

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（ \sim 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（ \sim 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深内部磁気圏における 100 keV 帯電子の変動と極域を流れる沿磁力線電流の関係 (Pandya, Ebihara et al., 2024)、②内部磁気圏における 1-100 keV 帯イオンの急増現象の質量依存性、③内部磁気圏におけるコーラス波動成長可能領域の地球磁場強度依存性、④惑星間空間衝撃波到来時における電離圏変動 (Zhang, Ebihara, Tanaka, 2023) について研究を行った。ここでは、深内部磁気圏における 100 keV 帯電子の急激な変動について報告する。

内部磁気圏には様々なエネルギーを持つ電子が捕捉されている。深内部磁気圏では 100 keV から数 100 keV のエネルギーを持つ電子のフラックスに多数のピークが現れている。エネルギー対時間スペクトル上で縞模様に見えることからゼブラ構造と呼ばれている。ヴァン・アレン衛星が深内部磁気圏の $L=1.5$ で観測した電子のゼブラ構造を解析し、静穏時にはゼブラ構造は安定して存在しつつも、磁気嵐がおこると急に乱れ、再構成することを明らかにした (Pandya, Ebihara et al., 2024)。しかし、 $L=1.5$ という深内部磁気圏で電子フラックスが瞬時に再構成する物理過程はよく分かっていない。

計算手法 (Computational Aspects) :

2017 年 9 月 7-8 日に観測された太陽風パラメータをグローバル 3 次元 MHD シミュレーション (REPPU, Level 6) に与え、磁気嵐を再現した。

研究成果 (Accomplishments) :

L=1.5 という深内部磁気圏で 2015 年 3 月 1-31 日にヴァン・アレン衛星によって観測された電子フラックスの変動を Figure 1 に示す。静穏時にはゼブラ構造は安定して存在し、Dst 指数 (Figure 1 第 4 パネル) が数日間下がると (磁気嵐がおこると) ゼブラ構造が乱れることが分かる。AMPERE 衛星群によって観測された極域を流れる全沿磁力線電流量を同第 2 パネルに示す。全沿磁力線電流の増加とゼブラ構造が再構成する期間が合致していることがわかる。

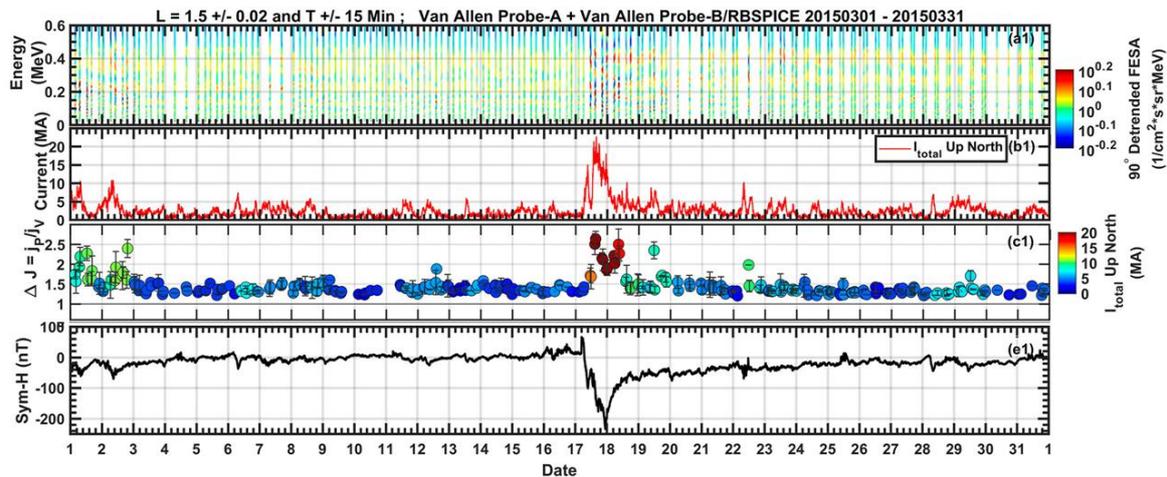


Figure 1: 2015 年 3 月 1-31 日に観測された電子フラックスの変動量 (第 1 パネル、縦軸は電子の運動エネルギー)、極域を流れる沿磁力線電流の総量 (第 2 パネル)、電子フラックスのピーク間比 (Δj , 色は沿磁力線電流の総量, 第 3 パネル)、磁気嵐を表す Sym-H 指数 (第 4 パネル) を示す。(Pandya et al., 2024 を改変)

グローバル MHD シミュレーションで得た磁気嵐中における全沿磁力線電流と L=1.5 における東西方向の電場 E_ϕ の関係を Figure 2 に示す。全沿磁力線電流が増加すると西向き電場が増加することがわかる。すなわち、以下のように電離圏を介して太陽風と深内部磁気圏が結合している可能性がある。

