

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： 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ホイッスラーモード波の計算機実験

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法でマッ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。シミュレーションモデルの中央に磁気赤道を設定し、そこで一定周波数・一定振幅で外部電流を励振することによりコーヒーレントな電磁界をトリガード波として注入し、そこから非線形発展するコーラス放射を再現し、その周波数変動、非線形成長の詳細な励起メカニズムを解析する。

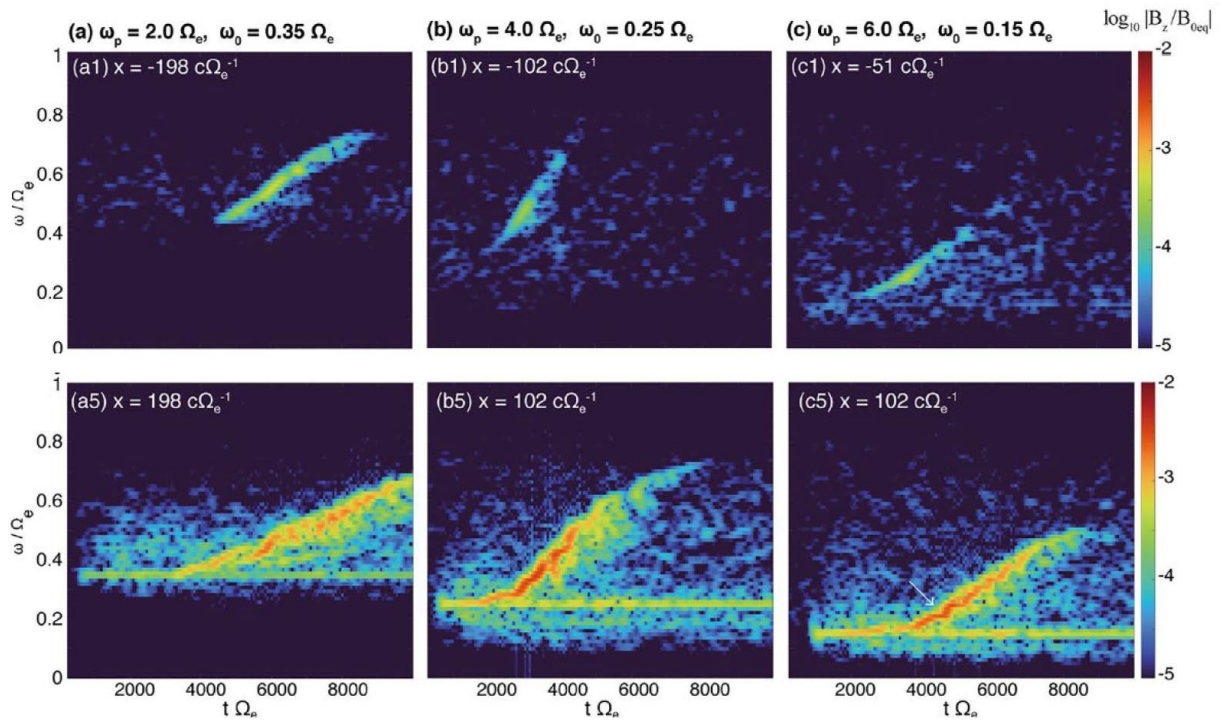


図1 磁気赤道を挟んで上流域（上）と下流域（下）の定点で観測したダイナミックスペクトル

研究成果（Accomplishments）：

ホイッスラーモードコーラス放射は高エネルギー電子の温度異方性によって熱雑音の一部が成長し、振幅が大きくなるにつれてコーヒーレントな波となってその非線形効果によって周波数変動を伴いながら、より大きく成長してゆく。熱雑音からの成長過程にはランダム性があり同じパラメータでシミュレーションを実行しても異なる周波数特性を示す波動が現れる。特に非線形成長過程においては、初期ノイズの特性に依存して結果が大きく異なる。そこで、熱雑音によるランダム性を出来る限り排除するために非線形成長の種となるコーヒーレントなトリガー波をシミュレーションモデルの中央から注入するトリガード放射の計算機実験を行った。

