

6. MSAS の測距機能とその性能評価

航法システム領域 ※坂井 丈泰, 北村 光教, 渡邊 浩志

1 まえがき

GPS に代表される衛星航法システムの性能を大陸規模の広い範囲にわたって向上させる広域補強システムとして、ICAO（国際民間航空機関）による標準規格 SBAS（Satellite-Based Augmentation System）がある。SBAS 規格の補強システムとしては、米国の WAAS、我が国の MSAS、欧州の EGNOS、そしてインドの GAGAN が運用されており、ロシア・中国・韓国も整備を進めている。

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利用することを意味しており、運用開始当初の MSAS はこの機能を提供していたが、2015 年 3 月以降は公式には提供されていない。一方、MSAS については 2020 年 4 月にシステム全体が更新され、地上監視局の配置が変更されたほか、静止衛星として準天頂衛星 3 号機（QZS-3）を使用することとなった。QZS-3 は衛星搭載の周波数標準により SBAS 信号を生成することから、地上で信号を生成していた従前の MSAS に比べて、測距精度が改善されている可能性がある。

当所では MSAS 信号の連続観測を実施しており、観測データを蓄積している。過去の観測データを使用して、MSAS の更新前後の測距性能を調査したので、その結果を報告する。

2 SBAS の測距機能

ICAO による GNSS SARPS 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[1]。補強システムに対する呼称として、補強される側の GPS 及び GLONASS はコアシステムと呼ばれる。

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 で、その定義は GNSS SARPS による。

SBAS が提供する情報はメッセージ単位で送信される。毎秒 1 個のメッセージが途切れることなく送信され、メッセージの内容は 0～63 のメッセージタイプ (MT) で識別される。測距機能に直接的に関係するのは MT 9 (GEO ranging function parameters) 及び MT 17 (GEO satellite almanacs) であり、それらの内容は表 1～表 4 の通りである。

MT 9 では GPS のエフェメリスに相当する SBAS 衛星の位置及びクロック誤差が提供される。MT 17 には、SBAS 衛星の概略の位置情報とともに、ステータス情報として提供されるサービスやサービスプロバイダの識別情報 (Service provider identifier, MSAS では 2) が含まれている。MT 9 はメッセージを送信している SBAS 衛星自身の情報しか含まないが、MT 17 は 3 衛星分の情報を収容できる。

SBAS の測距機能を利用するには、(i) MT 17 のステータス情報において測距機能が ON であることと、(ii) MT 9 の URA が 15 (“Do Not Use”) ではないことを確認したうえで、(iii) MT 9 の衛星位置及びクロック補正値を擬似距離に適用する。

ところで、SBAS 対応アビオニクス機器については米国 RTCA による技術基準 (MOPS) [2] が適用される。MOPS では、SBAS 衛星の擬似距離を使用する場合はディファレンシャル補正情報を適用することが定められており、これには補正値に付随する UDREI も含まれる。UDREI とはディファレンシャル補正適用後の精度をあらわすインデックスであり、その定義は表 5 の通りである。UDREI=14 (“Not Monitored”) は SBAS による補強の対象ではないことを意味し、対応するディファレンシャル補正情報は無効である。UDREI=15 (“Do Not Use”) は SBAS が異常を検出していることを意味し、当該衛星の擬似距離を使用してはならない。すなわち、UDREI \geq 14 あるいは補正値

表1 メッセージタイプ9(静止衛星測距機能)

Data	Bits	Range	Resolution
(Reserved)	8	—	—
$t_{0,GEO}$	13	0 to 86384	16
URA	4	0 to 15	1
X_G	30	± 42949673 m	0.08 m
Y_G	30	± 42949673 m	0.08 m
Z_G	25	± 6710886.4 m	0.4 m
\dot{X}_G	17	± 40.96 m/s	0.625 mm/s
\dot{Y}_G	17	± 40.96 m/s	0.625 mm/s
\dot{Z}_G	18	± 524.288 m/s	4 mm/s
\ddot{X}_G	10	± 6.4 mm/s ²	1.25 μ m/s ²
\ddot{Y}_G	10	± 6.4 mm/s ²	1.25 μ m/s ²
\ddot{Z}_G	10	± 32 mm/s ²	6.25 μ m/s ²
a_{Gf0}	12	± 0.9537 μ s	2 ⁻³¹ s
a_{Gf1}	8	± 0.11642 ns/s	2 ⁻⁴⁰ s/s

