

7.1 補強信号 L1-SAIF について

坂井 丈泰 (電子航法研究所)

sakai@enri.go.jp

7.1.1 はじめに

我が国初の実用測位衛星である準天頂衛星「みちびき」は、周知のとおり平成 22 年 9 月 11 日に種子島宇宙センターから H-IIA ロケット 18 号機により打ち上げられた。当日の天候は快晴、予定通り 20:17 に打ち上げられたロケットは第一段の燃焼終了が肉眼でわかるほどの好コンディションを順調に飛行し、28 分 27 秒後に「みちびき」を分離した。その後、9 月 27 日までに「みちびき」は所定の軌道に高い精度をもって投入され、10 月中旬現在はミッション機器の機能確認試験が行われている。

「みちびき」は、準天頂衛星システム QZSS (quasi-zenith satellite system) を構成する衛星である。QZSS のミッションは我が国における衛星測位の高度化であり、GPS と互換性をもつ測位補完信号と、GPS の測位性能を改善するための測位補強信号を放送する^{1/}。QZSS の特長のひとつはユーザに対する衛星の仰角を高くすることで、都市部や山間部における測位に有効と考えられている。この性質を利用して広い範囲にわたるユーザに対して高仰角から補完信号及び補強信号を放送することで、アベイラビリティが高く、かつ測位精度及び信頼性にすぐれた測位システムの構築を目指しているのである。

QZSS が放送する測位信号のうち、サブメータ級の補強信号である L1-SAIF (submeter-class augmentation with integrity function) については、国土交通省総合政策局の委託を受けて電子航法研究所が研究開発を進めてきた。信号形式については ICAO (国際民間航空機関) による補強信号の国際標準規格 SBAS (satellite-based augmentation system: 静止衛星型衛星航法補強システム) をベースとして、GPS L1 信号と同一の周波数にて広域補強情報を放送することとした。すでに信号仕様 IS-QZSS が公表され、他の補完・補強信号とともに L1-SAIF 信号の詳細が規定されている^{2/}。

電子航法研究所では、L1-SAIF 信号の設計にあわせて、L1-SAIF 信号により放送する補強情報を生成する L1-SAIF 実験局 (L1SMS :

L1-SAIF master station) の整備を進めてきた。以下、「みちびき」の概要とともにこの実験局の概要を紹介し、最近実施した総合検証試験の結果を報告する。

7.1.2 準天頂衛星「みちびき」

準天頂衛星システムは、「準天頂衛星システム計画の推進に係る基本方針」(地理空間情報活用推進会議、2006 年 3 月 31 日)及び「地理空間情報活用推進基本計画」(2008 年 4 月 15 日閣議決定)に基づいて開発が進められてきた。これらによれば、準天頂衛星初号機を含む第一段階のシステム整備・運用は宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が担当し、総務省・文部科学省・経済産業省・国土交通省の研究開発 4 省による技術実証ならびに民間及び他府省庁による利用実証を行い、第一段階の評価を踏まえて、初号機を含め 3 機の準天頂衛星を整備する第二段階に進むものとされている。

「みちびき」は測位ペイロードを主要ミッション機器とする三軸姿勢制御衛星であり、技術試験衛星型 (ETS-) で得られた研究開発成果を活かしながら、商用静止衛星バスシステム (DS2000) をベースとして開発された。準天頂衛星「みちびき」の外観を図 1 に、主要諸元を表 1 に示す。「みちびき」の主制御局 (MCS: master control station) は JAXA 筑波宇宙センターに、追跡管制局は JAXA 沖縄通信所に設置されてい

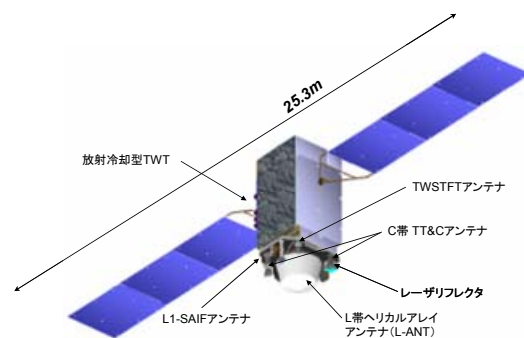


図 1 準天頂衛星「みちびき」の外観図

表 1 準天頂衛星「みちびき」の主要諸元

項目	諸元		
打上げ	ロケット：H-IIA（H2A-202）		
軌道	準天頂軌道		
質量	4,020kg（ドライ質量：1,802kg）		
設計寿命	10年（目標12年）		
サイズ	2.9m(D) × 3.0m(W) × 6.0m(H)（打上げ時）		
発生電力	5.3 kW 以上		
ミッション 機器	L 帯測位信号	L1-C/A	1575.42 MHz
		L1-SAIF	1575.42 MHz
		L1C	1575.42 MHz
		L2C	1227.60 MHz
		L5	1176.45 MHz
		LEX	1278.75 MHz
	時刻比較信号	上り	14.43453 GHz
		下り	12.30669 GHz

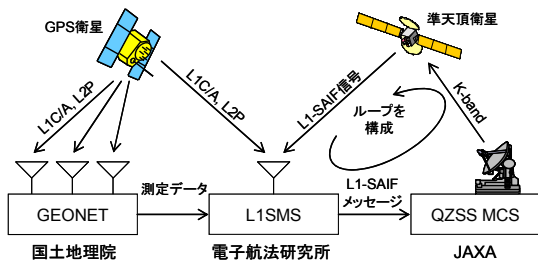


図 2 準天頂衛星 L1-SAIF 補強系の全体構成

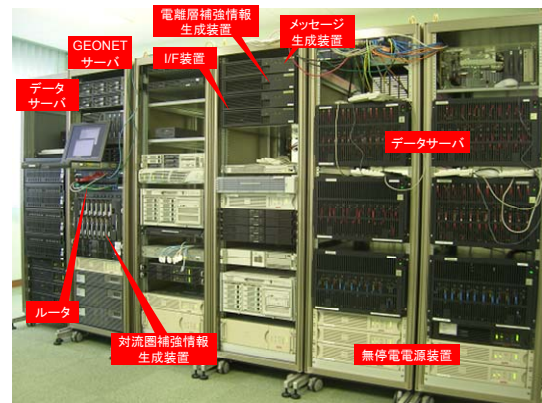


図 3 L1-SAIF 実験局（L1SMS）の外観

る。

7.1.3 L1-SAIF 信号の概要

L1-SAIF 信号は GPS と同一の L1 周波数（1575.42 MHz）にて準天頂衛星 QZS より放送されることとされており、GPS と同じ C/A コードによる拡散変調方式が採用されている（PRN 番号は 183 ~ 192、変調速度も GPS と同じ 1.023 Mcps）/2/。ただし符号化速度は GPS の 50 sps に対して 500 sps と高速化されており、符号化率 1/2 の畳込み符号が用いられているためデータ速度は 250 bps となる。すべての L1-SAIF メッセージは 250 ビットから構成されており、毎秒 1 メッセージが放送される。こうした信号形式及びメッセージ構造は SBAS と同一であり、ユーザ受信機の開発負担の軽減を図っている。また、アンテナ及び高周波回路についても追加や変更の

必要がなく、通常の GPS 受信機のソフトウェアを修正するのみで L1-SAIF に対応することができるよう配慮されている。

L1-SAIF メッセージには 0 ~ 63 のタイプが定義されており、それぞれのフォーマットに従って補正情報が収容される。タイプ 0 ~ 28、62 ~ 63 は SBAS と同一の内容であり、ディファレンシャル補正情報は高速補正、長期補正、電離層遅延補正に分けられ、それぞれ衛星クロック（変化の速い成分）、衛星軌道及びクロック（変化が遅い成分）、電離層伝搬遅延の補正に用いる。タイプ 52 ~ 60 は L1-SAIF で追加してあるメッセージで、大気遅延補正の高精度化や QZS 自身の軌道情報を放送するために用いる。

