

交換型リコネクションのトポロジーと力学：「極冠分岐現象の 数値シミュレーションによる再現」に向けて

Topology and dynamics of interchange-type reconnection: Toward the goal of “reproducing polar cap bifurcation phenomena by numerical simulation”

研究代表者： 渡辺正和 （九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門）
watanabe.masakazu.852@m.kyushu-u.ac.jp

研究分担者： 蔡東生 （筑波大学システム情報系）
cai@cs.tsukuba.ac.jp
担当：磁場位相解析プログラム開発・改良

研究分担者： 藤田茂 （統計数理研究所モデリング研究系）
sfujita@ism.ac.jp
担当：可視化プログラムの開発・改良

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）
takashi.tanaka.084@m.kyushu-u.ac.jp
担当：磁気流体コードの開発・改良

研究分担者： 宮崎 紘和 （九州大学理学部地球惑星科学科）
miyazaki.hirokazu.982@s.kyushu-u.ac.jp
担当：シミュレーションの実行・解析

研究目的 (Research Objective):

惑星間空間磁場 (interplanetary magnetic field, IMF) 北向き時には、電離圏においていわゆる極冠が2つ以上に分かれて見えることがある。これを極冠分岐現象と呼んでいる。本研究の最終目標は極冠分岐現象を数値シミュレーションで再現することである。しかしまだごく限られた場合にしか再現に成功していない。極冠分岐は磁気圏の複雑な磁場形状とトポロジーを反映していると思われる。したがって、まず最も簡単な基本構造と力学過程を知ることが重要である。IMF 北向き時には電離圏で逆向き対流セルが発生する。その起源は2つの交換型リコネクションによる磁束循環 (交換サイクル) と考えられる。本研究では、地球磁気圏を題材にして、交換型リコネクションの具体的な形と力学を明らかにする。交換型リコネクションとは、リコネクション前後で磁力線が属するトポロジー領域が入れ替わるリコネクションである。具体的には、IMF と開磁力線のリコネクション、開磁力線と閉磁力線のリコネクション、の2つがある。見かけは異なっても2つのリコネクションは同位相と考えられる。交換型リコネクションの理解を通して、最終的には極冠分岐現象の再現へつなげたい。またリコネクションの基礎は地球だけでなく太陽など他の天体にも応用でき

る。実際、交換リコネクションの概念は太陽物理学で最初に導入され、その後地球磁気圏に輸入された。基本的部分は共通である。

計算手法 (Computational Aspects):

田中高史氏が開発した磁気流体モデル REPPU (Reproduce Plasma Universe) を用いて交換サイクルを再現する。得られたシミュレーションデータに対し磁場トポロジー解析を行う。トポロジー解析プログラムがデカルト座標系の正規格子にしか対応していないので、まず正規格子 (0.25Re 間隔) にデータを補間する。続いて磁場零点 (磁気中性点) を探索する。零点は正負 2 種類ある。正の (負の) 零点から出る磁力線群は、安定 (不安定) 1 次元多様体と不安定 (安定) 2 次元多様体で表される。このうち、2 次元多様体で表される磁気面 (Σ 面=セパレーター) を追跡する。追跡には等高面法 (level-set method) を用いたアルゴリズムを採用する。ここ数年筑波大学で開発が進められてきたが、ようやく実用に耐えうるプログラムが出来つつある。 Σ 面を追跡し、他の零点との結合関係を調べる。交換型リコネクションは Σ 面上で起こるので、 Σ 面上での沿磁力線電場や速度ベクトルを可視化する。また零点近傍での磁力線形状を調べ、交換型リコネクションの幾何学と力学を考察する。

研究成果 (Accomplishments) :

