

1 はじめに

地球大気を覆う電離圏 (高度 90~1000 km) は 中性大気の一部が電離した状態で存在している領 域であり,下層大気と宇宙空間を繋ぐ遷移領域で あると同時に衛星電波が遅延等の影響を受ける伝 搬経路でもある.GPS 等を利用したより高信頼 度,高精度の航法,測位が実用化されつつあり, 電離圏による電波遅延の影響は大きな誤差の要因 となる.特に,局所的なプラズマ密度の不規則構 造を伴う電離圏擾乱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.このような電離圏擾 乱の発生機構を解明し,発生を予め予測すること が科学・実用の両面から求められている、本稿で は赤道・低緯度域における電離圏擾乱,特にプラ ズマバブルと呼ばれる現象について概説し、今後 解決すべき課題について述べる.研究の歴史的背 景や不安定理論の詳細については Kelley [1989], 丸山 [2002] 等を参照のこと.

 Rayleigh-Taylor 不安定とプラ ズマバブル

プラズマバブルの発生要因として磁気赤道にお ける Rayleigh-Taylor 不安定が最も有力視されて いる.図1に Rayleigh-Taylor 不安定の模式図と プラズマバブルの概念図を示す.下向きの重力加 速度 g によりイオンは東向き,電子は西向きの ローレンツ力を受け,その結果東向きの電流 j が 生じる.F層下部において密度の揺らぎが生じた 場合,電流の一様性を保つために高度が上昇(密 度が減少) した部分で東向き,高度が下降(密度 が増加)した部分で西向きの分極電場 E1 が生成 される $E_1 \times B(B$ は地球磁場) ドリフトにより 上昇部分でさらに上向き,下降部分でさらに下向 きの力を受け,その結果最初の揺らぎは時間とと もに成長する.Rayleigh-Taylor不安定は密度勾 配が鉛直上向き, つまり F 層ピーク高度以下の みで成長する.しかし種々の観測から F 層上部に おいてもほぼ同時に強い擾乱が発生することが示 唆されていた.これを解決したのがいわゆる「プ ラズマバブル」の概念である(図1下). これはF 層下部で成長した密度の減少領域が,F層ピーク に到達した後もそのまま泡状に F 層上部まで成 長を続けるというものである.これ以降1980年 代前半にかけて行われた数値シミュレーションに おいてこのプラズマバブルの成長はよく再現され ており,プラズマバブルの基本的概念はこの時点 で確立された.

平成 18 年度 MTI 研究会 サイエンスセッション

[©] Mesosphere Thermosphere Ionosphere (MTI) Research Group, Japan



図 1: (上図)Rayleigh-Taylor 不安定の模式図.(下図) プラズマバブルの概念図 [Woodman and La-Hoz, 1976].

東西電場による Pedersen 電流の項を含めた Rayleigh-Taylor 不安定の線形成長率は以下の式 で表される.

$$\gamma = \left(-\frac{g}{\nu_{in}} + \frac{E_0}{B}\right)\frac{1}{L} \tag{1}$$

 ν_{in} はイオンと中性大気の衝突周波数, E_0 は東向 き電場,Lは背景密度勾配のスケール長 $(1/L = (1/n_0)dn_0/dz)$ である.この式から成長率が大き くなるためには,(1)F層下部における急峻な密 度勾配 $(L \rightarrow \Lambda)$,(2)高いF層高度 $(\nu_{in} \rightarrow \Lambda)$, (3)強い東向き電場 $(E_0 \rightarrow \Lambda)$ が必要であるこ とが分かる.また東向き電場は $E \times B$ ドリフト によりF層高度を上昇させるため ((2)の効果), 不安定成長において非常に重要なパラメータであ る.東向き電場を強めるメカニズムとして日没時 における prereversal enhancement と呼ばれる現 象が知られている.日没時の東向き電場とプラズ マバブル発生にはある程度の相関関係が見られる が,電場の閾値を決定することは難しく,以下に 示すように他の要因の影響も大きいことを示唆し ている.

3 未解決の問題

初めに述べたようにプラズマバブルは強いシン チレーションの原因となるため,プラズマバブル 発生の場所・時刻を予測することが実用面から求 められている.しかしながら,1980年代までに 基本的な生成機構が既に明らかとなっているにも かかわらず,その発生予測は現状ではほとんど不 可能である.以下ではプラズマバブルの発生予測 に向けて今後解決すべき課題について述べる.

