

## 3-4-2 赤道電離圏シンチレーションと下層からの大気波動との関係

### 3-4-2 *Relation between Equatorial Ionospheric Scintillations and Atmospheric Waves from Below*

小川忠彦

OGAWA Tadahiko

#### 要旨

2003年1月から赤道直下のインドネシア・西スマトラのコトタバングで行われてきたGPS衛星電波の電離圏シンチレーション観測結果を概観するとともに、シンチレーション発生と下層から伝播してくる大気波動との関係を簡単に論じる。プラズマバブルに起因するシンチレーションは主に春秋期の2000～0100 LTに発生し、その活動は太陽活動の下降とともに低下した。シンチレーション活動はインド洋の対流圏擾乱と関係があり、プラネタリー波の影響を受けている。熱圏中性風の振る舞いを知るための数値シミュレーションを行った結果、長周期の波動は下部熱圏にのみ存在するが、短周期の大気重力波は熱圏全体には満ちていることが明らかになった。これらの大気波動がシンチレーションを引き起こすプラズマバブルの生成に関与している可能性を指摘する。

This paper reviews some results from equatorial GPS ionospheric scintillation observations that have been conducted at Kototabang, Indonesia since January 2003, and briefly discusses relations between scintillation and atmospheric waves from below. GPS scintillations caused by plasma bubbles appeared between 2000 and 0100 LT mainly in equinoctial months, and their activity decreased with decreasing solar activity. The scintillation activity can be related to tropospheric disturbances over the Indian Ocean to the west of Kototabang. Scintillation index fluctuates with periods of planetary waves, and similar periods are also found in Earth's brightness temperature variations. Numerical simulations to know behavior of neutral wind in the equatorial thermosphere indicate that planetary waves dissipate rapidly above about 125 km, and short-period atmospheric waves become predominant above 100 km. It is suggested that these atmospheric waves can contribute to the generation of plasma bubbles causing the scintillations.

#### [キーワード]

赤道電離圏擾乱, 電離圏シンチレーション, プラズマバブル, GPS, 大気波動

Equatorial ionospheric disturbance, Ionospheric scintillation, Plasma bubble, GPS, Atmospheric wave

## 1 まえがき

夜間の赤道電離圏に特有の擾乱はレーリー・テラー (Rayleigh-Taylor) プラズマ不安定を経て発生するプラズマバブルである。バブル生成の基本的な物理過程や特性はよく知られているが、バブルや赤道スプレッド F などに関わる電気力学過程の完全な理解には未だ至っていない (例え

ば、[1])。赤道熱圏を伝播する大気重力波 (以下、AGW と略記) がバブルの生成や F 層下部の波状構造に関わっている可能性は既に指摘されている (例えば、[2]–[7])。Ogawa ら [8][9] は、数百～1,000 km の東西スケールを持ち、バブルを内包した電子密度の波状構造が赤道異常内に存在していることを見つけた。また、周期 2 日以上プラネタリー波 (以下、PW と略記) が赤道中間圏と熱圏

を変調させることも指摘されている[10][11]。このように、電離圏・熱圏に固有の物理量(電場、導電率、中性風など)に加えて、下層から伝播してくる AGW や PW が赤道電離圏擾乱の電気力学過程に果たす役割を無視することはできない[12]。

バブル内とその周辺には様々な空間スケールを持つ電子密度不規則構造が存在するため、そこを通過する静止・移動衛星の電波はシンチレーションを被る。多数配置されている GPS 衛星電波を利用した地上でのシンチレーション観測は、天候に関係なくバブルを連続してモニターでき、バブル現象の更なる解明に貢献できる。

ここでは、長期にわたって蓄積されてきた GPS シンチレーションデータを解析し、バブルの活動が日々変動する理由と、バブルにまで成長する初期の弱いプラズマ擾乱の成因について概観する。なお、ここに記す内容は既に複数の誌上論文として発表されており[8][9][13]、詳細はこれらの文献を参照されたい。

## 2 GPS シンチレーション観測結果

### 2.1 GPS シンチレーション観測法

高度約 20,000 km を飛翔する GPS 衛星が発する電波(1.5754 GHz)の電離圏シンチレーション観測は、地理赤道に近いインドネシア・西スマトラのコタババン(南緯 0.20°、東経 100.32°;地磁気緯度は南緯 10.36°)において 2003 年 1 月後半に開始された[9][13][14]。コタババンの位置を図 1 に示す。GPS 受信機 3 台が約 130 m の間隔で三角状に配置されおり、各受信機の信号強度は 20 Hz のサンプリング間隔で記録されている。3 台の受信信号の時間変化を相関解析することにより、GPS シンチレーションの原因となる電離圏 F 層の電子密度不規則構造(空間スケール約 350 m)、すなわちプラズマバブルの移動速度と方向が分かる[14]。

例として、2003 年 4 月 1 日に受信された GPS 信号強度の時間変化を図 2 の下部に示す。上部の図はコタババンの 630 nm 全天カメラで 2235 LT に撮像され大気光の水平 2 次元分布であり、南北に細長く延びた幾つかの暗い領域がプラズマバブルである。2215 ~ 2240 LT において信号強度が弱まるとともに激しく時間変動しており、これがシンチレーションである。その原因は、GPS と地

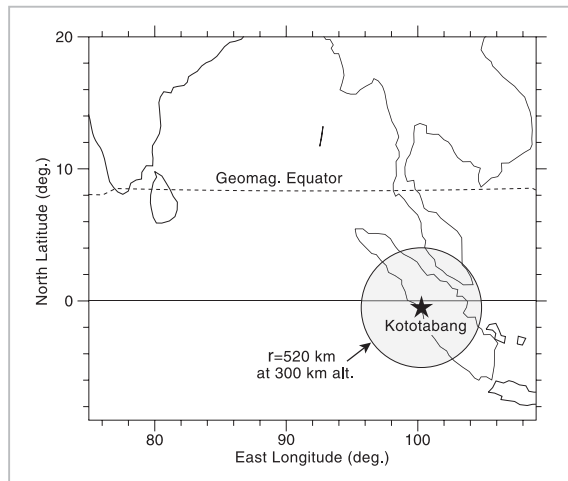


図1 コタババンの位置(★)とGPSシンチレーションの観測視野

コタババン真上の高度300kmを中心を持つ半径520kmの円内において衛星仰角 $\geq 30^\circ$ 。

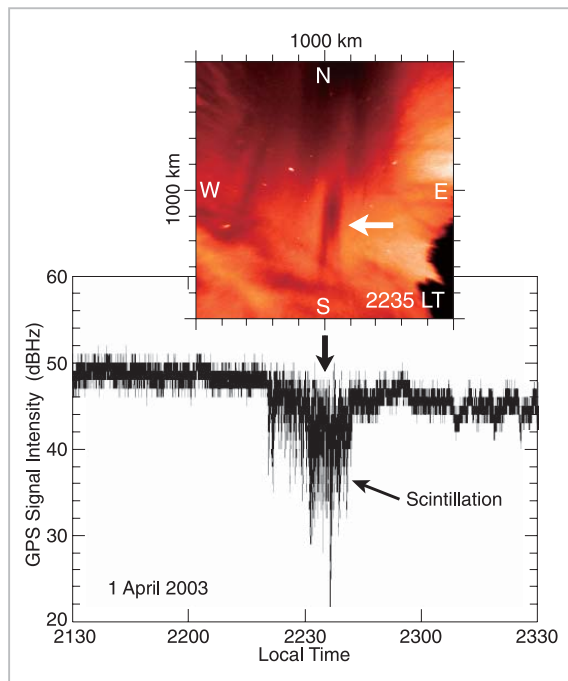


図2 プラズマバブルによるGPSシンチレーションの観測例(2003年4月1日)

