

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2013

課題番号：21340165

研究課題名(和文) 太陽系外縁部に存在したコンドリュールの形成および輸送過程

研究課題名(英文) Formation and transportation of chondrules at outer regions of protoplanetary disk

研究代表者

中村 智樹 (Nakamura, Tomoki)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20260721

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円、(間接経費) 3,660,000円

研究成果の概要(和文)：スターダスト探査機が回収した彗星サンプルの分析を行い、彗星コンドリュールの起源と形成について制約を加えた。彗星コンドリュールはタイプIとタイプIIの両方が存在し、ケイ酸塩鉱物の酸素同位体比は幅広い組成を示し、太陽に近い同位体比を示すものも存在した。タイプIコンドリュールに対し ^{26}Al を用いた年代決定を試みたが娘核 ^{26}Mg の過剰は検出されず、小惑星のコンドリュールよりも遅く形成された可能性があることがわかった。

研究成果の概要(英文)：We have carried out mineralogical and isotopic analyses on cometary chondrules recovered by the Stardust mission. Both type-I and type-II chondrules are present in cometary chondrules. Oxygen isotopes show a wide range of composition. Some silicates in chondrules show ^{16}O -rich composition close to the Sun, suggesting that they formed near the Sun. ^{26}Al was not detected from plagioclase in a type-I chondrule, indicating that this cometary chondrule formed after the decay of most of ^{26}Al and is younger than typical asteroidal chondrules.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地球宇宙化学

キーワード：彗星塵 ビルド第2彗星 コンドリュール スターダスト探査機

1. 研究開始当初の背景

コンドリュールは主にケイ酸塩鉱物(オリビンやパイロキシン)とガラスから構成され、高温での溶融後、急冷固化してできた直径1mm以下の球状物質である。小惑星帯から飛来するコンドライト隕石に特徴的な物質で、多くの隕石では体積の60-80%を占める。コンドリュールは太陽系の内側に存在していたため、円盤内側で形成された小惑星には多く含まれている。研究代表者は2008年にスターダスト探査機が回収した彗星の塵の中にコンドリュールのかけらを発見した。この研究で円盤外縁部起源の短周期彗星からコンドリュールが発見されたことは、形成期の太陽系には原始惑星系円盤の内側領域だけでなく外側領域にもコンドリュールが存在していたことが示された。しかしながら彗星のコンドリュールの起源や形成過程を知るには研究例が少ない状況であった。

2. 研究の目的

本研究では、スターダスト探査機が回収した彗星サンプルの分析を計画的、体系的に行い、彗星のコンドリュールの起源と形成過程について解明することを目的とする。

3. 研究の方法

小惑星のコンドリュール(図1)に対し、スターダスト回収試料に含まれる彗星のコンドリュールは大変小さい。

個々の彗星塵に対して多角度からのデータを得るために以下に示す多段階分析(図2)を行う。

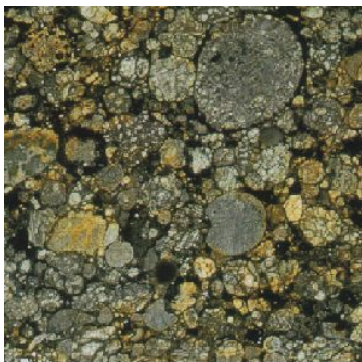


図1 コンドライト隕石中のコンドリュール。写真横幅約1.5mm。

第1段階: 個々の彗星塵は、NASA/JSCから小さなエアロジェルに含まれた状態で配分された。まず、エアロジェルを清浄なアルコールに浸し、塵をエアロジェルから取り出す。その後、塵を直径3ミクロンのガラスファイバーの先端に極少量の接着剤(グリコールフ