表2 メッセージタイプ17(静止衛星アルマナック)

Data	Bits	Range	Resolution
(Reserved)	2	—	—
PRN	8	0 to 210	1
Health & status	8	—	—
X_{GA}	30	± 42598.4 km	2.6 km
Y_{GA}	30	± 42598.4 km	2.6 km
Z_{GA}	25	± 6656 km	26 km
\dot{X}_{GA}	17	± 40 m/s	10 m/s
\dot{Y}_{GA}	17	± 40 m/s	10 m/s
\dot{Z}_{GA}	18	± 480 m/s	60 m/s
$t_{almanac}$	11	0~86336 s	64 s

が無効の場合は SBAS 衛星の擬似距離は使用できない。

MOPS では、SBAS の測距機能を利用する場合は、MT 17 に記載されている衛星位置と利用する衛星が送信している MT 9 から求めた衛星位置の差が 200 km 以内であることを確認することも定められている。この目的は相互相関の影響により別衛星の信号を追尾している場合にそれを検出することで、SBAS 衛星はいずれもドップラ周波数が小さいことから相互相関が大きくなりやすいことの対策である。測距機能を利用しないにもかかわらずこの確認を実行するアビオニクス機器が存在することから、いずれの SBAS も測距機能の提供の有無によらず MT 9 を送信している。すなわち、MT 9 が送信さ

表3 URA (User Range Accuracy) の定義 (RMS)

URA	Accuracy [m]	URA	Accuracy [m]
0	2	8	64
1	2.8	9	128
2	4	10	256
3	5.7	11	512
4	8	12	1024
5	11.3	13	2048
6	16	14	4096
7	32	15	“Do Not Use”

表4 Health and Status (MT 17) の内容

Bit	Contents	Range
0	Ranging	0: ON 1: OFF
1	Precision corrections	
2	Satellite status and basic corrections	—
3	(Spare)	
4 to 7	Service provider identifier	0 to 15

表5 UDREI の定義

UDREI	σ_{UDREI}^2 [m ²]	UDREI	σ_{UDREI}^2 [m ²]
0	0.0520	8	2.5465
1	0.0924	9	3.3260
2	0.1444	10	5.1968
3	0.2830	11	20.7870
4	0.4678	12	230.9661
5	0.8315	13	2078.695
6	1.2992	14	“Not Monitored”
7	1.8709	15	“Do Not Use”

れていることは測距機能が提供されることを意味しない。

3 MSAS の構成

MSAS 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 QZS-3 を使用することとなったため Michibiki-based Satellite Augmentation System に変更されている。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。

3.1 旧 MSAS (MSAS V1) ・MRS あり

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[3]-[5]。全体の構成は図1の通りであり, 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信号の送信はペ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(周波数のみ異なる)SBAS信号を生成して静止衛星にアップリンクし, これが周波数変換されて利用者向けに送信される。

2局のMCSは基本的にはそれぞれ1機ずつの静止衛星に対応しており, 神戸局(KASC: Kobe Aeronautical Satellite Center)はPRN129を用いてMTSAT-1Rから, 常陸太田局(HASC: Hitachi-Ota ASC)はPRN137によりMTSAT-2からSBAS信号を送信する。ただし, 両静止衛星はデュアルPRN機能をもち, いずれか一方あるいは両方のMCSの信号を中継できた。これにより, 衛星の保守作業時においてもアベイラビリティを下げることなくMSASの運用を継続できた。

