

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年5月23日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05306

研究課題名(和文) 磁気圏編隊観測を用いた三次元磁気リコネクションの研究

研究課題名(英文) Study on three-dimensional magnetic reconnection based on formation-flying spacecraft observations of the magnetosphere

研究代表者

長谷川 洋 (Hasegawa, Hiroshi)

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・助教

研究者番号：50435799

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：太陽風プラズマの地球磁気圏への侵入やオーロラ爆発の際のエネルギー解放に重要な役割を果たしている磁気リコネクション過程について、人工衛星による宇宙プラズマと電磁場の直接観測を用いて研究した。その結果、磁気圏界面における磁気リコネクションは7万キロメートルという広範囲にわたって5時間以上持続することを発見するとともに、磁気圏界面と磁気圏尾部の両領域で観測された磁気リコネクションの中心部の多次元構造を可視化することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽風プラズマやエネルギーの地球磁気圏流入の原因である磁気圏界面の磁気リコネクションが、磁気圏内で発生しているオーロラ関連現象を説明できるほど大規模に起きていることを人工衛星による直接観測によって実証できたことに意義がある。また、目に見えない宇宙プラズマや磁場の観測データから、磁気リコネクションの中心領域を可視化し、磁力線がつなぎ変わる仕組みを理解することにつながるデータ解析手法を確立したことの意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：Based on in-situ measurements by spacecraft of plasma and electromagnetic field, we studied the magnetic reconnection process in the geospace that plays a pivotal role in the transport of solar wind into Earth's magnetosphere and energy release during auroral expansion. We found that magnetic reconnection at the outer boundary of the magnetosphere, called the magnetopause, lasts for more than 5 hours along a line exceeding 70000 km, the largest-scale reconnection ever observed in the magnetosphere. Moreover, we successfully visualized multi-dimensional structures of the central small-scale region of magnetic reconnection observed in both the magnetopause and magnetotail.

研究分野：惑星間空間物理学

キーワード：磁気リコネクション 磁気圏界面 磁気圏尾部 電子拡散領域 電子電磁流体力学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 磁気リコネクションは、荷電粒子間の衝突がほとんど起きないプラズマ中で起こる磁力線のつながり方(トポロジー)を変える物理過程であり、その結果として磁場エネルギーがプラズマの運動・熱エネルギーへと変換される。地球近傍の宇宙空間では、地球磁気圏の外側境界である「磁気圏界面」や夜側の磁気圏尾部で発生していることが知られており、前者での磁気リコネクションは太陽風プラズマやエネルギーの磁気圏流入において、後者での磁気リコネクションはオーロラ爆発の際に起こるエネルギー解放において中心的な役割を果たしている。磁気リコネクションは、基本的には電流層中の二次元過程であり、磁力線がつながり変わる場所である X ポイントと呼ばれる特異点、電流層に向かうプラズマの流れ(インフロー)、そして X ポイントから放出される電流層沿いのプラズマの流れ(アウトフロー)によって特徴づけられる。しかし、磁気圏界面で起きる磁気リコネクションは、プラズマ乱流を伴う場合があり、三次元的に起きている可能性がある。また、より単純な磁気圏尾部の磁気リコネクションについても、X ライン(電流)方向の構造が生じる場合があり、三次元性を伴っている可能性がある。このような磁気リコネクションの三次元性の実態はよくわかっておらず、三次元構造と磁気リコネクションの際に起こるエネルギー変換の過程や効率との関係は不明である。

(2) 磁気リコネクションの素過程を解明することを目的として、NASA は 2015 年 3 月に同型 4 機の衛星からなる Magnetospheric Multiscale (MMS) を打ち上げた。MMS ミッションの主な観測対象は、地球磁気圏の境界領域や尾部電流層、さらには太陽風中やバウショックの下流の磁気圏シースで起こる磁気リコネクションである。MMS 衛星に搭載されている電子計測器は従来のものより 100 倍の高い時間分解能をもっており、磁力線がつながり変わり、磁場のエネルギーが電子のエネルギーへと変換される正にその領域(電子拡散領域)を観測できるように設計されている。衛星間距離は電子が磁力線の周りを旋回する空間スケールであるラーマー半径と同程度であり、物理量の勾配を測定できるように調整されているため、磁気リコネクションの中心部である X ポイント周辺領域の三次元構造まで明らかにすることが可能である。

2. 研究の目的

(1) MMS 衛星を中心とする地球磁気圏編隊観測によって得られたプラズマと電磁場のデータを用いて、磁気圏や太陽風中で起きている磁気リコネクションの三次元構造を解析するための新しい手法を開発する。

