

小特集 宇宙気候学

3. 太陽活動と地球環境変動

3. Solar Activity and Terrestrial Environmental Change

3.1 太陽活動の長期変動

3.1 Long-Term Variability of Solar Activity

草野 完也

KUSANO Kanya

名古屋大学太陽地球環境研究所

(原稿受付：2013年12月2日)

太陽黒点活動には Schwabe サイクルと呼ばれる約11年の周期変動と様々な長期変動があることがわかっている。特に、17世紀のマウンダー極小期に代表される大極小期は地球気候にも少なくない影響を与えたことが示唆されている。しかし、太陽黒点の周期活動と長期変動のメカニズムは未だに十分理解されていない。太陽表面の振動から太陽内部の状態を再現する日震学の進展とコンピュータによる数値モデルの発達により、太陽活動の基本的な性質を説明すると共にこれを予測する試みが進みつつある。

Keywords:

The Sun, sunspots, solar cycle, Maunder minimum, solar dynamo

3.1.1 はじめに

太陽地球システムの長期変動の原因として最も重要な要素の一つが太陽活動である。特に、太陽黒点活動は太陽表面と太陽風プラズマに満たされた領域である太陽圏の磁場環境を変えることによって、地球と地球周辺にも様々な影響を与える。太陽黒点は太陽表面に現れる1000ガウス程度の比較的強い磁場をもった領域である。黒点では磁場の影響で太陽表面の対流が抑制されるため、太陽内部からの効率的な熱エネルギー輸送が妨げられている。このため、黒点は黒点の無い静穏領域に比べて温度が低く、したがって光度も相対的に低い領域として現れる。

黒点をはじめとして太陽表面で磁場の強い領域は活動領域と呼ばれ、太陽フレアなど活発なエネルギー解放活動が発生する。また、黒点磁場は太陽表面の乱流によって次第に拡散することにより、黒点以外の静穏領域に磁場を供給する役割も果たす。一方、黒点に比べて規模の小さな強磁場領域として白斑がある。白斑は明るい領域を作る。小規模の磁束管では熱伝導の効果で周辺から加熱されると共に、磁場の効果で透明度が上がり太陽内部の高温プラズマからの放射が表面に達するためである。太陽からの全放射には白斑の効果が黒点の効果を上回るため、2章で述べたように黒点活動が活発な時期（太陽極大期）には全太陽放射が平均的にやや増加することが知られている。すなわち、黒点活動はフレアなどの爆発現象、太陽圏全体の磁場

の強化、太陽放射やそのスペクトルの変化など様々な影響を地球と太陽圏環境に与える。

本節ではこの太陽活動の基本的な性質とそのメカニズムの理解に関する研究の現状について概観する。

3.1.2 太陽周期活動

太陽黒点は歴史的に最も古く望遠鏡を使った観測の対象となった天文現象である。ガリレオ・ガリレイは1600年代の初頭に黒点の詳細な構造とその変化をスケッチに残している[1]。その後、400年あまりほぼ毎日、黒点は観測されているが、その記録(図1)は現在でも太陽活動の変動メカニズムを知るための貴重な資料となっている[2]。

ただし、1600年代から太陽黒点の観測が続けられていたにも関わらず、黒点の活動に周期性があることを明確に見

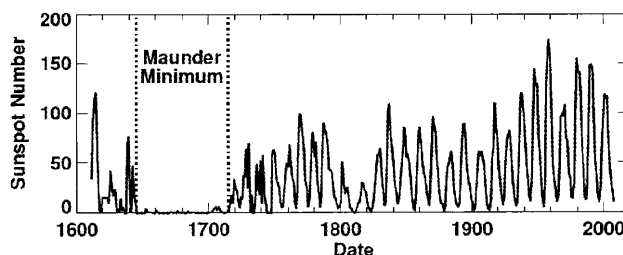


図1 過去四百年間の太陽黒点数の変化 ([2]より転載)。

出したのは、19世紀に至ってからで、Schwabe (1844) によるとされている[3]。Schwabe は黒点群の数を1826年から1844年まで18年間観測し、黒点群の数は約10年の周期をもって増減することを見出した。この周期的黒点活動は現在、Schwabe サイクルまたは太陽サイクルとして知られており、その周期は平均的に 11 ± 2 年である。また、ひとつの太陽サイクルに注目すると、黒点の出現緯度は図2の下図で見られるように中緯度(緯度20度~30度)から低緯度(10度以下)に次第に変化することが知られている。

