

プレ・シュペーラー極小期における樹木年輪中 ^{14}C 濃度測定

北澤恭平(a), 永治健太郎(a), 増田公明(a), 中村俊夫(b), 宮原ひろ子(c), 村木綏(d)

(a)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: 052-789-4320

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

(b)名古屋大学年代測定総合研究センター

(c)東京大学理学系研究科

(d)甲南大学理工

1. はじめに

過去の太陽黒点観測の記録から、太陽活動はシュワーベサイクルと呼ばれる11年の周期性を持つことが知られている。その太陽黒点の記録の中に、1645年～1715年にかけて黒点がほとんど現れなかった時期が存在する(図1)。この時期はマウンダー極小期と呼ばれ、太陽活動が極端に衰退していた時期であると考えられている。この無黒点期において太陽活動のシュワーベサイクルがあったのかどうかを太陽黒点から知ることはできない。また黒点観測開始以前の太陽の周期活動についても知ることはできない。

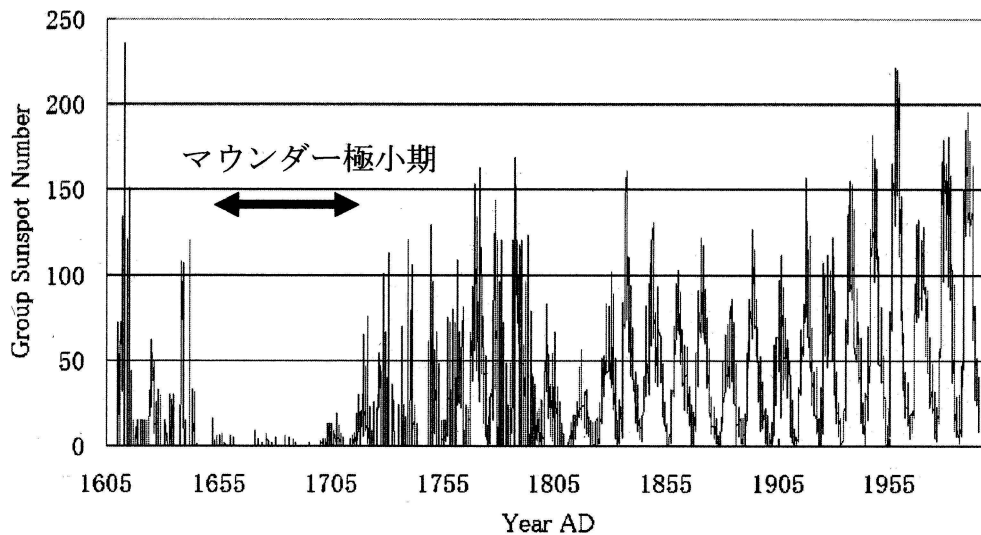


図1. 太陽黒点数 (Hoyt and Schatten, 1998)

そこで我々の研究グループでは宇宙線起源の放射性核種である ^{14}C をもちいて、過去の太陽活動極小期におけるシュワーベサイクルの研究を行ってきた。

これまでに、Stuiver(1980)によって定義された期間としてのシュペーラー極小期～マウンダー極小期(1413～1745)における樹木中 ^{14}C 濃度測定を行い、その結果マウンダー極小期ではシュワーベサイクルが14年程度に伸びており、極小期-極小期間の太陽活動通常期では強い11年、シュペーラー極小期では11

年程度であるがその活動は非常に弱まっていたという結論が出されている[Masuda, 2007; Miyahara, 2007]。この結果は極小期ごとにシュワーベサイクルの振る舞いが異なる可能性を示した。また2006年度には、Stuiver(1988)らによる太陽活動極小期の継続時間によるマウンダー型(継続時間80年程度)およびシュペーラー型(継続時間120年程度)の分類でマウンダー型に分類されたBC4世紀極小期についても測定が行われ[永治, 2007]、 $\Delta^{14}\text{C}$ の立ち上がりからピークにかけてシュワーベサイクルが長くなっている可能性があるという、マウンダー極小期と類似する結果が得られた。これらの結果からシュワーベサイクルの特性が極小期の型によって異なる可能性があると考えられる。しかし、シュペーラー極小期では $\Delta^{14}\text{C}$ の立ち上がり付近(1413年以前)が測定されておらず、これまでそれらを厳密に比較することができなかった。本稿では屋久杉を用いた、プレ・シュペーラー極小期(1346-1425)における ^{14}C 濃度測定の結果を報告する。

