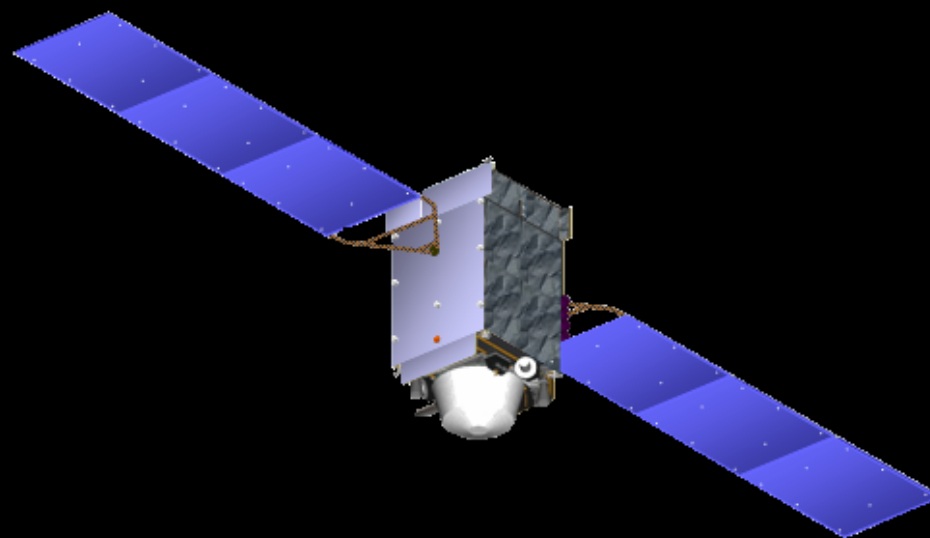


準天頂衛星「みちびき」の L1-SAIF信号



電子航法研究所
坂井 丈泰

はじめに

- 準天頂衛星システム(QZSS):
 - 準天頂衛星軌道上の測位衛星による衛星測位サービス。
 - GPS補完信号(測位衛星として動作)に加え、補強信号(付加的な情報を提供して全体の性能向上を図る)を放送。補強信号:L1-SAIF、LEXの2種類。
 - 第一段階:初号機「みちびき」を2010年9月に打ち上げ、技術実証実験を実施中。
 - 実用準天頂衛星システムの開発を閣議決定。2010年代後半に4機体制とする。
- L1-SAIF補強信号:
 - サブメータ級の測位精度を提供する補強信号。
 - GPS L1 C/A信号と同一のRF仕様:受信機のハードウェアは変更不要。
 - 国土交通省の委託を受け、電子航法研究所が開発を担当。
- 内容:(1) 準天頂衛星システム
(2) L1-SAIF信号の概要
(3) L1-SAIF実験局の概要
(4) 技術実証実験
(5) L1-SAIFによるレンジング性能

(1)

準天頂衛星システム

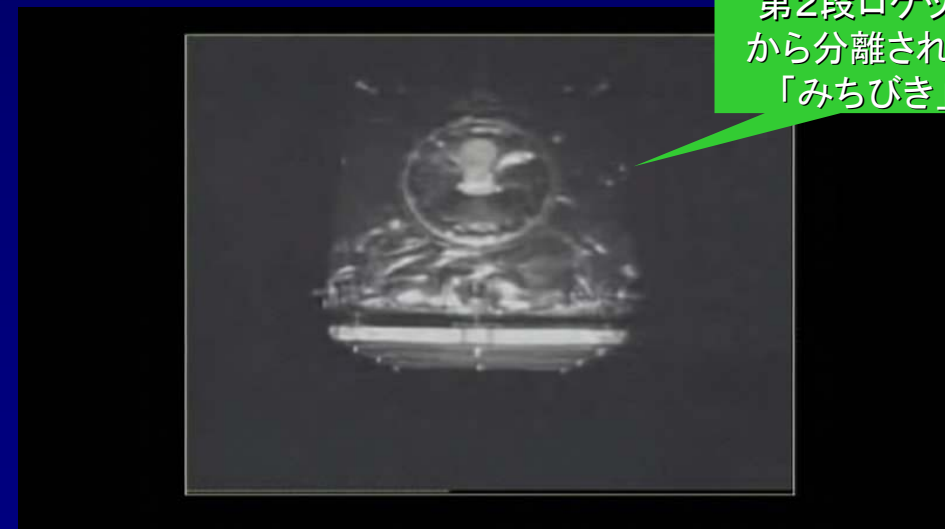
準天頂衛星打上げ



(c) 三菱重工業

2010年9月11日 20:17
準天頂衛星「みちびき」を打上げ

- H-IIA 18号機により種子島宇宙センターから打ち上げられた。
- 打上げから28分27秒後、「みちびき」を正常に分離。



第2段ロケット
から分離された
「みちびき」

(c) JAXA／三菱重工業

準天頂衛星「みちびき」

Mass	4,020kg (wet) 1,802kg (dry) (NAV Payload: 320kg)
Power	Approx. 5.3 kW (EOL) (NAV Payload: Approx. 1.9kW)
Design Life	10 years

Successfully launched on Sept.
11, 2010 and settled on Quasi-
Zenith Orbit (IGSO).

Nickname: "Michibiki"

Radiation Cooled TWT

25.3m

TWSTFT Antenna

C-band TTC Antenna

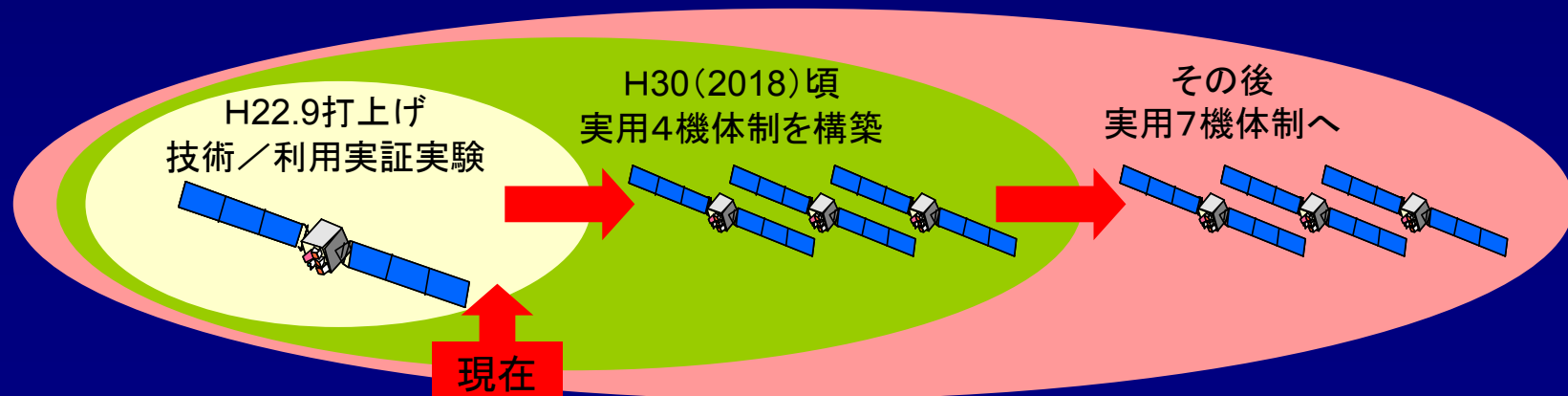
Laser Reflector

L-band Helical Array
Antenna

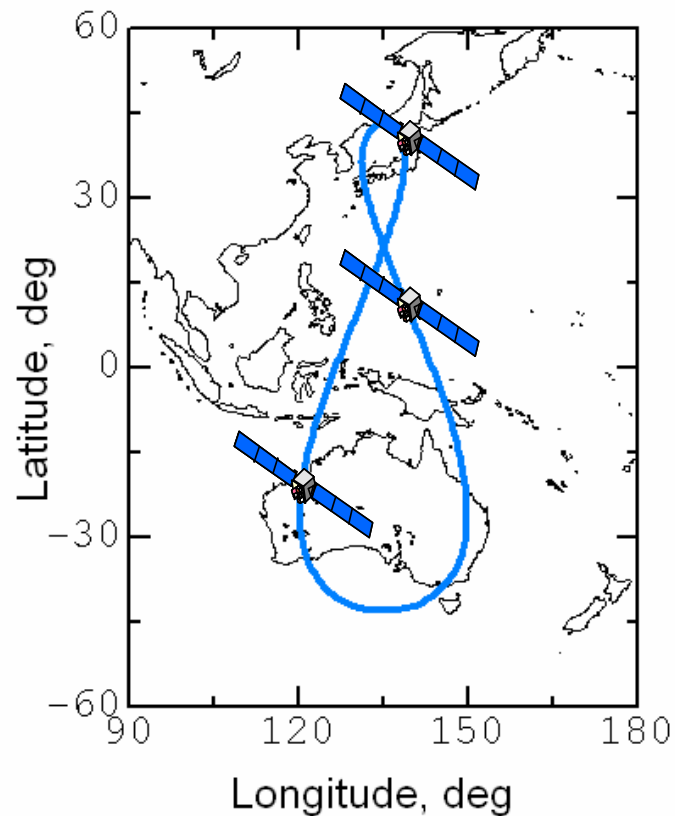
L1-SAIF Antenna

実用準天頂衛星システムの開発

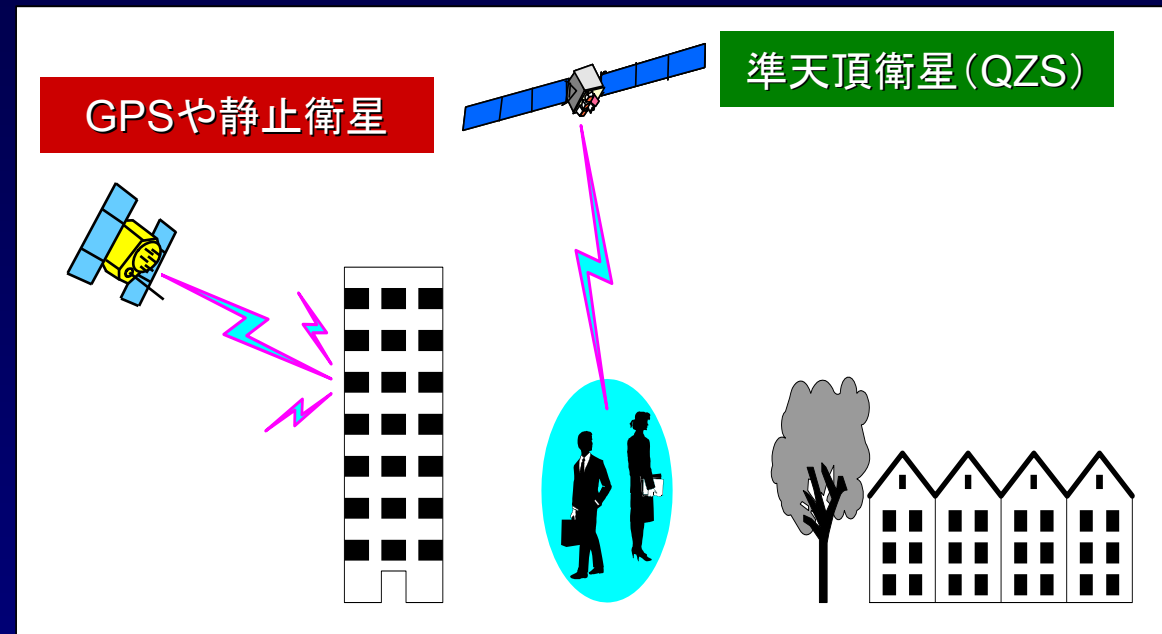
- 準天頂衛星システム 第1段階:
 - H15に官民合同プロジェクトとしてスタート。
 - H18.3に計画見直し:まず第1号機を打ち上げ、研究開発4省庁による技術実証実験と民間側の利用実証実験を実施する。第2号機以降はその成果にもとづき検討。
 - 初号機「みちびき」は2010年9月に打上げ成功。予定通り各種実験を実施中。
- 第2段階:実用準天頂衛星システムの開発:
 - H23.9.30閣議決定により、開発を進めることを決定。
 - 2010年代後半を目処として、4機体制による実用準天頂衛星システムの開発を進める。
 - 将来的にはさらに7機体制への以降を目指す。
 - 目的:社会インフラの整備、アジア太平洋地域への貢献、災害対応能力の向上、など。



