

樹木年輪中放射性炭素濃度測定による 7-8 世紀の太陽活動周期の研究  
A study of the solar activity cycle in 7-8th centuries by the carbon 14 content in tree-rings

三宅芙沙<sup>1\*</sup>・永冶健太朗<sup>1</sup>・増田公明<sup>1</sup>・村木綏<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>, Muraki Yasushi<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 <sup>14</sup>C is produced in the upper atmosphere by the galactic cosmic rays which are modulated by solar magnetic activity. Its content in tree-rings is retained for record of the past cosmic ray intensity and the solar activity. We have measured the <sup>14</sup>C content in Japanese cedar tree rings from 602 AD to 1072 AD with 2-year resolution. The 13-year periodicity was detected by the periodic analysis on the <sup>14</sup>C content data in a grand solar minimum from 650 to 720 AD (Maunder-type minimum). This periodicity may come from the solar cycle (Schwabe cycle). It is the third case of the increasing of Schwabe cycle length in the Maunder type solar minimum, after the Maunder minimum and the BC4 minimum.

Keywords: solar cycle; cosmogenic nuclide; the Maunder minimum

1. はじめに

太陽観測の中で最も古くから連続した記録として残っているものは、望遠鏡の発明によって 1610 年に始まった黒点観測である。黒点数は太陽活動の指標であり、平均 11 年周期で変動することが知られている (図 1)。この太陽活動周期のことをシュワーベサイクルと呼んでいる。シュワーベサイクルのメカニズムは太陽ダイナモ機構によって説明されているが、シュワーベサイクル周期長が何によって決定されているかなど不明な点が多く残されている。太陽メカニズムを考える上では、長期的な太陽の振る舞いを知る必要があるが、過去 400 年間の黒点記録だけでは不十分である。また、図 1 にみられるように 17 世紀後半から 18 世紀前半は黒点消失期 (マウンダー極小期) となっており、この期間の太陽活動は、黒点記録からはわからない。このような背景を受け、我々は樹木年輪中の放射性炭素 <sup>14</sup>C 濃度測定を研究手法として用いている。

放射性炭素 <sup>14</sup>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 <sup>14</sup>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 <sup>14</sup>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。

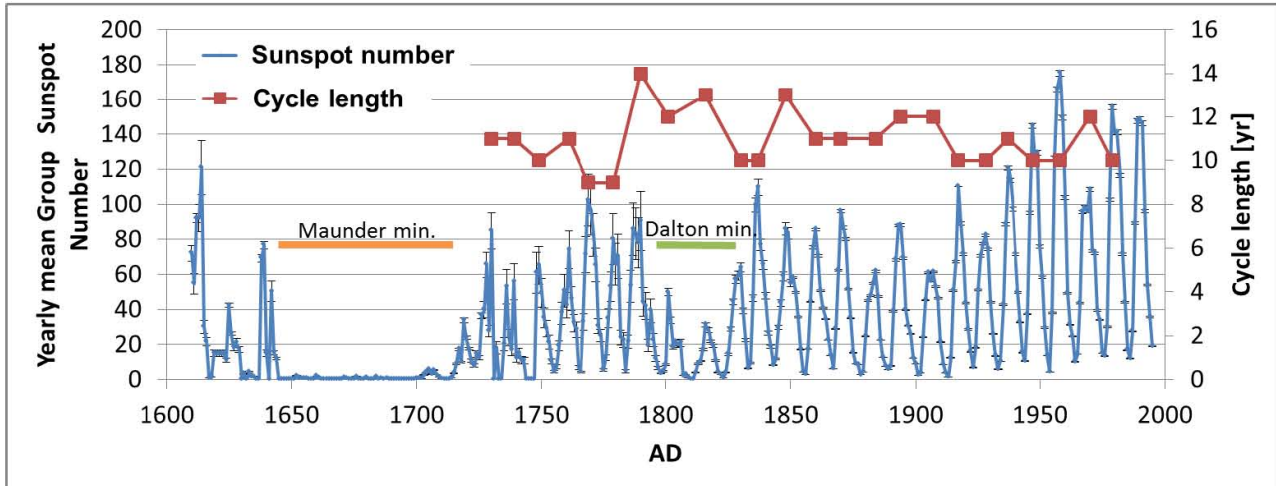


図 1 AD1610-1995 年の黒点数変動とその周期長[1]

Fig.1 Variation of the sunspot number from 1610 to 1995 AD and its cycle length.

