

水星磁気圏の 3 次元大域的完全

電磁粒子シミュレーション

Global 3D EM full particle simulation for Mercury Magnetosphere

研究代表者：蔡東生（筑波大学システム情報工学研究科CS専攻）

dongscai@gmail.com

研究分担者：Sri Ekawati（筑波大学システム情報工学研究科CS専攻）

ekawati@cavelab.cs.tsukuba.ac.jp

担当： シミュレーション, データ解析, 可視化

研究目的 (Research Objective):

水星は太陽に一番近い軌道を回り、月と火星の中間のサイズしかないにもかかわらず地球と同様、惑星固有の磁場を持っている惑星。その灼熱の環境、周回軌道投入に必要な燃料の多さから直接観測がほとんどできなかったのが水星である。「BepiColombo(ベピコロンボ)」とは、日本とヨーロッパ(European Space Agency(ESA):欧州宇宙機関)が共同で計画中の水星探査ミッションである。平成30年10月19日(金)22時45分28秒(現地時間)(10月20日(土)10時45分28秒(日本標準時))に、フランス領ギアナのギアナ宇宙センターから打ち上げられた。国際水星探査計画「ベピコロンボ」(BepiColombo)は、ESAとJAXAの共同で、観測目的に合わせた2つの周回探査機を水星周回軌道に送り込んで水星を観測する計画で、水星の磁場・磁気圏の観測を行う水星磁気圏探査機「みお」(MMO)と、水星の表面・内部の観測を行う水星表面探査機(MPO)から構成されている。2025年12月に予定される水星到着までの総航行距離は(太陽中心座標系で)約88億kmである。BepiColomboは、水星の公転周期と自転周期が3:2となることを示し、水星にゆかりの深いイタリアの応用数学者ジュセッペ・コロンボ博士(ベピは愛称)に因んでこの名前がつけられた。固有磁場と地球よりはるかに小さい磁気圏を持つ地球型惑星は地球と水星のみであり、初の水星の詳細探査は、「惑星の磁場・磁気圏の普遍性と特異性」の知見に大きな飛躍をもたらすと期待できる。われわれの経験では、グローバルシミュレーションを行う上での最大の困難は、ポストプロセス、即ち、データ処理、可視化である。そのため、実際よりかなり小さいシミュレーションモデルで計算を行い、大規模シミュレーションを行った場合の知見を得ることが本研究の第一目的である。

計算手法 (Computational Aspects) :

本研究では大域的三次元完全電磁シミュレーションコードを用いる。計算領域、IMF 磁場の時間変化を図 1 にしめす。太陽方向の境界から、IMF 磁場をもった太陽風を流し、GSM 座標中心にダイポール磁場をおき、地球の磁気圏を形成する。電磁場境界条件は、Lindman の吸収境界条件、即ち、一次近似を用いる。この近似では、45 度以上で入射する電磁波は吸収され、45 度以下の電磁波は反射される。粒子に関しては、境界を離れる粒子は、一旦取り出され、再度、境界領域からランダムに、Knudsen 流として再注入される。再注入される、粒子速度情報等は Vlasov 方程式を解いて決定しておらず、ランダムである。そのため、境界での擾乱が生じ、この擾乱が不安定化した場合、シミュレーションを停止する。

また、本シミュレーションでは、粒子の運動論的振る舞いはモデル化せず、電子とイオンの 2 流体モデルとしてシミュレーションを行う。数値加熱を防ぐ為、グリッドサイズと同程度のデバイ長を与える熱運量を粒子に与えるが、本数値実験では、グリッドサイズ=0.1~2Re であり、2 流体モデルとして扱う。そのため、space charge effect、ビーム不安定性、粒子の加速機構等が物理的に扱われていると考える。運動論によるバルーニング不安定等は考慮に入れない。

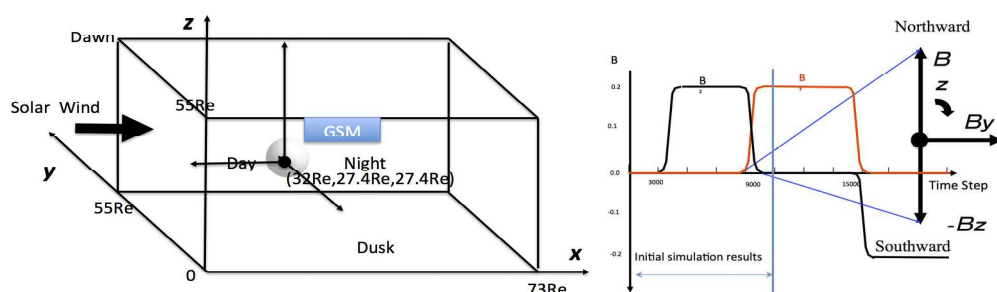


図 1：シミュレーションの設定と IMF の時間変化

水星磁気圏の作成

水星の磁気圏にはいくつかの特徴があり、大きさに関連しては、magnetopause までの距離が小さい、ion inertia ratio が大きいという特徴があり、これらを踏まえて、磁気圏を作成する。

