

3-2-4 赤道ジェット電流の変動と赤道スプレッド F

3-2-4 Relationship between Equatorial Electrojet Variation and Spread-F Occurrence

上本純平 丸山 隆 齋藤 享 石井 守 吉村玲子
 UEMOTO Jyunpei, MARUYAMA Takashi, SAITO Susumu, ISHII Mamoru, and
 YOSHIMURA Reiko

要旨

赤道域電離圏 F 領域において日没から夜半にかけて発生する赤道スプレッド F (Equatorial spread-F ; 以下 ESF と呼ぶ) は、衛星測位に深刻な悪影響を及ぼす恐れのある電子密度不規則構造である。ESF の発生に関わる物理量、及び物理プロセスは多岐に渡る事が知られているが、近年観測データの解析から日中の赤道ジェット電流 (Equatorial electrojet ; 以下 EEJ と呼ぶ) と ESF 発生との間の関連性が明らかにされ始めている。本稿では、SEALION データの解析から見出された結果を中心に EEJ と ESF の関連性、及び両者を結び付けているメカニズムについて述べる。

Equatorial spread-F (ESF) is electron density irregularity occurring in the post sunset equatorial F-region ionosphere which causes interruption and degradation to various satellite communication and navigation systems. It has been clarified that various physical parameters and processes control ESF occurrence and development. In addition to such controlling factors, recent observations suggest a relationship between ESF occurrence and equatorial electrojet (EEJ) strength. We discuss the recent observational results including a data analysis of SEALION observations and possible mechanisms of the relationship between ESF and EEJ.

[キーワード]

赤道域スプレッド F, 赤道ジェット電流, プレリバーサルエンハンスメント
 Equatorial spread-F, Equatorial electrojet, Pre-reversal enhancement

1 はじめに

日没から夜半にかけて、赤道域電離圏 F 領域ではしばしば赤道スプレッド F (Equatorial spread-F ; 以下 ESF と呼ぶ) と呼ばれる電子密度の不規則構造が生じる事が知られている。F 領域下端で発生するこの ESF は、非線形的に時間発展し、爆発的に上昇しながら緯度方向に広がる可能性を有しており、時には日本南部の緯度帯まで到達する [1]。このように非線形発展した不規則構造の擾乱スケールは、数 cm から数百 km のオーダーと幅広く、様々な周波数帯の電波に深刻な悪影響を及ぼす。このような背景から、GPS 測位に代表されるように地上-衛星間の高度な電波利用技術が身近なサービスとして生活に浸透しつつある現在、電波伝播障害を引き起こす恐れのある ESF

の発生予測の重要性が世界的に広く認識されている。この ESF 発生に関わる物理量、及び物理プロセスは多岐に渡り、本特集でも ESF の発展に関連するいくつかの物理プロセスについて述べられているが (例えば、文献 [2])、本稿では、近年観測研究から明らかにされつつある赤道ジェット電流 (Equatorial electrojet ; 以下 EEJ と呼ぶ) と ESF の関連性について、SEALION データの解析から見出された結果を中心に述べる。

2 背景

2.1 赤道ジェット電流 (Equatorial electrojet)

水平北向きの磁力線と東西電場から生じる上下方向のプラズマの $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトは赤道域電離圏

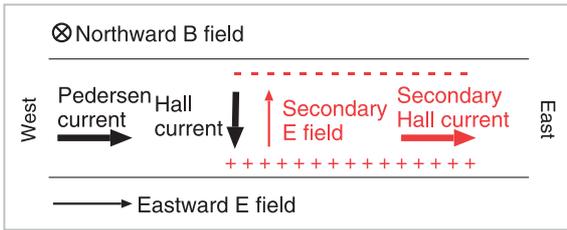


図1 Cowling 効果の模式図

黒矢印で示された Hall 電流により、高度方向に電荷分離が生じる。これを解消する向きに上向きの二次的な電場が生じ、その電場によって二次的な東向きの Hall 電流が駆動される。

の構造とダイナミクスに大きな影響を与えている。F 領域における $E \times B$ ドリフトは基本的に昼間上向きである。この上向き $E \times B$ ドリフトを引き起こす東向きの電場は E 領域ダイナモによって駆動された電場が等電位とみなせる磁力線を介して F 領域へマッピングされたものである。このダイナモ電場と同時に E 領域において駆動される東西方向の電流は、磁気赤道近傍 ($\pm 3^\circ$ 以内) においては Cowling 効果によって強められる。図 1 に Cowling 効果の模式図を示す。