過去の  $^{14}\text{C}$  濃度連続測定として、Stuiver らが約 1 万年前までの年代既知の樹木年輪中  $^{14}\text{C}$  濃度を 10 年ごとに測定した、 $^{14}\text{C}$  濃度変動曲線 (IntCal) がある[2]。IntCal を見てみると、マウンダー極小期には  $^{14}\text{C}$  濃度が高くなっており (これは太陽磁場が弱かったことが原因であると考えられている)、過去 1 万年間通してみるとマウンダー極小期のほかにも多くのよく似た変動が存在することがわかる。このような時期は、太陽活動極小期 (Grand solar minimum) と呼ばれ、今までに  $^{14}\text{C}$  データを用いた様々な研究が行われてきた。識別された太陽活動極小期は解析方法によって若干異なり、過去 5000 年間の数は 6-20 個である (Eddy[3], Stuiver et al.[4], Voss et al.[5], Goslar[6], Usoskin et al.[7])。また、Stuiver(1989)[8] は、極小期の継続期間によってマウンダー型 (短い) とシュペーラー型 (長い) に分類できることを提案した。

表 1 過去 5000 年間の太陽活動極小期 (中心年と継続期間は Usoskin et al., 2007、極小期の振幅は Eddy,1977、型は Stuiver et al.,1989 より)。型の M と S はそれぞれマウンダー型とシュペーラー型を示す。Voss et al., 1996 では、表の極小期以外にも 1800 年前後のダルトン極小期や、9 世紀後半極小期など、合計 20 個の極小期を挙げている。

Table.1 Grand solar minima for the last 5000 years (center year and duration period are cited from Usoskin et al., 2007, amplitude is cited from Eddy, 1977, and type is cited from Stuiver et al., 1989). The types M and S represent the Maunder type and the Spörer type, respectively. In addition to these, Voss et al., 1996 defined 20 grand solar minima, e.g., Dalton minimum around 1800 AD, the late 9th century minimum, and so on.

No. (Name)	Center year [AD]	Duration [yr]	Amplitude(Eddy,1977)	Type(Stuiver,1989)
1 (Maunder)	1680	80	1.0	M
2 (Spörer)	1470	160	1.1	S
3 (Wolf)	1305	70		M
4 (Oort)	1040	60		M
5 (late 7C)	685	70	0.7	
6 (BC4)	-360	60	2.4	M
7 (BC7)	-765	90	2.4	S
8	-1390	40	1.5	
9	-2860	60		S

さらに、IntCal より高時間分解能 (1-2 年) の測定が、主に太陽活動極小期を含む期間を中心に行われてきた。その中でマウンダー極小期においてシュワーベサイクルは 14 年に、また BC4 世紀の極小期には 16 年に伸びていたという報告がある[9][10]。これらのマウンダー型の太陽活動極小期においてシュワーベサイクル長が長くなるという結果は、最大黒点数とその黒点周期長との逆相関[11]や、太陽型恒星における活動度と周期長との逆相関関係[12]などの観測事例を支持する結果と言える。ただし、マウンダー極小期や BC4 世紀の極小期は過去数千年間で最大クラスの極小期であり、それ以外の極小期や通常期におけるシュワーベサイクル長の研究はほとんどない。一方、シュペラー極小期の高時間分解能測定も行われたが、明確な周期の伸びは確認されていない[13]。マウンダー型とシュペラー型によってダイナモメカニズムが異なり、周期長も異なる可能性があるが、詳しいことはわかっていない。シュワーベサイクル長の変動メカニズムが解明されていない現段階において行うべきことは、長年にわたって様々な太陽活動を呈する時期を調べることである。そこで、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 ; 以後 7 世紀後半極小期と呼ぶ) に注目し、この極小期を含む期間であり、太陽活動が通常もしくは活発であった AD602-1072 年までの  $^{14}\text{C}$  濃度を測定した。本稿では測定結果と、その周期解析結果について報告する。

## 2. 測定

今回用いた試料は、その年代が年輪年代を用いて決定された、樹齢約 1900 年の屋久杉である。1 年輪ごとに剥離した木片を、それぞれ化学洗浄 (AAA 処理、亜塩素酸処理) → $\text{CO}_2$  化→精製→グラフアイト化を行い、名古屋大学年代測定センターの AMS を用いて  $^{14}\text{C}$  濃度を測定した。

