

エラーマンボムの高解像度観測 —光球磁気リコネクションの証拠



渡 邊 皓 子

〈京都大学宇宙総合学研究ユニット 〒607-8471 京都市山科区北花山高峰町〉

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

太陽の活動領域や浮上磁場領域で見られるエラーマンボム。エラーマンボムとはH α 線のウィングで増光する現象である。その加熱メカニズムは、太陽大気の下層で起きる磁気リコネクションであると推測されていた。今回、世界最高峰の空間・時間分解能をもつ地上望遠鏡が撮影したデータで、初めてエラーマンボム内部の構造が分解できた。その結果、足元の輝点から次々と細長く明るいジェットが飛び出しており、その形が磁気リコネクションに特有のアネモネ型に似ていることを発見した。エラーマンボムが光球中での磁気リコネクションが原因であることを示した初めての観測的証拠である。

1. エラーマンボム

エラーマンボムとは、Ferdinand Ellermanというアメリカの天文学者によって1917年に発見された短時間増光現象¹⁾で、H α 線(6563 Å)やCa II K線(3933 Å)といった、太陽彩層から放射されるラインのウィングでのみ明るくなるという特徴的な吸収線輪郭をもつ(図1)。彩層ラインのウィングは、その放射高さが光球~彩層下部であるため、エラーマンボムはこの層で何らかの加熱が起きているということになる。黒点の周辺や磁場浮上領域で観測され、そのサイズは800 km程度ととても小さい。エラーマンボムの足元には極性の異なる磁場が存在することが統計的に知られている^{2),3)}ので、その加熱機構には磁気リコネクションがかかわっていると推測されている⁴⁾。しかし、磁気リコネクションを示す直接的な証拠は見つかっていなかった。

2. 磁気リコネクション

磁気リコネクション⁵⁾とは、磁気エネルギー

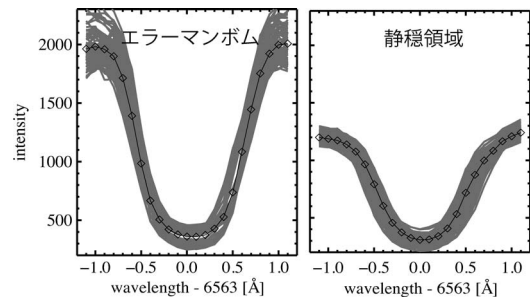


図1 H α 線で観測したエラーマンボムの特徴的線輪郭(左)と静穏領域の線輪郭(右)。ラインセンターでの明るさは両者ほぼ同じだが、ラインウィングになるとエラーマンボムがとても明るく光っているのがわかる。

を運動エネルギーや熱エネルギーに変換するプロセスのことで、恒星フレアや降着円盤ジェットなど宇宙で起きるあらゆる爆発的エネルギー解放現象にかかわっている。磁気リコネクションを模式的に示したのが図2である。互いに反平行な磁場が接近すると、その間に電流シートができる。反平行磁場を押しつけあうような力が局所的に加わると、そこに異常抵抗が生じて電流散逸が起き、

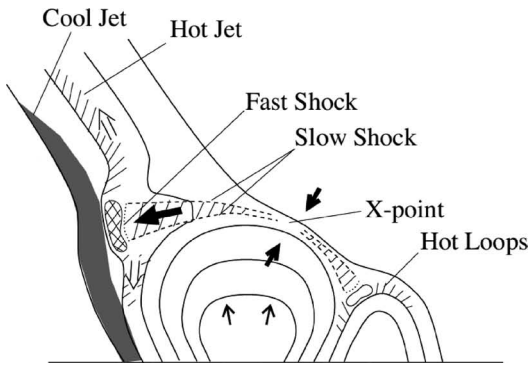
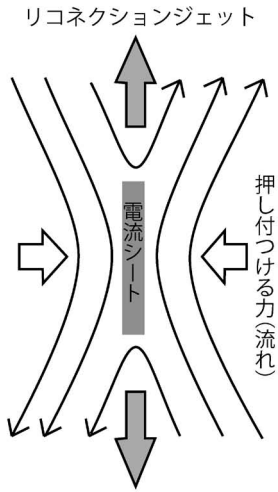


図2 磁気リコネクションの模式図(上)と、アネモネ型ジェットの典型的な磁場構造(下). 下図は Yokoyama and Shibata⁶⁾ (1996) より引用.

