

(続紙 1)

京都大学	博士 (情報学)	氏名	Weizheng Fu
論文題目	Three-Dimensional Imaging of Ionospheric Irregularities at Midlatitudes Using Global Navigation Satellite System (衛星測位システムによる中緯度電離圏イレギュラリティの3次元イメージング)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>地球の電離圏は、おおよそ高度約60~1000 kmの地球大気の上辺部にあたり、希薄な大気の一部が電離して弱電離プラズマとなっている。電離圏には様々な擾乱 (イレギュラリティ) が発生し、電離圏を通過する電波伝搬に影響を与える。電離圏擾乱の理解は、人工衛星から地上までの通信の品質確保にとって重要である。本論文では、衛星測位システム (Global Navigation Satellite System; GNSS) から地上までの電波伝搬を利用した電離圏全電子数 (Total Electron Content; TEC) 観測に基づき、特に中緯度に特徴的に現れる電離圏擾乱の空間構造や生成原因の解明に取り組んだ。</p> <p>第1章の序論において、本論文が研究対象とする中規模伝搬性電離圏擾乱 (Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbance; MSTID) を紹介している。MSTIDは中緯度域の電離圏F領域 (高度200~300km) において夏季の夜間に発生する電子密度の粗密波であって、波長が数百kmで南西方向に速度約100m/sで伝搬する。地上から見た振動周期は15分から1時間程度である。一方、電離圏E領域 (高度100~120km) においては、スボラディックE (Es) 層と呼ばれる電子密度が非常に高く薄い層が発生する。近年の研究から、MSTIDとEs層の間には相互作用が指摘されている。さらに地球磁力線で結ばれた南北半球において、MSTIDがほぼ同領域・同時に発生することも観測されている。本論文ではこれらについて研究を進めるとし、論文の構成を明らかにした。</p> <p>第2章は基礎的事項のレビューである。まず地球大気全体の密度構造、組成、温度と電子密度の高度分布を紹介している。次に電離圏の観測技術として、非干渉散乱 (Incoherent Scatter) レーダー、GPS (GNSS) システムを活用したTEC観測を紹介している。電離圏を高度300km付近にある1層の球殻と近似してTEC絶対値を求める手法、GNSS電波を低軌道衛星で捉える電波掩蔽手法を示した。日本においては、国土地理院が全国約1300点に配置されたGNSS受信機から構成されるGNSS連続観測システム (GNSS Earth Observation Network System; GEONET) を運用している。本論文ではGEONETからのTEC値データを解析に用いた。続いて、Es層が風シアによって生成するという理論、MSTIDの発生原因とされてきたPerkins不安定理論、E領域-F領域相互作用のシミュレーション研究、南北半球における同時観測研究を紹介した。</p> <p>第3章では、電離圏をE領域 (高度100km付近) とF領域 (高度300km付近) の2層構造と仮定するDouble thin-shellモデルを用いた電離圏のE領域-F領域相互作用の解析を行った。先行研究では、TEC値データから平均値を引き去ることでF領域からの寄与分を除去し、残余をE領域からのTEC変動としてEs層の抽出に成功した研究例がある。本論文では、電離圏を積極的にE領域とF領域の2層の球殻構造と仮定する解析モデルを設定し、GEONETのTECデータから各領域の水平構造を定めた。検証のため、E領域とF領域に人工的な水平構造があるデータセットを生成し、解析を実行した結果、正しく動作することを示した。</p> <p>第4章は、上記の2層モデルを利用した電離圏のE領域-F領域と南北両半球間の相互作用の研究結果である。まず2012年6月12日の日本上空の解析結果から、MSTIDとEs層がいずれも北西-南東方向の波面を持ち南西方向に伝搬することを明らかにした。またEs層の波面が発生した後でMSTIDの成長がみられることから、Es層の構造がMSTIDを引き起こすとの結果を得た。また2007年6月11日のケースでは、E領域とF領域の両方について、TEC値の変動とMUレーダー観測との同時・同領域の比較を行ったとこ</p>			

