

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月11日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04057

研究課題名(和文) 衛星多点観測と計算機シミュレーションによる内部磁気圏のイオン組成変化要因の探究

研究課題名(英文) Investigation of ion composition change in the inner magnetosphere based on multi-satellite observations and numerical simulations

研究代表者

能勢 正仁 (Nose, Masahito)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授

研究者番号：90333559

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,200,000円

研究成果の概要(和文)：日本が2016年12月に打ちあげた「あらせ衛星」の観測データの解析および計算機シミュレーションにより、酸素イオントラスおよびイオンと長周期地磁気脈動のドリフトバウンス共鳴現象に関する研究を行った。酸素イオントラスに関しては、その形状が軸対象ではなく朝側に偏った三日月形であることが、世界で初めて明らかにされた。ドリフトバウンス共鳴がリングカレントのエネルギー増加に少なからぬ影響を及ぼしていることやそれにはイオン種依存性があること、イオンフラックスの空間勾配が共鳴の重要なパラメータになり得ること、などの新しい発見が得られた。以上の研究成果を含め、査読付き国際学術誌に25編の論文を出版した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本が打ち上げた国産の「あらせ衛星」が観測したデータに基づく研究成果であるため、日本発の科学成果を世界に向けて発信することができた。酸素イオントラスの経度方向の構造が軸対象ではなく朝側に偏っていること、およびドリフトバウンス共鳴がリングカレントの発達に効果的であることやそのイオン種依存性などは、これまで報告のなされたことのないもので、学術的に大きな意義のある発見である。人類が宇宙空間を利用していくに当たって宇宙天気予報の研究が進んでおり、その実用化のために理解すべき、宇宙空間におけるイオンのダイナミクス的一端を明らかにした点で社会的な意義があると考えている。

研究成果の概要(英文)：We studied the longitudinal structure of the oxygen torus as well as the drift-bounce resonance between ions and geomagnetic pulsations. This study was based on analysis of observational data obtained by the "Arase" satellite which was launched by Japan in December 2016 and numerical simulations. We revealed for the first time that the oxygen torus is not axis-symmetric, but skewed towards the morning site; that is, its longitudinal structure is a crescent-shaped torus. We discovered that the drift-bounce resonance has a non-negligible effect on ring current development, this effect depends on ion species, and spatial gradient of ion flux can be one of important parameters of resonance condition, etc. The above results and other related findings have been published in 25 papers in international refereed journals.

研究分野：磁気圏物理学

 キーワード：内部磁気圏 イオン組成 磁気嵐 長周期地磁気脈動 ドリフトバウンス共鳴 酸素イオントラス  
波動粒子相互作用 イオン加速

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

### 1. 研究開始当初の背景

内部磁気圏におけるリングカレントのイオン組成は、静穏時には大半が水素イオン(H<sup>+</sup>)であるが、磁気嵐時には酸素イオン(O<sup>+</sup>)の割合が急激に増加し、時には半分以上を占めることが1980年代から報告されてきた[e.g., Williams, 1981; Hamilton et al., 1988]。O<sup>+</sup>イオンの供給源は究極的には電離層の低エネルギープラズマであり、そこからリングカレントの高エネルギーイオンへ至るまでに、どのような経路を辿りどのように加速されるのか、については議論が続いている。このような「内部磁気圏におけるO<sup>+</sup>イオンの輸送と加速、およびそのイオン種依存性」は、宇宙科学分野での重要な研究テーマとして捉えられ、世界各国で研究が行われている。

研究代表者は、これまでの研究[Nosé et al., 2010, 2014, 2015]で、内部磁気圏に存在する低エネルギーのO<sup>+</sup>イオンの高密度領域(酸素イオントール)は、完全な円環状ではなく夕方側が欠けた半円環の形状をしており、そういった低エネルギーO<sup>+</sup>イオンが磁場双極子化に伴う微小磁場擾乱によってその場で選択的に10 keV程度まで加速され、リングカレントのイオン組成変化に重要な役割を果たしていることを指摘した。また、長周期地磁気脈動とイオンの相互作用である「ドリフトバウンス共鳴」は、これまでに電子やH<sup>+</sup>イオンについて主に研究されてきたが、O<sup>+</sup>イオンにも起こりうる現象で、同様にリングカレントのイオン組成変化に寄与している可能性があると考えた。

