

樹木年輪中放射性炭素  $^{14}\text{C}$  濃度測定による 7-11 世紀の太陽活動の復元  
Reconstruction of the solar activity in 7-11 centuries by the carbon 14 content in tree-rings

三宅芙沙<sup>1\*</sup>・永治健太朗<sup>1</sup>・増田公明<sup>1</sup>・中村俊夫<sup>2</sup>  
Fusa Miyake<sup>1\*</sup>, Kentaro Nagaya<sup>1</sup>, Kimiaki Masuda<sup>1</sup>, Toshio Nakamura<sup>2</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学太陽地球環境研究所・<sup>2</sup>名古屋大学年代測定総合研究センター  
<sup>1</sup>Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University  
<sup>2</sup>Center for Chronological Research, Nagoya University

\*Correspondence to: Fusa Miyake ; E-mail: fmiyake@stelab.nagoya-u.ac.jp

Abstract

Radiocarbon  $^{14}\text{C}$  is produced by the galactic cosmic rays which are modulated by solar magnetic activity because most cosmic rays are charged particles.  $^{14}\text{C}$  is oxidized to form  $^{14}\text{CO}_2$  and taken by trees during the carbon cycle. So  $^{14}\text{C}$  content in tree-rings is retained for record of the past cosmic ray intensity and the solar activity.

We have measured the  $^{14}\text{C}$  content in Japanese cedar tree rings from 602 to 1072 AD with 2-year resolution, and found a rapid increase in  $^{14}\text{C}$  content at 775 AD. This 775 AD peak is consistent with the decadal IntCal data and the  $^{10}\text{Be}$  record from the Antarctic ice core. Therefore, it is highly possible that this peak was recorded all over the world and it was due to the increase in the cosmic ray intensity in 775 AD.

The 11-year and 14-year periodicities are detected by the Fourier analysis on the  $^{14}\text{C}$  content data from 602 to 1072 AD. These periodicities may come from the solar cycle (Schwabe cycle).

*Keywords: Solar cycle ; Cosmogenic nuclide*

1. はじめに

放射性炭素  $^{14}\text{C}$  は、宇宙線と大気原子核との核反応によって生成され樹木に取り込まれるため、樹木年輪中  $^{14}\text{C}$  濃度は、過去の宇宙線強度を記録している。また、宇宙線の大部分が荷電粒子であることから地球への到来宇宙線量は太陽活動によって影響される。従って、年代既知の樹木年輪中  $^{14}\text{C}$  濃度の測定は、過去の太陽活動を調べるために有効である。さらに過去の  $^{14}\text{C}$  濃度は、太陽活動だけではなく、宇宙線そのものが大量に放出される超新星爆発などの宇宙高エネルギー現象も記録している可能性がある。

先行研究では、主に太陽活動極小期における太陽活動周期（シュワーベサイクル、平均 11 年）と太陽活動度との関係について調べられており、マウンダー極小期にはシュワーベサイクル周期長が 14 年程度に伸びていたという報告がある（Miyahara,2004）。しかし極小期以外の期間の測定はあまり行われていないため、本研究では、大きな極小期は含まれていない AD602-1072 年を対象にして屋久杉年輪の  $^{14}\text{C}$  濃度を時間分解能 1-2 年で測定した。測定期間のうち、AD760-780 年には IntCal（10 年分解能の  $^{14}\text{C}$  濃度変動曲線：Stuiver,1998）において、20 年で約 10% の急激な増加がみられ、この期間に宇宙で高エネルギー現象が起きていた可能性がある。

本稿では、IntCal で見られた急激なピーク（以降スパイクピークと呼ぶ）の特徴と、AD602-1072 年のシュワーベサイクル周期長について議論する。

## 2. 測定結果

用いた試料は、樹齢約 1900 年の屋久杉である。試料調製の手順として以下のように行った。

- ・年輪ディスクを 1 年ごとに剥離し、化学洗浄を行って年輪間を移動しないセルロースを抽出する
- ・セルロースを CO<sub>2</sub> 化し、CO<sub>2</sub> と共に含まれている不純物ガスの除去を行う
- ・CO<sub>2</sub> をグラファイト化し、AMS で <sup>14</sup>C 濃度を測定する

今回の対象期間である AD602-1072 年のうち、既に測定されている 2 区間 (AD992-1072:毛受,2005、AD880-964:桑名,2006) とつなげる形で 2010 年に 7 回の測定を行った。分解能は基本的に 2 年 (1 年おき) で、区間によっては 1 年である。測定回ごとに、前後の測定回と重複させた年代を設けたが、すべて誤差の範囲内で一致し、再現性あるデータが得られた。重複年代は合成し、誤差とともに示したものが図 1 である (誤差の平均値は 2.6 [‰])。