この図は、磁気赤道面を南から眺めた図であり、磁場の方向は紙面に向かう方向である。東向きの電場が存在した場合、電場と同じ方向に Pedersen 電流が、電場と磁場に垂直な方向に Hall 電流が流れる。この Hall 電流により、上下方向に電荷分離が生じると同時に、この電荷分離を解消しようとして上向きの分極電場が生じる。この分極電場による二次的な Hall 電流は背景の東向きの電場によって生じた Pedersen 電流と同じく東向きとなり、電流が強められる事になる。EEJ とはこの Cowling 効果によって強められた電流を指す^[3]。通常、東向きの EEJ が昼間に卓越するが、西向きの EEJ が観測されることもままある。このような西向きの EEJ は counter EEJ (以下 CEJ と呼ぶ) と呼ばれている。EEJ は地磁気の水平成分に比較的大きな変動をもたらす為、地磁気観測データの解析に基づく研究がこれまで多く為されてきた (例えば、文献^[4])。地磁気の水平成分を用いて EEJ を評価する場合、磁気圏を流れる電流 (赤道環電流等) によってもたらされるグローバルな変動成分を除去する必要がある有り、磁気赤道近傍の水平成分と、磁気赤道からやや離れた低緯度地点のそれとの残差を EEJ の強度の指標とする手法が

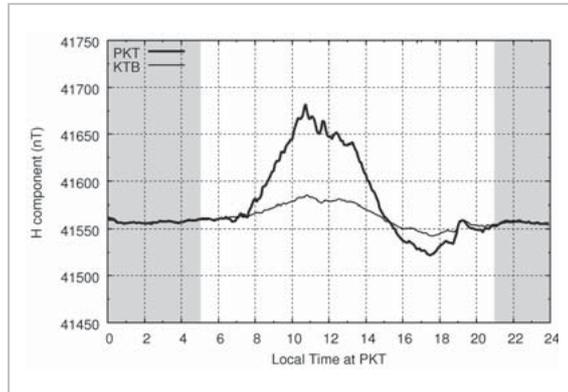


図2 地磁気の水平成分を用いた EEJ 評価手法の例

太線は磁気赤道近傍の、細線は影をつけた 21-05 時 LT の時間帯で磁気赤道近傍の水平成分との差が最小となるようにしたオフセット込みの低緯度の水平成分である。磁気赤道近傍、低緯度の水平成分は、それぞれ 2008 年 4 月 12 日に Phuket (地理緯度 8.1° 、地理経度 98.3° 、磁気緯度 0.1°)、Kototabang (地理緯度 -0.2° 、地理経度 100.3° 、磁気緯度 -10.0°) で観測された値である。両線に囲まれた部分が EEJ 由来の地磁気変動であり、15-19 時 LT 付近では CEJ が発生している。

よく用いられる。図 2 に地磁気の水平成分を用いた EEJ 評価手法の例を示す。

太線、細線はそれぞれ、磁気赤道近傍、磁気赤道からやや離れた低緯度地点の地磁気の水平成分の一日の変動を示しており、両線に囲まれた部分が EEJ 由来の地磁気変動である。

2.2 プレリバーサルエンハンスメント (Pre-reversal enhancement)

E 領域ダイナモによって駆動される昼間の上向き $E \times B$ ドリフトは、夜間においては下向きとなる。ドリフトの向きは日没の時間帯に反転するが、反転前に上向き $E \times B$ ドリフトがしばしば増大する事が良く知られている。この現象はプレリバーサルエンハンスメント (pre-reversal enhancement; 以下 PRE と呼ぶ) と呼ばれている (図 3)。

PRE の強度は、IS レーダ、衛星によるイオンドリフト観測、イオノゾンデ観測等から導出することが出来る。最も正確に PRE の強度を導出できるのは IS レーダであるが、赤道域に展開されている IS レーダは少なく、イオノゾンデ観測によって得られる F 層高度下端 ($h'F$) の LT 変化から導出する方法がよく用いられる。 $h'F$ はイオノゾンデ観測データであるイオノグラム上の見掛けの高度

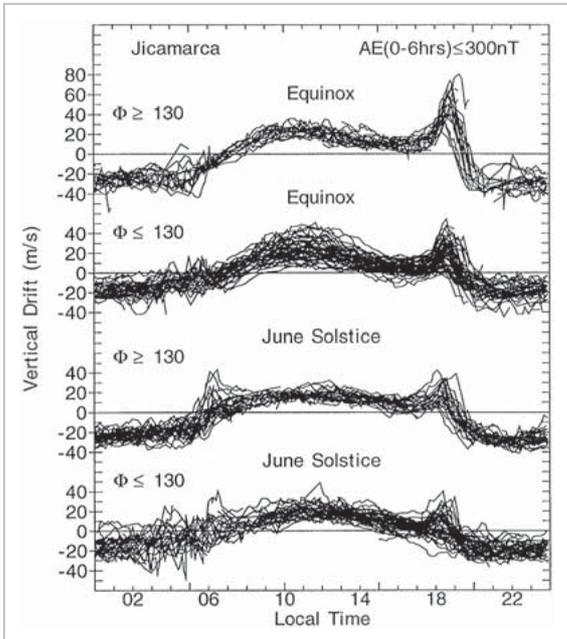


図3 Jicamarca (地理緯度 -11.9° 、地理経度 283.2° 、伏角緯度 1.0°) の IS レーダによって観測された電離圏 F 領域の上下方向のドリフト [7]

