

## 16. 次世代 SBAS 開発と準天頂衛星による放送実験

航法システム領域 ※北村 光教, 麻生 貴広, 坂井 丈泰

### 1. 背景

近年、全地球航法衛星システム（GNSS）を利用したアプリケーションの発展が目覚ましい。特に、米国の GNSS である GPS が著名であり、スマートフォンを初め、航空や車両のナビゲーション等に広く利用されている。

これらの GNSS を用いた測位の高精度化を図るシステムに、衛星型補強システム（SBAS: Satellite Based Augmentation System）と呼ばれる補強システムがある。航空機のナビゲーションでは SBAS を始めとした補強システムの利用が必須であるとされており、車両のナビゲーション等においても SBAS は実際に利用されている。また、SBAS は国際規格であることから、日本が管理・運用する SBAS である MSAS の他、米国の WAAS や欧州の EGNOS、印国の GAGAN 等、諸外国においても運用されており、世界中で利用されている。このように広く利用されている SBAS であるが、現行の SBAS には、電離圏活動の影響を受けやすいといった点や、SBAS が補強情報を放送する衛星（SBAS 衛星）の仰角が中程度であるため障害物に遮蔽されやすい点、また GPS 衛星が遮蔽された場合に衛星数の不足によって測位の利用可能性が低下しやすいといった課題がある。

そのような中、日本の航空局や電子航法研究所では、欧米諸国と協力して次世代型 SBAS の国際規格の検討を進めている。次世代 SBAS 規格では、2 周波測位信号の補強による電離圏に関する課題解決や、GNSS の複数コアシステム化による衛星数の増加、静止軌道以外の放送衛星の利用による SBAS 衛星の高仰角化等、現行 SBAS の課題解決が図られている。

電子航法研究所では、現在検討中の規格に基づいて、次世代 SBAS の試作機を開発している。本稿では、本試作機の概要と、評価試験結果について報告する。加えて、欧米に先駆けて実施した、世界初の次世代 SBAS 放送実験について報告する。

### 2. 衛星型補強システム（SBAS）

#### 2.1. 現行 SBAS

現行の SBAS 規格は、国際民間航空機関（ICAO）が衛星航法補強システム規格の一種 [1]として定めており、航空航法において GPS を利用する際には、衛星航法補強システムにより適切な補強を施して測位の安全性と信頼性を確保することとしている。

現行 SBAS は GPS の L1 帯信号（L1-C/A）を利用した 1 周波測位を補強することを目的として、地上に設置された受信機（監視局）ネットワークによって GPS の測位信号を監視している。これにより GPS 衛星の異常状態や測位の誤差情報を推定し、補強情報として静止衛星を経由してユーザに放送している（図 1）。

現行の SBAS にはいくつかの課題がある。一つは、現行の SBAS が 1 周波測位を補強するため、電離圏活動の影響を受けやすい点である。また、衛星が遮蔽されやすいことも課題の一つである。SBAS 衛星は静止軌道にあるため、日本から見ると中程度の仰角（40～50 度程度）になる。そのため、都市部や山間部等の周辺障害物が多い環境では、利用可能な地点が限られるという課題である。また同様に、GPS 衛星の遮蔽による衛星数の低下も課題である。観測した GPS の衛星数が、測位に最低限必要な機数（4 機）を下回った場合、GLONASS 等の他の GNSS を利用することで衛星数を補う方法があるが、現行 SBAS では GPS 以外の GNSS の利用が認められていない [2] ため、測位不可能になるという課題である。

#### 2.2. 次世代 SBAS

次世代 SBAS は、欧米諸国と共に電子航法研究所も参画している SBAS 相互運用性会議（IWG）において、規格化のための検討が進められている。本稿における仕様は、SBAS IWG が ICAO の航法システムパネル（NSP）に提出した次世代 SBAS に関するインターフェイス管理文書（ICD）のドラフト版 [3] を基にする。

現行 SBAS からの主な変更点は、マルチコンステレーション (MC) の 2 周波 (DF) 測位を補強する点と、静止軌道以外の軌道からも補強情報を配信可能になる点である (図 2)。

