

## 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 6 月 15 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21540464

研究課題名（和文） 磁気圏尾部リコネクション領域で観測される大振幅電場の研究

研究課題名（英文） On large-amplitude electric field fluctuation observed in magnetotail reconnection sites

研究代表者

篠原 育 (SHINOHARA IKU)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：20301723

研究成果の概要（和文）：

磁気圏尾部の磁気リコネクション領域で観測される数十 mV/m の大振幅電場変動について、観測データと数値シミュレーションデータを総合的に解析しながらその発生機構を探った。その結果、大振幅電場変動の発生領域は、従来考えられていた磁気リコネクションの磁場拡散領域近傍ではなく、磁気中性線よりかなり下流にあることが強く示唆され、発生機構の検討に見直しが必要であることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：

The generating mechanism of large-amplitude (tens of mV/m) electric field fluctuation observed in magnetotail reconnection sites has been investigated by using results of observational data analysis and numerical simulations synthetically. The results strongly suggest that the emerging region of the large-amplitude electric field fluctuation is downstream far from the diffusion region of magnetic reconnection. Since the generating mechanism has been thought to be strongly related with the plasma dynamics in the diffusion region, we have to reconsider the physical meaning of the large-amplitude electric field fluctuation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：宇宙プラズマ，磁気リコネクション，大振幅電場

## 1. 研究開始当初の背景

近年の ESA Cluster-II 衛星の磁気圏尾部における観測から、数十 mV/m にもおよぶ大振幅電場の観測例が報告されている。例えば、Cattell et al. (2005) は近尾部リコネクションイベントのデータ解析から X-line 近傍で～50 mV/m もの大振幅な電場変動が電子ビームとともに観測されていることを発見し、

この現象が Drake et al. (2003) の粒子シミュレーションで示された電子ホールである可能性を議論している。一方、Borg et al. (2005) は同じくリコネクション領域に発生する Hall 電場の大きさが～80 mV/m に達し、拡散領域の近傍領域を観測していることを報告している。これらの Cluster-II 衛星の尾部リコネクション領域における電場観測

の結果は、従来の理論やシミュレーション結果からは説明が難しいほどの大振幅の電場変動を示している。これらの大電場を説明するためには、恐らく局在化した比較的小さなスケールな構造を考えなければならず、これまでのリコネクション領域の構造の理解を修正しなければならない可能性があった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、磁気圏尾部の磁気リコネクション領域で観測される大振幅電場変動について、観測データと数値シミュレーションデータを総合的に解析しながらその発生機構や大振幅電場による粒子加速の可能性について明らかにすることである。

## 3. 研究の方法

本研究では、磁気リコネクション領域で観測される大振幅電場構造がどのように形成されるかを解明し、大振幅電場構造が磁気リコネクションに対してどのような役割を果たしているかを明らかにする。この為に、Geotail 衛星のプラズマ・電磁場高時間分解データの解析、および、空間高解像度の磁気リコネクションの粒子シミュレーションを行い、両者の結果を組み合わせることで総合的に大振幅電場の物理を理解する。以下では、主要な項目についての研究方法の概要を述べる。

### (1) 高時間分解電場データの評価

DC~数十 Hz の変動については、Geotail 衛星のプロンプアンテナ (EPD) による 64 Hz サンプリングの計測データが利用でき、より高周波のプラズマ波動の観測データについては、プラズマ波動センサー (PWI) のデータが利用できる。電場プローブの計測データは衛星から放出される光電子の影響によって大きくノイズに汚染されている。このノイズの影響を取り除く為に、粒子法 (PIC 法) による衛星環境を模擬した電場プローブ計測の数値シミュレーションを用いて、観測される電場データの評価を行う。

### (2) 空間高解像度粒子シミュレーション、観測データとの比較解析

本研究課題では磁気リコネクションとさまざまなスケールを持つ大振幅電場の関係を扱うために、粒子モデルを主に用いる。本研究課題ではできる限り、観測とパラメータをそろえ、空間解像度を高くした粒子シミュレーションを行うことによって、直接観測可能な計算データを作成し、境界条件を変えながら観測データとの比較を試みる。

### (3) リコネクションイベントと電場構造

Geotail 衛星は、これまでに磁気圏尾部における磁気リコネクションのイベントを多

数観測している。これらのイベント解析にもとづいて、大振幅電場とプラズマの特徴について解析する。Cattell et al. (2005) に報告されているような磁気中性面内で観測される大振幅電場変動のサーベイを行う。

Geotail 衛星のデータからもリコネクションイベントを中心に境界層付近での大振幅電場変動と密度勾配の関係について解析を行い、境界付近で観測される大振幅波動のモードの同定や、密度勾配の空間的スケールの見積もりなどを行う。

