

## 2-1-6 太陽活動の経験的な長期予測

### 2-1-6 Empirical Forecast of Solar Cycle

亘 慎一

WATARI Shinichi

#### 要旨

太陽活動が活発であればあるほど人工衛星など人間が作った技術システムに影響を与えるような宇宙嵐が多く発生する傾向がある。このため、宇宙天気予報において太陽活動サイクルの大きさを予測することが課題のひとつとなっている。本稿では、サイクルの長さ、太陽活動の極小において太陽黒点が観測されなかった日数や地磁気活動を用いたサイクルの長期予測について述べる。

Forecast of amplitude of a new cycle is important for space weather. Because many intense space storms tend to occur in solar cycles with larger maximum sunspot numbers. These intense storms cause failure of manmade technical systems such as satellite system. We report forecast of amplitude of solar cycle using cycle length, number of no-sunspot days in solar minimum and geomagnetic activity in solar minimum.

#### [キーワード]

太陽サイクル, 太陽黒点数, 極大期, 極小期

Solar cycle, Sunspot number, Solar maximum, Solar minimum

## 1 まえがき

太陽活動による地球周辺の宇宙環境の擾乱である「宇宙嵐」による衛星障害の発生がいくつも報告されている[1][2]。宇宙嵐の発生は、太陽活動に比例して多くなる傾向があるため、宇宙天気予報において太陽活動サイクルの大きさを予測することは課題のひとつとなっている。

年平均太陽黒点数と M 及び X クラスの太陽フレアの年間発生数(図 1 上)、年平均黒点数と太陽高エネルギー粒子現象の年間発生数(図 1 中)、年平均黒点数と地磁気擾乱の年間発生数(図 1 下)を図 1 に示す。図 1 に示したように、太陽活動が高いほど、太陽フレア、高エネルギー粒子現象、地磁気擾乱などの「宇宙嵐」が発生する頻度が高くなる傾向があり、それらによる障害の発生も増加する。

宇宙嵐は、衛星運用、宇宙飛行士や航空機乗務員の被曝、短波通信、衛星測位システム、電力網の運用などに影響を与えることがある[1][2]。また、太陽活動が高いと大気ドラッグが増加し、低軌道

周回衛星の軌道減衰を大きくする[1][2]。運用に必要な軌道を維持するためには、衛星に搭載された燃料を使用する必要があるため、太陽活動が高いと衛星の寿命が短くなる。軌道上のデブリの分布も大気ドラッグの変化により変動する。

太陽活動サイクルの極大の太陽黒点数の予測に関して、これまで多くの手法が提案されている[3][4]。Pesnell [5] は、予測手法を気候学的手法、極小期の活動状況を使う気候学的手法、前兆の現象を使う手法、ダイナモモデルによる手法、スペクトル的手法、非線形的予測手法の 6 つに分類している。気候学的手法は、過去の太陽活動変動の統計的な変動を将来の予測に使うものである。極小期の活動状況を使う気候学的手法は、直近の活動状況を次のサイクルの予測に使うものである。前兆現象を使う手法は極小期の太陽の極磁場の強度のように将来の太陽活動の指標となるものを予測に使う手法である。ダイナモモデルによる手法は太陽活動を駆動する物理的モデルを考慮した予測手法である。この手法はサイクル 24 の予測ではじめて使われるようになった[6]。スペクトル的

