

樹木年輪中 ^{14}C で探るマウンダー極小期の太陽活動変動

宮原ひろ子⁽¹⁾, 毛受弘彰⁽¹⁾, 桑名宏輔⁽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: 052-789-4318

e-mail: miyahara@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

太陽表面に現れる黒点は、太陽の磁場活動の指標となるもので、その数は太陽活動が活発であるほど多くなる。そしてその数は、18世紀以降、11年の周期性で変動していることが知られている（図1）。ところが、17世紀の終わりから18世紀の初めにかけて、数十年にわたり黒点数がほとんど現れなかった時期があったことが、Eddy（1976）によって指摘された（図2）。この長期にわたる黒点の消滅は、太陽活動が極度に低下していたことによるものと考えられ、マウンダー極小期と呼ばれている。黒点数が非常に少ないため、マウンダー極小期において太陽の11年変動が存続していたかどうかを黒点数の変動から知ることは難しい。そこで、我々のグループでは、マウンダー極小期に形成された年輪に含まれる放射性炭素 ^{14}C の濃度を測定し、その変動を調べている。地球大気中で銀河宇宙線によって生成される放射性炭素の生成量は、太陽活動と逆相関の変動を示すことが知られている。我々は、樹齢392年の室生寺杉を用いて、1631-1739年の放射性炭素濃度を測定した。マウンダー極小期については、すでに放射性炭素のデータが Stuiver らによって得られている。そこで、我々は、測定データを比較する事によって、太陽活動の変動に起因するシグナルを検出した。本稿では、現在までに得られている1631-1739年の ^{14}C 値と、その変動を周期解析した結果を報告する。

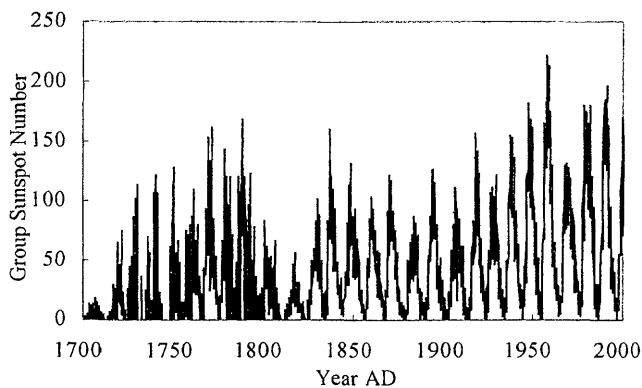


図1. 太陽黒点数 (Hoyt, 1998)

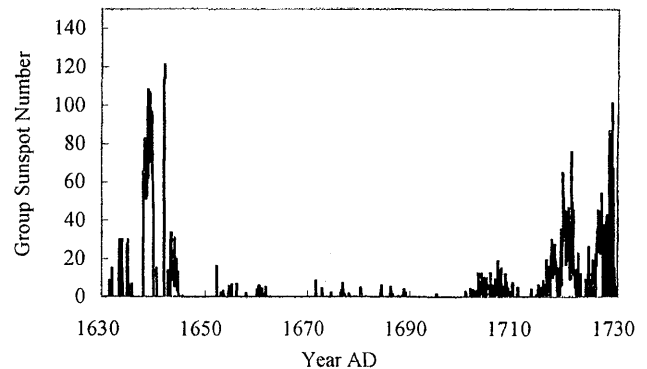


図2. マウンダー極小期における黒点数

2. 太陽活動と ^{14}C

放射性炭素 ^{14}C 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90%が陽子であるなど、その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

大気に飛来するまでの間に、惑星間空間磁場の影響を受け減衰される。一般に、太陽活動が活発な時期においては宇宙線の地球への到来量は減少し、逆に太陽活動が静穏な時期には到来量は増大する(図3)。宇宙線は、大気上層において大気原子核の核破砕反応により二次中性子を生成する。この二次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 はすぐさま酸化されて $^{14}\text{CO}_2$ となり、 $^{12}\text{CO}_2$ 、 $^{13}\text{CO}_2$ とともに大気圏、生物圏、海洋圏を循環する。そして光合成により、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になっている。

