

1 3.アジア太平洋地域 GBAS 電離圏脅威モデル

航法システム領域 ※齋藤 享, 吉原 貴之, 坂井 丈泰

1 はじめに

国際民間航空機関(ICAO)においては、航空航法を衛星航法 (Global Navigation Satellite System: GNSS)ベースに切り替えていくことを大きな方針としている。

地上型衛星航法補強装置 (Ground-Based Augmentation System: GBAS)は GNSS を用いて航空機の精密着陸進入を実現する、次世代の航法システムの一つである。GBAS は、ディファレンシャル GNSS 技術に基づいた GNSS 補強システムであり、空港周辺に設置した基準局による補強情報を航空機に対して送信し、航空機はその補強情報に基づいて誤差を補正し、正確な位置を得て安全に着陸を行う。

GBAS において補正する誤差にはいくつかの要因が含まれるが、電離圏による遅延効果が最も大きい。この電離圏遅延量が空間的に変動する場合 (これを電離圏勾配と呼ぶ)、ディファレンシャル補正誤差となる。通常はこの誤差は基準局と航空機の距離 1km あたり数 mm 程度(GPS L1 周波数(1.57542GHz)における値)であり、航空機の位置誤差の保守的な見積りである保護レベルに取り込むことによって航空機の安全性を保護する。

しかしながら、電離圏は必ずしも常に静穏な状態にあるわけではなく、様々な電離圏擾乱に伴い電離圏遅延量が通常状態の 10~100 倍程度変動する場合がある。これらを保護レベルで保護しようとする場合、保護レベルが極端に大きくなり、ほぼ全ての時間帯で GBAS が使用不可となってしまう。そのため、電離圏擾乱に伴う電離圏勾配については保護レベルで対応せず、異常状態として検出し、航空機が危険となる状態を排除することにより、安全性を確保する。これを実現するためには、電離圏擾乱に伴う電離圏勾配の特徴を知る必要があり、電離圏勾配の特徴を記述するパラメータの範囲を定義したものを電離圏脅威モデルと呼ぶ。

電離圏の性質は磁気緯度によって大きく異

なり、緯度領域ごとに特徴的な現象が存在する。日本付近では磁気赤道が地理赤道に比べて北に位置しており、磁気緯度としては低緯度に位置する。反対に、米国では磁気赤道が地理赤道の南側に位置しており、地理緯度に対して磁気緯度が高い。欧州では、磁気赤道が地理赤道に比べて北に位置しているが、地理緯度が高いため磁気緯度も中高緯度となる。

これまでに GNSS を用いた航空システムは欧米を中心として開発されてきており、電離圏脅威モデルも主に磁気中緯度を対象として開発されてきている[1-3]。しかし、電離圏の振舞いは磁気緯度によって大きく異なるため、日本を含む磁気低緯度においては、磁気低緯度特有の電離圏の振舞いを考慮した電離圏脅威モデルを構築する必要がある。

磁気低緯度においては、プラズマバブルと呼ばれる電離圏擾乱が存在することが知られている。プラズマバブルは電離圏中の密度の局所的な減少領域であり、東西に 100km 程度、南北には数 1000km の細長い構造を持つ (図 1)。プラズマバブルの東西の境界は非常に急峻であり、大きな電離圏勾配を伴うことが知られている。

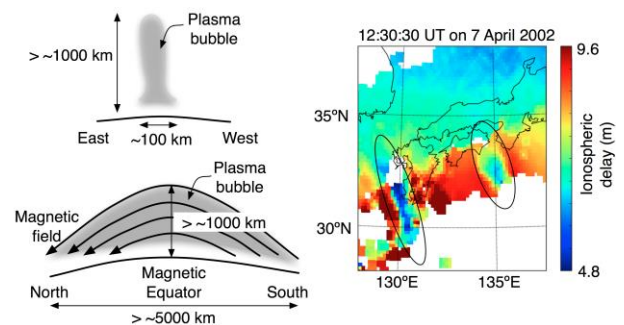


図 1 左：プラズマバブルの断面の模式図。右：日本付近で観測されたプラズマバブルに伴う電離圏遅延量変動 (黒線で囲まれた 2 つの領域)

