

研究開発本部 通信・データ処理グループ（中台 光洋、栗野 穰太、稲岡 和也、谷島 正信）  
宇宙科学研究所 宇宙機応用工学系（戸田 知朗）

深宇宙探査技術実証機DESTINYの通信系サブシステムには、従来の搭載機器と比較して、更なる機器の小型・軽量化と、データ伝送レートの向上が求められている。従来の小型科学衛星標準バスとして使用されているSバンド通信回線は、長年の運用実績から信頼性は高いが、割り当て可能な周波数帯域幅が狭く、高データレートの通信が困難である。そのためDESTINY通信系サブシステムでは、将来の惑星間ミッションへの適用も考慮し主回線としてXバンドの使用と、高データレートの通信が期待できるKaバンド回線をベースに検討を進めている。通信系サブシステムの概要と、軌道上実証を計画する新規機器の検討・開発状況について紹介する。

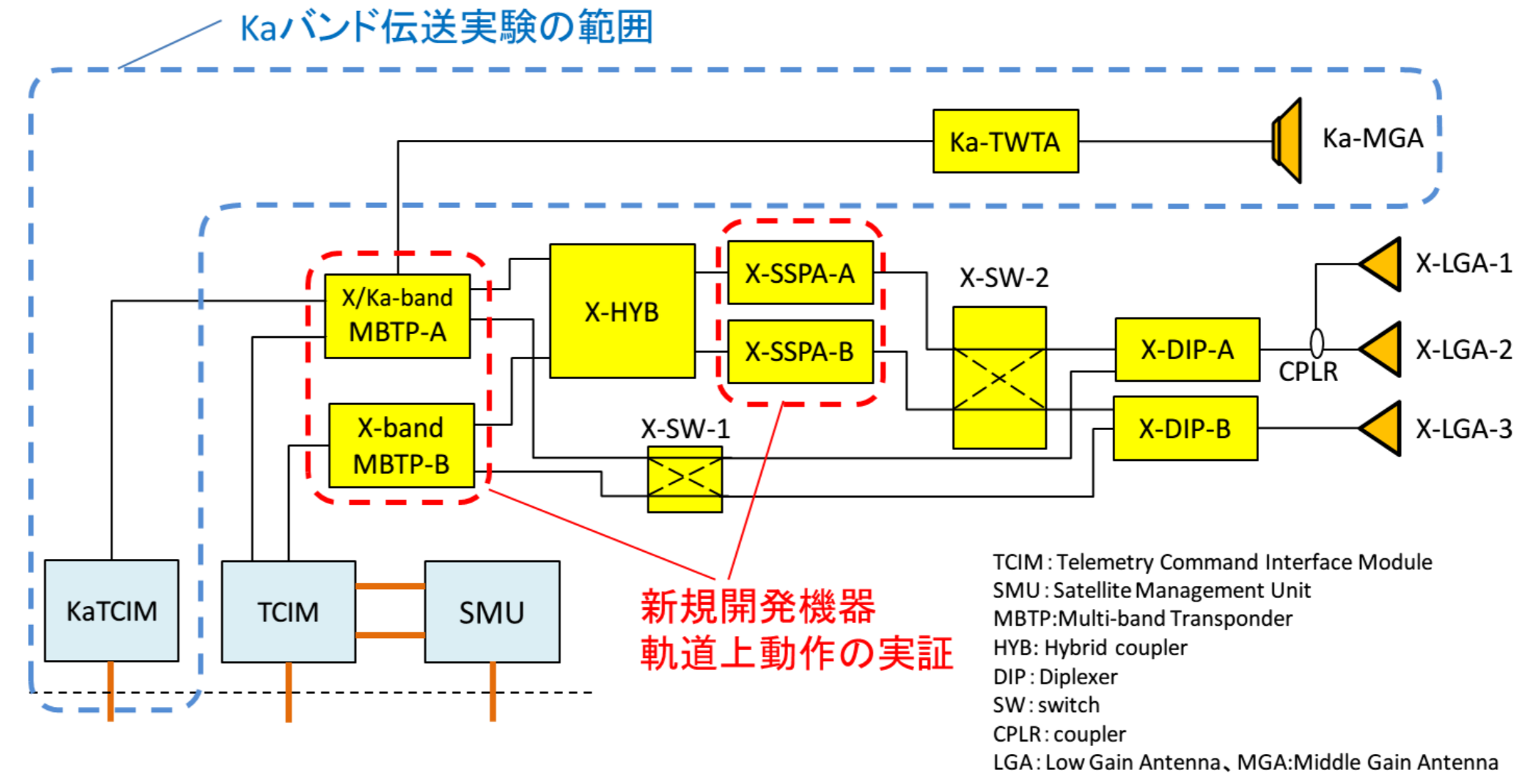
## 1. DESTINY通信系サブシステム概要

DESTINY実証機では、従来の小型科学衛星標準バスシステムで採用されているSバンド通信回線ではなく、**XバンドとKaバンドの2系統**の通信回線を備える。Xバンドを使用してHK回線とミッションデータ伝送回線を構成し、HK回線およびミッションデータ伝送回線として使用するため完全冗長構成とする。Kaバンドはミッションの位置づけとなる先端的通信実験を行うために使用し、常時接続を求めないため単系統としている。

DESTINY実証機では、小型科学衛星標準バスではSバンドを使用して主回線を構成しているため、Xバンドによる運用に対応するために、Xバンド対応の新規トランスポンダに置き換える。このトランスポンダはKaバンドにも対応可能なマルチバンド構成とすることで、Kaバンド伝送実験にも使用する。この**新規トランスポンダによりサブシステム全体で必要となる機器を減らし、搭載リソースを大幅に削減**することができる。

また電力増幅器として固体電力増幅器(SSPA)を採用し、**半導体素子に窒化ガリウム(GaN)を新しく採用**することで、従来のガリウム砒素(GaAs)を用いたSSPAと比べて**低消費電力化と高出力化**を実現する。これにより小型科学衛星においても高速な通信回線を構築することができる。

低利得アンテナ(LGA)、ダイプレクサ(DIP)等についてもXバンド用に変更するが、これらは従来用いられてきた信頼性の高い機器と同等のものを採用する。Kaバンド伝送実験用の機器として、テレメトリ・コマンインタフェースモジュール(TCIM)、進行波管電力増幅器(TWTA)、中利得アンテナ(MGA)を搭載する。これらの機器は従来使用されてきた機器と同等の品質を有するものを採用することで、信頼性を高める。

