屋久杉年輪中 14C 濃度測定による 7-8 世紀の太陽活動周期長の研究
A study of the solar activity cycle in 7-8th centuries by the carbon 14 content in Yaku-cedar tree- rings

三宅芙沙 [1*]・増田公明 [1]・中村俊夫 [2]
Fusa Miyake[1*], Kimiaki Masuda[1], Toshio Nakamura [2]

[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
[1]Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University
[2]Center for Chronological Research, Nagoya University

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

Abstract

Radiocarbon (^{14}C) is produced in the upper atmosphere by galactic cosmic rays, which are modulated by solar magnetic activity. Its content in tree rings is retained and provides a record of past cosmic ray intensity and solar activity. We have measured the ^{14}C content in Japanese cedar tree rings from AD 600 to 760, a time interval that includes a grand solar minimum in the 7th century, with a resolution of 2 year. Periodicity analysis of the ^{14}C data shows that there is a component in the frequency band of the Schwabe cycle, with a period of 12-13 years continuing throughout the minimum. This is the fourth case in which an increase in the length of the Schwabe cycle has been observed in a grand solar minimum, after the Maunder Minimum, the Spörer Minimum, and the 4th century BC Minimum. In addition to the increase in the cycle length, it was also found that short frequency components appear in the preceding and the beginning of the minimum. It is possible that this short component is related to the solar dynamo.

Keywords: solar cycle; cosmogenic nuclide; solar dynamo

1. はじめに

太陽の活動指標である黒点数の観測は、1610 年に開始された。黒点数の増減は 9 年から 13 年の間で繰り返され、平均約 11 年周期であることがわかっている。この周期のことをシュワーベサイクルと呼んでいる (Schwabe, 1843 [11])。また、1908 年には、ヘールによって黒点の磁場が最初に観測され、太陽の磁極が太陽活動極大期に反転することも発見された。このような磁極反転を考慮すると、太陽周期は 22 年とみることもできる(ヘールサイクル: Hale et al., 1919 [4]; Hale & Nicholson, 1925[5])。これらの観測事実を説明するために、太陽ダイナモ機構が考案されている。これは、主に運動エネルギーを磁場エネルギーに変換することを記述しており、磁極反転を再現する有力なモデルであると考えられている。しかし、シュワーベサイクル周期長は 11 年で一定ではなく、これが何によって制御されているのかほとんど理解されていない。シュワーベサイクル長のメカニズムを考える上では、長期的な太陽の活動を知る必要があるが、過去 400 年間の黒点数の記録だけでは限られた情報しか得られない。1610 年以前の太陽活動を間接的に調べる手法として、宇宙線生成核種の放射性同位体を用いた研究が有力とされている。

宇宙線生成核種を用いた太陽活動の復元は、今までに樹木年輪中の ^{14}C や、極地方の氷床中に含まれる ^{10}Be が用いられてきた。対象にされた測定期間は、主に Grand solar minimum と呼ばれる非

常に太陽活動が弱まっていた時期である。Grand solar minimum の中で良く知られているものは、黒点数がほぼゼロであったマウンダー極小期（AD1640-1720）が挙げられる。マウンダー極小期における ^{14}C や ^{10}Be の 1 年分解能測定により（Stuiver et al., 1998 [14], Beer et al., 1998 [1], Miyahara et al., 2004 [6]）、シュワーベサイクル周期長が 14 年に伸びていたことが指摘されている[1,6]。また、マウンダー極小期以前の Grand solar minimum であるシュペーラー極小期（AD1390-1550）、BC4 世紀極小期（BC390-330）の ^{14}C 濃度 1 年値が測定されており、シュペーラー極小期については極小期初期に 13 年に、BC4 世紀極小期には 16 年にシュワーベサイクル周期長が伸びていたことが報告されている（Miyahara et al. 2006; 2010 [7,8], Nagaya et al. 2012 [9]）。このように、Grand solar minimum において周期長が伸びるており、太陽活動度と周期朝との間の逆相関関係が指摘されているが、今挙げた Grand solar minimum は最大規模のものばかりであり、小規模の Grand solar minimum や、太陽活動が通常から活発な時期における測定はほとんど行われていない。また、シュペーラー極小期は、極小期のほとんどにおいて周期長が伸びていない。したがって、太陽活動度と周期長との逆相関関係は、必ずしも明確とは言えない。

