

# CME の形成過程に関する MHD シミュレーション

代田 真輝 (名古屋大学大学院 太陽地球環境研究所)

## Abstract

CME が惑星間空間を伝搬し、地球軌道に到達して地球磁気圏と相互作用することで磁気嵐等の宇宙天気擾乱現象が発生する。本研究では宇宙天気予報への応用を念頭に置き、CME の形成に焦点を当て、議論を行う。

CME の形成の研究を進めるにあたり、今回は Shiota, et al. (2010) の論文を紹介する。この論文では、フラックスロープの放出と周りの磁場との相互作用 (リコネクション) の MHD シミュレーションを行うことで CME の形成過程を考察している。

本論文紹介を通して、CME の形成研究における今後の方向性と、自身の指針も示す。

## 1 Introduction

CME は太陽表面における爆発現象のひとつであり、多くの質量と磁場フラックスを放出するため、CME は急激な磁場エネルギーの放出の結果と言われている。宇宙天気科学からの観点からは、南向きの磁気フラックスを地球の磁気圏に衝突すると地球近くの環境に大きな影響を与える。今後、宇宙天気予報をしていくにあたり、どのように CME が形成されただけ南向きの磁気フラックスであるのかを地球の軌道上にいつ到達するかも含めて、CME の全体の進化の過程を理解することはとても重要である。南向きの磁気フラックスの評価はとても難しい課題であり、CME 全体の成長過程の理解が必要である。

本論文では、場を取り巻く磁場によって囲まれた活動領域から放出されたねじれたフラックスロープの 3 次元の MHD シミュレーションを行う。数値的解の結果によって、CME の形成と CME が作る磁場構造の発展の状態を議論し、フラックスロープの放出とそれを取り巻く閉じた磁場との相互作用に焦点を当てる。

## 2 Methods

8 つの物理量 ( $\rho$ :密度,  $p$ :圧力,  $\mathbf{v}$ :速度ベクトル,  $\mathbf{B}$ :磁場ベクトル) が時間変化する 3 次元の MHD シミュレーションを取り扱う。MHD 方程式を簡単に扱うために、8 つの物理量は通常のコロナ中の量: $L_0 = R_\odot = 6.99 \times 10^5$  km,  $B_0 = 30$  G,  $\rho_0 = m_H \times 10^9 = 1.67 \times 10^{-15}$  g cm $^{-3}$  で規格化している。またスケールの大きさは  $v_0 = B_0/\sqrt{4\pi\rho_0} = 2071$  kms $^{-1}$ ,  $\tau_0 = L_0/v_0 = 350$  s,  $p_0 = 7.16 \times 10$  erg cm $^{-3}$  である。通常の MHD 方程式は以下ようになる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v} - \mathbf{B} \mathbf{B} + p_T \mathbf{I}) = \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{B} \mathbf{v} - \mathbf{v} \mathbf{B} + \psi \mathbf{I}) = -\nabla \times (\eta \mathbf{J}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot [(e + p_T) \mathbf{v} - (\mathbf{v} \cdot \mathbf{B}) \mathbf{B}] = 0 \quad (4)$$

また、 $\nabla \cdot \mathbf{B}$  はシミュレーション計算の中で破綻してしまうことが知られている。 $\nabla \cdot \mathbf{B}$  が小さい値であり続けるため、以下の式を採用する。

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + c_h^2 \nabla \cdot \mathbf{B} + c_h^2/c_p^2 \psi = 0 \quad (5)$$

グリッドは Yin-Yang グリッドを用いており、2 つの一致球面部分的なキメラグリッドからなる格子である。

初期条件としては、周囲の磁場は 3つのモデルを使って与える。

(A) "No ambient" Case

周囲に磁場が存在しておらず、活動領域では spheromak-type の磁場を持つ爆発の結果としてフラックスロープの放出が形成されることを考える。

(B) "Anti-parallel" Case

フラックスロープと逆向きの周囲の磁場を用意し、その後の発達を調べる。(図 1 を参照)

(C) "Parallel" Case

フラックスロープと同じ向きの周囲の磁場を用意し、その後の発達を調べる。

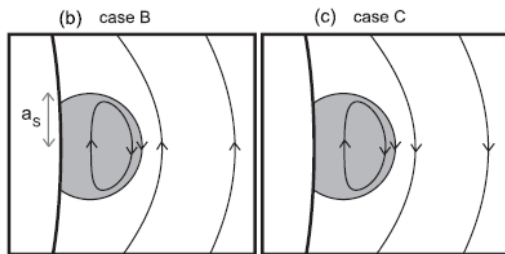


図 1: Case B, C の模式図

### 3 Results

以上の方法で解析した結果を図 2 に示す。右の図はプラズマベータ ( $\beta = p/2B^2$ ) が時間発展した図であり、 $x$  軸に沿った低いプラズマベータのところはフラックスロープの位置を表している。すべてのケースで、フラックスロープは広がりが始まってから急速に伝播し、若干減速しながら上昇し、拡大していく運動が続く。

(a) "No ambient" Case

Case A では磁気を帯びていないプラズマ内をフラックスロープが伝播する。この場合は磁気障害のない、基準となるケースとみることができる。フラックスロープは最初に ( $t < 10$ ) 急速に運ばれ、その後 ( $10 < t < 30$ ) では上昇し拡散する動きを示す。そのあとのフェイズでは ( $t > 30$ ) フラックスロープはほとんど一定の速度で同じように拡散していく。そして最終的に境界の外に到着する。

