

2.4.6. プラズマバブル

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)

2.4.6.1 はじめに

電離圏 F 領域において、電子密度は、高度 300km 付近に極大を持つが、地球の磁力線が水平になる磁気赤道では、電離圏 F 領域下部は不安定になることがあり、局所的に著しく電子密度が減少することがある。この現象は、上昇する泡に例えられてプラズマバブルと呼ばれている。プラズマバブルは、日没後の電離圏 F 領域下部において発生し、高高度に上昇する。図 1 の左図に、鹿児島県佐多とオーストラリア・ダーウィンに設置された全天大気光イメージャーで同時に撮像された酸素原子が発する 630nm 大気光の全天画像を示す (Otsuka et al., 2002)。大気光の明るさは、電離圏 F 領域下部における電子密度に比例するため、両全天画像中に見られる赤道方向から極方向に伸びる大気光の減光領域がプラズマバブルに相当する。プラズマバブルの東西方向の幅は、約 100km である。南北両半球で同時に観測されたプラズマバブルの構造は、赤道に対して対称になっていることが分かる。これは、図 1 右図に示すように、同一の磁力線が佐多とダーウィンを通っており、プラズマバブルによる電子密度減少領域が地球の磁力線に沿った構造をもつためである。

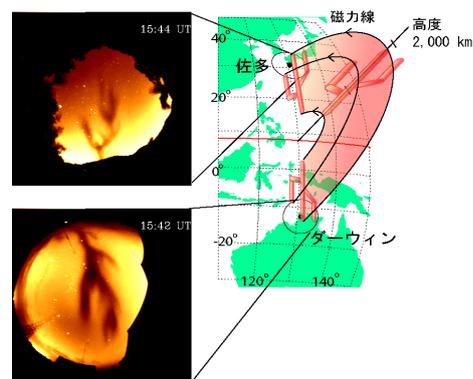


図 1. (左) 鹿児島県佐多とオーストラリアのダーウィンで同時観測された波長 630nm の大気光の全天画像。プラズマバブルによる減光領域が見られる (Otsuka et al. 2002)。(右) プラズマバブルの構造を表す模式図。

このように、プラズマバブルは、局所的に電子密度が急に減少する現象であるため、2.4.1 節で述べたように、GPS など衛星測位にとって大きな誤差をもたらす。また、プラズマバブルの内部には、様々な空間スケールをもつ電子密度の疎密構造が存在するため、そこを通る電波の振幅や位相が変動し（シンチレーション）、衛星放送や通信、衛星測位などに影響を与える。

2.4.6.2 レーリー・テラー不安定

一般に、レーリー・テラー不安定は、重たい流体が軽い流体の上にある場合に起こるが、磁気赤道上において、高高度ほど電子密度が大きくなる電離圏 F 領域下部においても発生する。図 2 に、磁気赤道における F 領域下部の電子密度分布の模式図を示す。F 領域において、電子は磁力線の周りをジャイロ運動するが、質量が大きいイオンは重力 \mathbf{g} と磁場 \mathbf{B} による $\mathbf{g} \times \mathbf{B}$ ドリフトするため、磁場が水平で北向きになる磁気赤道では、東向きに電流が流れる。また、日没直後には、プレリバーサル・エンハンスメントと呼ばれる東向き電場が増大する現象が起こる。この東向き電場も、東向きのペダーセン電流に寄与する。図に示すように、F 領域下部において、等電子密度面の高度方向の微小変動を考える。電子密度の疎密は、電流の流れやすさである導電率の非一様性をつくるため、東向き電流が低電子密度の領域に流れ込むところでは正の電荷が、流れ出すところでは負の電荷が蓄積される。これらの電荷により、最初に等電子密度面が高高度に持ち上げられたところでは、東向きの分極電場が生じ、この分極電場による $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトにより、さらに高高度にプラズマが持ち上げられる。反対に、最初に等電子密度面が低高度に押し下げられたところでは、西向きの電場が生じ、下向きの $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトによりさらに低高度に押し下げられる。このように、初期の微小変動が時間と共に成長する不安定な状態になる。この不安定がプラズマバブルの生成原因となるレーリー・テラー不安定である。

