

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400476

研究課題名(和文) 磁気圏尾部の磁気リコネクションの3次元構造

研究課題名(英文) Three-dimensional structure of magnetic reconnection in the magnetotail

## 研究代表者

長井 嗣信 (Nagai, Tsugunobu)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：60260527

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：地球磁気圏尾部では、地球半径の20 - 30倍程度の位置で起きる磁気リコネクションによって磁場エネルギーがプラズマのエネルギーに変換している。この磁気リコネクションが、地球半径40倍の幅をもつ磁気圏尾部で、どのような規模で起きているかを、人工衛星Geotailによる20年以上の観測をもとに確立した。磁気リコネクションのX-line は、イオン慣性長より狭い領域に形成され、その周辺には、ion-electron decoupling regionが10倍のイオン慣性長領域(一般に1地球半径以下)に形成され、朝夕方向に6倍の地球半径以上の長さを持つという3次元規模とその内部構造を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Magnetic reconnection produces plasma dynamics in the magnetotail through the conversion of the stored magnetic field energy during substorms. Magnetic reconnection usually forms at radial distance of 20-30 Re in the magnetotail. This study has established its three-dimensional structure and size using the observations with the Geotail spacecraft over 20 years. Magnetic reconnection takes place on a line, not as any set of points. The X line (its spatial size is less than one ion inertial length) forms in the center of the magnetic reconnection site, and it is surrounded with the ion-electron decoupling region with a scale size of 10 ion inertial lengths. The X line itself has its dawn-dusk length of  $> 6$  Re in the duskside of the magnetotail.

研究分野：宇宙空間物理学

キーワード：磁気リコネクション サブストーム 磁気圏尾部 磁気圏 オーロラ

### 1. 研究開始当初の背景

地球の磁気圏尾部では、サブストームのエネルギーを担う磁気リコネクション起きていることが、1960年代後半から1970年代の人工衛星観測からわかってきた。1980年代になり、人工衛星の観測の進歩により、グローバルな描像が作られるようになってきた。ここでは、観測的な証拠はないにもかかわらず、磁気リコネクションが磁気圏尾部の40倍の地球半径の幅に起こっていることを漠然と思いついており、1990年代になっても、磁気リコネクションの両端と磁気圏尾部の側面との関係を考えるということがあった。1990年代に観測を開始した日本の人工衛星 Geotail の観測は、これまでの「思い込み」を排し、磁気圏尾部での磁気リコネクションは、磁気圏尾部の限られた横幅(Y方向)の領域で起きることを確立した。しかしながら、XZ面(磁気圏の赤道に対して垂直な面)の磁気リコネクションは、2次元の計算機シミュレーションの結果との比較もあり、2次元的な描像でよく理解できることもわかってきた(e.g., Nagai et al., 2011)。しかしながら、本質的に3次元構造をもつ磁気リコネクションの物理過程を理解していたとは言えないことも、認識されてきた。計算機シミュレーションでは、3次元の計算も行われてきたが、XZ面に対して、Y方向にどのような条件を設定するかは、必ずしも明確でないことと、複雑な現象が現れるため、必ずしも物理を明快に説明しているとは考えられなかった。この様な中で、磁気圏尾部での観測は長期間にわたり継続できたので、観測的に磁気リコネクションの3次元構造を研究することができるようになってきた。

### 2. 研究の目的

磁気リコネクションは、地球磁気圏で起きているダイナミクスに關与する重要な物理過程であるとともに、宇宙プラズマの中の磁場構造の変化と運動エネルギー源として、いろいろな場所で大きな役割を担っている。本研究者は、これまでの研究により、磁気圏尾部で起きている磁気リコネクションは2次元的な描像により、基本的物理構造は理解できることを示してきた。磁気リコネクションは、本来3次元空間内の物理過程であり、2次元描像が、その「厚み」方向にどのような状態かを解明する必要がある。これまでの研究成果をもとに、本研究では、「磁気圏尾部の磁気リコネクションの3次元構造」の解明をし、一般の状況における「磁気リコネクションの3次元構造」についてあきらかにする道筋をつけることを、目標とする。

### 3. 研究の方法

人工衛星 Geotail は、1992年打ち上げ直後からの磁気圏遠尾部観測の軌道から、1995年に磁気圏近尾部の観測に適した軌道への変更が行われた。1996年以後、近地点は地球半

