

準天頂衛星システムの
技術実証の進捗状況
(サクセスクライテリアの達成状況)

平成24年3月28日(水)

(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)

宇宙利用ミッション本部

理事 本間 正修

ミッションマネージャ 野田 浩幸

報告内容

- 準天頂衛星初号機「みちびき」の主な経緯
- 準天頂衛星システム技術実証の概要とサクセスクライテリア
- GPS補完システム技術に関する
 - サクセスクライテリアの達成状況
- 次世代衛星測位基盤技術に関する
 - サクセスクライテリアの達成状況
- 衛星の運用状況
- まとめ

準天頂衛星初号機「みちびき」の主な経緯

(1) プロジェクトの経緯

- 2006年10月: 宇宙開発委員会推進部会において、「宇宙開発に関する重要な研究開発の評価」として、準天頂高精度測位実験の事前評価結果について最終とりまとめ。
- 2006年11月: 宇宙開発委員会において、上記とりまとめ了承。
- 2007年1月: JAXA宇宙利用推進本部(現、宇宙利用ミッション本部)において、準天頂衛星システムプロジェクトチームを発足し、準天頂衛星システム(第1段階)の整備・運用に着手。

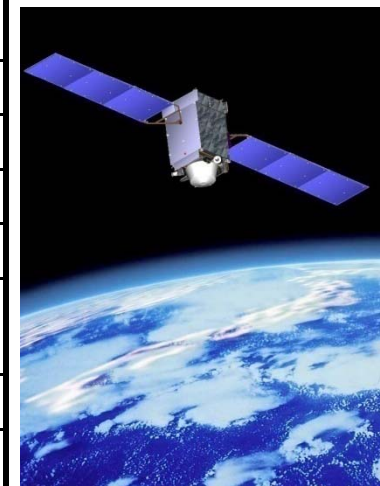
(2) 打ち上げ後の経緯

- 2010年9月11日20時17分にH-IIAロケット18号機により打ち上げ。
- 2010年12月13日に定常運用に移行。12月15日から技術実証・利用実証を開始。
- 2011年6月22日にGPS補完信号の一部(L1C/A、L2C)、7月14日に、残りの全てのGPS補完信号(L5、L1C)について、測位演算に使用できる健全な測位信号の提供を開始。
- 2012年3月現在、準天頂衛星システムの運用及び技術実証・利用実証は順調に実施されている。



@種子島宇宙センター

項目	諸 元
外觀形状	箱型(右図)
質量	4020kg(ドライ質量1802kg)
発生電力	約5kW
姿勢	三軸安定 / 測位アンテナを地心方向指向
測位用信号等	測位信号: GPS相互運用信号+独自信号(LEX信号) 時刻比較: Ku帯
寿命	10年(バッテリー、太陽電池、推薬: 12年)
軌道	準天頂軌道 (軌道傾斜角: 約45度、離心率: 約0.1、 周期: 23時間56分、軌道長半径: 約42,000km)
打上げロケット	H-IIA202ロケット



「みちびき」軌道上外観

準天頂衛星システム技術実証の概要とサクセスクライテリア

● 準天頂衛星システムの技術実証・利用実証

- GPS補完: GPS互換信号を送信し、GPSとの組み合わせによって、利用可能エリアの拡大や利用可能時間を増加させる実験を実施する。
 - GPS補強: 基準点で受信したGPS信号の誤差情報やGPS信号の使用可否情報等を送信して、測位の精度の高精度化や高信頼性化を行う。
 - 次世代衛星測位基盤技術: 実験用信号による衛星測位実験や擬似時計技術の研究開発及び軌道上実験を行う。
- ⇒ JAXAは、GPS補完、次世代衛星測位基盤技術に関する技術実証を実施する。(実験担当は補足①参照)

● サクセスクライテリア(下表参照)

クライテリア			達成状況
GPS補完システム技術	ミニマムサクセス	GPS補完信号を送信して都市部、山間部等で可視性改善が確認できること	達成
	フルサクセス	近代化GPS(*1)民生用サービス相当の測位性能が得られること。	達成
	エクストラサクセス	電離層遅延補正等の高精度化により目標を上回る測位性能が確認されること。	達成
次世代衛星測位基盤技術(*2)	ミニマムサクセス	—	—
	フルサクセス	将来の測位システム高度化に向けた基盤技術実験により所定の機能が確認されること。(実験計画制定時に、目標の具体化を図る。)	達成
	エクストラサクセス	将来の測位システム高度化に向けた基盤技術実験により所定の性能が確認されること。(実験計画制定時に、目標の具体化を図る。)	一部達成

* 1 近代化GPS: 米国で計画されている次世代の高精度化、高信頼性化衛星測位システム

* 2 将来の高度化に向けた基盤技術とは、実験信号(周波数・コード・メッセージ)等による測位精度の更なる高精度化、高信頼性化を目指した技術開発を計画中である。

GPS補完システム技術ミニマムサクセスの達成状況

クライテリア : GPS補完信号を送信して都市部、山間部等で可視性改善が確認できること。

確認結果 : 都市部、山間部での測位衛星の可視性改善のための以下の条件を満足することを確認した。

「日本国内で仰角60度以上で8時間以上準天頂衛星が見えること。」

⇒日本及びその近傍域において天頂に8時間以上の滞在を確認。(補足②参照)

⇒測位可能時間率の改善を確認(下図参照)。

1周波コード測位における測位可能時間率の改善(新宿の例)

- 走行軌跡
- GPSのみで測位ができた地点
(衛星4機以上が可視)
- GPS+「みちびき」で測位ができた地点
(衛星4機以上が可視)



測位可能時間率:

- GPSのみ 28.5%
- GPS+「みちびき」 70.0%

「みちびき」を組み合わせると新宿のようなビル谷でも測位可能時間率は70%に達し、**2.5倍の改善率**。高架下や樹木の陰を除けば、ほとんどの場所での測位が可能。

クライテリアを満足

GPS補完システム技術フルサクセスの達成状況(1/2)

