

## 6. GNSS 高度利用の為の低緯度電離圏異常監視

通信・航法・監視領域 ※齋藤 享, 坂井 丈泰, 藤井 直樹

### 1 はじめに

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、電離圏遅延量の空間不均一性は大きな誤差要因である。GNSS の航空利用においては安全性が最も重要であるので、電離圏遅延量勾配を確実に検出し、たとえ検出漏れがあったとしても、電離圏遅延量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可用性（アベイラビリティ）とトレードオフの関係にあり、過剰な対策はアベイラビリティの低下につながるが、実用システムにおいては両者を同時に満足しなければならない。このことから、GNSS をより高度に利用するためには、より効率的な電離圏遅延量勾配の検出方法を開発することが非常に重要である。

### 2 低緯度電離圏異常の影響

地球の電離圏は磁気緯度によって性質が大きく異なり、緯度領域ごとに特徴的な現象が存在する。日本は欧米に比べて磁気緯度が低く、低緯度から低中緯度にかけて位置している。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電離圏勾配を伴う。これらの現象は、磁気緯度が比較的高く中高緯度に位置する欧米ではこれまで重要視されてこなかった。特にプラズマバブルは、欧米で考慮されている磁気嵐に伴う電離圏遅延量勾配の急増現象と比較して同程度の電離圏勾配を伴う可能性があり、かつ、それに比べて発生頻度が非常に高

いことから、低~低中緯度に位置する日本において十分に考慮されなければならない。

### 3 GNSS によらない電離圏異常監視

これまで電離圏異常の監視は、GNSS を用いて行われてきた。SBAS である運輸多目的衛星補強システム (MSAS) における地上監視局の電離圏嵐検出システム、GBAS における電離圏勾配モニタなどがそれにあたる。実際、電子航法研究所が開発した GBAS プロトタイプにおいては、カテゴリ I の基準を満足するために、地上基準局に加えて滑走路進入方向に受信機を追加し、電離圏空間勾配を直接検出する電離圏フィールドモニタと呼ばれるシステムが取り入れられている。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 機程度しかいないため、「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。電離圏フィールドモニタについても、進入方向それぞれにモニタ受信機を設置する必要があるなど、問題点を含む。

一方で、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 以外の観測方法も数多く開発され用いられてきた。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生し、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。

### 4 電離圏監視に利用可能な観測手法

本節では、プラズマバブルの監視に利用可能な電離圏観測手法を紹介する。監視システムは常時利用可能でなければならないため、天候、時間帯

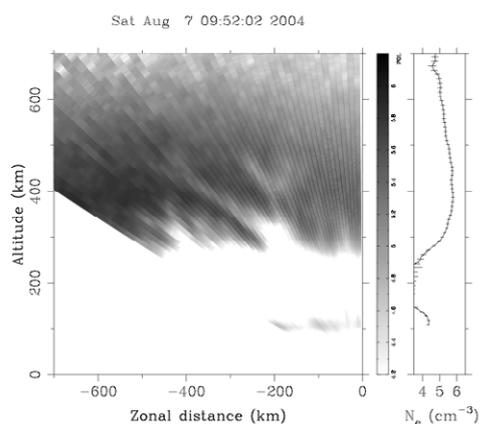


図 1: ALTAIR レーダーにより観測されたプラズマバブルに伴う電子密度減少 (Hysell et al., 2006)

などの制限を受ける光学機器を用いた観測方法は除外し、電波を用いた観測手法についてのみ述べることにする。

#### 4.1 非干渉散乱レーダー

非干渉散乱レーダーとは、VHF～UHF 帯の強力な電波を電離圏に照射し、電離圏に存在する自由電子のトムソン散乱による散乱波を受信するものである。トムソン散乱は極めて微弱であり大出力 (MW 級) と大開口面積 (1000 m<sup>2</sup> 級) を必要とするが、電子密度の高度分布を下部から上部電離圏にわたり直接計測することができるという極めて優れた能力を持つ。レーダービームを走査することにより電離圏電子密度の空間分布を直接監視することができる。近年では、京都大学・信楽 MU レーダー、アラスカ・PFISR レーダーなど、電子的にビームを走査し広範囲を同時に観測することができるレーダーシステムが実用化されている。図 1 は、太平洋 Kwajalein 環礁に設置された ALTAIR レーダーによるプラズマバブルの観測例であり、プラズマバブルに伴う電離圏電子密度の減少がはっきりと捉えられている。

