



岡山大学記者クラブ

文部科学記者会

科学記者会

御中

令和3年5月21日

岡山大学

初期太陽系における地球型惑星の材料物質の進化を説明： 地球質量の半分を占めるケイ素と酸素の同位体組成からの証拠

◆発表のポイント

- ・地球型惑星¹⁾の主要な材料と考えられる、エンスタタイト・コンドライト²⁾隕石に含まれるコンドリュール³⁾について、ケイ素および酸素の同位体組成⁴⁾を分析し、太陽系の誕生から地球型惑星の母体となった微惑星⁵⁾が形成するまでの、ケイ素と酸素の進化過程を解明しました。
- ・地球型惑星や小惑星の化学組成の違いが、始原的隕石⁶⁾であるコンドライトを単純に混合した化学組成を反映しているのではなく、原始太陽系円盤⁷⁾において、それぞれの材料物質が集積した場の塵とガス全体の組成によって決定づけられていることを示しました。
- ・これまで考えられてきた地球型惑星の化学組成の再検討が必要であると示唆されます。

岡山大学惑星物質研究所・The Pheasant Memorial Laboratory (PML)の田中亮吏教授、Christian Potiszil 助教、中村栄三教授(現 自然生命科学研究支援センター教授(特任))は、エンスタタイト・コンドライト隕石に含まれるコンドリュールおよびユレイライト隕石⁸⁾の酸素とケイ素の同位体組成分析を行うことにより、地球型惑星の約50%を構成するこれらの元素の、原始太陽系円盤での進化過程を明らかにしました。

地球型惑星の形成モデルには、エンスタタイト・コンドライトが主要な成分であるとする説や、ユレイライトに炭素質コンドライト⁹⁾が混合してできたとする説などがあります。しかしいずれのモデルについても、地球の岩石層や太陽系の天体などにおけるケイ素や酸素の同位体組成比に矛盾が生じ、うまく説明ができていませんでした。

本研究成果は、始原的隕石の組成が、必ずしも惑星の化学組成をそのまま反映しているものではないことを意味しており、これまで行われてきた地球型惑星の形成過程と化学組成の研究に新たな示唆を与えるものです。

本研究成果は5月20日、アメリカ天文学会の国際科学雑誌「*The Planetary Science Journal*」オンライン版に掲載されました。

◆研究者からのひとこと

地球誕生の歴史や地球内部構造を研究している過程で浮かんだ、「これまでに推定されてきた地球の化学組成はどこまで正しいのだろうか」という疑問をもとに、この研究をスタートさせました。今後も、当研究所で開発してきた地球惑星物質総合解析システム(CASTEM)を駆使して、太陽系と地球の誕生の謎をひも解いていく予定です。



田中教授



PRESS RELEASE

■発表内容

<背景>

太陽系の惑星は、約 46 億年前、ガスと塵からなる原始太陽系円盤から形成されました。原始太陽系円盤が冷却するに従い、微惑星が形成され、これらが衝突や成長を繰り返し、やがて地球を含む惑星が形成されました。始原的隕石には、このような初期太陽系で形成された塵や微惑星のかけらが含まれていることから、これらを分析することにより、惑星の形成過程や、惑星を構成する物質の化学組成を実証的に知ることができます。

これまで、多くの隕石の同位体組成分析結果から、地球型惑星は、原始太陽系円盤の木星よりも内側で形成された、非炭素質型物質を主な材料として形成されたと考えられてきました(図 1)。特に、エンスタタイト・コンドライトと呼ばれる非炭素質型始原的隕石は、酸素同位体組成や多くの元素の核合成起源同位体異常値¹⁰⁾が地球や月のそれらと一致するため、地球と月を形成した主要な材料物質と考えられてきました。一方で、ユレイライト隕石母天体に代表される非炭素質型隕石の中でも、核合成起源同位体異常値が小さい組成を持った微惑星に、さまざまな割合で炭素質コンドライト隕石母天体が混合した結果、地球型惑星が形成されたというモデルも提案されてきました。

