

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

研究目的 (Research Objective):

地球の内部磁気圏では、高エネルギー電子の加速や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)波が注目されている。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、この周波数変動により、一部の電子が効率的に加速されることで放射線帯電子フラックスの変動に寄与する。

赤道で生成された周波数上昇型のコーラス放射は、高緯度へと伝搬する過程で、外部磁場の勾配による非線形成長機構の影響を受けると同時に、伝搬方向が平行から斜めへと変化する。これらの予測を検証し、放射線帯電子の加速メカニズムを解析するために、斜め伝搬するコーラス波を考慮したテスト粒子シミュレーションを用い、共鳴電子の非線形軌道や共鳴電流を計算し、粒子の加速や波動の成長・減衰を評価した。

また、磁気圏では EMIC 波も多く観測されており、放射線帯電子は EMIC 波との相互作用によって散乱され、地球大気へと降下する。この降下過程は、放射線帯電子の効率的な消失を引き起こす。本研究では、グリーン関数法を用いて、コーラス放射および EMIC 波による放射線帯電子フラックスの変動を計算した。

一方、プラズマ圏において広帯域の周波数にわたるノイズのようなホイッスラーモード・ヒス放射に関しては、その発生機構について統一的な理解がまだ確立されていない。そこで本研究では、電子の温度異方性による波動成長を再現した粒子モデルの計算機実験を基に、高い空間分解能を持つ計算機シミュレーションを用い、プラズマ圏ヒスの発生条件や伝搬特性を定量的に解析した。

計算手法 (Computational Aspects):

- コーラス放射と EMIC 波による高エネルギー電子の加速や散乱について:

テスト粒子シミュレーションを用いて電子の軌道を追跡し、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、観測データ^[1]に基づいて波動モデルを設定し、新たに 4 種類のグリーン関数データを作成した。1 つのグリーン関数の作成には 3,600 個の電子を使用し、各波動モデルごとに合計 53,400 個のグリーン関数を生成した。これらのグリーン関数のセットには、初期エネルギーが 10 keV から 6 MeV、初期赤道ピッチ角が 1 度から 89 度までの電子が含まれている。さらに、MLT 依存の波動特性を考慮したコーラス放射による長時間の電子分布関数の計算は畳み込み積分を行った。波のモデルの生成は、OpenMP を用いて AKDK の System B および System C にて 64 コアで実行した。テスト粒子シミュレーションは、MPI と OpenMP のハイブリッド形式で System A にて総コア数 1080 で実行した。また、畳み込み積分は MPI を用いて System A にてコア数 600 で実行した。

- ヒス放射の波動成長について:

Particle-in-Cell 法に基づき、1 次元宇宙プラズマ粒子シミュレータ KEMPO1 を用いて解析を行った。シミュレーションでは、cold electron を 16,777,216 個、hot electron を 33,554,432 個設定し、hot electron の温度異方性や背景磁場の勾配がヒス放射の成長率に与える影響を調査した。計算には大量の粒子を扱うため、MPI を用いた並列計算を AKDK の System A 上で実施した。

^[1] He, J., Xia, Z., & Chen, L. (2023). Statistical properties of lower band rising tone chorus waves. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 128, e2023JA031528. <https://doi.org/10.1029/2023JA031528>

研究成果 (Accomplishments) :

昨年度までの研究ではグリーン関数の畳み込み積分を用いて電子分布を追跡するため、単一の波モデルのみが解かれていた。本年度の研究では、MLT 分布に基づいて内部磁気圏内の複数のコーラス波モデルを組み込めるプログラムを開発した。最大の課題は、MLT の異なる領域でコーラス波動の持続時間が異なることである。従来、単一の波モデルを扱う場合、時間スケールの単位はターゲットとする波動の持続時間であり、電子分布の時間発展はその持続時間の整数倍として積分されていた。しかし、複数の波モデルでは波動間の時間差を調整する必要がある。新しい畳み込み積分プログラムでは、特定の波動の範囲や位置を調整できるだけでなく、それに応じた時間スケールの補正も可能である。初歩的な結果として、異なる波動振幅と周波数変化率を考慮した 4 種類のグリーン関数セットを観測データに基づいて作った (Fig.1 は 1 つのコーラス波モデルである)。さらに、異なる MLT 領域に 2 つのコーラス波モデルを適用し、畳み込み積分を実行することで、電子分布の長期変動を表現した。その結果、コーラス波動と相互作用する電子分布のより現実的なシミュレーションが可能であることが示された。

