

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25247090

研究課題名(和文) 原始太陽の活動を隕石から探る

研究課題名(英文) Study of Protosolar activities recorded in meteorites

研究代表者

塚本 尚義 (YURIMOTO, HISAYOSHI)

北海道大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80191485

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、原始太陽におけるスーパーフレアのような高エネルギー現象の規模やエネルギーレベルを推定し、活発な原始太陽活動に関する新しいパラダイム構築をすることである。本研究では、太陽風Heの微小領域分布を定量分析する分析法を確立した。次に、この分析法をNASAの太陽風回収ミッションであるGenesisミッションに適用し、太陽風と物質との間の相互作用の物理を解明した。また、JAXAはやぶさミッションにより回収された小惑星イトカワ微粒子に太陽風Heが3次元的に不均一分布している様子を定量的に決定した。以上の成果を用い、隕石中の太陽風Heの検出を試みたが、有意な信号をまだ検出できていない。

研究成果の概要(英文)：Activities of protosun is believed to be much higher than the case of present sun and the activities would much contributed to the early solar system evolution, but the protosolar activity have not been well understand quantitatively. In order to study the protosolar activities, we have established microanalysis method for solar wind He in micro areas on materials using strong-field ionization of sputtered particles. We determined solar wind He distribution of a solar wind irradiated sample of NASA Genesis mission by the new method. We also determined quantitative 3-D distributions of solar wind He of asteroid Itokawa particles returned by JAXA Hayabusa mission. We have tried to detect solar wind He from gas-rich chondrites, but have not been detected probably because of lower concentration of the He. More development of the analysis method is required.

研究分野：数物系科学

キーワード：地球化学 宇宙科学 惑星起源・進化 天文学 分析化学

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究に関連する国内・国外の研究動向及び位置づけ

太陽は太陽系全質量の 99%以上を占め太陽系の天体の運動を支配するとともに、その強い電磁放射により太陽系惑星の熱環境も支配している。原始太陽はスーパーフレアを起こす等、強い非定常プロセスが活発で、その電磁氣的活動は現在の太陽に比べ桁違いに大きかったことが、誕生したばかりの原始星の天文観測により類推されている。このような活発な原始太陽の活動は、周囲の原始惑星系円盤における物質進化を大いにコントロールしたと考えられているが、現在コンドライト隕石中から回収される原始惑星系円盤物質中にこの活発な原始星活動の記録を読み解いた研究はあまり多くない。

最も確実な原始太陽活動の記録は、コンドライト隕石中の太陽起源希ガスの存在である。特にガスリッチコンドライトと呼ばれるコンドライト隕石は太陽起源希ガスの濃度が高い。長尾(東京大)のグループでは希ガスを非常に多く含むコンドライト(ガスリッチコンドライト)中のコンドリュールの中から太陽起源希ガスを検出した(Okazaki et al., 2001, Nature)。コンドリュールは約 2000K のケイ酸塩液滴の急冷物であり、希ガスの溶解度は小さいはずである。したがって、この高い希ガス濃度はコンドリュール冷却後、活発な原始太陽からのスーパーフレア起源と考えられる高エネルギーイオンのインプランテーションの結果であると考えられた。彼らの分析は、レーザー照射による試料サンプリングにより行われていて分析体積は約 $50\mu\text{m}^3$ である。その分析の空間分解能からイオン打ち込み距離を概算すると GeV オーダーの高エネルギーをもつイオン粒子が照射されなければならず、現在より約百万倍強いフレア活動を原始太陽は活発に行っていた可能性がある。

(2) 研究代表者のこれまでの研究成果を踏まえ着想に至った経緯

研究代表者は希ガスが打ち込まれたコンドリュール中の金属粒子の酸素同位体分析を同位体顕微鏡により行った。この分析の目的は、希ガスとともに打ち込まれた太陽起源酸素の同位体組成を決定し、太陽系の平均酸素同位体比を決定する事であった。打ち込まれた酸素数が極微量(数 ppm)であるため大部分の測定結果は地球大気汚染によるものであったが、一部明らかに地球大気とは異なる値の同位体比があり、それが太陽系の平均値ではないことを初めて証明した。また、NASA の太陽風捕獲ミッションにより持ち帰られた太陽風試料からの酸素同位体比予察値と一致したことから、原始太陽以来 46 億年間、太陽表面の酸素同位体比は一定であったことも明らかになった。この分析の空間分解能($10\mu\text{m}$)から酸素イオンの打ち込み深さを推定するとやはり GeV のエネルギー粒

