

黒点半暗部マイクロジェット： 彩層磁気リコネクションの証拠



勝川 行雄

〈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: yukio.katsukawa@nao.ac.jp

「ひので」可視光磁場望遠鏡 (SOT) の最大の成果は、太陽彩層でプラズマ噴出 (ジェット) 現象があらゆる場所で活発に起きていることを観測的に示したことであったとも言っても過言ではない。なかでも半暗部マイクロジェットは「ひので」によって新たに発見されたもので、黒点の半暗部彩層で頻発する微細ジェット現象である。半暗部マイクロジェットが発生する周囲の磁場や速度構造を詳しく観測することができるため、磁気リコネクションが彩層ジェットの駆動源であることを立証することができた現象である。完全に反平行の磁場配位でなくとも磁気リコネクションが突発的現象を引き起こすことを示した点も、磁気リコネクションの重要性を強く認識させるきっかけとなった。近年の高解像度観測の進展により、彩層より外側の遷移層・コロナへ影響を及ぼす可能性も示唆されている。

1. 「ひので」による活発な彩層活動の発見

「ひので」衛星に搭載された可視光磁場望遠鏡 (SOT) は、シーイングのない高解像で安定した観測が持ち味の装置である。その特徴が如実に発揮されたのが、光球の外側にある彩層やプロミネンスで見られる活動現象の研究である。彩層に感度のあるカルシウム H 線 (波長 396 nm) のフィルターで観測された動画を見ると、至る所でプラズマが数千 km から時には 1 万 km まで吹き上げられる様子にすぐに気づくことができる。プラズマの移動速度は秒速数十 km から 100 km 以上にもなる。温度 1 万度の彩層における音速は秒速 10 km 程度であることを考えると、その速度がいかに速いものかわかるだろう。可視光観測は地上望遠鏡でも可能ではあるが、数秒から 10 秒程度の短時間に変化する現象の研究はシーイングの影響により思うようにはできていなかった。「ひの

で」により彩層活動現象に注目が集まると、補償光学や画像処理によるシーイング補正技術の進歩も手伝い地上望遠鏡でも彩層研究が多くなされるようになった (図 1)。さらに、彩層活動現象に特化した IRIS 衛星 (後述) も登場するなど、「ひ

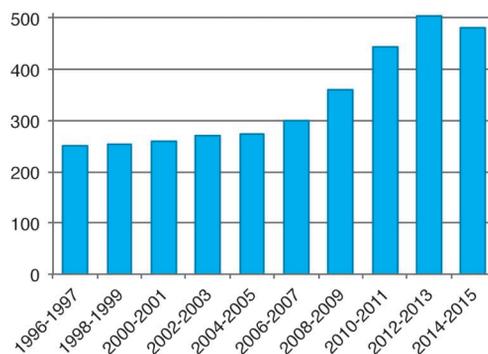


図1 アブストラクトに「solar chromosphere」を含む査読論文数の推移を Astrophysics Data System (ADS) で検索した結果。「ひので」の成果が出始めた 2007 年以降、彩層研究の論文数が増加していることがわかる。

ので」は彩層研究を加速させる契機となったのである。可視光で見たときの太陽の表面光球は、磁気エネルギーと比較して大気の熱エネルギーや対流の運動エネルギーが優勢で、磁場は対流からエネルギーを受け取る。彩層では、逆に、磁気エネルギーが優勢になり磁場によって周囲の大気が加速・加熱できるようになる。磁気圧に対するガス圧の比をプラズマベータというが、一般的に光球は高ベータ、彩層は低ベータと言われる。「ひので」はそのような磁場が支配する世界の様子を知るデータをわれわれにもたらしたのである。

彩層のジェット現象にはさまざまなものがある。静穏領域や活動領域の周辺部など太陽のあらゆる所で見られる長さ2,000-10,000 km程度のジェット状現象「スピキュール」¹⁾や、黒点の周辺で観測され付け根が逆Y字型で長さが2,000-5,000 km程度の「彩層アネモネジェット」(あるいは単に彩層ジェットとも言われる)²⁾が代表的なものである。これらは「ひので」の登場前から存在が知られていたが、「ひので」によって時間発展と統計的性質が詳しく調べられたことで、その発生メカニズムが解明されつつある。私が取り組んできた「半暗部マイクロジェット」は「ひので」によって新しく発見されたものである³⁾。以下で詳しく紹介する。

