

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔令和4（2022）年度 中間評価用〕

令和4年3月31日現在

研究期間：2020年度～2024年度  
課題番号：20H05643  
研究課題名：過去1万年間の太陽活動

研究代表者氏名（ローマ字）：三宅美沙（MIYAKE Fusa）  
所属研究機関・部局・職：名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授  
研究者番号：90738569

研究の概要：

大規模な太陽面爆発は、人工衛星の破壊や通信障害等を引き起こし、現在の宇宙開拓時代において大きな脅威になり得る。本課題は過去に発生した巨大な太陽面爆発の代替指標である宇宙線生成核種（樹木年輪の $^{14}\text{C}$ や氷床コアの $^{10}\text{Be}$ 、 $^{36}\text{Cl}$ ）を用いて、過去1万年間における巨大な太陽面爆発の発生頻度や規模の上限など長期的な特性を明らかにしようというものである。

研究分野：宇宙線物理学、太陽物理学

キーワード：太陽、宇宙線、宇宙線生成核種、太陽高エネルギー粒子、樹木年輪、氷床コア、加速器質量分析

1. 研究開始当初の背景

太陽フレアやコロナ質量放出は、非常に高いエネルギーを持つ粒子「Solar Energetic Particle (SEP)」を放出する。地球近傍の人工衛星は、しばしばSEPフラックスの急増を観測し、このような現象はSEPイベントとして知られる。大規模なSEPイベントは人工衛星の破壊や宇宙飛行士の被ばく、通信障害等を引き起こし、現在の宇宙開拓時代において大きな脅威になり得るため、その理解を深める必要がある。しかし、1940年代以前の観測データはなく発生頻度や規模の上限など長期的な発生特性についてよくわかっていない。

過去に発生した超巨大SEPイベント（観測史上最大のSEPイベントの数十倍規模）の優れた代替データとして、樹木年輪の $^{14}\text{C}$ や氷床コアの $^{10}\text{Be}$ 、 $^{36}\text{Cl}$ といった宇宙線生成核種が知られる。研究代表者らは、これまでに宇宙線生成核種の分析から、西暦774/775年や西暦993/994年などの超巨大SEPイベントの痕跡を発見した。これは、我々の太陽でスーパーフレアが発生した可能性を示すだけでなく、現代社会に甚大な影響を与え得る極端太陽現象が将来発生する可能性を示すものである。しかし、研究開始当初において、主に調査されていたのは過去3000年間であり、検出されたイベント数も少ないことから、超巨大SEPイベントの発生頻度分布などの特性の理解が不十分であった。また、宇宙線生成核種で検出されるSEPイベントは、現代観測で見ついている最大級のSEPイベントの数十倍の規模と推定されているが、現代の観測データに基づくイベント規模のキャリブレーションが成されていなかった。

2. 研究の目的

本研究は、（1）年輪の $^{14}\text{C}$ を用いて調査する年代を過去3000年間から過去1万年間（～BC8000年）に拡張し、過去1万年間における最大のSEPイベントの同定と、超巨大SEPイベントの発生頻度及びその発生特性の解明、（2）現代の観測で見ついている中で最大の1956年のSEPイベントを超高精度かつ高分解能な宇宙線生成核種の測定から捕らえることで、775年他イベントの規模を正確に決定すること、（3）太陽型恒星のスーパーフレアの発生頻度と比較することで、太陽フレアと太陽型恒星におけるスーパーフレアとを橋渡しし、太陽型恒星における太陽の普遍性・特殊性を評価すること、を目的としている。

3. 研究の方法

既に連続した単年データが得られている過去～3500年より前のBC8000～BC1500年について、1年分解能（隔年） $^{14}\text{C}$ 測定を行い（国産、ロシア産、米国産、フィンランド産樹木試料を利用）、過去1万年間の超巨大SEPイベントの痕跡を網羅的に検出する。さらに、南極氷床コアの $^{10}\text{Be}$ 、 $^{36}\text{Cl}$ 分析から検出された $^{14}\text{C}$ 増加の原因がSEP起源かどうか追究する。

SEP1956イベントについて、南極、グリーンランド氷床コアの高精度 $^{10}\text{Be}$ 分析から核種増加の有無を確認する。また、775年の1/5～1/10規模の小型イベントの検出と発生頻度の解明に向け、超高精度 $^{14}\text{C}$ 分析法の開発と、歴史文献をベースとした太陽活動活動発期の調査を行う。太陽型恒星のフレア発生頻度に関して、新たにTESSの測光データなどの解析から統計誤差のより小さい発生頻度分布を求める。

また、1万年を大幅に超える期間のSEPイベント発生を調査するための試料を模索する試みとして、トラバーチン（陸成石灰岩）試料を用いて775年周辺の $^{10}\text{Be}$ 測定を行う。

