

水星磁気圏内部における太陽風イオンダイナミクスの 3次元シミュレーション解析

Three-dimensional hybrid particle simulation for ions dynamics
in Mercury's inner magnetosphere

研究代表者： 臼井 英之（神戸大学 大学院システム情報学研究科 教授）
h-usui@port.kobe-u.ac.jp

研究分担者： 高村 彪丸（神戸大学 システム情報学研究科 大学院生（修士））
担当：計算機実験の実施、データ解析、結果の検討
三宅 洋平（神戸大学 システム情報学研究科 准教授）
担当：計算機実験結果の検討
岩本 昌倫（神戸大学 システム情報学研究科 特命助教）
担当：計算機実験結果の検討
松本 正晴（福島大学 情報基盤センター 准教授）
担当：ハイブリッド粒子シミュレーションコード提供

研究目的 (Research Objective):

本研究は、3次元ハイブリッド粒子モデルを用いたグローバルシミュレーションにより、太陽風と水星固有磁場との相互作用によって形成される水星磁気圏、とりわけ水星近傍の内部磁気圏構造および、そこでのイオンダイナミクスと電磁場構造の関係を明らかにすることを目的とする。

計算手法 (Computational Aspects):

本研究では、電子を質量0の流体、イオンをマクロ粒子群として扱うハイブリッド粒子モデルを用いた3次元グローバルシミュレーションを実行した。3次元シミュレーション空間に水星と水星磁場を模擬した磁気ダイポールモーメントをおき、シミュレーション境界から太陽風プラズマを流入させ、太陽風プラズマと水星固有磁場との電磁的な相互作用により形成される水星磁気圏を数値的に再現した。

研究成果 (Accomplishments) :

国際水星探査ミッション BepiColombo のフライバイ3の太陽風条件下でハイブリッド粒子シミュレーションを実施し、水星磁気圏の3次元描像をイオン密度、イオン電流、電場の観点から解析を行った。水星近傍の赤道面において、朝側および夕方側の両方に太陽方向に向かうイオン流が特徴的に見られた。この太陽方向に向かうイオン流は磁気圏尾部からのプラズマ圧力によるものと考えられ、この水星磁場を横切るイオンの流れにより水星近傍には水星磁場に垂直な方向にグローバルな電界が形成されることを確認した。この電界と水星磁場による $E \times B$ ドリフトによって、磁気圏

尾部から昼間側に向かうイオン流が説明できることを定量的に示した。また、マグネトポーズ近くの密度勾配の大きな領域では反磁性ドリフトも見られることを示した。一方、BepiColombo のフライバイ時に観測された高エネルギーイオン粒子は本シミュレーションでは再現されず、この乖離は、本シミュレーションの計算空間領域の制約によるものと思われるため、計算空間を拡大したシミュレーションが今後の課題である。また、観測される高エネルギー粒子は磁気圏尾部における磁気リコネクションに由来する可能性が高いことが示唆された。

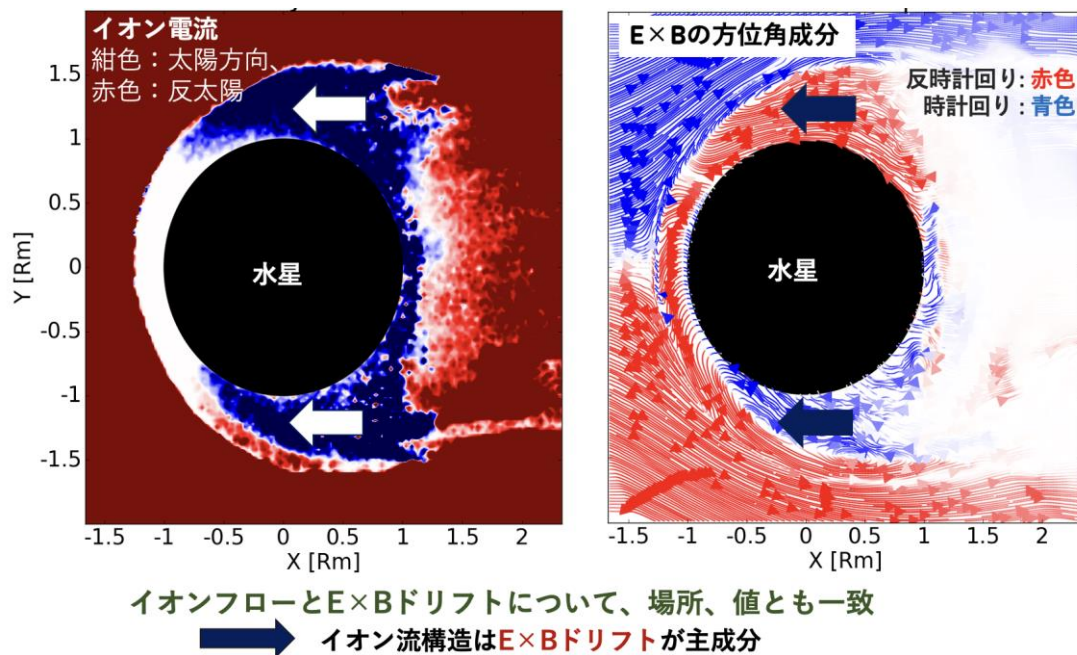


Fig 1: (左図) 赤道面でのイオン電流構造。水星近傍の紺色は太陽風方向に向かう電流であり、朝側、夕方側の双方に見られる。(右図) 水星磁場と励起された電場から計算した $E \times B$ ドリフト分布図。左図に示されたイオン流と $E \times B$ ドリフトは場所と値が一致することを確認した。

公表状況 (Publications) :

(口頭)

1. Toramaru Takamura, Hideyuki Usui, Yohei Miyake, Masaharu Matsumoto, Hybrid particle simulation for ions dynamics in Mercury's inner magnetosphere, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2025 年秋季年会 2025 年 11 月 25 日 (SGEPSS 優秀発表賞受賞)
2. 臼井英之, 高村彪丸, 三宅洋平, 岩本昌倫, 松本正晴, 水星磁気圏内部における太陽風イオンダイナミクスの 3 次元シミュレーション解析, 2025 年度 RISH 電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム 2026 年 3 月 5 日