

R005-08

A 会場 : 11/26 PM3 (16:40-18:25)

17:10~17:25:00

能登半島地震に伴う電離圏全電子数擾乱の伝搬異方性

#石本 夢実¹⁾, 柿並 義宏¹⁾, 齊藤 大晶²⁾

(¹⁾ 情報大, (²⁾ 公立千歳科学技術大学

Anisotropy of traveling Ionospheric disturbances measured by TEC after the 2024 Noto-Peninsula earthquake

#Mumi Ishimoto¹⁾, Yoshihiro Kakinami¹⁾, Hiroaki Saito²⁾

(¹⁾Hokkaido Information University, (²Chitose Institute of Science and Technology

Anisotropy of traveling Ionospheric disturbances measured by TEC after the 2024 Noto-Peninsula earthquake large earthquakes generate acoustic waves that propagate upward and disturb ionospheric plasma, detected as TEC variations from GNSS. The Mw 7.5 Noto Peninsula earthquake occurred at 37.5° N, 137.2° E on 1 January 2024 at 07:10 UT, and TEC disturbances were observed approximately 9 minutes later over the epicenter. At that time, two QZSS satellites (J02, J07) and two GPS satellites (G08, G16) were located. In this study, we computed ionospheric TEC from GEONET data provided by the Geospatial Information Authority of Japan (GSI) and analyzed coseismic TEC disturbances with a sampling rate of 30 s. Acoustic waves are expected to expand concentrically from the epicenter, producing concentric TEC perturbations. However, clear disturbances were observed southward for J02 and G16 and northeastward for J07, deviating from the expected concentric pattern.

To investigate the origin of the observed anisotropy, we computed the propagation of acoustic waves generated by the earthquake using a Hamiltonian ray-tracing method in spherical coordinates. Assuming the epicenter as the source, rays were launched isotopically, and their trajectories were analyzed. The atmospheric sound speed structure was modeled with altitude profiles of density and temperature derived from NRLMSISE-00. For each ray, the arrival time and propagation direction (wave vector) were extracted at altitudes below 500 km. Electrons readily move along geomagnetic field lines but have little mobility across them.

Thus, atmospheric perturbations induced by acoustic waves are more effective when the wave vector is aligned with the geomagnetic field vector and less effective when perpendicular. To quantify this effect, we calculated $|\cos \theta|$, where θ is the angle between the geomagnetic field vector and the wave vector, and defined it as the geomagnetic propagation coefficient. The large values indicate high amplitude of the ionospheric disturbances, while the smaller values correspond to low amplitude of those. The coefficient was higher south of the epicenter, suggesting that the disturbances mainly propagate southward. However, the disturbances for J07 mainly propagated eastward, which cannot be explained by geomagnetic effects alone, suggesting that apparent line-of-sight effects must also be considered.

Because TEC is an integrated density along the line of sight (hereafter observation vector), positive and negative perturbations along the same path cancel each other. When the wave vector is nearly parallel to the observation vector, cancellation reduces the apparent TEC disturbance. In contrast, when the two are perpendicular, the apparent disturbance is enhanced. We quantified this effect by calculating $\sin \Phi$, where Φ is the angle between the wave vector and the observation vector, and defined it as the observation coefficient. The observation coefficients were small in the direction of each satellite's observation vector from the epicenter. For instance, since J02 had a high elevation angle (~90°), the coefficient shows a low value over the epicenter. J07 had an azimuth toward south-southwest, G08 toward southwest, and G16 toward north-northeast, resulting in low coefficients in those directions.

To incorporate both effects, we multiplied the geomagnetic propagation coefficient by the observation coefficient, defining the product as the disturbance observation coefficient. This coefficient was highest southward for J02 and G16, eastward for J07, and southeastward for G08. Observed TEC disturbances were consistent with these coefficients: southward for J02 and G16, eastward for J07, and southward for G08. Disturbances were stronger in directions with higher disturbance observation coefficients. These findings indicate that the observed anisotropy of TEC disturbances results from the combined effects of geomagnetic field alignment and observation geometry.

