

惑星電磁圏におけるプラズマ粒子加速・加熱過程の計算機実験

加藤雄人¹、寺田直樹¹、八木学^{1,2}

田所裕康³、黒田剛史^{1,4}、寺田香織¹

1:東北大学大学院理学研究科 2:東京大学 3 武蔵野大学 4:情報通信研究機構

概要

本研究グループは、惑星電磁圏において様々な時間・空間スケールで生じるプラズマ粒子加速・加熱過程の定量的理解を目的として、大規模計算機実験を用いた研究を進めている。本課題では特に、地球磁気圏・放射線帯領域で発生し、相対論的電子加速過程において重要な役割を果たすとされるプラズマ波動ホイッスラーモード・コーラス放射の発生過程について着目した計算機実験を実施する。その結果、コーラス放射の発生に必要なとされる高エネルギー電子の分布関数と数密度が、その具体的な値とともに明らかとなった。また、背景場を MHD シミュレーションの結果に基づいて用いる連成計算を開始した。

1. はじめに

惑星電磁圏におけるプラズマ粒子の加速・加熱過程においては、様々な時間・空間スケールで生起する電磁プラズマ不安定が重要な役割を果たしている。マクロな不安定としては、惑星電磁圏と太陽風との相互作用により生じ、背景プラズマおよび電磁場の配位を決定する磁気流体力学的な不安定が挙げられ、ミクロな不安定としては、荷電粒子の旋回運動程度の時空間スケールでの、運動論的なプラズマ不安定が挙げられる。宇宙プラズマ中での粒子加速・加熱過程は、様々な時空間スケールで生じる不安定性の結果として生じる現象の一つである。これらのプラズマ不安定は、現象の持つ強い非線形性のため理論的な取り扱いが困難であり、詳細な物理過程を理解し定量的に評価する上で、計算機実験が不可欠な役割を果たしている。

本研究課題では研究対象として、惑星電磁圏でのプラズマ粒子-波動間相互作用に関する計算機実験を取り上げる。シミュレーションコードとしては、マクロな不安定は MHD コード、ミクロな不安定についてはプラズマ粒子個々の運動を電磁場の時空間発展と共に解き進める粒子コードならびに電子ハイブリッドコードを用いる。電子ハイブリッドコードとは、電子密度の大部分を担う低温成分を流体として扱い、低密度の高温成分のみを粒子として扱う独自のコードである。本課題ではこの電子ハイブリッドコードを用いて、先端的計算科学研究プロジェクトで 2015 年度に合計 6 ヶ月間利用させていただいた PRIMEHPC FX10・192 ノード・3072 コアを活用して、地球磁気圏の放射線帯領域で自然発生するプラズマ波動、ホイッスラーモード・コーラス放射の発生過程についての計算機実験を実施した。本プロジェクトを通じて大規模計算機リソースを占有できたことにより、従来の計算機実験では実現できなかった大きなシミュレーション空間と多数の粒子による大規模プラズマ粒子シミュレーションが可能となった。

本計算機実験で対象とするコーラス放射は、宇宙天気・宇宙環境の研究分野で最重要課題の一つとして挙げられる「放射線帯相対論的電子の生成過程」において重要な役割を果たす事がこれまでの衛星観測・理論研究により明らかとなっており、近年盛んに研究が進められている現象である。計算機実験で用いる電子ハイブリッドコードは、コーラス放射の発生過程を世界で初めて自己無撞着に再現し、また、コーラス放射の発生と同時に高効率な電子加速過程が生

じる事を定量的に示すことに成功している [Katoh and Omura, 2007a, 2007b, 2011, 2013]。本稿では、本課題により得られたコーラス放射発生過程に関する新たな知見について報告する。

2. 地球内部磁気圏・放射線帯での波動粒子相互作用

図1に本研究で対象とするプラズマ波動、コーラス放射の観測結果の一例を示す。コーラス放射は固有磁場を有する惑星の磁気圏で普遍的に観測されるプラズマ波動の一つとして知られている。時間的に周波数を上昇させる特徴的なスペクトルを示すコーラス放射は、半世紀を超える研究の歴史があるものの、その発生過程は未解明とされてきた。

これまでに申請者らが実施した計算機実験により、惑星電磁圏におけるプラズマ波動の励起過程ならびに粒子加速・加熱過程の双方で、惑星の固有磁場に捕捉された粒子が行う磁気赤道を中心とした南北両半球の往復運動（ミラー運動）が、現象を理解する上で鍵になる事が明らかになっている。ある磁力線上での固有磁場の強度分布は、磁気赤道で最小となり、高緯度になるほど大きくなっており、ミラー運動はこの背景磁場の空間勾配に起因する。このような非一様な構造の中で、粒子がプラズマ波動と相互作用することが、高効率な粒子加速・加熱過程を引き起こすための重要な要素となっている。この事はすなわち、実際の惑星電磁圏で生じている粒子加速・加熱過程の理解には、背景磁場の空間構造などの初期条件を現実の環境に即して設定し、計算機実験を実施する事が重要である事を示している。しかしながら、実環境下での計算機実験は、計算機資源の制約により実現が困難であった。

