

9. 気圧高度によるGPSのインテグリティ補強

衛星技術部 ※坂井 丈泰 惟村 和宣 新美 賢治

1 はじめに

さまざまな移動体の測位手段として GPS が一般的に利用されるようになってきており、民間航空分野においても GPS をはじめとする衛星航法システムの導入が図られている。在来の無線航法システムと比較すると GPS は精度も高く使いやすいシステムといえるが、民間航空分野への応用にあたっては出力される位置情報の信頼性に問題がある。すなわち、民間航空用の航法システムについてはインテグリティ (integrity; 完全性) に関する厳しい要求があり、GPS はこれを満たしていない。

インテグリティとは、ユーザの測位誤差 (測定で得られた位置の、真の位置からの差) が許容範囲内にあることを保証する能力といえる。民間航空分野においては GPS を含む衛星航法システムの国際標準仕様 (ICAO SARPs) [1] が最近定められたところであるが、これによると「許容範囲」はそれぞれの飛行フェーズに対して定められており、たとえば CAT-I 精密進入では水平・垂直方向について 40 m あるいは 10 ~ 15 m とされ、ターミナル空域では水平方向についてのみ 1.85 km というように設定されている。

「保証する能力」を定量的に表現するためには、確率が用いられる。同じ標準仕様によれば、CAT-I 精密進入では 1 回の着陸あたり $1 - 2 \times 10^{-7}$ 、ターミナル空域では 1 時間あたり $1 - 10^{-7}$ である。いずれも 1 にたいへん近い値であり、このような高い確率をもってユーザ測位誤差が所要の許容範囲内にあることを保証するというのがインテグリティの考え方である。インテグリティは、カバレッジ内のすべてのユーザについて、常に満たされていなければならない。

さて、民間航空用の衛星航法システムは以上のインテグリティ要件を満たしていなければならないから、GPS のみでは実現することができず、補強システムを追加して構成することとされている。これが現在開発中の SBAS (satellite-based augmentation system; 静止衛星型衛星航法補強システム) および GBAS (ground-based augmentation system; 地上型衛星航法補強システム) であって、所要のインテグリティを確保するためにさまざまな努力がなされている。衛星航法システムを提供するプロバイダとして

はこうした補強システムによりインテグリティを確保することとしているが、ユーザ側では GPS 以外のセンサを利用してさらに信頼性を高めることが有効である。具体的には地上ベースの在来型無線航法システムや慣性航法装置が考えられ、高度方向については気圧高度計が使用可能である。

気圧高度計は現在の航空機における標準的な高度測定手段であるが、周辺の大気環境の変動により比較的大きな指示誤差を生じることが知られている。気圧高度により衛星航法システムの補強を図るためには、必要な補正を施すとともに誤差の程度をあらかじめ把握しておく必要がある。こうした点を踏まえて気圧高度計による衛星航法システムの補強について検討し、実験により補正効果を調べたので、その概要を報告する。

2 気圧高度とその補正

気圧高度により GPS の補強を図る場合、気圧高度の測定精度が GPS と比べて十分でなければ有効な補強とはならない。気圧高度計の指示は大気環境による影響を受けて比較的大きく変動するため、これを補強に用いるには適当な補正が必要である。

2.1 気圧高度計の指示

気圧高度計は測定した大気圧 P hPa を標準大気モデルに従って高度 H m に換算する装置であり、この間の関係式は

$$H = 4.43308 \times 10^4 \left[1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{0.190263} \right] \quad (1)$$

で表される [2]。ここで、 $P_0 = 1013.25$ hPa は地上気圧を意味する。

現実の大気は標準大気モデルとは異なるから、式 (1) に基づく気圧高度計指示は大気の状態による影響を受けて誤差を生じる。気圧高度計の測定原理に起因するものも含めると、衛星航法システムが測定する幾何学的高度に対して、気圧高度計指示は次のような誤差を含んでいる：

1. 地上気圧 P_0 の変動： 地上気圧が P_0 から ΔP_0 だけ変動すると、高度計指示には $\Delta H \approx$

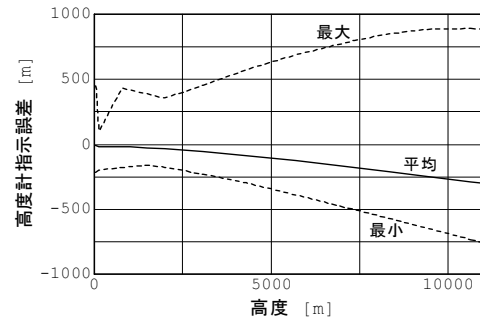
$-\frac{R}{g_0 M} \frac{T_0}{P_0} \Delta P_0$ の誤差を生じる。後述する QNH 規正により補正することとされている。

