

弱磁場小型天体のプラズマ環境に関する粒子シミュレーション

臼井英之 神戸大学 大学院システム情報学研究科

研究目的

本研究の目的は、磁場を持つ小惑星や月面磁気異常領域など、地球よりも十分弱い磁場を持つ小型天体と太陽風の相互作用により形成される小規模磁気圏をParticle-In-Cell法を用いた3次元電磁粒子シミュレーションにより再現し、小型磁気圏形成や磁気圏各領域でのプラズマ現象を粒子の運動論レベルで定量的に理解することである。今年度は、マグネトポーズ高速電子流による電場および密度擾乱について電子ビーム不安定性の観点から定量的な解析を電子の速度分布関数や1D粒子シミュレーションによって詳細解析を行った。

研究方法

本研究では、宇宙飛行体プラズマ環境解析用コードEMSESを主として用いた。EMSESはParticle-In-Cell法による電磁粒子シミュレーション手法を採用している。また、テスト粒子シミュレーションにより速度分布関数および粒子軌跡の解析を実施した。

研究結果

小天体固有磁場の磁気ダイポール中心から磁気圧と太陽風動圧が釣り合う点までの距離を D_p とし、太陽風イオン慣性長 L_i とする場合、本研究では、図1に示すように、 $D_p/L_i = 1$ となる磁場を持つ球体をシミュレーション空間に設定し、南向きIMFをもつ太陽風との相互作用を調べた。シミュレーション結果から、カスプやマグネトポーズをもつ小型磁気圏の形成、赤道面朝方々間での密度非対称性やマグネトポーズにおける電子の高速フラックスが確認された。特にポーズでの電界により加速された電子がマグネトポーズに沿ってメアンダリング運動により赤道面朝方に移動することを明らかにした。図3に昼間側マグネトポーズの夕方側での電子速度分布関数を示す。これよりy軸の正の方向に加速されたビーム成分が確認できる。また、同じ領域において、時間的及び空間的な電子密度擾乱が見られた。電子ビーム成分と密度擾乱の関係について以下で考察する。

考察

粒子ジャイロ半径に対して十分大きな地球磁気圏の境界層電流は粒子のドリフト運動が主に担っているが、小天体磁気圏の場合は、太陽風イオン、電子のサイクロトロン運動やその半径が磁気圏形成に対して無視できない。マグネトポーズでの電子挙動について図2に示す。左図に示すようにテスト粒子シミュレーションにより、マグネトポーズの電界によってx方向に加速された電子が $B=0$ のラインに沿ってメアンダリング運動をしながらy方向である朝方に移動していく様子が初めて確認できた。この電子の動きを速度分布関の観点から見ると、図3に示すように+y方向の電子ビームとして見える。一方、イオンは電子に比べて質量が大きいため、マグネトポーズによる電界加速やメアンダリング運動は見られない。マグネトポーズ夕方側では、この背景イオンの上を電子ビームがポーズに沿って流れることになる。この状況を1次元の粒子シミュレーションで再現して得られた電界プロファイルを図4に示す。シミュレーション結果から、電流駆動型静電不安定性が生じ、電界の発生、それにとまう電子密度擾乱が生じることが明らかとなった。シミュレーションで用いたプラズマ密度、ビーム速度をもとに計算した線形プラズマ波動成長率から最も成長する電界波長は、図4で得られる周期的な空間変動量とほぼ等しいことも確認できた。す

