

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26247082

研究課題名(和文) 地上オーロラ観測と衛星直接観測を連携させて挑む新しいサブストーム像の構築

研究課題名(英文) A challenge to construct a new substorm image by coordinating ground auroral observations and in-situ spacecraft observations

研究代表者

町田 忍 (Machida, Shinobu)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授

研究者番号：70209469

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 29,000,000円

研究成果の概要(和文)：地上の多点オーロラ観測および磁気圏観測の直接計測で得られたデータの解析、さらに、数値シミュレーションを併せて行うことによって研究を展開した。その結果、われわれがカタバルト電流層と名付けた領域において電子ティアリングモード不安定が発生し、その帰結として磁気リコネクションが開始すること、さらに、その両者に伴う地球向き的高速流が、内側の領域にバルーニング不安定などの圧力の不均一性に起因する不安定を励起して、大規模なオーロラの擾乱を発生させるという従来のモデルを改訂した新しいサブストーム像が得られた。また、関連の研究によって、磁気リコネクションの核心部分の解明が大きく前進した。

研究成果の概要(英文)：We have conducted integrated study by analyzing the ground-based auroral imager data and the in-situ observational data from GEOTAIL, THEMIS and MMS spacecraft, and further performing numerical plasma simulations. As a result, it was found that the electron tearing mode instability takes place in the catapult current sheet, resulting in the magnetic reconnection at the near-Earth neutral line. Moreover, the resultant high-speed plasma flows toward the Earth excites instability caused by non-uniformity of the pressure, such as the ballooning instability, and generates large-scale auroral disturbances. We could obtain a new substorm model revising previous models. Furthermore, related studies have largely advanced our understanding on the magnetic reconnection.

研究分野：磁気圏物理学

キーワード：サブストーム 地球惑星磁気圏 オーロラ 磁気リコネクション カタバルト電流層
GEOTAIL衛星 THEMIS計画 MMS衛星

1. 研究開始当初の背景

われわれは、本課題が採択される前の研究によって、サブストームのトリガーは、従来言われてきた地球中心から 8Re (地球半径) 程度隔たった夜側磁気圏の領域で尾部横断電流がブロックされるというカレントディスラプションモデル、あるいは、地球の中心から 20Re ほどの距離で起こる磁気リコネクションが原因であるとする近尾部磁気中性線モデルではなく、われわれがカタパルト電流層と名付けた、両者の中間の領域が不安定になるというモデル (Catapult Current Sheet Relaxation Model=カタパルト電流層緩和モデル) を提唱した [Machida et al., 2009]。

また、近年、サブストームの開始前後には、オーロラ活動に特徴的な変化のみられることが確認された。すなわち、オンセットの 5~10 分ほど前に Poleward Boundary Intensification (PBI) と呼ばれるオーロラが高緯度側に出現し、その後、PBI の東側の端から North-South (NS) アークと呼ばれる淡いオーロラが低緯度側に延びて行く。そして、それが低緯度に既に存在していた Quiet アークに達すると、オーロラの爆発的発展 (ブレークアップ) の発生することが指摘され注目を浴びていた。[Nishimura et al., 2010] そして、次に目指すべきは、サブストームトリガー後に、オーロラ、カレントディスラプション領域、カタパルト電流層、磁気中性線がどのように関わり合いながら大規模な発展を遂げてゆくかという問題の解明であった。

そのような潮流の中で、2014 年 10 月に MMS 衛星が打ち上げられる予定であった。この計画では、電子スケールの構造解明のために、従来のプラズマ観測では不十分であった時間分解能を大幅に改善し、さらに編隊飛行による多点同時観測が実施される。MMS 計画では磁気リコネクションのダイナミクスの解明が主目標として掲げられており、近尾部に発生する磁気リコネクションのサブストームへの関わりについて、われわれの理解を大きく前進させてくれることが期待されていた。

2. 研究の目的

地球の磁気圏は太陽風からエネルギーを取り込み、それを夜側尾部の領域に磁気エネルギーという形で蓄積する。しかし、この蓄積されたエネルギーは、あることをきっかけに爆発的に開放され、磁気圏・電離圏に様々な擾乱現象を発生させる。この過程はサブストームと呼ばれているが、それをトリガーして、さらに駆動する機構については、多くの可能性が提案されていて、未だに決着がつかない。本研究は、その問題に最終的な解答を与えるべく、地上に設置されたオーロラ、磁場、短波レーダーの観測網と、磁気圏尾部を飛行する GEOTAIL, THEMIS, MMS 衛星の観測データの解析、さらに、大規模なプラズマシ