近年では、プラズマバブルに伴う電離圏勾配の研究が進みつつある[4-7]が、それに先立

ち 2011 年に、アジア太平洋地域に共通で使用可能な GBAS 電離圏脅威モデルの構築を目的として、電離圏データの収集・共有・解析を行う「アジア太平洋地域電離圏問題検討タスクフォース(Ionospheric Studies Task Force: ISTF)」が ICAO アジア太平洋地域の枠組みの元に設立された。当所は、ISTF の設立から活動までを主導的に行ってきた [8]。本研究では、ISTF の設立以来行ってきた活動の結果として策定されたアジア太平洋地域共通の GBAS 電離圏脅威モデルについて述べる。

2 アジア太平洋地域電離圏問題検討タスクフォース (Ionospheric Studies Task Force: ISTF)

ISTF は、2011 年の CAO アジア太平洋航空航法計画実施地域グループ(APANPIRG)通信・航法・監視及び気象サブグループ(CNS/MET SG)会議 (現在は通信・航法・監視サブグループ(CNS SG)) の元で活動を行ってきた。

ISTF においては、データ収集及び解析を、貢献の意思のある各国の研究者・技術者によって行っており、当所は設立以来 ISTF の活動を主導してきた。ISTF は 2016 年 9 月の APANPIRG 会議に対する最終報告をもって活動を終了した。

3 解析手法

ISTF の解析においては、電離圏勾配の解析のために 2 種類の解析手法を採用した。一つは米国 FAA 及び韓国 KAIST によって開発された LTIAM (Long-term ionosphere anomaly monitoring)法[9]であり、もう一つは当所において開発された SF-CBCA (Single-frequency carrier-based and code-aided)法[10,11]である。

LTIAM 法は、2 つの観測点における 2 周波を用いた電離圏遅延量の差から電離圏勾配を自動的に導出するものである。大量データを解析するために適しており、大きな電離圏勾配の候補を検出し、その後手動で妥当性を検証する。電離圏遅延量の導出における周波数間バイアス (IFB)の影響から、比較的長い観測点間隔に適している。

SF-CBCA 法は、2 つの観測点における電離

圏遅延量の「差」を導出するものであり、精密な観測点の位置情報が必要とされる一方、1 周波の情報のみを用いるため IFB の影響がないこと、電離圏擾乱時のサイクルスリップなどの影響を受けにくいなどの利点を持つ。SF-CBCA 法は比較的短い観測点間隔 (20km 程度まで) に適している。

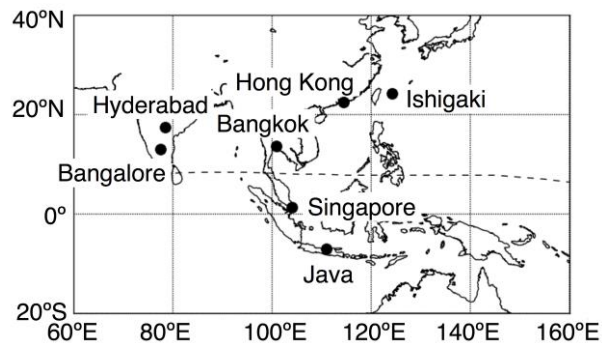


図 2 本研究で用いたデータが取得された場所。

4 データ

図 2 に本研究で用いたデータが取得された場所を示す。表 1 に、それぞれの場所においてデータが取得された期間、解析に用いた手法、及び観測点間隔を示す。

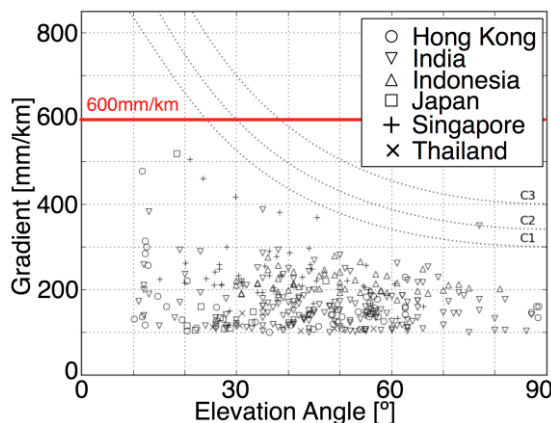


図 3 得られた 100mm/km 以上の電離圏勾配と衛星仰角の関係。

5 結果・考察

図 3 に、表 1 に示すデータを用いて解析した結果得られた 100mm/km 以上の電離圏勾配データを、その勾配が観測された衛星の仰角に対して示す。解析の詳細については別論文[12]を参照されたい。

