

地球磁気圏の EMIC 波: Arase 衛星による偏波解析を用いたイオン組成導出の試み

#菊地 陸¹⁾, 笠羽 康正¹⁾, 松田 昇也²⁾, 笠原 禎也²⁾, 松岡 彩子³⁾, 土屋 史紀¹⁾, 佐藤 晋之祐¹⁾, 城 剛希¹⁾

(¹⁾ 東北大学, (²⁾ 金沢大学, (³⁾ 京都大学

EMIC Waves in the Magnetosphere: Attempts to Derive Ion Composition Using Polarization Analysis by the Arase Satellite

#Riku Kikuchi¹⁾, Yasumasa KASABA¹⁾, Shoya MATSUDA²⁾, Yoshiya KASAHARA²⁾, Ayako MATSUOKA³⁾, Fuminori TSUCHIYA¹⁾, Shinnosuke SATOH¹⁾, Koki TACHI¹⁾

(¹⁾Tohoku University, (²Kanazawa University, (³Kyoto University

Electromagnetic ion cyclotron (EMIC) waves are low-frequency, circularly polarized electromagnetic waves excited by anisotropic ion distributions. These waves exhibit frequency characteristics based on each ion's cyclotron frequency, while their frequencies and polarizations depend on the density of each ion species. Thus, if the wave is sufficiently strong and the signal-to-noise (S/N) ratio is high, it is potentially possible to estimate the ion composition of the surrounding plasma. A key phenomenon for this plasma diagnostic is mode conversion, where the wave polarization switches between R-mode (right-hand polarized) and L-mode (left-hand polarized). The boundary frequency of this conversion, known as the crossover frequency, contains crucial information on the ambient ion composition. Particle instruments onboard satellites often struggle to detect low-energy ions below 10-20 eV. Therefore, investigating EMIC waves enables the inference of ion species and their compositions, providing insights into magnetospheric dynamics.

Previous observations by the Akebono satellite and Radiation Belt Storm Probes (RBSP) have identified EMIC waves associated with various ion species, as well as mode conversion events that are useful for estimating ion composition [Matsuda et al., 2015; Miyoshi et al. 2019]. However, only one mode conversion event has been reported by the Arase satellite [Miyoshi et al., 2019, Fig.2], and ion compositions have not been extensively discussed. The inference of ion compositions from EMIC wave observations in planetary magnetospheres can also be applied to BepiColombo (arriving at Mercury in November 2026), Juno (having conducted close flybys at the Galilean satellites) [Satoh et al., in preparation], and JUICE (orbiting Jupiter from 2031), and the application to these missions has to be prepared.

This study aims to investigate EMIC waves more comprehensively using magnetic field data from the Arase satellite and determine the distribution and dynamics of cold ion compositions from the topside ionosphere to the plasmasphere. We focus particularly on low altitudes, where He^+ and O^+ are expected to be more abundant. We primarily use 1,024 Hz waveform data from Wave Form Capture (WFC) [Matsuda et al., 2018] (EMIC-Burst data: obtained intermittently from 2017 to October 2018, during periods when the triaxial magnetic field waveform data from the search coil were available) on PWE, and also the ambient magnetic field data from Magnetic Field Experiment (MGF) [Matsuoka et al., 2018] onboard the Arase satellite, which can observe EMIC waves at frequencies above several tens of Hz with high frequency resolution in regions including the topside ionosphere.

We first searched for “EMIC waves with sufficient S/N and broad frequency coverage over H^+ , He^+ , O^+ cyclotron frequencies” in WFC EMIC-burst data. We then selected events near perigee ($R < 2.5R_E$) that exhibited sufficient intensity and mode conversion, allowing for the derivation of ion composition. For these events, we applied analysis methods previously used for Akebono and RBSP to estimate ion composition. Specifically, we performed polarization analysis with the singular value decomposition (SVD) method [Santolik et al., 2003] and identified the EMIC waves based on their polarization properties: polarization ellipticity, wave normal angle (WNA), which indicates the propagation direction, and planarity. Finally, we derived ion compositions by identifying cutoff and crossover frequencies, which provide information on the ambient ion population.

From March 2017 to October 2018, we identified approximately 100 EMIC mode conversion events, predominantly concentrated on the dayside (08-14 MLT). The derived ion composition ratios from these events confirm that the relative abundance of H^+ decreases, while that of He^+ increases, with decreasing altitude. This result is consistent with the International Reference Ionosphere (IRI) model and previous studies [Miyoshi et al. 2019], thereby indicating that ion compositions can be reliably inferred from Arase EMIC wave observations. As of August 2025, we are actively refining our analysis methods to obtain more precise ion composition ratios. Furthermore, we are attempting to extend our analysis period to after November 2018. We have already confirmed that, even with the constraint of a missing triaxial magnetic field component in the EMIC-burst data from this period, cutoff and crossover frequencies can still be identified from wave intensity and polarization information. We also plan to consider the use of data from the Hisaki space telescope to cross-validate our results, as it can be used to estimate exospheric neutral H, He, and O populations during the same period.

