

令和 4 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 5 年 5 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	5
3-1. プロジェクトの総合推進	5
3-1-1. FUT 衛星地上局システムの特徴に関する検討	5
3-1-2. 検討会および打ち合わせの実施	8
3-1-3. FUT 衛星地上局システム構成書の作成	10
(1) システム整備の基本方針	10
(2) システムの基本構成	10
(3) 口径 13.5m アンテナシステム	12
(4) 口径 3.9m アンテナシステム	17
(5) JAXA 相模原キャンパスおよびスウェーデン宇宙公社とのネットワーク接続	20
(6) システム全体の機器構成	21
3-2. 研究開発の進捗状況：FUT 衛星地上局各システムの開発・評価	23
3-2-1. 口径 13.5m アンテナの整備状況	23
3-2-2. 口径 13.5m アンテナに関する工場受入試験について	24
3-3. 人材育成の実施状況	27
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	27
3-3-2. 宇宙研究推進本部における人材育成	30
4. R4 年度実施内容のまとめと R5 年度の展望	33
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	35
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	37

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R4年度における実施内容の概要を述べる。R4年度では、FUT衛星地上局システムの整備およびJAXAのエクレウス衛星、Destiny+衛星の運用参画の準備を以下のように進めた。

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衛星地上局システム開発の円滑な進行を目指してプロジェクトを推進し、b. で行う検討会の結果を基に「FUT衛星地上局システム構成書」を作成した。令和4年度にはシステム設計の結果を「FUT衛星地上局システム構成書」としてまとめた。本構成書には以下の項目を記載した。

(ア) FUT衛星地上局システム全体としての性能仕様、システムブロック図および配線図、使用機器類一覧およびデータシート、各種インタフェース仕様

(イ) b. で実施する検討会の議事録

(ウ) 以下の点について整理し、FUT衛星地上局システムの特徴を明確にした。

- ・直径の異なる4台のアンテナのミッションと教育内容について
- ・世界の月探査計画の現状を基にした口径13.5mアンテナシステムの位置付け・技術の優位性および独創性
- ・市場への展開に関する検討内容

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. の構成書への記載項目を明確化するための検討会を月に1回程度開催した。

(イ) 必要に応じて各協力機関との打合せを行った。

(ウ) 検討会および打合せの議事録を作成した。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衛星地上局各システムの開発・評価

(ア) 設計に基づきFUT衛星地上局の開発を進めた。現在の進捗状況からアンテナ組立の25%（組立工程

の25%) が終了することを目標としたが、別途予算で購入予定のアンテナ組立がメーカー側の機器納入の遅延により本年度中にできなくなったため、代替手段として、組立の手順や組立計画の整備等を行い、アンテナ到着後に早急に組立ができる体制を整えた。また、次年度以降のアンテナの性能実証で必要となる測定機器類を購入し準備を進めた。

③人材育成

a. 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。

■卒業研究および大学院研究における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を行う）

■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を行う）

(イ)福井工業大学の主催により、本事業の紹介を通した宇宙の探査に関する本学学生の教育および一般への普及を目的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て講演会を実施した。

(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。

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. FUT衛星地上局システムの特徴に関する検討

福井工業大学では、2000年に口径10.26mパラボラアンテナ、2011年に口径2.4mパラボラアンテナによる地球観測衛星のデータ受信システムを整備し、衛星データを地域の環境計測に役立てる研究を推進してきた。この流れを発展させ、福井工業大学のパラボラアンテナシステムを「地球周回軌道から月軌道までをカバーする」地上局として再整備し、宇宙技術開発、宇宙科学、宇宙産業に貢献する人材育成の拠点形成と地域貢献を行うことを目的として、2020年度から「ふくいPHOENIXハイパープロジェクト」を推進している。ふくいPHOENIXハイパープロジェクトの実施内容の基本方針は、

- (1) 地球周回から月周辺軌道までの衛星および探査機の運用が可能な大学・民間では日本唯一の衛星地上局の構築
- (2) 衛星データおよび衛星地上局の活用による環境計測・保全、産業振興を通じた地域等への貢献
- (3) アルテミス計画（月に宇宙基地の構築）に参加する。
- (4) 電波望遠鏡の構築と宇宙科学（ブラックホールの発見等）

であり、この基本方針に沿って、2022年8月に新たに口径3.9mのパラボラアンテナシステムが導入され、現在、口径13.5mパラボラアンテナを用いた新システムの整備が進んでいる（図3-1-1）。各アンテナシステムのミッションと教育内容を表3-1-1に示す。地球周回衛星から月周辺探査機までの運用、電波による遠方宇宙の観測までを含めた宇宙に関する幅広い視野は大学・民間では国内唯一であり、極めて特徴のあるパラボラアンテナシステム群である。



図3-1-1. 福井工業大学あわらキャンパスのパラボラアンテナシステム群

表3-1-1. 各アンテナシステムのミッションと教育内容

アンテナシステム	ミッション	教育内容
2.4m	NASA地球観測衛星のデータ受信およびデータを用いた地域の環境計測および一般への教育	学部教育・大学院研究における地球観測衛星データを用いた環境計測研究／クラウドを用いたデータの公開による一般への教育啓蒙
3.9m	地球周回衛星の運用および月周辺探査機の運用への活用	地域の企業と推進する衛星プロジェクトを通じた学生教育／エクレウス探査機の電波受信による月周辺探査機の運用における3.9mアンテナの活用に関する卒業研究の実施
13.5m	地球周回衛星および月周辺探査機の運用	エクレウス探査機およびDESTINY+探査機の運用方法に関する学部教育・大学院研究の実施
10.26m	電波天文学(銀河やブラックホールの観測)	電波天文観測システムの構築に関する学部教育・大学院研究の実施

本事業における開発の主眼である超小型月探査機の運用を目的とした衛星地上局システムは、口径3.9mおよび口径13.5mアンテナシステムを用いて構成される。したがって、この2つのアンテナを用いて構成される地上局システムを「FUT衛星地上局システム」と定義する。FUT衛星地上局システムの特徴として以下が挙げられる。

(1) NASAのLEGS要求をほぼ満たしている。

アルテミス計画に関係し、米国／NASA追跡(SCaN)を中心に、月面活動における地上局 (LEGS; Lunar Exploration Ground Segment) に対する能力要求のガイドラインが策定され、この能力を満たす地上局の調査が始まっている。FUT衛星地上局システムの口径13.5mシステムはこの要求をほぼ満たす設計となっており、今後の月探査において十分な役割を果たすことが期待される。

(2) 低コスト

従来の月探査機の運用では、JAXAの口径34m (内之浦)、口径64m (臼田)、口径54m (美笹) といった大口径のパラボラアンテナを用いた地上局システムが使われてきた。これに対し、FUT衛星地上局システムは小口径のパラボラアンテナを用いることから大幅な低コスト化が図られている。FUT衛星地上局システムの活用により、月探査の低コスト化が期待される。また、このようなシステムの構築は世界に先駆けて実施されるものであり、今後の民間による月探査運用システムの構築においても電波領域の標準形になることが期待される。

また、月探査機 (一般に人工衛星) の運用は一つの地上局だけでは実用的な運用は難しい。グローバルな地上局ネットワークと連携できることが極めて重要である。この観点から福井工業大学は2021年5月に、グローバルな地上局ネットワークを有するスウェーデン宇宙公社と覚書を締結し、相互に連携していくこととした。図3-1-2にスウェーデン宇宙公社の地上局ネットワークとFUT衛星地上局システムの位置を記載した地図を示す。FUT衛星地上局システムの整備の基本方針の一つとして、スウェーデン宇宙公社

のシステムと互換性のあるシステムを構築する。このことから、

- (3) 日本国内の探査機プロジェクトにとって、FUT衛星地上局システムとの適合性を確認できればスウェーデン宇宙公社の地上局ネットワークとの適合性を確認できるので、グローバルな地上局ネットワークとの適合性確認のコストが下がることも特徴として挙げられる。

