

太陽周期活動と太陽極域磁場

塩田 大幸

〈名古屋大学 宇宙地球環境研究所 〒464-8601 名古屋市千種区不老町〉

e-mail: shiota@isee.nagoya-u.ac.jp



太陽の極域磁場は太陽物理学の最重要課題の鍵となる情報を含むと考えられている。ひのでの観測によって、極域には1,000 Gを超える強磁場パッチが広く存在していることが示された。さらに長期の極域磁場観測によって、太陽の極域内の磁場分布の年変化が明らかになり、太陽周期活動に伴って分布変動する大きな磁場パッチと、太陽面上の位置（極域、赤道）や太陽活動から独立して普遍的に維持される小規模な垂直磁場と水平磁場といった2種類の性質の異なる分布の磁場が混在している可能性が示された。今太陽活動周期は、これまでの著しい南北半球非対称性を反映して南北の極域磁場は異なる様子で発展している。今後、南北の半球の非対称性が極域磁場の形成過程にどのような影響を与え、次の極小期の極域磁場がどのように形成されていくか注視していく必要がある。

1. はじめに

太陽観測衛星「ひので」は2006年の打上げ以降、可視光磁場望遠鏡の圧倒的な高解像度高感度の偏光分光観測によって従来観測できていなかった太陽大気の描像を明らかにしてきた。特に太陽の極域は、太陽大気を斜めから観測することによる観測的困難（周縁減光・foreshortening）のため十分な理解に至っていなかったが、ひのでの観測によって理解が大きく進展した。その成果の詳細は常田先生の前回のひので特集号の記事¹⁾にまとめられているのでそちらを併せて参照していただきたい。本稿は、現在までの太陽活動の推移とともに極域磁場の継続観測によって得られた知見について紹介する。

2. 太陽の極域磁場

太陽の極域磁場は約11年周期で繰り返す太陽黒点の周期活動に伴い変動する²⁾。図1に、前太陽活動周期から現在に至るまでの太陽黒点数の推

移と経度方向に平均した太陽磁場の時間発展の様子を示す。まず太陽活動極小期では、南北それぞれの極域に、単一の極性の磁場が占める領域が広がり、平均磁場強度が最も大きくなる。1996年ごろは北極に正極磁場が、南極に負極磁場が、緯度60度付近まで存在していることが確認できる。太陽活動が上昇するにつれて、もともと極域にある磁場とは逆極性の磁束が、黒点が現れた低緯度領域から運ばれる²⁾。その結果、もともと極域にある磁束を相殺していくにつれて、単一極性領域が狭くなり平均磁場強度も下がっていく。太陽活動極大期の前後には単一極性の領域は姿を消し、平均磁場強度がほぼ0 Gの状態になる。その後太陽活動が低下する段階でも磁束の輸送が継続し、逆極性の磁場の単一極性領域が形成され広がる。極小期に再び領域の大きさと平均磁場強度が極大になる。2008年には北極が負極、南極が正極になっていることが確認できる。この極域磁場の変動過程は極性反転と呼ばれる。

極域磁場の定常的な観測は、地上観測で1970

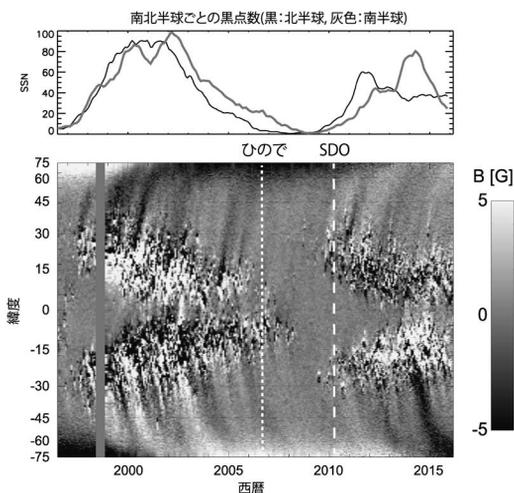


図1 (上) 南北半球ごとの黒点数(黒:北半球, 灰色:南半球). (下) SOHO/MDI 観測装置および SDO/HMI 観測装置で得られた平均磁場強度分布の時間変化. 縦の点線はひのでと SDO の打上げ時期.

