

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01263

研究課題名(和文) 彗星塵の形成年代に基づく彗星集積時期と原始太陽系ガス円盤散逸時期の推定

研究課題名(英文) Timing of dissipation of the solar nebula gas and accretion ages of cometary dust of comets based on the ^{26}Al - ^{26}Mg chronometry

研究代表者

中嶋 大輔 (Nakashima, Daisuke)

東北大学・理学研究科・講師

研究者番号：90734757

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,400,000円

研究成果の概要(和文)：彗星の集積時期と原始太陽系ガス円盤の散逸時期に制約を与えることを目的に、彗星塵の酸素同位体比分析と ^{26}Al - ^{26}Mg 同位体年代測定を行った。酸素同位体比分析から調べた試料は全て彗星起源であることがわかった。 ^{26}Al - ^{26}Mg 同位体年代測定では、彗星塵斜長石は ^{26}Mg の過剰を示さなかった。このことは、 ^{26}Al の壊変後に彗星塵斜長石が結晶化したことを示唆する。 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 初期比の誤差から見積もられる彗星塵斜長石の結晶化年代は太陽系形成開始から390万年後となり、先行研究の260万年よりも長い。彗星集積時期および原始太陽系ガス円盤の散逸時期は、これまで考えられていたよりも遅いことが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原始太陽系ガス円盤の進化過程の研究は、恒星と周囲のガス円盤の観測や数値計算によって行われている。我々の太陽系の進化過程の理解は、これらの結果からの類推に依るところが大きい。一方で本研究は、彗星塵の物質科学に基づき、原始太陽系ガス円盤の進化過程について直接的な制約を与えたという点で学術的意義がある。

研究成果の概要(英文)：Cometary dust particles were analyzed for oxygen and ^{26}Al - ^{26}Mg isotopes to give constraints on accretion ages of comets and timing of dissipation of the solar nebula gas. Oxygen isotope analysis showed that the particles are all cometary in origin. Plagioclase in a cometary dust particle showed no resolvable excess of ^{26}Mg , suggesting crystallization of the cometary plagioclase after decay of ^{26}Al . The cometary plagioclase formed 3.9 Myr after starting of the formation of solar system based on the uncertainty of the initial $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ ratio, which is later than that estimated in previous studies (2.6 Myr). It is considered that accretion of comets and dissipation of the solar nebula gas are later than previously though.

研究分野：太陽系物質科学

キーワード：彗星塵 斜長石 酸素同位体比 ^{26}Al - ^{26}Mg 同位体年代

1. 研究開始当初の背景

46億年前の太陽系では、原始太陽を取り巻くガス円盤内部で微小な塵が集積し、微惑星を形成した。それらが衝突合体を経て惑星を形成した。微惑星の集積は惑星への進化に至る主要な過程であり、その集積時期の推定は太陽系年代学における最重要課題の一つである。現在の太陽系にガス円盤は存在しない。太陽系形成の初期段階で散逸したためである。木星等ガス惑星の核形成以前にガス円盤が散逸した場合、外層を多量にまとった巨大ガス惑星に成長できない。逆に、ガスの散逸が遅い場合、形成された惑星がガスとの重力相互作用により内側へと移動し、全て太陽へと落下する。このように、ガス円盤の散逸時期の推定もまた惑星形成過程に関わる重要な課題である。以上から、本研究の最終目的は、微惑星集積時期と原始太陽系ガス円盤の散逸時期の推定である。

2. 研究の目的

冥王星以遠の太陽系外縁部(30AU; Astronomical Unitは地球-太陽間距離)に存在する彗星と火星-木星公転軌道間に存在する小惑星は、微惑星の生き残りであり、太陽系形成初期の情報を有する始原天体である。彗星からは直径1mm以下の微小な塵(彗星塵)が、小惑星からは隕石が恒常的に地球に飛来している。彗星塵は、物質科学的に、小惑星帯外縁部(3-5AU)の小惑星起源の隕石物質と類似している(Zolensky et al., 2006; Nakamura et al., 2008)。よって、同領域で形成した物質が、原始太陽系ガス円盤を通して太陽系外縁部へと輸送され、彗星を作ったと考えられている。彗星塵の形成時期を決定することで、彗星の集積時期のみならず、原始太陽系ガス円盤の散逸時期にも制約を与えることができる。これら二つを目的に、彗星塵の同位体年代測定を行った。