太陽表面から発せられる輝線の分光観測よりゼーマン効果を利用して太陽表面磁場を測定することができる。黒点は先行黒点(黒点群内で自転方向側に存在する黒点)と後行黒点で異なる磁気極性をもつが、同じ太陽サイクルに同じ(南または北)半球に現れる黒点の磁気極性の関係はほぼ同じである。一方、異なる半球では先行黒点と後行黒点の磁気極性の関係は反転することが見出されている(図3)。さらに、一つの太陽サイクルと次のサイクルでは、それぞれの半球の極性は反転する。これは太陽磁場を最初に観測したHaleによって発見された性質であり、Haleの極性法則と呼ばれる[5]。それゆえ、磁気極性も含めた太陽活動のサイクルは黒点周期の2倍となる。

また、太陽の北極域と南極域には通常異なる極性の磁場が存在することも見出されている[6]。最近の「ひので衛星」による精密な観測によって、この極域磁場は黒点と同じ1000 Gauss程度の磁束密度をもつ小さなパッチ状の磁束の分布から構成されていることが見出された(図4)[7]。

極域磁場の極性は黒点数の増える太陽極大期に反転する。ただし、南北極で極性反転の時期は必ずしも同時ではない。現在の太陽サイクル(サイクル24)では北極域の磁極反転が先行していることが報告されている[8]。実は一つの太陽サイクルで前半と後半に黒点が活発に現れる半球が異なる傾向があることが見出されており、前半に黒点活動が活発であった半球の極域磁場が先行して磁極反転を起す性質があることも指摘されている[9]。

太陽サイクルのメカニズムは未だに特定されていないが、有力な仮説の一つとして磁束輸送ダイナモモデルが提唱されている[10]。磁束輸送ダイナモモデルはいわゆる $\alpha\Omega$ ダイナモモデルの一種であり、これに観測から示唆されている子午面循環流(表層で極域向き、深部で赤道向きの流れ)の効果を付加したものである。すなわち、磁束輸送ダイナモモデルは、図5に示すように①対流層底部領域に存在するタコクラインと呼ばれる微分回転層での Ω (オメガ)効果によるトロイダル磁場の生成(図5(a)-(b))、②トロイダル磁場の磁束浮上とコリオリ力に起因した α 効果による太陽表面でのポロイダル磁場の生成(図5(c)-(f))、③子午面循環によるポロイダル磁束の極域への輸送と極域磁場の反転(図5(g)-(i))の3つのプロセスの繰り返しからなる。磁束輸送ダイナモモデルは太陽内部の流れと磁場の拡散および α 効果の分布を適切に与えると、黒点と極域磁場の極性反転や黒点帯の赤道収束など太陽活動周期の重要な性質を説明することができる強力なモデルであ