る、E領域ではMUレーダーが観測するQP（準周期）エコーとの同時性が良く、F領域ではMUレーダーによるMSTIDに対応するエコーの出現と対応が良かった。次に、日本とオーストラリアの同時TEC観測を用いて南北両半球の相互作用について調べた。オーストラリアではGNSS受信機の分布がまばらであるため、1層モデルの解析を行い、日本上空では2層モデル解析を行っている。結果は、日本が夏でオーストラリアが冬のケースでは、Es層の構造の発達とともにF領域にMSTIDが発生し、同時にオーストラリアにおいてMSTIDが検出された。逆にオーストラリアが夏で日本が冬のケースでは、オーストラリアのMSTIDと日本のMSTIDに対応関係がみられたが、日本上空のEs層の発達は見られなかった。両半球間の結合については、同時の衛星観測データから対応する磁場変動を検出している。以上から、MSTIDの発生は夏季のEs層の構造発達がF領域のMSTIDを形成し、さらに反対半球側に電界が伝搬することで冬半球のF領域でもMSTIDが誘発されることが分かった。

第5章においては、E領域とF領域の電子密度の3次元トモグラフィ解析を行った。まずE領域のEs層の3次元構造の解明のため、TECデータにトモグラフィ解析を行ってF領域の空間的に滑らかな電子密度分布を得ておき、原データからトモグラフィ解の寄与を差し引いた残りに対してE領域に特化した解析を行った。結果としてEs層の水平分布と高度変動の検出に成功した。さらに解析方法を工夫することによって、限られたデータに対してであるが、夜間のMSTIDの発生イベントに対して、F領域とE領域の電子密度の3次元構造をトモグラフィ解析し、両者の空間分布と時間変動を分離することに成功した。

第6章では、以上の研究から得られた知見をとりまとめ、本論文の結論を述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、GNSS受信網GEONETからのTEC観測、オーストラリアのGNSS受信網からのTEC観測、MUレーダー観測、複数の衛星観測データを組み合わせることによって、中緯度の電離圏に現れるMSTIDと呼ばれるイレギュラリティ現象に関して多角的な研究を実施した。得られた主な成果は以下の通りである。

(1) GEONETからのTEC観測データに対して、電離圏を2層と仮定した解析手法を開発して、電離圏のE領域(高度約100km)とF領域(高度約300km)を分離しつつMSTIDに関する電離圏構造の検出を可能にした。

(2) GEONETからのTEC観測データの3次元のトモグラフィ解析手法を工夫して、まずF領域からの影響を排除したうえでEs層の空間構造(水平構造と高度変化)を明らかにした。さらに夜間のMSTIDイベントに対して、MSTIDとEs層を分離したうえで空間構造の解明を達成した。

(3) 上記(1)の解析結果からMSTIDの発生がEs層の水平構造の発達に伴うことを明確に示すことで、理論やシミュレーションから予想されていたE領域-F領域相互作用によるMSTIDの発生を明らかにした。

(4) さらにオーストラリアにおけるGNSS観測データを組み合わせることで南北両半球の比較を行い、MSTIDが夏季の電離圏におけるE領域-F領域相互作用によって発生し、地球磁力線を通じた電界のマッピング効果によって、反対半球側のF領域にMSTIDが誘起される状況をデータから明示した。

以上要するに本論文は、電離圏E領域-F領域の相互作用と南北半球間の相互作用を明らかにし、MSTIDが夏季のEs層の構造の発達に伴ってその上空のF領域に発生し、さらに地球磁場を介した結合過程により反対半球のF領域においてMSTIDを発生させることを明らかにした。本論文で用いられたデータ解析手法は、GNSS受信機網からのTECデータ解析として最も先進的であり、さらにMSTIDに関する知見を高めた。これらの成果は学術上、實際上寄与するところ少なくない。よって、本論文は博士(情報学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年2月15日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

なお、本論文の令和6年3月23日以降のインターネットでの全文公表についても支障がないことを確認した。