

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔令和5（2023）年度 中間評価用〕

令和5年3月31日現在

研究期間：2021～2025
課題番号：21H04985
研究課題名：前主系列星期から現在に至る太陽活動変遷の研究
研究代表者氏名（ローマ字）：塚本 尚義 (YURIMOTO Hisayoshi)
所属研究機関・部局・職：北海道大学・理学研究院・教授
研究者番号：80191485

研究の概要：

本研究の目的は、前主系列星期から現在に至る46億年間の太陽活動の変遷を解明することである。そのために、46億年前に太陽風照射されたガスリッチ炭素質隕石；40億年前、30億年前、20億年前、10億年前、1億年前に太陽風照射された月面レゴリスセット；百万年前に太陽風照射された小惑星イトカワ粒子の分析を行う。

研究分野：宇宙地球化学

キーワード：地球化学、太陽風、太陽、原始太陽、希ガス

1. 研究開始当初の背景

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惑星の熱環境および電磁環境も支配している。天文学では、前主系列星期の恒星は、高エネルギー粒子を放出する激しいスーパーフレア現象を多発する活発な恒星活動をしていることが観測されている。この活発な恒星活動は、しばしば大規模なコロナ質量放出による激しい恒星風を発生させ、その周りの原始惑星系円盤中で進行するダスト物質および天体の進化やガスの散逸に大きな作用を与えると考えられている。このような活発な前主系列星太陽の活動は、周囲の原始惑星系円盤における物質進化を大いに支配したと考えられるが、その当時の物質からできている始原隕石からこの活発な太陽活動の記録を読み解いた研究はあまり多くない。一方、主系列星期の恒星においても、数千年間に1回の頻度でスーパーフレアが起き、恒星の年齢が若くなるほどその発生頻度が大きくなることがわかってきている。しかしながら、スーパーフレアが主系列星太陽でどのくらいの頻度で起こっていたのかは不明である。

2. 研究の目的

本研究の核心をなす学術的問いは、「太陽は、前主系列星の時どれくらいのエネルギーの粒子をどれだけ放出していたのか、主系列星になるとその放出が静かになっていったのか」である。そのために太陽の年齢46億年にわたる試料を準備して、46億年間の太陽風の変動を解明する。つまり、本研究の目的は、前主系列星期から現在に至る46億年間の太陽活動の変遷を解明することである。

3. 研究の方法

本研究では、同位体ナノスコープを用いて、太陽風照射があった地球外物質の固体粒子局所表面の希ガス濃度・同位体分布から太陽風の照射量とエネルギー分布を決定することにより、過去の太陽活動を解析する。同位体ナノスコープは、我々が独自に開発した固体中の希ガスの超局所3次元分析ができる質量分析装置で、世界唯一のものである。この装置に、新たに考案した誘導電荷検出システムと広領域イメージングシステムを設計することにより導入し、測定できる希ガス種類と測定領域の拡張を行う。

過去の太陽活動を推定するために次の地球外物質を測定する：百万年前までの太陽活動はJAXAはやぶさ探査機が持ち帰った小惑星イトカワ粒子、1億年前・10億年前・20億年前・40億年前の太陽活動はNASAアポロ宇宙船が持ち帰った月面レゴリス試料、前主系列星期(46億年前)の太陽活動はガスリッチ炭素質隕石（図1）。

これらの分析結果から解析された、低速のkeVレベルから超高速のMeVレベル（スーパーフレアに相当）に至る運動エネルギーをもつ粒子放射（太陽風）スペクトルの比較により、太陽活動の経年変化を解明する。

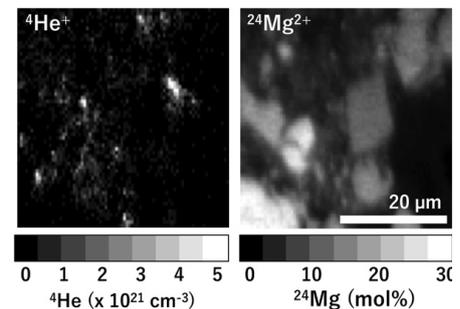


図1. ガスリッチ隕石 NWA801 マトリックス中の太陽風 He (左図) と鉍粒子 (右図) の2次元分布の比較。

4. これまでの成果

太陽の前主系列星期に形成した隕石母天体上に照射した太陽風の存在様式を、隕石のその場分析により世界で初めて観察できた(図2)。得られた太陽風起源希ガスの空間分布の画像は、「太陽風は、天体集積により角礫化した岩片が堆積した天体表面に降り注いだ。引き続き起こった集積による天体表面のガーデニング作用により太陽風がイオン注入された表面物質が天体内部に取り込まれた」という母天体上の宇宙風化過程を明らかに示していた。この太陽風照射期間は数百~数千年間と計算される。太陽風を記録しているこれらの物質は、原始太陽系円盤中に浮遊していた円盤物質であると考えられるが、本研究課題が期待している円盤物質が母天体に集積前に太陽風照射を受けていたことを示すエビデンスはまだ得られていない。

