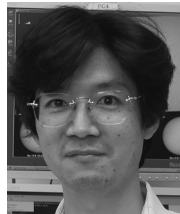


「ひので」がとらえた対流崩壊による強い磁束管形成過程



永田伸一

〈京都大学大学院理学研究科附属天文台 〒506-1314 岐阜県高山市上宝町蔵柱 飛騨天文台〉

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

太陽表面上は、キロガウスの磁場強度、空間サイズ ~ 200 km の、「強い磁束管」で埋め尽くされている。「強い磁束管」は、対流不安定性により形成されると考えられてきたが、30年の間、観測的検証はできなかった。「ひので」可視光望遠鏡の高精度偏光観測により明らかになった「強い磁束管」形成過程は、対流不安定性によるとする理論によく一致する。これにより、光球からコロナを貫き通す太陽外層大気の基本構造「強い磁束管」の理解は大きく進展した。

1. 強い磁束管

太陽の黒点が強い磁場をもった構造を持つこととは、一般にもよく知られているが、黒点の外にも黒点磁場に匹敵する磁場強度（キロガウス）をもった構造に満ちあふれていることは、太陽の研究者以外にはあまり知られていないのではないだろうか。この黒点外の強い磁場構造を「強い磁束管」と呼ぶ。光球での空間サイズは ~ 200 km、磁場強度は ~ 2 kG である。「強い磁束管」の存在が認識されるようになったのは 1970 年代である。当時の望遠鏡では空間的に分解できないサイズであったにもかかわらず、巧妙な方法でその空間サイズと磁場強度が導き出された。

磁場強度が十分大きく、吸収線（無偏光）が完全に分離していれば、ゼーマン効果から直ちに磁場強度が求められる。他方、そこまで磁場が強くない場合は、Stokes ベクトルと呼ばれる偏光スペクトルの形状から磁場を推定する（本特集中の清水による記事天文月報第 101 巻 8 号参照）。この場合、0 次の観測量は、磁場強度ではなく磁気フラックス（磁場強度と観測要素中の磁気大気の割合（フィリングファクター）の積）になる。Stenflo

ら²⁾は、Lande の g 因子が異なる二つの吸収線のゼーマン効果を同時に観測することで、0 次の観測量である磁気フラックスから、磁場強度とフィリングファクターを分離、キロガウスの磁場強度で太陽表面が覆われていることを示したのだった。

この「強い磁束管」は、連続光などでは輝点として表れることが知られている。このため、輝点をもって磁場構造の運動などが議論されてきている。しかし、正確な磁場診断には、上述のように偏光スペクトルのゼーマン交換診断が必要である。このために、「ひので」衛星は、可視光望遠鏡に Fe I 6301.5 Å, 6302.5 Å の Stokes ベクトルを取得するスペクトルポラリメーターを搭載している。

なお、太陽表面で観測される「強い磁束管」は、太陽全体で見ると、外層の高温大気、太陽コロナを形成する磁気ループを、光球で見た断面である。光球からコロナまでを、磁力線で貫かれた一つの系としてとらえ、太陽コロナの加熱機構を、磁束管の性質としてコロナ加熱を説明するのが、「ひので」の最大のミッション目的の一つである。

1.1 問題点

本稿で問題にするのは、「強い磁束管」の形成過

程である。そこで、磁場強度キロガウスというのはどういう状況なのか、簡単に見てみよう。電気伝導度が高く、磁気凍結定理が成立する太陽表面上では、磁力線はプラズマとともに運動する。光球面下は対流不安定な成層であり、対流セル（粒状斑）の生成消滅が絶え間なく起きる乱流状態にある。粒状斑の空間サイズはおよそ 1,000 km、寿命は～8 分程度である。太陽内部で生成されて表面に浮上した磁場は、対流運動に従って運動し、粒状斑間に掃き寄せると考えられる。この流体運動により磁場に対してなされる仕事が、粒状斑間に集められた磁場、「磁束管」の磁気エネルギー上昇、すなわち磁場強度上昇に使われる。この磁場強度増幅は、磁束管の磁気エネルギー密度が、仕事源である周囲の流体の運動エネルギー密度と等しくなるまで続けられると考えられる。この磁場強度は、equipartition（等分配）磁場強度 B_{eq} と呼ばれ、光球の密度 ρ 、粒状斑の運動速度 v を用いて、 $B_{eq} = \sqrt{4\pi\rho} \cdot v$ と与えられる。典型値を代入すると、たかだか $B_{eq} \sim 400$ G であり、観測の結果を大きく下回るのである。

