

次世代航法援助システム

Global Navigation Satellite System

川野 修一
KAWANO Shuichi

須賀 秀一
SUGA Shuichi

民間航空機の航行の安全は、地上に設置された航法援助装置で支えられている。しかし、これらが設置されていない地域や、洋上では航空機の自律航法に依存していることから、将来予想される交通量の増大に対しては、対応できない状況となっている。このため、国際民間航空機関では、GNSS(Global Navigation Satellite System)に対する規格の標準化を進めている。このシステムは、全地球的測位システムであるGPSを利用することで、地域的な制約を受けることのない利点を持つ。わが国でも、運輸省電子航法研究所及び航空振興財団がこのGNSSに関する研究を進めており、当社はこの研究のための実験評価システムを納入した。

The safety of civil aviation relies on ground navigation aids. In areas where there are no ground aids and on oceanic air routes, aircraft must depend on their own navigation system. The predicted increase in civil aviation traffic in the near future will make it difficult for current navigation aids to support navigation in all phases of flights.

To avoid this problem, the International Civil Aviation Organization (ICAO) is directing the establishment of standards for the global navigation satellite system (GNSS). GNSS employs navigation satellites, such as those of the global positioning system (GPS), to provide navigation capability throughout the world. In Japan, the Electronic Navigation Research Institute, the Ministry of Transport, and the Japan Civil Aviation Promotion Foundation are carrying out research on this navigation system. Toshiba has been providing experimental equipment for this research.

1 まえがき

増大する民間航空機の交通量に対応するため、現行システムに代わる新しい通信・航法・監視システムが求められている。その中の航法を担うシステムがGNSSである。このシステムは、GPS(Global Positioning System)などの航法衛星を利用することにより、現行システムでは実現できなかった高精度、高信頼度の航法を全地球的規模で実現し、航空機が離陸してから着陸するまですべての飛行範囲で支援を行うことを目的としている。現在、国際民間航空機関(ICAO)ではGNSSを実現するため、規格の標準化を進めている。

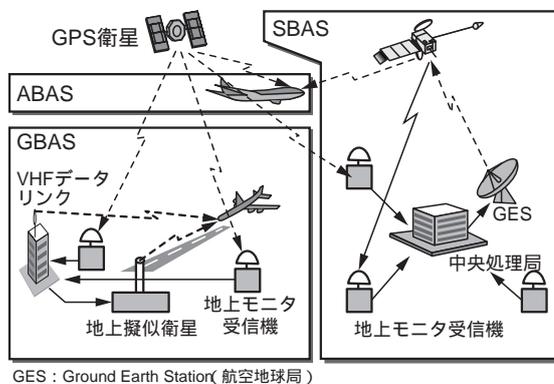
GPSを利用したナビゲーションといえば、一般的にカーナビゲーションを想像する。しかし、これを用いたシステムでは、精度を含め航空機の安全な航行を確保するには、信頼性が不十分である。国内ではこの課題を克服するために、運輸省電子航法研究所や航空振興財団が研究を進めている。

当社は、GNSSに関する信頼性を研究するための実験評価システムを電子航法研究所に納入したので、その内容について述べる。

2 GNSSのシステム概要

2.1 システムの分類

GNSSは航空機の安全な航行を行うために、システム全体



GES : Ground Earth Station(航空地球局)

図1. GNSSのシステム構成 SBAS, GBAS, ABASの三つの補強システムで構成される。

Concept of GNSS

の信頼性を向上することを目的としている。これを達成するために、以下に示す三つの補強システムが検討されている。これらのシステム概念を図1に示す。

2.1.1 静止衛星型航法衛星補強システム(SBAS : Satellite Based Augmentation System) SBASは、広範囲にサービスを提供する補強システムである。このため、広域に設置された複数の地上モニタ受信機で受信したGPSデータを処理し、静止衛星を介して航空機に信頼性向上のための補強情報を提供する。GPS衛星と同様な

