

17. GAST-D 機上実験装置の開発と評価

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

1 はじめに

地上型補強システム (GBAS) は、空港内に設けた地上装置を利用して高精度測位を可能とする補正情報や、GNSS 信号に異常があった場合に警報を発する等の補強情報を生成し、VHF データ放送 (VDB) を用いて空港周辺の航空機に対して放送し精密進入・着陸を実現するシステムである。GBAS では、補強情報に加えて複数の精密進入・着陸の経路情報を放送することができ、航空機は適切な経路を選択し安全に着陸することができる。

GAST-D (GBAS Approach Service Type-D) とは、GPS の L1 信号 (1.57542 GHz) を用いてカテゴリ III 精密進入を実現する GBAS である。全地球航法衛星システム (GNSS) による衛星航法で全ての飛行フェーズをサポートする GNSS 運航が望まれており、一部の国ではカテゴリ I (CAT-I) に対応した GBAS (GAST-C) の運用が開始されている中で、GAST-D は最終段階のカテゴリ III (CAT-III) を実現すると期待されているものである。

国際民間航空機関 (ICAO) は現在、GAST-D の技術標準 (SARPs) の策定を進めており、2010 年に策定された技術標準案 [1] の実現可能性を実機を用いた検証を、航法システムパネル (NSP) のもと各国で行っているところである。

GAST-D 技術標準案の検証は、米、欧、日を中心に行われており、米国では地上、機上両装置のプロトタイプを Honeywell 社が、欧州では地上装置プロトタイプを Thales 社及び Indra Navia 社が、機上装置プロトタイプを Thales 社 (大型機用) 及び Honeywell 社 (ビジネス機用) が担当している。これらの他、ドイツの Braunschweig 工科大学においても機上実験装置が開発され、飛行実験に用いられている [3]。

GAST-D の規格としての特徴は、CAT-III 着陸に必要なインテグリティ (完全性) を実現するために、機上装置にもインテグリティモニタ機能を持

たせることとした点にある。CAT-I GBAS においては、航空機がいかなる状態にあっても CAT-I の範囲内で安全であるように、GBAS 地上装置がインテグリティの担保を行う。しかしながら、地上装置だけでは CAT-III に対応したレベルで電離圏に起因する誤差の脅威を取り除くことが難しいと考えられたため、機上装置にも電離圏に起因する脅威に対応したインテグリティモニタが備えられ、地上・機上両装置の組み合わせにより、CAT-III に対応したインテグリティを達成する設計となっている [2]。

電子研究所では我が国の環境下におけるリスクに対応した GAST-D を実現するため、安全性設計及びそれを評価・検証する技術開発を行っている。欧米に比べて地磁気的な低緯度に位置する日本において重要となる、低緯度電離圏に特有の電離圏環境への対応性を実証するため、GAST-D 地上実験装置を開発し新石垣空港に設置した。GAST-D 装置の性能は、地上・機上両装置の組み合わせで達成されるため、当所で開発した GAST-D 地上実験装置の性能を評価するためには GAST-D に対応した機上装置が必要となる。しかしながら、GAST-D に対応した機上装置は市場に存在しないため、GAST-D 機上実験装置を合わせて開発する必要がある。本研究では、GAST-D 技術標準案の低磁気緯度環境対応性の検証に必要な、GAST-D に対応した機上実験装置を開発する。電子航法研究所で開発した GAST-D 地上実験装置は、GPS L1 信号と同等で GAST-D 技術標準案でも使用が認められている SBAS の測距信号にも対応するため、開発する機上実験装置は SBAS 衛星の測距信号にも対応したものである必要がある。

