

GNSS 観測に基づく日本-オーストラリア間における夜間中規模伝搬性電離圏擾乱の地磁気共役性の研究

#渡辺 一唯¹⁾, 大塚 雄一¹⁾, 新堀 淳樹¹⁾, 惣宇利 卓弥²⁾, MASUWARAN Veera Kumar³⁾, 西岡 未知⁴⁾, PERWITASARI Septi⁴⁾

⁽¹⁾ 名古屋大学宇宙地球環境研究所, ⁽²⁾ 京都大学生存圏研究所, ⁽³⁾ サストラミナシ大学, ⁽⁴⁾ 情報通信研究機構

Geomagnetic Conjugation of Nighttime Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances in Japan-Australia Based on GNSS Observation

#Kazui WATANABE¹⁾, Yuichi OTSUKA¹⁾, Atsuki SHINBORI¹⁾, Takuya SORI²⁾, Veera Kumar MASUWARAN³⁾, Michi NISHIOKA⁴⁾, Septi PERWITASARI⁴⁾

⁽¹⁾Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, ⁽²⁾Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, ⁽³⁾SASTRA Deemed University, ⁽⁴⁾National Institute of Information and Communications Technology

Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances (MSTIDs) are wave-like propagations of electron density perturbations that occur in the mid-latitude F region. Night MSTIDs are known to intensify through coupling with instabilities in sporadic E (Es) layers, which are more frequently observed in the summer hemisphere. Conjugate MSTIDs exhibiting mirror structures in both hemispheres along common magnetic field lines have also been reported. This suggests that electric fields generated in the Es layer are mapped along magnetic field lines, thereby enabling electromagnetic coupling of MSTIDs between hemispheres.

In this study, we performed a statistical analysis of ionospheric coupling between the northern and southern hemispheres. We utilized ionosonde data from four sites in Japan, together with total electron content (TEC) measurements derived from the Global Navigation Satellite System (GNSS) over Japan and its magnetic conjugate point in Australia, covering the years 2011 – 2020 and 2024.

The disturbance component of TEC (dTEC) associated with MSTIDs was obtained for each satellite – receiver pair by subtracting a 1-hour running mean from the original TEC data. MSTID activity was quantified as $\delta I/\bar{I}$, where δI denotes the average standard deviation of 1-hour TEC variations and \bar{I} the background TEC, computed within a $4.05^\circ \times 4.05^\circ$ area above each ionosonde. As indicators of Es-layer characteristics, we used foEs, the critical frequency of the Es layer. Correlation coefficients between foEs and the average MSTID activity (19:00-02:00 LT, May-August) were then evaluated.

The correlation between foEs over Japan and MSTID activity above Japan was consistently positive (0.2 to 0.8) across all years except at Okinawa, with higher values observed in the order Wakkanai, Kokubunji, Yamagawa, and Okinawa. This indicates that at higher latitudes, where Es-layer conductivity to the F region is enhanced and Perkins instability in the F region is weaker, MSTIDs rely more strongly on seeding from the Es layer, thereby exhibiting stronger coupling. Conversely, correlations between foEs in Japan and MSTID activity over Australia also tended to increase with latitude but were considerably smaller (-0.2 to 0.4) than the Japan – Japan correlations. These findings suggest that the influence of the Es layer on MSTIDs in the conjugate hemisphere is weaker than in the local hemisphere. This may imply that the polarization electric field generated by kilometer-scale Es layers produces electron density variations in the F region of the same hemisphere, which attenuate as they propagate along magnetic field lines to the opposite hemisphere, resulting in weak correlations with F-region electron density variations in the opposite hemisphere.

