

年輪中 ^{14}C 濃度変動による過去 1200 年間における太陽活動周期の変化

宮原ひろ子¹⁾, 中村俊夫¹⁾, 永治健太郎²⁾, 北澤恭平²⁾, 増田公明²⁾, 村木綏²⁾

¹⁾ 名古屋大学年代測定総合研究センター
〒464-8601 名古屋市千種区不老町
TEL : 052-789-2579, FAX : 052-789-3092
E-mail : miyahara@nendai.nagoya-u.ac.jp

²⁾ 名古屋大学太陽地球環境研究所

1. はじめに

年輪やアイスコア中に含まれる宇宙線起源核種の濃度測定により、太陽活動には黒点の増減に見られる 11 年周期変動や磁場反転に見られる 22 年周期変動の他にも 88 年周期や 208 年周期などの長周期変動があることが分かってきている (Stuiver, 1980, 1989)。連続的な黒点の望遠鏡観測が開始された 17 世紀以降において、太陽活動の長期変動の影響が最も顕著に現れたのは西暦 1645-1715 年に起こったマウンダー太陽活動極小期である (Eddy, 1976) (図 1)。18 世紀以降、太陽は比較的定常な 11 年変動を見せているが、マウンダー極小期においては約 70 年間にわたり黒点がほとんど観測されなかった。極端な太陽活動の低下のため、地球は小氷河期に見舞われ (Mann, 1999)、穀物の収穫量の低下や伝染病の蔓延が引き起こされたとされている (櫻井, 1986, 1987)。このような太陽の長周期変動のメカニズムは未だ解明されておらず、また、そのような長期にわたる太陽活動の低下が地球の寒冷化を引き起こすメカニズムについても、様々な研究はなされているが未だ理解は得られていない。

そこで本研究では、太陽長期変動の物理メカニズムに迫るため、年輪中放射性炭素の濃度を 1 年毎に高精度で測定しマウンダー極小期のような無黒点期 (太陽活動極小期) や太陽活動活発期における太陽 11 年変動の特性を調べてきた。これまでに、マウンダー極小期(西暦 1645-1715 年)、シュペーラー極小期(西暦 1415-1534 年)についての測定を完了している。また、マウンダー、シュペーラー極小期間の太陽活動通常期や 9~10 世紀頃の太陽活動活発期についても同様な測定を行い、太陽 11 年/22 年変動の特徴の比較を行ってきた。

本稿では、2000 年度より 2006 年度までに得られた結果を総合し、過去約 1200 年間における太陽活動周期の特性の変化についてまとめる。

2. 太陽活動、宇宙線、 ^{14}C

放射性炭素は主に地球に飛来する高エネルギーの銀河宇宙線と地球大気との相互作用により生成される。生成された放射性炭素はすぐさま酸化され、二酸化炭素として大気圏、海洋圏、生物圏を循環し、その 1 部は光合成により年輪に取り込まれる。銀河宇宙線は太陽圏内において太陽風や惑星間磁場により変調を受けるため、地球への到来量は太陽磁場活動度の変化に応じて増減する。一般に、宇宙線の到

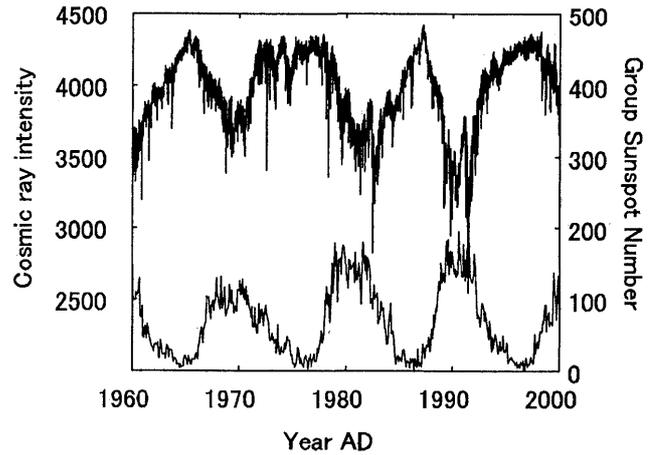
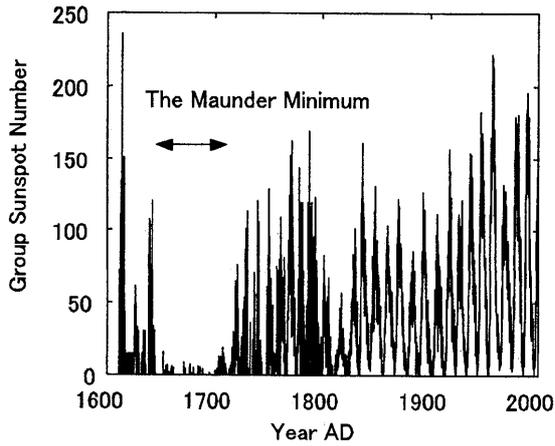


