

電離圏 E-F 領域結合に関する数値シミュレーション

横山 竜宏 情報通信研究機構

はじめに

地球大気を覆う電離圏は下層の中性大気と宇宙空間を繋ぐ遷移領域であり、多くの複雑な物理、化学過程が存在するため現在も未解明な現象が多く残されている。電離圏のプラズマはその運動が中性大気との衝突によって強く支配されているため、中性大気と電離大気の相互作用を解明することは電離圏の物理過程を理解する上で非常に重要である。一方、電離圏内では地球磁場に沿った導電率が非常に高く、電界により強く結合されている。中規模伝搬性電離圏擾乱 (Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbance; MSTID) の生成機構として大気重力波との関連が従来示唆されてきたが、全天大気光イメージャ、GPS-TEC、衛星等による観測技術が発達し、夜間に中緯度 F 領域において観測される MSTID に関しては電離圏における電場が重要な役割を果たしていることが示されてきている。この MSTID は北半球においては北西-南東方向の波面構造を持ち、その大半は南西方向に伝搬することが観測から明らかとなっている。また、磁気共役点における同時観測から、南北両半球において同時に MSTID が出現する例も多く報告されている [Otsuka *et al.*, 2004]。MSTID の最も有力な成因として F 領域における Perkins 不安定が考えられている [Perkins, 1973]。Perkins 不安定は北西-南東の波面構造は説明可能であるが、その線形成長率は非常に小さく、また伝搬方向も一意には決定されないため観測結果を全て説明するには不十分である。Perkins 不安定の成長率を補う機構として、地球磁場により結合された E 領域との相互作用が近年提唱されている [Tsunoda, 2006]。E 領域ではスポラディック E (E_s) 層の水平不均一構造により F 領域に比べて強い分極電場が容易に生成され得る。また、 E_s 層を形成する東西風速シアにより駆動される Perkins 不安定と類似した不安定機構が存在し、実際 E 領域においても北西-南東方向の構造がレーダー干渉計等により観測されている。現在までの研究により、E、F 両領域を含む 3 次元シミュレーションモデルを開発し、両領域における不安定機構により北西-南東方向の波面構造が形成される過程の再現に成功している (Yokoyama *et al.*, 2009; Yokoyama and Hysell, 2010; Yokoyama, 2013)。E-F 領域結合による MSTID の生成に関する結果について紹介する。

数値モデル

正イオンとして Fe^+ (スポラディック E 層)、 NO^+ (E 領域)、 O^+ (F 領域) の 3 種類を与える。各イオンと電子の連続の式、運動方程式、電流保存の式は以下で与えられる。

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} + \nabla \cdot (N_i \mathbf{V}_i) = S_i \quad (1)$$

$$q_j(\mathbf{E} + \mathbf{V}_j \times \mathbf{B}) + M_j \mathbf{g} - \frac{\nabla(N_j k_B T)}{N_j} + M_j \nu_{jn}(\mathbf{U} - \mathbf{V}_j) = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot \left[e \left(\sum_i N_i \mathbf{V}_i - N_e \mathbf{V}_e \right) \right] = 0 \quad (3)$$

シミュレーションモデルは、ダイポール磁場、等高度面 (球座標における等 r 面)、等経度面 (等 ϕ 面) から構成される非直交曲線座標系モデルである。シミュレーション領域は経度方向に約 9 度、緯

度方向に約 25 度確保し、それぞれ 0.02 度のグリッド間隔とした。鉛直方向は高度 90 km から 490 km とし、グリッド間隔は任意に設定可能であり、 E_s 層が存在する高度 102 km 付近では 100 m、F 領域上部では約 3 km とした。この計算領域を、南北両半球に対して用意し、プラズマ密度の時間変化 (式 (1)) はそれぞれ独立に、分極電場の分布 (式 (3)) は両半球の磁力線に沿って積分して計算する。北半球の高度 102 km にスポラディック E (E_s) 層を形成するような東西風シアを持ち、その中心では南向きの成分を持つような、高度方向に半時計回りに回転する中性風シアを E 領域に与えた。シアの振幅は 60 m s^{-1} とした。F 領域には南東向きの一様な中性風 200 m s^{-1} を与えた。F 領域のプラズマ密度の初期状態は水平一様とし、ランダムな密度変動を E_s 層に与えた。