#### 4. これまでの成果

現在得られている研究成果は、主に (1) BC5,000~BC4,000 年代の約 1,000 年間の連続  $^{14}\text{C}$  データ取得、(2) 複数の SEP 起源と考えられるイベントの発見 (3) 小型  $^{14}\text{C}$  増加イベントの検出手法の確立と小型 SEP イベント存在の示唆 (4) 歴史文献に基づく数多の磁気嵐現象の発見、(5) 新たな太陽活動を示唆するデータの取得、である。(1) について、本研究以前の長年にわたる取り組みで主に過去 3,000 年間の単年  $^{14}\text{C}$  データが取得されていたことを踏まえると、わずか~1 年で単年データ取得期間を大きく拡張したことになる。大規模 SEP イベントの発生頻度の議論を行う上でも、得られた単年  $^{14}\text{C}$  データの年代測定等への応用という側面からも、長期間の単年  $^{14}\text{C}$  データの取得は極めて重要である。(2) (3) について、例えば、BC5410 年の SEP イベント候補が複数の樹木試料から確認された (Miyake et al. 2021)。また、775 年イベントの約 1/8~1/5 に相当する  $^{14}\text{C}$  増加が複数報告されており (Miyahara et al. 2022)、仮にこれらが SEP 起源と特定できれば、現代観測で検出されている SEP イベントと 775 年イベントとの中間規模のイベントの存在を初めて示すことにつながり、大変重要な成果といえる。(4) について、1859 年のキャリントンイベントをはじめ、過去 3000 年にわたる数多くの磁気嵐現象の調査が進んでいる (e.g., Hayakawa et al. 2022)。(5) について、 $^{14}\text{C}$  の急増イベントは Grand Solar Minimum (太陽活動低調期) 後の太陽活動回復期に発生する傾向や (Kanzawa et al. 2021, Miyake et al. 2021)、Grand Solar Minimum のはじめに小型イベント頻発の痕跡 (Miyahara et al. 2022) も明らかになりつつある。

#### 5. 今後の計画

今後の計画として、主に (1) 過去 1 万年間の未測定期間の連続  $^{14}\text{C}$  データ取得 (BC1500~BC4600、BC5500~BC8000 年、国産、ロシア産樹木サンプルを使用予定) と、検出されたイベントに対する氷床コアの  $^{10}\text{Be}$ 、 $^{36}\text{Cl}$  分析 (2) 1956 年周辺の高精度  $^{10}\text{Be}$  分析 (南極沿岸 H15 コア、南極内陸ピットコア、グリーンランド SE ドームコア使用)、(3) 775 年周辺のトラバーチン試料の  $^{10}\text{Be}$  分析、(4) 文献記録を用いた過去の太陽活動活発期の調査と小型 SEP イベント調査のための超高精度  $^{14}\text{C}$  分析、(5) TESS データを用いた恒星フレア頻度の高精度化、が挙げられる。既に、一部の年代の樹木試料 (BC5500~BC8000 年) を除き、試料の準備が整っており、今後は順次、宇宙線生成核種の分析を進める。また、BC5500~BC8000 年の樹木試料についても、2022 年度に準備を進める予定である。

#### 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

<発表論文>

1. ○\*Hayakawa, H., Nevanlinna, H., Blake, S. P., Ebihara, Y., Bhaskar, A. T., Miyoshi, Y. (2022) Temporal Variations of the Three Geomagnetic Field Components at Colaba Observatory around the Carrington Storm in 1859, *The Astrophysical Journal*, 928, 32. (査読有)
2. ○\*Miyahara, H., F. Tokanai, T. Moriya, M. Takeyama, H. Sakurai, M. Ohyama, K. Horiuchi, H. Hotta (2022). Recurrent Large-Scale Solar Proton Events Before the Onset of the Wolf Grand Solar Minimum, *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL097201. (査読有)
3. ○\*Kanzawa, K., F. Miyake, K. Horiuchi, K. Sasa 他 14 名. (2021). High-Resolution  $^{10}\text{Be}$  and  $^{36}\text{Cl}$  Data From the Antarctic Dome Fuji Ice Core (~100 Years Around 5480 BCE): An Unusual Grand Solar Minimum Occurrence? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2021JA029378. <https://doi.org/10.1029/2021JA029378>. (査読有)
4. ○\*Miyake, F., I. P. Panyushkina, A. J. T. Jull, F. Adolphi, N. Brehm, S. Helama, K. Kanzawa, T. Moriya, R. Muscheler, K. Nicolussi, M. Oinonen, M. Salzer, M. Takeyama, F. Tokanai, L. Wacker., A single-year cosmic ray event at 5410 BCE registered in  $^{14}\text{C}$  of tree rings. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL093419. 2021. (査読有)
5. ○Okamoto, S., Y. Notsu, H. Maehara, 他 5 名. (2021). Statistical Properties of Superflares on Solar-type Stars: Results Using All of the Kepler Primary Mission Data. *The Astrophysical Journal*, 906, id.72, 28 pp. (査読有)

他、発表論文 32 件、図書 6 件、招待講演 9 件、受賞 1 件など

#### 7. ホームページ等

<https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/news/research-results/2021/20210604.html>  
<https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/news/research-results/2021/20210917.html>  
<https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/news/research-results/2022/20220106.html>  
[http://okayama.mtk.nao.ac.jp/EK\\_Dra/EK\\_Dra\\_superflare.html](http://okayama.mtk.nao.ac.jp/EK_Dra/EK_Dra_superflare.html)  
<https://www.youtube.com/watch?v=7mMsskHjfuY&t=138s>