子を持つフレアを仮定しなければいけなくなる。もし表面からイオン打ち込みプロファイルを測定することができれば、入射イオンの打ち込みエネルギーを正確に決めることができる。そのためには、地球大気汚染が無視できる希ガスの高空間分解能分析技術の開発が必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、原始太陽におけるスーパーフレアのような高エネルギー現象の規模やエネルギーレベルを推定し、活発な原始太陽活動に関する新しいパラダイム構築をすることである。そのために、ガスリッチコンドライトにトラップされた高濃度希ガス成分のトラップ箇所を特定しその濃度の空間分布をサブミクロンの分解能で解析する。従来このような希ガス分析は実現不可能であったが、新開発の同位体ナノスコープが実現可能にした。その空間分布のテクスチャー解析からガスリッチコンドライトが太陽起源希ガスをトラップしたメカニズムを解明し、原始太陽活動との関連性を明らかにする。本研究により原始太陽のスーパーフレアにより太陽表面からの爆発的に放出される粒子のエネルギー分布やそのフラックスを物質科学的に解明することを目指す。

3. 研究の方法

研究代表者のグループで開発中の同位体ナノスコープ(LIMAS)を本研究に適用した。LIMAS はフェムト秒レーザーによるポストイオン化機能を持つスパッタ中性粒子質量分析計である。ポストイオン化の物理にトンネルイオン化機構を用いているため、イオン化エネルギーの大きい希ガスもイオン化できる。また、サブミクロン領域の空間分解能で 3 次元分析が可能である。研究は次の手順で進めた。(1)この LIMAS による He の定量分析法を確立した。(2)次に、開発した分析法を NASA の太陽風回収ミッションである Genesis ミッションに適用し、太陽風と物質との間の相互作用の物理を解明した。(3)JAXA はやぶさミッションにより回収された小惑星イトカワ微粒子の太陽風を検出した。(4)隕石中の太陽風 He の検出を試みた。

4. 研究成果

(1) LIMAS による He の定量分析法の確立

LIMAS による太陽風 He の深さ方向分布の定量分析法を確立するために、He を規定量イオン注入したシリコン結晶スタンダードを作成した。イオン注入量の異なる試料を準備し検量線法により定量精度を検討した。深さ方向分析には、 800nm 径の Ga イオンを一次イオンに用いた。図 1 に、イオン強度を濃度変換した後の He の深さ方向分析測定値とその数値実験計算値を比較したグラフを 2 種類の注入条件について示す。この分析は $2 \times 4\mu\text{m}^2$ の微小領域から得られたもので、従

来の研究結果より面積比で 400 倍小さな領域の He 分析が可能になったことを示す。図に示されるように He 濃度が $10^{21} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (% ~ 10 ppm)の範囲で計算値と一致しており、強度と濃度が比例関係にある。また、検出限界は 10ppm のレベルである。この検出限界は超高真空(10^{-10} Pa)のサンプルチャンバー中に残留する He ガスのイオン化であることがわかった。しかし、この強度と濃度の比例関係は、He ピーク濃度が 10^{21} を超えたところで破綻する(図 2)。この原因が、He の不活性な化学的性質によりシリコン結晶が結晶中に He を保持することができなくなり、He の流出が起きることによることを決定した。また、その流出機構が普通の固体中の普通の拡散機構ではなく、イオン注入により導入された欠陥がネットワーク構造を形成し、それを高速拡散路とする機構であることを初めて提唱した。その結果、He 流出が起こった後も、未流出の状態と相似形の He 深さ方向分布を呈する。このため、He 定量分析を行うためには、用いる標準試料の選定を注意深く行う必要がある。

