

**令和4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調査」**

中間成果報告書

**一般財団法人衛星システム技術推進機構
Advanced Satellite Systems Technology Center (ASTEC)**



1. はじめに
2. 中間報告会スケジュール
3. 報告する調査内容
 - 3-1 5G/6Gに向けた衛星通信システムの調査
 - 3-2 新しい衛星通信システムの調査
 - 3-3 衛星システムIoTの調査
 - 3-4 衛星間通信による宇宙ネットワークの調査
 - 3-5 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査

本資料は、文部科学省殿から委託された下記委託業務について、中間段階での成果を報告するものである。

令和4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調査」

2. 中間報告会スケジュール

22-002-R-012

中間報告会の議事およびおおよその説明時間は下記の内容とする

日時 2020年11月1日 10:00～11:30

報告する調査内容

- | | |
|-------------------------------|---------------|
| 3-1 5G/6Gに向けた衛星通信システムの調査…………… | (約20分 p5～17) |
| 3-2 新しい衛星通信システムの調査 …………… | (約20分 p18～43) |
| 3-3 衛星システムIoTの調査 …………… | (約 5分 p44～49) |
| 3-4 衛星間通信による宇宙ネットワークの調査 …………… | (約10分 p50～58) |
| 3-5 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査…… | (約10分 p59～68) |

質疑応答



1. はじめに

2. 中間報告会スケジュール

3. 報告する調査内容

3-1 5G/6Gに向けた衛星通信システムの調査…………… (p 5~17)

3-2 新しい衛星通信システムの調査…………… (p18~43)

3-3 衛星システムIoTの調査…………… (p44~49)

3-4 衛星間通信による宇宙ネットワークの調査…………… (p50~58)

3-5 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査… (p59~68)



(調査要求)

- (1) 地上のBeyond 5G/6Gといった次世代の移動通信システムにむけて、日本及び世界における非地上系ネットワークを網羅的に調査すること。
- (2) 低軌道(以下、LEO)、中軌道(以下、MEO)、静止軌道(以下、GEO)等の各軌道において、長所短所を含めて調査し、まとめること。
- (3) 本調査において、日本の強み・弱みを分析し、まとめること。

(調査進捗状況)

- (1) 5G/6Gに関する標準化スケジュールおよびこれをもとに進められている非地上系ネットワーク(以下NTN: Non-Terrestrial Networks)の調査を実施している。ASTECが保有する情報をまとめるとともに、3GPP国際標準化組織での最新検討状況を調査中。また各NTNにおける技術的パラメータ(周波数プラン、帯域幅、データレート、ゲートウェイ数等)の調査している。
- (2) 各衛星軌道による通信方式の長所短所について、最新状況を調査中である。
- (3) (1)(2)項の調査結果をもとに日本の強み・弱みに関する分析を実施する予定。

3-1 5G/6Gに向けた衛星通信システムの調査 エグゼクティブサマリ

項目	重要なトレンド
3.1.1 3GPP規格の状況	<ul style="list-style-type: none">▶ 3GPPにおけるNTNの議論が進展▶ 3GPP準拠の衛星通信システムが数多く立ち上がっている。▶ スマートフォンから衛星への直接接続の計画が続々と立ち上がっている。 (Starlink・T-Mobile、APT Space Mobile, Apple・Globalstar等)
3.1.2 LEOコンステレーションの次のステップ: マルチオービット化	<ul style="list-style-type: none">▶ LEO・MEOコンステレーションの構築・進展に伴い、GEOとの接続が主要オペレータで検討されている。
3.1.3 gNodeBの適用検討	<ul style="list-style-type: none">▶ 5Gの基地局機能gNodeBの衛星搭載が検討されている。
3.1.4 HAPSサービスモデル (成層圏プラットフォーム)	<ul style="list-style-type: none">▶ 地上基地局の補完という位置づけで開発が進んでいる。

最終報告に向けての重要分析項目 (国内外比較を含む)

- ① ダイレクト・スマートフォン事業等の新しい事業や、またHAPSを含めたマルチオービット等の新しい通信事業は今後、主流になるのか。
- ② 3GPPリリースに合わせ特に欧州ではBBやIoT事業にNTNをどう組み込もうとしているか。

3GPP : 3rd Generation Partnership Project (第三世代以降の移動体通信システムの標準規格の仕様検討や調整を行う国際標準化機関、またはその標準化規格)

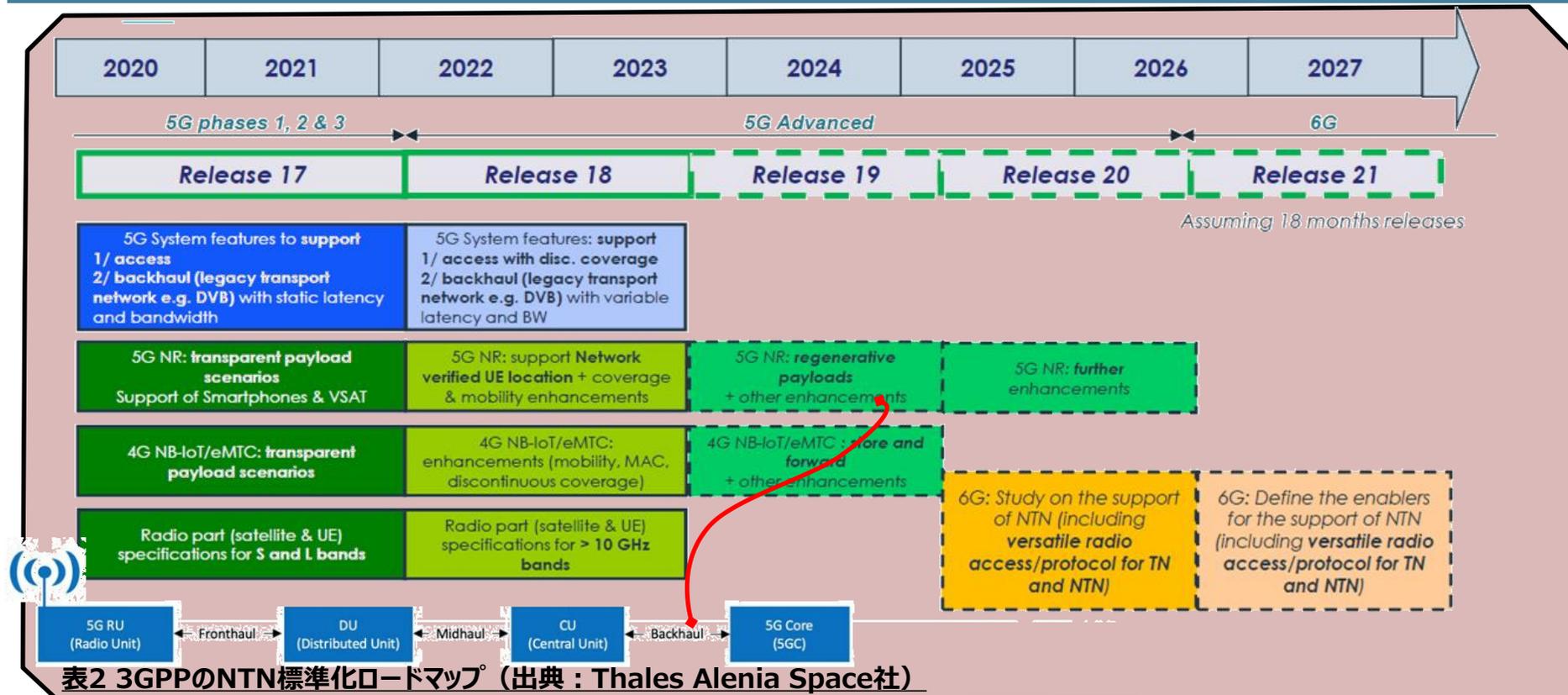
NTN : Non-Terrestrial Network (非地上系ネットワーク 地上・海・空にある移動体を多層的につなげる通信ネットワークシステムの総称)

TN: TN Terrestrial Network (通常の携帯電話を代表とする移動体機器を基地局などを通じて結ぶネットワークの総称)

3-1 5G/6Gに向けた衛星通信システムの調査

3GPP最新リリース18におけるNTNの状況 (1/2)

22-002-R-012



1. リリース17と18(short term版) は、**NTN(衛星)と互換性のある5Gとして最初のリリース**となり、NTNの課題である「伝搬遅延」、「大きなドップラー」、「不連続なカバレッジや移動セル (NGSO[非GEO]コンステレーション使用時)」などに対するNTNの構成や機能が定義される予定。
2. 但しこれらは、依然としてTransparent (再生中継ではない) な衛星に関して (上記構成図参照)。
3. gNodeB(Next generation NodeB) 機能をオンボード化するために必要な再生中継ペイロード (Non-transparent)への要求や、NGSOのNB-IoTのためのストア&フォワード機能は、リリース19以降で初めて扱われる。
4. TAS社等はこれらを取り扱ったブロードバンドの再生ペイロード (gNodeBの搭載化) を目指してARTES開発を継続

3-1 5G/6Gに向けた衛星通信システムの調査 進行中の非地上系携帯端末システム

22-002-R-012

システム名	比較項目	事業開発状況	サービスの種類	準拠基準	周波数帯	衛星本体構成	アンテナ部情報	今後の計画
1. Systems relying on the 3GPP "NTN" standard								
1-1	Experimental Thales + Ericsson + Qualcomm <i>Reference [1.a]</i>	3GPP NTNの標準化活動を支援する実験中 - [1]参照	数Mbps	3GPP 5G "NTN" Release >= 17 New Radio (NR)	L帯またはS帯衛星通信用MSS 周波数 - see [2]	LEO軌道, 何らかのnNodeB 機能を搭載 (TBC)	数m ² (TBC)	--
1-2	Omnispace <i>Reference [1.b]</i>	2機の実験用名の衛星で試験中	IoT	3GPP 5G "NTN" Release >= 17 NB-IoT	S band 3GPP n256	ナノ衛星 Spark-1 et Spark-2	--	ブロードバンドNTN, < 200 LEO衛星 + 15 MEO衛星
1-3	Sateliot <i>Reference [1.c]</i>	テレフォニカ、AWS]と共同R&D開発中	IoT	3GPP 5G "NTN" Release >= 17 NB-IoT	--	LEO軌道, ナノ衛星	--	--
1-4	Echostar - Hughes	3GPP NTNの標準化・規格化活動に積極的	IoT, 将来的BBの可能性	3GPP 5G "NTN" Release >= 17 NB-IoT & NR	S帯 (地上用も許容)	GEOとLEO	--	現状不明確。ディッシュTN 5Gネットワークを補完か?
2 Systems compatible with "TN" smartphones								
2-1	Space X and T-Mobile <i>Reference [2.a]</i>	商用サービスを米国で2023年末に開始予定 FCCの承認が必要?	メッセージ、音声、低データレートの通信	4G/5G "TN" 通常のスマートフォン	携帯電話用 uplink 1,910 - 1,915 downlink 1,990 - 1,996	Starlink LEO Generation 2	25 m ²	--
2-2	AST Space Mobile <i>Reference [2.b]</i>	最初の「Bluewalker 3」衛星で試験を実施	メッセージ	4G/5G "TN"	FCC 試験用ライセンス ATT cellular 700-960 MHz	LEO軌道	64 m ²	200機以上を計画。30 Mbps~1G を目標とする。
2-3	Lynk <i>Reference [2.c]</i>	「Lynk Tower 1」衛星および、さらに2022年末までの3衛星で試験を実施	携帯ブロードバンド、SNS	3GPP 2G (and 3G, 4G)	携帯電話用低周波域 600 - 1,000 MHz	LEO 小型衛星、ピザボックス形状	1 m x 1 m (x 0.15 m)	--
3 Hybrid cellular + stallite								
3-1	Apple + Globalstar <i>Reference [3.a]</i>	米国内で事業を開始した	緊急時SOSメッセージ	3GPP "TN" 携帯電話網 + Globalstar	Globalstar MSS 周波数帯域 上り回線L帯 1,610-1,626.5 MHz 下り回線S帯 2,483.5-2,500 MHz	LEO Globalstar + 次期衛星 (95% Apple出資)	--	Apple also appears to have 5G NTN plans
3-2	Huawei + Beidu satellite	「Huawei Mate 50」電話は衛星経由SMSサポート	ショート・メッセージ	3GPP "TN" 携帯電話網 + Beidu?	携帯電話用回線と衛星用通信用回線の両方	--	--	--
3-3	Iridium? Inmarsat?	具体的な発表なし	メッセージング	--	携帯電話用回線と衛星用通信用回線の両方 (MSS)	--	--	--

[1.a] https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/press_release/ericsson-qualcomm-and-thales-take-5g-spacedevice/

[1.b] <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/press-release/omnispace-and-thales-alenia-space-announce-successful-launch-first>

[1.c] <https://www.satellitetoday.com/iiot/2022/07/22/telefonica-to-collaborate-on-5g-iiot-service-with-sateliot/>
<https://sateliot.space/en/news-sateliot-space/sateliot-works-with-aws-on-innovative-cloud-native-5g-satellite-network-to-connect-iiot-devices-directly-to-satellites/>

[2.a] <https://spacenews.com/spacex-and-t-mobile-partner-for-direct-to-cellphone-satellite-service/> <https://www.lightreading.com/satellite/t-mobile-and-spacex-want-to-connect-regular-phones-to-satellites/d/d-id/779964?>

[2.b] <https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2022/07/28/nokia-radio-technology-to-enable-ast-spacemobiles-direct-to-cell-phone-connectivity-from-space>
<https://ast-science.com/2022/09/13/ast-spacemobile-confirms-successful-launch-of-bluewalker-3-into-orbit/>

[2.c] <https://spacenews.com/lynk-global-gets-first-commercial-satellite-direct-to-cell-operating-license/> <https://lynk.world/lynk-announces-successful-deployment-of-worlds-first-commercial-ready-cell-tower-in-space>

[3.a] <https://www.reuters.com/technology/apple-picks-globalstar-satellite-service-iphone-14-series-2022-09-07/>

3-1 5G/6Gに向けた衛星通信システムの調査

22-002-R-012

移動体通信の観点からみた各軌道の特徴と強み・弱み→マルチオービット化

- 主要な衛星通信事業者は、GEOとLEO/MEO(NGSOと総称)の衛星軌道の並行利用 (マルチオービット化)に移行
 - SES: 大規模GEO衛星群と次世代O3b MEO衛星群(mPower)を統合運用(次ページ)
 - ユーテルサット: OneWebとの合併を発表
 - Telesat「ライトスピード」ブロードバンドLEOコンステレーションを開発
 - Viasat: Viasat3を3機打上げ世界展開。並行して、LEOとの併用を計画するInmarsatを買収

	低軌道 (LEO)/中軌道(MEO)	静止軌道(GEO)
✓強み	<ul style="list-style-type: none">・低遅延(低レイテンシ) リアルタイム交通管制、ゲーム、音声電話などに重要・携帯機器から直接通信可能	<ul style="list-style-type: none">・大きな通信容量を集中して供給できる (1衛星で1TB規模)
✗弱み	<ul style="list-style-type: none">・強みを生かすには、コンステレーションの規模が必要	<ul style="list-style-type: none">・遅延が大きい (大半のブロードバンド インターネットサービスでは遅延はさほど問題とはならない)

今後の衛星サービスの成長率は年率10～15%と予測 [LOE 2/3, GEO 1/3]
→双方の利点を組み合わせたマルチオービット化が成長の鍵

3-1 5G/6Gに向けた衛星通信システムの調査

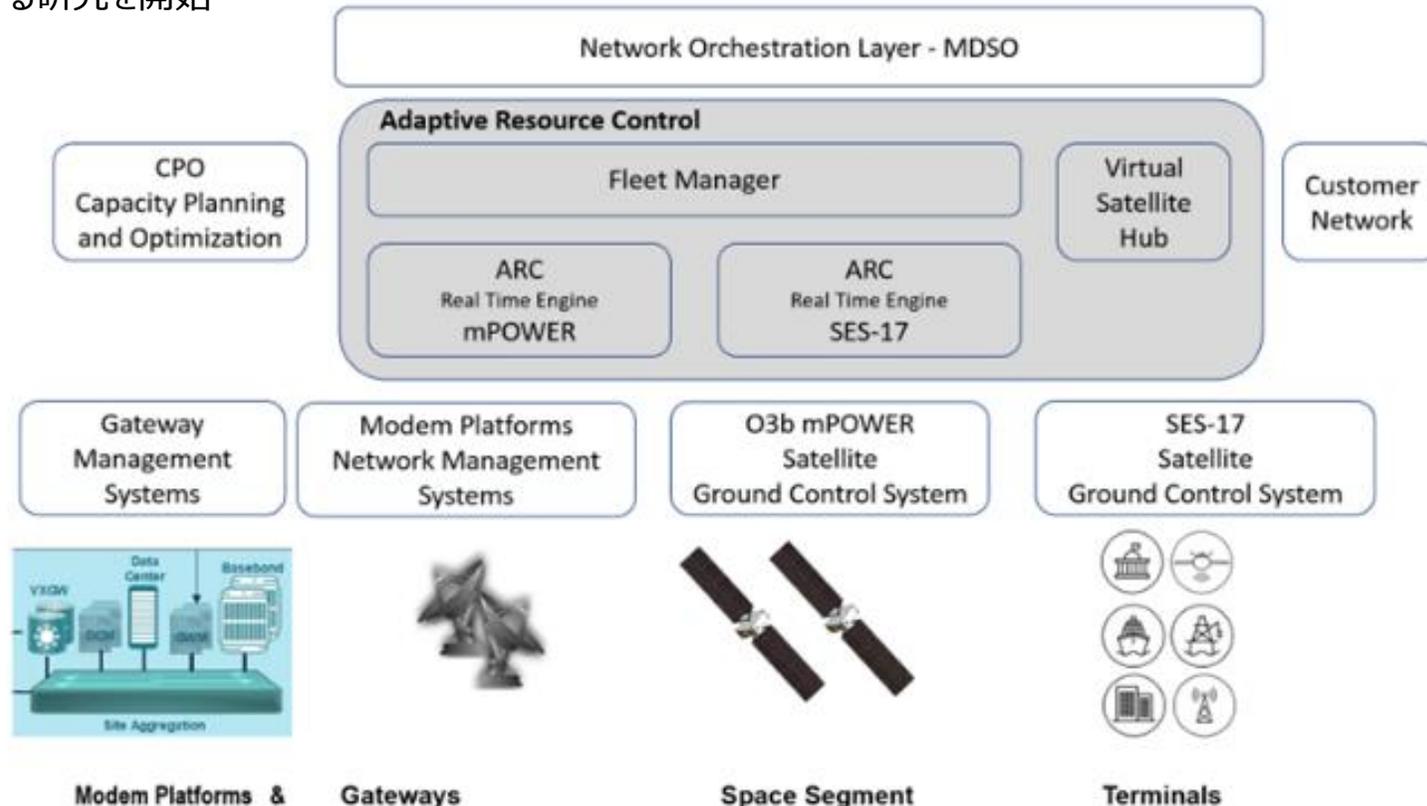
NTNの拡大→マルチオービット化へ

22-002-R-012

- マルチオービット対応 **端末の技術課題:** LEO追尾の途中で、要求に応じてGEO衛星にも切り替えられるようにすること。ビームポインティングや電力・周波数管理の面で新しい要件となる。
- マルチレイヤー化:** 3GPP規格のNTN(非地上ネットワーク)では、リリース19に向けて、地上波セルと衛星カバレッジの共存に関する研究を開始

•ネットワーク・オーケストレーション:

- ソフトウェア定義衛星で、衛星ビーム範囲の再定義に追従して地上システムも動的に適応させる機能。
- 多軌道端末管理は、衛星と地上のオーケストレーションのもう一つのステップとなる。
- SESの事例紹介: SESがGEO衛星 (SES-17) とMEOコンステレーション (mPower) 間の適応的なリソース制御を開発。