シュワーベサイクルには番号が付けられており、ヴァルドマイヤーにより 1755 年から始まる周期が 1 と決定された（1 サイクルは 黒点数の極小から次の極小までの期間）。現在は、サイクル 24 の半ばにさしかかっているが、1 つ前のサイクル 23 が終わった後、約 2 年間にわたって黒点がほとんど現れない期間があったため、サイクル 24 の周期長は伸びている。シュワーベサイクル周期長が伸びていることから、今後太陽活動自体も弱まり、Grand solar minimum 到来を予測した見解もある。太陽活動と地球気候は密接に結びついていると考えられているため、仮に太陽が Grand solar minimum に突入すると地球気候へ、さらには人間の生活へ与える影響は大きい。したがって、シュワーベサイクル周期長と太陽活動度の関係性を明らかにすることは、非常に重要であると考えられる。

今回はマウンダー型極小期の中では振幅が小さい極小期（AD650-720 ; Eddy, 1977 [3]と Usoskin et al., 2007 [16]によって定義された。以後 7 世紀極小期と呼ぶ）に注目し、この極小期を含む期間の AD600-760 年までの ^{14}C 濃度を測定した。

2. 方法

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（*Cryptomeria japonica*, 30.3° N, 130.5° E）である（図 1）。1 年輪ごとにカッターナイフを用いて丁寧に剥離した木片を、それぞれ化学洗浄（AAA 処理、亜塩素酸処理、中和）を行って年輪間を移動しないセルロースを得る。次にセルロースを酸化銅、サルフィックス（硫黄除去剤）と共に真空中で封じ切り、加熱することで CO_2 化させる。さらに冷却トラップを用いて真空ライン中で CO_2 の精製を行い、鉄粉触媒化で水素還元を行いグラファイトとする。最終的に、名古屋大学年代測定総合研究センターの AMS (Nakamura et al., 2000 [10])を用いてグラファイト中の ^{14}C 濃度を測定した。^{14}C 濃度は Stuiver & Polach, 1977 [13]によって定義される $\Delta^{14}C$ によって表される。各測定の平均誤差は 2.6‰ であり、誤差を小さくするために同じ年を 1−3 回測定した。同じ年代での測定値は誤差の範囲内で一致したため、重みつき平均を取り合成した（合成後の平均誤差は 2.0‰）。

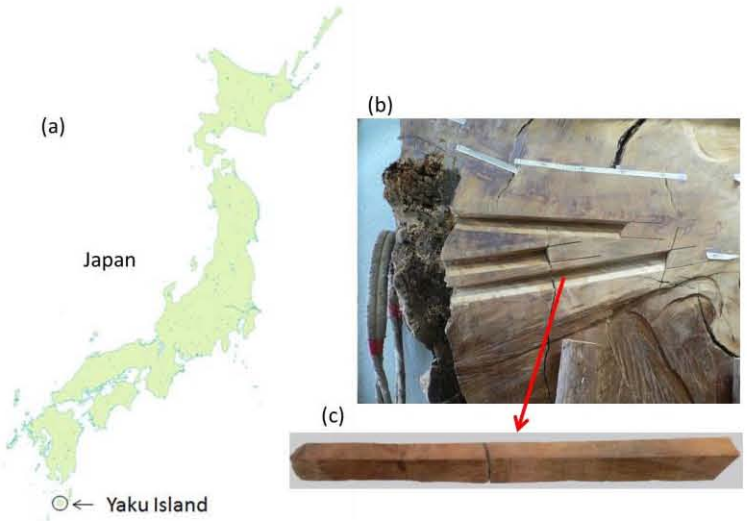

図1　(a)屋久島の位置　(b)屋久杉ディスク　(c)　切り出された木片(4 cm x 7 cm x 5 cm x 52 cmの三角柱)

Figure 1. (a) Location of Yaku Island (b) Disk cut from a Japanese cedar tree for this study. (c) Cut core (triangular pole, about 4 cm x 7 cm x 5 cm x 52 cm)

3. 結果

測定は AD 600-760 年にかけて 2 回通り隔年で行った(AD600,638,736,748 年は 1 回通り、AD676,678,686,698 年は 3 回通り)。AD 600-760 年までの $\Delta^{14}C$ 時系列データを図 2a に示す。データからシュワーベサイクル周波数帯を取り出すために、s 変換（Stochwell, 1996 [15]）を行ったものが図 2b である。s 変換とはウェーブレット変換の一種で、周期の時間分布を調べるために有効な解析手法である。図 2b より、8-13 年程度の周期シグナルが得られた。しかし、ここで注意しないといけないのは、年輪中 ^{14}C 濃度は炭素循環によって元の太陽活動周期の振幅の 1/100 に減衰していることである（Siegenthaler et al., 1980 [12]）。仮に元の宇宙線の変動が±15%だとすると（地上中性子モニターによる）、^{14}C 濃度における変化は 1.5‰となる。私たちの測定誤差が 2.0‰であるため、シュワーベサイクル周期長を議論する上で、誤差に対する有意性は非常に重要となる。ウェーブレット変換結果を Nagaya et al., 2012 [9]に示された方法を用いて、測定誤差に対する有意性で示したものが図 2c である。