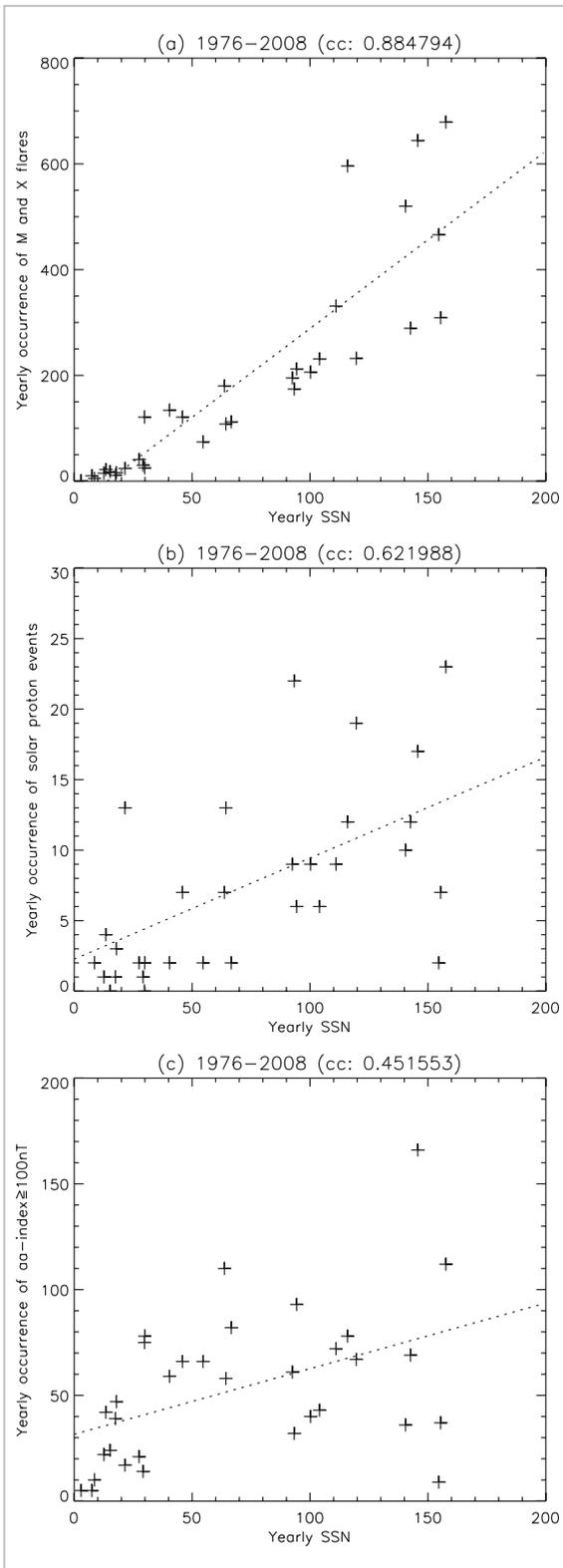


図1 年平均太陽黒点数とM及びXクラスの太陽フレアの年間発生数(上)、年平均黒点数と太陽高エネルギー粒子現象の年間発生数(中)、年平均黒点数と地磁気擾乱の年間発生数(下)

手法はフーリエ解析のように時系列分析を使った予測手法である。非線形予測手法は、ニューラルネットワークのように非線形の統計的モデルを使った予測手法である。Pesnell<sup>[5]</sup>が取りまとめた太陽活動サイクル24の極大における太陽黒点数の予測値は、42から185と予測手法によって大きな差がある。このことは、太陽活動サイクルの予測に関して、今後、さらに研究を進めていく必要があることを示している。

本稿では、太陽活動サイクルの長さ、極小期での黒点が観測されなかった日数および極小期での地磁気活動を用いた太陽活動サイクルの極大の太陽黒点数の統計的な手法による予測とそれらの予測手法を使った太陽活動サイクル24の極大の予測について述べる。

## 2 データについて

太陽活動サイクルの長さ、極小期において太陽黒点の観測されなかった日数、太陽活動サイクルの立ち上がりおよび極大の太陽黒点数との相関などについて統計解析には、ベルギー王立天文台(SIDC-team, World Data Center for the Sunspot Index, Royal Observatory of Belgium)より提供されている太陽黒点数の1日値(Jan.1849-Dec.2009)、年平均値、月平均値、13ヶ月移動平均値を用いた。極小期の地磁気活動と太陽活動サイクルの立ち上がり、極大の黒点数との相関については、米国海洋大気庁地理物理データセンター(NOAA/NGDC, National Atmospheric and Oceanic Administration)からの地磁気aa指数を用いて解析を行った。aa指数は、イギリスとオーストラリアの2か所での地磁気観測データから作られる地磁気活動をあらわす指数で、約140年間のデータが存在するため、他の地磁気指数に比べて長期間の統計解析を行うことができる利点がある。