出典: Euroconsult

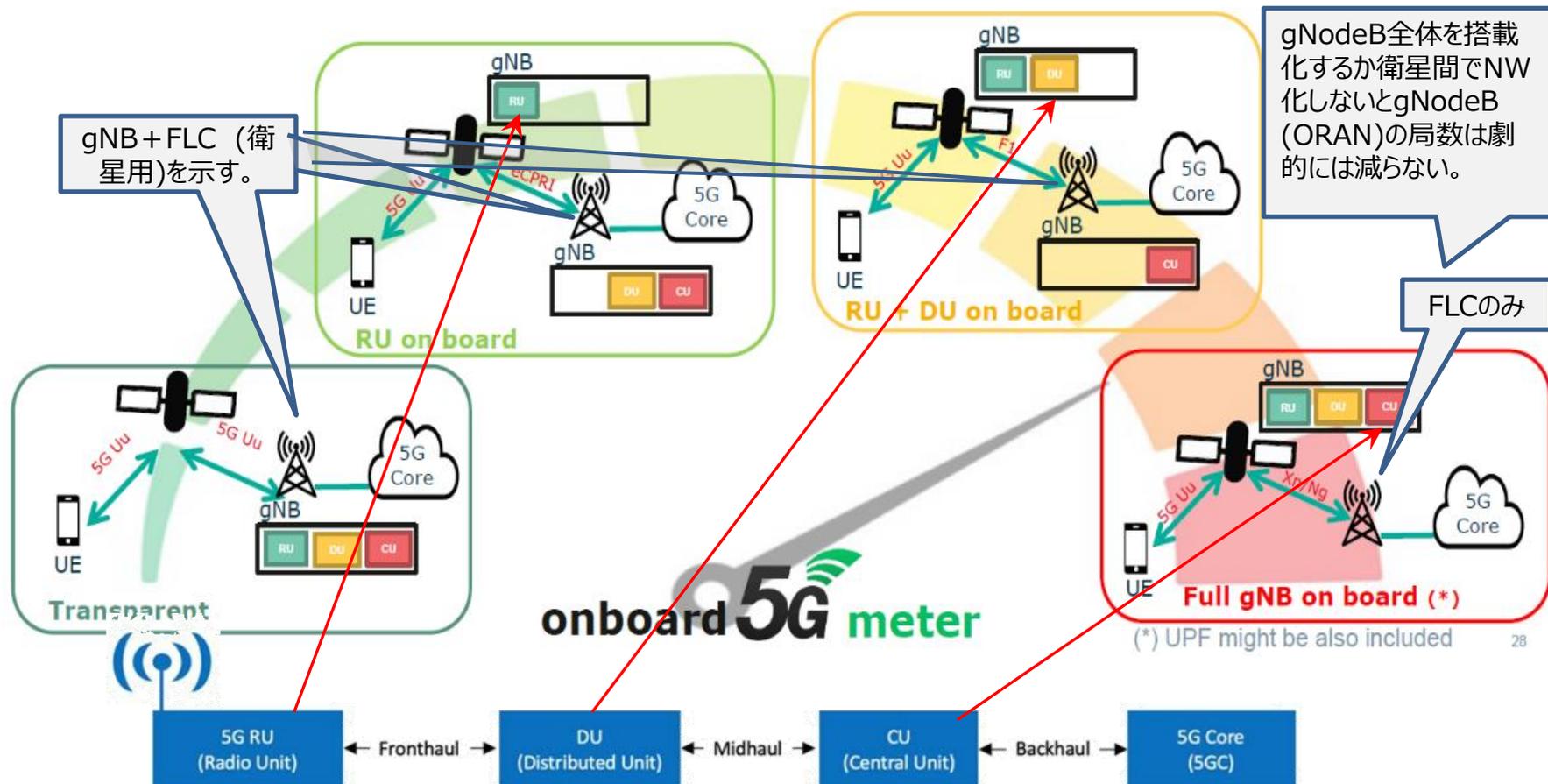
3-1 5G/6Gに向けた衛星通信システムの調査

gNodeBの搭載化のレベル (1/3)

22-002-R-012

- Transparentの場合、多くのGateway局数が必要。下図は、Open-RANフレームワークで定義されたgNodeBの各機能（CU[制御]、DU[配信]、RU[無線]）が衛星にどのレベルまで搭載できるかに応じた段階的なgNodeBの搭載化を示す。最終的にgNodeBの機能を全て搭載しないと局数は減らない。

参考文献[2] 3GPPの文書TR 38.821



Transparentから段階的なNon-Transparentタイプへ（完全なgNB衛星へ） 出典：ESA

3-1 5G/6Gに向けた衛星通信システムの調査

gNodeBの搭載化のレベル (2/3)

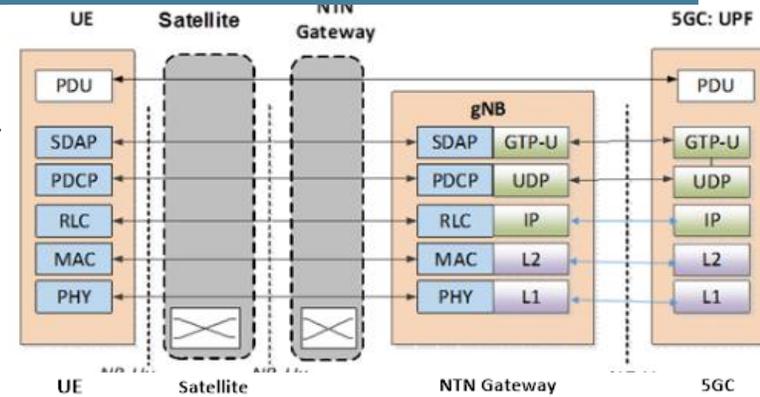
22-002-R-012

・ gNodeB搭載の3ケース検討

ケース1:トランスパレント(透過)型 (NTN Re17/18対応)

- 既存のGEO衛星で5G NR波形を使用することが可能
- 透過型衛星の場合、gNodeB - UE “NR-Uu”リンクは、ゲートウェイファイダーリンクとUEサービスリンクの両方に関連する長い遅延を考慮する必要がある
- スマートフォンへの直接アクセスが必要になるため、最終的には再生型に移行する必要があると予想される。

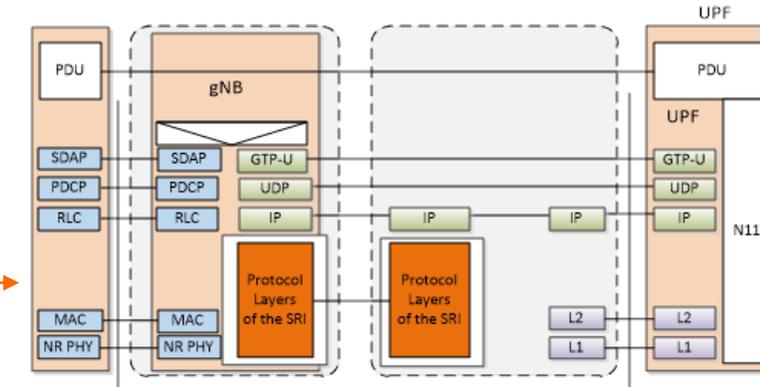
ケース1
トランスパレントな衛星ベースのNG-RANアーキテクチャ



ケース2:フルgNodeB搭載(再生型)の場合

- ゲートウェイファイダーリンクの容量を最小化
- 衛星ホップが1回で済むため、モバイルランダムアクセスなど、システムの**反応速度が高速化**
- ダイナミックビームフォーミングの効率化、システム容量の最適化
- **HAPSへの実装**にも適している。

ケース2
再生型gNB処理されたパイロード

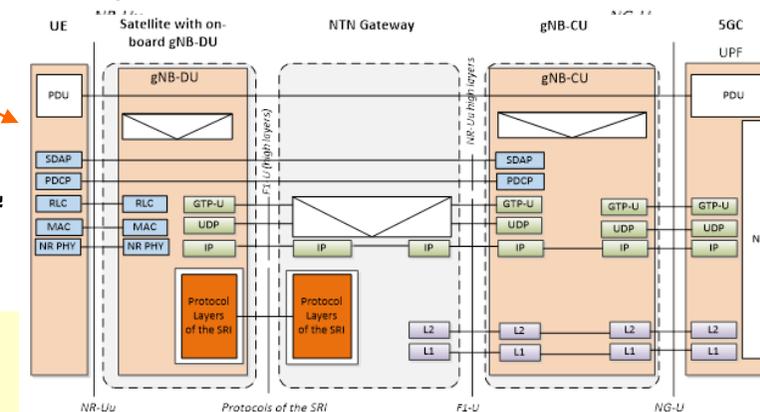


SRI : Satellite Radio Interface (衛星ラジオインターフェース)

ケース3:部分的gNodeB搭載(再生型)の場合

- フルgNodeBで衛星側の負担が大きくなる場合の軽減策
- CU(Centralized Unit)を地上側に置くため、**ファイダーリンクの負担が増加**(高速化・大容量化)
- 3GPP規格の進展に伴う**CUソフトウェアの更新が容易**
- クラウドベースのアーキテクチャに進化させることができる

ケース3
再生gNB-DU+ RU処理されたパイロード



・ ケース2と3は搭載系の難易度や地上局の削減の観点からトレードオフすべきであり、3GPPにおいても未決定

各国の動き

- ヨーロッパでは、ESA の支援を得て、ヨーロッパで共同プロジェクトが開始されている。
 - Thales Alenia Space はこの分野に積極的
 - Ericsson、Nokia、Qualcomm など既存携帯電話メーカーも参加
 - AmarisoftやSerma/AW2Sなど、より専門的なセルラーソフトウェアベンダーも Open RANアーキテクチャ開発に参加。より効率的なセルラー機能ブロックを提供する可能性がある。
- 中国のHuawei、ZTEや、そのパートナーなどの中国のセルラーサプライヤーが、5G ネットワークにおける強力な地位と3GPP NTNへの積極参加考慮すると、統合された将来の5G/6G衛星セルラーシステムの設計において、より大きな役割を果たすと考えられる。

3-1 5G/6Gに向けた衛星通信システムの調査

HAPSのサービスモデル (1/2)

22-002-R-012

HAPS (High Altitude Platform Station : 成層圏プラットフォーム) の特徴

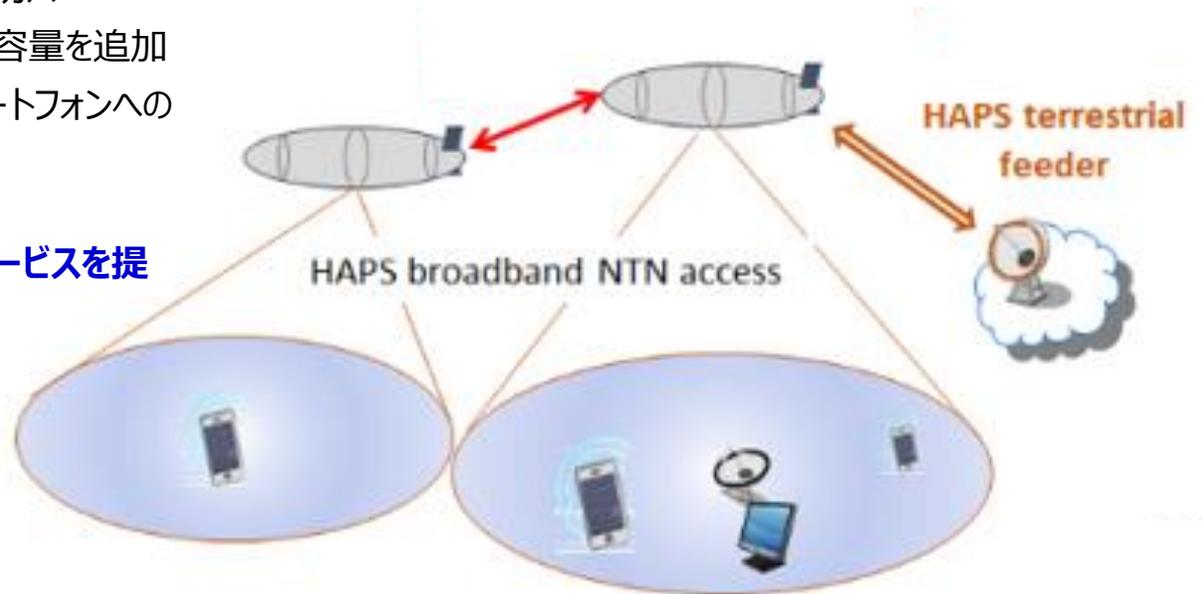
- ・ 地上約20kmなどの成層圏に飛行体を常駐させ、移動体通信の中継を行う
- ・ スマートフォンに**50Mbpsまたはそれ以上**の真のブロードバンド・サービスを提供
- ・ 比較的**広域(直径数百km)をカバー**し、衛星より**低遅延**

HAPSと衛星との役割分担(競合ではなく共存)

- ・ GEO: 映像配信やバックホールなど、広い範囲をカバー
- ・ MEO/LEO: バックホールやVSATサービスなどの容量を追加遅延に敏感なアプリケーションをサポートし、スマートフォンへの接続を提供 (最大数Mbps)
IoTサービスのカバレッジを提供
- ・ HAPS: **スマートフォンに真のブロードバンド・サービスを提供**できる付加的なレイヤーを構成

HAPSは「空の基地局」

- ・ HAPSは、地上の携帯電話ネットワークとの干渉の可能性をよりよく管理できる利点がある。
- ・ HAPSは、局所的なカバレッジを持つ追加の「空の基地局」とみなされ、携帯電話事業者はシステム間のTN-NTN干渉をうまくコントロールすることができる。



HAPS通信システムの基本構成

出典: Euroconsult

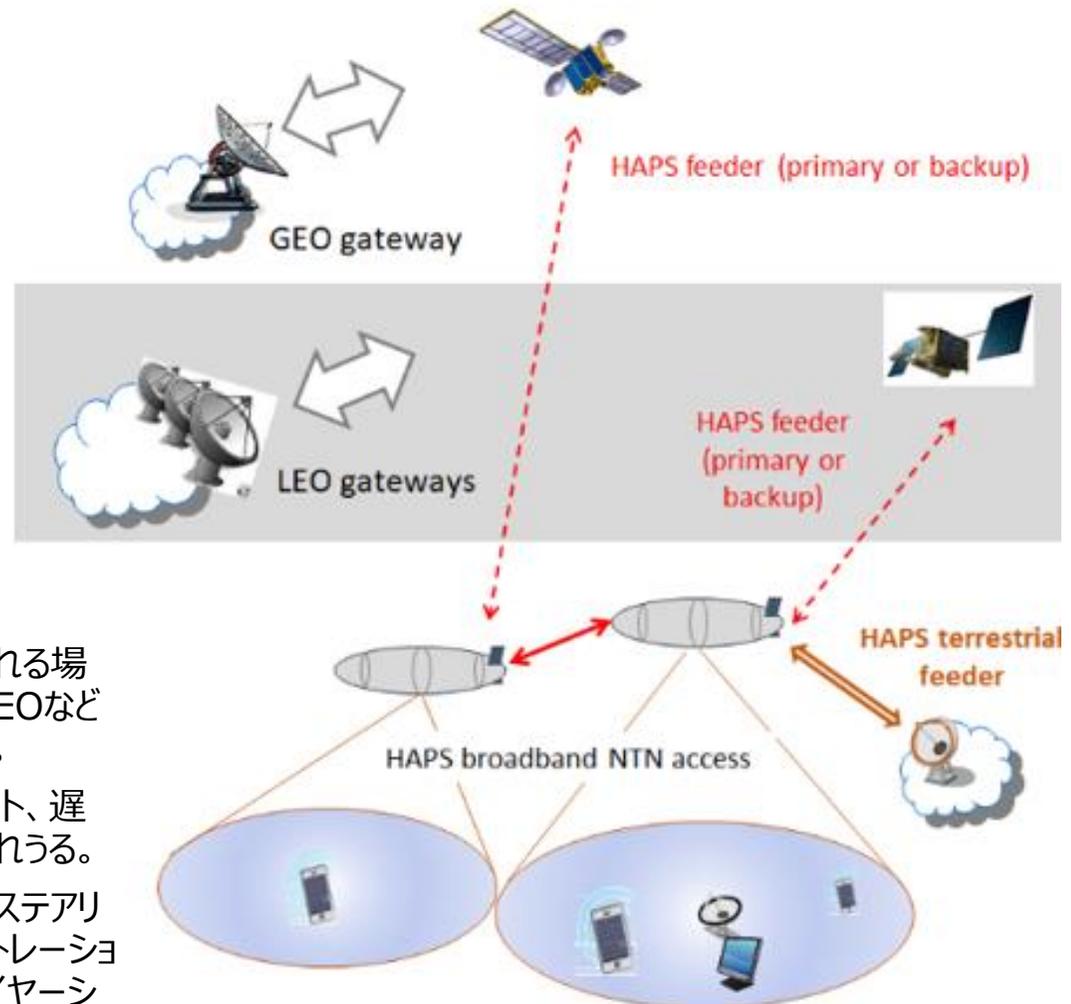
3-1 5G/6Gに向けた衛星通信システムの調査

HAPSのサービスモデル (2/2)

22-002-R-012

HAPSの技術的課題

- 大容量化: 船隊を組んで数Gbpsの広帯域通信を目指す場合、フィーダーリンクの容量はHAPS一隻あたりの容量の倍にもなり**容量増加の必要**が生ずる。数百Gbpsに達する可能性がある。
- 降雨減衰: ハイスループットが要求されるため、HAPSのフィーダーリンクには**Q/V周波数帯**が望ましいが、これらの周波数は**雨の影響**を受けやすい。
- 雲の影響: **光回線**は、HAPS間の接続に適しており、地上との接続も可能。しかし、**雲**は信頼性に影響を与える可能性がある。
- これらの課題に対しては、HAPSに大容量のRFまたは光接続を提供する衛星リンクを、地上のフィーダーリンクの補完、または代替と考えることが解決策のひとつといえる。



HAPSと衛星システムとのリンク

- 右の図ではNTNモバイル接続が、HAPSで直接得られる場合、および他のHAPSのバックホール経由やLEOやGEOなどの衛星経由で間接的に得られる場合の構成を示す。
- これらの通信経路は、個々の通信に必要なビットレート、遅延、サービスエリアなどのサービス要件に応じて選択される。
- **3GPP リリース19**では、TNとNTN 間のトラフィック ステアリングが研究される予定。複雑なネットワーク オーケストレーションが必要であることが予想される。このようなマルチレイヤーシステムは、**その後のリリースである、“NTN advanced”**や**6G**への検討で可能になると考えられる。

HAPSと衛星システムとのリンク

出典: Euroconsult

- 1. はじめに
- 2. 中間報告会スケジュール
- 3. 報告する調査内容
 - 3-1 5G/6Gに向けた衛星通信システムの調査…………… (p 5~17)
 - 3-2 新しい衛星通信システムの調査…………… (p18~43)
 - 3-3 衛星システムIoTの調査…………… (p44~49)
 - 3-4 衛星間通信による宇宙ネットワークの調査…………… (p50~58)
 - 3-5 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査… (p59~68)



3-2 新しい衛星通信システムの調査

22-002-R-012

(調査要求)

- (1) 世界において民間企業もしくは宇宙機関が運用している衛星通信システムを調査すること。また、将来に向けて研究開発されている新しい衛星通信システムを調査すること。
更に、新しい通信システムにおいて衛星に求められる機能性能、及びペイロードについて調査すること。
- (2) 2026～2030年を見据えた衛星通信システムの世界における動向について調査し、まとめること。
- (3) 本調査において、日本の強み・弱みを分析し、まとめること。

(調査進捗状況)

- (1) ASTECが保有する情報をもとに、現在世界で運用されている衛星通信システムとこれを構成する機器(アンテナ・ペイロード機器等)について整理中である。
併せて、上記システムや機器に関する最新状況の調査を実施中。
併せて、欧州宇宙機構(以下ESA)の方針、ESAの開発計画(ARTES)に関する調査を実施中である。
- (2) 2026～2030年の動向について、ASTEC内の情報をもとに分析するとともに、最新状況に関する情報収集を図っている。
- (3) (1)(2)項の調査結果をもとに日本の強み・弱みの分析を実施予定。

3-2 新しい衛星通信システムの調査

22-002-R-012

3-2 エグゼクティブサマリ

項目	重要なトレンド
3-2.1 システムとしての最新事例	<ul style="list-style-type: none">➤ LEO/MEOは新世代メガコンステレーションが構築途上。Starlinkなど成果も上がり始めている。➤ GEOは基本的にHTS型、最先端はSDS型に移行。
3-2.2 衛星の最新事例	<ul style="list-style-type: none">➤ GEO最先端3機種はSDS型➤ LEO4機種は最新型で衛星間通信および再生中継採用の傾向がみられる。
3-2.3 キー技術	<ul style="list-style-type: none">➤ 通信サービスに関するビーム数要求の増大、フレキシビリティ化要求、LEO/ MEOでのビームホッピング要求により、電子走査ビーム制御およびビームホッピングが必須技術になってきている。➤ 通信の地上系においてはトラフィックをAI等で予測しながら数千にもおよびビームをリアルタイムで制御する必要がある。➤ 中継器系ではデジタル プロセッサがキー技術で新型衛星には必須。➤ LEO/MEOのような周回衛星では、ビーム制御と周波数制御が必須技術となり、地上局での最適化制御が必要となる。検討事例としてAIを用いた最適化検討内容を示す。(IAC2022での発表より引用)➤ 再生中継が次の目標となる。

最終報告に向けての重要分析項目（国内外比較を含む）

- ・先端的デジタル通信衛星（SDS）に必須な技術はなにか。
- ・その先に必要とされる技術はなにか。
- ・日本がキャッチアップする方法は？

HTS : High Throughput Satellite
SDS : Software Defined Satellite

3-2 新しい衛星通信システムの調査

22-002-R-012

3-2.1 システムとしての最新事例

(1) LEO/MEO通信用メガコンステレーション (1/2)

