

木星探査機 Juno による観測結果に基づく木星磁気圏におけるインジェクション現象時に観測された電磁イオンサイクロトロン波動の事例解析

#野口 智史¹⁾, 加藤 雄人¹⁾, 熊本 篤志¹⁾

⁽¹⁾ 東北大・理・地球物理

A Case Study of EMIC Waves Observed During an Injection Event in Jupiter's Magnetosphere Based on Juno's Observation

#Tomofumi Noguchi¹⁾, Yuto Katoh¹⁾, Atsushi Kumamoto¹⁾

⁽¹⁾ Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

Unlike Earth's magnetosphere, the dynamics of Jupiter's giant magnetosphere are dominated by the planet's rapid rotation and its interaction with heavy ions supplied by moon Io. Plasma waves in this environment are a crucial subject of study for understanding energy transport and particle acceleration. This research focuses on a case in which Electromagnetic Ion Cyclotron (EMIC) waves were observed during an injection event in Jupiter's magnetosphere, where electrons and ions with a broad energy range from several keV to hundreds of keV are rapidly injected radially inward. The study is based on an analysis of data from the Juno spacecraft.

One excitation process for plasma waves like EMIC waves is temperature anisotropy in high-energy particles, where their temperature is predominantly perpendicular to the magnetic field lines. In Jupiter's magnetosphere, injection events are considered a primary mechanism for generating this anisotropy. It is thought that injections in the Jovian magnetosphere occur when high-energy particles are injected into the inner magnetosphere due to phenomena such as interchange instability (Mauk et al., 1999). Adiabatic heating associated with the inward radial transport during these injection events is expected to create strong temperature anisotropy in the velocity distribution of the high-energy particles. While recent studies have observed whistler-mode chorus waves caused by high-energy electrons with injection-induced temperature anisotropy in Jupiter's magnetosphere (Ma et al., 2024), there have been no reports of observational cases showing a clear association between particle injections and EMIC waves. Investigating whether injection-associated EMIC waves, which are frequently observed in Earth's magnetosphere, also occur at Jupiter is important for clarifying the details of particle acceleration processes in the Jovian magnetosphere and for exploring universal physical laws through comparison with Earth's magnetosphere.

This study aims to elucidate the details of Jupiter's magnetospheric dynamics and wave generation, as well as to confirm the contribution of wave-particle interactions and to make comparisons with Earth. For this purpose, we identified and investigated a case of the simultaneous occurrence of an injection event and EMIC waves using observational data from the Juno spacecraft. From observations by the Jovian Auroral Distributions Experiment (JADE) (McComas et al., 2017) around 05:00 UT on May 22, 2022, in the equatorial region at a distance of 15 – 20 Jovian radii (R_J) from the center of Jupiter, signs of an injection event were confirmed by a sharp increase in the energy flux of electrons and ions in the 0.1 – several tens of keV range. Meanwhile, concurrent magnetic field observations by the Magnetometer (MAG) (Connerney et al., 2017) revealed significant magnetic field fluctuations.

A detailed analysis of these magnetic field fluctuations was conducted using Wavelet analysis and polarization analysis based on the Singular Value Decomposition (SVD) method (Santolik et al., 2003). The results confirmed a wave phenomenon with an intensity exceeding 10^2 nT²/Hz lasting for about 5 minutes. This wave exhibited left-hand polarization, quasi-parallel propagation, and a frequency below the local oxygen ion cyclotron frequency. Based on these wave characteristics, it is considered that the identified event captured EMIC waves generated in association with an injection event.

While there have been reports of EMIC waves in Jupiter's magnetosphere, such as those originating from pickup ions from the moon Io (Cao et al., 2025) and in the outer magnetosphere (90 R_J) (Yuan et al., 2024), the present study is the first report of EMIC waves associated with an injection event in the inner magnetosphere.

木星の巨大磁気圏のダイナミクスは、地球とは異なり、惑星本体の高速な自転と衛星イオから供給される重イオンとの相互作用に支配されている。この環境におけるプラズマ波動は、エネルギー輸送や粒子加速を理解する上で極めて重要な研究対象である。本研究では、木星磁気圏で発生する動径方向内側へ数 keV から数百 keV に及ぶ広いエネルギー帯の電子とイオンが急激に注入されるインジェクション現象において、電磁イオンサイクロトロン (EMIC) 波が観測された事例に着目し、探査機 Juno データに基づいて考察する。

EMIC 波のようなプラズマ波動の励起過程として、高エネルギー粒子の温度が磁力線垂直方向に卓越する温度異方性が挙げられる。木星磁気圏において、インジェクションはこの異方性を生成する主要なメカニズムの一つと考えられている。木星磁気圏におけるインジェクション現状は、交換型不安定性 (Interchange Instability) などに伴って、磁気圏のより内側を高エネルギー粒子が注入されることで生じると考えられている (Mauk et al., 1999)。インジェクション現象に伴う動径方向内側への輸送に伴う断熱的な加熱により、高エネルギー粒子の速度分布には強い温度異方性が生じることが期待される。近年の研究では、木星磁気圏ではインジェクションによって温度異方性が卓越した高エネルギー電子に起因すホイッスラーモード・コーラス波が観測されているが (Ma et al., 2024)、一方で EMIC 波については、粒子注入との明

確な関連を示す観測事例の報告は未だない。地球磁気圏では多数の観測事例があるインジェクションに伴う EMIC 波が、木星磁気圏でも観測されるのか、という疑問を調査することは、木星磁気圏における粒子加速過程の詳細を明らかにするとともに、地球磁気圏との比較を通して普遍的な物理法則を探る上で重要である。

本研究は、木星磁気圏のダイナミクス、波動発生の詳細を明らかにすること、さらには波動粒子相互作用への寄与の考察や地球との比較を目的とし、インジェクションと EMIC 波の同時発生事例を Juno 探査機による観測データから同定して調査した。2022 年 5 月 22 日 5: 00 UT 前後における、木星中心からの距離が 15~20 木星半径 (R_J) の赤道域付近における Jovian Auroral Distributions Experiment (JADE) (McComas et al., 2017) による観測結果から、0.1-数十 keV の電子とイオンのエネルギーフラックスが急増するインジェクション現象の兆候が確認された。さらに、これと同時刻における磁力計 (MAG) (Connerney et al., 2017) による観測では、顕著な磁場変動が観測された。

磁場変動に対して Wavelet 解析を行い、特異値分解 (SVD) 法に基づく偏波解析 (Santolik et al., 2003) を用いて詳細に分析した結果、強度が $10^2 \text{ nT}^2/\text{Hz}$ 以上の強度の波動現象が約 5 分間持続していることが確認された。この波動は、左回り偏波、準平行伝播、そして局所的な酸素イオンのサイクロトロン周波数より低い周波数という特徴を示した。得られた波動特性に基づいて、同定されたイベントはインジェクション現象にともなって発生した EMIC 波をとらえたものであると考えられる。

木星磁気圏における EMIC 波については、衛星イオからのピックアップイオンに由来する EMIC 波 (Cao et al., 2025) や外部磁気圏 ($90 R_J$) における EMIC 波の報告例 (Yuan et al., 2024) があったが、内部磁気圏におけるインジェクション現象に伴う EMIC 波の報告としては初めての例となる。