1.2 対流崩壊

そこで、いかにして等分配磁場強度の磁束管の強度を上げるかが、大きな問題として浮かび上がった。30 年前に提唱されて、現在まで信じ

られているモデルのエッセンスは実に単純である^{3)~5)}。Parker らは、磁束管の中で対流不安定性が発達すればよいのではないかと、ということに着眼した。磁束管内部物質（プラズマ）は磁力線に沿ってのみ運動する。不安定性で発達した下降流とともに物質が抜けると、内部ガス圧が低下する。圧力平衡を保つために、磁束管は収縮して磁気圧を高める。この結果、磁気圧と周囲のガス圧の圧力平衡により決められるまで、磁場強度は上昇する。この磁束管内部での対流不安定性発達現象を convective collapse（対流崩壊）と呼んでいる（図 1）。対流崩壊で期待される磁場強度 B_{cc} は、ガス圧 P を用いて $B_{cc} = \sqrt{4\pi P}$ と与えられる。典型値は、 $B_{cc} \sim 2$ kG となり、観測に一致する。物理モデルは明確であり、不安定性の線形領域での振舞いや、非線型 MHD シミュレーションによる観測の予測など、いくつかの理論的研究がなされてきた^{6)~10)}。

2. 「ひので」の登場

このように「強い磁束管」の形成モデルは 30 年前にはその骨子は確立されていた。にもかかわらず、観測的検証に実に 30 年の歳月を要したのはなぜか？ これは、なぜ地上観測では難しかったのか、言い換えると、なぜ「ひので」が必要であっ

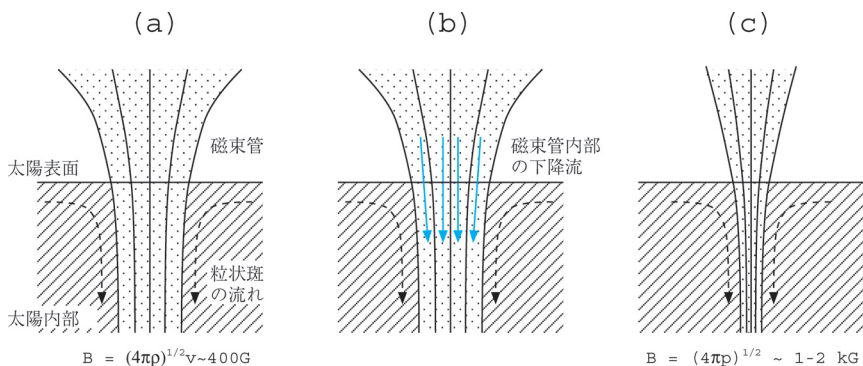


図 1 対流崩壊による「強い磁束管」形成の概念図。(a) Equipartition field 磁場強度をもつ磁束管。(b) 磁束管内部の対流不安定性により、下降流が発達する。(c) 下降流による磁束管内部質量の減少は磁束管内部のガス圧低下をもたらす。磁束管は収縮して磁気圧力で、磁束管内外の圧力平衡を保つようになる。この結果、キロガウスの磁場強度をもつ「強い磁束管」ができる。

