

赤道大気レーダーにより観測されたプラズマバブルに伴う FAIの衰退過程

齋藤 享¹、深尾 昌一郎²、山本 衛²、大塚 雄一³、丸山 隆¹

情報通信研究機構¹

京都大学生存圏研究所²

名古屋大学太陽地球環境研究所³

1 背景

プラズマバブルの内部には様々なスケールの不規則構造が存在している。キロメートル~100 m 規模の不規則構造は UHF-VHF 帯の電波にシンチレーションを引き起こす。メートルスケールの沿磁力線プラズマ不規則構造 (FAI) は、VHF レーダーによりブラッグ散乱エコーとして観測される。これらの短波長不規則構造は、プラズマバブルに伴う二次的なプラズマ不安定により生成されると考えられている。また、これらの短波長不規則構造のライフタイムは非常に短い (1 s 以下) と考えられており (Vickery and Kelley, 1982)、それらが観測されるためには常に生成され続けている必要がある。赤道大気レーダー (EAR) においては、プラズマバブルに伴う 3 m スケール FAI エコーが、生成から 4 時間以上経ち成長が止まったプラズマバブルにおいても観測されている (Fukao et al., 2006)。このような成長を止めたプラズマバブル中において 3 m FAI を生成し続ける物理過程は明らかになっていない。最近の Gadanki (インド) における観測で、Sekar et al. (2007) は東向き中性風がプラズマバブルの西壁を越える際に interchange 型のプラズマ不安定を引き起こし、3 m FAI を生成しているのではないかという説を発表した。しかしながら Sekar et al. (2007) の研究は、固定ビームのレーダーを用いた観測であり時間変動と空間変動を区別できないという弱点を持つ。本研究では、電子的にビームを走査できる EAR を用い、レーダーの視野内でプラズマバブルに伴う 3 m FAI が消滅する過程を観測することに成功したので、これを報告する。

2 観測方法

京都大学によりインドネシア・コトタバン (0.2°S, 100.3°E, 磁気緯度-10.4°) に設置された EAR を用いて 3 m FAI による散乱エコーを観測する。EAR のパルスごとに電子的にビームを走査できる能力を用い、実質的に同時に 8 方向を観測する。ビーム方向が異なる 2 セットの 8 ビーム観測を交互に行う。E 領域観測、対流圏・成層圏観測を間に挟むため、3-6 分毎に 16 方向の 3 m FAI の空間分布が得られる。今回の観測で用いたビーム方向を図 1 に示す。

名古屋大学がコトタバンに設置した 630.0 nm 大気光全天イメージャ (ASI; Shiokawa et al., 1999; Otsuka et al., 2004) を用い、O 原子の発光強度を観測する。プラズマバブルは ASI において帯状の 630.0 nm 大気光減光領域として観測される。

情報通信研究機構がコトタバン及び同一磁気子午面の磁気赤道に近いタイ・チュンボン (10.72°N, 99.37°E, 磁気緯度 3.3°) に設置したイオノゾンデ (Maruyama et al., 2007) により、レンジタイプ・スプレッド F の発生を観測する。プラズマバブルが発生すると、イオノグラムにおいてエコー・トレースが高度方向に広がる。これをレンジタイプ・スプレッド F と呼ぶ。

3 観測結果

2006 年 3 月 20 日から 31 日までの 11 晩、EAR による電離圏観測を行った。Figure 1 に、2006 年 3 月 28 日に赤道大気レーダー (ビーム 1-8) により観測されたエコー強度を示す。2100 LT 頃から 2 つのエコ

表 1: 観測ビーム方向

セット	ビーム方向	方位角 (°)	天頂角 (°)
1	1	125.0	37.5
	2	137.0	30.9
	3	151.0	26.6
	4	165.0	24.5
	5	180.0	23.8
	6	195.0	24.7
	7	209.0	27.2
	8	223.0	32.1
2	9	130.0	34.3
	10	144.0	28.4
	11	158.0	25.3
	12	172.0	24.0
	13	188.0	24.1
	14	202.0	25.7
	15	216.0	29.3
	16	230.0	35.9

一群が西から流入し東へ移動したことが見て取れる。この時、コトタバン、チュンボンにおいて強いレンジタイプ・スプレッド F が観測されている。このことは、不規則構造がコトタバンから磁気赤道にわたって存在していることを示す。また、レンジタイプ・スプレッド F は磁気赤道側(チュンボン)で先に観測されている。これは、プラズマバブルが低高度(磁気赤道に近い)ほど速く東進する性質と対応し、EAR エコーがプラズマバブルに伴うものであることを支持する。

3 m FAI の空間構造をよりはっきり見るために、16 方向のエコー強度を合成して 2 次元マップにしたものが図 2 である。高度に対して東へ傾いた 3 m FAI の構造が西から東へ移動し、2230 LT 頃に東向きの移動が止まり、下降しながらエコーが弱まり消滅したことが分かる。

