

「ひので」がもたらしたもの

櫻井 隆

〈国立天文台 太陽観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: sakurai@solar.mtk.nao.ac.jp



可視光による太陽の高分解能観測の歴史を概観し、分解能1-2秒角の「ひので前史」から0.2秒角の「ひので時代」になって何が変わったかを、微細磁束管、極磁場、カノピー構造と横磁場の観測について述べる。次にX線望遠鏡、紫外線分光器と組み合わせた、コロナの波動とコロナ加熱、活動領域からの太陽風の流出源について述べる。

1. 可視光による太陽の高分解能観測

ひので衛星搭載の観測装置のうち、最大のものは口径50 cmの可視光望遠鏡SOTである。太陽の観測的研究において、高分解能撮像は常に中心的課題の一つであった。まずその背景について見てみよう。

望遠鏡の分解能（回折限界）は観測波長/望遠鏡口径で決まる。可視光の波長500ナノメートル（緑）を例にとると、口径10 cmで約1秒角の分解能となる。口径50 cmならば0.2秒角である。太陽の視直径は約2,000秒角なので、1秒角の分解能があれば、太陽全体を2,000×2,000に分けて見ることができる。しかし実際は、大気の乱れ（シーイング）の影響で、望遠鏡の口径を大きくしてもそれに応じた解像度が得られるわけではない。特に太陽の観測では、太陽熱で熱せられた地面からのかげろや、暖まった望遠鏡内部の気流のために条件が悪い。1秒角をコンスタントに切る分解能を達成することを目標に、高い山や湖の畔に観測所を設置し、望遠鏡の内部を真空にするなどの工夫がなされたのが1960年頃である。太陽表面の粒状斑（対流の渦）の大きさが1-2秒角（1,000 kmくらい）で、これがくっきりと見えることが高分解能のベンチマークであった。

大気圏外からの観測でシーイングの影響を除去しようという計画も早くから、まず気球により始まった。プリンストン大学のシュバルツシルトが主導した、1957年のストラトスコープ実験（口径30 cm）が有名である¹⁾。本当の意味での大気圏外からの観測はスペースシャトル・チャレンジャー号に搭載されたスペースラブ2実験（1985年7月29日-8月5日）であった²⁾。望遠鏡の口径は30 cmで、磁場観測も計画していたが、電源のトラブルで最終日まで装置が動かず、結局16時間の連続光画像を取得したにとどまった。アメリカの太陽研究者は、より本格的なスペースからの可視光観測を目指し、口径1 mの太陽望遠鏡（奇しくも「ひので」と同じSOTと名づけられていた）を計画したが、実現しなかった。ヨーロッパでは、口径2.4 mの地上望遠鏡LEST（Large European Solar Telescope）が計画されたが、これも実現しなかった。ひのでSOTは満を持しての登場である。

1.1 微細磁束管

地上観測では、単純な撮像観測でもシーイングの影響で分解能が下がるが、磁場観測ではさらにその影響が大きい。太陽表面の磁場を測定するにはスペクトル線の偏光を測る必要があり、複数枚の画像を組み合わせなければならず、また光学系も複雑になるからである。

1970年代の地上の磁場観測装置(マグネトグラフという)は2-3秒角の分解能しかなかったが、しかし分解能以下の微細構造の兆候が捉えられていた³⁾。ゼーマン効果によって生じる偏光は、磁場があまり強くない(目安として数百ガウス以下)時には線形近似が成り立ち、磁場の強さと、スペクトル線の遷移ごとに量子力学で決まるランデ因子に比例するはずである。しかし、観測ではランデ因子の大きい線の偏光度が理論より小さかった。これは、測定領域(大きさ数秒角のピクセル)の中で磁場の分布が一様でなく、ほとんど磁場のない大部分の領域と、非常に強い局在した磁場とからなっているとすれば説明できる。例えば、磁場が10ガウスと測られたピクセルの中には、1,000ガウスの磁場が面積の1%を占め、それ以外には磁場がない、という解釈である。磁場強度が1,000ガウスもあると、ランデ因子の大きいスペクトル線については偏光度が飽和して、線形近似より小さな値になる。粒状斑の渦と渦の間に見える、大きさ0.2-0.3秒角くらいの輝点(大きさ200 km程度)が、この局在した磁場の実体であろうということも予想され、微細磁束管という名称が与えられていた。

