

# 宇宙天気予報における太陽風の MHD シミュレーション

山野内 雄哉 (名古屋大学大学院 太陽地球環境研究所)

## Abstract

地球の電磁的な環境を知ることは、電子機器が発達している我々の社会で非常に重要になってきている。そのため、地球軌道での太陽風の MHD シミュレーションによる宇宙天気予報を発達させることは、我々の生活に直結した課題である。

そこで今回は、名古屋大学で行われている宇宙天気予報モデリングの最新の論文である Shiota et al.(2014) を紹介する。この論文では 2007 年から 2009 年の 3 年間のシミュレーションを実行しており、その結果を地球軌道での太陽風の観測値と比較し、ある程度的一致を得られている。

本論文紹介を通して、太陽風のモデリング研究の到達点と今後の方向性を考察し、自身の今後の指針も示す。

## 1 Introduction

太陽フレアや磁気嵐、太陽風などの宇宙環境の擾乱は、放射線帯にある衛星の損傷や、船外活動をしている宇宙飛行士の被ばく、さらには地上での通信障害など、我々の生活に大きな影響を与える。これらの擾乱を把握し、それに対する影響を予報することを宇宙天気予報という。宇宙天気予報では先に述べたような様々な擾乱を予報するが、本発表では太陽風に焦点を当てて議論を行う。

宇宙天気予報のための太陽風の観測は地球から 150 万キロ離れたラグランジュポイントで ACE 衛星が行っている。ここで観測された擾乱を電波によって地球に伝えることで、その擾乱が到達する前に我々はそれによる影響をある程度予想することができる。しかし、この方法のみでは ACE 衛星に到達する前の太陽風の情報は知り得ないため、比較的近い未来の予報を行うことしかできない。そこで、ACE 衛星に到達する前の太陽風の情報を、太陽の光球面磁場の観測によって MHD (Magnetohydrodynamics: 磁気流体力学) シミュレーションを使って予想し、補完することで、この問題が解決できる。現在まで、MHD を使った太陽風のモデルは、地球などの惑星の軌道におけるリアルタイムの宇宙天気予報の実用的利用に向けて発展してきている。

## 2 Methods

2007 年～2009 年までの太陽風に関して、速度と磁場についての MHD シミュレーションを実行し、観測データと比較することによって、今回のモデルが実際の太陽風をどのくらい再現しているのかを調べる。なお、この 3 年間は、背景太陽風のプロファイル进行测试するために、CME (Coronal Mass Ejection、コロナ質量放出) などの太陽の活動現象が穏やかな極小期付近を選択した。

具体的なセットアップは、太陽を中心に 3 次元にグリッドを配置し、 $25R_{sun} < r < 425R_{sun} \sim 2AU$  ( $R_{sun}$ ; 太陽半径) の範囲で計算を行っている。内側境界の位置は、太陽風がアルフベン速度を十分に超している位置に設定してあり、あらゆる波動が内側には伝播しないため計算量を大幅に減らせる位置に設定してある。この内側境界の位置とグリッドセルの数の設定により、30 分の実時間で 1 日分の結果が得られるようになっている。

また、内側境界は以下の 3 つのモデルを使って与える。

### (1) ポテンシャル磁場モデル

カレントフリーな状況を仮定して、光球表面の磁場のプロファイルからコロナ磁場の構造と惑星間空間磁場 (IMF) の磁場構造を求める。

### (2) WSA モデル (運動学モデル)

(1) で求めたコロナ磁場の構造から太陽風の速度が求められる。

(3) Helios empirical モデル

(2) で求めた速度から密度と温度が求められる。

### 3 Results

以上の方法で解析した結果を図 1、図 2、図 3 に示す。それぞれ順に 2007 年、2008 年、2009 年の各パラメータの時間発展を表しており、それぞれの上段は太陽風速度、下段は IMF の方位角である。黒の点で表されているのが観測結果、赤の線で表されているのが MHD モデル、青の線で示されているのが運動学モデルの計算結果である。3 年間とも太陽風速度、IMF 方位角共に傾向がよく一致しているが、太陽風速度に関して、2007 年と 2008 年の振幅が実際の測定値よりも小さくなってしまっている。また、IMF の方位角は、グローバルな磁場の変動は再現されているものの、その微細構造は再現されていない。また太陽風速度について、MHD モデル(赤)と運動学モデル(青)を比較すると MHD モデルの方が変動が大きいことが分かる。これは、太陽風加速が磁場と密接な関係があることを示唆している。

