

EISCAT_3D レーダーを用いた降下電子エネルギースペクトルの水平分布の推定

#吹澤 瑞貴^{1,2)}, 小川 泰信^{1,2,3)}, 田中 良昌^{1,2,3)}

⁽¹⁾ 国立極地研究所, ⁽²⁾ 総合研究大学院大学, ⁽³⁾ データサイエンス共同利用基盤施設 極域環境データサイエンスセンター

Estimation of the horizontal distribution of the precipitating electron energy spectrum using EISCAT_3D radar

#Mizuki Fukizawa^{1,2)}, Yasunobu OGAWA^{1,2,3)}, Yoshimasa TANAKA^{1,2,3)}

⁽¹⁾National Institute of Polar Research, ⁽²⁾The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, ⁽³⁾Polar Environment Data Science Center, ROIS-DS

The CARD method estimates the energy spectrum of precipitating electron flux from the E-region electron density height distribution obtained by the European Incoherent Scatter (EISCAT) radar. This method was developed in 1989 and has been widely used. However, the conventional EISCAT radar is practically a unidirectional instrument using a large aperture antenna. It can only estimate the spectrum at a single point along the magnetic zenith. In contrast, the EISCAT_3D radar will be able to observe the ionosphere in three dimensions using a phased-array antenna. The aim of this study is to develop a method to estimate the horizontal two-dimensional distribution of the precipitating electron energy spectrum from the three-dimensional electron density distribution obtained by the EISCAT_3D radar.

First, we prepared a typical electron energy spectrum, which is often observed in a discrete aurora, as the true model. The energy distribution was defined as a combination of a Gaussian distribution with a characteristic energy of 5 keV and a one-sided power-law component. The power-law slopes were 1 on the low-energy side and 3 on the high-energy side. The spatial distribution of the total energy flux was assumed to follow a Gaussian distribution. It had a peak of 40 mW/m², a uniform offset of 10 mW/m², and a full width at half maximum of 47 km in the north – south direction. In the east – west direction, the center of this north – south Gaussian was set to meander with a sinusoidal amplitude of 20 km and a wavelength of 200 km. From this true-value spectrum, a three-dimensional (3D) electron density distribution was created. This was done by solving the electron density continuity equation under the steady-state assumption. Models for the ionization rate, neutral atmosphere, and effective recombination coefficient were adopted from previous studies.

For estimating the precipitating electron spectrum, the electron density height profile along the magnetic field lines was required. Therefore, we used the coordinate system (x, y, z) = (East, North, Magnetic Zenith). The prepared 3D data were then sampled according to the 27-beam configuration planned for the EISCAT_3D Common Programme. Finally, observation noise was added to generate synthetic data. The electron density values at 27 beam points in each altitude plane were spatially interpolated. This interpolation was used to construct the electron density height profile along the magnetic field line at each grid point.

When the least-squares estimation, as in the conventional CARD method, was applied to the 3D observation data, the total energy flux was reproduced with an accuracy better than 5 mW/m², and the average energy with an accuracy better than 2 keV. This result held within a region of ± 25 km east – west and ± 50 km north – south around the magnetic zenith. However, some oscillations remained in the estimated energy distribution. To address this, reconstruction was performed using maximum a posteriori estimation. In this approach, two smoothness priors were imposed: (i) the second-order derivative in the energy direction and (ii) the spatial second-order derivative between adjacent grids. As a result, the oscillations were suppressed, and the 5 keV peak was more clearly resolved compared with the least-squares method. Nevertheless, oscillations at high energies were not fully eliminated, and further improvements to the design of the prior distribution are planned in future works.

欧州非干渉散乱 (EISCAT) レーダーから得られる E 領域電子密度高度分布から最小二乗法により降下電子フラックスのエネルギースペクトルを推定する CARD 法が開発され、広く用いられてきた。しかし、従来の EISCAT レーダーは大口径アンテナを使用しており実質的に単一方向観測であるため、磁気天頂一点でのスペクトル推定にとどまる。一方で、近年観測開始予定の EISCAT_3D レーダーは位相配列式アンテナにより電離圏の 3 次元観測が可能となる。そこで本研究は、EISCAT_3D レーダーにより得られる電子密度の 3 次元分布から降下電子フラックスのエネルギースペクトル水平面内 2 次元分布を推定する手法の開発を目的とする。

まず、真値モデルとしてディスクリット・オーロラを想定し、エネルギー分布は特性エネルギー 5 keV のガウス分布に、低エネルギー側および高エネルギー側へそれぞれ傾き 1 と 3 の片側パワー則成分を加えた合成分布とした。全エネルギーフラックスの空間分布は、ピーク 40 mW/m²、南北方向の半値全幅 47 km のガウス分布とし、さらに一様なオフセット 10 mW/m² を加えた。東西方向には、この南北方向のガウス分布の中心位置が振幅 20 km、波長 200 km の正弦で蛇行するように設定した。この真値スペクトルから、先行研究に基づく電離率・中性大気・実効再結合係数のモデルを用い、定常状態を仮定した電子密度の連続の式を解くことで電子密度の 3 次元分布を作成した。さらに、EISCAT_3D の Common Programme で予定される 27 本ビーム配置に合わせてサンプリングし、観測ノイズを付与して擬似観測データを生成した。降下電子スペクトル推定には磁力線に沿った電子密度高度分布が必要であるため、座標系 (x, y, z) = (東, 北,

磁気天頂)を用い、各高度面で 27 本のビーム点での電子密度データを空間補間して、磁力線方向の電子密度高度プロファイルを格子点ごとに構成した。

このようにして用意した擬似的な電子密度の 3 次元観測データに対して、従来の CARD 法と同様に最小二乗推定を適用したところ、磁気天頂近傍で東西 ± 25 km、南北 ± 50 km の範囲において、全エネルギーフラックスは 5 mW/m^2 未満、平均エネルギーは 2 keV 未満の精度で再現できた。一方で、推定されたエネルギー分布には振動が残存した。そこで、最大事後確率推定に基づき、(i) エネルギー方向の 2 階微分と (ii) 隣接格子間の空間 2 階微分を滑らかさ事前として課すことで再構成を行った。その結果、最小二乗法に比べて振動が抑制され、5 keV のピークが明瞭化した。ただし、高エネルギー側の振動は完全には除去することができておらず、今後の課題として事前分布の設計をさらに工夫する予定である。