ドリフトの値の正負は、それぞれ上下方向に対応する。18 時 LT 付近において、ドリフト方向の反転前に上向きドリフトの増大 (PRE) が起きている様子が見取れる。

であり、一般的に実高度とは異なる。これは、電離圏中においてはプラズマの存在によって、電波の伝播速度が真空中のそれより小さくなる為であるが、夜間は地上から F 層下端までの電子密度が著しく減少する為、実高度との差が小さくなり、磁気赤道における $h'F$ の時間変化は $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトの寄与として見なせる事が文献 [5] によって示されている。これまでの観測によって、PRE の出現特性は太陽活動度、季節、地理経度、地磁気活動度に依存する事が明らかにされているが (例えば、文献 [6] [7])、その一方で激しい日々変動を示すことが知られており、日々変動の予測は達成されていない。下で述べるように、PRE は ESF の発生、及び発展にとって重要な役割を担っているため、日々変動の解明が重要視されている。一方、PRE の発生メカニズムに関する研究は、数値計算によって盛んに行われており、F 領域ダイナモが発端となっていることは明らかにされている (例えば、文献 [8] [9])。しかしながら、F 領域ダイナモと PRE の間を結ぶ物理プロセスは単純ではない。現在までに提案された PRE の発生メカニズムの

中で有力視されているのは、文献 [10] に述べられている F 領域ダイナモによる急激な鉛直電場変化が curl free 条件を満たすために水平電場を生成するというメカニズム、文献 [11] に述べられている低緯度 E 領域で起こる負電荷集積を介したメカニズム、及び文献 [12] に述べられている EEJ の発散電流と F 領域ダイナモによって発生する鉛直電流の接続を介したメカニズムである。文献 [8] では数値計算に基づき、上記の三つのメカニズムを比較し、文献 [10] に述べられているメカニズムが本質的であり、残りのメカニズムは補助的であると報告されているが、どのメカニズムも観測的な検証に乏しいのが現状である。

2.3 赤道スプレッド F (Equatorial spread-F)

日没付近で発生する ESF の発展の初期段階は、レーリー・テラー不安定性によって説明できることが明らかにされている (例えば、文献 [13])。図 4 に赤道域電離圏 F 領域におけるレーリー・テラー不安定性の模式図を示す。

電離圏 F 領域の電子密度ピークより低高度の領域では、プラズマの密度は高高度の方が高くなっている。大気重力波等の影響によって東西方向に波打ったような等密度面 (密度揺らぎ) が形成され、更に東向きの電流が存在すると、図のような分極電荷が発生する。この分極電荷による分極電場の $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトは低密度領域では上向き、高密度領域では下向きとなる為、密度揺らぎの振幅は更に大きくなり、不安定性が増大する。実際には、図 4 のように単純では無く、その不安定成長に絡む物理量、及び物理プロセスは文献 [14] によって述べられているように多岐に渡り、ESF の発生メカニズムは複雑である。複雑にしている要因の一つは、磁力線に沿った電気伝導度が非常に大きい為、レーリー・テラー不安定性の線形成長率を考慮する場合には、磁力線に沿った物理量の積分値を考える必要があるという事である。例えば、文献 [2] によって述べられているような磁気子午面の赤道横断風による ESF 成長の抑制効果は、磁力線を介した電気結合を考慮していない図 4 からは説明できない。もう一つの大きな要因は、ある物理量が他の物理量を変化させる事で ESF の成長率に間接的な影響を及ぼすという効果である。

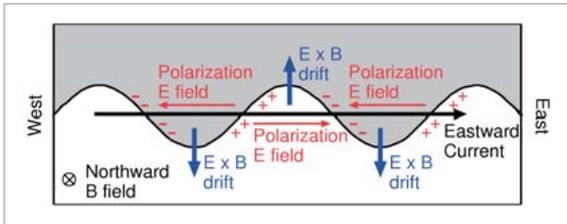


図4 レーリー・テラー不安定の模式図

東西方向の密度揺らぎ中を黒矢印のような東向きの電流が流れると、電荷分離が生じ、赤矢印のような分極電場が生じる。この分極電場による $E \times B$ ドリフト (青矢印) の向きは、電子密度の高い部分 (灰色部) では下向き、低い部分 (白色部) では上向きとなり、密度揺らぎの振幅が更に大きくなる。

例えば、東向きの電場は、図4に示された東向きの電流を強める事でESFの成長を促進すると同時に、上向き $E \times B$ ドリフトによる電離圏高度の上昇を引き起こし、イオン-中性大気衝突周波数を小さくする事でも不安定を増長させるという間接的な影響を及ぼしている。