図 3 は、ASI によって観測された 630 nm 大気光強度である。2 本の帯状の大気光減光領域が西から東へ移動していることが分かる。このことから、2006 年 3 月 28 日に EAR により観測されたエコーはプラズマバブルによるものであることがはっきり分かる。

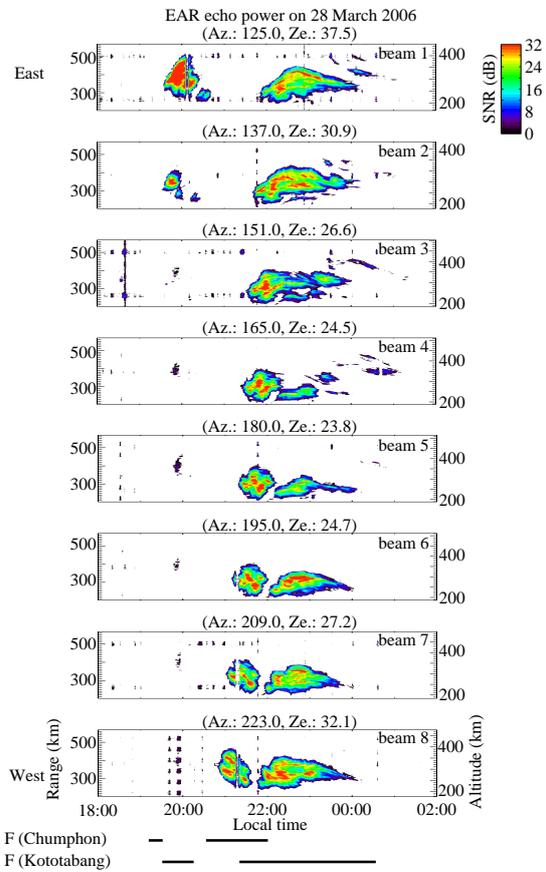


図 1: 2006 年 3 月 28 日に赤道大気レーダー (ビーム 1-8) により観測されたエコー強度。下部の横線は Kototabang 及び Chumphon (磁気赤道) においてスプレッド F が発生した時間を示す。

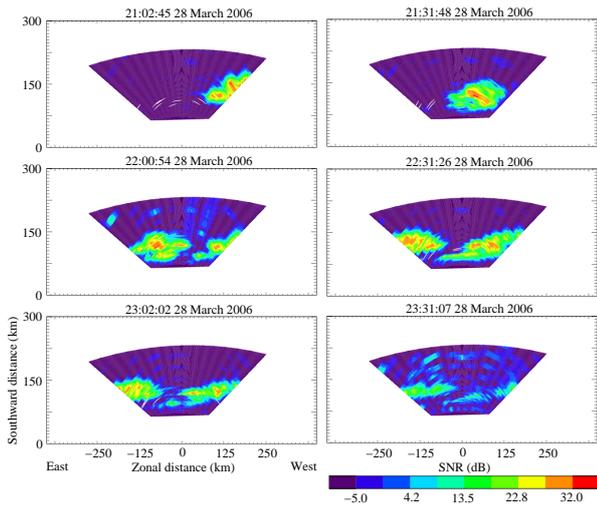


図 2: 2006 年 3 月 28 日に赤道大気レーダーにより観測されたエコー強度の 2 次元分布。

東向き移動が止まった後も減光領域は残り、3 m FAI の消滅後もプラズマバブルは存在していることがわかる。

2006 年 3 月 31 日においても、2006 年 3 月 28 日とよく似たエコーが EAR により観測された (図 4)。レンジタイプ・スプレッド F は 2006 年 3 月 28 日と同様にコトタバング、チュンポン双方で観測され、やはりチュンポンで先に観測されている。この時、コトタバング上空は雲に覆われており、大気光観測データはない。しかしながら EAR、イオノゾンの観測からこれらのエコーはプラズマバブルによるものと推定できる。

2006 年 3 月 31 日の例においても、高度に対して東へ傾いた 3 m FAI の構造が西から東へ移動し、東向きの移動が止まると、下降しながらエコーが弱まり消滅している (図 5)。

4 プラズマバブルの移動と 3 m FAI の消滅

プラズマバブルの移動と 3 m FAI の強度変動を詳しく見るために、図 6 に 2006 年 3 月 28 日に赤道大気レーダーにより観測された、高度 300 km におけるエコー強度の東西移動を示す。

