

## IMF Bz 北向き条件下における By 反転時の磁気圏応答

三村 恭子[1], 小原 隆博[2], 藤田 茂[3][4]

[1]東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻,

[2]東北大学 惑星プラズマ・大気研究センター,

[3]気象大学校, [4]国立極地研究所

### 要旨

IMF Bz が北向きのとき、地球磁気圏ではプラズマシートが IMF By に依存した傾きを持つことが知られている。この条件下で By の符号が反転するとプラズマシートの傾きも反転し、その際にローブ領域にプラズマシートが侵入する。この侵入したプラズマシートにより、オーロラオーバルよりも高緯度の極冠域にオーロラが出現することがあり、シートオーロラなどと呼ばれている。私たちは、グローバルスケールで地球磁気圏がどのような変化をしているかを理解するために、MHD シミュレーションの計算結果を用いて、磁力線の動きやプラズマの分布等に着目し解析を進めている。この解析結果から、まずはプラズマの分布に着目し、シートオーロラの成長過程を、(1)対流の反転するフェーズ、(2)高圧領域がオーバルから切り離され真夜中のほうに移動していくフェーズ、(3)その高圧領域が昼側に成長しながら反対側に動いていくフェーズという 3 つのフェーズに分類した。さらに、各フェーズにおいて磁力線がどのように時間変化しているのかを調べた。その結果を用いて、反転後の IMF By 成分の地球磁気圏への伝わり方を、シートオーロラの出現や動きに絡めて考察した。(2)のフェーズにおいて、反転前の IMF By と反転後 By に対応する 2 つの状態の磁気圏が混在することがわかった。このフェーズにおいてシートオーロラの棒状部分の夕方側と朝側で磁力線の特徴が大きく異なった。つまり 2 つの状態のどちらに依存する磁気圏であるのかをわける場所に、棒状の部分が存在することが明らかとなった。このようにグローバルスケールでの磁力線の変化を見るためにシミュレーションは非常に有効であり、今後このシミュレーション結果と観測を比較することが必要であると考えられた。

### 1.はじめに

#### 1-1. 磁気圏対流

我々の生活する地球は固有磁場を持っており、太陽風中のプラズマに凍結されている磁場、IMF(Interplanetary Magnetic Field)と絶えず相互作用を起こしている。太陽風が地球の昼側に

吹きつけることで、地球磁気圏は昼側ではつぶれ、夜側では尾部方向に引き伸ばされた形をしている。この IMF の Bz 成分(南北成分)が南を向いているとき、IMF と地球の北向きの固有磁場は反平行になり、地球昼側の低緯度でリコネクシ

オンと呼ばれる磁力線のつなぎ換えが起こる。一方、IMF の  $B_z$  成分が北向きのとき、IMF と地球の磁場は、昼側低緯度領域では反平行とならず、高緯度領域でリコネクションを起こすことが知られている。この  $B_z$  成分の違いは、電離圏でのプラズマ対流に大きな違いをもたらす。 $B_z$  成分が南向きのとき、極域電離圏では 2-cell convection となることが知られているが、北向

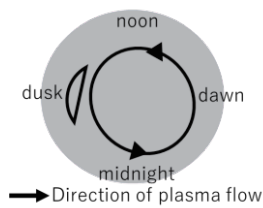


図 1. IMF  $B_z$  北向きで  $B_y$  朝向き時の電離圏対流

き時では大きなひとつの対流 round cell と、細く小さな crescent cell と呼ばれる対流が発生する。この round cell の向きは IMF  $B_y$  成分(朝-夕成分)に依存し、北半球において朝向き

のときは反時計回り(図 1)、夕方向きのときは時計回りの対流となり、南半球ではこれと反対となる。

また、地球に接続している磁力線は大きく分けて、両半球が地球に接続しているものと、北半球(または南半球)のみ地球に接続し反対側は宇宙空間に流れているものの 2 種類に分けられる。本研究ではそれぞれの磁力線を closed field line, north(or south) open field line と呼ぶ。Closed field line は、磁気圏ではプラズマシートに対応し、このプラズマシートには高温で高エネルギーを持ったプラズマが存在している。この磁力線をたどっていくと、電離圏において磁気緯度  $60\sim 75$  度付近にドーナツ状に存在するオーロラオーバルと呼ばれるオーロラ発光領域に対応している。一方 north(or south) open field line は、磁気圏においてローブ領域に対応し、プラズマシートに比べて低温で低いエネルギーのプラズマが存在している(図 2)。この磁力線をたどると、電離圏ではオーロラオーバルよりも高緯度側に存在する極冠域に対応する。

