

2.4.5. 中規模伝搬性電離圏擾乱(MSTID)

大塚 雄一(名古屋大学宇宙地球環境研究所)

(2020年3月31日受付、2021年5月31日公開)

2.4.5.1 はじめに

電離圏電子密度の変動が伝搬する現象として、伝搬性電離圏擾乱 (Traveling Ionospheric Disturbance: TID) が知られており、従来から多くの観測及び研究が行われてきた (Hunsucker, 1982; Hocke and Schlegel, 1996)。TIDは、その特徴に基づき、周期 15-60 分程度、水平波長が数百 km 程度の中規模 TID (Medium-Scale TID: MSTID)、周期 30 分から 3 時間程度、水平波長が 1000km 以上のものを大規模 TID (Large-Scale TID: LSTID) と分類されている (Hunsucker, 1982)。Hines (1960) 以来、TID は中性大気の振動である大気重力波が原因と考えられてきたが、1990 年代後半になると、全天大気光イメージャーや多点の GPS 受信機網による観測が行われるようになり、TID の水平二次元構造が明らかになると (図 1)、中緯度において夜間に観測される MSTID は、北半球では南西方向に、南半球では北西方向に伝搬するものが殆どであることなど、従来の大気重力波が原因とする考え方では説明できない特徴があることが明らかになった (Kelley and Miller, 1997)。LSTID は、2.4.3 節で述べたように、地磁気擾乱時に頻繁に現れ、赤道方向に伝搬するため、地磁気擾乱により高緯度域で発生した大気重力波が原因と考えられている。本節では、地磁気静穏時にも頻繁に現れる MSTID について述べる。MSTID による電子密度の変動は、背景の数%程度であるが、GPS など衛星測位において、精密な測定が要求される場合には、測位誤差の要因となり得る。

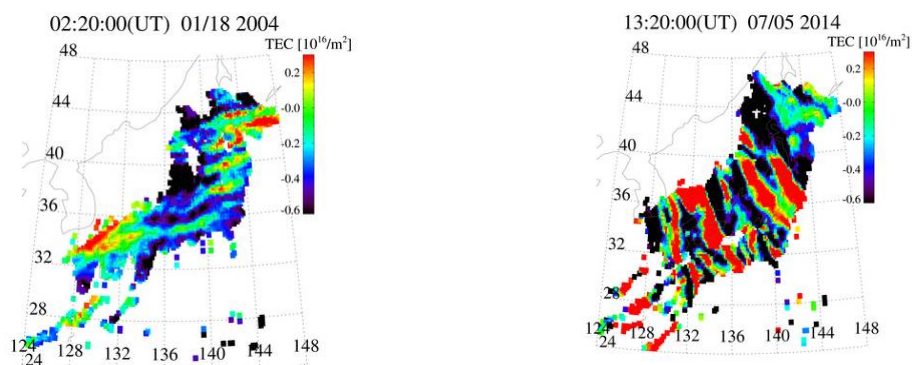


図 1. 日本上空の全電子数変動。(左) 昼間と(右) 夜間における中規模伝搬性電離圏擾乱(MSTID) の例 (<https://aer-nc-web.nict.go.jp/GPS/DRAWING-TEC/>)。

2.4.5.2 昼間に発生する MSTID

昼間に現れる MSTID は、赤道方向に伝搬するものが多く、冬に発生頻度が高い。この特徴は、経度に依らず、また南北両半球において見られる。赤道方向に伝搬するものが多いことは、昼間の MSTID が大気重力波に起因するものであると考えられる理由の一つである。大気重力波による中性大気風速変動と電離圏電子密度変動 n'_e との関係は、下の式のように表される (Hooke, 1968)。

$$n'_e = \frac{i}{\omega} u'_b \left\{ \frac{\partial n_e}{\partial z} \sin I - ik_b n_e \right\} \quad (2.4.5.1)$$