測定は AD602-1072 年にかけて隔年で行った。今回の対象期間のうち、2 区間 (AD992-1072:毛受,2005[14]、AD880-964:桑名,2006[15]) は既に一通り測定されており、新しい結果と調和的であるためこれらのデータを使用した。2010-2011 年にかけて、計 14 回 (1 回に測定するのは、年輪試料 29 個、NIST 試料 6 個、バックグラウンド試料 2 個である) の測定を行った。 $^{14}\text{C}$  濃度は Stuiver & Polach (1977)[16]によって定義される  $\Delta^{14}\text{C}$  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 1-4 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 2.1‰)。

## 3. 結果

AD 602-1072 年までの  $\Delta^{14}\text{C}$  時系列データを図 2a に示す。系列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、7-18 年バンドパスフィルターを通した後の系列を図 2b に、さらにバンドパス後の系列から得られた周期 (山から次の山まで) を図 2c に示す。図 2c において、サイクル (7,25,26,35,44) については 2 つの波が重なっているようにも見えるが、分離すると片方の周期が短く振幅も小さくなるため、今回は 1 つにまとめた。測定期間全体で、合計 44 周期を検出した。

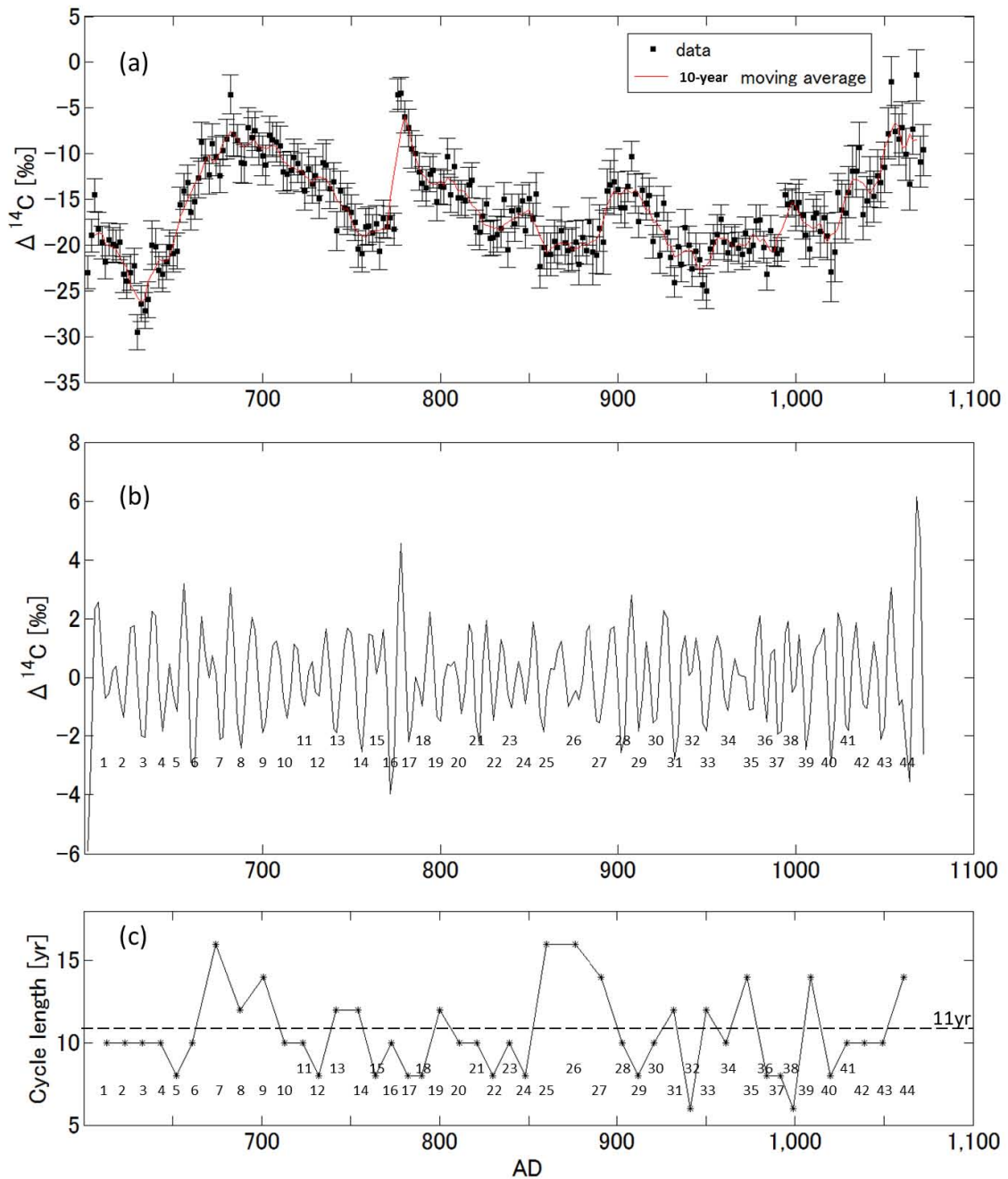


図2 (a)測定データの合成値とその10年移動平均 (b)7-18年バンドパスフィルター。グラフ中1-44までの数字は、サイクル番号を示す (c)パネル(b)で示された各サイクルの周期長