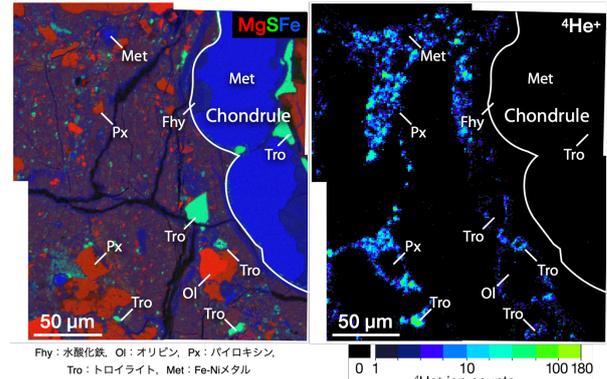


図2 炭素質隕石 NWA 801 CR2 のマトリックスの X 線元素マップ(左図)とその部分の ^4He 分布マップ(右図)。

はやぶさ探査機によりサンプリングされたオリビンからなる小惑星イトカワ微粒子 RA-QD02-0307 の表面の ^4He の 3 次元微小領域分析を行った(図3)。 ^4He 濃度が深さ約 35nm に極大を持つことより、 ^4He は太陽風により注入されていることがわかる。また、同一深さであっても ^4He は一様濃度に注入されておらず、深さ 20nm と 40nm の部分の濃度分布も異なる。このような分布は、イオン注入理論から単純に予想されず、今回の分析により初めて判明したことである。この原因について現在解析中である。また、深さ 100nm 以深の ^4He プロファイルは、現在同様に、コロナ質量放出(CME)が起きていたことを示している。これらの特徴から、太陽活動は 100 万年前まで現在とあまり変わらない可能性があることを示す証拠を初めて得ることができた。はやぶさ2が持ち帰った小惑星リュウグウ試料の測定を行ったが、バルク分析で検出された太陽風成分希ガスの保持場所の特定に至らなかった。

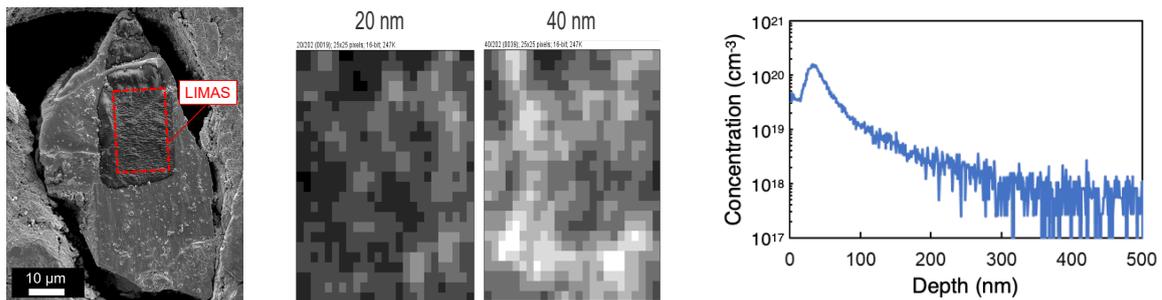


図3 分析後のイトカワ微粒子表面(左図)。赤枠が分析部。表面から深さ 20nm 部と 40nm 部(中図)の He 分布(横幅 15μm)。左図赤枠中央部 28μm² 領域の深さ方向分析(右図)。

5. 今後の計画

今後は、同位体ナノスコープを用いた月レゴリス粒子の希ガスの超局所表面 3 次元分析により、1 億年前・10 億年前・20 億年前・40 億年前の太陽活動を解析する。また、隕石の広領域イメージングによる希ガス分布サーベイを続け、前主系列星期に起こった突発的高エネルギー太陽活動の検出を試みる。以上により得られた新しい成果をまとめ、本研究の核心をなす学術的問いを一言で表す「過去に太陽はスーパーフレアを起こしたのか？」に解答し、太陽活動 46 億年間の変遷を明らかにする。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

Yokoyama, T., Bajo, K. (10 番目), Yurimoto, H*(149 番目), 他 146 名 (2023) Samples returned from the asteroid Ryugu are similar to Ivuna-type carbonaceous meteorites. *Science*, **379**, eabn7850. <https://doi.org/10.1126/science.abn7850>

Bajo, K.*, Aoki, J., Ishihara, M., Furuya, S., Nishimura, M., Yoshitake, M. and Yurimoto, H. (2022) Development of electrostatic-induced charge detector for multiturn time-of-flight mass spectrometer. *Journal of Mass Spectrometry* **57**, e4892. <https://doi.org/10.1002/jms.4892>

7. ホームページ等

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