

磁気セイル推進の開発へ向けた Hybrid PIC シミュレーション

代表者氏名： 松本 正晴（東京大学大学院情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻）
共同研究者： 大島 聡史（九州大学情報基盤研究開発センター），
片桐 孝洋（名古屋大学情報基盤センター）

太陽から噴出する高速の無衝突プラズマ流である太陽風を、人工的な磁気圏を展開することによって受け止め、宇宙機の推進力を得る磁気セイル推進が提案され研究が進められている。磁気プラズマセイル (Magneto-Plasma Sail, MPS) は、図 1 に示すように、探査機内に設置された超伝導コイルによって励磁された小規模ダイポール磁場を、人工的なプラズマ噴射によって広範囲に展開 (磁気インフレーション) させ太陽風を受け止めることで推進力の増大を狙う。MPS の推進特性には未だ不明な点が多く、その解明のためには宇宙機が作るダイポール磁場構造と太陽風との相互作用時に起きる物理現象を明確に把握する必要があるが、MPS で想定されている数十 km 程度の磁場構造スケールでは、太陽風プラズマ中のイオンの粒子的・運動論的效果が無視できないことから、電磁流体近似に基づくシミュレーションでは正確に現象を模擬できない。これはすなわち、磁気圏代表長と比較してイオン有限 Larmor 半径効果が支配的となり、プラズマ流の Magnetohydrodynamics (MHD) 的な描像からのずれが大きくなることによる。そこで本研究では、上記の物理効果を考慮できる 3 次元 Hybrid Particle-In-Cell (PIC) コードの開発と、それによる MPS の推力特性評価、ならびに、コードの大規模実行環境での計算性能の最適化を目的とした。

Hybrid PIC モデルの特徴は 1) 電子を慣性がない流体 (電子質量がゼロ) と仮定し 2) 系の代表的な Alfvén 速度が光速に対して十分低い (光速が無限大) と仮定することによって電子運動 (プラズマ振動, 電子サイクロトロン運動) の時間・空間スケールで起きる物理現象の影響を無視し、対象とする系のスケールをイオンの運動に合わせることが出来る点にあるが、本研究では、MPS システム全系を解析するため、大規模な計算環境において計算できる MPI/OpenMP による並列化コードを新たに開発した。計算例として代表的な計算条件における (a) プラズマ噴射無し, (b) プラズマ噴射有り ($\beta_{inject} = 4.16$), の条件での上流の太陽風数密度で規格化されたイオン数密度と磁力線分布を示す。(b) では、宇宙機 (内部境界) 周りのイオン数密度が (a) の場合と比較して高くなっており、(a) と比べて僅かながら、磁気圏は拡大していることがわかる (推力も増加する)。これは、プラズマ噴射によって宇宙機周辺に噴射量 (∇N) とプラズマ温度の関係で決まる反磁性電流が流れることにより磁気圏が拡大し、推力が増加することによる。本研究において、Hybrid PIC コードの基本部分は完成できたので、今後の課題としては、更なる大規模実行環境へ向けた分散並列環境における負荷不均衡の是正方法の導入や、幅広い噴射パラメータでの解析により MPS の推力増加の上限を探っていきたい。

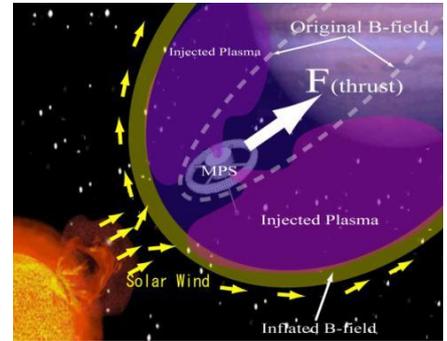
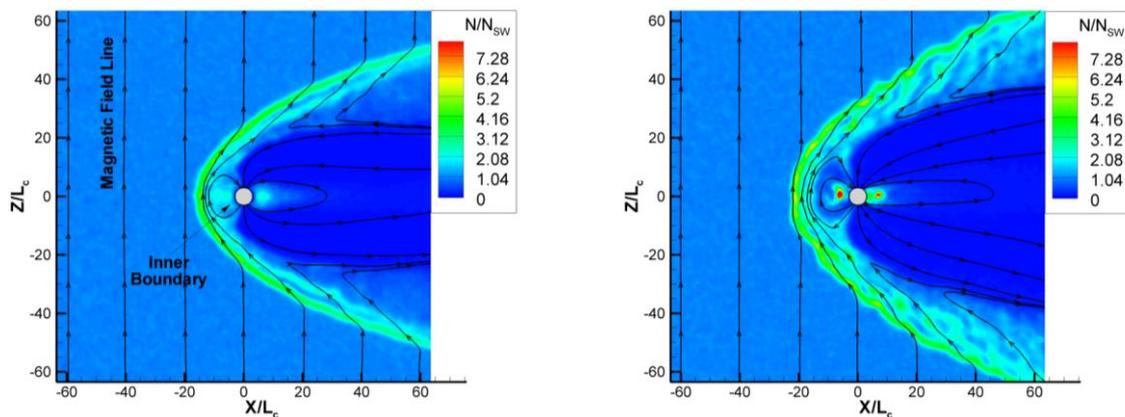


図 1 磁気プラズマセイルの概念図



(a) 噴射プラズマ無し

(b) $\beta_{inject} = 4.16$

図 2 $t\omega_c = 50$ 時の子午面 (xz 面) におけるイオン数密度と磁力線分布