## 3 太陽活動サイクルの長さとの次のサイクルの太陽活動について

図2に各太陽活動サイクル毎のサイクルの長さを示す。図から太陽活動サイクルの長さは、平均すると約11年だが、それぞれのサイクルを見てみると9年から13年と変動していることがわか

る。炭素の同位体 14 を使った過去の太陽活動の解析から宮原他<sup>[7]</sup>は、マウンダー極小期の際には太陽活動サイクルの長さが 13 年から 15 年と長くなっていたことを示した。これは、太陽活動サイ

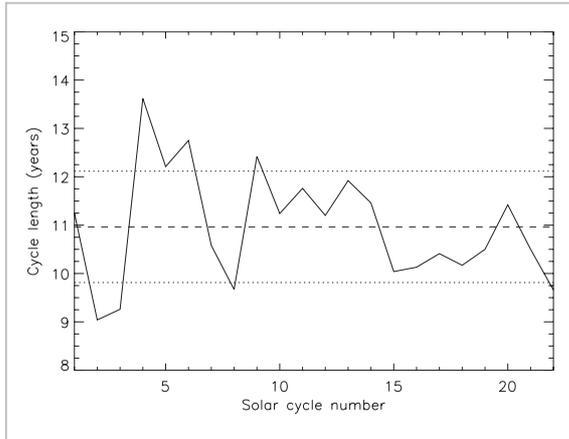


図2 各太陽活動サイクルの長さ

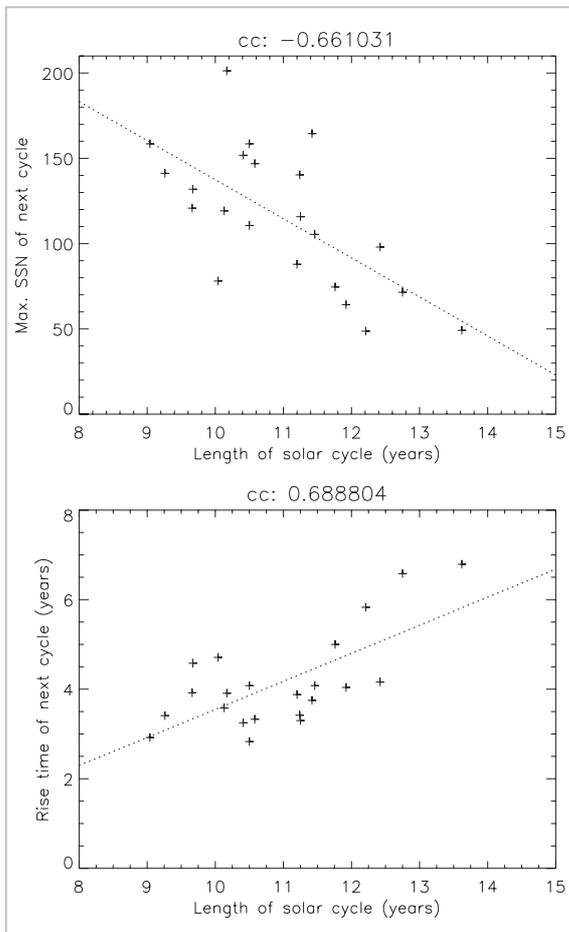


図3 太陽活動サイクルの長さとの次のサイクルの極大の太陽黒点数のプロット(上図)、太陽活動サイクルの長さとの次のサイクルの極大までの立ち上がり時間のプロット(下図)