大規模な地震が発生すると音波が発生する。この音波は大気中を上向きに伝搬し、伝搬の過程で周囲の大気を揺らす。こうした大気の揺らぎは熱圏に到達し、同高度に存在する電離圏中の電子を擾乱させる。その結果、GNSS 観測により見積もられる全電子数 (TEC) の擾乱として検出される。

2024 年 1 月 1 日 7:10 UT 能登半島で Mw7.5 の地震が発生 (震央 37.5° N, 137.2° E) し、発生約 9 分後に TEC 擾乱が観測された。地震発生時には QZSS 2 基 (J02, J07) と GPS 2 基 (G08, G16) が上空に位置していた。本研究では国

土地理院が運用する GEONET のデータから電離圏全電子数 TEC を計算し、地震後の TEC 擾乱について調べた。サンプリング周期は 30 秒である。音波が同心円状に広がるため TEC も同心円状に変化すると予想されるが、J02 と G16 は震源の南方向に、J07 では北東方向のみ明瞭な TEC 擾乱が観測され、音波の伝搬とは一致しなかった。

観測された各衛星における TEC 擾乱の伝搬異方性の原因を明らかにするため、地震に伴って上空に伝播する音波の到達方向を球面座標系に基づくハミルトニアン形式の ray tracing 法により計算した。波源を能登半島地震の震央と仮定し、各方向に等間隔で射出された音波の経路を解析した。音速構造は NRLMSISE-00 モデルにより構築し、密度と温度から音速分布を計算した。風の影響は考慮していない。各音線に対して、指定した高度（500km 以下）における到達時刻と音波伝播方向（波数ベクトル）を抽出した。

電子は磁力線に沿って移動できるが、垂直方向にはほとんど移動できない。震源からの音波による大気変動は、磁力線方向（以下、地磁気ベクトル）に平行であれば電子が動きやすく、垂直であれば動きにくい。地磁気ベクトルと波数ベクトルのなす角 θ から $|\cos \theta|$ を算出し、電子の移動し易さをモデル化（以下、地磁気伝搬係数）した。波数ベクトルが磁力線方向に平行の場合、地磁気伝搬係数の値は大きくなり、垂直の場合は値が低くなる。地磁気伝搬係数は、震源から南方向の値が高く、震源南側に伝播しやすい傾向が見られた。TEC 擾乱が震源南側で観測された衛星は J02, G08, G16 である。一方、J07 は震源から南には TEC 擾乱は観測されず、東方向に TEC 擾乱が観測されたため、この結果は地磁気ベクトルだけでは説明がつかない。そのため、TEC の見かけの変化を考慮する必要がある。

TEC は積分値であるため、電波の経路上（以下、観測ベクトル）に擾乱の正と負が存在すると、相殺され、見かけ上、擾乱がないように見える。そのため、波数ベクトルと観測ベクトルが平行に近い場合は相殺され、見かけの擾乱は小さくなる。一方、波数ベクトルと観測ベクトルが垂直に近い場合は見かけの擾乱が大きくなる。この効果を波数ベクトルと観測ベクトルのなす角 Φ から $\sin \Phi$ を計算（以下、観測係数）し、評価した。震源から見た観測ベクトル方向の観測係数の値は低くなる。J02 の仰角は 90 度近いので、震源周辺の観測係数の値が低かった。一方、J07 の方位角は南南西方向、G08 は南西方向、G16 は北北東方向を向いているため、観測係数はそれらの方向の値が低かった。

2 つの効果を考慮するため、計算した地磁気伝搬係数と観測係数をかけ合わせた（擾乱観測係数）。J02 と G16 は南方向に、J07 は東方向、G08 は南東方向で高い値を示した。J07 は全体的に値が低かった。TEC 擾乱は J02 と G16 は南方向に観測でき、J07 は東方向、G08 は南方向に観測できた。擾乱観測係数の値が高い方向では TEC 擾乱が強く、低い方向では弱いか観測されず、観測結果は擾乱観測係数と一致する。以上から、観測された異方性は地磁気ベクトルと観測ベクトルの相互作用によって形成されていることが分かった。