REPPU コードを用いて、交換型リコネクションによる磁気圏・電離圏対流 (交換サイクル) を再現した。具体的には、IMF 強度 6nT、時計角 -20° ($B_x=0$ nT, $B_y=-2.1$ nT, $B_z=5.7$ nT) で REPPU コードを長時間走らせ、定常磁気圏を作った。交換サイクルでは、電離圏に逆向き対流セルが現れる。その特徴は朝側・夕側どちらか一方のセルが完全に閉磁力線領域にあることである。磁気圏が定常であるかどうかは、電離圏対流が変わらないことにより判断した。ある時刻のシミュレーションデータを取り出し、詳細な解析を行った。磁気圏の大域的磁場トポロジーは、零点 2 個、セパレーター 2 本の基本構造から成ると予想される。実際に磁場零点を探索すると、北半球に A 型 (負の) 零点、南半球に B 型 (正の) 零点があった。零点から出入りする磁力線はある曲面 (2 次元多様体 Σ) とある曲線 (1 次元多様体 γ) から成る (以下の図 2b も参照せよ)。これらの多様体は磁場トポロジーの境界になっている。 Σ 面上で磁力線が発散する零点を B 型 (正の) 零点、 Σ 面上で磁力線が収束する零点を A 型 (負の) 零点と呼んでいる。

図 1 は 2 つの零点から Σ 面を追跡したものである。追跡には等高面法 (level-set method) を用いている。本研究で用いる座標系は $X=-X_{GSM}$ 、 $Y=-Y_{GSM}$ 、 $Z=Z_{GSM}$ である。通常使われる Geocentric Solar Magnetospheric (GSM) 座標系とは、 X と Y が逆向きである。北半球の零点 A [$(X,Y,Z)=(1.1, 2.9, 14.6)$ Re] から Σ_A (青) が、南半球の零点 B [$(X,Y,Z)=(1.3, -3.1, -14.7)$ Re] から Σ_B (紫) が出ている。両者の交線がセパレーターである。図 1 で分かるように、昼間側セパレーターは綺麗に求められている。夜側

セパレータも交線として部分的に求められている。 Σ 面の追跡は零点から $60R_e$ の距離まで行った。零点から離れると追跡に時間がかかるようになり、あるところで打ち切らざるを得ない。

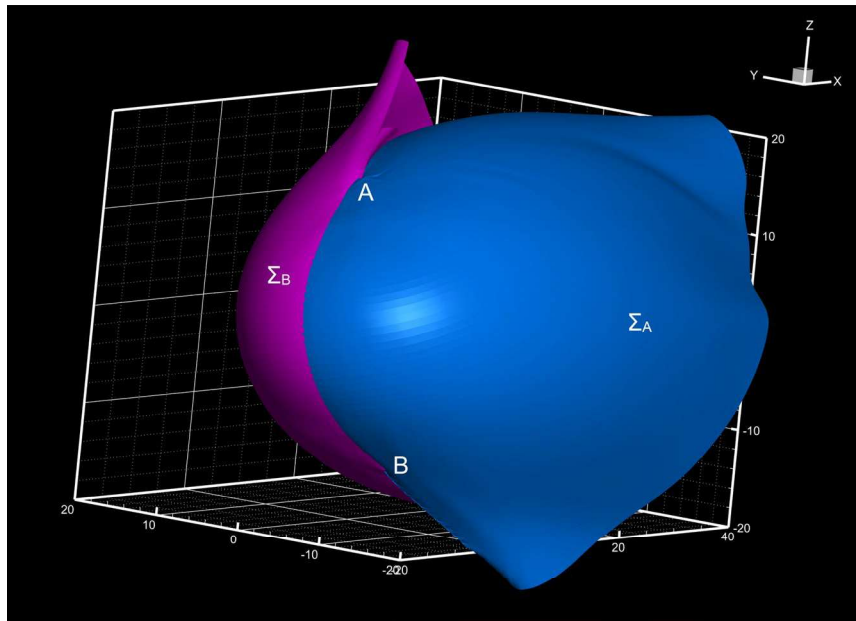


Fig.1 大域的磁気圏磁場トポロジー. 2つの零点から出る Σ 面を追跡したもの.

