

18. GAST-D 地上装置のプロトタイプ評価

航法システム領域 ※吉原 貴之, 齋藤 享, 毛塚 敦, 星野尾 一明,

福島 荘之介, 齋藤 真二

1 GBAS CAT-III (GAST-D) の概要

GBAS（地上型補強システム）は GNSS 信号を用いた航空機の精密進入及び着陸を支援する誘導システムである。図 1 に示すように地上装置は空港内に4局からなる GNSS 基準局で受信した GNSS 衛星信号を用いて、データ処理装置で補正情報と GNSS 衛星故障等の安全に関わる信頼性情報からなる補強情報（GBAS メッセージ）を生成し、VHF 電波でデータ放送（VDB）する。航空機は機上で受信した GNSS 受信信号と地上から受信した GBAS メッセージとを組み合わせて測位し、進入経路に対して横方向及び垂直方向の乖離量とともにそれら信頼性を判定する保護レベルを算出する。なお、横及び垂直保護レベルはそれぞれ設定されている警報限界と比較され、そのどちらかが超えた場合に GBAS を使用不可とすることで安全性を担保している[1,2]。

精密進入の初期段階を支援する GBAS カテゴリー I（CAT-I；決心高 60m）については、ICAO の国際標準及び勧告方式（SARPs）が平成 13 年に発効し、平成 24 年に独ブレーメン空港で導入されて以降、米国を含む 7 空港で運用が

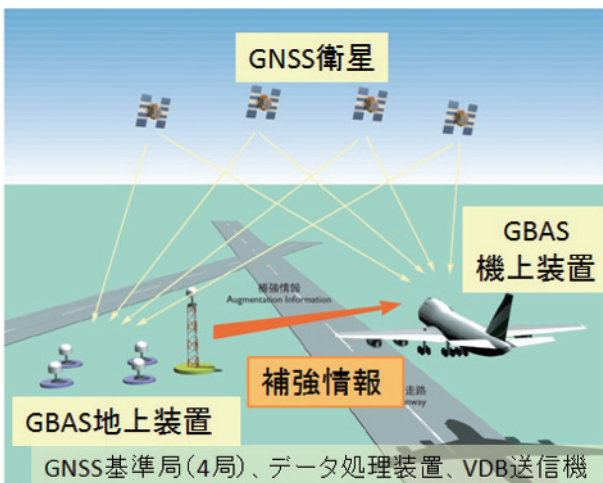


図 1. GBAS の概要

開始されている。精密進入の最終段階、着陸及び滑走路離脱まで支援可能な 1 周波信号（L1）による GBAS CAT-III（GAST-D; GBAS Approach Service Type D）の国際標準化作業に関して、SARPs 原案が ICAO 航法システムパネル（NSP）カテゴリー II/III 作業部会（CSG）で策定され、平成 22 年 5 月に机上検討による実現可能性の検証を完了した[3,4]。

GAST-D SARPs 原案では ILS（計器着陸システム）による CAT-III と同等な極めて高い安全性要件が規定されており、地上側のインテグリティ要件は GBAS CAT-I（GAST-C）が $1-2 \times 10^{-7}$ であるのに対して $1-1 \times 10^{-9}$ （後述の電離圏脅威の軽減策として機体側要件も含む）と 2 桁異なる。また、GBAS が使用不可な状態になってから航空機側で警報を発するまでの時間（TTA; Time-to-Alert）も 6 秒から 3 秒と短縮されている。

この安全性に関して、GNSS 信号の電離圏による遅延の空間変化（空間勾配）は GBAS の測位性能に影響を及ぼし、システム設計で考慮する通常状態としての範囲を超える大きな空間勾配（電離圏異常）が存在する場合には安全性への脅威となる[5]。GAST-C では、電離圏異常が航空機側にも影響して地上装置が検出できない“最悪ケース”への対策が主要課題であったが、GAST-D ではさらに高い安全性が要求されるため、電離圏異常の検出機能を航空機側にも付加して電離圏脅威の軽減を図っている（図 2）。

前述の GAST-D SARPs 原案は机上検討完了後、地上及び機上装置のプロトタイプ開発等を含む運用面からの検証作業（運用検証）に移行した。なお、この GAST-D は GNSS による航空航法で残されている CAT-III 精密進入を実現するものであり、GNSS 航法の全飛行フェーズへの対応と移行促進という視点から重要な技術課題として位置づけられる。

