

地震後の超高層大気変動を 3 次元解析で高精度に可視化 電波障害予測や宇宙天気予報の実現にも期待

【本研究のポイント】

- ・ 国内超稠密 GNSS ^{注1)} 受信機網から得られた全電子数 (TEC) ^{注2)} データに対して、電離圏電子密度の空間構造を推定する 3 次元電離圏トモグラフィー ^{注3)} を適用した。
- ・ その結果、令和 6 年能登半島地震後に観測された電離圏電子密度変動の 3 次元構造の時間発展を初めて捉えることに成功し、震央^{注4)}を中心として電子密度変動の波面が時間の経過とともに鉛直に近くなる傾向が捉えられた。
- ・ 震央から上方伝搬する音波のモデル計算結果の比較から、電子密度変動の波面の変化は、地震で発生した音波の伝搬によって説明できる。
- ・ 理論予測とトモグラフィー結果の差異は、電離圏における音波の非線形伝播や、断層に沿って複数の音波源が存在する可能性を示唆する。
- ・ 本成果は、地球と宇宙環境のつながりに関する理解を深め、将来的には GPS を使った測位の精度向上や、人類の生存環境に関わる宇宙環境予測に貢献すると期待される。

【研究概要】

名古屋大学宇宙地球環境研究所 (ISEE) の Weizheng Fu(ウェイチェン フー)日本学術振興会外国人特別研究員、大塚 雄一 准教授らの研究グループは、オスロ大学理学研究科、京都大学生存圏研究所、情報通信研究機構との共同研究で、日本国内に整備された超稠密な GNSS 観測網を活用することで、令和 6 年能登半島地震発生直後の電離圏応答を高精度に解析し、時間的・空間的に展開する電離圏電子密度変動の 3 次元的な特徴を明らかにしました。

本研究では、本研究グループが開発した三次元電離圏トモグラフィー手法を用いて、従来の 2 次元観測では見えなかった地震後の電離圏電子密度変動の立体構造や成長過程を明らかにしました。地震発生の約 10 分後から震央を中心として同心円状に広がる電子密度変動が水平方向および鉛直方向に広がる様子を明瞭に捉えました。特に、震央の南側では、高い高度ほど電子密度の変動が早く伝搬し、電子密度変動の波面の方向が時間とともに鉛直に近づく様子が捉えられました。モデル計算の結果、これらの変動は地震によって生じた音波によるものであり、高度が高くなるほど音速が大きくなるのが原因であることを確認しました。また、理論と観測の違いからは、電離圏内での音波の非線形な伝播や、断層沿いに複数の音波源が存在する可能性が示唆されます。本成果は、地球と宇宙環境のつながりに関する理解を深め、将来的には GPS を使った測位の精度向上や、人類の生存環境に関わる宇宙環境予測への貢献が期待されます。

本研究成果は、2025 年 5 月 29 日 (日本時間) 付の国際誌『Earth, Planets and Space』に掲載されました。

【研究背景と内容】

高度約 60~1000 km の地球大気の上層に位置する領域には、太陽から常時降り注ぐ放射によって大気の一部が電離され、「電離圏」と呼ばれる層が形成されます。近年では、衛星通信・放送、全球測位衛星システム (GNSS) など、電離圏を通過する電波を利用したシステムへの依存度が飛躍的に高まってきました。電離圏には自由電子が存

在するため、そこを通過する電波は伝搬の遅延や屈折などの影響を受けます。ひとたび電離圏に擾乱が生じると、GNSS による測位精度の低下や通信障害の発生が起こることがあります。

GNSS 衛星から送信された電波は、電離圏を通過する際に伝播遅延が生じます。このため、GNSS を使った測位に誤差が生じ、航空・航海ナビゲーションなどに悪影響を及ぼします。一方、この電波の遅延量から、電離圏における全電子数 (TEC) を推定することができます。この手法により、電離圏の時空間変動をリアルタイムで監視することが可能となります。電離圏は、太陽活動だけでなく、地震、火山噴火、津波、台風などの自然現象によっても影響を受けます。たとえば、2024 年 1 月 1 日 16 時 10 分 (日本時間) に発生した令和 6 年能登半島地震の直後には、震央付近を中心として、発生から約 10 分後に同心円状の電離圏擾乱が観測されました (図 1 参照)。これらの擾乱は、時間の経過とともに水平方向へと拡大しました。

