

# 高エネルギー電子の共鳴拡散過程についての 計算機シミュレーション

加藤 雄人<sup>1</sup>、小野 高幸<sup>2</sup>、飯島 雅英<sup>2</sup>

1：京都大学・生存圏研究所

2：東北大学・理学研究科・地球物理

本研究では、プラズマ波動と電子との相互作用を独自のモデルに基づいて取り扱うシミュレーションコードの開発を進め、これを用いてサイクロトロン共鳴による相対論的高エネルギー電子の拡散過程についての計算機実験を実施している。本稿では周期境界条件を用いた計算機シミュレーションの初期結果について述べ、共鳴拡散過程を開放系で取り扱うことの重要性について論じる。

## 1. はじめに

気象衛星や GPS 衛星など人類の宇宙利用の拡大とともに、衛星障害の回避や原因の究明が重要な課題となっている。衛星障害を引き起こす要因の多くは衛星周辺の環境の変動に大きな影響を受けることから、地球周辺の宇宙空間の変動を包括的に取り扱う宇宙環境科学の重要性が広く認識されつつある。その中でも、 $3.5 \sim 7.0 R_E$  ( $R_E$  は地球半径)に位置する地球放射線帯外帯で磁気嵐時に観測される相対論的電子フラックスの変動の物理は、近年特に注目を集めている研究課題である。本研究ではこのフラックス変動に深く関わるとされる、whistler-mode の波動と相対論的高エネルギー電子との共鳴拡散過程についてのシミュレーション研究を進めている。

90 年代以降の人工飛翔体による直接観測の結果から、放射線帯外帯での相対論的電子フラックスが磁気嵐主相において消失し、回復相において増大する様相が明らかにされている [Baker et al., 1994; Meredith et al., 2002]。放射線帯における高エネルギー電子の生成プロセスに対して行われてきた従来の研究では、磁気嵐時に強い強度で観測される whistler-mode の波動とのサイクロトロン共鳴を基本とする統計的な加速プロセスが重要とされ [Horne and Throne, 1998; Summers et al., 1998]、準線形理論に基づいて求められた拡散係数を用いて共鳴電子の加速効率および速度分布の時間変動量等が議論されてきている [e.g. Summers and Ma, 2000]。準線形理論に基づく放射線帯電子の共鳴拡散過程に関する研究は、放射線帯が比較的安定な領域として認識されていた 60 年代から行われている [Kennel and Petschek, 1966; Lyons 1974]。その成果を数時間から数日の時間スケールの変動に対して応用した近年の研究は、フラックス変動の物理的理解に対して一定の成果を挙げているが、準線形理論で用いられる仮定が磁気嵐時の放射線帯に適しているかについて議論すべき余地が残されている。

本研究ではこれまでに、孤立系が仮定される準線形理論に基づく拡散量の計算結果と開放系を用いた計算機シミュレーションの結果とを示し、拡散過程に対する計算機シミュレーションを用いた定量的な評価の必要性を示した [加藤 他, 2004]。この結果から、開放系として捉えられる磁気嵐時の放射線帯領域の物理を準線形理論で取り扱う際の問題点が指摘されている [Katoh et al., 2005a]。この成果によってなされた問題提起に基づいて、準線形理論が仮定する孤立系の下での変動量の比較を試みることを目的とし、周期境界条件の下での計算機シミュレーションを実施した。

## 2. シミュレーションコードの概要

放射線帯外帯でのパラメータを用いる場合、空間スケールの大きく異なる要素をシミュレーションモデル中で考慮する必要がある (whistler-mode の波動の波長は km オーダーとなり、その伝播の媒質となるコールド電子のデバイ長は数 m のオーダーとなる)。その一方で電子の運動に関する計算機実験で従来用いられている PIC (Particle in Cell) コードでは、空間グリッドの幅がデバイ長の数倍程度に制限されることから、計算機実験の実施には非常に多くの計算機資源が必要となる。それに対して本研究で用いるシミュレーションコードは電子のコールド成分を流体、ホット成分を粒子として扱う独自のモデルに基づいており、大きな空間スケールが必要とされる電磁波と高エネルギー電子との共鳴についての計算機実験に適したモデルとなっている [Katoh et al., 2005b]。

