

14C 濃度変動を用いた太陽活動の周期性の解析

桑名宏輔¹⁾・宮原ひろ子¹⁾・毛受弘彰¹⁾・永治健太郎¹⁾・増田公明¹⁾・村木綏¹⁾・中村俊夫²⁾

- 1) 名古屋大学太陽地球環境研究所
〒464-8601 名古屋市千種区不老町
TEL : 052-789-4323, FAX : 052-789-4313
E-mail : kuwana@stelab.nagoya-u.ac.jp
- 2) 名古屋大学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 11 年周期で盛衰を繰り返している(図 1)。太陽は従来、非常に安定した恒星であると考えられていたが、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盛衰がみられることが分かってきた。特に、太陽活動が極端に低下した極小期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きた。そのひとつであるマウンダー極小期(1645–1715 年)においては、太陽黒点がほとんど現れず、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は明らかではない。

我々は、宇宙線起源の放射性核種である ¹⁴C を用いて太陽活動極小期の研究を行ってきた。樹齢の長い樹木年輪中の ¹⁴C 濃度の測定を行い、マウンダー極小期とシュペーラー極小期(1415–1534 年)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てきた。その結果、両極小期において、太陽活動の周期的な変動は持続していて、“11 年”周期の周期長は、シュペーラー極小期においては約 11 年であったが、マウンダー極小期においては約 14 年と長くなっていたことが明らかになった(Miyahara et al., 2004, 2006)。これは、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り、さらに極小期によって太陽活動の変動のパターンが異なる可能性も考えられる。

本報告では、この可能性に対する議論を行うために、極小期以外の測定として、シュペーラー極小期とマウンダー極小期の間(1555–1615 年)と 9–10 世紀の期間(880–964 年)(図 2)の測定を行ったので、結果について報告する。

2. 太陽活動と ¹⁴C

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ため、太陽圏に突入してから地球大気に到来するまでに、惑星間空間磁場の影響で大きく変調を受ける。惑星間空間磁場は太陽から噴出されるプラズマ風(太陽風)によって、惑星間空間に太陽磁場が引き出されたものであるため、太陽活動の強弱と惑星間空間磁場の強弱の間には、正の相関が存在する。従って、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、地球に到来する宇宙線量が減少する。逆に、太陽活動が静穏な時期には地球に到来する宇宙線の量は増加する。このように、太陽活動の強弱と地球に到来する宇宙線の量は逆相関の関係を示している。

銀河宇宙線は、大気上層において大気原子核との核破砕反応により、二次宇宙線を生成する。このうち、熱中性子は、窒素原子核に捕獲され放射性炭素 ^{14}C を生成する。 ^{14}C は酸化され $^{14}\text{CO}_2$ となり、安定同位体から成る $^{12}\text{CO}_2$ 、 $^{13}\text{CO}_2$ とともに地球の炭素循環システム中を循環する。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 ^{14}C 濃度は、形成された年の ^{14}C 生成量、つまり太陽磁場活動の強度を反映したものとなっている。

図2に、過去2000年間の年輪中 ^{14}C 濃度の変動を示す。特に、過去1000年間には太陽活動が極度に低下した可能性のある ^{14}C 濃度の高い時期が数回存在しており、それぞれウォルフ極小期(1280-1340年)、シュペーラー極小期、マウンダー極小期、ダルトン極小期(1800-1820年)と呼ばれている。

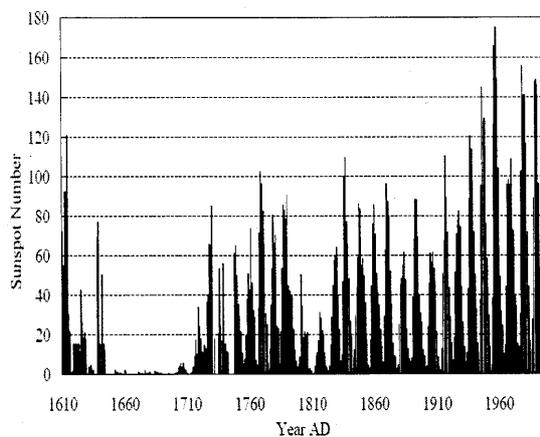


図1. 太陽黒点数の変動 (Hoyt,1998)

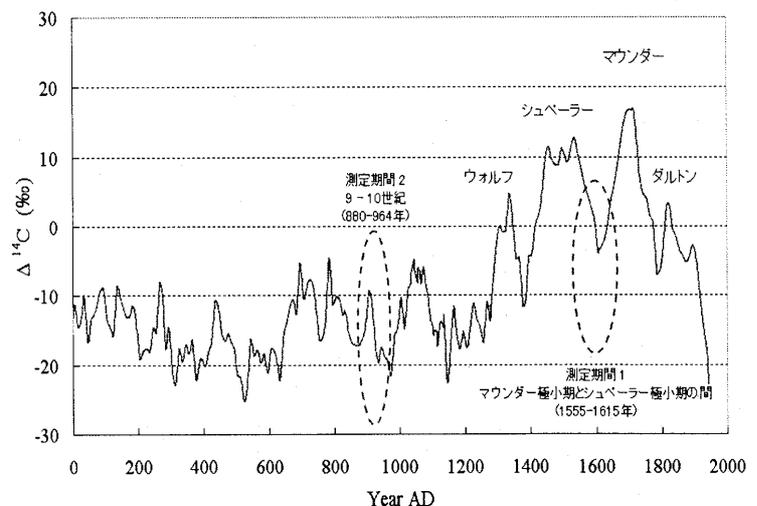


図2. 過去2000年間の放射性炭素濃度変動 (Stuiver,1998a)

3. 測定

本測定の測定試料として、屋久杉を用いた。シュペーラー極小期とマウンダー極小期の間の期間の測定においては、樹齢714年の屋久杉(図3)を、9-10世紀の期間の測定においては樹齢1895年の屋久杉(図4)を用いた。それぞれの屋久杉試料は、屋久島の中の別々の場所に生育していたものである。年輪の絶対年代については、年輪年代法によって決定した。樹木試料から年輪を1年ごとに剥離し、化学洗浄によって年輪間移動成分の除去を行い、セルロース成分のみを抽出する。セルロースを燃焼し、二酸化炭素にし、さらに水素還元によってグラファイトを生成した。以下に、調製手順について述べる。

1) 年輪の剥離

ブロック状に分割された木材試料の年輪を、カッターナイフを用いて年輪を1年ごとに剥離する。

2) 酸・アルカリによる洗浄

塩酸(1.2規定)と水酸化ナトリウム溶液(1.2規定)を用いて洗浄を行い、木片中の副成分等を除去する。

3) 塩酸酸性下亜塩素酸ナトリウムによる漂白

塩酸酸性下(1.2規定)で亜塩素酸ナトリウム(試料の量の約1.6倍量)による漂白を行い、リグニンを除去する。

4) 17.5%水酸化ナトリウムによる洗浄

17.5%水酸化ナトリウムによって洗浄し、ヘミセルロースを除去する。最後に蒸留水で試料に付着した薬品を洗い流し、オーブン（75℃）で一晩乾燥させる。

5) 二酸化炭素生成

9mmφバイコール管に約5mgのセルロースと約1gの線状酸化銅を入れ、真空ラインで排気した後に封管する。これを電気炉（850℃）にて3時間加熱し、セルロースを燃焼させ、二酸化炭素を得る。

6) 二酸化炭素の純化

真空ラインを用いて、燃焼時に生成した水や硫酸化物を除去するためにコールドトラップによる純化を行う。

7) 水素還元によるグラファイト生成

9mmφのバイコール管に炭素量の約1.5倍の質量の鉄粉を入れる。これに二酸化炭素の試料と炭素量の約2.1倍のモル数の水素を入れ封管する。これを電気炉（620℃）で6時間加熱し、グラファイトを生成する。

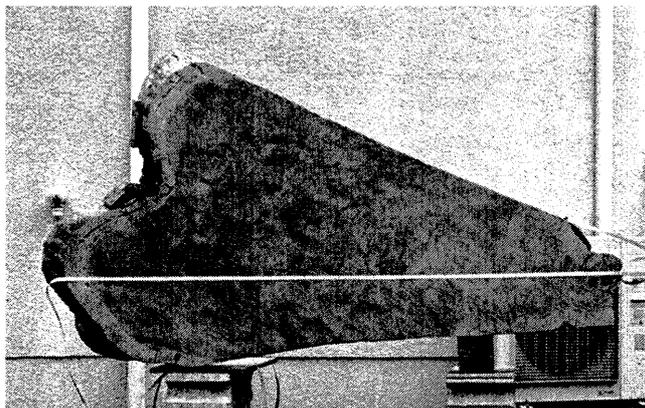


図3. 屋久杉試料 B (樹齢 714 年)