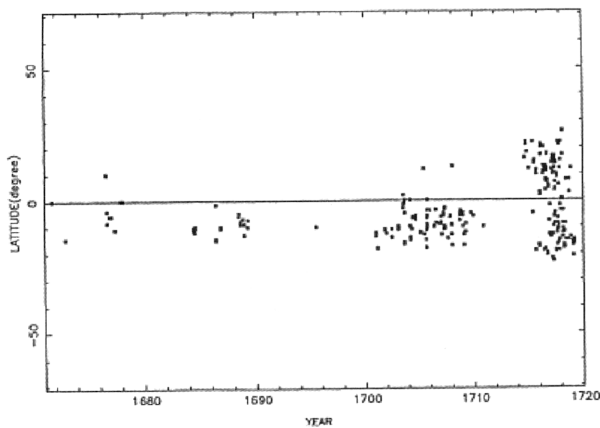


図2 17世紀(上)および20世紀(下)における黒点出現緯度の時間変化。[4]より転載。

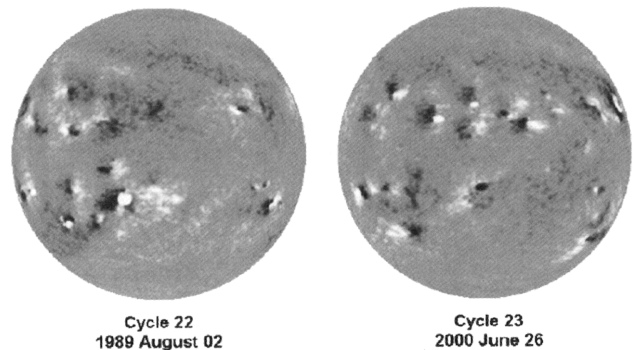


図3 太陽サイクル22およびサイクル23における太陽表面磁場。白と黒は正および負の磁極を示す。([2]より転載)

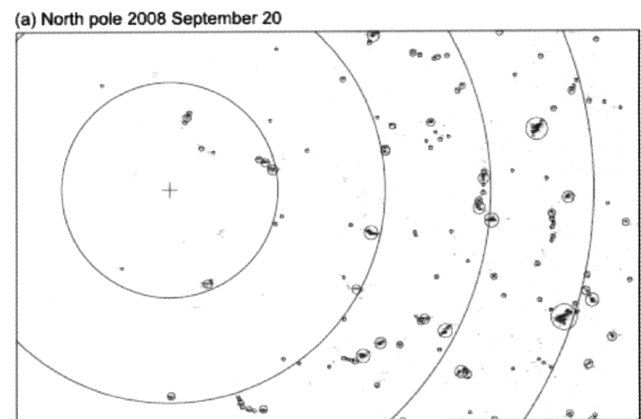


図4 ひので衛星が観測した2008年9月20日の太陽北極域の磁場分布。[8]より転載。

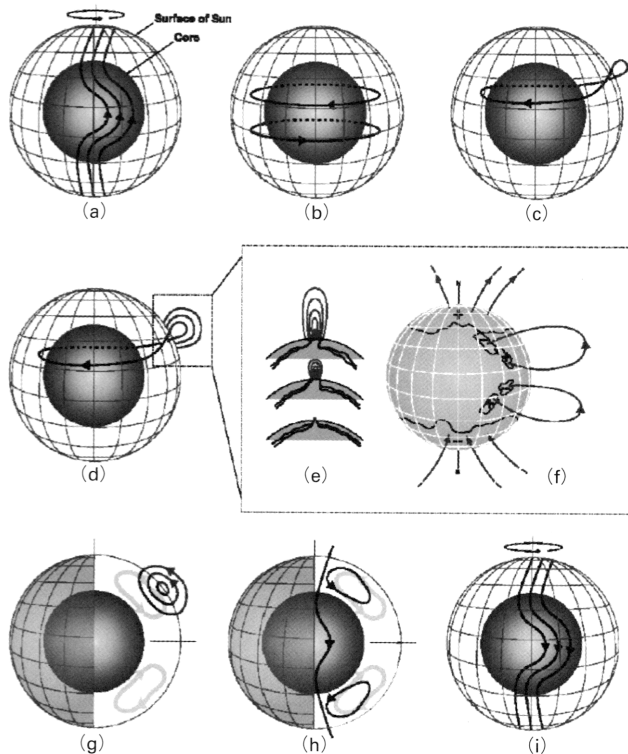


図5 磁束輸送ダイナモモデルにおける平均磁束場の変化。(a) 南北極をつなぐポロイダル磁束が微分回転の効果で、(b) 経度方向のトロイダル磁束に変換される。(c) 磁気浮力の効果で磁束管の一部が表面上昇すると共にコリオリ力によって回転し、表面でポロイダル磁場成分を生む(c-f)。子午面循環によって表面磁束は極域に運ばれ(g)、ポロイダル磁束を反転させる(h-i) ([10]より転載)。

る。しかし、それに必要な太陽内部の流れ構造や拡散率を生み出す物理過程は十分に説明できていない。それゆえ、太陽黒点の周期的活動の原因は未だに完全に解明されていない[11]。

