電離圏プラズマバブルの光学・電波観測

大塚 雄一、塩川和夫(名大 STE 研)、小川忠彦(NICT)、 山本衛、横山竜宏(京大 RISH)

1. プラズマバブルとは

赤道上空では、地球の磁力線は水平になるため、赤道電離圏特有の現象が現れる。その一つ がプラズマバブルとよばれる現象である。プラズマバブルとは、電離圏中でプラズマの穴(プラ ズマ密度の低い域)が生じる現象であり、プラズマバブル内部では、その周りに比べてプラズマ 密度が百分の1以上も低くなる。赤道域電離圏においてプラズマバブルは日没直後に発生し、 電離圏下部(高度 200 km 付近)から電離圏上部まで上昇する。時には、高度 2,000 km 以上に達 することもある。この現象は、水中で生じた泡が水面に向かって上昇する様子に似ていること から、"バブル(泡)"と名付けられている。水中では浮力、プラズマ中の場合には電場が上向きの 力としてはたらくので、バブルは上昇する。

2. 全天大気光イメージャーによる磁気共役点観測

2001 年 11 月 12 日の夜間に、同一の磁力線で結ばれた、鹿児島県佐多とオーストラリアのダ ーウィンで、超高感度 CCD カメラを用いた全天大気光イメージャーによってプラズマバブルを 同時に観測することに成功した[*Otsuka et al.*, 2002]。図 1a に、佐多町で 2001 年 11 月 12 日 15:44UT(00:44 LT)に観測された波長 630.0 nm の大気光の全天画像を示す。全天画像の上が北、 左が東であり、真中が佐多町の天頂にあたる。画像中、大気光の暗い領域が南から北に伸び、



図1:2001年11月12日夜間に磁気共役の関係にある佐多(a)とダーウィン(b)で同時 に観測された630nm大気光の全天画像。両画像中に見られる大気光の減光領域がプ ラズマバブル。(c)両画像において鏡像の関係にあることから、プラズマバブルが磁 力線に沿った構造をもつことが分かる。 数箇所で枝分かれしていることが分かる。これが大気光イメージャーで捉えられたプラズマバ ブルである。波長 630.0 nm の大気光は、高度 250 km 付近の酸素原子が出す光である。この酸 素原子は酸素イオンと酸素分子との衝突によってつくられるので、大気光の発光強度は酸素イ オンの密度、つまりプラズマ密度に比例する。したがって、大気光の暗い領域はプラズマ密度 が減少していることを表している。図 1b に、ほぼ同時にダーウィンで観測された 630.0 nm 大 気光の全天画像を示す。この画像も、上が北、左が東、真中が天頂である。佐多町で観測され た 630.0 nm 大気光強度の減少領域と上下対称の構造が観測されており、図 1c に示すようにプ ラズマバブルの構造が磁力線に沿っていることが分かる。このプラズマバブルは、磁気赤道で は高度約 1800km に達していた。

3. レーダーによる沿磁力線不規則構造の観測

京都大学によって、インドネシアのスマトラ島に赤道大気レーダー(Equatorial Atmosphere Radar; EAR; 0.20°S, 100.32°E; 磁気緯 10.6°S)が建設され、沿磁力線不規則構造(Field-Aligned Irregularity; FAI)の観測が 2002 年から開始された[*Fukao et al.*, 2003]。EAR はアクティブ・フェーズド・アレイを採用しており、ビームを高速に広範囲に走査することにより、高度・経度 断面での FAI 二次元構造を直接観測することができる、という利点がある。



図 2: (上)2003 年 4 月 1 日夜間に赤道大気レーダーで観測された FAI エコーの SN 比 の水平二次元分布。南緯 0.5-4.5 度、東経 98.0-102.0 度の範囲を示す。(下)630nm 大気光の水平二次元分布と重ねたもの。FAI がプラズマバブルの内部全体で起こっ ていることが分かる。

EAR によって観測される FAI とプラズマバブルの構造との関係を調べるため、2003 年 3 月 25 日から 4 月 9 日までの 15 晩に FAI と大気光の同時観測を行った。図 2 に、4 月 1 日 22-23 時 LT と翌 2 日 01-03 時 LT に大気光イメージャーによって観測された 630nm 大気光の水平二次 元分布を地理座標系で示す。この時、大気光発光高度を 250km とした。図中、EAR 上空を東 向きに移動するプラズマバブルによる 630nm 大気光の減光が見られる。

FAI エコー領域とプラズマバブルの空間構造の関係を明らかにするため、22-23 時 LT に観測 された FAI エコー領域を磁力線に沿って 630nm 大気光発光高度(250km と仮定)に投影し、大 気光の構造と比較した(図 2)。その結果、FAI はプラズマバブルの内部(大気光減光領域)全体で 起こっていることが明らかになった[Otsuka et al., 2004]。この結果は、過去に行われた結果 [Tsunoda and Towle, 1979; Szuszczewicz et al., 1980]と同様であるが、本研究により初めて二 次元分布での比較に成功した。また、図より、FAI エコー強度は、プラズマバブルの内部で最 も強いことが分かる。メータースケールの FAI は、low-frequency drift wave あるいは、lower hybrid drift (LHD) wave により生成されると考えられている[Ossakow, 1981]。LHD wave は、 背景のプラズマ密度がある値よりも低い場合にのみ起こり、プラズマ密度が低いほどその不安 定の成長率が大きくなる[Huba et al., 1978]。従って、FAI エコー強度がプラズマバブル内部で 最も強いことは、観測された FAI が LHD wave により生成されていることを示唆している。



