

3-2 電離圏不規則構造とSEALIONプロジェクト

3-2 Ionospheric Irregularities and the SEALION Project

3-2-1 SEALIONプロジェクトの概要と初期解析結果

3-2-1 Outline of the SEALION Project and Initial Results

丸山 隆 齋藤 享 川村真文 野崎憲朗 上本純平 津川卓也
陣 英克 石井 守 久保田 実

MARUYAMA Takashi, SAITO Susumu, KAWAMURA Masabumi, NOZAKI Kenro,
UEMOTO Jyunpei, TSUGAWA Takuya, JIN Hidekatsu, ISHII Mamoru, and
KUBOTA Minoru

要旨

電離圏不規則構造として最重要なプラズマ・バブルの発生機構を調べることを主な目的に、東南アジア域に電離圏観測網を整備してきた。3機のイオノゾンデ観測点は東経100°の磁気子午面に沿って配置され、うち二つはタイ北部とスマトラ島(インドネシア)の磁気共役点付近に、残りのひとつはマレー半島の磁気赤道付近にある。さらに、2機を東に6.3°離れたベトナムの磁気赤道付近と低緯度に配置した。このうち初期解析としてタイ—インドネシアの磁気子午面ネットワークから得られたデータを解析し、ネットワーク観測が電離圏・熱圏ダイナミクスの理解に極めて有効であることを示した。特に磁気赤道を横切る熱圏風はプラズマ・バブルの発生に強く関与するとされており、熱圏ダイナミクスの情報は電離圏不規則構造の発生予測研究に不可欠である。

An ionosonde network consisting of a meridional chain and longitudinal pairs was established in the Southeast Asian area. Three of five ionosondes are along the magnetic meridian of 100°E; two are close to the magnetic conjugate points in Northern Thailand and West Sumatra, Indonesia, and the other is near the magnetic equator in the Malay Peninsula, Thailand. The fourth and fifth ionosondes are also near the magnetic equator and low latitude in Vietnam but separated by about 6.3° towards east from the meridional chain. For a preliminary data analysis, nighttime ionospheric height variations at the three stations of the meridional chain were examined. The results demonstrate that the coordination of the network has a great potential for studying ionosphere/thermosphere dynamics. Through the assistance of model calculations, thermospheric neutral winds were inferred and compared with the HWM93 empirical thermospheric wind model. Higher-order wind variations that are not represented in the empirical model were found.

[キーワード]

プラズマ・バブル, 熱圏ダイナミクス, 赤道横断風, 収束風, $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト

Plasma bubble, Thermospheric dynamics, Transequatorial wind, Convergence wind, $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift

1 緒言

電離圏の状態を記述するのに最も基本的なパラメータは最大電子密度 (N_mF_2) と電子密度が最大に達する高度 (h_mF_2) である。電離圏密度がある高度で最大になることは Chapman [1] によって最初に示された。そこでは、大気密度が高さとともに指数関数的に減少する理想的な大気を考え、化学平衡と拡散平衡の均衡を通じて大気密度の減少率(スケールハイト)が h_mF_2 を決定している [2][3]。しかし、現実の電離圏はそのような静的で単純なものではない。中緯度では東向きの電場と地球磁場の作用によるプラズマの $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト、あるいは中性大気粒子とイオンの衝突で起こる磁力線に沿ったプラズマの運動が電離圏高度を大きく変化させる。電離圏高度と最大電子密度の変化は密接に関係している。すなわち電離圏高度が上昇すると、高高度で小さくなる再結合係数の性質から電子密度が上昇する [4][5]。低緯度での N_mF_2 の変動は中緯度に比べてさらに複雑である。磁気赤道では東向き電場による $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトは電離圏高度を上昇させ、高高度ではイオン-中性大気の衝突周波数が減少するため、重力の作用でプラズマが磁力線に沿って低緯度側へ拡散する。そのため結果的に磁気赤道上の最大電子密度は減少する [6][7]。この現象は fountain 効果と呼ばれている。低緯度側への拡散はある緯度を中心に最大電子密度の増加を引き起こす。磁気赤道を挟んで南と北に最大電子密度の(緯度分布としての)ピークが出現する現象を赤道異常 [8][9] と呼ぶ。さらに、赤道付近での電子密度分布を複雑にしているのが赤道を横切る中性大気風である。中性大気風に引きずられた磁力線に沿うプラズマの運動は磁気赤道の風上で電子密度減少、風下で密度増加の効果を持つ。しかし、中緯度と同様に赤道に向かう風は電離圏高度を上昇させ極に向かう風は電離圏高度を下降させる。したがって、風上では高度の上昇による再結合係数の減少から電子密度増加を、風下では逆に電子密度減少の効果を持つ。この二つの相反する効果の大小関係が実際の電子密度変動を決定する。Sharma と Hewens [10] は、赤道を横切る風がプラズマを夏半球から冬半球へ運ぶために、赤道異常の二つの山(crest)が冬半球側で高いことを示した。同様な南北非対称は Maruyama と Matuura [11] の

第 9b 図にも見られる。そこでは、北(冬)半球で最大電子密度高度が低いにも関わらず密度は高くなっている。Walker と Chan [12] は N_mF_2 と h_mF_2 のモデル計算により、上に述べたような複雑な観測事実が赤道横断風効果であることを示した。

外力によって複雑に変化する N_mF_2 に比べて、 h_mF_2 の外力に対する応答は遥かに直截的である。東西電場による $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトによる磁力線直角方向の運動、中性大気風に引きずられた磁力線方向の運動はより直接的に高度変動に現れる [3][13][14]。

低緯度における電離圏高度変動のひとつの重要な役割は電離圏プラズマ不安定との絡みにある。磁気赤道近傍では日没と共に電離圏下端部が急速に消滅する。その結果、鉛直方向の電子密度勾配が急峻になり Rayleigh-Taylor (R-T) 不安定によってプラズマ・バブルが発生し易くなる。R-T 不安定はイオン-中性大気粒子の衝突周波数が小さくなる高高度で成長率が高くなるが、電離圏高度の上昇に大きな役割を持つのは日没直後の東向き電場の増強による上向き $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトである。この電場増強は prereversal enhancement と呼ばれ、電離圏 F 領域高度における中性大気風によるダイナモ効果その原因である [15]-[18]。100 ms⁻¹ を超えるような強い赤道横断風も見かけ上の赤道電離圏高度上昇(特に電離圏下端)を引き起こす。これは、磁気赤道で下部電離圏を通過する比較的短い磁力管中のプラズマが総て吹き払われてしまう効果であるが、プラズマ不安定を引き起こさない点が電場効果と異なる [19]。赤道横断風が R-T 不安定を抑制する効果として、風下側で磁力線にそって押し下げられたプラズマによる急激な Pedersen 導電率の上昇が考えられている [11][20]-[22]。すなわち、R-T 不安定に伴って発生する磁気赤道付近の局所電場が伝導率の高い磁力線を介して低緯度で短絡されるため、不安定性が抑えられるというものである。

電離圏の高度変動は最大電子密度の変動に比べてより直截的であるとは述べたが、東西電場による変動と磁気子午面内の風による変動では意味合いが大きく異なり、二つの変動要因を分離することは特に重要である。しかし、限られた数の観測点から電場と風の効果を区別することは必ずしも容易ではない。

中緯度において、 h_mF_2 の変化から中性大気風を

求めようとする試みが数多くなされてきた[13][23]-[27]。この中で、Miller 他[24]は磁気子午面に沿った中性大気風の水平成分と $h_m F_2$ の平衡状態からのずれを結びつけるための数値係数を求め、その結果をもとに $h_m F_2$ 観測値から中性大気風を推定している。この方法では、中性大気風推定にとって $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトによる高度変動は無視できると仮定しているが、Millstone Hill レーダー(磁気緯度 $\sim 51^\circ$)の観測結果とつぎ合わせると、電場効果は無視したことによる不確かさは最大電子密度高度の測定精度およびレーダーによるイオン・ドリフト速度の不確かさの範囲内である[28]。Igi 他[29]は Miller 他[24]の手法に基づいて Kokubunji(磁気緯度 $\sim 30^\circ$)の $h_m F_2$ から中性大気風を推定し、信楽の MU レーダー観測と比較した。その結果、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトを無視したことによる風の推定誤差は大きくないことが示された。

低緯度では磁気伏角が小さく電離圏高度変動を引き起こす $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトの効果が相対的に大きくなっていくため、上に述べたような $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトを無視して高度変動から中性大気風を推定する方法は破綻する。De Medeiros 他[14]は、中緯度で用いられてきた方法を低緯度に適用するため、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトの効果を取り込んで Cachoeira Paulista(磁気緯度 $\sim 19^\circ$)上空の中性大気風を推定した。 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトは、ほぼ同じ磁気子午面で磁気赤道に近い Fortaleza の 15 分間隔のイオノグラムを用いて、 $h'F$ (見かけ上の電離圏下端高度)の時間微分から推定した値を磁力線の形に則り低緯度に投影したものをを用いた。こうして得られた中性大気風は経験的な中性大気風モデルである HWM-90[30]およびファブリペロー干渉計による測定値と相応に一致している。

Bittencour と Sahai[31]は同じ磁力線で結ばれた低緯度の磁気共役点で観測された $h_m F_2$ を比較して中性大気風を推定した。この方法で得られる風は磁気緯度で $\pm 20^\circ$ 程度離れた二地点の平均的な赤道横断風成分を表しているが、3000 km 離れた二地点の風は大きく異なるのが普通である。すなわち、中性大気風は赤道へ収束あるいは極側へ発散する成分と赤道を横切る成分の重ねあわせであり、磁気共役点の観測だけからでは収束/発散成分は求めることが出来ない。仮に、外力が無いときの電離圏高度が何らかの方法で推定でき、両地

点で同時に高度上昇が観測されたとして、その原因が赤道収束風であるか、東向き電場による上向き $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト(磁気共役点では $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトはほぼ等しい)であるか区別できない。

このような問題を解決し、熱圏/電離圏のダイナミクスを正確に捉えるために、われわれは先ず東経 100° の磁気子午面に沿って 3 カ所の観測地点を選んだ。そのうち二つはほぼ磁気共役点に、残りのひとつは中間の磁気赤道付近にある。電離圏の諸現象は概ね太陽の西進と共に移動する(migrate)が、東西方向に太陽の移動に同期しない大規模な揺らぎのあることが分かっている、電離圏不安定に何らかの寄与をしている[32][33]。そこで、東経 100° の南北チェーンに加えて、東に離れたベトナムの磁気赤道近傍および低緯度に 4、5 番目の観測点を置くことにした。

2 イオノゾンデ観測網

R-T プラズマ不安定の起き易い磁気赤道は図 1 に示すように、かなりの部分が大洋上にある。そのため、磁気赤道付近で南北の磁気子午面に沿った観測網を構築するには地理的な制限が非常に大きい。幸い、東南アジアでは磁気赤道の北側にインドシナ半島、南側にはインドネシアの島嶼がある。我々はここに電離圏観測網(SEALION: Southeast Asia Low-latitude Ionospheric Network)を整備してきた。最初に整備したのは東経 100° の南北チェーンで、タイ北部のチェンマイ(チェンマイ大学農学部実習農場内)、マレー半島中部のチュンボン(タイ・モンクット王工科大学ラカバンのチュンボン・キャンパス構内)、そしてスマトラ島中部のコタババン(京都大学の赤道大気レーダーに隣接するインドネシア航空宇宙庁実験場構内)である。チュンボンは磁気緯度 3.3°N と磁気赤道に近く、コタババン(地理緯度 0.2°S)とチェンマイ(地理緯度 16.6°N)は磁気共役点に近い関係にある。これら観測点は経度にして 1.4° 以内にあり、チェンマイとコタババンを通る磁気子午面は東西方向に 140 km のずれしかない。第 4、5 の観測点はベトナム南部のバクリウと北部のフーツイ(いずれもハノイ地球物理研究所の観測施設構内)である。バクリウとチュンボンの経度方向の距離は F 領域高度で 740 km である。これらの位置関係とパ

