

7. GBASによる航空機の実時間測位

航空システム部

※齊藤 真二 福島 莊之介 藤井 直樹

1 はじめに

GPS(Global Positioning System)などの全地球的航法衛星システムを航空機の航法に用いる場合、測位精度や信頼性を確保するために、擬似距離補正情報などの補強情報を航空機に伝送する必要がある。この補強情報を作成、伝送するシステムの一つに、空港に設置された地上局から補強情報を伝送する地上型補強システム(GBAS; Ground Based Augmentation System)がある。

当研究所では、国際民間航空機関(ICAO; International Civil Aviation Organization)の国際標準(SARPs; Standards and Recommended Practices)を評価・検証するため、GBAS-VHFデータ放送(VDB; VHF Data Broadcast)の送受信装置、GBAS補強情報の生成装置などを試作し、当研究所岩沼分室がある仙台空港周辺において飛行実験を実施している。

前回の発表[1]で、基準値に含まれるバイアス成分が問題となったので、平成13年度の飛行実験ではタッチ・アンド・ゴー飛行を行い、滑走路上の測位結果を用い、その問題の解決を行った。

平成13年度は平成13年7月に加えて、季節変動の効果などを調べるため平成14年2月にGBAS補強情報による航空機の測位実験を行った。本発表では、平成13年7月に仙台空港において実施した航空機の測位実験において、GBAS-DGPS測位による測位誤差がCAT-IIIの要求を満足する結果が得られたので報告する。また、固定基準局の設置後の平成14年2月に実施したGBAS補強情報による航空機の測位実験についても報告する。

2 飛行実験

平成13年7月23日から8月3日および平成14年2月18日から3月1日の期間、仙台空港において、当研究所所有の実験用航空機(Beechcraft社製B99 Airliner; JA8801)を使用し飛行実験を行った。この飛行実験では、進入・着陸時のGBAS補強情報による実時間測位の精度を調査するためB27(B滑走路、磁方位270度方向)へのアプローチ飛行(タッチ・アンド・ゴー飛行)を実施

表1: 地上装置の概要

基準局	A滑走路脇緑地帯
補正情報監視局	実験用MLS Az. サイト
補強情報生成装置	岩沼分室内
VHF送信装置	岩沼分室内
変調方式 / 周波数 出力	D8PSK / 108.5MHz 15W(最大50W)
VDB送信アンテナ 形状	岩沼分室敷地内 3段スタック型 アルフォードループ
アンテナ素子高	5.5m, 10.5m, 15.5m

表2: 機上搭載装置

VDB受信装置	
航法処理装置	PCで構成
GPS受信装置	NovAtel MiLLen. STD. Trimble 5700

した。

地上装置は、GBAS基準局、監視局のほか当研究所岩沼分室内に設置したGBAS補強情報生成装置、VHF送信装置、VDB送信アンテナなどで構成される。地上装置の概要を表1に示す。実験用航空機には、GBAS機上局として、VDB受信装置、GPS受信機を搭載し、地上局よりVDBで送信されたGBAS補強情報とGPS信号を受信し航空機の位置の実時間測位を行った。主な搭載装置を表2に示す。

平成13年7月までの飛行実験では、仙台空港A滑走路脇の緑地帯に可搬型の仮設基準局を設置し、実験を実施してきた。基準局はGPS受信機とGPSアンテナおよびデータ送信用のモデムで構成され、平成13年7月の飛行実験では、GPSアンテナを取り付けた高さ1.7m~4.0mのポールを一辺約80mの正方形を成すように設置し、GPS受信機およびモデムは実験用MLSのELシェルタ内に設置した。その時の仮設基準アンテナを図1に示す。

平成14年1月に仙台空港A滑走路脇の緑地帯に固定基準局を設置した。この固定基準局では、GPSアンテナ高を2.0mとし、ステンレス製の防雨箱にGPS受信機、モデムおよび電源を収納し、GPSアンテナのポールに取り付けた。概要を表3に示す。基準局のアンテナの配置は、150m、100mの間隔で直線に並べた3式(#1, #3, #4)のアンテナとそのうち2式(#1, #3)を含むように

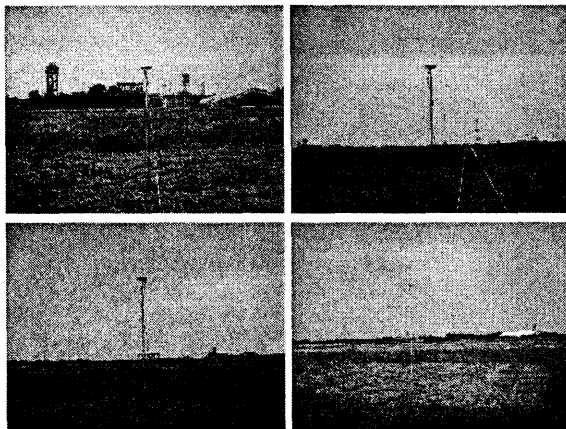


図 1: 仮設基準局
 アンテナ地上高： 1.7m(左上), 2.0m(右上)
 3.0m(左下), 4.0m(右下)
 アンテナ： NovAtel GPS600(L1/L2)

