

惑星間空間における CME の伝搬についての研究

石田 敏洋 (名古屋大学 太陽地球環境研究所)

Abstract

太陽表面では、日々突発的なエネルギー開放が起きている。このエネルギー開放に伴って太陽大気（太陽コロナ）内のプラズマの塊が惑星間空間へ飛び出すことがある。これをコロナ質量放出 (CME) という。CME が地球に到達すると、地球磁気圏に影響をあたえ、磁気嵐や様々な宇宙天気擾乱現象を引き起こす場合がある。特に激しい宇宙天気擾乱現象は人工衛星の損傷や通信障害、宇宙飛行士の被曝、送電システムの障害といったような人類に悪影響を与える原因になり得る。つまり、CME の形成とダイナミクスを理解することは人類にとっても大変重要な課題である。本会では今後の研究の足掛かりになるような CME の惑星間空間の「伝搬」に焦点を絞り、B.Vrsnak の Propagation of Interplanetary Coronal Mass Ejection: The Drag-Based Model(2013) という論文を紹介する。この論文では、CME の伝搬は、周囲の太陽風から力学的抗力を受け惑星間空間を進んでゆくモデルを提唱している。太陽風の速度や初期速度などの input を様々変え、さらに実際に ACE 衛星が L1 点で観測した太陽風の速度との比較を行い、そのモデルの妥当性を議論している。この論文発表を通して、現在の CME 伝搬の理解と今後の課題を考察する。

1 Introduction

太陽から惑星間空間中に放たれた CME は interplanetary coronal mass ejection (ICME) と呼ばれ、この ICME の地球軌道上での到達を予測することは、宇宙天気予報の主要な目的のひとつである。これを達成するには、ICME の伝搬を理解しなければならない。本発表で紹介する B.Vrsnak の Propagation of Interplanetary Coronal Mass Ejection: The Drag-Based Model(2013) では、Drag-Based Model(DBM) という周囲の太陽風からの抗力を受ける力として ICME の運動を記述するモデルを提唱している。

2 The Model

一般に、物体が流体中を運動するとき、二者間の相対速度の 2 乗に比例する力が働き、これを抗力という。DBM はこの抗力を用いたモデルである。ICME が周囲の太陽風から受ける抗力に起因する加速度は、

$$a = -\gamma(v - w)|v - w| \quad (1)$$

である。 v は ICME の速度、 w は周囲の太陽風の速度であり、時間の関数である。また γ はドラッグ

パラメータと呼ばれ

$$\gamma = \frac{c_d A \rho_w}{M + M_V} \sim 0.2 - 2 \times 10^{-7} \text{km}^{-1} \quad (2)$$

で表される。ここで c_d は抗力係数、 A は ICME の断面積、 ρ_w は太陽風の密度、 M は ICME の質量、 M_V は仮想質量である。一般に γ は r の関数であるが今回は $\gamma = \text{const.}$ として考える。 a を用いて、ICME の運動方程式を記述すると、

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = -\gamma \left(\frac{dr}{dt} - w(r) \right) \left| \frac{dr}{dt} - w(r) \right| \quad (3)$$

となる。運動方程式 (3) は $w = \text{const.}$ 、 $\gamma = \text{const.}$ のとき解析的に解くことができる。速度、位置のそれぞれの解析解は以下ようになる。

