

# 準天頂衛星 2～4号機

小淵保幸\*  
望月恭介\*\*  
高山拓也\*\*

Quasi-zenith Satellite 2-4

Yasuyuki Obuchi, Kyosuke Mochizuki, Takuya Takayama

## 要旨

日本独自の衛星測位システムとして計画されている“みちびき”は、2010年打ち上げの初号機、2017年打ち上げの2～4号機の計4機が軌道上で試験サービス中である。このシステムは、日本天頂付近の高仰角から信号を送出できる準天頂軌道衛星3機と、東経127度の静止軌道から信号を送出できる静止軌道衛星1機からなり、山間部や都心部の高層ビル街など、複雑な日本の地形でも広範囲にわたって測位サービスを終日提供することができる。2～4号機の開発は、初号機同様に衛星バスとして三菱電機標準衛星バス“DS2000”をプラットフォームとして進めた。DS2000は、バス技術として確立後も、軌道上実績を積み重ねながら継続的に機能・性能向上を図ってきており、初号

機に比べてバス機能・品質の向上を果たしている。さらに今回は、精度の高い各工期の緻密な組合せによって、約2か月差で並走する3機連続の製造・試験・射場作業・初期運用を実現した。また測位ミッションに関しては、パッチ方式のL帯アンテナや、センチメートル級測位補強信号を生成する測位パイロードサブシステム2の開発を担当、性能確認を経て完遂した。この測位ミッションの軌道上実績の蓄積は、今後のみちびき7機体制を含む、衛星測位サービスに関する技術確立の第一歩であり、現在詳細設計を進めている初号機後継機へもこれらの開発品が搭載される計画である。当社は今回の準天頂衛星3機連続開発の成功を糧とし、更なる衛星の高品質化を目指していく。



## 準天頂衛星4機の軌道上イメージ(CG画像)

準天頂軌道衛星3機(初号機、2号機、4号機)、静止軌道衛星1機(3号機)からなる準天頂衛星システム(みちびき)は、4機体制となることで24時間安定した高精度な測位サービスを提供することが可能となった。左端が初号機、左から3番目が3号機、それ以外の同仕様の2機が2号機及び4号機の三次元CGモデルである。

1. ま え が き

準天頂衛星システム(みちびき)は、日本独自の衛星測位システムとして計画され、2018年度に衛星4機体制となることを目指し、2010年9月に初号機、2017年6月に2号機、同年8月に3号機、同年10月に4号機を打ち上げ、現在4機での試験サービス中である。

準天頂衛星2～4号機は、当社標準衛星バスDS2000<sup>(1)(2)</sup>をベースに開発された初号機の技術を利用して開発された。また、初号機の2020年度の運用終了を控え、初号機後継機の開発を進めている。この開発では、2～4号機の実績を十分に生かし、更に信頼性を上げたDS2000バスをベースにしている。

本稿では、当社が推進した、これら準天頂衛星システムの開発について2017年に打ち上げられた2号機から4号機を中心に述べる。

2. 準天頂衛星システム

準天頂衛星システムは準天頂軌道衛星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。準天頂軌道衛星は、それぞれ異なる軌道面に配置し、いずれか1機が日本上空に滞在するようにすることで、高層ビルの多い都市部でも安定して信号が受信でき、測位可能な状況を広げる効果がある。準天頂軌道とは、地球の自転軸に対して傾いた楕円(だえん)の軌道を、地球の自転と同じ周期で巡ることで日本上空に長くとどまることが可能な軌道である。図1に準天頂軌道イメージを、図2に準天頂衛星の軌道上配置イメージを示す。また、2～4号機の衛星システム構成を図3に示す。衛星バスシステムとしてはDS2000を採用、3機共通の搭載ペイロードとして測位ペイロード1(生成信号:L1-C/A, L1C, L2C, L5, L1S, L1Sb(3号機だけ), L5S)、測位ペイロード2(生成信号:L6)から構成される。

2.1 準天頂衛星初号機

初号機は、高精度測位実験機器を搭載した、日本付近

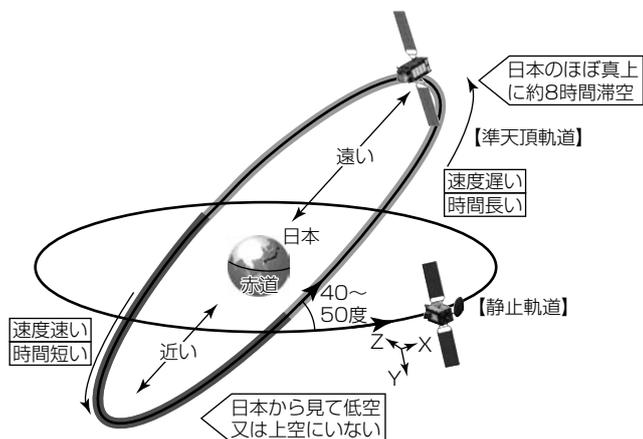


図1. 準天頂軌道イメージ

で高仰角からの測位信号のサービスが可能な準天頂軌道を周回する衛星で、2010年9月11日に打ち上げられ、試験サービス運用を継続している。搭載ペイロードとしては測位ペイロード(生成信号:L1-C/A, L1C, L2C, L5, L1-SAIF, LEX)、技術データ取得装置(TEDA)、準天頂衛星モニタカメラ(CAM)から構成される。

2.2 準天頂衛星2・4号機<sup>(3)</sup>

2・4号機(図4)は、全く同じ仕様で設計・製造し、2017年6月1日に2号機が、同年10月10日に4号機が打ち上げられた。いずれも打ち上げ後の軌道上性能確認を終え、現在試験サービス中である。

2・4号機の衛星システム構成は、初号機とほぼ同じであるが、新規となる測位ペイロード2は、測位信号の追加及び今後の測位信号拡張を前提とし、当社が開発を担当したサブシステムである。また、初号機のTEDAと同様の利用を目的とした、宇宙環境データ取得装置(SEDA)が搭載されている。

2.3 準天頂衛星3号機<sup>(3)</sup>

3号機(図5)は、2017年8月19日に東経127度の静止軌道上に打ち上げられた。

3号機の衛星システム構成は、2号機及び4号機と比較してメッセージ通信ペイロードが追加になっており、メッセージ通信用の展開型のS帯アンテナ(直径約3.2m)及び非展開型のKu帯アンテナ(直径約0.7m)がそれぞれ衛星の東面及び西面に搭載されているほか、測位ペイロード1の測

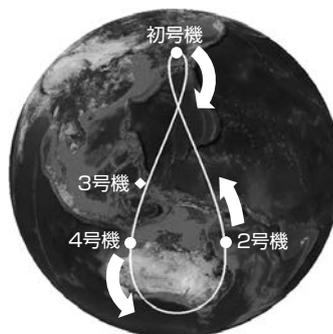
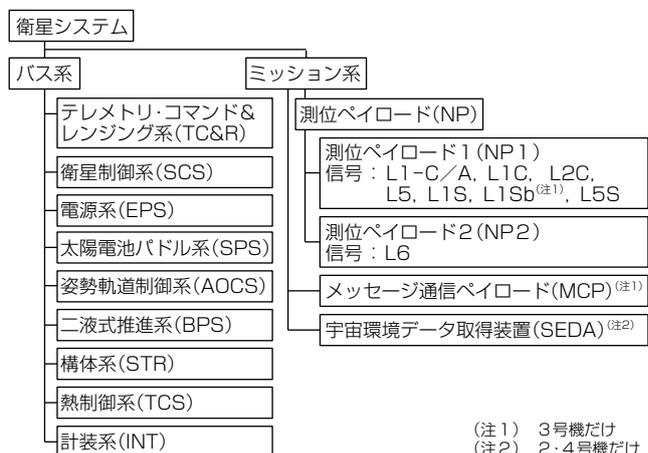


図2. 準天頂衛星の軌道上配置イメージ



(注1) 3号機だけ  
(注2) 2・4号機だけ

図3. 衛星システム構成

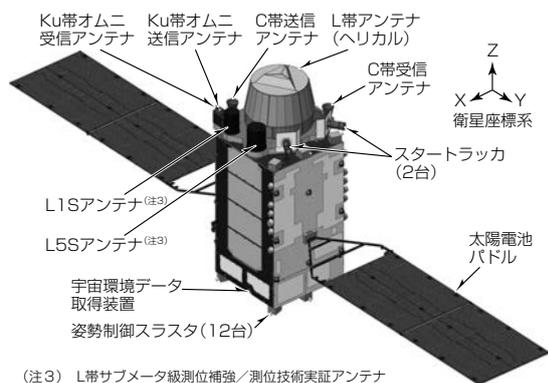


図4. 準天頂衛星2・4号機

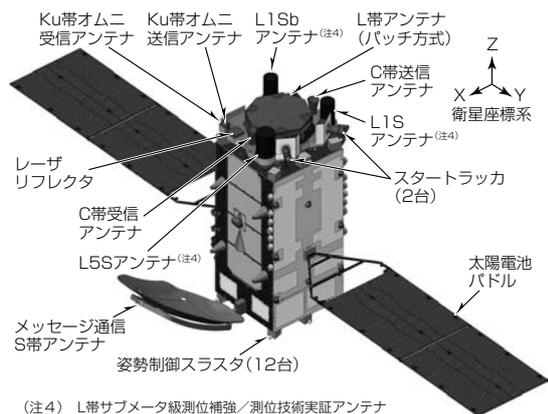


図5. 準天頂衛星3号機

位信号としてL1Sb信号が追加されている。なお、SEDAは搭載されていない。

また、地球指向面搭載のL帯アンテナがほかの準天頂衛星搭載のヘリカル方式と異なり、当社による新規開発となるパッチ方式アンテナを採用している。パッチ方式はヘリカル方式と比較して、薄型化かつ利得・耐電力性能向上を実現しており、地球指向面の機器搭載性が向上している。

### 3. 衛星システムの開発

#### 3.1 衛星システムの製造

準天頂衛星2～4号機は、約2か月差で並走する3機連続の製造・試験・射場作業を実現した。それぞれシステムインテグレーション完了後、2号機は2016年7月、3号機は2016年9月、4号機は2016年11月に衛星システム試験を開始し、9か月ほどで一連の試験を完了、打ち上げ射場での約50日間の打ち上げ準備作業(推薬充填や打ち上げ前試験等)を経て、2か月間隔で軌道上へ打ち上げられた。

2～4号機は、当社衛星標準バスDS2000のこれまでの製造ヘリテージを十分に活用することで、初号機からも表1に示すとおりバスシステムとしての進化を遂げている。太陽電池パドルは発電高効率化によってパネル枚数を3枚から2枚へダウンサイジングしているほか、衛星バスを構成する各コンポーネントの統合及びコンパクト化等によって、バス質量を250kg以上低減化しており、衛星寿命を15年以上に延ばすことも可能にした。そのほか、測位サービス

表1. 準天頂衛星2～4号機の初号機との比較

項目	初号機	2号機・3号機(静止)・4号機
発生電力EOL	5.3kW(3枚構成2翼)	6.3kW(2枚構成2翼)
消費電力	ペイロード1.9kW	ペイロード2・4号機: 1.9kW 3号機: 2.5kW
質量(ペイロード/バス)	355kg/1,445kg	2・4号機: 370kg/1,180kg 3号機: 475kg/1,210kg
打ち上げ質量/設計寿命	4,000kg/10年以上(12年目標)	2・4号機: 4,000kg/15年以上(H-IIA202ロケット) 3号機: 4,700kg/15年以上(H-IIA204ロケット)
測位信号	L1-C/A, L1C, L2C, L5, L1-SAIF, LEX	L1-C/A, L1C, L2C, L5, L1S, L5S, L6(3号機はL1Sb及びメッセージ通信S帯信号追加)

EOL: End Of Life

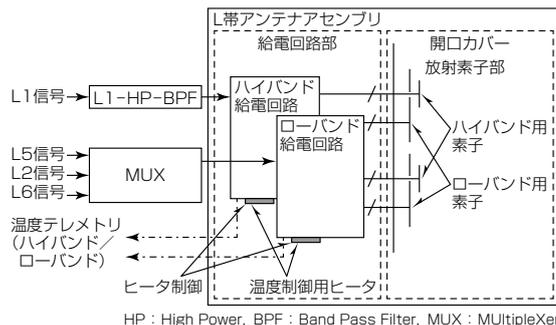


図6. パッチ方式L帯アンテナの構成

精度にかかわる極めて重要な要素の1つに、衛星の質量中心位置決定精度が挙げられるが、今回の2～4号機では、これまでのDS2000製造で培った質量特性値シミュレーション技法を用いて、高精度な質量中心位置管理がなされた。この技法の確からしさについては衛星システム試験で実証され、測位精度に貢献することになった。製造ヘリテージの活用は、システム性能の向上だけでなく、同時にシステムの高品質化と工程精度向上・リスク低減化にも大きく寄与している。

また、搭載ペイロードのうち、次節以降に示すパッチ方式のL帯アンテナ(3号機搭載)及び測位ペイロード2サブシステム(3機共通)の中核であるペイロードサービスユニット(Payload Service Unit: PSU)の開発を当社が担当した。打ち上げ後の軌道上試験で、バス性能を始め、これらの開発機器を含む測位ペイロードの機能及び測位サービスの性能も確認され、測位衛星としての軌道上実証がなされた。

#### 3.2 パッチ方式L帯アンテナ<sup>(4)</sup>

パッチ方式L帯アンテナの構成を図6に示す。このアンテナは、ハイバンド用(L1信号用)とローバンド用(L5, L2, L6信号用)との2種類の給電回路からなる給電回路部と、ハイバンドとローバンドとの2周波共用パッチアンテナ20素子からなる放射素子部で構成される。

ハイバンド用とローバンド用の2種類の給電回路に分離することによって、給電回路への入力電力の一極集中を回避し、大電力に対する耐性を向上させている。この耐電力性能については、このアンテナに接続する増幅器の出力変動等を考慮し、要求の入力電力より約2.3dB増の電力印加でも放電しないことを実機試験で確認している。

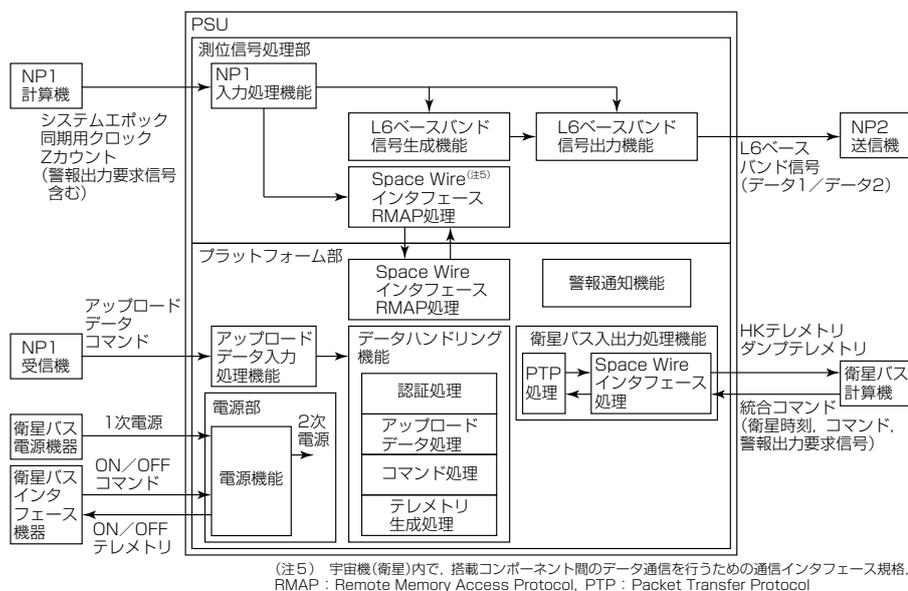


図7. PSUの機能ブロック図

また、2種類の給電回路を重ねた上にパッチアンテナ方式の放射素子部を搭載することで、低姿勢化を実現した。

アンテナ高さについては、海外GNSS(Global Navigation Satellite System)衛星搭載の測位アンテナ(ヘリカル方式)と比較すると、給電回路を含めても既存アンテナ部分の約半分である。低姿勢化を特長とするこのL帯アンテナは、ロケットへの搭載性、搭載品の視野確保、質量軽減の観点からも有効な技術として貢献できる。

なお、このアンテナは静止軌道に投入される準天頂衛星3号機用として開発したが、準天頂軌道用のL帯アンテナとして、衛星軌道の違いによって要求マスクパターンが変化してもこの設計のまま適用可能である。この節で述べた有用性と、今回の軌道上での性能実証を踏まえ、現在、当社で設計中である初号機後継機(準天頂軌道に投入)には、このアンテナが採用されている。

### 3.3 ペイロードサービスユニット<sup>(5)</sup>

ペイロードサービスユニット(PSU)は、測位ペイロード2サブシステムの構成コンポーネントの1つで、地上システムからのアップロードデータを基に、センチメートル級測位補強信号(L6ベースバンド信号)を生成・配信する機器である。持続測位可能な7機体制へ向けた信号配信システム技術の確立を目的として、PSUの開発を行った。

PSUの機能ブロック図を図7に示す。PSUの主な動作は、地上システムからNP1受信機を経由してアップロードデータを受信し、アップロードデータから測位メッセージを抽出する。次に、測位メッセージにPRN(Pseudo Random Number)コードを用いたCSK(Code Shift Keying)変調を施し、L6ベースバンド信号を生成する。そして、このL6ベースバンド信号を、アップロードデータに指定された時刻に、NP2送信機へ送信する。また、衛星バスとテレメトリ/コマンドのデータインタフェースを行い、PSU内部の

テレメトリ情報を収集し、HK(House Keeping)テレメトリを生成・送信する。

準天頂衛星システムでは、直接サービスをユーザーへ提供するという利用形態から、高い抗たん性と可用性が求められており、これらを実現するための様々な機能具備がPSUの大きな特徴の1つとなっている。また、PSUは、当社の標準衛星バスDS2000バスアーキテクチャの衛星制御器をベースにしており、基本設計の流用による設計・製品品質の向上、及びバス機器との使用部品共通化による部品コスト削減を図っている。

この節で示した性能が軌道上でも実証され、この機器も初号機後継機に引き続き搭載する計画で開発を進めている。

## 4. む す び

2017年に打ち上げられた準天頂衛星2~4号機の開発について述べた。打ち上げ後、2~4号機は軌道上での性能確認を経て、2018年度の4機体制サービスインを目指し、試験サービス実施中である。現在、当社鎌倉製作所では、2020年度に衛星寿命を迎える初号機の後継機を設計・開発中である。この初号機後継機の衛星システムの設計には、これまでの準天頂衛星4機の開発で培った測位衛星開発のヘリテージを最大限活用し、更なる高品質化を図っており、2020年度の打ち上げを目指し、システムの基本設計を完了して詳細設計フェーズに移行している。引き続き、安定した高品質の衛星システムの供給及び測位精度の向上を目標に、開発を進めていく。

## 参 考 文 献

- (1) 永島敬一郎, ほか: 国際競争に比肩する衛星インテグレーション技術—グローバル衛星メーカーを目指して—, 三菱電機技報, 78, No.10, 683~688 (2004)
- (2) 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)
- (3) 小淵保幸, ほか: 準天頂衛星システムの衛星開発, 第58回宇宙科学技術連合講演会講演集2C17 (2014)
- (4) 望月恭介, ほか: 準天頂衛星搭載用L帯アンテナプロトタイプ試験結果, 第60回宇宙科学技術連合講演会講演集3K14 (2016)
- (5) 高山拓也, ほか: 準天頂衛星搭載用ペイロードサービスユニットの開発, 第60回宇宙科学技術連合講演会講演集3K15 (2016)