

真北に近い惑星間空間磁場下における Dungey リコネクション の形状と交換サイクルとの関係

Geometry of Dungey reconnection and its relation to the interchange
cycle during periods of almost due northward interplanetary magnetic
field

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

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

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：シミュレーションコードの提供・助言

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・可視化・解析

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・可視化・解析

研究目的 (Research Objective):

もともと「高空間解像度のグローバル磁気流体シミュレーションによるカusp・マントル沿磁力線電流系の再現」という課題で採択されたのだが、この方面では進展がなかった。一方表題の研究は、過年度の計算結果に補足計算と新たな解釈を加えて得られた成果でかなり進展があった。後者の研究成果について報告する。

惑星間空間磁場（interplanetary magnetic field, IMF）南向き時には、昼間側磁気圏で地球の閉磁力線が開き、夜側磁気圏尾部で開磁力線（ローブ磁力線）が閉じるリコネクションが起こる。一連のリコネクションは Dungey (型) リコネクションと呼ばれ、Dungey リコネクションによる磁束循環は Dungey サイクルと呼ばれている (Fig. 1a)。これに対し IMF が真北に近い時は、まず IMF と一半球のローブ磁場がリコネクションを起こし、続いて新たに出来たローブ磁場と地球の閉磁場が反対半球でリコネクシ

オンを起こす。一連のリコネクションは交換（型）リコネクションと呼ばれ、交換リコネクションによる磁束循環は交換サイクルと呼ばれている (Fig. 1b)。交換サイクルは磁気圏境界領域で起こり、電離圏では昼間側高緯度領域の対流セルとして現れる。一方で、磁気圏尾部では地球方向に運ばれる閉磁束が観測され、夜側電離圏には IMF B_y に依存した対流セルが出現する (Fig. 1c)。これらの現象は IMF 北向きでも Dungey リコネクションが存在することを示唆している。またごく最近、分担者の田中が、磁気流体シミュレーションの解釈から、Dungey リコネクションが組み込まれた磁束循環モデルで Fig. 1c の夜側対流を説明している。このように IMF が真北に近くても Dungey リコネクションが生じるとなると、(1) その Dungey リコネクションはどのような形状で起こるのか、(2) Dungey サイクルと交換サイクルは共存し得るのか、などの疑問が湧いてくる。これらの疑問に答えるのが本研究である。

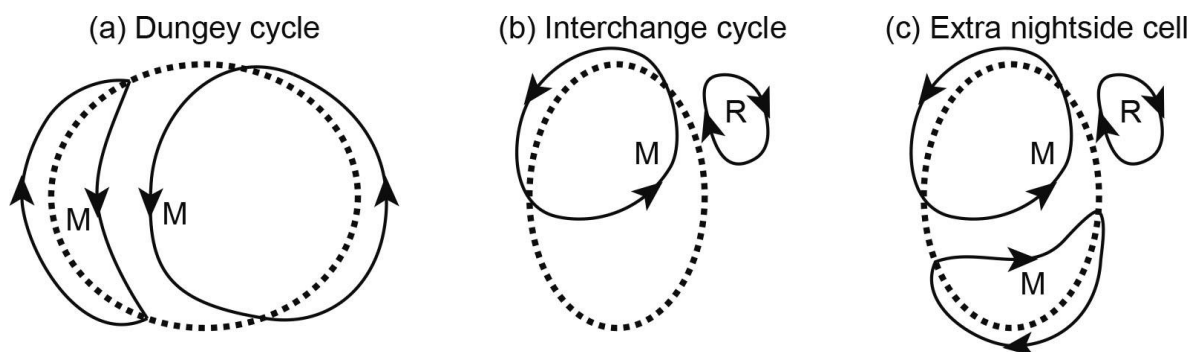


Fig. 1 電離圏で見た (a) IMF 南向き時の Dungey サイクル、(b) IMF 北向き時の交換サイクル、(c) IMF 北向き時の夜側に時折現れる対流セル. いずれも IMF $B_y < 0$ で北半球の場合を描いている. 破線は磁力線の開閉境界. M=merging cell; R=reciprocal cell.

