

¹⁴C 濃度測定による過去二千年の太陽活動変遷の研究

増田公明¹⁾・永治健太郎²⁾・北澤恭平²⁾・毛受弘彰²⁾・宮原ひろ子³⁾・中村俊夫³⁾

1) 太陽地球環境研究所

2) 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻

3) 年代測定総合研究センター

1. はじめに

太陽活動は、黒点数の変動に顕著に現れているように、平均 11 年の周期でその活動の強弱を繰り返し（シュワーベ・サイクル）太陽磁場極性の反転を考慮すると 22 年周期で変動している（ヘール・サイクル）さらに、数百年の長期的なスケールでも太陽活動にダイナミックな変化がみられ、特に太陽活動が極端に低下する数十年～百年以上の規模の極小期（grand minima）と呼ばれる時期が度々存在していたことが明らかになっている。このような太陽活動が過去にどのような周期性を持っていたかを知るとは、太陽活動変動のメカニズムを知る上できわめて重要であり、また太陽活動の将来の変動を予測するためにも必要である。我々は放射性炭素 ¹⁴C を利用して過去の太陽活動を知ろうとしている。ここではこれまでどこまで解明されているかを述べる。

2. 太陽活動と放射性炭素

放射性炭素 ¹⁴C は、太陽圏の外から飛来する銀河宇宙線と地球大気原子核との相互作用によって生成される。銀河宇宙線はほとんどが荷電粒子であるので、太陽圏に進入してから地球大気に到達するまでに、惑星間空間磁場による変調を受ける。惑星間空間磁場は太陽から放出されるプラズマ風（太陽風）によって太陽磁場が惑星間空間に引き出されたものであり、惑星間空間磁場の強弱や擾乱の大きさは太陽活動の強弱と正の相関をもつ。すなわち、太陽活動が活発な時期には惑星間空間磁場が強く、ゆらぎも大きいので、宇宙線は散乱されて地球に到来する宇宙線強度が減少する。逆に、太陽活動が静穏な時期には地球に到来する宇宙線強度は増加する。このように、太陽活動の強弱と地球に到達する宇宙線強度は逆相関の関係にある（図 1）。

銀河宇宙線は、大気上層における大気原子核との核破砕反応及び引き続き発生する種々の反応により二次宇宙線を生成する。このうち、熱化した中性子は窒素原子核に捕獲され放射性炭素 ¹⁴C を生成する。¹⁴C は酸化されて ¹⁴CO₂ となり、安定同位体から成る ¹²CO₂、¹³CO₂ とともに地球の炭素循環システムに含まれる。そしてその一部が光合成によって樹木に取り込まれる。したがって、年輪中の ¹⁴C 濃度は、それが形成された年の大気中 ¹⁴C 濃度、つまり宇宙線や太陽磁場活動の強度を反映したものとなる。

図 2 に過去 1000 年間の放射性炭素濃度の変動（10 年値）[Stuiver et al., 1998a] と、望遠鏡による観測から得られた太陽黒点数の変化 [Hoyt and Schatten, 1998] を示す。太陽活動は過去においても 11 年変動をしていたことがわかるが、詳しく見るとその周期長は少しずつ変化している。また 17 世紀後半には黒点がほとんど現れなかった時期がある。これはこの時代に太陽活動がきわめて弱かったことを示しており、マウンダー極小期と呼ばれている。同じような極小期が AD1800 年頃にも見られ、ダルトン極小期と呼ばれている。このような数十年規模の極小期は放射性炭素の変動にも現れており、大気中の放射性炭素濃度が太陽活動の変動を表すよい指標であることがわかる。