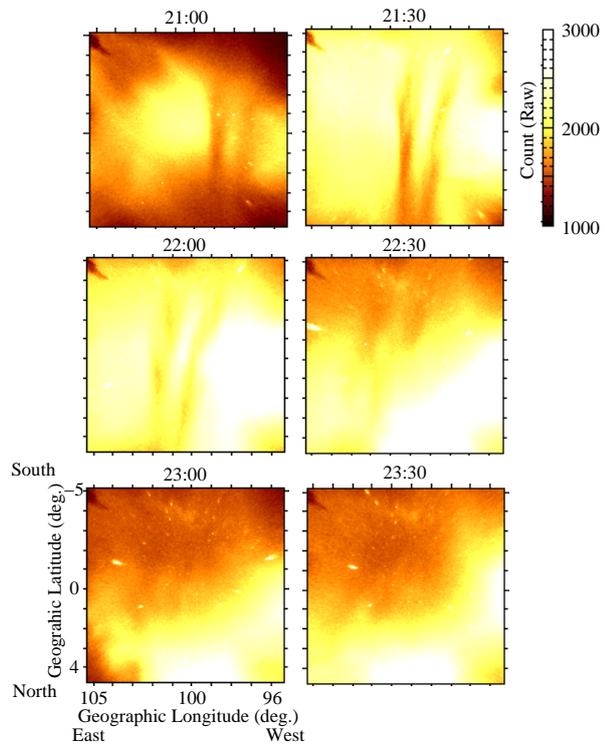


図 3: 2006 年 3 月 28 日に Kototabang において観測された 630.0 nm 大気光強度。発光層の高度を 300 km と仮定して地理座標に投影したもの。