年代後半から継続されている³⁾. これまでの観測データから、極小期の極域平均磁場強度と、その直後の太陽活動極大期の最大黒点数との間に良い相関があることが報告されている⁴⁾. この事実から、太陽内部で磁場を作り出す「太陽ダイナモ」に、太陽極域磁場が何らかの役割を果たしていると考えられている⁵⁾. さらに、極域磁場の形成過程の理解は、将来の太陽活動の予測の観点からも重要な意味をもつ.

一方、太陽の極域は「太陽コロナ・太陽風」の形成の点からも特徴的な領域である. 極小期の南北両極域には広い単一極性領域が形成され、その上空の太陽コロナには、大規模で安定に存在するコロナホールが形成される. このコロナホールからは、高速の太陽風が噴き出していることが観測されており⁶⁾, コロナホールの大きさと太陽風の速度の関係も示唆されている. この傾向から、太陽表面の磁場が、コロナ・太陽風形成に重要な役割を果たしていることが考えられるが、具体的な加熱・加速過程との関係についてはまだ明らかになっていない. また、極域のコロナにおけるジェッ

トなどのダイナミックな活動もコロナ・太陽風形成過程に寄与があると期待されるが、詳細については坂尾さんの記事⁷⁾を参照いただきたい. このように、太陽極域磁場は太陽物理学の最重要課題を理解するために鍵となる情報を含むと考えられている.

3. ひので極域磁場長期観測

太陽観測衛星「ひので」は、極めて高い性能をもつ可視光磁場望遠鏡⁸⁾を搭載し、宇宙空間から安定した高分解能・高精度偏光分光観測が可能である. これによって、極域磁場観測の困難を大幅に軽減し、従来観測が困難であった太陽のリム近くの領域の磁場を分解する観測が可能になった¹⁾. さらに、太陽の自転軸は、地球の公転軸から約7度傾いているため、3月には南極が、9月には北極が地球の方向に最も傾く. このタイミングを利用してひのでは、太陽極期の極点付近の磁場分布を観測することができる.

2007年3月に、ひのでは太陽の極点近傍の磁場の分布を初めて観測した⁹⁾. その観測で得られた表面に対して垂直方向の磁場の分布を図2に示す. この図は、極点上空から観測したときの様子に変換してある. この図から垂直磁場が局所的に集中した構造が極域全体に多数分布していることがわかる⁹⁾. このような集中した磁場構造は「磁場パッチ」と呼ばれる. 観測された極域全体の平均磁場強度 3.1 G ⁹⁾に対して、この極域に現れる大きな磁場パッチは、磁場強度が $1,000 \text{ G}$ を超えるような微細な内部構造をもつことから「強磁場パッチ」と呼ばれる. われわれは、この観測結果に対し一つ一つのパッチを同定し(図2)¹⁰⁾, それぞれのパッチが持つ磁束量ごとの分布を調べた. 縦軸をトータルの磁束量(磁束密度)に換算して相対的な磁束の分布を表したグラフが図3である. 図2をよく見ると、支配的な極性である正極の磁場パッチが大小さまざまに分布しているのに加えて、黒で示される負極の磁場パッチも 10^{16} Mx 前

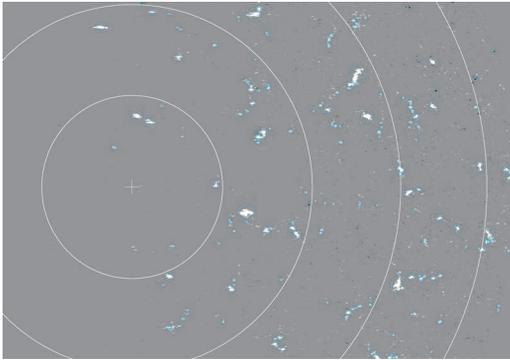


図2 2007年3月16日の太陽南極の垂直磁場マップ。極域上空から観測したときのマップに座標変換されたもの。色は磁束密度分布を示す。プラス記号が、南極点を示し、太線は緯度5度ごとの等緯度線を示す。青色の小さな円は、同定された磁場パッチの位置を示し、円の面積がその磁場パッチの磁束量を表す。

