

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800256

研究課題名(和文)電磁イオンサイクロトロン波動放射過程における非線形イオンダイナミクスの研究

研究課題名(英文)Study on nonlinear ion dynamics in electromagnetic ion cyclotron wave emissions

研究代表者

小路 真史(Shoji, Masafumi)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・特任助教

研究者番号：80722082

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：電磁イオンサイクロトロン(EMIC)波動が地球内部磁気圏において引き起こす、高エネルギーイオン、相対論的電子との相互作用に関する大規模シミュレーションを行った。異なるスペクトル構造を持つEMICライジングトーン放射がシミュレーションにおいて再現され、これらの波動によるプロトンの散乱及び加速効率や時間スケールが異なることを示した。また、相対論的電子が広いエネルギー範囲において高効率な散乱を受けることを示した。さらに、縦波成分電場を導入したモデルのシミュレーションにおいて、周波数下降を伴うEMIC放射が再現された。これらの現象が非線形波動粒子相互作用によって起きていることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We performed computer simulations on nonlinear interactions between electromagnetic ion cyclotron (EMIC) waves and high energy ions and relativistic electrons in the Earth's magnetosphere. The EMIC rising tone emissions with different spectrum characteristics are successfully reproduced in the simulations. The efficiency and time scale of the scattering and acceleration of protons are controlled by the wave spectra. The large amount of relativistic electrons with wide energy range are also scattered by the waves. We also performed the simulations with longitudinal electric fields, reproducing the EMIC falling tone emissions. We show that these plasma phenomena are conducted by the nonlinear wave particle interactions.

研究分野：宇宙プラズマ物理学

キーワード：非線形波動粒子相互作用 地球内部磁気圏 計算機シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

(1)地球周辺に存在する、放射線帯と呼ばれる領域において非常に高いエネルギーを持ったプラズマが形成されるメカニズムは、内部磁気圏分野において最も大きな課題となっている。1MeVを超える相対論的なエネルギーに至る電子フラックスは地球磁気圏の他の領域には存在せず、放射線帯において形成されるメカニズムは特定されていない。さらに、内部磁気圏には磁気嵐時に形成されるリングカレントに代表されるような、高エネルギーイオンが存在するが、形成・消失のメカニズムは明らかにされていない。近い将来の地球近傍の宇宙開発・利用の観点からも、高エネルギー粒子フラックスのダイナミクスの理解は不可欠である。昨夏に打ち上げられた米国の Van Allen Probes や、日本のジオ・スペース探査衛星 ERG をはじめとした様々な内部磁気圏探査衛星ミッションが国際的に計画されている中で、シミュレーションによるジオ・スペースプラズマ現象の再現及び物理過程の解明はこれらの衛星ミッションに先駆けて重要な知見をもたらすことが重要である。

(2)ジオ・スペースにおける粒子ダイナミクスをコントロールするのは様々なプラズマ波動との相互作用であり、前述の衛星ミッションによる現象の解明が期待されている。特に、数 Hz 帯に存在し、周波数上昇を伴って成長する電磁イオンサイクロトロン(EMIC)トリガード放射[Pickett et al., GRL, 2010]が数年前に発見された。この低周波波動放射現象は、放射線帯に存在する高エネルギープロトン[Shoji and Omura, 2011, 2012, 2013]及び相対論的電子[Omura and Zhao, JGR, 2013]を拡散させ、極域においてオーロラ発光をもたらす上で重要な役割を担うことが明らかになりつつある。申請者らはこれまでに、イオンの運動方程式、及びマクスウェル方程式を交互に解き進める、第一原理に基づいた大規模シミュレーションによって周波数上昇を伴う EMIC トリガード放射の再現に世界で初めて成功した([Shoji and Omura, 2011])。また、トリガード放射の発生メカニズムを明らかにし[Shoji and Omura, 2013]、数十 keV に及ぶ高エネルギープロトンの散乱を非常に効率よく行えることを明らかにした[Shoji and Omura, 2012]。しかしながら、磁気嵐時において放射線帯に存在する高エネルギーイオンフラックスの形成とその消失が報告されているが、そのマクロスケールのプラズマダイナミクスとミクロスケールな EMIC トリガード放射現象との関係は未だ明らかでない。また、放射線帯における高エネルギーイオンのピッチ角散乱を引き起こし、極域でのプロトン・オーロラ励起に重要な役割を果たしている電磁波動現象として、これまでにパル放射を初め EMIC 波が周波数上昇を伴っているスペクトルが観測されているが、生成メカニズムは明らかにされていない。