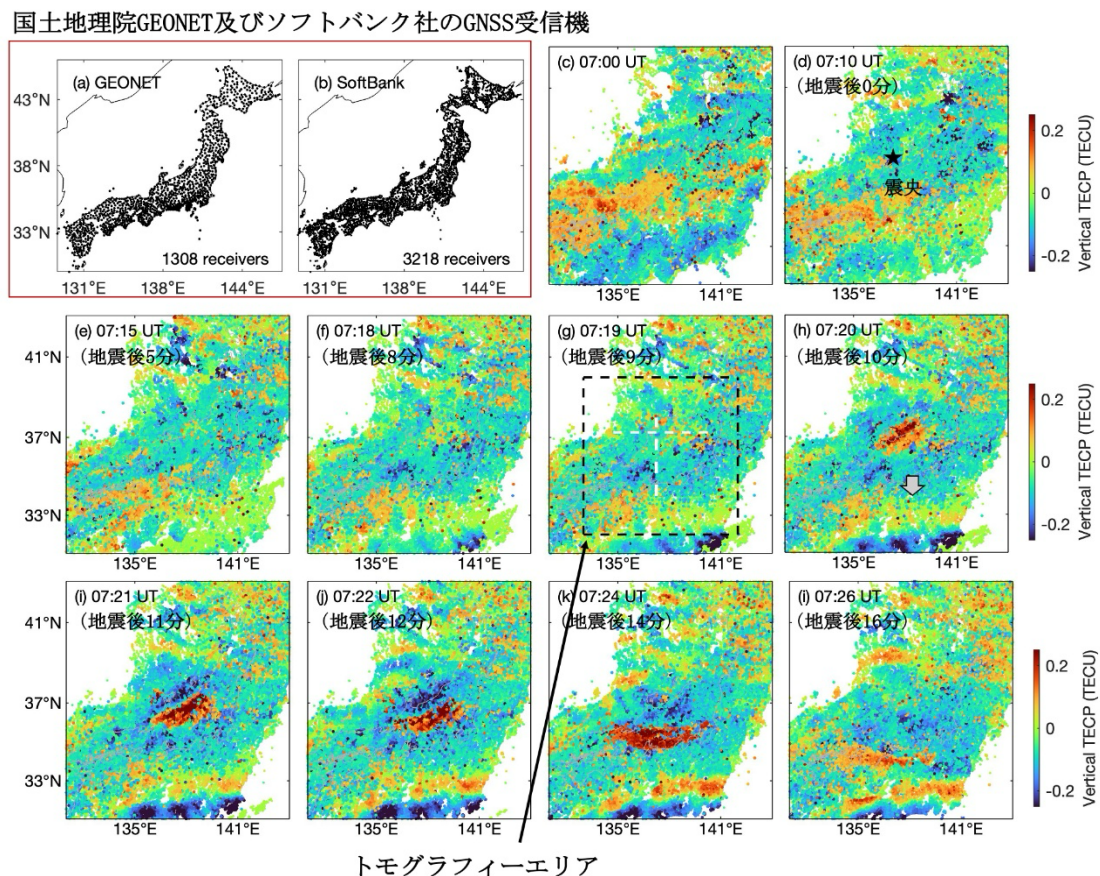


図 1 : (a, b)GEONET とソフトバンク社が提供する GNSS 受信機の分布 (c-i)令和 6 年能登半島地震の直後 TEC の変動成分の 2 次元マップ図。縦軸と横軸はそれぞれ、地理緯度と経度を表す。黒の点線で囲まれた部分は、3 次元トモグラフィの解析領域を示している。五角星は震央を示している。

従来の TEC 観測により、擾乱の水平構造を把握することは可能ですが、TEC は電子密度の高度方向積分量であるため、鉛直方向の情報を得ることができません。このため、擾乱の三次元的な構造やその発展過程を詳しく理解するには限界がありました。そこで本研究では、申請者が新たに開発した 3 次元電離圏トモグラフィ手法^{注 4)}を用い、国土地理院の GEONET 約 1,300 局およびソフトバンク社の 3,300 局を超える GNSS

受信機から得られた高密度な TEC データを解析しました。これにより、従来の 2 次元観測では捉えられなかった電離圏擾乱の三次元構造やその時間発展（四次元変化）を明らかにすることに成功しました。

図 2 (c-h) に示すように、鉛直方向にも同心円状の擾乱構造が確認されました。再構成された 3 次元構造からは、震央の南側において、電子密度変動の波面が「北上－南下」に傾いた構造を持ち、時間とともに次第に鉛直方向に近づく様子が確認されました。これらの特徴は、地震に伴って発生した音波が下層大気から上空に伝わり、電離圏を揺さぶった結果であると考えられます。モデル計算によって (図 2 (a, b))、震央付近から上空に向かって伝搬する音波の影響が定量的に再現されており、高度とともに音速が増すことも示されました（音速は温度の平方根に比例します）。