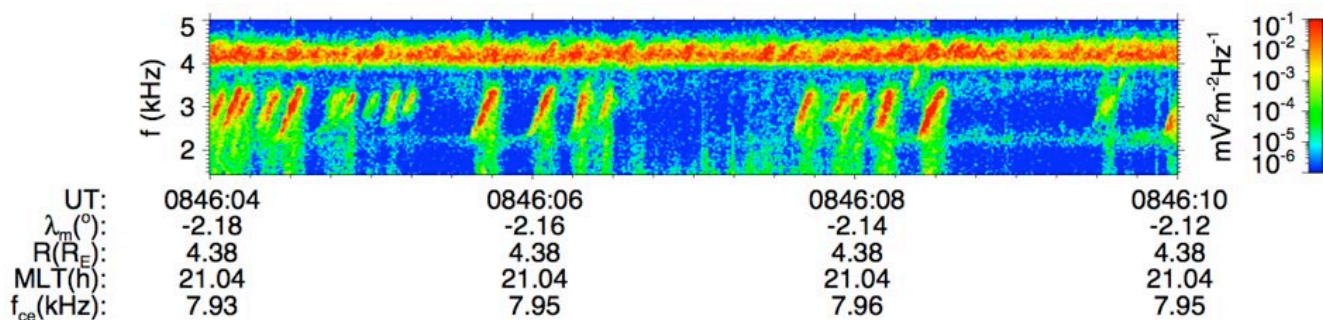


図1：CLUSTER 衛星による地球磁気圏赤道領域でのコーラス放射の観測結果 [Santolik et al., 2008]

この点に関して、先端的計算科学研究プロジェクトによる大規模計算機リソースを活用する事により、より大きなシミュレーション空間と多数の粒子を用いた計算機実験が可能となった。空間スケールは現実の地球磁気圏放射線帯領域での値を設定し、個々の粒子運動を解くプラズマ粒子の個数は2億6千万個を用いて、1024コアでは実時間1週間の規模となる計算機実験の実施が実現できた。この機会を活かして、従来の計算機リソースでは不可能であった、コーラス放射発生に至る条件を詳細に究明する。本研究課題は、2012年度・2014年度に同プロジェクトで採択いただいた課題で得られた成果をさらに発展させる課題と位置づけられる。

これまでに本研究課題により得られた成果から、コーラス放射発生過程での背景磁場構造の役割が明らかとなっている。一方で、コーラス放射発生の高エネルギー源となる高エネルギー電子は、磁気嵐など地磁気擾乱時には様々な速度分布関数を示すことが観測結果から明らかとなっている。そこで本研究課題では、磁気赤道領域で観測される高エネルギー電子の速度分布を参考として、様々な速度分布でのコーラス放射の発生条件を計算機実験により究明した。

計算結果の一例を図2に示す。高エネルギー電子の速度分布関数の初期条件として、速度分布の温度異方性を表すパラメータ A_T (背景磁場に対して平行方向・垂直方向の温度の比に対応) を様々に変化させて計算機実験を実施した。この図では、背景磁場の空間スケールと速度分布の非等方性を同一とした条件で、高エネルギー電子の数密度を変化させた場合に得られた計算結果を示している。この結果からは、コーラス放射の発生には一定の数密度が必要であり、また、数密度の増加に伴って波動強度やスペクトル特性が変化する様相が明らかになっている。

Spectra observed at northern hemisphere ($A_T = 9.0$)

