

Geotail 衛星によって観測された LH 帯プラズマ波動に関する 2次元粒子シミュレーション

1155005 金子 純一

1. はじめに

Geotail 衛星が飛翔し始めて 20 年が経ち、この間に地球磁気圏の構造や、多くの波動現象が解明されてきた。本研究室は地球磁気圏近尾部領域で観測された超低周波帯波動の解析を行っており、LH 帯波動の統計解析の結果、地球磁気圏近尾部領域の Lobe 領域、PSBL 領域で LH 帯波動が多く観測されることがわかった。本研究では LH 帯波動の解析結果をもとに 2 次元粒子シミュレーションを行い、LH 帯波動の励起メカニズム、パラメータ依存性について検討する。

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 は磁場に平行な速度成分を v_{para} で表し、背景イオンに対してドリフト速度 v_d の電子がシミュレーション空間内に一様に x 軸正の方向へ入射されている様子を表している。

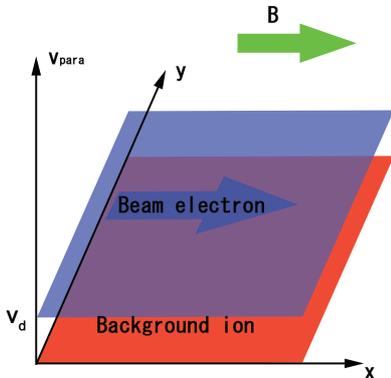


図 1: シミュレーションモデル

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 LH 帯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。

LH 帯波動の統計解析結果より PSBL 領域と Lobe 領域を想定し、磁場に平行方向のイオンの熱速度と磁場に垂直方向のイオンの熱速度と電子のドリフト速度を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	8,192 $t = 130.4\Pi_{pe}$
セルサイズ	$L = 1.0$
シミュレーション領域	128×128

	電子	背景イオン
超粒子数	67,108,864 4,096 個/grid	134,217,728 8,192 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	$v_{\parallel th,i} = 0.3, 0.1$
磁場に垂直方向の熱速度	1.0	$v_{\perp th,i} = 0.6, 0.1$
ドリフト速度	$v_d = 0.0, 2.0$	0.0

4. 領域別シミュレーション

統計解析結果より、LH 帯波動が観測される Lobe 領域では磁場に垂直方向のイオン温度が高いことが分かっている。したがって、Lobe 領域を再現するために磁場に垂直方向のイオンの熱速度を磁場に平行方向の熱速度より高くして温度異方性を与えた。具体的なパラメータは $v_{\parallel th,i} = 0.3$, $v_{\perp th,i} = 0.6$, $v_d = 0.0$ とした。

Lobe 領域を想定したパラメータで行ったシミュレーション結果を図 2~4 に示す。図 2 において不安定性は起こらず電界エネルギーは上昇していない。そのため、図 3 に示すようにポテンシャルは明確な空間構造を

持っていない。このシミュレーションにおいて、 $\omega_{LH} = \sqrt{\Omega_e \cdot \Omega_i} = 0.1 \times \Pi_e$ となることから $\omega = 0.1 \times \Pi_e$ 付近に励起される波動は LH 帯波動であると考えられる。そのため、磁場に垂直方向の $\omega-k$ ダイアグラム E_{\perp} の $\omega = 0.1 \times \Pi_e$ 付近に励起される波動を確認する。磁場に垂直方向の $\omega-k$ ダイアグラム (E_{\perp}) において、 $\omega = 0.1 \times \Pi_e$ 付近に波動は励起していない。