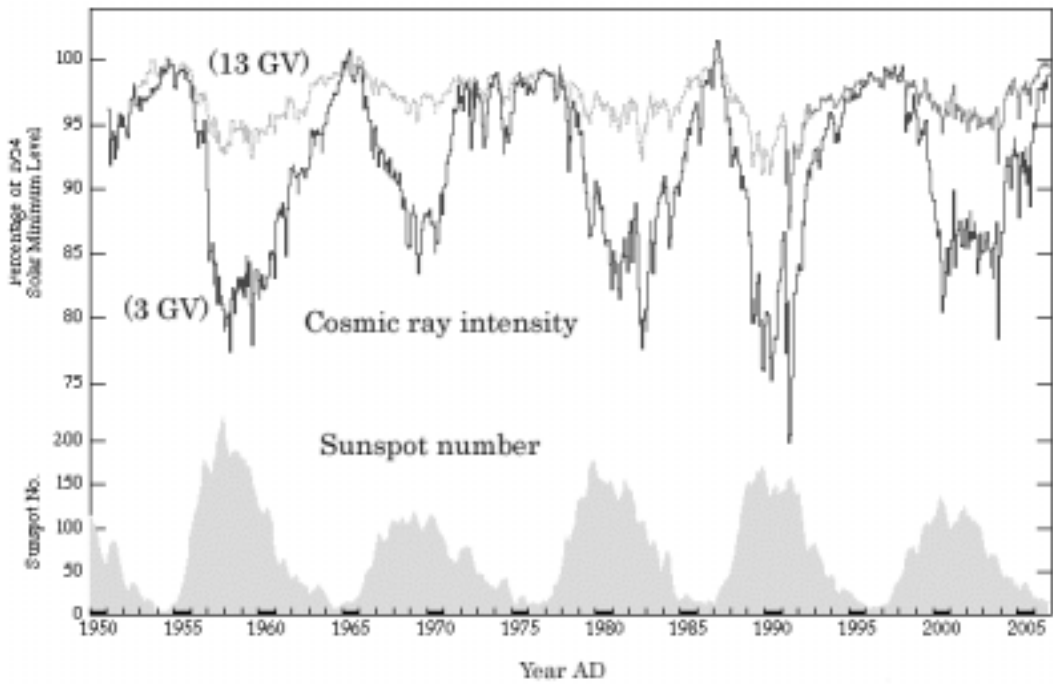


図1 最近50年間の太陽活動と宇宙線強度の変動 [Univ. of New Hampshire, 2007]

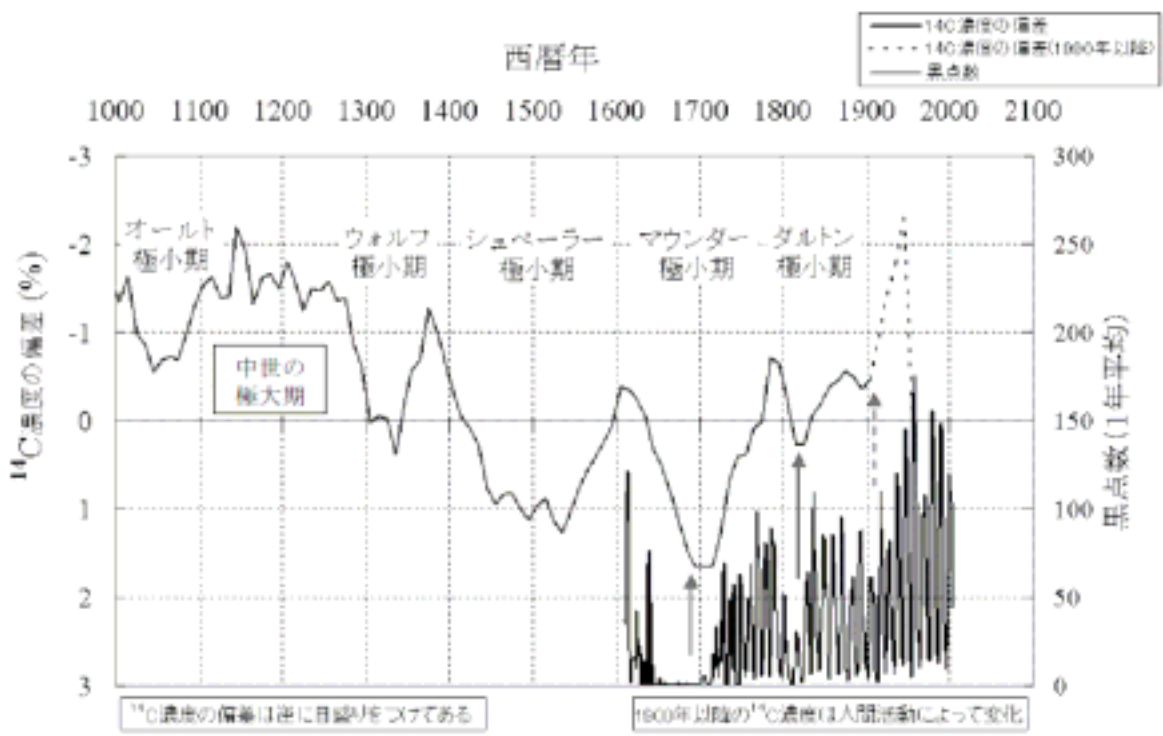


図2 過去1000年の放射性炭素濃度変動[Stuiver et al., 1998a]と過去400年の太陽黒点数の変化 [Hoyt and Schatten, 1998]