図4に、過去1000年間における年輪中 ^{14}C 濃度の変動を示す。地磁気変動にともなう長期変動に加え、数十年にわたる太陽活動の低下にともなう ^{14}C 濃度の増加が数回見られ、それぞれウォルフ極小期(1280-1340年)、シュペーラー極小期(1415-1534年)、マウンダー極小期(1645-1720年)、ダルトン極小期(1800-1820年)と呼ばれている。ダルトン極小期においては、黒点数は比較的少ないものの11年周期が存続していたことは黒点の記録(図1)より明らかである。しかしマウンダー極小期においては、黒点数が極端に少なく、11年変動が存続していたかどうかを黒点数の変動から判別することは難しい。そこで我々は、マウンダー極小期の年輪に含まれる ^{14}C の濃度変動を調べることによって、マウンダー極小期における11年変動の特性を調べた。

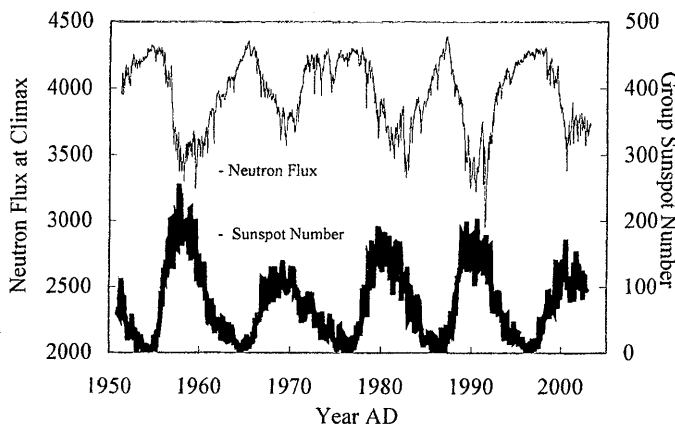


図3. 黒点数と宇宙線の11年変動

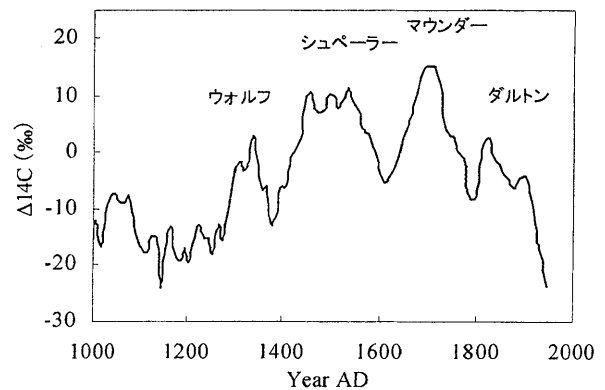


図4. 年輪中 ^{14}C 濃度変動 (Stuiver, 1998)

3. 測定

本測定には、1998年秋の台風により倒伏した樹齢392年の室生寺杉(北緯 34° 東経 136° にて採取、図5)を用いた。1年ごとに剥離した年輪は、ベンゼン・エタノール(1:1)混合液による副成分の除去、塩酸酸性下での亜塩素酸ナトリウムによるリグニン除去、酸・アルカリによる洗浄を経た後にグラフアイト化され、名古屋大学タンデトロン加速器質量分析計により ^{14}C 濃度の測定が行われた。

