

## 磁場構造が引き起こす太陽フレアとコロナ質量放出について

板橋 佑典 (名古屋大学大学院 理学研究科)

### Abstract

太陽系においてもっとも甚大な爆発である太陽フレアや CME は地球周辺環境や経済基盤に影響を与える場合がある。しかしこれらの引きがねになるメカニズムは未だに議論中であり、これらの爆発を引き起こす磁場構造は未だ不透明である。Kusano et al (2012) では 3 次元の電磁流体力学 (MHD) シミュレーションを用いて多様な磁場構造における非線形ダイナミクスを体系的に調査することにより、この問題を考察した。

その結果として彼らは 2 つの異なる磁場構造が太陽面爆発の発生を促進することを突き止めた。加えて彼らは 2 つの大きなフレア (2006 年 12 月 13 日の X クラスのフレア、及び 2011 年 2 月 13 日の M クラスのフレア) について、ひので衛星から得られた画像を用いた解析を行った。本講演では、この論文の内容を紹介し、太陽フレア問題について議論する。

## 1 Introduction

太陽面爆発の開始はいくつかの典型的な磁場構造に関係している可能性が高い。それは今まで発表されてきた論文でも指摘されている。今回私は Kusano et al (2012) の論文から新しく知見を得た。彼らの論文の目的は太陽面爆発が発生しやすい磁場構造を明らかにし、フレアの引き金となるメカニズムのよりよい理解をえることにある。しかし、活動領域内での磁場構造は複雑であるから画像に写っている磁場のデータだけではどれが重要な構造なのかかわからない。

そこでこの研究では 3 次元 MHD シミュレーションを用いて大規模なフリーフォース場と小規模な両極性磁場の相互作用によって引き起こされる非線形ダイナミクスを体系的に調査することにした。その結果 2 つの典型的な磁場構造が爆発駆動の候補にあがった。そしてこのシミュレーションと観測との比較をすることでこの両者がよく一致していることが示された。セクション 2 と 3 ではシミュレーションのモデルとその結果について述べ、セクション 4 と 5 ではシミュレーションと観測との比較がどのように対応しているかを説明し、最後にこの論文の結論から爆発の予言可能性について議論する。

## 2 Simulation Model

Kusano et al らが用いた「シミュレーションボックス」は長方形の定義域で  $(-3L, -0.75L, 0) < (x, y, z) < (3L, 0.75L, 3L)$  が活動領域 (AR) 範囲内の光球の上にある太陽大気部分に対応している。プリフレア状態をモデル化するために初期磁場は線形のフォースフリー磁場によって与えられる。シミュレーション開始後すぐに、小さな両極性磁場を底部境界面からフォースフリー磁場に注入する。この過程は電場の境界条件を与えることで計算できる。その電場はシミュレーションボックスの下に仮想的に位置する人工的な磁場トーラスの一定の上昇運動によって発生する。

彼らはより多くの磁場構造を形成する方法として運動学的な磁束上昇モデルを採用した。物理的に重要なシミュレーションの過程は磁束の注入が終わった後なので、彼らは主に磁束注入過程よりも磁束を注入した結果、その磁場構造によって引き起こされるダイナミクスに注目する。活動領域のプラズマ  $\beta$  値は 1 に対して十分に小さいので、彼らはプラズマ密度の変化とプラズマ圧の変化を考慮しない「0 ベータ」モデルを採用した。この論文の焦点である、“プリフレア段階”の AR 内のコロナプラズマはこのモデルによってよく近似できる。空間微分の演算子は 3 点格子を用いた 2 次の精度の有限差分法によって近似される。そして時間積分は 4 次精度の Runge-Kutta-Gill

