

広がって分布する磁場領域における太陽フレアの形成についての研究

吉田 正樹 (総合研究大学院大学 天文科学専攻 M1)

Abstract

2014 年 12 月 20 日 0:11(UT) に起きた X クラスフレアでは離れた逆極性の磁場で長く伸びたリボンが観測された。本研究ではこの磁場が複雑に広がった場合について、フレアリボンの形に注目し、このフレアがどのような原因で発生し、形成されたか考察した。

さらに、SDO (Solar Dynamic Observatory) 衛星によりフレア足元のフレアリボンの広がりや磁気リコネクション region の inflow の動きが同時に観測出来ていたため磁気エネルギーを解放する速さを表す reconnection rate を見積った。この 2 つが同時に観測されたのは初めてであり、以前から使われていた reconnection rate を求める手法よりも仮定を減らして計算することが可能になった。その結果 reconnection rate は $M_A = 0.018$ と得られこの値は先行研究から求められていた値と矛盾しないものである。

1 Introduction

太陽表面ではフレアと呼ばれる爆発現象が頻繁に起きている。フレアは太陽の磁場のつなぎ変え (磁気リコネクション) によって発生すると考えられている。フレアは黒点など磁場の強い領域で、様々な波長で突発的に明るくなる現象として観測されている。フレアの形成理論 (CSHKP モデル) では、接近した 2 つの逆極性の磁場の磁力線が引き伸ばされ、つなぎ変わる磁気リコネクションによって、磁気エネルギーが熱エネルギーや運動エネルギーに変換され、加熱されたプラズマが太陽の彩層を加熱し、リボン状の明るい構造が現れる。

磁気リコネクションは様々な数値シミュレーションが行われており、その理論モデルと実際の観測・実験により研究が進んでいる段階である。reconnection rate はフレアモデルの正しさを示す重要な値である。reconnection rate の無次元量 M_A は磁力線同士が接近する inflow の速度 v_i と reconnection region から飛び出す outflow の速度 v_o の比で表される。一般に outflow の速度は Alfvén 速度 v_A (:磁場のエネルギーが全て運動エネルギーに変わったときの速度) としてよい。よって reconnection rate は inflow の速度 v_i と Alfvén 速度 v_A の比として以下のように与えられる。

$$M_A = \frac{v_i}{v_A} \quad (1)$$

太陽フレアの観測で繋ぎ変わる磁束の変化量が分か

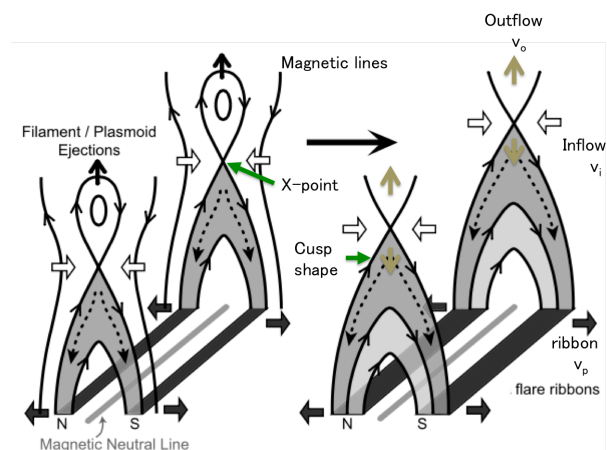


図 1: 磁力線がお互に接近し繋ぎ変わる現象が磁気リコネクションである。磁気リコネクションの構造として cusp shape が見られる。Modified from Asai et al., 2004b

れば、reconnection rate を見積もることが可能である。reconnection rate を観測から求める方法として代表的な方法としてリコネクション region の inflow の速度を直接観測し求めるという手法 (Yokoyama et al., 2001) と、リコネクション後に彩層面にできるフレアリボンを観測し、そのリボンの広がる速さを求めるといった手法 (Asai et al., 2004b) がある。しかし、どちらの方法もリコネクションが起こった領域における磁場の情報が不足しており、仮定なしで

は reconnection rate を導出することができない。

inflow の速度 v_i 、フレアリボンの広がる速度 v_p 、光球面磁場 B_p を使って inflow region における磁場 B_i を求める。inflow region とフレアリボンの広がる領域における磁気フラックスは等しいので、以下の関係を得る。

$$v_p B_p = v_i B_i \quad (2)$$

この式から B_i が求まる。

密度 ρ の inflow region における Alfvén 速度 $v_A (= B_i / \sqrt{4\pi\rho})$ を使うと eq.(1) より reconnection rate M_A が求まる。