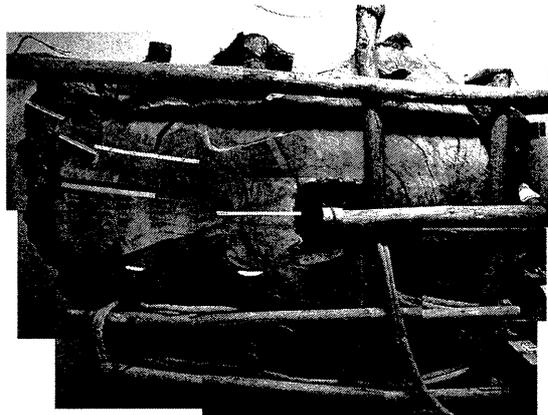


図4. 屋久杉試料 A (樹齢 1895 年)

4. 測定結果

4.1 シュペーラー極小期とマウンダー極小期の間の期間

今回の測定によって、これまで測定されたデータと合わせて、シュペーラー極小期とマウンダー極小期を含む、1413年から1745年までの連続したデータが得られたことになる。これを図5に示す。今回測定した期間は、1555年から1615年までであり、測定は隔年で行った。測定誤差は平均2.3%である。我々の測定結果はStuiverらの1年値(Stuiver,1998b)と比較して測定誤差の範囲内で一致しているが、 ^{14}C 濃度の絶対値は平均3%程度低くなっている。

この測定データから、マウンダー極小期とシュペーラー極小期の間の太陽活動通常期における太陽活動の周期変動を調べるために、周期解析を行った。まず、離散フーリエ変換を用いた周期解析結果を、図6に示す。その結果、8.9年～10.3年の周期と20.7年の周期が、今回の測定範囲(1555-1615年)において見られた。モンテカルロシミュレーションを用いた周期の統計的有意性は、どちらも 3σ 程度となっている。

次に、フーリエ変換による周期解析結果から得られた周期が、どのように時間的に変動しているかをみるために、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結果を図7に示す。結果より、8-11年の周期と19-23年の周期が、今回の測定期間全体にわたって強く見られる。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、それぞれ太陽活動の“11年”周期と、太陽磁場の極性反転の“22年”周期であることが分かる。“11年”周期について詳しく見てみると、今回の測定期間の前半（1555-1577年）では約9年の周期長、後半（1587-1615年）では約11年の周期長で周期が現れている。今回の測定期間は、シュペーラー極小期とマウンダー極小期の間の太陽活動通常期と考えられる期間であり、通常期の期間において“11年”周期は、約11年の周期長で強く現れているということが言える。

