

Arase 衛星を用いた高緯度・プラズマポーズ近傍におけるホイッスラーモードコーラスのダクト伝搬の事例解析

#安福 友梨¹⁾, 土屋 史紀¹⁾, 栗田 怜²⁾, 笠羽 康正¹⁾, 加藤 雄人³⁾, 吹澤 瑞貴⁴⁾, 三好 由純⁵⁾, 篠原 育⁶⁾, 笠原 禎也⁶⁾, 松田 昇也⁷⁾, 熊本 篤志³⁾, 松岡 彩子⁸⁾, 中村 紗都子⁵⁾, 北原 理弘³⁾

⁽¹⁾ 東北大学 惑星プラズマ大気研究センター, ⁽²⁾ 京都大学 生存圏研究所, ⁽³⁾ 東北大学 理学研究科, ⁽⁴⁾ 国立極地研究所, ⁽⁵⁾ 名古屋大学 宇宙地球環境研究所, ⁽⁶⁾ 宇宙科学研究所, ⁽⁷⁾ 金沢大学 自然科学研究科, ⁽⁸⁾ 京都大学 理学研究科

Ducted propagation of whistler mode chorus waves observed by the Arase satellite near the plasmopause at high latitudes

#Yuri Ampuku¹⁾, Fuminori Tsuchiya¹⁾, Satoshi Kurita²⁾, Yasumasa Kasaba¹⁾, Yuto Katoh³⁾, Mizuki Fukizawa⁴⁾, Yoshizumi Miyoshi⁵⁾, Iku Shinohara⁶⁾, Yoshiya Kasahara⁶⁾, Shoya Matsuda⁷⁾, Atsushi Kumamoto³⁾, Ayako Matsuoka⁸⁾, Satoko Nakamura⁵⁾, Masahiro Kitahara³⁾

⁽¹⁾ Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Tohoku University, ⁽²⁾ Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, ⁽³⁾ Graduate School of Science, Tohoku University, ⁽⁴⁾ National Institute of Polar Research, ⁽⁵⁾ Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, ⁽⁶⁾ Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Space and Astronautical Science, ⁽⁷⁾ Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, ⁽⁸⁾ Graduate School of Science, Kyoto University

Whistler mode chorus is a type of plasma waves generated near the geomagnetic equator by wave-particle interactions. Chorus scatters pitch angle of energetic electrons and causes the electrons to precipitate into the atmosphere. The resonance energy of electrons becomes higher as the wave propagates at higher latitudes, resulting in the scattering of relativistic electrons into the loss cone. Thus, the propagation of chorus is of great importance for the generation of microbursts and resultant loss of radiation belt electrons. The loss of radiation belt electrons results in significant ionization of the upper atmosphere as well as an impact on the middle atmosphere. The mechanism of the chorus propagation from the equator to higher latitudes has not been clarified. One of the most promising theories is the propagation along a field-aligned density duct. However, only a few observations of chorus propagating in duct structures have been reported [Chan et al. 2021, Haque et al. 2011, Moullard et al. 2002]. In this study, we report on chorus propagating in duct structures observed by the Arase satellite near the plasmopause at the geomagnetic latitude of $>10^\circ$.

During the period from April to July in 2017 and 2018, we identified 23 cases of chorus propagating in the duct-like structure near the plasmopause with Plasma Wave Experiment (PWE) / Onboard Frequency Analyzer (OFA). We examined properties of the chorus for three cases: (1) a duct-like structure characterized by density enhancement at geomagnetic latitude of -14° and McIlwain L of 4.2 at 11:30 UT, June 6, 2018, (2) density depression, geomagnetic latitude of -14.2° and McIlwain L of 4.3 at 11:32 UT, June 6, 2018, (3) density depression, geomagnetic latitude of 32.2° and McIlwain L of 4.6 at 02:52 UT, July 14, 2017.

We estimated the wave normal angles (WNAs) using the Singular Value Decomposition (SVD) method [Santolik et al., 2003] with the assumption on the presence of a single plane wave. We used the background magnetic vector observed by Magnetic Field Experiment (MGF), the spectral matrix of the magnetic field component of chorus observed by OFA for the estimation using the SVD method. We obtained a theoretical relation between the wave frequency and the electron density which satisfies the Snell's law and the dispersion relation with the quasi-longitudinal approximation using the WNAs. We compared the theoretical relation with the observed electron density and the chorus frequency range.

The observational results for each case are as follows. (1) The WNAs were concentrated around 0 deg. The observed chorus was LBC that was consistent with the dispersion relation with $\text{WNA}=0$ deg. (2) The WNAs were scattered around 0 deg - Gendrin angle (θ_G). The observed chorus was LBC that was consistent with the dispersion relation with $\text{WNA}=0$ deg - θ_G . (3) The WNAs were concentrated around θ_G . The observed chorus was LBC that was consistent with the dispersion relation between $\text{WNA}=0$ deg and $\text{WNA}=\theta_G$. We examined other events in the same way and identified 10, 11, and 2 events in total which were categorized as cases (1), (2), and (3), respectively.

We interpreted each result based on ducting theory. Case (1) was consistent with the ducting theory for the LBC propagating along the density enhancement with WNA of around 0 deg, Case (2) the ducting theory along the density depression with WNAs distributed between 0 deg and θ_G , and Case (3) the ducting theory along the density depression with WNAs of around θ_G . We discuss the planarity of the observed chorus waves derived from the SVD method. The planarity close to 1 means that the wave can be regarded as a single plane wave. For Case (1), the planarity of the observed chorus was about 0.8. For Cases (2) and (3), the planarity of the observed chorus was about 0.3 - 0.6, similar value to the background noise floor. Therefore, the WNAs are not reliable. There are two possibilities for the low planarity. Based on

the ducting theory, LBC ducting along the density depression could have wide WNA. If chorus waves with various WNAs coexist, the planarity is evaluated to low. The planarity is evaluated to be a lower value if the amplitude of the observed chorus is not large enough compared to the noise floor.

