

磁気嵐・サブストームに伴う 磁気圏高エネルギー荷電粒子変動の研究

Dynamics of energetic charged particles

associated with magnetic storms and substorms in the inner magnetosphere

研究代表者：海老原祐輔（京都大学生存圏研究所）

ebihara@rish.kyoto-u.ac.jp

研究分担者：

平原聖文（名古屋大学宇宙地球環境研究所）

担当：シミュレーション結果の解釈

田中高史（九州大学国際宇宙惑星環境研究センター）

担当：3次元グローバルMHDシミュレーションの開発

太田悠輝（京都大学生存圏研究所）

担当：粒子軌道シミュレーションの開発・解析

研究目的 (Research Objective):

内部磁気圏は地球の双極子型磁場が卓越する宇宙空間であり、数 eV から数十 MeV に至る様々なエネルギーを持つ荷電粒子が双極子型の磁場に捕捉されている。リングカレントを担う粒子（～keV）は数日間続く地磁気擾乱（磁気嵐）や人工衛星の表面帯電の原因に、放射線帯粒子（～MeV）は人工衛星の内部帯電の原因となるため、宇宙空間を安全に利用するためには荷電粒子の変動、すなわち粒子の輸送・散乱・消失過程を理解することが不可欠である。内部磁気圏の粒子変動は複雑な連鎖過程の結果であるから、それらを理解するためには太陽風から地球に至る広範な領域を一つのシステムとしてとらえる必要がある。本年度は、①磁気圏対流の電氣的性質 (Ebihara et al., 2025a)、②磁気圏対流電場の投影問題 (Ebihara et al., 2025b)、③惑星間空間衝撃波到来時の内部磁気圏・電離圏変動 (Ebihara and Tanaka, 2025)、④放射線帯外縁部とプラズマシート接続領域における電子の非断熱輸送過程について研究を行った。ここでは、①について報告する。

計算手法 (Computational Aspects)：

グローバル電磁流体（MHD）シミュレーション (Tanaka, 2015) を用い、磁気圏—電離圏の電場の対応関係を調査した。南向きの惑星間空間磁場をシミュレーションの上流側の境界条件として与え、電離圏では DP2 型の対流パターンが、内部磁気圏では朝側から夕側に向かう電場が現れることを確認した。

研究成果 (Accomplishments)：

放射線帯を含む地球近傍の宇宙空間（内部磁気圏）の粒子環境を理解する上で磁気圏対流は重要である。夜側プラズマシートから内部磁気圏へと高温プラズマが運

ばれることで環電流が発達し、中低緯度における地磁気の乱れ、すなわち磁気嵐がおこる。また、放射線帯変動の鍵を握るホイッスラーモード・コーラス波の励起には熱い電子の供給が不可欠であるが、この輸送もまた対流電場によって支配されていると考えられている。

観測的には、この対流電場は概ね朝側から夕側を向いていることが知られている。MHD シミュレーションにおいては、南向きの惑星間空間磁場を与えた際にも同様に朝側から夕側に向かう電場が発生しており、観測事実とも整合する。仮に磁気圏対流を静電場として捉えるならば、この対流電場に対応する空間電荷が磁気圏境界付近に存在すると解釈することができる。すなわち、朝側に正（+）、夕側に負（-）の空間電荷が配置されることで、朝側から夕側に向かう電場が形成されるという考え方です。しかし、MHD シミュレーションの結果から空間電荷の分布を算出したところ、Figure 1a に示すとおり、磁気圏の朝側では負（-）、夕側では正（+）の電荷が多く存在することが分かった。そして、3次元の空間電荷から得られる静電場は、Figure 1c に示すとおり、夕側から朝側に向かうものであった。この結果は、朝側に負（-）、夕側に正（+）の電荷が多く存在するという最近の人工衛星と整合する一方、「観測される電場の向き」と「蓄積されている電荷が作る電場の向き」が逆という新たな問題を提起することになった。この矛盾は、因果関係を再定義すると解消することができる。すなわち、「空間電荷が電場を形成する」のではなく、「プラズマの流れが磁気圏電場を規定し、その結果として空間電荷分布が副次的に生じる」というものである。MHD 近似において「プラズマの流れが電場を決める」という考えは、Vasyliūnas (2001)によって理論的に示されていた。本研究の結果は、そのように考えに立脚しなければ MHD シミュレーションで得られた電荷分布と電場の関係を本質的に理解できないことを明確に示している。Figure 1b は、境界条件として電場を課して算出した静電ポテンシャルを示している。このポテンシャルは朝側で高く、夕側で低くなっており、朝側から夕側に向かう静電場に対応する。太陽風中のポテンシャルが磁気圏で抑制されているように見えるが、磁気圏の朝側に負（-）、夕側に正（+）の空間電荷が多く存在し、外部（惑星間空間電場）を打ち消す方向に作用しているためである。惑星間空間の電場が磁気圏内に単純に浸透し、対流を引き起こすように見えるが、磁気圏対流電場はプラズマの運動によって規定されるものであり、その本質は静電的なポテンシャルの配置ではなく、プラズマの動力学にあることに注意が必要である。

