

地球の宇宙線起源同位体に記録された 過去の極端太陽イベント



三宅 芙沙

〈名古屋大学宇宙地球環境研究所 〒464-8601 愛知県名古屋市中種区不老町〉

e-mail: fmiyake@isee.nagoya-u.ac.jp

太陽フレアやコロナ質量放出といった太陽面の爆発現象によって、地球に大量の高エネルギー粒子が降り注ぐSEP (Solar Energetic Particle) イベントが時に引き起こされる。近年の研究から、観測史上最大のSEPイベントの数十倍という非常に規模の大きなSEPイベントが、年輪の ^{14}C や氷床コアの ^{10}Be などの宇宙線生成核種データに記録されていることが明らかになってきた。本稿では、AD775年に発見された大規模SEPイベントをはじめ、過去約1万年間に発生した大規模SEPイベントの痕跡について紹介する。

1. はじめに

太陽からの高エネルギー粒子 (SEP: Solar Energetic Particle) は、太陽フレアやコロナ質量放出 (CME: Coronal Mass Ejection) に伴い発生する。SEPの多くは1 GeV以下の比較的低エネルギーを持つが、中には数GeVまたはそれ以上まで加速される高エネルギー粒子もある。SEPは地球近傍の人工衛星 (GOES衛星など) によってモニターされており、時々SEP流束が大幅に増加するような現象がとらえられている。このような現象をSEPイベントと呼ぶ^{*1}。例えば、図1(a)は2000年7月12-14日にGOESによって観測されたプロトン流束を示すが、14日の流束の急増が大規模なSEPイベントとして検出された。図1(b)は、このSEPイベントの直前と直後のSOHO衛星のコロナグラフ撮像を示すが、大量のSEPが白

いノイズのように見えている。

人工衛星によるSEPの直接観測は、過去約50年にわたり実施されてきた。さらに、地上に設置された電離箱や中性子モニターを用いたSEPの間接データも過去約70年にわたり存在する。地上で検出されるようなSEPイベントは、SEPの流束が大きい、または高いエネルギーを持つ粒子が多く到来する、またはその両方といった非常に規模の大きなものであり、Ground Level Enhancement (GLE) と呼ばれる。1942年に電離箱で最初のGLEが検出された後、1951年には中性子モニターが導入され、それ以降は主に中性子モニターによってGLEの観測が行われている。2019年現在までに72のGLEが見つかっている。

SEPによる人工衛星の破壊といった直接被害や、SEPイベントと共に生じる可能性がある磁気嵐^{*2}による通信障害など、大規模なSEPイベン

^{*1} Solar Proton Event (SPE) と呼ばれることもある。

^{*2} SEPイベントや磁気嵐は太陽フレアやCMEに伴い発生するが、太陽フレアやCMEがあったからと言って、必ずしもこれらの現象が発生するわけではない。SEPイベントの場合、荷電粒子はパーカーの惑星間空間スパイラル磁場に沿って地球へ到来するため、大規模なSEPイベントは太陽面の西側で発生した爆発 (特に地球につながる磁力線のW55°付近) に起因する傾向にある。一方、磁気嵐はCMEの磁場が強い南向きの場合生じる。

