

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 22 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540479

研究課題名(和文) 惑星間空間磁場北向き時の磁気圏電離圏対流機構の解明

研究課題名(英文) Elucidation of magnetospheric convection mechanisms during northward interplanetary magnetic field periods

研究代表者

渡辺 正和 (Watanabe, Masakazu)

九州大学・学内共同利用施設等・准教授

研究者番号：70446607

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：グローバル数値シミュレーションを用いて、惑星間空間磁場朝夕成分反転時に出現するシートオーロラの形成過程を解明した。シートオーロラには単極性の沿磁力線電流が付随する。磁気圏の電流源領域では、膨張する磁気遅進波擾乱がプラズマの熱エネルギーを電磁エネルギーに変換することで定常沿磁力線電流が維持されている。このエネルギー変換過程は、シートオーロラに限らず、磁気圏ダイナモ一般の本質的機構である。

研究成果の概要(英文)：Using global numerical simulation, we elucidated the theta aurora formation processes when the dawn-dusk component of the interplanetary magnetic field switches. There appears a unipolar field-aligned current system on the theta aurora. In the magnetospheric source region of the currents, expanding slow mode disturbances convert plasma thermal energy to electromagnetic energy to maintain the steady state field-aligned current system. This energy conversion process represents the essential mechanism of the magnetospheric dynamo in general, not just limited to the theta aurora.

研究分野：磁気圏物理学

キーワード：シートオーロラ 沿磁力線電流 プラズマ対流 磁気圏ダイナモ

### 1. 研究開始当初の背景

惑星間空間磁場北向き時における磁気圏対流の考え方は1960年代初頭に遡る。北向きの惑星間空間磁場と地球の閉磁力線(両端とも地球に繋がっている磁力線)が繋ぎかえ(磁力線再結合)を起こし、その結果完全に閉じた磁気圏と電離圏には惑星間空間磁場南向き時とは逆向きの双対対流セルが形成されるというモデルである。その対流パターンを支持する観測も1970年代以降報告された。その後、やや様態の異なる磁気圏対流が議論されたが基本的には同じで、研究者の理解は長らく1960年代同様の直観的議論に基づくごく原始的なものにとどまっていた。2000年代中頃に進歩があった。その発端となったのは、グローバル数値シミュレーションにより、地球の開磁力線(一端のみ地球に繋がっている磁力線)と閉磁力線の再結合が地球磁気圏に存在することが示唆されたことである。この「交換型」磁力線再結合は、太陽物理ではよく知られていたが、地球磁気圏でその存在を指摘したものはそれまで皆無であった。その後交換型磁力線再結合を含む様々な磁気圏対流パターンが提唱され、一部を支持する観測もあったが、観測には制約が多いことや依然人間の直観に基づく議論から脱却できていなかった。そこで交換型磁力線再結合を含む新しい磁気圏対流モデルを、数値シミュレーションを用いて定量的に検証していこうという機運が高まっていた。

### 2. 研究の目的

惑星間空間磁場北向き時には、複雑で直観的理解が難しい現象が多くある。代表例は「シータオーロラ」と呼ばれている特殊な形をしたオーロラである。通常のオーロラオーバルに加えて、真昼から真夜中へ極冠域を横断するオーロラアークが現れる。シータオーロラは特殊な磁気圏構造の投影と考えられるが、それがどのようなものでどのような過程を経て形成されるかは皆目わかっていない。このように複雑な惑星間空間磁場北向き時の現象を、数値シミュレーションを用いてより原理的に、より定量的に理解することが本研究の目的である。エネルギー論の立場から言うと、全ての磁気圏大規模現象を起こす源は磁気圏のプラズマ対流である。プラズマ対流は磁力線再結合で駆動されると考えられるが、これまでの定性的議論ではその物理過程が不明である。磁気圏と電離圏は磁力線で結ばれており、磁気圏のプラズマは単独で動くことは出来ない。磁気圏と電離圏はお互いに情報を交換しながら全体として自己無撞着なプラズマ対流が形成されることになる。本研究では、この一連の過程を数値シミュレーションで明らかにする。また数値シミュレーションの結果が現実の磁気圏を表しているかの検証も重要である。観測と比較し得るほぼ唯一の物理量は、極域電離圏における大規模沿磁力線電流とプラズマ対流であ

る。本研究では、これらの量を観測と比較できる形で表現し、後の観測的研究に資することも目的としている。

### 3. 研究の方法

グローバル数値シミュレーションで惑星間空間磁場が北向き時の地球磁気圏を再現する。用いるシミュレーションコードは九州大学名誉教授田中高史氏が開発されたもので、太陽風から磁気圏までを抵抗性電磁流体で扱い、磁気圏内部境界を仮想電離圏(層)として解く。このコードの特長は、磁力線に沿って磁気圏と電離圏が同じ空間解像度になるようグリッド配置が工夫されており、観測との比較に堪え得る電離圏現象再現を主目的として開発されたものである。計算結果を観測と比較するため、大規模沿磁力線電流や電離圏対流を求める。また得られた数値解を可視化・解析し、磁力線再結合とそれに引き続く磁気圏対流の物理機構を解釈する。

