

# BENの低周波成分の励起メカニズムに関する 2次元粒子シミュレーション

0955014 広野 哲也

## 1. はじめに

地球磁気圏のプラズマシート境界層を始めとする様々な領域で広帯域静電ノイズ (BEN) が観測されている。BEN の波形は人工衛星 Geotail の観測結果によって、孤立したパルス状の波形 (ESW) であることが確認された。BEN の高周波成分は ESW として説明できるが、その低周波成分の励起メカニズムは未解明である。本研究では BEN の低周波成分が、高周波成分である ESW と同様にビーム不安定性の非線形発展の結果励起されるという仮定に基づき、ビーム不安定性からの低周波波動励起に関する 2 次元粒子シミュレーションを行った。Geotail 衛星の観測結果によると BEN の低周波成分の電界は磁場に垂直方向に振動している。そこで、ビーム不安定性の長時間発展の結果現れる磁場に垂直方向の低周波波動に着目し、そのパラメータ依存性について検討した。

## 2. 粒子シミュレーションモデル

本研究では、2 流体不安定性モデル (図 1) でシミュレーションを行う。図 1 はビームの磁場に平行な速度成分を  $v_{para}$ 、ドリフト速度を  $v_d$  とおき、電子がシミュレーション空間内に一様に  $x$  軸正の方向へ  $v_{para} = v_d$  で入射され、背景イオンが静止している様子を表している。

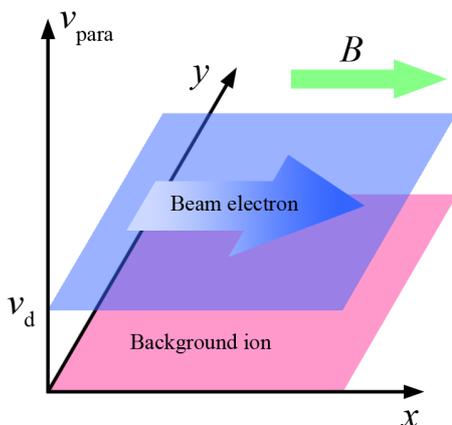


図 1: シミュレーションモデル (電子ビーム入射)

## 3. 粒子シミュレーションパラメータ

本研究で行ったシミュレーションのパラメータを表 1 に示す。本研究では低周波波動の励起を調べるために長時間発展を見る必要がある。そのために、電荷質量比を表 1 のように与えることで、イオンの質量を実際より軽くして (電子の 100 倍) イオンが運動しやすくしている。磁場強度を決定する電子サイクロトロン角周波数  $\Omega_e$  と電子ビームのドリフト速度  $v_d$  をパラメータとして変化させてシミュレーションを行い、シミュレーション領域内で起こるプラズマ波動現象を解析する。シミュレーションの境界条件には周期境界条件を用いることで広く一般的な宇宙プラズマ空間の一部を再現している。

表 1: 粒子シミュレーションのパラメータ

電子サイクロトロン角周波数	$\Omega_e = -1.0$
時間ステップ	$\Delta t = 0.1$
ステップ数	32768 $t = 521.5\Pi_{pe}$
セルサイズ	$L = 1.0$
シミュレーション領域	$128 \times 128$

	電子	背景イオン
超粒子数	67108864 4096 個/grid	134217728 8192 個/grid
プラズマ角周波数	$\Pi_e = 1.0$	0.1
電荷質量比	-1.0	0.01
磁場に平行方向の熱速度	1.0	0.1
磁場に垂直方向の熱速度	1.0	1.0
ドリフト速度	$v_d = 2.0$	0.0

## 4. 粒子シミュレーション結果

イオンの熱速度が磁場に垂直方向の波動励起に影響を与えると考え、磁場に垂直方向のイオンの熱速度が高い場合のシミュレーションを実行した。表 1 のパラメータで行ったシミュレーション結果を図 2 に示す。シミュレーション初期に磁場に平行方向のエネルギー

が上昇し、磁場に垂直方向に揃ったポテンシャルとなる（図 2(a)）。このポテンシャルは合体を繰り返し、磁場に垂直方向に揃った 1 次元状のポテンシャル構造（ESW）となる（図 2(c)）。その後、時間発展によって磁場に垂直方向のエネルギーも上昇し、崩れた 2 次元状のポテンシャル構造となっている（図 2(d)）。さらに時間が経過することで磁場に垂直方向のポテンシャルの強度が強くなり、1 次元的な ESW ポテンシャルは減衰している（図 2(f)）。

