

6. GBAS補強情報による航空機の測位実験

航空施設部

※齊藤 真二 福島 荘之介 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) 案を評価・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。

本発表では、平成13年1月に実施した飛行実験において、GBAS 補強情報による航空機のリアルタイムディファレンシャルGPS (DGPS) 測位を行ったので、その結果について報告する。また、前回の報告 [1] において、ナルによるメッセージ誤りの発生について報告し、その改善策として VDB 送信アンテナをスタック型にすることが有効であることを示したが、今回、VDB 送信アンテナを3段スタック型に変更し飛行実験を行った結果、ナルの発生が抑制されたことが確認できたので報告する。

2 GBAS の概要

GBAS は GPS 信号を受信し補強情報を作成する基準局とそれを放送する VDB 送信局からなる地上局、および航空機上で受信した GPS 信号と補強情報から航空機の測位、誘導を行う機上局で構成される。

基準局では、冗長性をもたせると同時にマルチパスなど GPS 受信アンテナの設置場所に依存する影響を少なくするため、複数の GPS 受信装置を設置している。GBAS データ生成装置では、これらの GPS 受信装置で取得したキャリアにより平滑された各衛星ごとの擬似距離などから補

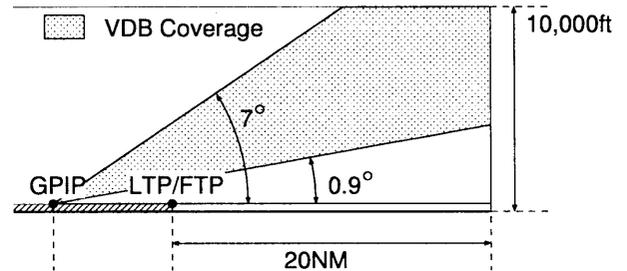


図1: VHF データ放送の覆域

強情報を生成し、VDB 送信局より放送する。

機上局では、地上から放送される補強情報と機上で受信した GPS 信号によりディファレンシャル GPS 測位を行うとともに、補強情報に含まれている信頼性に関する情報より測位値が有効であるかを判断し、航空機を誘導する。

このように、GBAS では従来の ILS などの航法装置と異なり、受信した情報や測位値の有効性の判断を機上局で行うこととなっているため、補強情報には測位に必要な擬似距離補正值などに加え、信頼性や飛行コースに関する情報も含まれ、後述するプロテクションレベル (PL; Protection Level) により完全性を確保している。

この GBAS-VDB の覆域は、ICAO の SARPs 案 [2] では、図1で示すような、高度 10,000ft、LTP/FTP (滑走路端) から 20NM、GPIP (アプローチコースと滑走路面の交点) での仰角で 0.9° から 7° とされている。この覆域内において、 $-99\text{dBW}/\text{m}^2$ の電界強度 (-87dBm の受信機入力と等価) が必要とされている。

3 飛行実験

平成13年1月23日から26日の期間において、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。今回の飛行実験では、更新した VDB 送信アンテナ (図3) の効果を調査するためのレベル飛行、および、進入・着陸時の GBAS 補強情報によるリアルタイム DGPS の精度を調査するアプローチ飛行を実施した。表1に実験の概要を示す。

今回の飛行実験期間中、仙台空港内の当研究所の MLS トラッカサイトに4式の GPS 受信装置を

表 1: 実験実施概要

実施期間	平成13年1月22日から26日
アプローチ飛行	B27 ローパス
レベル飛行	高度 8,000ft SDE(仙台空港) 直上から 110° 方向, 55NM

仮設し、GBASの基準局とした。MLSトラッカサイトは図2に示すように、A滑走路、A-1誘導路に面した当研究所岩沼分室前の緑地帯にあり、そこに80m間隔で立てた高さ3.5mのポール上にGPSアンテナを4式仮設した。実験用航空機には、GBAS機上局として、VDB受信装置、GPS受信機を搭載した。また、航空機の位置の基準となる後処理キネマティック測位を行うため、地上と機上に1台ずつGPS受信装置を設置した。地上側のGPSアンテナはVDB送信アンテナの鉄塔上に設置し、キネマティック測位の基準位置とした。今回の実験での基準局および機上局の詳細は表2、表3に示す通りである。

アプローチ飛行時には、仮設した4式のGPS受信装置から取得したデータにより、GBAS補強情報を作成、VDBで送信し、実験用航空機の機上局で受信した補強情報からリアルタイムDGPS測位を行った。また、VDB送信アンテナの特性の調査を行うため、レベル飛行時は、固定擬似データを送信し、機上局において、ビット誤り、メッセージ誤り、受信機入力レベルなどを記録した。

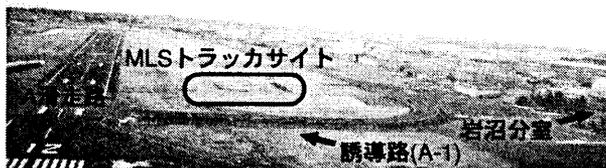


図 2: GBAS 基準局設置場所 (MLSトラッカサイト)

表 2: 仮設基準局の概要

GBAS 基準局	
GPS アンテナ数	4 (GPS600L1/L2)
配置	正方
高さ	3.5m
間隔	約 80m(一辺)
GPS 受信機	NovAtel MiLLen. STD. (4 式)
キネマティック基準局	
GPS 受信機	Trimble 4000SSi
アンテナ位置	VDB 送信鉄塔上

表 3: 実験用航空機搭載機材

名称	
GBAS-VHF 受信装置	
GPS 受信機	
GBAS 測位用	NovAtel MiLLen.STD.
キネマティック移動局	Trimble 4000SSi

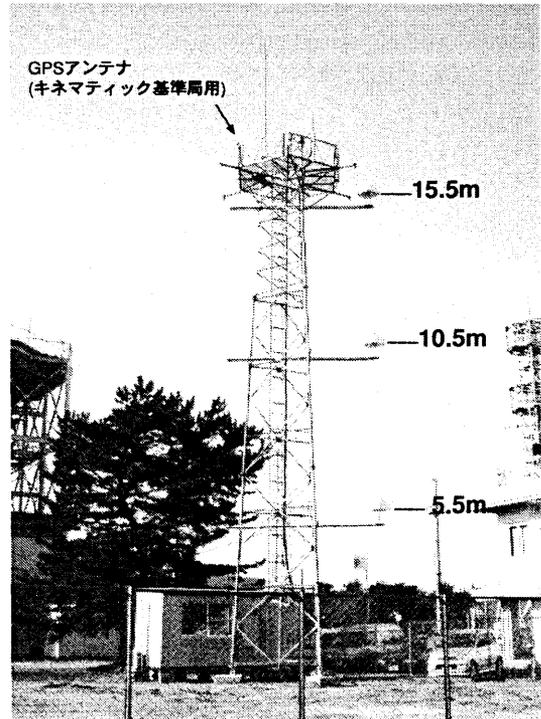


図 3: 3 段スタック VDB 送信アンテナ

4 スタック型送信アンテナの効果

前回の報告 [1] のとおり、従来の VDB 送信アンテナでは、GBAS-VDB 覆域内に生じる電界強度の落ち込み(ナル)が生じる箇所ではメッセージ誤りが発生した(図4)。また、同報告において、送信アンテナをスタック型にすることで、このナルの発生は抑制できることがわかったので、今回、VDB 送信アンテナのスタック型への変更を実施した。今回更新したスタック型送信アンテナの外観を図3、概要を表4に示す。

更新した VDB 送信アンテナの効果を調査するため、レベル飛行を行った。レベル飛行は、仙台空港直上から磁方位 110° 方向へ距離 55NM、高度 8,000ft で行い、その際、地上局から固定擬似データを送信し、機上において受信機入力レベル、メッセージ誤りなどを記録した。1999 年に行った従来の VDB アンテナによるレベル飛行での受信機入力、メッセージ誤り発生箇所を図4に、今回行ったスタック型 VDB 送信アンテナ

表 4: 3 段スタック VDB 送信アンテナの概要

周波数	108.5 MHz
送信電力	15W (最大 50W)
送信アンテナ	アルフォードループ (VOR サイドバンド用), 3 段
地上高	5.5m, 10.5m, 15.5m
給電比	1 : 1 : 1
位相遅延	180 : 90 : 0
偏波	水平偏波

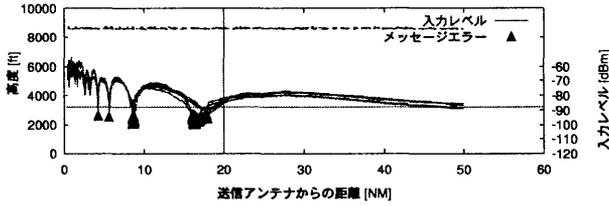


図 4: 従来のアンテナでの実験結果 (1999年6月)

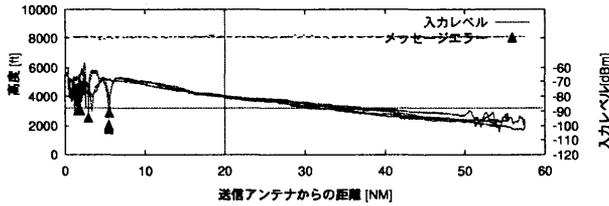


図 5: スタック型アンテナでの実験結果 (2001年1月)

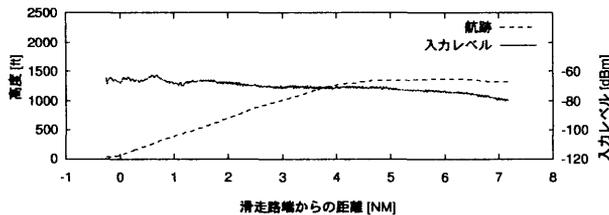


図 6: アプローチ飛行時の受信機入力

での結果を図5示す。図中において破線は航空機の飛行高度、実線は受信機入力レベル、‘▲’はメッセージ誤りの発生箇所を示している。図4および図5より、スタック型に変更したことで、従来のアンテナで生じていた仰角5°(17NM)および9°(9NM)付近のナルの発生が抑制され、メッセージ誤りの発生がなくなったことがわかる。なお、スタック型アンテナで発生する12.5°(6NM)付近のナルはGBAS-VDBの覆域の外である。

さらに、アプローチ中においても図6(破線:航空機の高度、実線:受信機入力レベル)に示す例ように十分な強度の受信機入力を得られ、メッセージ誤りの発生は確認されなかった。

5 航空機のリアルタイム DGPS 測位

仙台空港のB27(B滑走路, 磁方位270°方向)へのILSアプローチ飛行実験を実施した。このアプローチ飛行実験において、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、航空機のリアルタイムDGPS測位を行った。

アプローチ飛行の飛行航跡(13回分)を図7に示す。この図は、滑走路端を原点とし、滑走路中心線をX軸、滑走路端での鉛直方向上向きをZ軸、それぞれに直交する方向をY軸にとり、上

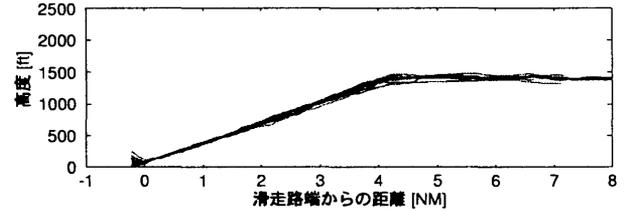
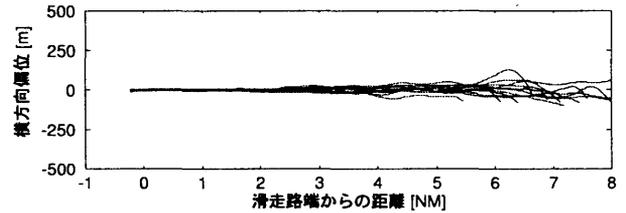
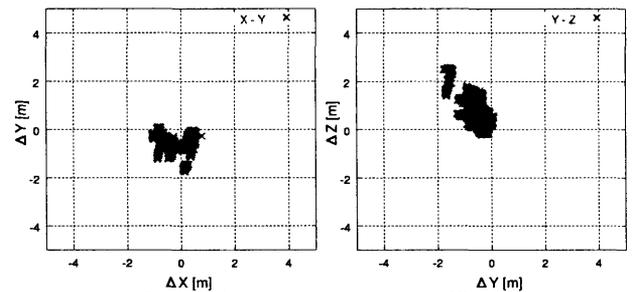


図 7: アプローチ飛行航跡 (2001年1月)

図はX-Y平面、下図はX-Z平面に航跡を射影した図である。ΔXをX軸方向の誤差、ΔYをY軸方向の誤差、ΔZをZ軸方向の誤差とし、後処理キネマティックの測位結果(GPSurvey)を基準とした場合のGBAS補正情報によるリアルタイムDGPSの誤差の例を図8に示す。また、その誤差の平均、標準偏差などを表5に示す。2σ値をみると、水平方向でおよそ0.75mから1m、垂直方向でおよそ1mの誤差があり、平均値より、横(Y)方向におよそ0.5m、垂直(Z)方向におよそ0.7mのバイアスがあったことがわかる。このバイアスの原因を調べるために、別のソフトウェア(GrafNav)を用い後処理キネマティック測位



(a) 水平方向 (b) 横・高さ

図 8: キネマティック測位との差

表 5: DGPS 測位の誤差 (アプローチ13回)

		ΔX	ΔY	ΔZ
平均値	m	0.096	-0.487	0.681
標準偏差	m	0.490	0.375	0.511
2σ	m	0.980	0.750	1.022
最大値	m	-1.08	-1.723	2.511
サンプル数		2816	2816	2816
アプローチ数		13	13	13

表 6: DGPS の誤差 (アプローチ1回分)

