

極冠分岐の磁気圏磁場トポロジーによる解釈

Interpretation of polar cap bifurcation in terms of magnetospheric field topology

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の提供・助言

研究分担者：藤田茂（情報・システム研究機構
データサイエンス共同利用基盤施設）
sfujita@ism.ac.jp
担当：可視化プログラムの提供・助言

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）
takashi.tanaka.084@m.kyushu-u.ac.jp
担当：磁気流体コードの提供・助言

研究分担者：今泉太晟（九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻）
taisei.imaizumi.729@s.kyushu-u.ac.jp
担当：シミュレーションの実行・結果の可視化と解析

研究分担者：畠山将英（九州大学理学部地球惑星科学科）
hatakeyama.shoei.511@s.kyushu-u.ac.jp
担当：シミュレーションの実行・結果の可視化と解析

研究分担者：上西園健太（九州大学理学部地球惑星科学科）
kaminishizono.kenta.826@s.kyushu-u.ac.jp
担当：シミュレーションの実行・結果の可視化と解析

研究目的 (Research Objective):

大規模なオーロラ発光は通常環状（オーロラオーバル）になり、中心部のオーロラ発光がない領域は極冠と呼ばれる。極冠は開いた磁力線の領域で、一般には単連結（円と同位相）である。グローバル数値シミュレーションで、北向き惑星間空間磁場 (IMF, interplanetary magnetic field) の下で磁気圏-電離圏結合系を再現してやると、図1のように極冠が2つに（場合によっては3つ以上に）分裂したように見えることがある。図1は IMF B_y （朝夕成分）が負の場合の計算結果で、北半球の朝方側と南半球の夕方側に極冠の「飛び地」が出来ている。見かけ上極冠の単連結性が破れている。これを極冠の分岐 (bifurcation) と呼ぶ。IMF 北向き時の観測では、極冠域で太陽

一地球方向に並んだオーロラアーク (Sun-aligned arc) が頻繁に観測される。数値シミュレーションで得られる極冠分岐が、Sun-aligned arc 等の自然現象と関係している可能性もある。分岐した極冠は磁気圏の大規模構造を反映しているはずだが、その理解はこれからである。本研究の目的は、極冠分岐を起こす磁気圏を数値シミュレーションで再現し、その磁場トポロジーを理解することである。磁場トポロジーは磁気リコネクションと深い関係があり、トポロジーの理解はリコネクションを含むプラズマ力学の理解につながる。

