

「ひので」による、太陽黒点内部の 磁場構造

渡 邊 皓 子

〈京都大学大学院理学研究科 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

e-mail: watanabe@kwasan.kyoto-u.ac.jp



渡邊



北井

北 井 礼 三 郎

〈京都大学大学院理学研究科附属天文台 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

e-mail: kitai@kwasan.kyoto-u.ac.jp

2006年に打ち上げられた太陽観測衛星「ひので」を用いて、太陽黒点の高分解能観測が行われた。太陽黒点の光球より内部の磁場構造を直接測定することはできないが、黒点内で起こっている対流の現れであるアンブラルドットの特徴を知ることで、間接的に迫っていく。アンブラルドットとは直径約300 km、寿命15分程度の輝点である。筆者らは「ひので」可視光磁場望遠鏡で3日間連続で観測された黒点の分光磁場データから、アンブラルドットは深い層で起こっており、弱い磁場と上昇流を伴うということを発見した。また、一部のアンブラルドットの明るさが振動的に変化していることを報告し、この要因が黒点内で起こっている振動対流であるという可能性を示した。

1. 太陽黒点の謎

太陽に黒点があるというのは、皆さんご存知のことだろう。古くは1610年のガリレオ・ガリレイによる黒点の発見にさかのぼり、その後の差動回転や黒点磁場への発見へとつながっていく。天文学の中で最も古くから研究されている対象の一つであろう。しかし、黒点はすでに理解され尽くしているかということ、全くそうではない。黒点が暗いのは、磁場が強くと対流を抑制しているからであるが、ではその黒点を作っている磁場はどこからきたのか？ どのようなメカニズムで崩壊するのか？ 黒点の表面下での磁場の形状は？ など、基本的なことから謎が多く、議論が絶えない。磁場の生成プロセスは、ダイナモ問題と呼ばれ太陽の差動回転に起因としているという説がある¹⁾。また、黒点の崩壊はMoving Magnetic Feature (黒

点周辺で外側へ動いていく微小な磁気要素)によって磁束が周辺領域へと引きはがされていくことで説明できるのではないかと、という説が近年有力視されている²⁾。筆者らは、黒点の表面下での磁場形状を知りたいということモチベーションに、日震学とは違うアプローチで研究を進めている。日震学とは、太陽表面で観測されるさまざまな音波の強度スペクトルから、太陽内部の密度や温度を知ることができるという手法であり、この手法により黒点下のガスの温度や速度場などが大まかにわかっている。

ところで、太陽黒点の磁場とはどの程度の強さであろうか。地球表面での磁場は強くて1 Gauss程度であるが、黒点は数千 Gaussに及ぶ。黒点の直径は2-3万 kmなので、地球表面を切り開いて太陽表面に貼り付け、ピップエレキバンを敷き詰めたもの、と想像してもらえれば大体正しい。

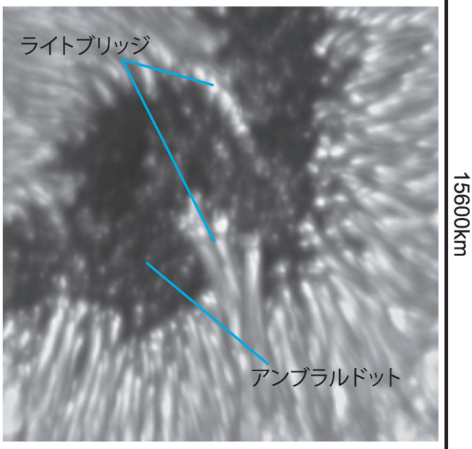
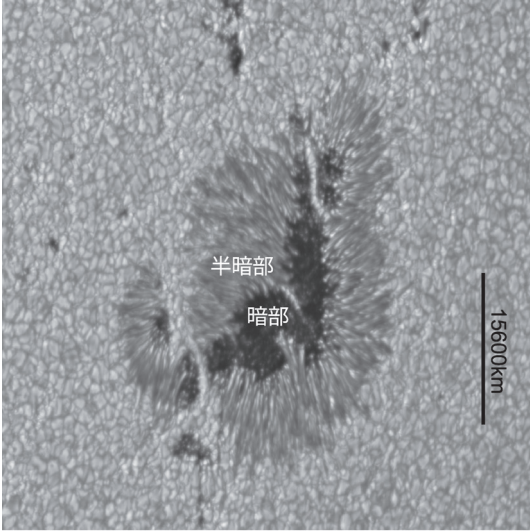


図1 「ひので」可視光望遠鏡によって blue continuum で撮影された黒点 (上) とその中央部分の拡大 (下).

何となくすごさが伝わるだろうか.

2. 黒点内部の微細構造

黒点は、暗部と呼ばれる特に暗い部分と、半暗部と呼ばれる筋状の構造からなる (図 1 上). 両者の間にどうして顕著な見た目の違いがあるのか? といった疑問もあるが、それは置いておいて、筆者らは暗部の中に注目した. 暗部内はのっぺりとした何もない状態では全くなく、たくさんの小さい輝点 (アンブラルドット) や、輝点が集まって

橋のようになったもの (ライトブリッジ) が存在する. ライトブリッジは黒点が崩壊に近づく頃によく見られる現象で、最終的には黒点を分断し、その崩壊に寄与する³⁾. アンブラルドットは北井ら⁴⁾が詳細な統計解析をしており、約 300 km のサイズで寿命 15 分程度、周囲より 400 K 程度高温であるということがわかった. このような詳細で信頼性の高い統計解析は、太陽観測衛星「ひので」可視光望遠鏡のデータによって初めて可能になった. 「ひので」可視光望遠鏡は、回折限界である 0.3 秒角を常に達成する空間分解能と、最速で 4 秒間隔という時間分解能を併せ持っているため、アンブラルドットのような比較的变化の速い、非常に小さい現象の観測に適している.

3. 暗部内輝点 アンブラルドット

アンブラルドットは、暗い黒点の中に現れるちょっと明るいところである. なぜ明るいのか? それはそこだけ対流が起きているからであると考えられている. そもそも、黒点は磁場がとても強いいため、対流が抑制されているところであった. しかし、もし完全に対流が起っていないとすると、黒点は観測されているよりも、もっと暗くなければ理論的におかしいということがわかって⁵⁾. アンブラルドットは、生まれたばかりの小さな黒点にも、安定した大きな黒点にも同じように無数に存在する. サイズは小さいが (例えば黒点を東京ドームの大きさとすると、アンブラルドットは大体 2 m 四方になる), 黒点全体を考えるとなくてはならない存在である. 対流によって下層の高温ガスが表面に現れているのがアンブラルドットなので、必ずそのルーツは直接観測不可能な黒点表面下の磁場との相互作用にあるはずである. これに注目し、アンブラルドットの表面での磁場の特徴を明らかにすることで、黒点内部の磁場を推測しよう、ということを目指している. また、磁場中で起こる対流の様子を詳しく知りたいという興味は、太陽物理学者だけのもの

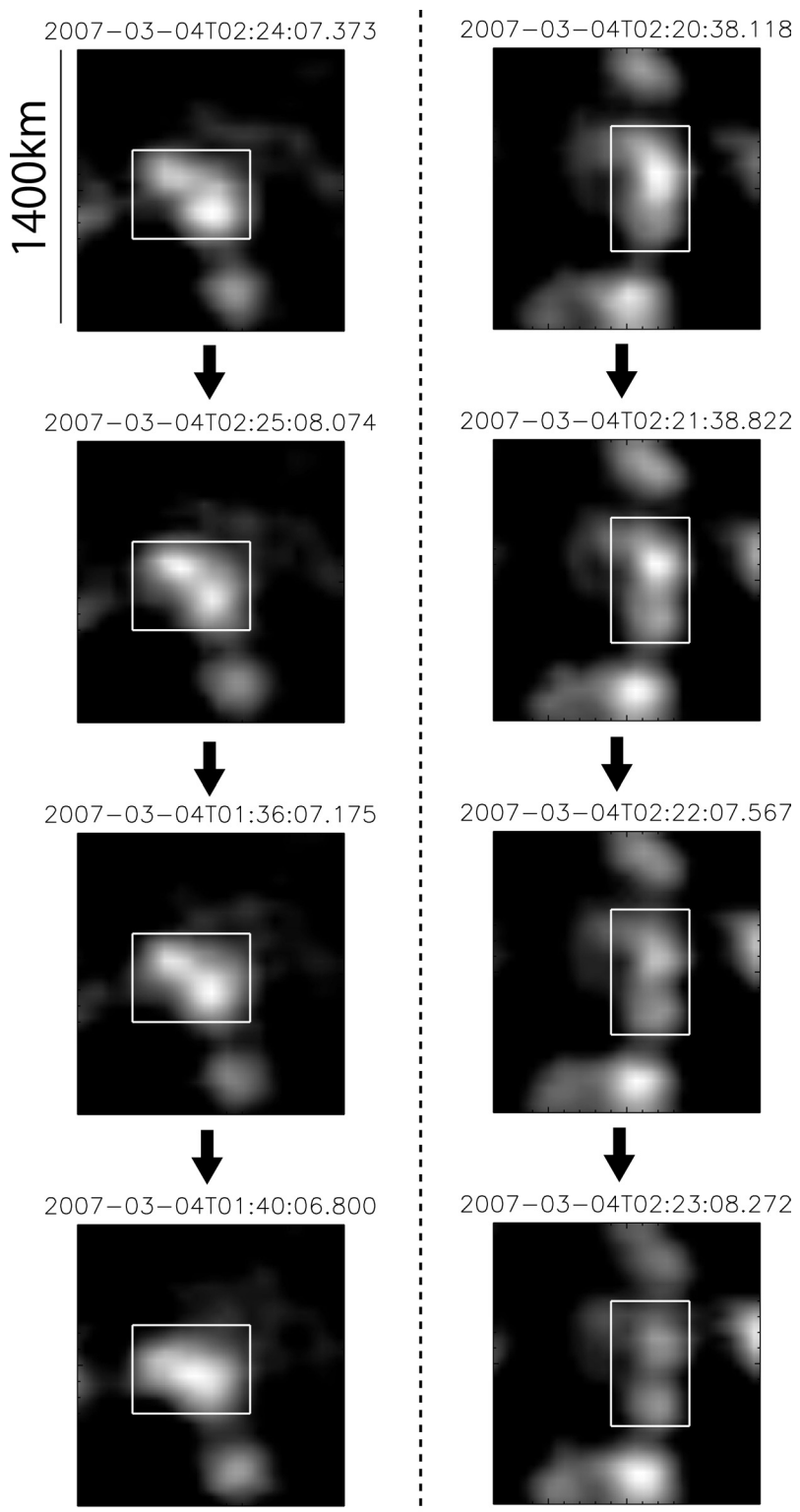


図2 アンブラルドットの結合（左）と分裂（右）.

でなく、非線形物理学者や、降着円盤や低温星における対流の研究者などからも強い関心が寄せられている。

筆者らは、2006年9月に打ち上げられた太陽観測衛星「ひので」の初期観測として、アンブラルドットの観測を提案し、受諾された。観測は2007年3月に、3日間連続で行われた。筆者の一人（渡邊）は2007年4月に大学院に入学し、さっそくデータ解析に携わった。まずはデータをじっくり見てみよう、と、黒点暗部を拡大したムービーを作り、再生してみた。アンブラルドットは暗部内の至る所に無数に存在し、暗部周辺部のものは黒点中心に向かって動き、暗部中心部のものはごちゃごちゃと無秩序に運動していた。複数のドットがくっついたり、元は一つだったのが複数に分裂したりする例もいくつか見られた（図2）。特に磁場の強いところ（ダークコア）では存在するドットが明らかに少ないことから、アンブラルドットは磁場の強さとの相関をもつということもわかった。

3.1 アンブラルドットの磁場構造

「ひので」衛星のもう一つの大きな強みは、その高精度な磁場測定にある。2007年3月の観測でも、毎日1回ずつ黒点をカバーする領域の磁場分光スキャンを行っている。各スリット位置で、磁場に敏感な鉄のラインを撮影し、地上でそれらを変換(Milne-Eddington inversion codeを用いた)することで、磁場ベクトル3成分とガスの視線速度を求めることができる。その結果、次のような発見をした。

- アンブラルドットは、周囲の暗部に比べてローカルに弱い磁場 ($\Delta B = -17 \text{ Gauss}$) と上昇流 ($\Delta v = 28 \text{ m s}^{-1}$) をもつ
- 太陽中心付近で観測すると、アンブラルドットと周囲の暗部では磁場や速度場の違いが見られるが、黒点が太陽中心から離れると、アンブラルドットと周囲の暗部での磁場・速度場に違いはなくなる(アンブラルドット磁場の center-to-

limb variation)

これらの結果は、アンブラルドットは弱い磁場の高温ガスでできていることと、その高温ガスが光球の低い層にしか存在しないということを示している(図3)。というのは、太陽中心付近で観測するのと、中心から離れたところで観測するのでは、観測している太陽大気層の高さが異なるからである。太陽全面像を可視光で観測したときに、縁が暗く見えるのと同じ理由である。一つ目の結果である弱い磁場 ($\Delta B = -17 \text{ Gauss}$) と上昇流 ($\Delta v = 28 \text{ m s}^{-1}$) は、最も深い層を観測できたときのデータを用いて得られた平均値である。ただし、今回の解析では下降流は観測できなかった。これは、下降流のある場所が空間的に小さすぎるか、下降するときにガスが冷却されて光量が低くなるからであると考えた。Lokesh ら⁶⁾は、サイズの大きなドットにおいて、上昇流の周りに下降流が見られる例を見つけている。

筆者らはもう一つ重要な発見をしている。それは、一部のアンブラルドットの明るさが時間的に振動しているという事実である。これは、黒点の大気構造において起きることが予測される、振動対流のモードに対応しているのではないか。つまり、アンブラルドットが磁気対流で起きているこ

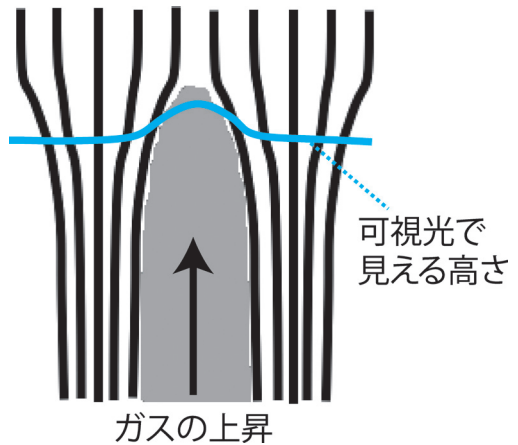


図3 アンブラルドット周辺磁場の概念図。灰色の部分は弱磁場の高温ガス(アンブラルドット)。

との証拠であると思われる。

3.2 アンブラルドットの特徴と磁場の相関

次に筆者らは、一つ一つのアンブラルドットのサイズ、寿命、固有運動といった特徴と、そのドットの出現位置の磁場との相関を調べた。これは、実際の現象を使って磁気対流のパラメーターサーベイを行っているようなものであり、得られた結果は磁気流体シミュレーションなどにフィードバックし、より現実に近い黒点モデルを構築するのに役立つ。

データは「ひので」衛星で2007年3月1日に撮影された黒点を用いた。アンブラルドットのサイズ、寿命、固有運動をバイアスなく求めるために、アンブラルドットを自動的に検出するアルゴリズムを作成した。その結果、約2時間連続の可視光イメージの中に、アンブラルドットを2,000個以上検出した。ほぼ同時に偏光磁場の観測も行っており、ドットの出現位置での磁場の強さと向きを求めた。両者の間には、次のような関係が見られた。

- アンブラルドットの寿命は、磁場に関係なくほぼ一定 (図4上)
- 磁場の強いところでは、アンブラルドットのサイズは小さい (図4中)
- アンブラルドットの運動の速さは、磁場がより水平に傾いているほうが速い (図4下)
- アンブラルドットの運動の向きは、磁場が傾いているところでは黒点中心方向だが、磁場が垂直に近いところではほぼランダム

磁場が強いと、対流によって上昇してきたガスの膨張が抑えられるので、ドットのサイズが小さくなったのだと考えた。寿命がほぼ一定であるのは、ドットの鉛直方向の長さでガスの上昇速度との兼ね合いであろう。つまり、ドットの鉛直方向の長さは観測されるサイズと相関があるとして、ガスの上昇速度も強磁場では抑制されてしまうので、(鉛直方向の長さ)/(上昇速度)で見積もられる寿命は、ほぼ一定となる。アンブラルドットの