しかしながら、これらのモデルを説明する上で、地球の主要な成分であるケイ素の同位体組成($\delta^{30}\text{Si}$ 値)が、エンスタタイト・コンドライト、ユレイライト、炭素質コンドライトのいずれよりも高いこと、ユレイライトや炭素質コンドライトの酸素同位体組成($\Delta^{17}\text{O}$ 値)が地球のそれより小さいこと、などがこれらのモデルの矛盾点として存在していました。また、地球のケイ素の大部分は岩石層(マントルと地殻)に含まれていますが、地球の岩石層のケイ素の存在比(例えば、ケイ素/マグネシウム)が、太陽系全体の存在比¹¹⁾より低いことも説明できていませんでした。これらの理由を説明するためのモデルとして、微惑星の衝突によるケイ素の蒸発や、地球の金属核とマントルが分離する際に大量のケイ素が金属核に分配されたことにより、地球の岩石相のケイ素同位体組成($\delta^{30}\text{Si}$ 値)が高くなり、ケイ素/マグネシウム比が低下した—などが考えられてきましたが、いずれも決め手になっておらず、新たな研究が求められていました。

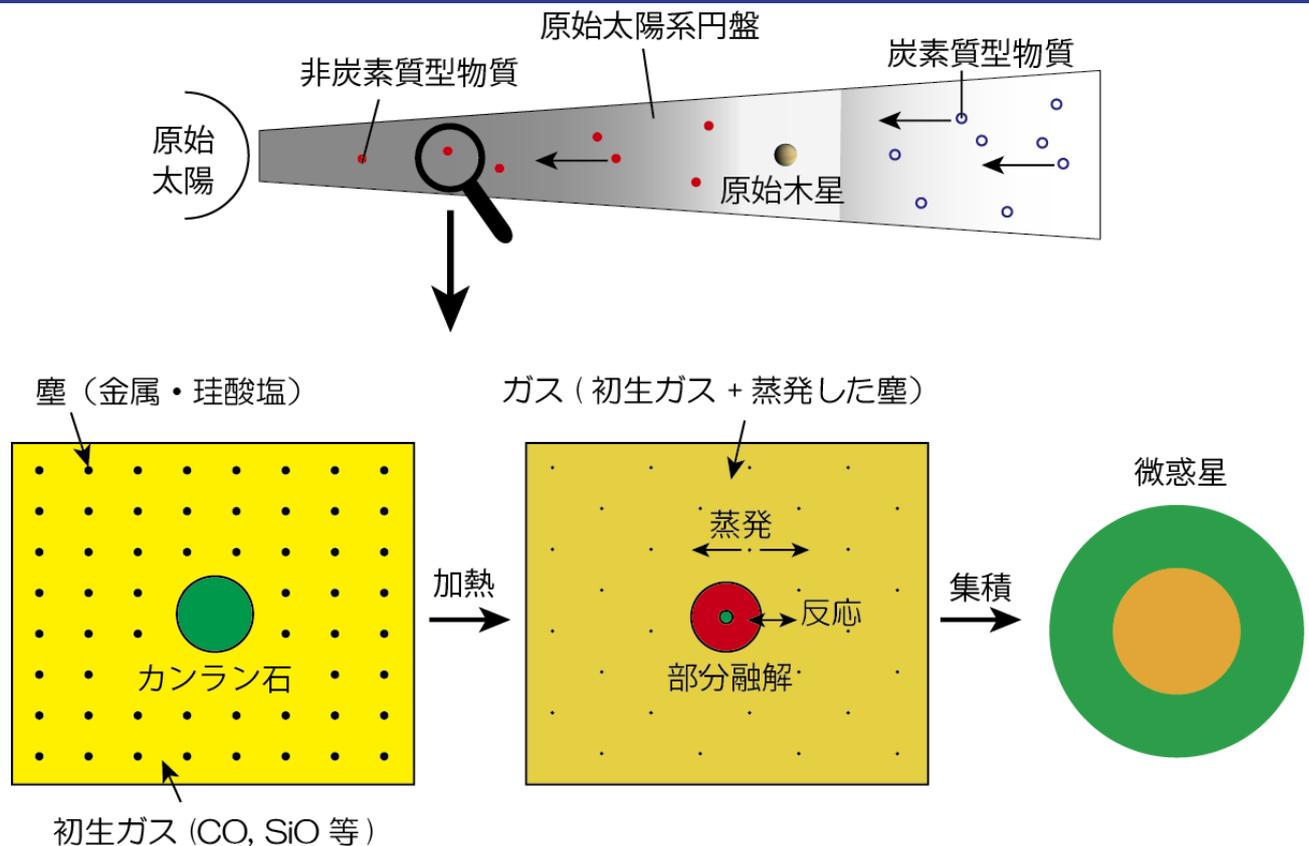


図 1：原始太陽系円盤の内側における、微惑星形成モデル。上図は、核合成起源同位体二分性に基づく、原始太陽系円盤モデル（Kruijer et al., 2017, PNAS, 114, 6712-6716 を改変）。これまでの研究から、太陽系が形成してから約 100 万年後までには、原始木星よりも内側の領域（地球型惑星が形成された領域）には、非炭素質型物質が卓越していたと考えられている。本研究では、この領域における微惑星形成過程において、急加熱された、溶融したカンラン石に富むコンドリュール、蒸発した塵、および初生ガスが反応することにより、よりケイ素に富むコンドリュールが形成され、これらの集積により、地球型惑星の起源となった微惑星が形成されたとのモデルを提案した（下図）。

