

16. 日本 FIR におけるインド GAGAN の性能評価

航法システム領域 ※麻生 貴広，坂井 丈泰

1 はじめに

航空機の航法においては、衛星航法システムの導入が世界的に進められている。衛星航法システムのひとつである米国の GPS (Global Positioning System: 全地球測位システム) は、一般に広く利用されており十分な測位精度が得られるが、航空機の航法に利用するにあたっては、GPS 自体の故障率や故障した際のユーザへの伝達遅れ等があり信頼性が足りない。そのため、GPS を単独で航空機の航法に利用することができず、適切な補強システムが必要とされている[1-2]。

国際民間航空機関 (ICAO: International Civil Aviation Organization) は、GPS 補強システムの一つとして、静止衛星を介して補強情報を伝送する SBAS (Satellite-Based Augmentation System: 静止衛星型衛星航法補強システム) の国際標準を定めた[3-4]。我が国では国土交通省航空局が SBAS を整備し、MSAS (MTSAT Satellite-based Augmentation System: 運輸多目的衛星用航法補強システム) として 2007 年 9 月に供用を開始した[5-6]。同様のシステムとして、図1のとおり米国の WAAS (Wide Area Augmentation Sys-

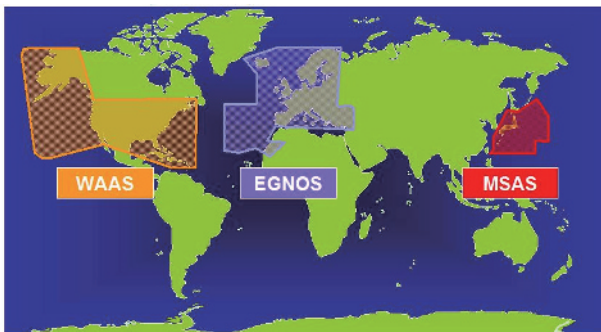


図 1. 世界の SBAS

tem), 欧州の EGNOS (European Geostationary Overlay Service) と呼ばれる SBAS が供用されている。

一方、2014 年からインドが提供する GAGAN (GPS Aided Geo Augmented Navigation) が供用され始め、日本の FIR における一部でも受信できる状況になったことから、GAGAN を使用した場合の信号特性及び非精密進入における性能を評価した。

2 GAGAN の概要

GAGAN は、インドの FIR における航空交通流の改善に向けた航空機の航法に適した精度やインテグリティを提供する SBAS システムである。

GAGAN は、システム開発を担当する ISRO (Indian Space Research Organisation) と SBAS サービスプロバイダの AAI (Airports Authority of India) による共同プログラムであり、2009 年の実証フェーズを経て、2013 年に最終運用フェーズへ移行してきた。その後、インド航空局 DGCA (Directorate General of Civil Aviation) により 2013 年に RNP0.1 が認証され、2014 年 2 月から正式に運用が開始されている[7]。現在、APV-1 での運用開始に向けて飛行方式の設計等を実施中である。

図 2 に GAGAN のシステム構成を示す[8]。15 の地上監視局 (INRES), 3 つの統制局 (INMCC), それらを接続するネットワーク装置, 3 つのアップリンク局 (INLUS) から成り、2 つの静止衛星 (将来的にもう 1 機打上げ予定) から GAGAN 信号が提供される。