図1. 太陽黒点数とマウンダー極小期 (Hoyt and Schatten, 1998) 図2. 銀河宇宙線 (上) と太陽黒点数 (下)

来量は、太陽活動が活発になると減少し、太陽活動が低下すると増加するが、それに加えて 11 年毎に逆転する太陽磁場極性の影響もわずかに見られる (Kota and Jokipii, 1983) (図2)。

太陽活動の 11 年変動に伴う宇宙線の増減の振幅は約 15% であるが、 ^{14}C 量の変動は炭素循環により約 1/90 に減衰される (Siegenthaler and Beer, 1988)。したがって、年輪中の ^{14}C 濃度を測定し過去の太陽 11 年変動を復元するには数% 以下の高精度での測定が必須である。22 年変動も同様に約 1/70 に減衰されるが、サイクルごとのわずかなピークの増減として検出することができるため、太陽磁場の極性を過去に遡って特定することが可能である。

3. 測定結果

2000 年度から 2007 年度までに、樹齢約 2000 年と樹齢 713 年の屋久杉および樹齢 392 年の室生寺杉を用いて、マウンダー極小期とシュペーラー極小期 (西暦 1415-1534 年) を含む西暦 1413-1745 年および太陽活動活発期を含む西暦 880-960 年についての測定を完了した。また、放射性炭素濃度測定による超新星爆発の同定の可能性について探るため、西暦 993-1093 年における放射性炭素濃度も測定した (Menjo, 2005)。図3にこれまでに得られた年輪中 ^{14}C 濃度のデータを示す。

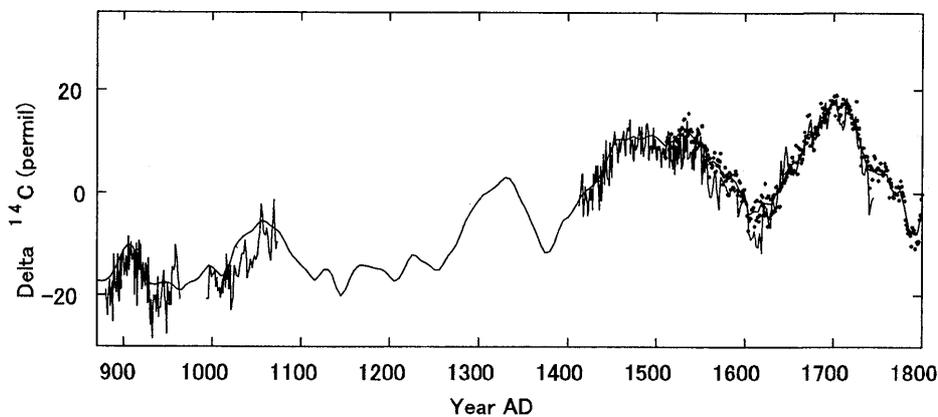


図3. 年輪中放射性炭素濃度

(黒 : Miyahara et al., 2004, 2006, 2007, Menjo et al., 2005. 灰 : Reimer et al., 2004. 点 : Stuiver et al., 1998)