$$\cdot R_{MP} = 1.3 - 2.1 R_M$$

$$\cdot R_M = 60 - 91 \text{ ion inertia length}$$

R_{MP} : Distance form GSM center to magnetopause

R_M :Mercury radii

今年度は、Alfven Mach Number=4.6でシミュレーションを行った。

研究成果 (Accomplishments) :

1, (昨年度より継続) 粒子シミュレーションによる Small Mercury Magnetosphere でカスプ解析

今回水星の磁気圏パラメータにあわせて、565X375X375 のグリッドサイズで小さな水星磁気圏を作成した。水星の半径 50 グリッドサイズのものを作成した。太陽磁場は(1)北向から、(2)Dusk-Dawn、(3)南向き(Phase 1, Phase 2)に変化する。図 1 にシミュレーションのコンフィギュレーション、IMF の時間変化を示す。本シミュレーションでは、水星の双極磁場をゆっくり発生させ、太陽風を左から入れて、磁気圏を生成する。次に、図 2 に IMF 北向きの太陽風を入れた参照水星磁気圏を示す。

2, (昨年度より継続) 水星磁気圏カスプ領域解析

水星磁気圏シミュレーションのため、現在我々の使っている、大域的完全電磁粒子コードの物理的妥当性を検査、立証するため、IMF 北向きにおける CUSP 領域解析を行った。

Cai ら (2015) の詳細な解析により、図 3a に示したカスプ領域の主な特徴(強い磁場振幅と弱いプラズマ密度)を復元することができた。つまり、この領域は磁場の空間プロファイルと低高度から高高度までの密度の空間プロファイルによって比較的よく定義することができる。CLUSTER 衛星による統計的観測(Lavraud et al., 2004a, 2005)に基づいて、典型的な SEC あるいは反磁性カスプ領域が定義される。北向きの IMF の場合、SEC 領域は極域、上方、下方、赤道の 4 つのエッジを持ち (Fig 3)、Cai ら (2015) の数値シミュレーションで解析されている。

特徴の一つは磁気シース領域から SEC 領域へ向かう際に、プラズマの流れが超アルフベニック領域から亜アルフベニック領域へと変化する遷移層(ATL)によって特徴付けられる。筆者らの知る限り、この ATL は Lavraud ら (2005) によって初めて実験的に観測され、Cai ら (2015) による北向き IMF かつ子午面のみの 3 次元 PIC シミュレーションで証明された。

