

2. カテゴリ III GBAS (GAST-D) の日本におけるリスク検討

航法システム領域 ※吉原 貴之, 齋藤 享, 星野尾 一明, 福島 荘之介, 齋藤 真二

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。特に進入着陸フェーズは高い安全性が要求され、国際民間航空機関(ICA0)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。GNSS単独使用ではこれらの要件を満たさないが、GBAS(Ground-Based Augmentation System)は、1周波ディファレンシャルGNSS測位方式を基礎としてこれを補強する地上型補強型システムである。決心高度200ftまで誘導可能なカテゴリI(CAT-I)のGBAS要件を定めるSARPsは平成13年に発効しており平成24年以降、ドイツのブレーメン空港、米国のニューアーク空港、並びにヒューストン空港で運用が開始された。

一方、GBASによるカテゴリIII(CAT-III)運航は、より厳しい安全性が要求されるため、GNSS運航における最終課題として残されているが、これが実現されれば全ての運航フェーズをGNSSでサポート可能となる。現在、GPS衛星信号の1周波を利用してCAT-IIIを実現するGBASとして、GAST-D(GBAS Approach Service Type-D)が期待されている。国際標準案の策定作業はICA0の航法システムパネル(NSP)作業部会で進められ、平成22年5月に机上検討による技術検証が完了したSARPs原案[1, 2]の策定がなされて以降、米国、欧州及び日本などでGAST-D地上プロトタイプ製作を含めた運用面からの検証活動が行われている。

電子航法研究所(以下、当研究所)では、平成20年度から21年度にかけてCAT-IのGBASプロトタイプを開発した。そこでは、CAT-Iシステムの安全性設計ならびに評価を通して安全性解析、電離圏を含む日本の環境におけるリスクの抽出及び軽減のためのモニタ方式の開発、

実装を行った[3]。その後、CAT-Iプロトタイプは平成23年1月に関西国際空港に設置され、飛行実験や長期データ収集に利用されている。GAST-Dに関して当研究所では、ICA0 SARPs原案の策定段階から欧米とは異なる日本の設置環境下で問題となるプラズマバブルと呼ばれる電離圏擾乱を中心に検討を開始した。そこではGAST-Dで考慮すべき電離圏遅延量の空間的变化(電離圏空間勾配)の大きさ、移動速度などの範囲が反映されるよう議論し、GAST-D電離圏脅威モデルとして米国などと共同でICA0 NSP作業部会に提案した。平成24年3月からは、これまでの知見をもとに、我が国の設置環境にも耐えうる安全性設計、解析技術と認証手法を確立すること、並びに当研究所が米国などと共同提案したGAST-D電離圏脅威モデルの妥当性検証を含めたSARPs原案の検証結果をICA0にフィードバックすることを目的としてGAST-D研究用地上装置開発に着手した。本発表では、GAST-Dの概要とともに、GAST-Dを日本に導入する際に検討すべき地上装置のインテグリティリスクに関して、GAST-D研究用地上装置の開発状況とともに報告する。

2. GAST-Dの概要

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。航空機側では地上送信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

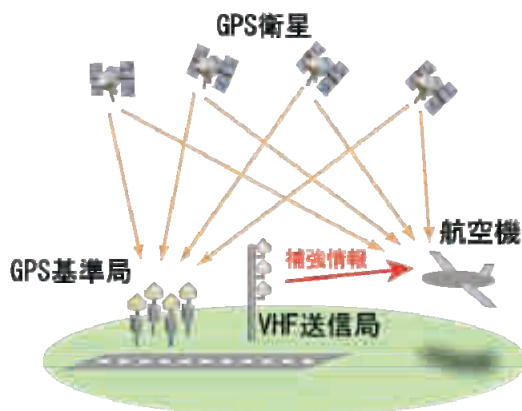


図1. GBAS の概念図

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[4,5]。

GBASのCAT-I運用開始までの世界的な経緯として、SARPs発効後に予想以上の電離圏空間勾配（電離圏異常）が確認され、その後のFAAにおけるCAT-I認証の主要課題となった。つまり、精密進入着陸で扱うような水平スケールが数10kmの範囲においても、水平方向1kmあたりの電離圏遅延量の空間変化率として400mm/km程度の電離圏空間勾配がもたらされることが明らかとなり、それを地上側で検出できない場合に、どのように航空機側の安全を保障するかということが課題となった。CAT-Iにおいては、地上装置で起こり得る航空機側の測位誤差をシミュレーションし、基準以上の測位誤差が生じる可能性のあるGPS衛星の組合せを排除するジオメトリ・スクリーニング[6]と呼ばれる手法を導入した。また、当研究所のCAT-I地上プロトタイプでは電離圏フィールドモニタ（IFM）を決心高度に相当する地点の直下付近に設置して常時、GPS基準局との間で電離圏空間勾配をモニタする手法を採用してジオメトリ・スクリーニングにおいて考慮すべき潜在的な誤差低減を図る必要があった[3]。

