

3-2-3 赤道スプレッド F の発生と電離圏大規模東西構造

3-2-3 *Large-Scale Zonal Structure of the Equatorial Ionosphere and Equatorial Spread F Occurrence*

齋藤 享 丸山 隆

SAITO Susumu and MARUYAMA Takashi

要旨

Prereversal enhancement (PRE) に伴う電離圏高度変動を、経度方向に 6.34° 離れた磁気赤道付近の 2 地点 (Chumphon・タイ (10.7°N , 99.4°E , 磁気緯度 $+3.3^\circ$)、Bac Lieu・ベトナム (9.3°N , 105.7°E , 磁気緯度 $+1.6^\circ$)) で比較を行った。2006 年 3 月 ~ 4 月にかけて得られた周波数 2.5 MHz における電離圏仮想高度 ($h'F$) の変動と赤道スプレッド F (equatorial spread F: ESF) の発生を比較した。その結果、ESF が発生しない場合には 2 地点の $h'F$ 変動は非常によく似たものであった一方、ESF が発生する場合には 2 地点の $h'F$ 変動が大きく異なることが多いことが分かった。このことは、ESF が発生する場合は PRE に伴う電離圏高度上昇すなわち東向き電離圏電場が非常に局在していることを示しており、数 100 km 規模の電離圏東西構造が ESF の発生と深く関わっていると考えられる。

Ionospheric height variations associated with the prereversal enhancement (PRE) were compared between two ionosonde stations near the magnetic equator (Chumphon, Thailand (10.7°N , 99.4°E , $+3.3^\circ$ magnetic latitude), Bac Lieu, Vietnam (9.3°N , 105.7°E , $+1.6^\circ$ magnetic latitude)) separated by 6.34° in longitude. Variations of ionospheric virtual height at 2.5 MHz ($h'F$) and equatorial spread F (ESF) occurrences were analyzed for a period from March to April, 2006. The results show that $h'F$ variations at the two stations were very similar when no ESF was observed. However, $h'F$ variations at the two stations were often very different when ESF was observed. This indicates that the ionospheric height enhancement, and hence the eastward electric field associated with PRE is quite localized when ESF occurs. Ionospheric structures with a zonal scale of several 100 km appear to be play an important role in the ESF occurrence.

【キーワード】

プラズマバブル, 赤道スプレッド F, プラズマバブル発生日々変動, 電離圏大規模東西構造, SEALION イオノゾンデネットワーク
Plasma bubble, Equatorial spread F, Day-to-day variation of plasma bubble occurrence, Large-scale zonal structure of the ionosphere, SEALION ionosonde network

1 はじめに

プラズマバブルは磁気低緯度・赤道域に特有の現象であり、イオノゾンデによる観測では強いレンジタイプ・スプレッド F (赤道スプレッド F、ESF) として観測される。プラズマバブルに伴う様々な規模の電離圏不規則構造による電離圏全電子数の急激な変化や衛星電波のシンチレーション

は衛星測位や衛星通信の劣化につながる。プラズマバブル発生の物理機構は、日没付近の prereversal enhancement (PRE) と呼ばれる、強い東向き電離圏電場によって電離圏が強く持ち上げられることによる Rayleigh-Taylor プラズマ不安定であることがよく知られている。しかし、その発生の日々変動を支配する機構については未解明であり、これを解明することが実利用の障害とな

るプラズマバブルの発生予測につながり、宇宙天気の見点から非常に重要である。

ESF あるいはプラズマバブルが一晩のうちにある程度の周期性をもって繰り返し発生するということが、過去の短波の赤道横断伝播を用いた観測 [1][2]、航空機搭載大気光イメージャによる観測 [3]、衛星観測 [4]、非干渉散乱レーダーによる観測 [5]、干渉散乱レーダーによる観測 [6] から知られている。表 1 はこれらの観測で得られた ESF/プラズマバブルの空間間隔をまとめたものである。これらの準周期的大規模構造が存在することが ESF/プラズマバブルの発生に関わっているのではないかとということが指摘されている [5][6]。

Tsunoda [5] は、Kwajalein 環礁の ALTAIR 非干渉散乱レーダーを用いた観測 [7] を行い、プラズマバブルが発生する際には波長約 400 km 程度の電離圏大規模東西構造 (large-scale wave structures: LSWSs) が存在することを発見した。この LSWSs は地面に対して動かず、地上からは定在波のように見えることも分かっている。最近になって Tsunoda and Ecklund [8] は VHF 干渉散乱レーダーを用いた観測を行い、プラズマバブルに伴う上昇流の速度には、PRE 規模の東西スケール (2000 ~ 3000 km) を持つ成分と LSWSs の東西スケール (数 100 km) を持つ成分が重畳されていることを示した。さらに、Tsunoda [9] は、ESF 発生前にイオノゾンのエコー強度が増大し電離圏と地上の間の多重反射が顕著になることが見いだし、これを LSWSs に伴う電離圏等電子密度面の湾曲による集束効果であると解釈した。

