

## GAST-D 性能評価のための電離圏誤差評価

航法システム領域 ※齋藤 享, 吉原 貴之

### 1 まえがき

GBAS (GNSS Ground-Based Augmentation System)とは、ICAO (International Civil Aviation Organization)において国際標準 (SARPs: Standards and Recommended Practices)として規格化されている、GPS等の測位衛星 (GNSS: Global Navigation Satellite System)を利用した航空機の進入着陸システムであり [1]、現行の ILS (Instrument Landing System)の後継となる次世代の進入着陸システムと位置付けられ、世界各国で導入が進められている。

これまでに、米国 GPS 及びロシア GLONASS の L1 周波数(1.57542 GHz)信号を用いる GBAS が標準化されており、カテゴリーI (CAT-I) 精密進入を実現する GAST (GBAS Approach Service Type) C 及びカテゴリーII/III (CAT-II/III) 精密進入を実現する GAST D の 2 つのサービスタイプが定義されている。

これまでに GAST C をサポートする GBAS は世界各地で導入されてきている。しかしながら、GAST D についてはボーイング 777-Xにおいて機上装置が搭載されるなど航空機側での対応の一方で、地上装置の整備が進んでいない。地上装置の整備が進まない原因としては、これを新たに導入するコストと、特に磁気低緯度地域における電離圏の影響による性能低下対策の必要性が挙げられる。

本研究では、GAST C 地上装置の機能を最大限活用し、磁気低緯度地域における GAST D の性能を最大化することを目的とする。

### 2 GAST D における電離圏異常対策

#### 2.1 GAST D の基本設計

GBAS は地上装置と機上装置からなるディファレンシャル GNSS システムであり、地上装置は GNSS 衛星信号を観測し、その誤差の補正值と信頼性 (インテグリティ) 情報を生成して VDB (VHF Data Broadcast) 信号により放送する。機上装置は、自ら観測した GNSS 衛星信号に

VDB 経由で受信した補正值を適用するとともにインテグリティ情報を用いて信頼性情報つきの測位解を得る[2, 3]。

ここで、GAST C においては地上装置が機上装置の測位解のインテグリティを担保する。すなわち、機上装置がどのような状態であってもその測位解の信頼性が担保されるようにインテグリティ情報を生成する。しかしながら、この手法では、特に地上装置と機上装置の電離圏遅延誤差の補正誤差に関するインテグリティ情報が保守的になり、CAT-II/III が要求するインテグリティ要件を満たさなければならない GAST D においては非現実的と考えられた。そこで、GAST D においては電離圏補正誤差についてのみ地上装置と機上装置が分担してインテグリティを担保する設計とされた[1-3]。

#### 2.2 潜在電離圏残留誤差( $E_{ig}$ )

GAST D において電離圏補正誤差については、地上装置が電離圏補正誤差の原因となる電離圏異常を監視し、衛星ごとの擬似距離測定値における潜在電離圏残留誤差を保証する。この保証値( $E_{ig}$ )を GBAS 基準点 (GBAS 基準局位置の重心) から滑走路端までの距離の関数として機上装置が得られるように、新たに GAST D 用に定義された GBAS メッセージ (メッセージタイプ (MT) 2 Additional Data Block (ADB) 3) を用いて放送する。この  $E_{ig}$  値は地上装置のインテグリティモニタ設計に基づき、事前にシミュレーション計算を用いて決定される。

機上装置は、自らの GNSS 観測データを用いた電離圏に関するインテグリティモニタを実行するとともに、 $E_{ig}$  値と衛星配置を基に推定される最大測位誤差が機体性能によって許される最大測位誤差を超えないように衛星配置を選別することにより、CAT-II/III 運航のためのコース偏位を出力する。従って、 $E_{ig}$  値が小さいほど可用性が高く、 $E_{ig}$  値が大きいほど可用性が低くなる。

GAST D SARPs の検証過程において、地上装

置が典型的な基準局配置とインテグリティモニタ構成をとった場合、電離圏遅延量が空間的に大きく変動する磁気低緯度地域においては  $E_{ig}$  値が大きくなり、可用性が低下する場合があることが示唆されている[1, 4]。