図3は過去1万2千年間の大気中放射性炭素濃度の変動を年代に対して示したものである [Stuiver et al., 1998a]。この図において千年オーダーの変動は、地磁気強度の変化 [Yang et al., 2000] が地球大気に進

入する宇宙線量すなわち放射性炭素濃度を変動させたためであると考えられている。この長期トレンドを取り除いた放射性炭素濃度の変化は数十年～百年程度継続するピークが何度も現れたことを示している。この放射性炭素濃度の増加が太陽活動によるものだとすれば、マウンダー極小期のような太陽活動極小期が過去に何度も現れたことを意味している。

マウンダー極小期（1645 – 1715 年）は、太陽黒点がほとんど現れなかった期間であるから、この時期に太陽が 11 年の周期的な活動を継続していたかどうかは、太陽黒点のデータからは明らかではない。そこで我々は放射性炭素濃度の変動を詳しく調べることによってマウンダー極小期をはじめとする太陽活動極小期にシュワーベ・サイクルがどうなっていたかを解明しようとしている。

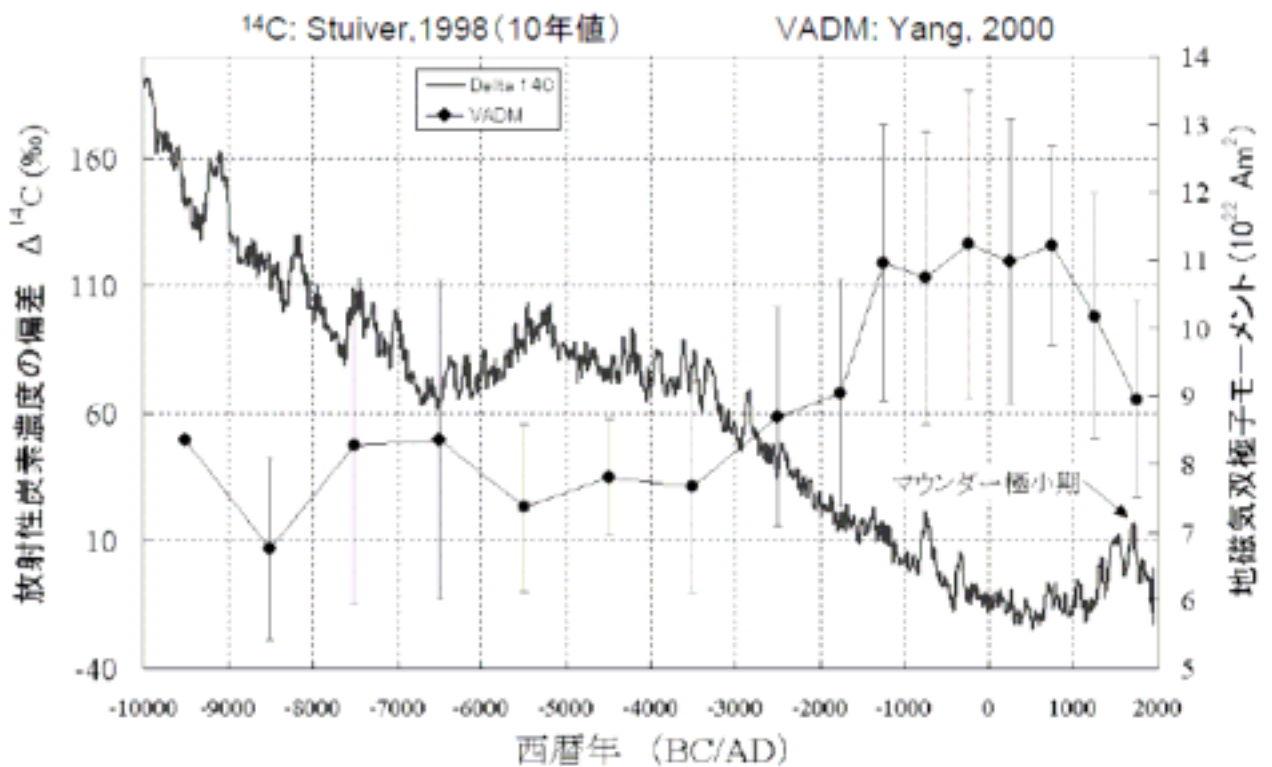


図3 過去1万2千年の¹⁴C濃度変動 [Stuiver et al., 1998a] と地磁気変動 [Yang et al., 2000]