## 4. 研究成果

(1) 宇宙機搭載電位プローブによる宇宙空間電位計測を精度よく行うためには、プローブ電位の基準電位となる宇宙機電位を正しく評価する事が必要不可欠である。宇宙機周辺には、宇宙環境由来の背景プラズマや宇宙機自身が放出する荷電粒子が存在することが知られているが、宇宙機はこれらの荷電粒子と相互作用し、宇宙機に流入する正味の電荷量によって宇宙機電位が決定される。地球磁気圏においては、背景プラズマ密度が 0.1/cc 程度と非常に希薄であり、宇宙機日照面より放出される光電子が最も支配的な電流成分となる。このような希薄な背景プラズマ環境においては、放出光電子のフラックス値に加えて、そのエネルギー分布、あるいは、速度分布を知る事が、宇宙機電位の定常値 (飽和値) を評価する上で必要不可欠であった。

本研究課題では、衛星に搭載した電場プローブによる電場計測に対して、光電子放出の影響によるノイズ等を定量的に評価するために 3 次元 full-PIC 静電コードを用いたシミュレーションをおこなった。具体的には、速度分布に関する放出光電子のモデル化を行い (図 1)、シミュレーションによって Geotail 衛星観測データより解析的に得られた宇宙機電位と光電子電流の相関について検証を行った。光電子電流と宇宙機 (=Geotail 衛星) 電位の相関をシミュレーションと理論値で比較した結果は、電流収集は理論値と良く一致しており、収集電流に対して、宇宙機周辺に拡散する光電子の静電的影響は無視出来る事が分かった。また、衛星電位と光電子電流の相関が定性的に一致する。これまでの解析結果からは、Geotail 衛星の電場観測に対して、光電子放出による大きなノイズの発生は認められず、今後の大振幅電場の解析に対して計測上のノイズによる影響の可能性に対してある程度排除することができる事が明らかになった。

(2) 電流層中に発生するプラズマ不安定を解析するという観点で、電子慣性長程度の現象が確実にキャプチャーできるように、2次

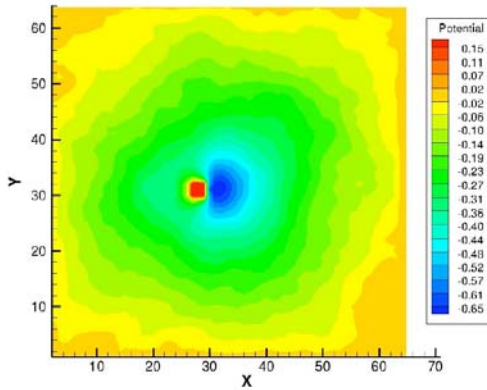


図 1: 光電子放出を考慮したプローブ周りの静電ポテンシャル分布

元のほぼ実物理パラメータの高解像度の磁気リコネクションの粒子シミュレーションを行った。(図2) これまでの磁気リコネクションのシミュレーションでは、観測されるような数十 mV/m もの大電場を説明できていないが、その理由としては、実物理量へ変換する際のスケールリングが正しくない、あるいは、空間分解能が不足しており、局在化した電場構造を再現できない、などが考えられていた。

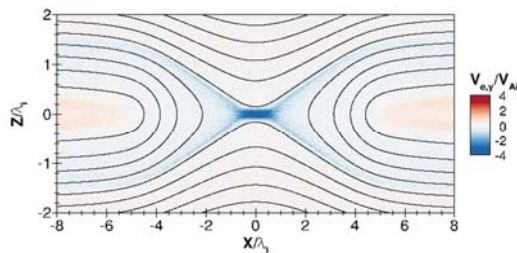


図 2: 高解像な磁気リコネクションのシミュレーションのスナップショット

しかし、実際に高解像度シミュレーションの結果を観測データと比べると、観測されるような大振幅電場はまったく再現されず、空間解像度の問題で大振幅電場が再できない、という可能性は否定されることとなった。3次元的な複数のプラズマ波動モードのカップリングによって励起されている可能性が残されているが、この可能性については今後とも更なる検討を進める必要がある。

(3) 磁気圏尾部のリコネクション観測例の内、これまでで最も拡散領域の中心部に近づいたと考えられる Geotail の観測データに着目し、リコネクション領域の空間スケールサイズを推定した結果、この観測イベントは、2次元粒子シミュレーションで示されてきた無衝突リコネクションの磁場拡散領域の描

