

3-2-2 プラズマバブルの発生における赤道横断熱圏風の効果

3-2-2 *Effects of Transequatorial Thermospheric Wind on Plasma Bubble Occurrences*

齋藤 享 丸山 隆

SAITO Susumu and MARUYAMA Takashi

要旨

東南アジアに設置されたイオノゾンデチェーン (Kototabang・インドネシア (0.2°S, 100.3°E)、Chumphon・タイ (10.7°N, 99.4°E)、Chiang Mai・タイ (18.8°N, 98.9°E)) によって 2004 年 10 月から 2005 年 4 月にかけて行われた観測のデータを用いて下部電離圏高度 (周波数 2.5 MHz における電離圏仮想高度 (h'F)) 変動とプラズマバブルの発生を比較した。その結果、日没付近の強い電離圏高度上昇が 3 観測点全てにおいて見られる場合にはプラズマバブルが発生すること、しかし磁気赤道付近 (Chumphon) で強い電離圏高度上昇が見られる場合でも電離圏高度に強い南北非対称が見られる場合にはプラズマバブルが発生しないことが分かった。電離圏下部の南北非対称構造は磁気赤道を越えて吹く熱圏南北中性風によるものであると考えられる。この結果から、熱圏における強い赤道横断南北風はプラズマバブルの発生を抑制し、プラズマバブルの発生の日々変動を支配する要因の 1 つであることが示された。

Data from the ionosonde chain in Southeast Asia (Kototabang, Indonesia (0.2°S, 100.3°E), Chumphon, Thailand (10.7°N, 99.4°E), and Chiang Mai, Thailand (18.8°N, 98.9°E)) were analyzed for a period from October, 2004 to April, 2005 to compare the bottomside ionospheric height (the virtual height at 2.5 MHz: h'F) variation and the plasma bubble occurrence. The results show that plasma bubbles were observed when the h'F enhancements around sunset at all three stations were strong. However, even when h'F enhancement near the magnetic equator (Chumphon) was strong, plasma bubbles were not observed when there was a noticeable north-south asymmetry of h'F. The north-south asymmetry in the bottomside ionospheric heights could be attributed to the strong transequatorial thermospheric neutral wind. Our results show that the strong transequatorial thermospheric wind is one of the important factors that control the day-to-day variability of the plasma bubble 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, 赤道横断熱圏風, 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, Transequatorial thermospheric wind, 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。ここで、レンジタイ

プ・スプレッド F とは F 領域エコーのトレースが全周波数帯において不鮮明になることを指し、イオノゾンデの電波が様々な規模の電離圏不規則構造によって散乱を受けるためであると考えられている。

今日では、プラズマバブルの物理機構はレイ

リー・テイラー (Rayleigh-Taylor) プラズマ不安定であるということが広く受け入れられている。プラズマバブルは日没付近の 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場合に発生することが知られている。しかし、PRE の強さとプラズマバブルの発生には必ずしも一対一の対応関係があるわけではなく^[1]、PRE が強い場合においてもプラズマバブルが発生しない場合もある。このようなプラズマバブルの発生の日々変動は非常に大きく、プラズマバブル発生頻度の季節、経度、太陽活動などに対する依存性がよく知られていることは対照的に、未だ解明が進んでいない部分である。これまでに PRE の強さとプラズマバブル発生との関係を支配する様々な物理機構が提案されているが、はっきりとした答えは未だ得られていない。

Maruyama and Matuura^[2] は、衛星を用いた トップサイド・サウンディング (衛星搭載イオノゾンデ) データを用いた解析を行い、ESF 発生の季節・経度変化がプラズマ密度の緯度分布の形状と深く関係しており、プラズマ密度の緯度分布が磁気赤道を挟んで対象である場合に ESF が多く観測されることを発見した。彼らはプラズマ密度の南北非対称は熱圏中性風のうち磁気赤道を越えて吹く南北風 (赤道横断風) によるものであり、赤道横断風は風下側の下部電離圏のプラズマ密度を増加させ、磁力線に沿って積分した Pedersen 電気伝導度を増加させることにより ESF の発生が抑制されるのではないかと考えた^[3]。磁気偏角は経度によって固有のものであるが、熱圏東西風は磁気座標系よりも地理座標により支配されるので、経度・季節によって磁気子午面と平均的な熱圏風の成す角度が変わる。このことが ESF の発生率の季節・経度変化を支配する一因ではないかと考えられた。Mendillo 他^[4] は、ESF 発生の日々変動に対しても赤道横断風が効果を持つのではないかと考え、Kwajalein 環礁において 630.0 nm 大気光と ALTAIR レーダーの同時観測を行い、大気光の南北構造と ESF 発生との間に関連があることを見出した。しかし、Mendillo 他^[5] による Fabry-Perot 干渉計を用いた熱圏風観測では、赤道横断風と ESF の発生の間にはっきりとした関係は見出されなかった。Valladares 他^[6] は南米西岸の

