

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287121

研究課題名(和文) 超高時間分解能低エネルギープラズマ粒子観測装置による新世代地球磁気圏観測

研究課題名(英文) New-generation Geo-magnetospheric Observation by super high time resolution low energy charged particle spectrometers

研究代表者

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・准教授

研究者番号：30260011

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、研究代表者の開発した高時間分解能低エネルギーイオン観測装置(FPI-DIS)を搭載したMMS衛星のデータを用いて、磁力線再結合領域の電子スケール構造を世界で初めて明らかにした他、本研究期間終了後に実施が決定した、カサブ領域からの電離大気流出をターゲットとした宇宙科学研究所のSS520-3号機観測ロケット実験に搭載して初めてのフライト実証試験を行う、新しい観測装置である低エネルギー電子・イオン同時計測型高時間分解能小型軽量計測装置の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：Using the data obtained by FPI-DIS (Fast Plasma Investigation-Dual Ion Sensor) that the research team lead developed, the electron scale structure of the dayside magnetic reconnection in the Earth's magnetosphere was revealed for the first time. The research team also succeeded in developing a new low energy charged particle spectrometer that can measure both ions and electrons with high time resolution that will be first flight verified by SS-520-3 ISAS Sounding Rocket Experiment in December 2017.

研究分野：磁気圏プラズマ物理学

キーワード：超高時間分解能プラズマ計測 電子 イオン 編隊飛行 観測ロケット 電子・イオン同時計測センサー MMS

1. 研究開始当初の背景

本研究は、地球磁気圏を4機の編隊飛行で探査する米国の人工衛星 MMS に高時間分解能プラズマ観測装置 (FPI) を搭載し、従来に比べて10倍以上高い時間分解能で観測を行なうことで、磁力線再結合の物理素過程等に関する世界初の観測成果を得ることを目的としていた。MMS 衛星計画は、米国の Sun-Earth Connection (SEC) Mission Roadmap 上に載っている衛星計画であり、平成27年3月に米国フロリダ州のケネディー宇宙センターから無事打ち上げられた。MMS 衛星計画は、同一構成の4機の衛星で構成される編隊飛行衛星計画で、2年間のノミナルミッション期間中、地球磁気圏昼側と夜側の磁力線再結合領域を重点的に観測する軌道で観測を行なう。MMS は高時間分解能のプラズマ及び、電磁場、プラズマ波動の“その場”観測によって、非常に小さいスケールの (100km 以下のサイズの) diffusion region (電子が磁力線からデカップルし、磁力線が再結合する領域) を特定し、その場で生じる物理現象の物理素過程を観測的に明らかにする。MMS 衛星計画は、世界で初めて磁力線再結合領域で電子スケールの時間と空間を分離した観測を行ないその物理素過程を明らかにすることを旨としたミッションである。本研究代表者は、MMS 衛星に搭載されている観測装置 FPI のうち、高時間分解能低エネルギーイオン観測装置 (FPI-DIS) の開発を担当していたことから、本研究を着想するに至った。

MMS 衛星計画に先立つ約20年前の1992年に、日米共同衛星計画である GEOTAIL 衛星 (Nishida, A., GRL, 21(25), 2871-2873, 1994) が打ち上げられた。GEOTAIL 衛星は地球磁気圏尾部領域の構造とダイナミクスを重点的に観測することを目的としており、打ち上げ後数年間、200Re までの地球磁気圏遠尾部で観測を行なった後、遠地点約30Re、近地点約10Re の軌道で現在まで観測を継続している。宇宙プラズマのコミュニティーが、GEOTAIL 衛星で得たものは、地球磁気圏尾部磁力線再結合領域のプラズマをはじめとする地球磁気圏プラズマに関する主にイオンの運動論的理解であった。この先の宇宙プラズマの理解のためには、今度は電子の運動論的理解が必須であるが、MMS ミッションは高時間分解能観測によってこれを実現する。更に、MMS 衛星計画の先を考える時、今度は電子スケールの現象と、それより大きなイオンスケール、MHD スケールといった複数スケール間の現象を同時にとらえることで、地球磁気圏全体の究極的な理解を目指すミッションが考えられるが、この将来のミッションのために必要となる観測装置の開発を本研究代表者は既に開始していた。そこで本研究では、MMS 衛星搭載 FPI によって得られるデータの解析を通して世界初の成果を得ると同時に、将来の究極的な磁気圏探査衛星ミッションを目指して、現時点で世界最高性能を誇る MMS 衛星搭載 FPI の性能を

更に高めたプラズマ粒子観測装置の開発を進めることにした。

2. 研究の目的

本研究は3年計画で実施する。本研究代表者の開発した MMS 衛星搭載 FPI-DIS は高時間分解能電子計測装置 FPI-DES とともに、低エネルギープラズマの高時間分解能観測を実施する。本研究の1年目に打ち上げられた MMS 衛星軌道は、観測開始直後、軌道傾斜角28度、近地点1.2Re、遠地点12Re、の楕円軌道で、磁気圏昼側のマグネトポーズが遠地点付近となるように設計されている。MMS 衛星の観測は本研究の2年目、3年目と継続し、この間磁気圏昼側の磁気圏界面付近を計2回通過した後、遠地点を25Reに上げて、今度は磁気圏夜側の磁力線再結合領域の観測を実施している。本研究では、磁力線再結合領域で観測された FPI-DIS/DES のデータを中心に解析することで、我が国の GEOTAIL 衛星では明らかにできなかった磁力線再結合領域の電子スケール構造を世界で初めて明らかにすることを目的としている。

以上の MMS 衛星で取得される世界初の高時間分解能データを用いた解析的研究と並行して、FPI-DIS/DES の時間分解能を数倍上回る超高時間分解能を目指した将来の低エネルギー粒子計測装置の開発を実施する。本研究期間終了後の平成29年度中には、本研究代表者が実験代表者となって、カスプ領域からの電離大気流出をターゲットとした、宇宙科学研究所の観測ロケット SS520 を用いた観測ロケット実験が実施されることになった。この観測ロケットに新規開発した観測装置を搭載して、実験の目的である電離大気流出メカニズムの解明を行なうと同時に、新規開発した観測装置の初めての飛行性能実証試験を行うことで、観測性能の実力を明らかにすることも本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究で、観測データを取得するために用いる、代表者が開発した観測装置 FPI-DIS を搭載した米国の MMS 衛星計画は、平成27年3月に無事打ち上げられた。打ち上げ後150日間は搭載観測装置の性能評価などが実施され、その後、本格的な観測が平成27年9月から始まった。平成26年度は、担当している FPI-DIS 観測装置のデータ処理を行なう準備や、解析ソフトウェアの準備などを進めた。MMS 衛星で取得される FPI-DIS のデータは米国 Goddard Space Flight Center にある FPI チームのサーバに蓄積されており、日本からは主に Goddard Space Flight Center のデータサーバから必要なデータを取得してデータの処理及び解析を行なうことができる。これらのデータには、一般には公開されない補正処理前のデータも含まれており観測装置担当として、信頼のおけるデータを自らの手で用意して、我が国の研究者コミュニティーへ供給

する。

研究2年目の平成27年度には9月から予定通り本格的な観測が開始され、平成26年度中に準備したコンピュータを使用して、担当しているFPI-DIS観測装置のデータ処理を行ない、信頼のおけるデータを自らの手で用意して我が国の研究者コミュニティへ供給した。また、磁力線再結合領域で観測されるFPI-DIS/DESのデータを中心に解析することで、我が国のGEOTAIL衛星では明らかにできなかった磁力線再結合領域の電子スケール構造を世界で初めて明らかにした。

研究最終年度の平成28年度には、打ち上げ以降、ほぼ完璧に観測を行っている担当機器であるFPI-DISのデータに関して、データの評価、処理を進めると並行して、主に磁気圏夜側で取得された低エネルギーイオン・電子のデータの解析を進めた。

一方、本研究では、MMS衛星計画の先の将来の磁気圏探査を見据えて超高時間分解能観測を実現するための観測装置の開発も並行して進めた。元々の計画では、本研究で開発を進める予定の観測装置は2つあり、一つは超高時間分解能電子計測センサーFESA(Fast Electron Spectrum Analyzer)、もう一つは小型軽量電子・イオン同時計測センサーEISA(Electron and Ion Spectrum Analyzer)であったが、実際に観測ロケットへ搭載できる観測装置の制限から、EISAの飛翔性能実証試験を平成29年度に実施される観測ロケット実験で計画することにした。実際のフライト品の製作は、平成27年度と平成28年度に実施する予定であったが、将来衛星に向けた設計のままでは観測ロケットへの搭載は観測装置サイズの面からも不可能であるため、計測原理はそのままにして、観測ロケット実験の観測目的にあわせた再設計を行なう必要がある。この再設計作業を平成26年度中に実施した。