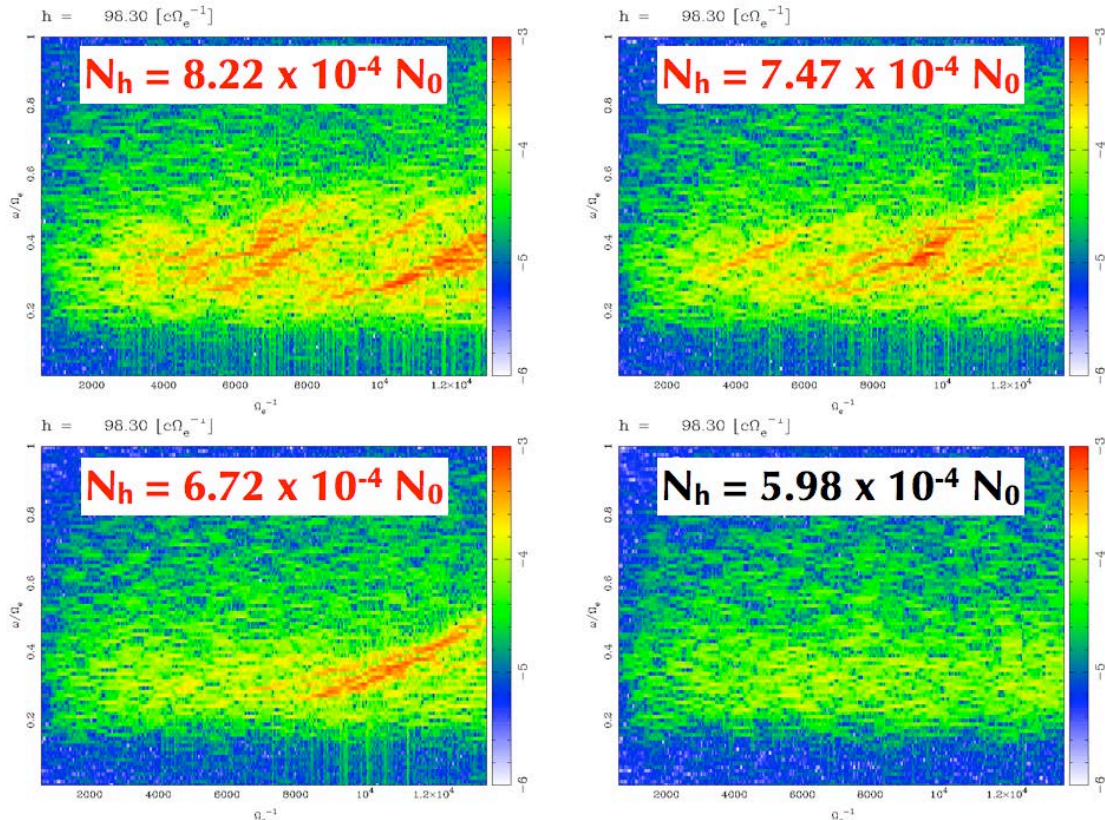


図2：計算機実験により再現されたコーラス放射のスペクトル。計算結果から示唆されるコーラス放射発生条件とスペクトル特性のパラメータ依存性。

図2に示される計算機実験を、異なる分布関数を高エネルギー電子の初期条件として与えて、コーラス放射の発生の有無を調査した結果を図3に示す。コーラス放射が再現されたパラメータを赤丸、明瞭なコーラス放射が見られなかったパラメータを青丸で示している。コーラス放射の発生条件としては、温度異方性が小さい場合は高エネルギー電子の数密度が一定量必要であることが予想されるが、どの程度の数密度が必要となるかを本研究の結果から定量的に示された。

昨年度の成果に基づけば、背景磁場強度の空間勾配が変化することで、コーラス放射の発生に必要な閾値も変化すると考えられ、図3で示した傾向もその影響を強く受けることが予想される。この点については、太陽風との相互作用による磁気圏構造の時間・空間変化を解き進めるMHDシミュレーションの結果を参照して、電子ハイブリッドコードの初期条件に用いる