Fukao 他 [6] はインドネシアに設置された赤道大気レーダーを用いた観測を行い、複数のプラズマバブルが 370 から 1000 km の間隔で発生する

ことが多いことを発見した。Fukao 他 [6] は、これらが下層から伝播する大気重力波によって電離圏が直接/間接に変調を受けたことによるものではないかという説を提案した。

PRE に伴う電離圏電場の東西空間変化については Fejer 他 [9] によっても研究されており、ペルーにおいて東西 170 km 離れた 2 地点 (Jicamarca 及び Huancayo) における電離圏垂直ドリフト速度の関係が日によって大きく変わることが示されている。しかし、平均的には両者はよく似た変化を示したため、Fejer 他 [10] はこの日々の変動は観測手法の違い (Jicamarca では非干渉散乱レーダーを用い、Huancayo ではイオノゾンデを用いた) によるものではないかとした。

以上の過去の研究は全て、数 100 km 規模の東西構造がプラズマバブルの発生において重要な役割を果たすものの一つであることを示唆している。しかし、このような東西構造を生み出す物理機構は不明のままである。これらの研究により東西構造の物理機構の理解が進んでいない理由は、一つは Tsunoda [5] や Fukao 他 [6] によって解析された観測例がごく限られていること、また Jicamarca と Huancayo の距離が数 100 km という規模の構造を調べるためには不十分であったと考えられること、Fukao 他 [6] の観測では背景電離圏の情報が得られていないことなどが考えられる。

本研究では、数 100 km 規模の電離圏東西構造のプラズマバブルの発生に対する効果を詳しく調べるため、東南アジアの磁気赤道上に東西 700 km の間隔で設置した 2 機のイオノゾンデを用いた PRE の観測を世界で初めて行った。本研究では、その観測データを用い、ESF の発生の日々変動と

表 1 文献に見られる電離圏東西空間構造の大きさ

文献	東西空間規模 (km)
Röttger (1973) [1]	380
Weber 他 (1980) [3]	100-700 (1-6°)
Tsunoda (2005) [5]	400
Lin 他 (2005) [4]	300-1000
Fukao 他 (2006) [6]	370-1000
Maruyama and Kawamura (2006) [2]	2090

電離圏高度変動の東西変化の関係を詳しく調べ、数 100 km 規模の電離圏東西構造の ESF 発生に対する重要性を検討した。

なお、本研究はプラズマバブルの発生に関わる物理機構を解明することを目的としているが、後述する観測上の制約のため、「プラズマバブル」という用語は用いず、プラズマバブルを含む電離圏不規則構造の存在を表す「赤道スプレッド F (ESF)」という用語を用いる。

本報告は 2007 年に Geophysical Research Letters において出版された Saito and Maruyama[11] に基づくものである。

2 観測

本研究では、SEALION 電離圏観測網[12][13]を構成するイオノゾンデのうち、磁気赤道に沿って東西に並ぶ 2 観測点 (Chumphon・タイ (10.7°N, 99.4°E, 磁気緯度 +3.3°)、Bac Lieu・ベトナム (9.3°N, 105.7°E, 磁気緯度 +1.6°)) において同時に観測を行った。2 観測点の位置を図 1 にまとめた。Chumphon と Bac Lieu は経度が 7.8° (高度 300 km において東西に 738 km) 離れており、その地方時の差は 25.4 分である。

本観測では、観測周波数範囲は 2 ~ 30 MHz、観測間隔は 5 分である。本研究における観測パラメータを表 2 にまとめた。SEALION 観測網のイオノゾンデ観測手法については、詳しくは本誌の他記事[14]を参照されたい。

この 2 地点における同時観測は 2005 年 12 月 5 日より開始され、機器保守のための中断を挟みながら継続的に行われている。

3 解析手法

本研究においては、電離圏高度変動の指標として、周波数 2.5 MHz (電子密度 $7.75 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-3}$ に対応) において手動で読み取った仮想高度 (h'F) を用いた。h'F を高度変動の指標とすることができる理由は Bittencourt and Abdu[15] に基づく。詳しい理由及び注意点については、前出の本誌の他記事[14]を参照されたい。電離圏 F 領域不規則構造の発生は、赤道スプレッド F (ESF) を読み取るにより同定することができる。本研究では 5 分毎のイオノグラムについて h'F と ESF の読み