ミュレーションを観測結果に基づいて統合的に実施することによって、サブストームの完全解明を目指す。具体的には、次の 3 つの目標を立てて研究を展開した。

(1) サブストーム時のオーロラの発展と磁気圏現象の対応づけ

オーロラは磁気圏の中の構造を大気という巨大なスクリーンに映し出しながら時間発展していく。前述のように、PBI や NS アーク、ビーズ状の構造を持ったオンセットアークの発達開始、そして、その約 30 秒後に、アークは指数関数的に増光し、空間的にも拡大して、その 2、3 分後に、低緯度から高緯度側に向かってさらに大きく拡大しながらバルジを形成していく。そのような、地上で起きるオーロラブレークアップの時間発展を磁気圏中に逆投影することによって、サブストーム時のオーロラの発展と磁気圏現象の対応関係を最新のデータと分野横断的な解析によって明らかにする。

(2) カタパルト電流層、カレントディスラプション、磁気リコネクションの相互関係の解明

GEOTAIL, THEMIS 衛星の磁場、プラズマ、波動データを用い、カタパルト電流層、カレントディスラプション、磁気リコネクションに関連する構造の時間変化の詳細を衛星の多点同時観測によって明らかにする。観測的には、磁気圏尾部は朝夕方向に 40Re 程度の幅があるが、磁気リコネクションは、その中の限定的な領域で起きている。地球から 10Re 程度の距離の磁気圏近尾部では、尾部電流層が弱くなり、磁気形状がダイポール化する領域は、最初 1-2Re 程度の狭い領域から始まって、東西方向に広がっていく [Miyashita et al., 2009]。オーロラも、当初、狭い経度領域 (15 度以下) で始まり経度および緯度方向に爆発的に発達していく [Ieda et al., 2008]。これらの現象が、広域的なティアリング不安定が発生するカタパルト電流層で結びついている仮説のもと、観測データの解析を進め、計算機シミュレーションを用いて検証していく。

(3) MMS 衛星計画への参画と取得データを用いた磁気リコネクション・マイクロ過程の解明

本研究計画を遂行するためには、過去の衛星データはもちろんのこと、2014 年に打ち上げられる MMS 衛星のデータを用いた研究を進めることが極めて有用である。MMS 衛星は、これまでの衛星では不十分であった時間分解能を大幅に改善しつつ、編隊飛行による多点同時観測によって、朝夕方向の時間発展とそれに伴う電磁場、特に、電子・イオンの加速や加熱に直接関与する DC 電場の研究を行うことができる。また、それに伴う電子やイオンの速度分布関数やエネルギースペクト

の変化の様子は、運動論的な取り扱いが必要とされるこれらの領域の現象の解明に重要な役割を果たす。本研究ではMMS衛星データの処理と解析のハード・ソフト両面における準備を併せて実施し、データ取得後は速やかに磁気リコネクションおよびサブストームトリガーに関する最新の研究成果を創出することを旨とする。

3. 研究の方法

本計画では、サブストームのトリガーおよび駆動機構の解明を目指し、サブストームに伴うオーロラ、磁気圏尾部の変動を、衛星および地上同時観測で得られた最新データを用いて詳細な解析を実施することを目指した。そのため、平成26年度は、まず、北米大陸に展開された地上観測網THEMIS/ASIで取得されたデータを用いたオーロラの発達に関する研究、また、それと同時に、GEOTAIL、THEMIS衛星の観測データの解析と、大規模な数値シミュレーションによる、カタパルト電流層の緩和、カレントディスラプション、磁気リコネクションの特性と相互関係の研究を実施した。平成27年度以降は、MMS衛星のデータを加えて、前年度の解析を発展させるとともに、オーロラと磁気圏現象の相互関係を明らかにして、サブストームのトリガーおよび駆動機構を解き明かすことを目指した。

「サブストーム時のオーロラの発展と磁気圏現象の対応づけの研究」については、サブストーム開始前のPBIの出現と、そこから延びるN-Sアークの発展、それに続くビーズ状のオンセットアークの発生から始まるサブストームオンセット、さらにそれから爆発的にオーロラバルジが形成されていくまで、オーロラの発達にはいくつかの段階があることが指摘されている[Kadokura et al., 2008; Nishimura et al., 2010]。そこで、各段階におけるオーロラ周辺の電離圏パラメータにどのような時間・空間的な変化が現れるのかに着目して、カナダで広く展開されている全天オーロライメージャ、磁力計から得られるデータとSuperDARN大型短波レーダーで取得されるデータを用いた総合解析を行い、それぞれの段階を生み出す物理メカニズムを明らかにした。

