

# 樹木年輪中 $^{14}\text{C}$ 濃度測定による太陽活動極小期の研究

古澤秀樹<sup>1)</sup>・宮原ひろ子<sup>1)</sup>・毛受弘彰<sup>1)</sup>・増田公明<sup>1)</sup>・村木綏<sup>1)</sup>・中村俊夫<sup>2)</sup>・北川浩之<sup>3)</sup>

1) 名古屋大学太陽地球環境研究所

〒464-8602 名古屋市千種区不老町

TEL : 052-789-4329, FAX : 052-789-4313

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

2) 名古屋大学年代測定総合研究センター

3) 名古屋大学環境学研究科

## 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。最近まで、太陽は非常に安定した恒星であると考えられていたが、過去の太陽活動の研究により数百年のスケールで極度に太陽活動が低下した時期、太陽活動極小期が存在することが分かってきた。しかし、そのひとつであるマウンダー極小期においては太陽黒点がほとんど現れず(図 1)、当時、11 年周期の太陽活動が継続していたかは明らかになっていない。また、この時期は小氷河期の最盛期と一致しているが、太陽活動の低下と地球気候の寒冷化の間に因果関係が存在するのかははっきりしていない。

我々の研究グループでは、宇宙線起源放射性核種である  $^{14}\text{C}$  を用いて、シュペーラー極小期(1415-1534 年)およびマウンダー極小期(1645-1720 年)における太陽活動の周期性と変動振幅を調べている。シュペーラー極小期においては未だに 1 年ごとに年輪中の  $^{14}\text{C}$  濃度を測定している他の研究機関はない。またマウンダー極小期においてはすでにアメリカの Stuiver らとロシアの Kocharov らが 1 年ごとの年輪中  $^{14}\text{C}$  濃度を測定しているが (Stuiver, 1998; Kocharov, 1995)、各々の結果は異なっており当時の太陽活動の変動強度や周期性には明確な結論が出ていない。そこで、シュペーラー極小期の研究には樹齢約 700 年の屋久杉を、マウンダー極小期の研究には樹齢 400 年の室生寺杉を用いて、加速器質量分析計により年輪中の  $^{14}\text{C}$  濃度を測定を行っている。本報告では、現在までに得られている屋久杉と室生寺杉の年輪中  $^{14}\text{C}$  濃度の測定結果について報告する。

## 2. 太陽活動と $^{14}\text{C}$

地球に到来する銀河宇宙線(一次宇宙線)の化学組成は、陽子が約 90%、 $\alpha$  粒子が約 10%であり、それに若干の重い原子核が含まれている。宇宙線は荷電粒子であるため、惑星間空間を通過して地球に到達する際に惑星間空間の磁場によりその軌道が大きく影響を受ける。太陽から噴き出される超音速のプラズマ風(太陽風)によって惑星間空間に太陽磁場が引き出され、惑星間空間磁場の大きさが

変動する。したがって太陽活動が活発な時期は地球に到来する宇宙線はこの磁場により遮蔽され宇宙線量は減少する。逆に太陽活動が静穏な時期は到来する宇宙線量は増大する。このように宇宙線量の変動は太陽活動の変動を反映する量になっている。

一次宇宙線は、大気上層において大気原子核（窒素、酸素、アルゴンなど）と核破砕反応（spallation）をおこし、二次宇宙線を生成する。それによって生成された熱中性子は、窒素原子核に捕獲され放射性炭素  $^{14}\text{C}$  を生成する。 $^{14}\text{C}$  は酸化され  $^{14}\text{CO}_2$  となり、安定同位体から成る  $^{12}\text{CO}_2$ 、 $^{13}\text{CO}_2$  とよく混合した状態で大気圏、海洋圏、生物圏を循環する。樹木は光合成により大気中の  $\text{CO}_2$  を取り込み 1 年毎に年輪を形成していく。年輪形成後は外部との炭素交換は途絶えるため、樹木は 1 年毎の大気  $^{14}\text{C}$  濃度の情報を記録していることになる。したがって樹齢の長い樹木を用いて年輪中の  $^{14}\text{C}$  濃度を測定すればその年輪が形成された時期の一次宇宙線量を推定することができ、さらには当時の太陽の磁場活動を復元することが可能である。