2. 半暗部マイクロジェットの発見

黒点の半暗部で微細なジェット状の増光現象が恒常的に発生していることは「ひので」カルシウムH線の動画を初めて見たときにすぐに気づくことができた。それは望遠鏡のふたを開けて間もない2006年11月のことである。それを見たとき、泣きそうになるくらい感動したことを今でもよく覚えている(図2)。私は大学院博士課程の頃、光球にある黒点半暗部の磁場構造がコロナ加熱に影響を与えている可能性を研究していたので、そのコロナ加熱の起源となる素過程がひょっとしたら捉えられたのではないかと興奮した。そ

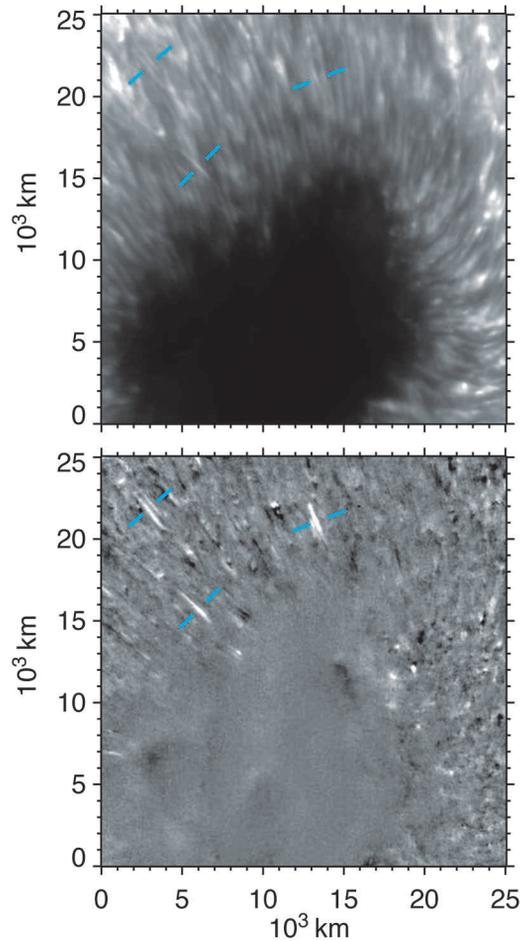


図2 「ひので」SOTのカルシウムH線フィルターで観測された黒点半暗部の彩層画像(上)とその20秒前の画像との差分(下)。青破線が半暗部マイクロジェットを示す。差分画像でジェット状の増光を見ることができる。

のときから彩層の面白さにひかれ研究するようになったが、コロナ加熱への影響はいまだにはっきりと示すことができていない。

半暗部マイクロジェットは長さ1,000-4,000 km程度、幅400 km以下、寿命は1分以下であり、それまで知られていた彩層現象と比較して短命で微細な現象である。地上望遠鏡ではこのような微細な彩層活動現象は検出できていなかった(しかし、後述のように、「ひので」の後に地上観測でも研究できるようになる)。ジェットの見か

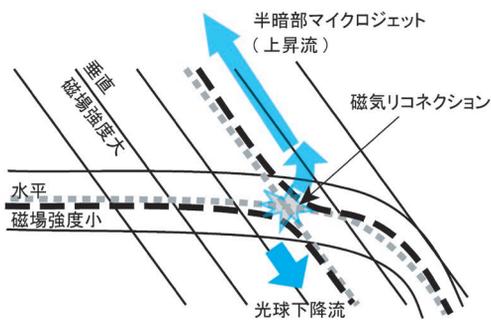


図3 半暗部マイクロジェットの模式図。黒線が半暗部の磁力線を表し、半暗部マイクロジェットを引き起こす磁気リコネクションの前後の磁力線を点線と破線で示す。青矢印は観測された下降流と上昇流を表す。

けの上昇速度は速いもので秒速100 kmを超えるものもあり、彩層での音速秒速10 kmよりもはるかに速い。黒点半暗部には、強力で入り組んだ磁場構造が存在することが偏光分光観測により判明している^{4), 5)}。太陽面に比較的垂直で強い磁場成分と、比較的的水平で弱い磁場成分が交互に存在し筋状構造を形作っている(図3)。そのような異なる磁場成分の境界で磁気リコネクションにより解放されたエネルギーが彩層を加熱していることを決定的に示す現象だったのである。また、完全に反平行の磁場配位でなくとも磁気リコネクションによる突発的エネルギー解放が発生することを示唆しており、彩層活動における磁気リコネクションの重要性がより強く認識されるようになった。