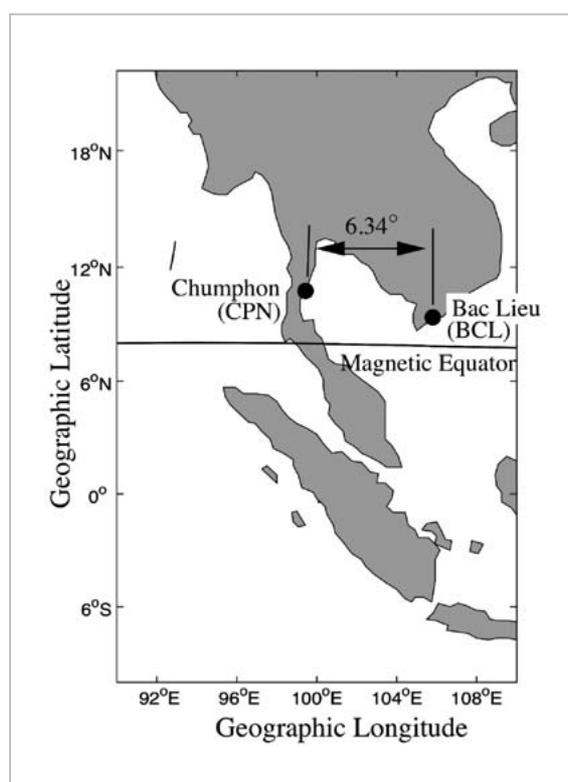


図1 イオノゾンデ観測点の位置

表2 イオノゾンデ観測パラメータ

形式	周波数変調連続波 (FM-CW) (疑似ランダム符号により送受切り替え)
送信電力 (ピーク)	20 W
送信電力 (平均)	10 W
周波数掃引範囲	2-30 MHz
周波数掃引速度	100 kHz s ⁻¹
掃引繰り返し周期	5 min

取りを行った。ESF は、強いレンジタイプ、弱いレンジタイプ、複数エコーの3つの類型に分類した。本研究では、強いレンジタイプ ESF とは F 領域のイオノグラムが高度方向に不鮮明になり臨界周波数付近の特徴的な形をとどめなくなったもの、弱いレンジタイプ ESF とは F 領域のイオノグラムが高度方向に不鮮明になるものの臨界周波数付近の特徴的な形をとどめているもの、複数エコーとは鮮明な F 領域イオノグラムトレースが複数現れるものと定義した。これら3類型それぞれのイオノグラムの例を図2に示す。

プラズマバブルが発生した場合イオノゾンデでは ESF として観測されるが、ESF は必ずしもプラズマバブルであるとは限らない。電離圏 F 領域ピークの上側まで達するプラズマバブルまでは成長せず磁気赤道付近の電離圏下部領域のみにとどまる不規則構造というものもあり、磁気赤道付近ではこれも ESF として観測される。プラズマバブルか電離圏下部不規則構造かの区別は、前出の本誌の他記事^[14]で行ったように、磁気子午面に沿った ESF の発達状況を調べるにより可能である。しかし本研究では、用いた磁気赤道上2地点のうち、Bac Lieu に対応する磁気低緯度観測点がなくプラズマバブルである保証がない。従って、本研究で検出した ESF にはプラズマバブルだけでなく磁気赤道付近に限られた不規則構造が含まれている可能性があり、本観測で見いだされた電離圏不規則構造を表す用語として ESF を用いることとする。2009 年現在では、Bac Lieu の経度上の Phu Thuy・ベトナム (21.0°N, 106.0°E, 磁気緯度+15.7°) におけるイオノゾンデ観測があり、プラズマバブルか電離圏下部不規則構造かの

区別が可能になっている。

4 解析結果

本観測地域における ESF の発生頻度は春分・秋分期に高いことが知られている^{[16][17][18]}ため、2006 年 3 月 10 日から 2006 年 4 月 10 日の間に得られたデータを用いて解析を行った。