基礎方程式は以下のとおりである。

$$\frac{\partial v_f}{\partial t} = -(v_f \cdot \nabla) v_f - \frac{e}{m} (E + v_f \times B) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho_f v_f) \quad (2)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -\nabla \times E \quad (3)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \nabla \times B - \frac{1}{\epsilon_0} J \quad (4)$$

$$\frac{d p_p}{dt} = q(E + v_p \times B) \quad (5)$$

$$\frac{d \mathcal{E}_{kin}}{dt} = v_p \cdot \frac{d p_p}{dt} \quad (6)$$

$$P_p = \frac{v_p}{c^2} \mathcal{E}_{kin} \quad (7)$$

ここで添字 f, p はそれぞれ電子の流体成分、粒子成分の物理量を示し、 $P_p$  及び  $\mathcal{E}_{kin}$  はそれぞれ高エネルギー電子の運動量及び運動エネルギーを示す。

本稿で用いるシミュレーション空間は背景磁場方向の一次元空間であり、周期境

界条件を用いることで、準線形理論の仮定する孤立系空間を模擬する。シミュレーションでは、シミュレーション空間の一部に設けられた注入領域の電場を強制的に振動させることによりプラズマ波動を生成する。シミュレーション空間は一次元であるが、電磁場及び運動量はそれぞれ XYZ 方向 3 成分を解き進める。

シミュレーションで用いる初期パラメータを表 1 に示す。熱速度が  $0.5 c$  ( $c$ : 光速) の Maxwellian をホット電子の初期速度分布として与え、シミュレーション空間内に一様に配置する。注入する whistler-mode の波動は  $0.5 \omega_{pe}$  にピークを持つ  $0.4 \omega_{pe}$  から  $0.6 \omega_{pe}$  までのガウシアン周波数スペクトルを、振幅の実行値が  $1 \text{ mV/m}$  となるように与える。Whistler-mode の波動がシミュレーション空間中を伝搬する過程で生じる共鳴により、ホット電子の運動に及ぼされる変化について着目する。本稿では  $100000 \text{ step}$  ( $4500 \omega_{pe}^{-1}$ ; 約  $25 \text{ msec}$  に相当) の時間スケールでのシミュレーション結果について示す。

背景電子のプラズマ周波数 $\omega_{pe}$	$2 \omega_{pe}$
グリッド幅 $x$	$0.06 c / \omega_{pe}$ (約 $100 \text{ m}$ )
タイムステップ幅 $t$	$0.045 \omega_{pe}^{-1}$
グリッド数 $Lx$	16384
ホット電子の背景電子に対する数密度比	$10^{-4}$
1 グリッドあたりの超粒子数	1024