2 電子航法研究所における研究開発

電子航法研究所では ICAO NSP CSG における GAST-D SARPs 原案の運用検証に対応する重点研究「カテゴリーⅢ着陸に対応した GBAS (GAST-D) の安全性設計及び検証技術の開発 (H23～H26 年度)」を実施した。この目的は、①GAST-D を日本に導入する際に必要となる安全性設計及び解析技術の開発と認証手法の確立、並びに②電離圏脅威モデルの妥当性検証と高度化（精緻化）の2点が挙げられる。

具体的には前者について、①-1) CAT-Ⅲ進入を実現する高い安全性要件を満たす GAST-D 地上プロトタイプ装置 (GAST-D 地上装置) を開発するとともに、①-2) GAST-D 機上評価装置を開発し、飛行実験により地上及び機上装置の連携による電離圏脅威の軽減策を実証することを最終目標としている。なお、GAST-D では航空機の滑走路離脱までを支援する必要があるため、滑走路上の VDB 覆域要件も重要な検証項目となる。

後者の電離圏脅威モデルは、GAST-D に対する電離圏の影響について、その機構、度合い等の特性とシステムの安全性設計で考慮すべきパラメータの範囲を規定するものである。SARPs 原案のガイダンスマテリアルでは、図3のように電離圏フロントを想定し、空間勾配の大きさ、水平方向の幅、移動速度、最大となる電離圏遅延量（深さ）のパラメータ範囲の指針を与えている。この脅威モデルの構築には当研究所も参画し、これまで観測データを用いた検証と高度化に取り組んできた。すなわち、電離圏に影響を及ぼす太陽活動度は約11年周期で変動しており、前回の太陽活動度極大期である平成13年以降の約1周期について、日本の高密度なGPS連続観測網による観測データと日本周辺地域を含む観測データの収集及び共有化を推進して電離圏脅威モデルに反映することを目的としている。

SARPs 原案の運用検証として、プロトタイプ開発まで実施するのは、米国アトランティックシティ、仏ツールーズ及び独フランクフルトの3空港であり、いずれも磁気中高緯度地域に位置する。後述のように、日本の磁気低緯度地域での検証は、欧米の検証活動を補完し、とりわけ、磁気低緯度地域で春季及び秋季の夜間に発

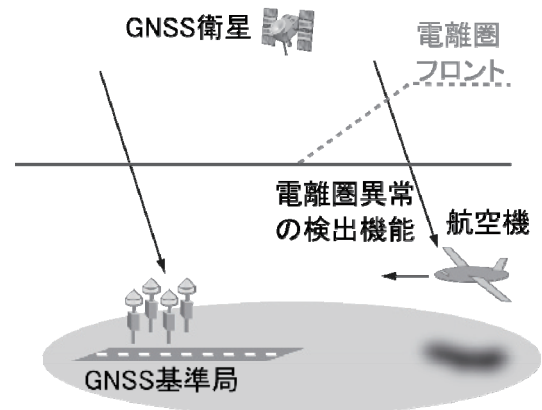


図2. GAST-D の電離圏脅威の軽減策

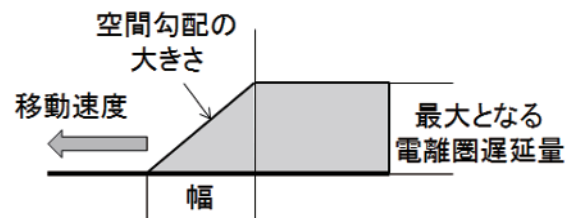


図3. 電離圏脅威モデル

生がみられる電離圏電子密度の局所的な減少により大きな空間勾配をもたらすプラズマバブルと呼ばれる電離圏擾乱に対する検証が特色となっている。

本発表では GAST-D 地上装置の安全性評価を中心に紹介し、講演番号19及び20の2件の発表ではそれぞれ、GAST-D 機上評価装置開発と飛行実験、VDB 覆域評価を紹介することとする。

3 GAST-D 地上装置の概要

システムの安全性評価は、その設計と検証とが一体であり、SARPs 原案で規定されている要件を分析、細分化してそれらを満足するように設計検証しながら製造する。具体的には、SAE (Society of Automotive Engineers, Inc.) 文書[6,7]の手順に準拠した安全性設計検証を行い、GAST-D 地上装置の製造契約を締結した日本電気株式会社と安全性設計検証会議を平成24年3月から平成25年9月までの約1年半の間にほぼ3週間毎、計23回開催した。

