

1. GBASの大規模空港への設置に関する一検討

通信・航法・監視領域 ※福島荘之介，齊藤真二，吉原貴之，齋藤享，藤田征吾，工藤正博*
 (*：現 国土交通省東京航空局)

1 はじめに

GBAS (Ground-Based Augmentation System : 地上型衛星航法補強システム) は，ILS (計器着陸装置) に代わる衛星航法による精密進入着陸システムである。近年，主要国では安全性要求を満たす GBAS 地上装置の開発研究が行われてきた。FAA (連邦航空局) は CAT-I の実用装置を開発し性能向上を続けており，欧州の各国，豪州は実用化に向け空港内に装置を設置し評価試験を開始している [1]。また，機上装置は MMR (Multi-Mode Receiver) として開発され，Boeing 社，Airbus 社は，B787，A380 以降の新型機種に GBAS の採用を決定した。電子航法研究所は，低磁気緯度の電離圏擾乱現象を脅威に含め安全性設計を行った GBAS 試作装置を開発し，2010 年 11 月に関西国際空港へ設置した。現在，実環境による装置動作を解析し，安全性設計されたリスク低減手法を評価している。また，装置の基本性能を検証するため，飛行評価実験，滑走路走行実験を実施した。

GBAS は，ILS と異なり装置 1 式で複数滑走路の両方向に進入経路を設定可能であり，機器の設置位置は進入滑走路に依存しない。ただし，GPS 信号を受信する 4 式の基準局機器の設置位置は，ユーザの航法システム誤差に影響するばかりか，安全性性能の保証に関係する。また，航空機に補強情報を送信する VDB (VHF Data Broadcast) リンクの覆域は，送信アンテナの設置位置に依存する。しかし，諸外国で大規模空港への設置は未だ少なく，十分な検討が進んでいる状況ではない。このため，関西国際空港への設置を GBAS 機器設置の一事例と考え，設置に関する具体的な課題を検討した。本稿では，GBAS 試作機器の構成を述べ，主要な機器設置位置に関する検討の過程と結果を報告する。

2 GBAS 試作装置の構成

GBAS 試作装置の構成を図 1 に示す。基準局機器は，4 式の基準局受信アンテナと収納箱から構

成され，収納箱内に基準局 GPS 受信機 (CMA-4048)，光メディアコンバータを備える。基準局 GPS 受信機は，GPS 衛星信号 (L1 C/A) を受信し，擬似距離，搬送波位相，航法メッセージなどを出力する。データ処理機器は，メッセージ生成部，評価部，運用部から構成され，GPS 補正情報，進入経路など送信メッセージを生成すると共に，安全性を保証するモニタなどリスク低減機能を備える。また，擬似ユーザ機器の出力情報から，機上装置と同様の測位演算処理，保護レベル計算を行い，システムを評価する。データ処理機器は，大容量のストレージデバイスを備え，GPS 受信データの他，処理結果を保存する。メッセージ生成部のボード CPU は，1PPS クロック信号を必要とするため，GPS 受信アンテナと受信機を備える。擬似ユーザは，GPS 受信アンテナ，GPS 受信機，光メディアコンバータから構成される。VDB 機器は，出力 80W の VHF 送信機であり，108~117.975 MHz の ILS/VOR と同様の周波数帯で D8PSK 変調の時分割デジタル信号を送信する。VHF 送信機は時分割信号の同期のため，GPS 受信機からの 1PPS 信号を必要とする。VDB アンテナは，垂直方向に 3 段スタックで水平偏波である。IFM 機器は，基準局と同

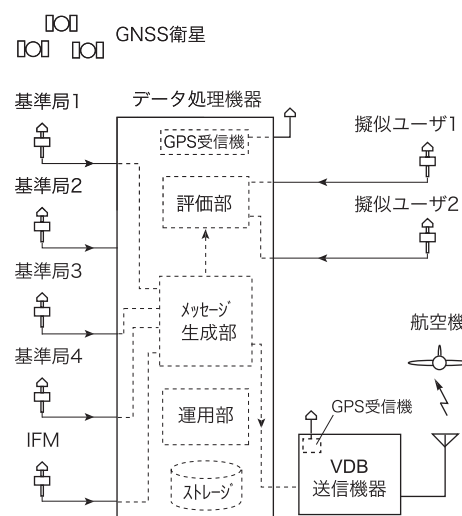


図 1: GBAS 試作装置の構成

様の構成であり、リスク低減機能である電離圏勾配モニタに用いる [2]。その他、評価機器があり、調布本所において、ストレージデバイスに保存された GPS 受信データからデータ処理装置と同様の処理を再現できる。各機器は、無停電電源を備える。実用装置との主な違いは、データ処理機器と VDB 送信機が冗長系を持たないこと、VDB 受信モニタを備えないこと、データ処理機器内のソフトウェアの開発過程に安全性保証標準規格を適用しないことである。