### 2. 研究の目的

この研究では、複数人工衛星(Van Allen Probes衛星、あらせ衛星)で得られたデータの解析と計算機シミュレーションを行い、(1)内部磁気圏における酸素イオントールの形状やその成因、(2)ULF波動とO<sup>+</sup>イオンのドリフトバウンス共鳴の確認とその性質、を調査することを目的とする。また、それらがリングカレントのイオン組成に及ぼす影響を調べることも目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 内部磁気圏における酸素イオントールの形状やその成因について

Van Allen Probes衛星およびあらせ衛星データのデータベースを作成する。両衛星からの磁場データ、電子密度データ、高エネルギーイオンフラックスデータを、研究代表者の所有する計算機にコピーし、統計処理が容易にできる環境を構築する。

トロイダル振動ULF波動イベントを衛星データベースから選び出す。波動の周波数を用いて、Singer et al. [1981]で提唱された波動方程式を数値的に解き、プラズマの平均質量密度を算出する。準中性条件を仮定し、質量密度の算出結果と電子密度データから、プラズマ平均質量を推定する。

両衛星の同時観測イベントに注目し、異なる場所で得られたプラズマ平均質量を比較することで、個々のイベントにおける酸素イオントールの経度構造を推定する。

極冠域・オーロラ帯から、テスト粒子として低エネルギー(<1 keV)のO<sup>+</sup>イオンを放出し、その軌跡を巡回中心近似によって時間的に追跡する。O<sup>+</sup>イオンの軌跡や内部磁気圏に到達した時のエネルギーが、放出場所・初期エネルギー・初期ピッチ角によってどのように変わるかを調査する。

#### (2) ULF波動とO<sup>+</sup>イオンのドリフトバウンス共鳴の確認とその性質について

ドリフトバウンス共鳴を起こしやすいと考えられるポロイダル振動ULF波動イベントを衛星データベースから選び出す。

選び出したULF波動に対応してO<sup>+</sup>イオンフラックスが同様の変動を示しているかを調査する。変動がある時には、そのエネルギー・ピッチ角が共鳴理論から想定されるものと一致するかどうかを調べ、共鳴イベントの同定を行う。選び出したイベントの性質(共鳴O<sup>+</sup>イオンエネルギー、発生場所など)を明らかにする。

ドリフトバウンス共鳴イベントの前後で地磁気Dst指数がどのように変化したかを調査し、共鳴がリングカレントの消長に及ぼす役割を考察する。

### 4. 研究成果

(1) あらせ衛星とVan Allen Probes衛星の2か所の同時観測データを利用して、その経度方向の構造を調査した。2017年4月24日に、あらせ衛星が朝側、Van Allen Probes衛星が夕方側に位置しており、それぞれの場所での平均プラズマ質量密度を推定することができた。あらせ衛星では3.0-3.5 amu (atomic mass unit)になるような質量密度の局所的な増大が見られた。これは約15%の酸素イオンが含まれていることを示唆する。一方、Van Allen Probes衛星では、明確な平均プラズマ質量密度の局所的な増大は見られなかった。このことから、酸素イオントールは、朝側に偏って存在していたと考えられる。この結果は、国際的に権威の高いGeophys. Res. Lett.誌に、Nosé et al. [2018]として発表した(発表雑誌論文)。

同様の解析を、Van Allen Probes衛星が午前側、あらせ衛星が午後側に位置していた2017年9月12日イベントに対しても行った。4月24日イベントの結果と同様に、午前側の領域では、3-4 amuに達するような平均プラズマ質量の局所的な増大が見られたのに対して、午後側では、そ

うした増大は存在しなかった。さらに、平均プラズマ質量が増大している領域内では、電磁イオンサイクロトロン波動が起こっていることから、酸素イオントラスはプラズマ波動の成長率を大きく変化させる可能性のあることが示唆された。

酸素イオントラスの経度方向の構造は、その直接観測の難しさから、ほとんど分かってこなかった。上記の研究成果は、その間接的観測を可能にする観測機器を搭載した内部磁気圏を飛翔する人工衛星が複数機存在することに注目したものであり、世界で初めてその経度方向の構造を推定したものである。図1は、推定の結果を模式図で示したものである。