そこで、より高い安全性要件が適用されるCAT-IIIでは早い段階からCAT-Iの延長策では特にアベイラビリティ確保が困難と予想され、航空機側にも基準以上の電離圏異常を検出するインテグリティモニタを装備し、地上と機上の連携で電離圏異常のインテグリティリスク低減を図ることが提唱された[7, 8]。CAT-I GBASのように従来は、地上及び機上装置の分界点を

SiS（Signal-in-Space）として定め、電離圏異常に関わるインテグリティリスクは地上側で保証すべきものであったが、CAT-IIIでは電離圏モニタの一部を機上側に移譲した結果、地上と機上の複合による安全性保証に大きく方針転換され、航空機の耐空証明の要件にも電離圏異常に関わる事項が加わっているようになった[9]。

3. GAST-D SARPs 原案

現行のSARPsにおけるGBAS要件の記述は垂直ガイダンス付アプローチ（APV-I, APV-II）及びCAT-Iとなっているが、これにCAT-IIIを加えて、GAST-D SARPs 原案ではこれらをGAST（GBAS Service Approach Type）として、GAST-A～Dに再定義している。すなわち、GBAS地上“サブシステム”と機上“サブシステム”の提供可能なサービスの組合せで最終的に航空機が利用可能なサービスが決定する。例えば、GAST-Dで着陸するためには、地上及び機上装備ともにGAST-D対応でなければならない。また、GAST-D要件はGAST-C要件を全て満足した上で、着陸後に滑走路を離脱するロールアウトまでをサポート可能な規格となっている。現行のSARPsに追記・修正する形態で、GAST-Dの安全性に関わる規定やメッセージ追加（Type11の新設及びType2の追加ブロック）とその処理方法などがGAST-D SARPs 原案としてまとめられているが、概要や背景となっている考え方などはコンセプト・ペーパーと呼ばれる別の文書としてまとめられている[2]。

GAST-Dの安全性保証のうちインテグリティに関する地上サブシステムに関連した要件の主な特徴としては、以下が挙げられる。

- (1) 電離圏異常以外のインテグリティリスク
 - CAT-Iと同様の考え方に基づき、地上サブシステムが放送する残留誤差情報を用いて航空機側が保護レベルを計算し、警報限界と比較して測位解の信頼性を判定する。地上サブシステムから放送する残留誤差情報の一部はGAST-D用メッセージとして追加されている。
 - 地上サブシステムのハードウェア、アルゴリズムのインテグリティは $1 \cdot 1 \times 10^{-9}$ と規定された。

- 従来の100秒スムージング擬似距離に加えて、30秒スムージング擬似距離の補強情報を導入し、その30秒スムージング擬似距離にGPS衛星故障などで異常がないことを保証するモニタ要件が付された。
- (2) 電離圏異常関連のインテグリティリスク
- 補強情報に含まれる電離圏異常に起因するレンジ誤差が滑走路端で1.5m以下であることを地上サブシステムが保証する。
 - GBAS基準局から滑走路端までの距離を5km内とするサイティング要件の導入。
- (3) 警報に要する時間など
- タイムリーに警報を発するための要件であるTTA (Time-to-alert) に関して、地上サブシステムのハードウェア故障に関するものを別に扱い、1.5秒以内とした。
 - 地上サブシステムでモニタすべき30秒スムージング擬似距離に異常、または地上で保証すべき電離圏異常があった場合に1.5秒以内に検出して放送に反映する。

なお、電離圏異常に関連して航空機上では地上サブシステムから放送された100秒及び30秒スムージング擬似距離を使用して、それぞれの測位解を算出し、その乖離の大きさをモニタしている。電離圏空間勾配が存在した場合には、スムージング時間によって擬似距離補正值に現れる影響の大きさが異なることから、両者の測位解の乖離が規定値以上の場合には異常と判断する。また、この乖離は最終的な保護レベルに加算される。航空機上にはSARPs原案の他にも、電離圏モニタ等の搭載が規定されている[5]。

3.GAST-D 研究用地上装置開発とリスク検討

当研究所は次の2つの視点から、平成23年3月よりGAST-D研究装置の開発に着手している。まず、①GAST-D SARPs原案における地上サブシステム要件について、日本の環境下における実現可能性と妥当性の検証をし、ICAOにフィードバックする。次に、②より高い安全性要件を満たすための安全性評価に関わる課題抽出と解決策の提示である。GAST-D研究用地上装置の開発は、CAT-Iプロトタイプの開発と同様に、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[10, 11]を参考に、システム設計・製造と安全性評価を一体とした手順とした。具体的には、製造者と安全性設計検証会議を3週間の頻度で開催して予備的安全性解析 (Preliminary System Safety Assessment; PSSA) やインテグリティモニタのアルゴリズム開発、検証などを実施している。なお、研究用装置であるためソフトウェアのインテグリティ保証やハードウェア冗長構成は具備せず、将来の拡張性を考慮してSBAS擬似距離の利用や、電離圏異常の事後検証用に2周波データの取得 (メッセージ生成はL1-C/A1周波利用) が可能な仕様となっている。

GAST-D SARPs 原案に対する日本の環境下で検討すべき事項として、特に今回独自の視点から取り組むこととした課題を以下に挙げる。

(1) 電離圏勾配モニタ

通常、数100m程度の基線長となるGPS基準局間で電離圏異常を検出するため、微小な電離圏遅延の空間差 (例えば基線長200mで60mmの遅延差) を搬送波位相観測値の利用で検出する必要がある。米国で提案され、主流となっているモニタ方式[12]とは異なるIFMアルゴリズムを拡張したモニタ方式[13]を設計、実装する。

(2) 複数受信機故障モニタ

SARPs原案ではGPS受信機故障に関して故障率と1受信機故障を想定した対策を規定しているが、将来的な課題として、複数受信機故障を検出するモニタ方式を設計、実装する。滑走路や誘導路など空港内レイアウトの制約で設置要件を満たす基準局配置が困難な場合のリスク軽減策として、複数受信機に相関性のあるマルチパス同時入射 (擬似距離の異常) があった場合の異常検出も含む。

(3) 積雪・着雪リスク解析

新千歳空港や青森空港のように積雪地帯では、図2のように積雪面からの反射波によるマルチパス干渉パターンが積雪面の高さや表層の状態により変化することが予想される。また、GPSアンテナへの着雪についてもGPS信号遅延の影響により、例えば微小な電離圏遅延の空間差を検出する電離圏勾配モニタの



図2. 積雪・着雪に関わる影響評価のための実験

誤検出の原因となる。そのため、独立行政法人防災科学技術研究所と共同で積雪、着雪に関わる影響評価のための実験を実施している。他にも、SARPs 原案で30秒スムージング擬似距離補正值のインテグリティを保証するためのモニタ要件が新たに規定された信号歪、CCD (Code Carrier Divergence)、過剰加速度及びエフェメリス異常モニタ、並びに近年問題となっている電波干渉 (RFI) を検出するモニタも、特に重要なインテグリティモニタとして CAT-I の知見を活用して設計、実装を進めている。

5. まとめ

GPS の1周波信号を利用して CAT-III を実現する GBAS として期待され、安全性要件を定めた SARPs 原案の策定作業が平成22年5月に完了し、運用面も含めた検証活動に移行している。当研究所では、平成24年3月より我が国の環境下での実現可能性及び妥当性検証と、安全性評価に関わる課題抽出と解決策を提示することを目的とした GAST-D 研究用地上装置の開発に着手し、とりわけ、電離圏勾配モニタ、複数受信機故障モニタ、並びに積雪・着雪リスクの検討は独自の視点から実施している。GAST-D 研究用地上装置については、平成25年9月に製造が完了し、その後、新石垣空港に設置して平成26年度から飛行実験による評価とともに長期データ収集により、危険な事象が発生しないことを確認する HMI 解析を実施する予定である。また、これらの活動により得られた成果は、電離圏脅威モデルの検証とともに ICAO NSP 作業部会での SARPs 原案の検証活動に積極的にフィードバックする予定である。

参考文献

- [1] T. Murphy 他, “Development Baseline SARPs Proposal”, ICAO/NSP WGW Flimsy 29, 2010年5月
- [2] J. Burns 他, “Conceptual Framework for the proposal for GBAS to Support CAT III Operations”, ICAO/NSP WGW Flimsy6, 2009年11月
- [3] 福島他, “衛星航法による精密進入着陸システムの開発と安全性の保証”, 信学論, Vol. J94-B, No.7, 2011年7月
- [4] ICAO SARPs, Annex 10 (87), 2012年11月
- [5] RTCA SC-159, RTCA/Do-253C, 2008年12月
- [6] S. Ramakrishnan 他, “Targeted Ephemeris Decorrelation Parameter Inflation for Improved LAAS Availability during Severe Ionosphere Anomalies”, Proc. of ION NTM 2008, 2008年1月
- [7] T. Murphy 他, “Mitigation of Ionospheric Gradient Threats for GBAS to Support CAT II/III”, Proc. of ION GNSS 2006, 2006年9月
- [8] C. Shively, “Treatment of Faulted Navigation Sensor Error when Assessing Risk of Unsafe Landing for CAT IIIB LAAS”, Proc. of ION GNSS 2006, 2006年9月
- [9] T. Murphy 他, “Fault Modeling for GBAS Airworthiness Assessments”, NAVIGATION, Vol. 59, No. 2, 2012年
- [10] “Certification considerations for highly-integrated or complex aircraft systems”, SAE international, Warrendale, PA, 1996年11月
- [11] “Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment”, SAE international, Warrendale, PA, 1996年12月
- [12] S. Khanafseh 他, “Carrier Phase Ionospheric Gradient Ground Monitor for GBAS with Experimental Validation”, Proc. of ION GNSS 2010, 2010年9月
- [13] S. Saito 他, “Absolute Gradient Monitoring for GAST-D with a Single-frequency Carrier-phase Based and Code-aided Technique”, Proc. of ION GNSS 2012, 2012年9月