赤道大気レーダーで昼間に観測された

高度 150km の沿磁力線不規則構造

水谷徳仁¹、大塚雄一¹、塩川和夫¹、横山竜宏²、山本衛³、A. K., Patra⁴、丸山隆⁵、石井守⁵ 1. 名大 STE 研 2. コーネル大 3. 京大 RISH 4. NARL 5. NICT

1. 背景

インドネシア・スマトラ島のコトタバンに建設された赤道大気レーダー(Equatorial Atmosphere Radar; EAR)によって、これまでにプラズマバブルに伴う F 領域沿磁力線不規則構造(Field-Aligned Irregularity; FAI)や、高度 100km 付近に出現する E 領域 FAI が観測されてきた[Fukao et al., 2003]。 今回は EAR を用いて昼間の高度 130km から 170km 付近に出現する FAI の観測を行った。このエコ ーは 150kmFAI エコーと呼ばれており、この FAI エコーの観測は電離圏の現象を理解するのに必要 な観測の一つである。150kmFAI エコーはペルー・ヒカマルカ(磁気伏角:0度)のレーダーで最初に観 測された(図 1)[Basley, 1964]。この図を見ると、FAI の発生高度が午前は下降し、正午頃に最低にな った後、午後は上昇していることがわかる。このことから、150kmFAI エコーはネックレスエコーと 呼ばれることもある。ヒカマルカの観測以来、150kmFAI エコーはミクロネシア・ポンペイ(磁気伏 角:0.5 度)のレーダー[Tsunoda and Ecklund, 2004]など磁気赤道付近のみで観測されており、磁気赤 道域特有の現象であると考えられていた(表 1)。しかし、近年、インド・ガダンキ(磁気伏角:12.5 度)

でも 150kmFAI エコーが観測されることがわ かった [Patra and Rao, 2006, 2007]。そして、 インドネシア・コトタバンの EAR(磁気伏角: -21.2 度)でも 150kmFAI エコーが観測された [Patra et al., 2008]。本研究では、EAR を用い て 150kmFAI エコーを観測し、150kmFAI エ コーの発生頻度、発生高度に季節変化があるこ とが明らかになった。さらに、今回は鉛直方向 におけるドップラー速度の統計解析を行った。



図 1 ヒカマルカ[Fawcett, 1999]で観測された 150kmFAI エコー強度のレンジ・時間断面

観測場所	磁気伏角	発表論文
Jicamarca (Peru) [11.9°S,76°W]	0°	Balsley [1964]
Pohnpei (Micronesia) [7.0°N,158.2°E]	0.5°	Kudeki et al. [1998]
Sao-Luis (Brazil) [2.3°S,44°W]	2.6°	de Paula and Hysell [2004]
Ivory Coast (Africa) [9.4°S,5.6°E]	4.0°	Blanc et al. [1996]
Gadanki (India) [13.5°N,79.2°E]	12.5°	Chaudhary [2004]
Kototabang (Indonesia) [0.2°S,100.3°E]	-21.2°	Patra et al. [2008]

衣I 住间の局及 IOUKMIAI エユール観側されに場所・磁気16月・発	免衣論乂
---------------------------------------	------

2. 観測

赤道大気レーダーは 3 素子八木アンテナ 560 本で構成されており、略円式アクティブ・フェーズ ド・アレイ方式である。送信周波数は 47MHz、送信尖頭出力は 100kW、アンテナビームはビーム幅 3.4 度で天頂角 30 度以内の任意の方向に向けることができる。今回の観測では、レンジ分解能 1.2km、 時間分解能 155 秒の観測を行った。ビーム方向は、高度 150km において磁力線に直交する 8 つの方 向にレーダー・ビームを向けた。ビーム方向の方位角、天頂角はそれぞれ、(135 度, 28.5 度)、(150 度, 24.0 度)、(165 度, 21.8 度)、(180 度, 21.2 度)、(195 度, 21.9 度)、(210 度, 24.3 度)、(225 度, 29.2 度)、(240 度, 38.8 度)である。