クライテリア：近代化GPS(*1)民生用サービス相当の測位性能が得られること。

(*1)近代化GPS:米国で計画されている次世代の高精度化、高信頼性化衛星測位システム

確認結果

(1) **精度** :GPSと組み合わせて測位を行ったときのユーザ水平方向測位精度を、以下①の通り、GPSの仕様値と同等とする。また、測位誤差の内、宇宙セグメント分(軌道推定誤差、時刻推定誤差のトータル)をクライテリアの必要条件として以下②の通りとする。

① **1周波コード:21.9m(95%)、2または3周波コード:7.5m(95%)**

② **SIS-URE (*2):±2.6m以内 (95%)**

⇒ 上記①、②を満足していることを確認した。(下表参照)

[ユーザ水平方向測位精度 (95%値)]

項目	1周波 コード測位	2周波 コード測位
仕様値 [m]	21.9	7.5
実績 [m]	4.98	3.84

※ 2011年7月~2012年2月におけるJAXA測位モニタ実験局
9局分のデータを集計(アラート設定期間除く)
(補足③、④参照)

[SIS-URE (95%値)]

項目	値
仕様値 [m]	±2.6
実績 [m]	±0.786

※1:対象期間は、2011年7月~2012年2月
(補足⑤参照)

(*2) SIS-URE(Signal-in-Space User Range Error):
測位精度を劣化させる誤差の一部であり、測位信号・信号の伝搬路・ユーザ受信機で発生する誤差の内、測位信号に起因する誤差。測位信号に含まれる衛星の軌道・時刻情報等の誤差であり、測位信号の基本性能を示す指標となっている。

GPS補完システム技術フルサクセスの達成状況(2/2)

(2)アベイラビリティ:精度等、所定の要件を満足して準天頂衛星システム全体が稼動する確率

確認結果 ⇒ 平成23年7月10日~平成24年3月3日までの実績において要求を満足(下表参照)。

項目	要求	実績
準天頂衛星システム全体	0.95以上	0.9835
<p>アベイラビリティを下げる主要因となっている衛星マヌーバ運用は、以下の通り、要求を満足している。</p> <p>①軌道制御によるサービス停止時間間隔 : 平均150日、アラート付加時間36時間以下 [要求] 平均180日に1回(アラートフラグ付加時間36時間以下) [実績]</p> <p>②アンローディングによるサービス停止時間間隔 : 平均40日以上、アラート付加時間12時間以下 [要求] 平均75日に1回(アラート付加時間12時間以下) [実績]</p> <p>なお、他の要因についても要求を満足している。(補足⑥参照)</p>		

(3)インテグリティ:「みちびき」およびGPSの状態をモニタし、異常検出時に早期にアラート情報をユーザへ通知する機能

確認結果 ⇒ 初期機能確認試験において意図的なSIS-URE異常を発生させ、異常検知からアラート通知までの時間計測を実施し、通知時間の要求を満足していることを確認(右下表参照)

[モニタ項目]

- SIS-URE : 航法メッセージの精度のモニタ
- コードロック : 信号品質のモニタ(アラートの自動発行は、「みちびき」のみを対象として実施)
- 受信電力 : 衛星が送信する測位信号の送信状態のモニタ
- データフォーマット : 航法メッセージフォーマットのモニタ

[アラート通知時間計測試験結果]

信号	仕様 [s]	最大通知時間 [s]
L1C/A	30	19
L2C	40	25.5
L5	30	18.8
L1C	90	54.0

(補足⑦参照)

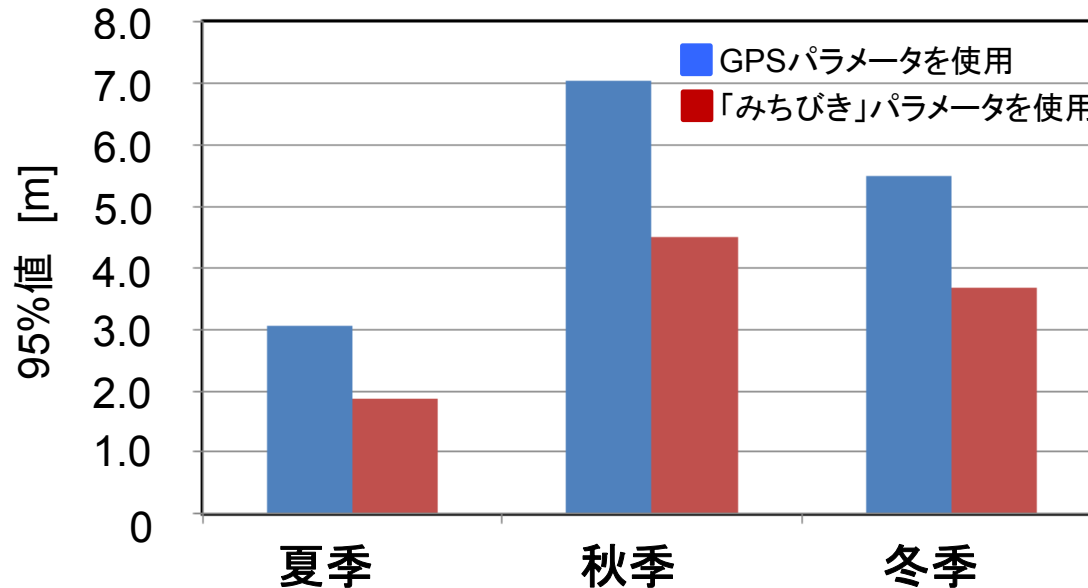
クライテリアを満足

GPS補完システム技術エクストラサクセスの達成状況

クライテリア：電離層遅延補正等の高精度化により目標を上回る測位性能が確認されること。

確認結果：GPSの電離層遅延補正モデルを日本近傍域を対象に合わせこむことにより、日本近傍域においてGPS(水平測位精度:21.9m(95%)以下)を上回る測位精度(3.33m(95%))を達成した。以下に季節ごとの精度改善効果を示す。(GPSのパラメータを使用した場合と比較して30~40%程度と大きく向上していることがわかる)(補足⑧参照)

