

プラズマ噴出現象に絡む磁場の構造について太陽観測がもたらす理解

坂上 峻仁 (京都大学大学院 理学研究科)

Abstract

宇宙には様々な高速噴出流（ジェット）があり、そのそれぞれに加速メカニズムが提案されている。例えば磁気力によってジェットを駆動するというアイデアは、宇宙に普遍的にある、ねじれをもつジェットの構造を磁場の構造として説明できるとして注目されている。一方、この加速メカニズムはプラズマの運動が磁場に支配される環境が前提であり、その環境はジェットの発生源近傍に期待されるばかりで観測的検証が十分に進んでいない。

もっとも、この加速メカニズムには特徴的な空間スケールがないため、宇宙一般のジェットの発生源近傍を観測できずとも、より詳細な観測が可能な太陽でのジェット現象に注目し、それについての理解を応用することはできる。太陽でも、彩層プラズマが上空のコロナに向かって加速、噴出されるジェット現象（サージ）が $H\alpha$ 線などで観測されており、その加速メカニズムに磁場が関係していることが示唆されている。このことから、宇宙一般のジェット現象の理解を検証するにあたり、サージの観測が極めて有意義であることが分かる。

そこで今回、我々は 2014 年 11 月 11 日に京都大学飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡で観測されたサージの解析を行った。観測では、高空間・高時間・高波長分解能のデータを取得でき、これからサージの視線速度場などの時間発展を議論できる。特に、サージの内部構造を、その加速メカニズムと関連付けて理解することは、宇宙一般のジェットの内部構造を推定する上で重要になる。本研究はその理解を目標とし、その第一段階として観測したサージの加速メカニズムの同定を行う。

1 Introduction

太陽で見られるジェット現象の中で、 $H\alpha$ 線などで見えるものはサージとも呼ばれる。サージを構成するのは 1 万 K 程度の比較的低温のプラズマで、これが $30\text{km s}^{-1}\sim 300\text{km s}^{-1}$ の速度で長さ数千～数万 km、幅数百～数千 km の細長く絞られた形で上空へ噴出する (Shibata et al. 2011)。



図 1: 京都大学飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡 (DST) で 1982 年 7 月 22 日に撮影されたサージ

その噴出機構については圧力駆動、磁気力駆動、衝撃波駆動など複数の可能性が考えられ、観測的検証が試みられてきた。磁気力駆動によってサージの観測結果を説明したのものとしては Roy (1973)、Shibata & Uchida (1986)、Canfield et al. (1996) などがある。これらはそれぞれ異なる磁場構造を想定し、それらの磁場構造に蓄えられるエネルギーがサー

ジの運動エネルギーに変換される機構を検証している。一方、Schmahl (1981)、Schmieder et al. (1983) など、観測したサージが圧力勾配によって駆動されたと主張する研究、Shibata et al. (1982)、Yang (2014) など、衝撃波による駆動で観測結果を説明する研究もある。

これらの中でも、磁気力によって駆動されるサージは宇宙一般の磁気力駆動型ジェットの典型としてその観測に大きな意味がある。その理由として、サージなどの太陽でのジェットを観測すればその詳細な空間情報を得られるということ、もう 1 つには観測から磁場構造を推定することが太陽の場合比較的容易であるということが挙げられる。そこで本研究ではジェットの内部構造と磁場構造のそれぞれの時間発展とその関係を探ることを目指し、磁気力駆動型のサージの観測・解析を行った。

2 Observations

観測は 2014 年 11 月 11 日に京都大学飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡 (DST) で行った。対象は太陽面上中央付近 (N15W08) にある黒点群で、解析したサージは午前 9 時 (JST) 頃にこの領域で起こっ

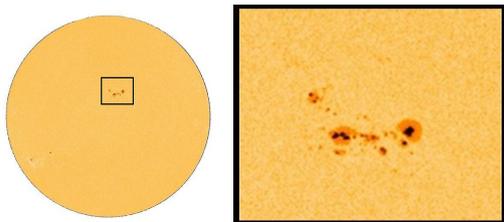


図 2: 観測した黒点群の太陽面上の位置 (左) とその様子 (右) (HMI Intensitygram Flat)