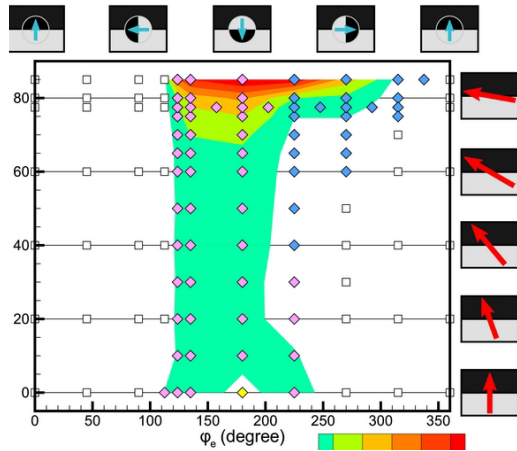


図 1: シア角  $\theta_0$  と方位角  $\phi_e$  のシミュレーション結果。正方形とひし形の違いはダイナミクスのタイプであり、等高線は爆発によって生まれる最大の全エネルギー ( $E_k$ ) の事を示している。四角はそのパラメータでは爆発がおきないことを表し、ひし形は各パラメータで爆発したことを表している。ピンクと青のひし形は OP 型が引き起こす爆発と RS 型が引き起こす爆発のプロセスに対応している。黄色のひし形は初期のポテンシャル場と比べて注入された磁場が完全に反並行な方向を向いているためにリコネクションを起こし、ポテンシャル場が崩壊する特殊な例である。右側と上側にあるサブセットは初期にシアされた場と、注入された小規模な場の構造を示しており、白色が正極、黒色が負極、矢印は磁場の水平成分を表している。

を用いて計算された。シミュレーションボックスに含まれている格子数は  $x, y, z$  方向にそれぞれ  $1024 \times 256 \times 512$  点であり格子分布は PIL 付近に集中している。だから最小の格子サイズは  $\Delta x = 5.9 \times 10^{-3}$ ,  $\Delta y = 2.9 \times 10^{-3}$ ,  $\Delta z = 5.9 \times 10^{-3}$  である。

### 3 Simulation Results

彼らは大規模なフリーフォースのシア角  $\theta_0$  とパラメーターとして注入された小規模な場の方位角  $\phi_e$  の方向を選んだ。そして、測定された空間パラメータは  $(0, 0) \leq (\theta_0, \phi_e) \leq (85^\circ, 360^\circ)$  で 106 種類計算された。  $\phi_e = 0^\circ$ ,  $0^\circ < \phi_e < 180^\circ$ ,  $\phi_e = 180^\circ$ ,  $180^\circ < \phi_e < 360^\circ$  の場合、それらはそれぞれ right polarity、normal shear、opposite polarity reversed shear の小規模な場に相当する。シミュレーションの結果は図 2 に要約してある。爆発によって発生した運動エネルギーが  $\theta_0$  に強く依存している事をはっきりと示している。なので、大規模な爆発は強くシアされた場合のみ可能である。

