

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（京大大学生存圏研究所）

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

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、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（FAC）」の生成と、サブストームを特徴付ける「サブストーム・カレントウエッジ型 FAC」の生成領域と過程を調べ、両者の性質を比較した。

計算手法 (Computational Aspects) :

グローバル 3 次元 MHD シミュレーションに南向きの惑星間空間磁場を与え、Region 1 型 FAC とカレントウエッジ型 FAC を発生させた。沿磁力線電流を担うアルベン波のパケットを電離圏側から時間について逆方向に追跡し、沿磁力線電流の生成領域と変換過程を調べた。ただし、沿磁力線電流はアルベン波に付随して流れると考え、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ことと仮定した。以下の 3 つの条件を満足する領域で FAC が発生するとした。我々はこれを「FAC ダイナモ」と名付けた。

- ① プラズマが磁気張力に対して負の仕事をする（プラズマが磁力線を引っ張ること）。すなわち、 $\mathbf{V} \cdot \mathbf{F}_t < 0$ 。ただし、 \mathbf{V} はプラズマの速度、 \mathbf{F}_t は磁気張力である。
- ② 垂直電流から沿磁力線電流への変換がおこること。すなわち、 $\nabla \cdot \mathbf{J}_{\parallel} \neq 0$ 。ここで \mathbf{J}_{\parallel} は沿磁力線電流である。
- ③ 沿磁力線電流が生成すること。すなわち、 $\partial J_{\parallel} / \partial t \neq [-\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} / \mu_0]_{\parallel}$ 。ここで \mathbf{E} は電場である。

研究成果（Accomplishments）：

Region 1 型 FAC の起源は磁気圏低緯度境界付近（フランク）にあった（Figure 1a)¹⁾。ここ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、低周波の電磁波動であるアルベン波を励起していた（G1 領域）。磁気圏起源のプラズマも加速を受け、アルベン波の励起に関与していた（G2 領域）。これらの領域を「フランク FAC ダイナモ」と名付けた。

カレントウェッジ型沿磁力線電流の起源は近尾部の赤道面付近にあった（Figure 1b)²⁾。磁気圏近尾部で磁気再結合がおこると地球向き的高速プラズマ流が発生する。高速プラズマ流が地球に近づくと東方向と西方向に分かれ、東西方向のプラズマ流は地球の磁力線を引っ張り、アルベン波を励起していた。我々はこの領域を「地球近傍 FAC ダイナモ」と呼ぶことにした。

