

# 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（東北大学大学院理学研究科）**

masahiro.kitahara@tohoku.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、人工飛翔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、本研究課題により明らかとした、背景磁場強度の空間勾配や高エネルギー電子の分布関数の変動がコーラス放射発生過程に及ぼす大きな影響に着想を得て、地磁気脈動(ULF 波動)や磁気流体波(分散性 Alfvén 波)がコーラス放射発生過程に

及ぼす影響について考察している。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、分散性 Alfvén 波による数百 eV-keV 電子の捕捉過程と非線形効果に関する研究成果 (Saito et al., 2025) について述べる。

### 計算手法 (Computational Aspects):

分散性 Alfvén 波は沿磁力線方向に電場成分をもつことにより keV 帯電子の加速過程を引き起こすことが知られている。磁気圏赤道領域では背景磁場に対して垂直方向の波長がイオンラーマー半径程度となる運動論的 Alfvén 波 (kinetic Alfvén waves: KAWs) の性質を示し、keV 帯電子の速度分布関数に大きな影響を及ぼすことが明らかとなっている。本研究では磁気赤道から高緯度方向へと伝播する KAWs による数 eV-keV 帯のエネルギーを持つ電子の捕捉過程について、案内中心近似を用いた運動方程式により個々の電子の運動を解くテスト粒子解析を行なうことで調べた。電子の運動方程式は 4 次の Runge-Kutta 法により解き進めた。KAWs の波形は Skekochihin et al. (2009) による分散関係式に基づいて与えた。背景磁場については電子ハイブリッドコードで用いる手法 [Katoh and Omura, JGR 2016] を参考に、Katoh and Omura (2006) で用いられた円筒座標系で表すモデルに基づいて導入した。計算の初期条件としては、地球磁気圏の  $L=9$  における磁力線に沿った背景磁場強度の空間勾配を想定して、磁気赤道において  $1 \text{ mV/m}$  の沿磁力線方向の電場成分を持つ  $0.15 \text{ Hz}$  の KAWs が磁力線に沿って伝播する状況を仮定した。さらに本研究では、KAWs と Landau 型の共鳴条件を満たす電子の運動について、2次共鳴理論に基づいた位相空間における共鳴電子の運動方程式を導出した。共鳴電子の位相空間における軌道の特徴付ける不均一性因子  $S$  を定式化し、 $S$  の値を定量的に評価することにより、計算結果の考察に用いた。

### 研究成果 (Accomplishments) :

計算結果の一例を図 1 に示す。初期エネルギー  $100 \text{ eV}$ 、初期ピッチ角  $10$  度の電子を磁気緯度  $1$  度を初期位置として設定し、磁力線に沿ってミラー運動する過程での KAWs による影響を計算した。その結果、KAWs との Landau 共鳴により捕捉される様相 (過程1) と、 $t \sim 8 \text{ sec}$  に磁気緯度  $60$  度付近のミラー点近傍で  $S$  の値が  $1$  を超えて KAWs による捕捉から逃れて磁気赤道方向にミラー運動する様相 (過程2;  $8 \text{ sec} < t < 10 \text{ sec}$ )、その後赤道方向へと運動する電子が後続の KAWs により継続的な加速を受ける様相 (過程3) がそれぞれ表されている。本研究では図 1 に示される計算を、様々な初期エネルギーについて行ない、その結果から、KAWs による典型的な電子加速過程は上記の過程1～3を経ることにより進行することを明らかとした。さらに本研究では、単色の KAWs による加速過程を経た電子が広いエネルギースペクトルを示すことを明らかとした。これらの結果は磁気圏における KAWs による高エネルギー電子生成過程の解明に重要な示唆を与える成果となった。詳細については Saito et al. (2025) を参照されたい。