タレート: アセトンに易溶)で固定する。塵はガラスファイバーの先端に取り付けられた状態で、放射光X線を利用した完全非破壊分析(X線回折分析(高エネルギー加速器研究機構)とナノスケールCT分析(SPring-8: 京都大土山博士らとの共同研究))を行う。これにより得られた塵の鉱物学的特長と三次元構造を基に彗星塵を分類し、コンドリュールの特徴を示す塵を選び出す。第2段階: 試料を樹脂(EM812エポキシ系樹脂)に包埋する。この際、塵をどの方向で樹脂に埋めるかが重要になる。第5、6段階で塵の断面を観察分析するので、塵は最大断面積が得られるように第3段階で切断されなくてはならない。CT撮影により塵の3次元構造がわかっているので、最大断面積を得るために塵をどの方向で樹脂に埋めればよいか決定できる。

第3段階: 塵は樹脂に埋まった状態でマイクロトームで上部から厚さ約100ナノメートルの薄膜状にダイヤモンド刃で順次切断される。塵が最大断面を示すまで(最大断面かどうかはCT像と比較して判断する)切断を続ける。その結果、塵は50枚程度の薄膜と残りの土台部分に分割される。

第4段階: 塵の薄膜を透過電子顕微鏡により、詳細な鉱物学的観察を行う(茨城大学: 野口博士との共同研究)。

第5段階: 土台部分は、フィールドエミッション走査電子顕微鏡による観察を行い、組織、鉱物組み合わせ、および鉱物の主要元素組成を把握する。

第6段階: 二次イオン質量分析計を用いて酸素同位体分析を行う。分析はCAMECA シムス imf 1280(ウイスコンシン大学: 木多博士らとの共同研究)の直径約2ミクロンのCs+ビームを用いて行う。これにより、コンドリュール中のオリビン、パイロキシン、ガラスなどの酸素同位体比を $\pm 1\%$ (2)程度で決定できる。また、二次イオン質量分析計を用

いて Al-Mg 年代決定を行う。分析は CAMECA ナノシムス 50(東京大学 : 佐野博士らとの共同研究) の直径約 1.5 ミクロンの O-ビームを用いて行う。これにより、コンドリュール中の斜長石の $^{27}\text{Al}/^{24}\text{Mg}$ および $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ を $\pm 5\%$ (2) で測定し、彗星コンドリュールを形成年代を決定することができる。

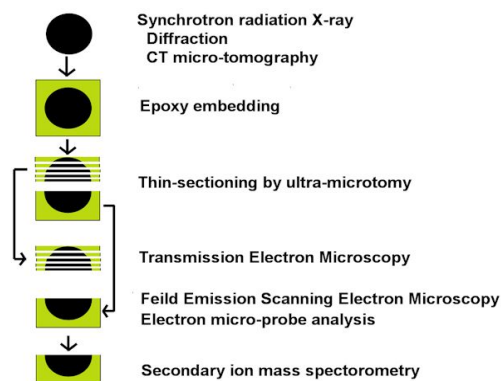


図2 彗星塵の多段階分析法

4 . 研究成果

短周期彗星ビルド 2 から回収された彗星塵の分析の結果、以下に示す 6 つの事実が明らかになった。

(1) 彗星塵の約 10% は結晶質粒子であり、小惑星に含まれるコンドリュールと同一の組織、鉱物組み合わせを示す。図 3 に彗星コンドリュールの電子顕微鏡で撮影した Si マップを示す。このコンドリュールは Mg に富むオリビン、パイロキシン、金属鉄で構成され斑状組織を示すことから、コンドライト隕石に多産するタイプ I ポーフィリティックコンドリュールである。