ヒス放射の PIC シミュレーションについて、背景磁場の勾配およびスーパー粒子数がヒス放射の非線形成長に与える影響を調査し、波の振幅成長を最大化する最適な磁場勾配が存在することを確認した。一方、背景磁場が均一な場合、が最も小さくなることも明らかになった (Fig.2)。さらに、均一な背景磁場におけるヒス放射の非線形成長に焦点を当て、背景磁場にとって平行と垂直方向の熱速度を変化させることで初期の温度異方性を調整し、温度異方性および温度等方性における理論的な線形成長率と非線形成長率を計算した。その結果、背景磁場が均一で温度等方性の場合でも、小さいながらも波が生成されることが示されたが、その振幅は非線形成長によると確認された。

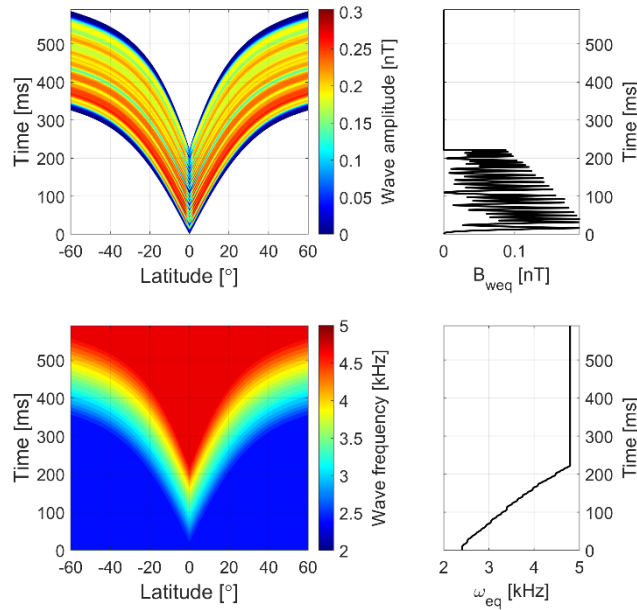


Fig.1 観測データに基づき数値グリーン関数の波動モデルの例

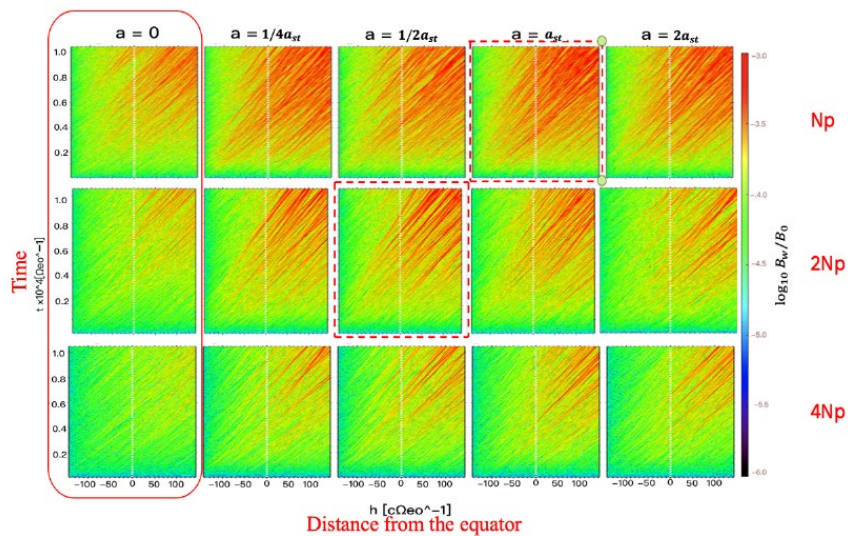


Fig.2 異なる背景磁場勾配およびスーパー粒子数におけるヒス振幅の関係図

公表状況 (Publications) :

(口頭)

1. Hsieh, Y.-K., & Omura, Y., Variations of energetic electrons via nonlinear interactions with lower-band chorus emissions around the Earth's outer radiation belt, Japan Geoscience Union (JpGU) Meeting 2024, Chiba, Japan, May 2024.
2. Hsieh, Y.-K., Omura, Y., Acceleration and Loss Processes of Radiation Belt Electrons Via Nonlinear Interactions with Whistler-mode Chorus Emissions, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 21st Annual Meeting, Pyeongchang, Korea, Jun 2024.
3. Hsieh, Y.-K., Omura, Y., & Katoh, Y., Green's function method on dynamics of radiation belt electrons via nonlinear interactions with chorus emissions and EMIC waves. COSPAR 2024, Busan, Korea, Jul 2024.
4. 謝 怡凱, 大村 善治, Energetic electron dynamics caused by whistler-mode chorus emissions in the Earth's inner magnetosphere, 第 156 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 立川, 2024 年 11 月
5. 殷 振興, 大村 善治, 謝 怡凱, Parametric dependence of nonlinear wave growth of whistler-mode hiss emissions, 第 156 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 立川, 2024 年 11 月