3. 結果及び考察

3.1 150kmFAI エコーの発生頻度

まず、EAR によって観測された高度 150kmFAI エコーの発生頻度について述べる。観測が開始された 2007 年 8 月から 2008 年 9 月までのデータを解析した。表 2 に 150kmFAI エコーの観測を行った日を示す。四角で囲まれた日は 150kmFAI エコーが観測された日である。毎月 1 週間程度 150kmFAI エコーの観測が行われているが、2007 年 1 月は観測が行われず、2008 年 2 月は 1 日のみしか観測が行われていない。表 2 より、150kmFAI エコーの発生頻度は 2007 年 8 月から 2008 年 2 月までの間において約 6 割であるが、2008 年 3 月から 5 月の間に 150kmFAI はほとんど観測されなかったことが分かる。しかし、2008 年 6 月から 9 月は 8 割の頻度で 150kmFAI エコーが観測された。このことから、150kmFAI エコーの発生頻度に 3 月から 5 月に ほとんど観測されないという顕著な季節変化があることがわかった。

表 2 EAR によって高度 150kmFAI エコーの観測が行われた日(2007 年 8 月~2008 年 9 月) (□は 150kmFAI エコーが観測された日を示している。)

2007年8月	10, 11, 12, 22, 24, 25, 26, 27, 28 H
9月	6, 19, 20, 21, 22, 23 日
10 月	10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 H
11 月	19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 日
12 月	12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 日
2008年2月	2日
3 月	$5, 6, 7, 8, 9, 10 \exists$
4月	$4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 \exists$
5 月	3, 4, 5, 6, 7日
6月	2, 3, 4, 5, 6 日
7 月	1, 2, 3, 4, 5, 30, 31日
8月	1, 2, 3, 4日
9月	<u>19</u> , <u>20</u> , <u>21</u> , <u>22</u> , <u>23</u> , <u>24</u> , <u>25</u> , <u>26</u> 日

3.2 150kmFAI エコーとスポラディック E 層の季節変化の比較

図2に、2007年8月から2008年9月までの150kmFAIエコーの観測データを基に求めた月 別の150kmFAIエコー発生頻度を示す。また、2006年1月から2007年7月までの期間の12時 LTにコトタバンのイオノゾンデで観測されたスポラディックE層の発生頻度を示す。ここでは、 スポラディックE層のfoEsが4.5MHz以上になる頻度を示す。まず、150kmFAIエコーの発生 頻度は3月から5月に低くなり、6月から12月に高くなっていることがわかる。それに対し、 スポラディックE層の発生頻度は1月から4月に低くなり、7月から11月に高くなっているこ とがわかる。この2つを比較すると、150kmFAIエコーとスポラディックE層の発生頻度の季節 変化の傾向がほぼ一致していることがわかった。





ここで、他地点における 150kmFAI エコーとスポラディック E 層の季節変化と比較をする。 まずは、ポンペイ(ミクロネシア)における 50MHz レーダー観測の結果について説明する [Tsunoda and Ecklund, 2004]。図3にポンペイにおける 1999 年から 2002 年までの 150kmFAI エコーの発生頻度を示す。横軸は日数、縦軸は発生頻度を示している。図3より、150kmFAIの 発生頻度は5月から8月にかけて高くなっていることがわかる。図4は、ポンペイに近いグアム におけるスポラディック E 層の発生頻度の図である[Smith, 1957]。横軸は1951 年1月から 1952 年 12月、縦軸は地方時を示している。図4より、夏の昼間に発生頻度が高くなっていることが わかる。図3と図4を比較すると、ポンペイにおいてはスポラディック E 層と 150kmFAI エコ ーの発生頻度の季節変化がほぼ一致していることがわかる。

次に、ガダンキ(インド)における 50MHz レーダー観測の結果について説明する[Patra and Rao, 2006]。図 5 にガダンキにおける 150kmFAI エコーの発生頻度を示す。横軸は地方時、縦軸はエ コーの発生頻度を表しており、春、夏、秋、冬の季節別の値が示されている。図 5 より、150kmFAI エコーの発生に季節依存性はなく、一年中いつでも発生頻度が高いことがわかる。図 6 は、ガダ ンキにおけるスポラディック E 層の臨界周波数を示している。横軸は地方時、縦軸は foEs を表 しており、図 5 と同様に春、夏、秋、冬の値が示されている。図 6 より、スポラディック E 層の 発生頻度が夏・秋で高いことがわかる。図 5、図 6 を比較すると、ガダンキにおいては 150kmFAI エコーの発生頻度とスポラディック E 層の発生頻度の季節変化に違いがあることがわかった。

コトタバン、ポンペイ、ガダンキの3地点における150kmFAIエコーとスポラディックE層

の季節変化を比較すると、コトタバン、ポンペイでは両者の季節変化が一致したのに対し、ガダ ンキでは異なることが明らかになった。このように、150kmFAIエコーとスポラディック E 層の 季節変化の関係は地点によって異なることが明らかになった。



