

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 C S 専攻）

dongscai@gmail.com

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量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ombo)」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ombo」(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 (MP0) 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ombo 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。本年度は、リコネクションを捉えるため、測地線レベルセット法を用いた可視化プログラムの作成を行い、磁気圏トポロジーの物理的意味と変化を検討した。

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。運動論によるバレーニング不安定等は考慮に入れない。

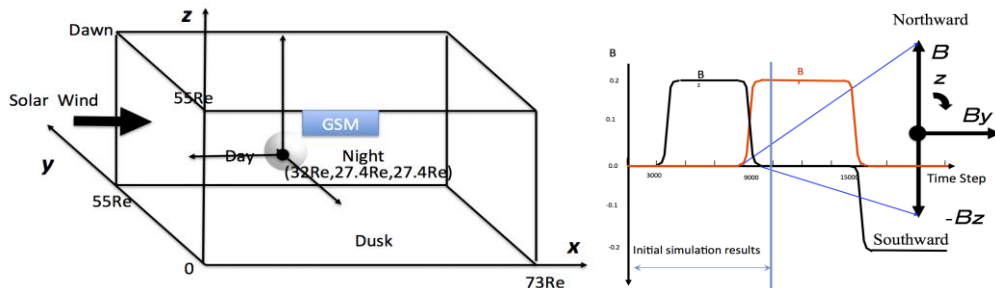


図 1：シミュレーションの設定と IMF の時間変化

研究成果 (Accomplishments)：

MHD における 3 次元磁気圏トポロジー

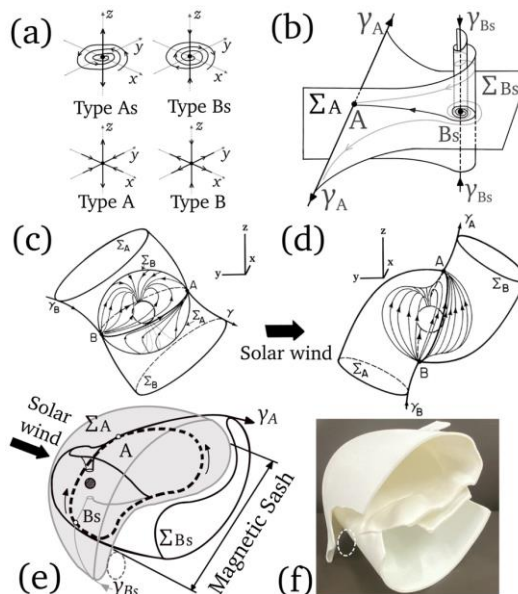


図 1. (a) A/As 型無極点は放射状/螺旋状の吸引サドル点；B/Bs 型無極点は放射状/螺旋状の反発サドル点；(b) A 型と Bs 型無極点間のサドル接続；A 型と B 型無極点間の南向 (c) と北向 (d) の IMF における最も単純な磁気圏トポロジーは、Lau と Finn [2] によって最初に示された；(e) 図. 2. 中性線は太い破線曲線で示されています。(f) (e) の 3D プリントトポロジー。

可視化で使用するシミュレーションは北向きの IMF ($B_x=0.0$ nT, $B_y=-4.3$ nT, $B_z=4.3$ nT) で開始され、南向き ($B_x=0.0$ nT, $B_y=-4.3$ nT, $B_z=-4.3$ nT) へと変化します。太陽風の密度、速度、温度の入力はシミュレーション全体を通じて一定に保たれています。シミュレーション結果から得られた元の不均一な六面体グリッドを、地球半径 (Re) 0.25 の正方格子データに

再サンプリングしました。座標系には地球中心太陽磁気座標系（GSM）を採用し、X 軸は尾部方向、Y 軸は朝方向、Z 軸は北方向を指します。

2.1 定常状態の北向き IMF における 3 次元トポロジー

磁場トポロジー理論に基づき、Lau と Finn は、地球の双極子を含む北向きおよび南向き IMF それぞれに対して、鞍点接続された円筒状多様体の対を図 1 (c, d) に示しました。このようなトポロジーは、これまでに全球 MHD シミュレーションまたは他のシミュレーション手法で視覚化されたことがありませんでした。本研究では初めて、図 2 に示すように、南北に位置する CP 1 および CP 3 というヌル点の間に、Lau と Finn が記述したトポロジーに対応する鞍点接続された全球トポロジーの対を可視化しました。我々は、CP 1 から 5 までの合計 5 つのヌル点を特定しましたが、このうちグローバルトポロジーを構成するのは CP 1 と CP 3 のみです。残りのヌル点は局所的なトポロジーに関与するものとみなされ、本報告書の範囲外として、詳細な議論は行いません。