・ 代表的通信用メガコンステレーション4機種と第一世代アップデート版イリジウムNEXT、MEOのO3b mPowerの諸元を示す。

① 通信容量はコンステレーション全体では大半がTbps以上 ② レイテンシはLEOでは50ms以下

③ 通信機能ではビームフォーミング、ビームホッピングなどのフレキシビリティを有している。

主要LEO/MEO通信コンステレーションの状況 (2022年3月現在)

システム名	Space-X Starlink	Amazon Kuiper	OneWeb	TELESAT Lightspeed	Iridium NEXT	SES O3b mPower
システムの特徴	消費者系として開始・大規模	消費者系として開始・大規模	第二世代通信LEOのさきがけ。一度破綻し、政府系が支援	政府系が支援	第一世代LEOコンステの進化系	MEO (GEOとのマルチネットワーク化を狙う)
衛星機数 (打上げ実績)	4,408 機 (>50%)	3,236 機 0%	650 機 -66%	198 機 0%	72 機 -100%	11 機 0%
合計の通信容量 (1衛星あたり容量)	~88 Tbps (~20 Gbps/sat.)	164 Tbps (50 Gbps/sat.)	~5 Tbps (~7.5 Gbps/sat.)	~10 Tbps (50 Gbps/sat.)	~170 Gbps (~2.4 Gbps/sat.)	~2.7 Tbps (200-315 Gbps/sat.)
実質通信容量(推定)	~22 Tbps	~40 Tbps	~1.2 Tbps	~5 Tbps	~50 Gbps	~1.9 Tbps
周波数帯 (ユーザーリンク)	Ku-band	Ka-band	Ku-band	Ka-band	L-band	Ka-band
軌道種類 (高度)	LEO (550 km)	LEO (~600 km)	LEO (~1,200 km)	LEO (1,000-1,350 km)	LEO (780 km)	MEO (8,062 km)
衛星質量	~260 kg	~650 kg	~150 kg	~700 kg	~860 kg	~1,700 kg
耐用年数	~5 years	5 to 7 years	~5 years	~10 years	15 years	>10 years
レイテンシ(遅延時間)	< 50 ms	< 50 ms	< 50 ms	< 50 ms	< 50 ms	~150 ms
パイロード通信機能 フレキシビリティ	Steerable beams, ISLs (as of Q3 2021)	Beams: flexible shape, steering, capacity	(情報なし)	Beam- hopping/forming, optical ISLs, OBP	Phased array antenna TDD architecture, optical ISLs, OBP	Dynamic beam- forming, steering, sizing

3-2 新しい衛星通信システムの調査

22-002-R-012

3-2.1 システムとしての最新事例

(1) LEO/MEO通信用メガコンステレーション (2/2)

④ 通信パイロードは現状は、大半がトランスパレント(透過型)だが、次世代としては、再生機能に取り組んでいる。

主要LEO/MEO通信コンステレーションの状況 (2022年3月現在)						
システム名	Space-X Starlink	Amazon Kuiper	OneWeb	TELESAT Lightspeed	Iridium NEXT	SES O3b mPower
主要パラメータ						
資金調達額と 調達形態	\$6.7b raised since 2015 (not only Starlink)	Likely internal (from operating cashflows)	\$3.4b raised pre- bankruptcy, \$2.7b post-	Internal, equity, debt, U.S./Can. C-band,	\$1.8b raised \$1.2 internal	Fully funded (internal)
サービス開始時期	2021	TBD (likely >2026)	2022 (polar)	2026	2017 Fully operational 2019	late 2022 / early 2023
衛星当たりビーム数	8 to 16	(情報なし)	16	24	48	5000
通信パイロードの特徴	Transparent (gen1) & regenerative (gen2)	Transparent (gen1) & regenerative (gen2?)	Transparent (gen1) & regenerative (gen2)	Regenerative and analog beamforming	Regenerative	Transparent digital beam forming
パイロード消費電力 (概算)	1.5kW	(情報なし)	250W	3.6kW	2.2kW	(情報なし)
推進方式	Electric	Electric	Electric	Electric	—	Electric
ユースケース	BtoB, BtoC, Mobile and fixed	Mobile and fixed	BtoB, Mobile and fixed	BtoB, Mobile and fixed	Mobile	BtoB, Mobile and fixed
カバレッジ範囲	55° North and South	56° South and 56° North	North pole and south pole	Global	Global	50° South and 50° North
ゲートウェイ数	(情報なし)	(情報なし)	>100	25-40	(情報なし)	(情報なし)

3-2 新しい衛星通信システムの調査

3-2.1 システムとしての最新事例 (2) GEO HTSシステム事例 (40Gbps以上)

22-002-R-012

右の表に、40Gbps以上の通信容量をもち、2018年以降に打上げもしくは打上げ予定の静止衛星を示す。

2024年以降はエアバスもしくはタレスの新型衛星が大半を占めている。これらの衛星の特徴は、地上からのコマンドにより通信機能を可変できる、**ソフトウェア定義衛星(SDS: Software Defined Satellite)**仕様となっていることである。

Name	Launch date	Satellite Bus	Type
Hylas 4	05/04/2018	NGIS GeoStar-3	BSS
Telstar 19 Vantage	22/07/2018	SSL-1300	FSS
SES 12	04/06/2018	Airbus D&S E3000EOR	FSS
Al Yah 3	25/01/2018	NGIS GeoStar-3	FSS
JCSat-18/Kacific-1	17/12/2019	Boeing 702MP	FSS
Inmarsat 5F5 (GX5)	26/11/2019	TAS Spacebus-4000B2	MSS - VHVS
Apstar 6D	09/07/2020	CAST DFH-4E	FSS
Konnect Africa	16/01/2020	TAS Spacebus-Neo100	FSS
Turksat 5B	19/12/2021	Airbus D&S E3000EOR	FSS
SES 17	24/10/2021	TAS Spacebus-Neo200	FSS
Viasat 3 1 Americas	2022	Boeing 702MP+	Broadband
Konnect VHVS	2022	TAS Spacebus-Neo200	Broadband
Viasat 3 2 EMEA	2023	Boeing 702MP+	Broadband
Inmarsat 6F2	2023	Airbus D&S E3000EOR	FSS
GSAT 20 (CMS-03)	2023	ISRO I-3K	FSS
Jupiter-3 / Echostar 24	2023	SSL-1300	Broadband
Satria (Nusantara Tiga)	2023	TAS Spacebus-Neo200	Broadband
Viasat 3 3 Asia	2024	Boeing 702MP+	Broadband
Inmarsat 7F1,F3	2024	Airbus D&S OneSat	MSS
Superbird 9	2024	Airbus D&S OneSat	FSS
Intelsat 42 (SD Sat 1)	2024	Airbus D&S OneSat	FSS
Optus 11	2024	Airbus D&S OneSat	FSS
Astra 1Q	2024	TAS SpaceInspire	FSS
Arsat-SG1	2025	GSATCOM Bus	HTS
Inmarsat 7F2	2025	Airbus D&S OneSat	MSS
Intelsat 43 (SD Sat 2)	2025	Airbus D&S OneSat	FSS
Satria 2 (Nusantara Lima)	2025	Boeing 702MP	Broadband
Thaicom 4R	2025	CAST DFH-4E	Broadband
Arabsat 7A	2025	TAS SpaceInspire	FSS
Intelsat 41	2025	TAS SpaceInspire	TBD
Intelsat 44	2025	TAS SpaceInspire	TBD

3-2 新しい衛星通信システムの調査

3-2.1 システムとしての最新事例 (3) データレー

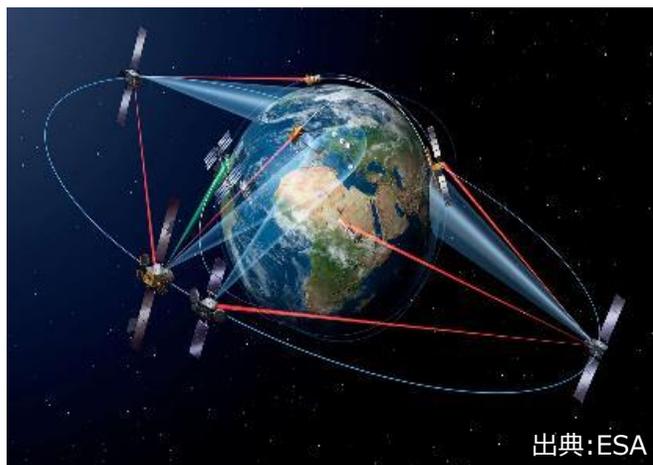
22-002-R-012

DRSシステムは、LEOまたはMEOで、地上局から見える再訪時間の問題に答えようとするものである。DRSは、テレメトリやテレコマンド、オンボードデータダンプのために、これらのリンクの利用可能時間を延長することを可能にする。歴史的に見ると、最初のデータ中継衛星リンクは、ロケットの上段をモニターしたり、船舶（宇宙ステーション、宇宙望遠鏡、シャトル、貨物、ロケットの上段など）とのほぼフルタイムの接続を確保するために開発されたものであった。

アーキテクチャ

DRSシステムの通常のアーキテクチャは、特定のDRSトランスポンダを搭載した1機または数機の静止衛星を使用している。少数の衛星でLEO/MEO軌道の広い範囲をカバーすることができる。これらのGEO衛星は特定の地上局（“DRSフィーダーリンク局”-ノミナルおよび冗長サイト）から常に見えており、ほとんどの時間はサービスを受ける衛星から見えている。スループットの必要性に応じて、これらのリンク（LEO-GEOまたはMEO-GEO）はRF帯（S、Ku、Ka帯）だけでなく、最近では光（近赤外線）でも実現されている。

地上セグメントにはフィーダーリンク局の他に、DRSミッションコントロールセンター、オペレーションセンター、DRSユーザーセンターが含まれる。



- 中国**は現在、8機のGEO衛星からなる天連システム（CTRDS）を2008年から運用している。最新世代の衛星「天連II-03」は、2022年に打ち上げられた。現在、中国の宇宙ステーションとのリンクは、100%の時間稼働率を誇っている。
- EU**は2016年からESAを通じてEDRSという独自のシステムを展開しており、2つの商業通信GEO（Eutelsat 9BのEDRS-A、Hylas-3のEDRS-C）に専用ペイロードを搭載する。ペイロードはレーザー通信端末一系を使用し、高速画像ダウンロードのためにSentinel LEO Earth Observation constellationと一緒に運用されている。
- インド**のIDRSSは、2機のGEO衛星で構成され、2023年に配備される予定である。S、Ku、Ka帯のカセグレンアンテナを使用し、リモートセンシングコンステレーションや将来の有人宇宙船「ガガンヤーン」のTMTCリンクを提供することが主な目的である。
- 日本**は2002年にDTRS（こだま）衛星でデータレーの実験を行っており、SバンドとKaバンドのペイロードが搭載されていた。2017年に引退。2020年には、新世代のDRSであるJDRS-1衛星が打上げられ、RF(DTRS:240Mbps)と光(LUCAS:1.8 Gbps)のDRSペイロードが搭載された。
- ロシア**は、1985年から宇宙ステーション接続のためのDRSシステムを展開している。現在のMSRSシステムは、3機のLutch-5 GEO衛星（5A、5B、5V）と、将来（2025年）、特に大型アンファラブルアンテナ反射板の技術実証機となるYenisei-A1によってサポートされている。
- 米国**は1980年代からDRSシステムを配備しており、その多くは軍事用途である。現在のシステムは、1991年から2017年の間に打ち上げられた9機の運用衛星によって支えられている。最新の2機、TDRS-Lと-M（3rd世代）は、S、Ku、Kaバンドの通信用に2つのステアリングアンテナを備え、最大5つのLEO衛星に同時にサービスを提供している。

最新のDRSシステムの典型的な性能

45,000 kmまでの距離では、これらの衛星間リターンリンク（LEO→GEO→GRND）において、光で~1.7 Gbps、Kaバンドで250 Mbpsの典型的なスループットが期待できる。（通常のXバンドリンクLEO→GRNDでは500 Mbps程度）

現在のトレンドは、データレートの向上、リンクの可用性（時間の割合）、同時にサービスを提供する衛星の数（例えば、TDMAなどのマルチアクセス方式）の増加を目指している。

3-2 新しい衛星通信システムの調査

3-2.2 衛星の最新事例 (1) GEO3機種(1/4)

22-002-R-012

最新のGEOの例を3機種挙げる。

Bus	OneSat	Space Inspire	702X
Manufacturer	Airbus	Thales Alenia Space	Boeing
Bus legacy	OneWeb + Skynet + Quantum + Eurostar	Spacebus	702 + O3bmPower
1rst client	Inmarsat GX Flex (x3 Inm. F7)	Astra-1Q	WGS-11 (USSF)
1rst launch	2023	2024	2023 (mPower)
Total unit sold	7 Inmarsat-7 F1, F2, F3 Optus 11 Intelsat 42, 43 Superbird 9	5 Astra 1Q SES 16 Intelsat 41,44 Arabasat 7A	1 + 11(MEO O3b mPower)

3-2 新しい衛星通信システムの調査

3-2.2 衛星の最新事例 (1) GEO3機種(2/4) エアバス社 Onesat

22-002-R-012

Onesatは、Airbus Defence and Space社によってGEO通信用に開発された。その目的は、最終コストと製造コストを削減するために、標準、モジュール、設計から製造までのアプローチに基づいて、完全に再構成可能なプラットフォームを開発することであった。

2019年、インマルサットは、ミッションのニーズに応じてカバー範囲、容量、周波数を調整する機能を持つ次世代Kaバンド衛星3機を発注した。

2020年、オーストラリアの衛星通信事業者Optus社は、Ku帯で放送とブロードバンドのVHTSミッションを組み合わせた衛星1機 (Optus 11) を発注した。

2021年、インテルサットは、通信衛星サービスプロバイダーの次世代ソフトウェア定義ネットワーク向けに、複数の周波数帯で動作する衛星2機を発注した。

2021年、スカパーJSAT株式会社は、「スーパーバード9」衛星1機を、軌道上運用と地上セグメントのサービス・サポートとして発注した。この衛星は、フルデジタル軌道上再構成可能な通信衛星で、Kuバンドおよび場合によってはKaバンド (日本および東アジア) で放送およびブロードバンドミッションを提供する予定である。

プラットフォーム開発の目的は、機械的なプラットフォームの設計を成熟させ、Onesatアプローチを可能にする技術を開発することである。これには、完全な一次構造の開発、機器や展開可能な付属物を支える二次構造の開発、熱制御システムの開発、さらに流体システム、機器推進システムの開発および適格性確認が含まれる。

DPSは、軌道上および電気的な軌道上昇中に推力方向の制御を行うために使用される。このシステムは、ユーロスターで開発されたものをベースに、新しい衛星のサイズと収容量に適合するように改良されたものである。

Orderer	Satellite	Date of order	Date of delivery
Inmarsat	Inmarsat- GX7, GX8 and GX9	2019	2024 ~2025
Intelsat	Intelsat 42 & 43	2021	2025
Optus	Optus 11	2020	2024
SKY Perfect JSAT	Superbird 9	2021	2024

eDPS (Enhanced Deployable Panel Radiator) は衛星に必要な排熱能力を提供するものである。

Onesatの機械プラットフォームと推進アーキテクチャは、5つの主要なアーキテクチャ部分から構成されている：

- Onesat ストラクチャ。これは装置とペイロードを支え、スタックした衛星の主要荷重をロケットとのインターフェイス部に分散させる。
- ペイロードと推進器にわたる熱制御の実装
- 打ち上げ時に複数の衛星を連結する押さえと解放機構



ARTES project (source: [Onesat Platform and Propulsion Development](#) | ESA TIA)

3-2 新しい衛星通信システムの調査

3-2.2 衛星の最新事例 (1) GEO3機種(3/4) タレス社 SpaceINSPIRE

22-002-R-012

スペースインスパイア (INstant SPace IN-orbit REconfiguration)

Space Inspireは、効率とリソース配分を最適化しながら、需要やニーズに応じてミッションと通信サービスを軌道上で透過的に再構成できる製品群を開発することを目的として、Thales Alenia Space社が開発した。

2021年には、IntelsatからIntelsat 41 (IS-41) とIntelsat 44 (IS-44) 衛星を受注した。同年、SESはSpacebus NEOプラットフォームとSpace Inspireの2機の衛星ASTRA 1PとAstra 1Qをそれぞれ発注している。Spacebus NEOプラットフォームでの経験を生かし、より柔軟性のある衛星を開発することが目的である。その結果、ASTRA 1QはASTRA 1Pと同じ目的（ダイレクト・トゥ・ホーム（DTH）事業）で使用され、簡単に再構成ができるようになる。

この衛星は、軌道上で完全に柔軟でカスタマイズ可能である。実際、シあるステムリソースやサービスをダイナミックに変更することで、他の軌道位置への展開が可能になる。

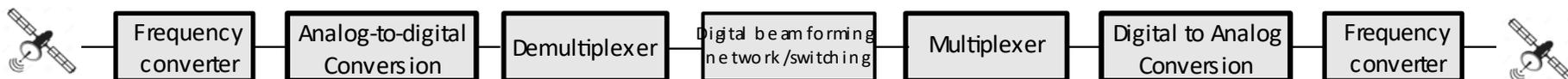
2022年、ARABSAT（中東・アフリカ地域の大手衛星通信事業者）とThales Alenia Spaceは、主ミッションをKuバンド、補助ミッションをCバンドで運用するARABSAT-7Aの製造契約に調印した。ARABSAT-7Aは、ARABSAT 6Aとともに、寿命を迎えたARABSAT-5AのCバンドとKuバンドの容量の大部分を置き換える予定である。

同年、SESはThales Alenia SpaceにKuバンドとCバンド（米国の5G向け）のSES-26を発注した。この衛星は、SESのNSS-13衛星を置き換えるものである。SES-26の主な目的は、ヨーロッパ、アフリカ、中東、アジア太平洋地域の放送局、メディア企業、通信事業者、インターネットサービスプロバイダー、政府機関への幅広いコンテンツ配信および接続サービスの維持と拡大である。

Orderer	Satellite	Date of order	Date of delivery
SES	Astra 1Q	2021	2024
Intelsat	Intelsat 41 & Intelsat 44	2022	2025
SES	SES-26	2022	X
Arabsat	ARABSAT - 7A	2022	2025



Intelsat IS-41, IS-44 (source: Thalesgroup)



3-2 新しい衛星通信システムの調査

3-2.2 衛星の最新事例 (1) GEO3機種(4/4) ボーイング社 702X

22-002-R-012

702Xプラットフォームは、ボーイングNGSOシステムに使用するために、特にボーイング社によって設計された。その設計は、702プラットフォームとO3b mPower MEOシステムをベースにしている。

702Xの技術は、市場の状況に応じて動的に帯域を割り当てるために使用される予定である。

702XプラットフォームのMEO版はすでに生産されており、プラットフォームの成熟した設計と、製造プロセスのコストとリスクの削減の成功を裏付けている。

ボーイング社は、このプラットフォームを搭載した最初のGEO衛星が2022年に運用開始されることを想定している。

ボーイング社の小型GEO衛星は、無燃料で約1900kgの重量で、再プログラム可能なソフトウェア定義型ペイロードで構成される。

702Xのペイロードモジュールには、デジタルで5000本のビームを生成できるフェーズドアレイアンテナが使用されている。



出典: Boeing

3-2 新しい衛星通信システムの調査

3-2.2 衛星の最新事例 (1) LEO代表例(1/4) Starlink

22-002-R-012

スターリンクは2020年8月に限定試験的に商用化され、2022年1月には24カ国で利用できるようになった。

Starlinkは合計1,933機の衛星を打ち上げ、そのうち183機が失敗または脱軌道し、1,837機が軌道に残っている。

TLEのデータによると、1,514機の衛星が運用高度にあり、スターリンク社は各軌道面に20°間隔で18機の衛星を配置し、各プレーンに最大4機の予備衛星を均等に配置している。これらの予備衛星は、故障した衛星の交換にすぐに使用でき、また必要に応じてサービスを提供し、容量を増強することができる。

衛星間通信 ISLを試験するために打ち上げられた衛星の中には、2組の衛星を異なる高度（540kmと400km）に配置し、放射線や大気の影響について光回線の特性を調べるなどの大規模な試験を行った後に、軌道を離脱したものもある。

現在、操縦不能で崩壊が進んでいる故障衛星が26機、積極的な軌道離脱で廃棄処理中の衛星が13機ある。



Artist view of the Starlink last generation satellite

出典:SpaceX

Feature	Generation 1	Generation 2
Mass at launch	295 kg	1000 kg
Customer segment RF	48 TX + 16 RX spot beams, Ku band	64 TX in Ku + Ka bands, 16 RX in Ku + Ka bands
Gateway segment RF	2 full duplex Ka band parabolic antennas	48x TX + 12x RX spot beams, Ka + E band
Total throughput	18 Gbps	80 Gbps
Operational altitudes	540 to 570 km in 5 shells	340 to 614 km in 9 shells
Operational lifespan	5 to 7 years	5 to 7 years
Co-frequency beams per cell	UT: 1 Ku, GW: 9 Ka	UT: 1 Ku, 1 Ka, GW: 32 Ka

