

2004年11月10日に日本上空で観測された電離圏擾乱に関する研究

京都大学理学研究科 西岡未知、齊藤昭則

1. 研究背景

地磁気擾乱時に出現する電離圏密度擾乱には、数メートルスケールから数千キロメートルスケールのもので様々なスケールのもが存在する。それらの電離圏擾乱のうち、数百 km のスケールを持つ中規模伝搬性電離圏擾乱 (Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbance : MSTID) の観測には、広範囲・高分解の観測網が必要である。本研究では、2004年11月10日に GEONET によって観測された MSTID について報告する。

2004年11月10日に起こった地磁気擾乱は、3日前の11月7日から始まった地磁気擾乱に引き続くものであった。図1に2004年11月6日から11日のDst指数を示す。日本上空でMSTIDが観測されたのは11月10日のUT10:00以降であり、その時間帯は図1の横線で示されている。

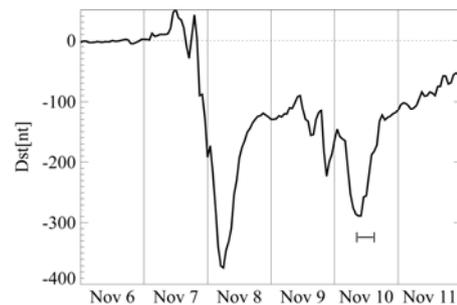


図1. 2004年11月6-11日のDst指数

2. データ

本研究には、GEONET や IGS 等の地上 GPS 受信機網データを用いた。地上 GPS 受信機網データを用いると、地上 GPS 受信機 - GPS 衛星間の全電子数 (Total Electron Content: TEC) を算出することが出来る。TEC データは 30 秒値である。用いた GEONET の地上 GPS 受信機は 1400 点以上であり、その分布を図2に示す。また、日本以外の TEC データを得るために、IGS 等の海外に展開される GPS 受信機網のデータを用いた。それらの受信機の位置は図3に示されている。

また、高度 850km を飛行する DMSF 衛星のイオン密度データ (1 秒値)、および TIMED 衛星搭載の GUVI の 135.6nm イメージャデータも用いた。

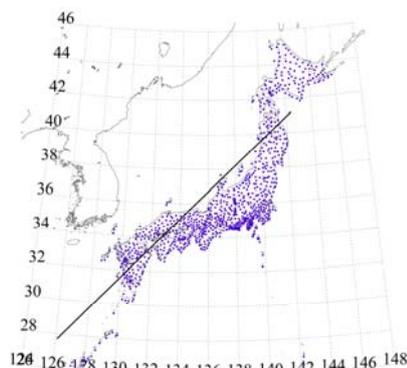


図2. GEONET の地上観測点

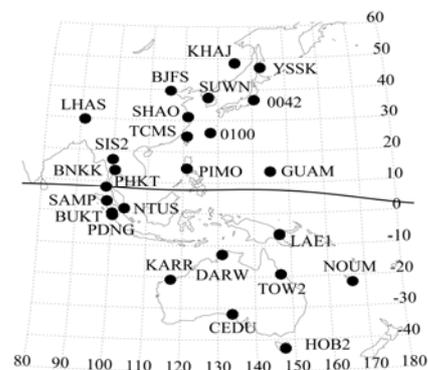


図3. IGS 等の地上観測点

3. 観測結果

GEONET の受信機網から求めた TEC 分布図を図 4 に示す。図 4 (a)、(b) のそれぞれの時刻は UT12:10 (LT21:10) と UT12:30 (LT21:30) である。どちらの時刻にも南東から北西に伸びる TEC の縞構造が存在し、時刻を追って見ると、これらの構造は北東から南西に伝播していることがわかる。縞構造の水平スケールは数百 km である。これらの縞構造を詳細に調べるために、波面垂直方向に沿って TEC のプロファイルを計算したものが図 5 である。横軸は図 2 の直線で示された波面垂直方向軸上の位置を経度で示している。実線で示されたのが UT12:10 における TEC 変動、破線で示されたのが UT12:30 における TEC 変動である。それぞれ東経 136.4 度、東経 134.8 度付近に描かれた矢印は、UT12:10 と UT12:30 に観測された TEC の極小値で、同一であるものを示しており、この部分の移動速度から、TEC の縞構造の移動速度は秒速 180m くらいであることがわかる。これらの性質は今まで GEONET によって観測されてきた MSTID の性質と一致し、2004 年 11 月 10 日に観測された TEC の縞構造も MSTID であるといえる。過去に観測された MSTID と今回観測された MSTID の大きな違いはその振幅である。今回観測された MSTID の振幅は約 30TECU であり、非常に振幅の大きな MSTID であったことがわかる。