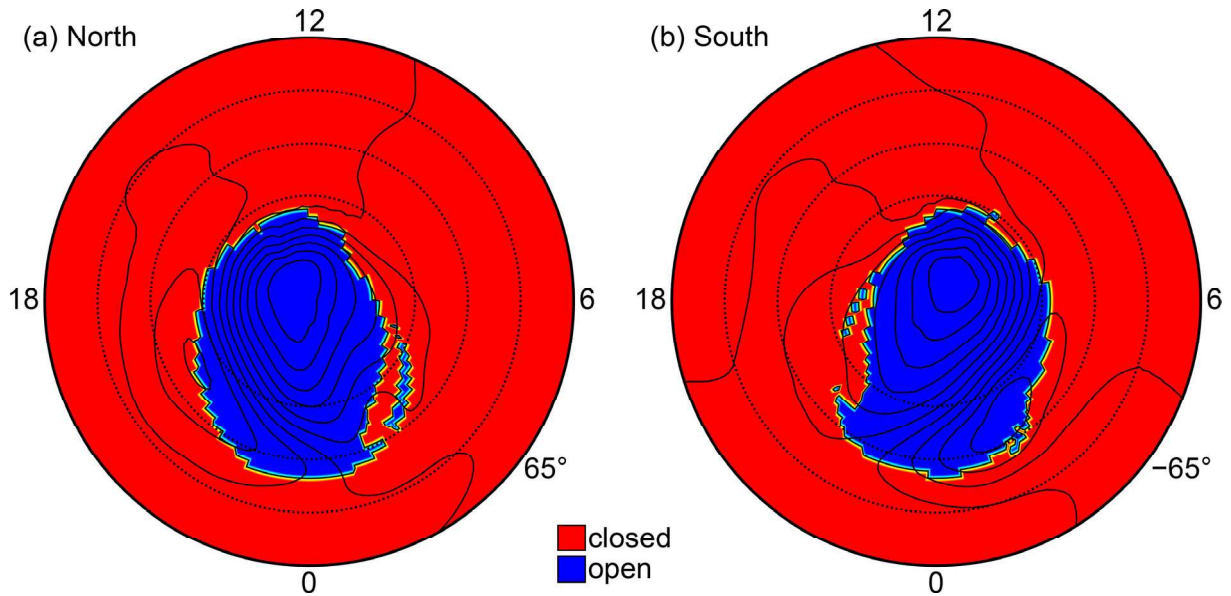


図1 シミュレーションで得られる極冠分岐の例。赤は閉磁力線領域、青は開磁力線領域 (極冠)。黒線は等ポテンシャル線を 4kV 毎に描いてある。

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、IMF 北向き時の極冠分岐を再現する。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 (または AB) 2 種類ある。正の零点 (B 型零点) から出る磁力線群は、安定 1 次元多様体と不安定 2 次元多様体で構成される。逆に、負の零点 (A 型零点) から出る磁力線群は、不安定 1 次元多様体と安定 2 次元多様体で構成される。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。 Σ 面を追跡し、他の零点が Σ 面上にないか調べる。もし他の零点が Σ 面上にあれば、その零点と Σ 面が出ている零点がセパレーターで結ばれている。全ての零点がセパレーターでどのように結ばれているかが分かれば、グローバルなトポロジーが一意に決定される。ただし、グローバルトポロジーの存在は定常性を仮定して

おり、時間変化する場合にはトポロジーの議論は意味がない。磁場形状の情報はアルフベン速度で伝わるので、アルフベン通過時間のスケールでは、系は定常であると仮定する。

研究成果 (Accomplishments) :

数値シミュレーションの結果にトポロジー解析を施し、演繹的にトポロジーを決定しようというのが本研究の主題である。しかし数値解析上の問題がいくつかあって、現時点ではまだ十分に成功していない。以下に述べることは、色々なシミュレーション結果から帰納される「予想」である。

(1) 極冠分岐に見られる共通のパターン

極冠分岐の典型的パターンは、図1のように、朝方または夕方のオーロラオーバル内に太陽方向に伸びた開磁力線領域が出現するものである。オーロラオーバルが「剥がれる」という表現がふさわしい。この極冠分岐は様々な状況で発生し得るが、IMF By (朝夕成分) の符号変化を伴わない太陽風擾乱が地球に到達すると、約1時間後にほぼ確実に現れることがわかった。ここでいう擾乱は、太陽風の密度変化、IMF 強度の変化、IMF By の符号を変えない範囲での IMF の回転、などである。擾乱到達前には、磁場零点2個、セパレータ2本の基本構造が磁気圏にある。擾乱が到達しても基本構造は保たれるが、擾乱到達後約20分から、零点がクラスター化して零点群になる。ここで言う零点クラスターは、同種零点の集まりである。零点群を遠くから眺めれば (クラスターの直径 $1R_E$ よりずっと長い空間スケールで見れば) 1個の零点に見える。