2 GAST-D 機上実験装置

2.1 ハードウェア構成

本研究で用いる GAST-D 機上実験装置は、市場調達可能な COTS (Commercial Off-The-Shelf) 品

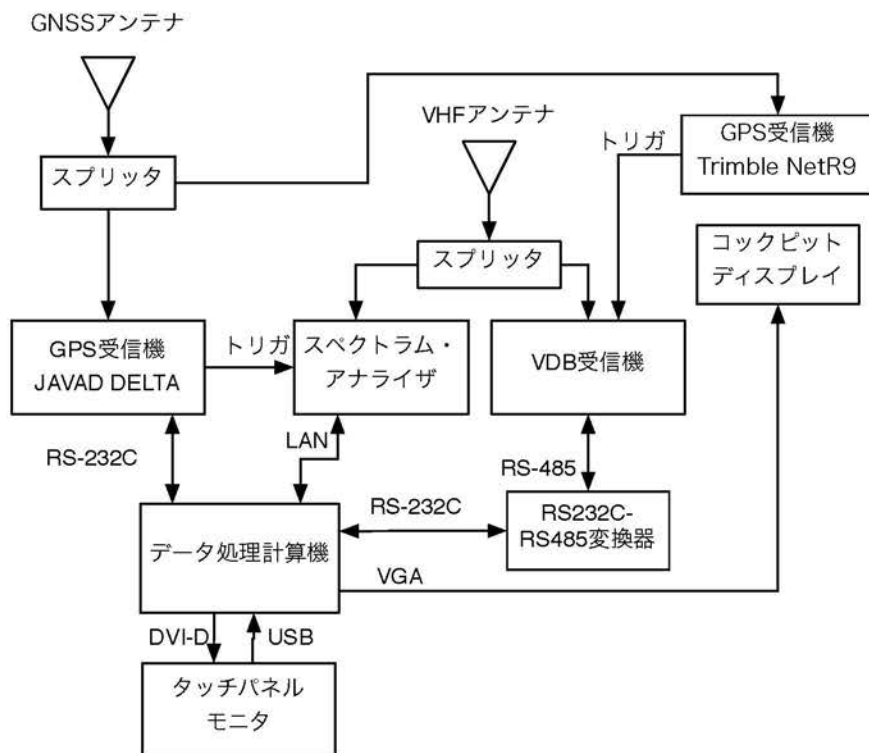


図 1: GAST-D 機上実験装置のハードウェアのブロック図

からなる。従って、ハードウェアとしてのインテグリティについては研究の対象としない。GAST-D 機上実験装置は、以下の主な構成要素からなる。

1. GNSS アンテナ
2. VHF アンテナ
3. GNSS 受信機
4. VDB 受信機
5. スペクトラム・アナライザ
6. データ処理計算機
7. コックピット・ディスプレイ

図 1 は、これらのハードウェア構成要素の関係を示したブロック図である。また、ハードウェア構成要素の具体的な形式を表 1 にまとめる。

GNSS アンテナは、GNSS 衛星からの信号を受信し、GNSS 受信機へ伝送する。GNSS 受信機は受信信号の処理を行い、GNSS 衛星との間の測距を行うとともに航法メッセージを取得する。取得したデータは、シリアル通信によりデータ処理計

算機へ送出される。本システムでは GPS L1 信号及び SBAS 信号のみを用いるが、GNSS アンテナは L1, L2, L5 の 3 周波に対応しており、GNSS 受信機は GLONASS, Galileo, QZSS 及び SBAS（静止衛星型衛星航法補強システム）にも対応しており、将来の多周波・複数コア衛星系への拡張が可能な構成となっている。GNSS アンテナは、電子航法研究所の実験用航空機の背面に、運航用 GNSS アンテナとは別に搭載されている。

VHF アンテナは、VHF 帯の水平偏波で放送される VDB 信号を受信し、VDB 受信機及びスペクトラム・アナライザへ伝送する。VDB 受信機は VDB 信号を受信し、ディファレンシャル位相シフト変調を復調し、GBAS メッセージを解釈し、シリアル通信によりデータ処理計算機へ送出する。スペクトラム・アナライザは、受信した VDB 信号の電界強度を測定する。測定データはシリアル通信によりデータ処理計算機へ送出される。電界強度データは、GAST-D 技術標準案で定める領域内で VDB 信号の電界強度が規定値以上に保つように送信できていることを確認するために用いられる。VHF アンテナは、電子航法研究所の実験用航空機の垂

表 1: GAST-D 機上実験装置構成部品。“*”は電子航法研究所実験用航空機に常設。

GNSS アンテナ*	AeroAntenna AT1675-381
VDB アンテナ*	Comant CI 120-200 G/S-L
GNSS 受信機	Javad Delta-G3T
VDB 受信機	Telerad RE9009A
スペクトラム・アナライザ	Agilent N9010A
データ処理計算機	CONTEC VPC2000
コックピット・ディスプレイ*	Flight Display Systems FD90AID-7

直尾翼に、運航用 VHF 航法アンテナとは別に搭載されている。

データ処理計算機では、GNSS 受信機、VDB 受信機及びスペクトラム・アナライザから得られたデータを取得し保存するとともに、GNSS 受信機及び VDB 受信機から得られたデータを用いて GBAS 補正と必要なインテグリティモニタ処理を実施し、VDB メッセージに含まれる進入経路に対するコース偏位を求め、コックピット・ディスプレイに表示するソフトウェアが動作する。データ処理計算機は、進入経路の選択などを含むユーザー・インターフェースとしても動作する。