た C5.4 クラスのフレアに付随して発生した。図 3 はそのサージの時間発展の様子を表す。サージは黒点

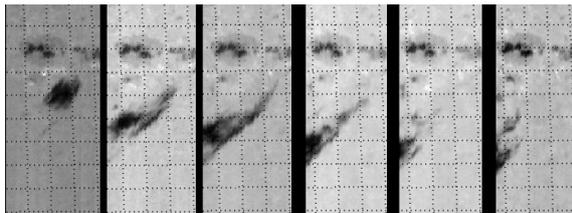


図 3: 観測・解析したサージ; 黒点からサージが噴出する様子を H α 短波長側 -1 \AA で 200 秒ごとに捉えた連続画像 (点線は太陽の経緯度線)

付近から十数分噴出し続け、長さ 7-8 万 km、幅 2 万 km の細長い構造を成し、視野外へ消えて行った。なお、このサージは結局十数万 km 上昇し、数十分後、上昇してきた軌道に沿って落下したことを確認している。観測ではこの現象について高空間高時間

表 1: 観測データの空間・時間・波長分解能

	H α	CaII K	CaII 8542
空間 (arcsec)	1.3×0.71	1.3×0.53	1.3×0.56
時間 (sec)	10	10	10
波長 (\AA)	0.043	0.030	0.029

高波長分解能かつ多波長 (H α 6563 \AA 、CaII K 3934 \AA 、CaII 8542 \AA) のデータを取得した (表 1)。

3 Analysis

解析にあたっては Beckers' Cloud Model (Beckers 1964) を用いた。図 4 では、勝手に選んだ点 (画像中赤

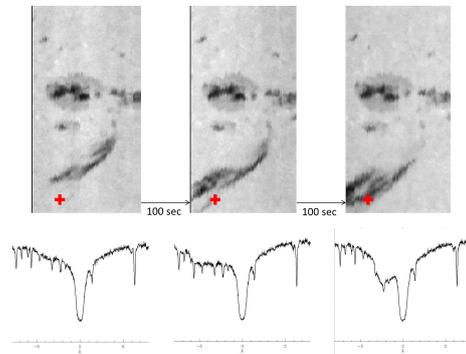


図 4: H α 短波長側 -2 \AA で見たサージの 100 秒間隔の連続画像 (上)。下の 3 つのスペクトルは、それぞれ上の 3 つの画像の赤十字で示す点からの光を分光して得られたものである。

十字で示す) の H α 線のスペクトルが、サージの通過中に時間変化する様子を見ることができる。特にサージが通過するとき、スペクトルの短波長側が徐々に強い吸収を受けることが分かる。Beckers' Cloud Model では、この吸収プロファイルを受容体の視線速度や光学的厚さなどの物理量で説明する。解析の結果、最も吸収を受けている左から 3 つ目のスペクトルからは、その座標での視線速度が 106 km s^{-1} で、光学的厚さが 0.43 であることが分かった。そして今回のデータセットでは、各時刻、各座標ごとに同様のスペクトル情報が得られているため、視野全体にわたって解析を施すことで観測したサージの視線速度場などを知ることができる (図 5)。

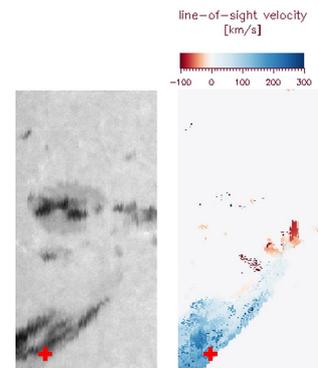


図 5: ある時刻のサージの H α 短波長側 -2 \AA のイメージ (左) と、解析によって分かった、その時刻のサージの視線速度場 (右)。速度の符号はこちら側に向かってくる向きを正としている。