MC とは、米国の GPS に加えて、露国の GLONASS や欧州の Galileo、中国の BeiDou という新しい GNSS を利用可能とすることである。これにより、衛星数の増加による高性能化が期待されている [4]。また、DF とは、L1 帯測位信号に加えて、L5 帯測位信号を合わせて利用可能とすることである。これにより、電離圏の影響を高精度に除去することが可能であるため、SBAS サービスの補強性能や利用可能性の向上が期待されている。次世代 SBAS が想定する静止軌道以外の軌道として、我が国の準天頂衛星システム (QZSS) が利用する傾斜対地同期軌道 (IGSO) が代表的である。IGSO の利用は、ユーザに高い仰角から補強情報を配信することが可能であるため、都市や山間部における SBAS 利用可能範囲の拡大が期待されている。

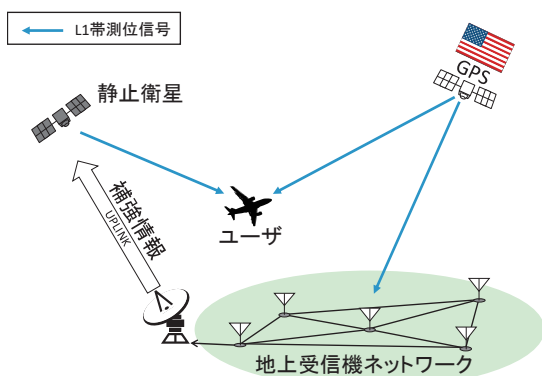


図 1 現行 SBAS の概要

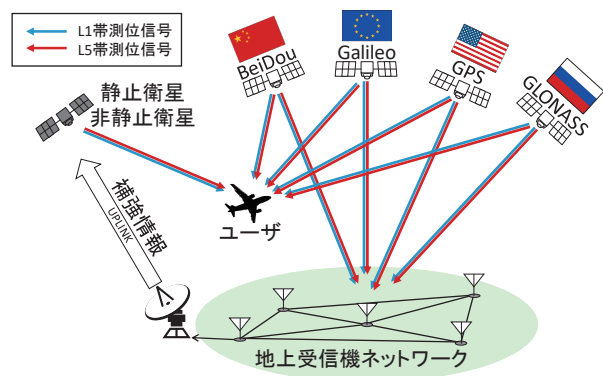


図 2 次世代 SBAS の概要

### 3. 次世代 SBAS 試作機の開発

電子航法研究所では、SBAS IWG において次世代 SBAS 規格策定に関する議論に参画することで、航空航法の性能向上と、国際社会における日本のプレゼンス向上を図っている。その中で、検討中の次世代 SBAS 規格に基づいて試作機を開発し、得られた知見をもとに議論をすることで、次世代 SBAS 規格策定のための検討を進めている。以下では次世代 SBAS 試作機の概要として、監視局 (GMS) の配置、補強対象、補強情報の生成、およびユーザ側の補正方法について述べる。

#### 3.1. 監視局 (GMS) の配置

SBAS は、サービスを提供する地域 (サービスエリア) 内に、GMS として GNSS 受信機を複数設置することで GNSS 衛星の監視を可能とする。本試作機では、図 3 に示す 13 地点に GMS を設置することとする。これらの GMS の GNSS 受信機は、国土地理院の GNSS 連続観測システム (GEONET) を利用しており、全て Trimble NETR9 である。またアンテナは、種子島と奄美大島の 2 局は TOPCON TPSCR.G5 を用い、他は全て Trimble TRM59800.80 というチョークリングアンテナを利用する。なお、これらの GMS は 1Hz で GNSS を監視する。