GPS 受信機の南北チェーンを用いて電離圏全電子数 (total electron content: TEC) の南北構造とプラズマバブルの発生を比較したが、両者の間にはっきりとした関係は見出されなかった。より多くのデータを用いた解析^[7] においても、同様の結果が得られている。しかし、Lee 他^[8] は、TEC の南北非対称が小さく東向き電場が強いことがプラズマバブルの発生につながる条件であるという結果を得、また Abdu 他^[9] は磁気赤道と磁気低緯度の 2ヶ所に設置したイオノゾンデ観測から南北風がプラズマバブルの発生を抑制する方向に働いている可能性を示した。このように、熱圏の赤道横断風がプラズマバブルの発生において重要な役割を担っているかどうかについては結論が出ていない。

熱圏赤道横断風を直接観測することは容易ではないが、磁気赤道とそれを挟んで南北の磁気共役点にイオノゾンデを設置し電離圏高度変動を観測することにより、電場による高度変動と熱圏風による高度変動を分離し、かつ熱圏風の速度と極性 (南向き、北向き、赤道向き収束、あるいは極向き発散) を推定することができる^[3]。このような目的で東南アジアに Southeast Asia low latitude ionospheric network (SEALION) と呼ばれる電離圏観測網が設置された^{[10][11]}。本研究では、SEALION により得られる熱圏南北風とプラズマバブル発生の日々変動の関係を明らかにすることを目的とする。

本報告は 2006 年に *Annales Geophysicae* において出版された Saito and Maruyama^[12] に基づくものである。

2 観測

本研究では、SEALION 電離圏観測網を構成するイオノゾンデのうち、磁気子午面にほぼ沿い磁気赤道をまたいで並ぶ 3 観測点 (Kototabang・インドネシア (0.2°S, 100.3°E)、Chumphon・タイ (10.7°N, 99.4°E)、Chiang Mai・タイ (18.8°N, 98.9°E)) で行われた同時観測のデータを用いた。図 1 と表 1 にまとめられているとおり、Chumphon は磁気赤道近くに位置し、Kototabang と Chiang Mai はそれぞれの磁気共役点近くに位置している。用いたイオノゾンデは FM-CW (Frequency-

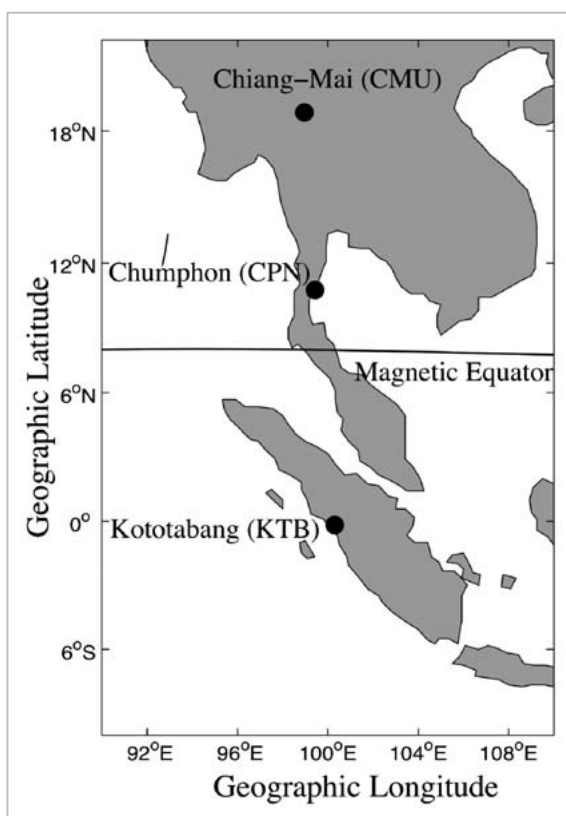


図1 イオノゾンデ観測点の位置 [12]

