

## SBAS 信号を使用する GBAS の開発について

齋藤 享<sup>†a)</sup> 藤井 直樹<sup>†</sup>

Development of GBAS for GNSS Using SBAS Ranging Signals

Susumu SAITO<sup>†a)</sup> and Naoki FUJII<sup>†</sup>

あらまし 地上局補強型衛星航法システム (GBAS : Ground-Based Augmentation System) は、故障及びメンテナンスなどによって生じる全地球的航法衛星システム (GNSS : Global Navigation Satellite System) における利用できる衛星の減少によりアベイラビリティの低下や精度の劣化の問題がある。今回、この問題解決のために静止衛星補強型衛星航法システム (SBAS : Satellite-Based Augmentation System) 衛星が放送する信号の測距機能を利用する GBAS の開発に成功したので、この経緯及び GBAS に SBAS 信号を使用する効果の評価を報告する。

キーワード 全地球的航法衛星システム, 地上局補強型衛星航法システム, 静止衛星補強型衛星航法システム

## 1. ま え が き

GPS (Global Positioning System) をはじめとする GNSS を航空機の航法に使うために精度の保証を行うことが求められており、広く ABAS (Airborne-Based Augmentation System) [1] が使われているが、それだけでは着陸システムに使用するだけの精度が確保されないため、複数の基準局から補強情報を生成し、108 ~ 118 MHz の電波を用いて地上局から補強情報を放送する GBAS (Ground-Based Augmentation System) [2], [3] が開発された。現在、国際民間航空機関 (ICAO : International Civil Aviation Organization) において、高度 60 m まで誘導できるカテゴリー I システムに対する国際標準 [4] が策定され、更に高精度、高信頼性が必要とされるカテゴリー II/III システムに対する国際標準の策定作業が行われている。我が国においても GBAS に対する開発が行われ、その飛行実験において精度は、垂直方向 0.8 m (95%値) と横方向 0.6 m (95%値) が得られている [5]。

一般に GBAS を含む GNSS の精度は、衛星配置からくる DOP (Dilution of Precision) とその測距信号

の精度によって決定されるために、衛星の故障やメンテナンスによる衛星の減少に伴う DOP の増大による精度の劣化に対応するための GNSS 衛星の追加が期待されている。追加の測距信号を放送している衛星として SBAS 衛星があり、日本においては、2009 年 10 月現在、2007 年 9 月から運用が開始されている MTSAT (Multi-functional Transport Satellite) 衛星 2 基から放送される MSAS (MTSAT Satellite-based Augmentation System) の信号が受信できる状態である。

ここでは、GNSS 衛星の減少に伴う衛星配置の劣化を補うために、世界では初めての SBAS 信号を利用できる GBAS の開発、及び、実際に受信した信号を元にシミュレーション評価した SBAS 信号の GBAS への効果について報告する [6] ~ [9]。

## 2. SBAS 信号を使う GBAS の概要

GBAS は、アメリカ合衆国では LAAS (Local Area Augmentation System) と呼ばれ、もともとは RTCA で議論された SCAT-1 [10] と呼ばれる Differential GPS システムが基本となっている。しかし、ICAO の場で国際標準を作成する際に安全性の立場から見直しが行われ、現在の GBAS の方式となった。ICAO の国際標準で決定された GBAS の構成は、図 1 で示されるように、4 局の GNSS 基準局、GNSS 基準局データから補強情報を生成する GBAS データ処理部、補強

<sup>†</sup>(独) 電子航法研究所通信・航法・監視領域, 調布市  
Department of Communication, Navigation and Surveillance  
Systems, Electronics Navigation Research Institute, 7-42-23  
Jindaiji-Higashimachi, Chofu-shi, 182-0012 Japan  
a) E-mail: susaito@enri.go.jp

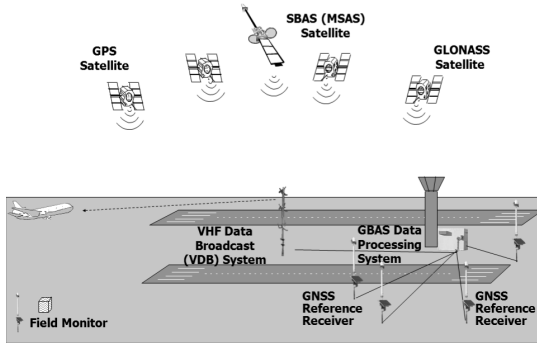


図 1 GBAS の構成図

Fig. 1 Configuration of ground-based augmentation system.

