

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、小川忠彦、横山竜宏（名大 STEL）、
山本衛(京大 RISH)、Effendy(LAPAN)、Patra(NARL)

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”にあたり、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]。さらに、我々は、EARサイトに送信周波数 30.8MHzのレーダーを設置し、E層及びF層のFAI観測を 2006 年 2 月より開始した。その結果、プラズマバブルによるFAIとは異なる性質をもつFAIを発見した。また、EARによって、昼間の高度 150km付近に存在するFAIを観測することに成功した。従来、この高度 150kmFAIは磁気赤道だけに存在すると考えられていたが、本観測はこの考え方を覆すものである。本講演では、これら生成機構が十分に解明されていないFAIの観測結果について報告する。

2. 31MHz レーダーによる F 領域 FAI の連続観測

2.1 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層の沿磁力線不規則構造の観測を開始した。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層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。



図 1: インドネシア・スマトラ島に設置された 30.8MH のレーダー

表 1: コトタバンに設置された VHF レーダーの主要緒元

場所:	0.20°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:	22 dBi
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・フェイズド・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

2.2 FAI の発生頻度

2006 年 2 月 23 日から 2007 年 11 月 28 日までに 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。本解析では、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 までのエコーを平均した。図 1a 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 年及び 2007 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ことが分かる。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]。図 1 に示した期間において、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。

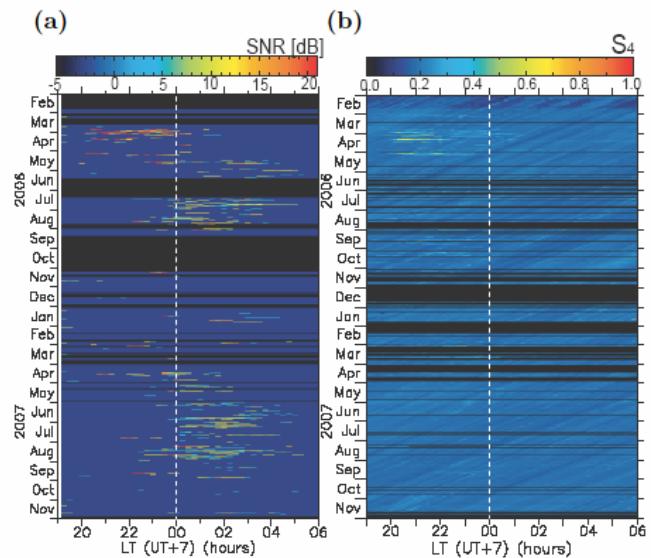


図 2: 2006 年 2 月から 2007 年 11 月までにコトタバンの VHF レーダーで観測された F 領域 FAI エコー (a) 及び GPS シンチレーション指数 S_4 (b) の季節・地方時変化

2.3 FAI の伝搬方向

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(19-01LT)に発生するFAI と真夜中過ぎ(23-06LT)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(表2)。真夜中前FAI は、26例観測されており、そのうち24例が東向きに伝搬していた。一方、真夜中過ぎFAI は、89例観測されており、そのうち10例が東向き、33例が西向きであった。残りの45例(全体の52%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。

表2: FAI の伝搬方向

	FAI 有	東向き	西向き	伝搬なし
真夜中前 FAI	26 日	24 日 (92%)	0 日 (0%)	2 日 (8%)
真夜中過ぎ FAI	89 日	10 日 (11%)	33 日 (37%)	46 日 (52%)

真夜中前 FAI: 3-5月の19-01 LT

真夜中過ぎ FAI: 5-8月の23-06 LT

2.4 中緯度 FAI との類似性

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。さらに、個々の観測例についても、以下のようにエコー領域及びドップラー速度について類似した性質をもつFAI エコーが観測されている。図3に、コタバン(左)と信楽MU レーダー(右)で観測されたFAI のエコー強度とドップラー速度のレンジ・時間断面図を示す。両地点で観測されたFAI と、塊状のエコー領域では上向きのドップラー速度をもっていることが分かる。塊状エコーの後には、ドップラー速度が小さく下向きの層状をなすエコー領域が存在している。