<発表内容>

地球型惑星や小惑星は金属や岩石によって構成され、その約半分は、ケイ素と酸素でできています。したがって、隕石や地球に含まれるケイ素と酸素の物質進化過程を解明することは、地球型惑星の形成と化学組成を推定する上で重要な手がかりとなります。

私たちは前項の謎を解明するため、太陽系形成初期に原始太陽系円盤の内側で形成された、地球の起源物質を代表する始原的隕石であるエンスタタイト・コンドライトから分離したコンドリュールと、非炭素質型惑星物質の同位体組成端成分であり、その母天体が太陽系形成後の約 10 万年後に形成したユレイライト隕石について、酸素・ケイ素同位体組成を分析し、その関係性を探りました。

分析の結果、ユレイライト隕石は幅広い酸素同位体組成を有する一方で、ケイ素同位体は均質であることが分かりました。これは、ユレイライト隕石母天体が集積した太陽系形成後の約 10 万年

PRESS RELEASE

後には、原始太陽系円盤の内側には酸素同位体の不均質性が存在したものの、すでにケイ素同位体については均質化が達成されていた事を示します。これに対し、エンスタタイト・コンドライト中のコンドリュールは、地球、月、火星、および非炭素質型小惑星起源隕石と調和的な、幅広いケイ素同位体組成を示し、さらに、酸素同位体組成と緩やかな負の相関性を持つことを発見しました(図2)。

