

3. 報告する調査内容

22-002-R-019

- 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)

3-4 衛星間通信による宇宙ネットワークの調査

(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た。
- (2) 宇宙ネットワークの構築に必要なデジタル技術について調査した。
- (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。

3-4 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"> ▶ ネットワーク構成事例
3-4.2 宇宙ネットワーク構成要素 (Starlinkを例に)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 衛星・ユーザー端末・ゲートウェイの構成
3-4.3 宇宙NW技術的課題	<ul style="list-style-type: none"> ①再生中継の実施方法 トレードオフ ②ISLホップ数と通信容量の制約 ③ローミング
3-4.4 通信用オンボードプロセッサ (OBP)の検討	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 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。 ▶ 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と考えられた。しかし、詳細検討の結果、両立する可能性が考えられた。
3-4.5 光通信による衛星間リンク (ISL)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 光通信は衛星間通信の主力になりつつある。 ① 光通信の特徴と機器構成 ② 基本機能(レンジング・捕捉・追尾) ③ 光端末の各国取組み状況
3-4.6 強み・弱み分析	<ul style="list-style-type: none"> ▶ JAXA衛星で軌道上実績はある一方、ISLに必要なノントランスペアレント技術の実績が不足している。 ▶ 取り組むべき技術項目案(ロングリスト)を提示した。

3-4 項目の構成

1. 宇宙ネットワーク事例の紹介
 ① GEO/LOE/MEO通信ネットワーク
 ② 観測データの中継
 ③ LEO通信コンステレーション

2. 宇宙ネットワーク構成要素
 衛星・ユーザー端末・ゲートウェイ
 (Starlinkを例に)

