

# 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（京大生生存圏研究所）  
omura@rish.kyoto-u.ac.jp

担当：計算結果の理論検討

北原 理弘（東北大学大学院理学研究科）

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、人工飛行体による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。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、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。コーラス放射によりピッチ角が散乱された電子は大気へと降下して、脈動オーロラを発生させることが明らかとなっている。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に取り組んでいる。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。本報告書では、大気に降下した電子と中性大気との衝突過程に関する研究成果について述べる。

## 計算手法 (Computational Aspects):

コーラス放射によるピッチ角散乱を受けることにより、極域電離圏に降り込んできた電子は大気と衝突することでそのエネルギーと運動方向を変化させて、一部は電離圏高度での電子密度上昇に寄与して消失し、消失を免れた一部は磁気圏へと運動していく。高エネルギー電子と大気との衝突過程については長い研究の歴史があるが、極域電磁気圏における磁場の非一様性に起因するミラー力の効果は、積極的には取り入れられてこなかった。これは、ミラー力による運動方向の変化が無視できるほどに、大気との衝突が高い頻度で生じることによる。一方で、衝突断面積のエネルギー依存性に起因して、特に大気との衝突頻度が相対的に小さくなる相対論的な高エネルギー電子の運動に対しては、ミラー力の影響が無視できないことが近年指摘されてきた [例えば Marshall and Bortnik, JGR 2018]。そこで本研究では、個々の荷電粒子について運動方程式を解くテスト粒子解析を、非一様磁場によるミラー力と、大気との衝突過程を Monte Carlo 法により取り入れて実施して、極域電離圏における電子と大気との衝突率の高度分布に対するミラー力の影響を考察した。

シミュレーション空間は  $L$  値で 6.45 に相当する磁力線に沿って、高度 400 km から 40 km 高度までを計算領域として設定した。背景磁場強度の高度変化はダイポール磁場モデルに従うとして、電子の運動方程式にミラー力を考慮する項を電子ハイブリッドコードで用いている手法 [Kato and Omura, JGR 2016] に基づいて導入した。

高度 400 km における初期エネルギーと初期ピッチ角を設定して、1 万個の電子の運動と大気との衝突過程を計算した。初期エネルギーを 1 keV から 1 MeV、初期ピッチ角を 0 度から 90 度までの範囲で変化させてそれぞれ計算を行い、大気と電子との衝突率の高度分布を求めた。

## 研究成果 (Accomplishments) :

計算結果を図 1 に示す。降下電子と大気との衝突率の高度分布を、エネルギーごとに色を変えて太い実線で示している。比較のため、磁力線に平行に降り込んできた場合 (点線) や、ミラー力を含めずに 70 度の角度で降り込んできた場合 (細い実線) の計算結果もそれぞれ示している。計算結果から、特に 100 keV 以上の電子による衝突率に対してミラー力の影響が顕著であり、100 km 以下における衝突率が 1~2 桁低下することを示している。さらに、400 keV と 1 MeV の降下電子を設定した計算結果では、400 km 高度で 70 度のピッチ角を持つ電子のミラー点に相当する高度 130 km 付近に衝突率の極大が現れることも明らかとなった。この衝突率の極大は、電子のエネルギーが高い場合には中性粒子との衝突断面積が小さくなる一方で、ピッチ角が 90 度近くとなるミラー点付近では滞留時間が長くなることにより、衝突率が局所的に大きくなることで説明できる。以上の研究成果は、極域電離圏に降下する電子と大気との衝突過程において、特にロスコーン角に近いピッチ角を持つ電子に対してミラー力の効果が顕著であることを明らかにするものであり、相対論的なエネルギーを持つ降下電子を低高度で観測する際には、ピッチ角計測が重要となることを示唆している。