これらの未解決問題をあらゆる時空間において定量的に解析するためには、大規模計算機実験によって自己無頓着に第一原理方程式を解き進め、非線形現象を再現する必要がある。

2. 研究の目的

(3)内部磁気圏において、数 Hz 帯の非線形波動放射現象である周波数上昇を伴う電磁イオンサイクロトロントリガード放射が発見され[Pickett et al., GRL, 2010]、相対論的電子及び高エネルギーイオン分布が大きな影響を受けることが明らかになりつつある。しかし、磁気赤道面内で引き起こされる高エネルギーイオンの非線形散乱過程、イオンの加速・加熱機構さらにこれらの影響による波動伝搬への影響は未だ定量評価されていない。実スケールシミュレーションにより非線形放射現象を再現し、高エネルギーイオンのダイナミクスとプラズマ環境を定量的に明らかにすることで、放射線帯を含むジオ・スペースの国際的な観測衛星ミッションに理論面から貢献する。

3. 研究の方法

(4)本研究では、イオン・ハイブリッドコードによって地球内部磁気圏のリアルパラメータシミュレーションを行い、EMIC 波と高エネルギーイオン間の非線形波動粒子相互作用をシミュレーション空間内部で再現し、プロトンと重イオンの加速、加熱及びピッチ角散乱、それらに伴う波動の飽和減衰過程について定量的に解析する。そのために、実際に観測される数分間続くトリガード放射が再現できる、粒子注入を実装したコード、および低エネルギーイオン加熱を探るための背景磁場に対して平行方向の電場を導入したコードの開発を行う。また、衛星データ解析チームと連携し、波動・粒子データとの比較により内部磁気圏での散乱に非線形 EMIC 波動がどの程度寄与しているかを示す。

4. 研究成果

(5)温度異方性による磁気赤道での自発的な EMIC トリガード放射が、ハイブリッドシミュレーション内で再現された。図1に再現されたライジングトーン放射のスペクトルを示す。励起過程において、非線形粒子補足の影響で非常に効率の良い散乱が起きる。また、飽和減衰過程において、高エネルギーイオンの一部が背景磁場に対して垂直方向に加速される。図2にプロトンの散乱・加速の時間変化を、2種類のパラメータで解析した結果を示す。磁場勾配が強い場合、コヒーレントなトリガード放射が励起されるが、この場合、位相空間中にクリアなプロトンホールを形成するために、トラッピングが効率よく起こり、結果として加速効率が非常に高くなることを示した。一方で、磁場勾配が緩いときに形成されるインコヒーレントな EMIC 放射は、あらゆる空間で同時多発的に発生することから、粒子散乱の時間スケールが早まることを示した。