Electromagnetic ion cyclotron (EMIC) 波は、温度異方性のある各種イオンにより励起される円偏波を持つ低周波電磁波動である。各イオンのサイクロトロン周波数を基準とした周波数特性を示すが、各イオンの密度がその周波数や偏波特性に影響を与える。このため、波動が強く十分な S/N 比が得られる場合には、周辺プラズマのイオン組成を推定することが可能である。特に、波動の周波数特性が R モード（右旋円偏波）から L モード（左旋円偏波）、もしくは L モードから R モードに切り替わるモード変換イベントは、その境界周波数（crossover 周波数）が周囲のイオン組成比に関する情報を含むため、プラズマ診断に非常に有用である。粒子計測器では 10-20 eV を下回る低エネルギーイオンの定常的な観測が困難であるため、EMIC 波を用いたイオン種及びその組成の導出は、地球及び惑星の磁気圏・プラズマ圏におけるイオンの輸送ダイナミクスを紐解く手がかりになり得る。

これまでに、Akebono 衛星や Radiation Belt Storm Probes (RBSP) 衛星により、各種イオンの EMIC 波が観測され、イオン組成の推定に有益なモード変換イベントも報告されている [Matsuda et al., 2015; Miyoshi et al. 2019]。一方、Arase 衛星におけるモード変換イベントの観測事例は、Miyoshi et al. (2019) の Fig.2 に示される一例のみに留まっており、イオン組成に関する詳細な議論は行われていない。惑星磁気圏の EMIC 波とそれによるイオン組成及びその変動推定は、2026 年 11 月に水星到着予定の BepiColombo、木星を周回しガリレオ衛星におけるフライバイ観測を行った Juno [Satoh et al., in preparation]、2031 年から木星を周回する JUICE による磁場観測にも適用可能であるが、手法の最適化や精度向上の確立も同時に必要である。

本研究は、Arase 衛星の磁場波動データを用いて EMIC 波の広範な観測事例を調べ、電離圏のトップサイドからプラズマ圏における低温イオンの組成分布とその変動を見出すことを目的として着手された。特に、 He^+ 、 O^+ がより多く含まれる低高度で重点的に解析を進めている。本解析は、電離圏トップサイドを含む領域での数十 Hz 以上の EMIC 波を高い周波数分解能で観測可能な PWE WFC (Wave Form Capture) [Matsuda et al., 2018] による 1,024 Hz 波形データ (EMIC-Burst: 磁場 3 軸波形データが存在する 2017-2018 年 10 月の間欠的期間)、および MGF (Magnetic Field Experiment) [Matsuoka et al., 2018] による背景磁場情報を用いて進めた。

まず WFC EMIC パーストデータにおいて「S/N の良く、 H^+ 、 He^+ 、 O^+ のサイクロトロン周波数を跨ぐ広帯域の EMIC 波」を探索し、組成情報を導出し得る強度が十分大きくモード変換が見られる波を近地点近傍 ($R < 2.5R_E$) でピックアップした。これらに Akebono・RBSP に対して行われてきた手法を適用してイオン組成の導出を行った。具体的には、特異値分解 (Singular Value Decomposition; SVD) 法 [Santolik et al., 2003] 等を用いた偏波解析を行い、偏波度 (polarization ellipticity)、伝播方向を示す波数法線角 (Wave Normal Angle; WNA)、及び波の平面性 (planarity) を基礎に EMIC 波動を識別し、イオン組成情報を含む cutoff 周波数や crossover 周波数を同定してイオン組成の導出を行った。

2017 年 3 月-2018 年 10 月の期間では、これまでに約 100 の EMIC モード変換イベントを特定（特に日中側 08-14 MLT に集中して発生）している。これらの cutoff 周波数と crossover 周波数からイオン組成比を求めた結果、高度が低くなるにつれて H^+ の割合が低くなり、 He^+ の割合が高くなることを確認できた。これは IRI (International Reference Ionosphere) モデルや先行研究 [Miyoshi et al. 2019] の結果と整合しており、Arase 衛星の EMIC 観測量からイオン組成を導出可能であることを示すものである。2025 年 8 月現在、より高精度でイオン組成比を求めるための解析手法の改良を進めている。また、サーチコイル磁力計の一軸が欠損してしまう 2018 年 11 月以降への解析期間の延長も試みつつある。磁場 2 軸のデータから得られる波動強度・偏波情報から cutoff 周波数や crossover 周波数は同定でき、イオン組成の導出が可能であることを確認済である。なお、同時期の地球外圏における中性 $\text{H} \cdot \text{He} \cdot \text{O}$ の量が極端紫外線望遠鏡衛星 Hisaki における $\text{H} \cdot \text{He} \cdot \text{O}$ コロナ発光量から推定可能でもあり、その援用も今後検討する。