次に、図 4 に左から 2007 年、2008 年、2009 年の観測とモデルとの相関係数を示す。黒線は速度の観測と MHD モデルとの相関、青線は速度の観測と WSA モデル(運動学モデル)との相関、赤線は IMF 方位角の観測と MHD モデルとの相関である。黒線で表されている MHD モデルと観測における速度の相関のピーク値は年々下がっていることが分かる。またこのピーク値は、青線で表されている運動学モデルと観測における速度の相関のピーク値と同等の値であることから、速度の変動は基本的に内側の境界条件で決定するといえる。一方、IMF の方位角の相関に関しては、2007 年、2008 年ともに 0.73 という十分な程度の相関が得られているが、2009 年では 0.54 という低い値にとどまっている。これは、地球がセクター境界に近いところに位置していたため、太陽コロナ中の磁場の变化に敏感な IMF の構造が含まれていると考えられる。

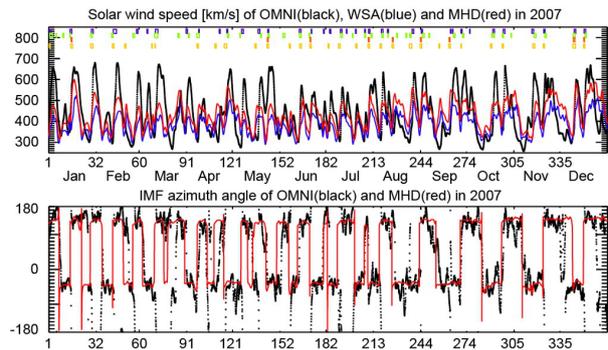


図 1: 2007 年の太陽風速度 (上段) と IMF 方位角 (下段)

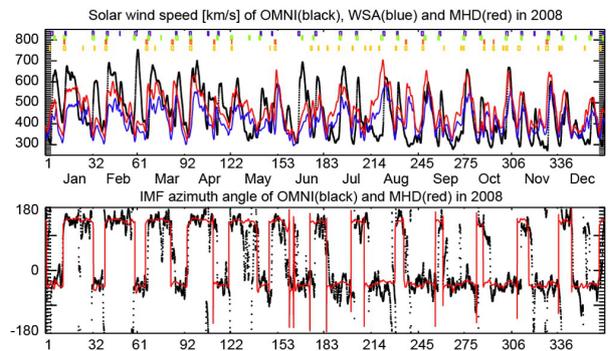


図 2: 2008 年の太陽風速度 (上段) と IMF 方位角 (下段)

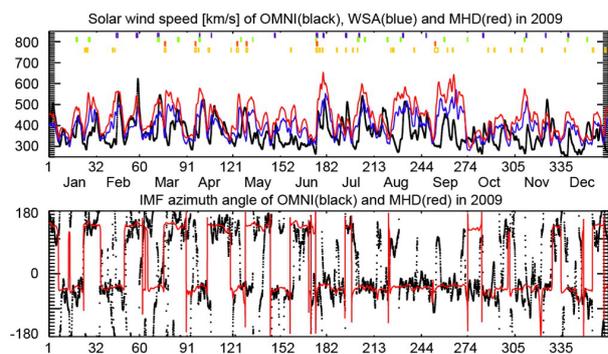


図 3: 2009 年の太陽風速度 (上段) と IMF 方位角 (下段)

### 4 Discussion / Summary

・太陽風速度に関して、2007 年と 2008 年に比べて 2009 年の相関は弱かった。この結果を受けて、太陽活動に応じて経験モデルを変更しなければいけな

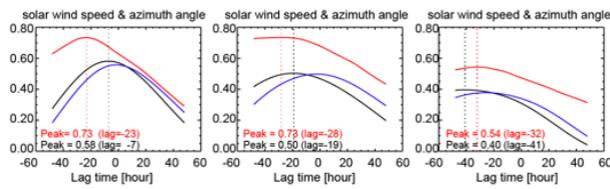


図 4: 各年の相関係数の時間発展

いと思われる。

・今回は CME の少ない太陽活動極小期の 2007 年～2009 年での解析を行ったので、シミュレーション結果をある程度再現することができた。しかし、太陽が活動的になると CME が増加し精度が下がることが予想されるため、CME のモデルと結合して精度を上げるのが今後の課題となっている。

## 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通りである。

- ・2010 年以降などの、太陽活動極小期以外ではどのような相関を示すのかを調べ、その時間発展を示す。
- ・相関が弱くなる時間に着目し、その時間の太陽で実際に発生していた現象と比較するなどして、その要因を探る。
- ・密度や温度についても同様に行い、よりモデルの精度を上げるための解決策を探る。