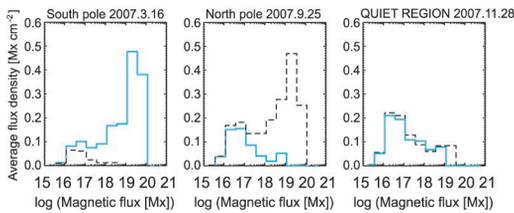


図3 南北両極域、低緯度静穏領域における垂直磁場パッチの分布¹⁰⁾。青直線が正極性、黒破線が負極性のパッチの分布を示す。

後の小さいものが存在していることがわかる。また、極小期の太陽極域に観測される特徴的な構造として、白斑という連続光観測で斑点状に明るく見える構造がある。この白斑と強磁場パッチの関係も調べられ、大きな強磁場パッチが白斑を内包していることがわかった¹¹⁾。

前章では、太陽の極域は単一極性領域と表現した。これは、太陽極域内部の磁場分布を分解できない平均磁場強度の観測で見られる性質である。図3左と図2を見ると、比較的磁束量の多いパッチが強磁場パッチで、支配的な正極のものがほとんどである。一方で、 10^{16} Mx前後の小さなパッチは、正極負極ともほぼ同量存在している。つま

り平均をとると小さなパッチからの寄与は相殺されるため、領域の平均的な磁性は、 10^{18} Mxよりも大きな強磁場パッチの分布が決めていることがわかる。2007年9月の北極観測にも同じ解析を行うと(図3中央)、北極は、南極とは対照的に負極性の強磁場パッチが支配的であったが、 10^{16} Mx前後の小さなパッチが正極負極ともほぼ同量存在している点が共通している。

パッチ状の磁場構造が、磁束が大きいものから小さいものまで正負両極性のものが混在する分布は、太陽極域に限らず太陽表面のあらゆる領域で観測されている¹²⁾。太陽表面の静穏領域には、さまざまな大きさの対流運動のパターンが観測されていて、直径が3万km前後のものを超粒状斑という。超粒状斑の境界には磁束が掃き寄せられることで、比較的大きなパッチ状の磁場が分布する。それらは網目状の超粒状斑の境界の形からネットワーク磁場と呼ばれる。超粒状斑の内部にはさらに小さなスケールの対流運動と関係するネットワーク間磁場と呼ばれる磁場が分布する。ネットワーク間磁場は、小規模な磁場パッチが正負同量存在し、すべての水平磁場が垂直磁場のそばで観測¹³⁾されていることから、内部からの小規模浮上磁場による生成、つまりローカルダイナモの結果であることが示唆されている。ネットワーク磁場は、磁束量 10^{18} Mxよりも大きいパッチが分布することが知られていて¹⁴⁾、前述したように極域で 10^{18} Mxを境に分布の性質が異なる点がよく一致する。これらはともに、表面の対流の影響を受けながら、生成・融合・分離・消滅を繰り返している¹⁵⁾。ひのではこれらの時間発展の様子を詳細に観測しており、詳しくは飯田さんの記事¹⁶⁾を参照していただきたい。静穏領域ではより大きな磁場パッチがより大きなパターンの対流と関係している。このことからより大きなパッチは対流層のより深い領域に根差していると考えられる。

