

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13602

研究課題名(和文)核宇宙年代学によるプレソーラー粒子の年代測定

研究課題名(英文) Dating of presolar grains by nuclear cosmochronology

研究代表者

横山 哲也 (Yokoyama, Tetsuya)

東京工業大学・理学院・准教授

研究者番号：00467028

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：U-Th核年代法によるプレソーラーの年代測定には、1 pg以下のU・Thの高精度定量分析が必要である。本研究では同位体希釈TIMS法による微量U・Th定量分析技術を開発した。その結果、1 pgのU及びThをそれぞれ再現性 0.45%及び1.3%で測定可能にした。これをプレソーラー粒子に適用した場合、求める年代には約7億年の誤差が付随することになる。

一方、太陽系近傍のr-核種の起源と進化に関し、銀河化学進化モデルと天文観測に隕石組成の解読を加えた新しい理論研究を行った。その結果、太陽系に供給されたr-核種が最後に合成されたのは太陽系形成の1.3-1.4億年前であることを突き止めた。

研究成果の概要(英文)：High precision analysis of U and Th abundances is key for dating presolar grains by U-Th nuclear cosmochronology. In this study, we have developed an isotope dilution TIMS method that enables the determination of 1 pg U and Th with analytical reproducibilities of 0.45% and 1.3%, respectively. The U-Th cosmochronology with this method would provide a 0.7 Gyr of uncertainty for the age of presolar grains determined.

On the other hand, we constrained the origin and evolution of r-process nuclides in the solar vicinity by a new theoretical study that combined the chemical composition of meteorites with galactic chemical evolution models and astronomical observations. Consequently, the timing of last r-process nucleosynthesis that contributed the solar system was determined to be 0.13-0.14 Gyr before the onset of solar system formation.

研究分野：宇宙化学

キーワード：U-Th核年代法 プレソーラー粒子 TIMS r-process

1. 研究開始当初の背景

放射性同位体を用いた初期太陽系年代学の進歩は著しい。例えば隕石中の太陽系最古物質、CAI の年代誤差はわずか 20 万年である (4567.3 ± 0.2 Ma)。一方、CAI 形成以前の世界は闇の中である。始原的隕石中のプレソーラー粒子は理論的には CAI より古い年代を持つが、その粒径は平均 $1 \mu\text{m}$ 以下と極小であるため分析が難しく、年代値の報告は皆無である。しかし、太陽系を形成した星間物質の年代を知ることは、太陽系の起源を議論する上で極めて重要である。

一方、望遠鏡による観測では、放射性重元素の存在比を用いた核宇宙年代学により、銀河系形成直後に誕生した超金属欠乏星の年代決定が行われている。超金属欠乏星の U, Th は銀河形成と同時に起きた初代超新星爆発に由来するため、超新星の U/Th 生成比から超金属欠乏星の年代が判明する。この U/Th 年代法は同位体比より分析が容易な元素比から星の年代を求めるという点で優れており、プレソーラー粒子に適用すれば粒子の年代が判明する。ただし銀河の化学組成は時間変化するため、恒星形成時の星間物質が持つ U/Th 初生比を銀河化学進化理論から求める必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、これまで誰も成功していない、先太陽系物質であるプレソーラー粒子の年代測定に挑戦することである。太陽系形成前に種々の星環境で合成されたプレソーラー粒子は太陽系の原材料そのものであり、それらがいつ、どのようにして作られたのかを知ることは太陽系の起源を議論する上で極めて重要である。本研究では、プレソーラー粒子の U/Th 比と銀河化学進化理論と融合した核宇宙年代学により、粒子の年代を求める。

3. 研究の方法

本研究はプレソーラー粒子の U/Th 比測定と銀河化学進化の理論研究を両軸に遂行される。粒子の分析に先立ち、TIMS による高感度質量分析技術を開発し、 1 pg の U と Th を誤差 1% 以下で測定できるようにする。その後、レーザーを用いてプレソーラー粒子を破壊して U・Th を抽出する技術を開発し、U および Th 濃度を測定する。一方、理論研究では最新の天文観測を元に新しい銀河化学進化モデルを構築し、太陽周辺領域の U/Th 比の時間進化を決定する。

4. 研究成果

1) 分析技術の開発

U-Th 核年代法によるプレソーラーの年代測定には、U・Th 濃度が極めて低い鉱物の測定が必要となる。しかし、現在の技術では 1 pg 以下の U・Th を高精度で定量することは非常に難しい。そこで、まずはトータルエバポレーション同位体希釈 TIMS 法を用いることで、

微小量 U 濃度の定量分析法を確立させることを目標に、研究を進めた。まず、TIMS 測定中に最も強いビームが得られる測定条件 (イオン化促進剤など) の検討を行い、colloidal silicic acid を用いて UO_2^+ を発生させる方法が最も適していることを確認した。次に、TIMS 測定中に発生するブランクを極限まで低下させるため、イオン化促進剤などの試薬をイオン交換樹脂に通すことで、U ブランクを 1 fg 以下にまで低下させることに成功した。その結果、 1 pg , 0.5 pg , 0.2 pg , 0.1 pg の U を、それぞれ再現性 0.45%, 0.44%, 0.77%, 2.2% で測定可能にした。相対誤差はそれぞれ 0.23%, 0.15%, 0.24%, 0.67% であり、いずれも再現性以内であったため、確度も問題ないことが確認された。