この時期のMSASはMRSがあることで静止衛星の軌道標定精度が良好であり, 公式に測距機能を提供していた。ただし, 周辺国との周波数調整によりトランスポンダの帯域幅が2.2MHzに限られていたことから測距精度はそれほど良好ではなく, URA=6(16m)程度が設定されていた。当然ながら, PRN129及びPRN137に対するディファレンシャル補正情報も送信されていた。

3.2 旧MSAS (MSAS V1)・MRSなし

2005年に打ち上げられたMTSAT-1Rについては, 10年間の運用期間が経過したことから2015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[7]。2局のMRSについては, これに先立って同年3月30日をもって廃止されていた。

静止衛星は1機となったが, MSAS信号についてはKASC及びHASCで引き続き生成され, MTSAT-2のデュアルPRN機能によりそれぞれ

PRN129及びPRN137として送信された。

測距機能は提供されないこととなったが, MT17では測距機能がONであり, MT9ではURA=14(4096m)が設定され, 正常な衛星位置及びクロック補正值が送信されていた。この理由は先に述べたアビオニクス機器の仕様による。ただし, PRN129及びPRN137に対するディファレンシャル補正情報についてはUDREI=14が設定され(ただし補正值は無効値ではない), 測距機能を利用できないようにされていた。

3.3 新MSAS (MSAS V2)

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た[6]-[9]。静止衛星はMTSAT-2からQZS-3に切り替えられ, LISb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, バックアップ局を所沢に設置している(図2)。

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が採用しているペントパイプトランスポンダ方式ではないこととなった。これにより周波数調整上の問題が緩和されることから広い帯域幅による測距精度の改善を期待できるが, 一方で完全性の確保におけるリアルタイム応答性能には注意が払われることとなった。

GMSが倍増しているとはいえ国内局のみの構成のため, 測距機能については提供されない。全面的な更新に伴う諸作業を優先するため, 性能面についての改善は図らず, 従前の性能を維持することとされた。

利用者にとっては, MT17にPRN129に対応する衛星がなくなり, またMT9及びMT17の衛星位置が変更されている。旧システムと同様であるが, 測距機能は提供されないというもののMT17では測距機能がONであり, MT9ではURA=14が設定されている。ただし, 衛星位置が正常な一方でクロック補正值は負の最大値(-285.9m)に設定されており, PRN137に対するディファレンシャル補正情報はUDREI=14及び無効値となっている。

