

## 3-2-7 短波赤道横断伝播によるプラズマバブルの遠隔観測

### 3-2-7 Remote Sensing Observations of Equatorial Plasma Bubble by HF Transequatorial Propagation

津川卓也 丸山 隆 川村眞文 石井 守 齋藤 享

TSUGAWA Takuya, MARUYAMA Takashi, KAWAMURA Masabumi, ISHII Mamoru, and SAITO Susumu

#### 要旨

低緯度電離圏で日没後に発生するプラズマバブルは、衛星信号のシンチレーション障害やロック損失を引き起こす。陸地が少ない日本の経度域におけるプラズマバブルの発生・移動の現況把握や予報をするためには、西太平洋域の定常的な遠隔観測が有効である。そのような遠隔観測の一つとして、豪州の短波放送を日本の短波到来方向探査装置で受信する短波赤道横断伝播観測を行っている。本稿では、この観測により得られたプラズマバブルの発生・移動の特徴を述べるとともに、プラズマバブルの下部構造の東西非対称性についても議論する。

Equatorial plasma bubbles generated in the low-latitude ionosphere after the sunset can cause scintillations and loss-of-lock of trans-ionospheric satellite signals. Continuous remote-sensing observations are effective for the nowcast and forecast of generations and propagations of plasma bubbles in the Japanese longitudinal sector. One of such remote-sensing observations is the observation of HF transequatorial propagation between Japan and Australia. This article describes the generation and propagation characteristics of plasma bubbles. The east-west asymmetry in the bottomside structures of plasma bubbles is also discussed.

#### [キーワード]

短波赤道横断伝播, プラズマバブル, 電離圏不規則構造, GPS シンチレーション, 電離圏全電子数  
HF transequatorial propagation, Plasma bubble, Ionospheric irregularity, GPS scintillation, ionospheric total electron content

## 1 はじめに

電波到来角推定法を用いた短波の赤道横断伝播 (HF trans-equatorial propagation: HF-TEP) 実験は、Rötger<sup>[1]</sup>により初めて電離圏研究として行われている。Kelleher and Rötger<sup>[2]</sup>は、Lindau・ドイツ-Tsumeb・ナミビア間における HF-TEP の非大圏伝播と、Nairobi・ケニアでのレーダーエコーとの比較を行い、両者によい相関があることを見出した。Rötger<sup>[3]</sup>は、非大圏伝播を引き起こす赤道域電離圏の大規模構造が、移動性電離圏擾乱を強める空間共鳴効果を通して赤道スプレッド F (equatorial spread F: ESF) 発生に関係している

ことを示唆している。

ESF の多くは Rayleigh-Taylor 不安定によって引き起こされるプラズマバブルに対応すると考えられている (例えば<sup>[4]</sup>)。Rayleigh-Taylor 不安定性の非線形的な発達で、密度の低いプラズマの「泡」を形成する。その泡は電離圏を上昇し続けると共に、磁力線に沿って数 1000 km も伸展する。この現象がプラズマバブルである。全天カメラによる大気光観測において、プラズマバブルは東西方向の幅 50 ~ 200 km、南北方向に 3000 km 以上も伸びた帯状の減光領域として現れる (例えば<sup>[5]</sup>)。Keskinen et al.<sup>[6]</sup>は、Rayleigh-Taylor 不安定性の非線形シミュレーションによってプラズマ密度減

少領域の3次元構造を明らかにし、それが磁気子午線に沿った電離圏下部の上昇と関係があることを示している。変調された等電子密度面、すなわちプラズマバブルの下部構造は、局所的な電離圏の傾きを形成するため、短波の伝播経路を変化させ得る。HF-TEP 実験はこの性質を利用してプラズマバブルに伴う電離圏下部の局所的な上昇を明らかにする。

赤道横断電波伝播実験の難しさの1つは、南北両半球の共役点となるような適当な2地点を見つけることである。我々は、すべての変調方式に対応できる MUSIC (multiple signal classification) アルゴリズム [7][8] を用いた短波到来方向探査装置を大洗・日本に設置し、Shepparton・オーストラリアから24時間送信されている Radio Australia の放送波を受信する短波赤道横断伝播観測を行った。

本報告は2006年に Annales Geophysicae において出版された Maruyama and Kawamura [9] に一部基づくものである。

## 2 実験装置

Shepparton (145.3°E, 36.2°S) から送信される Radio Australia の短波放送波を大洗 (140.6°E, 36.3°N) で受信した。図1に示すように、送受信点はほぼ同経度上で約8000 km 離れており、大洗から Shepparton への大圏方位は真北から時計回りに175.7° (真南から4.3°東向き) である。大洗の

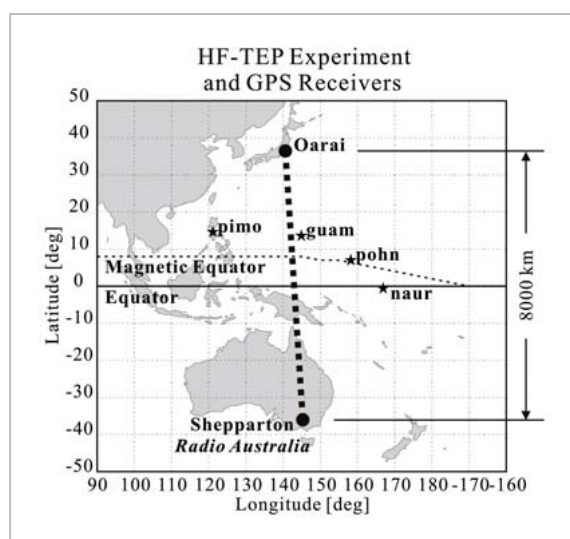


図1 短波赤道横断伝播観測の送受信点とGPS受信機の配置

短波到来方向探査装置は、直径2 mの直交ループアンテナ7基から成り、直径60 mの円周上に等間隔に配置されている。角度分解能は1°、時間分解能は0.5秒で、3つの異なる周波数(3~30 MHz)を同時に探知可能である。一般的に短波ラジオ放送波は複数の周波数で同時に送信されており、その周波数は時刻や季節によって異なっている(図2)。そのため、まず受信周波数を走査し、電波を検出した場合はその周波数の方位角、仰角、信号強度等の情報を8秒間計測する。その後、次の受信周波数の走査を行う。このようにして、受信電波情報を取得している。