上間の電波伝播路が電子密度不規則構造を伴うプラズマバブル内とその近傍を横切ったためである。コタババンの真上まで発達したバブル(白矢印)により、2235 LT 付近で最も強いシンチレーションが発生していることが分かる。

シンチレーションの強さを示す一つの指標として、 $S_4$  と呼ばれる指数が通常用いられており、 $S_4^2 = (\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2) / \langle I \rangle^2$  で与えられる。ここで、 $I$  は信号強度、かぎ括弧はアンサンブル平均である。

$S_4$ は通常0~1の値をとり、シンチレーションが強いと高くなる。ここでは、3台のうちの1台の受信機信号から10分毎に計算された $S_4$ 値を用いた。衛星仰角が低い場合には電離圏シンチレーション以外の要因でも信号強度が変動するため、ここでは仰角が $30^\circ$ 以上のデータを使用した。これにより、コトタバン上空の高度300 kmの点に中心を持つ半径520 kmの円内(図1)を通過する電波伝播路上で発生するシンチレーションが観測できる。この円は地磁気緯度で南緯 $4^\circ$ から $13^\circ$ をカバーしている。プラズマバブルは磁気赤道上のF層で発生し、次第に高々度へと発達しながら東進する。なお、図1から分かるように、磁気赤道上のバブルの上限高度が低い場合は観測視野外となるため、そのバブルは検出できない。

## 2.2 シンチレーション発生長期変化と周期

2003年1月後半から2009年6月中旬までの約6年半の間に観測された $S_4$ 値の時間・日変化を図3に示す。縦長の黒色部分では、受信機系などのトラブルのためにデータは無い。また、約0.2以下の低い $S_4$ は電波干渉や受信機ノイズなどに起因している可能性もあるので無視する。図3

から次の事実を指摘する。

(1) シンチレーション活動は太陽活動が下降し始めた2003年以降、年とともに衰退していき、2007年以降はほとんど止まっている。(ここで注意すべきは、上述したように、高々度にまで発達しないバブルによるシンチレーションはコトタバンでは観測できないことである。従って、図3は赤道上空のバブル活動の経年変化を正しく反映していない可能性もある。)

(2) シンチレーション活動が高い月は春秋期の3~4月と9~10月であり、発生時刻は2000~0100 LT (1300~1800 UT)である。

(3) シンチレーションの発生は日々不規則に変化するが、9~10月に比べて3~4月においてより頻繁であり、 $S_4$ も高い。

上記の特徴は、衛星で観測された東経 $100^\circ$ 付近のプラズマバブルの特徴とよく一致している(例えば、[15])。全天カメラなどで撮像されるプラズマバブルは、日没後から真夜中を数時間以上過ぎた時刻まで存在することが知られている。これに対して、シンチレーションが真夜中付近までしか発生しない理由は、その原因である350 mスケールの電子密度不規則構造が真夜中付近で消滅するからである、と考えられている。図3の結果は、コトタバン上空の日没後から真夜中にかけてのバブル活動の様相がGPSシンチレーション観測から分かることを強く示唆する。

上述のように、シンチレーション(従って、プラズマバブル)は日々不規則に発生するが、まったく不規則なのか、ある種の周期性が存在するのかを調べるため、長期間の $S_4$ データをウェーブレット解析する。図4は、2003年1月1日から2005年7月10日までの920日間における、(a)  $S_4$ の時間・日変化、(b) 同期間の1800~0200 LTに得られた $S_4$ を平均し、これを各日の1800~0200 LTの間の平均値から差し引いた $S_4$ 偏差値の日変化、(c) この偏差値変動をウェーブレット解析した結果、を示す。図4(b)には地磁気嵐急始(SC)の日が印されている。幾つかの地磁気嵐がシンチレーションを誘発した可能性はあるが、春秋期のシンチレーションと地磁気嵐発生との間に明瞭な相関は見られない。図4(c)から、春秋期には周期2~30日の間で幾つかのスペクトルピークが見られるが、これらのピークは惑星規模

