

3-2-8 短波赤道横断伝播とGPSシンチレーションによるプラズマバブル観測

3-2-8 *Observations of Plasma Bubbles by HF-TEP and GPS Scintillation*

齋藤 享 丸山 隆 石井 守 久保田 実

SAITO Susumu, MARUYAMA Takashi, ISHII Mamoru, and KUBOTA Minoru

要旨

Hainan・中国(19.5°N, 109.1°E)、Phu Thuy・ベトナム(21.0°N, 106.0°E)に設置したGPSシンチレーション観測装置により観測された結果と、大洗・日本(36.3°N, 140.6°E)に設置された短波到来方向探査装置による短波赤道横断伝播(HF-TEP)の観測結果を比較した。その結果、夜間のHainanにおけるGPSシンチレーションの発生と、大洗におけるRadio Australia放送波の西方からの非大圏伝播(off-great circle propagation: OGCP)の発生の間にはよい対応関係があることが分かった。このことから、HF-TEPにおける西方からのOGCPがプラズマバブルに対応していることが分かった。それぞれ約100m離して設置した3台のGPSシンチレーション受信機の受信信号を比較することにより、電離圏不規則構造のドリフト速度を推定することができる。一方、HF-TEPによりプラズマバブルに対応する電離圏下部構造の移動速度を推定することができる。両手法で推定したドリフト速度はお互いによく一致した。このことから、HF-TEP観測によりプラズマバブルの発生を広域的に監視しその到来を予測することができることが明らかになった。

GPS scintillations were observed at Hainan, China (19.5°N, 109.1°E) and Phu Thuy, Vietnam (21.0°N, 106.0°E) to compare with the transequatorial propagation of HF radio waves (HF-TEP) observed at Oarai, Japan (36.3°N, 140.6°E). The results show that the GPS scintillation occurrences at Hainan at nighttime were well coincided with the off-great circle propagation (OGCP) occurrence in HF-TEP of Radio Australia observed at Oarai. This confirms that the OGCP at nighttime corresponds to the plasma bubble occurrence. At Hainan and Phu Thuy, respectively, three GPS scintillation receivers were installed with about 100 m separation to measure the drift velocity of small-scale ionospheric plasma irregularities associated with plasma bubbles. On the other hand, the drift velocity of large-scale bottomside ionospheric structures associated with plasma bubble can be estimated by the change in arrival angles of HF-TEP. Measured velocities by these two methods were similar to each other. Our results show that the HF-TEP measurements are effective in monitoring plasma bubbles in wide area and forecast their arrival.

[キーワード]

プラズマバブル, 電離圏不規則構造, 短波赤道横断伝播, GPSシンチレーション, プラズマバブルモニタリング

Plasma bubble, Ionospheric irregularity, HF-TEP, GPS scintillation, Monitoring and prediction of plasma bubble propagation

1 はじめに

短波の赤道横断伝播 (HF trans-equatorial propagation: HF-TEP) 観測は、赤道域の大規模電離圏不規則構造を観測するために古くから用いられてきた。電波は直進するため短波の到来方向は電波源の大圏方向である場合が多いが、時に大圏方向から外れた方向から到来することがある。Röttge^[1]は、Lindau・ドイツと Tsumeb・ナミビアとの間で短波送受信実験を行い、夜間に東進する大規模波状構造があり、それが赤道スプレッド F に伴うものであることを示した。Maruyama and Kawamura^[2]は最新の短波到来方向探査装置を用いてオーストラリアからの放送波を用いた HF-TEP 観測を行い、夜間に到来方向が大圏方向から外れた西方に現れ徐々に南へと変化する現象を見いだした。彼らはこの非大圏伝播 (off-great circle propagation: OGCP) は赤道付近の東進する電離圏下部の大規模構造によるものであろうと推論し、その典型的な速度を約 200 m s^{-1} と求めた。さらに、その速度特性、発生頻度の季節依存性 (春分・秋分に極大を持つ) などから、夜間の短波赤道横断非大圏伝播はプラズマバブルによるものであり、短波赤道横断伝播観測によりプラズマバブル発生の広域監視が可能であると結論づけた。しかし、彼らの観測では、夜間の短波赤道横断非大圏伝播とプラズマバブルを結びつける直接的な証拠は得られていない。

プラズマバブルは様々な波長のプラズマ不規則構造を内包しており、VHF 帯、UHF 帯の電波がプラズマバブルを通過するとフレネル回折により強度及び位相が変動し地上においてシンチレーションとして観測される。シンチレーションは衛星通信、衛星測位において障害となる一方で、電離圏不規則構造の検出のためにも用いられてきた。フレネル回折によるシンチレーションは、ある波長 λ の電波がある高度 h に存在する水平規模 $\sqrt{2\lambda h}$ のプラズマ不規則構造を通過するとき強く生じる。近年では、GPS 衛星のシンチレーションはプラズマバブルを検出するだけでなく、空間的に離して設置した複数の受信機によってシンチレーションを観測し (spaced-receiver 法) プラズマバブルに伴う不規則構造の移動速度を測定するためにも用いられている^{[3]–[7]}。プラズマバブ

ルに伴う大きな電子密度勾配やプラズマ不規則構造は、衛星測位の高度利用や衛星通信の障害となるため、プラズマバブルの発生と移動を広域監視することは非常に重要である。

spaced-receiver 法では、GPS の L1 周波数 (1.57542 MHz) においてプラズマ不規則構造が高度 250 – 400 km に存在する場合、 $\sqrt{2\lambda h}$ は 300 – 400 m となり、プラズマバブルに内包されるこの程度の水平規模の不規則構造の移動速度を測定していることになる。ここで、電子密度減少領域としてのプラズマバブルそのものの移動速度を測定しているわけではない。実際、プラズマバブルそのものの移動速度と小規模不規則構造の移動速度の関係を明らかにするために、IMAGE 衛星によるプラズマバブルの撮像と ROCSAT-1 衛星によるプラズマドリフト速度測定の同時観測^[8]が行われ、両者には大きな違いがあることが示されている。この結果が正しいとすると、シンチレーションを引き起こすプラズマバブルに伴う小規模不規則構造の速度を測定したとしても、それは必ずしもプラズマバブルの速度とは同じとは限らず、シンチレーション観測から導出された速度によってプラズマバブルの移動を予測しようとする場合に大きな問題となる。従って、プラズマバブルに伴う様々な空間規模の不規則構造について速度を測定し、不規則構造の空間規模と移動速度の関係を明らかにすることは非常に重要である。

以上のような研究の背景に基づき、本研究では、HF-TEP 観測に見られる OGCP の原因となる下部電離圏大規模構造が何であるか (プラズマバブルであるのかそれともまた別のものであるのか) を明らかにすること、OGCP の到来角変化観測と spaced-receiver 法による GPS シンチレーション観測を用いてプラズマバブルに伴う不規則構造の空間規模と移動速度の関係を明らかにすることを目的とする。

