

平成 22 年 3 月 30 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20740286

研究課題名 (和文) コロナガス大規模噴出現象の 3 次元磁気流体シミュレーションと太陽風データ同化

研究課題名 (英文) Magnetohydrodynamic Simulation of Coronal Mass Ejections

研究代表者

片岡 龍峰 ( KATAOKA RYUHO )

東京工業大学・大学院理工学研究科・特任助教

研究者番号：90462671

研究成果の概要 (和文)：

コロナ質量放出の 3 次元磁気流体シミュレーションコードを開発した。太陽風観測データにもとづいて構成した背景風中に、太陽活動領域の磁場データによってパラメタライズされたスフェロマック型の磁気雲を、コロナグラフ観測と一致する速度で内側境界に導入することで、磁気嵐を引き起こす強い南向き磁場を再現可能なコロナ質量放出の伝播モデルを提唱した。

研究成果の概要 (英文)：

Magnetohydrodynamic simulation code of coronal mass ejections (CMEs) were developed. Spheromak-type magnetic cloud is parameterized based on the magnetic field data of Sun's active region, and is introduced into the realistic background solar wind constructed from the solar wind observations. This CME propagation model is capable of reproducing the strong southward magnetic field driving the Earth's magnetic storms.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,800,000	540,000	2,340,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学

キーワード：太陽地球システム・宇宙天気

## 1. 研究開始当初の背景

米国のステレオ探査機による新たな太陽・太陽風観測データも得られ始め、磁気嵐の予測が可能でコロナ質量放出(CME)モデリングが世界的に期待されていた。磁気嵐を予測するには、CMEに伴う磁場も取り入れた新しいモデリング手法を開発する必要があった

が、太陽磁場の情報のみから CME 内部の磁場を正確に推定することは困難とされていた。そこで視点を改めてデータ同化手法などを最大限に利用し、CME の伝播を正確に再現することで、背景太陽風を CME が掻き分けることで発生する 3 次元磁場の正確な再現を目指した。

## 2. 研究の目的

磁気嵐を予測可能な太陽風 CME モデリングは、今も宇宙天気分野の難題とされている。その主因は、CME に伴う磁場モデリングの困難さにある。太陽風の磁気流体モデリングと、CME を打ち出す磁気流体モデリングの多くは独立して研究が行われており、CME 内部の磁場構造と、背景太陽風の磁場構造の相互作用を同時にバランス良く 3 次元磁気流体シミュレーションで解く手法には常套手段が存在せず、様々な試行錯誤が繰り返されている。

磁気嵐は、数時間以上継続する強い南向きの惑星間空間磁場によって引き起こされることが知られている。そして、強い磁気嵐に限れば、磁気嵐を引き起こす強い惑星間空間磁場は、ほぼ全て CME に伴うものであることも知られている。つまり、強い磁気嵐の予測となると、地球における太陽風プロファイルの中でも、太陽風スピードのみならず、CME に伴う惑星間空間磁場の絶対値と方向を再現する必要があり、その手がかりとなる太陽・太陽風データも非常に限られているため、定量的なモデリングは困難を極める。

そこで本研究では、太陽風の 3 次元磁気流体シミュレーションと、太陽・太陽風観測データのデータ同化を行うことによって、磁気嵐の予測を可能にする、つまり地球での惑星間空間磁場観測データを定量的に再現することを目的とする。

## 3. 研究の方法

ひので衛星による詳細な磁場データを用いた初期 CME 磁場のパラメタライズ、コロナグラフ観測と一致する CME 放出手法、太陽風の惑星間空間シンチレーション観測を用いた背景風の構成、太陽の大規模な磁場観測の全てをバランス良く組み合わせることで、あらゆるデータを定量的に再現する CME 伝播磁気流体モデルを完成させ、その結果として地球位置での惑星間空間磁場観測を定量的に再現する。

本研究で解くべき磁気流体方程式は、以下の通りである。

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \rho \\ \rho \mathbf{v} \\ e \\ \mathbf{B} \end{pmatrix} = -\nabla \cdot \begin{pmatrix} \rho \mathbf{v} \\ \rho \mathbf{v} \mathbf{v} + p_t \mathbf{I} - \mathbf{B} \mathbf{B} \\ (e + p_t) \mathbf{v} - \mathbf{B} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{v}) \\ \mathbf{v} \mathbf{B} - \mathbf{B} \mathbf{v} \end{pmatrix}$$

ただし

$$p_t = p + \frac{B^2}{2}, e = \frac{\rho v^2}{2} + \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{B^2}{2}$$

ここで、 $\rho, \mathbf{v}, p, \mathbf{B}$  はそれぞれ密度、速度、圧力、磁場である。 $\gamma$  は比熱比で、本研究では 5/3 とする。磁気流体方程式のリーマン解法としては、最新の HLLD 法を用いる。内側境界に与える必要がある密度と温度は、速度の関数として経験則から与える。CME は時間変化する内側境界として、スフェロマック型の解析解で与えられる 3 次元磁場構造を一定のスピードで外に打ち出す方式を選ぶ。