図3は、Chumphonと Bac Lieu において観測された h'F の時間変動の例を示したものである。図3aは、両地点において ESF が観測されなかった場合(2006年3月22日)の h'F の時間変動である。Bac Lieuの h'F は Chumphon の h'F に対して 20~30分遅れて非常によく似た変動を示している。この 20~30分の遅れは、ちょうど2地点間の地方時の差(25.4分)に対応する。しかし、2006年3月27日(図3b)においては、Chumphon と Bac Lieu において観測された h'F は驚くほど異なった振る舞いを見せる。Chumphon においては強い PRE が観測されたにもかかわらず、Bac Lieu ではほとんど PRE が見られず、両地点の h'F の差は最大 100 km にも達した。このとき、日没直後に強い ESF が Chumphon において観測されたが、Bac Lieu では 15 時 UT (22 時 LT) になるまで観測されなかった。Bac Lieu では、15 時 UT に弱い h'F の増大に伴って強い ESF が観測されている。これは、Chumphon において発生した ESF が東向きに約 100 m s^{-1} で移動してきたものであると考えるとつじつまが合う。この 100 m s^{-1} という値は、プラズマバブルの移動速度として典型的に観測される値である^[6]。2006 年 3 月 28 (図3c)の例においては、日没直後に Bac Lieu に

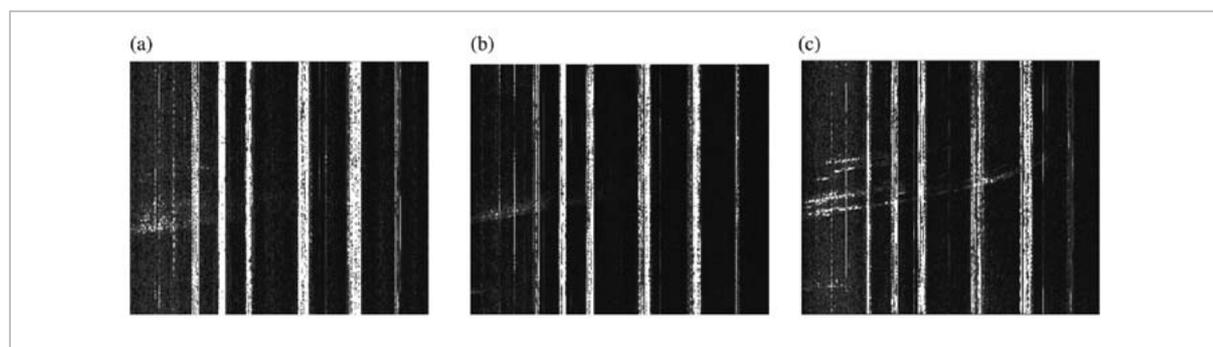


図2 (a)強いスプレッドF、(b)弱いスプレッドF、(c)複数エコーの例

横軸は周波数、縦軸は仮想高度(h'F)である。所々の周波数に見られる強い縦線は外来の干渉波である。

において強いESFが観測され、Chumphonにおいては弱いESFしか観測されなかった。このとき、Bac Lieuの方がPREが強く、2地点の最大h'Fの差は約70 kmであった。14時 UT 付近において両地点で観測されたESFは、同時に観測されたh'Fの極大に伴うものであると考えられる。この日の地磁気活動度は低く、このh'Fの極大は地磁気活動に伴う侵入電場によるものとは考えにくい。これらのh'F極大及びESFの発生原因は不明である。

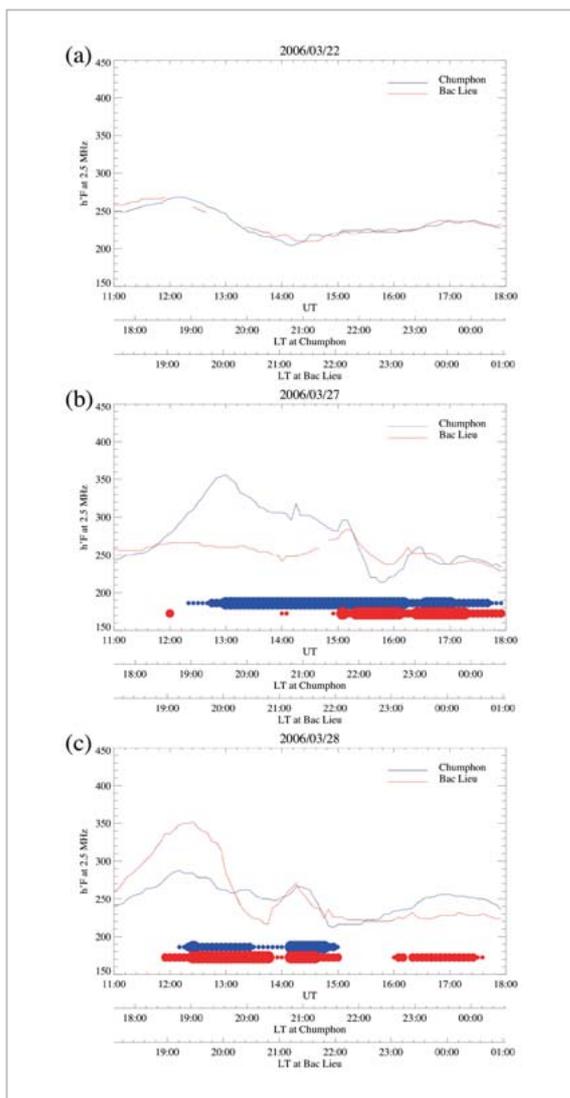


図3 Chumphon (青) 及び Bac Lieu (赤) における h'F の変動の例

(a) ESF が観測されなかった例、(b, c) ESF が観測された例。イオノゾンデにおいて通常と異なる F 領域エコーレーズの発生を丸印で示す。丸印の大中小はそれぞれ強いレンジタイプ ESF、弱いレンジタイプ ESF、複数エコーに対応する。Chumphon 及び Bac Lieu における地方時は、それぞれ UT + 6.62 時間、UT + 7.05 時間である。[11]

図4は、2006年3月10日から2006年4月10日の、Chumphon 及び Bac Lieu における 19 ~ 21 時 LT の間の最大 h'F と ESF の発生を示したものである。ここで、21 時 LT 以降に発生した ESF については、それらは遠方で発生して移動してきたものであり、その発生とその場の背景電離圏との直接的な関係はないと考えられるため、21 時 LT 以前に発生した ESF についてのみ示している。この図を見ると、Chumphon と Bac Lieu の最大 h'F の差が増大している場合には強い ESF が観測されることが見て取れる。反対に、2 地点の最大 h'F が共に小さい場合には強い ESF は観測されない。この場合、2 地点の h'F は非常によく似た時間変動を示し、最大 h'F を迎える時刻の差は平均 14 分であった。この時間差は 2 地点の地方時の違いに近い値である。また、2 地点の最大 h'F が共にある程度まで増大しても強い ESF が発生する場合としない場合もあることが分かる。これは、強い ESF の発生に関わる要因が他にもあり、例えば前出の記事[14]で述べた赤道横断南北風[16][19][20]、太陽活動度の変化[21]などにより最大 h'F が共にある程度まで増大しても ESF の発生が抑制されたのではないかと考えられる。

電離圏高度に東西構造が存在しても、最大 h'F を迎える時刻が異なるなどの場合においては

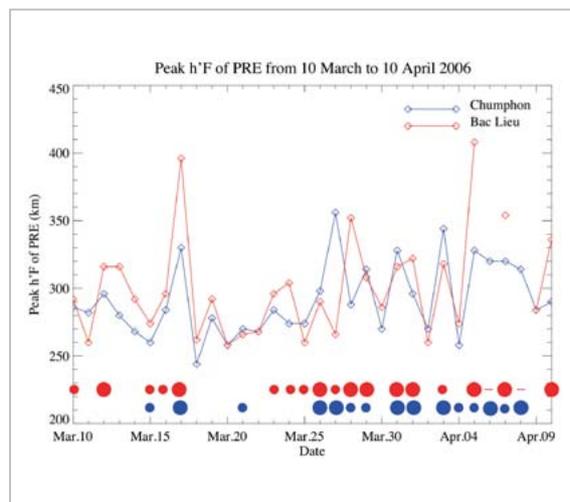


図4 Chumphon (青) 及び Bac Lieu (赤) における、PRE に伴う最大 h'F の日々変動

19 - 21 LT の ESF の発生を丸印で示す。丸印の大小はそれぞれ強いレンジタイプ ESF、弱いレンジタイプ ESF に対応する。Bac Lieu において、2006 年 4 月 6 日 1300 - 1500 UT (1833 - 2203 LT) の間、及び 2006 年 4 月 8 日の夜間、観測データが得られず欠測となっている。[11]

