

報道関係各位

2019年6月27日

【プレスリリース】

小惑星が外惑星領域から移動してきたことを初めて実験データで証明 隕石中の炭酸塩鉱物からドライアイスの存在量と小惑星が生まれた場所の推測に成功

茨城大学理学部の藤谷 渉 助教、マックス・プランク化学研究所（ドイツ）のペーター・ホッペ シニアリサーチサイエンティスト、海洋研究開発機構（JAMSTEC）高知コア研究所の牛久保 孝行 技術研究員、東京大学大気海洋研究所の佐野 有司 教授らによる国際研究チームは、隕石の炭酸塩鉱物からもとの小惑星に含まれていたドライアイス（固体二酸化炭素）の存在量を推定しました。そのデータをもとに、現在小惑星帯に集中している小惑星の一部がもとは太陽系の外惑星領域（木星軌道の外側）で形成され、その後現在の軌道へ移動した可能性が高いことを、世界で初めて実験データによって明らかにしました。

太陽系の小惑星は現在、火星と木星の公転軌道の間にある小惑星帯に集中して存在しています。それらの小惑星の一部は、かつて外惑星領域で形成されたにもかかわらず、木星型惑星の軌道が変化した際に惑星の強い重力によって散乱され、現在の軌道に運ばれてきたことが理論モデルによって示唆されています。

それに対し、近年は、隕石に含まれる炭素化合物などの揮発性物質から隕石母天体の周囲の温度を推測することで、軌道が安定する前の小惑星の場所を推定する研究が進められています。しかし、それらの炭素が何に由来するものなのか、その起源についてはほとんどわかっておらず、小惑星の形成過程を示す有効な実験データはありませんでした。

今回、研究グループがタギシュ・レイク隕石（カナダ西部に2000年落下）に豊富に含まれている炭酸塩鉱物の炭素同位体比（炭素-13と炭素-12の量比）を分析したところ、これらの炭素が隕石母天体に含まれていたドライアイスに由来するものである可能性がきわめて高いことがわかりました。また、隕石母天体のドライアイスの炭素同位体比および二酸化炭素と水の量比を見積もると、いずれも彗星の氷と類似していることもわかりました。ここから、タギシュ・レイク隕石の母天体とされるD型小惑星は、木星軌道以遠の外惑星領域において二酸化炭素が固体になるほどの低温環境下で形成され、その後小惑星帯へ運ばれたと考えられます。これは、小惑星の形成と軌道進化の過程を実験データで示した初めての成果です。

今回の成果により、隕石の炭酸塩鉱物はドライアイスの存在量、すなわち周囲の温度を示す指標となる可能性が示されたことから、今後、小惑星の形成過程の解明につながることを期待されます。また、D型小惑星と彗星の類似性は、彗星や太陽系外縁天体に関する情報がD型小惑星の研究から得られることを示しており、今後の惑星探査計画にも重要な知見となります。

この成果は、国際的な学術誌「Nature Astronomy」に2019年7月2日（日本時間）に掲載されます。

■研究内容

太陽系惑星の軌道は46億年前からほとんど変化していないのか、それとも重力による相互作用で軌道が変化していったのか、太陽系の進化の過程には未解明の謎がたくさんあります。理論モデルや隕石の分析から、火星軌道と木星軌道の間に位置するメインベルト小惑星や、木星軌道上に存在するトロヤ群小惑星は、木星軌道以遠（外惑星領域）で形成されたものの、木星型惑星[1]の軌道が変化した際に散乱されて現在の位置まで移動した、という仮説が提案されています。

小惑星の形成位置を推定するには、隕石中の炭素化合物など凝固点の低い揮発性成分が重要な手がかりとなります。水を多く含む始原的隕石（炭素質コンドライト）には、母天体において水と岩石との反応で形成した炭酸塩鉱物が存在します。炭酸塩鉱物に含まれる炭素は母天体に存在した揮発性の炭素化合物に由来すると考えられますが、その揮発性物質がどのようなものなのか、起源はわかっていませんでした。したがって、その揮発性物質から母天体の周囲の温度環境、すなわち太陽からの距離にまで踏み込んで議論することができませんでした。

本研究では、2000年にカナダ西部に落下したタギシュ・レイク隕石に含まれる炭酸塩鉱物（方解石： CaCO_3 および苦灰石： $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ）に対して、二次イオン質量分析計[2]という最先端の分析装置を用いて炭素の同位体比[3]（炭素-13と炭素-12の量比： $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ）を測定しました。その結果、炭酸塩鉱物の炭素同位体比は一樣で、地球の標準物質と比較して7%も ^{13}C に富んでいることがわかりました。これほど ^{13}C に富む有機物は極めてまれで、かつ、この隕石に含まれる炭酸塩鉱物は（炭素量で）1.3重量%と多量であるため、その炭素が有機物に由来する可能性は低いと考えられます。有機物以外に炭酸塩鉱物に炭素を供給できる物質は、母天体に固体として含まれていた二酸化炭素（ドライアイス）しかありません。ドライアイスは凝固点がマイナス200度（0.0001気圧程度の宇宙空間での数値）と低いため、本結果はドライアイスが存在できる低温環境下でタギシュ・レイク隕石の母天体が形成した可能性が高いことを示しています。このような環境は太陽から遠い、木星軌道以遠であったと考えられます。実際、本研究で推定したドライアイスの炭素同位体比やこの隕石に含まれる二酸化炭素と水の量比は彗星の観測値と矛盾しません。

