

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340137

研究課題名(和文) 始原的隕石の超精密安定同位体分析による初期太陽系物質の起源と進化プロセスの解明

研究課題名(英文) High-precision isotopic study of primitive meteorites

研究代表者

山下 勝行 (Yamashita, Katsuyuki)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：50322201

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、隕石の中でも特に始原的な特徴を示す試料をターゲットとし、その鉱物学的記載と精密同位体分析を通じて、太陽系の最も初期における物質進化プロセスとそのタイムスケールの解明に取り組んだ。分析対象の年代や組成を考慮し、Al-Mg, Mn-Cr, U-Pb, 希ガス等、複数の同位体を使うことで従来のアプローチでは困難であった課題に挑戦し、新しい分析方法の開発や、惑星物質の年代学の分野において重要な成果を得ることに成功した。

研究成果の概要(英文)：Multiple-isotope study of primitive meteorites including chondrites and primitive achondrites was undertaken in order to shed light on the origin and evolution of early solar system planetary bodies. To achieve this goal, emphasis was given to technical development leading to high-precision isotope analyses using TIMS and MC-ICP-MS. Meteorites with distinct petrological and geochemical properties were investigated, and important isotope data leading to high-precision chronology of the early solar system objects were obtained.

研究分野：宇宙地球化学

キーワード：地球化学 隕石 同位体

1. 研究開始当初の背景

太陽系形成史の解明は、地球惑星科学の中心的研究課題の一つであり、隕石を使った鉱物学的・宇宙化学的研究は、太陽系初期の情報を直接読み取るための最も有効な手段の一つである。固体元素や希ガスの安定同位体は、放射壊変を利用した年代測定や、放射壊変の影響を受けない同位体比の変動から物質の起源を明らかにするトレーサーとしてこれまでも多くの隕石研究に利用されてきた。特に近年の質量分析装置や分析技術の進歩は、これまで検出することのできなかつたわずかな同位体比の違いや、微小領域における同位体比の変動を識別することに成功しており、太陽系初期における物質進化のプロセスを高い時間的・空間的解像度で解読することを可能にしている。しかしその一方で、データの高精度化によって新たな課題も生じている。例えば、惑星物質の絶対年代決定に最も有効とされているU-Pb (Pb-Pb)年代測定は従来、親核種であるウランの同位体比が一定の値を持つという前提のもとで行われてきた。しかし、Brennecka et al. (2010)による研究で、一部の地球外物質の $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ 比に‰オーダーの変動が報告され、それまでベンチマークとされていた重要な初期太陽系物質の年代が見直されることになった。このことはU-Pb (Pb-Pb)年代だけでなく、これを基準として相対年代を絶対年代に変換していたAl-Mg, Mn-Cr, Hf-W等を使った年代にも大きな影響を与えることになった。このような背景のもと、年代測定に用いられている核種を中心に、元素合成プロセスの解明や、初期太陽系における同位体不均一性の厳密な評価が進みつつある。

2. 研究の目的

本研究では、金属元素の超精密安定同位体分析を、希ガスを含むマルチ元素同位体分析へと発展させ、さらに詳細な鉱物学的記載と組み合わせることで、原始太陽系円盤の化学構造に対する宇宙化学的制約を与え、太陽系形成から最も始原的な分化隕石母天体形成(始原的エコンドライト母天体)までの太陽系進化史の解明に取り組む。具体的には、(1)消滅核種を使った惑星物質の年代測定においてベンチマークとなる重要な隕石(あるいはその構成物質)の超精密年代測定と、(2)本研究で分析対象となっている元素の、初期太陽系における同位体不均一性の解明を重要な研究目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、これまで代表者が開発してきたMn-Cr, Fe-Ni同位体分析に、Al-MgやU-Pb同位体分析を加えることで化学組成や