#### 4.2 後方散乱レーダー

低緯度電離圏において急峻な電離圏勾配の原因となるプラズマバブルは、様々な大きさの電離圏不規則構造を伴うことが知られている。衛星航法が使用する L バンドにおいてシンチレーションの原

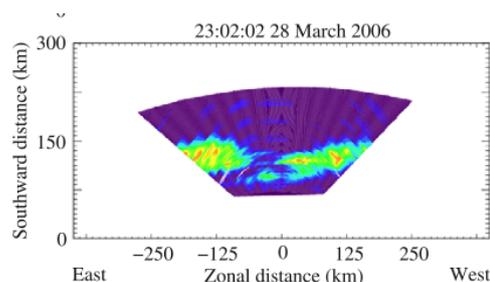


図 2: 赤道大気レーダーにより観測されたプラズマバブルに伴うレーダーエコー (Saito et al., 2008a)

因となる不規則構造は水平数 100 m 規模とされているが、メートル規模においても強い不規則構造がプラズマバブル内部を満たしていることが知られている (Otsuka et al., 2004)。ここに数 10 MHz 程度の VHF 電波を照射すると、電波の波長の半分の波長をもつ不規則構造による散乱は、散乱波が強め合い強いエコーとなって観測される (ブラッグ散乱)。この散乱は非干渉散乱レーダーに比べてはるかに強く、10 kW 級のレーダーで十分である。プラズマは磁場に沿っては動きやすいが磁場を横切っては動きにくいという性質を持ち、このような不規則構造は磁力線に沿って発達する。従って、レーダービームが磁力線に対して直角に交わる時強いエコーが観測される。図 2 は、京都大学によりインドネシアに設置された赤道大気レーダー (Fukao et al., 2003) によるプラズマバブルの観測例であり、プラズマバブルに伴うレーダーエコーの 2 次元像がはっきりと捉えられている。

#### 4.3 HF 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., 2008b) 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 3 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プラズマバブルの観測例であり、プラズマバブルに伴う非大圏伝播がはっきりと捉えられている。

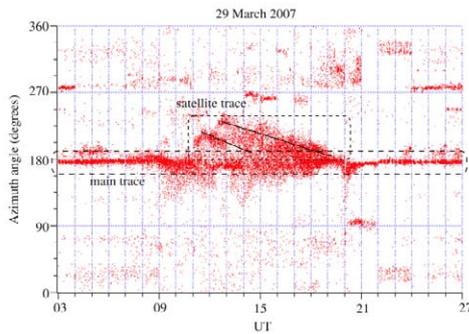


図3: プラズマバブルに伴う短波赤道横断非大圏伝播 (Saito et al., 2008b)

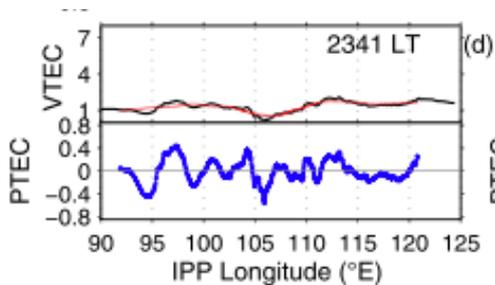


図4: 衛星ビーコンにより観測されたプラズマバブルに伴う電離圏全電子数変動 (Saito et al., 2008b)

#### 4.4 衛星ビーコン

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4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。

### 5 プラズマバブル監視への利用可能性

#### 5.1 非干渉散乱レーダー

電離圏の電子密度を仮定を用いず直接観測できるという点において、電離圏遅延量の監視方法と

しては極めて優れており理想的と言える。レーダー覆域は、仰角  $30^\circ$  以上の範囲でビーム走査を行う場合、電離圏電子密度が最も高い高度  $300\text{ km}$  において東西約  $1000\text{ km}$  である。しかしながら、大電力、大開口面積を必要とし、非常に高価であることには留意が必要である。

#### 5.2 後方散乱レーダー

後方散乱レーダーはプラズマバブルの断面を観測することになるが、プラズマバブルも磁力線に沿って発達することから、3次元分布を知ることができる。後方散乱レーダーは直接電子密度分布を測定するものではないが、レーダーエコーとプラズマバブルが対応することは明らかになっており、プラズマバブルの検出方法として有効である。本手法においても、東西約  $1000\text{ km}$  程度の覆域は達成可能である。また、エコー強度が非常に強いことから、安価なレーダーシステムにより構築可能である。以上のことから、プラズマバブルの存在を効率的に検出する優れた手法であるといえる。

#### 5.3 HF 赤道横断伝播

本手法は、上述のレーダーに比べ、プラズマバブルの位置、速度の推定精度においては劣るものの、数  $1000\text{ km}$  の広域を一度に監視できる点において優れている。現状においてもプラズマバブルが存在しないことの保証は可能である。現在、HF 赤道横断伝播によるプラズマバブルの位置、速度の推定精度をさらに向上させるため、パッシブレーダーの考え方を利用した測距を取り入れるべく、科学研究費補助金の支援を得て改良を進めている。

#### 5.4 衛星ビーコン

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、レーダーに比べて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  $3000\text{ km}$  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、過去に NNSS 等の衛星航法で用いられたものもあるため、技術的な問題はない。本手法を用いる上での留意点は、ビーコン電波を送出する赤道周回衛星を維持する必要があることである。ただし、米国空軍により宇宙

天気監視・予報の用途に打ち上げられた小型衛星(C/NOFS)がビーコン電波を送出しながら軌道を周回していることは注目に値する。

## 6 考察とまとめ

以上の検討から、プラズマバブルの監視法としては、後方散乱レーダーが最も優れており実用に最も近いと考えられる。HF赤道横断伝播についても、広範囲の監視システムとしては有望であり、更なる改良を進めていく。衛星ビーコンは衛星を維持する必要があり、すぐに実用化することは難しいと考えられるが実際にそのような衛星が米国により運用されている点には注意しておく必要がある。非干渉散乱レーダーについては、大掛かりな装置であるが、電離圏異常の問題を解決する最後の手段としての能力を持つことは特筆すべきである。

電子航法研究所ではこれまで、プラズマバブルを考慮した3次元電離圏モデルを開発し、衛星航法に対する影響の評価と対策の検討に用いてきた(Saito et al., 2009)。今後は、3次元電離圏モデルを用いてプラズマバブルの存在する電離圏を再現し、上述の電離圏監視法のうち最も優れていると考えられる後方散乱レーダーを利用した場合の衛星航法の性能向上を定量的に検討していく。また、設置場所と監視性能の関係を検討し、実現可能性を探っていく予定である。

## 参考文献

- 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.
- Maruyama, T., and M. Kawamura, Equatorial ionospheric disturbance observed through a transequatorial HF propagation experiment, *Ann. Geophys.*, 24, 1401-1409, 2006.
- 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.
- 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, L20802, doi:10.1029/2004GL020869, 2004.
- Röttger, J., Wave-like structures of large-scale equatorial spread-F irregularities, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1195-1206, 1973.
- Saito, S., S. Fukao, M. Yamamoto, Y. Otsuka, and T. Maruyama, Decay of 3-m-scale ionospheric irregularities associated with a plasma bubble observed with the Equatorial Atmosphere Radar, *J. Geophys. Res.*, 113, A11318, doi:10.1029/2008JA013118, 2008.
- 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., T. Yoshihara, and N. Fujii, Study of Effects of the Plasma Bubble on GBAS by a Three-Dimensional Ionospheric Delay Model, *Proceedings of ION GNSS 2009*, 2009.
- 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.