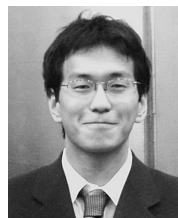


「ひので」で迫るプロミネンス形成と らせん浮上磁場の発見



岡本 丈典

〈国立天文台ひので科学プロジェクト研究員 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: joten.okamoto@nao.ac.jp

プロミネンスはその存在が知られて久しく、毎日のように観測されている。しかしながら、「いつ」「どうやって」できるのかという基本的なことがわかっていない。プロミネンスは光球から太陽コロナへ延びる磁場によって支えられているため、形成・進化過程を明らかにするには、長時間にわたる光球磁場の精密測定が不可欠である。大気揺らぎや夜の影響を受ける地上観測ではほぼ達成不可能であったが、「ひので」はこの要求に応えることができる。「ひので」の性能を生かしたわれわれの観測・研究により、プロミネンス形成に関連するらせん浮上磁場の観測的証拠を世界で初めて得ることに成功した。

1. プロミネンス

プロミネンスとは何か(図1)。日食時、太陽の縁から赤く噴き上がっているように見えたため、日本語では「紅炎」と名づけられている。ここに「炎」という表現があるためか、太陽面で何か燃えているようなイメージをもたれがちだが、もちろん太陽表面で酸化反応なんて起こらないし、核融合を起こすような温度もない。さらに、炎が噴き出したときにだけまた見えるというものでもない。紅炎などという名称からは想像しにくいであろうが、数日、数週間、数カ月間も消えずに存在するものもある。そんなプロミネンスの実体は、太陽コロナ中に浮かぶ低温プラズマのことである。紅炎という名称は誤解を招きがちなので、これはもう死語として使用しないでおきたい。

このプロミネンス、太陽面上にあるときは細長くて暗い「フィラメント」として観測される。これは、暗黒星雲などでもお馴染みのように、明るい背景光(この場合、太陽面からの光)を遮ることで黒く見えるのである。太陽の自転とともに縁

の外から内側(太陽面)に移動するプロミネンスを観測すれば、プロミネンスとフィラメントが同じものであることは、一目瞭然である。一般に、細長ければ何でも「フィラメント」という名称が付き、黒点半暗部の筋構造などもフィラメントと呼ばれている²⁾。たいへん紛らわしい。プロミネンスとフィラメントは同じ構造物を指す言葉であり、統一して差し支えない。よって、今後、すべてプロミネンスと呼ばせていただく。

さて、ここからが重要なのであるが、プロミネンスは100万度のコロナ中に浮かぶ1万度程度の低温プラズマである。単純な圧力平衡を考えれば、周りのコロナの密度に比べ100倍重いことがわかる。これではすぐに太陽表面に落下してしまいそうだが、先にも述べたように実際はそうではない。そのカギを握るのは「磁場」である。コロナ磁場がハンモックの役割を果たし、コロナ中の低温プラズマを支えている。これがプロミネンスである。そして、磁場の形状が安定していれば、飛ぶことも落ちることもなく、長期間にわたり存在できるのである。ただし、太陽は磁場だらけだ

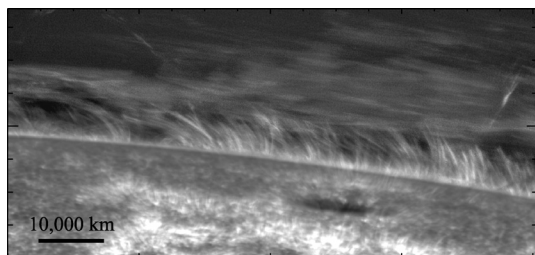


図1 「ひので」可視光望遠鏡が撮影した、太陽緑上のプロミネンス。横に伸びた構造をしている。黒点やスピキュールなどさまざまな構造が見られる¹⁾。

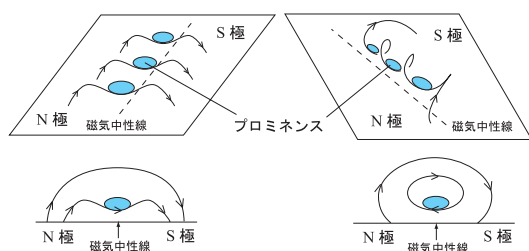


図2 プロミネンス磁場の様子。左は単純なハンモック構造。右はらせん状構造。上段はそれぞれの3次元的な鳥瞰図。下段は磁気中性線に沿って見た2次元図。

が、だからといってどこにでもプロミネンスがあるかというそうではない。太陽面のN極から出て、太陽面のS極へと戻っていくようなコロナ磁場があるとき、その間の部分、つまり太陽表面の磁場が反転している領域（磁気中性線）上でのみ、プロミネンスが見られる³⁾（図2左）。