年代の異なる初期太陽系物質の年代測定を可能にし、さらに放射壊変の影響を受けない同位体にも焦点を当てることで太陽系の異なる領域における同位体不均一性について調べる。また、本研究で分析対象となっている同位体の一部は宇宙線の影響によっても同位体比の変動が報告されているので、その評価を行うために希ガスをを用いた宇宙線照射年代の測定も並行して進める。複数の同位体を同時に分析することで、放射壊変による同位体異常とそれ以外の要因によるものの識別を試みる。本研究では、最新の表面電離型質量分析装置(TIMS)および多重検出器高周波誘導結合プラズマ質量分析装置(MC-ICP-MS)を用いることで、高精度のデータを出すと同時に、限られた試料から複数の同位体情報を得るための、新しい分析法の開発にも取り組む。

4. 研究成果

本研究を通じて、今後の宇宙化学研究に重要と考えられる隕石から貴重な年代学的・宇宙化学的データを得ることに成功した。また、年代測定に用いた同位体データの解釈に必要と判断したTi同位体分析法の開発においても成果が得られた。以下にその内容をまとめる。

炭素質コンドライトの全岩では、特にNi同位体に着目した。ここでは ^{60}Fe の放射壊変によって生成する ^{60}Ni だけでなく、近年報告されるようになった ^{62}Ni の同位体異常にも着目し、鉱物スケールにおける同位体不均一性について調べた。本研究では岩石学タイプの異なる炭素質コンドライトの全岩試料を段階的に分解することで異なる鉱物相に含まれるNiの同位体分析を行ったが、得られたデータからは誤差範囲を大きく超える同位体比の変動は確認できなかった。このことは、隕石母天体形成時にNi同位体が均一に分布していたか、あるいは母天体上で均一化されたことを意味する。一方、Cr同位体に関しては炭素質コンドライト中のCAIから、太陽系初期に同位体不均一性が存在していた可能性を示唆する興味深い結果が得られた。本研究では、炭素質コンドライトAllendeから分離した複数のCAIについて、Al-Mg年代とMn-Cr年代の両方の分析を行った。その結果、本研究で分析したCAIは全て同じAl-Mg年代を示し、約45.67億年前に、非常に短期間に形成されたことが明らかになった。しかしそれらのCr同位体はアイソクロン図上で、D'Orbigny隕石を基準として計算した45.67億年のアイソクロンとは明らかに傾きの異なる直線上にプロットされた。この矛盾を説明する方法はいくつか考えられるが、その一つがCAI形成時におけるCr同位体不均一性であり、今後さらに詳しい研究が期待される。Mn-Cr法を利用した初期太陽系物質の年代測定で、相対年代を絶対年代に置き換えるた

めの基準として用いられているアングライト D'Orbigny の Cr 同位体比についても見直しを進めた。本研究では、詳細な鋳物記載を行った D'Orbigny から、複数の鋳物の分離を行い、それらの精密 Cr 同位体分析を行った。その結果、これまで多くの研究で引用されてきた値に修正が必要であることが明らかになった。

アングライト以外ではユレイライトやアカプルコアイトの精密 Cr 同位体分析を行ったが、その中で特に興味深かったのが ^{54}Cr 同位体に不均一性を示す試料の発見である。この原因については現時点では明らかになっていないが、希ガス同位体分析の結果、極めて長い宇宙線照射年代を示すことが明らかになったので、宇宙線による同位体比の変動についても今後さらに多くの隕石を用いた定量的な解析を進めていく必要がある。

Ti の同位体分析に関しては、これまで代表者が行ってきた、Mn-Cr, Fe-Ni の分離方法では定量的な分離・精製ができないため、本研究では全く新しい分析方法の開発に着手した。ここでは分解した岩石試料にフッ酸を用いた処理と、3 段階のイオン交換を用いることで、高純度の Ti をほぼ 100% の回収率で分離すると同時に、今後 Ti 同位体との比較が重要となることが予想される元素の定量的回収にも成功した。また、この手法を用いて Allende 隕石中の CAI から分離した Ti の同位体比を測定した結果、先行研究で報告されている値と良い一致を示すことも確認できた。