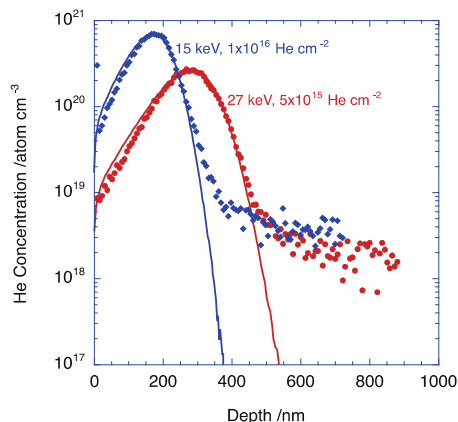


図 1 シリコン基盤中にイオン注入した He の深さ方向分析。図の曲線はイオン注入数値シミュレーション TRIM による計算値。

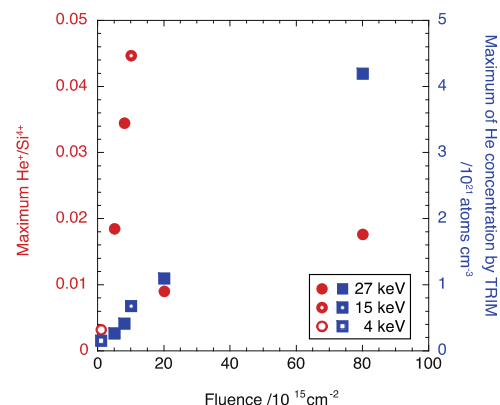


図 2 深さ方向分析の He/Si 比 (赤色), He ピーク濃度計算値 (青色) とイオン注入量との関係。

(2) NASA Genesis ミッション試料の太陽風の分析

太陽風が照射されると物質にどのような記録が残されるのかを解明するために、人工物質を太陽風に約 2 年間照射後、回収した

NASA Genesis ミッションの回収試料の一つであるダイヤモンドライクカーボン膜(DOS)中の太陽風 He 分布を定量分析した。成果(1)で開発した定量分析法を用いた。分析結果を図 3 に示す。He の深さ方向分析は今回の研究が世界初の結果である。

太陽風 He は DOS 中に打ち込まれており、その注入ピーク深さは 20nm である。この注入深さは太陽風 He の平均エネルギー 4keV に対応している。深さ方向分布は、Genesis ミッション期間の太陽風エネルギー分布を用いたイオン注入数値シミュレーションコードによる計算値と比較した。分析値の範囲において、両者の一致は、注入飛程、ピーク濃度、分布形状ともに極めてよかった。この結果は、太陽風と個体物質との間の相互作用の物理を解明したことを意味し、また、水素を除く全ての元素が Genesis ミッション試料に完全に捕獲されていることを示す。従ってある元素の深さ方向分析が決定されれば、その結果から、太陽風のエネルギー分布を計算することができることが証明された。これは、もし隕石中から太陽風 He の分布を計測できれば、45 億年前の太陽風活動を決定できるだろうという、本研究開始当初の予測を証明したことを意味する。

数値計算による深さ 100nm 以深のプロファイルは Genesis ミッション期間に起こった太陽フレアによる高エネルギー太陽風に起因している。本成果の He 検出限界は 10^{18} cm^{-3} であり、成果(1)の結果と整合的である。もし検出限界をもう 1 桁下げることができれば、太陽フレアについて物質科学的に研究することが可能になり、本研究で推進している方法が太古の太陽風フレアを直接研究する有力な方法であることをより強く期待するものである。