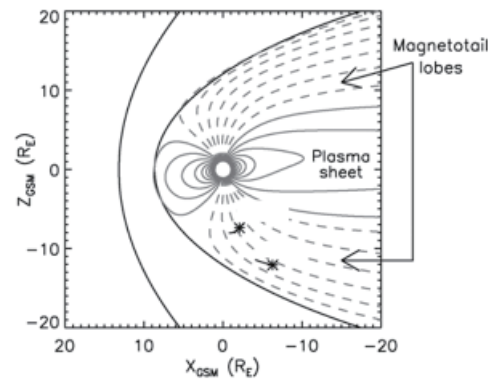


図 2. 地球磁気圏

## 1-2 シータオーロラ

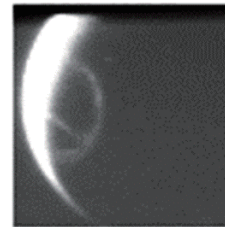


図 3. IMAGE 衛星で観測されたシータオーロラ

IMF  $B_z$  が北向きで、かつ  $B_y$  の極性が反転(朝→夕、又は夕→朝)すると極冠域に棒状にオーロラが出現することがある。オーロラオーバルと棒状部分をあわせるとギリシャ文字の  $\theta$  (シータ)に見えるため、

シータオーロラなどと呼ばれている(図 3)。

極冠域にオーロラを発光させる起源となるプラズマは、ローブ領域に侵入したプラズマシート由来であるということが、シミュレーション、観測の両方から示唆されている。まず、シミュレーションでは、[Tanaka et al., 2004]において、IMF  $B_z$  が北向きで  $B_y$  を朝から夕へ変化させたときのプラズマシートの動きが述べられている(図 4)。IMF  $B_z$  が北向き時に反太陽方向から磁気圏のプラズマシートを見ると、プラズマシートは  $B_y$  成分に対応した傾きをもっている。ここで  $B_y$  の極性を反転させると、プラズマシートの傾きもそれに対応して反転するが、この際にローブ領域にプラズマシートが侵入している様子が図 4 から読み取れる。また、観測では、[R. C. Fear et al., 2014] において IMAGE 衛星と Cluster 衛星の同時観測によるシータオーロライベントについて述べられている。2005 年 9 月 15

日 16 時～17 時あたりで北向きの IMF Bz が観測された。このとき, IMAGE 衛星の FUV カメラがシータオーロラの様子を捉えていた。さらに, このシータオーロラの棒状部分を横切るように Cluster 衛星がローブ領域を通過した。その際, 棒状部分の上空において Cluster 衛星で観測されたイオンや電子は, ローブ領域のプラズマとは異なり, 熱く高いエネルギーを持っていた。これは, ローブ領域に侵入したプラズマシート由来のプラズマを観測していると考えられた。以上より, シータオーロラを発光させるプラズマはプラズマシート由来であるとされている。

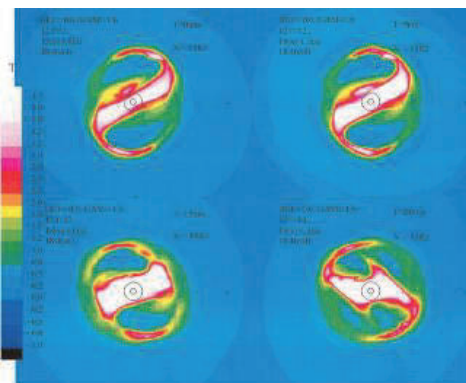


図 4. 磁気圏尾部から見たプラズマシートの動き

### 1-3 本研究の目的

シータオーロラを発光させる起源となるプラズマがプラズマシート由来のものであることを 1-2 で述べたが, なぜプラズマシートがそのような動きをするのか, 磁気圏の時間変化に着目して考えた研究は現時点でまだない。そこで我々はシータオーロラが発生することのある, IMF Bz が北向きで, By の符号が反転するときの地球磁気圏をシミュレーションにより再現し, その時間変化を明らかにすることを目指した。

極冠域は通常ローブと接続しており, 高いエネルギーを持ったプラズマは存在しない。このローブ領域にプラズマシートが侵入すると, オーロラを発光させるような高エネルギーのプラズマが, その周辺を周回している人工衛星にも影響を及ぼす危険がある。そのため, まずはこの