2. プロミネンスのらせん磁場

ところが、肝心のプロミネンスの磁場形状が明らかでない。プロミネンス内の磁場を測った統計観測⁴⁾があるが、それによるとプロミネンス内の磁場は光球のS極からN極に向かっている。ということは、どうも図2(上)で示したような単純なハンモックではなく、らせん形状をもった磁場がコロナ中に存在し、らせんの窪み部分に低温プラズマがたまったものがプロミネンスとして見え

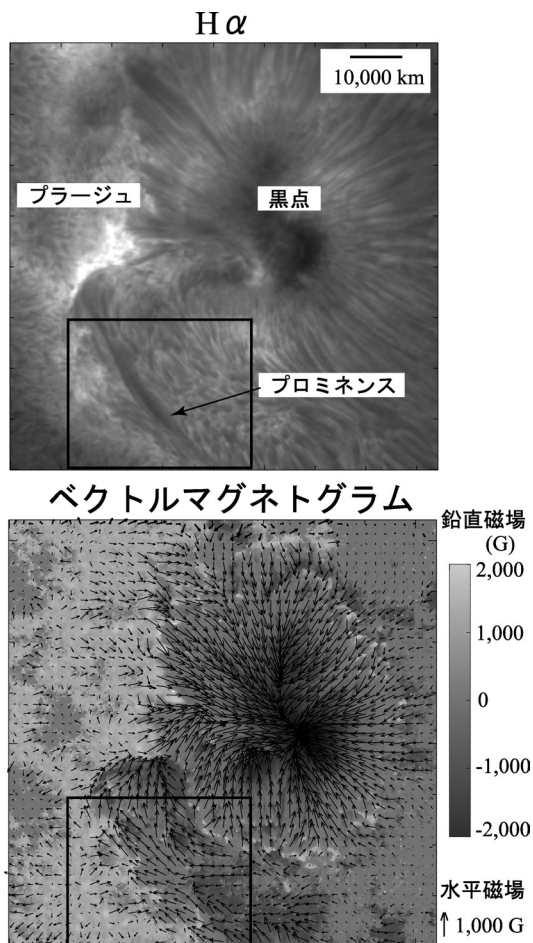


図3 「ひので」が撮影した活動領域。上はH α 線、下はベクトル磁場の図。背景の濃淡が鉛直磁場の強度である。白がN極、黒がS極。また、矢印は水平磁場の向きと強さを表している。プロミネンスの下の水平磁場が整理しているのがわかる。

ているのではないか^{5), 6)}（図2下）、というのが太陽物理学者の共通認識である。ただし、らせん状であると証明した観測的証拠は、これまでにはない。

ここでは、皆にならってそれが正しいとしておこう。すると、さらなる問題に直面する。コロナ中のらせん状の磁場はどうやって作られるのであろうか。このらせん磁場形成問題に関して、大きく分けて二つの理論的な研究がこれまでに提唱さ

れた。一つは「らせん磁場浮上説」^{7), 8)}。もともとねじれた磁場が太陽内部から浮上してくる、という考え方である。ねじれた磁場が浮いてきて、それがそのままプロミネンス磁場になる。これは非常に単純で想像しやすい。もう一つはやや複雑で、「シア・リコネクション説」(あるいはシア・アーケード説)^{9), 10)} と呼ばれる。最初はコロナ中にねじれた磁場はなく、ポテンシャル磁場(エネルギーの蓄えられていないリラックスした磁場)があるのみである。ここに光球のシア(せん断)運動と収束流が加わることで、コロナ磁場がひねられていく。幾何学的な位置関係で、ひねられた磁力線同士がつなぎ替わる(磁気リコネクション)ことで、コロナ中でねじれた磁場を形成する。

最近の研究は、「シア・リコネクション説」に偏ったものが多い。らせん磁場が光球の重いガスを引き連れてコロナへ浮上するというのは起こりえない、というのが大方の見方である。しかし、いずれの説においても観測的証拠があるわけではない。そして当然ながら、できあがるコロナ磁場の形状などは全く同じであるので、プロミネンス本体を観測しても問題は解決しない。

らせん磁場浮上かシア運動か。これを見分けるポイントはプロミネンス形成時における光球での

磁場の時間発展である。これを観測的に明らかにせねばならない。ただし、そのためには精密な磁場観測と、プロミネンス進化の追跡を行う連続観測が必要であるが、地上観測では夜や大気揺らぎの影響を受けるため、事実上不可能である。しかし、24時間連続観測かつ高精度の磁場測定ができる「ひので」によって、この無理難題に迫ることが可能となった。