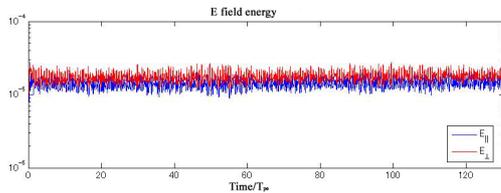


図 2: E_{\parallel}, E_{\perp} の時間変化

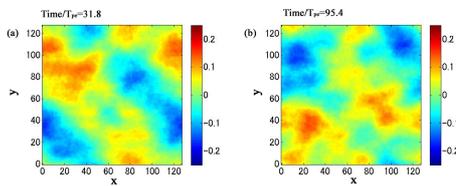


図 3: ポテンシャル構造の時間変化

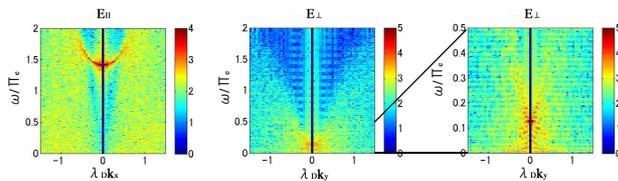


図 4: $\omega-k$ ダイアグラム

統計解析結果より、PSBL 領域では磁場に平行方向のイオン速度を持つことが分かっている。したがって、PSBL 領域を再現するためにはイオンにドリフト速度を与えてシミュレーションを行う必要がある。しかし、LH 帯波動という低周波波動の励起を調べるため、2 流体不安定性の長時間発展を観察しなければならない。質量の大きいイオンにドリフト速度を与えると運動エネルギーが大きくなり、数値的ノイズによって LH 帯波動の励起が妨げられる可能性がある。そこで、本研究ではイオンのドリフト速度を電子に与えて、イオンと電子を相対的に動かすことによって PSBL 領域を再現したシミュレーションを行った。

PSBL 領域を想定したパラメータで行ったシミュレーション結果を図 5~7 に示す。図 5 において、2 流体不安定性が起これ電界エネルギーが上昇している。まず磁場に平行方向の電界エネルギーが上昇し、すぐに磁場に垂直方向の電界エネルギーが上昇する。シミュレ

ーション後半では磁場に垂直方向の電界エネルギーが磁場に水平方向より高いため、ポテンシャルは磁場に平行方向に揃った構造になっている (図 6(b))。 $\omega-k$ ダイアグラムにおいて LH 帯波動の励起を調べると、LH 周波数帯である $\omega = 0.1 \times \Pi_e$ 周辺に波動が励起している (図 7 右図)。

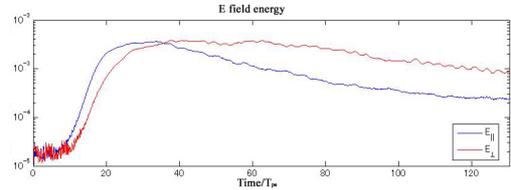


図 5: E_{\parallel}, E_{\perp} の時間変化

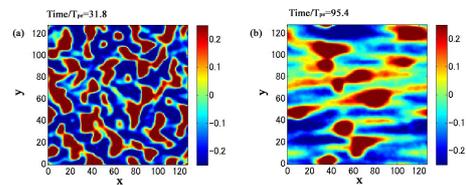


図 6: ポテンシャル構造の時間変化

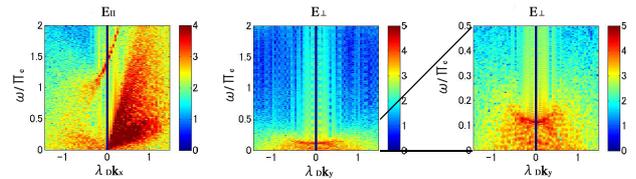


図 7: $\omega-k$ ダイアグラム

5. まとめと今後の課題

シミュレーション結果より、Lobe 領域では LH 帯波動の励起は確認されなかったが、PSBL 領域では LH 周波数帯周辺に波動が励起した。この結果から、Lobe 領域で多く観測された LH 帯波動は PSBL で励起した LH 帯波動が Lobe 領域に伝搬している可能性が考えられる。今回のシミュレーションでは LH 周波数帯だけに励起する LH 帯波動を再現することはできなかった。今後 LH 帯波動の発生条件をより詳しく調べるため、更に様々なパラメータでシミュレーションを行って検討する必要がある。