

## 6. 航空機高度計としてのGNSSの利用

衛星技術部 ※新美 賢治 坂井丈泰 惟村 和宣

### 1. はじめに

航空機は、安全かつ経済的な飛行のために高度情報を必要とする。一般に航法または測位といえば水平面内での位置を知ることを指し、従来より地上ベースの無線航法システムが利用されている。航空機の高度センサとしては気圧高度計 (barometric altimeter) が広く使用されており、高度情報を提供できる無線航法システムはともに進入着陸に用いられる ILS (instrumental landing system) あるいは電波高度計 (radio altimeter) に限られている。しかし、気圧高度計は気象状況の時間的あるいは空間的変動の影響を受けるため時々刻々の補正が必要であり、パイロットの負担となるとともにヒューマンエラーの潜在要因となり得る。また、高度センサが気圧高度計のみでは高度情報のインテグリティを確保することが難しく、過去に静圧系統のトラブルによる事故が何件か発生している。

ところで、さまざまな移動体の測位手段として、米国の運用する衛星航法システム GPS (global positioning system; 全地球的測位システム) が一般的に利用されるようになってきた。GPS によれば地球上のいずれの場所においてもユーザ位置を3次元的に測定することができ、シームレスかつリアルタイムな航法手段として各方面で応用が進められている。航空機の航法システムとして GPS を使用するには測位精度あるいは信頼性が不足するため、所要の補強システム SBAS (satellite-based augmentation system; 静止衛星型衛星航法補強システム) を日米欧の航空当局が整備中である。

GPS あるいは GNSS (global navigation satellite system; 全世界的航法衛星システム) --- SBAS による補強などで航空機の使用にたえる衛星航法システム --- は航空機の3次元位置を測定するから、水平位置のみならず高度も知ることができる。すなわち、GPS (GNSS) を利用して高度計を構成できることとなる。こうした衛星航法システムによる高度計は大気環境の影

響を受けず常に正確な高度を示すため、気圧高度計の場合に必要な補正操作が不要となる特長を有する。

一方で、GNSS の実用にあたっては、他の航空用航法システムと同様に十分な信頼性を確保する必要がある。衛星航法システムの利点のひとつは広いカバレッジに対して均質なサービスを提供できることであるが、一方でこれは多くの航空機がひとつのシステムを同時に使用することを意味し、信頼性については非常に高い水準が求められている。基本的にはGNSSのみで所要の信頼性を確保することとされているが、航空機側としては機上に搭載されているGNSS以外のセンサを利用して冗長性を高めることは有効である。

こうした用途には地上ベースの無線航法システムや慣性航法装置の利用が考えられ、高度方向については気圧高度計も使用可能である。

ただし、気圧高度計は大気環境の変動により比較的大きな指示誤差を生じるから、これ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評価しておく必要がある。

以上を踏まえ、電子航法研究所では、GNSS による高度計および気圧高度によるGNSS補強方式について研究を行ったので概要を報告する。

### 2. GNSS 高度計

GPS をはじめとする衛星航法システムはユーザの3次元位置を与えるから、水平位置を知るのみならず、高度センサとしても使用可能である。GPS の高度測定誤差は水平方向の測位誤差の約1.5倍と規定されているSBASでは今のところ進入着陸フェーズのみで高度方向の測位精度が規定されているがエンルート上でも所要の測位精度をもって高度を測定することが可能である。すでに小型機やヘリコプタでは(水平方向の航法の補助目的で)GPSが多く利用されており、またGPSによる位置および高度情報を用いて地表面への接近を検出するEGPWS (enhanced ground

proximity warning system; 対地接近警報システム) も実用化されている。

気圧高度計と比較した場合のGNSS高度計の特長は以下のとおりである：

- (1) 気象条件に左右されず、ヒステリシスや遅れもなく正しい幾何高度を測定する。
- (2) 気象状況による高度補正が不要となり、ヒューマンエラーの減少につながる。
- (3) SBAS と同一の枠組みで高度測定の精度およびインテグリティを規定できる。
- (4) 地形データとの組合せによりEGPWSを構成できる。
- (5) GNSS を主航法システムとして使用する場合、追加センサは不要となる。
- (6) 気圧高度計を使用する場合でも、インテグリティの確保に有用である。
- (7) 実運航中の航空機により気象観測や科学観測を行う場合に都合が良い。

(1)～(3)は、気圧高度計と比較した場合の本質的な差異を述べている。(1)および(2)は測定原理より直接に得られる帰結である。また(3)のように、GNSSセンサの一部としてRNP (required navigation performance; 航法性能要件)の概念に沿って測定値にインテグリティを規定することができる。これにより、たとえば他機との間の高度方向のセパレーションはこのインテグリティに基づいて設定することができることとなり、高度方向のフリーフライトを目指すうえで有用である。GNSS高度計の装備にあたっては(4)、(5)のとおりGNSSあるいはEGPWSを装備していれば追加センサは不要であり、経済的に導入できる。(6)は気圧高度計と併用した場合の効果であり、電波高度計を使用できる状況下(低高度に限られる)にある場合を除いて、高度に関して別ソースのセンサが得られることからインテグリティが向上することとなる。応用としては、(7)のようなことも考えられる。

