

樹木年輪に刻まれた突発的宇宙線イベント Sudden cosmic-ray increase events recorded in tree-rings

三宅美沙^{1*}・増田公明¹・箱崎真隆²・中村俊夫²・門叶冬樹³・加藤和浩³・木村勝彦⁴・光谷拓実⁵
Fusa Miyake^{1*}, Kimiaki Masuda¹, Masataka Hakozaiki², Toshio Nakamura², Fuyuki Tokanai³, Kazuhiro Kato³, Katsuhiko Kimura⁴, Takumi Mitsutani⁵

¹名古屋大学太陽地球環境研究所・²名古屋大学年代測定総合研究センター・山形大学理学³
・福島大学共生システム理工学研究科⁴・奈良文化財研究所⁵

¹ Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

² Center for Chronological Research, Nagoya University

³ Faculty of Science, Yamagata University

⁴ Faculty of Symbiotic Systems Science, Fukushima University

⁵ National Institutes for Cultural Heritage, Nara National Research Institute for Cultural Properties

*Correspondence author. E-mail: fmiyake@stelab.nagoya-u.ac.jp

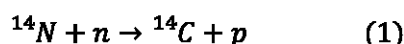
Abstract

Although some candidates for the cause of the mysterious cosmic ray event in AD 774-775 have been reported, we were not able to specify. In order to investigate the occurrence rate of the ¹⁴C increase event like the AD 775 one, we measured ¹⁴C content in Japanese tree-rings during an extended periods. As a result, we detected the second ¹⁴C increase by significant amount from AD 993 to AD 994. From the occurrence rate (one ¹⁴C event / 800 years), it was revealed that a large-scale SPE is the most plausible explanation for the ¹⁴C event.

Keywords: Tree-rings; Cosmogenic nuclide; Solar Proton Event; Radiocarbon

1. はじめに

地球に存在する炭素の同位体である放射線炭素 ¹⁴C は、地球外からの宇宙線によって生成される。宇宙線は常に地球に降り注いでおり、その正体は主に陽子などの高エネルギー粒子である。宇宙線のエネルギー分布は広範にわたり、太陽系外から飛来する銀河宇宙線 (Galactic Cosmic Ray, GCR, ~10²⁰eV) と、太陽で発生した太陽宇宙線 (Solar Cosmic Ray, SCR, ~10⁹eV) に大別される。地球大気に入射した宇宙線 (=一次宇宙線) は、大気原子核と核反応を起こし様々な2次粒子を生成する (=二次宇宙線)。¹⁴Cはいくつかの反応過程を経て生成されるが、主なものは一次宇宙線によって作られた熱中性子を窒素原子が捕獲する中性子捕獲反応である (式1)。



生成された ¹⁴C は大気中で酸化されて ¹⁴CO₂ となり、大気を循環した後樹木へと取り込まれる。従って、樹木年輪中の ¹⁴C 濃度は過去の到来宇宙線強度を記録していると考えられる。¹⁴C の半減期は 5730 年であることから仮に年代既知の樹木サンプルが存在すれば、過去数万年にわたって到来

宇宙線強度を調査できる。このような過去の到来宇宙線強度の記録は樹木年輪中 ^{14}C だけでなく、珊瑚年輪、堆積物中の ^{14}C や、氷床中の ^{10}Be や ^{36}Cl といった宇宙線生成核種を用いて調べることも可能である。

地球への宇宙線量は太陽活動（11年周期のシュワーベサイクル）によって影響を受け、 ^{14}C の生成量はシュワーベサイクルによって±15%程度増減しているが[Nagaya et al. 2012]、通常数年オーダーではこの変動を大きく上回らない。しかし、宇宙での高エネルギー現象（大規模 Solar Proton Event; SPE、地球近傍の超新星爆発やガンマ線バースト等）が発生した場合、地球へ大量の宇宙線が降り注ぎ、1年以下で大気中の ^{14}C 濃度が急上昇すると考えられる。