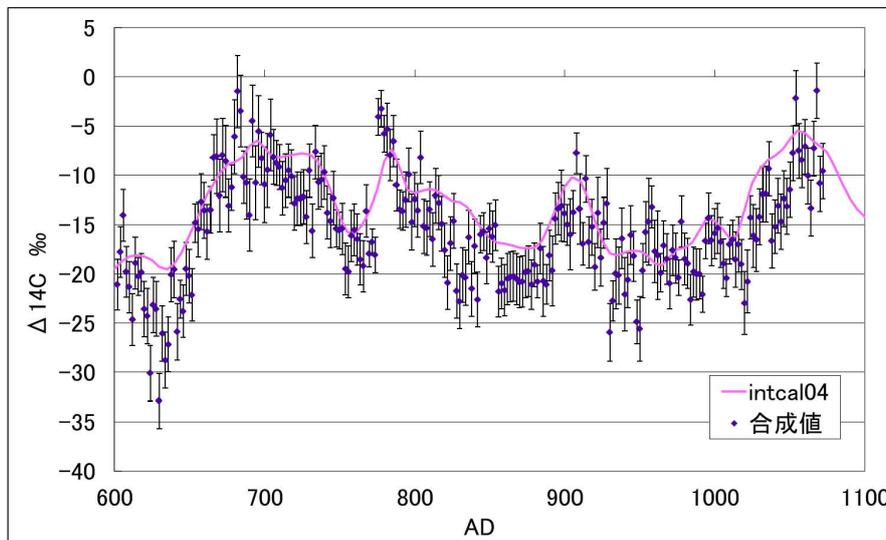


図 1 AD602-1072 年の測定データと IntCal04(Reimer,2004)

Fig.1 Present results of <sup>14</sup>C variation from 602 to 1072 AD (black closed circles with error bars) and with IntCal04 data (red line :Reimer,2004).

## 3. スパイクピーク

IntCal で AD760-780 年の約 20 年で 10‰の増加が認められたスパイクピークは、今回の高時間分解能の測定から、AD774 年から 775 年にかけて 1 年で増加していることが明らかになった。IntCal のデータ分解能は 10 年であるのに対して、今回の測定は分解能 1-2 年であるため、今回の測定結果を IntCal と同じ年数分平均して両者を比較したものを図 2 に示す。このように、スパイクピークの期間において北米・ヨーロッパの試料に基づく IntCal と日本の測定結果が非常に良く一致しており、AD775 年に 1 年間で急上昇したスパイクピークは、グローバルな変化の記録である可能性が高い。

ピーク後は、なだらかに減衰しており、これは炭素循環モデル (中村,1988) によって説明できる。また、南極アイスコア中の宇宙線生成核種である <sup>10</sup>Be の記録 (Horiuchi,2008) にも、AD775 年付近にかなりするどいピークがみられることから、宇宙線量を急激に変動させるような現象が起きていたと考えられる。

原因について、超新星爆発、大規模太陽フレアが挙げられるが、現段階で断言できない。<sup>14</sup>C、<sup>10</sup>Be の生成過程として、超新星爆発ではガンマ線によって、またフレアでは陽子によって生成されるプ

ロセスが想定される。今後は $^{14}\text{C}$ 、 $^{10}\text{Be}$ が生成されるまでの正確な見積もりができるように、GEANT4を用いた大気シミュレーションを行う予定である。

