

電子ハイブリッドコードによるホイッスラーモード・ コーラス放射励起過程での波動粒子相互作用の計算機実験

Electron hybrid simulation of wave-particle interactions in the generation process of whistler-mode chorus emissions

研究代表者：加藤 雄人（東北大学大学院理学研究科）
yuto.katoh@tohoku.ac.jp

研究分担者：大村 善治（京都大学生存圏研究所）
omura@rish.kyoto-u.ac.jp

担当：計算結果の理論検討

北原 理弘（名古屋大学宇宙地球環境研究所）

kitahara.masahiro@isee.nagoya-u.ac.jp

担当：計算機実験の実施、計算結果の理論検討

齋藤 幸碩（東北大学大学院理学研究科）

koseki.saito@stpp.gp.tohoku.ac.jp

担当：計算機実験の実施、計算結果の理論検討

磯野 航（東北大学大学院理学研究科）

ko_isono@stpp.gp.tohoku.ac.jp

担当：計算機実験の実施、計算結果の理論検討

研究目的 (Research Objective):

ホイッスラーモード・コーラス放射は、地球内部磁気圏の真夜中から朝側の領域で観測されるコヒーレントなプラズマ波動である。周波数が時間的に変化する特徴を持つコーラス放射の観測・理論研究は半世紀以上の歴史があり、高緯度領域の地上観測局での観測と、70年代から現在に至るまでに人工飛行体により得られた直接観測結果に基づく研究によって、その特徴が明らかにされてきた。90年代の後半には、地球放射線帯外帯における相対論的高エネルギー電子のフラックス変動に対して、コーラス放射による加速過程およびピッチ角散乱過程が重要な役割を果たすことが指摘され、コーラス放射に関わる物理過程は宇宙天気研究において特に重要な研究課題として認識されている。2016年12月に打ち上げられたジオスペース探査衛星 ERG(あらせ)では、コーラス放射と相対論的高エネルギー電子との相互作用が主要な観測対象の一つとして挙げられている。

コーラス放射の生成機構において、非一様磁場中でのサイクロトロン共鳴を基本とする非線形の波動粒子相互作用が本質的に重要である。本研究課題では、独自に開発を進めている電子ハイブリッドコードを用いた自己無撞着な計算機実験によりコーラス放射の生成過程を再現し、電子の速度分布に与えた温度異方性に起因した不安定による線形成長段階から、非線形波動粒子相互作用によるコーラス放射の生成に至るまでのプロセス全容の解明を目指して研究を進めている。また、計算結果の解釈には、テスト粒子解析を併用することで、発生したコーラス放射と相対論的高エネルギー電子との相互作用素過程を究明する。

計算手法 (Computational Aspects):

本研究で用いる電子ハイブリッドコードは、プラズマ波動伝搬の媒質となる背景電子を流体、高エネルギーの電子を粒子として取り扱う[e.g., *Katoh and Omura*, JGR 2004, 2006]。モデル中では背景のコールド電子と、keV から MeV オーダーのエネルギーを持つ高エネルギー電子の 2 粒子種を考慮する。流体として扱う背景電子の数密度は空間一様と仮定し、粒子として扱う高エネルギー電子の磁気赤道での速度分布としては、温度異方性を持ったロスコーン分布を仮定する。また、電場の静電成分は解かず、背景磁場に垂直方向成分の電磁場のみを解き進める。

テスト粒子解析には、*Kitahara and Katoh* (JGR 2019)で開発されたコードを用いる。*Kitahara and Katoh* (JGR 2019)では、コヒーレントなホイッスラーモード波動によりピッチ角の小さな電子が捕捉され、ピッチ角を大きく変化させる特異なピッチ角散乱過程「Anomalous scattering」について明らかとした。本テスト粒子解析コードは 2020 年度の共同利用研究により MPI を実装することで並列化され、広いエネルギー・ピッチ角範囲での非線形ピッチ角散乱過程の調査が可能となっている。

研究成果 (Accomplishments) :