黒点の中は光球でもプラズマベータが1もしくは低ベータになっている、つまり磁場が優勢な環境である。さらに、半暗部では磁場の筋状構造が対流によって絶えず自発的に生成される。そのような場所では磁気リコネクションが加熱や加速を引き起こすことは、当たり前といえば当たり前である。半暗部マイクロジェットは「ひので」以前には誰も予想していなかった彩層現象であるが、磁気リコネクションが重要な役割をしているという解釈には誰もが納得であった。

もし磁気リコネクションによって半暗部マイクロジェットが駆動されているなら、磁気リコネクションによって発生する流れが見えないか？ 磁場の時間変化が見えないか？ という疑問が生じる。その点を調べるために、「ひので」SOTのもう一つの売りである偏光分光観測を使って、半暗部の光球磁場・速度と、彩層の半暗部マイクロジェットの関係を調べる研究を行った。これは学振研究員としてチェコから来日していたJ. Jurcak氏との共同研究である。その結果、半暗部マイクロジェットの増光は半暗部の比較的垂直な磁場に沿って発生していること⁶⁾、さらに、彩層の増光と同時に光球で短命な下降流が発生していることを明らかにした^{7), 8)}。これにより、光球上部か彩層下部で磁気リコネクションが発生し、そこより上空の彩層で磁力線に沿って増光(すなわち温度上昇)を発生させ、下向きには下降流を発生させるというシナリオを観測に基づき描くことができた(図3)。このように磁気リコネクション発生場所周辺の磁場や速度を詳細に観測できたのも半暗部マイクロジェットの特徴である。一方、磁場構造の時間変化はまだ捉えられていない。磁気リコネクションの発生場所が磁場を測定している光球より上側だからかもしれない。

半暗部マイクロジェット研究のもう一つの課題は、見かけの運動(例えば、波動や温度上昇の伝播)とプラズマの真の運動を「ひので」のカルシウムH線フィルター観測のみでは区別することができないことであった。そのため、アメリカ・国立太陽観測所(National Solar Observatory; NSO)のDunn Solar Telescopeにある波長可変ファブリペローフィルター(Interferometric Bidimensional Spectrometer; IBIS)で近赤外域のカルシウム線(854 nm)の分光撮像観測を行った。これはNSOのK. Reardon氏、A. Tritschler氏との共同研究である。その結果、半暗部マイクロジェット発生時のカルシウム線分光プロファイルを多数観測することに成功した⁹⁾(図4)。観測前

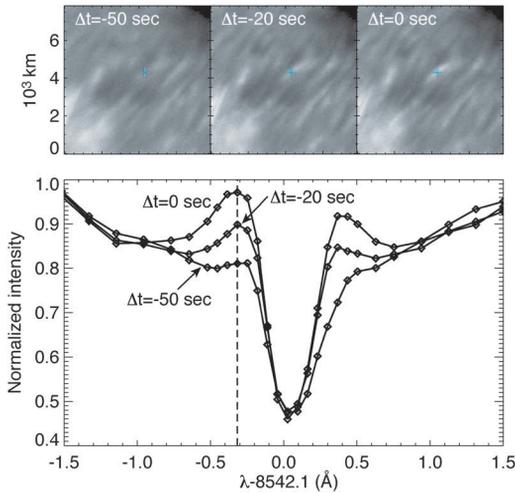


図4 アメリカNSOの分光撮像観測IBISで観測された半暗部マイクロジェットのスเปクトル。上段にカルシウム854 nmで観測された半暗部マイクロジェットの画像を示す(左から増光のピーク時刻から50秒前, 20秒前, ピーク時刻)。図中の十字のスเปクトルを下図に示す。増光は $\pm 0.3 \text{ \AA}$ のあたりに見られる。短波長側の方が明るくなる傾向があり, これは温度上昇している部分が青方偏移, すなわち上昇流であることを意味する。しかし, ドップラー偏移の大きさはせいぜい秒速10 kmである。

には超音速のプラズマ運動のドップラー効果によりカルシウム線の波長が移動することを期待していたが, ドップラー偏移から見積もられる運動はせいぜい秒速10 km程度で増光の伝播速度よりかなり小さいという結果となった。「ひので」による発見のあと半暗部マイクロジェットを再現する磁気流体数値シミュレーションも行われ^{10), 11)}, 磁力線に沿ったジェットを再現することに成功している。数値シミュレーションでもプラズマの運動はせいぜい秒速10 kmであり観測と整合していると言える。これは, 比較的密度の高い光球や彩層下部で磁気リコネクションが発生すると, 高速な流れを作ることができないためである。では, カルシウムH線の動画で見える速い伝播速度は何を意味しているのか。磁気リコネクションによって解放されたエネルギーの一部が磁気流体