To investigate characteristics of the low planarity in the density depression duct, we plan to perform detailed analysis for ducted chorus events for which waveform data observed by PWE/Waveform Capture (WFC) is available.

ホイッスラーモードコーラス波(以下、コーラス)は、波動粒子相互作用により磁気赤道面付近で発生する。コーラスによりピッチ角散乱を受けた高エネルギー電子は極域に降下し、diffuse aurora を発生させる。特に、高緯度に伝搬したコーラスは電子との共鳴エネルギーが高くなり、相対論的電子を大気以降下させるため、マイクロバーストの発生、放射線帯電子の消失、中層大気への影響といった観点で注目されている。コーラスを高緯度まで減衰することなく伝搬させるメカニズムとして、磁力線に沿って電子密度が増加/減少した「ダクト構造」内の伝搬が有力とされてきた。しかし、ダクト構造内を伝搬するコーラスの観測例は数例にとどまり [Chan et al. 2021, Haque et al. 2011, Moullard et al. 2002]、コーラスの伝搬特性は明らかとなっていない。本研究では、磁気緯度 10 度以上の領域で Arase 衛星がとらえた、ダクト構造内を伝搬するとみられるコーラスの観測を複数例示す。

Arase 衛星の遠地点が朝側に位置していた 2017 年 4 - 7 月及び 2018 年 4 - 7 月の観測データから、電子密度の増加/減少によるダクト構造とダクト内を伝搬するとみられるコーラスをプラズマポーズ近傍で 23 例同定した。そのうち、電子密度変化とそれに対応するコーラスの強度変化が明瞭な 3 例について詳細な解析を行った。

Arase 衛星に搭載された Plasma Wave Experiment (PWE) の High Frequency Analyzer (HFA) は (1) 2018 年 6 月 6 日 11:30 UT、磁気緯度-14 度、L 値 4.2 にて、電子密度の増加によるダクト構造を、(2) 2018 年 6 月 6 日 11:32 UT、磁気緯度-14.2 度、L 値 4.3 と (3) 2017 年 7 月 14 日 02:52 UT、磁気緯度 32.2 度、L 値 4.6 にて、電子密度の減少によるダクト構造を観測した。Onboard Frequency Analyzer (OFA) はこれらのダクト内を伝搬するとみられるコーラスを観測した。単一平面波近似の下、Singular Value Decomposition(SVD) 法 [Santolik et al., 2003] によりコーラスの wave normal angle (WNA) を導出した。この際、OFA が計算した磁界スペクトルマトリクス、Magnetic Field Experiment (MGF) が観測した背景磁場ベクトルを使用した。さらに、背景磁場強度と WNA をスネルの法則と準縦方向近似した分散関係式に当てはめ、コーラスの周波数とコーラスが伝搬可能な電子密度の関係を得た。この周波数と電子密度の関係を、OFA が観測したコーラスの周波数帯及び HFA が観測した電子密度と比較した。その結果、(1) のコーラスの WNA は 0 deg 付近に集中していた。周波数は、WNA=0 deg の分散関係に対応した lower-band chorus(LBC) の帯域であった。(2) のコーラスの WNA は 0 deg - Gendrin angle(θ_G) 付近に広がっていた。周波数は WNA=0 deg から θ_G にまたがる分散関係に対応した LBC の帯域であった。(3) のコーラスの WNA は θ_G 付近に集中していた。周波数は WNA=0 deg と WNA= θ_G の中間となる分散関係に対応した LBC の帯域であった。23 例のコーラスについて同様の解析を行い、(1)、(2)、及び (3) の特徴を示すコーラスをそれぞれ 10 例、11 例、2 例確認した。

ダクト伝搬理論より、減少ダクトにトラップされる LBC には WNA が 0 deg から θ_G 付近に跨るモードと WNA が θ_G 付近で伝搬するモード、増加ダクトにトラップされる LBC には WNA=0 deg 付近で伝搬するモードが存在できると予測されている。3 つに分類されたコーラスの観測結果をダクト伝搬理論に基づいて解釈すると、(1) は増加ダクトに沿った WNA が 0 deg 付近となる LBC のダクト伝搬、(2) は減少ダクトに沿った WNA が 0 deg - θ_G 付近となる LBC のダクト伝搬、(3) は減少ダクトに沿った WNA が θ_G 付近となる LBC のダクト伝搬と捉えて矛盾がないことが明らかになった。また、SVD 法で計算した観測したコーラスの planarity について議論する。planarity が 1 に近いほど SVD 法における単一平面波近似の妥当性が高い。(1) のタイプではいずれのイベントも planarity は 0.8 程度であった。よってコーラスは単一の平面波と仮定でき、伝搬角解析の結果の信頼性は高いと判断できる。一方、(2)、(3) のタイプのイベントでは、いずれのイベントも planarity が 0.3 - 0.6 前後で背景ノイズの planarity と同程度の値であった。よって伝搬角解析結果の信頼度は低いと言える。(2)、(3) のイベントで planarity が低くなる理由は 2 点考えられる。1 点目は、ダクト伝搬理論に基づくと減少ダクト内での LBC の伝搬モードは 2 通り存在することから、波面の異なる複数の LBC が重なっている可能性である。2 点目は、観測装置のノイズレベルに対して解析したコーラスの磁場成分の強度が十分でないため planarity がより低く計算されている可能性である。

本講演では、信頼性の高い伝搬角解析結果を得るため、PWE の Waveform Capture (WFC) による波形データが存在するイベントの解析事例を併せて報告予定である。