ひので以前にも、微細磁束管の磁場を直接測定する試みがなかったわけではないが、ひのでSOTによる、シーイングのないスペースからの観測で、精度良く、かつ定期的に測定できるようになった(図1)。粒状斑対流によって押しつけられた磁場が、最終的に磁場強度1,500ガウスくらいの微細磁束管になる過程(対流崩壊と呼ばれる)も捉えられている⁴⁾。磁場強度が1,500ガウスにもなると、それだけで磁束管の周囲のガスの圧力と釣り合うので、磁束管の中は低密度となり、放射が抜けやすい通り道となる。この効果によって太陽は磁場の多いとき(活動極大期)のほうが明るくなるため、微細磁束管の物理は地球へ降り注ぐ太陽光エネルギーの増減とも深く関係している。

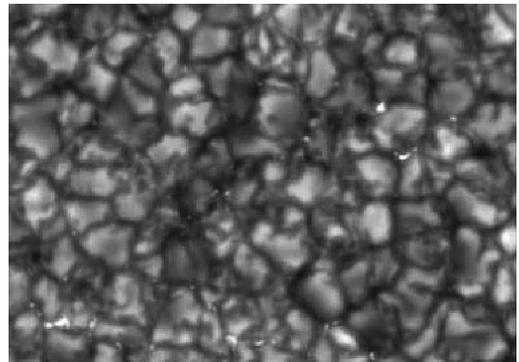


図1 SOTの高解像度写真(波長430ナノメートル, 国立天文台/JAXA)。

1.2 極磁場

太陽面上で最も磁場の強い領域は黒点で、2,000-4,000ガウスくらいの磁場をもっている。スペクトル線のゼーマン効果から黒点の磁場を初めて測定したのはアメリカ・ウィルソン山天文台のヘールで1908年のことである⁵⁾。これと比べると極域の磁場は弱く数ガウスしかないので、高感度の磁場観測装置(マグネトグラフ)が1950年代にできて初めて観測されるようになった。1957年には極磁場の反転が発見され⁶⁾、その後の継続観測から、極域の磁場は黒点の少ないとき(活動極小期)に最も拡大し、活動極大期には減少し反転することがわかった。太陽の磁場生成機構(ダイナモ機構)の理論では、極磁場が種となり、これが差動自転により引き延ばされ増幅されて、黒点のもととなる東西方向に向いた磁場になる。

一方、極域には「極域白斑」と呼ばれる輝点が見え、その数も活動極小期に多いことから、極域の磁場も均せば数ガウスだが、極域白斑に強い磁場が集中しているのではないかと考えられ、実際そのような観測も得られていた。しかしひので衛星の観測では、1,000ガウスを超える局在した磁場が方向まで含めて観測できるようになり(図2)、極域の磁束量まで測定できるようになった⁷⁾。極域白斑は磁場の特に強い、大きい磁束管に対応し、磁束管すべてが白斑として見えるわけではない。

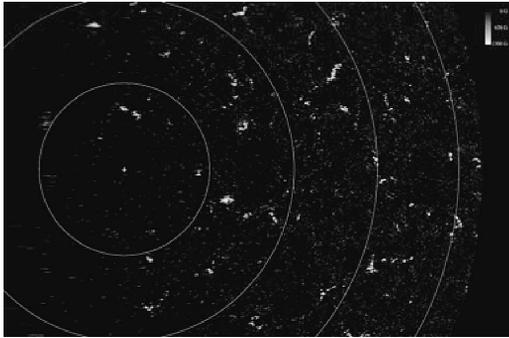


図2 太陽の南極域の磁場分布(2007年, 国立天文台/JAXA).

