

準天頂衛星システムを利用した高精度測位実験システム における高精度軌道時刻推定について

山本 洋介*¹, 沢辺 幹夫*²,
小暮 聡*², 卯尾 匡史*³

Precise Orbit and Clock Estimation Software for High Accuracy Positioning Experiment System Using Quasi Zenith Satellite System

By

Yosuke YAMAMOTO*¹, Mikio SAWABE*², Satoshi KOGURE*² and Masashi UO*³

Abstract: The Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) has started the development of High Accuracy Positioning Experiment System using Quasi-Zenith Satellite System (QZSS). The Master Control Station (MCS) which is one of the components of High Accuracy Positioning Experiment System performs precise orbit and clock estimation using QZSS and GPS positioning signals and generates navigation messages for QZSS users.

This paper presents an overview of the precise orbit and clock estimation software, simulation results of orbit and clock estimation by prototype software, and connection method between GPS time and QZSS time.

Keywords: Quasi-Zenith Satellite System, Orbit Determination, Time Synchronization

概 要

現在、宇宙航空研究開発機構（JAXA）および関連機関において、準天頂衛星システムを利用した高精度測位実験システムの開発を行っている。高精度測位実験システムの構成要素の一つであるマスターコントロール実験局は、測位モニタ実験局で受信した準天頂衛星の測位信号をリアルタイムに収集し、軌道時刻推定を行い、その推定結果に基づくエフェメリスやクロックパラメータを含むGPS補完航法メッセージを生成する。本稿では、マスターコントロール実験局で動作する軌道時刻推定ソフトウェアの概要、軌道時刻推定シミュレーションの結果ならびにGPS補完を実現するために必要となるGPS時系との接続方法についての概要を紹介する。

1. はじめに

現在、宇宙航空研究開発機構（JAXA）および関連機関において、準天頂衛星システム（QZSS：Quasi Zenith Satellite System）を利用した高精度測位実験システムの開発を行っている。QZSSは、日本のほぼ天頂を通る軌道を持つ衛星を複数組み合わせた衛星システムであり、常時1機以上の衛星を日本上空に配置するように設計されたものである。QZSSは2009

* 1 FUJITSU LIMITED

* 2 Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

* 3 NEC TOSHIBA Space Systems, Ltd.

年度に準天頂衛星初号機の打ち上げが計画されており、この衛星システムを利用した高精度測位実験が実施される予定である。

高精度測位実験システムの構成要素の一つである地上セグメントは、測位モニタ実験局で受信した準天頂衛星およびGPS衛星の測位信号をマスターコントロール実験局がリアルタイムに収集し、軌道時刻推定を行い、その推定結果に基づくエフェメリスやクロックパラメータを含むGPS補完航法メッセージを生成する。軌道時刻推定結果は、測位ユーザーがQZSSとGPSを組み合わせた測位を行う際に使用する準天頂衛星（QZS）のエフェメリスやクロックパラメータの源泉となることから、軌道時刻推定は高精度測位実験システムの最も重要な要素の一つである。

本稿では、MCSで動作する軌道時刻推定ソフトウェアの概要、軌道時刻推定シミュレーションの結果およびGPS補完を実現するために必要となるGPS時系との接続方法についての概要を紹介する。

2. 高精度測位実験システムの概要

2.1 高精度測位実験システムの概要

高精度測位実験システムは、QZSSを用いたGPS補完/GPS補強技術や衛星測位システム基盤技術の実証実験を行うことを目的としたシステムであり、QZSとGPS衛星を含む測位システムとして構成される[1]。本システムは、QZSに搭載した原子時計や測位信号送信機等から構成される高精度測位実験システム搭載系（宇宙セグメント）、準天頂衛星及びGPS衛星からの測位信号を受信する測位モニタ実験局（MS：Monitor Station）や各種データ処理を行うマスターコントロール実験局（MCS：Master Control Station）等から構成される高精度測位実験システム地上系（地上セグメント）から構成される。準天頂衛星はGPS互換信号のL1、L2、L5に加え、独自信号であるLEX信号を送信する。高精度測位実験システムの概要図を図2.1-1に示す。

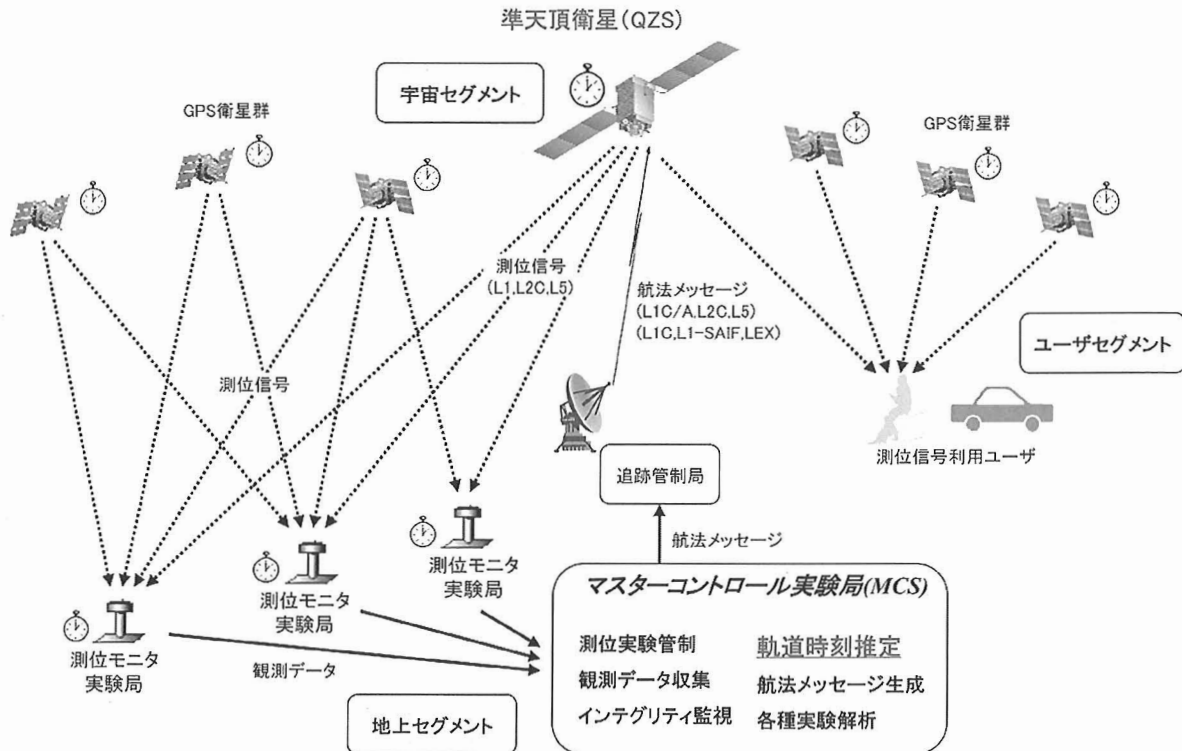


図 2.1-1 高精度測位実験システムの概要図

2.2 地上セグメントの概要

地上セグメントの構成要素の一つである測位モニタ実験局（MS）は、QZSS および GPS 信号受信局として国内4箇所（稚内、小金井、父島、沖縄）、海外5箇所（オアフ、シンガポール、キャンベラ、バンガロール、グアム）、またGPS専用局として海外3箇所（マスパロマス、パース、サンチャゴ）の計12箇所が実験初期の段階に設置される予定である（暫定）。MSで受信した測位信号はマスターコントロール実験局（MCS）へリアルタイムに送信する。