現象の物理過程を解明することが重要である。

## 2. シミュレーション

### 2-1. グローバル MHD シミュレーション

本研究では, 磁気圏の時間変化を明らかにするためにグローバル MHD (Magneto hydro dynamics)シミュレーションを用いて計算を行った。用いたコードは REPPU (REProduce Plasma Universe)コードの level 6 である。Level はグリッドの細かさを表しており, 今回の level6 は(動径方向 : 240)×(緯度方向 : 160)×(経度方向 : 200) = 7,680,000 グリッドである [A. Nakamizo et al., 2009]。

### 2-2. 太陽風パラメータ

REPPU コードでは, 太陽風中の磁場 3 成分 (IMF Bx, By, Bz), 密度(n), 速度の x(太陽-地球方向)成分(Vx), 温度(T)を設定することができる。本研究において初期値は表 1 のように設定した。

表 1. 太陽風パラメータの初期値

IMF Bx(nT)	0
IMF By(nT)	-4.3
IMF Bz(nT)	4.3
n(個/cc)	10
Vx(km/s)	372
T(K)	$1.02 \times 10^5$

この 6 つのパラメータのうち, IMF By のみを -4.3nT(朝向き)から+4.3nT(夕向き)に変化させ, シータオーロラの出現条件を再現した。その他のパラメータに関しては, すべての計算を通して一定値とした。また, この By の符号反転が地球昼側の 12Re(マグネトシース付近)に到達した時間を t=0 とした。

### 3. シミュレーション結果の解析

#### 3-1. 磁気圏におけるプラズマの対流と圧力

我々はまず、プラズマの対流と圧力の変化に着目した。図5~7で、8Reにおける地球の北半球のプラズマ分布を示す。カラーコンターはプラズマの圧力を、ベクトルは対流を表している。これらの図より、IMF By が反転してからの磁気圏の時間変化を、その特徴から3つのフェーズに分類することができた。

(1)first phase：昼側カusp領域で対流が反転。

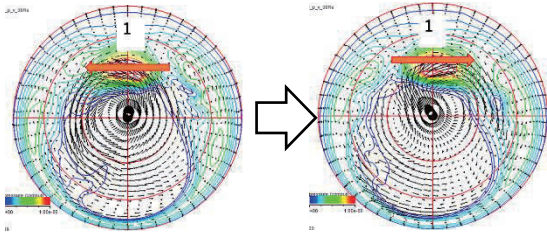


図5. 8Reでの(左)IMF By反転前(右)IMF By反転後のプラズマ分布

(2)second phase：高压領域が朝側からはがれてローブ領域に侵入。同時に高压部が夜側へ縮小。

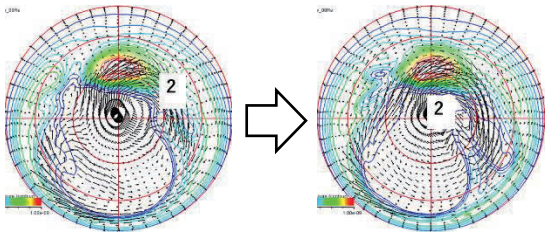


図6. (左)first phaseから時間経過後(右)左図よりもさらに時間経過後のプラズマ分布

(3)third phase：昼夜子午線を越えた高压部分が再び昼間方向へ伸びながら夕側へ移動。

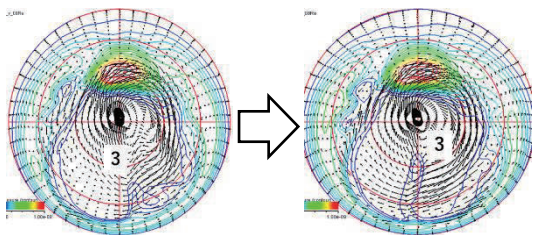


図7. (左)second phaseよりも時間経過後(右)左図よりもさらに時間経過後のプラズマ分布

以上(1)~(3)のフェーズを元に解析を進めた。

#### 3-2. 磁力線の構造

3-2では地球の磁力線の構造について着目した。ここから、符号反転後の新しいIMF Byの影響がどのように地球の磁気圏に伝わっていくのか、その磁気圏の変化とシートオーロラの起源となるプラズマシートの変形にどのような関係があるのかを読み取ることができた。まずは以下で、3-1で分類したそれぞれのフェーズにおける磁力線の構造を見ていく。なお、3章および4章で出てくる図に描かれている磁力線は、すべてclosed field lineとsouth open field lineの境界の磁力線、即ちプラズマシートとローブの境界の磁力線である。また、磁力線には黄緑と青の2種類あるが、今回区別は特になく、各図には8Reでのプラズマの圧力が重ねて描いてある。

