

赤道プラズマバブルに伴う磁場変動の数値シミュレーション

横山 竜宏⁽¹⁾, Claudia Stolle⁽²⁾

⁽¹⁾ 情報通信研究機構, ⁽²⁾ GFZ Potsdam, Germany

はじめに

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。赤道域電離圏においては、赤道スプレッド F/プラズマバブルと呼ばれる現象の研究が古くから行われている。プラズマバブルに伴う局所的なプラズマ密度の不規則構造が発生した場合には、電波の振幅、位相の急激な変動（シンチレーション）が生じるため、GPS 等による電子航法に深刻な障害を及ぼすことが知られている。現在までに、プラズマバブルの複雑な内部構造を再現可能な 3 次元数値モデルを開発し、非線形成長過程について明らかにすることに成功してきた (Yokoyama et al., 2014, 2015)。近年、高精度の磁力計を搭載した衛星観測 (CHAMP, Swarm) により、プラズマバブル中を衛星が通過する際に、数 nT 程度の磁場変動が観測されることが報告されている (e.g., Stolle et al., 2006)。この磁場変動は、プラズマ圧力勾配が作る電流によって主磁場成分が強められる反磁性効果と、プラズマバブルの壁面に沿って流れる沿磁力線電流による主磁場直交方向の変動によるものと解釈されている。そこで、数値モデル内で磁力線等ポテンシャルの仮定を外すことで 3 次元の電流場を計算し、その電流場が作る磁場変動の計算を行い、衛星観測との比較を行った。

数値モデル

正イオンとして NO⁺(E 領域) と O⁺(F 領域) の 2 種類を考える。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。

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

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

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

磁気赤道を中心とするダイポール座標系を用い、磁気赤道上で高度 88-1270km、緯度方向に ±20 度、経度方向に 3.4 度の領域を確保した。経度方向に波長 267km の変動を人工的に与え、そこからのプラズマバブルの成長過程について計算を実施した。また、プラズマの時間発展を計算する際には、磁力線を等ポテンシャルと仮定しているが、3 次元の電流場を計算する際には、等ポテンシャルの仮定を外し、沿磁力線電流を含めて式 (3) を満たすようにポテンシャル分布を計算する。

結果と考察

シミュレーション開始から 1800 秒後のプラズマ密度と電流密度ベクトル分布を図 1 に示す。東向きに流れる Pedersen 電流と重力による電流は、プラズマバブルの密度減少領域で分極を起し、電

