

太陽コロナ爆発現象の三次元可視化

塩田大幸¹, 草野完也^{1,2}, 井上諭³

1. 海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域
2. 名古屋大学 太陽地球環境研究所
3. 情報通信研究機構 電磁波計測研究センター

1. 目的

太陽コロナでは、太陽フレア・コロナ質量放出と呼ばれる爆発現象が発生している。太陽コロナは、高温希薄な完全電離プラズマで Alfvén の凍結定理が成り立つため、プラズマの運動 = 磁力線 (磁束) の運動と見なすことができる。磁場の強い活動領域には磁気エネルギーが蓄積されているが、そのエネルギーがプラズマの熱エネルギーに変換され急激な増光を伴うものがフレアであり、運動エネルギーとして解放され大量の磁束を伴うプラズマが惑星間に放出される現象がコロナ質量放出である。これらの爆発現象は、磁力線のつながり換え (磁気リコネクション) によるエネルギー解放と磁場のトポロジー変化が本質的に重要な磁気流体 (MHD) 現象である。しかし、リコネクションが起きているコロナ磁場の観測は困難であるため、コロナ中にどのようにエネルギーが蓄積され、それがどのようなきっかけで爆発的なエネルギー解放が始まるか、その後どのように惑星間空間へプラズマの放出に至るのかといった詳細な物理過程については明らかになっていない。本研究では、磁場構造の詳細な変化の解析から太陽フレア・コロナ質量放出の発生過程の解明を試みるため、三次元 MHD シミュレーションによる二種類の数値実験を行った。

2. 観測データ駆動型太陽フレアシミュレーション

2.1 方法

太陽フレアは大小様々なスケールの複雑な構造を持った磁場が関係しているため、その発生過程の解明にはフレアが発生する活動領域磁場を精密にモデル化する必要がある。2006 年に打ち上げられた太陽観測衛星「ひので」搭載の可視光望遠鏡は、非常に高い空間分解能の光球ベクトル磁場データを得ることができる。この太陽表面の磁場 3 成分のデータを境界条件とした境界値問題を数値的に解くことで三次元空間でのコロナ磁場を求めることができる。

本研究では、図.1 に示す巨大フレアが発生した 2006 年 12 月 13 日の「ひので」光球ベクトル磁場データを底部境界条件として、非線形 Force Free 近似に基づいて矩形領域コロナの三次元磁場構造を計算した。その結果得られた三次元磁場構造を初期条件として磁気リコネクションを誘発させる擾乱を加えたフレア発生の MHD シミュレーションを実行した。

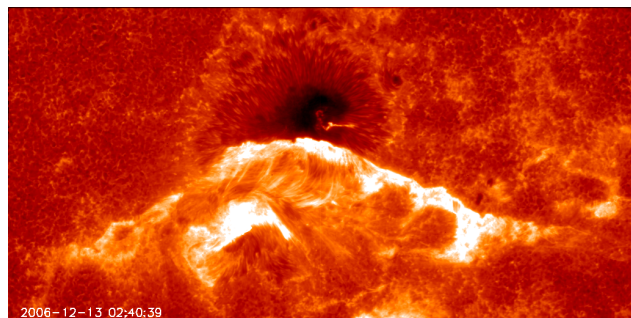


図.1 2006 年 12 月 13 日に発生した巨大フレアの彩層での様子。(ひのでサイエンスセンターホームページより)

2.2 結果

図.2 は非線形 Force Free 近似により計算された三次元磁場構造である。背景が青及び赤の部分に黒点が存在し、それらをつなぐ磁力線(白いチューブ)が強くねじれてエネルギーが蓄積された磁場構造になっていることがわかる。

この部分にエネルギー解放を誘発させる速度場を局部的に与え、太陽フレアの再現を行った結果の時間変化を図.3 に示す。磁気中性線上空に電流シートが形成され、そこで磁気リコネクションが始まり、その結果ねじれた磁束管が形成され、衝撃波を形成しながら放出されることがわかる。

