3. アジア太平洋域衛星航法電離圏脅威モデルの構築

航法システム領域　※齋藤　享，吉原　貴之、坂井　丈泰、星野尾　一明

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。GNSS を航空航法に用いるにあたっては、電離圏の影響を回避することが大きな課題である。

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。図 1 に示すように、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。

日本が属する磁気低緯度地域の電離圏においては、二つの特徴的な現象が見られる。一つは、赤道異常と呼ばれる磁気緯度 ±15° 付近に存在する電離圏電子密度の極大である (図 1)。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。このような電離圏勾配は、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 において誤差を生む要因である。

また、プラズマバブルの内部には様々な空間スケールのプラズマ不規則構造が存在しており、GNSS 信号の位相や強度が不規則に変動するシンチレーションと呼ばれる現象を引き起こす。シンチレーションは GNSS の測距精度を悪化させ、シンチレーションが強い場合には GNSS 衛星信号の追尾外れ（ロックオフ）に至り、使用可能な衛星数を減少させ、測位精度を悪化させる原因となる。

日本を含む磁気低緯度地域において GNSS の航空利用を推進するためには、低磁気緯度電離圏変動の特徴を詳しく調べ、それを適切に反映したモデル（脅威モデル）に基づいた安全なシステムを構築する必要がある。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が、日本を含む多くの国々が磁気低緯度に位置するアジア太平洋地域において GNSS の航空利用が進められようとしている今日、磁気低緯度地域において適用可能な電離圏脅威モデルを構築することは大変重要である。

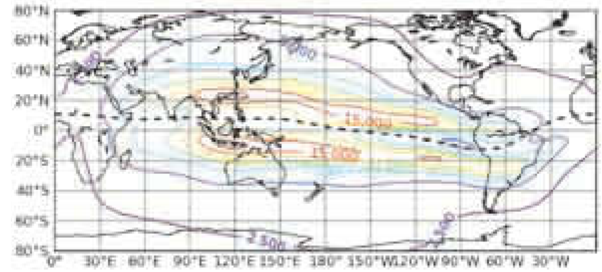

図 1: NeQuick モデル (Giovannni and Radicella, 1990; Radicella and Zhang, 1995) による電離圏垂直遅延量分布例（高太陽活動期、春季、日本時間 12 時）。破線は磁気赤道を表す。

2　電離圏脅威モデル

電離圏脅威モデルとは、あるシステムにおいて問題となりうる電離圏の振舞いについて、特徴的なパラメータを抽出しその考慮すべき変動の範囲を定量化したもの、ということができる。システムごとに補強方法が異なるため、電離圏の影響の現れ方は異なる。従って、脅威となりうる電離圏

の振舞いとそれを特徴づけるパラメータも異なり、電離圏脅威モデルもシステムごとに定義される必要がある。

広域補強を行う SBAS においては、電離圏の遅延量を地上監視局の観測に基づいてフィッティングを行い、緯度経度 5°×5° ごとの格子点の電離圏遅延量を推定する。このとき、フィッティングによって推定された電離圏遅延量と現実に存在する電離圏遅延量の差が誤差要因となる。日本の SBAS である MSAS においては、この差を生じさせるパラメータとして、地上監視局によって観測されている電離圏の位置（衛星-監視局間の視線が電離圏のある高度を横切る点, Ionosphere Pierce Point: IPP）の分布の格子点を中心とした偏りと、推定に用いる IPP と格子点との最大距離を採用し、これらのパラメータに対して補正誤差がどれほどになりうるかを過去のデータに基づいてモデル化する。図 2 は日本の MSAS について構築された脅威モデルである (Sakai et al., 2008)。

空港周辺に限られた狭域補強を行う GBAS においては、脅威モデルの形は全く異なる。GBAS においては、各 GNSS 衛星ごとに地上基準局で測定した測距誤差を用いて補正を行うため、地上基準局と航空機の距離に対する電離圏遅延量変動、すなわち電離圏空間勾配が問題となる。この空間勾配がどれほどの大きさ（急峻さ）を持つかが最も大きな問題となる。加えてこのような空間変動の最大変動（深さ）がどれほどか、さらにどれほどの速度で移動するかという点も重要なパラメータである。図 3 は、カテゴリー III 着陸に対応した GBAS (GAST-D) 標準案において用いられる電離圏脅威モデルの模式図であり、それぞれのパラメータについて表 1 のように範囲が定められている。

電離圏シンチレーションについては、測位精度の低下につながるものの、安全性の脅威にはなりにくい。しかしながら、実用システムとして重要な可用性を検討する上で重要であり、その発生頻度のモデル化が必要である。全地球的な規模においてはある程度の研究がなされており、発生頻度の予測モデルも存在する (Secan et al., 1995)。しかしながら、これらのモデルの精度は粗く、地域的な非一様性があるとされるシンチレーションの発生頻度を表すためには十分とはいえない。

本研究の目的は、太陽活動極大期における磁気低緯度の観測データをできるだけ多く収集・解析し、磁気低緯度地域の電離圏変動の特徴を適切に反映した電離圏脅威モデルを構築することである。

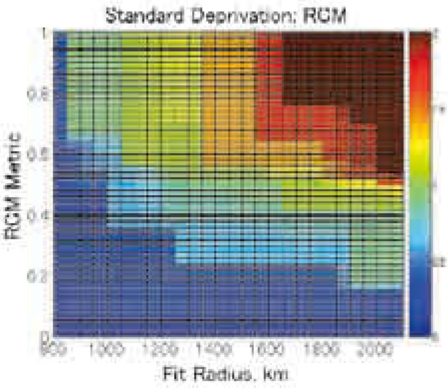

図 2: MSAS における電離圏脅威モデル。推定に用いる IPP と格子点の最大距離（横軸）と格子点周りの IPP の分布の偏りを示すパラメータ（縦軸）に対する最大電離圏遅延量（垂直換算）誤差が色で示されている。

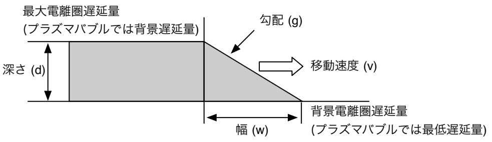

図 3: GAST-D 標準案で用いられる電離圏脅威モデル。

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
最大変動（深さ） (d)	50 m
空間スケール（幅） (w)	25–200 km

3 アジア太平洋地域における電離圏データ収集・解析・共有

電離圏脅威モデルの構築にあたり、電離圏変動の想定範囲を広く取れば安全性を高めることができる。しかし、脅威モデルを保守的にすればシステムの可用性が損なわれかねない。システムを安全かつ実用に耐えるものとするためには、脅威モデルの最適化が重要である。電離圏脅威モデルを適切に構築するためにはできる限り多くのデータを収集し解析することが必要であるが、磁気低緯度電離圏変動が頻繁に発生する日本の南部は比較的小さな島からなるという地理的な制約から収集できるデータ量には限りがある。そこで、アジア太平洋地域諸国の諸機関と協力し、国内外の観測データの収集・解析を行い、磁気低緯度地域に適した電離圏脅威モデルの構築を行うこととした。

3.1 電子航法研究所の観測活動

電子航法研究所の国内での観測活動は、石垣島 (北緯 24.3°、東経 124.2°、磁気緯度 19.4°) 設置した電離圏稠密観測システムを中心としている。石垣島には間隔約 80–1600 m で 5ヶ所に GNSS アンテナを設置し、電離圏遅延量とシンチレーションの観測を行っている。石垣島における観測データは、電子航法研究所で開発された高精度電離圏勾配導出法 (Fujita et al., 2010) によって解析が進められている。この解析により、これまでに 500 mm/km を超えるような極めて大きな電離圏勾配の存在が明らかとなっており (Saito et al., 2012)、GBAS に与える影響についての評価が行われているところである。石垣島の西方約 100 km の与那国島には、プラズマバブルの 2 次元撮像が可能な大気光全天イメージャが設置されており、石垣島で観測される電離圏変動とプラズマバブルの詳しい対応関係を調べることができる。これに加え、国土地理院の GEONET のうち 200 観測点のデータの 1 秒値を収集し、日本全土の電離圏変動を観測している。

国外においては、タイ及びインドネシアにおいて、基線長約 10 km 程度の短基線電離圏勾配観測を行っている。タイにおいては、モンクット王工科大学ラカバンと共同でバンコク国際空港周辺に GNSS 受信機を配置し、2011 年以来電離圏勾配観測を行っている。データ解析についても共同で行い、解析が進みつつあるところである (Rungraengwajiake et al., 2013; Supnithi et al., 2013)。インドネシアにおいては、京都大学がインドネシア航空宇宙庁と協力して設置運用する赤道大気レーダー周辺に、名古屋大学と協力して京都大学赤道大気レーダー共同利用課題として GPS 受信機を 3 台配置し、2012 年 10 月より短基線電離圏勾配観測を開始したところである。赤道大気レーダーによるプラズマバブル観測及び同観測所内において稼働中の他の電離圏観測機器との同時観測により、電離圏勾配とプラズマバブルの詳しい対応関係を調べる予定である。