図 2 に、過去 1000 年間の年輪中  $^{14}\text{C}$  濃度の変動を示す。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  $^{14}\text{C}$  濃度の高い時期が 5 度存在することが分かっている。古い方からオールト極小期（1010-1050 年）、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。

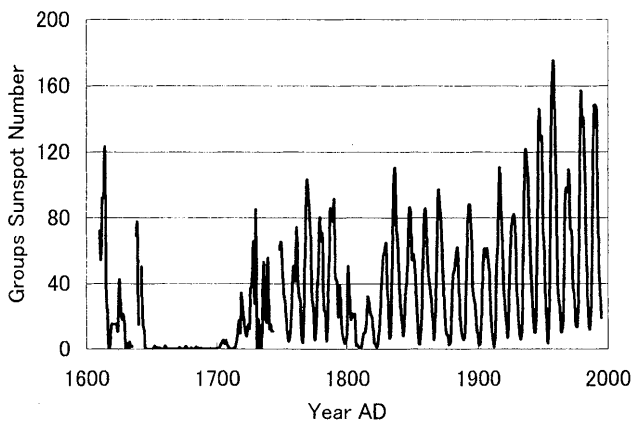


図 1 太陽黒点数 (Hoyt, 1998)

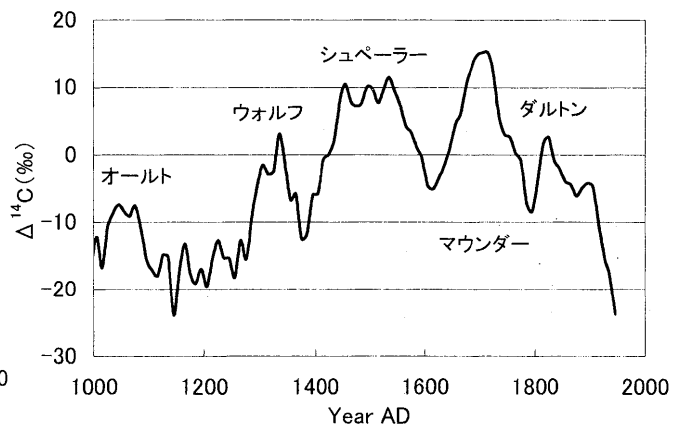


図 2 過去 1000 年間の年輪中  $^{14}\text{C}$  濃度変動 (Stuiver, 1998)

### 3. 試料調製

我々は  $^{14}\text{C}$  濃度測定試料として、シュペーラー極小期の研究には屋久杉（樹齢 714 年、北緯  $30^\circ$  東経  $130^\circ$  にて採取、図 3）を、マウンダー極小期の研究には室生寺杉（樹齢 392 年、北緯  $34^\circ$  東経  $136^\circ$  にて採取、図 4）を用いている。木材に含まれる年輪間移動成分を除去するために化学処理によりセルロースを抽出した。セルロースを燃焼して二酸化炭素に変換し、さらに水素還元によりグラファイトを生成した。以下に調製過程を述べる。

年輪の剥離

ブロック状に分割された木材試料の年輪をのみやピンセットを用いて外側から1年ごとに剥離する。

粉碎処理

以後の化学処理における化学反応性を高めるために、削りだした木を2~3mm程度に粉碎する。

有機洗浄

ベンゼン・エタノール(1:1)混合液により試料を洗浄し、副成分(樹脂、灰分)を除去する。

塩酸酸性下亜塩素酸ナトリウムによる漂白

塩酸酸性下(pH3)で亜塩素酸ナトリウムによる漂白を行い、リグニンを除去する。亜塩素酸ナトリウムの量は試料の量の約1.6倍である。

酸、アルカリによる洗浄

酸、アルカリによる洗浄を行う。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(80℃)で一晩乾燥させセルロースを得る。

二酸化炭素生成

9mmφバイコール管に約8mgのセルロースと線状酸化銅1g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℃)で3時間加熱しセルロースを燃焼させ、二酸化炭素を得る。

