

**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」**

**委託業務成果報告書
(公開版)**

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

2023年 3月

1. はじめに	(p3)
2. 調査状況全般	(p4)
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.....	(p6)
3-2 新しい衛星通信システムの調査.....	(p33)
3-3 衛星システムIoTの調査.....	(p60)
3-4 衛星間通信による宇宙ネットワークの調査.....	(p79)
3-5 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査...	(p130)
3-6 定常調査・動向調査.....	(p156)
3-7 適宜調査・事実確認.....	(p162~175)

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、最終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」

当該調査業務の目的を以下に示す。

宇宙開発事業は欧米を含め世界中で研究開発に取り組まれており、日本の宇宙開発においても世界の最新の技術動向を踏まえ、今後の宇宙開発を検討していく必要がある。この状況を考慮し、今後の通信衛星における研究開発計画検討のため、世界の通信衛星技術を調査する業務の一部を実施することを目的とする。また調査結果をもとに、日本の強み・弱み分析を実施することとした。

具体的な調査項目・内容については、3章の個別調査項目において詳述した。

2. 調査状況全般

22-002-R-019

➤ 有識者検討会および中間報告会における質疑の反映状況を以下に示す。

(1) 中間報告に先立つ有識者検討会における質疑(2022年10月18日)

項番	対応 項番	コメント内容	対応状況	本報告書で の反映箇所
1	3-1項	5G/6Gロードマップ対応で、各事業の目標実現時期も含めると有用。	中間報告書に反映した。	p9, p15
2	3-3項	IoTプログラムの注目事業に関しては、Space-XスピノフのSWARMも調べてみてはどうか。	Swarm社について、IoTプレーヤー調査に含めて情報収集した。	p72, 74
3	3-4項	衛星間光通信の必要捕捉精度についても調べてみてはどうか。	衛星間光通信の必要技術として調査した。	p112 ~113
4	3-4項	コンステでの観測と中継機能の同時実現についてももう少し広い観点でトレードオフしてはどうか。	Euroconsultに追加調査を依頼し、観測計をモジュール化すれば同時実現可能との検討結果を得たので、報告書に反映した。	p105 ~107
5	3-4項	宇宙ベースのクラウドの実現が近づいているので、トピック的に調査してみてはどうか。	宇宙ベースのクラウドについて、5G/6Gの一環として考えられるため、3-1項に追加レポートした。	p28~31
6	3-1項	Space-X/T-Mobileの計画についてフォローしてもらいたい。	中間報告書に反映した。	p17
7	3-1項	HAPSと5Gデファクトの動きを調査に含めると有用。	3GPPの5G/6GにおけるHAPSについて追加調査を実施し、報告書に反映した。	p26 ~27

2. 調査状況全般

22-002-R-019

(2) 中間報告会における質疑 (2022年11月1日)

項番	対応 項番	コメント内容	対応状況	本報告書で の反映箇所
1	3-1項	AWS はクラウド、地上局を既に保有しており、衛星を保有するとすべてを自社で有する唯一のプレイヤーになると考えている。彼らがどのような全体アーキテクチャを目指しているのかがわかるとよい。	AWSに関する調査結果を3-1項に追加した。	P28~ 31
2	3-3項	OneWeb への各機関の投資動機や比率は把握しているか？	判明している出資比率を最終報告に反映した。	P46
3	3-4項	QKD に関して欧州で活性化している背景を知りたい。	セキュリティ強化策はEU内の基本方針に含まれ、これを反映して宇宙用QKDも進められている。この旨を3-5項に追記した。	P134

(3) 最終報告会に先立つ有識者意見交換会における質疑 (2023年2月13日)

項番	対応 項番	コメント内容	対応状況	本報告書で の反映箇所
1	3-1項	クラウドの各種サービスは一般ユーザーも申し込めるようになっているのか？	実際に開始しているところもあるが、計画を発表して開発中のところもあったので、「計画中的のものも含む」と注記を追加した。	p31
3	3-3項	IoTでの国内事業者の電波申請がなかなか認可されない状況について、報告書には明記してほしい。	調査結果を3-5項に追記した。	P77

1. はじめに	(p3)
2. 調査状況全般	(p4)
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.....	(p6)
3-2 新しい衛星通信システムの調査.....	(p33)
3-3 衛星システムIoTの調査.....	(p60)
3-4 衛星間通信による宇宙ネットワークの調査.....	(p79)
3-5 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査...	(p130)
3-6 定常調査・動向調査.....	(p156)
3-7 適宜調査・事実確認.....	(p162~175)

3-1 5G/6Gに向けた衛星通信システムの調査

22-002-R-019

(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。

(調査結果)

- (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した。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)の調査した。
- (2) 各衛星軌道による通信方式の長所短所について、最新状況を調査した。
- (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した。

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 ^{*1} でのNTN ^{*2} 仕様化状況	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 3GPPにおけるNTN検討が進展、リリース17(22年6月)で初めて仕様化。 ➤ 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、AST 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"> ➤ 地上基地局の拡張、携帯電話のカバレッジの拡大という位置づけで開発が進んでいる。日本が主導的地位で推進中。
3-1.5 クラウドの衛星通信利用形態	<ul style="list-style-type: none"> ➤ データのストレージから、XaaSの形態で衛星通信システムでのクラウド利用が進展している。
3-1.6 強み・弱み分析	<ul style="list-style-type: none"> ➤ HAPSでは主導的地位を占める。3GPP標準化委員会に移動体通信事業者は積極参加。 ➤ 5G対応の技術開発を衛星搭載用システムとして進めるべきではないか。 <ol style="list-style-type: none"> 1. 5G RAN局の搭載化・デジタル再生中継技術 2. 5G 技術 (NFV、スライシング等) の実装技術

*1 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)

*2 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)
NTNの対になる用語 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)

3-1.1 3GPPでのNTN仕様化状況 ①全般状況

22-002-R-019

3GPP委員会で5GでNTNとして初となる仕様(リリース17)が22年6月に制定され、18、19と継続検討されている。

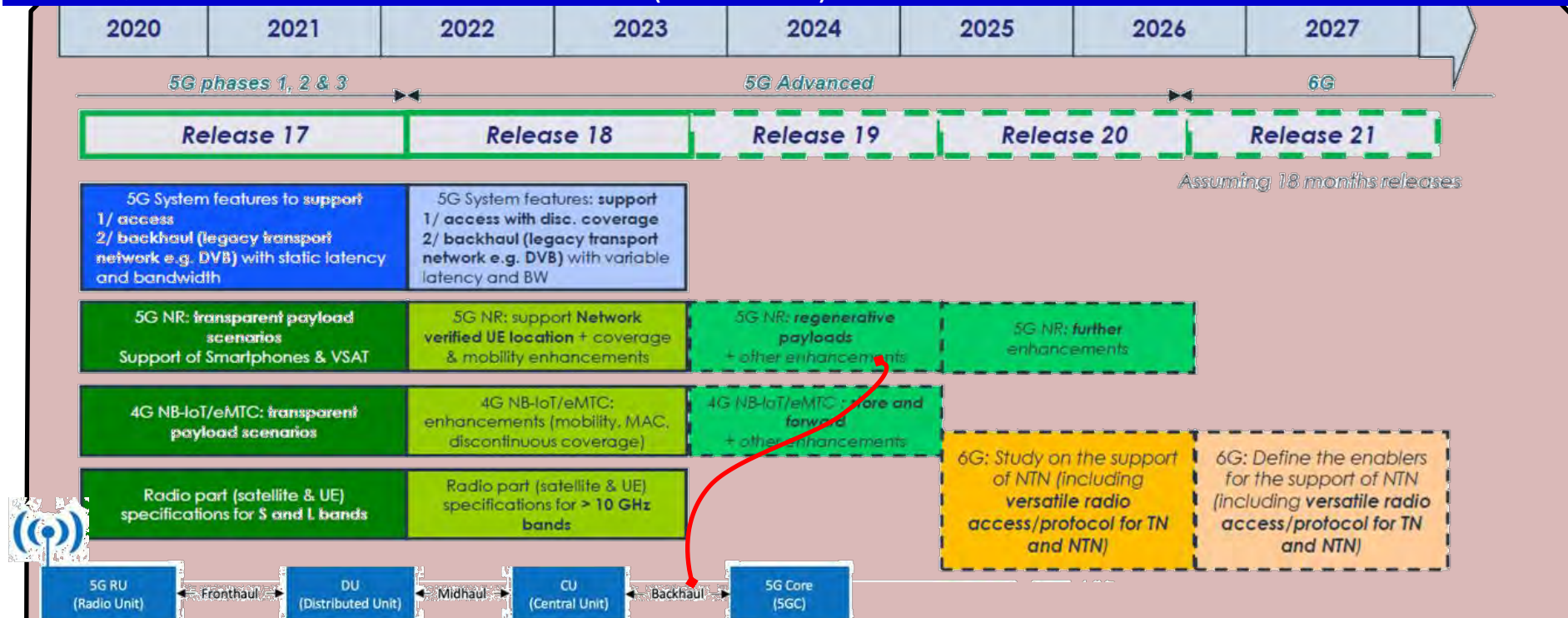


表2 3GPPのNTN標準化ロードマップ (出典: Thales Alenia Space社)

- 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。
- 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)。
- 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。
- 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 (g NodeBの搭載化) を目指してARTES開発を継続

3-1.1 3GPPでのNTN仕様化状況 ② 5Gリリース17検討事例紹介(1of5)

衛星通信では遅延が避けられない課題。それをどう検討し、仕様に落とし込んでいるか。

◆ 3GPPにおける5G要件(4Gからの主な変化)

4G

1. 遅延時間(10ms)
2. 通信速度(下り：1Gbps、
上り：数百Mbps)
3. カバレッジ(10万台/km²)



5G
高速・低遅延・同時接続に加え、NTNを統合

1. 遅延時間(**1ms**)
2. 超高速(下り：20Gbps、
上り：10Gbps)
3. カバレッジ(**100万台/km²**)

◆ 衛星側(NTN)にとっての課題

衛星(NTN)にとって、「低遅延」と「カバレッジ」が大きな課題

特に遅延は物理的な距離があり、「**低遅延(1ms)**」要求の緩和は避けられない。

⇒ 規定されているウィンドウ内での通信ができないため、**通信輻輳に対する追加の対策が必要**

要求項目	要求値	NTNでの 典型値	備考
1. 遅延時間 (レイテンシ)	1 ms	0.03ms ~120ms	衛星直下相当の 典型値であり条 件により変動
2. 通信速度	20 Gbps	10 Gbps ~200 Gbps	
3. カバレッジ	100万台 /km ²	要検討*1	*1)システム全 体で検討する 必要あり

プラットフォーム	高度	軌道	典型的 カバレッジ	距離による典型 的遅延時間
LEO衛星	300 - 1,500 km	円軌道	100 - 1,000 km	1-5 ms
MEO衛星	7,000 - 25,000 km		100 - 1,000 km	23 - 83 ms
GEO衛星	35,786 km	地上に対して 仮想的に仰 角・方位角が 一定の地点	200 - 3,500 km	120 ms
無人航空機 (HAPS含む)	8 - 50 km (HAPS 20 km)		5- 200 km	0.03 - 0.2 ms (HAPS 0.07 ms)

3-1.1 3GPPでのNTN仕様化状況 ② 5Gリリース17検討事例紹介(2of5)

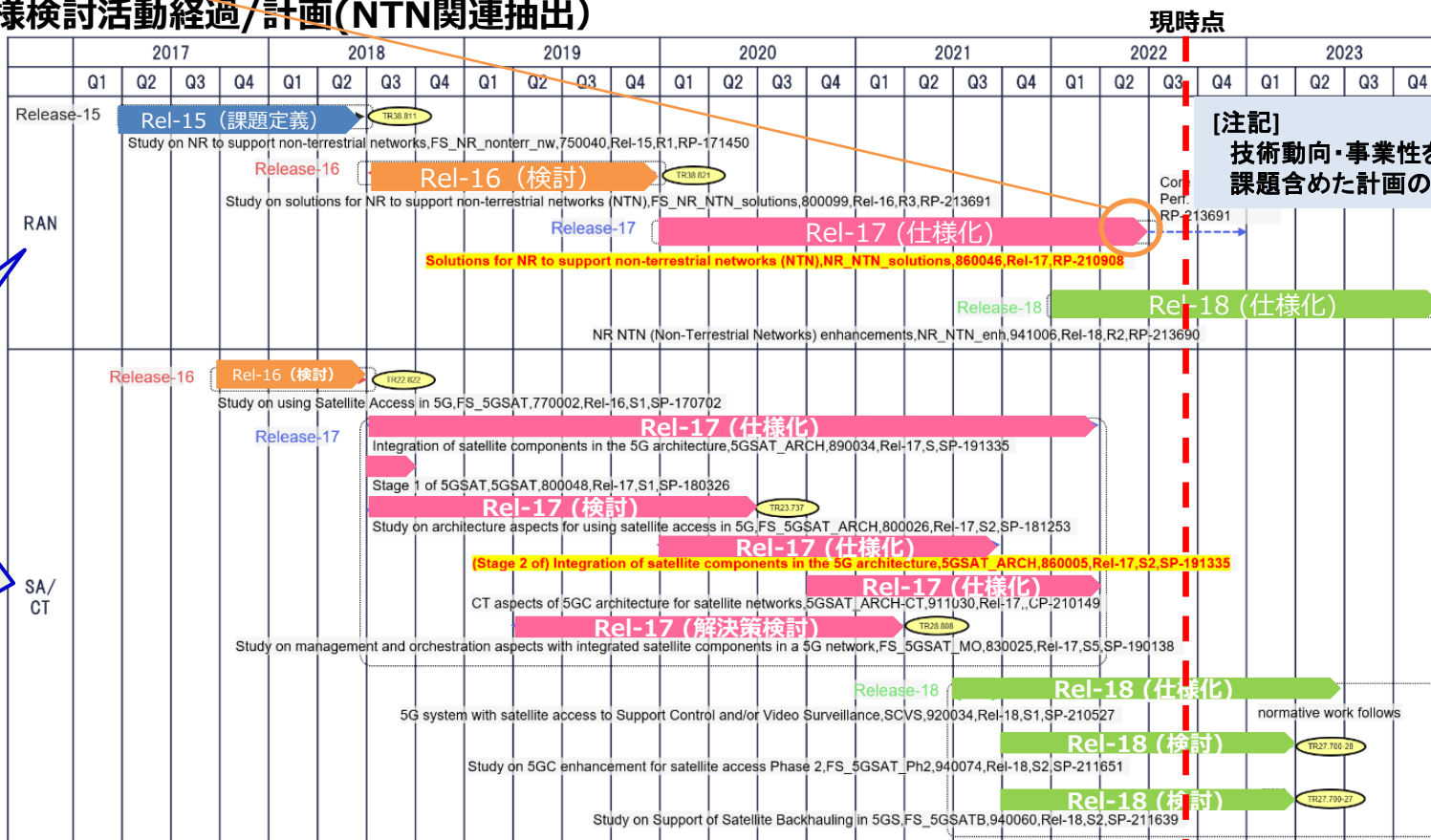
22-002-R-019

3GPPの各委員会での検討状況 — 手間・時間をかけて検討(後戻りしない仕組み)

3GPP委員会がステップごとに課題を明確化し、解決策が討議され、仕様化されている。(下図参照)

- **Releases-15**(2018年6月確定) : 5G仕様初リリース。ここで初めてNTNを取り込むことが決定
*NTN接続を5G仕様に組み込むことを課題の一つとして定義
- **Releases-16**(2018年6月確定) : NTNの仕様化に向けた要件を定義
- **Releases-17**(2020年6月確定) : Release-16で定義した要件に対応した主要課題とそれに対する解決案を検討
- **Releases-18**(2022年6月確定) : いくつかの解決策案に基づき、具体的な仕様を決定 [次頁詳細](#)

■ 仕様検討活動経過/計画(NTN関連抽出)



[注記] 技術動向・事業性を鑑みて柔軟に課題含めた計画の見直しがされる

RAN検討グループ (Radio Access Network)

SA検討グループ (Service & Systems Aspects)

CT検討グループ (Core Network & Terminals)

3-1.1 3GPPでのNTN仕様化状況 ② 5Gリリース17検討事例紹介(3of5)

5Gのリリース17で検討された事例紹介(3of5)ー各種課題をリストアップし解決策(仕様化)を検討

下図は、Release-17にて定義した衛星アクセスに関する主要課題に対する対応状況を示している。

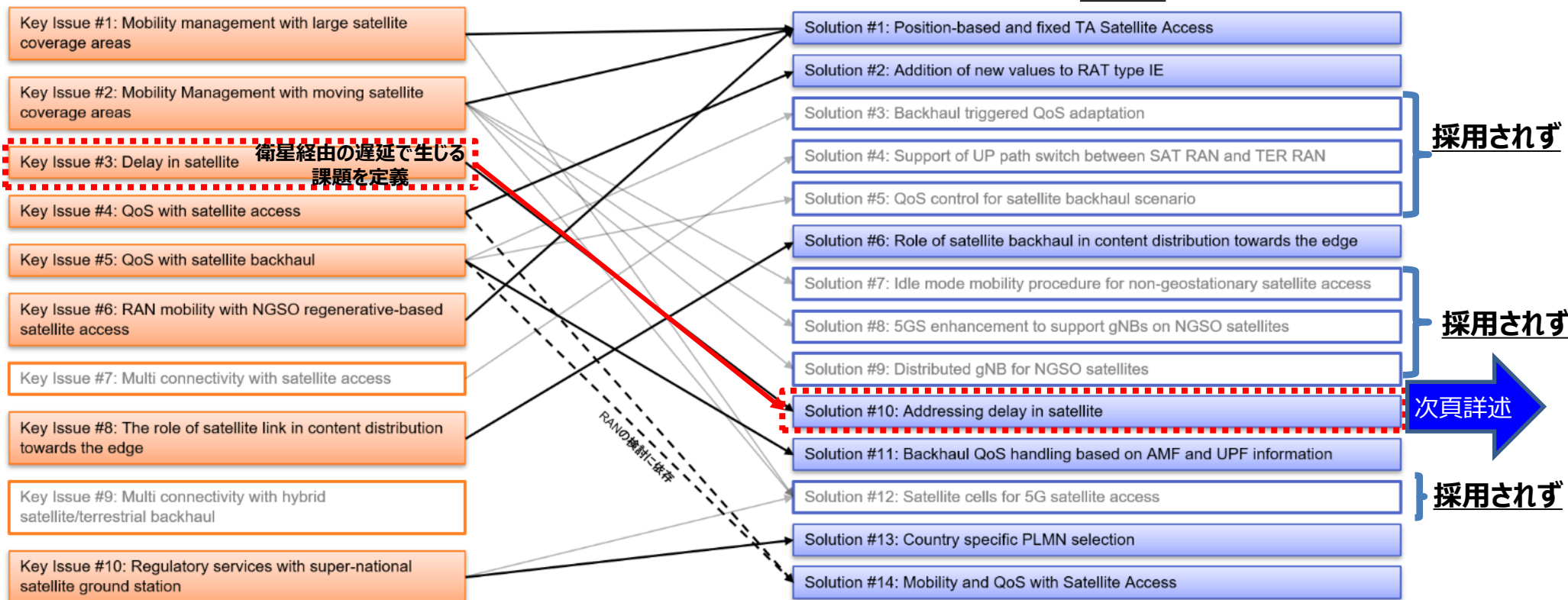
- 『Issue』の背景が白色の項目 : 解決策が提示されなかった項目(見つからなかった項目)
- 『Solution』の背景が白色の項目 : 比較検討などにより採用されなかった項目