今回、SDO 衛星が観測した 2014 年 12 月 20 日 0:11(UT) のフレアでは inflow の速度とフレアリボンの広がる速さを同時に観測できており、それによって上記 2 つの手法を組み合わせ新たな手法として reconnection rate を求めることが可能となった。

2 Instruments and Observations

本研究では主に SDO 衛星の観測データを用いた。SDO 衛星は NASA が打ち上げ複数の波長フィルターを使って太陽の全面観測を常に行っている。今回はその中でも特に 94 Å と 1600 Å、太陽光球面の磁場を測定した magnetogram を用いた。

1600 Å は太陽の光球上部（温度最下層）、94 Å は光球上空のコロナを見ている。今回は 1600 Å でフレアリボンの広がりを見て、94 Å でリコネクション region における inflow の動きを調べ、magnetogram を用いてフレアリボンの広がっている領域における光球磁場を調べた。但し、inflow が測定出来たのはフレアが起きて終盤のタイミングのみである。

3 Results

3.1 フレア形成シナリオ

フレア形成シナリオを考えるために、この領域の磁場に注目する。

この領域が太陽の東側リムから現れた時（12月12日）先行黒点が negative で後行黒点は positive であっ

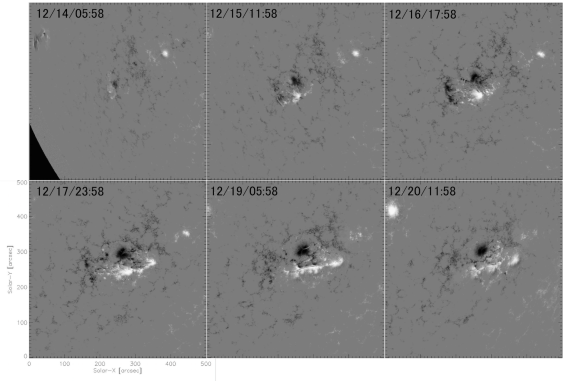


図 2: 2014/12/14/05:58-2014/12/20/11:58 のフレア発生後までの光球面磁場の変化。白色が positive で黒色が negative。12/14/05:58 の時点では図の中心の negative が positive よりも右側（西側）に位置していたが、その後 positive が negative を追い越して positive が negative よりも右側に位置していることが分かる。また、時間とともに negative は空間的に広がってきていることも分かる。SDO/HMI magnetogram

た。これは Hale-Nicholson の法則に依るところの現在の南半球の太陽の活動周期では先行黒点が positive で後行黒点が negative であるというものに反する。

時間発展を見ると本来の配置に戻るように、positive の磁場は Hale-Nicholson の法則を満たすように一度 negative の磁場を追い抜いて、西側リム付近（12月23日）に至ることが分かる。フレア発生の条件として逆極性の磁場が接近し磁気中性線を境に擦れ合うことによって上空の磁力線がシアして不安定となり上昇を始めフレアが発生する。positive な磁場が negative な磁場を追い抜いた際に、この擦れ合いが発生しフレアが発生する原因となった考えられる。

さらに、negative な磁場が東側リムから発生した際、negative な磁場は一塊であったものが広がって分布するようになったことが分かる。このことから、元は一塊だった negative な磁場が広がって分布するようになり、その状態で元々ペアになっていた磁力線同士でリコネクションを起こし、フレアリボンが広がって分布するようになったと考えられる。

3.2 reconnection rate の見積もり

図 3 左のように inflow の向きに沿ってスリットを引き、この領域における時間発展 (図 3 右) を調べた。さらに 94 Å からフレアループの足元を特定し、その位置での 1600 Å のフレアリボンの広がりを調べた (図 4 左)。94 Å の場合と同様に図のようにフレア領域にスリットを引き、この領域における時間発展を見た (図 4 右)。さらに magnetogram を用いて 1600 Å のフレアリボンの位置での磁場強度を求めた (図 4 左)。

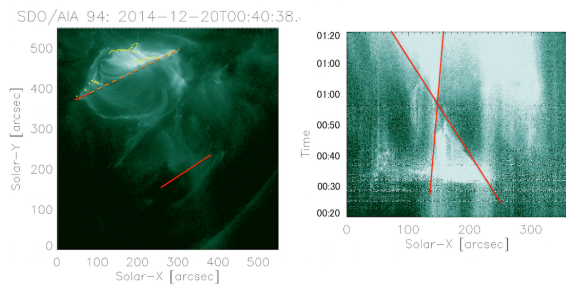


図 3: 左: 94 Å において図 1 のような cusp shape が見えている。右下の赤い線の位置にスリットを引いて右の図を作った。左上のオレンジの点線はフレアループの足元を表す。オレンジの線の左に小さくある赤い線の位置で図 4 の 1600 Å でのフレアループ足元を考える。黄色い contour は 1600 Å のフレアリボンである。右: 左の図の右下の赤い線のスリットの位置における時間変化。三角形の構造が見える。これは左の図の cusp shape が上昇していったためである。赤い線が交わった位置で丁度 x-point がスリットを通過している。赤い線の傾きが inflow の速度である。この cusp は全体的に左下に移動しているので綺麗な 2 等辺三角形になっていない。この 2 つの傾きの平均によって inflow の速度を求めた。