[GPS+「みちびき」による1周波コード測位の水平位置誤差] (国内のJAXA測位モニタ実験局4局における測位誤差)



クライテリアを
満足

※ 電離層状態の季節変化に配慮し、2011年8月~2012年2月にかけて季節毎に約2週間分のデータで評価した。

次世代衛星測位基盤技術に関するサクセスクライテリアの達成状況

フルサクセス : 将来の測位システム高度化に向けた基盤技術実験により所定の機能が確認されること。

確認結果 : 2kbpsのデータ伝送速度を有する我が国独自のLEX信号について、「準天頂衛星システムユーザインタフェース仕様書」(IS-QZSS)に規定する信号の機能(RF信号特性、メッセージフォーマット)を有することを確認した。

⇒ LEX信号のコード、メッセージなどの測位信号生成・送信機能は正常動作し地上モニタ局においても継続して正常に受信しており、RF特性を含む信号特性が正常であることを確認。なお、LEX信号について一部被干渉が見られたが、サクセスクライテリアの達成条件であるLEX信号の機能は確認できた。

クライテリアを満足

エクストラサクセス : 将来の測位システム高度化に向けた基盤技術実験により所定の性能が確認されること。

確認結果

- ① GPSのモデルとは異なる「みちびき」独自に構築した電離層遅延補正モデルにより、1周波測位において目標(3m(95%)以下)を上回る測位精度(1.40m(95%))を達成した。
- ② 高精度な衛星軌道・時刻情報を搭載したLEX信号を利用した単独搬送波位相測位により、地上基準点によらず、水平30cm、垂直60cmの誤差(rms)の測位精度を実現できること確認した結果、測位結果の70%で目標の精度を達成した。今後、測位精度の劣化要因の調査、「みちびき」に対する軌道・時刻推定の精度改善を継続し、エクストラサクセスの達成を目指す。(補足⑨参照)

クライテリアを一部満足

衛星の運用状況

- 定常段階移行(平成22年12月13日)から現時点まで、原子時計1の運用中のoff以外に軌道上不具合は発生しておらず、順調に運用されている。以下に原子時計1のoff事象に関する調査結果を示す。

(1) 発生状況

2011年7月28日、衛星搭載のルビジウム原子時計1が運用中にOFFとなる事象が発生した。このため、運用系を原子時計1から原子時計2に切り替えて定常運用を実施中である。

(2) 調査状況

調査の結果、原因は、原子時計に外部から電源を供給している搭載制御計算機の電源制御回路(原子時計1用)で発生した放射線によるシングルイベント、又は部品の偶発故障であり、原子時計1は故障していないと判断している。

(3) 今後の予定

原子時計2を使用した定常運用にリスクは無いため、引き続き現在のコンフィギュレーションで技術実証・利用実証を推進する。

なお、実用準天頂衛星システム設計への反映が出来るように、今後、時期を見定めて、放射線によるシングルイベントか部品の偶発故障かを特定するための運用を行う。

まとめ

- ✓ 「みちびき」は、当初計画通りに打ち上げられ、現時点まで順調に運用を続けている。
- ✓ 技術実証の結果、次世代衛星測位基盤技術のエクストラサクセスの一部を残し、サクセスクライテリアを満足することを確認した。
- ✓ 今後、次世代衛星測位基盤技術のエクストラサクセス(単独搬送波位相測位による高精度測位)の達成に向けて、技術実証を継続していく。
- ✓ 「みちびき」で獲得した成果は、実用準天頂衛星システムに継承していく予定である。