このシミュレーションで励起された波動を調べるため、 $\omega$ - $k$  ダイアグラムを求めた。シミュレーションの前半と後半では励起されている波動が異なっているので、シミュレーション前半・後半の電界をそれぞれフーリエ変換して得られた  $\omega$ - $k$  ダイアグラムを図 3 に示す。シミュレーション前半・後半ともに磁場に垂直方向の低周波成分では  $2 \times 0.01\Omega_e$  間隔の高調波が現れ、広帯域な周波数成分が確認できた（図 3 右図）。この高調波の間隔は LH 周波数 ( $\omega_{LH} = \sqrt{\Omega_e \cdot \Omega_i} = 0.01\Omega_e$ ) の整数倍と一致している。シミュレーション後半では磁場に垂直方向の低周波成分では、 $k_y \lambda_D = \pm 0.6$  付近に新たな波動の励起を確認できた（図 3 右下図）。

次に衛星によって観測された周波数スペクトルと比較するために、シミュレーション領域の中心点における電界の時間変化を観測し、フーリエ変換してその周波数スペクトルを求めた。シミュレーション前半・後半の電界をそれぞれフーリエ変換をして得られた周波数スペクトルを図 4 に示す。周波数の基準となる電子のプラズマ周波数を  $f_e = 1.0 \times 10^3$  [Hz] と仮定して実パラメータに変換した。シミュレーション後半では、磁場に垂直方向の低周波成分と磁場に平行方向の高周波成分が合成された、広帯域な周波数スペクトルが確認できた。

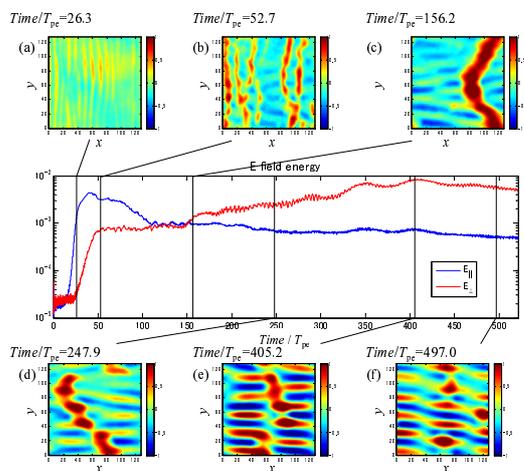


図 2:  $E_{\parallel}$ ,  $E_{\perp}$  およびポテンシャル構造の時間変化

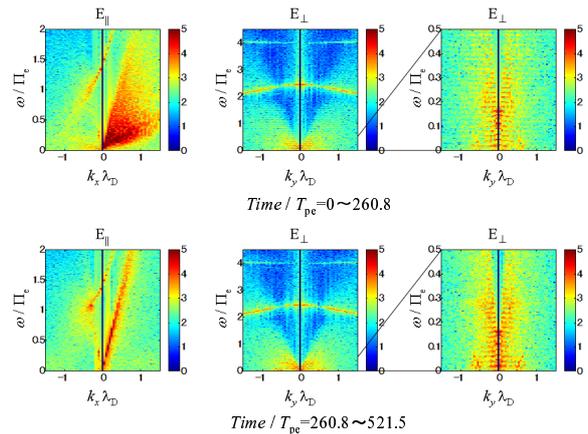


図 3:  $\omega$ - $k$  ダイアグラム

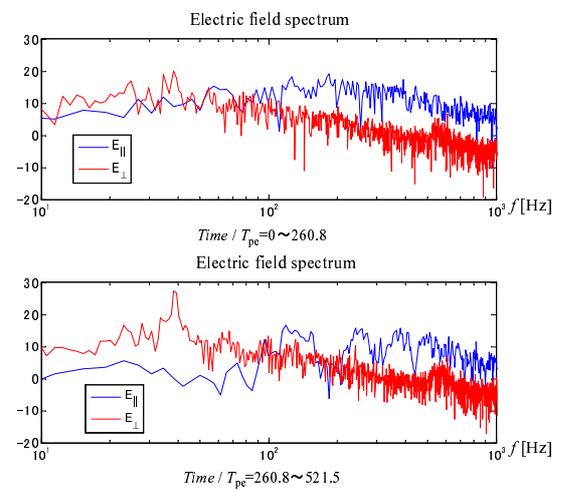


図 4: シミュレーションで観測された周波数スペクトル

## 5. まとめと今後の課題

様々なパラメータでシミュレーションを行った結果、強磁場で磁場に垂直方向のイオンの熱速度が高い場合には磁場に垂直方向の低周波成分（LH 高調波）と磁場に平行方向の高周波成分（ESW）が合成された、衛星によって観測された BEN と同様の広帯域な周波数スペクトルを確認できた。また、長時間発展によって磁場に垂直方向の低周波成分に新たな波動の励起を確認できた。

低周波波動をより詳しく調べるために、超粒子数を増加して領域を拡大し、長時間シミュレーションを実行する必要がある。そのため、大規模シミュレーションが実行可能なスーパーコンピュータの使用を検討する。また、磁場に垂直方向の低周波成分に新たに励起された波動に関して詳しく調査する必要がある。