このように、様々な物理量、及び複雑な物理プロセスに支配されているESFの成長率であるが、これらの物理量のうち、(完全な一対一対応は無いものの)最も大きな影響を及ぼす物理量はPREである事が過去の研究から実証されており(例えば、文献[14])、従ってPREの強度の予測がESFの発生、及び成長の予測実現にとっての第一歩であると言える。

3 EEJとPRE、及びESFの関連性

3.1 日中のEEJ

近年、観測データの解析から日中のEEJと日没付近のPREの強度、及びESF発生との関連性が指摘され始めている(例えば、文献[15][16])。日中のEEJとの関連性はESF発生予測にとって重要な意味を持っている。それは、日中のEEJは日没付近のPRE、及び日没後のESFの発生に先行して予め観測することができる為、ESFの発生予測に役立つ可能性を有するからである。文献[15]では1989年9月から12月の期間において、インドで取得されたVHF帯のシンチレーションデータと磁場データの解析から、11時LTにおけるEEJの強さと日没後におけるESFの発達との間に正の相関があると述べられている(図5)。

また、文献[16]では2001年から2005年の期間の

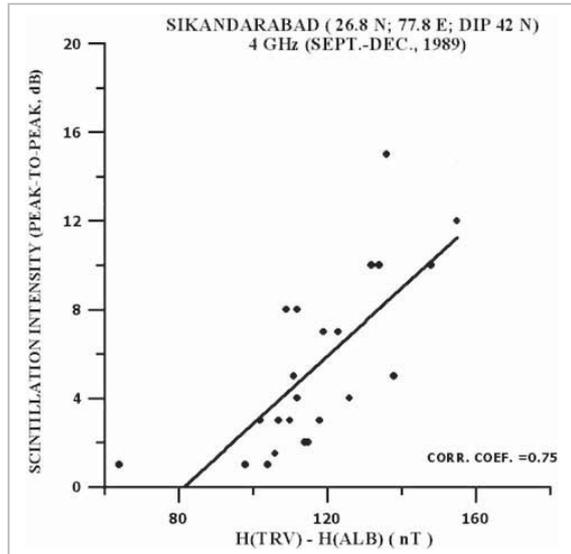


図5 1989年9月から12月の期間において観測された日没後の周波数4 GHzのシンチレーション強度と日中のEEJの相関図[15]

シンチレーション強度はSikandarabad(地理緯度26.8°、地理経度77.8°、磁気緯度20.8°)において観測され、EEJはTrivandrum(地理緯度8.5°、地理経度76.8°、磁気緯度0.3°)、及びAlibag(地理緯度18.6°、地理経度72.8°、磁気緯度13.4°)における地磁気観測データから導出されている。

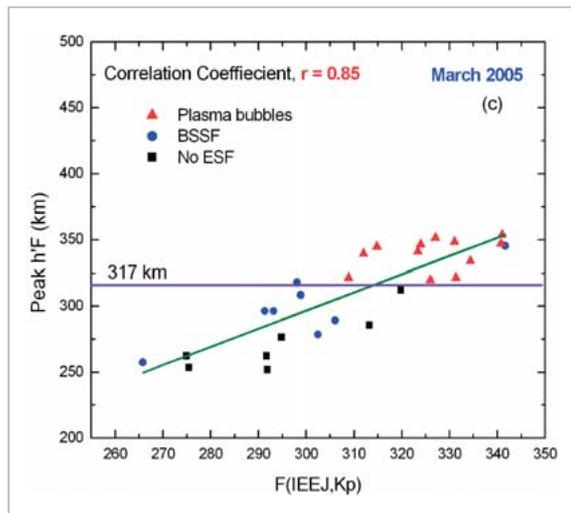


図6 2005年3月におけるTrivandrumのイオノゾンデから導出された日没付近の $h'F$ と日中のEEJの時間積分値との相関図[16]

EEJは、Tirunelveli(地理緯度8.7°、地理経度77.7°、磁気緯度0.6°)、及びAlibagにおける地磁気観測データから導出されている。なお、横軸の $F(IEEJ,Kp)$ は、EEJと Kp の関数である。

3月にインドで取得された磁場観測データ、及びイオノゾンデデータを解析し、07-17時LTのEEJの時間積分値とESF発生の有無の間に良い相関があると述べられている(図6)。