では、極域に現れる強磁場パッチと静穏領域で観測される磁場パッチとは同じものであろうか？

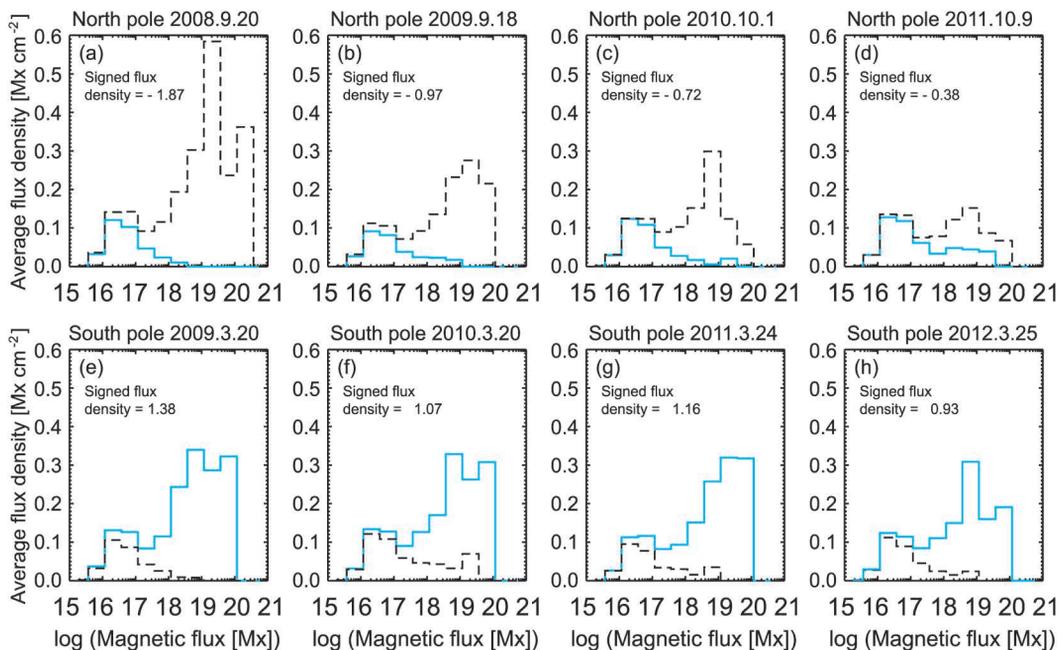


図4 南北両極域における垂直磁場パッチの分布の年変化¹⁰⁾. 青直線が正極性、黒破線が負極性のパッチの分布を示す。

図3の中央と右のグラフは、赤道付近の静穏領域が東側のリムに位置していたときの観測と、太陽の北極域の観測で同様の分布を表したものである。静穏領域では正負両極性がすべての範囲でほぼ対称的な分布をもつのにに対し、極域では負極性の磁場が支配的な非対称な分布を示した。図3の北極と静穏領域の観測は、全く同じ品質で観測されているため、絶対値の比較も可能である¹²⁾。 10^{16} Mx前後の小さな垂直磁場をもつ磁束量が静穏領域と極域ではほぼ等しいことがわかった。このことは、極域と赤道静穏領域に共通する物理過程でこれらの磁場の分布が維持されていることを示唆している。一方で大きなパッチの磁束量の最大値は、極域のものは静穏領域に比べて大きいことがわかった⁹⁾。前述のようにパッチの大きさと対流運動との間に関係があるとすれば、極域の強磁場パッチは対流層のより奥深くに関連している可能性がある。

2008年9月から、太陽極域の長期モニター観測

が継続されている。このデータから垂直磁場分布の長期にわたる変動を調べた(図4)。その結果、支配的な極性の大きな磁束をもつパッチのみが減少した。小さなパッチの分布は、南北両極域で同量の磁束が分布する点が共通し、また時期に依存する変化が見られないことが明らかになった。また、表面に対して水平な磁場の分布も調査したところ、小さなパッチの分布と同様に、太陽周期活動にかかわらずほぼ同じ分布が維持されていた。

この結果は、

- 太陽周期活動、つまり太陽極域に蓄積された磁束量に伴って分布が変動する大きな磁場パッチ
- 太陽面上の位置(極域、赤道)と関係なく、太陽周期活動から独立した別の過程によって維持される小規模な垂直磁場と水平磁場といった2種類の性質の異なる磁場が混在している可能性を示している。