構成される三角形の残りの頂点に1式(#2)を設置した形とした。詳細は図2に示すとおりである。平成14年2月の飛行実験では、この固定基準局を用い実験を実施した。

また、監視局を基準局からおよそ1km離れたA滑走路端付近(実験用MLS Az. シェルター)に設置した。監視局で得られたGPS信号はGBAS補強情報生成装置に伝送され、生成した補正情報により監視局位置の測位を行うことで、補正情報の監視を行う。基準局および監視局の計5式のGPS受信装置は岩沼分室に設置したGBAS補強情報生成装置へのデータ伝送のためモデムにより接続されている。

さらに、測位誤差の算出のための基準位置として後処理キネマティック値を用いるため、地上および機上にTrimble5700受信機を設置、搭載した。キネマティック測位の基準GPSアンテナはVDB送信アンテナの鉄塔上に設置した。後処理キネマティックの処理ソフトウェアとして、Trimble社のGPSurveyを用いた。今回の飛行実験では、タッチ・アンド・ゴー飛行を行うことにより、滑走路上での高さを用いて基準値として有効なデータの抽出を行った。抽出の方法として、

表 3: 固定基準局の概要

設置数	4
設置間隔	100m~150m
GPS受信機	NovAtel MiLLen. STD.
GPSアンテナ	AeroTechnology 2775 チョークリング付きパッチアンテナ
地上高	2.0m
モデム	非同期全2重

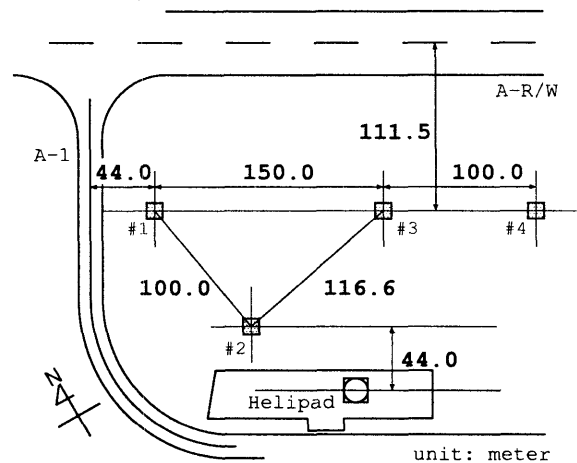


図 2: 固定基準局の設置場所

滑走路上での高さの測位結果が、他のタッチ・アンド・ゴー飛行時の測位結果とくらべ大きくばらついた飛行を除外するという操作を行った。

3 測位実験結果(平成13年7月)

平成13年7月に仙台空港において実施したアプローチ飛行実験において、GBAS基準局として設置した4式のGPS受信装置により取得したデータから作成したGBAS補強情報を用いて、航空機の実時間測位を行った。しかし、飛行実験後にGBAS補強情報に含まれる対流圏補正に関する値に誤りがあった[2]ことが分ったため、GBAS-DGPS測位の再計算を行い算出した測位結果について解析を行った。対流圏補正が正しく行われない場合、図5のように高さ方向の測位誤差が距離に依存することが分った。

測位誤差算出の際に航空機位置の基準値として用いる値として、滑走路端より-900m通過地点での後処理キネマティックによる高さの測位値

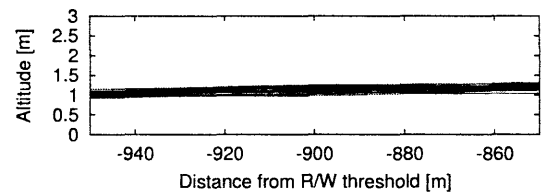


図 3: 後処理キネマティックによる滑走路上で航跡(平成13年7月実施)

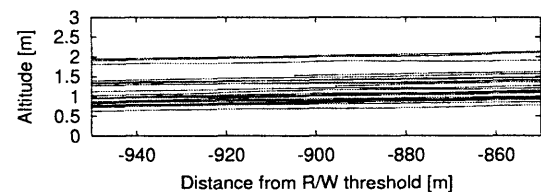


図 4: GBAS-DGPSによる滑走路上で航跡(平成13年7月実施)

表 4: -900m 点の航空機の高さ (平成 13 年 7 月)

