

イオン温度異方性による非線形プラズマ不安定性のシミュレーション

Simulation of nonlinear plasma instability driven by ion temperature anisotropy

研究代表者：小路 真史（名古屋大学宇宙地球環境研究所）
masafumi.shoji@nagoya-u.jp

研究分担者：大村 善治（京都大学生存圏研究所）
omura@rish.kyoto-u.ac.jp

担当：計算結果の理論的検討

研究目的 (Research Objective):

地球内部磁気圏の磁気赤道域において、数 Hz 帯に電磁イオンサイクロトロン (EMIC) ライジングトーン放射と呼ばれる新たなプラズマ波動放射現象が CLUSTER 衛星により観測された [Pickett *et al.*, GRL, 2010]。その後、あけぼの衛星、THEMIS 衛星でも EMIC トリガード放射が多数観測されている。この EMIC ライジングトーン放射は、ホイッスラーモードコーラス放射と同様に強い非線形波動粒子相互作用によって周波数上昇を伴う EMIC 波として観測される。この波動の存在により、内部磁気圏における高エネルギーのプロトンの生成や散乱、及び相対論的電子の消失に大きく関わっていることがこれまでの理論シミュレーション研究により明らかになりつつあるため、あらせ衛星や Van Allen Probes をはじめとした内部磁気圏衛星観測ミッションにおいても重要な観測対象となっている。本研究の目的は、A-KDK システムを利用した大規模計算によって、これらの次世代衛星観測に先立ち非線型 EMIC 放射による非線形波動粒子相互作用を再現し、内部磁気圏プラズマ環境へのインパクトを明らかにすることである。本稿では、EMIC ライジングトーン放射により低ピッチ角プロトンが高ピッチ角に散乱される様子をテスト粒子計算で明らかにしたもの、及びその結果として別のライジングトーン放射が励起するためのエネルギー源になり得ることを示す。

計算手法 (Computational Aspects):

本研究では、従来開発を進めているハイブリッドシミュレーションコードを使用する。ハイブリッドコードにおいて、電子は慣性を無視した流体として扱い、イオンを粒子として取り扱う。内部磁気圏の磁気赤道域における現象を詳細に解析するために、沿磁力線方向の一次元コードを開発した。内部では磁気赤道領域を模擬した非一様磁場を導入している。シミュレーション両端は解放境界とし、粒子はシミュレーション空間内部でミラー運動している。さらに、CLUSTER 衛星で観測された波動より重イオン密度比を見積もり、またリアルスケールの時空間パラメータをしようすることで、観測結果と比較しやすいシミュレーション結果を得られるようにしている。初期状態として、温度異方性を持った高エネルギープロトンを空間に配置し、この自由エネルギー

ギーによって EMIC 波を励起させ、非線形成長によって EMIC ライジングトーン・フォーリングトーン放射を再現する。また、シミュレーションコードは MPI による領域分割法により、内部の粒子モーメント計算ループは OpenMP によりスレッド並列化されている。テスト粒子計算に用いたコードは、粒子分割を MPI によって行なっている。

研究成果 (Accomplishments) :