2. 太陽活動と ^{14}C

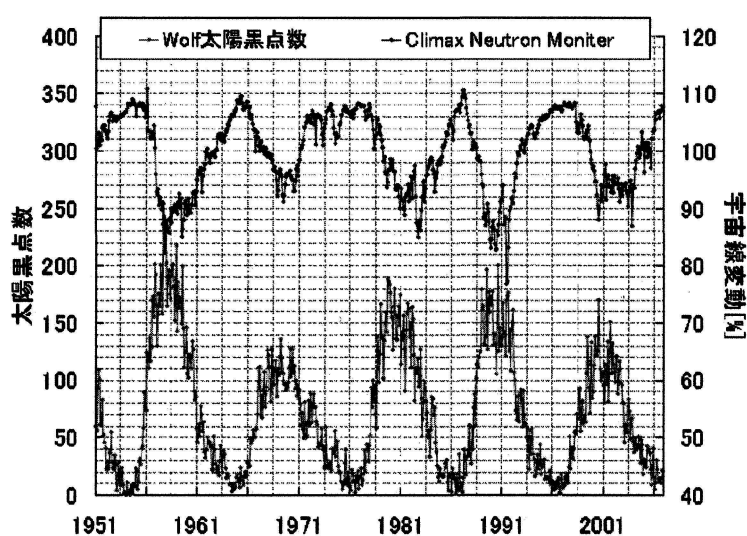


図 2. 太陽黒点数と宇宙線変動 (NGDC, SPDS)

間空間磁場からも影響を受ける。そのため、太陽活動が活発な時期に到来宇宙線は少なく、反対に太陽活動が弱まっている時期には到来宇宙線が増加するという逆相関を示す(図2)。したがって宇宙線により生成される放射性核種も太陽活動と逆相関を示す。

大気中の窒素による中性子捕獲により生成された ^{14}C は直ちに酸化され $^{14}\text{CO}_2$ になり、 $^{12}\text{CO}_2$ や $^{13}\text{CO}_2$ と混合され、様々な炭素循環過程によって、植物や動物、海洋に取り込まれる。このようにして宇宙線により生成された ^{14}C の一部が樹木年輪に含まれる。図3に過去3000年の ^{14}C 濃度変動を示す。

地球大気は一次宇宙線や、一次宇宙線と大気の相互作用により生じる二次宇宙線との相互作用により、様々な核種を生成する。 ^{14}C , ^{10}Be , ^{26}Al などもその中の例である。その生成過程は宇宙線が大気中の原子核と衝突することにより起こる核破砕反応によるものと、大気中で減速された二次宇宙線中性子が原子核に捕獲される中性子捕獲と呼ばれる2種類の反応がある。放射性炭素 ^{14}C は後者により生成される放射性核種である。一次宇宙線はその大半が荷電粒子であるため磁場により散乱される。地磁気はもちろん、先に述べたように太陽活動と相関のある惑星

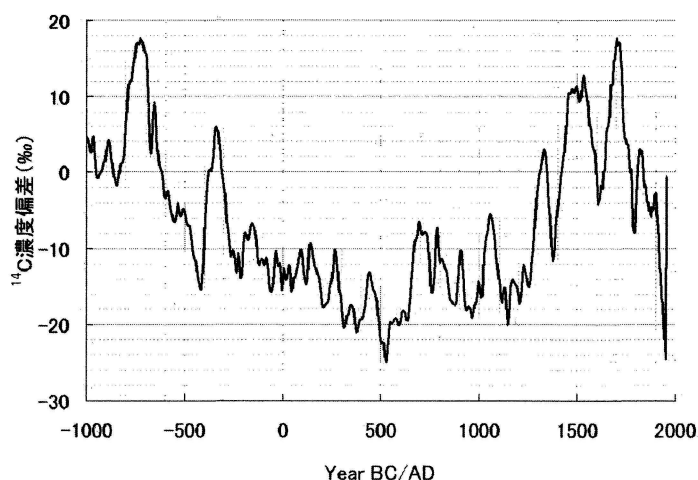


図 3. 過去 3000 年の ^{14}C 濃度変動 (Reimer et al., 2004)