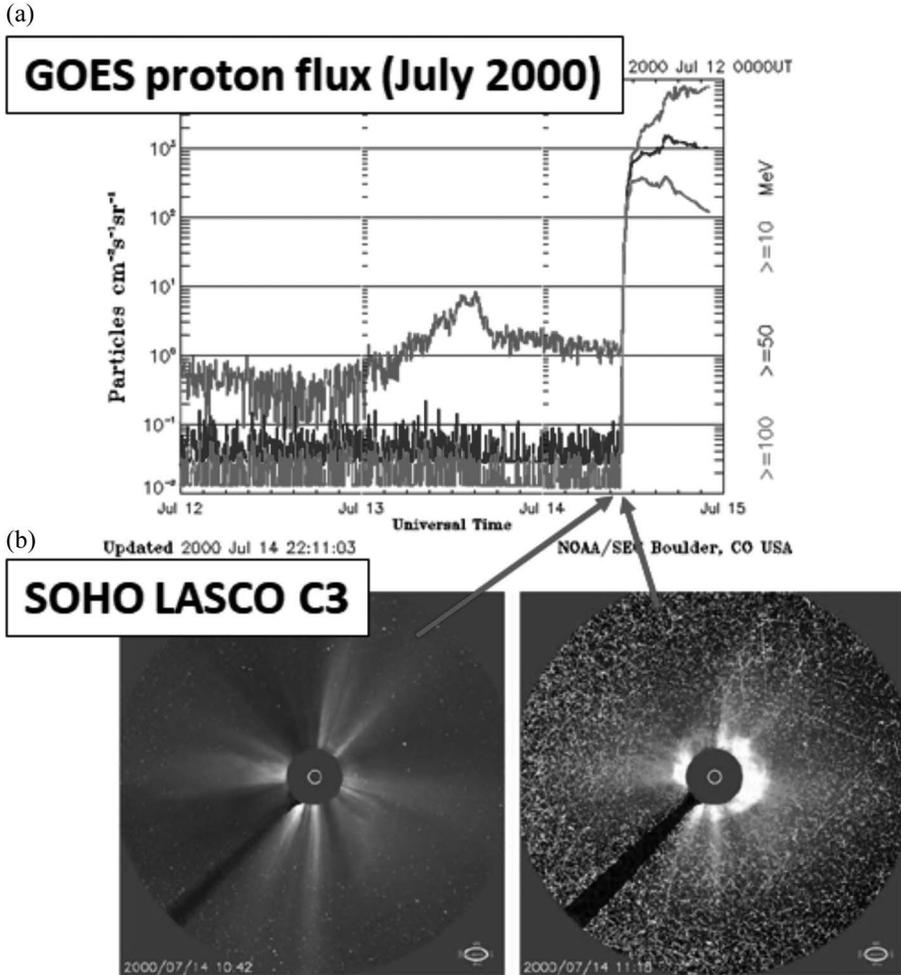


図1 (a) 2000年7月12-14日にGOESによって観測されたプロトン流束. データはそれぞれ10, 50, 100 MeV以上の流束を示す (NOAA/SEC). (b) 2000年7月14日のSEPイベントの直前と直後のSOHOの撮像 (ESA & NASA).

トは現代社会に大きな影響を与え得る. したがって, 大規模SEPイベントの発生頻度やSEPイベントの規模の上限などの情報は極めて重要である. しかし, このような長期的なSEPイベントの特性を調査するのに, 上に挙げた過去数十年間の観測記録では限界があり, SEPの代替データが必要になる. そのような代替データとして, 我々は宇宙線起源の同位体, すなわち宇宙線生成核種を用いている.

2. 過去のSEPイベント: 代替データ

2.1 宇宙線生成核種

宇宙線生成核種は, 大気中で高エネルギー粒子 (主に銀河宇宙線) によって生成される. 生成量が多い代表的な長寿命核種に, ^{14}C (半減期5730年), ^{10}Be ($\sim 1.4 \times 10^6$ 年), ^{36}Cl ($\sim 3 \times 10^5$ 年) がある. ^{14}C の主な生成経路は ^{14}N (n, p) ^{14}C の中性子捕獲反応で, ^{10}Be や ^{36}Cl は ^{14}N (n, 2n3p) ^{10}Be や ^{40}Ar (p, 2p3n) ^{36}Cl などの核破碎反応で生成される [1]. ここでA (b, c) Dは粒子Aに粒

子bが反応し、粒子cを放出して粒子Dを生成するプロセスを表す。これらの核反応の閾値エネルギーは典型的に数十 MeV であるため、SEPも宇宙線生成核種の生成に寄与している。

大気中で宇宙線生成核種が作られた後の振る舞いは、核種によって大きく異なる。 ^{14}C の場合、COを経た後に CO_2 となり、炭素循環に入る。一方、 ^{10}Be や ^{36}Cl は大気を漂うエアロゾルに付着し、地上に降り注ぐと考えられている。これらの核種を含み、過去へ遡ることができる（年代情報を有する）保存サンプルとして、我々はよく樹木年輪(^{14}C)や氷床コア(^{10}Be , ^{36}Cl)を用いる。SEPイベントは通常、数時間-数日という短いタイムスケールで発生するため、宇宙線生成核種にも1年以下の急激な増加として記録されている可能性がある。このように宇宙線生成核種が過去のSEPイベントの代替データとなり得る可能性について、いくつかの研究によって指摘されてきた [2-4]。

一方で、これまでに観測されたSEPイベント、特に規模の大きなSEPイベントであるGLEが発生した年代の宇宙線生成核種を~1年分解能で調査しても、明瞭な増加は確認されていない*³ [5, 6]。したがってSEPイベントを宇宙線生成核種でとらえることができたとしても、観測されているSEPイベントの規模をはるかに上回るイベントしか検出できないのである。