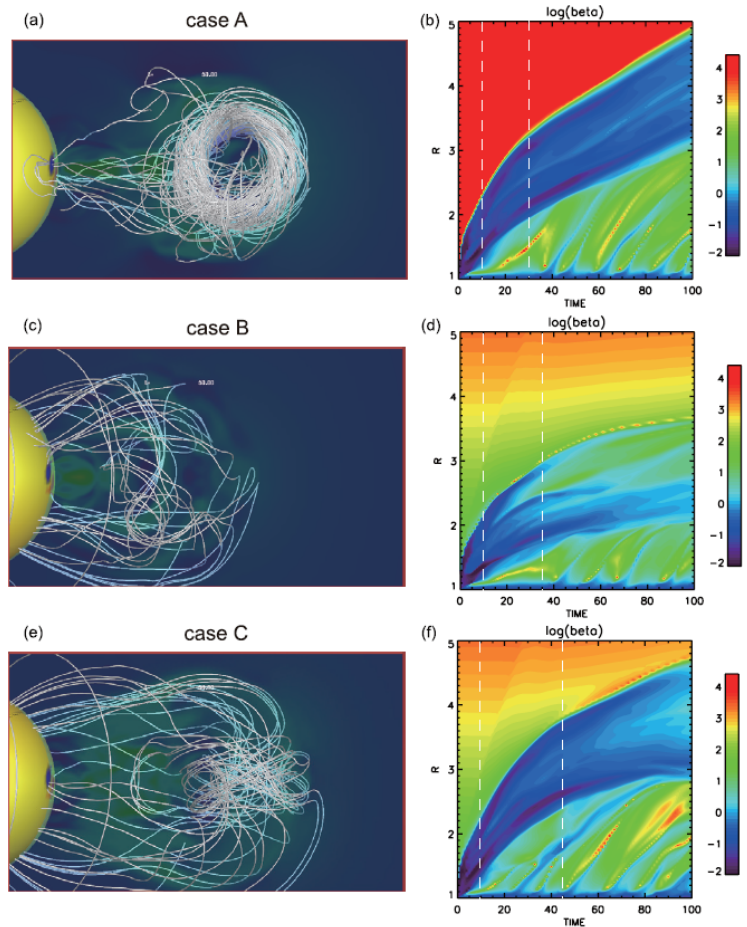


図 2:  $t=50$  のときのそれぞれのケースを可視化した図 (左図) とプラズマベータ ( $\beta = p/2B^2$ ) が時間発展したときの図 (右図)。

(b) "Anti-parallel" Case

Case B では周囲の磁場がフラックスロープと方向が逆向きで存在している。このときの時間発展は Case A とは大きく異なる。これは、フラックスロープのポロイダル方向と逆方向の磁場が存在するため、磁気リコネクションを引き起こし、強いカレントシートを発生させるからである。そのため、ポロイダル方向のフラックスは剥離され、最終的には存在しなくなる。

(c) "Parallel" Case

Case C では周囲の磁場がフラックスロープと同じ方向で存在している。このフラックスロープの時間発展はケース A と似ており、両方のケースで外側の

境界面に達する。しかし、ケース A の結果と比較して、フラックスロープはかなり変形する。この違いはフラックスロープと周りの磁場とのリコネクションによって引き起こされる。完全に逆平行でないリコネクションの結果として、強く曲がった磁束が形成される。

図 3 はこの場合の磁力線の発展の図式である。拡散しているフラックスロープはまず、のたうつ運動のために反時計回りに回転する。すると、電流シートが表面上の 2 か所に形成される。そこで、逆平行の磁場が接触しているところで発生する (図 3 での赤色の線の部分)。電流シートでリコネクションが起こり、それから強く曲げられた磁力線が (緑と青色) 形成される。まがった磁場のもつれをほどくため磁気張力が発生し、フラックスロープを回転させるトルク (紫色) を引き起こす。

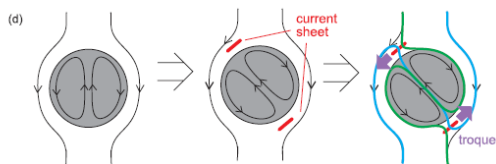


図 3: Case C での磁力線の発展の図式。

## 4 Summary

本論文でのまとめは以下のとおりである。

- ・フラックスロープは周囲に磁場が存在しないときは外部境界に逃げることができ、周囲の磁場が平行の場合では脱出することができない。
- ・周囲の磁場とフラックスロープが同じ向きの場合、フラックスロープはねじれた動きだけでなく周囲の磁場の相互作用が引き起こされる。そのため、放出している方向とは垂直に回転する。その結果、特にフラックスロープと周囲のリコネクションから生じる複雑な磁場構造の緩和による回転を示す。

## 5 Future Works

本論文を受けて、私自身の今後の研究の指針は以下のとおりである。

・太陽風は CME の形成には重要な要素であるが、CME の早期形成の段階でのフラックスロープとそれを取り巻く磁場の相互作用のみを調べるために本論文では太陽風は採用していない。したがって、太陽風をどのように本論文でのモデルに組み込むかを吟味しながらフラックスロープがどれだけ変化するかを調べていく。

・本論文の結果から、放出しているフラックスロープと周囲の磁場の相互作用は CME 構造に関わっており、宇宙天気を決めるのに重要であることがわかる。そのため、フレアが発生したときに CME の発生を予測することは必要である。本研究の最終目標である宇宙天気予報の精度の向上につながるために本研究を進めていきたい。

## Reference

shiota et al. (2010)