赤道域における対流圏活動と熱圏・電離圏擾乱との関係 [講演:小川忠彦 (名古屋大学太陽地球環境研究所:現・情報通信研究機構)]

1 赤道対流圈·熱圈·電離圈相互作用

太陽高度が高い赤道では太陽放射が最も強く対 流活動が非常に活発である。赤道域ではコリオリ 力が最小になるため、対流圏には特有の波動が存 在する。また、磁気赤道(地理赤道とは必ずしも 一致せず、±10°程度の範囲で変動する)では磁力 線が水平であり、赤道エレクトロジェット、プラ ズマバブルなどの赤道域特有の現象が存在する。 非常に活発な対流活動により励起される大気波 動は、エネルギーと運動量を上方に輸送し、その 伝搬途上で赤道域固有の振動、擾乱を生成する。 このように、赤道大気は大気の上下結合の研究を 行なうのに適した非常に特徴的な領域であるとい える。



図 1: 雲頂温度(左)と大気波動活動度(右)の 全地球分布 [Tsuda and Hocke, 2004]

1.1 インドネシアにおける熱圏・電離圏観 測の重要性

図1は、衛星により観測された雲頂温度(左 図)及び大気波動活動度(右図)の全球分布を示 す[Tsuda and Hocke, 2004]。雲頂温度の低いと ころは雲頂高度が高く積雲対流が活発であること を意味する。対流活動が活発な領域では大気波動 も活発で、上層へのエネルギー注入も大きいこと が分かる。この図から分かるように、海陸が複雑 に分布し「海洋大陸(Maritime continent)」と呼 ばれるインドネシア周辺は地球上で最も積雲対流 が活発な地域であり、対流圏・熱圏・電離圏相互 作用の研究にとって非常に重要な地域である。



図 2: CPEA 観測の概念図 [講演者提供]

平成 19 年度 MTI 研究会 サイエンスセッション

[©] Mesosphere Thermosphere Ionosphere (MTI) Research Group, Japan



図 3: 中低緯度 OMTI 観測点 (緑は SEALION の イオノゾンデ観測点) [講演者提供]

1.2 特 定 領 域 研 究「赤道大気上下結合」 (CPEA)

赤道域における対流圏から熱圏・電離圏に至 る大気の上下結合過程を明らかにするために、 2001年度から2006年度にかけての6年間、文部 科学省科学研究費補助金特定領域研究「赤道大気 上下結合」(Coupling processes in the equatorial atmosphere; CPEA)が実施された。CPEAで は、インドネシアのKototabang (南緯 0.2°、東 経 100.3°、磁気緯度-9.8°)に設置された赤道大 気レーダー(京都大学所有 [Fukao et al., 2003]) を中心とした総合観測研究である。表 1 に示す 機器を主とした観測(図 2)を基に、対流圏・熱 圏・電離圏相互作用過程の解明を目的とした研 究が行なわれたが、CPEA 終了後の現在も観測・ 研究は継続されており、非常に多くの研究成果 を挙げている。

図 2 に加えて、名古屋大学太陽地球環境研究 所では、中間圏、熱圏の大気波動を観測すること ができる大気光イメージャ(Optical mesosphere thermosphere imager; OMTI [Shiokawa et al., 1999]) 観測ネットワークを CPEA 以前から展開 している(図3)。表2に中低緯度の OMTI 観 測点を示す。これにより、中間圏、熱圏大気波動 の広域水平伝搬、南北対称性等を調べることがで きる。

表 1: Kototabang に設置された主な観測機器

名称	観測対象		
赤道大気レーダー	中・下層大気		
	電離圏不規則構造		
VHF レーダー	電離圈不規則構造		
流星レーダー	中間圏・下部熱圏風速		
イオノゾンデ*	電子密度高度分布		
GPS 受信機	電離圈不規則構造		
大気光イメージャー	中間圏・熱圏大気光		
磁力計	電離圏電流		

*SEALION (NICT) による観測

表 2: Optical Mesosphere Thermosphere Imager (OMTI) 観測網

観測点	緯度	経度	磁気緯度
陸別	43.5°	143.8°	38.0°
信楽	34.9°	136.1°	29.5°
佐多	31.0°	130.7°	25.8°
与那国	24.5°	123.0°	19.1°
Kototabang	-0.2°	100.3°	-9.8°
Darwin	-12.4°	131.0°	-22.7°

2 赤道熱圏・電離圏における大気波 動の散逸

図 4 は、Kototabang において観測された 630 nm の夜間大気光強度の南北に沿ったケオグ



図 4: Kototabang において観測された夜間の 630 nm 大気光強度(下段:絶対値、上段:変動成 分)に見られる準周期波動[Shiokawa et al., 2006]

