

インドネシアにおける沿磁力線不規則構造の VHF レーダー観測

大塚雄一、塩川和夫（名大 STEL）、小川忠彦（NICT）、Effendy (LAPAN)

1. はじめに

赤道域における沿磁力線不規則構造 (Field-Aligned Irregularity; FAI) のレーダー観測は、1960 年代から米国の研究者らを中心にペルー・ヒカマルカの大型レーダーを用いて行われてきた。2001 年には、京都大学がインドネシア・スマトラ島に赤道大気レーダー (EAR) を建設し、アジア域で初めて赤道域の F 領域 FAI を観測した。EAR サイトは、地理的には赤道直下に位置するが、地磁気緯度は 10°S であり地磁気的には”低緯度”にあたる。これまでに京都大学の MU レーダーを用いて、これまでに EAR によってプラズマバブルに伴う F 領域 FAI が観測されてきた [Fukao et al., 2003]。我々は、FAI の連続観測を実施するため、EAR サイトに送信周波数 30.8MHz のレーダーを設置した (図 1)。



図 1: インドネシア・コタバンの赤道大気レーダーサイトに設置された 30.8MHz の VHF レーダー。

2. 観測

2006 年 2 月より、赤道大気レーダーサイトにおいて、送信周波数 30.8MHz のレーダーによる E 層及び F 層 FAI の観測を開始した。図 1 に示すように、レーダーは 18 本の 3 素子八木アンテナから成り、その尖頭電力は 20 kW である。レーダーの主要緒元を表 1 に示す。レーダーは、電波の位相を制御することにより、ビームを 9 方向に走査することができる。ビームが磁力線に直交するように、ビームの天頂角を 20° としている。ビーム幅は、方位角方向には 12° 、天頂角方向には 40° である。この VHF レーダーは、定常的に E 層及び F 層の FAI 観測を切替えている。どちらの観測モードにおいても、FAI の時間・空間変化を分離して観測するため、ビームを 5 方向に走査している。F 領域 FAI 観測のレンジ及び時間分解能は、それぞれ 19.2km、4 分である。F 領域 FAI 観測の主な観測パラメーターを表 2 に示す。

表 1: VHF レーダーの主要諸元

場所:	0.2°S, 100.32°E (磁気伏角 10.36°S)
送信周波数:	30.8 MHz
アンテナ:	3 素子八木アンテナ 18 本
ゲイン:	22dBi
ビーム幅:	方位角 12° (半値全幅) 天頂角 40° (半値全幅)
ビーム走査:	アクティブ・フェーズド・コントロール 方位角 +54°~-54° (13°刻み)
送信機:	
尖頭電力:	20 kW
パルス幅:	1-200 μ s
サブパルス幅:	1, 2, 4, 8, 16 μ s
受信機:	1 台
A/D 変換機:	16 bit

表 2: F 領域 FAI の観測パラメーター

パルス繰り返し周期(IPP):	4.0 ms
パルス長:	128 μ s (シングル・パルス)
レンジ分解能:	19.2 km
サンプリング:	2.4 km
コヒーレント積分:	4 回
インコヒーレント積分:	3 回
FFT 点数:	128

3. 結果

これまでに VHF レーダーによって観測された F 領域 FAI のデータを解析し、FAI エコー発生
の季節・地方時変化を調べた。本研究では、FAI 以外の干渉波を除去するため、50km 以上のレ
ンジにわたって 0dB 以上の SN 比をもつエコーを FAI エコーとした。また、高度 200km から 540km
までの SN 比を平均した。図 2 に、南向きビームで得られた FAI エコー強度の季節・地方時変化
を示す。図中の黒い部分は、データ欠測を表す。図より、FAI エコーは、2006 年 3-5 月の真夜
中前と 2006 から 2009 年の 5-8 月における真夜中過ぎに頻繁に観測されていることが分かる。
また、真夜中過ぎの FAI エコーは、真夜中前のものに比べて弱い。

EAR サイトには、シンチレーション測定用の GPS 受信機が設置されており、2003 年 1 月か
ら連続観測を行っている [Otsuka et al., 2006]。2006 年 2 月から 2007 年 11 月までの期間にお

