

# ASTRO-G技術実証

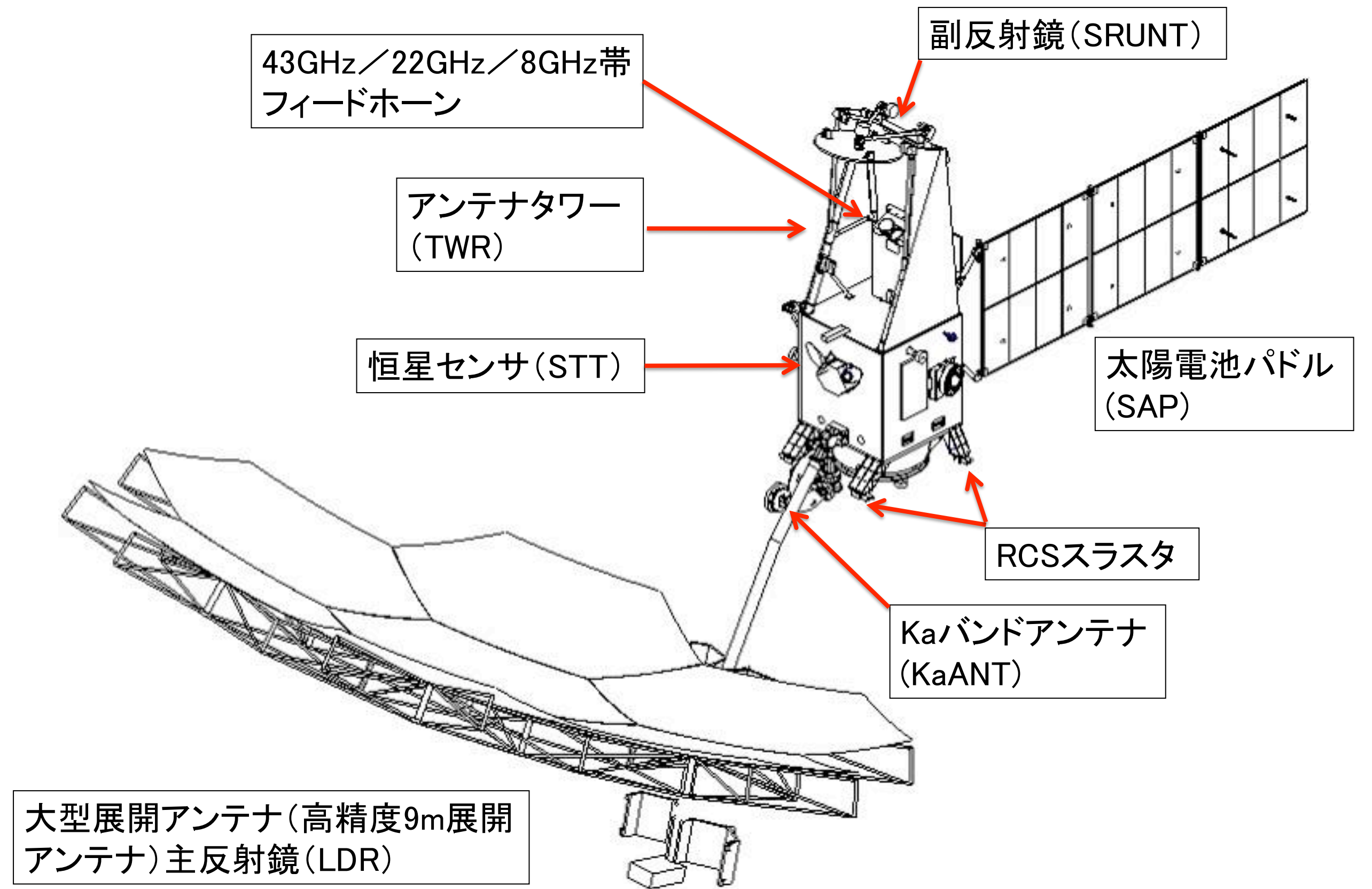
満田和久、紀伊恒男、吉原圭介、村田泰宏、斎藤宏文、小松敬治、坪井昌人、坂井真一郎、竹内央、望月奈々子 (ISAS/JAXA)、小林秀行 (国立天文台)、他ASTRO-G技術実証チーム

ASTRO-G技術実証チームは、ASTRO-G開発中に生じたミッション達成に関わる技術的な未達に対し、その実現性を検証し、技術課題を解決するため、2009年11月から活動を行った。その主な課題は、(1) 高精度9m展開アンテナ (大型展開アンテナ) の要求鏡面精度、(2) 観測信号高速処理系の軌道上放射線環境における耐性、(3) 22GHz 位相補償観測に必要な高速姿勢制御の安定性、(4) 22GHz 位相補償観測に必要な高精度軌道決定、の実現に向けた技術実証にあった。本報告では、その概要を紹介する。個別の技術実証の結果は、P2-042~047に示した。

## ASTRO-Gの概要

ASTRO-Gと地上の電波望遠鏡群が基線長約35,000kmの電波干渉計を構成、これによって観測周波数帯域で達成し得る人類史上最高の空間分解能を実現する。

衛星質量	1200kg (推進薬含む)
観測軌道	1000km × 25,000km 傾斜角31°
ロケット	H-IIAロケット
目標寿命	3年
ミッション系諸元	<ul style="list-style-type: none"> <li>観測周波数: 43GHz帯(*), 22GHz帯(*), 8GHz帯</li> <li>(*): 冷凍機にて30Kに冷却</li> <li>観測アンテナ: オフセットカセグレン式 (展開型主鏡直径 約9m)</li> <li>観測信号を高速サンプリングし、Ka帯にて1Gbpsでリアルタイム伝送</li> <li>同時に、地上から位相基準信号を受信</li> <li>高精度軌道決定のためGPS受信機とレーザ測距レフレクタを搭載</li> </ul>
バス系諸元	<ul style="list-style-type: none"> <li>電源: 発生電力 約1400W (EOL)</li> <li>姿勢: 三軸ゼロモーメント方式、CMGによる高速姿勢変更制御</li> </ul>

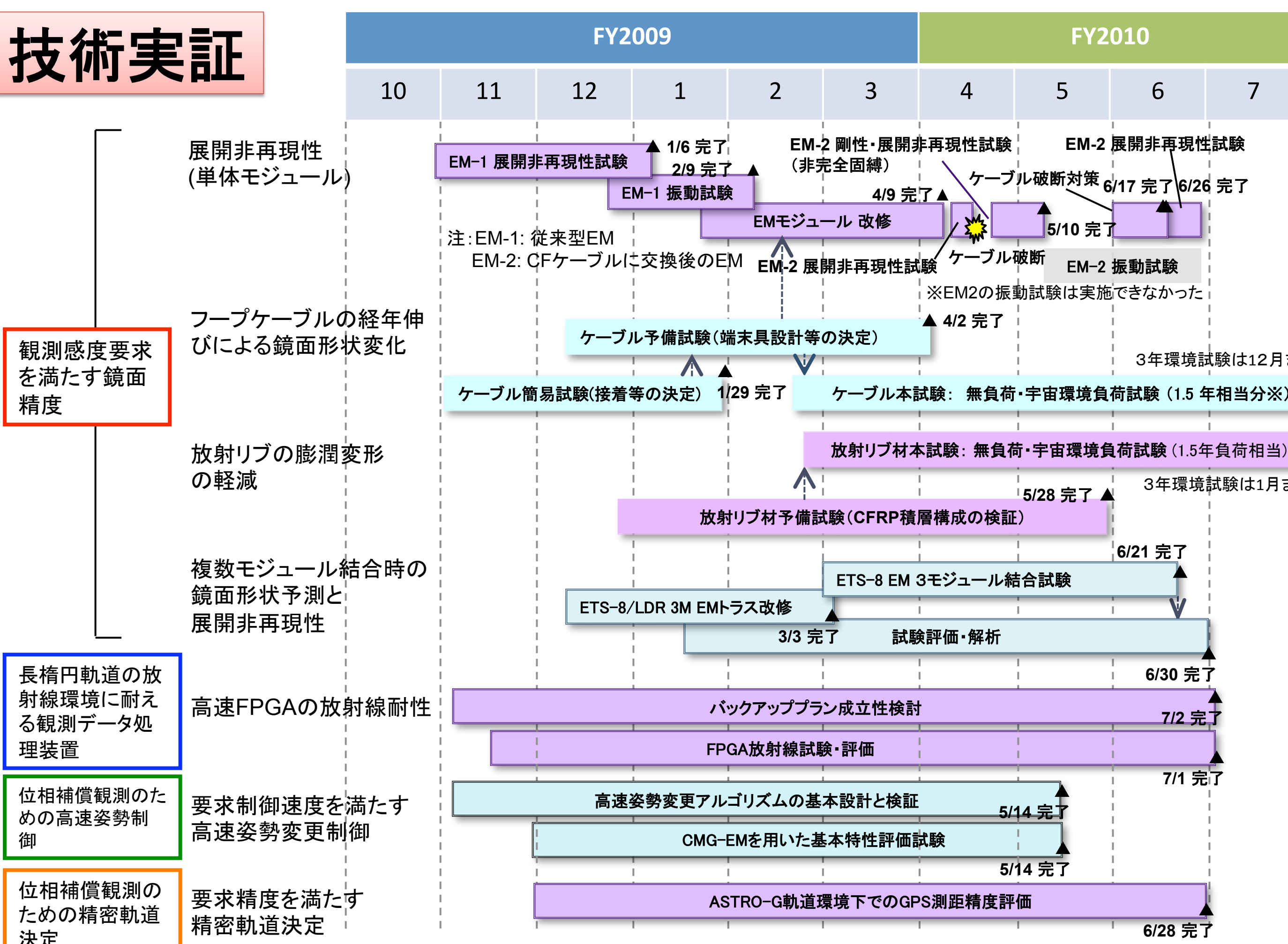


## 解決すべき技術課題

ミッション実現のために早期に解決すべき技術課題が抽出され、それを基に対策・検証計画を立てた。技術実証チームでは、この検証計画に沿って、技術的な実証を実施した。

技術項目	技術課題	推定要因	対策案	検証計画案
観測感度要求を満たす鏡面精度	単体モジュールの展開非再現性、フープケーブルの経年伸びによる鏡面形状変化	フープケーブル材質および端部処理に起因する初期伸び、及び、経年的な伸び。	フープケーブルの材質変更 (燃り有から燃り無へ、高剛性材料へ)。フープケーブルの端部処理変更 (ループ+かしめから、金具への接着)。	材料試験、要素試験 (熱・機械特性、耐宇宙環境試験など) によるケーブル性能の実証、EM 1 モジュールを改修し展開再現性試験による確認
	熱真空試験から、軌道上熱変形と膨潤変形	放射リブの大きな脱湿変形	放射リブ材を膨潤変形の小さなポリシアネート系レジンを用いたCFRPIに変更。	要素試験 (熱・機械的特性、脱湿変形、耐宇宙環境試験) による確認
	複数モジュール結合時の鏡面形状予測と展開非再現性	モジュールの初期形状誤差とモジュール結合部遊びに起因する鏡面変形量を7モジュールでは地上では測定できない。解析モデルによる予測が必須。	ETS-VIII大型展開アンテナEM 3モジュールを用いた結合試験で、解析モデルを検証	ETS-VIII 大型展開アンテナEMを改修し、ASTRO-Gの条件に適合した3モジュール結合試験、展開再現性試験を実施し、結合モデルの妥当性を確認。
長楕円軌道の放射線環境に耐える観測データ処理装置	高速FPGAの放射線耐性	放射線帯通過時に高頻度でSEUが生じ、バスファイト等による永久故障が高い確率でおきる可能性が否定できない。	該当FPGAの放射線耐性の試験による確認。並行して、バックアッププランとして、低速だが放射線耐性の高いFPGAを使用方式、FPGAを用いない方式の検討を行なう。	該当FPGAを実使用条件を模擬し放射線耐性試験を実施し、評価する。バックアッププランの実現性検討。
位相補償観測のための高速姿勢制御	要求制御速度を満たす高速姿勢変更制御	位相補償観測で要求される高速スイッチング姿勢変更は、確立していない新規技術。CMGの制御特性、大型展開アンテナの柔軟構造を考慮した制御アルゴリズムが確立していない。	CMG EM試験を実施。大型展開アンテナの設計、CMG EM試験で得られた誤差モデル、擾乱モデルを反映し、要求性能を満たす高速姿勢変更アルゴリズムの基本設計を行う。また、異常発生時のFDIR制御の発生トルクを検証し、大型展開アンテナの設計との整合性を検証。	貸与されているCMG EMを用い、実機の制御特性を確認、制御アルゴリズムの検証を行なう。また、異常発生時のFDIR制御の発生トルクを検証し、大型展開アンテナの設計との整合性を検証。
位相補償観測のための精密軌道決定	要求精度を満たす精密軌道決定	低~中軌道高度において、GPSによりASTRO-Gの要求精度を満たす計測精度が得られるか未確認。SLRと組み合わせた超高精度軌道決定の精度も未確認。	搭載を予定するGPS受信機の設計を基にした、ASTRO-Gの軌道条件下における測距精度評価を実施する。	取得した性能データをもとにGPS、SLRを用いた精密軌道決定の性能評価を実施。

## 技術実証



- ❖ 長さ変化の少ないフープケーブルによる鏡面精度の向上 P2-042~044  
 > 「燃りなしCFケーブル+ヒンジ金具への接着」を用いる事で、展開非再現性に寄与するヒステリシス特性、経年変化に寄与するクリープ特性が改善された。  
 > 最外周3つのフープケーブル交換で、展開非再現性が1/3に改善する事をEMで確認。
- ❖ 放射リブ膨潤変形の改善  
 > ポリシアネート系CFRPを試作・評価、脱湿の鏡面精度劣化への寄与が十分小さくなった事を確認。→クリープ・耐環境性能は改善の余地がある事が分かった。
- ❖ 構造材料の宇宙環境に換算可能な地上環境負荷の手法の確立→鏡面精度評価に反映
- ❖ モジュール間結合変形の数学モデルの妥当性検証 (ETS VIII EM、3モジュール結合試験)  
 > 変形モード、展開再現性を再現する事を確認。実測との相違を鏡面精度評価に反映。
- ❖ 総合鏡面精度評価方法の確立  
 > 複合的な系統鏡面精度劣化を、個別評価をもとに総合評価できる手法の確立。
- ❖ 観測信号高速処理系に用いるRAM型FPGAは軌道上で陽子線によるSEUの影響が大。
- ❖ 想定される回路を実装し、70 MeV陽子線照射条件下で動作を検証。 P2-047  
 > SEU自動検知・補正回路により正常自動復帰する事を確認。  
 > EOLx2のSEUを発生、SEUの影響による永久故障が生じない事を確認。
- ❖ バックアッププランとしてアンチヒューズ型FPGAの実現性をシミュレーションで確認。
- ❖ CMG EM特性評価試験←CMG搭載は国内初 P2-045  
 > ジンバル摩擦、CMG内部制御に設計・シミュレータに反映すべき知見が得られた。
- ❖ 高速スイッチング姿勢変更制御の指向精度維持性能の改善  
 > フィードフォワード制御に新たな誤差補正制御則を検討。柔軟構造の励振を招かず指向精度維持を確保できることをシミュレーションで確認。
- ❖ SLR集中キャンペーンとGPSにより、22GHz位相補償観測が要求する<5cm (1σ)を実現  
 > 必要なGPS仕様や、非重力摂動モデルの誤差を評価できた。
- ❖ GPS機能・性能の最適化により、GPSのみで<30~80cm(1σ)の精度が可能。 P2-046  
 > 関連処理要求はGPSのみで十分達成可能であることを確認。

## 技術実証の主な成果

- 大型展開アンテナ
  - ❖ 1/2 EOL (1.5年) まで等価RMS 1.0 mm以下の鏡面精度の要求を実現する技術的目処は得られた。ただし、課題・要処置項目は残されている。
  - ❖ 等価RMS 0.7 mm以下の達成の可能性はあるが、更なる開発が必要。
- 観測信号高速処理系: RAM型FPGAの耐放射線環境試験を行い、観測への影響が想定とおり小さい事を実証。
- 高速姿勢変更: CMG評価試験により、設計に必要な機能性能を評価。制御則の基本設計を行い、要求との整合性が数学モデルで確認された。
- 高精度軌道決定: 入手可能なGPSが要求性能を満たす。SLRとの組み合わせで位相補償観測の要求精度を満たす条件を明確化できた。