ラム(ある線上の強度を時系列に表示したもの) である [Shiokawa et al., 2006]。630 nm 大気光 強度は電子密度と酸素原子密度の積に比例する ことから、高度 250km 付近の電離圏 F 領域下部 の電子密度の良い指標であることが知られてい る。図4下段の帯状の領域が南半球赤道異常のク レスト (電子密度が最も高い部分) に対応する。 この中に周期30分~1時間で高緯度方向へ南向 きに伝搬する準周期的波状構造が見られる(図 4上段)。2年間にわたる観測の結果、このよう な準周期的波状構造は、平均的に周期約40分、 位相速度約 310 m s⁻¹ で南方向へ伝搬し、等位 相面はほぼ東西方向に沿っていることが明らか になった。このような波状構造の特性は、中緯 度域の昼・夜間に見られる中規模伝搬性電離圏 擾乱 (MSTID: 日本では昼間の伝搬方向はほぼ 南、夜間はほぼ南西)と呼ばれるものに非常に 良く似ている。現在、昼間の中緯度域 MSTID の 成因は大気重力波によるプラズマの変調 [Kotake et al., 2006]、夜間のそれは、後述のように、プ ラズマ不安定が重要であることが分かっている。 これに対して、上述の赤道域の夜間の波状構造 の成因は下層から伝搬する大気重力波であると 考えられている [Shiokawa et al., 2006]。

OH 分子の近赤外大気光 (720-910 nm)を用 いると、高度 86 km 付近の中性大気波動を検出



MTI上下結合の物理

図 5: Kototabang において OH 大気光により観 測された、高度 86 km 付近の短周期大気重力波 の諸パラメータ [Suzuki, 2007]

することができる。図 5 は、Kototabang におい て 2002~2005 年の間の 26 晩の観測において検 出された OH 大気光に見られる短周期重力波の 統計的特性を示したものである [Suzuki, 2007]。 Kototabang における中間圏上部の短周期大気重 力波は、どの方位へも伝搬している。このことは、 Kototabang 上空には常に雲頂高度の高い雲が存 在し、大気重力波を励起していることを示唆する。 また、これらの短周期重力波が輸送する上向きの 平均運動量フラックスは $3.3\pm 8.7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ と見積 もられる。この運動量輸送により中間圏上部は 1 日あたり約 27 m s^{-1} の加速を受けることになり、 短周期大気重力波は中間圏の風系の形成に重要な 役割を果たしていると考えられる。

下層大気の波動が熱圏・電離圏に影響を及ぼす ことを直接的に示す結果も得られている。2004年 12月26日0058 UT に発生したスマトラ・アンダ マン地震の直後に、東南アジアのGPS 観測網によ り、震央から北方へ伝搬する振幅1.6–6.9 TECU (1 TECU = 1×10^{16} electrons m⁻²)の電離圏全 電子数 (Total electron content; TEC)の変動が 観測された(図6)。この変動は、地震によって地





図 6: 2004年12月26日スマトラ大地震後のTEC 変動 [Otsuka et al., 2006b]

上で励起された音波が電離圏に到達し、これにプ ラズマが非等方的に応答した(磁力線の傾きの違 いにより、南方伝搬する縦波の音波は磁力線直交 方向に振動成分を持ちプラズマを動かすことがで きないため TEC は変動しない) ものと考えられ ている [Otsuka et al., 2006b]。観測された TEC 変動を説明するためには、電離圏 F 領域において 音波の振幅は200 m⁻¹ 程度である必要がある。音 波による電離圏擾乱に続いて、より長周期の擾乱 が地球磁場の周期的な変動(図7 [Ivemori et al., 2005]) や電離圏 F 領域の高度・密度変動 (図 8 [Shinagawa et al., 2007])として観測されている。 数値シミュレーションにより、これらは地震によっ て発生した大気重力波が電離圏に到達した結果で あることが分かっている。磁場変動はE領域高度 に達した大気重力波によるダイナモ電場の変調に よるもの、F領域高度・密度変動は大気重力波に よりプラズマが磁力線方向に動いたことによるも のである [Shinagawa et al., 2007]。



図 7: 2004年12月26日スマトラ大地震後の Phimai (タイ)における周期30秒-12分の磁場変動 [Iyemori et al., 2005]。黒: H 成分、赤: D 成分、 青: Z 成分。

赤道電離圏を介した南北中緯度電 離圏の水平結合

中緯度の夜間には F 領域を伝搬する波長 100~500 km の MSTID が存在する。図 9 は、佐 多(鹿児島)とその磁気共役点に近いダーウィ ン(オーストラリア)でほぼ同時に観測された 630 nm 大気光の変動成分であり、北西-南東方 向に延びる波状構造が MSTID である。図9の右 半分が佐多で観測された MSTID (伝搬方向は南 西)、左半分がダーウィンで観測された MSTID (伝搬方向は北西)を磁力線に沿って北半球に 投影したものである。両者の波状構造が非常に 良く一致することから、夜間の中緯度 MSTID は南北磁気共役性を持つことが分かる [Otsuka et al., 2004; Shiokawa et al., 2005]. MSTID σ 構造が磁気共役であることは、磁力線に沿い赤 道電離圏を超えて南北両半球間を伝わる電場が MSTID の生成や発達に重要な役割を果たしてい ることを示している。このことから、伝搬性電 離圏擾乱の生成には中性大気波動によるプラズ マの運動が主たる役割を果たしていると考えら れてきた従来の理論が見直しを迫られた。現在 では、Perkins 不安定 [Perkins, 1973] を基礎とし



図 8: 2004 年 12 月 26 日スマトラ大地震後の Chumphon、Chiang Mai (タイ)における電離 圏 F 領域高度・密度の変動成分 [Shinagawa et al., 2007]。実線は観測値、点線は数値シミュレーショ ン結果。