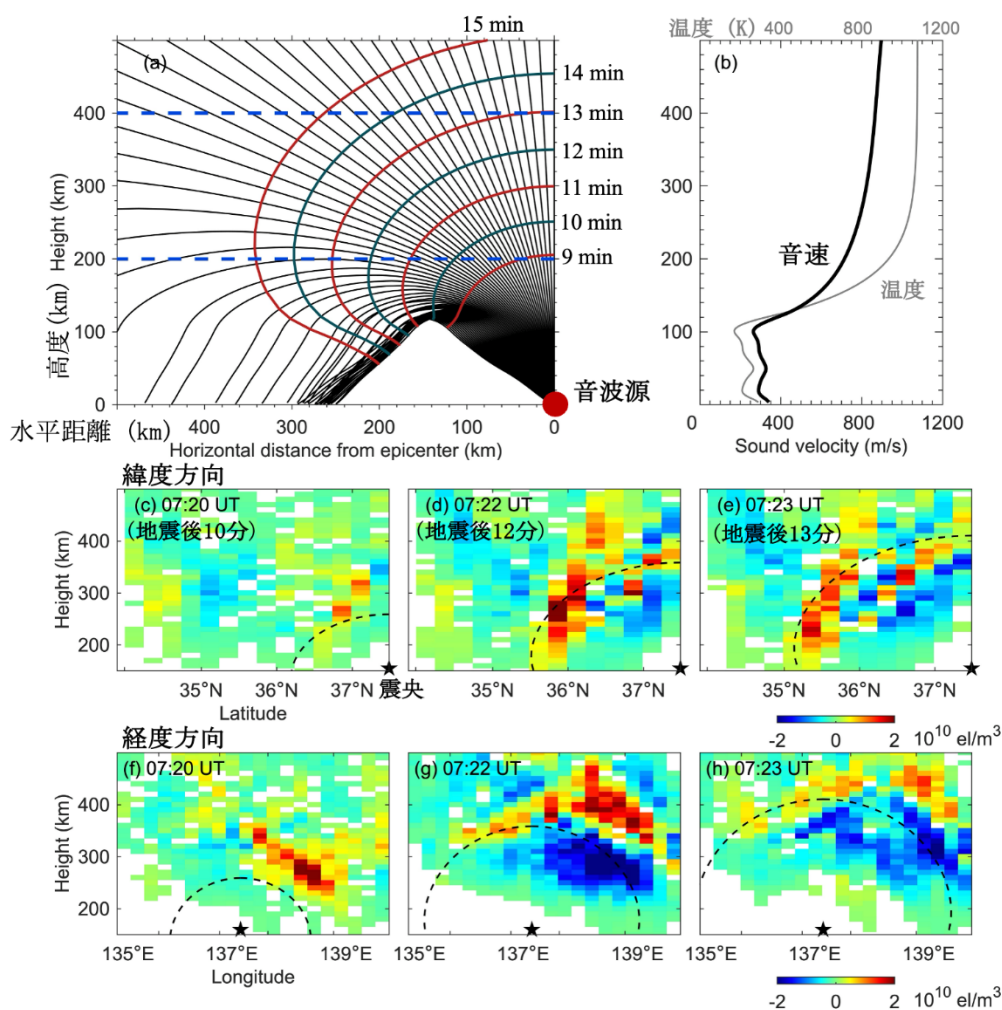


図 2 : (a)点波限から伝搬する音波の軌跡 (b)音速と温度の高度変化 (c-h) 緯度方向および経度方向における 3 次元電離圏トモグラフィの結果。黒の破線は、モデルにより計算された音波の波面の位置を示す。星印は震央を示している。

しかし、理論予測とトモグラフィー結果の間には差異が見られます。図 3 に示すように、震央直上の上空（青色領域）では、観測された電子密度擾乱と理論予測の間に約 1 分の時間差が確認されており、これは音波が電離圏に到達する過程で非線形な伝播が生じている可能性を示唆しています。また、電離圏電子密度の擾乱には左右非対称性も見られました。そこで、震央から約 50 km 離れた 2 か所に仮想的な音波源を設定し、地震発生 30 秒後に音波が放出されたと仮定したところ、理論結果と観測結果の整合性が向上しました。このことから、地震断層上には複数の音波源が存在し、それぞれが電離圏擾乱を引き起こしている可能性が示されます。