3. 方法

過去の太陽活動の 11 年変動を調べるためには、既知の年代の樹木年輪に含まれる放射性炭素濃度を 1 - 2 年の時間分解能で測定する必要がある。本研究で使用した樹木試料は、樹齢約 400 年の室生寺の杉（1998 年採取、図 4(a)）、樹齢約 710 年の屋久島の杉（1991 年採取、図 4(b)）及び樹齢約 2000 年の屋久杉（1956 年採取、図 4(c)）である。いずれの試料も年輪年代法により生育年代を確認、決定した [Kimura, 2003]。これらの樹木について年輪を 1 年ごとに削りだし、その 1 年分の年輪試料からのセルロース成分の抽出、二酸化炭素の生成及び精製、測定用グラファイト・ターゲットの調製を行った。

放射性炭素濃度は、名古屋大学年代測定総合研究センターのタンデトロン加速器質量分析計（AMS）[Nakamura et al., 2000] を用いて測定した。測定スキームは AMS 標準の方法に従い、放射性炭素濃度の絶対値は NEW-NIST 蔞酸標準試料を用いて決定した [Stuiver and Polach, 1977]。測定精度は 0.3-0.5 % であった。測定した年代は AD880-964 年（毎年）、AD1413-1554 年（毎年）、AD1555-1750（隔年）である。