ホイッスラーモード波の分散関係は、コールドプラズマの電子密度によって大きく変化するため、プラズマ周波数(f_{pe})とサイクロトロン周波数(f_{ce})の比を2, 4, 6と変化させた3つのケースについてトリガー波の周波数依存性を調べた。広い周波数範囲(0.05 ~ 0.6 f_{ce})で0.05 f_{ce} 間隔でトリガー波の周波数を変化させてシミュレーションを実行したところ、限られた周波数においてのみコーラス放射が現れた。図1に赤道域を挟んで波の伝搬方向とは逆の上流側（図1上）と伝搬方向の下流側（図1下）に想定した定点で観測したダイナミックスペクトルを示す。コーラスは、トリガー波

が存在しない上流域で形成されているのがわかる。これは、磁力線に沿って波の伝搬とは反対方向に進む共鳴電子が形成する共鳴電流によって励起されている。この励起された波束は外部磁場の勾配が無視できる赤道面付近では、波の磁界方向に平行な共鳴電流が形成されてプラズマの分散関係が変化して引き起こされる周波数変動が起こる。この周波数変動により波の電磁界によって形成される非線形波動ポテンシャルが波の磁界成分に対して非対称になることから、波の電界成分に反平行な共鳴電流が現れて波動が成長する。

この非線形波動成長過程は、単一のコーヒーレントな波と共鳴する電子の非線形ダイナミクスによるものであり、周波数が少し異なるトリガー波が共存する下流領域では共鳴電子が感じる電磁界はインコーヒーレントとなり共鳴電流が乱されて非線形成長が妨げられる。トリガー波よりも上流側にコーヒーレントな波束が新たに形成される過程は非線形成長にとって本質的に重要な役割を果たしている。この波動発生領域の速度は電子の共鳴速度 V_R と波束の群速度 V_g の和で定義されるソース速度 V_s ($= V_R + V_g$) に一致するとき、滑らかに周波数が上昇しながら波束の振幅が大きくなり、構造的に安定した波束が形成される。1つのコーラス放射はサブパッケージと呼ばれる複数の波束から形成されており、サブパッケージの大きさは、波動の発生領域の移動速度と V_s との関係によって決まることが明らかになった。(Nogi and Omura, 2023). 図2にコーラス波動の振幅(図2上)と周波数(図2下)の時間空間の発展を図1のプラズマ密度の異なる3つのケースに対応させて示す。 $f_{pe} = 2 f_{ce}$ の場合には、波動の生成領域の速度の絶対値が V_s よりも大きく、急激な波動成長と減衰が繰り返されるため、周波数が上昇を伴うサブパッケージが多く作られる。 $f_{pe} = 4 f_{ce}$ の場合には、生成領域の速度と V_s が一致しており、振幅の成長と周波数の上昇が緩やかに起こる大きな波束が生成されている。この結果は Van Allen Probes 衛星観測においても検証することができた(Foster et al., 2024)。また $f_{pe} = 6 f_{ce}$ の場合には共鳴電流の生成と波束の形成速度が遅くなり生成領域が下流側に流される傾向が現れる。

周波数変動を伴う波束の生成は一様磁場モデルでも確認されている(Fujiwara et al., 2023)。外部磁場の勾配は波束が下流へ伝搬する過程において次第に大きくなるが、この外部磁場の勾配の変化は振幅の変化とあいまって、赤道付近の上流側で形成されたライジングトーンのコーラス放射の波束が下流へと伝搬する過程で、さらにその振幅を大きく成長させる役割を演じている。

