

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26800257

研究課題名(和文) 内部磁気圏編隊衛星データを用いたリングカレントイオン加速と消失に関する研究

研究課題名(英文) Study on the acceleration and loss of ring current ions using multiple spacecraft in the inner magnetosphere

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、磁気圏と呼ばれる地球固有磁場の影響が卓越する宇宙空間のうち内部磁気圏(地球半径の数倍から10倍程度)におけるプラズマ圧力の変動を、人工衛星による直接観測で得られたデータを用いて調査した。プラズマ圧に最も寄与しているプラズマのエネルギーは磁気嵐中に大きく変動すること、地球大気起源の酸素イオンが内部磁気圏の外端付近に輸送されてプラズマ圧の増加に寄与していること、を示した。前者は、磁気圏尾部のプラズマ環境(密度や温度の時間空間変動)の重要性、後者は酸素イオンダイナミクスの新しい描像を示唆している。

研究成果の概要(英文)：This study investigated spatial and temporal variations of plasma pressure in the inner magnetosphere (inside of ~10 Earth radii), the inner part of the region where the Earth's magnetic field dominates, using data from in-situ observations by several spacecraft. The results show that (1) the energy of plasma that make the dominant contribution to plasma pressure changes in time during a magnetic storm and that (2) oxygen ions of Earth's atmospheric origin are transported to around the outer edge of the inner magnetosphere to contribute to an increase in plasma pressure. Result (1) indicates the importance of spatial and temporal changes in plasma characteristics in the magnetotail. Result (2) suggests a new picture of the dynamics (transport, acceleration, circulation, etc.) of ionized atmospheric oxygen ions in the magnetosphere.

研究分野：Magnetospheric plasma physics

キーワード：Inner magnetosphere geomagnetic storms ring current Acceleration and loss Outflow and transport

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 内部磁気圏プラズマ圧の増加と減少

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（内部磁気圏、地心半径の約2倍から約8倍の領域）において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。しかし、プラズマ圧に最も寄与する「最重要エネルギー帯」の詳細な空間分布や地磁気擾乱依存は、高時間空間分解能データが不足していたため、まだ明らかにされていない。

### (2) イオン加速

プラズマ圧  $O^+/H^+$  比を増加させる主要物理過程としては、(A) 電離圏から磁気圏尾部に流出する  $O^+$  の増加、(B) プラズマシートでの非断熱加速、(C) 内部磁気圏での非断熱加速が提唱されている。しかし、各過程の相対的な重要性はまだ明らかになっていない。

### (3) イオン消失

プラズマ圧を担う  $H^+$  や  $O^+$  の消失量が増加量を上回ると、磁気嵐が回復する。イオンを消失させる主要物理過程は、ジオコロナとの電荷交換反応、電磁イオンサイクロトロン (EMIC) 波動との相互作用に伴うピッチ角散乱、プラズマ圏低温プラズマとの衝突に伴うクーロン散乱、強い磁場勾配によるピッチ角散乱、磁気圏外への流出が提唱されている。各過程の重要性はこれまでモデリングや遠隔観測によって見積もられてきたが、内部磁気圏での“その場”観測に基づいた統一的な理解はまだ得られていない。

## 2. 研究の目的

磁気嵐の発達・減衰は内部磁気圏プラズマ圧の増加・減少によって起こり、プラズマ圧を担うイオンの加速・消失が鍵となる物理過程である。本研究では(1)プラズマ圧に最も寄与するイオンのエネルギー帯を同定した上で、(2)プラズマ圧  $O^+/H^+$  比の突発的増加を引き起こす非断熱加速メカニズムが内部磁気圏に存在するかどうか、(3)EMIC波動によるピッチ角散乱によりプラズマ圧はどの程度減少するのかを調査する。

## 3. 研究の方法

本研究では、内部磁気圏(地心半径 6 RE 以内)を飛行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た。具体的には、2012年8月に打ち上げられた米国 Van Allen Probes 衛星および2016年12月に打ち上げられた ERG (あらせ) 衛星を利用した。課題①、②、③を達成するために、それぞれ(A)イオンプラズマ圧に最も寄与するエネルギー帯をイオン分布関数の観測から同定し、(B)突発的イオン加速現象を複数衛星で捉

えた時に、イオン速度分布を現象前後と比較し、(C)複数衛星が EMIC 波動励起前後を捉えた時に、イオン速度分布の変化を比較した。全解析において粒子種依存を調査した。

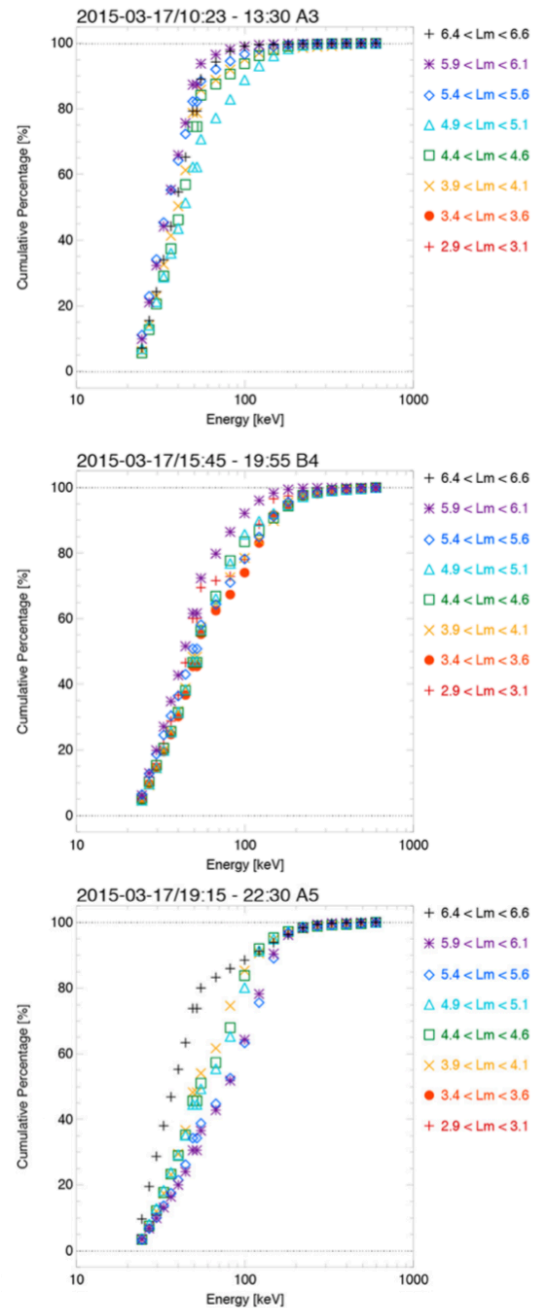


図1: 2015年3月17日磁気嵐中の最重要エネルギー帯の変化。曲線の傾きが緩やかなエネルギー帯がプラズマ圧に最も寄与していることを表している(論文1より抜粋)。

## 4. 研究成果

### (1) 最重要エネルギー帯と磁気嵐規模

予想以上に巨大化し世界的に注目を浴びた2015年3月17日の磁気嵐について、米国 Van Allen Probes 衛星の RBSPICE 粒子検出器を用いて実施し、最重要エネルギー帯の時間空間変動を調査した。その結果、図1に示すよ

うに、最重要エネルギー帯は磁気嵐主相中に大きく変化すること、またその変化に伴い磁気嵐は3段階に発達したことが明らかになった。より具体的には、0.1 - 10 keV/nT の第1断熱不変量を持つ高エネルギーイオンが内部磁気圏深くまで注入され、さらにその密度が増したことで磁気嵐が巨大化(約5割増強)したことが明らかになった。また、イオン密度に密接に関連している太陽風密度の変化を加味することで従来のDst予測経験モデル(Burtonモデル)を拡張し、密度変化が3段階目の磁気嵐発達に寄与していることを示した。

## (2) 最重要エネルギー帯の領域依存

あらせ衛星がこれまで観測した6つの磁気嵐の主相と初期回復相における、水素および酸素イオンのエネルギー密度の空間分布を調べた。次に、エネルギー密度に対してどのエネルギー帯が多く寄与しているか、各粒子種について調べ、その「寄与エネルギー帯」が地心距離にどのように依存するか調べた。その結果、水素イオンの寄与エネルギー帯は、深内部磁気圏(L値が4~5以下)では20-80 keV、静止軌道付近(L値が4~5以上)では40-100 keVであった。また、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同じであったが、静止軌道付近では60-150 keVであった。この寄与エネルギー帯の質量依存は、サブストーム活動などに伴い酸素イオンが効率的あるいは選択的に加速を受け、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。実際、磁気圏近尾部においてO<sup>+</sup>のフラックスのみが急増する現象も確認されている。

## (3) 短時間スケール O<sup>+</sup>/H<sup>+</sup>比増加

2013年6月6日の磁気嵐主相中にVan Allen Probes衛星2基によって観測されたイオンフラックス急増現象を事例解析した。フラックスの急増は局所的な電場増加・プラズマ注入に起因し、図2に示すように、酸素イオンは断熱的に加速されていることが明らかになった。

## (4) O<sup>+</sup>/H<sup>+</sup>比増加に関連する酸素イオン供給

また、この酸素イオン群は磁気嵐発生前に電離圏から内部磁気圏に沿磁力線に供給されていて、内部磁気圏到達時には100 eVから10 keVまで達していたことを示した。

## (5) EMIC波動とイオン速度分布関数の観測

課題③について、Van Allen Probes衛星2基の衛星間距離が非常に近く(数1000 km以下)、EMIC波動を観測しているイベントを解析した。EMIC波動の同時励起/非励起や励起継続時間の差異は確認できたが、対応するイオンフラックス変動やピッチ角の明らかな変動は確認できなかった。EMIC波動との相互作用に伴うイオンの消失を定量化するためには、

より高い(5-10度以下の)角度分解能の観測が必要であると考えられる。

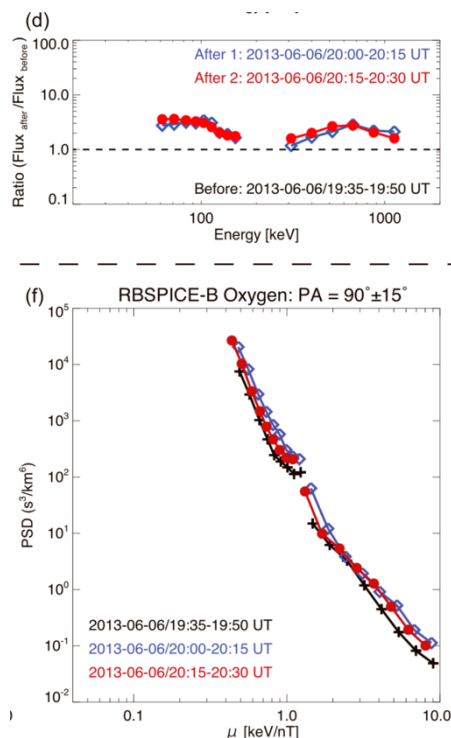


図2: 2013年6月6日フラックス急増現象中の酸素イオン変動。フラックス増加量のエネルギー依存性が小さいことが分かる。

## (6) 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Van Allen Probes衛星で得られた高エネルギープラズマのデータをいち早く解析し、イオン圧力増加に関する重要な成果を得た。それまであまり注目されていなかった最重要エネルギー帯の変動の大きさが観測的に確認され、磁気嵐発達に対するプラズマシート分布関数の重要性を示した。

また、近距離に位置する複数衛星による同時観測も積極的に活用し、輸送による断熱加速とローカルな非断熱加速との切り分けや、EMIC波動発生時のプラズマ変動など、単衛星では不可能であった解析を新たに示した。

## (7) 予期しない結果から得られた知見

これまで、地球電離圏起源の酸素イオンの大部分は、磁気圏尾部に供給された後に内部磁気圏に供給されると考えられていた。しかし、本研究では、環状電流域外端近くの近地球領域への直接供給が重要である可能性が示された。

また、EMIC波動に伴うイオン分布関数の変動を詳細に調査するためには、粒子観測の角度分解能が予想以上に高くなければならないことが分かった。

## (8) 今後の展望

内部磁気圏プラズマ圧に最も寄与する「最重要エネルギー帯」が磁気嵐中に大きく変動するという事は、磁気圏尾部プラズマシートのプラズマ環境（密度、温度、非熱的粒子の増減、組成比など）とプラズマ輸送モードが内部磁気圏プラズマ圧変動に対し重要な役割を担っていることを示している。今後は、 $O^+$ も含めた磁気圏尾部での加熱・加速および被加熱・加速プラズマの内部磁気圏への輸送の詳細を観測的に調査する必要がある。2015年以降米国MMS衛星が磁気圏尾部の質量分析観測を継続しており、Van Allen Probes衛星とあわせ衛星との同時観測を用いた研究が大いに期待できる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件、すべて査読有り)

- (1) K. Keika, K. Seki, M. Nosé, Y. Miyoshi, L. J. Lanzerotti, D. G. Mitchell, M. Gkioulidou, & J. W. Manweiler (2018), 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.
- (2) K. Keika, K. Seki, M. Nosé, S. Machida, Y. Miyoshi, L. J. Lanzerotti, D. G. Mitchell, M. Gkioulidou, D. Turner, H. Spence, and B. A. Larsen (2016), Storm time impulsive enhancements of energetic oxygen due to adiabatic acceleration of preexisting warm oxygen in the inner magnetosphere, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, doi:10.1002/2016JA022384.
- (3) M. Nosé, K. Keika, C. A. Kletzing, H. E. Spence, C. W. Smith, R. J. MacDowall, G. D. Reeves, B. A. Larsen, and D. G. Mitchell (2016), Van Allen Probes observations of magnetic field dipolarization and its associated  $O^+$  flux variations in the inner magnetosphere at  $L < 6.6$ , *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, doi:10.1002/2016JA022549.
- (4) K. Keika, R. Kataoka, and Y. Ebihara (2015), What caused the rapid recovery of the Carrington storm?, *Earth, Planets and Space*, 67:65, doi:10.1186/s40623-015-0234-y.

[学会発表] (計18件)

- (1) K. Keika, S. Kasahara, S. Yokota, M. Hoshino, K. Seki, M. Nosé, T. Amano, Y. Miyoshi, I. Shinohara, Energy and

mass dependence of the contribution to storm-time plasma pressure observed by Arase/MEP-i, AGU Fall Meeting 2017, New Orleans, December 12, 2017.

- (2) K. Keika, S. Kasahara, S. Yokota, M. Hoshino, K. Seki, M. Nosé, T. Amano, Y. Miyoshi, I. Shinohara, Energy and mass dependence of the contribution to storm-time plasma pressure: Arase/MEP-i observations, SGPSS 2017 Fall Meeting, Kyoto University, October 17, 2017.
- (3) K. Keika, Ring current spatio-temporal evolution affected by plasma sheet conditions and magnetosphere-ionosphere coupling, 2017 IAPSO-IAMAS-IAGA Joint Assembly, Cape Town International Convention Center, Cape Town, South Africa, August 29, 2017. (Invited)
- (4) K. Keika, K. Seki, Y. Miyoshi, M. Nose, L. J. Lanzerotti, D. G. Mitchell, M. Gkioulidou, A. Gerrard, H. Spence, B. A. Larsen, J. W. Manweiler, Oxygen impulsive energization during the storm main phase and its contribution to the ring current buildup, JpGU Meeting 2017, Makuhari Messe, Chiba, Japan, May 21-25, 2017.
- (5) 桂華邦裕, 地球磁気圏尾部での重イオンの振る舞い: 最近の研究と ERG 観測に向けて, 平成 28 年度名古屋大学宇宙地球環境研究所研究集会「太陽惑星系宇宙プラズマ中の重イオンに関する研究集会」, 大阪電気通信大学, 2017 年 3 月 7 日
- (6) 桂華邦裕, 地球電離圏起源イオンの磁気圏ダイナミクスに対する影響について, 平成 28 年度名古屋大学宇宙地球環境研究所研究集会「宇宙惑星結合系科学の実証的研究の創設に向けて」, 立教大学, 2016 年 12 月 26 日
- (7) K. Keika, Y. Miyoshi, S. Machida, M. Nosé, K. Seki, L. J. Lanzerotti, D. G. Mitchell, M. Gkioulidou, A. J. Gerrard, J. W. Manweiler, H. E. Spence, and B. Larsen, Oxygen energization and loss during the main phase of the 17 March 2015 storm: Van Allen Probes observations, AGU Fall Meeting 2016, Moscone Center, San Francisco, CA., USA, December 12, 2016.
- (8) K. Keika, Y. Miyoshi, S. Machida, M.