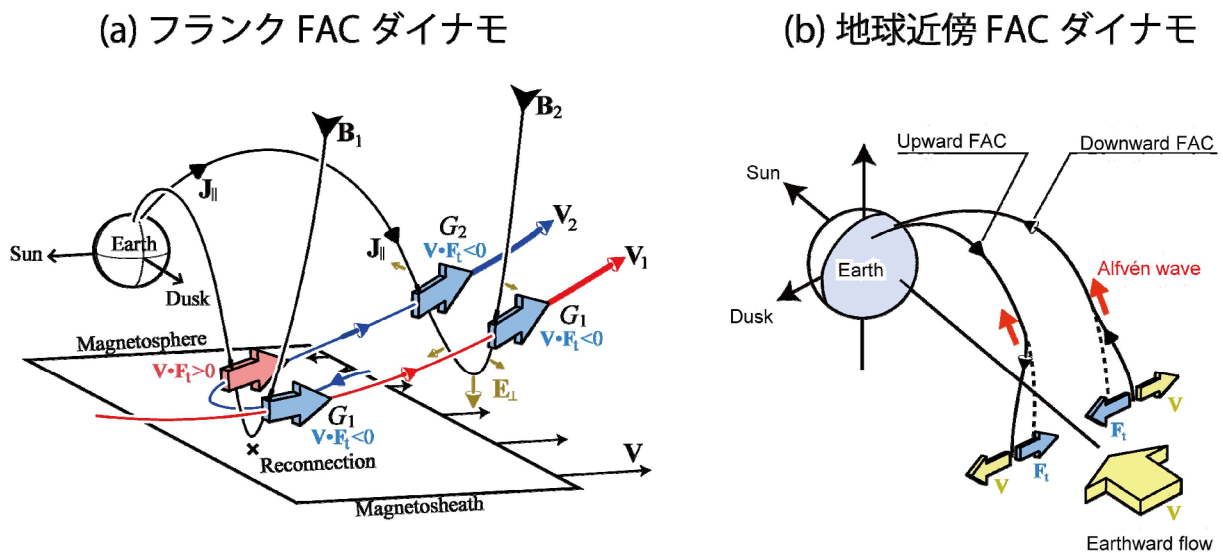


Figure 1: (a) Region 1 型沿磁力線電流の生成を担うと考えられる「フランク FAC ダイナモ」の模式図¹⁾。磁気圏フランク（磁気圏低緯度境界付近）で太陽風プラズマが再結合したばかりの地球の磁力線を引っ張り、アルベン波を励起する（G1 領域）。このとき磁気圏起源のプラズマが加速され、アルベン波の励起に関わる（G2 領域） (b) サブストーム・カレントウェッジ型沿磁力線の生成を担うと考えられる「地球近傍 FAC ダイナモ」の模式図²⁾。磁気圏近尾部で発生した磁気再結合に伴い、地球向き的高速流（大きい黄色い矢印）が発生する。その流れは東西方向に分流し（小さい黄色い印）、磁力線を引っ張る。磁気張力（青色の矢印）と反対方向にプラズマは運動するため、磁気張力に対して負の仕事をする。すなわちアルベン波を励起する。

Region 1 型 FAC の生成を担うと考えられる「フランク FAC ダイナモ」とカレントウエッジ型 FAC の生成を担うと考えられる「地球近傍 FAC ダイナモ」は全く異なる領域にあるが、上記の FAC ダイナモの要件を満たしているという点で共通している。ほかに共通する特徴をあげる。

1. 磁力線電流の生成率は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\partial J_{\parallel} / \partial t &= -(\nabla \times \nabla \times \mathbf{E})_{\parallel} / \mu_0 \\ &= -\nabla_{\parallel}(\nabla \cdot \mathbf{E}) / \mu_0 + (\nabla^2 \mathbf{E})_{\parallel} / \mu_0\end{aligned}$$

右辺第 1 項はシアーに関する項である。右辺第 1 項と第 2 項の寄与はともに大きいことから、沿磁力線電流は必ずしもシアーによって作られるとは限らない。

2. 「 $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} < 0$ 」で定義されるダイナモ領域と一致しない。「 $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$ 」はプラズマ速度と磁気張力の内積とプラズマ速度と磁気圧力の内積に分解できる。沿磁力線電流の生成に直接関わらないと思われる後者の寄与が大きいためである。
3. ごく一部を除きプラズマは常に動いているため、アルベン波は磁力線に沿って伝わりとは限らない。アルベン速度が低い外部磁気圏や磁気圏境界以遠では特に顕著である。つまり、沿磁力線電流が流れている電離圏から磁力線に沿ってたどっても、沿磁力線電流の生成領域 (FAC ダイナモ) にたどり着くとは限らない。

これらの FAC ダイナモ領域で生成した沿磁力線電流 (アルベン波) はプラズマに乗った系で磁場方向に伝わり、極域電離圏に流入する。これらの FAC ダイナモは太陽風のエネルギーを極域電離圏に導く要であると言える。また、サブストームの成長相は「フランク FAC ダイナモ」が、拡大相は「地球近傍 FAC ダイナモ」が駆動していると考えられ、サブストームの発達を理解する上でも重要と言える。

謝辞 (Acknowledgements) :

銭谷誠司博士から有益な助言をいただきました。お礼申し上げます。

公表状況 (Publications) :

1. Y. Ebihara and T. Tanaka (2022). Where is Region 1 field-aligned current generated?, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, e2021JA029991. doi:10.1029/2021JA029991.
2. Y. Ebihara and T. Tanaka (2023). Generation of field-aligned currents during substorm expansion: An update. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 128, e2022JA031011. doi:10.1029/2022JA031011.