# 中緯度電離圏 E-F 領域結合数値モデルによる 北西-南東波面構造の形成

横山 竜宏<sup>1</sup>、David L. Hysell<sup>1</sup>、大塚 雄 $-^2$ 、山本 衛<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Earth and Atmospheric Sciences, Cornell University <sup>2</sup>名古屋大学太陽地球環境研究所 <sup>3</sup>京都大学生存圈研究所

# 1. はじめに

中規模伝搬性電離圈擾乱 (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。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<sub>s</sub>) 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。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。本研究では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た [Yokoyama et al., 2009]。

#### 2. シミュレーションモデル

シミュレーションモデルとして  $45^{\circ}$  の伏角を持つ地球磁場を背景とする 3 次元の直交座 標系を考える。正イオンとして Fe<sup>+</sup>(スポラディック E( $E_{s}$ ) 層)、NO<sup>+</sup>(E 領域)、O<sup>+</sup>(F 領 域) の 3 種類を与える。各イオンの連続の式、運動方程式、電流保存の式は以下で与えら れる。

$$\frac{\partial N_{\rm Fe^+}}{\partial t} + \nabla \cdot (N_{\rm Fe^+} \mathbf{V}_{\rm Fe^+}) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial N_{\rm NO^+}}{\partial t} + \nabla \cdot \left( N_{\rm NO^+} \mathbf{V}_{\rm NO^+} \right) = P_{\rm NO^+} - L_{\rm NO^+} N_{\rm NO^+} N_e + L_{\rm O^+} N_{\rm O^+} \tag{2}$$

$$\frac{\partial N_{\mathrm{O}^+}}{\partial t} + \nabla \cdot (N_{\mathrm{O}^+} \mathbf{V}_{\mathrm{O}^+}) = P_{\mathrm{O}^+} - L_{\mathrm{O}^+} N_{\mathrm{O}^+}$$
(3)

$$e(\mathbf{E} + \mathbf{V}_i \times \mathbf{B}) + M_i \boldsymbol{g} - \frac{\nabla(N_i k_B T)}{N_i} + M_i \nu_{in} (\mathbf{U} - \mathbf{V}_i) = 0$$
(4)

$$-e(\mathbf{E} + \mathbf{V}_e \times \mathbf{B}) + M_e \boldsymbol{g} - \frac{\nabla (N_e k_B T)}{N_e} + M_e \nu_{en} (\mathbf{U} - \mathbf{V}_e) = 0$$
(5)

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot \left[ e \left( \sum_{i} N_{i} \mathbf{V}_{i} - N_{e} \mathbf{V}_{e} \right) \right] = 0$$
(6)

図1にシミュレーションモデル (左) とプラズマ密度と中性風の初期条件の例 (右) を示 す。シミュレーション領域は水平方向に 160 km×160 km、鉛直方向は高度 90 km から 470 km とし、水平方向はそれぞれ周期境界とした。地球磁場は 45°の傾きを持つが、周 期境界のために領域内の E 領域と F 領域は同一磁力線により結合されている。グリッド 間隔は高度 90-110 km の範囲は各方向に 0.5 km、高度 110 km 以上は 2 km とした。高度 102 km に  $E_s$  層を形成するような東西風シアを与え、F 領域には南東向きの一様な中性風 200 m s<sup>-1</sup>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、密度変動を  $E_s$  層 に与え計算を行った。



図 1: (左) シミュレーションモデル。(右) プラズマ密度と中性風の初期条件の例。

## 3. 結果と考察

*E*<sub>s</sub>層に北西-南東方向の密度変動を与えた場合の、F領域の積分導電率の時間変化を図 2(左)に示す。*E*<sub>s</sub>層内において生成された分極電場により作られるF層の変動は非常に鋭 く立ち上がり、計算開始後約700秒で10%程度の変動に到達している。一方、F領域に おける Perkins 不安定のみのシミュレーションでは、図2(右)に示すように10%の変動に 達するまでに約7000秒かかっている[*Yokoyama et al.*, 2008]。E領域の効果を含めること により、観測される MSTID の成長を十分に説明できる成長速度が得られることが明らか となった。次に、E領域に時計回りに回転する中性風シアを与えた場合の計算を行った。 この場合、*E*<sub>s</sub>層の中心高度で中性風は南向きの成分を持つため、E領域で生成された分 極電場のパターンは南に伝搬する。それに伴ってF領域の構造も*E*<sub>s</sub>層と同じ速度で伝搬 し、結果として南西方向の位相速度を持つことになる。頻繁に観測される MSTID の南西 伝搬は、E領域の中性風によってコントロールされている可能性があることがこの計算により明らかとなった。

 $E_s$ 層にランダムな密度変動を与えた場合の高度 102.5 km ( $E_s$  層) と 280 km (F 領域) に おける密度変動の時間変化を図 3 に示す。両領域において北西-南東の波面構造が形成さ れている。また、両者の構造のスケールもよく一致しており、E-F 領域間の結合過程が非 常に重要であることを示唆している。F 領域の中性風の方向を変化させ、北西-南東の構 造が Perkins 不安定により成長しない場合のシミュレーションでは、F 領域には目立った 構造は形成されなかった。従って、E 領域の  $E_s$ 層不安定だけでは F 層の構造を作るのに 十分ではなく、両不安定機構が互いに強めあう条件が必要であることが示された。



図 2: F 領域の積分導電率の時間変化。 $(\underline{c})E_s$ 層に密度変動を与えた場合。 $(\underline{c})E$ 領域の密度を0とし、F 領域に密度変動を与えた場合。



図 3: 高度 102.5 km (上) と 280 km (下) における密度変動の時間変化。

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<sub>s</sub> 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<sub>s</sub> 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<sub>s</sub> 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<sub>s</sub> 層にも現れる。今後は、計 算領域を広げた場合の波長特性、反対半球との結合、緯度依存性等について検証を行う予 定である。

## 参考文献

Perkins, F., Spread F and ionospheric currents, J. Geophys. Res., 78, 218-226, 1973.

- Tsunoda, R. T., On the coupling of layer instabilities in the nighttime midlatitude ionosphere, J. Geophys. Res., 111, A11304, doi:10.1029/2006JA011630, 2006.
- Yokoyama, T., Y. Otsuka, T. Ogawa, M. Yamamoto, and D. L. Hysell, First threedimensional simulation of the Perkins instability in the nighttime midlatitude ionosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L03101, doi:10.1029/2007GL032496, 2008.
- Yokoyama, T., D. L. Hysell, Y. Otsuka, and M. Yamamoto, Three-dimensional simulation of the coupled Perkins and E<sub>s</sub> layer instabilities in the nighttime midlatitude ionosphere, J. Geophys. Res., 114, A03308, doi:10.1029/2008JA013789, 2009.