表 1 シミュレーションで用いる初期パラメータ

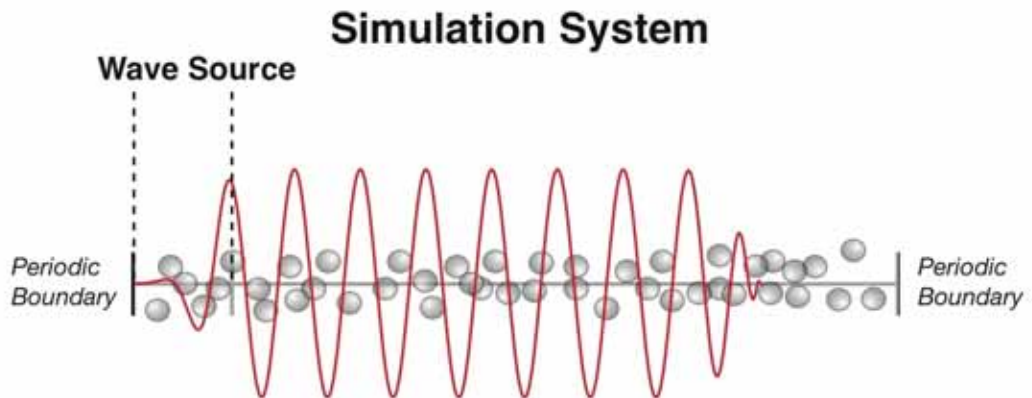


図 1 周期境界条件を用いたシミュレーション空間の模式図。ホット電子はシミュレーション空間に一様に分布する。プラズマ波動はシミュレーション空間中に設定された注入領域内の電場を強制的に振動させることにより生成される。

