

炭素 14 と宇宙線変動 —奈良時代の異変—
Radiocarbon and cosmic ray change - A mystery in the Nara Era -

増田公明^{1*}, 三宅美沙¹, 永治健太朗¹, 中村俊夫²
Kimiaki Masuda^{1*}, Fusa Miyake¹, Kentarou Nagaya¹, Toshio Nakamura²

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
¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory (STEL), Nagoya University,
²Center for chronological Research, Nagoya University

*Corresponding author. E-mail: kmasuda@stelab.nagoya-u.ac.jp

Abstract

We report an event of rapid increase in cosmic ray intensity, which occurred 1,200 years ago, by the measurements of radiocarbon concentration in tree rings in STEL, Nagoya University. The details of this event are described and high energy cosmological phenomena causing the event are discussed.

Keywords: radiocarbon, cosmic rays, super nova, gamma-ray burst, solar proton event, accelerator mass spectrometer

1. はじめに

大気中の放射性炭素（炭素 14, ^{14}C ）は、おもに太陽圏外から飛来する銀河宇宙線によって大気中につくられる中性子が窒素 14 原子核と反応することによって生成される。地球へ到達する銀河宇宙線強度は太陽がつくる惑星間空間磁場によって制御される。従って大気中の ^{14}C 量を測定すれば、地球へ到達した宇宙線強度やこれを制御している太陽活動を知ることができる。特に過去の大気中 ^{14}C 濃度の情報を保存している樹木年輪を調べることにより、1年ごとの ^{14}C 生成量がわかり、これから太陽活動の 11 年周期（シュワーベ・サイクル）とその変化や 1 年スケールの宇宙線強度変動がわかる。我々は、この手法により過去の太陽活動周期を調べてきた[1]。太陽活動は平均 11 年の周期で強弱を繰り返すとともに、100 年のスケールでその活動の極小期（grand solar minimum）を示す。過去 12,000 年にわたる 5-10 年ごとの地球大気中 ^{14}C 濃度は IntCal09 [2] としてまとめられ、このデータから多くの ^{14}C 濃度のピーク（宇宙線強度の増加）すなわち太陽活動極小期が同定されている。その中で、太陽活動の指標である黒点データと比較できる 17 世紀後半のマウンダー極小期は顕著で、地球気候の寒冷化（小氷期）との関連も議論されている。我々はこの年代やそれ以前の黒点データがない年代の ^{14}C 濃度を測定し、太陽活動極小期において通常の 11 年より長い周期成分を見いだした。この結果により、太陽活動が弱くなるときにはダイナモ活動の周期が長くなることが示唆された。最近では紀元前 4 世紀の太陽活動極小期と見られる年代の樹木

(クスノキ)を入手し、 ^{14}C 濃度を測定した結果、最も古い年代における11年周期のシュワーベ・サイクルを確認し、さらに顕著な周期長の伸びを見いだして極小期の普遍的な性質を調べた[1]。

一方、宇宙線の源が変化すれば当然生成される ^{14}C 濃度も変化する。すなわち宇宙空間の地球近傍で何らかの高エネルギー現象が起これば、地球に飛来する宇宙線が増加し、 ^{14}C 濃度が増加すると考えられる。我々は以前、歴史上最も明るく輝いたといわれる西暦1006年の超新星爆発SN1006や西暦1054年の超新星爆発SN1054(残骸はかに星雲)による宇宙線(ガンマ線)の増加が検出できないかを試みたが、太陽11年周期活動による変動を越える変化は見られなかった[3]。そこで今回、対象年代を広げ、8世紀の ^{14}C 濃度変化を調べたところ、西暦775年に非常に大きな ^{14}C 濃度の変動を発見した。本稿ではこの宇宙線増加の痕跡について詳しく述べ、その原因となる高エネルギー現象に関して考察する。

2. 高エネルギー現象の痕跡[4]