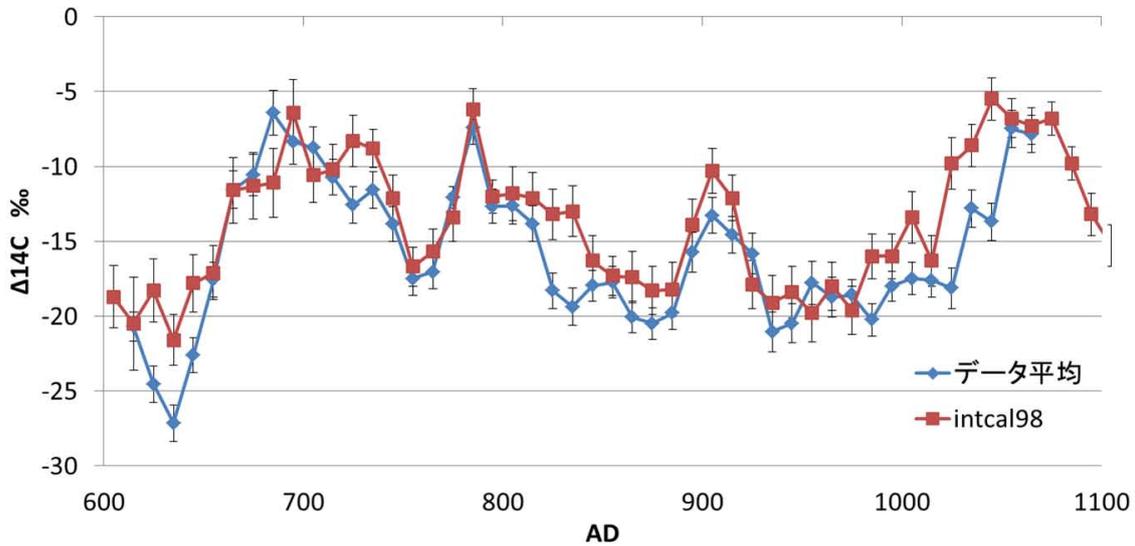


図2 測定データの10年平均と、IntCal98(Stuiver,1998)との比較  
Fig.2 Comparison of decadal averages of our data (blue diamonds) and IntCal98 data (red squares; Stuiver,1998).

#### 4. 周期解析結果

周期解析を行う際、スパイクピークの影響は障害になるため、測定データと炭素循環モデルとの残差をとった時系列データを作成した。この時系列を使ってフーリエ変換した結果を図3に示す。今回の測定期間においては、フーリエ変換から約11年と14年の卓越周期が得られ、これらの周期はシュワーベサイクル起源であると考えられる。ただ、フーリエ変換では、2つの周期が、連続して存在しているか、もしくは局在しているかわからないため、周期の時間分布を調べるのに有効なウェーブレット変換を行ったが、図4に示すように2つの周期は顕著ではなかった。フーリエ変換と比べると、ウェーブレット変換は誤差による影響を受けやすい性質があるため、現在の測定誤差で、ウェーブレット変換を用いた精密な議論はできないと考えられる。

先行研究から、シュワーベサイクル周期長は太陽活動極小期に伸びる傾向があることが示唆されているが、今回の測定期間には、大きな極小期は含まれていない。通常シュワーベサイクル周期長は平均11年であることが分かっており、フーリエ変換で14年周期が検出されたことから、極小期ではなくても周期が伸びている時期が存在する可能性がある。さらに誤差を小さくして、14年周期がどの年代に現れていたのか詳しく調べていく予定である。

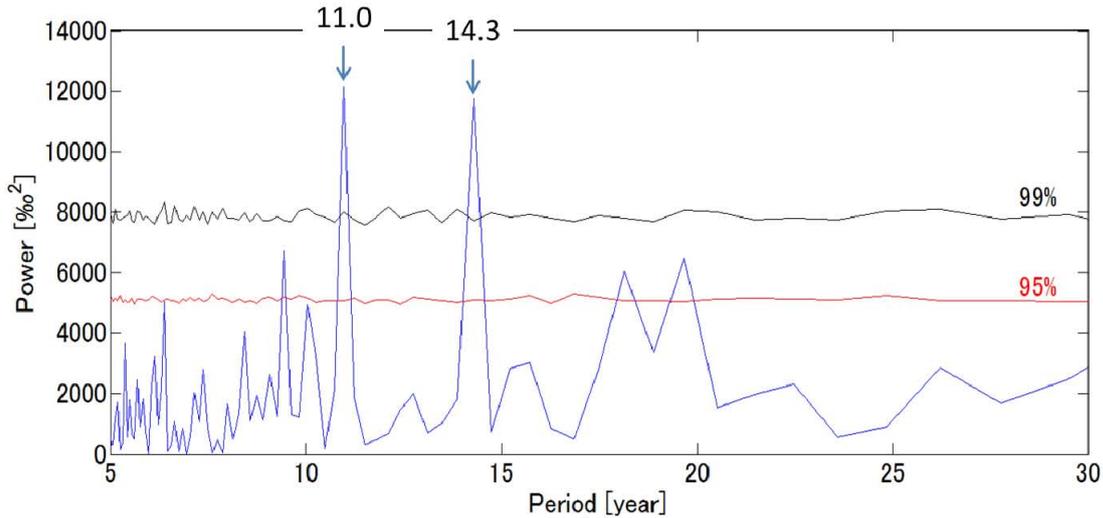


図3 5-30年のフーリエ変換パワースペクトル[‰²]。黒い線は99%、赤い線は95%の有意性を示す。  
 Fig.3 Fourier power spectra between 5 and 30 year periods in ‰².  
 The black and red lines represent 99% and 95% significant levels, respectively.

