

太陽表面で頻発する局所高速下降流

清水 敏文

〈宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉

e-mail: shimizu.toshifumi@isas.jaxa.jp



音速を超える高速のプラズマ流が、普遍的に太陽表面（光球層）に存在することが明らかになってきた。「ひので」に搭載した可視光磁場望遠鏡（SOT）は、今まで実現できなかった高解像度のスペクトル偏光観測を初めて行い、太陽表面の磁場に関する物理情報を与えている。一つの発見は、音速を超えるような高速下降流が、サブ秒角のスケールで多数普遍的に存在することである¹⁾。少なくとも3種類の異なる磁気活動とともに、下降流が発生している。これらの下降流の観測的な理解は、太陽表面に形成された磁場の微細な構造で起きている動的な物理過程を理解するうえで、さらには、天体プラズマにおける磁力線とプラズマ流との相互作用過程を理解するうえで、重要な観測的情報を与えるものとして注目される。

1. 鍵を握る基本パラメーター：磁場と速度

太陽は、表面を高解像度で分解して調べることができる唯一の恒星である。太陽表面にはさまざまな形態をもつ磁場が存在し、磁場は太陽表面ガス（プラズマ）の動的な運動と複雑に関係している。この複雑な過程が、太陽外層大気にダイナミックな振舞いや加熱を起こしていると考えてほぼ間違いない。この物理過程を理解することは、太陽表面の現象を理解することにとどまらず、広く宇宙に広がるプラズマが磁場と複雑にからみ合う系を理解するうえで助けとなる、基本的な物理情報を与えてくれるはずである。

太陽表面としての光球層は、大きなスケールから小さなスケールのプラズマ流を伴い、多種多様な磁氣的構造が形成されている。光球一面を覆いつくすように存在する「粒状斑」は、太陽エネルギーを対流によって表面に伝える過程で現れる対流セルである。対流セルの中心付近でガスが上昇し、縁付近で冷えたガスが下降している。速度は

せいぜい1-2 km/sである。対流運動は、表面に存在する磁力線をゆすったりねじったりして、かき乱された磁力線²⁾を作り出し、運動エネルギーの一部を磁力線に磁気エネルギーとして与えていると考えられている。また、磁場が集中した場所として広く存在が知られている「黒点」は、微細な内部構造をもっている。特に、暗部を取り囲む半暗部は、細い筋状の磁気構造³⁾から構成され、暗部側から外向きに数 km/s の速さのプラズマ流（エバーシェッド流^{4),5)}が絶えず存在していることが知られている。

このように、磁場のダイナミックな振舞いを考えるうえで、磁場とともに、そこに存在するプラズマの移動（運動）を観測的に把握することが、プラズマと磁場の複雑系において動的活動を起こす物理過程を理解するためには極めて重要となる。磁場の精密観測が可能な光球層にて今まで観測されてきた運動のほとんどは、光球層での音速（6-7 km/s）を大きく下回るものであった。しかし「ひので」の観測により、音速を超えるような速いプラズマ流の存在が、非常に詳細にとらえられる

ようになってきた。

2. スペクトル偏光観測

観測された現象の話始める前に、スペクトルの偏光観測について、まず説明しておく。この観測は、磁場を精密に計測し、同時に磁気大気のプラズマが移動する様子を知ることができる最も強力な診断方法である。「ひので」に搭載した可視光磁場望遠鏡 (Solar Optical Telescope; SOT) は、ある特定の波長域のみを通すフィルターを用いた撮像を行い、高解像度のムービー観測を実現し、太陽表面や彩層の磁場構造のダイナミックな時間発展をとらえることに成功した。この SOT には、スペクトロ・ポラリメーター (SP) と呼ばれるスペクトル偏光観測を行う機能がある。一般向けに行う成果説明では理解してもらおうのが難しいためにほとんどお目にかからないデータであるが、実は太陽表面の物理状態を診断するうえで最も重要な情報をもたらしてくれる。

SP は、630 ナノメートル付近に存在する中性の鉄原子起源の吸収線二つ、およびその周辺の連続

光を高分散スペクトルとして観測する (図 1)。しかも、偏光状態を高精度に計測する。このために、太陽光をゆっくり回転する偏光板を通して異なる偏光状態で何枚もデータを取得し、リアルタイムで加算減算処理を機上で行う操作によって、太陽光の偏光状態を表す四つのパラメーター (ストークス・パラメーター IQUV と呼ばれる) を高精度で測定する。