3 基準局機器の設置位置の検討

基準局機器の設置条件は、周囲に人工建造物など衛星信号を遮蔽する物件がなく、仰角 3 度の GPS 衛星が受信できることである。これは、GBAS 地上機器が仰角 5 度以上の GPS 衛星について補正情報を送信するからであり、昇る衛星のキャリアスムージング処理が、仰角 3 度以上の受信データを必要とするためである。ただし、ある方位が仰角 3 度に満たないとき、装置機能が失われる訳ではなく、機上側で利用衛星が少なくなる時間が増加し稼働率（アベイラビリティ）が低下する。これに対して、近接する物件からのマルチパス波は、受信衛星の擬似距離に誤差を与える。この結果、送信される補正值が誤差を含み、機上装置の測位誤差が増加する。特に、安全性（インテグリティ）に係わる要件は、各基準局 GPS アンテナをマルチパス波に対して独立になるよう離隔して設置することであり、次の理由による。

データ処理機器は、ある衛星について、エポック毎に 4 個の擬似距離を得て 4 個の補正值を生成し、ある補正值と残りの 3 個の補正值の平均の差分として、相対的な誤差（クロスバリデーション）である B 値を求める。GBAS 地上装置は、ある衛星の放送補正值（4 個の補正值の平均）毎にインテグリティ情報として 4 個の B 値を送信する。機上装置は、覆域内で B 値に基づく保護レベル（H1 仮定）を常時計算し、限界値を越えた場合に警報を発生して安全を保つ。このためには、B 値に相関がなく、2 個以上の B 値が同時に増大しない必要がある。基準局 GPS アンテナ間の最小離隔距離は、従来の検討から経験的に 100 m または 155 m と認識されている [3]。また、必要以上に基準局間距離を取れば、電離

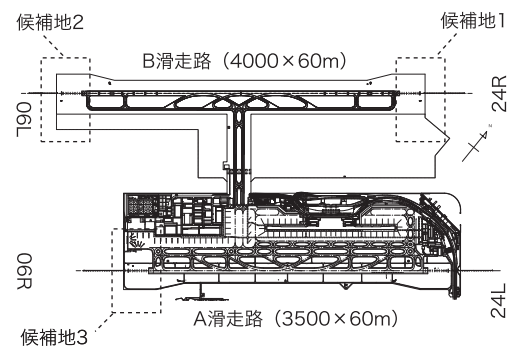


図 2: 基準局機器の候補地

圏・対流圏遅延量の誤差により補正值の誤差分散が増加し、測位誤差が増加するばかりか、放送する σ_{pr_gnd} （保護レベル計算に使われる完全性情報）が増加し稼働率が低下する。その他、電離圏脅威のリスク低減措置（ジオメトリスクリーニング）の設計条件として、4 個の基準局 GPS アンテナの中心位置から DH（決心高）までの距離を 6 km とする必要がある。

図 2 に関西国際空港の滑走路配置を示す。現地調査の結果、周囲に遮蔽物件がない場所は、B 滑走路 06L 及び 24R 末端、A 滑走路 06R 末端地区であり、この 3 カ所を候補地とした。その後、電源設備の存在や光ケーブルの敷設が簡便な候補地 1（B 滑走路 24R 末端地区）を選定した。候補地 1 では、数日間の GPS 受信実験を行い電波干渉が存在しないことを確認している。

候補地 1 でマルチパス源となる可能性がある物件は、離陸待ちで誘導路上に静止する航空機の垂直尾翼である。垂直尾翼によるマルチパス誤差の影響は、従来研究においてシミュレーション計算により検討されている。検討結果から、衛星、垂直尾翼、受信位置の関係において、垂直尾翼への入射波の接地角がブリースター角以下の場合に誤差が最大となり、反射断面積が最大の航空機（A380）で許容可能なマルチパス誤差（10 cm）を生じる垂直尾翼と受信位置の最小距離は 320 m となる [4]。また、GPS 信号が右旋偏波であるため、接地角がブリースター角以上になる場合は、反射波が左旋偏波となって、右旋偏波特性をもつ基準局 GPS アンテナで大きく減衰する。この場合の最小離隔距離は 110 m となる。以上から、航空機が誘導路上に静止し、基準局 3 と 4 に同時にマルチパス誤差が生じる最悪ケースを想定して、誘導路上の航空機位置

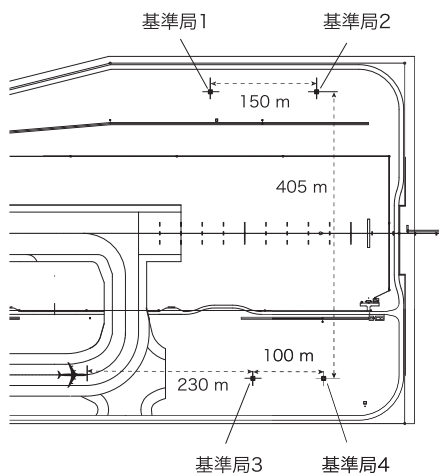


図 3: 基準局 GPS アンテナの配置

と基準局 4 間を 330 m 離隔した。候補地 1 における基準局 GPS アンテナの配置を図 3 に示す。

この他、基準局に近づくマルチパス源は、場周道路（約 70 m）を走行する大型車両である。しかし、この反射断面積は小さく、計算機シミュレーションでは問題とならない。また、走行車両の場合、マルチパス誤差が生じる位置関係となっても、移動により位置関係が変化して誤差が生じる時間は瞬時となるため、キャリアスムージング処理で減衰する可能性が高い。滑走路末端付近に設置する場合の懸念は、大型着陸機の上空通過により尾翼や胴体で GPS 信号が瞬間的に遮蔽され、サイクルスリップを生じて稼働率が低下する可能性である。基準局 GPS アンテナを着陸機の近傍に設置しない限り、この現象の頻度は少ないと思われるが、着陸機が頻繁に通過する滑走路付近に設置する場合には、検討の余地が残る。

これ以外に基準局 GPS アンテナの設置条件は、滑走路付近の制限表面であり、本設置では転移表面高（滑走路中心線と平行に 150 m の位置から 1/7 勾配）以下とする必要があった。また、転移表面に近接して設置した場合には、航空障害灯や昼間障害標識を設置する義務が生じる。基準局 GPS アンテナは、上記制限に加え、保守などの立ち入りによる遮蔽を考慮し地上高 2 m とした。基準局 GPS アンテナと収納箱の外観を図 4 に示す。更に、滑走路末端及び滑走路中心線の延長線に近い場合には、国際標準（Annex14）の脆弱性基準を適用する必要がある。

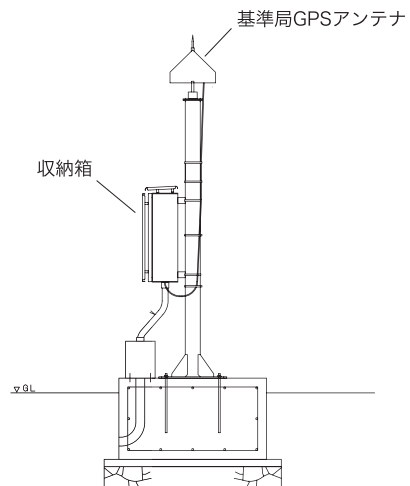


図 4: 基準局 GPS アンテナと収納箱

4 VDB 機器の設置位置の検討

VDB アンテナは、要求される覆域を確保するように設置する必要がある。図 5 に進入滑走路方向に対する SARPs（国際標準及び勧告方式）[5] の最小覆域を示す。典型的な垂直面の覆域は、0.9~7 度で 10,000 ft を上限とする。FAA 仕様は、更に仰角 85 度まで（上限 10,000 ft）を覆域とする [6]。覆域の定義は、最小電界強度が $215 \mu\text{V}/\text{m}$ ($-99 \text{ dBW}/\text{m}^2$)、最大電界強度が $0.350 \text{ V}/\text{m}$ ($-35 \text{ dBW}/\text{m}^2$) である。VDB 送信機は、23NM の覆域端で最小電界強度を確保するため、47 dBm (50W) の実効放射電力 (ERP) を必要とする。現行 SARPs では、CAT-I として滑走路面から 12 ft 以上を覆域とする勧告があり、GAST-D では自動着陸に対応するため 8 ft 以上の覆域を要求する草案が検討されている。この他 SARPs では、覆域改善の方法として、VDB 送信機とアンテナを 2 カ所以上に設置し、TDMA の異なるスロットを割り当てるマルチアンテナ方式が提案されている。一般的に、水平偏波アンテナの覆域は、アンテナの設置高に左右される。これは、設置高を高くした場合、低い高度の覆域は確保し易いが、大地反射波と直接波の合成により電界強度が急激に落ち込むナル領域が生じるためである。このため、GBAS の覆域を確保するには、周辺物件と地形を考慮し、アンテナ高をトレードオフした検討が必要がある。ただし、多段に垂直スタックしたアンテナを用いた場合は、覆域内のナル領域の抑制が期待できる [7]。

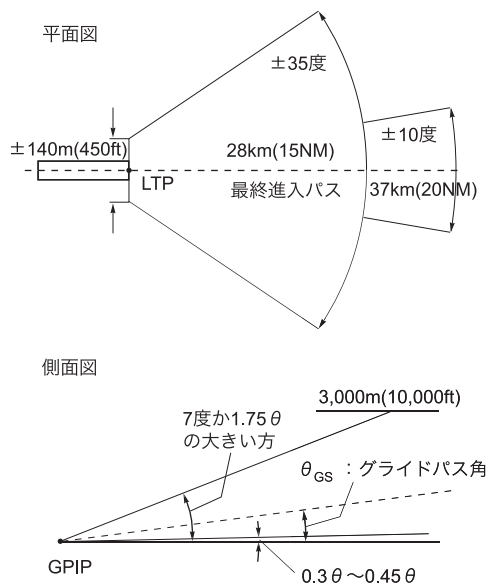


図 5: VDB 最小覆域 (SARPs)

関西国際空港への VDB アンテナの設置検討では、次の 2 案が検討された。候補案 1 は、海外の GBAS 設置空港でも行われている地上高 10 m 程の設置であり、基準局付近にシェルターを設け、データ処理機器と VDB 機器を設置する。ただし、この案の欠点は VDB アンテナから見通しのある滑走路にしか滑走面上の覆域を提供できないことである。関西国際空港など大規模空港では、2 本の滑走路間にターミナルビルディングなど大型構造物が存在し、VDB アンテナを設置していない側の滑走路面上 12 ft は見通せない。この場合は、マルチアンテナ方式を必要とする。候補案 2 は、2 本の滑走路が見通せる高い位置にアンテナを設置し、滑走路面上の電界強度を確保する。垂直スタックしたアンテナを用いてナル領域を抑制し、同時に上空の覆域も確保する。この方式は設置コストを低減できる可能性があり、海外でも大規模空港を想定して提案されたが、具体的な検討や実験例はなかった。検討の結果、装置の性能を実証するためには候補案 1 が有効であるが、今回はより積極的に候補案 2 を検討することとした。関西国際空港には、A 滑走路から 700 m の位置に高さ 40 m の対空通信鉄塔が存在する。ただし、鉄塔の北方向約 35 m にある空港監視レーダ (ASR) により、一部方位が遮蔽される。図 6 に VDB アンテナと送信鉄塔の外観を示す。

鉄塔上に VDB アンテナを設置した場合の、覆

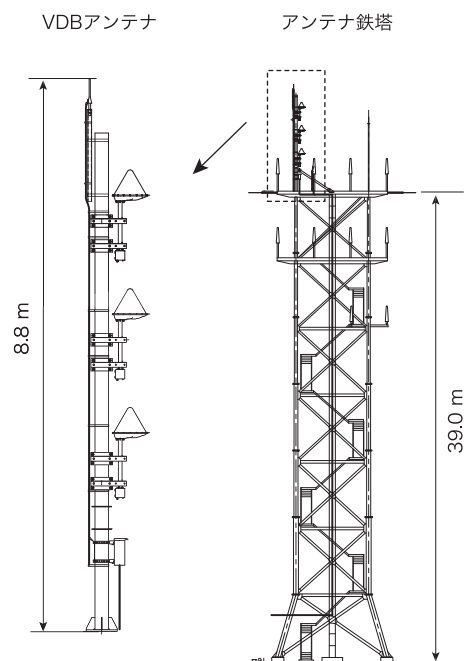


図 6: VDB アンテナと鉄塔

域内受信強度を計算機シミュレーションした結果を図 7, 8 に示す。この結果から、高度により距離と強度の異なるナルが複数存在するが、電力密度は最小及び最大要求値を満足することが分かる。ただし、シミュレーションでは大地反射面を海面やコンクリートなど一様と仮定するため、飛行実験による電界強度の計測が必要である。また、VDB アンテナの支柱 (直径 216.3 mm) による減衰は、支柱中心方向に最大 2.5 dB であった。VDB アンテナについても同様に制限表面高が条件となり、本設置ではアンテナ頂部を水平表面 (標点から 45 m) 以下とした。

5 設置と評価実験

前章の検討結果から関西国際空港に配置した GBAS 試作機器の全配置を図 9 に示す。データ処理機器を航空局庁舎内に、擬似ユーザ 1 を 06R 末端のシェルタに、擬似ユーザ 2 と IFM 機器を 06L 末端のシェルタ設置した。分散した機器は、既設光ケーブルにより接続したため、新規に設けた埋設管路は基準局機器周囲のみ (全長 500 m) である。これまで海外では、基準局機器、データ処理装置、VDB 送信機を遠距離に設置した事例はなかった。試作装置としての利点は、制限区域に立ち入らず、遠隔機器なしにデータ処理機器を操作でき、更に回線を経由して調布本所

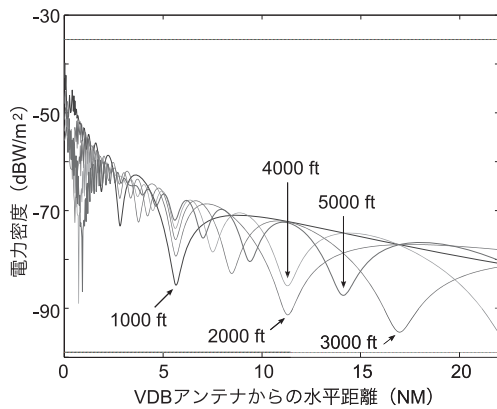


図 7: VDB 受信強度シミュレーション結果（高度：1,000～5,000 ft）

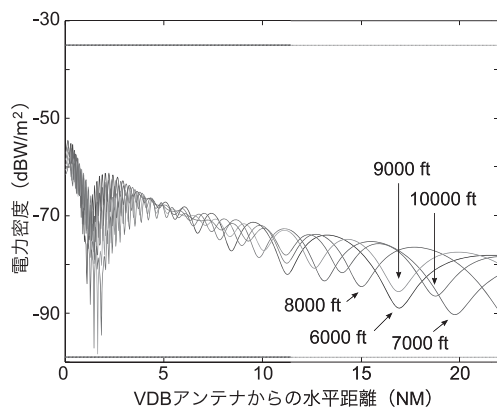


図 8: VDB 受信強度シミュレーション結果（高度：6,000～10,000 ft）

で動作を監視できることである。

評価実験にあたっては、VDB 送信機の実験局免許を 112.025～117.900 MHz の 1 波（電波の型式：16kG1D）として申請し、免許（114.05 MHz）を取得した。開局前には試験電波を発射し、関西国際空港周辺で利用される無線局に混信を与えないことを確認した。SARPs では、ILS と VDB の両立性が確認されるまで、112.025 MHz 未満に周波数を割り当てないこととしている。この他、基準局 GPS アンテナの位相中心位置を cm レベルで GPS 測量した。効率的な測量のため、基準局、擬似ユーザ、IFM の GPS アンテナは、あらかじめ 2 周波タイプを採用している。このとき、同様に A・B 滑走路の末端位置を GPS 測量し、Type 4 の経路データ（FAS：Final Approach Segment）を作成し放送した。

評価実験の詳細は、別に報告するが、現在までに車両による滑走路走行実験と飛行による電界強度の計測を実施している [8]。地上実験では、

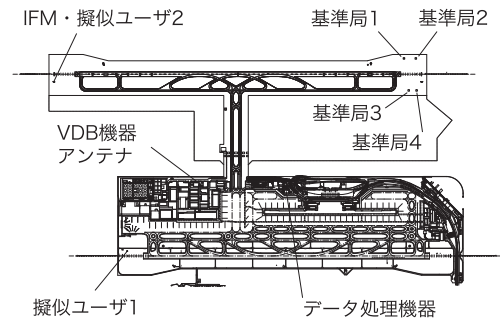


図 9: GBAS 機器の設置位置

車両上部に設置した VDB 受信アンテナで A・B 両滑走路上の電界強度が十分あり、滑走路面上を覆域とする性能が確認された。また、滑走路中心線上で機上 MMR のコース偏差指示が中心となることを確認した。飛行による電界強度の計測は更に異なる高度の実験を必要とする。

6 まとめ

GBAS 試作装置の関西国際空港への設置を通して、大規模空港への GBAS 設置方法を検討した。特に設置を考慮すべき GBAS 機器は、基準局 GPS アンテナと VDB アンテナである。これらは従来機器と比較して、進入滑走路に依存しないため、設置位置に自由度がある。しかし、基準局 GPS アンテナの配置はシステムの安全性設計にも係わるため、周辺のマルチパス源と離隔する必要がある。本設置では、基準局に近い誘導路上に静止する航空機垂直尾翼を対象に離隔距離を検討した。VDB アンテナは、滑走路面上付近から上空まで垂直方向に広い覆域要求を満たす設置位置を検討する必要がある。複数滑走路を有し滑走路間に構造物が存在する大規模空港では、マルチアンテナ方式、または、垂直スタックアンテナの高い設置が候補となる。本設置では、高さ 40 m の対空通信鉄塔を利用し、従来実験例がない垂直スタックの高い設置を検討した。

今後の課題は、GPS 受信データと装置動作の解析により基準局 GPS アンテナの設置が安全性に影響しないことを検証すること、複数高度の VDB の電界強度を計測することである。また、本例以外にも設置空港の状況に応じた複数事例の検討が有益となる。

謝辞

GBAS 試作装置の関西国際空港への設置及び評価実験については、航空局及び関西国際空港株式会社の関係者各位に多大なご協力とご尽力を頂いた。ここに深く感謝致します。

参考文献

- [1] 工藤正博, 藤井直樹, 福島荘之介, 齊藤真二, 吉原貴之, 齋藤享, 山康弘, 星野尾一明, “安全性解析のための GBAS プロトタイプに関する研究の概要”, 第 9 回電子航法研究所発表会, pp.71-74, 2008 年 6 月.
- [2] 吉原貴之, 齋藤享, 藤田征吾, 工藤正博, 福島荘之介, 齊藤真二, 藤井直樹, 星野尾一明, “GBAS プロトタイプ開発の概要と電離圏モニタ方式”, 第 10 回電子航法研究所発表会, pp.27-30, 2010 年 6 月.
- [3] FAA, Siting criteria for ground based augmentation system (GBAS), FAA Order 6884.1, Dec. 15, 2010.
- [4] 福島荘之介, 吉原貴之, “地上型補強システム基準局アンテナの設置位置に関する一検討”, 信学技報, 宇宙・航行エレクトロニクス (SANE), pp.17-22, Jul. 2009.
- [5] ICAO, International standards and recommended practices, annex 10 to the convention on international civil aviation, vol.1, Radio navigation aids, sixth edition, July 2006.
- [6] FAA, Specification of category I local area augmentation system ground facility, FAA-E-2937A, Oct. 21, 2005.
- [7] 齊藤真二, 福島荘之介, 藤井直樹, “地上補強型衛星航法システムの VHF 補強情報伝送試験”, 電子航法研究所報告, No.109, 2004 年 1 月.
- [8] 齊藤真二, 福島荘之介, 藤田征悟, 齋藤享, 吉原貴之, 工藤正博, “実験用 GBAS 機上装置による VDB 受信試験”, 第 11 回電子航法研究所発表会, 2011 年 6 月.