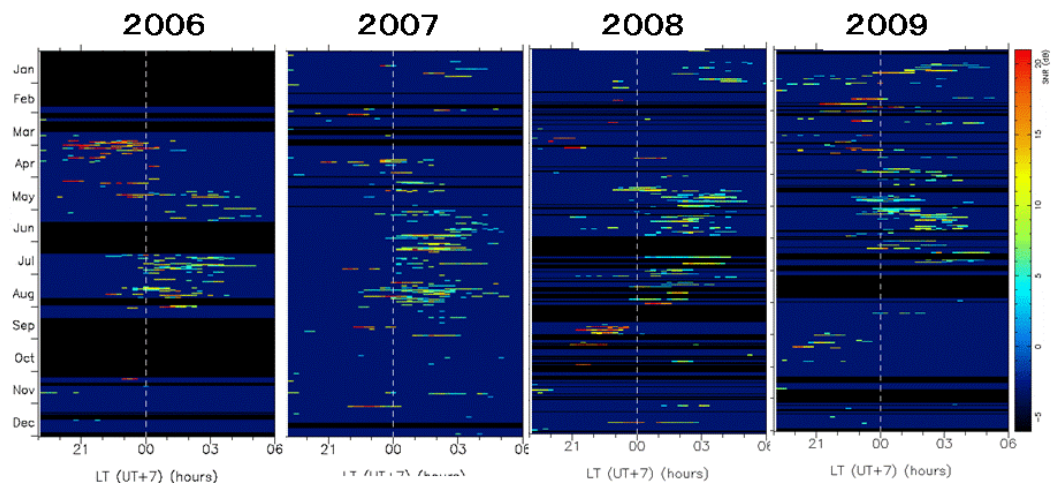


図 2: 2006 年から 2009 年までにコタバンの VHF レーダーで観測された F 領域 FAI エコーの地方時・季節変化。

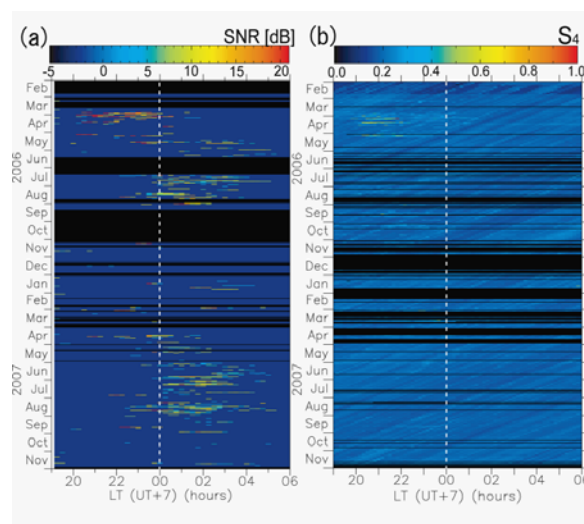


図 3: 2006 年 2 月から 2007 年 11 月までにコタバンの VHF レーダーで観測された F 領域 FAI エコー(a)と GPS シンチレーション指数 S4(b)の地方時・季節変化。

いて、GPS シンチレーションは、2006 年 3-5 月に発生しており、真夜中前の FAI エコーの出現とよく一致する。赤道域における GPS シンチレーションは、プラズマバブル内部に存在するプラズマ密度の不均一によって生じる。また、プラズマバブルは、インドネシア域では春・秋に発生頻度が高い[Tsunoda, 1985; Maruyama and Matuura, 1984]。このことから、真夜中前の FAI は、プラズマバブルに起因するものであると考えられる。しかし、真夜中過ぎの FAI は、プラズマバブルの発生頻度が低い季節に多く観測されている。さらに、通常、プラズマバブルに伴う FAI は、拡散によって真夜中頃には消滅するため、真夜中以降に観測されることは稀である。このことから、5-8 月の真夜中過ぎに観測された FAI は、プラズマバブルに伴うものとは異なると考えられる。

5 方向のビームで観測された FAI エコーの出現時間の差から、FAI のエコー領域が東西方向

のどちらに伝搬しているかを決定した。2006 年 2 月 23 日から 2007 年 11 月 28 日までの観測データを調べたところ、真夜中前(19-00LT)に発生する FAI と真夜中過ぎ(00-06LT)に発生する FAI とでは、その伝搬方向に違いがあることが分かった。真夜中前 FAI は、23 例観測されており、そのうち 21 例が東向きに伝搬していた。一方、真夜中過ぎ FAI は、80 例観測されており、そのうち 9 例が東向き、28 例が西向きであった。残りの 43 例(全体の 54%に相当)は、伝搬していないか、あるいは顕著な伝搬が見られなかったものである。真夜中過ぎ FAI 発生頻度の季節変化や西向きに伝搬する特徴は、MU レーダーで観測される F 領域 FAI と類似しており、中緯度の F 領域 FAI が低緯度域でも発生している可能性があると考えられる。