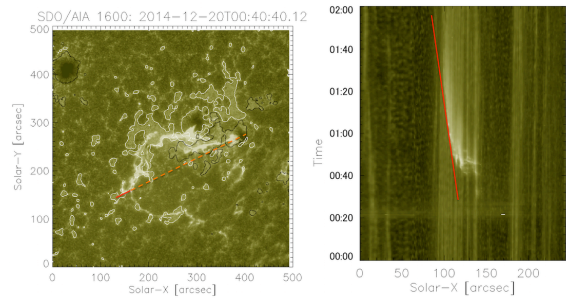


図 4: 左: 1600 Å で彩層でのリボンの広がりが見えている。contour は magnetogram で黒色が positive で白色が negative (図 2 の色と異なる点に注意)。左上のオレンジの点線と赤い線は図 3 左の左上のオレンジの点線と赤い線と一致する。magnetogram を用いてこの赤い線の位置の磁場を求めた。右: 左の図の赤い線の位置でスリットを引いてこの位置における時間変化を表す。赤い線の傾きがフレアリボンの速度を表す。

以上をまとめると以下の表 1 のように数値が求まった。

表 1: 観測からの測定パラメータと reconnection rate

v_p [cm s ⁻¹]	v_i [cm s ⁻¹]	B_p [G]	B_i [G]	M_A
4.0×10^5	23×10^5	800	139	0.0018

ここで、inflow region におけるプラズマ密度 ρ はコロナにおける典型的な値 $\rho = 10^{-9} \text{ g cm}^{-3}$ と仮定した。

Yokoyama et al., 2001 の場合では reconnection rate は $M_A = 0.001 - 0.03$ 、inflow の速度 $v_i = (1 - 4.7) \times 10^5 \text{ cm s}^{-1}$ となっており今回用いた手法でも consistent な結果が得られたことが分かる。

4 Conclusion

磁場の出現の時点で negative が先行、positive が後行となっていたため positive の磁場が negative の磁場を追い越し、そこで逆極性の磁場が擦れ合うことでフレアが発生した。元々一塊で磁力線は繋がっていた磁場が広がって分布するようになることで、フレアリボンは広がって分布するようになった。

SDO 衛星の観測によりフレアにおける inflow の速度とフレアリボンの速度を求めた。この 2 つの速度を同時に観測出来た例は初めてで、先行研究で行われてきた reconnection rate を求める手法よりも仮定を減らして求めることができる。結果 reconnection rate は $M_A = 0.0018$ となり先行研究で求められていた reconnection rate と十分 consistent な値が得られた。よってこの手法が有効であったことが分かると同時に以前まで行われていた仮定を用いた手法でもそこまで悪くないということも分かった。しかし、今回の測定ではフレアループの太陽面上の位置など幾何学的な補正が出来ていないので注意が必要である。

5 Futureworks

今回はリコネクション region におけるプラズマ密度を仮定して結果を出したが、プラズマ密度はひので衛星に搭載されている X 線望遠鏡 (XRT) を使ってリコネクション region における emission measure からプラズマ密度が出てくる。これについては勉強不足でできなかったのが今後の課題とし、精度良く reconnection rate を求めるようにしたい。

さらに、今回観測したフレアは長い時間をかけてリボンが広がっている様子がはっきり分かるので、単純に reconnection rate を求めるだけでなく、色々な時間・位置での reconnection rate を調べてみたい。ただし、この場合は Asai et al., 2004b と同様に $v_p B_p$ を求めることになる。

また、幾何学的な補正や不確かさの見積もりも行わなければならない。

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。

指導教官の末松さん、同室の鳥海さんの指導なければこの研究の進捗はなかったと思います。感謝いたします。

Reference

Yokoyama, T., Akita, K., Morimoto, T., Inoue, K., & Newmark, J. 2001, ApJ, 546, L69

Asai, A., Yokoyama, T., Shimojo, M., & Shibata, K. 2004b, ApJ, 605, L77