modulated continuous wave) と呼ばれる形式のものであり、電波を 2 MHz から 30 MHz まで連続的に周波数を掃引しながら発射し、電離圏からの反射波を受信する。反射波は電離圏まで往復する時間だけ前に発射されたものであるため、そのとき発射されている送信波の周波数よりもわずかに低い。その周波数差を用いて反射点までの距離を測定することができる。周波数に対する反射点の高度を図にしたものをイオノグラムと呼ぶ。電波はプラズマ周波数が電波の周波数に一致する点で反射されるため、これにより電子密度ピーク以下の電子密度分布を知ることができる。本研究に用いたイオノゾンデの観測パラメータを表2にまとめた。観測は5分毎に繰り返され、イオノグラム即ち下部電離圏の電子密度分布が5分毎に得られる。ただし、Kototabang においては、他の観測機器に対する電波干渉を抑制するため、観測の上限周波数が 20 MHz に制限されている。

3 解析手法

表1 イオノゾンデ観測点の位置

観測点	地理緯度	地理経度	磁気緯度	高度 300km 磁力線の 磁気赤道高度
Chumphon	10.72°	99.37°	3.22°	315 km
Kototabang	-0.20°	100.32°	-10.10°	474 km
Chiang Mai	18.76°	98.93°	13.21°	576 km

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) (擬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 (Kototabang のみ 2-20 MHz)
周波数掃引速度	100 kHz s ⁻¹
掃引繰り返し周期	5 min

電離圏 F 領域の高度変動は、電離圏電場、中性風による力学的力及びイオン化学反応によって決められる。Bittencourt and Abdu [13]の研究により、日没後の電離圏においてはイオノグラムから直接読み取った電離圏 F 領域仮想高度 ($h'F$) の変動は電離圏の運動の良い指標であることが分かっている。日没後、消滅率の高い分子イオンが卓越する電離圏 E 領域及び F1 領域は速やかに消滅し、これらの領域における電波の伝播遅延はほぼ無視できるものになり、電離圏 F 領域下部で反射される電波の仮想高度は実高度に近いものになる。このことから、本研究では周波数 2.5 MHz (電子密度 $7.75 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-3}$ に対応) における $h'F$ を手動で読み取り解析に用いることにした。3 地点で $h'F$ を読み取ることにより、下部電離圏電子密度の緯度構造を知ることができる。イオノグラムは 5 分毎に得られているが、 $h'F$ の読み取りは 15 分毎に行い、必要に応じて 5 分毎のイオノグラムを確認することとした。なお、高度 300 km 以下においてはイオン化学反応による見かけの電離圏高度変動が無視できないことが知られている [13]。実際 2.5 MHz における $h'F$ が 300 km を下回することは珍しくない。しかしそのような場合においても、見かけの高度変動を速度に変換し定量的な議論を行わない限り、電離圏ダイナミクスの定性的な議論には十分用いることが可能である。

イオノグラムからはプラズマバブルの存在を検出することもできる。プラズマバブルが存在すると、それに伴う様々な空間スケールの電離圏不規則構造によりイオノゾンドの電波が散乱を受け、イオノグラム上の反射高度が広い周波数範囲にわたって高度方向に不鮮明になる。これをレンジ型赤道スプレッド F (ESF) と呼ぶ。レンジ型 ESF は下部電離圏における電離圏不規則構造の存在を示すもので、全てがプラズマバブルに対応するとは限らない。しかし、磁気赤道を含む磁気子午面に並ぶ 3 地点の ESF を調べることにより、ESF の緯度構造を知ることができる。プラズマバブルは磁気赤道で発生し、高度方向に発達しつつ同時に磁力線に沿って極方向に発達する。従って以下の 2 つの条件を満たす ESF をプラズマバブルによるものであると判断することとした。(1) 3 地点全てにおいて強い ESF 観測がされる。ここで強い ESF とは、F 領域のイオノグラムが高度方