3. 試料と測定

本測定には鹿児島県の屋久島(北緯30° 東経130°)から採取した屋久杉(樹齢 712年)を使用した。この屋久杉は1995年に採取されたものである(図4)。この樹木試料の絶対年代はBomb effectの測定および年輪年代法により決定されている。1年ごとに剥離した年輪から、AAA処理および亜塩素酸ナトリウム処理によりセルロースのみを抽出し、真空ガラスラインの中で二酸化炭素生成の後グラファイト化され、名古屋大学タンデ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。

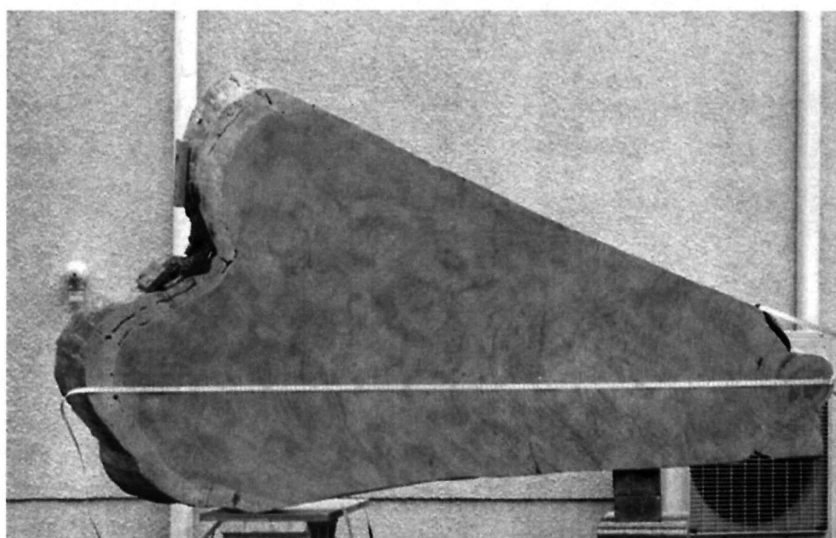


図4. 本測定に使用した屋久杉 (樹齢 712 年)

4. 測定結果

本年度は、このテーマに関して計3回の測定が行われた。1年輪ごとに測定されたプレ・シュペーラー領域(1346-1425)について測定結果を図5に示す。測定結果はIntCal04と比較し全体に低い値を示した。しかし、このような特徴はこれまでもマウンダー・シュペーラー極小期間の測定においても表れていた。

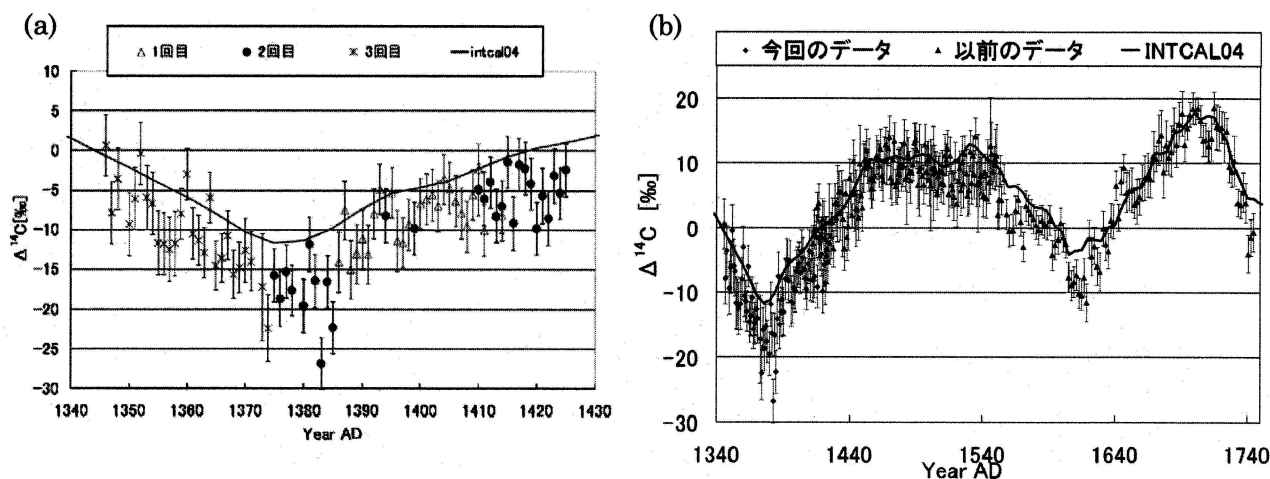


図5. (a) 2007年度測定結果, (b) 従来データおよび本年度データ

このデータを従来データと合わせて、周期解析を行った結果、1400年周辺に13年程度の周期信号が得られた。しかし、この信号は誤差の大きさから評価される信頼度としては大きくない。

