

スターダストプログラム 「衛星用の通信フルデジタル化技術開発」 成果報告

令和6(2024)年6月28日

宇宙航空研究開発機構

技術試験衛星9号機プロジェクトチーム プロジェクトマネージャ 深津 敦

これまでの経緯と本日のご報告事項

これまでの経緯

- 第1回衛星開発・実証小委員会(令和3年2月2日)において、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)のプロジェクトとして「衛星用の通信フルデジタル化技術開発」が採択され、フルデジタル通信ペイロード(FDP)の開発を開始した。
- 第61回宇宙開発利用部会(令和3年6月28日)において、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)のプロジェクトとして「衛星用の通信フルデジタル化技術開発」が採択され、開発を進めていることが報告された。

ご報告事項

- 令和5年度(2023年度)末までに、フルデジタル通信ペイロード(FDP)の地上での開発・実証を完了したため、その成果を報告する。

1.フルデジタル通信パイロード開発の背景・目的

■ 海外における通信衛星の開発動向と対応の必要性

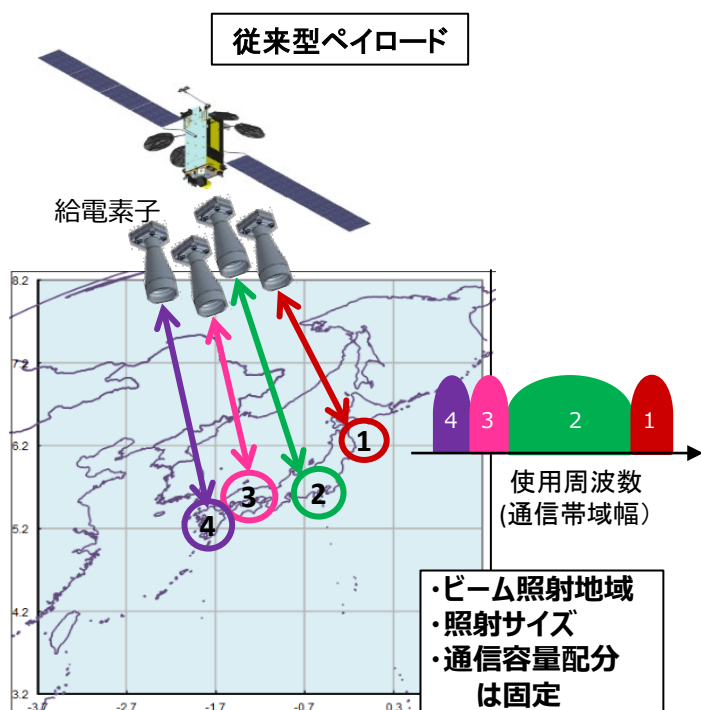
- 2019年以降、欧米の衛星メーカーから通信周波数や通信領域をフレキシブルに変更でき高速/大容量通信も可能な通信衛星の発表が相次ぎ、**通信衛星のフルデジタル化・大容量化が急速に進展。**
- 我が国の通信衛星の国際競争力確保のため、市場競争力の指標とされている\$1M/Gbpsの実現にむけて200Gbpsの通信容量を有し、通信速度当たりの価格で競争力を有するとともに通信サービスのフレキシビリティを備えた次世代静止通信衛星を早期に実現することが必要。
- 早期の軌道上実証が望まれることから、**ETS-9※に搭載することで上記の実現を可能とするフルデジタルパイロードの開発・実証を実施する。**

※ETS-9は次世代静止通信衛星に必要となるバス技術とミッション技術を実証し、宇宙産業や科学技術基盤の維持・強化を図ることを目的としている(第34回宇宙開発利用部会(2017年5月9日))

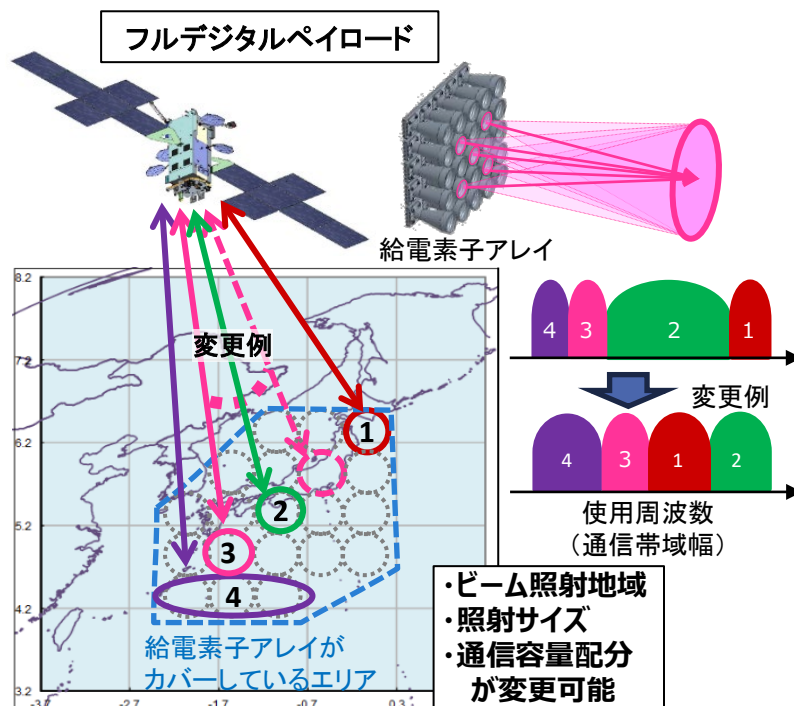
1.フルデジタル通信ペイロード開発の背景・目的

■ フルデジタルペイロード技術

- フルデジタルペイロードでは、デジタル化により、**ビーム照射地域の変更(デジタルビームフォーミング機能)**や**通信容量配分(周波数帯域幅)の変更(デジタルチャネライジング機能)**等の柔軟な機能変更が可能となるため、従来ペイロードではできなかった打ち上げ後の**通信需要の変化に対応することが可能**となる。
- フルデジタルペイロード技術は、打ち上げ後の柔軟な機能変更・ミッションの一部変更等が可能となるほか、信号処理のデジタル化により、**機能を拡張しつつも大型化をさせないことが可能**となる。