レーリー・テラー不安定の線形成長率 γ は、

$$\gamma = \left(\frac{E_0}{B} + \frac{g}{v_{in}} \right) \frac{1}{n_e} \frac{\partial n_e}{\partial z} \quad (2.4.6.1)$$

と表される。ここで、 E_0 は東向き電場、 B は磁場、 g は重力加速度、 v_{in} はイオン・中性大気の衝突周波数、 n_e は電子密度、 z は高度を表す。式 (2.4.6.1) より、(1) 東向き電場 E_0 が大きく、

(2) プラズマが v_{in} の小さい高高度にあり、(3) 電子密度の高度方向の勾配 $\left(\frac{1}{n_e} \frac{\partial n_e}{\partial z} \right)$ が大きい

いときに成長率が大きくなることが分かる。(1) と (2) は、東向きの電流が大きいことに相当する。また、東向き電場は、(1) だけでなく、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトによりプラズマを高高度に持ち上げることににより (2) の効果にも寄与するため、プラズマバブル発生に重要な要素となる。

レイリー・テイラー不安定の線形理論では、電子密度勾配が鉛直上向きとなる電離圏 F 領域下部においてのみ不安定が成長することになるが、実際には、密度勾配が下向きになる電離圏上部にもプラズマバブルは到達する。

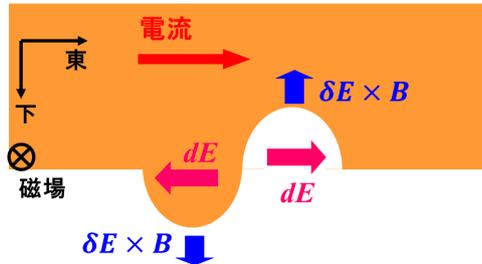


図 2. レイリー・テイラー不安定の模式図

2.4.6.3 プラズマバブル発生の特徴

プラズマバブルの発生頻度は、太陽活動度が高いほど高く、また、顕著な季節および経度変化を示す (Burke et al. 2004、図 2.4.6.3 参照)。大部分の経度域において、プラズマバブルは春と秋に発生頻度が高いが、プラズマバブル発生頻度は、地球の磁力線の偏角に依存する。図中の実線は、日没線と磁力線が平行になる日を示している。この実線は、プラズマバブル発生頻度が最大となる時期とよく一致している。特に、南米において偏角が西向きに大きくなる経度域では、プラズマバブル発生頻度が最大になる時期は 12 月に近くなる。このようなプラズマバブル発生頻度の季節・経度変化は、日没時における東向き電場の増大の季節・経度変化とよく一致する (Tsunoda 1985)。しかし、発生頻度が大西洋域では非常に高く、太平洋域では低いことや、春と秋との非対称が見られるなど、説明できない特徴もある。これらは、下層大気から電離圏・熱圏に上方伝搬する大気重力波など中性大気の変動に起因している可能性が指摘されている。

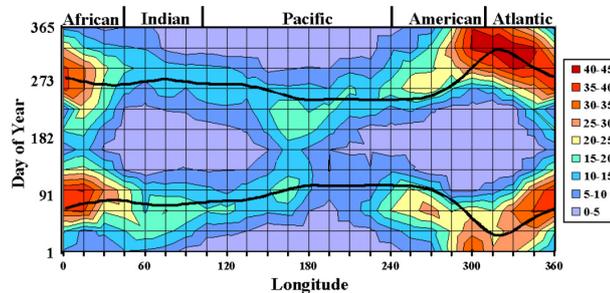


図 3. プラズマバブル発生頻度の経度・季節変化 (Burke et al. 2004)。図中の黒線は、日没線が地球の磁力線と平行になる日を表す。

地磁気擾乱も、プラズマバブルの発生に影響を与えることが知られている。地磁気嵐の主相において、強い東向き電場が電離圏に印加されると、中・高緯度にまで達するプラズマバブルが発生することが報告されている (Aa et al. 2018)。一方、地磁気嵐の主に回復相では、2.4.2 節で述べたように、熱圏における中性大気の循環が地磁気静穏時とは変わり、プラズマバブルの発生を抑制されることが多い (Carter et al. 2014)。