以上、主として昨年度実施したコーラス波動の生成過程に関するシミュレーション結果について考察を加えた論文(Nogi and Omura, 2023)の内容を紹介したが、本年度は、コーラスを形成しているサブパッケージが同時に複数の異なる周波数で発生するヒス放射のシミュレーションのパラメータ依存性を調べる研究($f_{pe} \gg f_{ce}$)を実施してきた。未だ十分な解析が進んでおらず、来年度の研究に引き継ぐ予定である。

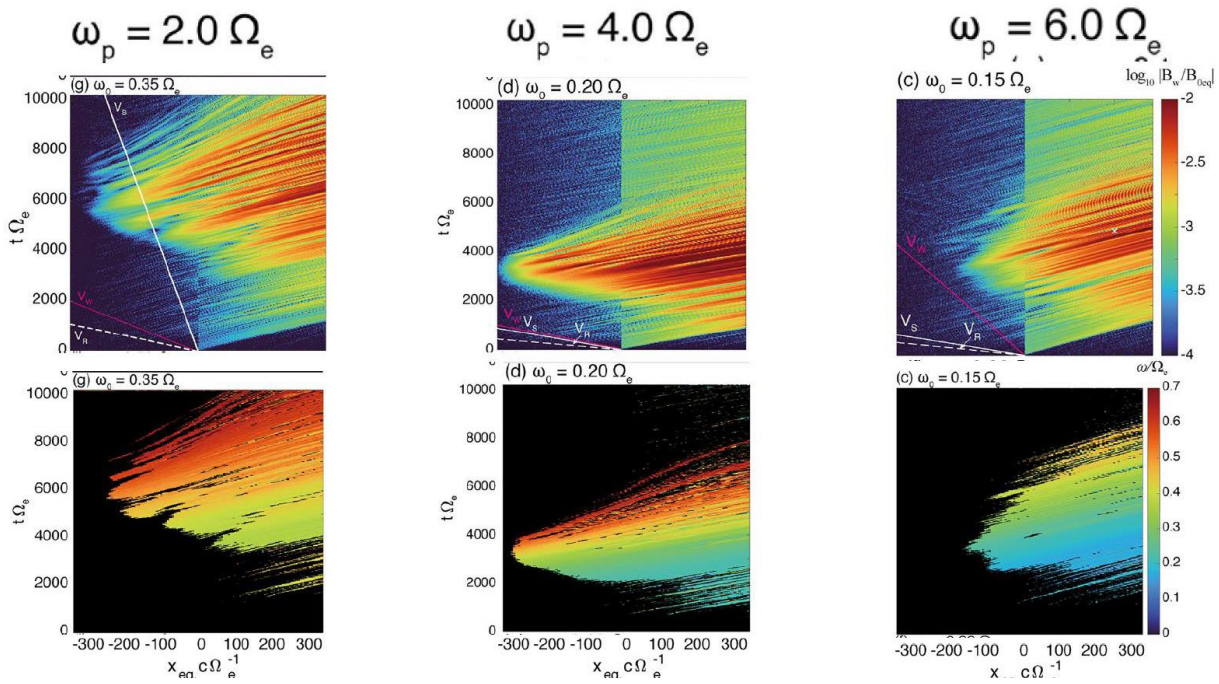


図2 トリガード・コーラス放射の形成過程のプラズマ密度依存性。振幅（上）と周波数（下）の時空間発展。

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. 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.
2. 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.
3. Foster JC, Erickson PJ and Omura Y (2024), Upstream motion of chorus wave generation: comparisons with observations, *Front. Astron. Space Sci.* 11:1374331.

(口頭)

1. Y. Omura, Y. Fujiwara, and T. Nogi, Generation of whistler-mode rising and falling tone emissions in an open system with a uniform magnetic field, *JpGU 2023*, May 21-26, 2023.
2. Y. Omura and T. Nogi, Whistler-mode Triggered Emissions in a Homogeneous Magnetic Field, Generation Processes of Whistler-mode Rising-tone Emissions in the Inner Magnetosphere, *AOGS 2023*, ST20-A023, August 3, 2023.