計算手法 (Computational Aspects):

分担者の田中が開発した磁気流体モデル Reproduce Plasma Universe (REPPU)を用いて、IMF 北向き時 ($B=6nT$ 、時計角 $\theta=-20^\circ$ [$B_y < 0$]) の準定常磁気圏を再現する。次に、得られた磁気圏の大域構造 (null-separator 構造) を決める磁気中性点を同定する。通常南北両半球に 1 個ずつある。各磁気中性点に対し、磁場勾配テンソル $\nabla \mathbf{B}$ の固有値・固有ベクトルを計算する。固有値実部の符号は、(++) または (--) と 2 つが同符号になる。同符号となる 2 つの固有値に対応する固有空間は、磁気中性点から発する 2 次元セパトリクス (Σ 面, fan) になり、残り 1 つの固有値に対応する固有空間は磁気中性点から発する 1 次元セパトリクス (γ 線, spine) になる。筑波大学のグループが開発した Σ 面追跡のプログラムを用いて、各磁気中性点から発する Σ 面を追跡し Σ 面の交線 (セパレータ) を求める。セパレータの形状とセパレータ上の沿磁力線電場から Dungey リコネクションを同定し、その様態を考察する。

研究成果 (Accomplishments) :

Fig. 2a は北半球の電離圏ポテンシャル(1kV 毎の等高線)と磁力線の開閉境界(赤が閉領域、青が開領域)を示したもので、Fig. 1b のパターンが得られている。すなわち夜側には目ぼしい対流セルはない。そのような期間を選んでいる。M は merging cell、R は reciprocal cell を表し Fig.1b の交換サイクルを構成している。L は lobe cell で Fig.1 では考慮していない。Fig. 2b はシミュレーションで得られた磁気圏の 2 つの磁気中性点(A, B)と、そこから発する Σ 面(Σ_A , Σ_B)を追跡したものである。右上に座標軸が示してあるが、X 軸と Y 軸が磁気圏物理学でよく使われる GSM 座標系とは符号が反転したものになっている($X=-X_{GSM}$, $Y=-Y_{GSM}$, $Z=Z_{GSM}$)。磁気中性点の位置は、 $A=(1.1, 2.9, 14.6)$ 、 $B=(1.3, -3.1, -14.7)$ (単位は地球半径 R_E)、また固有値実部の符号は $A(- - +)$ 、 $B(+ + -)$ である。 Σ_A と Σ_B の交線が A と B を結ぶセパレータで(昼間側と夜側の 2 本ある)、これらは磁力線でもある。

