

MSAS 信号による測距精度の評価

坂井 丈泰^{* a)}, 北村 光教^{*}

Ranging Accuracy of MSAS Signal

Takeyasu SAKAI^{*}, Mitsunori KITAMURA^{*}

あらまし 衛星航法システムに対する補強情報を送信する補強システムとして、静止衛星を使用する SBAS (Satellite-Based Augmentation System) が標準規格となっている。SBAS の信号は GPS と同一の形式であり、GPS と同様に測位衛星として利用できる。日本の SBAS である MSAS は過去にこのために必要なメッセージを送信して測距機能を提供していた時期があるが、現在は提供していない。一方、MSAS の静止衛星は 2020 年 4 月に更新されており、信号生成方式が変更されていることから、測距機能の提供を再開した場合にはその性能に変化があるものと思われる。静止衛星の更新前後の MSAS について測距精度を評価したところ、現行の MSAS では以前よりも改善されており、GPS と同等であることがわかった。

Abstract SBAS (Satellite-Based Augmentation System) is the standard system which augments GNSS using geostationary satellites. The structure of SBAS signal is same with GPS and this means the SBAS satellites have capability to work as additional ranging satellites like GPS. Japanese SBAS called MSAS once provided messages for this ranging function, but nowadays does not. Recently MSAS has updated its geostationary satellite in April 2020, and this likely means the ranging accuracy also has some difference due to change in the signal generation payload if MSAS provides the ranging function again. The authors have evaluated the ranging accuracy of the MSAS signal before and after the replacement of its geostationary satellite and confirm an improvement over the past to the same level with GPS.

キーワード SBAS, MSAS, 測距精度

Keyword SBAS, MSAS, ranging accuracy

1. まえがき

GPS に代表される衛星航法システムは GNSS と総称され、現在は GPS 以外にもロシアの GLONASS を利用できる。これら以外にも衛星航法システムの整備が進められており、欧州の Galileo、中国の BDS、そして日本による準天頂衛星システム (QZSS) がある。いずれも、GNSS 衛星が送信する測距信号を受信機により受信処理し、衛星-受信機間の距離を測定することで受信機の位置を算出する。

航空用途で GNSS を利用するには、完全性 (integrity: インテグリティ) を確保する機能の追加が必要とされる。これを行うのが補強システムであり、ICAO (International Civil Aviation Organization: 国際民間航空機関) は、人工衛星を経由して補強情報を伝送する SBAS (Satellite-Based Augmentation System)、滑走路付近の地上施設から VHF 無線により補強情報を伝送する GBAS (Ground-Based Augmentation System)、そして機上装置のみにより補強を行う ABAS (Aircraft-Based Augmentation System) の 3 種類の補強システムを規格化している。このうち、SBAS の特徴は広い地理的範囲に対して均一なサービスを提供できることであり、米国 WAAS、日本 MSAS、欧州 EGNOS、そしてインドの GAGAN がすでに稼働している。

SBAS の機能は、(i) 完全性の補強、(ii) ディファレンシャル補正、(iii) 測距信号の提供、である。このうち (iii) は SBAS 信号を測距信号として使用できることを意味し、必要なメッセージが送信されれば GPS 衛星に加えて SBAS 衛星を測位に利用できる。現状の MSAS はこの測距機能のためのメッセージを提供していないが、今後に予定されている衛星数の追加を契機としてこれを提供する可能性がある。一方、MSAS の使用衛星は 2020 年 4 月のシステム更新により変更されており、信号帯域幅や信号生成方式が大きく変わっていることから、それまでと比べて測距精度には変化があるものと思われる。

本論文では、更新前後の MSAS について測距精度を比較した結果を述べる。以下、第 2 章で SBAS の送信信号について述べ、第 3 章では MSAS の概要として主たる構成及び SBAS 信号の生成方式を説明する。第 4 章では新旧の MSAS について測距精度を評価した結果を報告し、第 5 章を結論とする。

2. SBAS の送信信号

民間航空機の航行支援施設については、ICAO の設置根拠である国際民間航空条約 (シカゴ条約) の第 10 附属書 (Annex 10: Aeronautical Telecommunications) により国際標準規格が定められている。GNSS に関する SARPS (Standards and Recommended Practices: 標準及び勧告方式) [1] には、GPS 及び GLONASS とあわせて、補強システムとして SBAS・GBAS・ABAS が規定されている。補強システムに相対する呼称として、補強される側の GPS 及び GLONASS はコアシステ

^{*}海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所

〒182-0012 東京都調布市深大寺東町 7-42-23

Electronic Navigation Research Institute, National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology, 7-42-23 Jindaiji-Higashi, Chofu-Shi, Tokyo 182-0012

a) sakai@mpat.go.jp

表 1 SBAS メッセージタイプ

Table 1 Definition of SBAS message types.

