

1.8 準天頂衛星システム技術実証：L1-SAIF サブメータ級補強実験

坂井文泰 （電子航法研究所）

sakai@enri.go.jp

1.8.1 はじめに

我が国で最初の衛星測位実証実験を行う準天頂衛星 (quasi-zenith satellite) QZS-1 は、2010年9月11日に宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 種子島宇宙センターから打ち上げられ、「みちびき」との愛称が付けられた。準天頂衛星を使用する衛星測位システムである準天頂衛星システム QZSS (quasi-zenith satellite system) 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通信・測位に有効である。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^{1/}。

QZSS が放送する測距信号のうち、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、国土交通省の委託を受けて当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及び変調方式にて広域補強情報を放送する。

当所では、「みちびき」の打上げ後、初期機能確認試験に続いて技術実証実験を実施している。以下、当所が整備した L1-SAIF 実験局 (L1SMS: L1-SAIF master station) の概要を述べるとともに、技術実証実験の概要を報告する。

1.8.2 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 1.023 Mcps の C/A コードによる拡散変調方式が採用されている。PRN 番号の割当ては表 1 のとおりで、QZS-1 の L1-SAIF 信号は PRN183 である。

補強情報の符号化方式は SBAS と同一である。

すなわち、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 メッセージは図 1 のように 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。

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 と同一の基本メッセージであり、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 独自の拡張メッセージで、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。

L1-SAIF 信号の詳細な仕様は、他の補完信号とともに IS-QZSS として規定されている^{2/}。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

表 1 準天頂衛星 L1 周波数の PRN 番号

PRN	信号名	衛星
183~187	L1-SAIF	QZS #1~5
188~192	L1-SAIF	予備
193~197	L1 C/A	QZS #1~5
198~202	L1 C/A	予備

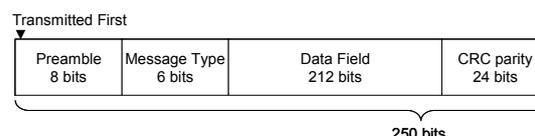


図 1 L1-SAIF メッセージの伝送フォーマット

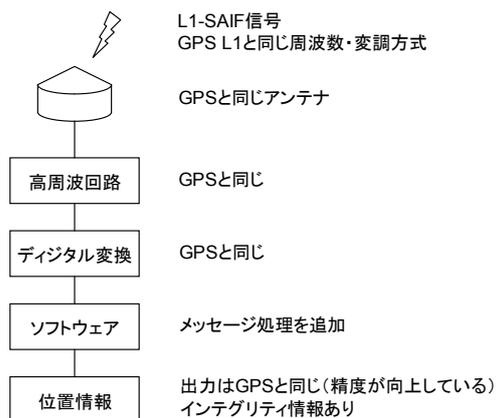


図2 L1-SAIF と GPS の共通性

関する誤りを防止するため、GPS IS や SBAS SARP_s と同様である。以上のとおり、L1-SAIF 信号の RF 形式及び変調方式は GPS と同一、メッセージ形式は SBAS と同一となっており、その関係は図 2 のように表される。

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 で定義した基本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⁾。ユーザ受信機は必ずしも表 2 のすべてのメッセージに対応する必要はなく、基本メッセージのみの対応でもサブメータ級の補強性能は得られる。

1.8.3 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整備した L1-SAIF 実験局 (L1SMS) について、概要を述べる。

1.8.3.1 全体構成

L1SMS の目的は L1-SAIF 補強信号に乗せる補強メッセージを生成することである。生成したメッセージは JAXA 筑波宇宙センターに設置されている準天頂衛星の主制御局 (MCS : master control station) に送信する必要があり、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。