Additionally, we analyzed dTEC data from an MSTID event observed over Japan in June 2024 to quantitatively investigate the spatial correlation of TEC variations associated with MSTIDs between the northern and southern hemispheres, which are connected by magnetic field lines. Using the IGRF model, magnetic conjugate points were calculated for each $0.15^\circ \times 0.15^\circ$ grid within the $4.05^\circ \times 4.05^\circ$ areas where MSTID activity was evaluated above the four ionosonde sites. Correlation coefficients between dTEC over Japan and that over the corresponding conjugate grids were computed every 5 minutes. The results showed that during the MSTID occurrence interval (19:00 – 02:00 LT) over Japan, the correlation coefficient reached values up to 0.7, confirming that TEC variations associated with MSTIDs exhibit magnetic conjugacy. However, the correlation varied significantly with time, indicating the need for further detailed analysis.

中規模伝搬性電離圏擾乱 (MSTID) は、主に中緯度の F 領域で発生する電子密度の疎密構造が波状に伝搬する現象である。夜間に発生する MSTID は、夏半球側において発生頻度が高いスプラディック E 層 (Es 層) の不安定性と結合して成長することが知られている。また、同一の磁力線上に位置する南北両半球で鏡像の構造を持つ MSTID が観測されている。このことは、Es 層で発生した電場が磁力線に沿ってマッピングされることで、両半球の MSTID が電磁氣的に結合している可能性を示唆している。

本研究では、この南北半球の電離圏結合の統計解析を行うため、2011 年から 2020 年及び 2024 年における、日本国内 4 地点のイオノゾンドのデータと日本及び日本と磁気共役点であるオーストラリアの全球測位衛星システム (GNSS) から収集された全電子量 (TEC) を調べた。

MSTID による TEC の擾乱成分 (dTEC) を、衛星と受信機のペアごとに、元の TEC データから 1 時間の移動平均を差

し引くことで求めた。MSTID 活動度を、1 時間ごとの TEC 変動の標準偏差 (δI) を背景 TEC (\bar{I}) で規格化した $\delta I/\bar{I}$ として定義し、各イオノゾンデがある地点上空の $4.05^\circ \times 4.05^\circ$ の領域で算出した。また、Es 層の特性を示す指標として、臨界周波数 foEs を使用し、5 月から 8 月の夜間（現地時間 19:00～翌 02:00）における平均 MSTID 活動度との日変動の相関係数を算出した。

日本の foEs と日本の MSTID 活動度の相関係数は、沖縄を除く 3 地点のすべての年で正の値を示し (0.2 から 0.8)、稚内、国分寺、山川、沖縄の順に高い値を示した。このことは、高緯度の方が F 領域に対する Es 層の導電率が高いことや F 領域でのパーキンス不安定が小さいことで、MSTID は Es 層からのシーディングがなければ十分に成長できないため、MSTID と Es 層の結合が強くなることが示唆される。一方で、日本の foEs とオーストラリアの MSTID 活動度の相関係数は、高緯度ほど最大値が大きくなったが、日本の foEs と日本の MSTID 活動度の相関係数と比較すると非常に小さい値であった (-0.2 から 0.4)。これらの結果から、Es 層が反対半球の MSTID に与える影響は、同半球の MSTID に与える影響よりも小さいことが考えられる。これは、数 km スケールの Es 層に起因する分極電場が、Es 層と同半球における F 領域電子密度の変動が生成されるが、磁力線に沿って反対半球に伝わる分極電場は減衰することにより、反対半球の F 領域電子密度変動とは相関が低いと考えられる。

また、磁力線でつながった南北両半球間において、MSTID による TEC 変動の空間構造の相関を定量的に調べるため、2024 年 6 月に日本上空で観測された MSTID 発生期間の dTEC データを解析した。IGRF モデルを用いて、MSTID 活動度を計算した 4 地点の緯度・経度 $4.05^\circ \times 4.05^\circ$ の範囲において $0.15^\circ \times 0.15^\circ$ の各グリッドに対応する磁気共役点を計算した。日本上空の各グリッドにおける dTEC と、その磁気共役点に対応するグリッド上の dTEC との相関係数を 5 分ごとに算出した。その結果、日本において MSTID が発生していた 19-2 時において、相関係数は、最大 0.7 であり、MSTID による TEC 変動が磁気共役性を持っていることが確認できた。しかし、相関係数の時間変化が大きく、より詳細な解析が必要である。