本研究以前の ^{14}C をはじめとする宇宙線生成核種の測定では、高エネルギー現象の明らかな痕跡は見つかっていなかった。特に、歴史記録に残る中で最も明るく輝いたと考えられている超新星爆発 SN1006（西暦 1006 年）や、観測史上最大の太陽フレアと言われているキャリントンフレア（西暦 1859 年）前後の年代に ^{14}C 濃度の上昇は見られない[Damon et al. 2000; Menjo et al. 2005; Stuiver et al. 1998]。このことから仮に ^{14}C 急増が発見されれば、上に挙げたイベントをはるかに上回る規模であったと言える。

このような高エネルギー現象を探索する目的で、これまでに我々は屋久杉 (*Cryptomeria japonica*) 年輪中の ^{14}C 濃度を測定してきた。10年分解能の IntCal 変動曲線[Reimer et al. 2009]において、増加率の大きい 8 世紀後半に着目して 1 年分解能で詳しく調べたところ、西暦 774-775 年にかけての ^{14}C 濃度急増を発見した[Miyake et al. 2012]。2 個体の屋久杉年輪を用いて見つかったこの 775 年イベントは、その後世界の複数の樹木を用いた ^{14}C 濃度測定から存在が確認されている[Usoskin et al. 2013; Güttler et al. 2013]。図 1 にドイツのオーク (*Quercus*) サンプルと屋久杉を用いた測定結果の比較を示す[Usoskin et al. 2013]。このような世界各地の樹木を用いた検証から、775 年イベントが屋久島付近の局所的なものではなく、宇宙線が全地球的に影響を与えたことが明らかになった。

775 年イベントの原因の有力な候補として、銀河系内で発生したショートガンマ線バースト（中性子星またはブラックホールの融合によって発生すると考えられている）、または太陽の大規模 SPE（太陽フレアやコロナ質量放出といった太陽表面の爆発によって大量の高エネルギー粒子が放出される現象）が挙げられていた。 ^{14}C 濃度を増加させるような地球近傍ショートガンマ線バーストの発生頻度は、観測によって約 400 万年に 1 度程度と見積もられているが、その誤差が大きいいため約 1300 年前（775 年）にショートガンマ線バーストが発生していた可能性は否定できない[Hambaryan & Neuhäuser 2013]。このように、2 つの有力候補が挙げられていたが、それ以上の議論が困難な状況であった。

さらに原因を追求する上で ^{14}C イベントの発生頻度が重要になると考えられるため、測定する年代を広げ ^{14}C イベントの探索を行った。本稿では、測定年代を拡張して見つかった 2 例目の ^{14}C 増加イベントとその原因について議論する。