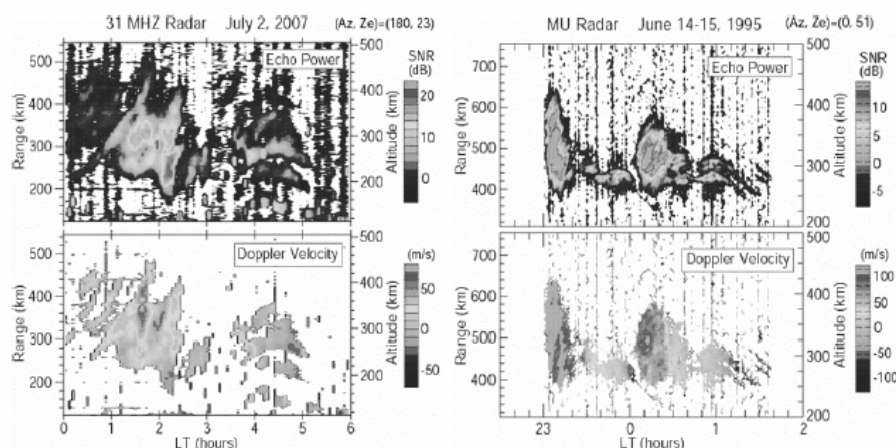


図3: コタバン(左)と信楽MU レーダー(右)で観測されたFAI のエコー強度とドップラー速度(レーダーから遠ざかる向きが正)のレンジ・時間断面図

2.5 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。

- 真夜中前(19-01 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(23-05 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。
RTI プロット上で層状に分布するものが多い。
中緯度の F 領域 FAI と類似している。

3. 昼間の高度 150-km FAI エコー

3.1 背景

昼間の高度 150km FAI エコーは、ペルーのヒカマルカ・レーダーによって最初に観測された [Balsley, 1964]。この高度 150km エコーの特徴は、FAI エコーが観測される高度が午前中は時間とともに下降し、正午頃に最低となった後、午後には上昇することである。従って、FAI エコー強度のレンジ・時間断面では、ネックレス状に FAI エコーが分布することから “ネックレス・エコー” と呼ばれることもある。高度 150km FAI エコーがこれまでに観測された場所を表 3 に示す。ヒカマルカで観測されて以来、この FAI は磁気赤道付近でのみ観測されており、磁気赤道域特有の現象であると考えられてきた。この FAI の生成機構については未解明であるが、磁力線が水平になる磁気赤道では、背景にあるプラズマ密度の鉛直勾配と磁場が直交するためにプラズマ不安定が起こるとする考え方がある [例えば、Tsunoda and Ecklund, 2000]。しかし、近年、インドのガダンキ(磁気伏角 12.5°) でも、昼間の高度 150km FAI エコーが観測されたという報告があり [Patra and Rao, 2006, 2007]、FAI 生成機構についての謎が深まった。さらに、EAR が設置されているコタババンは磁気伏角 21° であり、EAR によって高度 150km FAI エコーが観測されれば、最も磁氣的に高緯度で観測されたことになる。

表 3: 昼間の高度 150km FAI エコーが観測された場所と磁気伏角

観測場所	磁気伏角	発表論文
Jicamarca (Peru) [11.9°S , 76.0°W]	0°	Balsley [1964]
Pohnpei [7.0°N , 158.2°E]	0.5°	Kudeki et al. [1998]
Ivory Coast [9.4°N , 5.6°E]	4.0°	Blanc et al. [1996]
Sao-Luis [2.3°S , 44°W]	2.6°	de Paula and Hysell [2004]
Gadanki [13.5°N , 79.2°E]	12.5°	Chaudhary et al. [2004]
Kototabang [0.2°S , 100.3°E]	-21.2°	—

