

「ひので」で黒点がどこまでわかったか？

久保雅仁

〈自然科学研究機構国立天文台 ひので科学プロジェクト 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉
e-mail: masahito.kubo@nao.ac.jp



大きなものであれば、肉眼でも見ることができる黒点の研究は、地上観測を中心に非常に長い歴史をもつ。しかし、大気の影響を受けない宇宙からの高解像度・高精度磁場観測によって、黒点の磁場構造の詳細な変化を長時間にわたって連続的に捉えることに成功した。その結果、同時期に進展した黒点の数値計算との相乗効果もあり、黒点の理解が加速度的に進んだ。特に、黒点に見られるさまざまな微細構造は、対流と磁場が織りなす相互作用の結果であることがわかり、太陽研究者の中でほぼ統一した黒点の描像をもつに至った。

1. 「ひので」打ち上げ前の黒点研究

黒点は、太陽表面の黒いシミのように見られる構造で、1キロガウス以上の強い磁力線の塊である。強力な磁場が対流運動を抑え込み、対流からの熱輸送が断たれた結果、黒点中心部の温度は4,000度程度になり、約6,000度の周囲の太陽表面(光球)より温度が低くなるために、周囲より暗く見える。図1に示したように、黒点は中心付近の暗部とそれを取り囲む半暗部が基本構造である。黒点の観測は、ガリレオの時代から400年以上にわたって脈々と続けられており、黒点に関する論文は山のようにある。低解像度の望遠鏡で黒点を観測すると、のっぺりとした目玉焼きのような構造にしか見えないが、非常に解像度の高い望遠鏡で観測すると、半暗部内の筋構造、暗部内の淡い輝点、ライトブリッジ(明るい亀裂)、といった微細構造に埋め尽くされていることがわかる。

1990年代後半から太陽観測における補償光学の技術が発展し、黒点の微細構造の画像データが取得されるようになり、その形成メカニズムの研究が盛んになった。特に、半暗部の微細構造については、かなり白熱した議論が展開されていた。

半暗部の筋模様をよく見ると、明暗の筋が交互に並んでいることがわかる。この明暗の筋パターンとはほぼ同じ空間スケールで、太陽面に対する磁場の傾きが変動していることが知られていた。また、磁場がより水平な傾きをもつ領域にはエバーシェッド流と呼ばれる、秒速数キロメートルの外向きの流れがある。明るさや磁場の特徴が異なる筋構造がなぜ交互に並び、またエバーシェッド流の駆動メカニズムは何なのかということが長い間議論されてきた。詳細は、2008年101号の一本氏の記事¹⁾も参照していただきたい。これらの観測結果を説明するモデルとしては、垂直な磁力線の中に水平な磁束管が埋まっている「磁束管埋め込みモデル²⁾」が広く支持されていて、エバーシェッド流は水平な磁束管に沿って流れる熱いガスと考えられていた³⁾。ただし、このモデルでは、磁束管に沿って流れる高温ガスの熱入力だけでは、半暗部の明るさを説明できないという問題点があった。そこで、水平な磁束管など存在せず、垂直な磁力線の隙間に対流によって高温のガスが浮上してくるとする「ギャップモデル⁴⁾」が、「ひので」の打ち上げの少し前に提案され、議論を呼んだ。高温ガスが浮上してくる領域で