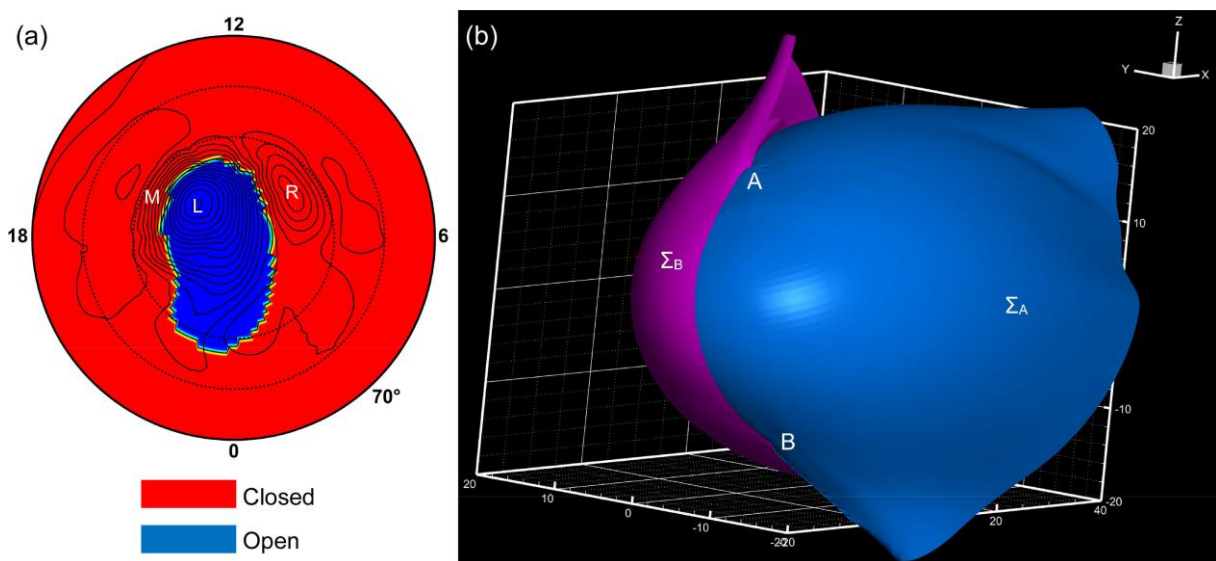


Fig. 2 (a) 計算機で再現された北半球の極冠と電離圏ポテンシャル。ポテンシャル等高線は 1kV 毎。M=merging cell; R=reciprocal cell; L=lobe cell. (b) 計算機で再現された磁気圏の 2-null 2-separator 構造。A, B が磁気中性点で、 Σ_A , Σ_B はそれぞれから発する 2 次元セパレーター。

Fig. 3a は A 点近傍の Σ_A 面上で(中心が A でほぼ半径 $5R_E$ の円)、磁力線(矢印付流線)と沿磁力線電場(色)を表したものである。北半球(+Z 側)から南半球(-Z 側)へ見下ろした形になっていて、左が太陽方向、上が朝方方向である。橙色の磁力線は Fig. 2b で求めたセパレータである。セパレータより朝方(上)側が南半球ローブと閉領域の境界で、セパレータより夕方(下)側が IMF と北半球ローブの境界である。セパレータより朝方では磁力線と逆向きの沿磁力線電場(青)が、セパレータより夕方では磁力線方向の沿磁力線電場(赤)が存在し、それぞれ南ローブ-閉領域リコネクション、IMF-北ローブ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 Σ 面上に特異性が現れる fan reconnection である。これらのリコネクションにより、Fig. 1b および Fig. 2a の交換サイクルが形成されている。ところで、Fig. 3a をよく見ると、ごくわずかだが、磁力線と逆向きの沿磁力線電場(青色)が昼側セパレータ上

にも夜側セパレータ上にもある。これは fan reconnection の自然な延長から生じる separator reconnection と考えることができる。すなわち、点Aに関しては fan reconnection で、点 B に関しては spine reconnection になっている。セパレータ上の沿磁力線電場は、昼側・夜側双方とも、IMF南向き時と同じ Dungey リコネクションが起こっていることを意味する。電離圏では Dungey サイクルの兆候は見えないが (Fig. 2a)、昼側で閉磁束が失われ、夜側で閉磁束が作られる過程が存在する。更に Fig. 3a をよく見ると、磁気中性点近傍でセパレータが朝夕方向に曲がっていることがわかる。この曲がりには Dungey リコネクションを起こしやすくする方向に働く。