図 3: インドネシア・コトタバンにおいて 2003-2011 年に観測された GPS シンチレー ション(S4)の地方時・季節変化。

4. GPS によるシンチレーション観測

プラズマバブルの内部には、様々な空間スケールをもつプラズマ密度の疎密構造(イレギュラリティ)が存在する。人工衛星から送信された電波は、イレギュラリティによって回折され、地上で受信されるときに電波の強度を強め合ったり弱め合ったりする。このため、受信信号の振幅や位相が変動する(シンチレーション)。シンチレーションを起こすイレギュラリティの空間スケールは、フレネル半径 $\sqrt{2\lambda_z}$ (ここで、 λ は送信電波の波長、zは地上の受信点からイレギュラリティまでの距離)で現される。本研究では、GPS 衛星から送信される L1 波(1.5GHz)を受信するため、フレネル半径は約 400m である。

図3に、シンチレーションの強さを示す指標であるS4インデックスの地方時・季節変化を示す。図から、 シンチレーションは日没後(19LT=12UT)から真夜中(01LT=18UT)の間に起こることが多いことが分かる。 季節変化については、3-4月と9-10月に多い。但し、3-4月の方が、9-10月よりも発生頻度が高いこと が分かる。また、シンチレーション発生頻度の年々変動から、シンチレーション発生頻度、つまりプラズ マバブルの発生頻度は、太陽活動度と正の相関があることが分かる。

5. Rayleigh-Taylor 不安定

プラズマバブルは、プラズマ不安定の一種であるレーリー・テーラー不安定によって生成さ れる[例えば、*Kelley*, 1989]。図4に示すように、赤道域F層の下部を考える。この高度領域で は、プラズマ密度は高高度ほど高くなる。赤道域電離圏では、日没直後に磁力線を横切る東向 きの電流が流れる。この東向き電流の原因は二つあり、その一つは、重力gとイオン・中性大 気間の衝突によって生じるgxB方向(東向き)の電流である。もう一つは、日没線付近で生じる E領域電子密度の不均一が原因で生じる東向き電場離によるPedersen電流である。ここで、プ ラズマ密度分布の小さな高度変化を考える。低高度から高高度に持ち上げられた部分は、周囲 に比べてプラズマ密度が小さく、逆に低高度に押し下げられたところでは、周囲よりもプラズ マ密度が大きくなる。Pedersen 導電率はプラズマ密度に比例するため、プラズマ密度変動は Pedersen 導電率変動に相当する。このPedersen 導電率の不均一の中を電流が流れると、電流 の一様性を保つため、分極電場が生じる。この分極電場は、プラズマ密度の減少(増大)領域にお



図 4: 赤道域電離圏において Rayleigh-Taylor 不安定を説明する模式図。赤道域 における F 領域下部の東西-鉛直断面。磁場は水平であり、高高度ほどプラズマ 密度が大きく密度が大きい。電流が東向きの時、不安定になる。

いて、東(西)向きとなる。この分極電場 E により、プラズマは ExB ドリフトするため、プラズ マ密度の減少(増大)領域はさらに上昇(下降)し、不安定となる。この不安定が、プラズマバブル の原因である。

6. まとめ

プラズマバブルは、赤道電離圏において電子密度が急激に減少する現象である。プラズマバ ブルの内部には、電子密度の疎密構造があり、HF/VHF/UHF レーダーはレーダーの送信電波 の半波長に相当する沿磁力線不規則構造(FAI)からの散乱を観測することがきる。本研究では、 送信周波数 47MHz の赤道大気レーダーを用いることにより、約3メーター・スケールの FAI を観測し、FAI がプラズマバブル内部全体に存在することを示した。また、GPS 衛星から送信 される電波を用いることにより、フレネル・スケールに相当する 400m 程度の電子密度の疎密 構造を観測することができる。インドネシア・コトタバンにおいて GPS シンチレーション観測 を継続することにより、シンチレーションが、春・秋の日没後に多いこと、太陽活動度と正の 相関があることが明らかになった。プラズマバブルの発生機構は、Rayleigh-Taylor 不安定で説 明される。

参考文献

- Fukao, S., H. Hashiguchi, M. Yamamoto, T. Tsuda, T. Nakamura, and M. K. Yamamoto, T. Sato, M. Hagio, and Y. Yabugaki, The Equatorial Atmosphere Radar (EAR): System description and first results, *Radio Sci.*, 38(3), 1053, doi:10.1029/2002RS002767, 2003.
- Huba, J. D., N. T. Gladd, and K. Papadopoulos, Lower-hybrid-drift wave turbulence in the distant magnetotail, J. Geophys. Res., 83, 5217-5226, 1978.
- Kelley, M. C., The Earth's ionosphere, Plasma Physics and Electrodynamics, Academic, SanDiego, Calif, 1989.
- Ossakow, S, Spread-F theories a review, J. Atmos. Terr. Phys., 43, 437-452, 1981.
- Otsuka, Y., K. Shiokawa, T. Ogawa, and P. Wilkinson, Geomagnetic conjugate observations of equatorial airglow depletions, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 10.1029/2002GL015347, 2002.
- Otsuka, Y., K. Shiokawa, T. Ogawa, T. Yokoyama, M. Yamamoto, and S. Fukao, Spatial relationship of equatorial plasma bubbles and field-aligned irregularities observed with an all-sky airglow imager and the Equatorial Atmosphere Radar, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L20802, 10.1029/2004GL020869, 2004.
- Szuszczewicz, E. P., R. T., Tsunoda, R. Narcisi, and J. C. Holmes, Coincident radar and rocket observations of equatorial spread *F*, *Geophys. Res. Lett.*, *1*, 537-540, 1980.
- Tsunoda, R. T. and D. P. Towle, On the spatial relationship of 1-m equatorial spread F irregularities and depletions in total electron content, Geophys. Res. Lett., 6, 873-876, 1979.