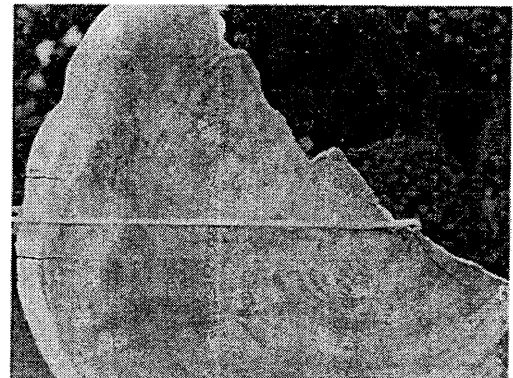


図5. 室生寺杉(樹齢392年)

4. マウンダー極小期における ^{14}C 濃度変動

本測定によって得られた 1631-1739 年（隔年）の ^{14}C 濃度を図 6 に示す。また、Stuiver らによって得られている ^{14}C 濃度の 1 年値、およびそれぞれの測定結果の 3 測定点移動平均を取ったものを図に示す。我々の測定結果は、1645 年付近、1710 年付近で、Stuiver らの $\Delta^{14}\text{C}$ 値と数%程度の濃度の違いを示しているが、全体的には測定誤差の範囲内でよい一致を示している。また、両測定結果は、周期的な変動を示している。そこで、両者に共通な周期性、つまり太陽活動

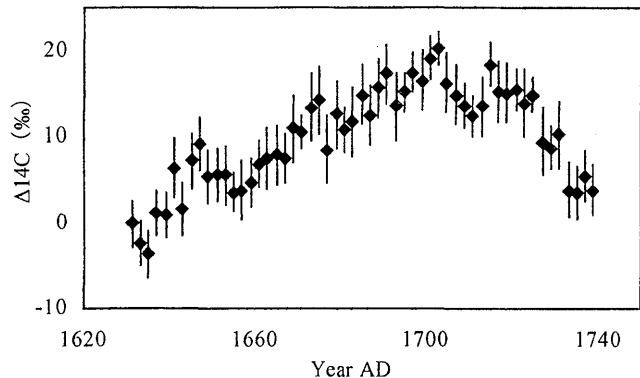


図 6. マウンダー極小期における年輪中 ^{14}C 濃度（測定結果）

に起因すると考えられる周期性を特定するために、*S*変換 (Stockwell, 1996) による周期解析を行った。 $\Delta^{14}\text{C}$ 値の変動には、太陽活動に起因する変動以外にも、地域的な ^{14}C 濃度の変動や測定における系統誤差によって生じる変動が含まれる。それらを取り除くため、我々は両者の *S*変換のクロス・スペクトルを計算し、両者に共通なシグナルのみを取り出した (図 8)。

図 3 に見られるように、太陽磁場活動にともなう宇宙線変動には、11 年変動に加えて、太陽磁場の極性が 11 年で反転し 22 年でもとの極性に戻ることに由来する 22 年変動も存在する。したがって、マウンダー極小期においても、太陽磁場がある周期性で変動していたとすると、その周期性に加え、2 倍の周期長を持つ周期が検出されるはずである。我々と Stuiver らによって得られた ^{14}C 濃度変動からは、図 8 のように、2 つの周期性 (Freq.1 と Freq.2) が検出された。Freq.1 は 13-15 年、Freq.2 は 24-29 年に対応する周波数に現れている。Freq.2 はまさに Freq.1 の倍周期となっており、マウンダー極小期において太陽磁場が周期的に変動していたことを示している。また、1700 年以降においては、その周期長の平均は約 11 年であるが、マウンダー極小期においては、13-15 年に伸びていたことになる。Stuiver らのデータを周期解析した Peristykh らは、マウンダー極小期における ^{14}C 濃度変動から太陽の 11 年周期が完全に失われてしまっていると指摘した (Peristykh and Damon, 1998)。しかし、今回の解析により、マウンダー極小期においても“11 年周期”は周期長が 13-15 年に伸びて存続していたということが明らかとなった。