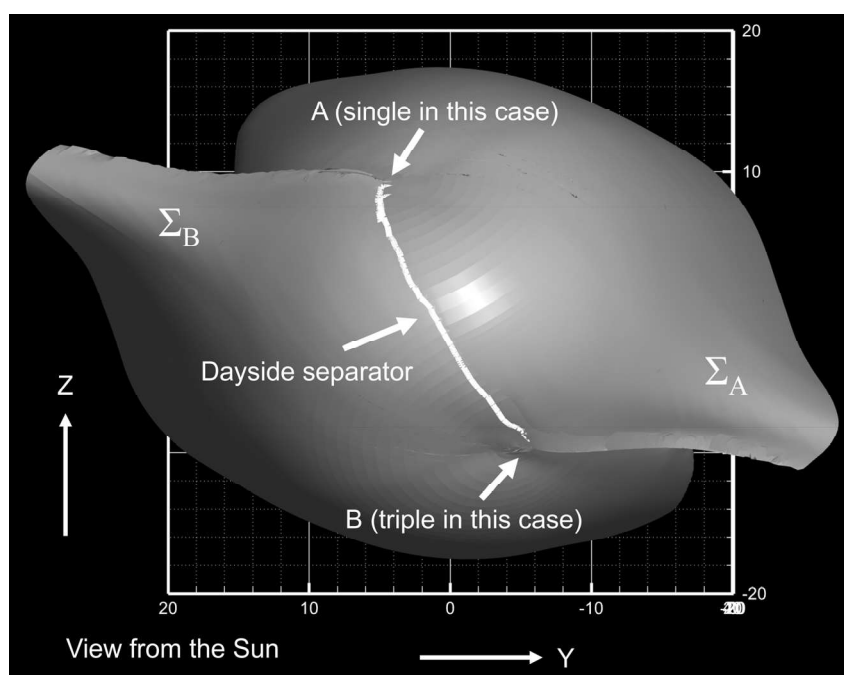


図2 2つの零点 (群) から出る Σ 面を追跡したもの。

図2はクラスター化後のトポロジー例である。クラスター化しても基本構造は変わらない。北半球に負の(A型)零点、南半球に正の(B型)零点があり、それぞれからセパレートリクス Σ_A と Σ_B が出ている。それらの交線がセパレータで、図2では昼間側セパレータのみ明示してある。図2の例では、北半球の零点は1個だが南半球の零点は3個ある。南半球の零点群の直径は約 $1R_E$ で、これより大きいスケールでは零点群は1個のB型(正の)零点とみなすことができる。そして図2のようにセパレートリクス Σ_B を追跡することができる。

零点のクラスター化と極冠分岐の時系列関係を表したものが図3である。この例の場合、 $T=250\text{min}$ にIMFが強度 $B=6\text{nT}$ 、時計角 $\theta=-45^\circ$ ($B_y < 0$)から $B=13\text{nT}$ 、 $\theta=-70^\circ$ に切り替わった。それから約20分後($T=270\text{min}$)、両半球の零点がクラスター化する。そして更にIMFが切り替わって約50分後($T=300\text{min}$)、両半球の電離圏で図1のような極冠分岐が始まる。

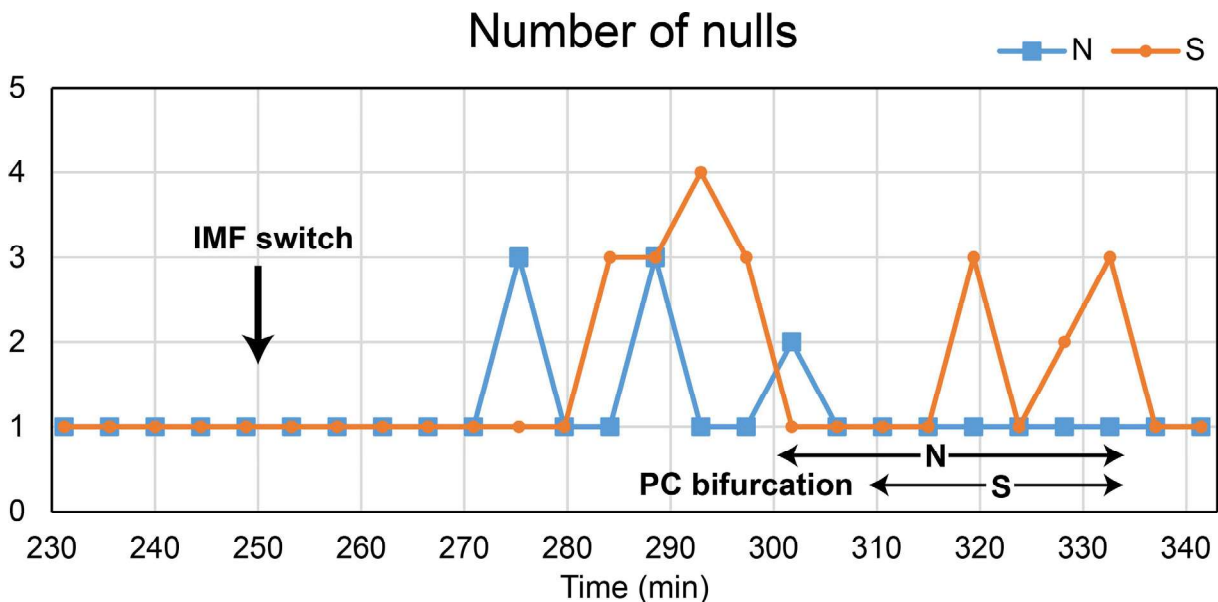


図3 零点数の推移。IMF条件の詳細は本文参照。

この例はIMFが変動する場合だが、太陽風密度や速度が変動した場合でも、同様に約1時間の時間差をもって極冠分岐が現れることを、我々は様々なシミュレーションで確認した。しかし極冠分岐の背景にあるグローバルトポロジーの決定は難しい。零点が近接しすぎていて、各零点から出る Σ 面は区別できない。また零点群の内部は零線や零領域があると予想され、これらの解析は一般に困難である。零点は磁場の1次近似で表現されるが、零線や零領域には展開の高次項が含まれる。