情報を航空機に伝える VHF データ放送 (VDB: VHF Data Broadcast) システムと送信データを監視する監視部で構成される。最少要件としての GBAS の覆域は、現在広く航空機の着陸システムとして使われている ILS (Instrument Landing System) [4] の覆域をわずかに狭くした 37km のほぼ扇形の覆域となっている。

GBAS の利点としては、(1) ILS と比べてパスが滑らかであること、(2) 一つのシステムで双方向の滑走路への進入及び複数の滑走路に対するサービスが提供できること、(3) 従来の航法機器に比べて誘導精度が優れており、かつ、空港に対して複数の接地点の変更や曲線進入が可能になるなどの柔軟な進入・出発経路が設定できるので進入最低高度の低下が期待できること、(4) 空港面における航空機に対する誘導が可能なこと、などが挙げられる。

GNSS 基準局は GNSS アンテナと GNSS 受信機などから構成され、受信した GNSS データを GBAS データ処理部に伝送する。GBAS データ処理部は GNSS 基準局からのデータを用い GBAS 補強情報を生成する。補強情報は、現在の航法システムである ILS, VOR が使用している VHF 航法バンド (108 ~ 118 MHz) を使い、VDB システムによって、水平偏波または楕円偏波で送信される。

航空機の航法システムである GBAS では、単なる位置精度だけでなく、測位情報がどれだけ正確であるかという完全性ということが重視される。完全性とは、利用者の誘導誤差が警告なしにある事故につながるしきい値以上にならない確率を指し、着陸に使用するためには、精密進入のカテゴリーに応じて  $(1 - 2 \times 10^{-7}) \sim (1 - 1 \times 10^{-9})$  以上の値が要求され

ている [4]。

従来の航法システムではその精度監視に地上システムが責任をもって行ってきた。しかし、GBAS では地上からの補強信号を使っていたとしても、機上システムがどの GNSS 衛星からの信号を利用しているかを地上から推測することが不可能であり、機上の誘導誤差を単純に地上では監視できないので直接的な監視が不可能である。そのため、補強情報には擬似距離の補正データだけでなく、機上において完全性の計算に必要な最大誤差を保証する保護レベル (PL: Protection Level) を計算するためのパラメータを放送している。パラメータとしては、基準局間の測距補正值の標準偏差  $\sigma_{pr\_gnd}$  や、基準局すべてを用いて生成した擬似距離補正值と基準局のうち一つずつを使用せずに生成した擬似距離補正值との差である B 値 [3], [4] などがある。計算した PL を警報限界 (AL: Alert Limit) と比べ、PL が AL より大きいときは、精度保証の確率が完全性の要求値より小さくなるので GBAS を使用しないことになっている。PL は衛星配置によって大きく変化するため、SBAS 信号を使うことによって、衛星配置が改善され PL が減少し GBAS のアベイラビリティが向上することが期待できる。

本研究では、仙台空港に設置されている実験用 GBAS [5] のプログラムを SBAS に対応できるように改修するとともに、4 局の基準局の受信機と機上装置を模擬する擬似ユーザ局の受信機については SBAS 信号が受信できるものに交換した。受信機としては、出力レートを 2 Hz に変更したカナダ Novatel 社製の EUROPAK-3M-L1L2GEO を採用した。このシステムを用い 2006 年 7 月から実際の受信した GPS 信号と SBAS 信号を用い、SBAS を利用した GBAS の評価を行った。

### 3. 開発時の問題点

SBAS 信号の送信帯域は 2.2 MHz 以上と規定されている [4]。実際 MSAS では 2.2 MHz を使用しており [11]、これは GPS 信号の帯域 (24 MHz 以上 [12]) に比べて狭い。その結果、図 2 で示すように GPS 信号の到達時刻の計測に使われる拡散コードの相関波形がなまる。図 2 の波形は相関波形を観測できる信号品質モニタ用受信機 [13] で測定した波形である。測距においては相関波形のピークを観測した時刻を信号の到着時刻とするために、SBAS 信号は GPS に比べ測距精度が悪いことが問題となる。実際、本研究で用いた

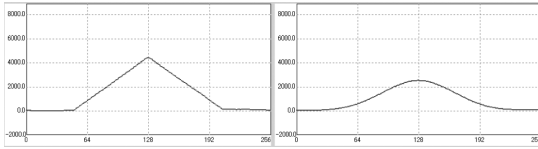


図 2 GPS 信号 (左) と SBAS 信号 (右) の相関波形  
Fig.2 Correlation curves of GPS signal (left) and SBAS signal (right).

