

令和 3 年 10 月 22 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13802

研究課題名(和文)7-10世紀の大規模SPE発生頻度分布の解明に向けた超高精度反復C14濃度測定

研究課題名(英文)Repetitive 14C measurements for understanding of occurrence distribution of extreme SPEs in the 7-10th centuries

研究代表者

三宅 芙沙(Miyake, Fusa)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授

研究者番号：90738569

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：樹木年輪の連続14C濃度測定により、大規模Solar Proton Event(SPE)の痕跡とみられる西暦775年と994年の14C急増イベントを発見された。大規模SPEは人工衛星や地上通信網の破壊を引き起こし、現代社会に対して巨大噴火・巨大地震に匹敵する自然災害となり得る。本研究の目的は、西暦600-1000年における年輪14C濃度測定値の超高精度化を実現することにより、775年と994年イベントより小さい規模の14C増加イベントを検出し、その頻度を明らかにすることである。本研究により、いくつかの小規模な14C増加を検出したが、大規模SPE起源が特定するためには、さらなる検証が必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

観測史上最大のキャリントンフレア(1859年)が仮に現在発生したとすると、人工衛星の故障や通信網の破壊等によって現代社会に深刻な被害を与えると予想されている。775年イベントは観測史上最大フレアの10倍以上の規模と考えられているため、過去にこのようなイベントがどの程度発生していたか知ることは非常に重要である。775年と994年の14Cイベントの発見により、14C単年測定が大規模SPE探索に有効であることが初めて示されたが、本研究ではさらに多くの、より小規模な14Cイベントを検出することで、大規模SPEの発生頻度の詳細について議論した。

研究成果の概要(英文)：Rapid 14C increase events have been discovered in 774-775 and 993-994 CE by continuous 14C concentration measurements of tree rings. The most plausible cause of these 14C increase events are an extreme Solar Proton Event (SPE). Such extreme SPEs cause the destruction of satellites and terrestrial communication networks, and can be a natural disaster in modern society comparable to huge eruptions and earthquakes. The purpose of this study is to detect more 14C increase events smaller than the 775 and 994 events by an ultra-high precision measurement of 14C concentrations in annual tree rings for the period 600-1000 CE, and clarify an occurrence rate of 14C events. Although we detected some smaller 14C events, further validation will be necessary to identify the extreme SPE origins.

研究分野：宇宙線生成核種

キーワード：樹木年輪 放射性炭素 Solar Proton Event

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

炭素の放射性同位体である  $^{14}\text{C}$  は地球外からの宇宙線によって生成される。 $^{14}\text{C}$  は  $\text{CO}_2$  となり樹木へと取り込まれるため、年輪中の  $^{14}\text{C}$  濃度は過去の宇宙線強度を記録している。研究開始当初までに我々は 6 - 12 世紀における年輪の単年  $^{14}\text{C}$  濃度測定を行い、西暦 774 - 775 年と西暦 993 - 994 年にそれぞれ  $^{14}\text{C}$  濃度の急増を発見していた (Miyake et al. 2012, 2013)。775 年と 994 年のイベントは、 $^{14}\text{C}$  濃度変動の形が非常によく似ており、994 年は 775 年の約半分の  $^{14}\text{C}$  増加を示す。この発見後、いくつかの研究グループによって世界各地の樹木の  $^{14}\text{C}$  濃度測定により 2 つのイベントが再確認された (e.g. Usoskin et al. 2013)。また、南極とグリーンランドから得られた氷床コアの  $^{10}\text{Be}$  濃度測定が行われ、期待される年代にシャープな  $^{10}\text{Be}$  増加が検出された (e.g. Mekhaldi et al. 2015)。このような様々な検証から、これらのイベントの原因は太陽フレアやコロナ質量放出によって引き起こされる大規模 SPE (Solar Proton Event) が妥当と考えられている。超巨大 SPE は人工衛星や地上通信網の破壊を引き起こし、現代社会に対して巨大噴火・巨大地震に匹敵する自然災害となり得るため、過去にどのような頻度で同様なイベントが発生するか調査することが非常に重要となる。

### 2. 研究の目的

これまでに単年 (または隔年) で  $^{14}\text{C}$  濃度測定が行われた期間は合計すると 2500 年程度である。これらの期間に検出された  $^{14}\text{C}$  急増イベントは 775 年と 994 年の 2 つだけであり、発生頻度を議論するには統計量が足りない。しかし、仮に測定誤差を小さく抑えることができれば、現在のデータでは誤差に隠れて見えていないより小規模なイベントの検出が可能となる。現状では、1 年輪あたり 1~2 回の測定から  $^{14}\text{C}$  濃度を求めているが、測定回数を増やせば、統計誤差を小さくすることができる。

