

# 電離圏観測手法の衛星航法利用援助への応用

斎藤 享

独立行政法人電子航法研究所

## 1 背景

全球衛星航法 (Global Navigation Satellite System: GNSS) において、電離圏による伝播遅延は最も大きな誤作要因の一つである。電離圏による伝播遅延の大きさは、衛星受信機間の単位面積あたりの全電子数 (total electron content: TEC) に比例する。地上基準局の観測データを基に補正情報を生成するディファレンシャル衛星航法システムである地上補強型衛星航法システム (Ground-based augmentation system: GBAS) や、静止衛星補強型衛星航法システム (Satellite-based augmentation system: SBAS) においては、TEC の大きさそのものではなく TEC の空間不均一性が大きな誤差要因となる。近年 GNSS は高い安全性が要求される航空航法においての利用が進んでおり、TEC 空間勾配を確実に検出することは大変重要となっている。GNSS を航空航法に利用するにあたっては、GNSS 信号を様々な視点からチェックすることにより、TEC 空間勾配による誤差が航空機に取って危険なものにならないように対策が取られている。このような安全対策は過剰に行うと利用可能な場合においても利用不可となることがあり、実用に耐えるシステムとするためには、安全対策と利用可能性を両立させる必要がある。このことから、GNSS をより高度に利用するためには、より効率的な TEC 空間勾配の検出方法を開発することが非常に重要である。

## 2 磁気低緯度電離圏異常の影響

中緯度域においては磁気嵐に伴う電離圏電子密度の急増 (Storm enhanced density: SED) に伴い極めて大きい TEC 空間勾配が存在することが知られている

(Pullen et al., 2009)。SED は発生頻度が比較的低く、日本においては前太陽周期の中で 2 回発生が確認されているのみである (e.g. Maruyama and Kawamura, 2006)。この SED に伴い観測された TEC 空間勾配は Pullen et al. (2009) により観測されたものに比べて小さいものであった。

日本を含む磁気低緯度において大きな TEC 空間勾配を伴う現象としてはプラズマバブルが挙げられる。日没付近の磁気赤道で発生するプラズマバブルは、南北方向に発達する局所的な電子密度の急減であり、東西 100 km 程度の幅を持ち、内部は外部に比べて 1 桁以上電子密度が低い。内部と外部の境界は極めて薄い (20~30 km 程度) ため、局所的に極めて大きな TEC 空間を伴いうる。プラズマバブルは発生頻度も高く (アジア域では、高太陽活動期の春分・秋分の夜間には頻繁に発生する)、GNSS に影響を与える TEC 空間勾配 (電離圏異常) として無視できないものである。そのため、プラズマバブルに伴う電離圏異常を監視し、効率よく検出することが必要となる。

これまで電離圏異常の監視は、GNSS 信号そのものを用いて行われてきた。GNSS を用いるシステムにおいて、GNSS を用いた電離圏監視を行おうとすることは自然であるが、それが必ずしも最前の方法とは限らない。GNSS 衛星は見かけの動きが遅く、全天に 10 機程度しかないため、「点」の観測となり、局所的な電離圏の変動に対して、見逃しの可能性が残る。見逃しの可能性が高ければ、その分システムを保守的にせざるを得ず、高度な利用が妨げられる。

電離圏の観測研究は過去長期間にわたって行われてきており、GNSS 以外のプラズマバブル観測方法も数多く開発され用いられてきた。むしろ、GNSS を利用する電離圏観測手法の方が新しいものである。

それらの中には、効率的に電離圏異常を検出するという目的に適した手法もいくつか存在する。本研究では、電離圏異常、特に日本において重要性の高いプラズマバブルについて、それが存在する場合には確実に警報を発し、存在しない場合は確実に存在しないことを保証する監視システムについて、いくつかの具体的手法を挙げて考察する。

### 3 電離圏観測手法を用いた電離圏異常監視

電離圏観測手法が衛星航法利用のためのプラズマバブルの監視に利用可能となるためにはいくつかの条件がある。第一に、監視システムは常時利用可能でなければならない。従って、天候、時間帯などの制限を受ける光学機器を用いた観測方法は有効ではなく、電波を用いる観測手法が適している。次に、従来の方法に比べて効率的に異常検出が行える必要がある。さらに、実利用システムとしては、得られる効果に対して高価でないことが必要である。最後に、安全性設計が可能であることも必要である。