本報告は 2008 年に Journal of Geophysical Research において出版された Saito 他^[9]に基づくものである。

2 観測・解析

本研究では、短波赤道横断伝播を大洗・日本 (36.3°N , 140.6°E) において観測すると同時に、

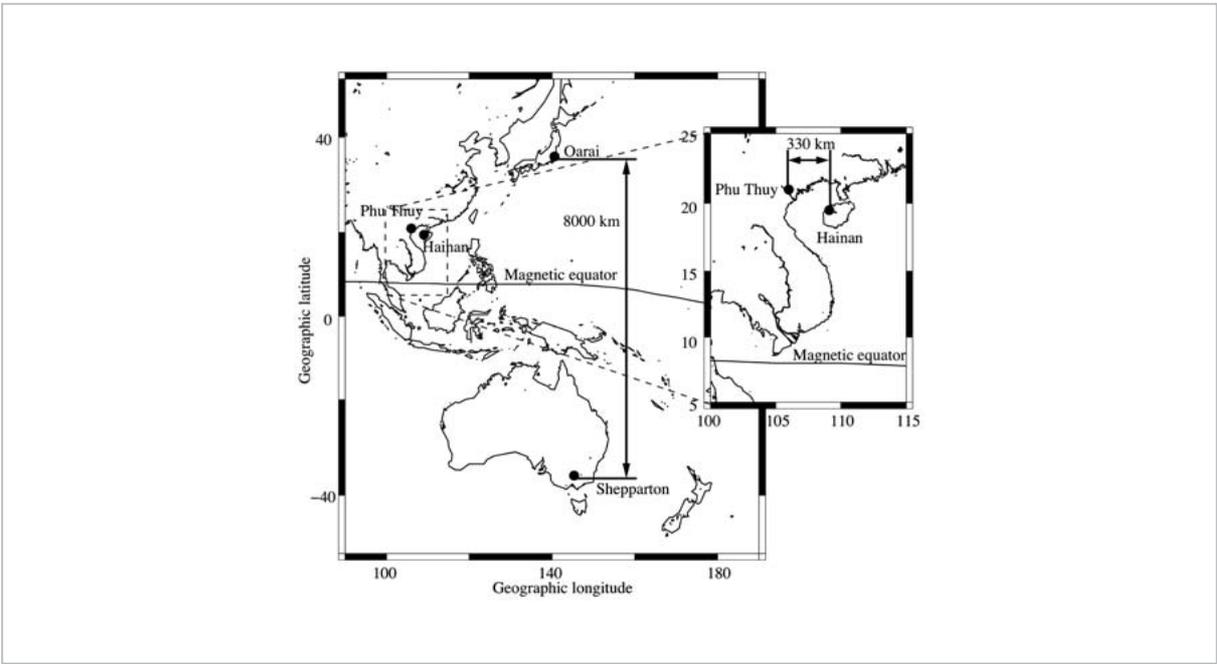


図1 観測の構成図。Radio Australia 送信点、大洗方向探査装置、GPS シンチレーション観測点、及び磁気赤道の位置を示す。[9]

spaced-receiver 法による GPS シンチレーション観測装置を Hainan・中国 (19.5°N, 109.1°E, 磁気緯度 +13.9°)、Phu Thuy・ベトナム (21.0°N, 106.0°E, 磁気緯度 +15.7°) に設置して観測を行った。

2.1 短波赤道横断伝播

短波赤道横断伝播の電波源としては、Shepparton・オーストラリア (36.2°S, 145.3°E) から送信される Radio Australia 放送波を用いる。これを大洗に設置された短波到来方向探査装置 (Oarai direction finder: ODF) を用いて受信する。Shepparton と大洗はほぼ同じ地理子午面内にあり、その間の距離は約 8000 km である (図 1)。東経 140°付近において磁気赤道は緯度約 8°N 付近に位置するので、両地点は、地磁気共役点というよりはむしろ地理的な南北共役点の関係にある。受信点である大洗から見た Shepparton の方位角は、真北から時計回りに 175.7°である。ODFは7基の直径 2 m の直交ループアンテナを直径 60 m の円周上に配置したアンテナアレイからなり、MUSIC 法により同時に最大 3 波の到来方向 (方位角、仰角) を角度分解能 1°、時間分解能 0.5 秒で決定することができる。Radio Australiaは24時間放送であるが、季節や地方時により送信周波数が

変更されるため、本観測では Radio Australia が放送する可能性のある周波数を全て走査して行った。受信周波数走査は、ある周波数で信号が検出されると、8 秒間その周波数で受信を行い、到来方向を測定し、その後次の周波数に移動する、という手順で行った。

大洗において観測される Radio Australia 放送波の OGCP がプラズマバブルに伴う電離圏プラズマ密度勾配による 1 回の鏡面反射によるものと考えると、大洗と Shepparton が地理的な南北共役点にあるので、反射点は地理赤道付近にあると考えることができる。プラズマバブルは南北に非常に長い構造を持つ [10][11] ので、ある地点でプラズマバブルが観測された場合、その地点と同じ経度の地理赤道付近にも同一のプラズマバブルが存在すると考えることができる。GPS シンチレーション観測装置を設置した Hainan の経度における地理赤道は大洗から見て方位角 226°にある (図 2) ため、Radio Australia 放送波の OGCP がプラズマバブルに伴うものであり、そのプラズマバブルが Hainan の観測装置視野内の緯度まで達しているとする、Hainan において同時にシンチレーションが観測されると想定される。Radio Australia 放送波の OGCP は必ずしも地理赤道付近のみで反射されるとは限らず、またプラズマバ

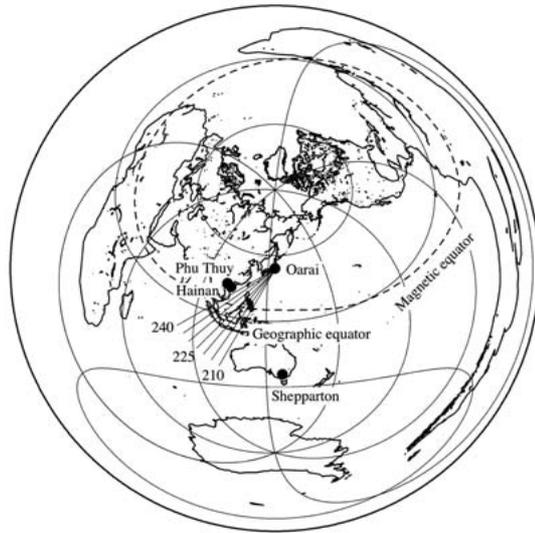


図2 正距方位図法による大洗における方位角と各観測点、及び磁気赤道との関係を示す。大洗を中心とした放射状の線は、大洗からの方位角(北を0°として時計回りに正)を210°から240°まで5°刻みで示したものである。^[9]

表1 GPSシンチレーション観測システム諸元

場所	Hainan	Phu Thuy
地理緯度	19.5°N	21.0°N
地理経度	109.1°	106.0°
磁気緯度	+13.9°	+15.7°
受信機型式	Ashtech G12/BR2G	JAVAD LGG100
周波数	L1 (1.57542 GHz)	L1 (1.57542 GHz)
データ取得速度	20 Hz	100 Hz

ブルの下部構造は経線に対して曲がっていることもあるので、OGCPの方位角は226°に対してばらつきを持つであろうと予想される。

2.2 GPS シンチレーション

spaced-receiver 法による GPS シンチレーション観測装置を設置した Hainan と Phu Thuy は東西に約 330 km 離れている (図 1)。表 1 に Hainan と Phu Thuy に設置した GPS シンチレーション観測装置の諸元を示す。この 2 地点にはそれぞれ GPS 受信機が 3 台ずつ設置されており、Hainan においては 2 台の Ashtech G12 受信機と 1 台の

Ashtech BR2G 受信機を設置し、搬送波強度・ノイズ比 (CNR) を 20 Hz で記録した。Phu Thuy では 3 台の JAVAD LGG-100 受信機を用いて CNR を 100 Hz で記録した。両地点において、3 台の受信機はそれぞれ図 3 に示す通り 90 ~ 100 m の間隔で設置された。記録された CNR を用いて、 S_4 シンチレーション指数、各受信機間の相互相関数の最大値、及び最大相関を与える時間遅れをそれぞれ 60 秒ごとに導出した。 S_4 指数は CNR の変動の標準偏差を正規化したもので、CNR を s とすると、

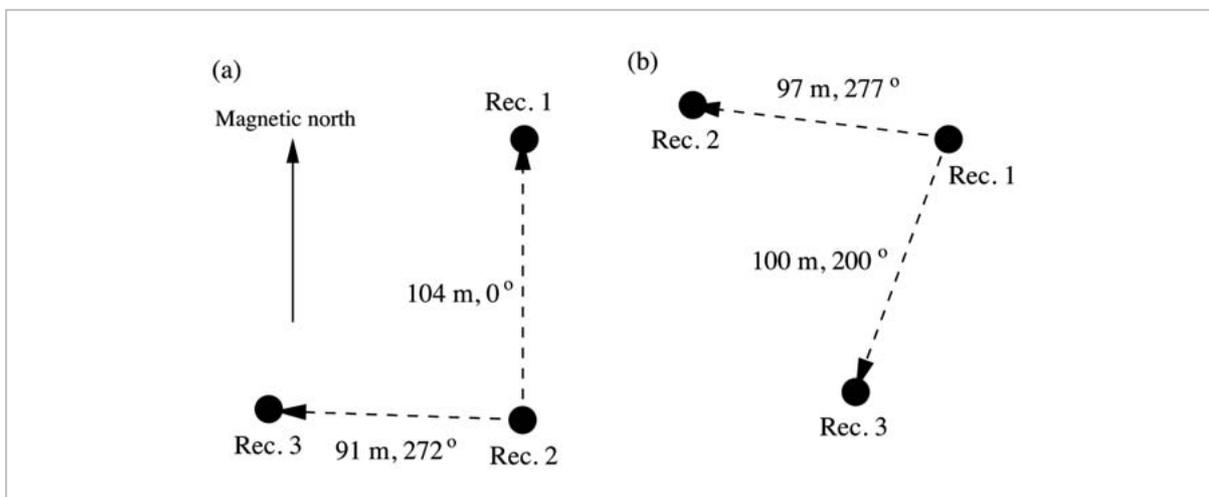


図3 (a) Hainan・中国、(b) Phu Thuy・ベトナムにおける GPS 受信アンテナの配置図

図中の角度は、磁北から時計回りに測った受信アンテナ間の相対位置を示す。[9]

$$S_4 = \sqrt{\frac{\langle s^2 \rangle - \langle s \rangle^2}{\langle s \rangle^2}} \quad (1)$$

で与えられる。得られた受信機間の時間遅れを用い平面波を仮定することにより、シンチレーションパターンの地上の移動速度(速度と方向)を導出することができる。この手法では、シンチレーションパターンの時間変化により導出された速度に誤差が生じることが知られている [12] が、プラズマバブルに伴う不規則構造による CNR 変動は通常 100 m 程度の距離では非常に相関が高く (100 m s⁻¹ 程度で移動するとすると、シンチレーションパターンは 1 秒程度の間ではあまり変化しないということを意味する)、このような誤差は無視できる [5]。不規則構造の電離圏における移動速度は、地上のシンチレーションパターンの移動速度と GPS 衛星の位置・速度から導出できる。以下、不規則構造の移動速度の導出方法は Ledvina 他[6]による。地上のシンチレーションパターンは、受信機とプラズマ不規則構造、GPS 衛星の位置関係で決まる。不規則構造は磁力線に沿って長く伸びていると考えることができるので、地上にできるシンチレーションパターンの形状と移動を、衛星から照らされる光が地上に作る不規則構造の影の類推として理解することができる。影を作る不規則構造が磁力線に沿って磁力線直交方向に移動することと光源となる衛星が動

くことの合成により地上の影の移動が決まることが分かるであろう。不規則構造は磁力線に沿って非常に長く伸びていると考えられるので、地上のシンチレーションパターンも平面波になると考えられる。このとき、観測可能なのは波面に直交する成分だけであり、波面に平行な移動成分はあったとしても観測できない。つまり、地上のシンチレーションパターンの移動により測定できる速度は 2 次元ベクトル量ではなくスカラー量であることに注意が必要である。また、プラズマバブルは高度方向に発達するが、シンチレーション強度は不規則構造の振幅の絶対値に比例するので、電離圏 F 領域ピーク付近の影響が最も強いと考えられる。このことから、不規則構造はある一定高度に存在すると仮定してよい。本研究では、不規則構造の存在する高度を 300 km と仮定した。衛星・受信機間の視線がこの高度を横切る点を IPP (Ionospheric pierce point) と呼ぶ。衛星高度を z_{sat} 、電離圏高度を z_{ion} (= 300 km) とし、受信機の位置での静止直交座標系 (y を磁北向き、 z を垂直上向きとする左手系) における不規則構造の速度を v_{ion} 、衛星の速度を v_{sat} とすると、地上のシンチレーションパターンの東向き速度は、

$$v_{scintx} = \frac{z_{sat}}{z_{sat} - z_{ion}} \left\{ v_{ionx} + \left(\frac{q_y}{q_x} \right) v_{iony} + \left(\frac{q_z}{q_x} \right) v_{ionz} - \frac{z_{ion}}{z_{sat}} \left[v_{satx} + \left(\frac{q_y}{q_x} \right) v_{saty} + \left(\frac{q_z}{q_x} \right) v_{satz} \right] \right\} \quad (2)$$

と書ける。IPP における磁力線に直交する座標系 (x を東向き、z を磁力線直交上向きとする左手系) での不規則構造の速度を v_{ipp} とすると、 v_{ipp} は 3 行 3 列の変換行列 \mathbf{R} を用いて

$$\mathbf{v}_{ipp} = \mathbf{R}\mathbf{v}_{ion} \quad (3)$$

と書ける。行列 \mathbf{R} は受信機の位置、磁力線の向き、IPP の位置 (衛星位置) から決まるものであるが、詳しくは Ledvina 他 [6] の式 4 ~ 8 を参照されたい。IPP における不規則構造の東向き及び磁力線直交上方向速度は、行列 \mathbf{R} の (i, j) 成分 R_{ij} を用いて次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} v_{ippx} \\ v_{ippz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} - \frac{R_{21}R_{12}}{R_{22}} & R_{13} - \frac{R_{21}R_{32}}{R_{22}} \\ R_{13} - \frac{R_{23}R_{12}}{R_{22}} & R_{33} - \frac{R_{23}R_{32}}{R_{22}} \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} v_{ionx} \\ v_{ionz} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、 \square^{-1} を逆行列を表すこととして行列 \mathbf{S} を次のように定義すると、

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} R_{11} - \frac{R_{21}R_{12}}{R_{22}} & R_{13} - \frac{R_{21}R_{32}}{R_{22}} \\ R_{13} - \frac{R_{23}R_{12}}{R_{22}} & R_{33} - \frac{R_{23}R_{32}}{R_{22}} \end{bmatrix}^{-1} \quad (5)$$

式 (1) は次のように書き換えることができる。

$$\mathbf{v}_{scintx} = \frac{z_{sat}}{z_{sat} - z_{ion}} \left\{ \left[\left(1 - \frac{q_y}{q_x} \frac{R_{21}}{R_{22}} \right) S_{11} + \left(\frac{q_z}{q_x} - \frac{q_y}{q_x} \frac{R_{23}}{R_{22}} \right) S_{21} \right] v_{ippx} \right. \\ \left. + \left[\left(1 - \frac{q_y}{q_x} \frac{R_{21}}{R_{22}} \right) S_{12} + \left(\frac{q_z}{q_x} - \frac{q_y}{q_x} \frac{R_{23}}{R_{22}} \right) S_{22} \right] v_{ippz} \right. \\ \left. - \frac{z_{ion}}{z_{sat}} \left[v_{satx} + \frac{q_y}{q_x} v_{saty} + \frac{q_z}{q_x} v_{satz} \right] \right\} \quad (6)$$

この式 (6) において未知数は v_{ippx} と v_{ippz} の 2 つであり、両者を同時に求めることはできない。そこで、本解析では v_{ippz} を 0 と仮定することとした。この仮定は v_{ippz} の寄与が v_{ippx} の寄与に比べて十分小さい場合に成り立つが、不規則構造の速度が無視できない磁力線直交上向き成分を持つ場合には不適当となる。しかし、プラズマバブルが発達しきった後には磁力線直交上向き成分は一般的に小さいと考えることができる。Fejer 他 [13] によれば、日没後の prereversal enhancement の後のプラズマ速度の磁力線直交上向き成分は東西成分に比べて約 5 分の 1 である。このことから、本研究では式 (6) の v_{ippz} の係数が v_{ippx} の係数に比べて 2

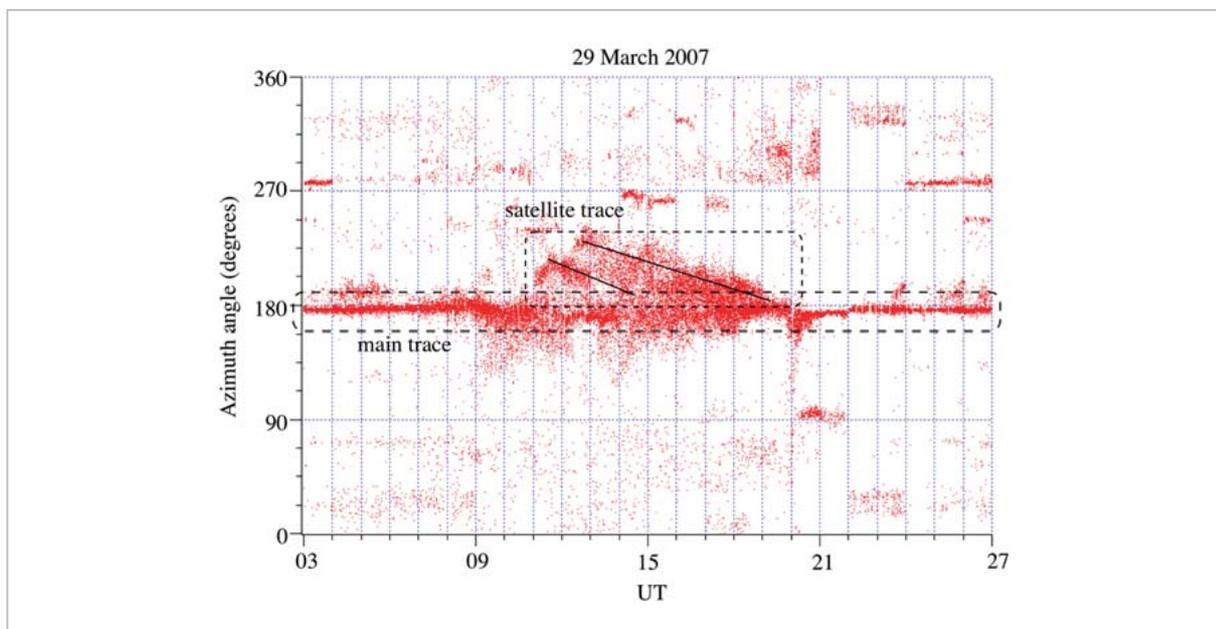


図4 2007年3月29日に大洗において観測されたRadio Australia放送波の到来方向
到来方向は地理北を0°とし時計回りに正と取った。[9]

分の1以下である場合に限り解析対象とすることとした。これにより、 V_{ippz} の寄与を V_{ippx} の寄与に比べて10分の1以下に抑えることができる。

3 結果

図4は2007年3月29日にODFによって観測されたRadio Australiaの到来方位角(北を 0° として時計回りに正)である。方位角 176° 付近のデータは大圏伝播のものであり、これを“main trace”と呼ぶ[2]。これに対し、12:00-19:00 UTの間にmain traceの西側に見られるデータ群は非大圏伝播によるものであり、“satellite trace”と呼ぶ。10:30-12:00 UTの 260° 付近、14:00-16:00 UTの 260° 付近、あるいは17:00-18:00 UTの 260° 付近のデータは、Radio Australia以外の電波源によるものであることが分かっている。satellite traceに属するデータの到来方向は時間とともに南へと変化し、反射点が東向きに移動したと考えられる。Maruyama and Kawamura[2]はこれを、プラズマバブルに伴う下部電離圏大規模構造が東向きに移動することに対応するのではないかと考えたのである。到来方位角の時間変化から、Maruyama and Kawamura[2]の使用した方法により反射点の移動速度を推定すると、東向き

93 m s^{-1} であった。但し、図4を見て分かるようにsatellite traceは広がりを持ち、速度推定の元となる傾きはある程度の範囲を持つ。傾きがはっきりと求められた場合においてもこの手法には $7\sim 8 \text{ m s}^{-1}$ の誤差が伴うので、実際の速度の推定誤差範囲はさらに大きくなることには注意が必要である。

大洗においてsatellite traceが観測されたこの同じ日に、HainanにおいてGPS信号の強いシンチレーションが観測された。図5は2007年3月29日にHainanにおいて観測されたGPS L1信号強度の S_4 指数である。PRN 16及び22のGPS L1信号に対し、それぞれ12:40-13:15 UT及び13:15-13:45 UTの間、大きな S_4 指数が観測された。このときPhu Thuyにおいては、シンチレーションは観測されなかった。図6はHainanにおけるPRN 16及び22の衛星信号強度変動の3受信機間の最大相関値、図7は図6の最大相関値に対応する信号強度変動の時間差を示す。これらは、全て S_4 指数が0.3以上であったデータのみについて示している。PRN 16と22のデータの間には不連続があるように思われるが、先に述べた通り地上におけるシンチレーションパターンの移動は受信機、プラズマ不規則構造、衛星の相互の位置関係、速度によって決まるものであるので、