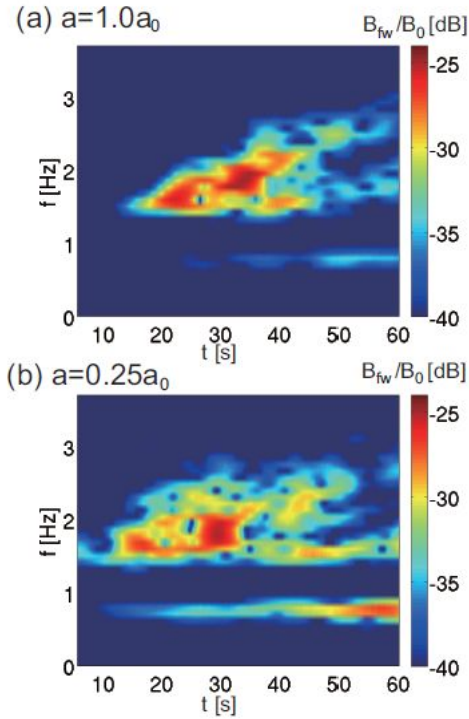


図 1: 異なる磁場勾配におけるダイナミックスペクトル(a)磁場勾配が強いとき(b)磁場勾配が弱いとき

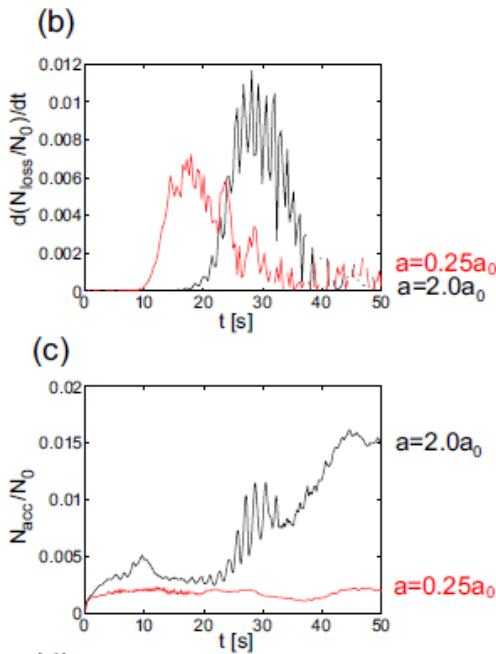


図 2: (上) ロスコーンに落ちたプロトンの数及び(下)磁気赤道面において加速された粒子の数。赤はインコヒーレント、黒はコヒーレントなトリガード放射による散乱の結果

(6)また、相対論的電子と EMIC 波動の相互作用に関するテスト粒子計算結果を異なる二つの EMIC 波動について行った。0.1MeV-20MeV の相対論的電子の散乱を解析

した結果、シミュレーション終了時において、特に 5MeV 以上の電子が広いピッチ角で散乱される様子が見られた。特にブロードバンドなケースにおいて、高いピッチ角まで散乱がされており、結果的に 5MeV-20MeV の電子のうち 85%が散乱された。(ライジングトーンの場合は 70%) ブロードバンドな放射は細かな非線形放射の集合であるため、非常に効率の良い粒子捕捉による電子散乱が起きる。従って、時間スケールもブロードバンドなケースのほうが早い。また、高エネルギープロトンに関して同様の傾向が見られ、さらに電子と同時に散乱のピークが現れることが明らかとなった。この結果は先に報告された衛星観測の結果とも一致する。

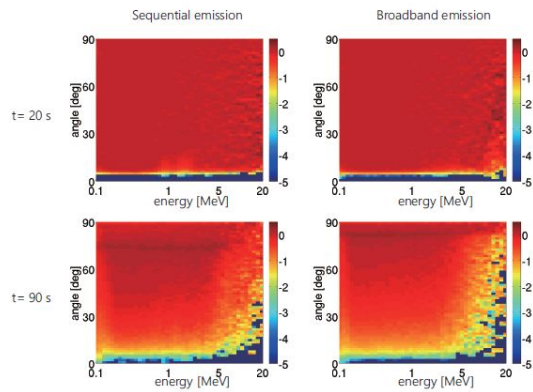
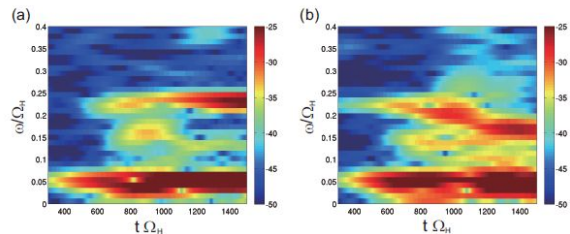


図 3: ピッチ角-エネルギー空間の電子分布の時間発展(左)磁場勾配がより大きい場合(a=1.0)(右)磁場勾配がより小さい場合(a=0.25)

