントル遷移層では、同じ化学組成をもつが結晶構造が異なるワズレアイトやリングウッドイトに変化し、下部マントルではブリッジマナイト $(\text{Mg, Fe})\text{SiO}_3$ とフェロペリクレーズ $(\text{Mg, Fe})\text{O}$ に変化する。

#### 大型放射光施設 SPring-8(※7) :

兵庫県の播磨科学公園都市にある世界最高性能の放射光を生み出す理化学研究所の施設で、利用者支援などは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。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時に発生する、細く強力な電磁波のこと。

#### 還元(※8) :

還元反応では酸化鉄が還元剤(例えば金属鉄など)から電子を受け取り酸素量が減少する。

### **【論文情報】**

掲載誌 : Nature Geoscience

題名 : Hadean mantle oxidation inferred from melting of peridotite under lower mantle conditions (和訳 : 下部マントル条件下でのカンラン岩の融解から推定される冥王代マントルの酸化)

著者 : Hideharu Kuwahara (桑原秀治) , Ryoichi Nakada (中田亮一) , Shintaro Kadoya (門屋辰太郎) , Takashi Yoshino (芳野極) , Tetsuo Irifune (入舩徹男)

DOI : 10.1038/s41561-023-01169-4

### **【研究サポート】**

日本学術振興会科学研究費補助金 課題番号 : 20H01994, 21K18655



## 【問い合わせ先】

(研究に関すること)

愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター

助教 桑原 秀治

電話：089-927-8153

愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター

センター長・教授 入船 徹男

電話：089-927-9645

海洋研究開発機構 高知コア研究所 物質科学研究グループ

主任研究員 中田 亮一

電話：088-878-2275

岡山大学 惑星物質研究所

所長・教授 芳野 極

電話：0858-43-3737

(プレスリリースに関すること)

愛媛大学総務部広報課

電話：089-927-9022

愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター (GRC)

電話：089-927-8165