

イオノゾンデ観測を用いた機械学習によるスポラディック E 層の統計解析と発生予測

#采山 裕紀¹⁾, 横山 竜宏¹⁾, 劉 鵬²⁾

⁽¹⁾ 京大生存研, ⁽²⁾ 京大生存研

Statistical analysis and prediction of sporadic E layer by machine learning using ionosonde observation

#Yuki Uneyama¹⁾, Tatsuhiro Yokoyama¹⁾, Peng LIU²⁾

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

The Sporadic E layer (hereinafter referred to as the Es layer) is a localized ionospheric layer that typically appears at an altitude of approximately 100 km, primarily during the early morning or daytime to evening in the summer. When the Es layer is significantly active, it can reflect VHF-band television and FM radio waves, causing them to unexpectedly reach distant locations. The objective of this research is to predict the occurrence of the Es layer to avoid such radio wave interference.

To observe the Es layer, the echoes of pulse waves emitted with sweeping frequencies are recorded. A graph that plots these echoes by frequency and apparent height is called an ionogram. However, due to the substantial noise contained in ionograms, simple algorithms for automatic detection have not provided sufficient accuracy, and parameter readings have long been conducted manually. Therefore, this study attempts to predict the occurrence of the Es layer by using a machine learning model that performs image analysis.

In this study, a model was used to predict ionogram images by following the sequence of steps described below. Instead of predicting images, the model predicts one-dimensional vectors, so the images are first converted into vectors. The vectors of the past hour (4 data points) are used as inputs to the model to predict the next vector, thereby obtaining the vector 15 minutes ahead. Finally, by reconvertting the vector into an image, the image 15 minutes ahead is obtained. Here, it is necessary for the conversion between images and vectors to be reversible. The prediction model for continuous time series vectors utilized a Transformer, commonly used in natural language processing. The Transformer, with its self-attention mechanism, is a model that can prominently learn the impact of input vectors on the vectors to be predicted, and it has been shown to be useful not only in natural language processing but also in image processing and time series prediction. First, the two-dimensional vector of the image was smoothed into a one-dimensional vector. Learning was then conducted by inputting four of these vectors into the Transformer. A dataset of 512 sets of time series data was used, with 80% allocated for training data and the remaining for test data. The results of the trained model showed that the mean SSIM (Structural Similarity Index) between the output image and the correct image was 0.804, indicating that the generated images had a fairly high accuracy based on objective evaluation.

In this study, a model was developed to predict the occurrence of the Es layer using time series image data. While high-accuracy predictions were achieved for data with strong temporal continuity, it was found that predicting the sudden occurrence of the Es layer was difficult. Future considerations for predicting the occurrence of the Es layer include incorporating not only image information but also the probability of Es layer occurrence as input variables, or changing the output to a binary prediction of occurrence or non-occurrence, or to the probability of occurrence. Furthermore, this model could be developed into one that predicts changes in the F layer in ionograms.

スポラディック E 層 (以下, Es 層) とは, 主に夏季の早朝や日中〜夕方にかけて上空約 100km 付近に出現する局所的な電離層のことである。発生が顕著な時には, VHF 帯を用いているテレビや FM ラジオ電波が反射され, 予想外に遠距離にまで電波が到達してしまうことがある。そのような電波障害を回避するために, Es 層の発生を予測することが本研究の目的である。

Es 層を観測するには, 周波数を掃引して発射したパルス電波のエコーを記録する。それを周波数と見かけの高さでグラフ化したものがイオノグラムである。しかし, イオノグラムに含まれる多数のノイズのため, 単純なアルゴリズムを用いた自動検出では十分な検出精度を出すことができず, 長らく人間の目によりパラメータ読み取りが行われていた。そこで, 画像解析を行う機械学習モデルを用いることで, Es 層を学習し発生予測を試みた。

本研究では, 以下に記す一連の流れを行うモデルを用いて, イオノグラム画像の予測を行った。画像の予測ではなく, 1次元ベクトルを予測するモデルを利用するため, まず画像をベクトルに変換する。過去 1 時間 (4 データ) のベクトルを, 次のベクトルを予測するモデルの入力とすることで 15 分後のベクトルが得られる。最終的にベクトルを画像に加工しなおすことで 15 分後の画像が得られる。ここで, 画像とベクトルは可逆変換を行う必要がある。時系列的に連続なベクトルの予測モデルは, 自然言語処理で用いられ Transformer を用いた。Transformer は self-Attention という機構により, 入力ベクトルが予測対象のベクトルに与える影響を顕著に学習できるモデルであり, 自然言語処理だけでなく画像処理や時系列予測にも有用であることが示されている。まず, 2次元のベクトルである画像に対し, 平滑化を行い 1次元ベクトルとした。このベクトル 4 つを Transformer に入力して学習を行った。512 セットの時系列データをデータセットとし, 80% を学習

用データ, 残りをテスト用データとした. 学習を行ったモデルの結果は, 出力画像と正解画像の平均 SSIM(画像類似性評価指数の 1 つ) を算出すると, 0.804 となり客観的評価でかなり良い精度の画像が生成されていることが分かった.

本研究では, 時系列画像データを用いて Es 層の発生予測を行うモデルを作成した. 時間的連続性の高いデータに対しては精度の高い予測が行えたが, 突発的に発生する Es 層の予測は難しいことが分かった. 今後は Es 層の発生を予測するために, 入力変数に画像情報だけでなく Es 層の発生確率を入れることや, 出力を画像ではなく発生の有無の二値とする, あるいは Es 層の発生確率とするなどの工夫が考えられる. また, このモデルはイオノグラムの F 層の変化を予測するモデルとして発展させることも考えられる.