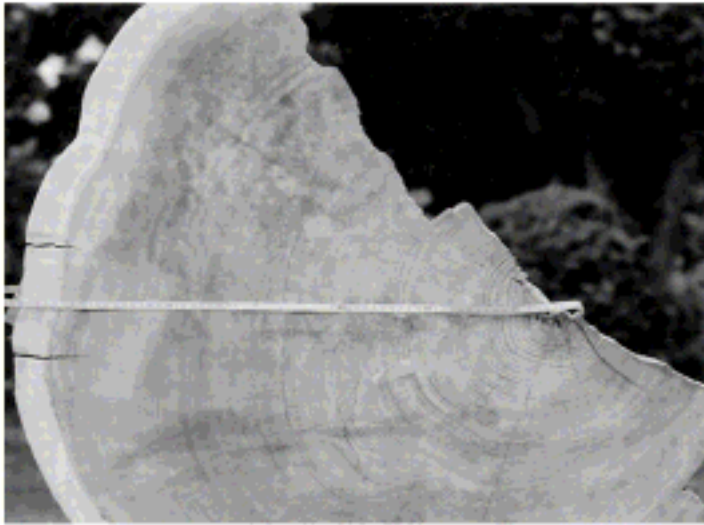


図4(a) 室生寺の杉
半径 60cm
樹齢 392年
1998年採取

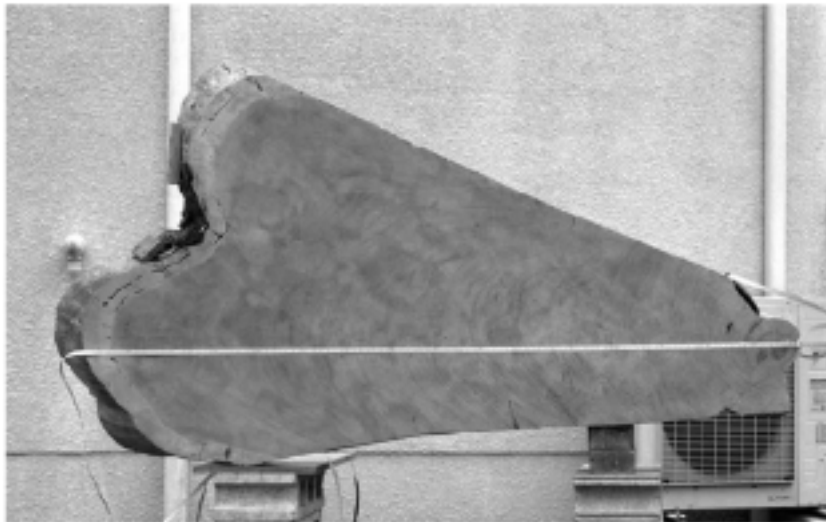


図4(b) 屋久島の杉
半径 1.7m
樹齢 712年
1991年採取

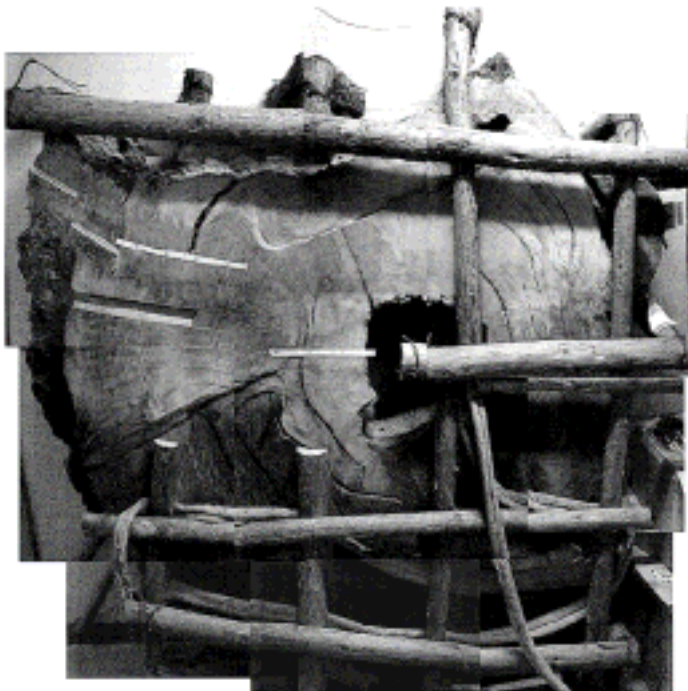


図4(c) 屋久杉
半径 1.3m
樹齢約 2000年
1956年採取

4 . 測定結果と考察

特徴的な年代ごとに放射性炭素濃度の測定結果を述べ、太陽活動の周期性に関して考察する。

4.1. マウンダー極小期 (AD 1645 - 1715 年)

マウンダー極小期に関しては、すでに Stuiver ら [Stuiver and Braziunas, 1993; Stuiver et al., 1998b] や Kocharov ら [Kocharov et al., 1995] による 1 年ごとあるいは隔年の測定がなされているが、彼らの結果は大きく食い違っている。我々が隔年で測定した結果 [Miyahara et al., 2004] は Stuiver らのデータ [Stuiver et al., 1998b] にほぼ一致し、この期間の大気中放射性炭素濃度のデータを確定することができた。周期解析の結果も我々の結果と Stuiver らの結果はほぼ一致する。互いに独立な雑音成分を消去するために両者のクロス・スペクトルをとったところ、図5のような結果が得られ、マウンダー極小期に、太陽活動が 11 年ではなく、14 年周期で変動していたことがわかった [Miyahara et al., 2004]。このことは、太陽が、極小期という、その活動の度合いが弱くなった時でも、シュワーベ・サイクルのような周期変動が残っていたことを示している。これは黒点数の観測では得られない情報である。また 14 年周期が見られる直前には 11 年周期の振幅が非常に弱くなっている。すなわち太陽活動が極小期のフェーズに入ると、まず通常の 11 年周期の振幅が弱くなり、次に周期長の長い成分が現れ、そして再び 11 年周期に戻る、という変化が見られる。14 年周期は太陽活動の長期的な変動と周期長の関連を示唆するものである。