太陽や宇宙における高エネルギー現象によって地球近傍の宇宙線環境が大きく変化することが予想される。またその変化は現象の発生の仕方に依存して、かなり短時間で上昇することが予想される。そこで有意な宇宙線増加を示す目安として、IntCal(5年または10年ごとの ^{14}C 濃度の校正データ)[2]を用いて、広い範囲の年代にわたってそのような痕跡がないかを調べた。その結果、過去3,000年間で3回ほど、 $\Delta^{14}\text{C}$ が3%/10年以上の早い増加を示している時期が見つかった。西暦1,800年頃、西暦780年頃、そして紀元前600年頃である。このうち西暦1,800年頃はStuiverらの1年値データ[5]があり、この変化は太陽活動のダルトン極小期による ^{14}C の増加を示す10年以上のゆっくりした変動であることがわかっている。また紀元前600年頃は、紀元前7世紀の ^{14}C 濃度の大きな増加の直後で、Takahashiら[6]によって1年分解能で測定されている。興味深い変動ではあるが、数年以下の早い変化ではないことがわかっている。一方、780年頃の年代ではまだ高時間分解能の測定は行われておらず、この年代の周辺で急激な ^{14}C 濃度変化がありそうなことがわかった。そこで我々は、屋久杉年輪(Tree-A)を用いて西暦750年から820年までの期間について1-2年ごとに ^{14}C 濃度を測定した。試料処理はすべて太陽地球環境研究所の実験室で行い、測定は年代測定総合研究センターの加速器質量分析計により行われた。 ^{14}C 濃度の単測定の誤差は2.6%程度であった。なお、別個体の屋久杉(Tree-B)についても西暦770年から779年の期間について1年ごとの ^{14}C 濃度を測定し、結果の再現性を確認した。

得られた結果を図1に示す[4]。パネル(a)は我々が測定したデータである。西暦774年から775年にかけて急激に ^{14}C 濃度が増加していることがわかる。増加量はこの1年間に12%であった。この増加率は、通常の太陽11年周期活動による1年あたりの変動量(5年で3%程度)に比べて20倍大きいことになる。ピーク値の増加率は15%である。パネル(b)は屋久杉の測定結果の10年平均とIntCal98の10年値[7]の比較で、欧米の樹木年輪から求められた値と屋久杉の結果が一致していることがわかる。さらに南極ドームふじのアイスコアで測定された ^{10}Be のフラックスの10年値にも同様な増加が見られている[8]。このことは、この現象が全地球的に起こったことを示している。図2は、この宇宙線の増加による ^{14}C の生成率とその継続時間をパラメータとして4-box炭素循環モデルを考慮して求めた減衰曲線である。最もよく合う継続時間は1年またはそれ以下で、継続時間1年に