2.4.6.4 日没時の東向き電場の増大

E 領域では、日没後にプラズマの生成が無くなると、再結合が進み、電子密度が急速に低下する。このため、日没線を挟んで、昼側と夜側とで、導電率の空間勾配が大きくなり、強い東西電場がつくられる。電離圏電場は、昼間は東向きであるが、夜間は反転して西向きになる。西向きに反転する前の日没時に東向き電場が増大することから、この現象はプレリバーサル・エンハンスメントと呼ばれており、Farley et al. (1986) によって以下のように説明される。図 4 に示すように、① F 領域において、日没時に中性風 \mathbf{U} が東向きに吹く。② \mathbf{U} によるダイナモ電場 $\mathbf{E} = -\mathbf{U} \times \mathbf{B}$ が生成される (\mathbf{B} は磁場であり、磁気赤道において、水平で北向き)。③ \mathbf{E} が磁力線に沿って E 領域に伝わり、 E 領域において昼側に西向きのホール電流が流れる⑤夜側は電子密度が小さく電流が流れないため、⑥日没線に負の電荷がたまり、⑦日没線の昼側に東向き電場、夜側に西向きの電場 \mathbf{E}_ϕ ができる。⑧ \mathbf{E}_ϕ が F 領域に伝わり、日没線の昼側において強い東向き電場ができる。この東向き電場は、上向きの $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトによりプラズマを高高度に持ち上げるため、プラズマバブルが発生しやすい状態になる。

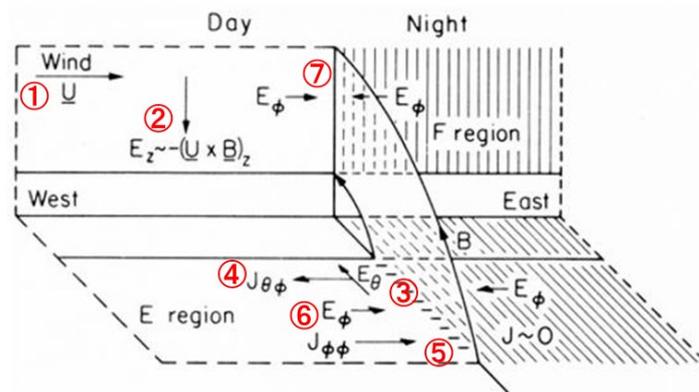


図 4. プレリバーサル・エンハンスメントの生成機構を表す模式図 (Farley et al. (1986) の図 7 に番号を加筆)。図の横方向は東西方向を表しており、左側が昼、右側の斜線の部分が夜側を表す。図の上部は F 領域、下部は E 領域を表す。両領域は、磁力線 (曲線) によってつながっている。

2.4.6.5 数値モデルによるプラズマバブル発生予測

レーリー・テラー不安定の成長率が大きいほど、プラズマバブルが発生しやすいと考えられることから、地球大気を計算することができる数値モデル用い、日々のレーリー・テラー不安定の成長率を計算し、プラズマバブルの発生を予測しようとする試みがなされている (Carter et al. 2014; Shinagawa et al. 2018)。Shinagawa et al. (2018)は、全大気圏－電離圏結合モデル GAIA (Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy)により、線形成長率を計算し、実際のプラズマバブル発生の有無と比較した。図 5 は、プラズマバブルの発生頻度が高い高太陽活動期にあたる 2011 年において、各日毎にレーリー・テラー不安定の線形成長率の最大値を求め、観測から得られたプラズマバブル発生日と比較したものである。プラズマバブル発生は、インドネシア・コトタバン (東経 100.32 度、南緯 0.2 度)における赤道大気レーダー (EAR)及び同サイトに設置された全地球測位システム (GPS)の観測データに基づいて決定したものである。線形成長率が高い値を持つ日ほど、実際に、プラズマバブルが発生している傾向が見られる。この結果は、全大気圏－電離圏結合モデルを用いることによってプラズマバブルの発生を予測できる可能性を示している。