波として磁力線に沿って上空へ伝播している可能性が高いと考えているが¹¹⁾, それを裏づける観測的証拠はまだ乏しい。そのためには半暗部マイクロジェットに沿って伝播速度がどう変化するかを捉えることが重要である。秒速100 kmの波が1,000 kmを通過するのを完全に分解するには, 5秒よりも十分短い時間間隔で撮像する必要がある。そのような観測を「ひので」や地上望遠鏡で行っており, 今後, 磁気流体波動の伝播を示すことができるかと期待している。

3. 遷移層・コロナの加熱に影響を及ぼしているか?

彩層ジェット現象がさらに外側のコロナの加熱にも影響を及ぼしているかどうかは, 当初から誰もが関心をもっていた。光球や彩層の観測では0.2秒角という高い解像度で微細なジェットが捉えられているが, 遷移層・コロナの観測はせいぜい1-2秒角の解像度しかなかった。実際に「ひので」搭載の極端紫外線撮像分光装置(EIS)やSOHO衛星搭載の紫外線分光装置SUMER(Solar Ultraviolet Measurements of Emitted Radiation)のデータと比較してみたが, 半暗部マイクロジェットに対応する遷移層・コロナの現象は全く見つけられずあきらめていた。しかし, 2013年からNASAのInterface Region Imaging Spectrograph(IRIS)衛星が観測を開始し状況が変わりつつある。IRIS衛星は紫外線分光装置を搭載する衛星で, 彩層・遷移層・コロナのスเปクトル線を観測することができる。特徴は0.4秒角というこれまでの遷移層・コロナ観測の装置と比べて高い解像度をもつことである。IRIS衛星の観測によって, 半暗部マイクロジェットは再び注目を集めるようになった。黒点半暗部で1秒角以下の大きさの輝点状の増光現象が無数に見えてきたのである¹²⁾。さらに, その輝点は彩層の半暗部マイクロジェットの先端に位置していることもわかった^{13), 14)}(図5)。つまり遷移層で半暗部マ

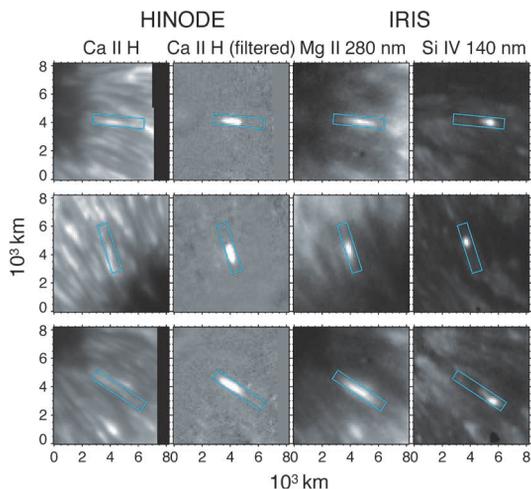


図5 「ひので」とIRIS衛星で観測された半暗部マイクロジェットの例。左側2枚が「ひので」カルシウムH線フィルターで観測された半暗部画像とそれにフィルターをかけて半暗部マイクロジェットを強調したもの。右側2枚がIRIS衛星で観測されたマグネシウム線（波長280 nm）とシリコン線（波長140 nm）の画像。マグネシウム線280 nmはカルシウム線と同じく1万度の彩層に感度があり半暗部マイクロジェットが見える。シリコン線140 nmは約10万度の遷移層温度に感度があり、半暗部マイクロジェットの先端のみが点状に増光している。

マイクロジェットに対応する増光現象が確認できたのである。さらに、2012年に観測を行ったロケット実験Hi-C（High Resolution Coronal Imager）では、弾道飛行している僅か5分間の観測ではあったが、0.2秒角という高い解像度により黒点上空のコロナで輝点状の増光現象を捉えている¹⁵⁾。今のところ100万度のコロナ温度にまで達しているという確証は得られておらず、今後、詳細な観測と解析が必要である。

4. 今後の展開

ここでは半暗部マイクロジェットに注目して彩層活動現象の研究を紹介した。彩層で発生する多彩なジェット現象は磁気リコネクションが駆動源であることは共通である。磁場の強さや配位が場

