

## 論文の内容の要旨

論文題目	Modeling and prediction of ionospheric characteristics using nonlinear autoregression and neural network (和訳：非線形同定手法を用いた電離層のモデリングおよび予測に関する研究) 特性
学位申請者	Hendy Santosa

地球を取り巻く電離層は、その中を通過、反射する電磁波の伝搬特性に多大な影響を及ぼすことが知られている。電離層の継続的な特性の観測には、電磁波による遠隔探査（リモートセンシング）が広く用いられている。例えば、電離層中で最大の電子密度をもつF層の観測には、電磁波の鉛直打ち上げ（イオノゾンデ）が用いられ、電子密度の高度分布が得られる。一方、MLT（Mesosphere-Lower Thermosphere）領域である電離層下端のD層は、その電子密度の小ささゆえ、VLF帯送信電波の受信振幅、位相の変化がほぼ唯一の観測方法である。電離層は、その上層及び下層起源の様々な要因（外因）により、時間空間的に複雑に変動する。例えば、上層からの外因として太陽活動の影響が挙げられる一方で、下層からの外因として大気の影響が挙げられる。しかしながら、外因別の電離層の変動への定量的評価は、現在までにほとんど行われていない。そこで本研究では、非線形システム同定手法を用いて、D層およびF2層における、電離層の時間変化の予測モデルを構築し、外因別の貢献度を導出した。特に、D層の電離層状態を表すVLF送信電波振幅の時間変動予測モデルの構築は初の試みである。さらに、D層、F層ともに、外因別の貢献度の導出も初めてである。今後これらの研究成果は、電離層のダイナミクスの理解、太陽活動や大気パラメータの監視、通信障害の予測、さらには地震に関連する異常値検出等に貢献する可能性がある。D層に関しては、電通大VLF帯送信電波観測ネットワークにより受信された様々な緯度を通過する国内外からの送信電波の電界振幅の長期時系列観測データを解析した。まず、電界振幅データに非線形システム同定手法の一つであるNARXNN（Nonlinear AutoRegressive with eXogenous input Neural Network）を適用して、プロセスモデルを生成し、電界振幅の時間変化に対する支配的な外因を同定した。次に、これらの支配的な外因を用いて、予測を行い構築されたモデルの評価を実施した。その結果、予測値と観測値の間に非常に高い相関係数が得られた。また、緯度の異なる伝搬経路において支配的な外因に違いが見られ、その理由に対する物理的考察を行った。さらに、F層に関しては、中緯度帯である日本国内で観測された、イオノゾ

ンデのデータを用いて、D層と同様の解析を実施し、予測モデルを構築するとともに、D層とF層間の特性の相違を調査した。



## 論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名      Hendy Santosa

審査委員主査      芳原 容英

委員      柳澤 正久

委員      安藤 芳晃

委員      高橋 弘太

委員      細川 敬祐

委員

委員

地球を取り巻く電離層は、その中を通過、反射する電磁波の伝搬特性に多大な影響を及ぼすことが知られている。電離層の継続的な特性の観測には、電磁波による遠隔探査（リモートセンシング）が広く用いられている。例えば、電離層中で最大の電子密度をもつF層の観測には、電磁波の鉛直打ち上げ（イオノゾンデ）が用いられ、電子密度の高度分布が得られる。一方、MLT（Mesosphere-Lower Thermosphere）領域である電離層下端のD層は、その電子密度の小ささゆえ、VLF帯送信電波の受信振幅、位相の変化がほぼ唯一の観測方法である。電離層は、その上層及び下層起源の様々な要因（外因）により、時間空間的に複雑に変動する。例えば、上層からの外因として太陽活動の影響が挙げられる一方で、下層からの外因として大気の影響が挙げられる。しかしながら、外因別の電離層の変動への定量的評価は、現在までにほとんど行われていない。そこで本研究では、非線形システム同定手法を用いて、D層およびF2層における、電離層の時間変化の予測モデルを構築し、外因別の貢献度を導出した。特に、D層の電離層状態を表すVLF帯送信電波振幅の時間変動予測モデルの構築は初の試みである。さらに、D層、F層ともに、外因別の貢献度の導出も初めてである。今後これらの研究成果は、電離層のダイナミクスの理解、太陽活動や大気パラメータの監視、通信障害の予測、さらには地震に関連する異常値検出等に貢献する可能性がある。D層に関しては、電通大VLF帯送信電波観測ネットワークにより受信された様々な緯度を通過する国内外からの送信電波の電界振幅の長期時系列観測データを解析した。まず、電界振幅データに非線形システム同定手法の一つであるNARXNN（Nonlinear AutoRegressive with eXogenous input Neural Network）を適用して、プロセスモデルを生成し、電界振幅の時間変化に対する支配的な外因を同定した。次に、これらの支配的な外因を用いて、予測を行い構築されたモデルの評価を実施した。その結果、予測値と観測値の間に非常に高い相関係数が得られた。また、緯度の異なる伝搬経路において支配的な外因に違いが見られ、その理由に対する物理的考察を行った。さらに、F層に関しては、中緯度帯である日本国内で観測された、

イオノゾンドのデータを用いて、D層と同様の解析を実施し、予測モデルを構築するとともに、D層とF層間の特性の相違を調査した。

本研究に関して、以上の内容の発表に対して質疑応答を行い、同時に申請者の研究に対する資質、能力、基礎学力について総合的に評価を行った。その結果、申請者が研究を推進する能力を十分有すること、また工学的立場から詳細に論文を記述していることを確認した。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。