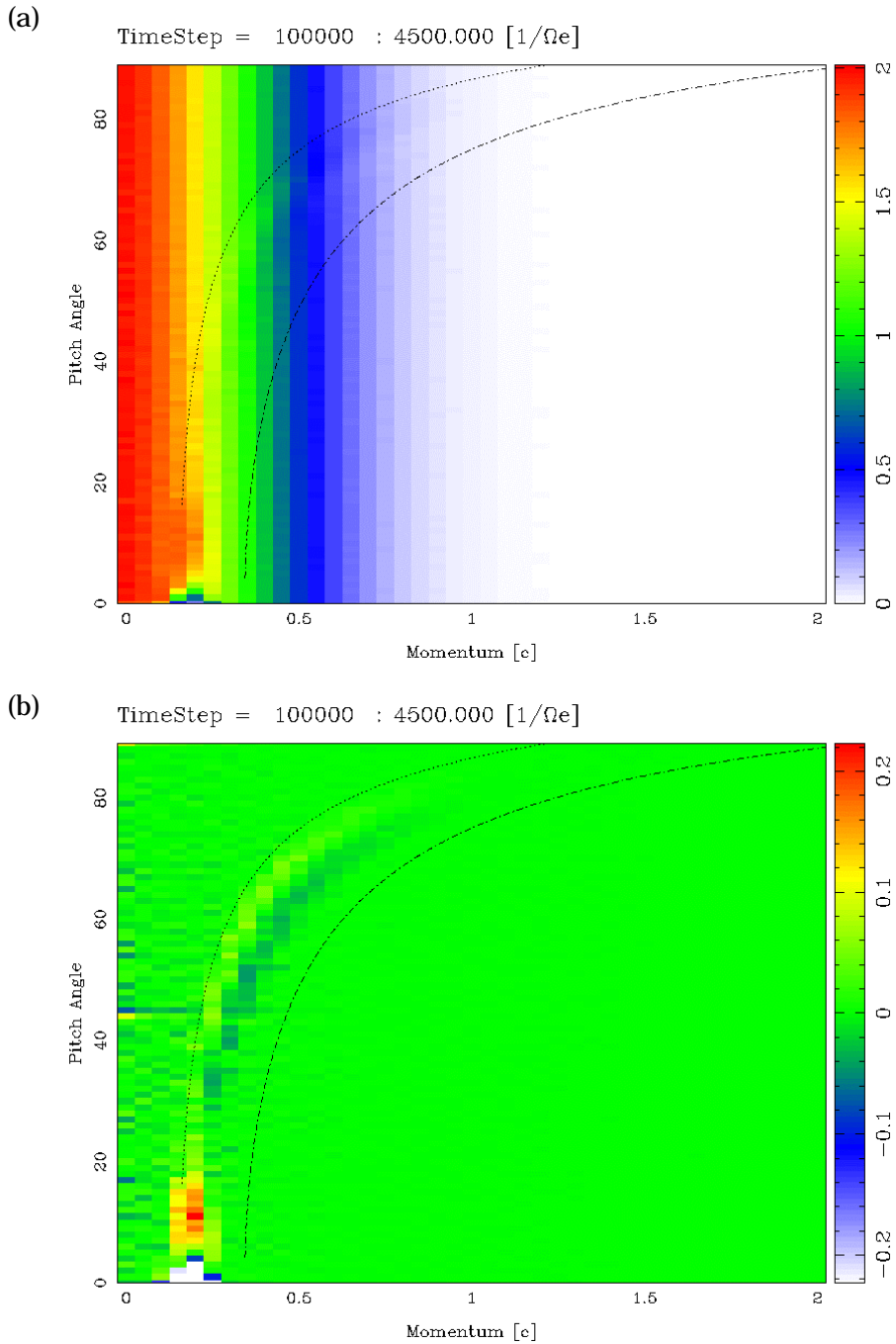


図2 (a)  $4500 \text{ e}^{-1}$ における運動量 - ピッチ角空間上での電子の数密度分布と(b)初期分布からの変動量。カラースケールの単位は  $10^{-6} \text{ m}^{-3}$ である。図中の破線はそれぞれ  $0.4 \text{ e}$ から  $0.6 \text{ e}$ のwhistler-modeに対する1次のサイクロトロン共鳴曲線を示している。

### 3. シミュレーション結果

図2にシミュレーションの結果得られた電子の運動量 - ピッチ角空間上での分布の変化量を示す。図2に示された結果では、設定した周波数帯域に対して1次のサイクロトロン共鳴条件

$$\omega - kv_p = \Omega_e / \gamma ; \gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2} \quad (8)$$

を満たす領域で電子の分布に変動が生じており、whistler-modeの波動との共鳴による速度分布の変化が再現できていることが示されている。シミュレーション結果から運動量分布・ピッチ角分布を求めたものを図3に示す。この結果と開放系での計算結果(加藤他、2004の図4)とを比較すると、ピッチ角分布の変動に関して、0度に近い電子の変動が大きく現れる結果が、今回のシミュレーションでも同様に得られている。その一方で、20~60度のピッチ角を持つ電子の変動に関しては準線形理論に基づいて得られる変動と同じ傾向を示している点が注目される。

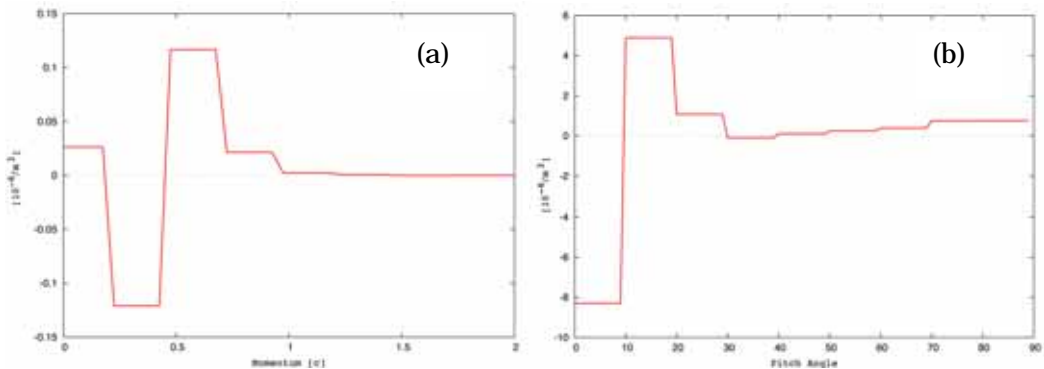


図3 4500 e<sup>-1</sup>における(a)運動量および(b)ピッチ角分布の初期分布からの変動量。

### 4. まとめ

Whistler-modeの波動と相対論的高エネルギー電子との共鳴拡散過程について、独自のモデルを用いての計算機実験を実施した。これまでの研究成果により指摘されている開放系・孤立系それぞれの系での拡散過程の違いを検討することを目的として、周期境界条件を用いたシミュレーションコードの開発を新たに行い、共鳴の様相を正確に再現できていることが示された。シミュレーションにより得られた結果からは、特にピッチ角分布の変動に関して、開放系でのシミュレーション結果と準線形理論に基づく結果の双方に見られていた変動と一致する傾向が現れている。