3.1 季節依存,経度依存

プラズマバブルの発生頻度が高くなる季節は地 球磁場の偏角に応じて変化する.具体的には,日 没境界線が地球磁場と平行に近づく季節に頻度が 高くなる.これは両半球の E 領域が同時に日没 を迎え, E層導電率が急激に減少することにより prereversal enhancement の効果がより高くなる ためである [Tsunoda, 1985]. 図 2 は DMSP 衛星 により観測された 1989 年から 2002 年におけるプ ラズマバブルの発生頻度を示したものである.黒 実線が日没境界線と地球磁場が平行となる時期を 示している.全体的な傾向は上記の理論に従って いるが,それだけでは説明できない点も多く見ら れる.まず発生頻度が大西洋域で非常に高くアジ ア・太平洋域で比較的小さいが,この経度依存性 は上記の理論では説明できない.また発生頻度の ピークが黒実線からずれている,年2回のピーク が非対称であるといった点も説明が困難である. プラズマの電気力学で説明できない点は中性大気



図 2: プラズマバブルの季節-経度依存性 [Burke et al., 2004].

の寄与によるものと考えられるため,現在熱圏-電離圏結合,あるいは大気の上下結合に関する研 究が盛んに行われている.例えば赤道横断南北風 がプラズマ密度の南北非対称を形成し,プラズマ バブルの発生を抑制するという結果が報告されて いる [Saito and Maruyama, 2006].

3.2 励起源,空間構造,日々変化

式(1)で示した Rayleigh-Taylor 不安定の成長 率は10⁻⁴ – 10⁻³のオーダーであり,熱雑音的 擾乱から式(1)に従って成長すると考えただけで は,日没直後に急激に発達するプラズマバブルは 説明できない.一方,プラズマバブルの頻度が高 くなる季節は前節で示した通りであるが,その季 節内においても日々変化が非常に大きい.中緯度 域における MSTID がほぼ毎晩観測されるのとは 対照的であり,発生予測を困難にしている大きな 要因でもある.プラズマバブルの成長を補い,発 生の日々変化を説明するアイデアとして古くから 考えられているのが大気重力波による電離層の変 調 (seeding) である.図3はペルーのヒカマルカ レーダーで観測された不規則構造からのエコーの 時間-高度分布である. F層下部からのエコーが 19:40LT と 21:30LT 頃を中心に 2 度大きく上昇 しており,F層が下降する領域においてプラズマ バブルに伴う羽状のエコー (plume) が約 20 分間 隔で観測されている.夜間の F 層は下向きダイ ナモ電場による東向きドリフトが卓越しており, レーダー観測で得られる時間変化は基本的には東 西方向の空間変化と考えることができる.ドリフ ト速度を100m/sと仮定すると1時間の時間変化 は 360 km の空間変化と換算できる.このように プラズマバブルは 600-1000 km スケールの一連 のプラズマバブル「群」として発生し,その中で は100-200 km スケールの間隔で個々のプラズマ バブルとして観測される例が非常に多い.赤道大 気レーダーの多ビーム観測により得られた実際の 空間構造も同様の構造を示している [Fukao et al., 2006].この空間構造の決定しているのが大気重



図 3: Jicamarca レーダーで観測されたレーダーエコーの時間-高度分布 [Kelley et al., 1981].

力波であるというのがそのアイデアであり,発生 の日々変化は下層大気の対流活動,すなわち大気 重力波の励起源との関連があるとも考えられてい る.しかし,大気重力波の対流圏から熱圏までの 伝搬過程に関する知識は未だ不十分であり,そも そも重力波が熱圏高度まで伝搬可能であるかどう かについても議論が分かれている.

E-F 領域結合

磁気赤道上の F 領域と地球磁場で結合された 低緯度 ($\pm 10^{\circ}$ 付近)E 領域がプラズマバブル生成 に及ぼす影響について近年注目されている.従来 の理論,数値モデルによる研究は磁気赤道上の東 西-鉛直 2 次元断面を仮定していたため,このE領域の影響は考慮されていなかった.しかし近年, プラズマバブルの発生に同期して低緯度E 領域の 電子密度が大きく減少するという例が示されてお り [Abdu et al., 2003],他にもE-F 領域結合の重 要性を示唆する観測結果が多く報告されている. 一方,低緯度 E 領域における密度変動とそれに 伴う分極電場がプラズマバブルの励起源として重 要であるという説もある [Tsunoda, 2007].両者 の間に何らかの関係があることは確実であるが, その因果関係については明らかになっておらず, 現在研究が進められている.また磁気赤道上の上 部 E 領域-下部 F 領域におけるプラズマドリフト の東西シアが不安定現象を生じさせ,それがプラ ズマバブルを励起するという考えも提唱されてい る [Hysell and Kudeki, 2004].