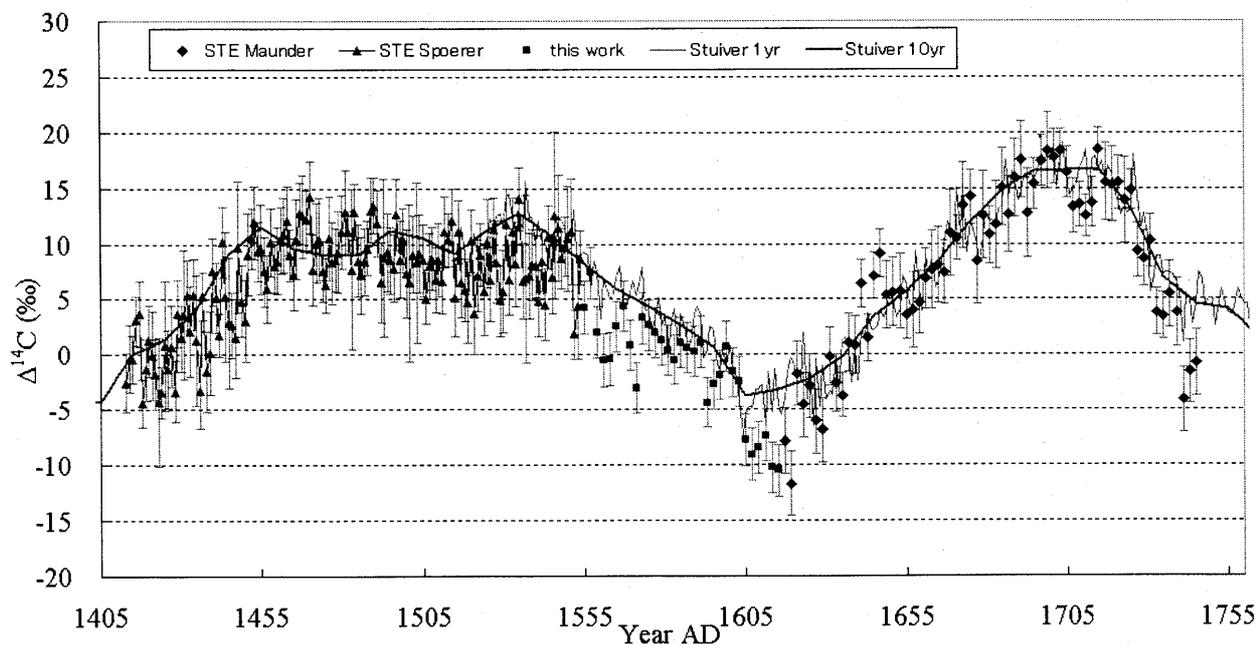


図5. 本研究による測定結果を含むこれまでの全測定結果（1413-1745年）

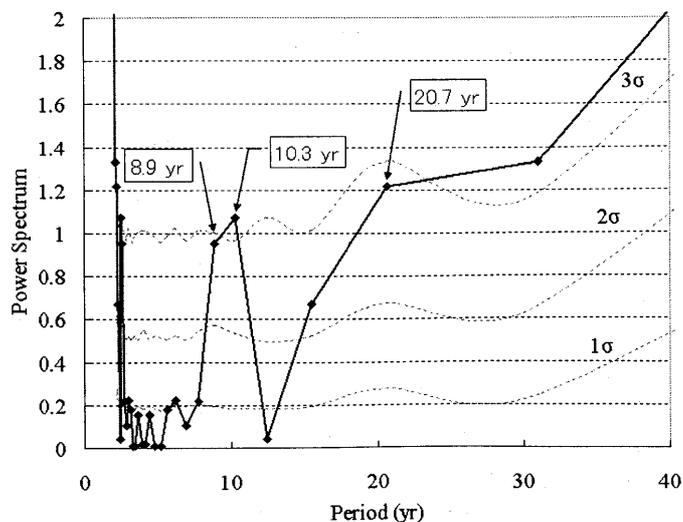


図6. 離散フーリエ変換による周期解析結果
（1555-1615年）

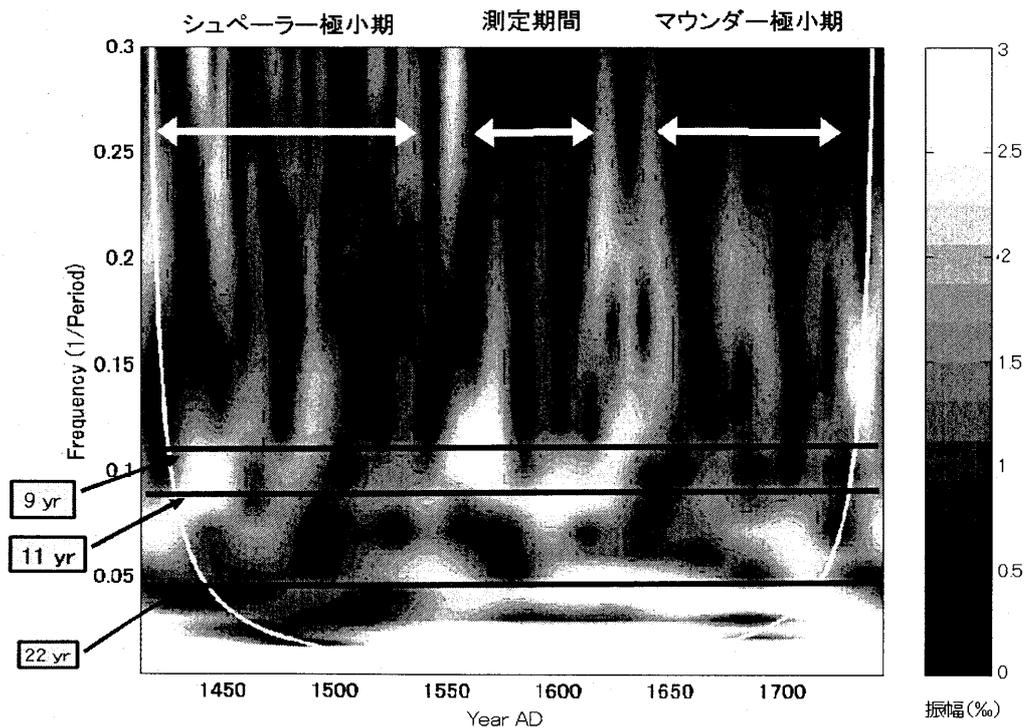


図7.本研究の測定結果を含むこれまでの我々の全測定結果（1413-1745年）に対するウェーブレット解析結果

4.2 9-10世紀の期間

極小期以外の測定として、さらに9-10世紀（880-964年）の測定を行った。9-10世紀の測定期間は、Stuiverらの10年値の樹木年輪中の ^{14}C 濃度の測定結果（図2）をみると、測定期間前半はシュペーラー極小期やマウンダー極小期ほど持続時間や変動の振幅も大きくないが、 ^{14}C 濃度のピークがみられる。この期間は太陽活動が短期的に弱まっていた期間であることが推測される。逆に後半は太陽活動が前半に比べ活発になっていたことが考えられる。