我々の平均測定誤差は 3.1%であり、我々の測定結果はスタイバーらによる 1 年値 (点) と誤差の範囲内で一致しているが、全体的にやや低目の値を示している。図 3 に見られる放射性炭素濃度の長期トレンドは地磁気の永年変化によるものである。一方、数十～数百年スケールの変動は太陽の長期変動によるものであり、上向きのピークは太陽活動極小期の起こった時期を示している。9 世紀から 13 世紀にかけては太陽活動が比較的活発であった時期と考えられており、中世の極大期と呼ばれている。

図 4、5、6 にウェーブレット変換によるマウンダー極小期、シュペーラー極小期、およびマウンダー極小期とシュペーラー極小期の間の通常期の放射性炭素濃度の周期解析結果を示す。マウンダー極小期に関しては、我々のデータとスタイバーらのデータのクロススペクトルを計算することにより両データに共通な周期成分のみを取り出している。それにより、地域的な気候変動の影響などによる数年スケールのノイズを除去することが可能である。

マウンダー極小期のスペクトルは約 13～15 年と約 24～28 年の 2 つの周期性を示しており、この間太陽が周期的な磁場の変動を保持していたことと、11 年周期が実際には約 14 年に伸びていたことを示唆している。シュペーラー極小期についてもスペクトルは断続的に 11 年程度のシグナルを示しており、長期にわたる黒点の消失にも関わらず太陽が周期的な変動を継続していたことを示している。シュペーラー極小期中頃の 1460～1510 年においてシグナルは顕著に弱くなっており、1460～1480 年辺りにおいて僅かに長めの周期性が検出されている。この間については、より高精度での測定を行い 11 年周期の特性を詳細に調べる必要がある。一方で、図 6 に見られるように、太陽活動通常期においては 11 年周期のシグナルは非常に顕著に現れている。この間の 11 年変動の振幅は約 1.5%である。1560 年から 1570 年にかけては周期性の短縮も見られ、約 9 年のシグナルが得られている。また、9 世紀の太陽活動活発期においても連続的な 9 年周期のシグナルが得られている。以上のことから、太陽の 11 年周期の実際の周期長は太陽磁場の活動度に応じて伸縮し、その周期長の範囲は約 9～15 年程度である可能性が大きいことが示唆される。

5. まとめ

本研究グループでは、太陽活動の長期変動の物理メカニズムに迫るため、年輪中放射性炭素濃度を指標として過去 1200 年間における太陽 11 年/22 年周期の特性の変化を調べてきた。これまでに、マウンダー極小期とシュペーラー極小期の 2 つの無黒点期を含む西暦 1413-1745 年、および太陽活動活発期を含む 9～11 世紀についての測定を完了し、周期解析により太陽活動の特性を調べた。

その結果、マウンダー極小期については顕著な周期性の伸長が見られ、太陽 11 年周期の実際の周期長が約 14 年であったことが明らかとなった。一方、シュペーラー極小期においてはマウンダー極小期の様な顕著な周期性の伸びは検出されなかったが、シュペーラー極小期中頃において 11 年周期が衰退しわずかに周期性が伸びていた可能性があることが分かった。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いては、11 年周期は 10～11 年の周期長に回復し、また西暦 1560 年付近においては約 9 年への短縮が認められた。中世の極大期においても連続的な約 9 年の周期性が確認され、太陽活動の活動度と 11 年周期の周期長に逆相関の関係があることが示唆された。

今後は更に継続時間の異なる複数のマウンダー型、シュペーラー型の太陽活動極小期についての測定を行い、太陽活動極小期の持続時間が何によって決定されるのかを明らかにしていく。

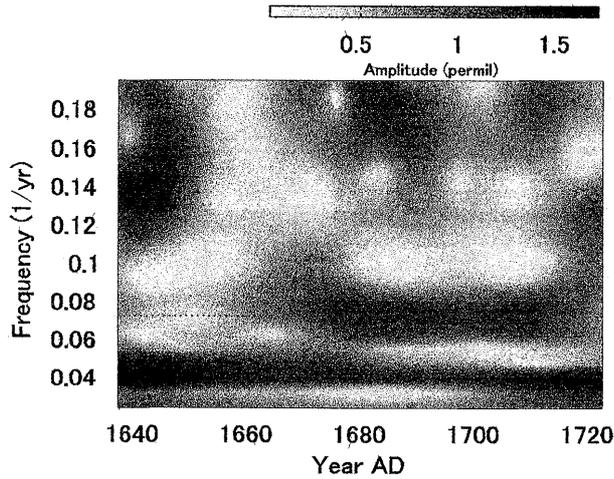


図4. マウンダー極小期における周期性
(点線は上から 14 年と 26 年に対応)