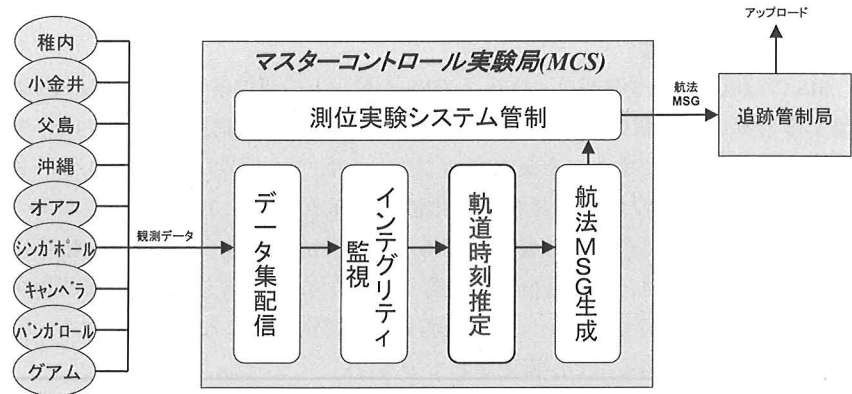


図 2.2-1 地上セグメントにおける処理フローの概要図

MCSは、MSで受信したQZSSおよびGPS測位信号をリアルタイムに収集し、インテグリティ監視や軌道時刻推定を行う。また、軌道時刻推定結果を用いてQZSのエフェメリスやクロックパラメータ等を生成し、GPS互換航法メッセージおよびQZSS独自信号の航法メッセージとして追跡管制システムを経由し準天頂衛星にコマンドとしてアップロードする。

地上セグメントにおける処理フローの概要図を図 2.2-1 に示す。

3. 軌道時刻推定処理の概要

3.1 軌道時刻推定処理の特徴

3.1.1 QZS/GPS一括推定方式

MCSで行う軌道時刻推定は、測位モニタ実験局で観測したL1とL2の搬送波位相および擬似距離の電離層フリー線形結合を基本観測量に用い、QZSとGPS衛星の位置/速度およびMS受信機を含むクロックオフセットをまとめて推定する。軌道時刻推定はリアルタイム処理とし、全衛星の位置/速度およびMS受信機を含むクロックオフセット等を平方根情報フィルタにより逐次推定する。

3.1.2 マスタークロック方式

また、推定する全衛星およびMS受信機のクロックオフセットは、MSの中の1つの受信機クロックを基準とした相対クロックオフセットを推定する。クロック基準局は、UTC（NICT）が物理的に接続された小金井局とする。これにより、軌道時刻推定系では全ての時計がクロック基準局の時計を基準とした時刻系で推定されることになり、その時系原点はクロック基準局受信機のアンテナ位相中心となる。

3.1.3 時系接続

軌道時刻推定系の時系原点はクロック基準局受信機のアンテナ位相中心となるためGPS時系と異なる時系原点を持つ。軌道時刻推定結果はGPS補完航法メッセージの源泉となるため、GPS時系を基準としたエフェメリスやクロックパラメータ等を生成する必要がある。そこで、軌道時刻推定系の時系原点とGPS時系との時系差（GQTO：GPS-QZSS Time Offset）を求め、軌道時刻推定結果を補正することによりGPS時系に接続する。GQTOは、軌道時刻推定によって推定されたGPS衛星クロックオフセットとGPS航法メッセージのクロックオフセットとの差の重み付き平均から求め、軌道時刻推定系の軌道及び時計をGPS時系基準となるよう補正する。GPS時系と接続することにより、GPS補完航法メッセージの生成が可能となる。

3.2 軌道時刻推定のソフトウェアモデル

軌道時刻推定ソフトウェアは、JAXAがADEOS-IIやALOSをターゲットに開発した高精度軌道決定システム（GUTS：Global and High Accuracy Trajectory Determination System）や技術試験衛星VIII型（ETS-VIII）に搭載される高精度時刻基準装置（HAC）を用いた測位実験システムによる実験を通して得られた技術を活用すると共に、国際GNSSサービス（IGS：International GNSS Service）や国際地球回転事業（IERS：International Earth Rotation Service）等の最新の活動成果に基づくソフトウェアモデルを取込んで開発する予定である。

軌道時刻推定ソフトウェアが採用するモデルを表 3.2-1 に示す。また、以下にソフトウェアモデルに関する特徴的な部分

について記述する。

3.2.1 基本観測量

MSに設置される受信機は、QZSとGPS衛星両方の測位信号を受信するGPS/QZS受信機とGPS衛星の測位信号のみを受信する市販GPS受信機の2台で構成される。GPS/QZS受信機は、L1、L2、L5信号に対応し、L1C/A、L2C、L5擬似距離の計測が可能である。市販GPS受信機はL1、L2信号に対応し、L1C/A、L2P擬似距離の計測が可能である。現在運用中のほとんどのGPS衛星は近代化信号であるL2C、L5に対応していないため、GPS近代化対応が進むまでの間、GPS衛星については市販GPS受信機で得られた搬送波位相、擬似距離を軌道時刻推定の観測量に用いる。

双方向時刻比較は、情報通信研究機構（NICT）が行う双方向時刻比較実験で得られた時刻制御実験局とQZSおよび測位モニタ実験局間の時刻オフセットを観測量として用いることを可能とする。特に、QZSとの時刻比較結果は軌道時刻推定の収束性に効果があることが確認されている[2]。

また、QZSにはレーザーフレクタが搭載される。高精度測位実験ではJAXA等の局を用いてSLR（Satellite Laser Ranging：衛星レーザ測距）を行い、軌道時刻推定の精度検証のためにオフライン解析に用いる。

3.2.2 観測データ前処理

軌道時刻推定にはL1とL2による電離層フリー線形結合を観測量に用いる。QZS/GPS受信機で得られた擬似距離は、

表3.2-1 軌道時刻推定ソフトウェアのモデル (1/2)

番号	項目	概要
1	基本観測量	
1.1	測位信号	測位モニタ実験局は受信機2台構成 ①GPS/QZS受信機 : GPS/QZS搬送波位相(L1,L2,L5)、擬似距離(L1C/A,L2C,L5) ②GPS受信機(μZ-CGRS) : GPS搬送波位相(L1,L2)、擬似距離(L1C/A,L2P) => 軌道時刻推定では電離層フリー線形結合を観測量に用いる(L1-L2の組合せ)。 => GPS衛星は近代化対応が進むまではGPS受信機のデータを用いる。
1.2	双方向時刻比較	双方向時刻比較時に選択して使用 ①時刻制御実験局-QZS衛星間時刻比較結果 ②時刻制御実験局-測位モニタ実験局間時刻比較結果
1.3	SLRデータ	オフライン解析時のみ使用
2	観測データ前処理	
2.1	受信機間バイアス補正	GPS衛星についてGPS受信機のデータを用いる場合に行う。 ①GPS/QZS及びGPS両受信機の共通観測L1C/Aによる受信機間バイアス補正 ②GPS/QZS受信機及びGPS受信機それぞれの周波数間バイアス補正
2.2	C1-P1バイアス補正	GPS SVクロック基準をL1P-L2P電離層フリー線形結合とするためのGPS L1C/Aに対する補正
2.3	サイクルスリップ検出	幾何学フリー線形結合、Melbourne-Webbena線形結合等の組合せによる検出
2.4	電離層補正	電離層フリー線形結合による電離層遅延補正
2.5	擬似距離データ平滑	擬似距離データの平滑化処理
3	観測量理論値計算	
3.1	アンテナ位相中心オフセット補正	①測位モニタ実験局 : オフセット+仰角依存性を考慮した補正 ②QZS衛星送信ANT : 衛星重心-ANT位相中心オフセット+衛星姿勢を考慮した補正 ③GPS衛星送信ANT : IGS解析センターが使用しているカタログ値使用
3.2	Phase Windup	送受信機アンテナ位相中心の幾何学的関係から補正
3.3	対流圏遅延補正	Niellマッピング関数を用いた天頂方向遅延及び水平勾配パラメータを推定
3.4	相対論補正	信号伝播における一般相対論効果の補正、運動系における時計の刻み速度の補正
3.5	受信機アンテナ位置補正	①プレート運動 : アンテナ座標の速度成分を設定、またはNNR-NUVELIAモデル使用 ②潮汐 : IERS Conventions(2003)準拠(固体地球潮汐、海洋荷重、極潮汐)
4	力学モデル等	
4.1	地球重力ポテンシャル	EGM96
4.2	第三天体重力	太陽、月及び太陽系惑星を質点として考慮(JPL-DE405)
4.3	潮汐モデル	IERS Conventions(2003)準拠(固体地球潮汐、海洋潮汐、極潮汐)
4.4	輻射圧モデル	①QZS衛星 : 多面形状モデル ②GPS衛星 : CODEモデルまたはGSPM04.bモデル
4.5	相対論効果	Schwarzschild Solution、Geodetic Precession、Lense Thirring
4.6	経験的加速度	定数、Half/Rev、Once/Rev、Twice/Rev加速度
4.7	推力噴射モデル	インパルスΔV、有限時間噴射モデル
4.8	積分	可変次数/可変ステップ予測子-修正子法(JAXA-INTOD)

表 3.2-1 軌道時刻推定ソフトウェアのモデル (2/2)

番号	項目	概要								
5	推定									
5.1	推定方式	平方根情報フィルタによる逐次推定								
5.2	推定パラメータ	<table border="0"> <tr> <td style="vertical-align: top;"> ①衛星位置、速度* ②太陽輻射圧パラメータ* ・QZS衛星 スケールファクタ、反射係数 ・GPS衛星 : モデルパラメータ ③経験的加速度パラメータ ④QZS/GPS SVクロックオフセット* ⑤測位モニタ実験局クロックオフセット* ⑥対流圏遅延パラメータ* </td> <td style="vertical-align: top;"> ⑦観測バイアス ・搬送波位相バイアス* ・擬似距離バイアス ・双方向時刻同期送受信機バイアス* ⑧GPS/QZS-GPS受信機間バイアス* ⑨地上局位置、速度 ⑩地球回転パラメータ ⑪地球重心オフセット </td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">[*は準リアルタイム軌道時刻推定で推定対象のパラメータ]</p>	①衛星位置、速度* ②太陽輻射圧パラメータ* ・QZS衛星 スケールファクタ、反射係数 ・GPS衛星 : モデルパラメータ ③経験的加速度パラメータ ④QZS/GPS SVクロックオフセット* ⑤測位モニタ実験局クロックオフセット* ⑥対流圏遅延パラメータ*	⑦観測バイアス ・搬送波位相バイアス* ・擬似距離バイアス ・双方向時刻同期送受信機バイアス* ⑧GPS/QZS-GPS受信機間バイアス* ⑨地上局位置、速度 ⑩地球回転パラメータ ⑪地球重心オフセット						
①衛星位置、速度* ②太陽輻射圧パラメータ* ・QZS衛星 スケールファクタ、反射係数 ・GPS衛星 : モデルパラメータ ③経験的加速度パラメータ ④QZS/GPS SVクロックオフセット* ⑤測位モニタ実験局クロックオフセット* ⑥対流圏遅延パラメータ*	⑦観測バイアス ・搬送波位相バイアス* ・擬似距離バイアス ・双方向時刻同期送受信機バイアス* ⑧GPS/QZS-GPS受信機間バイアス* ⑨地上局位置、速度 ⑩地球回転パラメータ ⑪地球重心オフセット									
6	基準時系、座標系									
6.1	基準時系	QZSST(MCS) : クロック基準局の受信機アンテナ位相中心が時系原点								
6.2	基準座標系	<table border="0"> <tr> <td>①地球固定座標系</td> <td>: ITRF2000準拠</td> </tr> <tr> <td>②慣性座標系</td> <td>: J2000.0</td> </tr> <tr> <td>③歳差、章動</td> <td>: IAU2000A</td> </tr> <tr> <td>④地球回転パラメータ</td> <td>: USNOのFinals2000A</td> </tr> </table>	①地球固定座標系	: ITRF2000準拠	②慣性座標系	: J2000.0	③歳差、章動	: IAU2000A	④地球回転パラメータ	: USNOのFinals2000A
①地球固定座標系	: ITRF2000準拠									
②慣性座標系	: J2000.0									
③歳差、章動	: IAU2000A									
④地球回転パラメータ	: USNOのFinals2000A									

L1C/AとL2Cの電離層フリー線形結合とし、市販GPS受信機で得られた擬似距離はL1C/AとL2Pの電離層フリー線形結合とする。なお、軌道時刻推定では両受信機で受信された観測データを1台の受信機で受信したデータとして扱うために受信機間バイアスの補正を行う。また、GPS衛星のL1C/A擬似距離についてGPS衛星クロックの時系原点をGPS航法メッセージと同様L1PとL2P電離層フリー線形結合とするためにC1-P1バイアス補正を行う。

さらに、搬送波位相についてはサイクルスリップ検出による搬送波バイアス推定区間の決定、擬似距離についてはスムージング処理等を行い、1秒間隔データを30秒間隔のサンプリングで軌道時刻推定処理に投入する。この時、全ての測位モニタ実験局の観測データが同じタイムタグおよびデータ間隔となるよう制御する。

3.2.3 観測モデル

QZSの衛星重心と測位信号送信アンテナ位相中心間のオフセット補正については、姿勢テレメトリデータを取込むことにより姿勢変動を考慮した補正を行う予定である。地球潮汐モデルには、IERS Conventions (2003) に準拠したモデルを採用する。

3.2.4 力学モデル

QZSの太陽輻射圧モデルについては衛星形状を複数の面から構成される多面体モデルを採用し、テレメトリデータの取り込みにより姿勢変動を考慮する。

3.2.5 パラメータ推定

リアルタイム軌道時刻推定では1エポックの観測データ群を1バッチとした平方根情報フィルタによる逐次推定を行う。パラメータ推定の属性としてプロセスノイズ（白色、ランダムウォーク、第一次ガウスマルコフ）を考慮する。リアルタイム処理では全衛星の位置/速度、太陽輻射圧パラメータ、MS受信機を含むクロックオフセット、対流圏天頂遅延量、搬送波位相バイアス等を推定する。

3.2.6 基準時系、座標系

軌道時刻推定系の基準時系（時系原点）は、クロック基準局の受信機アンテナ位相中心となる。MCS内ではこれをQZSS時系（QZSST(MCS)）とする。

基準座標系は、地球固定座標系についてはITRF 2000以降の座標系に準拠する。測位モニタ実験局の座標は、オフライン解析によりIGS (International GNSS Service) によるIGSグローバルサイトの座標推定の解を基準とした推定によりITRF系に準拠した形で維持管理する。また、歳差・章動理論はIAU 2000 Aを採用する予定である。

4. プロトタイプソフトウェアによる軌道時刻推定シミュレーション

QZS 及び GPS 衛星の擬似観測データを生成し、プロトタイプソフトウェアにより軌道時刻推定を行った結果について紹介する。

4.1 シミュレーション条件

擬似観測データの生成条件を表 4.1-1 に示す。また、軌道時刻推定条件を表 4.1-2 に示す。

4.2 軌道時刻推定結果

QZS について軌道時刻推定結果と擬似データ作成時の軌道およびクロックとの比較結果を図 4.2-1 に示す。擬似データ作成時の軌道およびクロックを真値とし、これと軌道時刻推定値との差を誤差として評価したものである。上段のグラフは QZS の位置推定誤差の推定開始時点からのプロファイルを示しており、下段のグラフは QZS のクロック推定誤差を示したものである。シミュレーションの結果から、推定開始 24 時間以降の定常状態において軌道位置は数十 cm、クロックオフセットは 1 ns 以下の精度が期待できる結果を得ている。

表 4.1-1 擬似観測データ生成条件

項目	内容
観測データ生成期間	3 日間
観測データ生成間隔	5 分
QZS 軌道	3 機分の軌道を生成
GPS 衛星軌道	IGS 精密暦を使用し 28 機分の軌道を生成
測位モニタ実験局	QZS/GPS 受信局を国内+海外に 9 局, GPS 専用局を海外に 3 局
QZS,GPS 衛星およびモニタ局 クロックオフセット	ノイズモデルとして White Phase-Modulation (PM) , White Frequency-Modulation(FM),Random Walk FM を使用
電離層遅延量	国際標準電離層 (IRI : International Reference Ionosphere) モデル
対流圏遅延	Lanyi マッピング関数
その他	搬送波位相バイアス、観測ノイズを考慮

表 4.1-2 軌道時刻推定条件

項目	内容
推定方式	1 エポック 1 バッチの平方根情報フィルタ
使用観測データ	搬送波位相、擬似距離
推定パラメータ	衛星位置速度、クロックオフセット、太陽輻射圧パラメータ モニタ局クロックオフセット (クロック基準局は除く) 対流圏遅延量湿潤項、搬送波位相バイアス
シミュレーションで考慮した誤差	地球重力モデル誤差 (JGM-3 と JGM-1 の差) 太陽輻射圧モデル誤差 (15%) 対流圏遅延誤差 (天頂方向 10%) 地上局位置誤差 (X,Y,Z 各成分最大 2cm)

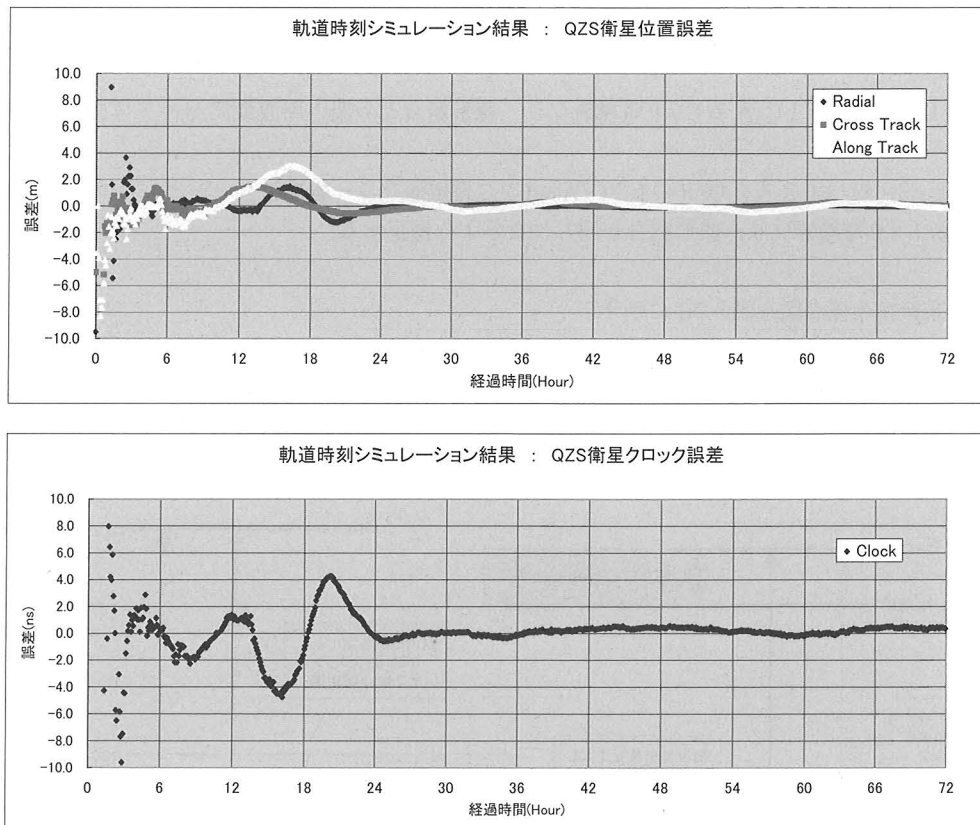


図 4.2-1 QZS の軌道時刻推定誤差

5. GPST と QZSST の時系接続

5.1 GQTO (GPS-QZSS Time Offset) の補正

QZS から放送される GPS 補完航法メッセージに含まれるエフェメリスやクロックパラメータ等の時系原点は、GPS 時系でなければならない。一方、MCS における軌道時刻推定系の時系原点は、クロック基準局の電離層フリー線形結合における受信機アンテナ位相中心であり GPS 時系とは異なる。そのため、軌道時刻推定系の時系原点（これを QZSS 時系 = QZSST (MCS) と呼ぶ）と GPS 時系との差 (GQTO : GPS-QZSS Time Offset) を求め、QZSST (MCS) を GPS 時系に接続する必要がある。

GQTO は、軌道時刻推定で推定された GPS 衛星の SV クロックオフセットと GPS 航法メッセージの SV クロックオフセットの差の重み付き平均により求め、QZS のエフェメリスやクロックパラメータを生成する際に GQTO を考慮することにより GPS 時系を原点としたパラメータに変換する。

5.2 受信機間バイアスおよび受信機周波数間バイアスの補正

5.1 項で述べた通り軌道時刻推定系の時系原点は、クロック基準局の受信機アンテナ位相中心となる。しかし、QZS が GPS/QZS 受信機、GPS 衛星が GPS 受信機の観測データを用いて軌道時刻推定を行った場合、QZSST (MCS) の原点は厳密には以下ようになる。

- ・ QZS のクロック : GPS/QZS 受信機の L1 C/A, L2 C 電離層フリー線形結合のアンテナ位相中心
- ・ GPS 衛星のクロック : GPS 受信機の L1 C/A, L2 P 電離層フリー線形結合のアンテナ位相中心

つまり、QZS と GPS 衛星とでは軌道時刻推定系の時系原点が異なる。GQTO による補正は、GPS 衛星に対する時系原点と GPS 時系との差に対して行うため、QZS の時系原点を GPS 時系と接続するためには、さらに QZS と GPS 衛星との時系原点の差を求め、補正する必要がある。これは以下のように行う。

- (1) GPS/QZS 受信機と GPS 受信機両方同時（観測タイミング < 100 ns）かつ共通観測の GPS 衛星 L1 C/A 擬似距離の差の一定時間における平均から両受信機間のバイアスを求める。

- (2) GPS/QZS 受信機の L1C/A と L1C/A & L2C 電離層フリー線形結合との間の周波数間バイアスをハードウェア計測値から求める。
- (3) GPS 受信機の L1C/A と L1C/A & L2P 電離層フリー線形結合との間の周波数間バイアスをハードウェア計測値から求める。
- (4) 上記 (1) から (3) のバイアスを QZS の L1C/A & L2C 電離層フリー線形結合データに加え、時系原点が GPS 受信機の L1C/A & L2P 電離層フリー線形結合と同じになるよう補正する。

GQTO も含めた時系接続の概念図を図 5.2-1 に示す。

GPS 補完の観点では、軌道時刻推定/予報精度に加え、上記の時系接続精度がユーザ測位精度を決める重要な要素となる。受信機間バイアスの軌道時刻推定への影響や時系接続精度については現在解析中である。

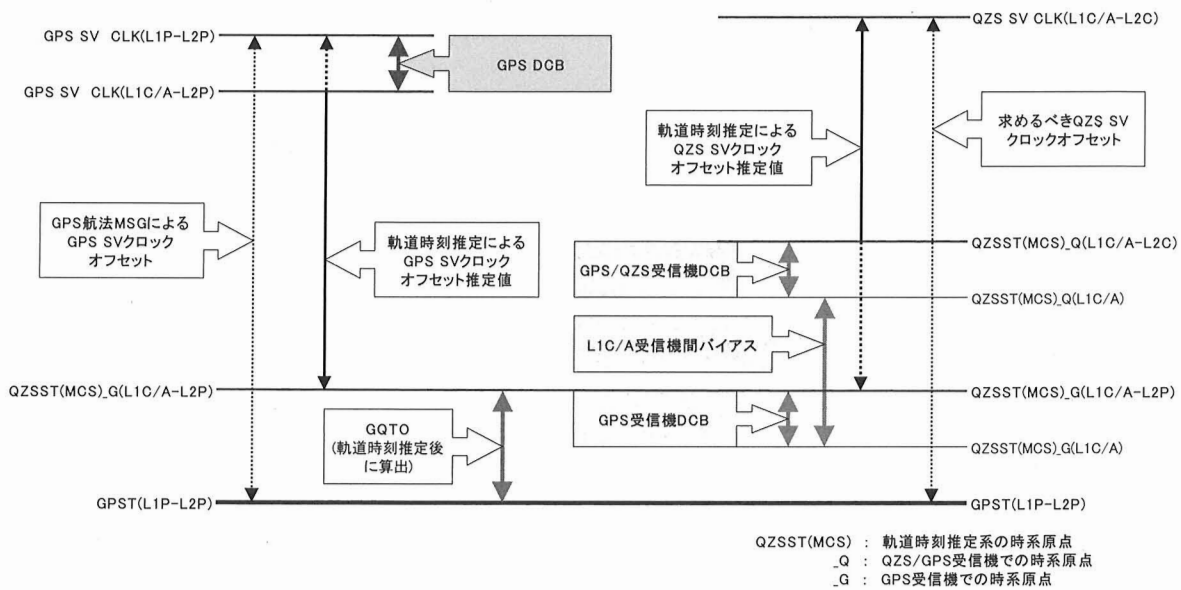


図 5.2-1 QZSS と GPS の時系接続概念図

6. お わ り に

本稿では準天頂衛星システムを利用した高精度測位実験システムにおける高精度軌道時刻推定処理、軌道時刻推定シミュレーションの結果ならびに GPS 時系との接続方法についての概要を紹介した。

現在、軌道時刻推定ソフトウェアは設計フェーズであり、2007 年度に開発を完了する予定である。その後、高精度測位実験システムのインテグレーションならびに準天頂衛星初号機の打ち上げを経て、準天頂衛星システムを利用した高精度測位実験において技術実証を行っていく予定である。

参 考 文 献

- [1] 川口, 他, “高精度測位実験システムのシステム運用要求”, 第 49 回宇宙科学技術連合講演会講演集, pp. 665 ~ 668, 2005
- [2] 柴田, 他, “準天頂衛星による高精度測位実験システムの SIS-URE 解析”, 第 49 回宇宙科学技術連合講演会講演集, pp. 669 ~ 674, 2005