このように今回の期間は短期間で太陽活動度が急激に変化した期間であり、周期長の変動をみるには非常に興味深い期間である。またこの期間は、石塚らにより、土埋木試料を用いた ^{14}C 濃度の測定が既に行われており（石塚 他, 2003）、データが比較できる点からみても都合が良い。

測定結果を図8に示す。測定期間は880年から964年で、1年ごとに測定を行った。比較のため、Stuiverらによる10年値のデータ（INTCAL98: Stuiver, 1998a）と、石塚らの土埋木のデータを同時にプロットしている。ただし、土埋木試料に関しては、年輪の正確な年代が決定されておらず、INTCAL98の測定データとの差が最も小さくなるように決定された年代を用いている（石塚 他, 2003）。我々の測定データと石塚らのデータを比較すると、同年代の試料については、石塚らの値の方が数%程度高い点があつかみられるものの、誤差の範囲においてよい一致がみられる。またINTCAL98のデータと我々の測定データを比較すると、誤差の範囲で一致しているが、我々の値の方が全体に平均3%程度低い。

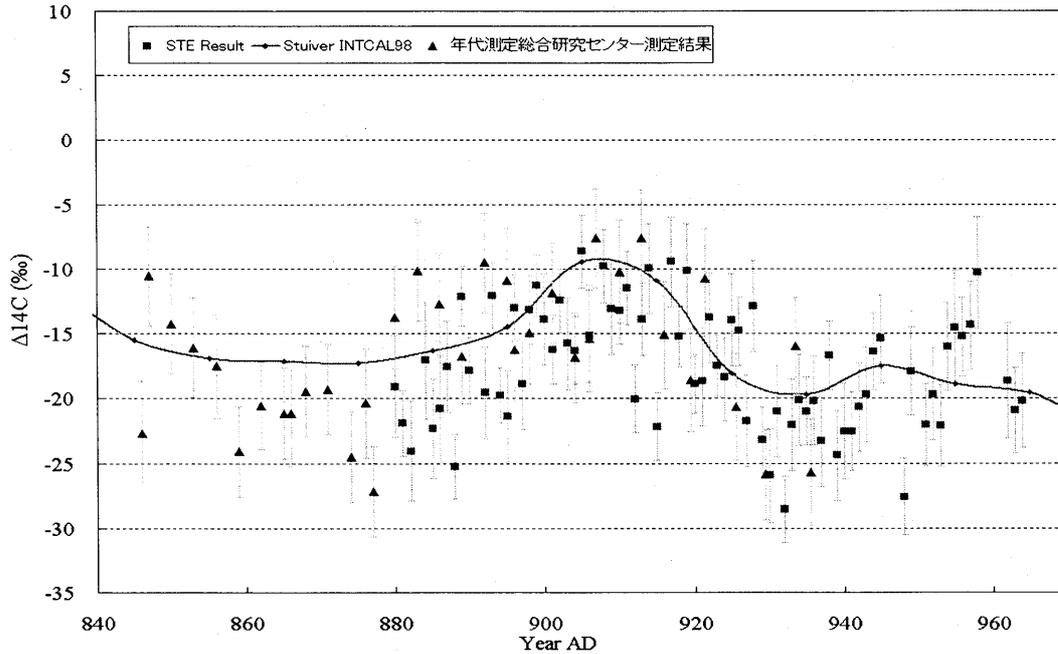


図8. 測定結果 (880 - 964 年)