*背景色ありは、解決した項目、および対応する解決策(灰色矢印は採用されなかった解決策との対応)

冒頭で提起した、「遅延時間」については「Issue#3」で提起され、Solution#10で解決策が仕様化

Release-17で定義した主要課題

解決策



「遅延時間問題」については、NTNでの同期方式の定義に織り込んだ。

◆ **Key Issue#3 : Delay in Satellite**

- 遅延時間(要求時間 : 1msec) : 物理的に達成が不可能であるため**要求緩和(値は前述)**
⇒ **遅延時間が増加することを考慮した、通信同期・輻輳のための対策が必要**

Solution #10 : Addressing delay in Satellite

遅延時間を織り込んだ同期方式を新たに規定

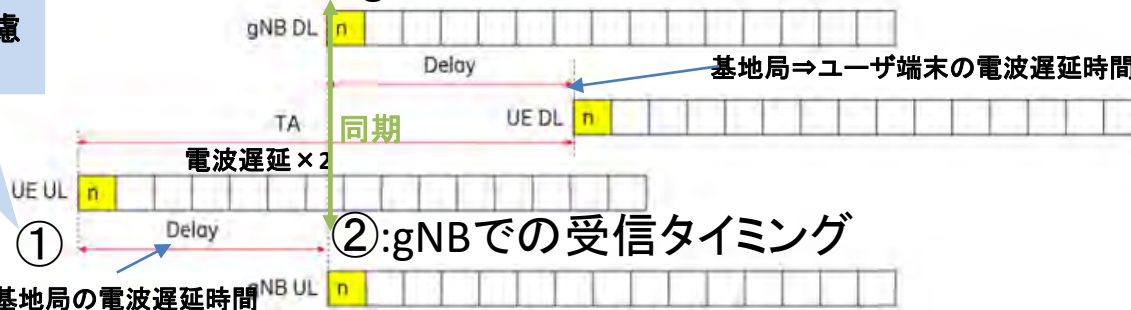
- 5Gの同期のための規定 : gNB(DL)は全てのgNBが同一のタイミング(③)で送信する必要がある
* gNBの送信タイミングに合わせてユーザ端末からのデータを送信する必要があることを意味する

[ソリューション]

- ユーザ端末が送信するタイミング(①)を調整 ⇒ gNB受信(②)とgNB(DL)送信タイミング(③)を一致させる
- ✓ Release17のNTN対応ユーザ端末はGNSSをサポート(位置/時刻と衛星軌道情報の取得が可能)
- ✓ 共通TA(Common Timing Advance)とスケジューリングオフセットの機能追加
→ ユーザ端末が衛星情報を共有する枠組みにより、TA補正、ドップラー補正(ネットワークと同期が可能)

③:gNBの送信タイミング

ユーザ端末が遅延を考慮してタイミング制御



Lynk Globalは衛星側で補正することで対応している

リリース17での検討・仕様化結果

- ◆NTNを5Gネットワークと連携・接続する上で課題となる、「遅延」に関する問題点と対策を説明
- ◆残った課題・対策を検討予定であるが、3GPPの特徴として、技術動向・事業性を鑑みて柔軟に課題含めた計画を見直しが行われるため、継続した動向の把握が重要となる
- ◆なお、Release-18以降ではさらなる高度なユースケース(再生中継、マルチオービット等)の検討が予定されている(次頁参照)

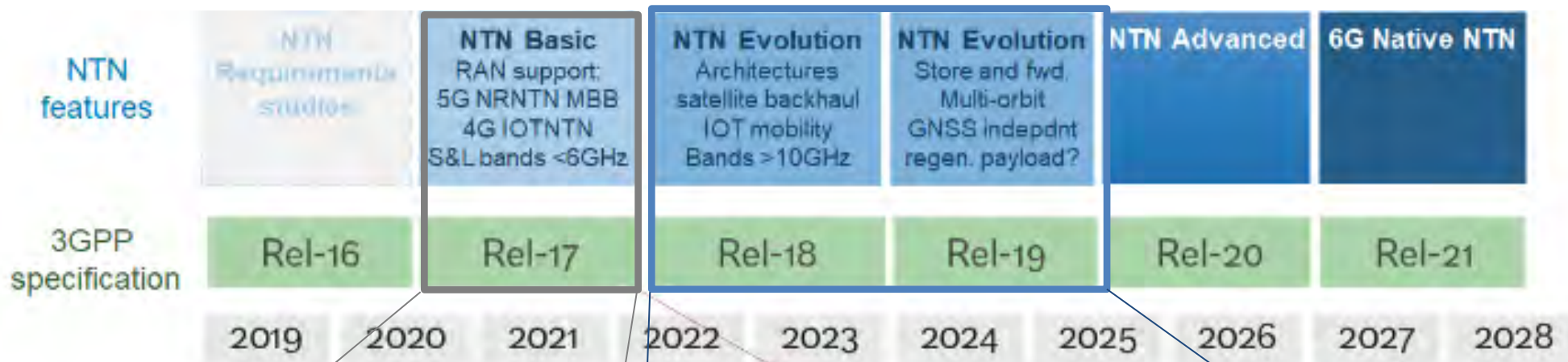
■ Release-17の主要課題対策状況(サマリ)

Issue	内容	Solution候補	Release.17 (策定済み)
#1	Mobility Management with large satellite coverage areas	#1, #12	#1
#2	Mobility Management with moving satellite coverage areas	#1, #7, #8, #9, #12	#1
#3	Delay in satellite	#10	#10
#4	QoS with satellite access	#2, #14(RAN検討に依存)	#2
#5	QoS with satellite backhaul	#3, #5, #11, #14(RAN検討に依存)	#11
#6	RAN mobility with NGSO regenerative-based satellite access	#1	#1
#7	Multi connectivity with satellite access	#4	対応不要と判断
#8	The role of satellite link in content distribution towards the edge	#6	#6
#9	Multi connectivity with hybrid satellite/terrestrial backhaul	Out of Scope	未解決 (未仕様化)
#10	Regulatory services with super-national satellite ground station	#13, #12	#13

3-1.1 3GPPでのNTN仕様化状況 ③ 5Gから6Gへの進捗状況

22-002-R-019

5G「リリース17」では衛星通信等NTNでの基本的課題(遅延が大きい等)に関する仕様が定義された。対応するチップセットの開発が進行中。並行して製品開発が進行中。NB-IoT分野の製品が先行。スマホ直接接続も急進展。リリース18ではバックホール機能の定義、リリース19では再生中継の定義を予定。



リリース17での仕様化で、市場がNTN 5Gに向けて活性化
 ・製品化はNB-IoTから Sateliotが衛星・製品の市場投入を発表('23-2月)*1
 ・サムソンがスマートフォン用モデム開発完了、チップ生産を発表('23-2月)*2

【標準規格に準拠した商用製品】
 R17 chipsets R18 chipsets R19 chipsets

ベントパイプ型：受信したデータをそのまま(周波数は変更)折り返す方式

◆ リリース済み
リリース17(NTN関連として初リリース)
 基本的な衛星機能を定義
 *「伝搬遅延」、「ドップラー」、「不連続なカバレッジ」などへの課題を検討

◆ 以降、検討中
リリース18
 従来機能である衛星バックホールのための機能を定義

再生中継型：受信したデータを解読する方式
リリース19以降
 再生中継型のペイロード(Internetのルータのようにヘッダー情報に基づいたルーティングが可能)、およびマルチオービットへの対応

*1: <https://eetimes.itmedia.co.jp/ee/articles/2301/23/news044.html>
 *2: <https://spacenews.com/samsung-unveils-satcom-solution-for-smartphones/>

3GPP委員会には、地上の事業者以外にも、NTN関連で衛星メーカー等関連各社が参加している。

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

3-1.1 3GPPでのNTN仕様化状況 ④5G対応の衛星事業展開状況

携帯端末システム(スマホ、IoT機器等)は各社戦略で5G準拠から独自規格まで各種展開中

22-002-R-019



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 (ユーザー端末向け規格)	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NTN 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。	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	第二世代はV2 Miniとして'23-2月 開始。スマホ接続のできるV2は打上げ機 (Starship)開発に依存。
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 + Beidou 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 + Beidou?	携帯電話用回線と衛星用通信 用回線の両方	--	--	--
3-3	Iridium	クアルコムの5Gモデムチップへの機能追加。	メッセージング	3GPP "TN" 携帯電話網 + Iridium	Iridium用L帯	--	--	--

[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.lighttrading.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/>

3-1.2 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(1/2)

22-002-R-019

各軌道での利点: 低軌道での低レイテンシ、静止軌道での大通信容量
→双方を生かすのはマルチオービット化

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 “Lightspeed” 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

3-1.2 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(2/2)

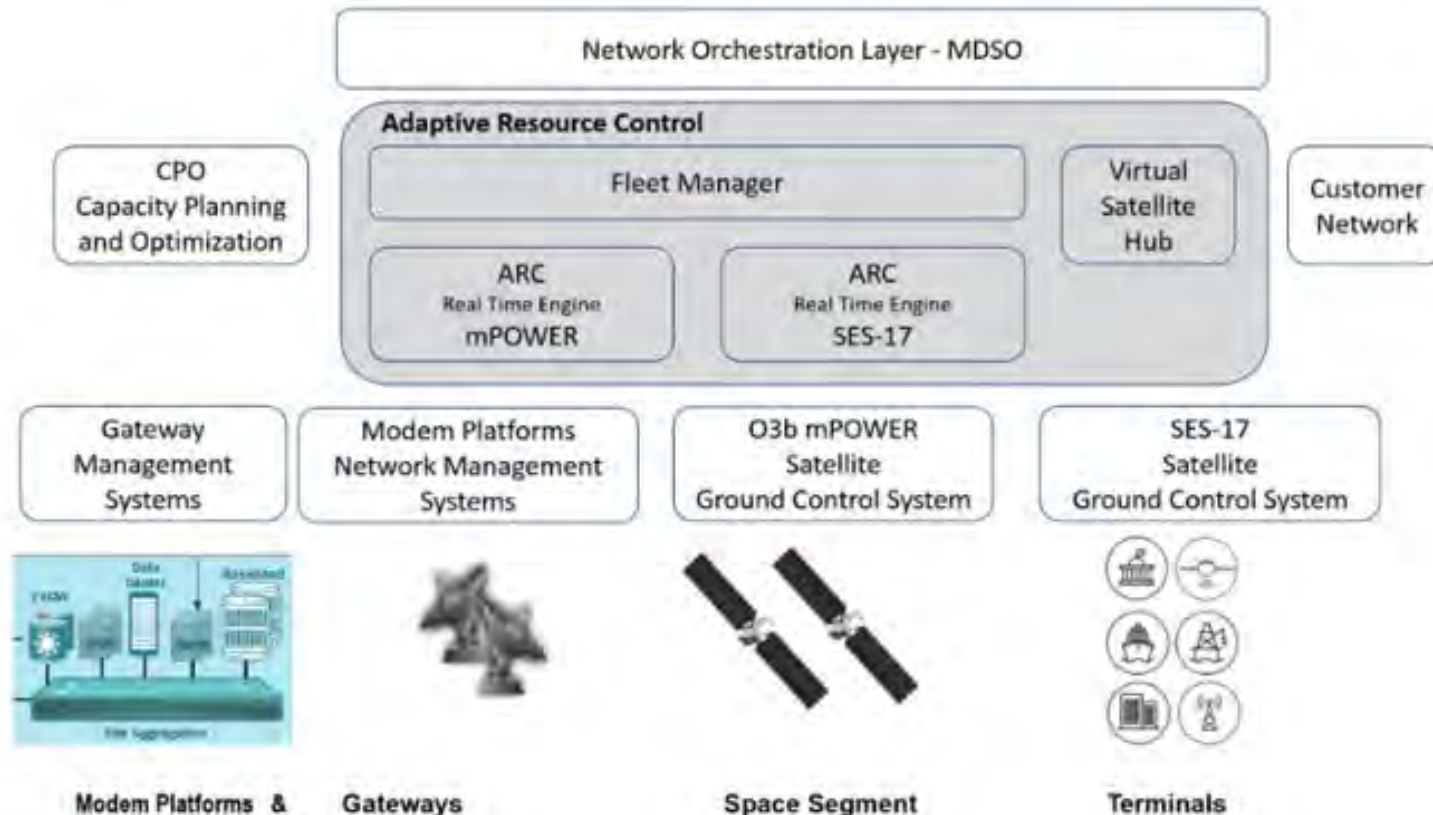
22-002-R-019

マルチオービット化への技術課題の検討が進められている。
SESがSES-17とmPowerの連携を発表。

- 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

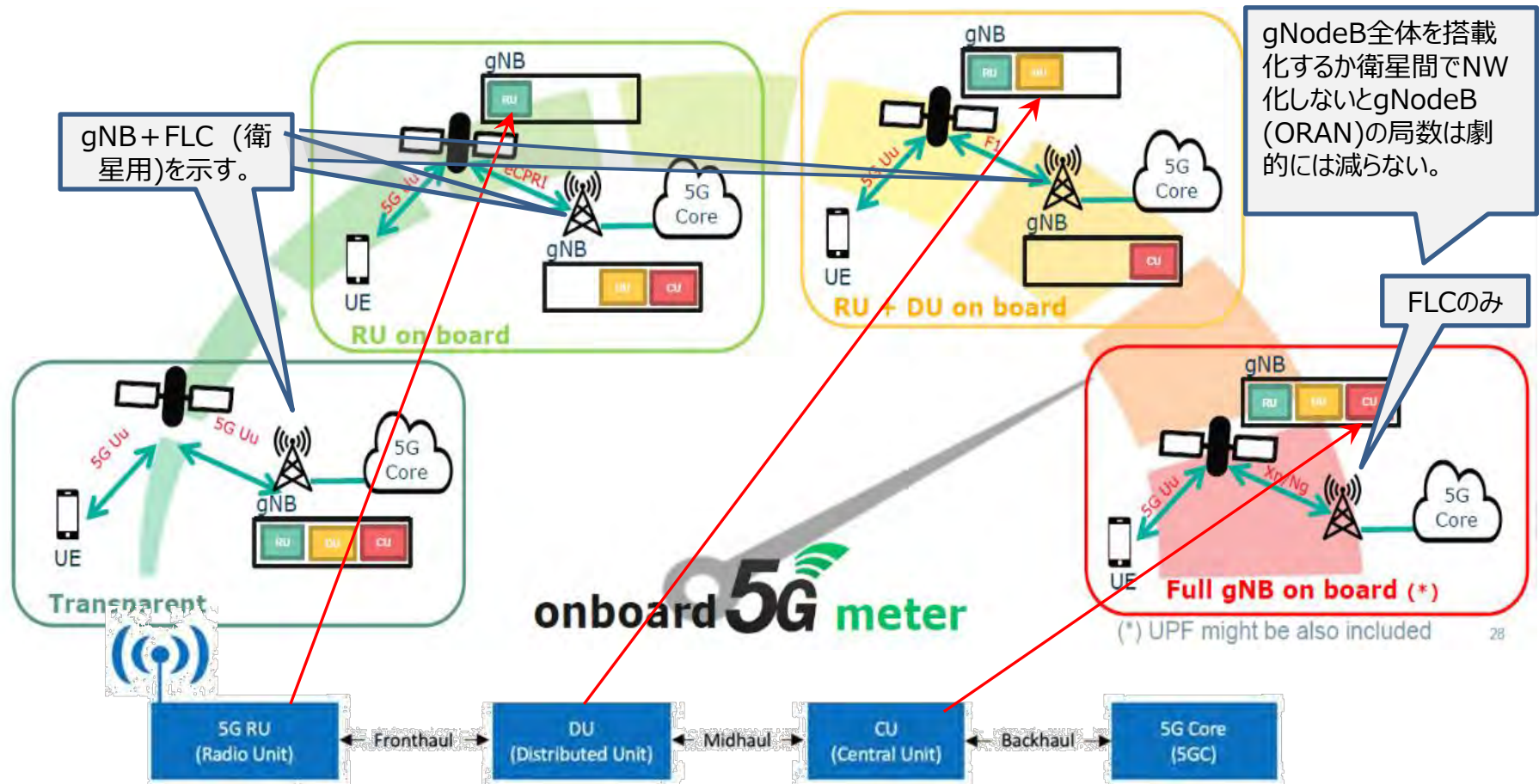
•ネットワーク・オーケストレーション:

- 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。



3-1.3 gNodeBの適用検討 (1/4)

- 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の機能を全て搭載化しないと局数は減らない。



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

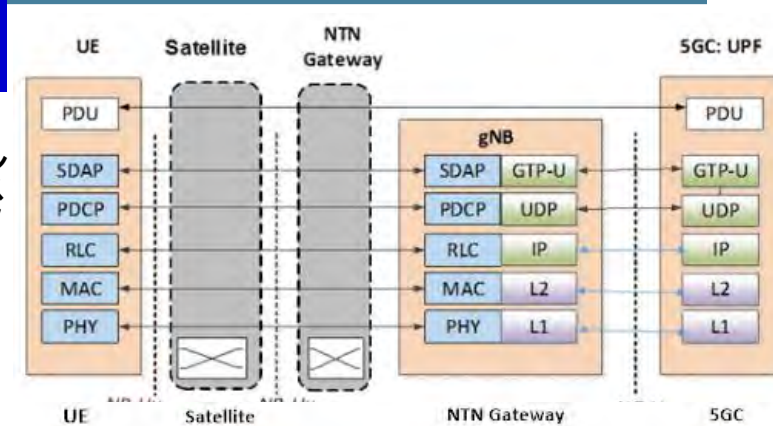
3-1.3 gNodeBの適用検討 (2/4)

gNodeB機能のトレードオフ事例.....ケース2と3は搭載系の難易度や地上局の削減の観点に依存。3GPP リリース19での課題

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

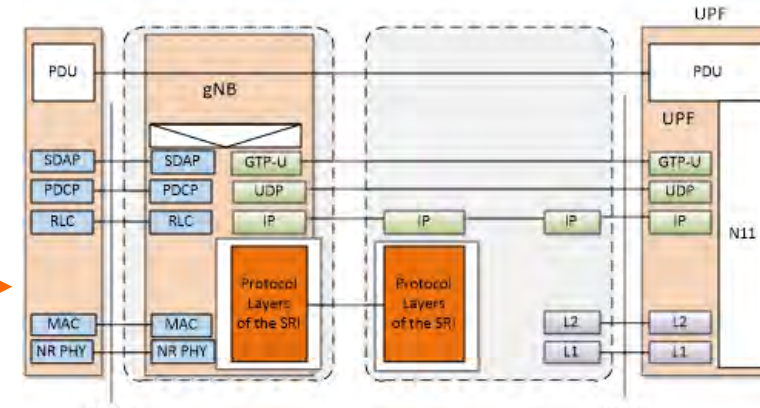


ケース2:フルgNodeB搭載(再生型)の場合

- 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

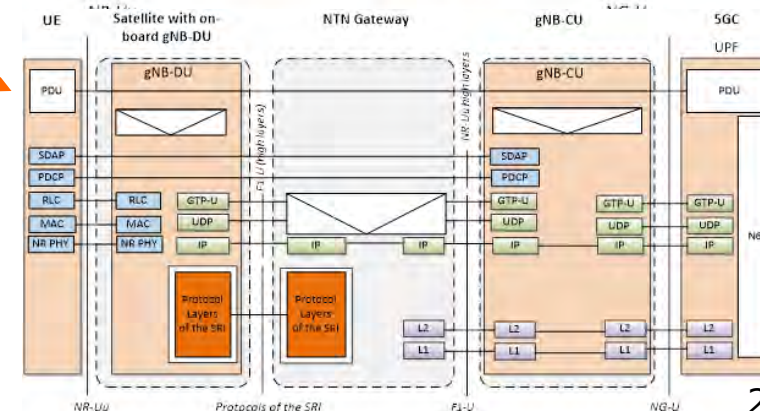
SRI : Satellite Radio Interface (衛星ラジオインターフェース)