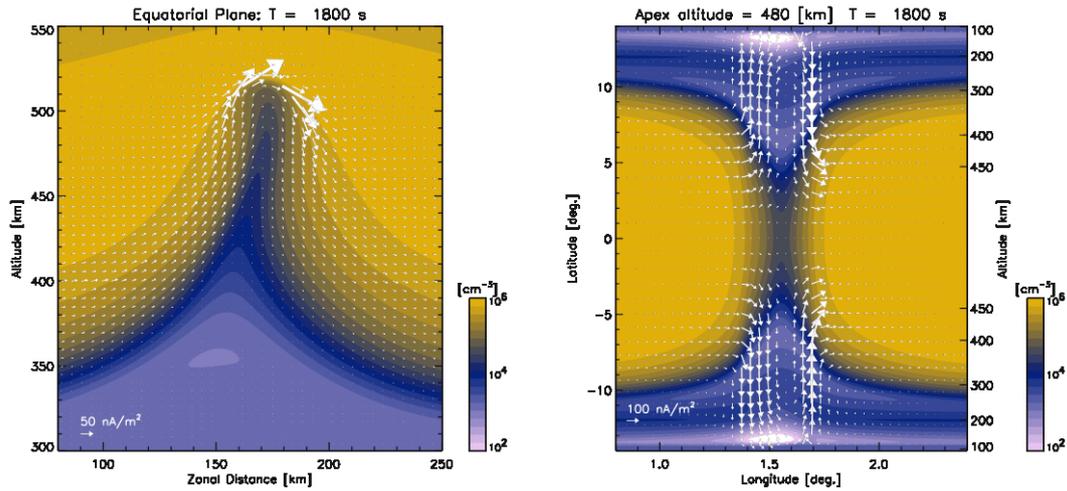


図 1: 成長中のプラズマバブルの密度分布と電流ベクトル。左図は赤道面、右図は磁力線に沿った面。

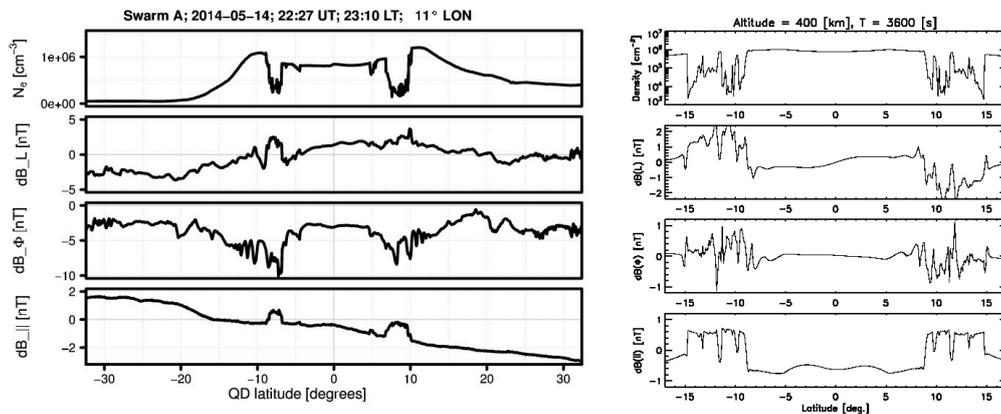


図 2: (左図)Swarm A 衛星により観測された電子密度と磁場変動。(右図)シミュレーションによるプラズマバブル内部の密度変動と磁場変動。

流の一様性を保とうとする。その分極電場が、プラズマバブル成長の重要な要因である。一方、圧力勾配による電流は、常に等密度線に沿って流れるため、プラズマバブルの先端部分に集中することになる。結果として、プラズマバブルを迂回するような電流場が形成され、この電流により、プラズマバブル内部の磁場は反磁性効果により強められることになる。また、東向き電流の一部は、沿磁力線電流となってプラズマバブルの西側を極向きに流れ、東側を赤道向きに流れる。この沿磁力線電流は、E 領域において Pedersen 電流としてプラズマバブルの磁力管を横切って閉じる回路を形成している。このような電流分布は、Stolle et al. (2006) で示されたモデル図と非常に良く一致している。図 2 に、Swarm A 衛星がプラズマバブル内部を観測した際の電子密度と磁場変動と、シミュレーション開始から 3600 秒後の十分に発達したプラズマバブル内部の同様の図を示す。密度の減少領域で、主磁場方向の磁場が約 1nT 強められている様子が見られる。また、沿磁力線電流によって、主磁場直交方向の磁場も変動している。以上から、CHAMP と Swarm 衛星で観測された磁場変動が、プラズマバブルに伴う電流場によるものであることが、確認された。

4. まとめ

プラズマバブルに伴う3次元電流場を数値シミュレーションを用いて再現することに成功した。その結果、観測と同程度の磁場変動が再現され、沿磁力線電流を含む3次元の電流分布は、想定されていたモデルとよく合致することが明らかとなった。また、中緯度において観測される中規模伝搬性電離圏擾乱 (MSTID) も数 nT 程度の磁場変動を伴うことが報告されている (e.g., Park et al., 2009)。このような磁場変動は、岩石圏起源の磁場変動と振幅、空間スケールが近く、固有磁場のモデル化にとっても重要な情報となり得ることから、今後重要な課題となることが予想される。

参考文献

- Park, J., H. Lühr, C. Stolle, M. Rother, K. W. Min, J.-K. Chung, Y. H. Kim, I. Michaelis, and M. Noja, Magnetic signatures of medium-scale traveling ionospheric disturbances as observed by CHAMP, *J. Geophys. Res.*, **114**, A03307, doi:10.1029/2008JA013792, 2009.
- Stolle, C., H. Lühr, M. Rother, and G. Balasis, Magnetic signatures of equatorial spread F as observed by the CHAMP satellite, *J. Geophys. Res.*, **111**, A02304, doi:10.1029/2005JA011184, 2006.
- 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*, **119**, 10,474-10,482, doi:10.1002/2014JA020708, 2014.
- Yokoyama, T., H. Jin, and H. Shinagawa, West wall structuring of equatorial plasma bubbles simulated by three-dimensional HIRB model, *J. Geophys. Res. Space Physics*, **120**, 8810-8816, doi:10.1002/2015JA021799, 2015.