測定データについて、離散フーリエ変換を用いた周期解析結果を図9に示す。結果より、8.5年と17年の周期がそれぞれ、 2σ 、 2.8σ 程度の統計的有意性で強く現れている。さらに、ウェーブレット解析を用いた時間-周波数解析を行った結果を図10に示す。離散フーリエ変換を用いた周期解析によって得られた8.5年と17年の周期が、測定期間の後半、920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“11年”周期と“22年”周期であると考えられる。測定期間の前半の880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弱くなっている。この前半の期間は、 ^{14}C 濃度のピークにあたり、太陽活動が若干弱まっていた期間と一致する。つまり、太陽活動が弱まっていた為に、“11年”周期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、INTCAL98のデータに見られるように、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、太陽活動が活発であった為に、周期長が約9年と短くなっていた可能性が考えられる。

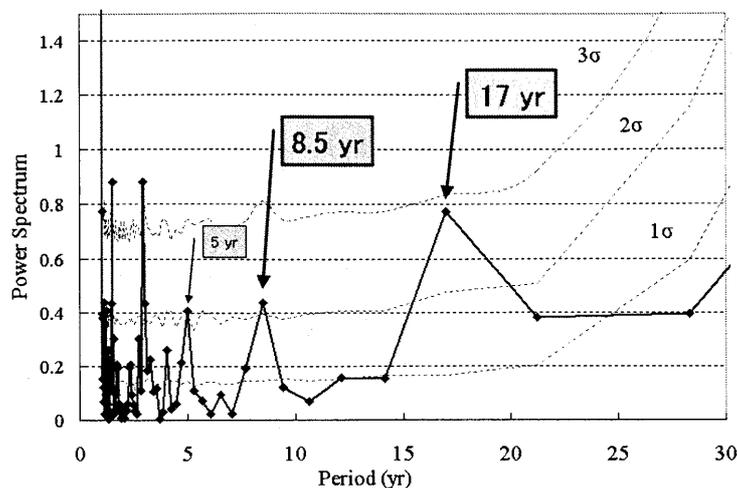
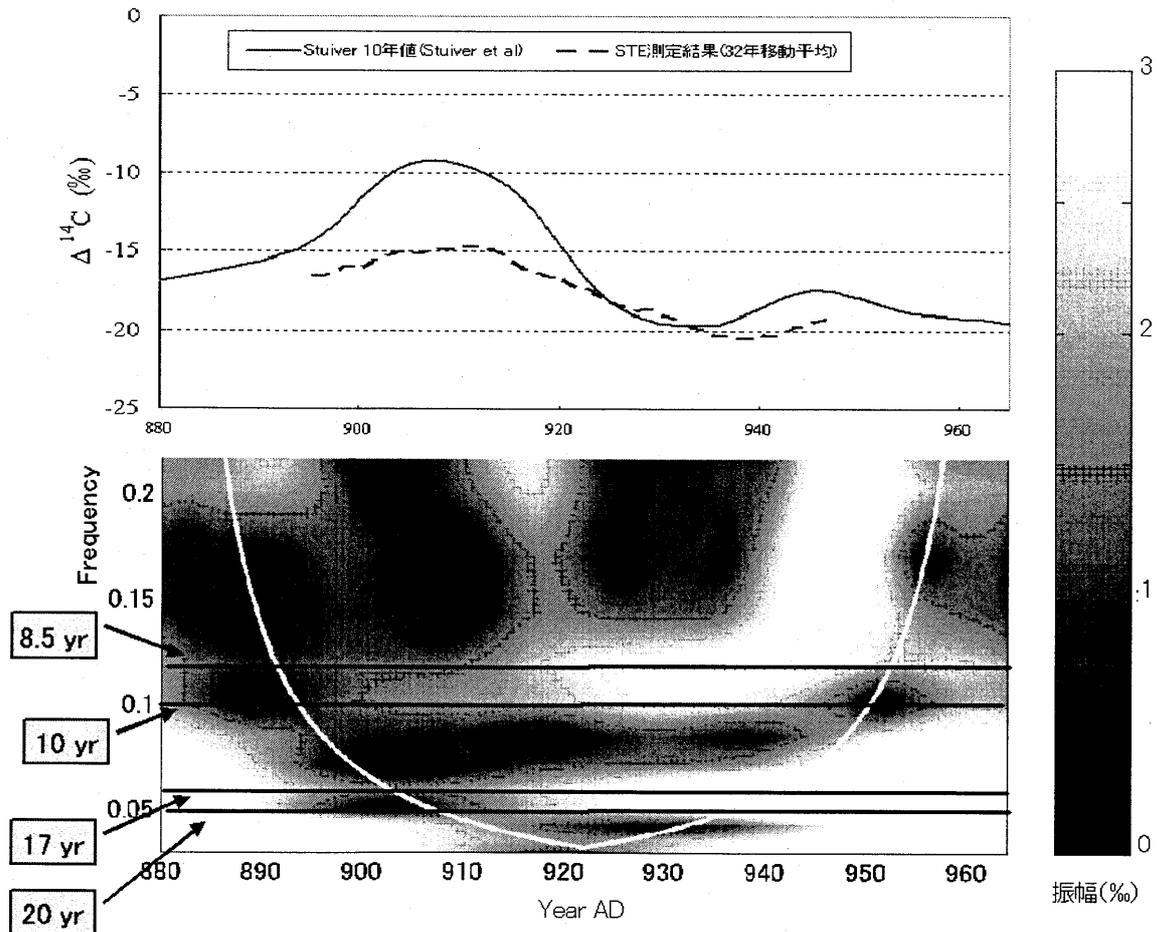


図9. 離散フーリエ変換による周期解析結果 (880-964年)

図11. ウェーブレット変換による周期解析結果と ^{14}C 濃度変動のトレンド

5. まとめ

我々は、樹木年輪中の ^{14}C 濃度を1年値で測定し、これまでマウンダー極小期とシュペーラー極小期における太陽活動の周期性について調べてきた。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太陽活動の変動の特性、特に周期長が異なるという解析結果が得られていた。この結論の信頼性を高め、さらに太陽活動度と周期長の関連性について詳細に調べるために、極小期以外の太陽活動通常期の期間における ^{14}C 濃度の測定を行った。測定期間としては、シュペーラー極小期とマウンダー極小期の間の期間 (1555-1615年) と9-10世紀の期間 (880-964年) を選択し、それぞれ隔年と1年ごとに測定を行った。その結果、マウンダー極小期とシュペーラー極小期の間の通常期と考えられる期間において、“11年”周期は本来の約11年の周期長でみられた。この結果は我々のこれまでの周期解析から得られた、マウンダー極小期とシュペーラー極小期に関する周期長の違いの可能性を裏付けるものである。また、9-10世紀の期間では、“11年”周期は前半 (880-920年頃) においては約10年の周期長で、後半 (920-960年頃) においては約9年の周期長で現れている。さらに前半は“11年”周期は弱くなっており、この期間は ^{14}C 濃度のピークがみられる期間と一致し、短期間で太陽活動が若干弱まっていたと考えられる。また、後半の期間は、逆に ^{14}C 濃度が非常に下がっている期間と一致し、太陽活動が活発であった為に、周期長が約9年と短くなっていた可能性がある。

以上、今回の測定結果より、太陽活動の通常期において、“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分かった。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期の周期変動の特性を確立することで、太陽の長期的な変動のメカニズムを解明することができると期待される。

謝辞

本研究を進めるにあたり、名古屋大学年代測定総合研究センターの皆様には多くのご指導、ご協力を頂きました。福島大学の木村勝彦先生には屋久杉の年輪年代決定のために、年輪幅解析を行って頂きました。この場を借りて深く御礼申し上げます。

本研究の一部は、文部科学省研究拠点形成費補助金(21世紀COEプログラムNo.G-4「太陽・地球・生命圏相互作用系の変動学」)、日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究B、代表者:増田公明、課題番号14340071)および日本学術振興会科学研究費補助金(特別研究員奨励費、代表者:宮原ひろ子)を用いて行われました。

参考文献

- Hoyt,D.V.,et al., 1998,Solar Physics, 179, 189-219
Miyahara,H.,et al., 2004,Solar Physics,224,317-322
Miyahara,H.,et al., 2006,Journal of Geophysical Research,(in press)
Stuiver,M.,et al., 1998a,Radiocarbon,40,1041-1083
Stuiver,M.,et al., 1998b,Radiocarbon,40,1127-1151
石塚友希夫 他, 2003,名古屋大学加速器質量分析計業績報告書 (XIV)

Analysis of the periodicity of the solar activity deduced from ^{14}C content

Kosuke Kuwana¹⁾, Hiroko Miyahara¹⁾, Hiroaki Menjo¹⁾, Kentaro Nagaya¹⁾,
Kimiaki Masuda¹⁾, Yasushi Muraki¹⁾, Toshio Nakamura²⁾