3.3 地磁気擾乱時の応答

地磁気擾乱時の赤道電離圏は侵入電場 (direct penetration) と極域の加熱により生じた中性風に よるダイナモ電場 (disturbance dynamo) の両者 の影響を受け,静穏時とは非常に異なった振舞い を見せる.プラズマバブルも擾乱時には特異な傾 向を示し,静穏時には日没直後に限られていたプ ラズマバブルの発生が真夜中以降や日出時刻付近 においても起こることがある.地磁気擾乱時のプ ラズマバブルに関する研究は未だ十分ではなく, また地方時毎にその応答は異なるため発生の予測 は非常に難しい.ここでは詳細は省略するが,地 磁気擾乱と赤道電離圏の関連について全球数値モ デルを用いた研究が行われている [Maruyama et al., 2005].

4 まとめ

現在のプラズマバブルに関する研究は,実用面 からの要求に答えるべく「いつ」「どこで」発生 するのかという基本的な課題に直面している.下 層大気の対流活動,中間圏・下部熱圏の重力波, 潮汐波,惑星波動,日没以前の電離圏の振舞い等 との関連が研究され始めているが,プラズマバブ ルの特性自身のさらなる解明も同時に必要とされ ている.日本では京都大学の赤道大気レーダー, 情報通信研究機構のアイオノゾンデ観測網を中心 に東南アジア域で研究が進められているが,今後 は中性大気の影響に関する研究が特に重要となる と考えられる.

参考文献

- Abdu, M. A., J. W. MacDougall, I. S. Batista, J. H. A. Sobral, and P. T. Jayachandran, Equatorial evening prereversal electric field enhancement and sporadic *E* layer disruption: A manifestation of *E* and *F* region coupling, J. Geophys. Res., **108**, doi:10.1029/2002JA009285, 2003.
- Burke, W. J., L. C. Gentile, C. Y. Huang, C. E., Valladares, and S. Y. Su, Longitudinal variability of equatorial plasma bubbles observed by DMSP and ROCSAT-1, J. Geophys. Res., 109, doi:10.1029/2004JA010583, 2004.
- Fukao, S., T. Yokoyama, T. Tayama, M. Yamamoto, T. Maruyama, and S. Saito, Eastward traverse of equatorial plasma plumes observed with the Equatorial Atmosphere Radar in Indonesia, Ann. Geophys., 24, 1411–1418, 2006.

- Hysell, D. L., and E. Kudeki, Collisional shear instability in the equatorial F region ionosphere, J. Geophys. Res., **109**,
- Kelley, M. C., The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics, Int. Geophys. Ser., 43, Academic Press, San Diego, Calif., 1989.

doi:10.1029/2004JA010636, 2004.

- Kelley, M. C., M. F. Larsen, and C. LaHoz, Gravity wave initiation of equatorial spread F: A case study, J. Geophys. Res., 86, 9087– 9100, 1981.
- Maruyama, N., A. D. Richmond, T. J. Fuller-Rowell, M. V. Codrescu, S. Sazykin, F. R. Toffoletto, R. W. Spiro, and G. H. Millward, Interaction between direct penetration and disturbance dynamo electric fields in the stormtime equatorial ionosphere, Geophys. Res. Lett., **32**, doi:10.1029/2005GL023763, 2005.
- Saito, S., and T. Maruyama, Ionospheric height variations observed by ionosondes along magnetic meridian and plasma bubble onsets, Ann. Geophys., 24, 2991–2996, 2006.
- 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**, 447–456, 1985.
- Tsunoda, R. T., Seeding of equatorial plasma bubbles with electric fields from an $E_{\rm s}$ layer instability, J. Geophys. Res., **112**, doi:10.1029/2006JA012103, 2007.
- Woodman, R. F., and C. LaHoz, Radar observations of F region equatorial irregularities, J. Geophys. Res., 81, 5447–5466, 1976.
- 丸山 隆, 電離圏・熱圏 電離圏不規則構造, 通 信総合研究所季報, 48, No.3, 143-155, 2002. (http://www.nict.go.jp/publication/shuppan/ kihou-journal/kihou-vol48no3/0401.pdf)