GAST-D 要件は、GAST-C 要件も包含することが規定されているため、過去の重点研究課題「GNSS 精密進入における安全性解析とリスク管理技術の開発 (H20～H23 年度)」における

GBAS CAT-I 地上プロトタイプ開発で得た知見を基礎として、従来の GAST-C 機能に加えて GAST-D 要件を満たすために新たに必要となる事項について設計検証した。その中で、GNSS 受信データが電離圏異常や衛星故障の影響を受けている場合に、航空機側で当該 GNSS 衛星信号を測位計算に使用しないように補強情報から排除するための異常検出モニタ方式の開発は重要な要素となっており、以下を中心に新規アルゴリズムを開発した。

- ・ 電離圏空間勾配モニタ
- ・ 信号歪モニタ (GAST-D 対応)
- ・ エフェメリスモニタ
- ・ 受信機故障モニタ

また、この他にも既存の異常検出モニタ方式の拡張による対応を含め、必要な異常検出モニタを実装して装置全体として GAST-D 地上装置の要件を満たすよう設計した。なお、多雪地域での運用で課題となる可能性のある GNSS 基準局アンテナへの着雪、積雪によるマルチパスの影響に関してもリスク評価を実施している。

4 新石垣空港への設置

平成 25 年 9 月に GAST-D 地上装置の製造が完了したが、安全性評価の一連の手順として空港環境下で長期安定性試験を実施する必要がある。これは、製造時の安全性設計検証では、過去の類似データや建物屋上での実験データなど、実際の空港環境とは異なる環境で取得したデータを基に安全性評価や、設定値が仮決めされた項目があるため、これらについて再検証する必要がある。また、電離圏の影響等、四季を通じたデータ収集で安全性を脅かす事象の発生がないか確認する HMI (Hazardous Misleading Information) 解析も重要である。

空港環境下での検証にあたっては、電離圏空間勾配モニタを中心とした電離圏異常の検出モニタの性能評価と検証に主眼を置くため、磁気低緯度地域に位置する新石垣空港を設置場所を選定した。この目的には、電離圏擾乱としてプラズマバブル発生下での飛行実験による地上及び機上装置の連携による電離圏異常検出の実証や、欧米とは電離圏環境が大きく異なる磁気低緯度地域での実施することにより、世界全域で

表 1. 測位精度 (95%値, 単位: m)

2014 年	GAST-C		GAST-D	
	水平	垂直	水平	垂直
3/21-27	0.1455	0.3848	0.2010	0.5212
8/7 - 13	0.1541	0.3705	0.2060	0.4938

利用可能であるように GAST-D SARPs 原案の妥当性検証への貢献が含まれる。また、GAST-D では航空機の滑走路離脱まで支援する必要があることから滑走路上の信号強度等を規定した VDB 覆域要件を検証する車両等を用いた地上実験も重要である。

図 4 に示すように平成 26 年 2 月に GAST-D 地上装置を新石垣空港に設置して以降、1 年以上の連続運転して長期安定性試験を実施している。なお、IFM (電離圏フィールドモニタ) は GAST-C 機能として GAST-D 地上装置の構成要素に含まれている。

5 GAST-D 地上装置の性能評価と検証

基本性能評価に関して、表 1 に IFM 局の GNSS 受信データを擬似ユーザとして解析した際の測位精度 (95%値) を示す。なお、異なる季節を比較するため、3 月及び 8 月の 1 週間をそれぞれ示している。これらの結果は、GAST-C 及び GAST-D の測位精度 (95%値) 要件が横方向 16m、垂直 4m であることを考慮すると十分満たしていることがわかる。また、GAST-C よりも GAST-D の測位結果が水平、垂直ともに大きくなっているのは GAST-D においては、電離圏擾乱への応答を改善するため擬似距離の平滑化時定数を 30 秒 (GAST-C は 100 秒) と短くしているため、受信データに含まれる測定誤差の影響をより強く受けていると考えられる。

新規に開発した電離圏空間勾配モニタは複数基線を用いた解析により、空間勾配の大きさ及び方向を推定可能であるとともに、それら推定解の整合性検証を可能としている。新石垣空港の実測データを用いた解析により、当初は想定していなかった対流圏遅延の空間勾配による影響が誤警報要因となることが明らかとなった[8]。これは欧米でも報告されており、現象の水平スケールを判定基準に導入する等の誤警報対策が必要である。この対流圏遅延の影響を除けば、