3. 研究の方法

南極表層雪から回収した塵の中から、太陽組成に近い組成を持つ試料をピックアップし、放射光X線回折(高エネルギー加速器研究機構)による構成鉱物組成分析を行った。更に、電子顕微鏡および透過型電子顕微鏡観察を行った。これら以外に、NASA-JSCから供された試料も観察した。研磨による試料平滑面を得た後に、ウィスコンシン大学の二次イオン質量分析計を用いて、酸素同位体比分析と ^{26}Al - ^{26}Mg 同位体年代測定を行った。特に、 ^{26}Al - ^{26}Mg 同位体年代測定においては、新規に導入された高輝度の酸素イオン源により測定時間が従来の1/10にまで短縮することができた。その結果、測定点数が増やせたことにより、 ^{26}Al - ^{26}Mg 同位体年代測定の分析精度が向上した。

4. 研究成果

分析を行った4試料は、輝石と鉄硫化物からなる塵、始原隕石の主要構成物質である高温球粒物質コンドリュールからなる塵、彗星物質にみられるガラス質物質(GEMS)と鉄に乏しくマンガンに富むカンラン石(LIMEオリビン)等を含む塵、粗粒の輝石と斜長石からなる塵であった。輝石とカンラン石のMg#(= $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe mol}\%)$)は99から60まで広い範囲を示し、様々な酸化還元環境下での形成を示唆する。輝石、カンラン石、斜長石の酸素同位体は、 $\Delta^{17}\text{O}$ 値(= $\delta^{17}\text{O} - 0.52 \times \delta^{18}\text{O}$)で、-3‰から+1‰までの範囲を示した。先行研究の彗星塵データを合わせて考えると、Mg#の減少と共に $\Delta^{17}\text{O}$ 値の増加がみられた。この傾向は、小惑星帯の比較的外側領域で形成したと考えられている炭素質コンドライトのコンドリュールやWild2彗星塵にもみられる(Nakashima et al., 2012; Tenner et al., 2018)。特に、本研究で見られた傾向は、太陽から最も遠い領域で形成したCRコンドライト隕石のコンドリュールの傾向とWild2彗星塵の傾向と強い類似性を示した。このことは、小惑星帯の外側領域で形成したコンドリュールやその破片が原始太陽系ガス円盤中を通して、彗星形成領域に運ばれたことを示唆する。更に、本研究で調べた彗星塵は、様々なタイミングで地球に飛来したと考えられる。即ち、様々な彗星を起源とした塵である。本研究の $\Delta^{17}\text{O}$ -Mg#トレンドは、全ての彗星のカンラン石と輝石の $\Delta^{17}\text{O}$ -Mg#トレンドを反映すると考えられる。サンプル数は未だ多くはないものの、彗星の高温鉱物の供給源は小惑星帯の外側領域にあることが本研究から示唆される。

彗星塵の ^{26}Al - ^{26}Mg 同位体年代測定では、斜長石5点、輝石4点の測定を行った。斜長石の $^{27}\text{Al}/^{24}\text{Mg}$ 比が32-37の狭い範囲に収まることから、この彗星塵の斜長石は二次的な変質を経験していないと言える。このことは、斜長石の酸素同位体比が共存する輝石と一致することと整合的である。斜長石の $\delta^{26}\text{Mg}$ 値は誤差の範囲内で全て0‰であった。 ^{26}Mg の過剰がみられないことは、原始太陽系ガス円盤において、 ^{26}Al がほぼ壊変した後に彗星塵斜長石が形成したことを意味する。 ^{26}Al - ^{26}Mg アイソクロンの傾きから得られる $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 初期値の誤差から見積もられる彗星塵斜長石の結晶化年代は太陽系形成後から390万年後となり、先行研究の260万年(Nakashima et al., 2015)よりも長い。彗星集積時期および原始太陽系ガス円盤の散逸時期は、これまで考えられていたよりも遅いことが分かった。