た、E-F 領域間相互作用を含むプラズマ不安定 が夜間の中緯度 MSTID の生成に重要な役割を 果たしていると考えられている。

図 10 は佐多とダーウィンで同時に観測された 630 nm 大気光に見られるプラズマバブルである。 プラズマバブルは低緯度・赤道電離圏において、日 没後に下部 F 領域の低密度プラズマ領域が「泡」 のように上部 F 領域へと急激に上昇する現象であ り、内部のプラズマ密度が周囲に比べて非常に低 いため、630 nm 大気光の減光領域として観測さ れる。両地点で観測されたプラズマバブルは南北 方向に長く延び、細かい構造までよく一致し磁気 共役である [Otsuka et al., 2002; Shiokawa et al., 2004]。このことから、プラズマバブルは南北両



図 9: 佐多、ダーウィンにおいて 630 nm 大気光 によりほぼ同時に観測された MSTID。右半分が 佐多で観測されたもの、左半分がダーウィンで観 測されたものを磁力線に沿って北半球に投影した もの [Otsuka et al., 2004]。[Otsuka et al., 2004]

半球にまたがり磁力線に沿って下部F領域から上 部F領域にかけて発達した電離圏の裂け目のよう な構造をしていることが分かる。プラズマバブル 発生のメカニズムのうち、プラズマバブル発生を トリガーする機構は未だ解明されていない。地磁 気活動が非常に活発な場合において、磁気圏電場 の低緯度への侵入がトリガーすることは知られて いるが、プラズマバブルは地磁気静穏時において も多く発生する。南北両半球間にまたがって成長 するプラズマバブルのトリガー機構を解明するた めには、プラズマバブルが発生し始める赤道電離 圏F領域だけではなく、磁力線に沿って結合する 低緯度電離圏及び熱圏との相互作用を考慮する必 要がある。

図 11 は、IMAGE 衛星によって観測された 135.6 nm 大気光の強度である [Ogawa et al., 2005]。135.6 nm 大気光は酸素原子イオンの再結 合によって放射されるので、F 領域ピーク付近の 電子密度の良い指標となる。図 11 において磁気 緯度 ±15~20° に存在する発光強度の高い2本の



図 10: (a) 佐多、(b) ダーウィンにおいて 630 nm 大気光により観測されたプラズマバブル [Otsuka et al., 2002]



図 11: IMAGE 衛星により観測された 135.6 nm 大気光に見られる赤道異常内の大規模波動構造 [Ogawa et al., 2005]

帯状の領域は赤道異常帯のクレスト域であるが、 その中に 1000 km 規模の東西波状構造が存在す ることが分かる。この構造は南北両半球の赤道 異常帯クレスト域の中にほぼ対称に表れており、 南北両半球電離圏の磁力線を介した結合が重要 な役割を果たしていることを示している。さら に、この東西波状構造の中にプラズマバブルが 存在していることが分かる。プラズマバブルは 東西方向に数 100 km 間隔で発生することが知 られている [e.g. Table 1, Saito and Maruyama, 2007] が、これらのバブルはこの 1000 km 規模の 波状構造内に存在していると考えられる。実際、 同程度の波状構造がプラズマバブルの発生と密 接に関連していることが近年の研究 [Tsunoda, 2005; Saito and Maruyama, 2007] で明らかに なってきている。この大規模波動構造の成因に ついては、大気重力波による変調 [Kelley et al., 1981; Singh et al., 1997]、F 領域プラズマ速度



図 12: Jicamarca レーダー(ペルー)により観 測されたプラズマバブルに伴うレーダーエコー [Kelley et al., 1981]

の高度シアによるプラズマ不安定 [Hysell and Kudeki, 2004] 等が提案されているものの、未だ 明確な答えは出されていない。また、波状構造 が 1000 km 規模の大きさを持つのに対し、バブ ルの東西スケールは 100 km 程度である。この違 いには、それぞれのメカニズムの特性スケール、 種となる初期擾乱のスケール等の影響が反映さ れていると考えられ、プラズマバブルの発生機 構を明らかにする上で重要な情報を示している。

4 赤道電離圏の電子密度擾乱、プラ ズマバブル発生と対流圏活動との 関係

日没後の赤道 F 領域にプラズマ不規則構造が 存在することは、イオノゾンデ観測においてぼや けた F 層トレース (スプレッド F)が見られるこ とから知られていた。ペルーの Jicamarca レー ダーを用いた観測では、日没後の下部 F 領域から 上部 F 電離圏へ向けて上昇するレーダーエコー (図 12)が発見され、プラズマバブルと名付けら れた [Woodman and LaHoz, 1976]。先にも述べ たように、プラズマバブルは、内部の電子密度が 極端に低いため、酸素原子の 630 nm 大気光の減 光領域として観測される (図 10)。プラズマバブ



図 13: GPS 信号のシンチレーション [Otsuka et al., 2006a]

ルは発生後、熱圏風により約 100 m s⁻¹ で東進 する。プラズマバブルの生成メカニズムは、本質 的には高密度のプラズマが低密度のプラズマの上 に存在することによる Rayleigh-Taylor プラズマ 不安定である。しかしながら、プラズマ不安定の 発生に必要な種となる初期擾乱が何であるかにつ いては未解明のままである。プラズマバブルの初 期擾乱の一つの候補として、下層大気から伝搬す る大気波動が考えられている。下層で発生した大 気波動は、上方に伝搬するに従って大気密度の減 少に伴い振幅が増大する。この大気波動がプラズ マを動かし、プラズマバブルの初期擾乱を与える のではないかと考えられる。しかし、このような 初期擾乱は必ずしもプラズマバブルの発生・発達 に結びつくものではなく、発生・発達には別の要 因(熱圏風、電離圏電場、電子密度勾配、E・F 領域の電気伝導度など)が必要である。また、大 気波動によると思われる電離圏電場の変動はプラ ズマバブルの発生の有無に関わらず常に存在して おり、プラズマバブルとの直接的な関係はないと **する意見もある** [Tsunoda, 2005]。

プラズマバブルの内部には様々な規模の不規則 構造が存在しており、そのうち 300~400 m 規模 のプラズマ不規則構造による電波の回折により、 プラズマバブル内を通過する GPS 信号に強いシ



図 14: Kototabang における GPS シンチレーショ ンの長期変動 [Ogawa et al., 2006, 2009]



図 15: インド洋上の雲頂温度と Kototabang にお ける GPS シンチレーションの日々変動 [Ogawa et al., 2006]

ンチレーションが生じる。(図 13)。 シンチレー ションは衛星測位、衛星通信、衛星リモートセン シングの障害となる一方、シンチレーションを観 測することによりプラズマバブルの発生をモニ ターすることができる。Kototabang においては GPS シンチレーションの長期観測を 2003 年より 行っている (図 14、[Ogawa et al., 2006, 2009])。 その結果、Kototabang における夜間の GPS シン チレーションは、春秋期の 20-01 LT に多く、太 陽活動の低下に伴って発生頻度が低下することが 分かった。この結果は、これまでに知られている インド・西太平洋域におけるプラズマバブルの発 生傾向と一致する。これらに加えて夜間の GPS シンチレーションは秋期より春期に多い、発生に 大きな日々変化があることなどが見て取れる。そ の原因は明らかではないが、春と秋で熱圏の赤道



図 16: インド洋上の雲頂温度と Kototabang に おける GPS シンチレーション指数の相関 [Ogawa et al., 2009]

横断中性風に差異があるのではないかと推測されている。

下層大気から伝搬する大気波動とプラズマバ ブルの発生の関係を調べるために、雲頂温度 (T_{bb})とGPSシンチレーションの発生を比較す る。図 15 は、Kototabang 西方のインド洋上の T_{bb}とKototabang におけるGPSシンチレーショ ン強度(S₄指数)を比較したものである。イン ド洋上のT_{bb}とKototabang におけるS₄指数に はともに大きな日々変動があり、高いT_{bb}(低い 雲頂高度)とS₄指数が対応している場合と低い T_{bb}(高い雲頂高度)とS₄指数が対応している 場合があり、両者の関係は単純ではない。しかし ながら、図 16に示すように、インド洋上のT_{bb} とKototabang におけるS₄指数の間には、最大 で相関係数 0.5 程度の相関があることは確かで ある。

GPS シンチレーションの発生の日々変動を見る と、数日 \sim 数 10 日の周期性があることが分かる。 図 17 の最上段は S₄ 指数の wavelet スペクトルで あり、いくつかの卓越する周期が存在することが 分かる。Kototabang の流星レーダーにより観測 された高度 92 km における大気重力波 (図 17 中



図 17: Kototabang における GPS シンチレーション、中間圏大気重力波、インド洋上の雲頂温度の wavelet スペクトル [Ogawa et al., 2009]

段)、インド洋上のT_{bb}(図17下段)においても 類似の周期帯にスペクトルのピークが見られる。 これらの特徴的な周期はロスビー波、ケルビン波 の周期に近く(図18)、プラズマバブルの発生 の日々変動にはプラネタリー波/ケルビン波が関 与していることを想像させる。ただし、T_{bb}、中 間圏大気重力波のスペクトルピークはプラズマバ ブルが発生しない季節においても存在することか ら、対流圏活動はバブル発生の季節変動、年変動 を説明するものではない。(季節変動の多くは日 没線と磁気子午面の関係、年変動は太陽活動度に よって説明されている。)

5 九大高精度 GCM との比較

対流圏から熱圏までを一括して扱う高精度中性 大気大循環(GCM)モデルが九州大学、東北大学 を中心に開発されている [Miyoshi and Fujiwara, 2008]。このモデル(九大GCM)により、下層大 気が超高層大気に与える影響を調べることができ る。図 19 は、九大GCM低分解能モデル(水平 格子間隔 5.6°)により計算された赤道上空の下部 熱圏東西風のスペクトルである。西進する周期2



図 18: Kototabang における GPS シンチレーショ ン発生の周期 [Ogawa et al., 2009]

日 (東西波数 3-4)の波動、周期 5-6、10、16 日 のプラネタリー波、東進する周期2-5日周期の赤 道ケルビン波が見られる。図 20 は水平格子間隔 を1.4°とした高分解能モデルにより計算された、 赤道の東経 0-100°の上部中間圏-熱圏東西風のス ペクトルである。周期1-数10日の波動は高度と ともに急減衰し、数時間以下の成分が高度ととも に顕著になることが分かる。すなわち、プラネタ リー波や赤道ケルビン波などの波動はF領域高度 まで伝搬することはできない。F 領域の現象であ るプラズマバブルの発生に惑星波程度の周期性が 見られることから、下部熱圏とF領域の間を結び つける過程が必要である。F 領域高度まで伝搬す る短周期波動に注目し、ある特定の日における東 西風の周期1-4時間成分の経度・高度断面の時間 変化を示したものが図 21 である。これらの波動 は約 1000 km の東西波長を持ち、パターンを変 えながら東進する。しかしながらこれらの波動パ ターンは日々大きく変動する。

これらの結果から、対流圏波動(大気重力波、 潮汐波、惑星波)が熱圏高度まで伝搬しているこ とが分かった。特に、短周期大気波動はF領域高 度まで伝搬し、東西1000 km 程度の構造を持ち ながら東進し、大きな日々変動を持つことは、プ ラズマバブルの特性と共通している。これらのこ



図 19: 九大 GCM モデルによる赤道上空のプラネ タリー波、ケルビン波のパワースペクトル [Ogawa et al., 2009]

とから、対流圏から伝搬していると思われる短周 期大気波動が直接・間接(磁力線を介した電場に よるなど)にF領域を変調し、プラズマバブル発 生の引き金となっているのではないかと想像でき る(図 22)。

6 熱圏大気重力波と対流圏活動に関 する過去の研究

本節では、今後の課題を明らかにするため、熱 圏大気重力波と対流圏活動に関して過去に行われ た研究を紹介する。

Röttger [1977] は、赤道域の中規模伝搬性電離 圏擾乱の出現と雨活動との間に重要な相関があ ることを示し、MSTIDを励起する大気重力波は 熱帯収束帯内の活発な積雲対流によって生成され る可能性を指摘した。さらに [Röttger, 1981] は、 真夜中前の赤道スプレッドF、すなわちプラズマ バブルの出現の季節・経度変化は、大気重力波を 励起する赤道域対流活動の季節・経度変化で説明 できるとした。しかしながら、プラズマバブルの 発生の季節・経度変化は主に日没線と磁気子午面 の関係の季節・経度変化で説明されるとする説が 有力である。(他に磁気子午面に沿った熱圏風の 季節・経度変化の効果 [Maruyama and Matuura, 1984] もあるとされる。)



図 20: 九大 GCM モデルによる赤道の東経 0–100° の中間圏・熱圏東西波のパワースペクトル [Ogawa et al., 2009]。上段:周期 1–数 10 日成分、下段: 周期 0.5–12 時間成分。

近年、電離圏電子密度・全電子数の全球分布に おいて、経度に固定された波数4の構造(図23 [Sagawa et al., 2005], 🛛 24 [Immel et al., 2006], 図 25 [Lin et al., 2007]) が存在することが発見さ れ注目を浴びている。Immel et al. [2006] は、こ の波数4の構造が高度115kmにおける1日潮汐 波による温度変化にも見られることを発見し、下 層から伝搬する大気重力波と電離圏プラズマ構造 との間に密接な関係が存在することを示した。対 流圏から熱圏までの中性大気全球モデルを用いた ダイナモシミュレーションにおいても、プラズマ バブルの発生に必要な日没付近での東向き電場の 強度の経度分布に波数4の構造が見られ、これは 下層大気を考慮しないと現れないことが示されて いる [Jin et al., 2008]。Hocke and Tsuda [2001] は、GPS掩蔽観測を用いてE領域電子密度変動に 経度変動。成層圏温度擾乱、対流圏水蒸気量に共 通した経度構造が存在することを発見し、この構 造が地形と関係していることを指摘した(図26)。 この結果は、対流圏から熱圏・電離圏にわたって 見られる波数4の構造が経度に固定されている理 由の1つが地形である可能性を示すものである。



図 21: 九大 GCM モデルによる短周期東西風の 経度・高度構造の時間変化 [Ogawa et al., 2009]



図 22: 対流圏擾乱による熱圏・電離圏擾乱の模式 図 [講演者提供]

Kudeki and Bhattacharyya [1999] は、Jicamarca レーダーによる観測で、プラズマバブル に伴い赤道 F 領域プラズマに渦構造(図 27)が 存在することを発見した。この渦構造の成因は 未解明であるが、中性風シアに伴うプラズマシ ア不安定、赤道 F 領域と磁力線で結合した低緯 度 *E*_s 層の分極電場の効果等が考えられている。

7 まとめと今後の課題

これまでに下層から上層への大気波動の伝搬、 運動量輸送を示唆する現象が発見されており、下 層から伝搬する大気波動の散逸が赤道熱圏・電離





圏における力学過程に重要な役割を果たしてい ることは確かであるといえる。また、巨大地震に 伴って発生した音波・大気重力波による電離圏電 子密度変動が観測されたことによって、下層大気 に起因する大気波動が電離圏擾乱を直接的に引き 起こすことが示されている。

上述のように、中緯度電離圏においては、磁力 線による赤道電離圏を介した水平結合過程も重要 である。中緯度夜間の MSTID に磁気共役性が見 られることは、MSTID に電磁力学過程が働いて いることを示し、大気重力波によるものと考えら れていた MSTID 励起メカニズムの理論の見直し が迫られた。現在では、E-F 領域間結合を考慮し たプラズマ不安定の理論が提案されている。