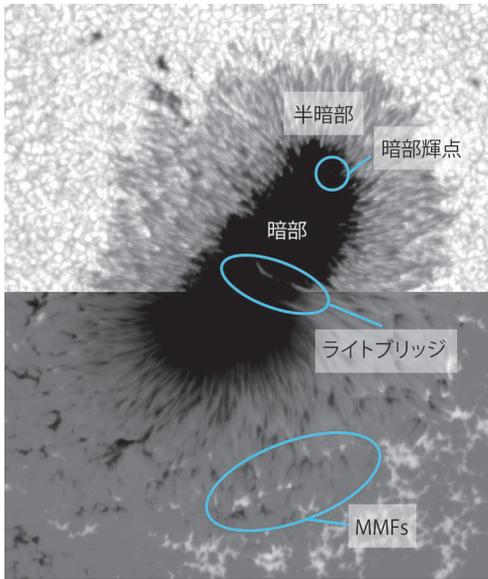


図1 「ひので」が最初に観測した黒点。上半分が連続光強度（明るさ）で下半分が視線方向の磁場強度（白が正極，黒が負極）。

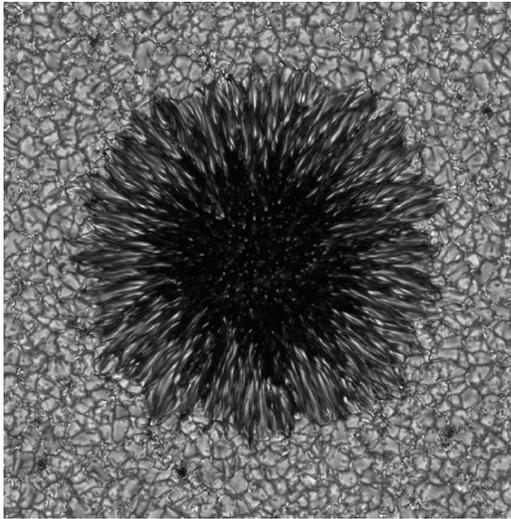
は、カusp構造をもつ磁力線が並び、カuspの頂上付近は周囲より磁場が少し水平になるため、磁場の傾きの変動が観測されるというものである。当時、黒点に関する研究成果を学会などで発表すると、冗談半分で「君はどっち派？」と聞かれたりもした。補償光学が発展しても、当時の地上観測で、微細構造の磁場を精度良く計測することは難しく、大気の影響を受けない「ひので」の可視光磁場望遠鏡（SOT）による磁場観測が、混沌とした状況を打破すると期待されていた。

2. 黒点内の微細構造の形成

「ひので」が最初に観測した黒点で、半暗部の明るい筋構造で対流運動が起きている証拠がすぐに見つかった。「対流運動の検出＝ドップラー速度の観測」という固定概念があったが、黒点の明るさの画像で、明るい筋構造がしめ縄のようにねじれながらくるくる回転しており、そのねじれの向きが黒点の位置（視野角）に依存しているという発見が決定打となった⁵⁾。高温のガスが、単純

に明るい筋構造の軸方向に移動しながら冷却・下降するだけでは、ねじれた運動は観測されないが、軸に沿って対流セルが並んでいると、冷却・下降するプラズマは軸から逸れる運動成分をもち、結果としてねじれ運動が見える。一方、半暗部の明るい筋構造でも、磁場は周囲よりも弱いものの、磁場のないギャップは見つからなかった^{6),7)}。「ひので」の初期成果を元に、「半暗部の2大モデルを混ぜれば、すべて上手く説明できるのでは？」という考えが急速に広まった。「磁束管埋め込みモデル」では、水平な磁束管に対流運動が書き加えられ、「ギャップモデル」ではギャップに水平な磁力線が書き加えられた。また、エバーシェッド流が伝わる筋構造は、暗部側では明るく、半暗部外側では暗いことが確かめられた。そして、エバーシェッド流の出発点では上昇流が、終点では下降流が観測されることがわかった⁸⁾。太陽内部から上昇してきた高温のガスが水平な磁力線を伝わる中で冷えて、最終的には太陽内部に沈み込むという描像が得られた。

