

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 1日現在

機関番号：17102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22840032

研究課題名（和文） 数値シミュレーションによる磁気圏磁場トポロジー分岐の解明

研究課題名（英文） Elucidation of Magnetospheric Magnetic Topology Bifurcation by Numerical Simulations

研究代表者

渡辺 正和 (WATANABE MASAKAZU)

九州大学・宙空環境研究センター・准教授

研究者番号：70446607

研究成果の概要（和文）：

惑星間空間磁場斜め北向き時の太陽風－磁気圏相互作用を電磁流体数値シミュレーションで再現し、磁場トポロジーの観点から磁束循環（プラズマ対流）を調べた。その結果、これまで予想されていたものとは異なる磁束循環のモードが発見された。それは地球の開いた磁力線と閉じた磁力線が起こす交換型磁力線再結合が介在するモードで、惑星間空間磁場と地球双極子軸のなす向きによってさまざまな現れ方がある。これまで観測されてきた電離圏対流パターンはこの新しい考え方で解釈し直すことができる。

研究成果の概要（英文）：

We investigated the solar wind – magnetosphere interaction using numerical magnetohydrodynamic simulation and examined the magnetic flux circulation (plasma convection) from a point of view of magnetic topology. We found a new magnetic flux circulation mode operating that is different from the one previously expected. The circulation mode is driven by magnetic reconnection between open and closed geomagnetic field lines. There are various appearance patterns depending on the directions of the interplanetary magnetic field and the Earth's dipole axis. Ionospheric convection patterns reported in the past are successfully explained by this new idea of magnetic flux circulation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,250,000	375,000	1,625,000
2011年度	1,150,000	345,000	1,495,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：超高層物理学

キーワード：磁場トポロジー・地球磁気圏・磁気圏対流・交換型磁力線再結合

## 1. 研究開始当初の背景

地球磁気圏のグローバルな磁場構造がどうなっているかは1970年代初頭まで理論的な考察がなされていたが、その後は忘れ去ら

れていた。おそらく観測による検証が不可能であったからだろう。1990年代後半になって、グローバル電磁流体シミュレーションが行われるようになり、かつての理論が見直さ

れるようになった。惑星間空間磁場が北向きの時は、電磁流体シミュレーションから得られる定常磁気圏の磁場トポロジーは、地球磁場を表す双極子磁場と惑星間空間磁場を表す一様磁場の重ね合わせで得られるものでうまく説明できることが一部の研究者に認識された。これは 1970 年代初頭さかんに研究されたものである。しかし磁気圏現象をグローバルな磁場トポロジーからとらえる考え方は、2000 年代に入っても主流とはなっていなかった。

## 2. 研究の目的

磁気圏の磁場がどんなトポロジーを持っているかは、一般にはほとんど知られていない。ここで「トポロジー」とは幾何学における「位相」の意味で用いている。トポロジーが変化しない定常磁気圏はまれであり、トポロジーは外的・内的要因により刻々変化している。例えば、サブストームはグローバルなトポロジー変化を伴う現象の代表例である。本研究は、磁気圏にはそもそものようなトポロジーがあり得るのかという基本的問題に取り組むことを目指す。近年発展してきたグローバル電磁流体数値シミュレーションを用いて、トポロジー変動を伴う現象（例えば磁気圏サブストーム）を再現し、その結果を解析することで磁気圏の正確なトポロジーを考察する。電磁流体で記述される現象では、プラズマの速度と磁場が本質的であるが、本研究はその一要素を解明することで磁気圏グローバル現象の物理的理解を推進する。

## 3. 研究の方法

太陽風－磁気圏－電離圏結合系の電磁流体数値シミュレーションコードはすでにくつか開発されている。そのうちのひとつを使い、さまざまな太陽風条件下で磁気圏を再現する。例えば、サブストームの成長相における磁気圏、惑星間空間磁場朝夕成分 ( $B_y$ ) が反転する場合の磁気圏、では磁場トポロジーの変化（分岐）が起こっていると予想される。これらのシミュレーション結果に対し、磁場トポロジーを決定するための数値解析アルゴリズムを開発する。磁場トポロジーは磁気中性点の配位で決まる。アルゴリズム開発は 2 段階に分かれ、まず磁気中性点を探索する手法を確立し、続いて磁気中性点を結ぶ磁力線（セパレーターと呼ばれている）を探索する手法を確立する。このアルゴリズムをシミュレーション結果に適用してグローバル磁場トポロジーを決定する。求めたトポロジーを基に、（シミュレーション結果としての）磁気圏現象を物理的に解釈する。