(2) 新しく開発したデータ解析手法や三次元構造を解析するための既存の手法を用いて、MMS 衛星によって観測された磁気リコネクション領域を解析し、磁気リコネクションの三次元性の実態を明らかにする。また、三次元性と磁気リコネクションに伴うエネルギー変換の過程や効率との関係を調査する。

3. 研究の方法

(1) 磁気リコネクションの中心部(電子拡散領域)では、イオンだけでなく電子までもが磁場の支配を逃れ、磁力線と電子流体は別々の運動をするようになる。この領域は理想電磁流体力学の枠組みでは記述することができないので、何らかの散逸過程を組み込む必要がある。本研究では、電子の電磁流体方程式に散逸項を組み込んだ支配方程式を用いて、磁気リコネクション領域を可視化するデータ解析手法を開発した。三次元構造そのものを再現するものではないが、再現された二次元構造と実際の観測データを比較することにより、三次元性についての情報を得ることができると考えた。開発した手法を試験するために、イオンと電子をともに粒子として扱う電磁粒子シミュレーションを用いて磁気リコネクション領域を模擬計算した結果を用いた。

(2) 開発したデータ解析手法を MMS 衛星が磁気リコネクション領域で得た観測データに適用し、磁気リコネクション領域の磁力線や電子流線の二次元構造を再現した。再現された二次元構造とエネルギー変換が起こる場所や変換効率との関係を調査した。

(3) 地球周辺の宇宙空間では、MMS 衛星だけでなく、JAXA の Geotail 衛星を含む複数の人工衛星が地球を周回しており、地球磁気圏の内外で起こる磁気リコネクションを観測することができる。したがって複数の衛星が最適な場所に配置されている場合には、複数の場所で同じ磁気リコネクションの影響(例えば、アウトフロー領域に存在するプラズマの加速流に相当するリコネクションジェット)を観測・比較することが可能である。このような複数衛星の同時観測によって、例えば X ラインの長さを推定することができるので、磁気リコネクションの三次元性についての情報を得ることができる。

4. 研究成果

(1) 人工衛星による電子と磁場の直接観測のデータから、電子の電磁流体方程式を用いて磁気リコネクションの中心部の磁場と電子速度場の二次元像を作成するデータ解析手法を開発することに成功した(Sonnerup 他、2016)。

(2) 開発したデータ解析手法を用いて、MMS 衛星によって地球磁気圏界面で観測された磁気リコネクションの中心部の二次元構造を再現することに成功した（長谷川 他、2017）。

(3) 開発したデータ解析手法を用いて、MMS 衛星によって地球磁気圏尾部で観測された磁気リコネクションの中心部の二次元構造を再現することに成功した（長谷川 他、2019）。X ポイントと電子流のよどみ点の場所が一致せず、ずれることを発見した（図 1）。このずれは、磁気圏尾部で起きている反平行磁場配位における対称磁気リコネクションについては予測されていなかったものであり、実際に起きている磁気リコネクションが単純ではないことを示す、驚きの成果である。また、再現された磁場構造は観測されたエネルギー変換効率と矛盾がないことを確認した。さらに、X ポイントの近くは三次元性が弱く、二次元構造モデルで磁気リコネクション領域を記述することができるが、X ポイントから離れたアウトフローの領域では無視できない三次元構造が存在することを発見した（中村 他、2018）。

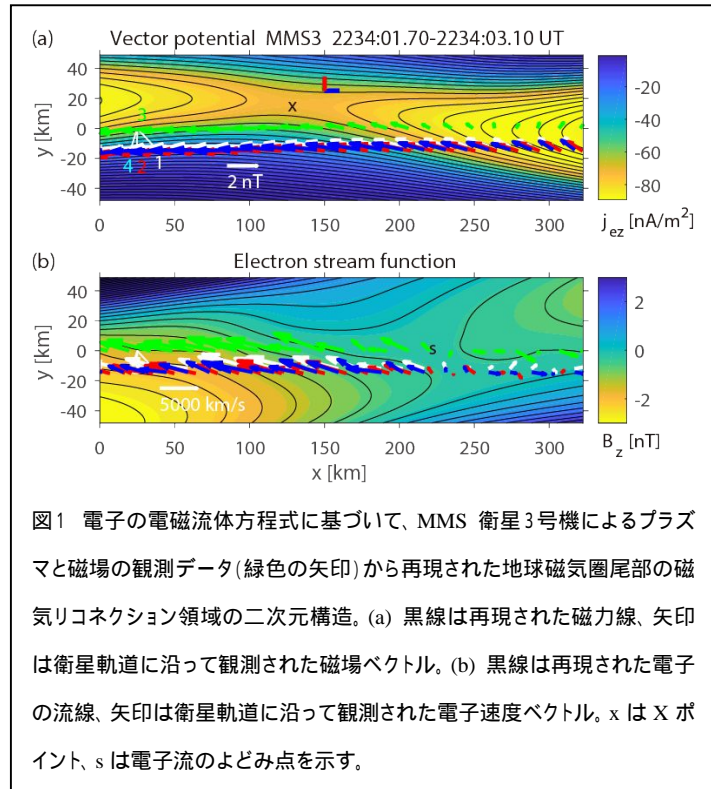


図1 電子の電磁流体方程式に基づいて、MMS 衛星3号機によるプラズマと磁場の観測データ（緑色の矢印）から再現された地球磁気圏尾部の磁気リコネクション領域の二次元構造。(a) 黒線は再現された磁力線、矢印は衛星軌道に沿って観測された磁場ベクトル。(b) 黒線は再現された電子の流線、矢印は衛星軌道に沿って観測された電子速度ベクトル。x は X ポイント、s は電子流のよどみ点を示す。

(4) 地球磁気圏の昼側前面で磁気リコネクションが起こりやすい太陽風磁場が南向きの時に、磁気圏界面の磁気リコネクションは5時間以上、7万キロメートルという広範囲にわたって継続することを発見した（長谷川 他、2016）。この発見は MMS 衛星と Geotail 衛星による磁気リコネクションジェット同時観測に基づくものであり（図 2）、地球磁気圏で直接観測された最大規模の磁気リコネクションである。乱流を伴うこともある磁気圏界面の磁気リコネクションが、観測されたような長い X ラインを伴って二次元的に起こりうることは驚きである。また、地球磁気圏内で発生するオーロラ爆発などの現象に必要なだけの太陽風エネルギーの流入が、磁気リコネクションのみによって説明可能であることを示したという点でも重要な成果である。

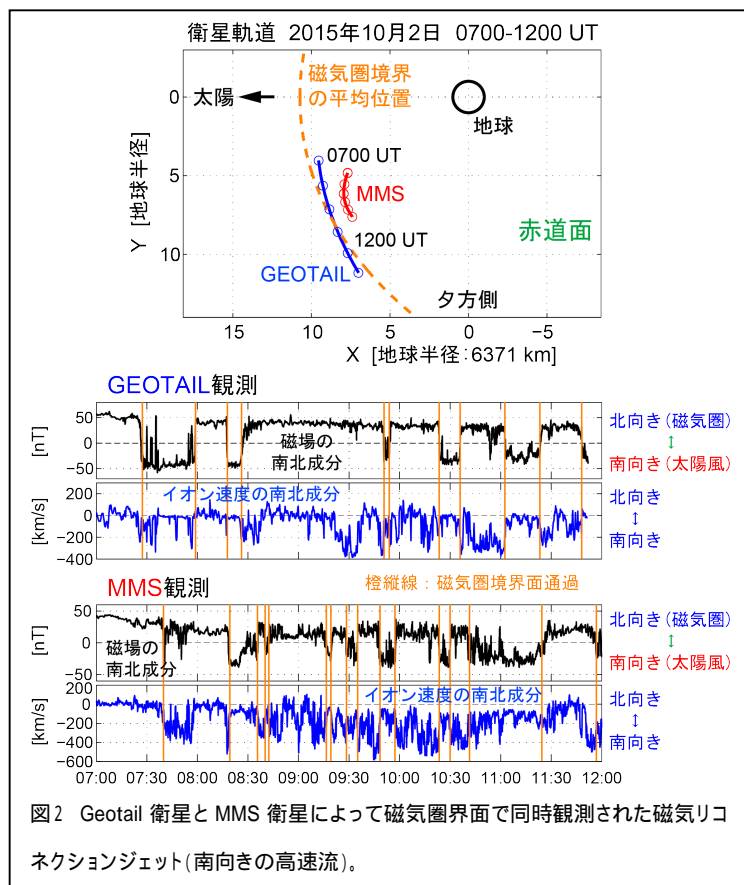


図2 Geotail 衛星と MMS 衛星によって磁気圏界面で同時観測された磁気リコネクションジェット(南向きの高速流)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 18 件)

長谷川 洋 他、Reconstruction of the electron diffusion region of magnetotail reconnection seen by the MMS spacecraft on 11 July 2017, J. Geophys. Res. Space Physics, 124, 122-138, 2019, <https://doi.org/10.1029/2018JA026051> .

中村 るみ、Genestreti, K. J., 中村 琢磨、Baumjohann, W., Varsani, A., Nagai, T., Bessho, N., Burch, J. L., Denton, R. E., Eastwood, J. P., Ergun, R. E., Gershman, D. J., Giles, B. L., 長谷川 洋他、Structure of the current sheet in the 11 July 2017 electron diffusion region event, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 124, 1173-1186, 2019, <https://doi.org/10.1029/2018JA026028> .

Tang, B.-B., Li, W. Y., Graham, D. B., Rager, A. C., Wang, C., Khotyaintsev, Y. V., Lavraud, B., 長谷川 洋他、Crescent-shaped electron distributions at the non-reconnecting magnetopause: Magnetospheric Multiscale observations, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 3024-3032, 2019, <https://doi.org/10.1029/2019GL082231> .

蔡 東生、Lembege, B., 長谷川 洋、Nishikawa, K.-I.、Identifying 3-D vortex structures at/around the magnetopause using a tetrahedral satellite configuration, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 123, 10158-10176, 2018, <https://doi.org/10.1029/2018JA025547> .

星 康人、長谷川 洋、北村 成寿、齋藤 義文、Angelopoulos, V.、Seasonal and solar wind control of the reconnection line location on the Earth's dayside magnetopause, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 123, 7498-7512, 2018, <https://doi.org/10.1029/2018JA025305> .

中村 琢磨、Genestreti, K. J., Liu, Y.-H., Nakamura, R., Teh, W.-L., 長谷川 洋他、Measurement of the magnetic reconnection rate in the Earth's magnetotail, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 123, 9150-9168, 2018, <https://doi.org/10.1029/2018JA025713> .

Denton, R. E., Sonnerup, B. U. Ö., Russell, C. T., 長谷川 洋、Determining L-M-N current sheet coordinates at the magnetopause from MMS data, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 123, 2274-2295, 2018, <https://doi.org/10.1002/2017JA024619> .

Kacem, I., Jacquey, C., Genot, V., Lavraud, B., Vernisse, Y., Marchaudon, A., Le Contel, O., Breuillard, H., Phan, T.-D., 長谷川 洋他、Magnetic reconnection at a thin current sheet separating two interlaced flux tubes at the Earth's magnetopause, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 123, 1779-1793, 2018, <https://doi.org/10.1002/2017JA024537> .

長谷川 洋他、Reconstruction of the electron diffusion region observed by the Magnetospheric Multiscale spacecraft: First results, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 4566-4574, 2017, <https://doi.org/10.1002/2017GL073163> .

中村 琢磨、長谷川 洋他、Turbulent mass transfer caused by vortex induced reconnection in collisionless magnetospheric plasmas, *Nature Communications*, 8, 1582, 2017, <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01579-0> .

中村 琢磨、Eriksson, S., 長谷川 洋他、Mass and energy transfer across the Earth's magnetopause caused by vortex-induced reconnection, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, 11505-11522, 2017, <https://doi.org/10.1002/2017JA024346> .

長谷川 洋他、Decay of mesoscale flux transfer events during quasi-continuous spatially extended reconnection at the magnetopause, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 4755-4762, 2016, <https://doi.org/10.1002/2016GL069225> .

Sonnerup, B. U. Ö., 長谷川 洋、Denton, R. E., 中村 琢磨、Reconstruction of the electron diffusion region, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 4279-4290, 2016, <https://doi.org/10.1002/2016JA022430> .

Denton, R. E., Sonnerup, B. U. Ö., 長谷川 洋他、Motion of the MMS spacecraft relative to the magnetic reconnection structure observed on 16 Oct 2015 at 1307 UT, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 5589-5596, 2016, <https://doi.org/10.1002/2016GL069214> .

Denton, R. E., Sonnerup, B. U. Ö., 長谷川 洋他、Reconnection guide field and quadrupolar structure observed by MMS on 16 October 2015 at 1307 UT, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 9880-9887, 2016, <https://doi.org/10.1002/2016JA023323> .

北村 成寿、長谷川 洋、齋藤 義文 他、Shift of the magnetopause reconnection line to the winter hemisphere under southward IMF condition: Geotail and MMS observations, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 5581-5588, 2016, <https://doi.org/10.1002/2016GL069095> .

Lavraud, B., Zhang, Y. C., Vernisse, Y., Gershman, D. J., Dorelli, J., Cassak, P. A., Dargent, J., Pollock, C., Giles, B., Aunai, N., Argall, M., Avanov, L., Barrie, A., Burch, J., Chandler, M., Chen, L.-J., Clark, G., Cohen, I., Coffey, V., Eastwood, J. P., Eriksson, S., Ergun, R., Farrugia, C. J., Fuselier, S. A., Génot, V., Grigorenko, E., 長谷川 洋他、Currents and associated electron scattering and bouncing near the diffusion region at Earth's magnetopause, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 3042-3050, 2016, <https://doi.org/10.1002/2016GL068359> .