Type	Message
0	SBAS test mode
1	PRN mask
2~5	Fast corrections
6	Integrity information
7	Fast Correction degradation parameters
9	GEO ranging function parameters
10	Degradation parameters
17	GEO satellite almanacs
18	Ionospheric grid point masks
24	Mixed fast/long-term satellite error corrections
25	Long-term satellite error corrections
26	Ionospheric delay corrections
27	SBAS service message
28	Clock-ephemeris covariance matrix
62	(Reserved)
63	Null message

ムという。

SBAS 信号は GPS L1 C/A 信号と同一の周波数及び拡散変調方式とされており、拡散符号には C/A コードが使用される。PRN 番号は 120~158 とされており、その定義は GNSS SARPS によるとともに、最近の GPS Interface Specifications にも記載されている[2]。変調速度は毎秒 500 シンボルであり、符号化率 1/2 の畳込み符号が適用されているためデータ速度は毎秒 250 ビットとなる。

SBAS が提供する情報はメッセージ単位で送信される。すべてのメッセージは 250 ビットで構成され、毎秒 1 個のメッセージが GPS 時刻の毎正秒に±50ns 以内に同期したタイミングで送信される。メッセージの内容は 0~63 のメッセージタイプ(MT:Message Type)で識別され、その定義は表 1 の通りである。このうち測距機能に関係するのは MT 9 及び MT17 であり、MT 9 には GPS のエフェメリス情報に相当する SBAS 衛星の位置及びクロック誤差が、MT 17 には SBAS 衛星の概略の位置情報とともにサービスプロバイダの識別情報等が含まれている。測距機能の提供の有無は送信されているメッセージにより知ることができるが、提供されていない場合でも C/A コードによる擬似距離の測定は可能であり、この場合もコード・キャリアコヒーレンシ、相関損失及びコード位相オフセットといった測距信号としての特性に関する規定は適用される。

3. MSAS の概要

SBAS 規格による補強システムとして、日本では MSAS を利用できる[3]-[10]。MSAS は国土交通省航空局が整備・運用しており、元来の名称は使用する静止衛星 MTSAT(Multi-functional Transport Satellite:運輸多目的衛星)にちなんで MTSAT-based Satellite Augmentation System の略とされていたが、最近では準天頂衛星 3 号機(QZS-3)を使用することとなったため Michibiki-based Satellite Augmentation System に変

表 2 MSAS V1/V2 が送信する SBAS 信号

Table 2 SBAS signals transmitted by MSAS V1 and V2.

System	MSAS V1	MSAS V2
Operational Period	Sept. 27, 2007 to March 31, 2020	From Feb. 21, 2020
PRN	129 and 137	137
SBAS Satellites	MTSAT-1R MTSAT-2	QZS-3
Signal Generation	Ground-Based Frequency Standard and Signal Generator	Onboard Frequency Standard and Signal Generator
Signal Bandwidth	2.2 MHz [11]	30.7 MHz [11]
Maximum Transmission Power	16 dBW [11]	21.9 dBW [11]
Received Signal Power	-158.5 to -152.5 dBW [1]	
Remark	PRN137 stopped on Feb. 21, 2020.	-

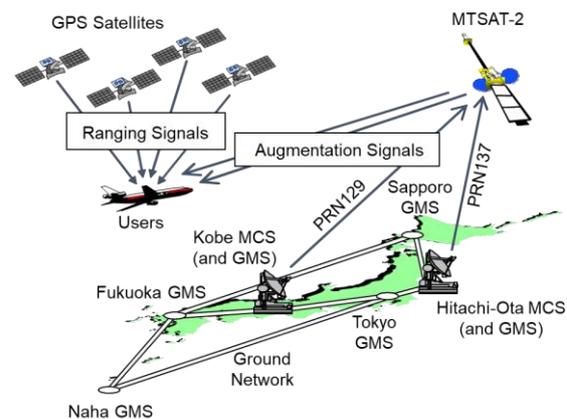


図 1 MSAS V1 の最終構成

Figure 1 The final configuration of MSAS V1.

更されている。MTSAT による旧 MSAS を MSAS V1、QZS-3 による新 MSAS を MSAS V2 と称して区別することがある。新旧 MSAS が送信する SBAS 信号の仕様は表 2 の通りである。

3.1 MSAS V1(旧 MSAS)

2007 年 9 月 27 日の運用開始時の構成は、航法統制局(MCS:Master Control Station)が 2 局、監視局(GMS:Ground Monitor Station)が 6 局(うち 2 局は MCS に併設)、標定局(MRS:Monitor and Ranging Station)が 2 局、及び静止衛星 2 機(MTSAT-1R 及び MTSAT-2)であった。2 局の MRS は静止衛星の軌道決定精度を改善するためにハワイ及びオーストラリアに設けられていた。

SBAS 信号の送信はベントパイプトランスポンダ方式による。すなわち、MCS 内の周波数標準により SBAS 信号を生成して静止衛星にアップリンクし、これがトランスポンダにより中継されて利用者向けに送信された。ただし、ITU における周波数調整によりトランスポンダの信号帯域幅が 2.2 MHz に限られており[11]、これを満たすことが試験により確認されるとともに[12]、測距精度を示す UDRE(User Differential Range Error、標準

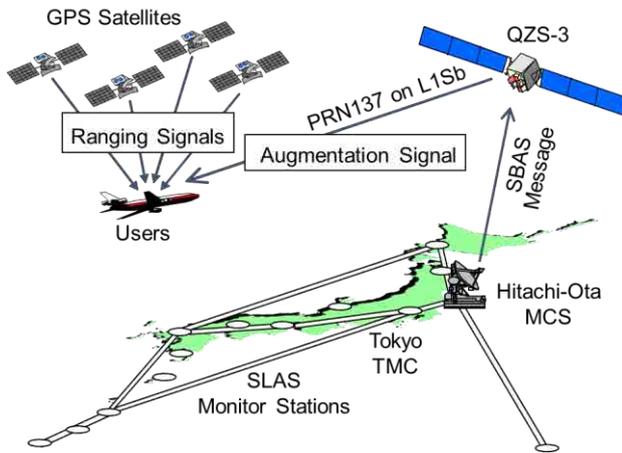


図 2 MSAS V2 の構成

Figure 2 Configuration of MSAS V2.