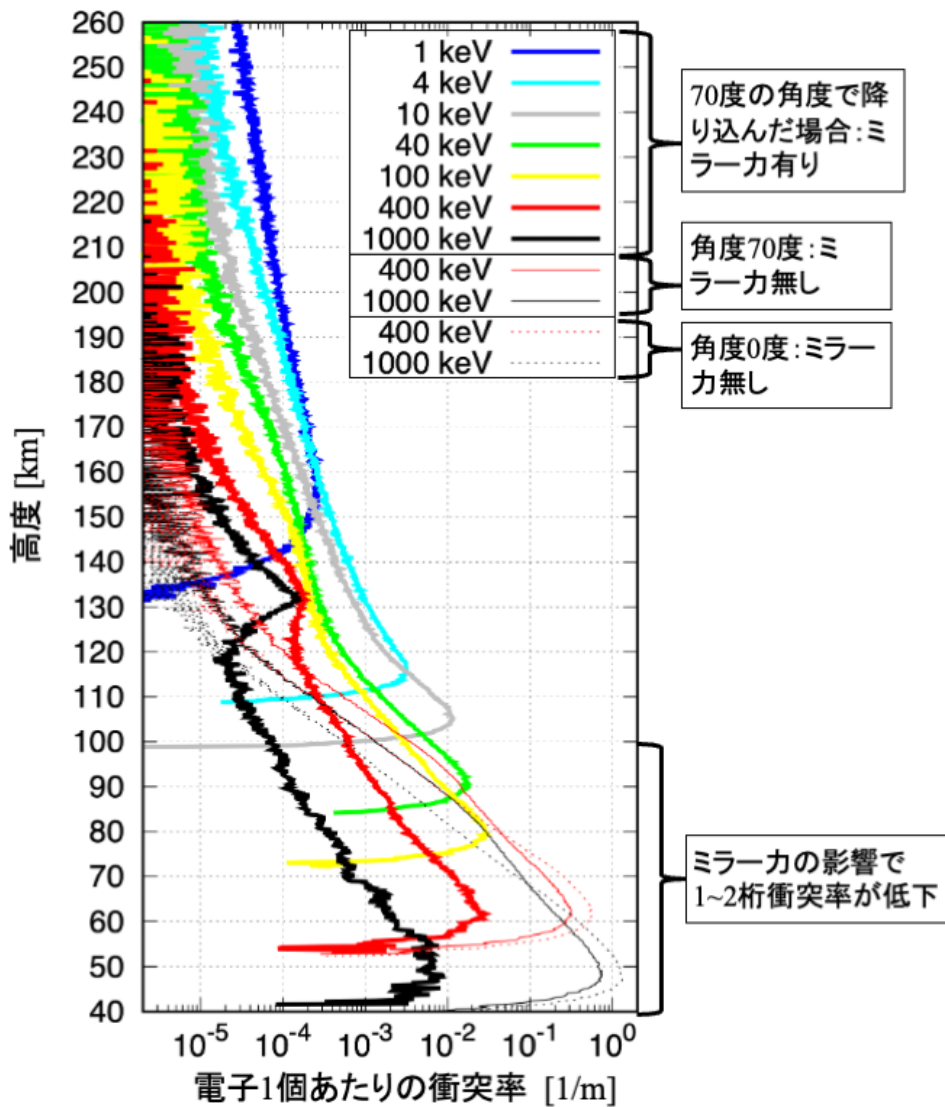


図1 降下電子と大気との衝突率の高度分布の計算結果

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. Katoh, Y., P. S. Rosendahl, Y. Ogawa, Y. Hiraki, and H. Tadokoro, Effect of the mirror force on the collision rate due to energetic electron precipitation: Monte Carlo simulations. *Earth Planets Space*, 75, 117, doi:10.1186/s40623-023-01871-y, 2023.
2. Saito, K., Y. Katoh, Y. Kawazura, M. Kitahara, T. Kimura, and A. Kumamoto, Plasma distribution solver: A model for field-aligned plasma profiles based on spatial variation of velocity distribution functions, *J. Geophys. Res.: Space Physics*, 128, e2023JA031660, doi:10.1029/2023JA031660, 2023.

(口頭)

1. Katoh, Y., P. S. Rosendahl, Y. Ogawa, Y. Hiraki, and H. Tadokoro, Effect of the mirror force on the collision rate due to relativistic electron precipitation, AGU Fall Meeting

2023, San Francisco, 11-15 December 2023.

2. Saito, K., Y. Katoh, Y. Kawazura, and A. Kumamoto, Theory and simulation of the nonlinear motion of resonant electrons trapped by kinetic Alfvén waves in the magnetosphere, AGU Fall Meeting 2023, San Francisco, 11-15 December 2023.
3. 加藤雄人, 大村善治, 笠原慧, 篠原育, 寺本万里子, PCUBE: Probing, controlling, and understanding of radiation belt environments, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2023 年秋季年会, 2023 年 9 月.