

大規模数値計算による惑星間空間磁場の南北不連続面に伴う磁気圏構造変化の解明

橋本 翼

九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻

1 はじめに

地球には常時、太陽から惑星間空間磁場 (Interplanetary Magnetic Field; IMF) が吹き続けており、地球の磁場と相互作用を起こしている。その相互作用の一つに磁力線つなぎ代わり現象 (リコネクション) があり、これにより太陽の磁場と地球の磁場が接続されることで、地球に太陽のエネルギーが流れ始める。電離圏や磁気圏での諸現象はリコネクションを契機に発動するため、IMF の状況に応じたリコネクションの発生有無やそれにとまなうプラズマ構造変化の理解は、この分野の基盤となり学術の進展に貢献する。

本研究は、特に IMF の向きが北向きから南向きに不連続に変化した際の状況をシミュレーションで再現している。先行研究では、この不連続面がバウショックに到達したとき、IMF 同士でリコネクションを起こすことが分かっており、磁気圏の磁場構造やプラズマ分布を大きく変化させることを明らかにしている (Maynard et al., 2002[1]; Samsonov et al., 2018[2])。そこで現状の課題としては、IMF 同士のリコネクションにより発動する磁気圏への影響を定量的調査すると同時に、その状況時の観測データとシミュレーション結果を比較することにより、IMF 同士のリコネクションが現実的に発生している事を検証する必要がある。

数値シミュレーションは地球周辺の宇宙環境 (太陽風—磁気圏—電離圏) を複合的に計算および再現が可能であるが、各物理量をグリッドごとに短いタイムスケールで計算するためには大規模な計算処理能力が必要になる。そのため、スーパーコンピュータを利用し研究を実施した。

2 研究手法

本研究では、非構造格子 3 次元シミュレーション

コード、REProduce Plasma Universe (REPPU) コード (Tanaka, 2015[3]) を用いた。磁気圏は電磁流体力学 (MHD: MagnetoHydroDynamics) 基本方程式で計算され、解像度は約 $300 \times 300 \times 300$ 、物理量は 50 種類の計算を行っている。さらに、ハイブリッド並列を組み高速化を図りながら、スーパーコンピュータを用い計算を行った。

3 研究結果

リコネクションにより発動する磁気圏への影響の定量的調査について、リコネクションが発生すると、磁力線が大きく曲げられ曲率を持つため、それが元に戻ろうとするときに発生するアンペール力 (磁気張力部分) がプラズマを加速させる。シミュレーションでは、この磁気張力により加速された、周囲より 25 km/s ほど早いプラズマを再現することができた (図 1)。また人工衛星 (GEOTAIL) の観測データでも、IMF が北向きから南向きに不連続に変化した際に、 75 km/s ほど加速されているプラズマを確認できた (図 2)。これらの結果から、シミュレーションで再現された IMF 不連続面におけるリコネクションは現実でも発生していることを明らかにした。

また本研究では、IMF リコネクションの発生頻度が少ないことも明らかにした。上記の結果より、IMF 同士のリコネクションでは数十 km/s ほどの速度上昇が確認されたが、この値は IMF と地球磁力線のリコネクションに比べると 1-2 オーダー小さい値である。これは IMF リコネクションが発生する磁気シース領域の磁場強度が弱いことに由来し、磁力線に垂直なプラズマ速度をシミュレーションで再現すると、この IMF リコネクションが間欠的に生じていることが明らかになった (図 3)。

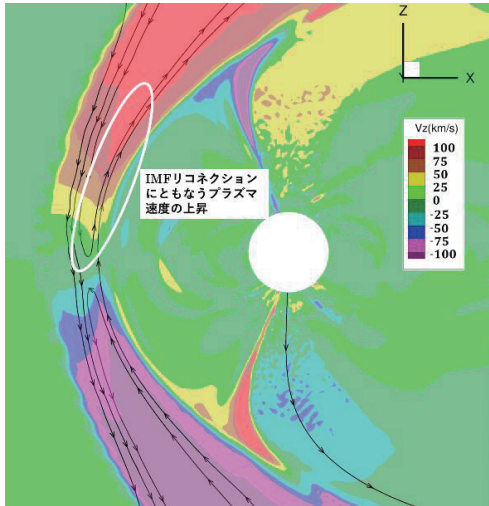


図1: IMF 同士のリコネクションにともなうプラズマ加速の可視化。ラインは磁力線を示し、背景の色は北向きのプラズマ速度を示す。

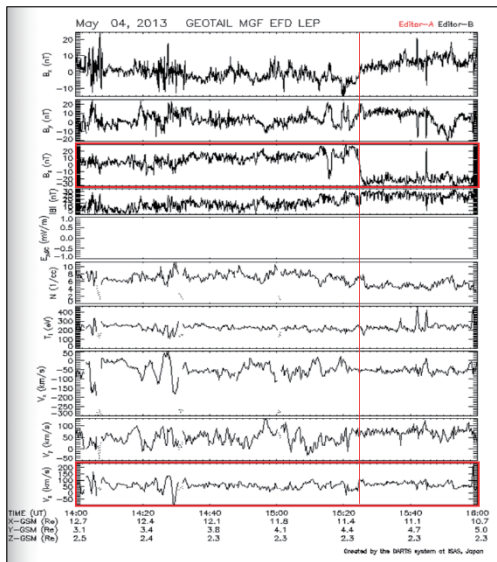


図2: 2013年5月4日、IMFの方向不連続がGEOTAIL衛星を通過した際の観測データ。15:24:00-15:25:00の間に磁場の方向が反転し、同時にプラズマ速度が上昇している。

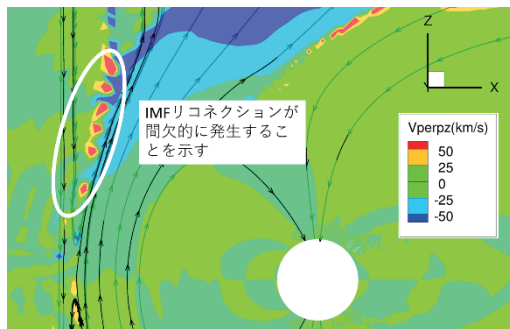


図3: ラインは磁力線を示し、背景の色は磁場に垂直でz方向のプラズマ速度を示す。IMFリコネクションにともなう間欠的な速度分布が現れている。

4 おわりに

本研究では、IMFが北向きから南向きに不連続に変化したときに生じるIMFリコネクションについて、大きく二つのことを明らかにした。一つは、シミュレーション結果と人工衛星観測データの比較により、加速されたプラズマ速度が概ね一致し、現実的にも発生している現象だと示した。また、このIMFリコネクションは間欠的に生じ、シミュレーションでその構造を再現することができた。今後は、IMFリコネクションが電離圏などの地球に近い環境において発動する局所的ダイナミクスの可視化を行い、宇宙環境（太陽風—磁気圏—電離圏）の結合研究として発展させていく。

5 謝辞

本研究の計算の一部は、京都大学のスーパーコンピュータ共同研究制度（若手・女性奨励枠）に基づくものであり、ここに感謝の意を表す。

6 参考文献

- [1] Maynard, N. C., Sonnerup, B. U. Ö, Siscoe, G. L., Weimer, D. R., Siebert, K. D., Erickson, G. M., et al. (2002). *Journal of Geophysical Research*, 107(A12), 1456.
- [2] Samsonov, A.A., Sibeck, D.G., Dmitrieva, N.P., Semenov, *Geophys. Res. Lett.* (2017)
- [3] Tanaka, T. (2015). In *Auroral Dynamics and Space Weather* (pp. 177–190). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.