

# 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：田中高史（九州大学国際宇宙天気科学・教育センター）

担当：3次元グローバルMHDシミュレーションの開発

研究分担者：矢野有人（京都大学生存圏研究所）

担当：3次元ホールMHDシミュレーションの開発と解析

## 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。keV 帯の電子やイオンはホイッスラーモード・コーラス波や電磁イオンサイクロトロン波（EMIC 波）を励起し、放射線帯電子の加速や散乱の原因となるなど、粒子間の相互作用も重要である。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) 内部磁気圏対流の駆動源として重要な役割を担っていると考えられる Region 1 型沿磁力線電流の生成と、(2) 沿磁力線電流と電離圏電流の 3 次元的な接合に着目した。

## 計算手法 (Computational Aspects) :

- (1) Region 1 沿磁力線電流の生成。グローバル 3 次元 MHD シミュレーションの上流側境界条件として南向きの惑星間空間磁場を与え、Region 1 および Region 2 型に対応する大規模沿磁力線電流を模擬した。これまで、沿磁力線電流の生成源は磁力線をトレースするか電流線（沿磁力線電流と垂直電流の和）をトレースする方法が用いられていた。本研究では、沿磁力線電流はアルベン波に付随して流れる電流であることを踏まえ、アルベン波の波束が背景のプラズマ運動に乗った系で磁力線方向に動くとし、波束の時空間変動を追跡した。電流保存則 ( $\nabla \cdot \mathbf{J}_{\parallel} = -\nabla \cdot \mathbf{J}_{\perp}$ )、電流生成率 ( $\partial J_{\parallel} / \partial t = -[\nabla \times \nabla \times \mathbf{E}]_{\parallel} / \mu_0$ )、プラズマが磁気張力に対する仕事 ( $\mathbf{V} \cdot \mathbf{F}_t$  ただし  $\mathbf{F}_t$  は磁気張力) に関する諸量を求め、沿磁力線電流の生成領域を特定するための指標とした<sup>1)</sup>。
- (2) 沿磁力線電流と電離圏電流の 3 次元的な接合。薄層近似ではなく 3 次元空間として電離圏を取り扱うローカル 3 次元ホール MHD シミュレーションを開発した。高さ 70 km から約 1000 km までの領域について解き、イオン-中性衝突周波数を高さに応じ

て変えた。シミュレーション領域の上端に正弦的に変動する電場を与え、アルベン波とそれに付随する沿磁力線電流を発生させ、電離圏に入射させた<sup>2)</sup>。

## 研究成果 (Accomplishments) :

(1) Region 1 沿磁力線電流の生成。先行研究と同様、惑星間空間磁場を南に向けたところ、大規模な沿磁力線電流構造が電離圏に現れた。内部磁気圏対流の形成に重要な役割を果たしていると考えられる Region 1 型沿磁力線電流の中心付近に着目し、アルベン波の波束を電離圏から時間について逆方向に追跡した。1 分ごとの波束の位置を Figure 1 に示す。 $G_1$  と  $G_2$  は沿磁力線電流の生成領域と考えられる領域で、磁気圏の脇腹と呼ばれる低緯度磁気圏境界付近にある。 $G_1$  では太陽風起源のプラズマが再結合したばかりの地球の磁力線を引っ張り、 $G_2$  では磁気圏起源のプラズマが引っ張っている ( $\mathbf{V} \cdot \mathbf{F}_1 < 0$ )。プラズマが磁力線を引っ張ることでアルベン波が励起され、発生した沿磁力線電流とともに地球側に伝わり、磁気圏を 3 次元的に貫く大規模な沿磁力線電流が作られている。大規模な沿磁力線電流の周囲には大規模なプラズマの流れが付随しており、これが磁気圏対流に対応すると考えられる。つまり、太陽風起源のエネルギーは  $G_1$  と  $G_2$  を経由して磁気圏に取り込まれ、磁気嵐やサブストームの発達を支えている可能性がある。Region 1 型沿磁力線電流が流れている電離圏から磁力線をトレースすると磁気圏遠尾部に向かい、 $G_1$  と  $G_2$  には到達しない。外部磁気圏や磁気圏境界付近ではアルベン速度が背景の流速と比べ遅くなり、電離圏から伸びる磁力線から大きく離れてゆくためである。沿磁力線電流の生成領域を評価するためにはプラズマ流を考慮する必要があると思われる。一方、電流線を電離圏側からトレースすると高緯度磁気圏境界に到達した。磁力線に対して垂直方向に流れる電流の影響を強く受けるためである。磁力線をトレースした場合も電流線をトレースした場合も  $G_1$  と  $G_2$  には到達しない。磁気圏の脇腹で Region 1 型沿磁力線電流が生成されるとの指摘が以前からあった。太陽風プラズマの速度剪断 (シアー) が空間電荷を作り、沿磁力線電流を発生させるという考え方で、惑星間空間磁場が南向きのときに Region 1 型沿磁力線電流が強まるという観測事実を説明することが難しかった。本研究で特定した  $G_1$  と  $G_2$  は南向きの惑星間空間磁場と再結合したばかりの地球の磁力線が関わっており、観測事実と調和的である。磁力線電流の生成率 ( $\partial J_{\parallel} / \partial t$ ) を調べると、速度剪断 (シアー) に加え、磁力線が湾曲していることで多くの沿磁力線電流が発生していることも分かった。以上の成果をまとめた論文は Journal of Geophysical Research: Space Physics 誌に受理された<sup>1)</sup>。



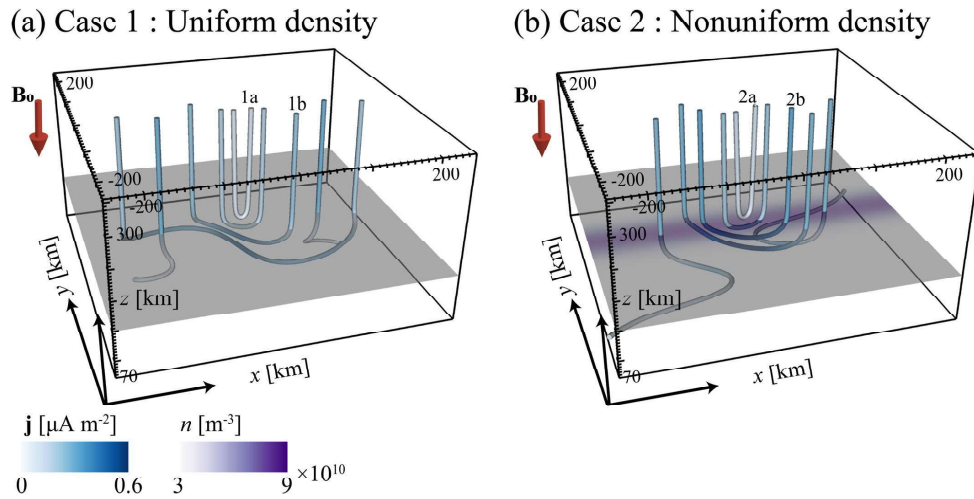


Figure 2 : 3次元ホール MHD シミュレーションで求めた電流線。(a)は密度が一様な場合、(b)は密度が非一様な場合を示す<sup>2)</sup>。

#### 公表状況 (Publications) :

1. Ebihara, Y. and T. Tanaka, Where is Region 1 field-aligned current generated?, Journal of Geophysical Research: Space Physics, doi:10.1029/2021JA029991, in press, 2022.
2. Yano, Y., and Y. Ebihara, Three-dimensional closure of field-aligned currents in the polar ionosphere, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 126, e2021JA029421, doi:10.1029/2021JA029421, 2021.