「カタパルト電流層、カレントディスラプション、磁気リコネクションの相互関係の解明」については、これまでに取得されたGEOTAIL、THEMIS衛星の磁場、プラズマ、波動データを用い、カタパルト電流層、カレントディスラプション、磁気リコネクションに関連する構造の時間変化の詳細を衛星の多点同時観測によって明らかにすることを目指した。さらに、磁気圏の数値シミュレーションを行う場合には、地球の固有磁場に起因するダイポール磁場成分を考慮する必要がある。そこで、ブラソフ方程式に基づいた初期磁場およびプラズマ粒子の速度分布関数について理論的な考察を行った上で、数値シ

ミュレーションを実行した。その上で、局所的に開始する電流層の緩和および磁気リコネクションの構造がどのように発展し、どのような変動や空間構造、特に、カレントディスラプション領域に対応する構造を作るかについて調べた。「MMS衛星計画への参画と取得データを用いた磁気リコネクション・マイクロ過程の解明」については、GEOTAIL衛星、THEMIS衛星で培った経験を活かして、MMS衛星計画で実施される科学観測で得られる各種物理量を効率よく表示・処理するための解析ソフトウェアの製作を行い、MMS衛星が打ち上がった後に速やかに行う必要のあるデータの評価と解析に備えた。MMS衛星群の高時間分解能(電子30msec、イオン150msec)のプラズマ観測データを用いて、これまでの衛星の時間分解能(約3sec)では捉えられなかった、プラズマ高速流やビームが存在するかを調べ、サブストームで重要な役割を果たす磁気リコネクションについて調べた。

4. 研究成果

(1) サブストーム時のオーロラの発展と磁気圏現象の対応づけ

- ① サブストームに伴う特徴的なオーロラ活動の研究を、昭和基地～アイランド共役点観測などにより得られたデータを用いて行い、サブストームのオンセット前後に現れるビーズ構造、オンセット後に現れるオメガバンドや東向きに拡大していく構造など、サブストームに伴う特徴的なオーロラ活動の研究を実施した。
- ② サブストームの過程で重要なエネルギー収支については、これまででも多くの研究報告があるが、いずれも地球半径の10倍以内の磁気圏尾部内で、磁気リコネクションの結果生じるローブからプラズマシートに向かう直流的なポインティングフラックスについて推定を適切に行っていなかった。今回これまでに得た観測結果に基づいてそれを実施することによって、正確なサブストームのエネルギー収支を求めることができた。
- ③ THEMIS計画によるオーロラサブストームの観測で、オーロラ爆発が10分間隔で生じ、極方向へ階段状に発達する現象について事例解析を行った結果、オーロラが階段状に拡大する時、磁気リコネクションの位置もそれに呼応して尾部側に不連続に移動していることが見出された。また、THEMIS計画による観測データを用いて、サブストーム開始に伴う磁気圏近尾部とオーロラアークの発展のタイミングを詳細に調べた。

(2) カタパルト電流層、カレントディスラプション、磁気リコネクションの相互関係の解明

- ① THEMIS衛星データの時間重畳法解析により、カタパルト電流で発生するプラズマ

流が、カレントディスラプションと磁気リコネクションを同時に開始させる様子が明確に示され、図1に示すカタパルト電流層緩和モデルの妥当性を裏付ける重要な結果が得られた。

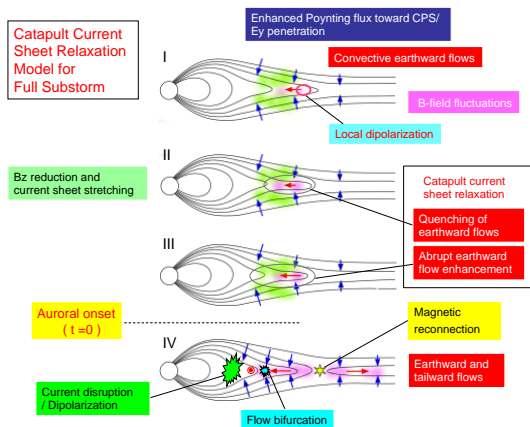


図1 カタパルト電流層緩和モデルの概念図 (引用文献①より)