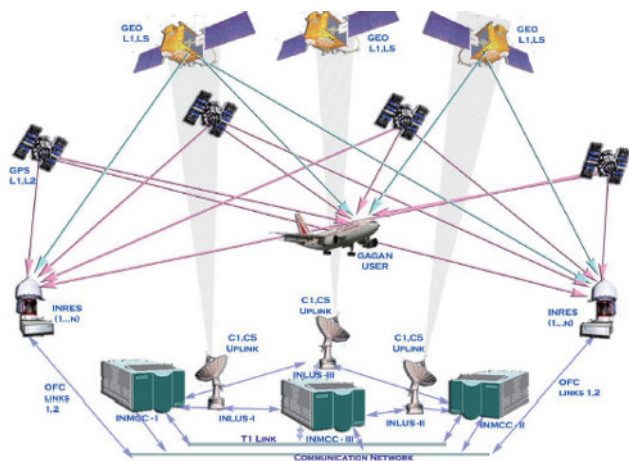


図 2. GAGAN のシステム構成

使用する静止衛星は、東経 55 度にある GSAT-8 と東経 83 度にある GSAT-10 の 2 基が使用されている。信号覆域は図 3 で示すとおりオーストラリア、中東に加え日本も含まれる。通常、GSAT-8 から PRN127, GSAT-10 から PRN128 の擬似雑音符号を用い SBAS メッセージが放送される。なお、MSAS で提供している静止衛星からのレンジング機能（GPS の測距信号が 1 つ増える）については GAGAN からは提供されていない。また、電離層遅延量推定においては ISRO が独自に開発したものでありインド FIR 周辺での電離層環境をモデル化したものを用いている。

3 GAGAN の性能評価

ICAO の国際標準で求められる SBAS の信号特性及び非精密進入での性能について、2014 年 11 月から 2015 年 2 月末にかけて 4 ヶ月間の評価を実施した。

3.1 信号特性の評価

GAGAN からは、L1 信号(1575.42 MHz) 及び L5 信号(1176.45 MHz)の 2 つの周波数が放送されているが、現在航空用途の SBAS 受信機においては L1 信号のみが使用されているため、本稿では L1 信号のみの評価とした。

日本の南方に位置する石垣の固定点で、SBAS の L1 信号を受信した搬送波電力対雑音電力密度 (C/N0) が図 4 のように得

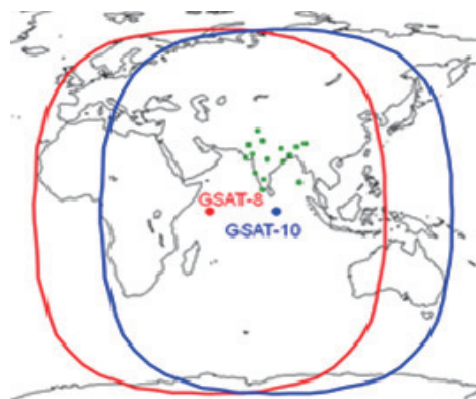


図 3. GAGAN の信号覆域

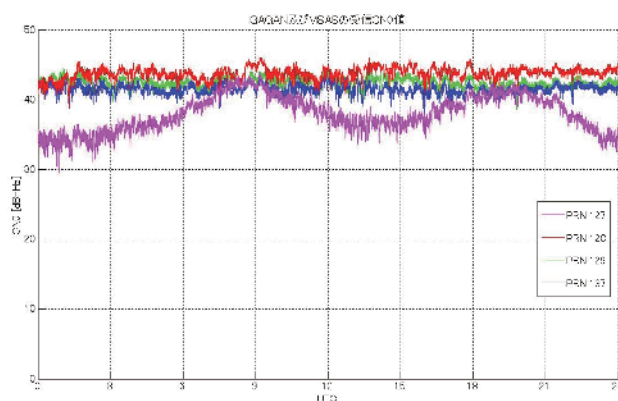


図 4. 石垣での SBAS 受信 C/N0

られている。C/N0 が高い順に、GAGAN(PRN128) , MSAS(PRN129) , MSAS(PRN137), GAGAN(PRN127)となっている。GAGAN(PRN128)は 1 日を通して非常に安定しており約 44dB-Hz で受信される。一方、GAGAN(PRN127)は 33~43dB-Hz と、1 日を通して 10dB ほど緩やかに変動している。これは PRN127 が本評価期間において試験中であり、静止衛星が所定の軌道保持範囲を超えていたため、信号強度が変化したものと思われる。

また、仙台、東京でも同様に受信状況を確認した。その結果 GAGAN (PRN128) と MSAS(PRN129,PRN137)の受信強度を比較すると次のとおりとなった。