### 4. 研究成果

(1) シータオーロラに付随する単極性沿磁力線電流の発見

惑星間空間磁場北向き時の代表的現象であるシータオーロラの数値シミュレーションを行い、大規模沿磁力線電流と電離圏対流に関する新知見を得た。惑星間空間磁場朝夕成分が反転すると、プラズマシートの一部が極冠内を朝側または夕側へドリフトしてシータオーロラが形成されるが、その際進行方向後方に単極性の沿磁力線電流が現れる(図1)。図1は惑星間空間磁場朝夕成分が負から

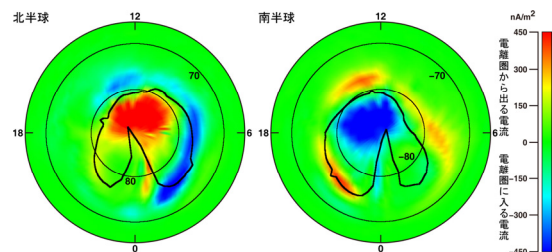


図1 沿磁力線電流の空間分布

正に反転した場合で、黒い実線は磁力線の閉閉境界を表す。一般に電流の極性は、シータオーロラが朝から夕へ移動している場合には電離圏から出る電流に、夕から朝へ移動している場合には電離圏に入る電流となる。この沿磁力線電流は隣接するいわゆる「リージョン1 (region 1)」電流系と電離圏内で閉じることにより、シータオーロラのドリフトを起こしている円型対流セルを励起する。沿磁力線電流を駆動するダイナモ(電磁エネルギーを生み出すもの)は、プラズマシート境界層のうち、惑星間空間磁場朝夕成分が反転する前の「古い」ローブに接しているところにある。惑星間空間磁場朝夕成分が制御する大規模沿磁力線電流がシータオーロラに存在することを示唆したのは本研究が初めてで

ある。今後は観測による検証が待たれる。

## (2) 準定常沿磁力線電流を駆動する磁気圏ダイナモの物理機構

シートオーロラに付随する沿磁力線電流を駆動する物理機構は、より一般的に定常沿磁力線電流を駆動するダイナモ機構として拡張されることがわかった。地球磁気圏では、流体の運動エネルギーはプラズマの熱エネルギーに比べて無視できるほど小さい。したがってダイナモのエネルギー源はプラズマの熱エネルギーであり、これを電磁エネルギーに変換する過程がダイナモである。この過程は、膨張する準定常磁気遅進波 (slow mode) 擾乱で解釈される。磁気遅進波は沿磁力線電流を伴わないので、上述の過程に引き続き磁気遅進波擾乱がアルフベン擾乱に変換される必要がある。以上の一連の過程を経て沿磁力線電流が駆動される。磁気圏ダイナモは磁気圏-電離圏結合系の根本をなす要素であり、将来は独立した大きな研究テーマとして扱われるべき内容を含んでいる。

## 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 2 件)

1. Cardinal, M. G., A. Yoshikawa, H. Kawano, H. Liu, M. Watanabe, S. Abe, T. Uozumi, G. Maeda, T. Hada, and K. Yumoto, Capacity building: A tool for advancing space weather science, *Space Weather*, 12, 10, 571-576, doi:10.1002/2014SW001110, 2014, 査読有.

2. Watanabe, M., S. Sakito, T. Tanaka, H. Shinagawa, and K. T. Murata, Global MHD modeling of ionospheric convection and field-aligned currents associated with IMF  $B_y$  triggered theta auroras, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, 8, doi:10.1002/2013JA019480, 2014, 査読有.

[学会発表] (計 47 件)

1. 渡辺正和, 藤田茂, 田中高史, 「2 null-2 separator」磁気圏におけるリコネクション電場とリコネクションモード, 電磁圏物理学シンポジウム (名古屋大学太陽地球環境研究所・研究集会), 2015 年 3 月 2 日, ホテル・ザ・ルイガンズ, 福岡.

2. 渡辺正和, Gordon Wilson, Marc R. Hairston, シータオーロラに伴う単極性沿磁力線電流系の観測, 第 5 回極域科学シンポジウム, OSp05, 2014 年 12 月 2 日, 国立極地研究所, 市川.

3. Watanabe, M., Role of plasma convection in pressure gradient-driven field-aligned

currents, Magnetosphere-Ionosphere Convection and Substorm meeting, 2014 年 11 月 8 日, 京都.

4. 渡辺正和, Gordon Wilson, Marc R. Hairston, 惑星間空間磁場  $B_y$  誘発シートオーロラに付随する単極性沿磁力線電流の観測, 第 136 回地球電磁気・地球惑星圏学会, R006-37, 2014 年 11 月 1 日, キッセイ文化ホール, 松本.

5. 渡辺正和, 圧力勾配駆動沿磁力線電流におけるプラズマ対流の役割, 非ダンジェー磁気圏物理学研究会 (国立極地研究所研究集会), 2014 年 9 月 18 日, 国立極地研究所, 市川.