3.2 ICAO を通した国際活動

さらなる電離圏データ収集・解析を進め、磁気低緯度地域に適した電離圏脅威モデルを構築するために、電子航法研究所では ICAO を通じた国際協調による、アジア太平洋地域における電離圏データ収集・共有・解析活動を主導的に行っている。2011 年には、アジア太平洋地域における航空航法への GNSS 導入促進に資するため、日本の主導により ICAO 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・監視サブグループ (CNS SG) の下に電離圏問題検討タスクフォース (Ionospheric Studies Task Force: ISTF) が設立された。ISTF の最終目的は、多くが磁気低緯度地域に属するアジア太平洋地域内で協調して電離圏データの収集・共有・解析を進め、既存の SBAS、GBAS 電離圏脅威モデルの磁気低緯度電離圏への適合性を評価し、必要とされれば地域内共通の電離圏脅威モデルを構築することである。

これまでに、2012 年 2 月（東京)、2012 年 10 月（バンコク）の 2 回の会議が開催されている。第 1 回会議では、活動の大きな軸となる 5 つの具体的な課題 (Task) が策定され、それぞれの課題の責任者の主導のもと活動が行われている。5 つの課題は以下のとおりである。

1. 観測データの収集・管理
2. ISTF におけるデータ解析手法の確立
3. 確立された手法による電離圏遅延量勾配解析
4. 確立された手法によるシンチレーション解析

5. 既存の電離圏脅威モデルの適合性評価と域内共通の電離圏脅威モデル (SBAS 及び GBAS それぞれ) の構築

電子航法研究所では、課題 1 及び 5 の責任者を担当する。

これまでに、データ収集・共有のための枠組み作り、データ源のリストアップ、共有用の共通データフォーマットの策定などが行われた。データ源のリストアップにおいては、電離圏遅延量観測点として 542 点、シンチレーション観測点として 37 点のデータが各国から ISTF の活動に提供されることとなっている。データサーバは電子航法研究所に設置され、これに各国の観測データと ISTF による解析結果が蓄積されることとなる。解析はまもなく本格的に開始される見込みである。

4 まとめ

電子航法研究所では、日本を含む磁気低緯度地域における GNSS の航空航法への導入を推進するために必要となる、電離圏変動の特性を定量的にパラメータ化し想定範囲を規定する電離圏脅威モデルの構築のための研究活動を行っている。

電子航法研究所が自ら行う電離圏観測・解析活動として、石垣島を中心とした電離圏勾配・シンチレーション観測と、国内外の研究機関と協力したタイ及びインドネシアにおける電離圏勾配観測を行っている。石垣島における観測データに対して電子航法研究所で開発した精密電離圏勾配導出法を適用した結果では、既存の GBAS 電離圏脅威モデルの範囲を超える可能性のあるデータが得られており、更なる解析を進めているところである。

電離圏データ収集・解析をより効率的に進めるため、ICAO を通じた国際協調による、アジア太平洋地域における電離圏データ収集・共有・解析活動を主導的に行っている。2011 年より活動を開始した電離圏問題検討タスクフォース (ISTF) においては、共通の電離圏環境にある国々の電離圏観測データを集約してアジア太平洋地域共通の SBAS、GBAS 電離圏脅威モデルの構築に向けた活動を行っている。

電子航法研究所では、これらの活動において今後も中心的な役割を果たし、アジア太平洋地域、更には全世界での GNSS の航空航法導入促進に資する研究を行っていく方針である。

参考文献

Di Giovanni, G. and S. R. Radicella, An analytical model of the electron density profile in the ionosphere, Adv. Space Res., 10, 27–30, 1990.

Radicella, S. M. and M. L. Zhang, The improved DGR analytical model of electron density height profile and total electron content in the ionosphere, Annali di Geofisica, 38, 35-41, 1995.

Sakai, T., K. Matsunaga, and K. Hoshinoo, Modeling ionospheric spatial threat based on dense observation datasets for MSAS, Proc.ION GNSS 2008, 2008.

ICAO GBAS CAT II/III Development Baseline SARPs, 2010.

Secan, J. A., R. M. Bussey, E. J. Fremouw, and Sa. Basu, An Improved Model of Equatorial Scintillation, Radio Science, 30, 607–617, 1995.

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.

Saito, S., S. Fujita, and T. Yoshihara, Absolute gradient monitoring for GAST-D with a single-frequency carrier-phase based and code- aided technique, Proc. ION GNSS 2012, 2184–2190, 2012.

Rungraengwajiake, S., P. Supnithi, S. Saito, N. Siansawasdi, and A. Saekow, Analytical results of ionospheric delay gradient based on GPS monitoring stations near Suvarnabhumi airport in Thailand, ENRI International Workshop on ATM/CNS, Tokyo, Japan, 2013.

Supnithi, P., S. Rungraengwajiake, S. Saito, N. Siansawasdi, and A. Saekow, Statistical characteristic of background ionospheric total electron content (TEC) in Bangkok, Thailand, ENRI International Workshop on ATM/CNS, Tokyo, Japan, 2013.