クルの長さとの太陽活動の間に関係があることを示唆している。そこで、太陽活動サイクルの長さとの次のサイクルの太陽活動に関して統計的解析を行った<sup>[8]</sup>。

図3に太陽活動サイクルの長さとの次のサイクルの極大の太陽黒点数のプロット(上図)、太陽活動サイクルの長さとの次のサイクルの極大までの立ち上がり時間のプロット(下図)を示す。図からわかるように、太陽活動サイクルの長さとの次のサイクルの極大の黒点数には正の相関があり、太陽活動サイクルの長さとの次の極大の立ち上がり時間には負の相関がある。図3のデータに最小二乗法を使ってフィッティングを行った結果が、式1および式2である。

$$\begin{aligned} \text{(次のサイクルの極大の太陽黒点数)} = \\ -22.92 \times (\text{太陽活動サイクルの長さ}) + 366.58 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{(次サイクルの立ち上がり時間)} = \\ 0.63 \times (\text{太陽活動サイクルの長さ}) - 2.72 \end{aligned} \quad (2)$$

#### 4 極小の太陽黒点が観測されなかった日数との次のサイクルの太陽活動について

表1は1849年以降、1年間に太陽黒点が観測されなかった日数の大きい年の順に10番目までを示したものである。サイクル23の極小にあたる2008年は、太陽黒点の観測されなかった日が多く、かなり太陽活動が小さいことがわかる。表2は1849年以降、連続して太陽黒点が観測されなかった日数の大きい順に10番目までを示したものである。この表によれば、過去のサイクルで黒点が10ヶ月くらい連続して観測されなかったことがあったことがわかる。最近では、サイクル22の極小期に太陽黒点が連続して42日間観測されない時期があった。また、2008年7月21日から連続31日間、2009年7月31日から連続32日間、太陽黒点が観測されない時期があった。

図4は年平均太陽黒点数(上図)と太陽黒点の観測されなかったに年間の日数(下図)をプロットしたものである。図に示したように、太陽活動サイクルの極小期付近では、太陽黒点の観測されな

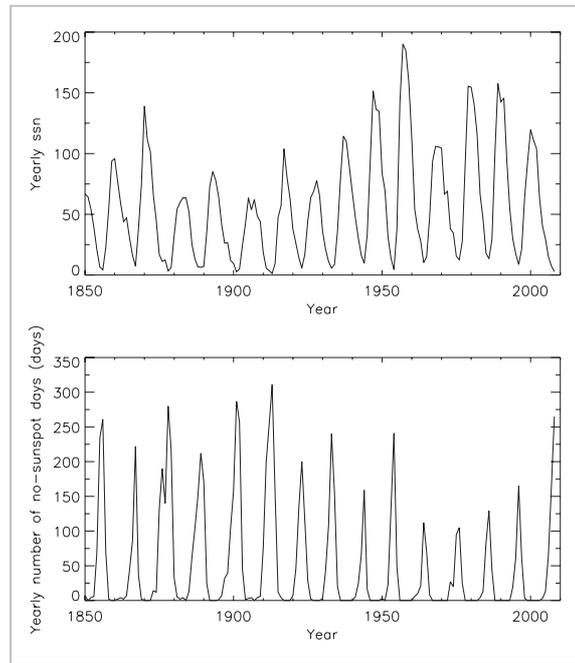
**表1** 1849年以降の太陽黒点が観測されなかった年間の日数

| no. | 年    | 黒点が観測されなかった年間の日数 (日/年) | サイクル |
|-----|------|------------------------|------|
| 1   | 1913 | 311                    | 14   |
| 2   | 1901 | 287                    | 13   |
| 3   | 1878 | 280                    | 11   |
| 4   | 2008 | 265                    | 23   |
| 5   | 2009 | 262                    |      |
| 6   | 1856 | 261                    | 10   |
| 7   | 1902 | 257                    | 13   |
| 8   | 1912 | 254                    | 14   |
| 9   | 1954 | 241                    | 18   |
| 10  | 1933 | 240                    | 16   |