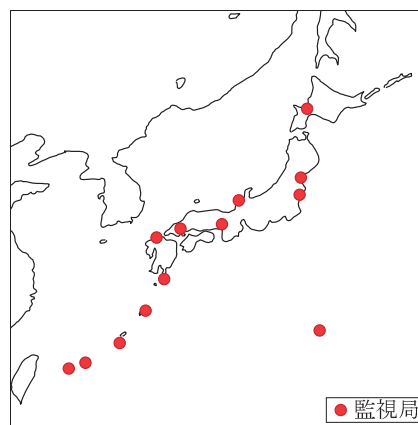


図 3 次世代 SBAS 試作機の監視局配置

#### 3.2. 補強対象 GNSS

次世代 SBAS では、多様な GNSS を補強することが可能であるが、GLONASS と BeiDou については、現状では L1 帯と L5 帯を用いた測位が不可能である。そこで本試作機では、

GPS と QZSS の L1-C/A 信号と L5 信号、および Galileo の E1B 信号と E5a 信号を補強する。

### 3.3. 補強情報の生成

試作機は補強情報生成のために、測位衛星の真の位置及び時計誤差を、衛星が放送するエフェメリスに対する残差として推定する。図 4 に推定部の概要を示す。この推定部では、観測した擬似距離は搬送波によって平滑化され、GMS の受信機時計誤差が個別に推定される。また、電離圏遅延は式(1)に示すように 2 つの周波数の異なる擬似距離を用いる電離圏フリー線形結合 (IFLC) によって推定される。ここで、 $\rho$  は擬似距離(m)であり、 $\rho_{IFLC}$  は電離圏遅延を除去した擬似距離を表す。 $f$  は搬送波の周波数(Hz)である。式(1)を式(2)の様に変形することで、電離圏遅延  $I$  を推定する。

$$\rho_{IFLC} = \frac{f_{L1}^2}{f_{L1}^2 - f_{L5}^2} \rho_{L1CA} - \frac{f_{L5}^2}{f_{L1}^2 - f_{L5}^2} \rho_{L5} \quad (1)$$

$$I = \rho_{L1CA} - \rho_{IFLC} = \frac{\rho_{L1CA} - \rho_{L5}}{1 - f_{L1}^2 / f_{L5}^2} \quad (2)$$

対流圏遅延は現行 SBAS の最低運用性能標準 (MOPS) [2]に記されているモデルから、衛星位置及び時計誤差がエフェメリスから計算される。GMS の受信機位置は GEONET の F3 解 (センチメートル級) を用いる。

カルマンフィルタ部における観測ベクトル  $\mathbf{Z}$  は、平滑化された擬似距離と上記の各推定・計算値から作成され、また、観測行列  $\mathbf{H}$  は GMS と衛星の幾何配置から作成される。カルマンフィルタは逐次的に衛星の位置・時計誤差を推定し、また、推定値の共分散行列も作成する。推定値は補正情報として、共分散行列  $\Phi$  はインテグリティ情報として利用される。

### 3.4. ユーザ側の測位補正

ユーザ側の測位演算部では、上記の補正情報を利用することで、測位の精度向上を図る。測位計算の方法は、基本的には通常の単独測位と同様である。ただし、衛星位置・時計誤差として式(3)、(4)に示す様に、エフェメリスから計算される衛星の位置  $\mathbf{POS}_{Ephc}$ 、時計誤差

$CLK_{Ephc}$  に、次世代 SBAS によるそれぞれの補正情報  $d\mathbf{POS}_{SBAS}$ 、 $dCLK_{SBAS}$  を加えることで、補正後の衛星位置  $\mathbf{POS}_{Corr}$ 、時計誤差  $CLK_{Corr}$  を求めて利用する。電離圏遅延は式(2)により求め、対流圏遅延は MOPS 記載のモデルを利用する。加えて、GPS-Galileo 間の時刻系バイアス ( $ISB_{GPS-GAL}$ ) も測位演算内で推定する。

システム間の時刻系バイアスに関する補正值 (ISB) について、次世代 SBAS は規格としてこれを放送する機能を有している。しかしながらこの ISB は、航空航法以外のアプリケーションに対するサービスとして定義されているため、航空航法では利用せず、測位演算時に各受信機 (ユーザ) が推定することとされている。そのため、本試作機では ISB を推定・放送せず、ユーザ受信機で推定することとする。

$$\mathbf{POS}_{Corr} = \mathbf{POS}_{Ephc} + d\mathbf{POS}_{SBAS} \quad (3)$$

$$CLK_{Corr} = CLK_{Ephc} + dCLK_{SBAS} \quad (4)$$

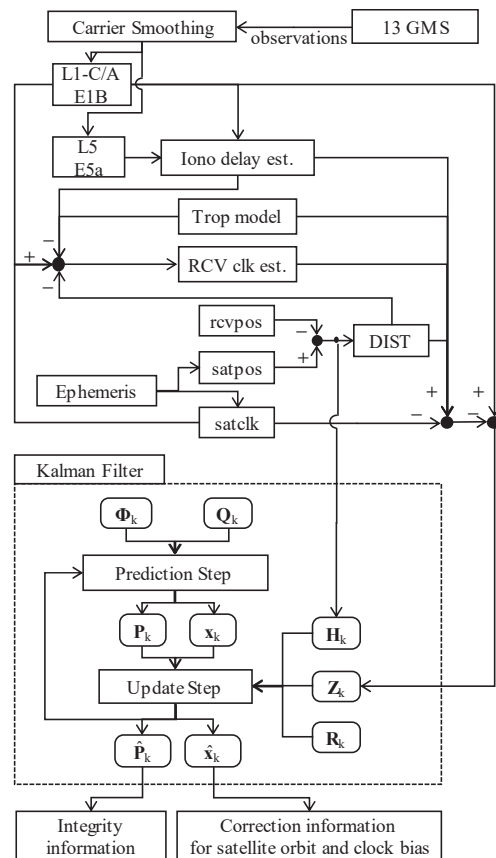


図 4 補強情報推定部

#### 4. 評価試験

次世代 SBAS 試作機の評価試験の結果を示す。評価試験の実施日は 2017 年 9 月 29 日とし、実施日に収集した GMS の監視データを用いて後処理解析によって補強情報を生成する。そして、代表的な試験局を用いて次世代 SBAS の特徴を評価し、日本全域に配置した 130 局の試験局を用いて広域の測位試験を行った結果を示す。なお、これらの試験局では 1Hz で観測を行う。

##### 4.1. 試験結果（代表的な 1 試験局）

図 5 に示す試験局は、図 3 に示す GMS の中心付近に位置し、また周辺の測位環境が良好でマルチパス誤差が少ないため、理想的な試験局である。そのため、現在の次世代 SBAS 試作機の到達しうる性能を評価可能であると考えられる。

本試験局における評価試験の結果として、水平誤差と各方向の測位誤差を図 6 と図 7 にそれぞれ示す。図中、青のプロットは GPS、Galileo、QZSS の 2 周波を利用した通常測位の

結果であり、赤のプロットが次世代 SBAS による補正を行った補強測位の結果である。また、図 8、図 9 にはそれぞれ水平および垂直方向の保護レベル (PL) と実際の測位誤差の関係 (インテグリティチャート) を示す。加えて、表 1 に測位誤差の統計値として、RMS 誤差と測位解のうち 95% の個数が含まれる誤差範囲 (95% 誤差) を示す。図 6、図 7 によると、次世代 SBAS の補正によって、水平・垂直方向の測位精度 (95% 誤差) がそれぞれ 0.49(m) と 1.00(m) まで大きく向上していることがわかる。また図 8、図 9 によると、水平・垂直方向の保護レベルのうち、95% が 6.42(m) および 12.17(m) 以下である (95% PL)。

以上の結果は、SBAS 規格において LPV-200 と呼ばれる航空機の自動着陸フェーズ (ILS Category-I 相当) の要件 (水平保護レベル  $\leq 40(m)$ 、垂直保護レベル  $\leq 35(m)$ ) を十分に満足するものである。