## 4. 研究成果

磁場トポロジー決定のアルゴリズム開発

はある技術的問題から最終的には成功せず、トポロジー変化（分岐）を議論するまでには至らなかった。しかし、磁場トポロジーがある程度わかっている、惑星間空間磁場北向き時の磁気圏については、シミュレーションを繰り返していくうちにいくつかの新知見が得られた。主な 2 点を紹介する。

### (1) 惑星間空間磁場が真北に近いが有限の朝夕成分 ( $B_y$ ) がある場合の磁束循環

伝統的な考え方によれば、惑星間空間磁場が北向きの場合、惑星間空間磁場と地球の開いた磁力線が再結合し、これが繰り返されることによって、開いた磁力線領域のみに磁束循環が励起される。この結果、電離圏にはいわゆるローブ対流セルが現れる。これをローブ循環と呼ぼう。本研究で初めて明らかになったことは、ローブ循環とは全く異なる磁束循環が存在することである。図 1 は惑星間空間磁場時計角が  $20^\circ$  ( $B_y > 0$ )、双極子軸の傾きなし、の場合シミュレーション結果を示す。赤道域には拡散領域（磁力線再結合が起こる場所）はないと考えられるので、図中の点 0 ( $20, 0, -2$ ) (単位は地球半径) を通る流線に沿う磁力線の変化を考えてみよう。図 2 は図 1 の点 0-5 を通る磁力線を描いたものである。流線に沿って惑星間空間磁場はまず南半球とつながり（磁力線 2）、続いて北半球ともつながり（磁力線 3）閉じた磁力線になる。次に北半球で地球と離れ（磁力線 4）、続いて南半球でも地球と離れ（磁力線 5）惑星間空

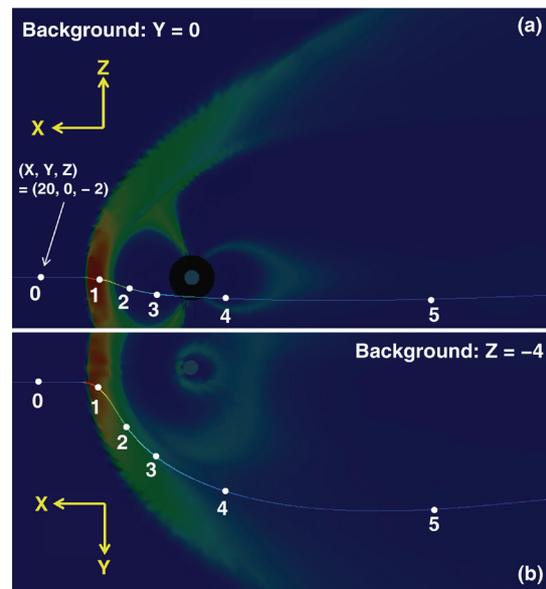


図 1 (a) 点 0 ( $20, 0, -2$ ) を通る流線を平面  $Y=0$  に投影したもの。背景のカラーはプラズマ圧力を表す。(b) 同様に点 0 を通る流線を平面  $Z=-4$  に投影したもの。背景のカラーはプラズマ圧力を表す。