**表2** 1849年以降、連続して太陽黒点が観測されなかった日数

| no. | 発生日        | 連続して黒点が観測されなかった日数 (日) | サイクル |
|-----|------------|-----------------------|------|
| 1   | 1913/04/08 | 92                    | 14   |
| 2   | 1901/03/11 | 69                    | 13   |
| 3   | 1879/02/16 | 54                    | 12   |
| 4   | 1855/08/14 | 49                    | 9    |
| 5   | 1902/03/17 | 49                    | 14   |
| 6   | 1878/04/04 | 47                    | 11   |
| 7   | 1878/09/14 | 45                    | 11   |
| 8   | 1902/01/16 | 45                    | 13   |
| 9   | 1912/01/21 | 43                    | 14   |
| 10  | 1996/09/13 | 42                    | 23   |
| 11  | 1856/04/22 | 41                    | 10   |
| 12  | 1901/11/26 | 40                    | 13   |
| 13  | 1913/07/15 | 39                    | 14   |
| 14  | 1924/01/06 | 39                    | 16   |
| 15  | 1855/12/12 | 38                    | 9    |
| 16  | 1866/12/29 | 38                    | 10   |
| 17  | 1876/05/17 | 37                    | 11   |
| 18  | 1878/07/27 | 37                    | 11   |
| 19  | 1933/11/05 | 36                    | 17   |
| 20  | 1944/04/18 | 36                    | 18   |
| 21  | 1867/04/20 | 35                    | 10   |
| 22  | 2009/07/31 | 32                    |      |
| 23  | 1900/11/25 | 31                    | 13   |
| 24  | 1912/07/12 | 31                    | 14   |
| 25  | 1933/12/12 | 31                    | 17   |
| 26  | 2008/07/21 | 31                    | 23   |

かった年間の日数が増加し、その日数はサイクル毎に変動していることがわかる。図からここ数サイクルは過去のサイクルと比較して極小期付近における太陽黒点の観測されない年間の日数が少なかったことがわかる。極小期の太陽黒点数と次の



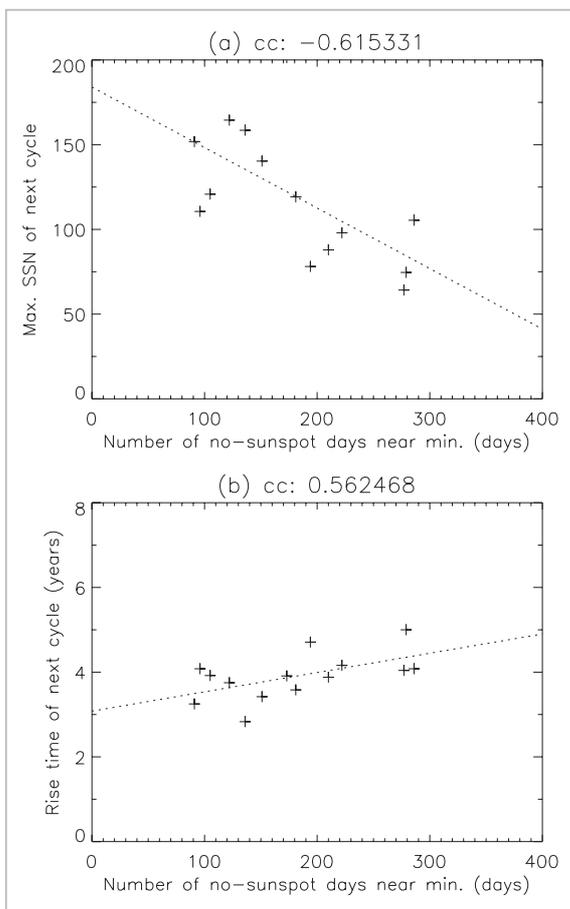
**図4** 年平均太陽黒点数(上図)と太陽黒点の観測されなかった年間の日数(下図)

