

イオンサイクロトロン波及び斜め伝搬ホイッスラーモード波動 粒子相互作用のテスト粒子シミュレーションとPICシミュレー ション

Test Particle Simulation and PIC simulation on Wave-Particle Interactions of EMIC waves
and Obliquely Propagating Whistler-mode Waves

研究代表者：謝 怡凱 (京都大学 生存圏研究所)

研究分担者：大村 善治 (京都大学 生存圏研究所)

担当：計算結果の理論的検討

Li Li (京都大学 生存圏研究所 客員研究員)

担当：ULF 波について PIC シミュレーションプログラムの実行

WANG XUEYI (京都大学 生存圏研究所 客員教授)

担当：2DPIC シミュレーションプログラムの実行、解析

研究目的 (Research Objective):

地球内部磁気圏では、高エネルギー電子の加速および散乱を引き起こす主要なプラズマ波動として、ホイッスラーモード波とイオンサイクロトロン (EMIC) 波が知られている。特に、ホイッスラーモード波の一種であるコーラス放射は、周波数が大きく変動する電磁放射現象であり、この周波数変動に伴って一部の電子が効率的に加速されることで、高エネルギー電子フラックスの変動に大きく寄与すると考えられている。赤道付近で生成された周波数上昇型のコーラス放射は、高緯度へ伝搬する過程で、外部磁場勾配に起因する非線形成長機構の影響を受けるとともに、伝搬方向が磁力線に平行な方向から斜め方向へと変化する。本研究では、このような伝搬過程に着目し、コーラス放射の伝搬角の違いが、共鳴電子のエネルギー変化および運動方向の変化に与える影響を評価した。

また、Hsieh and Omura (2018) は、コーラス放射のダイナミックスペクトルにおいて、電子サイクロトロン周波数の 0.5 倍付近に現れるギャップが、伝搬角の小さいホイッスラーモード波に対する Landau 共鳴を介した非線形補足によって形成される可能性を示唆している。本研究では、2 次元 PIC シミュレーションを用いて、self-consistent 系における斜め伝搬コーラス放射の生成過程を再現するとともに、そのダイナミックスペクトルに現れるギャップ構造の再現を試みた。

計算手法 (Computational Aspects):

(1) ホイッスラーモード波および EMIC 波による高エネルギー電子の加速・散乱：高エネルギー電子の加速および散乱過程を調べるため、テスト粒子シミュレーションを用いて電子軌道を追跡し、その結果に基づいて、相互作用後の電子分布の変化を表

す数値グリーン関数を作成した。本年度の研究では、ARASE 衛星による観測波形データと raytracing により得られた伝搬パターンに基づき、新たに 2 種類のグリーン関数データを構築した。これらのグリーン関数セットには、初期エネルギーが 10 keV から 6 MeV、初期赤道ピッチ角が 1° から 89° までの電子を含めた。

波動モデルの生成には OpenMP を使い、AKDK の System B において 64 コアによる並列計算を実施した。一方、テスト粒子シミュレーションについては、MPI と OpenMP のハイブリッド並列化を適用し、AKDK の System A において総コア数 1080 で計算を実行した。

(2) コーラス放射のギャップ構造：

コーラス放射のダイナミックスpekトルに現れるギャップ構造の再現を目的として、General Curvilinear Plasma Simulation Code (GCPIC) を使い、地球子午面内の二次元空間において PIC シミュレーションを実施した。低温電子および高エネルギー電子はいずれも粒子として取り扱い、相対論的ローレンツ力の下でその運動を記述した。初期条件として、低温電子には Maxwellian 分布を、高エネルギー電子には bi-Maxwellian 分布を与えた。境界条件としては、粒子に対して反射境界条件を、波動に対して吸収境界条件を適用した。シミュレーション領域は、 p - q 平面上に設定した。ここで、 p は径方向、 q は磁力線と反対方向を表す。この領域は 400×9984 格子から構成され、対象とする緯度範囲は -31° から 31° とした。総粒子数は 8×10^9 とした。計算では極めて多数の粒子を扱う必要があるため、MPI による並列計算を使い、AKD の System A 上で実施した。

研究成果 (Accomplishments)：

(1) 本年度の研究では、ARASE 衛星によって波動生成領域付近で観測された波形データから得られた波動振幅と周波数の時間変化を導入することにより、より現実的な条件を反映したシミュレーションを実現した。一方、観測された波動は赤道付近におけるものであるため、観測データには波動の伝搬に関する直接的な情報は含まれていない。この制約を補うため、ray tracing を適用し、波動の伝搬経路およびそれに伴う伝搬角の変化を再現した。その結果、2 種類のグリーン関数セットを作成することに成功した。今後は、これらの結果の詳細な検討と解析を通じて、その背景にある物理過程を明らかにする必要がある。

(2) 2D self-consistent シミュレーションにより、斜め伝搬コーラス放射の再現に成功した。シミュレーションの結果、波動の伝搬方向が平行方向から外れる場合に、ダイナミックスpekトル上にギャップ構造が現れることを確認した。波動のspekトルおよび対応する伝搬角については、それぞれ Fig.1 および Fig.2 に示す。この結果は、斜め伝搬コーラス放射の生成および発展に関する仮説を強く支持するものである。さらに、シミュレーション中の粒子ダイナミクスを解析した結果、波動の減衰が Landau 共鳴を介した非線形トラッピングによって生じていることを確認した。以上

の結果は、コーラス放射の振る舞いに対するより包括的な理解に向けた重要な一歩であるとともに、スーパーコンピュータを用いた大規模数値シミュレーションの有効性を示すものである。現在、これらの成果については論文として公表する準備を進めている。