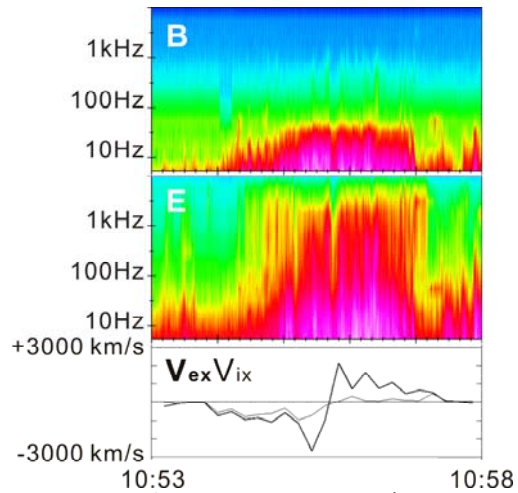


図 3: 2003 年 5 月 15 日のリコネクションイベントにおけるプラズマ波動(上: 磁場、中、電場)とプラズマ流速の X 成分(下: 太線-電子、細線-イオン)

像とよく一致することが明らかになった。更にこの観測例についてプラズマ波動のアクティビティを調べたところ、拡散領域再接近時には波動強度が明らかに下がっており、プラズマ波動の観点でも、無衝突リコネクションによる描像とよく合うことがわかった。これらの結果を総合的に検討したところ、大振幅電場擾乱が観測されていた場所は、これまで想定していたよりも、下流の領域に局在化された強い電流と共に現れていたことが見いだされた。このような強い電流領域は過去の数値シミュレーションでは再現されておらず、大振幅電場擾乱の成因とともに、リコネクション領域の構造の理解にとって新たな課題であると考えられる。

以上のように磁気圏尾部リコネクション領域における大振幅電場の成因について、観測データ解析、および、数値シミュレーションを併用してその成因を探求してきた。本研究の結果、少なくとも Cluster-II の研究チームが考えていたような磁気リコネクションの磁場拡散領域の近傍領域において大振幅電場が観測されていた訳ではない、ということが結論づけられたが、引き続き、磁気リコネクションのより下流領域における大振幅電場の発生メカニズムについては不明のままとなり、今後の更なる研究が課題として残された。最近の研究成果によれば、磁気圏尾部リコネクションによる電子加速現象は、X 型磁気中性線よりかなり下流側で発生することが明らかになっており、今回の研究の成果である大振幅電場の発生場所との関連性が示唆される。また、Geotail 衛星と Cluster-II 衛星で報告されている電場の値についても、Geotail 衛星の観測値の方が小

さめにてる傾向があるようで、大振幅電場の観測自体にも引き続き取り扱いに注意が必要であることもわかった。

#### 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 Nagai, T., I. Shinohara, M. Fujimoto, A. Matsuoka, Y. Saito, and T. Mukai, Construction of magnetic reconnection in the near-Earth magnetotail with Geotail, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 116 (4), A04222, DOI: 10.1029/2010JA016283 (2011)
- ② Fujimoto, M., H. Kojima, and I. Shinohara, Reconnection and waves: A review with a perspective, *Space Sci. Rev.*, 査読有, 160(1-4), p.123-143, DOI: 10.1007/s11214-011-9807-7 (2011)
- ③ Muranaka, T. H. O. Ueda, H. Usui, and I. Shinohara, Evaluation of Electric Field Probe Onboard Spacecraft Using a 3D Full PIC Simulation, *Trans. JSASS Space Tech. Japan*, 査読有, 7, ists26, pp.Pr\_2\_19-Pr\_2\_24, DOI:10.2322/tstj.7.Pr\_2\_19 (2009)

[学会発表] (計 4 件)

- ① Shinohara, I., H. Kojima, T. Nagai, and M. Fujimoto, Wave activity around the X-line observed in May 15, 2003 event, IKI workshop: Magnetotail current sheets, 2011年9月28日, モスクワ
- ② 篠原 育, 井筒 智彦, 長谷川 洋, 藤本 正樹, 長井 嗣信, 磁気圏で観測される磁場の乱れとプラズマの輸送, 物理学会シンポジウム「プラズマ中の磁場の乱れの発生と消滅」, 2010年9月25日, 大阪
- ③ 篠原 育, 大規模粒子シミュレーションから見えてきた宇宙空間プラズマ中のスケール間結合, 日本地球惑星科学2010連合大会, 2010年5月26日, 幕張
- ④ 村中 崇信, 上田 裕子, 臼井 英之, 篠原 育, 3次元 full-PIC シミュレーションによる宇宙機環境解析, 日本航空宇宙学会第40期講演会, 2009年4月9日, 調布

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

篠原 育 (SHINOHARA IKU)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙

科学研究所・准教授

研究者番号：20301723