偏差の 3.29 倍程度に相当する)は 50 m に設定された。この設定は、後述するように信号帯域幅が狭いと測距精度が劣化することを反映している。

運用開始時の構成を変えずに 7 年半にわたり運用された後、2 局の MRS は 2015 年 3 月 30 日をもって廃止された。引き続き、10 年間の運用期間が経過した MTSAT-1R は同年 9 月 28 日に使用を停止し、同年 12 月 10 日に運用を終了した [6]。最終的な構成は図 1 の通りで、静止衛星は MTSAT-2 のみとなったが、MSAS 信号については 2 局の MCS で引き続き生成され、MTSAT-2 により PRN129 及び PRN137 として送信された。MSAS V1 では、当初の構成では測距機能が提供されていたが、MRS を廃止した際にこれを中止した [10]。

3.2 MSAS V2(新 MSAS)

2020 年 4 月、MSAS は静止衛星及び地上施設が全面的に更新され、図 2 の構成となった [6]-[8]。静止衛星は MTSAT-2 から QZS-3 に切り替えられ、L1Sb 信号を使用して PRN137 が送信されている。GMS は国内 13 局となり、MCS は主局を常陸太田市、バックアップ局を所沢市に設置している。

静止衛星が QZS-3 に変更されたことにより、QZS-3 が送信する他の測距信号と同様に、SBAS 信号も衛星搭載周波数標準にもとづいて衛星内部で生成されている。すなわち、他のすべての SBAS が採用しているベントパイブトランスポンダ方式ではないこととなった。これにより低速のメッセージのみを伝送すればよいアップリンク信号が狭帯域になることから周波数調整上の問題が緩和され、30 MHz 以上の帯域幅により SBAS 信号を送信するとともに、送信電力についても向上している [11][13]。なお、L1Sb 信号の送信アンテナは、他の PNT サービス向け信号とは別に取り付けられている [7][8]。

静止衛星の切替えに際しては、PRN137 については 2020 年 2 月から QZS-3 を使用した試験が開始されており、2 月 21 日に QZS-3 に切り替えられた(ただし、3 月 24 日までは試験中を意味する MT 0 メッセージが送信されていた)。PRN129 については、2020 年 3 月 31 日をもって停止した。

MSAS V2 では静止衛星が 1 機のみであることから、信頼性

の観点より精密進入サービスを供用できない。このため、準天頂衛星システムの 7 機体制にあわせて、MSAS に静止衛星を追加したうえで性能向上を図る計画とされている [7]-[9]。現状の MSAS V2 では測距機能は提供されていないが、静止衛星の追加を契機としてこれを再開する可能性がある。

4. MSAS の測距精度

第 2 章に述べた通り SBAS 信号は GPS と同じ C/A コードで変調されており、測距信号として使用できる。本章では、新旧の MSAS について測距精度の評価を試みる。なお、本章で評価の対象とするのは信号帯域幅の影響を含む測距信号の品質に起因する雑音成分であり、SBAS によるディファレンシャル補正が可能なバイアス性の成分(おおむね時定数が 30 秒程度以上の誤差とする)は対象としない。

4.1 評価の方法

受信機 A が観測する衛星 i のコード擬似距離 ρ_i^A [m] は、次のようにモデル化できる。

$$\rho_i^A = R_i^A - B_i + I_i^A + T_i^A + S^A + \varepsilon_i^A \quad (1)$$

ここで、 R は衛星-受信機間の距離、 B は衛星クロック誤差、 I は電離圏伝搬遅延、 T は対流圏伝搬遅延、 S は受信機クロック誤差、 ε はその他の測定雑音で、単位はすべて [m] とする。

測定雑音 ε 以外はバイアス性の成分が支配的であるから、適当な平滑化フィルタ $f(\cdot)$ によりデトレンド処理を施すことでコード擬似距離の雑音 ε を評価できる。

$$\bar{\rho}_i^A \triangleq \rho_i^A - f(\rho_i^A) \approx \varepsilon_i^A \quad (2)$$

