

サブストーム時の放射線帯・プラズマシート遷移領域における電子の位相空間密度の時空間変動

#太田 悠輝¹⁾, 海老原 祐輔¹⁾, 田中 高史²⁾

⁽¹⁾ 京都大学生存圏研究所, ⁽²⁾ 九州大学

Spatio-temporal evolution of electron phase space density in the radiation belt-plasma sheet transition region during substorm

#Yuki OTA¹⁾, Yusuke EBIHARA¹⁾, Takashi TANAKA²⁾

⁽¹⁾ Kyoto University, Research Institute for Sustainable Humanosphere, ⁽²⁾ KYUSYU UNIVERSITY

For the rebuilding of radiation belts, two theories, the internal acceleration theory and the external supply theory, have been proposed as mechanisms, and in both theories, the phase space density (PSD) of electrons in the transition region between the radiation belt and the plasma sheet is important. To understand the fluctuations in the PSD of electrons, it is necessary to track a large number of electron orbits. However, in the transition region between the radiation belt and the plasma sheet, the curvature radius of the magnetic field lines is close to the cyclotron radius, so the bounce-averaging approximation or the gyrocenter approximation may not always be applicable. To track electron trajectories, it is necessary to solve the equations of motion sequentially, but the characteristic timescale of large-scale geomagnetic disturbances such as substorms (100 – 1000 seconds) is long compared to the cyclotron period (0.1 milliseconds), making this computationally challenging. Furthermore, since the global magnetohydrodynamic (MHD) simulation REPPU uses an unstructured grid, complex interpolation calculations are required to obtain the magnetic and electric fields at arbitrary positions and times. Therefore, we significantly reduced the time required for interpolation calculations by pre-assigning the fields to a simple orthogonal coordinate grid. In this study, we focused on the time period when magnetic dipolarization associated with substorms occurred, placed test particles on concentric circles at the magnetic equatorial plane and a geocentric distance of 7 RE, and traced them backward in time. Assuming a distribution function at the simulation boundary, we reconstructed the PSD using the phase space mapping method. As a result, we confirmed that the PSD of electrons with energies below 60 keV increased in a relatively wide region on the night side, and that the PSD of electrons with specific energies about 100 keV increased selectively in a narrow region around midnight. Upon examining the acceleration process along the electron trajectory, we found that the first adiabatic invariant is generally conserved from the far side of the plasma sheet to 7 RE, but since the trajectory depends on the gyro phase, the gyro-center approximation cannot be applied, and it is possible that two different types of acceleration are occurring. We will examine the spatio-temporal evolution in the PSD of electrons associated with substorms from the perspective of their dependence on energy, pitch angle, and gyro phase, and discuss the details.

放射線帯の再生機構として内部加速説と外部供給説が考えられているが、その双方において放射線帯・プラズマシート遷移領域における電子の位相空間密度は重要である。電子の位相空間密度の変動を理解するためには非常に多くの電子の軌道を追跡する必要があるが、放射線帯・プラズマシート遷移領域では磁力線の曲率半径がサイクロトロン半径に近く、バウンス平均近似や旋回中心近似をいつも適用できるとは限らない。電子の軌道を追跡するためには運動方程式を逐次的に解く必要があるが、0.1 ミリ秒オーダーのサイクロトロン周期に対し、サブストームなど磁気圏大規模変動の特徴時間スケール（100～1000 秒オーダー）は長く、計算時間の観点から困難である。また、グローバル電磁流体（MHD）シミュレーション REPPU は非構造格子を用いているため、任意の位置・時刻における磁場と電場を取得するためには複雑な内挿計算が必要である。そこで、単純な直交座標格子に予め場を割り当てることで内挿計算にかかる時間を大幅に短縮した。本研究では、サブストームに伴う磁気双極子化がおきた時間帯に着目し、磁気赤道面かつ地心距離 7 RE の同心円上にテスト粒子を配置し、時間について逆方向に追跡した。シミュレーション境界における分布関数を仮定し、位相空間写像法を用いて位相空間密度の再構築を行った。その結果、双極子化に伴い、夜側の比較的広い領域で 60 keV 以下のエネルギーを持つ電子の位相空間密度が増加すること、真夜中付近の狭い領域では 100 keV 帯の特定のエネルギーを持つ電子の位相空間密度が選択的に増加することを確認した。この電子の軌道に沿って加速過程を精査したところ、プラズマシート遠方から 7 RE に到達するまでの間、第一断熱不変量は概ね保存されているが、軌道はジャイロ位相に依存するため、旋回中心近似は適用できないことや、二つの異なるタイプの加速を受けている可能性があることが分かった。サブストームに伴って変動する電子の位相空間密度の時空間変化について、エネルギー、ピッチ角、ジャイロ位相に対する依存性の観点から精査し、その詳細を議論する。