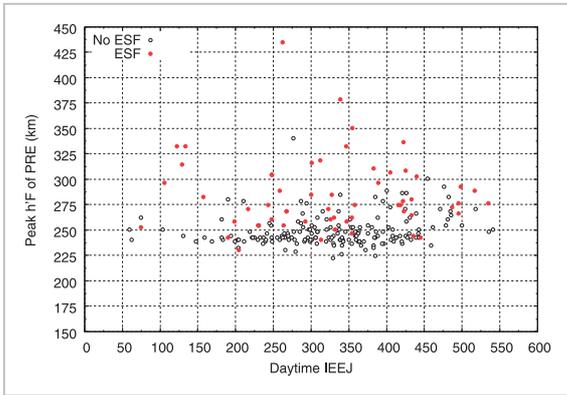


図7 2007年11月から2008年10月の1年間の東南アジアにおける日没付近の $h'F$ と日中のEEJの時間積分値の相関図

$h'F$ はChumphon(地理緯度10.7°、地理経度99.4°、磁気緯度3.3°)のイオノゾンデから導出された値であり、EEJはPhuket、及びKototabangから導出された値である。赤、白の点はそれぞれESF発生の有無を示す。

どちらの解析においても、イオノゾンデによって取得された $h'F$ から導出されたPREの強度との比較を行っており、EEJとPREの間にも良い相関があることが示されている(図6参照)。しかしながら、これらの結果は、全季節を網羅した解析結果ではなく、少なくとも東南アジア域においては、全季節を通じてこのような正の相関があるわけでは無いことが図7のSEALIONのデータ解析結果から見て取れる。

3.2 日没前のEEJ

一方、SEALIONデータの解析から日没1-2時間前のEEJの時間積分値とPREの間には全季節にわたって一貫した興味深い関係があることが最近明らかになってきた(図8)。

それは、日没前のEEJの時間積分値が小さい日には、PREは抑制される傾向にあるということである。また、ESF発生の有無に関しても、日没前のEEJの時間積分値が小さいと発生が抑制されている傾向が見て取れる。これは、PREがレーリー・テラー不安定性の成長率に最も大きく影響することを踏まえると妥当な結果である。一方、日没前のEEJの時間積分値が正の時は、日没前のEEJの時間積分値とPREの強度、及びESFの発生の関連性については、ばらつきが大きく明瞭な関係は見出せない。これは、PREの強度は必ずし

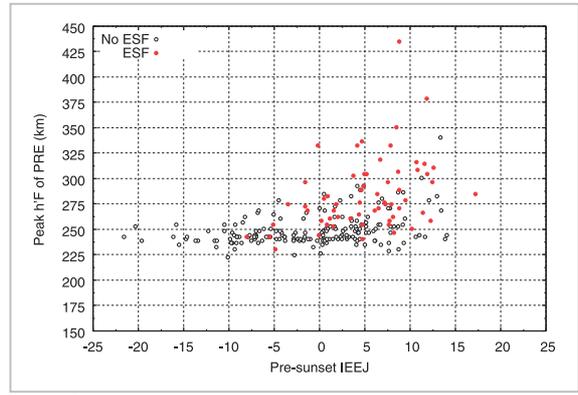


図8 2007年11月から2008年10月の1年間の東南アジアにおける日没付近の $h'F$ と日没1-2時間前のEEJの時間積分値の相関図

時間積分をするにあたって、東向きを正にとっている。

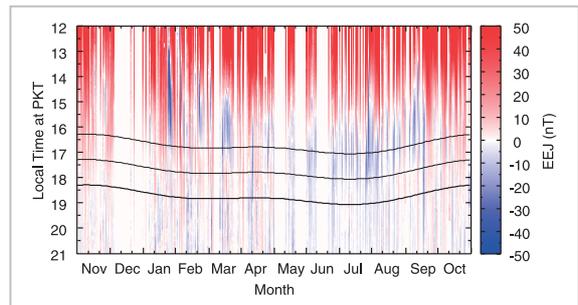


図9 2007年11月から2008年10月の1年間のPhuketにおけるEEJの変動の様子

太線は、PhuketのE領域高度における日没時間、二本の細線は、それぞれ日没1、2時間前の時間を示す。

も日没前のEEJの時間積分値の大きさだけでは決まらないことを示唆している。図9に2007年11月から2008年10月の1年間の12-21時LTにおけるEEJの年変動をカラーコンターで示す。

図中の赤い部分はEEJが正(東向き)であることを示し、青い部分はEEJが負(西向き)、つまりCEJが発生していることを示している。この図から午後15時LT付近においてCEJの発生する確率が高い傾向が見て取れる。このCEJは文献[17]の分類によるとevening CEJに相当する。また、その発生頻度は夏季に高く、冬季に低くなっている様子が見て取れる。また、evening CEJの開始時間も季節依存性を持っており、夏季に最も遅いLTで発生している傾向が見て取れる。図中の太い曲線はE領域高度(100 km)における日没時間を、2本の細い曲線に囲まれた部分はそれぞれ日

没 1-2 時間前をそれぞれ示しており、この曲線に囲まれた部分が日没前の EEJ の積分範囲を示している。EEJ の時間積分範囲とカラーコンターの比較から、日没前の EEJ の時間積分値が負となるのは evening CEJ の発生に相当することが見て取れる。従って、図 8 で示した結果と併せて考えると evening CEJ が発生している日には、PRE が抑制されていると言える。