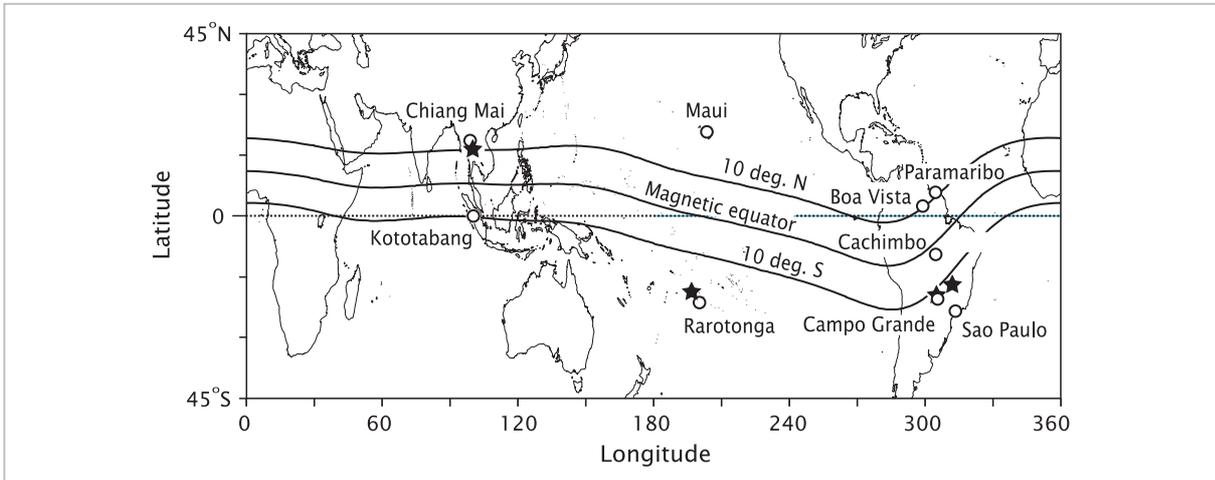


図1 磁気赤道および南北10°の磁気緯度

これまでに観測の行われた幾つかの施設の位置とその磁気共役点を同時に示す。Paramaribo - Sao Paulo、Maui - Rarotongaの各対はBittencourtとSahai^[31]によって、Boa Vista - Cachimbo - Campo GrandeのチェーンはCOPEXキャンペーンで運用された^{[34][35]}。

表1 SEALIONのイオノゾンデ局

イオノゾンデ	地理座標		磁気緯度	地磁気共役点	
	経度	緯度		経度	緯度
チェンマイ	98.9°E	18.8°N	13.0°N	99.2°E	2.3°S
チュンポン	99.4°E	10.7°N	3.3°N	99.4°E	5.6°N
コトタバ	100.3°E	0.2°S	10.0°S	100.1°E	16.6°N
フーツイ	106.0°E	21.0°N	15.7°N		
バクリウ	105.7°E	9.3°N	1.7°N		

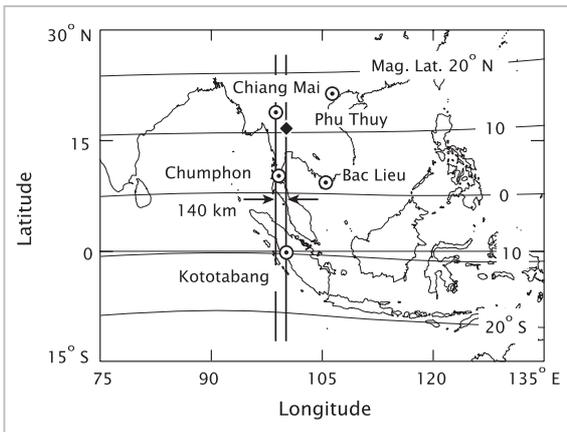


図2 東南アジア電離圏ネットワーク(SEALION)の拠点
コトタバンの磁気共役点が菱形で示されている。

ラメータを図2および表1にまとめて示す。

これら遠隔地の観測点ではイオノゾンデをほぼ無人で運用する必要があるため、新たに低電力で運用できるFM-CW (frequency modulated continuous

wave) 型の観測機を開発して用いている。その詳細については本特集号の別の論文^[36]に記述する。

3 電離圏高度変動の予備的考察

電離圏の高さを議論するときはF領域で電子密度が最大になる高度を用いるのが一般的である^{[3][24][26][31]}。しかし、イオノゾンデ観測から最大電子密度高度を求めるにはトレースを全周波数範囲で読み取り、これをもとに逐次計算^[37]を行うか、あるいは伝送特性パラメータ $M(3000)F_2$ から近似的に変換する方法^{[38][39]}がある。しかしながら、トレースを全周波数範囲にわたり読み取ることや臨界周波数付近の読み取りを精度良く行うには多くの労力を要する。電離圏高度を表す別の指標として用いられるのがF領域からのエコーの見かけ高度 $h'F$ である。これは、イオノグラムから容易に読み取ることが出来る。日没と共に電

離圏下端部の電離消滅が進むと、そこでの電波伝播遅延が無視できるようになり、 $h'F$ の変化が電離圏高度変化の良い指標となる。本稿では $h'F$ を用いて電離圏ダイナミクスを議論する。しかし、結果の解釈には幾つかの留意すべき点がある。すなわち、電離圏高度が外力によって大きく降下する場合、電離圏最下部での電離消滅反応が $h'F$ を支配・決定するようになり、下降運動は小さく見積もられる。また、特に明け方の時間帯で、臨界周波数が低下するとエコーレースの周波数対見掛高度の傾斜が急になり、 $h'F$ が読み取る点の周波数に大きく依存する。そのため、観測最低周波数に制限があることと合わせて、 $h'F$ の値が高めに読まれる傾向がある。

電離圏高度は中性大気運動や東西電場などの外力で大きく変化するが、イオノゾンデ観測単独ではこの二つの効果を分離することが難しい。そこで、理想化された条件でモデル計算を行い、二つの効果がそれぞれどのように現れるかを調べた。モデル計算としてはイオンの連続の式を磁力線に沿って解き電離圏下端高度を求める(例えば文献 [19][20])もので、磁場はダイポール近似(地理赤道と地磁気赤道は一致)、季節は春分とし、中程度の太陽活動度 ($F_{10.7} = 100$) を仮定した。モデル計算自体は単純化されたものであり、理論から定性的に演繹できること以上の結果は期待できないが、観測結果を解釈する上で大いに役立つものである。

外力の有無それぞれのモデル計算の結果を 20 時 LT に電子密度が $7.75 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ になる高度について図 3 に示す。この電子密度は観測周波数 2.5 MHz に対応する。最初の計算は重力以外の外力を入れない場合、すなわち光化学反応と磁力線に沿う拡散だけを考慮したもので、外力を入れた場合の比較の基準とするため図 3 の各パネルに点線で示してある。電離圏高度は磁気赤道を中心に僅かに上昇しているが、これは運動によるものではなく、磁気赤道の下部を通過する磁力管が短く、再結合によって日没後にすばやく電子密度が低下するのに対して、低緯度では磁力線に沿う上方(赤道より)からの拡散が下部の電離消滅を補うように働くためである。

次に上向きの $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトが加わった場合について、結果を図 3a に太い実線で示す。電場は磁気赤道上で 30 ms^{-1} の $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトに相当す

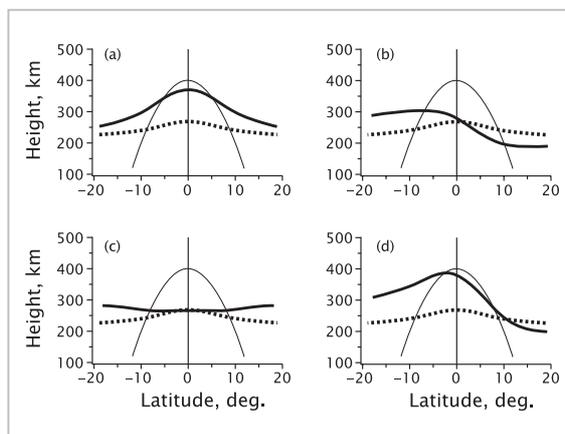


図3 電離圏下端の緯度変化

各パネルとも点線は重力以外の外力がないと仮定したときの高さで、細い線は赤道上 400 km を通過する磁力線を表す。太い線は (a) $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトの効果、(b) 赤道横断風の効果、(c) 赤道に収束する風の効果、(d) $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトと赤道横断風の足し合わせ効果を示す。

る値を 19 時に与えて 1 時間継続した後の高度変化を見たものである。この電場ドリフトによる磁気赤道上での電離圏高度上昇は 102 km で、実際の磁力管の全ドリフト量 ($30 \text{ ms}^{-1} \times 3600 \text{ s} = 108 \text{ km}$) にほぼ等しい。一方、磁気緯度 10° の低緯度では、上昇量が 38 km に留まっている。これは、磁気赤道の高高度から磁力線に沿う下方へのプラズマ・ドリフトが強まった (fountain effect) ことによる。3 つめの計算は赤道横断風の効果調べたもので、結果を図 3b に示してある。ここでは、高度および緯度に関して均一に 100 ms^{-1} の北向きの風を 19 時に与えて 1 時間継続した後の高度変化を見ている。風上側の磁気緯度 10° S では 60 km の高度上昇があるのに対して、風下側磁気緯度 10° N では 43 km の下降が見られる。上昇と下降の絶対値の違いは、風下側での高度低下によって再結合の効果が現れ、見かけの高度低下が抑えられているためである。また磁気赤道においても、およそ 10 km の上昇が見られるが、これは風によってプラズマが吹き払われた効果 [19] である。さらに注目すべきは、風上側の磁気緯度 10° S の高度は磁気赤道より高いことである。図 3c は赤道に向かって収束する中性大気風の効果を表す。この計算では南北の磁気緯度 10° の地点で赤道向きの 30 ms^{-1} の風を、これより赤道側では直線的に風速を弱めて磁気赤道で速度が 0 になるようにして 19 時から 1 時間与えた。低緯度では磁

力線に沿ってプラズマが上方に運ばれるため、磁気赤道上より高度が上昇していることが分かる。最後の計算は電場ドリフトと赤道横断風を同時に与えた場合で、結果を図 3d に示す。図 3a と 3b の重ねあわせになっていることが見て取れる。重要な点は南北磁気緯度 10° の地点での電離圏高度差が約 100 km となり、電場を入れないとき(図 3b)の値 ($60 + 43$ km) とほぼ等しいことである。このことは、赤道横断風によって引き起こされる南北の電離圏高度の差が電場ドリフトの大きさに強く依存しないことを示している。

これまで述べてきた、外力による電離圏高度変動はすべて、19時から20時までの1時間で到達した効果である。本来、外力による電離圏高度変動には蓄積効果があり、外力は一般に時間の関数であるから、観測データとの比較議論ではこの点にも留意する必要がある。図 4 は電離圏高度の変化がどの程度の時間で追従するか調べたものである。この計算では、 50 ms^{-1} の北向きの赤道横断風を 20 時に逆転させ、南向きで同じ強さの赤道横断風にしたときの高度変化を求めたものである。図から電離圏高度の南北差は 30 分で逆転し、1 時間後にはほぼ定常状態になったことが分かる。

4 初期結果

電離圏/熱圏システムは季節によって大きく変動するとともに、必ずしも原因が特定できない日々変動(weather)も大きい。そこで、ある程度連続した観測データを用いて、代表的な季節につ

いての平均的な描像(climate)を調べることにする。SEALION 南北チェーンで最初に完全なデータセットが得られたのは 2004 年末である。2004 年 12 月 7 日から 2005 年 1 月 5 日まで(冬至を挟んだ 1 ヶ月)の期間について、チェンマイ、チュンボン、コトタバンのイオノグラムから夜間 15 分ごとに 2.5 MHz における見かけ高度を読み取った結果を図 5 に示す。日ごとの値を細い実線で、また中央値(median value)を塗りつぶした菱形で表す。データ・ポイントが 04 時より後で減少しているのは臨界周波数が 2.5 MHz に近いからあるいはそれ以下に下がったことによる。低緯度、チェンマイとコトタバンの高度は 23 時より後で大きな日々変動を示しているが、チュンボンでは比較的変動が小さい。このことから、低緯度での高度変動は東西電場よりも中性大気風によるところが大きいと推測される。逆に、チュンボンでは 22-23 時に比べて 20 時前後に多少の日々変動が見られるが、これは東西電場の揺らぎによると考えられる。

次に中央値を用いて平均的な振舞を見ることにする。磁気赤道に近いチュンボンの高度変動は主に東西電場に支配されるから、これを電場強度のひとつの目安とすることが出来る。コトタバンの場合は 20 時を中心にチュンボンより高い高度に達しているが、これは電場の効果では考え難い。これより前の時間帯のチェンマイではチュンボンおよびコトタバンより高度が下がっているので総合すれば北向きの赤道横断風による効果(図 3b)の表れと結論できる。これをさらに定量的に議論するには幾つかの問題がある。北半球の冬であるから、太陽天頂角はコトタバンとチェンマイで大きく異なり、中性大気組成や熱圏温度も南北の観測地点で大きく異なると考えられる。また、チェンマイとコトタバンは完全には磁気共役ではなく、チェンマイの磁気緯度が僅かに高い。したがって、図 3a を参照すれば、アーチ状の磁力線の形状から、もともとチェンマイの高度はコトタバンより低くなる傾向にある。そこで、モデル計算を行い、中性大気風がないと仮定したときの電離圏高度を求め、その値と観測値を比較する。モデル計算は前述のものとはほぼ同じであるが、季節を通算日 356 日(冬至)、磁気緯度と地理緯度のずれを 8.2° と、実際の値に近づけた。最初に、電場を推定するため、中性大気風がないときのチュンボンの高度変

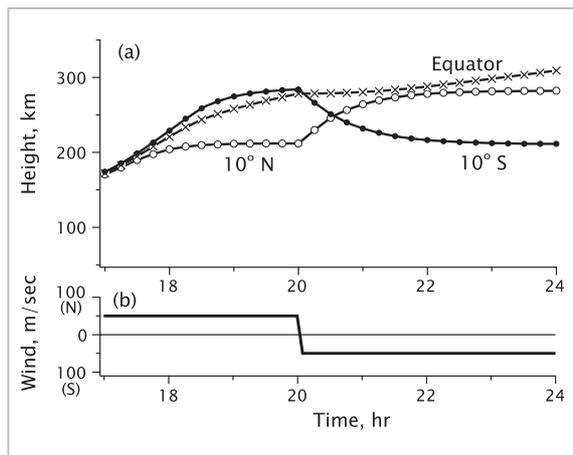


図4 赤道横断風の向きが逆転したときの電離圏高度の応答

動(中央値)が再現できるようにモデルに与える $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト速度を調整する。次に、得られた電場ドリフトの条件で、磁気子午面内の電子密度分布を求めて、チェンマイとコトタバンの電子密度が $7.75 \times 10^{10} \text{m}^{-3}$ となる高度を基準高度にとる。これと観測値(中央値)との差をプロットしたのが図 6a である。日没直後にはコトタバンの高度が基準高度よりも高く、チェンマイでは低くなっている。すでに述べたように赤道横断風の効果が強く効いている。しかし、時間の経過とともにコトタバンの高度はさらに上昇するが、チェンマイでは基準高度に近づく。20 時になると、チェンマイも基準高度より高くなり、両方の観測点で基準高度を超えている。一般に、二つの磁気共役点で高度が上昇するには二つの原因が考えられる。ひとつは $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトにより磁気子午面の全緯度で上昇する場合であり、もうひとつは赤道に収束する中性大気風によるものである。ここでは、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトの効果は基準高度を求める

際に織り込み済みであるから、図 6a の日没直後では赤道横断風の強さはほぼ同じままで、収束風が徐々に強まっていることになる。20 時を過ぎると、コトタバンの高度は基準高度に近づくが、チェンマイでは基準高度より僅かに高い状態が持続する。すなわち、赤道横断風成分は弱まり、収束風成分が残っている。22 時になると、チェンマイとコトタバンの曲線は交差し、赤道横断風の向きが逆転するが、再度 00 時に逆転が起こる。収束風成分についてみれば、22 時 30 分に一旦止むが、01 時頃に再び強まっている。

ところで、中性大気風については限られた観測データに基づいた全球的な経験モデル HWM93[40] が作られていて観測との比較にしばしば引用される。この経験モデルと比較するため、さらにモデル計算を行った。今度は HWM93 で与えられる中性大気風を入力し、チェンマイの $h'F$ 変動から $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト速度を再計算した。こうして得られた電場ドリフトと HWM93 風速場のもとで、コトタバンの高度を決めて、観測値との差を求めた。その結果を図 6b に示す。もし HWM93 風速場が正確であるならば SEALION イオノゾンデで観測された高度変動が正しく再現されていて、結果は殆どゼロの線になるはずである。実際、19 時付近

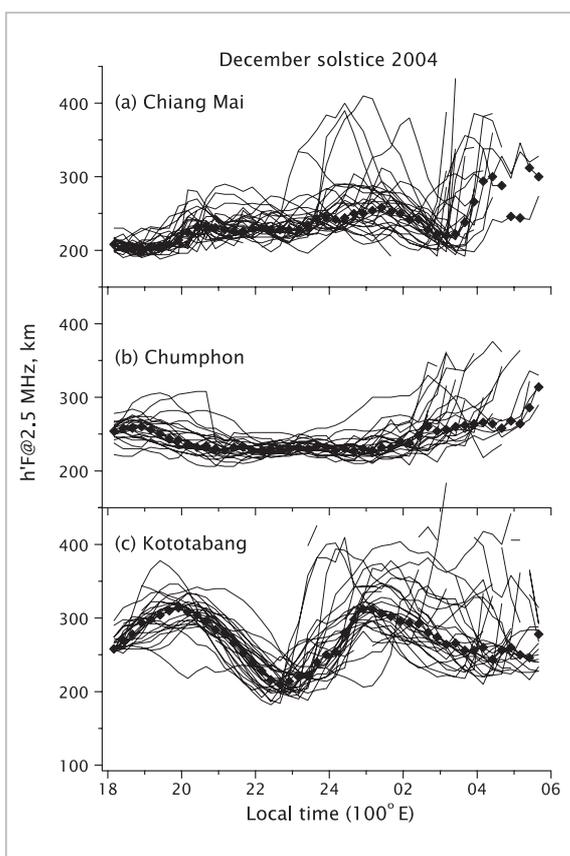


図5 2004年12月7日から2005年1月5日までの電離圏高度の観測値(細い実線)と期間中央値(塗りつぶした菱形)高度は2.5 MHzにおける見かけの高さ。

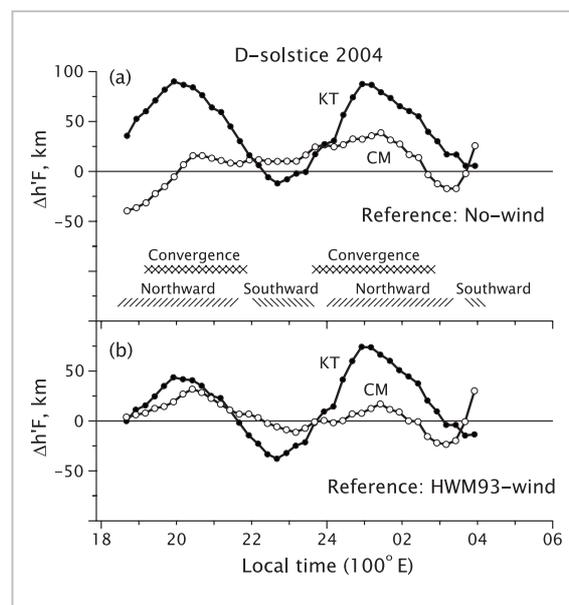


図6 モデル計算による基準高度と観測値(期間中央値)の差 (a)は風のないときの基準高度、(b)はHWM93モデルの風を与えた場合の基準高度である。

では HWM93 を用いた計算と観測は良く一致し、20 時付近のコトタバンについても差分が半分には減っている。しかし、それ以外では大きな食い違いが見られる。真夜中過ぎのコトタバンのピークは HWM93 を入れても殆ど変わっていない。夜間全体を通じて目立つのは、コトタバンの、チェンマイとともに 5-6 時間の周期でずれの大きさが変化していることである。もとより、HWM93 経験モデルでは 8 時間 (terdiurnal) より短い変動成分は考慮していない。しかし、この比較では 8 時間より短い周期の変動成分が無視できない振幅を持っていることを示している。