EMIC ライジングトーン放射は理論、シミュレーションにより非線形相互作用による励起過程が研究されている。EMIC 放射はホイッスラーモード放射とよく似た特性を持っているが、近年、低ピッチ角電子のホイッスラーモード放射がもたらす非線形な散乱による、高いピッチ角への巻き上げが報告されている。EMIC 波による低ピッチ角イオンの高いピッチ角への散乱も同様に起こりうると考えられているが、これまでの Shoji and Omura, [2013]などで用いられたシミュレーションでは、初期の粒子分布を subtracted Maxwellian と呼ばれる低ピッチ角粒子は存在しない分布関数としていたため、高ピッチ角散乱が起きているか、及び散乱された粒子が波動に与える影響は不明であった。図の左上にこれまでのシミュレーションで得られた EMIC ライジングトーン放射を示す。この電磁場データを使用して、放射中に低ピッチ角粒子(0 度から 30 度のピッチ角を持つ粒子)がどのような軌道を描くかをテスト粒子計算した結果を左下に示す。ホイッスラーモード波の場合と同様、EMIC 波でも低ピッチ角プロトンは高ピッチ角へ散乱されていることがわかった。非常に効率の良い散乱が起きていることが確認されたため、波動励起においても無視できない影響があると考え、低ピッチ角粒子を考慮する必要からロスコーンを全て埋めた、bi-Maxwellian でのハイブリッドシミュレーションを行った。結果を図右上に示す。従来のシミュレーションとは異なり EMIC ライジングトーン放射が複数回励起した。複数波動励起時の粒子軌道を追いかけるためにテスト粒子計算を行った結果を右下図に示すが、同じように粒子は高いピッチ角に巻き上げられていることがわかった。その直後に一部粒子は再び低いピッチ角へ散乱されている。そのとき、粒子はエネルギーを波動から受け取っていることがわかった。また、高ピッチ角からスタートした粒子の中にも、散乱、逆方向の散乱が複数回起きているものが確認されている。以上のことから、低ピッチ角に存在するプロトン粒子は、波動の影響を受けて高いピッチ角に多数巻き上げられ、結果として新たな波動励起のエネルギーソースになっていることを示した。一度波の励起によってエネルギーを失った粒子も、別の波からエネルギーを受けてさらに別の波動にエネルギーを渡している。観測においても、EMIC が複数回連なって起きることは珍しくない。EMIC ライジングトーン放射は一度の散乱で非常に効率良く粒子の温度異方性のエネルギーを消費するため、複数回の励起にはエネルギーの注入が必要である。可能性として考えられるのは磁気圏への粒子注入や断熱加速による温度異方性の復活、同じ磁力線にいたプロトンが反射して赤道に戻ってくるタイミングなどの外的な要因がある。今回の研究はそれらの可能性に加えて、EMIC 自身が粒子にエネルギーを与え、結果として新たな EMIC を生み出すものである。それぞれの時間スケールは特徴