ただし、太陽サイクルの周期や極小期の極域磁場が次のサイクルの黒点活動と相関することが見出されている。例えば、太陽サイクルの周期が長いと次のサイクルの黒点活動が低下するという傾向が統計的に知られている。これは太陽内部の乱流拡散が強いいため、時間と共に磁束が拡散して次のサイクルの黒点生成が弱まるためであるとして説明されている。また、極小期における極域磁場の強度と次の極大期の黒点活動の間に正の相関があることも示唆されている。この関係は極域磁場が Ω 効果の初期磁場となるポロイダル磁場の強さを反映しているため、磁束輸送ダイナモモデルの予想と整合する。これらの知見はダイナモモデルの検証に役立つと共に、次の太陽サイクルの活動度を予測するために重要である。新たな太陽サイクルに関する黒点活動の予測研究はこれまで多数行われているが、ほとんどの予測は成功していない。しかし最近行われた、極小期における極域磁場の測定を使った Svalgaard らの予測は現在の太陽サイクル(サイクル24)の観測結果と整合しており、極小期における極域磁場から次期太陽サイクルを予測できる可能性を示している[12]。

3.1.3 太陽黒点活動の長期変動

ガリレオ以来、約400年間の黒点観測の記録は黒点活動が長期的な時間スケールで大きく変化することを示している。特に、図1にみられるように、1645年から1715年までの70年間、黒点の出現数は著しく少なかったことがわかる。この黒点活動の低下については19世紀の後半になって Maunder および Spörer によって指摘され[13]、Eddy によってマウンダー極小期と呼ばれるようになった[14]。Eddy によればマウンダー極小期の時代にフランスを統治していたルイ14世によって黒点数が少ないことがすでに指摘されていたが、その後の研究者には忘れ去られたという[15]。

17世紀以前の黒点の記録は科学的資料としては残されていない。しかし、3.3節で詳しく述べるように年輪や氷床中に含まれる宇宙線生成核種の分析からさらに過去の太陽活動を知ることができる。これは太陽黒点活動によって銀河宇宙線が変調を受けることに起因している。黒点活動が激しい時期には太陽風中の電磁流体乱流の効果による銀河宇宙線の散乱が増し、地球軌道に到達する宇宙線量は減少する。一方、黒点活動が低下すると宇宙線の散乱が弱まり、宇宙線量は増加する。銀河宇宙線は地球大気と反応し、半減期 1.39×10^6 年の ^{10}Be や半減期5700年ほどの ^{14}Ca を大気中に生成する。 ^{14}Ca は光合成によって樹木年輪に、 ^{10}Be は降雪を通して南極やグリーンランドの氷床中に固定されるので、これらの分析を通して過去の太陽活動を推測することができる。

こうした宇宙線生成核種の分析によって、過去1000年間にマウンダー極小期を含む少なくとも4回の低活動状態が太陽で発生していたことがわかっている。これらは通常の太陽サイクルにおける太陽黒点の極小期と区別して大極小期と呼ばれる。Usoskin によれば太陽活動は大極小期、中間的な活動期、大極大期と呼ばれる非常に活発な時期に分類することができ、それらはそれぞれ15-20%、70%、10-15%の割合でこれまで発生した[16]。20世紀後半の太陽活動はこのうち大極大期に分類されている。すなわち、現代天文学が観測対象とした過去数十年間の太陽は平均的太陽に比べて著しく活発な時期に対応していたことがわかる。また、Beer によればマウンダー極小期においても宇宙線には太陽サイクルに対応する周期的変動がみられている[17]。これは太陽ダイナモ活動に必ずしも黒点の出現が不可欠ではないことを示唆しており、ダイナモ機構を考える上で重要な知見となっている。

黒点数変動や宇宙線生成核種の変化から、太陽活動には長時間スケールの周期成分が含まれていることも指摘されており、約88年の Gleissberg サイクル、約208年の Suess サイクルの他、104年、150年、506年の周期性が見出されている。これらの長周期変動の原因は今のところほとんど未解明であるが、太陽に及ぼされるわずかな惑星潮汐力の変動と一致することを指摘する研究も報告されており、議論となっている[18]。

