

# Monochromatic Whistler mode waveによる 放射線帯高エネルギー電子の共鳴拡散過程

加藤 雄人、大村 善治  
(京都大学・生存圏研究所)

## 1 はじめに

衛星搭載機器の異常の要因ともなる地球放射線帯高エネルギー粒子の物理は、宇宙環境科学および宇宙空間物理学の観点から重要な問題と認識されており、近年多くの研究者の注目を集めている。特に地球放射線帯外帯 (3.5~7.0 Re) は磁気嵐に対して敏感な応答を示し、磁気嵐主相において外帯を構成する高エネルギー電子フラックスが消失した後、回復相において再形成される様相が複数の飛翔体による観測結果から明らかとなっている [Baker et al., 1994; Li et al., 1997; Obara et al., 2000; Meredith et al., 2002]。この外帯再形成過程の物理機構については現在も議論が重ねられているが、Radial Diffusion により放射線帯の外部から供給された高エネルギー電子が、放射線帯内部での加速機構により相対論的エネルギーにまでさらに加速されるとするシナリオが有力な候補として認識されている。この放射線帯内部での加速機構としては、磁気嵐時に強い強度で観測されるプラズマ波動との波動粒子相互作用、特に Whistler mode chorus による共鳴拡散過程が重要とされている。

本研究では Whistler mode の波動と高エネルギー電子との波動粒子相互作用による加速機構に着目し、keV オーダーの電子によって励起される Whistler mode の波動と MeV オーダーの電子との共鳴についての計算機シミュレーションを行った。Whistler mode chorus の励起機構は未解決の問題が多く残されているものの、波動のエネルギー源となるのは keV オーダーの電子であり、励起源は磁気赤道であるとの考えが一般的に受け入れられている。本発表では、磁気赤道に存在する keV オーダーの電子が持つ温度異方性により Whistler mode の波動が励起され、励起された波動と MeV オーダーの相対論的高エネルギー電子とが共鳴し、結果として keV オーダーの電子の運動エネルギーが MeV 電子のエネルギーへと輸送されるシナリオの基礎過程を、計算機シミュレーションにより再現する。

## 2 シミュレーションモデル

本研究で実施する計算機シミュレーションは、プラズマ波動伝搬の媒質となる背景電子を流体、高エネルギーの電子を粒子として取り扱うモデルに基づいている [1]。モデル中では背景のコールド電子、keV オーダーのエネルギーを持つ電子及び相対論的エネルギーを持つ電子の3粒子種を考慮する (本文中ではそれぞれの粒子種を背景電子、keV 電子および MeV 電子と呼ぶ)。

シミュレーション空間として背景磁場に沿った一次元空間を設定し、keV 及び MeV 電子を空間中に一様に配置する。初期条件として keV 電子の分布に  $v_{th,\perp}/v_{th,\parallel} = 4.0$  の温度異方性を与えると、温度異方に起因するプラズマ不安定性による Whistler mode の波動の励起が期待される。励起される波動の特性は線形解析によって評価することが可能であ

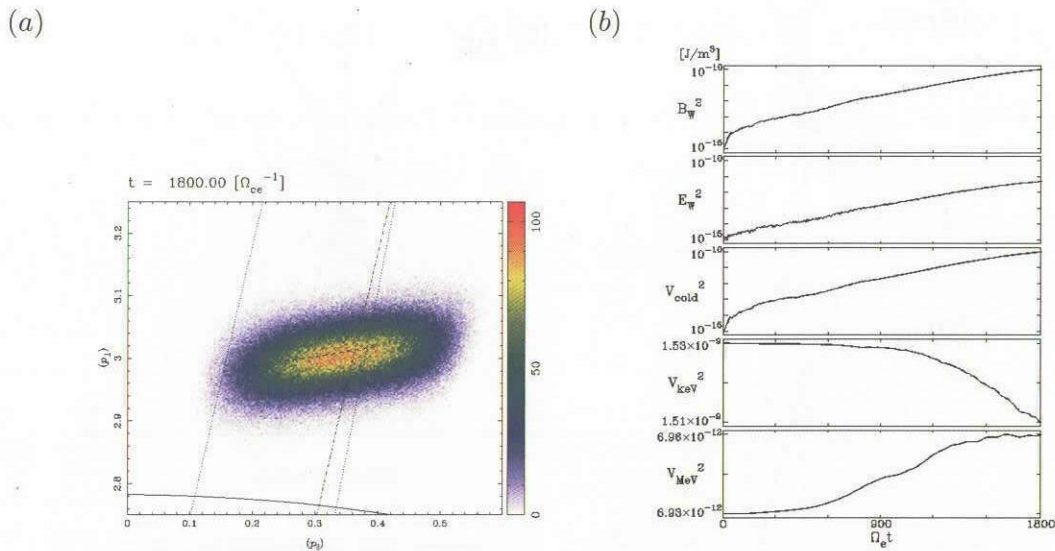


図 1: (a) MeV 電子の運動量空間上での  $1800\Omega_e^{-1}$  での分布。MeV 電子が拡散曲線に沿って拡散している。(b) 各エネルギーの時間発展。上から順に Whistler-mode の波動の磁場及び電場エネルギー、背景電子、keV 電子及び MeV 電子の運動エネルギーを示す。[Katoh and Omura, 2004]

り、その結果から波数が  $0.417\Omega_e/c$ 、周波数が  $0.62\Omega_e$  の Whistler mode (伝搬角  $0^\circ$ ) において成長率が最大 ( $1.12 \times 10^{-2}\Omega_e$ ) となることが示される。シミュレーションの総時間ステップは  $1800\Omega_e^{-1}$  (実時間にして約 2msec) であり、この時間スケールの中での波動励起プロセスと高エネルギー電子の粒子運動の時間発展を併せて解き進め、サイクロトロン共鳴を基本とする波動-粒子間の相互作用と MeV 電子の分布の変化について着目する。