- ② 地球のダイポール磁場を考慮した反平行磁場形状を持つ系に、磁気圏尾部 $X = -16$ Re 付近の local dipolarization 構造を付加した 2-1/2 次元電磁的全粒子シミュレーションを実行した。その結果、初期に電子ティアリングモード不安定が励起され、複数の磁気中性線が形成されるが、最終的には、その中の1つが発達して近地球磁気中性線 (Near-Earth neutral line: NENL) になることが見出された。また local dipolarization は NENL の位置や、電子ティアリングモードの成長率に影響を与え、さらに一連の磁場およびプラズマの変化がカタパルト電流層緩和モデルと良く符合することが見出された。
- ③ THEMIS 衛星で取得されたデータをサブストームと擬似サブストームが発生した時に分けて解析した結果、両者において近尾部で磁気リコネクションが発生することが明らかになった。しかし、サブストームの発生時は、地球半径の 7~8 倍程度の夜側磁気圏のプラズマ圧が擬似サブストームの発生時に比べて 1.4 倍ほど大きく、それがサブストームに発展するか否かを分ける鍵を握っていることが判明した。
- ④ THEMIS 衛星データの解析によって、カタパルト電流層で発生した地球向きの流れがバルーニング不安定の発生をトリガーしている結果を得た。また、磁気中性線の朝夕方向の空間スケールと、磁気中性線付近における電子加熱と低周波プラズマ波動について重要な関係を見出した。
- ⑤ GEOTAIL 衛星データの解析から、磁気リコネクション過程で重要な磁気中性線付近では、ホール効果によって、赤道面に向かう (南北方向の) 電場が生じ、それ

によってイオン加速の行われる様子が明らかになった。

- ⑥ 長期にわたる GEOTAIL 衛星のデータの中から磁気リコネクションイベントを抽出して、磁気中性線の朝夕方向の空間長について統計的に有意な物理像を得ることができた。
- (3) MMS 衛星計画への参画と取得データを用いた磁気リコネクション・マイクロ過程の解明
 - ① 分担者 (齋藤) の開発した観測装置 FPI-DIS16 台を搭載した 4 機 (各機 4 台) の MMS 衛星の一連の機能・動作試験が完了し、衛星が 2015 年 3 月 12 日に無事打上げられた。その後、衛星軌道上で 16 台のセンサー全てが予定通りの性能を発揮していることを確認した。MMS 衛星計画の大きな柱は衛星群の高時間分解 (30 msec) のプラズマ観測データを用いて、これまでの衛星の時間分解能 (約 3sec) では捉えられなかった現象のデータ解析を行うことであったが、それを達成できる目途が立った。
 - ② MMS 衛星のデータに 2 流体方程式を適用することによって、磁気中性線を取り巻く磁気拡散領域を解析した。その結果、図2に示すような低域混成波動の励起によって異常抵抗が発生している確かな証拠が得られた。

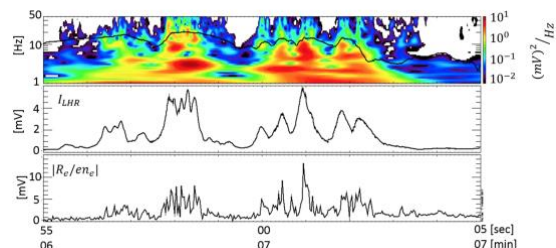


図2 上から順番に、MMS 衛星が磁気中性線近傍を通過した際の波動電場のダイナミックスペクトル、低域混成波の強度、電子流体方程式の異常抵抗項の大きさを示す。下段2つのパラメータ間の正の相関は、異常抵抗の発生を強く示唆する。

以上のように、本研究においては、地上の多点オーロラ観測および磁気圏観測の直接計測で得られたデータの解析、さらに、数値シミュレーションを併せて行った。その結果、われわれがカタパルト電流層と名付けた領域において電子ティアリングモード不安定が発生し、その帰結として磁気リコネクションが開始すること、さらに、その両者に伴う地球向きの高速流が、内側の領域にバルーニング不安定などの圧力の不均一性に起因する不安定を励起して、大規模なオーロラの擾乱を発生させるという従来のモデルを改訂した新しいサブストーム像を得た。また、関連の研究によって、磁気リコネクションの核

