

惑星間空間磁場北向き時の磁気尾部に現れる鎖交する閉磁束－ 惑星間空間磁束の磁場トポロジー

Magnetic topology of the closed and interplanetary flux interlinkage in the magnetotail for
northward interplanetary magnetic field

研究代表者：渡辺正和（九州大学）

研究分担者：蔡東生（名古屋商科大学 経営学部）

担当：磁場位相解析プログラムの提供・助言

藤田茂（統計数理研究所 データ同化研究センター）

担当：可視化プログラムの提供・助言

田中高史（九州大学 国際宇宙惑星環境研究センター）

担当：シミュレーションコードの提供・助言

片山峻佑（九州大学大学院 理学府 地球惑星科学専攻）

担当：可視化プログラムの開発・改変

嘉陽一輝（九州大学大学院 理学府 地球惑星科学専攻）

担当：データ解析プログラムの開発・改変

木戸大成（九州大学 理学部 地球惑星科学科）

担当：データ解析プログラムの開発・改変

岩井律樹（九州大学 理学部 地球惑星科学科）

担当：データ解析プログラムの開発・改変

加藤桃哉（九州大学 理学部 地球惑星科学科）

担当：データ解析プログラムの開発・改変

研究目的 (Research Objective):

本研究は元々「昼間側沿磁力線電流系の起源と REPPU モデルにおける半球間共役性の欠如」という課題名で採択されたものだが、標記研究課題において顕著な成果があったのでこれを報告する。太陽風－磁気圏－電離圏のグローバル磁気流体シミュレーションにおいて、惑星間空間磁場（interplanetary magnetic field, IMF）北向き時の磁気圏尾部に、閉磁束と惑星間空間磁束が鎖交する現象が時折発生する。磁気圏磁場は、零点 2 個とそれらを結ぶ 2 本のセパレータ（磁力線でもある）から成る構造が基本で、“2-null, 2-separator 構造”と呼ばれている。2 個の零点から発するセパトラトリクス（磁力線分離面）は、磁力線開閉境界を表すトーラス面と IMF-開磁場境界を表す円筒面を形成し、前者は後者に内接する。この接線が前述のセパレータである。鎖交磁場の存在は、トーラス面に“穴”が開き（すなわち新しい零点が発生し）、“2-null, 2-separator 構造”が局所的に壊れていることを意味する。鎖交磁束が発生することはこれまでも分かっていたが、数値誤差（数値拡散）により発生している可能性が捨てきれなかったため、また鎖交磁束は限られた状況下のみで出現する珍しい現象であったため、これまでトポロジーの解析と解釈をあまり進めてこなかった。しかし田中高史氏による最近の計算では、数値拡散がほとんどない高空間解像度モデルを用いると、

鎖交磁束は従来の低空間解像度モデルに比べてより頻繁に（ほぼ定常的に）、かつより大きな構造として現れることが分かった。したがって鎖交磁束は数値的なものではない。本研究の目的は、鎖交磁束の磁場トポロジーを明らかにし、鎖交磁束の形成過程を考察する一助とすることである。

計算手法 (Computational Aspects):