観測される吸収線は、原子が磁場の中にある場合ゼーマン効果によって 3 本に分かれる。磁場が視線方向に向いているときは、左右の 2 本が観測され、左右それぞれが逆符号に円偏光する (図 2a)。円偏光成分を表す V 信号から、磁場の視線方向成分を知ることができる。磁場が視線方向と直交している場合は等間隔の 3 本に分かれ、直線 (Q と U 信号) に偏光する。円偏光と直線偏光の比から視線方向に対する磁場の向きが、直線偏光 (Q と U) の比から、視線方向と直交した磁場がどの方位角を向いているかがわかる。3 本に分かれた吸収線は磁場の強さが強くなるほど比例して分裂することから、磁場の強さを知ることができ

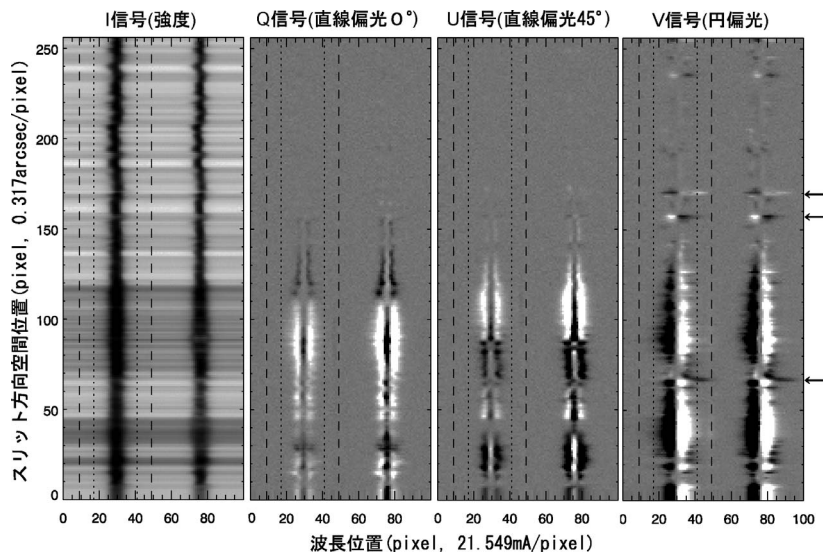


図1 可視光磁場望遠鏡のスペクトロポラリメーターで取得した偏光スペクトル。ゼーマン効果により偏光した中性鉄起源の2本の吸収線。矢印は、高速のプラズマ下降流の例である。

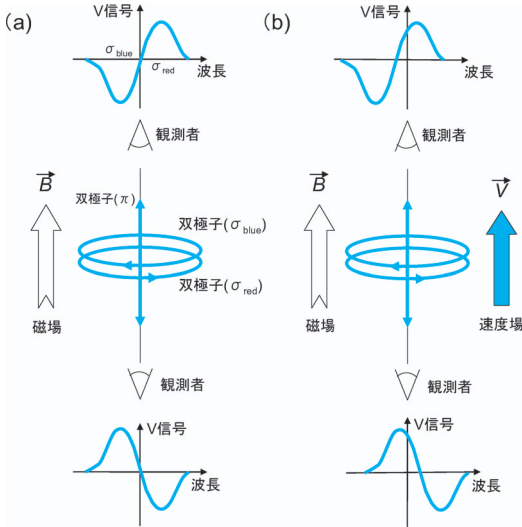


図2 (a) 視線方向に向かって太陽磁場が存在する場合に、ゼーマン効果によって発生する円偏光（ストークス V）信号。(b) 磁場に加えて視線方向に速度がある場合に、ドップラー効果で信号の波長ずれが起きる。

る。また、磁場の中にある原子が視線方向に移動している場合、3本に分かれた吸収線全体が、運動方向によって短波長か長波長方向にずれる（図2b）。いわゆる、ドップラー効果である。このように、偏光スペクトルを測定すれば、ゼーマン効果とドップラー効果を利用して、そこにある磁場の様子やプラズマ運動の様子を診断することができるのである。

3. 超音速プラズマ流の存在

さて、図1を詳しく見てみましょう。これはSPが取得した偏光スペクトルで、太陽面のある場所に置いたスリット位置で観測された偏光の様子である。横軸が波長方向で、右が長波長側である。縦方向はスリットに沿った空間であり、視野の下半分には、磁場が集中した黒点が存在し、強い偏光が見られる。上半分は、磁場がまばらにしか存在しない静穏領域である。