5. 光通信による衛星間リンク(ISL)
 ① 光通信の特徴と機器構成
 ② 基本機能(レンジング・捕捉・追尾)
 ③ 光端末の各国取組み状況

① GEO/LEO/MEO
通信ネットワーク

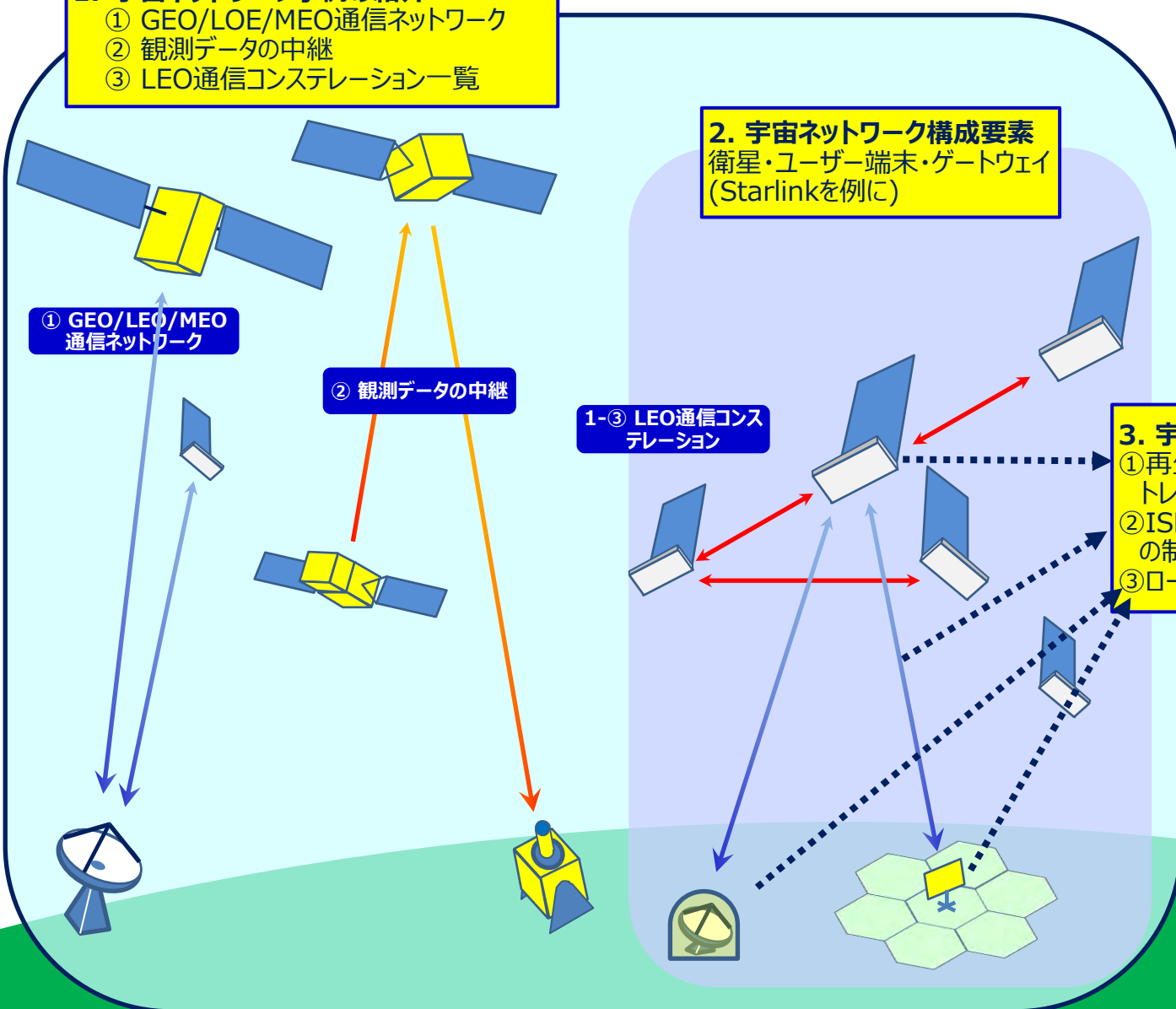
② 観測データの中継

1-③ LEO通信コンス
テレーション

3. 宇宙NW技術的課題
 ①再生中継の実施方法
 トレードオフ
 ②ISLホップ数と通信容量
 の制約
 ③ローミング

4. オンボードプロセッサの検討

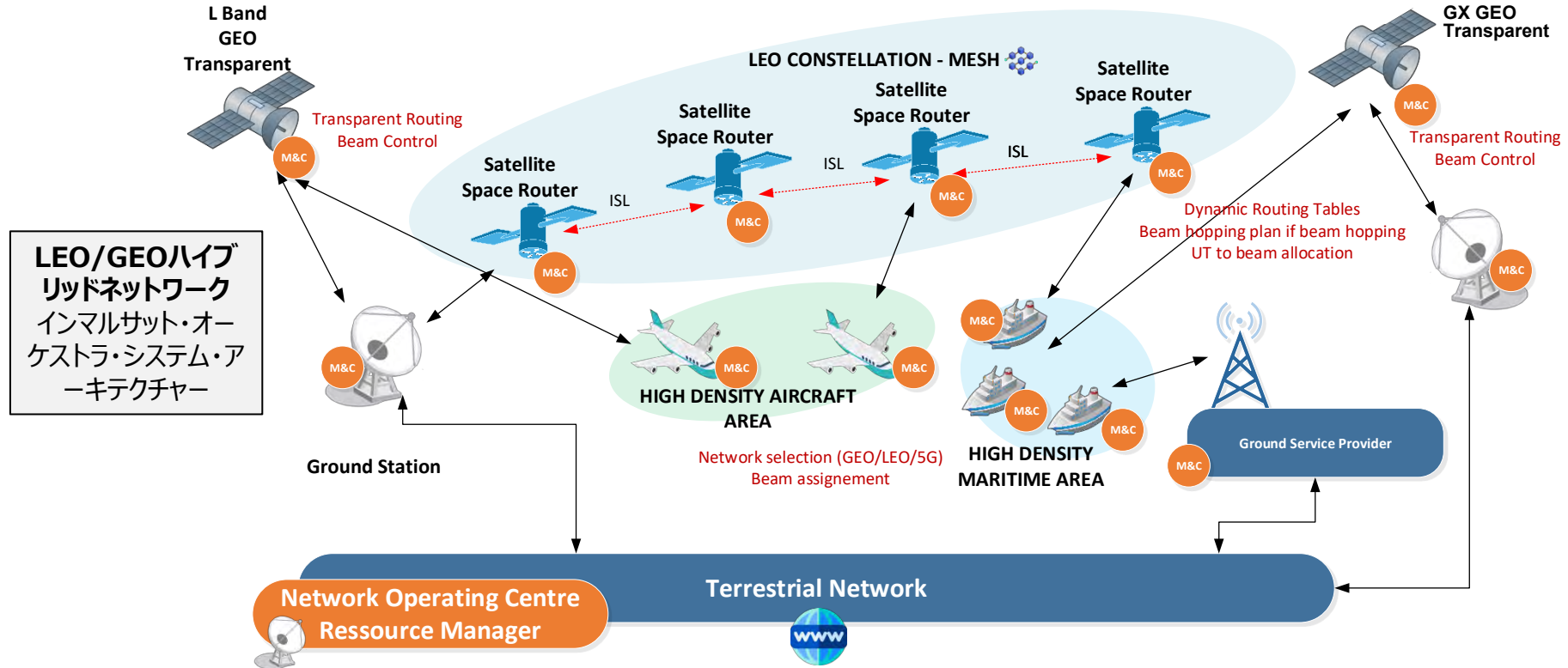
関連トピック:
 観測ミッションと通信ミッションは混載可能か



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

① GEO/LEO/MEO通信ネットワーク

Inmarsat「オーケストラ構想」: GEO/LEO/地上ネットワークによる総合的な移動体通信網構想。



- **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。出典: Euroconsult 83

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

② 観測データの中継

システム名	軌道/ネットワーク構成	ISL (衛星間接続)方式
Spacelink	MEO Constellation to connect customer LEO constellations to ground	RF ISL (Ka band) and Optical ISLs Several partnerships (Mynaric, Blue marble)
Capella X band SAR system	LEO Constellation for the X band SAR system Use of Inmarsat L band GEO satellites to relay command from the ground	L band connection
