

地球ダイポール磁場中の非線形波動粒子相互作用の計算機実験

Computer simulations of nonlinear wave-particle interactions
in the Earth's dipole magnetic field

研究代表者：大村善治 (京都大学・生存圏研究所)
omura@rishi.kyoto-u.ac.jp

研究分担者：WANG Xueyi (京都大学・生存圏研究所)
担当：ダイポール座標系における計算機実験の実行
殷 振興 (京都大学・工学研究科)
担当：1次元電磁粒子コードによるヒスの計算機実験

研究目的 (Research Objective):

地球磁気圏ではコーラス放射と呼ばれるホイッスラーモード波が多く観測されている。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るが、この周波数変動のためにサイクロトロン共鳴する電子の一部は効率よく加速されて放射線帯電子フラックスの変動に寄与している。赤道で生成されたライジングトーンのコーラス放射は赤道から高緯度に向かって伝搬する過程においてさらに、外部磁場の勾配による非線形成長機構が働くと同時に、伝搬角度が平行方向から次第に外れて斜め方向に波数ベクトルを向けながら伝搬する。この平行方向に近い準斜め伝搬においては、 $1/2$ サイクロトロン周波数においてホイッスラーモード波の群速度と位相速度が等しくなり、平行方向の電場とランダウ共鳴する電子が波のパケットと有効に相互作用し、外部磁場の勾配の効果により電子は加速され、そのエネルギーの分だけ波が減衰することが理論的に予測されている。以上のコーラス波動励起過程および高エネルギー電子の加速過程に関わる非線形波動粒子相互作用を大規模計算機実験で再現し、その理論的解析を行う。

計算手法 (Computational Aspects):

1次元電磁粒子コード：標準的なFDTD法でマクスウェル電磁界方程式を、多数の粒子の相対論的運動方程式を解くことで得られる電流密度を使って解き進める。地球のダイポール磁場によって捕捉された高エネルギー電子を想定し、運動方程式には外部磁場の不均一性によるミラー力を含める。この電子に温度異方性を与えることにより、地球の赤道面付近で外部磁場に沿って平行方向に伝搬するホイッスラーモード波が発生し、その顕著な周波数変動を伴う非線形発展(コーラス、ヒス)を追跡する。この非線形現象は有限振幅のトリガー波によっても励起することができる。磁気赤道に波の振動数に合わせた電流源を注入することにより、コーラスやヒスを再現し、その詳細な励起メカニズムを解析する。

研究成果（Accomplishments）：

これまでホイッスラーモード・コーラス放射およびヒス放射の周波数変動を駆動する機構はダイポール磁場であると考えられてきたが、外部磁場の勾配がない場合においても非線形成長は起こるのかという問題を明らかにするために均一磁場モデルを使って波動の成長の有無を確認した。

シミュレーションモデルの中央に一定周波数で外部電流を励振することによって、トリガー波の注入を行った。なめらかに周波数が上昇するライジングトーンおよび周波数が下降するフォーリングトーンが一樣磁場モデルにおいても発生することを電磁粒子シミュレーションによって再現させることに成功した（図1）。これらの周波数変動は高エネルギー電子がホイッスラーモード波とのサイクロトロン二次共鳴により位相捕捉されて共鳴電流が発生することによって起こっており、外部磁場の勾配は赤道付近の周波数変動によって不安定になった波束が下流へと伝搬する過程でさらに大きく成長することを助ける役割を果たしていることが判明した。