田中高史氏が開発した、太陽風－磁気圏－電離圏をグローバルに解く磁気流体コード REPPU (Reproduce Plasma Universe) を用いて磁気圏を再現する。今回用いたモデルは低空間解像度版（レベル 6, 角度分解能 1.2° ）である。実はレベル 6 で計算すると、鎖交磁束はごく限られた状況でしか現れない。レベル 7（角度分解能 0.6° ）でも状況はあまり変わらない。しかし田中高史氏のレベル 8（角度分解能 0.3° ）による計算では準定常的に現れる。研究代表者はレベル 8 を動かす技量がないので、これまでに行ったレベル 6 のシミュレーションの中から、鎖交磁束が現れた例を選び出した。ただしシミュレーションの生データは既に失われているので、今回新たに計算し直して前回とほぼ同じ結果を再現できた。こうして得られた磁場データを $0.25R_E$ 間隔の正方格子に補間する。この補間データを用いて磁気零点を探索する。零点探索は線形零点（零点近傍の磁場が磁場勾配テンソル $\nabla \mathbf{B}$ のみで表せる）が正方格子内に 1 個あると仮定して行う。したがって高次零点や正方格子内に複数の零点がある場合には対応できない。線形零点では、 $\nabla \mathbf{B}$ の固有値実部の符号は $(- \ - \ +)$ または $(+ \ + \ -)$ と 2 つが同符号になる。前者を A 型零点、後者を B 型零点と呼ぶ。同符号となる 2 つの固有値に対応する固有空間は、零点から発する 2 次元多様体（セパトリクス, Σ 面）になり、残り 1 つの固有値に対応する固有空間は零点から発する 1 次元多様体 (γ 線) になる。筑波大学で開発された Σ 面追跡のプログラムを用いて、各零点から発する Σ 面を追跡する。追跡には測地レベルセット法という手法が使われている。この手法は数学的に精度が保証されていて、磁力線を追跡するよりもはるかに正確に磁気面を求めることができる。最後に、 Σ 面の様相から、磁場トポロジーを推定する。

研究成果 (Accomplishments) :

図 1 はシミュレーションに現れた鎖交磁束の例であり、今回はこの事例の解析を行った。まず、大きさが $6nT$ 、時計角が -45° ($IMF B_y < 0$) の定常 IMF を 2 時間以続け、準定常磁気圏を作った。このとき、北半球に A 型零点 1 個、南半球に B 型零点 1 個の基本構造 (2-null, 2separator 構造) が定常的に観られた。これを図 2 に示してある。青は北半球の零点 A から追跡した Σ_A 面で、紫は南半球の零点 B から追跡した Σ_B 面である。いずれも反対半球の零点に到達する (A は Σ_B 上にあり、B は Σ_A 上にある)。 Σ_A と Σ_B は昼側および夜側で交差し、交線がそれぞれ昼側セパレータと夜側セパレータになる (図 2 は夜側セパレータが現れるまで十分な追跡を行っていない)。定常磁気圏を得た後、ある時刻で IMF の大きさを $13nT$ 、時計角を -70° に段階的に変えた。変

更後はこの IMF を定常に保った．図 1 に示す鎖交磁束は，階段状の IMF 擾乱から約 1 時間後に現れた．このように，レベル 6 のシミュレーションでは，鎖交磁束は IMF または太陽風に擾乱を与えた時に発生する．