図 2a は零点 A 近傍を拡大したものである。ただし Σ_A は半径 $5R_e$ のところまでしか描いていない。 Σ_A の半分 (セパレータより向こう側 [朝側]) は Σ_B に隠れて見えない。零点 A から上方および下方に伸びる γ_A は Σ_B の尾根または谷として見えている。昼間側から伸びてきた Σ_B と夜側から伸びてきた Σ_B は γ_A 上で綺麗に重なる。図 2b は零点 A 近傍を模式的に描いたものであるので図 2a と比較してほしい。

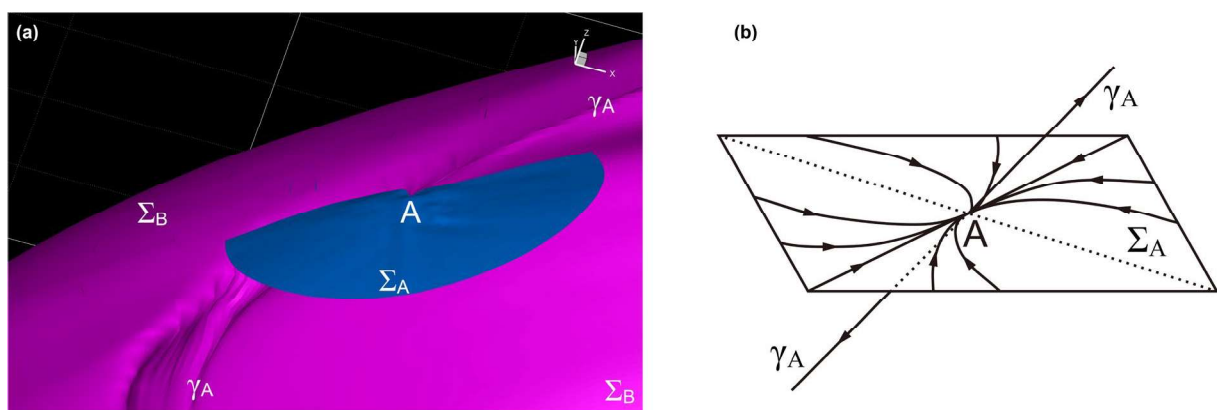


Fig.2 (a) 零点 A 近傍の様子. Σ_A は半径 $5R_e$ まで追跡. (b) A 型零点近傍の構造模式図.

図 3a は、半径 $5R_e$ の Σ_A (図 2a と同じ) において、矢線で磁力線を表すとともに

に色で沿磁力線電場を表したものである。橙色の磁力線はセパレータに最も近い磁力線を示している。図 3a から、セパレータより朝側には朝方に向く沿磁力線電場が、セパレータより夕側にも朝方に向く沿磁力線電場があることが分かる。前者は南半球ローブと閉磁力線のリコネクションが、後者は北半球ローブと IMF のリコネクションが起こっていることを示している（いずれも交換型リコネクション）。これよりいわゆる“X line”が零点 A から朝夕方向に伸びていることが予想される。図 3b は色で Σ_A を通過するプラズマ流を示したものである。正は面を南から北に通過する場合で、負は面を北から南に通過する場合である。予想される X line より昼側ではプラズマ流は南から北に通過し、X line より夜側ではプラズマ流は北から南に通過している。これらの流れは前述のリコネクションによる流れと合致している。

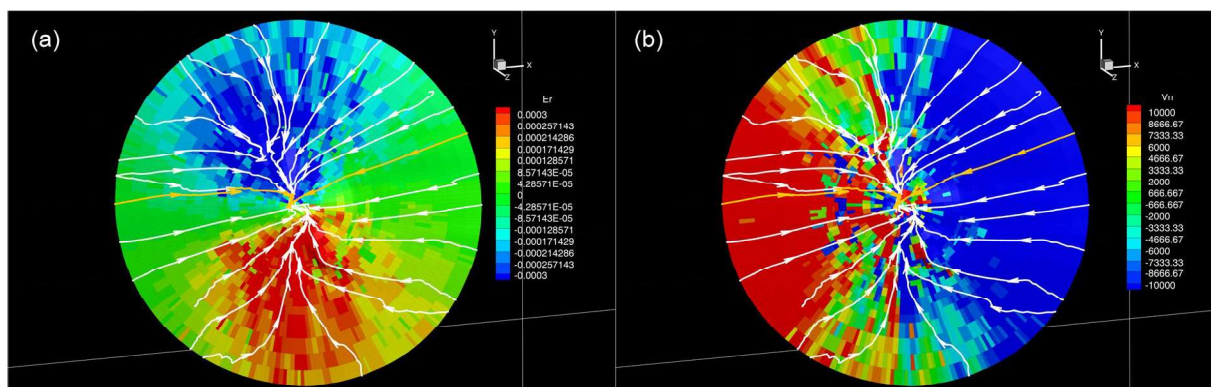


Fig.3 (a) Σ_A 上の沿磁力線電場と磁力線. (b) Σ_A を通過するプラズマ流（南から北が正）.