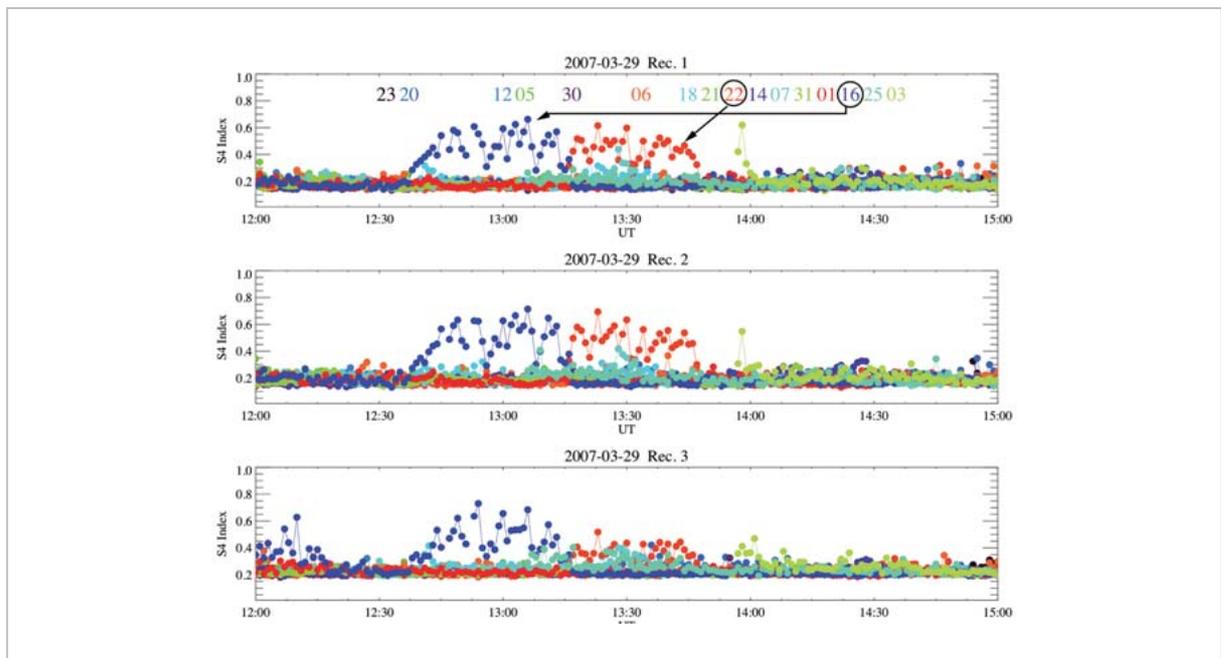


図5 2007年3月29日にHainanにおいて観測されたGPSシンチレーションの S_4 指数

異なる衛星の S_4 指数を、最上部の図に示す衛星番号(PRN)の色に対応する色で示した。[9]

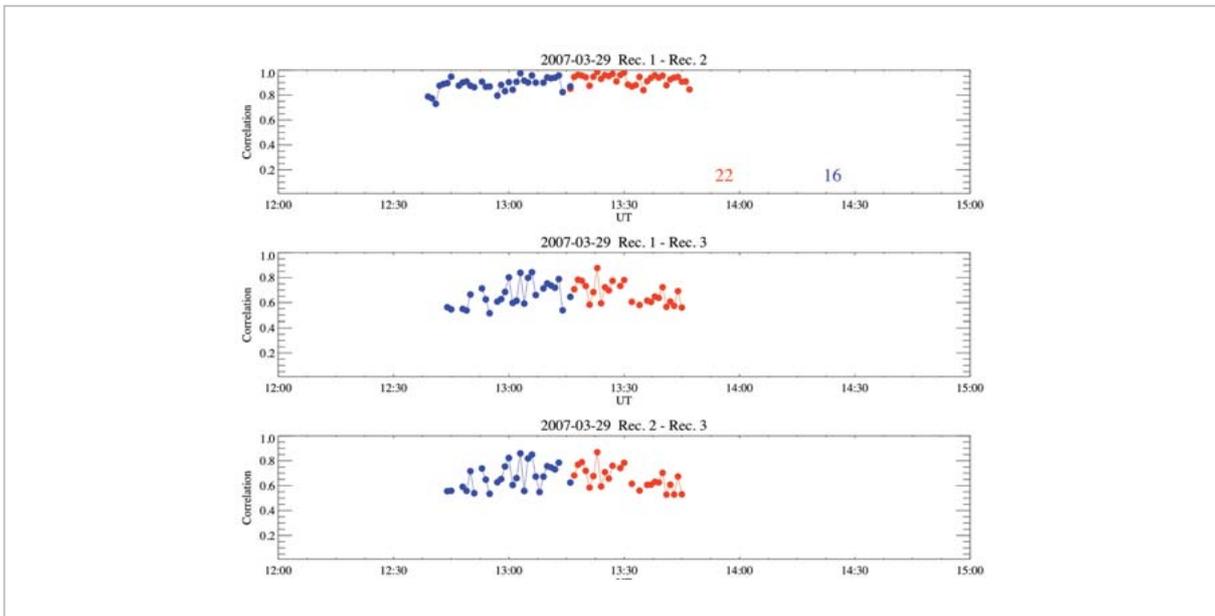


図6 2007年3月29日にHainanにおいて観測された受信強度変動のアンテナ間の相関係数
 S₄指数が0.3以上のものについてのみ表示し、青線はPRN 16衛星、赤線はPRN 22衛星のデータを示す。[9]

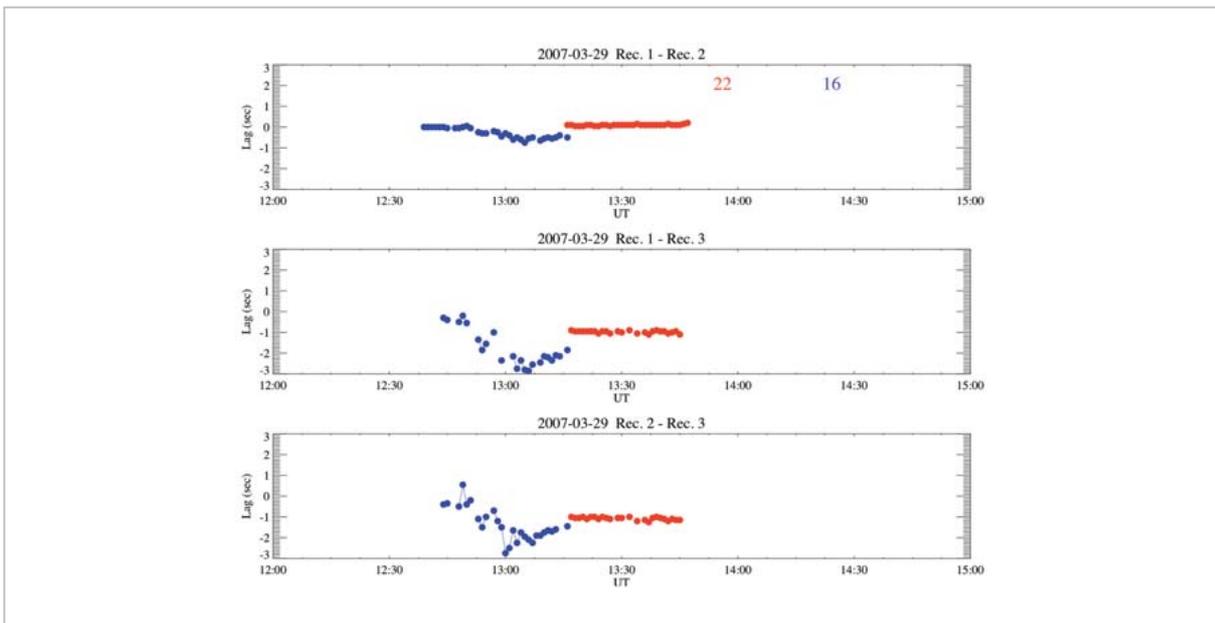


図7 2007年3月29日にHainanにおいて観測された受信強度変動のアンテナ間の時間遅れ
 S₄指数が0.3以上のものについてのみ表示し、青線はPRN 16衛星、赤線はPRN 22衛星のデータを示す。[9]

同一のプラズマバブルに伴う不規則構造によるシンチレーションであっても、異なる衛星間で受信機間の時間差に不連続が生じたとしても不思議ではない。これらの時間差から地上のシンチレーションパターンの移動速度を測定し、式(6)を用いて推定したプラズマ不規則構造の移動速度を示したものが図8である。ここで、PRN 16の衛星信号強度変動は、式(6)から速度を推定する条件

(v_{ippz} の係数が v_{ippx} の係数に比べて2分の1以下)が満たされなかったため、速度推定には用いなかった。図8によると、このとき推定されたプラズマ不規則構造の移動速度は、東向き約 130 m s^{-1} であった。GPSシンチレーションを用いて推定したこのプラズマ不規則構造の移動速度は、HF-TEPを用いて推定した下部電離圏大規模構造の移動速度とおおむね一致していると言える。

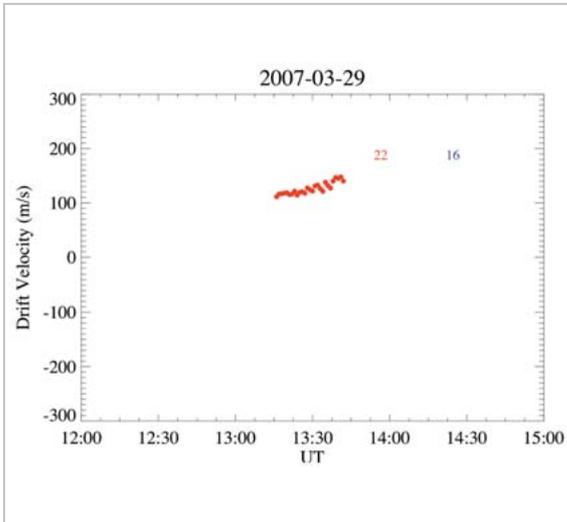


図8 2007年3月29日にHainanにおいて観測された受信強度変動のアンテナ間の相関を用いて導出した不規則構造の移動速度

S₄指数が0.3以上且つ式(6)において精度よく求められたものについてのみ表示し、青線はPRN 16衛星、赤線はPRN 22衛星のデータを示す。[9]

2007年3～10月の間、ODFはOGCPを3月26, 29, 31日、9月18, 22日、及び10月22日の6晩において226°付近のOGCPを観測した。Hainanにおいてプラズマバブルに伴うと考えられるGPSシンチレーションは、2007年3月26, 29, 31日、4月1, 15日、9月18日、及び10月22日に観測された。Phu ThuyにおけるGPS受信システムは残念ながら不調であり、2007年3月29日を除いて意味のある結論を導くことはできなかった。ODFによるOGCPの発生日とHainan, Phu ThuyにおけるGPSシンチレーションの発生日を表2に、ODFにおける方位角226°付近のOGCPの発生時間とHainanにおけるGPSシンチレーションの発生時間を表3にまとめた。但し、2007年4月15日については、ODFの不調によりHF-TEPデータが欠測となっており、表3からは除外した。これらの結果から、ODFにおける方位角226°付近のOGCPとHainanにおけるGPS

表2 HF-TEPのOGCPとGPSシンチレーションの発生

日付	OGCP	GPSシンチレーション	
	大洗 (方位角 226° 付近)	Hainan	Phu Thuy
2007年3月26日	O	O	ND
2007年3月29日	O	O	NO
2007年3月31日	O	O	ND
2007年4月15日	ND	O	ND
2007年9月18日	F	O	ND
2007年10月22日	O	O	ND

O, NO, NDはそれぞれ発生、発生なし、欠測を示す。2007年9月18日においては、OGCPは観測されたものの非常に弱かったためFと表した。

表3 大洗におけるOGCPとHainanにおけるGPSシンチレーションの発生時間 (UT)

日付	OGCP (大洗、方位角 226° 付近)	GPSシンチレーション (Hainan)
	2007年3月26日	11:50-15:30
2007年3月29日	11:30-15:00	12:40-13:45
2007年3月31日	11:30-17:00	12:20-14:00
2007年9月18日	14:45-17:00	14:30-16:00
2007年10月22日	11:00-14:00	13:30-13:55

シンチレーションが非常によく対応していることが分かる。また、ODF における OGCP は一般的に Hainan における GPS シンチレーションよりも早く発生し遅く終了している。このことは、HF-TEP における OGCP の原因となると考えられる下部電離圏大規模構造がプラズマバブルの発生に先立って生じ、GPS シンチレーションを引き起こす数 100 m 規模のプラズマ不規則構造に比べて長時間存在すること、また GPS シンチレーションによる観測は衛星受信機間の視線が電離圏を横切る「点」における観測であるのに対し、HF-TEP は「面」的な観測であり GPS 受信機よりも広い範囲を一度に観測していることを示している。

4 考察

図 9a は、Hainan における GPS 衛星の高度 300 km における IPP の軌跡を示したものであり、そのうちシンチレーションが観測された区間を赤線で示している。図 9b は Phu Thuy における GPS 衛星の高度 300 km における IPP の軌跡であり、Hainan においてシンチレーションが観測された位置が図 9a と同様に赤線で示されている。

これを見ると、Phu Thuy における IPP の軌跡が赤線から外れていることが分かる。Phu Thuy の PRN 18 衛星の IPP の軌跡は Hainan において PRN 22 衛星信号にシンチレーションが観測された位置に近いように見えるが、Phu Thuy における PRN 18 衛星の軌跡が赤線の位置に差し掛かった時刻と Hainan において PRN 22 衛星信号にシンチレーションが観測された時刻が異なり、Phu Thuy における PRN 18 衛星はプラズマバブルに遭遇することなく南東へ通り過ぎていく。これらのことから、Hainan においてシンチレーションが観測されたにも関わらず Phu Thuy においてシンチレーションが観測されなかった理由が理解できる。また、GPS シンチレーションを用いたプラズマバブル観測は本質的に点観測であり、衛星密度が十分でなければプラズマバブルを見逃す可能性があることも分かる。

Hainan におけるシンチレーションの発生は、13:15 UT を境に PRN 18 から PRN 22 へと移り変わっている。その後 PRN 22 のシンチレーションは 13:45 UT まで継続した。このことから、プラズマバブルと PRN 18 及び 22 衛星の IPP の軌跡の関係は図 10 のようなものであったと推測でき

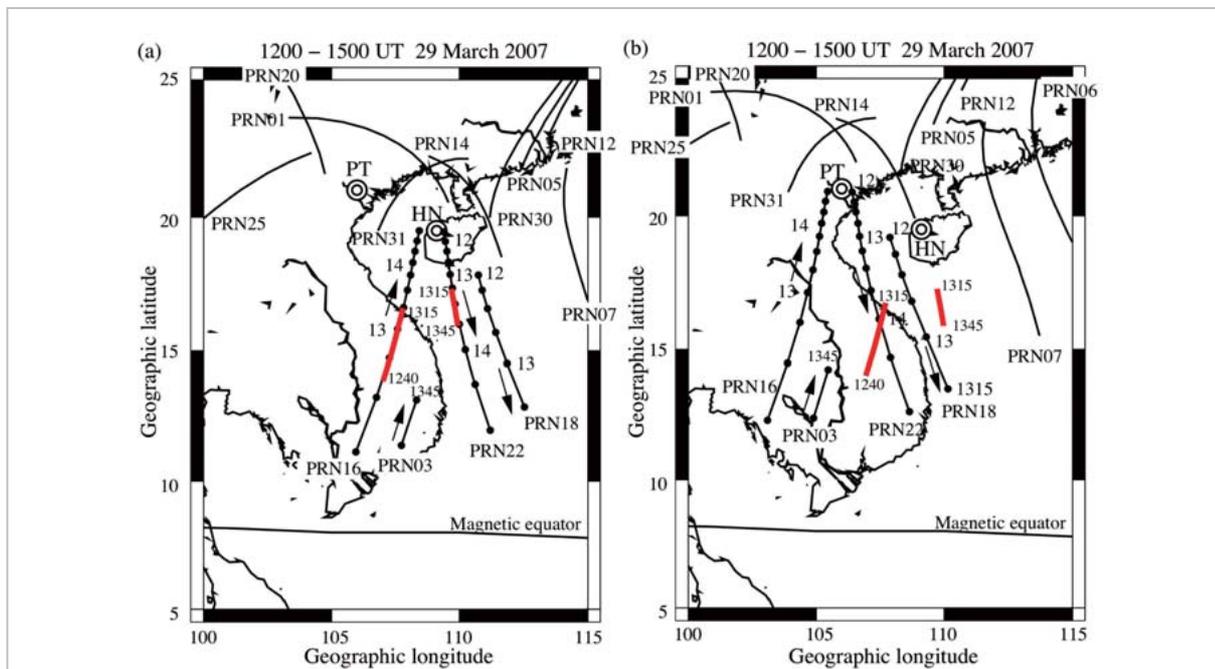


図9 (a) Hainan・中国、(b) Phu Thuy・ベトナムにおける、2007年3月29日12-15 UTのGPS衛星の軌跡を高度300 kmに投影したもの

線上の黒丸は15分ごとの衛星位置を示し、数字は時刻(UT)を示す。赤線はHainanにおいて強いシンチレーションが観測された位置を示す。[9]

る。この間プラズマバブルが形状を変えず一定速度で移動したと仮定するとプラズマバブルそのものの移動速度を推定することができる。図 10 から、プラズマバブルは 30 分間で約 270 km 東方に移動したと考えられ、プラズマバブル自体移動速度は東向き 150 m s^{-1} となる。この速度は、シンチレーションパターンの移動から推定したプラズマ不規則構造の移動速度 130 m s^{-1} と非常に近い。このことから、2007年 3月 29日に Hainan 付

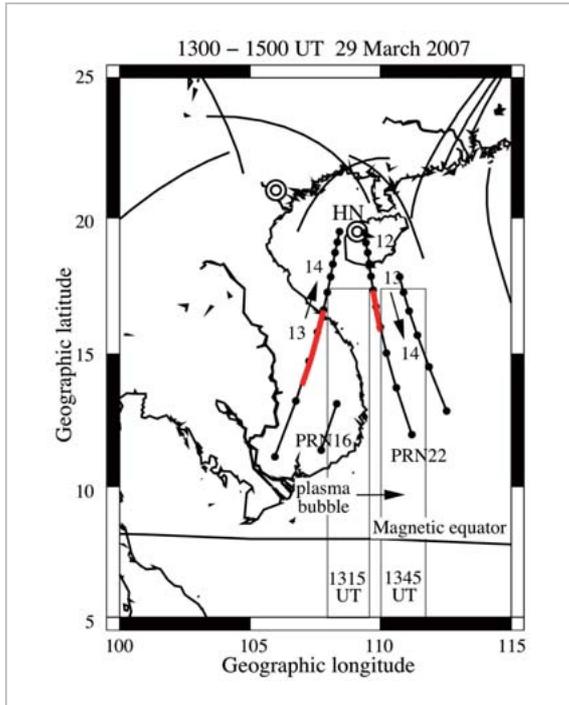


図10 図9と同様。2007年 13:15 UT から 13:45 UT の推定されたプラズマバブルの位置を示す。^[9]

近の経度で観測されたプラズマバブルについては、プラズマバブルの移動速度、プラズマ不規則構造の移動速度、さらに HF-TEP により推定された電離圏下部大規模構造の移動速度はいずれもほぼ同じであったと言える。

表 4 は、Hainan における GPS シンチレーション観測を用いて推定した小規模プラズマ不規則構造の移動速度と大洗における HF-TEP 観測を用いて推定した電離圏下部大規模構造の移動速度を比較したものである。これを見ると、これらの速度はおおむね一致していることが分かる。なお、2007年 9月 18日においては、HF-TEP 信号が非常に弱かったため速度を推定することができなかった。また、2007年 10月 22日においては、Hainan においてシンチレーションが観測された衛星の仰角が低く、こちらも速度を推定することができなかった。Huba 他^[14]は数値シミュレーションを用いた研究により、プラズマバブル内部の $E \times B$ ドリフト速度とプラズマバブルの上方発達速度が異なりうることを示した。つまり、プラズマの速度とプラズマバブルそのものの速度は必ずしも一致する必要はない、ということであるが、本研究で得られた小規模プラズマ不規則構造と大規模電離圏構造の速度差は、本研究で用いた観測手法の誤差の範囲内であった。このように、小規模プラズマ不規則構造と大規模電離圏構造の速度の違いについて Lin 他^[8]により提起された問題に対して、本研究から明確な答えを出すことは難しい。しかしながら、HF-TEP と GPS シンチレーションの同時観測を行い、低太陽活動のため

表4 HF-TEP と GPS シンチレーションにより推定された東西移動速度 (ms^{-1} 、東向きを正)

日付	OGCP (大洗、方位角 226° 付近)	GPS シンチレーション (Hainan)
2007年 3月 26日	77	80
2007年 3月 29日	93	130
2007年 3月 31日	93	80
2007年 4月 15日	-	95
2007年 9月 18日	-	50
2007年 10月 22日	39	-