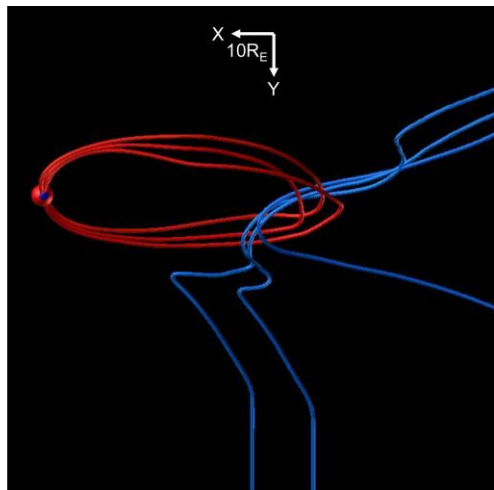


Fig. 1 シミュレーションに現れた鎖交磁束を北半球から眺めたもの．赤は閉磁力線，青は IMF 線を表し，太陽は左方にある．

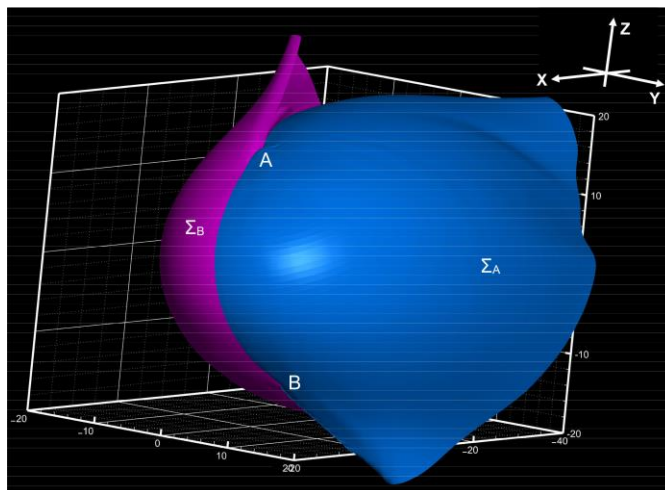


Fig. 2 IMF 擾乱到達前の磁場トポロジー．北半球の零点 A から出る Σ_A (青) と南半球の零点 B から出る Σ_B (紫) を描いている．基本の 2-null, 2-separator 構造が形成されている．

鎖交磁束の存在は，新たな零点が形成されたことを意味する．ではどこに形成されるかと言うと，図 2 に示す，元々ある大規模構造を決定する 2 つの零点が複数化する．

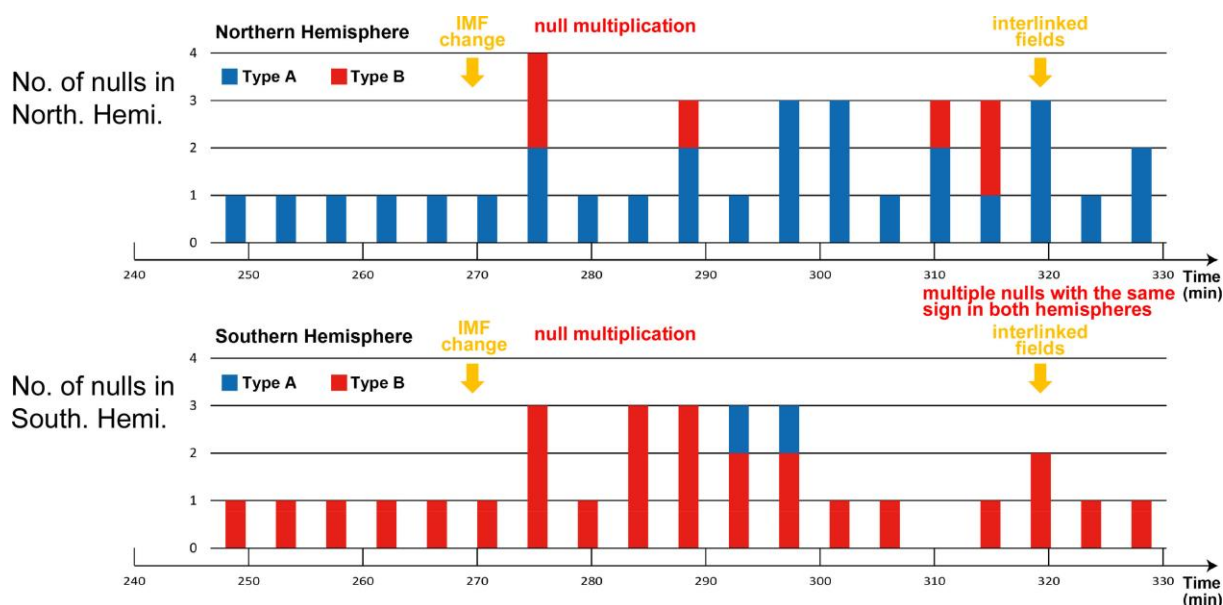


Fig. 3 各半球に現れる零点数の時間発展．上が北半球，下が南半球．青は A 型零点を，赤は B 型零点を表す．IMF 擾乱と鎖交磁束の時刻が橙矢印で示してある．