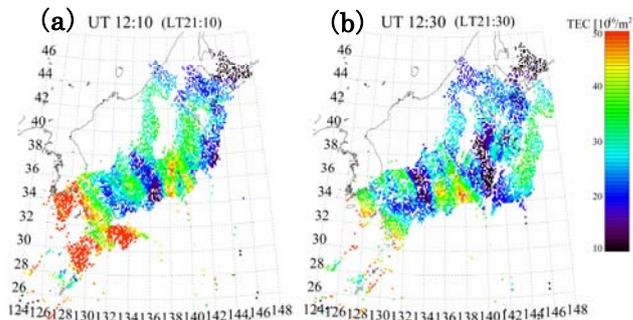


図 4. GEONET によって観測された TEC 分布

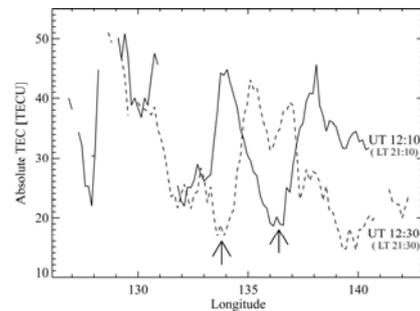


図 5. TEC 縞構造の断面図

日本上空で観測された MSTID について、日本以外に配置された地上 GPS 受信機網データを用いて、MSTID が出現していた範囲を調べた。図 6 は、各観測点における LT1900 から LT2300 の間の Rate Of TEC change Index (ROTI) の値を丸印の大きさとして示している。ROTI が 0.1、0.3、0.5 [TECU/min] の場合の丸印の大きさを図 6 に左下に例として示している。ROTI とは TEC30 秒値の時間変化の 5 分間での標準偏差であり、数十 km スケールの電子密度擾乱の強さの指数として用いられている。MSTID 内には数十 km スケールの電子密度擾乱が存在していると考えられるので、ROTI は MSTID 活動度のプ

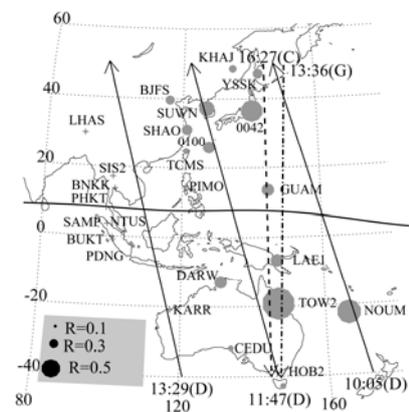


図 6. ROTI 分布

ロキシとして用いることが出来る。

日本上空で観測された MSTID は、北緯 45 度よりも北、東経 120 度よりも西では観測されなかったことがわかる。また、低緯度側でもその活動度は弱かった。日本と磁気共役の位置にあたるオーストラリアでは MSTID は観測されていた。南半球においても、東経 120 度よりも西、高緯度側、低緯度側では MSTID は観測されなかった。

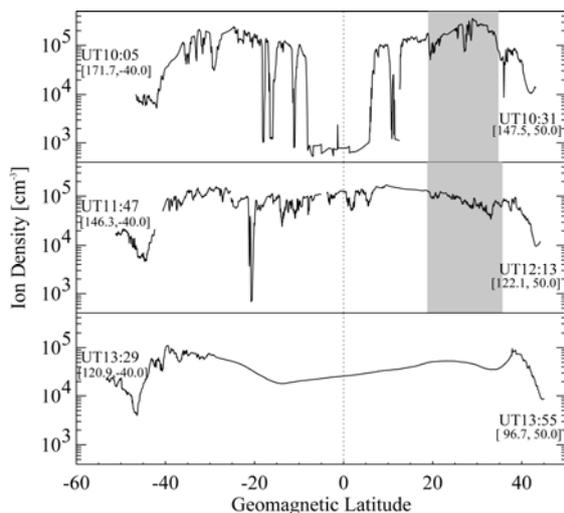


図 7. DMSP によるイオン密度観測

図 7 は、高度 850km を飛行する DMSP 衛星によって観測されたイオン密度の変動を地磁気経度を横軸として示している。地理緯度 -40 度から 50 度の範囲を飛行した 3 軌道のデータを UT の早い順に上から示す。それぞれの時刻は UT10:05、11:47、13:29 で、衛星の位置は図 6 に矢印で示されている。図 7 で影をつけた部分は MSTID が観測されていた日本上空に対応している。高度 850km で観測された MSTID は、水平空間スケールが数百 km であり、地上で観測された MSTID の水平スケールと一致する。また、電子密度変動の割合は、背景の数十パーセントであり、高度