- 石垣：MSAS < GAGAN
- 東京：MSAS = GAGAN
- 仙台：MSAS > GAGAN

このように、日本の FIR の南西（東京以西）においては MSAS よりも GAGAN

(PRN128)の方が受信信号強度が高いことが分かる。

覆域に関しては、GSAT-10のアンテナ中心方向が83°Eであるため、日本のFIRの広い範囲で受信可能であり、覆域は北方地域（北海道とカムチャッカ半島の中間）以西となっている。一方、GAGAN (PRN127)の静止衛星GSAT-8はアンテナ中心方向が70°Eであるため(静止衛星の直下点経度は55°E)、大阪辺りまでが限界となっている。そのためPRN127は東京を含めそれ以北では受信されない。

3.2 非精密進入サービスの性能評価

ICAOの国際標準では、GNSSを航空機の航法に用いるために4要件を満たすことが必要とされている。4要件とは、位置の正確さ（精度）、情報の確実さ（完全性）、中断のないサービス（継続性）、そして稼働率の高さ（利用可能性）である。

非精密進入においては、この4要件について、以下を満足する場合にサービス可能としている。

- 精度 : 220m
- 完全性 : $1 \cdot 10^{-7}/h$
- 継続性 : $1 \cdot 10^{-4}/h \sim 1 \cdot 10^{-8}/h$
- 利用可能性 : 99~99.999%

精度とは、95%測位精度をいい、95%の測位結果が入る中心からの半径をいう。

完全性とは、航法システムの異常による危険を防止するために、GPS衛星の故障あるいは誤動作をリアルタイムに検出してユーザ受信機に伝達するものである。これはユーザ位置における測位誤差の信頼限界を危険率 10^{-7} 以下とすることで実現される。この信頼限界は保護レベル(Protection Level)と呼ばれ、SBASが放送する補強メッセージには保護レベルを計算するために必要なパラメータが含まれている。

継続性とは、ある時間間隔にわたって継続した航法サービスを受けることのできる確率である。

利用可能性とは、測位計算に必要な補強GPS数が4つ以上かつ航法モードが利用可能な時間率である。ユーザ受信機は、計算して求めた保護レベルが警報限界より小さければ、その航法モードを利用可とし、警報限界は非精密進入時で556mと規定されている。

GAGANの性能を評価するため、米国航空無線技術委員会(RTCA)のSBAS受信機の規格であるDO-229Dに従い[9]、水平位置及び水平保護レベル(HPL)を求め、ICAO国際基準で求められる、精度・完全性・利用可能性について、北は新千歳、南は石垣まで日本全域を評価した。ここでは代表的な例として東京での1日の結果を示す。

(1) 精度 (アキュラシイ)

図5はGAGANの補強を用いて測位計算した結果を、真の座標を中心に東西方向及び南北方向の誤差として1日分をプロットしたものである。水平位置誤差は概ね真値 $\pm 20m$ の範囲に収まっているものの、まれに放射状に発散している。

誤差を時系列に示したものが図6の青点であり、UTC0時~24時を横軸に、水平面における誤差を縦軸に0~600mで示している。誤差は大きいところで100mであるものの、非精密進入の要件である精度220m(95%)を十分満足している。