従って、GPS については $N(0, \sigma_{GPS}^2)$ 、また SBAS については $N(0, \sigma_{SBAS}^2)$ に従う確率分布の雑音を ε に含むものとする。衛星 i が GPS ならば

$$\bar{\rho}_i^A |_{i \in GPS} \sim N(0, \sigma_{GPS}^2) \quad (3)$$

に、衛星 i が SBAS であれば

$$\bar{\rho}_i^A |_{i \in SBAS} \sim N(0, \sigma_{SBAS}^2) \quad (4)$$

に従う雑音がデトレンド後のコード擬似距離に含まれるものとして評価できる。 $N(0, \sigma^2)$ は、平均 0、分散 σ^2 の正規分布を意味する。

式(1)に含まれる誤差の性質によってはデトレンド処理により除去されないことが考えられるため、いま一つの測定値としてコード擬似距離の二重差を用いる。まず、各エポックにおいて仰角のもっとも高い GPS 衛星 p を基準とすると、それ以外の衛星との擬似距離の差を衛星間一重差 (BSSD: between-satellite single-difference) と呼び、次式のように定義する。

$$\begin{aligned} BSSD_{i,p}^A &\triangleq \rho_i^A - \rho_p^A \\ &= \Delta R_{i,p}^A - B_i + B_p + \Delta I_{i,p}^A + \Delta T_{i,p}^A + \Delta \varepsilon_{i,p}^A \end{aligned} \quad (5)$$

記号 Δ は衛星間の差分であることを意味し、添字との対応関係は定義式の例による。BSSD では、受信機クロック誤差が取り除かれる。

二重差 (DD: double difference) は、2ヶ所における BSSD の差分として定義する。

$$\begin{aligned} DD_{i,p}^{A,B} &\triangleq BSSD_{i,p}^A - BSSD_{i,p}^B \\ &= \rho_i^A - \rho_p^A - \rho_i^B + \rho_p^B \\ &= \nabla \Delta R_{i,p}^{A,B} + \nabla \Delta I_{i,p}^{A,B} + \nabla \Delta T_{i,p}^{A,B} + \nabla \Delta \varepsilon_{i,p}^{A,B} \end{aligned} \quad (6)$$

記号 ∇ は受信機間の差分であることを意味する。二重差では衛星クロック誤差及び受信機クロック誤差を相殺できる一方、電離圏伝搬遅延及び対流圏伝搬遅延については使用する2地点の両方の影響を受ける。

式(2)と同様に二重差についてもデトレンド処理を施すと、残る雑音成分を次のように書ける。

$$\begin{aligned} \overline{DD}_{i,p}^{A,B} &\triangleq DD_{i,p}^{A,B} - f(DD_{i,p}^{A,B}) \\ &\approx \varepsilon_i^A - \varepsilon_p^A - \varepsilon_i^B + \varepsilon_p^B \end{aligned} \quad (7)$$

従って、衛星 i が GPS 及び SBAS のそれぞれの場合について、

$$\overline{DD}_{i,p}^{A,B} \Big|_{i \in GPS} \sim N(0, 4\sigma_{GPS}^2) \quad (8)$$

及び

$$\overline{DD}_{i,p}^{A,B} \Big|_{i \in SBAS} \sim N(0, 2\sigma_{GPS}^2 + 2\sigma_{SBAS}^2) \quad (9)$$

に従う雑音がデトレンド後の二重差に含まれるものと評価できる。

式(2)及び(7)のデトレンド処理については、バイアス性の連続的な変化を取り除こうとするものであるから、例えば低次の平滑化フィルタの出力を差し引くことでよい。一般にマルチパス誤差の時定数が 100 秒程度とされていることを考慮して、平滑化フィルタ $f(\cdot)$ としては、対象エポックの ± 15 秒間の測定値の多項式近似を使用した。具体的には、エポック時刻 t における測定値 $m(t)$ を次の二次多項式

$$k_2\tau^2 + k_1\tau + k_0 = m(t + \tau) \quad (10)$$

により近似することとして、その係数を最小二乗法により

$$\begin{bmatrix} k_0 \\ k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot \begin{bmatrix} m(t-15) \\ \vdots \\ m(t) \\ \vdots \\ m(t+15) \end{bmatrix} \quad (11)$$

として求め、

$$f(m(t)) = k_0 \quad (12)$$

とする。行列 A は次の通りである。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -15 & (-15)^2 \\ 1 & -14 & (-14)^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 14 & (14)^2 \\ 1 & 15 & (15)^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

デトレンド処理によりバイアス性の成分は取り除かれることになるが、その場合であっても電離圏伝搬遅延の小さな時期及び時間帯を選択することが望ましいことに留意すべきである。

マルチパス誤差が大きくない環境下においては、デトレンド後に残る雑音には送信側及び受信側の信号帯域幅による影響を観測できる。受信アンテナ及び受信機フロントエンドのフィルタにより決まる受信側の信号帯域幅については、これが広いと所望信号以外の成分、すなわち雑音が増加する。一方、所望信号については送信側から受信側を通じた信号帯域幅が問題であり、これが狭いと高周波成分が完全に再現されず、受信機内部の相関処理において位相雑音が大きくなる[14]-[16]。受信側の信号帯域幅が十分に広いものとする、送信側の信号帯域幅が雑音成分の支配的な要因となる。十分な信号帯域幅をもつ GPS 衛星ではこうした問題はないが、SBAS 衛星では十分な信号帯域幅を確保できないことがあり、実際に 3.1 節で述べた通り MSAS V1 では信号帯域幅が 2.2

