

令和 2 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14400

研究課題名(和文) 多点観測を用いた磁気嵐中のリングカレント酸素イオン増加の時間空間変動に関する研究

研究課題名(英文) Study on spatio-temporal variations of oxygen ring current enhancements during magnetic storms using multi-spacecraft observations

研究代表者

桂華 邦裕 (Keika, Kunihiro)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教

研究者番号：10719454

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、複数の人工衛星が取得したデータを用いて、地球半径の10倍より地球側の宇宙空間(ジオスペース)における地球大気起源酸素イオンの時間空間変動を調査した。磁気嵐中に増強するイオン圧力を担う高エネルギー酸素イオンは、地球に近い領域では水素イオンと同じように振る舞うが、磁気圏尾部に近い領域では水素イオンよりも多くのエネルギーを得ていることが明らかになった。これは、磁気圏尾部で酸素イオンが選択的に加速されていて、そのダイナミクスがジオスペースのプラズマ特性に影響を与えていることを示唆している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回の研究成果である水素イオンと酸素イオンのエネルギー化の相違は、磁気圏近尾部のグローバルダイナミクスが流体近似では説明できないことを示している。地球半径の数倍以上の空間スケールを持つ現象に対する、プラズマの数kmから数千kmスケールの粒子的振る舞いの重要性に一石を投じた。また酸素イオン圧力は、磁気嵐の規模が大きいほど増加量が多いと言われている。酸素イオンの振る舞い(輸送や加速)をより深く理解することは、人類の宇宙活動に密接な宇宙天気現象としての巨大磁気嵐の発生メカニズムを理解する上でも重要である。

研究成果の概要(英文)：This study investigated spatial variations and energy-spectral evolution of oxygen ions of atmospheric origin in the inner magnetosphere (called geospace, at altitudes up to ~50,000 km), using in-situ observations made by multiple spacecraft such as Van Allen Probes and ERG (Arase). The oxygen ions make a significant contribution to ion pressure enhancements during magnetic storms. The observations showed that oxygen ions behave similarly to protons in the deep inner magnetosphere. Near the magnetotail, on the other hand, oxygen ions are energized more effectively than protons. The results indicate that oxygen ions are preferentially accelerated in the magnetotail and that the kinetic process affects plasma characteristics in the inner magnetosphere.

研究分野：惑星電磁気圏物理学

キーワード：地球磁気圏 磁気嵐 環状電流 地球起源酸素イオン 重イオン選択的加速 サブストーム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

- (1) 酸素イオン圧の磁気嵐規模(リングカレント強度、プラズマ全圧)に対する寄与  
磁気嵐と呼ばれる低緯度地磁気の急激な減少は、地球周辺の宇宙空間(地球半径の約2から8倍の領域、ここでは内部磁気圏と呼ぶ)でプラズマ圧が増加することで発生する。プラズマ圧は静穏時には水素イオン(H+)が支配的であるが、擾乱時には地球電離圏起源の1価の酸素イオン(O+)の寄与が大きくなることが知られている。酸素イオンの寄与は磁気嵐規模に比例すると報告されていたが、全事例が単一衛星による特定の地方時での観測であり、また当時の観測の時間分解能では空間変化を精査することは困難であった。
- (2) 内部磁気圏における低エネルギーイオン量と空間分布  
内部磁気圏プラズマ圧の増加量は、磁気圏尾部からの輸送に伴う断熱加速やその場での非断熱加速の効率だけでなく、リングカレントイオンの「種」となる低エネルギーイオンのフラックス量にも依存する。内部磁気圏における低エネルギーイオン量と空間分布は、観測データが不足していたため、まだ明らかにされていなかった。
- (3) 低エネルギー酸素イオン特性と磁気嵐規模との関連性  
プラズマ圧 O+/H+比が増加する原因は、電離圏から磁気圏に供給される低エネルギー酸素イオンの増加と、プラズマシートや内部磁気圏での非断熱加速が提唱されている。前者の調査はこれまで数多く実施されていたが、後者に着目した内部磁気圏多点観測に基づく研究は非常に少なかった。特に、磁気嵐直前の低エネルギー酸素イオン特性と磁気嵐規模を関連付ける観測的研究は行われていなかった。

## 2. 研究の目的

磁気嵐は、内部磁気圏リングカレントを規定するプラズマ圧の増加により発達するが、プラズマ圧を担う粒子(リングカレントイオン)は数10 keVから数100 keVの水素および酸素イオンである。本研究では、(1)酸素イオン圧力増加領域の空間的な広がりを見積もった上で、酸素イオン圧力のリングカレントに対する寄与を定量化する。また、(2)リングカレントイオンの「種」となり得る数10 eVから数keVイオン(低エネルギーイオン)量と空間分布を調査し、(3)磁気嵐直前の低エネルギー酸素イオンの特性(Precondition)が磁気嵐規模に与える影響の解明を目指す。

## 3. 研究の方法

本研究では、内部磁気圏を飛翔する人工衛星で得られたイオンおよび電磁場データを用いる。H+およびO+圧の地球動径方向プロファイルから圧力増加領域の広がりを見積もり、空間分布を考慮したO+/H+比と磁気嵐規模を比較する。また、低エネルギーイオンの特徴(フラックス量の空間分布、地磁気活動度依存性など)を同定し、磁気嵐前および磁気嵐主相中の低エネルギー酸素イオンの特徴と磁気嵐の規模を比較する。主に利用する衛星は、2012年8月に打ち上げられた米国Van Allen Probes衛星、2015年に打ち上げられたMMS衛星、2016年に打ち上げられたERG(あらせ)衛星である。

## 4. 研究成果

- (1) 酸素イオン圧の磁気嵐規模に対する寄与  
Van Allen Probes衛星およびERG(あらせ)衛星が観測した磁気嵐における水素および酸素イオンのエネルギー密度(イオン圧)から、磁気嵐の規模を決定するイオン全圧に対して酸素イオン圧がどの程度寄与するのか、また寄与度が領域によってどのように異なるか、を調査した。

地球からの距離に対する依存

イオン圧に寄与し得るエネルギー帯(寄与エネルギー帯、数keVから約100keV)を十分にカバーし、時間分解能が過去の観測よりも非常に高い(約8秒)、MEP-i粒子検出器で得られたデータを用い、水素イオン圧と酸素イオン圧の比(O+/H+比)の地心距離に対する依存を調査した。図1に示すように、O+/H+比は平均的には0.1から1.0の間であったが、地心距離3Re(地球半径)以

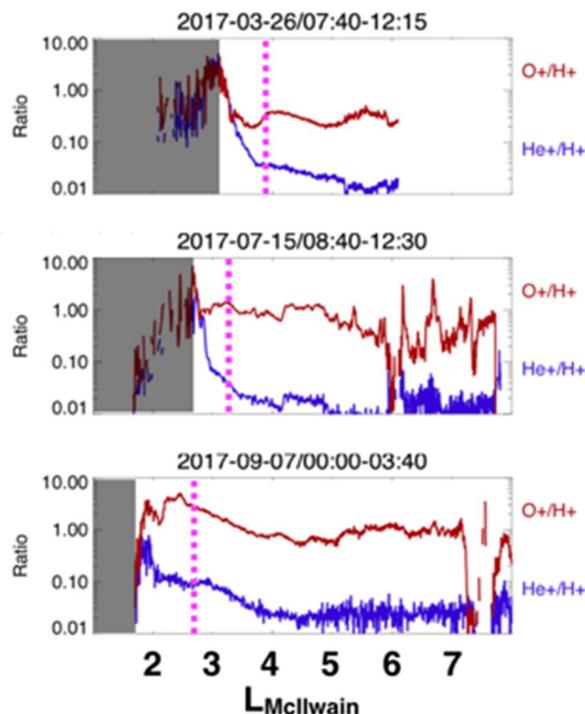


図1: 水素イオン(H+)に対する酸素イオン(O+)およびヘリウムイオン(He+)の比率の地心距離依存。

下の高プラズマ圧領域の地球側境界と、地心距離 6 Re 以遠の近尾部プラズマシート域で、特徴的な変動が見られた。

前者では、磁気嵐の規模によらず  $O^+/H^+$ 比が定常的に 1 より大きく 10 に達する場合もあった。これは、両イオンが磁気圏尾部から数時間断熱輸送される際に、水素イオンがより早く消失するためと考えられる。イオンが輸送中に地球ジオコリナと衝突して消失する（電荷交換によって電荷を失い中性化する）時間スケールは、 $\sim 50$  keV 以下では酸素イオンが水素イオンよりも 1 桁近く長い。

後者では、数 10 分程度の（磁気嵐に比べて）短い時間スケールで  $O^+/H^+$ 比が 1 を超えていた。これは、サブストーム活動などに伴い効率的に加速を受け、加速された酸素イオンが内部磁気圏圧力増加に影響を与えていることを示唆している。

#### 地方時方向の依存

Van Allen Probes 衛星 2 基による同時観測を用いて、酸素イオン圧の動径方向分布の地方時依存性を調査した。従来の理論研究や数値シミュレーション研究で提唱されていたように、酸素イオン圧力は磁気嵐主相では夜中から夕方側で高く、磁気嵐回復相では朝夕の差が小さくなっていることが示された [Keika et al., 2018a]。

#### 磁気嵐を引き起こす太陽風構造による差異

磁気嵐の原因となる太陽風構造は、主にコロナ質量放出 (CME) と共回転相互作用領域 (CIR) の 2 種類ある。酸素イオン圧力の磁気嵐規模に対する寄与の空間分布が、太陽風構造に依存するかどうかを調査した。図 2 に示すように、特に近地球域（地球半径 4 Re 以下）で、CME 型磁気嵐の方が酸素イオン圧力の寄与が高かった。これは、CME 到来時により多くの酸素イオンが電離圏から流出し、かつ磁気圏尾部に印加された強い電場により深内部磁気圏まで輸送されたためと考えられる。

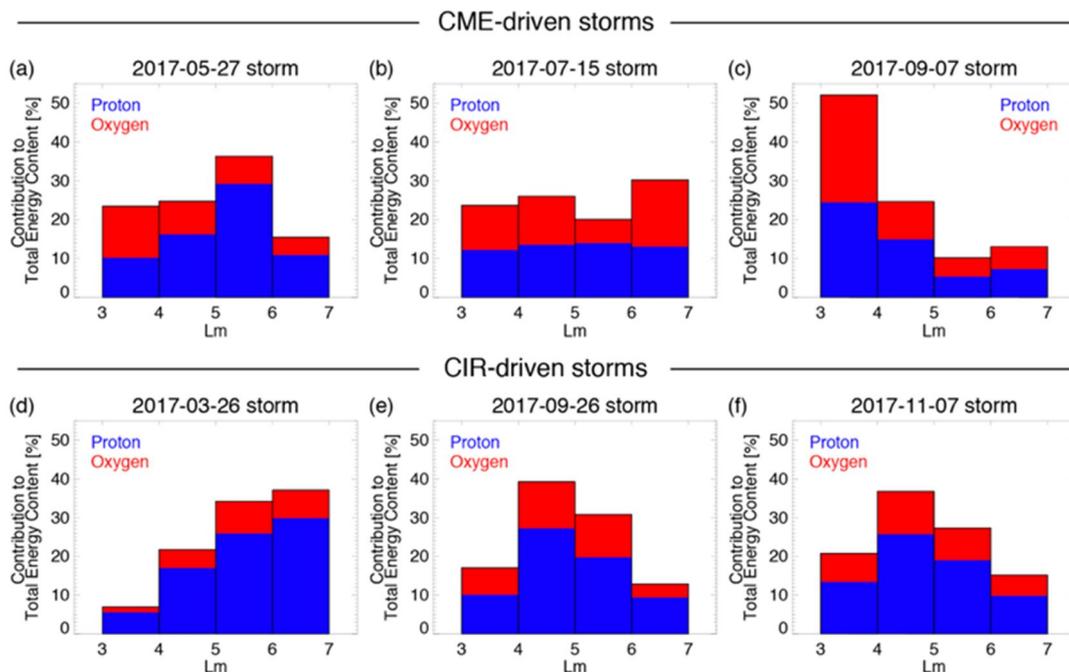


図 2: 水素イオン圧および酸素イオン圧のイオン全圧に対する割合の地心距離依存。上段が CME 型磁気嵐、下段が CIR 型磁気嵐。

#### (2) 酸素イオン圧に寄与するエネルギー帯の空間分布

上記研究では圧力というプラズマモーメント値を用いたが、さらに踏み込んでプラズマ分布関数（エネルギースペクトル）レベルまで遡ることで、プラズマ圧に対して最も寄与度が高いエネルギー帯（寄与エネルギー帯）を調査した。

#### 地球からの距離に対する依存

図 3 に、ERG（あらせ）衛星が観測した磁気嵐の主相における、水素イオンと酸素イオンのエネルギースペクトルを示す。縦軸は全プラズマ圧に対する寄与度をパーセントである。

水素イオンの寄与エネルギー帯は、深内部磁気圏（地心距離 5 Re 以下）では 20-80 keV、静止軌道付近（地心距離 5 Re 以上）では 40-100 keV であった。酸素イオンの寄与エネルギー帯は深内部磁気圏では水素イオンとほぼ同じであったが、静止軌道付近では 60-150 keV であった。寄与エネルギー帯が地心距離に依存する点は、低エネルギーイオンほど地球近くまで輸送されることと一致する。

深内部磁気圏で差異が見られないことは、磁気圏尾部のプラズマが深内部磁気圏まで断熱的に輸送されていることを示唆している。一方で、静止軌道付近で酸素イオンの寄与エネルギー帯が高いことは、近尾部プラズマシートに近い領域では酸素イオンの選択的あるいは優先的加速が起こっており、その短時間スケールの輸送・加速現象も静止軌道より内側のプラズマ特性に影響を与えていることを示唆している。その磁気嵐規模への寄与率は最低でも数 10%であった[Keika et al., 2018b]。

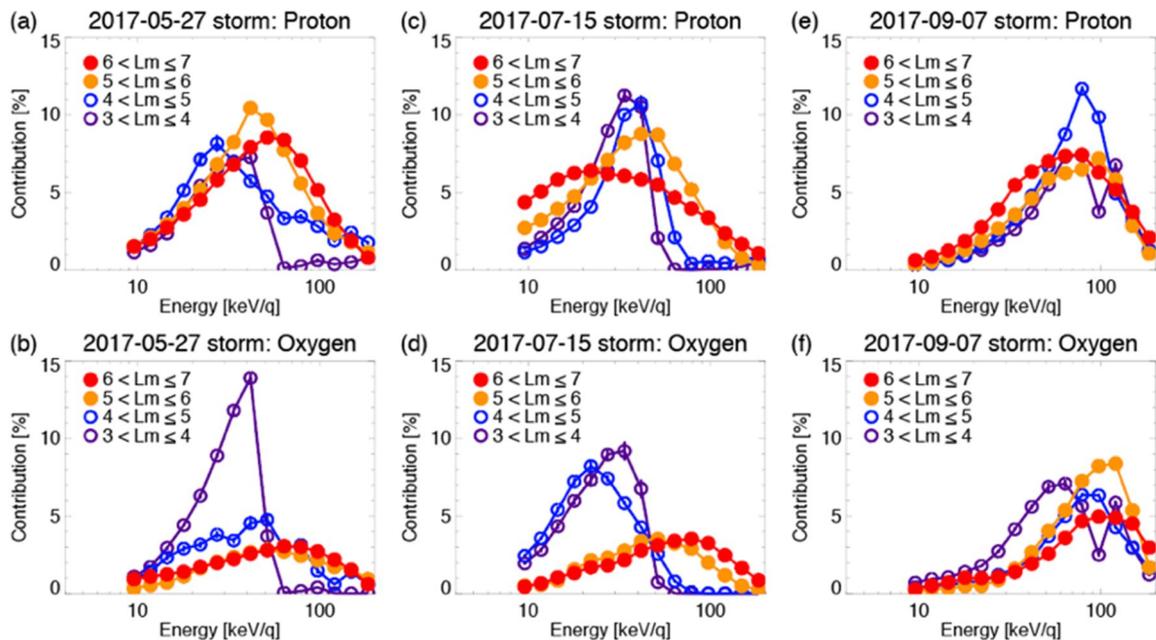


図 3: イオン全圧に対する各エネルギー帯が寄与する割合の地心距離依存。上段が水素イオン、下段が酸素イオン。

#### 磁気嵐を引き起こす太陽風構造による差異

寄与エネルギー帯の粒子種間の相違を、CME 型磁気嵐と CIR 型磁気嵐で比較した。地心距離依存、粒子種依存とともに同じような傾向が見られたが、CME 型磁気嵐の方が、酸素イオンの高圧化と寄与エネルギー帯の上昇が見られた。

### (3) 低エネルギーイオン量の空間的特徴

#### 内部磁気圏

Van Allen Probes 衛星搭載の ECT/HOPE 粒子検出器で観測された低エネルギー (1 keV 以下) 水素イオンと酸素イオンについて、磁気嵐発生前の空間分布や時間変動を調査した。多くの場合でイオン量の時間変動が大きく、また同時観測の解析から地方時方向の相違が大きいことも明らかになった。一方で、明瞭な空間的偏りや地磁気活動度依存性は見られなかった。これらの結果は、酸素イオンの内部磁気圏への供給は、サブストーム現象などに伴い、短時間でかつ局所的に発生していることを示唆している。

#### 磁気嵐規模との関連性

上記のデータを用いて、磁気嵐発生前の低エネルギー酸素イオン量と磁気嵐規模の関連性を調査した。酸素イオンの平均量と磁気嵐規模の間に強い相関は見られなかった。酸素イオンが局所的に増加している時間帯の長さや増加領域の広さなど、磁気嵐の規模に関連する可能性がある要素についても、はっきりとした相関は見られなかった。

#### 近尾部プラズマシート

MMS 衛星が磁気圏尾部を飛翔している際に HPCA 粒子検出器で取得された低エネルギー (1 keV 以下) 水素イオンデータを用いて、近尾部プラズマシートにおけるプラズマ特性を調査した。酸素イオンは十分なカウント数が得られない領域、時間帯が多かったため、今回は利用しなかった。速度分布関数を 2 成分フィッティングすることで、プラズマシート起源の熱い成分と電離圏あるいは太陽風起源の冷たい成分に分け、それぞれ密度と温度の特性を調べた。密度温度特性から電離圏起源と思われるプラズマ群を同定することができ、それらは地球半径の約 10 倍より地球側で卓越し、約 20 倍以内のプラズマ特性に大きな影響を与えていることが明らかになった。

(4) 国内外における位置づけとインパクト

本研究では、研究開始直前に打ち上げられた ERG(あらせ)衛星のデータをいち早く解析し、地球内部磁気圏における酸素イオン圧力増加現象について重要な成果を得た。特に、これまであまり注目されてこなかった、圧力に寄与するエネルギー帯の時間空間変動について、新しい知見を得た。近尾部プラズマシートに近い領域では酸素イオンが選択的にエネルギーを得ていることを示し、磁気リコネクションや磁場双極子化といった磁気圏尾部ダイナミクスが内部磁気圏の圧力変動(ひいては磁気嵐の発達)に大きな影響を与えていることを観測的に示した。

(5) 予期しない結果から得られた知見

研究当初、磁気嵐前の低エネルギー酸素イオンの状況(Precondition)が磁気嵐の規模に影響を与えているという仮説を立てていたが、本研究で用いたデータからは、強い相関を示す結果は得られなかった。現時点での解釈としては、内部磁気圏への酸素イオンの供給は短時間かつ局所的であり、酸素イオンの全体量を増やす程多くないこと、内部磁気圏ではなく尾部プラズマシートの Precondition が強く影響を与えていること、などが挙げられる。

(6) 今後の展望

本研究では、磁気圏近尾部で水素イオンより酸素イオンが多くのエネルギーを得ていることが明らかになり、質量依存加速が発生していることが示唆された。一方で、電荷が異なるイオンの振る舞いはまだ調査していない。地球磁気圏には2価の酸素イオンが存在していることが知られており、太陽風起源の2価のヘリウムイオンや6価や7価の酸素イオンも侵入しているため、加速や加熱の電荷依存も調査することが可能である。質量と電荷が異なる粒子種を検出可能な機器はすでに複数の衛星に搭載されている。加速や加熱の質量および電荷に対する依存と、それらの磁気圏尾部ダイナミクスにおける役割が明らかになることが期待される。

<引用文献>

- K. Keika et al. (2018a), Three-step buildup of the 17 March 2015 storm ring current: Implication for the cause of the unexpected storm intensification, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 123, doi:10.1002/2017JA024462.
- K. Keika et al. (2018b), Ion Energies Dominating Energy Density in the Inner Magnetosphere: Spatial Distributions and Composition, Observed by Arase/MEP-i, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2018GL080047.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件/うち国際共著 11件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kistler, L. M., Mouikis, C. G., Asamura, K., Yokota, S., Kasahara, S., Miyoshi, Y., Keika, K. et al.	4. 巻 124
2. 論文標題 Cusp and nightside auroral sources of O <sup>+</sup> in the plasma sheet	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/ 2019JA027061	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Seki, K., Keika, K., Kasahara, S., Yokota, S., Hori, T., Asamura, K., Higashio, N., Takada, M., Ogawa, Y., Matsuoka, A., Teramoto, M., Miyoshi, Y., and Shinohara, I.	4. 巻 46
2. 論文標題 Statistical properties of molecular ions in the ring current observed by the Arase (ERG) satellite	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 8643-8651
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019GL084163	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Keika, K., S. Kasahara, S. Yokota, M. Hoshino, K. Seki, M. Nose, T. Amano, Y. Miyoshi, and I. Shinohara	4. 巻 45
2. 論文標題 Ion energies dominating energy density in the inner magnetosphere: Spatial distributions and composition	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geophys. Res. Lett.	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018GL080047	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Keika Kunihiro, Seki Kanako, Nose' Masahito, Miyoshi Yoshizumi, Lanzerotti Louis J., Mitchell Donald G., Gkioulidou Matina, Manweiler Jerry W.	4. 巻 123
2. 論文標題 Three-Step Buildup of the 17 March 2015 Storm Ring Current: Implication for the Cause of the Unexpected Storm Intensification	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 414 ~ 428
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017JA024462	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

[学会発表] 計17件(うち招待講演 4件/うち国際学会 12件)

1. 発表者名 K. Keika, S. Kasahara, S. Yokota, M. Hoshino, K. Seki, T. Amano, L. M. Kistler, M. Nose', Y. Miyoshi, T. Hori, and I. Shinohara
2. 発表標題 Ion energization in the near-Earth magnetotail observed by Arase
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Keika
2. 発表標題 Transport and energization of ionospheric ions in Earth's magnetotail: Recent multi-spacecraft observations
3. 学会等名 APPC 2019 14th Asia-Pacific Physics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Keika, R. Asami, M. Hoshino, S. Fuselier, and MMS/HPCA team
2. 発表標題 Statistical study on warm plasma in the magnetotail based on two-component fits of distribution functions
3. 学会等名 JpGU Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桂華邦裕
2. 発表標題 Mass and Charge Dependent Characteristics of Earth's Magnetospheric Plasma
3. 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 桂華邦裕
2. 発表標題 Contribution from proton and oxygen ions to plasma pressure in the Earth's inner magnetosphere: Arase (ERG) observations
3. 学会等名 2nd URSI AT-RASC meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 桂華邦裕
2. 発表標題 Spatial distribution of the contributions from electrons, protons, and oxygen ions to energy density in the inner magnetosphere
3. 学会等名 JpGU 2018 meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻  <a href="http://www.eps.s.u-tokyo.ac.jp">http://www.eps.s.u-tokyo.ac.jp</a></p>
--

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	Lanzerotti Louis  (Lanzerotti Louis J.)	ニュージャージー工科大学・特任教授	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	Spence Harlan  (Spence Harlan)	ニューハンプシャー大学・教授	
研究協力者	笠原 慧  (Kasahara Satoshi)	東京大学・大学院理学系研究科地球惑星科学専攻・准教授	
研究協力者	浅村 和史  (Asamura Kazushi)	宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所・准教授	