心部分の理解が大きく進んだ。

<引用文献>

- ① S. Machida, Y. Miyashita, A. Ieda, M. Nosé, V. Angelopoulos, and J. P. McFadden, Statistical visualization of the Earth's magnetotail and the implied mechanism of substorm triggering based on superposed-epoch analysis of THEMIS data, *Ann. Geophys.*, 32, 99-111, 2014.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 43 件)

- ① Ieda A., Y. Nishimura, Y. Miyashita, V. Angelopoulos, A. Runov, T. Nagai, H. U. Frey, D. H. Fairfield, J. A. Slavin, H. Vanhamki, H. Uchino, R. Fujii, Y. Miyoshi., and S. Machida, Stepwise tailward retreat of magnetic reconnection: THEMIS observations of an auroral substorm, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 査読有, doi: 10.1002/2015JA022244, 2016.
- ② Pollock, C., A. Jacques, U. Gliese, Y. Saito 他 73 名, Fast plasma investigation for magnetospheric multiscale, *Space Sci. Rev.*, 査読有, 199, 331-406, doi: 10.1007/s11214-016-0245-4, 2016.
- ③ Miyashita, Y., S. Machida, Y. Kamide, and A. Nishida, Comment on “Where is the magnetic energy for the expansion phase of auroral substorms accumulated?” by S.-I. Akasofu, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 査読有, 120, 3827-3828, doi:10.1002/2014JA020841, 2015
- ④ Tanaka, Y., Y. Ogawa, A. Kadokura, N. Partamies, D. Whiter, C.-F. Enell, U. Brändström, T. Sergienko, B. Gustavsson, A. Kozlovsky, H. Miyaoka and, A. Yoshikawa, Eastward-expanding auroral surges observed in the post-midnight sector during a multiple-onset substorm, *Earth, Planets and Space*, 査読有, 67, doi: 10.1186/s40623-015-0350-8, 2015.
- ⑤ Nagai, T., I. Shinohara, and S. Zenitani, The dawn-dusk length of the X line in the near-Earth magnetotail: Geotail survey, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 査読有, 1994-2014, 120, doi: 10.1002/2015JA021606, 2015.
- ⑥ Uchino, H., and S. Machida, Full-particle simulations of instabilities in a thin current sheet of the magnetospheric system prior to substorm onset, *Earth, Planets and Space*, 査読有, 67, doi: 10.1186/s40623-015-0335-7, 2015.
- ⑦ Motoba, T., S. Ohtani, A. Kadokura, and J. Gjerloev, Interrelationship between preonset auroral and magnetic signatures at a geomagnetically conjugate Iceland-

Syowa pair, *J. Geophys. Res., Space Physics*, 査読有, 119, doi:10.1002/2013JA019512, 2014.

- ⑧ Morioka, A., Y. Miyoshi, Y. Kasaba, N. Sato, A. Kadokura, H. Misawa, Y. Miyashita, and I. Mann, Substorm onset process: Ignition of auroral acceleration and related substorm phases, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 査読有, 119, doi: 10.1002/2013JA019442, 2014.
- ⑨ Nagai, T., I. Shinohara, and S. Zenitani, Ion acceleration processes in magnetic reconnection: Geotail observations in the magnetotail, *J. Geophys. Res., Space Physics*, 査読有, doi:10.1002/2014JA020737, 2014.
- ⑩ S. Machida, Y. Miyashita, A. Ieda, M. Nosé, V. Angelopoulos, and J. P. McFadden, Statistical visualization of the Earth's magnetotail and the implied mechanism of substorm triggering based on superposed-epoch analysis of THEMIS data, *Ann. Geophys.*, 査読有, 32, 99-111, doi:10.5194/angeo-32-99-2014 2014.

[学会発表] (計 69 件)