EUROPAK-3M-L1L2GEO では、擬似距離測定誤差が GPS の場合 10 cm (キャリア・ノイズ比 44 dB-Hz 以上の場合の RMS 値) であるのに対し、SBAS 信号の場合 1 m となっている [14]. SBAS 受信機は SBAS 信号からの電離層補正情報などを使用するものの、測距機能は参考文献 [15] によって使用方法が決まられており、測距誤差が大きい場合には使用しない。しかし、GBAS では SBAS の規定とはかかわりなく SBAS 信号の測距機能を使用できるために、SBAS 測距精度の悪さにより GBAS の精度に悪影響が出る可能性がある。その影響を調べるために、実験システムにおいて、擬似ユーザ局における測位精度を比較した。その結果、SBAS 信号を用いない場合 0.580 m (95% 値) であった垂直誤差が SBAS 信号を用いた場合 1.342 m (95% 値) に悪化し、SBAS 信号を GBAS に利用するときの問題点が明らかになった。

筆者たちは、その原因として GBAS において精度に大きく影響を与える四つの基準局の GPS 受信機に対する時刻を合わせる処理方式に注目した。GBAS の測距補正值を作る標準的なアルゴリズムとしては、アメリカ合衆国連邦航空局 (FAA: Federal Aviation Administration) の NONFED LAAS の仕様書 [16] の式が使われている。この仕様書では、 $N_c$  個の共通衛星セット  $S_c$  に属する衛星  $n$  に対しそれぞれ  $M(n)$  個の共通基準局セット  $S_n$  に属する基準局  $m$  による測距値  $R(n, m)$  が存在する場合、各基準局における測距補正值  $PR_{sc}(n, m)$  は、

$$PR_{sc}(n, m) = R(n, m) - PR_s(n, m) - c t_{sv}(n) \quad (1)$$

ここで、 $c$  は光速、 $t_{sv}(n)$  は衛星時刻の補正值である。基準局受信機の時刻のばらつきを補正した測距補正值  $PR_{sca}(n, m)$  は、

$$PR_{sca}(n, m) \equiv PR_{sc}(n, m) - \frac{1}{N_c} \sum_{n \in S_c} PR_{sc}(n, m) \quad (2)$$

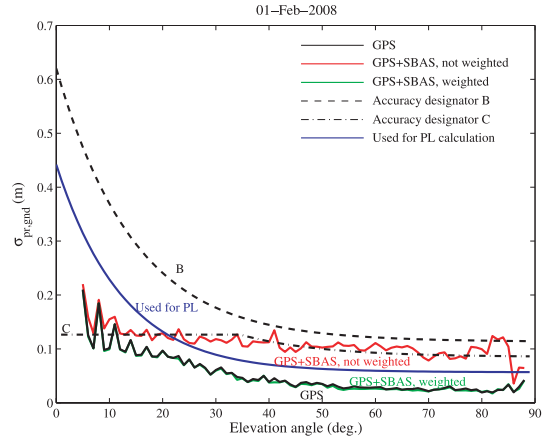


図 3 補強信号で放送される測距補正值の標準偏差 ( $\sigma_{pr\_gnd}$ ) と仰角の関係 (黒線が GPS 単独の場合、赤線が SBAS 信号を用いた場合、緑線が (4 式) を使った場合、破線は基準値 B、一点鎖線は基準値 C、青線はシミュレーション計算に使った  $\sigma_{pr\_gnd}$  を示す)

Fig.3 The  $\sigma_{pr\_gnd}$  values with (red) and without (black) SBAS ranging source signals as a function of the elevation angle for 24 hours data on 1 February 2008. The  $\sigma_{pr\_gnd}$  value with weighting in receiver clock-offset compensation is also plotted by green line. The dash line shows the accuracy designator B and the dot and dash line shows the accuracy designator C. The blue line shows the  $\sigma_{pr\_gnd}$  used for VPL simulations.

最終的に放送される衛星ごとの測距補正值  $PR_{corr}(n)$  は、

$$PR_{corr}(n) \equiv \frac{1}{M(n)} \sum_{m \in S_n} PR_{sca}(n, m) \quad (3)$$

と規定されている。式 (2) は基準局受信機の時刻のばらつきを補正するために、式 (1) で求めた測距補正值  $PR_{sc}(n, m)$  を基準局ごとに平均化し測距補正值から引いている。このとき、式 (2) では一般的に測位計算では考慮されている衛星の測距精度による重み付けは考慮されていない。そのため、基準局間の SBAS 信号の測距誤差によって、4 基準局間の  $PR_{sca}(n, m)$  のばらつきが大きくなるのが推定できる。このことが GBAS で完全性のパラメータである  $\sigma_{pr\_gnd}$  に反映する。GPS 信号のみを用いた場合と GPS 信号と SBAS 信号を用いた場合の  $\sigma_{pr\_gnd}$  を、実データに基づいて計算したところ、図 3 の中の赤線で示されるように、SBAS 信号を用いた場合は黒線で示す GPS 衛星だけを使った場合に比べて増加することが分かった。図 3 中の破線及び一点鎖線はそれぞれ、GBAS 地上システ

