

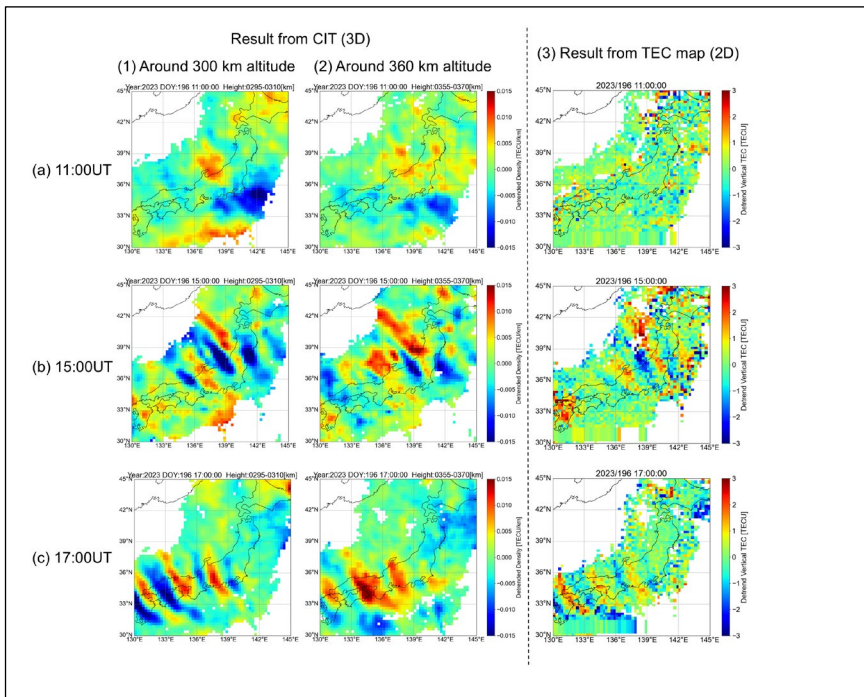
リアルタイムかつ高解像度な電離圏の3次元可視化

—将来の宇宙天気予報・短期地震予知の実現に寄与する可能性—

概要

梅野健 情報学研究科教授、米山慧 同研究科修士課程（現：(株)フレクト社員）らの研究グループは、リアルタイム、かつ経度緯度方向で0.25度の高解像度をもつ電離圏の可視化（3次元電離圏トモグラフィ）を実現するアルゴリズムを発見し、そのアルゴリズムを用いて中規模移動性電離圏擾乱（MSTID：Medium Scale Traveling Ionospheric Disturbances）などの詳細な3次元構造を明らかにしました。この結果は、今後、現在の天気予報と同様に数時間後の電離圏を本3次元データと物理モデルから予報する宇宙天気予報実現の道筋をつけるものであり、更には大地震発生前に観測されたと報告されている電離圏異常発生 of 物理的メカニズム解明にも寄与するものと期待されます。

本研究成果は、2025年10月14日に、米国地球物理学学会誌「*Journal of Geophysical Research: Space Physics*」にオンライン掲載されました。



日本列島上空の高精細な電離圏3次元構造の可視化

1. 背景

上空50kmから1000kmにまたがる電離圏の3次元構造を知ることが、現代社会のインフラであるGPSなどのGNSS測位衛星による測位サービスの安定稼働、あるいは太陽フレアの影響など時々刻々ダイナミ

ックに変化する宇宙天気の詳細な情報を得るのに欠かせません。

日本では GONET などの衛星測位の受信局が約 1 3 0 0 あるなど比較的高密度に展開され、複数衛星を活用する電離圏の 3 次元構造を得る電離圏トモグラフィを用いた研究やサービスなどがなされてきましたが、高解像度な電離圏トモグラフィをリアルタイムに稼働する場合、計算コストがかかることが課題となっていました。

また大地震発生直前に電離圏の異常が発生しているという多くの機関から報告がされてきましたが、何故このような電離圏異常が発生するのかという物理メカニズムの解明に、この高解像度な電離圏の 3 次元構造の時間変化を知ることが不可欠なばかりでなく、他の太陽フレアなど宇宙天気の要因で発生する電離圏擾乱との識別にとっても決定的に重要でした。

2. 研究手法・成果

(基本プロセス)

電離圏の 3 次元構造を知るのに、測位衛星から送られた 2 周波の電波を受信局で受け取り、2 周波の伝搬遅延を計測することで、衛星衛星と受信局間のパス上の総電子数 (TEC: Total Electron Content) を得ることができます。電離圏の 3 次元空間をメッシュで区切り、複数の衛星と複数受信局との間で、メッシュ毎の電子数密度のパス上の積分 (和) が総電子数であるという連立方程式を立ててメッシュ毎の電子数密度の解を得るのが 3 次元電離圏トモグラフィの基本プロセスです。その上でこの連立方程式を解く上で、従来法に以下の 3 つの新視点を加えました。