図 3 は、各半球における零点数の時間発展を表している（上が北半球、下が南半球）。また零点の型を色で表している（青が A 型、赤が B 型）。IMF 擾乱が加わるまでは、北半球に A 型 1 個、南半球に B 型 1 個の基本構造（2-mull, 2-separator 構造）が定常的に観えている。IMF 擾乱が加わった直後から、両半球とも元々ある零点が複数になり、零点“クラスター”を形成するようになる。ただし零点の型は同種であったり異種であったりする。IMF 擾乱から約 1 時間後に鎖交磁束が初めて観測されるが、これが図 1 に示した鎖交磁束である。図 3 からうかがえるこの時の特徴は、両半球とも元々ある零点と同型の零点のみが複数出現していることである。北半球には A 型 3 個、南半球には B 型 2 個が現れている。この時刻（Time=319min）における北半球の 3 つの零点について、 Σ 面を追跡してトポロジーを調べてみた。

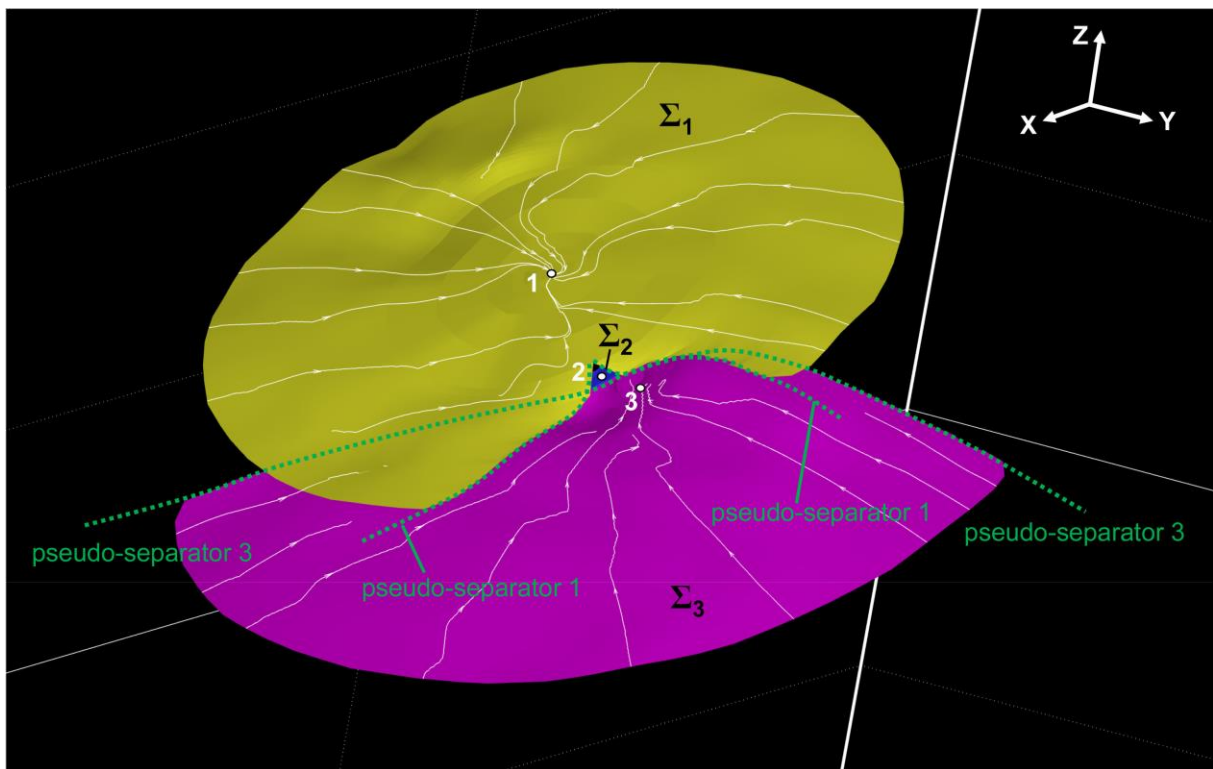


Fig. 4. 北半球における 3 個の A 型零点とそこから追跡した Σ 面。3 枚の Σ 面はほぼ同一の曲面上にある。 Σ 面が広がらない“pseudo-separator”（緑破線）が存在する。