準天頂衛星のメリット

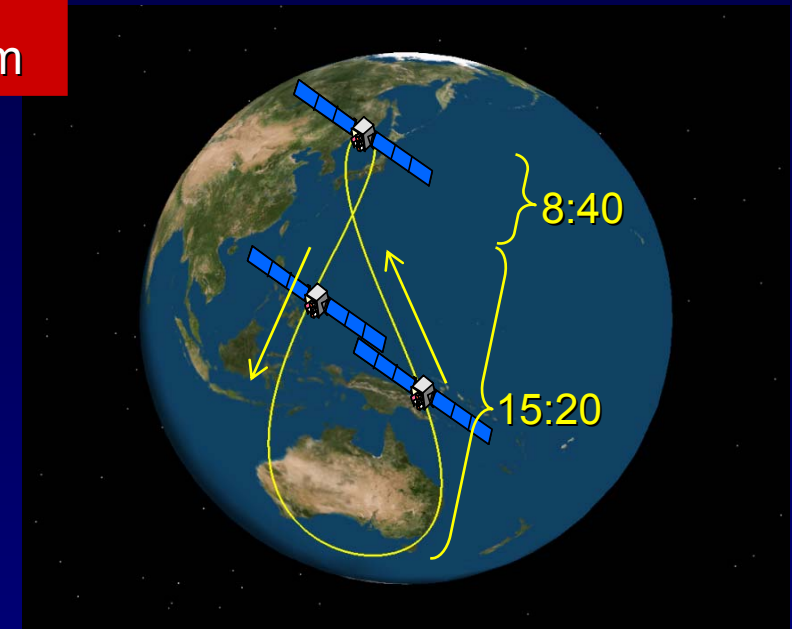
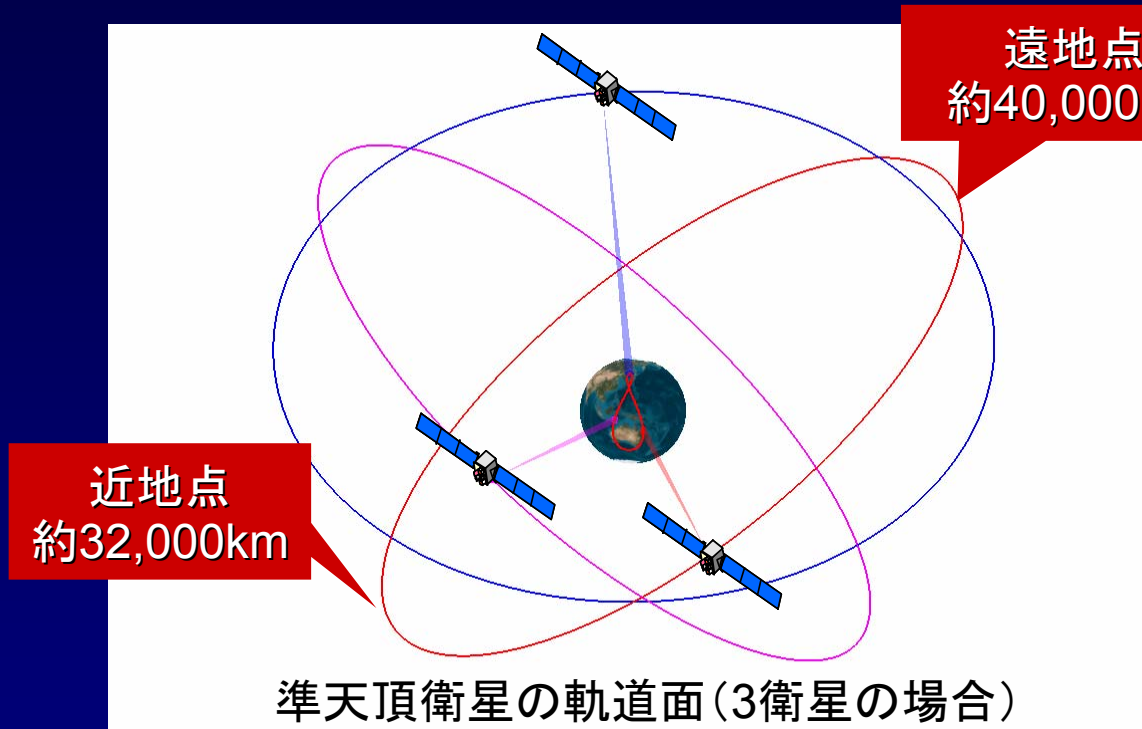


- 東経135度を中心に配置
- 初号機「みちびき」:
離心率0.075、軌道傾斜角43度



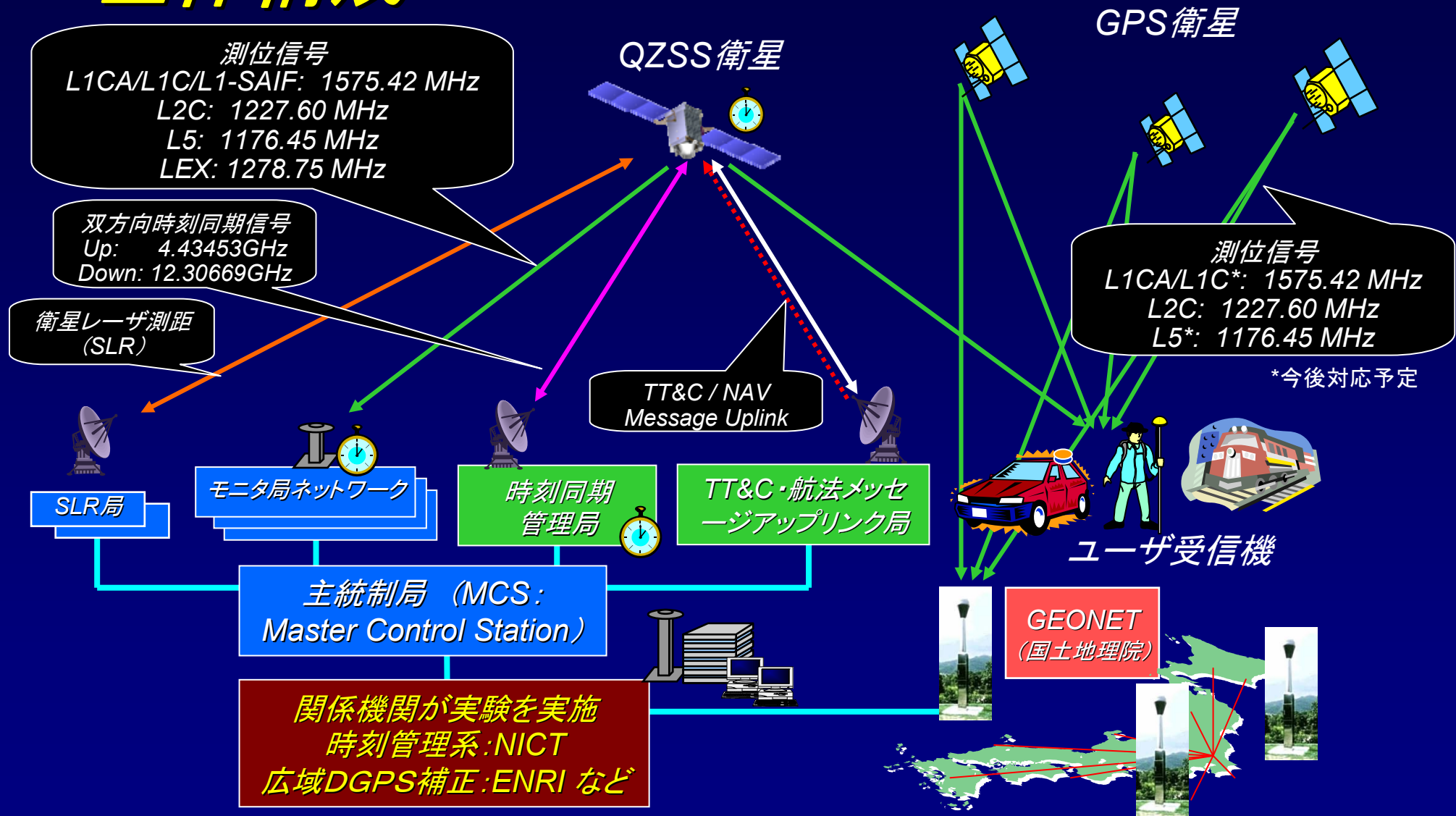
- 高仰角からサービスを提供可能。
- 山間部や都市部における測位・放送ミッションに有利。
- 高仰角から放送する情報により、GPS衛星の捕捉を支援できる。

準天頂衛星の軌道



- 軌道長半径(42,164km)は静止衛星軌道と同じ:地球自転に同期した周回速度。
- 軌道を傾斜させることで地上軌跡が8の字形になる:傾斜地球同期軌道(IGSO: Inclined Geosynchronous Orbit)あるいは準天頂衛星軌道(Quasi-Zenith Orbit)という。
- 同一の地上軌跡となるように3機以上の衛星を配置することで、特定地域のユーザに対して、通信・航法サービスを天頂付近から常時提供できる。

全体構成



(JAXA QZSS PT提供の図より)

準天頂衛星の機能

- GPS補完機能:

- GPS補完信号として、GPSと互換性のある測位信号を放送。
- 天頂付近の高仰角から測位信号を提供することで、都市部や山岳地域などで衛星数の不足を補い、いつでも位置情報が得られるようにする。
- 宇宙航空研究開発機構(JAXA)が技術実証実験を実施。
- 準天頂衛星の正確な位置の計算などのため、国内・アジア地域にモニタ局を展開。
- ユーザ受信機は、ソフトウェアの改修程度で対応できる。

- GPS補強機能:

- すべてのGPS衛星を対象として、距離測定精度を改善するディファレンシャル補正情報や信頼性改善のための情報を、補強信号に乗せて放送する。
- L1-SAIF信号: 移動体測位用。国際標準規格SBASと互換性のある信号形式で、ソフトウェアの改修程度で対応できる。
- 電子航法研究所では、国土交通省からの委託によりL1-SAIF補強信号の開発を実施。衛星打上げ後に技術実証実験を行い、現在も引き続き実験を実施中。

放送信号

信号名		周波数	帯域幅	最低受信電力
QZS-L1C	L1CD	1575.42 MHz	24 MHz	-163.0 dBW
	L1CP		24 MHz	- 158.25 dBW
QZS-L1-C/A			24 MHz	- 158.5 dBW
QZS-L1-SAIF			24 MHz	- 161.0 dBW
QZS-L2C		1227.6 MHz	24 MHz	- 160.0 dBW
QZS-L5	L5I	1176.45 MHz	25 MHz	- 157.9 dBW
	L5Q		25 MHz	- 157.9 dBW
QZS-LEX		1278.75 MHz	42 MHz	- 155.7 dBW

補完信号
(JAXA)

補強信号
(ENRI)

補完信号
(JAXA)

補強信号
(ENRI)

補強信号
(JAXA/GSI)

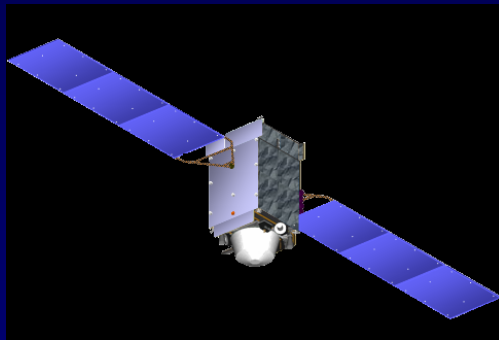
- 補完系: L1C/A、L2C、L5はGPSとほぼ互換 (PRN193)
- 補強系: L1-SAIFはGPS/SBASとほぼ互換 (PRN183)、LEXは独自仕様
- 詳細はIS-QZSSに規定あり

(2)

L1-SAIF信号の概要

L1-SAIF補強信号

準天頂衛星



補強信号
(補完機能)

補強信号
(誤差補正)

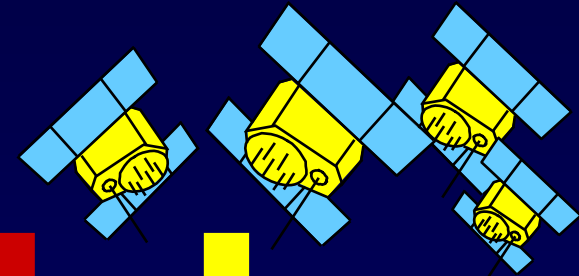
補強信号
(信頼性付与)