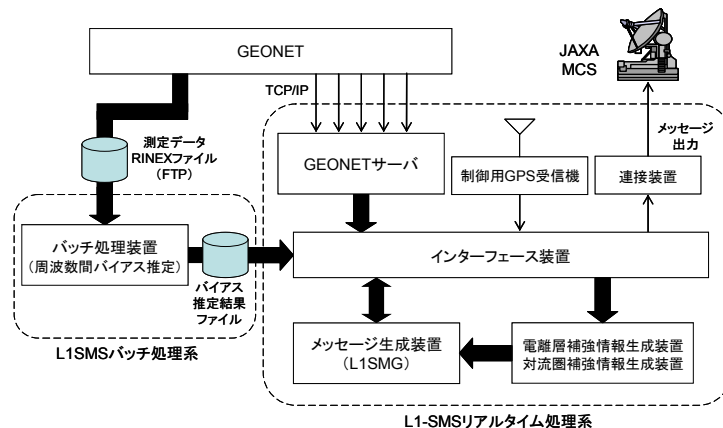


図4 L1-SAIF 実験局 (L1SMS) の構成

IS-QZSS には、信号形式及びメッセージ内容の定義に加えて、ユーザ受信機側の処理アルゴリズムも記載される。これは補正情報の利用手順をあらかじめ詳細に定めることで補正情報の解釈に関する誤りを防止するため、GPS IS や SBAS SARP_s と同様である。

L1-SAIF はその名のとおりのサブメータ級の測位性能を提供するものであるが、IS-QZSS で定義したメッセージによりこの目標が達成可能であることを、オフライン試験などにより確認している^{/3/ ~ /4/}。

7.1.4 L1-SAIF 実験局

準天頂衛星は L1-SAIF 信号を放送する機能を持つが、これに乗せる補強メッセージについては地上実験局にて生成し、衛星にアップリンクする。このために当所実験室に L1-SAIF 実験局 (L1SMS) を整備しており、JAXA の QZSS MCS とは商用通信回線により接続している。

GPS 測定データは国土地理院の電子基準点ネットワーク (GEONET) から取得する。データ配信拠点である日本測量協会とは IP-VPN 回線により接続しており、当所実験室までリアルタイムに測定データが伝送される。

全体の構成は、図 2 のとおりである。L1-SAIF 実験局は GEONET の GPS 測定データを受信・処理し、生成した補強メッセージを QZSS MCS に送信する。このメッセージは L1-SAIF 信号に乗せられてユーザに向けて放送され、また同時に L1-SAIF 実験局もこれを受信し、放送内容のチェックを行う。

L1-SAIF 実験局はいくつかのサブシステムから構成されており、各サブシステムは相互に接続

されており連携して動作する^{/5/}。L1-SAIF 実験局の外観を図 3 に、内部構成を図 4 に示す。

メッセージ生成装置 (L1SMG : L1-SAIF message generator) は、GEONET より得た測定データに基づいて L1-SAIF メッセージをリアルタイムに生成する。メッセージは毎秒 1 個が出力される。メッセージ生成装置が使用する GEONET 局を、GMS (ground monitor station) と称する。GMS 局数は最低 4 局であるが、上限は特に設けていない。

メッセージ生成装置はプレーナフィット方式により電離層補強情報を生成する機能を備えており、外部に設ける電離層補強情報生成装置からの補強情報が得られない場合は、内蔵のプレーナフィット機能を実行することとしてある。

電離層補強情報生成装置^{/6/ ~ /7/}は、GEONET より受信した測定データから、電離層遅延に関する補正情報及びインテグリティ情報を生成する。メッセージ生成装置は少ないモニタ局の測定データから毎秒リアルタイムにメッセージを生成する必要があるが、電離層補強情報生成装置は多数 (~ 200 局程度) の電子基準点における測定データを用いて 30 秒 ~ 150 秒毎に電離層補強情報を生成するものであることから、これらの処理装置を分離することとしている。電離層補強情報生成装置が使用する GEONET 局を、IMS (ionospheric monitor station) と呼ぶ。

L1-SAIF 実験局の動作については、リアルタイム試験などにより確認し、所要の性能を達成できる見通しを得ている^{/6/ ~ /8/}。一例として、2008 年 1 月 19 ~ 23 の 4 日間にわたり L1-SAIF 実験局を動作させ、出力された L1-SAIF メッセージを評価した結果を図 5 に示す。これは GEONET

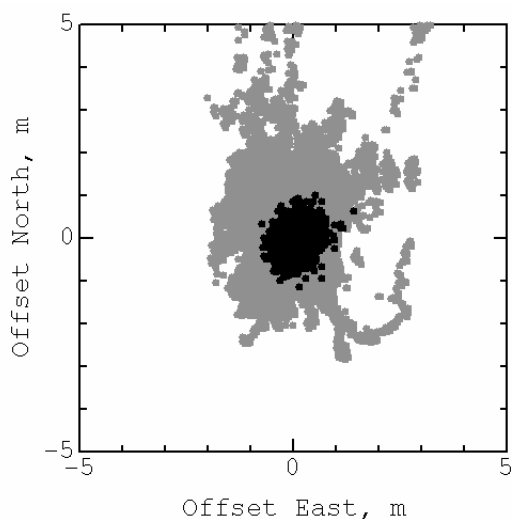


図5 ユーザ測位誤差の評価例（灰色：GPSのみ、
黒色：L1-SAIF補強あり）

高山局（940058）をユーザ局とみなして評価した結果で、4日間にわたる測位精度は水平方向で0.292 mであった（RMS値）。測量級の受信機及びアンテナによるマルチパスの少ない状況下における実験であることもあり、たいへん良好な測位精度が得られた。

7.1.5 他機関との連携稼働試験

L1-SAIF 実験局の開発に伴い、他機関との間で表2のとおり各種の試験を実施した。以下、その概要を報告する。

（1）測位系間外試験その1

L1-SAIF 実験局と QZSS MCS のインターフェースを確認するため、平成20年11月18日に本試験を NEC 府中事業所にて実施した。正式名称は「準天頂衛星システム（QZSS）高精度測位実験システム JAXA-ENRI 測位系間外インターフェース試験1」である。本試験の具体的な目的は、L1-SAIF 実験局と QZSS MCS で実際に実装されているインターフェースが JAXA-ENRI 間で取り決めた ICD（インターフェース仕様書）通りであること、また両者間でのデータの授受が問題なく行われることの確認である。

JAXA-ENRI 間の通信回線が未設置であることから、試験対象機材はすべて同一の場所に持ち込んでおり、通信回線は試験に含まれていない。実験実施場所の都合から L1-SAIF 実験局はインターフェース装置を除いてシミュレータを使用

し、また MCS については製造途中であったことからデータ集配信装置以外はシミュレータである。

本試験を実施したところ、実装上の細かい齟齬がいくつか発見されたものの、データ授受に大きな問題はないことを確認した。発見された不具合点は、試験後に改修した。

（2）測位システム試験

L1-SAIF 実験局と QZSS MCS に加え、衛星搭載系も含めた補強メッセージ伝送系全体の整合性を試験するため、平成20年12月25日に本試験を実施した。正式名称は「準天頂衛星システム（QZSS）高精度測位実験システム 測位システム試験（PFM）高精度補正技術適合性試験」である。本試験においては、測位系間外試験その1の使用機材に加え、航法ペイロード（EM）及び L1-SAIF プロトタイプ受信機を使用し、NOC（navigation onboard computer：搭載計算機）におけるメッセージ受信・変調処理や RF レベルのユーザインターフェースを確認することが目的である。

本試験に伴い NOC への入力データに若干の齟齬が発見されたため、試験後に改修した。

（3）ETS- 利用実験

平成18年12月18日に打ち上げられた技術試験衛星 型（ETS- =きく8号）については、通信・測位技術実証実験のほかに、大学や研究機関が参加する利用実験が実施された。当所はこれに参加し、平成21年2月17～18日に衛星回線を使用した L1-SAIF 実験局の動作試験を行った。

当所実験室（東京都調布市）の L1-SAIF 実験局から ETS- 実験用端末装置を用いて補強メッセージをアップリンクし、当所岩沼分室（仙台空港内）に設置した端末装置にてこれを受信、L1-SAIF プロトタイプ受信機に入力する構成とした。L1-SAIF プロトタイプ受信機は、GPS アンテナから L1-SAIF 信号を受信する以外にも、Ethernet ポートから TCP/IP 接続にて L1-SAIF メッセージを入力し、これを処理させることが可能である。

本実験により、衛星回線を介して L1-SAIF メッセージを伝送して正常に動作することを確認した。実験結果の例としては、補強後の測位誤差が図6のように得られている。

（4）測位系間外試験その2

JAXA-ENRI 間の通信回線を設置したことを受け、平成22年1月7日に本試験を実施した。

表2 L1-SAIF 実験局に関連して他機関と実施した試験

試験略称	実施時期	使用機材
測位系間外試験その1	平成20年11月	(NEC 府中) L1SMS, MCS
測位システム試験	平成20年12月	(NEC 府中) L1SMS, MCS, NP-EM, P-RX
ETS- 利用実験	平成21年2月	(ENRI 調布) L1SMS, ETS- 端末装置 (軌道上) ETS- (ENRI 仙台) ETS- 端末装置, P-RX
測位系間外試験その2	平成22年1月	(ENRI 調布) L1SMS, (JAXA つくば) MCS
測位地上系総合試験	平成22年2月	(ENRI 調布) L1SMS, (JAXA つくば) MCS
総合検証試験	平成22年2月	(ENRI 調布) L1SMS, (JAXA つくば) MCS (MELCO 鎌倉) NP-PFM, P-RX

NP: 航法ペイロード, EM: エンジニアリングモデル, PFM: プリフライトモデル, P-RX: L1-SAIF プロトタイプ受信機

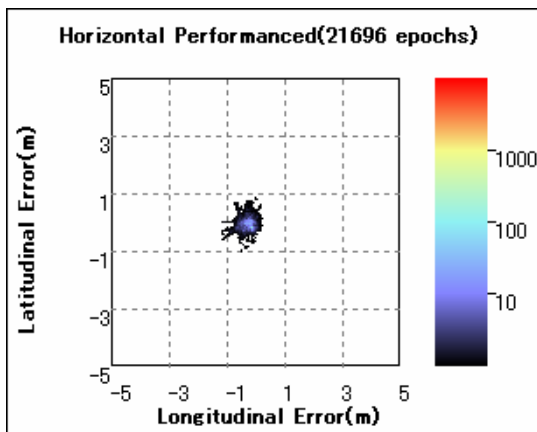


図6 L1-SAIF メッセージ適用後のユーザ測位誤差 (ETS- 利用実験)

正式名称は「準天頂衛星システム (QZSS) 高精度測位実験システム JAXA-ENRI 測位系間外インターフェース試験2」である。本試験の内容は、測位系間外試験その1では試験の対象外とした JAXA-ENRI 間通信回線について、実機相当の機材を設置して再度同様の試験を行うことである。すなわち、L1-SAIF 実験局は当所実験室、QZSS MCS は JAXA 筑波宇宙センター内に設置されており、これらを商用通信回線で接続した。

本試験を実施したところ、ICD の変更に伴う細かい齟齬がいくつか発見され、これらについては試験中あるいは試験後に改修した。

(5) 測位地上系総合試験

JAXA と各実験担当機関の相互間の地上系インターフェース試験がいずれも完了したことを

受け、平成22年1月25日~2月5日に本試験を実施した。正式名称は「準天頂衛星システム (QZSS) 高精度測位実験システム 測位地上系総合インテグレーション試験」である。直前に測位系間外試験その2を実施していたことから、当所が関係するインターフェースについては特に問題はなかった。

(6) 総合検証試験

以上の試験の完了を受け、準天頂衛星打上げ前の最終的な全体システム試験として、本試験を実施した。正式名称は「準天頂衛星システム (QZSS) 高精度測位実験システム 総合システム検証試験」である。当所が関係したのは試験全体のうちの高精度補正技術機能確認試験であり、平成22年2月25日に実施した。

本試験については、いずれも実機相当の機材を使用して行われた。L1-SAIF 実験局は当所実験室、QZSS MCS 及び追跡管制系の主要部は JAXA 筑波宇宙センター内に設置されており、これらを商用通信回線で接続した。追跡管制系の搭載部分、航法ペイロード (PFM) 及びプロトタイプ受信機は、衛星製造者である三菱電機鎌倉製作所に設置されている。

本試験を実施したところ、NOC とのインターフェースに若干の齟齬が発見され、いずれも試験中に改修した。

7.1.6 試験信号の受信

準天頂衛星「みちびき」は、打上げ後約3ヶ月をかけて初期チェックアウトを実施し、衛星各部

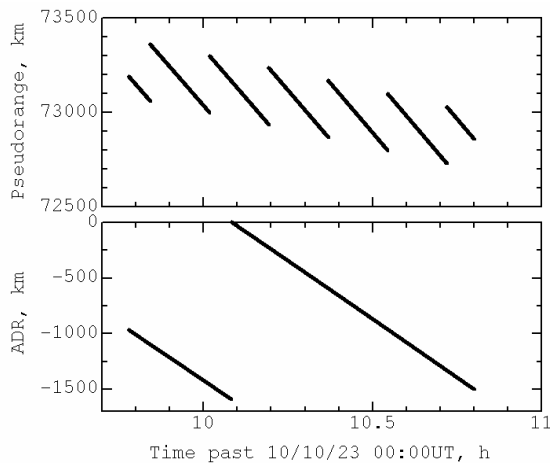


図7 L1-SAIF 試験信号の受信例（仙台空港、L1-SAIF プロトタイプ受信機）

の機能が正常であることを確認することとなっている。現在（2010年10月中旬）はその初期チェックアウトが行われているところであるが、この期間中に L1-SAIF の試験信号を受信した。

2010年10月23日09:46:48～10:48:07（GPS時刻）にかけて受信された L1-SAIF 試験信号の擬似距離及び搬送波位相積算値を、図7に示す。仙台空港内にある電子航法研究所岩沼分室に設置してある L1-SAIF プロトタイプ受信機（古野電気製）により受信した。

いずれの測定値も何らの補正も施していないため、主に受信機クロックの影響による変化がみられる。擬似距離には 1ms 単位のクロック調整による影響がみられる一方、搬送波位相については出力ビット数の制約により約 1596.3km を単位としたジャンプが起きる様子がわかる（前者は一般的な仕様であるが、後者は当受信機に固有の性質である）。以上を勘案すれば受信結果は妥当であり、L1-SAIF 試験信号は正常に放送されているものと判断できる。

7.1.7 おわりに

準天頂衛星「みちびき」の概要とともに、国土交通省総合政策局による委託を受けて当所で整備を進めてきた L1-SAIF 実験局の概要を述べ、各種試験結果を報告した。平成22年2月に実施した総合検証試験をもって準天頂衛星の打上げ前の試験はすべて完了し、JAXA 及び各実験担当機関の機材の動作を確認したところである。当所機材についても試験の結果は問題ない。

準天頂衛星「みちびき」は、所定の軌道に投入

後、順調に初期チェックアウトが進められてきている。最近の試験信号の受信結果からも、L1-SAIF 信号は正常に放送できるものと思われる。今後は、「みちびき」の初期チェックアウトが終了次第、技術実証試験を開始する予定である。

参考文献

- /1/ 小暮聡 他：QZSS の開発状況、日本航海学会 GPS/GNSS シンポジウム、Nov. 2007
- /2/ IS-QZSS, Version 1.1, July 2009 (<http://qzss.jaxa.jp/is-qzss/index.html>)
- /3/ 坂井丈泰、福島荘之介、新井直樹、伊藤憲、GPS 広域補強システムのプロトタイプ評価、電子情報通信学会論文誌、vol. J89-B, no. 7, pp. 1297～1306, July 2006
- /4/ T. Sakai, et. al.: Augmentation Performance of QZSS L1-SAIF Signal, ION NTM, San Diego, CA, Jan. 2007
- /5/ 坂井丈泰、福島荘之介、武市昇、伊藤憲、準天頂衛星 L1-SAIF 実験局の構成、第8回電子航法研究所研究発表会、June 2008
- /6/ T. Sakai, et. al.: The Ionospheric Correction Processor for SBAS and QZSS L1-SAIF, ION ITM, Anaheim, CA, Jan. 2009
- /7/ 坂井丈泰、福島荘之介、伊藤憲、準天頂衛星 L1-SAIF 実験局の性能確認、第9回電子航法研究所研究発表会、June 2009
- /8/ T. Sakai, et. al.: Recent Development of QZSS L1-SAIF Master Station, ION ITM, San Diego, CA, Jan. 2010