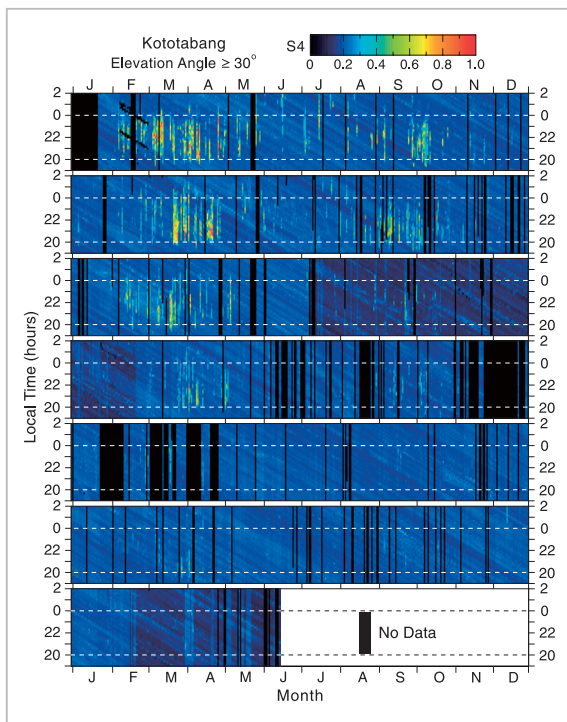


図3 2003年1月下旬から2009年6月中旬までの $S_4$ 指数の時間・日変化

黒い部分は欠測。

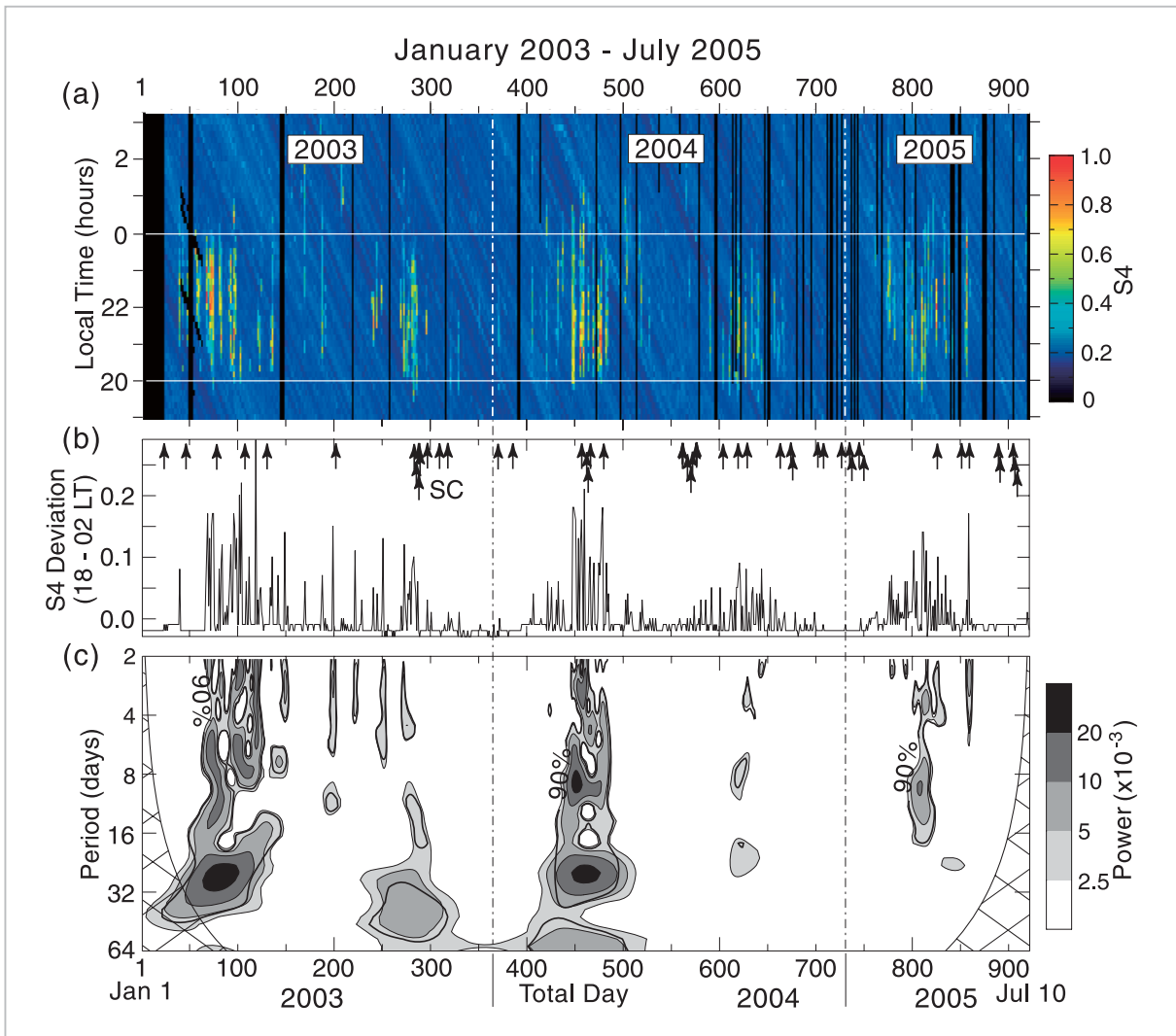


図4 (a) 2003年1月1日～2005年7月10日のS<sub>4</sub>の時間・日変化。(b) 同期間の1800～0200 LTにわたってS<sub>4</sub>を平均し、これを各日の1800～0200 LTの平均値から差し引いたS<sub>4</sub>偏差値の日変化。(c) S<sub>4</sub>偏差値のウェーブレット解析結果。太線曲線は90%信頼レベルで、網掛け部分は信頼できない [13]

の大気波動 (PW) や太陽活動が原因であると考えられる。

### 3 GPS シンチレーションと対流圏活動との関係

前章で、対流圏擾乱で作られて上方伝播するPWが赤道域GPSシンチレーションの発生に関与していることを示唆したが、この可能性を少し詳しく調べる。赤道対流圏擾乱の原因として雨、雲、気圧、対流などの時間・空間変動があるが、擾乱の度合いを表すパラメータとして、ここでは静止気象衛星で観測された雲頂温度 (T<sub>bb</sub>) を用いる。一般的に、様々な原因で対流圏内の対流活動

が活発(不活発)になると、雲頂が高く(低く)なり、T<sub>bb</sub>は低く(高く)なる。対流活動の活発化に伴い、様々な周期を持つ大気重力波や惑星波が強く励起され、成層圏を抜けて上方に伝播すると考えられる。

2003年3月1日～4月30日の期間におけるS<sub>4</sub> (図4) とT<sub>bb</sub>の日変化の比較を図5に示す。左図のT<sub>bb</sub>プロットにおいて、横軸は東経であり、コタバンは100.32°である。T<sub>bb</sub>については赤道付近の北緯2°～南緯2°と0000～2400 UTの間の平均値が描かれている。この図から、例えばday 80からday 90にかけて、250 K以下の低温域がインド洋上を東へ移動して行く様子が分かる。インド洋上と異なって、コタバン付近の温度分

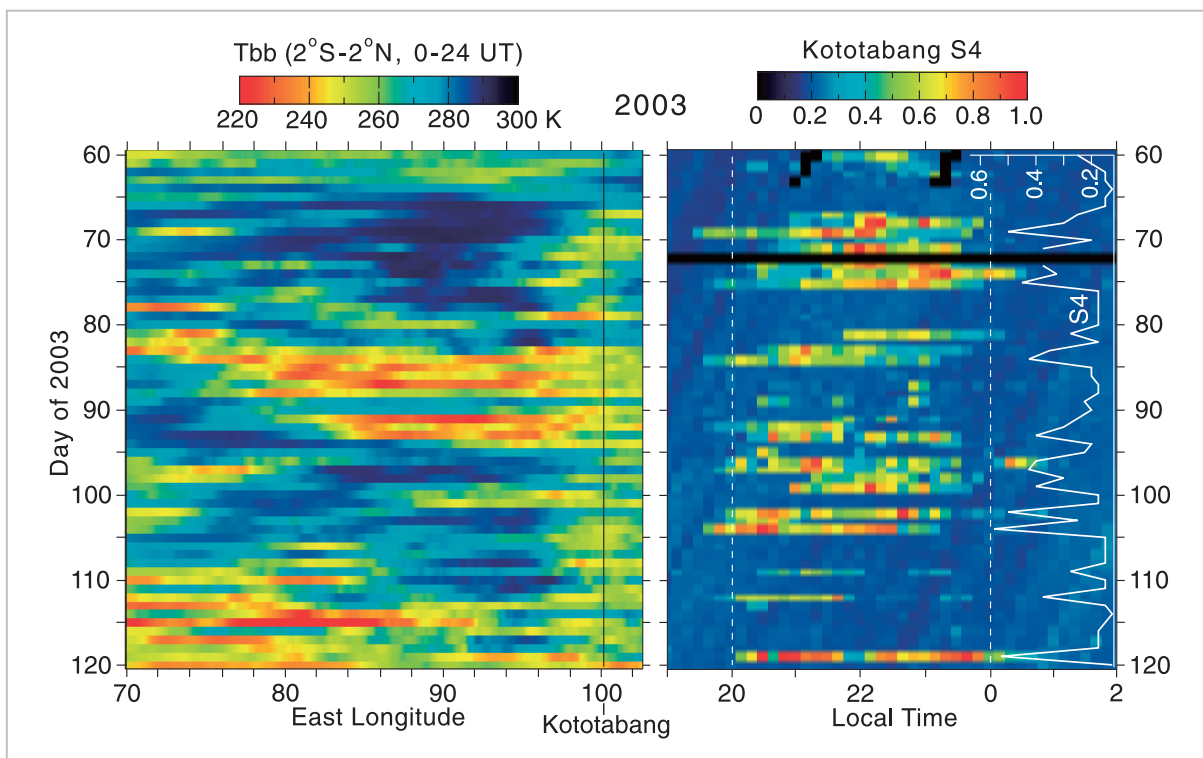


図5 (左) 2003年3月1日 (day 60) ~ 4月30日 (day 120) における北緯2°~南緯2°と0000 UT ~ 2400 UT にわたって平均した  $T_{bb}$  の経度・日変化。(右) 同期間における  $S_4$  指数の時間・日変化。白線曲線は 1800 ~ 0200 LT にわたって平均した  $S_4$  の日変化 [13]