4. 考察

図 2c より、AD630 年以前は 10 年、AD630-710 年にかけて 12-13 年のシグナルが 3σ 以上で検出されているのがわかる。特筆すべきは 12-13 年程度に周期長が伸びている期間が、7 世紀極小期に対応していることである。7 世紀極小期の初期（AD660 年付近）に、8 年程度の短周期成分も 3σ 以上で検出されているため、この時期には 2 つの成分が存在するが、12-13 年の長周期は極小期全般において強く検出されているため、7 世紀極小期においては長周期成分が主なものと考えて良いだろう。

極小期初期に、短期成分が ^{14}C 測定において検出されたのは、7 世紀極小期だけではなく、マウンダー、シュペーラー、BC4 世紀にも共通している[6,8,9]。したがって、この短周期の特徴は、Grand solar minimum に関連して生じている可能性が考えられる。Grand solar minimum に関連して短周期成分が生じる原因としては、太陽活動が弱まることにより炭素循環に影響が及んだ場合、あるいはシュワーベサイクル自体に短周期成分が存在する場合の 2 通りが考えられる。実際に、Choudhuri & Karak, 2009 [2]の磁束輸送太陽ダイナモモデルにおいて、マウンダー極小期の初期（AD1648 付近）

にポロイダル場の短周期成分が見られる。したがって、仮にこのモデルが正しい場合、太陽ダイナモの短周期成分が ^{14}C においても見えている可能性は考えられるが、より詳しい議論を行うためにはさらなる極小期における検証などが必要になるだろう。

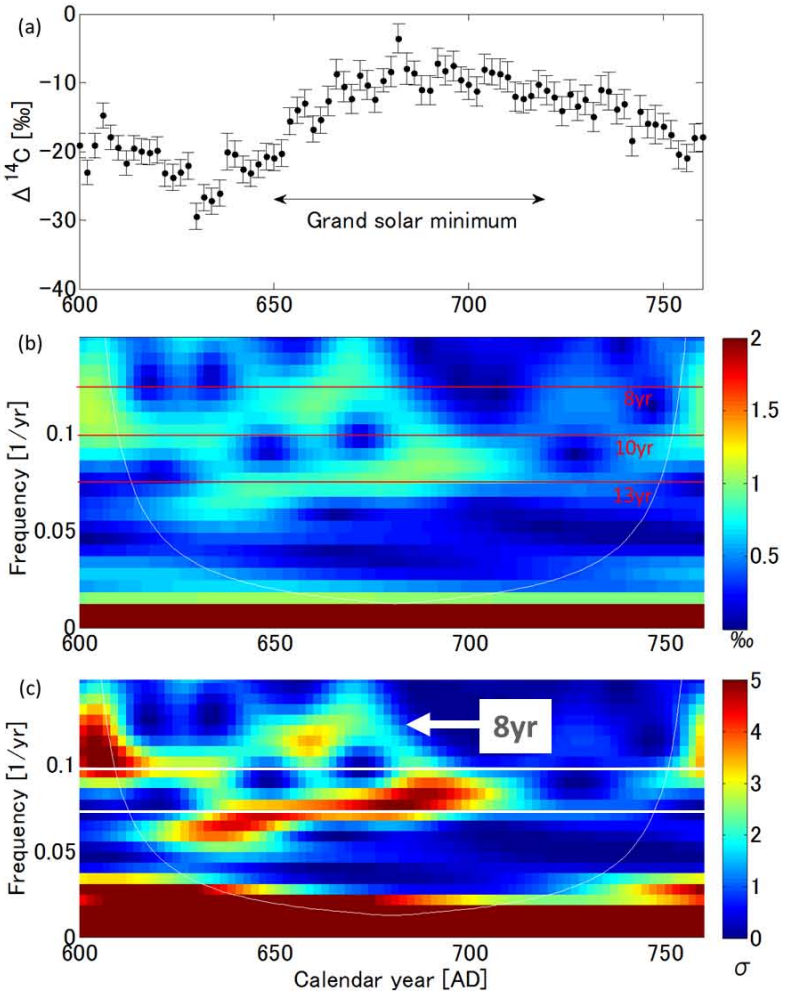

図 2　AD600-760 年のウェーブレット変換結果。(a) Δ ^{14}C 時系列データ。(b) ウェーブレット変換結果。カラーは振幅[‰]を示す。3 本の横線は上から、8、10、13 年に対応する。(c) ウェーブレットの結果を誤差に対する有意性[σ]に直したもの。2 本の横線は 10 年、13 年に対応する。矢印は 8 年を示す。