ここで、 u'_b と k_b は、それぞれ中性大気風速の変動と波数ベクトルの磁力線平行方向成分、 ω は角周波数、 n_e は背景の電子密度、 z は高度、 I は磁力線の伏角であり、 i は複素数を表す。電離圏中のイオンは、中性大気との衝突により力を受けるが、イオンは、磁場が存在するため磁場と直交方向にはジャイロ運動する。このため、イオンは、中性大気との衝突により、磁場と平行方向にのみ動き、磁力線平行方向には、イオンは中性大気と同じ速度 u'_b で動く。電子密度変動 n'_e の大きさは、 u'_b に比例することが分かる。式 (2.4.5.1) の右辺第一項は、イオンが上下方向に動かされることに起因する電子密度の変動に対応する。右辺第二項目は、イオンの集束・発散に伴う電子密度変動を表している。大気重力波による中性大気集束・発散は起こらないが、イオンは磁力線平行方向にしか動かないため、集束・発散が起こり、電子密度の変動が起こる。

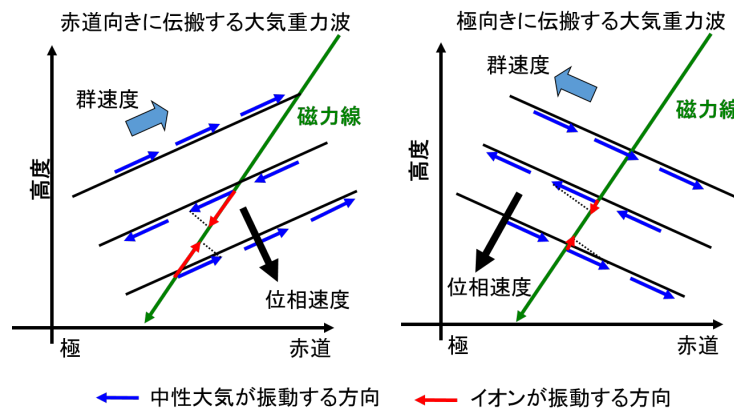


図 2. (左) 赤道向きおよび (右) 極向きに伝搬する大気重力波による中性大気の振動方向とイオンの振動方向との関係。

図 2 に、上方伝搬する大気重力波の波面と大気の振動方向の関係を表す。図の横軸は大気重力波の水平伝搬方向の水平距離であり、縦軸は高度を表す。水平・鉛直断面内において、大気は、大気重力波の波面と平行方向に振動する。図 2 の左図は、中緯度において、大気重力波が赤道方向に伝搬する場合であり、右図は、極方向に伝搬する場合を示す。地球の磁力線と大気

が振動する方向とを比較すると、大気重力波が赤道方向に伝搬する場合、極方向に伝搬する場合に比べて、大気の振動の磁力線平行成分が大きい。これは、式 (2.4.5.1) において u'_b が大きいことに対応し、大気重力波が赤道方向に伝搬する場合に、電子密度変動 n'_e の振幅が大きくなることを意味する。一方、右図に示すように、大気重力波が極方向に伝搬する場合、磁力線平行方向の大気の振動 (u'_b) の振幅は小さいため、 n'_e の振幅は小さくなる。このように、磁力線に対して、イオンの運動は非等方的であるため、大気重力波に対する電子密度変動も非等方的になる。たとえ大気重力波が等方的に伝搬する場合においても、電子密度変動である TID は、赤道方向に伝搬するものが大きな電子密度変動を伴う。このため、観測される MSTID は、赤道向きに伝搬するものが多い、と説明される。また、磁力線を横切る方向の中性大気の運動は、イオンとの衝突により抗力を受ける (イオン抗力)。このため、大気重力波は、減衰する。赤道方向に伝搬する大気重力波は、他の方向に伝搬する場合と比べて受けるイオン抗力も小さいため、減衰が小さく長距離の伝搬が可能である。このことも、赤道方向に伝搬する MSTID の頻度が高いことの原因と考えられる。