2.2 硝酸塩

過去のSEPイベントの代替データとして、宇宙線生成核種以外に氷床コアの硝酸塩（ナイトレ-

ート）も議論されてきた。その根拠として、ナイトレートは高エネルギー粒子による電離と解離プロセスによって成層圏で生成されると考えられており [7]、過去400年間のグリーンランド氷床コアのナイトレート変動のうち一番大きな増加が1859年（キャリントンイベント）付近で見つかったためである [8]。

しかし最近の研究から、グリーンランドの氷床コアにみられるナイトレート増加は、キャリントンイベントと考えられていたものも含めて、バイオマス燃焼に起因することが明らかになった [9]。またモデル計算からも、大規模SEPイベントは検出できるほどナイトレートを生成しないことが示された*⁴ [10]。完全に決着がついたわけではないが、現在はSEPイベントの代替データにナイトレートを利用することは困難であると考えられている。

3. 宇宙線生成核種に記録されたSEPイベント

3.1 775年の宇宙線急増

これまで見てきたように、宇宙線生成核種は過去のSEPイベントの代替データになり得るが、検出可能なイベントは現代の観測で見つかっているイベントの規模をはるかに上回るものである。しかし、長期的に考えると、そういった大規模なSEPイベントが発生していてもおかしくない。筆者らは、長命なことでも有名な屋久杉の ^{14}C 濃度を測定し、SEPイベントを反映する急激な ^{14}C 増

*³ 数日程度のSEPイベントを1年程度の分解能で調査すると、SEPイベントによる宇宙線生成核種の増加は平均されてしまうため、なるべく高い時間分解能で調査することが望ましい。しかし、上に挙げた保存サンプルでは1年以下の時間分解能での分析が難しいことが多い。例えば、樹木年輪は早材（春から夏にかけて形成される明るい色の木材）と晩材（夏から秋にかけて形成される暗い色の材）とを合わせて1年輪と認識できるが、それ以上の時間分解能（例えば季節変動）の情報を得るのは困難である。さらに1年の年輪幅が1 mm以下の木材も多いため、年輪剥離の技術的な困難さもある。氷床コアの場合も大変貴重なサンプルであるため、使用できる水量に制限があり、1年以下の時間分解能の分析は困難なことが多い。

*⁴ Katharina A Duderstadtら [10] では、観測史上最大SEPイベントの数十倍程度ではナイトレート増加は検出されないとしている。実際に、後述する宇宙線イベントが検出された775年や994年付近でナイトレートの増加はみられない [11]。

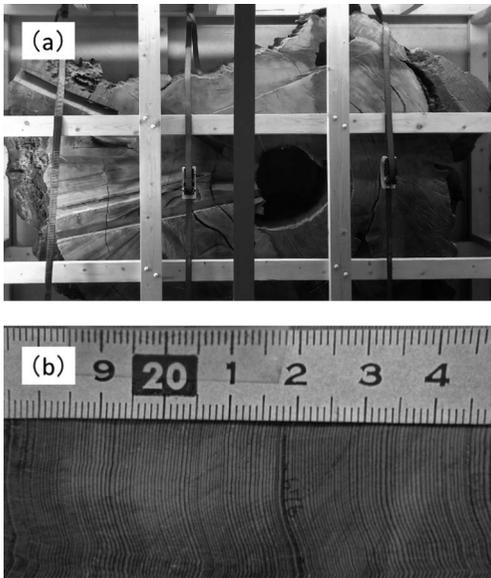


図2 (a) 分析に用いた樹齢約1900年の屋久杉サンプル(名古屋大学宇宙地球環境研究所: 所蔵).
(b) AD775年付近の屋久杉年輪拡大図.