"-" は欠測、あるいはデータ品質により速度が推定できなかったことを示す。

観測例は多くないものの非大圏伝播とシンチレーションが同時に観測され、両者を用いて推定した速度がおおむね一致するという結果は、夜間の HF-TEP に見られる非大圏伝播がプラズマバブルに伴うものであることを確かにするものであり、重要な発見である。

赤道を越えて伝播する HF 電波は電離圏 F 領域ピーク以下のプラズマバブルの境界で反射されると考えられる。一方シンチレーションの強度は電離圏プラズマ密度の変動の絶対値に比例するので、電離圏 F 領域ピーク付近のプラズマ不規則構造がシンチレーションに対して最も強く影響すると考えられる。実際、2007年3月29日の Hainan における観測(図10)においてシンチレーション領域の移動速度とプラズマ不規則構造の移動速度はほぼ一致している。これらのことから、HF-TEP と GPS シンチレーションの両手法はどちらも電離圏の同じ高度領域に感度を持ち、両手法で推定した速度が近い値を取ったと考えられる。

5 まとめ

本研究では、HF-TEP と GPS シンチレーションを世界で初めて同時に観測した結果を紹介した。HF-TEP は、Shepparton・オーストラリアから放送される Radio Australia 放送波の到来方向を大洗方向探査装置を用いて測定することにより観測した。GPS シンチレーション観測は、Hainan・中国及び Phu Thuy・ベトナムにおいて行った。Phu Thuy における観測では装置の不調のためわずかなデータしか得られなかったものの、Hainan における GPS シンチレーションの発生は、大洗における方位角 226° 付近の HF-TEP 非大圏伝播の発生とよく一致した。さらに、地上における GPS シンチレーションパターンの移動から推定したプラズマバブルに伴う小規模(300 - 400 m)プラズマ不規則構造の移動速度と、HF-TEP の到来方向の変化から推定した電離圏下部大規模構造の移動速度はよく一致した。これらの結果から、HF-TEP に見られる夜間の非大圏伝播はプラズマバブルに伴うものであり、HF-TEP はプラズマバブルの発生の広域監視に非常に有効であることが証明された。HF-TEP における非大圏伝播の到来方向は広がりを持ち、位置と速度の推定誤差を大

きくしている。より精度の高いプラズマバブルの位置と速度の推定は、プラズマバブルの発生と移動の監視のために重要である。到来方向の広がりには、HF 放送波がいくつかの異なる伝播路を取るためであると考えられるため、伝播路長を測定し伝播路を絞り込むことが有効である。伝播路長の測定には、電波源近傍と遠方の2ヶ所で同時に受信観測を行い波形の遅れから伝播時間を求めるパッシブレーダーの手法が有効であり、2009年現在、日本学術振興会科学研究費補助金若手(B)研究の支援により、パッシブレーダーを用いたプラズマバブルの発生と移動の広域監視システムの開発を行っているところである。将来的には、より直進性の高い VHF 電波を用いた TEP 観測用の送信機を用意して観測を行うことが望ましい。

MSAS (MTSAT satellite-based augmentation system: 運輸多目的衛星補強型衛星航法補強システム)、GBAS (Ground-based augmentation system: 地上型衛星航法補強システム)等の高度な衛星航法利用では、プラズマバブルの存在を見逃す可能性を考慮し大幅な安全マージンを取っている。これが更なる高度利用を阻む障害となっているが、プラズマバブルを確実に監視し移動を予測することが可能になれば、不要の安全マージンを削減することが可能になり、衛星航法の高度利用への道が開かれる。HF-TEP の非大圏伝播観測によるプラズマバブルの発生と移動の監視は、衛星航法の高度利用を可能とする有望な手法であり、社会的見地からも強く推進していく必要がある。

謝辞

Hainan、Phu Thuy における観測は、それぞれ中国科学アカデミー、ベトナム科学技術アカデミー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。中国科学アカデミー国立天文台の Ma 博士および Li 氏、中国科学アカデミー宇宙科学応用研究センターの Chen 氏、ベトナム科学技術アカデミーの Ha Duyen 博士および Le Truong 氏に感謝する。大洗方向探査装置のデータ取得については川村眞文氏に感謝する。また、SEALION プロジェクトに参加する諸氏に感謝する。

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 Maruyama, T., and M. Kawamura, "Equatorial ionospheric disturbance observed through a transequatorial HF propagation experiment", *Ann. Geophys.*, Vol.24, pp.1401-1409, 2006.
- 3 Valladares, C. E., R. Sheehan, S. Basu, H. Kuenzler, and J. Espinoza, "The multi-instrumented studies of equatorial thermosphere aeronomy scintillation system: Climatology of zonal drifts", *J. Geophys. Res.*, Vol.101, pp.26839-26850, 1996.
- 4 Kil, H., P. M. Kintner, E. R. de Paula, and I. J. Kantor, "Global Positioning System measurements of the ionospheric zonal apparent velocity at Cachoeira Paulista in Brazil", *J. Geophys. Res.*, Vol.105, pp.5317-5327, 2000.
- 5 Kintner, P. M., B. M. Ledvina, E. R. de Paula, and I. J. Kantor, "The size, shape, orientation, speed, and duration of GPS equatorial anomaly scintillations", *Radio Sci.*, Vol.39, pp.RS2012, doi:10.1029/2003RS002878, 2004.
- 6 Ledvina, B. M., P. M. Kintner, and E. R. de Paula, "Understanding spaced-receiver zonal velocity estimation", *J. Geophys. Res.*, Vol.109, pp.A10306, doi:10.1029/2004JA010489, 2004.
- 7 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.
- 8 Lin, C. S., 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", *J. Geophys. Res.*, Vol.110, pp.A06304, doi:10.1029/2004JA010774, 2005.
- 9 Saito, S., T. Maruyama, M. Ishii, M. Kubota, G. Ma, Y. Chen, J. Li, C. Ha Duyen, and T. Le Thuring, "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.
- 10 Kelley, M. C., J. J. Makela, L. J. Paxton, F. Kamalabadi, J. M. Comberiate, and H. Kil, "The first coordinated ground- and space-based optical observations of equatorial plasma bubbles", *Geophys. Res. Lett.*, 30, Vol.1766, 10.1029/2003GL017301, 2003.
- 11 Keskinen, M. J., S. L. Ossakow, and B. G. Fejer, "Three-dimensional nonlinear evolution of equatorial spread-F bubbles", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.30, pp.1855, doi:10.1029/2003GL017418, 2003.
- 12 Briggs, B. H., G. J. Philips, and D. H. Shinn, "The analysis of observations on spaced receivers of the fading of radio signals", *Proc. Phys. Soc. Sec. B*, Vol.63, pp.106-121, 1950.
- 13 Fejer, B. G., E. R. de Paula, S. A. González, and R. F. Woodman, "Average vertical and zonal F region plasma drifts over Jicamarca", *J. Geophys. Res.*, Vol.96, pp.13901-13908, 1991.
- 14 Huba, J. D., G. Joyce, and J. Krall, "Three-dimensional equatorial spread F modelling", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.35, pp.L10102, 10.1029/2008GL033509, 2008.



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

右井 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



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