中性大気風は太陽の位置が変わることによって大きく季節変動する。図 7 と 8 に示したのは、それぞれ、北半球の春分を中心とした 1 ヶ月 (2005 年 3 月 5 日から 4 月 5 日) および夏至を中心とした 1 ヶ月 (2005 年 6 月 5 日から 7 月 7 日) の 3 観測点における高度変動である。図 5 と同様に毎日の値を細い実線で、中央値を菱形で表した。図 5、7、8 の中央値を図 9 にまとめて季節的な特徴を比較

する。3 月 (図 9b) の 19 時 30 分を中心にしてチェンボン (磁気赤道) の高度が低緯度のチェンマイとコトタバンの比べて高く、東西電場の prereversal enhancement が明瞭に現れている。春分および秋分に prereversal enhancement が強くなるのは電場変動の一般的な傾向と合致する [41]。また、チェンマイとコトタバンの高度差は他の季節に比べて比較的小さいが、その符号は 6 時間程度の周期で交互に入れ替わっている。これは、図 6 に示した 12 月の特徴とも共通するもので、赤道横断風が南北に振動していることを表している。次に 6 月 (図 9c) を見ると、コトタバンの高度は常にチェンマイが高い状態で推移している。これは太陽が北半球にあり、夜間を通して南向きの風が卓越することを表している。12 月と 6 月を比べると、南北の入れ替えだけでは再現されない特徴の違いがあり、磁気赤道が地理赤道より北にずれていることが南北/夏冬の対称性を崩し、季節特性を複雑化させていると考えられる。