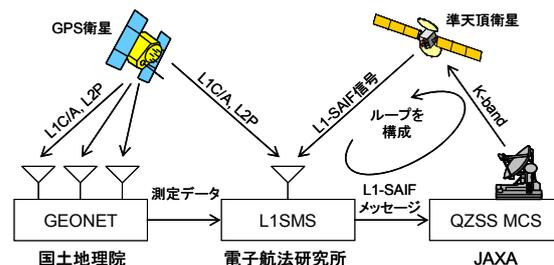


図3 準天頂衛星補強系の全体構成

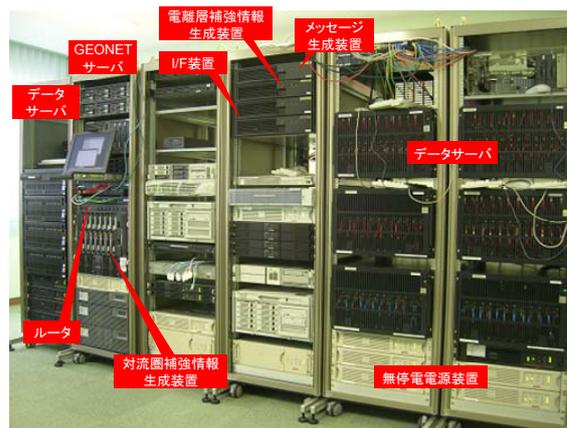


図4 L1-SAIF 実験局 (L1SMS) の外観

全体の構成は、図 3 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 JAXA 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る。現在のところ、L1-SAIF 実験局は IS-QZSS に記載されているメッセージのすべてを送出するわけではない。

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 4 に、内部構成を図 5 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

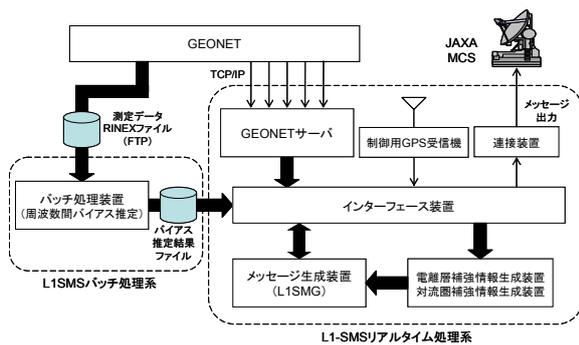


図 5 L1-SAIF 実験局 (L1SMS) の構成

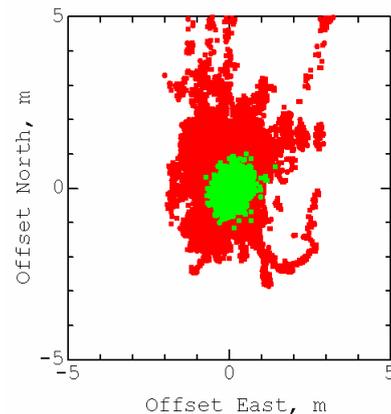


図 7 ユーザ測位誤差の評価例



図 6 L1-SAIF プロトタイプ受信機

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ー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。

1.8.3.2 L1-SAIF プロトタイプ受信機

準天頂衛星が放送するL1-SAIF信号を受信するための装置として、L1-SAIFプロトタイプ受信機を開発した(図6)。この受信機は、補強のないGPS信号のみによる測位結果と同時に、L1-SAIF補強メッセージによる補強処理が施された測位結果を出力する機能をもつ。また、実験局の評価・試験に使用するため、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。

1.8.3.3 事前試験の概要

L1-SAIF実験局の動作については、「みちびき」の打上げ前にリアルタイム試験などにより確認していた⁶⁻¹¹⁾。主要な評価結果について以下に紹介する。

図7は、2008年1月19~23の4日間にわたりL1-SAIF実験局を動作させ、性能評価を行った例である。同図には、L1-SAIFメッセージを適用した場合のユーザ側の測位誤差をGPSのみの場合の測位誤差とともに表示してある。具体的にはGEONET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0.292mであった(RMS値)。

また、2006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、2009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。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8のように得られている。

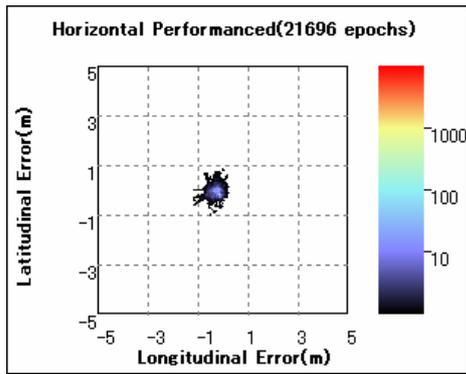


図8 L1-SAIF メッセージ適用後のユーザ測位誤差 (ETS- 利用実験)

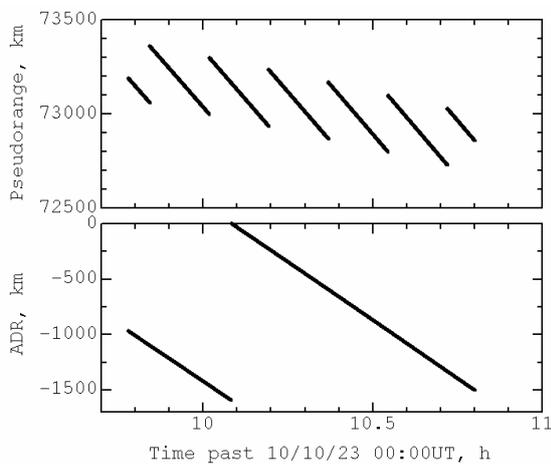


図9 L1-SAIF 試験信号による 擬似距離の測定例

1.8.4 技術実証実験

準天頂衛星「みちびき」は2010年9月11日にJAXA種子島宇宙センターから打ち上げられ、9月27日までに所定の軌道に投入された。その後は初期機能確認試験が行われ、10月19日にL1-SAIF信号の送信が開始された¹²⁻¹³⁾。特に大きなトラブルはなく初期機能確認試験は完了し、12月13日に定常運用に移行するとともに各研究機関による技術実証実験が開始された。

1.8.4.1 L1-SAIF 試験信号による擬似距離測定

2010年10月19日に送信が開始されたL1-SAIF試験信号は、IS-QZSSにもとづく通常のユーザ受信機は受信できないが、当所のL1-SAIFプロトタイプ受信機はこれを受信する機能をもっている。そこで、当所岩沼分室(仙台



(a) 実験車両の外観(矢印:アンテナ+IMU)



(b) L1-SAIFプロトタイプ受信機(矢印)

図10 実験車両の状況

空港内)に常置したL1-SAIFプロトタイプ受信機を利用して、試験信号の受信を試みた。

10月23日09:46~10:48の1時間にわたり測定された擬似距離は図9のとおりであって、上段はコード位相による、下段は搬送波位相による擬似距離である。

コード位相擬似距離は定期的に約300km(光速×1ms)のジャンプを繰り返し三角波のような形状となっているが、これは測定エポックをGPS時刻に合わせるために受信機が受信時刻を1ms単位で調整することによるもので、GPS受信機では一般的な動作である。

搬送波位相による擬似距離ではこの測定エポックの調整による影響は顕著ではないが、測定値が有限のビット数で表現されていることからオーバーフローにより大きなジャンプを生じていることがわかる。これも受信機の仕様によるもので、特に問題があるわけではない。



(a) 走行ルートの代表的風景



(a) 走行ルートの代表的風景



(b) L1-SAIF 補強あり

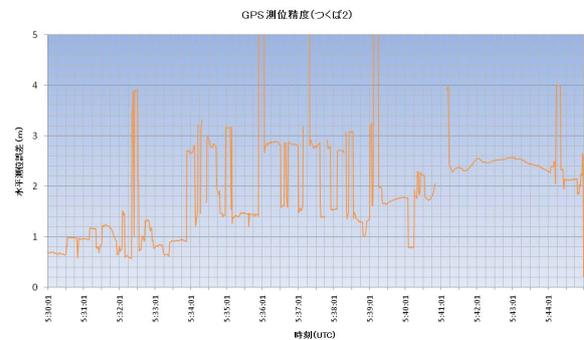


(b) L1-SAIF 補強あり



(c) GPS のみ (補強なし)

図 11 中央道での実験結果



(c) GPS のみ (補強なし)

図 12 つくば市での実験結果

1.8.4.2 車両による技術実証実験

「みちびき」の初期機能確認試験完了後、定常運用の開始と同時に当所においても車両を用いた技術実証実験を開始した。図 10 に、技術実証実験に使用した車両の外観及び受信機の搭載状況を示す。実験用車両には二周波 GPS アンテナを搭載し、L1-SAIF プロトタイプ受信機のほか基準位置算出用の測量用二周波受信機に接続した。また、アンテナ付近に IMU 装置を搭載して

おり、GPS 信号を受信しにくい環境下においても基準位置を算出できるように配慮した。

予備実験によりいくつかの走行ルートを選定したうえで、2010 年 12 月～翌年 2 月にかけて 3 回の実験を実施した。各実験では 4～5 日間程度にわたり走行し、測定データを収集した。走行後には基準位置の算出を事後処理により行っており、これには走行ルート付近にある国土地理院の電子基準点 (GEONET) を利用した。

実験結果の代表例として、中央道及びつくば市における状況をそれぞれ図 11 及び図 12 に示す。技術実証実験の期間中、「みちびき」は実験実施時間帯に比較的高仰角にあった。

中央道では、郊外の高架道路における実験例として甲府盆地付近の平坦なルートを 10km ほど走行した。現地の代表的な風景は図 11 (a) のとおりで、周囲の障害物は少ない。12 月 14 日に実施した実験について、同図 (b) に L1-SAIF 信号による補強がある場合、(c) には補強なしの場合の水平測位誤差を表示してある(同一の 15 分間)。この例では、補強のない GPS では 1m 程度以上の測位誤差が継続するが、補強情報の適用によりこれを 0.5m 程度に抑えられることを確認した。なお、図 11 (b) で大きな測位誤差を生じているように見える部分があるが、これは実際には衛星数が不足して測位ができない状況であった(プロットの都合により大きな測位誤差に見える)。

つくば市においては、一般道における実験例としてつくば市西部の県道を 6km ほど走行した。図 12 (a) が代表的な風景であり、低層建築物のほか、架空線や電柱、看板などの障害物がある。(b) 及び (c) には 12 月 16 日の実験について 15 分間にわたる水平測位誤差を表示してあるが、補強のない GPS の場合に 1~2m 以上になる測位誤差が、補強情報により 0.5~0.8m 程度に抑えられている。

なお、補強信号を適用することで以上のように測位誤差を抑えることができるが、遮蔽物やマルチパス波の影響により瞬間的に測位誤差が大きくなる事例が散見される。こうした現象への対策としては、受信機側のフィルタ及び信号捕捉・追尾性能の改良や、マルチパス除去技術の改善が必要と考える。

1.8.4.3 今年度の技術実証実験

車両による実験は国土交通省の委託によるものであったが、当所では委託業務の完了後も技術実証実験を継続している。今年度の主な実験内容は静止点における測位精度確認であるが、航空機や船舶による受信実験も計画している。

L1-SAIF 信号については、当所による L1-SAIF 補強実験と、(財)衛星測位利用推進センターが実施する利用実証実験の両方で使用されている。両者の実験は同時には実施できず、L1-SAIF 信号に乗せられている補強情報はいずれかの機関により生成されているものである。当所が実験を実施した日程は表 2 のとおりであり、

表 2 L1-SAIF 信号放送状況 (当所分)

実験 ID	開始日	終了日
E10-1	2010-12-13	2010-12-24
E10-2	2011-01-11	2011-01-21
E10-3	2011-02-07	2011-02-18
E10-4	2011-03-14	2011-03-25
E11-1	2011-04-11	2011-04-15
E11-2	2011-05-09	2011-05-13
E11-3	2011-06-20	2011-06-24
E11-4	2011-07-18	2011-07-22
E11-5	2011-08-15	2011-08-19
E11-6	2011-08-29	2011-09-02
E11-7	2011-10-10	2011-10-14

この期間中に放送された L1-SAIF 補強情報は当所の L1-SAIF 実験局による。なお、当所による L1-SAIF 補強情報の放送はあくまでも実験であり、実験期間中であっても常時放送されているとは限らず、また補強性能について何らの保証をするものでもない。

1.8.4.4 観測データの公開

技術実証実験の一環として、L1-SAIF 信号の当所による観測データを公開することとした (<http://www.enri.go.jp/sat/qzss.htm>)。これは、放送された L1-SAIF 信号を JAVAD ALPHA 受信機で連続受信しているもので、アンテナは当所 (東京都調布市) 6 号棟の屋上に設置してある。現在のところ、RINEX 形式の測定データ及び EMS 形式の航法メッセージが利用可能となっており、ファイルの作成単位はいずれも 1 日である。

・RINEX 観測ファイル (*.YYo)

L1/L2/L5 の擬似距離及び搬送波位相等の測定値が収められている。測位衛星の識別記号は次表のとおりとしてある。

システム	識別記号	nn の値
GPS	Gnn	PRN
GLONASS	Rnn	スロット番号
SBAS	Snn	PRN-100
Galileo	Enn	PRN
COMPASS	Cnn	PRN
QZSS	Jnn	PRN-192
L1-SAIF	Snn	PRN-100

準天頂衛星 QZS-1 が放送する補完信号の PRN 番号は 193 であるから、識別記号「J01」が対応する。また、L1-SAIF 信号の PRN 番号は 183 であるから、識別記号は「S83」となる。QZSS 及び L1-SAIF は現在のところ RINEX の規定に

は含まれていない独自仕様であるが、これらの識別記号については JAXA とも調整している。
EMS 形式ファイル (*.ems)

航法メッセージを 1 行 1 レコードとしたテキストファイルであり、レコードの形式は次のとおり。

形式	PRN YY MM DD HH MM SS TT data...	
パラ メータ	PRN	PRN 番号
	YY MM DD	放送日時
	HH MM SS	
	TT	タイプ
	data...	メッセージ内容

放送日時は、メッセージの先頭ビットの送信が開始された時刻である。タイプは、GPS/QZSS ではサブフレーム ID、GLONASS ではストリング番号、SBAS/SAIF ではメッセージタイプである。メッセージ内容は 16 進数で、最初の文字の MSB がメッセージの先頭ビットに対応する。

準天頂衛星 QZS-1 については、QZS-L1C/A 補完信号は PRN193 でメッセージ長は 300 ビット、L1-SAIF 信号は PRN183 で 250 ビットとして記録されている。

1.8.5 おわりに

国土交通省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るとともに、技術実証実験について現在までに得られている解析結果をもとに報告した。事前に実施していた各種実験に加えて、技術実証実験においても L1-SAIF 補強情報の適用によりユーザ測位誤差を改善でき、当初の目標であるサブメータ級測位を実現できることを確認した。

本年 4 月をもって国土交通省の委託業務は完了したが、当所においては収集した測定データをもとに解析作業を継続し、さらに充実した実験結果をまとめることとしている。また、当所では技術実証実験を継続しており、静止点における測位精度確認を行うほか、航空機や船舶による受信実験も計画している。観測データの公開も開始しており、準天頂衛星に関連する研究開発の進展に貢献したい。

参考文献

/1/ 宮野智行 他：QZSS の可能性、日本航海学会 GPS/GNSS シンポジウム、Nov. 2004.
 /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.
 /9/ 坂井丈泰、福島荘之介、伊藤憲：準天頂衛星 L1-SAIF 実験局の総合検証試験、第 10 回電子航法研究所研究発表会、June 2010.
 /10/ T. Sakai, et. al.: QZSS L1-SAIF Initial Experiment Results, ION ITM, San Diego, CA, Jan. 2011.
 /11/ 坂井丈泰、福島荘之介、伊藤憲：QZSS L1-SAIF 初期機能確認試験、電子情報通信学会総合大会、March 2011.
 /12/ 寺田弘慈：準天頂衛星システムの状況について、測位航法学会 GPS/GNSS シンポジウム、Nov. 2010.
 /13/ N. Inaba, et. al.: QZSS System Design and Initial Performance Verification, ION ITM, San Diego, Jan. 2011.