「ひので」打ち上げの少し後から、黒点を3次元の数値計算で再現するという試みが行われていた。それまでは、輻射輸送を考慮した3次元の電磁流体シミュレーションは、静穏領域を対象にしたものが主であった。不安定でかつ、サイズも大きく、強い磁力線が太陽の内部の深い領域まで突き刺さっている黒点を計算するのは難しいと言われていた。そういう状況だったので、実際の観測と見紛う黒点の計算結果⁹⁾（図2）を最初に見せてもらったときは、非常に驚いたとともに、観測が負けている感じがして悔しい気持ちも湧いた。この計算結果では、黒点で実際に観測されるさまざまな微細構造が見事に再現されている。磁場が強い黒点内といえども、対流が完全に抑えられているわけではなく、対流と磁場の相互作用の結果、黒点内の微細磁場構造が形成されていることが確かめられた。磁場強度・傾き、磁場の密集度などは場所によって異なるが、一つの対流セルに

図2 数値計算で再現された黒点¹⁰⁾。

着目すると、対流の湧き出し口付近では周囲より弱い磁場が存在し、沈み込み付近では垂直で強い磁場が存在するという、静穏領域でよく見られる対流と磁場の関係性をもつ。このような関係性が、黒点内のいろいろなところで見られ^{11), 12)}、その場の磁場構造に起因して多様な構造が形作られていることは興味深い。半暗部の水平な磁力線に沿ったエバーシェッド流も再現されており、それまで有力とされていた駆動メカニズムの一つであるサイホン効果（エバーシェッド流の出発点と終点での磁気圧差で駆動）は必要なく、ガス圧で駆動された太陽内部からの上昇流が、水平方向のローレンツ力によって水平流になるということで説明できることがわかった¹³⁾。「ひので」による観測と最新の数値計算の相乗効果で、黒点の微細構造の理解は加速度的に進み、現在ではほぼ統一した描像を描くことができています。

ただし、肝心の黒点内の微細磁場構造に関連した対流運動の上昇・下降流をドップラー速度の観測で捉えられたかかという点、上昇流は観測されたが、下降流に関しては曖昧である。下降流を捉えたという研究成果もある^{14), 15)}が、解析手法によるところもあり、誰もが納得する形にはなってい

ない。これは、下降流の領域が非常に微細でかつ光球の中でも太陽表面付近の低い層に限定されているためと言われている。2019年頃に観測が開始される、米国の口径4 mの大型地上望遠鏡による超高解像度観測で決着がつくことを期待している。

3. 黒点の形成過程

黒点の元となる磁力線は、太陽の内部から浮上してくる。連続的に浮上してきた磁力線が集合して、どんどん大きな磁力線の塊となり、暗部が形成され、その後は半暗部が形成される。黒点内の微細構造の形成過程の理解は、「ひので」観測によって各段に進んだが、黒点自体、特に半暗部がどうしてできるのかの理解はあまり進んでいない。これは、黒点の形成過程を詳細に観測することが難しいためである。黒点の微細構造の形成に重要な役割を果たす対流や磁場構造を空間的に分解しつつ、成長する黒点全体をカバーする広い視野と数時間以上の連続観測が必要となり、この条件を満たせるのは、現在でもSOTだけである。しかし、どこに黒点が形成されるかを予測することは難しく、太陽の一部を観測するSOTで、何もない静穏領域から黒点が形成されていく姿を完璧に捉えることはできていない。

ただし、少し変わった視点で黒点形成に関する非常に面白い結果も得られている。光球と彩層の明るさの画像の時間変化を比較すると、彩層のほうが先に半暗部が形成されいていることがわかった¹⁶⁾ (図3の青色矢印)。その後、地上装置で後追いの観測が行われ、半暗部の前兆現象が見られる領域の彩層で下降流も捉えられている¹⁷⁾。水平な磁力線を伴う半暗部の形成過程としては、暗部がある程度の大きさになると不安定になり、暗部の垂直な磁力線が周縁部で傾いてきて半暗部になるという説と、太陽内部から浮上してきた磁力線が上空を覆う暗部の磁力線にブロックされてそれ以上垂直になることができずに半暗部になるという