2. 気温分布の変動： 標準大気モデルでは、地上気温は 15.0 °C、上空の気温は高度に比例して $-0.0065^\circ\text{C}/\text{m}$ の割合で低下するものとされる。現実の鉛直気温分布がこれから外れると測定誤差を生じるが、 $H = 0$ では誤差とならない。
3. 高度の定義の違い： GPS で用いられる幾何高度に対して、気圧高度計はジオポテンシャル高度（幾何高度より若干小さい）を測定する。これらの差は高度 10000 m で 16.6 m 程度となるが、相互の変換は容易である。
4. 重力加速度の変動： 地表面上における重力加速度の国際標準値は $g_0 = 9.80665 \text{ m/s}^2$ とされるが、実際は場所により異なる。赤道上と極点での差は約 0.53% であり、これにより高度 10000 m で $\pm 20 \text{ m}$ 程度の影響がある。 $H = 0$ では誤差とならない。
5. ジオイドの影響： GPS が準拋楕円体からの高度を測定するのに対して、気圧高度計はジオイド面（地球重力の等ポテンシャル面）からの高度を測定する。これについては、適当なジオイドモデルを使用すれば十分な精度で補正できる。潮汐による影響も受けるが、その大きさは洋上で 1 m、陸上で 30 cm 程度である。

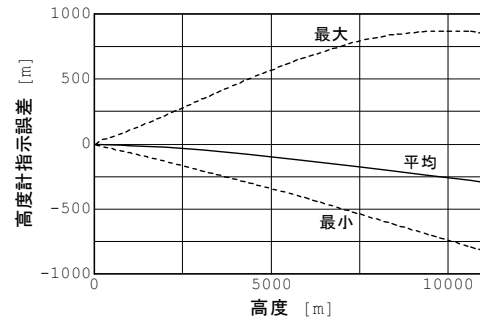
2.2 補正方式

我が国では、14000 ft 未満の高度では地上気圧 P_0 の補正をすることとされている。これが QNH 規正で、滑走路上で高度計が空港標高を指示するように地上気圧 P_0 を補正するものである。

前節に列挙した誤差要因のうち、1. はこの QNH 規正により補正される。4.~5. は場所に依存して決まるオフセット誤差であるから同様に QNH 規正により補正され、また 2.~3. は QNH 規正を行う基準高度では誤差を生じない。すなわち、滑走路上の気温の変化や潮汐による影響（いずれもゆるやかにしか変化しない）を除けば、QNH 規正により滑走路上においては常に正しい高度を指示させることができる。図 1 はこの様子を示したもので、標準大気モデルのみでは地上付近で生じる誤差が、QNH 規正により補正されていることがわかる。なお、この図は全国 20ヶ所



(a) 規正なし（標準大気）



(b) QNH 規正（地上気圧のみ補正）

図 1. QNH 規正による気圧高度の補正効果。

における 3 年分の高層大気観測データから作成した [3][4].

ただし、QNH 規正により補正されるのは地上（滑走路）付近における指示誤差であって、図 1 からわかるように上空における誤差は補正できない。飛行中の航空機においても衛星航法システムの補強を図るには、地上からユーザ高度に至るまでの気圧や気温の鉛直分布が必要となる。

こうした用途に利用可能な情報として、気象庁による数値予報データが考えられる。気象庁は予報業務に使用している数値予報モデルの計算結果を一般に提供しており、民間事業者の予報業務に活用できるよう便宜を図っている。現在のところ、全球数値予報モデル（GSM）、領域数値予報モデル（RSM）、メソ数値予報モデル（MSM）の 3 種類が提供されており、それぞれの緒元は表 1 のとおりである。いずれも、地上における気圧、気温、相対湿度等、また上空についてはいくつかの等気圧面における高度、気温、相対湿度（300 hPa 気圧面まで）等といった情報が等経緯度の格子点における値として格納されている。いずれの数値予報データも、初期時刻の 1~2 時間後から利用可能となる。

表 1. 数値予報モデルの緒元.

モデル	初期時刻	予報時刻	予報範囲	格子サイズ
全球数値予報モデル (GSM)	00/12UTC	6 時間毎	全球	1.25 × 1.25 度
領域数値予報モデル (RSM)	00/12UTC	3 時間毎	日本付近	0.4 × 0.5 度
メソ数値予報モデル (MSM)	00/06/12/18UTC	3 時間毎	日本付近	0.2 × 0.25 度

表 2. 実験フライトの一覧.

日付	コース	基準局
1 月 20 日 #1	仙台-横須賀-串本-高知	JD11/JD14/JD17/JD18
1 月 20 日 #2	高知-種子島-那覇	JD18/JD24/JD25/JD26
1 月 21 日	那覇-種子島-高知	JD18/JD24/JD25/JD26
1 月 22 日	高知-串本-横須賀-仙台	JD11/JD14/JD17/JD18

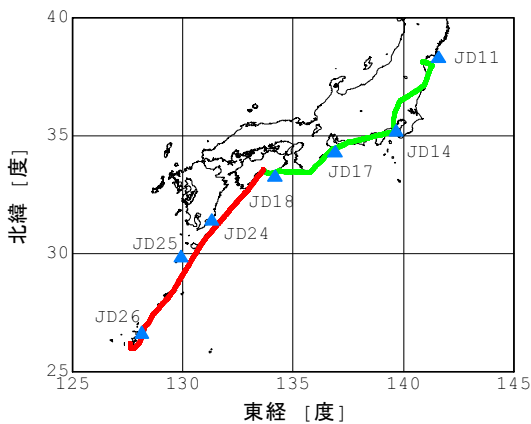


図 2. 飛行実験のコース.

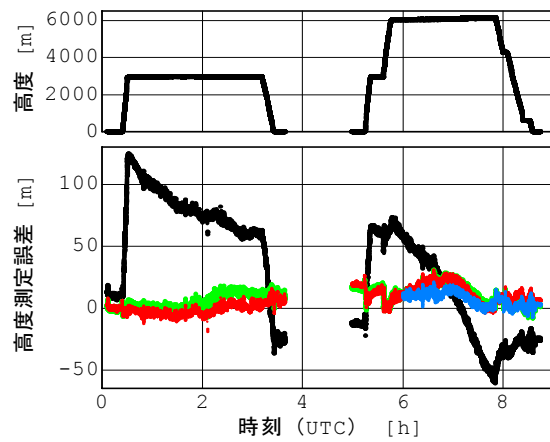


図 3. 高度測定誤差の例. (黒) 標準大気モデル, (緑) RSM@00UTC, (赤) MSM@00UTC, (青) MSM@06UTC.

3 飛行実験による評価

気圧高度の補正効果を調べるために, 実験用航空機により収集したデータを用いて試算を行った. 当所の実験機ビーチクラフト B99 を使用し, 気圧高度および外気温を記録するとともに, NovAtel 社製の GPS 受信機 MiLLenium RT-2 を搭載して位置データを収集した. 航空機位置の基準はディファレンシャル GPS 処理により得ることとし, 海上保安庁が運用しているディファレンシャル GPS 局の観測データを後日取得して利用した.

実験フライトの内容を表 2 に, コースを図 2 に示す (往路分のみを表示: 復路も同じコース). 図 2 には, 海上保安庁ディファレンシャル GPS 局の位置もあわせて表示してある. 実験終了後にこれらのディファレンシャル GPS 局の観測データ (RINEX ファイル) を収集し, フライト毎に表 2 に示した基準局を用いてディファレンシャル GPS 処理を行い, 実験機位置から各基準局までの距離による重み平均を実験機の基準位置とした. 気圧高度と直接比較するためには標

高を得る必要があるから, EGM-96 ジオイドを用いてジオイド補正を行った [5].

気圧高度計により測定した高度の基準位置に対する誤差の例を, 図 3 に示す. この図には 1 月 20 日に実施した 2 回のフライトをまとめて表示してあり, 黒色は標準大気モデルによる場合の測定誤差, 緑色および赤色はそれぞれ領域数値予報モデル (RSM) とメソ数値予報モデル (MSM) による補正後の残差である. 標準大気モデルによる誤差が出発時に最大であることから, 当日は北日本で標準大気から大きく外れた気象条件であったものと思われるが, 数値予報モデルの利用によりこうした高度測定誤差を抑制することができることが図から明らかである. 領域数値予報モデル (RSM) とメソ数値予報モデル (MSM) を比べると MSM のほうが補正精度に優れている可能性があるが, この理由のひとつは格子点の細かさにあるものと思われる. 2 回目のフライトで補正残差

表 3. 気圧高度の補正効果.