	ソフト	ΔX	ΔY	ΔZ
平均値	A	-0.398	-0.791	1.208
	B	-0.216	-0.178	0.830
標準偏差	A	0.118	0.062	0.232
	B	0.120	0.057	0.231

A:GPSurvey / B:GrafNav

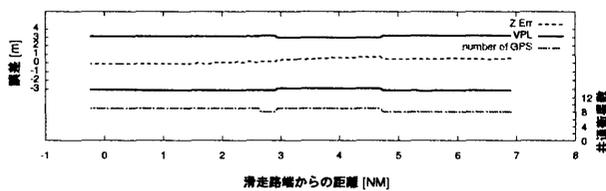


図 9: 鉛直方向誤差と VPL の例

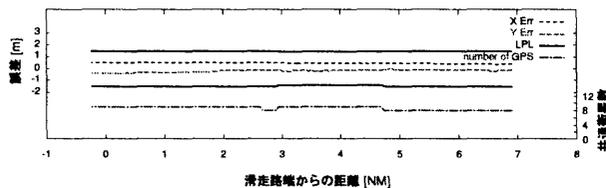


図 10: 水平方向誤差と LPL の例

を行い DGPS の誤差を算出した。表 6 にそれぞれの処理結果の例を示す。標準偏差値に比べ、バイアス値はソフトウェアの差異やアプローチ毎の差異が大きく、これは、サイクルスリップなどが生じたときの処理の違いによるものと考えられる。

アプローチ飛行時の DGPS 測位の誤差、および測位に用いた衛星数の変化の例 (1 月 24 日 5 回目のアプローチ) を図 9 (鉛直方向) および図 10 (水平方向) に示す。図中実線で示した VPL (Vertical Protection Level), LPL (Lateral Protection Level) は、補強情報に含まれる値から計算され、それぞれ鉛直方向、水平方向の測位誤差を見積もる値である。航法の完全性を確保するため、VPL・LPL と、警報のしきい値である VAL (Vertical Alert Limit)・LAL (Lateral Alert Limit) を比較しプロテクションレベルがアラートリミットを越えた場合、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。そのため、VPL, LPL の値は測位誤差より大きくなければならないが、図 9, 図 10 より、今回の実験ではアプローチ中の VPL, LPL は常に誤差より大きい値を示していたことがわかる。また、CAT-I(カテゴリ-I)アプローチの VAL は 10m, LAL は 40m と規定されているが、アプローチ実験中は VPL, LPL は常にこの値より低い値となっていた。

また、衛星数が増減したときに測位誤差がステップ状に変化する箇所があるが、航空機の位置は滑らかに変動するはずであるので、この原因を調査する必要がある。衛星数の変化は主に機上の GPS 受信機の可視衛星数の変化によるも

ので、機体と衛星の位置関係により、機上のアンテナや翼による影が生じ、可視衛星数が変化したものと考えられる。

6 まとめ

今回の飛行実験では、更新したスタック型 VDB 送信アンテナの評価のためのレベル飛行と実験用 GBAS 装置の精度の評価のためのアプローチ飛行を行った。

レベル飛行実験の結果から、3 段スタック型に更新した VDB 送信アンテナを用いることにより、従来のアンテナで生じていた覆域内のナルが抑制され、メッセージ誤りの発生がなかったことが確認された。また、アプローチ中においても従来の送信アンテナと変わらない十分な電界強度があることが確認された。

アプローチ飛行によるリアルタイム DGPS 測位実験の結果から、今回の実施したアプローチ飛行において、実験用システムの測位誤差は 2σ 値で約 1m であった。また、アプローチ飛行時の VPL, LPL は測位誤差より常に大きい値を示し、VAL, LAL を越えなかったことも確認できた。

7 今後の課題

スタック型 VDB アンテナについては、全方位の特性の調査や覆域の末端での電界強度などの調査を実施していないため、これらの調査を行う予定である。また、GBAS 覆域外であるが 12.5° 付近にナルが生じた。GBAS の拡張や GRAS (Ground-based Regional Augmentation System) への発展を考えた場合、ナルの少ない放射パターンを形成するアンテナ高・位相差・給電比などのパラメータを検討する必要がある。

リアルタイム測位の飛行実験は、実験中に実験用航空機に不具合が発生したため、十分な飛行実験が行えなかったため、統計的評価を行うのに十分なデータ取得をするため、飛行実験を実施する予定である。さらに、基準値の算出方法や衛星数の増減による影響を明確にすることも今後の課題である。

参考文献

- [1] 齊藤真二, 福島荘之介, 藤井直樹; “GBAS 飛行実験結果について”, 平成 12 年度 (第 32 回) 電子航法研究所研究発表会講演概要, 23-26, 2000.
- [2] ICAO, SARPs, Annex 10, 2001. (2001 年 11 月発行予定)