### 3 結果

ここでは 2つのシミュレーション結果 (それぞれ Run 1, Run 2 とする) を示す。図 1 は Run 1 の結果であり、MeV 電子の運動量空間中での分布と、各エネルギーの時間変化を示している。シミュレーション中では  $0.423\Omega_e/c$  (mode 13;  $k = 13k_{min}$ ) の波数を持つ Whistler mode の波動が励起され、線形解析の結果に一致する成長率で成長することが確認された。励起される Whistler mode は単色に近い狭帯域の波動スペクトルを持ち、図 1(b) には波動の励起とともに MeV 電子の運動エネルギーが増大している様相が示されている。この時、図 1(a) に示されるように、MeV 電子は運動量空間上を拡散曲線 (diffusion curve) に沿った方向に拡散されていることから、MeV 電子の運動エネルギーの増分は Whistler mode の波動との共鳴を介して keV 電子から輸送されたものであると結論付けられる。Run 1 で設定された MeV 電子の初期の運動エネルギーは約 1.1MeV に当たり、Whistler mode の波動との共鳴によるエネルギー変化量は約 46keV に相当する。

次に Run 2 として、MeV 電子の分布をより現実に近い、100keV から数 MeV までの広いエネルギーレンジをカバーする、べき乗分布 ( $f(\mathcal{E}_{kin}) = C\mathcal{E}_{kin}^2$ ) としてシミュレーションを実施した。その結果、90 度に近いピッチ角を持つ高エネルギー電子の一部が、非常に高い効率で加速を受ける様相が見出された。例として、初期状態で 200keV のエネルギーレンジに存在する電子を取り上げると、 $1800\Omega_e^{-1}$  の間に 300keV を超えるエネルギーにま

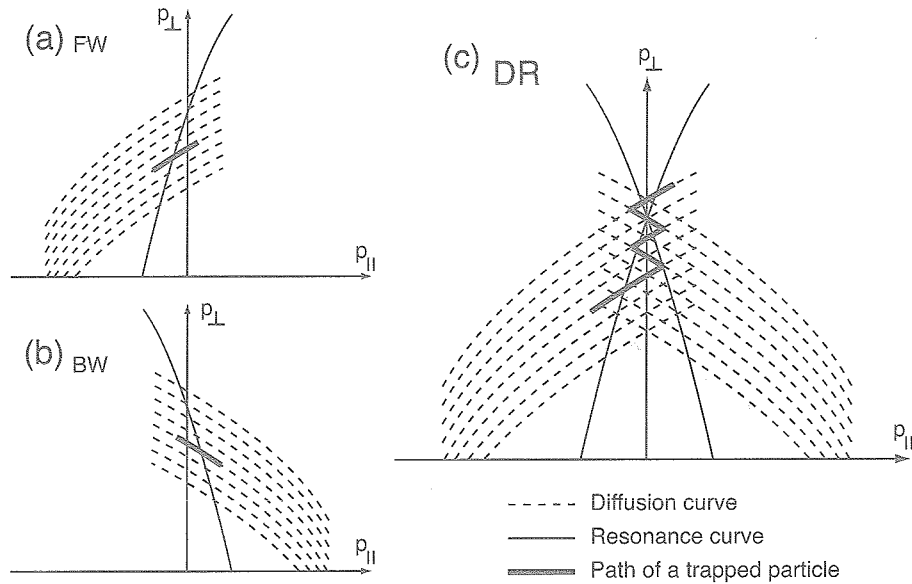


図 2: Run 2で見出された、高効率で加速された電子の運動を説明するモデル [Katoh and Omura, 2004]。前進波と後進波それぞれによる捕捉の効果が重ね合わさることにより、単一の波動では一つの拡散曲線にのみ沿っていた電子の運動が、複数の拡散曲線を乗り換えることで加速される。

で加速される電子が0.05%の割合で存在した。このように高い加速効率を生み出すプロセスは、図2に示されるような、前進波と後進波による効果の重ね合わせによって説明できる。温度異方に起因する不安定性では、前進・後進両方の Whistler mode が励起されることから、温度異方を持つ高エネルギー電子が頻繁に観測される実際の内部磁気圏においても、同様のプロセスによって電子の効率的な拡散が生じている可能性が指摘される。

## 4 まとめ

シミュレーションの結果から、Whistler mode の波動を介した keV 電子と MeV 電子との間でのエネルギーの移動が再現され、狭帯域の Whistler mode の波動による捕捉が MeV 電子のエネルギー変化に大きく影響を及ぼすことが示された。また、温度異方に起因する不安定性のように、前進波と後進波が混在する条件下において生じる高効率の加速プロセスの存在が指摘された。なお、本発表の内容は投稿論文の一部としてまとめられている [2]。

## 参考文献

- [1] Yuto Katoh, Takayuki Ono, and Masahide Iizima, A numerical study on the resonant scattering process of relativistic electrons via whistler-mode waves in the outer radiation belt, *Physics and Modeling of the Inner Magnetosphere*, eds. T. Pulkkinen, R.H.W. Friedel, and N. Tsyganenko, AGU Geophysical Monograph, (AGU, Washington, D. C., 2004), in press.
- [2] Yuto Katoh and Yoshiharu Omura, Acceleration of relativistic electrons due to resonant scattering by whistler mode waves generated by temperature anisotropy in the inner magnetosphere, *J. Geophys. Res.* 109, A12214, 2004, doi:10.1029/2004JA010654.