図 4 は北半球の 3 つの A 型零点と、そこから追跡した Σ 面である。3 個の零点は図 2 に示す零点 A の近傍にあり、最も離れている零点 1 と零点 3 でもその距離は $0.76R_e$ しかない。3 枚の Σ 面には以下の特徴がある：(1) Σ_1 , Σ_2 , Σ_3 はほぼ同一曲面上にある；(2) Σ_1 は図の pseudo-separator 1（緑破線）より零点 2, 3 側に広がらない；(3) Σ_3 は図の pseudo-separator 3（緑破線）より零点 1, 2 側に広がらない；(4) Σ_2 は初期円から全く広がらない。以上の特徴を解釈したものが図 5 である。同一平面上に、3 つの同じ強さの吸込み（A 型零点）が等間隔で存在すると仮定して描いてある。3 つの負電荷が作る電場と同じで、3 個の零点は互いに反発する。したがって任意の 2 個の零点

の中間線は separator になる．“pseudo”としているのは，面状に広がるなど不安定性があるからである．3 零点の真中は，理想的には零点であり得る．しかしこの零点は高次項 $[(n!)^{-1}\nabla^n \mathbf{B}]$ が卓越していて不安定である．擾乱がわずかでも加わると，零“点”ではなくなる．その意味で零“領域”としてある．高次項が効く零領域の磁場は複雑でよく分からない．図 5 は等しい強度の零点が 3 個の理想の場合だが，図 4 は零点 2 が他の 2 つより弱いと考えればよい．