GNSS 以外によるプラズマバブルの観測方法としては、

1. 非干渉散乱レーダー (Tsunoda and White, 1981; Hysell et al., 2006)
2. 干渉散乱レーダー (Fukao et al., 2004)
3. 短波赤道横断伝播 (Maruyama and Kawamura, 2006; Saito et al., 2008)
4. 低軌道衛星ビーコン観測 (Yamamoto, 2008; Thampi et al., 2009)

などが挙げられる。これらのうち、比較的安価で広範囲を監視可能と考えられる、3 及び 4 について、衛星航法のための電離圏異常監視システムとしての検討状況を紹介する。

#### 3.1 短波赤道横断伝播

赤道を超えて伝播する HF 電波が夜間において時に大圏方向から外れた方向から到来することは古く

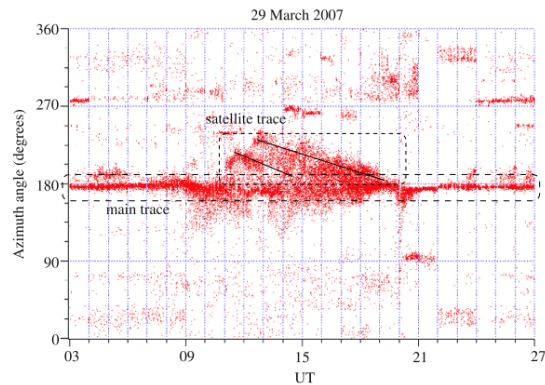


図 1: プラズマバブルに伴う短波赤道横断非大圏伝播 (Saito et al., 2008)

から知られていた (Röttger, 1973)。近年の高精度の HF 電波到来方向探査装置を用いた研究 (Maruyama and Kawamura, 2006; Saito et al., 2008) により、HF 赤道横断伝播の非大圏伝播はプラズマバブルに伴うものであり、到来方向を観測することにより移動速度まで推定できることが示されている。図 1 は、情報通信研究機構により茨城県大洗町に設置された方向探査装置による Radio Australia 放送波の到来方向であり、プラズマバブルに伴うと考えられる非大圏伝播がはっきりと捉えられている。

これは、以下のように説明できる。プラズマバブルが発生していない場合、反対半球から発射された図 3.1 の点線のように電波は大圏経路を通して到来する。プラズマバブルが発生すると、それに伴う電離圏下部の波状構造により反射された電波が大圏方向から大きく外れた方向から到来しうる (図 3.1 実線)。鏡面反射のように反射点が送受信点の中間の緯度 (この場合地理赤道付近) であると仮定することによりプラズマバブルの存在する経度を推定することができる。

図 1 の到来方向の分布の分散が大きいためにも分かるように、本手法によるプラズマバブルの位置、速度の推定精度は高くない。しかしながら東西数 1000 km の広域を一度に監視できる点において優れている。また、非大圏伝播が見られない場合にプラズマバブルが存在しないことを保証することは可能である。

さらに位置推定精度を向上させるためには、赤道横断伝播する電波の伝播距離を測定することが有効と考えられる。これまでに、赤道横断伝播する電波の到来方向の変動に伴って伝播距離が変動すること



図 2: 短波赤道横断非大圏伝播とプラズマバブル

が見いだされており (Saito et al., 2011)、今後の発展が期待できる。

ここでは手法の有効性を示すために Radio Australia 放送波を用いたが、今後実際に監視システムとして利用する場合には、独自の電波を送信する必要がある。

### 3.2 低軌道衛星ビーコン観測

低軌道を周回する衛星は、見かけの移動速度が大きく、電離圏を広範囲に監視することに適している。実際、低軌道傾斜角で赤道付近を周回する低軌道衛星の多周波ビーコン電波を用いた差分ドップラー観測により、プラズマバブルが発生し発達する様子が捉えられている。Thampi et al. (2009) さらに、複数の観測点を設置することにより、トモグラフィーにより電離圏電子密度の高度分布を導出することも可能である (Thampi and Yamamoto, 2010)。図 3 は、ベトナム・Bac Lieu において観測されたプラズマバブルに伴う電離圏全電子数の変動である。

本手法は、過去に NNSS などの衛星航法で用いられた多周波ビーコンと原理的に同じものである。衛星ビーコン観測は低仰角まで利用可能であり、仰角  $5^\circ$  まで利用した場合東西 3000 km 程度の覆域を持つ。ビーコン受信機は極めて安価に製作可能であるうえ (Yamamoto, 2008)、過去に NNSS 等の衛星航法で用いられたものもあるため、技術的な問題は無い。ただし、本手法では赤道周回のビーコン送信衛

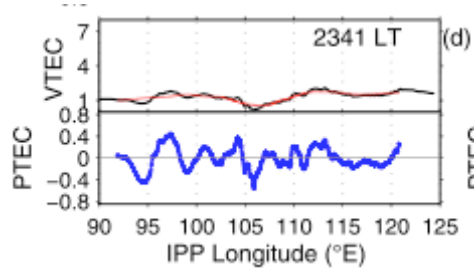


図 3: 衛星ビーコンにより観測されたプラズマバブルに伴う電離圏全電子数変動 (Thampi et al., 2009)

星を維持する必要がある。現在、これらを衛星航法利用のための電離圏異常監視システムとして利用する場合の利点と問題点について検討を行っているところである。

## 4 まとめ

本研究では、日本の位置する磁気低緯度において、衛星航法の高度利用の障害となる電離圏異常を効率的に監視する方法について検討を行った。低緯度電離圏で最大の問題となるプラズマバブルについて、広範囲を効率的に監視するために効果的と考えられる手法のうち、短波赤道横断伝播、衛星ビーコン電波観測の 2 つについて検討状況を紹介した。

短波赤道横断伝播は、非大圏伝播を検出することによりプラズマバブルの広域監視が可能であり、少なくとも一定の経度域での電離圏異常がないことを示すことが可能である。これに加えて伝播距離を測定することにより、プラズマバブルの位置と移動速度の推定精度の向上が期待できる。

衛星ビーコン観測による電離圏全電子数観測は、赤道周回衛星を用いることにより東西 3000 km 程度の範囲を監視することを可能とする。実際にプラズマバブルに伴う電離圏波状構造が捉えられており、こちらでも有効な手法として期待できる。

今後、これらのプラズマバブル監視法の効果の定量的な評価と、プラズマバブル以外の電離圏異常検出方法の検討を行っていく予定である。

## 参考文献

- Fukao, S., Y. Ozawa, T. Yokoyama, M. Yamamoto, and R. T. Tsunoda, First observations of the spatial structure of F region 3-m-scale field-aligned irregularities with the Equatorial Atmosphere Radar, *J. Geophys. Res.*, *109*, A02304, doi:10.1029/2003JA010096, 2004.
- Hysell, D. L., M. F. Larsen, C. M. Swenson, and T. F. Wheeler, Shear flow effects at the onset of equatorial spread F, *J. Geophys. Res.*, *111*, A11317, doi:10.1029/2006JA011963, 2006.
- Maruyama, T., Extreme enhancement in total electron content after sunset on 8 November 2004 and its connection with storm enhanced density, *Geophys. Res. Lett.*, *33*, L20111, doi:10.1029/2006GL027367, 2006.
- Maruyama, M., and M. Kawamura, Equatorial ionospheric disturbance observed through a transequatorial HF propagation experiment, *Ann. Geophys.*, *24*, 1401–1409, 2006.
- Pullen, S., Y. S. Park, and P. Enge, Impact and mitigation of ionospheric anomalies on ground-based augmentation of GNSS, *Radio Sci.*, *44*, RS0A21, doi:10.1029/2008RS004084, 2009.
- Röttger, J., Wave-like structures of large-scale equatorial spread-F irregularities, *J. Atmos. Terr. Phys.*, *35*, 1195–1206, 1973.
- Saito, S., T. Maruyama, M. Ishii, M. Kubota, G. Ma, Y. Chen, J. Li, C. Ha Duyen, and T. Le Truong, 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.*, *113*, A12313, doi:10.1029/2008JA013149, 2008.
- Saito, S., M. Yamamoto, and T. Maruyama, Plasma bubble monitoring by HF trans-equatorial arrival angle and propagation distance measurements, *Proceedings of URSI 2011*, 2011.
- Thampi, S. V., M. Yamamoto, R. T. Tsunoda, Y. Otsuka, T. Tsugawa, J. Uemoto, and M. Ishii, First observations of large-scale wave structure and equatorial spread F using CERTO radio beacon on the C/NOFS satellite, *Geophys. Res. Lett.*, *36*, L18111, doi:10.1029/2009GL039887, 2009.
- Thampi, S. V., and M. Yamamoto, First results from the ionospheric tomography experiment using beacon TEC data obtained by means of a network along a longitude of 136° over Japan, *Earth Planets Space*, *62*, 359–364, 2010.
- Tsunoda, R. T., and B. R. White, On the generation and growth of equatorial backscatter plumes: 1. Wave structure in the bottomside F layer, *J. Geophys. Res.*, *86*, 3610–3616, 1981.
- Yamamoto, M., Digital beacon receiver for ionospheric TEC measurement developed with GNU Radio, *Earth Planets Space*, *60*, e21–e24. 484, 2008.