5. まとめ

太陽活動が 70 年間にわたり極度に低下し黒点がほとんど観測されなかったマウンダー極小期における太陽活動の変動を年輪中 ^{14}C 濃度の変動により明らかにすべく、1631-1739 年に形成された年輪の隔年 55 点の ^{14}C 濃度測定が行われた。得られた測定値は、Stuiver らによる 1 年値と測定誤差の範囲内でよい一致を示した。両データを *S*変換により解析したところ、マウンダー極小期においても太陽の磁場およびその極性が周期的に変動していたことが明らかになった。また磁場変動の周期性は、現在の活発な太陽活動に見られる 11 年の周期性よりも、数年長く、13-15 年であったことが示唆された。

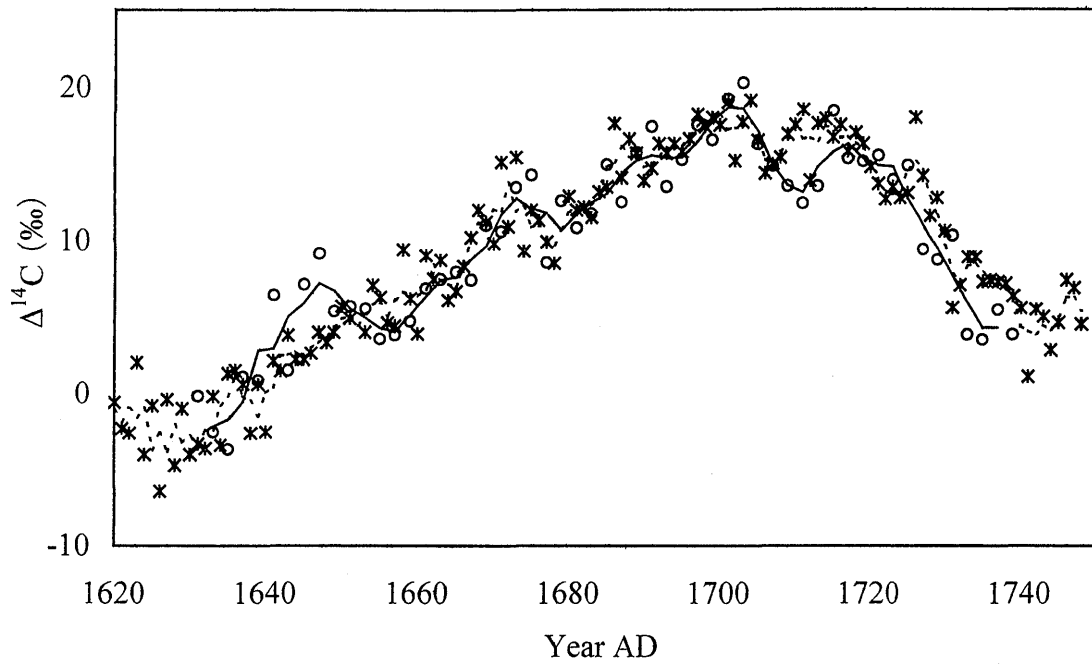


図7. マウンダー極小期における ^{14}C 濃度変動の比較 (STEL によるデータ (O) の 5 年移動平均 (実線) および Stuiver et al. (1998) によるデータ (*) の 3 年移動平均 (破線)。