スフェロマック磁場は極座標を用いて、解析的に次のように表現される磁場構造である。

$$B_r = 2B_0 \frac{j_1(\alpha r)}{\alpha r} \cos(\theta)$$

$$B_\theta = -B_0 (j_1(\alpha r) + \alpha r j_1'(\alpha r)) \sin(\theta)$$

$$B_\phi = B_0 j_1(\alpha r) \sin(\theta)$$

ここで  $j$  はベッセル関数であり、パラメタ  $\alpha$  はスフェロマックの半径  $a$  の関数として表される。実際の黒点付近の活動領域にしても CME 磁場にしても、このような理想的な磁場で近似できる保障は特にない。しかしながら、太陽の磁場観測から導出可能な量である磁気ヘリシティから  $a$  と  $B_0$  を自然に制限でき、太陽風シミュレーションへの投入も可能なため、この解析的な CME 磁場モデルによって太陽風プロファイルの再現性が、どのイベントでも合理的となれば、磁気嵐の宇宙天気予報実現へ向けた 1 ステップとしての貢献は大きい。

本研究での CME モデリングのターゲットのひとつとして、ひので衛星のベクトル磁場データが利用可能な 2006 年 12 月 13 日の CME イベントを選ぶ。この CME イベントでは、最大級の X3.4 フレアが発生しており、CME のみかけのスピードも最大級の 1774 km/s、磁気嵐の規模も大きく  $Dst = -146$  nT であった。地球を CME の一部が通過している証拠として、ゆっくりと磁場の向きが回転する低温のプラズマも観測されている。

宇宙天気予報への応用も目指すため、低解像度のシミュレーションを、リアルタイムで得られる太陽データを用いて自動的に運用し、リアルタイムの太陽風観測データと比較検討することにも挑戦する。

#### 4. 研究成果

リアルタイム数値宇宙天気予報を実現するための基礎研究を行うことも、本研究の目標の一つであったが、リアルタイムで取得される実太陽データに基いた境界条件を用いて、1年間以上にわたって自動的に運用可能な太陽風シミュレーションコードを開発し、運用に成功した。この結果は、動的な境界条件による数値宇宙天気予報の先駆けであり、JpGUにおいて招待講演も行った。

CMEの入力方法については、データ同化手法も含めて、特に磁場の入力が必要な研究課題として残されたが、ひとつの新たな手法として、スフェロマック型の磁場をパラメタライズして用いるCME入力手法を開発した。その結果、2006年12月の磁気嵐を引き起こす強い南向き磁場を、ひので衛星の太陽磁場データに基いて再現することができ、国際学術誌 *Journal of Geophysical Research* に発表した。

また、スフェロマック型の磁場を導入する観測的な根拠として、太陽活動領域と太陽風の磁気雲のヘリシティを比較する統計解析を共同研究し、その結果を国際学術誌 *The Astrophysics Journal* において発表した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

(1) Yamamoto, T. T., R. Kataoka, and S. Inoue (2010), Helical lengths of magnetic clouds from the magnetic flux conservation, *The Astrophysics Journal*, 710, 456-461. 査読有

(2) Kataoka, R., T. Ebisuzaki, K. Kusano, D. Shiota, S. Inoue, T. Yamamoto, and M. Tokumaru (2009), Three-dimensional magnetohydrodynamic (MHD) modeling of the solar wind structures associated with 13 December 2006 coronal mass ejection, *J. Geophys. Res.*, 114, A10102. 査読有

[学会発表] (計10件)

① Kataoka, R., Space weather forecast and solar energetic particle modeling, IRCS international symposium "Solar Energetic Particles: Origin and Environmental Impact", Kyoto, Jan

12-14, 2010.

② 片岡龍峰, 三好由純, 最強の放射線帯嵐を駆動する太陽風構造, 日本地球惑星科学連合2009年大会, 千葉, 2009年5月16日-5月21日. (招待講演)

③ 片岡龍峰, 草野完也, 塩田大幸, 井上諭, 宇宙天気モデリング: コロナ質量放出の惑星間空間伝播, 日本物理学会第64回年次大会, 東京, 2009年3月27-30日.

④ 片岡龍峰, 太陽から地球までの宇宙天気シミュレーションと予報, 太陽圏シンポジウム, 名古屋, 2009年1月28日. (招待講演)

⑤ Kataoka, R., Y. Miyoshi, and K. Hayashi, Numerical space weather forecast of the solar wind and radiation belts, AGU Fall Meeting 2008, San Francisco, Dec 15-19, 2008.

⑥ 片岡龍峰, 三好由純, 林啓志, 伊藤大晃, 藤木謙一, 徳丸宗利, Numerical space weather forecast of the solar wind and radiation belts, 第124回地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会, 仙台, 2008年10月9-10月12日.

⑦ Kataoka, R., Y. Miyoshi, K. Hayasi, Numerical space weather forecast of the solar wind and radiation belt, 第32回極域宙空圏シンポジウム, 東京, 2008年8月4-5日. (口頭発表)

⑧ Kataoka, R., and Y. Miyoshi, Numerical space weather forecast of the solar wind and radiation belts, AOGS 2008 5th Annual General Meeting, Busan, Korea, June 16-20, 2008. (Invited)

⑨ 片岡龍峰, 三好由純, 戎崎俊一, 数値宇宙天気予測: 太陽風放射線帯モデル, 日本地球惑星科学連合2008年大会, 千葉, 2008年5月25日-5月30日. (招待講演)

⑩ Kataoka, R., and Y. Miyoshi, Extreme flux enhancement of killer electrons at geosynchronous orbit, Space Weather Workshop, Boulder, Colorado, Apr 29-May 2, 2008. (Poster)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

片岡 龍峰 (KATAOKA RYUHO)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・特  
任助教  
研究者番号：90462671

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし