

博士学位論文の要約

Title: Development of Automatic Detection and Prediction Models for Ionospheric
Spatiotemporal Variation Based on Deep Learning

題目：機械学習に基づいた電離圏の時空間変化の自動検出と予測モデルの開発

申請者：劉鵬 令和7年3月1日

地球の電離圏は高度 60~1000km の高層大気で、太陽放射により中性粒子が部分的に電離されてプラズマとなる領域である。電離圏の電子密度の時空間異常変動は、突発性電離圏擾乱 (SID)、スポラディック E 層 (EsL)、プラズマバブル、スプレッド F と伝搬性電離圏擾乱 (TID) 等の宇宙天気現象を引き起こし、無線通信や衛星測位に重大な影響を与える電離圏異常現象である。本研究では、数十年間膨大な電離圏観測データの利用は不十分の問題を解決し、最先端の人工知能技術を活用して電離圏異常現象を自動かつ正確に検出・予測することを目的とし、モデルの開発に取り組んだ。本論文は下記の目次で主要な内容をまとめる：

第 1 章は「総論」である。まず、空間天気について説明し、太陽・地球間の磁気的な相互作用が地球の磁気圏や電離圏に与える影響を解説した。次に、電離圏の構造を詳細に紹介し、高度に応じた層状領域構造における電離の化学的プロセス、電子密度分布の形成要因を明らかにした。そして、代表的な電離圏擾乱現象のそれぞれの発生機構、特徴と影響を説明した。電離圏モデリングについては、物理モデル、関数に基づいた数値モデルと人工知能に基づいた数値モデルに分類して説明し、それぞれのモデルの特徴や限界を明らかにした。最後に、本研究の目的と内容を明確にし、機械学習を用いた電離圏の自動解析と予測モデルの開発に向けた研究背景を示した。

第 2 章は「機械学習」である。まずは畳み込みニューラルネットワーク (CNN) の基本構造と動作原理を解説した。畳み込み層、活性化関数、プーリング層、全結合層の機能や役割を詳細に説明し、画像分類やセグメンテーション分野における CNN の応用方法を示した。また、再帰型ニューラルネットワーク (RNN) についても解説し、時系列データ処理における RNN の特徴や、勾配消失や勾配爆発の問題に対する対策としての長短期記憶 (LSTM) モデルを紹介した。これらの機械学習技術が電離圏データ解析において検出と予測に適用の使い方を説明し、本研究における理論的基盤となった。

第 3 章は「データセット」である。まずは地球衛星測位システムのデータから全電子数 (TEC) の計算原理を詳しく説明し、伝搬性電離圏擾乱の観測手法である TEC の時間微分 dTEC マップの導出方法を説明した。また、イオノゾンデでの電離圏観測の動作原理とイオノグラムの作成方法を紹介し、本研究で使った信楽と国分寺のイオノグラムのデータについて説明した。そして、自動検出と予測モデルの訓練のためのデータセットの前処理方法を詳述し、データの選択とラベル付け等の手法を明らかにした。これらのデータセットと前処理は、機械学習検出と予測モデルの開発に不可欠なものである。

第 4 章は「伝搬性電離圏擾乱の自動検出」である。まずは中規模伝搬性電離圏擾乱 (MSTID) の従来の検出方法の問題点を挙げて、深層学習に基づく新しい自動検出と処理アルゴリズムを提案した。詳しくは個体分割の代表的なモデルであるマスク領域畳み込みニューラルネットワーク (Mask R-CNN) を利用する。また、検出した波状擾乱の幾何形状を外接楕円で正規化し、孤立した波状擾乱を排除するため非線型最適化手法で決めた閾値を設定し、最後に MSTID の特性値の導出手法を提案した。この手法を用いて、1997 年から 2019 年までの日本上空の 1,209,600 枚の dTEC マップを解析し、MSTID の発生率、波長、波面方向、波面方向の広がりと面積などの特性値の統計分析を行った。その結果、MSTID 特性値の季節的な依存性、太陽活動と地磁気活動との相関性を明らかにして、外部要因の依存性に対する物理的な解釈も論じた。

第 5 章は「イオノグラムの自動読取」である。信楽イオノグラムに対して、ノイズ除去、機械学習による電離圏エコー検出、座標系変換の 3 つの手順で構成された自動解析アルゴリズムを提案した。ノイズ除去の手順で鉛直ノイズ線を 4 次多項式フィッティング関数で、水平ノイズ線を背景平均値として除去した。機械学習モデルとしては、前述の Mask R-CNN を用いて E 領域、F 領域の O と X モード、スプレッド F、E と F 領域の多重電離圏―地面反射の 6 種類のエコー信号を手動でラベル付けした訓練データセットで学習した。その結果、最大約 97% の検出精度を達成し、読み取った信楽 foF2 を一番寄り国分寺の手動で読み取った foF2 と比較して精度を評価した。また、突発性電離圏擾乱、スポラディック E 層とスプレッド F などの電離圏異常現象を正しく検出できる。最後検出結果の年次、昼夜、季節的な比較を行い、それぞれの傾向を解析した。

第 6 章は「全電子数の自動予測」である。まずは TEC 予測モデルの研究背景と現状を説明した。既存の時空間系列予測に向けた機械学習モデルを分類して紹介し、それぞれのモデルの特徴や限界を分析した。そして、新しいマルチモーダル融合方法であるチャンネル融合層を提案し、これが既存のモデルに組み込むことで予測精度を向上させる原理を説明した。同じデータセットと実行環境での実験結果に基づいて、異なるネットワーク基盤とマルチモーダル融合方法による予測精度の定量および定性的な評価を行った。その結果、チャンネル融合層を用いたモデルが最先端の機械推論能力を示し、TEC の空間、季節、昼夜、太陽活動および地磁気活動に対する依存性を明らかにした。

第 7 章は「結論と展望」である。本研究の成果である伝搬性電離圏擾乱の自動解析アルゴリズム、イオノグラムの自動検出システム、全電子数の予測モデルの開発における成果を総括した。また、今後の研究課題として、データ種類の多様化 (レーダー、大気イメージャーなどのデータ)、検出システムの対象地域とデータ種類の拡大、観測システムに取り込む処理装置の開発が必要であることを考え、本研究の未来展望を述べた。これらの成果が電離圏研究や宇宙天気予報、衛星通信品質向上などの産業応用に貢献することを期待する。