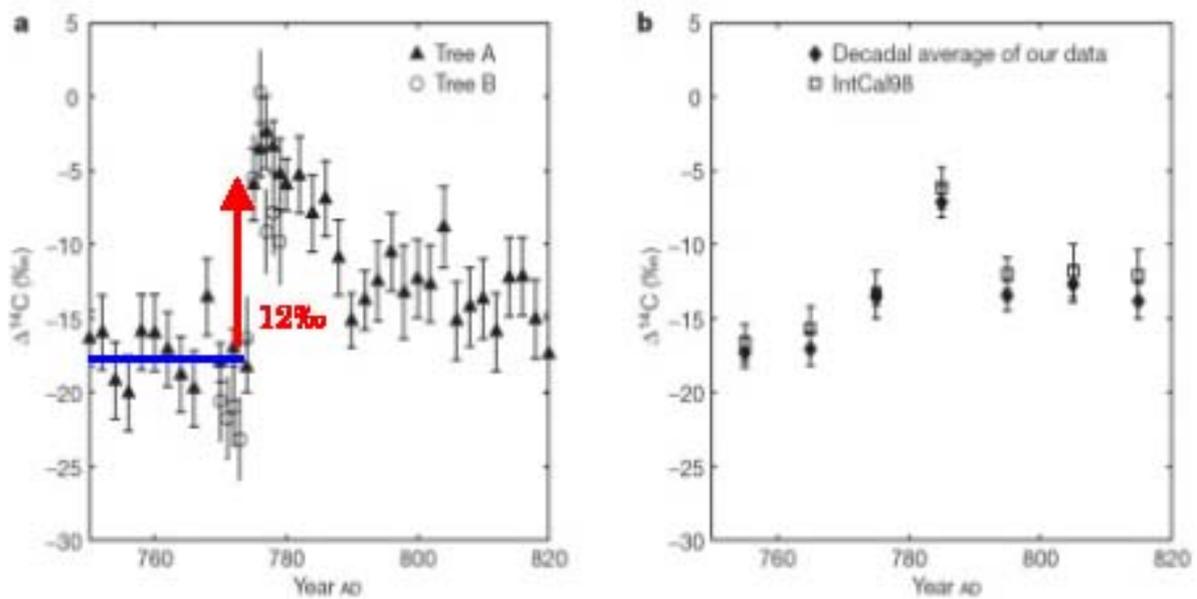


図1. 西暦760年から820年までの ^{14}C 濃度の変化[4]。(a) 歴久杉年輪1-2年ごとの値, (b) 歴久杉データの10年平均とIntCal98データ[7]の比較。(a)において, 西暦774年以前の平均値(水平線)と西暦775年の急激な増加(矢印)が示されている。

Fig. 1 Variation of ^{14}C concentration from AD760 to 820 [4]. (a) Values for 1-2 years of tree rings of Yaku cedar, (b) Comparison of decadal average of Yaku cedar data and IntCal98 data [7]. In the panel (a), the mean value of $\Delta^{14}\text{C}$ before AD774 (horizontal line) and a rapid increase of $\Delta^{14}\text{C}$ in AD775 (upward arrow) are indicated.

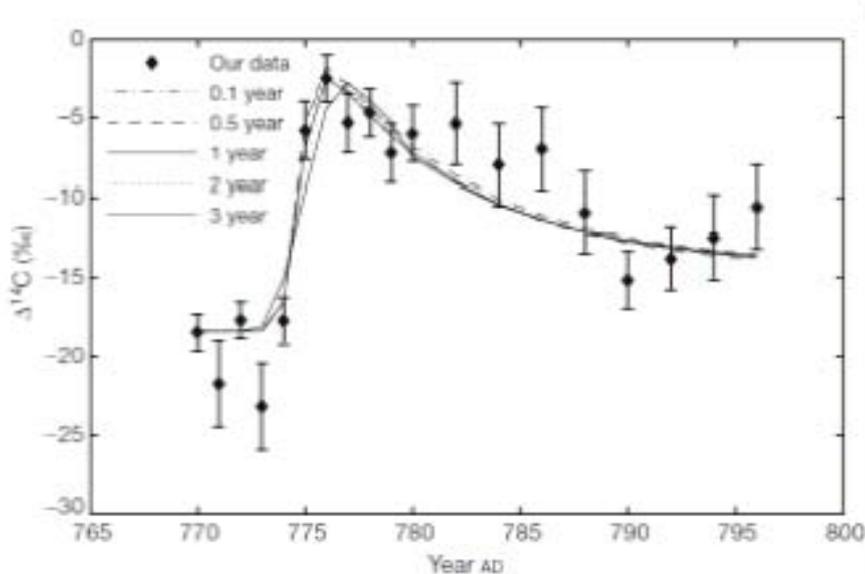


図2. 1年以下の短期入力による ^{14}C 濃度の急激な増加と4-boxモデル炭素循環による減衰

Fig. 2 A rapid increase of $\Delta^{14}\text{C}$ by the short input less than 1 year and a decay due to the carbon cycle by 4-box model.

