

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@rish.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
Liu Yin (京都大学生存圏研究所)
担当：1次元電磁粒子コードによるヒスの計算機実験
藤原 悠也 (京都大学生存圏研究所)
担当：1次元電磁粒子コードによるコーラスの計算機実験

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。

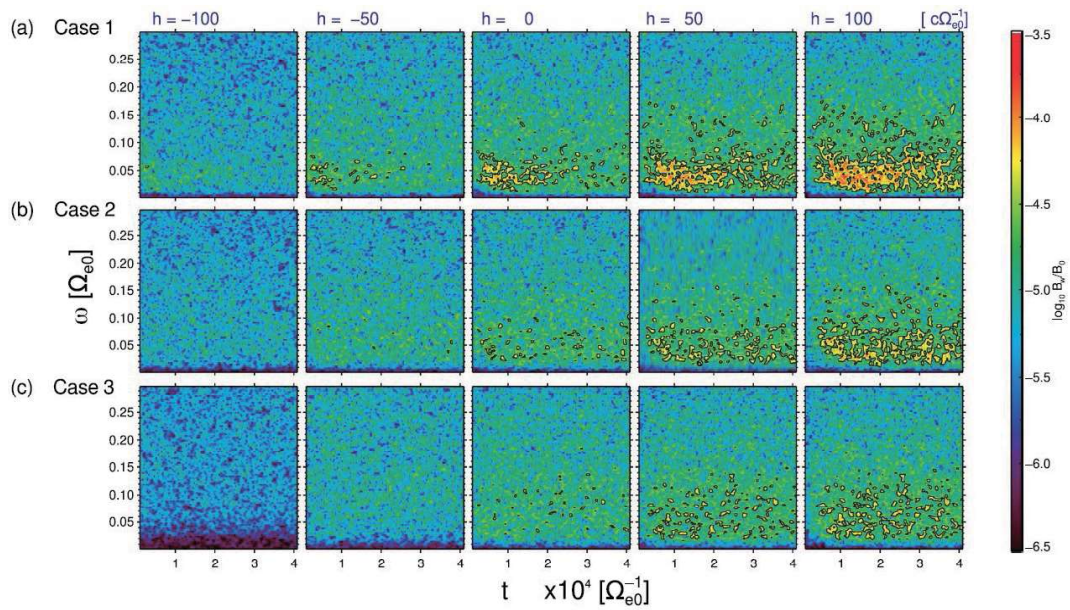


図1 電磁粒子シミュレーションで再現されたヒス放射のダイナミックスペクトル

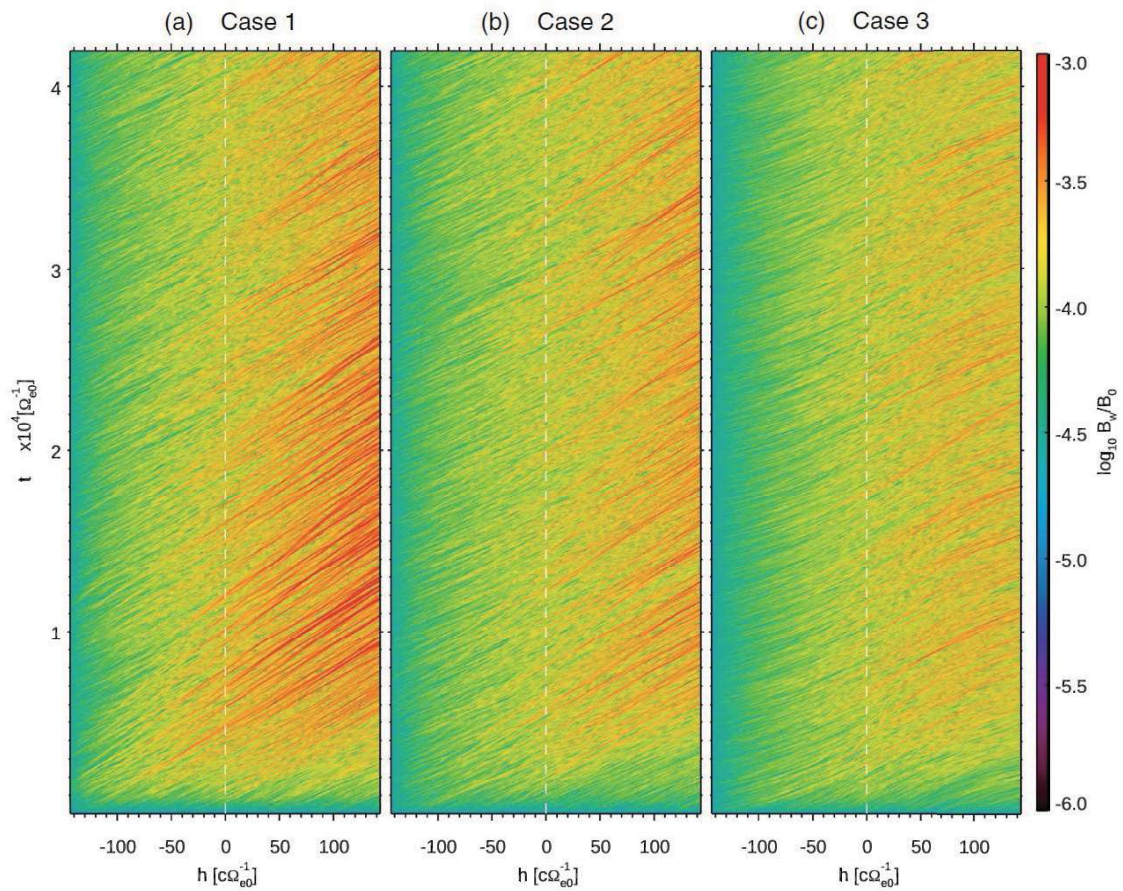


図2 ヒス放射（前進波）の振幅パケットの時空間発展

研究成果 (Accomplishments) :