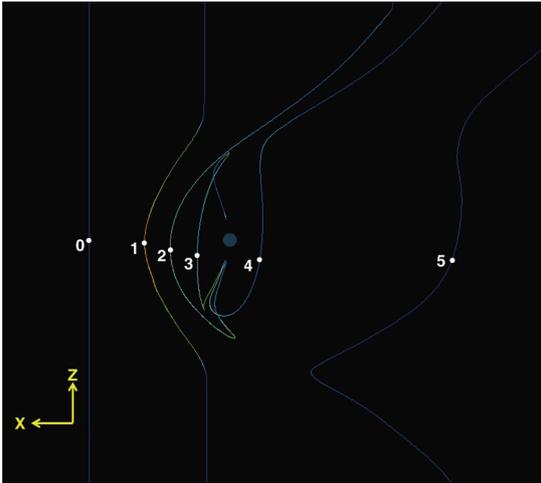


図2 図1の点0-5を通る磁力線をXZ面に投影して描いたもの。

間へ抜けていく。これはこれまで全く予想されていなかった磁束循環のモードが存在することを示しており、交換型磁力線再結合のみで構成されているので交換循環と名付けた。交換循環の特徴は、電離圏において閉じた磁力線の領域のみで循環する対流が現れることである（これをリシプロカルセルと呼んでいる）。図3はシミュレーションで再現された電離圏対流（すなわち静電ポテンシャル）である。磁力線開閉境界（太い実線）の低緯度側に、北半球では15時付近に正（+）の、南半球では9時付近に負（-）のポテンシャル（対流セル）が現れている。これがリシプロカルセルである。

(2) 惑星間空間磁場が斜め北向きの場合の磁束循環

惑星間空間磁場が北向きのとき、昼間側だけでなく夜側にも惑星間空間磁場朝夕成分 ( $B_y$ ) に依存する沿磁力線電流系・プラズマ対流系が存在することが1990年代初頭に発

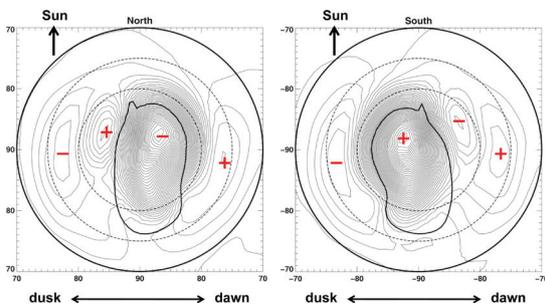


図3 惑星間空間磁場時計角  $20^\circ$  の場合の電離圏等ポテンシャル線（すなわち流線）を  $3kV$  ごとに描いたもの。太い実線は磁力線の開閉境界を表す。

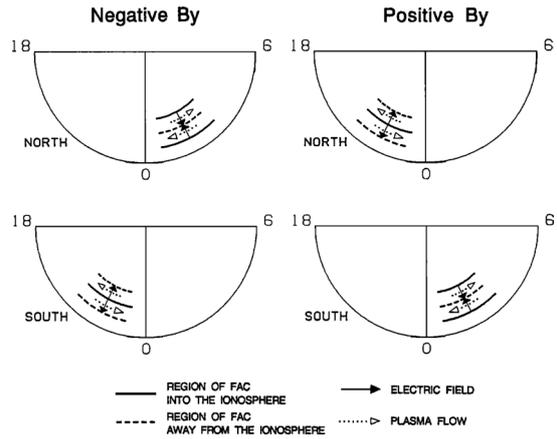


図4 惑星間空間磁場斜め北向き時に現れる夜側沿磁力線電流・プラズマ対流の模式図（田口1992からの引用）。

見された。図4はこれを模式的に表したものである。この物理機構は全く不明であったが、本研究でその糸口をつかむことができた。図5は惑星間空間磁場時計角が  $35^\circ$  ( $B_y > 0$ )、双極子軸の傾きなし、の場合シミュレーションで得られた電離圏ポテンシャルを示す。真夜の磁力線開閉境界付近に北半球では正（+）の、南半球では負（-）のポテンシャル（対流セル）が現れているのがわかる。これが図4で示されている沿磁力線電流系に対応すると考えられる。この対流セル形成にも交換型磁力線再結合が関わっている。

まとめると、磁気圏磁場トポロジー変化（分岐）の解明という当初の目的は完全には達成できなかったが、惑星間空間磁場北向き時の磁束循環についていくつかの新知見が得られた。この新知見はこれまでの太陽風-磁気圏相互作用理解の見直しを迫るものである。磁場トポロジー決定のアルゴリズム開発は今後も引き継ぎ、技術的問題を解決してゆくつもりである。