3.3 日没前の EEJ と日没付近の PRE、日没後の ESF を結ぶ物理プロセス

図 8、及び図 9 は、日没前の EEJ の時間積分値が負、つまり evening CEJ の発生日には、PRE が抑制される事を示している。また、ESF の発生の有無に関しても、EEJ 積分値が小さい日に ESF の発生が抑制されている事が見て取れる。ESF 発生の抑制に関しては、PRE がレーリー・テラー不安定性の成長率に最も大きく影響することを踏まえると妥当な結果である一方で、日没前の EEJ の時間積分値と日没付近の PRE の関係を説明する事は容易ではない。この日没前の EEJ の時間積分値と PRE を関連付ける物理プロセスとしては、少なくとも次の 2 つの可能性が考えられる。

一つ目の物理プロセスは昼間の EEJ と日没付近の F 領域の電流を介した接続である。文献[12]は数値計算によって日没付近の F 領域ダイナモによって生じる鉛直電流と EEJ が接続している可能性を報告している(図 10)。

この接続が実現されている場合、日没付近の E 領域の電気伝導度が低下している領域にも東向き電流が流れる必要があり、その為、電気伝導度の低い E 領域により強い東向き電場が必要とされ、その東向き電場が PRE を強めると述べている。文献[18]は、E 領域における 3 m スケールのイレギュラリティの観測から、EEJ の発散電流の存在を観測的に示している。evening CEJ 発生日に関する PRE の計算は行われていないが、evening CEJ が発生している日は、日没付近の E 領域では西向きの電流が流れていると考えられる。この場合、文献[12]によって提唱された PRE 発生メカニズムはトリガーされず、従って PRE の強度が抑制されると考える事ができる。但し、図 8 の結果は、同じ経度において得られた日没前の EEJ

の時間積分値と日没後の PRE の強度の比較を行っているので、厳密には空間変化を捉えていない事に注意する必要がある。

二つ目の物理プロセスは、E 領域ダイナモ電場による磁気子午面内のプラズマ分布、言い換えると電気伝導度の変化を介した接続である。磁気子午面内のプラズマ分布と PRE の強さ、及び ESF の発生の有無に関連性は、特にインドにおいてこれまで広く研究されてきている。文献[15]は日没付近の PRE と日没後の低緯度における赤道異常の強度の間に正の相関があると報告している。文献[19]は ESF 発生日の日没直前には、インドにおける観測から赤道異常の電子密度ピーク(クレスト)付近、及びクレストの内側の緯度帯においてプラズマ密度が大きくなることを統計的に示している(図 11)。

文献[20]は、インドにおいて取得されたビーコン TEC と ESF の比較から、16-18.75 時 LT の時間範囲における赤道異常が対称、かつ強い時に ESF が発生することを見出した。また、文献[21]は数値計算によって赤道異常内側のプラズマ分布と PRE が関連する可能性を示唆している。ESF 発生領域により近い赤道異常内側のプラズマ分布が日没 1-2 時間前の E 領域ダイナモ電場によって変化させられることは十分考えられることである。従って図 8 は、赤道異常内側のプラズマ分布を介した日没 1-2 時間前のダイナモと PRE の関連を観測的に捉えたものとも考えることも出来る。

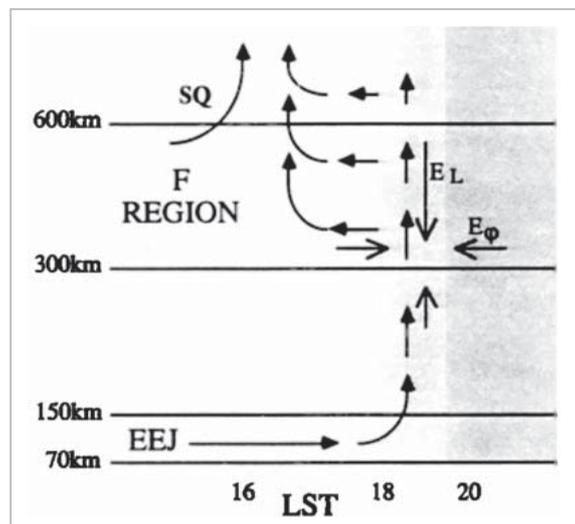


図 10 昼間の EEJ と F 領域の鉛直電流の接続を示した模式図[12]