コックピット・ディスプレイは、電子航法研究所の実験用航空機のコックピットに装備されており、データ処理計算機が求めた入経路に対するコース偏位などの情報を、参考情報として出力する。コックピット・ディスプレイは情報を表示するのみであり、コックピットから GAST-D 機上実験装置への操作を行うことはできない。

2.2 ソフトウェア構成

2.2.1 全体構成

ソフトウェアは、リアルタイムで動作するオンラインソフトウェアと、収集したデータを再解析するオフラインソフトウェアからなる。オンラインソフトウェアは、GNSS 受信機データ、VDB データ (GBAS メッセージ)、及び VDB 電界強度の生データを記録するとともに、GNSS 受信機及び VDB 受信機から得られたデータを用いて GBAS 補正と必要なインテグリティモニタ処理を実施し、VDB メッセージに含まれる進入経路に対するコース偏位を求め、コックピット・ディスプレイに表示する。オフラインソフトウェアでは、オンラインソフトウェ

アで収集したデータを再生し、設定する GAST-D 処理パラメータに基づいて再解析を行い、オンラインソフトウェアと同様の出力を行う。また、オンラインソフトウェア、オフラインソフトウェアともに、将来の拡張用として、測位情報、コース偏位情報などを UDP により外部に出力する機能を有する。図 2(a) は、本研究で開発した GAST-D 機上装置ソフトウェアのインターフェース画面の例である。図 2(b) はコックピット・ディスプレイに出力される画面の例である。コックピット・ディスプレイの右半分は、将来の拡張のため空白としている。図 2(c) はスペクトラム・アナライザから得られた VHF 信号のスペクトル強度を表示する画面の例である。

2.2.2 GAST-D 演算処理

GAST-D 機上実験装置のソフトウェアのうち、インテグリティモニタを含む GAST-D 演算に関する機能は、RTCA が定める最小運用性能基準 (Minimum Operational Performance Standard: MOPS)[4] 及び米国 LAAS (Local Area Augmentation System) インターフェース仕様 (Interface Control Document: ICD)[5] に準拠する。しかしながら、これらの仕様は、備えるべき機能と統一が必要な一部の計算方法を定義しているのみであり、それぞれの機能を実現するモジュール及びそれらを統合したソフトウェアとしての実装方法は各製造者の自由である。本研究では、データ取得からコース偏位の出力に至る一連の処理について、独自の設計に基づいて開発を行った。

図 3 は、GAST-D 機上実験装置のソフトウェアのうち、GAST-D 処理部分についての処理の流れ

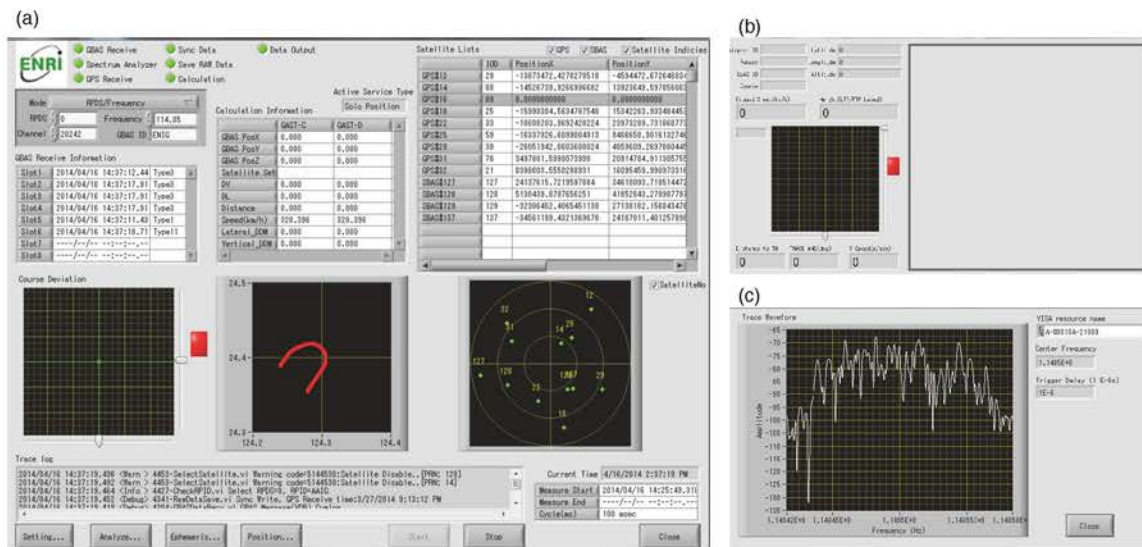


図 2: GAST-D 機上実験装置ソフトウェアのインターフェース。(a) インターフェース画面、(b) コックピット・ディスプレイ表示画面、(c) スペクトル表示画面。