布が不規則になる理由の一つとして、スマトラ島の高い山脈の影響が考えられる。左図と右図の比較から、シンチレーションはインド洋上の  $T_{bb}$  が低い(雲頂が高い)時だけでなく、高い(雲頂が低い)時にも発生しており、何らかの対流圏擾乱がシンチレーションの発生に寄与していることを示唆する。インド洋上の  $T_{bb}$  と  $S_4$  との関連に関する詳細な議論については Ogawa ら [9] [13] を参照されたい。

$S_4$  ウェーブレットスペクトルの長期にわたる変化を図4に示したが、ここでは、2003年2月から5月に注目し、 $S_4$  と  $T_{bb}$  のウェーブレットスペクトルを比較する。図6の最上段にはこの期間の  $S_4$  スペクトルが、下段にはインド洋赤道上(緯度0°)の4点(東経80°、85°、90°、95°)における  $T_{bb}$  のスペクトルが示されている。各地点の  $T_{bb}$  スペクトルには3~16日の周期を持つ幾つかのピークが存在するが、これらに対応したピークが  $S_4$  のスペクトルにも見られる。図6から求めた  $S_4$  と  $T_{bb}$  のスペクトル強度を図7に示す。 $T_{bb}$  は周期5日、7日、14日付近でピークを持つが、これらの周期において  $S_4$  もピークを持つ。しかし、 $S_4$  に

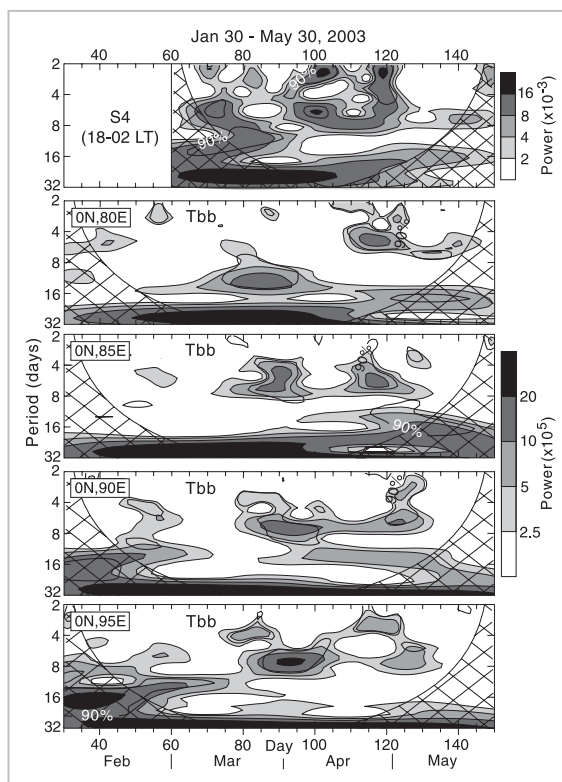


図6  $S_4$  偏差値のウェーブレット解析結果(図4(c)参照)と、赤道上4地点での  $T_{bb}$  のウェーブレット解析結果

太線曲線は90%信頼レベルで、網掛け部分は信頼できない。

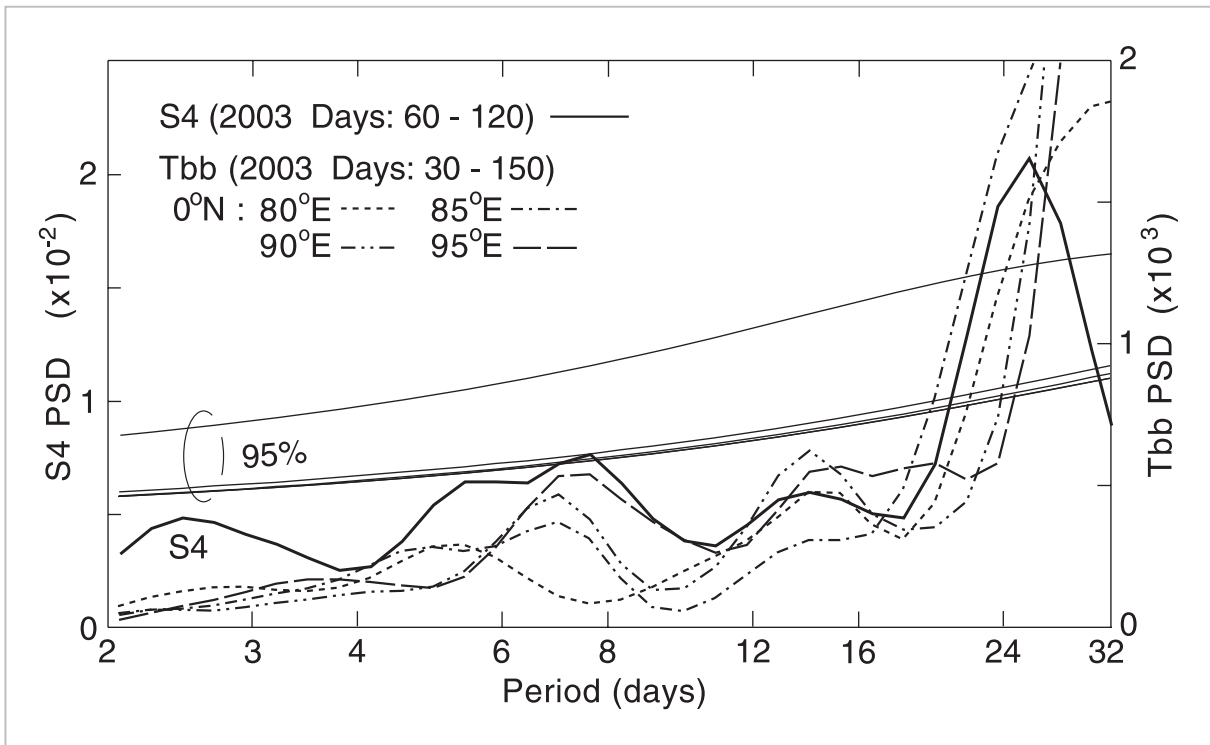


図7 図6から求めたS<sub>4</sub>偏差値とT<sub>bb</sub>のピリオドグラム(周期対スペクトル密度)  
滑らかな曲線は95%信頼レベル。

見られる周期2~3日と25日付近のピークはT<sub>bb</sub>には存在しない。このように、図6と図7は、5日以上周期を持つ対流圏起源のPWがシンチレーションの発生に寄与していることを示唆する。なお、正規ロスビー波(normal mode Rossby waves)と呼ばれるPWの周期は2日、5日、10日、16日であり[16]、上述の幾つかの周期はこれらに近い。

#### 4 赤道大気波動の数値シミュレーション

前章では、S<sub>4</sub>とT<sub>bb</sub>のデータ解析を基に、シンチレーション(プラズマバブル)の発生が下層からの長周期大気波動によって制御されている可能性を示した。しかし、このような大気波動が熱圏・電離圏高度に存在することをシンチレーション観測や他の電離圏・熱圏観測のみから実証することは極めて困難である。ここでは、九州大学が開発したKUGCM(Kyushu University General Circulation Model)を用いて、赤道大気波動の振る舞いを知るための数値シミュレーションを行うことにより、どのような種類の波動が熱圏に存在し得るのかを

調べる。KUGCMの詳細については他の文献(例えば、[17][18])を参照されたい。なお、バブルの発生には東西方向の中性風が重要なので(例えば、[19])、ここでは東西風のみ注目する。

赤道近傍のある地点(北緯0.4°、東経100°)での1年間のシミュレーションデータと、3月下旬の10日間のシミュレーションデータから計算された高度90、100、150、200 kmにおける東西風の周波数スペクトルをそれぞれ図8(a)と8(b)に示す。図8(a)には1~100日、図8(b)には0.5~12時間の周期成分が描かれている。図から明らかのように、約1日以上周期を持つ波動は高度100 km以上では急速に減衰し、150 km以上では存在しない。一方、0.5~3時間周期の波動の振幅は高度とともに増加し、後述のように、400 kmまで伝播可能である。北緯2.8°、経度0°~360°における1年間のシミュレーションデータを基に、2日以上周期を有する西進PW(負周波数)や東進ケルビン波(正周波数)の振幅が高度とともに減衰する様子を図9に示す。前述のように、周期2~20日の波動は125 km以上では減衰するが、125 km以下では幾つかの波動成分が存在する。卓越する波動は東西波数(K)が1~

3で周期2日のケルビン波と、 $K=1$ で周期6日のPWである。これら以外の波動として、 $K=2$ で周期4日のPW、 $K=1$ で周期5日、10日、16日のPW、 $K=3\sim4$ で周期2~2.5日のPWがある。図7では周期2.5、5、8、14、25日の波動が見られており、シミュレーションの結果と部分的に一致している。また、周期2日以上PWが赤道中間圏と熱圏を変調させることが指摘されている[10][11]。

ここでは図示しないが、3月のシミュレーションデータを用いてコトタバン上空150~350kmの東西風の時間変化を調べると、200km以上では、1日潮汐波のために日没から日出の夜間では東向き(最大風速は約80m/sで真夜中付近)、日中では西向きで最大約80m/sである[13]。日没付

近の東向き風は、プラズマバブル生成の引き金となる赤道電離圏F層の東向き電場の増大に重要な役割を果たしている[19]。

図8(b)において、高度が上がるにつれて周期0.5~12時間の短周期AGWが重要になることを指摘した。このうちの周期1~4時間のAGWによってコトタバン付近(北緯0.4°)の上空に現れる東西風系を調べる。3月21日のシミュレーションデータを基に作成した、1040~1600UT(コトタバンでは1740~2300LT)における東西風系の40分毎の時間変化を図10に示す。各図には東経・高度座標を用いて風速の等高線が描かれており、実線部が東向き風、破線部が西向き風である。高度120~300kmにおいて、東向き風と西向き風の領域はいずれも経度方向に300~1,000km、

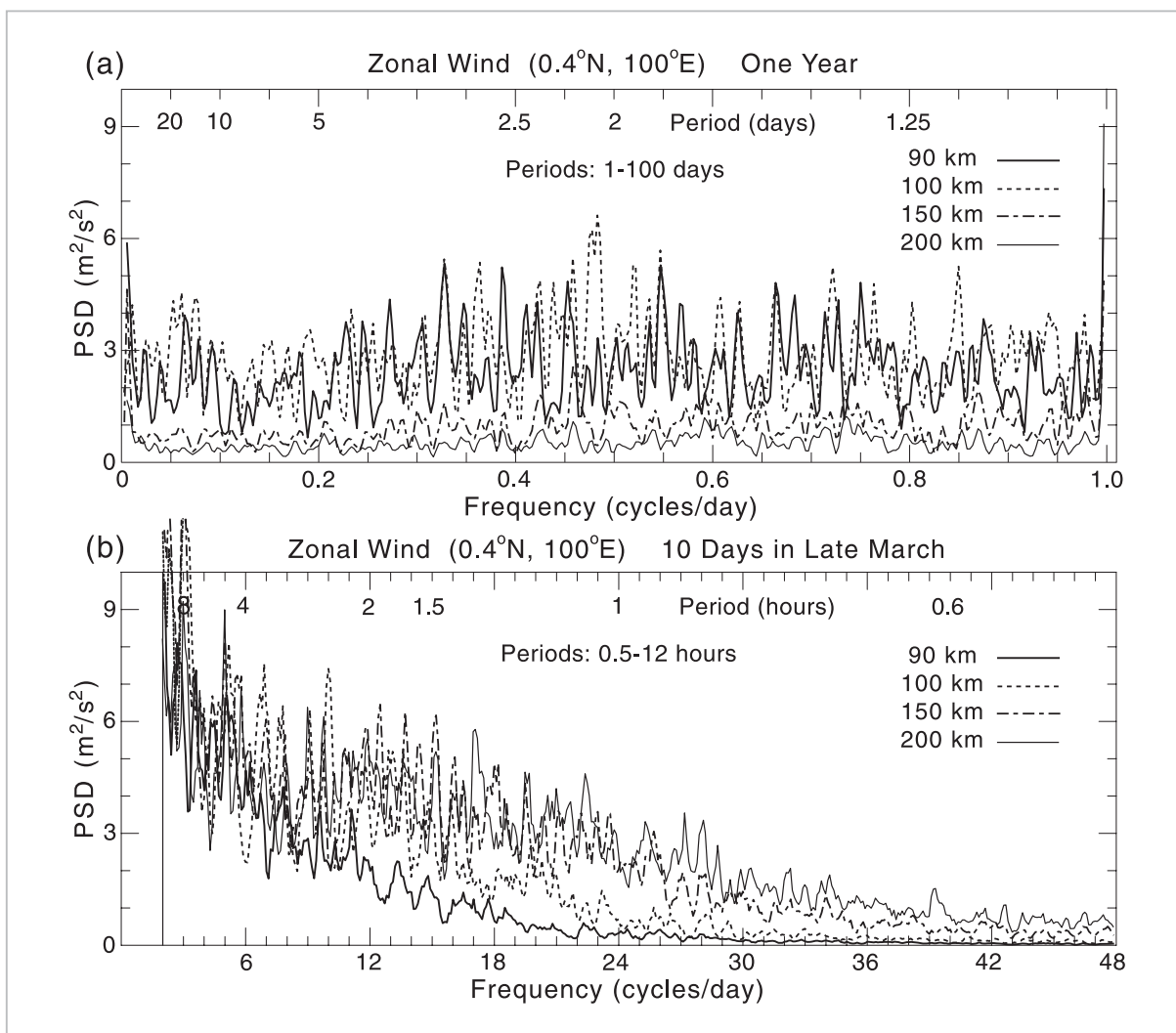


図8 1年間及び3月下旬の10日間の数値シミュレーションデータから得られたコトタバン付近の東西風の周波数スペクトル [13]