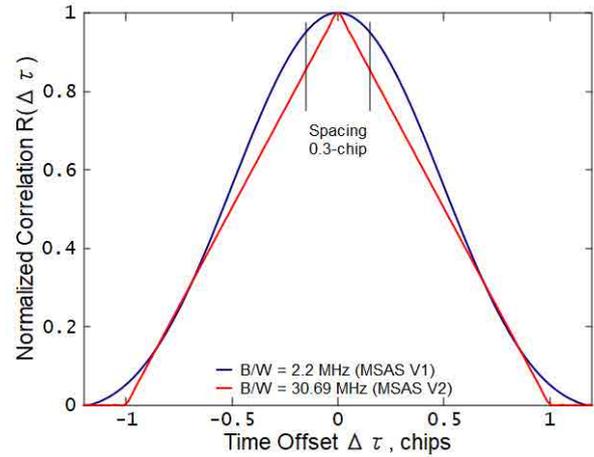


図3 信号帯域幅と相関器出力

Figure 3 Comparison of correlator outputs for different signal bandwidths.

表3 測距精度の評価に使用した観測データ

Table 3 Observations for ranging accuracy evaluation.

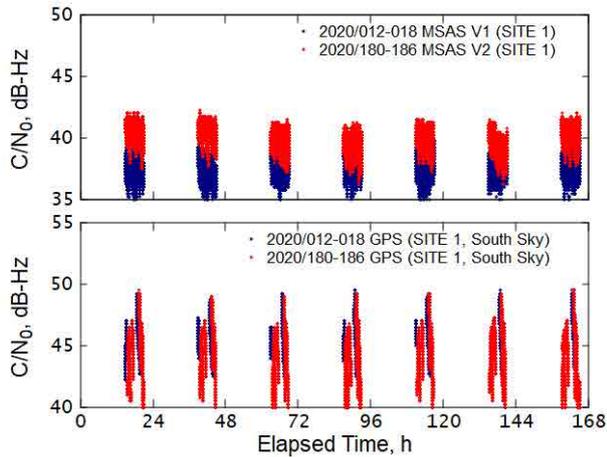
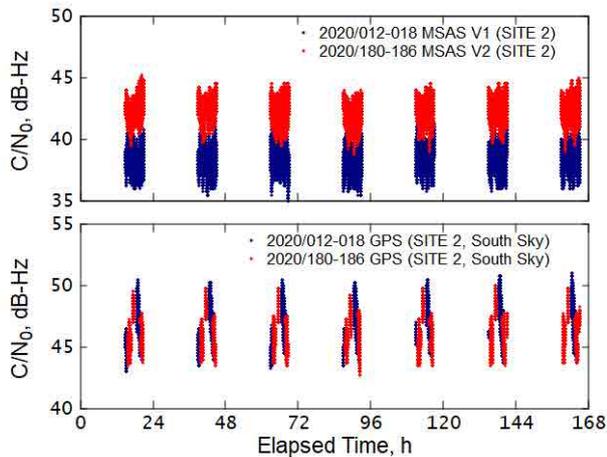
System	MSAS V1	MSAS V2
Observation Period	Jan. 12 to 18, 2020 (Week 2088)	June 28 to July 4, 2020 (Week 2112)
Observation Hours	15:00 to 21:00 GPST (0:00 to 6:00 Local Time)	
Epoch Interval	1 second	
Carrier Smoothing	50 seconds	
KP Index	$\leq 1+$	$\leq 2+$
PRN	137	137
SBAS Satellite	MTSAT-2	QZS-3
Site 1	Receiver	JAVAD Alpha-G3T
	Antenna	NovAtel GPS-703-GGG
	Location	38.1353N 140.9150E (Sendai Airport, Iwanuma-Shi, Miyagi)
Site 2	Receiver	JAVAD Alpha-G3T
	Antenna	NovAtel GPS-703-GGG
	Location	24.3451N 124.1722E (Chuo Undo Koen Park, Ishigaki-Shi, Okinawa)

MHzに限られていた。

受信機内部で擬似距離の測定に用いられる相関器出力は、信号帯域幅を狭めると図3のように丸みを帯びたカーブになる([17]も参照)。[16]の議論を参考にすると、擬似距離の測定精度は、この相関器出力 $R(\Delta\tau)$ に対応する弁別関数の傾き

$$\frac{\partial R(\Delta\tau - d/2)}{\partial \Delta\tau} \Big|_{\Delta\tau=0} - \frac{\partial R(\Delta\tau + d/2)}{\partial \Delta\tau} \Big|_{\Delta\tau=0} \quad (14)$$

に反比例するものと考えてよい。SBAS 対応受信機の規格において信号帯域幅の狭い SBAS について基準とされているように相関器幅 (correlator spacing) を $d = 0.3$ チップとすると[17]、十分な信号帯域幅がある場合に対して、2.2 MHz の信号帯域幅では式(14)の傾きは 0.64 倍程度になる。従って、信号帯域幅の拡大により MSAS V2 による測距精度はおおむね MSAS V1 の 0.64 倍程度の標準偏差になるものと予想できるが、実際にはさらにこの見積りに含まれていない受信機側のフィルタ特性等による影響も受けることになる。

図4 観測期間中の C/N_0 (岩沼市)Figure 4 C/N_0 during observation period at Site 1.図5 観測期間中の C/N_0 (石垣市)Figure 5 C/N_0 during observation period at Site 2.