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

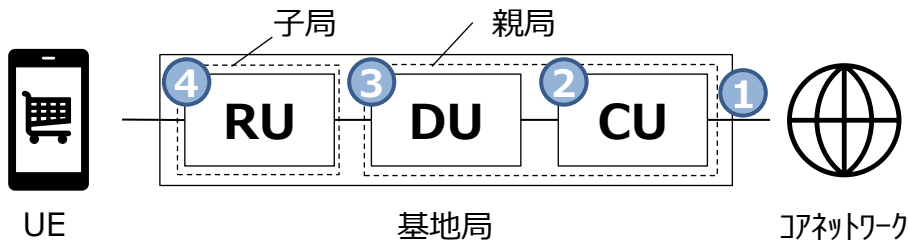
ケース3
再生gNB-DU+ RU処理されたパイロード



3-1.3 gNodeBの適用検討 (3/4)

➤ 5Gネットワークは、コアネットワークと基地局を接続するバックホールと、親局のCU/DU、子局のRUで構成されており、そのうちのどの部分を衛星が担うかによって、構成が変わる

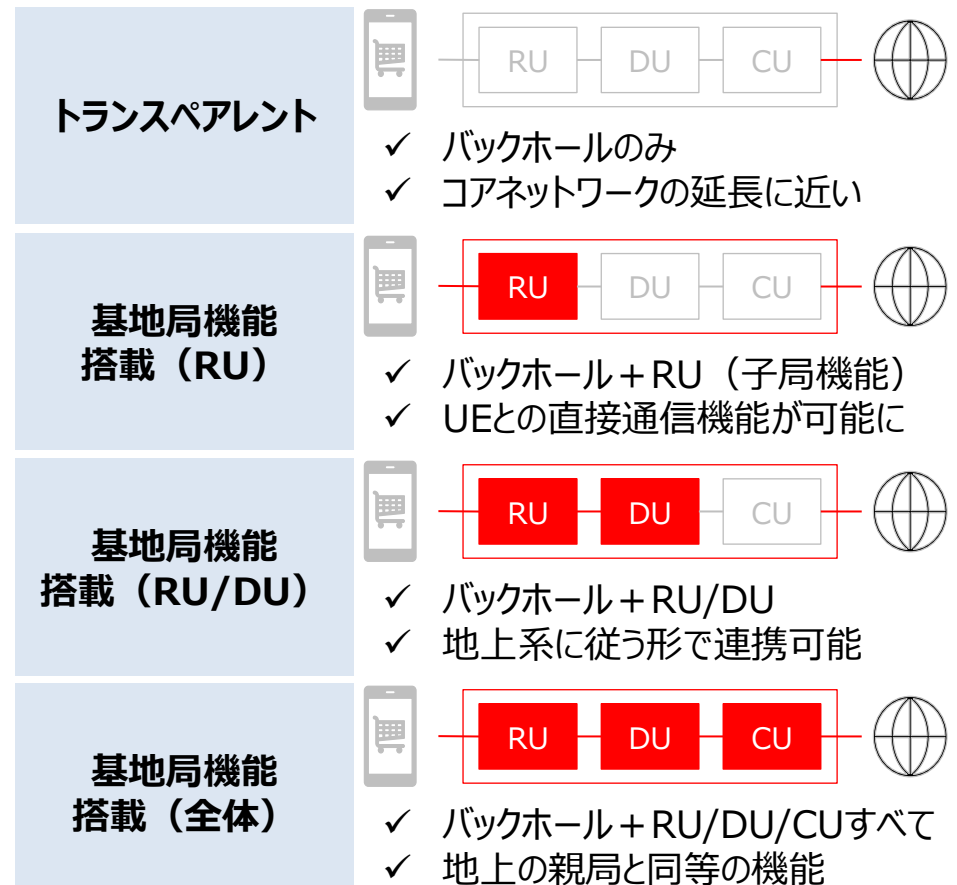
5Gネットワークの構成要素



- | | |
|--------------------------------------|---|
| ①
バックホール | ✓ 5Gコアネットワークと基地局を接続する |
| ②
CU
(Central Unit) | ✓ パケットデータコンバージェンスプロトコル、サービスデータアダプテーションプロトコルなどを処理し、無線リソース制御も行う |
| ③
DU
(Distributed Unit) | ✓ 変復調や符号・複合処理、および暗号化やMACを担う |
| ④
RU
(Radio Unit) | ✓ アナログ/デジタルビームフォーミングやAD/DA変換機能など、物理的処理で無線機としてユーザー端末を接続する |

- 5G機能の搭載にあたり、再生中継機能の果たす役割については今後も継続調査
- 出典：ASTEC分析





通信衛星の構成の類型



3-1.3 gNodeBの適用検討 (4/4)

➤ 現在の主流の用途はトランスペアレント型による、バックホール回線の提供であるが、今後再生中継機能の拡充等の衛星系での技術進歩により、5G基地局機能の搭載が進む可能性もある（詳細はP.15）

通信衛星の発展の段階とネットワーク全体への影響

衛星の機能	ネットワークとしての使われ方	取り組むプレイヤー
<p>トランスペアレント</p>  <ul style="list-style-type: none"> ✓ ユーザ端末から受信した信号を衛星がGWに転送する ✓ GWで設定したパス（コマンド）に従い、ルーティング・周波数は可変かつリアルタイム制御可能 	<p>固定的な独立システム</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 地上NWからは独立しており、GW局で接続・切り替えが実施される ✓ ネットワークルーティングは固定的 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Starlink, OneWebのGen1 ✓ O3b mPower
<p>基地局機能搭載（RU）</p>  <ul style="list-style-type: none"> ✓ 衛星で信号の変復調を行う ✓ 機能拡張で、基地局機能を載せることが可能となる 	<p>柔軟性を持った独立システム</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 地上NWからは独立している ✓ 一方、NTN内での柔軟性を有しており、ルーティング等の自由度が向上 	<p>➤ 新しいLEOコンステプレイヤーでは、5Gへの3GPP準拠を目指すプレイヤーが存在（AST Space MobileやLynk等）</p>
<p>基地局機能（RU/DU）</p>  <ul style="list-style-type: none"> ✓ 基地局機能のうち、一部（RU・DU）を搭載したもの ✓ 通信のアーキテクチャとしては、再生中継と変わらない 	<p>地上系を上位として連携可能なシステム</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ CU機能は地上NW上に残るため、地上からの指示を受けての動作となる 	
<p>基地局機能（全体）</p>  <ul style="list-style-type: none"> ✓ CUも含め、衛星自体が基地局機能を持つもの ✓ 地上局の代替となる 	<p>地上系とシームレス連携が可能なシステム</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 地上NWと同様に衛星単体で基地局機能まで担うことが可能 ✓ 地上NWと合わせたオーケストレーションも期待 	

3-1.4 HAPSサービスモデル ①HAPSの特徴 (1/2)

22-002-R-019

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

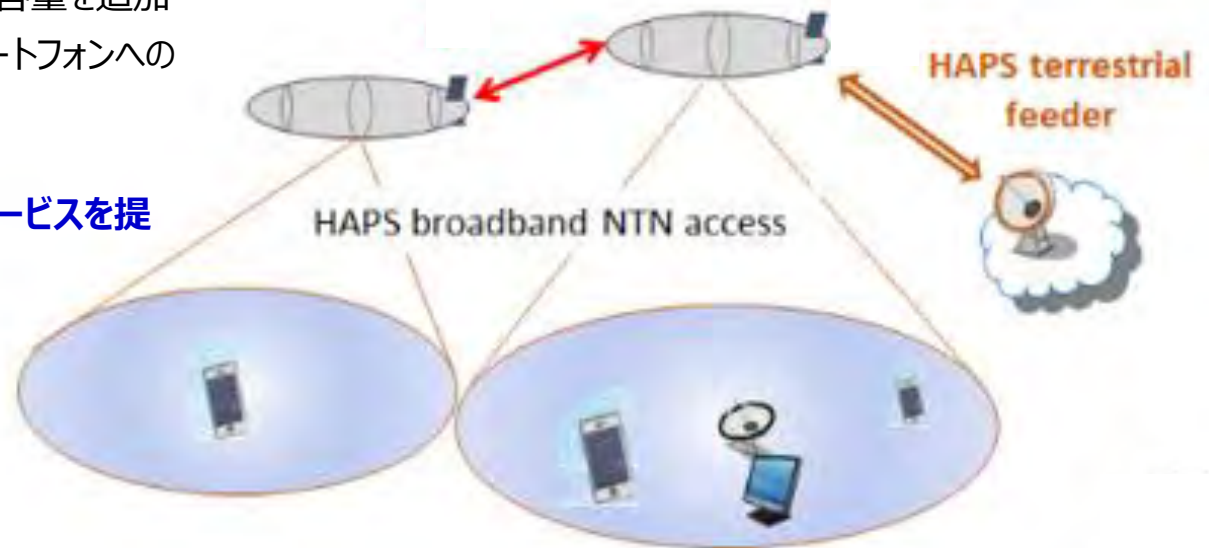
- ・ 地上約20kmなどの成層圏に飛行体を常駐させ、移動体通信の中継を行う
- ・ スマートフォンに**50Mbpsまたはそれ以上**の真のブロードバンド・サービスを提供
- ・ 比較的**広域(直径数百km)をカバー**し、衛星より**低遅延**

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

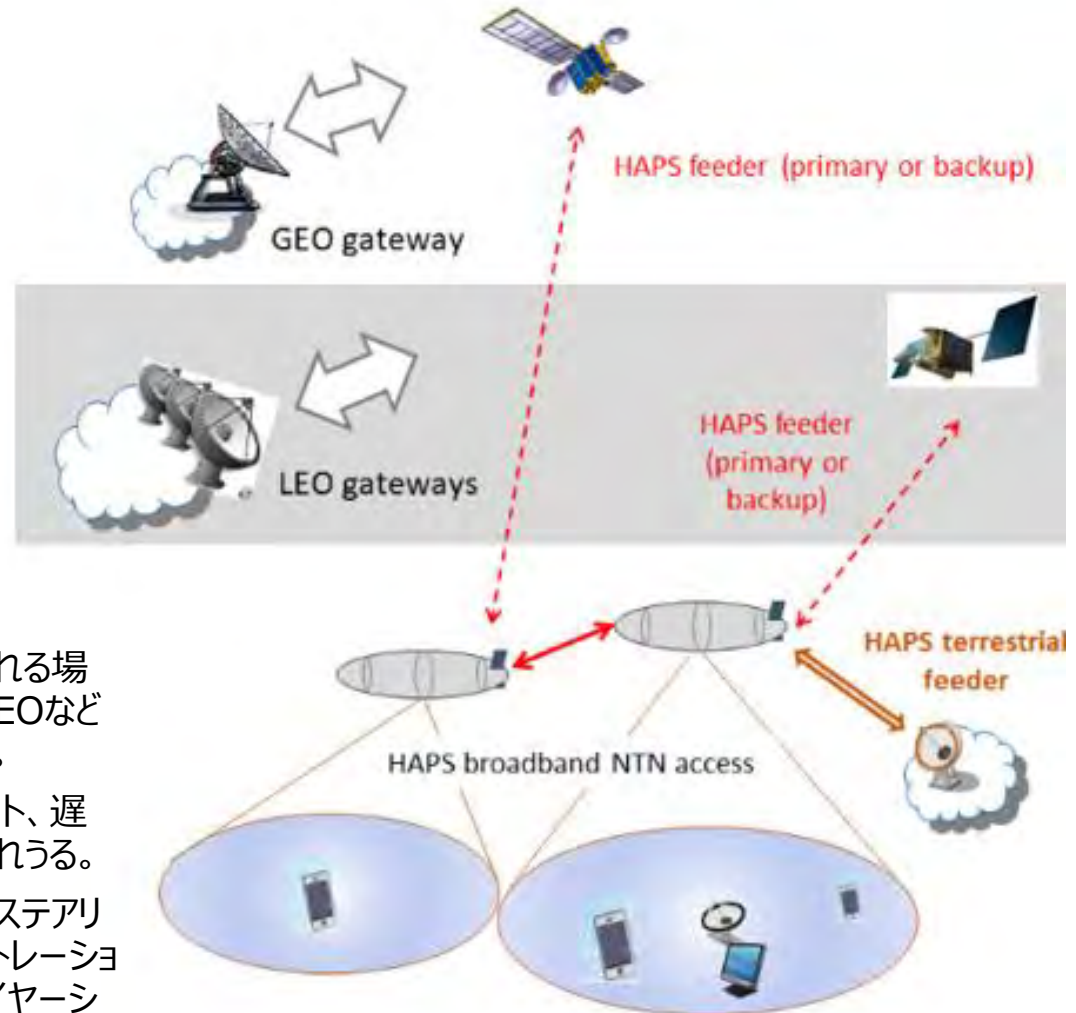
出典: Euroconsult

3-1.4 HAPSサービスモデル ①HAPSの特徴 (2/2)

22-002-R-019

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ркест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

3-1.4 HAPSサービスモデル ② HAPSにおける日本の位置づけ(1/2)

22-002-R-019

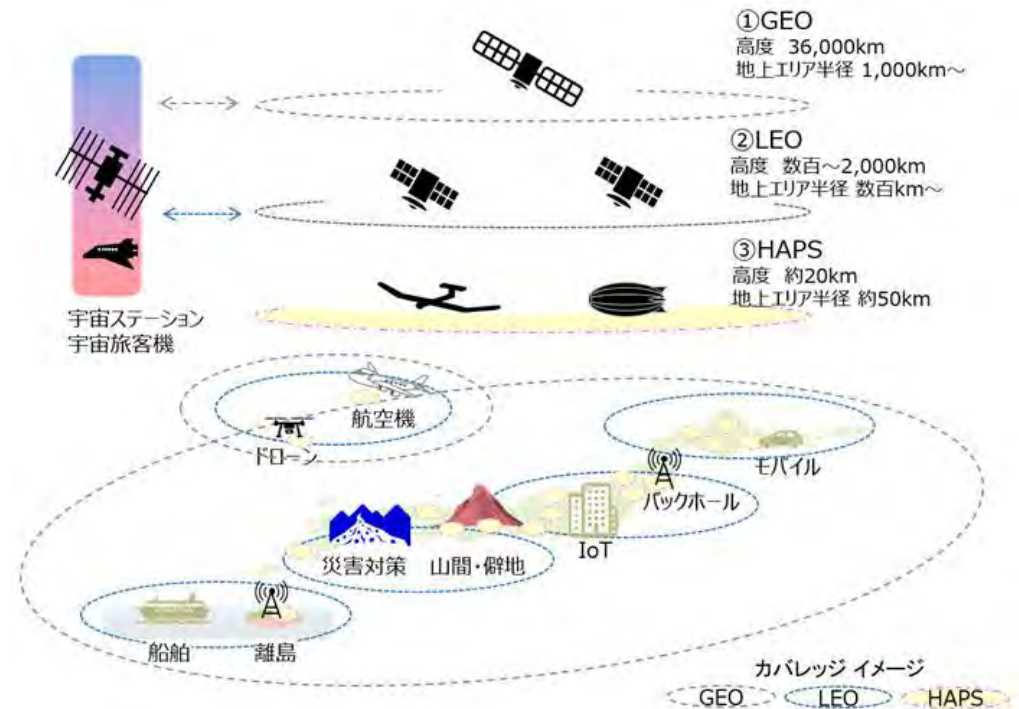
日本のオペレータはHAPS主導的立場

- テレコミュニケーションやテクノロジー、航空業界のリーディングカンパニーが「HAPSアライアンス」を立ち上げ
(当時 計12社: HAPSMobile、Loon、AeroVironment、Airbus Defence and Space、Bharti Airtel、China Telecom、Deutsche Telekom、Ericsson、Intelsat、Nokia Corporation、ソフトバンク、Telefonica)
<2020年2月21日 HAPS MOBILE>



- エアバス・NTT・NTTドコモ・スカパーJSAT、HAPSの早期実用化に向けた研究開発などの推進を検討する覚書を締結
～衛星とHAPSを組み合わせた大規模ネットワーク構想の実現をめざす～

<2022年1月17日 日経新聞>



3-1.4 HAPSサービスモデル ② HAPSにおける日本の位置づけ(2/2)

22-002-R-019

● Space Compassが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・ネットワークは、NTTのネットワーク・コンピューティングインフラと、スカパーJSATの宇宙アセット・事業を統合して構築する新たなインフラです。

地上から**高高度に浮かぶHAPS(High Altitude Platform Station)**、宇宙空間の低軌道・静止軌道まで複数の軌道を統合します。また、それらと地上を光無線通信ネットワークで結びコンステレーションを構成し、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します。また、地上のモバイル端末へのアクセス手段を提供し、超カバレッジを実現します。