低緯度・赤道電離圏現象であるプラズマバブル においても細部に至る磁気共役性が見られる。こ



図 24: IMAGE 衛星により観測された赤道異常電 子密度の波数 4 の経度構造 [Immel et al., 2006]

のことは、プラズマバブルを理解するためには低 緯度・赤道電離圏を一体として取り扱う必要があ ることを示している。プラズマバブルは赤道異常 内の磁気共役な東西1000 km 規模の大規模構造 中に存在することが明らかになっている。この大 規模構造はプラズマバブルの発生と関係している と見られるため、その成因を明らかにすることは プラズマバブルの発生の変動を知る上で重要であ る。現在のところその成因は不明であるが、下層 から伝搬する大気波動、プラズマシア不安定など が提案されている。

プラズマバブル内部には様々な規模の不規則構 造が存在し、そのうち数100m規模の不規則構 造がGPS信号にシンチレーションを引き起こす。 GPSシンチレーションの長期発生特性はプラズ マバブルのものと一致し、GPSシンチレーション によりプラズマバブルの発生をモニターすること ができる。GPSシンチレーションにより観測さ れたプラズマバブルの発生には大きな日々変動が あるが、数日~数10日の周期性が見られ、下層 大気で励起される惑星波がその一因である可能性 が示唆されている。しかしながら、一般的に対流 圏擾乱と熱圏・電離圏擾乱の関係を1対1で関連 づけることは非常に困難である。(ただし、巨大 地震により励起された音波・大気重力波の作用は



図 25: FORMOSAT-3 衛星により観測された赤 道異常電子密度の波数 4 の経度構造 [Lin et al., 2007]

例外である。)

プラズマバブルの発生に惑星波に近い時間周 期性があることは観測的に示されているが、九大 GCM によるシミュレーション結果によれば惑星 波は E 領域高度までは到達するものの F 領域高 度まで到達することができない。現在のところ、 惑星波周期でプラズマバブル発生が変動する理由 については不明であり、E 領域からの電場による 結合も含めて物理過程を追究する必要がある。九 大GCM によれば、短周期大気重力波はF領域高 度まで到達することができる。プラズマバブルの 発生には東西 1000 km 規模の構造が関わってい ると見られることから、短周期大気重力波がプラ ズマバブルの種(初期擾乱)を与えている可能性 がある。しかしながら短周期重力波がプラズマバ ブルの種となるとしても、その物理過程は明らか になっておらず、F 領域における直接作用、E 領 域からの電場による結合等を含めて追究する必要 がある。その他、極域擾乱に伴って発生し低緯度 へ伝搬する伝搬性大気擾乱(TAD)がプラズマバ ブルの発生に直接影響を与えているかどうかにつ いてはあまり研究が行われておらず、今後検討す る必要がある。(極域擾乱による熱圏風系の変化 が作る擾乱ダイナモ電場は一般的に日没付近の東 向き電場を弱めるため、間接的にプラズマバブル



図 26: GPS 掩蔽観測による E 領域電子密度変動、 成層圏温度擾乱成分、水蒸気量の経度分布 [Hocke and Tsuda, 2001]

の発生を抑制することは知られている。)

短周期重力波によって電離圏プラズマがどのような変動を受けるか、プラズマバブルの発生のトリガーとなりうるか、プラズマバブルの発達の詳細な過程がどのように変化するか等を明らかにするためには、中性大気と電離大気の電磁力学・化学過程を統一的に解く結合シミュレーションが必要である。現在、東北大学、九州大学、情報通信研究機構を中心に、対流圏から熱圏・電離圏までの統合全球モデルの開発が進められ、成果を挙げつつある。

地磁気静穏時におけるプラズマバブルのトリ ガー過程として、本稿では大気波動に注目して議 論を進めてきたが、大気波動だけではプラズマバ ブルの発生特性を説明することができず、その他 のトリガー過程についても検討する必要がある。 その過程においては、熱圏・電離圏に固有の物理 過程が占める割合は小さくないはずである。熱圏、 電離圏に固有の物理過程を考慮するためには中性、 電離大気の観測を充実させる必要があるが、高度



Plate 1. E × B drift and backscattered power map for February 24, 1996 (sunset time 18:32 LT, Kp=3, 2+). The vertical black strip at ~20:30 LT is due to transmitter failure.

図 27: Jicamarca レーダーにより観測された F 領 域プラズマドリフトの渦構造 [Kudeki and Bhattacharyya, 1999]

130 km 以上の中性風を観測することは非常に難 しく、これまでに十分な観測がなされてきたとは 言えない。今後、新たな観測法を開発し、中性大 気と電離大気の観測を充実させる必要がある。

力学的な結合過程の他、対流圏の雷活動に伴 う電場の電離圏への侵入がプラズマバブルをト リガーしたとされる例 [Woodman and Kudeki, 1984] も報告されており、下層大気との結合過程 はここで考えてきた以上に複雑である可能性が高 い。中間圏・熱圏・電離圏の環境と変動の研究に おいては、太陽放射、磁気圏、高緯度からの作用 に加えて、下層大気からの作用が重要であり、水 平・上下の結合過程を考慮して統合的に扱ってい くことが重要である。

参考文献

Abdu, M. A., T. K. Ramkumar, I. S. Batista, C. G. M. Brum, H. Takahashi, B. W. Reinish, and J. H. A. Sobral, Planetary wave signatures in the equatorial atmosphere-ionosphere system, and mesosphere- E- and F-region coupling, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 509-522, 2006.