磁力線がつながかわる。磁力線がつながかわるとその張力でプラズマがパチンコのように押し出され、高速のリコネクションジェットが発生する。太陽表面上では磁気リコネクションで生じたジェット現象がいくつも観測できる。最も規模の大きいものが太陽フレアであり、コロナ中で磁場のつながかえが起こり、たった数分から数時間の間に約 10^{30} エルグものエネルギーが解放される。そのほかには、スピキュールやサージなどの現象の駆動機構がリコネクションであると考えられている。

2.1 リコネクションの証拠

ある現象がリコネクションで起きていることを立証するには、観測的に何を示せば良いのか。リコネクションが起きている現場を分解して電流が散逸しているのを見ることができれば最高である。しかし、現在の観測技術でこれを達成するには空間分解能も時間分解能も足りない。そこで、リコネクションの結果生じるとされる、ジェットや足元のループ構造を観測することで代用する。太陽の大気は高い層ほど密度が低いため、上方向にはリコネクションジェットが放出されるが、下方向には高密度のプラズマと衝突し、磁力線に沿った形で加熱が起こりループ状に明るくなる。垂直に近い磁場中に、新しく磁気ループが浮上してくるような状況で起きるリコネクションでは、図2下のようにリコネクションポイント(X-point)を挟んで、上方にはジェットが、下方にはループ構造が作られる。明るくなっている部分の形がイソギンチャク(英語で sea anemone)に似ていることからアネモネ型ジェットと呼ばれる。Shibata⁷⁾によって発見された彩層アネモネジェットも、その形がアネモネ型であることからリコネクションが原因であると論じられている。本稿で述べるエラーマンボムは、これまで太陽表面上で観測されたジェット現象の中で最も小さい。

3. 観測と結果

3.1 燃え立つ炎のよう

スペインのラ・パルマ島にある Swedish 1-m Solar Telescope⁸⁾は太陽望遠鏡として世界最大級の口径をもち、非常に高度な補償光学系が整備されているため、特にサイズの小さな現象の解析において他に類を見ない上質のデータを提供してくれる。筆者が用いたデータは、この Swedish 1-m Solar Telescopeで撮影されたものである。観測日時は2008年6月11日の世界時8時から約30分間、非常に恵まれたシーイング環境のもと、小さな黒点が存在する活動領域を観測した。観測に用

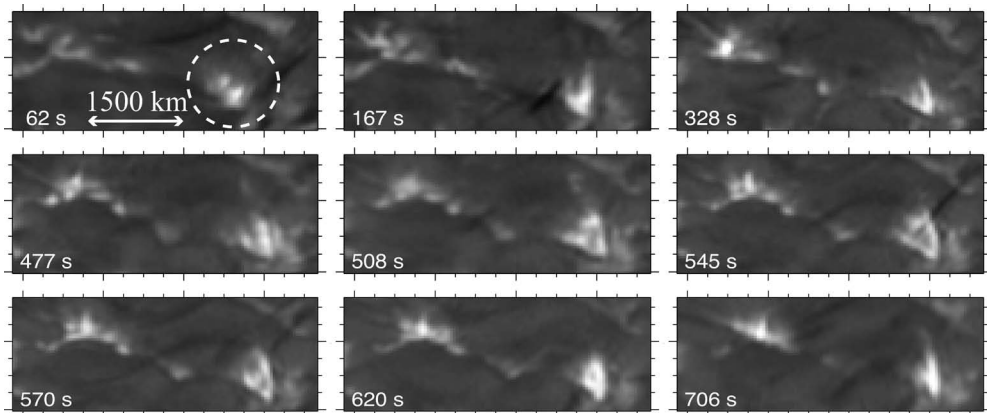


図3 H α -1.1 Åで撮影したエラーマンボムの時間変化. 左下に書かれている数字は観測開始時間からの経過秒. 白破線で囲った部分にあるエラーマンボムから、高速で変化するジェットが噴き出している.