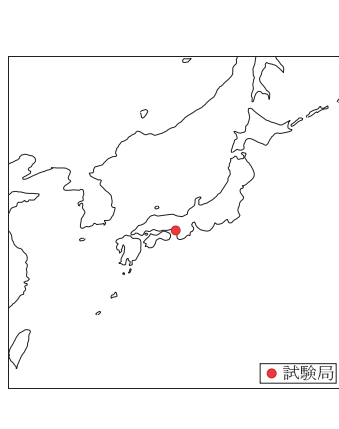


図 5 試験局配置

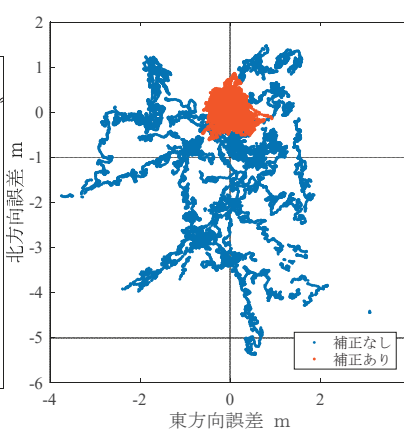


図 6 水平測位誤差

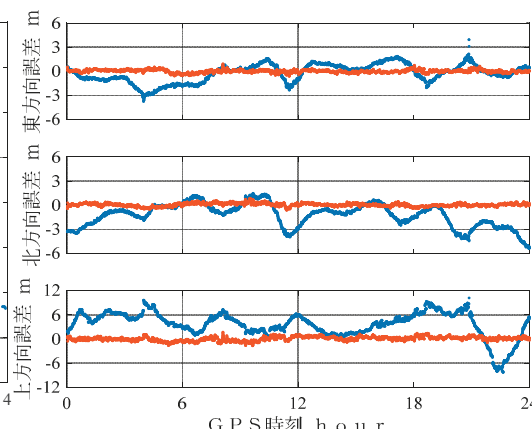


図 7 各方向の測位誤差

表 1 測位精度

補正の有無		なし	あり
RMS m	東西	1.15	0.19
	南北	1.89	0.20
	水平	2.21	0.27
	垂直	4.83	0.51
95% 誤差 m	東西	2.17	0.37
	南北	3.74	0.39
	水平	4.03	0.49
	垂直	7.84	1.00

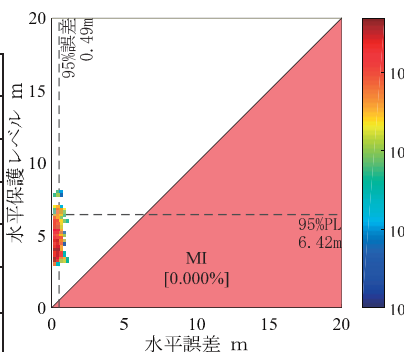


図 8 インテグリティチャート (水平)

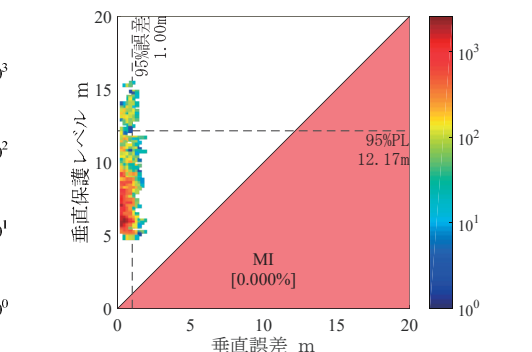


図 9 インテグリティチャート (垂直)



#### 4.2. 試験結果（日本全域の130試験局）

本試験で利用する試験局は、日本全域に配置された130局である。広範囲に設置することで、日本全域における次世代SBAS試作機の性能の傾向を評価する。

図10、図11に130局の各試験局における次世代SBASによる補強測位の水平及び垂直方向の95%誤差を示す。また、表2に全ての試験局の統計値を示す。

これらによると、日本全域で概ね水平0.7(m)以下、垂直1.4(m)以下と、良好な補強性能が得られていることがわかる。また、傾向として、日本の中心付近の精度がよく、南北に向かうにつれて誤差が増大していることがわかる。これは、図3に示すGMSの配置による影響であると思われる。補正值による補正誤差精度がGMS配置の重心ほど小さくなる特徴があるためであり、また、ある衛星の補強情報を生成するためには、複数（少なくとも4局）のGMSでその衛星の観測が必要でため、日本外縁部で

