

シュペーラー極小期における太陽活動研究

～年輪中 ^{14}C 濃度測定～

植村恒仁、宮原ひろ子、村木綏、増田公明

名古屋大学太陽地球環境研究所

Tel : 052-789-4318 , Fax : 052-789-4313

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

はじめに

過去の太陽活動の研究から、この 1000 年間に幾度か太陽活動が極端に弱い時期、極小期があったことが知られている。その中のひとつであるマウンダー極小期においては、太陽活動は通常の 11 年周期ではなく、22 年の周期があったとロシアの Kocharov 等により報告されている。

果たしてこの 22 年周期は何を意味するのであろうか。また、マウンダー極小期以外の極小期においても 22 年の周期性は見出されるのであろうか。

そこで我々は極小期における太陽活動の周期性を明らかにするために、マウンダー極小期以前の、シュペーラー極小期における太陽活動を調べることにした。測定方法は液体シンチレーション法と加速器質量分析法 (AMS 法) を併用した。

太陽活動と ^{14}C

大気上層では、太陽系外からの一次宇宙線によって二次宇宙線が作られている。窒素原子は、二次宇宙線である熱中性子を捕らえ、 ^{14}C に変換される。 ^{14}C の生成率は、太陽活動が激しい極大期ほど低く、太陽活動が低下する極小期になると増大する。これは、太陽系内では太陽活動による惑星間空間磁場の影響で、太陽活動が激しい極大期のときは、太陽系外からの宇宙線を遮蔽する効果のためである。つまり、宇宙線量と太陽活動の関係、 ^{14}C 生成率と太陽活動の関係は共に、逆相関の関係にある。生成された ^{14}C は直ちに酸化され、二酸化炭素として大気中に拡散し、炭素の安定同位体 ^{12}C や ^{13}C から成る二酸化炭素と共に炭素循環をすることとなる。

従って、大気中には、大気上層でつくられた ^{14}C がある割合で含まれる。植物は光合成により、大気中の二酸化炭素を取り込み、その一部が毎年年輪に蓄積される。形成された樹木の年輪は、大気との炭素交換をほとんど行わなくなり、さらに新たな年輪を形成していく。従って、年輪は形成された年の大気中の ^{14}C 濃度を記録していることになる。年輪に含まれている ^{14}C 濃度を測定することで、年輪が作られた年の ^{14}C 生産率を推定することができる。そこから逆に、太陽活動の様相を知ることが可能となる。

過去 1000 年間の ^{14}C 濃度変化の 10 年値を図 1 に示す(Stuiver,1998)。

図 1 から、過去 1000 年間に ^{14}C 濃度が増加した、つまり、太陽活動が弱い時期が 3 度あったことがわかる。それぞれ古い方からウォルフ極小期(1282～1342)、シュペーラー極小期(1415～1534)、

マウンダー極小期(1645～1720)と呼ばれている。マウンダー極小期について、ロシアの Kocharov 等のグループが年輪中 ^{14}C 濃度を調べた結果を図 2 に示す(Kocharov,1995)。マウンダー極小期においては、11年ではなく 22年の周期があることが顕著に表れている。

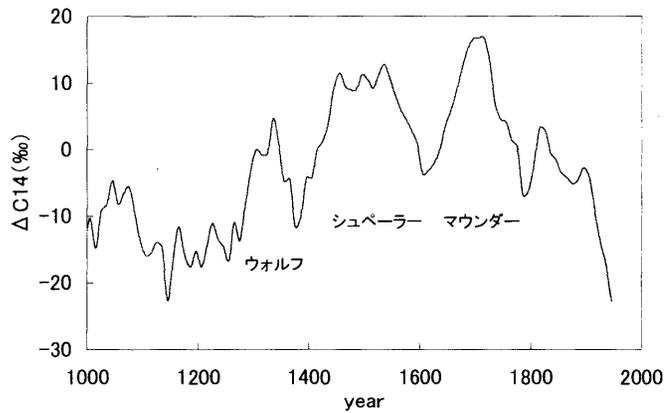


図 1 過去 1000 年間の ^{14}C 濃度変化 (10 年値)