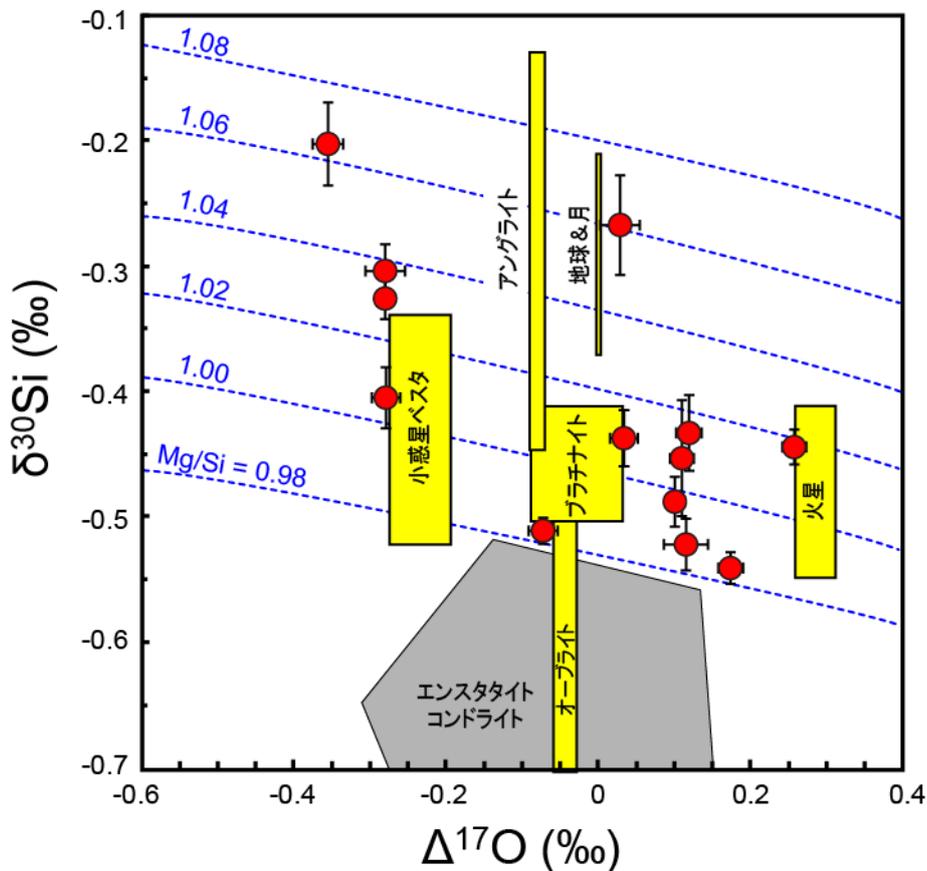


図2：エンスタタイト・コンドライト隕石に含まれるコンドリュールの酸素同位体比とケイ素同位体比の関係（赤丸）。 $\Delta^{17}\text{O}$ (‰)は、地球岩石との $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ のずれを、 $\delta^{30}\text{Si}$ (‰)は、標準試料の $^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si}$ とのずれをそれぞれ千分率で表したもの。黄色で囲った領域は、地球のマンテルと月、火星由来隕石、小惑星ベスタ由来隕石（HED隕石）、アングライト隕石、ブラチナイト隕石、オーブライト隕石の酸素およびケイ素同位体組成を示す。灰色で囲われた領域は、エンスタタイト・コンドライト隕石の組成範囲。青破線は、計算によって求められた、原始太陽系円盤内で、それぞれのコンドリュールが形成された環境における、塵-ガスの混合物のマグネシウム/ケイ素モル比。

このケイ素と酸素同位体の関係性について、私たちは「原始太陽系円盤から早期に形成した、鉄とニッケルを主成分とする金属、およびマグネシウムとケイ素を主成分とするケイ酸塩鉱物によって構成される塵が、瞬間的な加熱によって蒸発した。この蒸発したガスと、溶融したケイ酸塩メルトとの反応によって形成された」と結論づけています(図2)。



PRESS RELEASE

この反応が生じた際の塵とガス全体のマグネシウム／ケイ素比と酸素・ケイ素同位体組成は、星雲内での塵／ガス比や、塵に含まれる金属／ケイ酸塩鉱物比によって決定づけられ、惑星起源物質や微惑星の化学組成は、円盤内部でこれらの反応が生じた場の組成を反映しているものと考えられます。すなわち、始原的隕石の組成が必ずしも惑星の化学組成をそのまま反映しているものではないといえます。

<社会的な意義>

地球型惑星の化学組成は、太陽系初期に形成された、始原的な微惑星のかけらとされるコンドライト隕石の組成をもとに推定されてきました。とりわけ、地球の岩石と最も似通った同位体組成を持つエンスタタイト・コンドライトは、地球の起源物質の大部分を占めるものであると考えられています。しかしながら、エンスタタイト・コンドライト起源モデルに基づく、地球の核には、20～30%のケイ素が含まれることになり、これは非現実的な値であるとされてきました。一方で、炭素、窒素、水などの生命に必要な元素を多く含む、炭素質コンドライトを起源物質とした場合、地球の他の元素の同位体組成を説明することができませんでした。

我々の研究結果は、地球型惑星の化学組成が、円盤内の起源物質形成場における塵およびガス成分によって反映されており、始原的隕石の組成が必ずしも惑星の化学組成をそのまま反映しているものではないことを示しており、このことは、地球型惑星の化学組成の再検討が必要であることを示唆しています。

■論文情報

論文名：Silicon and Oxygen Isotope Evolution of the Inner Solar System

掲載紙：The Planetary Science Journal

著者：Ryoji Tanaka, Christian Potyszil, and Eizo Nakamura

DOI：https://doi.org/10.3847/PSJ/abf490

URL：https://iopscience.iop.org/article/10.3847/PSJ/abf490

■研究資金

本研究は、文部科学省機能強化促進経費（惑星物質研究所創設による革新的研究フロンティアの機能強化）および日本学術振興会科学研究費（20K04108）の支援を受けて実施しました。

■補足・用語説明

1. 地球型惑星：主に岩石や金属から構成される惑星。固体惑星とも呼ばれる。太陽系では、小惑星帯より内側に存在する、水星・金星・地球・火星がこれにあたる。

2. エンスタタイト・コンドライト：始原的隕石の一種。エンスタタイト（マグネシウムに富む輝石）を主要な鉱物として含むことからこのように呼ばれる。核合成起源同位体異常値（注9）が地球とほぼ合致することから、地球を形成した主要な材料物質とも考えられている。



PRESS RELEASE

3. コンドリュール：始原的隕石に含まれる、急加熱と急冷却を経て形成された、球形の物質。

4. 同位体組成：同一の元素（原子番号）であるが、異なった中性子数をもつ核種を同位体といい、その存在比で表現する。一般的に安定同位体比を表現する場合は、試料の同位体比の標準物質の同位体比との差を、標準試料の同位体比で規格化された値が用いられる。標準試料は、酸素は、国際原子力機関（IAEA）が発行する標準海水（VSMOW）が、ケイ素は、アメリカ国立標準技術研究所（NIST）が発行する石英（NBS 28）が用いられる。例えば、測定試料の酸素同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ 値）は、試料および標準海水の $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比を用いて、下記の式で表される。

