

## 10. 低緯度電離圏擾乱に伴う電離圏勾配の特性

航法システム領域 ※齋藤 享, 藤田 征吾, 吉原 貴之, 星野尾 一明

### 1 はじめに

静止衛星型衛星航法補強システム (Satellite-based Augmentation System: SBAS) や地上型衛星航法補強システム (Ground-based Augmentation System: GBAS) などのディファレンシャルGNSSにおいて、電離圏遅延量の空間非一様性は非常に深刻な問題である。

国際民間航空機関 (ICAO) においては、1周波GPSを用いる高カテゴリ着陸に対応したGBAS (これをGAST-Dと呼ぶ) の開発のための技術標準案 (ICAO GBAS CAT II/III Development Baseline SARPs, 2010) を2010年に策定した。このGAST-D技術標準案では、電離圏異常は楔状の電離圏遅延量空間変化としてモデル化されている (図1)。この電離圏異常の形状を表すパラメータのうち最も重要なものが、補正誤差に直結する空間勾配 ( $g$ ) である。GAST-D技術標準案においては、空間勾配の想定される値の範囲 (脅威空間という) は移動速度 ( $v$ ) の関数として与えられ、表1に示す値が用いられている。この脅威空間は、米国及び欧州での過去の観測データ (Lee et al., 2006, など) に基づいて決められたものであり、GAST-D技術標準案はこの脅威空間内において技術的に達成可能との見通しを得て、実機による検証段階へと移行している。

この脅威空間は米国及び欧州の磁気中緯度の観測データを基礎としており、日本が属する磁気低緯度の観測データは十分に取込まれていない。GAST-Dにおいては電離圏異常に関する監視機能が地上装置側だけでなく世界中の任意の地域を飛行することがあり得る機上受信機側にも装備されることが要求されていることから、電離圏脅威モデルは全世界的に共通のものが必要である。従って、磁気低緯度の観測データを十分に収集し、その解析結果をGAST-D技術標準案に反映させることは非常に重要である。

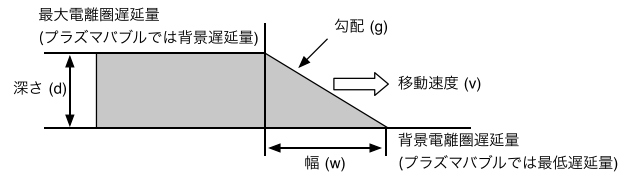


図1: GAST-D標準案で用いられる電離圏異常モデル (ICAO GBAS CAT II/III Development Baseline SARPs, 2010)。

表1: GAST-D標準案で用いられる電離圏遅延量勾配の脅威空間 (ICAO GBAS CAT II/III Development Baseline SARPs, 2010)。

移動速度 ( $v$ )	遅延量勾配の最大値 (L1周波数での値)
$v < 750$ m/sec	500 mm/km
$750 \leq v < 1500$ m/sec	100 mm/km

### 2 低緯度電離圏の特徴

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。日本が属する低緯度電離圏においては、二つの特徴的な現象が見られる。一つは、磁気緯度 $\pm 15^\circ$ 付近に存在する電離圏電子密度の極大であり、赤道異常と呼ばれる。赤道異常の位置は一定ではなく、時間とともに位置を変える。赤道異常の極側には大規模な電離圏遅延量勾配が存在するため、赤道異常の移動に伴い電離圏遅延量も大きく変化する。もう一つは、プラズマバブルと呼ばれる局所的な電子密度の急減である。プラズマバブルは日没付近の磁気赤道で発生し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く (20~30 km程度)、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ず、そ

のGBASへの影響についてはあまり深い研究が行われてこなかった。しかしながら、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、全世界共通の電離圏脅威モデルを必要とするGAST-Dにおいては十分に検討し考慮される必要がある。

### 3 短基線電離圏遅延量差検出法

精密進入に用いるGBASにおいては、空港に設置されるGBAS基準局の周辺20 km程度の範囲内の電離圏遅延量の空間変動が問題となる。従って、10 km程度以下の短い間隔で受信機を設置し電離圏遅延量の差を導出する必要がある。電離圏遅延量の導出では、周波数によって電離圏遅延量が異なることを利用し、GPS L1 (1.57542 GHz) 及びL2 (1.22760 GHz) の観測値を用いることが一般的である。しかしながら、2周波観測値を用いる場合、衛星、受信機それぞれに存在する周波数ごとのわずかな送信タイミングのずれ（周波数間バイアス）が問題となる。周波数間バイアスは観測値を用いて推定可能であるが、その推定誤差は一般にL1周波数での遅延量として200–300 mm以上と言われ、短い受信機間隔では十分な観測精度が得られない。また、電離圏擾乱時にはL2信号の途絶が起りやすく、最も注目する電離圏擾乱時に2周波観測値を用いる手法では電離圏遅延量データが得られないと言う問題も存在する。

そこで、本研究ではFujita et al. (2010) によって開発された、L1周波数の信号の搬送波位相を主に用いて2受信機間の電離圏遅延量差を高精度で導出する手法を用いた。L1信号のみを用いることにより、周波数間バイアスの問題がなくなり、電離圏擾乱時にL2信号が途絶したとしても電離圏遅延量差が導出可能となる。詳しい手法はFujita et al. (2010) に記されているとおりであるので、以下にその概要を簡単に示す。

本手法では、L1信号の搬送波位相測定値( $\Phi$ )を主に用い、擬似距離測定値( $\rho$ )を補助的に用いる。搬送波位相には初期値の不定性があるが測定精度は極めて精密である。擬似距離測定値は雑音が大きく測定精度は高くないが擬似距離絶対値を知ることができる。両者を組み合わせることにより、搬

送波位相の初期値を推定し測定精度の高い搬送波位相測定値に基づいた電離圏遅延量差を導出する。

実際には、 $p$ 番目の衛星の搬送波位相測定値( $\Phi^p$ )と、搬送波位相測定値と擬似距離測定値の電離圏フリー結合

$$L^p \equiv (\Phi^p + \rho^p)/2 \quad (1)$$

を基本観測値とする。ここで、受信機の精密な位置は既知とし、衛星受信機間の幾何距離を除いた $\Phi^p$ 、 $L^p$ の受信機間一重差（それぞれ $\Phi_{SD}^p$ 、 $L_{SD}^p$ ）は

$$\tilde{\Phi}_{SD}^p = b_{SD} - \delta I_{SD}^p + \lambda N_{SD}^p + \epsilon_{\Phi,SD}^p \quad (2)$$

$$\tilde{L}_{SD}^p = b_{SD} - \frac{\lambda}{2} N_{SD}^p + \frac{\epsilon_{\Phi,SD}^p + \epsilon_{\rho,SD}^p}{2} \quad (3)$$

となる。ここで、 $r$ は衛星受信機間の幾何距離、 $b$ は受信機時計誤差、 $\delta I$ は電離圏遅延量、 $\lambda$ はL1信号の波長、 $N$ は搬送波位相の初期値、 $\epsilon_{\Phi}$ 及び $\epsilon_{\rho}$ は搬送波位相及び擬似距離測定値の誤差である。

これらの連立方程式をカルマンフィルタを用いて $b_{SD}$ 、 $\delta I_{SD}^p$ 及び $N_{SD}^p$ について解く。カルマンフィルタによって $N_{SD}^p$ は実数として推定されるが、本来これは整数であることが分かっているのでLAMBDA法(Teunissen, 1995)を用いて最も確からしい整数値に改められる。この整数化された $N_{SD}^p$ を用いて、カルマンフィルタによって推定された $\delta I_{SD}^p$ を修正し、最終的な電離圏遅延量差を得る。

## 4 観測と解析及び結果

### 4.1 観測

電子航法研究所では、低緯度電離圏擾乱の衛星航法に対する影響を研究するため、石垣島(北緯24.3°、東経124.2°、磁気緯度19.4°)に短い距離間隔で5台のGPS受信機を設置して観測を行っている。図2は石垣島における受信機の配置である。距離間隔86–1551 mで配置されており、ここではそれぞれR1–R5と呼ぶことにする。

### 4.2 電離圏遅延量勾配

これまでに得られた観測データのうち、本解析では2008年3–4月及び2010年10月に得られたデータを用いた。春秋は、日本付近でプラズマバブルが発生しやすいとされる季節である。解析の結果、いくつかのプラズマバブルに伴う電離圏擾

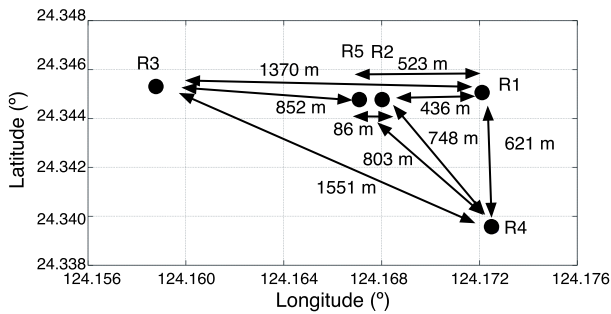


図 2: 石垣における受信機配置。

乱が検出された。図 3 は 2008 年 4 月 3 日に観測されたプラズマバブルに伴う受信機 R1-R3 間の GPS 衛星ごとの電離圏遅延量の空間勾配である。空間勾配は距離あたりの電離圏遅延量差 (mm/km) で表され、第 3 節に述べた手法を用いて導出された電離圏遅延量差 ( $\delta I_{13}$ ) を受信機間距離で除することによって得られる。プラズマバブルに伴う電離圏の変動は激しいため、電離圏遅延量差の推定において電離圏遅延量の激しい変動による推定誤りの危険性がある。ここでは、同様の手法を用いて更に 2 つの受信機対 (R1-R5 及び R5-R3) 間の電離圏遅延量差 ( $\delta I_{15}$ 、 $\delta I_{53}$ ) を推定し、これら全ての値が以下の関係 (式 4) を満たして整合的である場合のみ信頼できる結果として図 3 に示した。

$$\delta I_{13} = \delta I_{15} + \delta I_{53} \quad (4)$$

図 3 から、2008 年 4 月 3 日観測されたプラズマバブルに伴う電離圏遅延量勾配で、信頼できる最大値は 200 mm/km であったことが分かる。その他の日においても、200 mm/km 程度の電離圏遅延量勾配はプラズマバブルに伴って頻繁に観測されるものであった。この値は GAST-D 技術標準案 (表 1) で想定する電離圏脅威空間に十分収まるものである。しかしながら、今回の解析に用いたデータは太陽活動が低い期間のものであり、太陽活動が高く電離圏密度が高い期間においてはより大きな電離圏遅延量勾配が生じることが予想される。また、ここでは示していないが、解析結果の信頼性チェックによって排除された値には 380 mm/km に達するものもあった。これらのことを考慮すると、太陽活動の活発な期間のデータをさらに収集し、注意深く解析を進めていく必要がある。

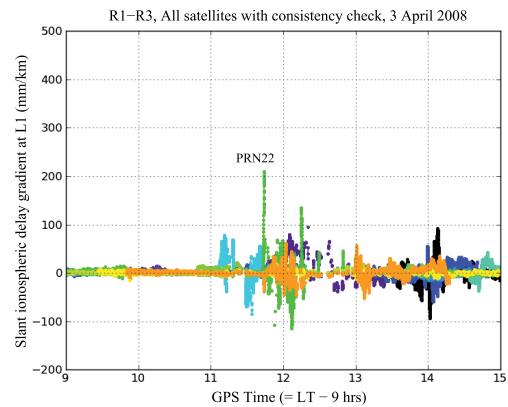


図 3: 2008 年 4 月 3 日に石垣で観測された、受信機 1-3 間のプラズマバブルに伴う電離圏遅延量勾配。異なる色は異なる衛星を表す。(Saito et al., 2012)

### 4.3 仰角・方位角特性

電離圏遅延量勾配の衛星航法に対する影響を考える上で、電離圏勾配の衛星の仰角・方位角に対する特性を調べることは重要である。図 4 は、2008 年 4 月及び 2010 年 10 月に石垣島で観測された、方位角・仰角それぞれ  $5^\circ$  ごとの最大電離圏遅延量勾配を示す。同様に図 5 は同じ期間に石垣島で観測された、方位角・仰角それぞれ  $5^\circ$  ごとの 50 mm/km を越える電離圏遅延量勾配が観測されたエポック数を示す。

これらを見ると、プラズマバブルに伴う大きな電離圏遅延量勾配は南方向 ( $145\text{--}200^\circ$ ) に集中して観測されていることが分かる。仰角では、低仰角 ( $20\text{--}30^\circ$ ) での大きな電離圏遅延量勾配の発生が多いが、中程度の仰角 ( $45^\circ$ ) においても少ないながら非常に大きな電離圏遅延量勾配が発生していた。

プラズマバブルは磁気赤道を中心に南北に長く発達する。従って、衛星受信機間の経路が南北に伸びるプラズマバブルの壁と平行になる場合、すなわち磁気赤道の北側に位置する日本では南方向に衛星が位置する場合に電離圏遅延量勾配が大きくなりやすいと考えられる。また仰角が低い場合には、衛星受信機間の経路が電離圏を通過する距離が長いために電離圏遅延量勾配が大きくなりやすいと考えられる。しかしながら、中程度の仰角において観測された非常に大きな電離圏遅延量勾配については、詳しい調査が必要である。