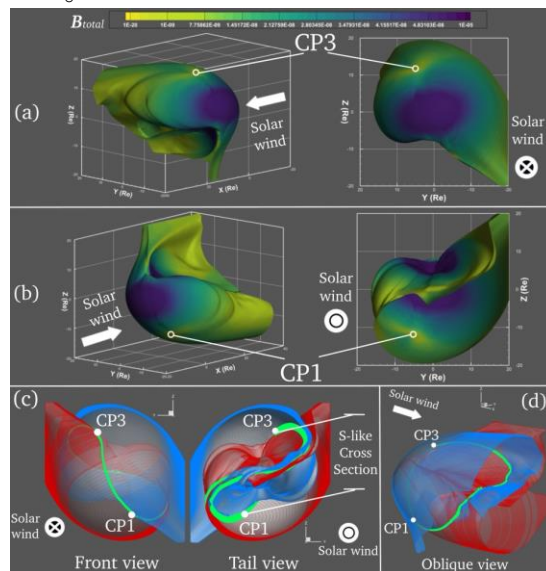


図 2 (a, b) には、全球の 2 次元不安定および安定多様体が可視化されています。これらはそれぞれ円筒状の多様体を持ち、一方の端は北および南の磁気圏尾部へと発散し、他方の端は南および北の地球極へと収束しています。図 2 (a, b) に示された多様体上の色は、磁場の強度を表しています。これらの多様体は北や南の無限遠方向に発散するのではなく、尾部方向に発散して磁気圏尾部を形成している点にご留意ください。磁場は、淡黄色で示された CP 1 および CP 3 付近の 2 箇所では比較的弱く、昼側のバウショック、太陽直下点、そして北極および南極付近では比較的強くなっています。

図 2. 北向き IMF 下における全球磁気圏トポロジー。パネル(a)および(b)は、それぞれ CP3 および CP1 に対応し、表面は磁場強度に基づいて着色されています。パネル(c)および(d)は、赤で示された不安定多様体と青で示された安定多様体の鞍点接続を示し、さまざまな視点から見た断面または中性線／中性リング（太字の緑色曲線）も描かれています。

図 2 (c, d) は、不安定多様体と安定多様体の間の鞍点接続を示しています。図 2 (c, d) では、それぞれ赤と青のメッシュで示されており、両者の交差部分は 2 本の「中性線(Neutral Line)」からなるリングを形成しています。この中性リングは、図 2 (c, d) では太い緑色の線で表示されています。2 本の中性線はともに南側の CP 1 から始まり、磁気圏の昼側と夜側

をそれぞれ斜めに流れて北側の CP 3 へと接続します。この可視化において、全球磁気圏トポロジーは CP 1 と 3 の間のこの鞍点接続によってのみ特定できます。

尾部において不安定多様体と安定多様体の間に挟まれた狭い通路、またはスリット（S 字状断面）は、磁場が弱い経路を形成し、磁気サッシュと呼ばれる構造に対応します。この赤道面付近の挟まれた経路は、磁気圏尾部におけるプラズマシートの位置にも一致しています。図 1 (e) では、不安定多様体および安定多様体の表面がそれぞれ図中の指定された表面に対応しています。

図 1 (e, f) は、それぞれ図 2 (d) のトポロジーを模式的に示したものおよび 3D プリントで再現したものです。これらは図 1 (d) に示されたトポロジーと位相的に同等です。ただし、Lau と Finn による図 1 (d) のトポロジーとは異なり、円筒状多様体の両端は北および南の無限遠へ伸びるのではなく、南西（夕側）および北東（朝側）から尾部方向へと伸びています。両者は主に夜側の赤道面付近で交差し、図 1 (e, f) および図 2 (c, d) に示されているような S 字状の断面を形成します。

さらに、赤道面付近で尾部方向に不安定・安定多様体の間に挟まれた S 字状のスリットは、その位置においてプラズマシートに対応します。磁気圏尾部におけるプラズマシートと、この 2 つの多様体に挟まれた S 字状スリット部分との関係については、それらが同一であるか否かを明らかにするためにさらなる研究が必要です。本論文では、これらの時間的なトポロジーに主として焦点を当てています。