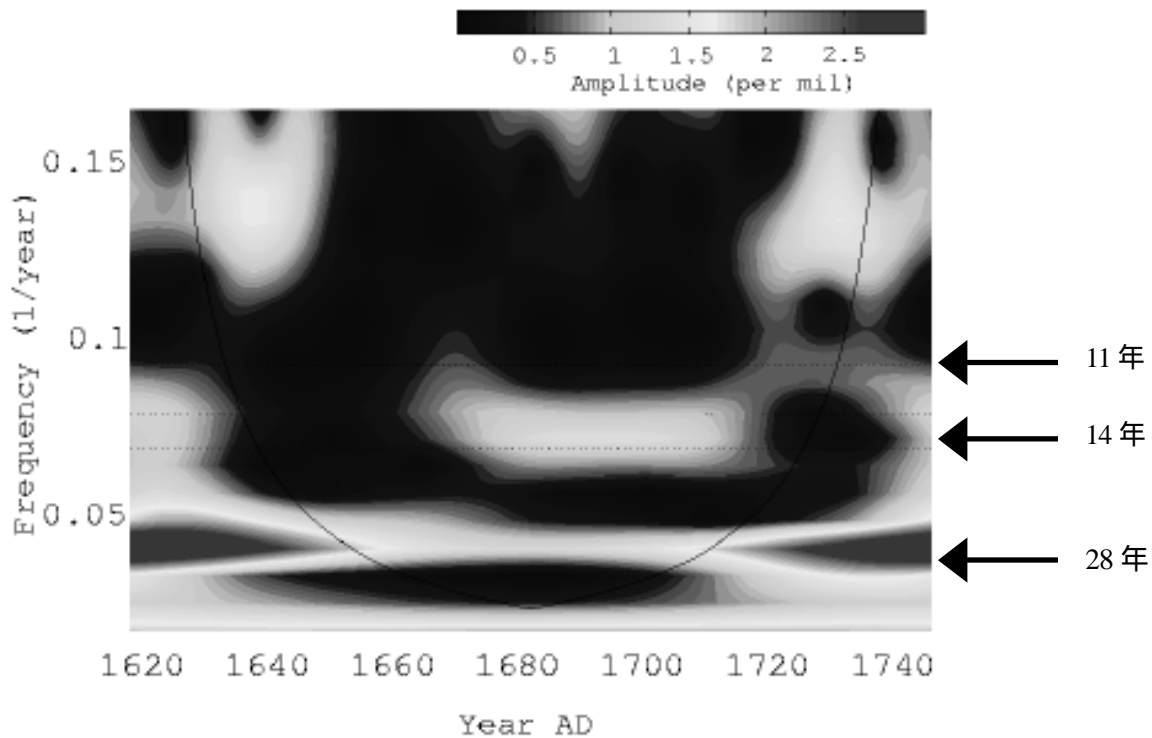


図5 マウンダー極小期における放射性炭素濃度の周期性 (Wavelet 解析) 我々のデータと Stuiver らのデータとのクロス・スペクトルをとっている。 [Miyahara et al., 2004]

4.2. シュペラー極小期 (AD 1416 - 1534 年)

シュペラー極小期における太陽活動の変動を 1 年ごとの高時間分解能で復元し、太陽活動周期についての解析を行った [Miyahara et al., 2006]。その結果は図6の通りである。シュペラー極小期においても太陽活動の周期的な変動は持続していたことが明らかになった。しかし、シュワーベ・サイクルの周期長はほぼ 11 年であり、マウンダー極小期の 14 年とは異なる結果となった。太陽活動と周期長の関

係については、極小期によって太陽活動の変動パターンが異なる可能性も考えられる。ただ、極小期中頃では11年周期の振幅が弱くなっており、この点はマウンダー極小期と類似している。