そこで我々は、今後の測定で有意な信号を得るために必要な測定精度(誤差の大きさ)をシミュレーションにより見積もった。その方法は、正弦波に正規乱数による誤差を加えて擬似データを作り、その周期解析を行うという工程を10,000回行い、その結果検出される信号の大きさを見積もるというもので

ある。結果は図6のようになった。縦軸は得られる信頼度、横軸は信号振幅に対する誤差の大きさである。太陽活動の11年周期であるシュワーベサイクルについては、炭素循環による ^{14}C 生成率から大気中の ^{14}C 濃度への変動振幅の減衰率がおよそ100分の1であるとされている (Siegenthaler, 1980)。シュワーベサイクルによる宇宙線強度の変化が $\pm 10\%$ 程度であるとする、大気中の ^{14}C 濃度の変動率はおよそ $\pm 1\%$ 程度であるということになる。

シミュレーションの結果から、 2σ 程度の信頼度を検出しようとした場合、誤差の大きさは振幅の1.5倍から2倍程度でなくてはならないということが分かる。そこで、大気中の ^{14}C 濃度変動の振幅が 1% 程度であるとすると、 2σ の信頼度を得るためには測定誤差を 1.5% から 2% 程度に抑えなくてはならない。本年度の平均測定誤差が 3.5% (系統誤差 1.5% 、統計誤差 2.6%)程度であることを考えると、その誤差の大きさを半分程度にしなくてはならない。これは現在の系統誤差を維持した場合、統計誤差を $2/5$ 倍(統計数約6倍)にしなくてはならないことを意味する。

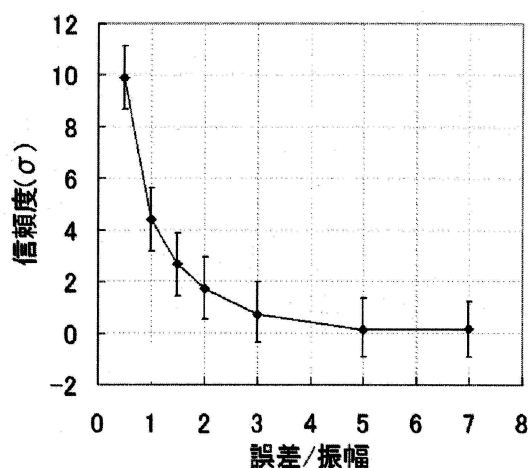


図6. 検出信頼度と誤差の大きさ

5. まとめ

屋久杉(樹齢712年)をもちいてプレ・シュペーラー期間の1346年-1425年の80年分の測定を行った。周期解析を行った結果、測定領域において13年程度の周期が観測されたがその信号の有意性は低く、現状ではその信号をシュワーベサイクルと断定するのは難しい。今後有意な信号を得るためには、統計数を現在の6倍程度に増やすことによって測定誤差を現在の半分程度まで減らすような測定が必要である。

参考文献

- Hoyt, D. V. and Schatten, K.H. (1998), Sol. Phys., 181, 491-512.
 Siegenthaler, U., Heimann, M. and Oeschger, H. (1980), RADIOCARBON, 22, 177-191.
 Stuiver, M. and Braziunas, T. F. (1988), Secular Solar and Geomagnetic Variations in the Last 10,000 Years, 245-266.
 Stuiver, M. and Quay, P.D. (1980), SCIENCE, 207, 11-19.
 Reimer, P.J. et al. (2004), RADIOCARBON, 46, 1029-1058.
 Masuda (2007), Proc. 30th ICRC, paper icrc0952.
 Miyahara (2007), Adv. Space Res. 40, 1060-1063.
 永治 (2007), 名古屋大学大学院理学研究科 修士論文.