(新しいポイントその 1: データのスパース性を利用した高速解法 (共役勾配法) の利用)

衛星と受信局とを結ぶパス上のメッシュには正の電子数密度を仮定することができますが、パスに載っていないメッシュが多数ありデータのスパース性が必ず、スパース行列となります。このスパース性を活用した高速解法として共役勾配法があり、今回我々は電離圏トモグラフィの連立方程式を解く上で共役勾配法を用いました。

(新しいポイントその 2: 時間連続性の活用)

電子数密度の時間変化は連続的であることを使います。具体的には、現在時刻の電子数密度解を次の時刻の解を得るための初期状態とし、それを繰り返し適用して解を得ます。

(新しいポイントその 3: 空間連続性の活用)

低解像度データは高解像度データの近似として使います。具体例として、水平方向に 100km×100km、高さ 30km のボクセルを水平方向に 25km×25km、高さ 15km の 4×4×2 (=32) のボクセルに細分割します。まず前処理として低解像度のボクセルで解を得て、高解像度の細部化したボクセルの初期解として用います。

これら 3 つの工夫を新たに施すことによって、従来と比べ圧倒的なスピードで高解像度かつリアルタイム計算を可能とする高頻度な電離圏の 3 次元構造を得ることができるようになりました。

図 1 がその結果です。

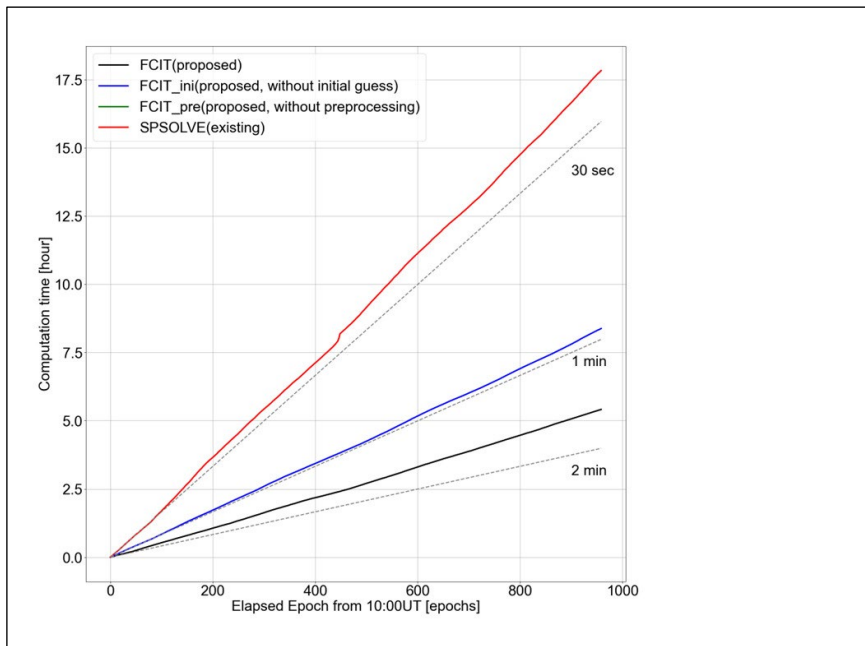


図1：従来法と（黒）と提案法（赤）との計算時間の比較

また提案手法を用いて、宇宙天気の一つである中規模の移動性電離圏擾乱（MSTID: Medium Scale Traveling Ionospheric Disturbances）の3次元構造を調べました。

