

太陽地球環境システムのシミュレーション研究

草野 完也（名古屋大学宇宙地球環境研究所）

1. 本研究の目的

太陽活動に起因する地球環境の変動は人類社会にも大きな影響を与えてきた（図1）。例えば、樹木年輪中の宇宙線生成核種の分析から千年スケールの環境変動が太陽活動変動と良い相関を持つことが知られている。しかし、太陽活動が地球環境に影響を与えるメカニズムは未解明である。また、巨大太陽フレアなどの爆発現象は、現代社会にも多様な影響と被害を与えると考えられているが、その発生を事前に予測する技術は未成熟である。本研究の目的は、太陽と地球からなる環境システムの長期及び短期変動を再現することができるシミュレーションを開発すると共に、多様な観測データとの比較を通して太陽地球環境システムの変動メカニズムを解明することにある。同時に、太陽活動の予測モデルを開発し、太陽地球圏環境変動に備える社会基盤の構築に貢献する。

2. 研究計画

本研究では下記に示す太陽と地球システムのシミュレーションを開発し、これを統合することで目的を達成する。

- ・太陽活動シミュレーション：黒点の11年周期に代表される太陽周期活動は太陽内部の微分回転と子午面循環によって磁束の再生成が繰り返し行なわれることに原因があると考えられている。そこで、太陽対流層の回転循環流に磁場のフィードバック効果を含んだ太陽周期活動モデルを独自に開発し、太陽周期活動変動の原因を探る。また、衛星・通信・電力システムなどのインフラに大きな影響を与える太陽面爆発現象の発生メカニズムを解明し、これを予測するため、観測データに基づく太陽フレアとコロナ質量放出のシミュレーションを実現する。

- ・地球システムシミュレーション：大気海洋結合循環モデルに太陽活動シミュレーションから得られる太陽放射スペクトル変動を導入することで、太陽活動の長期変動がどのよ

うな物理プロセスを通して最も気候に影響を与えるのかを明らかにする。また、先進的な雲微物理モデルである超水滴法を使い、大気電離を通して銀河宇宙線が雲に与える影響を第一原理から考察する。

これらの研究を新学術領域研究「太陽地球圏環境予測(PSTEP)」と協力し、全国的なプロジェクト研究として実施する。

3. 本年度の主な成果

3.1. 磁気リコネクションの高速化の解明

太陽フレアやコロナ質量放出等の爆発的な太陽活動は、太陽コロナ磁場に蓄積された自由エネルギーが突発的に解放されることで発生する。この磁気エネルギーの爆発的な解放には磁力線のつなぎ換えである磁気リコネクションが重要な役割を果たしていると考えられている。しかし、なぜ磁気リコネクションが爆発的に進行するのか、その高速化メカニズムはこれまで理解されていなかった。

我々はこの問題を解決する為、地球シミュ

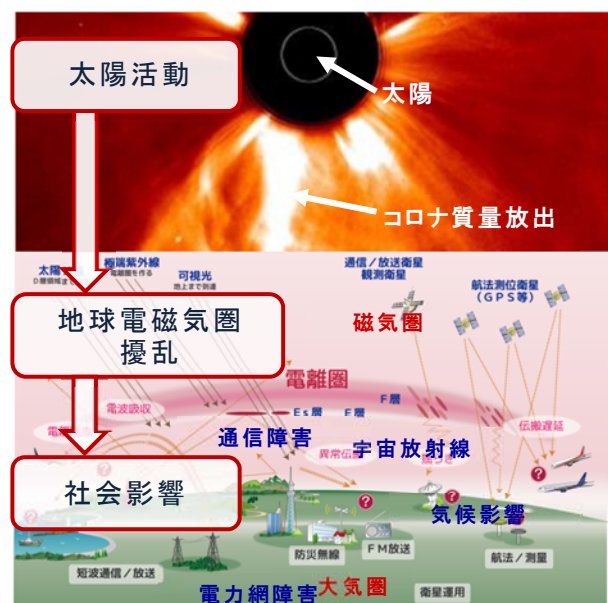


図1：本研究が手掛ける太陽地球環境システムとその社会影響。上図：2012年7月に観測された太陽から放出される巨大なコロナ質量放出の衛星観測像。下図：地球において現れる太陽地球圏環境変動の様々な社会影響。