サイクルの極大の太陽黒点数の間には正の相関があることが知られている[9]。そこで、太陽活動の極小直前の1年間における太陽黒点が観測されなかった日数と次のサイクルの太陽活動に関して統計的解析を行った。

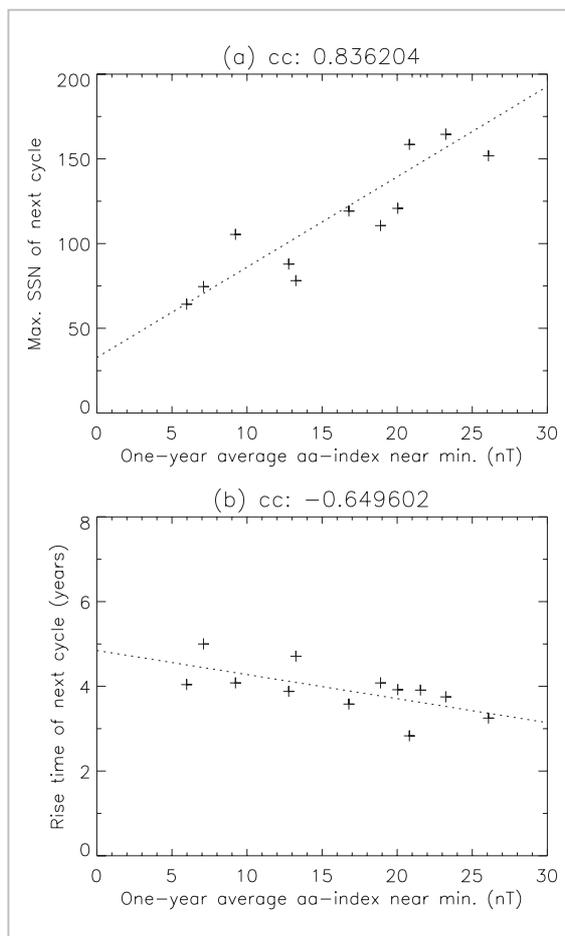
図5に極小直前の1年間における太陽黒点が観測されなかった日数と次のサイクルの極大の太陽黒点数のプロット(上図)、極小直前の1年間における太陽黒点が観測されなかった日数と次のサイクルの極大までの立ち上がり時間のプロット(下図)を示す。図からわかるように、極小直前の1年間における太陽黒点が観測されなかった日数と次のサイクルの極大の太陽黒点数には正の相関があり、極小直前の1年間における太陽黒点が観測されなかった日数と次の極大の立ち上がり時間には負の相関がある。図5のデータに最小二乗法を使ってフィッティングを行った結果が、式3および式4である。

$$\begin{aligned}
 (\text{次のサイクルの極大の太陽黒点数}) &= -0.36 \times \\
 &(\text{極小における太陽黒点の観測されなかった日数}) + 184.01 \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (\text{次サイクルの立ち上がり時間}) &= 0.0046 \times \\
 &(\text{極小における太陽黒点の観測されなかった日数}) + 3.08 \quad (4)
 \end{aligned}$$



**図5** 極小における太陽黒点が観測されなかった日数と次のサイクルの極大の太陽黒点数(上図)、極小における太陽黒点が観測されなかった日数と次のサイクルの極大までの立ち上がり時間のプロット(下図)



**図6** 極小における aa 指数の平均値と次サイクルの極大の黒点数のプロット(上図)と極小における aa 指数の平均値と次のサイクルの立ち上がり時間のプロット(下図)

## 5 極小の地磁気活動と次のサイクルの太陽活動について

太陽活動の極小期の地磁気活動が、次のサイクルの太陽活動の良い指標になることが知られている。Ohl<sup>[10]</sup>は、太陽活動の極小期の地磁気 aa 指数が次のサイクルの極大の黒点数と正の相関を持つことを見出した。Feynman<sup>[11]</sup>は、aa 指数の長期変動を R 成分と I 成分という二つの成分にわけて太陽活動との関連を調べ、I 成分のピーク値が次のサイクルの太陽黒点数とよい正の相関を持つことを示した。ここで R 成分はコロナ質量放出(CME, Coronal Mass Ejection)などスポラジックな太陽活動による地磁気擾乱によるもの、I 成分はコロナホールからの高速太陽風による回帰的な地磁気擾乱によるものである。

