

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740337

研究課題名(和文)複数衛星観測を用いた四次元時空間における宇宙プラズマ構造の再現

研究課題名(英文) Reconstruction of space plasma structures in four-dimensional spacetime from multi-spacecraft observations

研究代表者

長谷川 洋 (HASEGAWA, Hiroshi)

独立行政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) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：複数衛星観測のデータを用いて、宇宙プラズマの四次元時空間構造を再現する革新的なデータ解析手法を開発することを目的とした。二次元構造の時間発展を精度よく再現する手法、磁場やプラズマの三次元空間構造を二衛星観測から再現する手法、磁気リコネクションの電子拡散領域の二次元構造を再現する手法などの開発に成功した。そのうちの一手法をテミス衛星観測に適用し、地球磁気圏界面での磁気リコネクションによって形成された磁気フラックスロープが強い三次元性を持つことを発見した。2015年3月に無事打上げられたNASAの磁気圏編隊観測衛星(MMS)がもたらす高分解能データの解析に必要な手法開発は、ほぼ終了したと言える。

研究成果の概要(英文)：The objective of our research is to develop novel data analysis techniques for the reconstruction of space plasma structures in four-dimensional spacetime from multi-spacecraft measurements. We successfully developed methods for accurately reconstructing temporal evolution of two-dimensional (2-D) structures, for reconstructing three-dimensional (3-D) magnetic field and plasma structures from two-spacecraft measurements, for reconstructing the electron diffusion region in 2-D magnetic reconnection, etc. One of the methods, the 3-D reconstruction method, was successfully applied to THEMIS spacecraft observations of Earth's magnetopause. We found that a magnetic flux rope generated by magnetopause reconnection has a significant 3-D structure, suggesting the operation of 3-D reconnection. We are now almost ready for the analysis of high spatio-temporal resolution data to be taken by NASA's four-spacecraft Magnetospheric Multiscale (MMS) mission, successfully launched on 12 March 2015.

研究分野：宇宙プラズマ物理学

キーワード：衛星観測 地球・惑星磁気圏 磁気リコネクション 宇宙プラズマ データ解析手法 磁気圏界面 磁気フラックスロープ 時空間構造

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙空間で発生しているダイナミックな宇宙プラズマ・宇宙天気現象を理解し、精度のよい宇宙天気予報などにつなげるためには、まずは観測によって現実を正確に把握することが重要である。ところが、地球近傍の宇宙プラズマは光学的に非常に薄いため、遠隔観測(撮像観測など)が困難である。加えて、人工衛星によるその場観測から、宇宙プラズマ・磁場の空間構造、およびその時間発展を把握することは、原理的な問題により非常に困難であった。

我々は、電磁流体力学などの物理法則に基づいて、単一衛星観測からプラズマや磁場の定常二次元空間構造を再現すること、また複数衛星観測から三次元空間構造や多次元構造の時間発展を再現することが、原理的には可能であることを見出した。これまでの研究により、定常二次元構造を再現するデータ解析手法の開発には成功していたが、より多次元の時空間構造を再現するためには、幾つかの数値的な問題を解決し、新しい解析手法を開発する必要があった。

(2) 三次元以上の宇宙プラズマ時空間構造再現の可能性は、2000年代以降の磁気圏編隊観測ミッションの実現により、現実的なものとなった。2000年に4機からなるクラスター衛星が、2007年に5機からなるテミス衛星が打ち上げられ、2014年にはNASAが次世代の編隊観測衛星、Magnetospheric Multiscale (MMS) を打ち上げる予定であった(実際には、2015年3月に無事打ち上げられ、2015年9月より定常観測を開始する予定である)。

またJAXAは、海外機関との協力により、別の編隊観測ミッションSCOPE(cross-Scale Coupling in the Plasma universe)を、2020年代の打上げを想定して計画していた(本研究費申請の採択後、SCOPEのワーキンググループは終了となり、JAXAによる磁気圏編隊観測ミッションの実現はなくなった。しかしながら、MMSがもたらす高時空分解の観測データを解析するために、本研究によって開発された手法を活用できるという意味で、本研究成果には十分な価値と意義があることを強調しておく)。

2. 研究の目的

本研究の目的は、複数衛星観測のデータを用いて、宇宙プラズマの四次元時空間構造を再現するための、革新的なデータ解析手法を開発することである。

物理法則やデータ同化などの手法を利用して、宇宙プラズマ構造の時空発展を可視化する手法を開発し、2014年に打上げ予定のMMS衛星等がもたらす観測データを解析するために必要な開発と準備を進める。

3. 研究の方法

(1) その場観測から多次元時空間構造を再

現するための基礎となる支配方程式系を確立する。いかなる物理モデル・法則(電磁流体方程式、その簡略版、二流体方程式、電子流体方程式など)に基づいて、開発を行うか決定する。

(2) 支配方程式系に基づいて、構造再現のための数値コードの開発を行う。

(3) 開発した数値コードの試験を行う。この作業には、支配方程式系の解析解、または支配方程式系(またはそれに近い方程式系)を用いた数値シミュレーションの結果を利用する。

(4) データ同化などの、より高度な手法を組み込むことにより、数値コードのさらなる改良を行う。

(5) 開発した解析手法を実際の衛星観測に適用することにより、宇宙プラズマ現象について科学的に意味のある情報、新しい知見を抽出する。これは、既存のクラスターやテミス衛星観測のデータを使用することによって可能である。

(6) 再現された物理量の二次元、または三次元分布を初期条件として用いて、数値シミュレーションを実施する。これにより、実測された宇宙プラズマ構造の時間発展(過去と未来)を推測し、宇宙プラズマ過程の理解を深める。

4. 研究成果

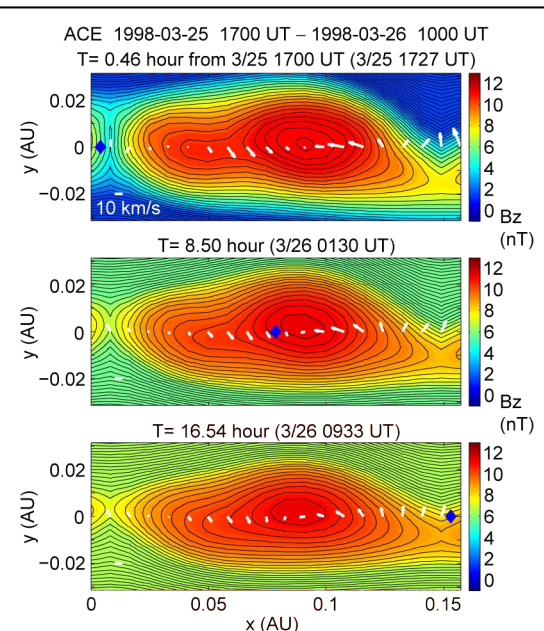


図1. ACE衛星による惑星間空間での観測から再現された、磁気フラックスロープ構造の時間発展。黒い実線は磁力線を、色は紙面垂直方向の磁場を、青いダイヤモンドはACE衛星の場所を示す。

(1) 単一衛星観測から二次元空間構造の時間発展を再現する手法 (Hasegawa et al., 2010) を改良し、時間エイリアシングの影響を除去するためのコード開発に成功した。

この手法では、宇宙プラズマが磁気静水圧 (magneto-hydrostatic) 平衡にあることを仮定し、グラッド・シャフラノフ方程式に基づいて、時空構造を再現する。従来の手法では、観測データがある瞬間に取得されたと仮定していたが、実際には衛星はある有限の時間で構造を通過していくので、ある時間幅をもってデータが取得される。本研究では、この効果を取り入れることで、すなわち時間変動と空間構造の影響を分離することによって、より正確に二次元構造の時間発展を再現できる改良版の開発に成功した。

図1は、改良版をACE衛星による太陽風中の磁気フラックスロープの観測に適用した結果である。グラッド・シャフラノフ方程式に基づいたこの手法は、速い(構造の静止系でみた時に、アルヴェン速度や音速に匹敵するプラズマ速度を伴う)構造変化には適用できないが、遅い構造変化を精度よく再現できることが分かった。この手法を利用することによって、磁気リコネクションの効率や、大規模構造中のメソスケールの構造変化を推定できることが明らかになった。

(2) 二衛星観測から磁場・プラズマの三次元空間構造を再現する手法 (Sonnerup and Hasegawa, 2011) を改良した。改良版の適用により、テミス衛星によって地球磁気圏界面で観測された磁気フラックスロープが三次元構造を持つことを、世界で初めて発見した。

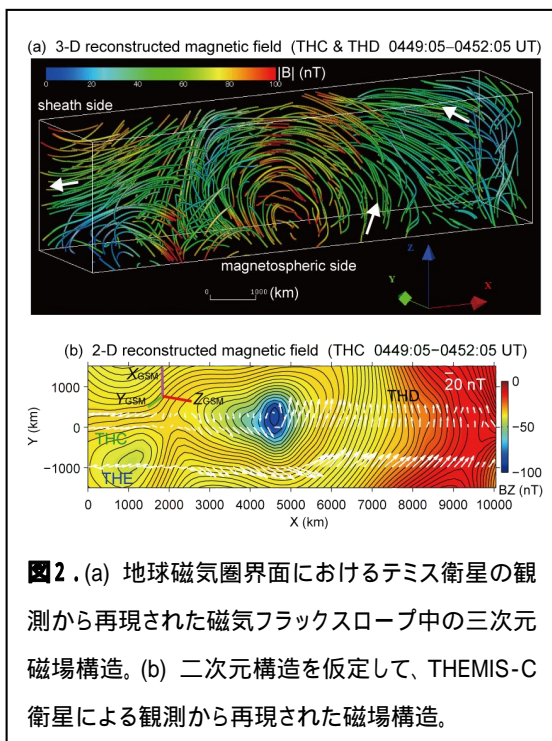


図2. (a) 地球磁気圏界面におけるテミス衛星の観測から再現された磁気フラックスロープ中の三次元磁場構造。(b) 二次元構造を仮定して、THEMIS-C衛星による観測から再現された磁場構造。

図2は、定常三次元構造を仮定して再現さ

れた磁力線と、定常二次元構造を仮定して再現された磁場構造を比較したものである。どちらの手法からも磁気フラックスロープの構造が再現され、太陽風磁場が南向きの時に磁気圏界面で形成された磁気フラックスロープをテミス衛星が観測したことが判明した。

注目すべき点は、二次元を仮定した場合よりも三次元を仮定した場合の方が、構造再現の精度が良いことである(図3)。すなわち、観測された構造が強い三次元性を持っているということである。このことは、磁気フラックスロープを生み出した磁気リコネクションが三次元的に起きていたことを示唆しており、非常に興味深い。三次元磁気リコネクションの宇宙プラズマ・磁気圏ダイナミクスにおける役割はまだ未解明であり、今後の研究が待たれる。

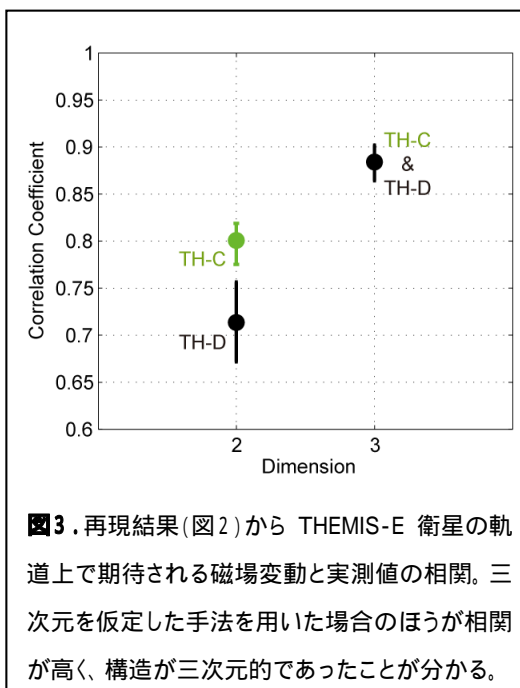


図3. 再現結果(図2)から THEMIS-E 衛星の軌道上で期待される磁場変動と実測値の相関。三次元を仮定した手法を用いた場合のほうが相関が高く、構造が三次元的であったことが分かる。

三次元磁場再現法の活用法の一つは、三次元磁気リコネクションの特徴的な構造である、「磁場ヌル」(磁場強度がゼロとなる点)や「セパレータ」(二次元リコネクションの磁気中性線に相当する構造)の同定である。再現法を用いない場合は、4衛星観測が必要であり、4衛星が構成する四面体の内部に存在する磁場ヌルが同定できるのみである。だが再現法を用いた場合には、再現空間全体からヌル・セパレータ構造を探索することができる。したがって、この手法は三次元磁気リコネクションの理解を深めるのに決定的な役割を果たす可能性があると考えられる。

(3) 一衛星観測から磁気リコネクションのエンジン部分である「電子拡散領域」の二次元構造を再現するための方程式系(電子流体方程式系)を確立し、それに基づいて再現法の数値コードを開発した。また、電子流体方

程式系の解析解を用いて、数値コードのベンチマークテストを行い、コード開発が成功したことを確認した。

このような開発を行った理由は、磁気リコネクションの基礎物理を解明することを目指す MMS 衛星のデータを解析するためには、磁気リコネクションの散逸領域に特化した解析手法が必要であると考えたからである。磁気リコネクションは、磁気圏ダイナミクスや太陽フレア等において、中心的な役割を演じているプラズマ素過程であるが、MMS は磁気圏界面と磁気圏尾部電流層で発生する磁気リコネクションを観測する。本研究で開発した解析手法を利用することによって、磁気リコネクションの散逸メカニズムや効率、磁気リコネクションの速さと関連があると考えられる「電子拡散領域」の構造、磁気中性線の方法などを推定できるようになるので、磁気リコネクションの理解が大きく進展することが期待される。

<引用文献>

Hasegawa, H., B. U. Ö. Sonnerup, T. Nakamura, Recovery of time evolution of Grad-Shafranov equilibria from single-spacecraft data: Benchmarking and application to a flux transfer event, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 115, A11219, 2010, DOI:10.1029/2010JA015679.

Sonnerup, B. U. Ö., H. Hasegawa, Reconstruction of steady, three-dimensional, magnetohydrostatic field and plasma structures in space: Theory and benchmarking, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 116, A09230, 2011, DOI:10.1029/2011JA016675.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計8件)

Hasegawa, H., B. U. Ö. Sonnerup, S. Eriksson, T. K. M. Nakamura, H. Kawano, Dual-spacecraft reconstruction of a three-dimensional magnetic flux rope at the Earth's magnetopause, *Ann. Geophys.*, 査読有、33, 169-184, 2015, DOI:10.5194/angeo-33-169-2015

Hara, T., K. Seki, H. Hasegawa, D. A. Brain, K. Matsunaga, M. H. Saito, D. Shiota, Study on formation processes of Martian flux ropes downstream from crustal magnetic fields based on Grad-Shafranov reconstruction, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 査読有、119, 7947-7962, 2014, DOI:10.1002/2014JA019943

Hara, T., K. Seki, H. Hasegawa, D. A. Brain, K. Matsunaga, M. H. Saito, The

spatial structure of Martian magnetic flux ropes recovered by the Grad-Shafranov reconstruction technique, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 査読有、119, 1262-1271, 2014, DOI:10.1002/2013JA019414

Hasegawa, H., B. U. Ö. Sonnerup, Q. Hu, T. K. M. Nakamura, Reconstruction of an evolving magnetic flux rope in the solar wind: Decomposing spatial and temporal variations from single-spacecraft data, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 査読有、119, 97-114, 2014

DOI:10.1002/2013JA019180

Sonnerup, B. U. Ö., R. E. Denton, H. Hasegawa, M. Swisdak, Axis and velocity determination for quasi two-dimensional plasma/field structures from Faraday's law: A second look, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 査読有、118, 2073-2086, 2013, DOI:10.1002/jgra.50211

Moore, T. E., J. L. Burch, W. Daughton, S. A. Fuselier, H. Hasegawa, S. Petrinc, Z. Pu, Multiscale studies of the three-dimensional dayside X line, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 査読有、99, 32-40, 2013, DOI:10.1016/j.jastp.2012.10.004

Hasegawa, H., H. Zhang, Y. Lin, B. U. Ö. Sonnerup, S. J. Schwartz, B. Lavraud, Q. G. Zong, Magnetic flux rope formation within a magnetosheath hot flow anomaly, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 査読有、117, A09214, 2012, DOI:10.1029/2012JA017920

Hasegawa, H., Structure and dynamics of the magnetopause and its boundary layers, *Monographs on Environment, Earth and Planets*, 査読有、1, 71-119, 2012, DOI:10.5047/meep.2012.00102.0071

[学会発表](計25件)

長谷川 洋, Sonnerup, B. U. Ö., Denton, R. E., その場観測を用いた磁気リコネクション拡散領域構造の再現、磁気リコネクション研究の最前線 太陽・惑星・実験室、2015年3月10-11日、東京大学

Hasegawa, H., B. U. Ö. Sonnerup, S. Eriksson, T. K. M. Nakamura, Dual-spacecraft reconstruction of a three-dimensional magnetic flux rope at Earth's magnetopause, AGU 2014 Fall Meeting, 2014年12月15-19日、San Francisco

Hasegawa, H., B. U. Ö. Sonnerup, S. Eriksson, T. K. M. Nakamura,

Dual-spacecraft reconstruction of a three-dimensional magnetic flux rope at Earth's magnetopause、Geospace revisited: a Cluster/MAARBLE/Van Allen Probes Conference、2014年9月15-20日、Rhodes (Greece)

長谷川 洋、Sonnerup, B. U. Ö., Eriksson, S., 中村 琢磨、二点観測を用いた地球磁気圏界面三次元フラックスロープ構造の再現、日本地球惑星科学連合 2014年大会、2014年4月28日 - 5月2日、横浜

Hasegawa, H., B. U. Ö. Sonnerup, Q. Hu, T. K. M. Nakamura、Recovery of an evolving magnetic flux rope in the solar wind: Decomposing spatial and temporal variations from single-spacecraft data、AGU 2013 Fall Meeting、2013年12月9-13日、San Francisco

Hasegawa, H., B. U. Ö. Sonnerup, Q. Hu, T. K. M. Nakamura、Reconstruction of an evolving magnetic flux rope in the solar wind: Decomposing spatial and temporal variations from single-spacecraft data、AOGS 2013、2013年6月24-28日、Brisbane (Australia)

長谷川 洋、Sonnerup, B. U. Ö., Hu, Q., 中村 琢磨、一点観測を用いた太陽風磁気フラックスロープの時間発展の再現、日本地球惑星科学連合 2013年大会、2013年5月19 - 24日、千葉

長谷川 洋、Sonnerup, B. U. Ö., 中村 琢磨、Eriksson, S.、複数衛星観測を用いた宇宙プラズマ三次元構造の再現、日本物理学会第68回年次大会、2013年3月26 - 29日、広島大学 (東広島)

長谷川 洋、Sonnerup, B. U. Ö., 中村 琢磨、Hu, Q.、複数衛星を用いた宇宙プラズマ・磁場構造の可視化、統計数理研究所共同研究集会「電離圏・磁気圏モデリングとデータ同化」、2013年2月4 - 5日、統計数理研究所 (東京)

Hasegawa, H.、Structure and dynamics of the magnetopause and its boundary layers: a review、The GEOTAIL 20th anniversary workshop、2012年11月12-14日、東京

長谷川 洋、Magnetic flux rope formation within a hot anomalous flow in Earth's magnetosheath、地球電磁気・地球惑星圏学会第132回講演会、2012年10月20 - 23日、札幌

Hasegawa, H., H. Zhang, Y. Lin, B. U. Ö. Sonnerup, S. J. Schwartz, B. Lavraud, Q.-G. Zong、Magnetic flux rope formation within a magnetosheath hot flow anomaly、3rd Cluster THEMIS workshop、2012年10月1-5日、Boulder

(Colorado)

Hasegawa, H.、Multi-spacecraft observations of solar wind-magnetosphere interactions、IAU (International Astronomical Union) XXVIII General Assembly、2012年8月20-31日、北京 (中国)

〔その他〕

ホームページ等

http://themis.igpp.ucla.edu/nuggets/nuggets_2015/Hasegawa/Hasegawa_15.html

http://sprg.isas.jaxa.jp/researchTeam/spacePlasma/results/1502_hase.html

https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/simple-search?jaxa_search=true&sort_by=2&order=DESC&rpp=20&jaxa=on&default=%E9%95%B7%E8%B0%B7%E5%B7%9D%E3%80%80%E6%B4%8B&submit=%E6%A4%9C%E7%B4%A2

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 洋 (HASEGAWA, Hiroshi)

独立行政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

(2) 研究協力者

Sonnerup, Bengt (Sonnerup, Bengt)

米国ダートマス大学・セイヤー工学部・名誉教授

中村 琢磨 (NAKAMURA, Takuma)

オーストリア科学アカデミー・宇宙科学研究所・研究員