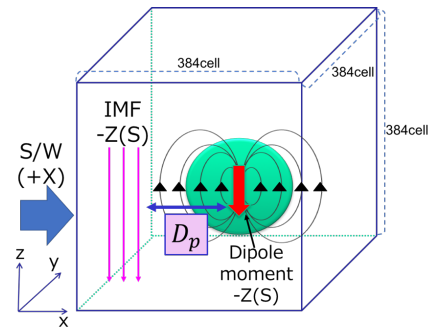


図1：3Dシミュレーションモデル

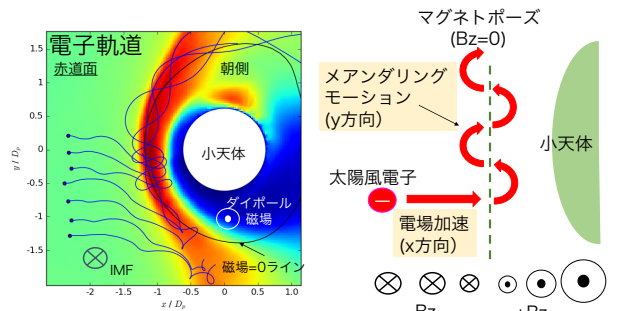


図2：昼間側マグネトポーズにおける電子挙動（赤道面）
左)、赤道面（右）での
イオンと電子のフラックスのベクトル分布

なわち、昼間側マグネトポーズでは、ポーズに垂直に加速を受け入射してきた電子がメアンダリング運動でポーズに沿った方向に向きをかえ、それがビーム成分となって夕方から朝方の方向に流れることによりプラズマ不安定性を引き起こし、マグネトポーズに沿って局所的な電界励起、それにもともなう電子密度擾乱を引き起こすことを明らかにした。

成果発表

- Hideyuki Usui, Yohei Miyake, Naoki Terada, Kanako Seki, Manabu Yagi and Yuto Katoh, Particle-in-Cell Simulation on the Electron Dynamics at the Dayside Magnetopause in a Small Magnetosphere, Poster, SM33D-3243, AGU 2019 San Francisco, Dec.2019. (Poster)
- Hideyuki Usui, Yohei Miyake, Wojciech J. Miloch, Keisuke Ito, Numerical Study of Plasma Depletion Region in a Satellite Wake, IEEE transactions on Plasma Science, Vol. 47, Issue 8, 3717-3723, DOI: 10.1109/TPS.2019.2918789 (Refereed paper)
- H. Usui, S. Oki, and Y. Miyake, Particle-in-cell Simulation Study on the Dayside Magnetopause in a Small-scale Magnetosphere, the AOGS 16th Annual Meeting , Singapore, 28 July-2 Aug, 2019. (Invited talk)
- H. Usui and Y. Miyake, Particle Simulation on Spacecraft-Plasma Interaction and its Application to Airless Bodies in Space, URSI-JRSM, Chofu, The University of Electro-Communications, Sept 5-6, 2019. (Invited talk)
- 臼井 英之, 相澤 紗絵, 八木 学, 村上 豪, BepiColombo SHOTS シミュレーションチーム, SHOTS simulations of Mercury's magnetosphere for the BepiColombo mission, 地球電磁気・地球惑星圏学会秋大会、熊本大学、2019/10/23-10/27. (Poster paper)
- H. Usui, S. Aizawa, L. S. Griton, M. Yagi, W. Exner, S. Fatemi, J. Amaya, J. Deca, N. André, V. Génot, D. Heyner, Murakami, F. Pantellini, BepiColombo SHOTS Project: A Comparative Study of Mercury's Magnetosphere Using MHD and Hybrid Particle Simulations, 惑星圏研究会, 2020年2月17日 (Poster)

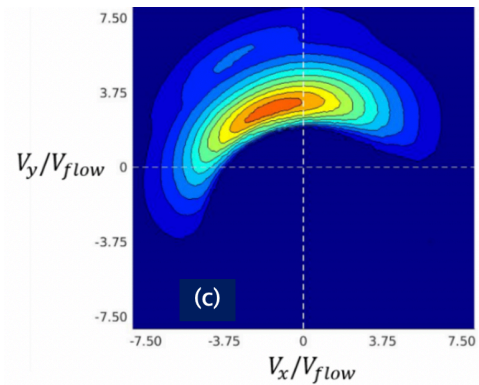


図 3 : 昼間側マグネトポーズ内側での電子速度分布関数

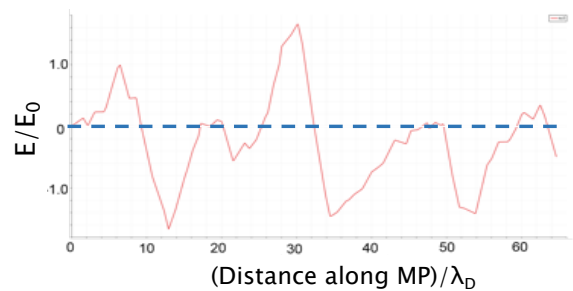


図 4 : 昼間側マグネトポーズに沿った電界の空間変動