3. 観測ターゲット

そこで、活動領域に付随するプロミネンスを数日間にわたり、追跡観測した。この活動領域はNOAA10953という番号がふられ、その中心にある黒点(図3上)はグレートブリテン&アイルランド島のような形をしているが、この数日後に「日本黒点」¹¹⁾となる。

さてここからは、黒点から目を離し、プロミネンスに注目してみる。図3(下)はH α 線による画像で、黒点の左下に伸びている黒い構造がプロミネンスである。観測初期から存在するプロミネンスは、2日間の間に消滅・生成を繰り返し、非常に不安定な状態であった。ところが、発光現象が数多く見られた後、数日間は消えることなく安定していた。

H α のプロミネンスそのもののデータだけから

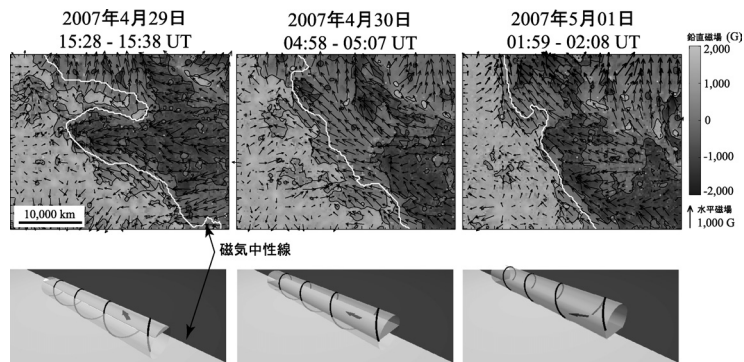


図4 (上) 図3の黒枠内におけるベクトル磁場の時間変化の様子。鉛直磁場の弱い灰色の部分が広くなり、その後狭くなっている。白線は磁気中性線を表す。(下) らせん浮上磁場の概念図。白と黒の平面が光球面を表す。筒状のものがらせん磁場。観測されるのは、らせん磁場が光球と交わる面だけであるため、その面内の水平磁場の向きを描かせてある。

わかる情報はここまでであり、形態学だけでは何が起こったのか明らかにすることはできない。そこで、このプロミネンスの状態変化と光球磁場の進化に着目する。

4. らせん磁場の浮上

プロミネンスの安定化の際、光球面の磁場に何か変化があったのであろうか。結論から言ってしまうと、このときにらせん状の磁場が浮上してくるのを発見した。その証拠は次の四つである。(1) プロミネンス直下において、周囲よりも磁場の弱い領域が出現し、その後消失した。(2) この一時的に出現した領域は水平磁場成分が卓越していた。(3) この水平磁場の向きが時間とともに徐々に変化した。(4) この領域で上昇流を観測した。この特徴は、光球下からのらせん磁場浮上の特徴と一致している。巨大な磁束管が、プロミネンスの下からゴソッと出てきたのである。その大きさは、3万 km×1万 km 程度。

図3(下)を見ていただきたい。プロミネンス直下の水平磁場の向きがそろっているのがわかる。特に、この水平磁場は、鉛直磁場の弱い領域(灰色の部分)だけに分布している。図4(上)はプロミネンス下での磁場の時間変化を示したものである。そして、この磁場の弱い領域が、自動ドアが開閉するかのごとく、時間とともに広くなり、その後閉じている。これだけでも非常に興味深い現象であるが、さらにおもしろいことに、この横磁場の向きが自動ドアの開閉とともに変化しているのがわかった。水平磁場の方向と磁気中性線のなす角を各時間ごとにプロットしたものを図5に示す。最初は、水平磁場が磁気中性線をまたいでN極(図4の白い領域)からS極(黒い領域)に向かう、いわゆる通常の磁場構造であった。その後、水平磁場はしだいに磁気中性線と平行になり、最後には、S極からN極に向かう方向に変化したの

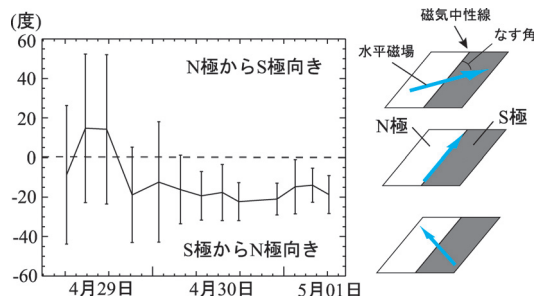


図5 図4で引いた磁気中性線と水平磁場のなす角を各時間ごとに平均し、プロットしたもの。鉛直磁場がN極の領域からS極の領域に向かう水平磁場を正の向きと定義している。観測初期では正の角度、つまり水平磁場はN極からS極へと向かっている。その後、徐々に負の角度へと変化している。

である。さらには、この磁場の弱い領域が上昇流をもっていることがわかった。上昇流があるということは、時間ごとのベクトル磁場の図を鉛直方向に並べれば、浮かび上がってきた磁場の3次元構造がわかる。ここまでくると、らせん磁場の浮上と考えるに足る証拠を得たと確信できる(図4下)。しかもこれは、世界初のらせん磁場浮上の観測的証拠である¹²⁾。(解析中は、それはもうニヤニヤしながらやってたことですよ。)

5. らせん磁場の性質

ここでは、「ひので」の観測データから引き出した物理量¹³⁾を基に、らせん磁場の性質を論じてみる。まず、黒点周辺やプラージュなど、磁気中性線周りの磁場は1,000ガウスを超えている一方で、このらせん磁場の強度はおよそ650ガウスである。周りより弱いとはいえ、この磁場強度はグラニユール(粒状斑)*1の運動を押しえつづけることができるくらい強い。しかし、ひのでの光球面観測データによると、グラニユールは健在である。なぜか? ここがまたおもしろいポイントである。確かに磁場は強いが、一方でフィリング

*1 太陽表面に遍在する対流構造。一つの大きさは約1,500 kmであり、10分程度で消える。

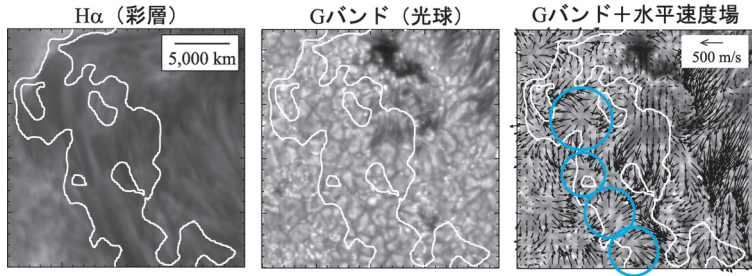


図6 らせん磁場浮上中における、光球の水平流速を調べたもの。左図は彩層の様子。中央図および右図は同じ図で、右図には水平流を矢印で表示している。白線は鉛直磁場が±650 Gaussの境界。青丸は磁気中性線に沿った発散流を表す。

ファクター（1ピクセルにおける磁場の面積占有率）が0.15であった。これが意味するところは、らせん浮上磁場はみっちり650 Gaussの磁場が詰まっているのではなく、実際は15%程度しか磁場の占める大気はないのである。他の85%は磁場のない普通のガスである。つまり、らせん磁場はピアノ線をゆるりと束ねてねじったようなものである。グラニュールの運動に翻弄されないが、逆に押さえつけることもない。グラニュール間をザルのごとく通過してきたと考えられる。そうして浮上した結果、コロナ中で膨張し、100 Gauss程度のコロナ磁場になると考えられる。これがプロミネンス磁場になったとすれば、活動領域に付随するプロミネンスとしては非常によい値である。すべてがうまくつながる。

6. 光球面の運動

シア・リコネクション説の観点からもこのデータを論じてみる。このモデルでは「シア運動」「磁気中性線に向かう収束流」「リコネクション」が必要条件である。「ひので」の光球面観測では、局所相関追跡法¹⁴⁾を用いることで、水平流速を出すことができる。短時間ではグラニュールなどの局所的な運動が卓越するが、その寿命よりもはるかに長い、2時間分を平均することで、長期的な運動パターンを調べることができる（図6）。その結

果、磁気中性線に沿ったシア運動は検出できなかったうえに、磁気中性線に沿って収束流ではなく、逆に発散流が見られたのである。さらに、この発散流は3,000–5,000 km程度の円形であり、おそらくメゾグラニュール（少し大きい粒状斑）^{*2}であると考えられる。このことから推測するに、磁気中性線に沿って並んだメゾグラニュールがらせん磁場浮上をサポートしたのかもしれない。少し論点がずれてしまったが、結論としてはシア・リコネクション説が唱えるような現象は起こっていないと考えられる。