MSTID による電子密度変動の鉛直構造は、大型の大気レーダーである非干渉散乱レーダーによって観測されている。図 3 に示すように、電子密度の変動が時間とともに低高度に伝搬している様子が見られる。大気重力波の位相速度と群速度の方向は 90 度異なることから、この電子密度の変動は、上方伝搬する大気重力波によるものと言える。また、電子密度変動の鉛直波長は、高高度ほど長くなる傾向が見られる。これは、熱圏では、高高度ほど大気の密度が小さくなることにより、大気の粘性や熱伝導率大きくなるためと考えられている (Pitteway and Hines 1963)。この特徴は、大気圏・電離圏結合モデルである GAIA (Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy) によっても再現されている (Miyoshi et al. 2018)。

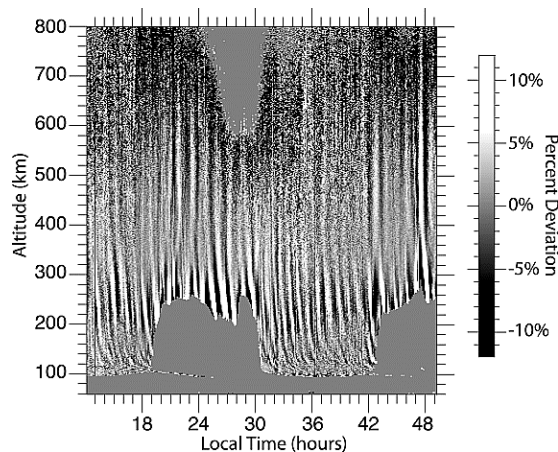


図 3. プエルトリコのアレシボにある非干渉散乱レーダーで観測された、周期 1-2 時間の成分をもつ電子密度変動の時間高度変化 (Livneh et al. 2007)。

大気重力波は、鉛直波数 m 、水平波数 k 、水平位相速度 c の関係を表す分散関係

$$m^2 = \frac{N^2}{(c-U)^2} - k^2 - \frac{1}{4H^2}$$

を満たす。ここで、 U は背景の風速、 m はブラント・パイサラ角振動数 N 、 H はスケールハイトを表す。大気重力波の鉛直波数 m は、 U に依存することが分かる。成層圏・中間圏では、強い東西風が吹くため、 U は重力波の位相速度 c に近くなる。 $(c-U)^2$ が小さくなると、上記の分散関係式から分かるように、 m は大きく（鉛直波長は短く）なる。 $c=U$ となる高度では、 m が無限大（鉛直波長がゼロ）になり、大気重力波はこの高度よりも上方に伝搬できなくなり、やがて砕波する。また、大気重力波の鉛直波長が短いほど粘性の効果がはたらき、大気重力波ははやく減衰する。このように、下層大気から電離圏にまで大気重力波が伝搬する途中の風速は、大気重力波の伝搬に大きな影響を与える。

また、大気重力波が伝搬途中で減衰や砕波すると、そこからあらたに大気重力波が励起されることがある（Vadas and Liu 2009）。成層圏・中間圏では、東西風速が大きくなることから、このような二次的な大気重力波が発生しやすいことが指摘されている。下層大気で励起された大気重力波が直接電離圏に伝搬するだけでなく、伝搬途中で破砕し、二次的に発生した大気重力波も、昼間の MSTID の原因となっていると考えられる。このように、昼間の MSTID は、下層大気から上方伝搬する大気重力波が原因と考えられるが、大気重力波がどこで励起され、どのように電離圏まで伝搬するかは、未だ明らかになっていないことが多く、理論的・観測的研究が進められている。