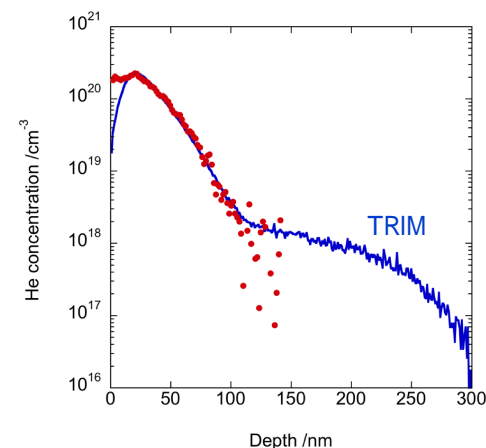


図 3 Genesis DOS 試料に打ち込まれた太陽風 He の深さ方向分布。数値計算値 (青色) も示している。

(3) JAXA はやぶさミッションの小惑星イトカワ微粒子の太陽風の分析

小惑星イトカワ表面は宇宙風化をしていることが判明している。この宇宙風化の主要因は太陽風照射であることが回収試料の電

子顕微鏡分析により解明されていた。我々は、太陽風 He の直接分析を試み、世界で初めて、イトカワ微粒子表面に打ち込まれた太陽風 He の 3 次元分布を得ることに成功した (図 4)。この分布を解析することにより、以下の成果を得た。打ち込まれた太陽風は単一微粒子内において非常に不均質な分布を呈し、イトカワの宇宙風化が微粒子のイトカワ表面のレゴリス粒子流動現象と関連していることを示唆している。イトカワ微粒子は約 150 年間太陽風照射されていると考えられているので、観測された He 量は、太陽風 He の約 80% がすでに流失していることを示している。しかし、微粒子中に残っている He の深さ方向分布は見かけ上 as-implant の深さ方向分布と相似形を保っている。このことは成果(1)で観測された He 流出減少の場合の減少と同じであり、微粒子中の欠陥ネットワーク形成による He 流出機構が小惑星表面において起こっていることを示している。成果(2)との比較から、深さ方向分布における深さ 150nm 以深のテールは太陽風フレアが記録されたものと考えられる。この太陽風フレア起源の He 分布は、過去 200 年年間の太陽風活動が現在のものと平均的に同じであったことを意味している。

以上の結果は、隕石中の太陽風 He 分布分析により、太陽系形成初期の原始太陽の直接の活動記録を検出できる可能性がさらに大きくなったことを意味している。

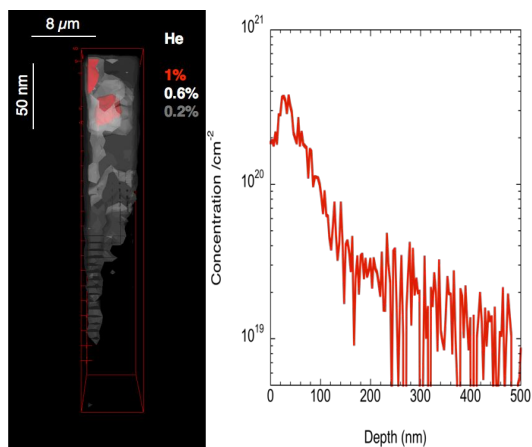


図 4 小惑星イトカワ微粒子に打ち込まれた太陽風 He の 3 次元分布 (左) と深さ方向分布 (右)。

(4) 隕石中の太陽風の検出

本研究の目的は、「ガスリッチコンドライトにトラップされた高濃度希ガス成分のトラップ箇所を特定しその濃度の空間分布をサブミクロンの分解能で解析する」ということだった。ガスリッチコンドライトの一つである NWA801 CR2 を LIMAS で分析を試みているが、現在まで、検出限界を超える有意な He 信号を検出できていない。そのため、検出限界を下げるために LIMAS の改良を行っている。具体的には、真空の微小リーク箇所の検索と対処を行なった。その結果、一次

イオンカラムの電極フィードスルーの数カ所に微小リークがあることを検出し、フィードスルー形状の改良を行い、リークを検出限界以下にした。その結果、現在の検出限界は、本報告の 10^{18} cm^{-3} から 1 桁小さくなり、 10^{17} cm^{-3} レベルになっている。現在、Genesis 試料から太陽風フレア成分の検出実験を計画中である。今後はさらに検出限界を下げるため、真空ポンプを増設による真空残留 He ガスの削減とレーザーアブレーション機能によるスパッタニュートラル源の原子数の増加を計画している。これらの改良により、ガスリッチコンドライトのその場太陽風分析に挑戦し続け、原始太陽のスーパーフレアによる太陽表面からの爆発的に放出される粒子のエネルギー分布やそのフラックスを物質科学的に解明し、原始太陽の活動の解明を目指したい。

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 22 件) 全て査読有

Zhang, A.-C., Ma, C., Sakamoto, N., Wang, R.-C., Hsu, W.-B. and Yurimoto, H. (2015) Mineralogical anatomy and implications of a Ti-Sc-rich ultrarefractory inclusion from Sayh al Uhaymir 290 CH3 chondrite. *Geochim. Cosmochim. Acta* 163, 27-39.