$$v(t) = \frac{v_0 - w}{1 \pm \gamma(v_0 - w)t} + w \quad (4)$$

$$r(t) = \pm \frac{1}{\gamma} \ln[1 \pm \gamma(v_0 - w)t] + wt + r_0 \quad (5)$$

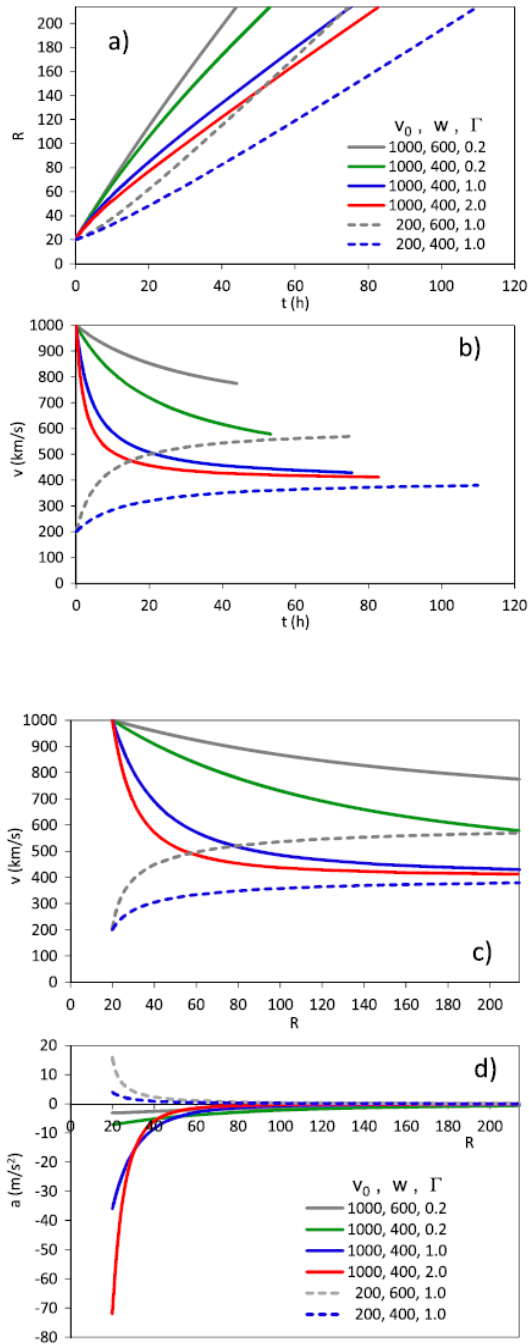


図 1: DBM に基づく ICME の力学

図 1 にあるように、 r_0, v_0, w, γ を決めることで ICME の時間変化を追うことができる。

3 Validation

この章では DBM に基づいた ICME の理解の妥当性を過去の観測的事実をもとに統計的に検証する。地球軌道は $r = 1\text{AU}$ ということがわかっているので、到達時間とその時の速度を決めることができる。地球軌道上までの到達時間を $t = T$ 、その時の速度を $v = v(T) = v_1$ と定めておく。過去に観測された 121 回の CME イベント (Schwenn *et al.* (2005) から 91 イベント、Manoharan (2006) から 30 イベント) から観測値 r_0, v_0, v_1, T がわかる。これらの観測値を DBM の方程式に代入することで未知数 w, γ を決めることができ、それぞれの統計を取ることができる。

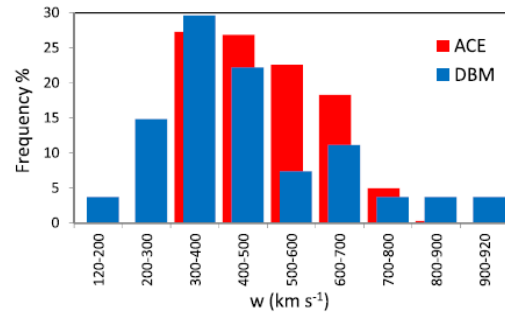


図 2: 太陽風速度 w の分布

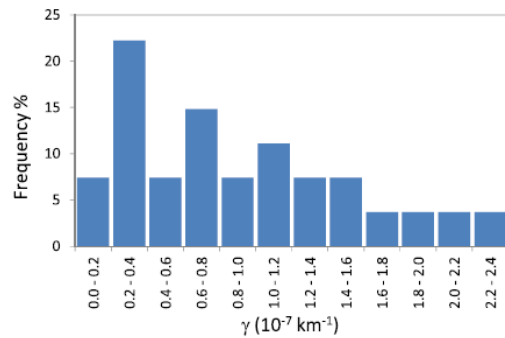


図 3: ドラッグパラメータ γ の分布

図 2 は太陽風速度 w の分布を表している。青い帯が今回 DBM をもとにした分布、後ろの赤い帯が ACE 衛星がラグランジュ点 L1 で 2005 年に観測した分布を示している。ここからふたつの分布はかなり一致している。また図 3 は γ が全体として低い値の割合が多い、これは使用した過去のイベントが CME の