- ① Machida, S., K. Fukui, Y. Miyashita, and A. Ieda, Toward a unified model of substorms, 13th International Conference on Substorms (ICS 13), 2017.
- ② 家田章正, 西村幸敏, 宮下幸長, 町田忍, 川嶋貴大, 三浦翼, オーロラ爆発の衛星画像と全天画像による同時観測, 第 140 回 SGEPS 総会および講演会, 2016.
- ③ 町田忍, 小林勇貴, 内野宏俊, 宮下幸長, 家田章正, 桂華邦裕, 三好由純, 北村成寿, 齋藤義文, MMS 衛星データを用いた磁気リコネクション過程の解明: 2 流体モデルの適用, 第 140 回 SGEPS 総会および講演会, 2016.
- ④ 門倉昭, 田中良昌, 佐藤由佳, 片岡龍峰, 岡田雅樹, 小川泰信, 田口真, 尾崎光紀, 細川敬祐, 行松彰, 山岸久雄, 佐藤夏雄, アイスランド~昭和基地共役点観測の現状と将来, 第 7 回極域科学シンポジウム, 2016.
- ⑤ Hasegawa, H., N. Kitamura, Y. Saito, I. Shinohara, S. Yokota, T. Nagai, S. Zenitani, and The MMS team, Structure of the magnetopause during quasi-continuous spatially-extended magnetic reconnection: Geotail and MMS conjunction on 2015-10-02, Japan Geoscience Union Meeting, 2016.
- ⑥ Saito, Y., S. Yokota, N. Kitamura, and H. Hasegawa, Japanese Participation to MMS: Current Status and Future Plan, Japan Geoscience Union Meeting, 2016.
- ⑦ Shinohara, I., T. Nagai, M. Fujimoto, H. Kojima, and S. Zenitani, Two types of flow

reversal events observed in magnetotail, American Geophysical Union Fall Meeting 2015, 2015.

- ⑧ Miyashita, Y., Time sequence of the development of the near-Earth magnetotail and the auroral arc associated with substorm onset, Workshop on Magnetotail Reconnection Onset and Dipolarization Fronts, 2015.
- ⑨ Ieda, A., Y. Miyashita, and S. Machida, Tailward leap of magnetic reconnection: A THEMIS case study, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 2015.
- ⑩ Kadokura, A., N. Sato, H. Yamagishi, Y. Tanaka, Y. Sato, M. Taguchi, T. Motoba, K. Hosokawa, G. Bjornsson, Current status of upper atmosphere physics observation in Iceland in 2015, The Fourth International Symposium on the Arctic Research (ISAR-4), 2015.
- ⑪ Nagai, T., Structure of magnetic reconnection in the near-Earth magnetotail, Chapman Conference on Magnetospheric Dynamics, 2015.
- ⑫ Machida, S., New Perspectives of Space Weather Forecast, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 2015.
- ⑬ Miyashita, Y., An assessment of substorm energy budget and energy transport in the magnetotail, Inner Magnetosphere Coupling III, 2015.
- ⑭ 寺田直樹, セミディスクリート中心スキームを用いた MHD および non-MHD コードの高次精度化, STE シミュレーション研究会, 2014.
- ⑮ 家田 章正, 宮下 幸長, 町田 忍, 西村 幸敏, 磁気圏尾部リコネクションの多重発生: テミス衛星による観測例, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 136 回総会・講演会, 2014.
- ⑯ 門倉 昭, 極地研宙空圏研究グループ, 宮道光平, 吉川康文, サブストーム発達過程におけるプロトンオーロラと電子オーロラの関係: 昭和基地地上観測 (Relationship between proton and electron auroras during a course of substorm evolution), 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 136 回総会・講演会, 2014.
- ⑰ Machida, S., Y. Miyashita, A. Ieda, M. Nose, V. Angelopoulos, J.P. McFadden, Catapult current sheet relaxation model confirmed by THEMIS observations, The 12th International Conference on Substorms, 2014.

[その他]

ホームページ等

<http://www.kinet-tv.ne.jp/~machifam/KAKENHI.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

町田 忍 (MACHIDA, Shinobu)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授

研究者番号: 70209469

(2) 研究分担者

長井 嗣信 (NAGAI, Tsugunobu)

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号: 60260527

門倉 昭 (KADOKURA, Akira)

国立極地研究所・研究教育系・教授

研究者番号: 70185883

齋藤 義文 (SAITO, Yoshifumi)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号: 30260011

篠原 育 (SHINOHARA, Iku)

国立研究開発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

家田 章正 (IEDA, Akimasa)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・助教

研究者番号: 70362209

堀 智昭 (HORI, Tomoaki)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・特任准教授

研究者番号: 30467344

寺田 直樹 (TERADA, Naoki)

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号: 70470060

宮下 幸長 (MIYASHITA, Yukinaga)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・特任助教

研究者番号: 20435811

(3) 連携研究者

銭谷 誠司 (ZENITANI, Seiji)

京都大学・生存圏研究所・特任講師

研究者番号: 10623952

(4) 研究協力者

西村 幸敏 (NISHIMURA, Yukitoshi)

米国 UCLA・海洋大気科学科・研究員