- Abdu, M. A., Outstanding problems in the equatorial ionosphere-thermosphere electrodynamics relevant to spread F, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., **63**, 869-884, 2001.
- Forbes, J. M., Planetary Waves in the Thermosphere-Ionosphere System, J. Geomag. Geoel. 48, 91–98,1996.
- Fukao, S., H. Hashiguchi, M. Yamamoto, T. Tsuda, T. Nakamura, M. K. Yamamoto, T. Sato, M. Hagio, and Y. Yabugaki, Equatorial Atmosphere Radar (EAR): System description and first results, Radio Sci., 38, 1053, doi:10.1029/2002RS002767, 2003.
- Hocke, K., and T. Tsuda, Gravity Waves and Ionospheric Irregularities Over Tropical Convection Zones Observed by GPS/MET Radio Occultation, Geophys. Res. Lett., 28, 2815– 2818, 2001.
- Hysell, D. L., and E. Kudeki, Collisional shear instability in the equatorial F region ionosphere, J. Geophys. Res., A11301, doi:10.1029/2004JA010636, 2004.
- Immel, T. J., E. Sagawa, S. L. England, S. B. Henderson, M. E. Hagan, S. B. Mende, H. U. Frey, C. M. Swenson, and L. J. Paxton, Control of equatorial ionospheric morphology by atmospheric tides, Geophys. Res. Lett., 33, L15108, doi:10.1029/2006GL026161, 2006.
- Iyemori, T., M. Nose, D. Han, Y. Gao, M. Hashizume, N. Choosakul, H. Shinagawa, Y. Tanaka, M. Utsugi, A. Saito, H. McCreadie, Y. Odagi, and F. Yang, Geomagnetic pulsations caused by the Sumatra earthquake on December 26, 2004, Geophys. Res. Lett., **32**, L20807, doi:10.1029/2005GL024083, 2005.
- Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara, and H. Shinagawa, Electrodynamics of the formation of ionospheric wave number 4 longitudinal structure, J. Geophys. Res., **113**, A09307, doi:10.1029/2008JA013301, 2008.
- Kelley, M., M. Larsen, C. LaHoz, and J. Mc-Clure, Gravity Wave Initiation of Equatorial

Spread F: A Case Study, J. Geophys. Res., 86, 9087–9100, 1981.

- Kotake, Y. Otsuka, T. Tsugawa, T. Ogawa, and A. Saito, Climatological study of GPS total electron content variations caused by medium-scale traveling ionospheric disturbances, J. Geophys. Res., **111**, A04306, doi:10.1029/2005JA011418, 2006.
- Kudeki, E., and S. Bhattacharyya, Postsunset vortex in equatorial F-region plasma drifts and implications for bottomside spread-F, J. Geophys. Res., 104, 28163-28170, 1999.
- Laštovička, J., A. V. Mikhailov, T. Ulich, J. Bremer, A. G. Elias, N. Ortiz de Adler, V. Jara, R. Abarca del Rio, A. J. Foppiano, E. Ovalle and A. D. Danilov, Long-term trends in foF2: A comparison of various methods, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 68, 1854-1870, 2006.
- Lin, C. H., W. Wang, M. E. Hagan, C. C. Hsiao, T. J. Immel, M. L. Hsu, J. Y. Liu, L. J. Paxton, T. W. Fang, and C. H. Liu, Plausible effect of atmospheric tides on the equatorial ionosphere observed by the FORMOSAT-3/COSMIC: Three-dimensional electron density structures, Geophys. Res. Lett., 34, doi:10.1029/2007GL029265, 2007.
- Maruyama, T., and N. Matuura, Longitudinal variability of annual changes in activity of equatorial spread F and plasma bubbles, J. Geophys. Res., **89**, 10903–10912, 1984.
- Miyoshi, Y. and H. Fujiwara, Gravity waves in the thermosphere simulated by a general circulation model, J. Geophys. Res., **113**, doi:10.1029/2007JD008874, 2008.
- Ogawa, T. E. Sagawa, Y. Otsuka, K. Shiokawa, T. J. Immel, S. B. Mende, P. Wilkinson, Simultaneous ground- and satellite-based airglow observations of geomagnetic conjugate plasma bubbles in the equatorial anomaly, Earth Planets Space, 57, 385–392, 2005.
- Ogawa, T., Y. Otsuka, K. Shiokawa, A. Saito, and M. Nishioka, Ionospheric disturbances over Indonesia and their possible association with atmospheric gravity waves from the troposphere, J. Meteor. Soc. Japan, **84A**, 327– 342, 2006.