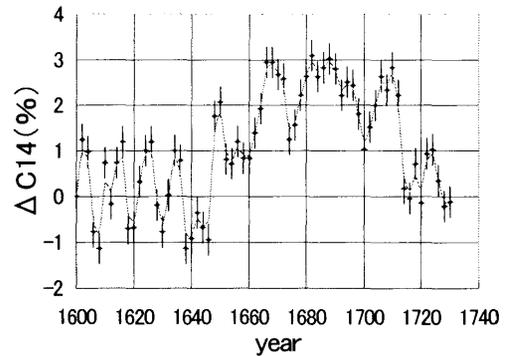


図 2 マウンダー極小期の 22 年周期

測定試料

研究が始まった当時、シュペーラー極小期の年輪を含む樹齢約 700 年の屋久杉 (図 3) を入手する機会に恵まれた。そこで我々は、極小期における太陽活動周期を調べるため、シュペーラー極小期に相当する年輪中の ^{14}C 濃度測定を行うことにした。

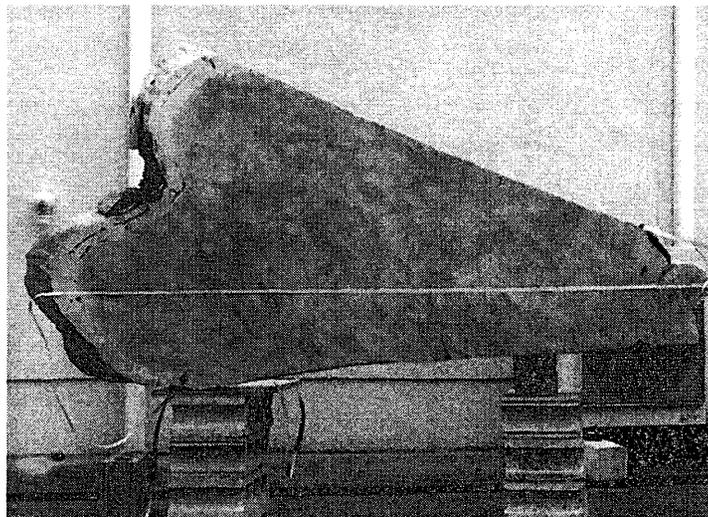


図 3 樹齢約 700 年の屋久杉

測定方法

年輪中 ^{14}C 濃度測定方法には 3 つ考えられる。AMS 法、気体比例計数管法、液体シンチレーション法である。我々の研究が始まった当時、AMS 法の最大精度は 0.7% と他の測定法に比べると精度が劣っていた。更に、通常 AMS は共同利用施設であり、占有時間が限られるため、140 個の試料の測定を目指していた我々の研究には適していなかった。

また、気体比例計数管法は、測定試料が気体であるため取り扱いが難しく、保存が困難である。更に、統計精度を上げるために、十分な試料の量を測定するには検出器が大きくなる、といった不便な面がある。

一方、液体シンチレーション法での測定は、測定試料が液体であるため取り扱いが容易であり、再測定も可能である。更に、測定器が比較的小さいといった利点もある。

ゆえに我々は、液体シンチレーション法での測定を採用した。また、測定溶媒には炭素の含有率が多く透明度の高いベンゼンを、溶質には発光効率が良く高い計数効率を与える **butyl-PBD** を選定した。そして、年輪からセルロースを生成し、ベンゼン合成、液体シンチレーション法での測定を行ってきた。

しかし、セルロースからベンゼンへの試料調製に不備があり、一部のベンゼン試料は、正しい ^{14}C 濃度を保持していないことが判明した。そこで、この一部の試料に関しては、ベンゼン合成を行う前段階のセルロースを **AMS** 法で測定することにした。研究が始まった当時の **AMS** 法の最大精度は 0.7% であったが、現在名古屋大学に設置されている加速器質量分析計の最大精度は 0.3% と、液体シンチレーション法での測定と同程度の精度を得られるまでに向上してきた。そこで我々は液体シンチレーション法と **AMS** 法を併用して測定することにした。以下、試料調整法を述べる。