周波数帯及び変調方式を採用することにより、測距情報も提供できる。

2.1.2 地上型航法衛星補強システム(GBAS: Ground Based Augmentation System) GBASは、各空港周辺の比較的狭い地域に対しサービスを提供する。空港に設置された複数の地上モニタ受信機から送られたGPSデータを処理し、VHF(Very High Frequency)データリンクにより、SBASと同様に信頼性向上のための補強情報を提供する。GBASは、狭い地域に限定して情報を提供するため、SBASと比較して高い精度を得ることができる。更に地上擬似衛星を付加し、この地上擬似衛星からGPS衛星と同様の周波数帯及び変調方式で測距情報を提供することができる。

2.1.3 航空機型航法衛星補強システム(ABAS: Aircraft Based Augmentation System) ABASは、航空機に搭載した受信機単体で航法の信頼性を高めるものであり、複数のGPS衛星から得たデータを、特殊なアルゴリズムの計算を行うことによりGPS衛星の故障を検出するシステムである。このようにABASは航法援助により実現するシステムでないため、ここでは説明を略する。

2.2 信頼性向上

前述したように、SBAS及びGBASは補強情報を航空機に伝達することにより、信頼性を向上させることができる。以下に、SBAS及びGBASに必要とされる信頼性向上の要件について述べる。

GPSを用いた測位では、位置を知りたい観測者(受信機)が各GPS衛星からの信号を受信することにより、GPS受信機とGPS衛星間の距離を測定(測距)し、得られた測距情報を基に観測者(受信機)の位置を求める(図2¹⁾。

GPS衛星が故障した場合、誤った測距情報やGPS衛星位置情報のために、航空機位置の測定に大きな誤りを引き起こし、場合によっては事故につながる危険がある。SBAS及びGBASでは、各GPS衛星信号を監視し、GPS衛星の故障状況を補強情報としてリアルタイムに航空機に伝達することにより、この危険を回避することができる。

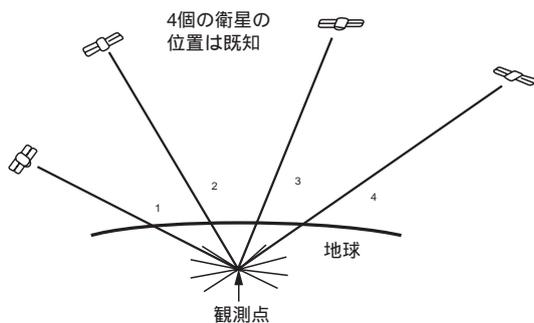


図2 . GPS測位原理 複数の衛星からの距離を測定(測距)し、それらの交点が三次元位置となる。
GPS positioning

GPS衛星だけを用いた測位では、100m(水平RMS(Root Mean Square: 平方自乗平均)値)程度⁽²⁾の精度しか得られない。航空機が着陸するには、4~7.7m(95%)の垂直精度が必要とされている。SBAS及びGBASでは、各GPS衛星信号を監視し、精度向上のための補強情報を航空機に伝達することにより、この問題を解決している。

更に、GPS衛星だけを用いた測位の場合、可視衛星数とその配置が精度に影響を与える。この精度劣化指標をDOP(Dilution of Precision)と言う。GPS衛星の位置変化によりDOPは時々刻々と変化し、精度が劣化する場合がある。この問題に対しては、GPS衛星と同様の測距信号源を増やすことにより、DOPを改善することができる。

3 実験評価システム

ここでは、当社が電子航法研究所に納入したSBAS及びGBASの実験評価システムについて述べる。

3.1 SBAS試験システム

3.1.1 試験システムの概要 SBASは、広域にサービスを提供するシステムである。そのため、GPS衛星が持つ各種の誤差を要因ごとに区別し、補正しなければならない。この誤差要因としては、米国国防総省が実施している故意の精度劣化(以下、SA誤差と呼ぶ。SA: Selective Availability)、大気による電波伝搬遅延(電離層遅延、対流圏遅延)や観測におけるマルチパスの影響が挙げられる。

3.1.2 システム構成 このシステムは図3のように、航空交通管制部(札幌、東京、福岡、那覇)及び電子航法研究所に、Ashtech社製GPS受信機を改修したモニタ用のGPS信号受信装置が設置されている。ホストコンピュータ装置、データ解析装置などは当社製UXシリーズ及びASシリーズなどを使用している。

3.1.3 オンラインシステム 各航空交通管制部で取得したGPSデータを、ISDN回線を介して、電子航法研究所の通信接続装置で受信し、そのデータに基づきリアルタイムで補強情報の計算を行う統合システムである。各航空交通管制部では、精密測量された既知の位置にGPS信号を受信するGPSアンテナが設置されている。このアンテナを介して取得したGPSデータは、GPS信号受信装置から1秒ごとの周期でISDN回線に出力されている。

この統合システムの代表的なソフトウェア機能を以下に示す。

- (1) GPS衛星標定⁽³⁾⁽⁴⁾ オンラインで取得したGPSデータを基に、カルマンフィルタ^(注1)を簡略化した直和射影フィルタ(状態変数相互の相関がないものとして定式化したフィルタ)を用いて、1秒ごとにGPS衛星位置、GPS

(注1) 過去のデータ推移が、一つ前のデータに影響を与えるという考えから、一つ前のデータを使用して現在のデータを推測する手法。

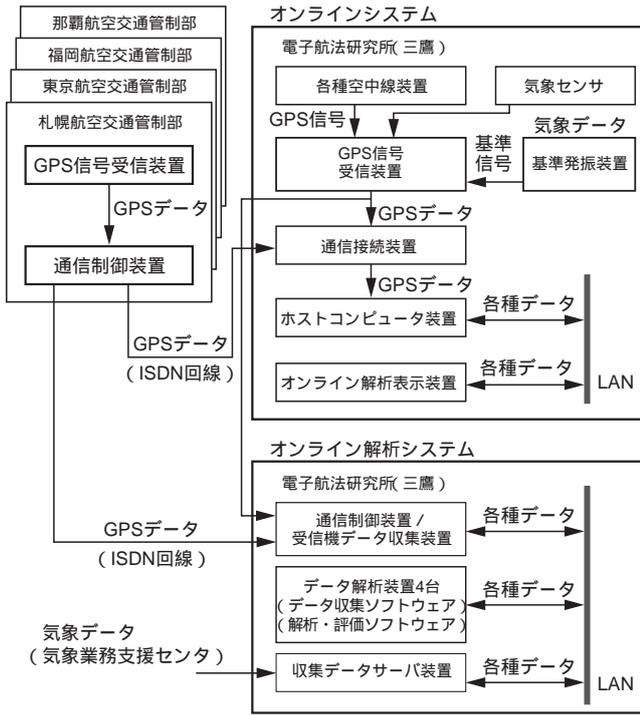


図3 .SBAS 試験システムの系統 GPS 信号受信装置及び解析装置などで構成されている。
Configuration of SBAS test system

送信時刻誤差及び受信機時刻誤差を求めることにより、SA 誤差を推定する。このフィルタは、GPS の三次元位置・速度、GPS 衛星時刻のオフセット、ドリフトレート、地上局と衛星間の搬送波サイクル数(2周波)、電離層遅延量(1周波)を状態変数としている。

- (2) 電離層遅延量推定 1周波用GPS受信機を搭載した航空機のために、電離層により生ずる伝搬遅延量を推定して、電離層の補強情報を作成するソフトウェアである。各航空交通管制部には、2周波が受信可能なGPS信号受信装置が設置されており、受信したGPSデータから電離層遅延量^(注2)を計算し、これらのデータから日本周辺の格子点(緯度、経度各5度)上の電離層遅延量を推定する。
- (3) 対流圏遅延量推定 電子航法研究所で取得した気象データ(温度、相対湿度、気圧)及び気象業務支援センターの気象データから対流圏遅延量^(注3)を推定する。推定した結果を基に、(1)で述べたGPS衛星標定ソフトウェアにて処理することにより、より良い精度のGPS衛星標定ができる。