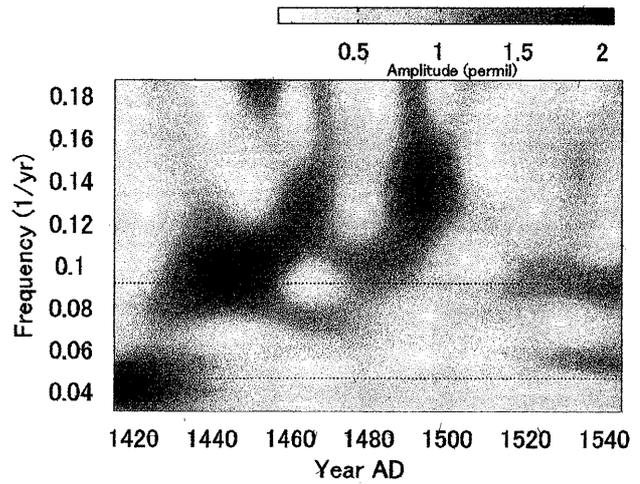


図5. シュペーラー極小期における周期性
(点線は 11 年と 22 年に対応)

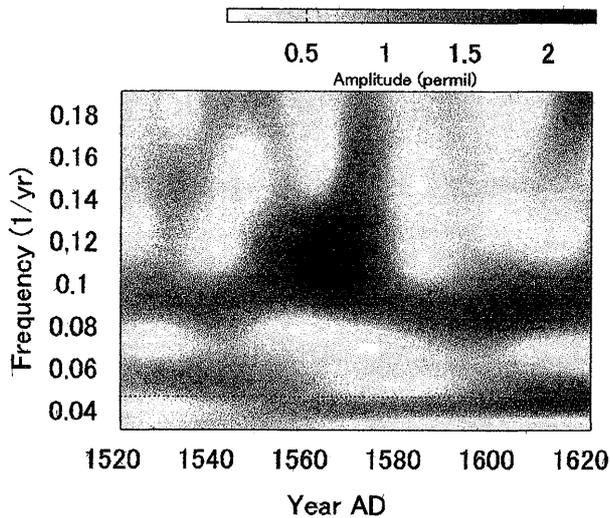


図6. 16~17 世紀の通常期における周期性
(点線は 11 年と 22 年に対応)

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、ご協力を賜りました。また、福島大学の木村勝彦先生には、試料年輪の年代決定にご協力を頂きました。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」) 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

- Eddy, J. A., 1976. The Maunder Minimum. *Science*, 192, 1189-1202.
- Hoyt, D. V., and Schatten, K. H., 1998, *Sol. Phys.*, 181, 491-512.
- Kota, J., and Jokipii, J. R., 1983, *Astrophys. J.*, 265, 573-581.
- Mann, M. E., Bradley, R. S., and Hughes, M. K., 1999, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 759-762.
- Menjo, H., et al., 2005, *Proc. 29th Int. Cosmic Ray Conf.*, 2, 357-360.
- Miyahara, H., et al., 2004, *Sol. Phys.* 224, 317-322.
- Miyahara, H., et al., 2006, *J. Geophys. Res.* 111, A03103.
- Miyahara, H., et al., 2007, *Adv. in Space Res.* (in press).
- Siegenthaler, U. and Beer, J., 1988, in *Secular Solar and Geomagnetic Variations in the Last 10,000 Years*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holland, pp.315-328.
- Reimer, R. J., et al., 2004, *Radiocarbon*, 46, 1029-1058.
- Stuiver, M., and Braziunas, T. F., 1989, *Nature*. 338, 405-408.
- Stuiver, M., and Quay, P. D., 1980, *Science*. 207, 11-19.
- Stuiver, M., Reimer, P. J., and Braziunas, T. F., 1998, *Radiocarbon*. 40, 1127-1551.
- 櫻井邦朋, 1986, 太陽研究の最前線に立ちて-, サイエンス社.
- 櫻井邦朋, 1987, 太陽黒点が語る文明史, 中公新書.