<引用文献>

- Nakamura T. et al. (2008) Chondrulelike objects in short-period comet 81P/Wild 2. *Science* 321, 1664-1667.
- Nakashima D. et al. (2012) Oxygen isotopes in crystalline silicates of comet Wild 2: a comparison of oxygen isotope systematics between Wild 2 particles and chondritic materials. *Earth Planet. Sci. Lett.* 357-358, 355-365.
- Nakashima D. et al. (2015) Late formation of a comet Wild 2 crystalline silicate particle, Pyxie, inferred from Al-Mg chronology of plagioclase. *Earth Planet. Sci. Lett.* 410, 54-61.
- Tenner T. J. et al. (2018) Oxygen isotope characteristics of chondrules from recent studies by secondary ion mass spectrometry. In *Chondrules: Records of Protoplanetary Disk Processes*, edited by S. S. Russell, H. C. Connolly Jr., and A. N. Krot, pp. 196 - 246. *Cambridge Planetary Science*, edited by F. Bagenal, D. Jewitt, C. Murray, J. Bell, R. Lorenz, F. Nimmo, S. Russell. Cambridge University Press.
- Zolensky M. E. et al. (2006) Mineralogy and petrology of Comet 81P/Wild 2 nucleus samples. *Science* 314, 1735-1739.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1 . 発表者名 D. Nakashima, S. Shimizu, R. Oike, K. Fukuda, M. Zhang, N. T. Kita, M. E. Zolensky, J. I. Lee, S. Park, T. Nakamura
2 . 発表標題 Oxygen isotopes in AMMs and IDPs: universality of oxygen isotope systematics of crystalline silicates in comets
3 . 学会等名 53rd Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 D. Nakashima, S. Shimizu, R. Oike, K. Fukuda, M. Zhang, N. T. Kita, M. E. Zolensky, J. I. Lee, S. Park, T. Nakamura
2 . 発表標題 Oxygen isotope study of cometary dust
3 . 学会等名 The Royal Astronomical Society specialist meeting (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 野口高明
2 . 発表標題 GEMSを産する微隕石と惑星間塵に含まれるコンドルールと難揮発性包有物について
3 . 学会等名 日本地球惑星連合2019年大会
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Takaaki Noguchi
2 . 発表標題 Chondrule-like objects and a refractory inclusion in GEMS-bearing Antarctic micrometeorites and interplanetary dust particles
3 . 学会等名 50th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4 . 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	木多 紀子 (Kita Noriko)	ウィスコンシン大学・Department of Geoscience・Senior Scientist	
研究協力者	チャン ミンミン (Zhang Migming)	ウィスコンシン大学・Department of Geoscience・Research Associate	
研究協力者	福田 航平 (Fukuda Kohei)	大阪大学・理学研究科・助教	
研究協力者	ゾレンスキー マイケル (Zolensky Michael)	アメリカ航空宇宙局・Johnson Space Center・Scientist	
研究協力者	李 ジョンイク (Lee Jong Ik)	韓国極地研究所	
研究協力者	朴 ソンボム (Park Sangbum)	韓国極地研究所	
連携研究者	中村 智樹 (Nakamura Tomoki) (20260721)	東北大学・理学研究科・教授 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	ウィスコンシン大学	ローレンス・リバモア国立研究所	アメリカ自然史博物館	他2機関
米国	ウィスコンシン大学	ローレンス・リバモア国立研究所	アメリカ自然史博物館	他2機関
韓国	韓国極地研究所			