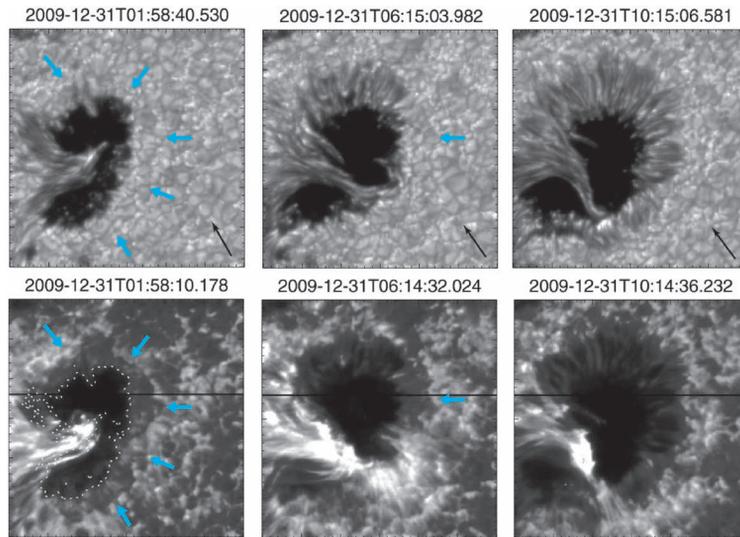


図3 半暗部の前兆現象. 上図が太陽表面(光球), 下図が彩層での明るさの変化. 青色矢印で示した領域で光球で半暗部が形成される前に, 彩層で暗い構造が形成されている¹⁶⁾.

説がある. 半暗部が彩層で先に形成され, 下降流をもつという結果は, 前者の形成過程を支持する.

SOTの結果から, 黒点の形成過程を理解するためには, 黒点が形成される過程の明るさ・速度場・磁場の変化を, 太陽の表面だけでなく彩層でも同時に捉えることが重要なことがわかり, これは次期太陽観測衛星SOLAR-Cへの宿題である. 黒点形成の前兆現象が, 日震学による太陽内部診断¹⁸⁾や太陽表面の速度場¹⁹⁾で得られ始めており, SOLAR-Cが観測を開始する頃には, 黒点ができそうな候補地を予想できるようになっていると願っている.

4. 黒点の崩壊過程

黒点崩壊の研究は, 筆者の博士論文のテーマの一つで, 「ひので」への宿題をたくさん記述したこともあり, 「ひので」のデータを使って答えを出すという使命感のようなものがあった. 崩壊期の黒点の周りには, moving magnetic features (MMFs) と呼ばれる, 黒点から周囲に向かってほぼ放射状に移動する多数の小さな磁気要素が存在する(図1). MMFsは, 黒点の磁束輸送に重

要な役割を果たしていると考えられていたが, 決定的な証拠はなかった. MMFsの中には, 黒点と同じ磁気極性で単極で見えるものと, 双極のペアで外向きに移動していくものがあることが知られている. 双極のペアは, 正味では磁束を輸送していないことになるので, 黒点の崩壊を理解するうえでは, 単極のMMFsに注目すべきであるが, なぜか双極タイプのMMFsの研究の方が多かった. 「ひので」の観測で, 単極のMMFsが, 黒点の半暗部から離れていく様子を克明に捉え, この磁束の剥ぎ取りに黒点内の対流運動が関与していることがわかった²⁰⁾(図4). また, 双極タイプのMMFsは, 半暗部から黒点外に伸びた水平な磁力線が, ウミヘビのような凹凸をもち, その凹凸がMMFsとして観測されることがわかった. 半暗部外端付近では, エバーシェッド流が, ウミヘビのような磁力線構造を作っていることも確かめられた.