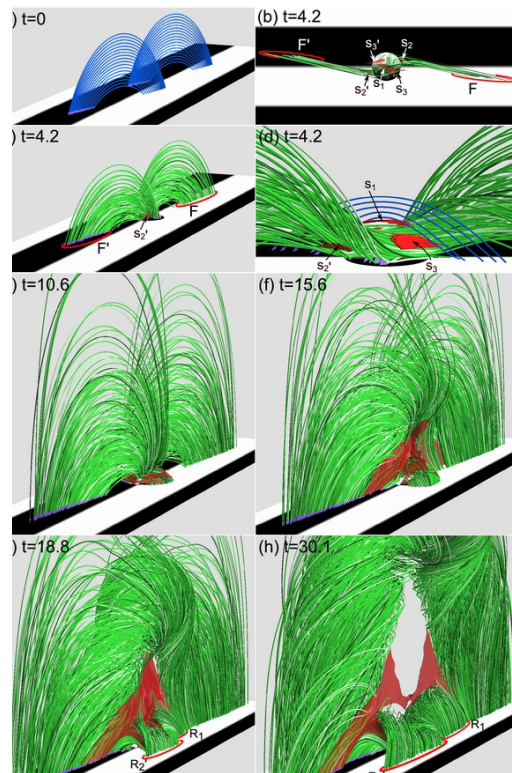


図 2: OP タイプの磁場が引き起こす reconnection-induced eruption のシミュレーション結果。 ( $\phi_e = 180^\circ, \theta_0 = 77.5$  度の場合) それぞれのサブセットは鳥瞰図 (a,c,e-h)、真上から見た図 (b) として拡大図 (d) を表現している。緑の管は磁力線のつながり方が初期状態から変わった管のことであり、初期状態で使われた磁場と初期のつながり方が保たれているものはそれぞれ (a) と (d) において青い管によって表現される。赤い等高線は  $|\nabla \times \mathbf{B}| > 40$  の強い電流層と一致する。底面上の灰の領域は (しろ: 正、黒: 負) 磁場  $B_z$  の  $z$  成分の分布である。ほかのパラメータは  $B_e = 2, r_e = 0.13, \tau_e = 20, v_e = 6.7 \times 10^{-3}$  と  $y_e = 0$  である。

この結果は観測とよく一致しているので大規模な爆発は強くシアされた場合 ( $\theta_0 > 75^\circ$ ) のみ可能である。この結果は以下のように説明される。なぜならより強くシアされた場合は磁場の非ポテンシャル成分としてより大きな自由エネルギーを蓄積する。しかし、この図の最も重要な特徴は太陽爆発の発生が  $\phi_e$  に影響されやすいことである。さらに爆発発生ケースは図 2 のひし形で表現される。これは主に  $\phi_e = 123^\circ \sim 270^\circ$  に存在する。この結果はシアされただけのものは爆発の発生に十分な状態ではないということ、それらの発生は小さな磁場構造によってコントロールされるということを示している。そのシミュレーション結果は OP タイプと RS タイプの磁

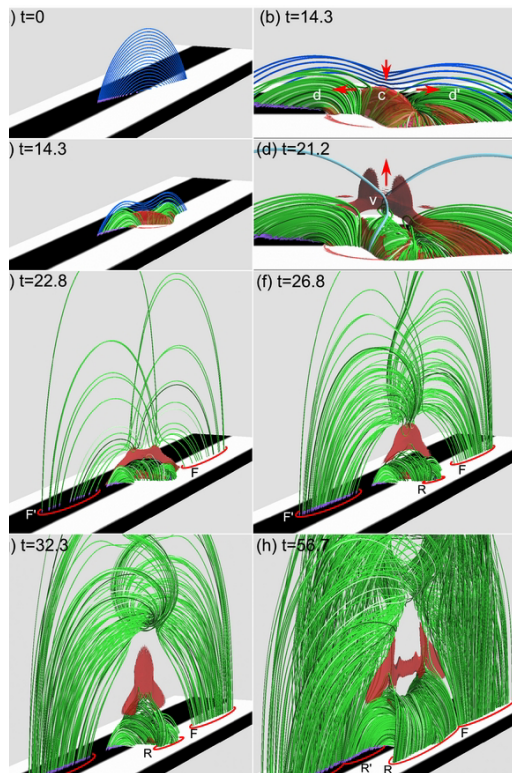


図 3: RS タイプの磁場が引き起こす eruption-induced reconnection のシミュレーション結果。 $(\phi_e = 270^\circ, \theta_0 = 77.5$  度の場合)。それぞれのサブセットは鳥瞰図 (a, c, e-h) と異なる時間での磁場の拡大図 (b) と (d)、緑の管は磁力線のつながり方が初期状態と変わった事を示している。初期状態で使われた磁場とつながり方が変わっていない磁場は (b) - (d) の空色と青の管と (a) の青い管によってプロットされる。(b) - (d) にある赤い矢は典型的な磁束方向である。その構成とほかのパラメタは図 3 で表現されるものたちとおなじである。