##### 3-2-1 first phase

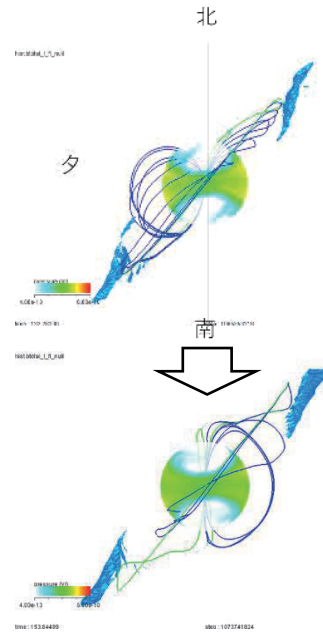


図8. 磁気圏尾部からみた(上)IMF By反転前(下)IMF By反転後の磁力線の様子

プラズマ分布からは対流の反転が見られたが、磁力線においても昼間側で変化が見られた。夜側の磁力線の傾きは、反転前の朝向きのByに対

応しているのに対し、昼間側の磁力線の傾きは反転後の夕方向き By に対応するものに变化した。この時点で By の变化が磁気圏の昼間側に到達していると考えられる。

3-2-2 second phase

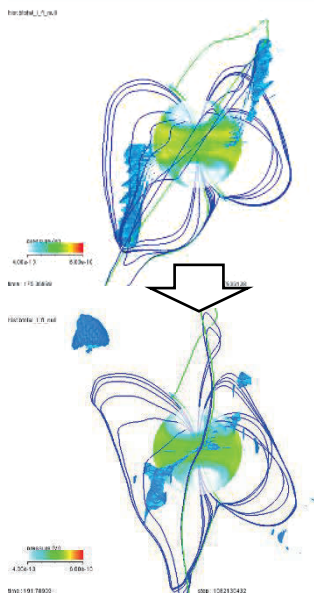


図 9. (上)first phase から時間経過後(下)上図よりもさらに時間経過後の磁力線の様子

プラズマの圧力が高い部分がローブ領域に入り込み真夜中方向に移動しているとき、磁力線の変化が磁気圏夜側まで伝わってきていることが図9から読み取れる。図9の上図と下図を比べると、磁気圏尾部を通る磁力線の傾きが、朝向きから夕方向きに変化していつていることがわかる。つまり地球の磁気圏に、反転前の IMF By と反転後の IMF By が共存しているフェーズであると考えられる。

3-2-3 third phase

真夜中の子午線を越えたプラズマの高圧領域は、昼間側に伸びながらさらに夕方側へ移動していくが、この時点で磁力線はすべて反転後の IMF By に対応していることが図 10 から読み取れる。

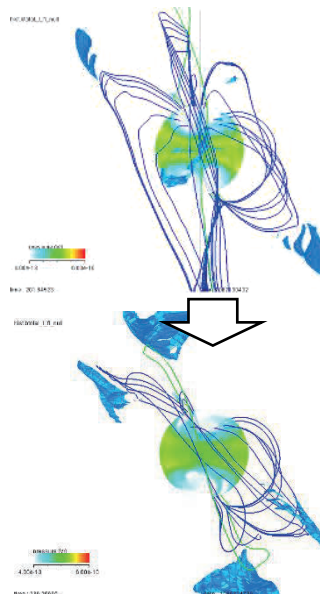


図 10. (上)second phase よりも時間経過後(下)上図よりもさらに時間経過後の磁気圏の様子

さらに、図 10 の下図は、first phase の図 8 と比較して、反転後の IMF By に対応する定常状態に近づいていることがわかる。

4. 考察：シータオーロラの棒状部分の磁力線

3 章ではオーロラオーバルの磁力線の全体像を見てきたが、本章ではシータオーロラの棒状部分の磁力線について着目する。

図 11(上)は、second phase 中のある時間における、シータオーロラの棒状部分と極冠領域の境目の磁力線を描いたものであり、棒状部分の夕側を赤、朝側を青で描いている。この図を磁気圏尾部から見たのが図 11(下)である。この図 11 の下図から、夕側の磁力線と朝側の磁力線ではその形が大きく異なることが読み取れる。赤い磁力線、即ち夕側の磁力線に着目すると、その傾きは朝向きの IMF By と同じ向き、つまり反転前の By と同じである。一方、朝側の青い磁力線は、反転後の夕方向き IMF By に対応していることがわかった。これをまとめると図 12 のようになる。この結果から、second phase において古い By に対応した構造と新しい By に対応した構造