(2) 比較的理解が進んでいる例からの考察

IMF 北向きのまま B_y 成分が反転すると、いわゆるシータオーロラが形成されることが、観測でもシミュレーションでもよく知られている。図 4 は $B=20\text{nT}$, $\theta=-40^\circ$ ($B_y<0$) から B はそのまま、 $\theta=+40^\circ$ ($B_y>0$) に IMF B_y を反転させたときのシミュレーションである。反転時刻を $T=0$ とすると、北半球では $T=20\text{min}$ ごろから朝方側のオーロラオーバルが剥がれてシータオーロラとなる。シータの横棒は極冠を横断し、約 1 時間後夕方側のオーロラオーバルと接触する。その結果極冠は分岐状態になる (図 4c)。

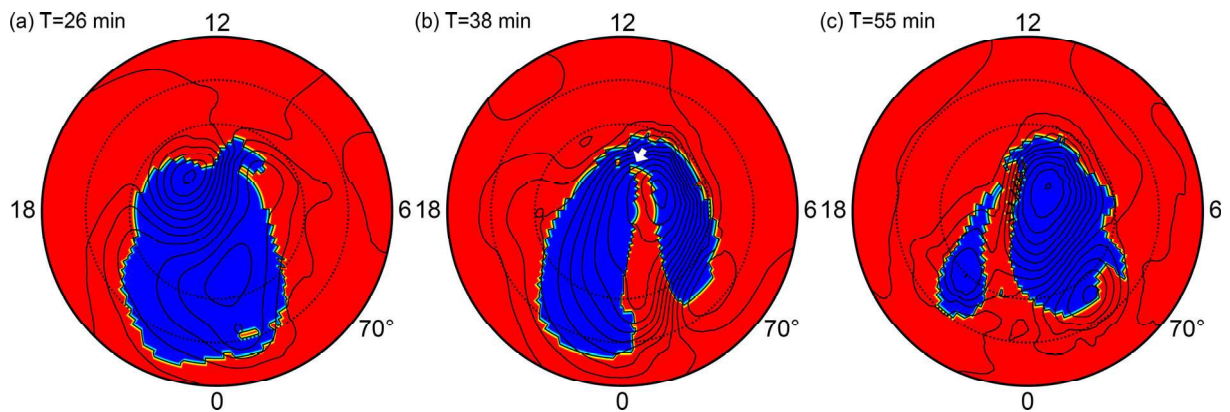


図 4 IMF B_y 反転によるシータオーロラ形成のシミュレーション(北半球)。赤は閉磁力線領域、青は開磁力線領域(極冠)。黒線は等ポテンシャル線を 4kV 毎に描いてある。図 4b の白矢印は古い IMF に伴う stemline の根元の位置を表す。

Tanaka et al. (2022a) は B_y 反転によりシータオーロラが形成される時の磁場トポロジーを調べた。磁気圏構造は、4 つの零点 (古い IMF に対応するもの 2 点と新しい IMF に対応するもの 2 点)、およびそれらをつなぐ 4 本のセパレータで表される (後出の図 5b 参照)。ただし、この構造は磁力線を試行錯誤的に描くことにより得られた描像で、定量的な解析から得られたものではない。シータオーロラ (Θ の横棒) が極冠を横断するとき、古い IMF の零点の根元 (零点と電離圏をつなぐ stemline の根元) は、図 4b のシータオーロラの昼間側先端にある (図 4b の白矢印)。古い IMF による零点の極性は、反対側にある新しい IMF による零点の極性と同一である。古い零点は新しい零点に接近してゆき、新しい IMF の下で零点 2 個の構造に戻ろうとしているように見える。