場構造が太陽面爆発を引き起こすことができるという事を予言している。

太陽面爆発が強くシアされた磁場だけでなく、2つの小さな磁場構造 OP 型と RS 型によってコントロールされることを明らかにした。私達はこの2つの磁場構造から引き起こされる爆発の過程の違いを見つけるために、OP 型と RS 型の磁場を注入した場合のシミュレーションをそれぞれ比較することでその違いを明らかにした。その結果、後半は同じようなプロセスを共にとるが、前半の部分では明らかに異なるプロセスをたどることがわかった。OP 型と RS 型が起こすその過程をそれぞれ reconnection-induced eruption、eruption-induced reconnection と区別することができる。太陽面爆発の因果律は小さな磁場が

引き起こす爆発によってコントロールされる。

## 4 Comparison With Observation

シミュレーションに基づいて、彼らは巨大な太陽面爆発の開始に有効な磁場構造が OP 型あるいは RS 型という小規模な磁場と強い磁気シアを含んでいることを明らかにした。プロセスの引き金となるどちらの型であっても、大きなフレアは初期段階の磁場シアと異なる方向の磁束成分との間の小規模なリコネクションによって駆動される。これらの結果は小規模リコネクションとして観測される。だから彼らはプリフレアが大きな爆発の前兆として OP 型または RS 型の領域で起き得ることを予測する。実際に、彼らはひのひに搭載されている太陽光学望遠鏡によって観測された二つの巨大なフレアがこの予言にしたがっていることを見出した。

それでこのセクションでは2つの巨大なフレアがセクション 3 で説明されたシミュレーションの結果とよく一致することを示す。図 4 にみられるように、2006 年 12 月 13 日 2 時 14 分に ARNOAA10930 で観測された X3.4 クラスのフレアの画像と図 2 に見られる OP 型の太陽面爆発のシミュレーション過程の比較では、OP 型形状が注入された状態の類似、シアされたリボンとツイストした磁束管の足の一致、プリフレア段階での一時的な増光部分とカレントシートの対応がみられる。また、図 5 に見られるように RS 型の場合では 2011 年 2 月 13 日 17 時 28 分に ARNOAA11158 で観測された M6.6 クラスのフレアの画像と、図 3 に見られる RS 型シミュレーションの結果と比較すると磁場構造の発展、プリフレアの発展、そしてフレアリボンからそれぞれが一致することを説明する。

## 5 Discussion and Conclusion

セクション 4 で示されたものはイベントは次の二つのシナリオによって説明されうる。シナリオ 1 は OP 型の磁場によっておきた "reconnection-induced eruption" であり、シナリオ 2 は RS 型磁場によっておきる "eruption-induced reconnection" である。彼



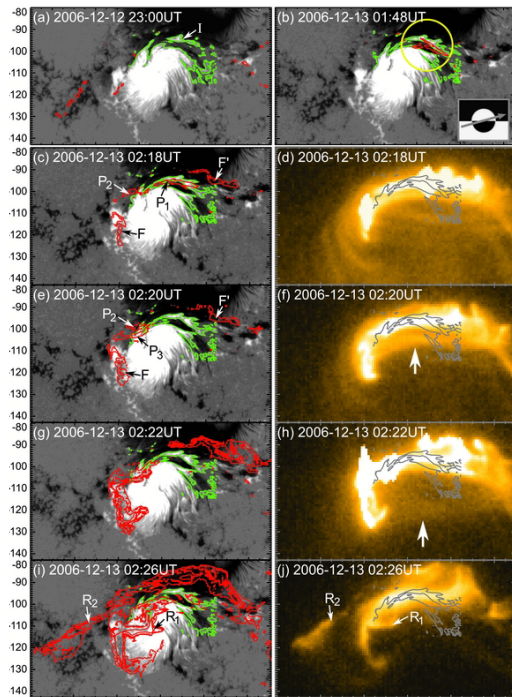


図 4: ひので/SOT によって観測された ARNOAA10930 での太陽フレアの開始過程 (a-c,e,g,i) と軟 X 線画像 (d,f,h,j)。SOT データの灰色の領域は  $Fe_{\square}6302 \text{ \AA}$  線の Stokes-V/I 信号であり。これは磁場 (黒: 負, 白: 正) の視野方向の成分と一致する。赤い線は  $Ca_{\square}H$  ラインの放出であり、SOT データ上の緑のラインと XRT データの灰色のラインは中央領域での PIL のことである。観測時間はそれぞれの図で見られる。b の右下角にある絵は時計回りに回転しているシア磁場で典型的な OP 型の磁場構造をしている。