	GBAS-DGPS	後処理キネマ
平均 μ [m]	1.178	1.112
標準偏差 σ [m]	0.375	0.070
サンプル	27	27

が一連のアプローチ飛行において、地上滑走時の測定値から、30cm以内となるものを抽出した。図3にこうして抽出した後処理キネマティックにより算出した滑走路における航空機の垂直方向の航跡を示す。また、図4に再計算によるGBAS-DGPS測位での滑走路での航跡を示す。

図6にアプローチ中の垂直(高さ)方向の測位誤差(GBAS-DGPS測位値と後処理キネマティック値の差)を示す。また、表5に滑走路端から0NM~7NMにおける誤差の平均、標準偏差などを示す。ここで ΔX は滑走路に沿った方向の誤差、 ΔY は滑走路に直交する方向の誤差、 ΔZ は垂直方向の誤差を表している。

GBASでは、航法の完全性を確保するためにプロテクションレベル(PL; Protection Level), アラートリミット(AL; Alert Limit)と呼ばれる値を用いる。PL値は測位誤差がこれを越える確率

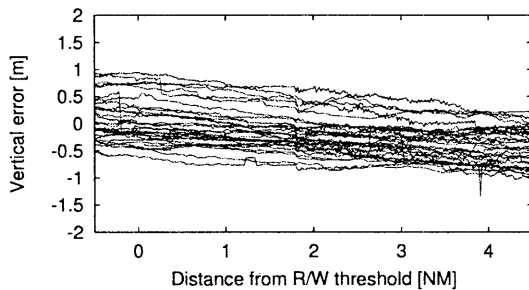


図 5: 垂直方向誤差-修正前 (平成 13 年 7 月)

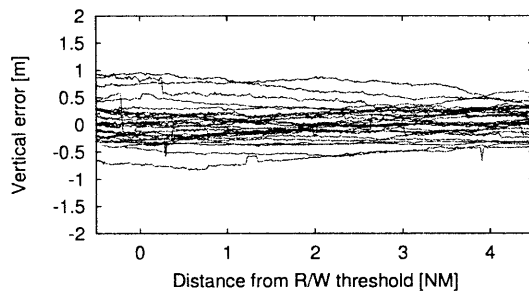


図 6: 垂直方向誤差-再計算 (平成 13 年 7 月)

表 5: GBAS-DGPS の測位誤差 (平成 13 年 7 月)

	ΔX	ΔY	ΔZ
平均 μ [m]	-0.207	0.012	0.009
標準偏差 σ [m]	0.137	0.161	0.341
$ \mu + 2\sigma$ [m]	0.480	0.335	0.691
最大値 [m]	0.485	0.737	0.977
AL95%値 [m]	—	13.682	3.421

アプローチ数: 27, サンプル数: 11623

が $0.5 \times 10^{-7}/\text{approach}$ となるような値 [3] とされ、補強情報に含まれる値から計算でき、機上装置において測位誤差を見積もる値である。機上装置ではPLと警報のしきい値であるALを比較し、PLが越えた場合、警報を発し、そのときの測位結果を航法には使用しないことになっている。CAT-Iアプローチの垂直方向アラートリミット値 (VAL; Vertical AL) は 10m とされている。ここでは、十分なデータ数がないため、VALをPLの定義で用いる係数 (K_{ffmd}) により 95%確率値に換算した値 (VAL95%値; 3.421m) と測位誤差の 95%値 ($|\mu| + 2\sigma$) の比較をおこなった。7月の飛行実験での結果では測位誤差の 95%値は 0.691m であり、VAL95%値より小さい値となっていた。

飛行実験期間を通しての基準局より約 1km 離れた監視局における GBAS-DGPS の測位結果の垂直方向の誤差は、95%値 ($|\mu| + 2\sigma$) で 0.657m (表 9) であった。機上装置において計算された値より小さい結果が得られているが、航空機が高速移動体であること、基準値となるキネマティック測位値の精度などを考慮すると妥当な値と考えられる。

つぎに、CAT-I, II, III の決心高度における測位誤差について航法システム誤差 (NSE; Navigation System Error) の要求値との比較を行った。アプローチ角が 3 度であるため、滑走路端から 900m, 300m, 0m の距離を通過した時の垂直誤差を算出した。その解析結果を表 6 に示す。また、SARPs [3] の NSE95% の要求値を表 7 に示す。これらの値を比較すると、7月の飛行実験での結果では測位誤差は CAT-III の要求値を満足していたことが分かった。

表 6: 決心高度での垂直方向誤差 (平成 13 年 7 月)

滑走路端からの距離	0m	300m	900m
	CAT-III	0.001	0.002
$ \mu + 2\sigma$ [m]	0.778	0.795	0.721

アプローチ数: 27

表 7: 垂直方向航法システム誤差 95%要求値

	GNSS SARPs 案	LAAS MASPS
CAT-I	200 feet decision height	$\leq 4.0 \sim 6.0$ m
	$\leq 4.0 \sim 6.0$ m	
CAT-II	100 feet decision height	≤ 2.0 m
	≤ 1.7 m	
CAT-III	50 feet decision height	≤ 2.0 m
	≤ 0.8 m	

4 測位実験結果 (平成14年2月)

平成14年2月に1月に新たに設置した固定基準局を用い、季節変動などの影響を調査するため、平成13年7月と同様の飛行実験を行った。

図7に後処理キネマティックにより算出した滑走路上における航空機の垂直方向の航跡を示す。平成14年2月の飛行実験時では、平成13年7月の場合とくらべ、測位結果に大きなばらつきがあった。

滑走路面上での高さ方向の測位結果のばらつきは、実験用航空機のサスペンションなどによる垂直方向の揺れ、地上滑走時の横方向偏位による滑走路の高さの違い、後処理キネマティック測位の誤差の和であらわされる。このうち前者の2つは、実施時期によらないもので、10数cm程度であると考えられる。一方、キネマティック測位は季節や時間帯による電離層、対流圏などの変動や、衛星配置、衛星数の変化などに影響されるため、平成14年2月の実験時には、平成13年7月の実験時に比べ、これらの影響が強くと現れた可能性が考えられる。

この時の実時間 GBAS-DGPS 測位による滑走路上で航跡を図8に示す。表8に示した-900m点の値の解析のとおり、後処理キネマティックでの航跡は実時間 GBAS-DGPS 測位と同程度のばらつきがあり、基準値として採用できないと判断

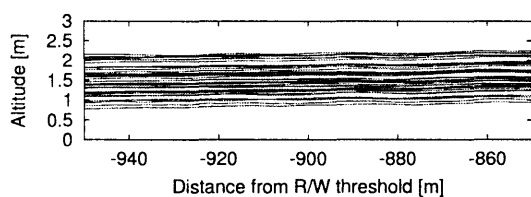


図7: 後処理キネマティックによる滑走路上で航跡 (平成14年2月実施)

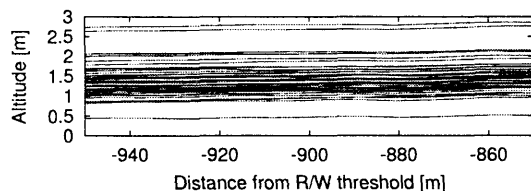


図8: 実時間 GBAS-DGPS による滑走路上で航跡 (平成14年2月実施)

表8: -900m点の航空機の高さ (平成14年2月)

	GBAS-DGPS	後処理キネマ
平均 μ [m]	1.462	1.564
標準偏差 σ [m]	0.436	0.358
サンプル	43	43

表9: 監視局での GBAS-DGPS の精度 (垂直方向)

	平成13年7月	平成14年2月
平均 μ [m]	0.097	0.089
標準偏差 σ [m]	0.280	0.258
$ \mu + 2\sigma$ [m]	0.691	0.605

した。さらに、別のソフトウェアにより後処理キネマティック測位を行い解析を試みたが、同様に大きなばらつきがあり、後処理キネマティックによる基準値が取得できなかった。

このときの監視局での GBAS-DGPS 測位の垂直方向の誤差の95%値は表9に示すとおり0.605mで、平成13年7月の実験時と同等の結果が得られていた。

5 まとめ

平成13年7月に実施した GBAS 補強情報による航空機の測位実験の測位誤差について、AL95%値との比較および各カテゴリの決心高度におけるNSE95%の要求値との比較を行った。その結果、GBAS-DGPS 測位の測位誤差の95%値はAL95%より小さい値であった。また、決心高度における測位誤差はCAT-IIIの要求値を満足する結果が得られた。

前回の報告 [1] において後処理キネマティック測位値において、処理ソフトウェアによる差異があったため、今回の飛行実験では、滑走路上での高さを基準にデータを抽出できるようにタッチ・アンド・ゴー飛行を行い選択し処理を行った。平成13年7月の飛行実験では、この方法により抽出を行い GBAS-DGPS の誤差の解析に用いた。しかし、平成14年2月の飛行実験では、後処理キネマティックの測位結果のばらつきが大きくなり、基準値として用いることができなかった。より正確で確実な基準位置の取得方法についての検討は今後の課題である。

参考文献

- [1] 齊藤真二, 福島荘之介, 藤井直樹; “GBAS 補強情報による航空機の測位実験”, 平成13年度電子航法研究所研究発表会講演概要, 23-26, 2001.
- [2] SAITOH S., Fukushima, Fujii; *Flight Experiment of GBAS in Japan*, proc. of ION GPS 2001,1757-1765, 2001.
- [3] ICAO, SARPs, Annex 10, Nov. 2001.