

東南アジアにおける GBAS 導入のための電離圏環境評価

航法システム領域 ※齋藤 享, 吉原 貴之
拓殖大学 中村 真帆

1 まえがき

GBAS (Ground-Based Augmentation System) GBAS とは, ICAO (International Civil Aviation Organization) で国際標準として規格化されている, GPS 等の測位衛星を利用した航空機の進入着陸システムであり [1], 現行の ILS (Instrument Landing System) の後継となる次世代の進入着陸システムと位置付けられ, 世界各国で導入が進められている。

GBAS の運用においては, 電離圏の空間・時間変動に伴う誤差にかかる安全性の確保が重要な課題であり, 電離圏変動に関わるパラメータ (これを電離圏脅威モデルという) を設置場所に合わせて決定する必要がある [2]。

アジア太平洋地域の磁気低緯度地域の電離圏脅威モデルは欧米等の磁気中緯度地域よりも厳しいことが分かってきており [3], 磁気低緯度地域における GBAS の運用のためには, 設置場所における電離圏脅威モデルが既存の電離圏脅威モデルに包含されるかどうかを調査する必要がある。

2 GBAS における電離圏脅威対策

GBAS では, 多くの場合を占める電離圏が静穏である場合と, 静穏時に比べて空間変動が 10~100 倍変動する擾乱時とを分けて取り扱う。そのため, 静穏時の電離圏空間変動を表す電離圏静穏時の電離圏勾配パラメータ (σ_{vig}) と, 擾乱時の電離圏空間変動を表す電離圏脅威モデルの二つを, GBAS が設置される場所の環境に合わせて決定する必要がある。

電離圏勾配は無限に長い波面を持つ前線状の構造として近似できるので, 電離圏脅威モデルは図 1 に示すように 4 つのパラメータ (電離圏勾配のスロープ, 電離圏勾配の移動速度, 電離圏勾配の幅, および電離圏勾配による最大遅延量) で表されるので, 観測に基づいてこれらを決定する。

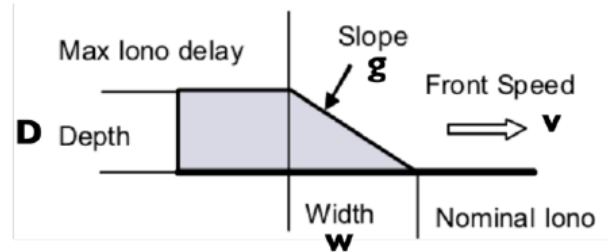


図 1. 前線状の電離圏勾配とそのパラメータ

3 観測環境の構築

ICAO アジア太平洋地域共通 GBAS 電離圏脅威モデルは, アジア太平洋地域の磁気低緯度地域の各国のデータを元に作成されており, 全域で一律の値を採用している。しかし, 磁気低緯度地域内においても電離圏環境は必ずしも一様ではなく, 磁気赤道を挟んで南北に赤道異常帯が存在し, 異常勾配の原因となる電離圏現象は同一 (プラズマバブル) であったとしても電離圏勾配の特性には地域内変動があることが予想できる (図 2)。地域内変動を考慮した電離圏脅威モデルを構築することにより, GBAS が設置される場所の環境に最適化し, GBAS の性能を最大限引き出すことができる。

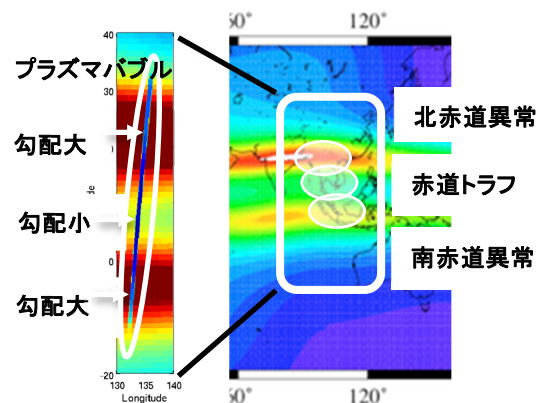


図 2. 磁気低緯度内の電離圏変動

3.1 観測場所の選定

本研究では, 北赤道異常帯に位置するベトナム (研究協力先: ベトナム科学技術アカデミー

地球物理研究所), 南赤道異常帯に位置するインドネシア(研究協力先: インドネシア研究革新庁)の2ヶ所を選定した。このほか, 赤道トラフ帯に位置するタイでは, 別途日本との協力により GBAS のための電離圏環境調査が行われており, 合わせて磁気低緯度地域内の異なる3地域の電離圏環境を調べることができる。

3.2 観測ネットワークの構築

観測ネットワークは最低3式の観測装置からなり, それぞれGPSを含む航法衛星システムの2周波以上の信号を観測可能なGNSS受信機と空中線の組である。これらを10km程度の間隔で, 一直線上に並ばず, 正三角形に近い配置になるように設置する。

3.2.1 ベトナム

ベトナムにおいては, 北赤道異常帯に近く, ベトナム科学アカデミー地球物理研究所があるハノイ周辺に観測ネットワークを構築した(図3)。ベトナム・ハノイでは, 2019年1月から観測を継続している。



図3. ベトナム・ハノイの観測装置配置

3.2.2 インドネシア

インドネシアにおいては, 南赤道異常帯に近く, インドネシア研究革新庁の旧インドネシア航空宇宙庁が存在するバンドン市周辺に観測ネットワークを構築した(図4)。インドネシア・バンドンにおいては, 2022年5月から観測を継続している。

4 解析方法

解析は, 図5に示す手順で行う。まず, 全データについて, 電離圏変動指標を導出し, 電離圏擾乱発生日を検出する。電離圏擾乱発生日

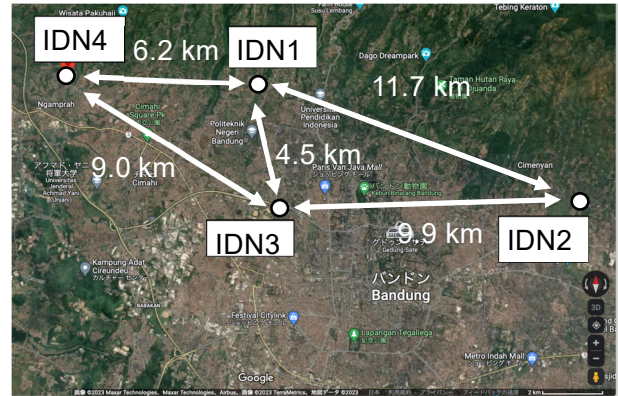


図4. インドネシア・バンドン観測装置配置

については, さらに電離圏現象タイプの同定を行い, プラズマバブルに伴う電離圏擾乱を検出し, 電離圏勾配パラメータを導出する。一方で, 電離圏静穏日のデータを用いて, 電離圏静穏時パラメータ(σ_{vig})を導出する。個々の手順については別途示す。

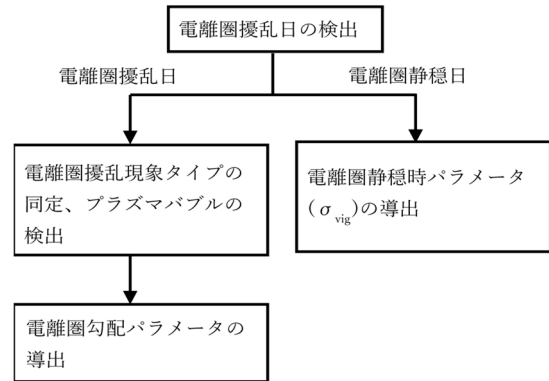


図5. 解析の流れ

4.1 電離圏擾乱発生日の検出

電離圏擾乱発生日を検出するために, 電離圏変動指標として”Along-Arc TEC Rate (AATR)” [4]を用いた。AATRが観測ネットワーク内全ての観測点において上昇している時を電離圏擾乱の発生として検出する。反対に, 特定の観測点のみにおいてAATRが上昇する場合は, 観測点周辺の環境に起因するものと考えられるため, 電離圏擾乱の発生とは捉えない。

4.2 電離圏擾乱時

電離圏勾配の導出においては, まず2受信機間の電離圏遅延量差を推定するために, 電子航法研究所で開発された”Single-frequency

carrier-based and code-aided (SF-CBCA)”法 [5] を用いる。さらに、3 受信機による 3 組の受信機ペアを用いて電離圏遅延量差を推定し、観測の冗長性を用いた推定値の検証(巡回和検査)を行う [6]。検証された電離圏遅延量差推定値を用い、電離圏勾配ベクトル(方向、傾きの大きさ)を求める [7]。求められた電離圏勾配ベクトルを用い、電離圏静穏時、擾乱時それぞれについて、GBAS において用いられる電離圏パラメータを決定する。

4.3 電離圏擾乱時

電離圏静穏時に適用される電離圏パラメータは、垂直方向換算の電離圏勾配標準偏差 (σ_{vig}) である [1]。 σ_{vig} は、電離圏勾配の発生頻度分布の裾において、ガウス分布を仮定して 10^{-7} 程度以下の発生頻度をカバーするように、観測された垂直方向換算の電離圏勾配の標準偏差を保守的に大きくしたものと設定する。具体的には、電離圏勾配の発生頻度の累積確率密度分布関数(CDF)を観測値から生成し、ガウス分布から導かれる CDF が 10^{-7} 以上の発生確率を包含するように、観測された電離圏勾配標準偏差に係数をかけて σ_{vig} を決定する [8]。標本数が 10^{-7} の確率を再現するために不十分な場合は、CDF の裾全体を包含するように σ_{vig} を決定する。

4.4 電離圏静穏時

図 1 に示す電離圏勾配を特徴付けるパラメータを決定するために、まず電離圏勾配の傾きの大きさ(g)を SF-CBCA 法を用いて推定された 2 次元電離圏勾配ベクトルの大きさとする。次に、各受信機の 2 周波観測を用いて導出した電離圏遅延量変動の相関を利用して速度(v)を推定する。さらに、推定された v と各受信機において電離圏遅延量が大きく変動する区間を用いて幅(w)と変動の総量(D)を求める。