ムの精度の指標として用いられる基準値 B 及び C を表す [4] . この結果, 機上では安全が保障される範囲の指標として計算される PL が増大し, AL を超える可能性が増え, GBAS の使える確率を示すアベイラビリティの低下につながる. 当初の目的では, SBAS 信号を使うことにより衛星配置の悪いときの PL を下げ, GBAS のアベイラビリティを上げることであったが, SBAS 信号の測距精度が悪いために, 結果は目的に反することとなった. そこで筆者たちは解決法として, 測位計算に使用する衛星の測距誤差に応じた重み付けと同様に, 測位計算に用いるものと同じ重み  $W(n)$  を四つの基準局の GPS 受信機に対する時刻合わせに使う方法である式 (4) を考えた .

$$PR_{sca}(n, m) \equiv PR_{sc}(n, m) - \frac{\sum_{n \in S_c} W(n) PR_{sc}(n, m)}{\sum_{n \in S_c} W(n)} \quad (4)$$

この式 (4) を式 (2) の代わりに測距補正值の生成時に使用し, 実データを用いて  $\sigma_{pr\_gnd}$  の計算を行ったところ,  $\sigma_{pr\_gnd}$  は同じ図 3 の緑線で示されるとおり, SBAS 信号に対する測距誤差が大きいことによる  $\sigma_{pr\_gnd}$  の増加は見られなくなり, ほぼ GPS 衛星だけを使った場合と同程度となった. このことから, 式 (4) を用いることにより, SBAS 信号がもつ測距誤差が大きいことの影響が軽微になり, SBAS 信号を GBAS に利用するときの問題点が解決し, 開発が可能となった.

#### 4. シミュレーションによる SBAS 信号の有効性の確認

GPS 衛星減少時の SBAS 信号の有効性を調べるため, 仙台空港で 2008 年 2 月 1 日に受信した GPS と SBAS のデータを使ってオフライン・シミュレーションを行った. このときシミュレーションの PL の計算に使った  $\sigma_{pr\_gnd}$  を図 3 に青線で示す. また, このときの SBAS の測距信号に対する重みは, 同じ仰角の GPS 信号の約 1/20 の重みを使っている.

シミュレーションを行った世界標準時 (UT: Universal Time) の 2008 年 2 月 1 日 00:00 から 06:00 UT までの各 GPS 衛星の仰角を図 4 に示す. ここで図 4 の中の線に添えられている数字は GPS 衛星の擬似雑音符号 (PRN: Pseudo Random Noise code) 番号を表す. 2008 年 2 月 1 日における使用可能な GPS 衛星

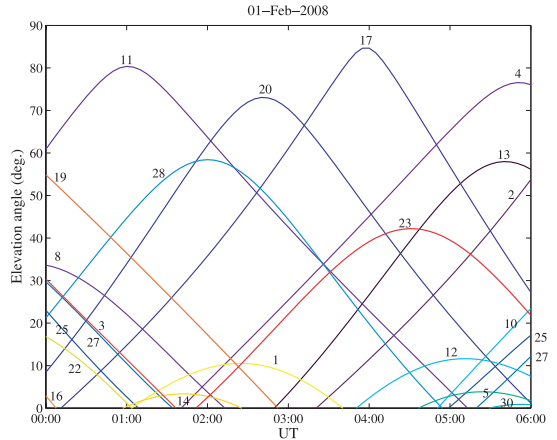


図 4 2008 年 2 月 1 日の UT 0:00 から 6:00 までの仙台空港 (38.1°N, 140.9°E) における GPS 衛星の仰角 (図の中の数字は PRN 番号を示す)

Fig. 4 Elevation angles of the GPS satellites at Sendai airport (38.1°N, 140.9°E) from 0000 to 0600 UT on 1 February 2008. Numbers in the figure indicate the PRN of each trace.

表 1 SBAS 信号を使った GBAS に対するシミュレーション条件

Table 1 Simulation conditions of GBAS with SBAS ranging source.

Case #	GPS	SBAS
1	all	not used
2	all	MTSAT-1R, MTSAT-2
3	PRN 17 and 20 disabled	not used
4	PRN 17 and 20 disabled	MTSAT-1R, MTSAT-2

総数は 30 基であり, SBAS 衛星である MTSAT-1R (PRN129) と MTSAT-2 (PRN137) の仰角は 46 度であった.

シミュレーションは, GPS 信号 GPS 信号と 2 基の SBAS 信号を使用した場合の二つのケース, 及び GPS 信号が全部正常で使用可能な場合と 1 基または 2 基の GPS 衛星の信号が使用できない場合のケースを相互に組み合わせたすべてのケースについて行った. 表 1 に, このときのシミュレーションの四つの条件を示す.

この四つの条件下における, 仙台空港の中にある当所岩沼分室の屋上に設置した固定の擬似ユーザ局の垂直誤差と垂直保護レベル (VPL: Vertical Protection Level) に対するシミュレーション結果のうち, PRN17 番と PRN20 番の GPS 衛星の信号を使用不可にしたケースのシミュレーション結果を紹介する.

図 5 は, 擬似ユーザ局の垂直誤差を示し, 図 6 は擬似ユーザ局における VPL の結果を示す. 図 5, 図 6

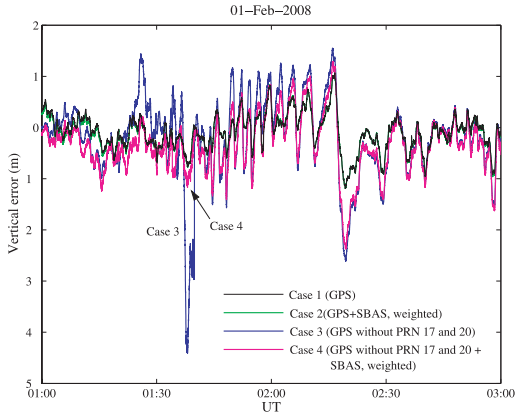


図 5 2008 年 2 月 1 日に UT 0100 から 0300 までの仙台空港で収録されたデータをもとにした垂直誤差のシミュレーション結果

Fig. 5 Calculated GBAS vertical errors at Sendai airport from 0100 to 0300 UT on 1 February 2008.

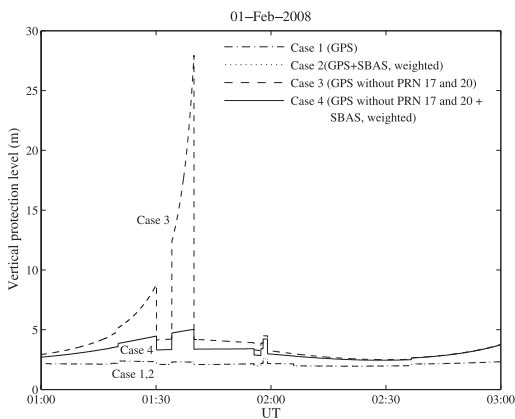


図 6 2008 年 2 月 1 日に UT 0100 から 0300 までの仙台空港で収録されたデータをもとにした垂直保護レベル (VPL) のシミュレーション結果

Fig. 6 Calculated VPLs at Sendai airport from 0100 to 0300 UT on 1 February 2008.

ともに、GPS 衛星の信号をすべて使用可能とし GPS 信号しか使わない場合を黒線で、GPS 衛星の信号をすべて使用可能とし SBAS 信号も使用した場合を緑線で、GPS 衛星 2 基の信号を使用不可とし SBAS 信号を使用しない場合を青線で、GPS 衛星 2 基の信号を使用不可とし SBAS 信号を使用した場合を赤線で示している。

この結果において、GPS 衛星 2 基の信号を使用不可とし SBAS 信号を使用しない場合では、擬似ユーザ局における垂直誤差は大きく増大し、カテゴリー I

表 2 2008 年 2 月 1 日のデータを使った、擬似ユーザ局における最大垂直誤差、垂直誤差の標準偏差及び VPL に関するシミュレーション結果

Table 2 Maximum and root-mean-square vertical errors, and the maximum VPL from 0100 to 0300 UT on 1 February 2008.

Case #	Max. V.Error [m]	RMS V.Error [m]	Max. VPL [m]
1	1.19	0.35	2.62
2	1.19	0.35	2.59
3	4.41	0.81	27.95
4	2.37	0.56	5.03

GBAS の垂直精度要件の 4 m を超える 4.41 m となっている。しかし、SBAS を使用した場合にはそのときの誤差は 1.2 m 程度に収まっており、SBAS 信号の効果が分かる。ただし、GPS がすべて使用可能な場合には、GPS しか使わない場合と GPS と SBAS 信号両方使用した場合とも、ほぼ 0.8 m でほとんど差がない。VPL についても同様であり、GPS 衛星 2 基故障のときの GPS だけ使用した場合には大きく増大し 29.95 m と GBAS が航空機の着陸システムとして使用できる限界値である垂直警告値 (VAL) の 10 m を超えている。しかし、SBAS 信号を同時に使用した場合にはそのときの VPL は 5.03 m 程度に収まっている。GPS 衛星の信号がすべて使用可能な場合には、SBAS 信号を利用しない場合、GPS 信号と SBAS 信号両方使用した場合とも、1.71 m で差がない。これは GPS 衛星が正常な場合には、SBAS 信号の測距における重みが軽いため、ほとんど影響を与えないためである。

四つのシミュレーションの最大垂直誤差、垂直誤差の標準偏差及び VPL の結果をまとめたものを表 2 に示す。SBAS 信号を使用しない場合における GPS 衛星 2 基の信号を使用不可とした場合において、最大垂直誤差と最大 VPL の発生した時刻は一致するものの、GPS 衛星 2 基の信号を使用不可とし SBAS 信号を使用した場合、GPS 信号をすべて使用し SBAS 信号を使用した場合としない場合の合計三つのケースでは、最大誤差が生じた時刻は SBAS を使用しない場合における GPS 衛星 2 基の信号を使用不可とした場合の最大 VPL の時刻とは一致しない。これは垂直誤差と VPL の相関が、それほど強いものではないことを示している。

次に、使用不可にした衛星と VPL の関係を調べるために、使用不可にする GPS 衛星を変えてシミュレーションを行った。仰角の高い PRN11 番衛星と PRN20 番衛星の信号を使用不可として、SBAS 信号を使用し

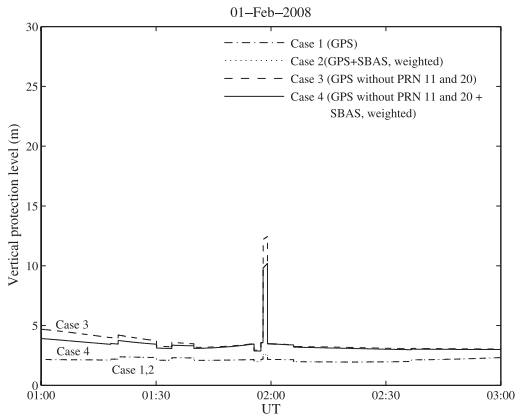


図 7 2008 年 2 月 1 日に 0100 から 0300 UT までの仙台空港で収録されたデータをもとに PRN11 番衛星と PRN20 番衛星の信号を使用不可にした場合の垂直保護レベル (VPL) のシミュレーション結果

Fig. 7 Calculated VPLs at Sendai airport from 0100 to 0300 UT on 1 February 2008 at the case of PRN-11 and PRN-20 satellites failure.

ない場合と使用する場合のシミュレーションの結果を図 7 に示す。

このシミュレーションにおいては、全体的に SBAS 信号を使用しない場合と使用する場合において VPL の差は、図 6 に比べて小さい。また、図 7 において見られた 02:00 UT 付近の VPL の増加に対する SBAS 信号の使用効果は、図 6 の 01:40 UT 付近の場合に比べると顕著ではない。

更に、2008 年 2 月 1 日に観測されたデータを基に、GPS 衛星 1 基の信号が使用不可能となるすべての場合 (30 通り) 及びの GPS 衛星が 2 基の信号が使用できない場合 (435 通り) について、シミュレーションを行った。GPS 衛星 1 基の信号が使用不可能となるケースにおいては、SBAS 信号を使用する場合と使用しない場合を比較すると、VPL が 10m を超えるイベントが発生しなかったために、使用不可となる時間には差はなかった。しかし、GPS 衛星が 2 基の信号が使用できない場合においては、SBAS 信号を使わない場合、435 通りのうち 19 通りの組合せにおいて VPL が 10m を超え GBAS が使用できなくなる時間が発生したが、SBAS 信号を使用した場合は 8 通りの組合せへと減少した。GPS 衛星 2 基の信号が使用できない 435 通りの場合における VPL に対するシミュレーション計算結果を、イベントの発生度数分布にまとめたものを表 3 に示す。

表 3 を見ると、SBAS 信号を用いない場合、GPS 衛

表 3 2008 年 2 月 1 日のデータを使った、擬似ユーザ局における GPS 衛星 2 基の信号が使用できない 435 通りの組合せにおける VPL に対するシミュレーション計算結果の発生度数

Table 3 Frequency distribution of VPLs simulated in the 435 combinations of 2 GPS satellites failure condition measured at the user receiver using data on 1 February 2008.

Range of VPL [m]	Without SBAS		With SBAS	
	Number of Event	Ratio of Event	Number of Event	Ratio of Event
~ 10	75149988	0.999760	75159777	0.999891
10 ~ 20	15423	2.052E-04	6884	9.158E-05
20 ~ 30	1886	2.509E-05	644	8.567E-06
30 ~ 40	68	9.046E-07	7	9.312E-08
40 ~ 50	4	5.321E-08	266	3.539E-06
50 ~ 60	86	1.144E-06	343	4.563E-06
60 ~ 70	124	1.650E-06	79	1.051E-06
70 ~ 80	93	1.237E-06	0	0
80 ~ 90	71	9.446E-07	0	0
90 ~ 100	58	7.716E-07	0	0
100 ~	199	2.647E-06	0	0

星が 2 基の信号が使用できない場合に VPL が 100m を超える場合も少なからずあるが、SBAS 信号を用いると VPL が 70m を超える場合はなくなっている。また、VPL がカテゴリー I GBAS の VAL (= 10m) を上回り GBAS が使用できない場合も、SBAS 信号を用いることにより 0.0240% から 0.0109% へと約 45.7% の減少させることが可能なことから、SBAS 信号の使用には VPL の上昇を抑える効果があることが分かる。

## 5. 考 察

ここで、SBAS 信号の GBAS のアベイラビリティに対する効果を考察する。ある個数の GPS 衛星の故障により GBAS が使用できなくなる確率は、ある個数の GPS 衛星が使用できなくなる確率とその場合において VPL が 10m を超える確率の積で表すことができる。