Fig.2 (a) Measured  $^{14}\text{C}$  content (squares with error bars) and 10-year moving average (line) (b) Filtered  $\Delta^{14}\text{C}$  record of the present result for a frequency band of  $1/18$ - $1/7$   $\text{yr}^{-1}$ . A figure for each peak represents the cycle number. (c) Length of each cycle assigned in the panel (b).

#### 4. 考察

バンドパスフィルターの結果を見てみると、44サイクルの周期長の平均は10.5年で、6-16年までのあいだでばらついているのがわかる。最近250年間の黒点周期の平均は約11年であることから、7-11世紀の太陽活動周期は現代とほぼ等しいことが推測できる。図2(c)で、11年よりも長い周期はいくつか見られるが、3周期以上連続しているのは、サイクル7-9と、25-27である(それぞれ



のサイクル周期長が独立であるとする、12年以上が3周期続く確率は1/27)。ここで注目したいのは、サイクル7-9については7世紀後半極小期に対応していることである。12年以上の周期が3回以上連続している期間が極小期に偶然一致しているとは考えにくい。7世紀後半極小期について詳しい周期を調べるために、ウェーブレット変換[17]を行った(AD602-750)。7世紀後半極小期を含む期間の測定データとウェーブレット変換結果を図3に示す。

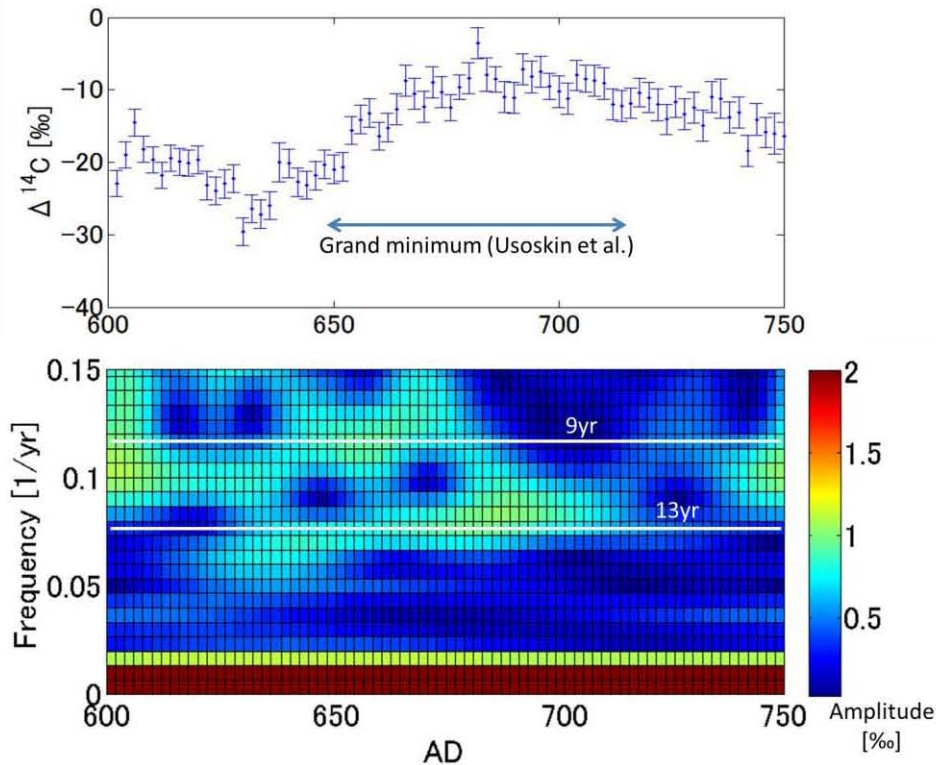


図3 AD602-750年の $\Delta^{14}\text{C}$ 時系列データ(上)とそのウェーブレット変換結果(下)。2本の横線は9年、13年に対応する。

Fig.3 Present data of  $\Delta^{14}\text{C}$  from 602 to 750 AD (top) and its results of wavelet analysis (bottom). The horizontal lines correspond to 1/9yrs and 1/13yrs (bottom).