矢印で示した3カ所に、周囲とは明らかに異なる

る、長波長側に長く伸びたV（円偏光）信号が受かっている。これが本解説で注目する現象である。吸収線の中心波長から250–400 mÅ（ミリオンångström）ほど、波長ずれが見られる。この波長ずれがドップラー効果によると考えると、7–14 km/s という大きなプラズマ流が存在していることを示唆している。太陽表面における音速が6–7 km/s であることを考えると、音速を超えた速度にまで加速されたプラズマ流が存在するのである。プラズマ流が超音速になっているなら、衝撃波の形成やプラズマ加熱が起こっていることが容易に想像される。

このような超音速プラズマ流の存在は、最近10年ほどの間に行われた地上観測で徐々に検出され始めていた^{6)–9)}。しかし、超音速のプラズマ流は、角度分解能1秒角（太陽面上約700 km）よりも小さい（サブ秒角）サイズで局所的に発生し、また間欠的に発生する現象のようで、地上観測では、最良のシーイング下でさらに補償光学系による像補正を働かして行われたスペクトル偏光観測で、ようやくその存在を確認できる程度であった。現に筆者も、「ひので」打ち上げの前年にスペイン・カナリー諸島の天文台で行ったスペクトル偏光観測の際に初めてこの存在に気がついたのである¹⁰⁾。

4. 頻発する高速下降流

観測された超音速プラズマ流は、ある特殊な条件下でのみ発生するまれな現象なのであろうか。それとも、いつでもどこでも発生しているプラズマ流なのであろうか。「ひので」の観測は、初めてその間に明確に答えてくれる。図3は、高速のプラズマ流が四つの異なる時間においてどこで起きたかを示している。超過信号とは、吸収線の中心波長から259–431 mÅ 離れた波長に存在する、V信号の積分強度である。高速のプラズマ流があると、中心波長から離れた波長に信号が現れるので、この超過信号で見て、白や黒の信号が強く出

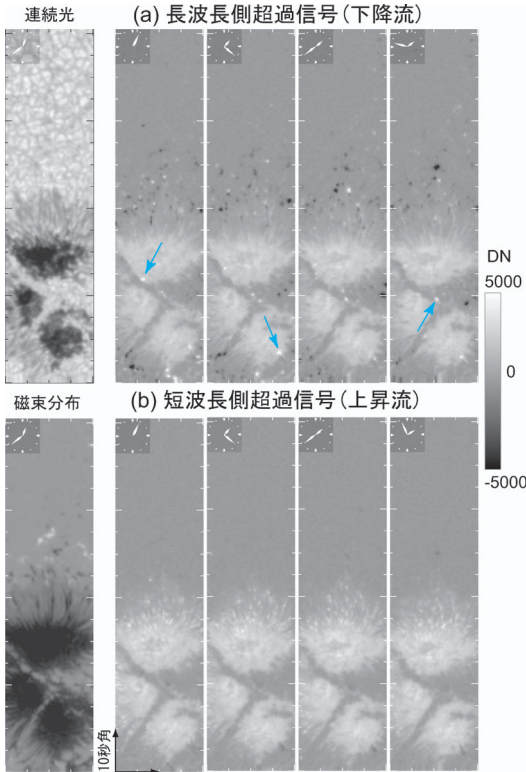


図3 82秒角×20.5秒角の視野において四つの異なる時刻に、吸収線の中心波長から大きく離れた波長で観測された円偏光信号のマップ。(a)は長波長側、(b)は短波長側。(a)では明るい信号は正の円偏光超過を、正負符号反転させた(b)では明るい信号は負の超過を意味する。超過信号は高速プラズマ流の存在を示唆する。

ていると、7-14 km/s 程度の超音速のプラズマ流が発生していると検出できる。なお、図3のマップは、観測視野をスリットでスキャンさせて取得したデータから生成している。

図3から、太陽面のいろいろな場所で局所的に高速流が発生することがわかる。最もよく観測されるのは、黒点半暗部の外周周辺付近である。加えて、ライトブリッジ¹¹⁾の成長によって三つに分裂した黒点半暗部の端部でも時どき見られる(三つの矢印)。また、黒点から離れた静穏領域(図上部)においても、高速流の発生をあらわに

見ることができる。静穏領域の磁場は磁束量が小さく偏光信号が弱いため、図3の超過信号は黒点周辺に比べ弱くなってしまいが、頻繁に見られる。

これら「ひので」で観測された高速流も、ほとんどサブ秒角のサイズと局所的である。また各イベントは、定常的な流れではなく突発的に超音速まで加速され、数分間ほどしか続かないプラズマ流である。さらに、ほとんどの高速プラズマ流は長波長側でのみ観測される。すなわち、プラズマ流は、希薄な上空大気から高密度な太陽面に向かう下降流なのだ。

5. 高速下降流を伴う磁場構造

そもそも何が超音速のプラズマ流を励起するのだろうか。また、プラズマ流が発生することによって、周囲にどんな影響を与えているのだろうか。この物理的過程を説明するには今後の観測データの解析および解釈を待つ必要があるが、いくつかの「特徴的な磁場構造の形成」に付随して高速の下降流が発生していることがわかってきた¹⁾。まず、高速流はV信号にのみ見ることができるとことは、磁場の存在がこのプラズマ流の発生に重要な役割をしている点である。そして、その磁場はほぼ太陽面に対して垂直に直立している(正確には視線方向に沿った向きだが、太陽面のほぼ中心付近を観測しているので、太陽面に垂直と考えてよい)。

前の節で、太陽面上の発生領域によって三つに分類分けした。それぞれの代表的な例についての拡大写真が図4である。この観測ではムービー観測を行っているので、さらに時間発展を追う解析が行われている。以下にそれぞれについての知見を簡単に述べる。

まず、黒点半暗部外周付近で頻発する高速下降流であるが、黒点の磁気極性と逆極の磁気島が新たに生まれる過程において、高速下降流がよく観測されている¹²⁾。黒点半暗部外周では、正極と

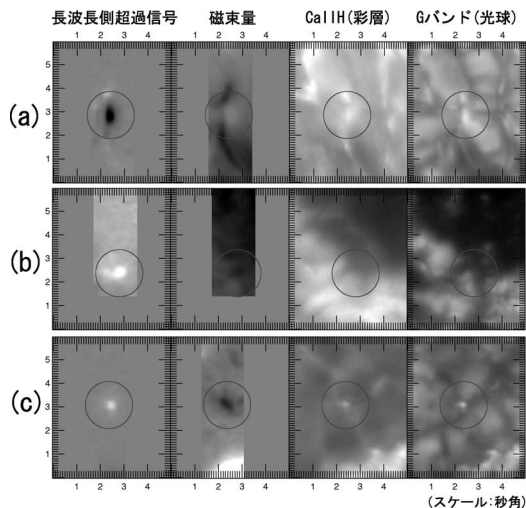


図4 太陽面上の発生領域によって分類分けされた三つの高速下降流の拡大写真。(a) 黒点半暗部外周付近 (b) 黒点暗部とライトブリッジ内対流との接点付近 (c) 静穏領域に点在する小さな磁気島。下降流発生時の光球面磁束量・明るさ、彩層明るさ。円は下降流を囲む半径1秒角の円。

負極の小さな磁気島が頻繁に生まれ、黒点から外向きに向かって流れ出しているのが観測されている。Moving Magnetic Feature (MMF) と呼ばれ、黒点磁束の崩壊過程として重要と考えられている¹³⁾。図5(a)のように、黒点半暗部周辺の磁力線は太陽面にほぼ平行に傾いているが、その外端では垂直方向に曲げられ、そこでMMF磁気島が発生している。つまり高速下降流の発達が磁力線を垂直向きに押し曲げ、MMF磁気島の発達を促進するのに有効に働いているように見える。高速下降流の源泉は、黒点半暗部の細い筋に沿って外向きに間欠的に流れるプラズマ流—エバーシェッド流—と思われる。

黒点暗部とライトブリッジ内対流との接点付近で見られる高速下降流では、強く密集した磁束(黒点暗部)の端部に成長する、小さな対流セルが見られる。類似の高速下降流は、ポア(半暗部を伴わない暗部のみの小さな黒点)の端部でも観測