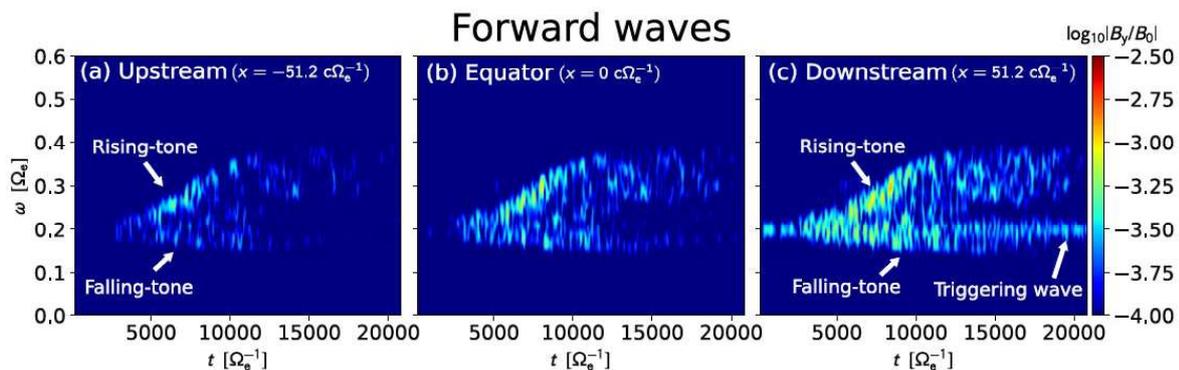


図1 一樣磁場中で発生したライジングトーン放射とフォーリングトーン放射

このような非線形波動粒子相互作用による波動の成長が、異なる周波数で多くのホイッスラーモード波束が同時に発生するプラズマ圏ヒス放射の生成過程においても起こっていることを、一樣磁場モデルの電磁粒子シミュレーションによって検証した（図2）。コーラス放射と同様に、周波数が上昇と下降のパターンがあり、それぞれ共鳴電子の密度の減少する場合と増加する場合に対応しており、波の磁界成分に平行な共鳴電流の符号が変化している。周波数変動が起こることによって波の電界成分に平行な共鳴電流が流れ、それによって波は成長している。この成長率を計算したところ、線形成長率よりもはるかに大きい非線形成長率によって波の振幅が増大していることを確認した。

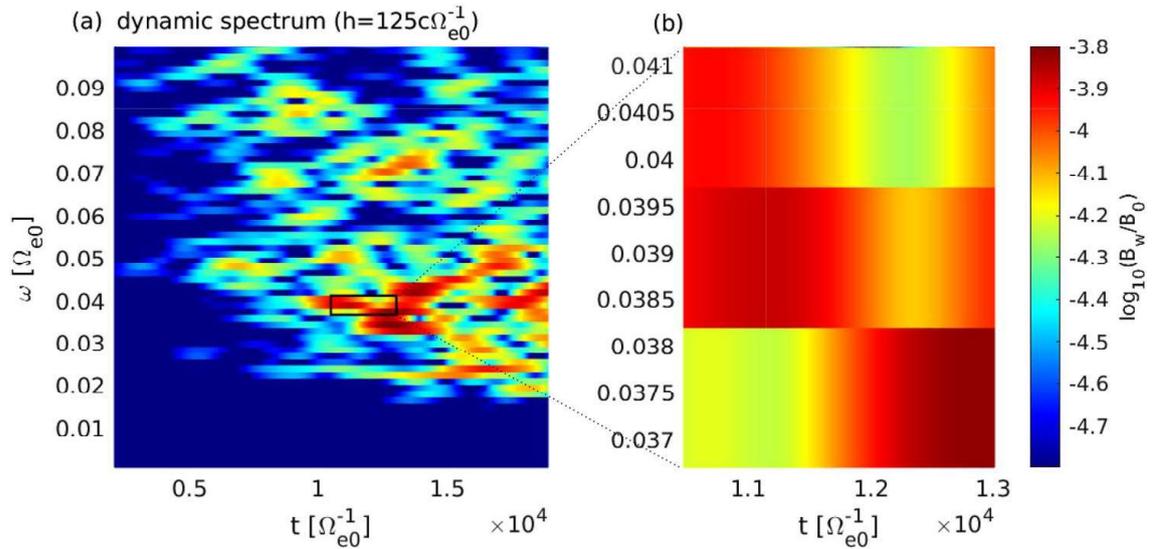


図2 電磁粒子コードで再現されたホイッスラーモード・ヒス放射（左）
ヒスを構成している波束の微細構造（右）

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. T. Nogi, and Y. Omura, Nonlinear signatures of VLF-triggered emissions: A simulation study. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, e2021JA029826, 2022.
2. Y. Fujiwara, T. Nogi, and Y. Omura, Nonlinear triggering process of whistler-mode emissions in a homogeneous magnetic field, *Earth, Planets and Space* 74, 95, 2022.
3. Y. Liu, and Y. Omura, Nonlinear wave Growth of whistler-mode hiss emissions in a uniform magnetic field, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, doi: 10.1029/2022JA030428, 2022
4. M. Tobita, and Y. Omura, Scattering of energetic electrons through nonlinear cyclotron resonance with coherent whistler-mode hiss emissions, *Phys. Plasmas* 29, 112901, doi: 10.1063/5.0106004, 2022.
5. Y. Fujiwara, Y. Omura, and T. Nogi (2023), Triggering of whistler-mode rising and falling tone emissions in a homogeneous magnetic field, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 128, e2022JA030967.
6. T. Nogi, and Y. Omura (2023), Upstream shift of generation region of whistler-mode rising-tone emissions in the magnetosphere, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 128, e2022JA031024.

(口頭)

1. Y. Omura, Y. Fujiwara, and T. Nogi, Whistler-mode Triggered Emissions in a Homogeneous Magnetic Field, AAPPS-DPP 2021, October, 2022.
2. T. Nogi and Y. Omura, Particle Simulation of Whistler-mode Hiss Emissions in a Homogeneous Magnetic Field, AOGS 2021, August, 2022.
3. Y. Omura, Y. Liu, Y. Fujiwara, and T. Nogi, Nonlinear Wave Growth Process of Whistler-mode Hiss and Chorus Emissions in the Magnetosphere, AGU Fall Meeting 2022, December, 2022.
4. 大村善治, 藤原悠哉, 野儀武志, 一様磁化プラズマ中でのホイッスラーモード・トリガー
ドエミッション, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 相模原市, 2022年11月.