- Ogawa, T., Y. Miyoshi, Y. Otsuka, T. Nakamura, and K. Shiokawa, Equatorial GPS ionospheric scintillations over Kototabang, Indonesia and their relation to atmospheric waves from below, Earth Planets Space, in press, 2009.
- Otsuka, Y., K. Shiokawa, T. Ogawa, and P. Wilkinson, Geomagnetic conjugate observations of equatorial airglow depletions, Geophys. Res. Lett., **29**, doi:10.1029/2002GL015347, 2002.
- Otsuka, Y., K. Shiokawa, T. Ogawa, T. Yokoyama, M. Yamamoto, and S. Fukao, Spatial relationship of equatorial plasma bubbles and field-aligned irregularities observed with an all-sky airglow imager and the Equatorial Atmosphere Radar, Geophys. Res. Lett., **31**, doi:10.1029/2004GL020869, 2004.
- 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, 84A, 343–351, 2006a.
- Otsuka, Y., N. Kotake, T. Tsugawa, K. Shiokawa, T.Ogawa, Effendy, S. Saito, M. Kawamura, T. Maruyama, N. Hemmakorn, and T. Komolmis, GPS detection of total electron content variations over Indonesia and Thailand following the 26 December 2004 earthquake, Earth Planets and Space, **58**, 159–165, 2006b.
- Perkins, F., Spread F and ionospheric currents, J. Geophys. Res., 78, 218–226, 1973.
- Röttger, J., Travelling disturbances in the equatorial ionosphere and their association with penetrative cumulus convection, J. Atmos. Terr. Phys., **39**, 987–998, 1977.
- Röttger, J., Equatorial spread-F by electric fields and atmospheric gravity waves generated by thunderstorms, J. Atmos. Terr. Phys., 43, 453–462, 1981.
- Sagawa, E., T. J. Immel, H. U. Frey, and S. B. Mende, Longitudinal structure of the equatorial anomaly in the nighttime ionosphere observed by IMAGE/FUV, J. Geophys. Res., 110, A11302, doi:10.1029/2004JA010848, 2005.

- Saito, S., and T. Maruyama, Large-scale longitudinal variation in ionospheric height and equatorial spread F occurrences observed by io-nosondes, Geophys. Res. Lett., **34**, doi:10.1029/2007GL030618, 2007.
- Shinagawa, H., T. Iemori, S. Saito, and T. Maruyama, A numerical simulation of ionospheric and atmospheric variations associated with the Sumatra Earthquake on December 26, 2004, Earth Planets Space, 59, 1015–1026, 2007.
- Shiokawa, K., Y. Katoh, M. Satoh, M. K. Ejiri, T. Ogawa, T. Nakamura, T. Tsuda, and R. H. Wiens, Development of optical mesosphere thermosphere imagers (OMTI), Earth Planets Space, **51**, 887–896, 1999.
- Shiokawa, K., Y. Otsuka, T. Ogawa, and P. Wilkinson, Time evolution of high-altitude plasma bubbles imaged at geomagnetic conjugate points, Ann. Geophys., 22, 3137–3143, 2004.
- Shiokawa, K., Y. Otsuka, Y. Tsugawa, T. Ogawa, A. Saito, K. Oshima, M. Kubota, T. Maruyama, T. Nakamura, M. Yamamoto, and P. Wilkinson, Geomagnetic conjugate observation of nighttime medium-scale and large-scale traveling ionospheric disturbances: FRONT3 campaign, J. Geophys. Res., 110, A05303, doi:10.1029/2004JA010845, 2005.
- Shiokawa, K., Y. Otsuka, and T. Ogawa, Quasiperiodic southward moving waves in 630-nm airglow images in the equatorial thermosphere, J. Geophys. Res., **111**, doi:10.1029/2005JA011406, 2006.
- Singh, S., F. Johnson, and R. Power, Gravity wave seeding of equatorial plasma bubbles, J. Geophys. Res., 102, 7399-7410, 1997.
- Suzuki, S., Study of mesospheric gravity wave dynamics based on airglow imaging observations at middle and low latitudes, PhD thesis, Nagoya University, 2007.
- Takahashi, H., L. M. Lima, C. M. Wrasse, M. A. Abdu, I. S. Batista, D. Gobbi, R. A. Buriti, P P. Batista, Evidence on 2–4 day oscillations of the equatorial ionosphere h'F and mesospheric airglow emissions, Geophys. Res. Lett., **32**, doi:10.1029/2004GL022318, 2005.

- Takahashi, H., C. M. Wrasse, D. Pancheva, M. A. Abdu, I. S. Batista, L. M. Lima, P. P. Batista, B. R. Clemesha, and K. Shiokawa, Signatures of 3–6 day planetary waves in the equatorial mesosphere and ionosphere, Ann. Geophys., 24, 3343–3350, 2006.
- Tsuda, T. and K. Hocke, Application of GPS radio occultation data for studies of atmospheric waves in the middle atmosphere and ionosphere, J. Meteor. Soc. Japan, **82**, 419– 426, 2004.
- Tsunoda, R. T., On the enigma of day-to-day variability in equatorial spread F, Geophys. Res. Lett., **32**, doi:10.1029/2005GL022512, 2005.
- Vadas, S. L, Horizontal and vertical propagation and dissipation of gravity waves in the thermosphere from lower atmospheric and thermospheric sources, J. Geophys. Res., 112, doi:10.1029/2006JA011845, 2007.
- Woodman, R. F., and C. La Hoz, Radar observations of F-region equatorial irregularities, J. Geophys. Res., 81, 5447, 1976.
- Woodman, R. F., and E. Kudeki, A causal relationship between lightning and explosive spread F, Geophys. Res. Lett., **11**, 1165–1167, 1984.