3.2 観測結果および考察

インドのガダンキ・レーダーで観測された高度 150km 付近における FAI のエコー強度は、非常に弱いことから [Patra and Rao, 2006]、EAR による観測でもエコー強度は非常に弱いと考えられた。そこで、弱いエコーでも十分な SN 比を得るため、コヒーレント積分回数を 14 回とした。

図 4 に、2007 年 8 月 25 日と 26 日に EAR で観測された高度 150km FAI エコーの例を示す。8 月 25 日において、FAI エコーは、10:30LT 頃には高度 155km に観測され、時間とともに高度が低下し、12:00LT 頃に極小となる。その後、14:30LT 頃には高度 155km 付近にまで上昇する。8 月 26 日も同様に、FAI エコーの高度は、12:00LT 頃に極小となり、レンジ・時間断面図上でネックレス形になっている。従って、従来磁気赤道付近で観測されていた高度 150km FAI エコーが EAR によっても観測された、とすることができる。

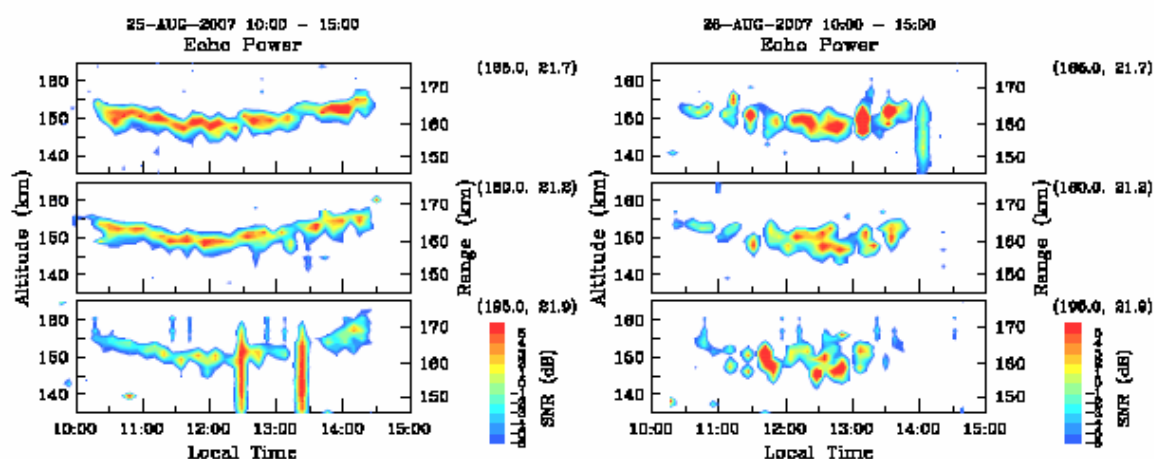


図 4: 2007 年 8 月 25 日と 26 日の昼間(10-15 時 LT)に、赤道大気レーダーで観測され高度 150km FAI エコー。

表 4 に、EARによって高度 150km FAI の観測を行った日及び、そのうち FAI が観測された日を示す。FAI の発生頻度は約 60% である。Kudeki et al [1998] は、Pohnpei [7.0°N, 158.2°E] において 50Mz レーダーの観測を行い、5-8 月に顕著な FAI 発生頻度の極大があることを示しているが、コトタバンの結果は、それとは異なり、あまり顕著な季節変化は見られない。

表 4: EAR によって高度 150km FAI エコーの観測が行われた日

8 月	<u>10</u> , 11, <u>12</u> , <u>22</u> , <u>24</u> , <u>25</u> , <u>26</u> , 27, 28 日
9 月	6, 19, <u>20</u> , 21, 22, 23 日
10 月	<u>10</u> , <u>11</u> , <u>12</u> , 13, <u>14</u> , 15, <u>16</u> 日
11 月	<u>19</u> , <u>20</u> , 21, <u>22</u> , <u>23</u> , <u>24</u> , <u>25</u> , <u>26</u> 日