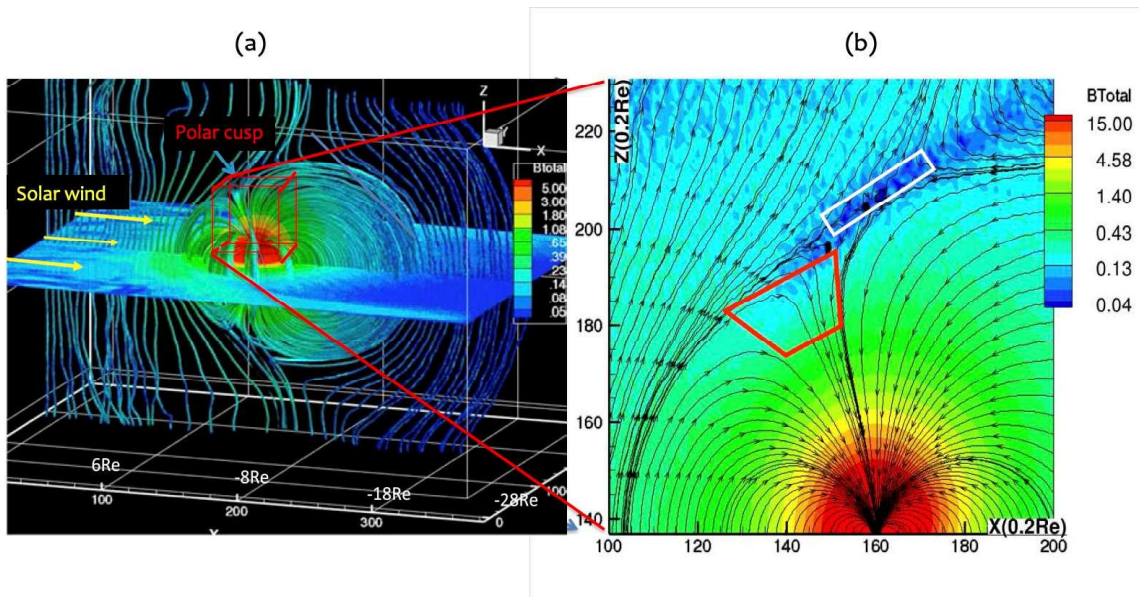


図 2 : 小さな参照水星磁気圏(左)と拡大したカusp領域 (右) . IMF は北向

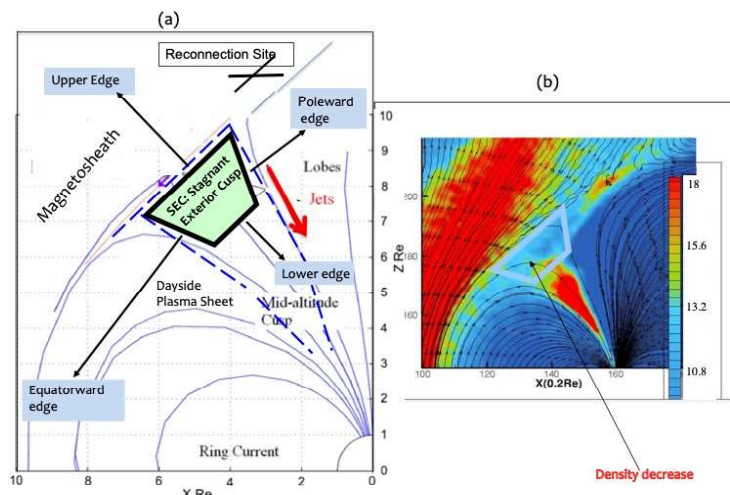


Figure 5

図 3: カusp磁場の境界

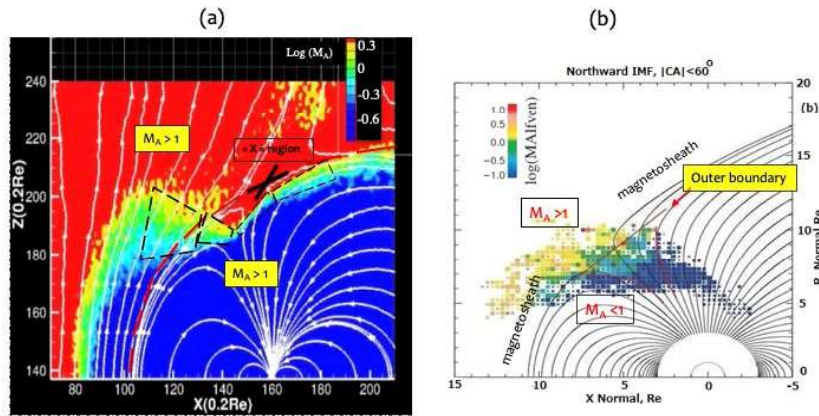


図 4 : IMF 北における、カusp領域における Alfvén Transition Layer のシミュレーション結果 (左) と、Cluster 衛星による観測結果 (b)の図は Lavraud et al. (2005) より)

Lavraud ら(2005)や Cai ら(2015)の先行研究に従い、ATL の正確な位置を証明する一つの方法は、地球位置を通る(x-z)子午線平面内に $\text{Log}(M_A)$ のマップをプロットすることで構成される。北向きの IMF の結果は図 4 に示されており、シミュレーション結果 (パネル 4a) と実験測定 (パネル 4b) の間の良い一致を証明している。

前年は、イオンフラックスのカusp侵入を議論したが、本年は電子フラックスのカusp侵入を議論する。

電子の場合は状況が大きく異なる。予想通り、電子のフラックスストリームラインは、カuspを通過する際に電子の質量が軽いため、より小さなスパイラル構造を示す (図 5a)。その主な特徴は (a)電子流線の渦巻き大きさは非常に小さく、これに対応してイオンフラックスの流線は細長く見える。(c)図 5b の拡大立体視(イオンに対すると同様の視野角)では、イオンとは対照的に、電子フラックスの強度がカusp上端付近で非常に強いこと(図 5a の白い四角の中の螺旋の赤い部分)がわかる。(d)図 5c の (x, y) 赤道平面上に投影した立体視 (により、明暗領域をより明確に分離できることがわかる。パネル(a)から(c)への漸進的な回転、高エネルギー電子束 (流線の赤い部分) が主に 2 つの異なる領域から放出されていることがわかる。1 つは明け方の側面領域の非常に高い高度に対応し (「A」で示す)、サブソーラー一点まで広がって