(7)また、平行電場を含めたシミュレーションモデルを開発し、周波数下降する EMIC 波動の再現に関するシミュレーションを行った。図 4 に 2 種のハイブリッドシミュレーションで得られた EMIC 波動の磁場ダイナミックスペクトルを示す。(a)は、従来使用していた縦波成分を無視したシミュレーションモデルによる結果で、(b)は縦波成分を導入した結果である。時間、周波数共にプロトンジャイロ周波数で規格化されている。どちらも、酸素バンドが同周波数帯で卓越してお



り、ヘリウムバンドが同周波数帯で励起し始めるが、パネル(b)でのみ、その後ヘリウムバンドの周波数が下降する。

図 4: 磁気赤道面での前進波のダイナミックスペクトル。(a)縦波成分が存在しない場合(b)縦波成分が存在する場合

(8)ヘリウムバンドと酸素バンドの線形成長率はほぼ同じであるが、酸素バンドの方がより非線形成長をおこしやすいパラメータとなっている。従って、酸素バンドは非線形波動成長により始めに強く励起される。前進波と後進波の酸素バンド EMIC 波動により、背景の低エネルギーイオンの分布を強く歪める力が働く。これにより、後から励起するヘリウムバンドが、空間的に歪められて励起され、細かな空間パケット構造の集合として現れる。これらのパケットの空間長は EMIC の一波長程度しかないため、高エネルギープロトンとの相互作用で、波のフレームにおいて相対的にサイクロトロン補足されるものが強く見える。非線形成長理論において、強く粒子捕捉が起きた場合には周波数下降を起こす共鳴電流が現れ、その後周波数下降しながら非線形成長を起こす。以上のプロセスによって、EMIC フォーリングトーン放射がシミュレーション空間内で励起された。

(9)図 5 に、フォーリングトーンが励起されたときの赤道域における高エネルギープロトンの速度分布関数を示す。右に、特定の垂直速度における平行方向の分布関数を示す。周波数降下がはじまるタイミングで、分布関数上に膨らみが現れる。これが、先に述べた非線形波動粒子相互作用における強い粒子捕捉を示しており、プロトンヒルと呼ばれる。プロトンヒルは EMIC 波動の共鳴速度周辺に現れるため、周波数下降にともなって、共鳴速度の絶対値が増加し、外側に移動する。最終的に、プロトン速度分布関数は大きく歪められるが、共鳴速度が内側に向かうライジングトーン放射と異なり、ピッチ角の高い粒子はあまり影響を受けないことを示した。

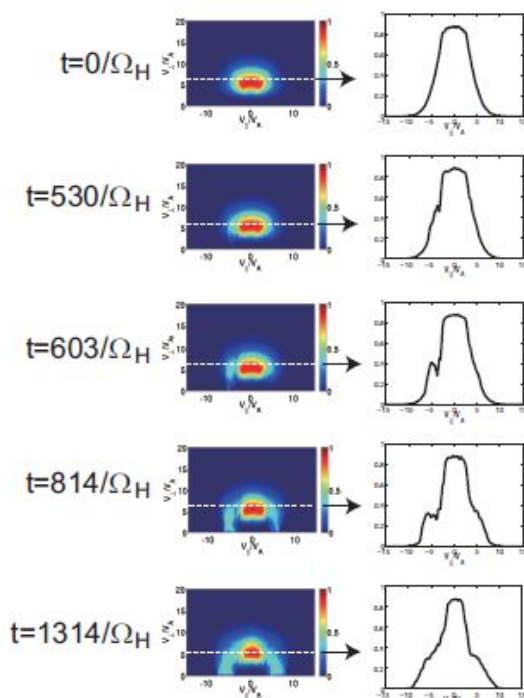


図 5 : 赤道域におけるプロトンの速度分布関

数。右図は $V=5.4VA$ における分布関数のスライスプロットを示す。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 6 件)

1. Ozaki, M., K. Shiokawa, Y. Miyoshi, R. Kataoka, S. Yagitani, T. Inoue, Y. Ebihara, C. W. Jun, R. Nomura, K. Sakaguchi, Y. Otsuka, M. Shoji, I. Schofield, M. Connors, and V. K. Jordanova, Fast modulations of pulsating proton aurora related to subpacket structures of Pc1 geomagnetic pulsations at subauroral latitudes, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 7859-7866, 2016. (査読有)