径の10倍、遠地点は地球半径の30倍、周期約5日の楕円軌道になり、太陽風・バウショック・磁気圏シース・磁気圏境界面・内部磁気圏の外縁の観測とともに、磁気圏近尾部の観測を継続している。1994年から2014年末までの期間に、近尾部に対応する地球磁気圏の地球半径10倍から30倍の磁気圏尾部のプラズマシートには、ほぼ6855時間滞在している。各年別の滞在時間が図1に示されている。夕方側と朝方側のプラズマシートでの滞在時間は各年では等しくなっていないが、全期間ではほぼ均等にサーベイしたことになる。地磁気活動度(サブストームの割合)もほぼ均等になっている。この長期間のデータベースをもとに、磁気リコネクションのグローバルな構造を統計的に解明することができてきた。電子電流層(イオンと電子の運動に差異ができる領域 ion-electron

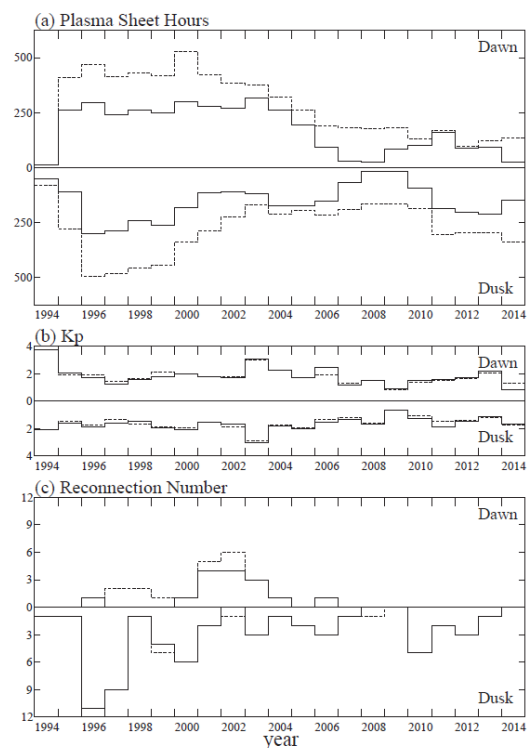


図1. 人工衛星 Geotail が plasma sheet に滞在した時間、その時の地磁気擾乱指数、磁気リコネクションの観測された数。

decoupling region) の特徴である電子の加速から、71例の磁気リコネクションを同定している。このデータをもとに、(1)電子電流層の構造、(2)イオンの加速メカニズム、(3)磁気リコネクションのX-lineの長さ、(4)磁気リコネクションのグローバルな3次元構造について、解析を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 電子電流層の構造

図2には、磁気リコネクション領域での電子とイオンの特徴を、模式的に示している。この電子とイオンの運動が分離している領域では、電子は特徴的な速度分布関数を示し

ている。地球磁気圏のなかのプラズマは、ほとんどの場合、電子もイオンも Maxwell (熱的) 分布をしており、磁気圏尾部のイオンの温度は 10keV 程度、電子の温度は 1keV 程度である。したがって、観測される 5keV 以上の電子のフラックスは、1keV 以下の電子のフラックスに比べてかなり少ない。この磁気リコネクションの電子とイオンが別々の運動をしている領域では、1keV 以下の電子のフラックスが減少し、5keV 以上の電子のフラックスが増加する。つまり、電子は全体として加速されていることになる。Maxwell 分布の電子は、なだらかな山型の速度分布関数を持つ(図2のMに相当する電子の分布)が、この磁気リコネクション領域で加速されている電子は、低エネルギー側でほぼ一定になっているフラットトップ (flat-top) 型をしている(図2のAとFに相当する電子の分布)。電子のプラズマ流速は、たとえ 3000km/s の速度を持っていても、この速度は 25eV のエネルギーに対応するにすぎず、電子の温度が 1keV 程度ならほぼ等方的に見えてしまう。ところが、3000km/s の速度を持って電流層を形成している電子のフラットトップ型速度分布関数は、明らかに-y 方向に偏った非等方向性を示す。このように、磁気リコネクション領域の電子は、ほかの領域では見られない特徴を示してくれる。図2に示してあるように、中央のCの位置(磁気拡散領域)のこの電子の速度分布関数のフラットトップ度は小さい。両側のAとFの位置でフラットトップの様子が顕著になっていることは、電子がより加速・加熱されていることを示している。

磁気リコネクションは非熱的なエネルギーを持つ電子の加速のメカニズムの1つと考えられることが多い。磁気圏尾部にも 10keV 以上のエネルギーを持つ電子が存在する。しかしながら今までの観測ではこの磁気リコネクションの電子とイオンが別々の運動をしている領域で、10keV 以上のエネルギーを持つ電子のフラックスが顕著に大きくなることはない。逆にこの磁気リコネクションの電子とイオンが別々の運動をしている領域のあとに観測される熱的なプラズマの中のほうが 10keV 以上のエネルギーを持つ電子のフラックスが高くなっていることが多くある。したがって磁気圏尾部の磁気リコネクションが直接電子を高エネルギーまで加速できるということは観測的には示されていない。この電子の加速過程については、さらなる検討が必要である。