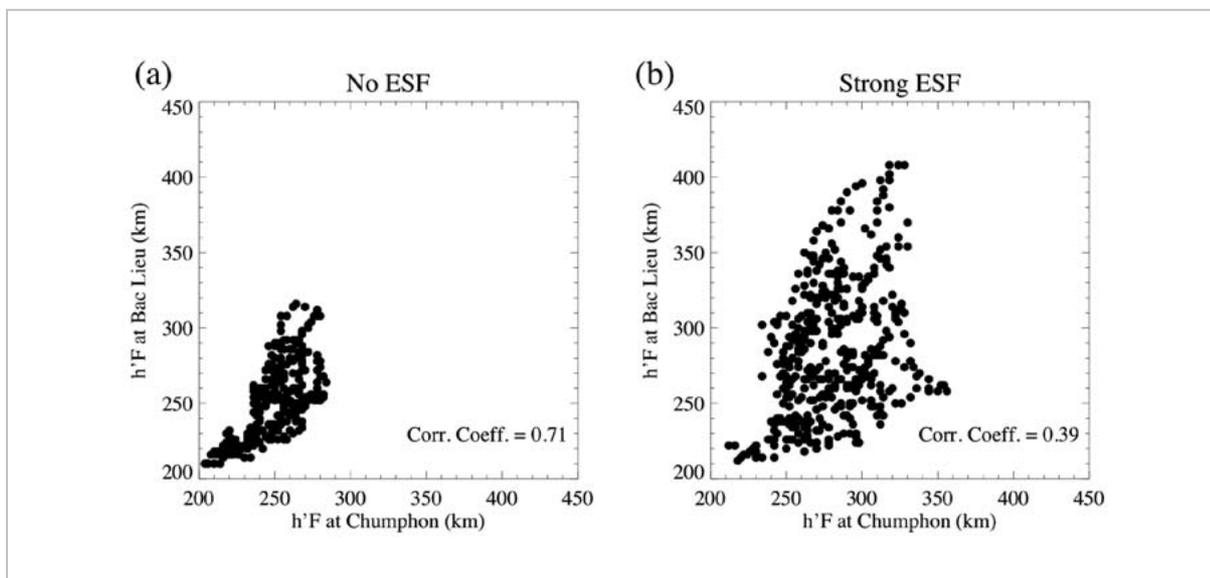


図5 Chumphonの18 – 22 LTの間に観測されたChumphonとBac Lieuのh'Fの散布図

(a) ESFが全く観測されなかった日(10日)、(b)強いESFが観測された日(12日)。^[11]

ChumphonとBac Lieuにおいて最大h'Fが同じになる場合もあり得る。図5は、Chumphonにおける18～22時LTの間のh'Fと同時刻のBac Lieuにおけるh'Fの関係を示したものである。ESFが全く観測されなかった場合(10日)においては、2地点のh'Fは良い相関(相関係数0.71)を示した(図5a)が、少なくともどちらか1地点で強いESFが観測された場合(12日)においては2地点のh'Fの相関係数は0.39と低かった(図5b)。このことから、強いESFが発生する場合に2地点のh'Fが異なる場合が多いことがはっきりした。

5 考察とまとめ

本研究では、高度300 kmにおいて磁気赤道に沿って東西に738 km離れたChumphonとBac Lieuにおける1ヶ月間のイオノゾンデ連続観測により、PREに伴う電離圏高度変動とESFの関係について調べた。2地点におけるPREに伴うh'F増大が共に弱い場合、h'Fの時間変動は地方時の差に相当する時間差を持ってよく似た変動を示し、このような場合には強いESFは観測されなかった。反対に、強いESFが観測された場合には、2地点のh'Fの時間変動が大きく異なることが多かった。このことは、強いESFの発生時には電離圏に数100 kmの距離で大きく変わる東

西構造がある場合が多いことを示す。また、2地点でそれぞれ強いESFが観測された場合には、同程度のh'F増大を示すこともあった(2006年4月1日など)。電離圏東西構造の波長が2地点間の距離に近い場合には、数100 km規模の東西構造が電離圏に存在していても、2地点でのh'F増大が同程度になり得る。本研究ではChumphonとBac Lieuの間に観測点がないためこれ以上のことは言えない。理論研究^{[22][23]}によれば、磁気偏角および磁気赤道と地理赤道のずれが同程度の範囲内では、h'Fの時間変動は空間変動に置き換えることができると考えられていた。つまり、地方時に固定されたPRE構造の下を観測点が地球の自転に伴って通過していくという描像である。PREに伴うh'Fの増大時間は2時間程度であることが多い^[24]ので、PREに伴う東西構造は経度で30°、距離にして約3000 kmと考えられる。PREが弱くESFが観測されなかった場合の2地点のh'Fの変動はまさにこのような描像に合致する。しかし、強いESFが観測された場合における、東西約700 km離れた2地点でのh'Fの大きな違いはこの描像から大きく離れており、予想外の結果であった。このような場合、ある1地点でのh'Fの時間変動は空間変動に置き換えることはできない。すなわち、ある1地点でh'Fを観測したとしても、その場所から数100 km離れば、

すでにその場所の h'F を代表するものではなくなるということである。これは、東西数 100 km の範囲内でプラズマバブルの発生を予測するためには、ある 1 点での観測だけでは不十分であるということである。

