

地球放射線帯電子の生成過程についてのプラズマ粒子シミュレーション

加藤雄人^{1,2}, 大村善治¹

京大生生存圏研究所¹, 東北大学大学院理学研究科惑星プラズマ・大気研究センター²

yuto@pparc.geophys.tohoku.ac.jp

概要: 磁場を持つ天体で普遍的な粒子加速過程の一つと考えられる、地球放射線帯の相対論的高エネルギー電子の生成過程を、大規模並列計算によるプラズマ粒子シミュレーションにより再現した。放射線帯電子の源である赤道領域での現象を電子スケールで模擬したことで、従来の近似的手法では記述できない非線形過程を捕えることに成功し、その非線形過程が生成過程の本質であることを明らかにした。今後さらに大規模なシミュレーションを実施することにより、放射線帯電子生成過程の新しい物理モデルの構築と、その時空間スケールの正確な評価が期待される。

1 はじめに

地球周辺の宇宙空間には、相対論的なエネルギーを持つ粒子が地球を取り巻くようにして分布しており、放射線帯と呼ばれている。放射線帯電子は、磁気嵐と呼ばれる宇宙環境の大規模な擾乱現象に対して敏感に応答し、そのフラックスを大きく変動させることが知られている。人工衛星の障害の要因となるなどする事から、放射線帯電子の変動現象の理解は、宇宙環境科学・宇宙天気研究の主要な課題の一つとして挙げられている。

放射線帯の赤道領域では、コーラス放射と呼ばれるプラズマ波動が自然発生している。観測研究の成果により、放射線帯電子はこのコーラス放射との相互作用により作り出されることが明らかとなっている。コーラス放射は木星、土星など磁場を有する惑星で共通して観測されており、普遍的な電子加速過程たりうる事が指摘されている。

一方、どのような物理過程によってコーラス放射が発生し、どのように相対論的電子が作り出されるのかについて、その物理の詳細は未解明の問題として残されてきた。その為、従来の放射線帯研究では、コーラス放射と放射線帯電子との相互作用を時空間平均し、近似的に取り扱う手法が主流である。しかしながら、放射線帯電子の源である赤道領域で生じている現象の本質は、電子スケールのマイクロな非線形過程であることが、大規模並列計算によるプラズマ粒子シミュレーションの結果から明らかとなった (Katoh and Omura, 2007a; Omura et al., 2008)。放射線帯電子の生成とコーラス放射の励起という2つのプロセスの究明には、プラズマ粒子個々の運動と電磁場の時間発展を解くプラズマ粒子シミュレーションによる、

スーパーコンピュータを用いた大規模計算機実験が唯一の方法論である。本研究は、自己無撞着な大規模プラズマ粒子シミュレーションにより物理素過程を詳細に議論し、放射線帯電子生成過程の新しい物理モデルを構築することを目的とする。

2 電子ハイブリッドモデル

本研究ではプラズマ粒子シミュレーションの手法の中でも独自のモデルである、電子ハイブリッドモデルを用いる。一般的なプラズマ粒子シミュレーションでは、系内に含まれる荷電粒子の運動を PIC 法 (Particle-In-Cell 法) により超粒子として解き進め、その結果生じる電流から Maxwell 方程式により電磁場の時間発展を各格子点で解く。電子ハイブリッドモデルでは、背景の冷たいプラズマを流体として扱い、熱的電子のみ粒子として個々の運動方程式を解く。これにより多大なメモリ容量と計算コストが割かれる粒子計算を効率的に行うことが可能となり、背景プラズマの非一様分布の設定も容易となる。

一本の磁力線に沿った 1 次元のシミュレーション空間を、赤道を中心に設定、背景磁場強度が空間的に変化する放射線帯赤道領域を模擬する。計算機資源の制約により、実スケールよりも 3.5 倍急峻な磁場空間勾配を用いる。約 3500km の空間に 200m の分解能で格子点を置き、熱的電子として約 7000 万個の超粒子を系内に配置する。コーラス放射の発生から相対論的電子の生成に至る一連の過程の再現に、0.1 μ sec 刻みで約 0.5 sec までの時間発展を計算した。本結果には、京都大学学術情報メディアセンターの HPC2500 を 4 ノード (512CPU) 使用し、2 週間の演算時間を要した。