図 3 に示した磁力線の形状に、交換型リコネクションの特徴が表れている。もしポテンシャル磁場（電流なし）であれば、 Σ 面上の磁力線は図 4a のようにセパレータ（太線）に接する形で零点に近づく。しかし図 3 では磁力線は図 4b のようにセパレータに直交する方向（X line に接しながら）零点に近づいている。これは X line 方向にいわゆる案内磁場（guide field）を作ることによって、交換型リコネクションを起こしていると解釈できる。

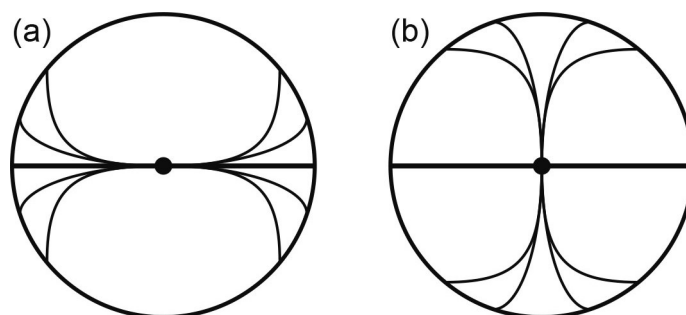
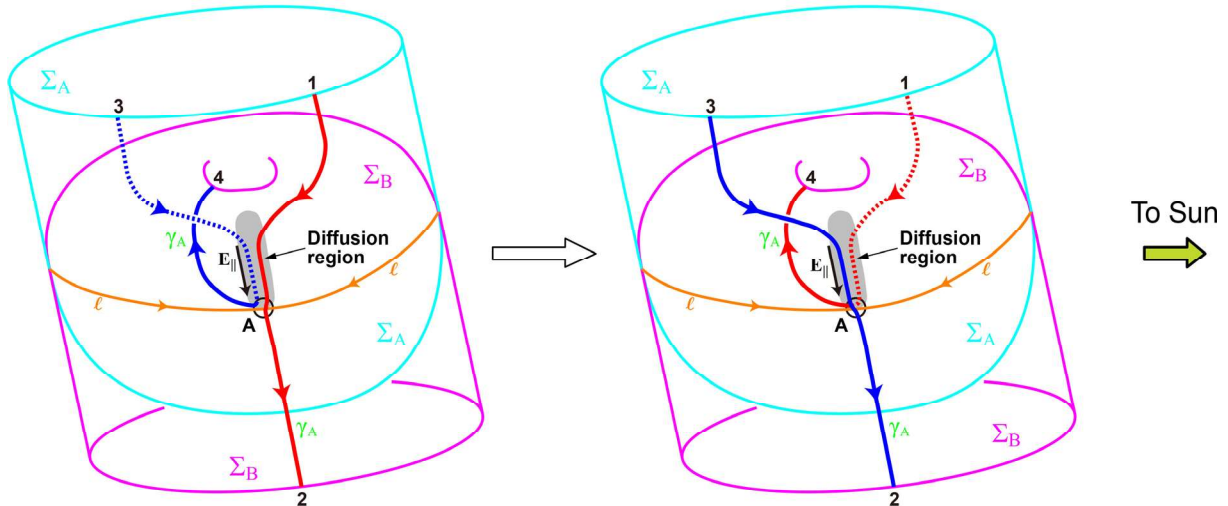


Fig.4 Σ 面上の磁力線形状（太線はセパレータ）: (a) 電流なしの場合 (b) 図 3 の場合.

図5は零点A近傍で起こっている2つの交換型リコネクションを模式的に示したものである。いずれも赤磁力線1-2と青磁力線3-4が拡散領域で入れ替わり、磁力線1-4と磁力線3-2になる。点線で表してある磁力線はセパトロイクスの向こう側（内側）にあり、実線の磁力線はセパトロイクスより手前側（外側）にある。リコネクション前後で磁力線はセパトロイクスを通過し、その向きは図3bにある流れの向きと同じである。このように交換型リコネクションは現実的磁気圏でも起こっており、その様態が本研究で初めて明らかにされた。

(a) IMF to north lobe reconnection



(b) south lobe to closed reconnection

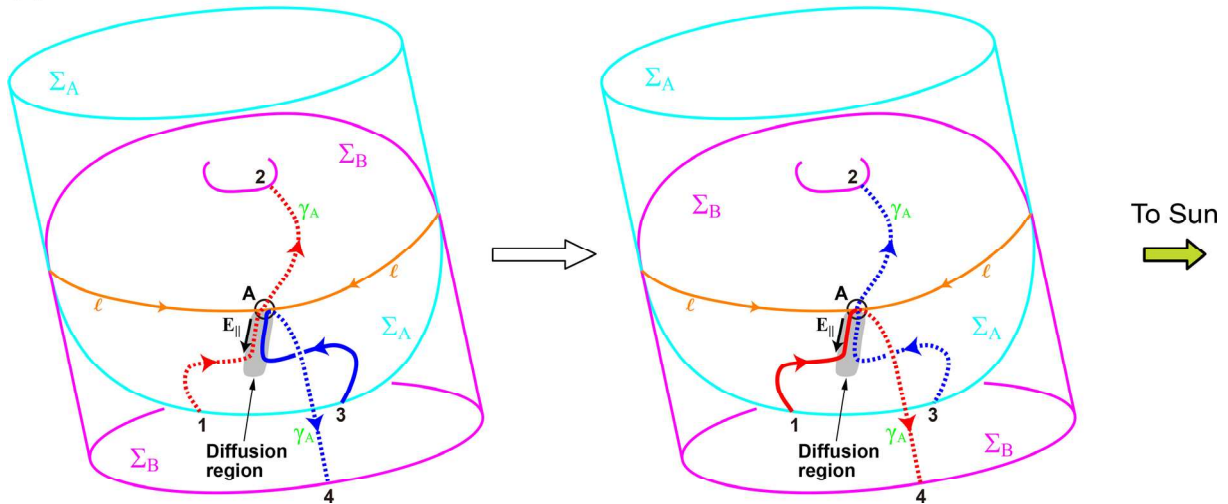


Fig.5 交換型リコネクションの模式図. 橙色はセパレータ. その他の記号は本文参照.

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. Tanaka, T., Ebihara, Y., Watanabe, M., Fujita, S., & Kataoka, R. (2021). Global simulation

of the Jovian magnetosphere: Transitional structure from the Io plasma disk to the plasma sheet. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2021JA029232.

<https://doi.org/10.1029/2021JA029232>

2. Tanaka, T., Ebihara, Y., Watanabe, M., Den, M., Fujita, S., Kikuchi, T., Hashimoto, K. K., & Kataoka, R. (2021). Development of the substorm as a manifestation of convection transient. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2020JA028942.

<https://doi.org/10.1029/2020JA028942>

3. Tanaka, T., Ebihara, Y., Watanabe, M., Den, M., Fujita, S., Kikuchi, T., Hashimoto, K. K., Nishitani, N., & Kataoka, R. (2021). Roles of the M-I coupling and plasma sheet dissipation on the growth-phase thinning and subsequent transition to the onset. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2021JA029925.

<https://doi.org/10.1029/2021JA029925>

(口頭)

1. Watanabe, M., T. Asano, D. Cai, P. Xiong, S. Fujita, and T. Tanaka, Topology and geometry of interchange-type reconnection in the terrestrial magnetosphere, Japan Geoscience Union Meeting 2021, PEM09-P10, オンライン, 2021年6月6日 (2021年5月30日–6月6日).
2. 渡辺正和, 田中高史, 藤田茂, 蔡東生, 熊沛坤, 磁気圏尾部“乗り換えリコネクション”の磁場トポロジー, 第150回地球電磁気・地球惑星圏学会, R006-38, オンライン, 2021年11月2日 (2021年11月1–4日).
3. Watanabe, M., D. Cai, P. Xiong, S. Fujita, and T. Tanaka, A possible origin of the “polar cap bifurcation” during northward interplanetary magnetic field periods, The 12th Symposium on Polar Science, OSo18, オンライン, 2021年11月18日 (2021年11月15日–11月18日).