Chumphon と Bac Lieu における h'F 変動の関係には大きな日々変動がある。ある日においては Chumphon の方が高く、ある日においては Bac Lieu の方が高く、またある日においては同程度であったりする。このことから、強い ESF の発生に関わっていると考えられる数 100 km 規模の電離圏東西構造の波長、位相関係には大きな日々変動があることが分かる。本研究では観測点が 2 つしかないため、この東西構造の波長が実際にどれほどであるか、また伝播しているのか定在波であるのかなどを知ることはできない。しかし本研究の結果は、強い ESF が発生する場合には電離圏が東西方向に、地方時に固定された PRE という描像から考えられる規模よりも小さな構造を持っているということが言える。この結果は、Tsunoda^[5]の結果と一致する。

本研究において、この数 100 km 規模の電離圏東西構造の発生が強い ESF の発生と日々変動のレベルで対応していることが発見された。これは、これまでの研究^{[5][6]}の提案を支持するものであり、重要な発見の一つであると言える。Tsunoda^[5]が見いだした数 100 km 規模の電離圏東西構造はプラズマバブル発生に先立って存在しており、これ

を検出することによりプラズマバブルの発生が予測できる可能性がある。しかしながら、この電離圏東西構造と、ESF の発生に関わると考えられているその他の要因との関係は不明のままである。本研究の結果は、h'F の増大、すなわち電離圏を持ち上げる東向きの電場が局在していることを示しており、その物理機構は F 領域プラズマのシア運動によるプラズマ不安定^[25]、あるいは大気重力波と PRE に伴う電場の空間共鳴^{[26][27]}であるかもしれないし、また全く別の機構によるものかもしれない。これらを区別するためには電離圏東西構造の規模、周期、伝播特性などを詳しく知る必要があるが、現時点では観測の不足のためこれらの情報は得られていない。東西構造の規模よりも短い間隔で東西広い範囲に展開するイオノゾンデチェーンが実現すれば非常に有効であると考えられる。また、C/NOFS 衛星^[28]などの赤道周回衛星による直接観測、衛星ビーコンを用いた全電子数の東西構造観測^[29]などとの同時観測も有効であると考えられる。

謝辞

Chumphon、Bac Lieu におけるイオノゾンデ観測は、それぞれ Mongkut 王工科大学(タイ)、ベトナム科学技術アカデミーと情報通信研究機構の研究協力覚え書きに基づいて行われている。

参考文献

- 1 Röttger, J., "Wave-like structures of large-scale equatorial spread-F irregularities", *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol.35, pp.1195-1206, 1973.
- 2 Maruyama, T., and M. Kawamura, "Equatorial ionospheric disturbance observed through a transequatorial HF propagation experiment", *Ann. Geophys.*, Vol.24, pp.1401-1409, 2006.
- 3 Weber, E. J., J. Buchau, and J. G. Moore, "Airborne studies of Equatorial F layer ionospheric irregularities", *J. Geophys. Res.*, Vol. 85, pp. 4631-4641, 1980.
- 4 Lin, C. S., T. J. Immel, H. -C. Yeh, S. B. Mende, and J. L. Burch, "Simultaneous observations of equatorial plasma depletion by IMAGE and ROCSAT-1 satellites", *J. Geophys. Res.*, Vol.110, pp.A06304, doi,10.1029/2004JA010774, 2005.
- 5 Tsunoda, R. T., "On the enigma of day-to-day variability in equatorial spread F", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.32, pp.L08103, doi,10.1029/2005GL022512, 2005.