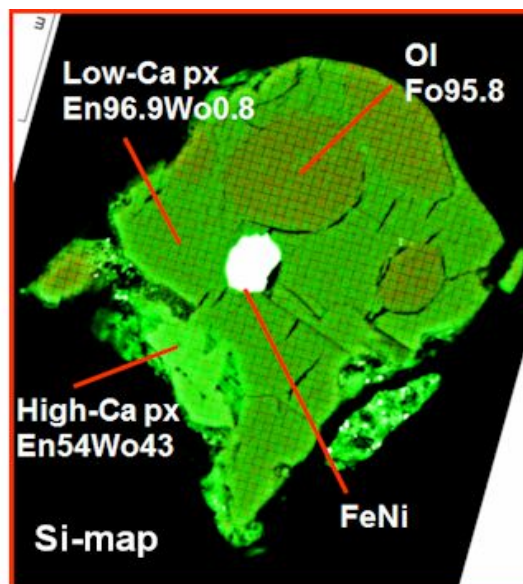


図3: 彗星コンドリュールの構成鉱物

(2) 彗星コンドリュールは MgO に富むタイプ I (図 3) と FeO を含むタイプ II が存在する。(3) 全熔融を経験したパートオリビンやラディアルパイロキシンコンドリュールは発見されていない。(4) コンドリュールを構成するケイ酸塩鉱物の酸素同位体比 (図 4) は幅広い組成を示し、大部分が Cap del ta ^{17}O がマイナスの値を示す。また、太陽の酸素同位体比に近い値を示すコンドリュールも存在する (図 4 の外部左下方向)。このことから彗星コンドリュールは炭素質コンドライト隕石のコンドリュールと同じ酸素同位体比の広がりを示し、両者は成因的に関連性があることがわかる (図 4 に炭素質コンドライトのコンドリュールの組成範囲 (図中 C の黄色の範囲)、普通コンドライトのコンドリュール (図中 O の水色の範囲)、エンスタイトコンドライト (図中 E) およびルムルチコンドライト (図中 R) のコンドリュールの組成範囲を示す) 。

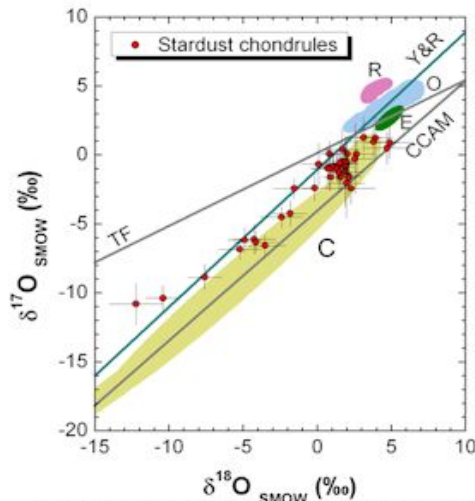


図4: 彗星コンドリュールを構成するケイ酸塩鉱物の酸素同位体比

(5) タイプIコンドリュールの年代決定をAl-Mg系で測定した結果、 ^{26}Al の過剰は検出されなかった。図5に彗星コンドリュール中の斜長石の電子顕微鏡像、および ^{27}Al の同位体分布を示す。 ^{26}Mg 、 ^{24}Mg の同位体分布も測定し、斜長石の $^{27}\text{Al}/^{24}\text{Mg}$ および $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ を求め、彗星コンドリュール形成時の初生比($^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$)を推定した。初生比は誤差の範囲で0になった(^{26}Al の存在は検出されなかった)。このことは、小惑星のコンドリュールよりも遅く形成された可能性を示す。欧米の研究グループの結果も同様で、コンドリュール、CAIともに ^{26}Al の過剰は検出されていない(例えばMatzel et al. (2010) Science 328, 483-486)。したがって、彗星の高温形成物質は ^{26}Al が崩壊した後(太陽系形成から約500万年後以降)に形成された可能性が高く、このことは彗星本体も小惑星よりも遅く形成されたことを示唆する。

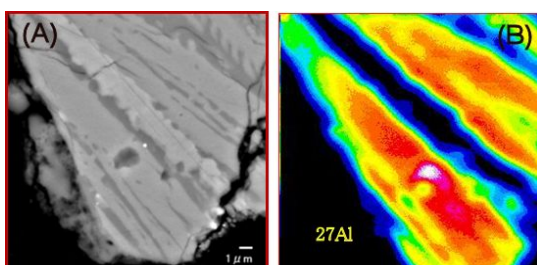


図5:コンドリュール中の斜長石の電子顕微鏡像(A)と ^{27}Al 像(B)。

以上のことから、彗星のコンドリュールは、太陽近傍で形成された前駆物質が小惑星のコンドリュールに比べると遅い時期に部分溶融することで形成され、その後太陽系外縁部に移動し彗星に取り込まれたと考えられる。また、彗星の分光測定で検出される結晶の吸収は彗星に含まれるコンドリュール起因である可能性が高いと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4 件)