所によって違うためさまざまな時間・空間スケールに渡り発生する。例えば、黒点内のライトブリッジで発生するジェット現象についても、垂直な磁場と水平な磁場との間の磁気リコネクションによってジェットが発生することが、「ひので」とIRIS衛星による観測と数値シミュレーションを比較することで示された^{16), 17)}。空間時間スケールは全く異なるが半暗部マイクロジェットと共通の物理過程で理解することができる。黒点以外の場所は平均的に磁場が弱く高プラズマベータのため、光球や彩層で磁気リコネクションが起きても周辺大気加熱・加速には影響が小さいと考えられている。しかし、黒点以外でも強い磁場が局所的に集中する場所が多くあることは確かである。そのような場所で磁気リコネクションが起きれば、解放されたエネルギーの一部が磁気流体波動によって上空へ輸送されコロナを加熱するという可能性も出てくる。そのためには、高時間分解能で高解像度な彩層・コロナ観測が必要となる。もう一つの課題は、光球・彩層磁場の時間変化を検出することである。10秒程度の短時間で発生する現象を分解した磁場速度観測が必要となるが、実現できる観測装置は今のところ存在しない。スペース観測では次期太陽観測衛星SOLAR-Cが、地上観測ではハワイに建設中の口径4 m太陽望遠鏡DKIST（Daniel K. Inouye Solar Telescope）が、直接検出に挑むことができる。これによって、彩層・コロナ加熱問題の研究にとどめをさしたい。

謝辞

「ひので」SOTの運用に10年間携わり、ここでは書けないいろいろなトラブルにみまわれながらも、取得したデータから多くの成果が生まれる現場に立ち会えたことは幸運でした。国内のSOTチームの方々、特に、常田佐久氏、清水敏文氏、末松芳法氏、一本潔氏、岡本文典氏、久保雅仁氏、坂東貴政氏にはたいへん感謝しております。

10年間一緒にSOT運用をやってきたT. Tarbell氏, R. Shine氏をはじめとしたアメリカSOTチームの方々にも感謝の気持ちを述べさせていただきます。半暗部マイクロジェットの研究に共に取り組んだJ. Jurcak氏, K. Reardon氏にも感謝しております。本稿の執筆にはあたって久保雅仁氏に有意義なコメントを多くいただきました。

参考文献

- 1) de Pontieu B., et al., 2007, PASJ 59, 655
- 2) Shibata K., et al., 2007, Science 318, 1591
- 3) Katsukawa Y., et al., 2007, Science 318, 1594
- 4) 一本潔, 「ひので」チーム, 2008, 天文月報101, 378
- 5) 勝川行雄, 2008, パリティ 28, 39
- 6) Jurcak J., Katsukawa Y., 2008, A&A 488, L33
- 7) Katsukawa Y., Jurcak J., 2010, A&A 524, A20
- 8) Jurcak J., Katsukawa Y., 2010, A&A 524, A21
- 9) Reardon K., Tritschler A., Katsukawa Y., 2013, ApJ 779, 143
- 10) Magara T., 2010, ApJ 715, 40
- 11) Nakamura N., et al., 2012, ApJ 761, 87
- 12) Tian H., et al., 2014, ApJ 790, 29
- 13) Vissers G., et al., 2015, ApJ 811, L33
- 14) Katsukawa Y., et al., 2016, submitted
- 15) Alpert S. E., et al., 2016, ApJ 822, 35
- 16) Toriumi S., Katsukawa Y., Cheung M., 2015, ApJ 811, 137
- 17) Toriumi S., Cheung M., Katsukawa Y., 2015, ApJ 811, 138

Penumbral Microjets above a Sunspot: Evidence of Magnetic Reconnection in the Solar Chromosphere

Yukio KATSUKAWA

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

Abstract: HINODE Solar Optical Telescope (SOT) has provided new view on active and ubiquitous occurrence of plasma ejections, i.e. jets in the solar chromosphere. Penumbral microjets are a major phenomenon newly discovered by HINODE SOT, and happen frequently in the sunspot chromosphere. What is special about penumbral microjets is that we can clearly observe magnetic and velocity structures around a penumbral microjet in a sunspot, and we can establish the scenario that magnetic reconnection drives the jets. Motivated by the observations, we started to recognize that magnetic reconnection is of crucial importance in the chromospheric dynamics because magnetic reconnection causes transient phenomena even when magnetic fields are not completely antiparallel. Recent progresses in high resolution observations of transition-regions and coronae are suggesting possible influence of penumbral microjets in the atmosphere outer than the chromosphere.