(1) と (2) の最終状態は、実はトポロジー的には同じではないかと思われる。実際、極冠分岐が発現するまでの時間スケールが約 1 時間と共通である。1 時間は太陽風・IMF の擾乱が磁気圏全体に行き渡る時間スケールである。この時磁気圏尾部で何か起こっているのかもしれない。この予想を念頭に (2) のトポロジー変化を解釈したものが図 5 である。IMF が切り替わる前、北半球午前側に負の零点、南半球午後側に正の零点がある (図 5a)。IMF が切り替わると新たな零点が出来る。この出

来方はよく分からないが、対称性から最初正午付近に零点ペアが現れて、朝方および夕方に広がってゆくと仮定しよう (図 5a)。古い零点は夜側に流れて 4 極構造になる (図 5b ; Tanaka et al., 2022a)。4 極構造は定常的なものではなく、新しい IMF の下での 2 極構造に戻ろうとする。このため同種零点が接近する (図 5c)。最終的には各半球で 2 つの零点が縮退する (図 5d)。この状態が (1) で記述した零点クラスターではないかと予想される。もしこの予想が正しければ、単連結性が消えているのは見かけだけで、2 つの極冠は実はつながっていることになる。

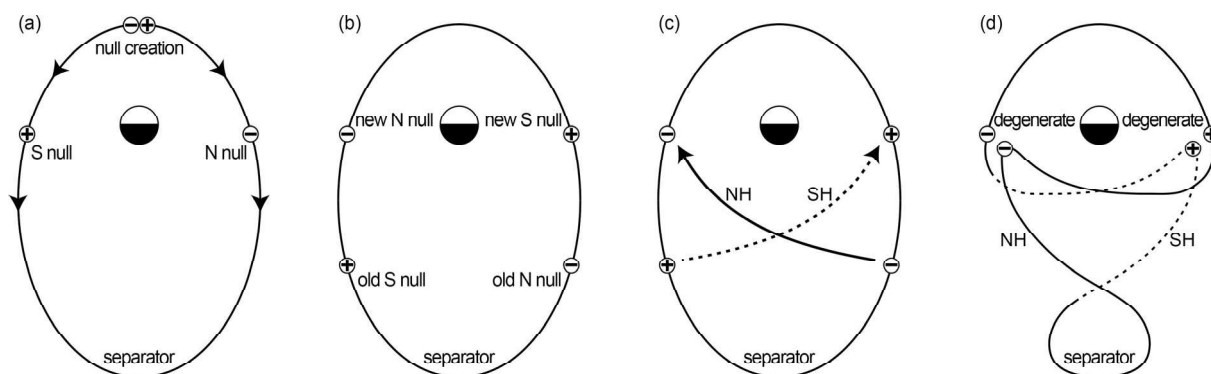


図 5 By 反転に伴うトポロジー変遷の解釈。矢印は零点の運動を表す。

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. Tanaka, T., Ebihara, Y., Watanabe, M., Fujita, S., Nishitani, N., & Kataoka, R. (2022a). Interpretation of the theta aurora based on the null-separator structure. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, e2022JA030332. <https://doi.org/10.1029/2022JA030332>
2. Tanaka, T., Watanabe, M., Ebihara, Y., Fujita, S., Nishitani, N., & Kataoka, R. (2022b). Unified theory of the arc auroras: Formation mechanism of the arc auroras conforming general principles of convection and FAC generation. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, e2022JA030403. <https://doi.org/10.1029/2022JA030403>

(口頭)

1. Masakazu Watanabe, Dongsheng Cai, Peikun Xiong, Shigeru Fujita, and Takashi Tanaka, Geometric and dynamic properties of interchange reconnection in the Earth's magnetosphere, Japan Geoscience Union Meeting 2022, PEM10-P07, オンライン, 2022 年 6 月 2 日 (2022 年 5 月 22 日-6 月 3 日).
2. 渡辺正和, 蔡東生, 熊沛坤, 藤田茂, 田中高史, 極冠分岐の磁場トポロジー, 第 152 回地球電磁気・地球惑星圏学会, R006-P03, 相模原, 2022 年 11 月 4 日 (2022 年 11 月 3-7 日).
3. Masakazu Watanabe, Dongsheng Cai, Peikun Xiong, Shigeru Fujita, Takashi Tanaka,

Reinterpreting “polar cap bifurcation” reproduced by magnetohydrodynamic simulations,
The 13th Symposium on Polar Science, OSp5, オンライン, 2022年11月16日 (2022
年11月15日-11月18日).