らはこの 2 つのシナリオがすべて太陽フレアの引き金に適用できるということを結論する。フレアの起こっている場所の PIL の形状分類はそれぞれが各シナリオの適用可能性を調査するために利用できるだろう。多様な太陽爆発の統計的研究はそれぞれのシナリオが CME と太陽フレアオンセットにどれほど適用できるのかを明らかにするために求められている。彼らの研究は太陽フレアと CME が自由エネルギーの蓄積した結果として必然的に起こる自然発生の場合よりも磁気シアが自由エネルギーを蓄積した領域で、磁場の乱れによって引き起こされるということを示している。シミュレーションは小さな磁場要素の方向がシアされた磁場構造を不安定にするために重要であることを示しているが、磁場の乱れの規模と位置もまた重要である可能性が非常に高い。これらのパラメタの重要性を決めるためにより広範な

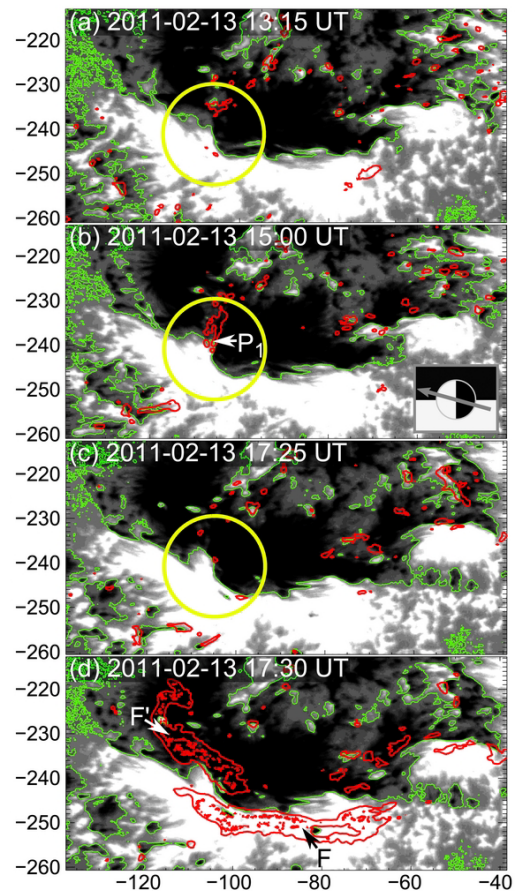


図 5: HINODE/SOT によって観測された ARNOAA11158 での太陽フレアの開始過程。灰色の領域は (黒; 負, 白; 正)  $Na_{\square}5896 \text{ \AA}$  線での Stokes-V/I 信号である。赤線は  $Ca_{\square}H$  ラインの放出であり緑の線は PIL である。観測時間はそれぞれの絵にある。b の右下角にある絵は反時計回りに回転するシア磁場で典型的な RS 型の磁場構造をしている。

シミュレーションの研究が必要である。

フレアトリガーの研究がより進むにつれて近い将来太陽嵐の予報がより正確なものになる日が来るだろう。私もまた太陽研究に貢献できるようにフレアトリガーの研究に専念していきたい。

## Bibliography

Kusano, K., Bamba, Y., Yamamoto, T. T., et al., Magnetic Field Structures Triggering Solar Flares and Coronal Mass Ejections, *The Astrophysical Journal*, 2012, 760, 31