全体的に勾配は仰角が高いほど小さく、仰角が低いほど大きい傾向が見て取れる。これらの中で最大の電離圏勾配は、日本の石垣において観測された 518mm/km ものものであった。これは、米国本土(CONUS)の GBAS 電離圏脅威モデル、ICAO におけるカテゴリーIII GBAS の技術標準の検証に用いられた電離圏脅威モデルの範囲を超えている。図中の点線は、垂直遅延量 300, 341, 及び 400mm/km に対して、電離圏を高度 350km に存在する薄い層と仮定した場合の垂直遅延量から斜め遅延量への換算係数を乗じたものを示している。傾斜係数は以下の式で与えられる。

$$S(El) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_e \cos El}{R_e + 350}\right)^2}}$$

ここで、 R_e は地球半径(6378.14km)、 El は仰角である。これを見ると、電離圏勾配は仰角に対して概ね傾斜係数で変化するものであることがわかる。これは、プラズマバブルが通常の電離圏に空いた空隙であることを考えると、電離圏勾配が仰角に対して傾斜係数の関数の形をとることは合理的である。

しかしながら、仰角 77 度において 1 点だけ 349mm/km の電離圏勾配がインド(Hydelabad)において観測されている。極めて高い安全性が要求される航空航法において、最悪ケースを全て保護するという考え方によれば、1 点であっても想定範囲を超えるデータを見逃すことはできない。このデータを一定の余裕を持って保護するためには、傾斜係数の関数とする場合、図 3 中の C3 の曲線のように、中低仰角において観測されたデータに対して極めて大きな電離圏勾配の上限値を与えることになり、保守的すぎると思われる。一方、観測データ数自体が限られており、また傾斜係数以外に適当な物理的根拠を持つ関数が現状では考えにくいことから、ここでは全ての観測データを保護することができるものとして、仰角によらず 600mm/km を上限値として採用することとした。

この上限値は、図 3 から分かるように高仰角については比較的保守的に設定されており、より多くのデータ解析を行うことで、合理的に

保守性を削減することができる可能性がある。電離圏脅威モデルは最新のデータによる定期的な見直しを行っていくことが重要であり、その中で保守性の削減を含む電離圏脅威モデルの範囲の検討(範囲の減少、拡大のどちらの可能性もあるが)が行われるべきである。

今回の検討では、GBAS において最も影響が大きい電離圏勾配の大きさのみについて解析を行ってきた。今後は、加えて電離圏勾配の空間的な幅、向き、移動速度などのパラメータについても解析を進めていく必要がある。

表 1 解析に用いたデータが取得された場所、期間、解析手法、及び観測点間隔

場所	期間	解析手法	観測点間隔(km)
Hong Kong	2000 年 10 月-2013 年 9 月	LTIAM	4.8-21
Hyderabad, India	2004-2015 年	LTIAM	9.3
Bangalore, India	2004-2015 年	LTIAM	6-20
Java, Indonesia	2013-2015 年	LTIAM	15-84
Ishigaki, Japan	2008 年 3-4 月 2010 年 9-10 月	SF-CBCA	1.4
Singapore	2011 年 9-11 月 2012 年 3-4 月 2012 年 9-10 月 2013 年 3-5 月 2013 年 9-11 月 2014 年 2-4 月 2014 年 9-10 月 2016 年 3-6 月 2008 年 3-4 月	LTIAM	2.3-33
Bangkok, Thailand	2011 年 9-10 月	SF-CBCA	12