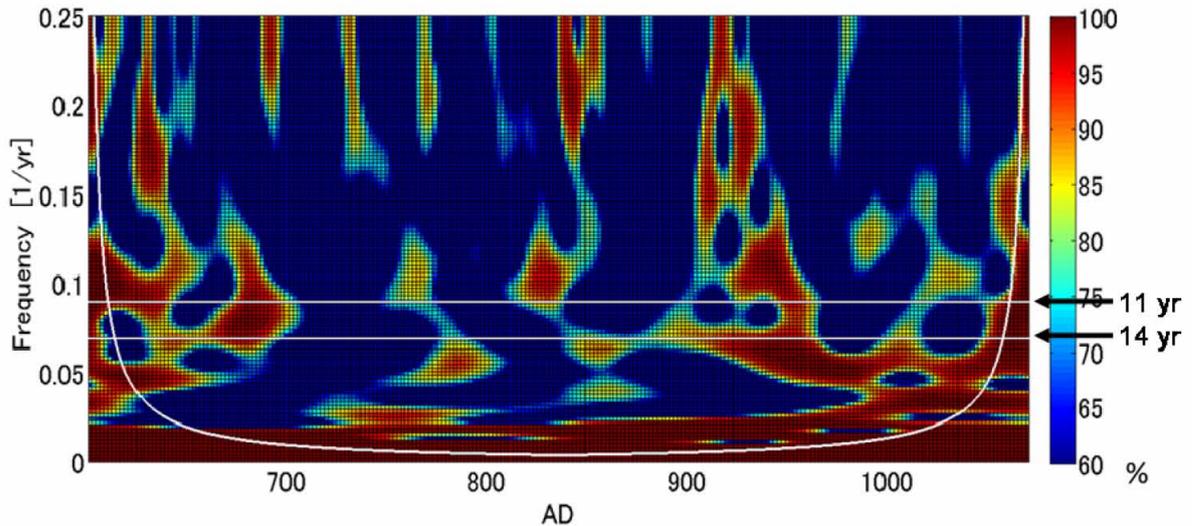


図4 ウェーブレット変換結果。横軸時間、縦軸周波数、カラーは測定誤差に対する有意性 (%)を示す。2本の白い横線は上から11年と14年に対応している。  
 Fig.4 Wavelet transform of our data. The horizontal and vertical axes show calendar year (AD) and frequency (1/yr), respectively. The color represents significance level (%) with the measurement error. The horizontal white lines correspond to  $0.090 \text{ yr}^{-1}$  (1/11yrs) and  $0.071 \text{ yr}^{-1}$  (1/14yrs).

## 5. まとめ

西暦 602-1072 年の屋久杉年輪中の  $^{14}\text{C}$  濃度測定を行った。

IntCal で AD760-780 年にかけてみられた急激な  $^{14}\text{C}$  濃度増加は、今回の測定から、AD774-775 にかけて約 15‰の増加をしていたことが明らかになった。測定データの 10 年平均は、IntCal と非常に良い一致を示し、この変化が全球的に記録されていた可能性を示している。

西暦 775 年のスパイクピークの原因として、超新星爆発、大規模太陽フレアが挙げられるが、現段階では特定できない。

測定期間の周期解析結果は、フーリエ変換では約 11 年と 14 年の卓越周期が検出された (有意性

99%以上)。これらの周期の時間分布を調べるために、ウェーブレット変換を行ったが、11年と14年の周期は顕著ではなかった。ウェーブレット変換はフーリエ変換と比べると、誤差の影響を受けやすい性質があるため、今回のウェーブレット変換の結果はあまり確実な議論をしているとは言えない。したがって、今後誤差を小さくするために、さらに測定を行う予定である。

フーリエ変換で11年と14年が検出されたということは、今回の測定期間においてこれら2つの周期が混在している可能性がある。もしこれが明らかになればシュワーベサイクルのメカニズムを考える上で重要な手掛かりとなる。したがって、誤差を小さくしてウェーブレット変換から確実な議論をすることは非常に意義のあることである。

## 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。

## 引用文献

- Horiuchi, K., et al., 2008, *Quaternary Geochronology*, 3, 253-261.  
桑名宏輔, 2006, 名大宇宙線研究室記事, 第47巻第1号, 443-503.  
毛受弘彰, 2005, 名大宇宙線研究室記事, 第46巻第1号, 407-489.  
Miyahara, H., et al., 2004, *Solar Phys.*, 224, 317-322.  
中村俊夫, 1988, 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書 (I), 46-51.  
Reimer, P. J., et al., 2004, *Radiocarbon*, 46, 1029-1058.  
Stuiver, M., et al., 1998, *Radiocarbon*, 40, 1127-1151.