的なので、今後の観測研究によって EMIC 波動励起の繰り返し頻度と比較して磁気圏で起きていることを検証する。

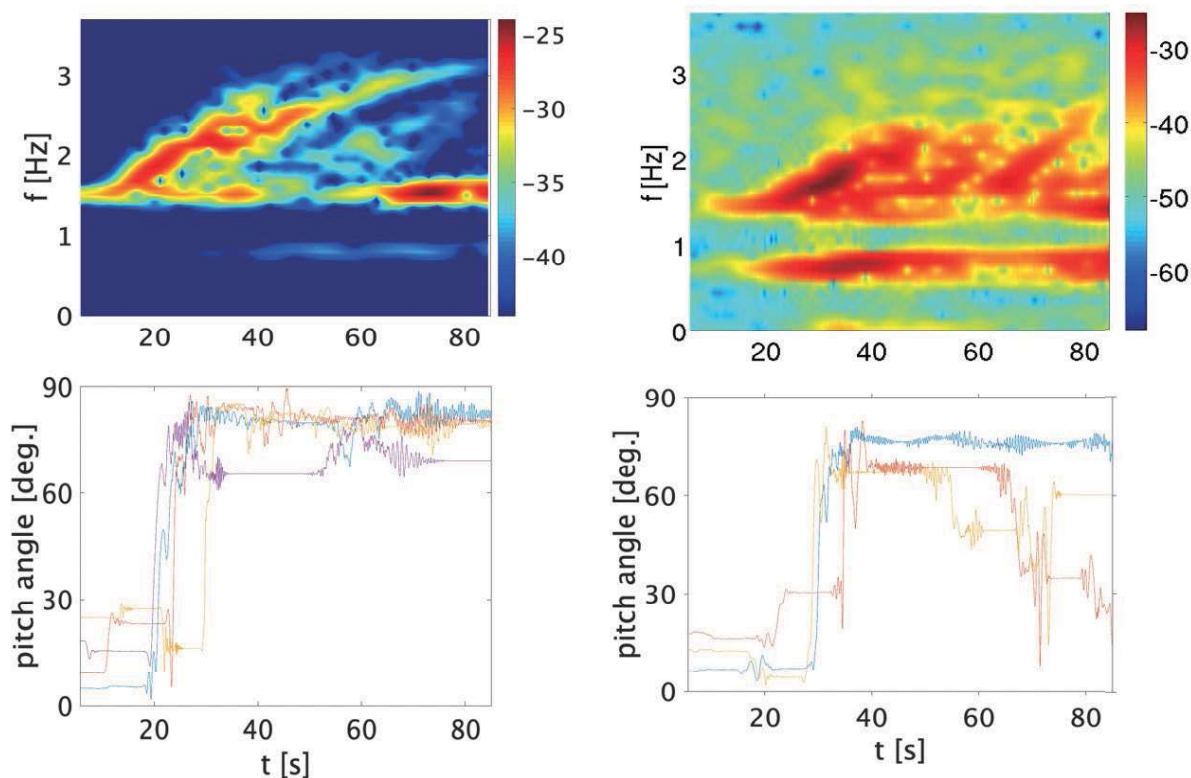


Fig.1: (左上)従来の subtracted Maxwellian 分布によるシミュレーションで得られるライジング トーン放射のダイナミックスペクトル(左下)左上のシミュレーションで得られた電磁場を用いて 計算したテスト粒子軌道(右上)bi-Maxwellian 分布によるシミュレーションで得られるダイナミ ックスペクトル(右下) 右上のシミュレーションで得られた電磁場を用いて計算したテスト粒子 軌道

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. **Shoji, M.**, Y. Omura, B. T. Tsurutani, O. P. Verkhoglyadova, and B. Lembège, Mirror Instability and L-mode Electromagnetic Ion Cyclotron Instability: Competition in the Earth's Magnetosheath, *J. Geophys. Res.*, *114*, A10203, 2009.
2. **Shoji, M.**, and Y. Omura, Simulation of Electromagnetic Ion Cyclotron Triggered Emissions in the Inner Magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, *116*, A05212, 2011.
3. **Shoji, M.**, Y. Omura, B. Grison, J. Pickett, and I. Dandouras, Electromagnetic Ion Cyclotron Waves in Helium Branch Induced by Multiple Electromagnetic Ion Cyclotron Triggered Emissions, *Geophys. Res. Lett.*, *38*, L17102, 2011.
4. **Shoji, M.**, Y. Omura, and L. C. Lee, Multidimensional Nonlinear Mirror-mode

- Structures in the Earth's Magnetosheath, *J. Geophys. Res.*, *117*, A08208, 2012.
5. **Shoji, M.**, and Y. Omura, Precipitation of Highly Energetic Protons by Helium Branch Electromagnetic Ion Cyclotron Triggered Emissions, *J. Geophys. Res.*, *117*, A12210, 2012.
 6. **Shoji, M.**, and Y. Omura, Triggering Process of Electromagnetic Ion Cyclotron Rising Tone Emissions in the Inner Magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, *116*, A05212, 2013.
 7. **Shoji, M.** and Y. Omura, Spectrum characteristics of electromagnetic ion cyclotron triggered emissions and associated energetic proton dynamics, *J. Geophys. Res.*, *119*, 3480-3489, 2014.
 8. **Shoji, M.**, Y. Miyoshi, Y. Katoh, K. Keika, V. Angelopoulos, S. Kasahara, K. Asamura, S. Nakamura, and Y. Omura, Ion hole formation and nonlinear generation of electromagnetic ion cyclotron waves: THEMIS observations, *Geophys. Res. Lett.*, *44*, 8730–8738, 2017.
 9. **Shoji, M.** and Y. Omura, Nonlinear generation mechanism of EMIC falling tone emissions, *J. Geophys. Res.* *122*, 2017.
 10. **Shoji, M.**, Y. Miyoshi, Y. Omura, L.M., Kistler, Y., Kasaba, S. Matsuda, Y. Kasahara, A. Matsuoka, R. Nomura, K. Ishisaka, A. Kumamoto, F. Tsuchiya S. Yagitani, M. Teramoto, K. Asamura, T. Takashima I. Shinohara, Instantaneous frequencyanalysis on nonlinear EMIC emissions: Arase observation. *Geophys. Res. Lett.*, *45*, 2018.