

## 5. GBAS プロトタイプ開発の概要と電離圏モニタ方式

通信・航法・監視領域 ※吉原貴之，齋藤享，藤田征吾，工藤正博，  
福島荘之介，齋藤真二，藤井直樹，星野尾一明

### 1. はじめに

GNSS は航空機の全ての運航フェーズをサポート可能な航法システムとして期待されているが高い安全性が要求されるため，国際民間航空機関（ICAO）は国際標準および勧告方式（SARPs）として，その性能要件を精度，完全性（インテグリティ），継続性（コンティニュイティ）および有効性（アベイラビリティ）として規定している。現在のところ，GPS 単独利用ではこれら要件を満たすことが困難なため，補強システムが必要である。GBAS（Ground-Based Augmentation System）は，1 周波ディファレンシャル GPS 測位方式を基礎とした着陸誘導を行う地上型補強型システムであり，将来は CAT-III までの精密進入のサポートが期待されている。なお，GBAS CAT-I の SARPs は 2001 年に発効しており，CAT-III についても現在，SARPs 案の策定が行われている。

電子航法研究所ではこれまで，日本に GBAS を導入する際の課題の抽出と検証のために GBAS の研究開発を実施し，ICAO における国際標準案の策定にも参加してきた。具体的には，VHF データ送受信装置の開発を経て平成 13 年度に GBAS テストベッドを製作し，仙台空港へ設置した。その後，飛行実験の実施および長期基礎データの取得による航法精度の評価とともに，完全性要件に関わる衛星故障や電離圏異常などのリスク解析と衛星 RF 回路故障の検出のための信号品質モニタ（Signal Quality Monitor; SQM）など主要なモニタ方式の開発を行っている。なお，電離圏に関しては，米国で磁気嵐に伴う電離圏擾乱がもたらす電離圏遅延の局所的な空間勾配が主要なリスクとして認識されているが，電離圏遅延の原因となる電子密度分布の様子や電離圏擾乱は磁気緯度により異なることが知られており，日本の環境で電離圏リスクを特定し，それに対応した安全性設計を実施することが重要である。

GBAS には高い安全性が要求されるため，その安全性評価はシステム設計を行いながら検証するプロセスが必要となる。平成 20 年度からはこれまでの知見をもとに，CAT-I 性能要件を満足する GBAS プロトタイプ開発に着手し，電離圏を含む日本の環境におけるリスクの抽出と，システムの安全性設計ならびに評価を通じた安全性解析，さらにリスクを軽減するモニタ方式の開発とその実装を行っている。H21 年度には GBAS プロトタイプ的设计・製造が完了し，本年度より関西国際空港に設置して実データを取得する。そこでは，設計段階で想定したパラメータが妥当であるかの検証，ならびにモニタ性能評価などを実施する予定である。本発表では，GBAS プロトタイプ開発の概要，および日本の電離圏環境に対応した脅威モデルとモニタ方式の検討結果を報告する。

### 2. GBAS の概要と安全性

GBAS は図 1 に示すように，位置が既知である GPS 基準局を空港内に 3~4 台設置して GPS 衛星の擬似距離に含まれる衛星軌道誤差や電離圏および対流圏遅延といった共通誤差の補正情報を生成し，そこに含まれる残留誤差情報を付加して補強情報とし，VHF 帯電波で送信する。航空機側では地上基準局から受信した補正情報から測位計算を行うとともに，残留誤差情報か

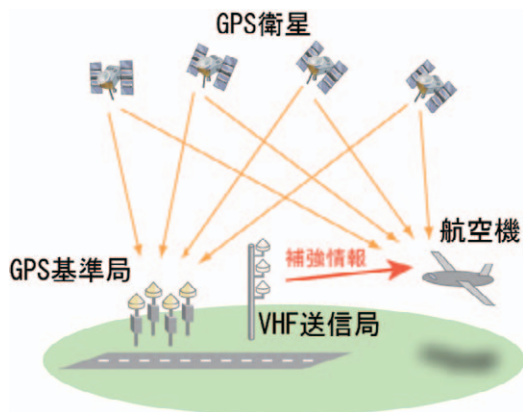


図 1. GBAS の概念図

ら横方向（Lateral Protection Level; LPL）および垂直保護レベル（Vertical Protection Level; VPL）を計算し、それが横方向（Lateral Alert Limit; LAL）および垂直警報限界（Vertical Alert Limit; VAL）以下に収まっているかを判定して測位解の信頼性をリアルタイム評価する[1,2]。GBASの航法精度に関しては仙台空港内に設置したGBASテストベッドを用いた飛行実験から垂直誤差0.81m(95%確率)の結果が得られており、CAT-Iの垂直精度要件の4mと比較しても十分達成している[3]。