Noguchi, T., Nakamura T., Ushikubo T., Kita N. T., Valley J.W., Yamanaka R., Kimoto Y., and Kitazawa Y., A chondrule captured by space exposed aerogel on the international space station. Earth and Planetary Science Letters 309, 2011, 198-206, 査読有.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2011.06.032>

Iida Y., Tschiyama A., Kadono T., Sakamoto K., Nakamura T., Uesugi K., Nakano T., and Zolensky M. E., Three-dimensional shapes and Fe contents of Stardust impact tracks: A track formation model and estimation of comet Wild 2 coma dust particle densities. Meteoritics and Planetary Science 45, 2010, 1302-1319, 査読有. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2010.01091.

x

Tschiyama A., Nakamura T., Okazaki T., Uesugi K., Nakano T., Sakamoto K., Akaki T., Iida Y., Jogo K., and Suzuki Y., Three-dimensional structures and elemental distributions of Stardust impact tracks using synchrotron

microtomography and x-ray fluorescence analysis. Meteoritics and Planetary Sciences. 44, 2009, 1203-1224, 査読有.

DOI: 10.1111/j.1945-5100.2009.tb01218.x

中村智樹, 野口高明, 土山明, 牛久保孝行, 木多紀子, ジョン・バレー, マイケル・ゾレンスキー, 嘉数勇基, 坂本佳奈子, 増尾悦子, 上杉健太郎, 中野司, スターダスト探査機により回収された短周期彗星 81P/ビルト 2 のコンドリュール、日本地球科学会誌、43 巻、2009 年、143 - 153, 査読有.

http://www.geochem.jp/journal_j/content_s/pdf/43-4-143.pdf#search='%E3%82%B9%E3%82%BF%E3%83%BC%E3%83%80%E3%82%B9%E3%83%88%E6%8E%A2%E6%9F%BB%E6%A9%9F%E3%81%AB%E3%82%88%E3%82%8A%E5%9B%9E%E5%8F%8E%E3%81%95%E3%82%8C%E3%81%9F%E7%9F%AD%E5%91%A8%E6%9C%9F%E5%BD%97%E6%98%9F81P%2F%E3%83%93%E3%83%AB%E3%83%88%E3%81%AE%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%83%89%E3%83%AA%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%AB'

〔学会発表〕(計 3 件)

T. Nakamura, New perspective for early solar system evolution derived from recent sample return missions. "Cosmochemistry of primitive bodies-The need for MarcoPolo-R - a European sample return space mission", Dec 3, 2012, Paris, France.

中村 智樹, 野口 高明, 土山 明, 牛久保孝行, 木多紀子, ジョン・バレー, 高畑 直人, 藤谷 渉, 佐野 有司, マイケル・ゾレンスキー, 上杉健太郎, 中野 司, 短周期彗星ビルド 2 に含まれるコンドリュールの鉱物学的同位体的特長 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 2010 年 5 月 28 日, 幕張メッセ国際会議場.

Nakamura T., Noguchi T., Tsuchiyama A., Ushikubo T., Kita N. T., Valley J. W.,

Takahata N., Sano Y., Zolensky M. E., Kakazu Y., Uesugi K. and Nakano T., Additional evidence for the presence of chondrules in Comet 81P/Wild2. 72nd Annual Meeting of the Meteoritical Society, July 15, 2009, Nancy, France, Abstract #5304.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 智樹 (NAKAMURA, TOMOKI)
東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 20260721

(2) 研究分担者

野口 高明 (NOGUCHI, TAKAAKI)
茨城大学・理学部・教授
研究者番号: 40222195

(3) 連携研究者

土山 明 (TUCHIYAMA, AKIRA)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 90180017

長尾 敬介 (NAGAO, KEISUKE)
東京大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 40131619

関谷 実 (SEKIYA, MINORU)
九州大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 60202420

佐野 有司 (SANO, YUJI)
東京大学・海洋研究所・教授
研究者番号: 50162524