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。

鉄触媒下水素還元によるグラファイト生成

9mmφのバイコール管に試料の炭素量の約1.5倍の質量の鉄粉を入れる。これに二酸化炭素試料と試料の炭素量の2.1倍のモル数の水素を入れ封管する。電気炉(650℃)で6時間加熱しグラファイトを生成する。

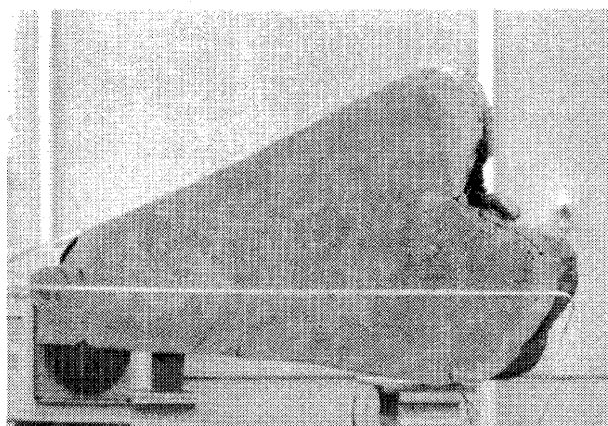


図3 屋久杉(樹齢714年)

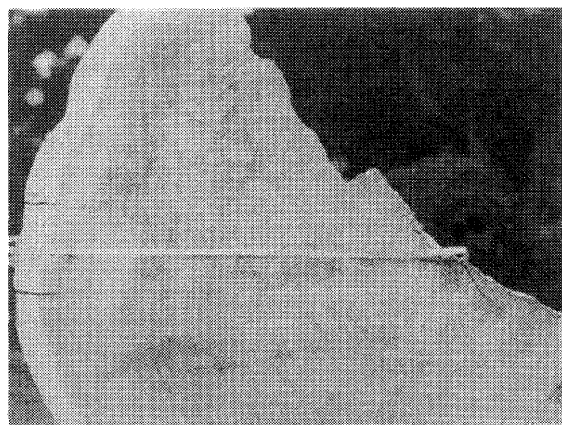


図4 室生寺杉(樹齢392年)

## 4. 測定結果

### 4.1 シュペーラー極小期

図5に加速器質量分析計（AMS）測定により得られた1409年から1551年における計112点の測定結果を示す。我々の測定結果は、Stuiverの10年値と測定誤差の範囲内で一致している。シュペーラー極小期における太陽活動の周期性を探るべく、線形補間した測定結果を用いて離散フーリエ変換（DFT: Discrete Fourier Transform）による周期解析を行った（図6）。その結果、11.9年と28.6年の周期のスペクトルピークが得られた。スペクトルの強度は11.9年の方が強く現れている。周期の統計的有意性は、11年が $1.6\sigma$ 、28.6年が $1\sigma$ 程度である。

フーリエ変換による周期解析結果から得られた11年の周期性がどのような時間変動をしているのかを調べるべく、線形補間した我々の測定結果を用いてバンドパスフィルターによる解析を行った。図7より、1450-1500年にかけて11年の周期性が弱まっていることが分かる。11年の周期性が弱まる時期の前後の変動強度は2-2.5%である。この値は、宇宙線量の20%程度の変動強度が炭素循環の過程で100分の1程度に減衰していると考えられる。以上の結果から、シュペーラー極小期においておおむね11年周期の太陽活動は継続しているものの、その中ごろにおいてその活動強度は弱まっていたと考えられる。また11年の周期性が弱まることにより、通常は強度が弱い11年周期に隠されているような別の周期が現れる可能性がある。

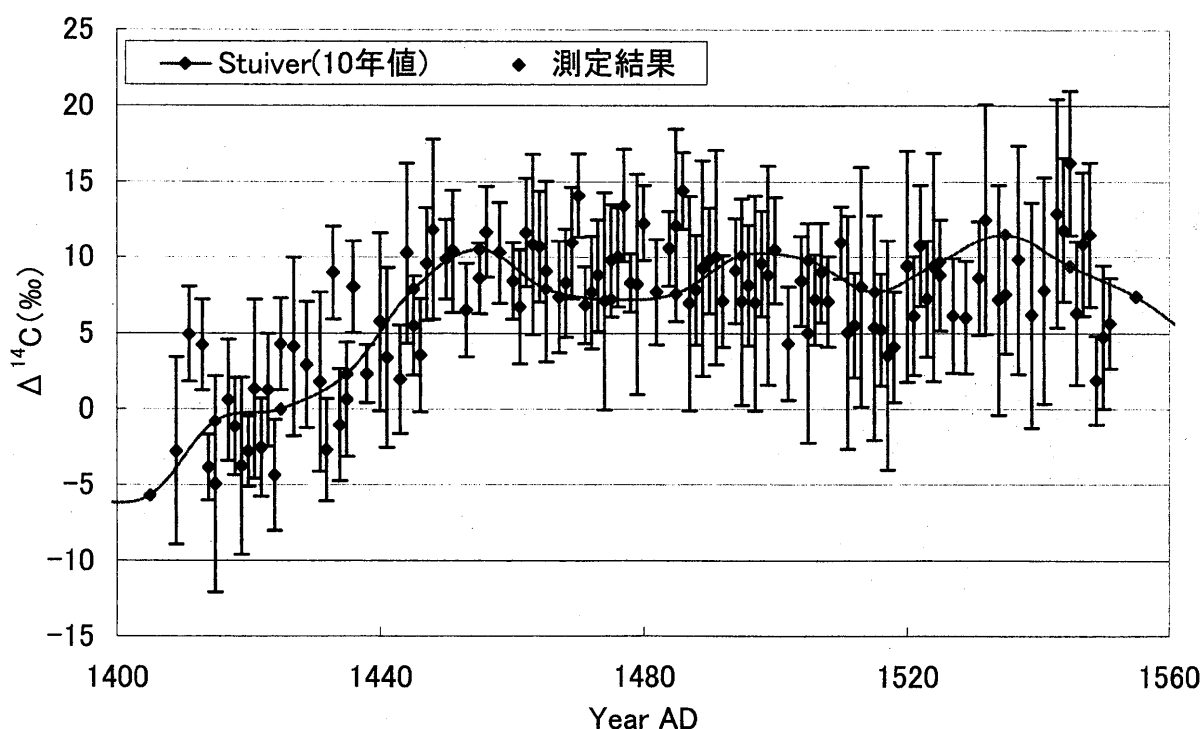


図5 屋久杉年輪中 $^{14}\text{C}$ 濃度（シュペーラー極小期）

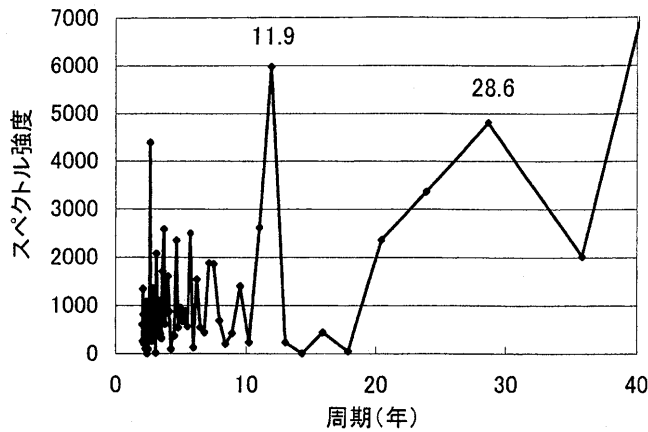


図6 フーリエ周期解析 (シュペーラー極小期)