すなわち、実運航中の航空機により低コストかつ高密度に気象データを取得し、あるいは長距離便を利用すれば北極圏の科学観測ができ

る可能性が指摘されているが、こうした応用では航空機が幾何高度により飛行していることが望ましい場合がある。

GNSS高度計のメリットは以上のとおりであるが、一方で次の点には注意しなければならない：

- (1) 標高を与えるためにジオイドに関する情報を要する。
- (2) 等気圧面を飛行するためには気圧(静圧)センサが必要となる。
- (3) 一定高度を飛行するとき、気圧も一定とは限らない。
- (4) 高層天気図は一般に等圧面図で提供される。
- (5) 衛星航法システムに不具合が発生した場合に影響を受ける。

(1)については、衛星航法システムが与える高度は基本的に楕円体高であるため、標高(平均海面=ジオイドに対する高度)を得るには適当なジオイドデータを必要とする。

(2)は、気圧高度計指示により飛行する場合の常に気圧が一定となる性質が失われることを意味し、経済高度と関係がある。気圧高度により一定高度を飛行する場合は常に気圧も一定となるが、GNSS高度計の指示は気圧と無関係であるから、一定高度を飛行するとき気圧も一定とは限らない。また、(4)のようにGNSS高度計はGNSS自体に事故あるいは不具合が発生した場合に当然影響を受ける。周辺の航空機もGNSS高度計を使用していれば同様な不具合を生じることとなるが、こうした場合にも安全に航空機を誘導できるような対策が必要である。

ところで、現段階では気圧高度計が標準として使用されているうえに、GNSSもまだ実用化されていない。今後GNSS高度計を主たる高度センサとして実用化するためには、以下のような4つのフェーズを経ることになるものと思われる：

- (1) GNSS航法システムとしてSBASが導入される。
- (2) GNSS高度計を幾何高度センサとして導入、利用(航空測量、科学観測など)。

(3) 気圧高度計から GNSS 高度計への移行フェーズ。

(4) GNSS 高度計が主たる高度センサとなる。

このうち、両センサが混在することとなる移行フェーズ (3) では、特に高度方向のセパレーションの確保に注意を要する。すなわち、高度センサについては安全上周辺航空機との相対精度が重要であり、誤差特性の異なるセンサをそのまま混在することはできない。

### 3. GNSS 高度計の誤差

GNSS により高度を測定する場合には、誤差要因には以下に述べる測位誤差とジオイド高データに起因するジオイドの精度がある。このうち、3.1 に述べる測位誤差は衛星航法システムの測位原理に起因するもので、座標系や高度の表現方法によらず発生する。それ以外の誤差要因は、GNSS による測定値を標高に変換する過程で生じる誤差である。

#### 3.1 測位誤差

GNSS は、衛星から送信される測距信号を用いて位置を測定する原理上、一般に次のような要因により測位誤差を生じるのは避けられない。

- (1) 電離層伝搬遅延：電離層の電離状態の不規則性の影響により、モデルによる補正後も 2~5m 程度の誤差が残留する。この電離層遅延誤差は DGPS 処理により低減できるが、SBAS などの広域補強システムでは数 m 程度の誤差が予想される。
- (2) 対流圏伝搬遅延：天頂方向で 2.5~3m 程度で、モデルによる補正後の残差は 0.5m 程度とされる。DGPS 処理により除去できるが、基準局—移動局間の高度差に相当する成分は残留する。
- (3) 受信機クロック誤差：一般に鉛直方向の測位精度と相関があることが知られている。仮に精密なクロックが使用可能であれば鉛直方向の測位精度を向上できる。
- (4) マルチパスおよびその他の誤差

これらはどれも衛星までの距離測定における誤差であり、ユーザの 3 次元位置を計算すると一般に鉛直方向は水平方向に比べて精度が劣る。たとえば GPS の典型的な測位精度は、水平方向については 13m とされるが、鉛直方向は 22m で

ある

ただし、これらの誤差は GNSS の実装にあたりははじめから考慮されている。たとえば、SBAS のインテグリティはこれらの誤差を考慮したうえで確保されており、進入着陸フェーズにある航空機に対して鉛直方向誤差は 4~6m (95%値) とされている。

### 4. 研究の概要

本研究は平成 14 年度から 3 年間研究を実施した。この 3 年間において

- (1) 飛行実験によるデータ収集
- (2) 気圧高度とその補正についての検討
- (3) 実験データによる気圧高度の補正の評価を実施した。

### 5. 主な研究成果

#### 5.1 飛行実験によるデータ収集

気圧高度計と GNSS による高度それぞれの特性を把握し、また相互の変換方式の開発に利用することを目的として、当所の実験機による飛行実験を実施してデータを収集した。

#### 5.2 気圧高度の補正例

気圧高度の補正効果を実際に確認するため、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。実験結果の一例として、平成14年3月に仙台—高知間で実施した実験結果について述べる。実験データは当所の実験用航空機ビーチクラフトB99により取得しており、本機の実験用静圧管系統にCollins社製エアデータコンピュータADC-85を接続し、ARINC429バスに出力される気圧高度および外気温データを記録した。また、NovAtel社製GPS受信機RT-20（1周波、ナローコレータ方式）を搭載して同時に測位データを収集するとともにDGPS処理のために調布市の当所実験室に設置した同様のGPS受信機でも測定を行った。実験結果を図1に示す。このように、実験データを分析した結果は、昨年度の研究発表会で述べた結果を裏付けるものであった。

#### 5.3 気圧高度とその補正についての検討

気圧高度によりGPSの補強を行うためには、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