対する ^{14}C 生成率は $19 \text{ atoms cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。この生成率は、通常の銀河宇宙線による生成率 $2 \text{ atoms cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の約10倍である。なお宇宙線生成の継続時間が短い場合は、 ^{14}C 生成率が継続時間に反比例して大きくなる (^{14}C 生成量が一定)。

3. 高エネルギー現象の原因

この現象の原因についてはまだ未解明である。1年以下の短期間に全球的に通常の10倍以上の生成率で ^{14}C を生成できる現象としては、太陽の近傍で起こる超新星爆発やガンマ線バースト、太陽自身の表面で起こる特大フレアなどが考えられる。

3.1 超新星爆発仮説

星の一生の最後である超新星の場合は爆発と同時に発生するガンマ線が直接地球へ到達することによって、地球大気中での光核反応から生じた中性子あるいはその後発達する空気シャワー中で生成される中性子から ^{14}C がつくられる。今回の事象で大気中につくられた ^{14}C の増加量15‰は、全球の大気中で13.5kgの ^{14}C に相当する。この ^{14}C を生成するために地球へ到達した宇宙線の総エネルギーを原子核反応の計算から求めると、ガンマ線のエネルギースペクトルを $E^{-2.5}$ と仮定してエネルギー当たりの生成率は $120 \text{ }^{14}\text{C atoms/erg}$ となり、上記の ^{14}C を生成するために必要なガンマ線エネルギーは $7 \times 10^{24} \text{ erg}$ となる。

超新星爆発で放出される総エネルギーは 10^{51} erg と考えられており、その1%がガンマ線として放出されるとすれば、 10^{49} erg のエネルギーが放出される。これは地球と超新星の間の距離が 200pc (パーセク, $1 \text{ pc} = 3.26 \text{ 光年} = 3.09 \times 10^{16} \text{ m}$) 程度であれば説明できる。この距離はこれまでの歴史記録に残っている超新星爆発 (例えばSN1006では2kpc) よりかなり近いので、空に明るい星の出現が見られたはずであるが、775年付近にそのようなはっきりした歴史記録はない。超新星の場合は可視光吸収によって星自身が見えない、あるいは南半球などの人口の少ない地域では記録が残らないなどの可能性はあるが、明るさと継続時間から考えると何らかの痕跡が期待される。また爆発後には超新星残骸が残され、現在の観測技術では何らかの形で発見されているはずと考えられる。太陽系の近くで若い超新星爆発の証拠は残っておらず、AD775事象が超新星爆発である可能性は低い。

3.2 ガンマ線バースト仮説

我々の論文発表後、ガンマ線バースト (gamma-ray burst: GRB) と呼ばれる高エネルギー現象が我々の銀河内の太陽に近いところで起こったのではないかと指摘がなされた[9]。磁化した中性子星が合体して回転するブラックホールになり、jet と呼ばれるエネルギー流をビーム状に放出する。Jetの方向に地球がいれば観測可能となる。Short GRBはガンマ線の放射が2秒以内に終わるもので、高エネルギー成分が多いスペクトルをもっている。これは ^{14}C と ^{10}Be の生成比を説明できる可能性がある。また歴史記録がないことや超新星残骸が見つかっていないことも説明できる。しかし我々の銀河内で short GRB が起こる確率は $(3.75 \times 10^6 \text{ yr})^{-1}$ とされ、 ^{14}C 事象の発生頻度 $(3000 \text{ yr})^{-1}$ と比べてかなり小さい。

3.3 太陽陽子事象 (Solar proton event: SPE)

一方、太陽表面で大フレアが起これば高エネルギー陽子が大量に発生し、地球に到達して大気中に ^{14}C をつくる。生成率は、高エネルギー陽子のエネルギースペクトルや地磁気によるカットオフを考慮して原子核反応の計算から求めると $10^{14}\text{C atoms/erg}$ であり、今回の事象の ^{14}C を生成するために地球へ到達した陽子の総エネルギーは $8 \times 10^{25}\text{ erg}$ となる。フレアによる陽子の放出が等方的と仮定すると、太陽から放出されるエネルギーは $2 \times 10^{35}\text{ erg}$ 程度と推定され、これは通常のフレアのエネルギー $10^{29}\text{-}10^{32}\text{ erg}$ よりかなり大きい。Melott and Thomas [10] によれば、通常フレアからの陽子は開口角 $24^\circ \sim 72^\circ$ の範囲に放出されるので、 24° とすればフレア自体のエネルギーは $2 \times 10^{33}\text{ erg}$ となるが、これでも過去最大のフレアより10倍以上大きい。このようなスーパーフレアが我々の太陽でも起こりうる事が最近の研究[11]で示されており、 10^{35} erg のフレアは3,000年に一度、 10^{34} erg のフレアは800年に一度の頻度で起こるとされている。しかし、ある程度大きな太陽フレアが起こった場合には地球大気や気候への影響の可能性があるが、775年頃にそのような形跡はない。逆に、太陽粒子によって引き起こされるオーロラが低緯度でも見えたという記録はあるようだ。