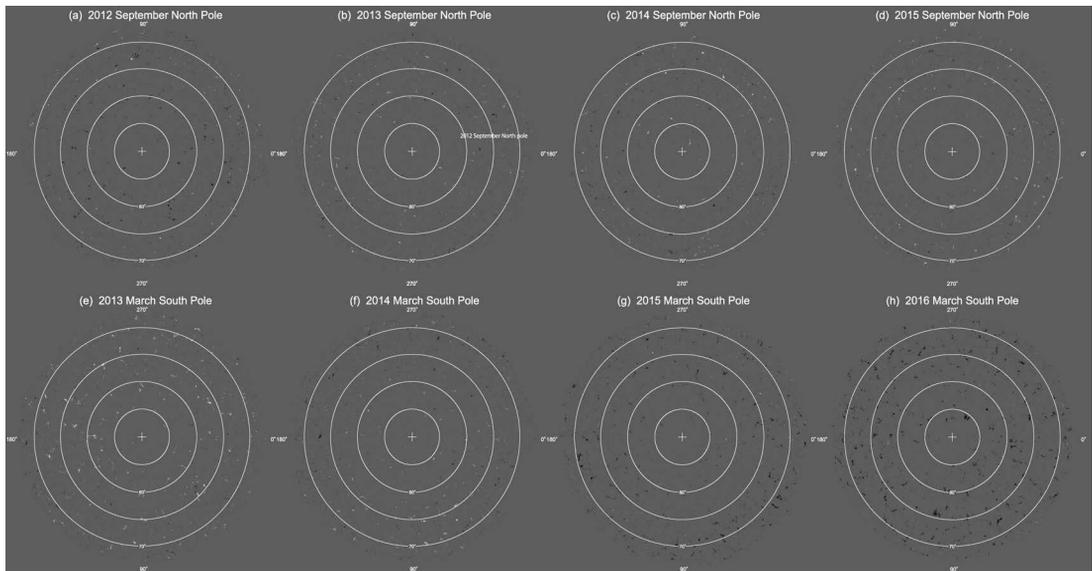


図5 南北両極域全体の垂直磁場分布の年変化. 白色は負極性, 黒色は正極性の磁場が存在. 太陽が自転するおよそ1カ月の間観測を継続し極域全体の磁場分布を合成している.

4. 太陽活動の推移と極域磁場観測

今太陽活動周期は, 2014年2月に極大期を迎え, 現在減衰期に入りつつある¹⁷⁾. 図1の上段は南北半球ごとの黒点数の推移を示す. 現在の活動周期は, 前周期に比べて平均的に黒点数が少なく, 南北の非対称性が顕著に表れていることが特徴的である. 2011年に北半球で太陽活動が極大になり, 一方で, 南半球では2013-2014年に活動度が極大となった.

ひのでは2012年より極域の集中観測を継続して行っている. その観測で得られた太陽極域全体の磁場の分布を図5に示す. 2012年9月の時点では北極の中心部に負極性の強磁場パッチが存在することがわかる. しかし, 極小期に比べるとその密度は低い(2013年3月や2016年3月の南極と比較すると, 大きなパッチの個数が少ないことがわかる). この強磁場パッチがほとんどない状態では平均磁場強度がほぼ0Gになっている. 2013年の9月になると負極性の磁場パッチはほぼなくなり, 正極性の磁場パッチが僅かに形成され始め

ている. しかし, その後2014, 2015年になっても磁場分布はほとんど変化してない. このことは, 北極域全体の平均磁場強度はほぼ0Gの状態がこの3年間継続していることを示している. 図1でもこの期間に高緯度に単極領域が現れず, 平均磁場強度が0G近くのままであることが確認できる.

一方で南極の磁場分布は, 2013年3月の時点では, 正極性の強磁場パッチが多数分布している. 2014年には正極性のパッチの数は大幅に減少した. 2015年には負極性の磁場パッチが低緯度領域から形成され, 2016年には南極域全体に, 負極性の大きな強磁場パッチが分布し, 極性反転が完了した. 南極の平均磁場強度の発展過程も図1で確認することができる. 2014年に現れた黒点から負極性の磁束が高緯度領域に輸送されていく過程が確認できる.