1.3 カノピー構造と水平磁場

太陽の表面(光球, 温度6,000度)近傍では大気の圧力は高さとともに急激に減少するため, 微細磁束管の磁場を外側から押しこめておくことができなくなり, 磁場は急激に広がって空間を満たす. こうしてできる, 漏斗状に広がった磁力線のことをカノピー(天蓋)構造と呼んでいる⁸⁾. カノピーの下には磁場のない大気があり, この部分では, 後述する大気加熱機構のうち磁場に関係しない加熱のみが作用するが, あまり効率が低いいため, 温度は下降を続け, 4,200度くらいまで下がったところでカノピーの磁場に遭遇するという描像がもたれていた.

しかしひので可視光望遠鏡の観測では, 磁束管と磁束管の間, 磁場のないはずのカノピー下の領域には, 数百ガウスの強さの, 水平方向に走る磁場が大量にある(図3)ことが発見された⁹⁾. 水平方向磁場の量は, 垂直方向磁場(微細磁束管の磁場)の量には無関係で, したがって11年周期の変動も示さないと推察される. 水平磁場は太陽表層の乱対流が作り出すもので, 太陽全体の自転やコリオリ力には関係のないメカニズムによるものようである. また, 領域の磁束の量によらない一定量を保っていることから, 活動領域のコロナの加熱源とも考えられない. 一方, これまで音波起源とも考えられてきた, 磁場の弱い領域の加熱や, 回転の遅い星の大気の加熱が, 実は水平磁場による加熱であったということかもしれない.

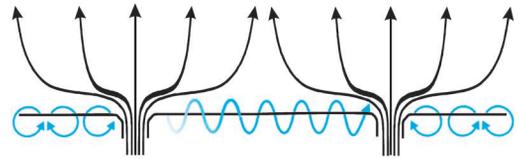


図3 カノピー構造と水平磁場(ウミヘビ状かリング状かは想像である).

2. さまざまな波動の発見とコロナ加熱

太陽の表面は6,000度なのに, その外側に温度100-200万度のコロナができるのはなぜか, というのがコロナ加熱問題で, 太陽および恒星物理学の未解決の重要研究課題である. コロナの温度がわかったのは1940年ごろで, 最初に考えられた説明は, 太陽表面の対流運動が作り出す圧力の乱れが音波として上層に伝わるにつれて, 大気の密度が下がるので音波の振幅が増大し, 衝撃波となって散逸し大気を加熱するというもの(音波加熱説)であった. その後, 1970年代になって人工衛星からコロナのX線観測がなされるようになると, コロナの中でも高温高密度の部分は, 太陽表面で磁場の強い領域(黒点とその周辺, いわゆる活動領域)の上空にできることがわかり, 加熱源として音波を磁氣的波動に置き換えた波動加熱説が形成された.

一方, 活動領域周辺のコロナでは, フレアと呼ばれる爆発現象が起こることがあり, 1千万度を超える高温プラズマや, 加速粒子の流れ, 巨大なプラズマ雲の放出(コロナ質量放出, CMEと呼ばれる)を引き起こす. 大きなフレアはまれにしか起こらないが, 小さなフレアほど個数, 頻度が大きいので, 微小なフレアがひっきりなしに起こってコロナを加熱しているという, 微小フレア説がパーカー¹⁰⁾により提唱された.