マウンダー極小期のような大極小期がなぜ発生するのか? さらに、次回いつ発生するのか? という問いに答えを

見出すことは宇宙気候学における重要な課題となっているが、今のところ明確な解答は得られていない。マウンダー極小期に観測された黒点はほとんど南半球の低緯度領域に出現していることから(図2上図)、極端に南北半球の対称性が崩れた状態にあった可能性がある[4]。これは通常の大極子成分とは異なる対称性をもつ磁場成分が当時相対的に大きくなっていったことを示唆している。地球ダイナモで間欠的に発生する磁極反転現象でも、半球対称性の破れが原因となることが指摘されている[19]。ダイナモ解の半球対称性とその変動の関係をj知ることは、太陽のみならず天体ダイナモの長期変動メカニズムを解明する上で重要な課題であると著者は考えている。

3.1.4 まとめと今後の課題

太陽黒点活動は宇宙気候変動の第一原因であるため、その理解は太陽地球環境の変動を知る上で重要である。太陽活動は約11年の周期をもつ太陽サイクルとその活動の長期変動を示す。太陽サイクルの原因は未だに十分解明されていないが、パラメータを調整すれば計算機で再現することができるモデルが作られつつある。しかし、モデルの検証は不十分であり、太陽内部の流れと磁場の構造は未だに明確になっていない。さらに、長期変動の原因解明はほとんど未着手であり、今後の理論と観測の相乗的な発展がその解明のためには不可欠となる。

太陽黒点活動の機構解明は太陽物理学における最重要課題であると共に、宇宙気候の理解にとっても必要である。また、黒点活動は太陽フレアのような爆発現象の発生確率とも関係するので、太陽周期活動の予測は宇宙気候のみならず短期的な宇宙環境の変動を考える上でも必要である。我々の社会システムはすでに衛星に強く依存しているので、宇宙インフラの効率的な開発戦略を練るためにも宇宙気候の将来予測を実現する研究が今後重要性を増すであろう。

一方、太陽黒点活動と気候変動にはある種の相関が存在するが、その原因を明確に説明する科学的理解に我々はまだ到達していない。今後、気候変動と太陽活動の精密観測を続けると共に、太陽と気候それぞれの精密モデルの開発を進めることが、地球環境と太陽との関わりを知るために重要であると考えている。

参考文献

- [1] The Galileo Project, Sunspots, <http://galileo.rice.edu/sci/observations/sunspots.html>
- [2] D.H. Hathaway, *Living Reviews in Solar Physics* **7**, 1 (2010).
- [3] H. Schwabe, *Astron. Nachr.* **21**, 233 (1844).
- [4] J.C. Ribes and E. Nesme-Ribes, *Astron. Astrophys.* **276**, 549 (1993).
- [5] G.E. Hale *et al.*, *Astrophys. J.* **49**, 153 (1919).
- [6] H.D. Babcock, *Astrophys. J.* **130**, 363 (1959).
- [7] H. Ito *et al.*, *Astrophys. J.* **719**, 131 (2010).
- [8] D. Shiota *et al.*, *Astrophys. J.* **753**, 157 (2012).
- [9] L. Svalgaard and Y. Kamide, *Astrophys. J.* **763**, 23 (2013).
- [10] M. Dikpati and P.A. Gilman, *Space Sci. Rev.* **144**, 67 (2009).
- [11] P. Charbonneau, *Living Reviews in Solar Physics* **7**, 3 (2010).
- [12] L. Svalgaard *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **32**, L01 104 (2005).
- [13] E.W. Maunder, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **50**, 251 (1890).
- [14] J.A. Eddy, *Science* **192**, 1189 (1976).
- [15] ジョン・エディ著, 上出洋介, 宮原ひろ子訳: 太陽活動と地球, 生命・環境をつかさどる太陽 (丸善出版, 2012).
- [16] I.G. Usoskin, *Living Rev. Solar Phys.* **10**, 1 (2013).
- [17] J. Beer *et al.*, *Solar Phys.* **181**, 237 (1998).
- [18] J.A. Abreu *et al.*, *Astron. Astrophys.* **548**, A88 (2012).
- [19] N. Nishikawa and K. Kusano, *Phys. Plasmas* **15**, 082903-082903-15 (2008).