一方、GBASの性能要件は精度の他に完全性、継続性および有効性の3つが存在する。安全性に関わる完全性要件は、航法システムにより提供される情報の正しさを示し、故障などで航空機側の誤差が警報限界を超える場合には規定時間（Time to Alert ; TTA）内に確実に警報を出す確率で規定される。なおCAT-Iに関して、SARPsではLPLおよびVPLをDH（Decision Height）上でそれぞれ40m、10mとし、TTAを6秒（地上システムには3秒を割り当て）、確実に警報を出す確率をどの1回の進入に対しても $1\cdot 2\times 10^{-7}$ と定めている。完全性に関連して、そのままでは要件を満たさない様な危険な事象がある場合には、異常検出モニタで検出し、これを排除する。なお、SARPsにおいて継続性要件、有効性要件としてCAT-Iではそれぞれ、15秒間にわたり $1\cdot 8\times 10^{-6}$ の確率でシステムが連続して動作すること、ならびに99~99.999%の確率でサービスが提供されることを定めている。

これら3つの要件は互いに関係しており、例えば、完全性要件を満足するようにシステム故障などの異常検出を保守的にし、正常であるにもかかわらず異常と認識する誤警報を多発してしまうと継続性に影響するとともに、有効性も低下させてしまう。したがって、安全性設計および評価を行う上では完全性だけでなく、継続性および有効性を含めた検討が必要である。なお、安全性に関わる要件が満たされているかの認証は各国の責任で行うこととされている。

### 3. GBASの安全性設計とプロトタイプ開発

安全性に関する証明と基本的な安全性認証のプロセスについては、SAE（Society of

Automotive Engineers, Inc.）の安全性認証における安全性評価および検証の考え方と手順[4, 5]を参考にした。そこではシステムの設計・製造と安全性評価を一体とした手順としており、機能故障評価（Functional Hazard Assessment; FHA）、予備的安全性解析（Preliminary System Safety Assessment; PSSA）、およびシステム安全性評価（System Safety Assessment; SSA）の手法が記述されている。なお、PSSAならびにSSAには、故障木解析（Fault Tree Analysis; FTA）も含まれる。

GBASの主要なリスクとそれらに対する異常検出モニタ方式に関しては、米国スタンフォード大学のIMT（Integrity Monitor Testbed）の研究がある[6]。電子航法研究所においても、仙台空港内のGBASテストベッドによる基礎データ解析、あるいは衛星故障の異常信号を模擬したシミュレーションなど主要なリスク解析とモニタ方式開発を行い、GBASテストベッドを対象とした故障木解析も実施している。

H20年度からはこれらの知見を活用し、実用機を想定した安全性設計および検証を通じた日本の環境におけるリスク解析と安全性評価を目的として、CAT-I性能要件を満足するGBASプロトタイプを新規に設計・製造することとした。このGBASプロトタイプにおける安全性設計および評価の完成度は実用機を想定して取り組んでいるが、手順が既に定められているソフトウェアコーディング基準や手法がある程度確立されている冗長系機能は不採用としている。設計・製造にあたっては、主にハードウェア構成を決定する基本設計審査を経てソフトウェアを含むシステム全体の詳細設計を決定する詳細設計審査まで、3週間に1回の頻度でデザインレビューを行う検討会を開催した。そこでは、システム設計と平行して①網羅的なリスクの抽出と故障木解析などによる体系化、②それら数値的な評価とGBASに脅威となるリスクの特定、③各リスクに対してシステムが許容する設計要求値の設定（リスク割り当て）、④その割り当てられた要求値を実現するために必要な異常検出モニタによる排除などリスク軽減手法、ならびに⑤最終的な残リスクの評価について実データやシミュレーションを含んだレビューと議論な