本稿では、1868 年以降の aa 指数を使い、太陽活動の極小直前の 1 年間における aa 指数の平均値を極小の地磁気活動の指標とした。図 6 に極小前の 1 年間における aa 指数の平均値と次サイクルの極大の黒点数のプロット(上図)と極小前の 1 年間における aa 指数の平均値と次のサイクルの立ち上がり時間のプロット(下図)を示す。図からわかるように、極小前の 1 年間における aa 指数の平均値と次サイクルの極大の太陽黒点数には正の相関があり、極小前の 1 年間における aa 指数の平均値と次サイクルの極大の立ち上がり時間には負の相関がある。図 6 のデータに最小二乗法を使ってフィッティングを行った結果が、式 5 および式 6 である。

$$\begin{aligned} \text{(次のサイクルの極大の黒点数)} &= 5.33 \times \\ &\text{(極小における aa 指数の年平均値)} + 32.75 \quad (5) \end{aligned}$$

$$(次サイクルの立ち上がり時間) = -0.057 \times (極小における aa 指数の年平均値) + 4.85 \quad (6)$$

## 6 サイクル 24 の予測について

「太陽活動サイクル 24 予測パネル」が NOAA と NASA によって組織され、太陽活動サイクル 24 の予測が行われている [12]。サイクル 24 の極大は 2011 年 10 月で極大の太陽黒点数が 140 になるという予測と 2012 年 8 月で極大の太陽黒点数が 90 になるという二つの予測が 2007 年 3 月にこのパネルによって発表された。しかし、2008 年の太陽活動が低調だったため、このパネルは以前発表した予測を修正し、サイクル 24 の活動は平均より小さく、極大は 2013 年 5 月で極大の太陽黒点数は 90 になるという予測を 2009 年 5 月に発表した。この際、サイクル 23 の極小は 2008 年 12 月だったとしている。

表 3 に式 1 から 6 によるサイクル 24 の極大の時期と極大の太陽黒点数の予測値を太陽活動サイクル 24 予測パネルによる予測値とともに示す。表 3 の予測値は、サイクル 23 の極小を 2008 年 12 月と仮定して計算を行ったものであるが、サイクル 24 の極大の太陽黒点数はサイクル 23 の極大の太陽黒点数 120.8 より小さくなることを示している。サイクル 23 の極小期の低い太陽活動や低い地磁気活動は、サイクル 24 の太陽活動が小さく、極大の時期も遅くなることを示唆している。しかし、サイクル 18 の極小期の太陽活動はかな

り低かったにもかかわらず、サイクル 19 の極大の太陽黒点数は 241 とこれまでの太陽活動サイクルの中で最大だったという例外もある。

## 7 むすび

現在の太陽活動サイクルの予測は、主として統計的手法によるもので、次のサイクルの太陽活動を事前に予測するのは依然として難しい状況にある。これまでの研究によれば、極小期における太陽活動や地磁気活動は次のサイクルの太陽活動のよい指標となることが知られている。サイクル 23 とは逆の磁場極性をもつ黒点群が 2008 年のはじめくらいから高緯度にあられ始めているが、太陽黒点が観測されない日が、2008 年では年間で 265 日、2009 年では年間で 262 日あり、太陽活動の低調な状態が続いている。

サイクル 23 の極小における低い太陽活動や低い地磁気活動は、サイクル 24 が活動の低いサイクルになることを示唆している。本稿による予測でもサイクル 24 の極大は 2013 年ころと予想され、極大における太陽黒点数はサイクル 23 より小さめになるとの結果が得られている。太陽活動サイクルの予測に関して、太陽活動のサイクル変動を駆動している物理的モデルを取り入れた予測モデルの開発が今後の重要な課題である。