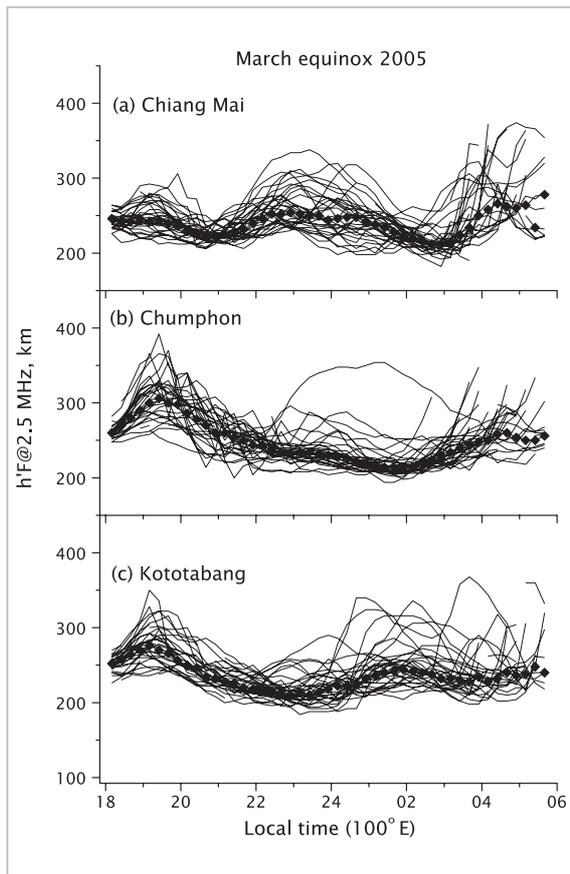


図7 図5と同様で、2005年3月5日から4月5日までの電離圏高度

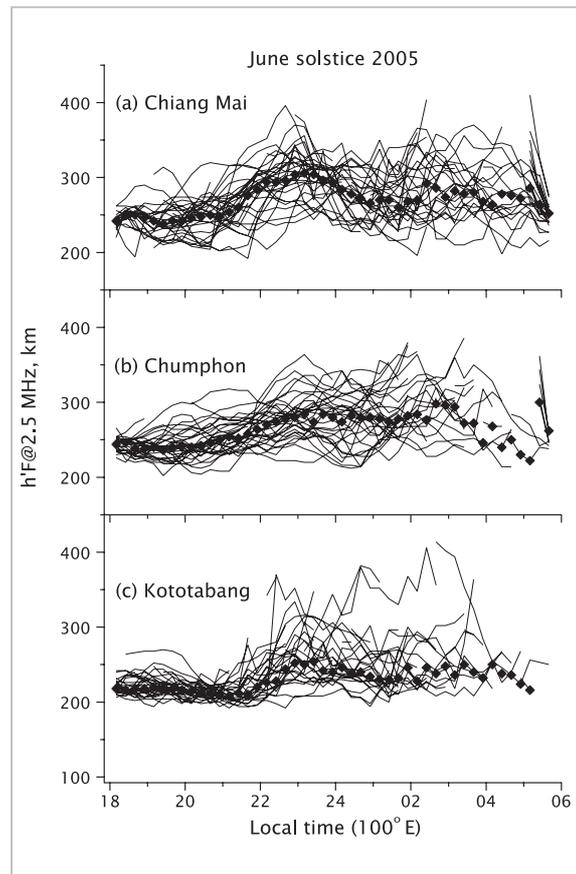


図8 図5と同様で、2005年6月5日から7月7日までの電離圏高度

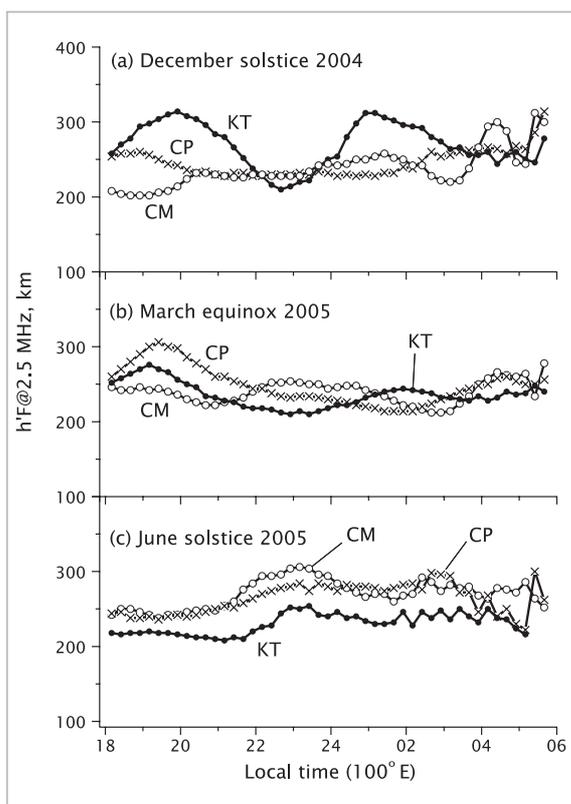


図9 季節ごとの高さの期間中央値

CMはチェンマイ、CPはチュンポン、KTはコトタバンを示す。

5 まとめ

赤道および低緯度の電離圏は熱圏中性大気風と東西電場の効果がともに強く現れ、南北の強い結合とあいまって、他の緯度とは違った特徴を示す。我々は赤道電離圏を詳しく調べるため東南アジアに5カ所の観測拠点を整備し、イオノゾンデ観測を開始した。このうち、100°E南北チェーンの3カ所で得られた初期データから電離圏高度を求めて統計的に解析した。高度の比較から、電場の効

参考文献

- 1 S. Chapman, "The absorption and dissociative or ionizing effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotating earth", Proc. Phys. Soc., Vol.43, pp.26-45, 1931.
- 2 T. Yonezawa, "Theory of formation of the ionosphere", Space Sci. Rev., Vol.5, pp.3-56, 1966.
- 3 H. Rishbeth, S. Ganguly, and J. C. G. Walker, "Field-aligned and field-perpendicular velocities in the ionospheric F2-layer", J. Atmos. Terr. Phys., Vol.40, pp.767-784, 1978.
- 4 D. F. Strobel, and M. B. McElroy, "The F2-layer at middle latitudes", Planet. Space Sci., Vol.18, pp.1181-1202, 1970.

果と中性大気風の効果を分離し、季節的な特徴を抽出した。風の特徴は6時間程度の周期的な変動など経験モデル HWM93 とはかなり異なることが分かり、南北チェーンが熱圏/電離圏のダイナミクスを研究する上で極めて有効であることが確認できた。中性大気風の振舞は電離圏プラズマ不安定にとって重要であり、プラズマ・バブル(赤道スプレッド F)の発生との関係などさらに進んだ解析は本特集号の別稿[42][43]で詳しく述べる。

本稿では触れることができなかったが、SEALION から明らかになった赤道に収束する中性大気風は、低緯度の熱圏で夜間に温度が上昇する現象 MTM (midnight temperature maximum) と強い相関のあることも分かった[44]。MTM とプラズマ・バブル発生との関連は未知であるが、MTM の原因には下層大気運動との結合が強く示唆されている。本特集号の 3-4 にあげたような中低層大気と電離圏/熱圏の結合問題の研究が緒についているところであり、電離圏の課題を解決する糸口になる可能性を持っている。今後の研究で進むべきひとつの方向として重要である。

謝辞

SEALION プロジェクトは、タイ、インドネシア、ベトナム各国の研究機関や大学との共同で進められている。タイのモンクット王工科大学ラカバンおよびチェンマイ大学、インドネシア航空宇宙庁、ベトナムのハノイ地球物理研究所、インドネシアのスマトラ島にレーダー施設を建設運用する京都大学生存圏研究所の方々に大きな支援と協力を頂いていることに感謝します。

- 5 T. Tanaka, and K. Hirao, "Effects of an electric field on the dynamical behavior of the ionospheres and its application to the storm time disturbance of the F-layer", *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol.35, pp.1443-1452, 1973.
- 6 W. B. Hanson, and R. J. Moffett, "Ionization transport effects in the equatorial F region", *J. Geophys. Res.*, Vol.71, pp.5559-5572, 1966.
- 7 D. N. Anderson, "A theoretical study of the ionospheric F region equatorial anomaly -2. Results in the American and Asian sectors", *Planet. Space Sci.*, Vol.21, pp.421-442, 1973.
- 8 S. Namba, and K. Maeda, "Radio wave propagation", Corona Publishing, Tokyo, p.86, 1939.
- 9 H. Rishbeth, "The equatorial F-layer: Progress and puzzles", *Ann. Geophys.*, Vol.18, pp. 730-739, 2000.
- 10 R. P. Sharma, and E. J. Hewens, "A study of the equatorial anomaly at American longitudes during sunspot minimum", *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vo.38, pp.475-484, 1976.
- 11 T. Maruyama, and N. Matuura, "Longitudinal variability of annual changes in activity of equatorial spread F and plasma bubbles", *J. Geophys. Res.*, Vol.89, No.A12, pp.10,903-10,912, 1984.
- 12 G. O. Walker, and H. F. Chan, "Computer simulations of the seasonal variations of the ionospheric equatorial anomaly in East Asia under solar minimum conditions", *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vo.51, pp.953-974, 1989.
- 13 J. E. Titheridge, "The calculation of neutral winds from ionospheric data", *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol.57, pp.1015-1036, 1995.
- 14 R. T. de Medeiros, M. A. Abdu, and I. S. Batista, "Thermospheric meridional wind at low latitude from measurements of F layer peak height", *J. Geophys. Res.*, Vol.102, No.A7, pp.14,531-14,540, 1997.
- 15 N. Matuura, "Electric fields deduced from the thermospheric model", *J. Geophys. Res.*, Vol.79, pp.4679-4689, 1974.
- 16 R. A. Heelis, P. C. Kendall, R. J. Moffett, D. W. Windle, and H. Rishbeth, "Electrical coupling of the E- and F-regions and its effect on F-region drifts and winds", *Planet. Space Sci.*, Vol.22, pp.743-756, 1974.
- 17 D. T. Farley, E. Bonelli, B. G. Fejer, and M. F. Larsen, "The prereversal enhancement of the zonal electric field in the equatorial ionosphere", *J. Geophys. Res.*, Vol.91, No.A12, pp.13,723-13,728, 1986.
- 18 Eccles, J. V., "Modeling investigation of the evening prereversal enhancement of the zonal electric field in the equatorial ionosphere", *J. Geophys. Res.*, Vol.103, pp.26,709-26,720, 1998.
- 19 T. Maruyama, "Modeling study of equatorial ionospheric height and spread F occurrence", *J. Geophys. Res.*, Vol.101, No.A3, pp.5157-5163, 1996.
- 20 T. Maruyama, "A diagnostic model for equatorial spread F, 1. Model description and application to electric field and neutral wind effects", *J. Geophys. Res.*, Vol.93, No.A12, pp.14,611-14,622, 1988.
- 21 M. Mendillo, J. Baumgardner, X. Pi, P. J. Sultan, and R. Tsunoda, "Onset conditions for equatorial spread F", *J. Geophys. Res.*, Vol.97, No.A9, pp.13,865-13,876, 1992.
- 22 S. Saito, and T. Maruyama, "Ionospheric height variations observed by ionosondes along magnetic meridian and plasma bubble onsets", *Ann. Geophys.*, Vol.24, pp.2991-2996, 2006.
- 23 M. J. Buonsanto, "Seasonal variations of day-time ionization flows inferred from a comparison of calculated and observed NmF2", *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol.48, pp.365-373, 1986.