どを行っている。

#### 4. リスク評価と軽減

ここではGBASに対する主要なリスクとして知られている衛星に伴う信号歪リスクを例に、リスク評価とその軽減について簡単に述べる。信号歪リスクは衛星のRF回路故障により送信信号が劣化することに起因して、とりわけ基準局側と航空機側とで異なる信号追尾方式の受信機を使用している場合に深刻な測位誤差をもたらす。想定するリスク発生頻度（事前確率）からそのままでは航法システムの完全性要件が満たされないため、GPS信号品質モニタによる異常検出によるリスク軽減が必要となる。

ICAOではGPS航法システムに対する影響を考慮して衛星故障モードを検討し、3つの異常信号モデルを脅威モデルと定義してSARPsに記述している。プロトタイプの実験設計においては、信号歪リスクに対する設計要求値を他のリスクとの関連で決定し、その設計値を満足すべく、異常検出モニタのアルゴリズム開発とTTAを考慮したモニタ性能（検出失敗確率）を見積もって正味の残リスクを評価する。その過程においては脅威モデルを用いた検出アルゴリズムの検証作業も含まれる。また、モニタの導入により完全性要件だけでなく、正常である場合にも雑音等により誤って異常と検出してしまう誤警報が継続性要件に与える影響も考慮する必要がある。こちらも他のモニタとの関係でシステム全体として要件を満たすように設計要求値の割り当てが行われる。この様に、GPS信号品質モニタは正常時の誤差、要求される検出失敗確率ならびに誤警報確率から適切なしきい値を決定した上でプロトタイプに実装されており[7]、衛星時計故障など他のリスクに対しても同様な手順でリスク軽減が図られている。

#### 5. 電離圏脅威モデルの構築とリスク軽減策

GBASにおける電離圏遅延は基準局と航空機の双方で受信した擬似距離にほぼ等しく含まれていることから、その大部分が共通誤差として補正される。しかし、図2の様に航空機の進入方向に沿って電離圏遅延の空間勾配（電離圏勾配）が存在した場合には、この影響を受ける

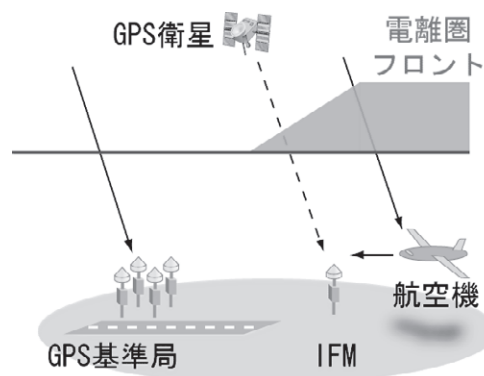


図2. GBASと電離圏勾配

GPS衛星の補正後のレンジ誤差が増大する[8]。

米国においては米国本土におけるGPS観測データによりSED(Storm Enhanced Density)を中心とした磁気嵐に伴う電離圏擾乱時における電離圏勾配を調査しているが、そこで観測された電離圏勾配（最大値412 mm/km; 2003年11月20日[9]）はSARPs策定時の想定を大幅に上回っており、そのリスク評価と軽減手法が主要な課題となってきた。このとき、電離圏リスクに対してGBASの安全設計上考慮すべき範囲を確定するため、単純化された電離圏フロントについて、電離圏勾配の大きさ、スロープ幅、速度などを観測データから抽出し、電離圏脅威モデルを構築している。また、その有効な軽減策として、基準局において電離圏遅延の時間変化を監視し、検出するCCD(Code-Carrier Divergence)モニタ、ならびに図2の様な位置関係から基準局側で電離圏勾配異常を検出できない場合の潜在的な誤差を低減するジオメトリ・スクリーニング(Geometry Screening)が重要である[9]。しかし、潜在的な誤差に対する許容値を小さく設定すると一般に有効性が劣化するため、GBAS進入における垂直誤差と地上障害物件の要件との関係について安全性解析して電離圏擾乱に起因する潜在的な垂直誤差に限って28.8mまで許容する内容となっている[10]。

日本においては欧米よりも低い磁気緯度に位置していることから、磁気嵐に伴う電離圏擾乱に加え、磁気緯度10~15度付近に電離圏電子密度のピークをもつ空間分布で特徴づけられる赤道異常[11]に伴う現象を考慮する必要がある。具体的には、太陽極大期の春季、秋季の日没から深夜にかけて発生確率が高く、急激な電子密

度の減少した領域が南北に長い構造をもつプラズマバブルと呼ばれる電離圏擾乱が、局所的な電離圏勾配を与える現象として知られている。プラズマバブルは極性の異なる電離圏フロントを一对備え、かつ複数のプラズマバブル列として観測されることも珍しくないため、同時に複数のGPS衛星が、異なる電離圏フロントの影響を受けることを考慮しなければならない。

プロトタイプ設計・製作にあたっては、電子航法研究所のGPS観測ネットワークデータに加えて、国土地理院電子基準点(GEONET)観測データに基づき、日本独自の電離圏脅威モデルを構築した。すなわち、磁気嵐に伴う電離圏擾乱として日本上空で観測されたSEDならびにプラズマバブルのそれぞれについて、電離圏勾配の大きさ、スローブ幅ならびに速度といったパラメータについて、安全性設計および評価で考慮すべき範囲を確定し、かつ仰角依存特性も加味して電離圏脅威モデルを構築した。

この脅威モデルに対して完全性要件を満たす軽減手法を検討した結果、CCDモニタおよびジオメトリ・スクリーニングのみによると、電離圏擾乱に起因する潜在的な垂直誤差の許容値をVALと同一の10m以下と設定した場合には完全性、継続性および有効性要件を同時に満たすのは困難である。そのため、図2で示す様により航空機側に近いDH付近に電離圏フィールドモニタ(Ionospheric Field Monitor; IFM)を設置して基準局と協調して電離圏勾配異常を検出し、潜在的な垂直誤差を低減することでこれらSARPs要件を満足すると結論付けた。

## 6. まとめ

実用機を想定した安全性設計および評価を通して、電離圏を含む日本の環境におけるリスク解析と安全性評価を行うため、H20年度にGBAS CAT-Iプロトタイプ開発に着手し、H21年度までに設計・製造を完了した。本年度より関西国際空港に設置し、実データ取得による設計段階で想定したパラメータの妥当性検証やモニタ性能の評価を実施する。それらの結果をプロトタイプの安全性設計および評価にフィードバックするとともに、IFMにおける電離圏勾配の異常検出アルゴリズム改良を行いたい。同時

に、基準局など設置条件および方法に関わるサイティング要件を導出するとともに、将来の新たな運航方式の検討を行うために実験用航空機を用いた飛行実験も実施する予定である。

## 参考文献

- [1] ICAO SARPs, ANNEX 10, 2006.
- [2] RTCA SC-159, RTCA/DO-246D, 2008.
- [3] 藤井直樹ほか, “高カテゴリ運用が可能な次世代着陸システムの研究”, 電子航法研究所 要望研究報告, 2006年
- [4] “Certification considerations for highly-integrated or complex aircraft systems”, SAE international, Warrendale, PA, Nov. 1996.
- [5] “Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment”, SAE international, Warrendale, PA, Dec. 1996.
- [6] Gang Xie, “Optimal on-airport monitoring of the integrity of GPS-based landing systems”, Ph.D. dissertation, Stanford University, Mar. 2004.
- [7] 齊藤真二ほか, “地上型衛星航法補強システムのためのGPS衛星故障信号検出手法としきい値決定方法およびその評価”, 電子航法研究所報告, No.123, 2010年1月
- [8] J. Christie et al., “Analytical and Experimental Observations of Ionospheric and Tropospheric Decorrelation Effect for Differential Satellite Navigation during Precision Approach”, proc. of ION GPS-98, pp 739-747, 1998.
- [9] S. Ramakrishnan et al., “Targeted Ephemeris Decorrelation Parameter Inflation for Improved LAAS Availability during Severe Ionosphere Anomalies”, ION NTM 2008, Jan. 2008.
- [10] C. Shively et al., “Safety Concepts For Mitigation of Ionospheric Anomaly Errors in GBAS”, proc. of ION NTM 2008, pp.367-381, Jan. 2008.
- [11] 丸山隆, “電離圏”, 宇宙環境科学, 恩藤忠典, 丸橋克英(編), 第3章, オーム社, 東京, 2000.