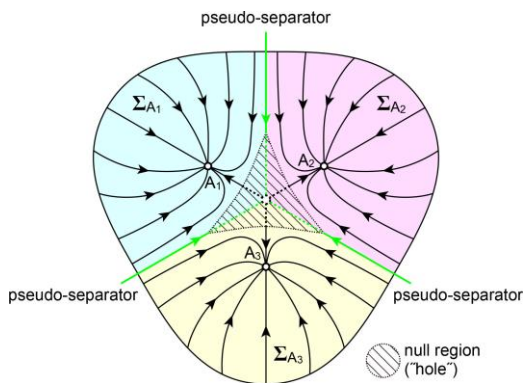


Fig. 5 図 4 の解釈．3 つの同じ強度の吸込みが同一平面上にあると仮定して描いてある．3 零点の真中は零領域．

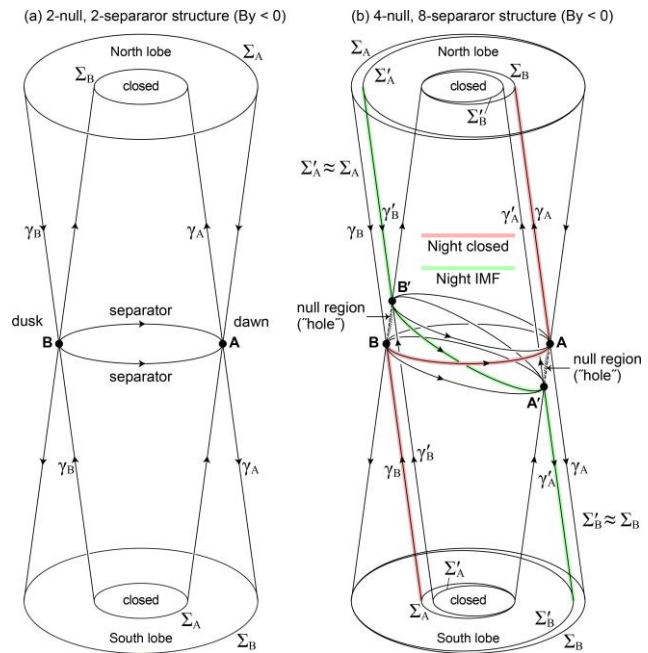


Fig. 6 鎖交磁束を作る最も簡単な磁場モデル．
図 6(a): 通常の 2-null, 2-separator 構造．図 6(b): Σ 面が二重化し 4-null, 8-separator 構造を形成．

図 5 は局所的な構造だが，大域構造を示したものが図 6 である．図 6(a)は IMF $B_y < 0$ の場合の 2-null, 2-separator 構造を夜側から見た図である．2 つの零点 A, B から円筒状の Σ_A と Σ_B が発している．上方（北半球）にある Σ_B の端と下方（南半球）にある Σ_A の端を中央の地球方向に折り返し，地球内部でつなげるとトーラスが出来る．これが磁力線開閉境界を表すトーラスである．簡単化のため，図 6(a)ではこの折り返しが省略されている．図 6(a)の 2-null, 2-separator 構造では，セパトリクスにより全空間は 4 つの領域（閉領域，北ローブ，南ローブ，IMF）に分離される．図 6(b)は Σ_A を A から離れたところで二重化し，同様に Σ_B を B から離れたところで二重化したものである．その結果，A, B も二重化し，図 5 と似た構造が形成される．図 5 は 3 つの同種零点が同一 Σ 面上にある場合だが，同様に，2 つの同種零点が同一 Σ 面上にある場合を考えればよい．実際，図 6(b)の A, A'は同一 Σ 面上 ($\Sigma_A \approx \Sigma'_A$) にある．同様に，図 6(b)の B, B'は同一 Σ 面上 ($\Sigma_B \approx \Sigma'_B$) にある．同種零点の中間領域には“零領域”が広がっていて，これがトーラスに開いた“穴”である．図 6(b)の構造は零点 4 個，セパレータ 8 本から成り，

“4-null, 8-separator 構造”とでも呼ぶべきものである．この構造ではセパトリクスにより全空間は 10 の領域に分離される．図 6(b)の赤線 (Σ_A , Σ_B よりわずかに内側にある) は閉磁力線を表し，緑線 (Σ'_A , Σ'_B よりわずかに外側にある) は IMF を表している．赤線は緑線より外側にあることから，鎖交磁束が形成されていることが分かる．

以上の考察から以下の結論を得る．鎖交磁束は，最も簡単には，4-null, 8-separator の構造で説明できる．大域構造を決定する本来の零点 2 個が分裂（複数化）して“零領域”を形成することが鎖交磁場の原因と思われる．

公表状況 (Publications) :

(口頭)

1. Watanabe, M., T. Tanaka, and S. Fujita, Magnetohydrodynamic simulation reproducing the dayside four-sheet field-aligned current system during IMF B_Y -dominated periods, Japan Geoscience Union Meeting 2025, PEM15-P07, 千葉, 2025 年 5 月 29 日 (2025 年 5 月 25 日–5 月 30 日).
2. 渡辺正和, 田中高史, 蔡東生, 藤田茂, 惑星間空間磁場北向き時の磁気圏尾部に現れる閉磁束と惑星間空間磁束の鎖交, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2025 年秋季年会, R006-P55, 神戸, 2025 年 11 月 25 日 (2025 年 11 月 23–27 日).
3. Watanabe, M., T. Tanaka, D. Cai, S. Fujita, Topological interpretation of the closed and interplanetary magnetic flux interlinkage in the magnetotail during northward interplanetary magnetic field periods, The 16th Symposium on Polar Science, OSO17, 立川, 2025 年 12 月 4 日 (2025 年 12 月 2 日–12 月 5 日).