MMFsによって単位時間に黒点から活動領域端に運ばれる磁束の総量が, 黒点の磁束減少率とほぼ一致しており, MMFsが黒点の磁束輸送を担っていることが観測的に確かめられた²¹⁾. ま

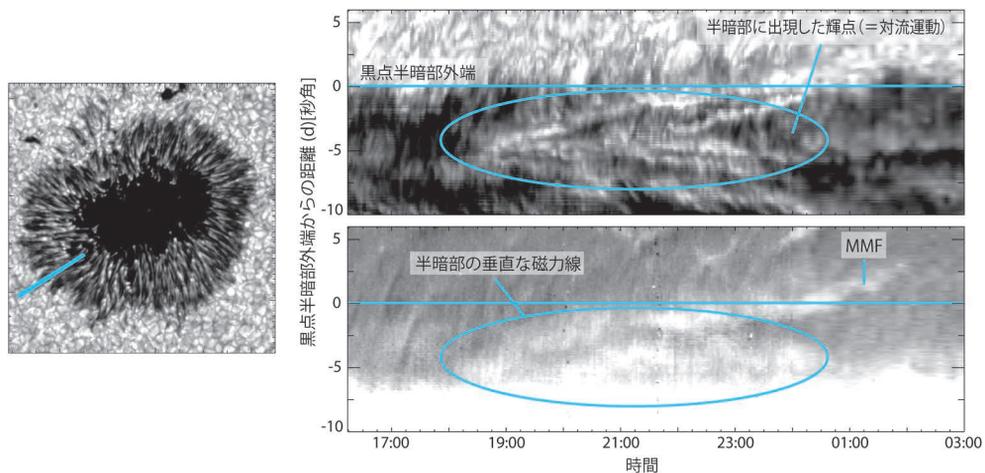


図4 左図の直線(半暗部の1本の筋構造)に沿った10時間半にわたる時間発展を右図に示す. 右上図が太陽表面での明るさで, 右下図が視線方向の磁場強度. 縦軸が黒点半暗部からの距離(マイナスが黒点内)で, 横軸が時刻を表す²⁰⁾.

た, 活動領域外端では黒点と同極の磁束の消失率が反対極性の磁束の消失率と釣り合うこともわかった. これらの結果で, 黒点内の対流運動で黒点の磁束が活動領域外端に運ばれ, そこで反対極性の磁気要素と衝突することで光球面から消えてしまうという黒点崩壊の全貌を定量的に証明できたと考えている. 高い空間分解能を活かした研究と比べると地味ではあるが, SOTの最も重要な点の一つは, 磁束の変化を定量的に捉えることができることだと考えていたので, そのアドバンテージを最大限に活かした成果だと個人的には思っている.

5. 今後の課題

黒点自体の理解という観点では, 3次元的に黒点の磁場や内部の対流運動を調べるのが重要である. 黒点の磁力線は元々太陽内部から浮上してきたものであるし, 太陽表面の微細構造は, 太陽内部の磁場と対流の相互作用の結果として表面に現れたものであると考えられているからである. ただし, 不透明な太陽内部を直接観測することは不可能なので, 日震学や数値計算が頼みになる. 黒点領域での日震学にはまだまだ改善が必要であ

り, 今後の発展が期待される(詳細は長島氏の記事²²⁾). 数値計算に関しても, 例えば図2の計算は, 最初から太陽表面に突き刺さった磁力線の塊が存在する状態からスタートしている. ダイナモ機構で増幅された磁場が太陽内部から浮上して, 黒点を形成していく姿を再現することが望まれる. また, 黒点の形成過程のところでも述べたとおり, 上空(彩層)の磁場・速度場構造も重要である. これは, 黒点の形成過程に限定した話ではない. 黒点の上空の彩層でさまざまなジェット現象が頻発していることは, 「ひので」の重要な発見の一つである²³⁾. 比較的磁場を観測しやすい黒点は, ジェットの駆動源と考えられている, 磁気リコネクションに伴う磁力線の変化を捉える最適地である.