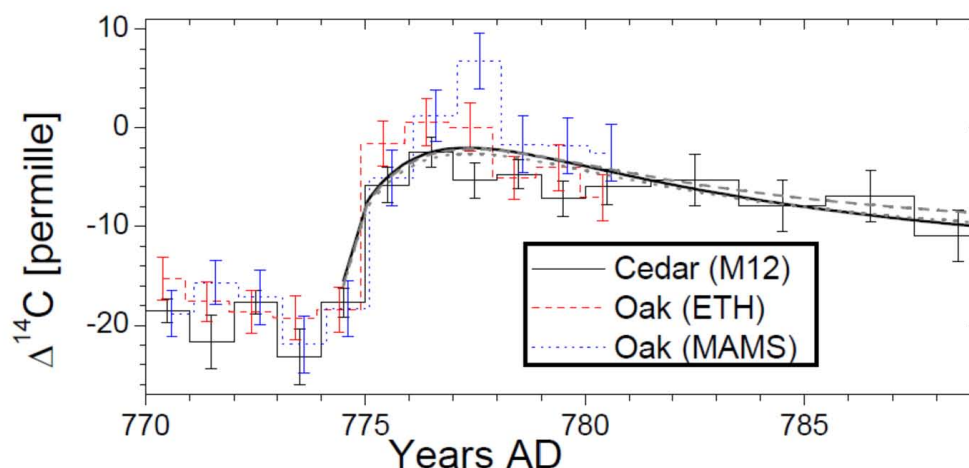


図 1：屋久杉サンプルとドイツオークサンプルの ^{14}C 濃度測定結果の比較。黒は我々の結果、赤と青はオークを用いた結果である。赤は ETH (スイスの AMS)、青は MAMS (ドイツの AMS) を示す。Usoskin et al. [2013]より転載。

Figure 1: The comparison of ^{14}C content in Japanese cedar trees and German oak trees. The lines show best fit series of the calculation of a carbon cycle model. This graph is cited from Usoskin et al. [2013].

2. 測定

用いた試料はその年代が年輪年代を用いて決定された、樹齢約 1900 年の屋久杉 (30.2°N , 130.3°E) である。1 年輪ごとに剥離した木片に、それぞれ前処理を施してグラファイトとし、名古屋大学年代測定総合研究センターの加速器質量分析計 (AMS) [Nakamura et al., 2000]で ^{14}C 濃度を測定した。 ^{14}C 濃度は Stuiver & Polach [1977]によって定義される $\Delta^{14}\text{C}$ によって表される。

3. 994 年イベント

775 年イベントについての Miyake et al. [2012]では、西暦 750-820 年までのデータを報告したが、今回さらに測定年代を広げて西暦 600-1021 年までの連続 ^{14}C データを取得した[Miyake et al. 2013]。データの分解能は測定範囲にわたってほぼ 2 年である (ただし西暦 991-1001 にかけては 1 年分解能)。得られた ^{14}C 濃度データと IntCal09 との比較を図 2 に示す。この測定により、西暦 993 年から 994 年にかけて 9.1‰の誤差に対して明らかな ^{14}C 濃度増加を発見した。1 年で増加した後は、775 年イベントと同様のゆるやかな減衰がみられる。この減衰は、炭素循環によって説明できると考えられる[Miyake et al. 2012]。775 年と 994 年の 2 イベントの比較を図 3 に示す。994 年イベントは 775 年イベントの規模の 0.6 倍であり、両者の変動が非常によく似ている。

994 年イベントの再現性を確認するために、長野県産のヒノキ (*Japanese cypress*) サンプルを用いた測定を行った (^{14}C 濃度測定は山形大学の AMS [Tokanai et al. 2013]を利用)。その結果、西暦 993-994 年にかけて明らかなギャップがみられ、994 年イベントについても異なる樹木による再現性を確認した。屋久杉を用いて検出した 994 年イベントは当初、992-993 年に起きたものと報告していた。しかし、年輪年代を新たに調査したところ偽年輪の誤認がみつき、946 年以降の年代は 1 年ずつ後ろにずれることが明らかになった[Miyake et al. 2013a & 2013b]。

南極氷床中 ^{10}Be フラックスの 10 年値にも、2 イベントに対応した年代に大きな上昇がみられ [Horiuchi et al. 2008]、 ^{14}C と ^{10}Be 両者の増加量の比は同程度である。仮に見つかった 2 つのイベン

トの原因が異なっていた場合、 ^{14}C と ^{10}Be の生成過程が異なることから、両者の間で増加量の比に違いが現れると考えられる。このように見つかった2つのイベントの ^{14}C 変動が似ているのに加え、 ^{14}C と ^{10}Be の増加量の比が同程度であることから、2イベントは同種の原因である可能性が高い。