試料調製

木材細胞は主成分（約 95%）と、樹脂、灰分といった細胞内含有物である副成分（約 5%）とに分けられる。主成分はセルロース（5 割）、ヘミセルロース（2 割）、リグニン（3 割）に分けられ、この内最も安定であるのが骨格部分のセルロースである。従って、我々の測定試料として適した部分はセルロースのみであり、他の部分を除去する必要がある。

削りだし

屋久杉をブロック状（約 25cm×9cm×6cm）に分割する。ブロック状屋久杉を圧力鍋で 30 分蒸して柔らかくし、のみやピンセットを使い一年ごとに削りだす。

粉砕処理

化学処理における化学反応を起こりやすくするため、木片試料を 2~3mm 程度の大きさに粉砕しておく。

副成分の除去

ベンゼン、エタノール混合液を用い、ソックスレー抽出機によって副成分の除去を行う。

リグニンの除去（漂白）

亜塩素酸ナトリウムを用いてリグニンの除去を行う。また漂白剤を活性化させる助剤として塩酸を用いる。試料 50g に対し 3 リットルビーカーに 2.5 リットルのイオン交換水を入れ、PH3 となるように塩酸を 10~20ml 加える。そこに亜塩素酸ナトリウム 80g と試料を入れ、約 80℃で 6 時間加熱する。

熱水による洗浄

漂白された試料を吸引ろ過し、熱水に入れ 30 分沸騰させる。その後沸騰させた蒸留水で洗浄し、吸引ろ過した後オーブン（80℃）で乾燥させ、セルロースを得る。

二酸化炭素生成

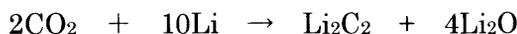
下記の反応によりセルロース試料から二酸化炭素を得る。



セルロース約 20g をステンレススチール製カップに詰め込み、反応容器にセットする。反応容器内を真空ポンプで引いた後、酸素ガスを 10atm 充填する。セルロースに接触させておいたニクロム線に電流を流すことによりセルロースを燃焼させ、二酸化炭素を生成する。-80℃のエタノールトラップで水分を除去しつつ液体窒素トラップで二酸化炭素を回収する。

リチウムカーバイド生成

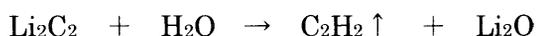
下記の反応により、二酸化炭素からリチウムカーバイドを得る。



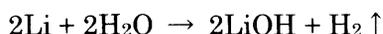
燃焼させたセルロースの約 1.5 倍の質量のリチウムをリチウムカーバイド生成筒に入れ、真空ポンプで引く。真空に引いた生成筒を 580°C にセットした炉に入れ、トラップに貯まっている二酸化炭素を気化させ、リチウムと反応させる。二酸化炭素がすべて気化したら、炉の温度を 850°C に上げる。そのまま 1 時間加熱し、リチウムカーバイドを生成する。

アセチレン合成

下記の反応により、生成されたリチウムカーバイドからアセチレンを得る。



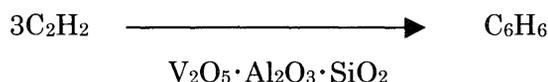
リチウムカーバイド生成筒をアセチレンベンゼン合成ラインにセットし、2 リットルのイオン交換水をゆっくりと滴下し、リチウムカーバイドからアセチレンを生成する。また、この時同時に下記の反応も起こる。



