

19. GAST-D 機上実験装置による飛行実験評価

航法システム領域 齋藤 享, ※吉原 貴之, 毛塚 敦,
齊藤 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。

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。

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 [1,2]。

GAST-D の技術標準 (SARPs)は現在策定の最終段階にあり、2010 年に策定された技術標準案 [1]の実現可能性の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。電子航法研究所では、磁気低

緯度電離圏に代表される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。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、地上及び機上両装置を開発し、地上装置を実空港(新石垣空港)に設置し、機上装置を電子航法研究所の実験用航空機に搭載して飛行実験による性能検証を行った。

2 GAST-D 機上実験装置

GAST-D に対応した機上受信機は市場に存在しないので独自に開発する必要がある。GPS や VDB 信号を受信しデータ処理を行うハードウェアは、それぞれの要素ごとに市場調達可能な COTS (Commercial Off-The-Shelf)品を組み合わせ構成する。GBAS 測位及びインテグリティモニタを行うソフトウェアについては、GAST-D SARPs 案, RTCA が定めるインターフェース定義文書(ICD, DO-246D)[3], 最小機能要件(MOPS, DO-253C)[4]に基づいて構成する。

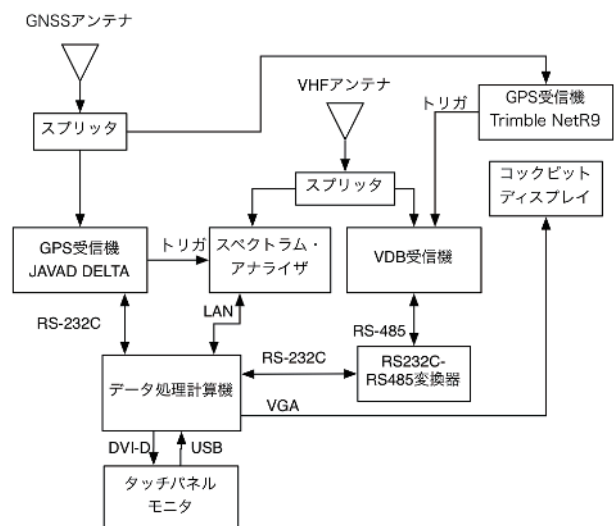


図1. GAST-D 機上装置のハードウェアブロック図

2.1 ハードウェア構成

図1は、ハードウェアのブロック図である。

GBAS 測位用 GNSS 受信機，VDB 受信機，スペクトラム・アナライザから取得されたデータは全てデータ処理計算機によって収集され，GAST-D 機上ソフトウェアによって処理される。結果はメイン画面（タッチパネルモニタ），コックピットディスプレイに表示されるとともに計算機内に記録される。1PPS 用 GNSS 受信機から取り出される GPS 時刻に同期した 1 秒パルス(1PPS)信号は，VDB 受信機に入力され，受信した VDB 信号の時分割多重(TDMA)スロットの判定に用いられる。これは，GAST-D において導入され，GAST-C (CAT-I GBAS)においても推奨される VDB authentication プロトコルをサポートするために必要なものである。この受信機は航空機のリファレンス位置取得のための精密測位にも用いる。