加の有無を調査することにした。

ここで、用いた屋久杉試料と試料調製の手法について簡単に触れたい。まず我々が使用した屋久杉は、1956年に屋久杉営林所により伐採された個体で、切り株ディスクを1996年に名古屋大学太陽地球環境研究所(現:宇宙地球環境研究所)の宇宙線研究室が研究用に購入したものである(図2a)。樹齢は1895年(残存年輪は~1500年)で、大変貴重なサンプルである。屋久杉の年輪幅は1mmに満たないことも多い(図2b)。カッターナイフを用いて1年輪ごとに剥離した木片を、化学洗浄によりセルロースとし、それを低圧下で燃焼させCO₂を得る。さらにCO₂を真空ラインで精製し、水素還元からグラファイトを得る。グラファイト中の¹⁴C濃度は加速器質量分析計を用いて測定する。

このように、たった1年の分析にも多くの労力

がかかるため、既存のデータベースを用いて、詳しく調べるべき場所のあたりをつけた。そのようなデータセットにIntCalと呼ばれる年代較正曲線[12]が知られ、主に欧米の樹木年輪から得られた10年分解能の¹⁴Cデータが、過去~12000年にわたって取得されている。仮にSEPイベントを反映した1年以下の大きな¹⁴C増加があった場合、IntCalデータにも急激な増加として見えている可能性がある。IntCalデータにおいて増加率の大きな年代をピックアップしたところ、8世紀後半に過去12000年間で3番目に急激な変化を示す年代があった。そこで、この8世紀後半の¹⁴C濃度を1年分解能で詳細に調査することにした。

測定の結果、AD774-775年の1年間に大きく¹⁴C濃度が増加している年代を発見した(図3)[13]。その増加量は通常の1年に観測される¹⁴C変動を大きく上回り、非常に多くの宇宙線流入があったことを示唆している。我々は、上に挙げた屋久杉とは別個体の屋久杉を用いて再度¹⁴C測定を実施し、この¹⁴C急増の再現性を確認した[13]。

その後、様々な研究者らによって世界各地の樹木サンプルを用いた検証が行われたが、いずれの分析にもAD775年の¹⁴C急増が再現された[15-20]。Ulf Büntgenら[15]による最新の報告では、南北半球含む世界の27地点の樹木を用いて775年イベントの測定が行われ、イベントの発生時期(つまり大気に¹⁴Cのインプットがあった時期)はAD774年7月±1か月と、非常に精度よく決定された*5。また、775年イベントの¹⁴C変動を説明するためには、大気で(1.9±0.1)×10⁸ atoms/cm²の¹⁴C生成があったことが示された[15]。用いた¹⁴Cデータや炭素循環モデルが異なる他の見積もりも、同様の値(1.3-2.1)×10⁸ atoms/cm²を示した[16, 19, 22-24]。これは、

*5 年輪の¹⁴C変動は炭素循環の希釈効果により、元の宇宙線変動にフィルターがかかったような変動を示す[21]。そのため、宇宙線による¹⁴C生成量の推定には、炭素循環モデルを用いる。Büntgenら[15]は、南北半球それぞれ11Boxからなる22Boxモデルを用いた。このモデルでは大気は成層圏と対流圏の二つのBoxからなる。