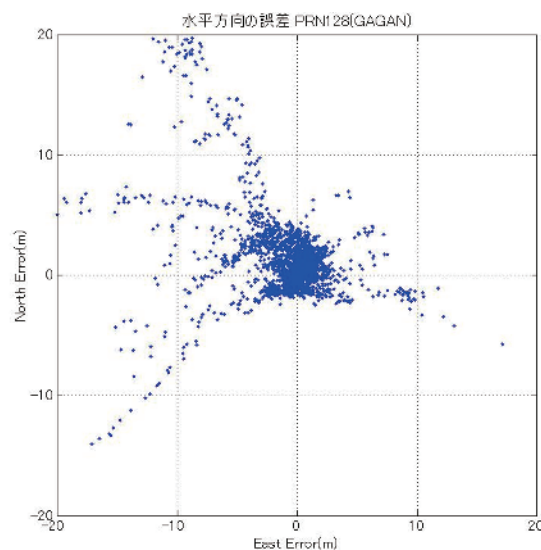


図5. 東京での水平位置誤差

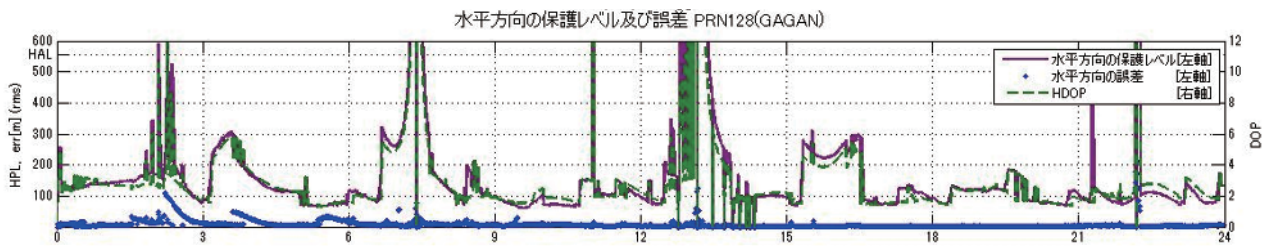


図 6. 誤差・HPL・HDOP（1日の時系列）

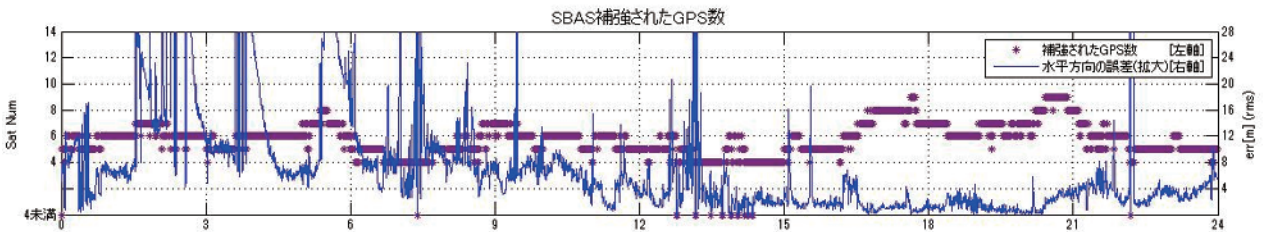


図 7. 補強可能 GPS 数・誤差（1日の時系列）

誤差をスケール 0~14m に拡大したものが図 7 の青線である。1 日の後半で補強 GPS 数（紫点）が増加傾向にある時は、位置精度も比較的lowめに安定していることが分かる。

(2) DOP と HPL

計算により求められた水平保護レベル（HPL）を図 6 の紫線で示す。概ね 100-300m 程度であるものの、まれに警報限界 HAL（556m）を超えていることが分かる。

HPL は、測位精度及び補強される GPS 衛星の幾何学的配置（DOP : Dilution of

Precision）に依存する[9]。GAGAN においては、図 6 のとおり HPL は DOP に対して強い相関があることが分かる。これより、HPL の劣化が GAGAN で補強される GPS の幾何学的配置に起因していることが分かる。

そこで、補強される GPS をスカイプロットで見たものが図 8 である。ユーザ位置を中心に西側しか補強されないことが確認できる。これはインドの地上局から見て、日本上空の東側に位置する GPS が可視範囲にないために補強メッセージが作られないためである。

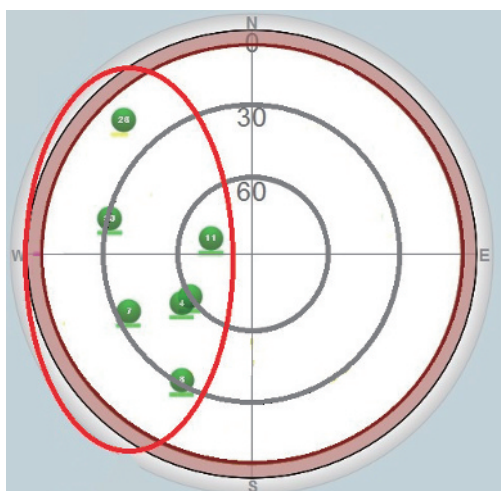


図 8. スカイプロット

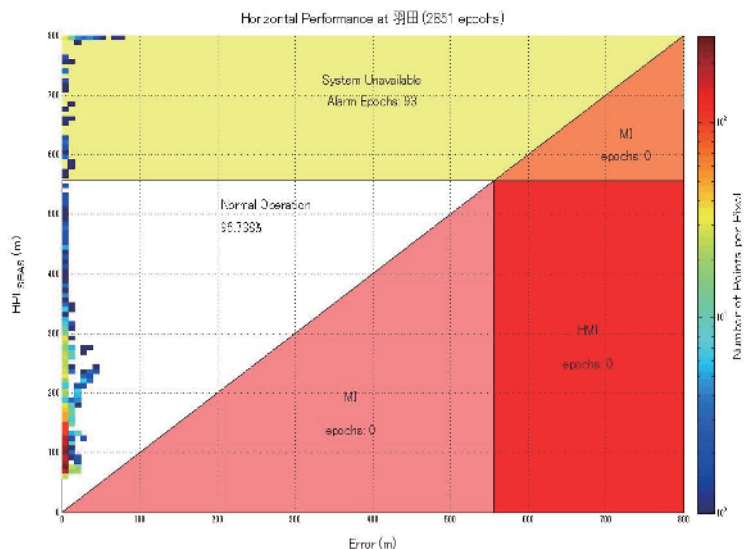


図 9. スタanfordチャート

(3) 完全性（インテグリティ）

(1)で求めた測位誤差と(2)で求めたHPLの結果を用いて、測位誤差とHPLの関係をスタンプォードチャートにしたものを図9に示す。誤差を横軸に、HPLを縦軸に、それぞれ0～600[m]としてプロットしたものである。1サンプル(30秒毎のデータ)毎に小さな■(ドット)として1つプロットし、1日分を重ねたものである。プロットが多く重なった箇所は頻度が多いことを示し、その度合いについては右側に垂直カラーバーで説明を加えた。

このスタンプォードチャートにより“誤差”と“HPL”の関係を容易に確認できる。具体的には、保護レベルが常に誤差より大きい（誤差をバウンドしている）ことを確認することで、ユーザが危険な状態が無かったかを判断できる。これがインテグリティ上の重要な確認である。スタンプォードチャートの斜線は、ちょうど誤差とHPLの値が等しく「誤差=HPL」の関係となる。インテグリティが担保されている（「誤差<HPL」）ことを確認するには、その斜線よりも左側のエリア(白色または黄色)に全プロットがあれば良いことになる。仮に斜線より右のエリア(黄土色:MI, 桃色:MI, 赤色:HMI)にプロットがある場合はインテグリティが保たれていないことになる。インテグリティ上の問題、すなわちHPLを超えるユーザ測位誤差を生じさせる可能性のある誤情報のことを、「誤誘導情報」(MI: Misleading Information)といい、更に誤差がHALを超える場合「危険な誤誘導情報」(HMI: Hazardously Misleading Information)といい、これらはSBASで最も重要な評価項目となっている。図9から分かるとおりGAGANではMI及びHMIの発生はゼロであり、誤差よりHPLの値が大きい関係にあることが分かる。11月から2月の評価期間においては、常にインテグリティが担保されていた。

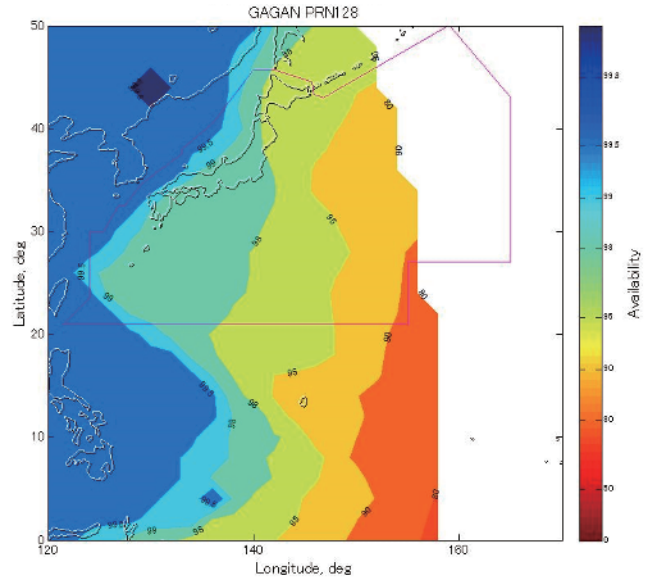


図10. 利用可能性

(4) 利用可能性（アベイラビリティ）

まず、SBAS受信機によるユーザ位置計算には、補強されるGPSが少なくとも4つ必要となる。評価期間の中で11月は全域を通して4衛星未満となる時間帯があったが、12月以降は経度135度辺りまでは1日を通し全時間において補強が可能であった。図7の紫点に代表的な1日でのGAGANで補強可能なGPS数を示す。平均して6基程度であり、多い時は9衛星程度補強可能である。まれに4未満の場合が見受けられるが、短時間なものがほとんどであった。

次に、HPLが閾値のHALを超えた際もSBASを使った非精密進入が利用できない。図6に示すとおりHPLがHAL(556m)を超える場合があり、非精密進入のサービスとして使用できない時間があることが分かる。

1日のうち、これらの使用できない時間を差し引いた残りの時間割合が利用可能性であり、結果を図10に示す。11月は西日本で90～99%、東日本で80～95%程度であったが、12月～2月にかけては西日本で98%以上、東日本で95%以上を確保していた。

4 まとめ

日本の FIR 内において，GAGAN（PRN128）はほぼ全域において安定した受信が可能であり，更に東京以西では MSAS より受信信号強度が高いことが確認された。非精密進入の要件である 95%精度が 220m 以内であることを確認し，完全性においても常に保護レベルが誤差より大きい（誤差をバウンドしている）ことを確認した。

一方，利用可能性については，補強可能な GPS 数が 4 つに満たない時間や水平保護レベルが警報限界（556m）を超える時間が発生しており，時間率は 80～99%程度である。この原因は，GAGAN による補強可能な GPS が，日本の FIR においては西側に限られるために水平保護レベルが劣化してしまうこと，またインドから見た日本の地理的要因で補強 GPS 数が 4 未満になり測位ができなくなる時間帯が存在することによる。

GAGAN は今後，更に日本に近い東経 93.5 度に位置する GSAT-15 の打ち上げを 2015 年 7 月に予定している。更には，新たに運用が予定されているアジア地域の SBAS として，ロシアの SDCM，韓国の K-SBAS，中国の BD-SBAS がある。日本周辺での SBAS 環境が充実してくることでシームレスな運航が可能となり，SBAS ユーザにとってはメリットがある一方，SBAS 受信機が自動で適切な SBAS を選択できるか問題が残る。引続き MSAS と他国の SBAS について相互運用性も考慮しながら，十分な性能評価を行う予定である。

参考文献

- [1] 坂井丈泰，“航空用衛星航法システムの信頼性，” 信頼性（日本信頼性学会誌），vol.28，no.1，pp.23-32，Jan 2006.
- [2] 坂井丈泰，“衛星航法システム MSAS の安全性設計，” 信頼性（日本信頼性学会誌），vol. 30，no. 5，pp. 392-397，

July 2008.

- [3] ICAO, International Standards and Recommended Practices, Aeronautical Telecommunications, Convention on Int'l Civil Aviation, Annex 10, vol. I, Nov 2006.
- [4] 坂井丈泰, 9.1 広域補強システム MSAS/SBAS, GPS ハンドブック, pp. 222-235, 朝倉書店, Sep 2010.
- [5] 今村純, 運輸多目的衛星用衛星航法補強システム (MSAS) の概要, 日本航海学会 GPS シンポジウム, pp. 81-85, Nov 2002.
- [6] 真鍋英記, 運輸多目的衛星用航法補強システム (MSAS) の供用開始, 日本航海学会 GPS/GNSS シンポジウム, pp. 35-39, Nov 2007.
- [7] ICAO, General Information for Meeting Bulletin, 2014.
- [8] N.Neelakantan, Overview of Indian Satellite Navigation Programme, ICG5, 2010.
- [9] RTCA, Minimum Operational Performance Standards For Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment, DO-229D, Rev.D Change 1, 2013.