3.1.4 オフライン解析システム 各航空交通管制部で取得したGPSデータを、ISDN回線を経由して、オフライ

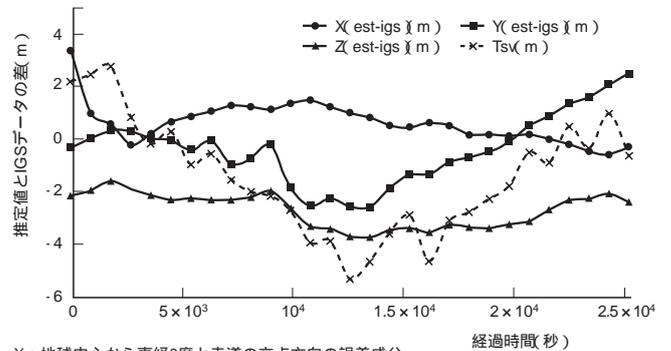
(注2) GPS衛星から放送される二つの異なる信号は、高度約50km~1,000kmの上空にある電離層を通過するときに、周波数の違いにより異なる屈折率で屈折する。これにより信号の伝搬時間に差違が生ずるため、この伝搬時間差から電離層部分の信号遅延量を推定する。

ンで電子航法研究所(三鷹)で回収し、SBAS補強情報算出に必要な技術の解析・評価を行うシステムである。主要なソフトウェアには、オンラインシステムと同様の三つのソフトウェアに加え、以下の機能を持っている。

- (1) DOP・可視解析 取得した衛星軌道情報を使用し、任意の場所及び時刻で見えるGPS衛星数やDOPについて解析をする。
- (2) 有効性(Availability)解析 衛星配置、衛星故障率、飛行状況などのパラメータから、SBASの有効性を解析するためシステム稼働率を計算する。

3.1.5 解析結果 この試験システムを使用した評価、解析の一例として、GPS衛星位置及びGPS送信時刻誤差のIGS(International GPS Service)データとの比較結果を図4⁽⁴⁾に示す。IGSデータは、世界各地で取得したGPSデータを基に、オフラインでGPS衛星軌道推定をしたものである。精度が極めて高く、一般的にGPS衛星軌道決定の研究・評価のための基準とされている。

この図は、オンラインシステムを使用してGPS衛星位置及びGPS送信時刻をリアルタイムで推定した結果で、GPS位置推定においてはIGSデータとの差が±4m以内の精度を達成していることがわかる。



X: 地球中心から東経0度と赤道の交点方向の誤差成分
Y: 地球中心から東経90度と赤道の交点方向の誤差成分
Z: 地球中心から北極方向の誤差成分
est-igs: システムの求めた推定結果とIGSデータとの差(誤差)

図4 .GPS衛星標定推定誤差 推定したGPS衛星位置及びGPS送信時刻誤差のIGSデータとの差を示す。送信時刻誤差(Tsv)は光速を乗じることで、単位は(m)で表現している。

Difference between estimated GPS position, clock and IGS data

3.2 GBAS データ評価装置

3.2.1 装置概要 GBASは、航空機へ伝達する補強情報を提供するシステムである。この評価装置では、外部から

(注3) GPS衛星から放送される信号は、高度約12km以下の対流圏(一部成層圏下部を含む)を通過するときに、大気の影響で屈折する。電離層の場合と異なり二つの信号の周波数差情報がないため、各高度の屈折率を標準大気、温度減率一定、静水圧平衡状態などを仮定して計算し、これらの屈折率から求まる遅延量を伝搬経路で積分することにより対流圏遅延量を推定する。

入力されるGPSデータを基にオンラインで補強情報を生成し、その結果を評価する。具体的には、複数のGPS受信機のGPSデータから、GPS衛星の故障状況を判断するためのデータや航空機の位置精度を向上するためのデータなどを作成する。入力されたGPSデータは内部に保存され、オフラインにより補強情報の妥当性を統計処理にて評価できる。

GBASはSBASと異なり、位置精度向上のためのGPS衛星の誤差情報を要因ごとに分離せず、衛星ごとに一括して誤差情報として、補正量とその変化量を提供する⁽⁵⁾。これらの原理は船舶用やVICIS(Vehicle Information and Communication System)などに用いられているDGPS(Differential GPS)と同様の概念である。航空機の安全な着陸のために、これらの補強情報を0.5秒ごとと短い間隔で更新する必要がある。このとき、マルチパスの影響を避けるため、複数のGPS受信機からのデータを同時に処理し、マルチパスの影響を低減させている。

