

スターダストプログラム 「衛星オンボードPPPの実証機開発」 成果報告

令和7年(2025年)7月4日

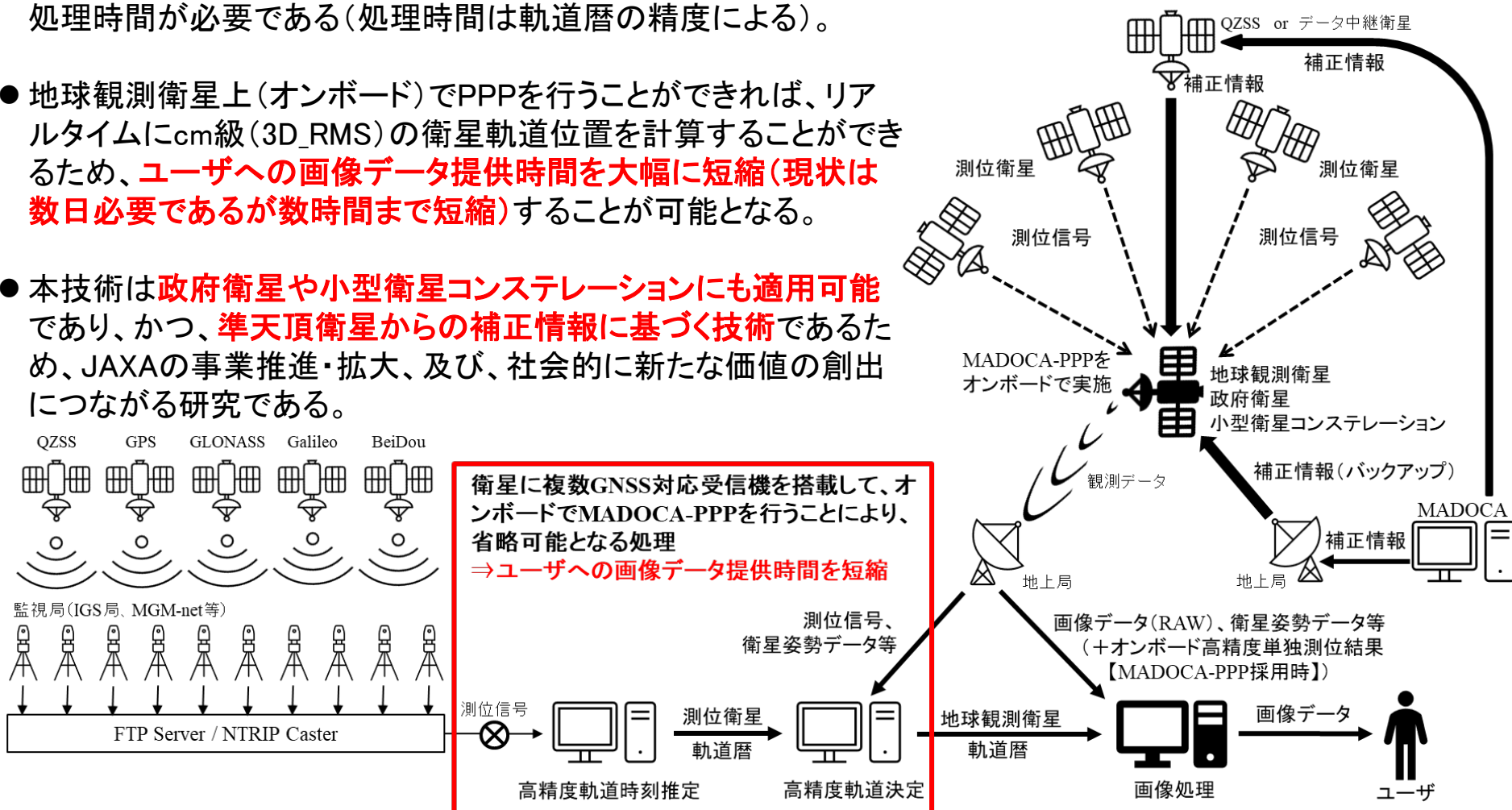
国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構
第一宇宙技術部門
衛星測位システム技術ユニット

1. 経緯
2. オンボードPPP研究の背景、目的
3. 研究開発方針
4. 研究開発スケジュール
5. 研究開発成果
6. 2024/12/13衛星開発・実証小委のプロジェクト評価結果の留意事項への対応
7. まとめ
8. 最新状況

- ① 2023年5月31日に「衛星オンボードPPPの実証機開発」が「宇宙開発利用加速化戦略プログラム(スターダストプログラム)」に採択された。
- ② 2024年12月13日開催の衛星開発・実証小委員会において、開発作業が前倒しで進捗していることを考慮し、事業期間を3年から2年に短縮する提案を行い、承認された。
- ③ 2025年3月31日、本事業のすべての作業を完了した。今回はその成果について、報告する。