は受信可能な衛星の内、補強された衛星が中心部と比較して少なく、DOPが悪いことが原因と考える。

図12、図13に各130試験局における水平および垂直方向の95%PLを示す。また、表2に統計値を合わせて示す。

95%誤差の傾向と同様に、全体として良好な保護レベルを示しているが、中心付近と比較して外縁部の保護レベルが増加している。これは保護レベルがDOPの悪化の影響を強く受けるためと思われる。また、垂直保護レベルについて、南方と比較して北方の保護レベルが悪化している傾向が見られる。これは、補強された衛星が少ないことに加えて、GNSSの軌道傾斜角の関係から、北方では垂直方向のDOPが悪化しやすいと思われる。

以上から、次世代SBAS試作機の性能が日本全域において良好であることが確認された。

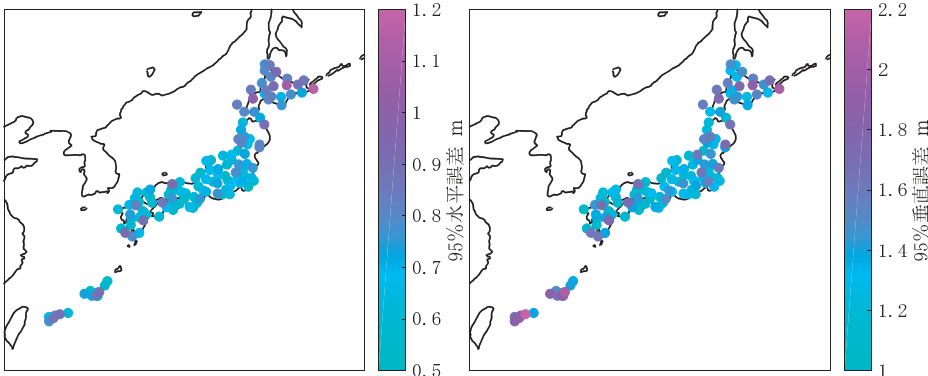


図10 95%水平測位誤差の分布

図11 95%垂直測位誤差の分布

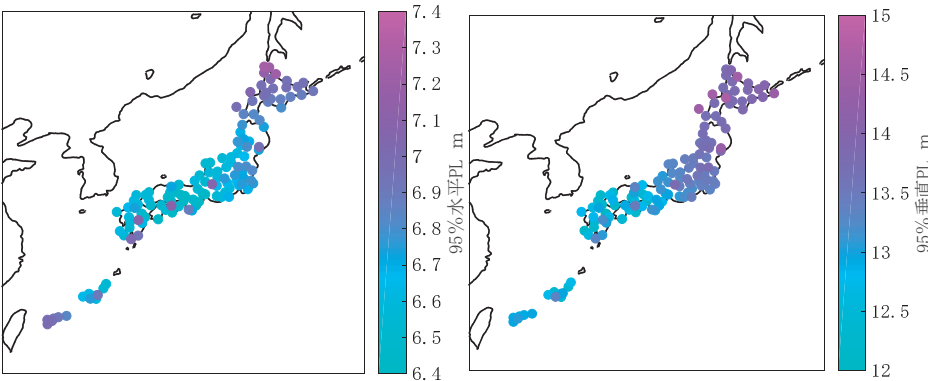


図12 95%水平保護レベルの分布

図13 95%垂直保護レベルの分布

表2 測位精度

補正の有無		あり
RMS m	東西	0.28
	南北	0.28
	水平	0.39
	垂直	0.72
95%誤差 m	東西	0.54
	南北	0.56
	水平	0.72
95%PL m	水平	6.74
	垂直	13.14

## 5. 放送実験

2017年8月23日、本次世代SBAS試作機を用いて、QZSSの非静止軌道衛星から放送された世界初の次世代SBAS放送実験を開始した。その後、平日（月～金曜日）の9～17時（日本時間、JST）に実験計画に基づいて断続的に実施している。また、続く2017年10月1日から、豪州も静止軌道衛星から同様の次世代SBAS送信実験を実施[5]しており、世界中で次世代SBAS規格策定のための活動が活発である。これらの実験は、我が国と共に規格策定に関わる欧米諸国にも関心を寄せられている。