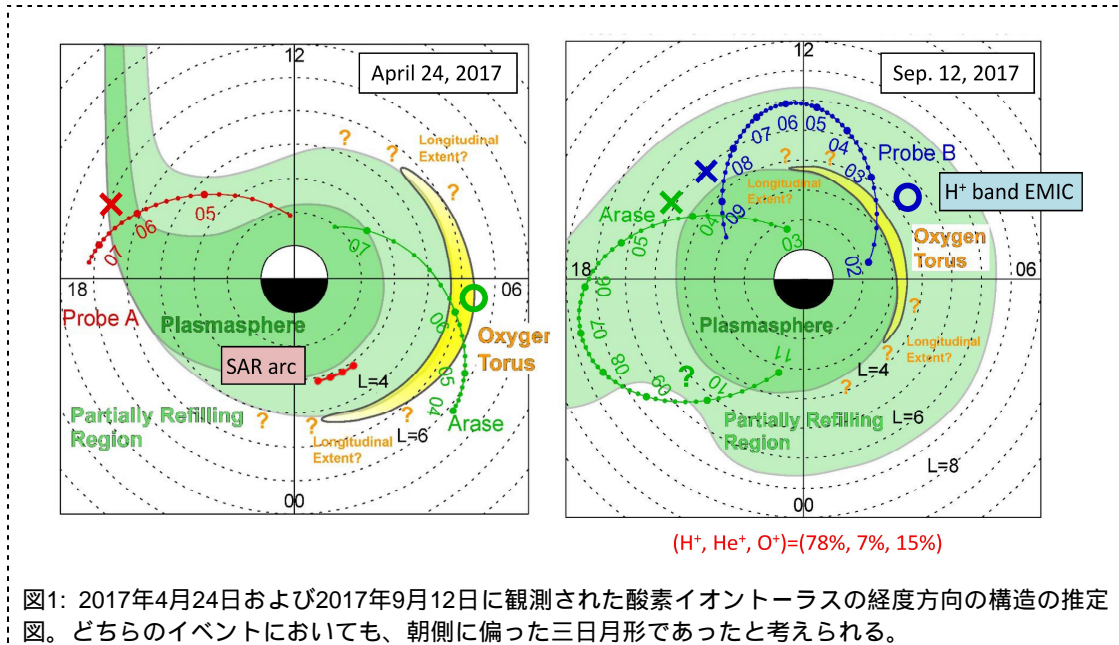


図1: 2017年4月24日および2017年9月12日に観測された酸素イオントラスの経度方向の構造の推定図。どちらのイベントにおいても、朝側に偏った三日月形であったと考えられる。

酸素イオントラス形成についての計算機シミュレーションを実施するために、ダイポール磁場およびTsyganenko 2005磁場モデルを用いて、内部磁気圏の磁場を計算機上に再現した。低エネルギーイオンの軌道に大きな影響を与えられとされる対流圏電場は、衛星データに基づいて構築したUNH-IMEF対流電場モデルを用いた。これらのモデル電磁場の中で、非常に低エネルギーのO+イオンの軌道計算を行った結果、イオンは朝側に移動し、そこで長時間滞在するとともに、モデルで表現される複雑な対流電場構造に対して複雑な軌道を描くことが分かった。

(2) あらせ衛星が観測した磁場と高エネルギー粒子データを用いた解析を行った。2017年3月27日に大振幅のPc5地磁気脈動が現れており、同時に酸素イオンのフラックスも同じ周期で振動していたことが分かった(図2)。あらせ衛星のすぐそばには米国のMMS衛星が飛翔していたため、両衛星の磁場データを同時解析したところ、経度方向の波数が-15という結果が得られた。O+イオンは、10-20 keV以下と50-100 keV以上の2つの異なるエネルギー帯でフラックス振動を示しており、これらは、異なる共鳴モードのドリフトバウンス共鳴であることを世界で初めて観測に基づいて示すことができた。

特に低いエネルギー帯での共鳴では、O+/H+イオンフラックス比が0.4となり、通常の数倍までO+イオンが増加していることが分かった。これは、ドリフトバウンス共鳴によってO+イオンのみが選択的に加速され、リングカレントのイオン組成を変化させたことを意味している。以上の結果は、Geophys. Res. Lett.誌に、Oimatsu et al. [2018]として発表した(発表雑誌論文)。