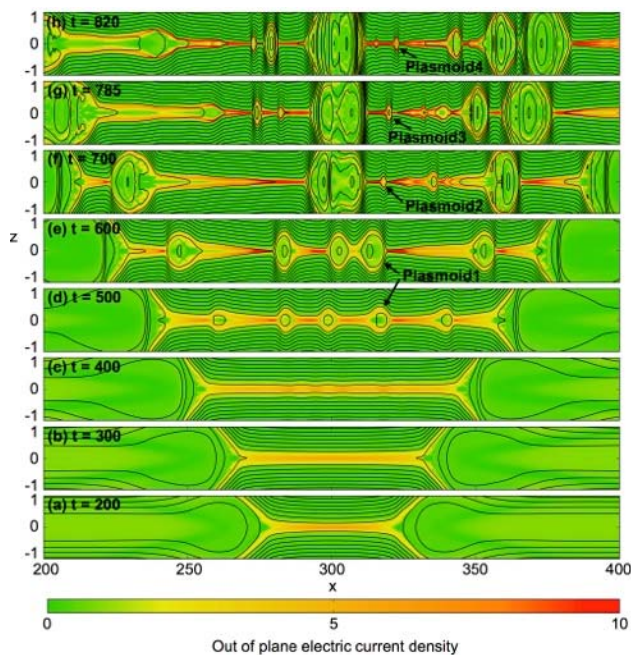


図2：2次元磁気リコネクションシミュレーションにおける電流強度と磁束構造の時間発展。電流層で磁気磁場が形成されることに伴い局所的に電流密度が増加し、リコネクションが高速化する。

レータの高速性を活かし、磁気リコネクションのこれまでに無い精密な電磁流体力学（MHD）シミュレーションを実施した。その結果、電流層が自発的に不安定化し、磁気島を形成することで、衝撃波を伴った高速リコネクションが実現することを見出した（図2）（Shibayama et al. 2015）。さらに、3次元系では電流方向に構造が不安定化することで、乱流的な振る舞いを示すことも確認した。

これらの結果より、従来の定常理論では考慮されていなかった複雑で動的な構造がリコネクションの高速化にとって重要な役割を果たすことを初めて明らかにすることができた。

3.2. 太陽フレアトリガ機構の解明

太陽フレアの発生を予測することは大規模な宇宙天気被害を防ぐために重要であるが、現在の予測信頼性は高くない。我々は太陽フレアが強く捻じれたコロナ磁場中に形成される小規模な磁場がトリガとなって発生するというモデルを提案している（Kusano et al. 2012）。これを検証するため、太陽観測衛星「ひので」で観測された精密な太陽表面磁場を用いて3次元コロナ磁場を数値的に構築すると共にその非線形不安定性を解析した。その結果、特定の小規模な磁場がトリガとなって太

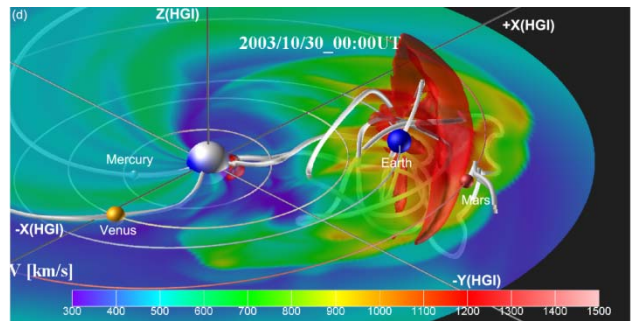


図3：2003年10月28日に発生した巨大太陽嵐（コロナ質量放出）が地球周辺を通過したときの磁力線と速度場の3次元描像。背景の色は速度分布を表す。コロナ質量放出の前面の衝撃波に伴う高速のプラズマの流れ（秒速1200 km）の領域が、赤い曲面で3次的に描画されている。座標の原点に太陽があり、色をついた球体は、惑星の位置を示し、惑星の周囲につながる磁力線が白いチューブで示されている。

陽フレアが実際に発生したことを確認した（Inoue et al. 2016）。この成果は観測データと数値シミュレーションによってフレア発生を予測するための基礎となるものである。

3.3. コロナ質量放出のシミュレーションによる磁気嵐予測の試み

太陽面で発生した爆発の結果としてコロナ質量放出が発生し、磁束を伴う巨大なプラズマが惑星間空間に放出される。これと地球磁気圏の衝突は磁気嵐発生の原因の一つとなるため、いつ、どのようなプラズマと磁場が太陽コロナから放出され、地球に到達するのを探ることは社会的にも重要である。我々は惑星間空間全体の電磁流体力学を計算することができる3次元シミュレーション（図3）を開発し、これに磁場を伴うコロナ質量放出を導入することで、磁気嵐の発生を予測するために必要な太陽風の変動を計算することに成功した（Shiota & Kataoka 2016）。

参考文献

- Shibayama, T, Kusano, K., et al., Phys. of Plasmas (2015) 22, 100706.
- Inoue, S., Hayashi, K., and Kusano, K., Astrophys. J. (2016) in press.
- Kusano, K., Bamba, Y., et al., Astrophys. J. (2012), 760, 31.
- Shiota, D., and Kataoka, R., Space Weather (2016) in press.