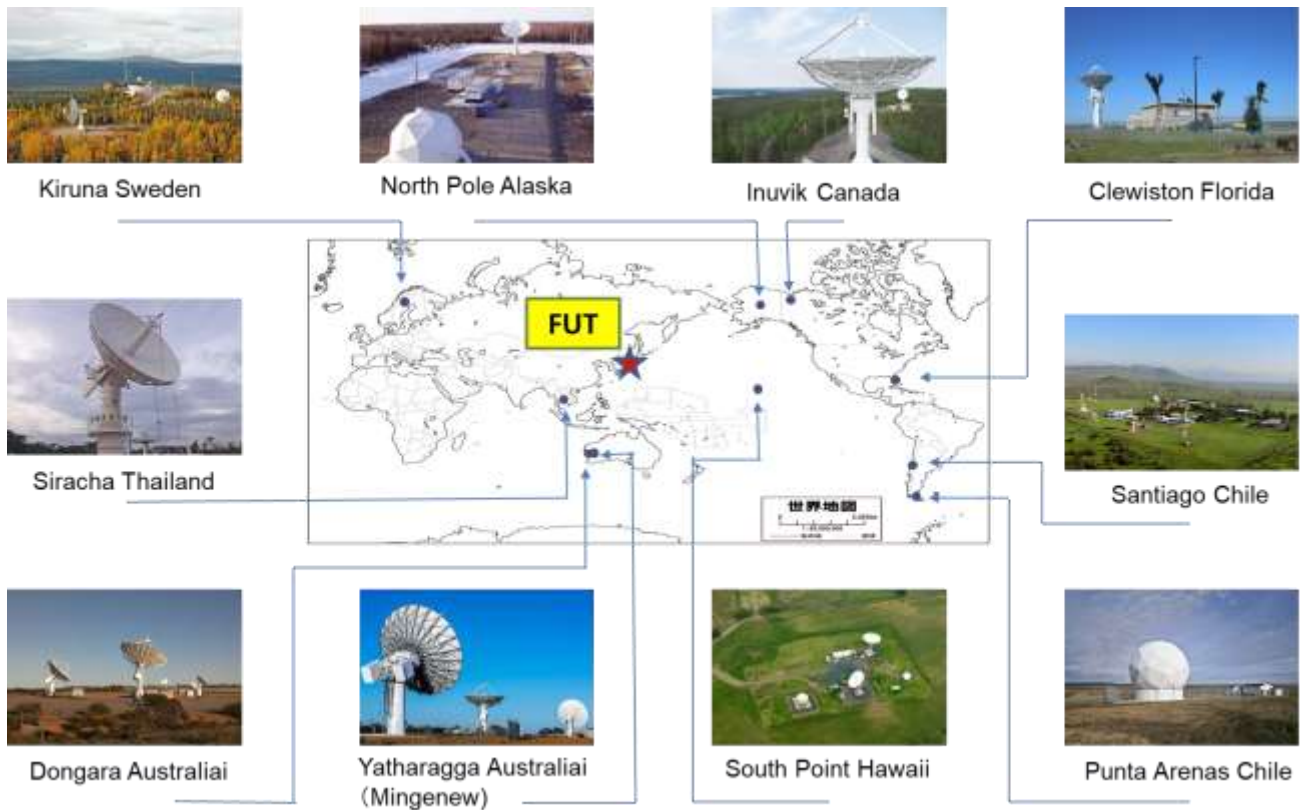


図3-1-2. スウェーデン宇宙公社の地上局ネットワークとFUT衛星地上局システムの位置

3-1-2. 検討会および打ち合わせの実施

図3-1-3にFUT衛星地上局システムの開発体制、表3-1-2に開発体制メンバーの役割を示す。システムの仕様検討や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。また、JAXAとの打ち合わせを実施した。

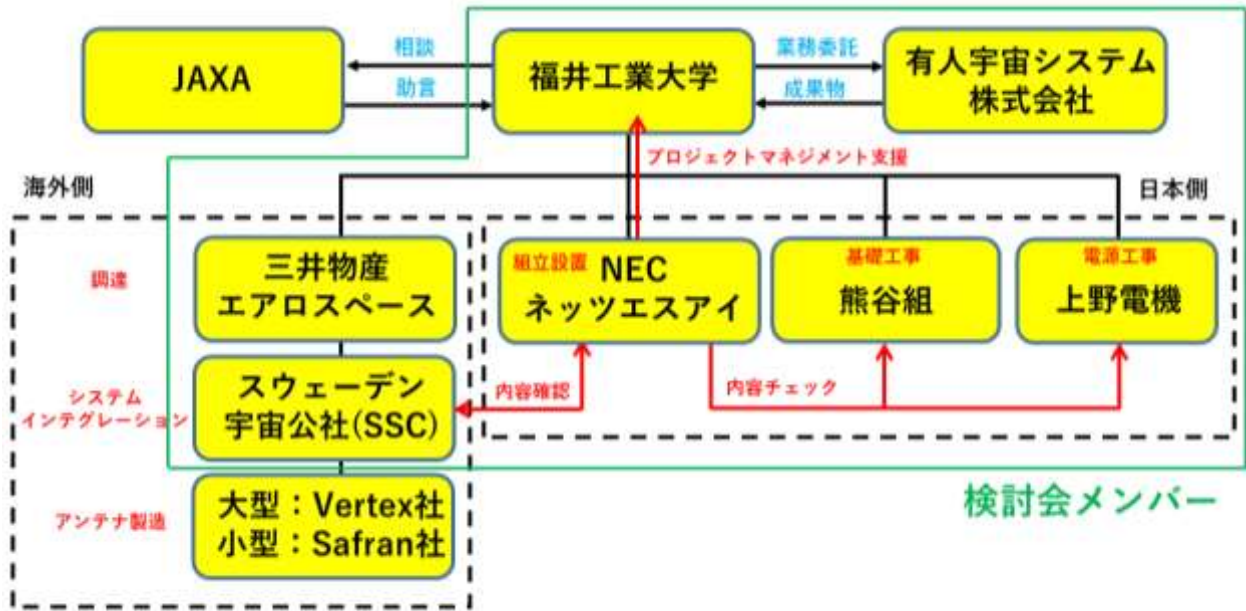


図3-1-3. FUT衛星地上局システムの開発体制

表3-1-2. 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 ネットエスアイ	プロジェクトマネジメントの支援。 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3-1-3に示す。FUT衛星地上局の核をなす口径13.5mアンテナシステムについては、本事業開始前のJAXAとの共同研究から引き続いての検討を行ったため、その経緯が分かるようにJAXAとの打ち合わせについては本事業開始前の打ち合わせも記載している。

表3-1-3. FUT衛星地上局システムの仕様に関する検討会および打ち合わせ一覧

種別	関連機関／ 部署	実施日／ 実施期間	内容
検討会	検討会メンバー	R4 年度	システム仕様検討、進捗管理など
打合わせ	福井工業大学および JAXA エクレウス チーム	2020/12/20～ 2021/04/03	エクレウス探査機の運用を目的とした口径13.5mアンテナシステムのミッション要求および成功基準、基本仕様の策定
	福井工業大学および JAXA DESTINY+ チーム	2022/02/28	FUT衛星地上局とDESTINY+探査機の情報交換
		2022/08/26	共同研究契約締結に関する打ち合わせ
		2022/11/01	共同研究契約締結後のキックオフ。スケジュール確認、適合性試験の実施方法、各種ベースライン文書の内容について
		2022/12/22	FUT衛星地上局とDESTINY+探査機のインタフェース項目／軌道測定データの受け渡し方法について
		2023/02/21	信号・データのインタフェース／適合性試験コンフィグレーション／その他
		2023/03/14	信号・データのインタフェース／適合性試験コンフィグレーション／ミッション成功基準について
	福井工業大学および JAXA 国際宇宙 探査センター	2022/03/15	FUT衛星地上局の情報提供
		2022/10/06	NASAのLEGS要求に対する適合性の検討
	福井工業大学および 福井大学（※）	2022/10/14	月測位衛星システムとの連携について

（※）福井大学は、R3年度の本委託事業において「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」の研究課題を進めており、本事業と連携すべき研究課題であることから打ち合わせを行った。

3-1-3. FUT衛星地上局システム構成書の作成

R4年度に作成した「FUT衛星地上局システム構成書」について、内容を抜粋して報告する。

(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。

(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3-1-4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。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する。

変復調を担うベースバンド装置として、safran社のCORTEXシリーズを採用する。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を導入する。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を導入する。

口径3.9mおよび口径13.5mのアンテナシステムは独立に時刻標準系と局管制装置を持ち、それぞれ単独での動作を可能とする。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する。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）を導入する。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る。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する。

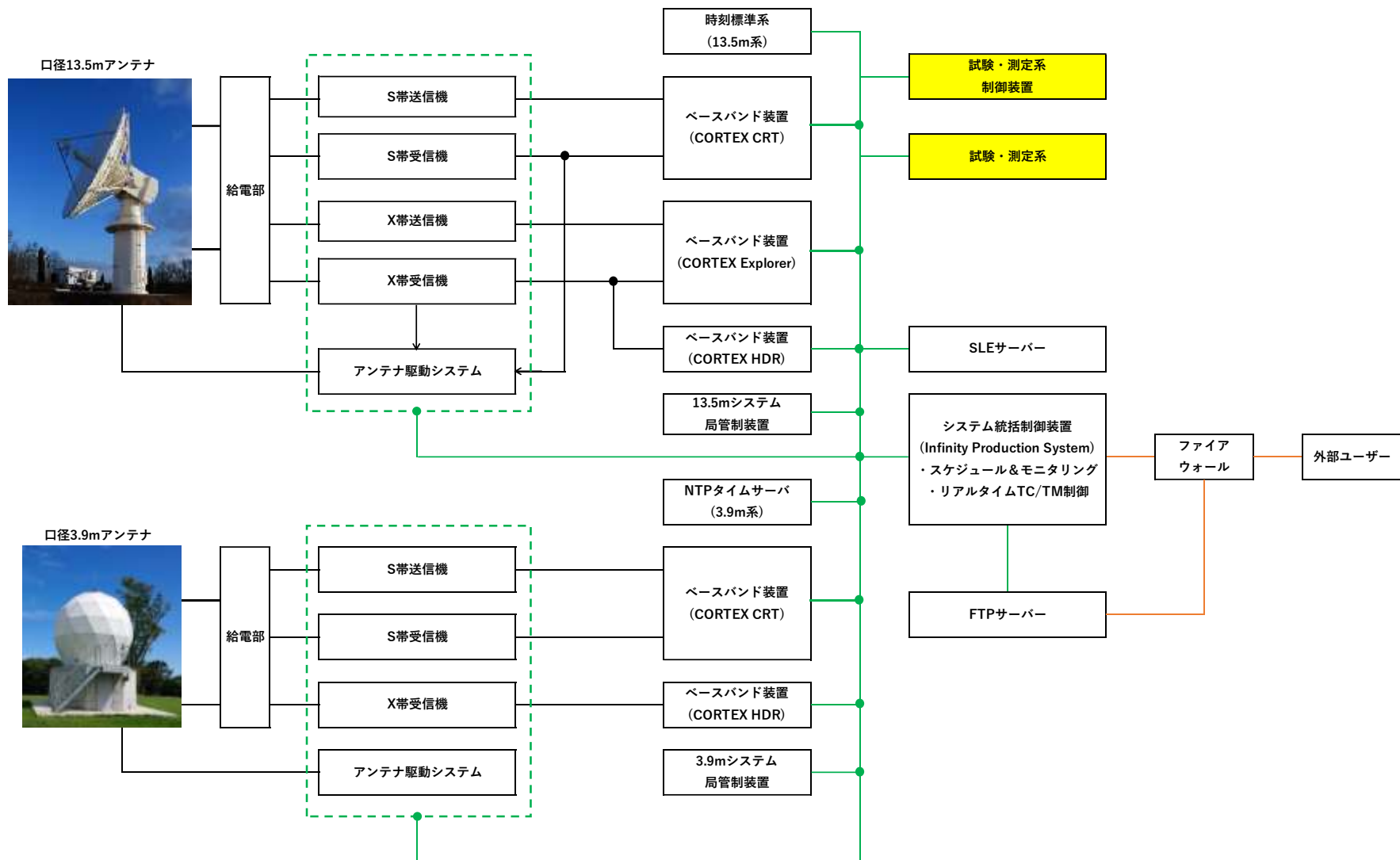


図3-1-4. FUT衛星地上局の構成

(3) 口径13.5mアンテナシステム

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

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3-1-5および図3-1-6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 CRT_Quantum、若しくは eXplorer 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、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、受信する偏波チャン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 信号及び 70MIF 信号は、受信レベル、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、eXplorer と HDR に入力される。CRT_Quantum 及び 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 若しくは eXplorer 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 若しくは eXplorer は、Infinity システムからの衛星コマンドデータに対し所要の符号化を施してコマンドベースバンド信号とし、さらに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、レンジトーンによって 70MIF 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、レンジ信号で変調が施された 70MIF 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。

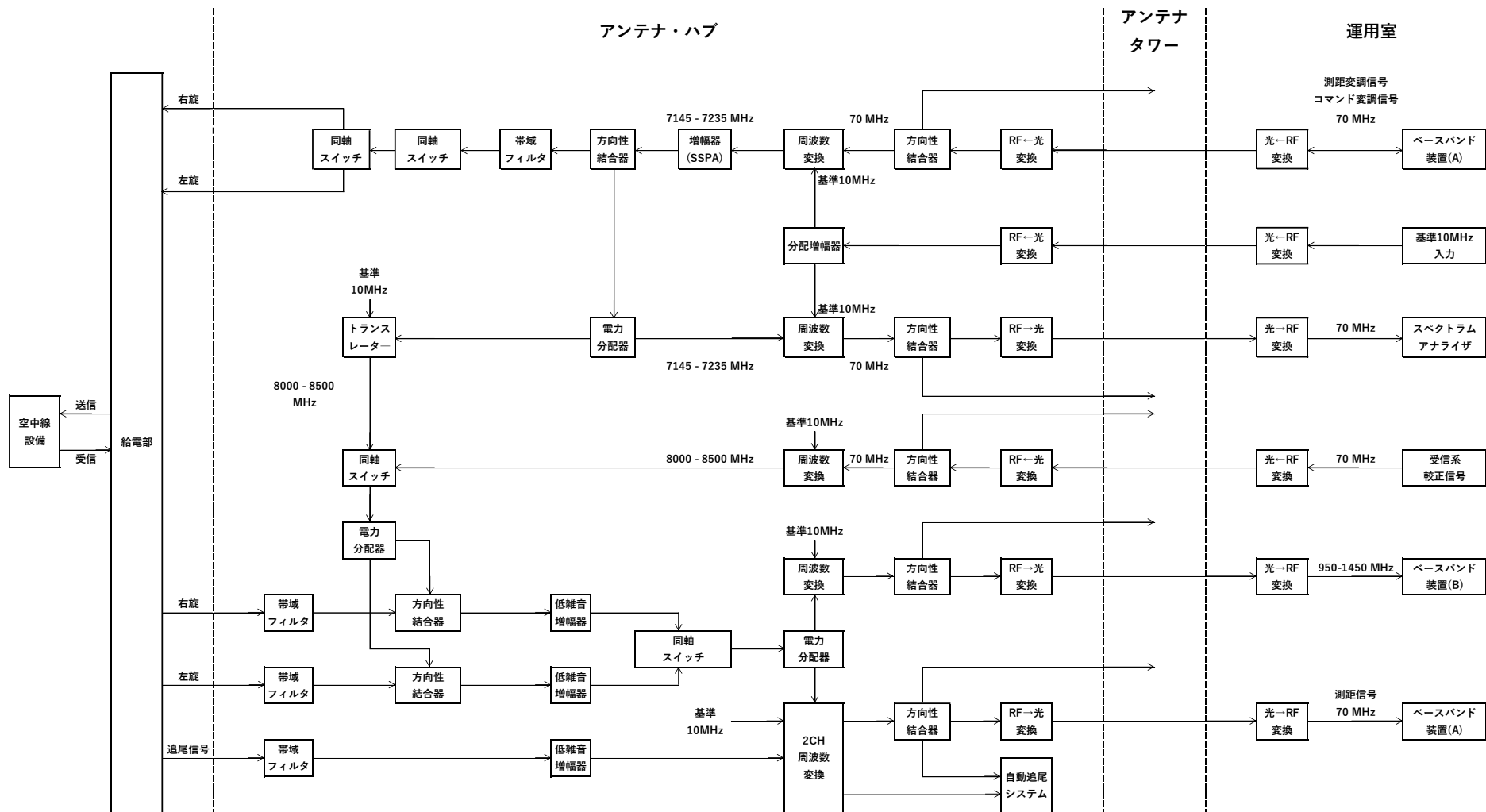


図3-1-5. 口径13.5mアンテナシステムのX帯システム系統図

表3-1-4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3-1-4. 口径13.5mシステムのS帯およびX帯の基本仕様

S 帯 送信	送信周波数	2.025 – 2.120 GHz
	EIRP	71.3 dBW @2.025 GHz
	偏波	RHCP / LHCP selectable
	アンテナ利得	46.5 dBi @2.073 GHz
S 帯 受信	受信周波数	2.200 -2.300 GHz
	G/T	25.9 dBi/K @ 2.200GHz
	偏波	Data: RHCP/LHCP diversity, Tracking: RHCP/LHCP selectable
	アンテナ利得	47.9 dBi @2.250 GHz
X 帯 送信	送信周波数	7.145 – 7.235 GHz
	EIRP	82.3 dBW @ 7.145 GHz
	偏波	RHCP / LHCP selectable
	アンテナ利得	57.7 dBi @7.190 GHz
X 帯 受信	受信周波数	8.000 – 8.500 GHz
	G/T	38.9 dBi/K @8.250GHz
	偏波	Data: RHCP/LHCP diversity, Tracking: RHCP/LHCP selectable
	アンテナ利得	59.6 dBi @ 8.250 GHz

(4) 口径3.9mアンテナシステム

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

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3-1-7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に対し所要の符号化を施してコマンドベースバンド信号とし、さらに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。シンク形成後は、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 や 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。

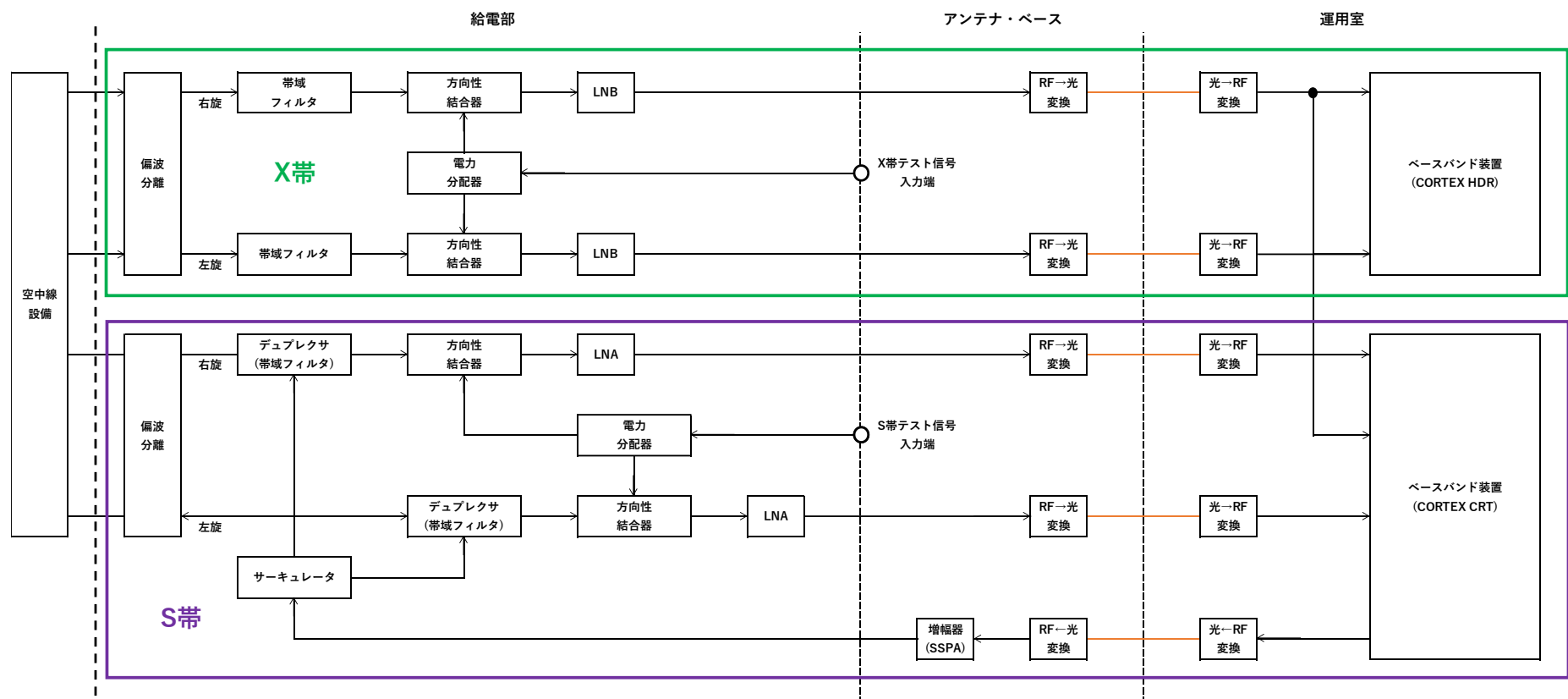


図3-1-7. 口径3.9mアンテナシステムのシステム系統図

表3-1-5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3-1-5. 口径3.9mシステムのS帯およびX帯の基本仕様

S 帯 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 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 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

(5) JAXA相模原キャンパスおよびスウェーデン宇宙公社とのネットワーク接続

SINET6のL2VPNサービスを介してJAXA相模原キャンパスとの専用回線を構築した(図3-1-8)。また、システムのメンテナンスのためにSINET6のIPv4/IPv6 Dualサービスを介してスウェーデン宇宙公社との回線を構築した。これらのネットワーク接続により、エクレウス探査機およびDESTINY+探査機の運用に必要なネットワークの基盤を構築した。

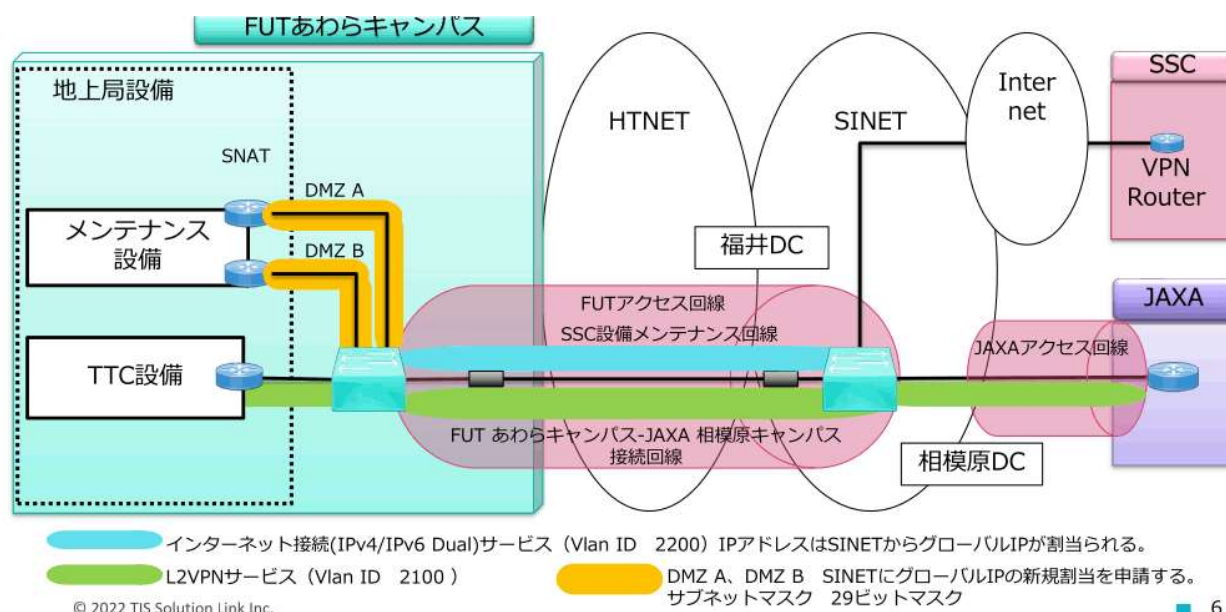


図3-1-8. FUT衛星地上局システムとJAXA相模原キャンパスおよびスウェーデン宇宙公社とのネットワーク接続

(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 3-1-9 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・測定系を導入する。試験・測定系における主要機器の一覧を表 3-1-6 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・測定系を構成する。
- 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 3-1-6. 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 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 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 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 信号発生器、ノイズソース	SMA100B、SMCV100B、 346A	RF 信号系統の動作試験時 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 信号分岐	文科省委託費 R4 年度
RF アッテネータ	8494A、8496A、8494G、 8495G	較正信号のレベル調整	文科省委託費 R4 年度および R5 年度
RF アッテネータ スイッチドライバ	11713D	可変 RF アッテネータ の制御	文科省委託費 R4 年度および R5 年度

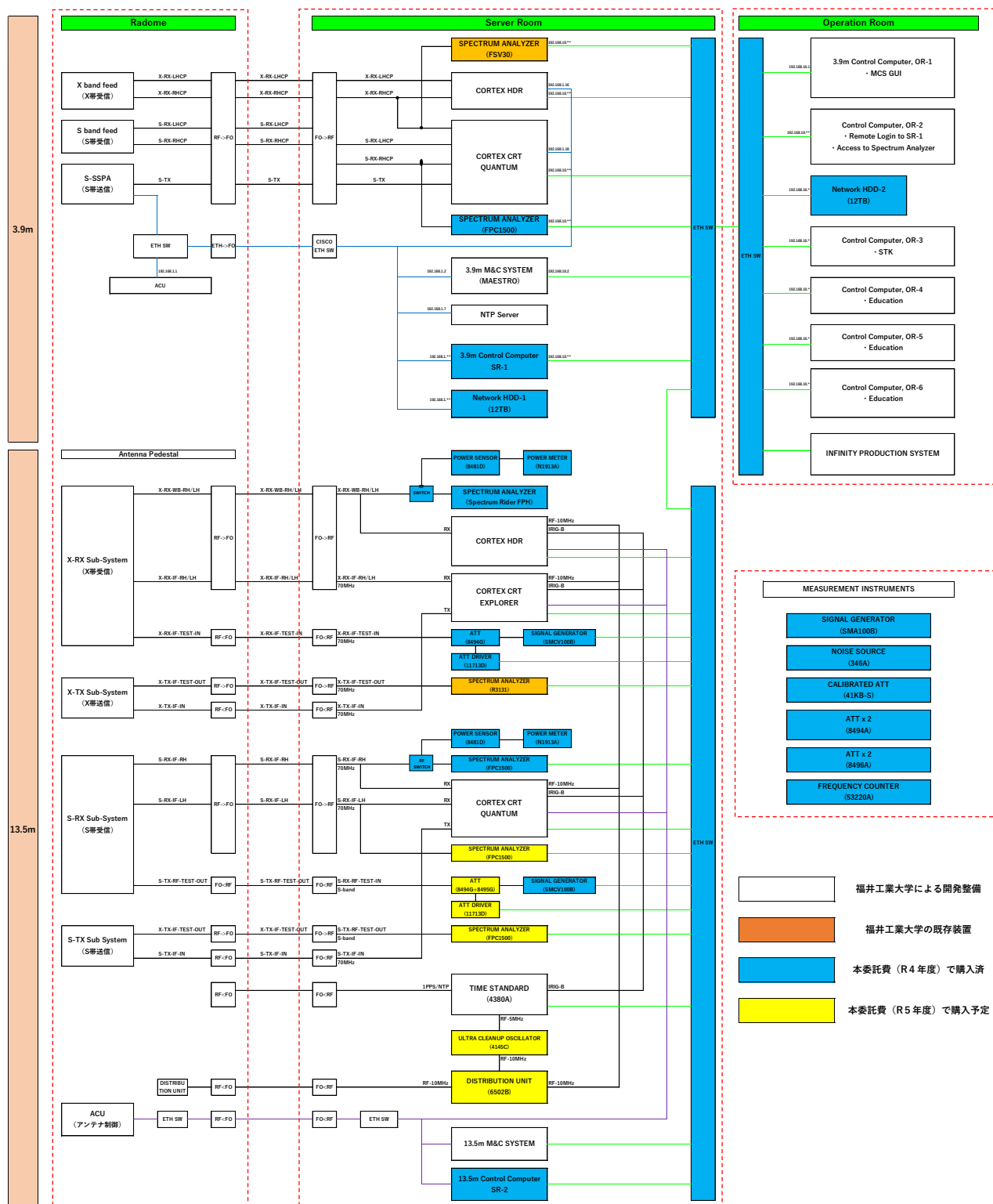


図 3-1-9. システム全体の機器構成。色で示された機器は試験・測定系を構成する機器であり、文科省委託費で R4 年度および R5 年度に購入する。これにより、FUT 衛星地上局全体を監視制御するシステムが完成する。

3－2．研究開発の進捗状況：FUT衛星地上局各システムの開発・評価

3－2－1．口径13.5mアンテナの整備状況

設計に基づきFUT衛星地上局の開発を進めた。現在の進捗状況からアンテナ組立の25%（組立工程の25%）が終了することを目指したが、別途予算で購入予定のアンテナ組立がメーカー側の機器納入の遅延により本年度中にできなくなったため、代替手段として、組立の手順や組立計画の整備等を行い、アンテナ到着後に早急に組立ができる体制を整えた（表3-2-1）。図3-2-1に、R4年度における口径13.5mの整備状況を示す。また、次年度以降のアンテナの性能実証で必要となる測定機器類を購入し準備を進めた。

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エクレス探索機との通信								



図3-2-1. 2023年2月23日時点での口径13.5mアンテナの建設状況。アンテナの基礎工事までが完了している。

3-2-2. 口径13.5mアンテナに関する工場受入試験について

1. 実施内容の概要

口径 13.5m アンテナの各要素の福井工大への出荷を前に、アンテナメーカーのドイツ CPI バーテックス社 (VA) の工場において、工場受入試験 (Factory Acceptance Test; FAT) として基本仕様と各要素の動作、進捗状況の確認が行われた。

本 FAT は、アンテナメーカーである VA 社が、システムインテグレータである三井物産エアロスペース (MBA) /スウェーデン宇宙公社 (SSC) に対してアンテナの基本仕様および各要素の動作状況、進捗状況を説明するために実施され、本学はオブザーバーの立場で出席した。

FAT の目的は以下のとおりである。

- アンテナの基本仕様の確認
- 機械系、駆動系、RF 系の各要素の動作確認および進捗状況の確認

FAT の各試験項目は、各要素のベンダーでの計測をもって VA 社が事前確認した項目と、本 FAT にて確認する項目に大別され、本 FAT では、

- 機械系および駆動系の動作および進捗状況の確認
- RF 系における信号伝送レベルの確認

が行われた。

2. 実施結果の概要と今後の対応

(1) 予定されていた確認項目・試験項目はすべて確認・試験が実施された。

(2) SSC の要求に基づいて VA が今後対応する項目、MBA/SSC が対応を検討する項目が残ったが、MBA/SSC は現段階では大きな問題はないとして日本への出荷を承認した。

(3) 本学としても現段階において大きな問題は見受けられないと判断した。

(4) SSC より、FAT 結果に基づくシステム性能の検討結果を受け取った。

(5) 今後、FAT および検討結果に基づいて要確認事項リストを作成し、8 月の設置における現地受入試験および最終受入試験の項目および手順について、本学と MBA/SSC との間で最終調整を行う。

3. 参加者

- 三井物産エアロスペース (MBA、FUT との直接契約者)
三島豪太, 航空産業第三部 宇宙事業室
- スウェーデン宇宙公社 (SSC、システムインテグレーション担当)
Anders Niemi, Director Ground Systems
Reine Tuoremaa, Director Ground Systems
Kevin O'Brien, Founder of SARL KOBConsult
- CPI バーテックス (VA、アンテナシステム担当)
Markus Kuckelheim, Team Leader Program Management
Karl Steeger, Director of Engineering

Michael Palecki, Director of Operations / integration

Gerbert Lagerweij, Director of Sales / Marketing

Jens Knippschild, Servo Engineering

Md Nahidul Islam, Servo Engineering

Paul Prinz, RF Engineering

Mahaballeshwar Rudramuni, RF Engineering

- 福井工業大学
中城智之, 電気電子工学科・教授
宮本祐介, 電気電子工学科・准教授
皿井宏仁, 客員教授 (3/3 の FAT 報告会にオンラインで参加)

4. FAT の日程

- 2月28日(火)
 - ・ プロジェクトの進捗状況と FAT での確認事項について
 - ・ 機械系システムの構成と FAT の内容
 - ・ 駆動系システムの構成と FAT の内容
 - ・ RF 系システムの構成と FAT の内容
 - ・ アンテナの準備・試験状況の作業現場視察
- 3月1日(水)
 - ・ 機械系および駆動系システムの FAT (機械系、駆動系のテスト、モニター&コントロールシステムの動作確認)
 - ・ RF 系システムの FAT (S 帯信号系のレベルダイアグラム確認)
- 3月2日(木)
 - ・ 機械系および駆動系システムの FAT (モニター&コントロールシステムの動作確認)
 - ・ RF 系システムの FAT (X 帯信号系のレベルダイアグラム確認)
- 3月3日(金)

現地とオンラインのハイブリッドによる FAT 報告会の実施。内容は以下の通り。

 - ・ FAT 試験結果の整理 (close と open の項目の整理)
 - ・ アンテナシステム全体に関する質疑応答
 - ・ FAT 試験結果に対する MBA/SSC の承認作業

5. FAT 関連レポート

番号	作成者	ファイル名／文書名	内容
1	VA	_13,5m Japan FM S-X-Band FAT results -set 4-after FAT	各要素のベンダーでの計測をもって VA 社が事前確認した項目と、本 FAT にて確認した項目のテストレポート
2	VA	FAT MoM AI -21621042 -2023-03-02 - V2_.xlsx	本 FAT 終了時点で open になっている事項を整理したファイル
3	SSC	SSC FUT System Summary Description DRAFT 0.5.docx	システム性能の要約。S 帯および X 帯の G/T、EIRP がシステムとして要求を満たす事の検討

6. FAT の様子 (写真)



図 3-2-2. VA 社の建屋入り口と口径 13.5m アンテナのタワー



図 3-2-3. 工場内のフィード部（中央の円筒）とアクセスハブ（右の直方体）



図 3-2-4. RF 系の試験系統の説明 (2/28)



図 3-2-5. 給電部内の機器配置の様子



図 3-2-6. アクセスハブ内の様子 (2/28)



図 3-2-7. RF 系およびモニター&コントロールシステムの試験の風景 (3/1)

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

(1) 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。

■卒業研究および大学院研究における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を行う）

- 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ている。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進めている。小型アンテナは指向性が広いため探査機が存在確認に役立つ。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。現在まで、エクレウス探査機は地球からの最大距離68万kmまで達したが、口径3.9mアンテナシステムで電波の受信に成功している。今後は周波数計測の精度向上を図り、定量的な評価を行う。

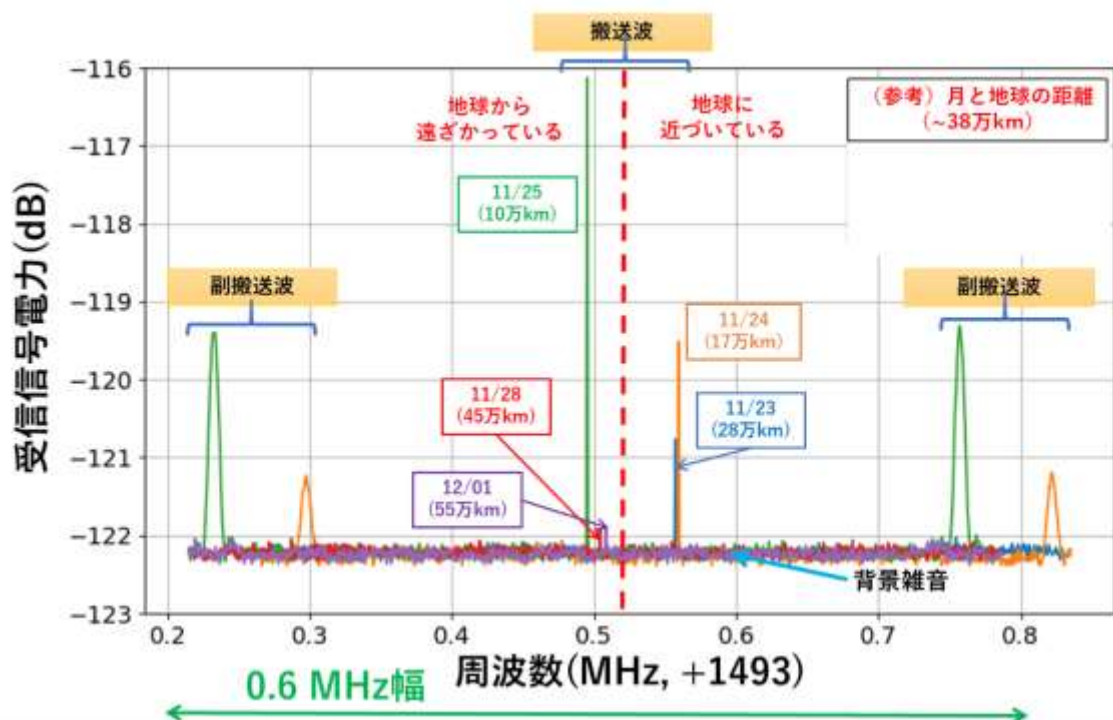


図3-3-1. 2022年11月23日から2022年12月1日において口径3.9mアンテナシステムで受信したエクレウス探査機の電波のスペクトルとその時間変化。

■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を行う）

- 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：福井県若狭湾では、リアス式海岸のために波が穏やかな環境を活かして古くから漁業や養殖業が盛んな地域であるが、しばしば赤潮により大きな被害が発生している。本研究は、若狭湾における赤潮の発生を予測し赤潮による被害を回避・軽減するため、地球観測衛星のデータを用いて若狭湾の赤潮の発生条件を明らかにすることを目的としている。若狭湾のモニタリングのため、LANDSATおよびSENTINELの公開データに加えて、口径2.4mおよび3.9mアンテナシステムで受信した地球観測衛星TERRA、AQUA、SuomiNPPのデータを用いる。これらの地球観測衛星は若狭湾全体を毎日撮像しており本研究で必要とするモニタリングに適している。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。

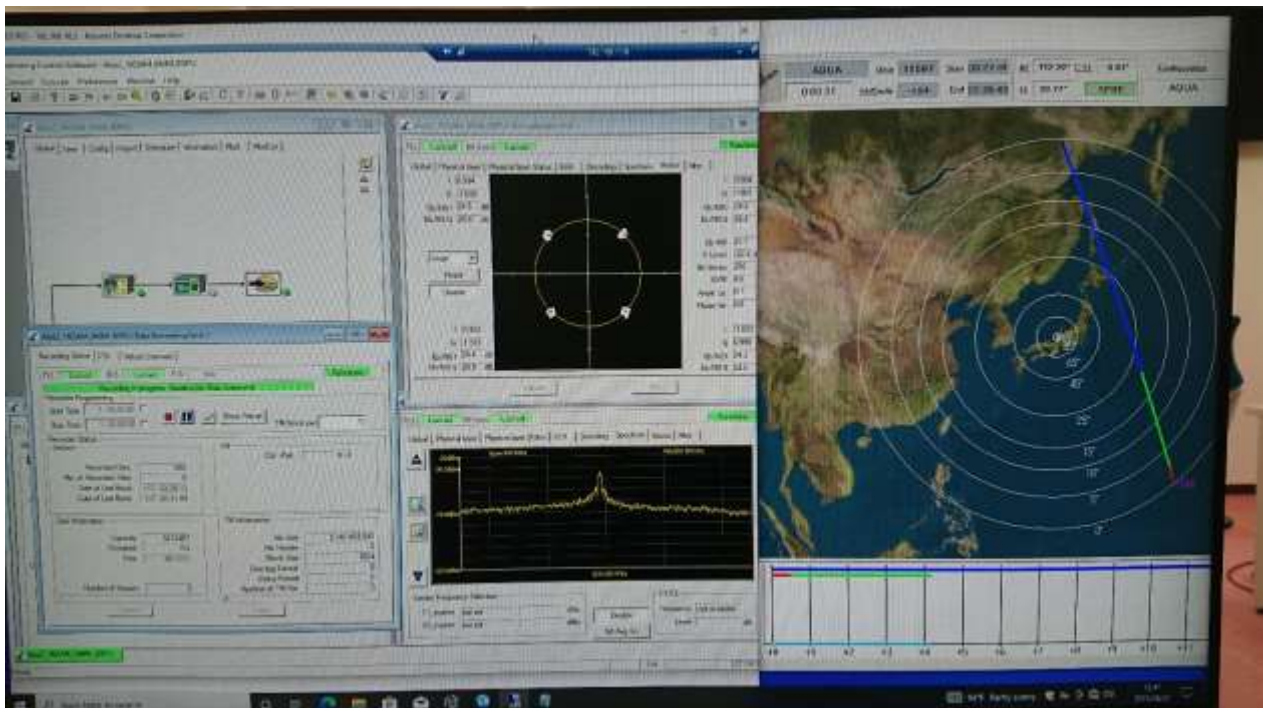


図3-3-2. 口径3.9mアンテナシステムにおけるAQUA衛星のデータ受信の様子。ベースバンド装置の設定や取得データの画像処理を通して衛星システムについての知識も修得する。

(2) 福井工業大学の主催により、本事業の紹介を通した宇宙の探査に関する本学学生の教育および一般への普及を目的とした講演会（福井工業大学公開講座、2022年10月22日実施、主催：福井工業大学）を実施した。図3-3-3に公開講座のフライヤを示す。



図3-3-3. 実施した公開講座のフライヤの表面（上）と裏面（下）

なお、公開講座の実施状況については以下のURLに公開している。

https://www.fukui-ut.ac.jp/news/education/report_s2/entry-8743.html

3-3-2. 宇宙研究推進本部における人材育成

(1) 本事業の紹介を通じた宇宙の探査に関する一般への普及を目的として講演会（日本海イノベーション会議、主催：福井工業大学および北國新聞社）を2023年2月26日に実施した。図3-3-4に、北國新聞に掲載された記事を示す。

2022年度 福井工業大学プログラム 日本海イノベーション会議

テーマ 福井工業大学 宇宙への挑戦

日本海イノベーション会議の福井工大プログラム「福井工業大学：宇宙への挑戦」は2月26日、金沢市の北國新聞20階ホールで開催された。宇宙航空研究開発機構（JAXA）の深井宏理事補佐と、同大が推進する宇宙関連事業「ふくいPHOENIXハイパープロジェクト」のメンバーが、宇宙技術開発や宇宙科学の現在と未来、大学が担う役割について解説した。

主催：福井工業大学、北國新聞社 協賛：北國新聞社、福井県

世界最小の月探査機を追跡
宇宙探査機「かぐやか」が月面に降下した。福井工業大学の深井宏理事補佐が、この探査機の追跡の様子を解説した。

宇宙通信地上局の取り組み
福井工業大学の宇宙通信地上局は、宇宙探査機の追跡やデータを受信するための取り組みを行っている。

当日は多くの質問をいただき感謝申し上げます。質問への回答は、福井工業大学「ふくいPHOENIXハイパープロジェクト」のウェブページ（下記URL参照）内に掲載しています。
<https://www.fukui-ut.ac.jp/phoenixhyper/>

電波望遠鏡で宇宙の謎に迫る

電波で見える宇宙の姿
電波望遠鏡は、宇宙のさまざまな現象を観測するための重要なツールである。福井工業大学の宇宙研究の幅を広げる新地上局は、電波望遠鏡の活用を推進している。

電波望遠鏡は、宇宙のさまざまな現象を観測するための重要なツールである。福井工業大学の宇宙研究の幅を広げる新地上局は、電波望遠鏡の活用を推進している。

宇宙科学の未来を学ぶ

JAXA宇宙科学の目指す
飛躍と福井工業大学への期待
深井 宏氏（JAXA理事補佐）が、宇宙科学の未来について語った。

太陽系の進化史を焼き直す

太陽系の進化史を焼き直す。福井工業大学の宇宙研究の幅を広げる新地上局は、太陽系の進化史を研究するための取り組みを行っている。

宇宙研究の幅広げる新地上局

宇宙研究の幅を広げる新地上局。福井工業大学の宇宙研究の幅を広げる新地上局は、宇宙研究の幅を広げるための取り組みを行っている。

宇宙が身近なものになる時代に向けて
中城 智之氏（JAXA理事補佐）が、宇宙が身近なものになる時代に向けて語った。

図3-3-4. 北國新聞に掲載された日本海イノベーション会議講演会の記事

本講演会の詳細について以下のURLに公開している。

<https://www.fukui-ut.ac.jp/news/education/fphp/entry-9051.html>

また、会場の参加者から寄せられた質問への回答を以下のURLに公開している。

<https://www.fukui-ut.ac.jp/news/education/fphp/entry-9106.html>

(2) 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

実施日時：2023 年 3 月 25 日（土）14 時～16 時

場所：あわらキャンパス

参加者：中学生 10 名（芦原中学校、金津中学校）、教諭 1 名（芦原中学校）の計 11 名

2. 実施スケジュール

内容	開始	終了	行動	場所
参加者案内	14:00		参加者があわらキャンパスに到着	2 号館前
		14:05	参加者を運用室に案内	運用室
衛星データ受信体験	14:07	14:20	3.9m アンテナによる NPP 衛星のデータ受信体験	運用室
ミニ講義	14:20	14:40	衛星地上局の説明	運用室
設備見学	14:40	14:50	運用室／サーバ室の説明	運用室／サーバ室
	14:50	15:00	3.9m アンテナへ移動	3.9m レドーム
	15:00	15:20	3.9m アンテナ見学	3.9m レドーム
	15:20	15:25	13.5m アンテナに移動	
	15:25	15:35	13.5m 建設現場見学	13.5m サイト
アンケート記入	14:35	15:45	204 室に移動	
	15:45	15:55	アンケートへの回答	204 室
終了	15:55	16:00	終わりのあいさつ	204 室
帰り	16:00	16:10	バスに移動	2 号館前
	16:10		バス出発	

2. アンケート結果

【設問への回答】

設問	回答
今日の体験は全体的に楽しかったですか。一つ選んで○で囲ってください。	はい：10 名、どちらでもない：0 名、いいえ：0 名
ミニ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：9 名、どちらでもない：1 名(芦原 2 年)、いいえ：0 名
楽しかった体験を○で囲ってください（複数回答可）	人工衛星の追跡：4 名、ミニ講義：4 名、設備見学：8 名
設備見学で楽しかった体験を○で囲ってください（複数回答可）。その他があればご記入ください。	運用室：2 名、3.9m アンテナ：10 名、13.5m アンテナ（建設現場）：4 名、その他：なし
宇宙に関して興味がわきましたか	はい：10 名、どちらでもない：0 名、いいえ：0 名
あわらキャンパスの公開イベントにまた参加したいですか	はい：8 名、どちらでもない：2 名、いいえ：0 名

【自由記述】

- アンテナが電波などに関係していることは知っていたけど、思っている以上に深くかかわっていて驚きました。人工えい星やアンテナがこわれたらどうなるのか知りたいです！
- 宇宙に無関心な自分でも、内容が分かりやすく、考えやすかったです。3. 9 mアンテナの上にあるランプ(?) はなんですか？
- 設備見学でアンテナの中に実際に入れて楽しかった。
- この講義などで、とても宇宙に興味を持ちました。楽しかったです。
- アンテナが小さいのしか知らなかったのも、とても大きくてびっくりしました。衛星では受信することが大事だということが知れたので、家に帰って家族に教えてあげようと思います。今日は有難うございました。
- 宇宙についてあまり知らなかったのでもいいきかいでした。わかったものかわからないものがあるってむずかしいところもあったけどたのしかったです。未来のことが少しでも知れて月のことでもはやくどのようになっていくのか知りたいです。
- 様々な光を集めているとおっしゃっていましたが、その光を集めると他にどのようなことが分かるのでしょうか。インターネットで耳にした話ですが、宇宙のはじで起こっているビッグバンが光として見れるということを知りました。この他にも、星の誕生などを見れるのでしょうか。
- 私は将来的にロケットや人工衛星を作る仕事に就きたいと思っていましたが、衛星との通信で宇宙研究に関わることも良いと感じました。
- 質問：月への長期滞在について、月は地球の重力の約 $1/6$ の重力がはたらいていて、滞在によって筋肉量が減少すると思うのですが、もし、これが月面での生活（健康）への被害とするのならば、どのように対策するべきだとお考えですか。
- 人工衛星の大きさにもいろいろあって、パラボラアンテナがなんでおわん形なのかも、丁寧に教えてくださって、分かりやすかったです。そして、まだ世界で行われていないことを福井が積極的にし、これからの宇宙、生活を支えていくことはすごいと思いました。

3. その他

本一般公開の詳細について以下の URL に公開している。

<https://www.fukui-ut.ac.jp/news/education/fphp/entry-9103.html>

4. R4 年度実施内容のまとめと R5 年度の展望

1. R4 年度において、当初の計画通り以下の内容を実施し、概ね十分な成果を得ることができた。

(1) FUT 衛星地上局システムの特徴について以下の 3 つの観点から整理を行った。

- ・ 直径の異なる4台のアンテナのミッションと教育内容について
- ・ 世界の月探査計画の現状を基にした口径13.5mアンテナシステムの位置付け・技術の優位性および独創性
- ・ 市場への展開に関する検討内容

(2) FUT 衛星地上局システムに関する検討会および打ち合わせを実施し、システム開発の方針・仕様を明確にし、システムの設計を行った。

(3) システムの開発に着手し、

A) アンテナメーカーでの工場受入試験を実施し、以下を確認した。

- アンテナの基本仕様の確認
- 機械系、駆動系、RF 系の各要素の動作確認および進捗状況の確認
- 機械系および駆動系の動作および進捗状況の確認
- RF 系における信号伝送レベルの確認

B) アンテナ基礎の完成までを実施した。当初の予定ではアンテナ組み立て工程の 25%まで実施の予定であったが進捗が遅れた。これに対して組立の手順や組立計画の整備等を行い、アンテナ到着後に早急に組立ができる体制を整えた。

C) 次年度以降のアンテナの性能実証で必要となる測定機器類を購入し準備を進めた。これにより、次年度に試験・測定系を構成することができ、FUT 衛星地上局全体を監視制御するシステムが完成できる。

(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) 福井工業大学公開講座、日本海イノベーション会議講演会、FUT 衛星地上局の一般公開による一般への普及

2. R5 年度の展望

(1) 5 月から予定通りに口径 13.5m アンテナの組み立てが始まった（図 4-1）。現時点で順調に進行しており、8 月に完成予定である。

(2) 現在、8 月の設置における現地受入試験および最終受入試験の項目および手順について詳細の検討を行っている。

(3) 8 月の完成後、直ちにエクレウス探査機との通信実験に取り組む予定である。

(4) 同時に、口径 13.5m アンテナシステムの性能について、電波天文観測的手法による確認の準備を進める。

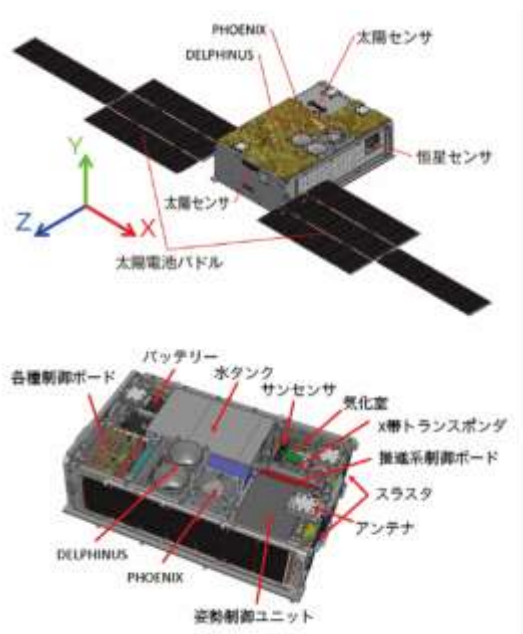


図 4-1 5 月 3 日に予定通り始まったアンテナ組み立て作業の様子

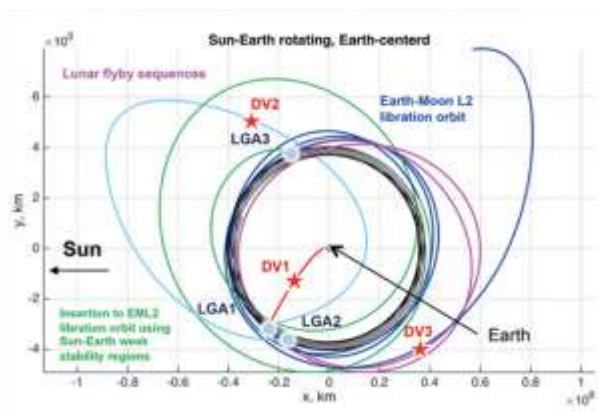
付録 A：エクレウス探査機の運用に関するミッション要求および成功基準

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 3.3×10^{-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。



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 サクセス	月距離 38 万kmまでにおける通信リンクの確立 ・テレメトリ受信 ・コマンド送信
フル サクセス	(1)軌道情報の取得 ・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） ・口径 3.9m による追尾 ・口径 13.5m による追尾
	(3)運用 ・所要の運用の実施
エクストラ サクセス	・口径 3.9m と口径 13.5m の連携 ・月距離以遠において、フルサクセスの項目を実施する