研究2年目の平成27年度には、平成26年度中に観測ロケット用に最適化して再設計したEISAの観測ロケット搭載品の機構設計を観測ロケットPI部の設計進捗に合わせて実施し、フライト品の製作を開始した。同時並行して、EISAを観測ロケット上で伸展するための伸展機構部やEISAに必要な高圧電源やデータ処理・制御電子回路部分の設計・製作も進めた。平成27年度末までに、フライト品アナライザーの製作を完了して、製作が終わった部分から、試験を開始した。まずは、製作したアナライザーが設計通りであるかどうかの確認を実験室でイオンビームあるいは電子ビームをアナライザーに入射して実施した。

研究最終年度の平成28年度には、平成26年度に観測ロケット用に最適化し、平成27年度に製作を開始した、EISAのフライト品の製作を進めて、平成28年度末までにアナライザーを観測ロケット搭載部分から外側に

向けて伸展させるための伸展機構部の製作を完了させた。平成29年の6月頃には、SS520-3号機観測ロケットの1次噛み合わせ試験が実施される予定であり、1次噛み合わせ試験後、振動試験、温度サイクル試験を含む環境試験と、観測装置の較正試験を実施して、平成29年度の冬に予定されている観測ロケット打ち上げに向けた準備を進める計画である。

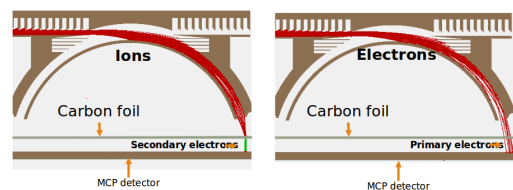
4. 研究成果

(1) 観測装置の開発 概要

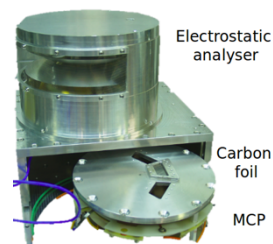
本研究は、平成26年度から開始したが、平成26年度には、炭素膜を用いた原理の電子・イオン同時計測センサーEISAの要素試験のための実験装置を設計・製作しその特性を計測した。この試験結果から、EISAとしては、本研究の申請時に予定していた、2次電子放出板を用いる方式を変更して、炭素膜を用いるものを採用することにし、2017年度打ち上げ予定のSS520-3号機観測ロケット搭載低エネルギー電子・イオン計測装置として初めてのフライト実証試験を行うことにした。

(2) 観測装置の開発 炭素膜方式のEISA

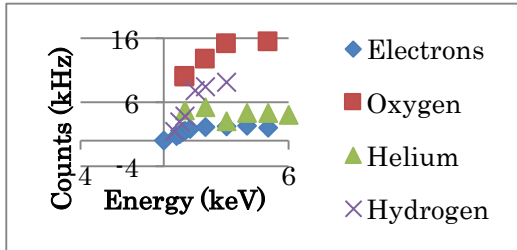
電子とイオンを計測する場合、検出器であるMCP(Micro Channel Plate)に印加する高電圧の極性を電子検出とイオン検出で切り替える必要がある。しかしながら、高い時間分解能で計測を行う場合、この高圧切り替えは困難である。そこで、MCPでは電子の検出のみにし、高電圧の高速切り替えをしないで済むようにする必要がある。炭素膜方式は以下の図に示す通り、従来の静電分析器とMCPの間に、炭素膜を置き、イオンが入射した場合にはカーボンフォイルを通過した際に放出される2次電子をMCP検出し、電子が入射した場合には、主に、カーボンフォイルを通過した電子を検出する。



炭素膜方式の試験のためには、既に実験室にあった静電分析器を用いる事にした。炭素膜を静電分析器と、検出器であるMCPアセンブリの間に設置できるような以下のような実験装置を設計・製作した。



この装置を真空チェンバーに入れて、電子といくつかの種類イオンを入射して下図に示す結果を得た。データ点の間に見られるカウント差は、異なる入射エネルギーで試験を行ったのと、異なる種類の入射粒子は、異なる強度で発生しているためである。この実験で計測しなかったのは、どのくらいのエネルギー以上であれば、検出効率が上がるかという点である。



1-2keV より低いエネルギーの粒子は、電子もイオンもあまり効率よく検出することは出来なかった。keV より低いエネルギーの粒子を検出するためには、1 kV から 2 kV の加速(炭素膜に 1kV から 2kV を印加する)が必要である事がわかった。この事は、イオンの検出のためには、負の加速電圧が、電子の検出のためには正の加速電圧が必要であるが、MCP への高圧印加とは異なり、炭素膜への電圧印加は高速に切り替える事ができるため、このことは電子、イオン同時計測センサーに炭素膜を使用する可能である事を示している。炭素膜方式の場合のメリットは、電子・イオン共に 2kV 以上の電圧で加速すれば効率よく検出可能であり、静電分析器の設計は変えずにカーボンフォイルを追加するだけで、実現できる点である。一方デメリットは、MCP への印加電圧は、+ 2 kV を印加したカーボンフォイルの電位より高くする必要があることから、電子計測の場合、MCP への印加電圧が高くなることである。

今回の研究結果から、炭素膜方式を電子、イオン同時計測センサーに使用することを決定した。2次電子放出板方式に比べて、簡単な構造で実現でき、より少ない種類の高圧で実現可能な事がその理由である。

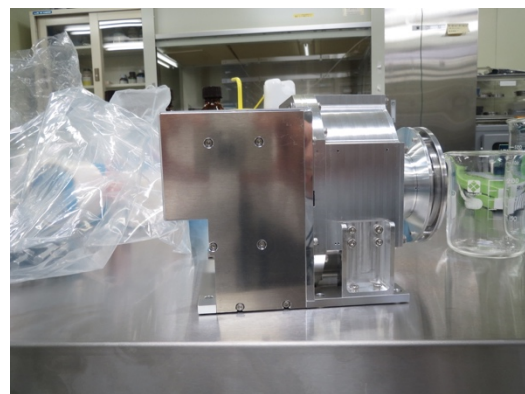
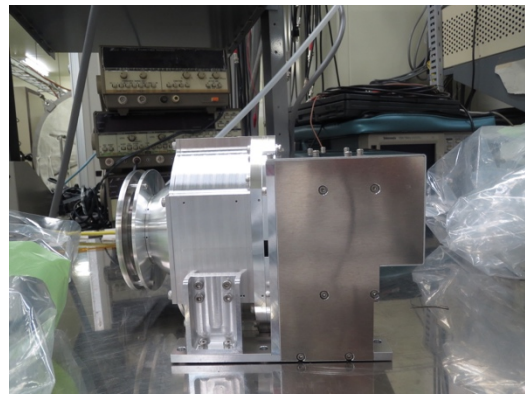
(3) 観測装置の開発 SS-520-3 観測ロケット実験

電離大気の流れ・流出現象は、地球のみならず火星、水星を含む他惑星や月を含む衛星周辺でも起こる普遍的な現象であることが最近の国内外の観測で次第に明らかとなってきた。しかしながら、その流出機構については、それぞれの天体の条件で様々に変化し、それらの機構を理解することは天体周辺大気の変遷を理解・予測する上で必要不可欠である。SS-520-3 観測ロケット実験は、地球で主要な電離大気流出が起きている極域カスプ周辺領域において、電離大気流出の主たる原因として理論的に想定されている波動-粒子相互作用を、将来の人工衛星ミッションに向けて新たに開

発された観測装置を用いて世界で初めてその場で検出、解明するミッションである。SS-520-3 観測ロケット実験が解明を目指す波動-粒子相互作用は極域カスプ上空 800km 付近から効率よく働いていると予測されており、本実験には 800km 以上の高度まで到達できる SS-520 の使用が必須となる。更に、カスプ上空に SS-520 を打ち上げる事のできる射場は、スピッツベルゲン・ニーオレスンを除いて他には無い。本実験においては、ロケット搭載観測装置による直接計測と、地上からのレーダー及び光学観測を総合的に実施する。SS520-3 観測ロケットには、カスプ上空で、約 10eV~10keV までの低エネルギーイオンと電子を計測するために、低エネルギーイオン/電子計測器 (LEP: Low Energy Particle experiment) が搭載される。LEP として、本研究で開発を行った EISA を搭載して、初の飛翔性能実証試験を行う予定である。

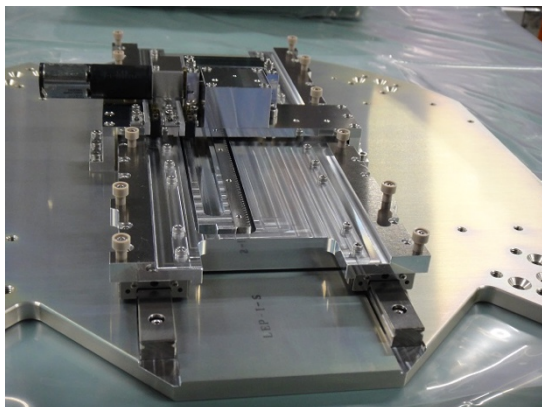
(4) 観測装置の開発 SS-520-3 搭載 EISA

以下に、本研究で開発を行った、SS-520-3 搭載 EISA のアナライザー部分の写真を示す。



アナライザーは電子計測用アナライザーとイオン計測用アナライザーの2つを用意した。本来は1台のアナライザーで電子・イオンの両方の計測が可能であるが、そのためには正極性から負極性までの高電圧を掃引するための高圧電源が必要となる。本研究の範囲では観測ロケット搭載用の正負両極性掃引電源まで開発する余裕がないことから、高圧電源としては既開発品を用いることにし、その代わ

り電子用センサーとイオン用センサーを別々に用意して搭載することにした。本観測装置で計測するのは数電子ボルトから数十電子ボルト程度の低エネルギー電子・イオンであるため、ロケット構体の影響を受けない様に、観測装置をロケット構体から10cmくらい伸展する必要がある。以下に示すのは、電子用、イオン用両方のアナライザーをロケット構体から伸展するための伸展機構の写真である。この伸展機構の上に、アナライザーを取り付けて、観測ロケットに搭載する。



(4) 観測装置の開発 結論

本研究の主な成果は以下の通りである。

1. 電子・イオンの同時計測センサーとして、2次電子放出板を使用する方式のセンサー設計と、要素試験を実施した。
2. 試験の結果、EISAとしては、カーボンフォイルを使用する方式の方が、検出器に印加する電圧は少し高くなるものの、これまでのアナライザー部の設計をそのまま利用できることや、比較的簡単な構造で実現可能であることが明らかとなった。
3. EISAの初めてのフライト実証試験の機会として、SS520-3号機ロケット実験搭載LEPにカーボンフォイル方式のEISAを採用し、平成27年度にセンサーの設計を行い、フライト品の製造を開始、平成28年度中にフライト品を完成することができた。今後、平成29年12月のフライトに向けて飛翔前試験を実施する。

なお、本研究で開発を行ったSS-520-3号機観測ロケット搭載EISAに使用した、高時間分解能観測可能な荷電粒子の検出器に関して、その成果を査読付き論文にまとめて出版することができた〔雑誌論文①〕。

(5) MMS衛星データの解析 概要

本研究代表者の開発した高時間分解能低エネルギーイオン観測装置(FPI-DIS)〔雑誌論文⑤〕を搭載したMMS衛星は、申請時の予定よりは5ヶ月ほど遅れたものの、本研究の1

年目である平成27年3月に米国フロリダ州のケネディー宇宙センターから無事打ち上げられた。これまでのところ、衛星に搭載されたFPI-DIS16台は、大きな問題もなく観測を継続している。

研究1年目の平成26年度にはデータ処理のようなコンピュータや、データストレージの準備を進め、研究2年目の9月から本格的な観測が開始された後は、担当しているFPI-DIS観測装置のデータ処理を行ない、信頼のにおけるデータを自らの手で用意して我が国の研究者コミュニティへ供給した。また、磁力線再結合領域で観測されるFPI-DIS/DESのデータを中心に解析することで、我が国のGeotail衛星では明らかにできなかった磁力線再結合領域の電子スケール構造を世界で初めて明らかにした他、Geotailとの共同観測における成果を挙げた。研究最終年度の平成28年度には、FPI-DISのデータの評価、処理を進めるのと並行して、主に磁気圏夜側で取得された低エネルギーイオン・電子のデータの解析を進めた。

(6) MMS衛星データの解析 磁力線再結合領域の電子スケール構造

地球磁気圏において磁気リコネクションは、地球磁気圏の昼間側の磁気圏界面と地球磁気圏の夜側の磁気圏尾部で観測されるが、これまでの人工衛星による観測では時間的・空間的な観測分解能が足りなかったためそのメカニズムは未解明であった。特に、電子拡散領域と呼ばれている磁気リコネクションの中心部分のサイズは数kmのオーダーであり、この数kmの部分が、衛星に対して動いているため、この部分の構造を理解するためには、数10ミリ秒の時間分解能で、プラズマの、特に電子の分布を計測する必要がある。MMS衛星は、4機の衛星の衛星間距離を10km程度にして観測を行うことで、電子拡散領域の構造を観測できることに加え、MMS衛星には時間分解能30ミリ秒で電子の3次元分布関数を計測できる観測装置FPI-DES(Fast Plasma Investigation-Dual Electron Sensor)と150ミリ秒でイオンの3次元分布関数を計測できる観測装置FPI-DIS(Fast Plasma Investigation-Dual Ion Sensor)が搭載されている。MMS衛星は、2015年10月6日に、磁気リコネクションの起きている地球磁気圏昼間側の磁気圏界面付近を飛行し、初めて電子拡散領域のその場観測に成功した。その結果、磁場のエネルギーがプラズマ粒子に変換されていること、磁場のエネルギーは電場と電流が一緒になって散逸させていること、電子が磁場の束縛から解放されて加速され、電流を担っていることを初めて明らかにすることができた。〔雑誌論文④〕

(7) MMS衛星データの解析 Geotail衛星との共同観測の成果

MMS衛星の打ち上げ以降、Geotail衛星の日

本における受信時間を増やして、MMS 衛星との共同観測を進めている。この共同観測の結果、地球磁気圏の境界でおきる磁気リコネクションが、東西方向に7万 km以上にわたって5時間以上持続的に発生すること〔雑誌論文③〕、磁極が傾いている時の磁気リコネクションの発生場所は冬半球側にずれること〔雑誌論文②〕を初めて明らかにすることができた。これらの成果は、太陽風エネルギーの磁気圏流入量が太陽風や惑星磁場の変動に伴ってどのように変化するかを理解する上で重要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

- ① Y. Saito, S. Yokota, K. Asamura, and A. Krieger, High-speed MCP anodes for high time resolution low-energy charged particle spectrometers, *J. Geophys. Res. SpacePhysics*, 査読有, 122, 1816-1830, 2017.
doi:10.1002/2016JA023157.
- ② N. Kitamura, H. Hasegawa, Y. Saito, I. Shinohara, S. Yokota, 他16名, Shift of the magnetopause reconnection line to the winter hemisphere under southward IMF conditions: Geotail and MMS observations, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, 43, 5581-5588, 2016.
doi:10.1002/2016GL069095
- ③ H. Hasegawa, N. Kitamura, Y. Saito, T. Nagai, I. Shinohara, S. Yokota, 他20名, Decay of mesoscale flux transfer events during quasi-continuous spatially extended reconnection at the magnetopause, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, 43, 4755-4762, 2016.
doi:10.1002/2016GL069225
- ④ J. L. Burch, R. B. Torbert, T. D. Phan, 以下略 Y. Saito 51名中48番目, Electron-scale measurements of magnetic reconnection in space, *Science*, 査読有, Volume 352, Issue 6290, 2016.
doi:10.1126/science.aaf2939
- ⑤ C. Pollock, A. Jacques, U. Gliese, Y. Saito, 以下略 S. Yokota 76名中14番目, Fast plasma investigation for magnetospheric multiscale, *Space Sci. Rev.*, 査読有, 199, 331-406, 2016.
doi: 10.1007/s11214-016-0245-4

〔学会発表〕(計2件)

- ① Yoshifumi Saito, Hirotsugu Kojima, Yasunobu Ogawa, SS520-3 Sounding Rocket Experiment Targeting the Ion Outflow Over the Cusp Region, AOGS 2016, August, Beijing
- ② 斎藤 義文, 小嶋 浩嗣, 小川 泰信, SS-520-3号機観測ロケット実験の概要と期待される成果, JpGU2016, 5月, 千葉幕張

〔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://sprg.isas.jaxa.jp/researchTeam/spacePlasma/whatsSpacePlasma.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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・太陽系科学研究系・准教授
研究者番号: 30260011

(2) 研究分担者

浅村 和史 (ASAMURA, Kazushi)
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・太陽系科学研究系・助教
研究者番号: 50321568

横田 勝一郎 (YOKOTA, Shoichiro)

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・太陽系科学研究系・助教
研究者番号: 40435798