### 2.3 電離圏フィールドモニタ(IFM)

先に述べたように、GAST Cにおいては地上装置が機上装置の測位解の信頼性に責任を持つ設計となっているため、保守的なインテグリティモニタが必要となる。GAST Cにおいては、電離圏遅延量の空間変動に伴う誤差を保証するために、機上装置が使用しうる衛星配置を全て仮定し、電離圏起因の潜在誤差により機上側が危険となり得る衛星配置が排除されるようにインテグリティパラメータを大きく調整する操作（地上ジオメトリスクリーニング）[5]が一般的に用いられる。

この地上ジオメトリスクリーニングは、磁気低緯度地域などの電離圏変動が大きい地域においては可用性が十分でないレベルまで損なう結果となることがある。このため、電子航法研究所では電離圏フィールドモニタ(IFM: Ionospheric Field Monitor)と呼ばれる監視局を用いることで電離圏起因の潜在誤差を低減させ、GAST Cの可用性を改善する手法を開発した[6, 7]。

IFMはGAST Cのために開発された技術であるが、GAST Dは規格としてGAST Cを包含すること、また既存のGAST C地上装置のアップグレードとしてGAST D地上装置が実現されることがコスト面からも望まれることから、GAST D地上装置がGAST CのためにIFMを装備することは十分あり得ることである。IFMはその概念から、電離圏起因の潜在誤差を低減させるものであるので、GAST Dにおける  $E_{ig}$  値を低減させることができると可能性がある。

## 3 評価方法

GAST Dの性能評価においては、満たすべきものとして与えられるインテグリティ要件に対する可用性が指標となる。まず与えられたGBAS地上局と滑走路端の配置及び電離圏脅威モデルに対し、これらを記述するパラメータのあり得る全ての組み合わせに対して残留誤差の

シミュレーションを行い、最大未検出誤差として  $E_{ig}$  値を決定する。ここでは、インテグリティモニタの性能を仮定する必要がある。次に得られた  $E_{ig}$  値をもとに、航空機側の最大許容誤差を仮定し、ある場所における衛星配置全てについて GAST D サービスの可不可を判定し、可用性を導出する。

### 3.1 インテグリティモニタ

電離圏に関連したインテグリティモニタは、標準的には地上側の CCD (Code-Carrier Divergence) モニタ及び IGM (Ionospheric Gradient Monitor)、機上側の DSIGMA (Dual-Solution Pseudorange Ionospheric Gradient Monitoring) 及び CCD (Code-Carrier Divergence) モニタがある。各モニタの詳細については文献[1-4]をされたい。しかし、DSIGMA と機上 CCD モニタは相関が高いことが知られており、保守的に評価するため機上 CCD モニタは考慮しないこととする。

加えて、本研究では IFM を地上側のインテグリティモニタとして考慮する。

### 3.2 インテグリティモニタの評価方法

それぞれのインテグリティモニタに対し、あるシミュレーション条件が与えられた際にモニタの検定統計量  $x$  が得られる。この検定統計量は標準偏差  $\sigma_{int}$  をもつ正規分布で表現されると、この条件下で見逃す確率、すなわち検定統計量が閾値  $x_{th}$  以下となる確率( $P_{md}$ )は、図1に示すようなものとなり、以下の式で与えられる。

$$P_{md} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{int}^2}} \int_{-\infty}^{x_{th}} \exp\left(-\frac{(t-x)^2}{2\sigma_{int}^2}\right) dt \\ = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{x_{th}-x}{\sqrt{2\sigma_{int}^2}}\right) \right] \quad (1)$$

ここで  $\operatorname{erf}$  は誤差関数である。

閾値  $x_{th}$  は継続性要件を満たす最小値として、以下のように与える。

$$x_{th} = K_{FFD} \times \sigma_{cont} \quad (2)$$

ここで  $\sigma_{cont}$  は継続性のための異常がない場合の標準偏差、 $K_{FFD}$  は継続性要件のための係数である。閾値は継続性要件とインテグリティ要件を満たす範囲内で設定することができるが、保