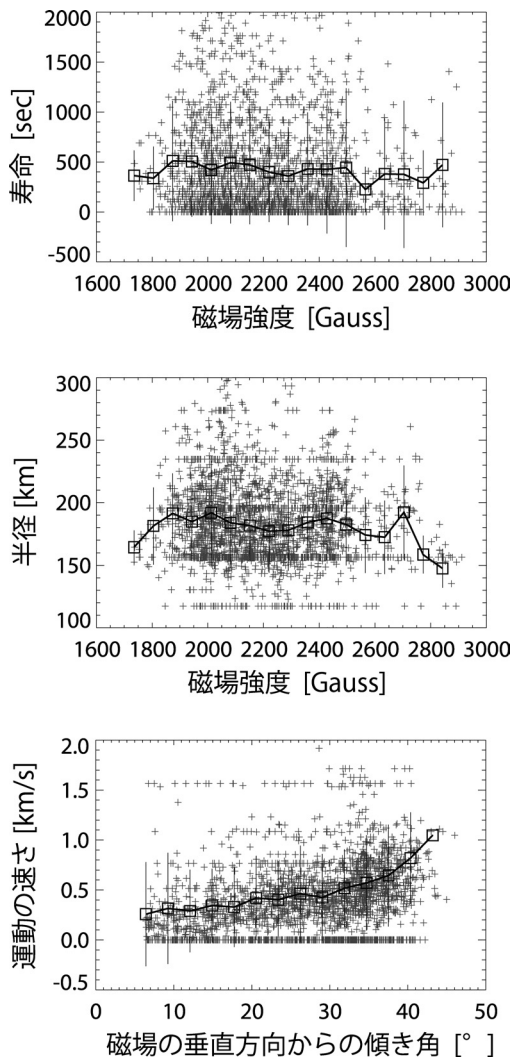


図4 アンブラルドットと磁場強度の分散図。□は平均値を、縦線は1シグマエラーを示している。

運動の速さと向きは、Scharmerら⁷⁾の論文に書かれているメカニズムで説明できる。磁場が水平に傾いているところに高温ガスが上昇してくると、黒点内側のところの磁力線が疎になり、どんどん次の高温ガスが上昇してくる。磁場が垂直なところでは、上記のメカニズムは起こりにくくなるため、黒点内側への系統的な動きを示さなくなる。

4. アンブラルドット研究の今後

アンブラルドットに関する研究は、「ひので」衛星によって格段に進展したと言える。地上観測は常に大気揺らぎの影響を受けるため、安定した画質のイメージを連続で撮影することができなかった。上記の“アンブラルドットの寿命と磁場の強さを比較する”といった研究は、まさに「ひので」衛星のおかげで達成できたものである。筆者らは、次のステップとして、生まれたての黒点、崩壊しかけの黒点など、いろいろな成長時期にある黒点における、アンブラルドットの特徴の変化を見たいと思っている。これにより、黒点の磁場構造の進化を考察したい。

今後の黒点観測がどのように進展するかは、太陽の活動度にも強く依存する。2008年1月に新しい活動周期の始まりを告げる黒点が観測され⁸⁾、次々と黒点が出てくるだろうことが期待されたが、今のところさっぱりである。もう少し辛抱強く様子を見てやる必要がある。

謝 辞

本稿は、筆者の一人（渡邊）の修士論文の一部を基にしています。この研究を進めるにあたり、指導教官である北井礼三郎准教授、一本 潔教授、共同研究者である国立天文台の勝川行雄助教をはじめ、多くの人々にご指導、ご鞭撻を賜りました。また、「ひので」衛星の運用にも参加させていただき、その経験は研究に役立つだけでなく、国際的なプロジェクトに携わることの楽しさと難しさを学びました。皆さんに出会い、このような楽しい研究生生活を送れていることに、心から感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 石川遼子, 2008, 天文月報 101, 630
- 2) Kubo M., et al., 2007, PASJ 59, S607
- 3) Katsukawa Y., et al., 2007, PASJ 59, S577
- 4) Kitai R., et al., 2007, PASJ 59, S585
- 5) Deinzer W., 1965, ApJ 141, 548
- 6) Lokesh B., Jain R., Jaaffrey S. N. A., 2007, ApJ 665, L79
- 7) Scharmer G. B., Nordlund A., Heinemann T., 2008, ApJ 677L, 149S
- 8) <http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/topics/cycle24/>

Magnetic Structure of Sunspot Umbrae Revealed by the *Hinode* Satellite

Hiroko WATANABE

Department of Astronomy, Kyoto University, Kitashirakawa-Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan

Reizaburo KITAI

Kwasan and Hida Observatories, Department of Astronomy, Kyoto University Kitashirakawa-Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan

Abstract: A high-resolution observation of a sunspot was done using the *Hinode* satellite launched on 2006. We can approach to the physics of the subsurface structure of sunspots by revealing the properties of umbral dots, which have a typical size of 300 km and lifetime of 15 minutes, and thought to be are signatures of magnetoconvection. We found weaker magnetic fields, upward flows, and evidence of the oscillatory convection in umbral dots.