電磁粒子コードで再現されたホイッスラーモード・ヒス放射の生成過程のパラメータ依存性について調べた。図 1 に示すように、Case 1, Case 2, Case 3 と外部磁場の勾配を次第に強くしてジョブを実行した。高エネルギー電子のフラックスや温度異方性はすべて同じ条件を与えている。高エネルギー電子の温度異方性によりホイッスラーモードの低周波部分に正の線形成長率が存在しており、その部分に波が熱雑音による電磁界の揺らぎから成長する。その一部がコーヒーレントな波束となって高エネルギー電子との非線形波動粒子相互作用により非常に強い非線形成長率によって成長し、磁力線にそって伝搬する。シミュレーションでは、外部磁場に平行な 1 次元空間を想定しており、前進波と後進波が存在するが、ホイッスラーモードの偏波特性をつかって分離することができる。図 2 には前進波のみ取り出して波束の振幅の時空間発展を描いている。継続時間の短い波束が時空間で離散的に励起され、それが磁力線に沿って伝搬しつつ大きく成長する様子が示されている。個々の波束において伝搬速度が異なっている。これは波束の周波数が異なっており、それに対応して群速度も異なっているからである。これらの波束の成長率は線形成長率に比べてはるかに大きく、かつ振幅の小さい波束ほどより急速に成長する。この特性はコーラス波動の成長過程を説明するために導かれた非線形成長率の特性と一致している。コーラス波の成長過程においても比較的継続時間のサブパケットと呼ばれる短い波束が発生しており、ヒスとコーラスの波束の発生過程は本質的に同じであると考えられる。

周波数が上昇する典型的なコーラス波の生成過程においては、共鳴電子が波の電磁界が作るポテンシャルの周りを取り囲むように運動してできる電子ホールが生成され、また周波数が減少するコーラス波では、共鳴電子が波のポテンシャルの内部に捕捉されてできる電子島が生成されていることがこれまでの計算機実験で確認されている。共鳴電子がつくるこれらのポテンシャル構造ができる条件は、不均一性因子(inhomogeneity factor) S の絶対値が 1 以下であることである。この S 値は、波の周波数変動率と外部磁場の勾配および波の振幅によって決まっている。上記の Case 1, Case 2, Case 3 においては外部磁場の勾配を次第に強くすることにより、 S 値の絶対値が 1 以下となる範囲が赤道付近の狭い領域に限定されるために、波動が非線形成長できる空間的な範囲が次第に狭くなることにより、波動の成長が抑制されていることがわかった[Liu et al., EPS, 2021]。

次に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ところ、周波数変動を伴う短い波束が異なる周波数において多数成長しており、ヒスを構成するコーヒーレントな波束(ヒスエレメント)が生成されることがわかった。これらの波束は線形成長率よりも大きな非線形成長率で成長しており、周波数変動による S 値の変化により、速度位相空間において波を成長させるような波動ポテンシャルが出来ることにより非線形成長が起こることが確認された[Liu and Omura, submitted to JGR]。

ヒス放射とコーラス放射の違いはプラズマ密度によって生じる。プラズマ密度を表すプラズマ周波数 f_{pe} とサイクロトロン周波数 f_{ce} の比によって、ホイッスラーモード波の線形成長の周波数範囲が決まる。プラズマ圏のようにプラズマ密度が高く f_{pe}/f_{ce} の比が大きい場合には低周波帯でヒスのようなスペクトルになる。一方、プラズマ圏の外側では、プラズマ密度が低くなるために典型的な $0.2 \sim 0.7f_{ce}$ の周波数においてコ

ーラス放射が励起される。

均一な磁場モデルを使ってコーラス放射を励起させる計算機実験を、シミュレーション空間の中心にトリガー波を $0.3f_{ce}$ の周波数で注入することにより実行した。周波数が徐々に上昇するコーラス放射が生成されることを確認した[Fujiwara et al., submitted to EPS]。外部磁場の勾配は、均一な磁場の赤道付近で励起された周波数変動を伴う比較的小振幅の波束が外部磁場に沿って伝搬する過程で、増大する振幅に比例して磁場勾配を増大させて S 値を電子ホール形成による非線形成長が可能な値の範囲($|S| < 1$) に抑えることにより伝搬過程における非線形成長率を維持する役割をしている。

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. Omura, Nonlinear wave growth theory of whistler-mode chorus and hiss emissions in the magnetosphere. *Earth Planets and Space* 73, 95. 2021.
3. Y. Liu, Y. Omura, and M. Hikishima, Simulation study on parametric dependence of whistler-mode hiss generation in the plasmasphere, *Earth, Planets and Space* 73, 230, 2021.
4. Y. Fujiwara, T. Nogi, and Y. Omura, Nonlinear triggering process of whistler-mode rising-tone emissions in a homogeneous magnetic field, submitted to *Earth Planets and Space*.
5. Y. Liu, and Y. Omura, Nonlinear wave growth of whistler-mode hiss emissions in a uniform magnetic field, submitted to *JGR Space Physics*.

(口頭)

1. Y. Omura, Nonlinear Wave Growth Process of Whistler-mode Chorus Emissions in the Earth's Magnetosphere, AGU Fall Meeting 2021, December, 2021.
2. Y. Omura, Nonlinear Wave Growth Processes of Whistler-mode Chorus and Hiss Emissions in the Earth's Magnetosphere, AAPPS-DPP 2021, September, 2021.
3. T. Nogi and Y. Omura, Simulation study of triggered rising-tone emissions in the Earth's magnetosphere, AOGS 2021, August, 2021.