□ は、高度 150km FAI エコーが観測された日

他地点での観測結果との比較

図 5 は、ペルーのヒカマルカ、インドのガダンキで観測された高度 150km FAI の例を EAR で観測されたものと比較したものである。これら 3 ヶ所で観測された FAI は、RTI プロットにおいてネックレスの形状を示すが、高度変化の範囲が異なる。ヒカマルカで観測された FAI は、高度約 140km から 180km まで約 40km、ガダンキでは、高度約 145km から 160km まで約 15km の範囲の変化が見られるが、コトタバンでは、高度約 150km から 160km まで約 10km と小さい。これらの結果から、磁気伏角が大きくなるほど FAI の高度変化の範囲が小さくなる傾向があることが分かる。しかし、ここでは、ヒカマルカ、ガダンキの観測結果については、論文発表された各々一例だけを用いて比較したものである。よって、今後、これらのデータについて統計的に調べる必要がある。

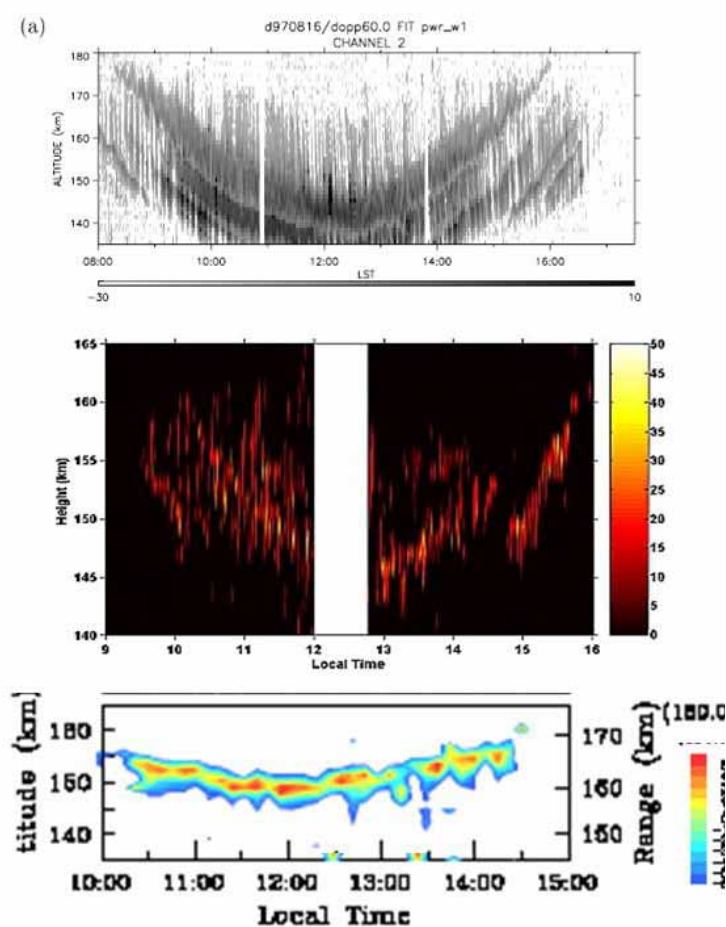


図 5: ヒカマルカ[Fawcett, 1999](上)、ガダンキ[Patra and Rao, 2006](中)、コトタバン(下)で観測された高度 150km FAI エコー強度のレンジ・時間断面。

3.3 まとめ

コタバン（磁気伏角 21 度）において、昼間の高度 150kmFAI エコーを観測することに初めて成功し、FAI エコーが以下の特徴を持っていることを明らかにした。

- ・ コタバンで観測された FAI の性質（スペクトル幅、ドップラー速度）は、従来の磁気赤道付近での観測結果と類似している。
- ・ しかし、コタバンで観測された FAI が発生する高度範囲は、他地点での結果と比べて狭く、地磁気緯度が大きくなるほど高度範囲が小さくなる傾向が見られた。