結果と考察

3600 秒後と 7200 秒後における E 領域の Hall コンダクタンスと F 領域の Pedersen コンダクタンスの変動成分を図 1(b) と (c) に示す。両領域において、北西-南東の波面構造が形成され、それが南向きに伝搬する様子が見られる。 E_s 層の伝搬は、 E_s 層中心付近の南向き中性風によるものであるが、F 領域の伝搬は E 領域との電場による結合によるものである。F 領域の変動が見られる部分の北側に着目すると、 E_s 層の移動により結合が途切れた後は、F 領域における不安定条件は満たしているにもかかわらず、その変動は減衰している。従って、 E_s 層との結合は、北西-南東方向の初期変動を形成するだけでなく、MSTID の成長にも非常に重要であると言える。生成された MSTID の波長は約 150 km であり、観測されるスケールとほぼ同程度である。また、振幅は低緯度側で大きく、波面の磁気子午面からの傾きが低緯度側で小さい様子も見られた。これらも、観測から得られている MSTID の特徴とよく一致している。

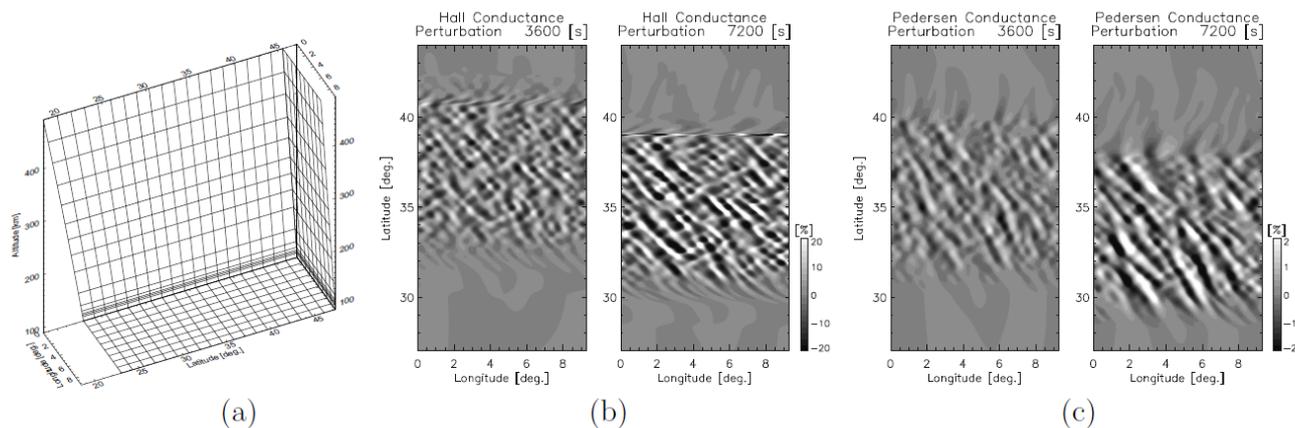


図 1: ダイポール磁場、等高度面、等経度面からなる非直交座標系のグリッド配置 (a)。E 領域に回転する中性風速シアとランダムな密度変動を与えた場合の、E 領域の Hall コンダクタンス (b) と F 領域の Pedersen コンダクタンス (c) の変動成分。

4. まとめ

中緯度電離圏 E-F 領域を結合させた数値モデルを用いて、MSTID の北西-南東波面構造の再現に成功した。本研究の結論として以下の 3 点が挙げられる。(1) E_s 層における北西-南東構造の不安定

機構が、F 領域の北西–南東構造の生成において最も重要である。一方、F 領域における Perkins 不安定も、その成長を加速させる役割を果たしている。(2) E 領域の中性風により E_s 層の構造が移動すると、それに引きずられるようにして F 層の構造も伝搬する。時計回りに回転する中性風シアを考えた場合、構造の南西伝搬が説明可能である。(3) F 層から E 層への結合効果は E_s 層の構造のスケールに現れる。つまり、F 層に形成された構造と同程度のスケールを持ったパターンが E_s 層にも現れる。

現在までに、この数値モデルを赤道域に応用し、赤道域で発生するプラズマバブルの再現に成功している (Yokoyama *et al.*, 2014)。赤道域から中緯度までを包括的に扱う数値モデルを構築することで、現象の理解がさらに深まることが期待される。

参考文献

- Yokoyama, T., D. L. Hysell, Y. Otsuka, and M. Yamamoto, Three-dimensional simulation of the coupled Perkins and E_s layer instabilities in the nighttime midlatitude ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **114**, A03308, doi:10.1029/2008JA013789, 2009.
- Yokoyama, T., and D. L. Hysell, A new midlatitude ionosphere electrodynamics coupling model (MIECO): Latitudinal dependence and propagation of medium-scale traveling ionospheric disturbances, *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L08105, doi:10.1029/2010GL042598, 2010.
- Yokoyama, T., Scale dependence and frontal formation of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances, *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 4515-4519, doi:10.1002/grl.50905, 2013.
- Yokoyama, T., H. Shinagawa, and H. Jin, Nonlinear growth, bifurcation and pinching of equatorial plasma bubble simulated by three-dimensional high-resolution bubble model, *J. Geophys. Res., Space Physics*, doi:10.1002/2014JA020708, 2014.