本実験における補強メッセージは、常陸太田市（もしくは神戸市）に置かれたQZSSの主管制局から準天頂衛星2号機（QZS-2）にアップリンクされ、その後L5S信号（PRN:196）に重畳されて放送される。QZS-2の衛星軌道はIGSOであり、日本上空に長時間滞空するという特徴を持つ。そのため、都市部等の障害物の多い環境でも遮蔽されることなく利用可能であると期待できる。

放送実験結果の一部として、2017年11月13日10～16時（JST）に実施した放送及び測位評価試験の結果を図14、図15および表3に示す。試験局は第4.1節と同じである。これらの結果によると、QZSSからの放送による実際の測位においても、第4章と同程度に良好な補強を実現していることがわかる。

以上の放送実験は今後も継続して実施することを計画している。

## 6. まとめ

規格化が進められている次世代SBASについて、試作機の概要と評価試験、および放送実験について述べた。それらによると、次世代SBASによる補強を行うことで、日本全域で高精度な補強が可能であることや、放送実験によって実際の測位における有用性も明らかとなった。これらの知見は、SBAS IWGで議論されており、規格策定に貢献している。

今後の次世代SBAS開発として、GMSを海外に設置した場合を想定した評価や、航空機を用いた実環境評価を実施する予定である。

## 参考文献

- [1] ICAO, SARPs Annex 10, Vol.I, 6th Ed., Jul. 2006.
- [2] “Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System / Wide Area Augmentation System Airborne Equipment,” Publication DO-229E, RTCA SC-159, WG-2, Washington, DC, 15 Dec. 2016.
- [3] DFMC SBAS SARPs - Part B Draft Ver. 0.3 Proposal, ICAO, NSP/3-IP/38, Dec. 2016.
- [4] M. Stanisak, U. Haak, and A. Schwital, “Different Positioning Strategies Using Multi-Frequency / Multi-Constellation GNSS Measurements,” Proc. ION GNSS+ 2015, Tampa, Florida, pp.2654-2668, Sep. 2015.
- [5] “Technical Specifications Document for Satellite-Based Augmentation System Testbed,” CRCSI, Revision 5, 10 Nov. 2017.

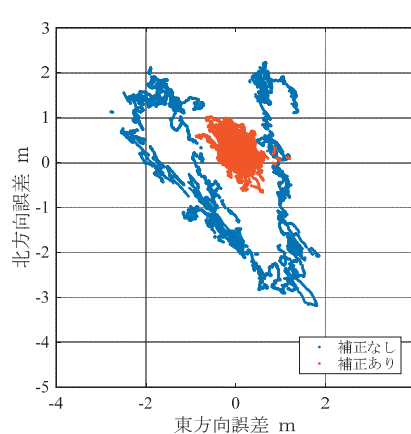


図 14 水平誤差（放送実験）

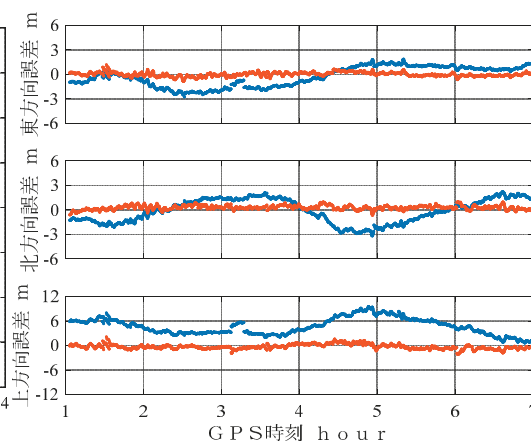


図 15 各方向誤差（放送実験）

表 3 測位精度(放送実験)

補正の有無		なし	あり
RMS m	東西	1.25	0.25
	南北	1.46	0.38
	水平	1.95	0.46
	垂直	5.09	0.65
95%誤差 m	東西	2.20	0.49
	南北	2.53	0.71
	水平	2.80	0.82
	垂直	8.25	1.16