4. まとめ

我々は、1-2年の高時間分解能の ^{14}C 測定により、過去の太陽活動周期の検出や宇宙における突発高エネルギー現象の探索を試みてきた。その結果、太陽活動極小期におけるシュワーベ・サイクルの周期長の伸びを見だし、また今回AD775年の宇宙線の突発現象を発見した。この事象の特徴は、宇宙における1年以下の短期間の高エネルギー現象による全地球的な宇宙線の増加が起こったというものであった。これらの研究は、加速器質量分析計による大量の試料の高精度測定によって可能となったものである。今後も年代を拡張して測定を継続する予定であり、さらなる発見につながりたいと考えている。そのためにも名古屋大学の加速器質量分析計の更新や試料調製の効率化が検討されている。また、 ^{10}Be の1年値を東京大学のMALTで測定中であるが、名古屋でも測定できるようになればさらに重要な発見につながるものと考えられる。

謝辞

福島大学の木村勝彦さんには年輪の年代決定をしていただくとともに、Tree-Bの年輪試料を提供していただきました。ここにお礼を申し上げます。

また本研究は科学研究費補助金（基盤研究B：課題番号22340144）を使用して行われました。

参考文献

- [1] Nagaya, K., Kitazawa, K., Miyake, F., Masuda, K., Muraki, Y., Nakamura, T., Miyahara, H. and Matsuzaki, H., *Solar Phys.* **280** (2012) 223-236.
- [2] Reimer, P. J., Baillie, M. G. L., Bard, E., Bayliss, A. and Beck, J. W., *Radiocarbon* **51** (2009) 1111-1150.

- [3] Menjo, H., Miyahara, H., Kuwana, K., Masuda, K., Muraki, Y. and Nakamura, T., *Proc. 29th ICRC 2* (2005) 357-360.
- [4] Miyake, F., Nagaya, K., Masuda, K. and Nakamura T., *Nature* **486** (2012) 240-242.
- [5] Stuiver, M., Reimer, P. J. and Braziunas, T. F., *Radiocarbon* **40** (1998) 1127-1151.
- [6] Takahashi, Y., Sakurai, H., Suzuki, K., Koriyama, T., Sato, T., Gunji, S. and Tokanai, F., *Proc. 30th ICRC 1* (2007) 673-676.
- [7] Stuiver, M., Reimer, P. J., Bard, E. U., Beck, J. W., Burr, G. S., Hughen, K. A., Kromer, B., McCormac, G., Van der Plicht, J. and Spurk., M., *Radiocarbon* **40** (1998) 1041-1083..
- [8] Horiuchi, K., Uchida, T., Sakamoto, Y., Ohta, A., Matsuzaki, H., Shibata, Y. and Motoyama, H., *Quat. Geochronology* **3** (2008) 253-261.
- [9] Hambaryan, V. V. and Neuhäuser, R., *MNRAS* **430** (2013) 32-36.
- [10] Melott, A. L. and Thomas, B. C., *Nature* **491** (2012) E1-E2.
- [11] Maehara, H., Shibayama, T, Notsu, S., Notsu, Y., Nagao, T., Kusaba, S., Honda, S., Nogami, D. and Shibata, K., *Nature* **485** (2012) 478-481.

日本語要旨

名古屋大学太陽地球環境研究所における炭素 14 測定によって最近得られた 1200 年前に起きた急激な宇宙線増加事象について報告する。この事象の詳細を述べるとともに、原因となる高エネルギー宇宙現象について議論する。