一つの信号で3つの機能

①補完機能

②誤差補正機能

③信頼性付与機能



GPS衛星群

測位信号

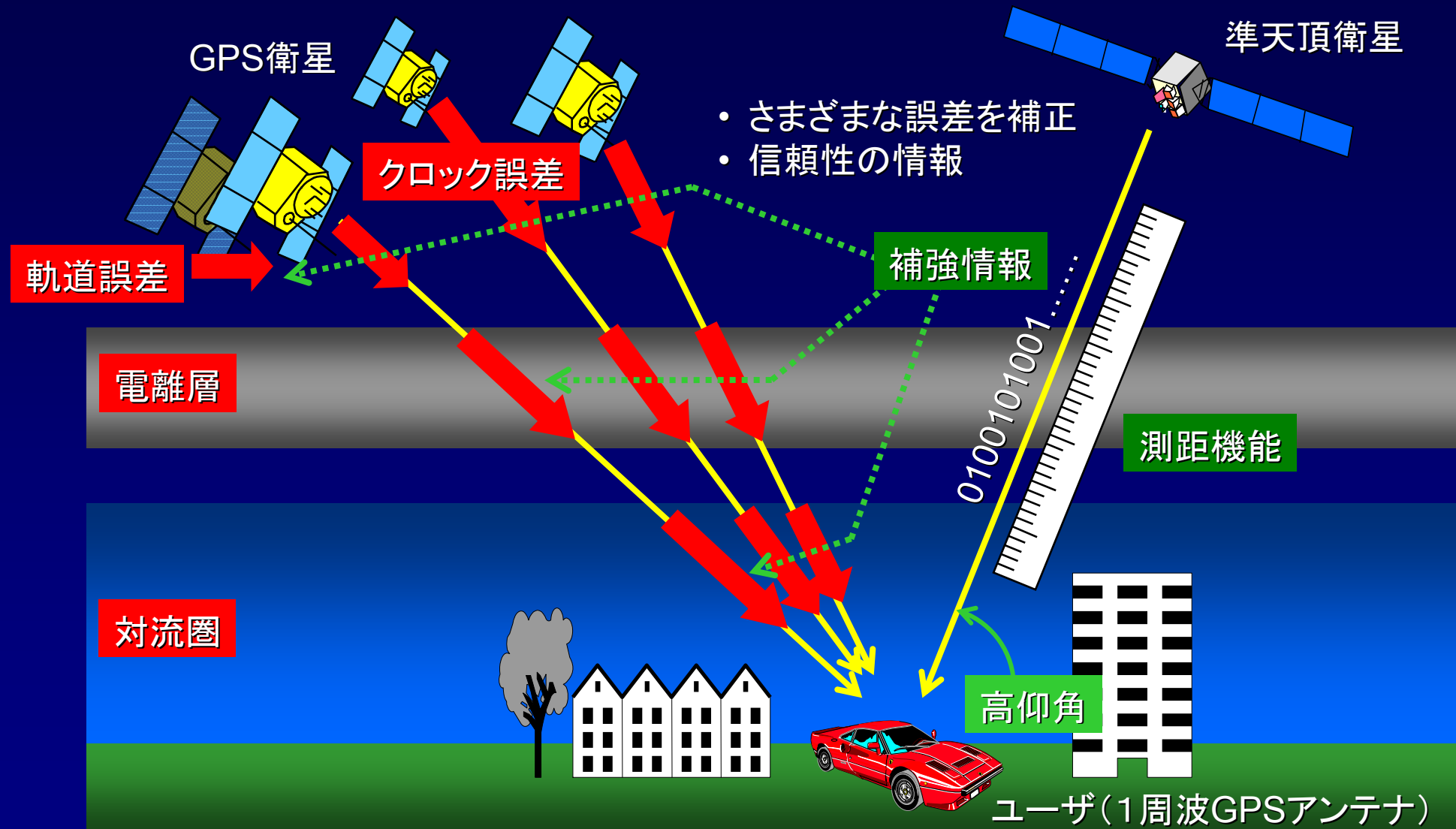
- 一つの補強信号により、3つの機能を提供: 補完機能 (距離測定)・誤差補正 (目標精度=1m)・信頼性付与。
- ユーザ受信機は、1つのGPS用アンテナによりGPSとL1-SAIFの両方を受信: 受信機の負担軽減。
- 情報の伝送はメッセージ単位: メッセージ順序・内容は可変=フレキシブルな情報提供。

SAIF: Submeter Augmentation with Integrity Function



ユーザ
(GPS受信機)

サブメータ級補強の仕組み



L1-SAIFメッセージ形式

- 航空用補強システムSBASと同一のフォーマット:
 - GPS L1 C/Aコード、PRN183で送信。毎秒1個のメッセージ。
 - メッセージの内容はメッセージタイプで識別。送信順序は任意＝フレキシブル。
 - SBAS用ソフトウェアを流用可能：受信機ソフトウェアの開発負担を軽減。
 - サブメータ級の測位精度は達成可能。
- 補強メッセージの内容:
 - 日本全国で利用可能な広域ディファレンシャル補正情報：衛星軌道・クロック・電離層遅延・対流圏遅延をそれぞれ別々に補正。
 - 補強対象：GPS・準天頂衛星自身・(GLONASS)・(ガリレオ)
 - 基本的な補強情報はSBAS互換メッセージで、高度な補強処理については拡張メッセージで対応。

プリアンブル 8ビット	メッセージタイプ 6ビット	データ領域 212ビット	CRCコード 24ビット
----------------	------------------	-----------------	-----------------

250ビット／1秒

GPS/L1-SAIFシミュレータ

- GPS/L1-SAIFシミュレータ:
 - GPS L1 C/A信号および QZSS L1-SAIF信号を発生。
 - あらかじめ与えられているGPS衛星およびQZSS衛星の軌道情報および信号仕様に従ってRF信号を生成。
 - Spirent社製GPS/SBASシミュレータ GSS7700を改造。
- 実験用に付加した機能:
 - L1-SAIFメッセージをLANポートからTCP/IP接続により入力するためのコマンドを追加。
 - L1-SAIFメッセージは、このコマンドによるか、あるいはシミュレータ内部で生成されたSBASメッセージが流用される。



GPS/L1-SAIF受信機

- プロトタイプGPS/L1-SAIF受信機:

- GPS L1 C/A信号およびQZSS L1-SAIF信号を受信。
- IS-QZSSの規定に従い、L1-SAIFメッセージを復調・適用する。
- 古野電気製。

- 実験用に付加した機能:

- L1-SAIFメッセージをLANポートからTCP/IP接続にて入力できる。
- L1-SAIFおよびSBAS信号を同時に処理し、複数の測位結果を出力可能。
- 持ち運び可能なサイズ・重量。

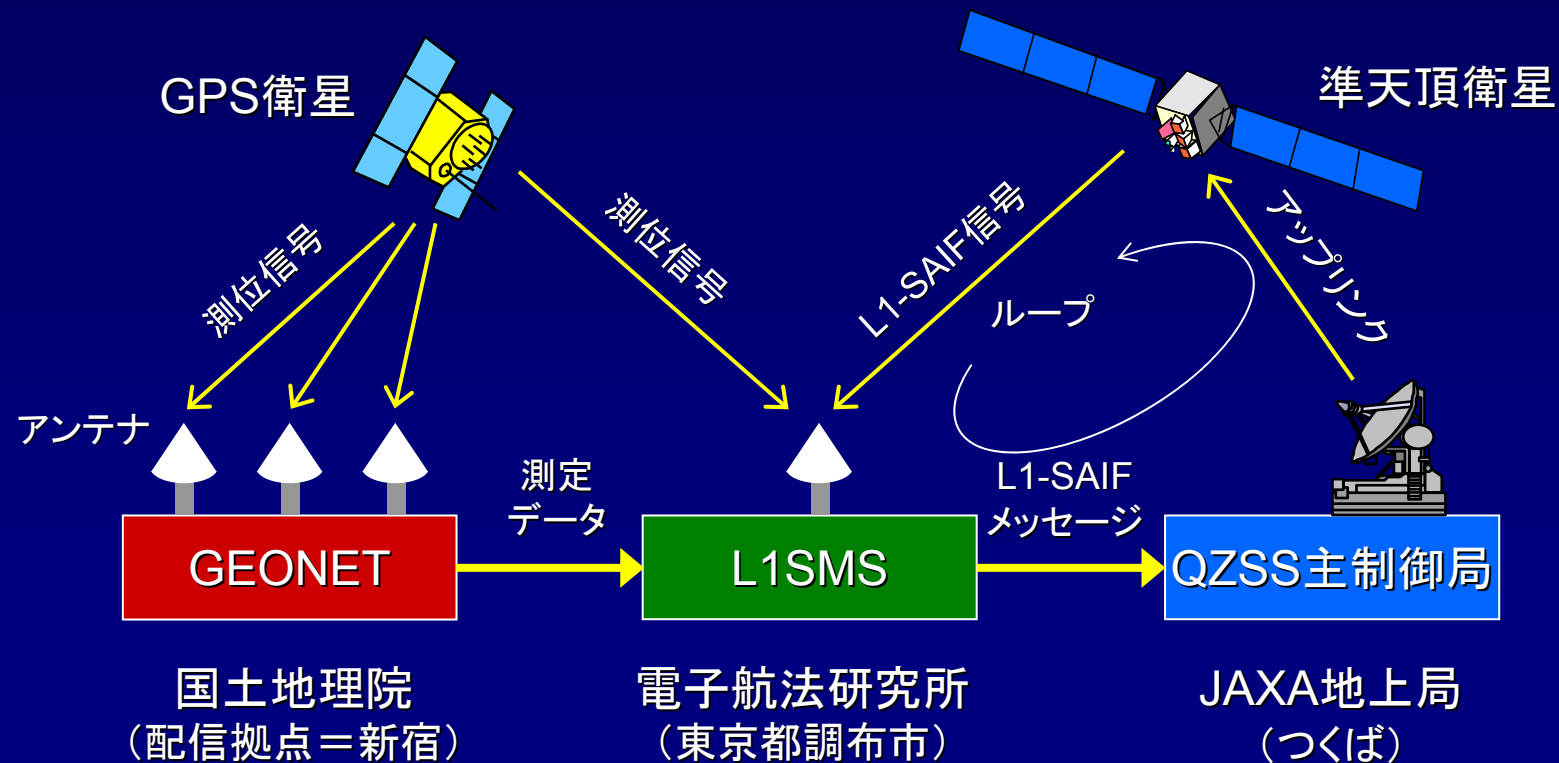


(3)