また、150kmFAI エコーとスポラディック E 層の日々変化について比較をした。比較した期間 は 2007 年 8 月 25 日から 28 日までの連続した 4 日間である。この 4 日間は毎日 150kmFAI エ コーの観測が行われ、25 日と 26 日は 150kmFAI エコーが観測されたが、27 日と 28 日は観測さ れなかった。図 7 に 4 日間に得られた 15 分おきのスポラディック E 層の foEs の時間変化を示 す。横軸は地方時を示し、縦軸は foEs を示している。図 7 を見ると、150kmFAI エコーが観測 された 25 日、26 日と観測されなかった 27 日、28 日とでは foEs に違いは見られるが、150kmFAI エコーの有無とは相関が見られないことがわかった。よって、この 4 日間の日々変化において 150kmFAI エコーがある日とない日で foEs に相関が見られないことがわかった。



図7 2007年8月25日から28日の連続した4日間にコトタバンで観測された スポラディック E 層の foEs の時間変化

3.3 150kmFAI エコーの発生高度の季節変化

150kmFAI エコーの発生高度の季節変化について調べた。図 8 に 2007 年 8 月から 2008 年 8 月までの 150kmFAI エコーが観測された日の全てのデータを示す。ビーム方向は、方位角 165 度、天頂角 21.8 度の方向だが、2007 年 8 月 10 日と 2007 年 8 月 12 日のデータは方位角 180 度、 天頂角 21.2 度の方向のデータを用いた。図 8 で注目したのは、エコーの高度変化と 12 時 LT に おける発生高度である。まず、図 8 から、11 月及び 12 月では 150kmFAI エコーの高度変化が小 さいこと、また、ほとんどの場合で 12 時 LT±30 分付近に 150kmFAI エコーの発生高度が最も 低くなっていることがわかる。



図 8 2007 年 8 月から 2008 年 9 月までの 150kmFAI エコー。ビーム方向は方位角 165 度、天頂角 21.8 度。但し、2007 年 8 月 10 日、2007 年 8 月 12 日は方位角 180 度、天 頂角 21.2 度のビーム方向である。

150kmFAI エコーの高度変化及び発生高度についてさらに詳しく調べた。図9に、150kmFAI エコーの最高到達高度と最低高度との高度差を示す。横軸は 2007 年 8 月から 2008 年 9 月であ る。図9より、11 月、12 月に高度差が小さくなっていることがわかる。8 月から 10 月では高度 差が 8km 前後であるのに対し、11 月、12 月では半分の 4km 前後となっている。図 10 は 12 時 LT における 150kmFAI エコーの発生高度を示している。横軸は 2007 年 8 月から 2008 年 9 月 である。図 10 より、11 月、12 月で発生高度が高くなっていることがわかる。8 月から 10 月で は 144km から 150km くらいであるのに対し、11 月、12 月では 150km から 158km となってい る。このように、高度差や発生高度も季節によって変化していることが明らかになった。



3.4150km エコーの鉛直方向のドップラー速度の季節変化

150km エコーのドップラー速度の季節変化について調べた。調べた期間は 2007 年 8 月から 2008 年 9 月、高度範囲 130km から 170km、及び南向きビーム(方位角 180 度)で 1 時間毎に平 均をした。図 11 にコトタバンにおける鉛直方向のドップラー速度を季節ごとにプロットしたも のと、ヒカマルカにおける F 領域の鉛直方向の E×B ドリフト[Fejer et al.,1991]をプロットした ものを示す。図 11 を見ると、ヒカマルカの値はコトタバンの値に比べて大きいことがわかる。 しかし、コトタバンにおいてもヒカマルカにおいても、明け方から正午頃にかけて鉛直方向のド ップラー速度の値が増加していき、午後にかけて減少しているという傾向がほぼ一致しているこ とがわかる。



図 11 コトタバンにおける 150kmFAI エコーの高度方向に平均した 1 時間おきのドップラー速度変化 とヒカマルカにおける F 領域の鉛直方向の E×B ドリフト[Fejer et al., 1991]

4. まとめ

2007 年 8 月から 2008 年 9 月までの期間に赤道大気レーダーによって観測された 150km エコーの データを統計解析した。その結果を下にまとめる。

