

高精度測位社会実現に向けた 準天頂衛星システム7機体制の確立

二木康徳*
Yasunori Futagi
上原晃斉*
Akinari Uehara
木村剛久†
Takehisa Kimura

Establishing A Seven Satellite Constellation for Quasi-Zenith Satellite System in order to Realize High Precision Positioning Society

要 旨

2018年11月から4機体制によるサービスを開始している準天頂衛星システム(QZSS)については、持続測位が可能になる7機体制の確立のために必要な追加3機の開発が宇宙基本計画に明記され、2019年に内閣府から三菱電機が、衛星3機のシステム及びバスサブシステムと、7号機搭載メッセージ通信パイロード(MCP)を受注した。測位パイロード(NP)及び高精度測距システムパイロード(PRP)は、高精度測位システム製造事業者が開発して内閣府から支給される。

追加3機(5~7号機)は、精度・信頼性の向上や抗たん性の強化等の目的によって、NPの機能向上と、PRPの追加が図られており、これまでの準天頂衛星に比べてミッション規模が約1.3倍になっている。これを測位性能に悪

影響を与えることなく、品質・信頼度高く、開発効率や工程にも考慮してシステムを成立させるため、従来の準天頂衛星(QZS)と同様に当社の標準衛星プラットフォーム“DS2000”を採用し、最新ラインアップの構成品の選択と、2~4号機の軌道上実績の活用、豊富な実績に裏付けられたシステム解析や機器配置・実装手法の適用によって、要求を満足する設計と、開発スケジュールの設定を行った。今後は、衛星システムの整備を着実に進めるとともに、衛星管制地上システムの開発及びセンチメートル級測位補強サービス等の性能向上施策の取組みを通じて、準天頂衛星システムが拓(ひら)く豊かな高精度測位社会の実現に貢献していく。



準天頂衛星5号機, 6号機, 7号機の軌道上イメージ(CG画像)

高精度かつ安定した位置情報等のサービス提供が終日可能になる4機体制に対して、7機体制では米国GPS(Global Positioning System)等の衛星がなくても持続測位が可能になる。これに必要な追加3機で、正面が5号機、右上が6号機、左上が7号機の三次元CG(Computer Graphics)モデルであり、7号機には衛星安否確認サービスを送受信するS帯の3m級展開アンテナが搭載されている。

1. ま え が き

2018年11月から4機体制によるサービスを開始している準天頂衛星システムについては、2015年1月に閣議決定された宇宙基本計画で、持続測位が可能になる7機体制の確立のために必要な追加3機の開発が明記され、2019年に内閣府から当社が、衛星3機のシステム及びバスサブシステムと、7号機搭載MCPを受注した。

本稿ではこの開発状況を、7機体制及び衛星管制地上システムと併せて述べる。

2. 準天頂衛星システム

2.1 4機体制

4機体制の準天頂衛星システム⁽¹⁾は、準天頂軌道衛星3機(初号機、2号機、4号機)と静止軌道衛星1機(3号機)から構成される。準天頂軌道は、地表面に対しほぼ静止して周回する静止軌道に対して、40~50度傾斜し遠地点が日本上空近傍になる楕円(だえん)軌道(離心率0.075)であり、日本のほぼ真上に滞在する時間を長く取れる特長がある。図1に軌道概要を、図2(a)に各衛星軌道の地表面上への投影図を示す。

日本からは静止軌道衛星1機と、60度以上の高仰角にいる準天頂軌道衛星1機が常に見えることから、高精度かつ安定した位置情報等のサービス提供が終日可能になる。ただし衛星測位計算には4機以上必要であり、米国GPS等の衛星が2機以上必要になる。

2.2 7機体制

7機体制で追加される3機は、5号機が準天頂軌道衛星、6号機が静止衛星、7号機が準静止衛星であり、総合システム設計による衛星軌道は図2(b)のとおり計画されている。日本からは静止軌道衛星3機と、60度以上の高仰角にいる準天頂軌道衛星1機の計4機が常に見えることから、米国GPS等に依存しなくても、持続測位が可能になり、安全保障能力の維持・強化に貢献する。

5~7号機には、精度・信頼性の向上や抗たん性の強化等の測位技術の高度化を継続的に進める観点から、NPの機能向上と、PRPの追加が実施される。また7号機には、災害対策・国土強靱(きょうじん)化に関わる衛星安否確認サービスを送受信するMCPを搭載し、現行3号機に問題が生じた場合はバックアップとして使用する。