850km においても MSTID による電子密度変化は十分大きかったことがわかる。この MSTID は南半球にも見られる。

UT10:05 のパスにおいて地磁気緯度 20 度よりも低緯度側に、背景の電子密度の 99 パーセント以上が減少する電子密度領域が見られる。これらはプラズマ・バブルと考えられる。また、UT10:05 のパスにおいて、地磁気緯度 10 度よりも低緯度側の電子密度は、高緯度側のそれよりも 2 桁ほど小さい。これは、磁気赤道域で、電離圏ピーク高度が 850km よりも高高度に存在していたことを示しており、強い東向き電場がかかって $E \times B$ ドリフトにより電離圏が持ち上げられたことを示唆している。

強い東向き電場による電離圏高度の上昇は TIMED 衛星による GUVI データによっても示唆される。図 8 は GUVI によって観測された 135.6nm の発光強度を示している。日本付近で電子密度が高い。中緯度において電子密度が高いことは、その経度帯の磁気赤道域で東向き電場が強く、

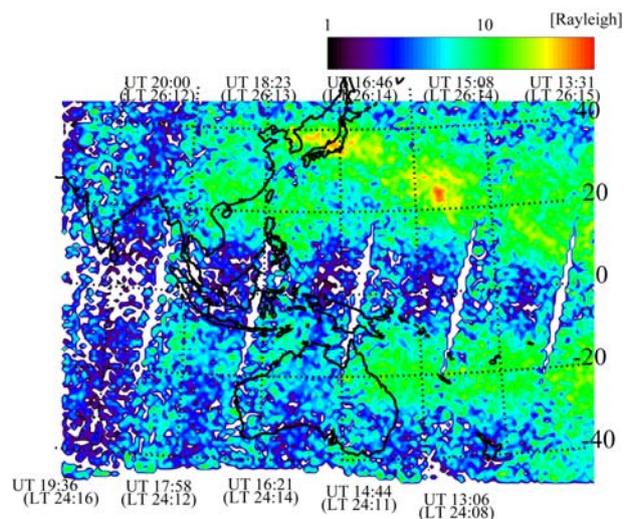


図 8. GUVI の 135.6nm 発光

磁気赤道域で $E \times B$ ドリフトによって持ち上げられた高電子密度部分が磁力線沿いに中緯度へ移動してきたことを示唆している。中緯度で光電子密度が観測された経度帯は東経 120 度以東であり、MSTID が観測された経度帯と一致する。

4. 考察と結論

2004 年 11 月 10 日に地上 GPS 受信機網および DMSP 衛星によって MSTID が観測された。MSTID の波面は南東-北西方向に伸びており、その伝播速度は北東から南西方向に 180m/s であった。波面の水平スケールは数百 m であり、これらの MSTID の特徴は過去に観測された MSTID の特徴とほぼ一致する。また、MSTID の振幅は地上 TEC 観測で 30TECU であり背景の TEC の半分であった。高度 850km での直接観測でも背景の電子密度の数十パーセントの電子密度変化が観測された。この MSTID が観測された領域は、東経 120 度以東の中緯度帯（磁気緯度 20 度から 40 度）に限られ、南半球でも観測された。

この振幅の大きな MSTID が出現した原因としては強い東向きの電場の存在が考えられる。磁気赤道域の東向きの電場により電離圏が高高度に持ち上げられ、中緯度でプラズマ不安定性が強められたと考えられる。東向きの強い電場の証拠としては、GUVI による 135.6nm の大気光データがある。GUVI のイメージャデータによると、MSTID の観測された経度帯の中緯度に高電子密度部分が分布していた。これはこの経度帯における磁気赤道域の強い東向き電場が電離層を高高度に押し上げ、プラズマが磁力線沿いに中緯度まで運ばれた結果だと解釈できる。

謝辞

本研究を行うにあたり、以下の機関からデータの提供を受けました。感謝いたします。

地上 GPS 受信機データ

国土地理院、International GNSS Service、名古屋大学太陽地球環境研究所

DMSP 衛星搭載 SSIES データ

Air Force Research Laboratory

TIME 衛星 GUVI データ

The John Hopkins University Applied Physical Laboratory

Dst 指数

地磁気世界資料センター