誤警報確率が 2×10^{-7} 以下，未検出確率 10^{-9} 以下の検出性能を達成可能であり，要件を満たすことが確認された[9]。

また，信号歪モニタは製造時に建物屋上での取得データを使用して設計検証した異常検出モニタの 1 つである。そのため，空港環境下での取得データを用いて最終検証を実施したところ，低仰角衛星（5 度～10 度）については現在使用している一般的なチョークリングアンテナでは要件を満たすことが困難であるが，低仰角マルチパスの低減効果の高いアンテナ（MLA）を採用することにより達成の見通しを得た。

なお，この他にも GAST-D 地上装置を用いて前述のように GAST-D 機上評価装置を用いた飛行実験による検証，地上実験を含む VDB の覆域要件の検証も実施している。

6 まとめと今後の課題

GAST-D を日本に導入する際に必要となる安全性設計及び解析技術の開発と認証手法を確立することを目的に GAST-D 地上装置を開発した。製造時の安全性設計検証，並びに空港環境下での検証により，見通しを含めて GAST-D 要件を満たすことを確認し，SARPs 原案の妥当性を検証した。また，これら成果は ICAO NSP CSG にフィードバックした。なお，CSG における運用面を含めた検証活動は平成 27 年 4 月にほぼ完了したが，電離圏空間勾配モニタの対流圏遅延による誤警報対策と VDB 要件の一部については，本年 10 月頃まで継続して検証することとなっている。今後の課題としては，本研究で実施した

主要なリスク，異常検出モニタ以外について長期データによる評価を行うとともに，磁気低緯度での GBAS 運用の視点から HMI 解析を継続し，検証の完成度を高めたい。また，得られた知見を GAST-C の安全性設計へフィードバックしたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり，多大なご支援を賜りました国土交通省航空局，沖縄県土木建築部空港課，石垣市建設部空港課の関係各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] ICAO SARPs, Annex 10 (89), Nov. 2014.
- [2] RTCA SC-159, RTCA/Do-253C, Dec. 2008.
- [3] T. Murphy et al., ICAO/NSP/WGW/8-Flimsy 29, May 2010.
- [4] J. Burns et al., ICAO/NSP/WGW/7-Flimsy6, Nov. 2009.
- [5] M. Luo et al., "Ionospheric Spatial Gradient Threat for LAAS: Mitigation and Tolerable Threat Space", Proc. of the ION NTM 2004, pp 490-501, Jan. 2004.
- [6] "Certification considerations for highly-integrated or complex aircraft systems", SAE international, Warrendale, PA, Nov. 1996.
- [7] "Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment", SAE international, Warrendale, PA, Dec. 1996.
- [8] 中原宏明, "GAST-D 電離圏勾配モニタの性能評価", 2014 年度電気通信大学電気通信学部情報通信工学科卒業論文, 2014 年 3 月
- [9] S. Saito et al., "Performance of GAST-D ionospheric gradient monitor studied with low latitude ionospheric disturbance data obtained in a real airport environment", Proc. of ION Pacific PNT 2015, Honolulu, HI, Apr. 2015.

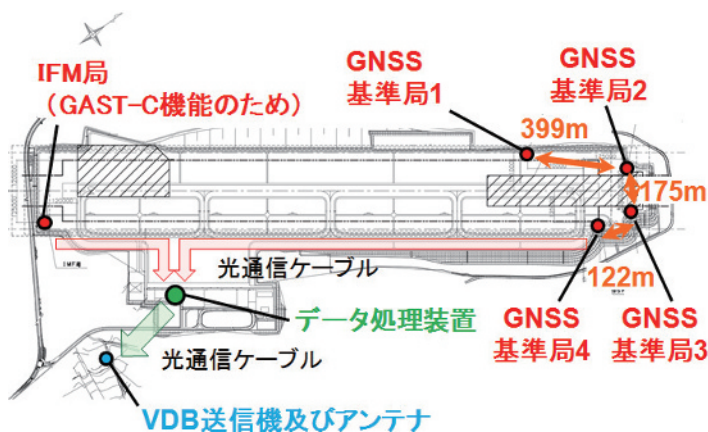


図 4. 新石垣空港における GAST-D 地上装置配置