Nosé, K. Seki, L. J. Lanzerotti, D. G. Mitchell, M. Gkioulidou, A. J. Gerrard, and J. W. Manweiler, Temporal variations of oxygen contribution to the ring current during the 17 March 2015 storm: Van Allen Probes observations, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第140回講演会, 九州大学, 2016年11月20日

- (9) 桂華邦裕, Van Allen Probes 衛星で観測された内部磁気圏 EMIC 波動とイオン速度分布関数, 平成 28 年度名古屋大学宇宙地球環境研究所研究集会「ERG 衛星観測に向けた EMIC 波動および関連現象に関する研究集会」, 宇宙科学研究所, 2016 年 9 月 6 日
- (10) K. Keika, Y. Miyoshi, S. Machida, M. Nosé, K. Seki, L. J. Lanzerotti, D. G. Mitchell, M. Gkioulidou, A. J. Gerrard, and J. W. Manweiler, Three-step development of the 17 March 2015 magnetic storm: Van Allen Probes/RBSPICE observations, JpGU Meeting 2016, Makuhari Messe, Chiba, Japan, May 22-26, 2016.
- (11) K. Keika, K. Seki, M. Nosé, S. Machida, Y. Miyoshi, L. J. Lanzerotti, D. G. Mitchell, M. Gkioulidou, A. Gerrard, J. W. Manweiler (2015), Characteristics of ring current protons and oxygen ions during the 7 January 2015 and 17 March 2015 storms: Van Allen Probes/RBSPICE observations, AGU 2015 Fall meeting, San Francisco, CA., USA, December 17, 2015.
- (12) K. Keika, Key unresolved issues to be addressed by in-situ ion measurements in the Earth's inner magnetosphere: ERG and Van Allen Probes collaborations, ISAS Symposium - Magnetospheric Plasmas 2015, Tokyo Institute of Technology, December 3, 2015. (Invited)
- (13) 桂華邦裕, 関華奈子, 能勢正仁, 町田忍, 三好由純, L. J. Lanzerotti, D. G. Mitchell, M. Gkioulidou (2015), 2015 年 1 月 7 日および 3 月 18 日の磁気嵐におけるリングカレントイオンの特徴, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 138 回講演会, 東京大学, November 1, 2015.
- (14) K. Keika, K. Seki, M. Nosé, S. Machida, L. J. Lanzerotti, D. G. Mitchell, M. Gkioulidou, and A. Ukhorskiy (2015), Impulsive enhancements of oxygen ions

in the inner magnetosphere: Van Allen Probes RBSPICE observations, JpGU Meeting 2015, Makuhari Messe, Chiba, Japan, May 26, 2015.

- (15) K. Keika, K. Seki, M. Nosé, S. Machida, L. J. Lanzerotti, D. G. Mitchell, M. Gkioulidou, and A. Ukhorskiy (2015), Impulsive enhancements of oxygen ions in the inner magnetosphere during the storm main phase: Van Allen Probes/RBSPICE observations, Inner Magnetosphere Coupling III, University of California Los Angeles, Los Angeles, LA, March 24, 2015.
- (16) K. Keika, L. M. Kistler, P. C. Brandt, K. Seki, M. Nosé, S. Machida, L. J. Lanzerotti, M. Gkioulidou, A. Ukhorskiy, and D. G. Mitchell (2014), Ion composition and energization in the Earth's inner magnetosphere and the effects on the ring current buildup, 2014 AGU Fall Meeting, Moscone Center, San Francisco, CA., USA., December 16, 2014. (Invited)
- (17) K. Keika, K. Seki, M. Nosé, S. Machida, L. J. Lanzerotti, M. Gkioulidou, A. Ukhorskiy, and D. G. Mitchell (2014), Energetic protons and oxygen ions observed by Van Allen Probes/RBSPICE during storm-time substorms, The 12th International Conference on Substorms, Ise-shima Royal Hotel, Ise, Japan, November 13, 2014.
- (18) 桂華邦裕, 関華奈子, 能勢正仁, 町田忍, L. J. Lanzerotti, M. Gkioulidou, A. Ukhorskiy, D. G. Mitchell (2014), Van Allen Probes 衛星搭載 RBSPICE 粒子検出器による磁気嵐中高エネルギー水素および酸素イオンの複数点観測, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 136 回講演会, キッセイ文化ホール, November 1, 2014.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

桂華 邦裕 (KEIKA, Kunihiro)  
東京大学・大学院理学系研究科・助教  
研究者番号: 10719454

### (4) 研究協力者

Louis J. Lanzerotti  
米国ニュージャージー工科大学、特任教授  
Harlan Spence  
米国ニューハンプシャー大学・教授  
笠原 慧 (KASAHARA, Satoshi)  
東京大学・大学院理学系研究科・准教授