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{{}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}_{\text{試料}} - {}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}_{\text{標準試料}}}{{}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}_{\text{標準試料}}}$$

蒸発や結晶化などの化学反応などにより、物質中の $\delta^{18}\text{O}$ 値と $\delta^{17}\text{O}$ 値は変動するが、その変動値は酸素の質量差に依存するため、地球上の岩石の同位体組成を、 $\delta^{18}\text{O}$ 値（横軸）と $\delta^{17}\text{O}$ 値（縦軸）図にプロットすると、地球分別線と呼ばれる傾き約 1/2 の直線関係を示す。これは、地球が誕生した際に、地球全体が融けた状態となって、酸素同位体組成が均質化したことを示している。一方、多くの隕石の酸素同位体は、地球分別線から外れた幅広い値を持つ（隕石の $\delta^{17}\text{O}$ 値の地球分別線からのずれを $\Delta^{17}\text{O}$ 値と表現する：図 2 参照）。これは、原始太陽系円盤内のガスや塵の酸素同位体組成が均質化されておらず、それぞれの隕石が異なった起源物質を材料にして形成されたことを示している。

5. 微惑星：原始太陽系円盤に含まれる塵が衝突・合体し成長した直径 10km 程度の小天体。微惑星が合体を繰り返すことにより、原始惑星を経て、現在の惑星に進化したと考えられている。

6. 始原的隕石：コンドリュールを含む隕石をコンドライト隕石または始原的隕石と呼ぶ。太陽系形成初期に、原始太陽系円盤内の塵やガスから形成された物質が集積した母天体の破片で、母天体内での高温での融解作用などを受けずに、太陽系初期の始原的な情報を残している。

7. 原始太陽系円盤：太陽系天体が誕生する前に存在し、原始太陽の周囲に存在した、ガスと塵からなる円盤。

8. ユレイライト隕石：主にケイ酸塩からなり、コンドリュールを含まない非炭素質型石質隕石の一種。原始太陽系円盤の内側で最も早く集積した天体の一つと考えられており、太陽系誕生後、約 10 万年後には、ユレイライト隕石の母天体が集積していたと考えられている。また、非炭素質型隕石の中で、 $\Delta^{17}\text{O}$ 値が最も小さく、核合成起源同位体異常値が最も小さいという特徴を持つ。

9. 炭素質型と非炭素質型：隕石や惑星物質は、さまざまな元素の核合成起源同位体異常値¹⁰⁾から炭素質型と非炭素質型に分類される。炭素質型と非炭素質型物質は原始太陽系円盤における木星位



PRESS RELEASE

置の外側と内側でそれぞれ形成されたと考えられている。始原的隕石のうち、炭素質コンドライトは炭素質型、普通コンドライトとエンスタタイト・コンドライトは非炭素質型に分類される。図1に示した、地球、月、火星由来隕石、小惑星ベスタ由来隕石（HED 隕石）、アングライト隕石、プラチナイト隕石、オーブライト隕石は全て非炭素質型に分類される。

10. 核合成起源同位体異常：元素の安定同位体組成比（例えば $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ）は、蒸発、凝結、代謝などの反応過程により変動するが、これらの物理化学的プロセスに伴う同位体組成変動は、それぞれの核種の質量差に依存して変動する。しかしながら、多くの隕石に含まれるカルシウム、チタン、クロム、ニッケルなどの安定同位体のうち、特に中性子が最も多い核種（ ^{48}Ca 、 ^{50}Ti 、 ^{54}Cr 、 ^{62}Ni ）は、地球と異なった比率で含まれることがわかっており、これを核合成起源同位体異常と呼ばれている。炭素質型隕石には、非炭素質型隕石に比べて、これらの核種が多く含まれている。

11. 太陽系の化学組成：太陽系の質量のうち 99.9 重量%は太陽である。従って、太陽系全体の元素比は、太陽の組成で近似される。求められた太陽の元素比は、炭素質コンドライトのうち、最も始原的な組成をもつと考えられている、CI コンドライトの元素比（水素やヘリウムなどは除く）とほぼ一致する。

<お問い合わせ>

岡山大学惑星物質研究所 教授 田中亮吏

TEL: 0858-43-3748

FAX : 0858-43-3748



岡山大学は持続可能な開発目標（SDGs）を支援しています。