- ① 惑星間空間磁場が南を向くと地球磁場と再結合したばかりの磁力線を磁気圏低緯度境界付近で太陽風プラズマが引っ張り、アルベン波を励起するとともに沿磁力線電流を生成する (Ebihara and Tanaka, 2022, doi:10.1029/2021JA029991)。
- ② アルベン波はプラズマ流の影響を受けるため、磁力線に沿って進むとは限らない。磁気圏低緯度境界付近で発生したアルベン波は反太陽方向に流されつつ極域に向かい、Region 1 型として知られる沿磁力線電流となって電離圏に接続する (Ebihara and Tanaka, 2022, doi:10.1029/2021JA029991)。
- ③ 電離圏電場が低緯度に広がり (Kikuchi and Araki, 1979, doi:10.1016/0021-9169(79)90094-1)、磁力線に沿って深内部磁気圏に伝わる (Nishimura et al.,

2010, doi:10.1029/2010JA015491; Ebihara et al., 2020, doi:10.1029/2019JA026998)。

- ④ 内部磁気圏で捕捉されている電子が西向き電場によって地球方向（深内部磁気圏）に運ばれる (Pandya, Ebihara, et al., 2023, doi: 10.1029/2022JA030950)。

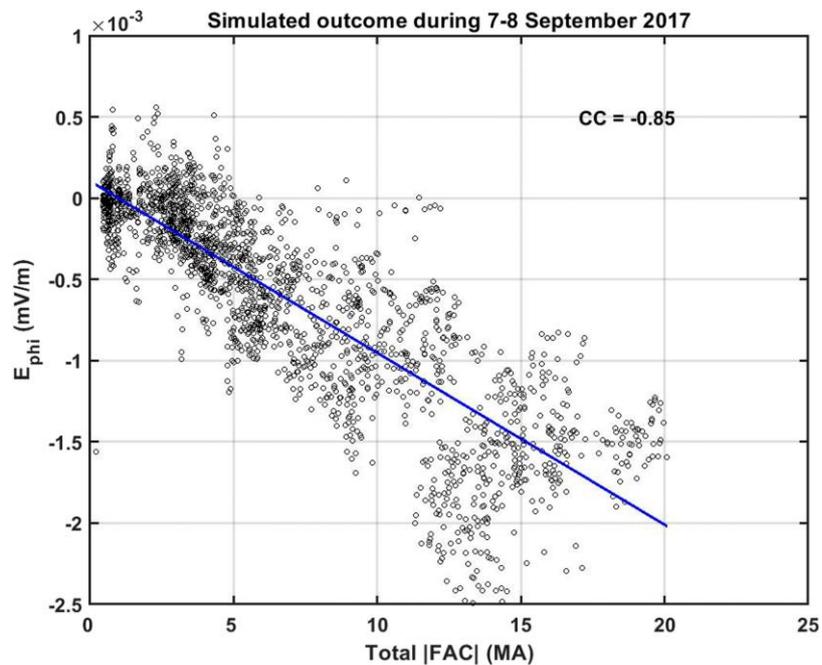


Figure 2: グローバル MHD シミュレーションで得た 2017 年 9 月 17-18 日の磁気嵐中における全沿磁力線電流 (Total FAC) と L=1.5 の真夜中における東西方向の電場 E_{ϕ} の関係。東向きが正で、相関係数は -0.85 である。

(Pandya et al., 2024 を改変)

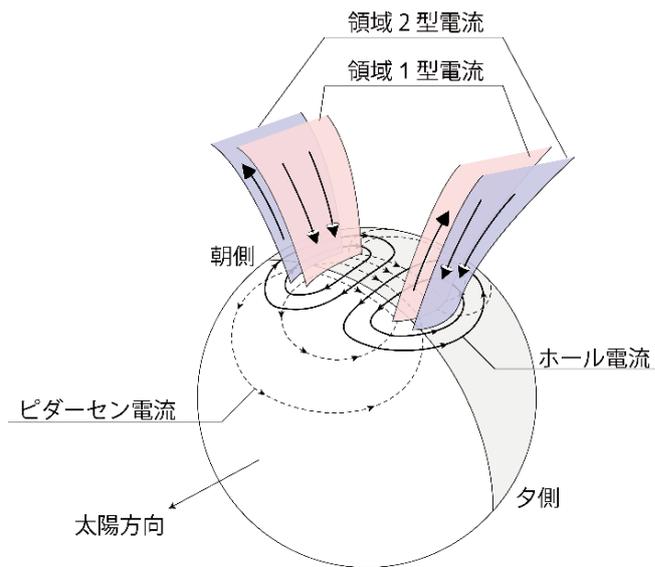


Figure 3: 沿磁力線電流と電離圏電流（電離圏電場）の関係を示す模式図。

惑星間空間磁場が南を向き、対流が強まり、粒子が地球側に輸送されるという単純な内部磁気圏像ではなく、素過程に立脚した新しい磁気圏像の獲得を引き続き目指していきたい。

公表状況（Publications）：

1. Pandya, M., Y. Ebihara, T. Tanaka, J. Manweiler, and S. Vines (2024), Intensification of the electron zebra stripes in the Earth's inner magnetosphere during geomagnetic storms, *Geophysical Research Letters*, 51, e2023GL107822, doi:10.1029/2023GL107822.
2. Zhang, T., Y. Ebihara and T. Tanaka (2023), Nighttime geomagnetic response to jumps of solar wind dynamic pressure: A possible cause of Quebec blackout in March 1989, *Space Weather*, 21, 11, e2023SW003493, doi:10.1029/2023SW003493.