2. オンボードPPP研究の背景、目的

- 高分解能センサを搭載している地球観測衛星は、画像処理のために「高精度軌道暦」が必要である。
- 地球観測衛星の「高精度軌道暦」を生成するためには、「測位衛星の高精度軌道暦」と「地球観測衛星に搭載しているGNSS受信機が受信した測位信号」が必要であり、現状は**数時間から数日**の処理時間が必要である（処理時間は軌道暦の精度による）。
- 地球観測衛星上（オンボード）でPPPを行うことができれば、リアルタイムにcm級（3D_RMS）の衛星軌道位置を計算することができるため、**ユーザへの画像データ提供時間を大幅に短縮（現状は数日必要であるが数時間まで短縮）**することが可能となる。
- 本技術は**政府衛星や小型衛星コンステレーションにも適用可能**であり、かつ、**準天頂衛星からの補正情報に基づく技術**であるため、JAXAの事業推進・拡大、及び、社会的に新たな価値の創出につながる研究である。



高分解能センサを搭載する地球観測衛星の撮像画像のユーザへの提供時間を大幅に短縮するために、

- ①MADOCA※の補正情報を使用してPPP(Precise Point Positioning)を行うことができる演算処理装置と、
②複数GNSS対応受信機を搭載し、③衛星オンボードでMADOCAの補正情報を使用したPPPを行って、リアルタイムにcmオーダー(3D_RMS)の衛星軌道位置推定が行える実証機のサブシステムを設計・開発する。

※ Multi-GNSS ADvanced Orbit and Clock Augmentation: 高精度測位補正技術

①衛星オンボードPPP演算処理装置開発

R5 OBC(EM、FM)調達

R6 OBC(FM)調達、S/W実装、
コンポーネント試験

②準天頂衛星L6信号対応GNSS受信機開発

R5 搭載機器選定、調達、
コンポーネント試験(FM)

R6 コンポーネント試験(FM)

③サブシステム設計・開発

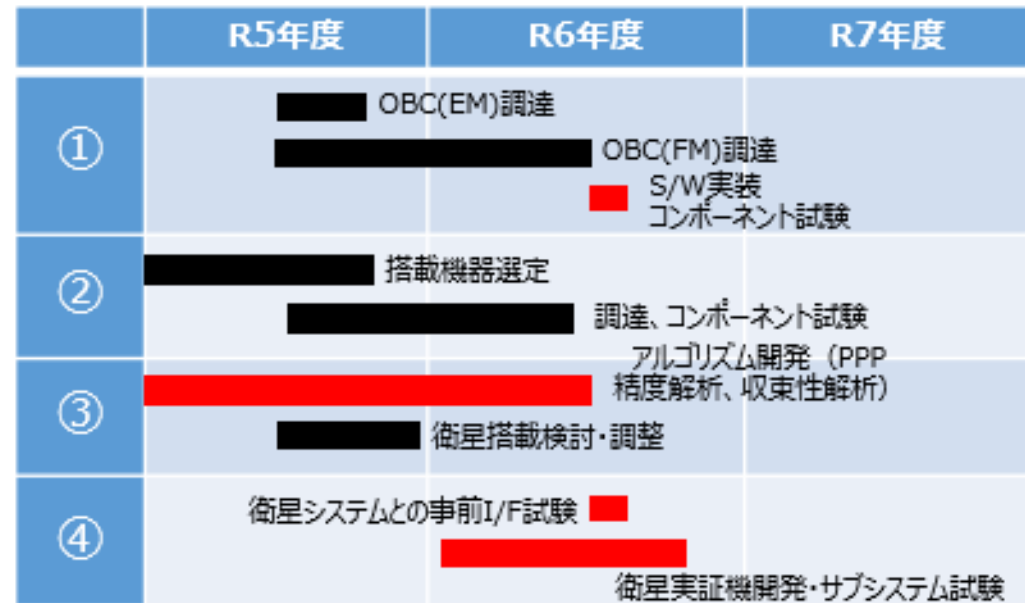
R5 アルゴリズム開発(PPP精度解析、
収束性解析)、衛星搭載検討・調整

R6 アルゴリズム開発

④衛星搭載PPP実証機(※)の開発

R6 衛星システムとの事前I/F試験(EM)、
衛星実証機開発(FM)、サブシステム試験(FM)

※ GNSS受信機、アンテナ、演算処理装置、ソフトウェアで構成される実証機(搭載機器)



※ 赤色は当初計画より作業期間を短縮した業務を示す

5.1 高精度単独測位ソフトウェア(MALIB_LEO)

-世界の技術動向-

➤ PPPサービスに関する世界の技術動向を以下に示す

	MADOCA-PPP (【 】はオンボードPPPの仕様)	Galileo HAS (High Accuracy Service)	PPP-B2b
サービス範囲	QZSSからの信号が受信可能なエリア	全世界	中国とその周辺地域
補強対象衛星	QZSS: L1C/A, L1C/B, L1C, L2C, L5 GPS: L1C/A, L1P, L1C, L2C, L2P, L5 Galileo: E1, E5a GLONASS: G1, G2	GPS: L1/L5; L2C Galileo: E1/E5a/E5b/E6; E5 AltBOC	GPS: L1, L2, L5 Galileo: E1, E5a, E5b, E6 GLONASS: G1, G2 BDS: B1, B1C, B2a, B2b, B3
補強信号	軌道 クロック コードバイアス 搬送波位相バイアス	軌道 クロック コードバイアス 搬送波位相バイアス	軌道 クロック コードバイアス
フォーマット	Compact-SSR	Compact-SSR	SSR
データ伝送レート	2,000 bps	448 bps	500 bps
水平精度(95%)	30 cm以下 【8cm以下】	20 cm以下	20 cm以下
垂直精度(95%)	50 cm以下 【16cm以下】	40 cm以下	40 cm以下
収束時間	30分以下 【5分以下】 (電離圏補正情報あり: 10分以下)	5分以下	20分以下

Galileo HASは人工衛星もサービス対象に含んでいるため、MADOCA-PPPを使用する衛星オンボードPPPの仕様(95%)は、Galileo HASを上回る、水平:8 cm以下、垂直:16 cm以下、3D RMSで10cm以下に設定する。宇宙では対流圏遅延の影響がなく地上よりも条件が良いことを考慮し、収束時間は Galileo HASと同等の、5分以下に設定する。

5.1 高精度単独測位ソフトウェア(MALIB_LEO)

オンボードPPPの精度解析条件、及び結果を以下に示す。仕様である3D RMSで10cm以下を達成した。

表5-1 解析条件

解析期間	2023/03/01(24H)
観測データ	Sentinel-6AのRINEXデータ QZSS L6Eアーカイブデータ
衛星測位システム	GPS、Galileo
解析ケース	kinematic PPP(電離層フリー) kinematic PPP(STEC推定) PPP+dynamics(STEC推定) PPP-AR+dynamics(STEC推定)

表5-2 解析結果

No.	解析ケース	3D_RMS(cm)
1	kinematic PPP(電離層フリー)	7.6
2	kinematic PPP(STEC推定)	8.3
3	PPP+dynamics(STEC推定)	7.8
4	PPP-AR+dynamics(STEC推定)	6.8

5. 研究開発成果(3/11)

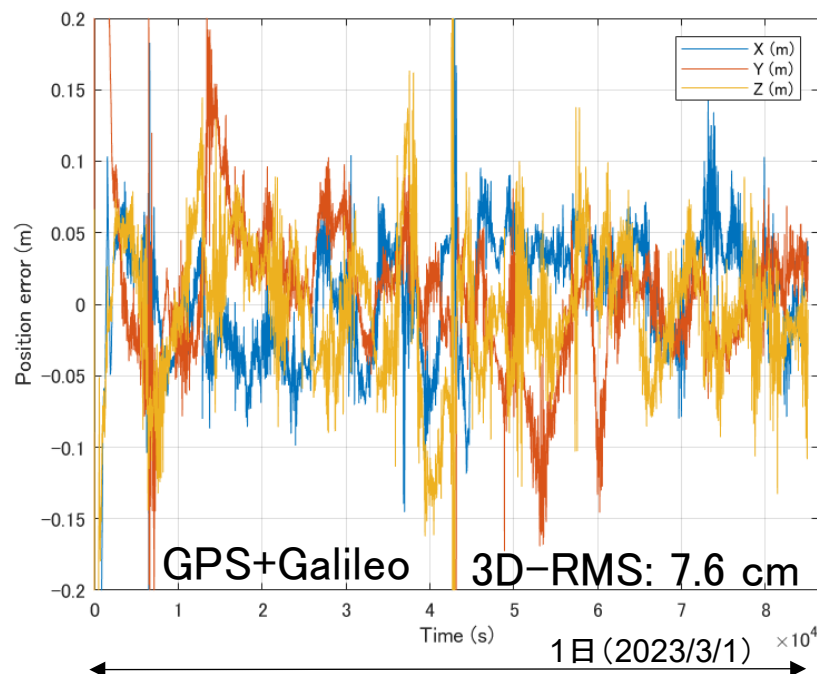
5.1 高精度単独測位ソフトウェア(MALIB_LEO)

—電離層遅延補正機能の実装—

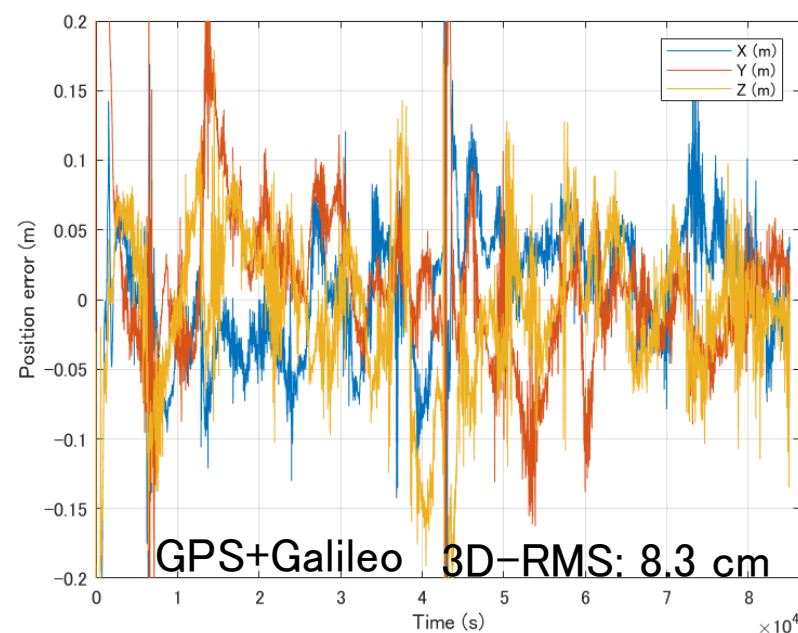
- 軌道上において、GNSS軌道・時計誤差以外で主要な誤差要因は電離層遅延であるが、通常のPPPで用いられる線形結合観測量を用いる方式に加えて、電離層遅延量をカルマンフィルタで推定する方式も実装する。
- 電離層遅延量を推定する際のプロセスノイズ値を決める必要があり、現在は地上のPPPで実績のある値を採用しているが軌道上でチューニングを行って最適な値を決定する。
- 下記図より、各電離層遅延補正方式(※)において、10 cm以内の精度を達成し、実装に問題ないことを確認。軌道上実証でどちらの電離層遅延補正方式が優位となるか実証する。

※ 通常の単独測位においては、電離層遅延の影響は、数mの測位誤差となる

線形結合(電離層フリー)を用いる方式



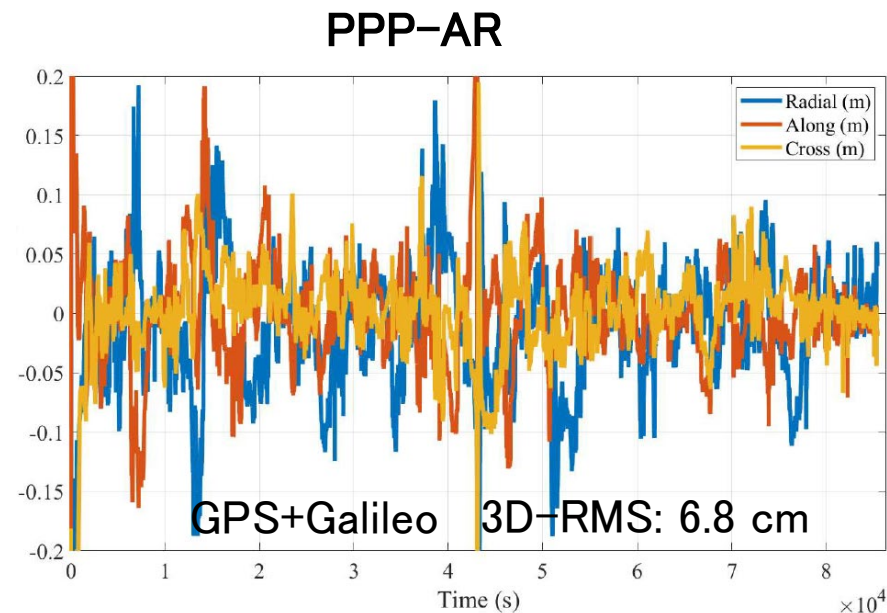
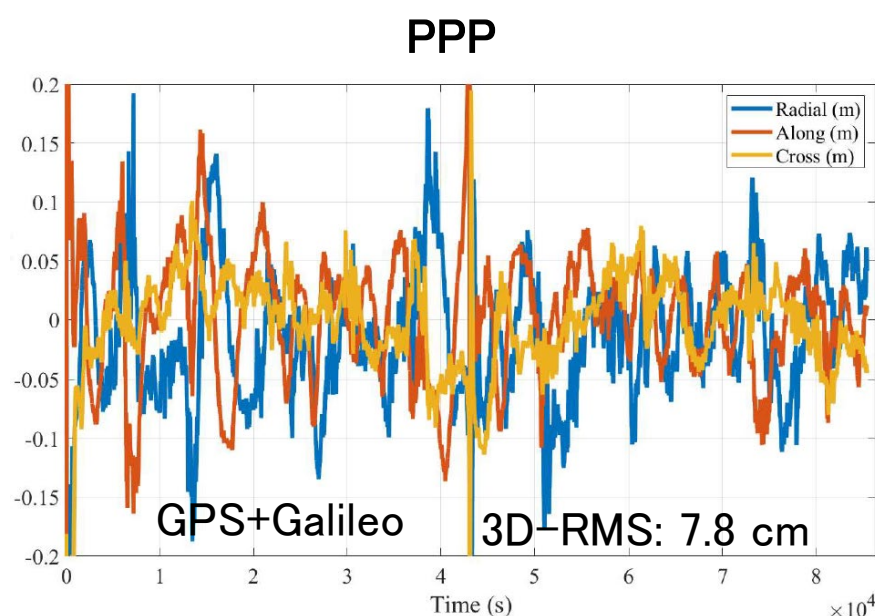
電離層遅延量を推定する方式



5.1 高精度単独測位ソフトウェア(MALIB_LEO)

–アンビギュイティ決定(AR)機能の実装–

- PPPのフィルタの観測更新で得られた測位解に含まれるアンビギュイティから、より確からしい値を求めて、より高精度な測位解を得るプロセスであるアンビギュイティ決定の機能の実装を進めている。
- アンビギュイティ決定の性能は使用する衛星の観測量の数に依存するため、QZSS MADOCA-PPPの主要なサービスエリアであるアジア地域以外では、衛星数が減少する問題があったが、複数のGNSS観測量を取り込む改修と、観測データに応じた重みをフィルタの事後残差から設定する手法を用いることで、軌道上であってもアンビギュイティ決定率を8割以上まで向上させることが可能となった。
- 下記図より、アンビギュイティ決定を行うことで、測位誤差(3D-RMS)は10%程度減少し、実装に問題ないことを確認。



※観測データに応じた重み適用
(前頁の解析条件の差分)

1日(2023/3/1)

5.1 高精度単独測位ソフトウェア(MALIB_LEO)

-収束時間解析-

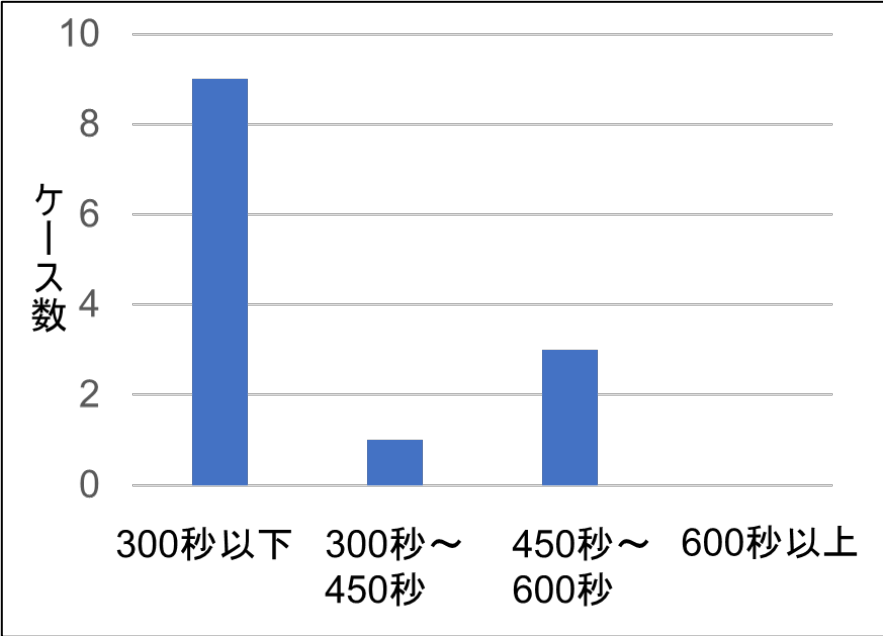
- 精度解析で用いた観測データを使用し、QZSSの可視時間を考慮してオンボードPPP (PPP-AR+dynamics(STEC推定))の開始時間を30分単位でずらし、3D誤差が10cm以下になるまでの収束時間(※)を評価した結果を表5-3に示す。

※ MADOCA-PPP(地上)の収束時間(仕様)は30分以下、BeidouのPPP-B2bの収束時間は20分以下。
MADOCA-PPP(オンボードPPP)の収束時間(仕様)は5分以下。

- 現時点では、収束時間の仕様を満足する割合は約70%であるが、仕様である収束時間5分以内を達成できる目途を得た。収束時間の改善に向け引き続き検討を進める。

表5-3 収束時間解析結果

収束時間	ケース数
300秒以下	9
300秒～450秒	1
450秒～600秒	3
600秒以上	0



5.2 高性能オンボードコンピュータ(H2-OBC)

- 軌道上で高精度単独測位を行うソフトウェアを搭載する計算機(Unibap)であり、本計算機のみが、衛星バスと電氣的なインタフェースを行う機能を有する。
- 衛星バスとのインタフェースは電源とEthernetである。
- H2-OBC(FM)のH/WはUnibap社(スウェーデン)で試験が行われ、2024年10月中旬にJAXAに納入された。
- JAXAでH2-OBCへの搭載ソフトウェアの実装、試験等を行い、2024年12月末に衛星システムに引き渡した。

メーカー	Unibap
型番	iX10-100
参考URL	https://unibap.com/solutions/spacecloud-hardware/ix10/
寸法	約110x110xH85mm
質量	約2000g
筐体材質	アルミ合金(黒アルマイト、アロジン処理@取付面)
形状	右図参照
取り付け要求	16xM4
固有振動数	120Hz以上
電源	DC12V
消費電力	オペレーション時：最大38W
インタフェース	Ethernet、USB
許容温度範囲	-40～+70℃
耐振動、衝撃性能	ランダム25Grms(各軸)TBD
視野	N/A
その他	計算機基板は複数衛星にてフライト実績あり

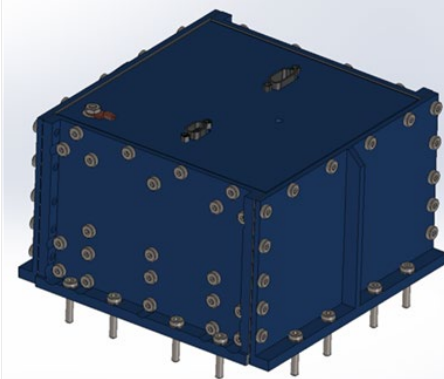
Processing & Storage

CPU: AMD Ryzen V1000 GPU: 8 x AMD Radeon

VPU: Myriad X (iX10-101), Hailo-8 (iX10-102)

RAM: 24 GB DDR4 ECC (CPU/GPU)

Storage: 2 x 4TB NVMe SSD, 1 x 128GB SATA SSD



H2-OBC外観図(左:計算機基板、右:筐体)

5. 研究開発成果(7/11)

5.3 GNSS受信機(GNSS-Rx)

- 軌道上で準天頂衛星を含むGNSSからの測位信号(3周波)と準天頂衛星からのL6信号を受信する受信機(Septentrio)であり、受信した測位信号をOBCに提供する。
- 受信機の電源はOBCから供給される。
- GNSS-RxのEM試験、FM試験は2024年11月に完了し、2024年12月末に衛星システムに引き渡した。

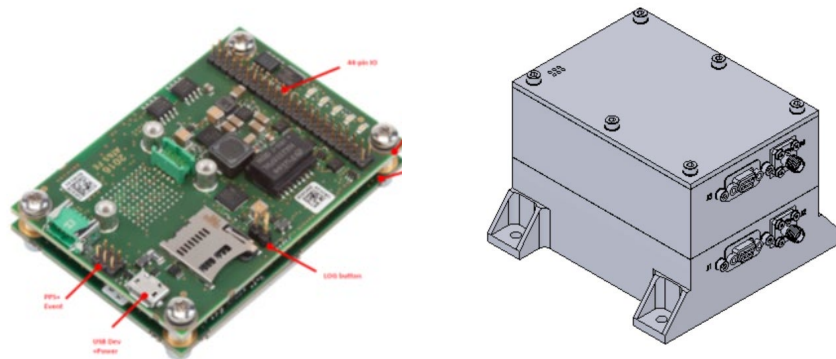
メーカー	Septentrio
型番	AsteRx-m3-CLAS
参考URL	https://www.septentrio.com/ja/zhpin/gnssshouxinji/oemshouxinjihto-1/asterx-m3-clas
寸法	約100x80xH50mm (受信機2セットの場合: H80mm)
質量	約400g (受信機2セットの場合: 約600g)
筐体材質	アルミ合金(黒アルマイト、アロジン処理@取付面)
形状	右図参照
取り付け要求	4xM4 (TBD)
固有振動数	120Hz以上
電源	DC5V
消費電力	定常1.5W (受信機2セットの場合: 3.0W)
インタフェース	USB(MDM9-M)、RF(SMA-F)
許容温度範囲	-40~+85℃(動作時)
耐振動、衝撃性能	ランダム25Grms(各軸)TBD
視野	N/A
その他	電源はH2-OBCから供給される

FEATURES

GNSS signals

544 Hardware channels for simultaneous tracking of most visible signals:

- ▶ GPS: L1 C/A, L1C, L2C, L2 P(Y), L5
- ▶ GLONASS: L1 C/A, L2C/A, L3, L2P
- ▶ BeiDou: B1I, B1C, B2a, B2b, B2I, B3I
- ▶ Galileo: E1, E5a, E5b
- ▶ QZSS: L1 C/A, L1C/B, L1C, L2C, L5, L6
- ▶ NavIC: L5
- ▶ SBAS: EGNOS, WAAS, GAGAN, MSAS, SDCM



GNSS-Rx外観図(左: 受信機基板、右: 筐体)

5. 研究開発成果(8/11)

5.4 GNSS低雑音増幅器(GNSS-LNA)

- アンテナで受信した信号を増幅してGNSS受信機に入力するための増幅器（GPS SOURCE）である。
- GNSS受信機とは同軸ケーブルでインタフェースする。電源はGNSS受信機から供給される。
- GNSS-LNAのEM試験、FM試験は2024年11月に完了し、2024年12月末に衛星システムに引き渡した。

メーカー	GPS Source
型番	MA11M-SF
参考URL	https://www.gpssource.com/products/ma11m-military-grade-gps-mini-amplifier
寸法	約4x2x1.2inch
質量	約150g
筐体材質	アルミ合金など
形状	右図参照
取り付け要求	4xM4（LNA本体用：2x 4-40UNC-2B）
固有振動数	
電源	DC5～7V（GNSS受信機から供給）
消費電力	0.33W
インタフェース	RF(SMA-F)
許容温度範囲	-40～+85℃
耐振動、衝撃性能	16Grms/40G
視野	N/A
その他	電源はGNSS受信機から供給される



GNSS-LNA外観図

5.5 GNSSアンテナ(GNSS-ANT)

- GNSSからの測位信号を受信するためのアンテナ(Anywaves)である。
- 同軸ケーブルでLNAとインタフェースする。
- GNSS-ANTはAnywaves社での試験が完了しており、2023年度末にJAXAへ納入済みである。2024年12月末に衛星システムにGNSS-ANTを引き渡した。

メーカー	Anywaves
型番	GNSS All- Bands Antenna
受信周波数	1.16GHz～1.61GHz
受信可能GNSS信号	QZSS L1/L2/L5/L6 GPS L1/L2/L5 Galileo E1/E5a/E5b/E6 GLONASS G1/G2/G3
参考URL	https://anywaves.com/products/gnss-all-bands-antenna/
寸法	99.4 mm x 99.4 mm x H15.2 mm
質量	130g
筐体材質	TECAPEEK GF30 coated with SG- 121FDwhite paint
形状	右図参照
取り付け要求	4xM3
固有振動数	
電源	N/A
消費電力	N/A
インタフェース	RF(SMA-F)
許容温度範囲	-120～+120℃
耐振動、衝撃性能	Z-axis random vibration 24.8Grms Thermal cycling
視野	右図参照
その他	フライト実績あり



GNSS-ANT外観図

5. 研究開発成果(10/11)

5.6 コーナキューブリフレクタ(CCR)

- オンボードPPPの精度を評価するために、レーザーレンジングを利用する。
- レーザーレンジングを行うためには、衛星にCCRを搭載する必要があるため、JAXAで開発したMt.Fujiを利用する。
- 衛星バスとのインタフェースは、機械的なインタフェースのみである。
- 2024年12月末に衛星システムにCCRを引き渡した。

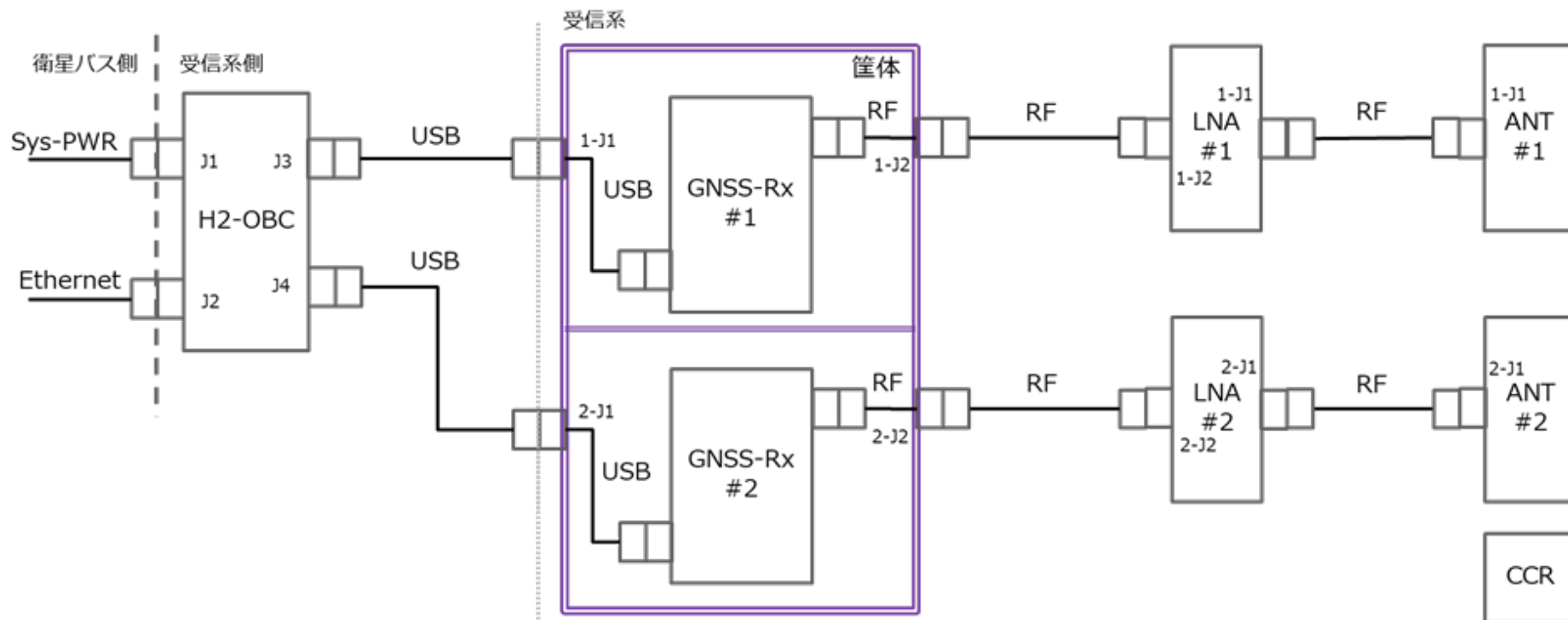
メーカー	JAXA
型番	Mt.Fuji (大型サイズ) 、 Mt.Fuji-Mini
参考URL	https://track.sfo.jaxa.jp/project/mtfuji.html
寸法	Φ112xH32mm(Mini : Φ62xH17.5mm)
質量	260g (Mini : 55g)
筐体材質	本体：アルミニウム CCR：合成石英 緩衝材：PTFE、PFA
形状	右図参照
取り付け要求	6xM4 (Mini : 6xM3)
固有振動数	
電源	N/A
消費電力	N/A
インタフェース	N/A
許容温度範囲	-130～+180℃ (Mini : TBD)
耐振動、衝撃性能	X/Y/Z : 22/21/26Grms(参考値)
視野	右図参照
その他	フライト予定あり



CCR外観図

5.7 オンボードPPP全体構成

- オンボードPPP技術は、高性能オンボードコンピュータ(H2-OBC)、GNSS受信機(GNSS-Rx)、低雑音増幅器(LNA)、アンテナ(ANT)で構成される。
- オンボードPPP技術の精度を評価するために、コーナキューブリフレクタ(CCR)を搭載してSLR局からレーザレンジングを行う。



オンボードPPP ブロック図

6. 留意事項への対応

【留意事項】

準天頂衛星システムのサービスエリアはアジア・太平洋地域であるが、グローバルな利用を念頭に開発を進めること

- QZSS不可視帯への対応としては、以下が考えられる
 - ① GNSSから放送される放送暦に基づくオンボードPPP
 - ② 地上で計算したGNSS予測暦(JAXA超速報暦)に基づくオンボードPPP
 - ③ 高精度力学モデルに基づく自衛星のオンボード軌道伝播
 - ④ オンボードで高精度力学モデルを使用して計算したGNSS予測暦に基づくオンボードPPP
 - ⑤ データ中継衛星(インマルサット)経由で配信されるJAXA MADOCAリアルタイム暦に基づくオンボードPPP

- 上記①、②、③の解析結果(不可視時間:47分)を表6-1に示す。

表6-1 QZSS不可視帯における精度解析結果

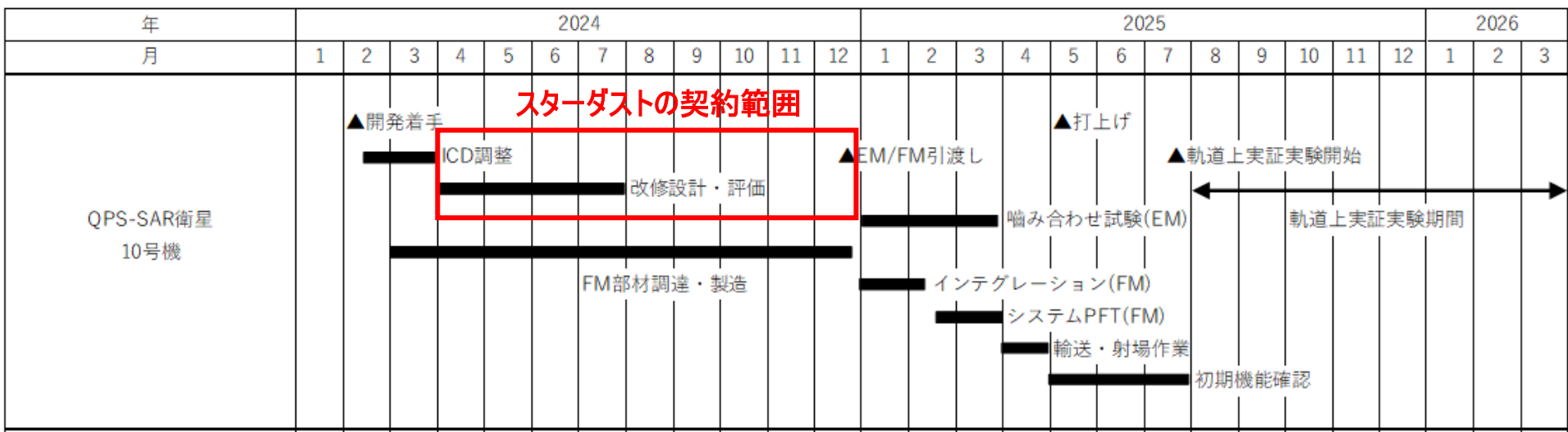
ケース	精度(3D RMS)
①(放送暦)	35 cm
②(JAXA超速報暦)	19 cm
③(LEO軌道伝播)	330 cm

- 今後、④、⑤の手法についても詳細検討を行い、QZSS不可視帯への対応を決定する予定である。

- 本研究は、2023年4月に文部科学省から公募された宇宙開発利用加速化戦略プログラムに「衛星オンボードPPPの実証機開発」として採択され、2024年度末にそのすべての開発作業を完了した。
- 2023年度は衛星に搭載する機器の選定や衛星搭載可能性の検討を行い実現性があることを確認した。
- 2024年度は、軌道上実証に向けて、オンボードPPP技術を実現する搭載ソフトウェア開発を行うとともに、構成機器のEM/FM試験を行い、全ての機器を12月末までに衛星システムに引渡した。
- 今回獲得した技術は、政府衛星や小型衛星コンステレーションにも適用可能であり、かつ、準天頂衛星からの補正情報に基づく技術であるため、JAXAの事業推進・拡大、及び、社会的に新たな価値の創出につながることを期待される。

8. 最新状況(1/2)

- 2023年5月のスターダスト採択後、検討作業が順調に進み、オンボードPPP実証機を搭載する衛星プラットフォームが決定。2025年度中に軌道上実証を行う枠組みが整った(小型技術刷新衛星研究開発プログラムの一環で、オンボードPPPをQPS-SAR10号機で打上げることが決定)。以下、軌道上実証に係る経緯を記載する。
 - 2024年2月にQPS研究所とのキックオフを実施
 - 2024年3月中にオンボードPPPとQPS衛星の間のICDを確定
 - 2024年9月にソフトウェア(MALIB v1.1.0)の開発を完了
 - 2024年11月までにコンポーネント(EM/FM)の製造完了
 - 2024年12月にオンボードPPPの最終電気性能試験を完了し、EM/FMをQPS衛星に提供
 - 2025年1月～4月でインテグレーション、衛星システムPFTを実施



- 2025年5月17日にRocket Lab社のElectronで、オンボードPPP実証機を搭載する衛星がニュージーランドから打上げられた。
- 2025年5月下旬に、オンボードPPP実証機の電源をONし、H/Wとして問題がないことを確認した。
- 衛星の初期機能確認が完了する2025年8月頃から、オンボードPPP技術の軌道上実証実験を開始する予定である。
- 軌道上実証実験で取得したデータについては、オンボード PPPのアルゴリズム開発、解析作業等を希望する研究機関、教育機関、受信機メーカ等に対して公開することを検討する。



写真：Electron "The Sea God Sees" ミッション (Credit: Rocket Lab)

年	2024年	2025年			
月	10月～12月	1月～3月	4月～6月	7月～9月	10月～12月
スケジュール	▲ 搭載機器引渡	衛星システム試験	▲ リフトオフ(2025/5/17) 輸送、射場作業	初期機能確認	軌道上実証実験

現在(2025年7月)