4 Results

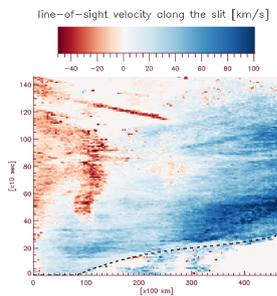


図 6: サージのタイムスライス。サージの運動を 1 次元的なものに平均化している。

得られた視線速度場などから、このサージが磁気力によって駆動されたことを示唆する特徴がいくつか見つかった。図 6 は、サージの運動を一次元的なものに平均化したときの視線速度のタイムスライスである。このタイムスライスで、横軸はサージの足元（スリット右上端）からの距離、縦軸は時間になっている（下から上へ時間が進む）。従ってサージの先頭がスリットに沿って走る様子を図 6 に示した点線に見ることができる。この点線に沿った視線速度、及びこの点線からわかるサージの先頭の水平速度から、サージの先頭の 3 次元的速度の時

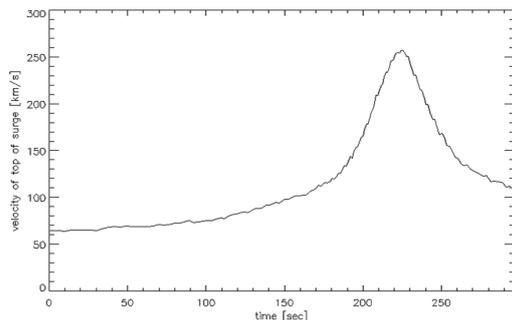


図 7: サージの先頭の 3 次元的速度場の時間発展の様子。

間発展を知ることができる。それを図 7 に示す。図 7 から、サージの先頭は 4 分程度かけてゆっくりと加速されたことが分かる。この加速のタイムスケールは、このサージが衝撃波によって駆動されたと考えては説明できない長さである。サージが衝撃波駆動である場合、その加速は撃力的であるため、一般に加速のタイムスケールは短い。Shibata et al. 1982 の TABLE III でその数値計算上の値を見ることができるが、その値は高々 1 分強である。従ってこのサージの噴出メカニズムは圧力駆動か、磁気力駆動かに絞られる。

一方、圧力駆動か磁気力駆動かは、サージの達した速度で判別することができる。実際、サージの達

する速度は圧力駆動ならば音速、磁気力駆動ならば Alfvén 速度で制限される。図 7 を見ると、観測したサージの先頭が達した速度は 250 km s^{-1} にもなり、これを音速程度とすると、サージの温度は予想値よりも 2 桁大きく、 $\sim 3 \times 10^6 \text{ K}$ にもなる。対して、 250 km s^{-1} を Alfvén 速度程度とすると、周辺の磁場が $\sim 10 \text{ G}$ であれば説明でき、この値は十分合理的である。従って、観測したサージは磁気力によって駆動されたと結論できる。

5 Discussion

観測したサージが磁気力によって駆動されるには、それが起こりうる磁場構造がなくてはならない。Canfield et al. (1996) などでは、サージが磁気力

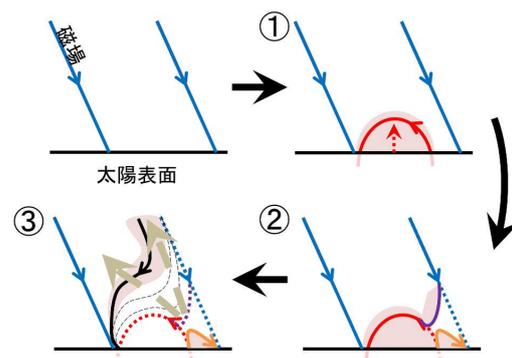


図 8: サージが磁気力によって駆動される過程

によって駆動される過程として図 8 のようなものを想定している。すなわち、まず発端は太陽表面の単極磁場領域にループ状の磁力線が浮上することにある (図 8 ①)。このとき、浮上磁場とその周りの磁場が反平行になる領域が現れ、ここに磁場の拡散領域ができる。この磁場の拡散領域において磁力線のつながり変わりが起こると (磁気リコネクション: 図 8 ②)、曲がった磁力線が伸びようとする力 (磁気張力) がはたらき、この磁力線の動きに連動してプラズマが上空へ放り投げられる (磁気張力加速: 図 8 ③)。