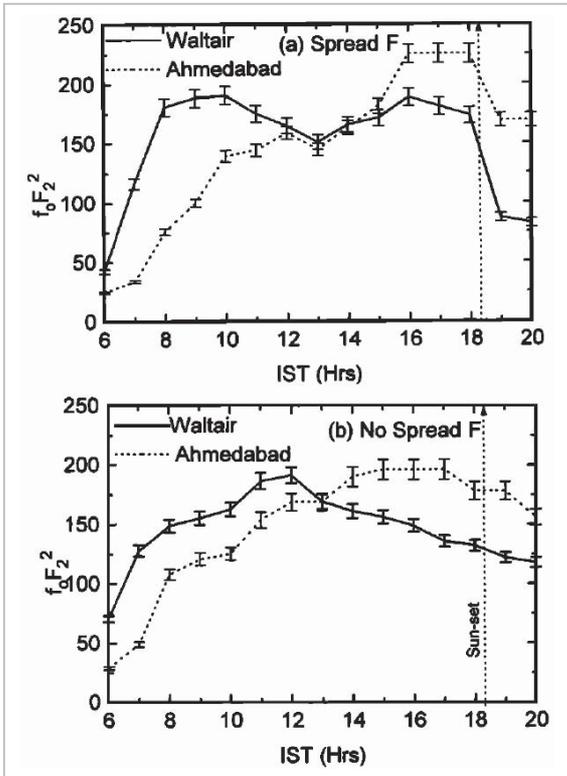


図11 ESF 発生日と非発生日における日没直前の赤道異常の発達の違い[19]

1991年3、4、9、及び10月における Waltair (地理緯度 17.7°、地理経度 83.3°、伏角緯度 20.0°)、及び Ahmedabad (地理緯度 23.0°、地理経度 72.4°、伏角緯度 31.5°) のイオゾンデ観測から導出された foF2 の時間変化。上図 (a)、下図 (b) はそれぞれ ESF 発生日と非発生日の foF2 の時間変化である。

2.2 で述べたように、文献[8]は、文献[12]によって提唱された EEJ と F 領域の鉛直電流の接続を介した PRE のメカニズムは補助的であることをモデル計算から示している。しかしながら、CEJ を考慮したモデル計算は行われていない事、及びモデル内の電気伝導度は経験モデルに基づいており、モデル内で計算される $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトと電気伝導度は self-consistent ではない事を踏まえると、ここで挙げた日没前の EEJ と PRE を結ぶ二つの物理プロセスは、文献[8]のモデルの適用範囲外であると言える。従って文献[8]の計算結果を持って本稿で述べた日没前の EEJ と PRE、及び

ESF 発生との関連性を否定する事はできず、今後、CEJ を含めた EEJ と ESF を結ぶ物理プロセスの検証が必要とされる。

4 むすび

本稿では近年観測研究から明らかにされつつある EEJ と ESF 発生との PRE を介した関連性について述べた。日中の EEJ と日没後の PRE、及び ESF 発生の間には必ずしも全季節を通じて正の相関関係が成り立つわけではないことが明らかになってきた一方で、日没 1-2 時間前の EEJ の時間積分値が負、つまり日没直前の時間帯に CEJ が発生していた場合、日没付近の PRE、及び日没後の ESF 発生は全季節を通じて抑制されていることが新たに明らかになってきた。日没前の EEJ は PRE、及び ESF の発生に対して先行して観測することができる事を踏まえると、日没前の EEJ と PRE、及び ESF 発生との関係は、ESF の発生予測実現の為に今後更に研究が進められるべき課題である。日没直前の CEJ と日没後の PRE を結びつける物理プロセスはまだ解明されておらず、現段階で少なくとも、日没前の EEJ と日没付近の F 領域の電流の接続を介したプロセス、及び E 領域ダイナモ電場による磁気子午面内のプラズマ分布の変化を介したプロセスの二通りの可能性が考えられる。今後、経度の離れた領域における EEJ と日没付近の PRE の同時観測、及び同磁気子午面内における EEJ と赤道異常内側のプラズマ分布、日没付近の PRE の同時観測から両者を結びつける物理プロセスを明らかにしていく必要がある。

謝辞

Kototabang の地磁気観測データは、名古屋大学太陽地球環境研究所、京都大学生存圏研究所、インドネシア航空宇宙庁による共同観測データであり、提供頂きました事に感謝の意を表します。