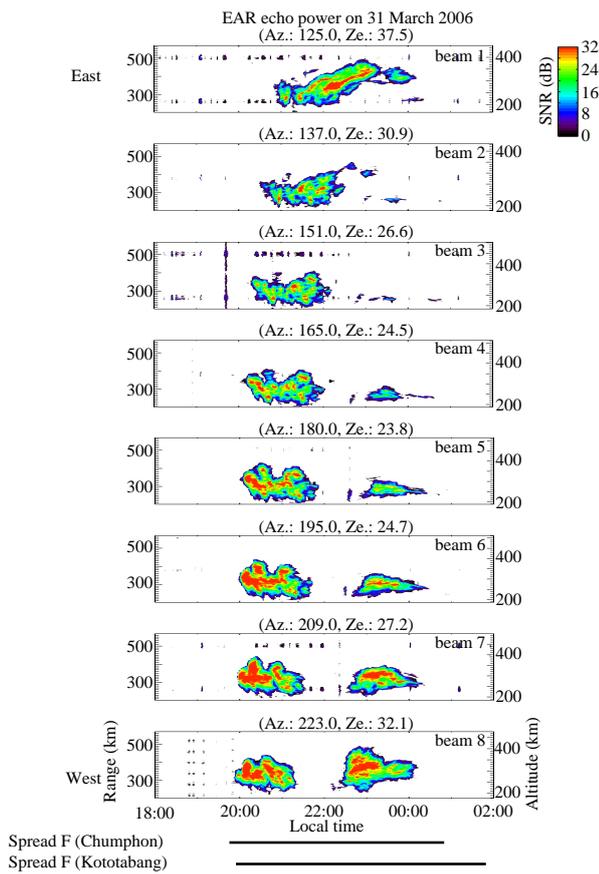


図 4: 図 4 と同様。2006 年 3 月 31 日のものを示す。

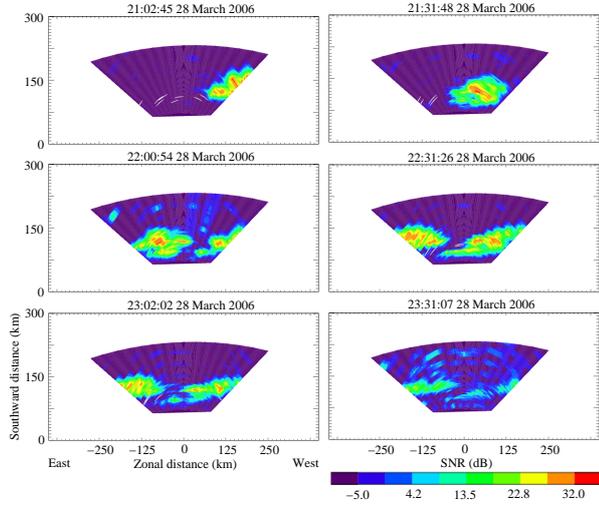


図 5: 図 2 と同様。2006 年 3 月 31 日のものを示す。

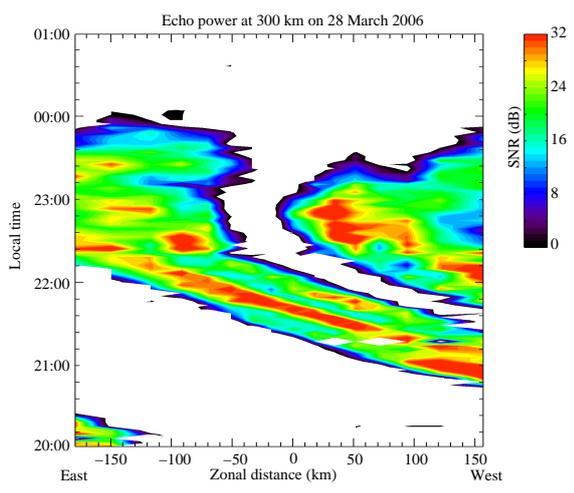


図 6: 2006 年 3 月 28 日に赤道大気レーダーにより観測された、高度 300 km におけるエコー強度の東西移動。

プラズマバブルの東向き移動は東向き中性風による下向き F 層ダイナモ電場によると考えられる。プラズマバブル内の分極電場のため、プラズマバブルは中性風より遅い速度で東進する。そのため、中性風はプラズマバブルによる電子密度勾配を追い越して吹く。この状態は interchange タイプのプラズマ不安定に対して不安定である。プラズマバブルの東向き移動の減速は、東向き中性風の減速を示唆する。東向き移動が弱まると、3 m FAI は全体として夜間の西向き電場 (Fejer et al., 1991) により下降しつつ消滅した。以上のことから、東向き中性風がプラズマバブルの壁を吹き超える時の interchange タイプのプラズマ不安定が 3 m FAI を維持している可能性が示された。東向き中性風が真夜中付近で減速する理由として、midnight temperature maximum (MTM; Harper, 1973) の発達と考えられる。MTM の発達と 3 m FAI の衰退、プラズマバブルの東進速度変化の関係については今後の研究が必要である。

5 まとめと今後の課題

EAR による多ビーム観測、大気光イメージャ、イオノゾンデを用いた観測により、プラズマバブルに伴う 3 m FAI の衰退過程を詳しく調べた。2006 年 3

月 28 日、31 日に、EAR の視野内でプラズマバブルに伴う 3 m FAI の消滅が観測された。この 2 例では共に、プラズマバブルの東向き移動が減速するとともに急激に 3 m FAI が減衰した。この観測結果から、東向き中性風がプラズマバブルの壁を吹き超える時の interchange タイプのプラズマ不安定が 3 m FAI を維持している可能性が示された。しかしながら観測例は 2 例のみであり、過去のデータを再検討するとともに、観測例を増やし、統計的研究を行う必要がある。また、東向き中性風が真夜中付近で減速する理由としては、MTM との関係を検討する必要がある。

Acknowledgment

Chumphon、Kototabang の各観測点は、それぞれ King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)、the Indonesian National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN) との協定に基づき運営されている。Kototabang の観測点は京都大学生存圏研究所の赤道大気レーダープロジェクトの協力を受けている。

参考文献

- Fejer, B. G., E. R. de Paula, S. A. González, and R. F. Woodman (1991), Average vertical and zonal F region plasma drifts over Jicamarca, *J. Geophys. Res.*, *96*, 13901–13908.
- Fukao, S., T. Yokoyama, T. Tayama, M. Yamamoto, T. Maruyama, and S. Saito (2006), Eastward traverse of equatorial plasma plumes observed with the Equatorial Atmosphere Radar in Indonesia, *Ann. Geophys.*, *24*, 1411–1418, SRef-ID: 1432-0576/ag/2006-24-1411.
- Harper, R. M. (1973), Nighttime meridional neutral winds near 350 km at low to mid-latitudes, *J. Atmos. Terr. Phys.*, *35*, 2023–2034.
- Maruyama, T., M. Kawamura, S. Saito, K. Nozaki, H. Kato, H. Hemmakorn, T. Boonchuk, T. Komolmis, and C. Ha Duyen (2007), Low latitude ionosonde network for ionosphere-thermosphere coupling studies, *Annales Geophysicae*, *25*, 1569–1577.
- Otsuka, Y., K. Shiokawa, T. Ogawa, T. Yokoyama, M. Yamamoto, and S. Fukao (2004), 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, doi:10.1029/2004GL020869.
- Sekar, R., D. Chakrabarty, S. Sarkhel, A. K. Patra, C. V. Devasia, and M. C. Kelley (2007), Identification of active fossil bubbles based on coordinated VHF radar and airglow measurements, *Ann. Geophys.*, *25*, 2099–2102.
- Shiokawa, K., Y. Katoh, M. Satoh, M. K. Ejiri, T. Ogawa, T. Nakamura, T. Tsuda, and R. H. Wiens (1999), Development of optical mesosphere thermosphere imagers (OMTI), *Earth Planets Space*, *51*, 887–896.
- Vickrey, J. F., and M. C. Kelley (1982), The effects of a conducting E layer on classical F region cross-field plasma diffusion, *J. Geophys. Res.*, *87*, 4461–4468.