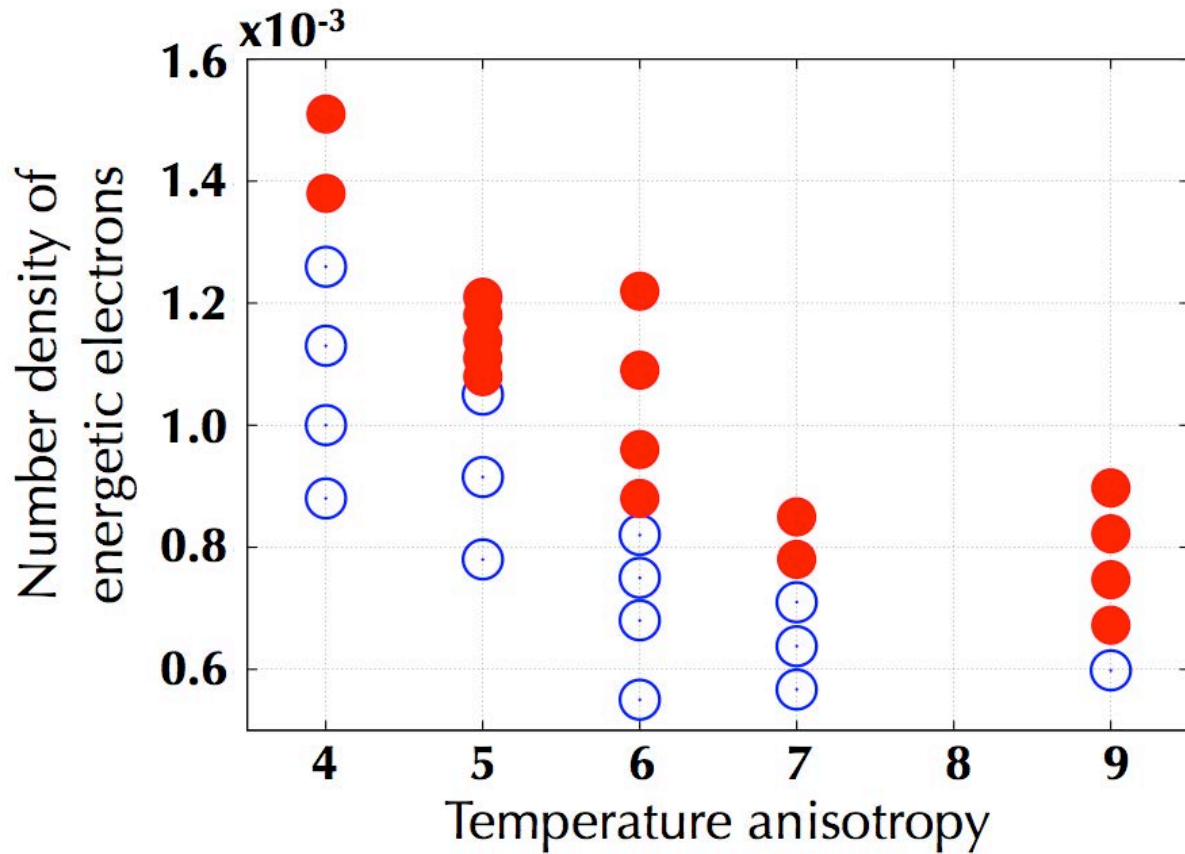


図3：計算機実験結果のサマリー。横軸は温度異方性（A_T）、縦軸は高エネルギー電子の数密度（背景電子密度を1とした場合の値）を示す。コーラス放射の発生した条件を赤丸、明瞭なコーラス放射が確認できなかった条件を青丸で示す。

ことにより、実際の惑星磁気圏での磁場構造が取り得る変動範囲を考慮した電子ハイブリッド・MHD連成計算の取り組みを開始した。今後連成計算の結果を蓄積していくことで、初期条件とコーラス放射発生の有無と、発生したコーラス放射のスペクトル特性との対応関係を定量的に明らかにする必要がある。また、コーラス放射のスペクトル特性と相対論的電子の加速機構との関連についての解析を計画しており、コーラス放射生成のメカニズムの解明および電子加速過程に関する理解を進める。

3. まとめと今後の課題

先端的計算科学研究プロジェクトによる計算機資源を活用して、惑星磁気圏において普遍的に見られるプラズマ波動、ホイッスラーモード・コーラス放射の発生過程に関する大規模計算機実験を実施した。2012年度・2014年度にプロダクトラン課題として採択された研究内容を更に発展させ、コーラス放射の発生過程ならびにスペクトル特性を決定する要因について計算機実験結果に基づいて考察した。その結果、コーラス放射の発生条件に深く関わる高エネルギー電子の分布関数と数密度の閾値を、定量的に明らかにすることに成功した。コーラス放射の波動特性は、相対論的電子の加速過程に対して大きな影響を及ぼすと考えられる。電子ハイブリッド・MHD連成計算の取り組みも積極的に進めて、今後も大規模計算機リソースの活用機会を捉えて、計算機実験により定量的な評価を実施する。

参考文献

- [1] Katoh, Y. and Y. Omura, Computer simulation of chorus wave generation in the Earth's inner magnetosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L03102, doi:10.1029/2006GL028594, 2007.
- [2] Katoh, Y. and Y. Omura, Relativistic particle acceleration in the process of whistler-mode chorus wave generation, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L13102, doi:10.1029/2007GL029758, 2007.
- [3] Katoh, Y. and Y. Omura, Amplitude dependence of frequency sweep rates of whistler mode chorus emissions, *J. Geophys. Res.*, 116, A07201, doi:10.1029/2011JA016496, 2011.
- [4] Katoh, Y. and Y. Omura, Effect of the background magnetic field inhomogeneity on generation processes of whistler-mode chorus and hiss-like emissions, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, 4189-4198, doi:10.1002/jgra.50395, 2013.
- [5] Santolik, O. et al., Frequencies of wave packets of whistler-mode chorus inside its source region: a case study, *Ann. Geophys.*, 26, 1665-1670, 2008.