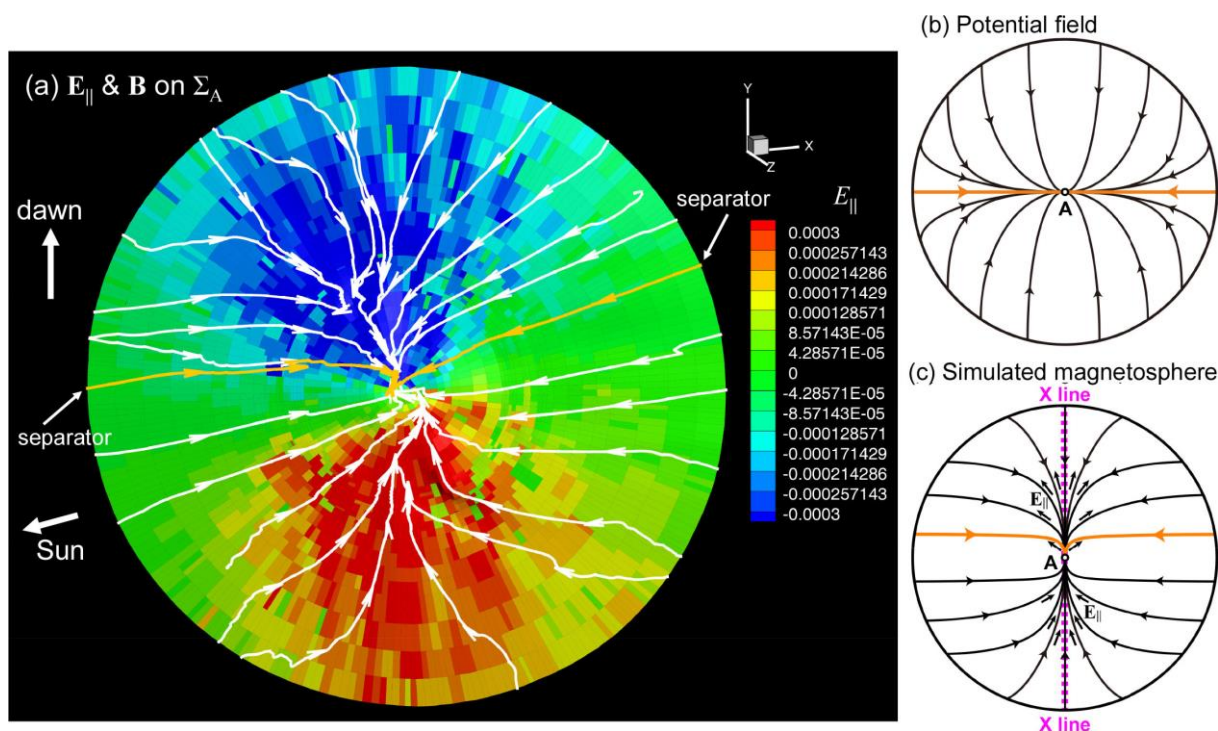


Fig. 3 (a) Σ_A 上の磁力線 (流線) と沿磁力線電場 (色). 中心点 A から半径がほぼ $5R_E$ の領域を示している. 橙色はセパレータ (Σ_A と Σ_B の交線). (b) ポテンシャル磁場 (例えば双極子磁場と一様磁場の重ね合わせ) の場合の Σ 面上の磁場構造. (c) Fig. 3a の模式的表現.

Fig. 3a を模式的に表したものが Fig. 3c である。磁気中性点近傍における磁力線の変形は、交換リコネクションに伴う電流による。これを電流がないポテンシャル磁場の場合 (Fig. 3b) と比較してみる。ポテンシャル磁場では、 Σ 面上で磁力線はセパレータ (橙色) に接するように磁気中性点に近づく (Fig. 3b)。交換リコネクションが起こっているときは、Fig. 3c のようにいわゆる X line に接するように磁力線は変形する。それに伴い、セパレータも Fig. 3c の様に磁気中性点近傍で朝夕方向に曲がる。このため、朝方側の沿磁力線電場がセパレータ上にも広がりやすくなり、その結果 Dungey リコネクションが起こる。これらの Dungey リコネクションを夕方側からみた模式図で書けば Fig. 4a, 4b のようになる。Fig. 4b は反平行磁場に見えないが、磁気圏尾部から見れば“反平行的”に見える。ただし、3次元のリコネクションは拡散領域における平行磁場の入れ替わりが本質であり、2次元リコネクションの描像である

「反平行磁場のつなぎ換え」を3次元に拡張するのは誤りである。

ところで、Fig. 3a, 3c でみたように、Fig. 4a, 4b の Dungey リコネクションは Fig. 4c の south lobe-closed 交換リコネクションの自然な延長として現れるから、交換サイクルと共存し得る。逆に言えば、Fig. 4a, 4b の Dungey リコネクションは Fig. 4c の south lobe-closed リコネクションとほとんど区別できない。我々は拡散領域に入ってゆく磁力線と拡散領域から出てくる磁力線を観察することはできるが、拡散領域内でどのようにつなぎ換わっているのかを判断することはできない。Fig. 4a, 4b, 4c の3リコネクションの区別は概念的と言える。また、Dungey サイクルは Fig. 1a の形では存在できないが、南半球での north lobe-closed 交換リコネクション (Fig. 4d) を介して交換サイクルと共存できる。すなわち、Fig. 4a で出来た磁力線②は直接 Fig. 4b の②となれるが、Fig. 4a の①はそのままでは夜側の Dungey リコネクションに参加できない。しかし Fig. 4d の交換リコネクションを介すれば、磁力線④として夜側 Dungey リコネクションに参加でき、磁束循環を完結することができる。これを混成サイクル (hybrid cycle) と呼んでいる。Fig. 4a, 4b, 4d において、同じ数字の磁力線は frozen-in により磁束が輸送されることを表している。