以上のことから、150km FAI の生成機構を解明するためには、異なる緯度での観測が重要と考えられる。また、EAR によって昼間の高度 150km FAI エコーが観測されたということは、150km FAI が磁気赤道だけで起こるのでは無いことを示しており、今後、信楽 MU レーダー（磁気伏角約 50 度）でも観測を試みたい。

4. おわりに

- EAR サイトにおいて、2006 年 2 月から 31MHz レーダーによる F 領域 FAI の連続観測を行った。5 - 8 月の真夜中過ぎに、中緯 FAI と類似した FAI が頻繁に観測された。FAI と中規模伝搬性電離圏擾乱(MSTID)との関係を研究中である。
- EAR によって、昼間の高度 150kmFAI エコーを観測することに初めて成功した。この観測結果より、高度 150km FAI が、磁気赤道固有の現象ではないことが示された。また、他地点での観測結果と比較することにより、地磁気緯度が大きくなるほど FAI の高度範囲が小さくなる傾向があることが明らかになった。150km FAI の生成機構を解明するには、異なる緯度での観測が重要と考えられる。

参考文献

- Balsley, B. B. (1964), Evidence of stratified echoing region at 150 km in the vicinity of magnetic equator during daylight hours, *J. Geophys. Res.*, 69, 1925.
- Blanc, E., B. Mercandalli, and E. Hounninou (1996), Kilometric irregularities in the *E* and *F* regions of the daytime equatorial ionosphere observed by a high resolution HF radar, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 645.
- Choudhary, R. K., J.-P. St.-Maurice, and K. K. Mahajan (2004), Observation of coherent echoes with narrow spectra near 150 km altitude during daytime away from the dip equator, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L19801, doi: 10.1029/2004GL020299.
- de Paula, E. R., and D. L. Hysell (2004), The Sao Luis 30 MHz coherent scatter ionospheric radar: System description and initial results, *Radio Sci.*, 39, RS1014, doi:10.1029/2003RS002914.
- Fawcett, C. (1999), An investigation of equatorial 150-km irregularities, Ph.D. thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign.
- Fukao, S., H. Hashiguchi, M. Yamamoto, T. Tsuda, T. Nakamura, and M. K. Yamamoto, T. Sato, M. Hagio, and Y. Yabugaki (2003), The Equatorial Atmosphere Radar (EAR): System description and first results, *Radio Sci.*, 38(3), 1053, doi:10.1029/2002RS002767.

- Kudeki, E., C. D. Fawcett, W. L. Ecklund, P. E. Johnston, and S. J. Franke (1998), Equatorial 150-km irregularities observed at Pohnpei, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 4097.
- Maruyama, T. and N. Matuura (1984), Longitudinal variability of annual changes in activity of equatorial spread F and plasma bubbles, *J. Geophys. Res.*, 89, 10,903-10,912.
- Otsuka, Y., K. Shiokawa, and T. Ogawa (2006), Equatorial ionospheric scintillations and zonal irregularity drifts observed with closely-spaced GPS receivers in Indonesia, *J. Meteor. Soc. Japan*, 84A, 343-351.
- Patra, A. K., and N. V. Rao (2006), Radar observations of daytime 150-km echoes from outside the equatorial electrojet belt over Gadanki, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L03104, doi:10.1029/2005GL024564.
- Patra, A. K., and N. V. Rao (2007), Further investigations on 150-km echoing riddle using simultaneous observations of 150-km and E region echoes from off-electrojet location Gadanki, *J. Geophys. Res.*, 112, A09301, doi:10.1029/2006JA012204.
- Tsunoda, R. T. (1985), 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.
- Tsunoda, R. T., and W. L. Ecklund (2000), On the nature of 150-km radar echoes over the magnetic dip equator, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 657.