参考文献

- 1 馬冠一, 丸山隆, "東アジア経度の高密度 GPS 受信機網による磁気嵐時スーパーバブルの観測", 情報通信研究機構季報, 本特集号, 3-2-9, 2009.
- 2 齋藤享, 丸山隆, "プラズマバブルの発生における赤道横断熱圏風の効果", 情報通信研究機構季報, 本特集号, 3-2-2, 2009.
- 3 Chapman, S., "The equatorial electrojet as detected from the abnormal electric current distribution above Huancayo, Peru and elsewhere", *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, Vol.44, pp.368-390, 1951.
- 4 Doumouya, V., J. Vassal, Y. Cohen, O. Fambitakoye, and M. Menvielle, "Equatorial electrojet at African longitudes: first results from magnetic measurements", *Annales Geophysicae*, Vol.16, pp.658-676, 1998.
- 5 Bittencourt, J. A. and M. A. Abdu, "A theoretical comparison between apparent and real vertical ionization drift velocities in the equatorial F region", *Journal of Geophysical Research*, Vol.86, pp.2451-2454, 1981.
- 6 Fejer, B. G. and L. Scherliess, "Empirical models of storm time equatorial zonal electric fields", *Journal of Geophysical Research*, Vol.102, pp.24047-24056, 1997.
- 7 Fejer, B. G. and L. Scherliess, "On the variability of equatorial F-region vertical plasma drifts", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol.63, pp.893-897, 2001.
- 8 Eccles, J. V., "Modeling investigation of the evening prereversal enhancement of the zonal electric field in the equatorial ionosphere", *Journal of Geophysical Research*, Vol.103, pp.26709-26719, 1998.
- 9 Heelis, R. A., "Electrodynamics in the low and middle latitude ionosphere: a tutorial", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol.66, pp.825-838, 2004.
- 10 Rishbeth, H., "Polarization fields produced by winds in the equatorial F-region", *Planetary and Space Science*, Vol.19, pp.357-369, 1971.
- 11 Farley, D. T., E. Bonelli, B. G. Fejer, and M. F. Larsen, "The prereversal enhancement of the zonal electric field in the equatorial ionosphere", *Journal of Geophysical Research*, Vol.91, pp.13723-13728, 1986.
- 12 Haerendel, G. and J. V. Eccles, "The role of the equatorial electrojet in the Evening Ionosphere", *Journal of Geophysical Research*, Vol.97, pp.1181-1192, 1992.
- 13 Sultan, P. J., "Linear theory and modeling of the Rayleigh-Taylor instability leading to the occurrence of equatorial spread F", *Journal of Geophysical Research*, Vol.101, pp.26875-26891, 1996.
- 14 Abdu, M. A., "Outstanding problems in the equatorial ionosphere-E~thermosphere electrodynamics relevant to spread F", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol.63, pp.869-884, 2001.
- 15 Dabas, R. S., Lakha Singh, D. R. Lakshmi, P. Subramanyam, P. Chopra, and S. C. Garg, "Evolution and dynamics of equatorial plasma bubbles: Relationships to E×B drift, postsunset total electron content enhancements, and equatorial electrojet strength", *Radio Science*, Vol.38, doi:10.1029/2001RS002586, 2003.
- 16 Tulasi Ram, S., P. V. S. Rama Rao, D. S. V. V. D. Prasad, K. Niranjana, A. Raja Babu, R. Sridharan, C. V. Devasia, and Sudha Ravindran, "The combined effects of electrojet strength and the geomagnetic activity (Kp-index) on the post sunset height rise of the F-layer and its role in the generation of ESF during high and low solar activity periods", *Annales Geophysicae*, Vol.25, pp.2007-2017, 2007.
- 17 Alex, S. and S. Mukherjee, "Local time dependence of the equatorial counter electrojet effect in a narrow longitudinal belt", *Earth Planets Space*, Vol.53, pp.1151-1161, 2001.

- 18 Denardini, C. M., M. A. Abdu, E. R. de Paula, C. M. Wrasse, and J. H. A. Sobral, "VHF radar observations of the dip equatorial E-region during sunset in the Brazilian sector", *Annales Geophysicae*, Vol.24, pp.1617-1623, 2006.
- 19 Rama Rao, P. V. S., P. T. Jayachandran, and P. Sri Ram, "Ionospheric irregularities-role of Equatorial Ionization Anomaly", *Radio Science*, Vol.32, pp.1551-1556, 1997.
- 20 Thampi, S. V., S. Ravindran, T. K. Pant, C. V. Devasia, and R. Sridharan, "Seasonal dependence of the "forecast parameter" based on the EIA characteristics for the prediction of Equatorial Spread F (ESF)", *Annales Geophysicae*, Vol.26, pp.1751-1757, 2008.
- 21 Prakash S., D. Pallamraju, H. S. S. Sinha, "Role of the equatorial ionization anomaly in the development of the evening prereversal enhancement of the equatorial zonal electric field", *Journal of Geophysical Research*, Vol.114, A02301, doi:10.1029/2007JA012808, 2009.

うえもとじゅんぺい
上本純平

電磁波計測研究センター宇宙環境計測
グループ専攻研究員 博士(理学)超
高層大気物理

まるやま たかし
丸山 隆

上席研究員 博士(工学)
超高層大気物理



さいとう しょう
齋藤 亨

独立行政法人電子航法研究所通信・航
法・監視領域主任研究員 博士(理学)
超高層大気物理学、衛星航法

みらい てる
右井 尊

電磁波計測研究センター推進室室長
博士(理学)
超高層大気物理学

よしむら りんこ
吉村玲子

北里大学一般教育部自然科学教育
センター講師 博士(理学)
超高層大気物理