2.4.5.3 夜間に発生する MSTID

夜間において MSTID は、昼間とは異なり、北半球では南西方向に、南半球では北西方向に伝搬するものが多い。これは、夜間の MSTID が大気重力波に起因するものではなく、電磁力学的な作用によって発生するためである。図 4 に、MSTID とそれに伴う電場変動の観測結果を示す（Shiokawa et al. 2003）。図には、大気光イメージャーで観測された酸素原子が発する波長 630nm の大気光の二次元分布が示されており、北西から南東にのびる波面をもつ夜間の MSTID による大気光変動が見られる。同時刻に人工衛星で観測された電場変動を、磁力線沿って大気光が発光する高度 300km に投影したものが黒線で示されている。電場変動 δE は、大気光発光強度の増大領域では南西向き、減少領域では北東向きであることが分かる。このような MSTID に伴う電場変動は、下のよう説明される。熱圏における中性大気風速 U は、圧力傾度力とイオン抗力の釣り合いによって決まるため、夜間では、北半球の中緯度において南西方向に吹く。従って、 U によるペダーセン電流 J は、 $U \times B$ 方向である北東向きに流れる。630nm 大気光の発光強度は、 F 領域の電子密度と酸素分子の密度の積に比例するため、ペダーセン導電率 Σ_p にも比例する。

よって、630nm 大気光の変動は、 Σ_p の空間変動と見なすことができる(Makela and Kelley 2003)。 J が、空間的に不均一な Σ_p を流れるとき、図中に示すように正または負の電荷が溜まり、分極電場 δE が生じる。このようにして生成された E_p が東(西)向き成分をもつと、 $E \times B$ ドリフトにより F 領域プラズマは上(下)方に動かされ、高(低)高度では中性大気密度が減少(増大)するため、大気光の減(増)光する。発光強度が減少する。このように、夜間の MSTID の生成には分極電場が重要な役割を担っている。電離圏を通る地球の磁力線は、導電率が高く、電離圏電場はほぼ減衰することなく南北両半球の F 領域に伝わるため (Farley 1960)、南北両半球において鏡像の構造をもつ MSTID が同時に発生する (Otsuka et al. 2004)。

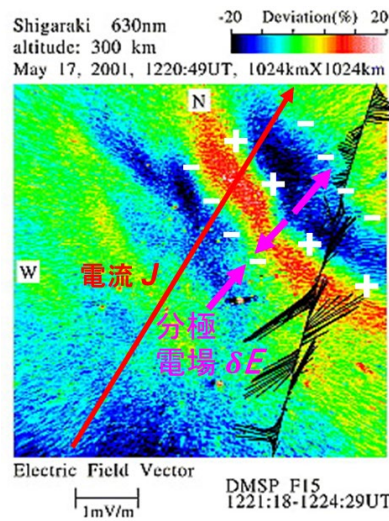


図 4. MSTID による 630nm 大気光変動と分極電場との関係 (Shiokawa et al. (2003)に電流 J 、分極電場及び電荷を加筆)。

上述したように、夜間の MSTID による電子密度変動は分極電場を伴っている。この電子密度変動と分極電場が成長するメカニズムとして、パーキンス不安定が提唱されている (Perkins, 1973)。夜間の中緯度 F 領域におけるプラズマは、下向きの重力拡散速度と、磁力線に平行な赤道向きの中性風及び東向き電場による $E \times B$ ドリフト速度が釣り合った状態にあり、安定である。しかし、パーキンス不安定は、その上下方向の釣り合いがくずれる現象である。図 5 に、中緯度における磁力線直交面内における高度積分したペダーセン電流 J 、ペダーセン導電率 (Σ_p) の変動と分極電場との関係を示す。 J は、導電率の変動を横切って流れる。 J を MSTID の波面に垂直方向と平行方向の二成分 (J_{\perp} と J_{\parallel})に分けて考える。波面と垂直な方向では、電流は連続して流れるため、高導電率領域と低導電率領域で同じ電流 J_{\perp} が流れる。一方、波面と平行方向の電流 J_{\parallel} は、高導電率領域において大きく、低導電率領域では小さくなる。このため、プラズマに働く $J \times B$ の力は、高(低)導電率領域で下向きに大きく(小さく)、プラズマは下(上)向きの力を受ける。この結果、高(低)導電率領域のプラズマは低(高)高度に動かされ、さらに導電率が高く(低く)なる。このように、初期の微小変動が時間と共に成長する。パーキンス不安定は、