おり、もう一つは夕方の側面領域内の低い高度に対応し（「B」で示す）反対側（夜）まで伸びている。

電子については、イオンについて定義したと同様の（x-z）平面内に投影した3Dプロット（図5d）を行うことで解析を完了できる（yは図に直角）。その上で、L1, LB, L2線の位置とSECを報告した。図5dから、(a)カusp領域内（L1-LB線間）に電子が蓄積・析出すること、(b)電子束のスパイラルサイズはカusp入口でのイオンよりも小さいこと、(c)子午線平面での診断だけではわからない3次元効果の重要性が確認された。イオンとは対照的に、電子束の局所的な高強度は、より深く侵入してもまだ残っており（図5dでは隠れているが、3Dプロットを回転させると見える）、高エネルギーの電子が非常に低い高度で証明される。

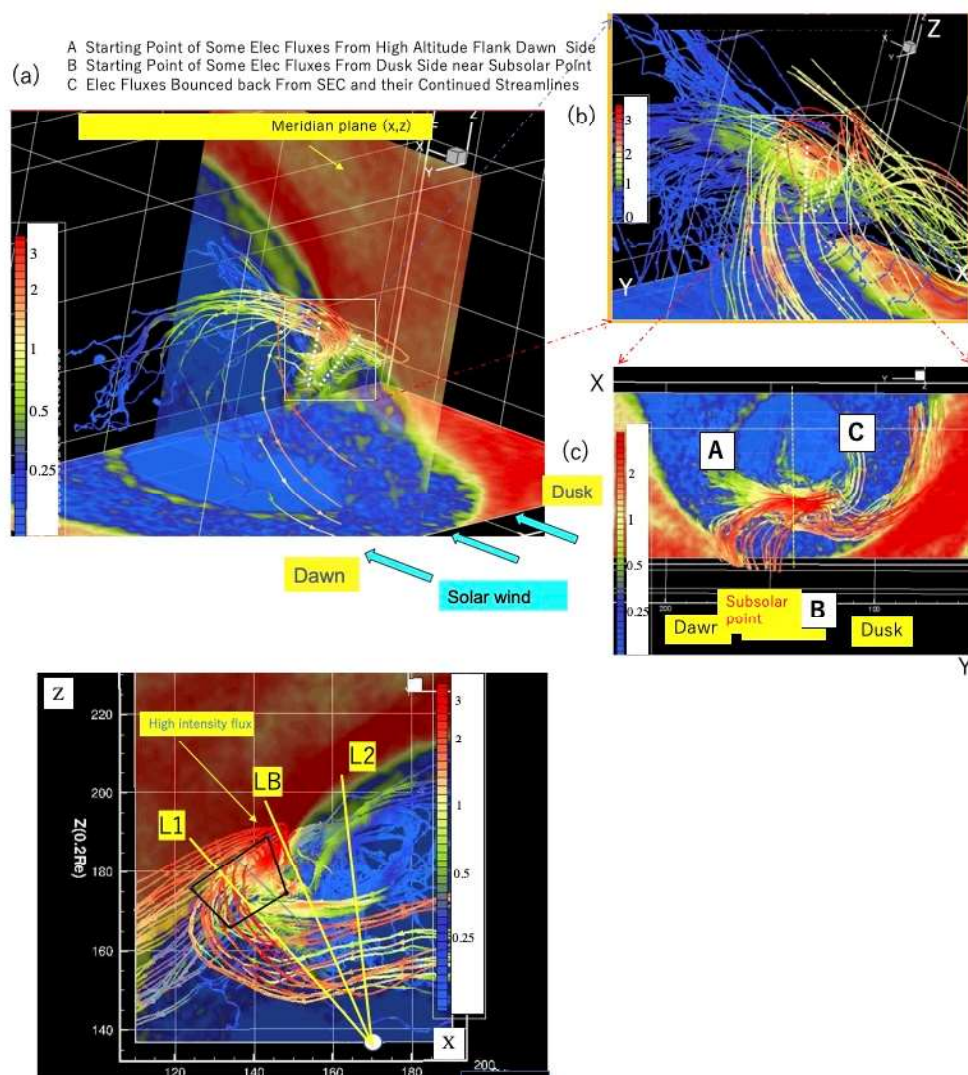


図 5 : IMF 北における、カusp領域における電子フラックス流線の 3D 表示。
 (a) 全電子フラックスの 2 次元等値面を 2 つの異なる平面 (x-y (赤道) 平面と x-z (子午線) 平面) で表現し、カusp領域を透視している。各流線に沿って色
 が変化し、電子フラックスの局所的な強度を示している。太陽風は X 軸に沿
 って流れている (青い矢印)。(b): (a)の白い四角の中のカusp領域を拡大したもの。
 (a)と(b)の白い点線は、漏斗状のカuspの境界を表している。3 次元電子フラッ
 クスの流線は、フラックス強度が最大となるカuspに収束している (流線に沿っ
 て赤色) ; (c) パネル (b) の白い長方形内のカusp領域の拡大図。(d)カusp領
 域の拡大図 (夕方側から)。

3. 磁気圏における位相

本年度は Geodesic Level Set 法により図 5 のように、磁気圏のトポロジー可視
 化を行った。CP1(Bs 型)と CP3(A 型)からのグローバルな 2 次元不安定多様体
 と安定多様体を、それぞれ図 6 に示す。CP1、CP3 から発せられる多様体はそ
 れぞれ、一端が北磁尾、南磁尾に分岐し、他端が地球の南極、北極に収束する円
 柱状の多様体 $W^u(x_{CP1})$ と $W^s(x_{CP3})$ を持つグローバル 2 次元多様体である (終
 点)。グローバル多様体は、データ境界 (ターミネーター : 境界の出入り口) に
 ぶつかった時点で、進まなくなる。 $W^u(x_{CP1})$ と $W^s(x_{CP3})$ のマニフォールドの
 弧長はそれぞれ 60.00 Re と 60.05 Re である。

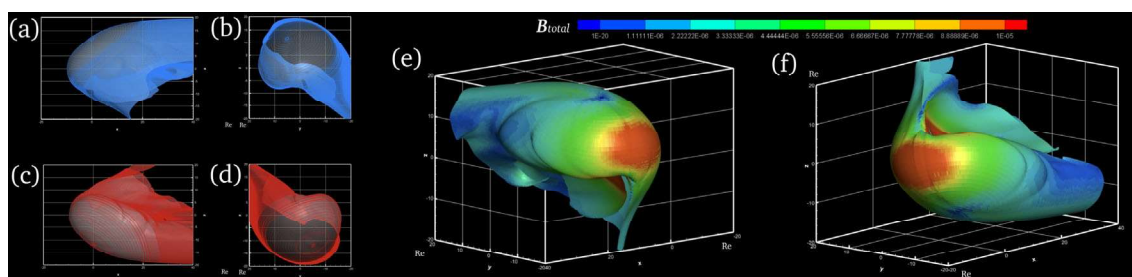