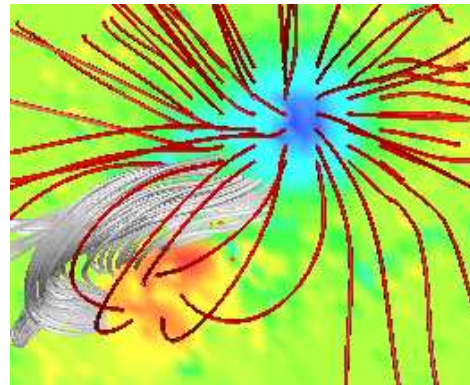


図.2 非線形 Force Free 近似により得られた三次元磁場構造。赤・白のチューブは磁力線を示し、背景の色が太陽表面の磁場強度を示す。(Inoue et al. 2009)

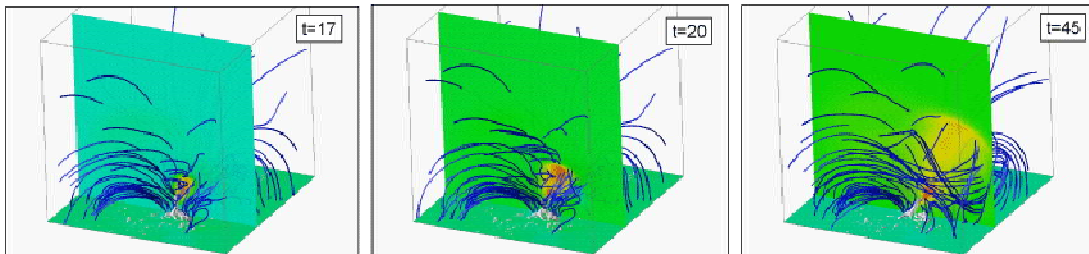


図.3 磁場構造の時間変化の様子。等値面は電流密度、鉛直方向の背景は鉛直方向の速度を示す。(Kusano et al. 2009)

3. コロナ質量放出シミュレーション

3.1 方法

コロナ質量放出は、前節のシミュレーションのようなフレアに至るコロナ磁場の崩壊の結果放出されたねじれた磁場構造が、重力及び周囲の磁場による束縛を振り切って惑星間空間へと放出・膨張する現象である。本計算では、モデル磁場を使って表した活動領域スケールの噴出するねじれた磁束管と、重力及び全球スケールのダイポール磁場との相互作用によるコロナ質量放出形成過程の三次元全球 MHD シミュレーションを行った。

3.2 結果

図.4 に時間発展の様子を示す。初期条件に置いたねじれた磁束管は、外向きの磁気圧勾配のため膨張・放出する。その際に、ねじれを解放するため、磁束管は回転しながら噴出する。また、進路にある周囲の磁場との複雑に相互作用(磁気リコネクション)をするため、噴出する磁束管構造も大きく変形することがわかる。このシミュレーションから、周囲の場との相互作用の結果がコロナ質量放出形成に重要であることが示唆された。

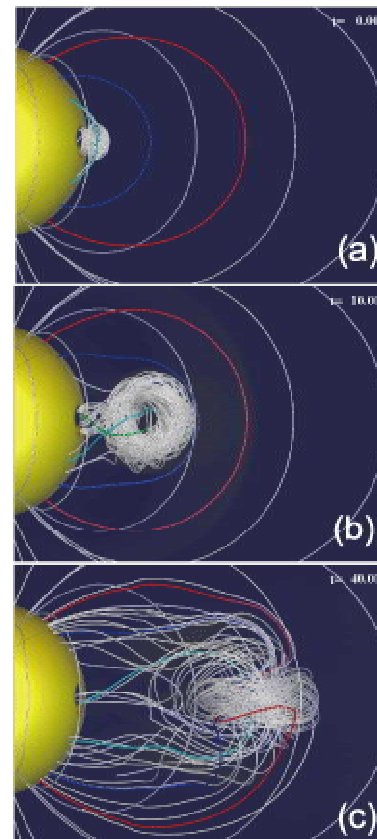


図.4 コロナ質量放出シミュレーションでの、三次元磁場構造の時間変化の様子。チューブは磁力線を示し、球面の色が太陽表面の磁場強度を示す。(Shiota et al. 2009)

4. 結論

太陽フレア・コロナ質量放出は磁場の複雑なトポロジー変化が本質的な役割を果たす現象である。これらは、三次元的に磁場を積分した磁力線を描きその時間変化を調べることで本質を明らかにすることができる現象である。いつどの領域で起こる磁気リコネクションが重要であるかを明らかにすることでその発生メカニズムの解明につながるが、そのために CAVE を使った磁気流体シミュレーション結果の内部からの三次元的な可視化・解析が有効な手段の一つになることが期待できる。