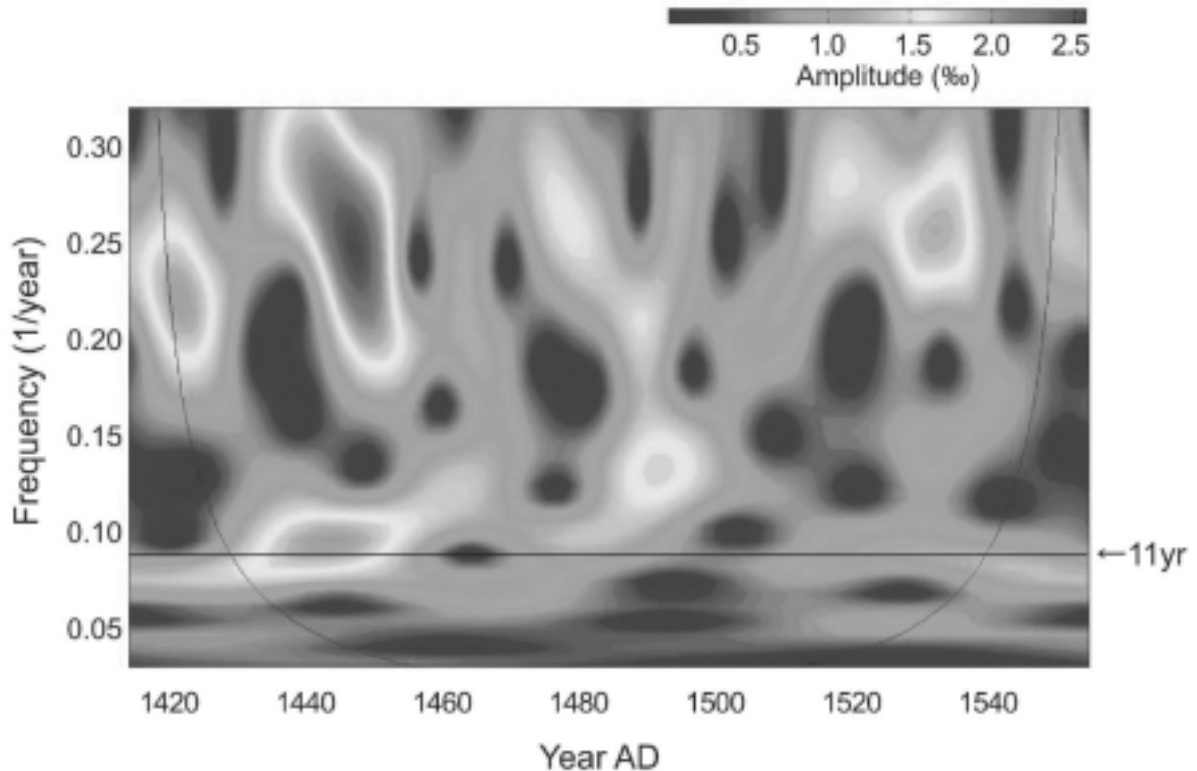


図6 シュペラー極小期における放射性炭素濃度の周期性 (Wavelet 解析) [Miyahara et al., 2006]

4-3. 極小期の間の通常期 (AD 1555 - 1615 年)

シュペラー極小期とマウンダー極小期の間である1555年から1615年までの年輪試料について放射性炭素濃度を隔年で測定した [Miyahara et al., 2007]。これにより極小期のデータと合わせて、シュペラー極小期とマウンダー極小期を含む1413年から1745年までの333年間の連続したデータが得られたことになる (一部隔年)。測定誤差は平均2.3%である。我々の測定結果はStuiverら [Stuiver et al., 1998b] の1年値と比較して測定誤差の範囲内で一致していると言えるが、系統的にずれている年代もある。平均して、我々の ^{14}C 濃度の値はStuiverらに比べて3%程度低くなっている。この測定データの時系列に対して周期解析を行った。その結果、極小期の間の期間 (AD 1555-1615年) に対して、離散フーリエ変換による周期解析で8.9年~10.3年の周期と20.7年の周期が3程度の有意性で見られた。さらに今回の測定期間を含む我々の全測定結果 (1413-1745年) に対して、ウェーブレット変換を用いた時間-周波数解析を行った。その結果1555-1615年の期間で8-11年の周期と19-23年の周期が強く見られた。それぞれ11年前後の周期とその倍周期である22年前後の周期が同時にみられることから、これらはそれぞれ太陽活動のシュワーベ・サイクルと、太陽磁場極性反転のハール・サイクルであると考えられる。この結果、二つの極小期間の太陽活動通常期においては“11年”のシュワーベ・サイクルがほぼ11年であったことがわかり、先に得られた極小期における周期性と対比させることができる。

4-4. 9-10世紀の期間 (通常期)

極小期以外の対象期間として、さらに9-10世紀 (AD880-964年) の1年ごとの測定を行った。Stuiver

らによる 10 年値のデータ [Stuiver et al., 1998a] と比較すると、我々の結果は平均約 3%低い。この系統的な違いはシュペーラー - マウンダー極小期間でも見られたものであり、欧米と日本の地域効果の存在を示唆しているように思われる。離散フーリエ変換を用いた周期解析では 8.5 年と 17 年の周期がそれぞれ 2 と 2.8 程度の有意性で強く見られる。ウェーブレット解析でも 8.5 年と 17 年の周期が、測定期間後半の AD920 年から 960 年頃に強く現れている。8.5 年に対して 17 年と、ちょうど倍周期が同時に現れていることから、それぞれ太陽活動のシュワーベ・サイクルとヘール・サイクルであると考えられる。測定期間前半の AD880 年から 920 年までの期間においては 10 年前後の周期が見られるが、周期の振幅は後半に比べて弱くなっている。この前半の期間は、マウンダー極小期ほどではないが ^{14}C 濃度のピークにあたり、太陽活動が若干弱くなっていた可能性がある。つまり、太陽活動が弱まっていたために、シュワーベ・サイクルの振幅は弱くなっていた(しかし、周期長は 10 年程度のままである)と解釈できる。逆に後半の期間は地磁気の影響を差し引いても、 ^{14}C 濃度の値が非常に下がっている期間であり、太陽活動が比較的活発であったために、周期長が約 9 年と短くなっていた可能性が考えられる。