イオンでは、いわゆる熱速度(温度に対応する)とバルクの流体としての速度が分離可能なため、速度分布関数の観測から直接的にダイナミクスを解明しやすい。磁気リコネクションの中心に位置する磁気拡散領域を横切った時でも、イオン密度は小さくなっているが、図2のCの位置の速度分布関数が示すように、低エネルギーから高エネルギー(40

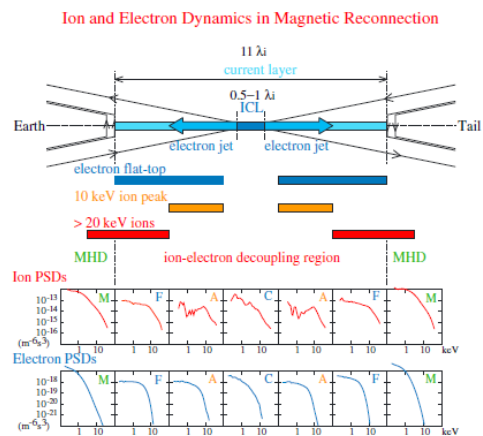


図2. 磁気リコネクションの電流層でのイオンと電子のエネルギー分布。

keV 程度)のイオンが存在する。実際には、本当に小さな磁気拡散領域内だけを切り取った観測ではないと考えられるため、磁気拡散領域にどのようなエネルギーを持ちどのような運動をしているイオンが存在しているかは、今のところわからない。磁気拡散領域のすぐ近傍(図2のAとF)でも、>20 keV 程度のイオンは存在している。しかし、>20 keV 程度のイオンのフラックスは、電子とイオンの運動が分離している領域の外側へ行くほど増加し、すぐ外側のMHDの領域に至って最大に達する。

## (2) イオンの加速メカニズム

従来、イオンは、磁気リコネクション電場である+y 方向(夕方方向)の電場によって加速されていると考えられてきた。図3にイオンの加速の様子を模式的に示した。確かに、+y 方向の磁気リコネクション電場によって、加速されていることは、中心部付近で高エネルギーのイオンほど+y 方向に運動していることからわかる。これらのイオンは、反平行磁場の磁気中性面付近で、電場方向に加速されている(meandering motion)。しかしながら、ホール電場による加速も重要である。電子とイオンとは慣性長の違いからその運動は分離され、電子は磁気拡散領域の中まで入るが、イオンはそれより外側により多く存在する。この電荷の分離は、中心に向かう電場を形成する。実際には、赤道面の上方(北半球)では-z 方向の電場、赤道面の下方(南半球)では+z 方向の電場が形成され、観測により確認されている。このホール電場は、磁気リコネクション領域に入ってくるイオンを、赤道面方向に加速している。

赤道面近くでの観測では、インフローとして、ほぼ南向きの運動するイオンの群とほぼ北向きの運動するイオンの群、アウトフローとして、+y 方向(夕方方向)に運動するイオンの群が同時に観測される。このz 方向に運動する2つのイオン群は、北と南から磁気リコネクション領域に入ってくるインフローであり、ホール電場により 10keV 程度まで加

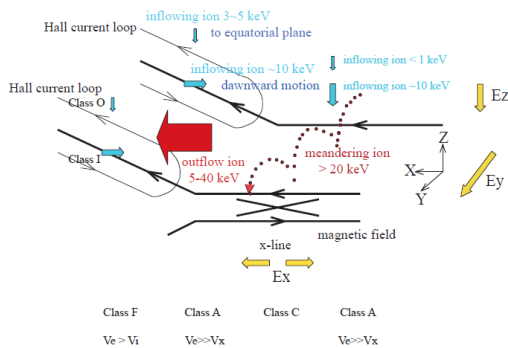


図3 . X-line 付近でのイオンの加速過程。

速されている。インフローするイオンは、電子の運動と分離されることにより、ホール電場を作ることと、それにより加速されることの2つの役割がうまく釣り合うような状態となっていると考えられる。