Variation of solar cycles during the last 1200 years indicated by the radiocarbon content in tree-rings

Hiroko Miyahara¹⁾, Toshio Nakamura¹⁾,
Kentaro Nagaya²⁾, Kyohei Kitazawa²⁾, Kimiaki Masuda²⁾, Yasushi Muraki²⁾

1) Center for Chronological Research, Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8602, Japan

Tel : +81-52-789-2579, Fax : +81-52-789-3092

2) Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

Radiocarbon is mainly produced by the incoming galactic cosmic rays modulated by solar wind and the interplanetary magnetic field, and thus its production rate and its content in the atmosphere and in the tree-rings reflect the state of solar magnetic activity. By measuring the radiocarbon contents in annual tree-rings, we can trace back the characteristics of the eleven-year solar cycles during the pre-historical periods.

The Sun holds several long-term cyclic variations in addition to the 11-year sunspot activity cycle and the 22-year cycle in the polarity reversals. The 88-year and the 208-year quasi cyclic variations of the Sun have caused several long-lasting sunspot minima such as the Maunder Minimum (1645-1715 AD), and have brought cold spells as referred as the Little Ice Age. However, not only the mechanisms of the solar influence on climate but also the mechanism of such long-term variations in solar activity is not clarified yet.

In order to obtain the clues for the mechanisms of the long-term solar variations, we investigated the change of the characteristics of the eleven-year solar cycle during the last 1200 years, including the grand solar activity maxima around the 9-10th century, the Spörer Minimum (1415-1534 AD) and the Maunder Minimum.

The spectral analyses of our radiocarbon data have indicated the suppression of the eleven-year variations and the slight stretching of the cycle lengths during the grand activity minima. On the other hand, slight shortening of the eleven-year cycle has been found around the grand solar activity maxima. The variability of the "11-year" solar cycle during the last 1200 years seems to be 9-15 years.

[論文]

H. Miyahara, K. Masuda, Y. Muraki, H. Kitagawa & T. Nakamura, 2006, Variation of solar cyclicity during the Spoerer Minimum, JGR, 111, A03103.

H. Miyahara, K. Masuda, K. Nagaya, K. Kuwana, Y. Muraki & T. Nakamura, 2007, Variation of solar activity from the Spoerer to the Maunder minima indicated by radiocarbon content in tree-rings, Advances in Space Research (in press).

[学会発表]

宮原ひろ子, 増田公明, 村木綏, 2006, 屋久杉年輪中放射性炭素による9~10世紀の太陽活動周期, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ国際会議場.

宮原ひろ子, 増田公明, 村木綏, 2006, 太陽活動の長期変動にともなう太陽11年周期の変化について, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 秋季大会, 相模原市産業会館.

H. Miyahara, K. Masuda, Y. Muraki, H. Kitagawa and T. Nakamura, 2006, Variability of Solar cycles during the last 1200 years deduced from radiocarbon data, 2nd International Symposium on SPACE CLIMATE, - Long-term Changes in the Sun and their Effects in the Heliosphere and Planet Earth -, Sinaia, Romania.

H. Miyahara, K. Masuda, T. Nakamura, H. Kitagawa K. Nagaya and Y. Muraki, 2006, Radiocarbon content in single-year tree rings of Japanese cedar, The 9th symposium of Japanese AMS Society -Prospects for the New Frontiers of Earth and Environmental Sciences-, Takeda Hall, The University of Tokyo.

H. Miyayara, K. Masuda, Y. Muraki, 2006, Variation of the 11-yr and the 22-yr solar cycles associated with long-term solar variations, AGU fall meeting, San Francisco, USA.