いた波長はH α 線で、ラインセンターでは彩層上部が、ラインウィングでは光球底部が観測できる。

6秒ごとに観測された画像を並べて動画にして見ると、驚くべき様子がとらえられていた。H α ウィングで光っている小さな領域から、見た目が高速に変化するジェットが噴き出していて、その足元が黒点から遠くなる方向に流れるように移動している。それはまるで燃え立つ炎のようである。同じ領域はH α センター付近では彩層ファイブレル*1に隠れて全く見えなくなるので、エラーマンボムの特徴と一致している。

伸び縮みするジェットがH α ウィング（放射高さは光球底部）でのみ見られるということは、リコネクションが光球底部で起こっていることを意味する。一部の例では、リコネクションに特有のアネモネ型の形態が確認できた（図3の中央列参照）。観測した活動領域が太陽中心から48度東に回転した場所に位置していることで、表面からほぼ垂直に上がったジェットが見やすくなったことも今回の発見の鍵であろう。

表1 エラーマンボムの平均的な性質

寿命	566秒
足元輝点のサイズ	471 km
ジェットの長さ	855 km
ジェットの伸縮スピード	8.3 km/s

3.2 ジェットの性質

図3のようなジェットを噴出しているエラーマンボムは、約30分の観測中に17例見つかった。そのどれもが磁場が比較的密集した領域に存在し、細長いジェットが何度も伸びたり縮んだり時間変化していた。ジェットの上がる方向は、上空を覆う彩層ファイブレルとは相関がなく、すべてその場所での水平面から真上方向であった。また、黒点周囲で発生したエラーマンボムは、黒点から遠くなる方向へ足元が移動していく様子が観測された。17例のエラーマンボムの平均的な性質を表1にまとめた。ジェットの長さは1,000 km近くあり、鉛直上方向に伸びていると考えられるので、光球を超えて彩層に到達している。ジェットの伸縮スピードは最大で20 km/sと、光球でのアルペン速度*2と同程度である。

*1 彩層全体を覆う暗い筋状の構造のことを彩層ファイブレル (dark fibril) と呼ぶ。

*2 磁気張力を復元力として磁力線に沿って伝わる波で、そのスピードは $v = \sqrt{B/4\pi\rho}$ (B: 磁場強度, ρ : ガス密度)。

3.3 発生場所

今回発見したジェットを伴う17例のエラーマンボムは、黒点周辺のモート領域で多く発生している。モート領域とは、黒点の周囲数万km程度の領域で、黒点外側に向かう水平流（モート流）を特徴とする。モート流に乗って、黒点の磁力線が剥がれて外側へ散逸していると考えられている。外側へ流れていく磁力線は、その形が波打っており、光球面に隣接した正極と負極のペアを作るとの報告がある⁹⁾。つまり、モート領域には磁場が反平行になっている場所があり、光球でリコネクションを起こしやすい状況にあるのである。エラーマンボムの足元は黒点外側へ向かって移動しており、その速度は平均0.67 km/sで、モート流の速度と整合している。モート流に乗って移動しつつ、次々と新しい磁力線とリコネクションを起こしているというシナリオが、今回見つかったようなジェットが何度も伸び縮みするエラーマンボムを説明すると考えている。

3.4 彩層への影響

エラーマンボムが光球でのリコネクションの結果生じたジェット現象であることはわかったが、それは上空の彩層へ影響を与えるのだろうか？この疑問解決のヒントとなる観測例を図4に示す。H α ウィングで明るく光るエラーマンボムが出現したのち、サージと呼ばれる彩層での突発的ガス噴出現象が起きている。サージはエラーマンボムに比べると速度もサイズも大きい（視線速度100 km/s程度、サイズ数千km）が、位置やタイミングから考えて、光球で起きたエラーマンボムが彩層でのサージを誘発したと思われる。エネルギーが 10^{27} エルグ程度の小さなエラーマンボムが、その10倍以上エネルギーの大きなサージの引き金となるのだから、その影響は決して小さくない。