次に、 ^{229}Th を用いた同位体希釈 TIMS 法による極微小量 Th 定量分析の技術開発を行った。TIMS における Th のイオン化効率は非常に悪く、 1 pg の Th から得られるビーム強度は平均 100 cps にも満たなかった。これは同量の U を用いた場合の $1/20$ 以下の強度である。また、ビーム強度が 10 cps を切ると $^{229}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 比の測定誤差が急激に大きくなることが分かった。そこで、10 cps 以下のデータを含めずに 1 pg の Th 標準物質の定量分析を行った結果、濃度の繰り返し再現性は 1.3% であった。

以上をまとめると、 1 pg の U 及び Th を用いて求める U/Th 比に伴う誤差は 1.5% 程度であると考えられる。したがって、プレソーラー粒子に核宇宙年代学を適用した場合、求めた年代には 7 億年程度の誤差が付随することになる。しかし、本研究では TIMS の分析技術開発に想定以上の時間がかかり、プレソーラー粒子の実測まではできなかった。必要とする U・Th 量の低下、並びにプレソーラー粒子の実測は今後の課題となる。

2) 理論的研究

プレソーラー粒子の中で最も精力的に研究されているシリコンカーバイド (SiC) の起源を再検討した。銀河内微粒子の移動、成長、破壊に関するシミュレーションを用いて、最も存在度の高い main stream タイプのシリコンカーバイドが示す Si 同位体比の再現を試みた。その結果、実測値を説明するには太陽系を形成した粒子が現在の太陽系の位置 (銀河中心から 8 kpc) よりも内側 (銀河中心から約 6 kpc) に由来することが明らかとなった。

次に、本研究の分析対象である U および Th の元素合成過程に関し、その起源と進化を検討した。U および Th は速い中性子捕獲反応 (r-process) で合成されると考えられている。しかし r-核種の起源については不明な点が多く、長い間議論となっていた。我々は太陽系近傍の r-核種の起源と進化に関し、銀河

化学進化モデルと天文観測に加え、隕石組成の解読という新しい視点を取り入れた。その結果、隕石から期待される太陽系形成期における²⁴⁴Pu量、および現在の深海の堆積層から評価された現在における²⁴⁴Pu量を同時に説明するためには、r-核種が超新星起源ではなく、極めて稀な天体現象である中性子星の合体が起源でなくてはならないことを明らかにした。また、太陽系に供給されたr-核種が最後に合成されたのは、太陽系形成の1.3-1.4億年前であることを突き止めた。このようなr-核種の年代測定は隕石学と天文学の融合により実現したものであり、極めて独創的かつ先駆的な研究であるといえる。

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 6 件)

1. Tsujimoto, T., Nishimura, N. The r-process in Magnetorotational Supernovae. The Astrophysical Journal Letters, 811, 2015, L10 (4pp). 査読あり
2. Tsujimoto, T., Ishigaki, M.N., Shigeyama, T., Aoki, W. Chemical feature of Eu abundance in the Draco dwarf spheroidal galaxy. Publications of the Astronomical Society of Japan. 67, 2015, L3 (1-6). 査読あり
3. Yokoyama, T., Walker, R.J. Nucleosynthetic isotope variation of siderophile and chalcophile elements in the Solar System. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2016, 107-160. 査読あり
4. Nagai, Y., Yokoyama, T. Molybdenum isotope analysis by negative thermal ionization mass spectrometry (N-TIMS): Effects of oxygen isotopic compositions. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 31, 2016, 948-960. 査読あり
5. Tsujimoto, T., Yokoyama, T., Bekki, K. Chemical evolution of ²⁴⁴Pu in the solar vicinity and its implication for the properties of r-process production. The Astrophysical Journal Letters, 835, 2017, L3 (5PP). 査読あり
6. Fukami, Y., Tobita, M., Yokoyama, T., Moriwaki, R., Usui, T. Precise isotope analysis for sub-nanogram lead by total evaporation thermal ionization mass spectrometry (TE-TIMS) coupled with ²⁰⁴Pb-²⁰⁷Pb double spike method. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 32, 2017, 848-857. 査読あり

[学会発表](計 6 件)

1. Tsujimoto, T. Chemical footsteps of r-nuclides in satellite galaxies of Local Group. In the Footsteps of galaxies: tracing the evolution of environmental effects. 2015/09/07-2015/09/11. Soverato, Italy.
2. Yokoyama, T., Walker, R.J. Nucleosynthetic isotope variation of siderophile and chalcophile elements in the Solar System. Mineralogical Society of America & Geochemistry Short Course. 2015/12/11-2015/12/12. La Jolla, USA
3. Tsujimoto, T., Yokoyama, T. Origin and evolution of r-nuclides in Local Universe. Goldschmidt Conference. 2016/6/29. Yokohama, Kanagawa.
4. 辻本 拓司 短寿命放射性核種 ²⁴⁴Pu の太陽系における化学進化 同位体比部会 2016/11/17 秋田市
5. Nakanishi, N., Yokoyama, T., Okabayashi, S., Shimazaki, K., Usui, T., Iwamori, H. Analysis of highly siderophile elements in metal phases from CR chondrite, NWA 801. The Seventh Symposium on Polar Science. 2016/12/1. Tachikawa, Tokyo.
6. Tobita, M., Usui, T., Niihara, T., Misawa, K., Yokoyama, T. Lead isotopic systematics of Martian meteorite Zagami. The Seventh Symposium on Polar Science. 2016/12/2. Tachikawa, Tokyo.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横山 哲也 (YOKOYAMA, Tetsuya)
東京工業大学・理学院・准教授
研究者番号：00467028

(2) 研究分担者

辻本 拓司 (TSUJIMOTO, Takuji)
国立天文台・光赤外研究部・助教
研究者番号：10270456

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()