



文部科学省

令和5年度地球観測技術等調査研究委託事業
「将来通信衛星にかかると技術調査」

最終報告

2024年3月

Sli.doで質問を受け付けております。お気軽にご記入ください。
今後の調査要望でも構いません。

Join at
slido.com
#mext0301



目次

背景と目的・調査の全体像

① マルチオービット化の動向

② 衛星間光通信

③ 地上通信とNTNの統合

④ Q/V帯活用と降雨減衰対策

⑤ 非再生・再生中継技術

⑥ 将来通信衛星に関連する最新技術動向

研究開発に関する戦略(案)のとりまとめ

転換期を迎えている通信衛星に関し、研究開発計画立案に資する基礎情報を収集する

背景

- 通信衛星は、地上通信網がリーチできない地域のデジタルデバイドの解消や船舶・航空機などの移動体向け通信環境として利用されている
- 通信需要が増える中、高速・広帯域通信を実現するためのHTSや低遅延通信が可能なLEOコンステレーション通信ネットワークの構築が世界で進められており、通信衛星技術も大きな転換期を迎えている
- 文部科学省殿は、上述した転換期を踏まえながら今後の宇宙開発利用の在り方および通信衛星の研究開発計画を検討する必要がある

目的

- 通信衛星の研究開発計画を立案するためには、通信衛星に関する政策的・経済的・社会的・技術的な外部環境変化を導出すると共に、わが国の通信衛星事業や関連技術等の強み・弱みを把握し、外部の変化と内部の状況のギャップを把握する必要がある
- これを踏まえ、本業務の目的を、通信衛星にまつわる外部環境変化とそれに伴う国内リソースの強み・弱みを分析し、外部の変化と国内リソースのギャップを埋めるに資する通信衛星の研究開発立案への示唆を得ることとする

本調査の全体像

本調査では、衛星通信の重要トピックとなる以下の3点に従い論点を整理

- NTN(非地上系ネットワーク)の構築
- ミリ波帯の適用
- 非再生・再生中継技術と衛星のソフトウェア化(SDS: Software Defined Satellite)

	NTNの構築	ミリ波帯の適用	非再生・再生中継技術
主な論点	<ul style="list-style-type: none">• <u>マルチオービット化</u>によるNTN構築はどこまで進んでいる• 衛星間通信ネットワークにおける<u>衛星間光通信</u>技術の現状と課題は何か• NTNと地上通信を統合する上で留意すべき点は何か	<ul style="list-style-type: none">• ミリ波帯などの高周波数帯を活用する背景は何か• 降雨減衰など、ミリ波帯活用時に留意すべき点は何か• 降雨減衰対策において重要となる技術は何か、また研究開発はどこまで進んでいるか	<ul style="list-style-type: none">• 現在主流となる<u>非再生中継</u>においてキーとなる技術は何か• <u>衛星のソフトウェア化</u>はどこまで進んでいるか• <u>再生中継技術</u>の技術的課題は何か
調査項目	<ul style="list-style-type: none">① マルチオービット化の動向② 衛星間光通信③ 地上通信とNTNの統合⑥ 将来通信衛星に関する最新技術動向	<ul style="list-style-type: none">④ Q/V帯活用と降雨減衰対策	<ul style="list-style-type: none">⑤ 非再生・再生中継技術

目次

背景と目的・調査の全体像

① マルチオービット化の動向

② 衛星間光通信

③ 地上通信とNTNの統合

④ Q/V帯活用と降雨減衰対策

⑤ 非再生・再生中継技術

⑥ 将来通信衛星に関連する最新技術動向

研究開発に関する戦略(案)のとりまとめ

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

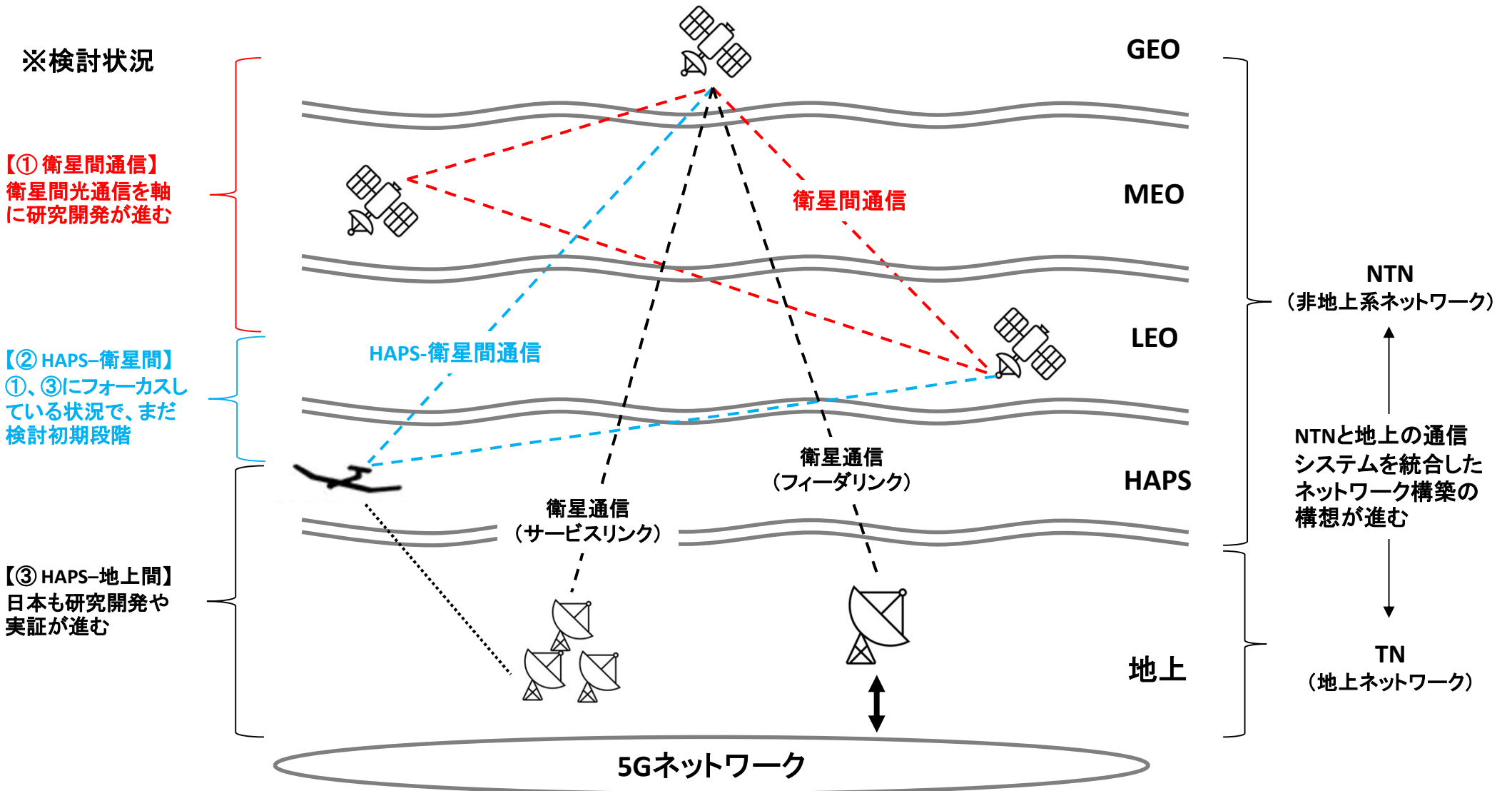
総論

- NTN(非地上系ネットワーク)と地上の通信システムを統合したネットワーク構築の構想が進む中、各事業者は現在衛星間通信ネットワークの構築やHAPS-地上間通信の研究開発・実証に注力している状況。
- SES社は自社保有のGEO衛星とMEO衛星を連携した運用を開始しており、Eutelsat社はOneWeb社と経営統合し、またIntelsat社もOneWeb社とパートナーシップ契約を締結するなど、GEO衛星とLEO衛星を組み合わせた通信サービスの提供に向けて取り組みを進めている。
- 一方日本でも、NTTとスカパーJSAT、および両社によって設立されたSpace Compass社において、地上からHAPS、複数軌道の衛星を多層的に繋ぎ、統合した宇宙統合コンピューティング・ネットワークの構築を進めている
 - ✓ 現在はHAPS-地上間通信の研究開発に注力
 - ✓ 今後GEO衛星-HAPS、GEO/LEO衛星-HAPS間の接続や、それら全体を統合したNW構築を進める構想
- NTN構築に関する取り組みの中で、HAPSについては国内外ともに研究開発・実証フェーズに留まっている状況である。その中で、日本でも大手通信事業者を中心に実証が進められており、将来的に日本として強みを発揮できる可能性のある領域だと考えられる。

マルチオービット衛星と地上を含む通信の全体像

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- 従来の静止衛星に加え、近年はLEOにおける衛星コンステレーションの構築が進む
- さらに、ルーティングの選択肢やシステム容量の増加、冗長性の確保等が可能になることから、衛星通信のマルチオービット化の検討が進む



マルチオービット化の利点

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- 軌道によって衛星サービスの特徴は異なる
 - ✓ LEOでは低遅延の通信を提供できる一方で、カバー範囲が狭く、また衛星間ネットワークや地上インフラも複雑で技術的な課題は多い
 - ✓ GEOは遅延は大きいがかバー範囲は広く、既に信頼性の高い広帯域通信を提供するなど実績のあるソリューションが存在
- マルチオービット化によって、特徴や能力の異なる各軌道(LEO/MEO/GEO)のメリットを活かすことができる**

	LEO (500 – 1,200 km)	MEO (5,000 - 20,000 km)	GEO (36,000 km)
強み	<ul style="list-style-type: none"> 伝搬遅延時間が非常に小さく、リアルタイム性が要求されるトレーディングやXRやゲーミング関連のアプリケーションにも適用可能 衛星を小型化することで製造期間の短縮や1機当たりの打ち上げコストを削減し、多数の衛星を同時に打ち上げることが可能となる 	<ul style="list-style-type: none"> 伝搬遅延時間が小さく地上の光ファイバーでの通信と同等のパフォーマンスを出せる 赤道上軌道(軌道傾斜角 = 0)に衛星を配置することで、世界の96%の人口をかバー可能 軌道傾斜角を持つ衛星で高緯度地域をかバーすることも可能 	<ul style="list-style-type: none"> 衛星1機当たりのカバーエリアが広く、広範囲を少ない衛星基数でカバーできる 大型のハイスループット衛星により高速伝送、大容量化を図ることができる 衛星の追尾が容易
弱み	<ul style="list-style-type: none"> 衛星1機当たりのカバレッジが小さく飛行速度が速いため、通信の連続性を維持するために高度の衛星追尾や衛星ハンドオーバーが必要 有用なサービスを提供するためには多数の衛星によるコンステレーションの構築が必要 多数の衛星が軌道上に配置されるためデブリ抑制の意識が必要 	<ul style="list-style-type: none"> LEOよりもカバーエリアは広いが、通信の連続性を維持するために、シームレスな衛星間ハンドオーバーのためのデュアル・トラッキング・アンテナのような技術が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 伝搬遅延時間が大きいためリアルタイム性を必要とするアプリケーションには適さない 衛星が大型化するため、衛星製造期間が長く、打ち上げ費用が高くなる

マルチオービット化に向けた衛星通信事業者の動向

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- 従来の衛星アーキテクチャでは、単一の軌道に衛星を配置することが一般的であったが、カバレッジの向上や通信容量の増加等を目的に、近年マルチオービット化を検討する事業者が増加

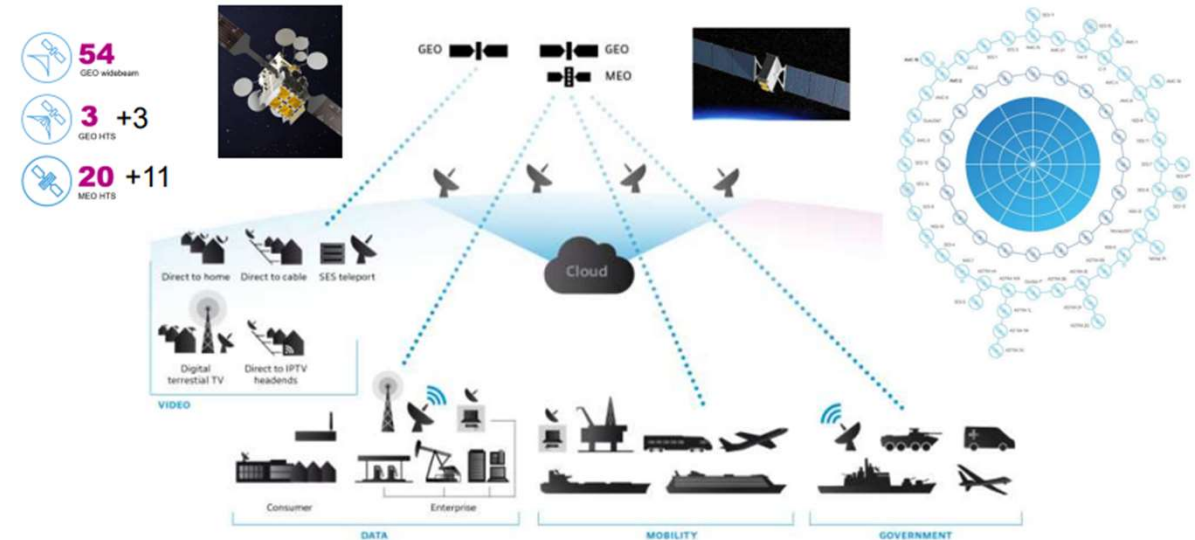
GEO事業者	LEO/MEO事業者	衛星の組み合わせ	検討状況	マルチオービット化に関する動向等
SES (ルクセンブルク)	O3b Networks (買収済)	GEO+MEO	運用中	<ul style="list-style-type: none"> 高スループット、低レイテンシのMEO衛星保有によるサービス拡大、および顧客基盤の拡大を目的にO3b networksを買収 GEOとMEOのマルチオービット衛星を運用
Eutelsat Group (フランス)	OneWeb (買収済)	GEO+LEO	運用中	<ul style="list-style-type: none"> 高速インターネット接続の需要が高まっていることを背景に、OneWebと経営統合(2023年9月) GEO/LEO衛星を組み合わせたハイブリッドネットワークソリューションを提供
Intelsat (アメリカ)	OneWeb	GEO+LEO	研究開発～ 実証中	<ul style="list-style-type: none"> 航空会社およびその乗客に対してインフライト接続を提供することを目的にOneWebとのパートナーシップ契約を締結 GEOとLEOを組み合わせたマルチオービットソリューションによって、航空機における極地サービスの実証に成功(2023年12月)
Telesat (カナダ)		GEO+LEO	研究開発～ 実証中	<ul style="list-style-type: none"> 政府、電気通信、海事、航空分野の顧客向けに廉価で高速度・大容量通信を提供することを目的に自社でLEOコンステレーションを構築 2024年2月にAvanti CommunicationsとMOUを締結、同社のマルチオービットソリューションにTelesat Lightspeedコンステレーションを組み込む共同開発を実施
KT Sat (韓国)	未定	—	計画中	<ul style="list-style-type: none"> マルチオービット戦略の一環として、2021年に国際電気通信連合(ITU)にLEOコンステレーション設計を申請 2022年初には、MEO/HEO衛星サービスの新興企業であるMangata Networks社(米)へ出資
Hispasat (スペイン)	未定	—	計画中	<ul style="list-style-type: none"> 2023年2月にGEO衛星であるAmazonas Nexusを打ち上げ 現在はマルチオービット化を進める上でのパートナー企業を選定している状況
Yahsat (UAE)	未定	—	計画中	<ul style="list-style-type: none"> メガ・コンステレーションが増加することによる自社ビジネス縮小の危機感から、マルチオービット戦略を検討 現在はマルチオービット化を進める上でのパートナー企業を選定している状況
Space Compass	未定	—	計画中	<ul style="list-style-type: none"> LEOで収集したデータをGEO経由で地上へ高速伝送する、「光データリレーサービス」を2024年度に開始予定

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- GEO/MEOのマルチオービット衛星を運用

【SESのマルチオービット化関連動向】

- 2016年にMEO衛星コンステレーションの構築・運用を行うO3b Networksを買収
- 静止軌道(GEO)に約50基の静止衛星を、さらに中軌道(MEO)に20基のO3b衛星を運用している
- O3bに後継となる次世代MEO衛星のO3b mPOWERの展開を進めており、2022年12月に最初の2機の打ち上げに成功し、2023年にサービスを開始予定
- 2024年にはさらに追加で5基のO3b mPOWERを打ち上げ、コンステレーションに加える予定
- 2023年、SES、ThinKomおよびHughes Network Systemsは共同で、政府の航空機ミッション向けに複数のソリューションをサポートできる高性能マルチオービットサービスを実証、成功裏に終える
- 2023年、SESはSES-17(GEO)、O3b mPOWERおよびO3bのマルチオービット衛星を統合的に管理・運用するためのプラットフォームにGilat社のSkyEdge IVを採用
- 2023年9月、SESのMEOとSpaceXのLEO(Starlink)を統合したサービスを船舶向けに提供開始



出所)SES

次世代MEO衛星のO3b mPOWERの今後の展開予定



NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

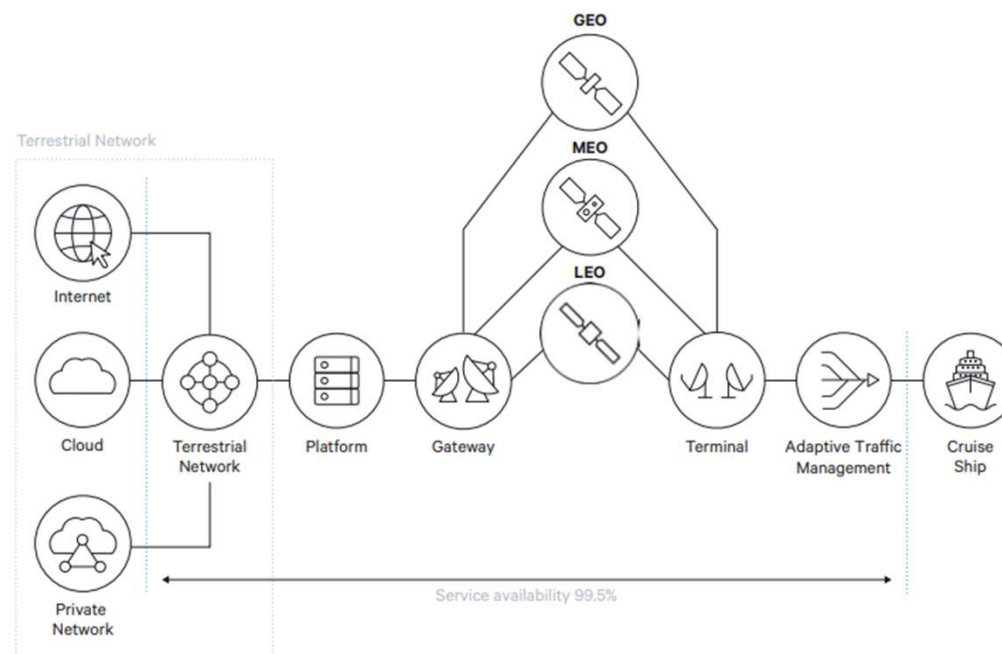
- 「CRUISE mPOWERD + STARRINK」を2023年9月に提供開始
 - ✓ SESが提供する「CRUISE mPOWERD」とSpaceXの「Starlink」を組み合わせた船舶向け通信接続ソリューション
 - ✓ 業界初のMEOサービスとLEOサービスをシームレスに統合したサービス
 - ✓ MEOのカバレッジの外(極地を除く北部・南部)ではGEOを活用したサービスを提供
→GEOによるバックアップ
 - ✓ 1隻あたり1.5/3.0 Gbpsの帯域幅を保証する二つのサービスを提供

2つのレベルのサービスを提供

	Pro Package	Premium Package
Antenna type	Maritime (3-axis stabilised) and Maritime Flat High Performance	Maritime (3-axis stabilised) and Maritime Flat High Performance
Bandwidth	1.5Gbps (1 x 0.5Gbps) SES 250 x 250Mbps and Starlink 800 x 200Mbps	3Gbps (2 x 1Gbps) SES 600 x 600Mbps and Starlink 1440 x 360Mbps
Data caps	No	No
Highest priority	Yes	Yes
Outside MEO coverage GEO-based back-up (+-50degrees)	Available	Available
Round-trip satellite latency (MEO)	150ms	150ms
Service availability (MEO/GEO)	99.5%	99.5%
Traffic termination	SES gateway or SES-defined point of presence (PoP) + Starlink IP termination	SES gateway or SES-defined point of presence (PoP) + Starlink IP termination
Adaptive traffic management	Yes	Yes
SES Cloud Direct	Yes	Yes
Voice	Yes	Yes

出所)SES

衛星⇄海上・地上を繋ぐネットワークダイアグラム



出所)SES

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- GEO衛星を保有・運用する米Intelsat社、仏Eutelsat社は共にOneWebのLEO衛星コンステレーションと連携したマルチオービット化を進める
- **2023年、Eutelsat CommunicationsおよびOneWebのLEOコンステレーションネットワークからの衛星容量をIntelsatに提供する、7年間で数百万€のマルチオービット協定を締結**

Intelsat

- GEO衛星と地上ネットワーク「IntelsatOne」を組み合わせた接続サービスに加え、Eutelsatとの提携によってマルチオービット接続サービスを提供
- 2022年8月、GEO衛星とLEO衛星を連携して航空会社およびその乗客に対してインフライト接続(IFC)を提供することを目的にOneWeb社とパートナーシップ契約を締結、2023年12月に航空機における極地サービスの実証に成功
- 自社およびEutelsatのGEO衛星、OneWebのLEOコンステレーションという3つの事業者の衛星ネットワークを組み合わせた接続サービスを提供する
- マルチオービット衛星運用を含む次世代統合ネットワークの構築を見据え、高度なソフトウェア定義や光ネットワーク通信を提供するAalyria社と提携

Eutelsat & OneWeb

- OneWebの衛星コンステレーションを活用したマルチオービット戦略を展開
- 2022年7月、Eutelsat CommunicationsはLEOコンステレーション構築に取り組むOneWebとの経営統合を視野に入れた覚書に調印、2023年9月に経営統合を完了
- 2023年9月までに関連規制当局の認可を取得し、2023年9月28日に臨時株主総会を開催予定
- 2023年5月にはNATO通信情報局向けにGEO/LEOを同一端末で接続するデモンストレーションを実施し、その有用性を示した

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- EU主体のマルチオービット衛星による通信衛星コンステレーション計画「IRIS²」の立ち上げ(2022年)

【概要】

- IRIS: Infrastructure for Resilience, Interconnection & Security
- 2023年2月に欧州議会の承認を受け、**2023年5月にコンソーシアムの組成を発表**
- 欧州の主要衛星プレイヤーが参加し、スタートアップを含む中小企業への参加も呼び掛ける
 - ✓ Airbus Defense & Space
 - ✓ **Eutelsat**
 - ✓ Hispasat
 - ✓ **SES**
 - ✓ Thales Alenia Space
- 2025年から2027年にかけて最大170基のLEO衛星の開発と打ち上げを予定