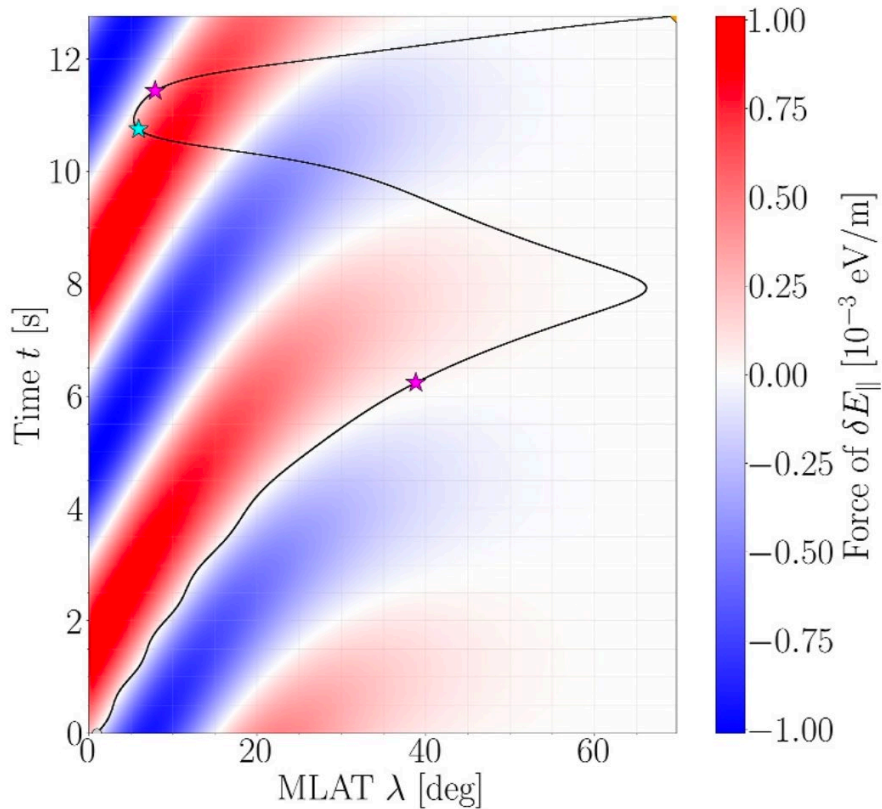


Fig.1 KAWs との Landau 共鳴により捕捉された電子の軌道 (Saito et al., 2025)。横軸は磁気緯度、縦軸は経過時間を示し、波動電場成分が電子に及ぼす力を色で示す。

## 公表状況 (Publications) :

### (論文)

1. Saito, K., Y. Katoh, Y. Kawazura, and A. Kumamoto, Nonlinear dynamics and auroral acceleration processes of electrons driven by kinetic Alfvén waves in the magnetosphere, J. Geophys. Res.: Space Physics, 130, e2024JA033469, doi:10.1029/2024JA033469, 2024.
2. Tachi, K. and Y. Katoh, Formation of a magnetic duct by the compressional component of ULF oscillation: a ray tracing study of whistler-mode wave propagation, Earth Planets Space, 76, 166, doi:10.1186/s40623-024-02109-1, 2024

### (口頭)

1. Katoh, Y., P. S. Rosendahl, Y. Ogawa, Y. Hiraki, and H. Tadokoro, Role of the mirror force on the collision rate due to relativistic electron precipitation, EGU General Assembly, Vienna, 14-19 April, 2024.
2. Tachi, K., and Y. Katoh, Propagation of whistler-mode waves in the magnetic duct caused by the compressional component of ULF wave oscillation, EGU General Assembly, Vienna, 14-19 April, 2024.
3. Katoh, Y., Properties of the generation and propagation of whistler-mode chorus emissions

- in the Earth's inner magnetosphere, ISSS-15 & IPELS-16, Garching, Germany, 1-9 August, 2024. (Invited)
4. Saito, K., Y. Katoh, Y. Kawazura, and A. Kumamoto, Test particle simulation for electrons accelerated by kinetic Alfvén waves and precipitating into the ionosphere, ISSS-15 & IPELS-16, Garching, Germany, 1-9 August, 2024.
  5. Isono, K., A. Yoshikawa, Y. Katoh, Y. Kawazura, and A. Kumamoto, Curvilinear magnetic fields and ULF waves: A local frame approach to linear MHD waves analysis, ISSS-15 & IPELS-16, Garching, Germany, 1-9 August, 2024.
  6. Katoh, Y., G. Ishizawa, and M. Kitahara, Evaluation of the nonlinear pitch angle scattering of energetic electrons by coherent whistler-mode waves, AOGS 2024, Pyeongchang, Korea, 23-28 June 2024. (Invited)
  7. Katoh, Y., Y. Omura, S. Kasahara, I. Shinohara, M. Teramoto, and T. Mitani, PCUBE: a CubeSat project for probing, controlling, and understanding of radiation belt environments, AOGS 2024, Pyeongchang, Korea, 23-28 June 2024. (Invited)
  8. Katoh, Y., K. Nagaoka, S. Kubo, Y. Omura, Y. Hsieh, and S. Okada, Control of the Phase Space Distribution of Relativistic Particles by Electromagnetic Waves: Laboratory/Numerical Experiment and its Application, AGU Fall Meeting 2024, Washington D. C., 9-13 December 2024.
  9. Isono, K., A. Yoshikawa, Y. Katoh, Y. Kawazura, and A. Kumamoto, Local frame approach to analyze the structure of magnetic field lines in the Earth's magnetosphere, AGU Fall Meeting 2024, Washington D. C., 9-13 December 2024.
  10. Saito, K., Y. Katoh, Y. Kawazura, A. Kumamoto, Theoretical and numerical study of the nonlinear motion of electrons accelerated by kinetic Alfvén waves in the magnetosphere, ITER International School 2024, 9-13 December 2024.
  11. 城 剛希, 加藤雄人, Raytracing study of whistler-mode waves in the magnetic duct formed by the compressional component of ULF waves, JpGU 2024, 千葉, 26-31 May 2024.
  12. 齋藤 幸碩、加藤 雄人、川面 洋平、熊本 篤志, Kinetic Alfvén wave によるオーロラ電子加速過程の理論・数値的考察, JpGU 2024, 千葉, 26-31 May 2024.
  13. 齋藤 幸碩, 加藤 雄人, 川面 洋平, 熊本 篤志, 地球磁気圏における kinetic Alfvén wave による効率的な電子加速過程の理論・数値的検討, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2024 年秋季年会, 立川, 23-27 November 2024.