図 6. 大域的な磁場のトポロジーは CP1 と 3 によって決定される。パネル(a)と
 (b)はそれぞれ、CP3 からの 2 次元不安定多様体を x-z と y-z 平面に投影した青
 メッシュ、(e)は B_{total} で表面の色をフラッドにした斜視図である。パネル(c)
 と(d)はそれぞれ、CP1 からの 2 次元安定多様体を x-z と y-z 平面に投影した赤
 色のメッシュで、(f)は表面の色を B_{total} で色分けした斜視図である。

公表状況 (Publications) :

(口頭)

Cai, D., Magnetosphere as Complex Dynamical System Based on Vortexes, AOGS, Singapore, 2022

Cai, D. and Bertrand Lembege, Impact of the IMF Rotation from North to dawn-dusk and south direction on the cusp features and on the Alfvén Transition Layer: Global 3D PIC simulation, Chicago, AGU, 2022.

Cai, D. and Bertrand Lembege, How the cusp features and the Alfvén Transition Layer are affected by the IMF Rotation from North to dawn-dusk direction ?, Vienna, EGU, 2022

(論文)

B. Lembège and D. Cai, Evidence of the Alfvén Transition Layer and Particle Precipitation in the Cusp Region: 3D Global PIC Simulation of the Solar Wind–Earth Magnetosphere Interaction, *ApJ*, 2022, DOI 10.3847/1538-4357/ac7e52

S. Ekawati, D. Cai In-Situ Observation of Magnetic Null on 19 September 2015 Event Using Magnetospheric Multiscale Mission Magnetosphere Interaction *Journal of Geophysical Research: Space Physics* Volume 128 24 January 2023
<https://doi.org/10.1029/2021JA029571>