7. プロミネンス形成とらせん浮上磁場

さて、最後にらせん浮上磁場とプロミネンスとの関係を述べよう。研究の動機からすれば、ここが一番重要である。まず、らせん磁場浮上に伴い、発光が幾度となく見られたことである。おそらく、既存のプロミネンス磁場と新しく浮上してきた磁場とがぶつかり、磁気リコネクションを生じたことが発光の原因であろう。既存のプロミネンスはばらばらの磁場をもっており、らせん浮上磁場がかすがいとしてそれらをつなぎ合わせ、より長い新たなプロミネンス磁場を形成したものと推測される。この場合、一からプロミネンス磁場およびプラズマを光球から供給せずとも、もともと

*2 メゾグラニュール：グラニュールの動きを追跡すると現れる水平流のパターン。グラニュールのような明るさの濃淡はない。3,000–10,000 km程度のサイズをもつ。寿命は不明など、いまだ謎の多い対流構造である。

コロナ中にあるプラズマを再利用することで、プロミネンスの形成・維持を行うことができる。今回の観測では、一例のらせん磁場浮上の証拠しか得られていないが、同じ場所で何度もらせん磁場の浮上が起こることで、プロミネンスのメンテナンスを行っているのかもしれない。

8. 今 後

プロミネンス形成に関する研究は、光球磁場の連続観測が行えるようになったことで、大きく前進するものと期待される。本研究はその第一歩であり、「ひので」がこれを実行できることを証明した。これを踏まえ、同様の観測例を増やし、らせん磁場浮上の発生頻度を明らかにすることが重要である。実は希有な例だったのか、普遍的に起こっているのか。活動領域のプロミネンスは、静穏領域のそれとは、形成過程が異なるのか。周囲の環境や差動回転が及ぼす影響はどのようなものか。さらには、太陽活動周期において、プロミネンスの数やサイズは大きく変化するが、差動回転は11年の周期の中で比較的一定であり、シア・リコネクション説の考え方だけではこれを説明できない。内部からの磁場の供給が、プロミネンスと密接にかかわっていると考えられる。つまり、プロミネンス形成と太陽ダイナモ機構は強く関連しているのかもしれないということである。このように、プロミネンス研究は今後、「ひので」によってますますおもしろくなるだろう。

謝 辞

「ひので」(Solar-B)の開発・運用にかかわる多くの皆様に感謝します。本研究は、岡本文典の博士論文の一部であり、常田佐久, Bruce Lites, 久保雅仁, 横山央明, Tom Berger, 一本 潔, 勝川行雄, 永田伸一, 柴田一成, 清水敏文, Dick Shine, 末松芳法, Ted Tarbell, Alan Title 各氏の共同研究としてなされました。上記の方々からは、議論だけではなく、長年にわたる「ひので」可視光望遠鏡

の開発から打ち上げ後の運用、および磁場解析ソフト作成など通じて、さまざまな方面からサポートしていただきました。合わせて、筆者は特別研究員として日本学術振興会からの援助も受けています。

参 考 文 献

- 1) Okamoto T. J., et al., 2007, *Science* 318, 1577
- 2) 一本 潔, 2008, *天文月報* 101, 378
- 3) Kippenhahn R., Schluter A., 1957, *Z. Astrophys.* 43, 36
- 4) Leroy J. L., et al., 1984, *A&A* 131, 33
- 5) Kuperus M., Raadu M. A., 1974, *A&A* 31, 189
- 6) Hirayama T., 1985, *Sol. Phys.* 100, 415
- 7) Rust D. M., Kumar A., 1994, *Sol. Phys.* 155, 69
- 8) Low B. C., Hundhausen J. R., 1995, *ApJ* 443, 818
- 9) van Ballegooijen A. A., Martens P. C. H., 1989, *ApJ* 343, 971
- 10) Antiochos S. K., et al., 1994, *ApJ* 420, L41
- 11) 勝川行雄, 2008, *天文月報* 101, 318
- 12) Okamoto T. J., et al., 2008, *ApJ* 673, L215
- 13) Yokoyama T., et al., 2008, *ApJ*, submitted
- 14) November L. J., Simon G. W., 1988, *ApJ* 333, 427
- 15) Berger T. E., et al., 2008, *ApJ* 676, 89

Emerging Helical Flux Rope Associated with Prominence Formation Observed by Hinode

Takenori J. OKAMOTO

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

Abstract: The new Japan/US/UK solar physics satellite Hinode enables the highest resolution imaging of prominences as yet seen with a temporal uniformity that allows long-hours of diffraction-limited movies and with a capability of photospheric vector magnetic field measurements. We investigate formation and evolution processes of active-region prominences with the Solar Optical Telescope observations. Here we report a discovery about emergence of a helical flux rope associated with prominence formation and discuss the property of the helical flux rope.