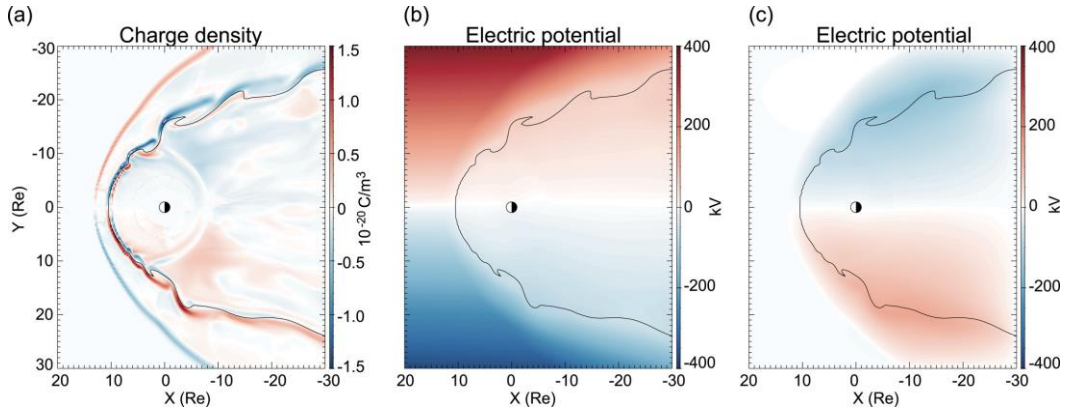


Figure 1: MHD シミュレーションで得た磁気赤道面における (a) 空間電荷、(b) 3 次元の空間電荷をもとに導出した静電ポテンシャル (境界条件として電場を与えた場合=ノイマン境界条件)、(c) 同静電ポテンシャル (境界のポテンシャルをゼロとした場合=ディレクレ型境界条件)。(Ebihara et al, 2025a)。

人工衛星やレーダーを用いた観測によって、電離圏近くでは、朝側に正 (+)、夕側に負 (-) の空間電荷が配置されていることが広く知られている。MHD シミュレーションの結果も、この観測事実と整合しており、同様に朝側に正 (+)、夕側に負 (-) の電荷配置を示している。Figure 2 は、空間電荷による静電ポテンシャルの 3 次元分布を示している。夕側に着目すると、電離圏近くでは電位が低く、磁気赤道面では高い。なぜ赤道面付近と極域低高度では電位の極性が逆になるのだろうか。この差異は、以下のように磁気圏内部における三次元的なプラズマ対流運動を考慮することで、矛盾なく理解することができる。Figure 2 の太線はポインティング・ベクトルを線積分したものであり、ここではこれを S カーブと呼ぶ。この曲線は、磁場に垂直な方向の運動を示すとともに、理想 MHD において磁気エンタルピーの輸送経路を示している。太陽風から夕側の磁気圏内へと流入した S カーブは、北極上空から見て時計回りに旋回しながら電離圏へと向かう。この旋回の向き ($\nabla \times \mathbf{V}$ の方向、ただし $\mathbf{V}$ はプラズマ速度) は、磁気赤道面付近と電離圏付近で大きく変わらず、南向き (下方向) を向いている。しかし、背景磁場の向きは大きく異なる。磁気赤道面付近では北向き (上方向) であるのに対し、電離圏付近では南向き (下方向) である。ここで、空間電荷を直接示す電場の発散 $\nabla \cdot \mathbf{E}$ を考える。理想 MHD 近似において、電場の発散は $\nabla \cdot \mathbf{E} = -\mathbf{B} \cdot (\nabla \times \mathbf{V}) + \mathbf{V} \cdot (\nabla \times \mathbf{B})$ で与えられる。ただし、 $\mathbf{B}$ は磁場である。磁気圏境界付近や遠方の磁気圏尾部を除き、右边第 2 項は第 1 項と比べ小さい。したがって、右边第 2 項を無視すると、 $\nabla \cdot \mathbf{E}$ の極性は、磁場 $\mathbf{B}$ と $\nabla \times \mathbf{V}$ の内積で決まる。Figure 2 に示されるとおり、S カーブの旋回の向き (渦度) が概ね同じであっても、背景磁場の方向が反転するため、結果として磁気赤道面付近では $\nabla \cdot \mathbf{E} < 0$ (負電荷に対応)、電離圏近くでは $\nabla \cdot \mathbf{E} > 0$ (正電荷に対応) となる。