Measurement of carbon 14 content in tree ring during the Pre-Spoerer minimum period

Kyohei Kitazawa^(a), Kentaro Nagaya^(a), Kimiaki Masuda^(a),
Toshio Nakamura^(b), Hiroko Miyahara^(c), Yasushi Muraki^(d)

- (a) Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan
Tel : +81-52-789-4320, Fax +81-52-789-4313
- (b) Center for Chronological Research, Nagoya University
- (c) School of Science, Tokyo University
- (d) Faculty of science and engineering, Konan University

Abstract

The sunspot number, which is a typical index of solar activity, shows a clear 11-year periodicity called the Schwabe cycle. However, in the period around 1645 to 1715 AD the sunspots were almost absent on the solar surface. This is considered to be due to extraordinary weakening of solar activity and this period is called the Maunder minimum. We cannot know from the sunspot record if the Schwabe cycle continued or not in the Maunder minimum. Also we cannot know the periodicity of solar activity without sunspot observation as in pre-telescope era. So we use carbon 14, which is one of cosmogenic nuclides as an indirect index of solar activity with inverse correlation, in order to study 11-year periodicity during grand solar minima like the Maunder minimum.

Stuiver classified grand solar minima into two types by duration of minima. The Maunder-type minima have a duration of ~ 80 yr whereas the Spoerer-type minima last ~ 120 yr. We previously measured carbon 14 content in Japanese tree for the Maunder minimum (the Maunder type), the Spoerer minimum (the Spoerer type) and the 4th-century-BC minimum (the Maunder type) and a periodicity of 14 yr was obtained for the Maunder-type minima. But we have not finished measuring the carbon 14 content around a leading edge of the Spoerer minimum.

This year we measured carbon 14 content in tree rings of 80 years for the pre-Spoerer minimum (1346 to 1425 AD). As a result of frequency analysis we obtained a periodicity signal of 13yr, but only with small significance. A limit of measurement error to get significant signal of 11-year periodicity is discussed.

(原著論文)

Variation of solar activity from the Spoerer to the Maunder minima indicated by radiocarbon content in tree-rings

H. Miyahara, K. Masuda, K. Nagaya, K. Kuwana, Y. Muraki, T. Nakamura
Adv. in Space Res. 40 (2007) 1060-1063.

(Proceedings)

Variation of solar "11-year cycle" during the grand solar minimum in the 4th century BC by measurement of ^{14}C content in tree rings

K. Nagaya, K. Kitazawa, K. Masuda, Y. Muraki, H. Miyahara, T. Nakamura
30th Intern. Cosmic Ray Conf., July 2007, Merida, Mexico

Solar activity variation in grand solar minima deduced from cosmogenic radiocarbon

K. Masuda, K. Nagaya, K. Kitazawa, Y. Muraki, H. Miyahara, T. Nakamura
30th Intern. Cosmic Ray Conf., July 2007, Merida, Mexico

(学会発表)

樹木年輪中放射性炭素濃度変動を用いた太陽活動の研究

永治健太郎, 北澤恭平, 増田公明, 村木綏, 宮原ひろ子, 中村俊夫
日本物理学会 2007 年春季大会 2007 年 3 月, 八王子

過去 1200 年間における太陽活動周期の変化とその気候への影響

宮原ひろ子, 増田公明, 村木綏, 中村俊夫
日本地球惑星科学連合 2007 年大会, May 2007, 千葉

宇宙線起源核種を用いた太陽活動研究の成果と今後の展望

宮原ひろ子, 横山祐典, 松崎浩之, 永治健太郎, 北澤恭平, 増田公明, 村木綏, 中村俊夫
第 122 回 地球電磁気・地球惑星圏学会, 2007 年 9 月, 名古屋

放射性炭素濃度測定による太陽活動極小期におけるシュワーベサイクルの特性 (I)

北澤恭平, 永治健太郎, 増田公明, 宮原ひろ子, 村木綏, 中村俊夫
日本物理学会 第 62 回年次大会, 2007 年 9 月, 札幌

放射性炭素濃度測定による太陽活動極小期におけるシュワーベサイクルの特性 (II)

永治健太郎, 北澤恭平, 増田公明, 宮原ひろ子, 村木綏, 中村俊夫
日本物理学会 第 62 回年次大会, 2007 年 9 月, 札幌

Effect of variable Schwabe/Hale cycles of the sun on climate change

H. Miyahara, Y. Yokoyama, K. Masuda, K. Nagaya, K. Kitazawa, Y. Muraki, H. Kitagawa and T. Nakamura

Intern. CAWSES Symposium, Oct. 2007, Kyoto

Solar activity variation in grand solar minima deduced from cosmogenic radiocarbon

K. Masuda, K. Nagaya, H. Miyahara and T. Nakamura

Intern. CAWSES Symposium, Oct. 2007, Kyoto