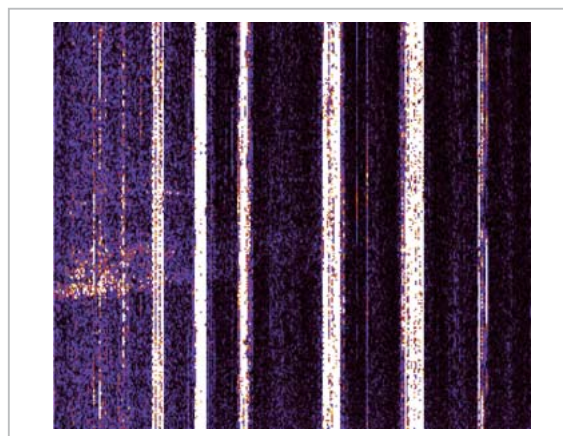


図2 強いスプレッド F の例

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。

向に不鮮明になり電子密度ピークに対応する臨界周波数付近の特徴的な形をとどめなくなったものを言う。図 2 は強い ESF の例である。(2) 磁気赤道に近い Chumphon で最初に観測され、ある程度の遅れをもって Kototabang、Chiang Mai で観測される。ESF が Chumphon のみで観測される場合は、電離圏不規則構造は電離圏下部のみにとどまり、プラズマバブルには発達していないと判断した。プラズマバブルは磁気赤道上の F 領域の日没付近で発生し東向きに移動することが知られている [14] ので、日没後早い時間に観測されるプラズマバブルは観測点近くにおいて発生したものの、遅い時間に観測されるものは観測点遠方で発生し観測点上空へ移動してきたものと考えることができる。従って、本研究では日没後の 19 - 21 時 LT に観測されたプラズマバブルを観測点近傍で発生した「fresh」なプラズマバブルとし、それよりも遅い時間に観測されたものを遠方で発生し移動してきた「fossile (化石)」なプラズマバブルとした。「fresh」なプラズマバブルは、観測点付近の電離圏状態の影響を受けて発生していると考えられるのに対し、「fossile」なプラズマバブルの発生は観測点付近の電離圏と深く関係しているとは考えにくい。すなわち、「fossile」なプラズマバブルしか観測されなかった場合は、観測点付近でプラズマバブルは発生しなかった場合に分類すべきである。これらのことから、本研究ではそれぞれの日を「fresh」なプラズマバブルが観測された場合と、「fossile」なプラズマバブルのみ観測されたか

プラズマバブルが観測されなかった場合に分類し、電離圏状態との関係調べることとした。

4 結果

本研究では、東南アジア域でプラズマバブルの発生頻度が高い春分・秋分付近のデータとして、2004年10月と2005年3～4月に SEALION の3観測点(図1、表1)によって観測されたイオノグラムから読み取った h'F と ESF の発生の有無を用いた。図3は Chumphon における PRE に伴う h'F の最高値と、Chumphon における h'F が最高に達したときの Kototabang 及び Chiang Mai の h'F を示したものである。この Kototabang、Chiang Mai の h'F がスポラディック E 層による遮蔽などのために読み取れない場合は、5分ごとのイオノグラムから読み取った h'F から内挿したデータを用いた。図中の黒丸は「fresh」なプラズマバブルが観測された日を示している。これを見ると、「fresh」なプラズマバブルが観測された日は、Chumphon の最高 h'F が発生しない日よりも高い傾向にあることが分かる。しかしながら、Chumphon の最高 h'F が高い場合でも、「fresh」なプラズマバブルが観測されていない日があることも分かる。Chumphon の最高 h'F が高い場合に「fresh」なプラズマバブルが観測されるかされないかの違いはどこにあるだろうか? その違いは磁気赤道から離れた Kototabang と Chiang Mai の h'F にあり、「fresh」なプラズマバブルが観測されている日には、磁気赤道近くの Chumphon だけでなく、磁気赤道から離れた Kototabang と Chiang Mai でも電離圏が持ち上げられていることが見て取れる。

このことは、3観測点の h'F の時間変動(図4)を見てみることにより、よりはっきりと分かる。図4では、各日を (a)「fresh」なプラズマバブルが観測された日、(b)「fresh」なプラズマバブルが発生しなかった日で Chumphon における最高 h'F が 325 km よりも高かった日、(c)「fresh」なプラズマバブルが発生しなかった日で Chumphon における最高 h'F が 325 km よりも低かった日、の3つに分類し、3観測点それぞれの平均的な h'F 変動を示したものである。「fresh」なプラズマバブルが発生した日(図4a)は、PRE に伴い3観測点

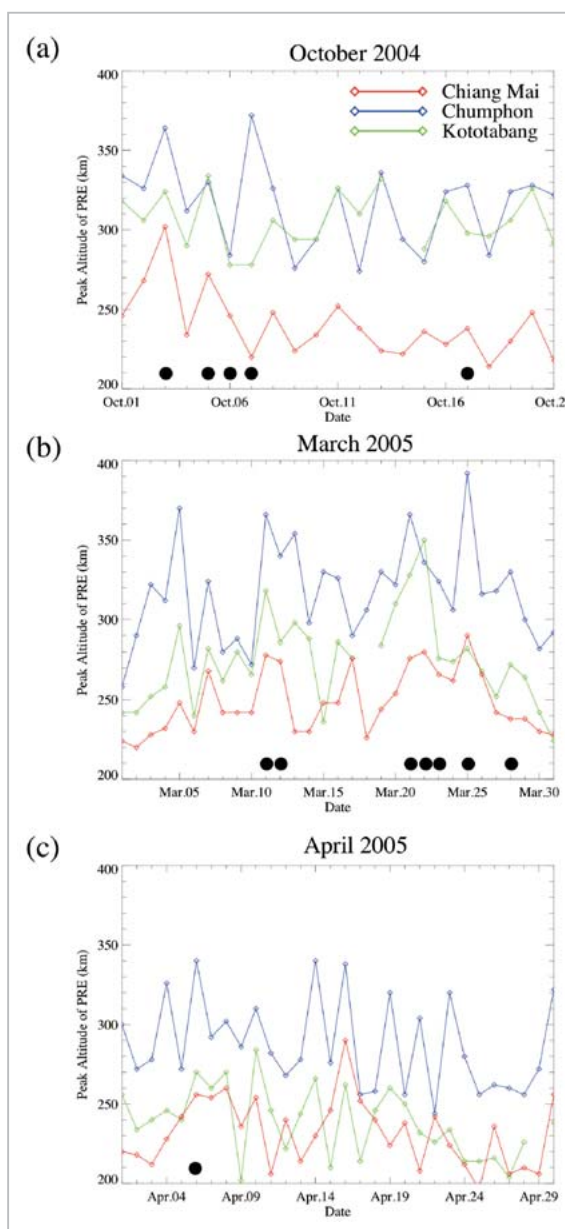


図3 (a)2004年10月、(b)2005年10月、(c)2005年4月の磁気赤道(Chumphon)における最大 h'F (青線) [12]

緑線、赤線はそれぞれ、Chumphon において h'F が最大となったときの Kototabang と Chiang Mai における h'F である。黒丸はその日に「fresh」なプラズマバブルが観測されたことを示す。[12]

全てで h'F が増大している(電離圏が持ち上げられている)ことが分かる。Chumphon で h'F が大きく増大しながらも「fresh」なプラズマバブルが観測されなかった日(図4b)においては、Chiang Mai における h'F の増大が非常に小さく、反対に Kototabang では「fresh」なプラズマバブルが観測された日の Chumphon に匹敵するほど増大していることがわかる。言い換えれば、下部電離圏電

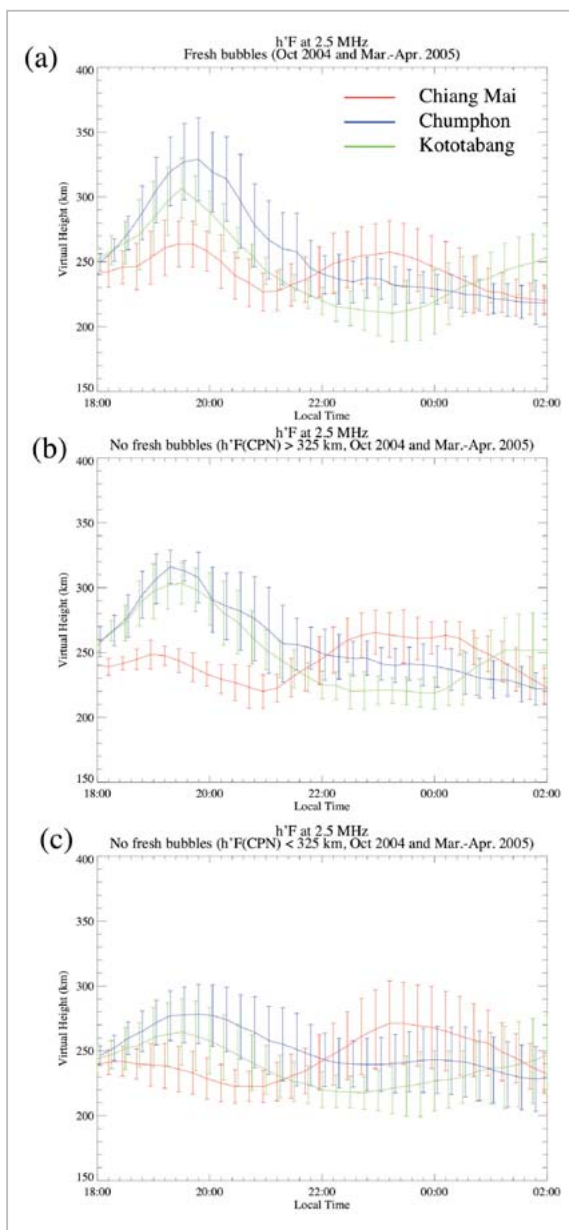


図4 Chumphon (青)、Kototabang (緑)、Chiang Mai (赤)における平均的なh'Fの時間変動

(a) 「fresh」なプラズマバブルが観測された場合、(b) Chumphonにおける最大h'Fが325 km以上であったにも関わらず「fresh」なプラズマバブルが観測されなかった場合、(c) Chumphonにおける最大h'Fが325 km未満であった場合。[12]

電子密度が磁気赤道を挟んで南北非対称な構造を持っている。図4cはPREが弱い日のh'Fを示しており、このような場合には「fresh」なプラズマバブルは一度も観測されなかった。図5はKototabangとChiang Maiのh'Fの差を示したもので、Chumphonでh'Fが大きく増大しながらも「fresh」なプラズマバブルが観測されなかった日に

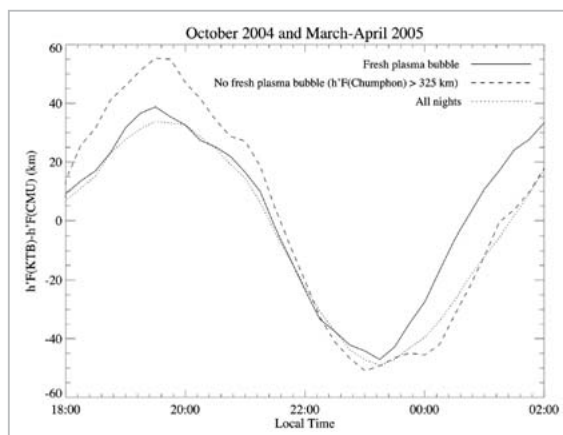


図5 KototabangとChiang Maiのh'Fの差の時間変動

実線は「fresh」なプラズマバブルが観測された場合、破線はChumphonにおける最大h'Fが325 km以上であったにも関わらず「fresh」なプラズマバブルが観測されなかった場合、点線は全ての場合において平均を取ったもの。[12]

においては、PRE 極大付近においてKototabangとChiang Maiのh'Fの差が明らかに大きくなっていることが分かる。ここで、PRE付近においてChiang Maiのh'FがKototabangのh'Fよりも系統的に低い(線が正にずれている)ことが見て取れるが、これはChiang MaiがKototabangの厳密な磁気共役点ではなく、わずかに高緯度側に位置しているためであると考えられる。Kototabang、Chiang Maiは通常赤道異常帯のピークの内側にあり、赤道異常帯のピークにより近いChiang MaiではKototabangよりも電子密度が一般的に高く、ピーク下側の等電子密度面は低い。本研究で用いたh'Fは一定の周波数(2.5 MHz)で読み取っているため、2.5 MHzの電波は電子密度の高いChiang Maiの方が低い高度で反射される。KototabangとChiang Maiのh'Fの系統的な違いは以上のように説明できると考えられる。

5 考察

本研究における解析により、PREが強いのに関わらずプラズマバブルが発生しない場合には下部電離圏電子密度の南北非対称構造がよりはっきりと現れていることが分かった。これは、下部電離圏電子密度に強い南北非対称が存在する場合プラズマバブルの発生が抑制されるということであり、磁力線に沿って積分したPedersen電気伝

導度に大きく寄与する電離圏下部 F 領域の電子密度分布がプラズマバブル発生の重要な要因の一つであるということを示す。磁力線に沿って積分した Pedersen 電気伝導度の増大は、PRE そのものの抑制にも働くが、プラズマバブルの非線形発展の抑制にも働く [1]。本研究の結果は、下部電離圏電子密度の南北非対称が存在する場合に PRE が強くてもプラズマバブルの発生が抑制されることを示しており、PRE 自体を抑制するほどではなくとも、プラズマバブルの非線形発展を抑制することにより、プラズマバブルの発生が抑制されているものと考えられる。

夜間の電離圏下部 F 領域の高度は主に、磁気赤道においては電離圏電場のみによって決まるが、磁気赤道から離れた場所においては電離圏電場に加え、磁気子午面に沿った熱圏中性風のイオン・中性粒子衝突を介したドラッグ効果が重要な役割を果たす。電離圏 F 領域において磁力線はほぼ等ポテンシャルであるので、電場による電離圏高度変動は磁気赤道を挟んだ両側で対称である。従って、電離圏高度変動の南北による違いは磁気子午面に沿った熱圏中性風によるものと考えられることができる。このことを用いて、磁気赤道と同一磁気子午面内で磁気赤道から離れた場所の h'F の時間変化から、磁気子午面に沿った熱圏中性風速度を導出することができる [15]。本研究では磁気赤道から離れた観測点が南北 2 点存在するため、それぞれの点において磁気子午面に沿った熱圏中性風速度が導出でき、それが磁気赤道を横切る風であるか、収束/発散する風であるかが推定できる。この手法により導出された平均的な中性風速度は、「fresh」なプラズマバブルが観測された場合 (図 4a) において赤道を横切り北向き 5 m s^{-1} 、PRE が強いにも関わらず「fresh」なプラズマバブルが観測されなかった場合 (図 4b) において赤道を横切り北向き 15 m s^{-1} であった。PRE が弱かった場合 (図 4c) においては赤道を横切り北向き 5 m s^{-1} であり、「fresh」なプラズマバブルが観測された場合とほぼ同じであった。

本研究の結果は、熱圏赤道横断中性風がプラズマバブルの発生を抑制する要因のうちの重要な一つであることを示した。しかし、過去の TEC 観測による解析結果では、このような結論は見出されていない [5]–[7]。この違いは以下のように説明

できる。Maruyama [3] [16]、Devasia 他 [17] によれば、プラズマバブルの発生に重要なものは下部電離圏高度、すなわち磁力線に沿って積分した Pedersen 電気伝導度に大きく寄与する下部電離圏の電子密度である。一方、TEC は電波源の衛星から受信機までの伝播経路に沿った電離圏プラズマ全ての寄与を受けており、下部電離圏ではなく電離圏 F 領域ピーク付近の電離圏プラズマが大きく寄与する。さらに、電離圏 F 領域ピーク付近から上の電子密度分布は、その時の熱圏中性風だけでなく昼間以来の赤道異常帯の発達履歴によって大きく影響を受ける。従って、TEC における南北対称/非対称構造とプラズマバブルの発生との関連性が低くても不思議ではない。

6 結論

本研究の結果、熱圏赤道横断中性風がプラズマバブルの発生を抑制する要因のうち重要な一つであることが明らかとなった。プラズマバブルは様々な空間スケールの電離圏不規則構造を伴い、シンチレーションによる衛星通信の障害や、TEC の急激な空間変化によるディファレンシャル衛星測位の精度劣化の原因となる。宇宙天気観測の観点から、プラズマバブルの発生を予測することは急務であるが、図 3、4 からも分かるように h'F には大きな日々変動があり、プラズマバブルの発生には熱圏赤道横断中性風の他にも様々な要因が関わっていると考えられる。しかしながら、本研究により熱圏赤道横断中性風は明らかにプラズマバブルの発生の日々変動を支配する重要な要因であることが分かったことから、熱圏中性風速度の詳細な観測がプラズマバブルの発生予測につながる次のステップの一つであると言える。