また、Figure 2 は、磁気圏がたとえ定常状態にあっても、太陽風から電離圏に至る

恒常的なエネルギー流が存在し続けることを示している。これは、常に動力的な過程がプラズマに作用し、太陽風からのエネルギー供給と電離圏におけるエネルギー消費のバランスの上に、対流構造が維持されていることを意味する。つまり、磁気圏対流とは、従来考えられていたような単純な「物質とエネルギーの循環」ではなく、絶え間ないエネルギーの流入と散逸によって支えられている点こそが本質であり、その意味で磁気圏は極めて動的な平衡系と言えるかもしれない (Ebihara et al., 2025a)。

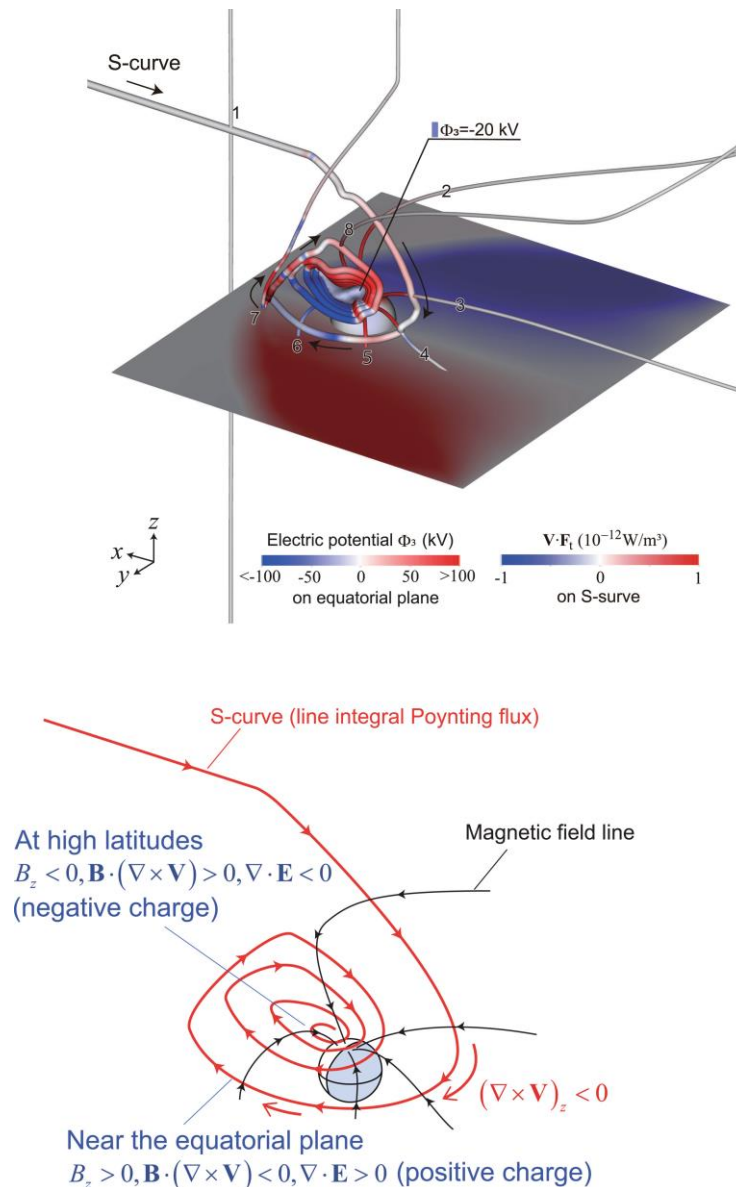


Figure 2: (上) MHD シミュレーションで得た電場ポテンシャルの3次元分布ならびに赤道面上に示す。太い管はポインティング・ベクトルを線積分したもの、細い管は磁力線を示す。(下) 上図の模式図。(Ebihara et al, 2025a)。

公表状況 (Publications) :

1. Ebihara, Y., M. Hirahara, and T. Tanaka, MHD simulation study on quasi-steady dawn-dusk convection electric field in Earth's magnetosphere, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 130, 7, e2025JA033731, doi:10.1029/2025JA033731, 2025.
2. Ebihara, Y., M. Hirahara, and T. Tanaka, Testing field-line mapping of electric fields in Earth's magnetosphere, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 130, e2025JA034108, doi:10.1029/2025JA034108, 2025.
3. Ebihara, Y. and T. Tanaka, Cause of shock-associated substorm activity on 24 September 1998: A global MHD simulation study, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 130, e2025JA034636, doi:10.1029/2025JA034636, 2025.