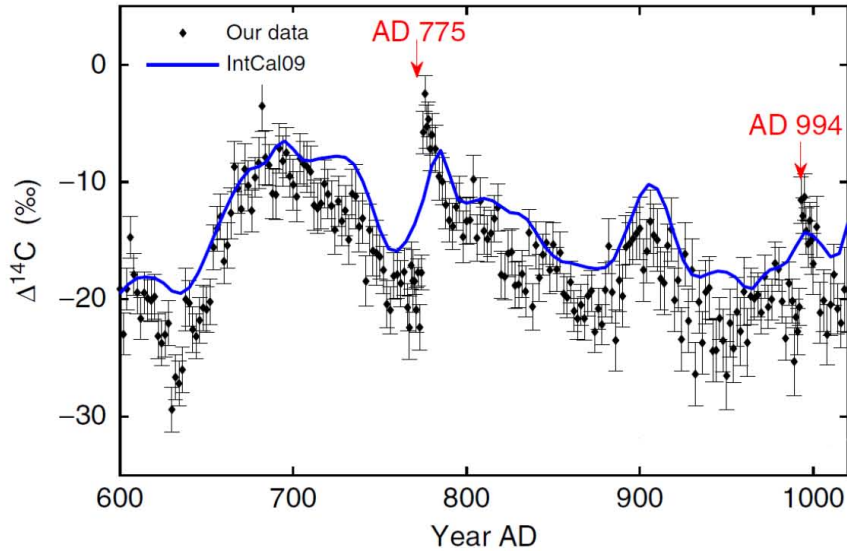


図2： AD600-1021年までの測定データ（ひし形+誤差棒）と、IntCal09（実線）の比較。矢印は、それぞれ西暦775年と西暦994年に対応している。Miyake et al. [2013]より転載（一部修正）。

Figure 2. Comparison between our measurement data (diamonds with error bars) and the IntCal09 data (line). The arrows indicate AD 775 and AD 994 from left. This graph is cited from Miyake et al. [2013a].

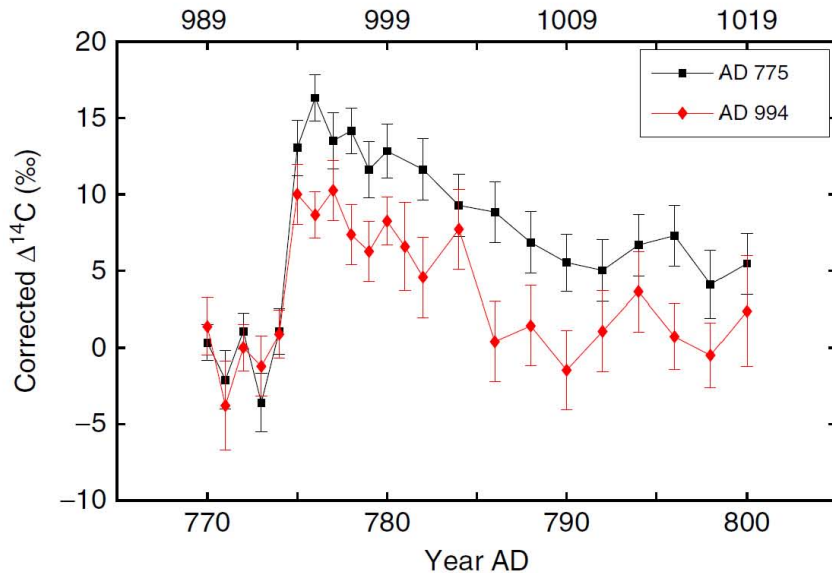


図3： 775年イベント（四角）と994年イベント（ひし形）との比較。縦軸は、増加前の5点（775年イベントはAD770-774年、994年イベントはAD989-993年）の加重平均をゼロとしたものである Miyake et al. [2013]より転載。

Figure 3. Comparison of the AD 775 (squares) and the AD 994 (diamonds) peaks. The zero level of the vertical axes is shifted to be the weighted mean value of AD 770–774 for the AD 775 series and AD 989–993 for the AD 994 series. This graph is cited from Miyake et al. [2013a].