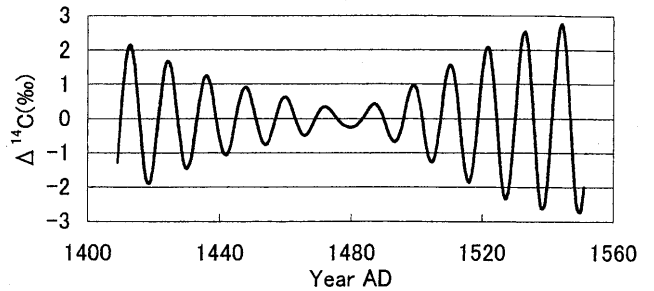


図7 シュペーラー極小期における  
11-12年周期成分

#### 4.2 マウンダー極小期

図8にAMS測定により得られた1653年から1731年における隔年40点の測定結果を示す。比較のためにStuiver (1年値)とKocharov (1年値)の結果がプロットしてある。我々の測定結果は、Stuiverの結果と比較して全体的にやや低い値を示しているが測定誤差の範囲内である。一方、Kocharovの結果のような大きい変動振幅は得られていない。マウンダー極小期における $\Delta^{14}\text{C}$ のピーク年代は、Stuiverの結果に一致している。この測定結果を40個の時系列データとして離散フーリエ変換による周期解析を行い、得られた周期を2倍する(図9)。その結果、10年にスペクトルのピークは存在するもののその強度は弱く、その統計的有意性は $0.7\sigma$ 程度である。このことから、測定期間において11年周期性が弱かった可能性がある。しかし、測定点が少なく測定期間も短いために、各々の測定値の誤差によるばらつきによって周期性が見えなくなっている可能性も考えられる。したがって、マウンダー極小期において11年周期の太陽活動が継続していたのか否かを確証するには測定点が不足している。今後11年周期成分の振幅と時間変動の定量的な結論を出すには、より高精度での測定もしくは測定点や測定期間を増やす必要がある。

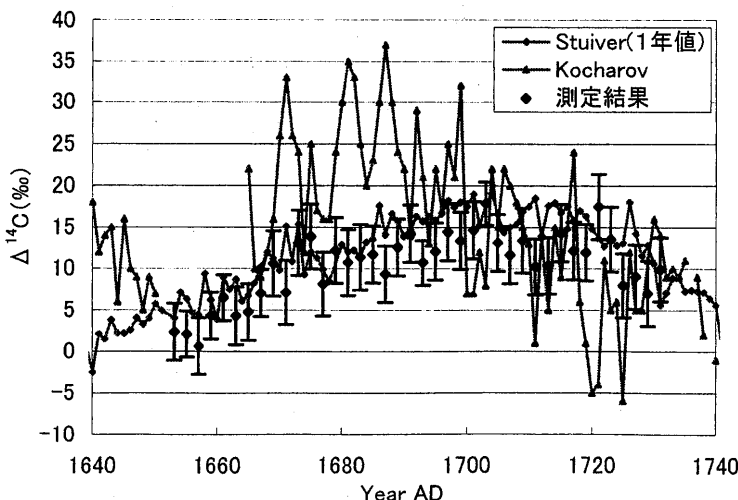


図8 室生寺杉年輪中 $^{14}\text{C}$ 濃度 (マウンダー極小期)

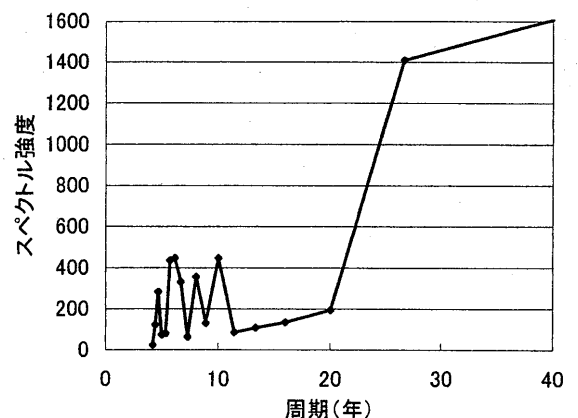


図9 フーリエ周期解析(マウンダー極小期)