本研究の目的は、西暦 600-1000 年における年輪  $^{14}\text{C}$  濃度測定値の超高精度化を実現することにより、775 年と 994 年イベントより小さい規模 (775 年イベントの約 1/3 以上) の  $^{14}\text{C}$  増加イベントを検出し、その頻度を明らかにすることである。太陽フレアの直接観測により、フレアの発生頻度分布はエネルギーのべき乗に比例することがわかっている。直接観測で知られる太陽フレアの最も高いエネルギーは  $10^{32}\text{erg}$  程度である。一方で、銀河系の太陽型恒星の観測から  $10^{32}\text{erg}$  を大幅に上回る規模の恒星フレアが複数見つかった (Maehara et al. 2012)。このようなフレアをスーパーフレアと呼ぶ。スーパーフレアも太陽とほぼ同様な発生頻度分布に従う可能性が示されたが (e.g. Maehara et al. 2015)、この関係が我々の太陽でまだ観測されていない大規模な太陽フレアについても成立するか不明である。仮に検出された  $^{14}\text{C}$  イベントの原因が大規模 SPE であった場合、 $^{14}\text{C}$  イベント頻度は太陽面爆発の頻度に比例すると考えられる。 $^{14}\text{C}$  増加イベントの発生もスーパーフレアの従うエネルギー分布と同様か調査し、 $^{14}\text{C}$  増加イベントを実際に観測されている太陽フレアや太陽型恒星のスーパーフレアと結びつけ、統一的な議論を行う。

### 3. 研究の方法

本研究の目標は、測定誤差を減少させ小型  $^{14}\text{C}$  増加イベントを検出することであるが、この目標を達成するためには既にデータが得られている年代を再測定して誤差を減少させるのが効率的である。そのような年代として、我々がこれまでに屋久杉年輪を用いて詳細に調査している西暦 600-1000 年を選定した。

$^{14}\text{C}$  濃度測定に先立ち、使用する樹木サンプル (屋久杉サンプル) の暦年代を研究分担者の箱崎が年輪年代法によって再確認した。屋久杉サンプルはすでに暦年代が与えられているが、部位によっては偽年輪や不連続年輪が含まれている可能性があるためである。

$^{14}\text{C}$  濃度測定のための前処理と AMS (加速器質量分析計) 測定は、名古屋大学宇宙地球環境研究所および山形大学高感度加速器質量分析センターで行った。実際に実施した測定内容を以下に示す。

- (1) 既に取得されている西暦 600-1000 年の隔年データのうち、誤差が 2.0% より大きい年代の  $^{14}\text{C}$  濃度を測定した。この分析により、既存のデータと合成した  $^{14}\text{C}$  データセットの平均誤差は 1.7% となった。
- (2) 得られたデータに対して、([連続する 2 点間の差] / [測定誤差の平均])  $\geq 3.0$  : 以降増加の有意性  $I$  で示す) である年代を有意な増加とみなし、今度は単年精度で増加の前後 9 年分の測定を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 小型イベントの検出

分析の結果、有意な増加として検出された年代は、以前に発見された西暦 774 - 775 年と西暦 993 - 994 年の他、西暦 638 年、836 年に検出された ( $I=3.3, 3.0$ )。しかし、西暦 638 年周辺の  $^{14}\text{C}$  濃度変動を詳しく見てみると、SPE 起源と考えられている西暦 775 年や 994 年前後の  $^{14}\text{C}$  濃度変動 (1 年以内の短期的な宇宙線流入を反映した 1 年での大きな  $^{14}\text{C}$  濃度増加とその後の炭素循環に伴う緩やかな  $^{14}\text{C}$  濃度減少) とは異なり、10 年程度で連続して増加している一部としてこの増加が起きており、増加後の  $^{14}\text{C}$  濃度の減少は見られない。また、西暦 836 年につ

いては、1点のみの増加として検出された。Iの全体分布を見てみると、検出された2つの増加の値はガウス分布フィットした分布の端に位置し、統計的なばらつきによって生じている可能性がある。

SPE 起源の変化(1年を境にギャップがみられる)の特徴を捉えるため、連続する2点間の差ではなく、連続する4点について、年代が新しい方の2点と古い方の2点のそれぞれの平均値の差を、測定誤差の平均値で割った増加の有意性( $I_4$ )について3以上になる年代をみると、西暦775年や994年以外では、西暦638年、西暦656年について検出された( $I_4=3.8, 3.2$ )。前者は上の基準で検出された年代と同じものである。また西暦656年について詳細な $^{14}\text{C}$ 濃度変動を調査したが、西暦638年前後の変化と同様に、20年程度の長期的な増加の一部として検出された。これら2つの年代は、ちょうど太陽活動低調期(Grand Solar Minimum)の初期の時期に相当し、Grand Solar Minimumの $^{14}\text{C}$ 濃度変動(典型的に、数十年かけて起きる20%程度の大きな $^{14}\text{C}$ 濃度増加)の一部を見ている可能性がある。