6 まとめ

ICAO アジア太平洋地域では、ISTF において GNSS 利用推進のため、電離圏データ収集・解析を行ってきた。その一つとしてアジア太平洋

地域共通の GBAS 電離圏脅威モデルを構築した。

データ解析の結果、ICAO アジア太平洋地域共通の GBAS 電離圏脅威モデルとして、電離圏勾配の上限値を衛星仰角によらず 600mm/km とすることとした。

このモデルは、高仰角で比較的保守的に設定されており、今後の定期的なモデルの見直しの中で上限値の縮小を含めて議論することが重要である。また、電離圏勾配の大きさ以外のパラメータについても解析検討を進める必要がある。

謝辞

本研究は、ICAO アジア太平洋地域における ISTF の枠組みを通して行われた。データ提供を行った各国及び各国の観測機関、及び解析に参加した各国の専門家に深く感謝する。

参考文献

- [1] Pullen, S., Y. S. Park, and P. Enge (2009), Impact and mitigation of ionospheric anomalies on ground-based augmentation of GNSS, *Radio Sci.*, 44, RS0A21, doi:10.1029/2008RS004084.
- [2] Terkildsen M. (2010) GBAS Ionospheric Threat Model Evaluation: Mid-latitude Australian Region. IPS-CR-09-01-P.
- [3] Schlüter S., Prieto-Cerdeira R., Orus-Peres R., Lam J. P., Juan M., Sanz J., and Hernández-Pajares M. (2013) Characterization and Modeling of the Ionosphere for EGNOS Development and Qualification. Paper presented at European Navigation Conference, Vienna, Austria, 23-25.
- [4] Saito S., Fujita S. and Yoshihara T. (2012a) Precise measurements of ionospheric delay gradient at short baselines associated with low latitude ionospheric disturbances. Proc. ION International Technical Meeting 2012, Institute of Navigation, Newport Beach, California, January 30-February 1, 1145-1150.
- [5] Rungraengwajjake, S. Supnithi, P., Saito, S. Siansawasdi, N., and Saekow, A. (2015), Ionospheric delay gradient monitoring for GBAS by GPS stations near Suvarnabhumi airport, Thailand, *Radio Sci.*, 50, 1076-1085, doi:10.1002/2015RS005738.
- [6] Lee J., Yoon M., Pullen S., Gillespie J., Mather M., Cole R., Rodrigues de Souza J., Doherty P. and Pradipta R. (2015) Preliminary Results from Ionospheric Threat Model Development to Support GBAS Operations in the Brazilian Region. Proc. ION GNSS+ 2015, Institute of Navigation, Tampa, Florida, September 14-18, 1500-1506.
- [7] Sánchez-Naranjo, S., Rincón, W., Ramos-Pollán, R., González, F.A., and Soley S. (2017), A comprehensive assessment of ionospheric gradients observed in Ecuador during 2013 and 2014 for ground based augmentation systems, *Adv. Space Res.*, 59, 1992-2006.
- [8] 齋藤他, アジア太平洋域衛星航法電離圏脅威モデルの構築, 電子航法研究所研究発表会, 2016年6月.
- [9] Jung S., and Lee J., (2012) Long-term ionospheric anomaly monitoring for ground based augmentation systems. *Radio Sci.*, 47, RS4006.
- [10] Fujita S., Yoshihara T., and Saito S. (2010) Determination of ionospheric gradients in short baselines by using single frequency measurements. *J. Aero. Astro. Avi.*, A-42(4):269-275.
- [11] Saito S., Yoshihara T., and Fujita S. (2012b) Absolute gradient monitoring for GAST-D with a single-frequency carrier-phase based and code-aided technique. Proc. ION GNSS 2012, Institute of Navigation, Nashville, Tennessee, USA, September 17-21, 3055-3065.
- [12] Saito, S., Sunda, S. Lee, J., Pullen, S., Supriadi, S., Yoshihara, T., Terkildsen, M., Lecat, F., and ICAO APANPIRG Ionospheric Studies Task Force (2017), Ionospheric delay gradient model for GBAS in the Asia-Pacific region, Submitted to GPS Solutions.