(3) 磁気リコネクション X-line の長さ

磁気リコネクション領域のスケール (図4) は、地球半径の 20-30 倍の磁気圏尾部で

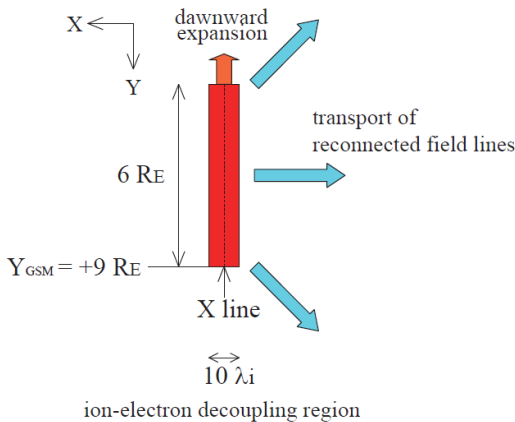


図4 . 磁気リコネクションの X-line の長さ。

起きた 44 例の磁気リコネクションをもとに得ることができた。ここで、地球方向に X 軸、朝夕方向を Y 軸とする。磁気リコネクションにともなう X-line の観測は、 $Y = +15 \text{ Re}$  ( $\text{Re}$  は 1 地球半径) から  $Y = -10 \text{ Re}$  までに分布するが、比較的小さなサブストーム (地磁気活動度指数  $K_p < 2+$ ) の時には、 $Y = +3$  to  $+9 \text{ Re}$  のほぼ  $6 \text{ Re}$  の範囲に集中する。この外側では、磁気リコネクションにともなう電子の加速は観測されるが、X-line を横切った時の観測がまれになっている。より大きなサブストーム (地磁気活動度指数  $K_p > 3-$ ) では、X-line の Y 方向の長さが、特に朝方側に広がっていくことがわかる。 $Y = +9 \text{ Re}$  付近では、磁気リコネクション領域に流れ込む -Y 方向の MHD 的なインフローが観測される。これは、イオンの速度分布関数を解析することによって、はじめてわかることである。磁気リコネクション、特に、X-line の観測頻度だけでは、必ずしも X-line の長さを規定することはできない。しかし、プラズマの運動の観

測から夕方側に端の効果ができ、これがある地点 ( $Y = +9 \text{ Re}$ ) 付近に集中して観測されることは、X-line が孤立の「点」の集まりではなく、「線」を形成していることを示している。

(4) 磁気リコネクションのグローバルな 3次元構造

磁気リコネクションの現場では、イオンと電子の慣性長の違いにより、イオンと電子の運動が異なってくる。慣性長の小さい電子は、磁力線とともに運動しやすく、中心部の小さな拡散領域 (diffusion region) にまで入ってから出ていく。いっぽう、慣性長の大きなイオンを、小さな拡散領域まで運ばれにくい (通過してしまう) ので、イオンの運動と電子の運動の分離、いわゆるホール効果 (Hall effect) が起きる。したがって、磁場と粒子はホール効果により本来的に 3 次元的な構造と運動とを示してしまう。それとは別に、磁気リコネクションをしている X-line は、磁気圏尾部の地球 遠尾部に垂直な Y 方向に対して、有限な幅 (地球半径の 6 倍程度で、磁気圏尾部の幅の 15% 程度) と観測されている。この有限な幅の中で、磁気リコネクションの性質がどのように異なり 3 次元性を示すかを図 5 に示した。この解析でも、マクロな構造に Y 方向に有意な違いは分かっていない。これは逆に、X-line が、本当に “line” 的であることを示している。ミクロな構造としては、イオンの運動の方向に唯一の違いが見出せる。イオンは X-line の地球側では、地球向きのアウトフローとなり、X-line の反地球側では、反地球向きのアウトフローになっている。磁気リコネクションの電場は、Y 方向を向いているため、アウトフローになるイオンは、Y 方向を向きながら地球向き、または、反地球向きの流れを形成している。実際に、イオンの速度分布関数を見ると、X-line が反地球向きに運動している場合には、高エネルギーのイオン成分は、反地球向き、+Y 向き、そして、地球向きと運動の方向を変えていくことがわかる。しかしながら、X-line の +Y 方向の端では、逆向きとなっている。すなわち、高エネルギーイオン成分は、反地球向き、-Y 向き、そして、地球向きと運動の方向を変えていき、さらに、低エネルギー成分と混ざった MHD 的なプラズマ流となっている。つまり、磁気リコネクションの電場の方向と逆向きのプラズマの流れが観測される。

この現象は、磁気圏尾部の中心軸から +Y 方向に 10 倍の地球半径程度離れたところだけに観測される。一般に、磁気リコネクションの領域は、外側の領域に比べてプラズマ圧力は低くなっていることが観測されており、このプラズマ流は、圧力勾配によって端となる境界から流れ込むプラズマと解釈できる。このようなプラズマ流は、+Y 方向の端だけでなく、-Y 方向の端でもあってもよいはずで