各ビームにおける FAI のドップラー速度をスペクトルの 1 次モーメントから求めた。2006 年 2 月から 2007 年 11 月までに得られたドップラー速度のデータを 1 時間毎に分類し、平均した。最も西(方位角 234°)と東(方位角 126°)に振ったビームで得られた視線方向のドップラー速度の平均地方時変化を図 4 に示す。速度の正(負)の値は、レーダーに近づく(から遠ざかる)向きを表す。FAI のドップラー速度は、電場 E による $E \times B$ ドリフト速度を表していると考えられる。ここでは、誤差を小さくするため、FAI エコーの SN 比が-5dB 以上のものだけを用いた。真夜中前において、西(東)向きビームで得られたドップラー速度は正(負)であり、FAI が東向きの速度を持っていることが分かる。一方、真夜中過ぎでは両者の速度の差は小さいが、4-5 時 LT には両方向のドップラー速度の大きさが逆転しており、FAI が西向き速度をもっていることが分かる。従って、FAI のエコー領域の移動と $E \times B$ ドリフトの方向が一致していると言える。

上述したように、コタバンの VHF レーダーによって真夜中過ぎに観測される FAI エコーの発生する季節、伝搬方向やドップラー速度の向きは、中緯度で観測される FAI の特徴と類似している。中緯度における F 領域 FAI は、F 領域電子密度の変動である中規模伝搬性電離圏擾乱

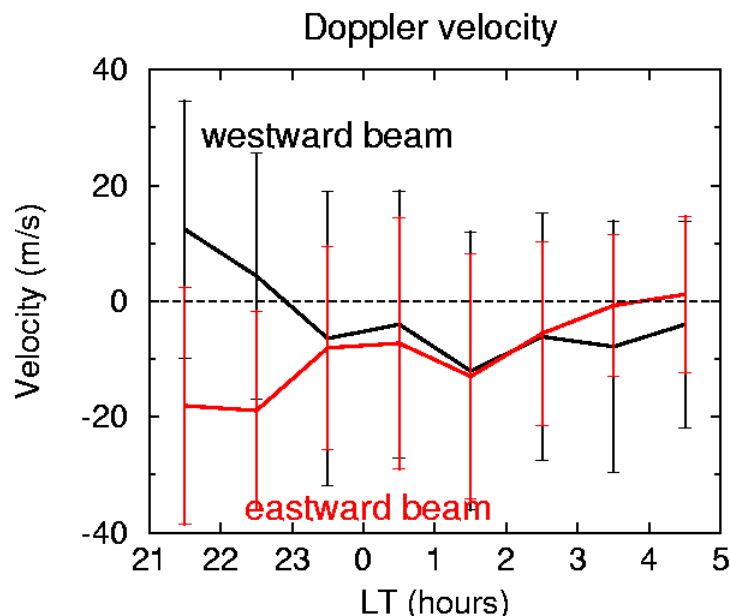


図4: 南西向き(方位角234°; 実線)及び南東向き(方位角126°; 赤線)ビームで観測されたFAI ドップラー速度(正はレーダーに近づく向き)の地方時変化。2006 年2 月から2007 年11 月までに得られたデータの平均値。エラーバーは標準偏差を表す。

(Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbance; MSTID)に伴って発生しており[例えば、Otsuka et al., 2009]、またこの MSTID については、スプラデック E(Es)層との電磁力学的結合がその生成原因の一つとして重要な役割りを果たしていることが示唆されている[例えば、Otsuka et al., 2008]。そこで本研究では、F 領域 FAI の発生頻度と比較するために、コタバンにおける Es 層の発生頻度を調べた。図 5 に、2007 年 8 月から 2008 年 7 月までの Es 層突き抜け周波数(foEs)の地方時・季節変化を示す。これより、夜間においては、5-8 月の真夜中から日出時に高い foEs が見られることが分かる。この季節・地方時変化は、コタバンで観測された F 領域 FAI の発生頻度の季節・地方時変化と一致しており、コタバンにおける F 領域 FAI が、中緯度の FAI と同様に Es 層との電磁力学的結合によって生成されている可能性が示唆される。