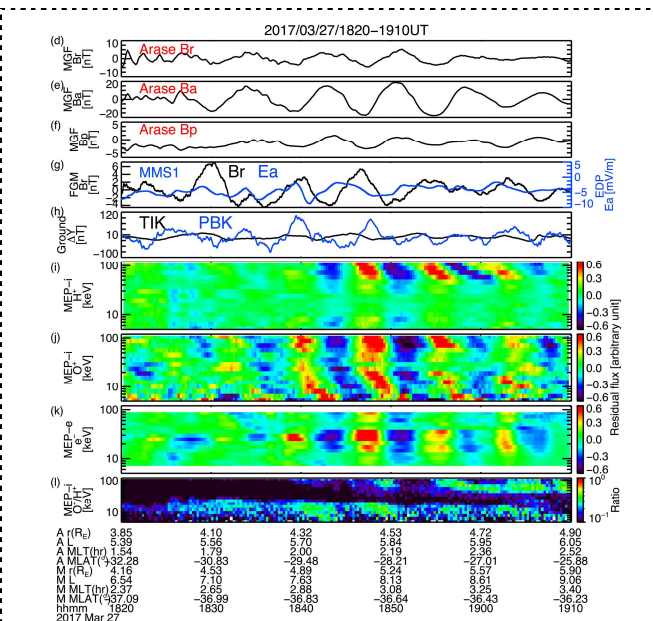


図2: 2017年3月27日に観測されたPc5地磁気脈動とそれに伴うH+イオンおよびO+イオンのフラックス変動。パネル(i)から分かるようにO+イオンは高エネルギー帯と低エネルギー帯で振動を示している。パネル(l)は、O+/H+イオン比を示しており、O+イオンが選択的に加速されている様子が分かる。Oimatsu et al. [2018]より抜粋。

2017年4月15日に観測されたPg脈動(Giant pulsation)とH+イオンフラックスの変動についても解析を行った。地上の複数観測点でも観測されたPg脈動の位相差から、経度方向の波数は-50という値を得た。この波数とフラックス振動が生じているH+イオンのエネルギーは、ドリフトバウンス共鳴理論から予測されるものと一致した。高エネルギー粒子の旋回半径を利用して、一か所の観測点から動径方向のフラックス濃淡を調査する方法を考案し、その結果から、Pg脈動は、プラズマのエネルギー分布における勾配によるものではなく、動径方向のフラックス濃淡により励起されていることを結論付けた。以上の結果は、*Geophys. Res. Lett.*誌に、Yamamoto et al. [2018]として発表した(発表雑誌論文)。

2014年3月2日にVan Allen Probes衛星が昼側で経度方向に異なる2地点で観測を行っている時のデータを解析し、長周期脈動の経度方向の波数を調査したところ、-266とこれまでに報告されたことのないような大きな値となっていることが分かった。その時の55-280 keVのH+イオンフラックス変動は、ドリフトバウンス共鳴で説明できることを明らかにした。イオンフラックスの空間的・エネルギー的勾配についての解析から、ドリフトバウンス共鳴を通して、波のエネルギーがプラズマに移動していることが推察された。このことは、イベント中に磁気嵐の回復割合が小さくなっていったことから裏付けられ、ドリフトバウンス共鳴がリングカレントのエネルギーの増減に少なからぬ影響を及ぼすことが明らかになった。この結果は、*J. Geophys. Res.*誌に、Oimatsu et al. [2018]として発表した(発表雑誌論文)。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 25件)

Nosé, M., A. Matsuoka, A. Kumamoto, Y. Kasahara, J. Goldstein, M. Teramoto, F. Tsuchiya, S. Matsuda, M. Shoji, S. Imajo, S. Oimatsu, K. Yamamoto, Y. Obana, R. Nomura, A. Fujimoto, I. Shinohara, Y. Miyoshi, W. S. Kurth, C. A. Kletzing, C. W. Smith, and R. J. MacDowall, Longitudinal structure of oxygen torus in the inner magnetosphere: Simultaneous observations by Arase and Van Allen Probe A, *Geophys. Res. Lett.*, *45*, doi:10.1029/2018GL080122, 2018. (査読有)

Nosé, M., A. Matsuoka, S. Kasahara, S. Yokota, M. Teramoto, K. Keika, K. Yamamoto, R. Nomura, A. Fujimoto, N. Higashio, H. Koshiishi, S. Imajo, S. Oimatsu, Y. M. Tanaka, M. Shinohara, I. Shinohara, and Y. Miyoshi, Magnetic field dipolarization and its associated ion flux variations in the dawnside deep inner magnetosphere: Arase observations, *Geophys. Res. Lett.*, *45*, doi:10.1029/2018GL078825, 2018. (査読有)

Oimatsu, S., M. Nosé, M. Teramoto, K. Yamamoto, A. Matsuoka, S. Kasahara, S. Yokota, K. Keika, G. Le, R. Nomura, A. Fujimoto, D. Sormakov, O. Troshichev, Y.-M. Tanaka, M. Shinohara, I. Shinohara, Y. Miyoshi, J. A. Slavin, R. E. Ergun, and P.-A. Lindqvist, Drift-bounce resonance between Pc5 pulsations and ions at multiple energies in the nightside magnetosphere: Arase and MMS observations, *Geophys. Res. Lett.*, *45*, doi:10.1029/2018GL078961, 2018. (査読有)

