A 204

磁気圏Global MHDシミュレーションによる ビジュアルデータマイニング* —磁力線の時間追跡と磁気リコネクション発生領域の抽出—

松岡 大祐[®] (海洋研究開発機構), 村田 健史 (情報通信研究機構),

藤田 茂 (気象大学校), 田中 高史 (九州大学)

Visual Data Mining of Magnetospheric Global MHD Simulation — Tracking of Magnetic Field Line and Extraction of Magnetic Reconnection Region —

Daisuke MATSUOKA, Ken T. MURATA, Shigeru FUJITA and Takashi TANAKA

ABSTRACT

Solar-terrestrial physics is the study of the plasma dynamics in the geo-space including the Sun, solar wind, Earth's magnetosphere and ionosphere. Recently, large-scale numerical simulations to study magnetospheric dynamics have been done by using supercomputer. However, it is difficult to understand 3-dimensional configurations and time-dependent change of magnetic field line.

In this study, we perform visual analysis by using high temporal and spatial resolution data and detect magnetic reconnection region in the Earth's magnetosphere. Furthermore, we succeed to visualize magnetic reconnection via time-dependent trace of magnetic field line.

Keywords : Space plasma, MHD, Magnetic field line, Magnetic reconnection, Volume tracking

1. 結 論

太陽地球系物理学は、太陽が地球周辺の電磁環境（地球磁気圏や電離層）に与える物理過程の解明を目的とした研究分野である。人工衛星による観測的研究と数値シミュレーションによる理論的研究が主な研究手法である。特に数値シミュレーションは、近年の計算機技術の飛躍的向上にともない、より現実のモデルに近い大規模かつ高精度な3次元計算が主流となってきた。

地球磁気圏のダイナミクスには、プラズマのエネルギーとともに磁場のエネルギーが大きく影響する。そのため、磁力線トポロジーの時間変化の解析は、太陽風・惑星間空間磁場（IMF: Interplanetary Magnetic Field）と地球磁気圏ダイナミクスの相互作用を理解する上で有効な手法である。特に、磁気リコネクションと呼ばれる磁力線のつながりかえ現象は、磁気嵐の発生や磁気圏対流を引き起こす原因として知られている¹⁾。磁気リコネクションが発生する領域を抽出する手法は、2次元平面上においてはプラズマの流れや電場を解析する等の手法によって実現されてきた²⁾。しかし、3次元空間上においては、その複雑さから実現されていない。

磁力線はプラズマの流れとともに運動する性質（磁場凍結の定理）を持っているため、磁力線の時間変化を正確に追跡するためには速度場に沿った時間トレースが必要である。これは、シミュレーションの時間間隔と同程

度の高時空間分解能データ解析が必要不可欠である。しかし、数10～100万ステップを超える大規模データ可視化の困難さから、ある程度の時間間隔で間引いたデータを解析しているのが現状である。

本研究では、磁気圏全体の磁気流体力学（MHD: Magnetohydrodynamics）シミュレーションを実行した結果に対して超高時間分解能での可視化解析を行うことにより、磁気リコネクションの発生領域を推定する。また、磁力線の時間トレースを行うことにより、推定した領域で磁気リコネクションが発生しているかどうかの検証を行う。

2. Global MHD シミュレーション

本研究では、MHD方程式をTVDスキームによって差分化したシミュレーションコードを用いた³⁾。地球磁気圏の形状に適合させた変形球座標系の非直行構造格子（格子点数：鉛直方向140×緯度方向120×経度方向89）を用いている。データは磁場ベクトル、電流ベクトル、流速ベクトル、圧力、プラズマ密度に加え、座標値も合わせると合計14成分を出力した。速度場に沿った流体粒子の時間トレースを行うため、シミュレーションの時間間隔と同様の0.03秒間隔でデータを出力した。本研究では1時間程度の現象を対象とするため、合計で約1TBのデータを出力した。

Fig.1 Visualization of 3D separatrix.

3. 磁力線の並列可視化手法と環境

本研究では、前後関係のある時系列データを効率的に可視化処理するために、並列パイプライン処理を用いて磁力線の可視化および後述する3次元セパトロリクス（3次元セパトロリクス）の可視化を行った。また、可視化環境としてグリッドデータファームの参照実相であるGfarm（ファイルシステムノード8台）を用いた。

4. 磁気リコネクション発生領域の抽出

地球磁気圏における磁力線は、その両端の位置（起源）によってopen（Sun-Earth）、closed（Earth-Earth）、detached（Sun-Sun）の3種類に分類される。本研究では、シミュレーション空間中の100×100個の点に対して、その点を通る磁力線が3種類のうちのどれに分類されるかを計算した。次に、種類ごとに適当な値を定義し、磁力線トポロジーの3次元分布の境界面（セパトロリクスと呼ばれる）を等値面として可視化した（Fig. 1）。ここで、濃い灰色で示す面はclosed磁力線とopen磁力線の境界、薄い灰色で示す面はopen磁力線とdetached磁力線の境界を表わしている。

生成した等値面（セパトロリクス）は、磁力線のトポロジー変化が起きなければ次の時刻においては流速に沿って移動するため、計算によって予測することが可能である。しかし、実際には磁気リコネクション等のトポロジー変化によってセパトロリクスは予測とは異なる形状に変化する。本研究では、この性質を利用し両者の差分をとることによって磁力線トポロジーが変化した領域、すなわち磁気リコネクションの発生領域を推定した。

5. 磁力線トレースによる検証

推定した磁気リコネクション発生領域において、実際に磁力線のトポロジーが変化していることを確かめるためには、時間変化する場において同じ磁力線を追跡する

Fig.2 Magnetic reconnection.

必要がある。そこで本研究では、時間変化する速度場に対して無質量の流体粒子を放出し、その流体粒子を始点として磁力線の時間変化の様子を可視化した。Fig. 2に示すように、時間経過とともに磁力線のトポロジーが変化し、detachedな磁力線からopenな磁力線につながりかわっていることが分かる。図中の面は等圧力面を表わす。同様の手法を、前節で推定した磁気リコネクション発生領域に対して行うことにより、磁気リコネクションが実際に起き、磁力線のトポロジカルな形状が変化していることを確認することができた。

6. 結論

本研究では、磁気リコネクションにともなう磁力線トポロジーの時間変化を解析するために、高時空間分解能データを用いた3次元セパトロリクスの可視化とボリュームトラッキングを行った。実際の3次元セパトロリクスと速度の時間トレースを用いた予測値を比較することによって、磁気リコネクション発生領域を推定することができた。また、磁力線の時間トレースを行うことで、推定した領域で現象が発生していることを検証した。

参考文献

- 1) Hones, E. W., Jr., Baker, D. N., Bame, S. J., Feldman, W. C., Gosling, J. T., McComas, D. J., Zwickl, R. D., Slavin, J. A., Smith, E. J., and Tsurutani, B. T.: Structure of the magnetotail at 220RE and its response to geomagnetic activity, *Geophysical Research Letter*, Vol.11 (1984) pp. 5-7.
- 2) Ogino, T., Walker, R. J., Ashour-Abdalla, M., and Dawson, J. M.: Magnetic flux ropes in 3-dimensional MHD simulations, *Physics of Magnetic Flux Ropes*, *Geophys. Monogr. Ser.*, 58, edited by C. T. Russell, E. R. Priest, and L. C. Lee (1990) pp.669-678.
- 3) Tanaka, T.: Finite volume TVD scheme for magnetohydrodynamics on unstructured grids in Space plasma simulation, *Lecture notes in physics*, edited by J. Buchner et al., Springer (2003) pp. 275.