6. Watanabe, M., S. Sakito, T. Tanaka, H. Shinagawa, and K. T. Murata, Global MHD modeling of ionospheric convection and field-aligned currents associated with IMF  $B_y$  triggered theta auroras, AOGS (Asia Oceania Geoscience Society) Annual Meeting 2014, ST12-05-A005, 2014 年 7 月 29 日, 札幌.

7. 渡辺正和, 定常沿磁力線電流の駆動機構: プラズマ対流を用いた一般理論, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, PEM37-P02, 2014 年 4 月 30 日, パシフィコ横浜, 横浜.

8. 渡辺正和, 定常沿磁力線電流の駆動機構: プラズマ対流を用いた一般論, 名古屋大学太陽地球環境研究所 電磁圏物理学シンポジウム, 2014 年 3 月 18 日, 九州大学西新プラザ, 福岡.

9. Watanabe, M., S. Sakito, T. Tanaka, H. Shinagawa, and K. T. Murata, Convection and Birkeland currents associated with IMF  $B_y$  triggered theta auroras: An MHD modeling, International CAWSES-II Symposium, SS4p2-019, 2013 年 11 月 21 日, 名古屋大学豊田講堂, 名古屋.

10. 渡辺正和, 圧力勾配駆動沿磁力線電流におけるプラズマ対流の役割, 第 4 回極域科学シンポジウム, OS-P16, 2013 年 11 月 15 日, 国立極地研究所, 立川.

11. 渡辺正和, 圧力勾配駆動沿磁力線電流におけるプラズマ対流の役割, 第 134 回地球電磁気・地球惑星圏学会, R006-48, 2013 年 11 月 4 日, 高知大学朝倉キャンパス, 高知.

12. 渡辺正和, 圧力勾配駆動沿磁力線電流におけるプラズマ対流の役割, 第 9 回磁気圏-電離圏複合系における対流に関する研究会, 名古屋大学太陽地球環境研究所, 2013 年 8 月 29 日, 名古屋大学太陽地球環境研究所, 名古屋.

13. 渡辺正和, 崎戸伸太郎, 田中高史, 品川裕之, 村田健史, シータオーロラに付随する電離圏対流と沿磁力線電流:MHDモデリング, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, PEM28-14, 2013 年 5 月 23 日, 幕張メッセ国際会議場, 千葉.

14. 渡辺正和, 崎戸伸太郎, 田中高史, 品川裕之, 村田健史, シータオーロラ形成にともなう電離圏対流と沿磁力線電流:MHDモデリング, 名古屋大学太陽地球環境研究所 電磁圏物理学シンポジウム, 2013 年 3 月 5 日, 九州大学西新プラザ, 福岡.

15. 渡辺正和, 崎戸伸太郎, 江藤洋香, 田中高史, 品川裕之, 村田健史, シータオーロラ形成にともなう沿磁力線電流と電離圏対流, 国立極地研究所 SuperDARN による極域超高層大気研究集会, 2013 年 2 月 15 日, 国立極地研究所, 立川.

16. Watanabe, M., S. Fujita, Y. Kubota, H. Shinagawa, T. Tanaka, and T. Murata, Dungey/interchange hybrid-type magnetic flux circulation mode in the magnetosphere, 第 3 回極域科学シンポジウム/第 36 回極域宇宙圏シンポジウム, 2012 年 11 月 27 日, 国立極地研究所, 立川.

17. 渡辺正和, 藤田茂, 久保田康文, 品川裕之, 田中高史, 村田健史, Dungey 型/交換型混成磁気圏磁束循環の数値シミュレーション, 第 132 回地球電磁気・地球惑星圏学会, B006-27, 2012 年 10 月 21 日, 札幌コンベンションセンター, 札幌.

18. Watanabe, M., Basic Space Physics through Problem Solving, ISWI and MAGDAS School on Space Science 2012, 2012 年 9 月 24 日, Ciloto Cianjur, West Java, Indonesia.

19. Watanabe, M., Magnetospheric Physics, ISWI and MAGDAS School on Space Science 2012, 2012 年 9 月 19 日, Ciloto Cianjur, West Java, Indonesia.

20. 渡辺正和, 花岡知幾, 崎戸伸太郎, 沿磁力線電流の磁気圏クロージャーに関する一考察, 名古屋大学太陽地球環境研究所 第 8 回磁気圏-電離圏複合系における対流に関する研究会, 2012 年 9 月 11 日, キャンパスプラザ京都, 京都.

21. 渡辺正和, 藤田茂, 久保田康文, 品川裕之, 田中高史, 村田健史, 惑星間空間磁場斜め北向き時の磁気圏大規模磁束循環, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, PEM30-P17, 2012 年 5 月 24 日, 幕張メッセ国際会議場, 千葉.

[その他]  
ホームページ等  
[http://denji102.geo.kyushu-u.ac.jp/stp/research\\_02.html](http://denji102.geo.kyushu-u.ac.jp/stp/research_02.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渡辺 正和 (WATANABE, Masakazu)  
九州大学大学院・理学研究院・准教授  
研究者番号: 70446607