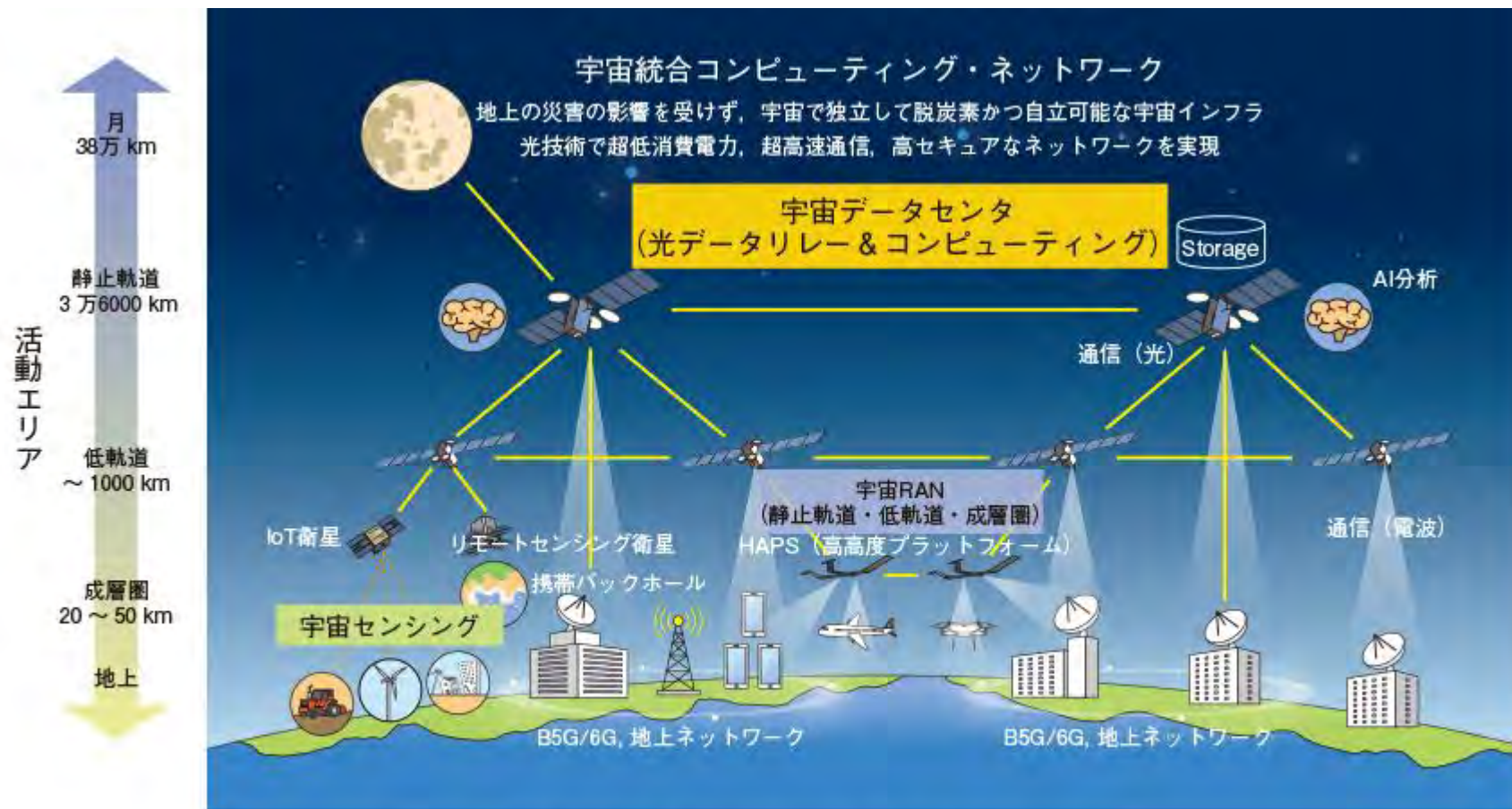


図1 宇宙統合コンピューティング・ネットワーク構想

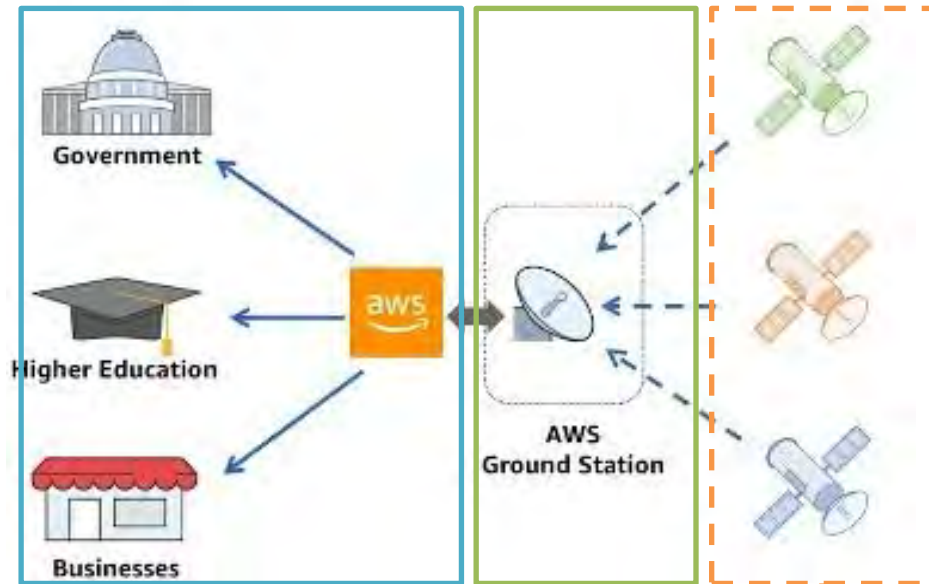
出典:NTTジャーナル

3-1.5 クラウドの衛星通信利用形態 (1/4)

22-002-R-019

- 地上システム・クラウドではAWSやMicrosoftが中心となり、地上局～データ分析までのインフラをサービス型で提供することで、衛星事業者は付加価値の高い領域へのフォーカスが可能になる
- AWSは、自社で地上局を持ち、衛星データの保存や処理など、全ての衛星運用をクラウド上で行うSaaS型サービスとしてAWS Ground Stationを展開。一方、Azureは提携戦略での展開を行う

AWS Ground Station

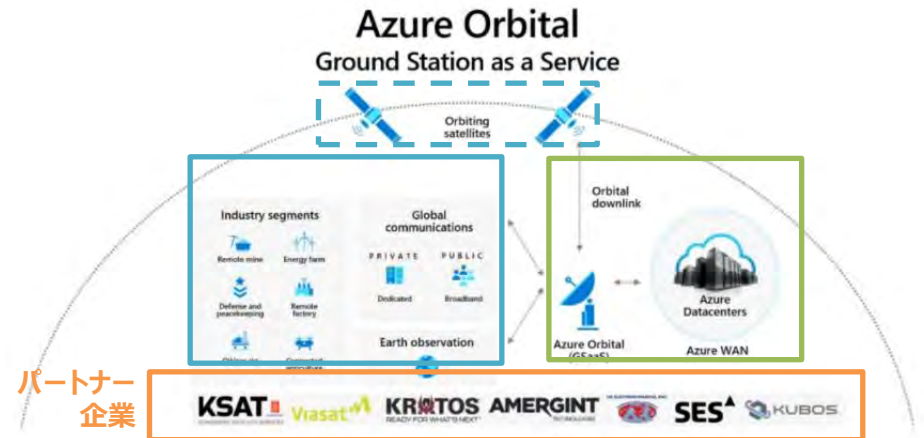


-AWS上への衛星データ蓄積
-オペレータ/顧客ともにAWSクラウドを利用

-自社グラウンドステーションをSaaS型の地上局サービスで展開
-11拠点を展開済み

-Xバンド・Sバンドの周波数帯でLEO/MEOをカバー
-パスの15分前までコンタクト予約の確認、キャンセル、リスケジュールが可能

Azure Orbital



-仮想化処理機能や管理ソフトウェアをクラウド上で展開

-基地局インフラは、自社だけでなくパートナー企業も活用

-パートナー企業の活用に特徴がみられる。
-パートナーには地上局インフラ (KSATやViasat)、仮想化処理 (KRATOS・AMERGINT等)、ミッションコントロールソフトウェア (KUBOS) 等が含まれる

3-1.5 クラウドの衛星通信利用形態 (2/4)

- AWS Ground Stationは、基本料金・最低料金などは設定しておらず、帯域幅プランに分単位で課金されるAs-a-Service方式での料金体系を設定している

AWS Ground Stationの料金体系

AWS Ground Station is billed in per-minute increments.

You can schedule access to antenna systems on a per-minute basis and pay only for the time you schedule. AWS Ground Station offers antennas in the following locations: Oregon (US), Ohio (US), Middle East (Bahrain), EU (Stockholm), Asia Pacific (Sydney), EU (Ireland), Africa (Cape Town), Hawaii (US), Asia Pacific (Seoul), and Asia Pacific (Singapore). Additional sites will become available in the coming months.

帯域幅タイプ

時間あたり価格

Contact Type	Pricing
Narrowband Reserved	\$3 per minute
Wideband Reserved	\$10 per minute
Narrowband On-Demand	\$10 per minute
Wideband On-Demand	\$22 per minute

54MHzを基準
にNarrow
/Wideを分類

With a single price, you can use any antenna in the global AWS Ground Station network.

Cancelled On-Demand Contact	Cancelled Reserved Contact >24hrs in advance	Cancelled Reserved Contact <24hrs in advance
100% of contact cost	No cost	100% of contact cost

Reserved minute pricing is available for customers who reserve a minimum of 150 minutes per month, for 12 months. [Contact Us](#) to learn more.

観測衛星における価格計算サンプル

Use satellite imagery to grow business

During a strategic planning session for the upcoming fiscal year, a company decides that it would like to collect high-resolution satellite data from an area of interest during the next twelve (12) months to improve their overall business case. The company reaches an agreement with a satellite imagery provider and determines that high-resolution satellite imagery can be collected using 165 Wide-band minutes per month.

衛星データを購入する事業者を想定。
年間Wide-bandを165分/月利用するものと想定

Pricing Factors

Price factors include: The price to use AWS Ground Station as a satellite data collection tool is based on the total number of minutes used during service period and type of service required. For this scenario we assume that AWS Ground Station will be used for twelve months to support one hundred sixty-five (165) wideband (WB) minutes per month. These passes will all be billed at the Wideband Reserved rate (\$10 per minute).

Monthly Reserved Minutes for twelve or more months:

Minutes per month: 165

AWS GS WB Reserved Minute Rate: \$10

Total price per month: \$1,650

Months: 12

Monthly price: \$1,650

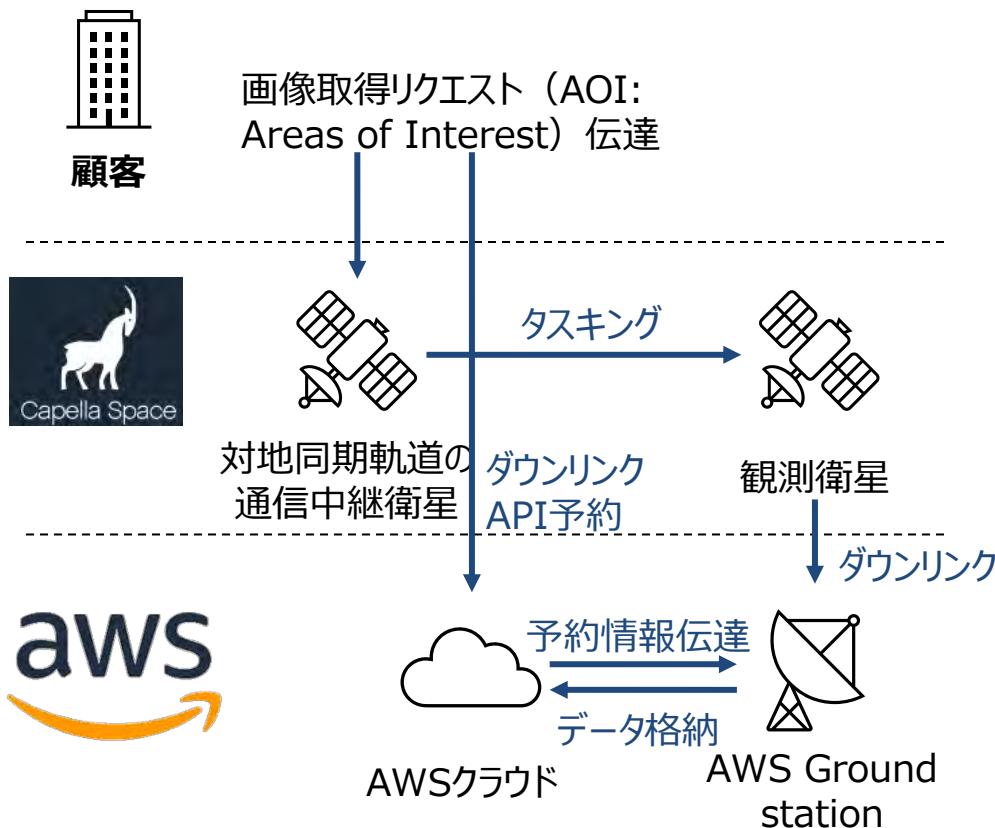
Total Annual Price: \$19,800

価格は利用する通信容量と時間のみによって決まる
年間費用: \$19,800
= Wide-band単価: \$10/min
×利用時間: 165分/月
×利用期間: 12か月

3-1.5 クラウドの衛星通信利用形態 (3/4)

- 小型衛星観測コンステレーションを運用するCapella Spaceは、地上局も含めてITインフラを全てAWS上に移管することで、サービス品質の改善・事業規模拡大への対応を進めている

Capella SpaceによるAWS Ground Stationの活用事例



AWS と協力しながら AWS Ground Station からの地球規模の情報を活用することで、当社では衛星業界で可能であることの限界を広げています。その上で、コストや、衛星データから利益を引き出すために必要な時間までを削減しています。Capella による、地球観測データの収集のための自動的でリアルタイムのアプローチと、AWS の実績あるインフラストラクチャや比類ないサービスのポートフォリオとを組み合わせることで、人命を救い、この星の環境を守るためのインサイトを、顧客がタイムリーに入手できるよう支援しています。







Capella Space CEO
Payam Banazadeh

3-1.5 クラウドの衛星通信利用形態 (4/4)

22-002-R-019

- メガクラウドベンダーは各社ともに、SaaS/PaaS/IaaSの各レイヤでの自社でのサービス提供に加え、宇宙機関や企業によるデータ格納・分析や、エンドユーザー向けサービス提供等にも活用されている

	aws	Azure	Google Cloud Platform
 <p>SaaS (ソフトウェア)</p>	<p>HERE</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Amazon Location Serviceに衛星データを組み込み、地図やルータリングサービスを提供 	<p>Microsoft</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Azure上のAI“SpaceEye”で雲処理等のソリューションを提供 <p>Esri, Blackshark.ai, Orbital Insight</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 地理空間サービス情報をAWS上に蓄積し、分析アプリGO*2を提供 	<p>Synspective</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ SaaS: アプリ管理ツールのKubernetesを活用し、アプリケーションを提供 <p>RESTEC</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ GEE*3を活用し、地球可視化ツールVEGAを構築
 <p>PaaS (プラットフォーム)</p>	<p>Capella</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ PaaS: 顧客からの観測オーダー受信～衛星運用までをAWS上でシステム化 	<p>AWS</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Earth on AWSとしてLandSatやSentinelデータを提供 <p>Microsoft & Airbus</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 衛星画像と標高データをAzure Mapsに提供 ✓ 機械学習サービスAzure Machine Learning等との組み合わせによるユースケースが期待 	<p>Planet</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ PaaS: 顧客からの観測オーダー受信～衛星運用までをパッケージ化
 <p>IaaS (インフラ)</p>	<p>NASA/JPL</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 衛星データの蓄積・処理をAWSクラウド上で実施 	<p>iDirect</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 同社の衛星-地上通信を仮想ネットワーク機能化として提供 <p>KRATOS</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 衛星のコマンド～データ格納の仮想ネットワーク機能等を提供 	<p>Planet</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ IaaS: 自社のデータ格納・分析にGCPを活用
 <p>衛星/衛星データ所有者</p>	<p>衛星データをGaaSを通じて受信</p> <p>AWS Ground Stationを提供</p>	<p>地上局サービスAzure Orbital Ground Stationを提供</p>	<p>Leaf Space</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 自社地上局をサービス化したGaaS*2をGCP上に構築

注)一部計画中的のものも含む。

*1: GaaS: Ground Station as a Serviceの略 *2 GO: Orbital Insight社の提供する地理空間情報分析アプリ *3 GEE: Google Earth EngineとしてGCPで提供される衛星画像解析パッケージ
出所) [HERE事例](#)、[AWS \(HERE\)](#)、[NASA/JPL講演資料](#)、[ZDNet](#)、[AWS](#)、[AWS \(Capella\)](#)、[KRATOS](#)、[ZDNet \(Airbus\)](#)、[Microsoft\(iDirect\)](#)、[GCP \(Synspective\)](#)、[RESTEC](#)、[宙畑 \(Planet\)](#)、[Leaf Space](#) 31

3-1.6 弱み・強み分析

22-002-R-019

- 衛星通信が従来の孤高の立場から、巨大移動体通信網の一部として機能する、大きな潮流が進行中。
- 5G/6Gの規格化の動きを捉え、積極的に開発を進めていく必要があるのではないか。

動向分析サマリ

Fact Finding及び 海外動向分析	現状の日本における動向分析	
		強み弱み
<p>事業動向</p> <ul style="list-style-type: none"> ・3GPP Rel17においてNTNが初めて仕様化された('22-6月) ・Rel18で引き続き、カバレッジ拡張、周波数上限の拡張など機能拡張の仕様化が検討されている('23までの予定)。 ・Rel19で再生中継(ノントランスペアレント)が初めて仕様化される計画('25) <p>技術動向</p> <ul style="list-style-type: none"> ・製品化は関連チップセットが発売されてからで、約18か月と予想される。さらにある宇宙IoTメーカーは、「23年末にRel17対応のシステムをリリースする」とアナウンスしている。→製品化のスピードは速い。 	<p>日本のオペレータはHAPS主導的立場</p> <ul style="list-style-type: none"> ● HAPSモバイル(ソフトバンク系)がエアバス・インテルサットなどとHAPSアライアンスを編成(2020年2月)。 ● NTT,ドコモ,スカパーJSAT,エアバスの四社がHAPS早期実用化にむけて覚書締結(2022年1月)。 ● Space Compassが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) <p>衛星側の動き</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 衛星側では日本のオペレータが海外衛星運用者と提携するケースが多い。 ● 国産衛星システムとしての動きはみられない。 	<p>強み</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ HAPSでは主導的位置 ✓ 3GPP標準化委員会に移動体通信事業者は積極参加。 <p>弱み</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ HAPS以外、衛星分野での大きな動きがみられない。

日本における重要項目と目標とすべき達成レベル

- ・3GPP規格へ対応した技術開発を衛星搭載用システムとして進めるべきではないか。
- ・HAPS関連のように、衛星側も積極的に3GPP委員会に参加すべきではないか。(仕様規格化検討に参加)

- 5G RAN局の搭載化・デジタル再生中継技術**
 - 5G/B5G/6GとNTN接続技術
 - 5G/B5G/6Gの地上局(RAN)の搭載化技術、再生中継器技術
- 5G 技術 (NFV、スライシング等)の実装技術**
 - 5G技術の実装 (NFV : Network Functions Virtualization、NWスライシング)
 - 多数多地点アクセス制御やNB IoT等

3. 報告する調査内容

- 1. はじめに (p3)
- 2. 調査状況全般 (p4)
- 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..... (p6)
 - 3-2 新しい衛星通信システムの調査..... (p33)
 - 3-3 衛星システムIoTの調査..... (p60)
 - 3-4 衛星間通信による宇宙ネットワークの調査..... (p79)
 - 3-5 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査... (p130)
 - 3-6 定常調査・動向調査..... (p156)
 - 3-7 適宜調査・事実確認..... (p162~175)

3-2 新しい衛星通信システムの調査

(調査要求)

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)について整理した。
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した。
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した。
- (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した。
- (3) (1)(2)項の調査結果をもとに日本の強み・弱みの分析を実施した。