- 6 Fukao, S., T. Yokoyama, T. Tayama, M. Yamamoto, T. Maruyama, and S. Saito, "Eastward traverse of equatorial plasma plumes observed with the Equatorial Atmosphere Radar in Indonesia", *Ann. Geophys.*, Vol.24, pp.1411-1418, 2006.
- 7 Tsunoda, R. T., and B. R. White, "On the generation and growth of equatorial backscatter plumes, 1. Wave structure in the bottomside F layer", *J. Geophys. Res.*, Vol.86, pp.3610-3616, 1981.
- 8 Tsunoda, R. T. and W. L. Ecklund, "On the post-sunset rise of the equatorial F layer and superposed upwelling and bubbles", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.34, pp.L04101, doi:10.1029/2006GL028832, 2007.
- 9 Tsunoda, R. T., "Multi-reflected echoes: Another ionogram signature of large-scale wave structure", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.36, pp.L01102, doi:10.1029/2008GL036221, 2009.
- 10 Fejer, B. G., E. R. de Paula, L. Scherliess, and I. S. Batista, "Incoherent scatter radar, ionosonde, and satellite measurements of equatorial F region vertical plasma drifts in the evening sector", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.23, pp.1733-1736, 1996.
- 11 Saito, S. and T. Maruyama, "Large-scale longitudinal variation in ionospheric height and equatorial spread F occurrences observed by ionosondes", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.34, pp.L16109, doi:10.1029/2007GL030618, 2007.
- 12 Maruyama, T., M. Kawamura, S. Saito, K. Nozaki, H. Kato, N. Hemmakorn, T. Boonchuk, T. Komolmis, and C. Ha Duyen, "Low latitude ionospher-thermosphere dynamics studies with ionosondechain in Southeast Asia", *Ann. Geophys.*, Vol.25, pp.1569-1577, 2007.
- 13 丸山隆, 齋藤享, 川村眞文, 野崎憲朗, 上本純平, 津川卓也, 陣英克, 石井守, 久保田実, "SEALION プロジェクトの概要と初期解析結果", *情報通信研究機構季報*, 本特集号, 3-2-1, 2009.
- 14 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.
- 15 Bittencourt, J. A., and M. A. Abdu, "A theoretical comparison between apparent and real vertical ionization drift velocities in the equatorial F region", *J. Geophys. Res.*, Vol.86, pp.2451-2455, 1981.
- 16 Maruyama, T., and N. Matuura, "Longitudinal variability of annual changes in activity of equatorial spread F and plasma bubbles", *J. Geophys. Res.*, Vol.89, pp.10903-10912, 1984.
- 17 Burke, W. J., C. Y. Huang, L. C. Gentile, and L. Bauer, "Seasonal-longitudinal variability of equatorial plasma bubbles", *Ann. Geophys.*, Vol.22, pp.3089-3098, 2004.
- 18 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*, Vol.84A, pp.343-351, 2006.
- 19 Maruyama, T., "A diagnostic model for equatorial spread F1. Model description and application to electric field and neutral wind effects", *J. Geophys. Res.*, Vol.93, pp.14611-14622, 1988.
- 20 Saito, S., and T. Maruyama, "Ionospheric height variations observed ionosondes along magnetic meridian and plasma bubble onsets", *Ann. Geophys.*, Vol.24, pp.2991-2996, 2006.
- 21 Jayachandran, B., N. Balan, P. B. Rao, J. H. Sastri, and G. J. Bailey, "HF Doppler and ionosonde observations on the onset conditions of equatorial spread F", *J. Geophys. Res.*, Vol.98, pp.13741-13750, 1993.
- 22 Batista, I. S., M. A. Abdu, and J. A. Bittencourt, "Equatorial F region vertical plasma drifts- Seasonal and longitudinal asymmetries in the American sector", *J. Geophys. Res.*, Vol.91, pp.12055-12064, 1986.
- 23 Fejer, B., "The electrodynamic of the low-latitude ionosphere, recent results and future challenges", *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol.59, pp.1465-1482, 1997.
- 24 Woodman, R. F., "Vertical drift velocities and east-west electric fields at the magnetic equator", *J. Geophys. Res.*, Vol.75, pp.6249-6259, 1970.

- 25 Hysell, D. L., M. C. Kelley, and W. E. Swartz, "Seeding and layering of equatorial spread F by gravity waves", J. Geophys. Res.. Vol.95, pp.17253-17260, 1990.
- 26 Kelley, M. C., M. F. Larsen, C. LaHoz, and J. P. McClure, "Gravity wave interaction of equatorial spread F, a case study(1981)", J. Geophys. Res.. Vol.86, pp.9087-9100, 1981.
- 27 Hysell, D. L., and E. Kudeki, "Collisional shear instability in the equatorial F region ionosphere", J. Geophys. Res.. Vol.109, pp.A11301, doi,10.1029/2004JA010636, 2004.
- 28 de La Beaujardière, O., and the C/NOFS Science Definition Team, "C/NOFS: a mission to forecast scintillations", J. Atmos. Solar-Terr. Phys., Vol.66, pp.1573-1591, 2004.
- 29 Thampi S. V., M. Yamamoto, R. T. Tsunoda, Y. Otsuka, T. Tsugawa, J. Uemoto, and M. Ishii, "First observations of large-scale wave structure and equatorial spread F using CERTO radio beacon on the C/NOFS satellite", Geophys. Res. Lett., Vol.36, pp.L18111, doi: 10.1029/2009GL039887, 2009.



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

丸山 隆

上席研究員 博士(工学)
超高層大気物理