3.2.2 解析結果 この評価装置を使用した評価の一例として、精度改善結果を述べる。

4式(セット)のGPS受信機から得られるGPSデータを処理し、その処理結果より測位精度がどれだけ改善するかを評価した。GPS衛星だけを用了場合と、GBAS補強を実施した場合の測位誤差の比較を図5に示す。補正を行うと、

大幅に測位精度が向上していることがわかる。

4 将来動向

SBASについては、ICAOにおける規格の標準化が終了しつつあり、世界中を網羅するサービスを提供するために、日本、米国、EU(European Union)が中心となって整備を進めている。一方、GBASについては、2004年度をめぐりSBASとのインタフェースや着陸支援に関する要求仕様がICAOにて規定される予定であり、今後実整備に向けた準備が進められるものと考えられる。

5 あとがき

この実験評価システムは、電子航法研究所においてGNSSに関する広範囲な解析・評価に使用されており、また将来にわたる観測、評価、解析や国際的な協調研究にも有効活用されるものと期待される。

GBASについては、航空振興財団が研究を実施している地上擬似衛星と組合せでの実験が予定されており、今後よりいっそうの国際的貢献が期待されている。

謝 辞

これらのシステムの開発にあたり、ご意見、ご指導いただいた運輸省電子航法研究所並びに航空振興財団の関係各位に深く感謝の意を表します。

文 献

- (1) 日本測地学会．新訂版 GPS人工衛星による精密測位システム（社 日本測量協会，1989，272p.
- (2) Bradford W. Parkinson. Global Positioning System: Theory and Applications. 出版AIAA, 793p.
- (3) Hoshino, K.; Sato, T. "Initial Results of GPS Orbit and Clock Estimation by Japanese GNSS Test System". ION National Technical Meeting. Santa Monica, 1997-01, The Institute of Navigation. 1997, p.901 - 910.
- (4) 星野尾一明．電子航法研究所におけるGPS関連の研究. 航空無線．第18号(冬期), 1998, p.11 - 16.
- (5) FAA Specification. Performance Type One Local Area Augmentation System Ground Facility. FAA-E-2937, 1999, 118p.

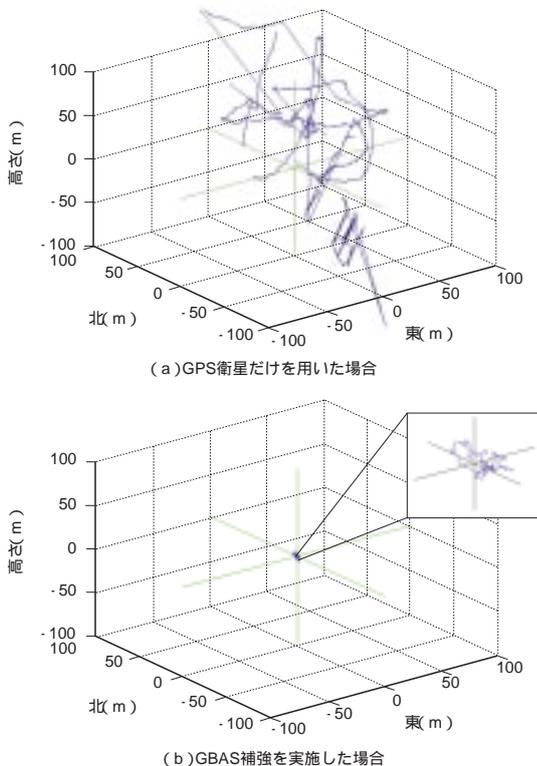


図5 . GBAS補強前後の比較 GPS衛星だけを用了場合は、空間的に大きな誤差が表れている。GBAS補強後の測位誤差は、GPS衛星だけを用了場合に比較して、精度が大幅に改善されている。
Comparison of positioning-error before and after GBAS augmentation



川野 修一 KAWANO Shuichi

情報・社会システム社 小向工場 電波応用システム技術
部主務。将来航空航法システムの開発に従事。
Komukai Operations



須賀 秀一 SUGA Shuichi

情報・社会システム社 小向工場 電波応用システム技術
部主務。将来航空航法システムの開発に従事。
Komukai Operations