(a) 周期1~100日。(b) 周期0.5~12時間。強度が非常に強いため、1日と0.5日成分は省略。

高度方向に 30 ~ 100 km のスケールを持っている。また、両領域とも形を変えながら約 100 m/s で概して東に移動しており、上述のコトタバン上空の東西風の時間変化とほぼ一致している。各領域内の風速も時間変化しており、最大で約 100 m/s に達する。図 10 に示す高度 120 km 以上の波動構造の原因は主にイオンドラッグと分子粘

性であり、これらは熱圏での PW の上方伝播にも影響を与える。

図 11 に示すように、200 ~ 250 km の東西間隔を持つ複数の地磁気共役プラズマバブルが経度方向に数百 ~ 1,000 km のスケールを持つ F 層電子密度の波状構造内に存在し、東へ約 100 m/s で移動することが見つかっている [8][9]。この事実は図

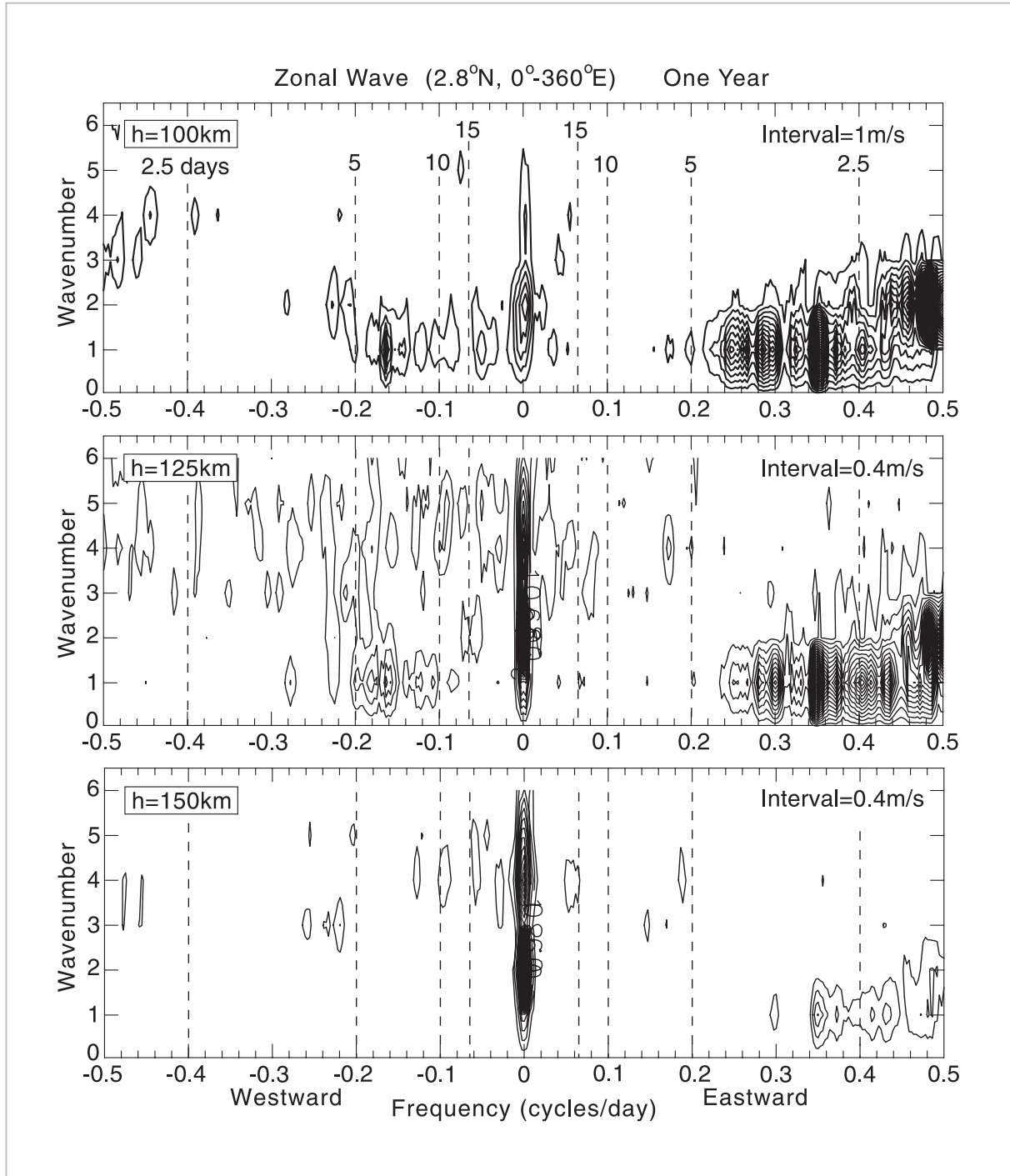


図9 1年間の数値シミュレーションデータから得られた、2日以上周期を持つ北緯2.8°における大気波動のパワースペクトル [13]