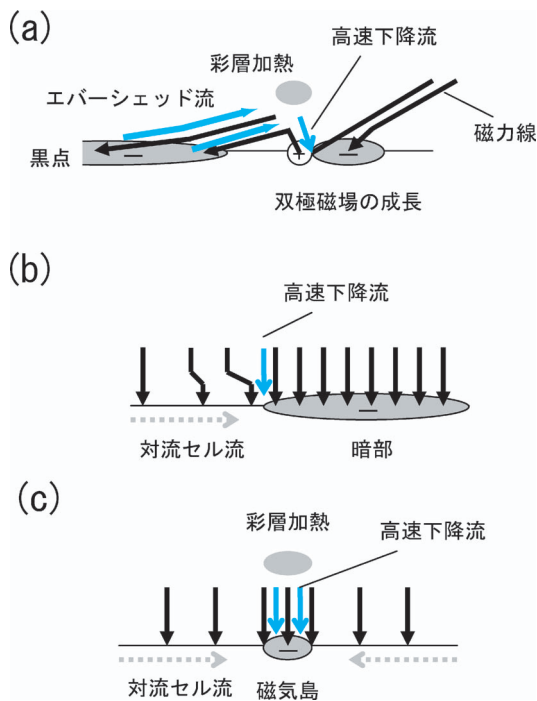


図5 三つの高速下降流の磁場および速度場構造(横から見た図)。

されることがある。強く密集した磁束に接する対流セルは、ある程度の磁束を伴っていて、対流運動によってその磁束の一部が暗部に対してはき寄せられる(図5b)。このはき寄せの際に、何らかの磁束同士の相互作用によって下降流が発生しているのかもしれない。

最後に、静穏領域に点在する小さな磁気島での高速下降流であるが、これはキロガウスの直立した強い磁束管が太陽面に形成される現象に付随したプラズマ流であるようだ(図5c)。静穏領域にも磁場が存在するが、それらの多くは太陽面にほぼ垂直に立ち、Gバンド画像で輝点としてとらえられるように、0.2秒角程度の断面に収縮した磁束管として存在する。この磁束管がもつ磁場の強さはキロガウス(1.3-1.5 kG)に増幅されており、対流崩壊¹⁴⁾と呼ばれる過程により形成されると考えられている。放射冷却によって対流不安定が発生し、それにより磁束管内に強い下降流が発達す

ると予測されたものである¹⁵⁾。興味深いのは、この種の下降流の発達とともに、少し上層にある大気(彩層)に感度があるCa II H線のフィルター観測データに増光が見られることである。超音速下降流に伴い衝撃波が発生し、それにより彩層が加熱される可能性も示唆するデータである。

6. 最後 に

「ひので」の観測データに基づいた、太陽面磁場と速度場の観測的研究は、まだ出発点を切ったばかりである。本解説で紹介した研究は、観測される速度でも特に激しい物理過程が期待される、音速を超える高速度流に注目した。今後現象の観測的研究が「ひので」の観測でさらに進み、現象の物理的解釈がより確固たるものへと進むことに期待したい。また、磁場の活動とプラズマ流との相互関係が明らかになることによって、広範な天体電磁流体力学現象の理解への寄与につながるかもしれない。

参考文献

- 1) Shimizu T., et al., 2008, ApJ 680, 1467
- 2) Lites B. W., et al., 2007, PASJ 59, S571
- 3) Jurcak J., et al., 2007, PASJ 59, S601
- 4) Ichimoto K., et al., 2007, PASJ 59, S593
- 5) 一本 潔, 2008, 天文月報 101, 378
- 6) Martinez Pillet V., et al., 1994, ApJ 425, L113
- 7) del Tor Iniesta J. C., et al., 2001, ApJ 549, L39
- 8) Bellot Rubio L. R., et al., 2001, ApJ 560, 1010
- 9) Sigwarth M., 2001, ApJ 563, 1031
- 10) Shimizu T., et al., 2007, ASP Conf. Ser. 369, 113
- 11) 勝川行雄, 2008, 天文月報 101, 318
- 12) Kubo M., et al., 2007, PASJ 59, S607
- 13) Kubo M., et al., 2007, ApJ 659, 812
- 14) Parker E. N., 1978, ApJ 221, 368
- 15) Nagata S., et al., 2008, ApJ 677, L145

Frequent Occurrence of High-Speed Local Mass Downflows on the Solar Surface

Toshifumi SHIMIZU

*Institute of Space and Astronautical Science,
Japan Aerospace Exploration Agency, Sagamihara,
Kanagawa 229-8510, Japan*

Abstract: New spectro-polarimetric measurements have been carried out with the Solar Optical Telescope onboard the Hinode satellite, revealing the frequent appearance of polarization signals indicating high-speed, probably supersonic, downflows that are associated with at least three different configurations of magnetic fields in the solar photosphere. The excitation of supersonic mass flows are one of the key observational features of the dynamical evolution occurring in magnetic-field fine structures on the solar surface. Furthermore, understanding the origins of observed supersonic flows may help us to understand complicated interactions between plasma flows and magnetic fields in the astrophysical plasma.