## 謝辞

太陽黒点数の 1 日値 (Jan.1849-Dec.2009)、年平均値、月平均値、13 ヶ月移動平均値の提供について、ベルギー王立天文台 (SIDC-team, World Data Center for the Sunspot Index, Royal Observatory of Belgium) に感謝する。また、太陽フレアリスト、太陽高エネルギー粒子現象リスト、地磁気 aa-指数の提供について、米国海洋大気庁地球物理データセンター (NOAA/NGDC: National Oceanic and Atmospheric Administration/National Geophysical Data Center) に感謝する。

表 3 太陽活動サイクル 24 の極大の時期と極大の太陽黒点数の予測値

| 予測手法                             | 極大の時期      | 極大の太陽黒点数 |
|----------------------------------|------------|----------|
| 極小における黒点の観測されなかった日数による予測         | 2013 年 3 月 | 89       |
| 極小における地磁気活動 (aa-index による) による予測 | 2013 年 3 月 | 110      |
| 太陽活動サイクルの長さによる予測                 | 2014 年 2 月 | 78       |
| 太陽活動サイクル 24 予測パネルのコンセンサスによる予測    | 2013 年 5 月 | 90       |

## 参考文献

- 1 L. J. Lanzerotti, "Space weather effects on technologies", in Space Weather, edited by P. Song, H. Singer, and G. Siscoe, Geophys. Monogr. Ser., Vol.125, AGU, Washington, D. C., pp.11-22, 2001.
- 2 I. A. Daglis (ed.), "Effects of space weather on technology infrastructure", NATO Science Series, Vol.175, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 2004.
- 3 D. H. Hathaway, R. M. Wilson, and E. J. Reichmann, "A synthesis of solar cycle prediction techniques", J. Geophys. Res., Vol.104, pp.22375-22388, 1999.
- 4 R. P. Kane, "A preliminary estimate of the size of the coming solar cycle 24 based on Ohl's precursor method", Solar Phys., Vol.243, pp.205-217, 2007.
- 5 W. D. Pesnell, "Predictions of solar cycle 24", Solar Phys., Vol.252, pp.209-220, 2008.
- 6 M. Dikpati, G. de Toma, and P. A. Gilman, "Predicting the strength solar cycle 24 using a flux-transport dynamo-based tool", Geophys. Res. Lett., Vol.33, L05102, doi:10.1029/2005GL025221, 2006.
- 7 H. Miyahara, K. Masuda, Y. Muraki, H. Furuzawa, H. Menjo, and H. Nakamura, "Cyclicality of solar activity during the Maunder Minimum deduced from radiocarbon content", Sol. Phys., Vol.224, pp.317-322, 2004.
- 8 S. Watari, "Forecasting solar cycle 24 using the relationship between cycle length and maximum sunspot number", Space Weather, doi:10.1029/2008SW000397, 2008.
- 9 R. M. Wilson, D. H. Hathaway, and E. J. Reichmann, "An estimate for the size of cycle 23 based on near minimum conditions", J. Geophys. Res., Vol.103, pp.6595-6603, 1998.
- 10 A. I. Ohl and G. I. Ohl, "A new method of very long-term prediction of solar activity", NASA Marshall Space Flight Center Solar-Terrestrial Predictions Proceedings, Vol.9, pp.258-263, 1966.
- 11 J. Feynman, "Geomagnetic and solar wind cycles, 1900-1975", J. Geophys. Res., Vol.87 (1982), pp.6153-6162, 1982.
- 12 <http://www.swpc.noaa.gov/SolarCycle/SC24/index.html>



萩原 一

電磁波計測研究センター宇宙環境計測  
グループ研究マネージャー 博士(理学)  
太陽地球系物理学、宇宙天気