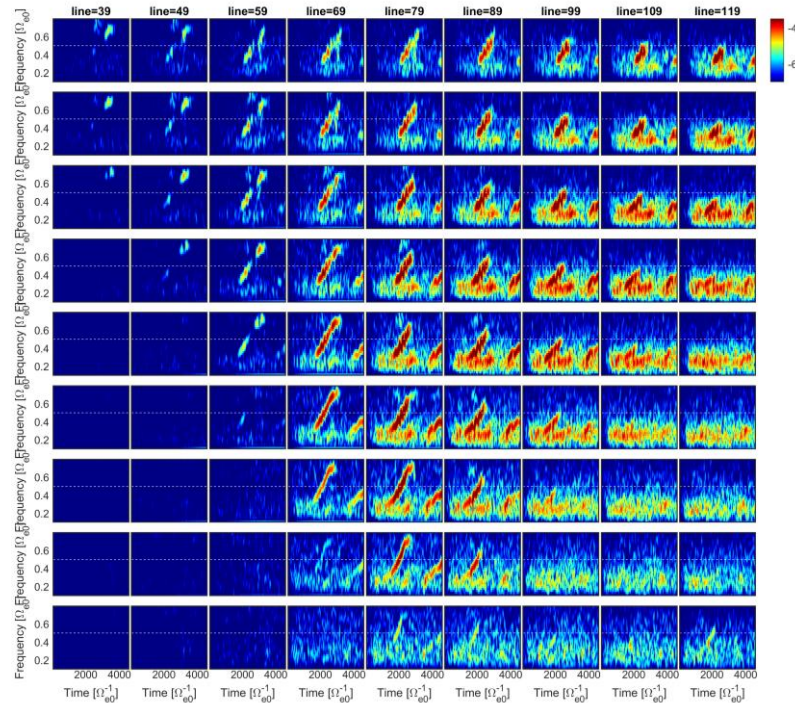


Fig.1 磁力線に越えるホイッスラーモード波のダイナミクススペクトル。

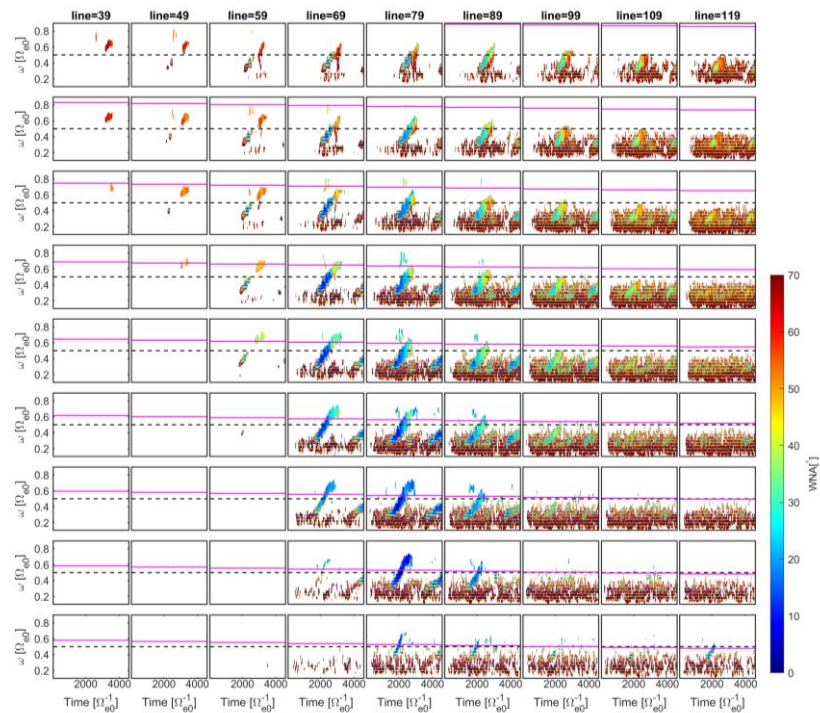


Fig.2 ホイッスラーモード波の伝搬角。ホイッスラーモード波は自然に斜め伝搬になることが示す。

公表状況 (Publications) :

(口頭)

1. Hsieh, Y.-K., Omura, Y., Energetic Electron Precipitation Induced by Nonlinear Interactions with Parallel and Oblique Chorus Waves, The 10th Asia Research Node (ARN) Symposium on Humanosphere Science, Tainan, Taiwan, Sep 2025.

(ポスター)

1. Hsieh, Y.-K., Chen, H., Wang, X., Xia, Z., and Omura, Y., Wave damping of a chorus emission around half electron gyrofrequency under the stationary wave condition: result of 2D general curvilinear particle-in-cell simulation, Japan Geoscience Union (JpGU) Meeting 2025, Chiba, Japan, May 2025.
2. Hsieh, Y.-K., Omura, Y., Energetic Electron Precipitation Induced by Nonlinear Interactions with Parallel and Oblique Chorus Waves, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 22nd Annual Meeting, Singapore, Jul 2025.
3. Hsieh, Y.-K., Chen, H., Wang, X., Xia, Z., and Omura, Y., Formation of the Spectral Gap Around $0.5f_{ce}$ of Obliquely Propagating Chorus Waves Under the Stationary Wave Condition, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 22nd Annual Meeting, Singapore, Jul 2025.
4. 謝 怡凱, 大村 善治, Short-term and long-term energetic electron precipitation induced by whistler-mode chorus waves, 第 158 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 神戸, 2025 年 11 月