

16. カテゴリⅢGBAS 地上装置のプロトタイプ開発

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，毛塚 敦

1. はじめに

離陸から着陸まで航空機の全ての運航フェーズを GNSS 航法でサポートすることが期待されている。航法システムには航法精度とともに安全性が要求され、国際民間航空機関（ICAO）が国際標準および勧告方式（SARPs）として性能要件を規定している[1]。とりわけ、高い安全性が要求される精密進入では、GNSS 衛星信号に含まれる測距誤差を低減するための補正情報とともに、衛星の故障や衛星信号が地球大気を伝搬する際に受ける影響を監視し、異常が検出された場合には航空機で使用しないようにするための安全に関わる情報を提供する補強システムが必要である。なお、GNSS の航空航法用途では航空バンドとして保護され、衛星数も確保されている L1 帯 1 周波信号のみの利用が現状である。

地上型補強システム（GBAS；Ground Based-Augmentation System）は図 1 のように GNSS アンテナおよび GNSS 受信機からなる GNSS 基準局を空港内に 4 式設置し、狭域ディファレンシャル測位方式を基礎とした補正情報の生成とともに、衛星故障や伝搬異常等を監視して安全性に関わる情報と合わせて補強情報として航空機に VHF データ放送（VDB；VHF Data Broadcast）し、精密進入をサポートする。

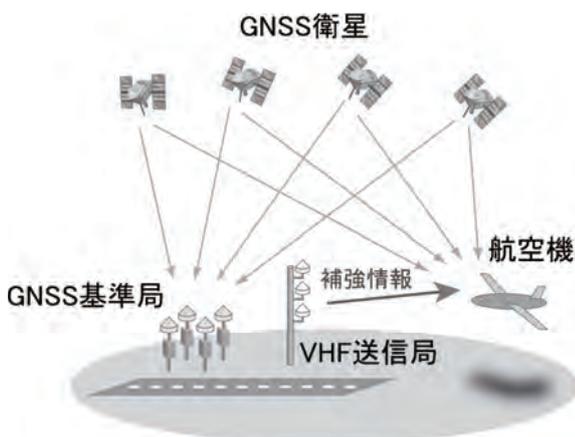


図 1. GBAS の概要

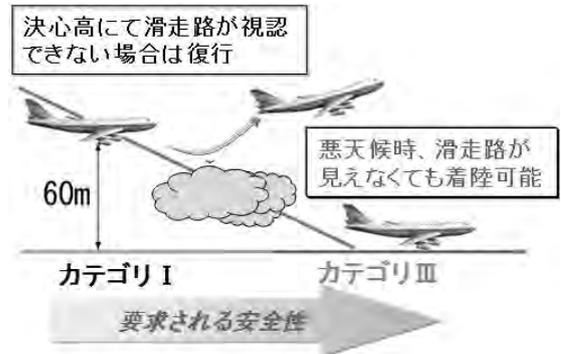


図 2. 精密進入のカテゴリ I とカテゴリ III

航空機の精密進入に関わる分類は ICAO により、カテゴリ（Category：CAT）I～IIIまで定められている。図 2 のように、その初期段階であるカテゴリ I（CAT-I；Category I）をサポートする GBAS では、決心高と呼ばれるパイロットが復行するか否かを判断する着地点からの高さが 60m まで誘導可能であり、既にドイツのブレーメン空港、米国のニューアーク空港およびヒューストン空港で導入されて運用されている。

GBAS は精密進入の最終段階であり、より厳しい安全性が要求される CAT-III まで誘導可能な航法システムとして期待されている。この CAT-III GBAS が実現すれば、離陸から着陸までといった全ての運航フェーズを GNSS 航法で包含することが可能となるため、GNSS 運航の最終課題と位置づけられているだけでなく、今後の GNSS 運航への移行に関する動向に重要な事項となっている。したがって、CAT-III GBAS における技術開発と課題解決は、将来の GNSS によるシームレスかつ高精度な航法とそれによる効率的な経路設計の実現に寄与するものである。

2. CAT-III GBAS の概要

2.1 電離圏脅威と軽減策

前述のように、CAT-I GBAS は海外では既に一部の空港で運用されているが、運用に至る前段階では、安全性要件を満たしているかどうか

のシステム認証作業を実施した。そこでは、GNSS衛星信号が電離圏を通過する際に受ける伝搬遅延の空間変化（空間勾配）が想定以上に大きい（電離圏異常）場合に安全性への脅威となることが示され、その対策が主要な課題となっていた。GBASはディファレンシャル測位方式に基づいているため、空港内のGNSS基準局から離れるほど補正情報に含まれる電離圏遅延による誤差の増加など補強情報が劣化する。CAT-I GBASの要件を規定するSARPsもこの性質を踏まえて策定され、発効された。しかしその後、米国において電離圏擾乱時に想定以上の電離圏遅延の空間勾配がもたらされたことが明らかとなった。とりわけ、図3のように電離圏遅延の大きな空間勾配をもつ電離圏フロントが存在し、地上側で検出できない場合にどのようにして航空機側の安全性を確保するかが課題となった。

この解決策としては、電離圏フロントが常時存在するとしてその最悪ケースを想定し、地上側で航空機側の測位誤差をシミュレーションして基準以上の測位誤差が生じる可能性のあるGPS衛星の組合せを航空機側で排除するようにGBASメッセージを生成するというジオメトリスクリーニングと呼ばれる方式が用いられている[2]。また、電子航法研究所が日本の設置環境を踏まえ、安全性設計および検証して開発したCAT-I GBASプロトタイプ（平成22年度に関西国際空港に設置）では、図3にあるような独自のIFM（Ionosphere Field Monitor）を実装し、電離圏遅延の空間差（空間勾配）を直接計測することにより、上述の最悪ケースの想定における潜在的な測距誤差の大きさを低減することとした[3]。

CAT-IIIではより高い安全性要件が適用されるため、電離圏異常の対策としてCAT-Iの延長で対応することは困難であると考えられ、図4のように航空機側でも電離圏異常を検出するモニタ機能を搭載することが提案された[4]。従来、GNSS信号の伝搬異常のリスクについては、GBASの地上装置側で監視して安全性を保証することとしていたが、ここではその一部を航空機側に委譲して連携して電離圏異常を検出し、安全性を保証するという方針の転換が行われて

いる。これにより、CAT-III GBASでは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ることになった[5]。

2.2 ICAOにおけるSARPs原案

ICAOの航法システムパネル（NSP）作業部会では、CAT-III GBASをL1帯1周波で実現するSARPsの策定作業を実施し、要件に対する実現可能性について机上検討による検証を実施済みのSARPs原案として平成22年5月にまとめた[6, 7]。それ以降、そのSARPs原案について運用面も含めた検証を実施している。航空機側の機上装置で要件となっている電離圏異常の検出手順はいくつかあるが、主要なものとしては異なる2つの時定数で平滑化された擬似距離を使用してそれぞれ測位計算を行い、それらの乖離が垂直、または水平方向で一定値よりも大きくなる場合にはその測位解は衛星の組合せとともに排除し、最終解として採用しない[8]。これは、電離圏遅延の空間勾配が存在する場合には、平滑化された擬似距離に対する影響の大きさがその時定数によって異なることを利用し

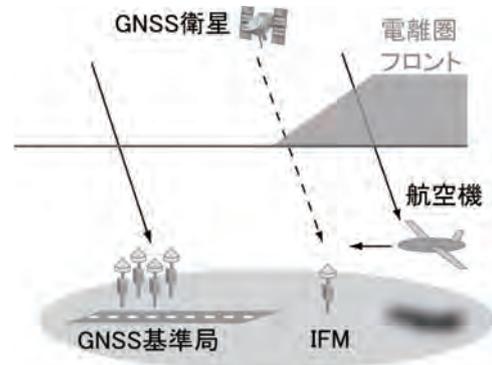


図3. 電離圏フロントとIFM



図4. CAT-IIIにおける航空機上での検出を含めた電離圏異常への対策

ている。このため、CAT-IIIではCAT-Iで測位計算に使用する平滑化時定数 100 秒の擬似距離とともに、新たに時定数が 30 秒の擬似距離で測位することとし、GBAS 地上装置ではこれら測位計算に必要な補強メッセージを送信する。

2.3 GAST (GBAS Approach Service Type)

CAT-III GBAS の SARP s 原案では提供するサービスを垂直誘導付誘導 (APV ; Approach Procedures with Vertical guidance) を含めて表1のようにGBASアプローチサービスタイプ (GAST) A~D に再整理し、CAT-III GBAS は GAST-D と呼ばれる。また、GBAS 地上装置と機上装置をそれぞれ、地上サブシステム、機上サブシステムと呼び、最終的に航空機が使用するサービスタイプは、両者の提供可能なサービスで一致するものの中で最も高いものが自動的に選択される。なお、GAST-D は、CAT-I である GAST-C の要件を全て満足する必要がある。また、GAST-D は高度 60m 以下から着陸を経て滑走路を離脱するロールアウトまでをサポート可能としている。そのため、滑走路上の覆域要件も重要となる。

2.4 国際的な SARP s 原案の検証活動

前述のように、GAST-D SARP s 原案は平成 22 年 5 月から運用面を含めた検証へ移行しており、米国アトランティックシティ空港、フランスのツールーズ空港、ドイツのフランクフルト空港ではこの SARP s 原案の検証のため、GAST-D 地上装置のプロトタイプが開発、設置されて検証プログラムが進められている。電子航法研究所は、これまで国土交通省航空局と連携して SARP s 原案の策定活動に参画してきた。とりわけ、日本の環境下では後述のプラズマバブルと呼ばれる電離圏擾乱を考慮する必要があることから、GAST-D で想定すべき電離圏異常の範囲を定める電離圏脅威モデルの構築にもかかわってきた。そこで、電子航法研究所は SARP s 原案の妥当性検証と、日本における GAST-D 地上サブシステムの安全性評価に係る要件を明確にするため、ICAO を通じて国際的な GAST-D 検証活動に参画することとし、次章で述べる GAST-D 研究用地上装置を開発する

表 1. GAST (アプローチサービスタイプ)

サービスタイプ	A	B	C	D
進入方式	APV-I	APV-II	CAT-I	CAT-III

とともに、実際の空港環境下に設置して各種実証実験を実施することとした。

3. GAST-D 研究用地上装置の開発

3.1 目的と概要

電子航法研究所では、平成 24 年 3 月より GAST-D SARP s 原案の妥当性検証と結果の ICAO へのフィードバック、ならびに日本における GAST-D 地上サブシステムの安全性評価に係る要件の明確化のため、GAST-D 研究用地上装置 (プロトタイプ) の開発に着手した。システムの安全性評価は、設計、製造および検証と一体でなされる [9, 10]。そのため、GAST-D 研究用地上装置のシステム安全性設計および検証を通して GAST-D SARP s の要件の妥当性、実証による実現性の検証を実施することが可能となる。また、日本の設置環境での安全性に対するリスクなど安全性評価に関わる要件を明確にし、その軽減手法を開発することで、日本に GAST-D を導入する際の要件、対策技術、ならびに安全性評価技術の獲得を目的としている。

システム安全性設計検証に関しては、製造者である日本電気株式会社とともに平成 25 年 9 月に開発完了するまで安全性設計検証会議をほぼ 3 週間毎に合計 23 回開催して、システム設計、リスク抽出と評価、リスクを低減する異常検出モニタの設計検証レビューなどを実施した。なお、本装置は研究用途であり、決められた手順に従うことで達成されると考えられるソフトウェア信頼性担保や、冗長性構成などは実装しないこととした。