今回観測したサージの噴出過程も概ね図 8 のような過程で説明できると考えられる。その根拠として図 9 を挙げる。この図は今回飛騨天文台で観測したものと同一サージを NASA の SDO 衛星でとらえたもので、上からそれぞれ、サージが

噴出している様子、落下している様子、および、この時間帯の視線方向の磁場強度の分布を表す。また上の 2 つは 171 Å のイメージで、これは $\sim 6.3 \times 10^5 \text{K}$ のプラズマを見ていることに相当する。注目すべき点はサージが噴出しているときの足元（緑で示す領域）と、落下していく先（橙で示す領域）がずれているということである。これは図 8、図 10 を見れば容易に解釈できる。そこでそれらの領域の磁場に注目すると、図 8 のメカニズムに則れば、サージが噴出する足元は磁場が反平行な領域で、サージが落下していくのは単極磁場領域であることが分かる。そして図 9 では実際そうになっているため、今回観測したサージの噴出過程を図 8 の様なものと考えて矛盾はない。

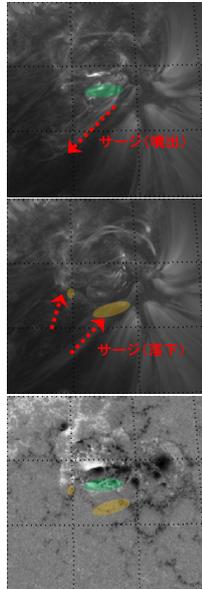


図 9: SDO 衛星による、サージの噴出・落下の様子、及びその関連領域の視線磁場マップ。磁場マップの白と黒では極性が反転している。

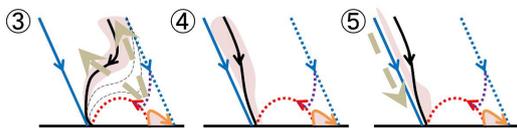


図 10: 図 8 のように噴出したサージが落下する過程。このときサージは磁場が反平行な領域から噴出し、単極磁場領域へ落下していく。

6 Future Work

今回の研究で、観測したサージが磁気力、特に磁気張力によって駆動されたことが分かった。本研究の最終目的は、磁気力によって駆動されたジェットの内構造を磁場の構造と関連付けて理解することにあるため、その準備が整ったことになる。一方、観測したサージの内構造については

- 局所的に高速な視線速度を持つ領域が現れる
- ねじれの運動が見られる

- 温度の時間変化が見られる

などが見られているため、まずはこれらを定量的に評価することが課題である。

7 Summary

サージを高空間・高時間・高波長分解能かつ多波長で観測することに成功した。解析から、このサージが磁気力によって加速されたことが分かったため、その加速メカニズムとサージの内部構造を関連付けて議論することができる。

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。また本研究は京都大学飛騨天文台での観測をもとに行っております。

Reference

- Ohara, Sekii, Sakurai, Ichimoto, Shibata, Yashiro, Tsuneta, Kataoka, Kojima, Oka, Kamide, Miyoshi, Shiokawa, Omura, Watanabe, Yoda, Nagatsuma, Munakata, Kusano, Hoshino, Isobe, & Terasawa 2013, Kyoto University Press
- Roy 1973, Solar Physics
- Shibata & Uchida 2015, Solar Physics
- Canfield, Reardon, Leka, Shibata, Yokoyama, & Shimojo 1986, Astrophysical Journal
- Schmahl 1981, Solar Physics
- Schmieder, Mein, Vial, & Tandberg-Hanssen 1983, Astronomy and Astrophysics
- Shibata, Nishikawa, Kitai, & Suematsu 1982, Solar Physics
- Yang, Chae, Lim, Lee, Park, Song, & Cho 2014, Astrophysical Journal
- Beckers 1964, Ph.D. Thesis