を大まかに示したものである。処理のうち、GAST-D に特有の電離圏異常対策として実装される主な処理としては以下のものが挙げられる。

1. 30 秒キャリア・スムージング
2. ジオメトリ・スクリーニング
3. DSIGMA
4. 保護レベル計算

なお、コード擬似距離と搬送波位相の乖離を監視する CCD(Code-Carrier Divergence) モニタは、電離圏異常の検出にも用いられるが、GAST-C 及び D に共通の処理である。

キャリア・スムージングとは、雑音の大きいコード擬似距離を、搬送波位相を用いて平滑化するものであるが、電離圏に起因するコード擬似距離と搬送波位相の乖離 (CCD) による誤差が発生しうる。この誤差はスムージング時定数によって変化するので、GAST-D では、GAST-C で用いられる 100 秒の時定数に加え、30 秒の時定数でもスムージングを行い、後の処理に用いる。ジオメトリ・スクリーニングとは、未検出誤差の衛星配置による増幅を避けるため、機上装置側で使用する衛星セットについて、擬似距離測定値から位置を計算する行列 (S 行列) を用いて衛星配置を評価し、S 行列の要素が一

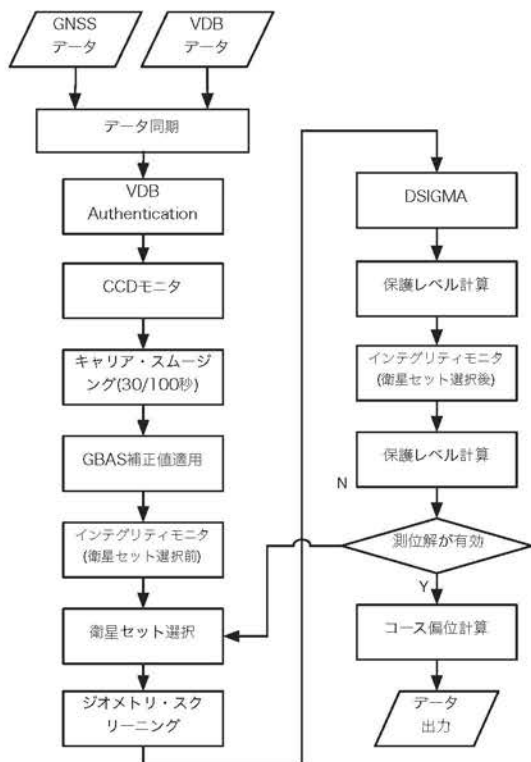


図 3: GAST-D 機上実験装置のソフトウェアのブロック図 (GAST-D 処理部分のみ)。

定値より大きい場合にその衛星セットを無効化するものである。DSIGMA (Dual Solution Ionospheric Gradient Monitoring Algorithm) とは、30 秒及び 100 秒の 2 つの時定数を用いてスムージングされたコード擬似距離に GBAS 補正を適用して測位を行い、2 つの測位解を比較するものである。電離圏に何らかの空間勾配がある場合、異なる時定数でキャリア・スムージングを受けたコード擬似距離を用いた測位解に乖離が生じるので、この乖離を用いて電離圏異常の有無を検出する。さらに、DSIGMA において算出された 2 つの異なるスムージング時定数に対応する測位解の乖離は、保護レベルの計算において通常の保護レベルに加算される。

本研究では、これらのモニタ群について、RTCA DO-253C (LAAS MOPS) [4] にアルゴリズムの記述があるものはそれに従い、記述がないものにおいては独自に考案したアルゴリズムを用いて実装を行った。また、モジュールの実行順序、衛星セットの選択においても独自のアルゴリズムを実装した。これらのモジュールの性能は飛行実験によるデータを用いて評価し、全体として GAST-D 技術標準案の妥当性の評価につなげる予定である。また、衛星セット選択アルゴリズムについては、低緯度電離圏擾乱の影響を最小化する新手法をシミュレーションにより開発しており、本 GAST-D 機上実験装置のソフトウェアに実装していく予定である。