## (2) 今後の課題

本研究により、西暦600-1000年の隔年 $^{14}\text{C}$ データを誤差2.0%以下で取得し、西暦775年のイベントの1/3程度(誤差2.0%では $\sim 1/2.5$ )のイベントの検出を試みた結果、いくつかの急激な変化(5~6%の増加)を $I > 3.0$ でとらえた。しかし、それらはSPE特有の変化として検出されなかった。これらの $^{14}\text{C}$ 変動は、SPE発生を否定するものではないが、仮にSPEによる増加をとらえていたとしても、それ以外の要因による $^{14}\text{C}$ 変動と重ね合わせた変化であると考えられ、小型SPEによる $^{14}\text{C}$ 増加を確実に検出するためには、SPE起源以外の微小な $^{14}\text{C}$ 変動の理解が必須である。

そのような、他要因による変化として、まず11年の太陽周期であるシュワーベサイクルが挙げられる。年輪 $^{14}\text{C}$ データにみられるシュワーベサイクルの振幅は、1~2%程度と考えられており、この影響を排除するためには、該当年代前後の少なくとも1-2サイクル分の同定が必要と考えられる。また、黒点データが存在する期間におけるシュワーベサイクルに起因する $^{14}\text{C}$ 変動に関する基礎データの収集が必須である。さらに、本研究により、Grand Solar Minimumにおける $^{14}\text{C}$ 増加はいくつかの急激な上昇を繰り返していた可能性が示された。これらの増加が太陽圏磁場の変動による宇宙線モジュレーションに起因するのか、大規模なSPEに起因するのか現時点では判定できないが、今後他のGrand Solar Minimumの詳細な調査にや、より高分解能の調査によりさらなる知見が得られることが期待できる。

## <引用文献>

- F. Miyake et al., *Nature*, **486**, 240-242, 2012.
- F. Miyake et al., *Nat. Commun.*, **4**:1748, 2013.
- I. Usoskin et al., *Astron. Astrophys.*, **552**:L3, 2013.
- F. Mekhaldi et al., *Nat. Commun.*, **6**:8611, 2015.
- H. Maehara et al., *Nature*, **485**, 478-481, 2012.
- Maehara et al., *Earth, Planets and Space*, **67**:59, 2015.

## 5. 主な発表論文等

### [雑誌論文](計8件)

- F. Miyake, K. Horiuchi, Y. Motizuki, Y. Nakai, K. Takahashi, K. Masuda, H. Motoyama, H. Matsuzaki,  $^{10}\text{Be}$  Signature of the Cosmic Ray Event in the 10th Century CE in Both Hemispheres, as Confirmed by Quasi-Annual  $^{10}\text{Be}$  Data From the Antarctic Dome Fuji Ice Core, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, **46**, 11-18 (2019), DOI: 10.1029/2018GL080475.

### [学会発表](計22件)

- Fusa Miyake, Rapid cosmic ray events shown in carbon-14 data of tree rings, PSTEP A04 International Workshop, 2019 (招待).
- Fusa Miyake, A search for past extreme solar events using  $^{14}\text{C}$  data in tree rings, Chapman on Scientific Challenges Pertaining to Space Weather Forecasting Including Extremes, 2019 (招待).
- 三宅 芙沙, 樹木年輪から探る過去の大規模SPE、SGEPSS、2018 (招待).
- 三宅 芙沙, 樹木年輪の炭素14濃度に刻まれた過去の宇宙線増加現象、第79回応用物理学会 秋季学術講演会、2018 (招待).
- Fusa Miyake, Annual cosmic ray events shown in carbon-14 data from the BC 10th to AD 14th century, *Radiocarbon*, 2018.
- 三宅 芙沙,  $^{14}\text{C}$ データにみられる宇宙線イベント、JpGU、2018 (招待).
- 三宅 芙沙, 年輪の炭素14を用いた古太陽活動の復元、ISEE 研究集会太陽圏宇宙線研究集会、2017 (招待).
- 三宅 芙沙, 樹木年輪と単年宇宙線イベント、第19回AMSシンポジウム・2016年度

「樹木年輪研究会」共同開催シンポジウム、2016（招待）.  
Fusa Miyake, Annual cosmic ray events shown in <sup>14</sup>C data of tree-rings, VarSITI 2016, 2016（招待）.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

アウトリーチ活動（一般向け講演会）

「屋久杉に刻まれた過去の太陽活動」仁科記念講演会 2018 「アイソトープで探る宇宙」 2018.

「古木に記された過去の巨大フレア」中日文化センター講演会「巨大太陽フレアと地球環境」 2018.

「屋久杉の年輪と宇宙とはかかわりがあった！」、わかりやすい科学 「科学のたまご」を君のところに 科学講座、2017.

「過去の太陽と樹木年輪」夏休み体験学習 樹木年輪・年縞堆積物から過去の太陽活動、地球の古気候を探る（名古屋大学宇宙地球環境研究所） 2016.

「過去の太陽嵐を探る」名古屋大学宇宙地球環境研究所公開講演会「嵐を測る」 2016.

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：箱崎 真隆

ローマ字氏名：Hakozaki Masataka

所属研究機関名：国立歴史民俗博物館

部局名：大学共同利用機関等の部局等

職名：研究員

研究者番号（8桁）：30634414

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。