このように, 今太陽活動周期は南北半球で非対称性の強い発展を経ている. 北極域の極性反転が先行し, 2013-2014年の間は南北両極域が正極性の磁場をもつ状態になった. しかし, 北極域の磁

場強度はほぼ0 G近くで推移したため、南北四重極磁場構造が優位になる状態には発展しなかった。一方で南極は急速に極性反転が進んだ。別の見方をすると、太陽の南北双極子磁場の形成が停滞している状態であると捉えることもできる。今後、この非対称な発展から極域磁場の形成過程がどのような影響を受け、次の極小期の極域磁場がどのように形成されていくかを観測することで、次期太陽周期の活動度の予見が得られ、太陽ダイナモの解明につながる事が期待される。

前太陽活動極小期は、通常よりも長く続いた。このような周期の伸びは、過去にマウンダー極小期と呼ばれる太陽の黒点数が長期間低下した時期の直前にも見られた¹⁸⁾。マウンダー極小期には太陽全体の基本的な南北対称性も崩れた可能性が示唆されている¹⁹⁾。今後の太陽の活動がマウンダー極小期のように停滞していくのか、または、何事もなく活発な周期活動を取り戻すか、今後次の周期までを含む今後10-20年の間、太陽を注視する必要がある。

南極域の急激な極性反転の結果として、現在南半球からのみ高速太陽風が流れ出している。どのタイミングで高速太陽風が流れ始めたか、極域磁場分布の発展過程の解析と比較することで太陽風の加速過程の解明の一助となることが期待される。今後海外ではSolar Orbiter, Solar Probe Plusといった、内部太陽圏に向かう探査機の打上げが2018年に予定されている。Solar Orbiterは軌道傾斜角を徐々に増加させ、太陽の極域を公転面から離れて観測することを計画している。それらが活躍する2020年代までひのでが観測を続けられるかどうか定かではないが、ひのでによる太陽極域の磁場観測と、その領域につながる惑星間空間磁場の同時観測が実現できれば、太陽コロナ・太陽風の形成過程の解明に寄与することが期待される。

参考文献

- 1) 常田佐久, 2008, 天文月報101, 638
- 2) Hathaway D., 2010, Living Rev. Solar Phys. 7, 1
- 3) Svalgaard L., et al., 1978, Sol. Phys. 58, 225
- 4) Svalgaard L., et al., 2005, GRL 32, L01104
- 5) Chouduri A. R., 2011, in IAU Symp. 273, 28
- 6) Wang Y., et al., 1996, Science 271, 464
- 7) 坂尾太郎, 2016, 天文月報109, 694
- 8) Tsuneta S., et al., 2008, Sol. Phys. 249, 167
- 9) Tsuneta S., et al., 2008, ApJ 688, 1374
- 10) Shiota D., et al., 2012, ApJ 753, 157
- 11) Kaithakkal A. J., et al., 2015, ApJ 776, 122
- 12) Ito H., et al., 2010, ApJ 719, 131
- 13) Ishikawa R., Tsuneta S., 2011, ApJ 735, 74
- 14) Wang J., et al., 1995, Sol. Phys. 160, 277
- 15) Kaithakkal A. J., et al., 2015, ApJ 799, 139
- 16) 飯田佑輔, 2016, 天文月報109, 632
- 17) Sun X., et al., 2015, ApJ 798, 114
- 18) Miyahara H., et al., 2010, Journal of Cosmology 8, 1970
- 19) Sokoloff D., Nesme-Ribes E., 1994, A&A 288, 293

Hinode Observation of the Sun's Polar Magnetic Field and Solar Cycle Variation Daikou SHIOTA

Institute for Space and Earth Environmental Research, Nagoya University, Furo-cho, Chigusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan

Abstract: The Sun's polar magnetic field can play important roles in the several physical processes such as solar dynamo, solar corona heating and solar wind acceleration. The first Hinode SOT observations of the polar areas revealed the existence of many patches with intrinsic field strengths of over 1 kG distributed across the entire polar region. Hinode monitoring of both polar areas revealed that the distribution of the magnetic patches consists of two different components: polarity-imbalanced component of large patches that varies associated with solar cycle and stables well-balanced components of small patches. It is important to keep monitor of the polar regions to understand the formation process of the polar field in the current solar cycle.