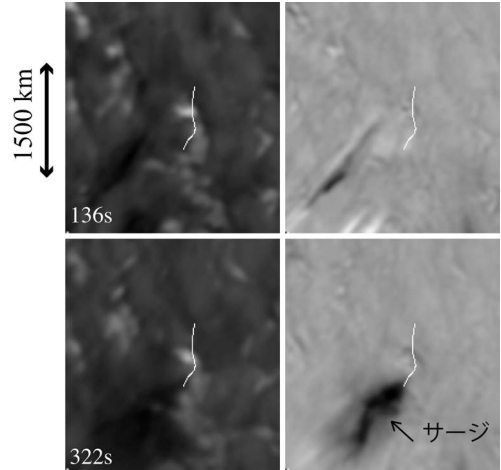


図4 サージを伴うエラーマンボムの時間変化。左下の数字はエラーマンボム出現時からの経過秒。左列はH α ウィングの明るさ、右列はH α ドップラーグラム。サージなどの暗い現象に対しては、ドップラーグラムの黒色は上昇流を、白色は下降流を表す。白色の曲線は、エラーマンボムの足元の移動軌跡を示している。

4. 今後の展望—観測でどこまで迫れるか

エラーマンボムの観測は、望遠鏡の空間分解能の向上に伴って発展してきた。始めは丸いと思われていたエラーマンボムの形が、1980年代に楕円形であると指摘され¹⁰⁾、今回の観測では足元の輝点とそこから伸びているジェットで構成していることがわかった。さらに空間分解能が上がれば、数km~数十kmと言われるリコネクションポイントそのものを分解できるかもしれない。実際、現在検討が進められている4メートルの口径をもつAdvanced Technology Solar Telescopeでは、約30 kmの分解能が達成できる。このような展望を現実味を帯びて語れるのは、地球に最も近い恒星である太陽に独自の強みであり、使命であるのではないだろうか。

謝 辞

本稿の内容は2011年に筆者らが発表した投稿論文¹¹⁾に基づいています。本稿の研究はオスロ大学との共同研究であり、筆者のオスロ大学への短期滞在をサポートしてくれた、京都大学大学院理学研究科グローバルCOEプログラムに感謝申し上げます。この研究を進めるにあたり、指導教官である北井礼三郎氏、オスロ大学へ招待してくださったMats Carlsson氏、論文執筆に数多くのアドバイスをくださったRobert J. Rutten氏をはじめ、多くの人々に有益なコメントをいただきました。

参考文献

- 1) Ellerman E., 1917, ApJ 46, 298
- 2) Georgoulis M. K., Rust D. M., Bernasconi P. N., Schmieder B., 2002, ApJ 575, 506
- 3) Watanabe H., et al., 2008, ApJ 684, 736
- 4) Yokoyama T., Shibata K., 1995, Nature 375, 42
- 5) Priest E. R., Forbes T., 2000, Magnetic Reconnection: MHD Theory and Applications (Cambridge University Press, Cambridge; New York)
- 6) Yokoyama T., Shibata K., 1996, PASJ 48, 353
- 7) Shibata K., et al., 2007, Science 318, 1591
- 8) Scharmer G. B., Bjelksjo K., Korhonen T. K., Lindberg B., Petterson B., 2003, Proc. SPIE 4853, 341
- 9) Kubo M., Shimizu T., Tsuneta S., 2007, ApJ 659, 812
- 10) Kurokawa H., Kawaguchi I., Funakoshi Y., Nakai Y., 1982, Sol. Phys. 79, 77
- 11) Watanabe H., Vissers G., Kitai R., van der Voort L. R., Rutten R. J., 2011, ApJ 736, 736

Evidence for Photospheric Reconnection —Observation of Ellerman Bombs

Hiroko WATANABE

Unit of Synergetic Studies for Space, Kyoto University, Kitakazan, Ohmine-cho, Yamashina-ku, Kyoto 607-8471, Japan

Abstract: The Ellerman bombs are transient brightenings observed in solar active regions or in emerging flux regions. Their heating mechanism is considered to be the magnetic reconnection occurring in the lower atmospheric layer. We observed an active region with an unprecedented spatial and temporal resolution, and succeeded in resolving the internal fine structures of the Ellerman bombs. As a result, we found that Ellerman bombs consist of footpoint bright points and spiky “jets” flaring from the footpoints. Their morphology is similar to the anemone type reconnection jets.