平均よりも 4 倍ほど大きかったことが影響したものと思われる。しかし γ は物理的に見積もられた範囲内の値になっている。

次に図 2、図 3 の分布の範囲内の様々な w, γ の組み合わせに対して計算された到達”予測”時間 C と実際に観測された到達時間 O を比べてみた。

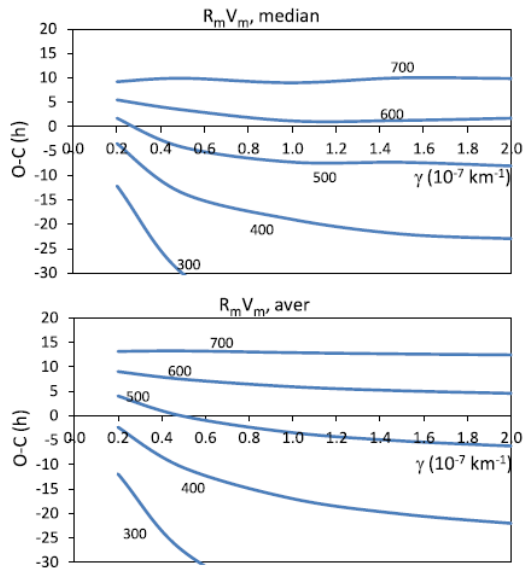


図 4: 様々な w, γ に対する到達時間における予測と観測の差

図 4 から到達時間差は γ の値よりも w の値に大きく依拠していることがわかる。これはドラッグパラメータよりも太陽風速度のほうがより重要なパラメータだということを意味していて、Vrsnak and Zic(2007)の結果とも合致している。

4 Tracking the Interplanetary Kinematics

さらに詳細に DBM の性能を調べるために、DBM で計算された ICME と STEREO 衛星によって観測された ICME の比較を行った。今回それぞれ 2007 年 11 月 15 日、2008 年 12 月 12 日、2008 年 6 月 1 日に打ち出された CME のイベントを用いた。

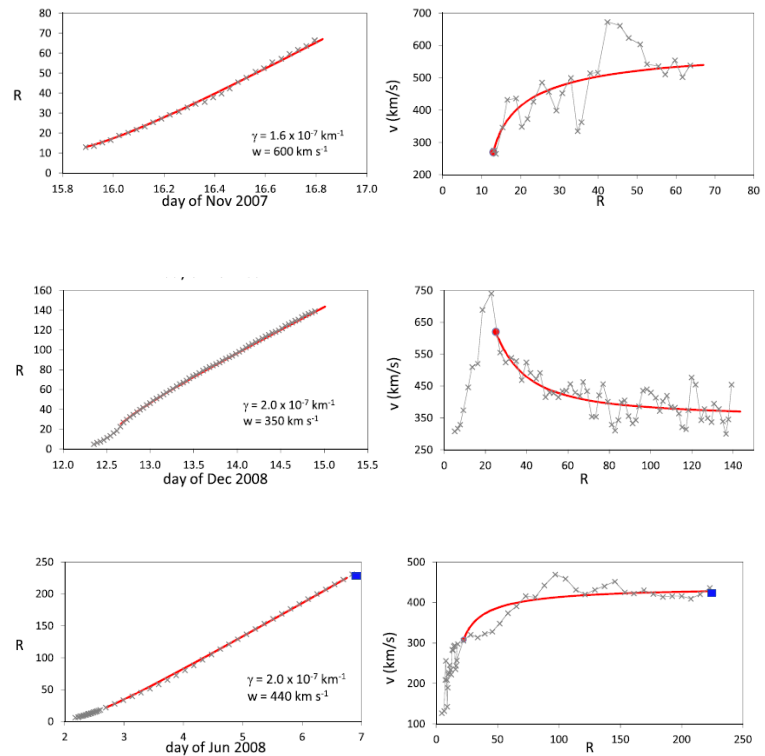


図 5: DBM と観測値の比較

図 5 中、灰色のプロットが観測値、赤線が DBM に基づいた計算結果である。それぞれ w, γ を決めると観測値を綺麗に説明することができた。

5 Conclusion and Future work

本発表では ICME の伝搬の解析解を与えるような DBM について紹介した。この DBM にもとづくアプローチは扱いやすく、リアルタイムの宇宙天気予報への応用につながる。今回のモデルは太陽風の速度が一樣であったり、ICME の伝搬に伴う衝撃波が考慮されていなかったりと、単純化を極めたものである。このモデルを受けて今後は MHD シミュレーションを用いた CME の伝搬についての研究をしていきたいと思う。