4.2 評価結果

MSAS の測距精度の評価には、電子航法研究所岩沼分室(宮城県岩沼市, 仙台空港内)及び石垣市中央運動公園(沖縄県石垣市)の2地点における観測データを使用した。観測時期及び条件等の概要は表3の通りである。観測時期としては、使用衛星の切替えの直前及び直後を避けるとともに、一般に電離圏活動が静穏な1月及び6月から地磁気活動の大きさを示すKP指数[18]の小さな週を選び、MSAS V1(旧システム)については2020年1月12~18日、MSAS V2(新システム)は2020年6月28~7月4日とした。電離圏伝搬遅延の影響を抑えるため、電離圏活動が弱い0:00~6:00JST(15:00~21:00GPST)の観測データのみを使用する。使用した受信機及びアンテナは同一であり、機器類の変更もないから、各観測時期の2地点の観測データをそれぞれ比較できる。エポック間隔は1秒間、キャリアスムージング時定数は50秒である。

まず、それぞれの時期の受信信号の C/N_0 を図4及び図5に示す。GPS衛星については C/N_0 に大きな変化はない一方、MSASでは3~4 dB程度の変化がみられる。これはMSASの

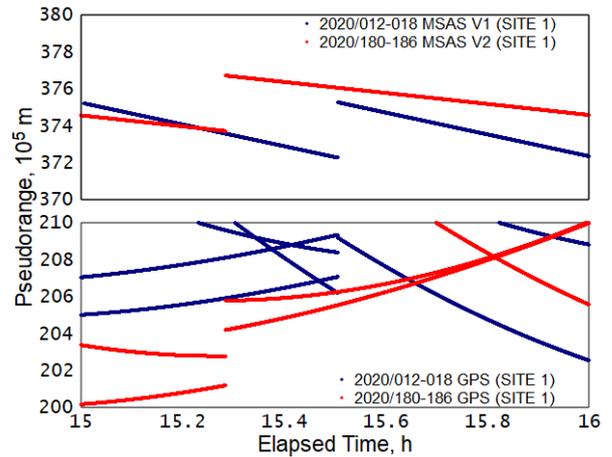


図6 MSAS及びGPSのコード擬似距離の例(岩沼市)

Figure 6 Pseudorange of MSAS and GPS observed at Site 1.

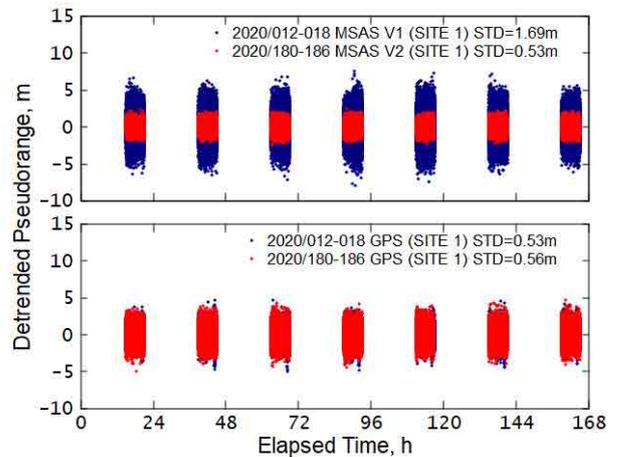


図7 デトレンド後のコード擬似距離(岩沼市)

Figure 7 Detrended pseudorange at Site 1.

使用衛星がQZS-3に変更されたことによる変化で、過去の報告とも合致する[12]。 C/N_0 の改善量の平均を求めると、岩沼市で2.39 dB、石垣市で3.92 dBであった。なお、これらの図において、GPSについてはMSAS衛星の周辺方向(方位角 ± 30 度、仰角 ± 10 度以内)のもののみをプロットしてある。

コード擬似距離は例えば図6のように観測された(岩沼市の1時間分のみ)。上段はMSAS信号、下段には比較のためにGPS衛星の測定値を表示してあり、各観測期間について1回ずつの受信機クロックのジャンプがみられるほかはコード擬似距離は滑らかに変化している。

トレンド後のコード擬似距離は図7(岩沼市)及び図8(石垣市)のように観測された。いずれの観測点においても、GPSについては特段の変化がない一方、MSAS信号では標準偏差が1.7 m程度から0.5 m程度に減少している。確認のために1時間分のみを拡大すると図9のようになっており、電離圏伝搬遅延やマルチパス誤差による影響はみられない。

コード擬似距離の二重差は、図10のように観測された。差分であることから標準偏差が大きくなっているが、次段落に述

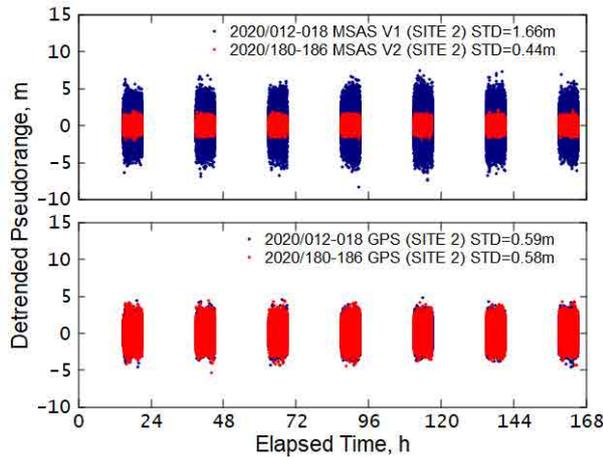


図 8 デトレンド後のコード擬似距離(石垣市)
Figure 8 Detrended pseudorange at Site 2.

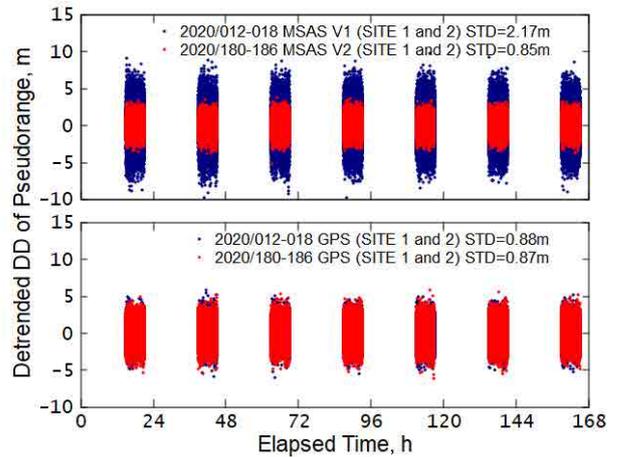


図 10 デトレンド後のコード擬似距離二重差
Figure 10 Detrended double difference of pseudorange.

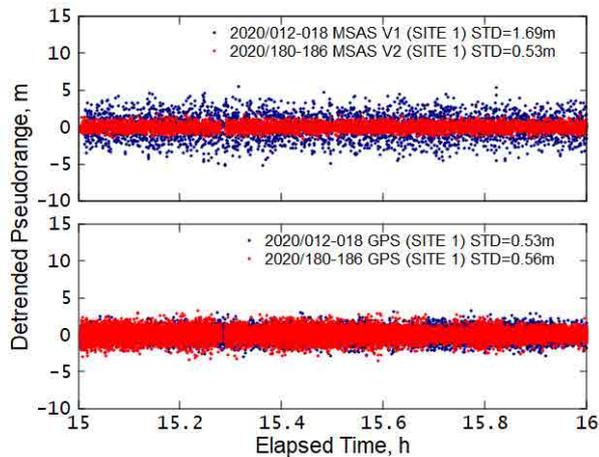


図 9 デトレンド後のコード擬似距離(岩沼市, 拡大)
Figure 9 Detrended pseudorange at Site 1 (Enlarged).

べるようにコード擬似距離の標準偏差を推定すると矛盾はない。図 7 及び図 8 と変わらない傾向であることから、コード擬似距離のデトレンドにより観測された MSAS 信号に特有の性質は受信機クロック誤差や衛星クロック誤差に起因しないことを確認できる。なお、図 7~10 のいずれについても、平均値は無視できるレベルであった。

観測されたコード擬似距離及びその二重差の標準偏差をまとめると、表 4 の通りであった。式(3), (4), (8)及び(9)にもとづき最小二乗法によりコード擬似距離の測距精度を推定した結果は表 5 の通りで、二重差による標準偏差が若干小さい。これより、二重差を求めることで受信機クロック誤差及び衛星クロック誤差が相殺される効果がみられる一方、2 地点の影響を受ける電離圏伝搬遅延及びマルチパス誤差については問題となっていないことがわかる。MSAS の測距精度として二重差による結果を報告すると、MSAS V1 で 1.47 m 程度、MSAS V2 では 0.42 m 程度であるが、これらは受信機に依存するうえキアスムージングによる効果も含んでいる。相対的な比較としては、MSAS V2 では標準偏差が 30%以下に減少し、GPS と

表 4 測定値の標準偏差

Table 4 Standard deviation of measurements.

Period	System	Location	Standard deviation, m	
			Pseudorange	DD
Jan. 12 to 18, 2020	MSAS V1	Site 1	1.69	2.17
		Site 2	1.66	
	GPS	Site 1	0.53	0.88
		Site 2	0.59	
June 28 to July 4, 2020	MSAS V2	Site 1	0.53	0.85
		Site 2	0.44	
	GPS	Site 1	0.56	0.87
		Site 2	0.58	

表 5 推定された測距精度

Table 5 Estimated ranging accuracy.

Measurement	Period	Accuracy in standard deviation, m	
		MSAS (σ_{SBAS})	GPS (σ_{GPS})
Pseudorange	Jan. 12 to 18, 2020	1.67	0.56
	June 28 to July 4, 2020	0.49	0.57
DD	Jan. 12 to 18, 2020	1.47	0.44
	June 28 to July 4, 2020	0.42	0.44

同等の測距精度が実現されているものといえる。

一般にコード擬似距離の測距精度は C/N_0 の平方根に反比例することが知られており[16], 2.39~3.92 dB の C/N_0 の改善に対応して擬似距離の標準偏差は 76~63%程度になることが予想される。また、4.1 節に述べた信号帯域幅の拡大による効果をあわせると、MSAS V2 における擬似距離の標準偏差は MSAS V1 の 48~40%程度になるものと考えられ、実際の測定結果をおおむね説明できる。残る差異は、この見積りに含まれていない受信機側のフィルタ特性等による影響と思われる。

5. むすび

国際標準の補強システムである SBAS の一つとして、日本は MSAS を整備・運用してきている。SBAS 信号は測距信号として使用できるが、MSAS については 2020 年 4 月のシステム更新により使用衛星が変更されていることから、その前後の測距精度の比較を試みた。

2020 年 1 月及び 6 月の各 1 週間を対象として調べた結果、MSAS 信号についてコード擬似距離の標準偏差が 30% 以下に改善し、GPS 並みになっていることを確認した。この改善量は、更新後の MSAS V2 が使用している準天頂衛星 3 号機 (QZS-3) における送信電力の向上及び信号帯域幅の拡大によりおおむね説明できる。

現状の MSAS は測距機能のために必要なメッセージを提供していないが、測距信号の品質としては GPS と同等の測距精度が実現されていることがわかった。今後に予定されている MSAS 衛星の追加後には、こうした知見を踏まえて測距機能が提供され、MSAS 衛星が航法衛星としても機能することを期待したい。

(令和 3 年 10 月 7 日受付, 令和 3 年 11 月 17 日再受付)

文 献

- [1] Aeronautical Telecommunications, Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, International Standards and Recommended Practices, 7th Ed., ICAO, July 2018.
- [2] NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Segment Interfaces, Global Positioning Systems Directorate, IS-GPS-200, Rev. J, April 2018.
- [3] 真鍋英記, “運輸多目的衛星用航法補強システム (MSAS) の供用開始,” GPS/GNSS シンポジウム, pp. 35–39, 東京, Nov. 2007.
- [4] 本田祐美子, “航空衛星センターと MSAS 運用業務の紹介,” GPS/GNSS シンポジウム, pp. 41–45, 東京, Nov. 2007.
- [5] 麻生貴広, “MSAS の運用状況と地殻変動への対応,” GPS/GNSS シンポジウム, pp. 21–26, 東京, Nov. 2011.
- [6] 田代英明, “QZSS を利用した SBAS サービス,” GPS/GNSS シンポジウム, pp. 58–63, 東京, Oct. 2016.
- [7] 田代英明, “QZSS を利用した SBAS サービス,” GPS/GNSS シンポジウム, pp. 21–28, 東京, Nov. 2017.
- [8] 田代英明, “準天頂衛星システムを利用した SBAS の性能向上について,” 航空無線, no.95, pp. 22–28, Spring 2018.
- [9] 小暮聡, “準天頂衛星システムの最新状況,” GPS/GNSS シンポジウム, pp. 2–13, 東京, Oct. 2020.
- [10] 坂井丈泰, “国際標準補強システム SBAS の現況,” GPS/GNSS シンポジウム, pp. 154–162, 東京, Oct. 2020.
- [11] ITU Satellite Filing, As of Aug. 2018.
- [12] “MSAS 総合調整進捗報告,” MSAS 技術評価検討委員会資料集, 資料 14-1, 国土交通省航空局, March 2006.
- [13] T. Sakai and S. Kogure, “QZSS Update,” Proc. 31st Int’l Tech. Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+), pp. 804–848, Sept. 2018.
- [14] 松本一実, “高感度 GPS 受信機,” GPS ハンドブック, 5.3 節, 朝倉書店, pp. 119–123, 東京, 2010.
- [15] S. Gunawardend and Y. Morton, “Fundamentals and Overview of GNSS Receivers,” Position, Navigation, and Timing Technolo-

gies in the 21st Century, Chapter 14, pp. 309–338, John Wiley & Sons, 2021.

- [16] 宮野智行 (訳), “第 10 章 信号対雑音比と測距精度,” 精説 GPS 基本概念・測位原理・信号と受信機, 改訂第 2 版, pp. 367–399, 京都, 2010.
- [17] “GEO Bias Analysis Tool,” Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment, RTCA, DO-229, Rev. F, Appendix T, June 2020.
- [18] 京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センタ, “Kp 指数,” <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index-j.html>, 参照 May 14, 2021.

著者紹介

坂井 丈泰 (正会員) 平 8 早大院修士課程了。同年電子航法研究所入所。現在, 同所航法システム領域上席研究員。衛星航法システムの航空機応用に関する研究に従事。平 14~15 米国スタンフォード大学客員研究員, 平 25 ミュンヘン連邦軍大学客員研究員, 平 26~30 宇宙航空研究開発機構主幹研究開発員。平 18 IEEE AES 優秀論文賞, 平 19 米国航法学会 ION GNSS 優秀論文賞。東京海洋大学客員准教授。博士(工学)。

北村 光教 (正会員) 平 22 早大理工学部卒, 平 27 同大学院博士課程了。博士課程では都市部環境下における衛星測位の高精度化に関する研究に従事。現在, 電子航法研究所において SBAS の次世代化に関する研究に従事。博士(工学)。