4. 原因について

これまでに実施された ^{14}C 濃度の 1-2 年分解能の測定期間は、合計すると約 1600 年間である。その中で 2 イベント見つかったことから、現段階での ^{14}C イベントの発生頻度は 800 年に 1 度といえる。この頻度は、前述したショートガンマ線バーストの頻度よりはるかに大きく、800 年に 1 度ショートガンマ線バーストが起きる確率は 0.02% である。従って、ショートガンマ線バーストは原因としては考えにくく、大規模 SPE が ^{14}C イベントの最も妥当な説明と言える。

775 年イベントの ^{14}C 増加量がどの程度の規模の SPE に相当するかの試算がいくつかあり、地球へ入射した宇宙線は、観測で知られる最大級 SPE の 10~数 10 倍にのぼるとみられる[Usoskin et al. 2012 & 2013; Thomas et al. 2013]。前述したように、観測史上最大のキャリントンフレア発生年前後において ^{14}C 濃度増加がみられない。仮にキャリントンフレアによる ^{14}C 増加が測定誤差程度とすると、775 年イベントはキャリントンイベントの少なくとも 10 倍に相当し、これは上記の見積もりと矛盾しない。

ここで注意する必要があるのは、年輪が 1 年分解能であることから到来宇宙線の 1 年間の総量しか求まらない点である。従って ^{14}C イベントの原因が 1 つの SPE である必要はなく、複数の SPE による可能性がある（ただし、1 年以内に発生している必要がある）。実際に、太陽フレアが発生する太陽の活動領域において、複数のフレアが連続して起きることがあるため、そのようなシナリオも十分考えられる。

このような大規模の SPE が発生すると、オゾン層が破壊され地上への宇宙線量も若干上昇するが、生物への直接的な悪影響はあまりないと見積もられている[Melott & Thomas 2012]。実際に 2 つの ^{14}C イベントが発生した前後の年代を調べても、疫病が蔓延した等の記録は見つかっていない。

しかし、仮に今日において大規模 SPE が発生した場合、現代社会へ甚大な被害が及ぶと考えられる。例えば高エネルギー粒子による人工衛星の故障や、電離層擾乱による地球規模の通信障害、さらに大規模な停電等が起きると予想されている。キャリントンフレアが仮に今日発生した場合の被害総額は全米だけでも 1-2 兆ドル（1 年間）に及ぶという試算もある[Royal Academy of Engineering Report 2013]。今回の発見は、このキャリントンフレアを大きく上回るような SPE が 775 年と 994 年に発生した可能性を意味しており、千年オーダーでみるとこのような SPE が太陽では普遍的に生じていたと考えられる。言い換えると、過去の大規模 SPE の痕跡はそうしたイベントが将来においても発生する可能性を示すものである。

表 1：記録に残る大規模な SPE の人間活動への影響。AD775 年イベントの放射線量の数値は、仮に 775 年イベントがキャリントンフレアの 10 倍と仮定した場合のもの。

Table 1: Influence of large SPEs to human activity. The values of a radiation dose of the AD 775 event are based on an assumption that the 775 event is 10 times larger than the Carrington event.

イベント	航空機内放射線	ISS 軌道放射線	主な被害
1989 年イベント	4 [mSv]	20-40 [mSv]	<ul style="list-style-type: none"> ・ケベック州停電 ・気象衛星故障 ・通信障害
キャリントンフレア (1859 年)	~20 [mSv]	~100 [mSv]	<ul style="list-style-type: none"> ・電信局火災 (欧米) ・赤道付近のオーロラ
AD 775 年イベント	>200 [mSv]	>1 [Sv]	