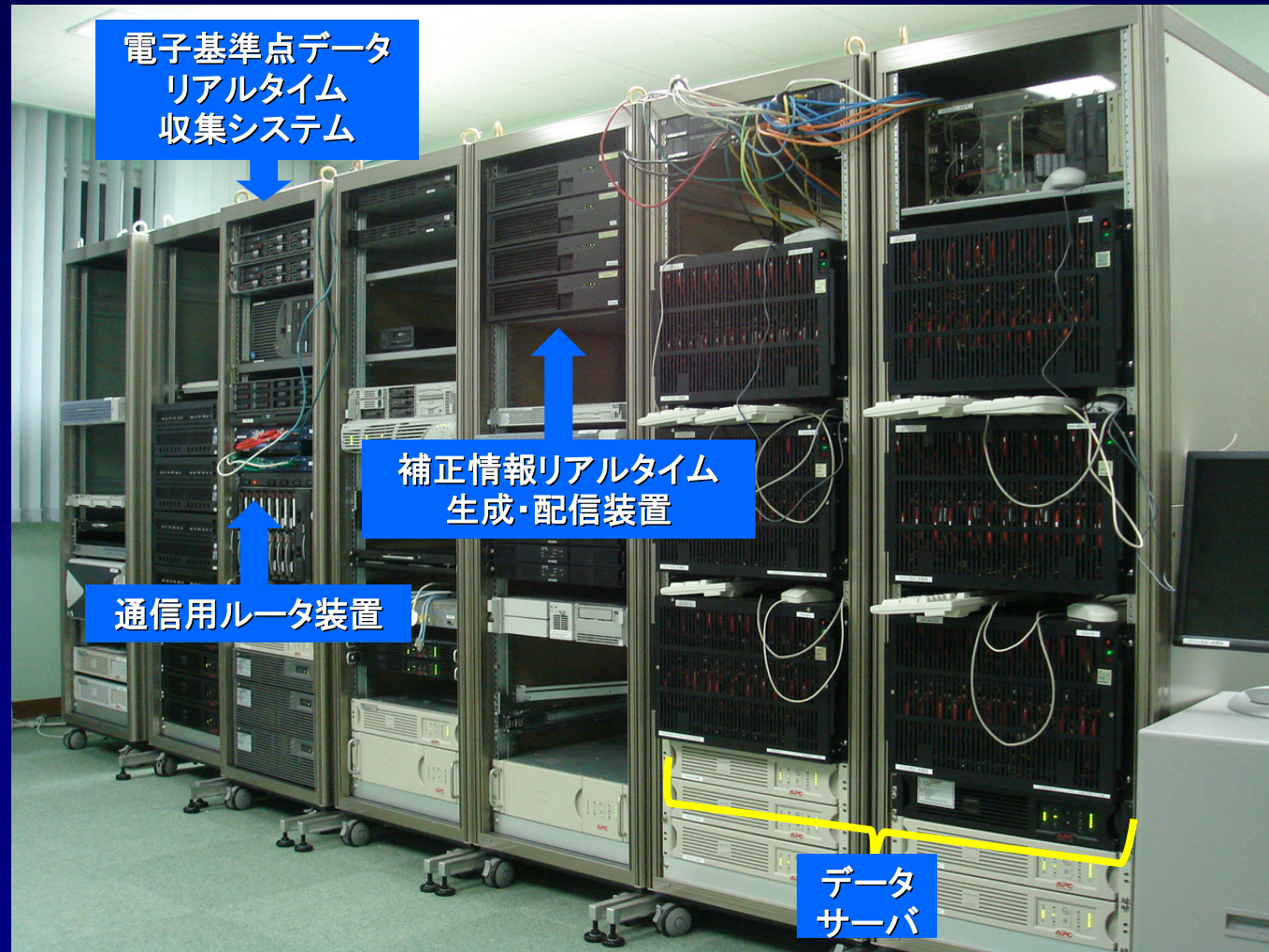
L1-SAIF実験局の概要

L1-SAIF実験局(L1SMS)

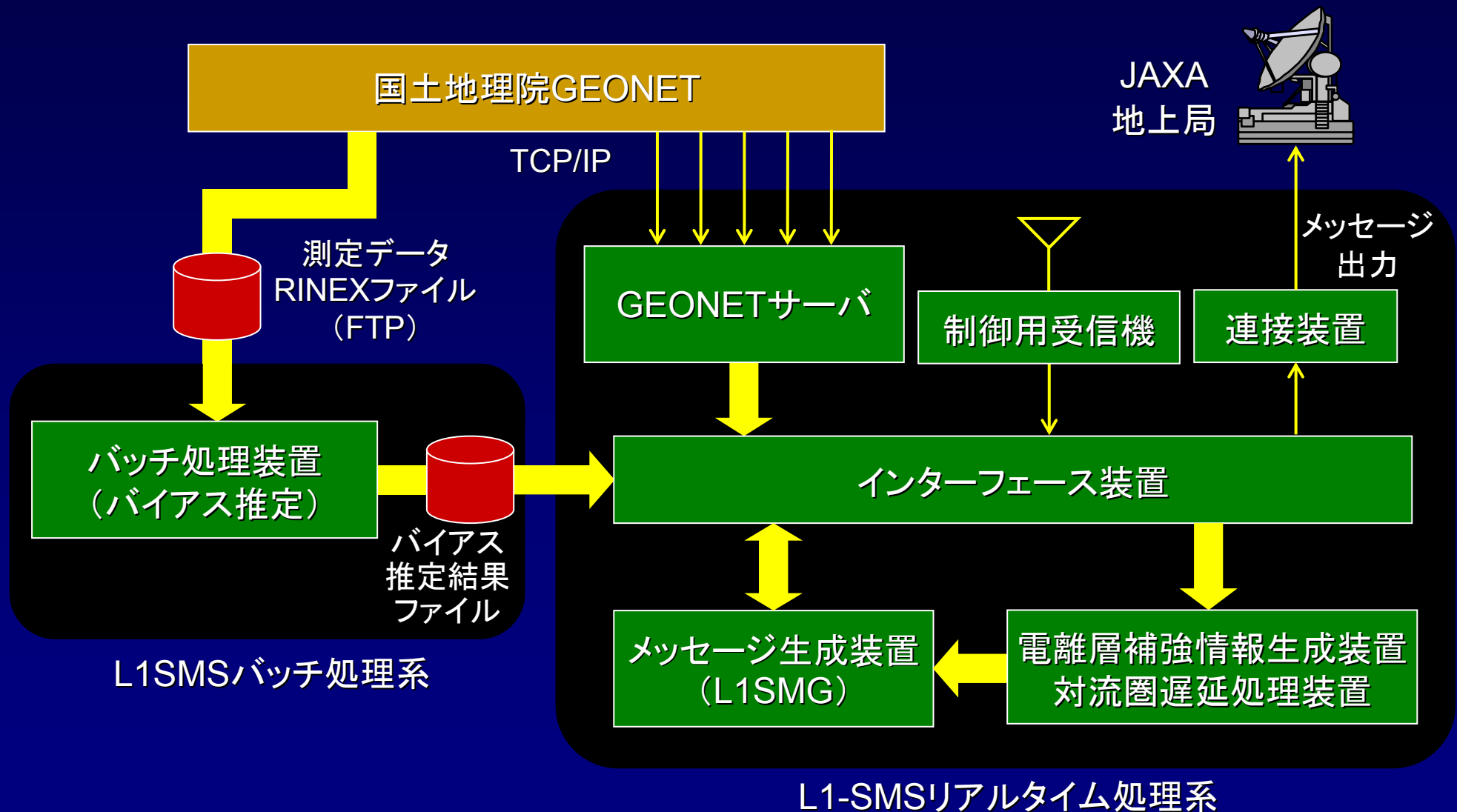
- L1-SAIF実験局(L1SMS:L1-SAIF Master Station):
 - L1-SAIF補強メッセージをリアルタイムに生成し、JAXA地上局(つくば)に送信する。
 - 電子航法研究所構内(東京都調布市)に設置。
 - 補強メッセージの生成に使うGPS測定データについては、国土地理院電子基準点ネットワーク(GEONET)から取得する。



L1-SAIF実験局の外観

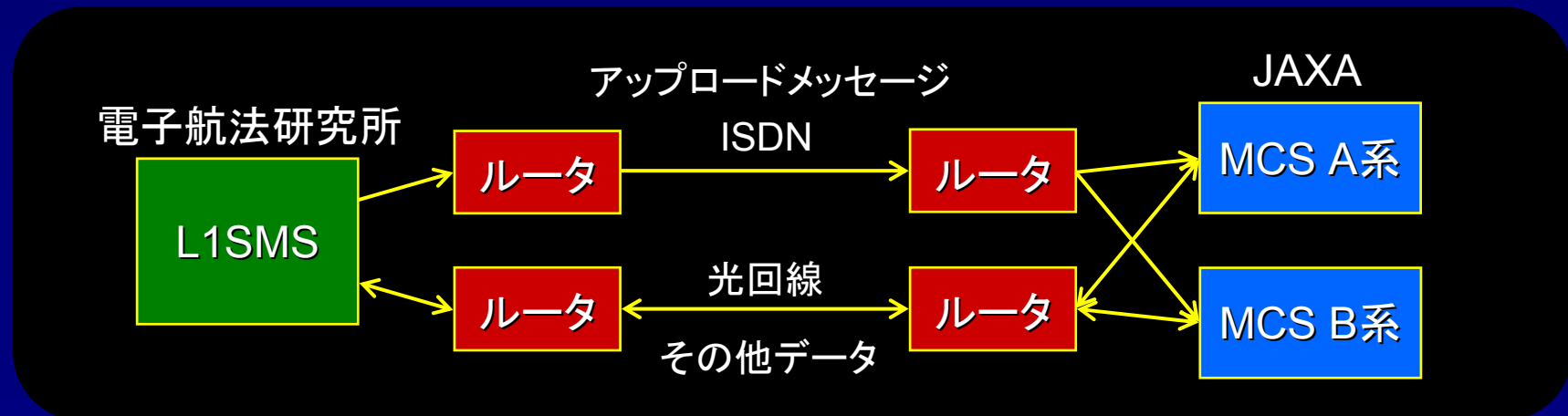


L1-SAIF実験局の構成

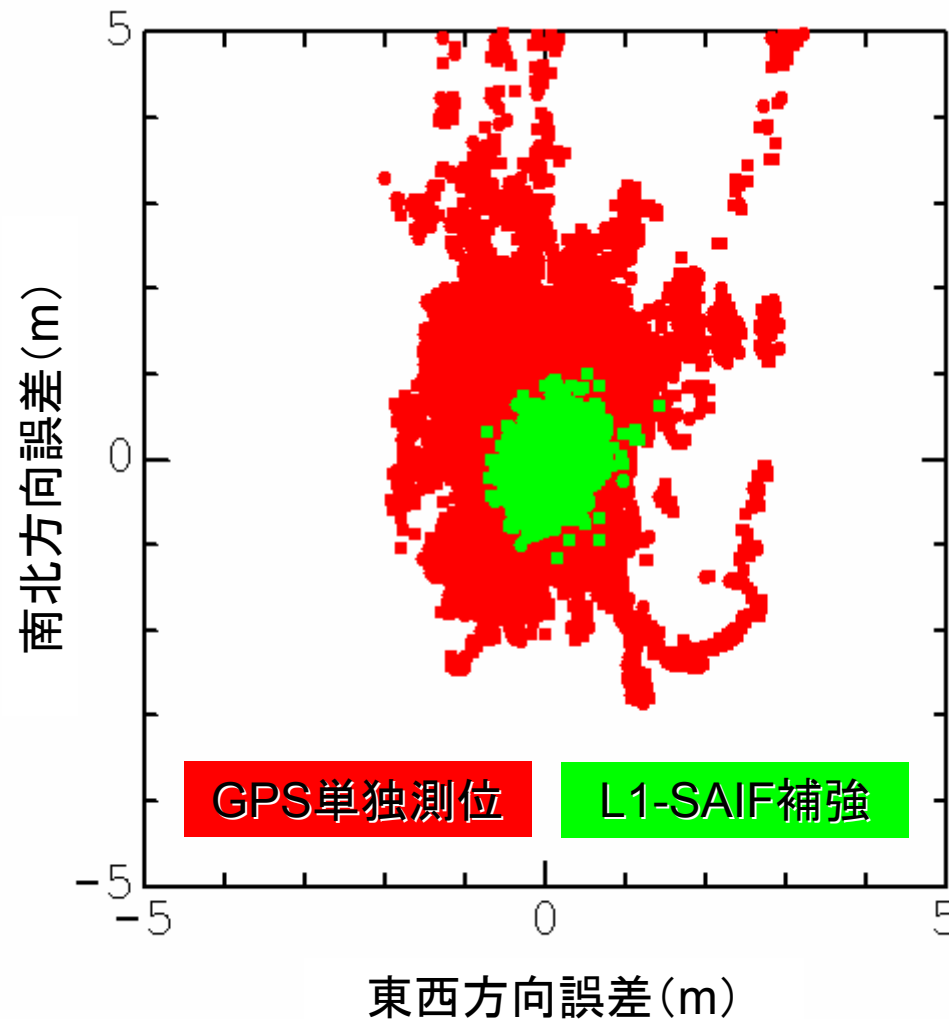


JAXA-ENRI インターフェース

- 地上システムICD (Interface Control Document) 「G-ICD」:
 - JAXA QZSS主制御局 (MCS) と電子航法研究所 L1-SAIF 実験局 (L1SMS) との間のインターフェースを規定。
 - 2008年1月に初版制定。
 - TCP/IP 接続で授受するデータのフォーマットをビット単位で詳細に規定。
- 2本の通信回線による構成:
 - ISDN (64kbps) および光回線 (1.5Mbps) を利用。
 - ISDN (低速回線): L1-SAIF アップロードのための高信頼回線。
 - 光回線 (高速回線): 実験局ステータスやモニタ局観測データを交換。



リアルタイム動作試験



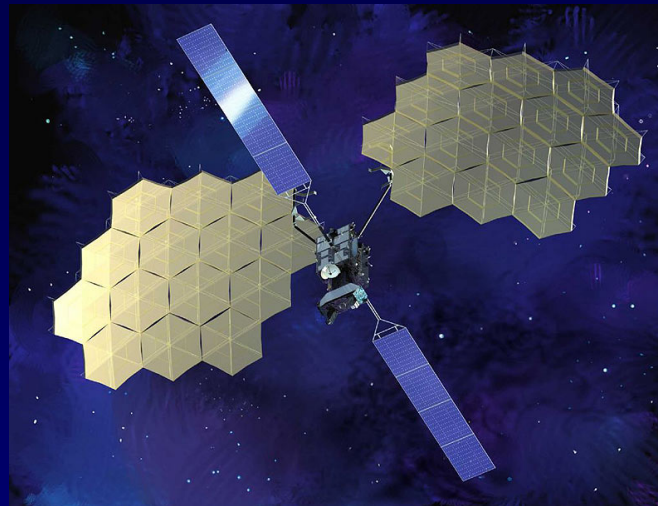
- 電子基準点940058(高山)におけるユーザ測位誤差。
- モニタ局配置は、札幌・茨城・東京・神戸・福岡・那覇の6局構成。
- 実験期間：2008年1月19～23日（5日間）

システム		水平測位誤差	垂直測位誤差
GPS単独	RMS	1.45 m	2.92 m
	最大	6.02 m	8.45 m
L1-SAIF補強	RMS	0.29 m	0.39 m
	最大	1.56 m	2.57 m

ETS-VIIIによる実験



L1-SAIF実験局
(東京都調布市)



ETS-VIII(きく8号)



GPS衛星

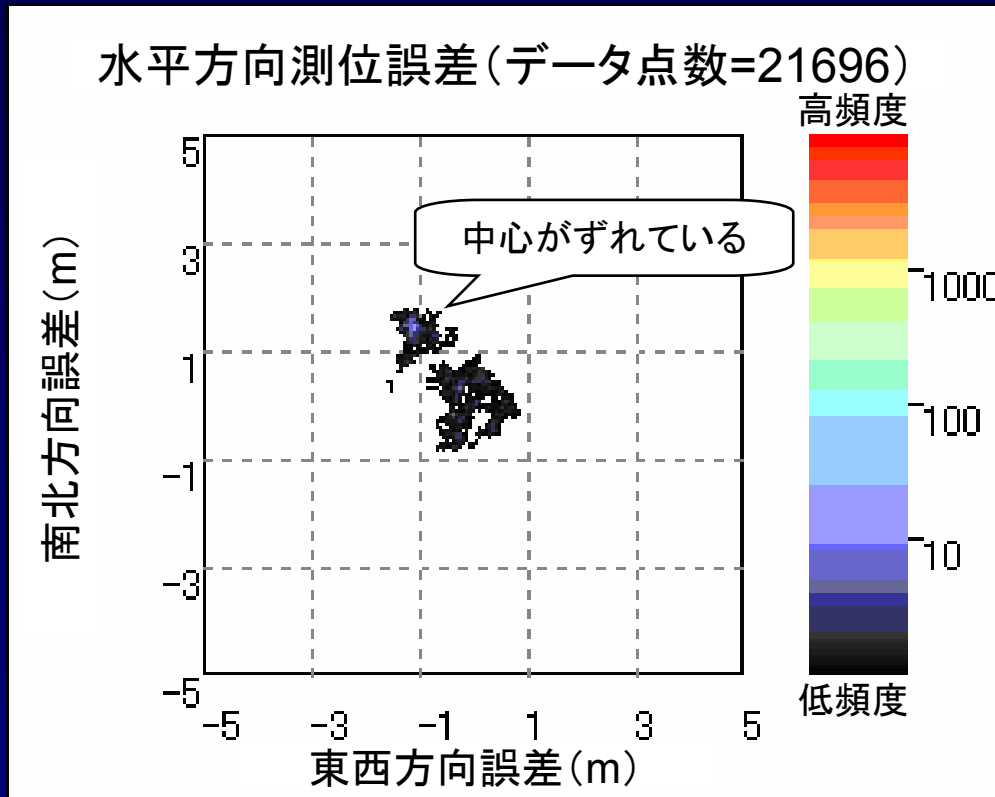


GPS/L1-SAIF受信機
(仙台空港)

- ETS-VIII衛星(きく8号)利用実験として、補強メッセージを衛星回線で伝送する実験を実施。
- 衛星回線・LANを経由して、L1-SAIFメッセージを遠隔地のGPS/L1-SAIF受信機で受信・処理し、補強済みの測位結果を得た。
- 信号形式が異なり、またETS-VIII端末に測距機能がないことから、補完機能の試験は不可。

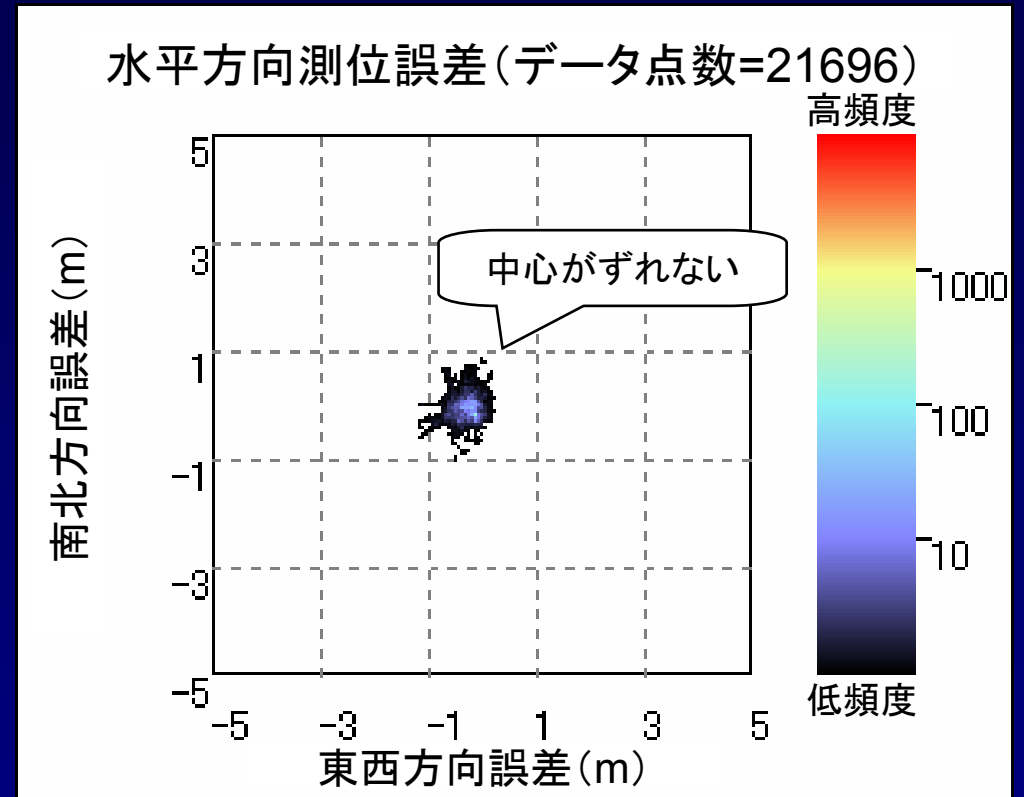
ETS-VIIIによる実験(結果)

2009年2月17 01:21:39~07:23:14 UTC (約6時間)



GPS単独測位

測位精度(水平方向) 1.221 m
(垂直方向) 4.043 m



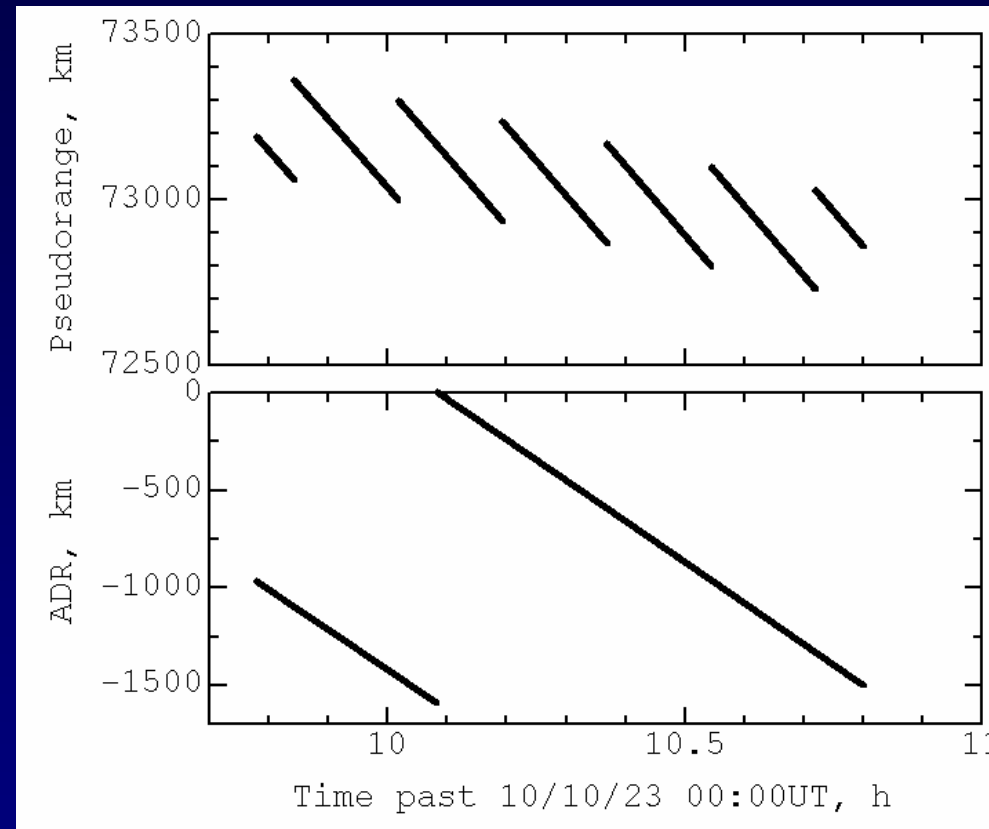
L1-SAIF補強あり

測位精度(水平方向) 0.412 m
(垂直方向) 0.464 m

(4)

技術実証実験

試験信号の受信



- 軌道上の準天頂衛星から放送されたL1-SAIF試験信号を受信。
- 2010年10月23日09:46:48～10:48:07(GPS時刻)にかけて、電子航法研究所岩沼分室(仙台空港内)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。
- 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。

車両による実験

- L1-SAIF技術実証実験:

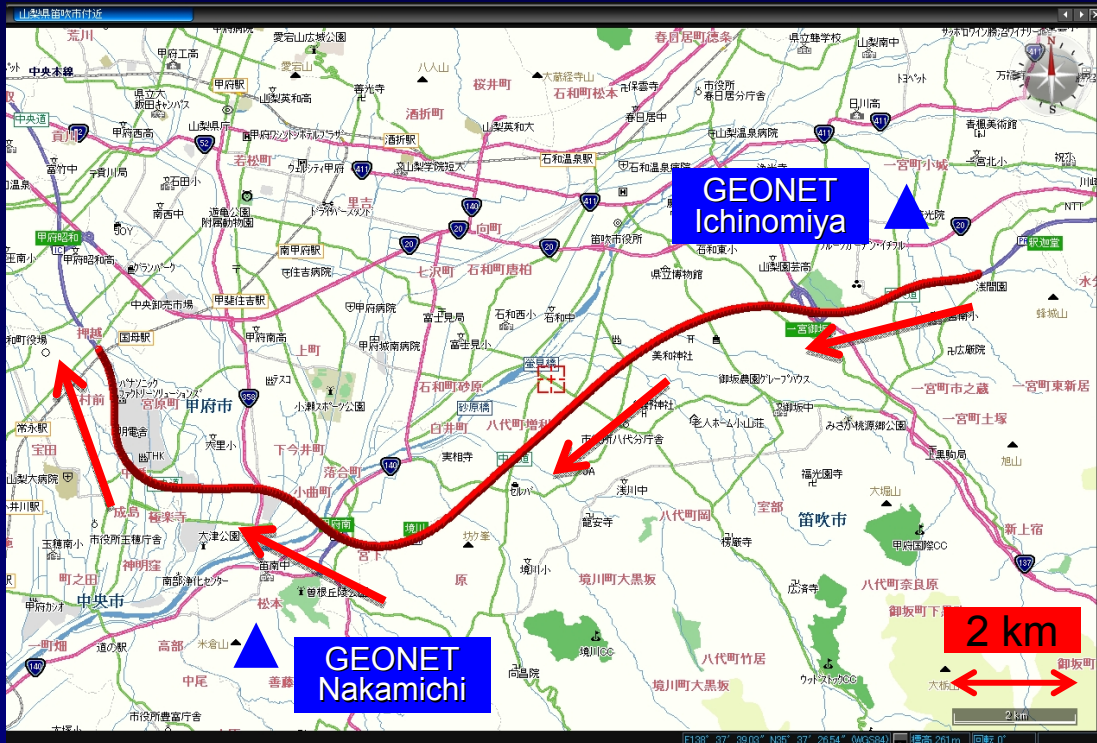
- L1-SAIFはもともと移動体に対する補強サービスとして計画されている。
- このため、車両を使用して実験を行った。
- 実験場所としては、都市部・郊外・高速道路(高架道)を予定。
- 実験期間:2010年12月~2011年3月。

- 実験機材:

- 基準位置: GPS+IMUセンサで取得
- 国土地理院GEONET電子基準点を利用して、後処理により高精度な基準位置を得る。
- 車両内にGPS/L1-SAIF受信機とパソコンを搭載。
- 受信機はL1-SAIF補強処理をリアルタイムに実施。受信機から出力された位置情報を記録する。
- 記録された位置出力と基準位置を比較し、測位誤差を求めた。



高速道路での実験



走行経路

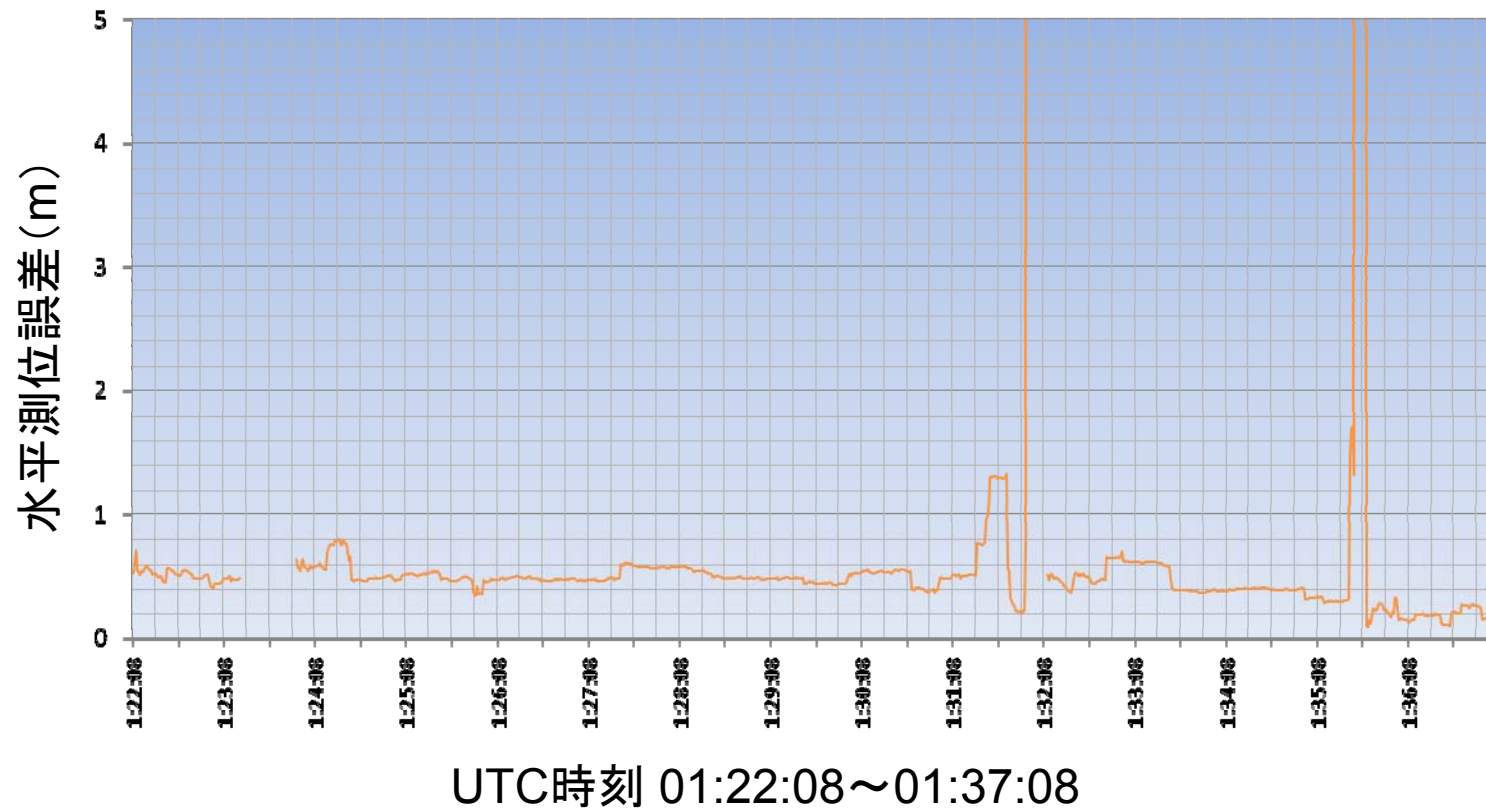


典型的な状況

- 2010年12月14日(準天頂衛星は天頂付近にあることを確認)
- 中央道の甲府盆地付近の10km程度の区間を西向きに走行した。
- 高速道路を横切る橋や電線などの障害物は少なく、平坦な経路。

高速道路:L1-SAIF補強あり

中央道:L1-SAIF補強あり

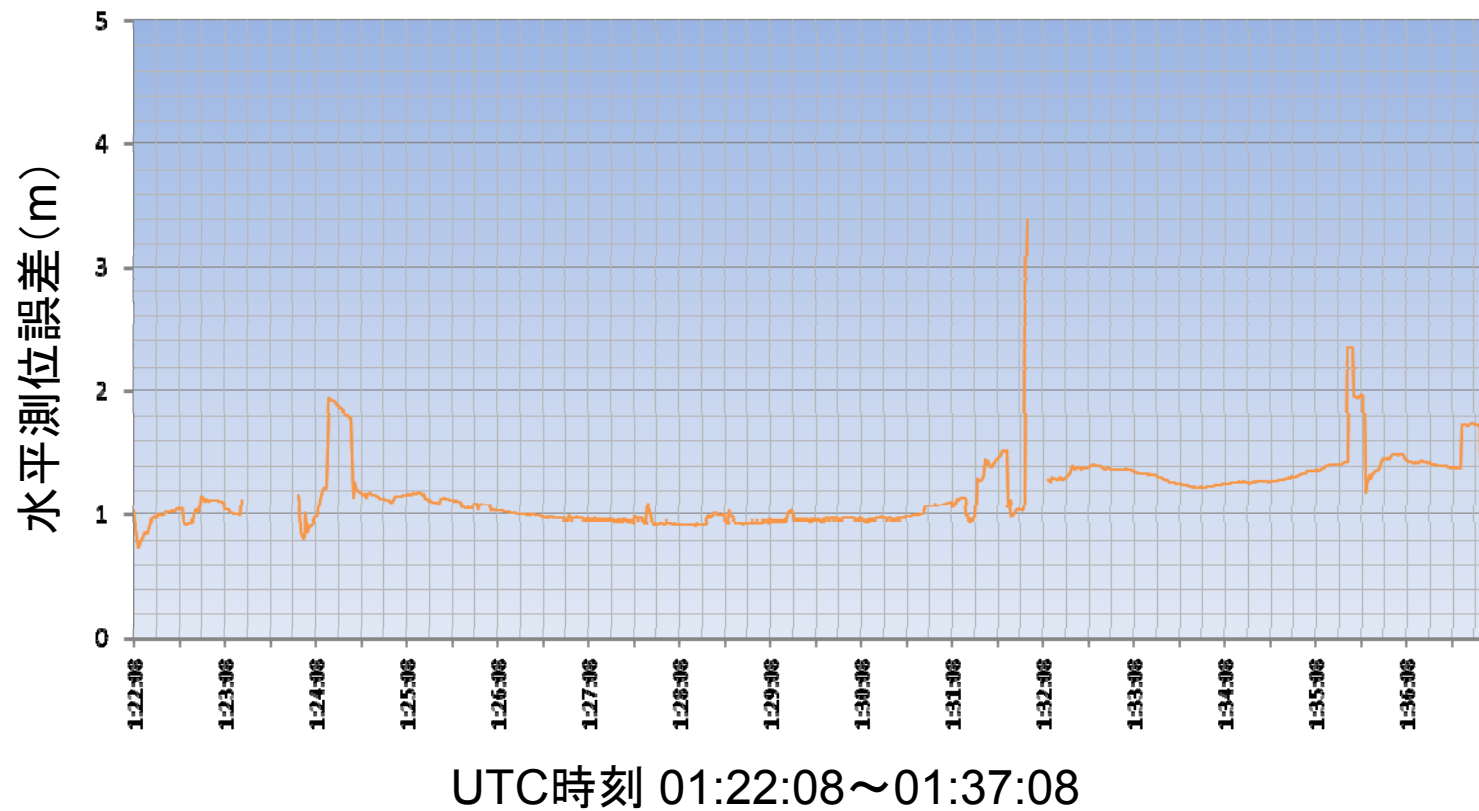


0.5m

15 分

高速道路:補強なし

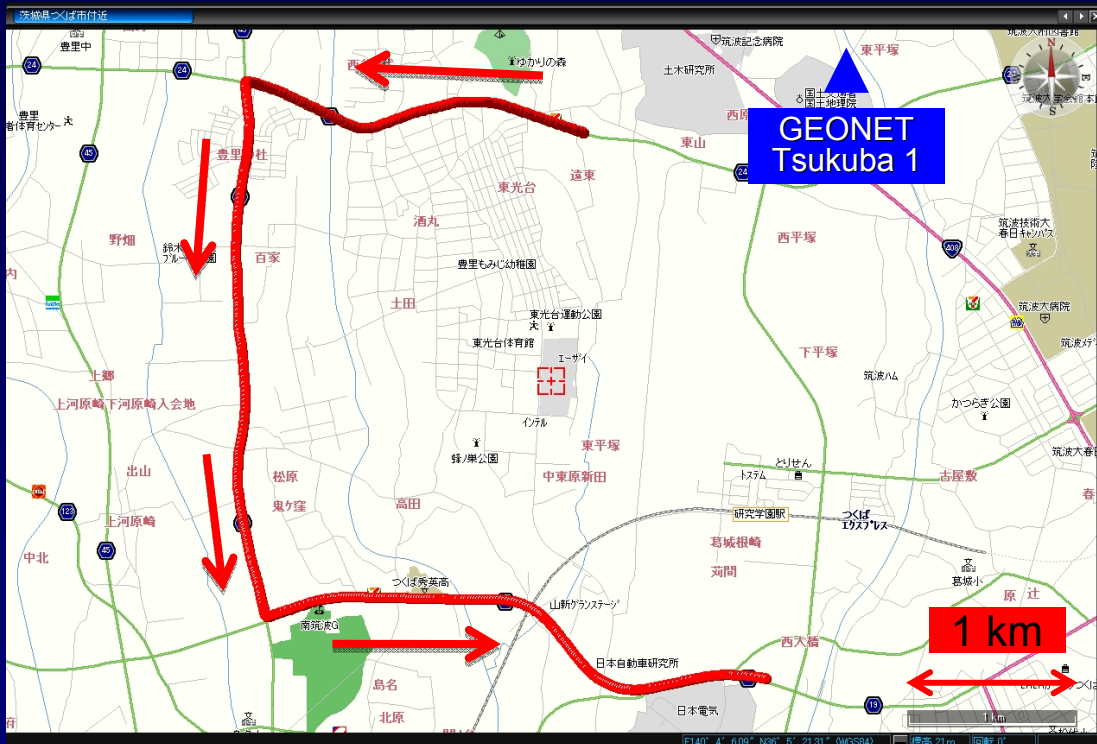
中央道:L1-SAIF補強なし



1.2m

15 分

つくば市での実験



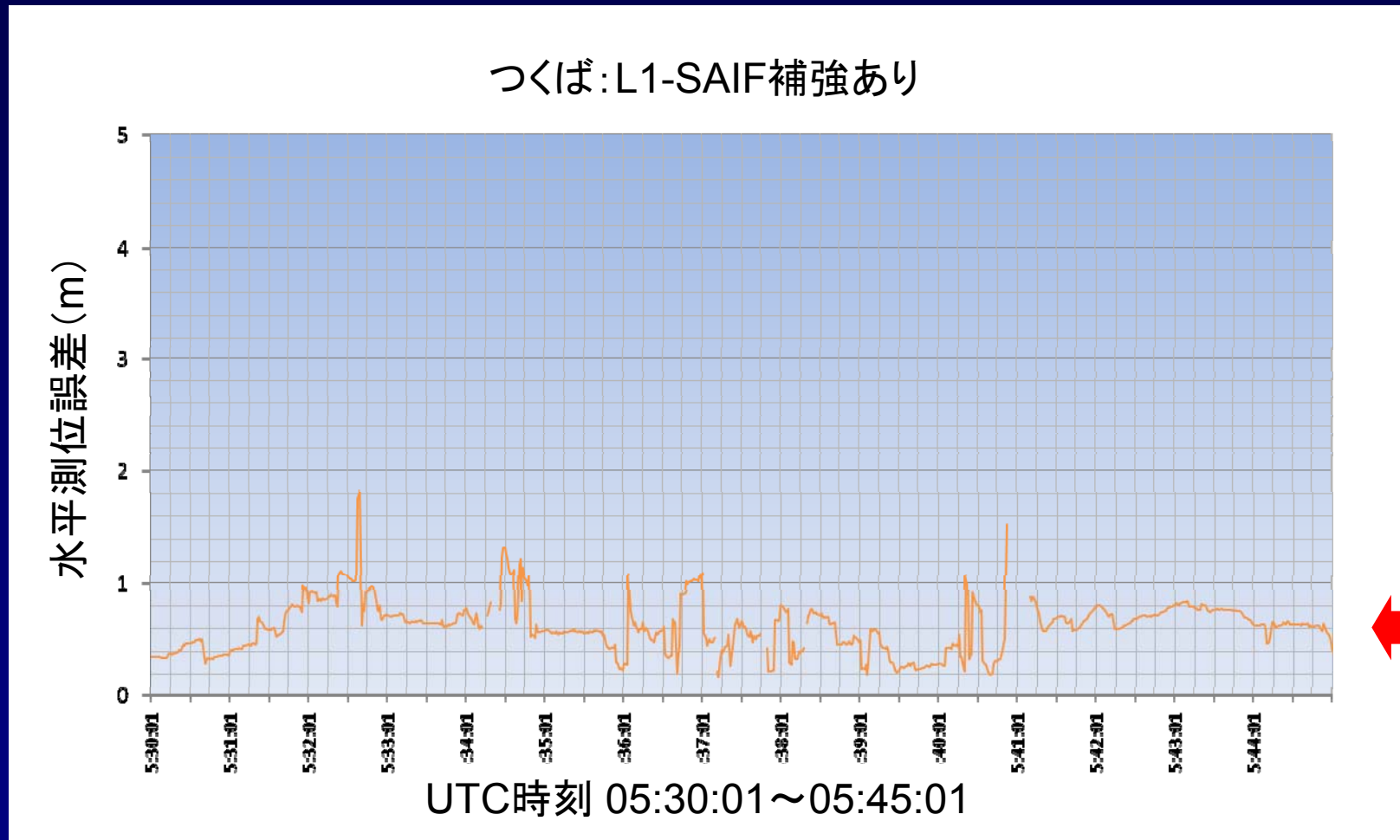
走行経路



典型的な状況

- 2010年12月16日(準天頂衛星は天頂付近にあることを確認)
- 茨城県つくば市の西部郊外を6kmほど走行した。
- 高層建築は少ないが、電柱や電線、信号機といった障害物が多数ある状況。

つくば市:L1-SAIF補強あり

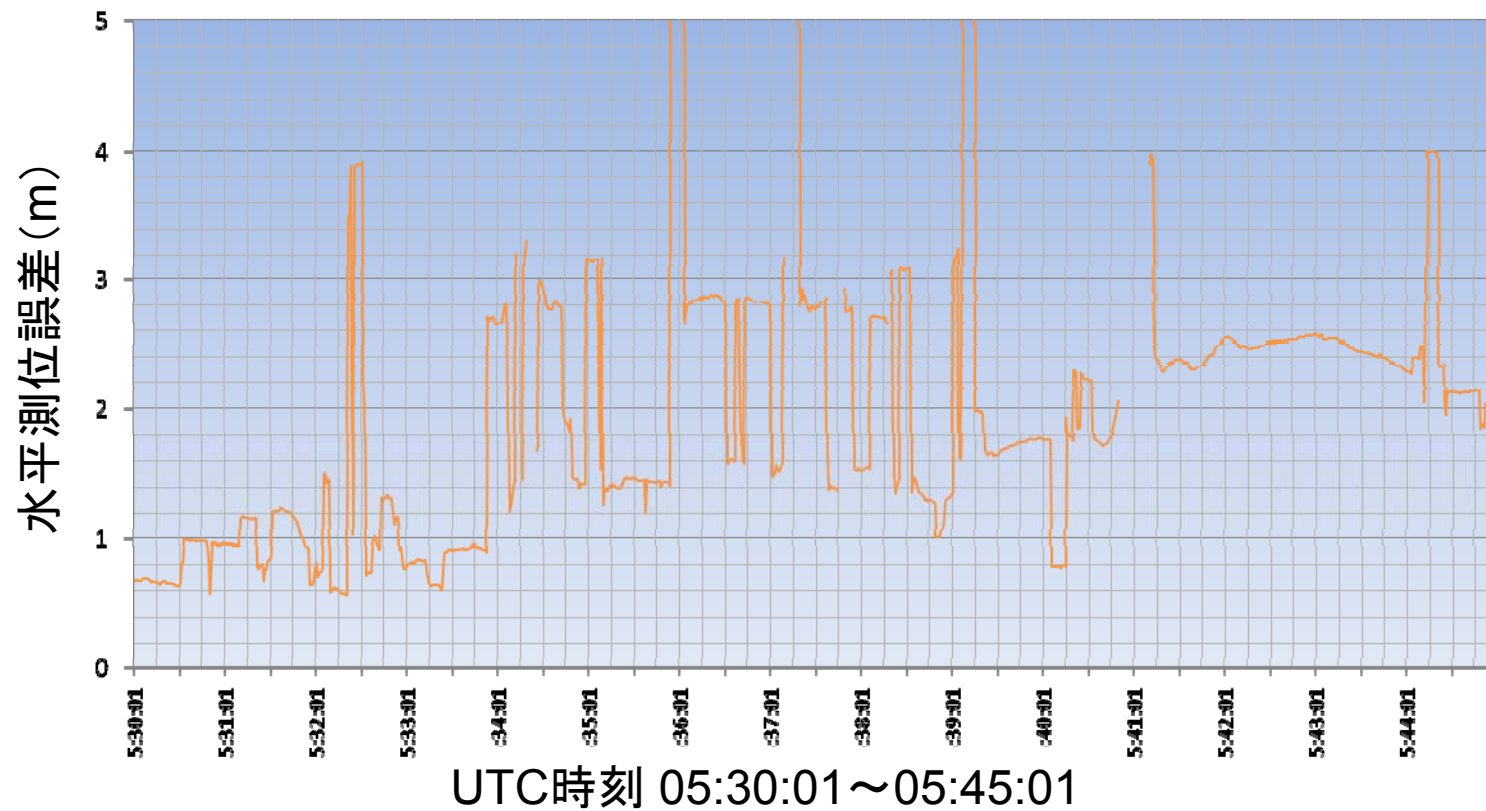


0.6m

15 分

つくば市:補強なし

つくば:L1-SAIF補強なし



15 分

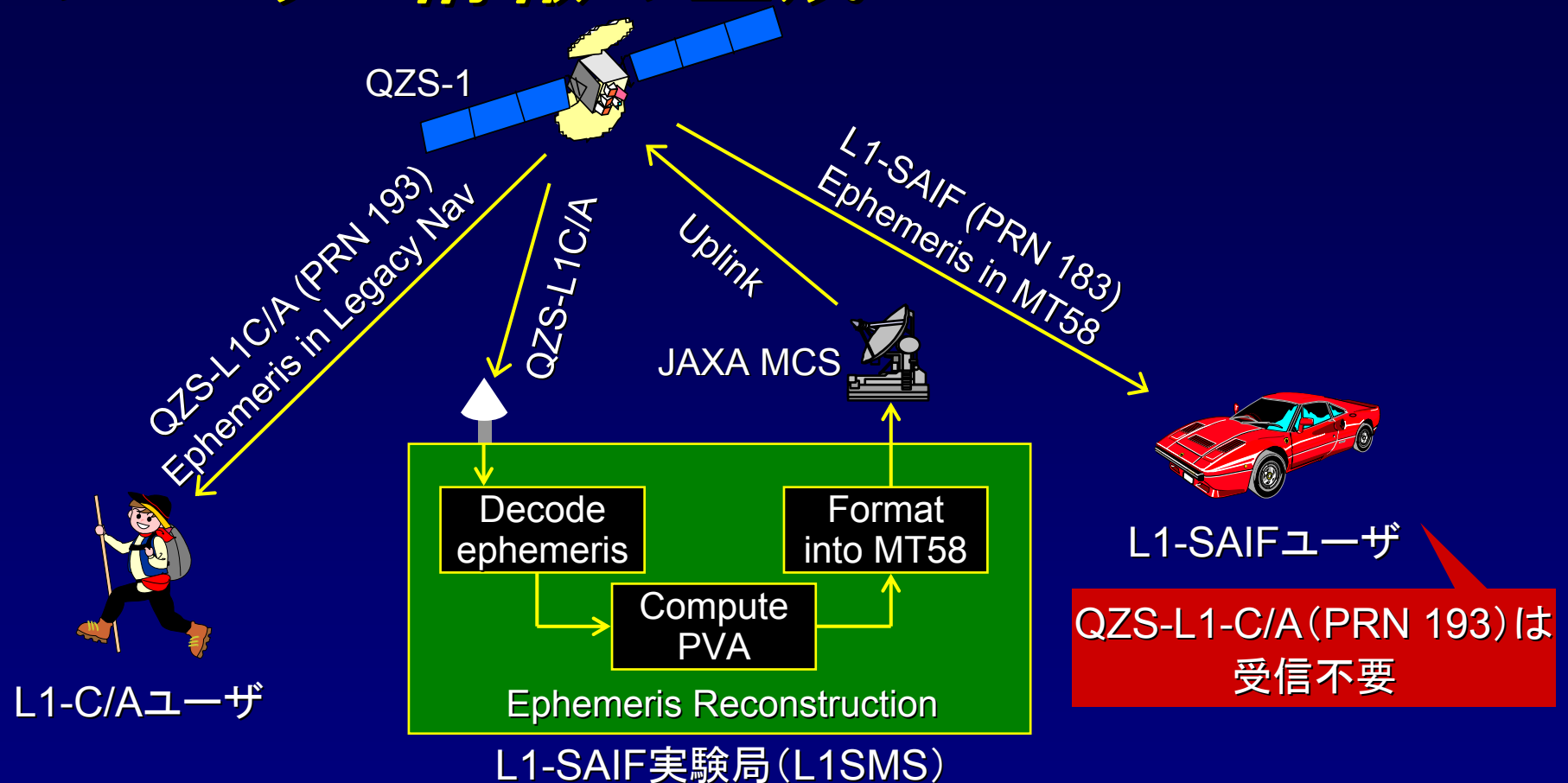
(5)

L1-SAIF信号のレンジング性能

レンジング機能の利用

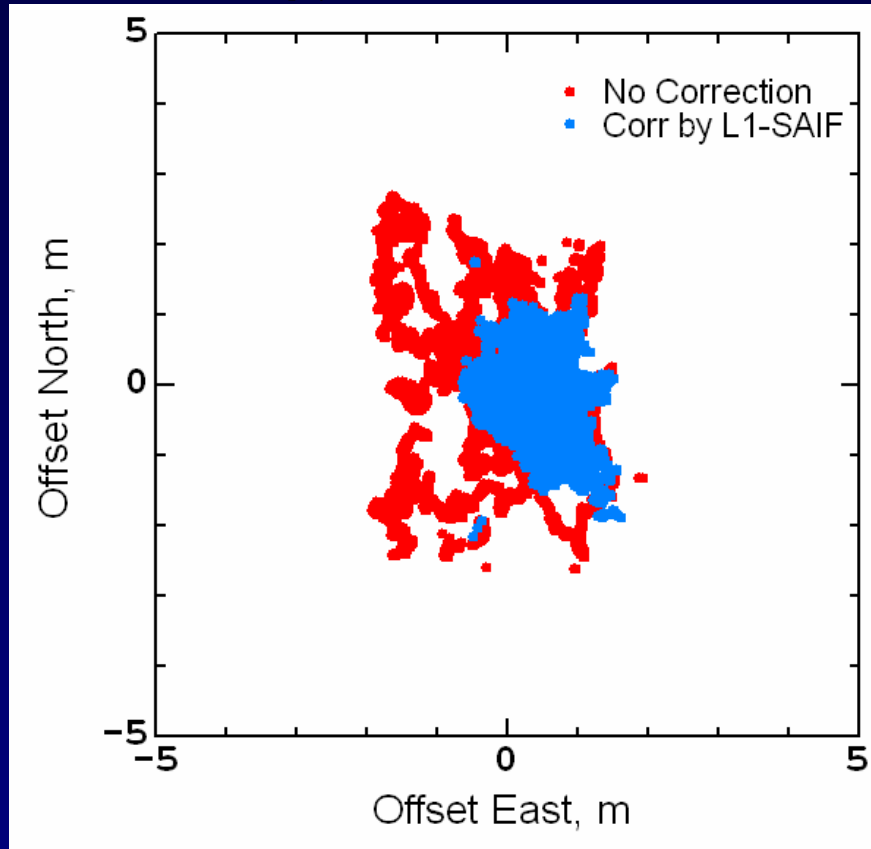
- L1-SAIF信号のレンジング(測距)機能:
 - RF信号形式はGPS L1 C/A信号と同一(PRN番号183): 距離の測定に使用可能。
 - レンジング機能を有効とするためには、準天頂衛星自身のエフェメリス情報(軌道情報)を放送する必要がある。
 - ◆ このため、L1-SAIF拡張メッセージでMT58「QZSエフェメリス」を定義。
- L1-SAIF実験局(L1SMS)にエフェメリス情報の放送機能を付加。
 - MT58「QZSエフェメリス」を放送する(電子航法研究所による実験中のみ)。
 - MT58の生成には、JAXAモニタ局から送られてくるQZS-L1-C/A航法メッセージを使用。
- エフェメリス情報の品質も含めて、レンジング性能を評価した。
 - RF信号の品質: 帯域幅が24MHzと広く、GPSと同等の測距性能が期待できる。
 - 問題はエフェメリス情報の品質。
 - 性能評価に使用したユーザ受信機:
 - ◆ JAVAD ALPHA-G3T(QZSSオプション付き)
 - ◆ 擬似距離出力を電子航法研究所開発のソフトウェアで処理。
 - ◆ 仰角マスク5度、キャリアスレーシング100秒。

エフェメリス情報の生成



- QZS-L1-C/A信号(補完信号:PRN 193)で放送された軌道情報から、L1-SAIF信号向けのエフェメリス情報を再構成する:
 - ◆ L1-C/A信号の航法メッセージを取得して、位置・速度・加速度に変換してMT58を生成する。
- ユーザはL1-SAIF (PRN 183) 以外の信号を受信する必要はない。

水平測位誤差(L1-SAIFレンジングあり)



2011-08-18

02:18:45 to 21:16:20

L1-SAIF (PRN183) Ranging ON

L1SMS Configuration:

6 DF GPS GMS (GEONET)

4 SF GPS/QZS GMS (JAXA)

User location:

@ENRI, Tokyo

Receiver:

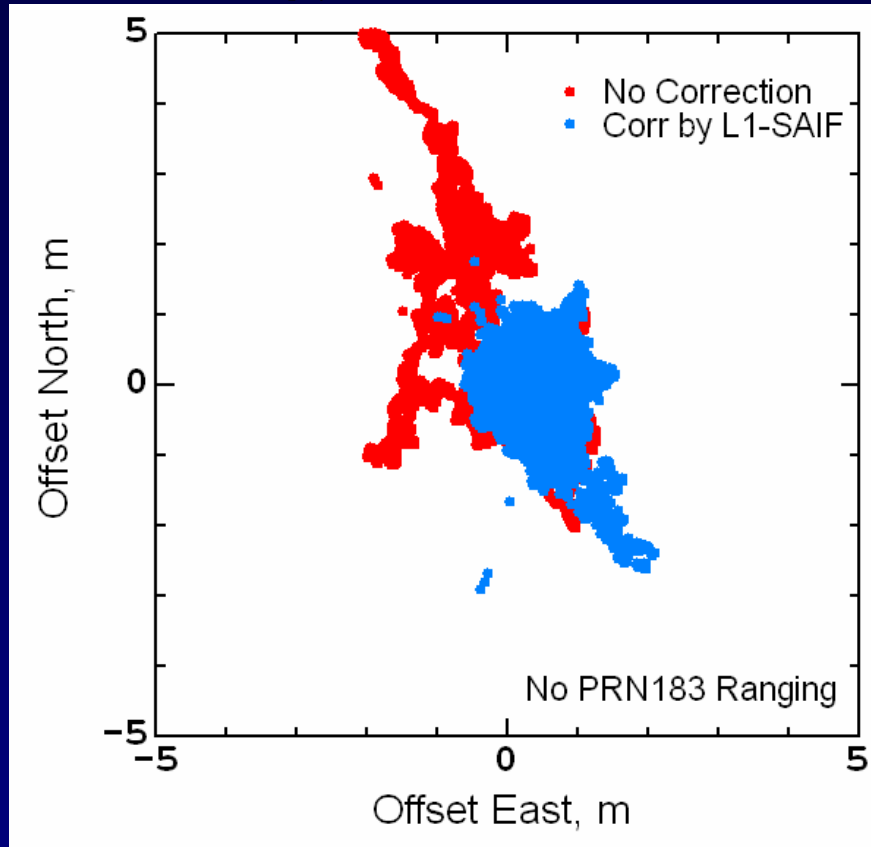
JAVAD ALPHA-G3T

Processing by ENRI

Mask 5deg, Smoothing 100s

L1-SAIF Correction	L1-SAIF Ranging	Hor RMS	Hor Max	Ver RMS	Ver Max
OFF	OFF	1.809 m	6.241 m	2.673 m	7.187 m
	ON	1.403 m	8.982 m	3.714 m	15.196 m
ON	OFF	0.680 m	8.686 m	0.988 m	13.308 m
	ON	0.658 m	2.494 m	0.937 m	4.682 m

水平測位誤差(L1-SAIFレンジングなし)



2011-08-18

02:18:45 to 21:16:20

L1-SAIF (PRN183) Ranging OFF

L1SMS Configuration:

6 DF GPS GMS (GEONET)

4 SF GPS/QZS GMS (JAXA)

User location:

@ENRI, Tokyo

Receiver:

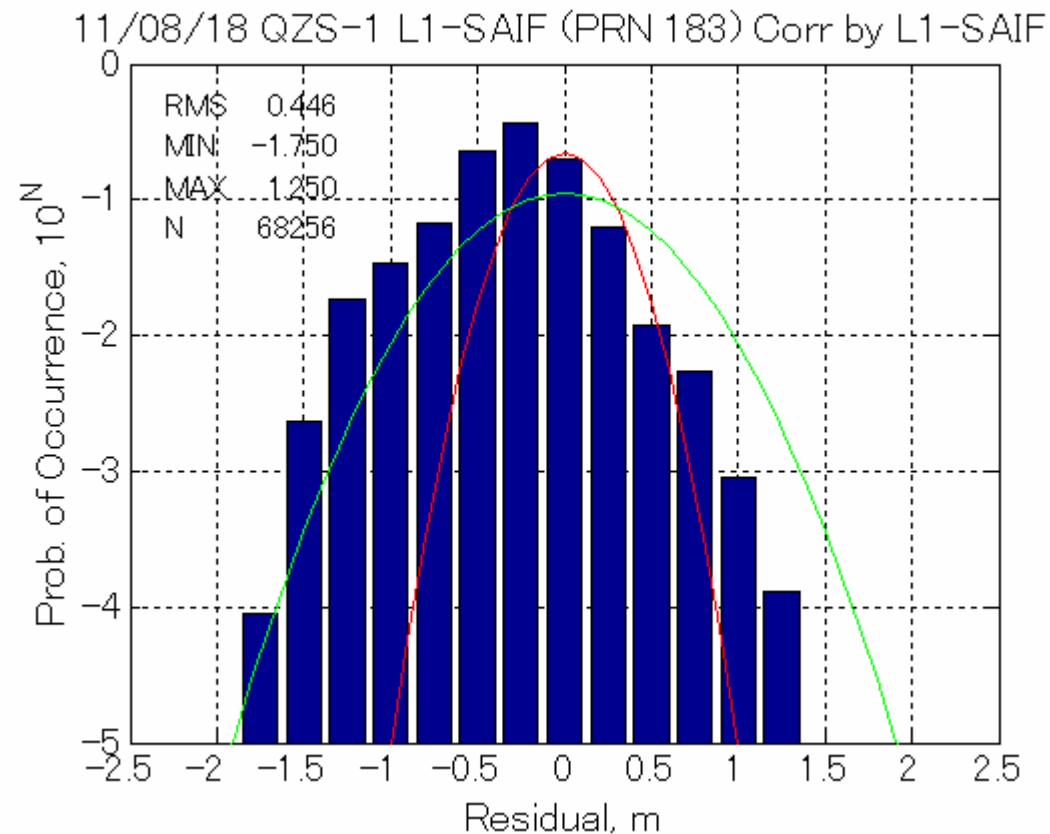
JAVAD ALPHA-G3T

Processing by ENRI

Mask 5deg, Smoothing 100s

L1-SAIF Correction	L1-SAIF Ranging	Hor RMS	Hor Max	Ver RMS	Ver Max
OFF	OFF	1.809 m	6.241 m	2.673 m	7.187 m
	ON	1.403 m	8.982 m	3.714 m	15.196 m
ON	OFF	0.680 m	8.686 m	0.988 m	13.308 m
	ON	0.658 m	2.494 m	0.937 m	4.682 m

残差ヒストグラム



2011-08-18

02:18:45 to 21:16:20

L1-SAIF Correction ON

L1SMS Configuration:

6 DF GPS GMS (GEONET)

4 SF GPS/QZS GMS (JAXA)

User location:

@ENRI, Tokyo

Receiver:

JAVAD ALPHA-G3T

Processing by ENRI

Mask 5deg, Smoothing 100s

- 残差は仰角によらず1.8m以内に収まり、RMS値も0.44mと良好。
- 小さなバイアス誤差(～0.3m)がみられる。

まとめ

- 準天頂衛星システム(QZSS) L1-SAIF補強信号:
 - 準天頂衛星は、GPS補完信号に加え、補強信号を放送する。
 - 補強信号:すべてのGPS衛星に対して、測位性能を改善する補強情報を提供。
 - L1-SAIF信号:GPS L1 C/Aと同一形式の補強信号。当所が開発を担当。
 - JAXAの高精度測位実験システムと連携して稼動するL1-SAIF実験局を電子航法研究所内に整備した。
- 技術実証実験:
 - 準天頂衛星「みちびき」を使用して技術実証実験を実施。
 - L1-SAIF信号については車両による実験を行い、サブメータ程度の測位精度が得られることを確認した。
 - L1-SAIF信号の測距機能を利用できるようL1-SAIF実験局に機能追加。測距性能を評価したところ、0.44m RMS程度の良い性能を確認した。
- 今後の予定:
 - 当所はH24年度末までL1-SAIF信号に関連した実験を継続。
 - MSAS衛星やGLONASS衛星に対する補強情報の生成・放送を予定。