## 3 実験結果

我々が本実験で最も興味があるのは、電離圏下部の大規模構造に伴う傾きに由来する非大圏電波伝播であるため、主として到来方位角の時間変化を解析した。図3は、2003年4月21-22日における到来電波の方位角-時間(AT)プロットである。横軸の時間は世界標準時(universal time: UT、日本標準時-9時間)であり、日本における真夜中が横軸中央に対応する。縦軸は真北を基準として時計回りに測定した方位角を表す。一般的に、短波放送では複数の放送局が同一の周波数を使って送信しているため、Radio Australia 以外の放送局からの電波はノイズとなるが、このような放送局のほとんどは北半球にあるため、ATプロット内で容易に判別できる。図3や他のATプロット

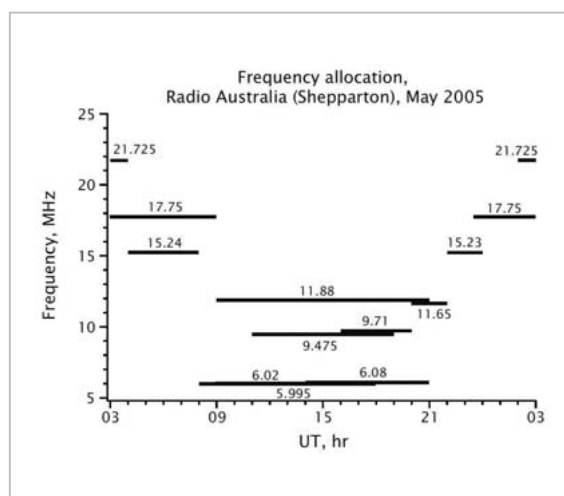


図2 2005年5月におけるRadio Australia放送波の周波数[9]

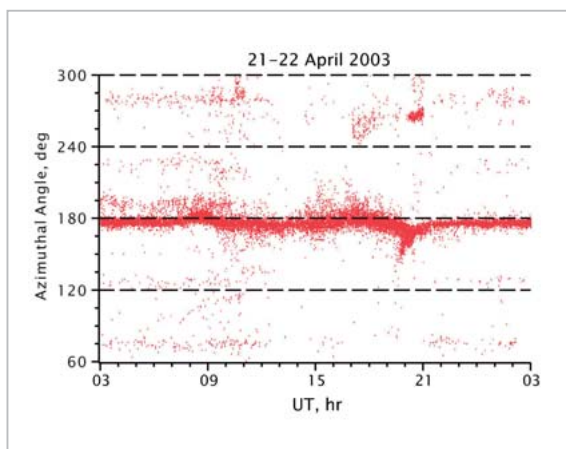


図3 2003年4月21-22日における方位角-時間(AT)プロット([9]より再構成)

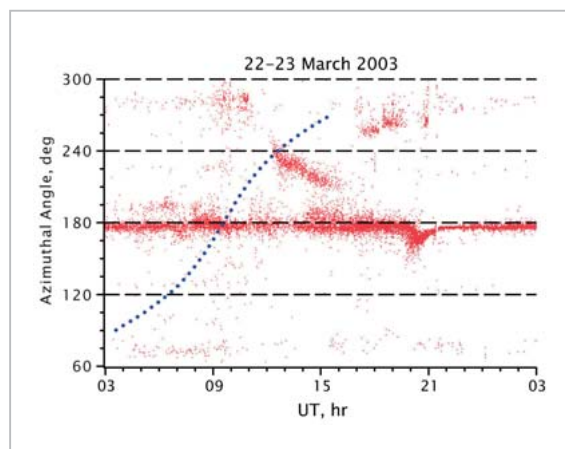


図4 2003年3月22-23日におけるATプロット([9]より再構成)

ロットにおいて、 $240^\circ$ 以上(真南から西に $60^\circ$ 以上)の方位角を持つデータは、そのような他の放送局からの混信である。

昼間のRadio Australiaからの短波到来角は大圏方位に近く、ATプロット内の $176^\circ$ 付近に時間変化がほとんどない1本のトレース(メイントレース)を形成する。日没付近では、08:40 UT頃に到来角が大圏方位に対してやや西へ変移し、09:30 UTまでには元の大圏方位に戻る。その後、メイントレースの到来角はわずかではあるがやや東へ変移し、夜の間徐々に大圏方位へ戻っていく。このような到来方位角の変動は基本的に毎日繰り返されており、日没に伴う電離圏変動を反映していると解釈できる。同様に、日出付近では、到来角が東へ変移した後、徐々に大圏方位へ戻る傾向が見られる。この日出から昼間にかけての時間変化も毎日繰り返されている。上記のような定常的に見られるメイントレースとは異なるタイプのトレース(衛星トレース)が観測された例として、2003年3月22-23日のATプロットを図4に示す。衛星トレースが、12:00 UT、方位角 $240^\circ$ 付近に突如現れた後、一定の時間変化率で3.5時間程度の間、東へ変移していることがわかる。

図5は、この衛星トレースが複数現れている2004年3月24-25日のATプロットである。複数の衛星トレースが大圏方位より西に現れているが、個々の衛星トレースは図4のそれと同様の時間変化をしている。少なくとも4つのトレース(ATプロット内の1-4番)が確認できるが、それらはおおよそ等間隔に並ん

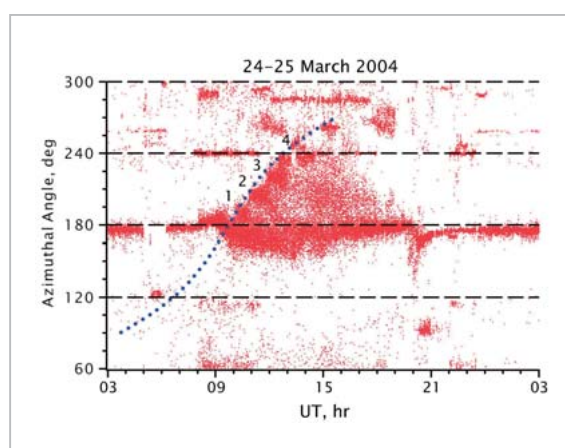


図5 2004年3月24-25日におけるATプロット([9]より再構成)

