

令和 5 年度宇宙航空科学技術推進委託費

「超小型月探査機の高度化に資するコンパクトな衛星地上局システムの開発」

委託業務成果報告書

令和 6 年 12 月

福井工業大学

# 目 次

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| 1. 委託業務の目的 .....                                         | 3  |
| 2. 実施内容の概要 .....                                         | 3  |
| 3. 実施内容に関する成果報告 .....                                    | 4  |
| 3-1. プロジェクトの総合推進 .....                                   | 4  |
| 3-1-1. プロジェクトの進捗管理 .....                                 | 4  |
| 3-1-2. FUT 衛星地上局システム全体に関する検討会、各協力機関との打合せの実施 .....        | 7  |
| 3-2. 研究開発 .....                                          | 9  |
| 3-2-1. システム整備の基本方針 .....                                 | 9  |
| 3-2-2. システムの基本構成 .....                                   | 9  |
| 3-2-3. 口径 13.5m アンテナシステム .....                           | 11 |
| (1) 整備方針 .....                                           | 11 |
| (2) システム系統 .....                                         | 11 |
| (3) 性能試験結果 .....                                         | 15 |
| (4) VLBI 観測機能の整備状況 .....                                 | 16 |
| (5) ウルトラクリーンアップオシレータの整備状況 .....                          | 17 |
| 3-2-4. 口径 3.9m アンテナシステム .....                            | 18 |
| (1) 整備方針 .....                                           | 18 |
| (2) システム系統 .....                                         | 18 |
| (3) 基本仕様 .....                                           | 21 |
| 3-2-5. ネットワーク整備状況：JAXA 相模原キャンパスとの疎通試験 .....              | 22 |
| 3-2-6. システム全体の機器構成 .....                                 | 24 |
| 3-3. 人材育成の実施状況 .....                                     | 26 |
| 3-3-1. 工学部・電気電子工学科および大学院・応用理工学専攻・宇宙情報科学コースにおける人材育成 ..... | 26 |
| 3-3-2. 宇宙研究推進本部における人材育成 .....                            | 28 |
| 4. R5 年度実施内容のまとめと R6 年度の展望 .....                         | 32 |
| 付録 A：エクレウス探査機の運用に関するミッション要求および成功基準 .....                 | 33 |
| 付録 B：DESTINY+探査機の運用に関するミッション要求および成功基準 .....              | 35 |

## 1. 委託業務の目的

月－地球間通信に最適設計し現在開発中の口径13.5mの小型パラボラアンテナによる衛星地上局（以下、FUT衛星地上局）の性能実証を通して、世界に先駆けて超小型月探査機の運用に最適化されたコンパクトな衛星地上局システムの完成を目指す。

超小型月探査機からのデータを受信する機能、超小型月探査機へ命令を送信する機能、及び超小型月探査機との通信により探査機の軌道決定に必要なパラメータを測定する機能を持つコンパクトな衛星地上局について、JAXAの超小型探査機エクレウスおよびDestiny+の運用への参画と電波天文観測的手法によって性能実証を行う。

## 2. 実施内容の概要

本章ではR5年度における実施内容の概要を述べる。R5年度では、FUT衛星地上局システムを完成させ、地上試験、および電波天文観測的手法のうち電波強度観測によってFUT衛星地上局の性能を実証した。また電波天文的観測手法のうちVLBI観測について準備を行った。

### ①プロジェクトの総合推進

#### a. プロジェクトの進捗管理

FUT衛星地上局の完成、地上試験による性能実証の成功、電波天文観測的手法のうち、電波強度観測については性能実証の成功、VLBI観測については準備完了を目指してプロジェクトを推進し、実施内容に対する報告書を作成した。報告書は以下の内容で構成されている。

(ア) FUT衛星地上局の完成状況

(イ) 地上試験による性能実証結果

(ウ) 電波天文観測的手法のうち電波強度観測については性能実証の結果、VLBI観測については準備の状況

#### b. FUT衛星地上局システム全体に関する検討会、各協力機関との打合せの実施

(ア) aの報告書を構成する内容に関する検討会を月に1回程度開催した。

(イ) 各協力機関との打合せを必要に応じて実施した。

(ウ) 検討会および打ち合わせの議事録を毎回作成した。議事録には検討されたアクションアイテムおよびそれへの対応状況を明確に記載した。

### ②研究開発

#### a. FUT衛星地上局全システムの統合

(ア) アンテナ組立を完成し、アンテナ制御・信号送受信・ネットワークのシステムの統合を行った。

#### b. FUT衛星地上局の結合試験による性能実証

以下の(ア)および(イ)の2つの方法によりFUT衛星地上局の性能実証を行った。性能実証において必要な設備備品を購入した。

(ア) 地上試験による基本性能実証

地上試験によるFUT衛星地上局の基本的な性能実証を行った。

(イ) 電波天文観測的手法を用いた基本性能実証

- ・ 信号の受信感度を定めるG/Tの測定のために、FUT衛星地上局単体による太陽の電波強度観測を行った。
- ・ 探査機の軌道決定精度を決める時刻決定の安定度を計測するため、他の地上局とのVLBI観測のR6年度での本格実施に向けて観測方法を検討し、必要な機器の開発を進めた。

③人材育成

a. 工学部・電気電子工学科、電気電子情報工学科および大学院・応用理工学専攻・宇宙情報科学コースにおける人材育成

(ア) 以下の研究課題の実施により、探査機搭載機器との通信系も含めミッション全体を俯瞰し理解出来る運用人材の育成を行った。

- ・ 卒業研究におけるFUT衛星地上局を活用した研究課題の実施（エクレウス探査機を題材とし、月探査機の運用を目的とするアンテナシステムおよび運用方法の検討）
- ・ 口径2.4mおよび3.9mアンテナシステムを活用した大学院研究における研究課題の実施（学生がアンテナシステムの運用を行うことによって取得するデータを活用した衛星データ利活用に関する研究）

(イ) 学外から講師を招き、工学部・電気電子工学科、電気電子情報工学科および大学院・応用理工学専攻・宇宙情報科学コースの学生を対象とした講演会を実施した。

b. 宇宙研究推進本部における人材育成

(ア) 本事業の紹介を通した宇宙の探査に関する一般への普及を目的とした講演会を実施した。

(イ) 地域の若い人へ夢を与えることを目的として、FUT衛星地上局システムの一般公開を実施した。

### 3. 実施内容に関する成果報告

2で述べた実施内容①プロジェクトの総合推進、②研究開発、③人材育成の各項について、具体的な内容及び成果について報告する。

#### 3-1. プロジェクトの総合推進

##### 3-1-1. プロジェクトの進捗管理

表3-1-1に、R4年度委託業務成果報告書に記載したR5年度の進捗予定を示す。福井工業大学あわらキャンパスへの口径13.5mアンテナ本体および機器の輸送を6月までに終了し、アンテナ組立を9月までに完成させ、引き続いてエクレウス探査機との通信により性能実証を実施する予定であった。

表3-1-2にR5年度の実際の実施内容を示す。表3-1-1の当初予定に対して以下の変更を行った。

- (1) エクレウス探査機がR5年度5月中旬に通信途絶となった（その後通信機能が復帰せず、R6年度3月に廃局となった）。エクレウス探査機との通信による性能実証が不可能となったため、⑦地上および電波天文観測による性能実証を行うこととした。

- (2) アンテナ組立後の8月に、アンテナ駆動後にネジの一部に緩みが発見された。この件は安全に関わる重大事案であるため、この原因を究明し、対処方法の詳細検討および実施をする必要があると判断した。これに3か月を要し、アンテナ組立は12月に終了した。
- (3) 時刻安定度向上に必要な機器「ウルトラクリーンアップオシレータ」について、メーカー側都合によりR5年度内の納入が困難となった。そこで、⑦地上および電波天文観測では時刻安定度を除いた項目について実施し、時刻安定度に関して納入日（9月30日）以降、10月に⑧ウルトラクリーンアップオシレータ単体試験を行った。

以上の変更を行い、13.5mアンテナシステムとして2023年10月に完成した。完成した13.5mアンテナシステムの外観を図3-1-1に、FUT衛星地上局運用室の様子を図3-1-2に示す。

R5年度の実施内容について、以下の内容で構成される「FUT衛星地上局システム構成書」を作成した。

(ア) FUT衛星地上局の完成状況

(イ) 地上試験による性能実証結果

(ウ) 電波天文観測的手法のうち電波強度観測については性能実証の結果、VLBI観測については準備の状況

表3-1-1. 【R4年度委託業務成果報告書より抜粋】表3-2-1. R4年度の進捗状況およびR5年度の進捗予定

| 年度            | R4 年度 |     |       |     | R5 年度 |     |       |     |
|---------------|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|
| 項目・月          | 4-6   | 7-9 | 10-12 | 1-3 | 4-6   | 7-9 | 10-12 | 1-3 |
| ①工場検査         |       |     |       |     |       |     |       |     |
| ②基礎工事         |       |     |       |     |       |     |       |     |
| ③アンテナ輸送       |       |     |       |     |       |     |       |     |
| ④機器輸送         |       |     |       |     |       |     |       |     |
| ⑤アンテナ組立       |       |     |       |     |       |     |       |     |
| ⑥エクレウス探査機との通信 |       |     |       |     |       |     |       |     |

表3-1-2. R5年度実施内容の進捗状況

| 年度                    | R4年度 |       |     | R5年度 |     |       |     | R6年度 |     |       |
|-----------------------|------|-------|-----|------|-----|-------|-----|------|-----|-------|
| 項目・月                  | 7-9  | 10-12 | 1-3 | 4-6  | 7-9 | 10-12 | 1-3 | 4-6  | 7-9 | 10-12 |
| ①工場検査                 |      |       |     |      |     |       |     |      |     |       |
| ②基礎工事                 |      |       |     |      |     |       |     |      |     |       |
| ③アンテナ輸送               |      |       |     |      |     |       |     |      |     |       |
| ④機器輸送                 |      |       |     |      |     |       |     |      |     |       |
| ⑤アンテナ組立               |      |       |     |      |     |       |     |      |     |       |
| ⑥エクレウス探査機との通信         |      |       |     |      |     |       |     |      |     |       |
| ⑦地上および電波天文観測による試験     |      |       |     |      |     |       |     |      |     |       |
| ⑧VLBI観測の準備            |      |       |     |      |     |       |     |      |     |       |
| ⑨ウルトラクリーンアップオシレータ単体試験 |      |       |     |      |     |       |     |      |     |       |

R4年度実施内容  R5年度実施内容



図3-1-1 13.5mアンテナシステムの外観



図3-1-2 FUT衛星地上局運用室の様子

### 3-1-2. FUT衛星地上局システム全体に関する検討会、各協力機関との打合せの実施

図3-1-3にFUT衛星地上局システムの開発体制、表3-1-3に開発体制メンバーの役割を示す。システムの進捗状況の把握および発生した問題点の共有及び解決方法の検討のための検討会を福井工業大学を中心として実施した。

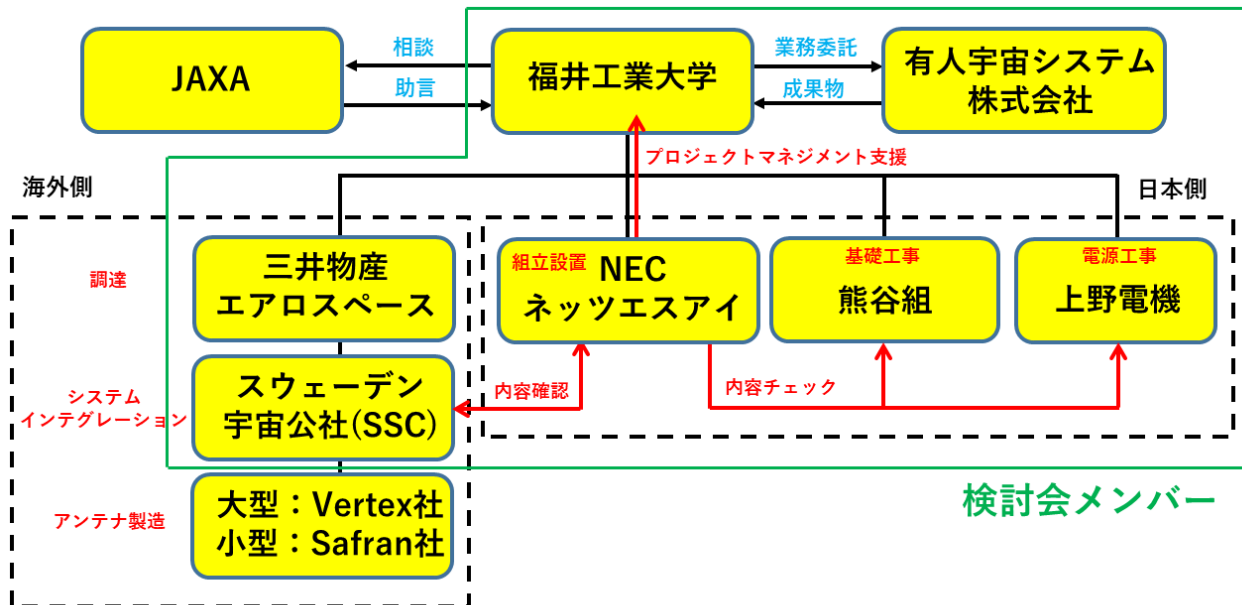


図3-1-3. FUT衛星地上局システムの開発体制

表3-1-3. 開発体制メンバーの役割

| 機関名              | 役割                                                   | 検討会メンバー |
|------------------|------------------------------------------------------|---------|
| 福井工業大学           | アンテナシステムの仕様決定。最終責任者。                                 | ○       |
| JAXA             | プロジェクトの進め方および技術面での助言                                 |         |
| 有人宇宙システム株式会社     | 大学とJAXA及びアンテナ設置業者との技術調整への参加／助言                       | ○       |
| NEC ネットズエスアイ     | プロジェクトマネジメントの支援。<br>電波干渉計測／アンテナ本体の組立・設置／地上局システムの機器配線 | ○       |
| 三井物産エアロスペース      | 海外メンバーの統括／SSC 契約管理／輸入ロジスティクス／支払・為替対応／輸送              | ○       |
| 熊谷組              | 地質調査／基礎設計／基礎工事                                       | ○       |
| 上野電機             | 1次側電源工事／配電盤までの整備                                     | ○       |
| スウェーデン宇宙公社 (SSC) | 地上局システム全体のインテグレーション                                  | ○       |
| Vertex 社         | 13.5m アンテナ本体製造／日本への輸送                                |         |
| Safran 社         | 3.9m アンテナ本体製造／日本への輸送                                 |         |

検討会および打ち合わせの実施状況を表3-1-4に示す。検討会メンバーによる進捗管理、問題点の解決方法検討などの検討会を随時実施した他、JAXA DESTINY+チームとの打ち合わせを継続的に実施した。2024年2月29日には、FUT衛星地上局とJAXA相模原キャンパスの間のネットワーク疎通試験を実施し、ネットワークの接続を確認した。

福井大学については、R3年度の本委託事業における「月面・月周回軌道宇宙機への測位・IoT通信サービスを提供する超小型衛星」の研究課題に関して、本事業と連携すべき研究課題であることからR4年度に引き続き情報交換を行った。

表3-1-4. FUT衛星地上局の進捗管理に関する検討会および打ち合わせ・情報交換一覧

| 種別    | 関連機関／<br>部署                       | 実施日／<br>実施期間                                                                                              | 内容                                                                                                     |
|-------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 検討会   | 検討会メンバー                           | R5年度                                                                                                      | 進捗管理、問題点の解決方法検討など                                                                                      |
| 打ち合わせ | 福井工業大学および<br>JAXA DESTINY+<br>チーム | <u>2023年</u><br>5月11日、5月17日、6月<br>27日、7月4日、8月3日、<br>10月27日、12月26日<br><u>2024年</u><br>2月6日、2月29日、3月19<br>日 | FUT衛星地上局によるDESTINY+探査機の<br>運用に関する各種検討<br><br>FUT衛星地上局とJAXA相模原キャンパスの<br>間のネットワーク疎通試験の実施（2024年2<br>月29日） |
|       | 福井工業大学および<br>福井大学                 | メールでの情報交換                                                                                                 | 月測位衛星システムとの連携について                                                                                      |



### 3-2. 研究開発

R5年度に作成した「FUT衛星地上局システム構成書」から内容を抜粋して報告する。

#### 3-2-1. システム整備の基本方針

FUT衛星地上局システムの整備の基本方針は以下の通りである。

##### A) 月周辺探査機の運用を可能とする。

- 月探査機の運用を可能とするため、探査機からの信号受信、探査機へのコマンド送信および探査機の軌道決定機能を持つ。
- 月周辺探査機について、JAXAのエクレウス探査機の運用が可能な仕様とする（付録A）。エクレウス探査機は6Uサイズの超小型探査機であり、今後の超小型月探査機の基本形とみなせる。したがって、エクレウス探査機の運用が可能な仕様とすることによって、今後の多くの超小型月探査機の運用に資することができる。
- 探査機の探索機能を有する。JAXAのDESTINY+探査機（付録B）のように、軌道が頻繁に変化する探査機においても確実に通信を確立する。

##### B) 地球周回衛星の運用を可能とする。

- 信号受信において、低レートから高レートのミッションデータに対応する。
- 月探査機の運用との両立から、高いダイナミックレンジをシステムとして達成する。

##### C) スウェーデン宇宙公社の地上局ネットワークと互換性を有する。

#### 3-2-2. システムの基本構成

FUT衛星地上局システムの構成を図3-2-1に示す。本システムは口径3.9mおよび口径13.5mのアンテナシステムから構成される。月周辺探査機運用の核となるのは口径13.5mシステムであり、S帯とX帯の双方において送受信機能を備えている。口径3.9mシステムはS帯の送受信機能およびX帯の受信機能を備え、その広い指向性を活かして探査機からの電波の捕捉用システムとして用いることが可能である。システムは標準製品を組合せて構築しシステム要求を満たすこととした。

変復調を担うベースバンド装置として、safran社のCORTEXシリーズを採用した。本機種はスウェーデン宇宙公社や各国宇宙機関で広く採用されており、FUT衛星地上局システムの実用性の観点から採用した。各システムにおいて、S帯では想定される通信速度からCRTを採用し、地球周回衛星の高速ダウンリンクへの対応としてHDRを導入した。月周辺探査機の運用への対応として、口径13.5mシステムのX帯に受信感度の高いeXplorerを導入した。

口径3.9mおよび口径13.5mのアンテナシステムは独立に局管制装置を持ち、それぞれ単独での動作が可能である。時刻標準系については、月周辺探査機の運用の核となる口径13.5mのアンテナシステムにおいて軌道観測運用の際の長時間において安定した動作を可能とするため、GPS信号に同期する $10^{-13}$ レベルの高安定時刻標準を導入した。システム統括制御装置として、スウェーデン宇宙公社で使用実績のある「Infinity Production System」（以下、IPS）を導入した。IPSの導入により、FUT衛星地上局システムとスウェーデン宇宙公社のグローバル地上局ネットワークとの円滑な連携が可能となった。また、システムの動作状況を確認するため、試験・測定システムを導入する。IPSと試験・測定システムを連携させ、システム全体の状況をリアルタイムに把握しつつ、口径3.9mおよび口径13.5mのアンテナシステムの効率的な運用を行うシステムとした。

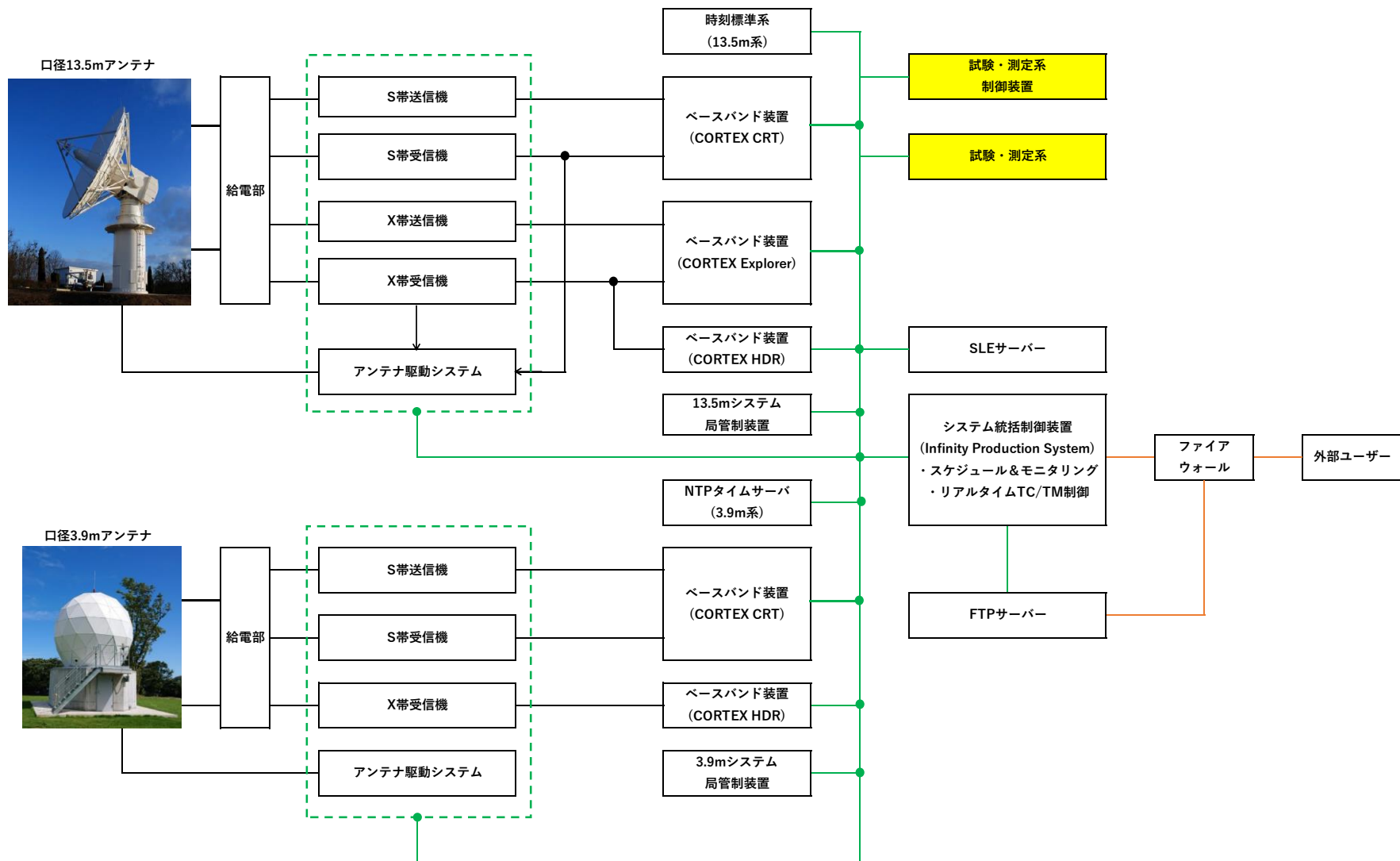


図3-2-1. FUT衛星地上局の構成

### 3-2-3. 口径13.5mアンテナシステム

#### (1) 整備方針

- A) 運用対象宇宙機は、主として大学やベンチャー企業が開発製造する小型以下の近地球周回宇宙機および月近傍を飛翔する宇宙機とする（運用可能な衛星高度は350km以上とする）
- B) 受信は、S および X バンドテレメトリ、X バンドミッションデータ、送信は S および X バンドコマンドデータとする。受信方式は、S バンドは円偏波ダイバシチ受信方式、X バンドは円偏波（RHCP/LHCP）選択受信方式とする。
- C) アンテナの駆動モードとして、プログラム追尾モードの他、自動追尾モードを含む
- D) 衛星ハウスキーピングテレメトリおよび高速ミッションデータ信号の受信復調およびコマンド信号の変調送信機能、並びに距離および距離変化率（RARR）計測機能を有する。

#### ●復調可能なテレメトリデータ

ハウスキーピングテレメトリデータレート 10bps-2Mbps

高レートミッションデータレート 1Mbps-400Mbps

#### ●送出可能コマンドデータレート 10bps-100kbps

#### ●RARR 最大 100 万 km、最大 15km/sec

#### (2) システム系統

13.5m アンテナ送受信局システムの概略機能系統を、図3-2-1および図3-2-2に示す。システムは、開口径13.5mのS/Xバンド共架のパラボラアンテナに、S バンド送受信系、X バンド送受信系、システムの健全性チェック用のRFループバック試験系が装備されている。

##### A) S バンド受信系

アンテナで受信されたS バンド RF (S-RX) 信号は、RHCP成分とLHCP成分に分離され、各々低雑音増幅される。増幅されたS-RX信号は70MHzIF 信号に周波数変換された後、光ファイバを用いて運用室へ伝送される。伝送された S-RX 信号はテレメトリおよびレンジング機能を備えたベースバンド装置(CRT\_Quantum)に入力され、テレメトリベースバンド信号の復調、データの復号、同期処理、および RARR 計測が行われ、Infinity システムへ出力される。

##### B) X バンド受信系

アンテナで受信された X バンド RF(X-RX)信号は、RHCP成分とLHCP成分に分離され、各々低雑音増幅され、受信する偏波チャネルの信号が選択される。選択された信号はさらにL バンド IF(L-IF)信号と 70M IF 信号に周波数変換される。それぞれ、光ファイバを用いて運用室へ伝送される。伝送された L-IF 信号は広帯域ベースバンド装置HDRに、70M IF 信号はベースバンド装置 (CRT\_eXplorer) に入力される。CRT\_eXplorer に入力された 70M IF 信号は、テレメトリベースバンド信号の復調、データの復号、同期処理、RARR 計測が行われ、Infinity システムへ出力される。一方、HDR に入力された L-IF 信号は、ミッションデータの復調、復号さらに同期処理が行われ、所定のフォーマットで蓄積保存される。蓄積保存されたミッションデータは、衛星ユーザからの要求の基づき、所要のタイミングでInfinity システムを介して再生伝送される。

### C) S バンド送信系

CRT\_Quantum は70M IF 信号を生成し、光ファイバを介して 13.5m アンテナタワーに伝送され、所要の S バンド RF 信号に周波数変換されたのち、SSPA へ入力される。SSPA 出力の S-TX 信号は、RHCP もしくは LHCP いずれかの RF 偏波により 13.5m アンテナから送信される。その後 S バンド搬送波信号に対し、衛星搭載のコマンド受信機が搬送波を捕捉するように周波数制御が施される。周波数制御は、衛星搭載コマンド受信機が待ち受けている周波数に時々刻々制御するドップラ補償制御方式とノミナル搬送波周波数を中心に所定の速度で所定の周波数幅を掃引する方式のいずれかが選択されて行われる。

衛星ユーザはコマンドデータを CRT\_Quantum が指定するフォーマットに変換し TCP/IP プロトコルで Infinity システムに伝送する。Infinity システムは地上局管理者が適切に設定したルーティングによりコマンドデータを CRT\_Quantum に伝送する。衛星搭載のコマンド受信機が搬送波を捕捉した後、CRT\_Quantum は Infinity システムからの衛星コマンドデータを用いて搬送波に対して変調を施して衛星とのコマンド伝送リンクを形成する。リンク形成後は、衛星ユーザが衛星に対し、所要のコマンドデータの伝送をテレメトリデータで衛星内部の状態を確認しながら行う。

衛星との RARR 計測を行う場合は、レンジトーン信号によって 70M IF 信号の変調を施し、コマンド変調と同様に、S バンド RF 信号に周波数変換の後、SSPA で増幅後、アンテナから衛星に向けて送信される。

### D) X バンド送信系

コマンド、レンジトーン信号で変調が施された 70M IF 信号を X バンド RF 信号に周波数変換し、SSPA で増幅後アンテナから送信される（周波数が X バンドに変換される以外は、S バンド送信系と同様）。

### E) 試験系

システム維持管理のためには、定期的にシステムの機能性能確認や校正を行い、特性のトレンド管理しながら予防保全に努めることが重要である。その機能性能確認や校正を行うために、S バンド、X バンドともに、次の試験系を有している。

- ① テレメトリ・レンジング動作、性能評価
- ② AGC 校正
- ③ RARR 校正
- ④ コマンドエコー折返し照合
- ⑤ 実運用動作模擬試験

RF 試験信号は S バンドおよび X バンドの低雑音増幅の前段に装備されているテストカップラを介して受信系へ注入される。CRT\_Quantum、eXplorer や HDR には、テレメトリやコマンド、レンジ信号によるシミュレーション機能が具備されており、そのシミュレーション信号を S あるいは X バンド RF 信号に変換することによってシステム試験が可能となる。

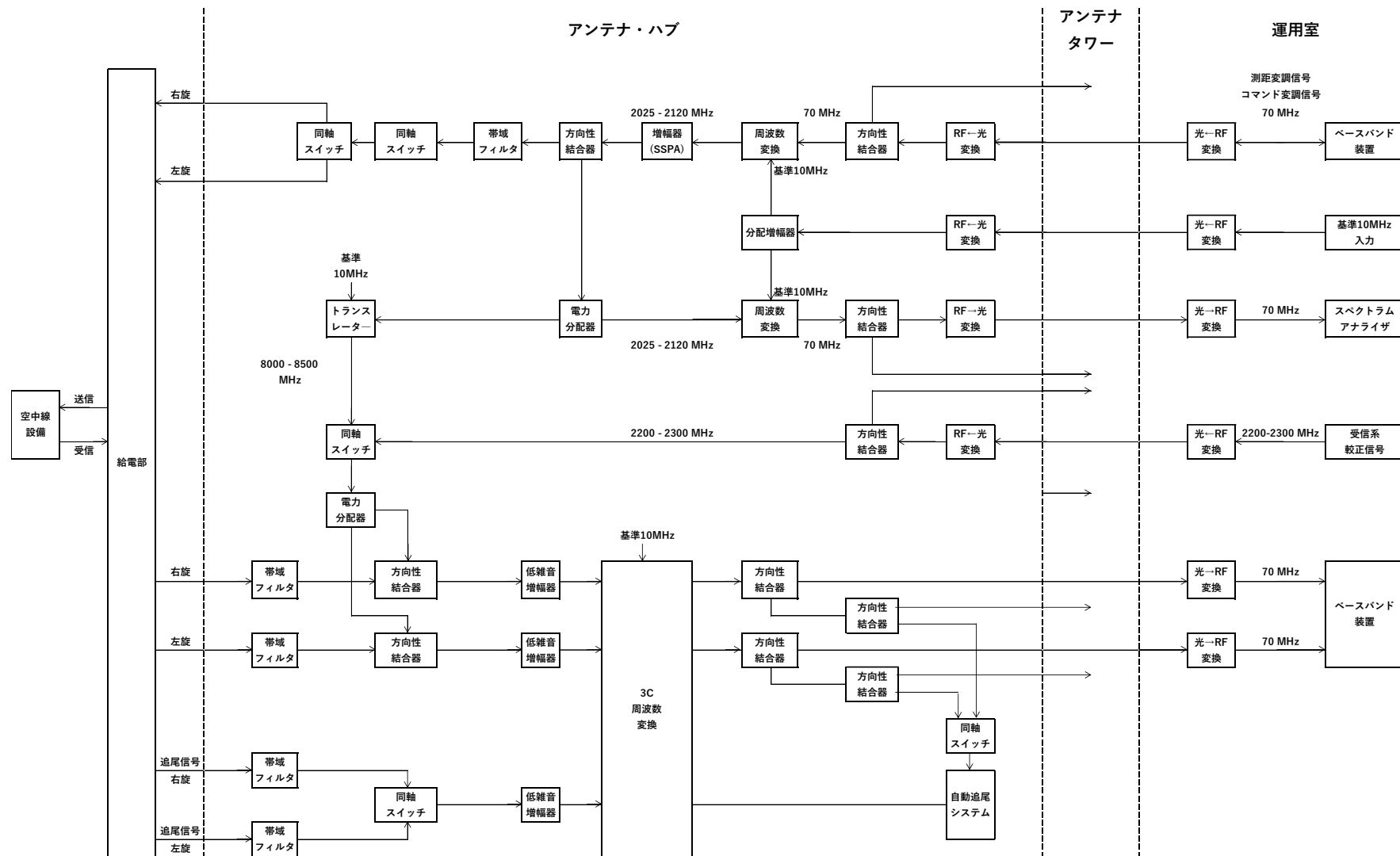


図3-2-2. 口径13.5mアンテナシステムのS帯システム系統図

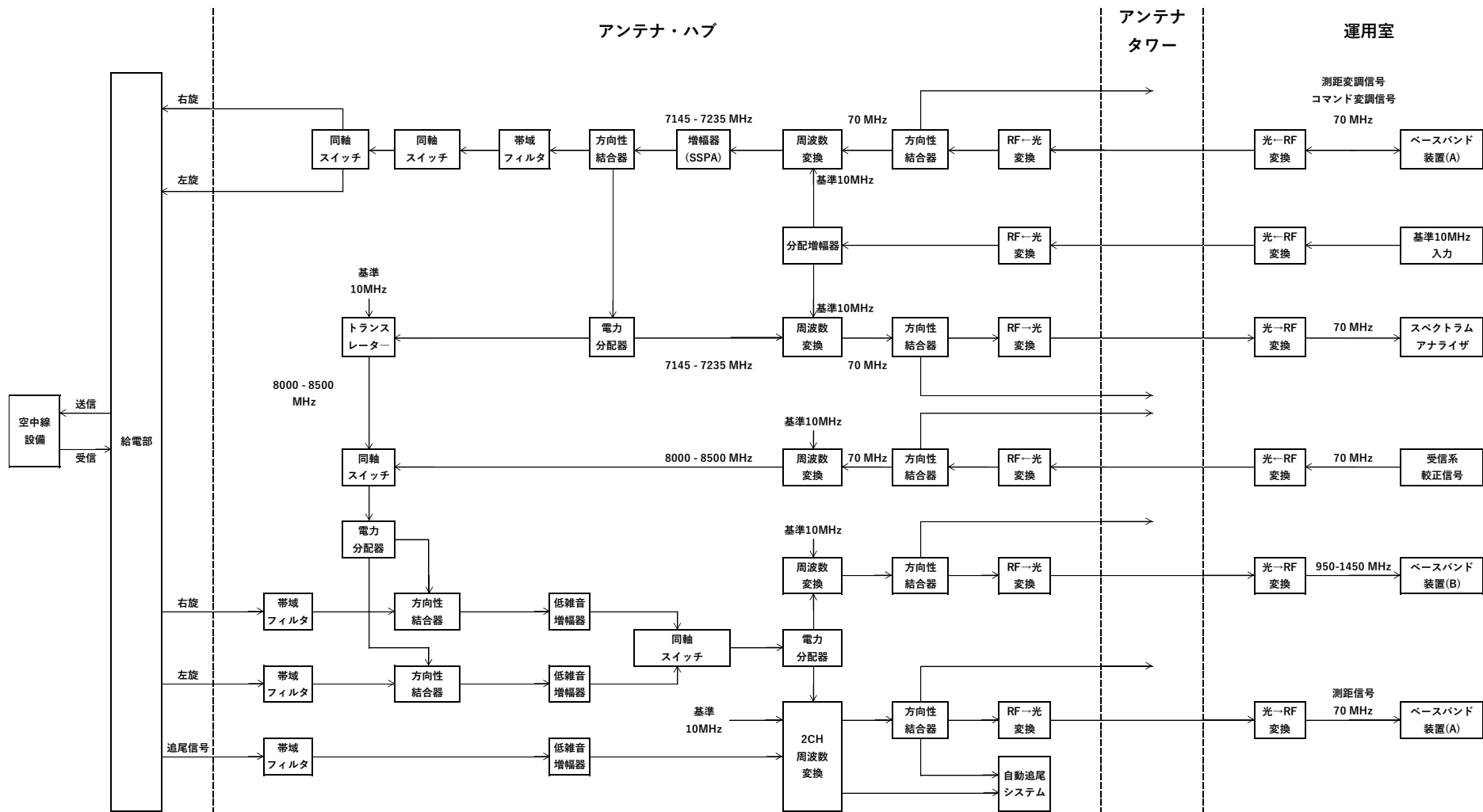


図3-2-3. 口径13.5mアンテナシステムのX帯システム系統図

### (3) 性能試験結果

表3-2-1に、「⑦地上および電波天文観測による試験」（5ページの表3-1-2）において確認された性能および設計仕様との適合性を示す。

表3-2-1. 口径13.5mシステムのS帯およびX帯の基本仕様

| 項目            |        | 「⑦地上および電波天文観測による試験」<br>(5 ページの表 3-1-2) における測定結果             | 設計仕様との<br>適合性 |
|---------------|--------|-------------------------------------------------------------|---------------|
| S 帯<br>送信     | 送信周波数  | 2.025 – 2.120 GHz                                           | 合格            |
|               | EIRP   | 71.3 dBW @2.025 GHz                                         | 合格            |
|               | 偏波     | RHCP / LHCP selectable                                      | 合格            |
|               | アンテナ利得 | 46.5 dBi @2.073 GHz                                         | 合格            |
| S 帯<br>受信     | 受信周波数  | 2.200 -2.300 GHz                                            | 合格            |
|               | G/T    | 25.9 dBi/K @ 2.200GHz                                       | 合格            |
|               | 偏波     | Data: RHCP/LHCP diversity、Tracking: RHCP/LHCP selectable    | 合格            |
|               | アンテナ利得 | 47.9 dBi @2.250 GHz                                         | 合格            |
| X 帯<br>送信     | 送信周波数  | 7.145 – 7.235 GHz                                           | 合格            |
|               | EIRP   | 82.3 dBW @ 7.145 GHz                                        | 合格            |
|               | 偏波     | RHCP / LHCP selectable                                      | 合格            |
|               | アンテナ利得 | 57.7 dBi @7.190 GHz                                         | 合格            |
| X 帯<br>受信     | 受信周波数  | 8.000 – 8.500 GHz                                           | 合格            |
|               | G/T    | 38.9 dBi/K @8.250GHz                                        | 合格            |
|               | 偏波     | Data: RHCP/LHCP selectable 、 Tracking: RHCP/LHCP selectable | 合格            |
|               | アンテナ利得 | 59.6 dBi @ 8.250 GHz                                        | 合格            |
| ビーム幅          | S 帯    | 方位角：0.588 deg、仰角：0.598 deg（周波数：2.2235 GHz）                  | 合格            |
|               | X 帯    | 方位角：0.169 deg、仰角：0.170 deg（周波数：7.7425 GHz）                  | 合格            |
| ポインティング<br>精度 | 静的     | 9 mdeg                                                      | 合格            |
|               | 追跡時    | 13.2 ~ 38.4 mdeg（仰角に依存）                                     | 合格            |

#### (4) VLBI観測機能の整備状況

13.5m アンテナでは、従来の RARR による探査機軌道観測に加えて、VLBI 観測による探査機軌道観測 (DDOR: Delta Differential One-way Range) を実施することを視野に入れており、13.5m アンテナでの X 帯 (8.000-8.500 GHz) VLBI 観測のため、VLBI 用 IF 系およびバックエンドを整備した。キューサーなどの天体の連続波観測では、天体の最小検出感度が観測帯域幅の 1/2 乗に比例するため、広帯域であるほど高感度になる。よって VLBI 用 IF 系は 13.5m アンテナの X 帯受信周波数帯域 500 MHz をフルに使うことができる右偏波の IF 系 (950-1450 MHz) に接続する。既設の IF 系に於いて 950-1450 MHz の信号はアンテナ部で光変換 (E/O) 後、運用室に光伝送され再び電気信号に変換 (O/E) される。O/E 後すぐに分配器で信号を分配することで、既設のベースバンド装置と VLBI 装置を並列に使用できるシステムとした (図 3-2-4)。

R6 年度において、VLBI 用記録系には、エレックス工業の Direct RF Sampler with DSP DRS4 シリーズを採用する。本機種は国立天文台水沢 VLBI 観測所や国内 VLBI ネットワーク局で広く採用されており、VLBI 観測の実用性および将来的な機能拡張ユーザビリティの観点から採用した。サンプラーへの入力信号は将来、両偏波観測実施に対応できるよう 2 チャンネルとした。AD 変換サンプリング速度は 4096 MHz であり、入力信号帯域は最大 2048 MHz まで取ることができる。また、DDOR 計測に対応できるよう、量子化ビット数は 12 bit とした。また、本システム導入装置の特徴として、Digital Baseband Converter (DBBC) 機能を有しており、100-2048MHz から任意の 32 MHz (×4-6 ch) または任意の 512 MHz (×2-4 ch) を切り出すことが可能である (32/512 MHz モードは装置再起動で切り替え)。32 MHz モードは強い強度を持つ衛星信号を効率的 (ノイズの影響を受けないよう) に測定するために用いられ、512 MHz モードは上述のような天体観測時に用いられる。取得されたデータは 16 Gbps で Scalable Data Recorder (SDR) に記録される。本レコーダーはストレージモジュールを脱着し輸送できるものであり、VLBI 観測終了後、取得した大容量データを相関局に輸送し相関処理を行うことができる。

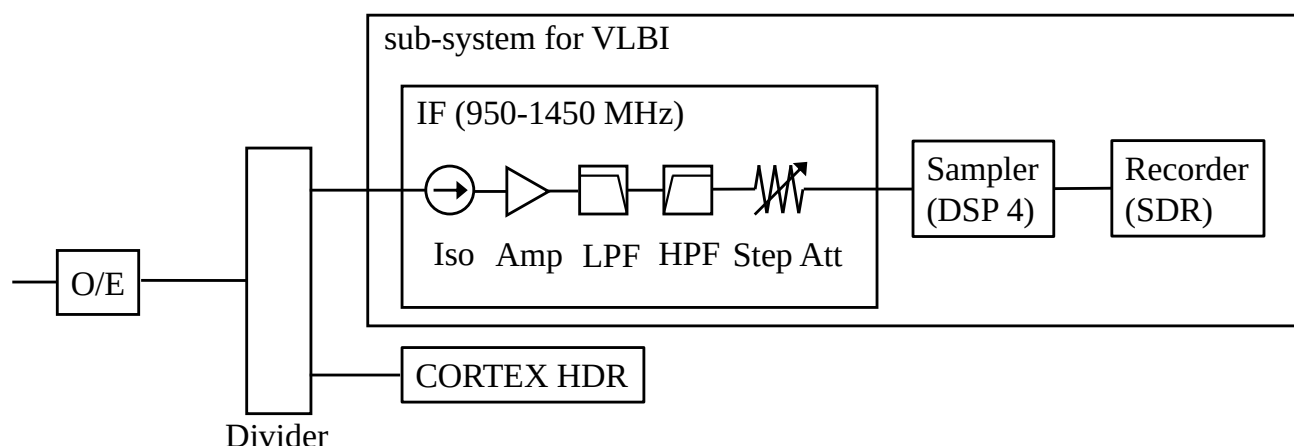


図 3-2-4. VLBI 用サブシステムのブロックダイアグラム



# (5) ウルトラクリーンアップオシレータの整備状況

13.5m アンテナシステムの時刻精度向上のため、ウルトラクリーンアップオシレータ TC4145C および 10MHz 信号分配器 6502B(マイクロチップ社製)を導入し設置した。設置状況を図 3-2-5 に示す。ウルトラクリーンアップオシレータの単体試験として、低ジッタ高精度 GPSDO 基準発振器 GPSDO-LB (アイキャスエンタープライズ製) との 10MHz 信号周波数比較実験を行い、1 秒間の短期安定度の  $10^{-12}$  オーダーの安定度であることを確認できた (図 3-2-6)。この安定度は GPSDO-LB の安定度で決まっているため、今後の VLBI 観測において TC4145C の精度  $10^{-13}$  オーダーが達成できているか検討する。

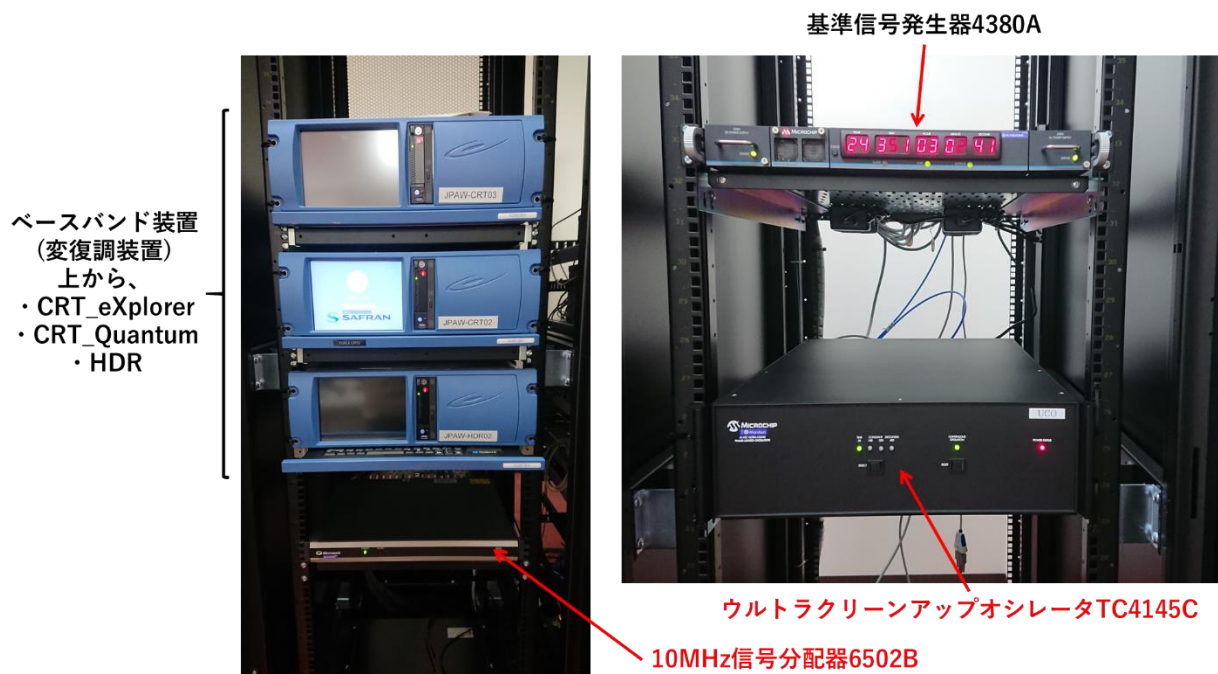


図 3-2-5 ウルトラクリーンアップオシレータおよび信号分配器の設置状況



図 3-2-6 ウルトラクリーンアップオシレータの単体試験のブロック図

### 3-2-4. 口径3.9mアンテナシステム

#### (1)整備方針

- A) 運用対象衛星は、主として大学やベンチャー企業が開発製造する小型以下の近地球周回衛星とする。（運用可能な衛星高度は、350km 以上とする）
- B) 受信は、S および X バンドテレメトリ、X バンドミッションデータ、送信は S バンドコマンドデータとする。
- C) 衛星ハウスキーピングテレメトリ信号の受信復調およびコマンド信号の変調送信機能を有する。レンジング機能については、衛星自身が GPS 受信機搭載による軌道決定機能を保有していることが一般的であるため、特に具備しない。

#### ●復調可能なテレメトリデータ

ハウスキーピングテレメトリデータレート 1kbps-2Mbps

高レートミッションデータレート 1Mbps-400Mbps

#### ●送出可能コマンドデータレート 100bps-100kbps

#### (2)システム系統

3.9mアンテナ送受信局システムの概略機能系統を図3-2-7に示す。システムは、開口径 3.9m の S/Xバンド共架のパラボラアンテナに、S バンド受信系、X バンド受信系、S バンド送信系が装備されている。

#### A) S バンド受信系

アンテナで受信された S バンド RF (S-RX) 信号は、RHCP 成分と LHCP 成分に分離され、各々低雑音増幅される。増幅された S-RX 信号は光ファイバを用いて運用室へ伝送される。伝送された S-RX 信号は CRT\_Quantum というコマンド・レンジング・テレメトリユニットに入力され、テレメトリベースバンド信号の復調、データの復号、同期処理が行われ、Infinity システムへ出力される。

#### B) X バンド受信系

アンテナで受信された X バンド RF(X-RX)信号は、RHCP 成分と LHCP 成分に分離され、各々低雑音増幅され、さらに L バンド IF(L-IF)信号へ周波数変換される。L-IF 信号は光ファイバを用いて運用室へ伝送される。伝送された L-IF 信号は、信号の形式、スペクトラムの広がり（帯域幅）によって選択された CRT\_Quantum と HDR に入力される。CRT\_Quantumに入力された L-IF 信号は、テレメトリベースバンド信号の復調、データの復号、同期処理が行われ、Infinity システムへ出力される。一方、HDR に入力された L-IF 信号は、ミッションデータの復調、復号さらに同期処理が行われ、所定のフォーマットで蓄積保存される。蓄積保存されたミッションデータは、衛星ユーザからの要求の基づき、所要のタイミングでInfinity システムを介して再生伝送される。

#### C) S バンド送信系

CRT\_Quantum は、S バンド搬送波信号を生成し、光ファイバを介して SSPA へ伝送する。SSPA 出力の S-TX 信号は、RHCP もしくは LHCP いずれかの RF 偏波により 3.9mアンテナから送信される。その後 S バンド搬送波信号に対し、衛星搭載のコマンド受信機

が搬送波を捕捉するように周波数制御が施される。周波数制御は、衛星搭載コマンド受信機が待ち受けている周波数に時々刻々制御するドップラ補償制御方式とノミナル搬送波周波数を中心に所定の速度で所定の周波数幅を掃引する方式のいずれかが選択されて行われる。

衛星ユーザから送られてくる衛星コマンドデータは、Infinity システムで受信され、衛星に伝送するフォーマットへ変換される。変換された衛星コマンドデータは CRT\_Quantum に伝送される。衛星搭載のコマンド受信機が搬送波を捕捉した後、CRT\_Quantum はInfinity システムからの衛星コマンドデータを用いて搬送波に対して変調を施して衛星とのコマンド伝送リンクを形成する。リンク形成後は、衛星ユーザが衛星に対し、所要のコマンドデータの伝送をテレメトリデータで衛星内部の状態を確認しながら行う。

#### D) 試験系

システム維持管理のためには、定期的にシステムの機能性能確認や校正を行い、特性のトレンド管理しながら予防保全に努めることが重要である。その機能性能確認や校正を行うために、S バンドおよびX バンドの低雑音増幅の前段にテストカプラを装備している。

CRT\_Quantum および HDR には、テレメトリやコマンド信号のシミュレーション機能が具備されており、そのシミュレーション信号を S あるいは X バンド RF 信号に変換することによってシステム試験が可能となる。なお、RF 信号への変換器は、試験時独自に準備しなければならない。

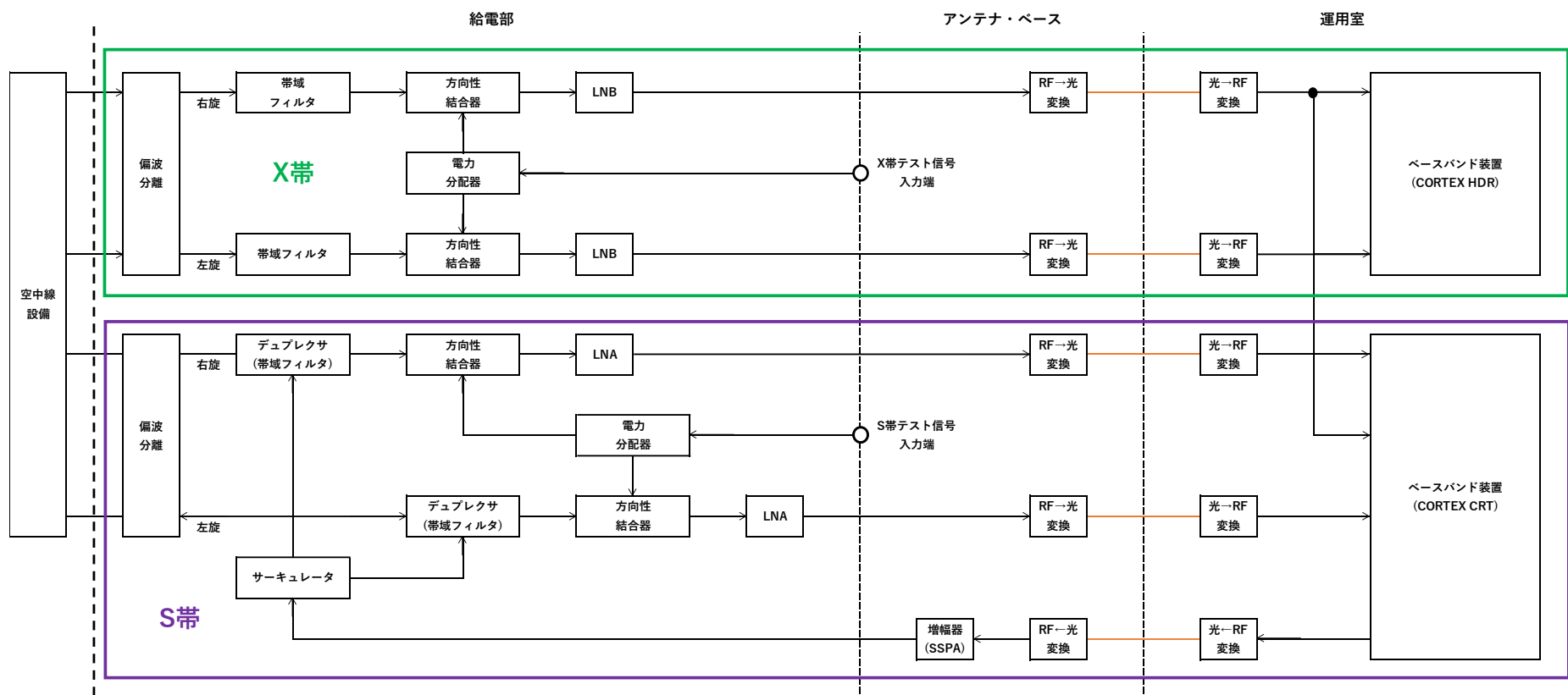


図3-2-7. 口径3.9mアンテナシステムのシステム系統図

### (3) 基本仕様

表3-2-2にS帯およびX帯におけるシステムの基本仕様を示す。

表3-2-2. 口径3.9mシステムのS帯およびX帯の基本仕様

|           |       |                        |
|-----------|-------|------------------------|
| S 帯<br>送信 | 送信周波数 | 2.025 – 2.120 GHz      |
|           | EIRP  | 45.0 dBW @ 2.250 GHz   |
|           | 偏波    | RHCP/LHCP selectable   |
| S 帯<br>受信 | 受信周波数 | 2.200 – 2.300 GHz      |
|           | G/T   | 13.5 dBi/K @ 2.250 GHz |
|           | 偏波    | RHCP/LHCP simultaneous |
| X 帯<br>受信 | 受信周波数 | 7.900 – 8.500 GHz      |
|           | G/T   | 26.5 dBi/K @ 8.200 GHz |
|           | 偏波    | RHCP/LHCP simultaneous |

3-2-5. ネットワーク整備状況：JAXA 相模原キャンパスとの疎通試験

福井工業大学（以下、FUT）と宇宙航空研究開発機構（以下、JAXA）は、FUTあわらキャンパスのアンテナ設備とJAXA相模原キャンパスの管制設備のネットワーク接続の調整・整備をR4年度から開始している。特に、テレコマンド／テレメトリの伝送を目的としてSINETを介したネットワーク接続の整備を進めてきており、R5年度にはpingおよびtracerouteによる疎通確認を行った。

図3-2-8にFUTあわらキャンパスとJAXA相模原キャンパスの接続状況を示す。両キャンパスはSINETを介してL2VPNによる専用回線⑥によって接続されている。あわらキャンパス側は、13.5mアンテナシステム①を統括・計画系システムinfinity②で制御する構成となっており、サービスネットワーク③により外部と接続する構成となっている。セキュリティ向上等を目的として2つのアイソレーションLAN④および⑤を介して⑥と接続する構成としている。

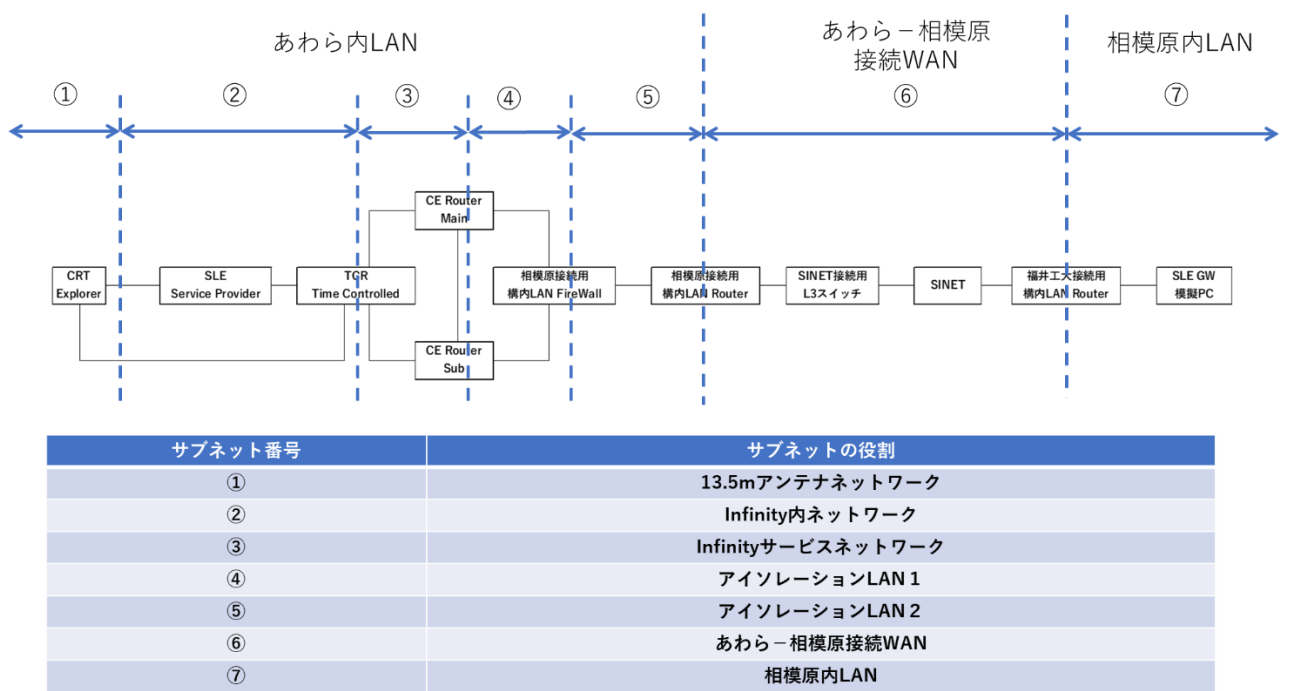
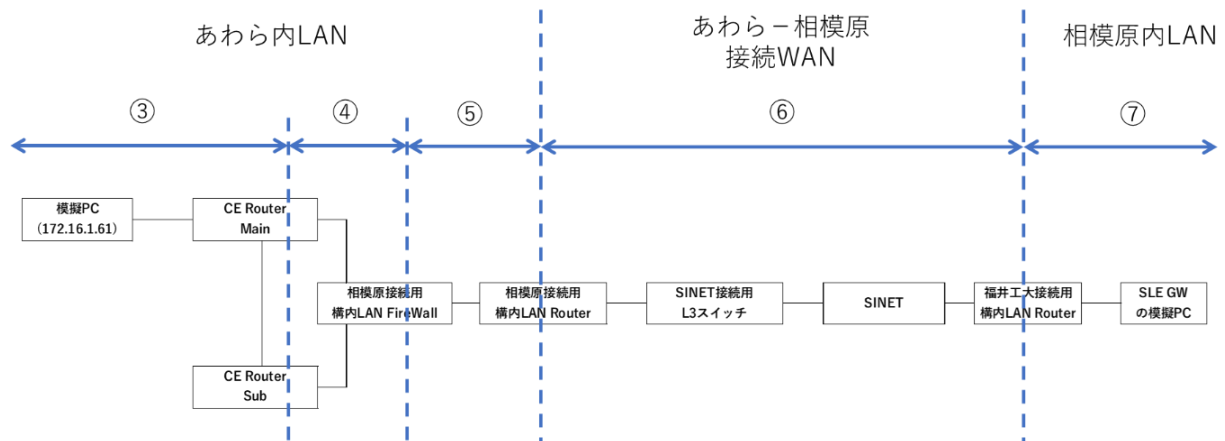


図3-2-8 FUTあわらキャンパスとJAXA相模原キャンパスの接続状況

R5年度におけるFUTあわらキャンパスとJAXA相模原キャンパスの間のping疎通試験時の接続を図3-2-9に示す。あわらキャンパスでは③Infinityサービスネットワーク内にTCRの模擬PCを、相模原キャンパスでは⑦相模原内LANにおいてSLE GWの模擬PCをそれぞれ設置して以下の試験を行い応答があることおよび想定されたルーティングが行われていることを確認した。

- (1) ③模擬PCから⑦SLE GW模擬PCへのpingおよびtraceroute
- (2) ③模擬PCから⑥福井工大接続用LAN Routerへのpingおよびtraceroute

(A)CE Router Main を介しての接続



(B)CE Router Sub を介しての接続

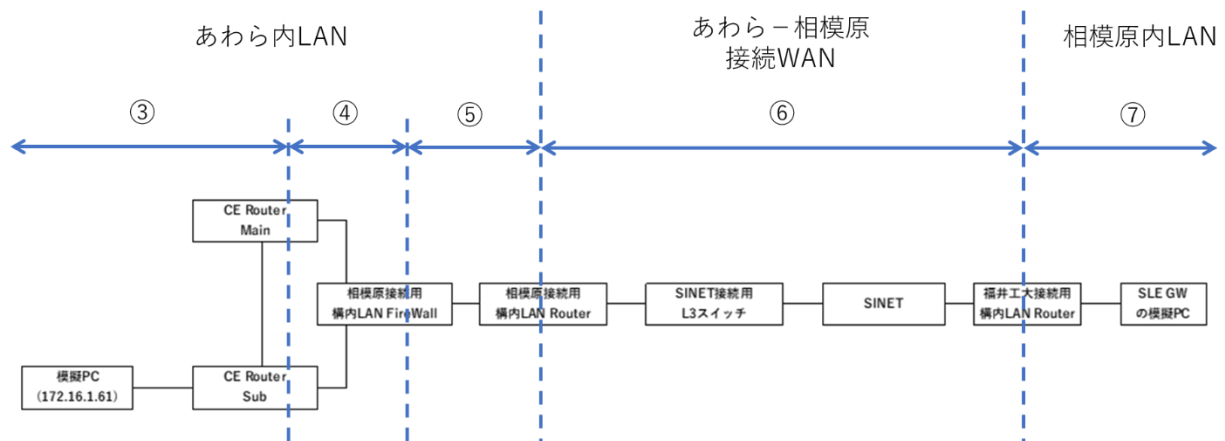


図 3-2-9 FUT あわらキャンパスと JAXA 相模原キャンパスの間の ping 疎通試験時の接続

### 3-2-6. システム全体の機器構成

試験・測定も含めたシステム全体の機器構成を図 3-2-10 に示す。

- 口径 3.9m および口径 13.5m アンテナの RF システム系統の動作状況を確認するため試験・測定系を導入した。試験・測定系における主要機器の一覧を表 3-2-3 に示す。
- 導入した測定機器を一括して監視制御するためのコンピュータを口径 3.9m および口径 13.5m アンテナシステムそれぞれに導入し（SR-1 および SR-2）、試験・測定系を構成した。
- 試験・測定系は、局管制装置のバックアップ機能（口径 3.9m および口径 13.5m アンテナシステムの監視制御機能）に加え、取得データの管理および基本的な処理機能も持つ。
- 運用室のコンピュータから、リモートデスクトップ機能によって SR-1 および SR-2 の制御を行う。この機能と Infinity Production System による局管制機能により、運用室において口径 3.9m および口径 13.5m アンテナシステムについて測定機器も含めた全体システムの監視制御を行う。

表 3-2-3. 試験・測定系で使用する主要機器の一覧

| 機器名                           | 図 3-1-8 の表記                 | 用途                     | 入手方法                     |
|-------------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------|
| スペクトラムアナライザ                   | FPC1500                     | 信号スペクトルの計測             | 文科省委託費<br>R4 年度および R5 年度 |
| デスクトップパソコン                    | SR-1 および SR-2               | 試験・測定系の制御              | 文科省委託費 R4 年度             |
| ハンドヘルド型<br>スペクトラムアナライザ        | Spectrum Rider FPH          | X 帯信号スペクトルの計測          | 文科省委託費 R4 年度             |
| 周波数カウンタ                       | 53220A                      | 信号発生器の周波数測定            | 文科省委託費 R4 年度             |
| RF パワーメータおよび<br>RF パワーセンサー    | N1913A および 8481D            | 受信信号の電力測定              | 文科省委託費 R4 年度             |
| RF 信号発生器、ベクトル<br>信号発生器、ノイズソース | SMA100B、SMCV100B、<br>346A   | RF 信号系統の動作試験時<br>の較正信号 | 文科省委託費 R4 年度             |
| RF スイッチ                       | RF スイッチ                     | 受信信号系億における<br>信号分岐     | 文科省委託費 R4 年度             |
| RF アッテネータ                     | 8494A、8496A、8494G、<br>8495G | 較正信号のレベル調整             | 文科省委託費<br>R4 年度および R5 年度 |
| RF アッテネータ<br>スイッチドライバ         | 11713D                      | 可変 RF アッテネータ<br>の制御    | 文科省委託費<br>R4 年度および R5 年度 |



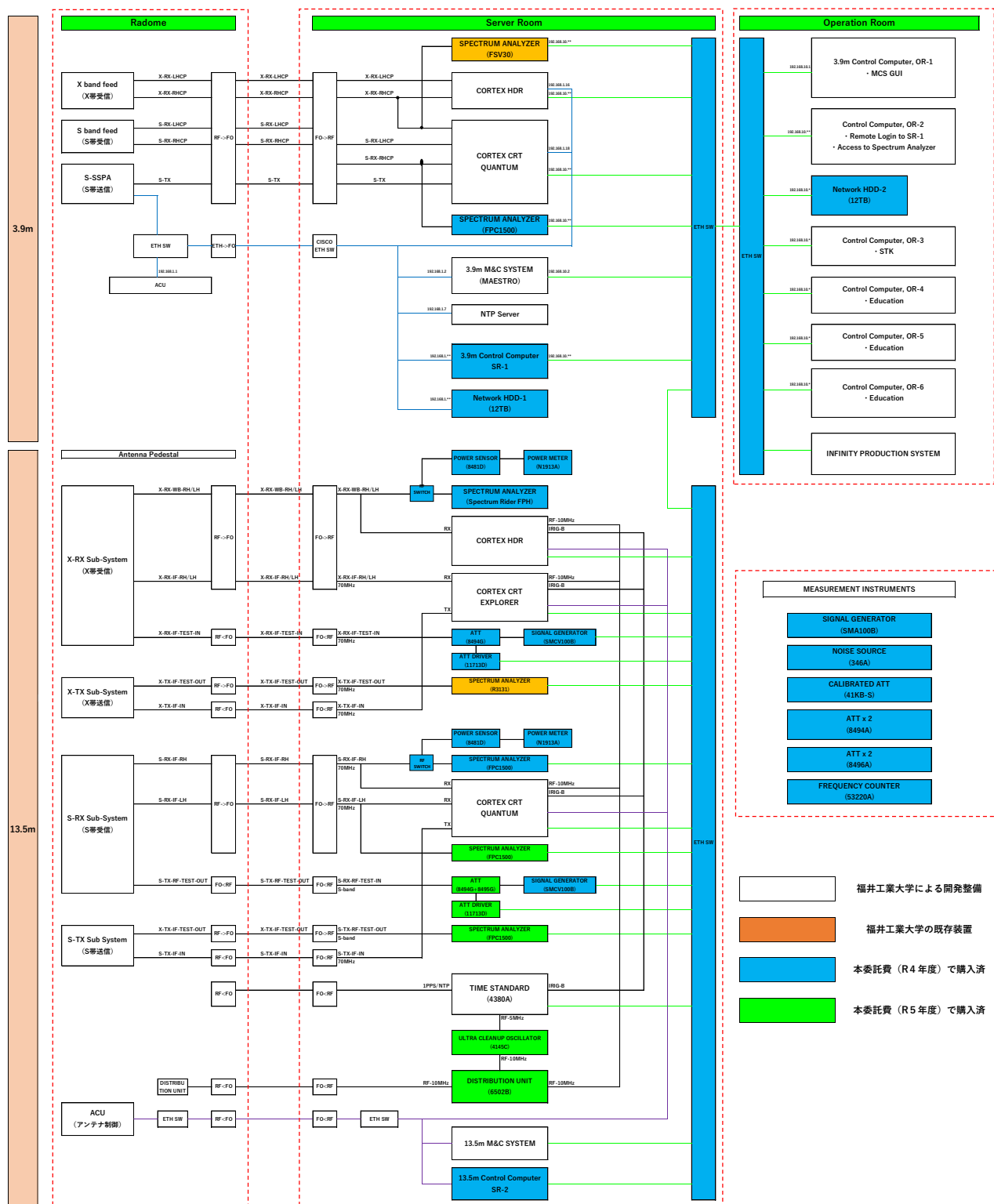


図 3-2-10. システム全体の機器構成。色で示された機器は試験・測定系を構成する機器であり、文科省委託費で R4 年度および R5 年度に購入した。これにより、FUT 衛星地上局全体を監視制御するシステムが完成した。

### 3-3. 人材育成の実施状況

#### 3-3-1. 工学部・電気電子工学科および大学院・応用理工学専攻・宇宙情報科学コースにおける人材育成

(ア) 以下の研究課題の実施により、探査機搭載機器との通信系も含めミッション全体を俯瞰し理解出来る運用人材の育成を行った。

#### ■卒業研究におけるFUT衛星地上局を活用した研究課題の実施（エクレウス探査機を題材とし、月探査機の運用を目的とするアンテナシステムおよび運用方法の検討）

- 研究題目：3.9mアンテナシステムを用いたエクレウス探査機の軌道推定に関する研究
- カテゴリー：卒業研究
- 研究内容：2022年11月16日にNASAのSLSロケットで打ち上げられたエクレウス探査機について、2022年11月23日から口径3.9mアンテナシステムを用いて電波の受信を継続的に実施した。計測された受信電波の周波数に対して探査機側の通信機の安定性も含めて評価し、口径3.9mアンテナシステムが月周辺探査機の軌道推定にどの程度役立つかを評価することを目的として研究を実施した。小型アンテナは指向性が広いため探査機の存在確認に役立つ。ある程度の軌道推定まで可能になれば、月周辺探査機の安定した運用により貢献できる。図3-3-1に、2022年11月23日から2022年12月1日までの測定データを示す。地球スイングバイ前後の電波の周波数変化をとらえることに概ね成功している。R5年度はこのデータを用いてエクレウス探査機の楕円軌道の軌道要素を推定する基礎研究を行った。

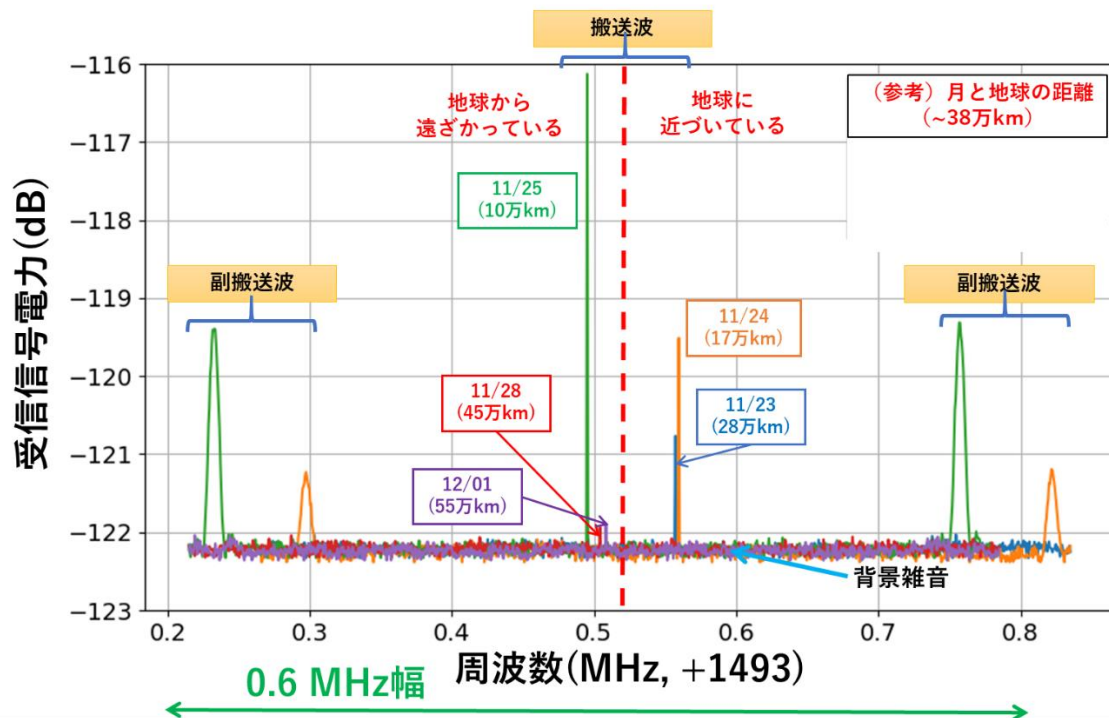


図3-3-1. 2022年11月23日から2022年12月1日において口径3.9mアンテナシステムで受信したエクレウス探査機の電波のスペクトルとその時間変化。

■口径2.4mおよび3.9mアンテナシステムを活用した大学院研究における研究課題の実施（学生がアンテナシステムの運用を行うことによって取得するデータを活用した衛星データ利活用に関する研究）

- 研究題目：衛星リモートセンシングを用いた若狭湾の赤潮モニタリングに関する研究
- カテゴリー：大学院研究
- 研究内容：赤潮は沿岸漁業や養殖業に被害をもたらす重要な環境問題であり、その発生条件を明らかにすることは漁業被害低減の観点から大きな意義がある。赤潮発生条件の導出のためには、赤潮の発生状況を把握する必要があるが、一般に赤潮の発生範囲は数10 km<sup>2</sup>から数100 km<sup>2</sup>の広範囲に及び、かつ、高頻度の観測が必要となることから、地球観測衛星データの利用が不可欠である。

一方これまで、衛星データを用いた赤潮研究について、赤潮の検出に関する報告は多くあるが、その発生条件の考察にまで踏み込んだ研究は少ない。その理由として、光学衛星による検出であるため、発生条件に対する雲の影響を除去することが難しいことが挙げられる。この課題に対して本論文では、2004年から2019年までの16年にわたる長期間の地球観測衛星データを用いた統計的な手法によって雲の影響の低減を試みた点に創意工夫がある。その結果として、赤潮の発生条件として、クロロフィル a 濃度には下限値(3 mg/m<sup>3</sup>)が、表面海水温に対しては適温範囲(12~20°C)が存在することを明らかにし、加えて日照時間が重要な条件である可能性を示唆した。

また、赤潮検出における雲の影響を除去する手法の開発を目標として、合成開口レーダー衛星のデータに本格的に着目したことは他の研究にはない本論文の大きな特徴である。手法としては途上であるが、合成開口レーダー衛星のデータによる赤潮検出の可能性が示唆されており、今後の研究開発の発展が期待される。

本事業における関連として、口径3.9mアンテナシステムにおけるAQUA衛星のデータ受信の様子を図3-3-2に示す。

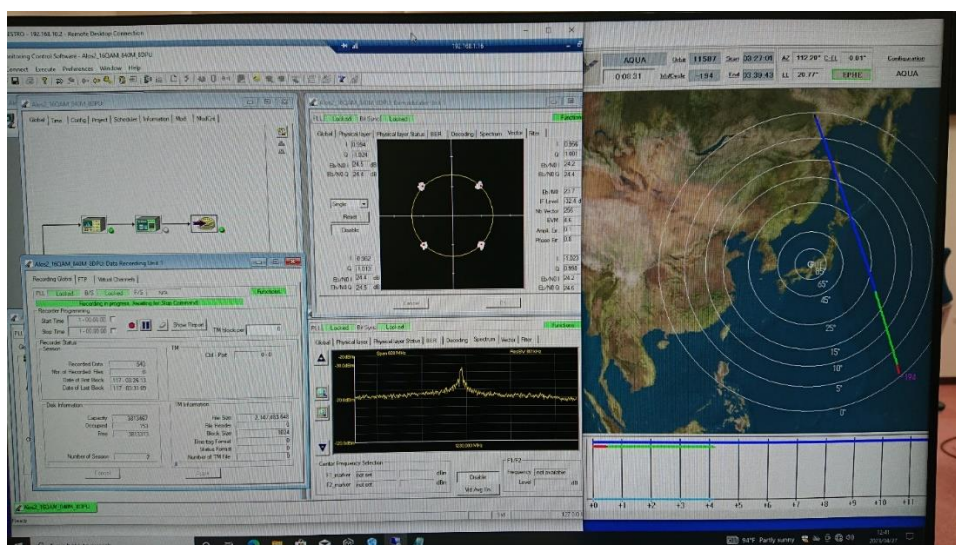


図3-3-2. 口径3.9mアンテナシステムにおけるAQUA衛星のデータ受信の様子。ベースバンド装置の設定や取得データの画像処理を通して衛星システムについての知識も修得した。

(イ) 学外から講師を招き、工学部・電気電子工学科、電気電子情報工学科および大学院・応用理工学専攻・宇宙情報科学コースの学生を対象とした講演会を実施した。

(1) 講師：中須賀 真一 教授

(東京大学大学院工学系研究科 航空宇宙工学専攻航空宇宙システム学講座)

題目：大学発の超小型衛星が宇宙を変える！～宇宙開発利用とビジネスの新潮流～

開催日：2024年02月02日

主催：福井工業大学

実施状況のURL：<https://www.fukui-ut.ac.jp/news/education/fphp/entry-10212.html>

(2) Paola Andreani氏（ヨーロッパ南天天文台 科学局本部 ESO天文学者教授会代表 兼科学担当室長）によるセミナー

開催日：2023年11月01日

主催：福井工業大学

実施状況のURL：<https://www.fukui-ut.ac.jp/news/education/fphp/entry-9988.html>

### 3-3-2. 宇宙研究推進本部における人材育成

(ア) 本事業の紹介を通した宇宙の探査に関する一般への普及を目的とした講演会を実施した

(1) 講演会名称：令和5年度未来塾講演会

主 催：福井工業大学

開催日：2023年9月30日

講 師：毛利衛氏（宇宙飛行士・日本科学未来館名誉館長）

題 目：宇宙から見た地球生命のつながり

実施状況のURL：[https://www.fukui-ut.ac.jp/news/education/report\\_o/entry-9899.html](https://www.fukui-ut.ac.jp/news/education/report_o/entry-9899.html)

(2) 講演会名称：FUT公開講座

主 催：福井工業大学

開催日：2023年10月21日

講 師：中城智之（福井工業大学・工学部・電気電子情報工学科・教授）

題 目：あわらキャンパス宇宙通信・宇宙観測地上局の一般公開

実施状況のURL：<https://www.fukui-ut.ac.jp/news/education/fphp/entry-9951.html>



(イ) 本事業の紹介を通し地域の若い人へ夢を与えることを目的とし、FUT衛星地上局システムの一般公開を実施した。

## 1. 実施概要

- (1) イベント名：宇宙がもっと近くなる！13.5m パラボラアンテナ見学・体験イベント
- (2) 実施日：2023 年 11 月 3 日（金・祝）～4 日（土）
- (3) 参加高校生の人数：7 名（滋賀県および石川県）
- (4) URL：<https://www.fukui-ut.ac.jp/news/education/fphp/entry-10003.html>

**福井工業大学主催**  
**宇宙がもっと近くなる！**  
**13.5mパラボラアンテナ**  
**見学・体験イベント**  
JAXAの打ち上げた月探査機「エクレウス」の運用に参画中！

**国内最大級の  
人工衛星運用地上局！！**

開催日：令和5年11月3日（祝金）、4日（土）  
集合場所：福井工業大学 福井キャンパス(福井市学園3丁目6-1)  
※実施場所はあわらキャンパスです。  
対象：高校生  
定員：20名（1校2名程度）  
※応募多数の場合は抽選となります。  
※ご参加いただく高校生の方のみ、9/8(金)9/29(金)までに参加決定のご連絡をいたします。  
※中部圏に在籍する高校生が対象です。（福井県外の高校生が優先です。）  
持ち物：ノート、筆記用具、一泊分の着替え等  
参加費：無料  
その他の下記の費用は大学が負担いたします。  
①最寄り駅～福井駅までの往復交通費  
※バス・自家用車等の場合の交通費は、自己負担をお願いいたします。  
最寄り駅から福井駅までの距離50km未満→乗車料金  
最寄り駅から福井駅までの距離50km以上→乗車料金+特急料金（自由席）  
②宿泊費（福井アカデミアホテル1泊分）※福井工業大学 福井キャンパス横のホテル  
③食費（1日目夕食、2日目朝食、昼食）  
④傷害保険加入料（2日間分）  
その他：スマートフォン・カメラでの施設撮影はOKです。  
申し込み：下記問合せ先へメールでお申し込み下さい。  
※申し込みに必要な情報：学校名、参加者氏名、学年、携帯番号、メールアドレス  
※申し込みでいただいた個人情報は本イベントのみに使用させていただきます。  
申込期限：令和5年8月31日（木）-9月22日（金）  
問合せ先：福井工業大学 社会連携推進課  
TEL：0776-29-7834 Mail:shakai-u@fukui-ut.ac.jp



口径10mパラボラアンテナ



衛星地上局



上記QRコードからも  
詳細を確認いただけます！

当日スケジュール（予定）は裏面に記載

図 3-3-3 13.5m パラボラアンテナ見学・体験イベントの配布チラシ

## 2. 実施スケジュール

### (1) 11月3日

- 14時～：自己紹介、アイスブレイク
- 14時10分～14時30分：あわらキャンパス、プロジェクトの紹介
- 14時30分～15時30分：キャンパス内案内、13.5m アンテナ駆動、内部見学
- 15時30分～17時30分：自作電波望遠鏡による天の川からの電波観測体験
- 17時30分～：福井キャンパスへ移動
- 18時30分～：夕食・懇談@アカデミアホテル

### (2) 11月4日

- 9時30分～：衛星リモートセンシングとは
- 10時00分～：3.9m アンテナ駆動・レドーム内見学／アンテナ操作体験／衛星データ受信準備体験
- 10時55分～11時08分：地球観測衛星のデータを受信体験
- 11時08分～11時30分：受信データの画像化体験
- 11時30分～：アンケート記入、記念写真撮影
- 12時～：昼食・懇談@北潟湖畔荘
- 13時30分～：東尋坊見学
- 15時～：福井駅へ移動、15時50分福井駅にて解散

## 4. アンケート結果

### 【選択方式欄】

| 設問  | 内容                                               | 回答               |    |
|-----|--------------------------------------------------|------------------|----|
| (1) | 見学・体験会は楽しかったですか。一つ選んで○で囲ってください。                  | はい               | 7名 |
|     |                                                  | どちらでもない          | 0名 |
|     |                                                  | いいえ              | 0名 |
| (2) | 見学・体験会で楽しかった内容を教えてください（複数回答可）                    | 13.5m アンテナ見学     | 6名 |
|     |                                                  | 3.9m アンテナ見学      | 4名 |
|     |                                                  | 運用室・サーバー室見学      | 3名 |
|     |                                                  | 自作アンテナによる天の川観測体験 | 7名 |
|     |                                                  | 衛星データ受信・解析体験     | 6名 |
| (3) | 講義の内容はわかりやすかったですか。一つ選んで○で囲ってください。                | はい               | 7名 |
|     |                                                  | どちらでもない          | 0名 |
|     |                                                  | いいえ              | 0名 |
| (4) | 宇宙分野への興味・理解について、参加前と比べて変化はありましたか。一つ選んで○で囲ってください。 | 興味・理解がより深くなった    | 7名 |
|     |                                                  | 参加前と変わらない        | 0名 |
|     |                                                  | 興味・理解が低下した       | 0名 |

【自由記述欄】

| 回答内容                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 電波望遠鏡による観測がとても楽しかったです。現在光学的なアプローチに代わって主流となっている手法の仕組みに触れることができて良かったです。部活動でも挑戦してみたいと思います。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 13.5m アンテナ見学について、実際にそこで作業している方々の話を聞いたのが初めての体験で印象的でした。<br>自作アンテナ制作は予定の 2 時間程という短い時間で本当に出来るのか不安でしたが、手際のいい段取りと丁寧なサポートでしっかり完成させられたので良かったです。夕食の時に聞いた先生方の話が講義の内容と同じかそれ以上に面白かったです。これから学校に戻ったら天文部で今回のアンテナを再現してみようと思います。                                                                                                                                                                                                      |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 初めて見学・体験会に来たけど、13.5m アンテナの見学とか衛星のデータ受信とか普通なら見れない、できないことが体験できてすごく楽しかったです！</li> <li>・ 天の川の観測とか特別な部品が必要で作れないと思ってたので、わりと身近な物で作れて、しかも観測もできてすごかったです。</li> <li>・ 天体に関するくわしい話とか今の状態を知れて良かったです。</li> </ul>                                                                                                                                                                           |
| 衛星に関することに関しての知識がない状態で参加しました。そして、宇宙関連も久しぶりにふれる機会となりました。家で見れるデータにふれてみたいと思うようになりました。今回の貴重な体験を忘れることなく、色々な事に生かせるといいなと思いました。13.5m アンテナの完成を楽しみにしています。                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 僕は、この体験をするまでは宇宙に対して漠然と地球を超えた「宇宙空間」という背景にしか自分の視線を向けられていませんでした。しかし、この体験を通して宇宙に対する違った方向からのアプローチの仕方を学ぶことができました。中城先生と直接話をする機会がありました。僕が何に興味がありそうなのかを、先生の体験などと合わせながら言語化をしてくれて助かりました。この貴重な体験は今後政治などのニュースを見るときにも役立ちそうで、僕自身の視野を広げてくれます。<br>Q1:水の中でしか生きられない魚、水の中では生きられない人間がいるように宇宙空間に我々より科学技術が発展している未知の生物はいるか可能性ってあるにはありますか？<br>Q2:テレビや本などにのっている宇宙人はほとんど見た目が似ていると思うのですが、あれって人間が想像している宇宙人とかなり似ています。人間が想像しているものと似ているのっておかしくないですか？ |
| 今回の体験の内容は、一般的には専門的で入りにくいと思われていそうだが、実際は、学校での勉強の延長線上にあり、私たちの生活とあまりかけ離れたものではないと思った。<br>また、宇宙から地球を見ることは、気象や写真だけで大きな影響を与えていると思っていたが実際には今日の地球で問題になっている地球温暖化への対策や観察、さらには、政治的な効力までをも持っていると思い、宇宙空間を制することは、地球の表面全てを制することだと思った。                                                                                                                                                                                                 |
| 普段触れることない電波を使った観測というのを実際に体験出来てとても興味深い 2 日間でした。先生方も気さくに話しかけてくださり、宇宙分野についてさらに理解を深めることができました。<br>今回最も印象に残ったことは、13.5m アンテナの見学です。圧倒的なスケールの大きさと神秘的な                                                                                                                                                                                                                                                                        |

たずまいに感動しました。

#### 4. R5 年度実施内容のまとめと R6 年度の展望

##### 1. R5 年度の FUT 衛星地上局の開発整備に関して

- (1) アンテナシステムを完成させ、当初設計通りの性能を有することを地上および電波天文観測による試験によって確認することができた。また、システムの整備状況について、FUT 衛星地上局システム構成書にまとめた。
- (2) VLBI 観測機能について基本的な準備を終えることができた。
- (3) DESTINY+探査機の運用に向けて、FUT あわらキャンパスと JAXA 宇宙科学研究所相模原キャンパスの間のネットワーク整備を進め、基本的な疎通を確認することができた。
- (4) 人材育成に関して以下を実施した。
  - A) FUT 衛星地上局を活用した卒業研究および大学院研究における学生教育
  - B) 学外講師による宇宙を題材として講演会及びセミナー、福井工業大学公開講座、FUT 衛星地上局の一般公開による一般への普及

##### 2. R6 年度の展望

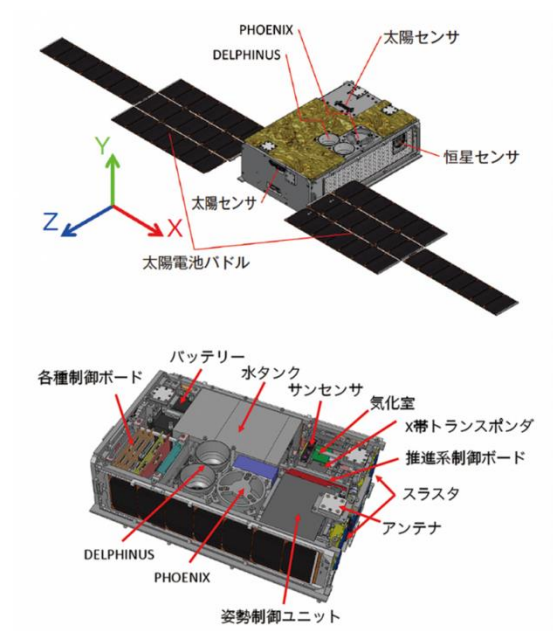
- (1) FUT 衛星地上局の基本性能を確認することができたので、地上における探査機シミュレータとの通信試験を行うことにより運用性能を確認する。
- (2) 他のアンテナ局との VLBI 観測を行い、システム全体としての時刻安定度の確認を行う。
- (3) JAXA 宇宙科学研究所相模原キャンパスとの接続に関して、実際の探査機運用において使用される SLE プロトコルでの接続確認、および TCP/IP プロトコルによる実際のテレメトリ信号の通信について確認を行い、DESTINY+探査機との適合性試験の準備を進める。



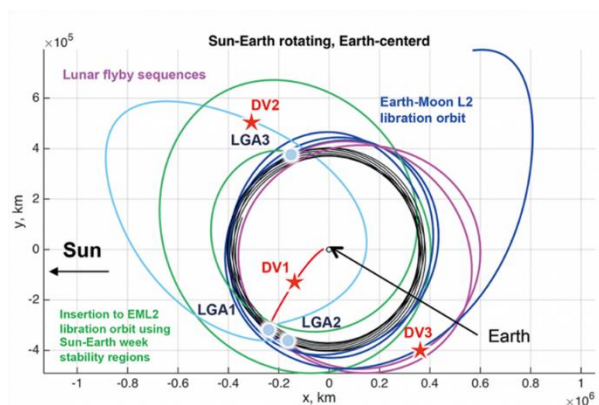
## 付録 A：エクレウス探査機の運用に関するミッション要求および成功基準

### 1. エクレウス探査機について

エクレウス探査機はサイズ6U、総重量14kgの超小型月周辺探査機であり、2022年11月16日にNASAのSLSロケットで打ち上げられた。福井工業大学は、FUT衛星地上局システムによるエクレウス探査機の運用について2020年11月にJAXAと共同研究契約を締結した。次項より、JAXAとの共同研究において策定したミッション要求および成功基準を示す。



- サイズ：6 U（1 U=10cm×10cm×10cm）
- 総重量：14kg以下
- ミッション：地球の磁気圏プラズマ撮像、月の裏面における月面衝突閃光の観測、地球から月軌道周辺までの空間におけるダスト環境の評価
- 打ち上げ：2022年11月16日



図A-1. エクレウス探査機の外観、構成、軌道

### 2. ミッション要求

#### 月軌道までの超小型衛星の運用が可能な地上局の開発と機能実証

エクレウス探査機およびDESTINY+探査機の運用に有用なa)X帯におけるテレメトリ受信機能, b)X帯における送信機能, c)軌道決定支援機能の3つの機能を備える事を通して、月軌道までの超小型衛星の運用が可能な地上局の開発と機能実証を行う。

### 3. ミッション成功基準

#### (A)達成すべき性能

エクレウス探査機の運用に参画することにより本衛星地上局の性能を確認する。エクレウス探査機の軌道の3つのフェーズの内、「打ち上げ～EML2：地球距離 0～約 0.01AU」において運用支援が可能であることを実証することを目的とする。1) X帯における受信機能, 2) X帯における送信機能, 3)軌道決定支援機能の達成すべき性能について、最低限達成すべき通信性能として以下ように規定する。

### 1) X帯における受信機能

探査機仰角 15 度以上において、

- ①地球距離 44 万kmにおいて、エクレウス探査機が XMGA 使用時に通信速度 128bps でリンクマージンを 3dB 確保できること。
- ②地球距離 150 万kmにおいて、エクレウス探査機が XMGA 使用時に通信速度 128bps でリンクマージンを 3dB 確保できること。

### 2) X帯における送信機能

探査機仰角 15 度以上において、

- ①地球距離 44 万kmにおいて、通信速度 125bps でリンクマージン 3dB を確保できること。
- ②地球距離 150 万kmにおいて、通信速度 15.625bps でリンクマージン 3dB を確保できること。

### 3)軌道決定支援機能

探査機仰角 15 度以上において、

- ①地球距離 44 万kmにおいてエクレウス探査機の軌道決定に有用な(a)ドップラー計測、(b)疑似雑音測距が可能なこと。
- ②地球距離 150 万kmにおいてエクレウス探査機の軌道決定に有用なドップラー計測が可能なこと。
- ③DDOR 機能の付加が可能であること。

## (B)地上局の主要パラメータへの要求事項

### ①EIRP および G/T に対する要求

回線計算から、衛星地上局に要求される EIRP および G/T について表 A-1 にまとめる。

表 A-1 衛星地上局に要求される EIRP および G/T (仰角 15 度)

|            | 1)-①  | 1)-②  | 2)-①  | 2)-②  | 3)-①-(b) |
|------------|-------|-------|-------|-------|----------|
| EIRP(dBW)  | ----  | ----  | 76.30 | 77.90 | 82.30    |
| G/T(dBi/K) | 24.53 | 34.57 | ----  | ----  | 38.49    |

### ②周波数標準の周波数安定度に対する要求

また、3)-①-(a)および 3)-②ドップラー計測について、長期安定度  $3.3 \times 10^{-12}$  以下を達成すること。

### ③ネットワークに関する要求

JAXA 管制システムとのオンライン接続を可能とする機能を持つこと。

### ④DDOR 機能に対する要求

3)-③について、DDOR 機能を追加可能な IF 出力をつくること。

以上の検討結果を基に整理したエクレウス探査機の運用における成功基準を表A-2に示す。

表A-2 エクレウス探査機の運用における成功基準

| 成功基準  | X帯受信                         | X帯送信                         | 軌道決定                    |
|-------|------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| ミニマム  | 受信感度を決める「G/T」の数値として、38.5dB/K | 送信能力を決める「EIRP」の数値として、82.3dBW |                         |
| フル    | 44万kmの距離でのテレメトリ受信(128bps)    | 44万kmの距離でのコマンド送信(125bps)     | One-Way ドップラー計測および測距の実施 |
| エクストラ | 150万kmの距離でのテレメトリ受信(128bps)   | 150万kmの距離でのコマンド送信(15.6bps)   | Two-Way ドップラー計測の実施      |

## 付録 B：DESTINY+探査機の運用に関するミッション要求および成功基準

### 1. DESTINY+探査機について

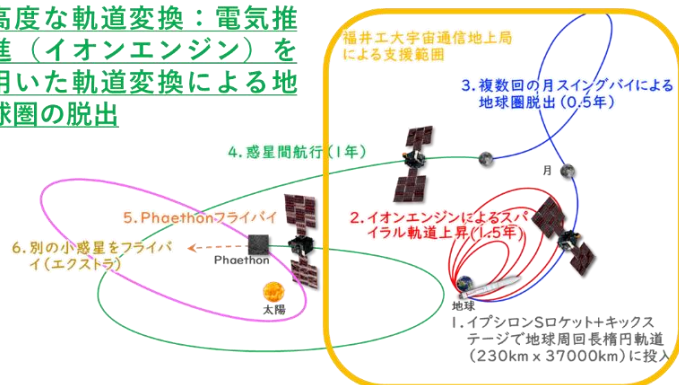
DESTINY+探査機は小惑星フェートンの探査を理学的目的とした深宇宙探査機であり、2024年度の打ち上げが予定されている。工学的には、深宇宙探査の低コスト化を目的として、イプシロンロケットで地球周回軌道に投入された後、搭載のイオンエンジンによって軌道高度を徐々に上昇させ、2年かけて月軌道に到達、その後、小惑星フェートンに向けて地球圏を脱出する。イオンエンジンによる高頻度の軌道制御が想定されており、地上局には確実な探査機の捕捉が求められる。福井工業大学は、FUT 衛星地上局システムによる DESTINY+探査機の運用について 2022 年 10 月に JAXA と共同研究契約を締結した。



- サイズ：1.3m × 1.08m × 1.33m
- 総重量：480kg
- 打ち上げ予定：2024年度
- ミッション期間：約4年間（長期ミッション）

### 工学ミッションの目標：電気推進航行技術の発展

#### 高度な軌道変換：電気推進（イオンエンジン）を用いた軌道変換による地球圏の脱出



### 従来の探査機とは全く異なる運用／地上局にとっての大きなチャレンジ

- ・ イオンエンジンによる高頻度な軌道制御
- ・ 制御毎に変化する軌道に対応した衛星捕捉
- ・ 制御後の軌道決定に必要な軌道データの取得
- ・ 小型アンテナによる広範囲な衛星の探索及び、大型アンテナを連携した確実な衛星運用

図 B-1. DESTINY+探査機の外観、基本諸元、軌道および運用上の特徴

## 2. ミッション要求および成功基準

ミッション要求および成功基準については、現在、JAXA と検討中である（表 B-1）。探査機の確実な捕捉のために、口径 3.9m アンテナの活用が求められている。

表 B-1. DESTINY+探査機の運用における成功基準（検討中）

| 成功基準          | 項目                                                  |
|---------------|-----------------------------------------------------|
| ミニマム<br>サクセス  | 月距離 38 万kmまでにおける通信リンクの確立<br>・テレメトリ受信<br>・コマンド送信     |
| フル<br>サクセス    | (1)軌道情報の取得<br>・折り返し／再生レンジングデータの取得                   |
|               | (2)探査機追尾（探索）<br>・口径 3.9m による追尾<br>・口径 13.5m による追尾   |
|               | (3)運用<br>・所要の運用の実施                                  |
| エクストラ<br>サクセス | ・口径 3.9m と口径 13.5m の連携<br>・月距離以遠において、フルサクセスの項目を実施する |