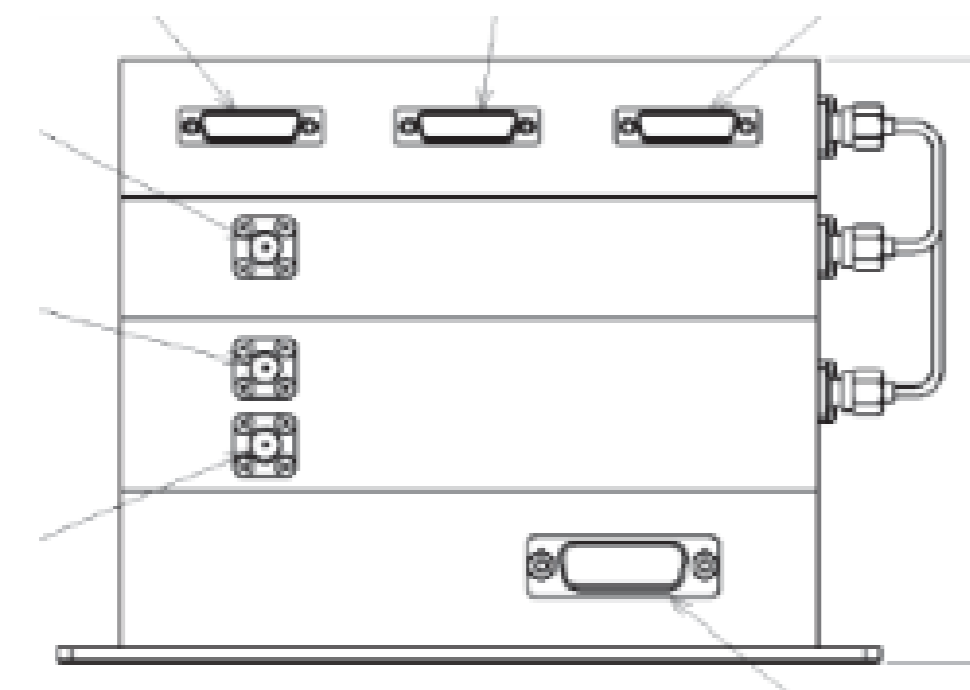


DESTINY実証機の通信系サブシステムの機能ブロック図

- Xバンド通信系
    - HK回線
    - ミッションデータ伝送
  - Kaバンド通信系
    - 通信実験用途
- 1つの通信回線に統合することで搭載リソースを削減  
L2点ミッションにおけるKaバンド回線の安定性評価、データ伝送量推定精度の向上

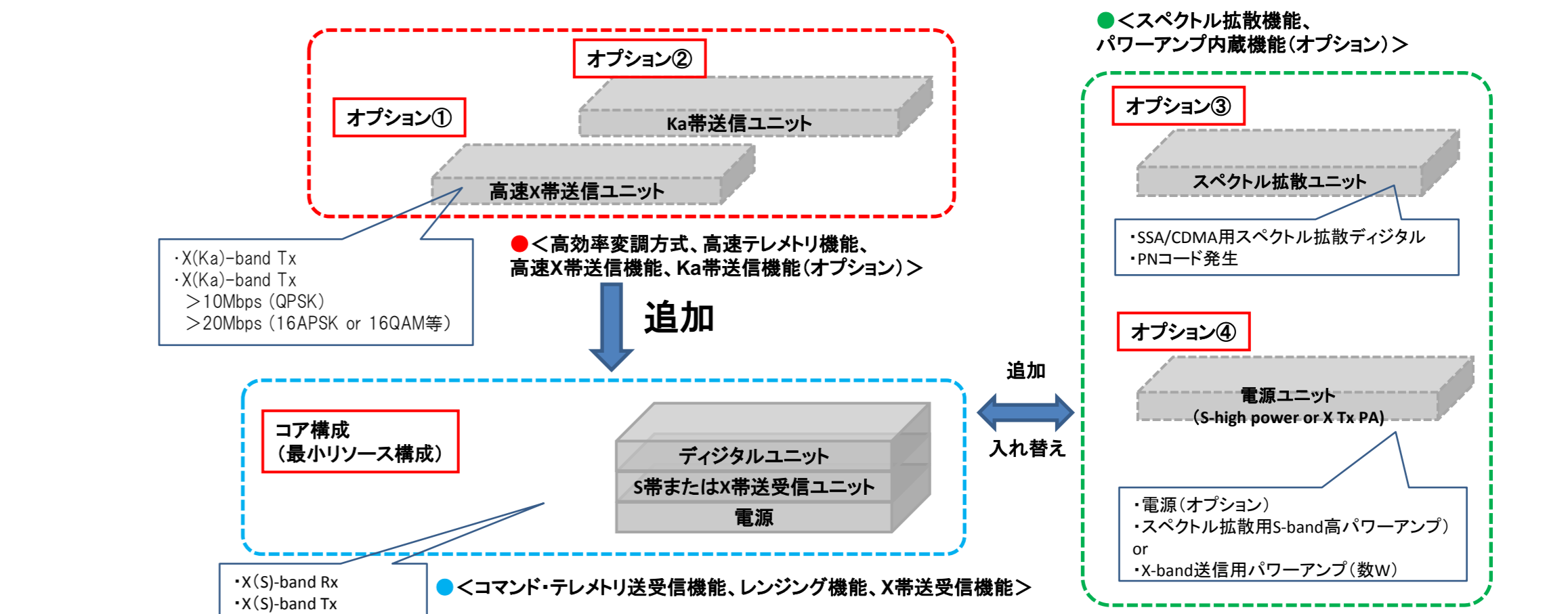
## 2. 新規開発機器①: マルチバンドトランスポンダ(MBTP)

- 通信モード
  - 4つの変復調モード(PCM-PSK/PM, PSK-PM, BPSK, QPSK)を有し、**最大ビットレートは10Mbps以上に対応可能**。
  - 変復調モードは、コマンドによる切り替え、または受信信号によって自動的に判別して遷移する機能も有する設計としている。
- 搭載機器の小型・軽量化
  - 複数の周波数帯を使った**HK通信機とミッションデータ伝送送信機を1つの機器で実現**することで、周波数毎に専用のトランスポンダやトランスミッタを搭載する必要がなく、トータルリソースを削減することを目的としている。
- 機能のモジュール化による拡張性
  - 機能をモジュール毎に分けることで、衛星ミッションに応じて機能(周波数帯、変調方式)の取捨選択が可能な拡張性のある設計とすることで、DESTINYによる軌道上実証後、他の宇宙機への搭載が容易な設計としている。
  - また必要機能に絞った小型・軽量化により、コストメリットが期待できる。



マルチバンドトランスポンダ外観

検討したマルチバンドトランスポンダの構成・機能	
機器構成	
①Uplink: S-band, Downlink: S-band	
②Uplink: X-band, Downlink: X-band	
③Uplink: S-band, Downlink: S-band/X-band(高速)	
④Uplink: X-band, Downlink: X-band/X-band(高速)	
上記に加えてKa-bandモジュールの構成を検討中	
変復調モード	
Uplink: PCM/PSK-PM, PSK-PM, BPSK(上記①~④共通)	
Downlink: PCM/PSK-PM, PSK-PM, QPSK	
構成③、④はQPSK(高速)も具備	



【詳細検討結果】 ※従来機器: 小型衛星標準バスに使われているSバンドトランスポンダ

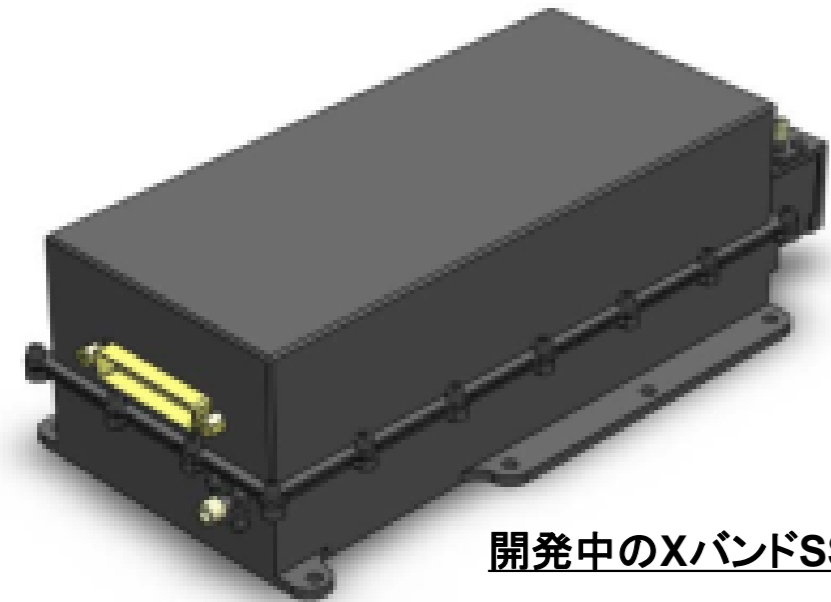
- 送信Xバンドの機器構成(X/X構成)
  - 従来機器と比較して小型、軽量、省電力化が可能な見込みが得られた。
    - 容積・質量が3分の2程度、
    - 消費電力は受信部のみ動作時に最大12W程度、送受信時は最大35W程度
- DESTINYに搭載を予定するX/Kaマルチバンド構成と同等のS/Xマルチバンド構成
  - 従来機器と比較して、同程度の大きさ、質量となる見込みが得られ、標準バスからの置き換えが可能である結果が得られた。

上記に加え、Ka-band送信機モジュールについても検討を行う予定である。

## 3. 新規開発機器②: GaNデバイスを用いたXバンド固体電力増幅器(GaN/XSSPA)

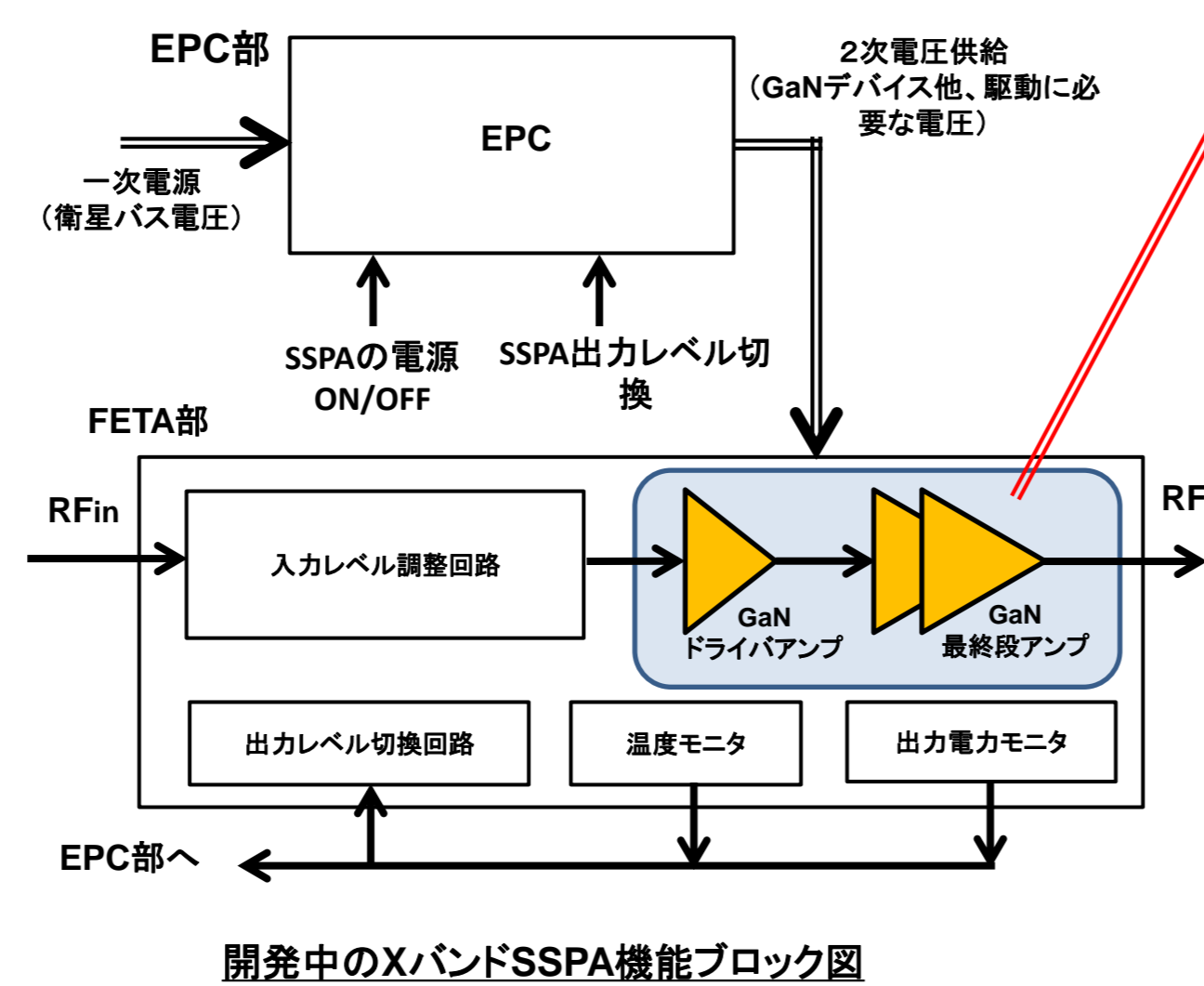
Xバンド回線用にGaN系デバイスを用いた固体電力増幅器(GaN/XSSPA)を搭載する。小型・低質量・高電圧電源を必要としないため高信頼なSSPAに、高耐圧性や良好な高周波特性を有するGaN系半導体素子に用いることで、SSPAの高出力化と高電力効率化を狙っている。

GaN/XSSPAは、GaNデバイスのチューニングだけで地球観測衛星向けのXバンドSSPAとして従来機器との置き換えが可能のように、筐体の大きさや材料、電源部回路やRF部を構成するその他のデバイスを選定して設計している。これによりDESTINYによる軌道上実証後、他の衛星へ搭載する際の、開発期間の短縮と低コスト化を図ることができる。



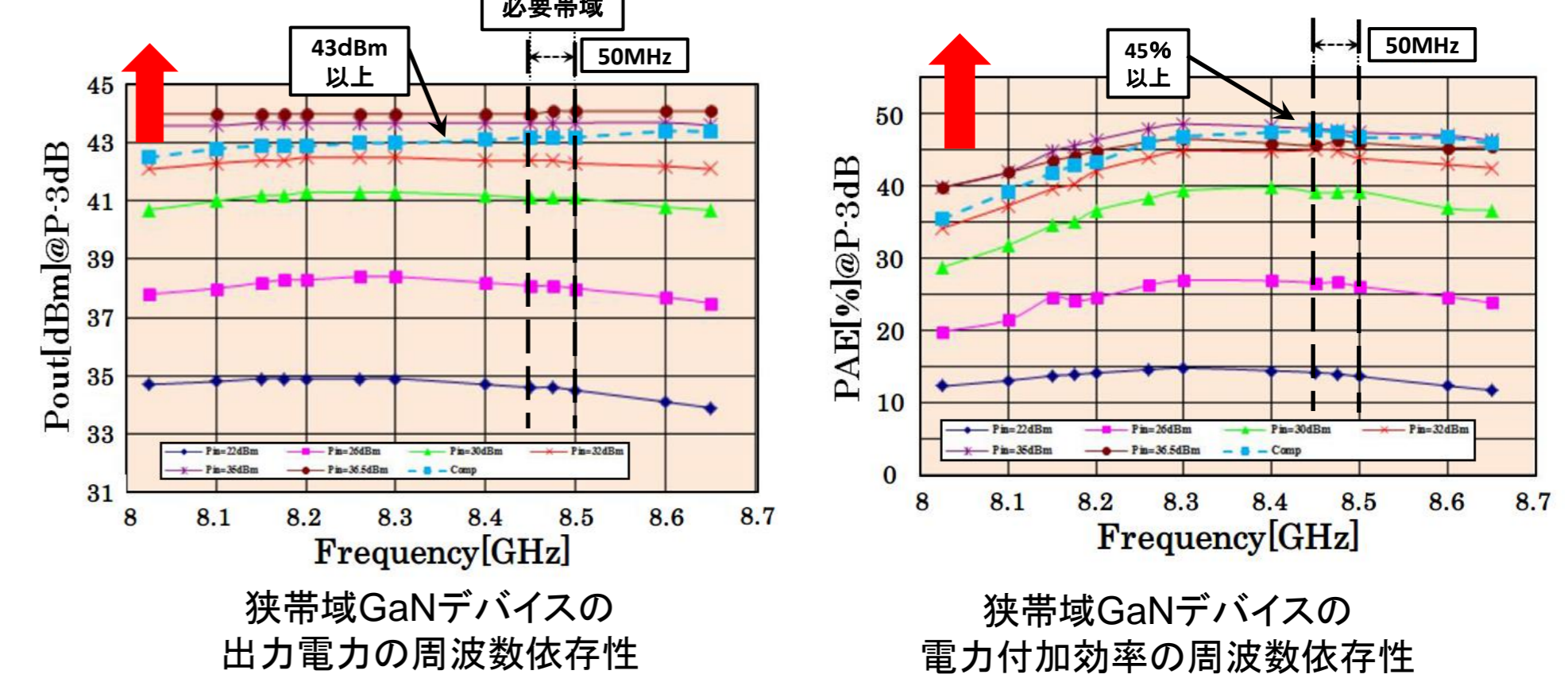
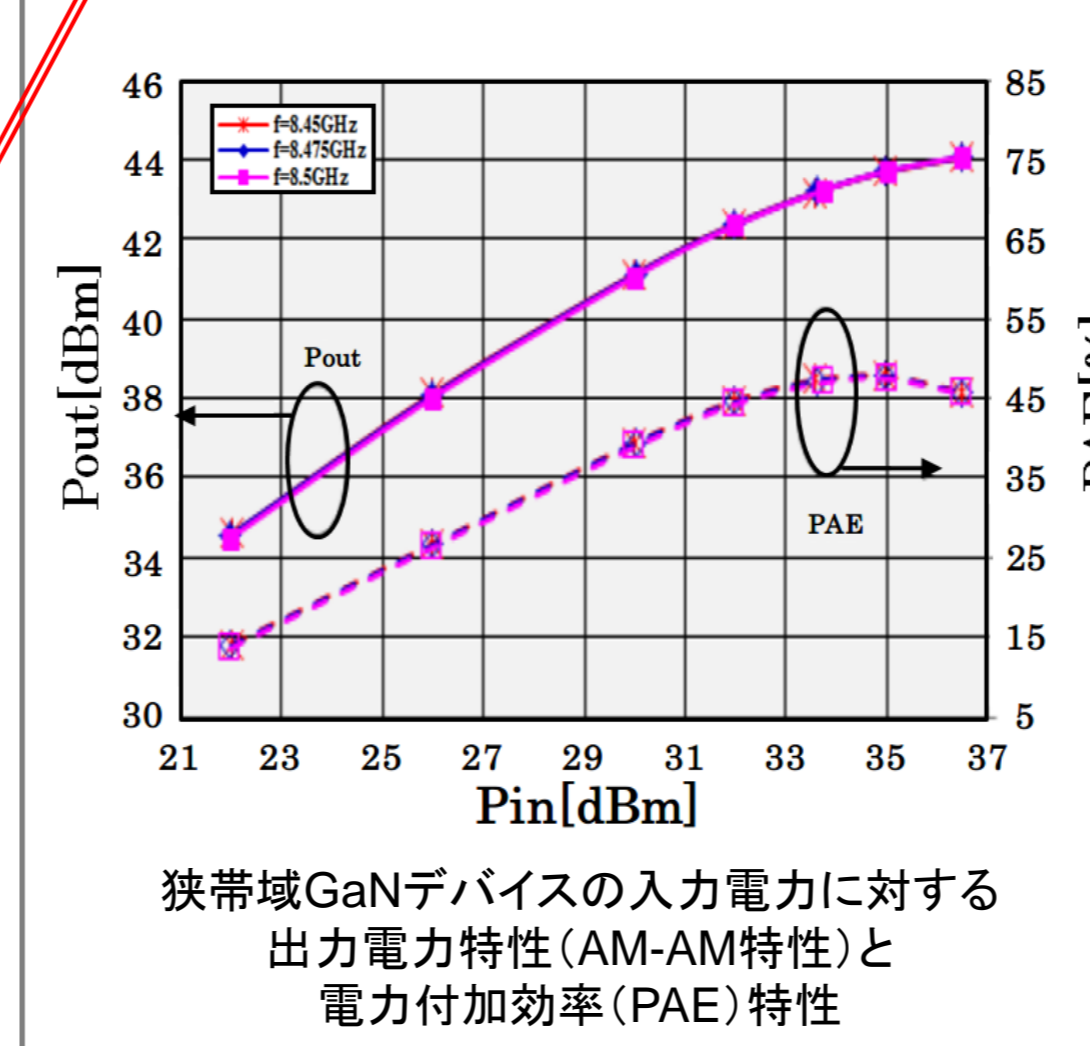
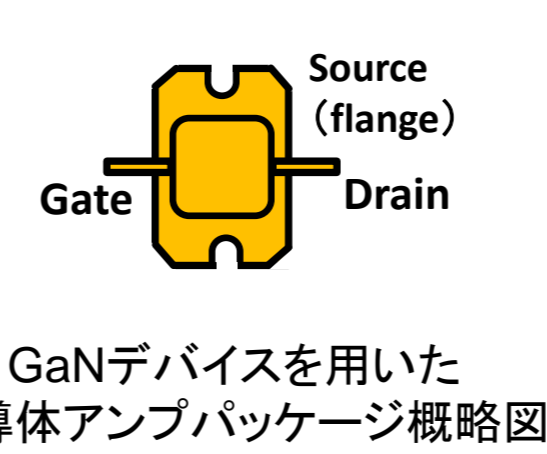
開発中のXバンドSSPA外観

目標物理特性				
大きさ	190 × 150 × 70(H) mm <sup>3</sup> 以下			
質量	1200g以下			
目標電気性能				
種類	周波数 [GHz]	帯域幅 [MHz]	出力電力 [dBm]	電力効率 [%]
狭帯域 XSSPA	8.025 ~ 8.5	50	>43 @P-3dB	>35 @P-3dB



開発中のXバンドSSPA機能ブロック図

### 【GaNデバイスパッケージの試作結果】



GaNデバイス単体の試作の結果、50MHz帯域幅(8.45GHzから8.5GHz)において周波数依存性がほとんどなく、**目標出力+43dBm以上**と、**電力付加効率(PAE)が目標値の45%を超える結果**が得られた。

また、RF回路部、電源部の詳細設計により、**SSPA全体の電力効率が35%以上となる設計結果**が得られた。

## 4. Kaバンド回線を用いたデータ伝送量の評価実験

- 実験概要
  - Kaバンド通信回線を用いて、将来の**L2点滞在ミッションのデータ伝送量推定精度の向上**と、低高度、長楕円軌道、月軌道近傍における、**指向追跡精度を含めたその限界を検証**する。
- 実験方法
  - 地球近傍からL2点まで、衛星—地球局間距離を漸増させながら統計評価に必要な長期間の回線データ(低仰角から高仰角まで)を季節に依らず満遍なく取得する。地球近傍(打上げ後、チェックアウト終了時点)からL2点到着まで、中利得アンテナの地球指向が許される限り実施を検討している。
- 必要となるシステムリソース
  - 実験に用いる機器はマルチバンドトランスポンダに統合されるKaバンドモジュール、5W級電力増幅器(TWTA)、および衛星構体に固定されている中利得アンテナから成り、従来使用されてきた信頼性のある機器を可能な限り採用することを検討中。またKaバンド地球局については、いくつかのケースを検討中である。

## 今後の課題

- マルチバンドトランスポンダのKaバンドモジュール部の設計検討を行う。
- GaN/XSSPA全体の電気性能を確認し、宇宙環境を模擬した環境試験の実施をする。
- 小型衛星標準バスからの変更に伴う、XバンドおよびKaバンド用にTCIMの設計変更などを進める。
- 各運用フェーズにおけるアンテナパターンと回線の成立性検証や、二周波使用時の高精度に軌道決定をする際のノイズの影響について検討を行う。  
また、現在日本にはKaバンドを使用できる地上局が存在しないため、Kaバンド伝送実験に向けて地上局の整備についての検討を進める。