その為コックを開き発生した水素ガスを逃がしつつ液体窒素トラップでアセチレンを回収する。

ベンゼン合成

下記の反応により生成されたアセチレンからベンゼンを得る。



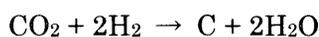
トラップに回収されたアセチレンは、生成量を圧力計で計測するため、一度気化させて 10 リットルタンクに貯められる。その後、アセチレンをバナジウム触媒 ($\text{V}_2\text{O}_5 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) に流し込み、ベンゼンを合成する。バナジウム触媒は、Arslanov 教授が開発した触媒で、常温でベンゼン合成を行うことができる(Arslanov,1993)。合成されたベンゼンは、液体窒素トラップによって回収する。

合成されたベンゼンを Wallac 社製の液体シンチレーションカウンター Quantulus1220 を用いて ^{14}C 濃度測定を行った。また、ベンゼン合成過程の途中に生成したセルロースをグラファイト化し AMS 法により測定を行った。以下、グラファイト化の方法を述べる。

グラファイト化

セルロース試料を約 8mg、酸化銅を約 900mg それぞれとり、9mm φ × 200mm のバイコール管（融点 1300°C）につめる。封管ラインに接続し、0.01Torr まで排気したのちにバーナーで封管する。これを、電気炉（850°C）で約 3 時間加熱し、試料から二酸化炭素を得る。

二酸化炭素を水素で還元することにより、グラファイト化を図る。この際に鉄の粉末を触媒として用いる。



Fe

鉄の粉末の表面が酸化されている場合グラファイト化は進行しないため、グラファイト化を行う前に鉄の再還元を行った。

測定結果

図4に液体シンチレーション法による測定結果を、図5にAMS法による測定結果の1479年以降のデータを示す。そして、図6に両測定を合わせた結果を示す。測定点は、126点中86点である。複数回測定した試料は、統計的な重みを考慮した上での平均をとった。また誤差棒は、計数値の統計誤差と合成時期の違うNBS標準試料を補正したことによる誤差を考慮した誤差を表す。参考のためにStuiver等によって測定された10年値も示した。また、3年移動平均、33年移動平均も図6に示す。我々の測定結果が、Stuiver等によって得られた10年値と良い一致をしていることがわかる。しかし、長期トレンドを除いた変動の大きさは、 $\pm 0.4\%$ 程度で、Kocharov等の値より小さいことがわかった。

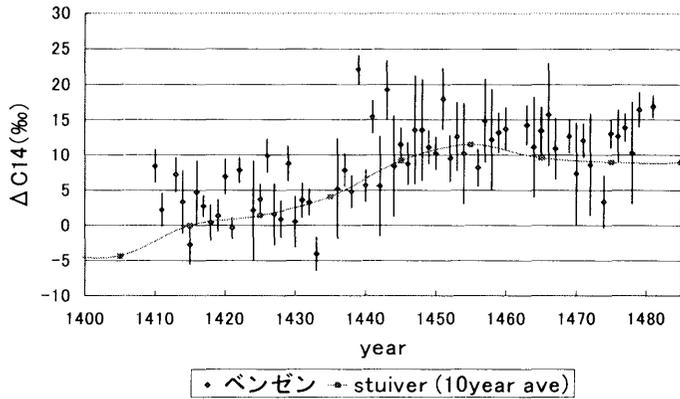


図4 液体シンチレーション法による測定結果

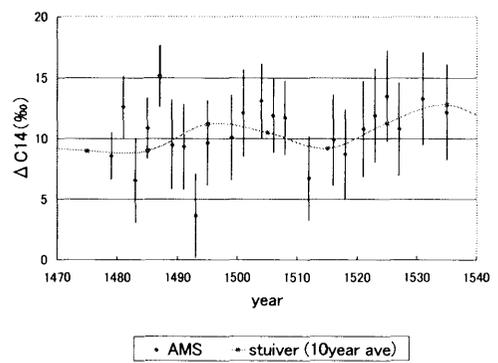


図5 AMS法による測定結果

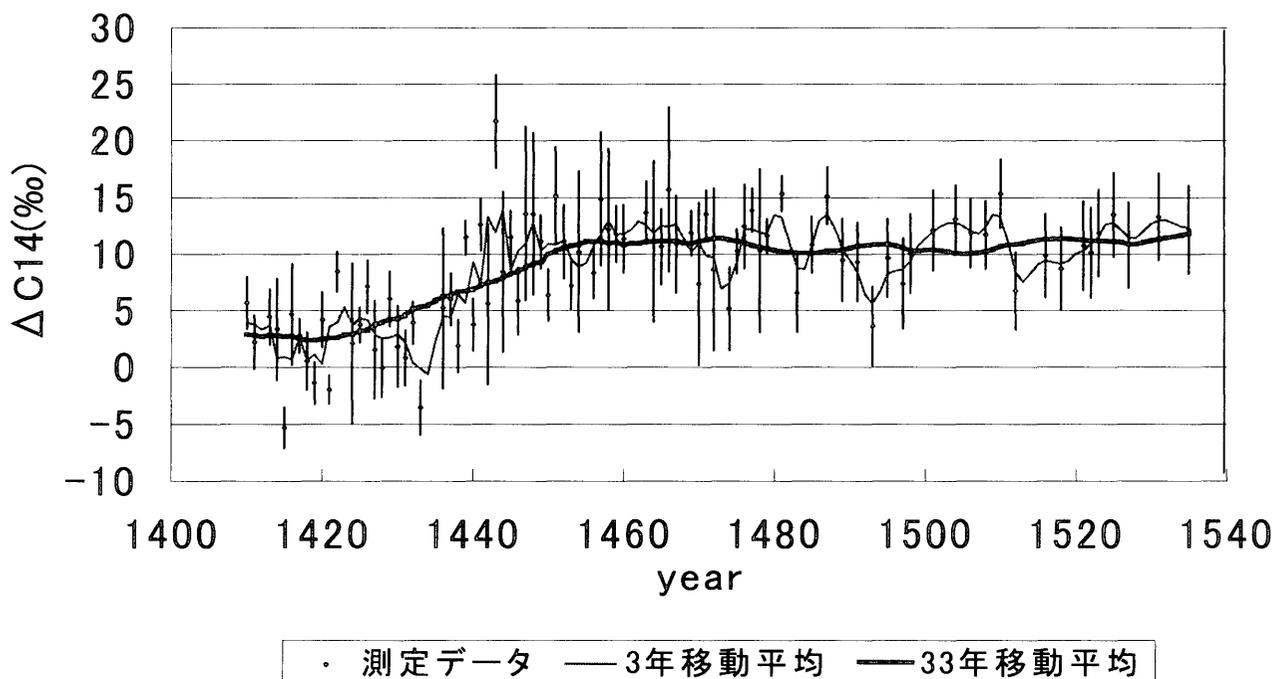


図6 全測定結果

周期解析による考察

測定データからシュペーラー極小期における周期性の有無を検証するために、MEM（最大エントロピー法）による周期解析を行った。なお、未測定点については線形補間法による補間を行った。図7に

測定データの周期解析結果を示す。長期変動による長周期性が強く出てしまっているため、比較的短い周期が見えづらくなっている。図 8 に拡大図を示す。図 8 からは、いくつかのピークが見られるが、20.8 年のピーク（ただし、MEM の分解能から考えると、20 年前後のピークとしかいえない）が最も高いスペクトル強度であることが見てとれる。