周波数ゼロ付近のピークは波動の季節変化と1年変化による。



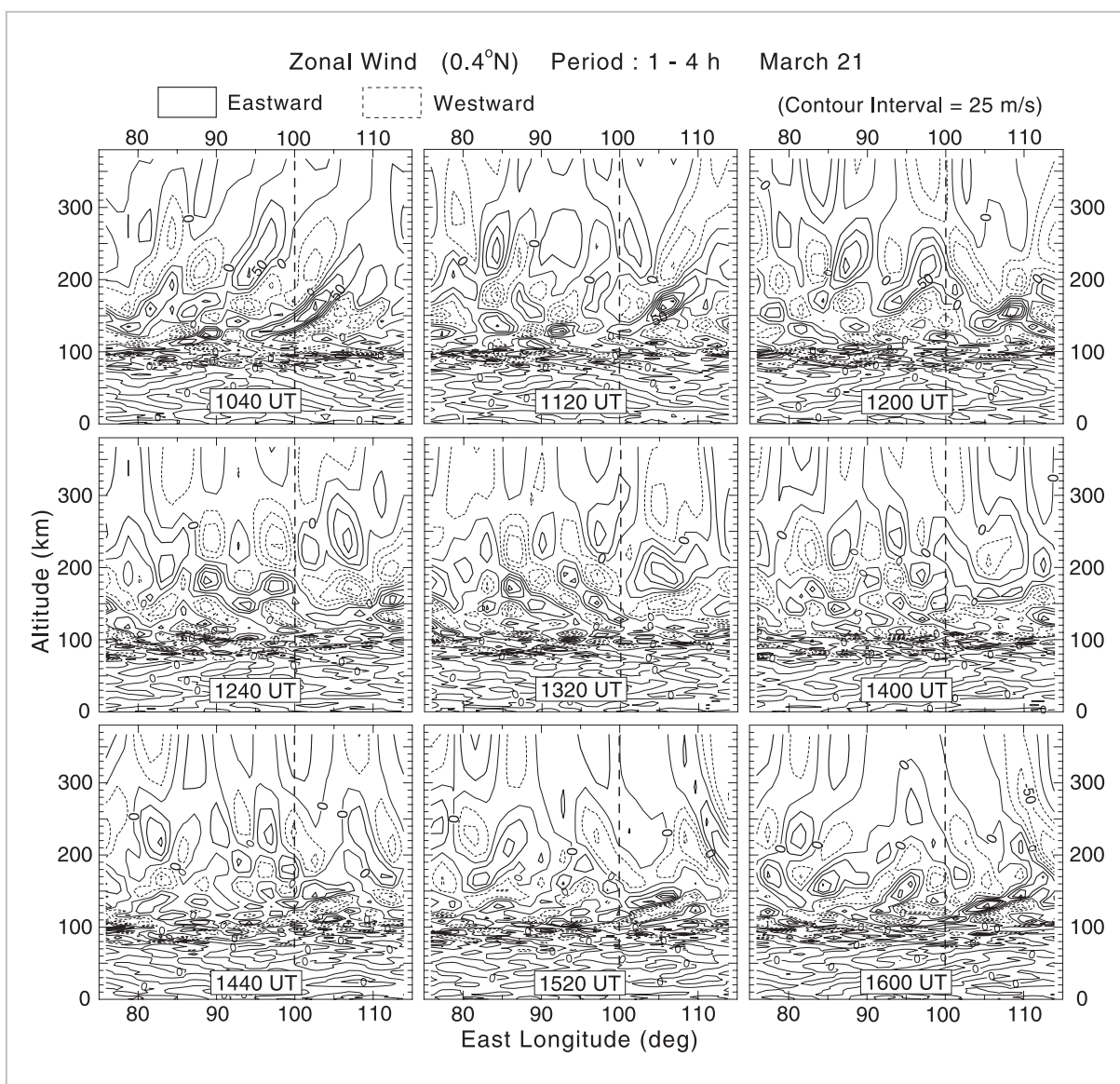


図10 3月21日の数値シミュレーションデータから得られた、40分毎の東西風（周期1～4時間）の経度・高度断面図 [13]

実線部（破線部）が東向き。縦破線はコトタパンの経度。

10に示したシミュレーションの結果を支持する。冒頭で述べたように、赤道熱圏を伝播するAGWがバブルの生成やF層下部の波状構造に関わっていることを多数の研究者が指摘している（例えば、[2]–[7][20]）。

## 5 むすび

GPSシンチレーション現象の長期観測と数値シミュレーションを通して赤道電離圏擾乱の一端に触れた。冒頭で述べたように、ここで述べた内容のほとんどは既に幾つかの誌上論文として発表さ

れており、本文はそれらの簡単なレビューである。主な結果は次の通りである：

(1) コトタバンにおけるシンチレーションの発生は赤道プラズマバブルの存在と密接に関係しており、シンチレーション観測はバブル現象の解明に有効な手段である。2003年以降のシンチレーション活動は太陽活動の低下とともに衰退してきた。活動には春秋の非対称性がある。このような特徴は、例えば衛星で観測されたプラズマバブルの特徴と一致する。

(2) シンチレーションは主に2000～0100LTで発生するが、発生の有無は日々変化する。長期の

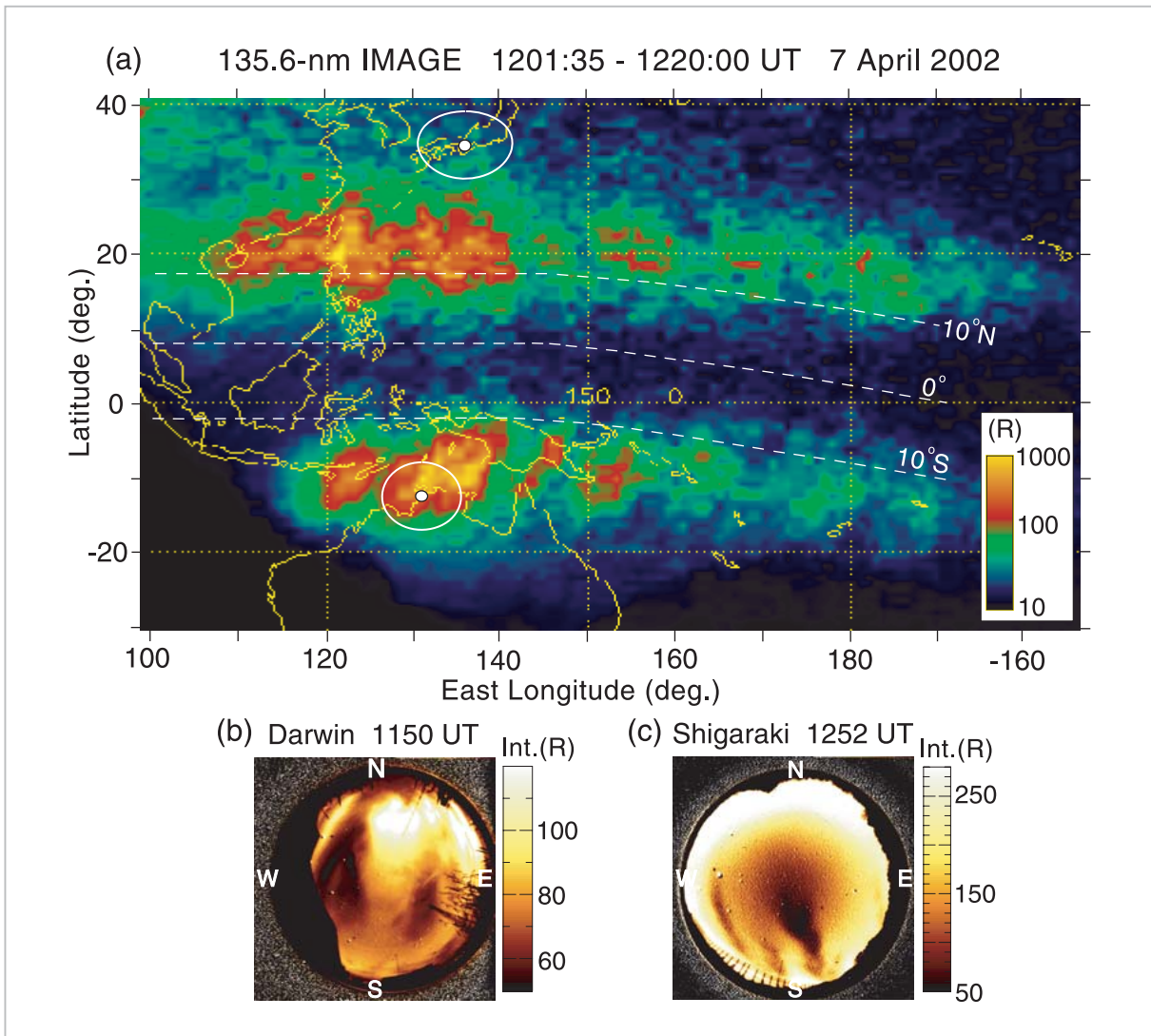


図 11 (a) IMAGE 衛星で観測された 135.6 nm の大気光分布と、(b) 滋賀県・信楽と (c) オーストラリア・ダーウィンの全天カメラで撮像された地磁気共役プラズマバブル<sup>[9]</sup>