3.2 機能と特色

今回開発した GAST-D 研究用地上装置は、GAST-D SARP s 原案の妥当性検証を目的としているため、異常検出モニタ等の各種設定パラメータの変更を容易にするなど比較的自由度の高い設計とした。これは、既発効の SARP s に基づき、将来の運用用品を想定して開発に取り組んだ前述の CAT-I GBAS 研究用地上装置と異

なる点である。基本機能としては、GAST-D メッセージ放送機能（GAST-C メッセージを包含する）、最終進入の直線経路へ接続するための曲線を含む経路情報を放送する TAP（Terminal Area Path）放送機能があり、将来の拡張性として SBAS（衛星型補強システム）の測距信号の利用と、電離圏異常の事後検証に有効な 2 周波（L1/L2 帯）での GPS データ取得（GAST-D メッセージ生成は 1 周波）も可能である。なお、GAST-D は GAST-C 要件を全て満たす必要があることから、GAST-C 機能としての IFM も実装している。ハードウェア構成としては、CAT-I GBAS 研究用地上装置とほぼ同じであるが、前述のように基準局に用いた GNSS 受信機が 2 周波対応であることが異なっている。また、日本の環境下で検討すべく独自の視点から注力した課題には、電離圏空間勾配モニタ、複数受信機故障検出モニタ、積雪・着雪リスク解析などが挙げられる[11]。

3.3 CSAC の利用と期待される効果

今回の研究装置には研究要素として GNSS 受信機に安定した周波数標準を供給し、受信機時計のドリフト誤差を抑制して性能向上を図るため、CSAC（Chip Scale Atomic Clock）と呼ばれる小型基準信号発信器を選択的に使用できるようにした。CSAC は 10cm 四方程度内の基盤に搭載された小型原子時計で省スペースであり、図 5 に示す GNSS 基準局の収納箱への設置が容易であるだけでなく、消費電力が低いため発熱量が少なく、屋外環境にも対応可能であるという特徴もある。CSAC の利用に関しては主に以下の 2 つの点が期待される[12]。

1 つ目は、地上装置における複数受信機故障の検出性能の向上である。GBAS では 4 局の GNSS 基準局を使用するため、うち 1 局が故障しても安全であるように設計されている。しかし、将来的な課題として滑走路や誘導路など空港内レイアウトの制約で GNSS 基準局を必ずしも条件の良い環境下に設置できないことが予想される。そのような場合には、航空機など人工物から相関性のあるマルチパス波が 2 つの基準局に同時入射して補正情報を劣化させるリスクが考えられるため、CSAC から安定した周波



図 5. GNSS 基準局の外観

数標準を個々の GNSS 基準局受信機に入力することでそれら受信機の信頼性を増し、補正情報の劣化をもたらす複数受信機の故障検出性能を向上する技術開発を行う。

もう 1 つは、電離圏空間勾配モニタの異常検出性能の向上である。電離圏空間勾配モニタは複数の GNSS 基準局を使用して GNSS 衛星毎に電離圏遅延の空間勾配を監視し、電離圏異常の影響を受けている GNSS 衛星信号を検出する[13]。具体的には、複数の GNSS 基準局間で観測される同一 GNSS 衛星の搬送波擬似距離の差分をモニタしているが、そこには抽出すべき電離圏遅延の差分に 2 台の受信機時計変動の差分が重畳している。そのため、それぞれの GNSS 基準局受信機に CSAC による安定した周波数標準を入力することで、受信機時計変動の低減を図り、電離圏遅延の空間勾配の検出性能の向上が期待される。

3.4 実装した主な異常検出モニタ

GAST-D 研究用地上装置の開発は、CAT-I GBAS 研究用地上装置の開発で得た知見を基にそれらを発展させて取り組んだが、新規に設計検証した主な異常検出モニタとしては、電離圏空間勾配モニタ、複数受信機故障モニタおよび電波干渉（RFI）モニタが挙げられる。なお、電離圏空間勾配モニタに使用されている電離圏遅延変動の推定アルゴリズムは CAT-I GBAS 研究用地上装置の IFM で採用されたアルゴリ

ズムを応用した。また、CAT-I GBAS 研究用地上装置の異常検出モニタを拡張、高性能化して設計検証したモニタとしては、信号歪モニタ、エフェメリスモニタが挙げられ、異常検出のアルゴリズムの大きな変更はないが、GAST-D の安全性要件を満足するかどうかの検証に重点を置いたモニタとしては、CCD (Code Carrier Divergence) モニタ、過剰加速度モニタ等が挙げられる。異常検出モニタの設計検証においては、検討に用いた解析データが必ずしも実際の空港環境と同等の環境で取得したものばかりではないため、一部の検証に関しては前提条件を付して仮決めし、空港設置後に実データにより設計の妥当性を検証することとした。

4. 空港への設置と検証

4.1 磁気低緯度での GAST-D 検証の意義

前述のように、机上検討として仮決めされた部分について、実データを用いた妥当性の検証や設定パラメータの最適化のため、GAST-D 研究用地上装置を実際の空港環境下に設置して評価する必要がある。また、四季を通じて長期データを収集することにより安全性を脅かす事象の発生がないかを確認する HMI (Hazardous Misleading Information) 解析も重要である。

GAST-D SARPs 検証の主要課題が電離圏異常への対策であるため、GAST-D 研究用地上装置に実装した電離圏空間勾配モニタの検証と、地上および機上サブシステム双方で実施する電離圏異常検出モニタの連携が有効に機能するか実際の電離圏擾乱が発生する環境下で実証することが重要であると考えた。そのため、同装置を磁気低緯度に位置する新石垣空港に設置することとした。欧州および北米が磁気中高緯度地域で GAST-D SARPs を検証しているのに対し、日本の検証活動は唯一、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であり、世界全域で利用可能な GAST-D SARPs の妥当性検証に貢献するものである。

磁気低緯度地域では春季および秋季の夜間にプラズマバブルと呼ばれる電離圏擾乱の発生頻度が高くなるが、これは電離圏の電子密度の局所的な減少により電離圏遅延の空間勾配をもたらす。このプラズマバブルの GNSS 航法システ

ムへの影響評価のため、電子航法研究所では沖縄県石垣市に GPS 電離圏稠密観測装置を設置し、平成 17 年より連続観測している。また、大気光イメージャと呼ばれる全天カメラでプラズマバブルを撮影可能な観測機器を GAST-D SARPs 検証に合わせて与那国島から石垣市に移設したことにより、これら観測データを統合した GAST-D 研究用地上装置の総合的な評価検証が期待される[14]。なお、図 6 にこれらの位置関係を示す。

4.2 空港内の構成機器設置と今後の検証

図 7 に新石垣空港内の構成機器の配置を示す。空港内に GNSS 基準局 1~4 並びに IFM 局が配置され、GNSS 受信データは光通信でデータ処理装置に伝送される。そこで GAST-D メッセージが生成された後、VHF 送信局に光伝送されて VHF 送信アンテナより航空機に放送される。基準局配置に関して、とりわけ基準局 1 と基準局 2 で構成される基準局対については、電離圏空間勾配の推定誤差を考慮して基線長に対する検出性能の感度解析により、滑走路方向に 400m 弱程度の長さを確保した。また、基準局 1、基準局 2 は場周道路に隣接し、基準局 4 は誘導路に近いため、電離圏擾乱など特徴的な事象が発生した際に、GNSS 受信データに車両や航空機といった人工物からの反射波の影響を受けていないことを確認するため、監視カメラを設置して記録することとした。

本装置を用いて平成 26 年 3 月下旬には、実験用航空機による飛行実験を実施し、プラズマバブル観測時の飛行を含む実験データを取得したところである。今後は、長期データ収集による妥当性検証と HMI 解析を実施する予定である。また、GAST-D 研究用地上装置から放送される VHF 送信電波の使用可能範囲について、滑走路を含む検証も実施する予定である。

5. まとめ

CAT-III を実現する GBAS として、ICAO NSP 作業部会で GAST-D SARPs 原案が策定され、平成 22 年 5 月から運用を含めた検証へ移行しているが、電子航法研究所もこの検証活動に参加し、GAST-D 研究用地上装置を開発した。当

該装置は新石垣空港に設置して世界で唯一となる磁気低緯度地域での SARPs 原案の妥当性検証を実施している。平成 26 年度は、電離圏空間勾配モニタを中心とした異常検出モニタの検証とともに、実験用航空機を用いた飛行実験による実証と長期安定性試験を実施してそれらの検証結果を取りまとめ、ICAO にフィードバックするとともに、日本に GAST-D を導入する際の要件や安全性評価技術をまとめる予定である。

謝辞

GAST-D 研究用地上装置の新石垣空港への設置、データ収集につきまして、国土交通省航空局、沖縄県土木建築部空港課、ならびに石垣市建設部空港課の関係者に多大なるご協力を賜りましたことに深く感謝を申し上げます。

参考文献

[1] ICAO SARPs, Annex 10 (87), 2012 年 11 月
 [2] 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
 [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] T. Murphy 他, “Mitigation of Ionospheric Gradient Threats for GBAS to Support CAT II/III”, Proc. of ION GNSS 2006, 2006 年 9 月
 [5] T. Murphy 他, “Fault Modeling for GBAS Airworthiness Assessments”, NAVIGATION, Vol. 59, No. 2, 2012 年
 [6] T. Murphy 他, “Development Baseline

SARPs Proposal”, ICAO/NSP WGW Flimsy 29, 2010 年 5 月

[7] J. Burns 他, “Conceptual Framework for the proposal for GBAS to Support CAT III Operations”, ICAO/NSP WGW Flimsy6, 2009 年 11 月

[8] RTCA SC-159, RTCA/Do-253C, 2008 年 12 月

[9] “Certification considerations for highly-integrated or complex aircraft systems”, SAE international, Warrendale, PA, 1996 年 11 月

[10] “Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment”, SAE international, Warrendale, PA, 1996 年 12 月

[11] 吉原他, “カテゴリ III GBAS (GAST-D) の日本におけるリスク検討”, 第 13 回電子航法研究所研究発表会講演概要, 2013 年 6 月

[12] T. Yoshihara 他, “A Study on practical use of CSAC (Chip scale atomic clock) for GBAS ground subsystem”, Proc. of ION ITM 2014, 2014 年 1 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

[14] T. Yoshihara 他, “A program of GAST-D operational validation in an ionospheric active region of Japan”, ISPA 2013, 2013 年 10 月



図 6. 空港と電離圏観測機器

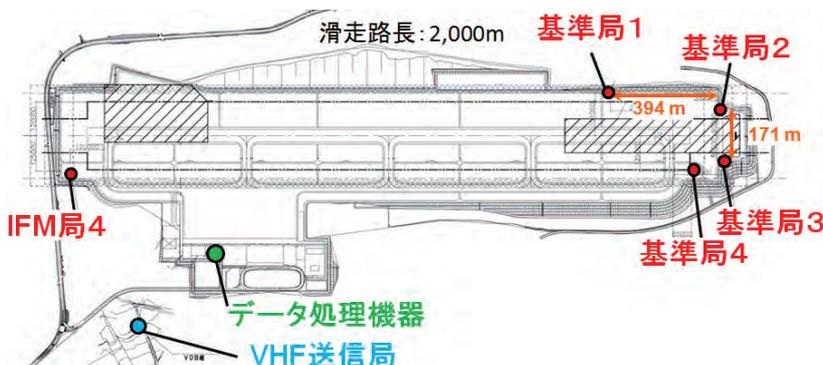


図 7. 新石垣空港内の GAST-D 研究用地上装置の構成機器配置