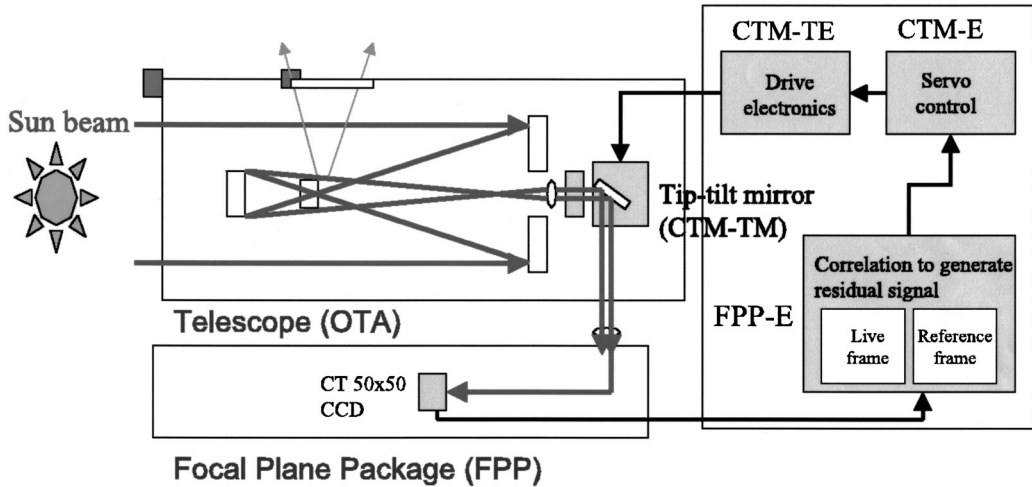


図2 可視光望遠鏡画像安定化装置の機能ダイアグラム。望遠鏡部分 (Optical Telescope Assembly; OTA) の内部の2次焦点直後に、Tip-Tilt mirror が配置されている。焦点面検出器 (Focal Plain Package; FPP) に導かれた光の一部は、Correlation Tracker の高速撮像カメラに像を結ぶ。画像の相関処理により評価された指向誤差は、Tip-Tilt 駆動信号として利用される。画像安定化装置は、580 Hz の周波数で動作するデジタル制御系である。

たのかということと同値である。障壁は地球大気のシーイングである。磁束管の空間サイズは 200 km, 角度分解としておよそ 0.2 秒角, 6,000 Å 付近で観測するとして、望遠鏡の口径は 0.5 m 以上を要する。さらに、たかだか数%の偏光スペクトルを正確に診断するために必要な偏光計測の S/N 比は 1,000. これを、現象が継続する数分間の間、安定に保たなければならない。

磁場を診断する偏光情報は、複数の撮像データの加減算により得られるために、この1セットのデータを取得する ~10 秒程度の間は、極めて高い指向安定度が必要とされる。地球大気の影響のない宇宙空間からの観測の場合でも事情は同じである。「ひので」可視光望遠鏡の場合、10 秒間での指向変動誤差 (σ) に対して、 $3\sigma < 0.09$ 秒角と見積もられた。これは極めて高いハードルである。「ひので」可視光望遠鏡においては、この指向誤差精度要求をクリアするために、望遠鏡内部に画像安定化装置を搭載した¹¹⁾ (図2)。実はこの画像安定化装置が、「ひので」可視光望遠鏡の高精度観測を下支えし続けているのである。近年の太陽補償光

学 (Adaptive Optics) 技術の発達は見張るものがあるが、「強い磁束管」の磁気構造、さらにその時間発展を精密に診断するには至ってはいない。このような状況の中、「強い磁束管」形成は、可視光望遠鏡、特に画像安定化装置の開発に携わったものとして、是非とも取り組みたかった課題の一つであった。2006 年秋、「ひので」衛星立ち上げ運用において、可視光望遠鏡の画像安定化装置、スペクトルポラリメーターの機能が一つ一つ確認されていく中で、太陽物理の積年の課題の一つ、「強い磁束管」形成の観測的検証は必ずできると確信していった。

3. とらえられた対流崩壊現象

満を持して、観測を実行に移したのは 2007 年 2 月 6 日であった。光球面至る所で発生しているであろう対流崩壊を確実にとらえるために、われわれは最も観測データの解釈がしやすいよう、太陽中心が黒点のない静穏領域で占められている時期を選択し、太陽の真ん中を観測した。重要なのは時間分解能である。スペクトルポラリメーターはス

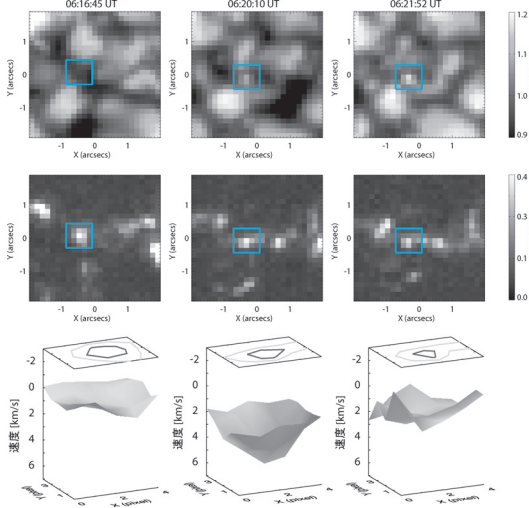


図3 「ひので」可視光遠望鏡スペクトルポラリメーターによって観測された、「強い磁束管」の形成過程。上段は連続光強度分布，中段は偏光度を，下段は視線方向速度を表す（下段は上，中段の青い四角の内部を示す）。各段，左は「強い磁束管」形成前，中は下降流成長の途中，右は「強い磁束管」形成後を示す。文献13より転載。

リットスキャン機構をもつ分光器である。時間分解能を稼ぐために、視野幅わずかに4秒角の領域をおよそ50秒の時間分解能で観測を試みた。空間分解能はおおよそ0.3秒角である。得られたデータの偏光信号の分布と、視線方向速度とを一瞥し、視線方向速度の急激な時間変動が至る所に見られることに気がついた。(スペクトルポラリメーターに見られる高速流に関しては清水らの研究も参照されたい¹²⁾。)

図3は、この観測視野の中のとある部分に着目して、連続光強度、偏光度、および磁気大気の視線方向速度を示したものである¹³⁾。これを見ると、粒状斑間の磁力線が密集した箇所です突如として急激な下降流が成長し、その後連続光で輝点が見えることがわかる。さらに、この輝点に対応する偏光信号構造の示す、磁場強度、視線方向速度、連続光強度の時間変化を示したのが図4である。先に述べた物理モデルを裏書するかのよう、最

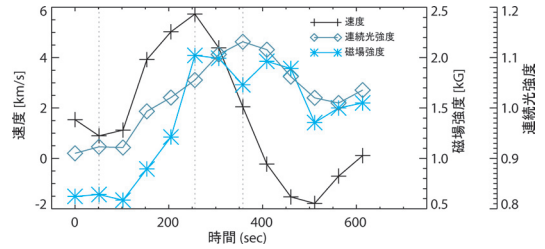


図4 図3に示す「強い磁束管」の、視線方向速度、連続光強度、および磁場強度の時間変動。時刻原点は2007-02-06T 06:15:54 (UT)。文献13より転載。

初 equipartition field 強度であった磁場強度は、下降流成長に伴って2 kGにまで急上昇している。

他方、連続光強度の変動は速度、磁場とは若干異なる。これに関しては、次のように考えている。ガス圧、密度低下による、連続光を発する $\tau=1$ 面の低下は下降流がある限り続く一方で、磁場強度の上昇は周囲との圧力平衡が成り立つ時点で終わる。このため、連続光強度の変動が他のパラメーターの変動に比較してなだらかになっているのだろう。

定性的ではあるが、もう少し現象詳細を検討すると以下のようにまとめられ、われわれは、これにより30年来の課題に対する解答を得たものと考えている。

- 磁場強度上昇により粒状斑間に流れ込む熱流束が減少し、放射冷却が優勢な状況で対流不安定性が発達し、急激な下降流が生ずる。
- 下降流により磁束管内部の質量が流出、ガス圧は低下する。同時に、磁束管が縮んで磁気圧を上昇させることで周囲との圧力平衡を保つ。
- 連続光が放射される光学的厚み $\tau=1$ に相当する面は、磁束管のガス圧低下に伴って、より温度の高い下方に移動する。このため、形成された強い磁束管は連続光では明るい構造として表れる。
- 現象の最後に見られる上昇流の発達は、下降流が、下層で衝突を起こして反射してきた結果と考えられる。

4. おわりに

「強い磁束管」形成の研究はこの速報で一区切りであるが、対流不安定性発達過程は、定量的な議論を要する。線形解析の範囲で、不安定性の成長率は磁束管のプラズマ β および、管径に依存することがわかっており、統計的な見地からの研究が必要である。対流崩壊の下降流のバウンスに関しては、上空大気への応答、特に加熱の観点からの研究が望まれる。本稿では、磁束管の力学安定性を重力方向に限定して議論したのであるが、水平方向の安定性に起因する現象も期待される。「強い磁束管」を表すと考えられる輝点は、分裂を示すことも知られており、磁束管の交換不安定性発達も興味深い。これら、「強い磁束管」の動的性質を、その上空大気への応答という観点から構成しなおし、「ひので」のミッション目標の一つであるコロナ加熱問題へと迫りたいと考えている。

この研究は「ひので」初期解析の一部としてなされた。ここにたどり着くまでを振り返ると、いまをさかのぼること10年前の「XUV ドップラー望遠鏡」の観測ロケット実験や、可視光望遠鏡開発試験の数々の場面に脳裏に甦る。画像安定化装置に関しては、日米の装置を結合しての閉ループ機能試験、衛星全体を吊り上げての微小擾乱伝達試験は、特に印象深い。「ひので」可視光望遠鏡の超高精度観測の実現は、可視光望遠鏡開発チーム、衛星システム、宇宙研の諸先生方、一丸となって初めて可能になったものである。常に数々の難題を抱えていた現場での、関係各位の不断の努力への敬意は尽くしきれない。また、この歴史的望遠鏡の開発に携わる貴重な機会を得られた幸運を噛みしめている。

なお、本研究の仕上げは、筆者の7カ月の育児休業期間中になされた。単身赴任が続く筆者にとって、ラップトップに向かい合う父の背中につもいた長女、そばで励まし続けてくれた妻と長男の生活は、何ものにも代えがたい貴重な時間で

あった。ちなみに、2004年度の男性の育児休業取得率は0.5%、6カ月以上の休業取得者は、さらにその4.2%という数字がある(厚生労働省による)。次代の人材育成に携わる一大学教師として、男女共同参画社会の観点から、この問題を看過するわけにはいかないと考えている。学問のよりいっそうの発展のためにも、本稿が *work life balance* という考え方の問題提起のきっかけとなれば、望外の喜びである。最後に、職場のみなさんの協力なしには、私の育児休業そしてこの研究の完遂は、実現できなかった。改めて心より感謝申し上げる。

参考文献

- 1) Hale G. E., 1908, ApJ 28, 315
- 2) Stenflo J. O., 1973, Sol. Phys. 32, 41
- 3) Parker E. N., 1978, ApJ 221, 368
- 4) Spruit H. C., Zweibel E. G., 1979, Sol. Phys. 62, 15
- 5) Webb A. R., Roberts B., 1978, Sol. Phys. 59, 249
- 6) Hasan S. S., 1985, A&A 143, 39
- 7) Grossmann-Doerth U., Schüssler M., Steiner O., 1998, A&A 337, 928
- 8) Steiner O., Grossmann-Doerth U., Knoelker M., Schüssler M., 1998, ApJ 495, 468
- 9) Takeuchi A., 1999, ApJ 522, 518
- 10) Vögler et al., 2005, A&A 429, 335
- 11) Shimizu T., 2008, Sol. Phys. 249, 221
- 12) Shimizu T., 2008, ApJ 680, 1467
- 13) Nagata S., et al., 2008, ApJL 677, 145

Formation of Solar Magnetic Flux Tubes Observed with Hinode

Shin'ichi NAGATA

Hida Observatory, Kyoto University, Kamitakara, Takayama, Gifu 506-1314, Japan

Abstract: The solar surface, photosphere, is covered with magnetic flux tubes with kilo gauss field strength and spatial scale of ~ 200 km. It has been believed that those flux tubes are formed through convective instability, however the hypothesis has lacked the observational support so far. The Solar Optical Telescope of Hinode revealed the formation of those flux tubes for the first time. The observation is well explained with the theoretical model predicted thirty years ago.