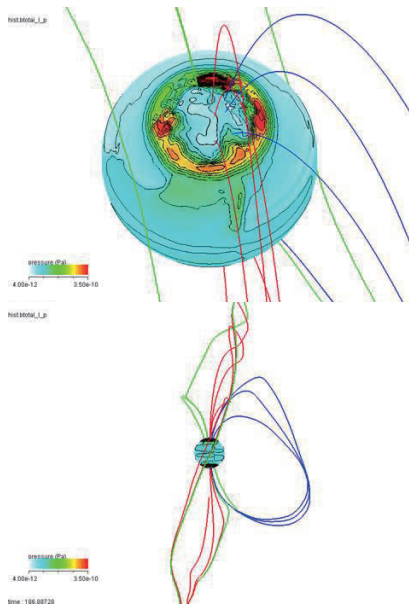


図 11. (上)3Re でのプラズマ圧力と開閉磁力線の境界  
(下)上の図を磁気圏尾部から見た図

が共存しており、この構造の境目は、ローブ領域に入り込んだプラズマシートにある、ということが言える。そして磁力線がプラズマシートの朝側、夕側のどちら側に属するかによりどちらの By に支配されるか決まる。

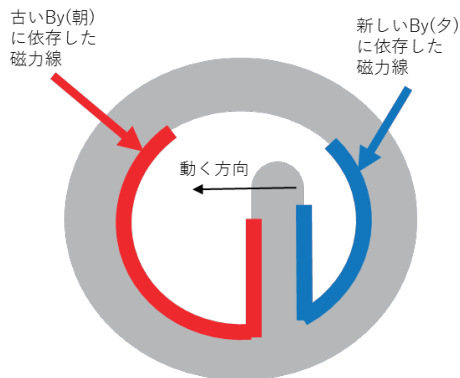


図 12. シータオーロラ発生時の磁力線のまとめ

## 5.まとめと今後の課題

今回の解析結果から、IMF Bz が北向きで By の符号を反転させたとき、地球の磁気圏をプラズマの特徴から 3 つのフェーズに分類することができた。IMF By の符号変化が 12Re に到達してからまもなく、磁力線は昼側から新しい By の傾きに対応してその傾きを変えていった。また

Second phase では、新旧 2 つの By に対応する磁気圏の構造が共存していた。さらに Second phase においてシータオーロラのバーの部分の closed field line と south open field line の境界を見ると、朝側では新しい By に、夕方側では古い By に対応した構造が見られた。

今回の解析では、グローバル MHD シミュレーションの結果を用いて磁気圏の磁力線に着目し、その時間変化を追ってきた。このように、グローバルスケールで磁力線の時間変化を見ることは、現段階で人工衛星の観測では不可能であり、シミュレーションデータの解析の強みだと考える。一方、シミュレーションだけでは実際の磁気圏で起こっていることをすべて解明することは不可能であり、今後、観測結果との比較が必要である。磁気圏でのシミュレーションの計算結果を電離圏と対応させることで、人工衛星による電離圏での観測結果と比較が可能となるため、本研究の結果を観測結果と比較し、整合を取ることを重要であると考えられる。

## 参考文献

- R. C. Fear, S. E. Milan, R. Maggiolo, A. N. Fazakerley, I. Dandouras, S. B. Mende(2014), Direct observation of closed magnetic flux trapped in the high-latitude magnetosphere, *Science* 19 December 2014: Vol. 346 no. 6216 pp. 1506-1510DOI: 10.1126/science.1257377
- Tanaka, T., T. Obara, and M. Kunitake(2004), Formation of the theta aurora by a transient convection during northward interplanetary magnetic field, *J. Geophys. Res.*, 109, A09201,doi:10.1029/2003A010271.
- A. Nakamizo, T. Tanaka, Y. Kubo, S. Kamei, H. Shimazu, and H. Shinagawa(2009), Development of the 3-D MHD model of the solar corona-solar wind combining system, *J. Geophys. Res.*, 114, A07109, doi:10.1029/2008JA013844,