3-2 新しい衛星通信システムの調査

3-2.2 衛星の最新事例 (2) LEO代表例(2/4) Lightspeed (テレサット)

22-002-R-012

2016年11月、Telesat Canadaは、Ka帯で運用し、高度1200kmの衛星117機で構成されるコンステレーションをFCCに申請した。(2017年に認可)

2017年3月、FCCの新しい処理ラウンドの一環として、TelesatはVバンドで動作する第2のコンステレーションを打ち上げ、運用するための要求を提出した。この新しいコンステレーションは、高度1000kmと1248kmの2つのシェルに117機の衛星で構成され、2018年に認可された。

テレサットは2022年に59機、2023年に59機と平均してKaバンド衛星を打ち上げ、さらに2022年から2027年の間に年平均20機のVバンド衛星を打ち上げる必要がある。

2020年5月、TelesatはFCCに対し、Ka帯のコンステレーションサイズを、第1フェーズでは117機から298機、第2フェーズではさらに1373機の衛星を増設するよう要請を提出した。

カナダ政府はLightspeedに14億ドルを投資する意向を表明し、TelesatはLightspeedへの投資資金として2026年満期の有担保上位債券5億ドルを発行すると発表した。

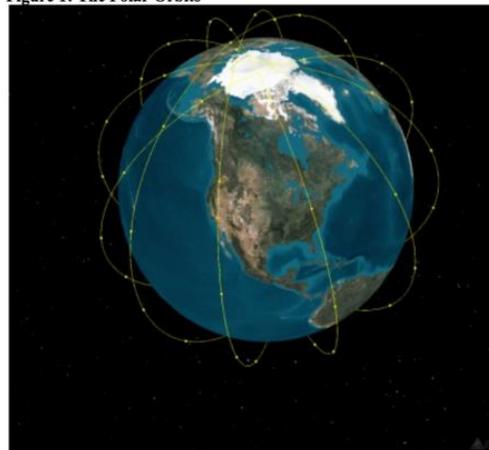
現在、Telesat社はKa帯で運用する試験衛星1機 (LEO-1) を打ち上げ、潜在顧客やパートナーに対するデモンストレーションを実施している。

軌道構成は2種類ある。軌道傾斜角99.5度の極軌道と37.4度の傾斜軌道があり、KaバンドとVバンドは同じ傾斜角と軌道構成で運用される予定である。

Lightspeedの主要性能

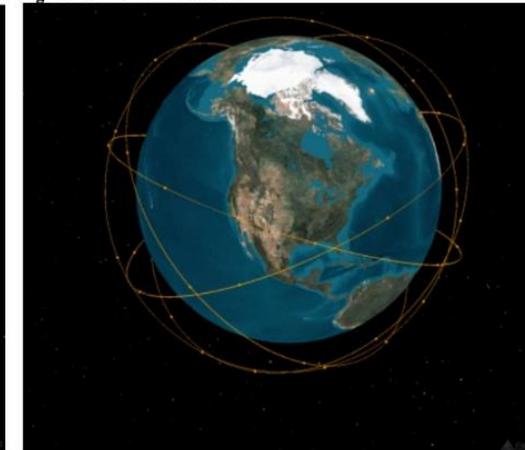
Feature	Telesat Lightspeed
Satellite weight	700kg
Electrical power	4kW
Fuel and orbit raising	Krypton gas and electric thrusters
Manufacturer	Thales Alenia Space
Maximum data rates	7.5 Gbps to a signal user terminal, 20 gbps to a single ground location
Operational life	10 years
Additional features	Phased array antennas (450 spot beams), ISL, in-satellite data processing and digital processor

Figure 1: The Polar Orbits



(1) 極軌道

Figure 2: The Inclined Orbits



(2) 傾斜軌道

Lightspeedの軌道

出典:Telesat

3-2 新しい衛星通信システムの調査

3-2.2 衛星の最新事例 (2) LEO代表例(3/4) OneWeb

22-002-R-012

OneWeb NGSOシステムは、Network Access Associates Ltd (旧 WorldVu Satellites Ltd) が設計・開発・運用を行っている。2012年に設立され、2019年に最初の衛星を打ち上げ、2020年3月に破産に陥った。同社は、英国政府、インドの多国籍企業であるBharti Globalを中心とした新たな事業体グループが所有する倒産を免れた。それぞれが42%の株式を保有している。ソフトバンクは残りの12%の株式を保有している。この記事を書いている時点で、OneWebは合計394機の衛星を打ち上げており、そのうち1機は失敗し、脱軌道の予定である。運用高度の衛星は16機の極平面内、1200kmにあり、いくつかの衛星はまだ引き上げられ、最終的な軌道スロットに配置される。

TLEのデータによると、358機の衛星が運用高度に達している。

OneWebは、各軌道面に10°間隔で36機の衛星を配置する。現在、Airbus社と締結している衛星群設計・製造契約は900機であり、このうち252機が予備衛星として、故障や脱落した衛星の代替に使用されると推測される。

OneWeb衛星間の衛星間通信ISLは計画されておらず、テストもされていないため、純粋にオフロードのためのゲートウェイに依存している。

OneWebは、2021年末に同社の衛星の1機が故障し、スペースデブリ除去に関する声明を遵守して脱軌道させることを報告した。

OneWebは、2022年1月にBTとトライアルを開始したのみで、まだ商用サービスを開始していない。最初の商用顧客は2022年中頃を予定。

OneWeb gen2は2025年に予定されている。OneWebが運用を開始した衛星の1バージョンである。質量150kgで、ジンバル付きのKa帯ゲートウェイリフレクタアンテナ2基と、固定サイズのビームを持つKu帯アンテナ2基を備え、グループとして南北軸に10°のステアリングが可能である。

この衛星は、スター・トラッカーと、リチウムイオン電池を動力源とするキセノンプラズマ推進システム (PPS) を搭載している。各衛星は2つのTT&C無指向性アンテナを搭載している。姿勢制御には、PPSスラスタを使わず、必要な時に磁気トルカで脱力するモーメントムホイールを使用する。各衛星には、Ku帯には16台のフォワードリンク用固体電力増幅器 (SSPA)、Ka帯には4台のSSPAが搭載されている。



(Left) Oneweb satellite stack
(source: defencehub)



(Right) Oneweb satellite
(source: Aerospatium)

3-2 新しい衛星通信システムの調査

3-2.2 衛星の最新事例 (2) LEO代表例(4/4) Kuiper

22-002-R-012

2019年4月、ブロードバンドアクセスのためのNGSOコンステレーション市場に参入する機会を得たアマゾン、スペースXのスターリンクシステムの打ち上げをみてコンステレーションの開発、資金調達、打ち上げを行う意向を表明している。

2019年7月、そのために設立されたAmazonの子会社Kuiper Systems LLCは、Ka帯で運用し、590km、610km、630kmの3シェルで3236機の衛星を構成するコンステレーションの申請をFCCに行った。これらの高度は、SpaceX社が申請している高度に非常に近い。

FCCは2020年7月にコンステレーションを認可したが、Kuiperによる要求を一切取り除くことなく、事前に認可を受けたコンステレーションに対して、周波数共有、および有害な干渉に関する制限を課している。

この認可は、Kuiper社が2026年7月までにコンステレーションの50%を打ち上げ、2029年7月までに残りの衛星を打ち上げることを要求している。このため、Kuiperは現在から最初の期限までの間に月当たり約34機、2026年から2029年までの間に月当たり45機の衛星を打ち上げなくてはならない。現在、ULAとは9回のアトラスV打上げミッションを契約しているが、衛星の打上げは行っていない。Amazonは2022年第4四半期に2機の試験衛星を打ち上げることを示唆しており、これにはABL Space SystemsのRS-1ロケットを契約している。

カイパーサービスは当初南緯56度から北緯56度の帯域をターゲットとしている。サービス提供地域は、米国本土、ハワイ、米国領を予定しており、ライセンス供与やゲートウェイの展開が可能になり次第、追加していく予定。

高度に傾いた軌道に打ち上げる計画はなく、カナダ、アラスカ、スカンジナビア地方の一部が使えなくなる。

認可の義務を果たすために、カイパーは2026年まで平均して年間405機、2027年から2029年までは年間539機の衛星を打ち上げる必要がある。

これに対し、SpaceX社は2021年中に986機の衛星を打ち上げており、Kuiper社が2023年初頭までに最終的な衛星設計を行うことができれば、スケジュールを達成できる可能性がある。



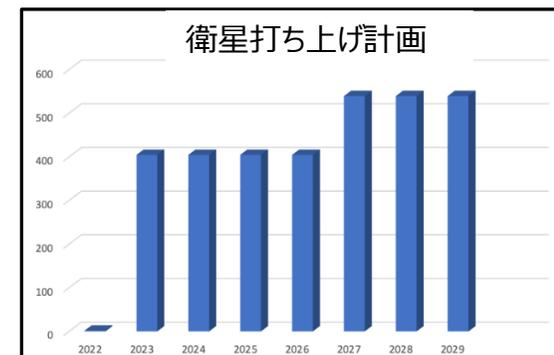
Satellite Positioning for Best Alignment of Coverage Footprints



Representative Spot Beam Frequency Reuse (300km² Spot Area)

上図・左図は、連続カバーのためのフットプリントと衛星の配置、およびサービスセルを示す。

カイパー衛星は、ゲートウェイ・リンクにパラボラアンテナ、サービス・リンクにフェーズドアレイアンテナを使用する。



3-2 新しい衛星通信システムの調査

3-2.3 キー技術 (1) サブシステム

22-002-R-012

アンテナ方式 1

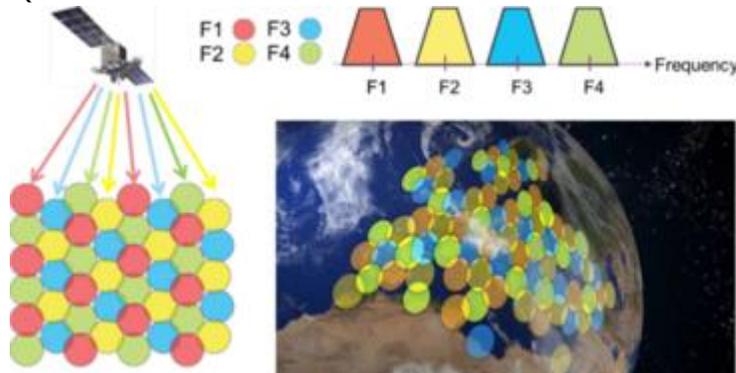
・電子走査型アンテナ (ESA: Electronically Steerable Antenna、DRA : Direct Radiative Antenna)

アクティブ電子走査アンテナ (ESA) は、最適化されたイリュミネーション則 (振幅および位相シフト) にて数十個の放射素子 (Re) のアレイにて、ビームフォーミング及び走査を実現するアクティブアンテナタイプである。

・イリュミネーション則はビームフォーミングプロセッサにて計算され、波面内の各REからの構成的で破壊的な干渉にて、所望のアンテナパターンを生成する電子走査アンテナによるアップリンク及びダウンリンクカバレッジのフレキシビリティにて、対象地域にわたり、G/T及びEIRPをチューニングすることにて、**キャパシティを動的に割り当て可能**となる。

・今まではESAのGEO通信衛星への使用はその複雑さやスループット・ビーム数優先の観点から比較的限られてきた。現在、カバレッジの柔軟性要求に伴って変化しており、**GEOではDBFを行うデジタルプロセッサとペアになり欧米で最新の標準になりつつあり、LEO/MEOでも実装されつつある。**

(O3bmPower及びStarlink衛星通信コンステレーションは、ESAを実装)。



古典的なフィードホーンを用いた4色の周波数再利用スキームを用いた典型的なマルチスポットKa-Band HTS。これは、SFPBを用いたSDMAの一種です。[出典: Eutelsat]



出典:SES

ESA(DRA)の長所	ESA(DRA)の欠点
<ul style="list-style-type: none">100本、1000本の微細なビームを生成する能力SSPA / Mini TWTA等低出力でローフットプリントの中継器との併用が可能自由度の高いカバレッジと容量配分がDTPとの併用時に得られる。カバレッジスポットごとにフィードホーンを用意する必要がない：リフレクターの数を制限できる機構部なしカバレッジマルチ化による干渉緩和	<ul style="list-style-type: none">ビームの指向性が弱いので、周波数再利用の色数は多くしなければならない。容量を小さくする制約となる。EIRPが小さいため地上超小型端末や、GEOで使用する場合のハンドヘルド機には不向き。一般的なリフレクターアンテナと比較して、RF性能が低い (位相/振幅誤差によるゲインロス、グレーティングローブ、ビームスキャンの制限など)。プラットフォームへの影響 (温度調節など)新しいビームの追加は既存のビームを劣化させる-運用上の問題

3-2 新しい衛星通信システムの調査

3-2.3 キー技術 (1) サブシステム

22-002-R-012

アンテナ方式 2

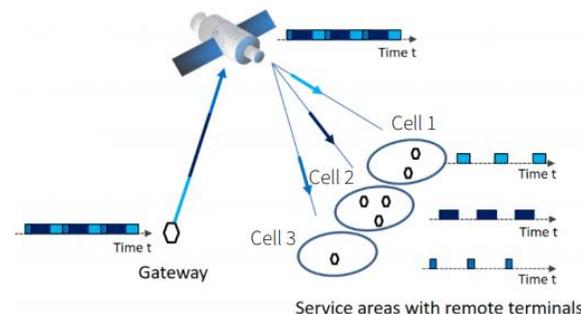
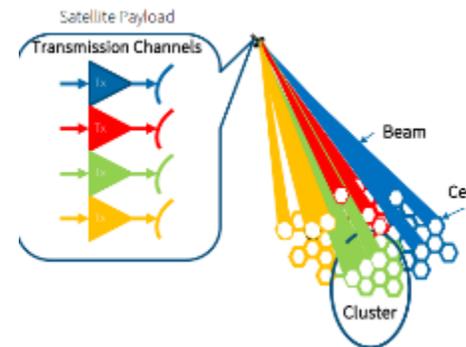
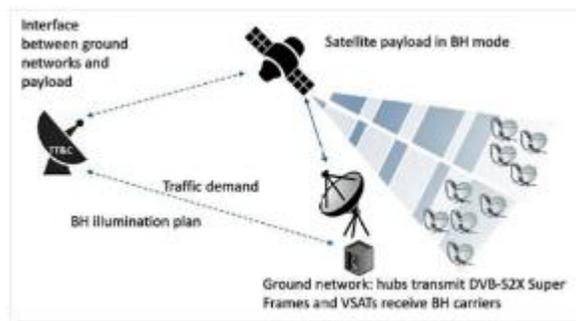
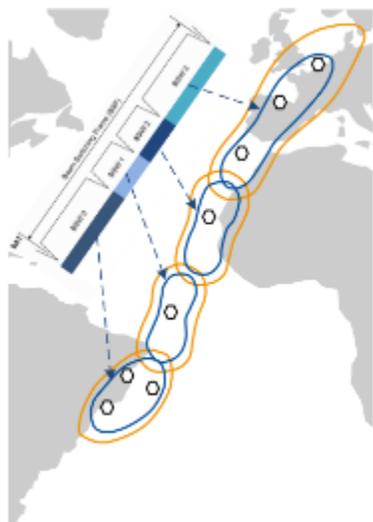
ビームホッピング

ESAの機能を用いて時間的・空間的にビームをホッピングさせる方式であり、ESAがマルチビームを形成するときに、例えばLEO/MEOにおいては軌道運動に合わせてビームをユーザに向ける必要がある。

ESAによるマルチビームは柔軟性の反面、CIが劣化するため同一周波数のビームが同時に照射されない場合、同一周波数の干渉が少なくなるため、容量抑制し、またHPAをより飽和点に近い状態で動作させることが可能になる。バックオフを小さくすることができ、ダウンリンクのC/Noとスペクトル効率を向上させることができる。しかし、周波数再利用率が低い場合（または完全再利用の場合）には、同一チャンネル干渉が性能を低下させる可能性がありこれらのトレードオフが必要となる。

本ビームホッピングには、需要に完全にマッチした時空間的な照射プランを構築できるかどうかという課題がある。

最近打ち上げられたEutelsat Quantumは、電子制御式アンテナによりビームホッピングが可能(アップリンク8ビーム/ダウンリンク8ビーム)である。OneWebでは、ビームホッピングの技術実証機として衛星を開発、ペイロードは SatixFy 社が担当している。これに続き、Starlink Gen2(ユーザー)、OneWeb Gen2(ユーザー)、O3b mPOWER、Lightspeed(ユーザー)の各コンステレーションでビームホッピングを計画している。



3-2 新しい衛星通信システムの調査

3-2.3 キー技術 (1) サブシステム

22-002-R-012

デジタルペイロード

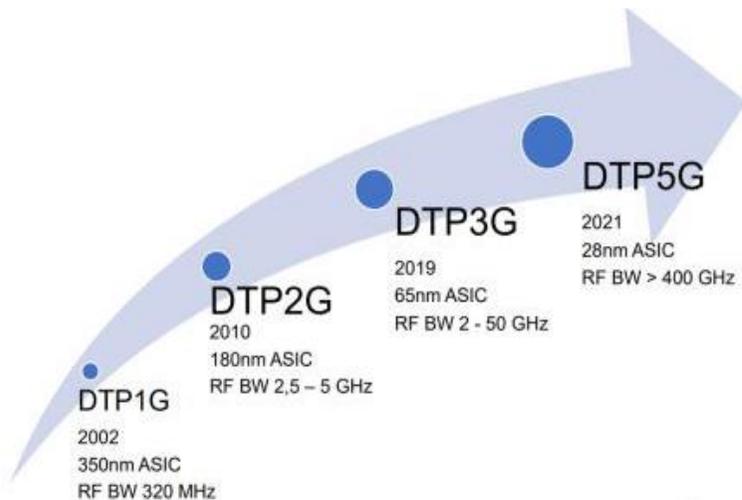
デジタル トランスパアレント プロセッサ (DTP)

(日本ではデジタルペイロードプロセッサ(DPP)と呼称)

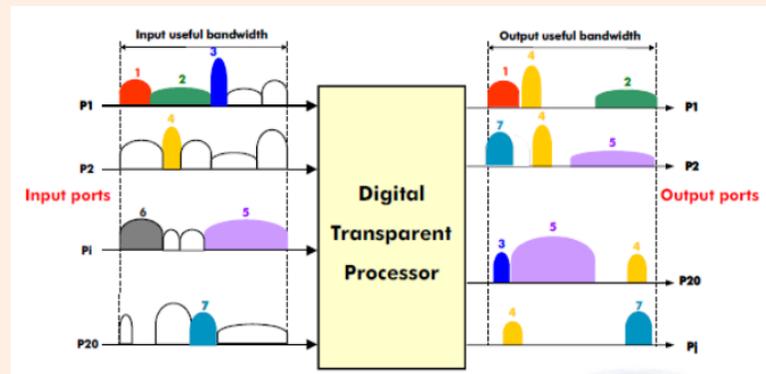
・衛星通信システムのフレキシビリティにおける主要技術の1つは、需要に従って様々なカバレッジエリアの衛星キャパシティを適応させるように、ビーム間のダイナミックなチャネライゼーションとルーティング可能にするDTPである。

→エアバス、タレス、ボーイングは本製品の製造能力を有している。

→これらプロセッサは**オンボードでの変調及び復調を伴わないため、「トランスパアレント」と呼ばれる**。DTPは今や十分な成熟レベルに達し、ワイドバンドHTSシステムのフレキシブルペイロードアーキテクチャの基礎である。ASICとFPGA技術の最近の発展は、処理の新しい能力を開いた。



過去及び現在のDTP世代
(出典: CNES/Thales)



DTP特性及びルーティング能力のイラスト図(出典: CNES/Thales)

上図中の異なる7つのケース:

1. シンプルルーティング(ポイント-ポイント間、「ベントパイプ」ルーティングに最も近い)
2. 周波数シフトを伴うシンプルルーティング(出力スペクトルにおけるキャリアの異なる位置)
3. ゲイン調整付きの別のポートへのシンプルルーティング (減衰あり)
4. ゲイン調整が異なるすべての出力ポートへのブロードキャスト
5. 異なる利得調整 (増幅または減衰) を持つ異なる出力ポートへの広帯域搬送波マルチキャスト
6. 帯域幅「ヌルリング」: このシグナルはミュートされて、出力に現れない
7. 異なる出力ポートへのナローバンドキャリアのマルチキャスト

注意: このタイプのチャネライズと接続/ルーティングは、衛星へのテレコマンドによって変更できるソフトウェア構成である。

3-2 新しい衛星通信システムの調査

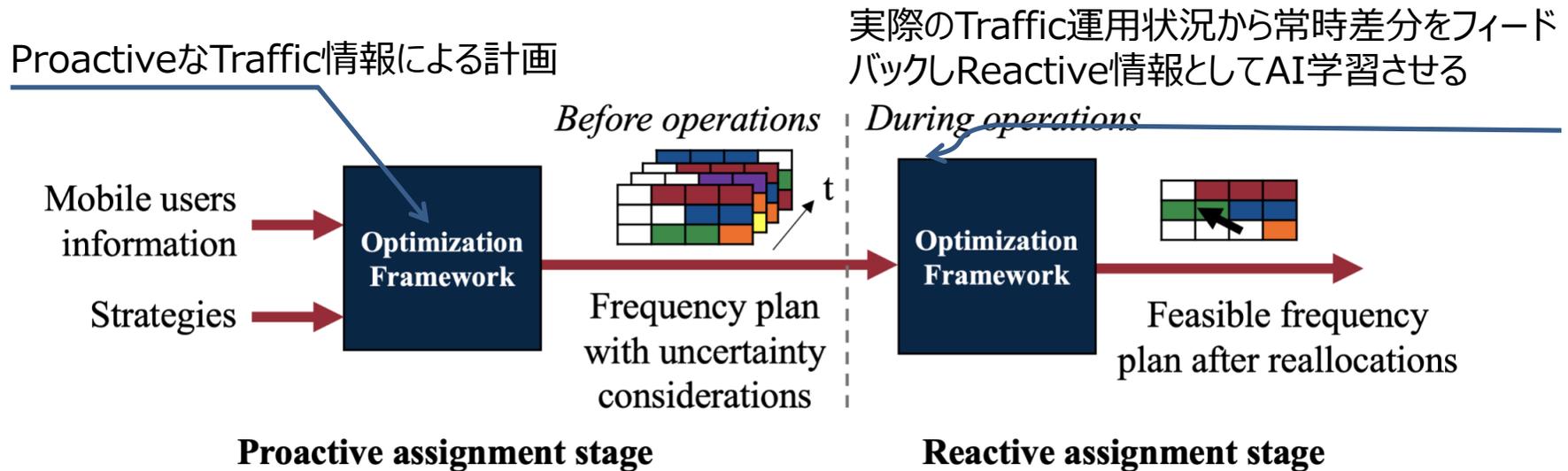
3-2.3 キー技術 (1) サブシステム 事例紹介 MIT:AIベースのMEO通信衛星の動的周波数・ビーム制御(1/4)22-002-R-012

[出典:73rd International Astronautical Congress (IAC), Paris, France, 18-22 September 2022. IAC-22,B2,2,3,x74194
"Dynamic Frequency Assignment for Mobile Users in Multibeam Satellite Constellations"
Guillem Casadesus-Vila¹ Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology]

1. 最新のデジタル通信衛星は数千のスポットビームを搭載し、選択したサービスエリアをカバーし、ユーザーを追跡することが可能。
2. 周波数、帯域、電力、覆域は、ユーザーの要求に応じてリアルタイムで調整可能。
3. DBFにより、同一偏波・周波数のビーム間の空間的分離によって周波数を再利用し、限られた3GHzというITUルールの中でスループット最大化を図っている。
4. 従来の固定のグリッドレイアウトやステアラブルビームと比較して、ハンドオーバーの回数を減らすことができ、コンステレーション効率をさらに向上させることが可能。
5. **半面、通信の自由度が大きいゆえに、変化する需要ニーズを満たしたうえで、最適なりソースの配分を見つけることは動的リソース管理 (Dynamic Resource Management: DRM) 問題としてコミュニティではよく知られている。**
6. 例えば航空輸送の50%は地球表面の4%に、海上輸送の80%は地球表面の15%に集中している。**これらをApriori 情報とともに、AIによりパターンとして学習させることで、需要ピークに貢献することが可能。**
7. **一般のモバイルユーザーや煩瑣な運航変更は、不確実性の大きな要因**であり、また上記Deterministicな運行も突発的な遅延や天候で乱れることは往々にあり、これは衛星のビームアロケーションを混乱させることになる。**これにはReactiveな方式で運用の中で学習させていった。**

3-2 新しい衛星通信システムの調査

3-2.3 キー技術 (1) サブシステム 事例紹介 MIT:AIベースのMEO通信衛星の動的周波数・ビーム制御(2/4)22-002-R-012



1. 900本以上のビームが密集するシナリオでは、運航等の**ア priori**情報が揃っていても**99.97%のユーザーにサービスを提供することができた。**
2. 重要なのは評価関数の重みとしてユーザのストレス（待ち時間）・ビーム間ハンドオーバー数・衛星消費電力の**係数配分**であり、これらは**実際の運用の中で戦略的に調整**するしかない。逆にそれをビジネス上決めれば、**評価関数を最小化する運用は Reactiveな方法で収斂修練可能**と考えている。
3. また周波数やビームを各ユーザに割り当てるのは**非効率的**であり、**ストアしている周波数を reactiveに集中Trafficに割り当てる**いわゆる**Truncation的な方法**が有効なのは論ずるまでもない。

[出典:73rd International Astronautical Congress (IAC), Paris, France, 18-22 September 2022. IAC-22,B2,2,3,x74194 "Dynamic Frequency Assignment for Mobile Users in Multibeam Satellite Constellations" Guillem Casadesus-Vilalta Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology]

3-2 新しい衛星通信システムの調査

3-2.3 キー技術 (1) サブシステム 事例紹介 MIT:AIベースのMEO通信衛星の動的周波数・ビーム制御(3/4)22-002-R-012

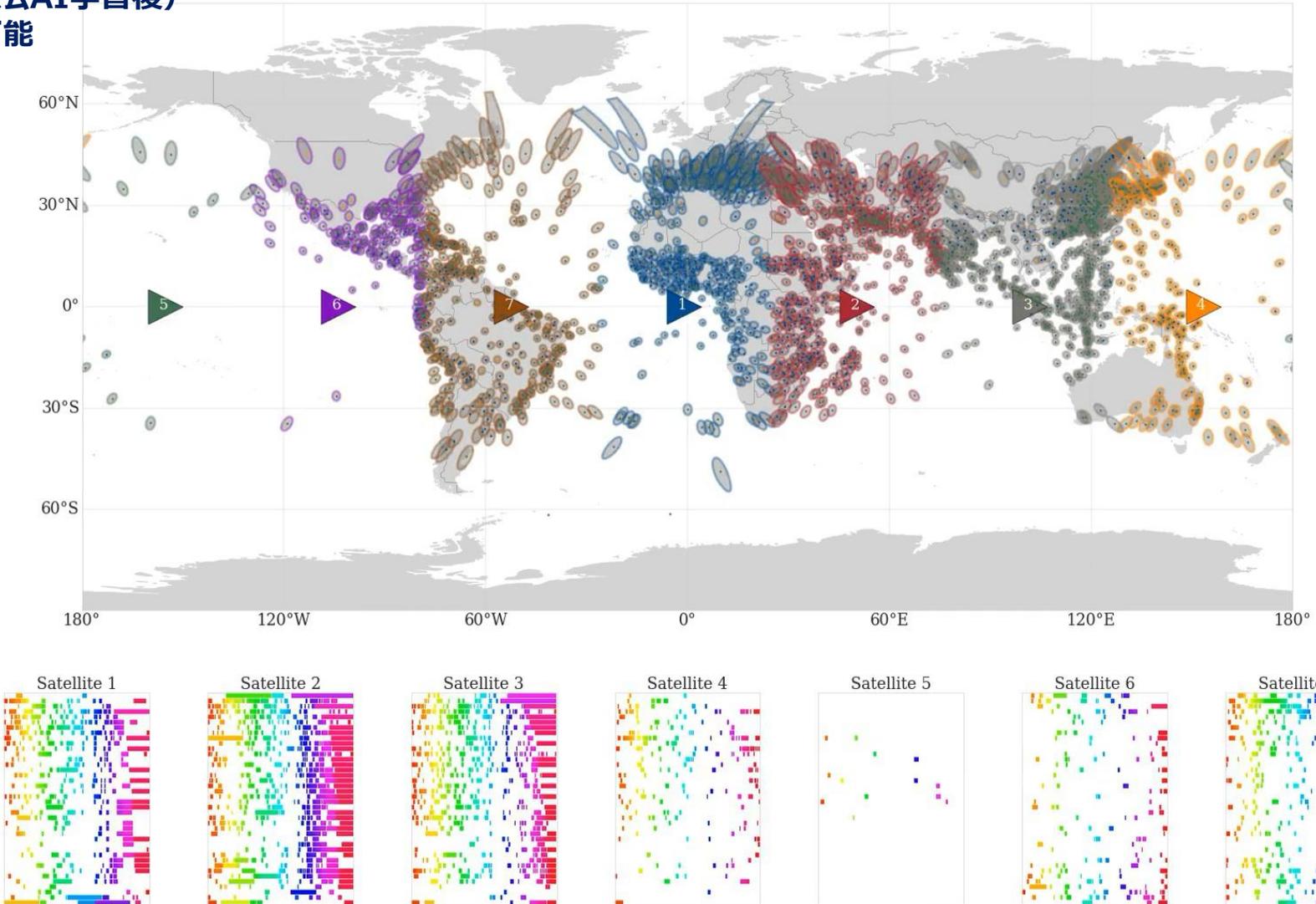
アルゴリズム結果例

[出典:73rd International Astronautical Congress (IAC), Paris, France, 18-22 September 2022. IAC-22,B2,2,3,x74194
"Dynamic Frequency Assignment for Mobile Users in Multibeam Satellite Constellations"
Guillem Casadesus-Vilalta Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology]

mPower7機によるTraffic制御 (アルゴリズムAI学習後)

00:00:00

動画再生可能



3-2 新しい衛星通信システムの調査

3-2.3 キー技術 (1) サブシステム 事例紹介 MIT:AIベースのMEO通信衛星の動的周波数・ビーム制御(4/4)22-002-R-012

【出典:73rd International Astronautical Congress (IAC), Paris, France, 18-22 September 2022. IAC-22,B2,2,3,x74194 "Dynamic Frequency Assignment for Mobile Users in Multibeam Satellite Constellations" Guillem Casadesus-Vila Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology】

1. アルゴリズムを使うことで100%ユーザーサービス可能である。
2. 通信小名愛100%はMandatory。
3. 但し不確実なユーザが330Spot (ビーム数で) 等と多くなると消費電力を+30%にEIRP拡大しないと99.9%にはいかない。

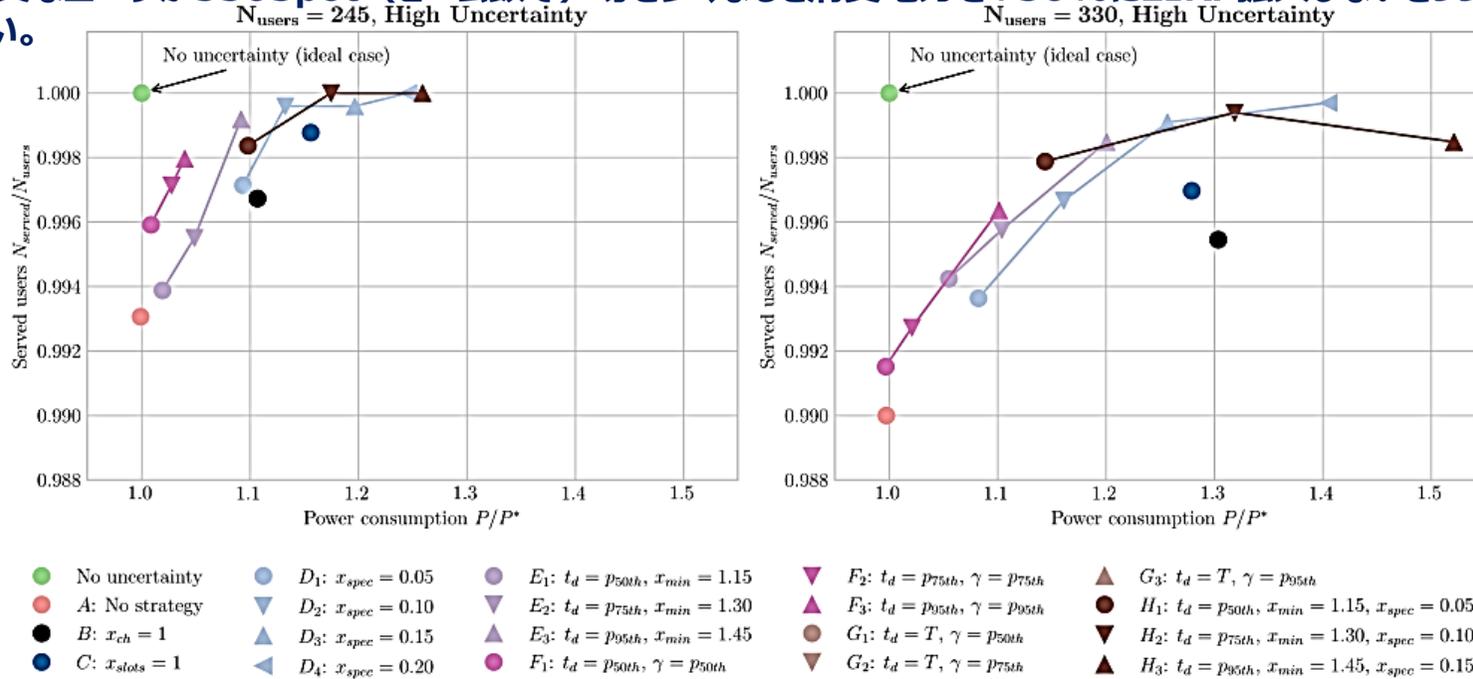


Fig. 6: Average fraction of served users N_{served}/N_{users} and normalized power consumption P/P^* scenarios with 245 and 330 users and high uncertainty (results for 10 runs). P^* is the power consumption of an ideal case with no uncertainty (in green).

1. 固定ビームでモバイルユーザーをカバーするハイブリッドビームカバレッジソリューションの開発。
2. モバイルユーザーを効率的にゲートウェイに誘導する方法の研究。
3. ゲートウェイに効率的にルーティングする方法の研究、および本フレームワークアルゴリズムの機能拡張。
4. 需要の不確実性に更に対処すること。現行は+30%のEIRP増が必要。

3-2 新しい衛星通信システムの調査

3-2.3 キー技術 (2) 機器

22-002-R-012

中継器技術1

高出力増幅器: 高周波向TWTA対SSPA

- ・宇宙ベースのRF通信における2つの大きな選択肢には、**進行波増幅器(TWTA)**と**固体増幅器(SSPA)**がある。
- 歴史的には、高出力、効率及び周波数(例えばKa帯)の点からは、TWTAが選択されてきた。
- 線形化、小型化及び窒化ガリウム(GaN)などの**新素材の使用**による最新の技術進歩により、**SSPAの利用範囲が拡大**し、トレードオフ(Ka帯における出力性能vsサイズマス及び価格)の対象となっている。

ミニチュアTWTA

- ・特に新しい技術ではないが、多くの増幅器がペイロードにおいて必要とされる場合には、小型のTWTAが注目される。実際、これらのチューブはより短い(<20cm)、軽く、従来のTWTAより消費電力が低い。他方、最大のRF出力電力は、従来のTWTAより一般的に低い。ミニチュアTWTAによって提案されるサイズの縮小係数は約5、ノイズは約100の係数である。

フレキシブルTWTA

- ・TWTAの新世代品は、テレコマンドにて、**飽和出力が約3dBの範囲で調整可能**である。
- 本機器により、**高出力TWTAを全体の電力消費を増大させずに実現可能**。
- カソード電流を低減するため、アノード電圧をコントロールすることにて結果的に飽和出力の低減を実現。
- 異なるタイプの進行波管(TWTAはしばしば衛星のクリティカルパスとなるため、**装置の調達短縮につながる**)の冗長が可能となる。また、電力消費量リミットがある場合に必要EIRPを得るためのトランスポンダの微調も可能。また、フレキシブルTWTAは、**従来型よりも、同じ動作点における電力効率が高い**。

マルチポート増幅器

- ・MPA技術は、同じ周波数で動作する信号の全出力ポートに対して、利用可能な電力リソースをバランスさせることができる電力増幅アーキテクチャ。
- 原理は、Buttler-RFマトリクスを介した信号のコヒーレント分割と再結合に基づいている。
- 課題の一つは、周波数が高くなるにつれて位相整合が難しくなることである。信号電力は、入力レベル当たりのMPA入力間で共有される。



3-2 新しい衛星通信システムの調査

3-2.3 キー技術 (2) 機器

22-002-R-012

中継器技術2

《Q/V帯技術・機器開発状況一覧》

区分	技術・機器名(企業)	周波数	内容
衛星搭載機器	SSPP(DAS Photonics)	Q/V帯	Q/V帯用周波数変換器の軌道上実証 (図①)
	PLL LNB(Norsat社)	40.5-41.0 GHz	Q帯周波数変換 (図②)
	TWT(Thales)	37.5-42.5 GHz	衛星搭載用TWT (図③)
	LNA及びSSPA等 (TAS伊)	Q/V帯	衛星搭載用LNA(InP)及びSSPA(GaN)等。()内は、デバイス (図④、⑤)
地上系	Feed System(エアバス)	Q Tx 37.5-40.5G Q Rx 42.5-43.5G V Rx 47.2-51.4G	フィードシステムのEM開発 (図⑥)
	複合炭素繊維アンテナ(Calian, SED)	Q/V帯	アップリンク及びダウンリンク用地上アンテナ (図⑦)
	高電力ダイプレクサ(ITS)	Q Rx 37.5 - 42.5 G V Tx 47.2 - 51.4 G	地上局用500Wダイプレクサ (図⑧)
	TWTA(Comtech Xicom)	Q/V帯	地上局アップリンク用送信機
	フェーズドアレイアンテナ(ThinKom)	Q 37.5-42.5 GHz V 47.2-51.4 GHz	LEO及びMEO衛星コンステ向ユーザ端末用アンテナ (図⑨)

【衛星搭載機器】



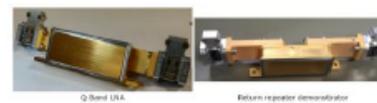
図①：SSPP PFMの写真



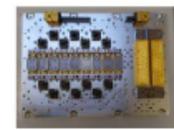
図②：PLL LNBの写真



図③：TWTのBreadboardモデル写真
【ARTESプログラムにて開発】



図④：Q帯LNA(左)及びリターンリピータデモ器(右)
【ARTESプログラムにて開発】



図⑤：20W SSPA
【ARTESプログラムにて開発】

【地上系機器】



図⑥：Q/V Feed
【ARTESプログラムにて開発】



図⑦：Ka/Q/V帯ゲートウェイアンテナ
【ARTESプログラムにて開発】



図⑧：Q/V帯ダイプレクサアセンブリ
【ARTESプログラムにて開発】



図⑨：LEO及びMEO
コンステ向ユーザ端末用
アンテナ

LNA : Low Noise Amplifier
LNB : Low Noise Block Converter
ITS : Information Technology Service
PLL : Phase Lock Loop
SSPA : Solid State Power Amplifier
SSPP : Single String Photonic Payload
TWT : Traveling Wave Tube

3-2 新しい衛星通信システムの調査

3-2.3 キー技術 (3) 今後の動向 再生中継 DTPと再生型との比較(1/2)

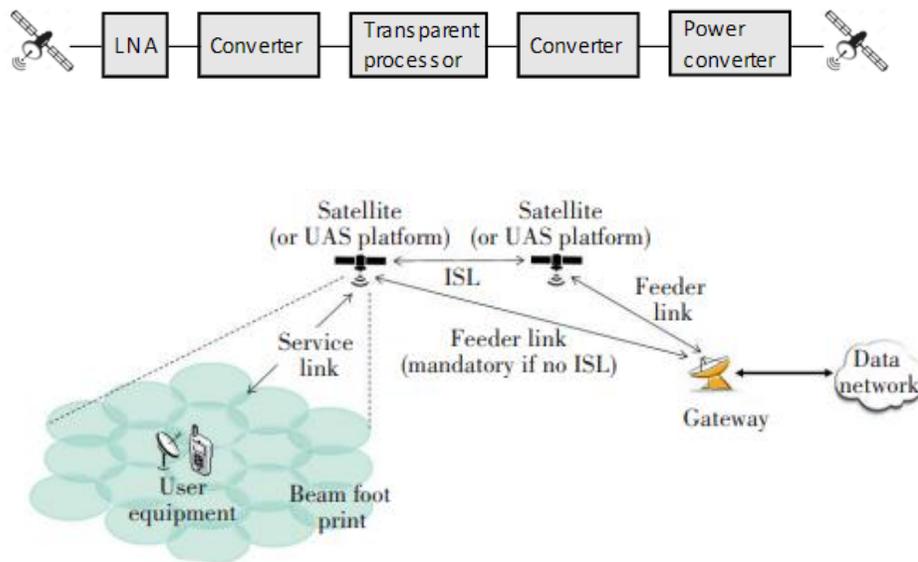
22-002-R-012

定義

- ・ ユーザーデータは復調、処理、再変調される。
- ・ 再生ペイロードは、デジタル透過型プロセッサ (DTP) または完全再生型 (FR) トランスポンダであるオンボード処理 (OBP) により可能
- ・ FRトランスポンダがエンコーディング/デコーディングなどの高度な機能を含む場合、DTPトランスポンダは効率的なルーティングで信号性能を強化したり、フィードリンクのスペクトル効率を向上させたりすることができる。OBPはLNAとHPA (High Power Amplifier) の間に配置され、アップリンクとダウンリンクのエアインタフェースを変換する。

特徴

- ・ 再生ペイロードは、性能の向上とレイテンシーの低減を実現。
- ・ 再生ペイロードにより、非GEOコンステレーションの実装が簡素化される可能性がある。
- ・ 再生ペイロードは、より多くの処理能力をオンボードで必要とし、将来につながるすたれない設計を保証する可能性がある。
- ・ 衛星に搭載された復調装置は、衛星の寿命が尽きるまで凍結され、透明ペイロードのように市場で刻々と変化する波形の進化に対応できないことを意味する。
- ・ LEO衛星群における衛星間リンク (ISL) は、再生ペイロード間の通信に利用できる。これにより、受信側の地上局/ユーザ端末の地理的な範囲が広がる。衛星間リンクでは、パケットレベルのデータルーティング (IP上のシングルホップ接続) を行うために、RF信号の復調が必要となる。
- ・ 再生ペイロードを使用することで、必要なゲートウェイの数やLEO衛星の数を減らすことができる (例えば、リアルタイムアプリケーションには興味を持たれる可能性がある)。
- ・ デジタルビームフォーミングと同時に使用する場合、再生ペイロードの利点は減少する可能性がある。実際、再生はデータ量を「圧縮」してしましますが、DBFでは逆の発想になる。
- ・ 軍事用の GEO 衛星では、再生ペイロードを使用することは、干渉を回避するのに役立つので、セキュリティ上、興味を持たれる可能性がある。実際、破損したデータパケットを送信することはなく、リンク間のジャンプを回避することができる。



Field of view of the satellite (or UAS platform)

ISL: inter-satellite links UAS: unmanned artificial system

再生型ペイロード 出典: Euroconsult

3-2 新しい衛星通信システムの調査

3-2.3 キー技術 (3) 今後の動向 再生中継 DTPと再生型との比較(2/2)

22-002-R-012

	透過型ペイロード	再生ペイロード
定義	デジタル透過型プロセッサすなわちデジタルチャネライザは、複数の入力ポートから狭帯域チャンネルを用いて複数のサブチャンネルを生成し、サブチャンネルを独立して結合して出力ポートにルーティングするプロセッサである。このタイプのプロセッサは、スイッチドTDMAやデジタルビームフォーミングもサポートしている。	再生ペイロードは、単純な回路切り替えを行う代わりに、キャリアまたは複数のキャリアの復調と再変調を行い、データパケットを複数の出力ポートにルーティングすることができる。オンボードで再プログラム可能なシステムを使用することで、新しい変調方式に適應することができる (ソフトウェア定義ペイロード)。
優先アプリケーション	GEO、MEO、場合によってはLEO衛星 (ゲートウェイの混雑状況、価格、ターゲット市場、既存の地上ネットワークの可能性を考慮したトレードオフが必要)	軍用GEO、LEOコンステレーション
既存システム例	Onesat、Inmarsat GX7、GX8、GX9などOnesatプラットフォームを使用する衛星、O3b mPower	Starlink Gen 2、Iridium Next、Lightspeed Telesat
長所	<ul style="list-style-type: none"> 再生ペイロードより複雑ではない (再生型ペイロードと比較して、柔軟性や再構成性に劣る) 	<ul style="list-style-type: none"> アップリンク・ダウンリンク間でユーザーデータをルーティングする非常に効率的な方法 リンクバジェットの改善 高容量化 エンド・ツー・エンドのリンクバジェットを削減し、Ground to Ground全体の効率を改善 フィーダーリンクのスペクトル効率向上によるゲートウェイや衛星の必要数の削減 データ保存
短所	<ul style="list-style-type: none"> ゲートウェイの数が多く、インフラ全体のコストに影響する ゲートウェイのローカライゼーションがデータのルーティングに与える影響は大きい 	<ul style="list-style-type: none"> 高速デジタル信号処理と効率的なオンボード専用ソフトウェアが必要なため、透過型と比較してデジタルペイロードの複雑さ(およびコスト)が大幅に増加。 地上運用ソフトウェアも高度な複雑さ(データのルーティング等)を必要とする。 復調・変調にASICを使用した場合、フィーダとユーザのRF波形を変更することができない。FPGAを使用した場合、DCを過剰に消費する危険性がある。 地上技術(MODCOD、波形、暗号、信号など)の陳腐化の可能性がある。しかし、FPGAとオンボードサーバーを使った新しいSDR技術で部分的に緩和される可能性がある。また、LEOコンステレーション(衛星の寿命が5年未満)であれば、それほど危機的な状況ではない。 エアインタフェースの複雑さ - ネットワーク層の完全な検証の必要性

- 1. はじめに
- 2. 中間報告会スケジュール
- 3. 報告する調査内容
 - 3-1 5G/6Gに向けた衛星通信システムの調査…………… (p 5~17)
 - 3-2 新しい衛星通信システムの調査…………… (p18~43)
 - 3-3 衛星システムIoTの調査…………… (p44~49)
 - 3-4 衛星間通信による宇宙ネットワークの調査…………… (p50~58)
 - 3-5 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査… (p59~68)

(調査要求)

- (1) 携帯電話やIoTデバイス等への衛星からのデータ送受信に関する現在の利活用状況、及び今後の技術動向について調査すること。
- (2) 各軌道におけるIoTデータ収集の長所短所を調査すること。
- (3) 本調査において、日本の強み・弱み等の分析を行うこと。

(調査進捗状況)

- (1) 衛星によるIoTサービスのインフラ整備状況や利活用状況・技術に関して調査中。
- (2) GEO・MEO・LEO各軌道によるIoTシステム提供の長短所や、追加調査項目として提案する周波数認可の海外の状況に関する調査中。
 - 地上デバイスの種類（大きさや送信方法）
 - 周波数・変調方式等通信方式
 - データレート
 - 1衛星または衛星コンステレーションにおける収集可能台数
 - 衛星側受信/復調/記録再生/送信の仕組み
 - 収集頻度
 - 衛星で開発が必要な詳細機能性能
 - LPWA方式に関する調査（LPWA: Low Power Wide Area、低消費電力で長距離データ通信を可能とする無線通信技術）
- (3) (1)(2)項の調査結果をもとに、日本の強み・弱み等の分析を実施する予定。

3-3 エグゼクティブサマリ

項目	重要なトレンド
3-3.1 衛星IoTの実施事例	<ul style="list-style-type: none">▶ ICTフォーラムでまとめられているように、世界で衛星IoT事業が推進されている。▶ 日本として衛星IoT事業が成立するか検討する必要がある
3-2.2 衛星IoTのユースケース紹介	<ul style="list-style-type: none">▶ Skywalker(中国HEAD社)がIAC2022で開発事例を紹介した。

最終報告に向けての重要分析項目（国内外比較を含む）

・海外で積極的に進められている衛星IoT事業に対して、機器や衛星供給の観点で必要な技術はなにか。

3-3 衛星システムIoTの調査

22-002-R-012

本報告では、IAC2022で発表のあった、中国 **HEAD Aerospace Technology社**のSkywalker計画に関する発表を事例として報告する。



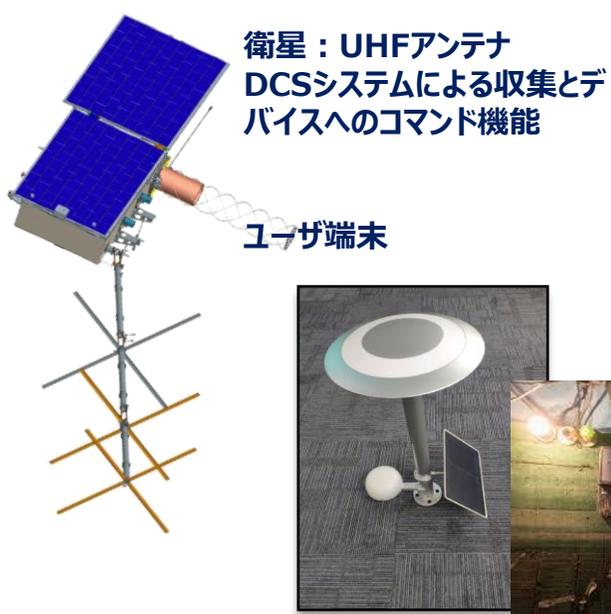
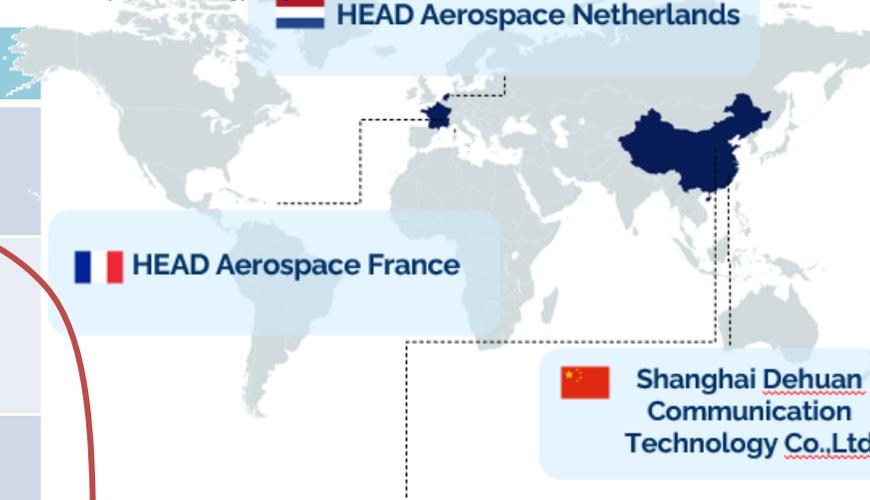
3-3 衛星システムIoTの調査

China HEAD Aerospace Technology(中国 北京) IoTコンステレーション22-002-R-012

衛星IoTサービス Skywalker

[出典:73rd International Astronautical Congress (IAC), Paris, France, 18-22 September 2022. IAC-22-B2.3.x73016
 "Advanced Space-based Internet-of-things (IoT) constellation bringing high revisit & low latency communication services"
 Dr. Wei Sun, China HEAD Aerospace Technology Co.]

Satellites	48
Orbit	LEO 700km@50° 36 satellites SSO 500-700km 12 satellites 48機で再訪性は10分とのこと
Payloads	DCS, AIS, ADS-B, VDES(Vhfデータ交換システム), optical payload. IoTスマートメータへのCMD+ダウンリンク、SkywalkerとしてITUファイリングを完了しているとのこと (UHF)。
利用	世界5か所のG/W局にIoTデータをダウンロードし、 100分以内 に利用者へ配信。

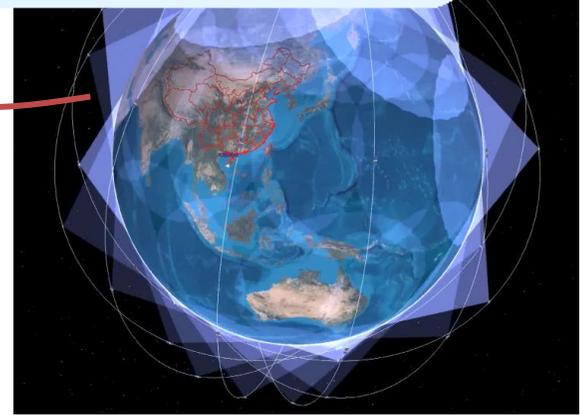


- **スマート農業**
- **プラントモニタ**
- **海洋アセットのモニタ**
- **交通や物流モニタ危険物やその輸送モニタ**
- **建設・鉱山・鉄道：橋梁等のモニタ**



スマートメータ

China HEAD Aerospace HQ, Beijing
 Investment in IoT business;
 Combined constellation and global gateway deployment;
 Importing space components;
 Providing IoT connectivity and solutions



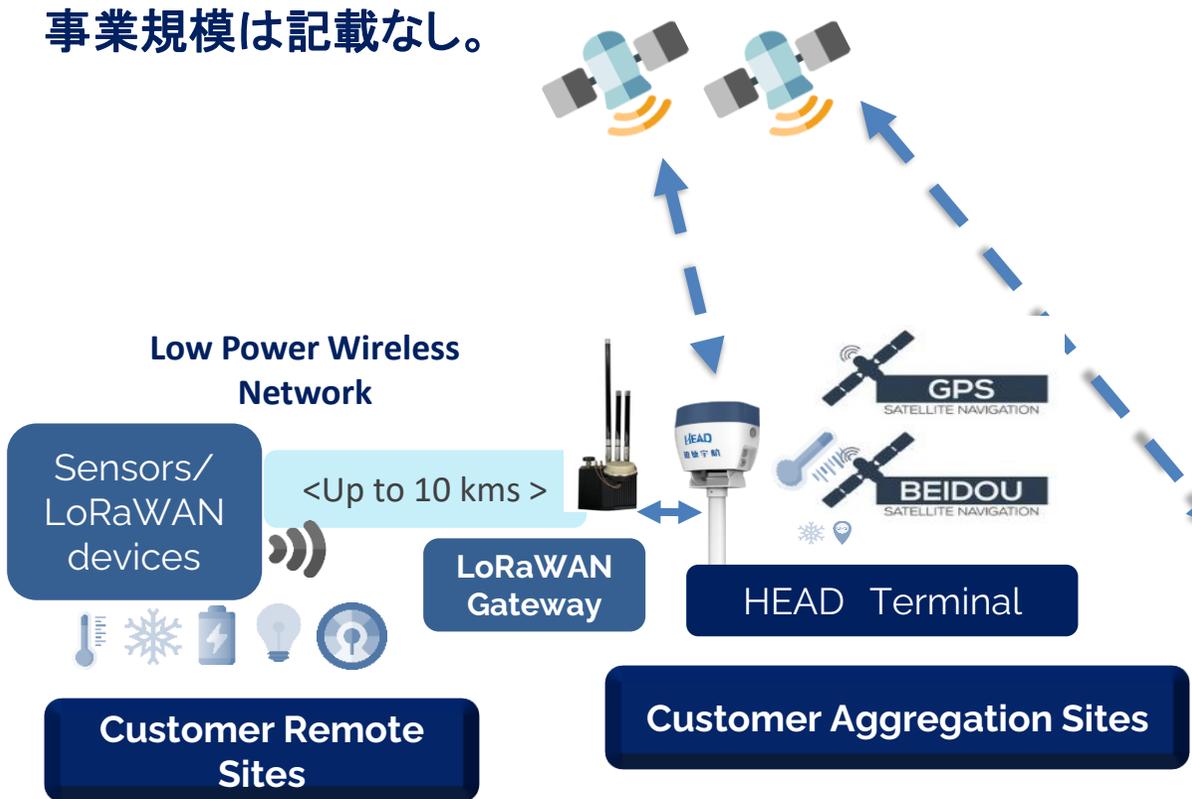
3-3 衛星システムIoTの調査

China HEAD Aerospace Technology(中国 北京) IoTコンステレーション 22-002-R-012

衛星IoTサービス Skywalker

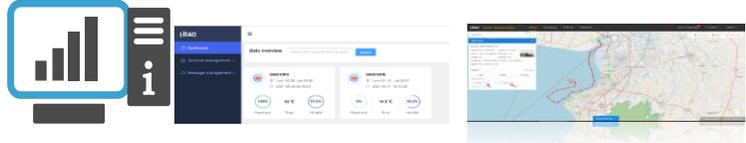
Skywalker Constellation

事業規模は記載なし。



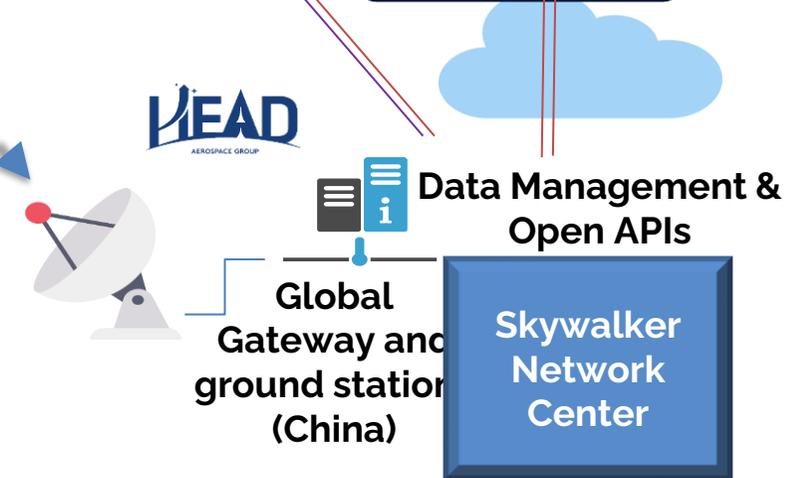
HEAD社自身によるアプリケーション

① HEAD Standard applications



ユーザへローデータ配信

② Customer Applications



[出典:73rd International Astronautical Congress (IAC), Paris, France, 18-22 September 2022. IAC-22-B2.3.x73016
"Advanced Space-based Internet-of-things (IoT) constellation bringing high revisit & low latency communication services"
Dr. Wei Sun, China HEAD Aerospace Technology Co.]

- 1. はじめに
- 2. 中間報告会スケジュール
- 3. 報告する調査内容
 - 3-1 5G/6Gに向けた衛星通信システムの調査…………… (p 5~17)
 - 3-2 新しい衛星通信システムの調査…………… (p18~43)
 - 3-3 衛星システムIoTの調査…………… (p44~49)
 - 3-4 衛星間通信による宇宙ネットワークの調査…………… (p50~58)
 - 3-5 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査… (p59~68)

(調査要求)

- (1) 地球観測衛星の観測データを地上にダウンリンクするためには、迅速性やリアルタイム性が重要であることから、LEO-LEO間、LEO-MEO間、LEO-GEO間等における宇宙ネットワークに関する総合システム技術やネットワーク通信技術、プロトコル等に関する必要な要素技術（電波・光通信）に関して、現在の動向を整理するとともに、世界の研究開発動向の調査を行うこと。あわせて、欧米、中国、ロシア、インド等を含めた各国の光通信機器に係る今後の展望や戦略について調査の上、まとめること。
- (2) 宇宙ネットワークの構築に必要なオンボード処理技術等のデジタル技術について調査を行うこと。なお、地上管制（通信パス、タスキングを含む）との協調や分担等も含むこと。
- (3) 光衛星間通信による宇宙ネットワークの長所短所を調査し、日本の強み・弱み等の分析を行うこと。

(調査進捗状況)

- (1) RFだけでなく、光通信リンクも含め、かつ光通信ユニットの製造者情報等詳細情報も含めている。
- (2) デジタル技術について調査している。
- (3) (1)(2)項の調査結果をもとに日本の強み・弱み等の分析を実施する。

3-4 エグゼクティブサマリ

項目	重要なトレンド
3-4.1 LEO/MEO/GEOのハイブリッドネットワークコンステレーション	<ul style="list-style-type: none">➤ 大手通信オペレータが取り組み始めている。➤ 主目的として、利便性の向上とともに、復元性の保持が挙げられている。➤ 衛星側でのオンボードプロセッサによる再生中継が必須となる。➤ 総通信容量の制約、ハンドオーバーやローミングをどのように実現するかが課題となっている。
3-4.2 通信・観測コンステレーションにおける通信用OBPの役割比較	<ul style="list-style-type: none">➤ 観測用コンステレーションに比較して通信コンステレーションの場合の方が、ユーザー端末とゲートウェイがあるため、複雑で、一般には両立は困難。➤ 宇宙用再生中継に使用できるオンボードプロセッサは数年で技術的に大幅に向上。COTS品も含めて選択肢が増えてきた。
3-4.3 衛星間の光通信リンク	<ul style="list-style-type: none">➤ 光通信はブロードバンド対応面で優れており、衛星間通信の主力になりつつある。

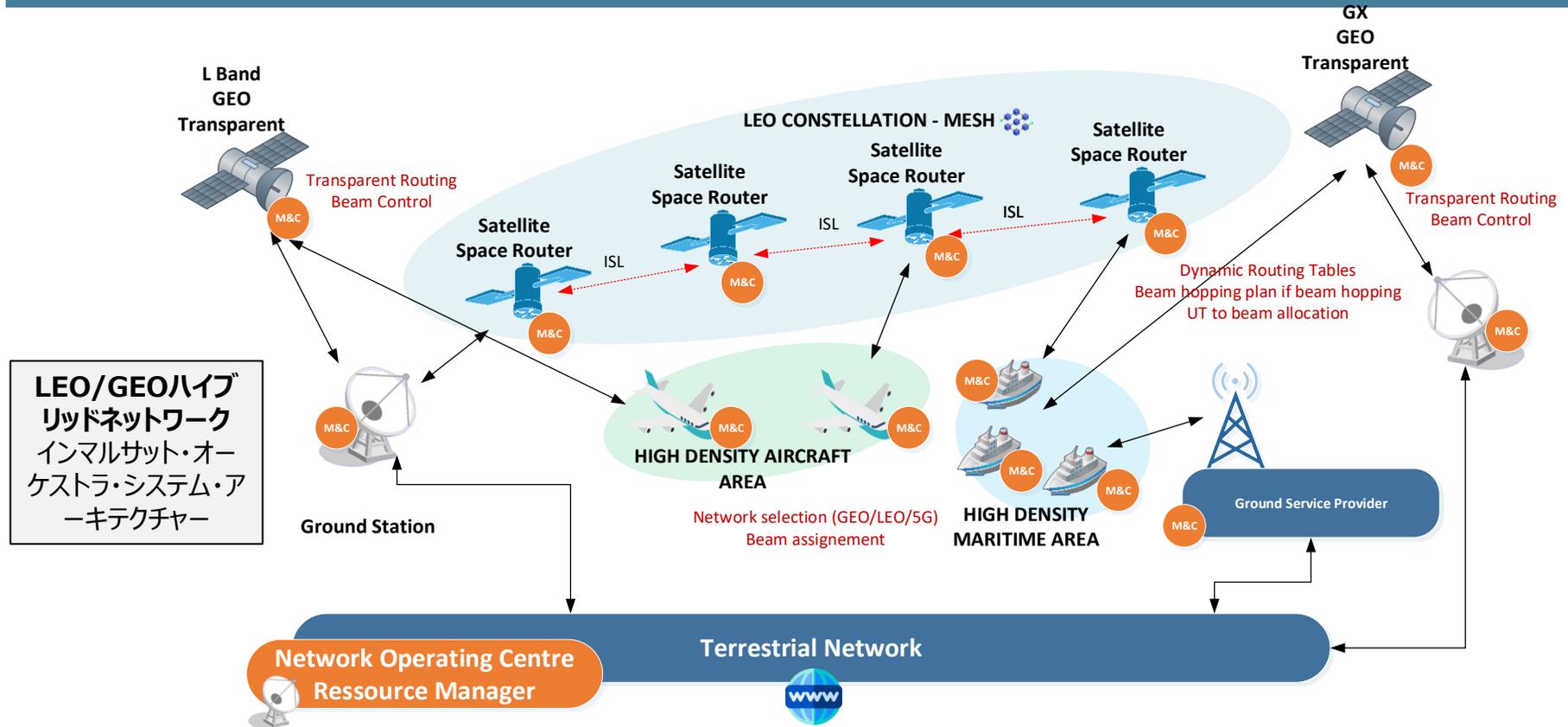
最終報告に向けての重要分析項目（国内外比較を含む）

- ・スペースメッシュネットワークを将来構築するための技術はなにか

3-4 衛星間通信による宇宙ネットワークの調査

3-4.1 LEO/MEO/GEOのハイブリッドネットワークコンステレーション

22-002-R-012



• LEO/GEO ハイブリッドネットワーク

- 目的は、**GEOシステムをLEO/MEOでそれぞれ機能性能を補完し、耐障害性(resilience)を向上**させ、GEOでのサービスに加えハイデンシティ地域により大きいスループットを提供すること、即ち**LEOでホットスポットを提供する能力**。
- Inmarsat が Orchestra として推進しているコンセプトが該当する。Orchestraでは、**Inmarsatは既存のLバンドGEOとKaバンドGX静止衛星にLEOコンステレーションを追加**し、すでにInmarsatが持っている地上の既存アセットの利点を活用したいと考えているようである。
- Boeingは、LEO/MEO/GEOのマルチ軌道システムの構築構想を持っているがまだ絵の段階。
- **これらメッシュシステムは、グローバルなリソースの調整と最適化が必要なため**、E2Eのネットワークを実現する上で複雑なものとなっている。実際、宇宙ルーターは地上のルーターに比べ、デバイスの制約から自律性、柔軟性、容量に不足が大きい状況。

3-4 衛星間通信による宇宙ネットワークの調査

3-4.1 大規模メッシュネットワークの実現方法の分類

22-002-R-012

- 大規模なメッシュネットワークでは、信号のルーティングに再生プロセッサを使用する必要がある。
- トランスペアレントなスイッチング（アナログとデジタルの切り替え、全デジタル化のみ）では、データパケットが到達できるホップ数がすぐに制限される。
- 再生オンボードプロセッサ（OBP、DPP）は、レイヤー2（データリンク）からレイヤー3（ネットワーク）の範囲を分担。
- フルIP（レイヤー3）ルーターは最も柔軟性があるが、現在の搭載系デバイスの限界、特にDC電力消費（20W/Gbps以上、Itbpsで20kW）の課題が大きい。
- 現実的代替案として、データリンク層より上位の層に、容量を抑えた制御・管理機能を配置し、耐障害性を向上させることが考えられる。（ISL障害時のデータ損失を回避し、サービスの中断を最小化する目的）。

case	Switching	OBP (DPP)	ISL	Regenerative (再生中継)	長所	短所
1	なし	なし	なし	なし	ベントパイプ型で簡便	ゲートウェイの数はスループットと比例し非常に多い
2	RF	なし	非再生中継	なし	ベントパイプ型で簡便 ISLはP2Pの中継的機能	ISLはSwap制約で1~2台搭載であるためゲートウェイの数はケース1と同じ規模。
3	デジタル	あり	同上	なし	OBP (DPP)の中でスイッチング・ルーティングはデジタル処理	ケース2より安価。ケース2と比較して、ほとんど改善されていない。
4	Packet Layer 2 Data Link (Ethernet)	あり	再生中継	あり イーサネットレベルまで	再生中継タイプの中でも現状の搭載系性能で比較的实现しやすい。	メッシュNWの制御は地上側で行うことになり、運用や故障対応が複雑。パス再構成に関してオンボード処理は難。
5	Packet Layer 2.5 Adaptation Layer (MPLS)	あり	同上	あり イーサネットレベルまで	ケース4よりもオンボード自律化は進む。例えばISL不具合時でも通信の連続性は保持可能。MPLS(前頁)が再ルーティング機能を有する。オンボード機能の複雑さと宇宙NW性能の中庸的な成立解。	メッシュNWの制御は地上側で行うことになり、運用や故障対応が複雑。MPLS機能でCase4より処理は複雑。
6	Packet Layer 3 Network (IP)	あり	同上	あり IPまで	通信制御・管理面では最も自律性に富む。	Case5よりオンボード高度化。IP制御可否は搭載系の能力に依存、現状は処理通信量に対してハードルが高い。

3-4 衛星間通信による宇宙ネットワークの調査

3-4.1 大規模メッシュネットワークの課題

22-002-R-012

- **衛星間通信網の課題（地上を介さない通信を目的として考察）**
 - 通常、軌道面内用に2式、異なる軌道間で2式のISLが設置だが、まずは端末のコストが課題。ISLは空間メッシュに必要なシステムであるが**SWaP、Capex、Opexを鑑みトレードオフが必要**。
 - 次にメッシュNWとして達成可能な総容量の課題。LEO/LEO間でISLは10Gbps程度（RF-ISLでは～800Mbps）実現できるが、**これらを束ねた総通信容量の処理(10Gbps×N)が課題**。すなわちゲートウェイの見通し外にある全ての衛星からのトラフィックは、ゲートウェイの見通し内にある衛星を通過する必要があり、**限られたG/Wと通信する衛星がボトルネックとなり**、非常に厳しいリソースプランニングと割り当てが必要。
 - さらに下記の課題もある。
 - 通信量が多い場合、地上局に到達するために必要なISLホップ数が増え、メッシュ制御が複雑になる。
 - **隣接する衛星**が提供する容量、及び**隣接する衛星が提供する高密度地域の数**に対応したプランニングが常時必要。
- **ローミング面の課題（GWのエリア外の中継）**
 - G/Wの切替（ハンドオーバー）を含むローミングは、シームレスな通信を実現するために、衛星コンステレーションにおいて最も重要な機能。
 - 最初のステップでは、UTは衛星1によってサービスを受け、その衛星は現在ゲートウェイAに接続され、さらに地上ファイバーによってPoP（Point of Presence）Pに接続されている。次のステップでは、数秒後、衛星はゲートウェイBに近づき、ゲートウェイBにローミングする。UTの接続先はゲートウェイAからゲートウェイBに切り替わるが、ネットワーク経路トポロジーの衛星とPOPの割り当ては維持されなければならない。数秒後の3番目のステップでは、UTはよりよい位置にいる衛星2から衛星1にローミング（ハンドオーバ）する。
 - **これらを実現するには「break before make」（リンク中断は数十msで、次のリンクを作成する必要あり）または「make before break」（次のリンクをあらかじめ準備）モードのどちらかが必要**。

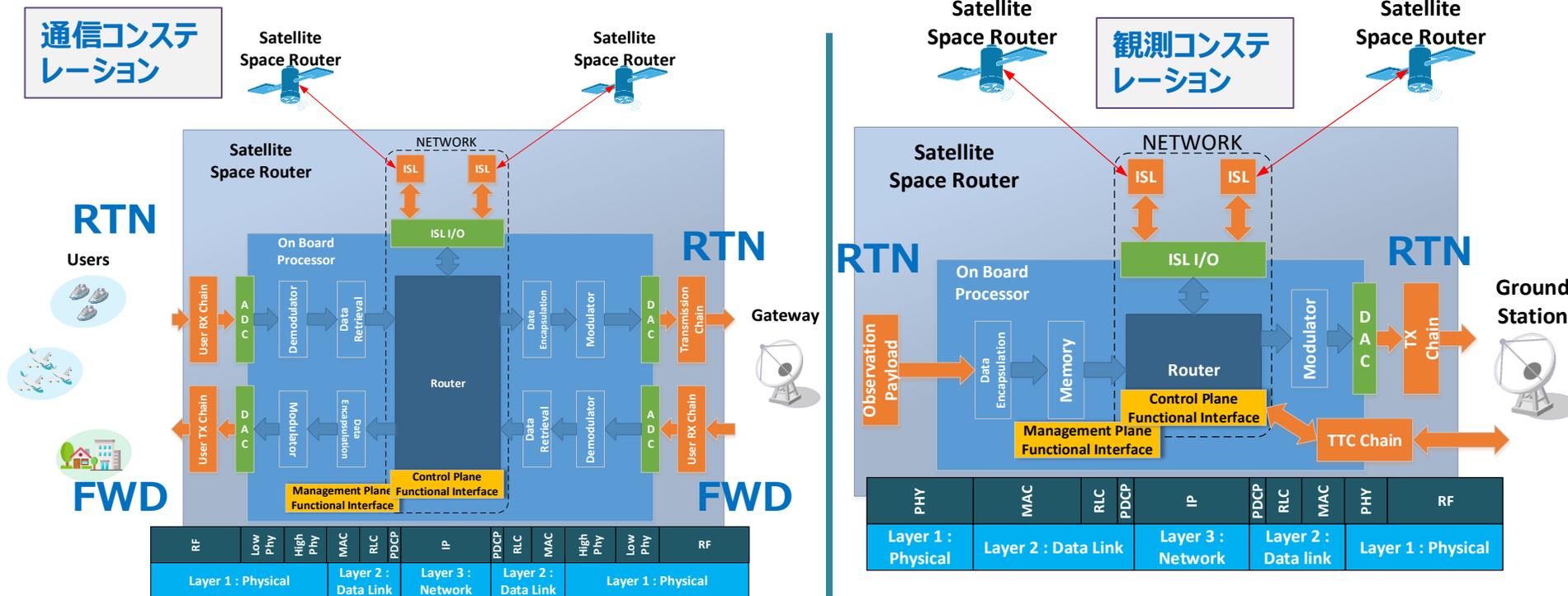
3-4 衛星間通信による宇宙ネットワークの調査

3-4.1 通信・観測コンステレーションにおける通信用OBPの役割比較

22-002-R-012

- 通信OBPは、前述のようにOSIモデルのLayer1（物理層）～Layer2（データ層：イーサネット等）Layer3（NW層：IP等）に係わり、UT・衛星間・GW通信(DT)・観測センサ処理後のストリーム等様々なデータストリーム制御を行う。
- 下記の通り、通信コンステレーションの方がUT～GW（またはISL）のFWD/RTNルーティングがあるため通信制御機能としてはやや複雑。
- **日本では機数も限られている。観測＋通信中継を同時に搭載できる衛星が可能か？**

OBP は、搭載されたペイロード、ISL、地上セグメントとのデータインタフェースを担う。



出典: Euroconsult

3-4 衛星間通信による宇宙ネットワークの調査

3-4.2 通信用のOBP (DPP)に関して

22-002-R-012

- 通信用のオンボードプロセッサ（OBP、DPP）は、オンボードネットワーク機能の中心であると同時に、ペイロードの中心的な役割。
- ここ数年、OBPの宇宙技術は大幅に向上。
- チップの線幅は30nm以下になり、大容量のデータを管理できる低電圧、低電力のチップセットが特にASICやDSP、更にはFPGAも可能になりつつある。
- 最新の**SoCアーキテクチャは、低消費電力（2W未満）で高速ADCおよびDAC（3GHz以上の帯域幅）の実装を可能に。**
- また、複雑なアルゴリズムの実装も可能に。
- 14nm以下の民生超細密プロセスにより、**高速コネクティブティ、高速トランシーバを組み込んだ強力なCOTS製品を提供**
- ルーター機能には、データプレーンスイッチング、コントロールプレーン管理、管理プレーンインターフェイス（他のコンポーネントにも必要）が含まれる。
- **テレコムミッションのメッシュ通信の場合、ルーター機能はデータストリームを復調し、IPまたはイーサネットパケット内にデータとして配置するモデム機能が必要。**
- **特にリターンリンクでは周波数や時間多重アクセスをオンボードで制御する必要がある。**

CISCO IRIS Space Router
[出典：CISCO]。



小型衛星では、Ultrascaleを使用しルータと送受信機を一体にできるが、大型通信衛星では、一機当たりのスループットが1~2桁大きいためルーティング専用のユニット(DPP)を持つことになる。

Manufacturer	Product	Processor	Pedigree	Vehicle
Gomspace	Nanomind A3200	Atmel AT32UC3C MCU	COTS	Cubesat
Isis	iOBC	ARM9	COTS	Cubesat
Pumpkin	PPM A1	TI MSP430F1612	COTS	Cubesat
	PPM A2	TI MSP430F1611	COTS	Cubesat
	PPM A3	TI MSP430F2618	COTS	Cubesat
	PPM B1	Silicon Labs C8051F120	COTS	Cubesat
	PPM D1	Microchip PIC24FJ256GA110	COTS	Cubesat
	PPM D2	Microchip PIC33FJ256GP710	COTS	Cubesat
	PPM E1	Microchip PIC24FJ256GB210	COTS	Cubesat
Xiphos	Q7S	Xilinx Zynq 7020 Arm 9	COTS w/SEE mitigation	Nano, micro and small sat
	Q8S	Xilinx Ultrascale+ ARM Cortex-A53	COTS w/SEE mitigation	Nano, micro and small sat
BAE	RAD750	RAD750	Radhard	General satellite
	RAD5545	RAD5545	Radhard	General satellite
AAC Clyde Space	Kryten-M3	SmartFusion Cortex-M3	COTS	Cubesat
	Sirius OBC	SmartFusion Cortex-M3	COTS w/SEE mitigation	Cubesat
Innoflight	cfc-300	Xilinx Zynq ARM Cortex A9	COTS	Cubesat
	cfc-400	Xilinx Zynq Ultrascale+	COTS	Cubesat
	cfc-500	Xilinx Kintex Ultrascale+ NVIDIA TK1	COTS	Cubesat
Space Micro	CSP	Xilinx Zynq-7020 Dual ARM Core	COTS	Cubesat
NanoAvionics	SatBus 3C2	STM32 ARM Cortex M7	COTS	Cubesat
MOOG	G-Series SteppeEagle	AMD G-Series compatible	Radhard	General satellite
	V-SeriesRyzen	AMD V-Series compatible	Radhard	General satellite
SEAKR	Athena-3 SBC	PowerPC e500	Ukn	General satellite
	Medusa SBC	PowerPC e500	Ukn	General satellite
	RCC5	Virtex 5 FX-130T	Ukn	General satellite
Satixfy	SX3000	CEVA XC 323	Ukn	General satellite
	SX4000	ARM A53	Ukn	General satellite
Ramon Space	NOGAH	ICS (in house)	Ukn	Nano, micro and small sat

OBPメーカー。[出典：NASA/TP-2020-5008734]。

3.4 衛星間通信による宇宙ネットワークの調査

3-4.3 衛星間の光通信リンク

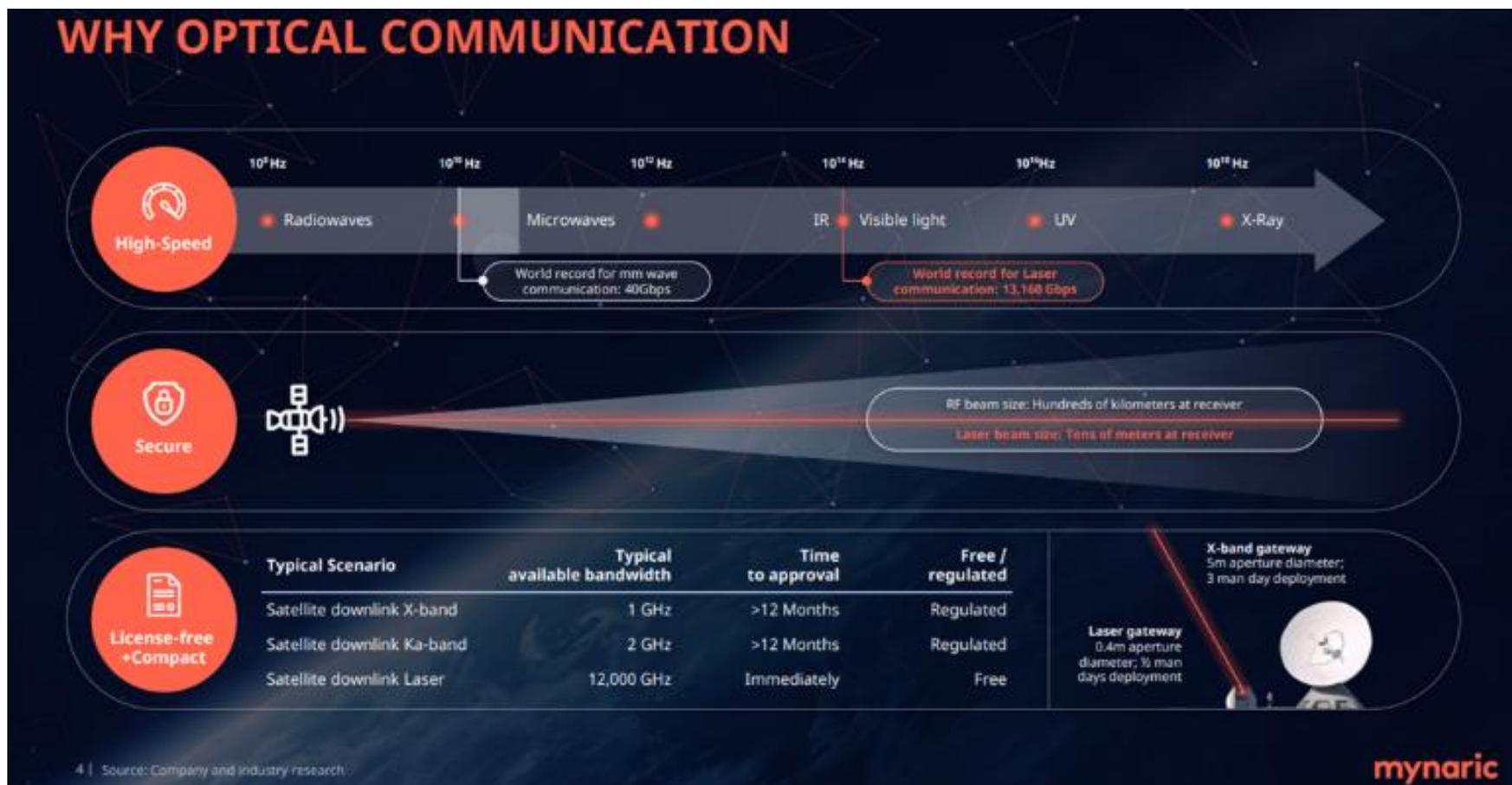
22-002-R-012

光通信がRF通信に比べて優れている主な点

- **高速・大容量** : RFより高周波域を使用するため伝送容量が増加
- **セキュリティ性** : ビームの広がりが小さい(漏洩が狭く傍受されにくい)
- **周波数申請不要** : 現状使用しているRFと異なりライセンスフリー
*ビーム幅が小さく他システムへの影響が小さいことに起因
- **小型・軽量・低消費電力**

光通信の技術的課題

- 光ビームの指向性が高いため、非常に正確なポインティングが必要となる
- 雲や大気中の水(可視光の波長と同等の大きさの水滴によるミー散乱)、大気擾乱、受信機の観測視野内にある太陽などによる干渉や減衰が大きい



1. はじめに

2. 中間報告会スケジュール

3. 報告する調査内容

- 3-1 5G/6Gに向けた衛星通信システムの調査…………… (p 5~17)
- 3-2 新しい衛星通信システムの調査…………… (p18~43)
- 3-3 衛星システムIoTの調査…………… (p44~49)
- 3-4 衛星間通信による宇宙ネットワークの調査…………… (p50~58)
- 3-5 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査… (p59~68)



(調査要求)

- (1) 量子鍵配送 (QKD) の海外における事業的側面及び技術的側面から調査し、衛星によるQKDシステムの確立に必要な条件や技術を調査し、分析すること。
- (2) 本調査において、日本の強み・弱み分析を実施すること。

(調査進捗状況)

- (1) ASTECにて保有している情報をもとにQKDの技術情報を整理している。併せて事業的側面について調査中。
- (2) (1)項の調査結果をもとに、日本の強み・弱み分析を実施の予定。

3-5 エグゼクティブサマリ

項目	重要なトレンド
3-5.1 量子コンピュータによる暗号の危機と対策	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 暗号通信の漏洩対策として、PQCとQKDが検討されている。
3-5.2 量子鍵配送(QKD)の課題と対策	<ul style="list-style-type: none"> ➤ QKDはより本質的な意味で漏洩を防止できるが、遠隔地との通信で光ファイバでは100km以遠への伝達が困難。QKDでは衛星通信が有望視されている。
3-5.3 QKD開発の最新状況(近年の推移、IAC2022学会発表事例)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 欧州で活発に行われており、TESAT(独)IAC2022学会でQKD対応可能な光端末の開発紹介をした。 ➤ 上記TESAT以外にも、IACでは欧州勢の発表が多かった。
3-5.4 各国の動向比較	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 各国で対応が異なり、米国はPQCを推進しているが、QKDの次のステップを狙っている可能性もある。一方、欧州・中国はQKDの検討を勢力的に進めている。 ➤ 日本も基礎研究では優れているが、応用技術開発が立ち遅れ気味。

最終報告に向けての重要分析項目（国内外比較を含む）

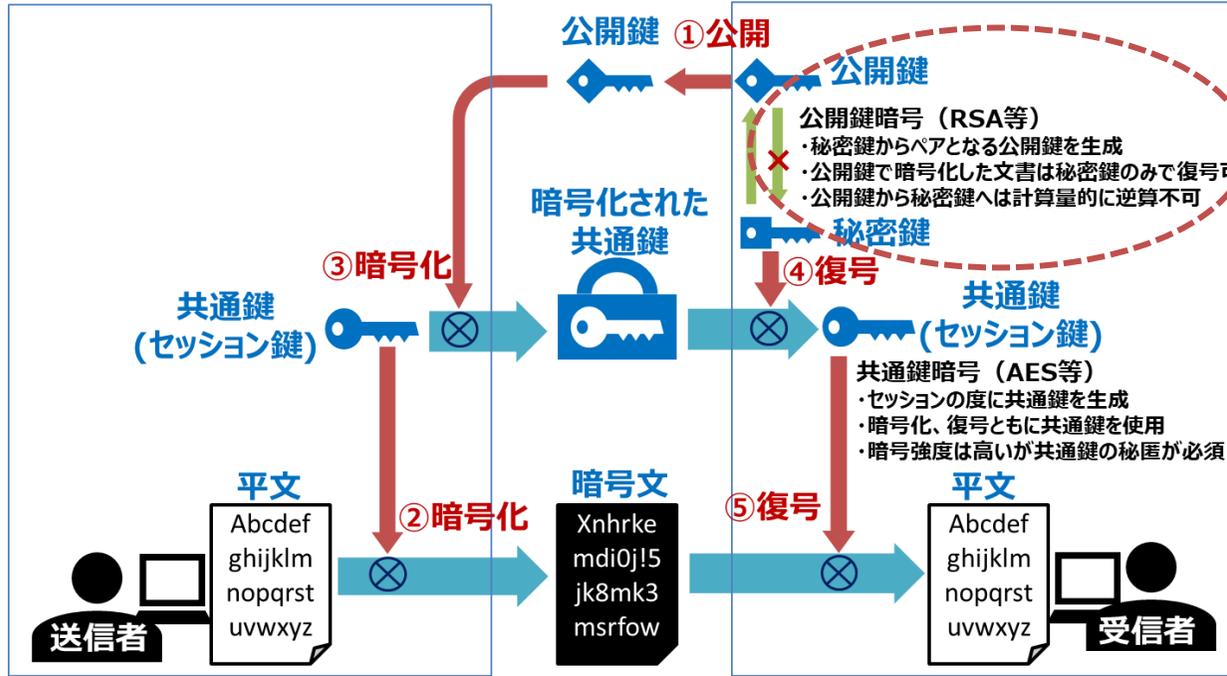
- ・日本の強みを生かすための方策はなにか。

3-5 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査

3-5.1 QKDの必要性 特に中国・欧州で実証が進められておりSESも実証衛星を打ち上げるとのこと 22-002-R-012

量子コンピュータによる暗号の危機と対策

セッション鍵方式による暗号化通信



量子コンピュータの出現により
公開鍵による暗号化が危殆化

公開鍵と通信データから
セッション鍵が解読可能に！

2つの対策

対策1

公開鍵暗号のアルゴリズムを強化
耐量子コンピュータ暗号

PQC: Post-Quantum Cryptography

対策2

盗聴できない方法で共通鍵を送付
量子鍵配送

QKD: Quantum Key Distribution

送信者側

- ① 秘密鍵と公開鍵を生成して公開鍵を公開
- ② 平文を共通鍵 (セッション鍵) で暗号化して送信
- ③ 受信者の公開鍵で共通鍵を暗号化して送信

受信者側

- ④ 秘密鍵で暗号化された共通鍵を復号
- ⑤ 復号した共通鍵で平文を復号

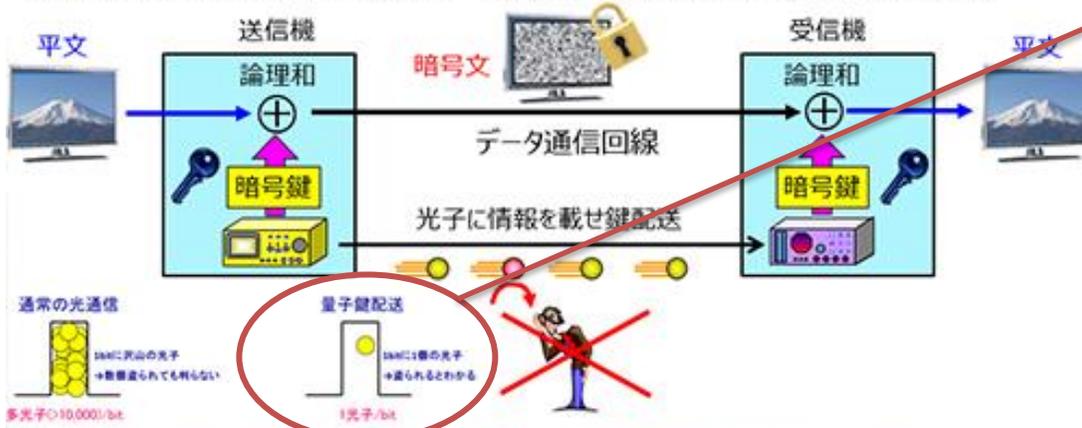


3-5 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査

3-5.2 課題と対策

22-002-R-012

- 量子鍵配送 (QKD) により平文と同じサイズの暗号鍵を共有
- 送りたい情報と暗号鍵を1ビットずつ排他的論理和を計算し暗号化 (1度使った鍵は2度と使い回さない → Vernam's ワンタイムパッド暗号 : OTP)



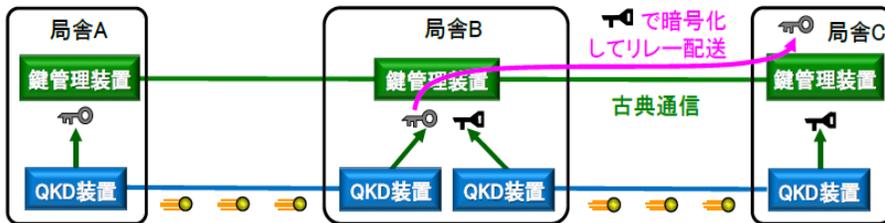
非常に微弱な光信号で通信するため
長距離(100km~)のファイバ伝送が困難

信頼できる中継局で中継
or
衛星を利用した中継・鍵配信

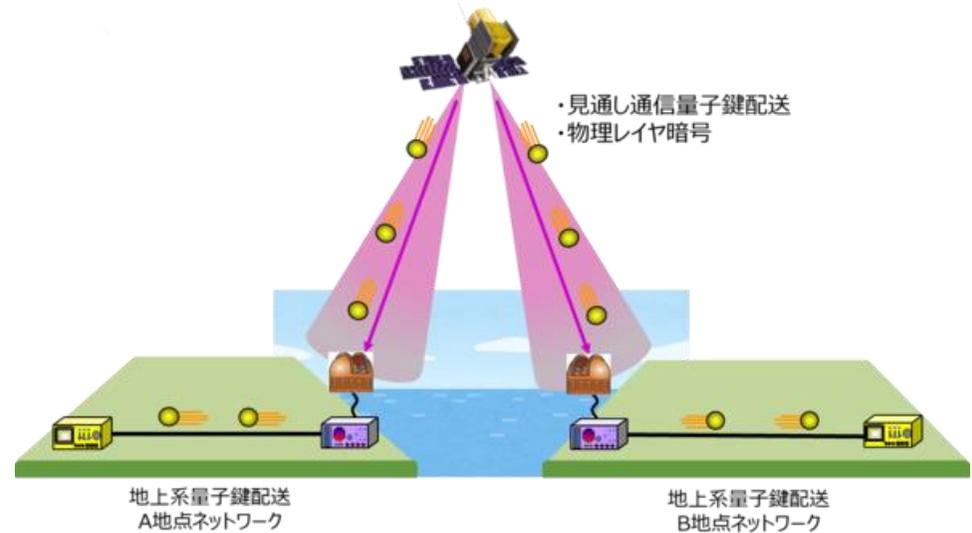
どんな盗聴も確実に検知 情報漏洩を完全に防止

https://jpn.nec.com/press/201910/20191029_02.html

ネットワーク化は、局舎(電気処理)を介した鍵のパケットリレーで実現。



https://www.soumu.go.jp/main_content/000675902.pdf



<https://www.skyperfectjsat.space/news/detail/1.html>



3-5 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査

3-5.3 QKD開発の最新状況 (1/4)

22-002-R-012

欧州QKD実証衛星の状況

- ESAを中心にEuroQCI (量子暗号実証にかかわる産学官推進組織)を立ち上げ、EU全体での量子通信インフラを推進している。以下に挙げる宇宙分野での実証もこの枠組みの元に進められている。
- 欧州では全産業をあげて、量子暗号を実ビジネスで利用できる環境の醸成を推進している。

プログラム名 (推進母体)	概要	打ち上げ時期
Eagle-1 (SES/ESA/欧州メーカー)	SESがESA支援により TESATレーザ通信技術 にQKDを載せた欧州初のQKD専用衛星；伊製LEO衛星、重量300kg	2024
^{カラムニエル} Caramuel (HISPASAT/ESA/スペインメーカー)	QKD実証P/Lの開発・搭載を計画；全スペイン宇宙産業参加で光学通信の技術にのせてQKDの効率的頒布の実証を目指す。	N/A
Arquit (英スタートアップ/ESA)	ESAの補助金で独自のQKD衛星打ち上げを計画； https://arquit.uk/quantum-cloud/	2023
SpeQtral (シンガポール スタートアップ/TAS)	TASの衛星技術を活用して独自のQKD衛星打ち上げを計画。TASは地上局機能で参加；未だMoU段階なので詳細不透明。	2024

3-5 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査

3-5.3 QKD開発の最新状況 (2/4) (IAC2022より)

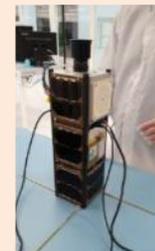
22-002-R-012

ALTERNATIVE FOR LOW SIZE, WEIGHT AND POWER: THE CUBELECT FAMILY



IAC 2022 Conference B2.3.2
"Broadband Optical Communication
Terminals for Constellations in Operation"
Matthias Metzigemba
Tesat-Spacecom GmbH Co. KG

- » CubeLCT is an optical Transmitter for optical data downlinks from LEO
- » Technology Cooperation with German Space Agency DLR-IKN
- » CubeL: 400g / 8W @ 100 Mbps
- » CubeL+ : Evolution to 1Gbps and bi-directional inter satellite links in 2023



© GOMSPACE

① Cube SAT 用

- CubeL 100Mbps
- Cube+ 1Gbps

» TRL9
In-orbit verification in PIXL-1 Mission



© DLR IKN



① Cube 実証

➤ PIXL-1 で

軌道上実証実施

③ 戦闘機用

- LEOとの通信を目標
- 地上と実証実施



reuse of space qualified bulding blocks

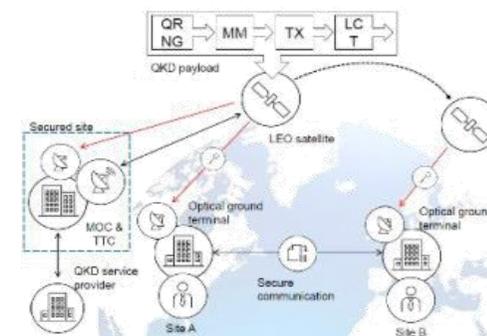
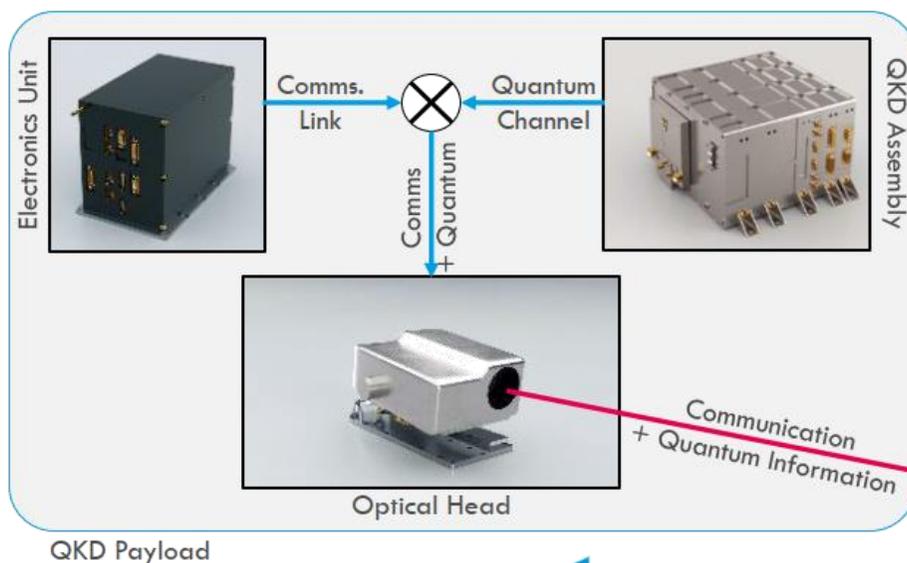
3-5 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査

3-5.3 QKD開発の最新状況 (3/4)

22-002-R-012

- 次のアプリケーションとしてQKDを考えている。
- ASTEC調査では通信のレーザー波とQKD用の光子伝送は同時にできないという見解
- 下記によれば**Comm.LinkとQuantunチャンネルをMUXして同じOpticalヘッドで伝送できる**とのことで**実証中**。これができればデータと量子鍵との同時配送も可能となりそう。
- EAGLE-1プログラム。

NEXT APPLICATION QKD : LASER COMMUNICATION AND QKD PAYLOAD **EAGLE 1**



Optical Ground Station



3-5 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査

3-5.3 QKD開発の最新状況 (4/4) (IAC2022のプログラムより)

22-002-R-012

TAS	Thales Alenia Space France	Satellite-based Quantum Information Networks: Use cases, Architecture, and Roadmap	地上部分のQIN (量子情報NW)のハイレベルアーキテクチャを振り返り、そこから 宇宙QKDのTASの3段階のロードマップを説明。実証機の設計について詳述。今後10年間に実用的なQINを実現するという野心的な目標を掲げている。
	Zentrum für Telematik	Quantum Key Distribution for Secure Communication by Nano-Satellites	ナノサテライトによるQKDミッションに関しての検討。
	University of Auckland	Implementing LEO-to-Ground Gaussian Modulated Continuous Variable Quantum Key Distribution	LEOから地上へのQKDに拡散符号化系列を可変にするガウシアン拡散変調を用いた検討
OHB	OHB System AG - Oberpfaffenhofen	Spaceborne Quantum Random Number Generators (QRNG) – Developments towards a Product	欧州委員会は、欧州量子通信インフラストラクチャ (EuroQCI) の準備を進めており、一つにSAGA (Secure And cryptoGrAphic) プロジェクトの研究があり、QKDの実証実験を目的としたものが Eagle-1 (TESATのデータ・QKD多重化実証の項参考) 。拡散のための乱数は決定論的乱数 (DRNG)ではなくより生成の難しい真の乱数生成器 (TRNG) により衛星量子鍵配送 (QKD) を生成する必要がある。
	Università degli Studi di Padova	Advanced qubit generator and synchronizing Quantum Communications in Space	ESAの方針に従い、Quantum-Bit-Error-Rate (QBER) を向上させるためのQubitといわれる変復調方式の研究。、
	National University of Singapore	An optical ground station for space based quantum key distribution	現在シンガポールで建設中の光地上局の設計と運用コンセプトについて報告。望遠鏡、量子受信機、偏光補正システム、ポインティング・捕捉・追跡システムなどの主要なサブシステム成され、800nm付近の光子の偏光状態を受信分析予定。
OHB	OHB System AG	A way out: Standardized Space-to-ground-to-everywhere Security	概念的な説明に留まる。
	Budapest University of Technology and Economics	Transmitting quantum entanglement in scarce satellite networks	REBSANと呼ぶ衛星ベースの量子通信によるルーティングアルゴリズムを使うと従来より配信効率があがり32機のLEO衛星で世界をカバー可能。
Tesat	Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG	Broadband Optical Communication Terminals for Constellations in Operation	光端末の次のアプリケーションとしてQKDを考えている。Comm.LinkとQuantunチャンネルをMUXして同じOpticalヘッドで伝送できるとのことで実証中。ESAのEAGLE-1プログラム。

3-5 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査

3-5.4 各国QKD/PQC開発動向

22-002-R-012

技術	量子鍵配送 (QKD)	衛星QKD	耐量子計算暗号(PQC)
米国	○ 以前より活動は減った印象だが、2018年に国家量子イニシアチブ法 (NQI)が署名されるなど、産官学による取り組みは継続。メーカーによる製品開発はやや減速。	? 国家量子調整室(NQCO)が発表した「米国の量子ネットワークの為の戦略ビジョン」の中で触れているが詳細は不明。	◎ NISTが主導し、2016年ごろから標準化を推進。世界中からアルゴリズムを集めて評価している。
英国	◎ UKNQTPなどを通じて産官学が連携し積極開発。ケンブリッジ大学、BTグループ、東芝の活動が有名で、東芝欧州研の装置は最先端。	◎ 衛星15機と地上43局のコンステレーションを目標に衛星QKDプラットフォームを開発中。	△ 英国国家サイバーセキュリティセンター (NCSC) が米国NISTの標準化に従う方針を発表。
独国	○ QuNETを通じて産官学が連携し開発。目立った装置メーカーは不在。	◎ DLR等が衛星量子鍵配信の実証を計画	△ 一部の大学はNISTの標準化に応募。BSIは既存暗号との組み合わせを推奨。
中国	◎ 量子通信ケーブル「京滬幹線」等の開発と実用化を積極的に推進	◎ 量子実験衛星「墨子号」による実験を積極的に実施	○ 米国NISTへのアルゴリズム提供や評価に学会が積極的に参加。
日本	◎ NICTを中心に産官学で連携して積極開発。長距離高速通信が可能な装置開発ではNEC、東芝が世界最先端。	○ 総務省が中心となり、産官学によって衛星量子を研究・開発中。	△ NICTやIPAが中心となり、アルゴリズムなどの評価を行っている。

◎: リーダとして推進、○: 積極的、△: 追従的または消極的



(財)衛星システム技術推進機構