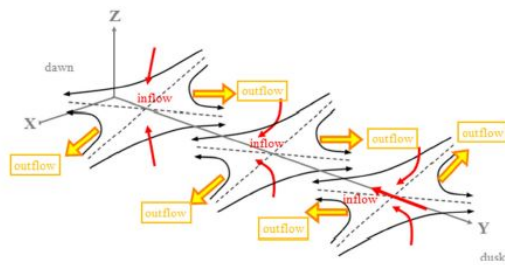


図5 . 磁気リコネクションの3次元構造

ある。しかしながら、-Y方向の端に近い観測例で、特にMHD的なプラズマ流が観測されることはない。このことは、次のように説明できる。計算機シミュレーションによる3次元の磁気リコネクションでは、電流方向の有限な幅の中で起きた時、電流を担う電荷の流れの方向に、拡大していくことが知られている。つまり、イオンが電流を担っている時は、イオンの流れの+Y方向に拡大し、電子が電流を担っている時は、電子の流れの-Y方向に拡大していく。磁気圏尾部の磁気リコネクションでは、観測されるように電子が電流を担っていることがわかる。したがって、+Y方向の端は固定していて、隣接してMHD的なプラズマが流入しやすい。一方、-Y方向の端では、磁気リコネクション自体が拡大していくことにより、隣接するプラズマが流れ込むことを阻止していると考えられる。このメカニズムの観測的検証は必要である。しかしながら、このイオン流の流れの方向の観測は重要である。磁気リコネクションが、“X-line”的に「線構造」をしていることは、直接的には観測されていない。したがって、同時に「点」上の磁気リコネクションがいくつも存在して、あたかも「線構造」をしているものが存在しているように観測されている可能性がある。しかし、この場合なら、各「点」で、+Y方向から流れ込むプラズマ流が存在していてもよいはずである。しかし、観測的には+Y方向からのプラズマ流は、磁気圏尾部の中央から10倍の地球半径程度離れたところでしか、観測されていない。このことは、磁気リコネクションが“X-line”のような「線構造」をしていることを支持している。

#### (5) 今後の展望

現在の衛星観測でも、イオンの速度分布関数は十分な時間空間分解能で観測ができるので、イオンのダイナミクスについては、このように、かなりのところまで解明できてきた。しかしながら、電子の速度分布関数についての観測は、時間分解能と3次元的空间分解能とも十分とは言えない。特に「磁気拡散領域だけを切り取った観測」ができていないため電子のダイナミクスについて詳しく議論できる段階ではない。さらに、「なぜ磁気リコネクションは起きるか」という究極的な問いに答えるためには、1点または数点での観測では不十分で、ミクロ構造と

マクロ構造をつなぐような観測を行って磁気リコネクションが起きているときの全体構造の中でどのようなプラズマ物理過程が引き起こされているかを正確に説明する必要がある。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10件)

(1) T. Nagai, I. Shinohara, and S. Zenitani, The dawn-dusk length of the X line in the near-Earth magnetotail: Geotail survey in 1994–2014, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 8762–8773, 2015. (査読あり) DOI:10.1002/2015JA021606.

(2) T. Nagai, I. Shinohara, and S. Zenitani, Ion acceleration processes in magnetic reconnection: Geotail observations in the magnetotail. *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 1766–1783, 2015.

(査読あり) DOI: 10.1002/2014JA020737.

(3) T. Nagai, S. Zenitani, I. Shinohara, R. Nakamura, M. Fujimoto, Y. Saito, and T. Mukai, Ion and electron dynamics in the ion-electron decoupling region of magnetic reconnection with Geotail observations, *J. Geophys. Res.*, 118, 7703–7713, 2013.

(査読あり) DOI:10.1002/2013JA019135.

(4) T. Nagai, I. Shinohara, S. Zenitani, R. Nakamura, T. K. M. Nakamura, M. Fujimoto, Y. Saito, and T. Mukai, Three-dimensional structure of magnetic reconnection in the magnetotail from Geotail observations, *J. Geophys. Res.*, 118, 1667–1678, 2013.

(査読あり) DOI:10.1002/jgra.50247.

〔学会発表〕(計 2件)

(1) 長井 嗣信 Structure of magnetic reconnection in the near-Earth magnetotail, Chapman Conference on Magnetospheric Dynamics, Fairbanks, USA, 2015年9月2日-10月2日.

(2) 長井 嗣信 Dawn-dusk asymmetry of magnetic reconnection in the magnetotail, (招待講演) American Geophysical Union 2013 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2013年12月9-13日.

## 6 . 研究組織

(1) 研究代表者

長井 嗣信 (NAGAI TSUGUNOBU)

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号: 60260527