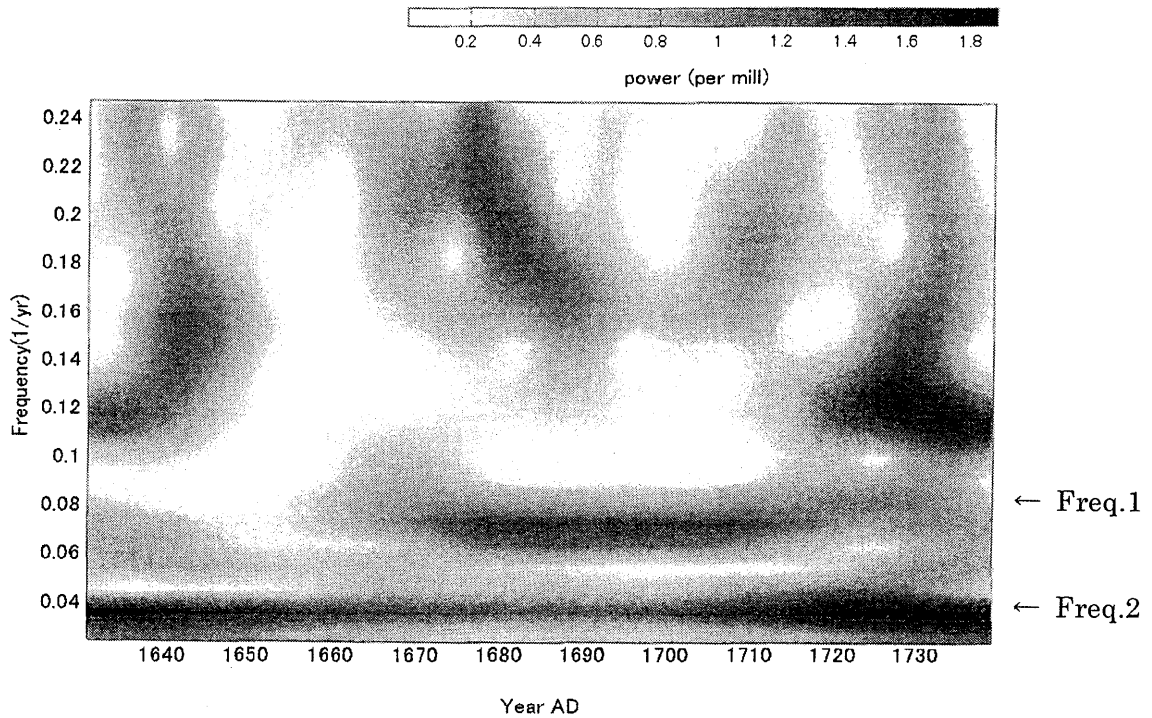


図8. マウンダー極小期における ^{14}C 濃度変動 (図7) の周期性

謝辞

本研究を行うにあたり、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御指導、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」)、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

- Eddy, J.A. (1976) The Maunder Minimum. *Science*, 192, 1189-1202.
- Hoyt, D. V. and Schatten, K. H. (1998) Group sunspot numbers: A new solar activity reconstruction. *Sol. Phys.*, 181, 491-512.
- Peristykh, A. N. and Damon, P. E. (1998) Modulation of Atmospheric ^{14}C Concentration by the Solar Wind and Irradiance Components of the Hale and Schwabe Solar Cycles, *Sol. Phys.*, 177, 343-355.
- Stockwell, R. G., Mansinha, L. and Lowe, R. P. (1996) Localization of the Complex Spectrum: The S Transform, *IEEE Trans. on: Signal Processing*, 44(4), 998-1001.
- Stuiver, M., Reimer, P. J. and Braziunas, T. F. (1998) High-precision radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples. *Radiocarbon*, 40(3), 1127-1551.

Variation of solar activity during the Maunder Minimum deduced from radiocarbon content in tree rings

Hiroko Miyahara⁽¹⁾, Hiroaki Menjo⁽¹⁾, Kousuke Kuwana⁽¹⁾, Kimiaki Masuda⁽¹⁾,
Yasushi Muraki⁽¹⁾, Toshio Nakamura⁽²⁾