## 5. まとめ

太陽活動が極度に低下した太陽活動極小期における太陽活動の変動振幅や変動周期を明らかにすべく、年輪中の<sup>14</sup>C濃度の測定が行われた。これまでに、シュペーラー極小期は1409-1551年における112点が、マウンダー極小期は1653-1731年における隔年40点がAMSにより測定された。シュペーラー極小期においては、Stuiverらの結果（10年値）と測定誤差の範囲内でよい一致を示した。離散フーリエ変換による周期解析を行った結果、11.9年と28.6年の周期が得られた。11.9年周期の統計的有意性は1.6 $\sigma$ 程度である。バンドパスフィルターによる解析結果から極小期の中ごろの1450-1500年において、11年の周期性が弱くなっていることが分かった。以上から、シュペーラー極小期の中頃において11年周期の太陽の磁場活動が弱まっていたことが分かった。一方マウンダー極小期において、我々の結果は測定期間全体においてStuiverらの結果より低い値を示しているが、測定誤差の範囲内であった。離散フーリエ変換による周期解析の結果、有意なスペクトル強度は得られなかった。現在までに得られた測定結果からマウンダー極小期において11年周期が存続していると確証することは困難である。今後、11年周期成分の振幅や時間変動に関して定量的な結論を出すには、測定点を増やし測定期間を広げる必要がある。また、別の極小期の<sup>14</sup>C濃度や<sup>10</sup>Be量の高精度の測定結果が得られれば、シュペーラー極小期の中ごろに見られる11年周期の太陽活動の衰退が太陽活動極小期に共通な現象であるのかが明らかになるとと思われる。そして、太陽磁場の長期変動のメカニズムに対して新たな知見が得られるものと期待される。

## 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丹生越子さん、池田晃子さん、他センターの皆さんには、加速器質量分析計による測定や試料調製全般にわたり多大なご指導やご協力を頂きました。この場を借りて深くお礼申し上げます。

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）を使用して行われました。

## 参考文献

1. Kocharov, G. E., et al., 1995 : Radiocarbon content variation and Maunder minimum of solar activity, *Solar Physics*, 159, 381-391.
2. Hoyt, D. V., et al., 1998 : Group sunspot numbers, *Solar Physics*, 179, 189-219.
3. Stuiver, M., et al., 1998 : High-precision Radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples, *Radiocarbon*, 40, 1127-1151.

# Study of solar activity during the grand minima by measuring the $^{14}\text{C}$ content of tree rings

Hideki Furuzawa<sup>1)</sup>, Hiroko Miyahara<sup>1)</sup>, Hiroaki Menjo<sup>1)</sup>, Kimiaki Masuda<sup>1)</sup>, Yasushi Muraki<sup>1)</sup>,  
Toshio Nakamura<sup>2)</sup>, Hiroyuki Kitagawa<sup>3)</sup>

1) Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

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

Tel : +81-52-789-4329, Fax : +81-52-789-4313

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

2) Center for Chronological Reserch, Nagoya University

3) Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

## Abstract

Radiocarbon  $^{14}\text{C}$ , which is one of cosmogenic radioisotopes, is a good index of change in the solar activity. Investigation of the  $^{14}\text{C}$  content in each tree ring gives information on the change of solar activity in the past. Variation of the  $^{14}\text{C}$  content shows that five grand minima, when the solar activity was extremely weak, existed in the last millennium. The Maunder Minimum(1645-1720 AD), one of the grand minima in the last millennium, is well known to have had almost no sunspots.

To clarify the characteristics of solar activity during the grand minima, we have investigated the solar activity during the Spörer Minimum(1415-1534 AD) and Maunder Minimum. We measured the  $^{14}\text{C}$  content in the 714-year-old Yaku cedar tree from Spörer Minimum and the 392-year-old Murou-ji cedar tree from Maunder Minimum by the accelerator mass spectrometry(AMS).

The time series of the  $^{14}\text{C}$  data for the Spörer Minimum was analyzed by Fourier Analysis. The power spectrum shows peaks in the periodicity at 11.9yr and 28.6yr. The amplitude of 11.9yr period was stronger than that of 28.6yr. The 11-year cycle was extracted from the time series of the data by using band-pass filter. The 11-year cycle was suppressed during the 50 years of the mid Spörer Minimum. In Fourier Analysis of the  $^{14}\text{C}$  data for the Maunder Minimum, the power spectrum shows no significant peak.

We continue this study to get more detail characteristics of the solar activity during the grand minima.