5 . まとめ

樹木年輪中の ^{14}C 濃度を 1 年という高時間分解能で測定することにより、過去の太陽活動の周期性を調べることができる。これまでにマウンダー極小期とシュペーラー極小期という二つの顕著な極小期について太陽活動の周期性を調べた。その結果、同じ極小期でもマウンダー極小期とシュペーラー極小期では太陽活動変動の特性、特に周期長が異なるという結果が得られた。一方、この両極小期の間の期間や、9-10 世紀のような極小期ではない太陽活動通常期の周期長は 10-11 年を示している。また一部の年代では 9 年というやや短い周期長を示している。これらの時期には太陽活動が活発であった可能性がある。

これらの測定により、太陽活動の通常期においてシュワーベ・サイクル(“11 年”周期)は約 11 年の周期長ではっきりと現れていたことが明らかになった。加えて、太陽活動の変動と相関している可能性がある周期長の伸縮がみられ、太陽はこの 2000 年間には 8 年から 14 年も周期長を変化させるほどダイナミックに変動していることが明らかになった。このように、極小期や極大期といったさまざまな太陽活動の周期変動の特性をさらに確立することで、太陽の長期的な変動のメカニズム解明につなげることができると思われる。

参考文献

- Hoyt D. V. and K. H. Schatten (1998), Group sunspot numbers: A new solar activity reconstruction, *Solar Phys.*, *181*, 491-512.
- Kimura K. (2003), private communication.
- Kocharov G. E., V. M. Ostryakov, A. N. Peristykh and V. A. Vasil'ev (1995), Radiocarbon content variations and Maunder Minimum of solar activity, *Solar Phys.*, *159*, 381-391.
- Miyahara H., K. Masuda, Y. Muraki, H. Furuzawa, H. Menjo and T. Nakamura (2004), Cyclicity of solar activity during the Maunder Minimum deduced from radiocarbon content, *Solar Phys.*, *224*, 317-322.
- Miyahara H., K. Masuda, Y. Muraki, H. Kitagawa and T. Nakamura (2006), Variation of solar cyclicity during the Spörer Minimum, *J. Geophys. Res.*, *111*, A03103, doi:10.1029/2005JA011016.
- Miyahara H., K. Masuda, K. Nagaya, K. Kuwana, Y. Muraki and T. Nakamura (2007), Variation of solar activity from the Spörer to the Maunder minima indicated by radiocarbon content in tree-rings, *Adv. Space Res.*, to be published.

- Nakamura, T., E. Niu, H. Oda, A. Ikeda, M. Minami, H. Takahashi, M. Adachi, L. Pals, A. Gott dang, and N. Suya (2000), The HVEE Tandatron AMS system at Nagoya University, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.B*, 172, 52–57.
- Stuiver M. and H. A. Polach (1977), Discussion: Reporting of ^{14}C data, *Radiocarbon*, 19, 355-363.
- Stuiver M. and T. F. Braziunas (1993), Sun, ocean, climate and atmospheric $^{14}\text{CO}_2$: an evaluation of causal and spectral relationships, *The Holocene* 3,4, 289-305.
- Stuiver, M. et al. (1998a), INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24,000-0 cal BP, *Radiocarbon*, 40, 1041-1083.
- Stuiver M., P. L. Reimer and T. F. Braziunas (1998b), High-precision radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples, *Radiocarbon*, 40, 1127-1151.
- Univ. of New Hampshire (2007), Neutron monitors, http://ulysses.sr.unh.edu/NeutronMonitor/neutron_mon.html.
- Yang S., H. Odah and J. Shaw (2000), Variations in the geomagnetic dipole moment over the last 12000 years, *Geophys. J. Int.*, 140, 158-162.