- ① 150kmFAI エコーの発生頻度は、3 月から5 月には小さいが他の季節には60%以上と大きくなるという顕著な季節変化があることが明らかになった。この結果は、ガダンキの結果とは異なるものであった。
- ② 12時 LT における 150kmFAI エコーの発生頻度とスポラディック E 層の発生頻度の季節変化に ついて比較をした。その結果、両者の季節変化は類似していることがわかった。
- ③ 2007 年 8 月 25 日から 28 日の連続する 4 日間で 150kmFAI エコーとスポラディック E 層の日々 変化について比較をした。その結果、両者の日々変化に相関がないことがわかった。
- ④ 150kmFAI エコーの発生高度の季節変化について調べた。各日における 150kmFAI エコーの最高到達高度と最低高度の差は、11 月、12 月に最も小さく約 4km であり、他の季節では約 8kmであった。発生高度は7月、8月に低い(144~150km)のに対し、11 月、12 月に高い(150~158km)

⑤ 150kmFAIエコーの鉛直方向のドップラー速度の季節変化について調べた。ヒカマルカにおける F領域の鉛直方向のE×Bドリフトの季節変化とコトタバンにおける鉛直方向のドップラー速度 の季節変化を比較すると、ヒカマルカの値がコトタバンの値に比べて大きいことが、コトタバン においてもヒカマルカにおいても、明け方から正午頃にかけて鉛直方向のドップラー速度の値が 増加していき、午後にかけて減少しているという傾向がほぼ一致していることがわかった。

5. 今後の課題

今後の課題として以下の3点をあげる。

- ① 継続して赤道大気レーダーによって 150kmFAI エコーの観測を行う。
- ② コトタバンにおけるスポラディック E 層の発生頻度の調査を行う。具体的には、150kmFAI エコーの観測期間と同じ期間のスポラディック E 層の発生頻度の調査を行う。
- ③ 150kmFAI エコーのドップラー速度の特徴の詳細な調査を行う。具体的には東西方向のドップ ラー速度を算出する。

6. 謝辞

コトタバンのスポラディック E 層の調査には、NICT のイオノグラムのデータを使用させていただ きました。

7. 参考文献

- [1] Balsley, B. B., Evidence of stratified echoing region at 150 km in the vicinity of magnetic equator during daylight hours, J. Geophys. Res., 69, 1925, 1964.
- [2] Blanc, E., B. Mercandalli, and E. Houngninou, 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, 1996.
- [3] Choudhary, R. K., J.-P. St.-Maurice, and K. K. Mahajan, 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, 2004.
- [4] de Paula, E. R., and D. L. Hysell, The Sao Luis 30 MHz coherent scatter ionospheric radar: System description and initial results, Radio Sci., 39, RS1014, doi:10.1029/2003RS002914, 2004.
- [5] Fawcett, C., An investigation of equatorial 150-km irregularities, Ph.D. thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, 1999.
- [6] Fejer, B. G., E. R., de Paula, S. A., Gonzalez, and R. F., Woodman, Average vertical and zonal F region plasma drifts over Jicamarca, J. Geophys. Res., 96, 13,901, 1991.
- [7] 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, 2003a.

- [8] Fukao, S., Y. Ozawa, M. Yamamoto, and R. Tsunoda, Altitude-extended equatorial spread F observed near sunrise terminator over Indonesia, Geophys. Res. Lett., 30(22), 2137, doi:10.1029/2003GL018383, 2003b.
- [9] Kudeki, E., C. D. Fawcett, W. L. Ecklund, P. E. Johnston, and S. J. Franke, Equatorial 150-km irregularities observed at Pohnpei, Geophys. Res. Lett., 25, 4097, 1998.
- [10] Patra, A. K., and N. V. Rao, Radar observations of daytime 150-km echoes from outside the equatorial electrojet belt over Gadanki, Geophys. Res. Lett., 33, L03104, doi:10.1029/2005GL024564, 2006.
- [11] Patra, A. K., and N. V. Rao, 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, 2007.
- [12] Patra, A. K., T. Yokoyama, Y. Otsuka, and M. Yamamoto, Daytime 150-km echoes observed with the Equatorial Atmosphere Radar in Indonesia: First results, Geophys. Res. Lett., 35, L06810, doi:10.1029/2007GL033130, 2008.
- [13] Smith, E. K., Jr., Worldwide occurrence of sporadic E, Natl. Bur. Stand. Circ. 582, U.S. Govt. Print. Off., Washington DC, March 1957.
- [14] Tsunoda, R. T., and W. L. Ecklund, On a summer maximum in the occurrence frequency of 150 km (F1) radar echoes over Pohnpei, Geophys. Res. Lett., 31, L06810, doi:10.1029/2003GL018704, 2004.