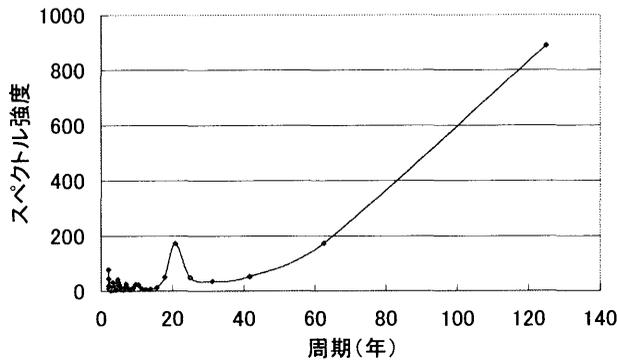


図 7 周期解析結果

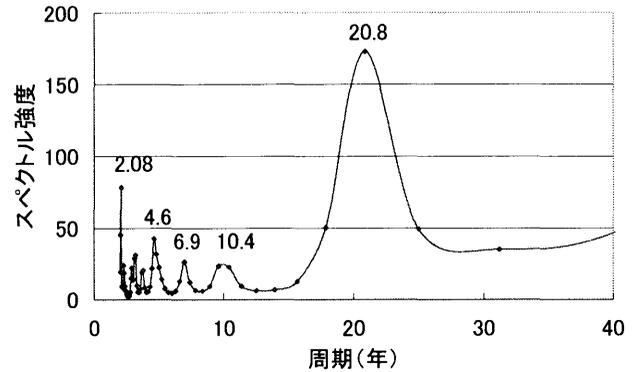


図 8 周期解析結果（拡大）

まとめ

測定データの周期解析の結果、シュペーラー極小期における太陽活動周期は、20 年前後である可能性が高いことが判明した。つまり、Kocharov 等の結果と合わせて考えると、太陽活動極小期においては、20 年前後の周期が基本となる可能性が高いことを意味する。

しかし、未測定点が多いこと、誤差が大きいことを考慮すると、まだなお太陽活動の 20 年前後の周期性を断定することはできない。そのため今後、測定点を増やし、制度を高める必要がある。

ただ、極小期における太陽の 20 年前後の周期性が本物であるとする、太陽の 11 年周期で変動する磁場活動が弱まったことにより、まったく別の機構からなる 20 年前後の周期を持つ太陽の磁場活動が見えたことを意味するのかもしれない。

謝辞

本研究を行うにあたって、多くの方々のご指導、ご協力を頂きました。AMS での試料調製、測定において名古屋大学年代測定総合研究センターの中村俊夫先生、池田晃子さん他センターの皆様にご指導ご協力を頂きました。Kh.Arslanov 先生には、化学ラインの構築、試料調製方法など本研究全般に渡り、数多くのご指導、助言をして頂きました。名古屋大学環境学研究科の松本英二先生、北川浩之先生には、Quantulus、化学ラインの使用、試料調製等において多くのご指導、助言をして頂きました。ここに深く感謝致します。国際日本文化研究センターの安田喜憲先生、ならびに研究室の皆様には、Quantulus の使用において様々なご協力を頂きました。皆様に大変お世話になりました。この場をお借りして皆様に深く感謝致します。

本研究の一部は、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 12440062）を使用して行われました。

参考文献

- Arslanov, Kh. A, et al., 1993 : Problems and Method of Dating Low- Activity Samples by Liquid Scintillation Counting, Radiocarbon, 35, 393-398.
- Kocharov, G. E., 1995 : Radiocarbon content variation and Maunder minimum of solar activity, Solar Physics, 159, 381-391.
- Stuiver, M., 1998 : High-precision Radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples, Radiocarbon,40, 1127-1151.

Solar activity research of the Sporer minimum

Tunehito Uemura , Hiroko Miyahara , Yasushi Muraki , Kimiaki Masuda

STElab. Nagoya University
Tel:052-789-4318 , Fax:052-789-4313
E-mail:uemura@stelab.nagoya-u.ac.jp

Abstract

It is known that the periods when solar activity was extremely weak (so-called grand minima) existed several times in the last 1000 years. It is reported by Kocharov et al. that the solar activity periodicity during the Maunder minimum was not the 11 year variation but the 22 year variation.

What does the cycle of 22 years mean? Does the periodicity of 22 years exist also in the minima other than the Maunder minimum?

We have investigated the solar activity of the Sporer minimum, which preceded the Maunder minimum, in order to understand the periodicity of solar activity during the minima. Both the liquid scintillation method and the accelerator mass spectrometry method (AMS method) were used for measuring the ^{14}C concentration in annual tree rings.