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 12 件)

1. Miura, Y.N., Nagao, K., and Kimura, M. (2014) Noble gases in individual chondrules of the Allende CV3 chondrite. *Meteoritics & Planetary Science*, 49: 1037–1056. 査読有 DOI: 10.1111/maps.12313
2. Hidaka, H. and Yoneda, S. (2014) Isotopic excesses of proton-rich nuclei related to space weathering observed in a gas-rich meteorite Kapoeta. *Astrophys. J.*, 786: 138 (8pp). 査読有 DOI: 10.1088/0004-637X/786/2/138
3. Popova O.P. 他 (59 人中 12, 56 番) (2013) Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization. *Science*, 342: 1069–1073. 査読有 DOI: 10.1126/science.1242642
4. Hidaka, H. and Yoneda, S. (2013)

Radioactive Cs capture in the early solar system. *Scientific Reports*, 3: 1330 (6pp). 査読有 DOI: 10.1038/srep01330

5. Yoneda, S., Hidaka, H., Machida, S., Yokoyama, T., Misawa, K., Sasaki, S., and Kanazawa, N. (2012) Special features of the new thermal ionization mass spectrometer installed at the National Museum of Nature and Science, and their precision, reproducibility and long term stability on isotopic ratio measurements. *Bulletin of the National Museum of Nature and Science, Series E*, 35: 1-6. 査読有 <https://www.kahaku.go.jp/research/publication/index.html>
6. Hidaka, H., Kondo T., and Yoneda, S. (2012) Heterogeneous isotopic anomalies of Sm and Gd in the Norton County meteorite: Evidence for irradiation from the active early Sun. *The Astrophysical Journal*, 746: 132 (8pp). 査読有 DOI: 10.1088/0004-637X/746/2/132
7. Jenniskens P. 他 (70 人中 3, 48 番) (2012) Radar-enabled recovery of the Sutter's Mill meteorite, a carbonaceous chondrite regolith breccia. *Science*, 338: 1583–1587. 査読有 DOI: 10.1126/science.1227163

[学会発表](計 36 件)

1. Hidaka, H., Sera, K. and Yoneda, S., Isotopic and geochemical studies of Sr and REE in eucrites and diogenites. NIPR Symposium, 2014 年 12 月 2 日～2014 年 12 月 3 日, 国立国語研究所(東京都)
2. Katsuyuki Yamashita, Josh Wimpenny, Matthew Sanborn, Seiji Maruyama, and Qing-zhu Yin, Magnesium and chromium isotope systematics of Allende CAIs. 日本地球化学会第 61 回年会, 2014 年 9 月 16 日～2014 年 9 月 18 日, 富山大学(富山県)
3. 宮本恒, 山下勝行 炭素質コンドライトの Ni 同位体異常. 日本地球化学会第 61 回年会, 2014 年 9 月 16 日～2014 年 9 月 18 日, 富山大学(富山県)
4. 西原克, 後田祥吾, 山下勝行 地球外物質に含まれる Ti の分離方法の開発. 日本地球化学会第 61 回年会, 2014 年 9 月 16 日～2014 年 9 月 18 日, 富山大学(富山県)
5. 白水秀子, Michalik Jozef, 日下宗一郎, 山下勝行, 山下美沙, 山下大輔, 尾上哲