謝辞

Chiang Mai, Chumphon, Kototabang におけるイオノゾンデ観測は、それぞれ Chiang Mai 大学 (タイ)、Mongkut 王工科大学 (タイ)、インドネシア航空宇宙庁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。Kototabang における観測は、京都大学生存圏研究所の支援も受けている。

参考文献

- 1 Abdu, M. A., "Outstanding problems in the equatorial ionosphere-thermosphere electrodynamics relevant to spread F", *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, Vol.63, pp.869-884, 2001.
- 2 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.
- 3 Maruyama, T., "Modeling study of equatorial ionospheric height and spread F occurrence", *J. Geophys. Res.*, Vol.101, pp.5157-5163, 1996.
- 4 Mendillo, M., J. Baumgardner, X. Q. Pi, P. J. Sultan, and R. T. Tsunoda, "Onset conditions for equatorial Spread F", *J. Geophys. Res.*, Vol.97, pp.13865-13876, 1992.
- 5 Mendillo, M., J. Meriwether, and M. Biondi, "Testing the thermospheric neutral wind suppression mechanism for day-to-day variability of equatorial spread F", *J. Geophys. Res.*, Vol.106, pp.3655-3663, 2001.
- 6 Valladares, C. E., S. Basu, K. Groves, M. P. Hagan, D. Hysell, A. J. Mazzella Jr., and R. E. Sheehan, "Measurement of the latitudinal distributions of total electron content during equatorial spread F events", *J. Geophys. Res.*, Vol.106, pp.29133-29152, 2001.
- 7 Valladares, C. E., J. Villalobos, R. Sheehan, and M. P. Hagan, "Latitudinal extension of low-latitude scintillations measured with a network of GPS receivers", *Ann. Geophys.*, Vol.22, pp.3155-3175, 2004.
- 8 Lee, C.-C., J.-Y. Liu, B. W. Reinisch, W.-S. Chen, and F.-D. Chu, "The effects of the pre-reversal drift, the EIA asymmetry, and magnetic activity on the equatorial spread F during solar minimum", *Ann. Geophys.*, Vol.23, pp.745-751, 2005.
- 9 Abdu, M. A., K. N. Iyer, R. T. de Medeiros, I. S. Batista, and J. H. A. Sobral, "Thermospheric meridional wind control of equatorial spread F and evening prereversal electric field", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.33, pp.L07106, doi,10.1029/2005GL024835, 2006.
- 10 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.
- 11 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.
- 12 Saito, S. and T. Maruyama, "Ionospheric height variations observed by ionosondes along magnetic meridian and plasma bubble onsets", *Ann. Geophys.*, Vol.24, pp.2991-2996, 2006.
- 13 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.
- 14 Yokoyama, T., S. Fukao, and M. Yamamoto, "Relationship of the onset of equatorial F region irregularities with the sunset terminator observed with the Equatorial Atmosphere Radar", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.31, pp.L24804, doi,10.1029/2004GL021529, 2004.
- 15 Krishna Murthy, B. V., S. S. Hari, and V. V. Somayajulu, "Nighttime equatorial thermospheric meridional winds from ionospheric h'F data", *J. Geophys. Res.*, Vol.95, pp.4307-4310, 1990.
- 16 Maruyama, T., "A diagnostic model for equatorial spread F, 1, Model description and application to electric field and neutral wind effects", *J. Geophys. Res.*, Vol.93, pp.14611-14622, 1988.
- 17 Devasia, C. V., N. Jyoti, K. S. V. Subbarao, K. S. Viswanathan, D. Tiwari, and R. Sridharan, "On the plausible linkage of thermospheric meridional winds with the equatorial spread F", *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, Vol.64, pp.1-12, 2002.



齋藤 享

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

電離圏電波伝播に関する研究開発 / 電離圏不規則構造とSEA L I O Nプロジェクト / プラズマバブルの発生における赤道横断熱圏風の効果