・それぞれのビーム用の給電素子が必要であり、打ち上げ後の変更ができない。



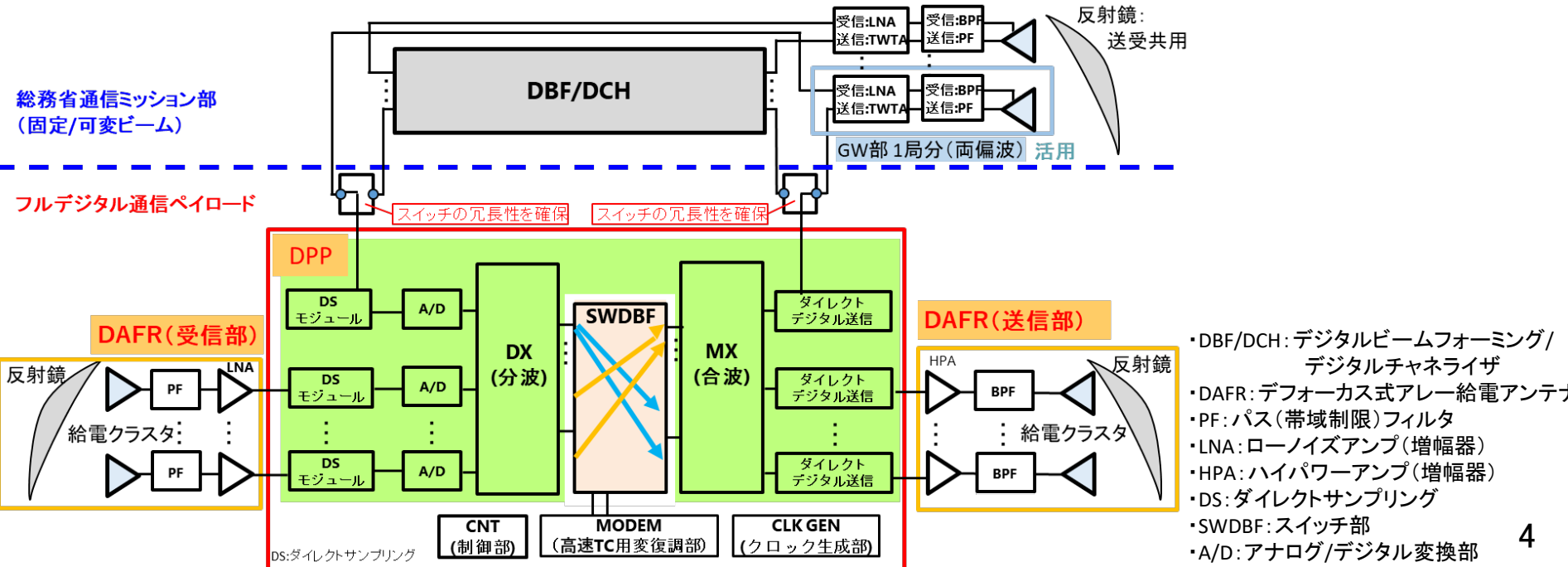
- ・複数の給電素子からの電波の合成により1つのビームを作る。
- ・給電素子アレイがカバーしているエリア内では自在にビームの形成が可能となる。

2. フルデジタル通信ペイロードの開発方針

- 次世代静止通信衛星で通信容量200Gbpsの実現に向けた実証が可能となる**最小構成にダウンスケール**して、効率的にETS-9で技術実証する方針とした。
 - キーとなる**機能及び処理帯域は次世代静止通信衛星と同一仕様**
 - 次世代静止通信衛星での大容量化を想定して、**データ処理プロセッサとしてCOTS品を採用**
 - ゲートウェイ(GW)ビーム用の送受信部は**固定ビーム/可変ビームを活用**