5 結果

5.1 静穏時電離圏パラメータ(σ_{vig})

図 6 は、ベトナム・ハノイにおいて 2022 年 3 月 12 日～2023 年 2 月 6 日のうち、明らかに電離圏異常ではなく受信環境等に起因すると考えられる異常データを含む日を排除した 128 日の

データから導出した、静穏時電離圏勾配の発生頻度の累積頻度分布(CDF)である。観測された電離圏勾配の傾きの大きさの標準偏差は 1.63 mm/km であった。観測された CDF の裾をすべて包含するためには、観測された標準偏差を 2.3 倍する必要がある、このことから σ_{vig} は 3.75 mm/km と決定された。 σ_{vig} の値は、2019 年以降年々増加傾向にあり、太陽活動の上昇を反映しているものと考えられる。

インドネシア・バンドンでは、2022 年 5 月 26 日～2022 年 12 月 30 日のうち、電離圏静穏時と判定された 105 日のデータを σ_{vig} の導出に用いた。図 6 と同様の手法により、 σ_{vig} は 4.58 mm/km と決定された。

今回得られた σ_{vig} は、インドネシア・バンドンの方がわずかに大きいものであった。これが南北半球間の何らかの違いを反映する有為なものであるかどうかを判断するためには、今後のデータの蓄積と解析が必要である。

5.2 電離圏擾乱時の電離圏パラメータ

ベトナム・ハノイにおいては、2022 年 3 月 12 日～2023 年 2 月 6 日のうち 89 日においてプラズマバブルに伴う電離圏擾乱が検出された。2019 年には年間数例しか検出されなかったが、太陽活動の上昇に伴い発生頻度が急激に上昇していることがわかる。電離圏勾配のスロープ(g)については 200 mm/km を超える電離圏勾配が多数検出され、最大値は 300 mm/km に迫るものであった。これらは、ICAO アジア太平洋地域モデルの最大値(600 mm/km)に十分包含されているが、年々最大値が増加してきており、引き続き太陽活動極大期に向けてデータ収集と解析を行っていく必要がある。その他のパラメータについては、幅(D)について ICAO APAC 共通 GBAS 共通電離圏脅威モデルおよび GAST-D 検証用電離圏脅威モデルによって規定されている値の下限値(25 km)を下回るものが検出されており、下限値を引き下げる必要が示された。

インドネシア・バンドンにおいては、2022 年 5 月 26 日～2022 年 12 月 30 日のうち 53 日についてプラズマバブルに伴う電離圏擾乱が検出された。インドネシアにおいても、スロープ(g)について最大値は 250 mm/km を超えるもの

であった。これは反対半球のベトナムの値と同様であると言ってよい。

その他のパラメータ等、詳細な結果については、本研究の報告書[8]に詳しくまとめられている。

6 まとめ

これまでの活動により、ベトナム、インドネシアにおいて連続的に電離圏勾配データを収集する観測網を構築することができた。いずれもデータ収集と解析を現地研究者と共同で実施されており、現地研究機関における技術力の養成も進んでいる。

ベトナムにおいては、2018年に最初の電離圏勾配観測を開始して以来、現地研究機関との協力により連続してデータ収集が行われてきており、太陽活動周期(約11年)の半分程度に達するデータが収集できてきている。解析も随時行われており、近い将来のGBAS導入に対応した電離圏環境評価体制が整ってきている。

インドネシアにおいては、太陽活動が上昇してきている本年度から連続的にデータ収集と解析を始めることができた。

この成果をもとに、引き続き磁気低緯度地域における電離圏環境調査を効果的に行い、磁気低緯度地域におけるGBAS導入に貢献していきたい。

謝辞

本研究は、総務省による「周波数の国際協調利用促進に資する磁気低緯度地域における電離圏環境調査に関する請負」(2020~2022年度)として実施された。

参考文献

[1] Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Volume I, Radio Navigation

Aids, Seventh Edition, July 2018.

- [2] International Civil Aviation Organization Asia and Pacific Office, GBAS safety assessment guidance related to anomalous ionospheric conditions, Edition 1.0, September 2016.
- [3] International Civil Aviation Organization Asia and Pacific Office, GBAS ionospheric threat model for APAC region, 31 January 2017.
- [4] J. Sanz, J. M. Juan, G. González-Casado, R. Prieto-Cerdeira, S. Schlüter and R. Orús, Novel Ionospheric Activity Indicator Specifically Tailored for GNSS Users, in Proceedings of the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014), pp. 1173–1182, 2014.
- [5] S. Fujita, 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.
- [6] S. Saito, T. Yoshihara, and S. Fujita, Absolute gradient monitoring for GAST-D with a single-frequency carrier-phase based and code-aided technique, in Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012), pp. 2184–2190, 2012.
- [7] S. Saito and T. Yoshihara, Evaluation of extreme ionospheric total electron content gradient associated with plasma bubbles for GNSS Ground-Based Augmentation System, Radio Sci., 52, 951-962, doi:10.1002/2017RS006291, 2017.
- [8] 周波数の国際協調利用促進に資する磁気低緯度地域における電離圏環境調査に関する請負報告書, 2023年3月