高度範囲 [m]		予報 モデル	測定誤差 [m]				データ 点数
			平均値	RMS 値	最小値	最大値	
地上	～20	なし	6.005	44.88	-36.28	118.0	5752
		RSM	8.755	12.46	-8.170	33.86	
		MSM	9.172	11.65	-4.361	27.03	
FL100/110	2900～3200	なし	122.7	139.0	-37.66	254.9	14814
		RSM	6.269	8.559	-8.149	23.27	
		MSM	1.494	6.190	-18.98	25.72	
FL200/210	5950～	なし	26.67	59.79	-60.48	168.5	10768
		RSM	15.93	17.79	-1.902	38.70	
		MSM	11.26	13.85	-9.594	30.63	

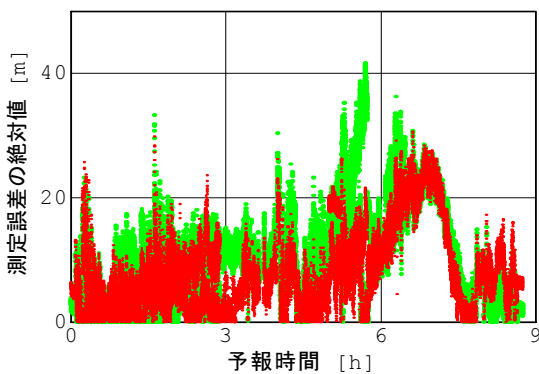


図 4. 予報時間と測定誤差の関係.

が大きいのは、飛行高度が高く、また飛行経路の大部分が洋上であったことが原因と考える。洋上では気象観測がほとんど行われないため、陸地に比べると一般に数値予報の精度は低下する。

補正に利用した数値予報モデルの初期時刻はいずれも 00:00UTC である。フライト終了時には約 9 時間先の予報データを用いて補正していたことになるが、補正残差は 5 m 程度に抑えられている。MSM については 06:00UTC を初期時刻とした予報データが利用できるため、これによる補正結果を青色で表示した。00:00UTC の予報データによる結果と比べると補正残差が小さく抑えられており、予報時間は短いほうが有利であることを確認できる。

4 回のフライトについて、モデル別・高度別に補正効果をまとめた結果を表 3 に示す。標準大気モデルでは誤差の RMS 値が 130 m 以上に達するが、数値予報モデルの利用によりこれを 20 m 以下に抑えることができる。RMS 値で比較すると格子点が細かい MSM が優れているが、極値は逆に大きくなることもあり、インテグリティの観点からはさらに検討を要する。

図 4 は、4 フライトについて予報時間と補正残差の関係を表示したものである。全体的には予報時間が長くなると残差も大きくなる傾向にあるが、相関は弱く、他の要因（陸地/洋上の区別など）による影響のほうが大きいものと思われる。

4 むすび

衛星航法システムのインテグリティ補強には気圧高度計が有効であるが、気象条件の変動による影響を補正する必要がある。このために気象庁の数値予報データを利用することを考え、飛行実験データにより有効性を確認した。補正残差については予報時間との相関は弱く、地理的要因による影響のほうが大きいものと思われる。

実用にあたっては、今回の結果に加えて、さらに空間・時間軸それぞれの補間方式を比較検討するとともに、具体的な補強方式の設計が必要である。

参考文献

- [1] *International Standards and Recommended Practices, Aeronautical Telecommunications, Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation*, vol. I, ICAO, Nov. 2002.
- [2] 坂井丈泰, 惟村和宣, 新美賢治, “気圧高度と GPS 高度の比較実験”, 信学技報, SANE2001-105, pp. 25～32, Dec. 2001.
- [3] 気象庁, 高層気象観測年報 (CD-ROM), 1998～2000.
- [4] 坂井丈泰, 惟村和宣, 新美賢治, “GPS 補強のための気圧高度計の補正”, 信学技報, SANE2002-33, pp. 7～12, July 2002.
- [5] *The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96*, NASA/TP-1998-206861, 1998.