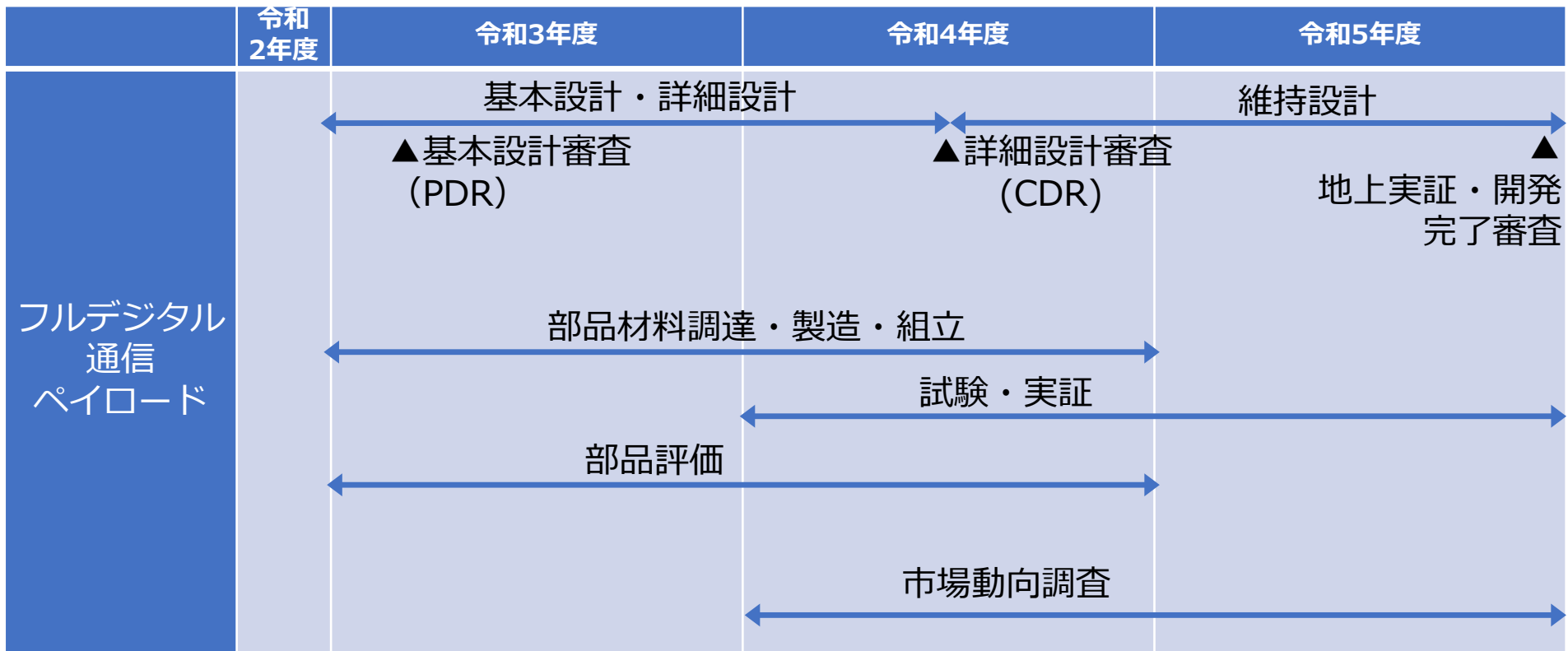
■ フルデジタル通信ペイロードの構成

- デジタル信号処理部(DPP)は、チャネライザ機能を持つ分波合波部(DX/MX)、ビームフォーミング機能を持つスイッチ部(SWDBF)、これらの制御を行う制御部(CNT)、高速テレメトリコマンド(TTC)部(MODEM)およびクロック生成部(CLK GEN)によって構成される。
- デフォーカス式アレー給電反射鏡アンテナ(DAFR)は、フィルタ、受信部(LNA)/送信部(HPA)及び給電素子によって構成される。



3. 開発スケジュール(実績)

- 本開発のスケジュール(実績)を以下に示す。文部科学省殿よりJAXAが受託して計画立案・管理等を行い、三菱電機(株)がフルデジタル通信パイロードの設計・製造及び地上での試験、実証を請負うことで本開発を実施した。

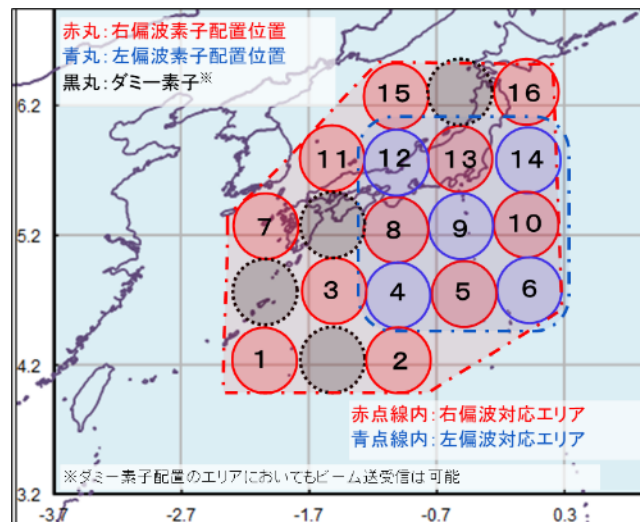
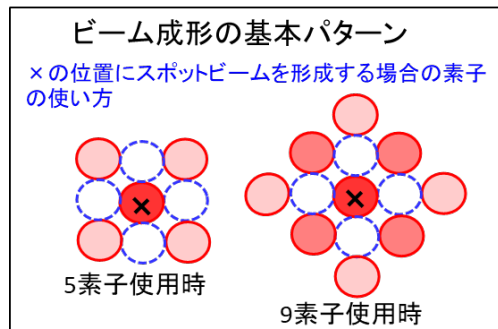


4. 開発結果

● DAFR(送信部・受信部)

➤ 送受信に用いる給電素子数を実証に必要な最小限かつ運用性を考慮して下図のと通りの設計とした。

➤ 給電素子からの電波の合成により1つのビームを形成させており、給電素子が配置された領域の範囲内であればデジタルビームフォーミング機能によって任意の場所にビームを形成することが可能となる。

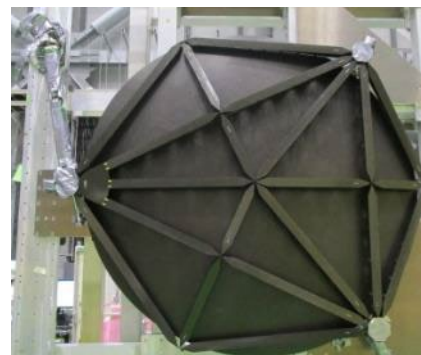


送受信用の素子配置と送受信可能エリア

➤ DAFRIは、反射鏡、給電素子をアレー化した給電クラスタ(円偏波発生器含む)、信号を増幅するLNA(受信)／HPA(送信)が主要な構成要素となっている。



製作した給電クラスタ(左図:上面, 右図:側面)

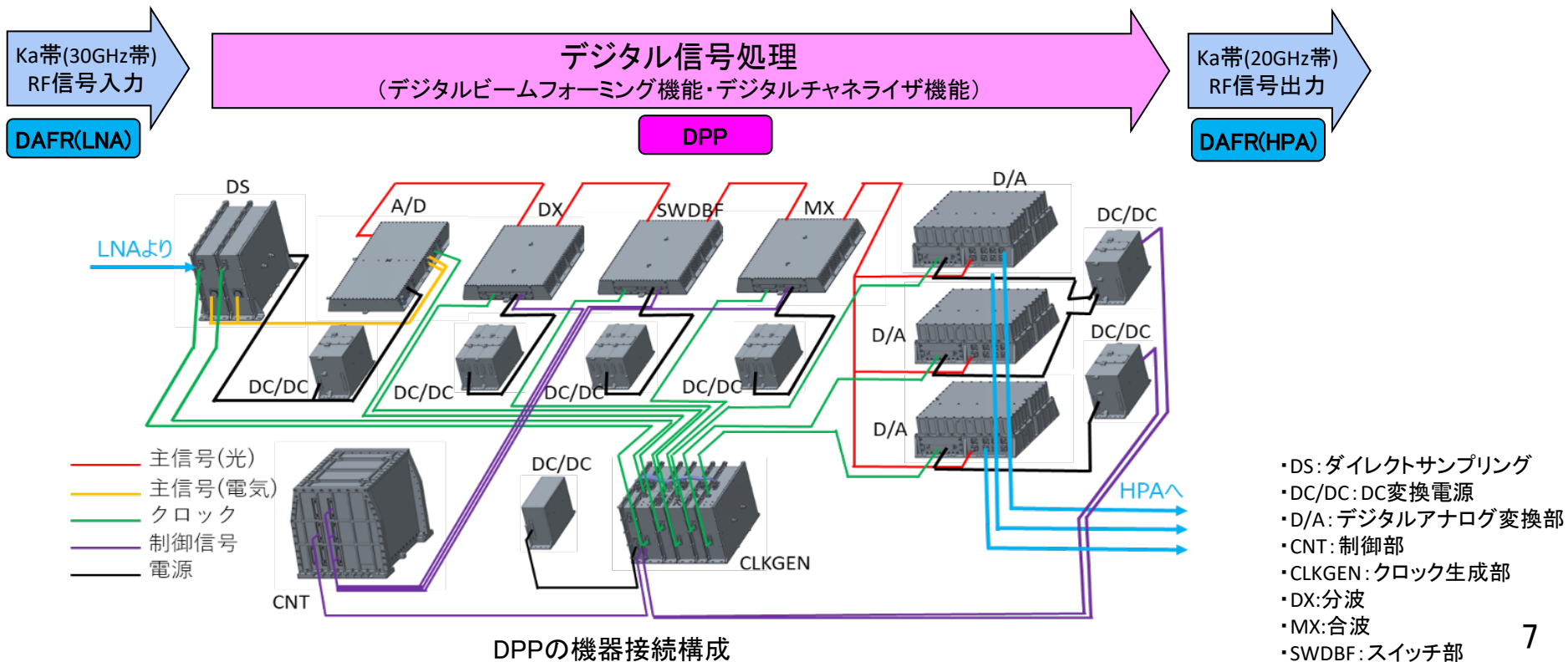


製作した反射鏡

4. 開発結果

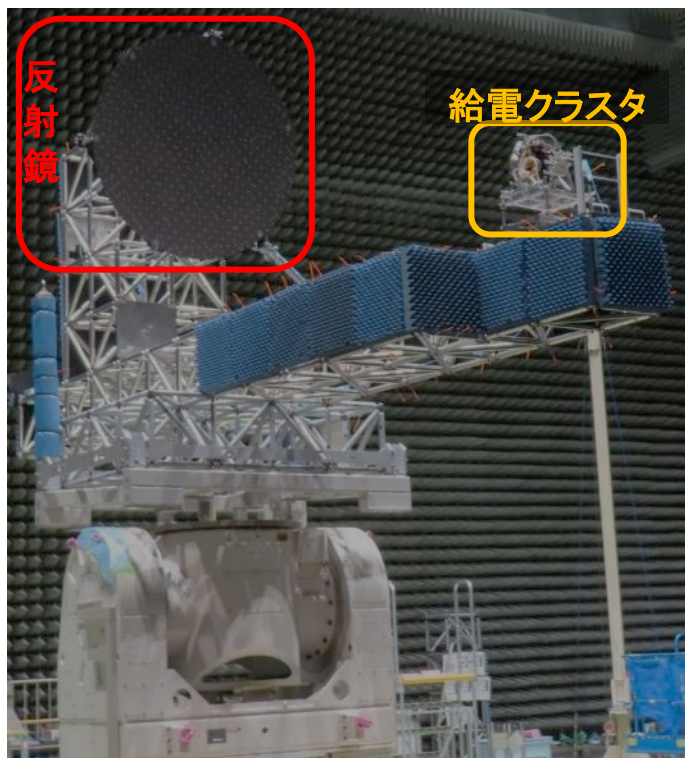
● DPP(信号処理部)

- DPPは、受信のDAFR(LNA)で受信したKa帯(30GHz帯)のRF信号をベースバンド信号に変換し、デジタル信号処理を行いデジタルビームフォーミング機能やデジタルチャネライザ機能を実現し、送信するKa帯(20GHz帯)のRF信号を送信のDAFR(HPA)に出力する構成とした。
- デジタルビームフォーミング・デジタルチャネライザ機能の実現に必要なメインの信号処理は、DX, SWDBF, MXにて実現しているが、ハードウェアとしては同一の設計となっており、搭載するFPGAに付加する機能を変えることによりそれぞれの機能を実現させている。
また、この演算に用いているFPGAについては、ETS-9が軌道上に行った後においてもロジックの書き換えが可能となるような設計としている。

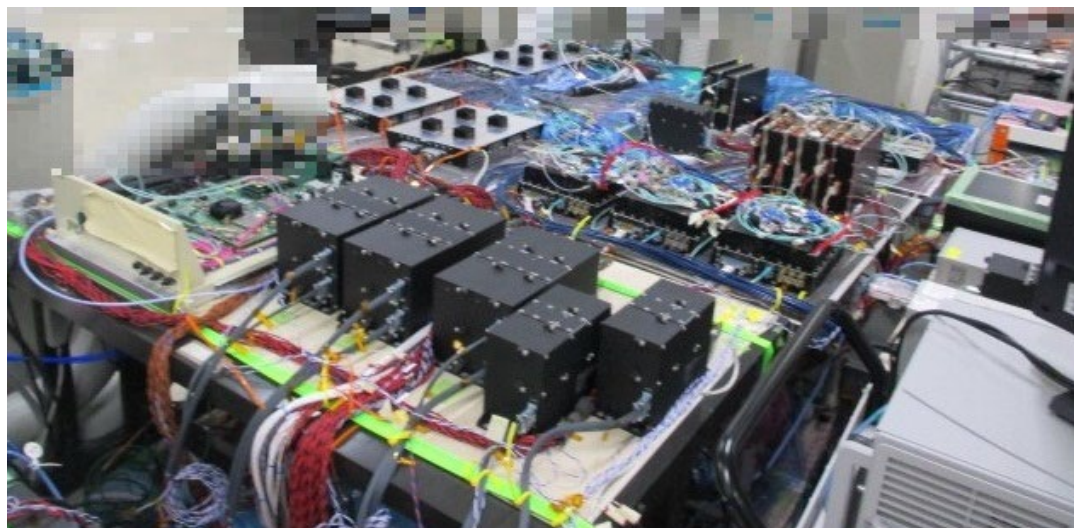


4. 開発結果

- DAFRの試験実施状況及びDPPの試験準備時の状況を以下に示す。
- それぞれの試験にてフルデジタル通信ペイロードの機能・性能を確認した。
- これにより、通信のフレキシビリティを有するとともに200Gbpsの通信容量を有する次世代静止通信衛星を衛星システムメーカーが商用展開していくために必要な、通信ペイロード技術についての実証を完了した。



DAFR試験の準備状況



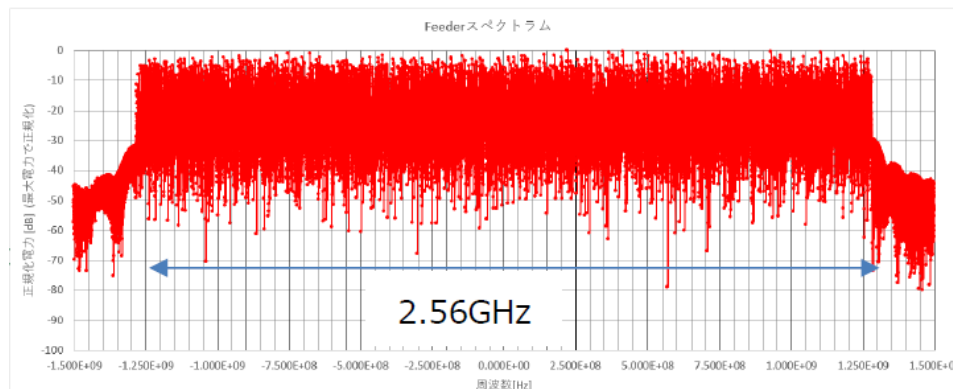
DPP試験の準備状況

4. 開発結果

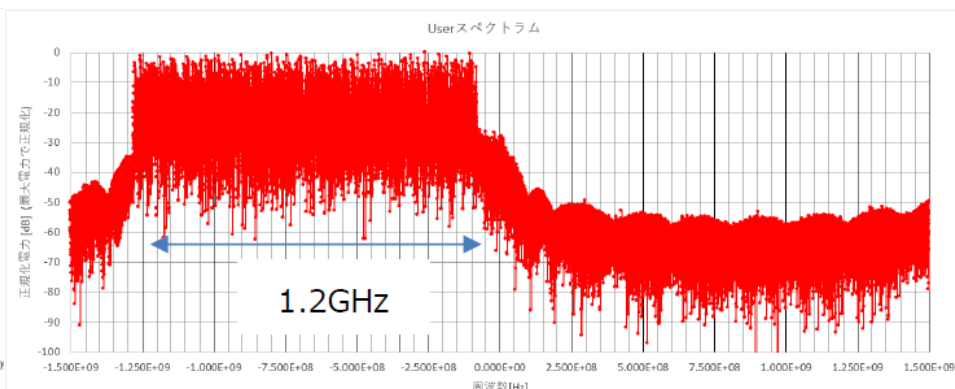
主要機能である「デジタルチャネライザ機能」「デジタルビームフォーミング機能」について、以下の方法にて開発結果の妥当性を確認した。

▶ 「デジタルチャネライザ機能」

要求機能	動作内容	確認方法	結果
デジタルチャネライザ機能	DPP部: DXにて、入力信号を分波し、MXにて分波された信号を合波して、所望の周波数帯域幅の信号を生成する。	DX/MXを用いて、DXに信号を入力し、出力信号が分波されていること、および、DXにて分波された信号をMXに入力し、出力信号が合波されていることを確認する。	フィーダリンクが2.56GHz、ユーザビームが1.2GHzの場合において分波・合波が正常に動作することを確認した。
	DPP部: チャネライザ設定に合わせて分波した信号の経路選択(スイッチ機能)を行う。	SWDBFに信号を入力し、任意にスイッチ切り替えを行い、所望の出力となる事を確認する。	SWDBFにて使用可能性のある全てのスイッチパターンについて正常動作を確認した。



2.56[GHz]信号の出力波形

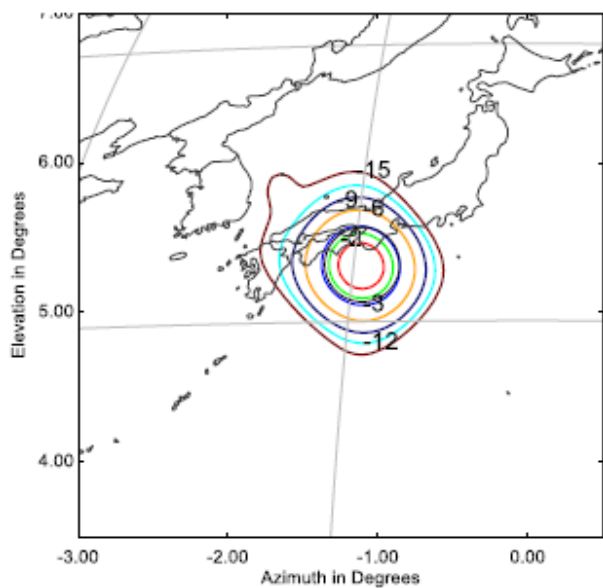


1.2[GHz]信号の出力波形

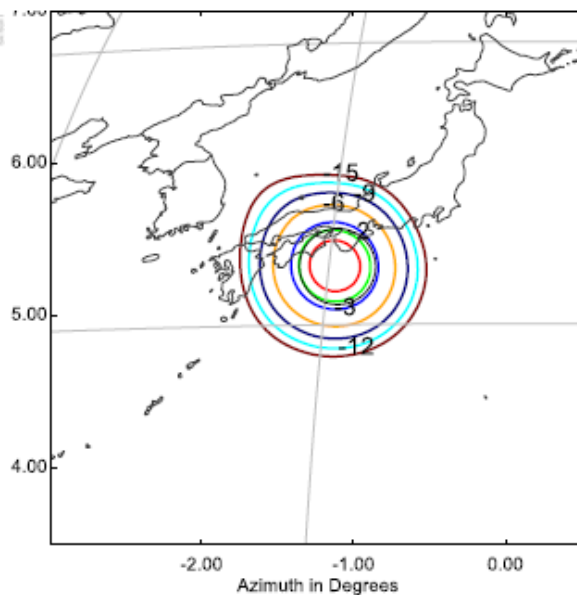
4. 開発結果

▶ 「デジタルビームフォーミング機能」

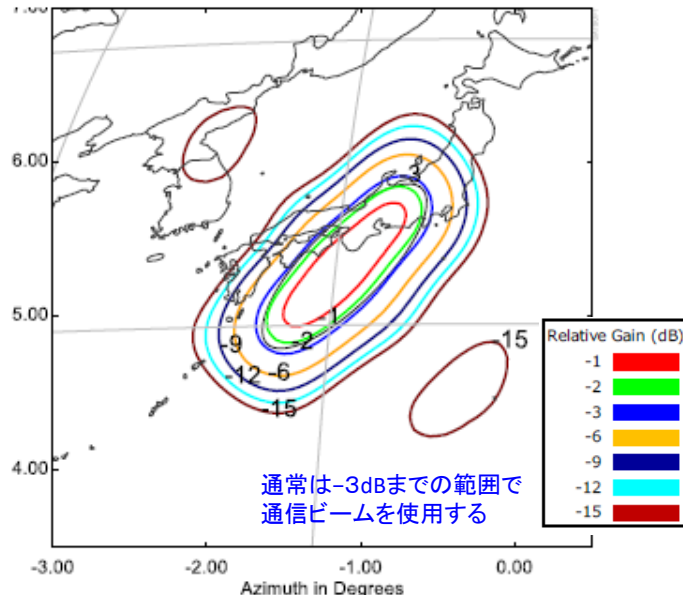
要求機能	動作内容	確認方法	結果
デジタルビームフォーミング機能	DPP部: ビームフォーミングの設定に合わせて、分波された信号毎に励振係数の設定を行う。	SWDBFに入力された各信号に対して、任意の励振係数を設定できることを確認する。	SWDBFの各出力に所望の精度で励振係数が設定できることを確認した。
	DAFR部: 給電クラスタにて、電波の送信・受信を行い、信号増幅部にて適切に信号を増幅する。	電波暗室試験にて、給電クラスタのアンテナパターンを計測する。	設計結果に適合するアンテナパターンとなっていることを確認した。



8の位置のRHCPビーム(5素子1ビーム)



8の位置のRHCPビーム(9素子1ビーム)

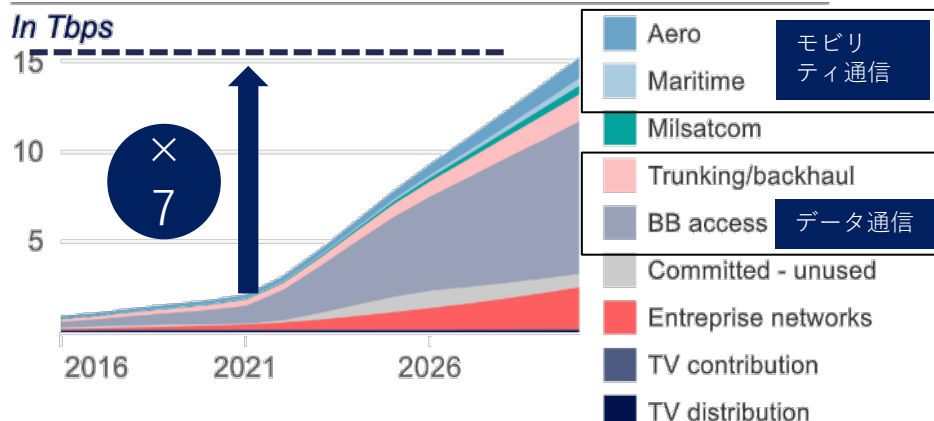


任意形状ビーム(9素子使用)

5. 市場動向の調査結果

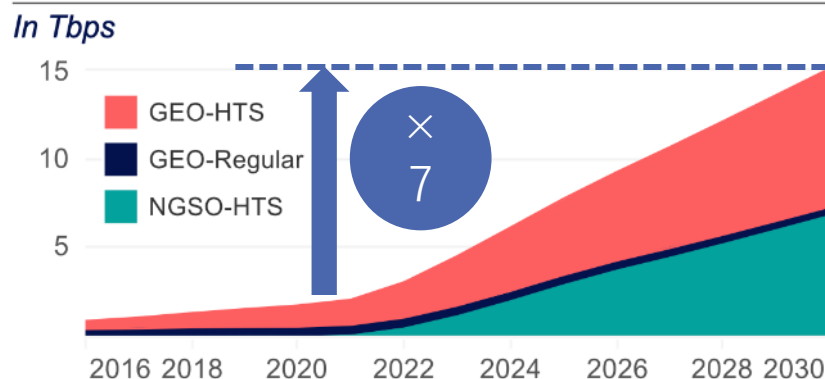
- 商用通信衛星市場は日進月歩であることをふまえて動向調査を実施した。
- 世界的なデータトラフィックの増大を背景に、通信衛星のキャパシティ需要は、2020年～2030年にかけて、7倍以上の需要が見込まれる。
特に、データ通信が成長市場となる。また、地上通信網がアクセスできない航空機、船舶向けモビリティ通信市場が拡大する見込み。(ユーロコンサル社調査による)

Satellite capacity demand by application



出展：Euroconsult research and estimates, 2021レポート

Satellite capacity demand by type of capacity



出展：Euroconsult research and estimates, 2021レポート

衛星通信キャパシティの市場動向予測

- 従来型放送サービスから、多様なデータ通信サービスへと変化する市場に対応するためには、ペイロード効率増大とフレキシビリティ技術がますます重要になっている。

5. 市場動向の調査結果

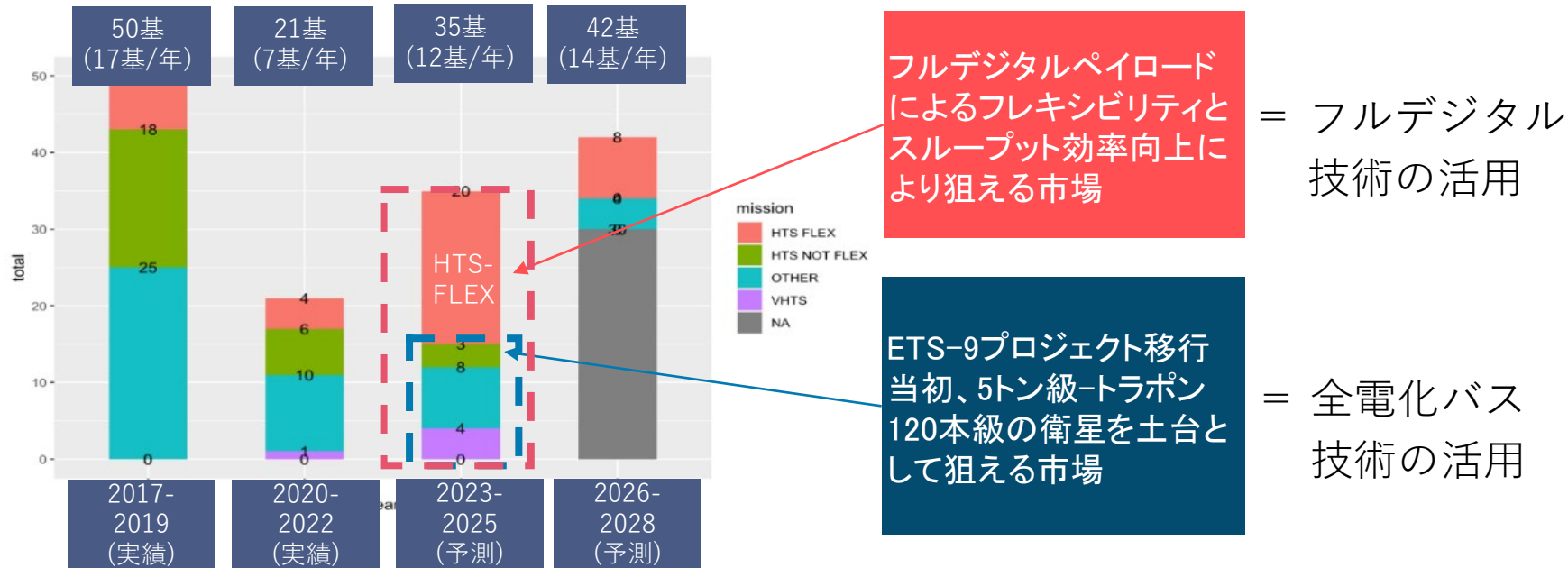
静止通信衛星の市場動向

- FDP開発を決定した2020年当時、LEOコンステレーションによる通信インフラの開発計画が立ち上がったことや、フルデジタル静止通信衛星が相次いで発表された直後であった。
- LEOコンステレーションは、当時ほとんどがサービスを開始していなかったが、同時期に静止通信衛星の需要が低下したこともあり通信衛星市場を席卷するのではとの予想もあった。
- 2024年現在、Starlink(打上げ5000機以上)が全球サービスを実施しており、OneWeb(打上げ600機以上)も2024年には同様のサービスを開始予定など実態が伴ってきている。
- 一方で、オペレータの動向としては、静止通信衛星とLEOコンステレーションをバランス良く統合したサービス体制の構築を指向する動きが盛んになってきている。

5. 市場動向の調査結果

- 年12基程度の母数に対して、次世代静止通信衛星では、200Gbpsの通信容量の実現に加え、フルデジタル化によるスループット効率の向上や、全電化衛星によるペイロード搭載率向上の利点を生かして、顧客の多様なニーズに対応可能である。
- また、ビット単価の\$1M/Gbpsについては近年の世界情勢の変動や物価の高騰などもあり海外の衛星メーカーでは達成出来ていない模様であるが、コスト競争力の指標となることに変わりはなく次世代静止通信衛星の商用展開においても引き続き達成を目指すことが重要であることを確認した。
- 次世代静止通信衛星では、フルデジタル化によるスループット効率の向上や、全電化衛星によるペイロード搭載率向上の利点を生かして、顧客の多様なニーズに対応可能であることから、世界の通信衛星市場に向けた意義価値は維持されていると評価している。

静止通信衛星の打上げ計画動向



静止通信衛星の打上げ計画動向予測とETS-9技術開発の対応

6. プロジェクト評価結果の留意事項への対応

- 第28回衛星開発・実証小委員会(令和6年1月22日)においてご提言いただいた、プロジェクト評価結果の留意事項と対応状況について示す。

【プロジェクト評価結果の留意事項】

①衛星用の通信フルデジタル化技術開発(R2-01)

海外における変化のスピードの速い静止通信衛星分野において、次世代静止通信衛星の先の競争力強化を見据えた海外の技術動向について調査を継続実施しながら、欧米メーカーと比肩する衛星の実現のために重要な基盤技術の一つとして、開発中の技術試験衛星(ETS-9)による早期の宇宙実証をすべく、技術開発を適切に進めていると評価できる。

本プロジェクトは今年度で終了となるが、本技術が世界に通じるものになるよう、商業化を目指す民間事業者の取組を継続的に支援していくことが必要であり、高発熱を伴うフルデジタル通信システムを搭載するためには、少ない電力で高い排熱に対応できる必要があるため、「デジタル信号処理に対する高効率排熱システムの研究開発(R4-07)」等、静止通信衛星の競争力強化に向けた今後の取組が重要である。

【プロジェクトにおける対応状況】

上記のご意見を踏まえ、本受託業務において静止通信衛星分野の動向に付いて調査を実施してきた。今後継続して競争力強化に取り組むため、次世代静止通信衛星のさらなる高度化を見据えた高効率排熱システムの開発を目指してJAXAでは令和4年度より「デジタル信号処理に対する高効率排熱システムの研究開発(R4-07)」を実施している。この業務において高効率排熱システムの研究開発に取り組むと共に、排熱の対象となる通信ペイロードについて、静止通信衛星の競争力強化に向けて将来我が国として開発すべき技術の確認という観点で、市場動向の調査を実施している。

7. まとめ

- 本「衛星用の通信フルデジタル化技術開発」業務にて、デジタルチャネライザやデジタルビームフォーミングといった通信サービスのフレキシビリティ機能を有したフルデジタル通信ペイロードの地上での開発・実証を完了した。
- これにより、我が国の衛星システムメーカーが「次世代静止通信衛星」を商用展開して国際市場における競争力を確保するために重要なフルデジタル化ペイロードの技術を獲得することができたことから、衛星システムメーカーが「次世代静止通信衛星」の受注活動をより積極的に行っていくための1つの実績を得たと考えている。