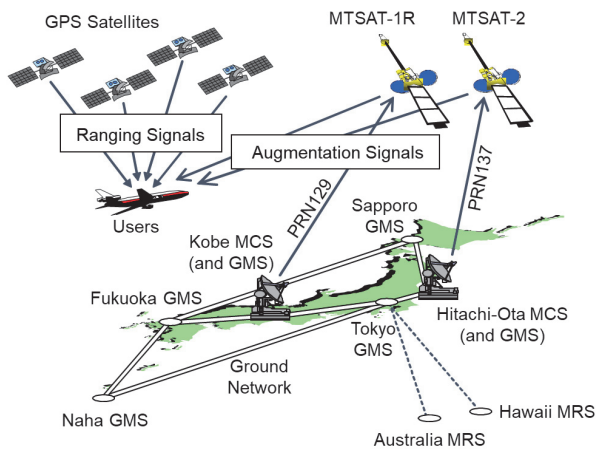


図1 運用開始時のMSASの構成

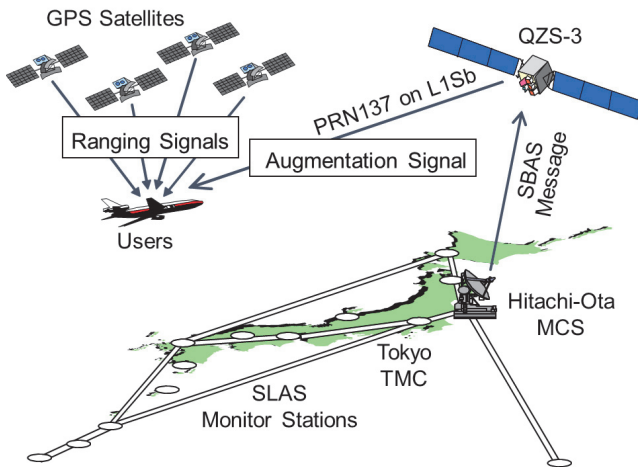


図2 現在のMSASの構成

4 測距機能の性能評価

MSASについては二度にわたり構成が変更されてきているので、それぞれの時期について測距機能の性能を評価した。なお、各時期に送信されていた測距機能に関する情報と観測データの概要をまとめると、表6の通りである。観測データのエポック間隔は1秒である。

4.1 MT 9の作成 (MSAS V2のみ)

MSAS V2については、MT 9に有効なクロック補正値が格納されていない。これをそのまま評価した結果を評価(i)とする。クロック補正値がなくても送信信号の安定度を評価することはできるが、現実的にはエフェメリス情報に相当する情報を与えたい。

現実的な評価とするために、本研究ではQZS-3のL1 C/A信号で送信された航法メッセ

表6 性能評価に使用した観測データ

システム	MSAS V1 w/MRS	MSAS V1 w/o MRS	MSAS V2
観測期間	2014年1月16~18日	2018年1月10~12日	2021年1月17~19日
KP指数	≤2-	≤2-	≤2
PRN	137	137	137
SBAS衛星	MTSAT-2	MTSAT-2	QZS-3
MT 17 Ranging	ON	ON	ON
MT 9 URA	6 (16 m)	14 (4096 m)	14 (4096 m)
MT 9 静止衛星位置	Valid	Valid	Valid
MT 9 クロック補正値	Valid	Valid	-285.9 m
ディファレンシャル補正	Valid (UDREI<14)	Valid (UDREI=14)	Invalid (UDREI=14)
受信機	NovAtel MiLLenium-STD (東京都調布市)		
アンテナ	NovAtel Model 600-L1/L2	Septentrio PolaNt-x MF	

ージ (LNAV) を使用して MT 9 を作成することとした。これを評価(ii)とする。MSAS V2でも MT 9 自体は送信されているので、観測データを格納したログファイルに含まれる MT 9 を書き換えて使用する。具体的には、MT 9 のタイムアウト時間を考慮して約 120 秒後をエポック時刻として、L1 C/A 信号の LNAV メッセージから算出した衛星位置及び速度、クロック補正値とその変化率を格納し直した。あわせて URA を 6 (16 m) に設定した。

MSAS V2 については、SBAS 衛星に対するディファレンシャル補正情報については、0 (補正なし) に設定した。従ってこの方法による評価結果にはバイアス誤差が残り、それはディファレンシャル補正情報を適切に生成することで解決されることに注意する。

4.2 評価結果

まず、それぞれの時期の受信信号の C/N₀ を図3に示す。観測時期は電離圏活動の影響が小さい冬季とし、それぞれ地磁気擾乱の度をあらかず KP 指数が小さい期間を選定した。本研究の観測環境では 2017 年末に受信アンテナが広帯域のものに交換されており、C/N₀ が若干低下するとともに雑音が増えている様子がわかる。いずれにしても十分な C/N₀ が確保されており、SBAS 信号の受信に特段の支障はない。

次に、測距信号の残差は図4のように観測さ

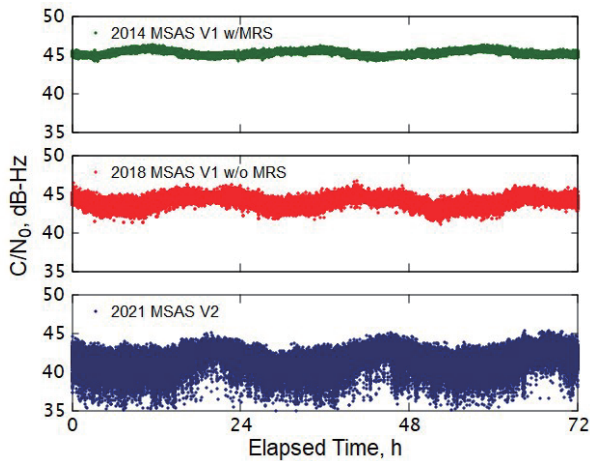


図3 受信信号の C/N₀

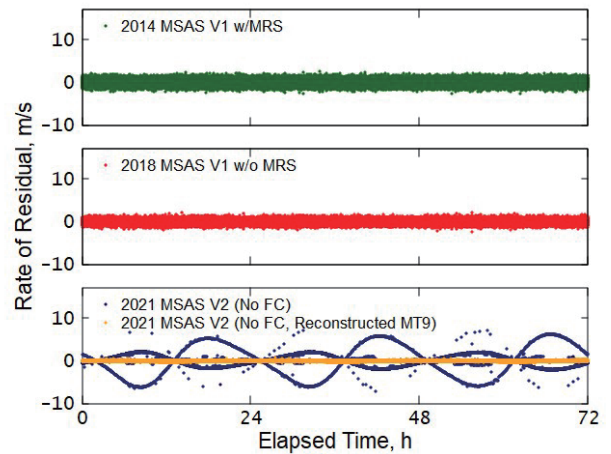


図5 残差の変化率

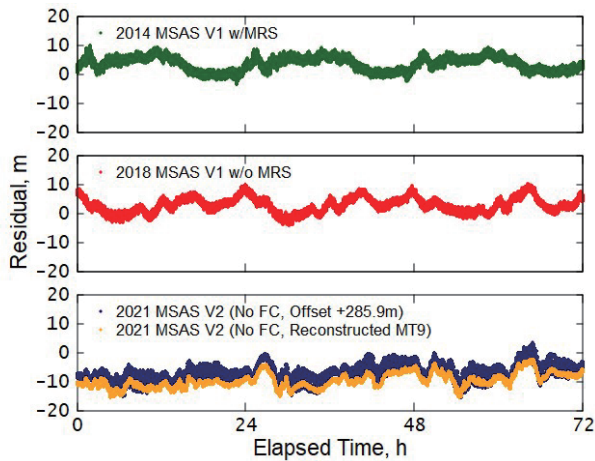


図4 測距信号の残差

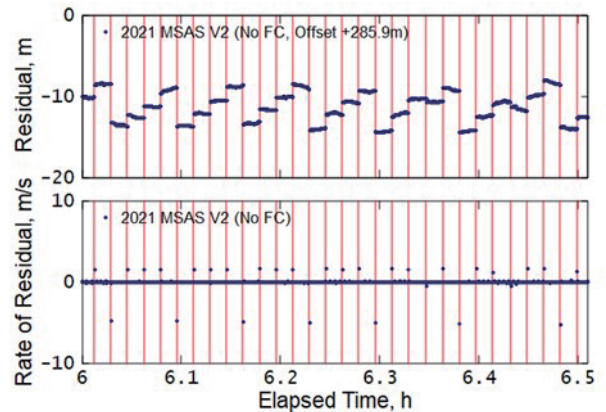


図6 残差及び残差の変化率と MT9 の送信タイミング

れた。2021 年の観測データについては、評価 (i) MSAS V2 が送信した MT 9 をそのまま使用した場合 (青)、評価 (ii) L1 C/A 信号の LNAV メッセージにより MT 9 を再構成して使用した場合 (橙)、の両方をプロットしてある。評価 (i) については、クロック補正值の設定を踏まえ 285.9 m を加えてある。いずれもキャリアスムージングは 100 秒とした。

2014 年及び 2018 年の観測データは似た傾向を示し、残差の RMS 値は 4 m 程度であった。2018 年のほうが若干ばらつきは小さいようであるが、受信アンテナの帯域が広がっている影響と思われる。MRS が廃止された影響は確認できないが、性能に変化がないと結論するには複数地点における評価結果を比較する必要がある。2021 年の MSAS V2 については評価

(i) と評価 (ii) で大きな違いはみられず、いずれも -10 m 程度のバイアスがある。ばらつき成分については、MT 9 を再構成した評価 (ii) のほうが抑えられている。

測距信号としての品質をみるために、残差の変化率 (前エポックとの差分) を調べた例を図 5 に示す。バイアス成分がなくなってばらつきが見えており、その傾向は図 4 と変わらない。すなわち、2014 年の観測データと比べると 2018 年は若干ばらつきが小さく、2021 年の評価 (ii) はもっとも良好な品質を示している。評価 (i) では周期的に大きな変化がみられ、グラフが何本かあるかのように見えている。この周期は 1 分間程度であるが、一定ではない。

この周期的な変化の原因を確かめるため、

表7 測距精度の評価

システム	標準偏差	
	残差 [m]	残差の変化率 [m/s]
MSAS V1 (MRS あり)	2.35	0.302
MSAS V1 (MRS なし)	2.54	0.208
MSAS V2 (ディファレンシャル補正なし)	2.94	0.291
MSAS V2 (ディファレンシャル補正なし, MT 9を再構成)	2.45	0.0272

MSAS V2 の評価 (i) について図4及び図5の一部を拡大し、MT 9を受信したタイミング（赤線）を重ねると、図6のようであった。大きな変化を生じるのはMT 9が更新されるタイミングであり、前後のMT 9同士でステップ状の差異があることがわかる。現在のMSAS V2においては測距機能について十分な性能をもって提供する意図はなく、相互相関の対策としてMT 17との比較を行うアビオニクス機器のためにMT 9を送信していることがこの様子からもうかがえる。

残差及びその変化率の標準偏差は表7の通りであり、上記の傾向を反映している。2021年の観測データについてMT 9を再構成して使用した結果からはMSAS V2が送信しているSBAS信号の品質が良好であることが示唆されるが、これを測距性能に反映するにはMT 9の生成方式を改める必要がある。

5 むすび

測距機能に関連する情報を中心として運用開始以来のMSASのシステム構成を整理するとともに、新旧のMSASについて測距性能を調査した結果を報告した。

2014年、2018年、及び2021年の観測データから得られた知見は次の通りである：(i) 静止衛星MTSATを使用していたMSAS V1では測距精度は4 m RMS程度であり、標定局MRSの有無による測距性能の差は確認できなかった、(ii) 現行のMSAS V2では測距機能は公式には提供されていないが、ディファレンシャル補正情報を完全に適用せずとも標準偏差3 m程度の測距精度を期待できる、(iii) MSAS V2で

は、SBAS衛星の位置情報を含むMT 9の生成方式の仕様により擬似距離残差にステップ状の変化がみられる、(iv) MSAS V2では擬似距離残差の変化が小さく、SBAS信号としての品質は良好であることが示唆される。MSAS V2では準天頂衛星3号機(QZS-3)を使用していることでSBAS信号の品質が改善しているものと思われるが、これを測距性能に反映するにはエフェメリス情報を送信するMT 9メッセージの生成方式を改める必要がある。

参考文献

- [1] International Standards and Recommended Practices, Annex 10 to the Convention on Civil Aviation: Aeronautical Telecommunications, Vol. I: Radio Navigation Aids, 6th Ed., July 2006.
- [2] Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment, RTCA, DO-229, Rev. F, June 2020.
- [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] 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.
- [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. 58-63, 東京, Oct. 2016.
- [8] 儀宝正志, 次期MSASの整備状況について, 航空無線, No. 94, pp. 13-19, Winter 2017.
- [9] 田代英明, 準天頂衛星システムを使用したSBASの性能向上について, 航空無線, No. 95, pp. 22-28, Spring 2018.