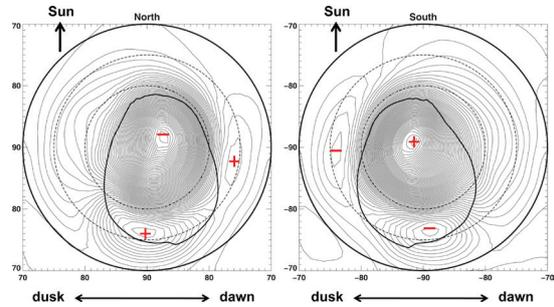


図5 惑星間空間磁場時計角  $35^\circ$  の場合の電離圏等ポテンシャル線（すなわち流線）を  $3kV$  ごとに描いたもの。太い実線は磁力線の開閉境界を表す。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① 渡辺正和, 藤田茂, 品川裕之, 田中高史, 久保田康文, 村田健史, 惑星空間磁場北向き時に現れる夜側プラズマ対流の解釈, 第7回磁気圏電離圏複合系における対流に関する研究会, 査読無, 名古屋大学太陽地球環境研究所, pp. 1-8, 2012.
- ② Watanabe, M., G. J. Sofko, X. Yan, K. A. McWilliams, J.-P. St.-Maurice, A. V. Koustov, G. C. Hussey, and M. R. Hairston, Ionospheric convection signatures of the interchange cycle at small interplanetary magnetic field clock angles, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, 115, A12230, doi:10.1029/2009JA015041, 2010.
- ③ Watanabe, M., K. Kabin, G. J. Sofko, R. Rankin, T. I. Gombosi, and A. J. Ridley Dipole tilt effects on the magnetosphere-ionosphere convection system during interplanetary magnetic field BY-dominated periods: MHD modeling, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, vol. 115, A07218, doi:10.1029/2009JA014910, 2010.

[学会発表] (計19件)

- ① 渡辺正和, 藤田茂, 久保田康文, 品川裕之, 田中高史, 村田健史, 惑星空間磁場北向き時の磁気圏: 磁気圏のトポロジー的観方, 平成23年度・第2回太陽地球環境(STE)現象報告会, 2012年3月15日, 九州大学(福岡)
- ② Watanabe, M., Pseudoconjugate phenomena at high latitudes, NIPR Symposium on Conjugate Aurora and SuperDARN - past, present and future, 2012年2月17日, 国立極地研究所(立川)
- ③ 渡辺正和, 藤田茂, 品川裕之, 田中高史, 久保田康文, 村田健史, 惑星間磁場北向き時に現れるBY成分に制御された夜側プラズマ対流系の起源, 第35回極域宇宙圏シンポジウム, 2011年11月15日, 国立極地研究所(立川)
- ④ 渡辺正和, 藤田茂, 品川裕之, 田中高史, 村田健史, 惑星間磁場北向き時に発生するBY成分に支配される夜側プラズマ対流系の起源, 第130回球電磁気・地

球惑星圏学会, 2011年11月5日, 神戸大学(神戸)

- ⑤ 渡辺正和, 藤田茂, 品川裕之, 田中高史, 村田健史, 惑星間磁場北向き時に現れる夜側プラズマ対流の解釈, 第7回磁気圏-電離圏複合系における対流に関する研究会, 2011年9月28日, 名古屋大学環境総合館(名古屋)
- ⑥ 渡辺正和, リコネクションにより駆動される電離圏対流, 2011年度中間圏・熱圏・電離圏(MTI)研究会(招待講演), 2011年8月31日, 九州大学(福岡)
- ⑦ 渡辺正和, 池田鈴菜, 藤田茂, 品川裕之, 田中高史, 惑星間空間磁場北向き時に現れるリシプロカル電離圏対流セル, 日本地球惑星科学連合2011年度連合大会, 2011年5月25日, 幕張メッセ(千葉)
- ⑧ 渡辺正和, 池田鈴菜, 藤田茂, 品川裕之, 田中高史, リシプロカルセルの観測とMHDシミュレーションによる再現, 2011年2月28日, 九州大学西新プラザ(福岡)
- ⑨ 渡辺正和, K. Konstantin, G. J. Sofko, R. Rankin, A. J. Ridley, and T. I. Gombosi, 惑星間磁場BY卓越時の粘性対流セルとマーキング対流セルの関係, 第128回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2010年11月1日, 沖縄県市町村自治会館(那覇)
- ⑩ Watanabe, M., and G. J. Sofko, Interchange cycles at small IMF clock angles, 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference, 2010年9月26日, 富山国際会議場(富山)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 正和 (WATANABE MASAKAZU)  
九州大学・宙空環境研究センター・准教授  
研究者番号: 70446607

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: