

赤道大気レーダーを用いた高度 150 km 沿磁力線不規則構造のドリフト速度に関する研究

大塚雄一^{1*}・水谷徳仁^{1,2}・塩川和夫¹・Amit Patra³・横山竜宏⁴・山本 衛⁴

Drift velocities of 150-km Field-Aligned Irregularities observed by the Equatorial Atmosphere Radar

Yuichi Otsuka^{1*}, Naruhito Mizutani^{1,2}, Kazuo Shiokawa¹, Amit Patra³,
Tatsuhiko Yokoyama⁴ and Mamoru Yamamoto⁴

(2012年12月27日受付; 2013年6月27日受理)

Abstract: Between 130 and 170 km altitude in the daytime ionosphere, the so-called 150-km field-aligned irregularities (FAIs) have been observed since the 1960s at equatorial regions with several very high frequency (VHF) radars. We report statistical results of 150-km FAI drift velocities on a plane perpendicular to the geomagnetic field, acquired by analyzing the Doppler velocities of 150-km FAIs observed with the Equatorial Atmosphere Radar (EAR) at Kototabang, Indonesia during the period from Aug. 2007 to Oct. 2009. We found that the southward/upward perpendicular drift velocity of the 150-km FAIs tends to decrease in the afternoon and that this feature is consistent with that of F-region plasma drift velocities over the magnetic equator. The zonal component of the 150-km FAI drift velocity is westward and decreases with time, whereas the F-region plasma drift velocity observed with the incoherent scatter radar at Jicamarca, Peru, which is westward, reaches a maximum at about noon. The southward/upward and zonal drift velocities of the 150-km FAIs are smaller than that of the F-region plasma drift velocity by approximately 3 m/s and 25 m/s, respectively, on average. The large difference between the 150-km FAI and F-region plasma drift velocities may not arise from a difference in the magnetic latitudes at which their electric fields are generated. Electric fields generated at the altitude at which the 150-km FAIs occur may not be negligible.

要旨: 高度 130–170 km の電離圏において昼間に発生する「高度 150 km 沿磁力線不規則構造 (FAI) エコー」は、赤道域に設置された VHF レーダーによって 1960 年代以降、観測されてきた。本研究では、2007 年 8 月から 2009 年 10 月までに、インドネシアの赤道大気レーダー (EAR) によって昼間に観測された 150 km FAI エコーのドリフト速度の統計解析を行った。このデータと経験モデルから得

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所. Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601.

² 日本車輛製造株式会社. Nippon Sharyo, LTD., Sanbonmatsu-cho 1-1, Atsuta-ku, Nagoya 456-8691.

³ National Atmospheric Research Laboratory, Gadank, Chittoor Dist., Andhra Pradesh 517112, India.

⁴ 京都大学生存圏研究所. Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011.

* Corresponding author. E-mail: otsuka@stelab.nagoya-u.ac.jp

られたF領域プラズマ・ドリフト速度及び、ヒカマルカISレーダーによる観測結果との比較を行った。その結果、150 km FAI エコーの磁力線直交上/南向きドリフト速度は、午後において減少することが明らかになった。この傾向は、F領域プラズマ・ドリフト速度の場合と一致する。一方、150 km FAI エコーの西向きドリフト速度は、昼間において時間とともに減少する傾向があり、ヒカマルカの非干渉散乱レーダーで観測されたF領域プラズマ・ドリフト速度が示すような正午付近の極大は顕著ではなかった。150 km FAI ドリフト速度の大きさは、F領域プラズマ・ドリフト速度と比較し、平均で鉛直成分は約3 m/s 小さく、東西成分は25 m/s 小さいことが明らかになった。この違いを、電場生成領域であるE領域の、磁気緯度による違いで説明するのは難しく、高度150 km 付近で生成される局所的な電場が影響している可能性が考えられる。

1. はじめに

沿磁力線不規則構造 (Field-Aligned Irregularity; FAI) とは、電離圏プラズマの疎密構造が磁力線直交方向にできる現象であり、レーダーによって強い散乱エコーが観測される。FAI の一種である高度150 km FAI は、高度130 km から170 km 付近に出現し、昼間に観測される。150 km FAI エコーは、ヒカマルカ (ペルー、磁気緯度: 0.9° N) に設置されたレーダー (送信周波数: 50 MHz) で最初に観測された (Basley, 1964)。このエコーの特徴として、発生高度が午前中は時間とともに下降し、正午頃に最低になった後、午後は上昇することが挙げられる。このように、エコー強度の時間・高度断面図において、150 km FAI エコーはネックレスの形状に似ているということから、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、150 km FAI エコーはポンペイ (ミクロネシア、磁気緯度: 0.3° N) のレーダー (50 MHz) (Kudeki *et al.*, 1998)、サン・ルイス (ブラジル、磁気緯度: 1.3° S) のレーダー (30 MHz) (de Paula and Hysell, 2004)、コロゴ (コートジボワール、磁気緯度: 2.6° S) のHFレーダー (Blanc, 1996) のように磁気赤道付近でのみ観測されてきた。このため、150 km FAI は磁気赤道域特有の現象であると考えられ、その生成原因も磁場が水平になる磁気赤道を前提として考えられた (Tsunoda and Ecklund, 2004)。しかし、近年、磁気赤道から離れたガダンキ (インド、磁気緯度: 6.4° N) のレーダー (53 MHz) (Choudhary *et al.*, 2004) やコトタバン (インドネシア、磁気緯度: 10.4° S) の赤道大気レーダー (47 MHz) (Patra *et al.*, 2008) でも150 km FAI エコーが観測されることが判明した。このように、磁気赤道から離れた緯度においても150 km FAI が観測されるようになってきた。

電離圏電場は、 $E \times B$ ドリフトによって電離圏プラズマを動かすため、電離圏構造に影響を与える。したがって、電離圏ダイナミクスの研究には、電場の観測が必要である。従来、電離圏電場は、大型の非干渉散乱 (Incoherent Scatter; IS) レーダーによるプラズマ・ドリフト速度の観測や人工衛星搭載機器など高価な装置によって観測されてきた。ところが、150 km FAI が存在すれば、比較的小型の干渉散乱レーダーでもFAI エコーを観測することができる。このFAI エコーのドップラー速度は、電離圏電場による $E \times B$ ドリフト速度にほぼ等しいことが指摘されている (Kudeki and Fawcett, 1993)。これまでに、150 km FAI のドップラー

速度とF領域電場との比較は、主に南米域での観測に基づき行われてきたが、本研究では、東南アジア域に位置するコッタバン (0.2°S, 100.3°E) の赤道大気レーダー (Equatorial Atmosphere Radar; EAR) (Fukao *et al.*, 2003) を用いる。Patra *et al.* (2008) は、初めてEARを用いて150km FAIの観測を行い、数日間の観測から150km FAIのドップラー速度が電離圏電場のE×Bドリフトに近いことを示した。本研究では、150km FAIのドップラー速度の統計解析を行い、その結果をヒカマルカISレーダーによる観測結果及び、経験モデルから得られたE×Bドリフト速度との比較を行う。

2. 観測及びデータ解析方法

EARは、2001年にインドネシアのスマトラ島・コッタバンに建設された大気観測用のレーダーである (Fukao *et al.*, 2003)。EARは、560本の3素子八木アンテナを直径約110mの円形に配置したアンテナアレイを有するモノスタティック・パルス・ドップラー・レーダーであり、送信周波数は47MHz、送信尖頭出力は100kWである。

表1 赤道大気レーダー (EAR) による昼間の高度150km FAIの観測パラメータ
Table 1. Parameters of daytime 150-km FAI measurements by the Equatorial Atmosphere Radar (EAR).

観測日	2007年8月 22–28日	2007年9月～ 2009年10月	2008年2月
ビーム方向 (方位角, 天頂角)	(165°, 21.8°) (180°, 21.2°) (195°, 21.9°)	(135°, 28.5°) (150°, 24.0°) (165°, 21.8°) (180°, 21.2°) (195°, 21.9°) (210°, 24.3°) (225°, 29.2°) (240°, 38.8°)	(150°, 24.0°) (165°, 21.8°) (180°, 21.2°) (195°, 21.9°)
レンジ範囲	90.0–219.6 km		
高度範囲	79.6–202.8 km		
レンジ分解能	1.2 km		
パルス繰り返し時間	1.6 ms		
FFT点数	256 点		
パルスコード	8ビット・コンプリメンタリ符号		
コヒーレント積分	8 回		
インコヒーレント積分	5 回		
時間分解能	465 s	344 s	82 s

EARによる150 km FAIの観測は、2007年8月から開始され、以来、毎月1週間程度ずつ行われるようになった(Yokoyama *et al.*, 2009)。本研究では、2007年8月から2009年10月までに、EARを用いて150 km FAIの観測が行われた129日のデータを解析した。129日の観測日のうち、150 km FAI エコーが観測されたのは、90日である。表1に、主な観測パラメータを示す。インドのガダンキ・レーダーで観測された高度150 km付近におけるFAIのエコー強度は、非常に弱いことがPatra and Rao (2006)によって報告されており、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、弱いエコーでも検出できるように、サブパルス幅が $8\mu\text{s}$ の8ビット・コンプリメンタリ符号を用い、コヒーレント積分を8回、インコヒーレント積分を5回行った。観測レンジの範囲は、90.0-219.6 km、レンジ分解能は1.2 kmである。また、150 km FAI エコーの観測は、対流圏・成層圏観測と切り替えて行っているため、時間分解能は、2007年8月は465 s、2007年9月から2009年10月までは344 sである。ただし、2008年2月は、150 km FAI エコー観測のみを連続して行ったため、時間分解能は82 sである。

表1に示すように、FAI観測は、レーダー・ビームを磁力線に直交する方向に向けて行う。EARによる観測では複数のビームを操作しているため、各ビーム方向で得られたドップラー速度を合成することにより、磁力線直交面内におけるFAIのドリフト速度を求めることができる。本研究では、磁力線直交上/南向き成分と東向き成分の2方向に分けて調べる。磁力線直交上/南向きドリフト速度は、方位角 180° のビーム方向のドップラー速度を用いた。東西ドリフト速度は、方位角 165° と方位角 195° の2つのビーム方向のドップラー速度をベクトル合成して求めた。本研究では、ドップラー速度の誤差を小さくするため、エコー強度が -3 dB 以上のデータを用いた。FAIドリフト速度の季節・日変化を調べるため、データを南半球の夏(11-2月)、分点時(3, 4, 9, 10月)、冬(5-8月)の3つの季節、及びエコーが出現する09LT~15LTの間を1時間ごとに分割した。各季節において、1時間ごとに平均値を求め、ドップラー速度の平均日変化を求めた。

3. 結果及び考察

3.1. 磁力線直交上/南向きドリフト速度

EARによって観測された150 km FAI エコーの磁力線直交上/南向きドリフト速度の平均日変化を図1の太線で示す。エラーバーは、標準偏差を表す。図の左から順に、南半球の夏(11-2月)、分点時(3, 4, 9, 10月)、冬(5-8月)の平均値である。どの季節においても、ドリフト速度は、上/南向きであり、おおむね午後は時間とともに小さくなる傾向が見られる。

これらの観測結果をF領域における $E \times B$ ドリフト速度と比較するため、Scherliess and Fejer (1999)によるF領域鉛直プラズマ・ドリフト速度の経験モデルを用いた。この経験

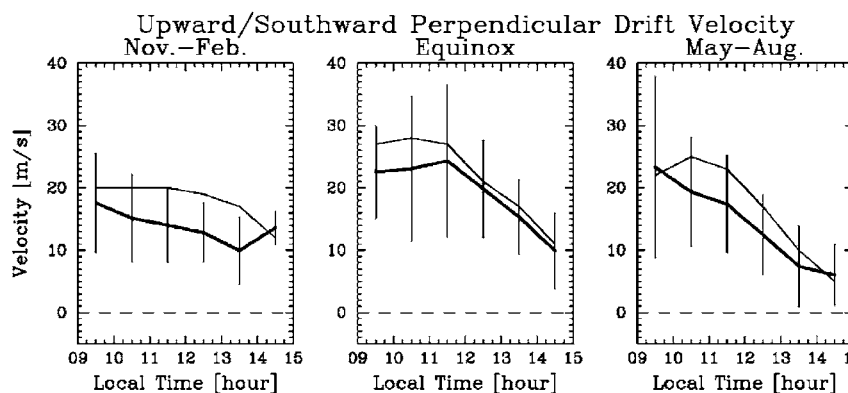


図 1 インドネシアの赤道大気レーダー (EAR) によって観測された 150 km FAI エコーの磁力線直交上 / 南向きドリフト速度の平均日変化 (太線). 左から, 11-2 月, 3, 4, 9, 10 月, 5-8 月の平均. 細線は, Scherliess and Fejer (1999) による F 領域鉛直プラズマ・ドリフト速度の経験モデルから得た, 各季節における F 領域鉛直プラズマ・ドリフト速度 (太陽活動度指数 $F_{10.7}$ の値は 70 とした). エラーバーは標準偏差を表す.

Fig. 1. Thick lines indicate the local time variations of the 150-km FAI drift velocity perpendicular to the geomagnetic field line (positive upward/southward), observed by the EAR for (left) Nov.-Feb., (middle) equinox, and (right) May-Aug. Thin lines indicate the vertical plasma drift velocity taken from the empirical model of Scherliess and Fejer (1999) under the condition of $F_{10.7} = 70$. Error bar represents standard deviation of the drift velocity.

モデルは, IS レーダー及び人工衛星による観測に基づいて作られており, 磁気赤道における F 領域鉛直プラズマ・ドリフト速度が地理経度, 太陽活動度の指数 $F_{10.7}$, 日, 地方時の関数として与えられる. 本研究では, 地理経度をコトタバンの経度である 100.3°E とし, $F_{10.7}$ の値は太陽極小期に相当する 70 とし, Scherliess and Fejer モデルからドリフト速度の値を求めた. 図より, 分点時 (3, 4, 9, 10 月) 及び冬 (5-8 月) では, 150 km FAI エコーの磁力線直交上 / 南向きドリフト速度と経験モデルから得た F 領域鉛直プラズマ・ドリフト速度は, 午後において時間とともに減少するという日変化の傾向が一致している. 冬 (5-8 月) では, 両速度とも, 正午前に極大値を持つという類似した特徴も見られる. 分点時及び冬の両速度の大きさを比較すると, 150 km FAI エコーの磁力線直交上 / 南向きドリフト速度の平均値は, ほとんどの時間帯において F 領域鉛直プラズマ・ドリフト速度よりも小さいが, その差は 5 m/s 以内であり, 標準偏差の大きさよりも小さい. したがって, 分点時及び冬においては, 150 km FAI エコーの磁力線直交上 / 南向きドリフト速度は背景電場による $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトとほぼ一致すると言える. しかし, 夏 (11-2 月) では, 150 km FAI エコーの磁力線直交上 / 南向きドリフト速度は, 11-13 LT 台の平均値において F 領域鉛直プラズマ・ドリフトの値よりも $6-8\text{ m/s}$ 小さく, 両速度の差は標準偏差よりも大きい. 年平均では, 150 km

FAI エコーの磁力線直交上 / 南向きドリフト速度は、F 領域鉛直プラズマ・ドリフト速度に比べて約 3 m/s 小さい。Scherliess and Fejer (1999) では、モデルから得られた値をヒカマルカ・レーダーや AE-E 衛星で観測された値の平均値と比較し、モデルの再現性を検証している。その結果、昼間のほとんどの時間帯において、モデルの値は、ヒカマルカの値とは 5 m/s 以内、AE-E 衛星の値とは 10 m/s 以内で一致することが示されている (Scherliess and Fejer (1999), 図 4-6)。したがって、コトタバンの 150 km FAI エコーのドリフト速度と F 領域鉛直ドリフト速度のモデルの値の違いは、Scherliess and Fejer (1999) のモデルの誤差によるものかもしれない。

3.2. 東西ドリフト速度

2007 年 8 月から 2009 年 10 月に EAR で観測された 150 km FAI エコーのドップラー速度から東西ドリフト速度を求めた。各季節における平均日変化を図 2 に太線で示す。図の左から順に、南半球の夏 (11-2 月), 分点時 (3, 4, 9, 10 月), 冬 (5-8 月) の平均値である。東西ドリフト速度は、方位角 165° と方位角 195° の 2 つのビーム方向のドップラー速度をベクトル合成して求めたが、150 km FAI エコーの強度は方位角依存性が強く (Yokoyama *et al.*, 2009), 方位角 195° のビームで十分な SN 比が得られなく、データが欠測する場合がある。このため、中図に示す分点時における 09 LT のデータが欠測になっている。図中のエラーバー

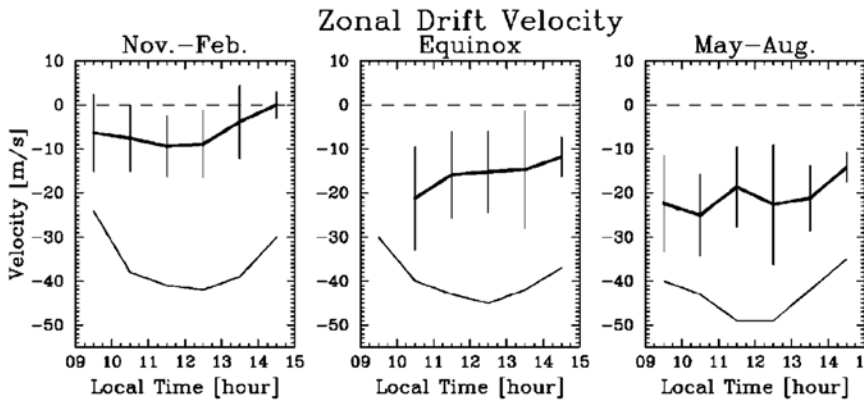


図 2 インドネシアの赤道大気レーダー (EAR) によって観測された 150 km FAI エコーの東向きドリフト速度の平均日変化 (太線)。細線は、ヒカマルカで観測された F 領域の東西ドリフト速度 (Fejer *et al.* 1991)。左から、11-2 月, 3, 4, 9, 10 月, 5-8 月の平均。エラーバーは標準偏差を表す。

Fig. 2. Thick lines indicate the local time variations of the 150-km FAI drift velocity perpendicular to the geomagnetic field line (positive eastward), observed by the EAR for (left) Nov.-Feb., (middle) equinox, and (right) May-Aug. Thin lines indicate the F-region zonal plasma drift velocity observed at Jicamarca (Fejer *et al.*, 1991). Error bar represents standard deviation of the drift velocity.

は、標準偏差を表す。また、比較のため、ヒカマルカで観測されたF領域の東西ドリフト速度 (Fejer *et al.*, 1991) を同図に細線で示す。ヒカマルカのF領域東西ドリフト速度は、1979年から1988年6月の間の観測のうち175日のデータを使用したものである。図2より、午後において時間とともに西向き速度が減少していくという日変化の傾向は、どの季節でも一致していることが分かる。しかし、ヒカマルカのF領域東西ドリフト速度では、正午付近に西向き速度の極大がどの季節においても見られるのに対し、コトタパンの150km FAI エコーのドップラー速度では地方時変化が小さく、そのような極大は見られない、という違いがある。また、どの季節においてもヒカマルカのF領域東西ドリフト速度に比べて150km FAI エコーの東西ドリフト速度は、15-35 m/s (年平均では25 m/s) 小さい。

ヒカマルカのISレーダーを用いて、Chau and Woodman (2004) は、150km FAI エコーの東西ドリフト速度とF領域東西ドリフト速度の比較を行い、両速度とも、正午頃に最も西向き速度が大きくなり、午後にかけて西向き速度が小さくなるという日変化が一致するが、150km FAI エコーの東西ドリフト速度は、F領域東西ドリフト速度よりも西向き速度が小さく、その差は特に正午前で大きくなる、と報告している。この150km FAI エコーとF領域の東西ドリフト速度の値の違いは、本論文で示したコトタパンにおける150km FAI エコーのドリフト速度とヒカマルカのF領域ドリフト速度の違いと同じ傾向である。しかし、コトタパンにおける150km FAI エコーのドリフト速度とF領域ドリフト速度との違いは、ヒカマルカにおけるものよりも大きい。また、150km FAI エコーのドリフト速度とF領域ドリフト速度との違いは、鉛直方向よりも東西方向に顕著にみられる。この傾向は、Chau and Woodman (2004) によるヒカマルカでの結果と一致する。Chau and Woodman (2004) は、東西方向のドリフト速度の差について考え得る原因を二つ挙げている。1つは、E領域の東西風の緯度変化が原因であるというものである。昼間はE領域が主な電場の生成領域であり、生成された電場は磁力線に沿って伝わるため、150km FAI エコーのドリフト速度及びF領域ドリフト速度はE領域で作られた電場による $E \times B$ ドリフトであると考えられる。電離圏電場は、ホール導電率が最大になる高度105kmにおいて、E層ダイナモにより生成されると考えられる。図3に示すように、磁気赤道であるヒカマルカで観測される150km FAI とF領域における電場は、それぞれの磁力線がつながるE領域で生成されたものと考えられる。両者の電場生成領域の磁気緯度は、 $4.7^\circ N$ と $9.5^\circ N$ であり、その間は 4.8° の違いがある。Chau and Woodman (2004) は、ヒカマルカで観測される150km FAI とF領域ドリフト速度との違いは平均で約4 m/sあり、この違いは、電場生成されるE領域の磁気緯度による違いに起因することを指摘した。ここでは、電場の経度依存性は小さく、コトタパンとヒカマルカの経度による違いは無視できると仮定し、この説明をコトタパンでのドリフト速度においても適用することにより、電場の磁気緯度変化について考察する。コトタパンは磁気緯度 $10.4^\circ S$ に位置し、観測される150km FAI の位置を通る磁力線は、磁気緯度 $11.9^\circ N$ で

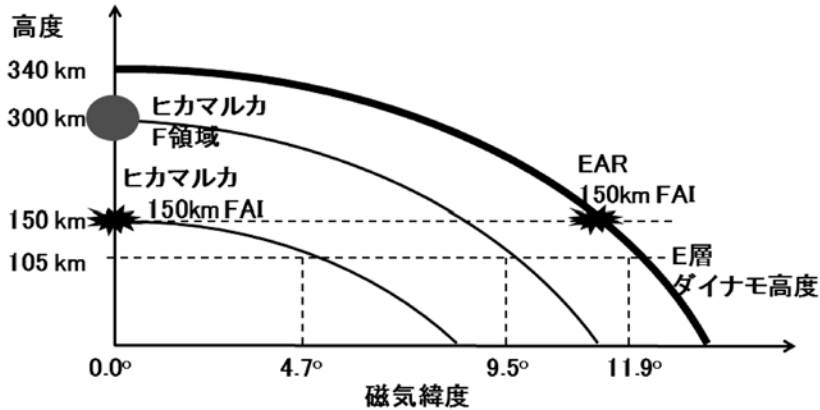


図 3 赤道大気レーダー (EAR) による 150 km FAI 観測と、ヒカマルカにおける 150 km FAI と F 領域観測の観測領域を示す南北・高度断面図. 図中の太い曲線は、EAR で観測される 150 km FAI が通る磁力線を表す. 細い曲線は、ヒカマルカで観測される 150 km FAI と F 領域の観測領域を通る磁力線を表す. 高度 105 km は、電場が生じられるダイナモ作用が働く高度である.

Fig. 3. Magnetic latitude and altitude cross-section showing locations of the 150 km FAI observed by the EAR and the 150-km FAI and F-region drift observed by the Jicamarca radar. Magnetic field lines connecting to the 150-km FAI observed by the EAR (thick line), and the 150-km FAI and F-region observed by Jicamarca (thin line) are also shown. The electric fields are considered to be generated at an altitude of 105 km.

電場生成領域 (高度 105 km) につながる. ヒカマルカで観測される 150 km FAI の電場生成領域である E 領域の緯度 4.7°N とは 6.2° の違いがあることから, コトタバンとヒカマルカの 150 km FAI エコードリフト速度の差は, それぞれの電場が生じられる E 領域の磁気緯度の違いに起因すると考えられる. しかし, コトタバんで観測される 150 km FAI の電場生成領域は磁気緯度 11.9°N であり, ヒカマルカでの F 領域ドリフトを起こす電場生成領域の磁気緯度 9.5°N との差は 2.4° である. この差は, ヒカマルカで観測される 150 km FAI と F 領域ドリフトの電場生成領域の緯度差 (4.8°) よりも小さい. しかし, コトタバンにおける 150 km FAI エコーのドリフト速度は, ヒカマルカの F 領域ドリフト速度と $15\text{--}35\text{ m/s}$ の差があり, その差は, ヒカマルカでの 150 km FAI と F 領域ドリフト速度の差よりも大きい. この結果より, 電場の磁気緯度変化では, コトタバんで観測された 150 km FAI のドリフト速度とヒカマルカの F 領域ドリフト速度との違いを説明することができない, と言える. ただし, ここでは, 電場の経度依存性は小さく, コトタバンとヒカマルカの経度による違いよりも磁気緯度変化が大きいと仮定した. しかし, この仮定は必ずしも正しいとは限らず, その妥当性を検証する必要がある.

昼間の電離圏では, ホール導電率が最も高い高度 105 km 付近の中性風による E 層ダイナモによって Sq 電流とよばれる電流 (ダイナモ電流) が流れ, 電流の発散がゼロになるよう

にダイナモ電場が作られる。このダイナモ電流は、磁気赤道を挟んで南北半球それぞれにおいて、約 30° E付近を中心に昼側電離圏を一周するように流れる。このことから、ダイナモ電流及びその電流から作られるダイナモ電場は、磁気緯度に強く依存し、また比較的経度変化は小さいと考えられる。もっとも、中性風は地磁気緯度よりもむしろ地理緯度に強く依存すると考えられること、コトタバンの緯度はそれぞれ 0° 、 12° Sと大きく異なることから、コトタバンの地理緯度の違いも、コトタバンの観測された150km FAI エコーのドリフト速度とヒカマルカのF領域ドリフト速度との違いに寄与している可能性が考えられる。さらに、ヒカマルカ付近は最も磁場の偏角が大きい経度域であり、このような特徴が電場の経度変化をもたらす可能性もある。Doumouya and Cohen (2004) は、高度約450kmを飛翔する衛星、CHAMP (CHallenging Minisatellite Payload) で観測された磁場データを解析し、赤道ジェット電流の強度に経度依存性があることを明らかにした。赤道ジェット電流は磁気赤道における電離圏電場と密接に関係しており、この結果は、電場の経度依存性が存在することを示している。本研究によって指摘された、コトタバンの150km FAI エコーのドリフト速度とヒカマルカのF領域ドリフト速度との違いについて、その原因が電離圏電場の磁気緯度変化に起因するものか、あるいは経度、地理緯度変化が主な原因であるかを区別するためには、多地点での電場の観測が望まれる。

Chau and Woodman (2004) は、ヒカマルカにおいて観測された150km FAI エコーのドリフト速度とF領域ドリフト速度が異なる原因の2つ目として、高度150km付近での東西中性風の影響を挙げている。高度150km付近に東西風が存在する場合、その場所において電場が生成される。そのために、F領域と高度150kmではドリフト速度が異なるというものである。ヒカマルカのISレーダーで観測されたF領域ドリフト速度は、プラズマの $E \times B$ ドリフトを観測しており、プラズマの巨視的な運動に対応すると考えられるが、メーター・スケールの電離圏電子密度構造であるFAIは、局所的に生成された分極電場による $E \times B$ ドリフトで運動しており、この速度は巨視的なプラズマの運動の速度と異なる可能性が考えられる。

4. ま と め

インドネシアの赤道大気レーダーで観測された150km FAI エコーのドリフト速度の統計解析を行い、以下のことを明らかにした。

1) 150km FAI エコーの磁力線直交上/南向きドリフト速度は、おおむね午後において時間とともに小さくなる傾向がある。このドリフト速度の日変化の傾向は、Scherrliess and Fejer (1999) によるF領域における鉛直プラズマ・ドリフト速度の経験モデルと一致することが分かった。一方で、150km FAI エコーのドリフト速度は、F領域プラズマ・ドリフトに比べて平均約3m/s小さいことが明らかになった。

2) 150 km FAI エコーの西向きドリフト速度は、昼間において時間とともに減少することが明らかになった。ヒカマルカにおける F 領域プラズマの東西ドリフトは、正午付近に西向き速度の極大がみられるが、コトタバンにおける 150 km FAI エコーのドップラー速度にはそのような極大は見られない。また、150 km FAI エコーのドップラー速度の値は、F 領域プラズマ・ドリフト速度よりも平均約 25 m/s 小さいことが明らかになった。Chau and Woodman (2004) で指摘されている、電場生成領域である E 領域の緯度による違いでは、両速度の差を説明するのは難しい。高度 150 km 付近で生成される局所的な電場が影響している可能性が考えられる。

文 献

- Balsley, B.B. (1964): Evidence of a stratified echoing region at 150 kilometers in the vicinity of the magnetic equator during daylight hours. *J. Geophys. Res.*, **69**, 1925–1930, doi: 10.1029/JZ069i009p01925.
- Blanc, E., Mercandalli, B. and Houngninou, E. (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**, 645–648, doi: 10.1029/96GL00415.
- Chau, J.L. and Woodman, R.F. (2004): Daytime vertical and zonal velocities from 150-km echoes: Their relevance to *F*-region dynamics. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L17801, doi: 10.1029/2004GL020800.
- Choudhary, R.K., St.-Maurice, J.-P. and Mahajan, K.K. (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 Hysell, D.L. (2004): The São Luís 30 MHz coherent scatter ionospheric radar: System description and initial results. *Radio Sci.*, **39**, RS1014, doi: 10.1029/2003RS002914.
- Doumouya, V. and Cohen, Y. (2004): Improving and testing the empirical equatorial electrojet model with CHAMP satellite data. *Ann. Geophys.*, **22**, 3323–3333, doi: 10.5194/angeo-22-3323-2004.
- Fejer, B.G., de Paula, E.R., González, S.A. and Woodman, R.F. (1991): Average vertical and zonal *F* region plasma drifts over Jicamarca. *J. Geophys. Res.*, **96**, 13901–13906, doi: 10.1029/91JA01171.
- Fukao, S., Hashiguchi, H., Yamamoto, M., Tsuda, T., Nakamura, T., Yamamoto, M.K., Sato, T., Hagio, M. and Yabugaki, Y. (2003): Equatorial Atmosphere Radar (EAR): System description and first results. *Radio Sci.*, **38**, 1053, doi: 10.1029/2002RS002767.
- Kudeki, E. and Fawcett, C.D. (1993): High resolution observations of 150 km echoes at Jicamarca. *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 1987–1990, doi: 10.1029/93GL01256.
- Kudeki, E., Fawcett, C.D., Ecklund, W.L., Johnston, P.E. and Franke, S.J. (1998): Equatorial 150-km irregularities observed at Pohnpei. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 4079–4082, doi: 10.1029/1998GL090069.
- Patra, A.K. and Rao, N.V. (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., Yokoyama, T., Otsuka, Y. and Yamamoto, M. (2008): Daytime 150-km echoes observed with the Equatorial Atmosphere Radar in Indonesia: First results. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L06101, doi: 10.1029/2007GL033130.
- Scherliess, L. and Fejer, B.G. (1999): Radar and satellite global equatorial *F* region vertical drift model. *J. Geophys. Res.*, **104**, 6829–6842, doi: 10.1029/1999JA900025.
- Tsunoda, R.T. and Ecklund, W.L. (2004): On a summer maximum in the occurrence frequency of 150 km (*F_i*) radar echoes over Pohnpei. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L06810, doi: 10.1029/2003GL018704.
- Yokoyama, T., Hysell, D.L., Patra, A.K., Otsuka, Y. and Yamamoto, M. (2009): Zonal asymmetry of daytime 150-km echoes observed by Equatorial Atmosphere Radar in Indonesia. *Ann. Geophys.*, **27**, 967–974, doi: 10.5194/angeo-27-967-2009.