2.3 飛行実験

本研究で開発した GAST-D 機上実験装置を用いて、GAST-D 地上実験装置が設置されている新石垣空港において、2014 年 3 月 20～30 日の間飛行実験を実施した。実験期間中、昼間 6 フライト、夜間 4 フライトの計 10 フライトを実施し、合計 40 回のアプローチを行った。GAST-D 機上実験装置は、データ取得については概ね良好に動作し、飛行実験中の GNSS 受信機データ、VDB データ、及び VDB 電界強度を収集することができた。飛行実験では、夜間 4 フライトのうち 3 フライトにおいて電離圏擾乱の発生が確認されており、世界初の低緯度電離圏擾乱時の GBAS 飛行実験となった。

図 4 は、1 回のアプローチ中に得られた VDB 信号強度の例である。実験用航空機のアンテナ特性、アンテナ・受信機間の伝送損失などの補正前のデータではあるが、GAST-D 技術標準案の定める最低

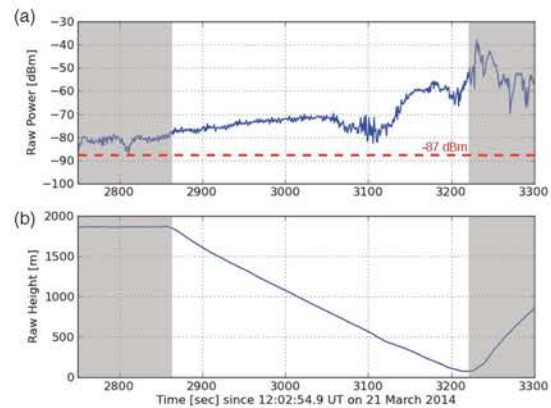


図 4: (a) 1 回のアプローチ中に得られた VDB 信号強度の例。実験用航空機のアンテナ特性、アンテナ・受信機間の伝送損失などについては未補正であることに注意。(b) 実験用航空機の高度。2860～3220 秒の間がアプローチ。

電界強度 (-87 dBm) を満たしていることが分かる。

GAST-D 機上装置としてのインテグリティモニタ機能を含む総合性能評価については、オフラインソフトウェアを用いて GAST-D 処理パラメータの調整を行いつつ、解析を進めていく。

3 まとめ

GAST-D 技術標準案の検証のため、電子航法研究所で開発した GAST-D 地上実験装置と組み合わせ使用する GAST-D 機上実験装置を開発した。本研究では、低緯度電離圏に特有の電離圏環境への対応性の実証を主要な目的とし、GAST-D において新たに取り入れられた電離圏異常に関連したインテグリティモニタの実装した GAST-D 処理ソフトウェアを開発した。ソフトウェアは、RTCA DO-253C (LAAS MOPS)[4] 及び DO-246D (LAAS ICD)[5] に準拠し、特に記述のない部分については独自のアルゴリズムを実装した。本研究で開発した GAST-D 機上実験装置を用いて、GAST-D 地上実験装置が設置されている新石垣空港において、2014 年 3 月 20～30 日の間飛行実験を実施し、世界初の低緯度電離圏擾乱時の GBAS 飛行実験に成功した。今後、GAST-D 処理パラメータの調整を行いつつ解析を進め、GAST-D 機上装置としてのインテグリティモニタ機能を含む総合性能評価を

行っていく予定である。加えて、新たに開発した低緯度電離圏擾乱の影響を最小するための衛星セット選択アルゴリズムを、本 GAST-D 機上実験装置のソフトウェアに実装し、評価を行っていく予定である。

謝辞

新石垣空港における飛行実験の実施については、航空局、沖縄県、石垣市、気象庁、海上保安庁の多大なる協力に感謝いたします。

参考文献

- [1] ICAO GBAS CAT II/III Development Baseline SARPs, 2010.
- [2] Conceptual Framework for the Proposal for GBAS to Support CAT III Operations, Attachment H to the report of the 10–20 November 2009 meeting of the Navigation Systems Panel (NSP) Working Group of the Whole (WGW), 2009.
- [3] Stanisak, M., R. Schork, M. Kujawska, T. Feuerle, and P. Hecker, Conception, Implementation and Validation of a GAST-D Capable Airborne Receiver Simulation, Proceedings of ION GNSS 2012, 250–257, September 2012.
- [4] RTCA DO-253C, Minimum operational performance standards (MOPS) for GPS Local Area Augmentation System (LAAS) airborne equipment, RTCA Inc., 2008.
- [5] RTCA DO-246D, GNSS-based precision approach Local Area Augmentation System (LAAS) signal-in-space interface control document (ICD), RTCA Inc., 2008.