白線の円は信楽とダーウィンの全天カメラの視野。

$S_4$  指数をウェーブレット解析した結果、シンチレーションの発生には下層から伝播してくる周期 2 日以上 の PW が関与していることが分かった。このことは、赤道対流圏擾乱の指標となる  $T_{bb}$  のウェーブレット解析からも支持される。

(3) 赤道付近の熱圏に存在する大気波動の様相を知るために KUGCM を用いて数値シミュレーションを行った結果、長周期の PW やケルビン波は高度約 120 km 以上には伝播しないが、短周期の AGW はこの高度を超えても存在することが分かった。AGW により熱圏内に 100 ~ 1,000 km のスケールを持つ東西風の構造が作られ、これが東へ約 100 m/s で移動する。このような東西風の振る舞いは日没付近でのバブルの生成や、生成後の

東への移動と密接に関係していると思われる。

(4) 上述のように、バブルが存在する高度まで PW やケルビン波は伝播できない。これらの大気波動によって E 層高度に作られる電場が地球磁力線に沿って F 層高度に伝わるとすると、PW やケルビン波の影響がシンチレーション(バブル)の活動に現れることになる。

以上、下層から伝播してくる AGW や PW が赤道電離圏の電気力学過程に関与していることは疑いないと考えられるが、中性大気波動とプラズマとの詳細な相互作用過程や AGW によるバブル生成のトリガー過程の解明などについてさらなる研究が必要である。また、上述のような数値シミュレーションを更に発展させて、中性大気とプ

ラズマ過程を融合させたシミュレーションが今後重要になる。

最後に、GPS シンチレーションの最新データは大塚雄一氏(名古屋大学太陽地球環境研究所)か

ら、シミュレーションデータは三好勉信氏(九州大学大学院理学研究院)から提供されました。感謝します。

## 参考文献

- 1 M. A. Abdu, "Outstanding Problems in the Equatorial Ionosphere-Thermosphere Electrodynamics Relevant to Spread F", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol.63, pp.869-884, 2001.
- 2 J. Röttger, "Travelling Disturbances in the Equatorial Ionosphere and Their Association with Penetrative Cumulus Convection", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol.39, pp.987-998, 1977.
- 3 J. Röttger, "Equatorial Spread-F by Electric Fields and Atmospheric Gravity Waves Generated by Thunderstorms", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol.43, pp.453-462, 1981.
- 4 M. C. Kelley, M. F. Larsen, C. LaHoz and J. P. McClure, "Gravity Wave Initiation of Equatorial Spread F: A Case Study", *Journal of Geophysical Research*, Vol.86, pp.9087-9100, 1981.
- 5 S. Singh, F. S. Johnson and R. A. Power, "Gravity Wave Seeding of Equatorial Plasma Bubbles", *Journal of Geophysical Research*, Vol.112, pp.7399-7410, 1997.
- 6 C. S. Lin, 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", *Journal of Geophysical Research*, Vol.110, A06304, doi:10.1029/2004JA010774, 2005.
- 7 R. T. Tsunoda, "On the Enigma of Day-to-Day Variability in the Equatorial Spread F", *Geophysical Research Letters*, Vol.32, L08103, doi:10.1029/2005GL022512, 2005.
- 8 T. Ogawa, E. Sagawa, Y. Otsuka, K. Shiokawa, T. J. Immel, S. B. Mende and P. Wilkinson, "Simultaneous Ground- and Satellite-Based Airglow Observations of Geomagnetic Conjugate Plasma Bubbles in the Equatorial Anomaly", *Earth Planets Space*, Vol.57, pp.385-392, 2005.
- 9 T. 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", *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol.84A, pp.327-342, 2006.
- 10 H. Takahashi, L. M. Lima, C. W. Wrasse, M. A. Abdu, I. S. Batista, D. Gobbi, R. A. Buriti and P. P. Batista, "Evidence on 2-4 Day Oscillations of the Equatorial Ionosphere h'F and Mesospheric Airglow Emissions", *Geophysical Research Letters*, Vol.32, L12102, doi:10.1029/2004GL022318, 2005.
- 11 M. A. Abdu, P. P. Batista, I. S. Batista, C. G. M. Brum, A. J. Carrasco and B. W. Reinisch, "Planetary Wave Oscillations in Mesospheric Winds, Equatorial Evening Prereversal Electric Field and Spread F", *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L07107, doi:10.1029/2005GL024837, 2006.
- 12 J. Laštovička, "Forcing of the Ionosphere by Waves From Below", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol.68, pp.479-497, 2006.
- 13 T. 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*, Vol.61, pp.397-410, 2009.

- 14 Y. Otsuka, Y., K. Shiokawa and T. Ogawa, "Equatorial Ionospheric Scintillations and Zonal Irregularity Drifts Observed With Closely-Spaced GPS Receivers in Indonesia", Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol.84A, pp.343-351, 2006.
- 15 L. C. Gentile, W. J. Burke and F. J. Rich, "A Global Climatology for Equatorial Plasma Bubbles in the Topside Ionosphere", Annales Geophysicae, Vol.24, pp.163-172, 2006.
- 16 J. M. Forbes, "Planetary Waves in the Thermosphere-Ionosphere System", Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, Vol.48, pp.91-98, 1996.
- 17 Y. Miyoshi and H. Fujiwara, "Excitation Mechanism of Intraseasonal Oscillation in the Equatorial Mesosphere and Lower Thermosphere", Journal of Geophysical Research, Vol.111, D14108, doi:10.1029/2005JD006993, 2006.
- 18 Y. Miyoshi and H. Fujiwara, "Gravity Waves in the Thermosphere Simulated by a General Circulation Model", Journal of Geophysical Research, Vol.113, D01101, doi: 10.1029/2007JD008874, 2008.
- 19 D. T. Farley, E. Bonelli, B. G. Fejer and M. F. Larsen, "The Prereversal of the Zonal Electric Field in the Equatorial Ionosphere", Journal of Geophysical Research, Vol.91, pp.13,723-13,728, 1986.
- 20 S. Prakash, "Production of Electric Field Perturbations by Gravity Wave Winds in the E Region Suitable for Initiating Equatorial Spread F", Journal of Geophysical Research, Vol.104, pp.10,051-10,069, 1999.



おがわただひこ  
小川忠彦

電磁波計測研究センター環境情報セン  
シング・ネットワークグループ客員研  
究員 工学博士  
超高層大気物理