(1) Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

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

Tel : +81-52-789-4318, Fax : +81-52-789-4313

E-mail : miyahara@stelab.nagoya-u.ac.jp

(2) Center for Chronological Research, Nagoya University

Abstract

This paper presents the variation of solar activity during the Maunder Minimum (1645-1715 AD) deduced from radiocarbon content in tree-rings. Radiocarbon is produced by the galactic cosmic rays, which are modulated by the solar wind and the interplanetary magnetic field in the heliosphere. The production rate of radiocarbon, therefore, reflects the state of solar magnetic activity. Most distinct index of solar magnetic activity is the group sunspot number. The variations of sunspot number have shown clear cyclicity since the 18th century with average length being about eleven years. The sunspots, however, have once almost disappeared during the period of 1645-1715 AD due to extraordinary weakening of solar activity. This period has been called as the Maunder Minimum. There is no remarkable cyclicity in the sunspot variations. We, therefore, investigated the cyclicity of radiocarbon content in tree rings from the Maunder Minimum in order to clarify the characteristics of solar activity during this period. We compared two radiocarbon records obtained newly by our group and by Stuiver et al. The results of frequency analyses have shown that solar magnetic reversals had maintained through the Maunder Minimum and that the length of the "eleven-year" cycle was stretched to 13-15 years.

[投稿論文]

H. Miyahara, K. Masuda, Y. Muraki, T. Uemura, M. Kato, H. Toyozumi, H. Furuzawa, T. Nakamura, H. Kitagawa, E. Matsumoto (2004) Radiocarbon contents in tree rings during the Spoerer minimum, Nucl Instr. and Meth. B., 223-224, 655-659.

H. Miyahara, K. Masuda, H. Furuzawa, H. Menjo, Y. Muraki, H. Kitagawa, T. Nakamura (2004) Variation of the radiocarbon content in tree rings during the Spoerer Minimum, Radiocarbon, 46(2), 965-968.

H. Miyahara, K. Masuda, Y. Muraki, H. Furuzawa, H. Menjo, T. Nakamura (2004) Cyclicity of solar activity during the Maunder Minimum deduced from radiocarbon content, Sol. Phys., 224, 317-322.

H. Miyahara, K. Masuda, Y. Muraki, H. Kitagawa, T. Nakamura (2005) Variation of solar cyclicity during the Spoerer Minimum, J. Geophys. Res. (submitted)

[学会・シンポジウム]

宮原ひろ子, 増田公明, 村木綏 (2004)
太陽活動極小期における 11 年周期変動の特性, 宇宙天気シンポジウム(ポスター)

宮原ひろ子, 毛受弘彰, 桑名宏輔, 増田公明, 村木綏, 中村俊夫, 北川浩之 (2004)
宇宙線生成核種による過去の太陽活動周期, 日本物理学会秋季大会, 高知大学

毛受弘彰, 桑名宏輔, 宮原ひろ子, 増田公明, 村木綏, 中村俊夫 (2004)
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, 日本物理学会秋季大会, 高知大学

H. Miyahara, K. Masuda, Y. Muraki, H. Menjo, H. Furuzawa, H. Kitagawa and T. Nakamura (2004) Variation of the annual radiocarbon concentration in the Japanese cedar tree around the 15th to 18th century, 8th Conference "Methods of Absolute Chronology", Ustron, Poland. (ポスター)

H. Miyahara, K. Masuda, Y. Muraki, H. Menjo, H. Furuzawa, H. Kitagawa and T. Nakamura (2004) The variation of Solar Activity during the Spoerer Minimum, AOGS 1st annual meeting, Singapore.

K. Masuda, H. Miyahara, Y. Muraki, H. Menjo, H. Furuzawa, T. Nakamura and J. Beer (2004) Solar Activity during the Maunder Minimum as Measured by Radiocarbon, AOGS 1st annual meeting, Singapore.

H.Miyahara, K.Masuda, Y.Muraki, H.Menjo, H.Furuzawa, H.Kitagawa, T.Nakamura (2004) The 11-year solar cycle during the Spoerer and the Maunder minima, 1st International Symposium on SPACE CLIMATE - Direct and Indirect observations of Long-term Solar Activity -, Oulu, Finland.

K. Masuda, H. Miyahara, Y. Muraki (2004) Solar cycle during the Maunder Minimum, AGU fall meeting, San Francisco. (ポスター)