エグゼクティブサマリ

22-002-R-019

項目	重要なトレンド
3-2.1 システム最新事例	<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は事業を開始し、2022年末までに世界46か国に展開。 ➤ GEOは基本的にHTS型^{*1}、最先端はSDS型^{*2}に移行。
3-2.2 衛星最新事例	<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。
3-2.4 強み・弱み分析	<ul style="list-style-type: none"> ➤ マルチビーム用の電子走査式アンテナは防衛用やSARで世界的実績あるも、フルデジタル化ペイロードのキーデバイスが輸入品。高額かつ長納期など入手性に難あり。 ➤ 通信需要の変動への可変性が重要で、継続的開発項目として以下の開発が必要。 <ol style="list-style-type: none"> 1.通信ペイロード技術 2.通信プロセッサ関連技術 3.電子走査アンテナ技術 4.構成通信機器技術

*1 HTS : High Throughput Satellite

*2 SDS : Software Defined Satellite

3-2.1 システム最新事例

22-002-R-019

(1) LEO/MEO通信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 ^{*1} (>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

*1: 第一世代フェーズ1の計画機数

3-2.1 システム最新事例

(1) LEO/MEO通信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
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)

3-2.1 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-019

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 SpacelInspire	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 SpacelInspire	FSS
Intelsat 41	2025	TAS SpacelInspire	TBD
Intelsat 44	2025	TAS SpacelInspire	TBD
Flexsat (Eutelsat)	2026	TAS SpacelInspire	TBD

3-2.1 システムとしての最新事例 (3) データリレー

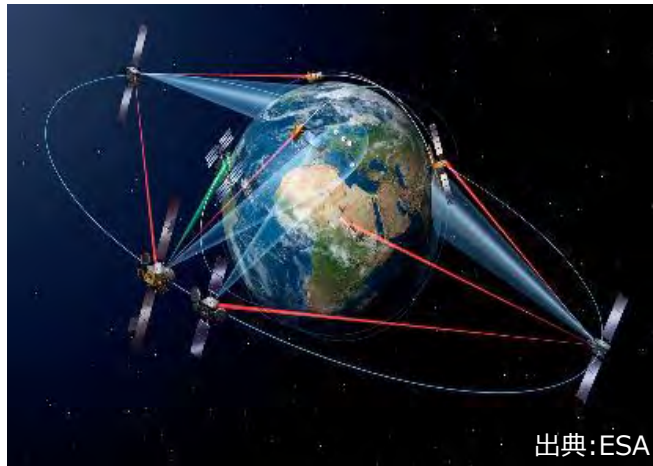
22-002-R-019

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。



出典: ESA

-  **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）衛星でデータリ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。

3-2.2 衛星の最新事例 (1) GEO3機種(1/4)

22-002-R-019

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	2022 (mPower)
Total unit sold	7 Inmarsat-7 F1, F2, F3 Optus 11 Intelsat 42, 43 Superbird 9	6 Astra 1Q SES 26 Intelsat 41, 44 Arabasat 7A Flexsat	1 + 11(MEO O3b mPower)

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-019

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)

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

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。

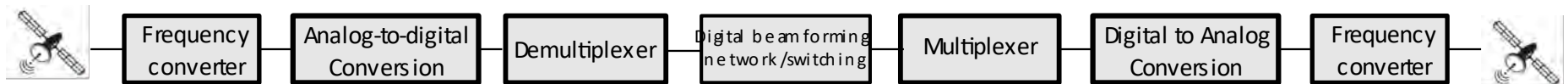
2022年、ARABSAT（中東・アフリカ地域の大手衛星通信事業者）とThales Alenia Spaceは、主ミッションをKuバンド、補助ミッションをCバンドで運用するARABSAT-7Aの製造契約に調印した。ARABSAT-7Aは、ARABSAT 6Aとともに、寿命を迎えたARABSAT-5AのCバンドとKuバンドの容量の大部分を置き換える予定である。

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
Eutelsat	Flexsat	2022	2026



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



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

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年に打上げられ、2023年から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、打ち上げ時約1700kg、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

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

22-002-R-019

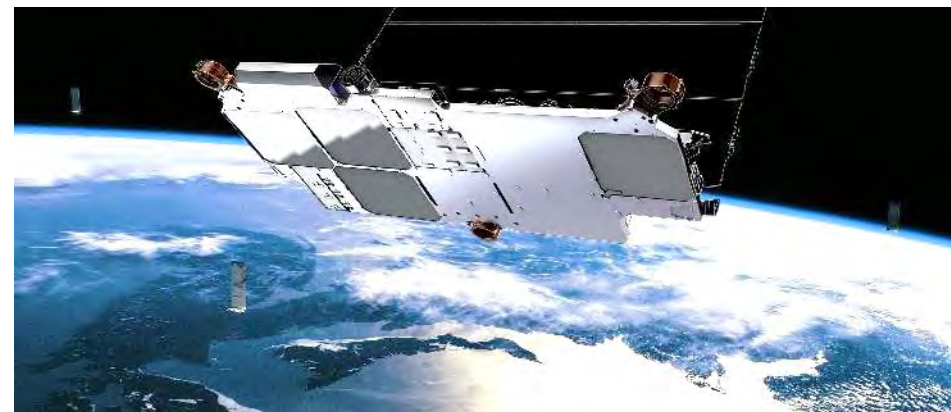
スターリンクは2020年8月に限定試験的に商用化され、2022年1月には24カ国で利用できるようになった。

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

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

22-002-R-019

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。

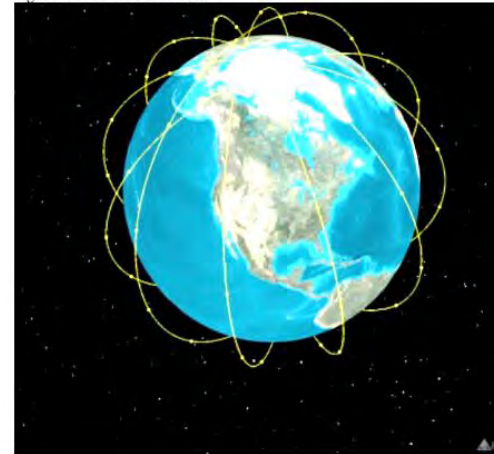
現在、Telesat社はKa帯で運用する試験衛星1機 (LEO-1) を打ち上げ、潜在顧客やパートナーに対するデモンストレーションを実施している。

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

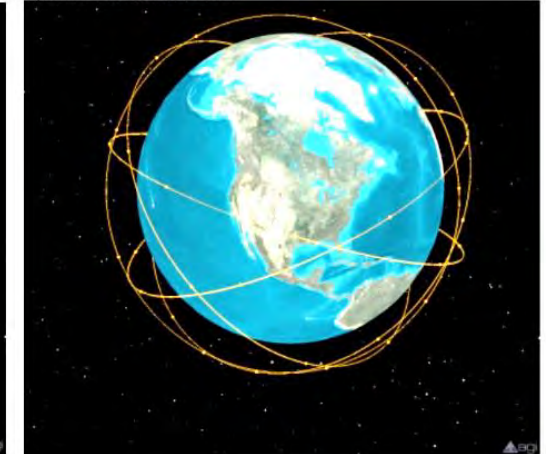
Feature	Telesat Lightspeed
Satellite weight	700kg
Electrical power	4kW
Fuel and orbit raising	Krypton gas and electric thrusters
Manufacturer	Thales Alenia Space
Maximum data rates	7.5 Gbps to a signal user terminal, 20 gbps to a single ground location
Operational life	10 years
Additional features	Phased 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

3-2.2 衛星の最新事例 (2) LEO代表例(3/4) OneWeb

22-002-R-019

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。

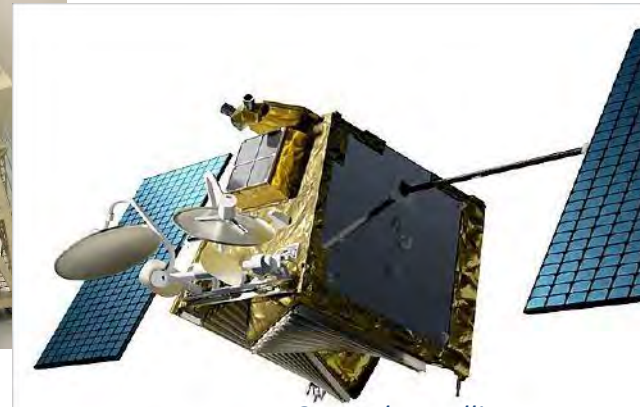
OneWebは、2022年1月にBTとトライアルを開始したのみで、まだ商用サービスを開始していない。最初の商用顧客は2022年中頃を予定。

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。



Oneweb satellite stack (source: defencehub)



Oneweb satellite (source: Aerospatium)

出資状況(再建後)

投資組織	億\$	比率	投資の背景(推定)
Bahrti(印)	10.0	34.3%	投資効率、Bahrti社通信網の強化、インド政府へのパートナーシップ提案。
Eutelsat(仏)	7.15	24.5%	投資効率、事業の多角化(モバイルバックホール等5Gネットワークへのサービス提供)、EUの「シンフォニー」へのOneWeb採用狙い。
英国政府	5.0	17.2%	Ku帯権益確保、エアバス等産業強化、Brexitでガリレオ利用権喪失の代替、安全保障上のレジリエンス要素、国内BB通信サービス提供。
ソフトバンク	3.5	12.0%	投資効率重視。バックホールと海上輸送に注力。
Hanwa(韓)	3.0	10.3%	以前、2030年までに二千機のLEOを打ち上げる事業計画を持っていた。
Hughes(米)	0.5	1.7%	LEOを商業と政府の移動体通信を補完する手段とみなす。OneWebの通信キャパシティを米国とインドの企業向けに販売予定。
合計	29.2		

3-2.2 衛星の最新事例 (2) LEO代表例(4/4) Kuiper

22-002-R-019

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。



3-2.3 キー技術 (1) サブシステム

アンテナ方式 1

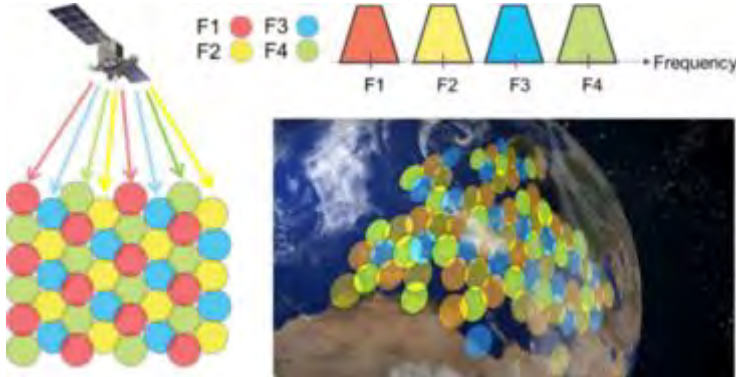
・電子走査型アンテナ (ESA: Electronically Steerable Antenna、DRA : Direct Radiative Antenna)

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

3-2.3 キー技術 (1) サブシステム

22-002-R-019

アンテナ方式 2

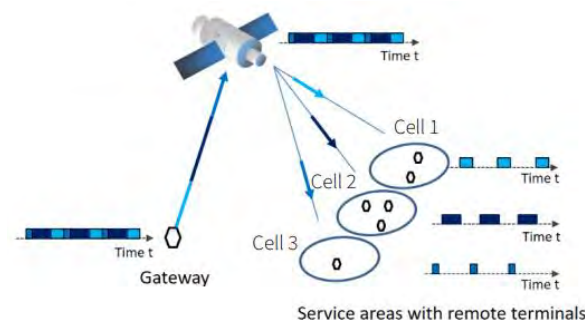
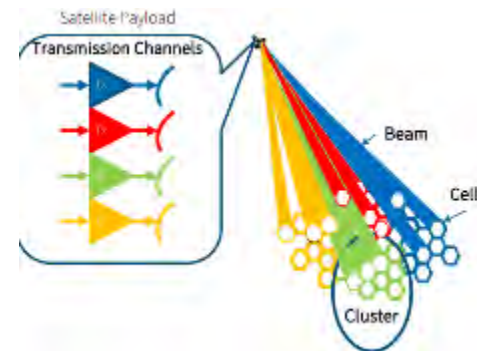
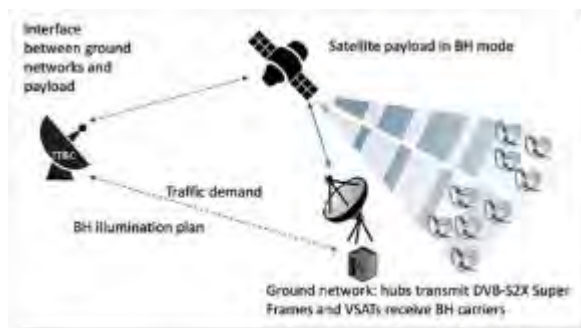
ビームホッピング

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。



3-2.3 キー技術 (1) サブシステム

22-002-R-019

デジタルパイロード

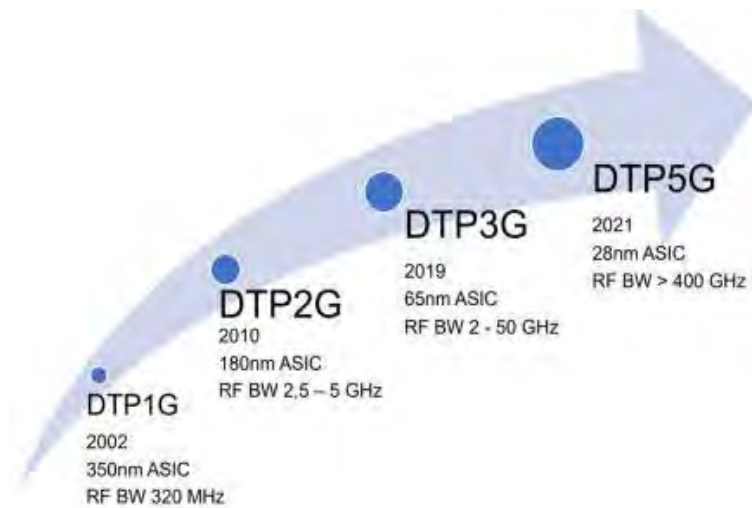
デジタル トランスパアレント プロセッサ (DTP)

(日本ではデジタルパイロードプロセッサ(DPP)と呼称)

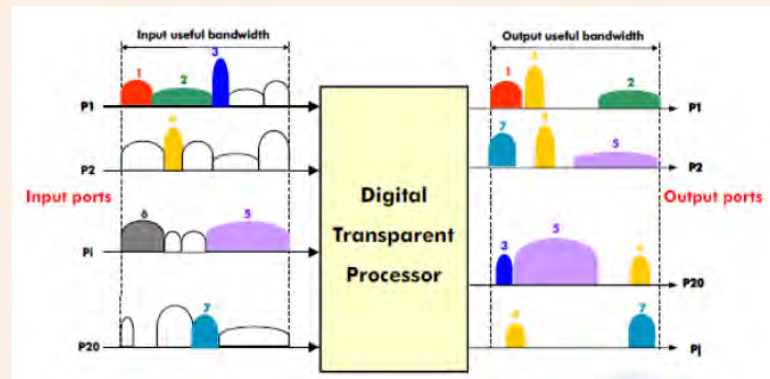
・衛星通信システムのフレキシビリティにおける主要技術の1つは、需要に従って様々なカバレッジエリアの衛星キャパシティを適応させるように、ビーム間のダイナミックなチャネライゼーションとルーティング可能にするDTPである。

→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パ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、「バントパイプ」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

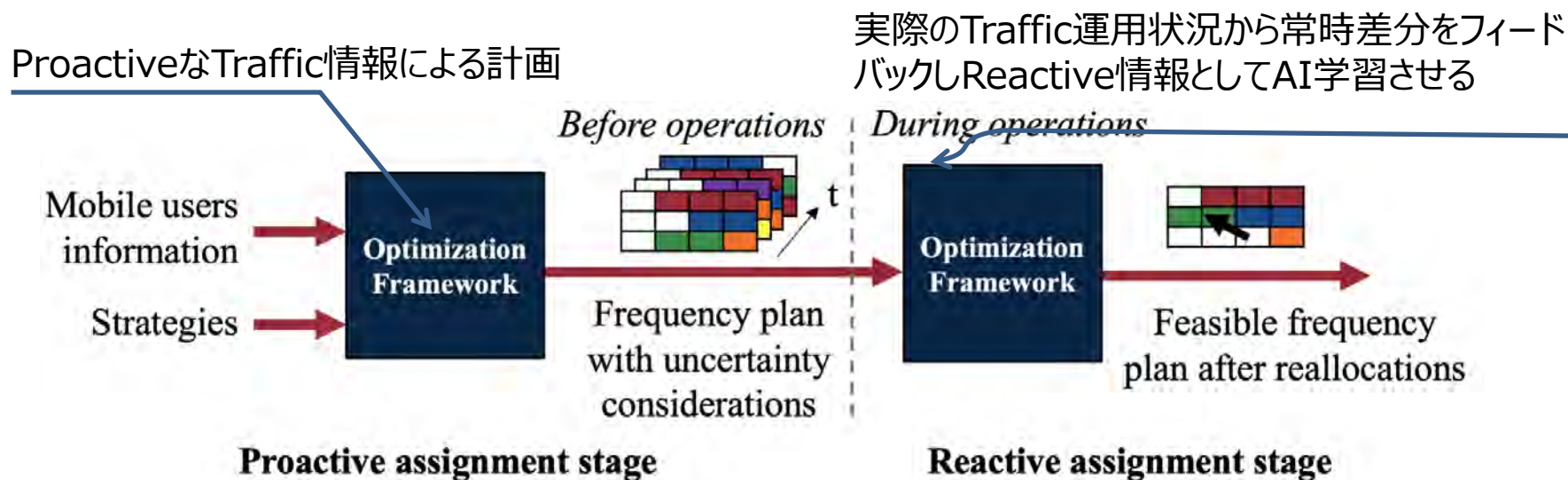
注意: このタイプのチャネライズと接続/ルーティングは、衛星へのテレコマンドによって変更できるソフトウェア構成である。