しかし、プラズマバブルの発生は、必ずしもレーリー・テラー不安定の成長率だけで決まるのではなく、大気波動による不安定の”シーディング”の効果も大きいと考えられている (Tsunoda, 2010)。Yokoyama et al. (2019)は、電離圏プラズマの運動を数値的に解く局所高精度モデルを開発し、数 m/s 程度の中性大気の鉛直風がプラズマバブルのシーディングになり得ることを示した。従って、プラズマバブルの発生を予測するためには、電離圏・熱圏に伝搬する大気波動の予測も必要と考えられている。

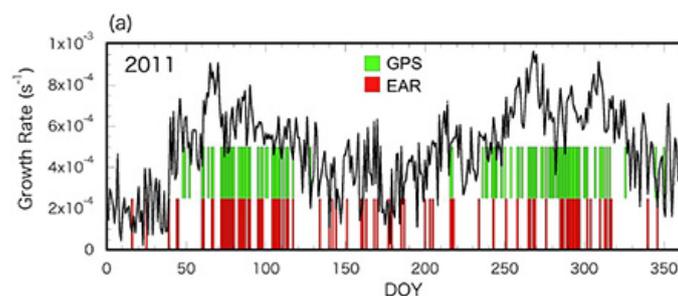


図 5. GAIA で求められたインドネシア・コトタバンにおける 2011 年のレーリー・テラー不安定の線形成長率の日々変動 (黒の実線)。緑と赤の縦棒は、GPS (緑)と赤道大気レーダー (赤)でプラズマバブルが観測された日を示す。

参考文献

- Aa, E., Huang, W., Liu, S., Ridley, A., Zou, S., Shi, L. et al.: Midlatitude plasma bubbles over China and adjacent areas during a magnetic storm on 8 September 2017. *Space Weather* 16, 321–331, <https://doi.org/10.1002/2017SW001776>, (2018)
- Burke, W.J., Huang, C.Y., Gentile, L.C., Bauer, L.: Seasonal-longitudinal variability of equatorial plasma bubbles. *Ann. Geophys.* 22, 3089-3098 (2004)
- Carter, B. A., Retterer, J. M., Yizengaw E., Groves, K., Caton, R., McNamara, L et al.: Geomagnetic control of equatorial plasma bubble activity modeled by the TIEGCM with Kp. *Geophys. Res. Lett.* 41, 5331–5339, doi:10.1002/2014GL060953 (2014)
- Farley, D.T., Bonelli, E., Fejer, B. G., Larsen, M. F.: The prereversal of the zonal electric field in the equatorial ionosphere. *J. Geophys. Res.* 91, 13,723–13,728 (1986)
- Otsuka, Y., Shiokawa, K., Ogawa, T., Wilkinson, P.: Geomagnetic conjugate observations of equatorial airglow depletions. *Geophys. Res. Lett.* 29(15), doi:10.1029/2002GL015347 (2002)
- Shinagawa, H., Jin, H., Miyoshi, Y. Fujiwara, H., Yokoyama, T., Otsuka, Y.: Daily and seasonal variations in the linear growth rate of the Rayleigh-Taylor instability in the ionosphere obtained with GAIA. *Prog. Earth Planet Sci.* 5, 16, <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0175-8> (2018)
- Tsunoda, R. T.: Control of the seasonal and longitudinal occurrence of equatorial scintillations by the longitudinal gradient in the integrated E-region Pedersen conductivity. *J. Geophys. Res.* 90, 447 (1985)
- Tsunoda, R. T.: On equatorial spread F: Establishing a seeding hypothesis. *J. Geophys. Res.* 115, A12303, doi:10.1029/2010JA015564 (2010)
- Yokoyama, T., Jin, H., Shinagawa, H., Liu, H.: Seeding of equatorial plasma bubbles by vertical neutral wind. *Geophys. Res. Lett.* 46, 7088– 7095 <https://doi.org/10.1029/2019GL083629> (2019)