

## WPIA手法に基づくホイッスラーモードコーラス放射による高エネルギー電子の ピッチ角散乱過程の定量評価について

# 北原理弘 [1]; 加藤 雄人 [1]; 小嶋 浩嗣 [2]; 大村 善治 [2]  
[1] 東北大・理・地球物理; [2] 京大・生存圏

### Simulation study of WPIA for direct measurements of pitch angle scattering of electrons by chorus emissions

# Masahiro Kitahara[1]; Yuto Katoh[1]; Hirotsugu Kojima[2]; Yoshiharu Omura[2]  
[1] Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ.; [2] RISH, Kyoto Univ.

Pitch angle scattering of energetic electrons by chorus emissions is one of significant wave-particle interactions in the Earth's magnetosphere. A number of previous studies showed that electrons with the kinetic energy of a few keV to tens keV are scattered by whistler-mode waves and that the scattered electrons precipitated into the atmosphere cause diffuse aurora and/or pulsating aurora. However, recent studies suggest that the dominant wave mode contributing to the precipitation should be different depending on the local time and radial distance in the magnetosphere. In addition, the location where the efficient pitch angle scattering occurs and the physical process controlling the characteristic time scale of aurora have not been identified yet. Therefore, direct measurements of wave-particle interactions would contribute the thorough understanding of the pitch angle scattering in the magnetosphere.

Fukuhara et al. (2009) proposed a new instrumentation called Wave-Particle Interaction Analyzer (WPIA), which measures a relative phase angle between a wave magnetic field vector and a velocity vector of each particle and calculates the energy exchange between waves and particles. The WPIA is able to directly detect wave-particle interactions in space plasmas and will be installed on the ERG satellite of JAXA/ISAS. In the present study, in addition to the energy exchange proposed by Fukuhara et al. (2009), we propose the direct measurement of the pitch angle scattering of resonant particles by plasma waves via the WPIA by computing the Lorentz force of wave electromagnetic fields acting on each particle.

We apply the proposed method to results of the one-dimensional electron hybrid simulation reproducing the generation of whistler-mode chorus emissions around the magnetic equator [Katoh and Omura, 2007]. By using the wave and velocity vectors of 180 - 220 keV electrons obtained at fixed observation points assumed in the simulation system, we analyze the averaged Lorentz force acting on each particle in the whole simulation time, corresponding to 20,000 gyro periods. We use the time and pitch angle resolutions of 500 gyro-periods and 1 degree, respectively, for the analysis.

In the result of the analysis, we obtain significant values for electrons in the kinetic energy and pitch angle ranges satisfying the cyclotron resonance condition with the reproduced chorus emissions. The obtained value is three times larger than the magnitude of perturbations in other pitch angle ranges. We compared the result of the analysis with the temporal variation of pitch angle distributions and wave spectra observed at fixed points in the simulation. While the pitch angle distribution varies similarly in both hemispheres, the obtained Lorentz force is only significant in the pitch angle range corresponding to the electrons moving northward (southward) in the southern (northern) hemisphere, indicating the pitch angle scattering of electrons by pole-ward propagating chorus emissions. The results of the present study demonstrate that the proposed method enables us to identify the location where the pitch angle scattering occurs in the simulation system. We also discuss the method to evaluate the ambiguity of the WPIA measurement by referring the integration time, pitch angle resolution and number of particles necessary to obtain statistically significant values as well as an example of the application of the proposed analysis method to evaluate long-time variation of the distribution function of energetic/relativistic electrons including the nonlinear effect of wave-particle interactions by chorus emissions.

プラズマ波動による電子のピッチ角散乱は、地球磁気圏において重要な波動粒子相互作用の一つである。数 keV から数十 keV の運動エネルギーを持った電子は、ホイッスラーモード波動と広いピッチ角範囲でサイクロトロン共鳴条件を満たし、相互作用することが知られている。相互作用の結果としてピッチ角散乱を受けロスコーン角より小さいピッチ角を持つに至った電子については、地球大気に降り込みディフューズオーロラあるいはパルセイティングオーロラを発生させる原因となりうるというシナリオが数々の研究において示唆されている。一方で、近年の研究によりピッチ角散乱を担う波動のモードが磁気地方時や動径方向距離によって異なっている可能性が示唆されており、また、パルセイティングオーロラに特徴的な周期的発光の時間スケールを決める物理過程が同定されていないなど、未だ解明されていない問題が多く残されている。従ってピッチ角散乱の直接観測は、磁気圏内の波動粒子相互作用がどこでいつどのように生じているかを詳細に理解するために重要である。

波動粒子相互作用解析装置 (Wave-Particle Interaction Analyzer; WPIA) は Fukuhara et al. (2009) により提唱された新しいタイプの観測装置である。WPIA は波動の電磁場ベクトルと粒子の速度ベクトルの相対位相角を測定することにより、様々な物理量を演算・出力する装置である。WPIA は宇宙空間プラズマにおける波動粒子相互作用を直接的に観測することが期待され、JAXA/ISAS の次期磁気圏探査衛星 ERG に搭載される予定である。本研究では Fukuhara et al. (2009) により提案された波動粒子間のエネルギー授受量を表す物理量に加えて、ピッチ角散乱を直接計測するための物理量を提案する。具体的には個々の粒子の受けるローレンツ力の平均値あるいは積算値を計算する手法である。

本研究ではまず、コーラス放射の生成過程を再現したシミュレーションに対して新たに提案する WPIA 手法を適用し解析を行った。シミュレーションでは 1 次元ハイブリッドコードが用いられ、赤道付近でコーラスが発生し、両磁極に向かって振幅を増幅させながら伝搬する様相が示されている [Kato and Omura, 2007]。シミュレーション中に複数の疑似観測点を置き、その場所を通過した高エネルギー電子の速度ベクトルと電磁場ベクトルを用いて、シミュレーション時間全体に相当する 20000 ジャイロ周期にわたってローレンツ力の解析を行った。解析に用いる電子のエネルギー帯は 180 - 220 keV とし、時間分解能およびピッチ角分解能はそれぞれ 500 ジャイロ周期、1 度を想定して解析を行った。

解析の結果、発生するコーラス放射の周波数帯とサイクロトロン共鳴条件を満たすエネルギー・ピッチ角範囲に対応する電子が、ピッチ角散乱される方向に有意なローレンツ力を受けることを、本研究で提案する手法により定量的に評価できることが示された。解析により得られたローレンツ力の大きさは、共鳴条件から外れるピッチ角を持つ粒子が示す値の変動に対して、3 倍程度の値をとる事が示された。さらに、粒子のピッチ角分布の時間変動を北半球・南半球それぞれにおいて計測したところ、ピッチ角分布の変化する範囲や大きさは両半球でほぼ同様な結果となることに対して、ローレンツ力の解析では北半球（南半球）の地点では南（北）向きの波動の共鳴条件に対応するピッチ角範囲においてのみ有意な値が得られた。これは、赤道方向に運動する高エネルギー電子が、極方向に伝搬するコーラス放射によってピッチ角散乱を受けた事を示している。これらの結果から、本研究で提唱する新たな WPIA 解析手法によって、どのような粒子が・どの領域で・どの程度の強さのピッチ角散乱を受けるかを、直接且つ定量的に同定すること可能であることが示された。本発表では今回の解析手法の統計的不確定性を見積もりを行い、実際の観測において統計的に有意な値を得るために必要な時間分解能・ピッチ角分解能・積算回数などを議論するとともに、コーラス放射による非線形効果を含めた分布関数の長時間発展を評価する応用例についても報告する。