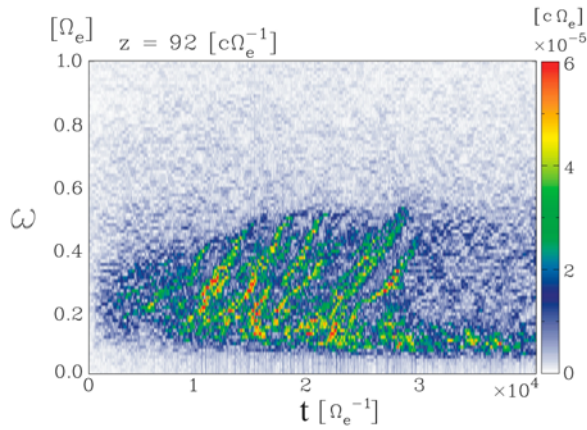


図1 再現されたコーラス放射の周波数スペクトル (Katoh and Omura, 2007a)

3 シミュレーション結果

電子ハイブリッド・コードによる大規模シミュレーションの結果、Maxwell 方程式を FDTD 法で直接的に解く方法でコーラス放射の生成過程を再現することに世界で初めて成功した (図1)。赤道を起源として生成されたコーラス放射が、南北両極方向に伝搬しつつ成長する様相が見取れる (図2b)。図1に示されるように、周波数上昇を伴う狭帯域の波動が連続的に生成されており、飛翔体観測により得られているコーラス放射の特徴をよく再現している。この結果に端を発した理論研究により、コヒーレントな波動の成長に関する新しい非線形理論を構築、シミュレーション結果の理論解釈に成功した (Omura et al., 2008)。この成果はコーラス放射に関する観測・理論研究の50年余りの歴史の中で画期的な成果として、国内外で高い評価を受けている。さらにシミュレーション結果では、生成されたコーラス放射により高効率に加速される電子の存在が見出されており (図2a)、放射線帯電子の生成過程では非線形過程が本質であることを示す重要な成果となった。

4 まとめ

大規模並列計算を用いたプラズマ粒子シミュレーションにより、コーラス放射発生と相対論的電子の生成を世界で初めて再現することに成功した。その結果は、磁場を有する天体に普遍的な加速過程と考えられる、コーラス放射が関わる波動粒子相互作用の本質を明らかとした。更に大きな計算機リソースを利用することで、放射線帯電子生成過程の時空間スケールの正確な評価が期待される。今後の大規模計算に向けて、本シミュレーション

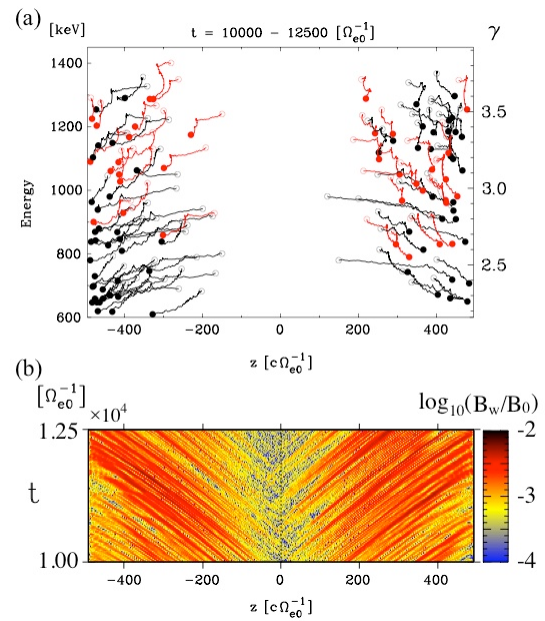


図2 (a)加速電子の軌跡 (Katoh and Omura, 2007b) と (b)コーラス放射の伝搬の様子

コードには並列化手法に改善の余地が残されている。現在並列化手法として採用している、粒子計算を各プロセスに均一に割り付ける粒子分割法では、電磁場の計算が冗長実行されている。性能向上には、各プロセスに担当するシミュレーション領域を割り付ける領域分割法が望ましいが、粒子の空間分布が非一様であるため、プロセス間のロードバランスが問題となる。この点に関し、Nakashima et al. (2007)によりロードバランスを取りつつ領域分割を実現する新しいアルゴリズムが提案されている。これら最新の並列化手法を活用することで、効率的な超並列計算の実現を図る。

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, 2007a.
- [2] Katoh Y. and Y. Omura, 「Relativistic particle acceleration in the process of whistler-mode chorus wave generation」, Geophys. Res. Lett., 34, L13102, 2007b.
- [3] Omura, Y., Y. Katoh, and D. Summers, 「Theory and simulation of the generation of whistler-mode chorus」, J. Geophys. Res., 113, A04223, 2008.
- [4] Nakashima, H., H. Usui, and Y. Omura, 「OhHelp: A simple but efficient space-partitioned dynamic load balancing for particle simulations」, 情報処理学会研究報告, vol. 2007, No. 122, pp. 25-30, 2007.