3-2.3 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-019

[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。**

3-2.3 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-019



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。

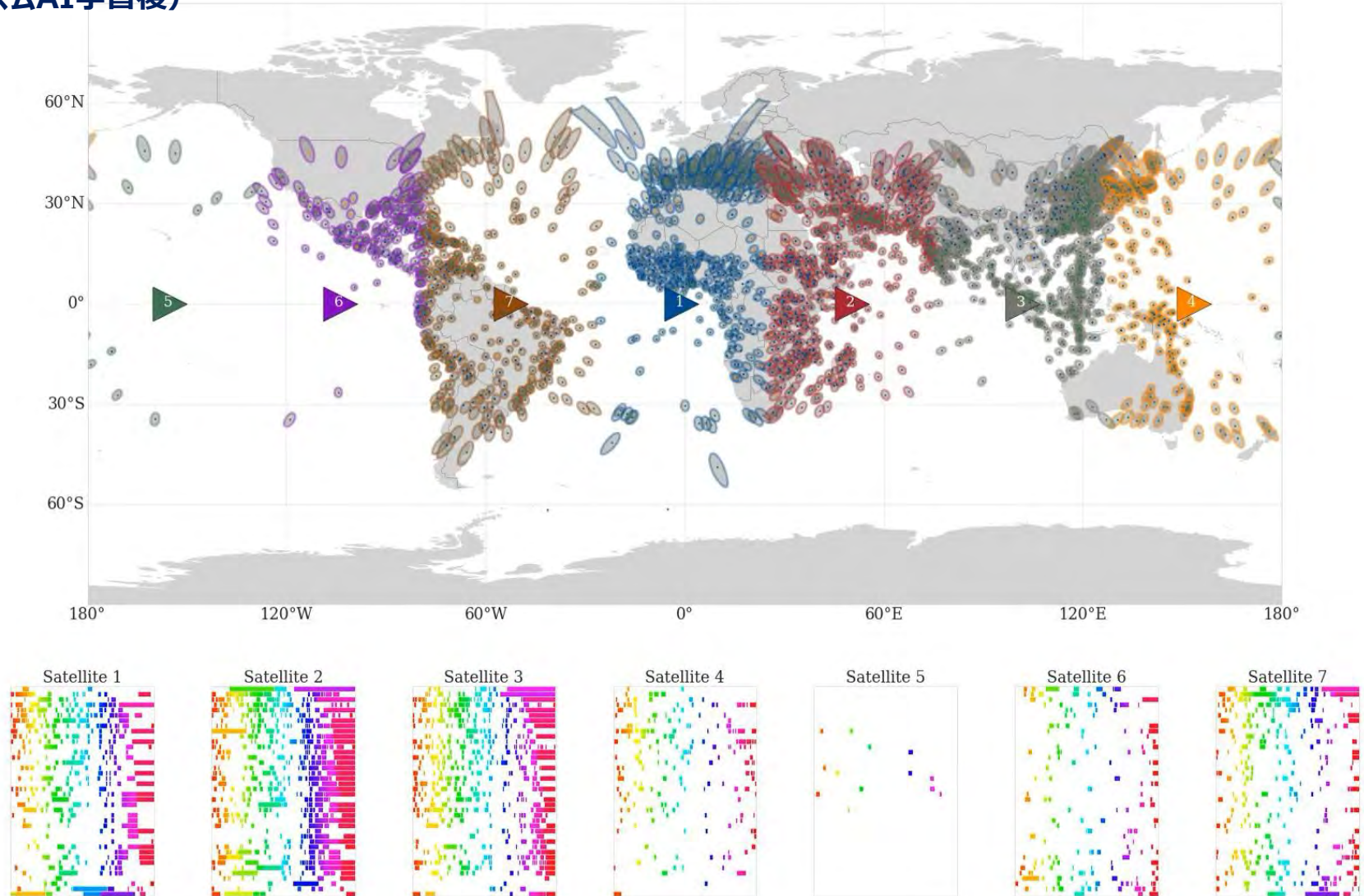
3-2.3 キー技術 (1) サブシステム 事例紹介 MIT:AIベースのMEO通信衛星の動的周波数・ビーム制御(3/4)22-002-R-019

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-Vilalba 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



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-019

【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。

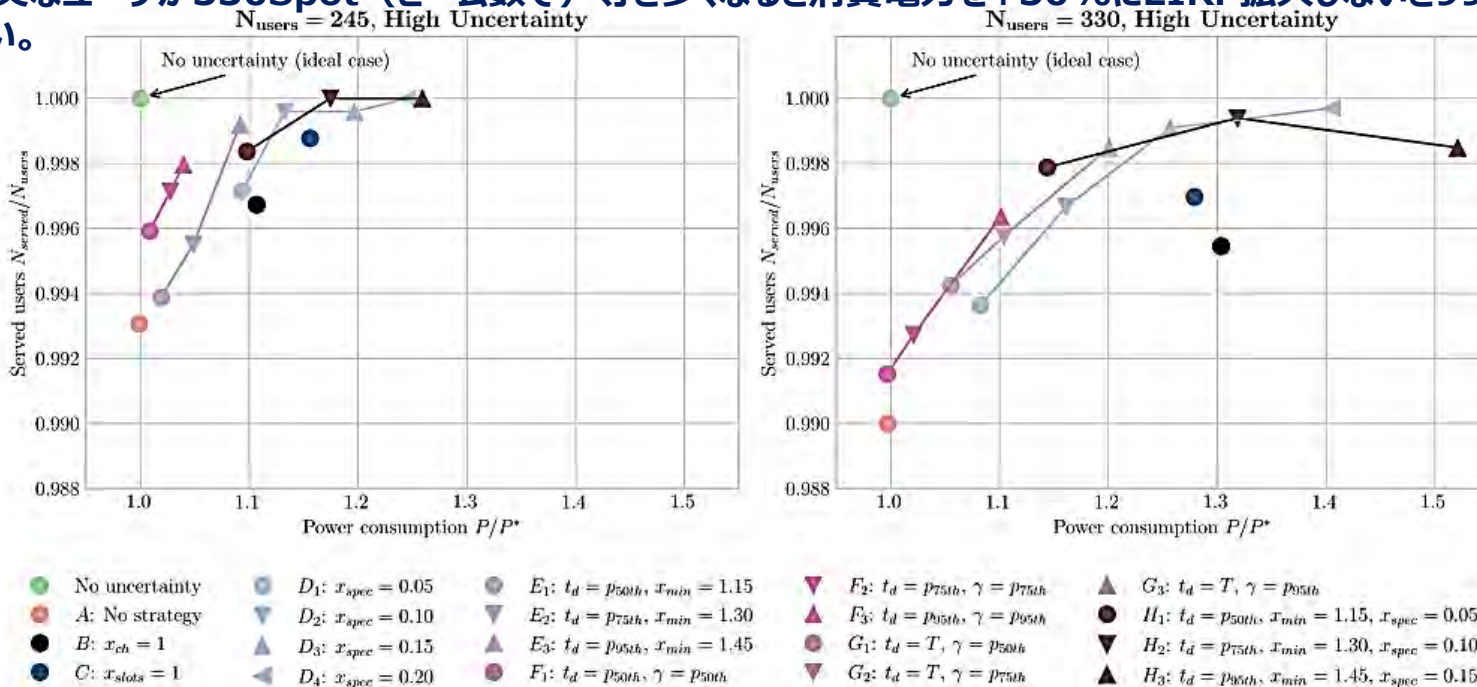


Fig. 6: Average fraction of served users N_{served}/N_{users} and normalized power consumption P/P^* scenarios with 245 and 330 users and high uncertainty (results for 10 runs). P^* is the power consumption of an ideal case with no uncertainty (in green).

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。

3-2.3 キー技術 (2) 機器

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、電力消費量リットがある場合に必要な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。

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モジュール(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

3-2.3 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)

1 2 3 4

22-002-R-019

定義

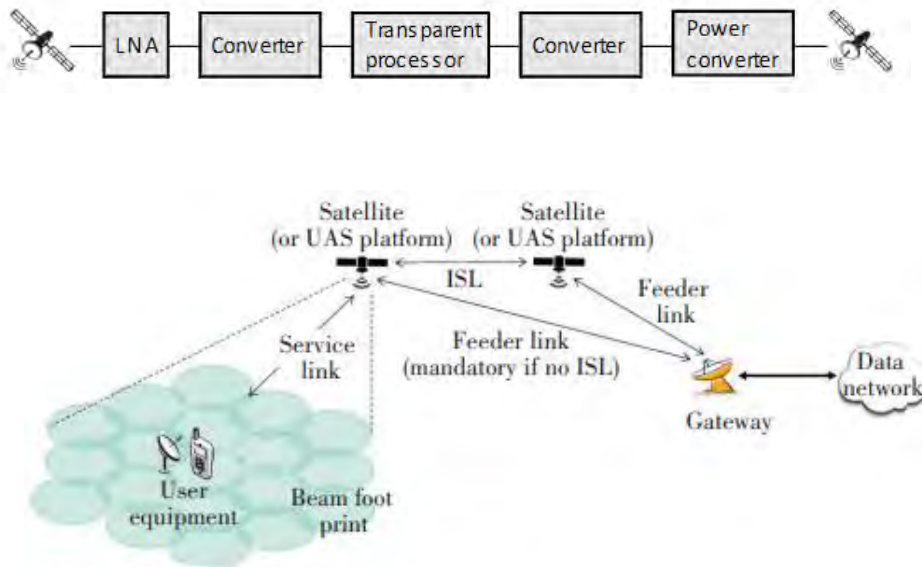
・ ユーザーデータは復調、処理、再変調される。

・ 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

3-2.3 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)

1 2 3 4

22-002-R-019

	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

- 放送からデータ通信への切り替えが本格化し、データ通信需要が高まっている。このブロードバンド対応で衛星システムの形態もGEO主体からLEO/MEOなど需要に応じた形態に多様化。
- 技術的には、軌道上での通信機能の可変性が重要となり、今後も進展すると予測される。

動向分析サマリ

Fact Finding及び 海外動向分析	現状の日本における動向分析	
	強み弱み	
<p>事業動向</p> <ul style="list-style-type: none"> ・従来の通信衛星で主流であったGEOがソフトウェア定義衛星(SDS)に移行している。 ・低遅延を特長として、LEO通信コンステレーション実用化が急加速。 <p>技術動向</p> <ul style="list-style-type: none"> ・事業面の需要から、打ち上げ後も軌道上で通信機能の可変性を要求され、ソフトウェア定義型衛星(SDS)、同ペイロード(SDP)が実用化されつつある。 ・通信機能は、現状はデジタル化され、通信帯域の変更が可能(トランスペアレント型)。アンテナもマルチビームの形成が機械式から電子走査式に進展している。 	<p>技術的にはETS-9で開発中</p> <ul style="list-style-type: none"> ・現状では、実績差・性能差は小さくないものの、ETS-9で開発を推進しキャッチアップを図っている。 <ul style="list-style-type: none"> ✓ フルデジタル化ペイロード ✓ Ka帯マルチビームアンテナ ✓ 光ファイダリンク(通信容量大容量化) 	<p>強み</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ マルチビーム用の電子走査式アンテナは防衛用やSARで世界的実績あり。 <p>弱み</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ フルデジタル化ペイロードのキーデバイスが輸入品。高額かつ長納期など入手性に難あり。 ✓ 継続的な開発体制の構築が必要。

日本における重要項目と目標とすべき達成レベル

- データ通信需要の高まりとともに、通信需要の変動に対応する可変性が求められており、以下の開発が必要と考えられる。
- 継続的開発項目候補**
- 1.通信ペイロード技術**
 - トランスペアレント型開発の遂行
 - ノントランスペアレント型の開発
 - 2.通信プロセッサ関連技術**
 - デジタル通信プロセッサ
 - デジタルビームフォーミング
 - 衛星内フォトニクス伝送
 - 3.電子走査アンテナ技術**
 - DRA型:広角・低利得
(Direct Radiative Antenna)
 - PAFR型:狭角・高利得
(Phased Array-Fed Reflector)
 - 4.構成通信機器技術**
 - 小型高効率増幅器
(GaN MMIC/SSPA、小型TWTA)
 - Q/V/W/E、高周波増幅器・受信

3. 報告する調査内容

- 1. はじめに (p3)
- 2. 調査状況全般 (p4)
- 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..... (p6)
 - 3-2 新しい衛星通信システムの調査..... (p33)
 - 3-3 衛星システムIoTの調査..... (p60)**
 - 3-4 衛星間通信による宇宙ネットワークの調査..... (p79)
 - 3-5 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査... (p130~155)
 - 3-6 定常調査・動向調査..... (p156~)
 - 3-7 適宜調査・事実確認..... (p162~)

3-3 衛星システムIoTの調査

(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。
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。
本調査において、日本の強み・弱み等の分析を行うこと。

(調査結果)

- (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・技術に関して調査した。
- (2) GEO・LEO各軌道によるIoTシステム提供の長短所や、下記のような通信方式に関する特徴を調査した。また、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ついても調査した。
 - 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
 - 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した。

3-3 エグゼクティブサマリ

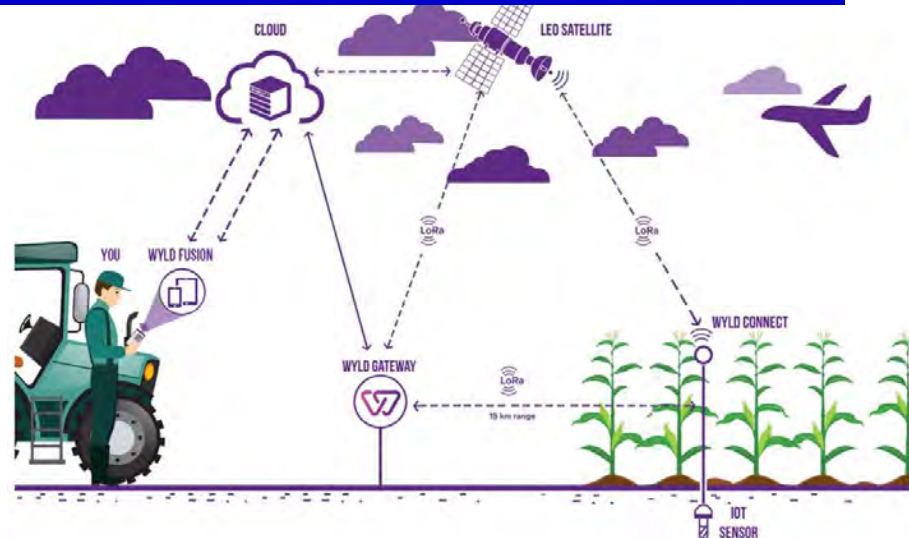
項目	重要なトレンド
3-3.1 衛星IoTの定義とユースケース	<ul style="list-style-type: none"> ▶ IoT(地上IoT+衛星IoT)は農業・海事・物流管理・採掘施設から緊急連絡まで幅広い分野で使われている。 ▶ 衛星IoTは地上の通信網が使えない状況に適用される。
3-3.2 衛星IoTの方式	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 代表的通信方式には、3GPP規格準拠のNB-IoT、LTE-Mとライセンス不要なLoRa、SigFoxなどの方式がある。 ▶ 衛星への接続方式も直接接続と間接接続がある。 ▶ 既存のLEO/GEO衛星を使うケース、新規にLEO衛星コンステレーションを編成している場合もある。
3-3.3 代表的プレーヤー	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 従来のLEO/GEO通信事業者のほか、新規にLEO衛星(マイクロサット、ナノサット)を軌道上で運用する事業者も多い。
3-3.4 日本における衛星IoTの課題	<ul style="list-style-type: none"> ▶ IoT信号を衛星が受信することについて、扱いが不明確になっている。→欧州状況についてコンサルタントからの回答:①実質的には問題とはされていない。②電波規制の割当て外ではある。③地上にある周波数規制下で動作しているのであれば、衛星のITU申請は必要ない。[コンサル見解]④日本の行政機関とさらに話し合うことをリコメンドされた。
3-3.5 強み・弱み分析	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 災害時の遠隔地域の状況モニタや、通信経路の確保に適しているのではないだろうか。 ▶ 国内でのアップストリーム側の開発が未着手の一方、5G以降の進展により、国内市場が海外勢に席卷されることはないだろうか。 ▶ 手段として衛星IoTがあることは広く周知して全体システムの中の一手法として使用することはできるのではないだろうか。

3-3.1 衛星IoTの定義とユースケース

22-002-R-019

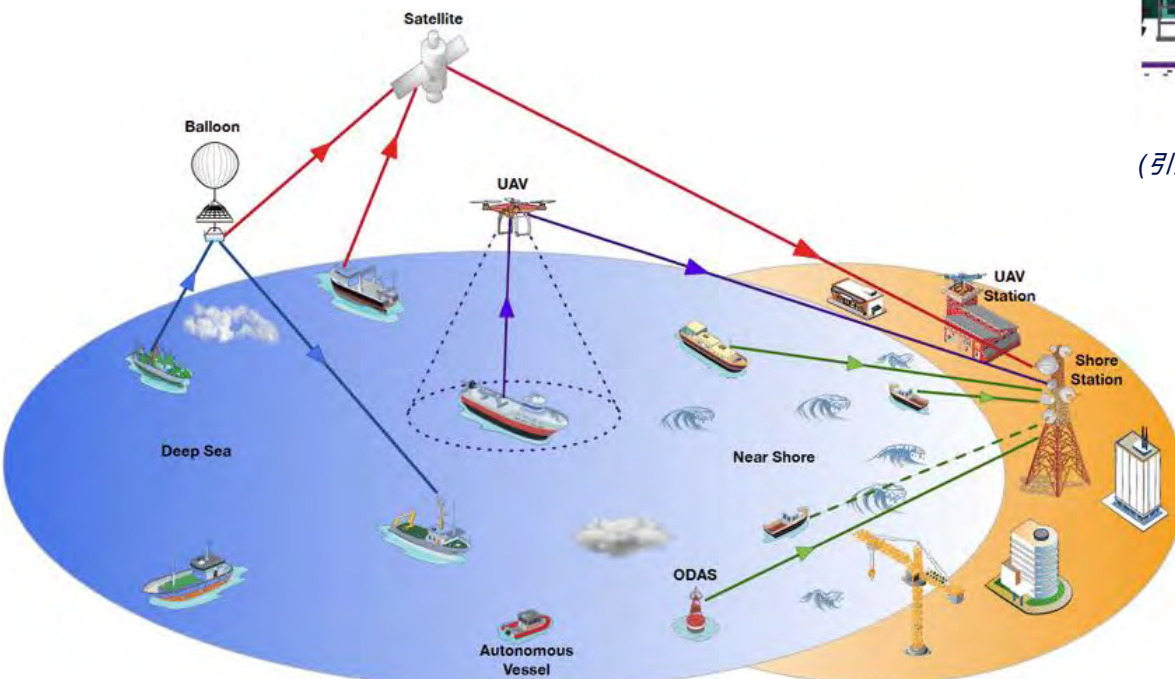
IoTは様々な用途があり、定義が覆う範囲は広い。M2M技術にも通じている。衛星IoTは一手法。

- Machine-To-Machines (M2M)技術から発展。
- 本報告書では下記のような機器を称する。
「対象とするモノが情報を交換できるようにする機器——たとえば電子回路やソフトウェア、センサー、接続機能などを備えた産業機器のような機器——によって構成されるネットワーク」
- 地上の通信網を利用する地上IoTがあり、これと区別して、衛星システムIoT(衛星IoT、宇宙IoT)と称する。



使用事例: 農業用でのセンサー接続

(引用元: [Connecting Sensors for Agriculture | LPWAN for Agritech | Wyld Networks](#))



各種無線通信技術で実現する海事(IoT)通信の例

(source: Cellular Communications in Ocean Waves for Maritime IoT by Y.HUO, C.DONG, & S.J. BEATTY)

主な用途

- スマート農業・畜産業・漁業
- 海事
- 輸送・物流管理
- 採掘施設 (石油・天然ガス・各種鉱山)
- 再生可能エネルギー 風力や光量等のIoTモニタ
- 緊急連絡・救急通報
- 科学・環境 野生動物追跡、海洋環境・気候モニタ等

出典:kineis HP, Sateliot HP

出典:Euroconsult



3-3.1 衛星IoTの定義とユースケース 地上IoTとの比較(1/2)