- 24 K. L. Miller, D. G. Torr, and P. G. Richards, "Meridional winds in the thermosphere derived from measurement of F2 layer height", J. Geophys. Res., Vol.91, No.A4, pp.4531-4535, 1986.
- 25 K. L. Miller, M. Lemon, and P. G. Richards, "A meridional wind climatology from a fast model for the derivation of meridional winds from the height of the ionospheric F2 region", J. Atmos. Solar-Terr. Phys., Vol.59, pp.1805-1822, 1997.
- 26 P. G. Richards, "An improved algorithm for determining neutral winds from the height of the F2 peak electron density", J. Geophys. Res., Vol.96, No.A10, pp.17,839-17,846, 1991.
- 27 L. Liu, X. Luan, W. Wan, B. Ning, and J. Lei, "A new approach to the derivation of dynamic information from ionosonde measurements", Ann. Geophys., Vol.21, pp.2185-2191, 2003.
- 28 K. L. Miller, J. E. Salah, and D. G. Torr, "The effect of electric fields on measurements of meridional neutral winds in the thermosphere", Ann. Geophys., Vol.5A, pp.337-342, 1987.
- 29 S. Igi, T. Ogawa, W. L. Oliver, and S. Fukao, "Thermospheric winds over Japan: Comparison of ionosonde and radar measurements", J. Geophys. Res., Vol.100, No.A11, pp.21,323-21,326, 1995.
- 30 A. E. Hedin, M. A. Biondi, R. G. Burnside, G. Hernandez, R. M. Johnson, T. L. Killeen, C. Mazaudier, J. W. Meriwether, J. E. Salah, R. J. Sica, R. W. Smith, N. W. Spencer, V. B. Wickwar, and T. S. Virdi, "Revised global model of thermosphere winds using satellite and ground-based observations", J. Geophys. Res., Vol.96, No.A5, pp.7657-7688, 1991.
- 31 J. A. Bittencourt, and Y. Sahai, "F-region neutral winds from ionosonde measurements of hmF2 at low latitude magnetic conjugate regions", J. Atmos. Terr. Phys., Vol.40, pp.669-676, 1978.
- 32 M. C. Kelley, M. F. Larsen, C. La Hoz, and J. P. McClure, "Gravity wave initiation of equatorial spread F: A case study", J. Geophys. Res., Vol.86, No.A11, pp.9087-9100, 1981.
- 33 R. T. Tsunoda, "On the enigma of day-to-day variability in equatorial spread F", Geophys. Res. Lett., Vol.32, L08103, doi:10.1029/2005GL022512, 2005.
- 34 B. W. Reinisch, M. Abdu, I. Batista, G. S. Sales, G. Khmyrov, T. A. Bullett, J. Chau, and V. Rios, "Multistation digisonde observations of equatorial spread F in South America", Ann. Geophys., Vol.22, pp.3145-3153, 2004.
- 35 M. A. Abdu, I. S. Batista, B. W. Reinisch, and A. J. Carrasco, "Equatorial F-layer heights, evening prereversal electric field, and night E-layer density in the American sector: IRI validation with observations", Adv. Space Res., Vol.34, pp.1953-1965, 2004.
- 36 野崎憲朗, "FMCWイオノソンの開発", 本特集号, 3-2-5, 2009.
- 37 J. E. Titheridge, "The real height analysis of ionograms: A generalized formulation", Radio Sci., Vol.23, pp.831-849, 1988.
- 38 T. Shimazaki, "World-wide daily variations in the height of the maximum electron density of the ionospheric F2 layer", J. Radio Res. Labs., Vol.2, pp.85-97, 1955.
- 39 F. T. Berkey, and G. H. Stonehocker, "A comparison of the height of the maximum electron density of the F2-layer from real height analysis and estimates based on M(3000)F2", J. Atmos. Terr. Phys., Vol.51, pp.873-877, 1989.
- 40 A. E. Hedin, E. L. Fleming, A. H. Manson, F. J. Schmidlin, S. K. Avery, R. R. Clark, S. J. Franke, G. J. Fraser, T. Tsuda, F. Vial, and R. A. Vincent, "Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere", J. Atmos. Solar-Terr. Phys., Vol.58, pp.1421-1447, 1996.
- 41 B. G. Fejer, E. R. de Paula, R. A. Heelis, and W. B. Hanson, "Global equatorial ionospheric vertical plasma drifts measured by the AE-E satellite", J. Geophys. Res., Vol.100, No.A4, pp.5769-5776, 1995.

- 42 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", 本特集号, 3-2-2, 2009.
- 43 齋藤享, 丸山隆, "赤道スプレッドFの発生と電離圏大規模東西構造", 本特集号, 3-2-3, 2009.
- 44 T. Maruyama, S. Saito, M. Kawamura, and K. Nozaki, "Thermospheric meridional winds as deduced from ionosonde chain at low and equatorial latitudes and their connection with midnight temperature maximum", J. Geophys. Res., Vol.113, A09316, doi:10.1029/2008JA013031, 2008.

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 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

かわむら まさみ
川村 眞文

元宇宙環境計測グループ技術員
計算機ネットワーク



のぎしけんろう
野崎 憲朗

テレコムエンジニアリングセンター
宇宙環境科学

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



つがわたくや
津川 卓也

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



しん ひろかつ
陣 英亮

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 理学博士
超高層大気物理

しし じゅん
石井 守

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



くぼた みつる
久保田 実

電磁波計測研究センター宇宙環境計測グループ主任研究員 博士(理学) 超高層大気物理