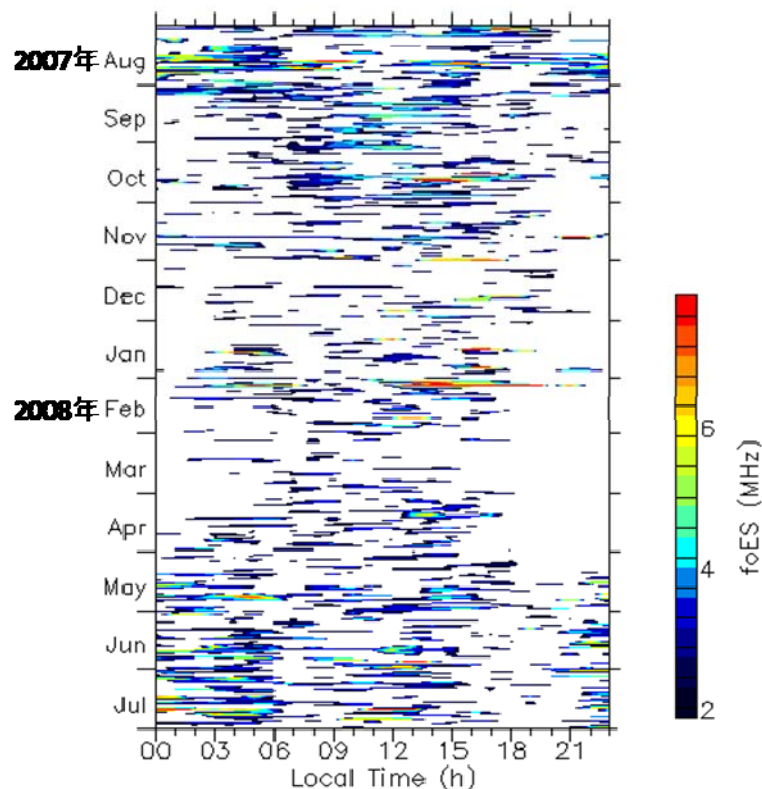


図 5: 2007 年 8 月から 2008 年 7 月までにコタバンのイオノゾンデで得られたスプラデック E 層の突き抜け周波数(foEs)の季節・地方時変化。

4 まとめ

EAR サイトにおいて、2006 年 2 月から 30.8 MHz レーダーによる F 領域 FAI の連続観測を行った。その結果、観測された F 領域 FAI は、その性質から以下の 2 種類に分類することができることが明らかになった。

・真夜中前(19-00 LT) の F 領域 FAI

- 3-5 月に発生頻度が高く、GPS シンチレーションを伴う。
- プラズマバブルに伴う FAI と考えられる。

・ 真夜中過ぎ(00-05 LT) の F 領域 FAI

- 5-8 月に発生頻度が高く、GPS シンチレーションを伴わない。
- FAI エコー領域が西向きに伝搬するものが多い。
- FAI の Doppler 速度は西向き成分をもつ。
- 上記の特徴は、中緯度の F 領域 FAI と類似している。

真夜中過ぎの FAI の生成原因は未だ明らかにされておらず、さらなる研究が必要である。

参考文献

- Fukao, S., H. Hashiguchi, M. Yamamoto, T. Tsuda, T. Nakamura, M. K. Yamamoto, T. Sato, M. Hagino, and Y. Yabugaki, The Equatorial Atmosphere Radar (EAR): System description and first results, *Radio Sci.*, 38(3), 1053, doi:10.1029/2002RS002767, 2003.
- Fukao, S., Y. Ozawa, T. Yokoyama, M. Yamamoto, and R. T. Tsunoda, First observations of the spatial structure of F region 3-m-scale field-aligned irregularities with the Equatorial Atmosphere Radar in Indonesia, *J. Geophys. Res.*, 109, A02304, doi:10.1029/2003JA010096, 2004.
- Maruyama, T. and N. Matuura, Longitudinal variability of annual changes in activity of equatorial spread F and plasma bubbles, *J. Geophys. Res.*, 89, 10,903-10,912, 1984.
- Otsuka, Y., K. Shiokawa, and T. Ogawa, Equatorial ionospheric scintillations and zonal irregularity drifts observed with closely-spaced GPS receivers in Indonesia, *J. Meteor. Soc. Japan*, 84A, 343-351, 2006.
- Otsuka, Y., T. Tani, T. Tsugawa, and T. Ogawa, Statistical study of relationship between medium-scale traveling ionospheric disturbance and sporadic E layer activities in summer night over Japan, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 70, 2196-2202, 2008.
- Otsuka, Y., K. Shiokawa, T. Ogawa, T. Yokoyama, and M. Yamamoto, Spatial relationship of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances and F region field-aligned irregularities observed with two spaced all-sky airglow imagers and the middle and upper atmosphere radar, *J. Geophys. Res.*, 114, A05302, doi:10.1029/2008JA013902, 2009.
- Tsunoda, R. T., Control of the seasonal and longitudinal occurrence of equatorial scintillations by the longitudinal gradient in integrated E region Pedersen conductivity, *J. Geophys. Res.*, 90, 447-456, 1985.

謝辞

情報通信研究機構がインドネシア・コトタバンに設置されているイオノゾンデのデータを使用させて頂きました。