なお，本研究では，地上・機上連携による GAST-D 補強性能の試験を目的としておりハードウェアのインテグリティについては研究の対象としない

2.2 ソフトウェア構成

図 2 に，GAST-D 機上ソフトウェアのブロック図を示す。本ソフトウェアでは，GAST-D 機上装置に必要なとされるインテグリティモニタの

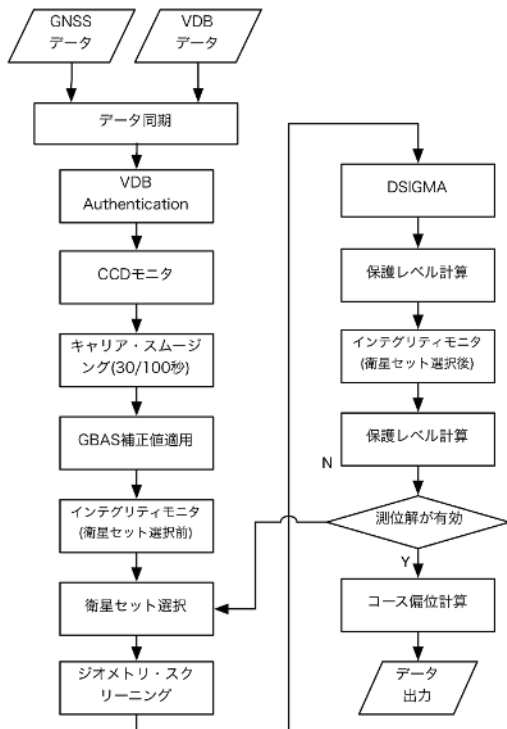


図 2. GAST-D 機上装置のソフトウェアブロック図

主なものを全て実装している。代表的なものが，コード擬似距離と搬送波位相の変化の乖離から電離圏異常を検出する CCD モニタ，異なる時定数（100 秒，30 秒）でコード擬似距離を搬送波位相によって平滑化して測位を行い解の乖離から電離圏異常を検出する DSIGMA (Dual Solution Ionospheric Gradient Monitoring Algorithm)，測距誤差が位置誤差に大きく反映されうる衛星配置を排除するジオメトリスクリーニング，VDB 信号の spoofing を防止する VDB authentication などがある。

なお本研究では，地上・機上連携による GAST-D 補強性能の検証を目的としており，ソフトウェアコーディングのインテグリティについては研究の対象としない。

3 飛行実験

GAST-D 地上・機上連携による補強性能を検証するために，本 GAST-D 機上装置を搭載した電子航法研究所実験用航空機(Beechcraft 式 B300 型)を用いた飛行実験を行った。



図 3. 石垣島における地上実験装置の配置

3.1 地上実験装置

地上側の実験装置は，GAST-D 補強情報を生成し放送する GAST-D 地上実験装置を中心とし，電離圏擾乱の発生状況を独立に観測する電離圏シンチレーション観測網，大気光全天イメージャからなる。これらの装置は，新石垣空港を始めとする石垣島内に設置されている(図 3)。新石垣空港に設置した最大の理由は，プラズマバブルと呼ばれる非常に大きな電離圏空間変動を伴う現象が頻繁に発生する場所であり，GAST-D の補強性能を実際の電離圏擾乱の発生

下で検証するためである。

3.1.1 新石垣空港 GAST-D 地上実験装置

GAST-D 地上実験装置は、電子航法研究所で開発し、NEC 社によって製造されたものであり、新石垣空港に設置され、2014 年 2 月より連続的に運用されている。

GAST-D 地上装置の詳細については、別発表に詳しいので、そちらを参照されたい。

3.1.2 電離圏シンチレーション観測

電離圏シンチレーション受信機は、GNSS 電波の強度と位相のふらつきを検出するものである。プラズマバブルに伴って存在する電離圏プラズマの不規則構造（数 100m 規模）は GNSS 電波に「またたき」を与えるため、強度の変動（強度シンチレーション）としてプラズマバブルの存在を推定できる。

強度シンチレーションは、一定時間内の GNSS 受信強度変動の規格化された標準偏差を用いて表わされることが多く、これを S4 指数と呼ぶ。この値が大きいほど電離圏シンチレーションが強く、振幅の大きな電離圏不規則構造が存在することになる。

シンチレーション受信機は、石垣市、石垣市教育委員会の協力により、新石垣空港から約 11 km 離れた石垣市市街地の 4 カ所に設置され

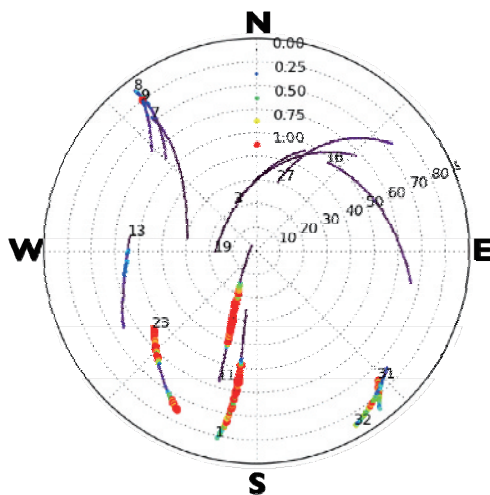


図 4. 電離圏シンチレーションの例（2014 年 3 月 23 日 21～23 JST）。衛星軌道に沿って暖色系の色でシンボルが大きくなるほど強いシンチレーションが発生していることを示す。

ており、シンチレーションの発生状況を外部からリアルタイムで監視できるようになっている。

3.1.3 大気光全天イメージャ

大気光全天イメージャとは、地球大気が放つ微弱な光（大気光）を、魚眼レンズを装着した超高感度カメラを用いて撮像する装置である。大気光は、その光の波長によって発光メカニズムが異なり、波長と発光高度に関係があることが知られている。特に発光高度と電離圏 F 領域の電子密度の関連が強いものとして、630.0 nm、777.4 nm があり、それぞれ高度 250 km、350 km 付近が発光ピークであると言われている。プラズマバブルは電離圏電子密度の急激な落ち込みであるので、大気光全天イメージャでは大気光の中の暗い帯状構造として捉えられることとなる(図 5 左)。

電子航法研究所では、石垣市教育委員会の協力を得て、名古屋大学と共同で石垣市西部の崎枝小中学校に大気光全天イメージャを設置した(図 5 右)。本イメージャは 630.0 nm、777.4 nm を含む 5 種類の光学フィルタを備え、自動的にフィルタを切り替えながら観測を行う。撮影された画像は、電子航法研究所の端末を通してリアルタイムで監視することができる。

3.2 実験日程・フライトパターン

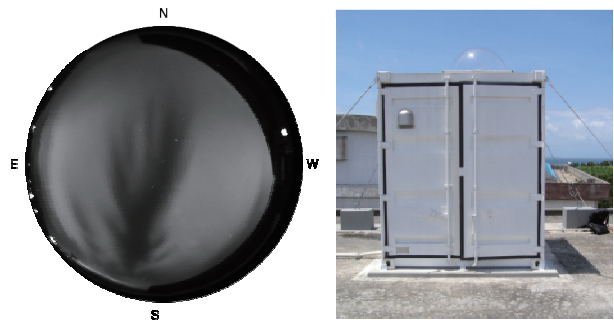


図 5. 左：大気光全天イメージャによるプラズマバブル観測例。図の上下左右が北南東西に対応している。右：石垣市立崎枝小中学校に設置した大気光全天イメージャ。

飛行実験は、2014 年 3 月 21～28 日、2014 年 9 月 14～23 日の 2 回実施した。飛行実験日程は、プラズマバブルの発生頻度が高い春分、秋分前後の、新月前後を選んで設定された。新月前後が選ばれる理由は、大気光全天イメージャの超高感度カメラが月の強い光で破損すること

を避けるためである。

飛行パターンは、アプローチサービス性能の他、VDB電波の覆域測定を行うため7種類設定し、天候、電離圏擾乱発生状況を勘案してその日に適した飛行パターンを選択して実施した。表1に飛行パターンの概要を示す。

表1. 飛行パターン一覧

1	高度 10,000 ft, 半径 20 nm 周回
2	高度 1,500 ft, 半径 15 nm 周回
3	高度 2,000 ft, 半径 20 nm 周回
4	高度 10,000 ft, 滑走路沿い 50 nm 直線
5	高度 2,000 ft, 滑走路沿い 50 nm 直線
6	RWY-04 アプローチ
7	RWY-22 アプローチ

4 結果

4.1 飛行実験実施結果

4.1.1 2014年3月

2014年3月の飛行実験では、昼間6、夜間4の合計10フライトを実施し、その中で合計45アプローチ(RWY-22: 24回, RWY-04: 21回)を実施した(表2)。4回の夜間飛行のうち、3回でプラズマバブルの発生が確認された。

表2. 2014年3月の飛行実験実施内容

実施日	パターン	備考
3月21日昼	6	
3月21日夜	7	
3月23日昼	2	
3月22日夜	6	プラズマバブル有
3月23日昼	1	
3月23日夜	5及び2	プラズマバブル有
3月25日昼	3	
3月26日昼	7	
3月28日昼	4及び2	
3月28日夜	6及び7	プラズマバブル有 イメージ観測有

4.1.2 2014年9月

2014年9月の飛行実験では、昼間3、夜間4の合計7フライトを実施し、その中で合計32

アプローチ(RWY-22: 18回, RWY-04: 14回)を実施した(表3)。4回の夜間飛行のうち、2回でプラズマバブルの発生が確認された。特にこの飛行実験においては、夜間の実験において電離圏シンチレーション観測及び大気光全天イメージ観測のリアルタイムデータを用い、プラズマバブルの発生の有無を確認したうえで飛行の実施・中止の判断を行った。

表3. 2014年9月の飛行実験実施内容

実施日	パターン	備考
9月15日昼	7	
9月15日夜	6及び7	プラズマバブル有 イメージ観測有
9月16日昼	1及び7	
9月16日夜	6	
9月17日昼	2及び7	
9月19日夜	6及び7	
9月23日夜	6及び7	プラズマバブル有 イメージ観測有

4.2 航法性能

図6は、2014年9月23日夜間の飛行実験結果を示したものである。このフライトでは、最下段(航空機の高度(WGS-84 楕円体高))に示すように7回のアプローチが実施された。また、大気光全天イメージ及びシンチレーション受信機により、このフライトのプラズマバブルの発生が確認されている(図7)。

最上段は航法性能を示しており、緑線は垂直位置誤差(事後解析精密測位結果を基準)、青線は垂直保護レベル(Vertical Protection Level: VPL)、赤線は垂直警報限界(Vertical Alert Limit: VAL)である。垂直警報限界はスレッシュホールドからの距離に伴って43.35 mまで増加するが、図を見やすくするため25 mを超える警報限界は表示範囲外としている。

このフライトにおいて、垂直位置誤差がVPLを超える場合(Hazardous Misleading Information: HMI)は発生せず、安全性は完全に保たれていた。このフライトを通しての垂直位置誤差(95%値)は0.86 mであり、ICAOの定める垂直精度要件(4 m)を十分満たしていた。

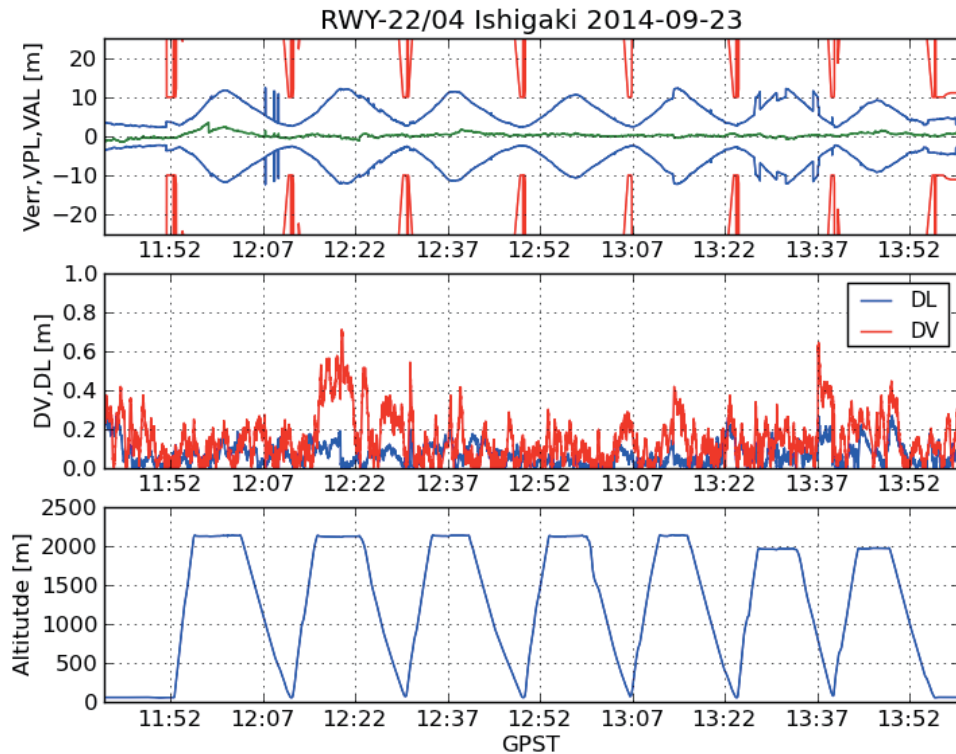


図 6. 2014 年 9 月 23 日夜間の飛行実験結果。上：垂直位置誤差(緑)，垂直保護レベル(青)，垂直警報限界(赤)。中：DSIGMA モニタの出力値(赤：垂直成分(D_V)，青：横方向成分(D_L)。下：飛行高度(WGS-84 楕円体高)。

4.3 電離圏擾乱に対する反応

図 6 中段は、DSIGMA モニタの出力値（青：横方向成分(D_L)，赤：垂直成分(D_V)）を示したものである。DSIGMA モニタは、コード擬似距離を搬送波位相により平滑化する際に 100 秒と 30 秒の 2 つの時定数を用い、それぞれを用いた測位解を比較するものである。電離圏遅延量に変動がない場合は両者に差は出ないが、電離圏遅延量に変動がある場合は電離圏起因の誤差の蓄積量が平滑化時定数によって異なるため、両者に差が現れる。これを電離圏異常の指標とし、D_L、D_Vのいずれかが 2 m を超える場合は、その測位解を用いないことが定められている [4]。DSIGMA モニタについては、机上計算による動作の予想と、実データによりマルチパスの強い地上駐機時を除いて通常状態では DSIGMA モニタが反応しないことは確かめられているが [5]、現実の電離圏擾乱に対してどのように反応するかは検証されていない。

本フライトの結果を見ると、GPS 時刻（日本時間-9 時間）12:15~12:23, 12:26~12:30, 13:37~13:40 に D_V の増大が見られる。これら

はいずれも飛行中であり、地表面や地上構造物からのマルチパスによるものとは考えにくい。このとき、GAST-D 機上装置が測位に使用していた衛星の方位を調べ、大気光全天イメージャに見られるプラズマバブルの位置と比較したところ、12:15~12:23, 12:26~12:30 においては GPS PRN02 衛星、13:37~13:40 には GPS PRN05 衛星の信号が、それぞれプラズマバブルを通過してきていることが確認された(図 7)。12:13 の大気光全天イメージャ画像では、GPS PRN02 衛星の方向に雲がかかっているが、画像の履歴を調べると、プラズマバブルには当該衛星の位置に分枝があることが分かる。従って、本フライトで観測された D_V 値の明瞭な増大は、いずれもプラズマバブルに伴うものであることが分かり、DSIGMA モニタが電離圏異常に対して確かに反応することが確認された。

この D_V 値の明瞭な増大は、明瞭な垂直位置誤差の増大は伴っていない。これは、GAST-D で用いる平滑化時定数が 30 秒であり、GAST-C (CAT-I)における時定数 100 秒に比べて電離圏勾配に起因する誤差の蓄積が少なくて済んだ