Yamamoto, K., M. Nosé, S. Kasahara, S. Yokota, K. Keika, A. Matsuoka, M. Teramoto, K. Takahashi, S. Oimatsu, R. Nomura, M. Vellante, B. Heilig, A. Fujimoto, Y. Tanaka, M. Shinohara I. Shinohara, and Y. Miyoshi, Giant pulsations excited by a steep earthward gradient of proton phase space density: Arase observation, *Geophys. Res. Lett.*, *45*, 6773–6781, doi:10.1029/2018GL078293, 2018. (査読有)

Oimatsu, S., M. Nosé, K. Takahashi, K. Yamamoto, K. Keika, C. A. Kletzing, C. W. Smith, R. J. MacDowall, and D. G. Mitchell, Van Allen Probes observations of drift-bounce resonance and energy transfer between energetic ring current protons and poloidal Pc4 wave, *J. Geophys. Res.*, *123*, doi:10.1029/2017JA025087, 2018. (査読有)

Nosé, M., M. Uyeshima, J. Kawai, and H. Hase, Ionospheric Alfvén resonator observed at low-latitude ground station, Muroto, *J. Geophys. Res.*, *122*, doi:10.1002/2017JA024204, 2017. (査読有)

Nosé, M., K. Keika, C. A. Kletzing, H. E. Spence, C. W. Smith, R. J. MacDowall, G. D. Reeves, B. A. Larsen, and D. G. Mitchell, Van Allen Probes observations of magnetic field dipolarization and its associated O<sup>+</sup> flux variations in the inner magnetosphere at L<6.6, *J. Geophys. Res.*, *121*, doi:10.1002/2016JA022549, 2016. (査読有)

[学会発表](計 33件)

Nosé, M., A. Matsuoka, A. Kumamoto, Y. Kasahara, J. Goldstein, M. Teramoto, F. Tsuchiya, S. Matsuda, M. Shoji, S. Imajo, S. Oimatsu, K. Yamamoto, Y. Obana, R. Nomura, A. Fujimoto, I. Shinohara, Y. Miyoshi, W. S. Kurth, C. A. Kletzing, C. W. Smith, and R. J. MacDowall, Longitudinal structure of oxygen torus in the inner magnetosphere: Simultaneous observations by Arase and Van Allen Probe A, 2018 AGU Fall Meeting, December 2018, Washington, D.C., USA (Oral, Invited)

Nosé, M., A. Matsuoka, S. Kasahara, S. Yokota, N. Higashio, H. Koshiishi, S. Imajo, M.

Teramoto, R. Nomura, A. Fujimoto, K. Keika, Y. -M. Tanaka, M. Shinohara, I. Shinohara, and Y. Miyoshi, Magnetic field dipolarization and its associated ion flux variations in the inner magnetosphere: Simultaneous observations by Arase and Michibiki satellites, AGU Fall Meeting 2017, December 2017, New Orleans, USA (Oral).

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

能勢正仁のホームページ：<http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/nose.masahito>

Substorm Swift Search：<http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/nose.masahito/s-cubed>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：笠原 慧  
ローマ字氏名：(KASAHARA, satoshi)  
所属研究機関名：東京大学  
部局名：大学院理学系研究科  
職名：准教授  
研究者番号(8桁)：00550500

研究分担者氏名：寺本 万里子  
ローマ字氏名：(TERAMOTO, mariko)  
所属研究機関名：名古屋大学  
部局名：宇宙地球環境研究所  
職名：特任助教  
研究者番号(8桁)：10614331

研究分担者氏名：桂華 邦裕  
ローマ字氏名：(KEIKA, kunihiro)  
所属研究機関名：名古屋大学  
部局名：大学院理学系研究科  
職名：助教  
研究者番号(8桁)：10719454

研究分担者氏名：横田 勝一郎  
ローマ字氏名：(YOKOTA, shoichiro)  
所属研究機関名：大阪大学  
部局名：大学院理学系研究科  
職名：准教授  
研究者番号(8桁)：40435798

研究分担者氏名：尾花 由紀  
ローマ字氏名：(OBANA, yuki)  
所属研究機関名：大阪電気通信大学  
部局名：工学部  
職名：准教授  
研究者番号(8桁)：50398096

(2)研究協力者  
研究協力者氏名：  
ローマ字氏名：

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。