- 1) Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan
Tel : +81-52-789-4323, Fax : +81-52-789-4313
- 2) Center for Chronological Research, Nagoya University

Abstract

Radiocarbon ^{14}C , which is one of cosmogenic radioisotopes, is a good index of solar activity. Investigation of the ^{14}C content in each tree ring gives information on the change of solar activity in the past. Variation of the ^{14}C content shows that grand solar minima, when the solar activity was extremely weak for several ten years or more, occurred many times in the past. The Maunder Minimum (1645-1720 AD), one of the grand solar minima in the last millennium, is well known to have had almost no sunspots, and then periodicity of solar activity cannot be seen. Therefore, we have investigated the periodicity of radiocarbon content in tree rings in order to clarify the characteristics of variation of solar activity during the grand solar minima. We have already obtained the ^{14}C records for 1413-1554 AD including the Spoerer Minimum and for 1617-1745 AD including the Maunder Minimum with annual time resolution by using Japanese cedar trees. As a result of frequency analysis of these radiocarbon records, we found that the Sun maintained periodic variation even if the minima. We found, however, the length of the "eleven-year" cycle during the Maunder Minimum was around 14 years and that during the Spoerer Minimum was around 11 years. This suggests that the cycle length is related to solar activity, and that the pattern of periodicity of solar activity for the type of grand solar minimum.

In order to clarify these possibilities, we have investigated periodicity of solar activity in periods other than the grand solar minimum by measuring the ^{14}C content in the period between the Maunder Minimum and the Spoerer Minimum (1555-1615 AD) and 9th-10th centuries (880-964 AD).

As a result, we found that the length of the "eleven-year" cycle during the normal period was around 11 years, which was expected from the modern solar activity. This result supports the difference in the cycle length in each solar minimum mentioned above. Furthermore, inverse correlation of the strength of solar activity and the cycle length is suggested. Our results should be a great clue as to the mechanism to which solar activity becomes weak and bases for studies of long-term solar periodic variations.

(学会発表)

宮原ひろ子, 毛受弘彰, 桑名宏輔, 増田公明, 村木綏, 中村俊夫 (2005), マウンダー極小期における太陽活動変動, 日本物理学会第 60 回年次大会 (野田) .

毛受弘彰, 桑名宏輔, 宮原ひろ子, 増田公明, 村木綏, 中村俊夫 (2005), 年輪中の放射性炭素測定による過去の超新星爆発同定の可能性 II, 日本物理学会第 60 回年次大会 (野田) .

宮原ひろ子, 増田公明, 村木綏 (2005), マウンダー極小期における太陽の磁場反転周期, 日本天文学会 2005 年春季年会 (日野) .

H. Miyahara, K. Masuda, H. Menjo, K. Kuwana, Y. Muraki and T. Nakamura (2005), Variation of solar activity during the grand solar minima deduced from radiocarbon content in tree rings, 29th Int. Cosmic Ray Conf. (Pune, India).

H. Menjo, H. Miyahara, K. Kuwana, K. Masuda, Y. Muraki and T. Nakamura (2005), Possibility of the detection of past supernova explosion by radiocarbon measurement, 29th Int. Cosmic Ray Conf. (Pune, India).

桑名宏輔, 宮原ひろ子, 永冶健太郎, 毛受弘彰, 増田公明, 村木綏, 中村俊夫 (2005), 樹木年輪中 C14 濃度変動を用いた太陽活動の周期性の解析, 日本物理学会 2005 年秋季大会 (大阪) .

増田公明, 宮原ひろ子, 中村俊夫 (2005), Long-term variation in solar activity and cosmic ray intensity deduced from radiocarbon 14C measurements, CAWSES workshop 2005 (名古屋) .

宮原ひろ子, 増田公明, 村木綏 (2005), Solar influence on the earth's climate since the Maunder Minimum, CAWSES workshop 2005 (名古屋) .

宮原ひろ子, 増田公明, 村木綏, 桑名宏輔, 永冶健太郎, 中村俊夫 (2005), 年輪中 14C による過去の太陽活動と惑星間磁場の変動, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 118 回講演会 (京都) .

H. Miyahara, K. Masuda, Y. Muraki (2005), Variation of solar activity and its effect on climate since the Spörer Minimum, 2005 AGU Fall Meeting (San Francisco, USA).