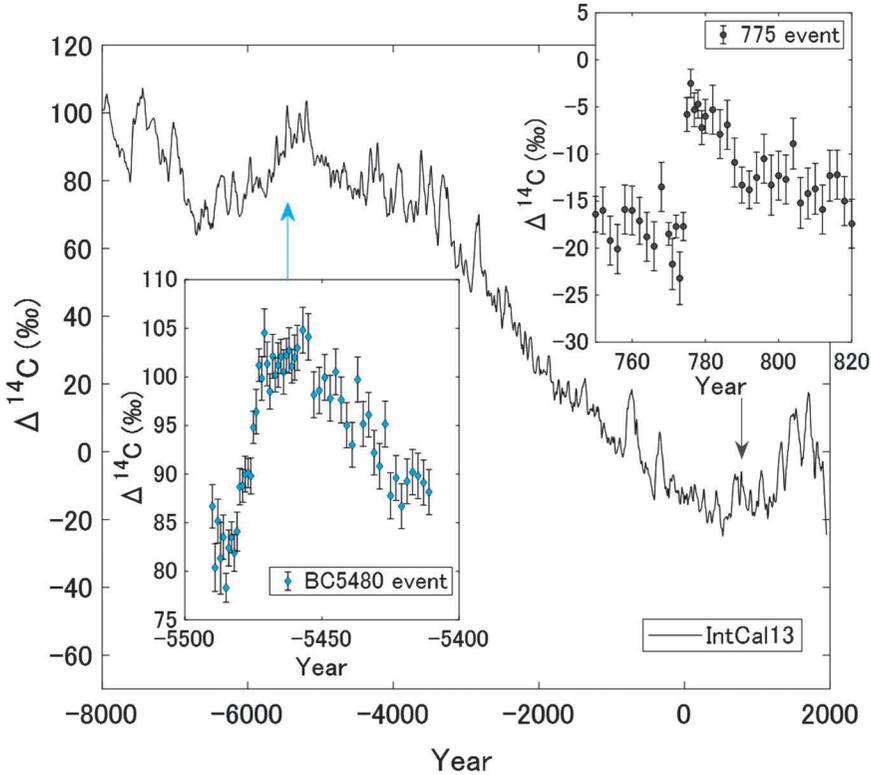


図3 過去～1万年間の¹⁴Cデータ (IntCal13) [12] と、AD775年とBC5480年付近に検出された、急激な¹⁴C濃度増加を示す (それぞれ屋久杉とイガゴヨウマツの測定値を示す) [13, 14]. 二つのイベントはIntCalデータにも急激な増加として現れている. IntCalデータにみられる数十年-百年程度と千年スケールの変化は、それぞれ太陽磁場と地球磁場の変動を反映したものと考えられている.

AD774年に通常の銀河宇宙線による年間の¹⁴C生成量の2-3倍の¹⁴C生成が追加であったことを意味している.

3.2 類似¹⁴C増加イベントの発見

775年イベントの検出以降、類似イベントの探索のため、1年分解能の調査が進み、AD993-994年 [15, 23, 25, 26], BC3372-3371年 [27], ~BC660年 [18] にそれぞれ急激な¹⁴C増加が報告された. これらのイベントは、それぞれ検証された樹木サンプル数が違うものの (994年イベントは南北半球の10地点以上の樹木の調査が行われた一方、BC3371年イベントと~BC660年イベントはそれぞれ一個体の樹木サンプルの¹⁴Cデー

タが報告された)、775年イベントと似たような変化、つまり急激な¹⁴C増加とその後のゆるやかな¹⁴Cの減衰を示す. したがって、これらの年代にも775年イベント同様に短期的な宇宙線流入があったと考えられている.

3.3 ¹⁴C増加イベントの原因

急激な¹⁴C増加を引き起こす原因として、上に挙げたSEPイベント以外にも考えられるが、現在得られている情報からはSEPが支持されている. 本節では他の候補に関する議論を簡単に紹介したい. 他の候補とは具体的にはガンマ線バーストや超新星爆発、さらに地球への彗星衝突である [13, 15, 16, 19, 20, 24, 25, 28-33]. ガンマ線バーストや超新

*6 爆発によって生じた荷電粒子は星間磁場に曲げられ、まっすぐ地球に到達できない. 中性子は寿命が短いため地球へ到達する前に崩壊する.

星爆発の場合、爆発によって生じた様々な種類の粒子のうち、唯一ガンマ線が爆発直後に地球へ到達し^{*6}、大気原子と光核反応を起して宇宙線生成核種を生成すると考えられている [34]。一方の彗星衝突では、彗星表面に蓄積された宇宙線生成核種が地球の大気にばらまかれるというものである（特にオールトの雲から来るような長周期彗星は、太陽圏内より高い宇宙線流束に長期にわたってさらされており、それぞれの宇宙線生成核種の生成と崩壊とが釣り合っていると考えられている）。

彗星衝突起源を支持する根拠として、AD773年の中国の彗星観測記録が報告された [32]。しかし他の検証から、宇宙線イベントの¹⁴C増加を引き起こすためには、彗星の直径が~100 kmと非常に大きくなければならず、そのような彗星が残したであろう深刻な被害や巨大クレーターが見つかっていないため、彗星衝突説は否定された [33, 35]。したがって、原因を特定するためにはSEP起源（主にプロトン起源）とガンマ線起源とのどちらであるか考える必要がある。単一の¹⁴Cデータセットだけではこのような原因追究が難しいため、これまでにいくつもの検証が行われてきた。

まず一つ目の検証は、入射粒子の種類とエネルギースペクトルを異なる宇宙線生成核種の生成率比から推定するというものである。ガンマ線の場合、¹⁴Cの主な生成は、光核反応（閾値エネルギー：~10 MeV）でできた中性子が散乱によってエネルギーを失い、最終的に中性子捕獲反応から起きると考えられる。一方、¹⁰Beの生成は、光核反応によって生成された二次粒子（主に中性子）がさらに核破砕を起さなければならず、効率的に¹⁰Beを生成するエネルギーはプロトンよりもガンマ線の方が高い。そのため、ガンマ線起源ではプロトン起源と比べると¹⁰Be/¹⁴Cが一桁ほど

小さく、検出できるほど氷床コアの¹⁰Be増加が起きないと予想された [24]。

これまでに、775年イベント、994年イベント、~BC660年イベントに対して、南極とグリーンランドの複数地点の約1年分解能¹⁰Be濃度が測定され、すべての測定において明確な¹⁰Beピークが報告された^{*7} [22, 36-39]。これは、ガンマ線起源を否定するものである。さらに、グリーンランド氷床コアの³⁶Cl/¹⁰Beの調査も行われ、検出された宇宙線イベントは、非常にエネルギースペクトルがハードなSEPイベントと矛盾しないことが示された [22, 39]。

二つ目の検証は、¹⁴Cと¹⁰Beのデータに南北対称性や緯度依存性（高緯度ほど多くの核種が生成される）があるか調査することである。プロトン起源の場合、地球へ入射する粒子は地磁気の影響を受け、上に挙げた効果がデータに現れる一方で、ガンマ線の場合は地磁気による影響を受けないため、このような効果は起きないと考えられる（ただし、赤道付近にガンマ線が入射するといった特殊な条件では、南北対称性が生じる）。前述したBüntgenら [15] の世界各地の¹⁴Cデータや、南極とグリーンランドの¹⁰Beデータは、南北半球ではほぼ同程度の核種の濃度増加を示した [22, 36, 37]。さらに、Joonas Uusitaloら [20] は、北半球樹木の¹⁴Cデータに有意な緯度依存性があることを報告した。これらもまた、プロトン起源を支持するものである。

三つ目の検証は、イベント発生当時の歴史記録の調査である。太陽活動の代替データとして、近年オーロラの歴史記録が注目を集めている（天文月報2017年7月号）。オーロラ、特に低緯度オーロラは大規模な磁気嵐に伴って観測される。SEPイベントの直接的な代替データではないものの、

^{*7} 氷床コアの場合、年輪ほど正確に年層が刻まれておらず、775年イベントでは、5地点の氷床コアの分析でそれぞれ元の氷床コアの年代モデルにおいてAD775年 ± 5 年以内に¹⁰Beスパイクが検出された。しかし、これらの¹⁰Beスパイクはバックグラウンド変動に対して有意に大きいものであり宇宙線イベントを捕らえたものと考えられる。これらの宇宙線イベントを用いて、逆に氷床コアの年代にタイムマーカーが与えられた。

低緯度オーロラの記録は、大規模な磁気嵐を引き起こすような活発な太陽活動を示唆している。早川尚志らは世界各地のオーロラ記録を精力的に調査し、AD992年の終わりからAD993年の初めにかけて、韓国、ドイツ、アイルランドのオーロラ記録を報告した [40]。これらの記録は、994年イベントと関連している可能性がある。また、AD774年のオーロラ記録は見つかっていないが、AD770-773年、AD776年にいくつかのオーロラ記録が見つかっており [41]、AD770年代の活発な太陽活動がうかがえる。

以上述べてきたように、これまでに見つかっている宇宙線イベントの多くは大規模なSEPイベントによって引き起こされたと考えられている。それでは、どれくらいの規模のSEPイベントが起きていたのだろうか。いくつかの見積もりがあるが、例えば、SEPイベントのエネルギースペクトルを1956年のSEPイベント (GLE #5)^{*8}に仮定した場合、775年イベントは1956年のイベントの25-50倍の規模と見積もられている [19]。また、前述したように、現代の観測で見つかっているSEPイベントにおいて¹⁴Cデータの誤差 (~1%)を上回る増加が見つかっていないことから、少なくとも775年イベントは現代のイベントより一桁以上は大きいと制限をかけることが可能だ。

このような大規模なSEPイベントは、スーパーフレアによって引き起こされた可能性がある。スーパーフレアは最大クラスの太陽フレアの約10倍以上という規模の大きなフレアで、太陽型の恒星で複数観測されている^{*9} [42]。太陽フレアとスーパーフレアとの直接的な関係、さらには、太陽フレアの規模とSEPイベントの規模との関係に関して、理解されていないことも多いため、今後のさらなる研究が必要だが、宇宙線生成

核種に刻まれたSEPイベントが太陽でスーパーフレアが発生していたことを示す手掛かりとなるかもしれない。

4. さらなるSEPイベントの探索

このように、宇宙線生成核種は観測史上最大のSEPイベントの数十倍という大規模イベントの代替データとなり得ることがわかってきた。しかし、実際に宇宙線生成核種の急激な増加として検出するためには、既存の10年以上の分解能データでは困難であり、これまで紹介してきたように~1年より高い時間分解能で調査する必要がある。

我々は、775年イベントと同等以上の規模のSEPイベントを探索する目的で、過去12000年間のIntCalデータにおいて急激な増加を示す四つの年代について、カリフォルニア産のイガゴヨウマツを用いて1年分解能で調査した [43]。しかし、いずれの年代も775年イベントのような急激な増加は検出されなかった。過去12000年間のIntCalデータにおいて、1年間に0.3%以上という急激な増加を示す年代は上記の4期間と775年イベント含めて15期間あり、そのうち上記4期間と他で測定された2期間を含めた6期間について、急激な増加ではなかった [43-45]。したがって、775年イベントと同等以上の大規模イベントは過去~1万年通して見ても、非常に稀な現象であった可能性が高い [43]。

一方で、上に挙げた15期間のうち別の1期間であるBC5480年付近について、イガゴヨウマツを用いた1年分解能の測定を行い、775年イベントとは異なるタイプの急激な¹⁴C増加を検出した [14]。BC5480年イベントは、775年イベントのような1年での急増ではなく、5-10年の増加を示したが、トータルの増加量は775年イベントより

^{*8} 現代の観測で見つかっているSEPイベントの中で、エネルギースペクトルがハードな最大のSEPイベントと考えられている。

^{*9} ケプラー衛星の可視光観測で増光現象として検出されている。

も大きい(図3)。さらに増加後の¹⁴C変動は775年イベントのようにすぐ減衰する*¹⁰ではなく、しばらく微増した後ゆるやかな減少がみられた。このような変動を、惑星間空間磁場の変化による銀河宇宙線の変調や単一のSEPイベントだけを用いて説明することは難しい。BC5480年イベントの原因について現時点でよくわかっていないが、例えば複数の大規模なSEPイベントが数年にわたって立て続けに発生したような現象が起きていたかもしれない。今後、¹⁴Cだけではなく他の核種の測定を行い、原因を追究していきたい。

5. おわりに

この1万年間を見ても、1年分解能で調査されていない年代が多く残されており、さらなるSEPイベントや、これまで知られていないような太陽活動の痕跡がまだまだ記録されている可能性がある。過去の太陽活動、特にSEPイベントを調査するという目的で、近年、1年分解能の¹⁴Cデータや¹⁰Beデータの収集が急速に進んでいる[46-48]。このようなデータの収集は今後も続くと思われる。大規模SEPイベントの発生頻度など長期的な振る舞いも明らかになるだろう。

また、宇宙線イベントの原因に関する議論や、1万年を超えるような長期にわたる調査には、年輪の¹⁴Cデータだけでは限界がある。このような調査のためには、氷床コアや、近年注目を集めているトラバーチン堆積物[49]などの複数の保存サンプルを利用することが重要になるだろう。今後、多くの研究者らと協力して、様々な種類の核種や保存サンプルを用いた長期データを収集していきたい。