Fig.2 The results of a wavelet analysis from AD 600-760. (a) Present data of Δ ^{14}C. (b) Result of s-transform. The color shows the amplitude in ‰. The horizontal lines correspond to 1/8yrs, 1/10yrs and 1/13yrs. (c) The color represents the significance level in sigma with respect to the measurement error. The horizontal lines correspond to 1/10yrs and 1/13yrs. The arrow shows 1/8yrs.

今回の 7 世紀極小期におけるシュワーベサイクル周期長の伸びは、マウンダー、シュペーラー、BC4 世紀の Grand solar minimum に次いで 4 例目の発見となる。Grand solar minimum は、その継続期間の違いから、短いマウンダー型と、長いシュペーラー型に分類されている。3 つのマウンダー型極小期（マウンダー、7 世紀、BC4 世紀）は極小期全般にわたって周期長が伸びていたのに対して、シュペーラー型極小期は極小期前半においてのみ周期長が伸びている。シュペーラー型の極小期はその継続期間が非常に長いことから、マウンダー型とはダイナモメカニズムが異なることなどが提案されているが、詳しいことは分かっていない。したがって、このようなマウンダー型とシュ

ペーラー型の違いが存在するかどうかについても、今後他の Grand solar minimum の測定によって明らかにされることが期待される。

5. まとめ

AD600-760 年の屋久杉年輪中 ^{14}C 濃度の測定を分解能 2 年で行った。測定データの周期解析によって、7 世紀マウンダー型極小期においてシュワーベサイクル周期長が 12-13 年に伸びていたことが明らかになった。Grand solar minimum において周期長が伸びるのは、マウンダー、シュペーラー、BC4 世紀に次いで 4 例目の発見である。また、マウンダー型の極小期では、極小期全般にわたって周期長が伸びているのに対し、継続期間が長いシュペーラー型においては極小期初期にのみ周期長が伸びていることが明らかになった。これはマウンダー型、シュペーラー型の違いを反映していると考えられる。

さらに、7 世紀極小期において、極小期初期に 8 年程度の短期成分が検出された。この特徴は他の Grand solar minimum においても見られ、磁束輸送太陽ダイナモモデルもマウンダー極小期初期の短期成分を予測していることから、^{14}C にみられる短期成分は太陽ダイナモによる可能性が考えられる。

今後さらに多くの極小期を測定し、極小期の短周期成分の原因等について明らかにしていく予定である。

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

[1] Beer, J., *et al.*, 1998, *Solar phys.*, **181**, 237.
[2] Choudhuri, A. R. and Karak B. B., 2009, *Res. Astron. Astrophys.*, **9(9)**, 953.
[3] Eddy, J. A., 1977, *Clim. Change.,* **1,** 173.
[4] Hale, G. E., *et al.*, 1919, *Astrophys. J.*, **49**, 153.
[5] Hale, G. E. and Nicholson, S. B., 1925, *Astrophys. J.*, **62**, 270.
[6] Miyahara, H., *et al.*, 2004, *Solar Phys.*, **224**, 317.
[7] Miyahara, H., *et al.*, 2006, *J. Geophys. Res.*, **111**, A03103.
[8] Miyahara, H., *et al.*, 2010, *J. Cosmology*, **8**, 1970.
[9] Nagaya, K., *et al.*, 2012, *Solar Phys.*, **280**, 223.
[10] Nakamura, T., et al., 2000, *Nucl. Instrum. Methods B*, **172**, 52.
[11] Schwabe, M. T., 1843, *Die Sonne. Astron. Nachr.*, **20**, 283.
[12] Siegenthaler, U., *et al.*, 1980, *Radiocarbon*, **22**, 177.
[13] Stuiver, M. and Polach, H.A., 1977, *Radiocarbon*, **19**, 355.
[14] Stuiver, M., *et al.*, 1998, *Radiocarbon*, **40**, 1127.
[15] Stockwell, R.G., 1996, *IEEE Transactions on Signal Processing*, **44**, 998.
[16] Usoskin, I.G., *et al.*, 2007, *A&A*, **471**, 301.