Σ_p 変動の波数ベクトルが、 J の方向と東西方向との間にある場合に不安定が成長する。夜間のMSTIDは、北(南)半球において北西-南東(南西-北東)にのびる波面をもつことから、パーキンス不安定がMSTIDの生成機構と考えられる。

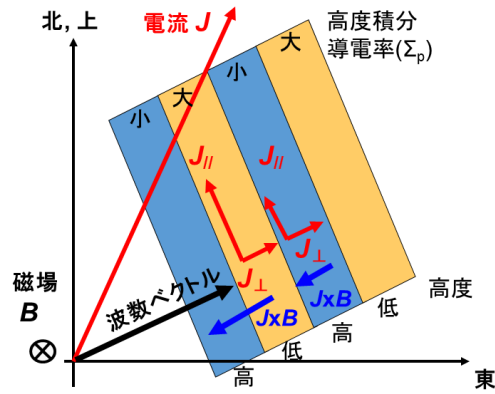


図 5. 磁力線直交面内における電流と導電率変動の関係。電流および導電率は F 領域全体を磁力線に沿って積分したもの。パーキンス不安定の発生機構を示す。

参考文献

- Farley, D. T.: A theory of electrostatic fields in the ionosphere at nonpolar geomagnetic latitudes. *J. Geophys. Res.* 65, 869–877 (1960)
- Hines, C. O.: Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. *Can. J. Phys.* 38, 1441–1481 (1960)
- Hocke, K., Schlegel, K.: A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982–1995. *Ann. Geophys.* 14, 917–940 (1996)
- Hooke, W. H.: Ionospheric irregularities produced by internal atmospheric gravity waves. *J. Atmos. Terr. Phys.* 38, 1441–1481 (1968)
- Hunsucker, R. D.: Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: A review. *Rev. Geophys.* 20, 293–315, doi:10.1029/RG020i002p00293 (1982)
- Kelley, M. C., Miller, C. A.: Electrodynamic waves? A new look at the role of electric fields in thermospheric wave dynamics. *J. Geophys. Res.* 102, 11,539–11,547 (1997)
- Livneh, D. J., Seker, I., Djuth, F. T., Mathews, J. D.: Continuous quasiperiodic thermospheric waves over Arecibo. *J. Geophys. Res.* 112, A07313, doi:10.1029/2006JA012225 (2007)
- Makela, J.J., Kelley, M.C.: Using the 630.0-nm nightglow emission as a surrogate for the ionospheric Pedersen conductivity. *J. Geophys. Res.* 108(A6), 1253 (2003)
- Miyoshi, Y., Jin, H., Fujiwara, H., Shinagawa, H.: Numerical study of traveling ionospheric disturbances generated by an upward propagating gravity wave. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 123, 2141–2155, <https://doi.org/10.1002/2017JA025110> (2018)
- Otsuka, Y., Shiokawa, K., Ogawa, T., Wilkinson, P.: Geomagnetic conjugate observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances at midlatitude using all-sky airglow imagers. *Geophys. Res. Lett.* 31, L15803, doi:10.1029/2004GL020262 (2004)
- Perkins, F.: Spread F and ionospheric currents. *J. Geophys. Res.* 78, 218–226 (1973)
- Pitteway, M. L. V., Hines, C. O.: The viscous damping of atmospheric gravity waves. *Can. J. Phys.* 41, 1935–1948 (1963)
- Vadas, S. L., Liu, H.: Generation of large-scale gravity waves and neutral winds in the thermosphere from the dissipation of convectively generated gravity waves. *J. Geophys. Res.* 114, A10310, doi:10.1029/2009JA014108 (2009)
- Shiokawa, K., Otsuka, Y., Ihara, C., Ogawa, T., Rich, F. J.: Ground and satellite observations of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbance at midlatitude. *J. Geophys. Res.* 108(A4), 1145. doi:10.1029/2002JA009639 (2003)