地上IoTに対して衛星IoTはカバー範囲が広く(数千km)、接続機器も数万台接続可能。

地上IoTと衛星IoT 形態の比較

	地上 IoT	衛星IoT
定義	地上型IoT/WSN (Wireless Sensor Network) は、インターネット、モバイル通信網、プライベートネットワークなどの地上型ネットワークを通じてデータを伝送する。	衛星IoTは、宇宙を拠点とした情報ネットワークでデータを伝送する。
カバレッジ	地上波ネットワークに依存 (遠隔地、海、海洋等ではカバレッジなし)	衛星ネットワークはより広い範囲をカバー可能 →遠隔地やアクセスしにくい場所でのIoT接続要求に対応可能 (地上波ネットワークは地球上の約15%~20%しかカバーしていない)
ベースステーションのカバレッジ	数十km	数千km
ベースステーションへの接続ノード数	数百規模	数万規模
インターノード・リンク	あり	安定したリンクはなし
ノードと基地局間の共通接続モード	インターモードリンクによるマルチホップ ^o 接続	直接接続

3-3.1 衛星IoTの定義とユースケース 地上IoTとの比較(2/2) 利点と課題

衛星IoTは、地上IoTと相補的に運用され、特に遠隔地・広域でのIoTに適している

	地上IoT	衛星IoT
利点	<ul style="list-style-type: none"> - 衛星IoTよりもレイテンシが良い。(地表から衛星までの間を中継して戻ってくるため、これは衛星IoTの制限となりうる) - ネットワークの修理やメンテナンスがあまり複雑ではない - 接続が天候に左右されにくい。(雨や雷、吹雪などの気象条件は、衛星の接続に影響を与える可能性がある) - 地上波のIoTは衛星のIoTよりも発展している。そのため、ユーザー一人当たりの帯域幅はそれほど制限されない。 	<ul style="list-style-type: none"> - 遠隔地の資産に接続——広域化とブロードバンド接続(例:海洋) - センサーネットワークと拡張カバレッジの使用 - より高い信頼性 —— ハブステーションやユーザー端末に暗号化ユニットを使用することで、安全な通信を提供。衛星IoTネットワークは、一般に独自のクローズドシステムとして提供されるため、信頼性が向上し、より高いセキュリティを提供。 - 相互接続されたオブジェクト間のデータ交換がより高速でできる - 重要なアプリケーション(高可用性が必要)に対して代替の冗長経路を提供できることを考慮したリーズナブルなコスト統合化
欠点	<ul style="list-style-type: none"> - 衛星IoTに比べ、カバー範囲が狭い - 衛星IoTと比較してセキュリティが低い 	<ul style="list-style-type: none"> - レイテンシが悪いために適用できない用途がある。 - 地上IoTと比較して、レイテンシーが大きくなりうる。 - 気象条件や環境条件(都市部の高層ビルなど)は、衛星の接続性に影響を及ぼしうる。これにより、接続の質への影響、遅延増加の恐れあり。 - 衛星からの信号は、特に都市部では建物の影響により減衰されやすい。 - ユーザーあたりの帯域幅が制限されることがあり、通常、計画に基づいて割り当てられる。このため、衛星インターネットは他の選択肢に比べて高価であり、他のタイプの接続が利用できない場合に有効。 - 低帯域の衛星インフラをLPWAアプリケーションで再利用する可能性

衛星 IoT は地上波 IoT を補完するという観点で開発されている。この方針に従い、衛星とセルの接続の標準と構成は、両方のネットワークのハイブリッドを可能にする。これにより、両方のネットワークと技術の利点を活用することができるようになる。衛星IoTは、地上波が利用できない、あるいはセットアップができない場合に利用される。

3-3.2 衛星IoTの方式① 代表的通信方式の比較 (1/2)

IoT(地上、衛星)の主要通信方式は4種。2種はライセンス不要、他の2種は3GPP準拠。

IOT protocol	Frequency	Modulation	Bandwidth	Throughput	Latency	Range(*)	Power consumption	Applications
LoRa	License-free sub-gigahertz radio frequency band: - [864-870/873MHz] (Europe) - [915-928MHz] (South America) - [902-928MHz] (North America) - [865-867MHz] (India) - [915-928MHz] (Asia) - 2.4GHz (Worldwide)	CSS	125kHz or 500kHz for uplink channels and 500kHz for downlink channels	270 kbps	62ms ~ 1.48s [Uplink] 1~2.2 s [Downlink]	Up to 5km in urban areas and up to 10km in perfect conditions	Up to 10 years of battery lifetime	Smart parking, waste management, water level, air quality control...
SigFox	Unlicensed bands worldwide with radio frequency ranging from 862 to 928MHz. 7 zones with Sigfox radio configurations (cf. Radio Configurations Sigfox build) - 868MHz (Europe) - 902MHz (USA) - 433MHz (Asia)	BPSK	100Hz in the European area for uplink and 600Hz for USA. For the downlink, the channel bandwidth is 1.5kHz	Up to 1kbps	固定送信時間 6.24s [Uplink] 20-50s [Downlink]	Up to 10km in urban area and up to 20km in rural area	Up to 5 years of battery lifetime	Stock management, smart parking...
NB-IoT (要免許)	LTE In-band , guard band and GSM re-purposing	QPSK	180-200kHz	60kbps uplink and 30kbps downlink (note: with 3GPP release 14 (Cat-NB2), if the network supports it, the throughput might be 169kbps uplink and 127kbps downlink)	1.6 to 10s	1km in urban areas and 10km in rural areas	Up to 10 years of battery lifetime	Static, low throughput applications requiring low power and long-range: smart agriculture, smart city...
LTE-M (要免許)	LTE In-band	FDMA	45MHz (narrower than for LTE, around 20MHz)	375kbps uplink and 300kbps downlink	10ms to 4s	1km in urban areas and 10km in rural areas	Up to 10 years of battery lifetime	Simple voice usages, Supply chain tracking, wearables (ex: smart watches), patient monitoring...

(Range*) 衛星信号はバックホールを通過するため、バックホールのカバーエリアのみを考慮し、範囲は限定される。

3-3.2 衛星IoTの方式① 代表的通信方式の比較 (2/2)

IoT(地上、衛星)の主要通信方式は4種。2種はライセンス不要、他の2種は3GPP準拠。

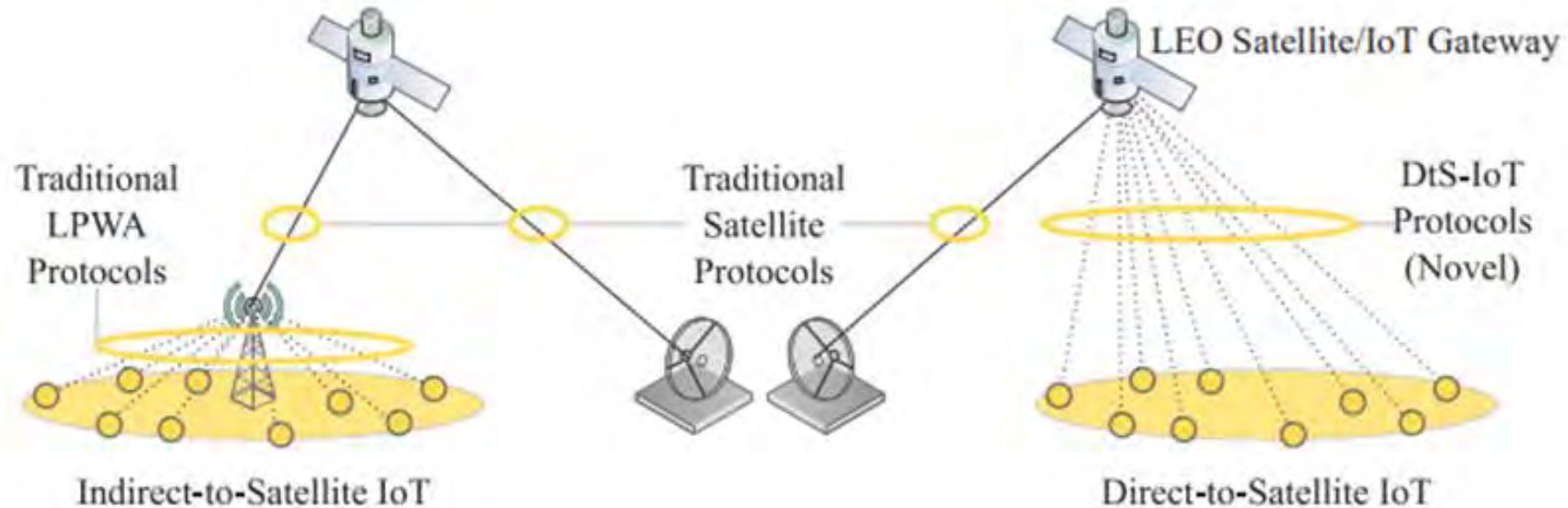
IOT protocol	特徴
LoRa (unlicensed LPWAN、Long Rangeに由来)	ノンセルラーLPWANの技術標準 である。バッテリー駆動のデバイスを対象とし、複雑なローカルインストールを行うことなく、IoTソリューション間の相互運用性を実現する。さらに、LoRaは 免許不要の周波数帯で動作 する。LoRaの物理層は、CSS (Chirp Spread Spectrum) 変調を使用して、 干渉、マルチパス、フェーディングを処理 する。LoRaは、 NB-IoTネットワークよりも広いネットワークカバレッジを持つ可能性 がある。例えば、総面積約30,500km ² のベルギーでは、LoRaネットワークの展開は、 わずか7つの基地局で国全体をカバー している。
SigFox (免許不要のLPWAN)	グローバルなサービスプロバイダーや大手メーカーからスタートアップ企業、シングルユーザーまで幅広いIoT顧客向けの デバイス・ツール・クラウドアプリケーション用 の低消費電力システムである。 (仏トールーズに拠点を置く通信事業者「SIGFOX社」が2009年から提供している)
NB-IoT narrowband IoT (licensed LPWAN)	コストと電力効率の面で LTE-Mの性能を大規模なIoTデバイス群に拡張 することを目的とする (NB-IoTセルあたり最大 50,000台 のIoTデバイス)。3GPPによって設計された。これは、 ライセンスされた無線周波数で動作する新しいエアインターフェースと考えることができる 。この技術は、 LPWA技術よりも高いデータレート を確保することができる。「この技術は、 カバレッジの向上、膨大な数の低スループットデバイスのサポート、低遅延感度、超低デバイスコスト、低デバイス消費電力、および最適化されたネットワークアーキテクチャを提供します 」(参照：NB-IoT explained: a complete guide to Narrowband-IoT (i-scoop.eu))。据え置き型のIoTソリューションに適している。
LTE-M (licensed LPWAN)	セルラーLPWA技術の一つ で、3GPP標準化団体で発表された規格(Release 13)である。この技術により、 複数のGSMバンドで高効率な接続が可能 になる。 (GSM: global system for mobile communications)

3-3.2 衛星IoTの方式② 間接接続と直接接続 (1/2)

衛星IoTにも関節接続方式と直接接続方式がある。一長一短があり用途によって使い分けられる。

衛星への接続方式の違い——直接接続/間接接続

接続方式	間接接続方式 Indirect-to-Satellite	直接接続方式 Direct-to-Satellite
利点	スループットがより高い (大容量バックホールをもつため)	柔軟性が高い 接続しやすい
欠点	<ul style="list-style-type: none"> バックホールのための専用基地局が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 既存のプロトコルの見直しや適応が必要 データレートが低い IP対応でインターネットとの連携が必要

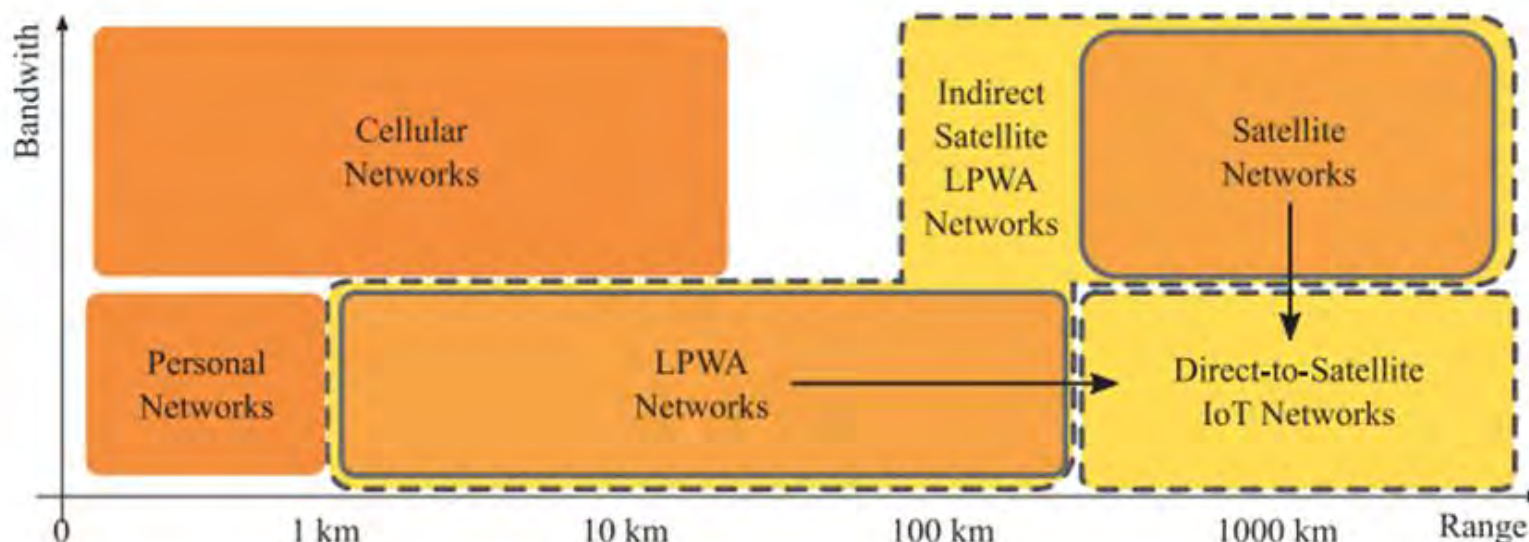


3-3.2 衛星IoTの方式② 間接接続と直接接続 (2/2)

衛星IoTの直接接続: 関節接続と同等のカバー範囲で、かつ狭帯域で運用できることが検討されている。

通信方式の帯域幅とカバレッジ範囲による比較

- 最近の研究では、Direct-to-Satellite IoTアーキテクチャのために、衛星リンク上でLPWAN技術を使用することの実現可能性が示されている。
- 一例として、LEO衛星IoTコンステレーションスペクトラムをLoRaやNB-IoTなどの地上波IoTシステムと共有することが考えられる。
- 別の実験では、LEO衛星の展開距離と考えられる250kmまでの長距離リンクにおけるLoRaのパフォーマンスが定義されている



パーソナル、セルラー、LPWA、衛星ネットワークに必要な帯域とレンジキャパシティの比較

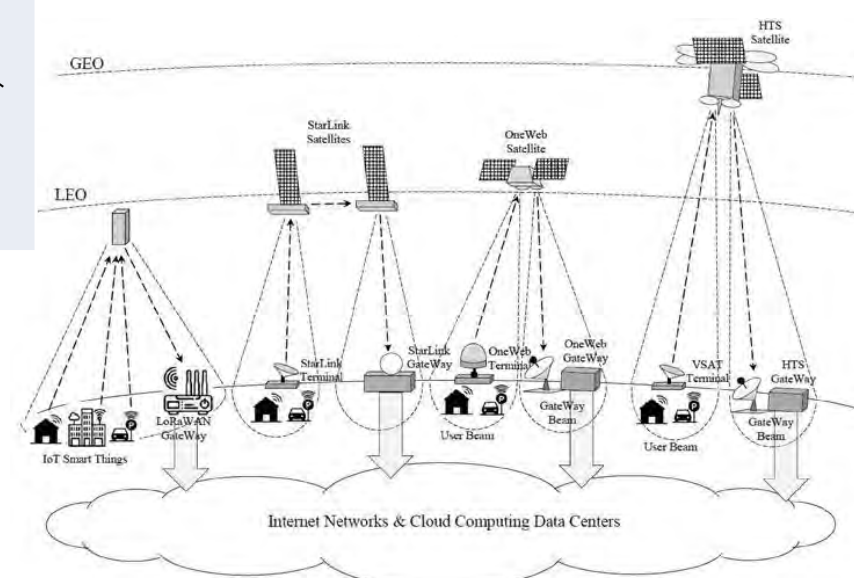
(source: Direct-to-satellite IoT – A survey of the State of the Art and Future Research Perspectives by J.A. FRAIRE & all.)

