

機械学習モデルを用いた信楽イオノゾンデ観測の長期統計解析

#寺内 充¹⁾, 劉 鵬¹⁾, 横山 竜宏¹⁾

(¹ 京都大学生存圏研究所)

Long-term Statistical Analysis of Shigaraki Ionosonde Observations Using Machine Learning Models

#Mitsuru Terauchi¹⁾, Peng LIU¹⁾, Tatsuhiro YOKOYAMA¹⁾

(¹ Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University)

The Earth's ionosphere extends from an altitude of about 50 – 60 km up to 1000 km. In this region, molecules and atoms in the neutral atmosphere are partially ionized by ultraviolet radiation and other forms of solar energy, resulting in the generation of plasma. The ionosphere has a layered structure consisting of the F, E, and D regions, among which the F2 layer, located at around 250 – 400 km altitude, exhibits the highest electron density and strongly influences the propagation characteristics of long-distance shortwave communication and satellite navigation systems. Because electron density is affected by plasma, it shows diurnal, seasonal, and multi-year variations, while also undergoing irregular fluctuations caused by geomagnetic disturbances, sporadic E layers, and plasma bubbles. The ionosphere reflects radio waves, and the reflection frequency and altitude are determined by the vertical distribution of electron density. Therefore, long-term observation and analysis of electron density in the ionosphere play an important role in the development of communication technologies.

Observation methods for the ionosphere include ionosondes, incoherent scatter (IS) radars, and artificial satellites, each with its own characteristics. At the MU Observatory, located in Shigaraki, Kōka City, Shiga Prefecture, both an ionosonde and the MU radar—an atmospheric radar designed to observe the middle and upper atmosphere—are installed. The MU radar also functions as an IS radar, enabling continuous ionospheric observations. At the Shigaraki MU Observatory, ionospheric monitoring using the ionosonde is routinely conducted alongside MU radar measurements. The ionosonde works by transmitting upward-directed radio waves with varying frequencies from the ground and recording the signals reflected by the ionosphere. Since the MU radar data alone cannot provide absolute electron density values, calibration using ionospheric parameters obtained from ionograms observed by the ionosonde is required. However, currently, ionospheric parameters are not manually extracted from the ionograms at Shigaraki MU Observatory. Furthermore, manually deriving such parameters from the entire archive of past observations would require enormous time and effort, making it impractical.

To address this issue, this study developed an automatic ionosonde reading system using a machine learning model to automatically extract the critical frequency of the F2 layer (f_{OF2}). The proposed method consists of noise reduction for ionograms and machine learning using Mask R-CNN, achieving an accuracy of 95.70% in validation. The automatically extracted f_{OF2} values spanning 22 years were compared with ionosonde observation data from Kokubunji to validate their reliability. The comparison with Kokubunji showed a strong correlation with the Shigaraki results, while also revealing the influence of sporadic E layers on reading accuracy. Furthermore, a comparison with the empirical IRI model was conducted to evaluate the long-term statistical characteristics at Shigaraki. The comparison with the IRI model confirmed that the overall trend of electron density variations was consistent, and long-term changes were found to correlate with solar activity.

地球の電離圏は高度 50-60 から 1000km の範囲に存在し、この領域では地球の中性大気内の分子・原子が太陽からの紫外線などの放射エネルギーによって一部電離し、プラズマが生成されている。電離圏は F、E、D 層といった高度ごとの層構造を持ち、特に高度 250 – 400 km 付近に位置する F2 層は最も電子密度が高く、長距離短波通信や衛星測位システムの伝搬特性に大きな影響を与える。電子密度はプラズマが関わってくるため日変化や季節変化や数年単位での周期的な変動が見られる一方で、地磁気擾乱による電離圏あらしやスパラディック E 層・プラズマバブルといった不規則な変動が起こる。電離圏は電波を反射する性質を持ち、反射周波数や反射高度は電子密度の高度分布によって決まる。よって電離圏における電子密度の長期的な観測と解析は、通信技術の発展において重要な役割を持つ。

電離圏観測の手段には、イオノゾンデ・非干渉散乱 (IS) レーダー・人工衛星などがあり、それぞれの観測手段には特徴がある。滋賀県甲賀市信楽町に位置する MU 観測所には、イオノゾンデと中層大気・超高層大気を観測するための大気観測レーダーである MU レーダーが設置されており、IS レーダーとして電離圏の観測が続けられている。また、信楽 MU 観測所では、MU レーダーでの観測と合わせてイオノゾンデによる電離圏観測が定常的に実施されている。イオノゾンデでは地上から電波の周波数を変化させながら上方に向けて発射し、電離圏で反射される様子を記録している。MU レーダーのデータからは直接電子密度の絶対値を求めることができず、イオノゾンデによる観測結果であるイオノグラムから得られる電離圏パラメータを用いた較正が必要となる。しかし、現在、信楽 MU 観測所のイオノグラムの電離圏パラメータの読み取りは手動で行われていない。また、過去のすべての観測データから手動で電離圏パラメータを読み取ることは膨大な時間と労力を要し、現実的ではない。

この問題を解決するため、本研究では機械学習モデルを用いたイオノゾンデの自動読み取りシステムにより、F2 層

での臨界周波数 (foF2) の自動抽出を行った。提案手法は、イオノグラムのノイズ除去と Mask R-CNN による機械学習からなり、検証では 95.70% の正確性を達成した。提案手法により読み取った 22 年間分の foF2 の値は国分寺のイオノゾンデ観測データと比較し、測定の妥当性を検証した。国分寺との比較では、信楽の読み取り結果との高い相関が確認でき、スカラディック E 層による読み取り精度への影響も見られた。また、電離圏の経験モデルである IRI モデルとの比較を行い、信楽の長期統計の特性を評価した。IRI モデルとの比較では電子密度の変化の傾向が概ね一致することが確認され、長期変化では太陽活動とも相関が見られた。