2.2 サブストーム直前の 3 次元トポロジー

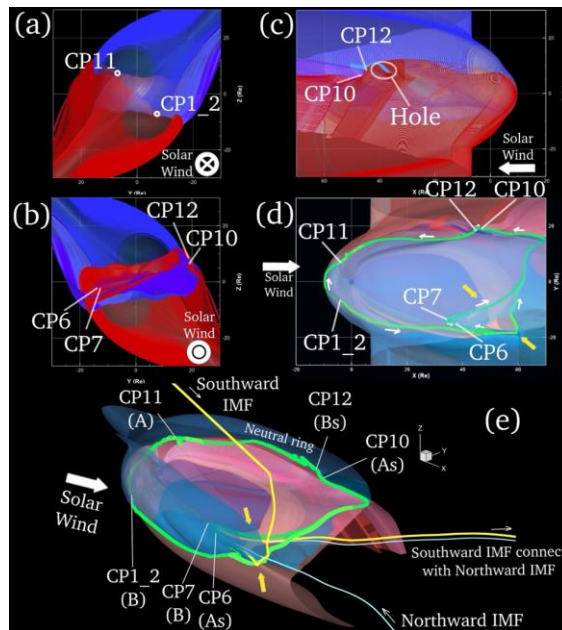


図 3. サブストーム発生前の 3.34 分前における 3 次元全球磁気圏トポロジー。パネル (a) は前面、(b) は背面、(c) は朝側、(d) は北上から、(e) は背面と斜めの視点から、それぞれ主に赤系で示された不安定多様体と青系で示された安定多様体の間の鞍点接続トポロジーを表示しています。中性線は太字の緑色で示されています。

次に、図 3 に示されるように、南向き IMF への転換後、サブストーム発生前の 3.34 分前における 3 次元磁気圏トポロジーを可視化します。サブストーム発生の時刻は、プラズマシートを

流れる尾部横断電流が途絶し、高速なプラズマ流が生成される時点として特定されます。この時点では、識別された 12 個のヌル点のうち 7 個が全球トポロジーに関与しており、すべて中性線上に位置しています。

北方向に伸びる青い円筒状多様体は、CP 6 (As 型)、10 (A 型)、11 (As 型) から構成される 2 次元安定多様体で構成されています。一方、南方向に伸びる赤い円筒状多様体は、CP 1 (B 型)、2 (B 型)、7 (B 型)、12 (Bs 型) から構成される 2 次元不安定多様体によって構成されています。ここで CP 1 と 2 は非常に近接していますが、その距離はグリッドサイズよりも大きく、トポロジー的には両者の固有空間は同一と見なされます。

夕側の尾部における中性リングは、図 3 中の太い黄色の矢印で示された領域において、分岐しつつ統合されて「くさび形の線」を形成しています。これは、3 つ以上のヌル点から構成される鞍点接続です。

夕側磁気圏尾部領域における新しいくさび形中性線と、IMF 転換前に存在した旧中性線は、子午面（真夜中）付近で統合されています。これは、IMF の転換によって生じた「旧磁気圏」と「新磁気圏」が夕側尾部領域で共存していることを示しています。

夕側磁気圏尾部を除いて、合計 7 つのヌル点が中性リングに沿って接続され、磁気圏のグローバルトポロジーを形成しています。この構造は、図 1 (c) に Lau と Finn によって示された、南向き IMF 下における地球磁気圏トポロジーの模式図と本質的に同一です。ただし尾部に見られる非対称な中性線により、旧来の磁気圏構造も部分的に保持されていることが確認されます。

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. Ningyi Xie, Xinwei Lee, Dongsheng Cai, Yoshiyuki Saito, Nobuyoshi Asai, Hoong Chuin Lau, A Feasibility-Preserved Quantum Approximate Solver for the Capacitated Vehicle Routing Problem, Quantum Information Processing, accepted. 2024.
2. Zhenyu Ta, Ningyi Xie, Dongsheng Cai, Nobuyoshi Asai, Comparative Study of Quantum and Classical Conditional Image Generators, Knowledge-Based Systems, Knowledge-Based Systems, 2024, accepted.
3. Xiong, P., S. Fujita, M. Watanabe, T. Tanaka, and D. Cai, 3D Topology of Transient Bifurcation Just Before Substorm Onset, Radioscience Letter, accepted, 2024
4. Lee, X., X. Yan, N. Xie, Y. Saito, D. Cai, and N. Asai, Iterative Layerwise Training for Quantum Approximate Optimization Algorithm, Physical Review A, 109, 052406, 2024.
5. Hou, Z., R. Dong and D. Cai, Structural Color in Amber-Entombed Wasp: A Detailed Study Using NS-FDTD Simulations, Trans. IEEE Access, accepted, 2024.