黒点の数は, 太陽の11年周期活動の指標として用いられる. 数十年にわたって黒点が出現しないマウンダー極小期のような状況がなぜ作られ, どうやって元の周期活動に戻るのかは大きな謎である. 太陽の周期活動には, 太陽全体を循環する磁場が重要と考えられている. 確かに, 黒点が出現しやすい活動領域帯から極域に流れていく磁場の存在が長期観測で確認されている. 黒点が出現

すると、多量の磁束が黒点から周囲にまき散らさ
れているように見えるが、実はそのほとんどが周
囲の静穏領域に到達する前に反対極性の磁気要素
と衝突して消えてしまう²¹⁾。ひょっとしたら、
目玉焼き模様の黒点にまで成長しなくても、もう
少し小さな磁場が一定量出現すれば、太陽の周期
活動を維持する最低限の磁束循環は維持されるの
かもしれない。「ひので」は、静穏領域の磁束の
周期活動を調べるために、月に1回の頻度で、子
午線に沿って磁場の観測を継続している。静穏領
域の磁束でも周期変動する成分があることが捉え
られており²⁴⁾、この成分に対する黒点起源の磁
束の割合を知ることは重要である。ようやく、1
周期(11年)分のデータが得られるので、太陽
の周期活動に関する新たな研究が花開く時期であ
る。そのためにも、「ひので」が1年でも長く、詳
細な磁場データをわれわれに与えてくれることを
願っている。

謝 辞

混沌としていた黒点の研究が、僅か数年で収束
に向けて進展したという事実が、可視光磁場望遠
鏡が提供してくれるデータの素晴らしさを物語っ
ている。可視光磁場望遠鏡の開発・運用に携わっ
た日米のすべての関係者に感謝したい。

参考文献

- 1) 一本潔, 2008, 天文月報 101, 384
- 2) Solanki S. K., Montavon C. A. P., 1993, A&A 275, 283
- 3) Scharmer G. B., Spruit H. C., 2006, A&A 460, 605
- 4) Schlichenmaier R., et al., 1998, A&A 337, 897
- 5) Ichimoto K., et al., 2007, Science 318, 1597
- 6) Jurcak J., et al., 2007, PASJ 59, S601
- 7) Borrero J. M., Solanki S. K., 2008, ApJ 687, 668
- 8) Ichimoto K., et al., 2007, PASJ 59, S593
- 9) Rempel M., et al., 2009, Science 325, 171
- 10) Rempel M., 2012, ApJ 750, 62
- 11) Katsukawa Y., et al., 2007, PASJ 59, S577
- 12) Watanabe H., et al., 2009 PASJ 61, 193
- 13) Rempel M., 2011, ApJ 729, 22
- 14) Ortiz A., et al., 2010, ApJ 713, 1282
- 15) Lagg A., et al., 2014, A&A 568, 60
- 16) Shimizu T., et al., 2012, ApJ 747, L18
- 17) Romano P., et al., 2013, ApJ 771, L3
- 18) Ilonidis S., et al., 2011, Science 333, 993
- 19) Toriumi S., et al., 2014, ApJ 794, 19
- 20) Kubo M., et al., 2008, ApJ 681, 1677
- 21) Kubo M., et al., 2008, ApJ 686, 1447
- 22) 長島薫, 2016, 天文月報 109, 618
- 23) 勝川行雄, 2016, 天文月報 109, 548
- 24) Lites B. W., et al., 2014, PASJ 66, S4

New Insights into Sunspots form Hinode Observations

Masahito KUBO

*National Astronomical Observatory of Japan,
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: Studies on sunspots have very long histories mostly supported by ground based observations. However, detailed evolution of sunspot magnetic field structures are revealed by space-borne observations of accurate photospheric magnetic fields at high spatial resolution under the seeing free condition. After the launch of Hinode, radiative 3D magnetohydrodynamic simulations successfully demonstrate sunspots. The combinations of good observations and simulations make a rapid progress of our knowledge on sunspots. Especially, fine-scale structures in sunspots are commonly understood as a manifestation of magneto-convection.