5. おわりに

太陽型の恒星では、「スーパーフレア」と呼ばれる通常の太陽フレアの何桁もエネルギーが高い現象が観測されている[*Schaefer et al. 2000; Maehara et al. 2012*]. しかし、スーパーフレアが実際に太陽で起きるか完全に理解されていない。今回見つかった ^{14}C 増加量からは、地球へ入射した総エネルギーを算出できるが、元の太陽でのフレアエネルギーに戻すためにはいくつかの仮定が必要となる。我々の太陽でどのクラスのフレアがどの程度の頻度で発生するか明らかにすることは、太陽物理学においても非常に重要である。今後見つかった ^{14}C イベントがどの規模のフレアに相当するか、綿密に調べる必要がある。

現時点では2つの ^{14}C イベントが見つかったが、過去遡るとさらに多くのイベントが存在すると予想される。今後、長期にわたる測定を実施して新たな ^{14}C イベントを検出し、より正確な発生頻度を求める予定である。大規模 SPE の発生頻度は、将来の SPE に備える上で非常に重要なパラメータになると考えられる。

最後に、 ^{14}C イベントは1年のギャップとしてその存在を認識できることから、 ^{14}C 年代測定における年代束縛点になり得る。従って多くの ^{14}C イベントを検出することは、より正確な未知試料の年代決定に大きく貢献するものと期待される。

謝辞

福島大学の木村勝彦先生には、試料年輪の絶対年代を決定していただきました。この場を借りて、お礼申し上げます。本研究は、学術振興会特別研究員奨励費（課題番号：24・3218）の助成を受けたものです。

引用文献

- Damon, P. E., et al., 1995, *Radiocarbon*, 37, 599.
 Hambaryan, V. V. and Neuhäuser, R. A., 2012, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 430, 32.
 Horiuchi, K., et al., 2008, *Quat. Geochronol.*, 3, 253.
 Güttler, D., et al., 2013, *Nuclear Physics in Astrophysics VI* (poster).
 Maehara, H., et al., 2012, *Nature*, 485, 478.
 Melott, A. L. and Thomas, B. C., *Nature*, 491, E1.
 Menjo, H., et al., 2005, *Proc. 29th Int. Cosmic Ray Conf.*, 2, 357.
 Miyake, F., et al., 2012, *Nature*, 486, 240.
 Miyake, F., et al., 2013a, *Nat. Commun.*, 4, doi:10.1038/ncomms2873.
 Miyake, F., et al., 2013b, *Nat. Commun.*, 4, doi:10.1038/ncomms3747.
 Nakamura, T., et al., 2000, *Nucl. Instrum. Methods B*, 172, 52.
 Nagaya, K., et al., 2012, *Solar Phys.*, 280, 223.
 Reimer, P. J., et al., 2009, *Radiocarbon*, 51, 1111.
 Royal Academy of Engineering Report, 2013, Royal Academies Press, Washington, D.C.
 Schaefer, B. E., et al., 2000, *Astrophys. J.*, 529, 1026.
 Stuiver, M. and Polach, H. A., 1977, *Radiocarbon*, 19, 355.
 Stuiver, M., et al., 1998, *Radiocarbon*, 40, 1041.
 Tokanai, F., et al., 2013, *Radiocarbon*, 55, 251.
 Thomas, B. C., et al., 2013, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 1237.

Usoskin, I. G. and Kovaltsov, G. A., 2012, *Astrophys. J.*, 757, 92.

Usoskin, I. G., et al., 2013, *Astron. Astrophys.*, 552, L3.

日本語要旨

775年の宇宙線イベントの原因について、いくつかの候補が挙がっていたが特定するのは難しい状況であった。本研究の年代を拡張した ^{14}C 濃度測定により、993-994年にかけても似たような ^{14}C 急増を発見した。また、994年イベントは日本産の2個体の樹木から存在を確認した。 ^{14}C イベントの発生頻度から、その原因として大規模SPEが妥当であると考えられる。

見つかった ^{14}C イベントの ^{14}C 増加量は、観測史上最大のSPEの10~数10倍に相当する。このような規模のSPEが仮に今日発生した場合、現代社会へ深刻な被害を及ぼすと想定される。今回の発見はこうした大SPEが将来において発生する可能性を示したものである。