3-3.2 衛星IoTの方式③ LEO IoTとGEO IoT

衛星IoTでLEO衛星を使う場合とGEO衛星を使う場合がある。用途・目的によって選択される。

LEO IoTとGEO IoTの比較

LEO IoT	GEO IoT
特徴	
<ul style="list-style-type: none"> - 低レイテンシー - 距離の短縮：スループットの向上が可能 - より複雑なシステム コンステレーション - 全体が重くなる - ペイロードがより複雑になる可能性がある - コンステレーション全体のスループットが向上 	<ul style="list-style-type: none"> - 高レイテンシー - 最弱のユーザー端末とのリンクバジェットを閉じることがより難しい - ペイロードがよりシンプルになる - アンテナビームは、ホットスポットエリアに連続的に向けることができる
結果	
<ul style="list-style-type: none"> - 地球をカバーするために何十、何千もの衛星を必要とする(システム要求による) - 運用がより大がかりになる - 障害や干渉に対して、高い堅牢性と復元力 - 長期的な維持に非常にコストがかかる - 市場によっては、多くの未使用のダウンタイムが発生する (軌道上のデューティサイクルの70%が海上で未使用となる) 	<ul style="list-style-type: none"> - 全体としてより安価 - 設置・運用が全体的に簡単 - LEOより復元力が低い - より最適なビーム最適化 (ビームは常にホットスポット領域に向けられる)



3-3.3 代表的プレーヤー (1/4)

衛星IoTの事業者は、専門メーカーからLEO/GEOオペレータまで幅広い。

IoT機器	適用分野	使用周波数	レイテンシ	保有衛星/運用状況	通信方式	特徴, データシート, リンク例
Kineis (France)	IoT/M2M, AIS	UHF bands around 401MHz	-	7 in-orbit (25 satellites planned) / Prototype development	LoRaWAN (Hybridation LoRaWAN et Kinéis – Kineis)	Two-way communications, 10 satellites include a secondary AIS payload Connectivity – Kineis Kineis products presentation (2020): Webinaire: Démarrer avec l'IoT spatial (kineis.com)
Iridium (NEXT) (USA)	Internet, IoT/M2M, Orbital Data Relay, Constellation-as- a-service	L band (1-2GHz), Ka band (18 - 26.5GHz)	40- 50ms	75 satellites (66 satellite operational and 9 in-orbit spares) / Launched	LoRaWAN backhaul communications over Iridium (IoT takes to the skies as Iridium looks to get in on the action TelecomTV) LTE	Iridium Website Iridium Edge - Satellite IoT Device Satellite Phone Store
Globalstar – Second generation (USA)	Internet, IoT/M2M, Orbital Data Relay	11.5MHz (全米) – L, S, and C bands	-	25 in-orbit (41 satellites planned) / Launched and replenishing	LTE	IoT presentation from Globalstar: CompanyOverview_Partnership.pdf (globalstar.com)
Orbcomm – OG2 (USA)	IoT/M2M, AIS	137 to 401 MHz	-	50 in-orbit (52 satellites planned) / Launched and replenishing	LPWAN	Fully dedicated to M2M, Space-as-a- service New: ST 9100 for Custom IoT Solutions ORBCOMM Blog ORBCOMM Antennas Manufacturer 2J Antennas (2j-antennas.com)

3-3.3 代表的プレーヤー (2/4)

衛星IoTの事業者には、SpaceXに買収されたSwarm(米)を含む。GEOオペレータのInmarsatも事業参入している。

IoT機器	適用分野	使用周波数	レイテンシ	保有衛星/運用状況	通信方式	特徴, データシート, リンク例
Fleet Space (Alpha) (豪州)	IoT/M2M		-	7 in-orbit (140 small satellites planned) / Launches ongoing	LPWAN	-
Astrocast (スイス)	IoT/M2M	L-band (1-2 GHz)	Max. 15min	12 in-orbit (80 satellites planned) – First launch in 2018 / Launches ongoing	LPWA (NA)	Inter-satellite links, nanospace propulsion Technology - Astrocast - Taking IoT Further
Myriota (豪州)	IoT/M2M	UHF/VHF	-	2 in-orbit (50 satellites planned) / Prototypes launched	-	Run unique, patented software which provides reliable, direct-to-satellite IoT connectivity Myriota-Product-Brief-Final.pdf
Swarm (米)	IoT/ M2M	S band	-	Approx. 150 small satellites « SpaceBEE » (170 satellites planned) / Launched and replenishing	-	DA-19-1044A1.pdf
Inmarsat ELERA /Global Xpress (英)	IoT/M2M	Ka-band, L-band, S-band	-	14 satellites	-	ELERA IoT (inmarsat.com) Global Xpress (inmarsat.com)

追加情報：スペイン・バルセロナに拠点を置く新興企業**Sateliot**は2023年2月、5G IoT対応衛星の打ち上げを予定している。同社は5G IoT衛星コンステレーションを提供する業界初の衛星オペレーターとしての地位を確立していきたい考えだ。(2023年1月23日付) [<https://eetimes.itmedia.co.jp/ee/articles/2301/23/news044.html>]

3-3.3 代表的プレーヤー (3/4)

衛星IoTの接続プロバイダーは300社ある。第一世代LEO通信衛星コンステレーションも事業展開。

- 衛星IoT接続プロバイダーは300社存在する。
- 代表的企業: Iridium, Globalstar, Inmarsat, Thuraya et Orbcomm, Eutelsat et Telesat, Kineis, GomSpace, Aerial & Maritime, AisTech, Analytical Space, Astrocast, Blink Astro, eightyLEO, Commsat, Fleet Space Technologies, Helios Wire, Hiber Global, Hongyan, Guodian Gaoke, Kepler Communications, Lacuna Space, Myriota, NSL Comm, OQ Technology, Swarm Technologies, Spire Global, Sky and Space Global, SAT4M2M et Xingyun.

Globalstar (72機運用。うち24機は第二世代。25年に17機打上げ予定)

- IoT製品として、SPOT（主にパーソナル・トラックングや物流企業で使用される双方向製品群）と一方向製品の2種類を提供。
- 現在、同事業者は、自動監視と制御を提供することで、産業用IoT市場により良いサービスを提供するための双方向製品を開発している。

イリジウム (75機運用)

- スペースIoT、および75機の衛星を使ったCaaS (Constellation As A Service)で知られている。
- 航空、漁船、重機などの産業用IoTアプリケーションだけでなく、最も急成長しているパーソナルトラックングを含む様々な市場をターゲットにしている。
- イリジウムエッジ端末により、地上ネットワークとのハイブリッド接続も可能。

Orbcomm (ARGOSなどのLEO衛星コンステレーションを使用)

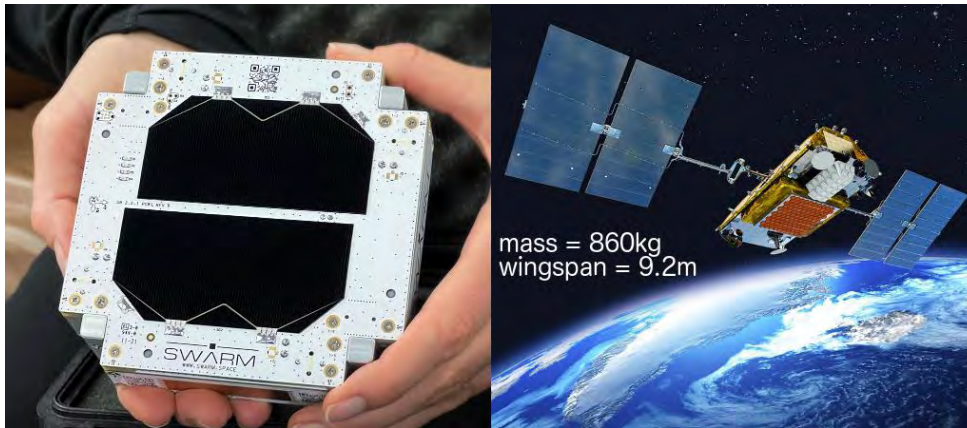
- 接続されたIoTデバイスの数を考慮すると、主要なMSS衛星事業者で、ネットワーク、デバイス、デバイス管理ソリューションを提供している。
- 現在、OG2 VHFコンステレーションを使用し、Inmarsatと提携し、主に輸送・物流市場にサービスを提供している
- Orbcommは、多くの携帯電話事業者とのパートナーシップにより、地上波IoT接続も提供しており、ハイブリッドネットワークソリューションの分野でも有数の事業者である。
- さらに、同社は2022年に新しいOGxコンステレーションを立ち上げ、Inmarsatとの提携を更新して、広帯域データパケットと低コスト端末の組み合わせを提供することを計画している。

3-3.3 代表的プレーヤー (4/4)

スタートアップ企業各社も積極的に事業展開をしている。

Swarm (米)

- 2021年にSpaceXに買収された。
- 約150機の小型衛星 " SpaceBEE " を高度450-550kmに打上げた。170機の衛星コンステレーションを目標としている。
- ストア&フォワード方式で宇宙で最も小さい運用衛星 (1/4U)を保有。



Swarm and Iridium satellites (source: [Swarm vs. Iridium For Satellite IoT | Project Lab \(nootropicdesign.com\)](https://www.projectlab.com/blog/swarm-vs-iridium-for-satellite-iot))

Kineis (仏) (7機の衛星 (ARGOSシステム) を運用)

- 2018年にCLSによって設立。
- 産業用IoT市場やAISサービスによる船舶監視をターゲットにしている。
- 2023年にRocket Labとともに25機のナノサットを打ち上げ、Argosコンステレーションを改良し、15分ごとに受信データをリフレッシュできるようにする計画である。

Astrocast

- 2014年設立。複数企業からプライベート資金を調達。
- 2021年には、オスロのユーロネクスト成長市場で4300万ドルを調達して上場し、受け取った資金総額は7000万ドルに増加。
- 幅広い産業分野を対象としており、主に農業、環境、海運の領域で顧客にサービスを提供。

Fleet (豪)

- 総額3740万ドルを調達。
- セミハイブリッドネットワークを使用して地上波市場にサービスを提供。
- SEA Gasと契約し、同社の700kmのパイプラインを衛星でバックホールされたLoRaセンサーでカバーする。

3-3.3 代表的プレーヤー 事例紹介 China HEAD Aerospace (1/2)

22-002-R-019

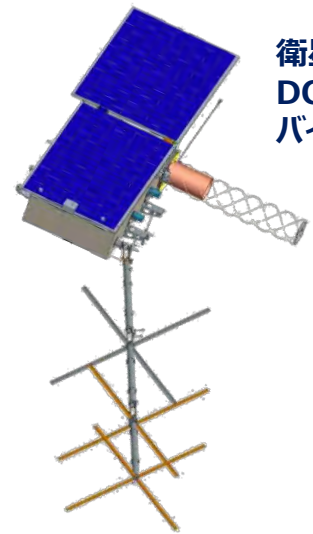
中国メーカーも衛星IoT事業を世界展開している。

[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., Ltd.

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。



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



衛星：UHFアンテナ
DCSシステムによる収集とデ
バイスへのコマンド機能

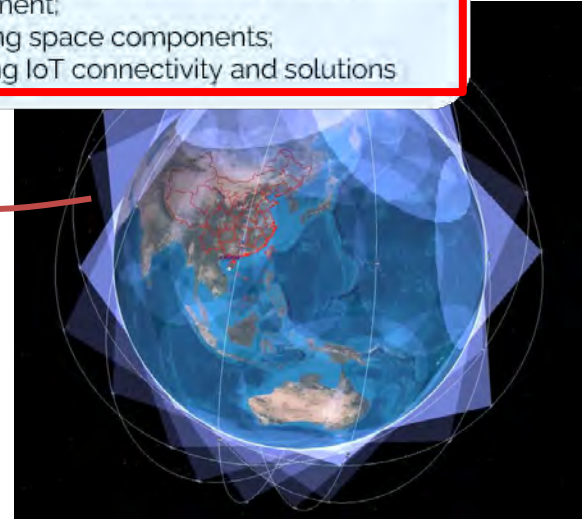


ユーザ端末



スマートメータ

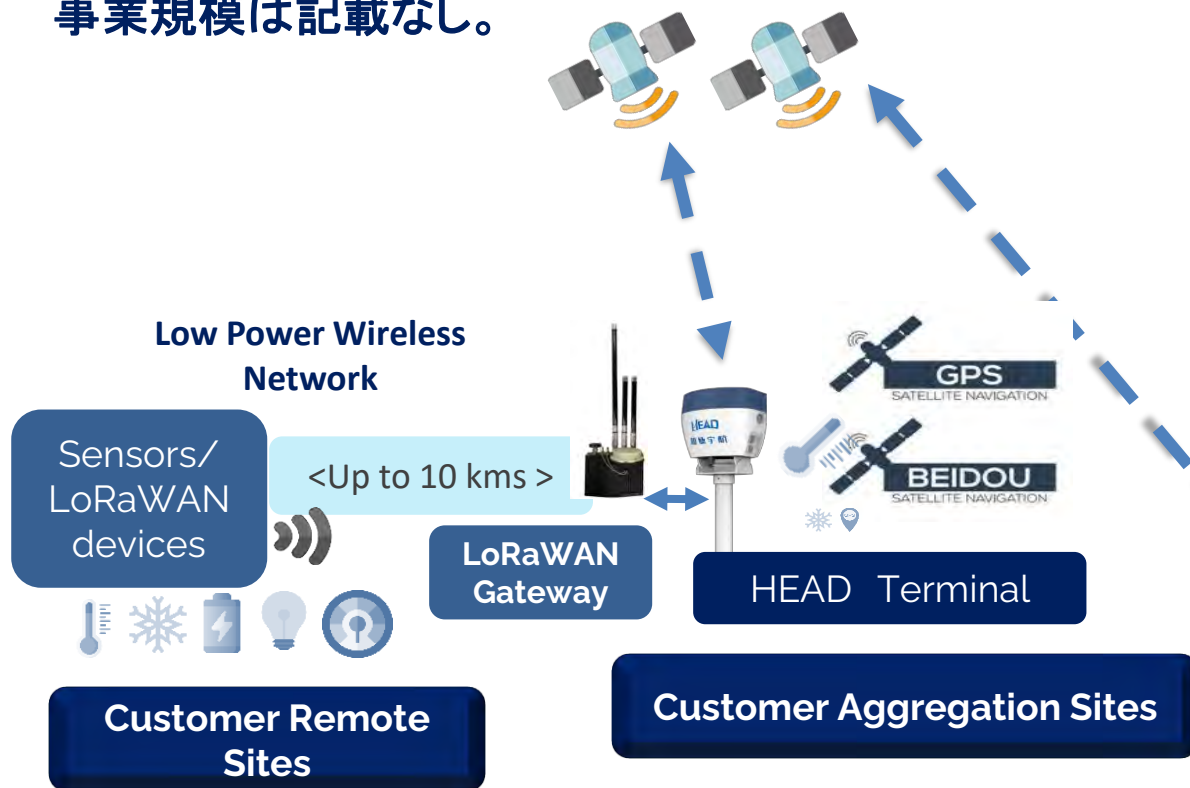
- **スマート農業**
- **プラントモニタ**
- **海洋アセットのモニタ**
- **交通や物流モニタ危険物やその輸送モニタ**
- **建設・鉱山・鉄道：橋梁等のモニタ**



衛星IoTサービス Skywalker

Skywalker Constellation

事業規模は記載なし。



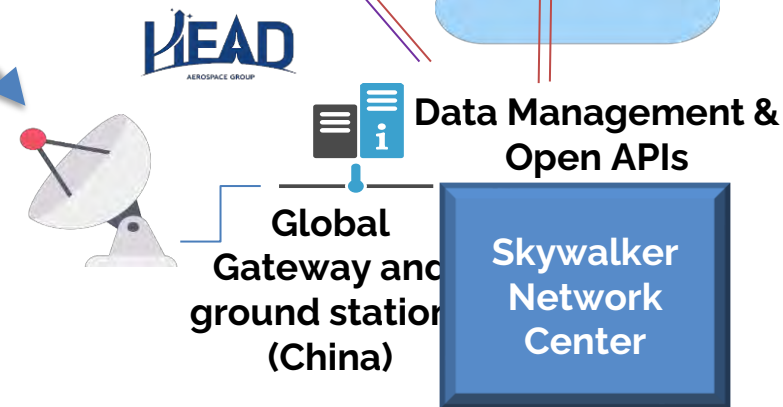
HEAD社自身によるアプリケーション

①HEAD Standard applications



ユーザへローデータ配信

②Customer Applications



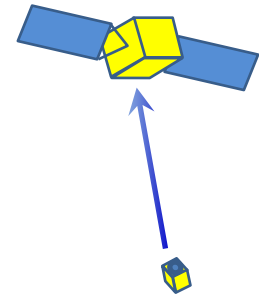
[出典:73rd International Astronautical Congress (IAC), Paris, France, 18-22 September 2022. IAC-22-B2.3.x73016
 "Advanced Space-based Internet-of-things (IoT) constellation bringing high revisit & low latency communication services"
 Dr. Wei Sun, China HEAD Aerospace Technology Co.]

3-3.4 日本の衛星IoTの課題

22-002-R-019

国内の衛星IoT事業は実証実験段階。事業環境は整いつつある。課題は何か？

- IoTからの信号を受信するための衛星(LEOコンステレーション)を構成した実績がない。
- IoTからの信号を衛星が受信することについて、扱いが不明確になっている。
 - 欧州状況に関する海外コンサルタントのコメント要旨 (詳細下記)
 - 地上での使用を超える干渉は起こさず、特に問題とはされていない。
 - 電波規則の割当て外ではある。
 - 地上にある周波数規制下で動作しているのであれば、衛星のITU申請は必要ない。[Satconsult見解]
- 今後のIoT事業推進の観点からは、過去の類似事例としてAIS*¹での対応が参考になり、各事業者の最適解を行政機関と相談し、打開策を検討する動きが重要。



出典1

*1: AIS情報使用にあたって「グレーゾーン解消制度」が適用され利用可能となった。

参考 令和3年度にASTECCがSatconsult*に質問した際の回答

(* Satconsult: Euroconsultグループ。技術分野の専門コンサルタント)

衛星によるNB-IoTに関するリコメンド

(Satconsult、周波数エキスパート)

- NB-IoTの場合、IoTデバイスが標準的な地上デバイス(LoRaWANなど)であり、衛星での使用のために何の変更もされていない場合、衛星での信号の受信は、「通常の」地上での使用よりも多くの干渉を引き起こす可能性はないため、実質上問題とはされていないが、電波規則の割り当ての枠外であるため、電波規則のプロセスの中で正式な承認と保護を得ることができていない。つまり、「優先権」や「干渉保護」などの概念を適用することができない。Satconsultの見解では、地上での受信を目的とした信号を変更することなく(強度や変調方式等を変えずに)衛星で受信することに電波法上の問題はなく、衛星での受信とサービスに関してITUへの正式な申請を必要としないとのこと。

当然のことながら、IoTデバイスから衛星へのリンクを実現するために、NB-IoTデバイスを「通常の」地上用の構成(すなわち強度や周波数)から変更する場合は規制の対象になる。

- 日本の専門家会議でも同様の見解が示されているようであるが、日本の行政機関はITUへの申請が必要だと主張している、乃至は海外事例を参考にしたいとのこと。Satconsult見解は、地上波のNB-IoT機器については、既にある地上の周波数規制の下に動作しており、その受信に関しては地上であれ衛星であれ、干渉を起こすものではないため、衛星のITU申請は必要ないとのこと。
- 日本の行政機関の立場は、規制の観点からは合理的ではないと考えており、この件に関しては日本の行政機関とさらに話し合うことをリコメンドすること。

3.3-5 強み・弱み分析

- **小型衛星・超小型衛星の進展とともに普及。地上IoTで対応できない状況・地域に用途拡大。**
- **課題解決の一手段として地上IoTなどと併せて使われることも多く、4G/5G技術との連携が重要。**

動向分析サマリ

Fact Finding及び 海外動向分析	現状の日本における動向分析	
	強み弱み	
<p>事業動向 ・地上のIoTでカバーできない地域での利用が進んでいる。地上通信網の届かない地域やモニタ範囲が数千kmにおよぶ場合など。</p> <p>技術動向 ・IoTプロトコルとしては、3GPP準拠の方式(LTE-M、NB-IoTなど)と、非セルラー系の方式(LoRa、Sigfoxなど)がよく使われている。</p>	<p>IoT活用の一部としての利用が進み始めている。 ・利用するための技術は進んでいる。 (一事例として、「ローカル5G」技術の適用がある。5G規格の一部を用途に合わせて変更することで最適化する)</p> <p>IoT用の小型衛星の製造・打上げの実績はない。</p> <p>衛星がIoTデバイスからの電波を受信することに関して総務省との調整が完了していないため、ビジネスとして成立していないと思われる。</p>	<p>強み ✓ 地上IoTや衛星データを駆使したIoTプレーヤーの存在 ✓ IoTデバイス ✓ ローカル5G対応の技術を有している。</p> <p>弱み ✓ 衛星IoTに適した衛星の製造・運用実績がない。</p>

日本における重要項目と目標とすべき達成レベル

- ・日本では、災害時の遠隔地域の状況モニタや、通信経路の確保に適しているのではないだろうか。
- ・国内でのアップストリーム側の開発が未着手の一方、5G以降の進展により、国内市場が海外勢に席卷されることはないだろうか。
- ・手段として衛星IoTがあることは広く周知して全体システムの中の一手法として使用することはできるのではないだろうか。

重要な技術

- ・3GPP規格仕様 5G リリース17対応の仕様の把握
- ・ローカル5G活用による、現地要求への最適化技術
- ・端末の低消費電力化