守性のため、閾値が最も小さくなるように式(2)のように与えることとした。

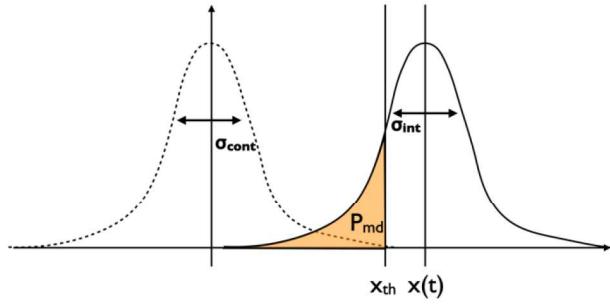


図1. 検定統計量の分布と見逃し確率  $P_{md}$

### 3.3 シミュレーション

GBAS 地上局と滑走路端の配置に加え、航空機の速度、衛星の電離圏貫通点(IPP: Ionospheric Pierce Point)の速度、及び直線状の波面をもつと仮定する電離圏空間変動をパラメータ化し、その組み合わせそれぞれについて残留誤差のシミュレーションを実施する（図2, 3）。それぞれのシミュレーションにおいて航空機が1アプローチを実施し、滑走路端に達した時点での電離圏残留誤差の見逃し確率( $P_{md,tot}$ )が  $10^{-9}$  以上である場合、これを残留誤差として記録する。

見逃し確率は、それぞれのモニタの見逃し確率を用いて、IFMなしの場合

$$P_{md,tot} = \min(P_{md,IGM} \times P_{md,DSIGMA}, P_{md,IGM} \times P_{md,CCDgnd}) \quad (3)$$

IFMありの場合は

$$P_{md,tot} = \min(\min(P_{md,IGM}, P_{md,IFM}) \times P_{md,DSIGMA}, \min(P_{md,IGM}, P_{md,IFM}) \times P_{md,CCDgnd}) \quad (4)$$

として求められる。

電離圏脅威モデルについては文献[7, 8]を参考し、表1に示す値を用いた。

インテグリティモニタの設定値は、地上 IGM、地上 CCD、機上 DSIGMA については文献[4]を参照し、IFM については文献[9]を参照し、表2に示す値を用いた。

表1. 電離圏脅威モデル

Slope [mm/km]	0-600
Width [km]	5-25
Depth [m]	10
Speed [m/s]	0-750

表2. インテグリティモニタの設定値

	継続性 $\sigma (\sigma_{cont})$	$K_{FFD}$	インテグ リティ $\sigma$ ( $\sigma_{int}$ )	$K_{md}$
地上 IGM	16.7 [mm/km]	5.54	26.7 [mm/km]	6.0
地上 CCD	6.9 [mm/s]	5.91	6.9 [mm/s]	6.0
機上 DSIGMA	0.174 [m]	5.61	0.174 [m]	6.0
地上 IFM	10 [mm]	5.2	10 [mm]	6.0

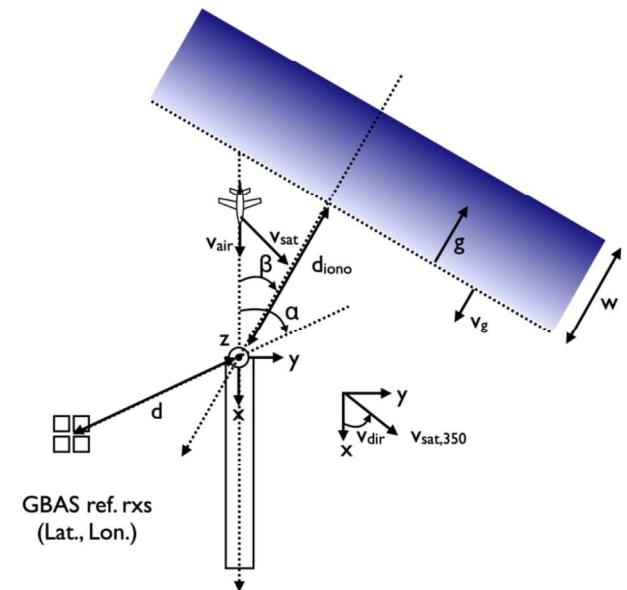


図2. IFMなしの場合のシミュレーション配置

## 4 結果

### 4.1 アプローチシミュレーション例

まず、個々のアプローチシミュレーションの結果を確認するために、図4に示す配置においてシミュレーションを実行した。この時、アプローチ開始時においては10mの電離圏残留誤差があるものの、次第にインテグリティモニタが働き、最終的には0.35mの誤差が残るもの、インテグリティモニタによって見逃される確率は  $10^{-9}$  よりも極めて小さく、安全であることがわかる。

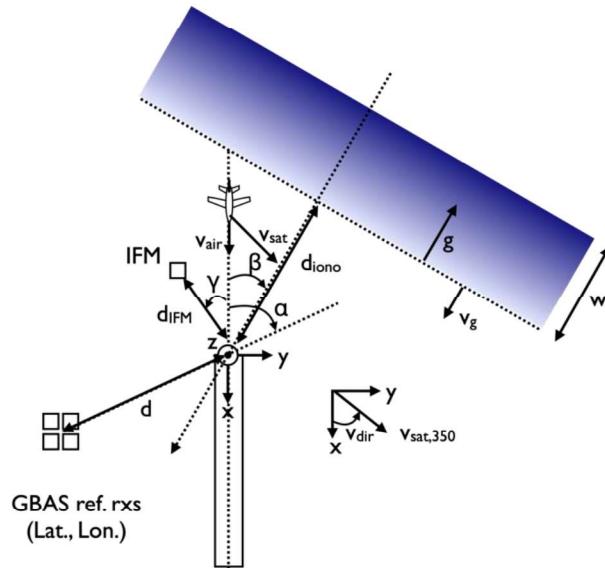


図3. IFMありの場合のシミュレーション配置

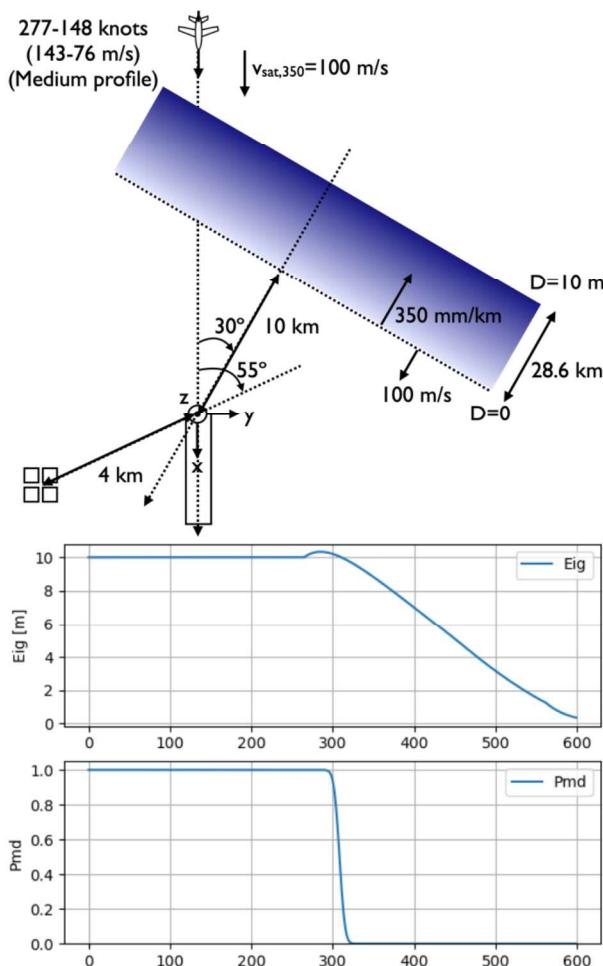


図4. アプローチシミュレーションの例及び結果

#### 4.2 IFMなし(GAST D標準構成)の場合

表3に示すパラメータを用いてシミュレー

ションを実行した結果を、見逃し確率  $10^{-9}$  以上において、最大 2.86m の電離圏残留誤差があり得ることがわかった。これは標準的な  $E_{ig}$  の最大値(2.75m)[1]を超えており、可用性が損なわれる恐れがあるものである。

表3. シミュレーションパラメータ

$d_{grp}$ [km]	$\beta$ [°]	$d_{iono}$ [km]	$g$ [mm/km]
4	- 90:15:90	0:1:20	200:20:600, -600:20:-200
W	D	v	$v_{air}$
10	10	-750:10:750	Medium

#### 4.3 IFMありの場合

次に、図5に示す位置にIFMを配置し、表3に示すパラメータを用いてシミュレーションを実行したところ、見逃し確率  $10^{-9}$  以上において、最大電離圏残留誤差が 1.53mまで減少した。これは標準的な  $E_{ig}$  の最大値(2.75m)に比べて十分小さく、十分高い可用性が期待できるものである。

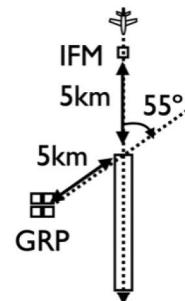


図5. IFMの配置

#### 5まとめ

本研究では、GAST Dの可用性を高めるため、GAST Cの可用性を高めるために開発されたIFMの活用を検討した。そのためにGAST Dにおける電離圏残留誤差を求めるシミュレーションを開発し実行した。その結果、GAST DにおいてIFMは電離圏残留誤差を大きく減少させる効果があり、GAST Dにおいても可用性を高めるために有効であることが示された。さらに網羅的シミュレーションを実行するとともに、具体的なGBAS地上装置、滑走路及びIFMの配

置に対してシミュレーションを実行することにより、IFMの効果の定量的な評価を進める予定である。

## 参考文献

- [1] International Civil Aviation Organization, “Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Volume I, Radio Navigation Aids,” International Civil Aviation Organization, July 2023.
- [2] RTCA, DO-246E Change 1, “GNSS-based Precision Approach Local Area Augmentation System (LAAS) Signal-in-Space Interface Control Document (ICD),” RTCA, xx 20xx.
- [3] RTCA, DO-253D Change 1, “Minimum Operational Performance Standards for GPS Local Area Augmentation System Airborne Equipment,” RTCA, xx 20xx.
- [4] S. Pullen, R. Cassel, B. Johnson, M. Brenner, D. Weed, and L. Cypriano, M. Topland, M. Stakkeland, B. Pervan, M. Harris, S. Saito, J. Lee, B. Cleark, B. Beauchamp, J. Dennis, “Impact of Ionospheric Anomalies on GBAS GAST D Service and Validation of Relevant ICAO SARPs Requirements,” Proc. ION GNSS+ 2017, pp.2085-2105, Portland, US, September 2017.
- [5] J. Seo, J. Lee, S. Pullen, P. Enge, S. Close, “Targeted parameter inflation within ground-based augmentation systems to minimize anomalous ionospheric impact,” J. Aircr., 49, pp.587-599, 2012.
- [6] S. Fujita T. Yoshihara, S. Saito, “Performance Evaluation of Single Frequency based Ionosphere Field Monitor for GBAS,” Proc. International Global Navigation Satellite System Society, Sydney, Australia, November 2011.
- [6] K. Suzuki, Y. Nozaki, T. Ono, T. Yoshihara, S. Saito, S. Fukushima, “CAT-I GBAS Availability Improvement through Ionosphere Field Monitor (IFM),” Proc. ION GNSS 2011, Portland, US, September 2011.
- [7] Saito and Yoshihara, “Evaluation of extreme ionospheric total electron content gradient associated with plasma bubbles for GNSS Ground-Based Augmentation System,” Radio Sci., 52, pp.951-962, 2017.  
DOI: 10.1002/2017RS006291.
- [8] S. Saito, S. Fujita, T. Yoshihara, “Absolute gradient monitoring for GAST-D with a single-frequency carrier-phase based and code-aided technique,” Proc. ION GNSS 2012, Nashville, US, September 2012.
- [9] S. Saito, S. Sunda, J. Lee, S. Pullen, S. Supriadi, T. Yoshihara, M. Terkildsen, F. Lecat, ICAO APANPIRG Ionospheric Studies Task Force, “Ionospheric delay gradient model for GBAS in the Asia-Pacific region,” GPS Solut., 21, pp.1937-1947, 2017.  
DOI: 10.1007/s10291-017-0662-1.