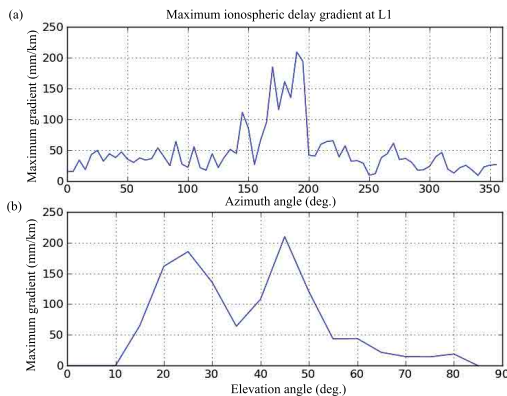


図 4: 2008 年 4 月及び 2010 年 10 月に石垣で観測された、(a) 方位角、(b) 仰角それぞれ 5° ごとの最大電離圏遅延量勾配。方位角は真北を 0° とし、時計回りを正にとる。(Saito et al., 2012)

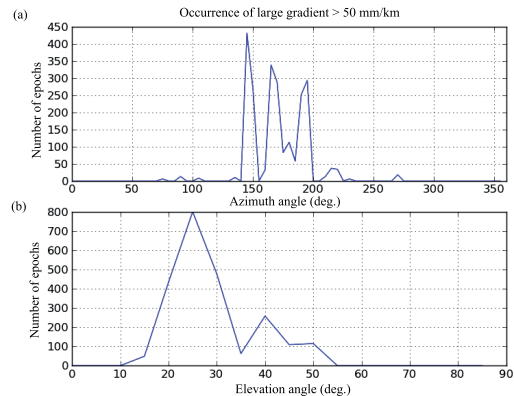


図 5: 図 4 とほぼ同じであるが、電離圏遅延量勾配が 50 mm/km を越えたエポック数を示す。(Saito et al., 2012)

## 5 まとめ

本研究では、SBAS、GBAS 等の誤差要因となる、低緯度電離圏擾乱に伴う電離圏遅延量空間勾配の評価を、石垣島に設置した電離圏遅延量勾配観測システムの観測データと、電子航法研究所で開発した L1 周波数信号のみを用いる電離圏遅延量差導出法 (Fujita et al., 2010) を用いて行った。

2008 年 4 月及び 2010 年 10 月に得られたデータを解析した結果、低太陽活動期にもかかわらずプラズマバブルに伴い 200 mm/km に達する電離圏遅延量勾配が頻繁に観測された。この値は GAST-D 技術標準案 (表 1) で想定する電離圏脅威空間に十分収まるものであるが、解析に用いたデータが低太陽活動期のものであること、信頼性チェックを通過しなかったもの 380 mm/km に達する例もあったことなどを考慮すると、今後太陽活動の活発な期間のデータをさらに収集し、手法の改良も含めて注意深く解析を進めていく必要がある。

プラズマバブルに伴う電離圏遅延量勾配には、明確な衛星の方位角・仰角に対する依存性が見られ、南側の低仰角で大きな電離圏遅延量勾配が発生しやすいことが分かった。この性質は、プラズマバブルの構造を反映しているものと考えられ、GBAS、SBAS 等の磁気低緯度における安全性設計において重要な情報である。

今後、磁気低緯度における衛星航法の安全性設

計の基礎となる電離圏遅延量勾配の情報を蓄積するとともに、現在開発中の GAST-D などの国際標準に対して、日本が位置する磁気低緯度の特性を考慮するように働きかけていく予定である。

## 参考文献

- Fujita, S., T. Yoshihara, and S. Saito, Determination of ionospheric gradients in short baselines by using single frequency measurements, *J. Aero. Astro. Avi.*, A-42, 269–275, 2010.
- ICAO GBAS CAT II/III Development Baseline SARPs, 2010.
- Lee, J., M. Luo, S. Pullen, Y. S. Park, P. Enge, and M. Brenner, Position-domain geometry screening to maximize LAAS availability in the presence of ionosphere anomalies, *Proceedings of ION GNSS 2006*, 2006.
- Saito, S., S. Fujita, and T. Yoshihara, Precise measurements of ionospheric delay gradient at short baselines associated with low latitude ionospheric disturbances, *Proc. ION ITM 2012*, 1445–1450, 2012.
- Teunissen, P. J. G., The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: A method for fast GPS integer ambiguity estimation, *J. Geodesy*, 70, 65–82, 1995.