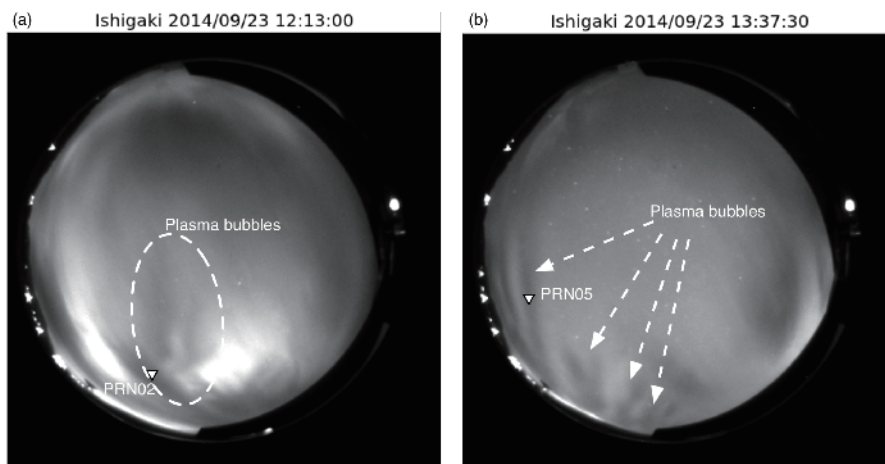


図 7. 左：2014 年 9 月 23 日 12:13 UT の大気光全天イメージャ (630.0 nm)画像。右：同 13:37 UT の画像。画像中▽はそれぞれ GPS PRN02 及び GPS PRN05 衛星の位置を示す。

ためであると考えられる。この時、GAST-C モードであれば D_V 値に対応した 0.6 m 程度の垂直誤差増大があったと考えられる。

5 まとめと今後の課題

本研究では、カテゴリーIII 着陸に対応した GBAS (GAST-D)に対応した機上実験装置を開発し、GAST-D 地上装置が設置された新石垣空港において飛行実験を実施した。新石垣空港周辺には電離圏シンチレーション受信機、大気光全天イメージャが設置されており、これを参考にすることにより電離圏擾乱（プラズマバブル）発生中の GAST-D 飛行実験に世界で初めて成功した。プラズマバブルが発生した 2014 年 9 月 23 日夜間のフライト結果を解析したところ、95%垂直位置誤差は 0.86 m であり、GAST-D の精度要件を十分満足していた。また、機上側で電離圏異常を検出する DSIGMA モニタがプラズマバブルに対して反応することが、大気光全天イメージャ観測から確認された。これにより、電離圏擾乱に対する DSIGMA モニタの反応を世界で初めて実データで実証した。

今後は、他のフライトのデータの解析を進め、昼・夜、電離圏静穏時・擾乱時の比較を進める。また、GAST-D で導入された機上モニタ (DSIGMA, CCD, VDB authentication 等)の動作を検証する。さらに、電離圏擾乱に対応した最適な衛星セット選択法[6]についても、実データを用いて検証を行う。

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と支援に感謝いたします。

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), November 2009.
- [3] RTCA DO-246D, GNSS-based precision approach Local Area Augmentation System (LAAS) signal-in-space interface control document (ICD), RTCA Inc., 2008.
- [4] RTCA DO-253C, Minimum operational performance standards (MOPS) for GPS Local Area Augmentation System (LAAS) airborne equipment, RTCA Inc., 2008.
- [5] GBAS CAT II/III Business aircraft operational validation input results - updated, Working Paper 28, The 1st meeting of the Navigation Systems Panel, April 2015.
- [6] Saito, S., K. Vernez, T. Yoshihara, and A. Kezuka, Performance improvement of GAST-D airborne monitor algorithms under disturbed ionospheric conditions, Proceedings of ION GNSS+ 2014, 2014.