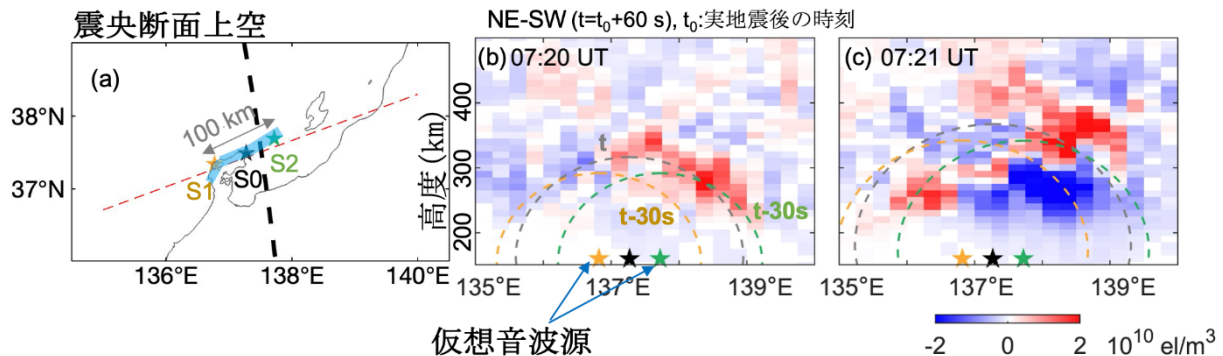


図 3: (a)令和 6 年能登半島地震の断層の位置(図中の青色の部分)を地表に投影した地図。赤の破線は、図 (b) および (c) に対応する鉛直断面の位置を示す。黒の破線は地磁力線の方角を示す。(b, c) 黄色と緑色の星印が震央から 50 km 離れた位置に設定した 2 つの仮想音波源を示す。黄色と緑色の破線は、それぞれ時刻 t の 30 秒後から伝播を開始する音波のモデル計算による波面を示す。

【成果の意義】

本研究は、地震が引き起こす電離圏の変動を 3 次元的にとらえ、その成り立ちや進展を詳細に明らかにした点で、新たな観測・解析手法の有効性を示す重要な成果です。特に、電離圏における音波の非線形な伝播現象や複数の震源からの影響といった、従来十分に理解されていなかった物理過程への新たな知見を提供しました。このような研究は、地震と宇宙環境の相互作用に関する理解を深めるだけでなく、将来的には、地震による電波障害の予測や、より精度の高い宇宙天気予報の実現にもつながる可能性があります。

本研究は、2024 年度から始まった日本学術振興会外国人特別研究員プロジェクトの支援のもとで行われたものです。

本研究で使用したソフトバンクの独自基準点の後処理解析用データは、「ソフトバンク独自基準点データの宇宙地球科学用途利活用コンソーシアム」の枠組みを通じて、ソフトバンク株式会社および ALES 株式会社より提供を受けたものを使用しました。

【用語説明】

注 1) GNSS :

アメリカの GPS、日本の準天頂衛星 (QZSS)、ロシアの GLONASS、中国の BeiDou、欧州連合の Galileo 等の測位衛星システムの総称。

注 2) 全電子数 (TEC) :

GNSS 人工衛星で送信された電波が地上の GNSS 受信機で受信されるまでに通過した経路上に存在する電子の総数。電離圏には多くの電子が存在し、これらの電子が GPS などの衛星信号に影響を与える。TEC を測定することで、電離圏の状態やその変化を知ることができる。単位は「TECU (1 TEC Unit = 10^{16} 個/m²)」で表される。

注 3) 3 次元電離圏トモグラフィー：

複数の GNSS 受信機から得られる TEC データを使って、電離圏の電子密度分布を 3 次元的に再構成する手法。まるで医療用の CT スキャンのように、電離圏の内部構造を可視化することができるため、電離圏擾乱の解明に役立つ。

注 4) 震央：

地震が発生した地下の震源の真上にあたる地上の点。

【論文情報】

雑誌名：Earth, Planets and Space

論文タイトル：Unveiling the Vertical Ionospheric Responses Following the 2024 Noto Peninsula Earthquake with an Ultra-Dense GNSS Network

著者：Weizheng Fu（名古屋大学宇宙地球環境研究所）、大塚雄一（名古屋大学宇宙地球環境研究所）、Nicholas Ssessanga（オスロ大学理学研究科）、新堀淳樹（名古屋大学宇宙地球環境研究所）、惣宇利卓弥（京都大学生存圏研究所）、西岡未知（情報通信研究機構）、Perwitasari Septi（情報通信研究機構）

DOI: <https://doi.org/10.1186/s40623-025-02211-y>