2.3 7機体制による測位精度の向上

7機体制構築によって、準天頂衛星システムが提供する

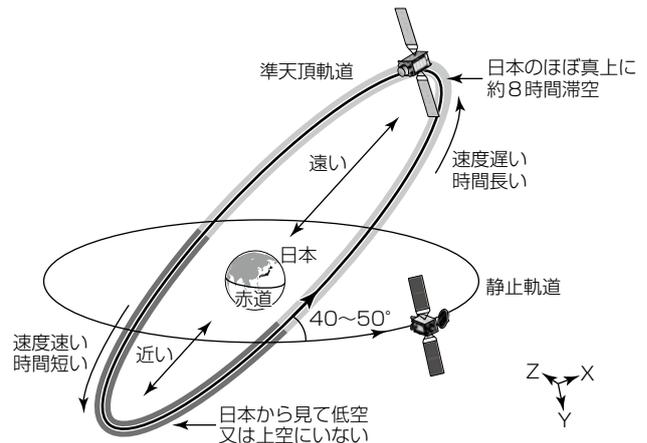


図1. 静止軌道と準天頂軌道

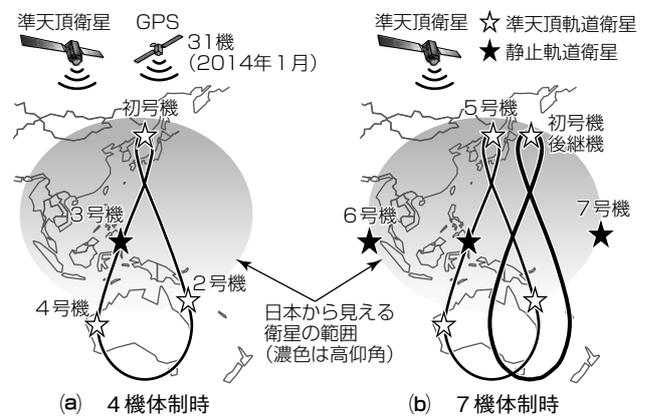


図2. 各衛星軌道の地表面上への投影

表1. 7機体制でのユーザー測位精度(衛星測位サービス)

フェーズ	ユーザー測位精度 水平方向(RMS)	開始時期
7機体制 (第1期)	監視局の観測データだけを使用するケース 9.0m(HDOP≤6.7)	2023年~
	QZS-5, 6, 7の衛星間測距機能及び衛星/地上間測距機能による観測量を使用するケース 1.6m(HDOP≤2.6)	2027年~
7機体制 (第2期)	7機全てで衛星間測距機能及び衛星/地上間測距機能による観測量を使用するケース 1.0m(HDOP≤2.6)	2036年~

RMS: 二乗平均平方根, HDOP: Horizontal Dilution Of Precision

各種サービスは機能が拡張される。特に、衛星測位サービスでは、4機体制で他GNSS(Global Navigation Satellite System)を補完するサービスから、7機の軌道上配置によって、準天頂衛星システムだけでユーザー測位可能(持続測位)なサービスが提供される。さらに、5~7号機から新たに具備されるPRPの衛星間測距機能及び衛星/地上間測距機能によって、段階的にユーザー測位性能が向上する計画である⁽²⁾。7機体制各フェーズでのユーザー測位精度仕様を表1に示す。

3. 開発状況

3.1 衛星システム設計

衛星システムは、従来の準天頂衛星同様、豊富な軌道上実績によって実証されている高い信頼性と適応性を持った

DS2000^③を採用して設計した。4機体制の各号機と比較した5～7号機の衛星主要諸元を表2に示す。また5～7号機の外觀図を図3～図5に示す。

5～7号機は、高精度測位システム製造事業者によって開発されるNPの機能向上と、PRPの追加等によって、搭載ミッションが2～4号機に比べて、質量で約120～170kg増、電力で約500W増と約1.3倍の規模であり、また地球指向面(+Z)側に、PRP構成部品である衛星間測距(ISR)アンテナが2～4台追加搭載される。

ミッション質量増に対しては、ロケットの打ち上げ能力

増と、2～4号機の軌道上実績に基づく推葉解析の精度向上によって、衛星ドライ質量の上限許容値を最大限確保し、これに収まる質量配分内での支持構造物や計装品等の設計を実現した。

ミッション電力増に対応し、太陽電池パドルのセルをDS2000最新ラインアップに変更して発電効率を上げ、パネル枚数は各翼2枚に抑え、測位精度に影響する太陽輻射(ふくしゃ)圧の増加と、衛星システム質量への影響を回避している。バッテリーは、セル容量と段数の最適化を行っている。

表2. 衛星主要諸元

衛星主要諸元	初号機 (QZS-1)	2号機 (QZS-2)	4号機 (QZS-4)	3号機 (QZS-3)	初号機後継機 (QZS-1R)	5号機 (QZS-5)	6号機 (QZS-6)	7号機 (QZS-7)												
設計寿命(打ち上げ後)	10年以上 (12年目標)	15年以上																		
打ち上げ年月	2010/9/11	2017/6/1	2017/10/10	2017/8/19	2021年度	2023年度	2023年度	2023年度												
軌道	準天頂軌道	準天頂軌道	準天頂軌道	静止軌道	準天頂軌道	準天頂軌道	静止軌道	準静止軌道												
打ち上げロケット	H-IIA202			H-IIA204	H-IIA202	H3-22S														
質量(ドライ/打ち上げ)	約1.8t/約4.0t	約1.6t/約4.0t	約1.6t/約4.0t	約1.7t/約4.7t	約1.6t/約4.0t	約1.8t/約4.8t	約1.9t/約4.9t	約2.0t/約5.0t												
搭載ミッション (質量/消費電力)	355kg/1.9kW	370kg/1.9kW		475kg/2.5kW	361kg/2.2kW	495kg/2.4kW	575kg/2.7kW	647kg/3.0kW												
測位ミッションペイロード	(支給品)	(調達品, L6は当社開発)				(支給品)														
測位ペイロード(NP)	<table border="1"> <tr> <td>測位補完信号</td> <td>L1-C/A, L1C, L2C, L5</td> <td>L1-C/A (L1-C/B), L1C, L2C, L5</td> </tr> <tr> <td>測位補強信号</td> <td>L1-SAIF, LEX</td> <td>L1S (災害・危機管理通報機能を含む), L6</td> </tr> <tr> <td>測位技術実証</td> <td>L5S</td> <td>L1Sb, L5S, L5S</td> </tr> <tr> <td>L帯アンテナ方式</td> <td>ヘリカルアンテナ</td> <td>パッチアンテナ</td> </tr> </table>								測位補完信号	L1-C/A, L1C, L2C, L5	L1-C/A (L1-C/B), L1C, L2C, L5	測位補強信号	L1-SAIF, LEX	L1S (災害・危機管理通報機能を含む), L6	測位技術実証	L5S	L1Sb, L5S, L5S	L帯アンテナ方式	ヘリカルアンテナ	パッチアンテナ
測位補完信号	L1-C/A, L1C, L2C, L5	L1-C/A (L1-C/B), L1C, L2C, L5																		
測位補強信号	L1-SAIF, LEX	L1S (災害・危機管理通報機能を含む), L6																		
測位技術実証	L5S	L1Sb, L5S, L5S																		
L帯アンテナ方式	ヘリカルアンテナ	パッチアンテナ																		
高精度測距システムペイロード(PRP)						衛星間測距, 衛星地上間測距														
メッセージ通信ペイロード(MCP)			(調達品)					(当社開発)												
二次ペイロード	TEDA, モニタカメラ	SEDA																		
パドル発生電力(EOL)	5.3kW	6.3kW				6.7kW														
軌道上展開後の大きさ	全長約25m	全長約19m																		
太陽電池パドル 構成セル	3枚構成, 2翼 AHES (高効率Siセル)	2枚構成, 2翼 ZTJ (高効率GaAs)				2枚構成, 2翼 3G30C Advanced (高効率GaAs)														
電源バス	100V安定化バス及び34V(低電圧バス機器用)																			
バッテリー	リチウムイオン175Ah×2set	リチウムイオン100Ah×2set				リチウムイオン110Ah×2set														
テレメトリ・コマンド&レンジング系	USB/C帯の2系統	C帯/Ku帯の2系統																		
衛星制御系データバス	1553Bバス	1553Bバス, SpaceWire																		
姿勢軌道制御系	4-skew ゼロモーメント, STT/IRU姿勢決定系																			
推進系	二液式推進系																			
熱制御系	南北面ヒートパイプパネル方式																			
構造	セントラルシリンダ方式																			
自動化自律化運用	ストアドコマンド運用・グループコマンド運用, ヒーター/バッテリー充放電のソフトウェア制御																			

SAIF: Submeter-class Augmentation with Integrity Function, LEX: L-band EXperiment, TEDA: 技術データ取得装置, SEDA: 宇宙環境データ取得装置, AHES: Advanced High Efficiency Silicon, Si: シリコン, ZTJ: 3rd Generation Triple-Junction Solar Cell, GaAs: ガリウムヒ素, IRU: 慣性基準装置

5号機に対して6・7号機で追加されるミッション機器・質量は大きい。測位精度確保のため衛星質量中心を極力衛星機軸に近づける必要がある一方、ケーブル長や電磁適合性等に影響する構成品の位置関係は、3機でできるだけ一致させることが、安定した性能を効率的に開発する上で望ましい。衛星構体内及び外部の機器配置は、これを考慮して実施しており、高精度測位システム製造事業者との詳細なレイアウト調整を経て、質量配分値内のバランスウェイトを適切に配置し、サービス期間中の質量中心位置を機軸にほぼ一致させられる機器配置を実現した。

地球指向面機器配置は、ISRアンテナが5号機に4台、6・7号機に2台ずつ追加され、それぞれの異なる指向方向要求を満足させるため、DS2000最新ラインアップのスタートラッカ(STT)採用で配置制約を最小に

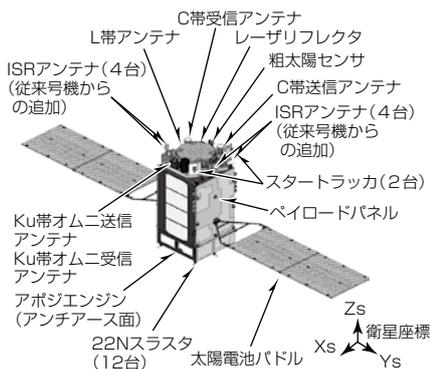


図3. 5号機

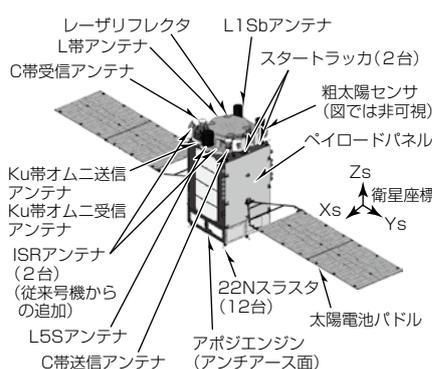


図4. 6号機

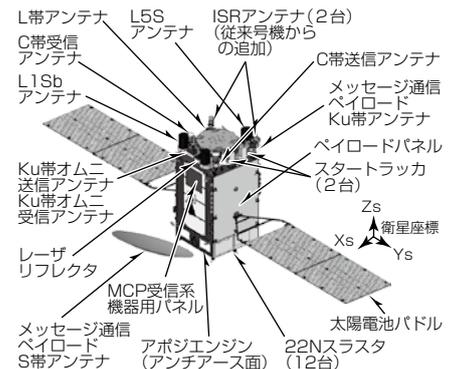


図5. 7号機

することによって成立させ、3機の共通要素が極力多くなる配置設計にした。

7号機MCPの東(+X)面に搭載される3m級展開型のS帯アンテナと、西面搭載の1m級固定のKu帯アンテナは当社で設計・製造する。どちらもDS2000で開発実績のある形状・寸法内であり、搭載領域や保持開放機構位置のシステム成立性を確認済みである。

ミッション規模が最大になる7号機では南北(±Y)面のペイロードパネル搭載領域が不足するため、過去機種実績に基づき東面上部に放熱面を設け、MCP受信系機器の一部を搭載する。また準静止軌道でのアンローディング頻度を抑制する必要があるが、軌道上評価で較正(こうせい)した外乱解析によって、現衛星形態で要求を満足することを確認している。

これら以外の機器は、軌道上成功実績を生かし、品質・信頼性と、安定かつ効率的な生産を確保するため、前号機からの変更点を最小にして、極力3機共通化を図っている。

3.2 衛星開発スケジュール

5～7号機の開発スケジュールを図6に示す。

5号機と6・7号機でミッション構成が一部異なり、出荷前審査(PSR)時期も離れていることから、システムの基本/詳細設計審査(PDR/CDR)は時期を分けて実施するが、バスサブシステムはほぼ同一仕様になるよう設計を進めてきたことから、PDR/CDRは3機同時に実施することにした。製造・試験は、設備競合等の制約を考慮しながら3機連続で進める必要があるが、2～4号機時に開発・実践した工程管理手法によって精度高く工程を構築し、各号機のシステムAIT(Assembly, Integration and Test)及びシステム試験は、NP/PRPの支給を受けてから約1年で工場出荷するよう設定した。

PDRはシステム、サブシステム共に2019年度中に全て完了している。3機共通のバスサブシステムは、CDRを完了させて機器製造に着手しており、システムCDRは5号

年度	2019	2020	2021	2022	2023
基本設計	5号機システム	→PDR			
	6・7号機システム	→PDR			
	バスサブシステム、MCP	→PDR			
詳細設計	バスサブシステム		→CDR		
	5号機システム		→CDR		
	7号機MCP		→CDR		
			→CDR		
5号機	製造				
	システムAIT			支給◆□	
	システム試験				→PSR
6号機	製造				
	システムAIT			支給◆□	
	システム試験				→PSR
7号機	製造				
	システムAIT			支給◆□	
	システム試験				→PSR

図6. 5～7号機の開発スケジュール

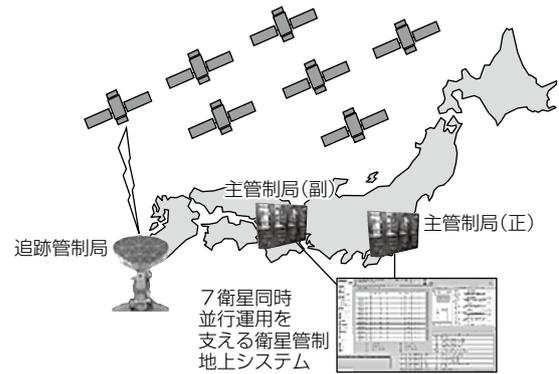


図7. 衛星管制地上システム

機が2021年春、6・7号機が2021年秋の計画である。

3.3 7機同時並行運用を支える衛星管制地上システム

7機体制で、当社開発の衛星管制地上システム“Birdstar”を用いた“7衛星同時並行運用”を実現する(図7)。

4機体制での“4衛星同時並行運用”で、衛星の位置や姿勢保持制御、状態監視のルーチン運用の自動化を実現し、省人化に寄与しているが、限られた運用者によって7衛星同時並行運用を実現するため、運用の自動化に加えて、緊急対応時のサポート機能の充実を必要とする。衛星と地上の連携を強化して異常検知から復旧運用のための支援機能を開発し、更なる省人化と運用効率化に寄与していく。

4. むすび

準天頂衛星システム7機体制は、日本の安全保障の維持・強化に向けた持続測位能力の向上が図られるとともに、各種サービスによる災害対策での活用や、自動運転、農業、交通・物流、建築等の様々な分野・利活用シーンへの社会実装が期待されている。

このために追加される5～7号機は、DS2000に、2～4号機の軌道上実績と、豊富な実績を持ったシステム解析・手法を適用して、要求を満足する設計を行った。

当社は引き続き、衛星システムの整備を着実に進めるとともに、衛星管制地上システムの開発及びセンチメートル級測位補強サービス等のサービス維持・性能向上施策の取組み(4)を通じて、準天頂衛星システムが拓く豊かな高精度測位社会の実現に貢献していく。

参考文献

- (1) 小淵保幸, ほか: 準天頂衛星2～4号機, 三菱電機技報, 92, No.2, 109～112 (2018)
- (2) 小暮 聡(内閣府): 準天頂衛星システムの最新状況, GPS/GNSSシンポジウム2020
- (3) 関根功治, ほか: 静止衛星標準バス“DS2000”の開発と今後の指針, 三菱電機技報, 90, No.2, 115～118 (2016)
- (4) 上原晃斉, ほか: 準天頂衛星システムセンチメートル級測位補強サービスの利便性向上について, 三菱電機技報, 94, No.2, 121～126 (2020)