出所)EU

【目的】

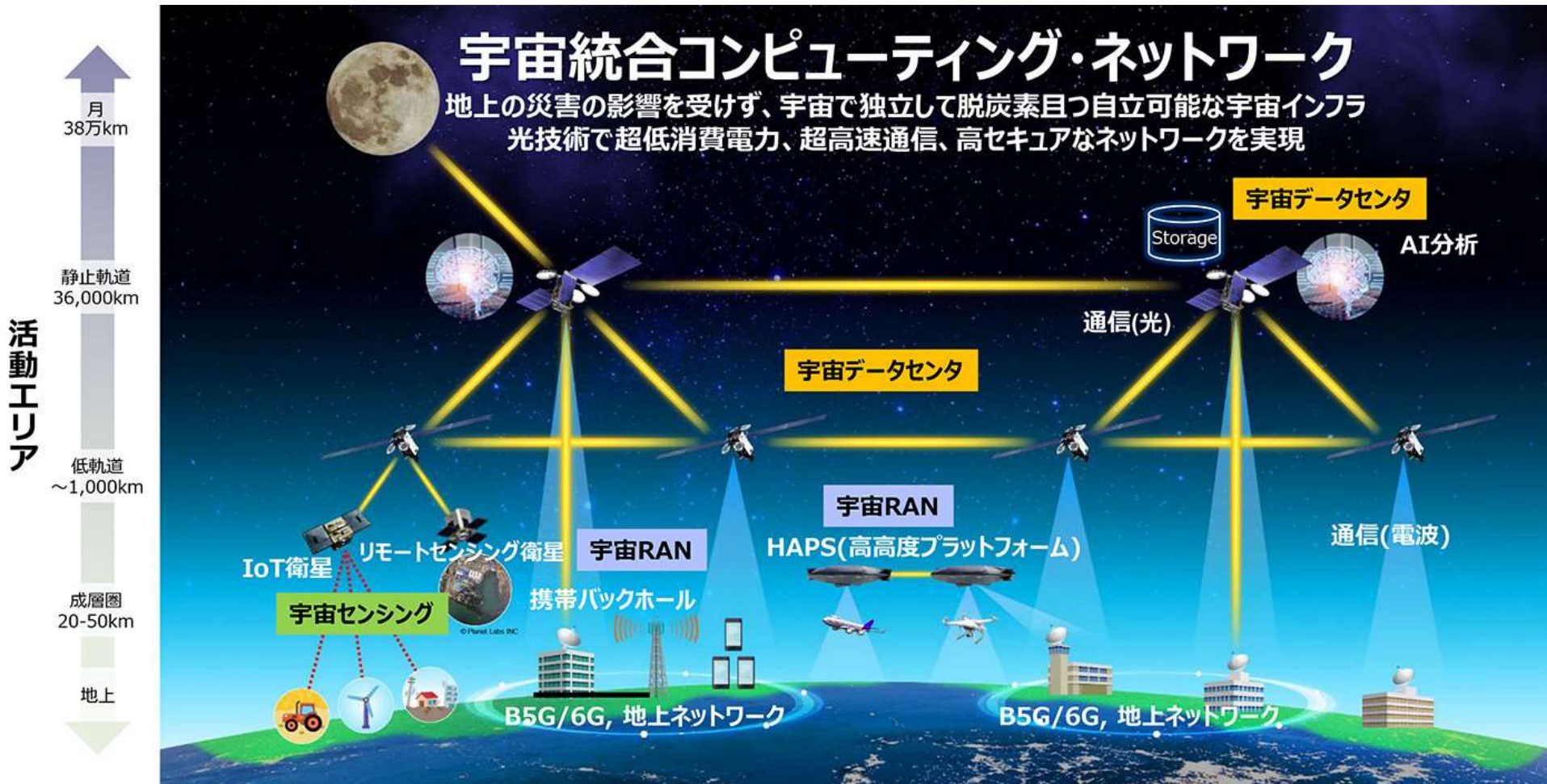
- EUとその加盟国に安全な通信サービスを提供
- EuroQCIの宇宙および地上のセグメントを統合し、暗号鍵の安全な伝送を可能にする
- GEO/MEO/LEOの利点を活かしたマルチオービット衛星コンステレーションを構成し、広いカバー範囲、高スループット、低遅延の実現
- 欧州委員会は2027年までに24億ユーロ、ESAも今後3年間で6.42億ユーロを拠出し、民生用途を想定した民間資本も含めた全体の投資額は60億ユーロ程度になる見込み

※EuroQCI(欧州量子通信インフラストラクチャ): 量子技術を活用して通信セキュリティを保証するだけでなく、量子センサーとプロセッサのネットワークを構築するQIN(量子インフォメーションネットワーク)を構築することを目標とするイニシアティブ

衛星通信事業者の動向：NTT/スカパーJSAT

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- 2021年、地上からHAPS (High Altitude Platform Station: 高高度プラットフォーム)、宇宙空間の低軌道～静止軌道までのマルチオービットを統合し、分散コンピューティングによってさまざまなデータ処理を高度化する**宇宙統合コンピューティング・ネットワーク構想**を発表
- 2022年7月、宇宙統合コンピューティング・ネットワーク構想の第一歩として**Space Compass**を設立、宇宙データセンタ事業および宇宙RAN事業を軸に宇宙統合コンピューティング・ネットワーク構想の事業化を目指す



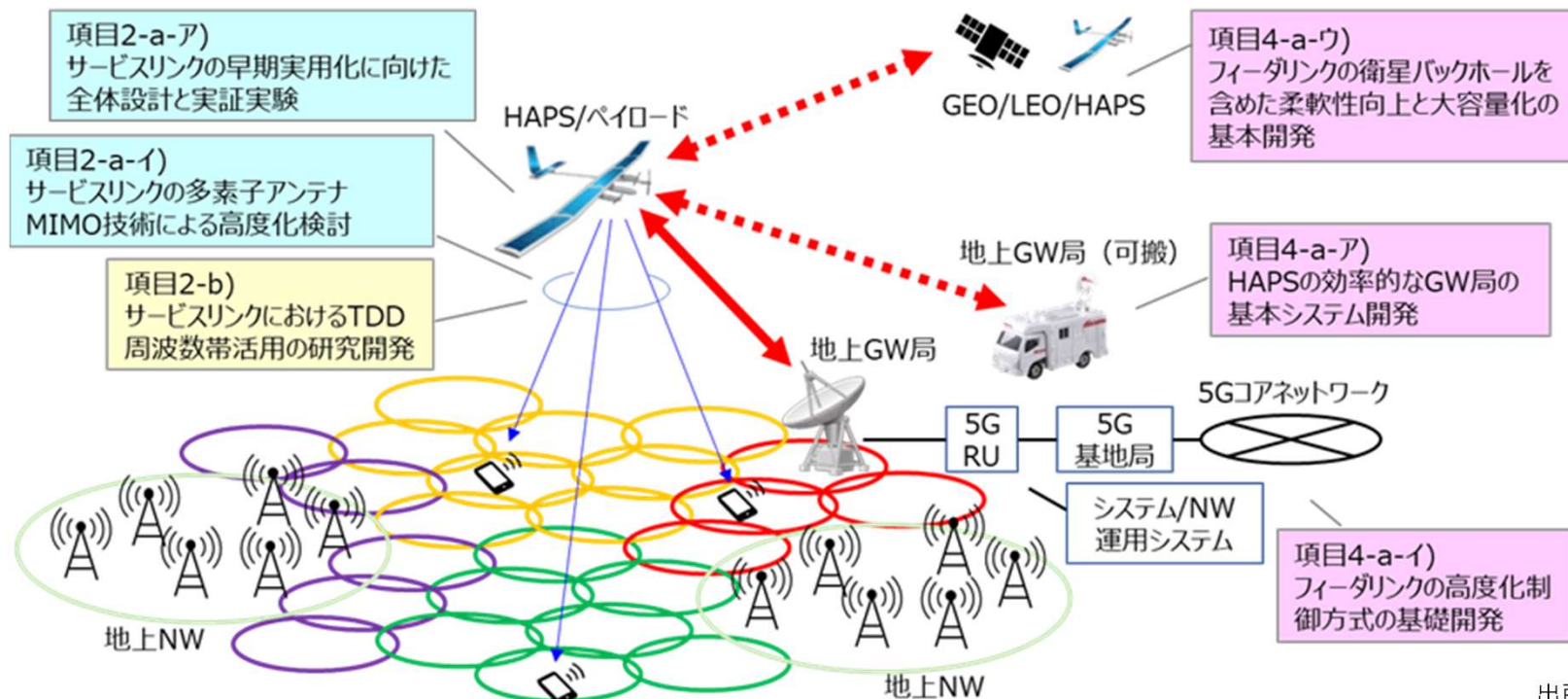
出所) NTT

衛星通信事業者の動向：Space Compass/NTT等

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- 宇宙統合コンピューティング・ネットワーク構想の実現に向けて、NTTはHAPSや低軌道～静止軌道までを視野に入れた垂直方向の多層型NTNの研究開発を推進
- HAPSと地上の接続、GEO衛星とHAPSの接続、そしてGEO/LEO衛星とHAPSの接続の順序で各レイヤーのネットワークを連携した多層型NTNの実現を目指しており、現状はHAPS-地上間の接続(STEP1)に関する研究開発に注力している状況
- 2023年12月、Space CompassとNTT、NTTドコモ、スカパーJSATは共同で、HAPSを介した携帯端末向け直接通信システムの早期実用化に向けた高速大容量化技術の研究開発を開始(※NICTが公募する「革新的情報通信技術(Beyond 5G(6G))基金事業」に採択された)

HAPSを介した携帯端末向け直接通信システムの早期実用化に向けた高速大容量化技術の開発全全体像



出所)Space Compass

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

総論

- NTN(非地上系ネットワーク)と地上の通信システムを統合したネットワーク構築の構想が進む中、各事業者は現在衛星間通信ネットワークの構築やHAPS-地上間通信の研究開発・実証に注力している状況。
- SES社は自社保有のGEO衛星とMEO衛星を連携した運用を開始しており、Eutelsat社はOneWeb社と経営統合し、またIntelsat社もOneWeb社とパートナーシップ契約を締結するなど、GEO衛星とLEO衛星を組み合わせた通信サービスの提供に向けて取り組みを進めている。
- 一方日本でも、NTTとスカパーJSAT、および両社によって設立されたSpace Compass社において、地上からHAPS、複数軌道の衛星を多層的に繋ぎ、統合した宇宙統合コンピューティング・ネットワークの構築を進めている
 - ✓ 現在はHAPS-地上間通信の研究開発に注力
 - ✓ 今後GEO衛星-HAPS、GEO/LEO衛星-HAPS間の接続や、それら全体を統合したNW構築を進める構想
- NTN構築に関する取り組みの中で、HAPSについては国内外ともに研究開発・実証フェーズに留まっている状況である。その中で、日本でも大手通信事業者を中心に実証が進められており、将来的に日本として強みを発揮できる可能性のある領域だと考えられる。

目次

背景と目的・調査の全体像

① マルチオービット化の動向

② 衛星間光通信

③ 地上通信とNTNの統合

④ Q/V帯活用と降雨減衰対策

⑤ 非再生・再生中継技術

⑥ 将来通信衛星に関連する最新技術動向

研究開発に関する戦略(案)のとりまとめ

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

総論

- NTN構築の取り組みの中で、現在各事業者は衛星間通信ネットワークの構築を推し進めている。その中で、高速・大容量通信が可能で、かつ周波数調整や免許が不要な衛星間光通信はキーとなる技術である。
- 通信サービスが成り立つには、通信システムの相互接続性や相互運用性の実現が前提となることから、標準化により方式を共通化することが必要不可欠である。
- 衛星間光通信の分野においては、国際的な標準化検討委員会であるCCSDS (Consultative Committee for Space Data System) や米国のSDA (Space Development Agency) において、衛星間光通信方式や光通信端末に関する標準化を進められている。
- 衛星間通信ネットワークのキー技術となる衛星間光通信においては、PAT (Pointing、Acquisition、Tracking: 指向、捕捉、追尾) が中核技術である。米国のマサチューセッツ工科大学がCubeSatレーザー通信用のPATシステムの設計を行ったほか、DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt、ドイツ航空宇宙センター) がPATを衛星間通信 (ISL) へ適用する研究を進めており、2024年に軌道上実証が行われる予定である。
- Tesat社やMynaric社(ともに独)などの大手メーカーがCCSDS/SDA規格に準拠し、小さな体積かつ低消費電力で、高い伝送速度を実現するレーザー端末製品を開発しており、商用製品の展開も進む。
- 光通信端末は既に欧米各社が商業ベースにのっており、物理層の技術に日本がこれからキャッチアップするのは困難な状況。セキュリティなどの高レイヤーの部分は各社独自に開発する領域であり、ハンドオーバーやルーティングのように相互に関係するような機能は標準化も見据えて注力すべき領域だと考える。

- CCSDS (Consultative Committee for Space Data System: 宇宙データシステム諮問委員会)では衛星間光通信に関する標準化などを規定

CCSDSにおいて国際標準化の検討を行っている技術分野

技術分野	概要	技術分野	概要
①システムエンジニアリングエリア	宇宙機運用における通信、運用、クロスサポートのアーキテクチャを総合的に検討	④宇宙機内インタフェースサービスエリア	宇宙機のオンボードデータ通信に関するシステムにおける、オンボードソフトウェアとハードウェアとのインターフェース方式を簡略化するサービスや、各種通信プロトコル、各種データ処理アプリケーションの標準化について検討
②ミッション運用／情報管理サービスエリア	宇宙機の軌道上での各運用フェーズにおける、宇宙機と地上のシステムを運用するための各種アプリケーションの標準化とミッション運用情報の管理に関わる規格及びプロセスについての検討・推奨	⑤スペースリンクサービスエリア	スペースリンクサービスエリア 宇宙機－宇宙機間で相互運用を行う宇宙リンクサービスについて、効率の良い宇宙リンク通信システムの標準化を検討
③相互支援サービスエリア	相互運用支援を目的とした、他機関の地上ネットワークの相互利用の実現に向けたインターフェース及び地上通信サービスの標準化に関する検討・推奨	⑥宇宙インターネットワーキングエリア	宇宙機～地上システム間、宇宙機～宇宙機間のネットワーク上におけるデータ通信サービス及びプロトコルについて、主にネットワーク層からアプリケーション層までの推奨項目に取り組み



スペースリンクサービスエリアのOptical Communications WGにて光通信に関する標準化の検討が進められる

WG名称	検討事項
RF Modulation WG	宇宙機－宇宙機、宇宙機－地上システム間等の電波変調方式の検討
Space Link Coding and Synchronization WG	宇宙空間のデータ通信時のデータ符号化/符号化の方法の検討
Data Compression WG	宇宙空間における通信時のデータ圧縮方法の検討
Space Link Protocols WG	高データレートのテレメトリ及びコマンドに対応できる方法の検討
Space Data Link Layer Security WG	宇宙空間のデータ通信時におけるデータリンク層の情報保護方法の検討
Optical Communications WG	光通信に必要なデータの変調、符号化技術等に関する標準化の検討

光衛星通信に関する標準化：CCSDS

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- CCSDS (Consultative Committee for Space Data System: 宇宙データシステム諮問委員会)では衛星間光通信に関する標準化などを規定

- 光通信の物理層についてはCCSDS 141.0-B-1で規定されている。主な内容は、伝送するレーザーの中心周波数、レーザー線幅、偏波方式等を定義するもの
- 推奨規格として規定する方式は、HPE (High Photon Efficiency)、O3K (Optical On-Off Keying) であり、HDRについては予備検討規格が公表されている**

OSI階層モデル	CCSDSの階層	処理内容
ネットワーク層以上		—
データリンク層 (Data Link Layer)	データリンクプロトコル副層 (Data Link Protocol Sublayer)	他の規格で推奨される TM Space Data Link Protocol、AOS Space Data Link Protocol 及び Unified Space Data Link Protocol (USLP) のトランスファーフレームを生成
	同期・チャネルコーディング副層 (Synchronization and Channel Coding Sublayer)	トランスファーフレームを、光スペースリンクを通して伝送するためのデータリンク層—物理層間の符号化及び同期
物理層 (Physical Layer)	物理層 (Physical Layer)	光通信におけるデータ伝送のための物理的伝送に必要な光信号の特性を定めている



方式	High Photon Efficiency (HPE)	Optical On-Off Keying (O3K)	High Data Rate (HDR)	
特徴	月・惑星との光通信のための規格	主に低軌道衛星から地上への光通信回線のための規格	静止衛星を用いた光データ中継や光フィーダリンク用の規格	
データリンクプロトコル副層	TM (推奨規格 <u>132.0-B-2</u>)			
	AOS (推奨規格 <u>732.0-B-3</u>)			
	USLP (推奨規格 <u>732.1-B-1</u>)			
同期&チャネルコーディング副層	推奨規格 <u>142.0-B-1</u>	O3K方式の規格を追記予定	HDR 1064nm (ESA/DLR)	HDR 1550nm (NASA/CNES/JAXA/NICT)
物理層	推奨規格 <u>141.0-B-1</u>	O3K方式の規格を追記予定	予備検討規格 <u>141.11-O-1</u>	予備検討規格 TBD

出所) <https://stage.tksc.jaxa.jp/ccsds/docs/files/bluebook/sls/141.0.b.1.pdf>

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- SDA (Space Development Agency、2019年3月設立)では光通信端末に関する標準化などを規定
- SDA規格に準拠した光通信端末を世界をリードする企業が供給することで、SDA活動を中心に世界中の関連企業が動く状況になりつつある

【SDAの動向】

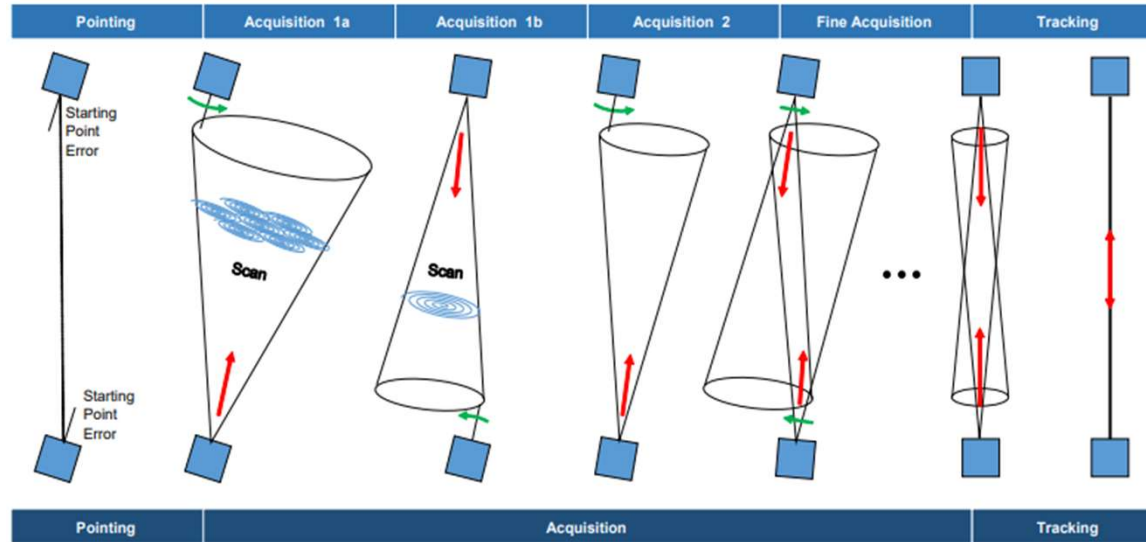
- 米国防相(DOD)構想する数百機以上の小型衛星コンステレーションによるNDSA (National Defense Space Architecture: 国家防衛宇宙体系)をSDAが主導
- 2022年、Transport Layerの独自基準「Tranche 1」に準拠した衛星42機の開発を下記の3社に発注、実証の中で標準仕様を調整
 - ① Northrop Grumman
 - ② Lockheed Martin
 - ③ York Space Systems
- 光衛星通信端末で世界をリードするMynaricがNorthrop Grummanに、Tesat-SpacecomがLockheed Martinに端末を供給
- Tranche 1では地上で使われている部品の転用も見据え、地上の光通信で一般的に使用されるレーザー波長である1.55μm帯を標準に据える(通信速度:2.5 ~ 10 Gbps)
- 2023年3月にはTranche 2規格の草案を発表し、衛星選定プロセスを開始している
- 世界有数の光通信端末メーカーがSDA規格に準拠した製品を開発し、具体的な実証も進んでいることから、この規格がデファクトスタンダードになる可能性が大きい

SDAの「Optical Communications Terminal (OCT) Standard Version 3.0」にて定義される項目の概要

階層		定義する項目
Layer 1	物理層	<ul style="list-style-type: none"> • PAT (Pointing, Acquisition, Tracking) • 変調方式 • 送受信遅延 • 送受信の波長 • 送信信号電力 • 送信ビーム
Layer 2	同期とチャンネル符号化	<ul style="list-style-type: none"> • プロトコル: SDA OCT Standard 3 - 3GPP 5G NR LDPC • Re - Programming OCTは、軌道上で再プログラム可能でなければならない • エラー訂正された伝送を可能にするために必要なツールやデータ構造に関する定義

- **PAT (Pointing, Acquisition, Tracking: 指向、捕捉、追尾)**は標準化が進んでおり、衛星間光通信の確立において中核となる技術

指向・捕捉・追尾フェーズの模式図



出所) <https://www.sda.mil/wp-content/uploads/2022/04/SDA-OCT-Standard-v3.0.pdf>

PATのフェーズ	手順
Pointing	<ul style="list-style-type: none"> • ある端末がもう一方の端末から新しいリンクコマンドを受信した後、リンクパラメータに従い、ターゲットの端末に向けて粗いビームの照射を開始する
Acquisition 1a	<ul style="list-style-type: none"> • リード側端末がフォロー側端末の指向方向をスパイラル状にスキャンする • フォロー側端末のビームを検出し、指向方向を修正する
Acquisition 1b	<ul style="list-style-type: none"> • 今度はフォロー側端末がリード側端末の指向方向をスパイラル状にスキャンする • リード側端末のビームを検出し、指向方向を修正する
Acquisition 2	<ul style="list-style-type: none"> • 双方の指向誤差が小さくなるまで、上記動作を繰り返す
Fine Acquisition	<ul style="list-style-type: none"> • 捕捉センサーに一定の頻度でビームが受信できるようになると、範囲を狭めて双方同時にスキャンし、両方の捕捉センサーで安定してビームが受信できるようにする
Tracking	<ul style="list-style-type: none"> • 両端末間にリンクが確立され、通信が開始される • リンクはコマンドまたは障害状態により終了し、リンクを再確立するための準備状態となる

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- 米国のマサチューセッツ工科大学がCubeSatレーザー通信のPATシステムを設計
- DLRがPATを衛星間通信(ISL)へ適用する研究を進めており、2024年に軌道上実証が行われる予定

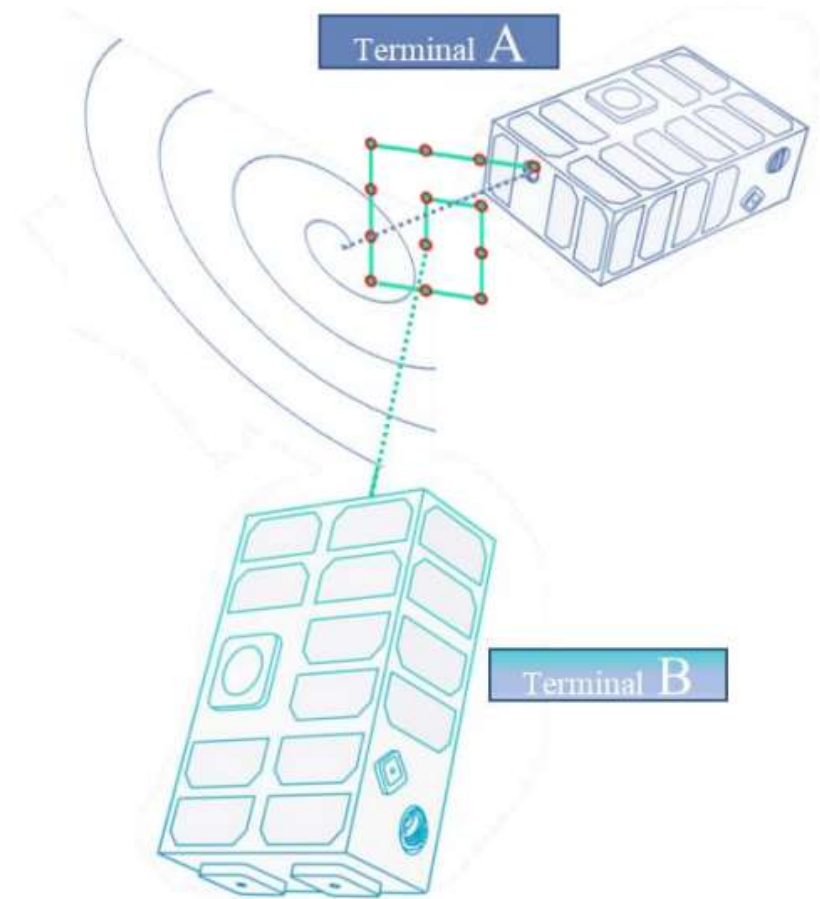
【DLRのISLレーザー通信端末の開発】

- DLRはキューブサット用ISLレーザー通信端末「CubeISL」を開発
- CubeISL端末間の光通信リンク確立のために、もう一方の衛星上のパートナー端末のレーザーを取得する探索・捕捉アルゴリズムを提案
- 二次的な通信チャンネルに依存することなく、リンクを確立する時間を短縮することを重要視したスキームを開発
- 同一のサーチパターンを利用すると2衛星間で時間的依存関係が生じ、2つのスパイラルがお互いに無限に続くこともあるため、両方のサーチパターンの繰り返し周期を異なるものとし、お互いに非同期とすることで効率的なサーチができるとした方法を考案

【CubeISLの軌道上実証】

- CubeISLレーザー通信端末の実証を、CubeISLミッションで実施することを予定
 - ✓ CubeISLミッションは、2024年に6機のCubeSatを使用して実施される予定
 - ✓ 衛星は同じ軌道面上でコンステレーション飛行する。捕捉時間、データレート、達成可能な最大距離などを検証するために、衛星には軌道制御システムを搭載
 - ✓ これを利用して、ステップごとに検証実験を行い、段階的に距離を最大1,500 kmまで伸ばす

捕捉パターンの例



出所) Acquisition Concept for Optical Inter-Satellite Communication Terminals on Cubesats

主要な光衛星通信装置と製造メーカー

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- 大手メーカーを中心にCCSDS/SDA規格に準拠し、小さな体積かつ低消費電力で、高い伝送速度を実現するレーザー端末製品を開発

	Tesat			Mynaric		Skyloom	Mostcom		Thales Alenia
	LCT135	SmartLCT	CubeLCT	CONDOR Mk2	CONDOR Mk3	V'Ger10	SOT-90	SOT-150	OPTEL-μ
対象衛星	GEO-GEO GEO-LEO GEO-地上	LEO-GEO	LEO-地上	LEO-LEO	LEO-LEO	LEO-LEO	LEO-LEO LEO-地上	GEO-GEO GEO-LEO GEO-地上	LEO-地上
データ伝送距離	80,000km	45,000km	1,500km	5,000km	6,500km	-	5,000km	50,000km	1,000km
データ伝送速度	1.8Gbps	1.8Gbps	100Mbps	1.25Gbps	2.5Gbps	1-10Gbps	10Gbps	1.25Gbps	1.25Gbps
大きさ	60.0×60.0×70.0cm ³	35.0×35.0×20.0cm ³	9.0×9.5×3.5cm ³	57.3×27.1×23.0cm ³	37.2×28.2×25.7cm ³	-	45.0×30.0×38.0cm ³	60.0×40.0×48.0cm ³	20.7×27.7×6.5cm ³
消費電力	150W	130W	8W	1W	4W	-	60W	100W	45W
動眼視野	完全半球型 (粗動ポインティングアセンブリ付)	完全半球型	+/- 1°内蔵ファインステアリング	方位角: +165°から-185° 仰角: +25°から-5°	方位角: -175°から +175° 仰角: -60°か +85°	-	-	-	半球型
動作波長	1064-1550nmバンド	1064nmバンド	1530-1565nmバンド	1536-1553nmバンド	1536-1553nmバンド	-	-	-	1520nmバンド
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 欧州データ中継衛星システム(EDRS)の運用サービスの中核 光ホモダイン検波によるBPSK変調を使用 	<ul style="list-style-type: none"> 欧州委員会のコペルニクス次世代ミッションで運用予定 	<ul style="list-style-type: none"> 小型衛星向け IM/DD技術実装 CCSDSのO3K規格を使用 	<ul style="list-style-type: none"> SDA規格のトランシェI0に完全準拠 電磁干渉に強い耐性 規制当局との周波数調整不要 光通信コントローラは、デュアル構成で最大2つの光ヘッドを操作可能 	<ul style="list-style-type: none"> SDA規格のトランシェ0・1に完全準拠 規制当局との周波数調整不要 微振動環境と広い温度範囲に強い耐性 モジュール設計により、光通信コントローラで複数の光ヘッドを操作可能 	<ul style="list-style-type: none"> SDA準拠 モジュール設計 	<ul style="list-style-type: none"> さまざまなアプリケーションシナリオに適した統合光トランシーバースとサービス情報交換プロトコルを搭載 加入者に対する相互角度座標および傾斜距離測定機能を搭載 通信方向を安定させる二重ループの半球状視野エリア 量子鍵配布システムやビデオ監視システム搭載を検討中 	<ul style="list-style-type: none"> モジュール設計 	

主要な光衛星通信装置と製造メーカー：Mynaric

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- SDA規格に準拠した光通信端末「CONDOR」シリーズの開発・販売を手掛ける

- DLRからスピノフして設立された宇宙通信ネットワーク用通信機器メーカー
- CONDORシリーズは下記のプロジェクトなどで採用実績がある
 - ✓ Transport Layerの独自基準「Tranche 1」に準拠した衛星42機の一部開発を担うNorthrop Grumman
 - ✓ Capella Spaceの商用SAR衛星
 - ✓ DARPAの小型衛星関連技術実証プログラム「Blackjack」の衛星
- 直近では、2023年1月に、光を利用した即応通信ネットワークサービス「WarpHub InterSat」の開発を進める日本のワープスペース社は、第一世代の3基の中継衛星用の光通信端末としてMynaricのCONDOR Mk3を採用すると発表した

CONDOR Mk2



CONDOR Mk3



出所) Mynaric

端末名称	CONDOR Mk2	CONDOR Mk3
通信速度	1.25Gbps	2.5Gbps
通信距離	5,000km	6,500km以上
波長	1536-1553nm	1536-1553nm
アンテナ口径	80 mm	80 mm
送信出力	1W	4W
寸法	57.3×27.1×23.0cm ³	37.2×28.2×25.7cm ³

主要な光衛星通信装置と製造メーカー：Tesat

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- 欧州で通信衛星用ペイロード機器を手掛ける主力メーカー

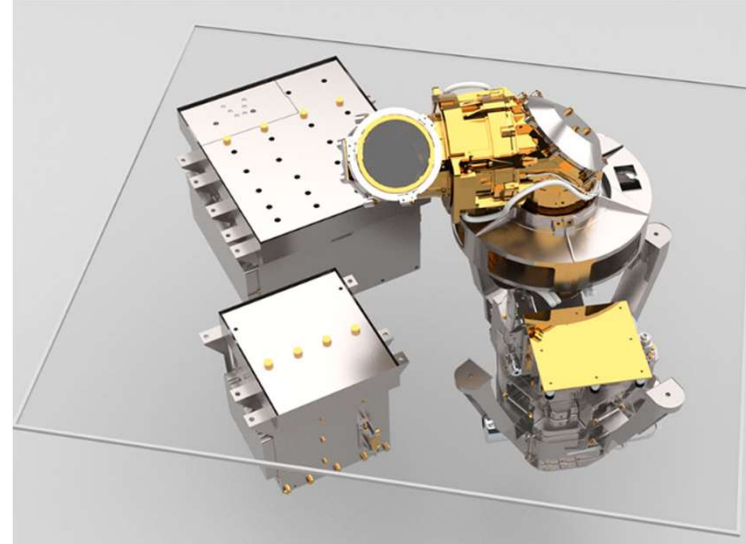
- GEOやLEO、キューブサットまで対応可能な光通信機器を提供
- LCT135は欧州データ中継衛星システム(EDRS)の運用サービスの中核として採用されている
- また、SmartLCTは欧州委員会のコペルニクス次世代ミッションで運用予定となっている
- 長距離量子暗号鍵配送(QKD)に関する技術実証衛星にも光通信端末を提供

端末名称	LCT135	Smart LCT	CubeLCT
通信速度	1.8Gbps	1.8Gbps	100Mbps
データ伝送距離	80,000km	45,000km	1,500km
波長	1064-1550nm	1064nm	1530-1565nm
送信出力	150W	130W	8W
寸法	60.0×60.0×70.0cm ³	35.0×35.0×20.0cm ³	9.0×9.5×3.5cm ³

LCT135



Smart LCT



CubeLCT



NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

総論

- NTN構築の取り組みの中で、現在各事業者は衛星間通信ネットワークの構築を推し進めている。その中で、高速・大容量通信が可能で、かつ周波数調整や免許が不要な衛星間光通信はキーとなる技術である。
- 通信サービスが成り立つには、通信システムの相互接続性や相互運用性の実現が前提となることから、標準化により方式を共通化することが必要不可欠である。
- 衛星間光通信の分野においては、国際的な標準化検討委員会であるCCSDS (Consultative Committee for Space Data System) や米国のSDA (Space Development Agency) において、衛星間光通信方式や光通信端末に関する標準化を進められている。
- 衛星間通信ネットワークのキー技術となる衛星間光通信においては、PAT (Pointing、Acquisition、Tracking: 指向、捕捉、追尾) が中核技術である。米国のマサチューセッツ工科大学がCubeSatレーザー通信用のPATシステムの設計を行ったほか、DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt、ドイツ航空宇宙センター) がPATを衛星間通信 (ISL) へ適用する研究を進めており、2024年に軌道上実証が行われる予定である。
- Tesat社やMynaric社(ともに独)などの大手メーカーがCCSDS/SDA規格に準拠し、小さな体積かつ低消費電力で、高い伝送速度を実現するレーザー端末製品を開発しており、商用製品の展開も進む。
- 光通信端末は既に欧米各社が商業ベースにのっており、物理層の技術に日本がこれからキャッチアップするのは困難な状況。セキュリティなどの高レイヤーの部分は各社独自に開発する領域であり、ハンドオーバーやルーティングのように相互に関係するような機能は標準化も見据えて注力すべき領域だと考える。

目次

背景と目的・調査の全体像

① マルチオービット化の動向

② 衛星間光通信

③ 地上通信とNTNの統合

④ Q/V帯活用と降雨減衰対策

⑤ 非再生・再生中継技術

⑥ 将来通信衛星に関連する最新技術動向

研究開発に関する戦略(案)のとりまとめ

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

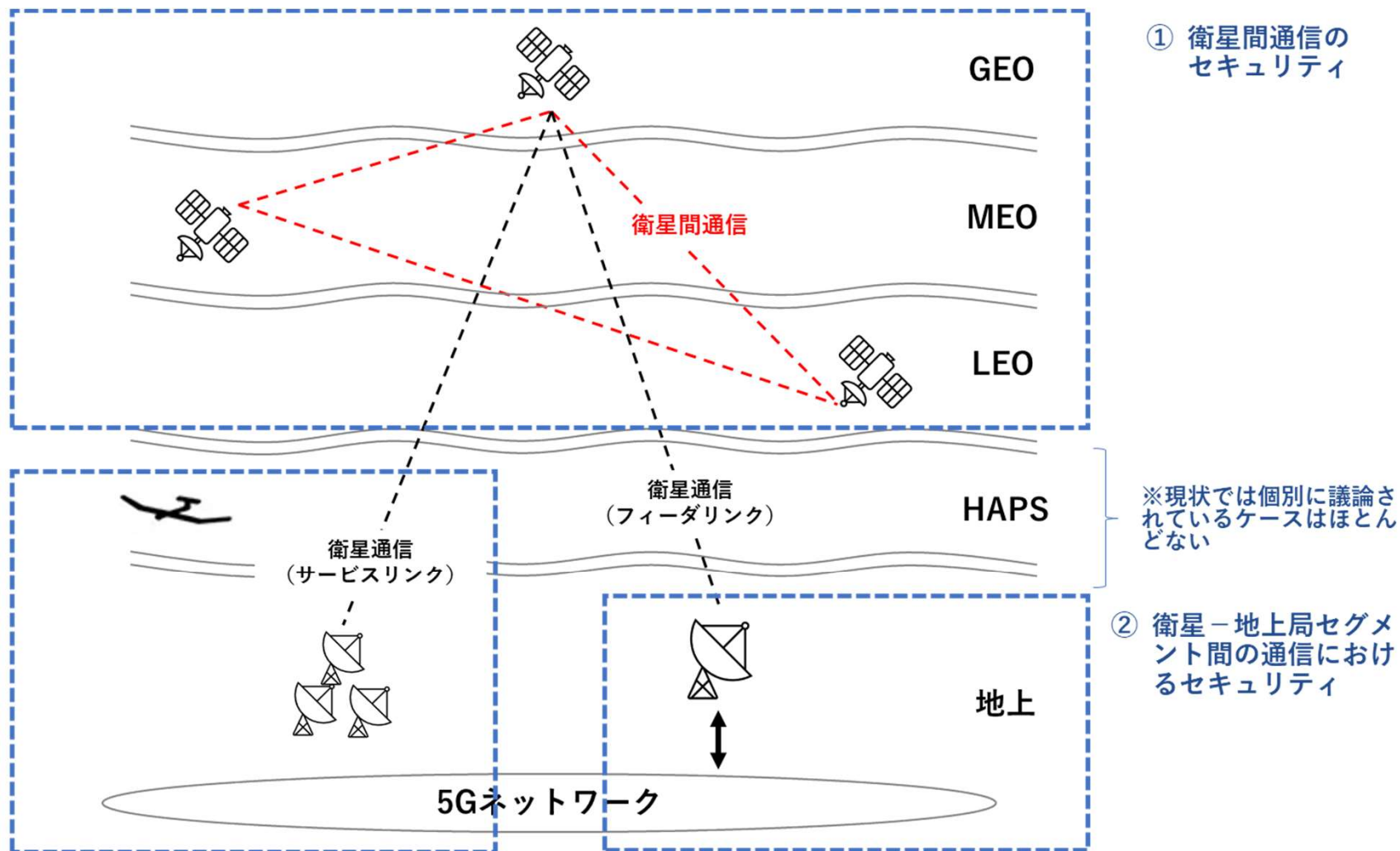
総論

- 地上・非地上通信の一体化による主要なターゲットは以下の2点
 - ✓ 孤立した遠隔地、航空機や船舶の機内、都市部や農村部での 5G サービスの強化
 - ✓ 地上車両、航空機、船舶、高速列車などの移動プラットフォームにおけるM2M(Machine-to-Machine)、およびIoT(Internet of Things)デバイスによるサービスの継続性維持
- これらのターゲットは重要なインフラであることからセキュリティインシデントによる影響は非常に大きいため、その対策は重要な課題である一方、衛星に対するセキュリティ対策が十分でないのが現状
- 一体化通信においては、①衛星間通信、②衛星ー地上局間通信、③衛星ーユーザー間通信、の3つの領域で特徴的な課題があり、それぞれの領域に対して対応策が提案されている
- 既存の地上通信と、衛星通信を統合したネットワークの課題は共通するが、「衛星が高速で移動すること」、「衛星と地上の通信の長距離による高遅延」および「コンピューティングリソースの欠如」の3点に起因して地上における対策をそのまま適用できない点が課題
- 境界型セキュリティには限界があり、内部ネットワークにも脅威が存在しうると考える「ゼロトラストセキュリティ」の考え方が広まっており、この考え方を宇宙に適用する動きもある
- 衛星も含めた一体化通信におけるセキュリティ技術の確立はこれからであり、日本においても量子暗号技術であるQKDをはじめ、強みを出せる可能性のある領域の一つだと考えられる

統合ネットワークにおけるセキュリティ

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- 一体化通信におけるセキュリティ上の課題やその対応策は、以下の3つに分類可能
 - ①衛星間通信 : GEO、MEO、LEO 内、およびこれらの軌道間通信
 - ②衛星-地上局間通信 : 衛星と地上局(携帯向け基地局やユーザー機器接続用ゲートウェイ等)の間の通信
 - ③衛星-ユーザー間通信 : 衛星と地上のユーザー機器(UE)との間の直接通信



統合ネットワークにおけるセキュリティ

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- 「衛星の高速移動」、「高遅延」および「コンピューティングリソースの欠如」の3点に起因して、既存の地上通信と共通する課題ではあっても、地上における対策(例えば暗号化等)をそのまま適用できない点が課題

セグメント	課題	想定される対策技術
①衛星間通信	<ul style="list-style-type: none"> 衛星上ではストレージ、計算リソース、エネルギーリソースなどが限られていることや、衛星間通信がブロードキャスト方式で行われることなどから、通信の機密性・完全性が損なわれる可能性がある → 強力な暗号化が必要 軌道間の衛星間通信では、高度や移動速度の差があるため暗号化の複雑さが増す TCP/IPの動作環境を改善するため衛星システムに実装されているPEP (Performance Enhancing Proxies) と、TCP/IPのセキュリティ技術でIpssecの連携に課題がある 衛星ネットワークのルーティングプロトコルへの攻撃の可能性 (通信の断絶や情報路漏洩の可能性) 	<ul style="list-style-type: none"> 衛星ダイバーシティによる盗聴リスク軽減 非対称鍵とユーザーのIDを公開鍵として使用するIDベースの暗号化 → 公開鍵が不要なため、簡素化できる 長距離で安全に鍵を共有するために衛星中継を利用した量子鍵配送 (QKD) 暗号化技術が実装不可な場合はDSSS (Direct Sequence Spread Spectrum : 直接スペクトラム拡散) でもセキュリティ向上は可能
②衛星-地上局間通信	<ul style="list-style-type: none"> NTNと5Gの統合を念頭に、下記の課題が存在 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 衛星ネットワーク用にも実装が進むソフトウェア定義ネットワーク (SDN) やネットワーク仮想化 (NFV) などのプログラム可能なアーキテクチャは悪意あるソフトウェア進入を可能にする ✓ コンポーネントのオープン性や、セキュリティに弱点を持つIoTなどとの統合によるリスク ✓ セキュリティ慣行が異なる衛星と地上のコンポーネントで整合性を担保すること 衛星に搭載されるgNBでは計算やストレージのリソースの問題から、現状は地上局などと同様の効率的なセキュリティ技術を適用不可 衛星のカバー範囲が広く、妨害攻撃にさらされる可能性が高くなる 	<ul style="list-style-type: none"> 地上セグメント起因のセキュリティリスクの回避には強力な認証やアクセス制御が重要 <ul style="list-style-type: none"> ✓ アクセス制御 ✓ アプリケーションへのアクセスの最小限化 ✓ 制御プラットフォームの階層設定 プログラムの書き換え権限の限定 妨害対策向けの妨害信号フィルタリングやアンテナアレイ設計 ブロックチェーン技術
③衛星-ユーザー間通信	<ul style="list-style-type: none"> ユーザー機器 (スマートフォン、HAPS、UAV、海上端末等) は多様であり、セキュリティ要件も多様 → IoTデバイス接続によるセキュリティリスク <ul style="list-style-type: none"> ✓ ユーザー機器のコンピューティングリソース不足 ✓ ユーザー機器の高い移動性によりハンドオーバーが頻繁に発生 ✓ 以前の接続点に関する情報を伝えるシグナリングメッセージの盗聴・改ざん ✓ 軌道間衛星通信ではハンドオーバーの遅延が大きくなり、セキュリティ対策の複雑性が増す ローミングにおけるユーザー認証 → 既存の技術では衛星通信適用には十分でない 衛星の動く範囲やカバー範囲が地理的に広いため、暗号化での鍵管理が困難 	<ul style="list-style-type: none"> ユーザーに匿名性を提供するAnFRA (Anonymous and Fast Roaming Authentication) → 認証プロセス中に衛星利用を最小限にする

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- 各セグメントにおけるセキュリティ上の課題に対して提案されている対策／対策技術

課題	概要
衛星ダイバーシティ	複数の衛星から同時にRFを送信することによって、 電波の減衰を減らしたり、地上局から見た仰角が複数の衛星ごとに違うために受信できる可能性が高まったりするなどによって、ジャミング攻撃からのリスクを軽減することができる。 なお、3つの衛星によるダイバーシティシステムによって、1つのジャミング攻撃からの影響を完全に軽減できるとの研究報告もある。
IDベースの暗号化	鍵の配布でプロセスを複雑にしない軽量の暗号化技術 であり、認証、署名、暗号化等の方式をID（個人を特定することが可能な情報を意味しており、例えば住所氏名、emailアドレス、電話番号、基礎年金番号等はIDとして扱うことが可能）に基いて実現する方式。事前に公開鍵を作成し、持ち主との対応を公開鍵証明書などで保証する必要がある公開鍵暗号とは異なり、 特定の相手のIDをそのまま公開鍵として使用できるため、鍵管理が簡素化できる。 リソースに制限のある衛星通信において適用可能性がある一方で、IDの信頼性や変更可能性を検討する必要があることや、ユーザー宛の暗号文を（不正に）復号可能である鍵生成センターの信頼性が担保される必要があること、ユーザー鍵が漏洩した場合にはIDを効率的に変更する必要があるなど、課題もある。
量子鍵配送（QKD）	1ビットの暗号鍵情報（乱数）を光子（光の粒子）の1粒ずつに載せて伝送する技術であり、 盗聴を確実に検知することができる。 QKDは鍵を安全に共有するための効率的な方法であるが、地上の光ファイバーで送受信を行うと大きな伝送ロスが発生してしまい、通信距離に大きな制限が発生するといった課題がある。この長距離伝送の課題を解決する方法として、衛星中継を使用する新しい技術開発が行われている。
直接スペクトラム拡散（DSSS）	通信の信号を本来よりも広い帯域に拡散して通信する技術の一方式。DSSSでは、送信時に送るべき信号の帯域よりも大きな帯域をもった拡散信号PN（pseudo - random number）符号を掛け合わせる。受信時には、送信時の拡散信号を掛け合わせて（逆拡散）、元の信号に復元（復調）する。この方式では、 PN符号がわからなければ復元できないようになっているため、秘匿性が高く、ジャミング攻撃への対抗技術となる。
匿名性のある高速ローミング（AnFRA）	グループ署名技術を使用し、ローミングユーザーに十分な匿名性を提供する認証セキュリティとして提案されている。また、衛星の認証時にホームネットワークコントロールセンターのリアルタイムの関与を避けることによって、 衛星のコンピューティングリソースを最小限に抑えることができる。

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

総論

- 地上・非地上通信の一体化による主要なターゲットは以下の2点
 - ✓ 孤立した遠隔地、航空機や船舶の機内、都市部や農村部での 5G サービスの強化
 - ✓ 地上車両、航空機、船舶、高速列車などの移動プラットフォームにおけるM2M(Machine-to-Machine)、およびIoT(Internet of Things)デバイスによるサービスの継続性維持
- これらのターゲットは重要なインフラであることからセキュリティインシデントによる影響は非常に大きいため、その対策は重要な課題である一方、衛星に対するセキュリティ対策が十分でないのが現状
- 一体化通信においては、①衛星間通信、②衛星－地上局間通信、③衛星－ユーザー間通信、の3つの領域で特徴的な課題があり、それぞれの領域に対して対応策が提案されている
- 既存の地上通信と、衛星通信を統合したネットワークの課題は共通するが、「衛星が高速で移動すること」、「衛星と地上の通信の長距離による高遅延」および「コンピューティングリソースの欠如」の3点に起因して地上における対策をそのまま適用できない点が課題
- 境界型セキュリティには限界があり、内部ネットワークにも脅威が存在しうると考える「ゼロトラストセキュリティ」の考え方が広まっており、この考え方を宇宙に適用する動きもある
- 衛星も含めた一体化通信におけるセキュリティ技術の確立はこれからであり、日本においても量子暗号技術であるQKDをはじめ、強みを出せる可能性のある領域の一つだと考えられる

目次

背景と目的・調査の全体像

① マルチオービット化の動向

② 衛星間光通信

③ 地上通信とNTNの統合

④ Q/V帯活用と降雨減衰対策

⑤ 非再生・再生中継技術

⑥ 将来通信衛星に関連する最新技術動向

研究開発に関する戦略(案)のとりまとめ

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

総論

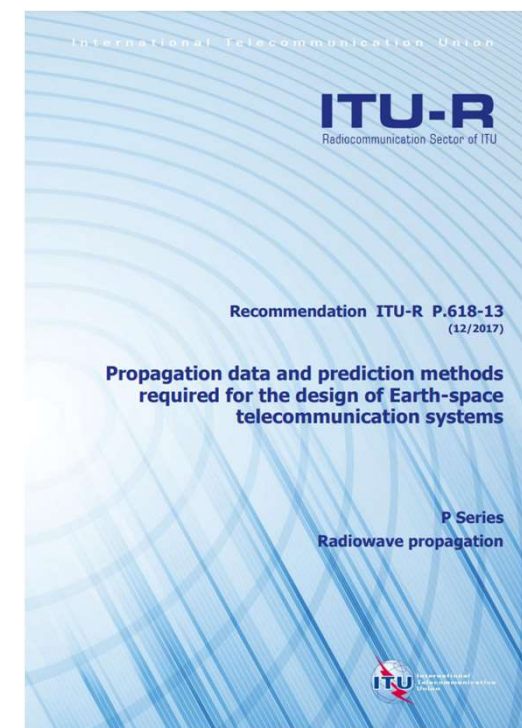
- 大容量、低コストの衛星通信システムへの顧客の関心度が高まっており、Q/V帯(40/50 GHz)やW帯(70/80 GHz)、光通信技術等を活用したVHTS(Very-HTS)の開発を複数の企業や公的機関が進めている。
- 高周波数帯の電波は大気や降雨の影響を受けやすいため、影響把握のための大気モデルや降雨減衰モデルの開発・整備が必要であり、そのために実証実験による観測データの取得が行われている。
- 国内ではスカパーJSATやソフトバンクがHAPSによるNTN通信ネットワークの構築を目指しており、この研究開発の中でミリ波通信の電波伝搬実験や降雨減衰対策技術の検証などを実施している。一方、世界ではESAのARTESやECのQV-LIFTなどの公的機関のプロジェクトにおいてもQ/V帯を含む高周波数帯を利用した通信システムの開発や電波伝搬実証などが実施されている。
- 降雨対策技術に関しては、ATPC(Automated Transmit Power Control)やAMC(Adaptive Modulation and Coding)、ダイバーシティ法などを単独、もしくは組み合わせて利用するための開発・検証が進んでいる。
- 日本は先進的な降雨レーダーを持っていることから、降雨レーダーを活用した降雨減衰推定法の検討も進められており、日本の強みになる可能性がある
- 降雨減衰予測(周波数スケージング)では、降雨の種類による雨滴粒径分布に対応した手法が日本の研究者から提案され、推定精度が向上する結果も示されており、降雨減衰予測関連は一つの強みになり得る
- また、Ku帯地上マイクロ波回線の干渉を避けるために、Ka帯の衛星通信を世界に先駆けて開発した経緯もあり、このような経験がQ/V帯などの新たな高周波数帯衛星の開発に資するものとする

- 衛星通信の大容量化への要求や、衛星サービスの拡大に伴う周波数枯渇の問題から2000年代以降Ka帯の活用が進んできたが、更なる大容量・低コスト化にむけてQ/V帯などへの顧客の関心度が高まっている
- Q/V帯などの高い周波数帯の電波伝搬は大気ガスや降雨の影響を大きく受けるため、衛星システムの設計には大気モデルや降雨減衰モデルの精度が重要になる
- 上記のような電波伝搬特性の推定手法等はITU勧告において示されている
- 一方で、これらの伝搬モデルの実際の性能は必ずしも信頼できる評価がなされているわけではないため、Q/V帯を含む高周波数帯の活用に向けて、降雨減衰影響などの評価のために各社で実証実験が進められている

ITU-R勧告 P.618-13 (2017/12)

大気影響や降雨減衰に関してレポートされている主要なITU-R勧告

ITU勧告	内容
ITU-R P.618-13	Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems
ITU-R P.676-13	Attenuation by atmospheric gases and related effects
ITU-R P.837-7	Characteristics of precipitation for propagation modelling
ITU-R P.838-3	Specific attenuation model for rain for use in prediction methods
ITU-R P.840-6	Attenuation due to cloud and fog



高周波数帯の電波伝搬へ影響を及ぼすもの

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- 電波伝搬へ影響を及ぼすものとして、大気ガスによる吸収やシンチレーションなどの影響が考えられるが、**高周波数帯では特に大気ガスの吸収が強く影響を及ぼす**

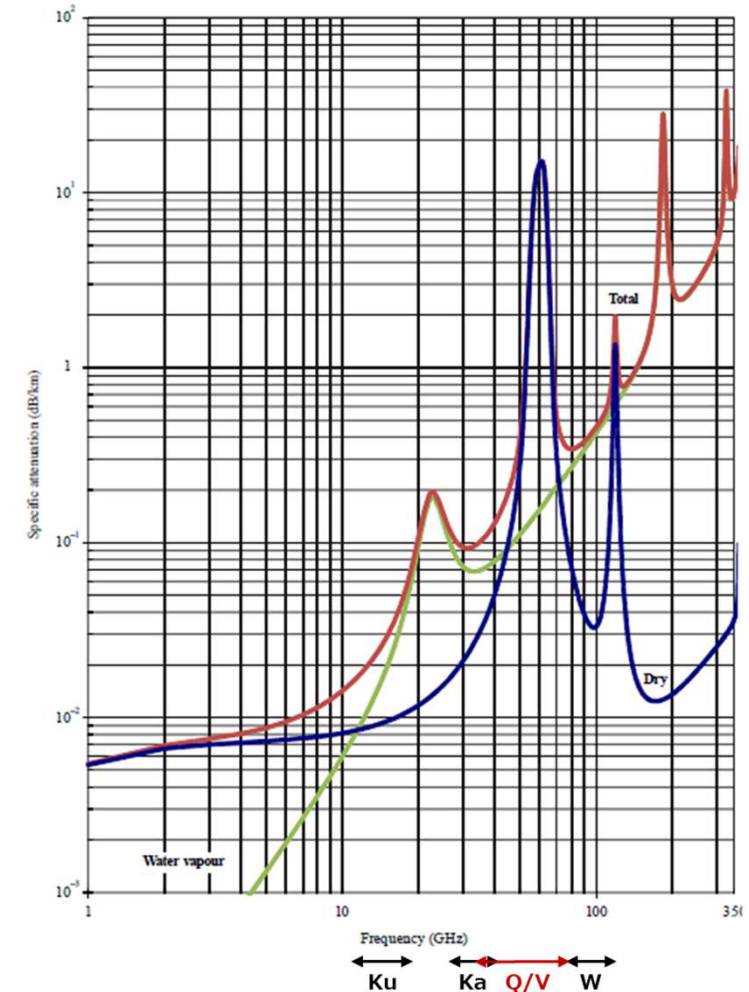
【大気ガスによる吸収】

- 損失を伴う媒質中では電波は指数関数的に減衰
- 大気ガスによる減衰は10 GHz以下の周波数では通常無視してよいが、**低仰角では10 GHz以上、特に準ミリ波(20~30 GHz)以上の高周波数では大気による減衰の重要度が増す**
- 大気ガスによる減衰は主に吸収によるもので、周波数や仰角、海拔高度、水蒸気密度(温度)などに依存する
- 主に水蒸気と酸素による吸収が大きくなり、**水蒸気は22 GHz近辺に、そして酸素は60 GHz近辺に吸収のピークが現れる**

【シンチレーション】

- シンチレーション：電子密度が不規則な電離層や屈折率が空間的・時間的に変動する大気中を電波が通過する際に振幅(強度)や位相、偏波面が短期的に変動
- 衛星通信に影響を与えるシンチレーションは、電離層に起因する電離層シンチレーション(Ionospheric Scintillation)と対流圏に起因する対流圏シンチレーション(Tropospheric Scintillation)が存在
- 電離層シンチレーションは周波数の1.5~2乗に反比例するとされており、10 GHz以上の衛星通信システムでは対流圏に起因するものに比べて無視できる
- 対流圏シンチレーションは低仰角で、かつ無降雨時や弱降雨時の運用においては問題になり得る

大気ガスによる吸収係数 [dB/km]



出所) ITU-R P.676-11 “Attenuation by atmospheric gases”

降雨減衰対策のキー技術

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- 従来 of 低周波数の電波を活用した衛星通信システムでは、伝搬路のある場所での降雨の静的な統計特性を利用してあらかじめ降雨減衰の発生を予測し、その予測をもとにあらかじめ送信電力を増やしておく静的な手法(降雨減衰マーヅンの付加)が用いられていた
- ミリ波帯などの高周波数の電波になると静的な手法ではシステムコストが増大するため、降雨強度の動的な性質を把握して、実際に降雨が発生している場所のみに対策を行う動的降雨減衰対策技術の重要性が増している
- その中でもダイバーシティ技術、特にサイトダイバーシティは降雨減衰対策のキー技術

主要な降雨減衰対策技術

降雨減衰対策技術		詳細	特徴
静的方法	① マーヅン確保	場所によりアンテナ径を大きくしたり送信機出力を大きくしたりするなど、回線設計に余裕をもたせる	<ul style="list-style-type: none"> 降雨減衰が小さい場合に有効 アンテナ径や出力に制約がある
動的方法	② ATPC (自動送信電力制御)	降雨のリアルタイムモニタリングを実施することで、降雨減衰量の観測値に応じた送信電力の増力制御を自動で行う	<ul style="list-style-type: none"> 1対1通信において、悪条件下のスループットを最適にできる 回線資源を最適化する機構が必要となるためリンクの複雑度が増す 局在した強雨には効果が小さい
	③ AMC (適応変調符号化)	降雨時には降雨耐性の強いモードに自動的に切り替える	
④ ダイバーシティ法 (サイトダイバーシティ、ルートダイバーシティ、周波数ダイバーシティ、タイムダイバーシティ、衛星軌道ダイバーシティ)		相関の小さい複数のルートを設定、劣化の少ないルートを採用することで通信品質を確保	<ul style="list-style-type: none"> 降雨減衰が大きい場合に有効 複数のルートを設置するため、コストやリンクの複雑度が増加

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- ダイバーシティ法は、降雨減衰量の相関の小さい複数の伝送ルートを用意し、その中で降雨減衰の影響が少ないルートを適切に選択するもの

ダイバーシティ法の分類

ダイバーシティ法	特徴
サイトダイバーシティ	<ul style="list-style-type: none"> 一定以上離れた2地点にそれぞれ地上局を設置し、降雨によって一方の地上局の回線品質が基準値を下回った場合に、他方の地上局に切り替えて回線の品質を確保する方式。
周波数ダイバーシティ	<ul style="list-style-type: none"> 周波数のわずかに異なる二つ以上の電波に同一の通信情報をのせて伝送する方式 狭帯域信号の場合は、複数のキャリア周波数を用いて送信し、受信側においてキャリア周波数に対応したバンドパスフィルタを用いて信号を分離・抽出する
タイムダイバーシティ	<ul style="list-style-type: none"> 時間をずらして複数回コンテンツを伝送する方式であり、受信側は降雨減衰の影響の少ないコンテンツを選択して合成する。 リアルタイムの通信・放送が必要でない場合に有用な方式。
衛星軌道ダイバーシティ (サテライトダイバーシティ)	<ul style="list-style-type: none"> 二つ以上の複数の衛星通信回線を確保し、電波伝搬路の環境条件(降雨等)に応じて通信回線を切り替えることで通信品質を確保する方式。

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- 複数の方式がある中で、サイトダイバーシティは衛星通信において降雨減衰の影響を軽減する有力な手法だと考えられている

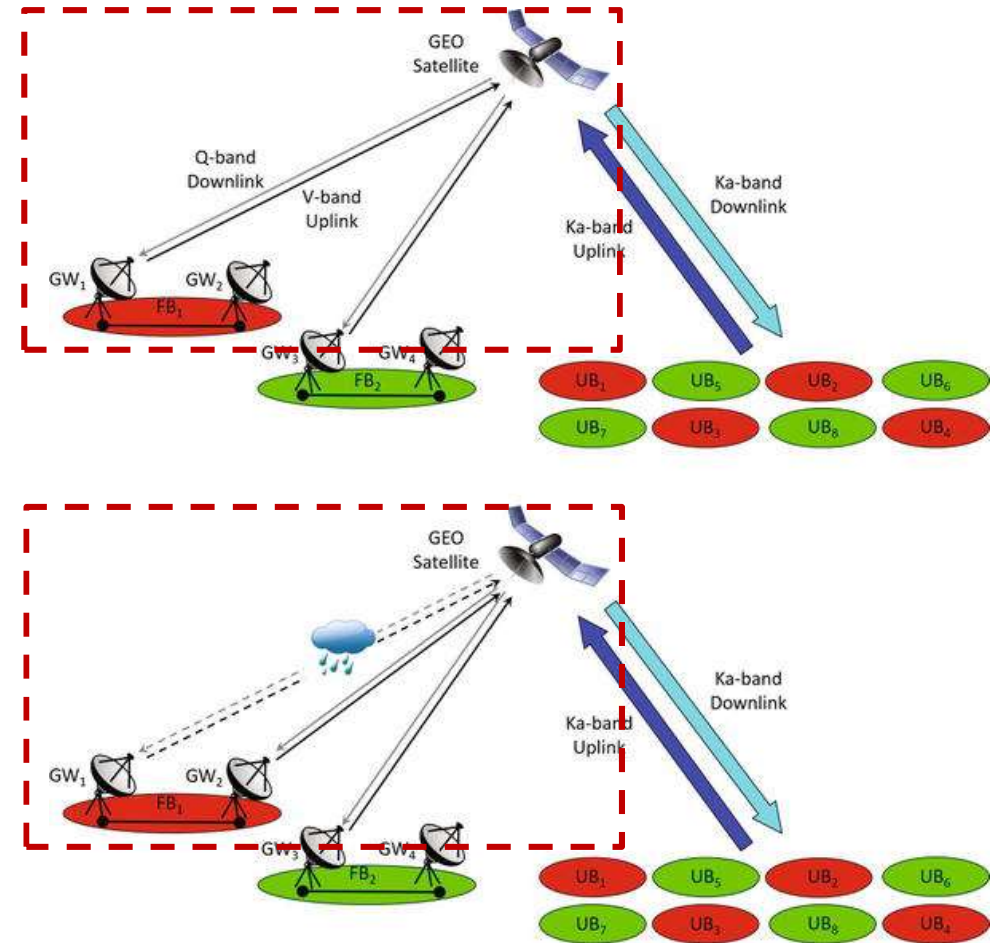
【サイトダイバーシティの特徴と開発の方向性】

- サイトダイバーシティは、一定程度以上離れた2地点間では同時に強い雨の降る確率が小さいことを利用したものであり、地上局間の距離は一般的には20 km程度離れば良いとされている

※ただし、台風の頻度が多い日本ではより大きな距離が必要とされている

- 複数サイトでの降雨予測を正確に実施し、適切なタイミングでダイバーシティ切り替えを行うためのアルゴリズム開発なども行われている
→ 降雨レーダーなどの活用
- 例えば、副局側で晴れているのが明白なのであれば、主局において雨が降る前に事前にサイトダイバーシティ切り替えを行うことでスループット低下を防げる
→ ただし、切り替えが頻繁になってしまう可能性もある

シングルサイトダイバーシティの運用イメージ



出所)「Ka-to-W Band EM Wave Propagation: Tropospheric Effects and Countermeasures」, Lorenzo Luini et.al. 2017

降雨減衰関連の研究開発

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- 欧州や日本を中心に、Ka～Qバンドによる降雨減衰推定に関する研究を実施

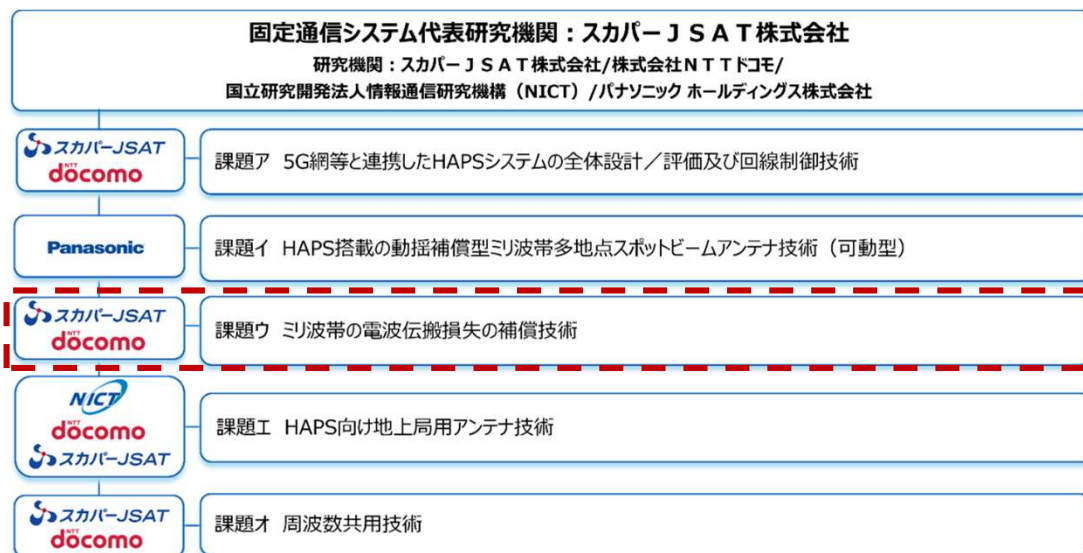
事業者・研究機関 プログラム等	国・ 地域	テーマ	詳細
スカパーJSAT NTTドコモ	日本	HAPSからの38GHz帯 の電波伝搬実験	<ul style="list-style-type: none"> 2022年10月には成層圏下層(上空約14km)から地上の受信機への38GHz帯の電波伝搬実験を実施し、世界で初めて電波伝搬測定に成功 降雨の影響を受けやすいミリ波の伝搬に対して、従来の国内における静止衛星システムを利用した携帯電話のバックホール回線と同等の接続性を確保することを目指し、複数の地上局を切り替えて通信品質を担保するサイトダイバーシティ技術の実証なども実施
Aldo Paraboni Mission	欧州	Ka/Qバンドの大気伝 搬特性の明確化	<ul style="list-style-type: none"> Inmarsatが開発した静止通信衛星Alphasatの4つの技術実証ペイロードのうちの一つ「Aldo Paraboni Q/V Communications and Propagation」による将来の通信アプリケーションのための新しい周波数探索 北・中央・南イタリアの各地で電波を受信し、ITUによる降雨減衰推定値と比較実証すると同時にサイトダイバーシティによる降雨減衰の低減効果を確認
ESA ARTES	欧州	Kaバンド衛星通信シ ステムの統計デー タの測定と評価	<ul style="list-style-type: none"> 熱帯地域(マレーシア)におけるKaバンド衛星通信システムの特性を評価する「KaTropical」プロジェクト 熱帯地域をカバーするKaバンドSatComシステムの開発のための無線チャネルモデリングと地上システム要件の特性評価を改善することを目的としている 降雨や雲による減衰の統計的分布に関する現在の予測モデルの精度評価やフェージングの持続時間、サイトダイバーシティおよび時間ダイバーシティに関する統計モデルの改善も重要なターゲット
大阪電気通信大学	日本	高周波数帯の衛星 電波に対する気象 の影響評価	<ul style="list-style-type: none"> 衛星通信の長期データとアメダスからの気象情報を32年間にわたり突き合わせて降雨減衰の検証を実施 世界で初めて、電波の減衰が雨量や雨雲の高さの他に地上風速(台風等)の影響も受けることを示す

降雨減衰関連の研究開発：スカパーJSAT

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

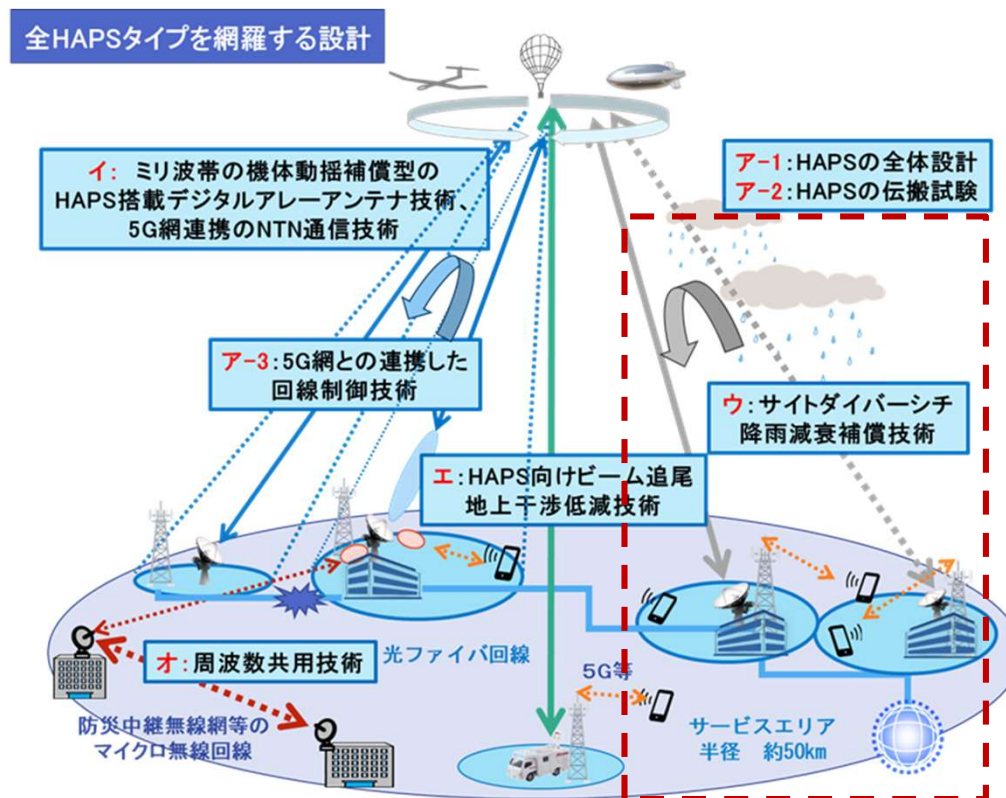
- スカパーJSATとNTTドコモは、成層圏(上空約20km)に通信装置を搭載した高高度プラットフォームであるHAPSを飛行させることによる、空・海を含むあらゆる場所への通信サービスの提供を検討
- 高速通信に適する38GHz帯の電波を利用した、成層圏から地上の固定局への通信サービス提供の実現可能性を実証する中で、降雨減衰の評価も実施
- 本実験は総務省による電波資源拡大のための研究開発「HAPSを利用した無線通信システムに係る周波数有効利用技術に関する研究開発」の一環として実施

「HAPSを利用した無線通信システムに係る周波数有効利用技術に関する研究開発」



出所)スカパーJSAT

HAPSシステムの概要と関連技術



出所)スカパーJSAT

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- Aldo Paraboni Q/V Communications and Propagationは、Alphasatが搭載する4つの技術実証ペイロードのうちの一つで、将来の通信アプリケーションのため新しい周波数を探索するもの
- このプロジェクトと搭載ペイロードはESA、Inmarsat他欧州の約12の機関および産業界のパートナーが参加する官民パートナーシップによる成果であり、2013年7月にギアナ宇宙センターから打ち上げに成功している
- 搭載ペイロードはASI(イタリア宇宙機関)の支援のもと、Thales Alenia Space社とSpace Engineering社(現Airbus Italia社)が開発

【Aldo Paraboni ペイロードを利用した取り組み】

- Kaバンド(19.701GHz)およびQバンド(39.402GHz)における大気伝搬特性をより明確にすることが目的
- イタリアのTito Scalco(南イタリア)とSpino d'Adda(北イタリア)、ローマ(中央イタリア)の3つの地上局でビーコン信号を受信、サイトダイバーシティによって降雨減衰が低減できることを確認
- 近年を同ペイロードにより得られたデータを用いて、降雨減衰の評価(ITU-R推定値との比較等)や降雨減衰モデルの提案、サイトダイバーシティ技術の評価等の研究結果が発表されている

Q/Vバンド通信ペイロード

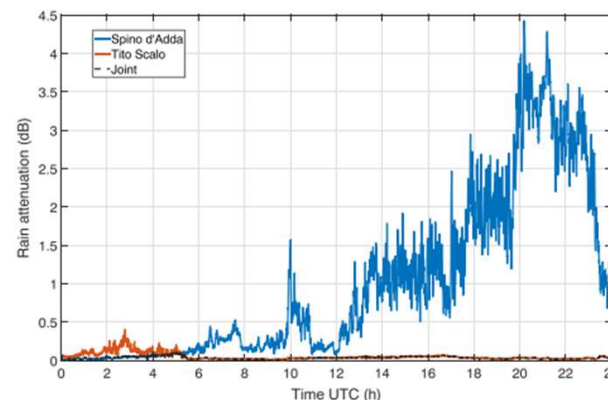


出所)ESA

気候的特徴の異なるTito Scalco、Spino d'AddaおよびRoma



Tito ScalcoとSpino d'Addaにおける降雨減衰低減例



出所)C. Riva et al. 2018, "ropagation experiment : Measurement campaign at the Italian ground stations"

(参考) 近年のAldo Paraboni Q/Vペイロード関連の文献

年	文献名	目的
2018	The Alphasat Aldo Paraboni propagation experiment: Measurement campaign at the Italian ground stations	<ul style="list-style-type: none"> Ka/Qバンドの伝搬特性の理解 イタリア3地点における観測データの処理&分析、および降雨減衰特性の評価
2019	Assessment of spatial and temporal properties of Ka/Q band earth - space radio channel across Europe using Alphasat Aldo Paraboni payload	<ul style="list-style-type: none"> 将来のモデリング、およびフェージング軽減技術のためのデータ収集 Ka/Qバンドの無線チャネルの欧州における空間的および時間的相関を実験的に特徴付ける
2019	Prediction of Channel Excess Attenuation for Satellite Communication Systems at Q-Band Using Artificial Neural Network	<ul style="list-style-type: none"> 過去データや気象データを用いた人工ニューラルネットワークによるQバンド衛星チャネルのフェージング推定
2020	Enhancement of the Synthetic Storm Technique for the Prediction of Rain Attenuation Time Series at EHF	<ul style="list-style-type: none"> 1年間の伝搬データに対して、雨の減衰予測モデル(E-SST)と周波数スケーリングによる予測精度の評価を実施
2023	Site Diversity Experiment in Q-Band Satellite Communications in Slovenia and Hungary	<ul style="list-style-type: none"> リュブリャナ(スロベニア)とブタペスト(ハンガリー)における大規模サイトダイバーシティシステムの性能評価

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

総論

- 大容量、低コストの衛星通信システムへの顧客の関心度が高まっており、Q/V帯(40/50 GHz)やW帯(70/80 GHz)、光通信技術等を活用したVHTS(Very-HTS)の開発を複数の企業や公的機関が進めている。
- 高周波数帯の電波は大気や降雨の影響を受けやすいため、影響把握のための大気モデルや降雨減衰モデルの開発・整備が必要であり、そのために実証実験による観測データの取得が行われている。
- 国内ではスカパーJSATやソフトバンクがHAPSによるNTN通信ネットワークの構築を目指しており、この研究開発の中でミリ波通信の電波伝搬実験や降雨減衰対策技術の検証などを実施している。一方、世界ではESAのARTESやECのQV-LIFTなどの公的機関のプロジェクトにおいてもQ/V帯を含む高周波数帯を利用した通信システムの開発や電波伝搬実証などが実施されている。
- 降雨対策技術に関しては、ATPC(Automated Transmit Power Control)やAMC(Adaptive Modulation and Coding)、ダイバーシティ法などを単独、もしくは組み合わせて利用するための開発・検証が進んでいる。
- 日本は先進的な降雨レーダーを持っていることから、降雨レーダーを活用した降雨減衰推定法の検討も進められており、日本の強みになる可能性がある
- 降雨減衰予測(周波数スケージング)では、降雨の種類による雨滴粒径分布に対応した手法が日本の研究者から提案され、推定精度が向上する結果も示されており、降雨減衰予測関連は一つの強みになり得る
- また、Ku帯地上マイクロ波回線の干渉を避けるために、Ka帯の衛星通信を世界に先駆けて開発した経緯もあり、このような経験がQ/V帯などの新たな高周波数帯衛星の開発に資するものと考え

目次

背景と目的・調査の全体像

① マルチオービット化の動向

② 衛星間光通信

③ 地上通信とNTNの統合

④ Q/V帯活用と降雨減衰対策

⑤ 非再生・再生中継技術

⑥ 将来通信衛星に関連する最新技術動向

研究開発に関する戦略(案)のとりまとめ

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

総論

【一般論：衛星搭載ペイロードの高機能化（非再生中継・再生中継の概要）】

- 通信衛星の高速大容量化、リソース（周波数や電力）割当の柔軟化、軌道上での機能再構成等が要求される。
- 地上局から送信された信号（アップリンク）を衛星上で周波数変換し増幅して地上局に送信（ダウンリンク）する従来型の非再生中継ペイロード（ベントパイプペイロード）ではデジタルチャネライザーやデジタルビームフォーミングが開発され、これらのデジタルペイロードをソフトウェア制御するSDS（Software Defined Satellite）が世界で広く利用されようとしている。海外衛星製造事業者は独自のSDSペイロードを保有し活用している。
- 地上局から送信（アップリンク）された信号を衛星上でベースバンド信号に復調し、誤り訂正やスイッチングなどの処理を行った後、再度変調して地上局に送信（ダウンリンク）する再生中継ペイロードを搭載する通信衛星の開発も進んでおり、今後、衛星間光通信などを見据えてオンボード処理による再生中継ペイロードの開発が激しくなると考えられる。

【非再生中継および再生中継ペイロード】

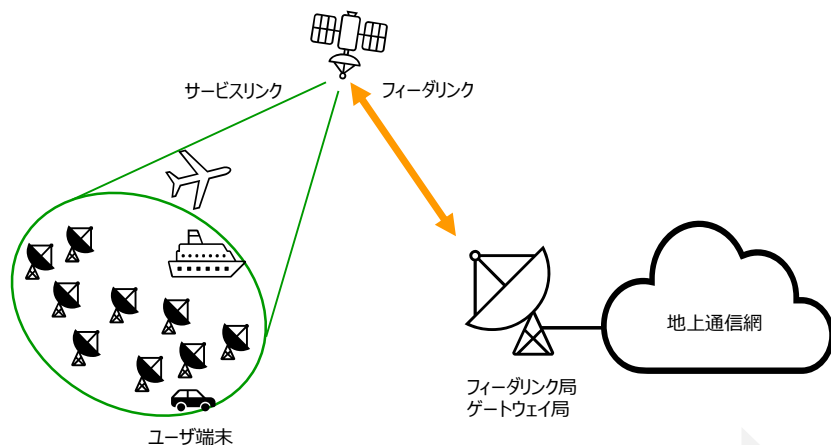
- NTNにおける非再生・再生中継技術については3GPPでも議論が行われており、Rel.18以降、NTNについて議論が深まると思料する。既にRel.17では非再生中継（トランスペアレント）ペイロードがサポートされている。
- 国内ではETS-8やWINDSにおいて再生中継技術の実証が行われたが、技術開発の継続が見られない。また、デジタルペイロードについてはETS-9で実証が行われる予定であるが、海外では非再生中継ペイロードも再生中継ペイロードも商用衛星への搭載実績がある。
- 海外で既に商用フェーズにある衛星搭載ペイロード（SDSや再生中継）をこれからキャッチアップすることは困難、今後のNTNと地上との連携を見据え、海外でも開発が始まったばかりの地上との一体化技術に注力すべきか。

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- ① 衛星の大容量化、リソース(周波数や電力)割当の柔軟化、軌道上での機能再構成等が要求される
- ② 搭載ペイロードの種類
 - ・ 非再生中継は、地上局から送信された信号(アップリンク)を衛星上で周波数変換し増幅して地上局に送信(ダウンリンク)する
 - ・ 再生中継は、地上局から送信(アップリンク)された信号を衛星上でベースバンド信号に復調し、誤り訂正やスイッチングなどの処理を行った後、再度変調して地上局に送信(ダウンリンク)
- ③ ①の要求を②でどのように実現するかがキーポイント

旧来の通信衛星

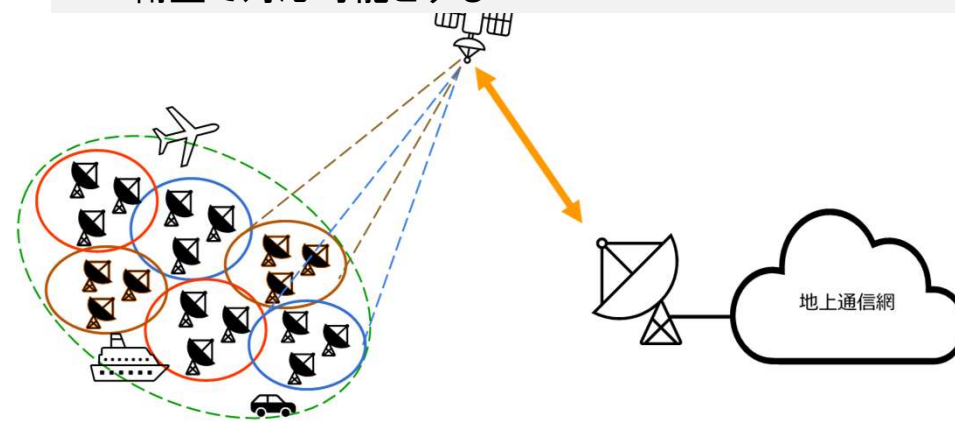
- ・ 1つのビームで広いエリアをカバーする
- ・ 非再生中継ペイロード



多数のビームでサービスエリアを構成し、周波数再利用等による大容量化、ビーム内利得向上による高速化を図る

新たな要求条件

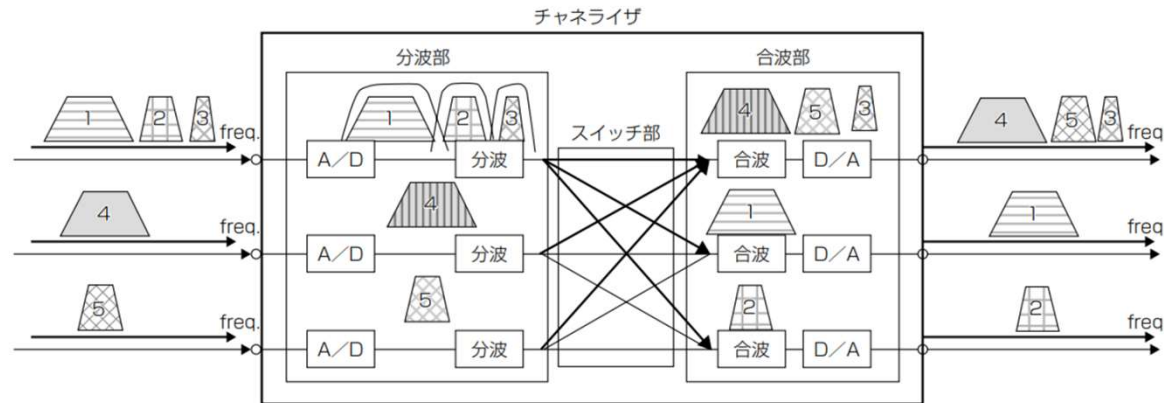
- ・ 高速大容量化(ハイスループット化)
- ・ 加入者数やトラフィック状況の変動への対応
- ・ サービスエリアや軌道の変更に対して打上げ済みの衛星で対応可能とする



- ・ 信号を該当のビームへ伝送するため衛星上でスイッチングが必要
- ・ ビームを所望のエリアに振り向ける機能が必要
- ・ ペイロードのデジタル化、ソフトウェア制御によりペイロードの再構成を行うことで要求条件の変更に対して柔軟に対応

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

- 要求条件の変化に対して柔軟に機能を変更するため、以下の技術が開発されている。
 - ビームごとの周波数割当を柔軟に変更するチャネライザー(デジタルチャネライザー)
 - ビームの指向を柔軟に変更するデジタルビームフォーミング
 - 搭載ソフトウェアによるデジタルペイロード制御



チャネライザーのイメージ

出所)三菱電機技報
<https://www.giho.mitsubishielectric.co.jp/giho/pdf/2014/1402108.pdf>

【従来型ペイロード】

- ビーム照射位置
 - 照射サイズ
 - 通信帯域幅
- 固定

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。



【フルデジタル通信ペイロード】

- ビーム照射位置
 - 照射サイズ
 - 通信帯域幅
- 変更可能

- 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。



ビーム形成のイメージ

出所)JAXA
<https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/project/ets-9/>

■ 従来型のペイロードに比べてフルデジタルペイロードは多くの利点を有する

項目	従来型ペイロード	フルデジタル通信ペイロード
ビーム照射位置・ビームサイズ・照射サイズ	固定	可変 <ul style="list-style-type: none"> 需要やビジネスモデルの変化に応じて軌道上でカバーエリアを変更できる
通信帯域幅	固定	可変 <ul style="list-style-type: none"> 変化するトラフィック需要に対応でき衛星リソースの有効利用につながる
システム	<ul style="list-style-type: none"> ビームを構成する給電素子の組み合わせが変更できない。 1:1あるいは複数の給電素子でビームを構成するが打ち上げ後、構成を変更できない 	<ul style="list-style-type: none"> ビームを構成する複数の給電素子の組み合わせを変更できる。 給電素子アレーがカバーするエリア内では自在にビーム形成ができる。

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

■ オンボード処理による再生中継のメリット

- アップリンクとダウンリンクで異なった方式で通信ができるため端末間の柔軟な接続が可能
- 地上局であるHUBを経由しないで衛星端末～衛星端末間の通信が可能(メッシュネットワークの構成が可能)

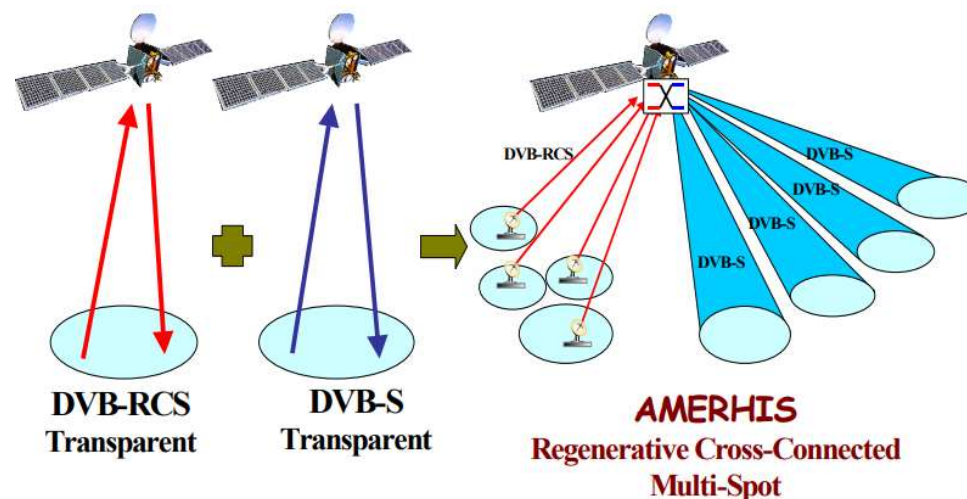
■ アップリンク～ダウンリンク接続

非再生中継(ベントパイプ)ペイロード

- アップリンクがDVB-RCSの場合ダウンリンクもDVB-RCS

再生中継ペイロード

- アップリンクとダウンリンクの通信方式が異なっても通信可能



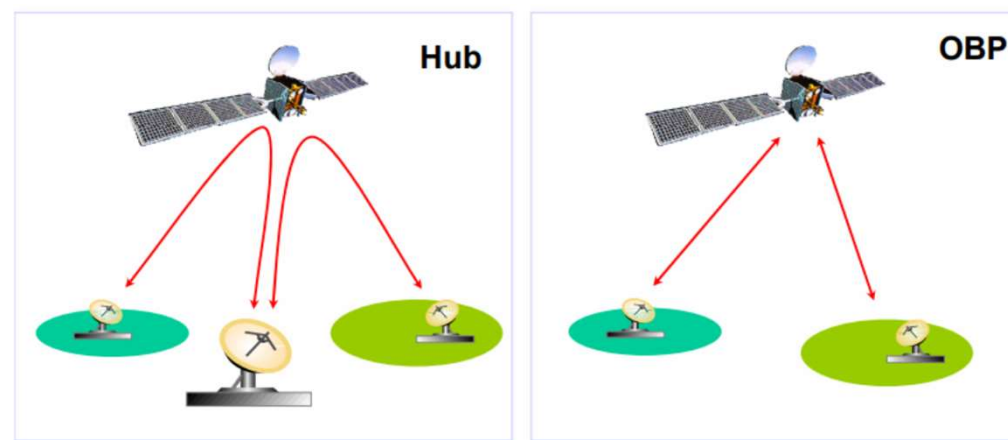
■ 端末～端末間通信

非再生中継(ベントパイプ)ペイロード

- 衛星端末間の通信はハブを中継する必要がある(HUBがスイッチング機能を担う)

再生中継ペイロード

- アップリンクとダウンリンクの通信方式が異なっても通信可能(オンボードでスイッチング)



出所) <https://www.dlr.de/rd/Portaldata/28/Resources/dokumente/RA/Rodriguez.pdf>

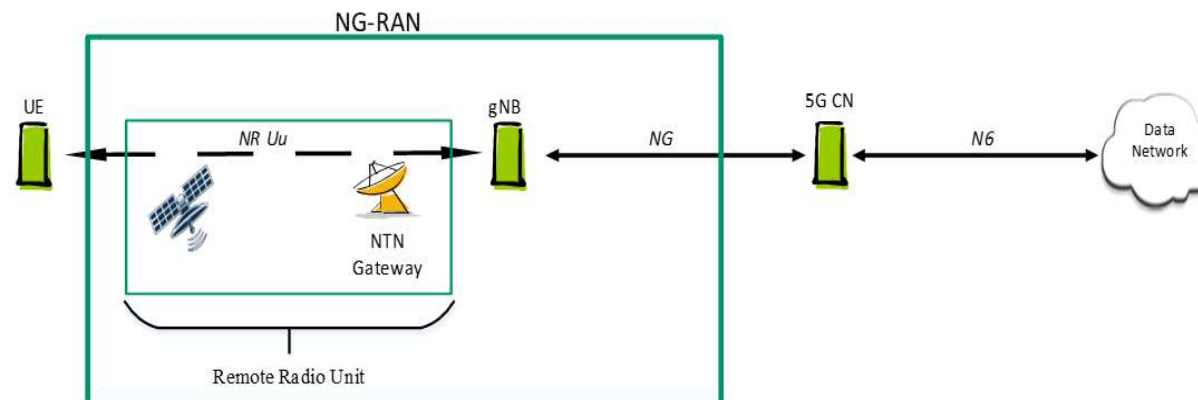
NTNにおける非再生中継と再生中継

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

3GPPにおける非再生(トランスペアレント)中継および再生(ノントランスペアレント)中継ペイロードの扱い

トランスペアレント衛星による無線アクセスネットワーク

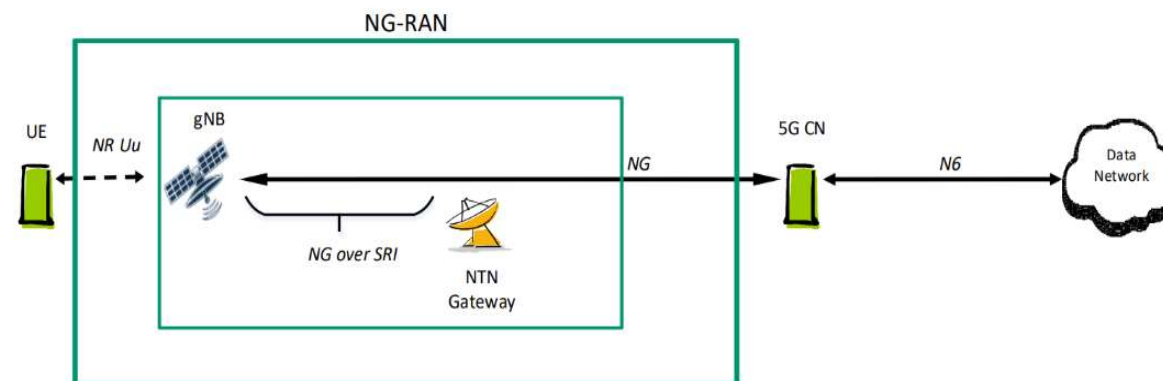
- 衛星区間はNR(New Radio) Uuインターフェース(無線端末から基地局へのアップリンク(上り回線)と基地局から無線端末へのダウンリンク(下り回線)から構成されるインターフェース)で接続される。
- トランスペアレントペイロードはアップリンクとダウンリンクを接続するために周波数変換、フィルタリング、信号の増幅などを行う。



出所) 3GPP TR 38.821

gNB処理機能ペイロードを有する再生中継衛星

- 地上局から送信した信号は衛星ペイロードで再生され、衛星区間はgNB(NR基地局)となる。
- UE(User Equipment: 端末)と衛星間のサービスリンクインターフェースはNR Uu(NR radio interface)
- 衛星区間とCN(Core Node)はNG(Next Generation)インターフェースで接続されるため、衛星とNTN Gateway間のフィーダリンクはSRI(Satellite Radio Interface)上でのNGインターフェースで接続される。



出所) 3GPP TR 38.821

非再生中継におけるSDSの動向(1)

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

■ 実験的な衛星も含め既にSDSが打ち上げられている。

N o.	衛星名	事業者	製造事業者	概要
1	QUANTUM	Eutelsat	Airbus Defence and Space	<ul style="list-style-type: none"> バスはSSTLが提供 ESA、Eutelsat、Airbus Defence and SpaceによるPPP体制で構築した実験的なSDSによる通信衛星で動的ビーム成形や電力およびスループットの最適化が可能 2021年7月に打上げ
2	O3b mPOWER	SES	Boeing	<ul style="list-style-type: none"> 702Xを利用した最初のO3b mPOWERを2022年12月、打上げ 高度約8000kmのMEO 衛星あたり5000ビームを生成し、リアルタイムで変化する需要に応じて、容量を動的に変更可能

非再生中継におけるSDSの動向(2)

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

■ 海外の主要衛星製造事業者はSDS (Software Defined Satellite) をプラットフォームとして提供している。

No.	衛星名	事業者	製造事業者	概要
3	Arabsat-7A	Arabsat	Thales Alenia Space	<ul style="list-style-type: none"> ThalesのSDSプラットフォームであるSpace Inspireを利用するHTS 2026年以降、打上げ予定
4	Flexsat	Eutelsat	Thales Alenia Space	<ul style="list-style-type: none"> 需要が集中する地域では、Eutelsatと合併したOneWebのLEOコンステレーションと連携 Space Inspireをベースとする再構成可能ペイロード (C、Kuバンド) 100GbpのHTS 2026年以降、打上げ予定
5	ASTRA-1Q	SES	Thales Alenia Space	<ul style="list-style-type: none"> Space-InspireベースとするDTH 向け再構成ペイロード 2024年、打上げ予定
6	SES-26	SES	Thales Alenia Space	<ul style="list-style-type: none"> Space-InspireベースとするHTS 2024年、打上げ予定
7	Intelsat 41/44	Intelsat	Thales Alenia Space	<ul style="list-style-type: none"> Space-InspireをベースとするHTS 2025 年以降、打上げ予定
8	Intelsat 42/44	Intelsat	Airbus Defence and Space	<ul style="list-style-type: none"> Intelsatの次世代SDN (Software Defined Network) のOneSat衛星 2023年以降、打上げ
9	Inmarsat GX7.8.9	Inmarsat	Airbus Defence and Space	<ul style="list-style-type: none"> OneSatをベースとする移動体向けの衛星で、数千のビーム動的に形成 2024年以降、打上げ予定
10	Superbird-9	スカパーJSAT	Airbus Defence and Space	<ul style="list-style-type: none"> Superbird-C2の後継衛星として、フルデジタル化ペイロードを搭載するフレキシブル衛星であるAirbusのOneSat型衛星を選定 2024年、打ち上げ予定

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

■ 主要なSDSプラットフォームは以下のとおりである

SDSプラットフォーム 【衛星製造事業者】	概要
Space-Inspire 【Thales Alenia Space】	<ul style="list-style-type: none"> 2020年11月Thales Alenia Spaceは、Space Inspire開発における大きなマイルストーンであるPDR(Preliminary Design Review)の終了を発表。 周波数や電力などの衛星リソースを最大限、効率的かつ効果的に利用し、シームレスな通信とサービスの再構成、需要に対する速やかな軌道上での調整、放送とブロードバンド接続サービスの柔軟性確保を目的としている。 Space Inspireは、衛星の設計・製造において、柔軟で効率的かつ信頼性の高い方法を提供する。 主な諸元 <ul style="list-style-type: none"> ✓ プラットフォーム重量(ドライ) : 2000kg ✓ ペイロード供給電力 : <14kW ✓ 軌道 : 静止軌道 ✓ 推進システム : 電気推進
OneSat 【Airbus】	<ul style="list-style-type: none"> 2021年4月、AirbusはOneSatプロダクトラインの最終設計審査を終え重要なマイルストーンを通過したと発表 再構成可能なOneSatプロダクトラインは、最新のデジタル処理や数千ビームの構成を可能にするアクティブアンテナを備えている。 OneSatは、標準的でモジュラー型の製造設計アプローチに基づいており、既存の通信衛星よりも迅速に、低コストで提供することができる。さらに、軌道上の衛星に対して、動的に適宜(rolling basis)新しい技術を採用できるようにすることで、将来の課題に対応する。 ソフトウェア定義されたソリューションであり、KaあるいはKuバンドの複数の衛星ペイロードミッション間に適応することができ、DTHから高スループットのミッションまで対応できる。

海外のSDSプラットフォームの動向(2)

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

■ Space InspireやOneSat以外にもSDSプラットフォームが開発されている

SDSプラットフォーム 【衛星製造事業者】	概要
LM-400プラットフォーム 【Lockheed Martin】	<ul style="list-style-type: none"> 公共、軍事、民間ユーザーにサービスを提供できるLockheed Martinのフレキシブルな中型の衛星バスLockheed MartinのSDSアーキテクチャであるSmartSat™により、ミッションの柔軟性と搭載データ処理能力が向上しており、地上のミッションオペレーターや意思決定者に実行すべきデータを提供するまでの時間を大幅に短縮。 Modular Open Systems Architecture (MOSA)に準拠し、他のサービスのプラットフォームとの相互運用性を実現しており、Joint All-Domain Operations/Joint All-Domain Command and Control (JADO/JADC 2)に関する国防総省ビジョンを可能とする。 LEO/MEO/GEOに適用可能 主要諸元 <ul style="list-style-type: none"> ✓ バス重量: ≤1000 kg ✓ ペイロード電力: 最大14 kW ✓ 適応ミッション: 画像、リモートセンシング、通信、レーダ
702X 【Boeing】	<ul style="list-style-type: none"> 従来の702プラットフォームをベースとするSDS 702 Xを利用する、SESのO3b mPOWERシステムでは、オペレーターは地上からペイロードを再プログラムすることでリソースを再割り当てすることができる。 製造工程中でも事業計画やミッションプランの変更に対応できるため、リスクを軽減することができる。 主要諸元 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 小型GEOへの適用が可能(2019年8月時点) ✓ 発生電力: 25kWまで拡張可能 ✓ リアルタイムで変更可能な5000以上の可動ビーム

主なSDS(SDRペイロード)計画の経緯

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

■ 海外におけるSDR開発の概要は以下のとおり。

各国の衛星事業者や衛星製造事業者では2019年以前よりSDRおよびSDS計画の開発を進め、SDSシステムの発表は2019年頃から盛んになったとみられる。

Spireは2012年より、画像処理ではなくソフトウェア定義のRFペイロードを実現したいと考えていた唯一の企業であったとしている。以下に、主なSDRの開発経緯をVia Satelliteの記事*から引用する。

- 2013年: Spire Globalは最初のSDR衛星ArduSat-1とArduSat-X (1U Cubesat) をISSから放出し、Spireサーバへのデータ送信を開始
- 2015年: Eutelsatが、柔軟なアーキテクチャとカスタマイズ可能なカバレッジを特徴とするEutelsat Quantumを発表
- 2019年2月: Iridiumが、Thales Alenia Spaceが製造した75機のIridium NEXTコンステレーションの配備を完了。Iridium NEXTでは搭載プロセッサにより、ソフトウェアを再プログラムしてアップグレードすることができる再生中継ペイロードを搭載
- 2019年3月: Lockheed MartinがSDSアーキテクチャであるSmartSatを発表
- 2019年5月: AirbusはInmarsatと次世代のKaバンド静止衛星であるGX 7、8、9の設計、製造、製造契約を締結。これらの衛星は、AirbusのSDSであるOneSatをベースにした最初のもの。
- 2019年9月: BoeingはSDS 702 Xファミリーを発表。702 Xは、SESのO 3 b mPOWER MEOシステム構築にあたりデジタルペイロードとリソース管理技術を組み合わせている。
- 2021年1月: IntelsatはAirbusと2機のSDSの設計、製造、納入契約を締結

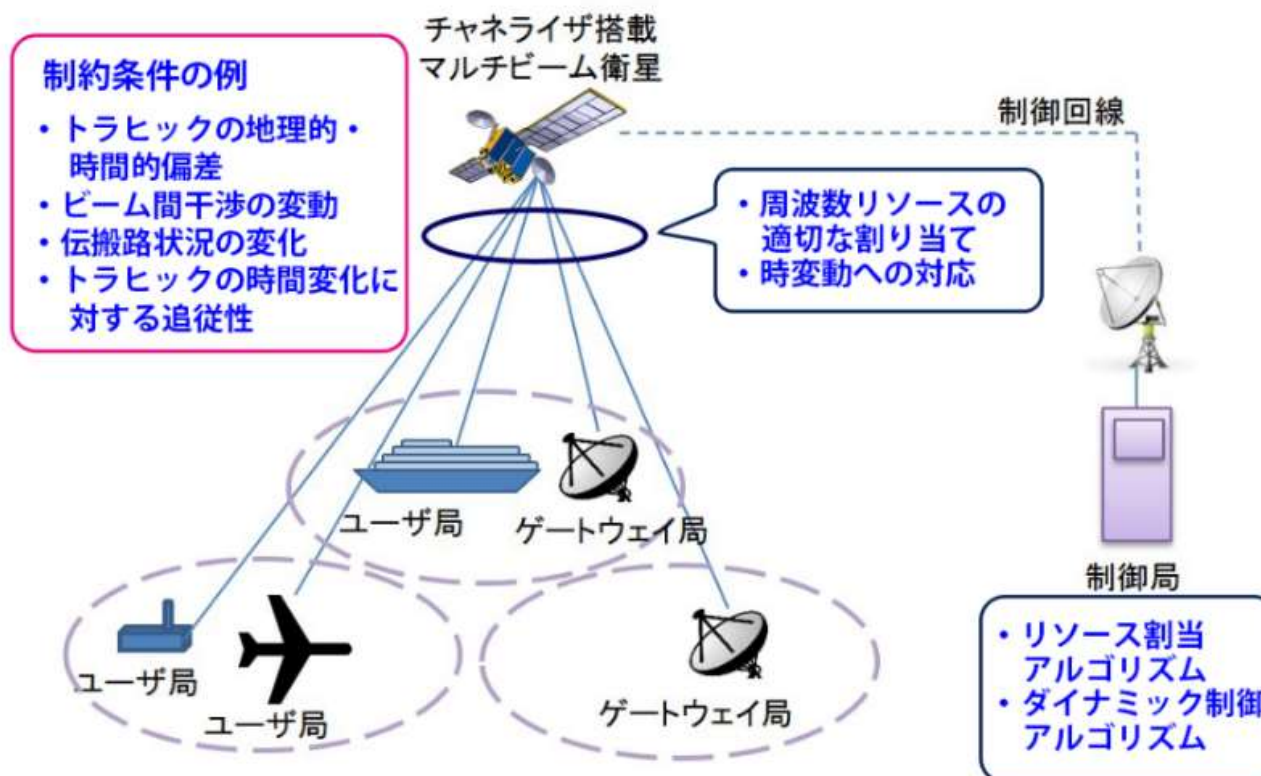
* : Via Satellite (<https://interactive.satellitetoday.com/via/april-2021/how-software-defined-satellites-will-shape-communications/>)

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

■ 技術試験衛星9号機(ETS-9)の開発が進められている

主な開発項目

- ETS-9では、フルデジタル通信ペイロードの開発が進められている。
- フルデジタル通信ペイロードの開発項目を下図表に示す。
- 新技術として周波数フレキシビリティを有するチャネライザ、マルチビーム給電部を搭載する衛星通信システムを取り上げ、有効な制御の仕組みの構築、なやの周波数利用効率(トラヒックの収容率)の向上が課題、とされている



出所)NICT

世界における再生中継ペイロード搭載衛星の状況

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

■ 海外では再生中継ペイロードを搭載した商用衛星が打ち上げられている

No.	衛星名	事業者	製造事業者	概要
1	Iridium NEXT	Iridium Communications Inc.	Thales Alenia Space	<ul style="list-style-type: none"> 2017年より打上げ開始し2019年2月、75機のコンステレーションが完成 48ビームのセルラーパターンを構成するバンドのフェーズドアレイアンテナを採用 Kaバンドリンクは、地上のゲートウェイとの通信および軌道上の隣接する衛星とのクロスリンクにも使用。衛星コンステレーションをクロスリンクすることで、ほぼグローバルに地上や航空機のユーザーからの通信を可能にする。 軌道上ルーティングは、onboard processor (OBP) と a platform computer (PFC) によってソフトウェア制御される。ソフトウェアプログラムは、地上からアップロードも可能。 Raytheon Technologiesの子会社であるSEAKR Engineering LLC (1982年創立) は Digital Channelizer/Beamformers、変復調器、Software-Defined Radiosなどを製造しており、Iridium NEXTの再生中継オンボードプロセッサも提供し、Iridium NEXTにおけるRF channelization、regeneration、packet switching処理を行う。
2	Amazonas 1	Hispasat	Thales Alenia Space	<ul style="list-style-type: none"> 2004年に打上げられ、世界で最初に運用された再生中継、衛星上交換システムで、AmerHis (Advanced Multimedia Enhanced Regenerative Hispasat) プロセッサを搭載 ESAの資金提供を受け開発されたAmerHisプロセッサが搭載されていた
3	Hispasat 36W-1	Hispasat	Thales Alenia Space	<ul style="list-style-type: none"> ドイツのOHB System AG、ESA、HISPASATが開発したSmallGEOプラットフォームにRedSAT regenerativeペイロードを搭載し2017年1月、打上げ RedSATには、再構成可能な4本のKuバンドアップリンクビーム(受信ビーム)を構成するアクティブ直接放射アンテナ(DRA: Direct Radiating Antenna)と、36MHzの再生4チャンネルを構成するオンボードプロセッサが含まれる。
4	SpaceWay 3	Hughes Network Systems	Boeing	<ul style="list-style-type: none"> Hughes Network Systemsが運用する再生中継方式Kaバンドペイロード搭載衛星し、スポットビーム形成、地上端末間のシングルホップネットワークをサポート。 Boeingの702HPバスをベースとし、2007年8月に打ち上げられたHTS オンボードのスイッチングおよびルーティング機能を採用することで、ブロードバンドオンデマンドサービスやブロードバンドIPサービスを提供 スループットは10Gbps

海外における搭載ペイロード技術の開発状況

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

■ 海外では継続的に再生中継技術の開発が進められている。

分野	事業者	概要
再生中継ペイロード	Thales Alenia Space	<ul style="list-style-type: none"> Hispasat-36Wに搭載されたRedSatペイロードは搭載直接放射アンテナ (DRA: Direct Radiating Antenna)は、36 MHz帯域のKuバンドビームにより、4つの再構成可能な領域に対してサービスを提供可能。 4チャンネルすべてを一度に処理可能で、DVB-RCS規格の受信したデータをDVB-S2 (Digital Video Broadcasting Second Generation) 規格信号に変換
	OneWeb	<ul style="list-style-type: none"> 2023年5月20日、Falcon 9により打ち上げられた16機のOneWebのうちの1機はJoeySatと名付けられたOneWebの第2世代LEO衛星のプロトタイプ (OneWeb 0721) を搭載。陸、海、空の移動体に対する宇宙からの5Gサービスの提供を実証することが目的。
非再生中継ペイロード	Airbus Defense Space	<ul style="list-style-type: none"> トランスペアレントデジタルプロセッサ (Transparent Digital Processor: DTP) で、2018年6月に打上げられたSES-12で軌道上実証することによって、周波数の有効利用の推進を図った。ペイロードの柔軟性を利用するために必要な技術と制御システムの開発も含むものであった。 再生型のデジタルビームホッピング (Beam-hopping) で、1秒間に最大1000回の切り替え、および出力変化が可能であり、緊急時など顧客の需要の変化に柔軟に対応できる。デジタルペイロードは、SatixFyが製造、試験、認証などを行っている
要素技術	SatixFy	<ul style="list-style-type: none"> DVB-S2Xなどの規格をサポートするSDR (Software Defined Radio) やESMA (Electronic Steered Multi Beam Antenna) を有する衛星通信モデムを開発している。 数十～数百のビームを生成し、需要に応じてスペクトルを分割できるデジタルビームフォーマとチャネライザ、多数のSDR変調器/復調器を含む再生プロセッサから構成されるRegenerative processor payloadを開発 OneWeb、Satixfy、CGI (英国のConsultants to Government and Industriesを行う企業) が連携して、シームレス5 G、LEO、GEOのハイブリッドソリューションを実証
地上と衛星との一体化	ESA	<ul style="list-style-type: none"> 直接インタフェースと再構成機能による軌道上での柔軟性を備えたデジタル通信ペイロードサービスの提供に特化したフライト品の開発と認定を行うことで、ユニットの開発と認証テストを行うHILINK (high-speed bridge between ground and payload) 素推進。 主契約者はThales Alenia Spaceであり、リアルタイムの動的・仮想・共有かつホスト型ペイロード管理、およびスマートペイロードサービスに適したペイロード管理のための新しい概念を可能にする再構成可能なペイロードコンピュータである。
Photo-Digital Channelizer	EUコンソーシアム	<ul style="list-style-type: none"> EUの資金提供を受けて、将来のTerabit/s通信衛星のための宇宙グレードのフォトニクスハードウェアをサポートするフォトニクス技術の準備を進めている。

日本における再生中継ペイロード搭載衛星の開発状況

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

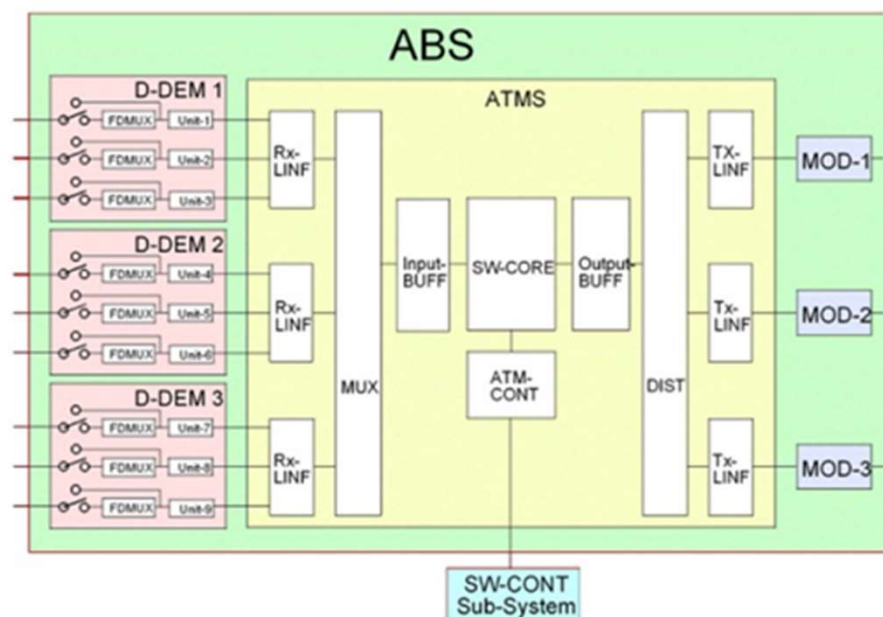
■ ETS-8とWINDSで再生中継ペイロードの開発が行われたが、継続されていない

■ ETS-8

- 2006年12月に打ち上げられた技術試験衛星Ⅷ型「きく8号」(ETS-8)ではNICTが担当したオンボードプロセッサが搭載され、フォワード・リターンリンク接続用の非再生中継(スルーリピータ)ペイロードとオンボード回線交換のための再生中継ペイロードが搭載された。
- パケット交換機は、信号の変調・復調、交換機能を有し、数百kbps以上の伝送速度高速による移動体通信システムを実現した。パケット交換を行なうための制御情報はパケット内に含まれているため、伝送するパケット信号の再生中継を行ない、得られた制御情報をもとにして交換制御する方式がとられた。

■ WINDS

- 2008年に打ち上げられたWINDSではNICTが開発したATM(Asynchronous Transfer Mode)セルをベースバンドで交換するための再生交換中継器(ABS: ATM-based Baseband Switching Subsystem)が搭載された。
- ABSでは、複数の地上局から送信される信号のセルヘッダによって高速に振り分け、同一ビームに送る情報を多重化して送信する機能を有し、複数の信号を効率的に交換できる。



NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

■ 非再生中継や再生中継などの衛星搭載ペイロード分野において今後日本が取り組むべき方向性

		海外	日本
衛星搭載ペイロード技術	非再生中継 (SDS)	<ul style="list-style-type: none"> 近年、海外ではソフトウェア制御による再構成可能なデジタルペイロード(非再生中継ペイロード)を搭載した商用通信衛星(HTS)が数多く打ち上げられる予定 	<ul style="list-style-type: none"> 日本ではETS-9向けのデジタルチャネライザやマルチビーム給電部を搭載する衛星通信システムを開発し宇宙実証を行う予定
	再生中継	<ul style="list-style-type: none"> Thales Alenia Spaceは2000年初めから再生中継ペイロードの宇宙実証を行い、2017年から打ち上げを開始した商用通信衛星のIridium NEXTに搭載。 2007年打上げのHTSであるSpaceWay 3でも再生中継方式を適用 	<ul style="list-style-type: none"> 2006年、2008年に打ち上げられたETS 8、WINDSで再生中継方式通信を実証 その後、開発継続や市場展開は見られていない。
	技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 地上との一体化技術 宇宙でのフォトニクス技術の適用検討 	<p>【日本として実施する技術開発は？】</p> <ul style="list-style-type: none"> 既に商用フェーズにあり2000年初頭から継続して開発が行われている衛星搭載ペイロード(SDSや再生中継)をキャッチアップしオーバーテイクすることはかなり難しい 今後のNTNと地上との連携を見据え、海外でも開発が始まったばかりの地上との一体化技術に注力すべき

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		
③		

総論

【一般論：衛星搭載ペイロードの高機能化（非再生中継・再生中継の概要）】

- 通信衛星の高速大容量化、リソース（周波数や電力）割当の柔軟化、軌道上での機能再構成等が要求される。
- 地上局から送信された信号（アップリンク）を衛星上で周波数変換し増幅して地上局に送信（ダウンリンク）する従来型の非再生中継ペイロード（ベントパイプペイロード）ではデジタルチャネライザーやデジタルビームフォーミングが開発され、これらのデジタルペイロードをソフトウェア制御するSDS（Software Defined Satellite）が世界で広く利用されようとしている。海外衛星製造事業者は独自のSDSペイロードを保有し活用している。
- 地上局から送信（アップリンク）された信号を衛星上でベースバンド信号に復調し、誤り訂正やスイッチングなどの処理を行った後、再度変調して地上局に送信（ダウンリンク）する再生中継ペイロードを搭載する通信衛星の開発も進んでおり、今後、衛星間光通信などを見据えてオンボード処理による再生中継ペイロードの開発が激しくなると考えられる。

【非再生中継および再生中継ペイロード】

- NTNにおける非再生・再生中継技術については3GPPでも議論が行われており、Rel.18以降、NTNについて議論が深まると思料する。既にRel.17では非再生中継（トランスペアレント）ペイロードがサポートされている。
- 国内ではETS-8やWINDSにおいて再生中継技術の実証が行われたが、技術開発の継続が見られない。また、デジタルペイロードについてはETS-9で実証が行われる予定であるが、海外では非再生中継ペイロードも再生中継ペイロードも商用衛星への搭載実績がある。
- 海外で既に商用フェーズにある衛星搭載ペイロード（SDSや再生中継）をこれからキャッチアップすることは困難、今後のNTNと地上との連携を見据え、海外でも開発が始まったばかりの地上との一体化技術に注力すべきか。

目次

背景と目的・調査の全体像

① マルチオービット化の動向

② 衛星間光通信

③ 地上通信とNTNの統合

④ Q/V帯活用と降雨減衰対策

⑤ 非再生・再生中継技術

⑥ 将来通信衛星に関連する最新技術動向

研究開発に関する戦略(案)のとりまとめ

将来通信衛星に関連する最新技術動向

総論

【量子】

- 各国とも研究開発・実証の段階で、現状では商用化の目途は立っていない状況
- 米国は、既存のハードウェアで対応できる耐量子暗号に注力し、量子暗号に消極的
- 日本でも光ファイバーによる地上系量子暗号と、衛星量子暗号の連携が求められる

【衛星IoT】

- 利用シーン・ニーズに合わせて、求められる衛星の規模や通信方式が異なり、各サービスが乱立
- 5GやNB-IoTによる衛星IoTは、携帯電話事業との提携が必要で、衛星システムは海外勢が優勢
- 日本においてライセンス不要な通信を行う超小型衛星コンステレーションの構築を目指すのはあり得る

No	R4年度の調査項目	本報告の トピック
①	5G/6Gに向けた衛星通信システムの調査	
②	新しい衛星通信システムの調査	
③	衛星システムIoTの調査	○
④	衛星間通信による宇宙ネットワークの調査	
⑤	衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査	○

衛星による量子暗号通信 - 量子鍵配送とは

- IRIS²計画でも量子技術は安全なマルチオービット衛星接続システムを確立する上で重要なテクノロジーだと言及されている

量子技術が必要となる背景

近づきつつある量子コンピュータの実用化

- 2019年、Googleが量子超越性(Quantum Supremacy)を実証したと発表
- また、2023年6月にはIBMが古典コンピュータでは効率的に実現できない物質モデルのダイナミクスの再現を量子コンピュータによって実現したと発表[1]
- 2021年、IBMの量子コンピュータが日本で稼働開始しており、実用化が着実に近づきつつある

既存暗号通信技術が解読される

- RSAなどの既存の暗号技術は量子コンピュータの登場によって危殆化
→ 既存のスーパーコンピュータを使っても解読に1億年かかるRSA暗号が、量子コンピュータでは24時間以内で解読できると言われている



対抗のために必要な技術

量子鍵配送(QKD: Quantum Key Distribution)

- 1ビットの暗号鍵情報(乱数)を光子(光の粒子)の1粒ずつに載せて伝送する技術であり、盗聴を確実に検知できる
- 情報理論的安全性を実現
- 高度な機密情報に適する(安全保障等)
- 光ファイバーによる通信では、伝送距離や通信速度に課題 → 衛星利用

耐量子暗号(PQC: Post-Quantum Cryptography)

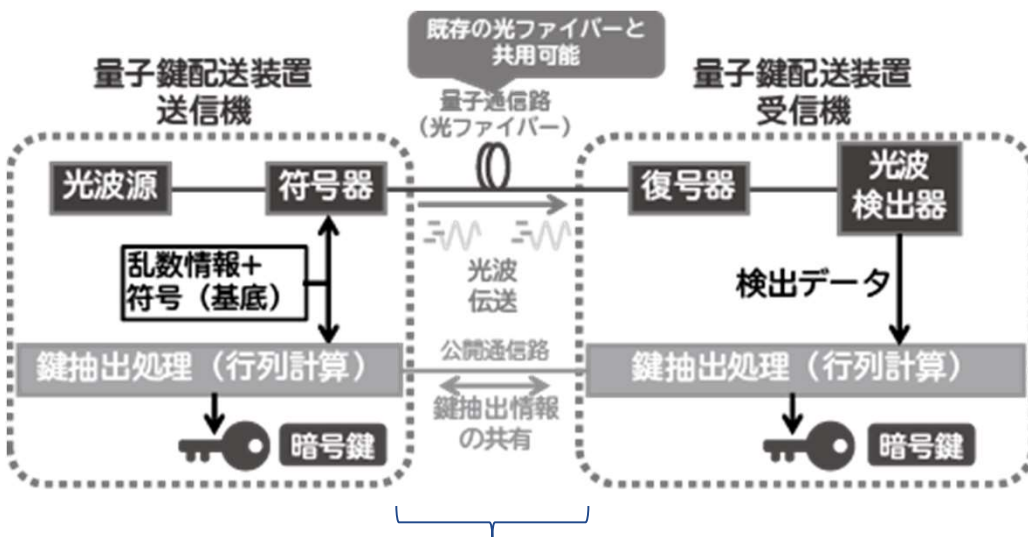
- 量子コンピュータを利用しても安全性の根拠を効率よく崩す方法が見つからない問題で暗号化する技術
- 計算量的安全性
- アルゴリズムの解明や計算機の進展もあるため、将来まで安全性を保障するものではないが、現状のインフラにのる点はメリット

[1] https://newsroom.ibm.com/2023-06-14-IBM-Quantum-Computer-Demonstrates-Next-Step-Towards-Moving-Beyond-Classical-Supercomputing?_gl=1*1mq1gg*_ga*MTcxMjA5MTA0Ni4xNjk1NzE1OTU4*_ga_FYECCS21D*MTY5NTcxNTk1OC4xLjAuMTY5NTcxNTk2My4wLjAuMA..

衛星による量子暗号通信 - なぜ衛星が必要か

- 量子鍵配送の課題である伝送距離を伸長し、グローバルな量子暗号通信網を構築するには衛星の役割が不可欠
- 量子鍵配送では非常に微弱な光を使用するため、地上の光ファイバーで送受信を行うと大きな伝送ロスが発生してしまい、通信距離に大きな制限が発生してしまう
 - ✓ 現在実用可能な量子鍵配送システムの通信きよりは100 km程度
 - ✓ 日本の東芝は2021年、通信距離を最大化する技術を用いて、光ファイバで世界最長となる600km超の伝送を実現したと発表
- 衛星で光子を送受信すると光ファイバより光子が減衰せず、伝送距離を伸ばすことができる
 - ✓ 中国は2021年、衛星・地上間量子通信ネットワーク実験において、4600 kmの量子鍵配送に成功したと発表
- 対象とするLEO衛星は地球を高速で周回するため通信可能時間に制約はあるが、実質的にグローバル(大陸を跨ぐ)な量子暗号通信が可能となる

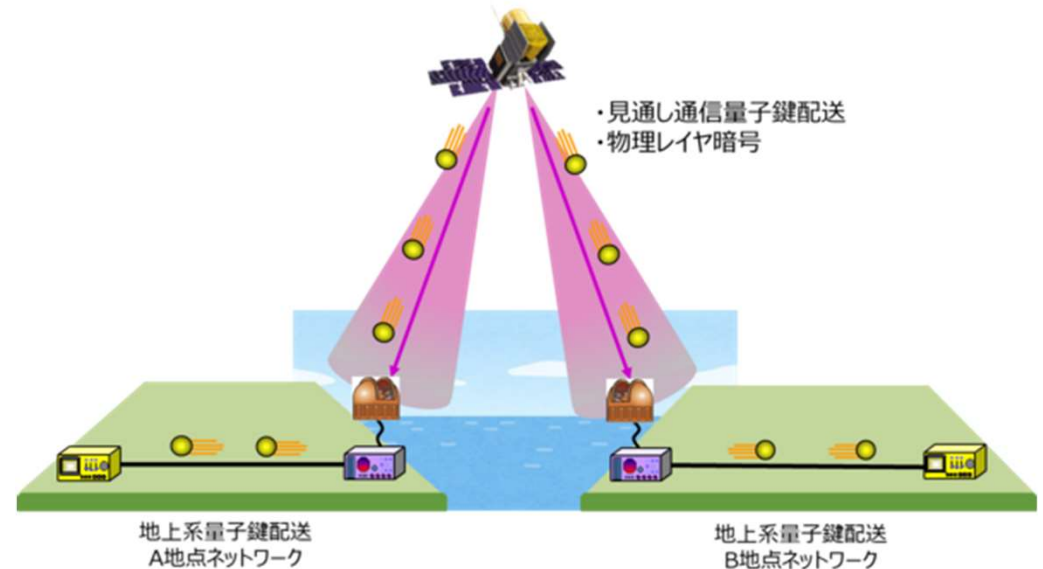
量子鍵配送の仕組み(CV-QKD方式)



微弱な光波を用いるため、地上での光ファイバ網だと伝送ロスが大きい

出所) NEC

衛星を用いた量子暗号通信イメージ



出所) スカパーJSAT

衛星による量子暗号通信に関する各国の動向

NTN	ミリ波帯	再生・非再生
①	④	⑤
②		⑥
③		

- QKDの研究開発や社会実装は、中国が規模やスピードで先行する
- 今年度において、新たなQKD衛星の打ち上げは確認されなかった

国	方向性	政府・民間の動向
米国	<ul style="list-style-type: none"> • QKD研究は低調ないし消滅か • 政府はPQCの標準化と普及に注力 	<ul style="list-style-type: none"> • 2018年に米国家量子イニシアティブ法の成立し、最大 \$ 13億を投資する計画があるものの、QKDへの割り当ては限定的 • NSAは国家安全保障システムへQKDを使用することに対して前向きでない • 一方で、NSAは耐量子暗号（PQC）技術に注力し、商用化も先行 • NASAやMITリンカーン研究所は量子通信の要素技術であるレーザーによる光通信に注力 • 2023年3月にQuSecureとアクセンチュアがPQCによる実証実験を実施 ✓ QuSecure社のテクノロジーにより、この実証はソフトウェア面でのアップデートのみで実現
中国	<ul style="list-style-type: none"> • 既に地上で量子インフラを構築 	<ul style="list-style-type: none"> • 2017年、量子実験衛星Miciusと地上間（距離1,200km、1kbps）で世界初の衛星QKD に成功 • 2021年、Miciusと地上に設置された長さ2,000キロの量子通信ケーブル「京滬幹線」（北京・済南・合肥・上海の4都市をつなぐ量子通信ネットワーク）の接続により、距離4,600キロの衛星・地上間量子鍵配送実験に成功 • 2022年、中国科技大学が製造した量子科学衛星Miciusに次ぐJinan 1を打ち上げ。Miciusの1/6の質量で、今後は QKDに関する各種実証などが実施される予定 • Chinese Academy of Sciences (CAS)とNational Space Science Centerが協力して中高軌道衛星を開発中 ✓ もつれ粒子を生成するQKDに焦点を当てた3機または5機の100キログラム未満の小型衛星を800km太陽同期軌道（SSO）に投入予定
日本	<ul style="list-style-type: none"> • NICT、スカパーJSAT社を中心とした研究開発 	<ul style="list-style-type: none"> • 2017年に衛星を用いたQKD 研究開発が宇宙基本計画に明記され、衛星QKDの研究開発がスタート • 東芝社が地上系QKDに関する事業や研究開発を積極的に行っている。 • 総務省の研究開発公募案件として、2つのプロジェクトが進行中 ✓ 衛星通信における量子暗号技術の研究開発（2018～2023年度） ✓ グローバル量子暗号通信網構築のための衛星量子暗号技術の研究開発（2021～2025年度） • スカパーJSATは、物理レイヤ暗号通信の実現に向けて、東京スカイツリーと地上可搬局の光伝送実証を実施 • 2023年8月に光通信装置をISSへ打上げ、宇宙空間-地上間での光通信実証を実施中 • グローバル量子暗号通信網構築のため静止軌道との通信を実現する受信機を開発中

衛星による量子暗号通信に関する各国の動向

- ・ シンガポールやインドで新たな研究開発の動きがある

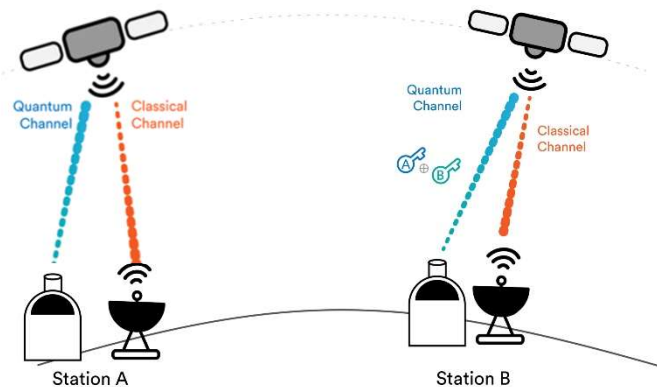
国	方向性	政府・民間の動向
欧州	<ul style="list-style-type: none"> ・ プロジェクトなどを通じた欧州全体での動きが顕著 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ESAは、LEO-QKD商業サービス提供を目指すQUARTZとQKDSatの両プロジェクトを進めていた。また、長距離量子衛星通信の実証を目指すTeQuantSを2023年から支援している。 ・ QUARTZ <ul style="list-style-type: none"> ✓ SES社を中心とする産業コンソーシアムがBB84プロトコルによるLEO衛星ベースQKDを2024年から3年間「Eagle-1」衛星で実施予定 ✓ 2023年5月にSES社は、TESAT社を主要パートナーとしてペイロードの開発と統合を行うと発表 ✓ 2023年11月に地上局は、オランダの研究機関と企業を中心として構築することが発表された。 ・ QKDSat <ul style="list-style-type: none"> ✓ Arqit社（イギリス）が率いる産業コンソーシアムが2023年の商用サービス開始を目指していた。 ✓ 2022年12月に同社が撤退を表明。2023年5月には同社のQKD関連部門は売却される可能性が高いと報じられる。 ・ TeQuantS <ul style="list-style-type: none"> ✓ タレス・アレニア・スペース社を中心としたコンソーシアムが、2026年までの長距離量子衛星通信の実証を目指している。 ✓ 2023年1月にESAがARTESプログラムの一部として支援することを発表 ・ QUDICE <ul style="list-style-type: none"> ✓ 2023年1月に開始し、6か国11の機関・企業が共同でQKDコンポーネントの研究開発を実施している。 ・ 量子通信ハブ（Quantum Communications Hub）（イギリス） <ul style="list-style-type: none"> ✓ 政府プログラムとして、複数のベンチャー企業に資金提供を行い商用QKDの開発を推進 ✓ 12UのCubeSatを2024年に打ち上げる予定で、連続量QKDと離散量QKDの両方の端末が搭載される。
その他	<ul style="list-style-type: none"> ・ シンガポールやインドが活発化 	<ul style="list-style-type: none"> ・ SpeQtral社（シンガポール） <ul style="list-style-type: none"> ✓ シンガポール国立大学からスピンアウトしたスタートアップ企業で商用QKDサービスの実用化を目指している。 ✓ 2019年にキューブサットで実証を実施 ✓ 2024年に二つの衛星で実証を行う予定。2023年、欧州の企業に搭載機器や衛星バスを発注 ・ インド <ul style="list-style-type: none"> ✓ 2023年4月にインド政府は、「National Quantum Mission（国家量子計画）」を発表 ✓ 2030年までに量子分野に600億ルピー（日本円で約1000億円）を投じ、インド国内での衛星QKD実現を目指している。

欧州での新たな研究開発プログラム: QUDICE

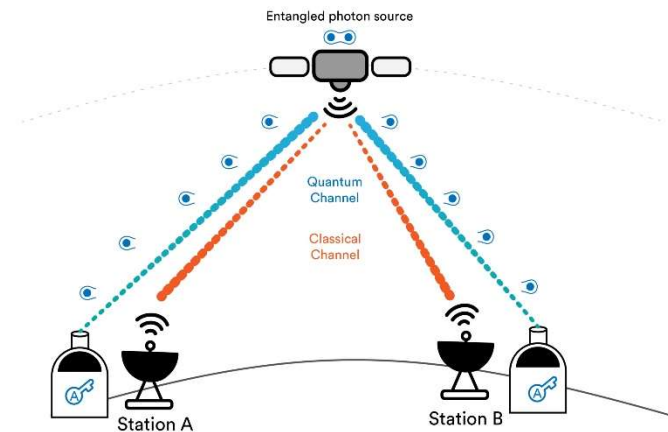
- 欧州で2023年1月に新たな研究開発プログラム「QUDICE」が始動した
 - 複数の暗号プロトコル・通信方式による量子暗号通信の実証を目指している
 - 欧州の6カ国から11の研究機関と企業が共同で実施しているプログラム
 - ✓ イタリアのパドバ大学が中心となり、企業としては、SateliotやThales Alenia Spaceが参画している
 - 前身のプログラムである「QUANGO」は12UのIoT用の5G規格QKD衛星を開発していた
 - 離散量QKDと連続量QKDの2つの暗号プロトコルにそれぞれ対応した2つのコンポーネントを2024年末までに開発し、2025年に実証することを目指している
 - 通信方式も2つの方式を実証する予定
 - ✓ 連続方式では、衛星内に秘密鍵を保存し、二つの基地局と時間差でそれぞれ通信を行うことで長距離通信を行う
 - ✓ 同時方式では、二つの地上局と同時に通信を行い大陸内で通信を行う
- 量子暗号通信に関して規格が定まらない中で複数の方式について同時に試行していると推測される

通信方式

連続方式



同時方式



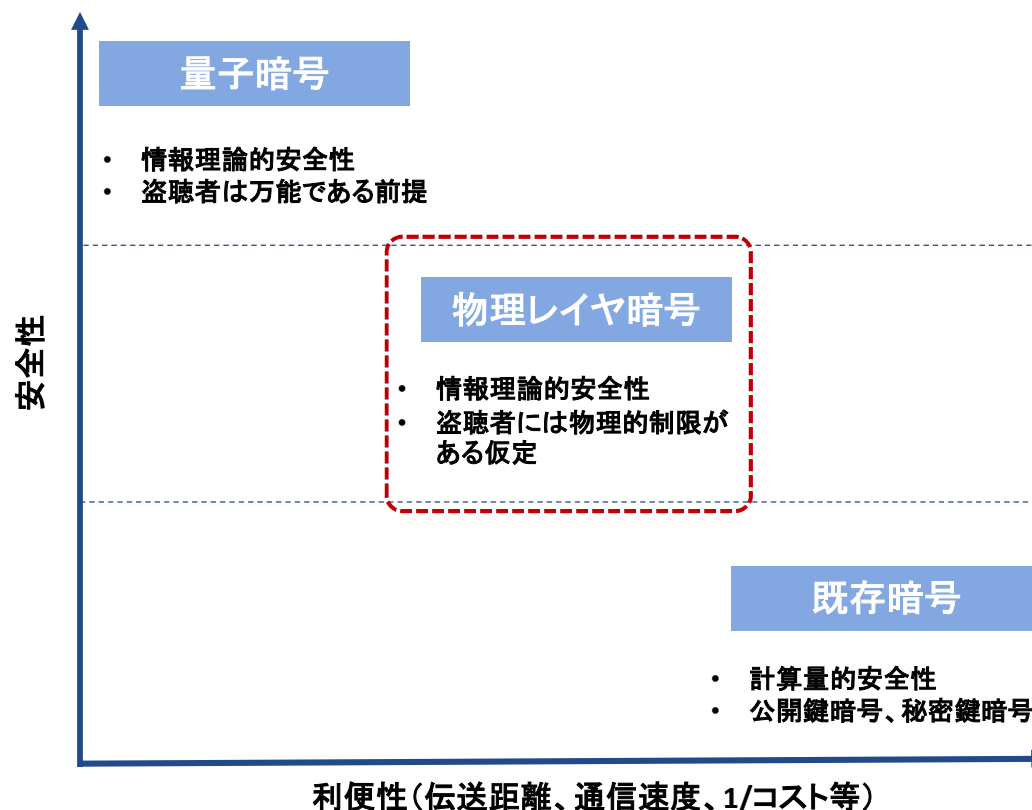
出所)QUDICE

日本における量子暗号通信に関する研究動向

- 日本は量子暗号通信に関する要素技術において高い技術力をもつ
 - ✓ NICTを中心に研究開発を進め、2010年にTokyo QKD Network(フィールド実証のためのテストベッド)を稼働
 - ✓ ITU-TにおけるQKD関連勧告7件の成立に日本の技術が活かされ、標準化を主導
 - ✓ 東芝デジタルソリューションズは2021年にNTTと共同で、QKDとPQCを組み合わせた柔軟かつ拡張性に富む暗号鍵配送システムの検証に成功
 - ✓ NICTは衛星-地上通信などの見通し通信で適用可能な「物理レイヤ暗号」の研究開発にも注力
- 一方で、商用ネットワークにおける実証では中国がスピード・規模双方で後塵を拝しており、技術的優位性を活かすかたちでグローバルの商用ネットワークにどう組みこんでいくかが重要な課題

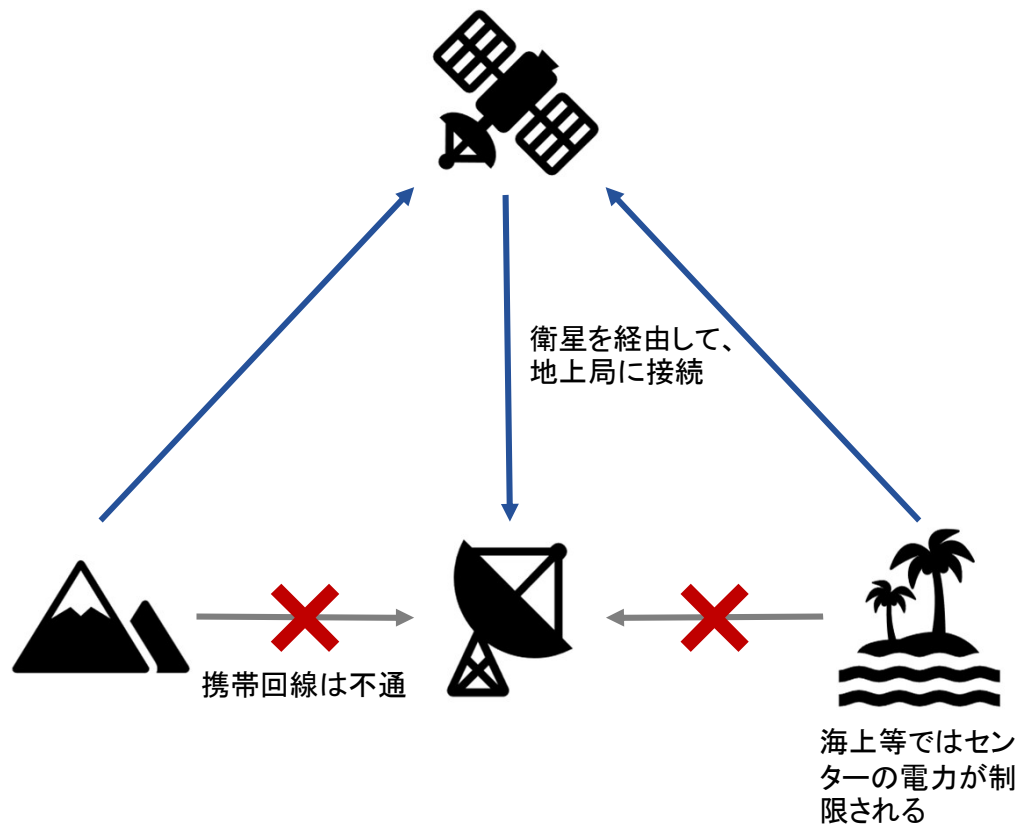
物理レイヤ暗号とは

- ✓ 見通し通信では、伝送路での盗聴者の有無が様々な手段で確認でき、盗聴者が可能な攻撃は「受動的盗聴」に合理的に制限可能
 - ✓ この盗聴者への合理的仮定を課すことにより、伝送性能の大幅な改善が期待できる技術
 - ✓ 盗聴者に対する仮定が満足されている限り解読不可能であり、情報理論的安全性を実現
- NICTやスカパーJASATなどは、総務省の研究開発プロジェクトである「衛星通信における量子暗号技術の研究開発」において、低軌道衛星-地上可搬局とでの光通信技術を応用した安全な暗号鍵共有技術(物理レイヤ暗号)の技術実証に成功



衛星システムIoT概要

- IoT衛星は、地上や海上に設置されたIoTセンサーが取得した情報をセンサー情報の集約局やユーザーに伝送するための衛星
- 携帯電話回線などの地上の通信設備が利用できない山間部や海上のIoTセンサーについて、衛星を介した通信が期待されている
- 衛星IoTの特徴として、通信量は少ないが地上センサの電力制限が厳しいことが多い
- 電力制限や通信容量に応じて、複数の通信方式が乱立している



衛星IoTで用いられる主な通信方式

- **5G:**
高速・大容量の衛星通信が可能。大規模なLEOコンステレーションが必要。
- **LTE:**
従来の衛星携帯電話規格。低容量のデータ通信も可能なため、IoTに転用可能。
- **NB-IoT:**
LTEの周波数帯の隙間を利用できる。2022年の3GPP Release 17で5G NB-IoT NTNが規格化される。
- **LoRa:**
ライセンス不要。通信速度は低いが、省電力で通信可能距離が長く、静止衛星との通信も可能。
- **独自規格:**
ライセンス不要の周波数帯を用いることが多い。データ量を極限まで削減し、省電力化が可能。

衛星システムIoTの代表的プレイヤー

- ニーズごとに各規格が乱立。LTEのみNB-IoTに移行する動きがある

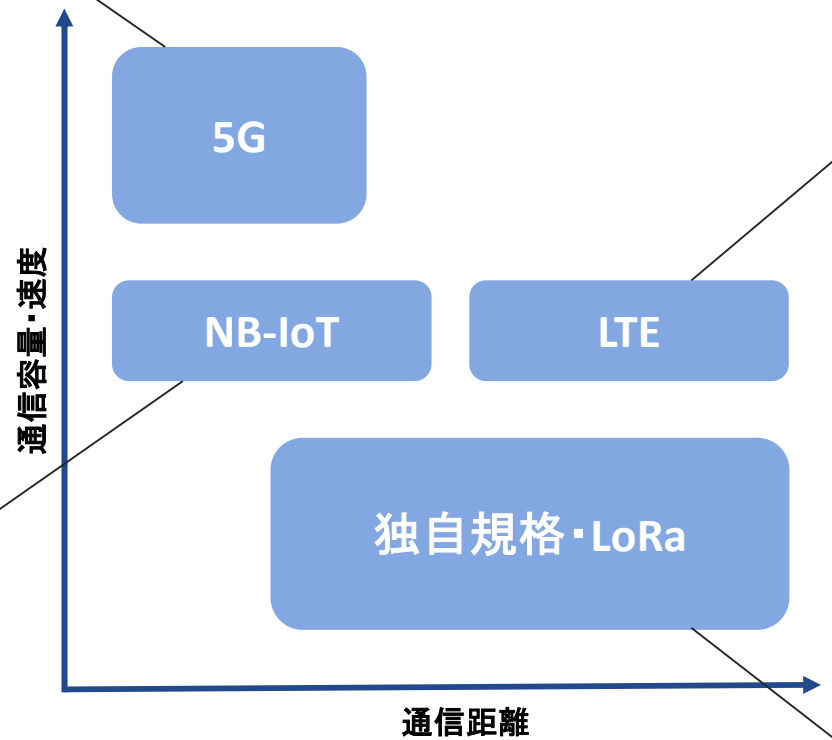
5G衛星コンステレーション

- 代表的なプレイヤー
 - ✓ **Starlink (米)**
IoTコンステレーションを計画していたSwarm Technologiesを買収。同社はStarlinkの開発に合流
 - ✓ **Project Kuiper (米)**
Amazonの衛星コンステレーションでIoT分野への参入も予定している

NB-IoT

- 代表的なプレイヤー
 - ✓ **Sateliot (スペイン)**
23年4月に5G NB-IoTに準拠した衛星を打ち上げ、7月に実証に成功
 - ✓ **OQ Technology (ルクセンブルク)**
23年1月に5G NB-IoTの実証に成功

衛星IoTの通信方式



LTE

- 代表的なプレイヤー
 - ✓ **Iridium (米)**
Project Stardustを開始し、今後はNB-IoTを用いて、5G規格との互換性を確保することを目指している
 - ✓ **Globalstar (米)**
将来的には、NB-IoTによる双方向IoT通信サービスを採用する予定

独自規格・LoRa

- 代表的なプレイヤー
 - ✓ **Myriota (豪)**
独自の通信規格による環境、農業、鉱業向けのサービスを展開
 - ✓ **Lacuna Sapace (英)**
LoRa規格による32機体制の超小型衛星コンステレーションを構築予定

衛星システムIoT: Sateliot(スペイン) / Apogeo Space(イタリア)

- Sateliotは、23年4月に3GPP Release 17の5G NB-IoT NTNに準拠した衛星を打ち上げ
- Apogeo Spaceは、1/3Uサイズのピコ衛星によるコンステレーションを構築中

Sateliot(スペイン)

- 2023年4月に3GPP Release 17の5G NB-IoT NTNに準拠した通信を行う6Uサイズの衛星を打ち上げた
- 2023年7月にスペインの携帯電話事業者Telefónicaと提携し、通常のSIMカードとIoT端末で実証実験を実施した
 - ✓ 地上側は、追加のハードウェアを購入せずに、衛星や携帯電話のネットワークとシームレスに接続できるようになることをめざしている
- 最終的には250機からなる衛星コンステレーションを構築する予定

Sateliot衛星のイメージ

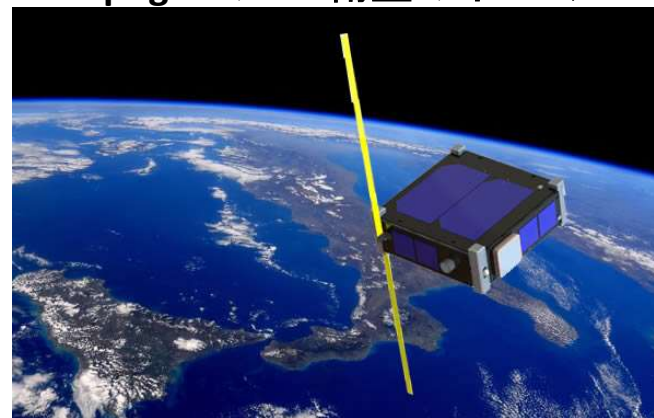


出所) Sateliot

Apogeo Space(イタリア)

- 2023年11月に最初の運用衛星9機を打ち上げ
 - ✓ 衛星はキューブサットの3分の1の大きさのピコ衛星
 - ✓ 通信規格はLoRa
 - ✓ 2024年に9機以上を打ち上げる予定
 - ✓ 最初の約20機の衛星ネットワークにより、地球上あらゆる場所から最大30分の待ち時間でデータを取得でき、コンステレーション全体で継続的な通信が可能になるとしている。
- 最終的には2027年までに96機からなる衛星コンステレーションを構築する予定

Apogeoのピコ衛星のイメージ



出所) Apogeo Space

目次

背景と目的・調査の全体像

① マルチオービット化の動向

② 衛星間光通信

③ 地上通信とNTNの統合

④ Q/V帯活用と降雨減衰対策

⑤ 非再生・再生中継技術

⑥ 将来通信衛星に関連する最新技術動向

研究開発に関する戦略(案)のとりまとめ

本調査の全体像

各調査項目における調査結果総論を踏まえ、今後のアクションへの示唆を整理

調査項目	NTNの構築	ミリ波帯の適用	非再生・再生中継技術
<p>主な論点</p>	<ul style="list-style-type: none"> マルチオービット化によるNTN構築はどこまで進んでいる 衛星間通信ネットワークにおける衛星間光通信技術の現状と課題は何か NTNと地上通信を統合する上で留意すべき点は何か 	<ul style="list-style-type: none"> ミリ波帯などの高周波数帯を活用する背景は何か 降雨減衰など、ミリ波帯活用時に留意すべき点は何か 降雨減衰対策において重要となる技術は何か、また研究開発はどこまで進んでいるか 	<ul style="list-style-type: none"> 現在主流となる非再生中継においてキーとなる技術は何か 衛星のソフトウェア化はどこまで進んでいるか 再生中継技術の技術的課題は何か
<p>調査結果総論</p>	<ul style="list-style-type: none"> 海外では複数軌道の衛星を連携して運用する事業者も現れる NTN構築の中で、HAPSについては、大手通信事業者を中心に実証が進んでおり、将来的に日本で強みを発揮できる可能性のある領域 	<ul style="list-style-type: none"> 欧州や日本でQ/V帯活用の検討が進むが、ほとんどが研究段階 欧州のプログラムの一部でQ/V帯通信ペイロードを搭載した衛星が打ち上げられ、実証が進む 予測モデルの確立等で強みを出せる可能性あり 	<ul style="list-style-type: none"> 従来型の非再生中継ではデジタルペイロードをソフトウェア制御するSDSがキー技術 再生中継ペイロードを搭載する通信衛星の開発も各国で始まる
<p>今後のアクションへの示唆</p>	<ul style="list-style-type: none"> NTNの中でも、先行するHAPS開発は引き続き注力 光通信端末において、日本がこれから物理層の技術に参入していくのは困難、ハンドオーバーやルーティング機能のような制御系の領域に注力するのが妥当か 	<ul style="list-style-type: none"> HAPSを活用した降雨減衰の実測・評価とデータの蓄積、高周波数帯の降雨減衰推定モデルの高度化は積極的に後押し 	<ul style="list-style-type: none"> 海外で既に商用フェーズにある衛星搭載ペイロード(SDSや再生中継)をこれからキャッチアップすることは困難 今後のNTNと地上との連携を見据え、海外でも開発が始まったばかりの地上との一体化技術に注力

日本の強み・弱みの整理

- 全体として商用化では遅れをとるが、個別の要素技術では強みの出せる領域(HAPS、量子鍵配送技術等)もあり

領域

強み・弱み

研究開発の方向性

領域		強み・弱み		研究開発の方向性	
NTN	マルチオービット衛星運用	○	<ul style="list-style-type: none"> 海外事業者はマルチオービット衛星運用の商用サービスを開始して先行 HAPSは国内外問わず研究開発・実証フェーズの中、日本でも実証が進んでいる点が強み 	<ul style="list-style-type: none"> 災害の多い日本では、災害時の通信手段確保に資するHAPSは日本の地理的特性に合致しており、海外勢と同等に先行するHAPSの研究開発・実証の推進 光通信装置については、日本がこれから物理層の技術に参入するのは困難、ハンドオーバーやルーチング機能のような制御系の領域に注力するのが妥当 	
	衛星間光通信	要素技術	△		<ul style="list-style-type: none"> JAXAによる光衛星間通信システム「LUCAS」や、NECやワークスペースなどで光衛星通信技術の開発が進められるものの、それは海外も同様
		光通信装置	×		<ul style="list-style-type: none"> 海外では既にMynaric社やTesat社がSDAやCCSDSの規格に準拠した光衛星通信装置の商用での提供を開始、これから日本の事業者がキャッチアップするのは困難
	NTN/地上通信の一体化(セキュリティ/レジリエンス)	△	<ul style="list-style-type: none"> NTNと地上を一体化した通信網におけるセキュリティへの取り組みはこれから 通信の機密性を高める要素の一つである量子鍵配送の要素技術で強みを出せる可能性あり 		
ミリ波帯の適用	降雨減衰予測技術	○	<ul style="list-style-type: none"> 日本では高精度な降雨減衰予測モデルを研究する研究者がいる 日本が持つ先進的な降雨レーダーを活用した降雨減衰推定法が確立できれば大きな強みになり得る 	<ul style="list-style-type: none"> HAPSを活用した降雨減衰の実測・評価とデータの蓄積、Q/V帯を含む高周波数帯の降雨減衰推定モデルの高度化を積極的に後押し 	
	降雨減衰対策技術	○	<ul style="list-style-type: none"> スカパーJSATやドコモなどが中心となってミリ波帯の伝搬実験を実施 降雨減衰対策法の一つであるサイトダイバーシティ技術の検証などをHAPSを活用して先行して実施 		
再生・非再生中継	非再生中継技術(SDS)	△	<ul style="list-style-type: none"> 日本では技術試験衛星9号機(ETS-9)においてフルデジタル通信ペイロードの開発が進められているが、現状は実証段階であり商用化には時間がかかる 海外では既に商用衛星への非再生中継ペイロードの搭載実績あり 	<ul style="list-style-type: none"> 海外で既に商用フェーズの衛星搭載ペイロード(SDS等)をこれからキャッチアップは困難 NTNと地上との連携を見据え、海外でも開発が始まったばかりの地上との一体化技術に注力 	
	再生中継技術	×	<ul style="list-style-type: none"> 海外では既に商用フェーズにある再生中継技術を活用したペイロードを衛星に搭載、日本がこれからキャッチアップして市場を獲得することはかなり難しい状況 		
令和4年度調査項目	衛星システムIoT	×	<ul style="list-style-type: none"> 日本ではIoT向けの小型衛星コンステの計画がなく、IoT向け衛星の研究開発が進まず 日本国内では衛星IoTサービスを提供する海外事業者と国内通信事業者が提携しており、これから日本の事業者が当該領域に進出するのは難しい状況 	<ul style="list-style-type: none"> 日本は地上でのQKD技術において最先端技術を保有 衛星QKDの開発にこれらを活かすことや、研究開発を進める物理レイヤ暗号技術を推進するための政策的後押しが望まれる 	
	衛星による量子暗号配送システム・要素技術	○	<ul style="list-style-type: none"> 地上における量子鍵配送については、東芝が世界最先端の技術を保有 日本で研究開発・実証が進む物理レイヤ暗号や地上における量子鍵配送の技術を活かすことで当該領域で大きな強みを発揮できる可能性 		

【凡例】

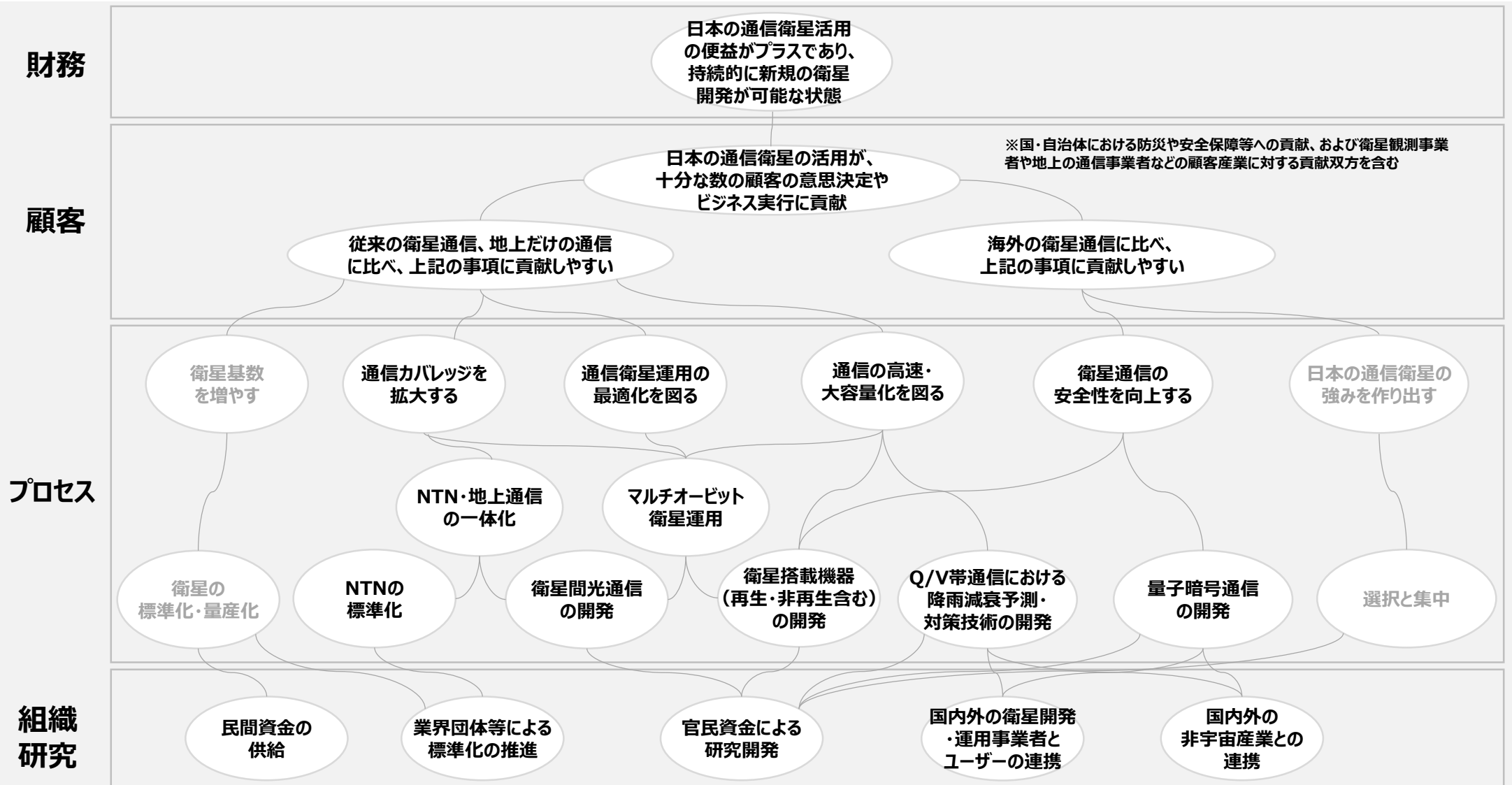
○：現状の官による支援を継続して実施する等により将来的に世界レベルでのプレゼンスを発揮できる可能性あり

△：海外勢に劣後する分野・領域であり、将来的にプレゼンスを発揮するためには、これまでの延長線上には無い積極的かつ大胆で新たな官による支援・介入等が必要

×

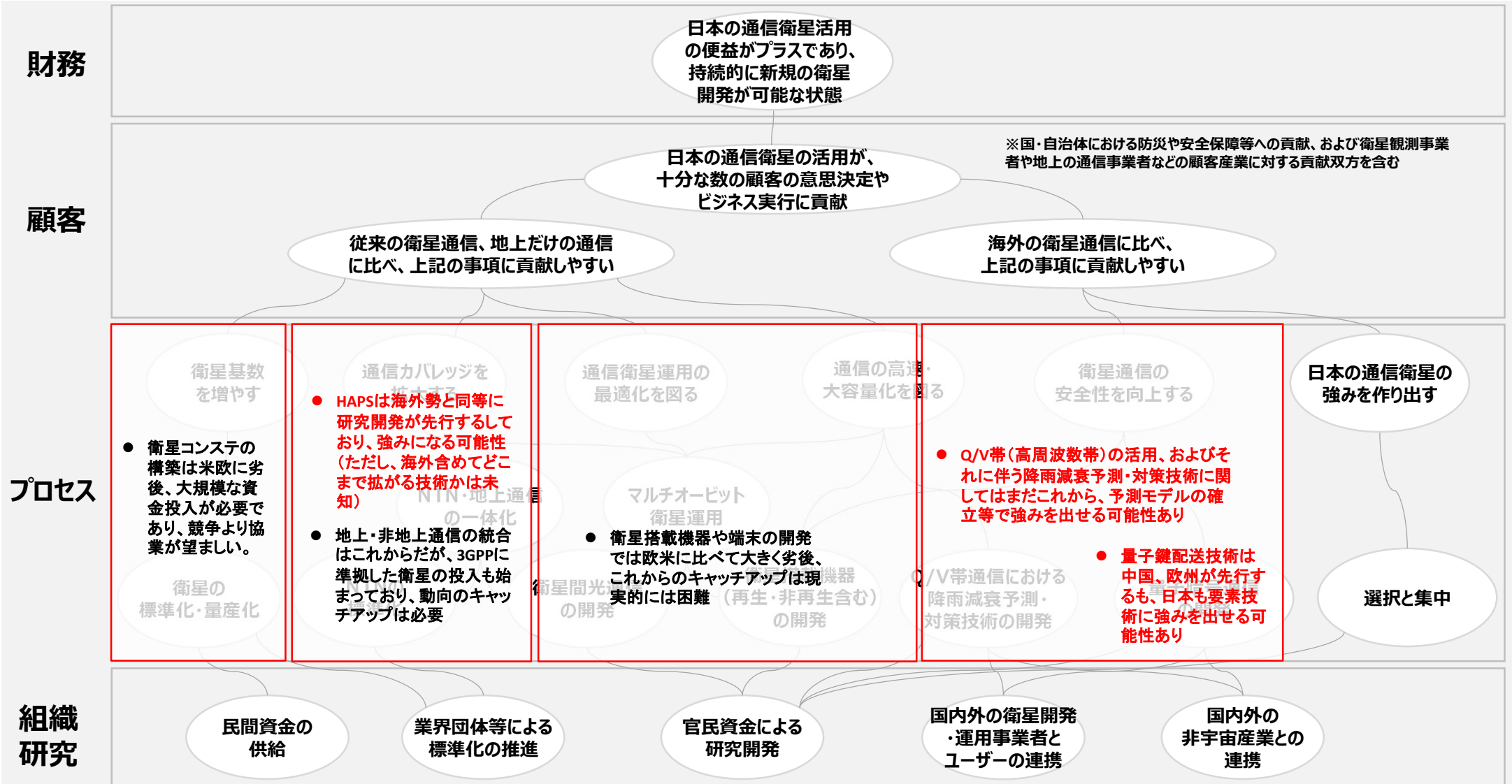
戦略マップ(案)

- 量の部分(衛星、機器・端末の量産)は国際協業が必要。質の部分で強みを出す必要があり、現状の技術トレンドや標準化動向をキャッチアップした上で、選択と集中で日本の強みを際立たせる必要がある。



戦略マップ(案)

- 量の部分(衛星、機器・端末の量産)は国際協業が必要。質の部分で強みを出す必要があり、現状の技術トレンドや標準化動向をキャッチアップした上で、選択と集中で日本の強みを際立たせる必要がある。



衛星通信に関するプログラム

- 日本及び海外の衛星通信が対象となっている研究開発プログラムをまとめる
- 日本の研究支援プログラムについては、先端分野に特化したものを含む各種支援制度が用意されている
- 米国ではCSPが一つのテーマについて、複数企業に競争させる形のプログラムを実施している
- 欧州ではARTESが衛星通信の全ての分野・ステージを対象として、支援を実施している
- 英国ではSpace Cluster Fundingが研究開発拠点や実証環境の提供に焦点を当てたプログラムとして実施

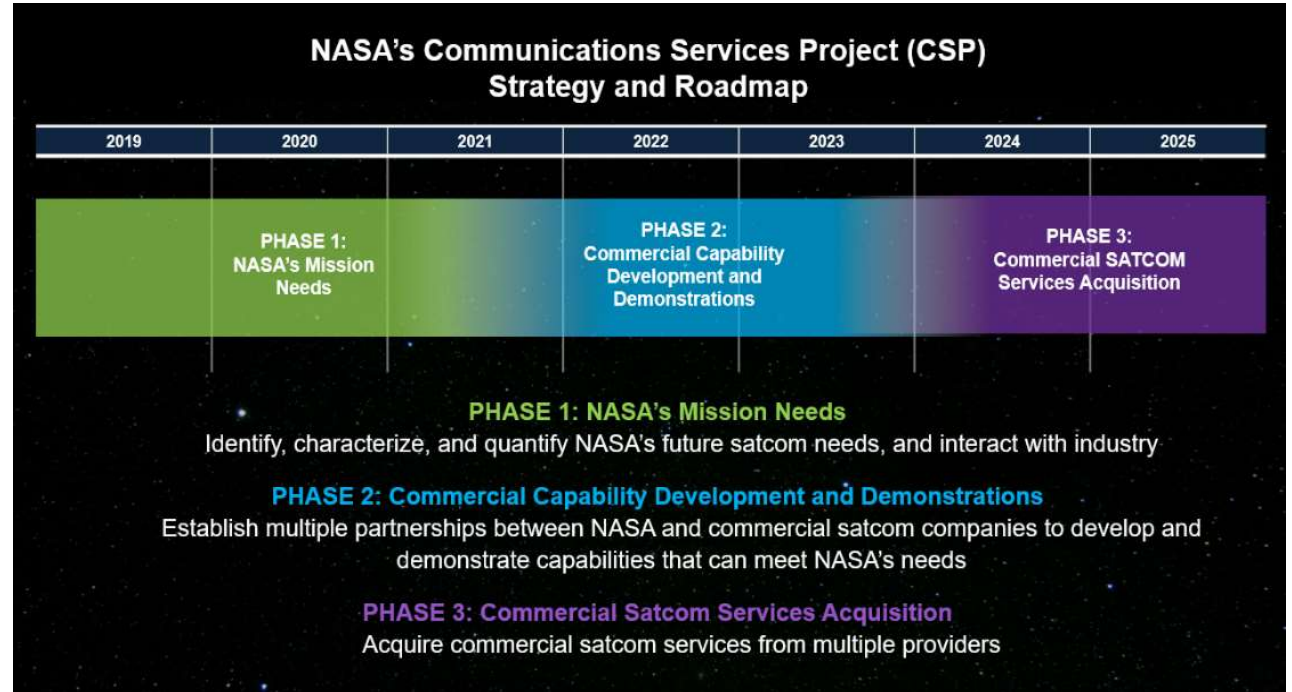
国名	プログラム名	提供機関	支援手段	支援内容
日本	革新的衛星技術実証プログラム	JAXA	軌道上実証機会の提供	企業・大学が開発した衛星や機器にJAXAが打ち上げ機会を提供。IoTやXバンドでの通信の実証を実施
	「Beyond 5G研究開発促進事業」及び「革新的情報通信技術(Beyond 5G(6G))基金事業」	NICT	研究開発支援	最大年24億円でHAPSやQ/V帯に関する研究開発への支援を実施
	ICT重点技術の研究開発プロジェクト	総務省	研究開発支援	年2-14億円でQKDや光通信に関する研究開発への支援を実施
	経済安全保障重要技術育成プログラム(通称「Kプロ」)	内閣府/NEDO	研究開発支援	年18-75億円で船舶通信向け衛星や光通信に関する研究開発への支援を実施
	日本版SBIR推進プログラム(一気通貫型)	NEDO	研究開発支援	年0.2-1億円で光通信に関する研究開発への支援を実施
米国	SBIR	NASA	研究開発支援	年25-85万ドルで宇宙全般の研究開発への支援を実施
	Communications Services Project (CSP)	NASA	研究開発支援	複数の企業に対して、年500-1750万ドルでNASAの既存通信システムを代替するための民間システムの研究開発を支援
	Space-BACN	DARPA	研究開発支援	LEOコンステ同士でシームレスな通信を可能にする研究に対して支援を実施
欧州・カナダ	ARTES	ESA	研究開発支援	衛星通信分野の各研究開発プログラムに対して10万ユーロ以上を支援
英国	National Space Innovation Programme	UKSA	研究開発支援	年100-500万ポンドでQKDや光通信に関する研究開発に対して支援を実施
	Space Cluster Funding	UKSA	インフラ整備支援	最大60万ポンドを各地域の大学・企業による宇宙関連の研究設備の整備に対して提供。同時に研究開発用の電波免許の利用も許可
	Satellite Applications Catapult	Innovate UK	ビジネス支援	産業界と学術界をつなげる支援を行う。通信では5Gに関するプログラムを実施

衛星通信に関するプログラム

海外の支援プログラムから我が国の研究開発プログラムへの示唆

【政府保有通信衛星の民間への切り替え】

- NASAのCSPプログラムはNASAの既存の通信システムを民間で代替するサービスの開発を支援している。
- 日本で導入する場合、政府が保有している通信衛星(防衛省のXバンド通信衛星や内閣官房の情報収集衛星のうちデータ中継衛星等)の民間サービスによる代替を目指して、民間の研究開発を促すことになる。
- CSPプログラムでも5年以上かけて、民間の研究開発を支援。日本でも政府保有衛星の更新に適用可能か



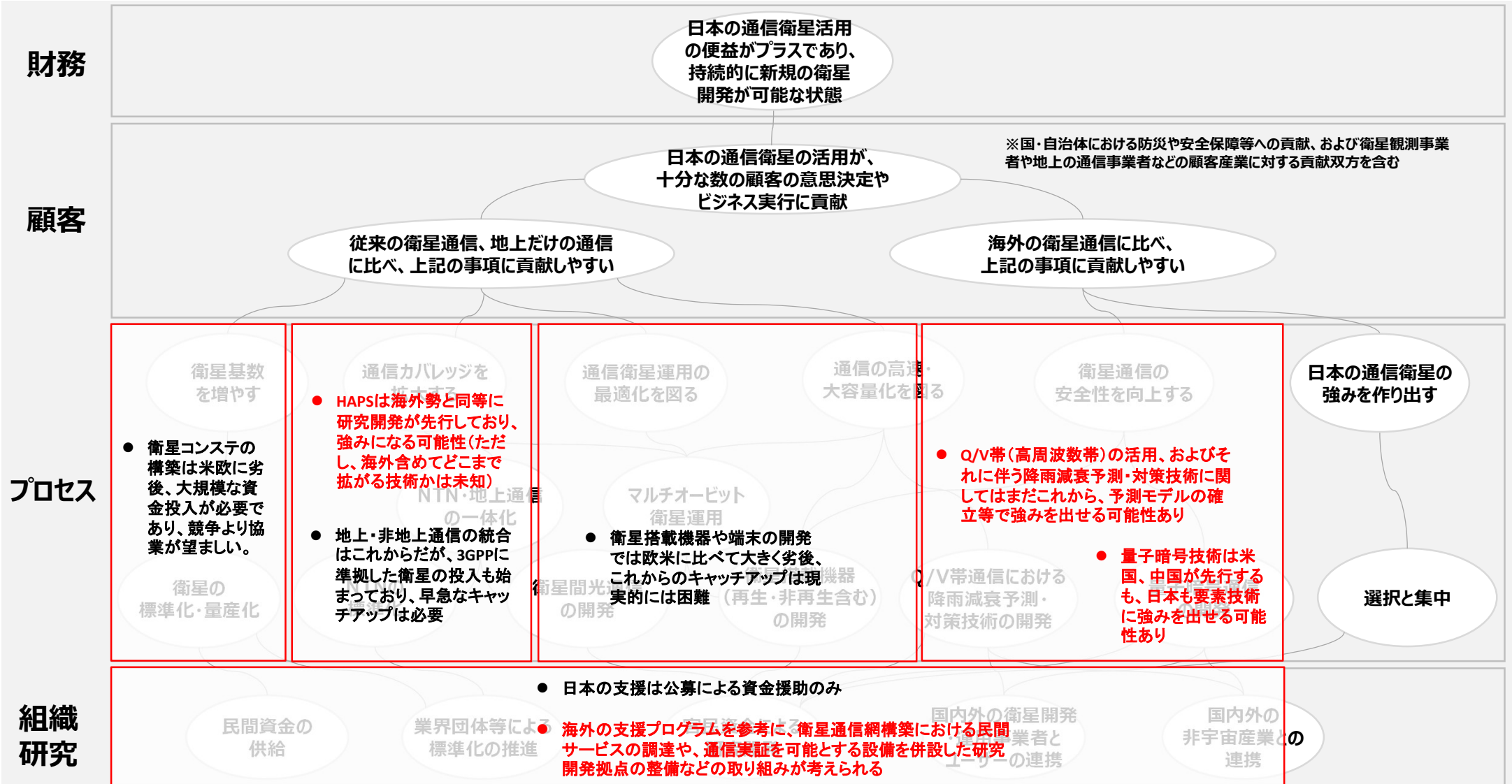
出所) NASA

【衛星通信技術に特化した研究開発拠点の設置】

- 英国はSpace Cluster Funding及びSatellite Applications Catapultで英国内の地方に研究開発拠点を整備
- 研究開発拠点では、テスト環境の提供や研究施設及びインキュベーション施設の提供を行っている
- 日本で導入する場合、NICTの研究開発テストベッドと連携し、拠点整備を行うことも考えられる

戦略マップ(案)

- 日本における支援の仕組みは主に公募による資金援助、新たな強みを作り出すためには、海外のプログラムなどを参考に、積極的かつ大胆な支援・介入が必要か



アクションプラン(案)

- 本検討の結果を踏まえ、日本の強みを発揮できる領域への「選択と集中」の方針策定が必要
- 地上通信とNTNの統合を見据え、HAPSの研究開発の推進、高速大容量通信に向けたQ/V帯通信向け降雨減衰予測モデルの確立、一体化通信に向けたセキュリティ技術の開発・実証等の方向性が考えられる

技術開発の点で特に重要

	2024	2025	2026	2027	2028
選択と集中の方針策定	方針案の策定	実行とモニタリング及び次期計画立案のための調査			方針案の策定
衛星の標準化・量産化	標準化技術の開発支援 & 標準化戦略の策定	実証・規格設定			量産
	国際連携方針の策定 + 国際的標準化活動				
マルチオービット衛星運用	新規開発方針の策定	設計・開発・実証 (HAPS等)			次期開発方針の策定
	海外における開発・運用動向の継続的把握				
	国際連携方針の策定				
衛星間光通信の開発	注力領域の選定	技術開発 & 実証支援		実装	
	国際連携方針の策定 + 国際的標準化活動				
NTN/地上通信の一体化	注力領域の選定	技術開発 & 実証支援		実装	
	宇宙を含めた通信のセキュリティガイドラインの策定・更新				
	地上通信における5G標準化活動との連携				
Q/V帯通信における降雨減衰の予測・対策技術	新規開発方針の策定	技術開発 & 実証支援			実装
	海外における開発・運用動向の継続的把握				
	国際連携方針の策定 + 国際的標準化活動				
再生・非再生中継技術の開発	開発方針の策定	技術開発 & 実証支援		実装	
	国際連携方針の策定				
量子暗号通信の開発	注力領域の選定	技術開発 & 実証支援		実装	
	物理レイヤ暗号等の我が国の強みのある要素技術開発の継続支援				
	国際連携方針の策定 + 国際的標準化活動				



DigitalBlast