以上

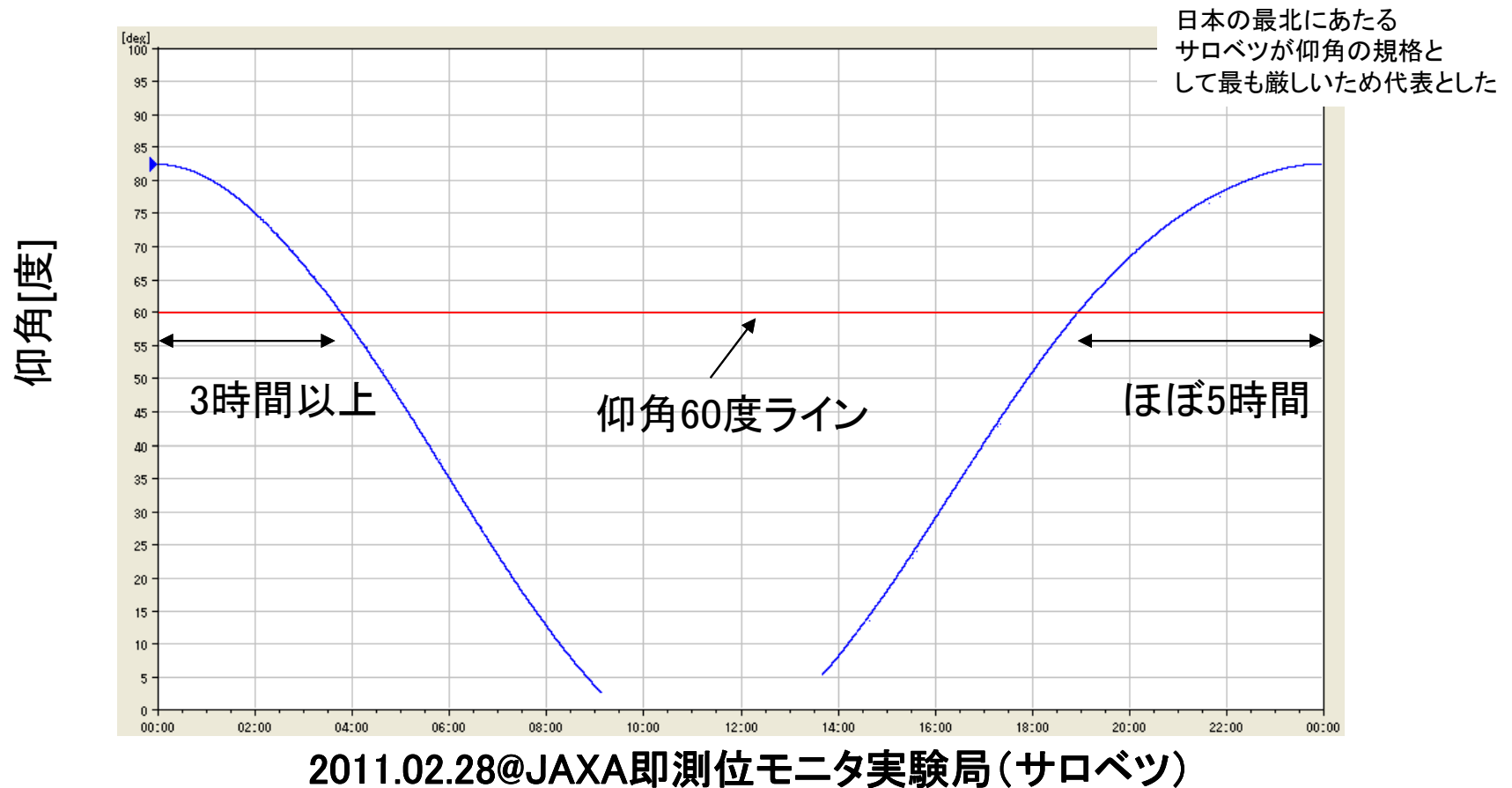
補足説明資料

補足① 準天頂衛星システム技術実証・利用実証の概要

技術識別	担当機関	概要
GPS補完	(独)宇宙航空研究開発機構	GPS補完信号を送信し、GPSとの組み合わせによって利用可能エリアの拡大や利用可能時間を増加させる実験(GPS補完信号利用)。
	(独)通信情報研究機構	衛星搭載の時刻比較装置により、衛星内、地上-衛星間など、準天頂衛星システム内外の時刻比較を実施し、精度を検証する実験(時刻比較用Kuバンド信号利用)。
GPS補強	(独)電子航法研究所	GPSの測距補正情報(軌道、時刻、伝搬補正情報など)及びインテグリティ情報を生成し、測位信号として送信する実験(L1-SAIF利用)。目標精度はサブメータ級。
	国土地理院	GPS向けの測位補正情報を生成し、測位信号として送信し、GPS測量への高精度補正に適用できることを確認する実験(LEX利用)。目標精度はセンチメータ級。
	(財)衛星測位利用推進センター	電子基準点などの情報に基づいてGPS補強情報やGPS衛星捕捉支援情報を生成・配信し、サブメータ級の1周波コード単独測位を行う実験(L1-SAIF利用)及びセンチメータ級の2周波搬送波位相単独測位(LEX利用)を行う実験。
次世代基盤技術	(独)宇宙航空研究開発機構	GPS及びQZSS測位補正情報を生成し、測位信号として送信し、測位性能を向上できることを確認する実験(LEX信号利用)。
	(独)産業技術総合研究所	搭載の原子時計の代わりに、地上においた高安定周波数基準により通信回線を使って搭載水晶発振器を連続的に校正し、それを周波数基準として測位信号の生成が可能であることを確認する実験(L1C/A利用)。

補足② 準天頂衛星初号機「みちびき」の高仰角特性

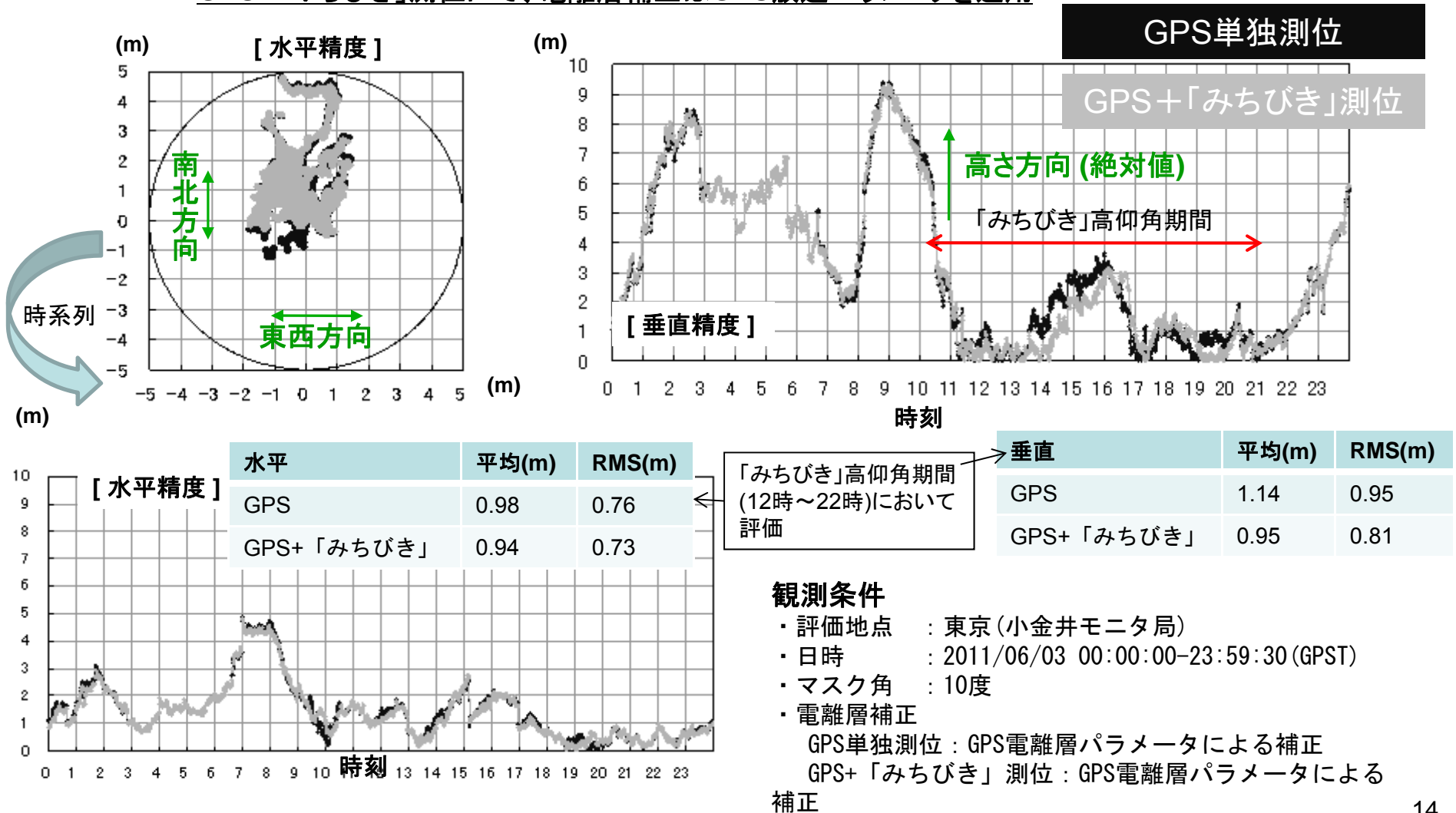
- 「日本国内で仰角60度以上で8時間以上準天頂衛星が見えること」を、JAXA測位モニタ実験局の内、日本の最北にあたるサロベツ局(最も厳しいケース)で評価し、要求に合致することを確認した。



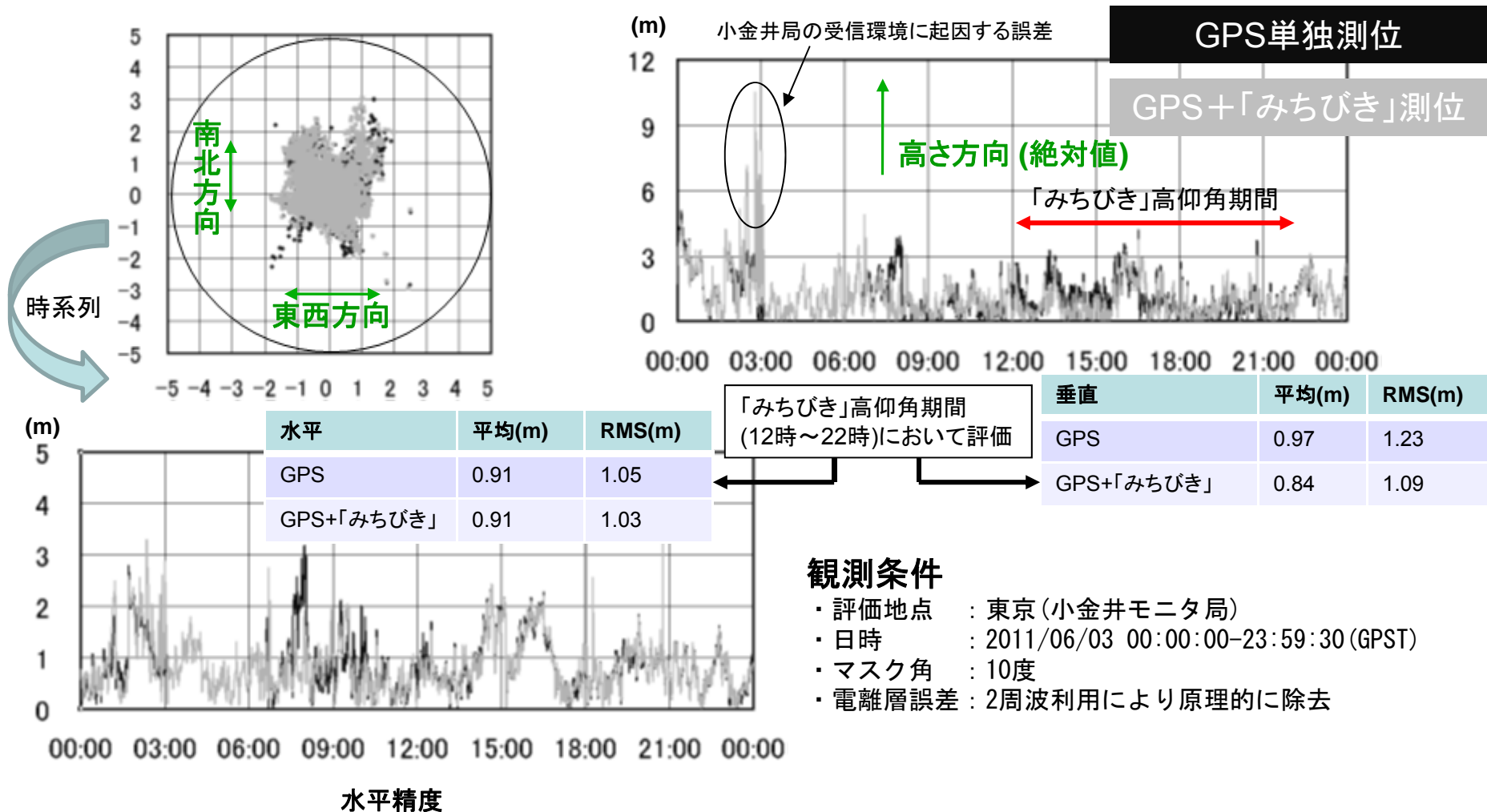
補足③ 「みちびき」とGPSの組み合わせ測位精度(1周波コード測位)

ユーザ測位精度:「みちびき」とGPSの組み合わせ測位精度は、1周波コード:水
 平方向誤差21.9m (95%)以下を満足。以下に測位結果の例を示す。

GPS+「みちびき」測位にて、電離層補正はGPS放送パラメータを適用

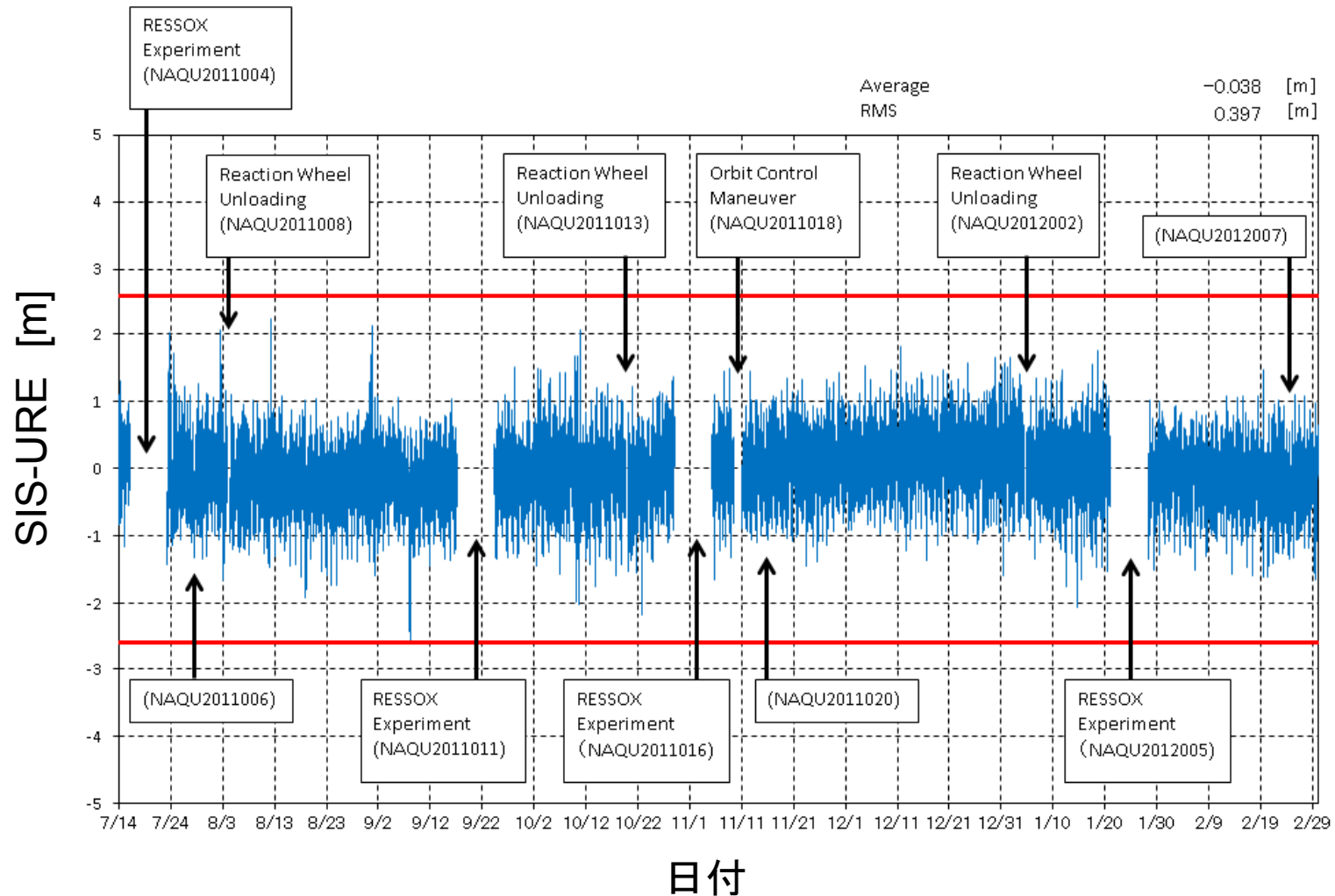


ユーザ測位精度:「みちびき」とGPSの組み合わせ測位精度は、2周波コード:水平方向誤差7.5m (95%)以下を満足。以下に測位結果の例を示す。



補足⑤ SIS-UREの推移

SIS-UREは、全測位信号のアラートが解除となった平成23年7月以降、現時点まで要求仕様(±2.6m以内[95%])を満足している。以下に平成23年7月から平成24年2月までのSIS-UREの推移を示す。(特定の実験時や衛星軌道制御等の運用時は計画的にアラートを設定しており、その期間のデータは削除した(下図中の注釈参照))



補足⑥ アベイラビリティの確認結果

アベイラビリティ:精度等、所定の要件を満足して準天頂衛星システム全体が稼働する確率

平成23年7月~平成24年2月までの実績

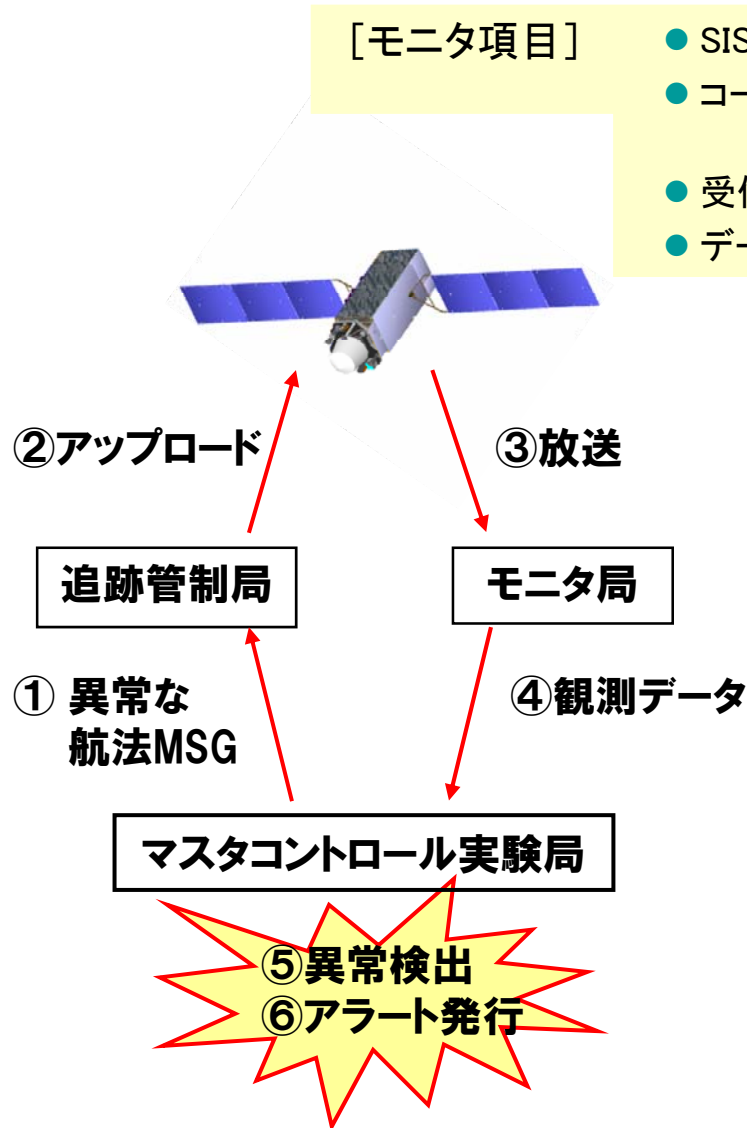
項目		要求	実績
準天頂衛星システムのアベイラビリティ		0.95以上	0.9835
内 訳	$T_{\Delta V}$: 軌道制御によるサービス停止時間	間隔は平均150日、 アラート付加時間36時間以下	0.9930
	T_{UL} : アンローディングによるサービス停止時間	間隔は平均40日以上、 アラート付加時間12時間以下	0.9930
	A_{SAT} : 衛星バス稼働率	0.995以上	1
	A_{GRD} : 追跡管制システム稼働率	0.995以上	1
	A_{NAV} : 高精度測位実験システム稼働率	0.99以上	0.9975
	A_{ACC} : 誤警報を出さない確率	0.995以上	0.9999

①軌道制御によるサービス停止時間間隔: 平均180日に1回(アラートフラグ付加時間36時間以下) [実績]

②アンローディングによるサービス停止時間間隔: 平均75日に1回(アラート付加時間12時間以下) [実績]

補足⑦ インテグリティの確認結果

インテグリティ:「みちびき」およびGPSの状態をモニタし、異常検出時に早期にアラート情報をユーザへ通知する機能



[モニタ項目]

- SIS-URE : 航法メッセージの精度のモニタ
- コードロック : 信号品質のモニタ (アラートの自動発行は、「みちびき」のみを対象として実施)
- 受信電力 : 送信電力のモニタ
- データフォーマット : 航法メッセージフォーマットのモニタ

アラート通知時間計測結果

信号	仕様 [s]	実験時の通知時間[s]	最大通知時間(フレーム長考慮)[s]
L1C/A	30	13	19
L2C	40	13.5	25.5
L5	30	12.8	18.8
L1C	90	36.0	54.0

※左図の③の異常信号を受信してマスタコントロールが異常を検知してからアラートが発行され、①、②、③の経路でモニタ局でそのアラートが受信されるまでの時間を計測した。

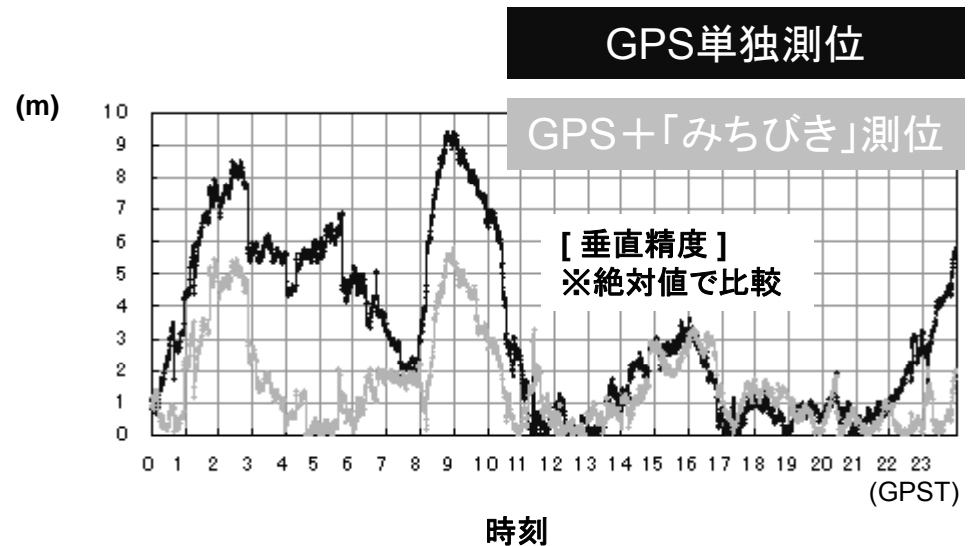
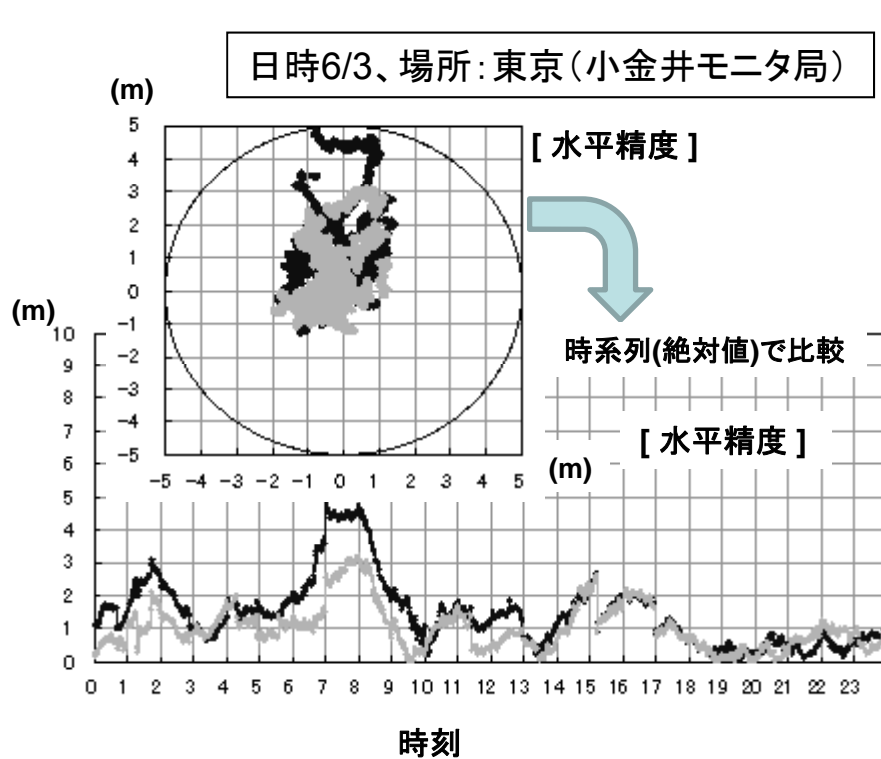
全測位信号のアラートが解除となった平成23年7月14日以降、以下の案件でインテグリティ機能が正常に動作している。

⇒平成23年7月28日原子時計10FF事象発生の際、コードロックモニタで異常を検知し、アラートを発行。(ただし、測位信号を生成する原子時計がOFFとなったため、衛星からはアラートが放送されていない)

JAXA補足⑧ 「みちびき」電離層遅延補正パラメータによる測位精度の改善

アプローチ: JAXAモニタ実験局で取得したデータ及び電子基準点データを使用し、GPSの電離層遅延補正モデルを日本近傍域に合わせこんだモデルに基づいて電離層遅延補正パラメータを生成した。

上記で生成したパラメータを使用したユーザ測位水平誤差の改善例を以下に示す。



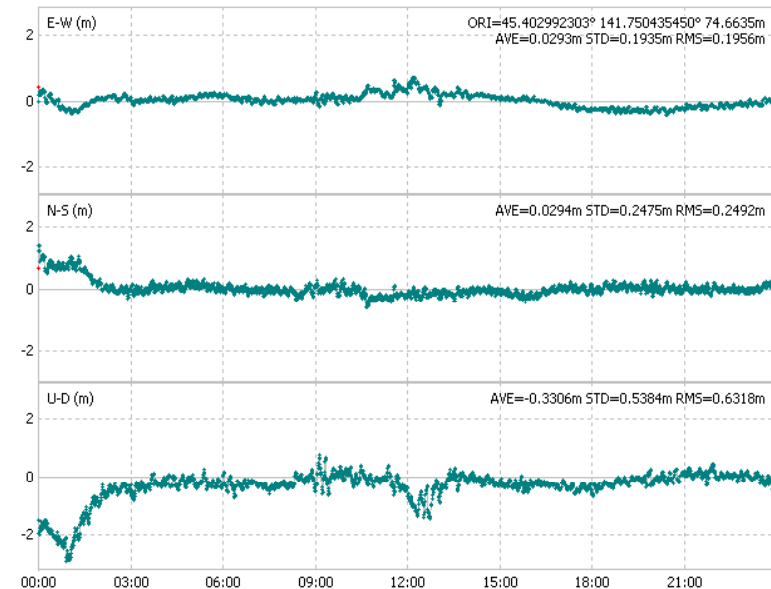
測位精度(m)		GPS单独測位	GPS+「みちびき」測位
水平方向	平均	1.451	1.027
	RMS	1.773	1.232
	最大	4.885	3.209
垂直方向	平均	3.204	1.540
	RMS	4.122	2.080
	最大	9.388	5.828

補足⑨ 単独搬送波位相測位 (PPP) の実験結果

既存のJAXAモニタ実験局で取得したデータに基づいて「みちびき」とGPSの精密な軌道・時刻推定値を作成し、そのデータを使用してPPP (Precise Point Positioning)を実施した。

得られた測位結果の7割程度で目標の測位精度(水平±30cm/垂直±60cm誤差(RMS))が得られた(下表参照)。今後、測位精度の劣化要因の調査、「みちびき」に対する軌道・時刻推定の精度改善を継続し、エクストラサクセスの達成を目指す。

場所	年	月	日	RMS[m]	RMS[m]	RMS[m]	RMS[m]
				E-W	N-S	水平	U-D
稚内	2011	6	26	0.1056	0.1376	0.1735	0.3033
			9	0.1303	0.1363	0.1886	0.4808
			12	0.1956	0.2492	<u>0.3168</u>	<u>0.6317</u>
東京	2011	6	26	0.1163	0.1293	0.1739	0.3500
			9	0.1372	0.1366	0.1936	0.3643
			12	0.1906	0.1801	0.2622	<u>0.9775</u>
東京 (+「みちびき」)	2011	6	26	0.1163	0.1292	0.1738	0.3501
			9	0.1372	0.1366	0.1936	0.3643
			12	0.1914	0.1793	0.2622	<u>0.9773</u>
銚子	2011	6	26	0.139	0.1249	0.1868	0.3625
			9	0.2321	0.1509	0.2768	0.4875
			12	0.1618	0.1749	0.2383	<u>0.7543</u>
和泊	2011	6	26	0.1125	0.1225	0.1663	0.314
			9	0.1996	0.2196	0.2968	0.4129
			12	0.205	0.2269	<u>0.3058</u>	0.5075
南大東	2011	6	26	0.1534	0.1292	0.2006	0.339
			9	<u>0.3647</u>	<u>0.3291</u>	<u>0.4912</u>	<u>0.9475</u>
			12	<u>0.3909</u>	<u>0.3793</u>	<u>0.5447</u>	<u>0.8095</u>



稚内(2011年12月27日)の結果
(目標精度未達の例)

上記の場合は、収束に測位開始から1, 2時間かかっていることが、南北方向、上下方向の誤差を増加させている。

下線で示す部分が目標(水平±30cm、垂直±60cm)を達成していない計算結果