でおり、現れ始める方位角が時間と共に西へ変移している。個々の衛星トレースは出現から1時間程度の間は輪郭を保っているが、その後は徐々に拡散して消えている。この日の夜間は、通常見られるメイントレースについても、図3、4に比べて多少ばらつきが見られる。

## 4 議論

### 4.1 日没・日出の効果

初めに、定常的に現れる日没・日出付近の方位角変動について議論する。日没付近では、赤道電離圏の東向き電場の evening enhancement または prereversal enhancement (PRE) により電離圏高度が急上昇する(例えば[10])。また、電離圏下部では分子イオンの再結合が急速に進む。この東向き

電場の増大は日没付近で2時間程度続くことが知られている。季節や太陽活動度にも大きく依存するが、電離圏高度はこの間に数10~100 km以上上昇する。ある場所におけるこのような電離圏高度の時間変化が、ある瞬間における赤道域の空間変化に等しいとすれば、電離圏下部の等電子密度面は東西方向3000 kmにわたって東高西低の傾きを持つことになる。この傾きが、短波赤道横断伝播の到来角を大圏方位より西方向へ変移させる。電離圏高度上昇の極大では、等電子密度面は東西方向の勾配を持たないため、到来角は大圏方位に戻る。その後、電離圏高度の下降に伴い、等電子密度面が西高東低の傾きを持つため、到来角は大圏方位より東方向へ変移する。このPREピーク後の到来角変移は、ピーク前の西方向への変移に比べて小さい。これはPREにより上昇した電離圏下部構造の西の壁は昼側で電子密度が高く東西勾配が大きいのにに対し、東の壁は夜側で電離圏下部の分子イオンの再結合が進み、東西勾配が小さいことに対応していると考えられる。夜間、電離圏下部の高度が化学平衡状態になるに従って、到来角も大圏方位へ戻っていく。

日出付近では、日照に伴う光電離により、東方向から電離圏下部の電子密度が急増する。その結果、等電子密度面に西高東低の傾きが生じ、短波赤道横断伝播の到来角が東方向へ変移する。

#### 4.2 サテライトトレースの出現時刻

サテライトトレースを作る短波赤道横断伝播は、赤道付近のプラズマバブルの下部構造で1回だけ鏡面反射していると仮定すると、ATプロットの各点から、反射点における地方時を求めることができる。プラズマバブル下部には、磁気子午線方向に数1000 km、東西方向に50~200 kmの幅を持つ局所的な電離圏上昇領域ができる。東南アジアの赤道域では、地磁気の偏角がほとんど0°であるため、図6aの太線で示すような南北方向に沿った線形構造モデルを考える。Sheppartonと大洗は地理座標においてほぼ共役点になるので、短波赤道横断伝播の反射点Pは地理赤道上と仮定する。大洗における到来方位角 $\alpha$ から点Pの経度を求めることができる。大洗-点P間の経度幅と電波を受信したUTから、反射点の地方時(local time: LT)、すなわちプラズマバブルの位

置がわかる。ATプロット上においては、地方時に固定された反射点Pの軌跡はS字のカーブ(Sカーブ)を描く(図6b)。Sカーブが方位角 $\alpha = 180^\circ$ を通過するUTは大洗のLTとなる。

図4、5において、サテライトトレースに接するSカーブが $\alpha = 180^\circ$ を通過するのは、09:45 UT (19:05 LT)である。2003年3月中にサテライトトレースが観測されたATプロットをすべて重ねたものを図7に示す。大圏方位付近のメインレー

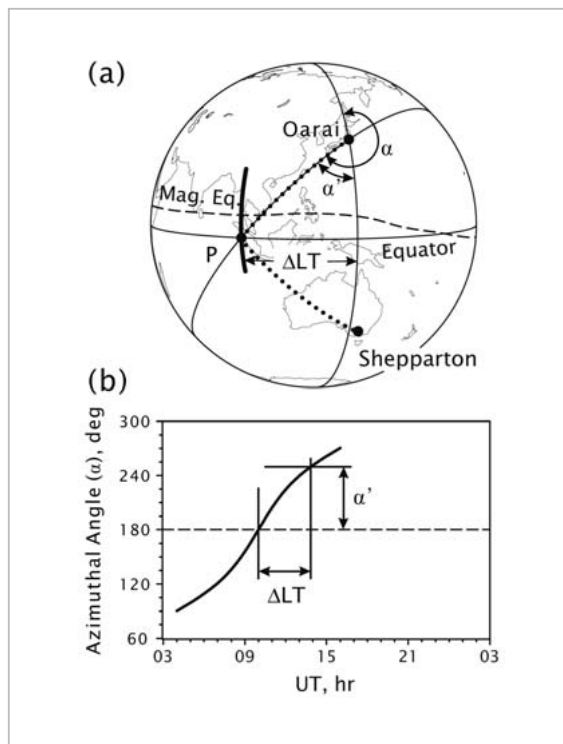


図6 短波赤道横断伝播の到来方位角と反射点の関係 ([9]より再構成)

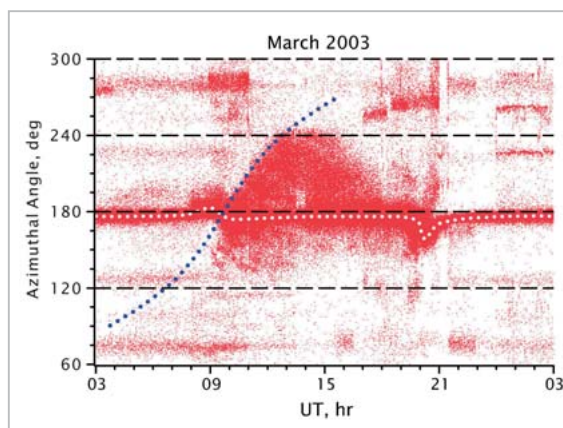


図7 2003年3月でサテライトトレースが出現したATプロットを重ねた図 ([9]より再構成)

スより西側において、サテライトトレースの左上側境界はSカーブとよく一致している。これは、サテライトトレースが同じLTで始まることを意味する。このことは、プラズマバブルが主に日没付近で生成されることに対応している [11]。図7の白点線は平均したメイントレースである。このメイントレースが、日没効果の電離圏高度上昇に伴って西方向へ変移した後、大圏方位に戻る時に、Sカーブがメイントレースと交差している。すなわち、サテライトトレースの始まりは、電離層高度上昇の極大に一致している。このことは、レーダーの後方散乱エコーで捉えられるプラズマバブルが、電離圏高度上昇の極大又は下降時によく観測されることとも一致する [12]。別の見方をすれば、サテライトトレースの始まりがSカーブに一致しているという事実は、短波赤道横断伝播の反射点が地理赤道上であるという仮定が妥当であると考えてよいことを示している。仮に反射点が赤道よりも北(南)にあるならば、同じプラズマバブルに対して方位角  $\alpha$  は大きく(小さく)なるはずである。

### 4.3 ドリフト速度及び空間構造

ATプロットにおいて、サテライトトレースは東方向に移動している。2003年3月22-23日のイベントについて、図8に示す手法を用いてその移動する速度(東西ドリフト速度)を推定する。まず、サテライトトレース(斜めの太線)上に2つの基準点(ここでは始まりとその60分後)を決め、それぞれの点を通るSカーブを描く。反射点にお

ける2点のLTの差は92分であるが、大洗において実際に観測された時間差は60分である。その差の32分は、反射点が東向きに移動したことにより生じるもので、経度に換算すると $8^\circ$ 、距離に換算すると890 kmになる。従って、このサテライトトレースを作るプラズマバブルの東向きドリフト速度は、 $247 \text{ m s}^{-1}$ と推定される。ただし、サテライトトレースは広がりを持つため、その傾きがはっきりしている場合でも $7 \sim 8 \text{ m s}^{-1}$ 程度の誤差が含まれることには注意が必要である [13]。

この手法を用いて、サテライトトレースの発生頻度が高い3月を中心とした季節について、プラズマバブルの東西ドリフト速度を計算した。図9aは2003-2005年の2-4月における東西ドリフト速度(東向きに正)、図9bは最も出現頻度の高い3月のみにおける東西ドリフト速度、図9cは2月と4月における東西ドリフト速度を表す。ドリフト速度は月によって異なり、出現頻度が高い月では平均 $220 \text{ m s}^{-1}$ と速く、その他の月では平均 $190 \text{ m s}^{-1}$ 、全期間の平均は $200 \text{ m s}^{-1}$ (図9a)であった。プラズマバブルの東西ドリフト速度は、基本的には背景電離圏プラズマの東西ドリフト速度、あるいは中性風速度で決まると考えられている。HF-TEPを利用した本手法により推定された東西ドリフト速度は、IMAGE衛星による遠紫外線撮像観測で得られたインドの経度域におけるプラズマバブルのドリフト速度 [14] と同程度である。

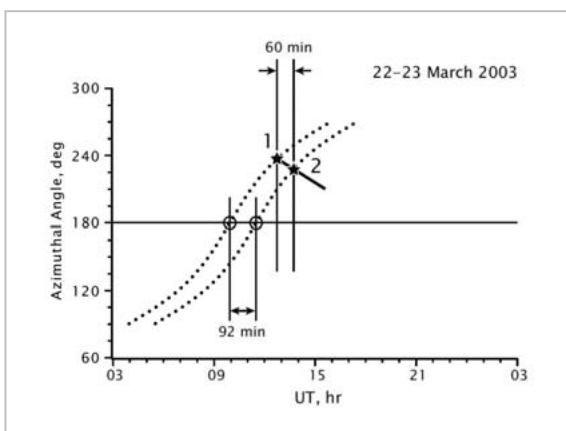


図8 サテライトトレースを作るプラズマバブルの東西ドリフト速度の推定法 ([9] より再構成)

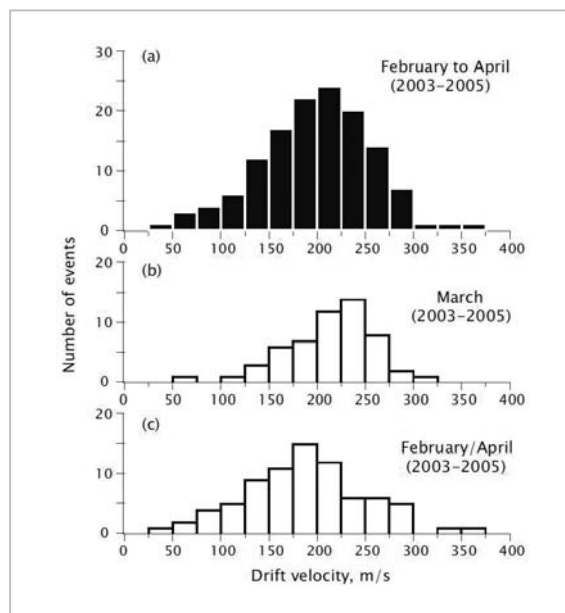


図9 プラズマバブルの東向きドリフト速度 [9]

また、Saito et al.[13] は、HF-TEP 観測で推定されたプラズマバブルのドリフト速度と、GPS シンチレーション観測で推定されたプラズマバブル内部の電離圏不規則構造のドリフト速度が、互いによく一致することを明らかにしている。一方で、ROCSAT-1 衛星で観測されたプラズマバブルの東西ドリフト速度[15] や、ペルーの Jicamarca レーダーで得られた平均的な電離圏プラズマドリフト速度、DE-2 衛星の観測で得られた中性風の速度[16] は、本手法で得られたドリフト速度よりも小さい値を示している。この定量的な違いを厳密に議論するためには、プラズマバブルのドリフト速度が経度に大きく依存すること[14] や、短波赤道横断伝播の反射点が地理赤道から離れた緯度(例えば磁気赤道)であったり、反射点が複数ある可能性を考慮する必要がある。また、プラズマドリフト速度は高度で変化するため、観測手法によって感度のある高度が異なり、ドリフト速度が異なることも考えられる。プラズマドリフト速度について、例えば地磁気共役点である 2 地点の HF-TEP 実験と反射点付近の地上観測を同時に行う等すれば、より定量的な議論が可能になると考えられる。

図 5 に示した 2004 年 3 月 24-25 日の複数のサテライトトレースが観測されたイベントについては、プラズマバブルのドリフト速度が  $232 \text{ m s}^{-1}$  と推定された。このドリフト速度から、周期的なサテライトトレースの波長が推定できる。個々のサテライトトレースの開始は同じ LT であり、開始時刻 (UT) では 50 分の間隔がある。この 50 分間に、次のプラズマバブルの開始場所は 1390 km 西にずれ、最初のプラズマバブルは 700 km 東にドリフトする。したがって、2 つのプラズマバブルの東西方向の間隔は 2090 km と推定できる。この波長は地磁気擾乱時に中緯度で観測される大規模移動性電離圏擾乱と同程度である。一方、Rötger[1] の HF-TEP 観測や、IMAGE 衛星の遠紫外線撮像観測で示されたプラズマバブルの波長は、中規模移動性電離圏擾乱と同程度(数 100 ~ 1000 km)である。我々の HF-TEP 観測では、図 5 の AT プロットに見られるように、遅い LT でしばしばサテライトトレースが不明瞭になっている。この原因の 1 つとして、間隔が短い複数のプラズマバブルの存在や、大きな構造を持つ 1 つの

プラズマバブルが、2 つ以上に分岐していることも考えられる[17]。本 HF-TEP 観測は、電離圏下部構造での鏡面反射を仮定しているが、仮にその電離圏下部構造がより小さなスケールの構造を含んでいる場合、その散乱効果は取り除けない。赤道電離圏構造は様々な空間スケールを内包していると考えられ、観測手法が異なれば、観測されやすい波長も異なるという可能性は否定できない。

#### 4.4 季節変化

図 10 は、サテライトトレースの月別発生数と太陽活動度指数 (F10.7) の月平均値を示している。月別発生数は、1 つ以上のサテライトトレースが観測された日数としている。サテライトトレースの発生は、2-4 月と 10 月付近の季節にはほぼ限られている。プラズマバブル発生の季節変化は、経度依存することが知られている。東南アジアやインド域等の地磁気偏角が小さい地域では、春秋分付近で ESF やプラズマバブルの発生頻度が高い[18]。同様の季節変化は、赤道域 GHz 帯シンチレーションの発生数にも見られる[19]-[21]。

図 10 を詳しく見ると、プラズマバブル発生数は、春(2-4 月)の方が秋(10 月付近)よりも大きい非対称性が見られる。このような春秋非対称性は、DMSP 衛星により 1989 ~ 2002 年に観測されたプラズマバブル発生頻度の季節・経度依存性[22] でははっきり見られなかった特徴である。この春秋非対称性の大きさは年によって異なり、例えば 2003 年は大きい一方で 2004 年ではそれほど顕著ではないことがわかる。山川・日本-Darwin・

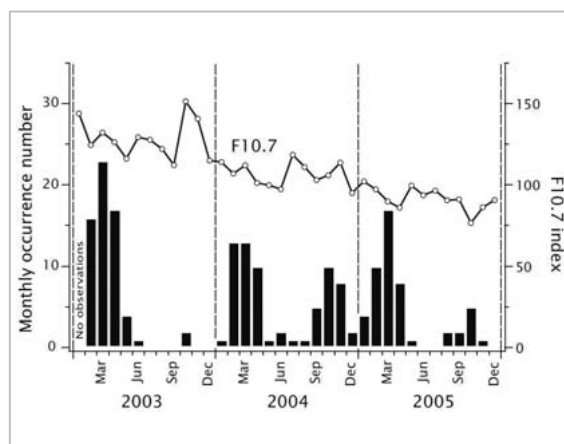


図 10 サテライトトレースの月別発生数と太陽活動度指数 (F10.7) [9]

オーストラリア間の VHF 帯を利用した赤道横断伝播実験でも、信号受信率に同様の季節変化と春秋非対称性が現れている [23]。この実験でも、春秋非対称性の規模が大きい年もあれば、ほとんど非対称性が見られない年もあった。VHF 帯による赤道横断電波伝播は、プラズマバブル内の電離圏不規則構造による前方散乱か、あるいはプラズマバブル内のダクト伝播によるものと考えられる [24]。2003 - 2005 年の 3 年間で、図 10 の F10.7 指数が 130 から 80 へ変化していることからわかるように、太陽活動度は徐々に低下している。2003 年秋分付近の極端に低い例を除けば、発生数は概ね太陽活動度と同様に年々低下している。この傾向は、DMSF 衛星による高度 800 km の電子密度急減の発生傾向とも一致している [25]。

#### 4.5 プラズマバブルの下部構造

図 7 で見られるように、サテライトトレースはメイントレースよりも西側 (AT プロットの上側) でよく現れる一方、東側ではほとんど現れていない。これは、大圏経路よりも東側ではプラズマバブルが発生していない、すなわちプラズマバブルの発生に東西非対称性があるためか、あるいは、プラズマバブル下部構造に東西非対称性があるためと考えられる。大洗 - Shepparton の大圏経路は HF-TEP 観測の都合上決まったものであるので、前者の可能性は低いと考えられるが、この可能性

を完全に排除するためには、HF-TEP とは異なる手法で確認する必要がある。

そこで、西太平洋赤道域にある 4 点の GPS 受信機 (図 1 の星印で示した pimo、guam、pohn、naur) のデータから電離圏全電子数 (total electron content : TEC) を算出し、大洗 - Shepparton の大圏経路を挟んだプラズマバブル発生の東西非対称性を調べた。各 GPS 受信機 - 衛星のペアから得られる 30 秒値の TEC データについて、1 分当たりの TEC 時間変化量 (dTEC/min) の 5 分間標準偏差を計算した [26]。この値は、ROTI (rate of TEC change index) と呼ばれ、~ 20 km スケールの電離圏擾乱指数となる。赤道域ではプラズマバブル内の小規模電離圏不規則構造に対応して ROTI が増大すると考えられ、プラズマバブル発生の指標としても ROTI が用いられている (例えば [26])。図 11a は、2008 年 3 月 19 日の AT プロットに、各受信機における ROTI 中間値が 1 TECU/min (1 TECU =  $10^{16} \text{ m}^{-2}$ ) 以上のものを黒点で示している。ここで、図中の各受信機の方位角は、大洗から見た各受信機経度の地理赤道とした。図 11a の黒 (灰色) の細かい S カーブと太い S カーブは、それぞれ地理赤道の電離圏高度 100 km と 400 km における日没 (日出) の方位角である。図 11a の AT プロットにおいて、09:30 UT の 160° 付近、及び 12:00 UT の 220° 付近において、サテライトトレースが出現し、時間と共に東方向

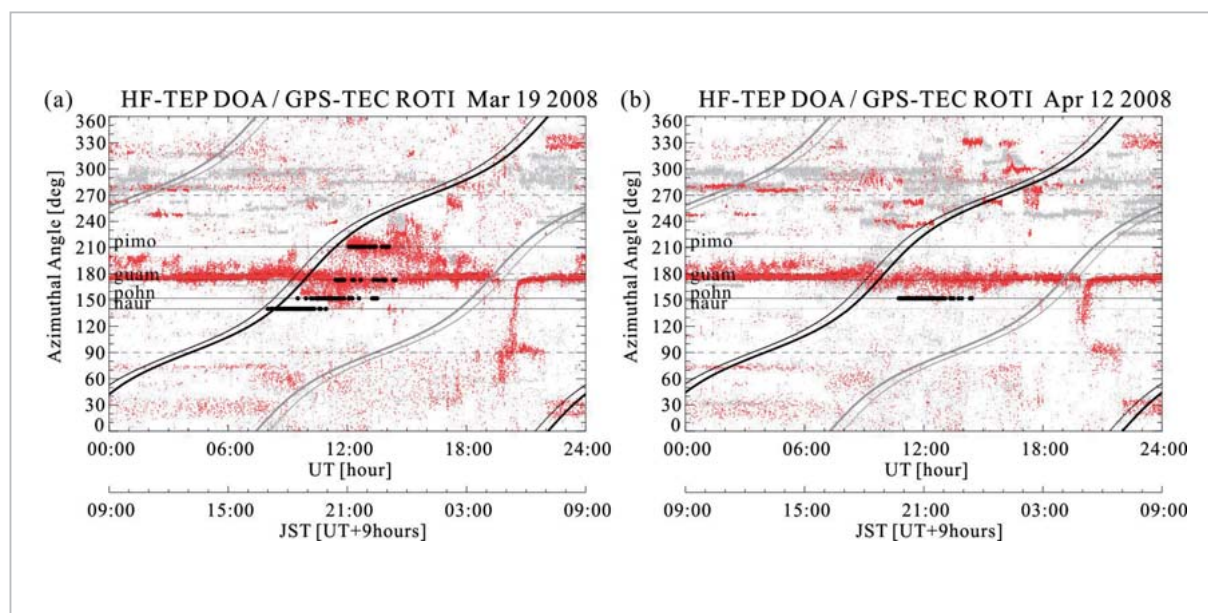


図 11 2008 年 3 月 19 日及び 4 月 12 日における方位角 - 時間プロット

へ変移している。GPS 受信機 pimo、guam、pohn では、それぞれの経度でサテライトトレースが現れている時間帯において ROTI 増大が見られる。一方、naur では日没後に ROTI が見られるが、これに対応するようなサテライトトレースは確認できない。図 11b は、2008 年 4 月 12 日の AT プロットである。この日の AT プロットには、メイントレース以外の特徴的なサテライトトレースは観測されていないが、pohn では日没後の 10:00 UT 付近から ROTI 増大が観測されている (naur は欠測)。図 11 の 2 イベントから、大圏経路より西側ではサテライトトレースに伴って ROTI が増大しているのに対し、東側では ROTI 増大が観測されてもサテライトトレースが現れないことがあることがわかる。

図 12 は、(a) 方位角 211° (pimo) と (b) 157° (pohn) における日没から真夜中までの HF-TEP 到来角カウント数 (DOA) 及び ROTI の積分值の日日変化を示している。HF-TEP、ROTI 共に大きな日々変化が見られるが、大圏方位より西の pimo に対応する方位角 211° では、ROTI 増大が観測された 8 イベントすべてでサテライトトレースも観測されているのに対し、大圏方位より東の pohn に対応する方位角 157° では、ROTI 増大が観測された 13 イベント中 5 イベントしかサテライトトレースが観測されていない。この結果から、大圏経路より東でサテライトトレースが現れないのは、プラズマバブルが存在しないからではなく、プラ

ズマバブルの下部構造に東西非対称性があるためということが確認できた。

サテライトトレースが大圏経路より西側のプラズマバブルで現れやすい原因を考える前に、ここでもう一度、大圏方位からずれた HF-TEP (サテライトトレースに対応する) の物理機構について考察する。考えられる物理機構としては、下記の 3 つが挙げられる。

1. 電離圏 F 領域下部の等電子密度面での鏡面反射<sup>[1]</sup>
2. 電離圏不規則構造による前方散乱<sup>[23]</sup>
3. プラズマバブル内のダクト伝播<sup>[24]</sup>

図 13 は、図 11a の 2008 年 3 月 19 日の AT プロットを、受信信号強度に応じて色分けしたものである。大圏経路より西の 220° 付近 12:00 UT から始まっているサテライトトレースの信号強度は、メイントレースのそれとほとんど変わらない値を持っている。従って、サテライトトレースが散乱によるものとは考えにくい。また、地磁気共役点ではない西方からの HF-TEP 到来であるので、プラズマバブル内のダクト伝播も考えにくい。以上のことから、サテライトトレースは、メイントレースと同様に、電離圏下部での鏡面反射によるものと考えられる。

Bernhardt<sup>[27]</sup> は、計算機シミュレーションにより、プラズマバブルの下部構造に東西非対称性が存在することを示している (図 14)。この東西非対称性は、東西方向のイオンドリフト速度の高度

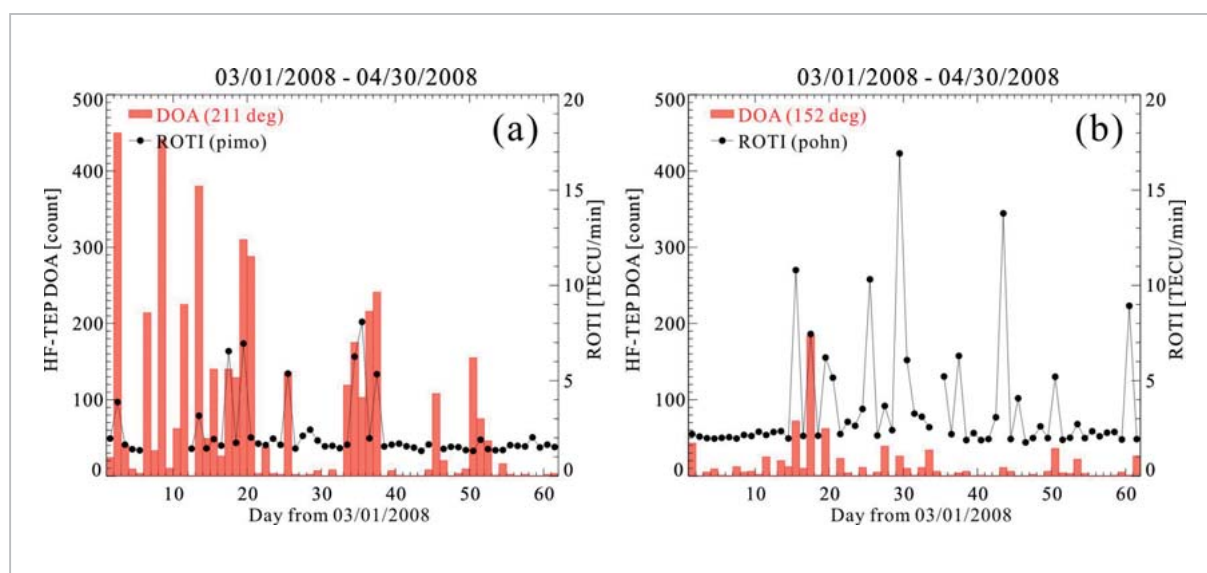


図 12 方位角 211°、157° での HF-TEP 到来カウント数 (DOA) と ROTI 増大の日日変化



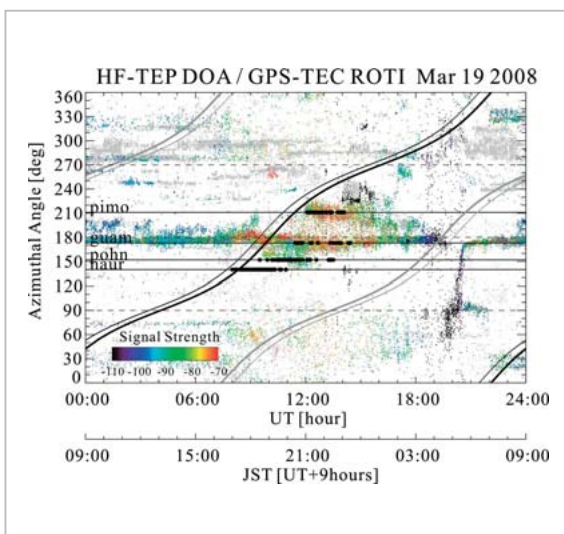


図13 2008年3月19日における方位角-時間-信号強度プロット

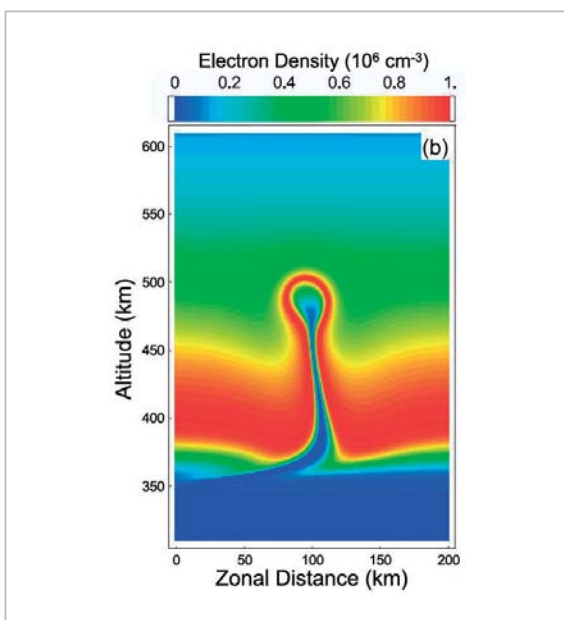


図14 シミュレーションによるプラズマバブル下部構造の東西非対称性<sup>[27]</sup>

変化により生まれる。非大圏経路の HF-TEP は、このようなプラズマバブルの下部構造で鏡面反射されるために、東西非対称性を持つものと考えられる。

## 5 おわりに

Shepparton から放送されている Radio Australia の HF 放送波を、大洗の短波到来方向探査装置で受信する、短波赤道横断伝播 (HF-TEP) 観測を行った。しばしば夜間に観測される非大圏経路の HF-TEP (サテライトトレース) は、プラズマバブルに伴う電離圏下部の上昇によるものである。本研究で得られたサテライトトレースの発生時間、東西ドリフト速度、季節変化、東西非対称性等の特徴は、過去にされている多くの観測結果とよく一致している。しかしながら、赤道域電離圏擾乱の東向きドリフト速度や複数のプラズマバブルイベントにおける間隔など、定量的にはまだ一致しない部分も残された。本実験では、大圏方位より西に 60° までのサテライトトレースを観測することができる。プラズマバブルや、それに伴う電離圏擾乱 (例えば電離圏シンチレーション) は一般的に東へ移動するため、本実験は上流側で発生したそれらの電離圏擾乱現象を広い範囲で監視できる。このことは、通信障害や衛星測位精度低下を起こす宇宙天気監視や予報にとって非常に有用である。本実験で用いた、HF-TEP の反射点が地理赤道であるという仮定は、プラズマバブルの東西ドリフト速度の精度に大きな誤差を産む。これを解決するためには、専用の送信機を地磁気共役点に設置し、固定周波数で HF-TEP 実験を行うことが必要であろう。また、高精度な電離圏モデルを用いた HF-TEP のレイトレーシング計算も有用である。

## 謝辞

本研究で利用した GPS 受信機データは、International GNSS Service (IGS, <http://igsb.jpl.nasa.gov/>)、及び Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC, <http://sopac.ucsd.edu/>) から提供された。

## 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 Kelleher, R. F. and Röttger, J., "Equatorial spread-F irregularities observed at Nairobi and on the transequatorial path Lindau-Tsumeb", *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol.35, pp.1207-1211, 1973.
- 3 Röttger, J. "The macro-scale structure of equatorial spread-F irregularities", *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol.38, pp.97-101, 1976.
- 4 Fejer, B. G. and Kelley, M. C., "Ionospheric irregularities", *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol.18, pp.401-454, 1980.
- 5 Weber, E. J., Buchau, J., and Moore, J. G., "Airborne studies of equatorial F layer ionospheric irregularities", *J. Geophys. Res.*, Vol.85, pp.4631-4641, 1980.
- 6 Keskinen, M. J., Ossakow, S. L., and Fejer, B. G., "Threedimensional nonlinear evolution of equatorial ionospheric spread-F bubbles", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.30, No.16, 1855, doi:10.1029/2003GL017418, 2003.
- 7 Shumidt, R. O., "Multiple emitter location and signal parameter estimation", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol.AP-34, pp.276-280, 1986.
- 8 Hawlitschka, S., "Travelling ionospheric disturbances (TIDs) and tides observed by a super-resolution HF direction finding system", *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, Vol.68, pp.568-577, 2006.
- 9 Maruyama, T., and M. Kawamura, "Equatorial ionospheric disturbance observed through a transequatorial HF propagation experiment", *Ann. Geophys.*, Vol.24, pp.1401-1409, 2006.
- 10 Fejer, B. G., de Paula, E. R., Batista, I. S., Bonelli, E., and Woodman, R. F., "Equatorial F region vertical plasma drifts during solar maxima", *J. Geophys. Res.*, Vol.94, pp.12049-12054, 1989.
- 11 Yokoyama, T., Fukao, S., and Yamamoto, M., "Relationship of the onset of equatorial F region irregularities with the sunset terminator observed with the Equatorial Atmosphere Radar", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.31, L24804, doi:10.1029/2004GL021529, 2004.
- 12 Argo, P. E. and Kelley, M. C., "Digital ionosonde observations during equatorial spread F", *J. Geophys. Res.*, Vol.91, pp.5539-5555, 1986.
- 13 Saito, S., T. Maruyama, M. Ishii, M. Kubota, G. Ma, Y. Chen, J. Li, C. Ha Duyen, and T. Le Thurong, "Observations of small- to large-scale ionospheric irregularities associated with plasma bubbles with a transequatorial HF propagation experiment and spaced GPS receivers", *J. Geophys. Res.*, Vol.113, A12313, doi:10.1029/2008JA013149, 2008.
- 14 Immel, T. J., Frey, H. U., Mende, S. B., and Sagawa, E., "Global observations of the zonal drift speed of equatorial ionospheric plasma bubbles", *Ann. Geophys.*, Vol.22, pp.3099-3107, 2004.
- 15 Lin, C. S., Immel, T. J., Yeh, H. -C., Mende, S. B., and Burch, J. L., "Simultaneous observations of equatorial plasma depletion by IMAGE and ROCSAT-1 satellites", *J. Geophys. Res.*, Vol.110, A06304, doi:10.1029/2004JA010774, 2005.
- 16 Fejer, B. G., Kudeki, E., and Farley, D. T., "Equatorial F region zonal plasma drifts", *J. Geophys. Res.*, Vol.90, pp.12249-12255, 1985.
- 17 Mendillo, M. and Baumgardner, J., "Airglow characteristics of equatorial plasma depletions", *J. Geophys. Res.*, Vol.87, pp.7641-7652, 1982.
- 18 Maruyama, T. and Matuura, N., "Longitudinal variability of annual changes in activity of equatorial spread F and plasma bubbles", *J. Geophys. Res.*, Vol.89, pp.10903-10912, 1984.
- 19 Paulson, M. R., "Scintillation of VHF/UHF and L band satellite signals at Guam", *Radio Sci.*, Vol.16, pp.877-884, 1981.

- 20 Fang, D. J. and Liu, C. H., "A morphological study of gigahertz equatorial scintillations in the Asian region", Radio Sci., Vol.18, pp.241-252, 1983.
- 21 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.
- 22 Burke, W. J., L. C. Gentile, C. Y. Huang, C. E. Valladares, and S. Y. Su, "Longitudinal variability of equatorial plasma bubbles observed by DMSP and ROCSAT-1", J. Geophys. Res., Vol.109, doi:10.1029/2004JA010583, 2004.
- 23 Tanohata, K., Kuriki, I., Iguchi, M., Yamashita, K., and Sakamoto, T., "The results of long-term experiment of trans-equatorial VHF wave propagation", Rev. Radio Res. Lab. (in Japanese), Vol.26, pp.885-897, 1980.
- 24 Heron, M. L., "Recent progress in transequatorial propagation- review", J. Atmos. Terr. Phys., Vol.43, pp.597-606, 1981.
- 25 Huang, C. Y., Burke, W. J., Machuzak, J. S., Gentile, L. C., and Sultan, P. J., "Equatorial plasma bubbles observed by DMSP satellites during a full solar cycle: Toward a global climatology", J. Geophys. Res., Vol.107, No.A12, 1434, doi:10.1029/2002JA009452, 2002.
- 26 Nishioka, M., A. Saito, and T. Tsugawa, "Occurrence characteristics of plasma bubble derived from global ground-based GPS receiver networks", J. Geophys. Res., Vol.113, A05301, doi:10.1029/2007JA012605, 2008.
- 27 Bernhardt, P. A., "Quasi-analytic models for density bubbles and plasma clouds in the equatorial ionosphere: 2. A simple Lagrangian transport model", J. Geophys. Res., Vol.112, A11310, doi:10.1029/2007JA012287, 2007.



つがわ たかし  
**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

まる やま なかし  
**丸山 隆**

上席研究員 博士(工学) 超高層大気物理

かわむら まさみ  
**川村真文**

元宇宙環境計測グループ技術員 計算機ネットワーク

いし い まさる  
**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



ささ はら まさひろ  
**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