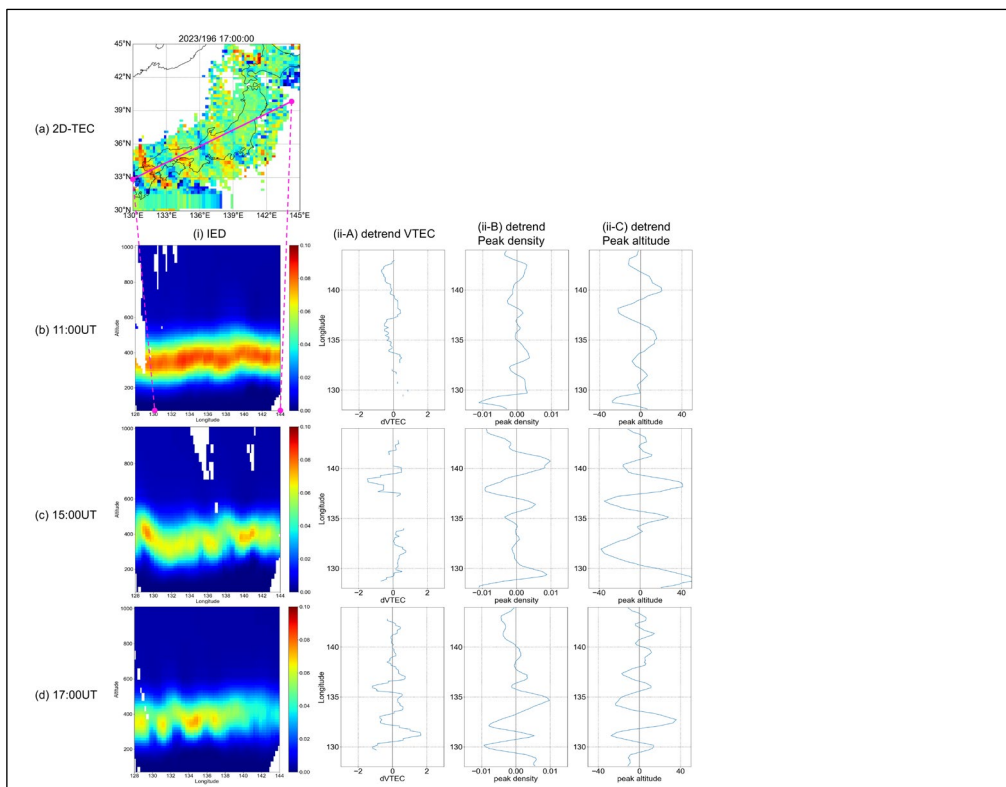


図2 日本上空のMSTID（2023年7月15日夜間）の3次元トモグラフィ解析結果
すると、日本では、冬の日中（ケース1）、冬の夜（ケース2）、夏の夜（ケース3）の期間に発生するMSTIDの全てのケースにおいて、電子数密度のピークとピークをもつ高さが負の相関を持ち、その負の相関の程

度が夏の夜（ケース 3）が最も高く、冬の日中（ケース 1）が最も低いことが、わかりました。

3. 波及効果、今後の予定

今回開発した電離圏 3 次元トモグラフィ手法は日本全国の情報を宇宙天気ダイナミックな情報（例：電離圏の電子数密度）を高解像度で得ることができます。京都大学には花山天文台や潮岬風力実験設備に施設した電離層観測装置が設置され電離層の電子数密度や電子数密度がピークを持つ時の高度といった情報を得ることができますが、その場所は限られたものでした。将来的には、国土地理院から得られたデータ（現在 15 分後に準リアルタイムデータとして公開）から解析した電子数密度のデータと物理モデルからデータ同化を行い宇宙天気の予報を行う基礎手段として活用できます。また、日本だけでなく、高密度な GNSS 受信局網がある地域であれば、世界中どこでも適用できます。また測位衛星だけでなく、多数存在の低軌道衛星(LEO)と地上局とを結ぶパスでより高精細な電離圏情報を得ることが期待できます。

電離圏に関連する科学的解明に関しても、本論文で明らかにした MSTID の基本構造の詳細といった特定のタイプの電離圏擾乱の基本特性の抽出だけでなく、その MSTID の発生起源の解明、大地震発生直前に観察される電離圏擾乱の発生メカニズムの解明、宇宙天気に関わる電離圏擾乱の諸現象との識別、といった様々な電離圏の諸現象の物理メカニズム解明などに寄与できると期待できます。

<用語解説>

電離圏：上空 60 km から 1000 km にまたがる酸素分子、窒素分子などの分子が電離し、電子が分布する層。1902 年、Kennelly(米)や Heaviside(英)によって仮説が提唱され、1924 年、Appleton (英) が電波を送信し、反射するのを確認することでその存在証明をした。

GNSS: Global Navigation Satellite Systems の略。

GEONET: 国土地理院が施設する GNSS 観測網。日本全国に約 1300 の観測局がある。

宇宙天気：太陽フレアや移動性電離圏擾乱（TID：Traveling Ionospheric Disturbances）など様々な電離圏や磁気圏でおこる現象の総称。NICT（情報通信研究機構）で日本の宇宙天気に関わる情報提供サービスが行われている。

共役勾配法：連立一次方程式や非線形最適化問題を解くための反復法で、特にスパース行列を持つ場合、高速に解を得ることができる。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Fast Computerized Ionospheric Tomography Using GNSS-TEC in Densely Observed Regions
(高密度観測密度地域における GNSS-TEC を用いた高速計算電離圏トモグラフィ)

著 者：Satoru Yoneyama, Ken Umeno

掲 載 誌：Journal of Geophysical Research: Space Physics DOI：10.1029/2024JA033404