米国国防省が発行している GPS Standard Positioning Service (SPS) Performance Standard [12] によれば、1 基の GPS 衛星が使用できなくなる時間は 1 年間当り 96 時間であり、そのうちメンテナンススケジュールによらず使用できない時間は 1 年間当り 72 時間である。したがって、1 基の GPS 衛星がメンテナンススケジュールにより信号が使用できない確率は、 $24 / (24 \cdot 365.25) = 0.00274$ 、メンテナンススケジュールによらない理由で使用できない確率は、 $72 / (24 \cdot 365.25) = 0.00821$ 、となる。

表 4 一定数の GPS 衛星の信号が使用できなくなる確率 (総衛星数 30 基の場合)

Table 4 Probability of a certain number of GPS satellites are unavailable, when the total number of satellites is 30.

# of unavailable satellites (n)	n satellites unavailable	n or more satellites unavailable
0	0.7167	-
1	0.2427	0.2833
2	0.0369	0.0406
3	0.0035	0.0037
4	0.0002	0.0002

メンテナンススケジュールによる衛星停止はできる限り重ならないように行われると仮定し、GPS 衛星の総数が 30 基である場合に一定数の衛星の信号が使用できない確率を表 4 にまとめた。GPS 衛星の総数が 30 基である場合、28.33%の確率で 1 基以上の信号が使用できなくなり、4.06%の確率で 2 基以上の GPS 衛星の信号が使用できなくなる。

2 基の GPS 衛星が使用できない場合に VPL が 10 m を超える確率は、SBAS 信号を用いない場合 0.024%、用いる場合 0.0109%であるので、2 基の GPS 衛星の故障により GBAS が使用できなくなる確率は、SBAS 信号を用いない場合  $9.6 \times 10^{-6}$ 、SBAS を用いる場合  $4.4 \times 10^{-6}$  となる。これは、主要空港に GBAS を使う場合のアベイラビリティ要件の  $1 - 1 \times 10^{-5}$  に比べると問題となる数値であり [4]、SBAS 信号を使うことにより、アベイラビリティ要件に対する影響を大幅に軽減することが可能となることが分かる。

今回は、仙台空港における GBAS テストベットの VPL が 10 m が超えるケースが生じた GPS 衛星 2 基が故障した場合までについて検討した。その結果、GBAS における SBAS 信号を使用することの有効性を十分示すことができた。今後、更にアベイラビリティに対する詳細な検討が必要な場合においては、場合の数が多く計算時間が膨大になるが、3 基以上の GPS 衛星が使用できない場合についても検討が必要になる。しかし、GBAS の設置場所の緯度経度及び周辺的环境も  $\sigma_{pr\_gnd}$  に影響を与えアベイラビリティに影響することから、より具体的な条件においての検討が必要である。

本研究の結果、測距誤差の精度が GPS の測距精度に比べて精度が 10 倍以上悪い MSAS 信号を使ったとしても、SBAS 信号が有効であることが明らかとなった。MSAS の測距信号の帯域が現在の 2.2 MHz でなく、GPS で使用されている 24 MHz 以上に機能向上

されれば、測距信号の精度向上により、測位及び PL の計算時の重みも大きくすることが可能となると考えられる。したがって、SBAS 信号の性能が向上すれば、PL の改善効果が大きくなることが期待でき、更に SBAS 信号の使用効果が上がることが期待できる。

## 6. むすび

一般に、GNSS の精度は衛星配置とその信号の精度によって決定されるため、衛星の故障及びメンテナンスなどによる使用できる衛星の減少による測位精度の劣化などに対しては、追加の GNSS 衛星が期待されている。今回、追加する GNSS 衛星として、信号形式もほぼ同一で時刻同期も保証されている SBAS 衛星の信号を利用する GBAS を開発し、その効果について評価した。

仙台空港に設置してある GBAS 実験システムに対して、SBAS 信号を利用するためにデータ処理装置のプログラムを変更するとともに、基準局受信機を SBAS 信号を受信可能なカナダ Novatel 社製の Euro3M 受信機に変更し、SBAS 信号を利用できる GBAS の開発を行った。このとき、SBAS の測距精度が劣ることにより、従来からの方法では SBAS 信号を利用するときに生じる  $\sigma_{pr\_gnd}$  の増加によるアベイラビリティの低下という問題に対して有効な解決法を考案し、世界で初めて SBAS 信号を利用できる GBAS の開発に成功した。

日本付近では、日本の SBAS 衛星である MTSAT を用いた MSAS が 2007 年 9 月から運用されており、2 基の静止衛星からの信号が受信できる状態になっている。仙台空港において実際に受信した GPS と SBAS のデータをもとに、GPS 衛星のメンテナンスや故障などで GPS 衛星が 1 基及び 2 基の信号が使用できない場合における測位誤差と VPL に対するシミュレーション評価を行った。シミュレーションでは、GBAS に対する SBAS 信号による効果は GPS 衛星が正常に動作している場合は少ないが、GPS 衛星がメンテナンスや故障などで複数個使えなくなった場合には効果が大きいという結果が得られた。