Hashiguchi, M., Kobayashi, S. and Yurimoto, H. (2015) Deuterium- and ^{15}N -signatures of organic globules in Murchison and Northwest Africa 801 meteorites. *Geochem. J.* 49, 377-391.

Okuchi, T., Purevjav, N., Tomioka, N., Lin, J.-F., Kuribayashi, T., Schoneveld, L., Hwang, H., Sakamoto, N., Kawasaki, N. and Yurimoto, H. (2015) Synthesis of large and homogeneous single crystals of water-bearing minerals by slow cooling at deep-mantle pressures. *American Mineralogist* 100, 1483-1492.

Kawasaki, N., Kato, C., Itoh, S., Wakaki, S., Ito, M. and Yurimoto, H. (2015) 26Al-26Mg chronology and oxygen isotope distributions of multiple melting for a Type C CAI from Allende. *Geochim. Cosmochim. Acta* 169, 99-114.

Bajo, K., Olinger, C. T., Jurewicz, A. J. G., Burnett, D. S., Sakaguchi, I., Suzuki, T., Itose, S., Ishihara, M., Uchino, K., Wieler, R. and Yurimoto, H. (2015) Depth profiling analysis of solar wind helium collected in diamond-like carbon film from Genesis. *Geochem. J.* 49, 559-566, doi:10.2343/geochemj.2.0385.

Sun, W., Yoshino, T., Sakamoto, N. and Yurimoto, H. (2015) Hydrogen self-diffusivity in single crystal ringwoodite:

- Implications for water content and distribution in the mantle transition zone. *Geophys. Res. Lett.* 42, 6582–6589, doi:10.1002/2015GL064486.
- Cai, N., Inoue, T., Fujino, K., Ohfuji, H. and Yurimoto, H. (2015) A possible new Al-bearing hydrous Mg-silicate (23 Å phase) in the deep upper mantle. *American Mineralogist* 100, 2330-2335.
- Chang, Y.-Y., Jacobsen, S.D., Bina, C.R., Thomas, S.-M., Smyth, J.R., Frost, D.J., Ballaran, T.B., McCammon, C.A., Hauri, E.H., Inoue, T., Yurimoto, H., Meng, Y. and Dera, P. (2015) Comparative compressibility of hydrous wadsleyite and ringwoodite: Effect of H₂O and implications for detecting water in the transition zone. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 120, doi:10.1002/2015JB012123.
- Zellmer G. F., Sakamoto N., Iizuka Y., Miyoshi M., Tamura Y., Hsieh H.-H. and Yurimoto H. (2014) Crystal uptake into aphyric arc melts: insights from two-pyroxene pseudo-decompression paths, plagioclase hygrometry, and measurement of hydrogen in olivines from mafic volcanics of SW Japan. In *Orogenic Andesites and Crustal Growth*, Geological Society, London, Special Publications, Vol. 385 (ed. A. Gómez-Tuena, S. M. Straub, and G. F. Zellmer), 161-184. doi: 10.1144/SP385.3.
- Wakita, S., Nakamura, T., Ikeda, T. and Yurimoto, H. (2014) Thermal modeling for a parent body of Itokawa. *Meteorit. Planet. Sci.* 49, 228-236.
- Zhang, A.-C., Itoh, S., Sakamoto, N., Wang, R.-C. and Yurimoto, H. (2014) Origins of Al-rich chondrules: Clues from a compound Al-rich chondrule in the Dar al Gani 978 carbonaceous chondrite. *Geochim. Cosmochim. Acta* 130, 78–92.
- Zellmer, G. F., Hwang, S.-L., Sakamoto, N., Iizuka, Y., Harada, S., Kimura, J.-I., Tamura, Y. and Yurimoto, H. (2014) Interaction of arc magmas with subvolcanic hydrothermal systems: insights from compositions and metasomatic textures of olivine crystals in fresh basalts of Daisen and Mengameyama, Western Honshu, Japan. In G. F. Zellmer, M. Edmonds and S. M. Straub, Eds. *The Role of Volatiles in the Genesis, Evolution and Eruption of Arc Magmas*, Special Publications, 410. Geological Society of London, London. Doi: 10.1144/SP410.1.
- Yurimoto, H., Itoh, S., Zolensky, M., Kusakabe, M., Karen, A. and Bodnar, R. (2014) Isotopic compositions of asteroidal liquid water trapped in fluid inclusions of chondrites. *Geochim. J.* 48, 549-560.
- Wakaki, S., Itoh, S., Tanaka, T. and Yurimoto, H. (2013) Petrology, trace element abundances and oxygen isotopic compositions of a compound CAI-chondrule object from Allende. *Geochim. Cosmochim. Acta* 102, 261-279.
- Ebata, S., Ishihara, M., Kumondai, K., Mibuka, R., Uchino, K. and Yurimoto, H. (2013) Development of an ultra-high performance multi-turn TOF-SIMS/SNMS System “MULTUM-SIMS/SNMS”. *J. Am. Soc. Mass Spectrom.* 24, 222-229. DOI 10.1007/s13361-012-0528-2.
- Imamura, K., Ogasawara, Y., Yurimoto, H. and Kusakabe, M. (2013) Carbon isotope heterogeneity in metamorphic diamond from the Kokchetav UHP dolomite marble, northern Kazakhstan. *International Geology Review* 55, 453-467.
- Negishi, H., Arai, S., Yurimoto, H., Ito, S., Ishimaru, S., Tamura, A. and Akizawa, N. (2013) Sulfide-rich dunite within a thick Moho transition zone of the northern Oman ophiolite: implications for the origin of Cyprus-type sulfide deposits. *Lithos* 164-167, 22-35.
- Hashiguchi, M., Kobayashi, S. and Yurimoto, H. (2013) In situ observation of D-rich carbonaceous globules embedded in NWA 801 CR2 chondrite. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 122, 306-323. doi: 10.1016/j.gca.2013.08.007.
- Sakaguchi, I., Sakamoto, N., Hashiguchi, M., Yurimoto, H., Hishita, S. and Ohashi, N. (2013) Characterization of oxygen defect and zinc segregation in the dense tin dioxide ceramics added with zinc oxide. *Journal of the Ceramic Society of Japan* 121, 956-959.
- Hashiguchi, M., Sakaguchi, I., Sakamoto, N., Yurimoto, H., Hishita, S. and Ohashi, N. (2013) Ion implantation and diffusion of zinc in dense SnO₂ ceramics. *Journal of the Ceramic Society of Japan* 121, 1004-1007.
- 21 Zhang, A.-C. and Yurimoto, H. (2013) Petrography and mineralogy of the ungrouped type 3 carbonaceous chondrite Dar al Gani 978. *Meteorit. Planet. Sci.* 48, 1651–1677.
- 22 Paque, J. M., Sutton, S. R., Simon, S. B., Beckett, J. R., Burnett, D. S., Grossman, L., Yurimoto, H., Itoh, S. and Connolly, H. C. (2013) XANES and Mg isotopic analyses of spinels in Ca-Al-rich inclusions: Evidence for formation under oxidizing conditions. *Meteorit. Planet. Sci.* 48, 2015-2043.

[学会発表](計 1件)

Yurimoto H., Bajo K, Olinger CT, Jurewicz AJG, Burnett DS, Sakaguchi I, Suzuki TT, Itose S, Ishihara M, Uchino K & Wieler R (2015) Depth Distribution of Solar Wind He Implanted into NASA Genesis Targets. *Goldschmidt2015*, August 16-21, 2015,

Prague, CZ.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://vigarano.ep.sci.hokudai.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂本 尚義 (YURIMOTO HISAYOSHI)

北海道大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：80191485

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし