

内部磁気圏における ULF 波動の伝搬過程を解く MHD シミュレーションコードの開発

#磯野 航¹⁾, 加藤 雄人¹⁾, 川面 洋平^{1,2)}, 熊本 篤志¹⁾

⁽¹⁾ 東北大学・理・地球物理, ⁽²⁾ 東北大学学際科学フロンティア研究所, ⁽³⁾ 東北大学・理・地球物理

Development of the MHD simulation code for the propagation of ULF waves in the inner magnetosphere

#Isono Ko¹⁾, Yuto Katoh¹⁾, Atsushi Kumamoto¹⁾

⁽¹⁾ Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ., ⁽²⁾ Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences Tohoku University, ⁽³⁾ Dept. Geophys., Tohoku Univ.

The excitation and propagation of ultra-low frequency (ULF) waves are ubiquitously observed in the Earth's inner magnetosphere during geomagnetically disturbed periods. ULF waves are characterized by long wave periods of tens to hundreds of seconds and wavelengths of thousands of kilometers, globally distributed in the magnetosphere. The driving source of ULF waves is known to be an excitation process from outside the magnetosphere and a generation process inside the magnetosphere. The former is mainly due to solar wind pressure fluctuations and Kelvin-Helmholtz instability at the magnetopause, while the latter is mainly due to energetic ions injected into the inner magnetosphere during substorms (e.g., Takahashi, 2015). It has also been pointed out that ULF waves modulate the flux and pitch angle distributions of energetic electrons (Zhou et al., 2016). On the other hand, the feedback process from energetic electrons to ULF waves has not been discussed. However, in recent years, numerical simulations and observations revealed the effect of energetic electrons on ULF waves. Hori et al. (2018) clarified the simultaneous occurrence of the flux enhancement of energetic electrons drifting eastward and ULF waves propagating eastward from the simultaneous observations by the Arase satellite and the radar Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN). Ono et al. (2020) revealed in the Arase satellite observation that the flux and pitch angle distribution of energetic electrons are modulated by ULF waves, and suggested that the observed relationship can be explained by considering ULF waves with m-number larger than the typical value of toroidal mode ULF waves. These new observational findings suggest the need for a comprehensive study of the relationship between ULF waves and energetic electrons, including the energy exchange between them.

In this study, to discuss the interaction between energetic electrons and ULF waves in the magnetosphere, we develop an MHD simulation code to quantitatively compute the propagation of ULF waves in the inner magnetosphere. Since the amplitude of the ULF wave is sufficiently small with respect to the background magnetic field strength, the contribution of the nonlinear term is assumed to be small and only the linear term of the set of MHD equations is considered. To solve the propagation of ULF waves in the radial and longitudinal directions, we set a spatially three-dimensional simulation system using cylindrical coordinates [e.g., Southwood and Kivelson, 1984] with the Z axis in the magnetic field line direction, r axis in the radial direction, and theta axis in the meridional direction. The spectral method is used for both the Z and theta axes to reduce the computational cost. We assume a few wavenumber components in the Z axis for fundamental and lowest order harmonics of standing Alfvén waves. We set tens of wavenumber components in the theta axis to treat high m-number ULF waves. Using the developed model, we calculate the propagation of fundamental ULF waves initially assumed in a specific longitude range, the equipartition of electromagnetic energy among toroidal and poloidal modes, and the mode conversion between fast and shear Alfvén waves in the inner magnetosphere.

地球内部磁気圏では磁気嵐などに伴い、ULF 波動と呼ばれるプラズマ波動が観測されている。ULF 波動は周期が数十秒から数百秒と長く、波長が数千キロメートルと内部磁気圏全体にわたる現象である。ULF 波動の駆動源としては磁気圏外部からの励振過程ならびに磁気圏内部での発生過程の存在が明らかにされており、前者は太陽風動圧の変動や磁気圏界面におけるケルビン-ヘルムホルツ不安定、後者は磁気擾乱時にサブストーム等により注入される高エネルギーイオンが主な要因とされている (e.g., Takahashi, 2015)。また、内部磁気圏で発生した ULF 波動により、高エネルギー電子のフラックスやピッチ角分布に変化が生じることが指摘されている (Zhou et al., 2016)。一方で、高エネルギー電子が ULF 波動に与える影響については論じられてこなかった。

しかしながら近年、数値計算や観測から高エネルギー電子と ULF 波動との様々な関係性が指摘されている。Hori et al. (2018) はあらせ衛星と短波レーダー SuperDARN の同時観測から、朝側にドリフトする高エネルギー電子と朝側に伝搬する ULF 波動が同時に生じている様相を明らかにした。また、Ono et al. (2020) は、あらせ衛星による観測結果から、ULF 波動によって高エネルギー電子のフラックスおよびピッチ角分布が変調を受けている現象を見出し、典型的な値よりも大きな方位角方向モード数 (m-number) を示す ULF 波動を考えることで説明できることを明らかにした。これらの新たな観測事実は、ULF 波動と高エネルギー電子の関係性について相互作用も含めた包括的な研究の必要性を示唆している。

本研究では、磁気圏内での高エネルギー電子と ULF 波動の相互作用を議論するために内部磁気圏における ULF 波動

の伝搬と波動特性を定量的に明らかにすることを目的として、MHD 方程式系を基礎方程式とするシミュレーションコードを開発している。ULF 波動の振幅は背景磁場強度に対して十分に小さいことから、非線形項の寄与は小さいとして、線形化した MHD 方程式系を取り扱う。磁気圏内における ULF 波動の動径方向、経度方向への伝搬を解こうために、磁力線方向に z 軸、動径方向に r 軸、経度方向に θ 軸を取る円筒座標系 [e.g., Southwood and Kivelson, 1984] を用いた空間 3 次元方向のシミュレーション空間を設定する。ここで磁力線方向、経度方向についてスペクトル法を用いることにより、計算コストの削減を図る。波数空間としては磁力線方向については一桁、経度方向については二桁程度の波数を対象とする。このモデルを用いて、特定の経度範囲において存在する fundamental mode の ULF 波動がどのように伝搬し、toroidal mode と poloidal mode の分配ならびに fast mode と shear Alfvén wave 間でのモード変換がどのように生じるかについて考察する。