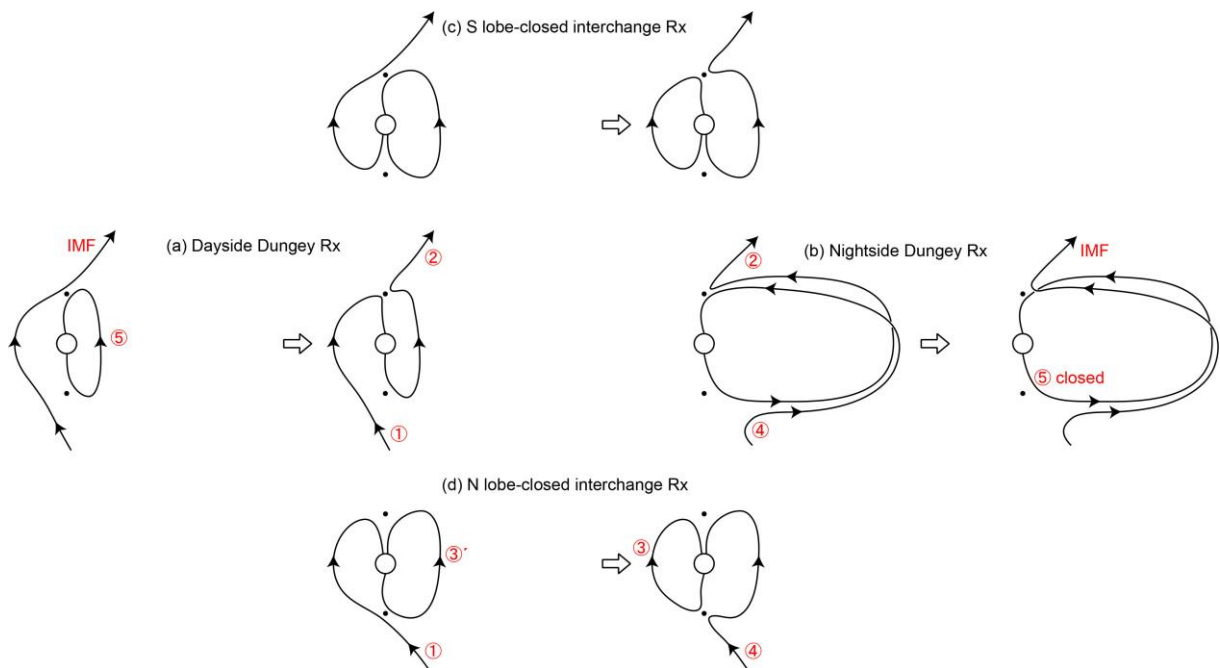


Fig. 4 北半球の磁気中性点近傍で起こる (a) 昼側 Dungey リコネクション、(b) 夜側 Dungey リコネクション、(c) 南ローブ-閉領域交換リコネクション. (d) は南半球の磁気中性点近傍で起こる北ローブ-閉領域交換リコネクション. Fig. 4a, 4b, 4d の同じ数字は磁力線が frozen-in で運ばれることを意味し、Fig. 4a, 4d, 4b, 4a, ... で混成サイクル (交換リコネクションで変形された Dungey サイクル) を形成する. Rx=reconnexion=reconnection.

公表状況 (Publications) :

(口頭)

1. Masakazu Watanabe, Dongsheng Cai, Peikun Xiong, Shigeru Fujita, and Takashi Tanaka,

Magnetic field topology of the magnetosphere evolving polar cap bifurcation in the ionosphere, Japan Geoscience Union Meeting 2023, PEM10-P17, 千葉, 2023 年 5 月 24 日 (2023 年 5 月 21 日–26 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 154 回地球電磁気・地球惑星圏学会, R006-11, 仙台, 2023 年 9 月 25 日 (2023 年 9 月 23–27 日).
3. Masakazu Watanabe, Dongsheng Cai, Peikun Xiong, Shigeru Fujita, and Takashi Tanaka, How does interchange reconnection proceed in the terrestrial magnetosphere?, The 14th Symposium on Polar Science, OS-O-14, 立川, 2023 年 11 月 15 日 (2023 年 11 月 14 日–17 日).

なお、本報告の内容は以下で発表予定

4. Masakazu Watanabe, Dongsheng Cai, Peikun Xiong, Shigeru Fujita, and Takashi Tanaka, Geometry of Dungey reconnection and its relation to the interchange cycle during periods of almost due northward interplanetary magnetic field, Japan Geoscience Union Meeting 2024, 千葉, 2024 年 5 月 26 日–31 日).