電子ハイブリッドコードを用いた計算機実験では、ダイポール磁場中の一本の磁力線に沿ってシミュレーション空間を設定し、磁力線上で背景磁場強度の空間勾配をモデル化して粒子の運動方程式に取り入れることにより、磁力線沿いに運動する高エネルギー電子のミラー運動を再現する。シミュレーション空間は磁気赤道を中心とする1次元とする。高エネルギー電子の初期速度分布として与える分布関数の温度異方性および高エネルギー電子の数密度、ならびに背景磁場強度の空間勾配を様々に変化させて、コーラス放射の発生条件に関するサーベイ計算を実施した。初期速度分布関数に対する依存性に関して、温度異方性が 4 から 9 の範囲までは *Katoh et al.* (JGR 2018)で報告済みであり、温度異方性のサーベイ範囲をさらに広げて調査を継続する。

テスト粒子解析に関しては、コーラス放射による高エネルギー電子のピッチ角散乱過程に関わる解析を、2020 年度の共同利用研究から継続して実施した。合計約 1700 万個のテスト粒子を用いて、初期エネルギーを 10 keV から 80 keV までの範囲で 1 keV 刻みで与え、初期ピッチ角は磁気赤道においてロスコーン角 (5.6 度) から 90 度の範囲に対応するように設定する。コヒーレントなホイッスラーモード波動を磁気赤道で発生させ、磁力線に沿って伝搬する様相を再現、伝搬する波束とのサイクロトロン共鳴により高エネルギー電子のエネルギーとピッチ角に対して及ぼされる影響を定量的に評価した。*Kitahara and Katoh* (2019)により示された Anomalous trapping 過程は低ピッチ角電子がほぼ全てロスコーンから離れる方向にピッチ角を変化させる過程であり、観測結果をどのように理解するかが課題とされていた。本研究による解析により、Anomalous trapping は確かに発生する一方で、それを補うに十分なほど Resonant scattering によりピッチ角が散乱されロスコーン内に落ち込む電子が存在することが明らかとされ、観測結果に対する一つの説明を与える結果が得られた。今後、自己無撞着なシミュレーション結果ならびに衛星観測結果の解析による実証を計画している。

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. Zhang, X.-J., A. G. Demekhov, Y. Katoh, D. Nunn, X. Tao, D. Mourenas, Y. Omura, A. V. Artemyev, V. Angelopoulos, Fine structure of chorus wave packets: Comparison between observations and wave generation models, *J. Geophys. Res.: Space Physics*, 126, e2021JA029330, doi:10.1029/2021JA029330, 2021.

(口頭)

1. Ishizawa, G., Y. Katoh, M. Kitahara, Evaluation of nonlinear effects in the pitch angle scattering process of energetic electrons into the loss cone by coherent whistler-mode waves, *URSI GASS 2021, Rome and online*, 28 August - 4 September 2021.
2. Katoh, Y., H. Kojima, S. Kurita, J. Miki, M. Hikishima, M. Kitahara, Y. Miyoshi, Y. Kasahara, S. Kasahara, S. Matsuda, T. Takashima, K. Asamura, T. Mitani, N. Higashio, A. Matsuoka, M. Ozaki, S. Yagitani, S. Yokota, and I. Shinohara, Wave-Particle Interaction Analyzer for the direct measurement of the energy exchange through wave-particle interactions in the magnetosphere, *URSI GASS 2021, Rome and online*, 28 August - 4 September 2021. [invited]
3. 齋藤幸碩, 加藤雄人, 北原理弘, 川面洋平, 木村智樹, 熊本篤志, 磁気赤道周辺での kinetic Alfvén wave による電子加速過程に関するテスト粒子計算, 第150回地球電磁気・地球惑星圏学会 総会および講演会, オンライン, 11月1日-4日, 2021年.
4. 磯野航, 加藤雄人, 川面洋平, 熊本篤志, 地球内部磁気圏における Toroidal mode ULF wave による高エネルギー電子のフラックス増強のシミュレーション研究, 第150回地球電磁気・地球惑星圏学会 総会および講演会, オンライン, 11月1日-4日, 2021年.