- 治 スロバキア Kardolina セクションの三畳紀末石灰岩に記録された炭素同位体比変動 .日本地質学会第 121 年学術大会, 2014 年 9 月 13 日~2014 年 9 月 15 日, 鹿児島大学 (鹿児島県)
6. Hidaka, H. and Yoneda, S., Ba isotopic variations due to space weathering processes observed in lunar surficial soils. The 77th Annual Meteoritical Society Meeting, 2014 年 9 月 8 日~2014 年 9 月 13 日, Casablanca (Morocco)
 7. Nagao, K., Haba, M.K., Zolensky, M., Jenniskens, P., and Shaddad, M.H., Noble Gases in Two Fragments of Different Lithologies from the Almahata Sitta Meteorite. The 77th Annual Meteoritical Society Meeting, 2014 年 9 月 8 日~2014 年 9 月 13 日, Casablanca (Morocco)
 8. Hisashi Miyamoto and Katsuyuki Yamashita, Investigation of Ni isotopic anomalies in carbonaceous chondrites at the mineral scale. V. M. Goldschmidt Conference, 2014 年 6 月 8 日~2014 年 6 月 13 日, Sacramento (USA)
 9. Hidaka, H., Sera, K. and Yoneda, S., Sr, Ba and REE isotopic studies of eucrites. V. M. Goldschmidt Conference, 2014 年 6 月 8 日~2014 年 6 月 13 日, Sacramento (USA)
 10. 佐藤峰南, 山下勝行, 米田成一, 白井直樹, 海老原充, 野崎達生, 鈴木勝彦, 尾上哲治 日本の三畳紀後期イジェクタ堆積物の地球化学的検討: とくに衝突隕石の起源について .日本地球惑星科学連合大会, 2014 年 4 月 28 日~2014 年 5 月 2 日, パシフィコ横浜 (神奈川県)
 11. Amelin, Y, Merle, R.E., Yin, Q.Z., Yamashita, K., Nagashima, K, Krot, A.N., Heaman, L.M., The potential of multi-step dissolution in Pb isotopic dating of individual chondrules. 45th Lunar and Planetary Science Conference, 2014 年 3 月 17 日~2014 年 3 月 21 日, Woodlands (USA)
 12. Nagao, K., Haba, M. K., Park, J., and Herzog, G. F., Trapped noble gases in thirteen ureilites from Antarctica. 45th Lunar and Planetary Science Conference, 2014 年 3 月 17 日~2014 年 3 月 21 日, Woodlands (USA)
 13. Hidaka, H., Sera, K., and Yoneda, S., Systematic isotopic studies of Sr, Ba, Ce, Nd and Sm in eucrites. NIPR Symposium, 2013 年 11 月 14 日~2013 年 11 月 15 日, 国立国語研究所 (東京都)
 14. 白水秀子, Michalik Jozef, 山下美沙, 山下勝行, 尾上哲治 スロバキア Kardolina 地域の三畳紀末(レーチアン)石灰岩から発見されたスフェルール層の特徴 .日本地質学会第 120 年学術大会, 2013 年 9 月 14 日~2013 年 9 月 16 日, 東北大学 (宮城県)
 15. 大西市朗, 鈴木俊明, 吉武美和, 山下勝行 Allende 隕石中の compact type A・CAI の SEM/TEM 観察 .日本鉱物科学会 2013 年年会, 2013 年 9 月 11 日~2013 年 9 月 13 日, 筑波大学 (茨城県)
 16. 西原克, 山下勝行 地球外物質中に含まれる Ti の分離方法の開発 . 日本地球化学会第 60 回年会, 2013 年 9 月 11 日~2013 年 9 月 13 日, 筑波大学 (茨城県)
 17. 宮本恒, 山下勝行 TIMS 及び MC-ICP-MS を用いた隕石の Ni 同位体分析 .日本地球化学会第 60 回年会, 2013 年 9 月 11 日~2013 年 9 月 13 日, 筑波大学 (茨城県)
 18. Yin, Q-Z, Yamakawa, A., Sanborn, M. and Yamashita, K., Allende Chondrule Chronology Revisited: Eroding Age Gap between CAIs and Chondrules. V. M. Goldschmidt Conference, 2013 年 8 月 25 日~2013 年 8 月 30 日, Florence (Italy)
 19. Hidaka, H. and Yoneda, S., Isotopic evidence for an activity of the early Sun studied from the isotopic measurements of Kapoeta. V. M. Goldschmidt Conference, 2013 年 8 月 25 日~2013 年 8 月 30 日, Florence (Italy)
 20. Yamashita, K., Sato, H., Onoue, T., and Yoneda, S., Chromium isotopic anomaly preserved in deep-sea sediments: An evidence for an Upper Triassic impact event. 76th Annual Meteoritical Society Meeting, 2013 年 7 月 29 日~2013 年 8 月 2 日, Edmonton (Canada)
 21. Ohnishi, I., Suzuki, T., Yoshitake, M. and Yamashita, K., Petrological and mineralogical study of compact type A CAI in the Allende CV chondrite. 76th Annual Meteoritical Society Meeting, 2013 年 7 月 29 日~2013 年 8 月 2 日, Edmonton (Canada)
 22. Hidaka, H. and Yoneda, S., Isotopic studies of radiogenic and neutron-captured REE of