ひのではさまざまな波動現象を発見し, 診断ツールとしての波動の研究は大いに進展したが, コロナの加熱(特に, 活動領域周辺の高温高密度のコロナの加熱)が波動の運ぶエネルギーで説明でき

るかという結果は否定的である。しかし微小フレア説にも、コロナを加熱するのに必要なエネルギーを供給できるか不明な点があり、また紫外線分光装置EISによる温度診断でも、微小フレア起源の1千万度のプラズマの量は少ない。ひので打ち上げ前には、太陽表面の現象とコロナの加熱の関係がわかれば決着がつくと期待していたが、ひのでのX線、紫外線によるコロナ観測は分解能が1秒角を切っていないこと、また光球とコロナの間の、温度約1万度の彩層は撮像観測だけで分光診断機能が欠けていたこと、などのために結論を持ち越している。2013年に打ち上げられたNASAのIRIS衛星が彩層の分光観測を実施しており、ひのでとの共同研究による進展が期待される。

3. 活動領域からの流出流と太陽風

高温のコロナは太陽の重力でとどめておくことができず、太陽風として惑星間空間に流出する。磁力線が惑星間空間に向かって開いていてガスが流れやすい極域からは高速の太陽風が吹き出しており、地球軌道近傍での速度は 800 km s^{-1} である。一方、低緯度領域からは速度 300 km s^{-1} くらいの低速風が流れ出ているが、磁力線が大体は閉じている(惑星間空間につながっていない)低緯度帯からどのようにしてガスが抜け出すのかははっきりとはわかっていなかった。

1992年に内田ら¹¹⁾は、ようこう衛星のX線観測で、活動領域から延びるループ状の磁力線がそのまま膨張して惑星間空間へ流れ出る現象を見て、これが低速風の源であるという説を提唱した。できつつある活動領域では、確かに表面下から次々と磁場が浮上するので、このような現象になることは広く認められているが、できあがった活動領域でも持続するかを含め、低速風の主たる供給源であるかどうかは今でも議論がある。

一方、ひのでのX線望遠鏡XRTは、ようこうSXTより時間、空間分解能とも向上した結果、活動領域の端のほうから連続的に流出する流れの

パターンを発見した¹²⁾。紫外線分光装置EISによりドップラー速度も測定され、外向きの流れであることが確認された¹³⁾。また、磁力線のモデル計算から、活動領域の中にも、惑星間空間へつながる磁力線があり、それに沿った流れであることもわかってきた。これが低速風の主たる供給源であるかどうかはさらに研究が必要である。

以上、ひのでがもたらした新しい太陽画像の主なものを駆け足でまとめてみた。詳しくは本稿に続くテーマ別の解説記事をご覧ください。

参考文献

- 1) Schwarzschild M., 1960, ApJ 130, 345
- 2) Title A. M., 1989, ApJ 336, 475
- 3) Harvey J., Livingston W., 1969, Sol. Phys. 10, 283
- 4) Nagata S., Tsuneta S., Suematsu Y., et al., 2007, ApJ 677, L145
- 5) Hale G. E., 1908, ApJ 28, 315
- 6) Babcock H. D., 1959, ApJ 130, 364
- 7) Tsuneta S., Ichimoto K., Katsukawa Y., et al., 2008, ApJ 688, 1374
- 8) Giovanelli R. G., 1980, Sol. Phys. 68, 49
- 9) Ishikawa R., Tsuneta S., 2009, A&A 495, 607
- 10) Parker E. N., 1972, ApJ 174, 499
- 11) Uchida Y., McAllister A., Strong K. T., et al., 1992, PASJ 44, L155
- 12) Sakao T., Kano R., Narukage N., et al., 2007, Science 318, 1585
- 13) Harra L. K., Sakao T., Mandrini C. H., et al., 2008, ApJ 676, L147

Hinode's Contributions to Solar Physics

Takashi SAKURAI

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

Abstract: After reviewing high-resolution optical observations of the Sun in the pre-Hinode era, typically a spatial resolution of 1–2 arcsec, new findings of Hinode with 0.2 arcsec resolution are presented on magnetic flux tubes, polar fields, canopy structure and horizontal magnetic fields. In combination with the X-ray and EUV instruments on Hinode, next I present observations of coronal waves in the context of coronal heating, and acceleration of solar wind from active regions.