2. Sugiyama, H., S. Singh, Y. Omura, M. Shoji, D. Nunn, and D. Summers, Electromagnetic ion cyclotron waves in the Earth's magnetosphere with a kappa-Maxwellian particle distribution, *J. Geophys. Res.*, 120, 8426, 2015. (査読有)

3. Nakamura, S., Y. Omura, M. Shoji, M. Nose, D. Summers, and V. Angelopoulos, Subpacket structures in EMIC rising tone emissions observed by the THEMIS probes, *J. Geophys. Res.*, 120, 7318, 2015. (査読有)

4. Nakamura, S., Y. Omura, S. Machida, M. Shoji, M. Nose, and V. Angelopoulos, Electromagnetic ion cyclotron rising tone emissions observed by THEMIS probes outside the plasmopause, *J. Geophys. Res.*, 119, 1874-1886, 2014. (査読有)

5. 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. (査読有)

6. Nose, M., K. Takahashi, K. Keika, L. Kistler, K. Koga, H. Koshiishi, H. Matsumoto, M. Shoji, Y. Miyashita, and R. Nomura, Magnetic fluctuations embedded in dipolarization inside geosynchronous orbit and their associated selective acceleration of O^+ ions, *J. Geophys. Res.*, 119, 4639-4655, 2014. (査読有)

[学会発表](計 13 件)

1. 小路真史、大村善治, Hybrid simulation of EMIC falling tone emissions, AGU fall meeting 2016, 2016/12/12-2016/12/16, San Francisco.

2. 小路真史、大村善治, Hybrid simulation of EMIC falling tone emissions, 第 140 回 SGPSS 総会及び講演会, 2016/11/19-2016/11/23, 福岡市.

3. 小路真史、大村善治, Simulation of nonlinear interaction between energetic

plasmas and EMIC rising tone emissions, Japan Geoscience Union annual meeting, 2016/05/22-2016/05/26, 千葉市.

4. 小路真史、大村善治, Effects of EMIC rising tone emissions in the inner magnetosphere, AGU fall meeting 2015, 2015/12/15, San Francisco.

5. 小路真史、大村善治, Effects of EMIC rising tone emissions in the inner magnetosphere, 2015/10/31, 第 138 回 SGPSS 総会及び講演会, 東京.

6. 小路真史、大村善治, Effects of EMIC rising tone emissions in the inner magnetosphere, AOGS 12th Annual Meeting, 2015/08/05, シンガポール.

7. 小路真史、大村善治, Simulations of EMIC rising tone emissions in the inner magnetosphere, IWEPPINES, 2015/05/21, フランス.

8. 小路真史、大村善治, EMIC トリガード放射が与える内部磁気圏高エネルギープラズマ環境への影響, Japan Geoscience Union Meeting 2015, 2015/05/24, 千葉市.

9. 小路真史、三好由純、他、In-situ observations of nonlinear wave particle interaction of electromagnetic ion cyclotron waves, 第 136 回 SGPSS 総会及び講演会, 2014/10/30-2014/11/03, 松本.

10. 小路真史、大村善治、Spectrum Characteristics of Electromagnetic Ion Cyclotron Triggered Emissions and Associated Energetic Proton Dynamics, Chapman Conference, 2014/09/01-2014/09/05, チェジュ、韓国.

11. 小路真史、大村善治、Spectrum Characteristics of Electromagnetic Ion Cyclotron Triggered Emissions and Associated Energetic Proton Dynamics, URSI General Assembly and Scientific Symposium, 2014/08/18-2014/08/20, 北京, 中国.

12. 小路真史、大村善治、Spectrum Characteristics of Electromagnetic Ion Cyclotron Triggered Emissions and Associated Energetic Proton Dynamics, AOGS 11th Annual Meeting, 2014/07/28-2014/08/01, 札幌市, (招待).

13. 小路真史、大村善治、電磁イオンサイクロトロン波動による非線形波動粒子相互作用, Japan Geoscience Union Meeting 2014, 2014/04/28-2014/05/02, 横浜市, (招待).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小路 真史 (SHOJI, Masafumi)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・特任助教

研究者番号：80722082