以上の結果は、whistler-modeの波動による共鳴拡散過程についての計算機実験に対して本シミュレーションモデルの有効性を示すものである。磁気嵐時の地球放射線帯は開放系として捉えられ、そこでの共鳴拡散過程を取り扱う際には開放系としての取り扱いが本質的に重要となる。開放系における共鳴拡散過程を扱う理論はいまだ確立されておらず、計算機シミュレーションによってのみ評価が可能な研究課題である。今後開放系における共鳴拡散過程についての議論を進める際に、今回開発された孤立系の下での計算機実験による結果との比較が有効であり、系の違い

による共鳴拡散過程への影響についての重要な成果が得られると期待される。

## 謝辞

本研究は東北大学情報シナジーセンターとの平成16年度共同研究課題「電磁波との共鳴による電子加速についての計算機シミュレーション」による成果であり、シミュレーションコードの開発にあたっては同センターとの共同研究として進められた。対象とする物理過程を捉えるに十分な時間・空間スケールでのシミュレーションを現実的な演算時間で実施する為には、本シミュレーションコードのチューニングが必須の課題であった。独自のモデルに基づく本コードのチューニングにおいては共同研究を通じた有益な助言と多大な協力をいただき、本シミュレーションコードのSX-7での演算性能の向上において大きな効果を得ることができた。

## 参考文献

- [1] Baker, D. N., J. B. Blake, L. B. Callis, J. R. Cummings, D. Hovestadt, S. Kanekal, B. Klecker, R. A. Mewaldt, and R. D. Zwickl, Relativistic electron acceleration and decay time scales in the inner and outer radiation belts: SAMPEX. *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 409–412, 1994.
- [2] Horne, R. B. and R. M. Thorne, Potential waves for relativistic electron scattering and stochastic acceleration during magnetic storms, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 3011–3014, 1998.
- [3] 加藤、小野、飯島、Whistler-modeの波動による高エネルギー電子の共鳴拡散過程についての計算機実験、SENAC, **37**, 3, 7–15, 2004.
- [4] Katoh, Y., T. Ono, and M. Iizima, Numerical experiment of resonant scattering process of high energetic electrons in the outer radiation belt, *Earth Planets Space*, **57**, 2, 117–124, 2005a.
- [5] Katoh, Y., T. Ono, and M. Iizima, A numerical study on the resonant scattering process of relativistic electrons via whistler-mode waves in the outer radiation belt, AGU Monograph on “*Physics and Modelling of the Inner Magnetosphere*”, edited by T. Pulkkinen, R.H.W. Friedel, and N. Tsyganenko, in press, 2005b.
- [6] Kennel, C. F. and H. E. Petschek, Limit of stably trapped particle fluxes, *J. Geophys. Res.*, **71**, 1–28, 1966.
- [7] Lyons, L. R., Pitch angle and energy diffusion coefficients from resonant interactions with ioncyclotron and whistler waves, *J. Plasma Phys.*, **12**, 417–432, 1974.
- [8] Meredith, N. P., R. B. Horne, D. Summers, R. M. Thorne, R. H. A. Iles, D. Heyndreickx, and R. R. Anderson, Evidence for acceleration of outer zone electrons to relativistic energies by whistler mode chorus, *Ann. Geophys.*, **20**, 967–979, 2002.
- [9] Summers, D., R. M. Thorne, and F. Xiao, Relativistic theory of wave-particle resonant diffusion with application to electron acceleration in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **103**, 20487–20500, 1998.
- [10] Summers, D. and C. Y. Ma, A model for generating relativistic electrons in the Earth's inner magnetosphere based on gyroresonant wave-particle interactions, *J. Geophys. Res.*, **105**, 2625–2639, 2000.