謝辞

本稿は、筆者が大学院時代から現在に至るまでの発表論文に基づくものであり、これまでに多く

の方々からご支援、ご協力を賜った。特に、名古屋大学の増田公明氏、中村俊夫氏、弘前大学の堀内一穂氏、福島大学の木村勝彦氏、国立歴史民俗博物館の箱崎真隆氏、アリゾナ大学のA. J. T. Jull氏、I. P. Panyshkina氏、チューリッヒ工科大学のL. Wacker氏、オウル大学のI. Usoskin氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] Beer, J., et al., 2012, *Cosmogenic Radionuclides* (Springer, Berlin)
- [2] Lingenfelter, R., & Ramaty, R., 1970, *Proc. of the 12th Nobel. symposium*, 513
- [3] Usoskin, I. G., et al., 2006, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L08107
- [4] Webber, W. R., et al., 2007, *J. Geophys. Res.* 112, A10106
- [5] Hua, Q., & Barbetti, M., 2004, *Radiocarbon*, 46, 1273
- [6] Baroni, M., et al., 2011, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 7132
- [7] Crutzen, P. J., et al., 1975, *Science*, 189, 457
- [8] McCracken, K. G., et al., 2001, *J. Geophys. Res.*, 106, 21585
- [9] Wolff, E. W., et al., 2012, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L08503
- [10] Duderstadt, K. A., et al., 2016, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 2994
- [11] Mekhaldi, F., et al., 2017, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, 11900
- [12] Reimer, P. J., et al., 2013, *Radiocarbon*, 55, 1869
- [13] Miyake, F., et al., 2012, *Nature*, 486, 240
- [14] Miyake, F., et al., 2017, *PNAS*, 114, 881
- [15] Büntgen, U., et al., 2018, *Nat. Commun.*, 9, 3605
- [16] Gütler, D., et al., 2015, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 411, 290
- [17] Jull, A. J. T., et al., 2014, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 3004
- [18] Park, J., et al., 2017, *Radiocarbon*, 59, 1147
- [19] Usoskin, I. G., et al., 2013, *A&A*, 552, L3
- [20] Uusitalo, J., et al., 2018, *Nat. Commun.*, 9, 3495
- [21] Siegenthaler, U., et al., 1980, *Radiocarbon*, 22, 177
- [22] Mekhaldi, F., et al., 2015, *Nat. Commun.*, 6, 8611
- [23] Miyake, F., et al., 2014, *Radiocarbon*, 56, 1189
- [24] Pavlov, A. K., et al., 2013, *MNRAS*, 435, 2878
- [25] Miyake, F., et al., 2013, *Nat. Commun.*, 4, 1748
- [26] Fogtmann-Schulz, A., et al., 2017, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 8621

*¹⁰ 775年イベントにみられる¹⁴C濃度の減衰は、炭素循環によって¹⁴Cが大気圏リザーバーから他のリザーバー（主に海洋リザーバー）へ移動するタイムスケールとよく一致する。

- [27] Wang, F. Y., et al., 2017, Nat. Commun., 8, 1487
 [28] Melott, A. L., & Thomas, B. C., 2012, Nature, 491, E1
 [29] Thomas, B. C., et al., 2013, Geophys. Res. Lett., 40, 1237
 [30] Hambaryan, V. V., & Neuhäuser, R., 2013, MNRAS, 430, 32
 [31] Cliver, E. W., et al., 2014, ApJ, 781, 32
 [32] Liu, Y., et al., 2014, Scientific Reports, 4, 3728
 [33] Usoskin, I. G., & Kovaltsov, G. A., 2015, Icarus, 260, 475
 [34] Konstantinov, B. P., & Kocharov, G. E., 1965, Doklady Akad. Nauk. USSR, 165, 63
 [35] Overholt, A. C., & Melott, A. L., 2013, Earth Planet. Sci. Lett., 377, 55
 [36] Miyake, F., et al., 2015, Geophys. Res. Lett., 42, 84
 [37] Miyake, F., et al., 2019, Geophys. Res. Lett., 46, 11
 [38] Sigl, M., et al., 2015, Nature, 523, 543
 [39] O'Hare, P., et al., 2019, PNAS, 116, 5961
 [40] Hayakawa, H., et al., 2017, Sol. Phys., 292, 12
 [41] Hayakawa, H., et al., 2019, Sol. Phys., 294, 42
 [42] Maehara, H., et al., 2012, Nature, 485, 478
 [43] Miyake, F., et al., 2017, Radiocarbon, 59, 315
 [44] Stuiver, M., et al., 1998, Radiocarbon, 40, 1127
 [45] Nagaya, K., et al., 2012, Sol. Phys., 280, 223
 [46] Jull, A. J. T., et al., 2018, Radiocarbon, 60, 1237
 [47] Eastoe, C. J., et al., 2019, Radiocarbon, 61, 661
 [48] Baroni, M., et al., 2019, J. Geophys. Res., 124, 7082
 [49] Xu, H., et al., 2019, Quaternary Science Reviews, 216, 34

Past Extreme Solar Events Recorded in Cosmogenic Isotopes on Earth

Fusa MIYAKE

Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-6801, Japan

Abstract: Solar energetic particle (SEP) events are sometimes triggered by solar flares and coronal mass ejections. During SEP events, large amounts of energetic particles hit the earth. Recent researches have figured out that extreme SEP events, which are several dozen times larger than the largest SEP event observed during the space era, were recorded in cosmogenic isotope data such as ^{14}C in annual tree rings and ^{10}Be in ice cores. This paper introduces traces of extreme SEP events that occurred during the past $\sim 10,000$ years, including the largest SEP event that occurred in 775 CE.