まずAD602-750年のウェーブレット変換結果を見てみると(図3下)、7世紀後半極小期が始まる前には10年程度の周期であったのが、極小期が始まると約9年と13年の2つの周期に分かれている。さらに、極小期の終わりごろには13年のみに変化しており、周期の伸びが確認された。7世紀後半極小期はUsoskinによってマウンダー型と定義されている。マウンダー型における周期の伸びは、マウンダー極小期、BC4極小期に次いで3例目の発見である。さらに3つの極小期の振幅と周期長の伸びとの間に相関傾向があることが明らかになった(マウンダー極小期の振幅を1とした場合、7世紀後半極小期; 振幅0.7・周期13年、マウンダー極小期; 振幅1・周期14年、BC4極小期; 振幅2.4・周期16年)。また、極小期の始まりで9年と13年が混在しているが、このような特徴はBC4世紀にも共通してみられる[10]。もし、極小期の初期に2つの周期フェーズが共存しているのが事実であるなら大変興味深い現象といえる。

シュペーラー極小期については、今までの測定から周期長の伸びは確認されていない(もしくは、極小期が始まる前段階で伸びている)。ただシュペーラー型極小期はマウンダー型と比べると数も少なく、さらに継続期間が非常に長いことからいくつかの極小期の複合型、もしくは原因のメカニズムがマウンダー型とは異なることが考えられている(Usoskin[7], Miyahara[13])。今後シュペー

ラー型 (BC7 世紀) 極小期についても高精度な測定を行い、詳しく調べていく予定である。

## 5. まとめ

AD602-1072 年の年輪中  $^{14}\text{C}$  濃度の測定を分解能 2 年で行った。同じ年の複数回測定によって得られた合成誤差は平均 2.1% である。測定データの周期解析(バンドパスフィルターによる)結果より、12 年以上のサイクルが、7 世紀後半のマウンダー型極小期に 3 サイクル連続していることが明らかになった。ウェーブレット変換においてもこれらの周期の伸びは確認され、13 年程度の連続周期が検出された。

マウンダー型極小期での周期長の伸びは、今までに測定されたマウンダー極小期 (14 年)、BC4 極小期 (16 年) に次いで、今回の 7 世紀後半極小期で 3 例目である。また 3 つの極小期の振幅と周期長の伸びとの間に相関傾向があることが明らかになった。さらに、7 世紀後半極小期の始まりで 9 年と 13 年が混在しているが、このような特徴は BC4 世紀にも共通してみられるため、極小期の初期に 2 つの周期フェーズが共存している可能性がある。

今後さらに多くの極小期を測定し、極小期の継続期間、振幅、また周期などの間の関係を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] Hoyt, D.V. and Schatten, K.H., 1998, *Solar Phys.*, 181, 491.
- [2] Stuiver, M., et al., 1998, *Radiocarbon*, 40, 1127.
- [3] Eddy, J.A., 1977, *Clim. Change.*, 1, 173.
- [4] Stuiver, M., et al., 1980, *Science*, 207, 11.
- [5] Voss, H., et al., 1996, *J. Geophys. Res.*, 101, 15637.
- [6] Goslar, T., 2003, in: *PAGES News (Past Global Changes)*, 11(2-3), 12.
- [7] Usoskin, I.G., et al., 2007, *A&A*, 471, 301.
- [8] Stuiver, M., et al., 1989, *Nature*, 338, 405.
- [9] Miyahara, H., et al., 2004, *Solar Phys.*, 224, 317.
- [10] Nagaya, K., et al., 2012, submitted to *Solar Phys.*
- [11] Lassen, K., et al., 1995, *Atmos. Terr. Phys.*, 57: 835.
- [12] Soon, W. H., et al., 1994, *Solar Phys.*, 154: 385.
- [13] Miyahara, H., et al., 2010, *J. Cosmology*, 8, 1970.
- [14] 桑名宏輔 他, 2006, 名大 AMS 業績報告書(XVII) 50.
- [15] 毛受弘彰 他, 2005, 名大 AMS 業績報告書(XVI) 65.
- [16] Stuiver, M. and Polach, H.A., 1977, *Radiocarbon*, 19, 355.
- [17] Stockwell, R.G., 1996, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 44, 998.