残念ながら、現在、SBAS 信号を使う機上機器が開発されていないことから、SBAS 信号を使用する GBAS の実用化に対しては地上機器の開発とともに機上機器の開発が必要であり、今回の成果が生かされるためには、もう少し時間がかかる。これらの結果をもとに今後、GBAS の実用化のために総合的な安全性の

検証作業などを行い、日本の国土にあったアベイラビリティの高いGBASを開発していく予定である。

謝辞 最後に、このシステムの開発に協力して頂いた日本電気(株)の小野剛氏、鈴木和史氏に謝意を表したい。

## 文 献

- [1] "Global navigation satellite system (GNSS) manual," Appendix of AN-Conf/11-IP/14, International Civil Aviation Organization, Montreal, July 2003.
- [2] "GNSS-based precision approach local area augmentation system (LAAS) signal-in-space interface control document (ICD)," RTCA/DO-246C, RTCA, Washington, D.C. USA, April 2005.
- [3] "Minimum operational performance standards for GPS local area augmentation system airborne equipment," RTCA/DO-253B, RTCA, Washington, D.C. USA, June 2007.
- [4] "International standards and recommended practices aeronautical telecommunications," Amendment 81 of Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation Volume I (Radio Navigation Aids), International Civil Aviation Organization, Montreal, July 2006.
- [5] 齊藤真二, 福島荘之介, 藤井直樹, "地上補強型衛星航法システムの飛行実験による性能評価" 信学論 (B), vol. J87-B, no. 4 pp.555-562, April 2004.
- [6] 藤井直樹, 吉原貴之, 齊藤真二, 福島荘之介, "SBASの疑似距離信号を利用したGBAS" 2007 信学ソ大(通信), p.242, Sept. 2007.
- [7] 藤井直樹, 吉原貴之, 齊藤真二, 福島荘之介, "SBASの疑似距離信号を利用したGBASにおける問題点と解決法" 2008 信学総大(通信), p.256, March 2008.
- [8] S. Saito, N. Fujii, K. Suzuki, and T. Ono, "Solutions to issues of GBAS using SBAS ranging source signals," Proc. ION GNSS 2008, Savannah, Georgia, Sept. 2008.
- [9] 藤井直樹, 齋藤 享, 吉原貴之, 齊藤真二, 福島荘之介, 工藤正博, "GBASにおけるSBAS測距信号の使用効果について" 信学技報, SANE2008-121, Feb. 2009.
- [10] "Minimum aviation system performance standards DGNSS instrument approach system: Special category 1 (SCAT-1)," RTCA D-217, RTCA, Washington, D.C. USA, Aug. 1997.
- [11] "Overview of MSAS," Presentation of Third Meeting of the International Committee on Global Navigation Satellite Systems (ICG), Pasadena, USA, Dec. 2008, www.oosa.unvienna.org/pdf/icg/2008/icg3/08-1.pdf
- [12] "Global positioning system standard positioning service performance standard," Department of Defence, Washington, D.C., Sept. 2008.
- [13] 齊藤真二, 吉原貴之, 福島荘之介, 藤井直樹, "擬似劣化GPS信号への測距差推定によるSQM手法の適用" 信学技報, SANE2007-111, Jan. 2008.
- [14] "Euro-3M enclosures users manual rev 1," NovAtel,

Canada, Oct. 2004.

- [15] "Minimum operational performance standards for global positioning system/wide area augmentation system airborne equipment," RTCA/DO-229D, RTCA, Washington, D.C. USA, Dec. 2006.
  - [16] "Category I local area augmentation system ground facility," FAA-E-AJW44-2937A, United States Department of Transportation Federal Aviation Administration, Washington, D.C. USA, Oct. 2005.
- (平成 21 年 11 月 5 日受付, 22 年 2 月 16 日再受付)



齋藤 享 (正員)

2001 名古屋大学大学院理学研究科博士課程了(素粒子宇宙物理学専攻)。2000 ノルウェー王国 Tromsø 大学。2001 京都大学宇宙電波科学研究センター及び 2003 情報通信研究機構において、電離圏不規則構造の研究に従事。2008 電子航法研究所に入所以来、GBAS の開発及び GNSS に対する電離圏の影響に関する研究に従事。現在、同所主任研究員。



藤井 直樹 (正員)

1979 神戸大学大学院理学研究科修士課程了。同年電子航法研究所に入所以来「ILS の設置基準」「MLS の開発研究」「航空機アドレス監視システムの開発」及び「GBAS の開発」などの電子航法に関する研究に従事。現在、同所通信・航法・監視領域長。