Vernisse, Y., Lavraud, B., Eriksson, S., Gershman, D. J., Dorelli, J., Pollock, C., Giles, B., Aunai, N., Avanov, L., Burch, J., Chandler, M., Coffey, V., Dargent, J., Ergun, R. E., Farrugia, C. J., Génot, V., Graham, D., 長谷川 洋他、Signatures of complex magnetic topologies from multiple reconnection sites induced by Kelvin-Helmholtz instability, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 9926-9939, 2016, <https://doi.org/10.1002/2016JA023051> .

[学会発表](計16件)

長谷川 洋、Reconstruction of space plasma structures from in-situ measurements、Toyama International Symposium on “Physics at the Cosmic Frontier”、2019 .

長谷川 洋 他、Generation of turbulence in Kelvin-Helmholtz vortices at Earth's magnetopause: MMS observations、ISEE symposium "Recent progress in heliospheric physics by direct measurements of unexplored space plasmas"、2019 .

長谷川 洋 他、On the generation of turbulence observed in the flank of Earth's magnetosphere、JpGU 2018 Meeting、2018 .

長谷川 洋 他、Reconstruction of the magnetotail reconnection region seen by MMS on 11 July 2017、MMS Science Community Workshop #3、2018 .

長谷川 洋 他、Reconstruction of the electron diffusion region of magnetotail reconnection seen by the MMS spacecraft on 11 July 2017、Magnetic Reconnection in Space, Solar, Astrophysical, and Laboratory Plasmas (MR2018)、2018 .

長谷川 洋 他、Generation of turbulence observed in magnetopause Kelvin-Helmholtz vortices: Revisiting Magnetospheric Multiscale observations on 8 September 2015、Fundamental Physical Processes in Solar-Terrestrial Research and Their Relevance to Planetary Physics 2018、2018 .

長谷川 洋 他、Large-scale context of a magnetopause Kelvin-Helmholtz event observed by the MMS spacecraft on 8 September 2015、Toulouse Magnetic Reconnection Workshop、2017 .

長谷川 洋 他、Large-scale context of a magnetopause Kelvin-Helmholtz event observed by the MMS spacecraft on 8 September 2015、JpGU-AGU Joint Meeting 2017、2017 .

長谷川 洋 他、Evolution and its consequence of the magnetopause Kelvin-Helmholtz instability: MMS event on 8 September 2015 revisited、AGU Chapman Conference on Dayside Magnetosphere Interactions、2017 .

長谷川 洋 他、Generation of turbulence in magnetopause Kelvin-Helmholtz vortices: Revisiting the 2015-09-08 event、MMS Science Working Team meeting、2017 .

長谷川 洋 他、Revisiting a magnetopause Kelvin-Helmholtz event seen by the MMS spacecraft on 9 September 2015: Large-scale context and wave properties、AGU 2017 Fall Meeting、2017 .

長谷川 洋 他、Reconstruction of the electron diffusion region observed by MMS: First results、AGU 2016 Fall Meeting、2016 .

長谷川 洋 他、Structure of the magnetopause during quasi-continuous spatially extended magnetic reconnection: Geotail and MMS conjunction on 2015-10-02、JpGU 2016 Meeting、2016 .

長谷川 洋 他、Reconstruction of the electron diffusion region observed by MMS: First results、First MMS Community Science Workshop、2016 .

長谷川 洋 他、Structure of Earth's magnetopause during quasi-continuous extended magnetic reconnection: Geotail and MMS conjunction、Future perspectives of researches in space physics、2016 .

長谷川 洋 他、Structure of magnetic reconnection jets at the Earth's dayside magnetopause: Geotail and MMS simultaneous observations、2016 .

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.isas.jaxa.jp/topics/000285.html>

<http://www.isas.jaxa.jp/feature/forefront/161226.html>

<http://www.isas.jaxa.jp/en/topics/000544.html>

<http://www.isas.jaxa.jp/topics/001193.html>

<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/taking-a-spin-on-plasma-space-tornadoes-with-nasa-observations>

6 . 研究組織

(2)研究協力者

研究協力者氏名：中村 琢磨

ローマ字氏名：(NAKAMURA, takuma)

研究協力者氏名：Bengt Sonnerup

ローマ字氏名：(SONNERUP, bengt)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。