lunar meteorites. 76th Annual Meteoritical Society Meeting 2013年7月29日～2013年8月2日, Edmonton (Canada)

23. 宮本恒, 山下勝行 TIMS 及び MC-ICP-MS を用いた隕石中の Ni 同位体分析. 日本地球惑星科学連合大会, 2013年5月19日～2013年5月24日, 幕張メッセ(千葉県)
24. Hidaka, H. and Yoneda, S., Systematic p-process isotopic excesses of Sr, Ba, Ce and Sm observed in the chemical separates of the Kapoeta meteorite. 44th Lunar and Planetary Science Conference, 2013年3月18日～2013年3月22日, Woodlands (USA)
25. Yamashita, K. Meteorite properties: a glimpse on our origins? Japanese-French Frontiers of Science Symposium, 2013年1月25日～2013年1月27日, ロイヤルオークホテル スパ&ガーデンズ(滋賀県大津市)
26. 宮本恒, 山下勝行 表面電離型質量分析計を用いた隕石の Ni 同位体分析. 日本地球化学会第59回年会, 2012年9月11日～2012年9月13日, 九州大学(福岡県)
27. Hidaka, H. and Yoneda, S., Heterogeneous neutron capture record of the Norton County meteorite. The 75th Annual Meteoritical Society Meeting, 2012年8月12日～2012年8月17日, Cairns (Australia)
28. Hidaka, H. and Yoneda, S., Large and heterogeneous isotopic anomalies of Sm and Gd in the Norton County meteorite. V. M. Goldschmidt Conference, 2012年6月24日～2012年6月29日, Montreal (Canada)

〔図書〕(計1件)

1. 富岡尚敬, 瀬戸雄介 オーム社、マイクロビームアナリシスハンドブック(宇宙・惑星科学関連試料の分析 - 電子顕微鏡法), 日本学術振興会マイクロビームアナリシス第141委員会編, (2014), 570-576.

6. 研究組織

(1)研究代表者

山下 勝行 (KATSUYUKI YAMASHITA)
岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授
研究者番号: 50322201

(2)研究分担者

富岡 尚敬 (NAOTAKA TOMIOKA)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・主任技術研究員
研究者番号: 30335418

(3)研究分担者

長尾 敬介 (KEISUKE NAGAO)
東京大学・理学(系)研究科(研究院)・教授
研究者番号: 40131619

(4)研究分担者

日高 洋 (HIROSHI HIDAKA)
広島大学・理学(系)研究科(研究院)・教授
研究者番号: 10208770

(5)研究分担者

米田 成一 (SHIGEKAZU YONEDA)
国立科学博物館・理工学研究部・理化学グループ長
研究者番号: 60210788

(6)研究協力者

QING-ZHU YIN
Department of Earth and Planetary Sciences
University of California, Davis
研究者番号: -