タギシュ・レイク隕石はその反射スペクトル[4]からD型と呼ばれるタイプの小惑星から飛来したといわれています。D型小惑星はメインベルト外縁やトロヤ群小惑星に多く存在します。理論モデルによると、約40億年前に木星型惑星の軌道が変化し、その際に太陽系外縁の天体がメインベルトやトロヤ群領域に移動した可能性があります。本研究はそのシナリオと調和的であり、したがって、初期の太陽系は現在の安定した状態からは想像できないほどダイナミックに惑星軌道が変化していたのかもしれない。

さらに、本結果は以下のようなことを示唆します。まず、外惑星領域の低温環境下でどのような物質が形成し、進化していったのかを、タギシュ・レイク隕石の分析を通じて理解できるかもしれません。近い将来、探査機によるD型小惑星や彗星の調査が計画されていますが、そのような探査計画にも有用なデータを提供するでしょう。次に、小天体の移動が現実发生过っていたならば、地球型惑星[4]が存在する内惑星領域にも、外惑星領域で形成した物質が存在する、ということの意味します。これは地球の大気や海洋を含む、惑星に存在する揮発性物質の起源を探るうえで非常に重要な知見です。実際、地球大気に含まれるキセノンのうち20%は彗星物質に由来する、という報告があります。以上のように、小天体の形成場所は現在の太陽系惑星の姿がどのように構築されていったのか、また、惑星の材料となった物質はどのようなものであったか、という重要な問題を解決する糸口になります。

<語注>

[1] 地球型惑星、木星型惑星：太陽系の惑星は地球型と木星型に大別される。前者は水星、金星、地球、火星を指し、後者は木星、土星、天王星、海王星を指す。地球型惑星は主に岩石や金属鉄からなり、木星型惑星はガスや氷を含む。木星型惑星は地球型惑星に比べて質量が大きい、密度は小さい。

[2] 二次イオン質量分析計：ミクロンサイズに絞ったイオンビーム（一次イオン）を試料表面に照射することで試料中の原子を叩き出し（スパッタリング）、そのうちイオン化したもの（二次イオン）を検出して目的の原子の存在量を測定する装置。イオンを質量で選別して検出するため、同位体比の測定が可能である。

[3] 同位体比：陽子数が等しいが中性子数が異なる核種を同位体という。陽子数が等しいことは同一の元素であることと同義であり、同位体は互いに化学的な性質が同等である。一方、中性子数が異なるため同位体の質量は互いに異なる。

[4] 反射スペクトル：入射光の強度に対する反射光の強度の比を反射率とよび、光の波長と反射率の関係を反射スペクトルという。物質の色に相当するものだが、反射スペクトルによる小惑星の分類には可視光域だけではなく近赤外域も用いる。

◆発表論文の情報

<論文タイトル>

Migration of D-type asteroids from the outer solar system inferred from carbonate in meteorites (隕石中の炭酸塩鉱物が示す D 型小惑星の外惑星領域からの移動)

<著者名> ※肩書きは 2019 年 5 月現在

- ・藤谷 渉 茨城大学 理学部 助教
- ・P. Hoppe マックス・プランク研究所（ドイツ）シニアリサーチサイエンティスト
- ・牛久保 孝行 海洋研究開発機構（JAMSTEC）高知コア研究所技術研究員
- ・福田 航平 ウィスコンシン大学マディソン校（アメリカ）博士研究員
- ・P. Lindgren Lund University（スウェーデン）研究員
- ・M. R. Lee University of Glasgow（イギリス）教授
- ・小池 みずほ JAXA・宇宙航空研究開発機構 日本学術振興会特別研究員（PD）
- ・白井 厚太郎 東京大学 大気海洋研究所 准教授
- ・佐野 有司 東京大学 大気海洋研究所 教授

<雑誌名>

Nature Astronomy

<掲載日>

2019 年 7 月 2 日掲載（日本時間） ※ロンドン現地時刻（夏時間）2019 年 7 月 1 日 16:00

【発表者】

茨城大学理学部 助教
藤谷 渉

海洋研究開発機構 (JAMSTEC) 高知コア研究所 技術研究員
牛久保 孝行

東京大学大気海洋研究所教授
佐野 有司

【報道関係のお問い合わせ】

茨城大学 広報室

海洋研究開発機構 (JAMSTEC) 海洋科学技術戦略部広報課

東京大学大気海洋研究所 広報室