Warpspace	MEO Constellation to connect customer LEO constellations to ground	Optical ISLs
Analytical Space / Fast Pixel Network - Hedron	LEO Constellation to relay customer LEO Observation data to ground	Optical ISLs
Pleiades NEO / EDRS	LEO Imagery Satellites Connection to GEO EDRS satellites to update mission plan (EDRS: European Data Relay Satellite System)	Optical ISL

出典: Euroconsult

・Space Compass, Skyloom, GEOデータ中継衛星SkyCompass打上げ計画発表

Skyloom Global Corporation (本社: 米国コロラド州デンバー、以下 Skyloom) と株式会社 Space Compass (本社: 東京都千代田区、以下 Space Compass) は、アジア上空に1機目となる静止軌道 (GEO: Geostationary Earth Orbit) 衛星SkyCompass-1を2024年末までに打上げる共同事業契約を正式に締結しましたのでお知らせいたします。両者で提供する最先端の光通信ネットワークシステムにより、急速に拡大する地球観測市場にリアルタイムかつ大容量のデータリレーを直接クラウドに提供します。SkyCompass-1はパートナーシップの第1ステップとなり、両社は今後数年かけてリレーキャパシティの増強およびグローバル展開に向けたGEO衛星コンステレーション構築の検討を推進してまいります。2023年前半にはリレーサービスの販売予約開始を予定しており、既に複数の潜在顧客との協議を進めております。

出典: 日刊工業新聞



③ LEO通信コンステレーション

LEO通信衛星網でも衛星間通信も適用したネットワークが計画されている。多くは光通信を採用。

システム名	軌道/ネットワーク構成	周波数帯域	ISL (衛星間接続)方式
Lightspeed	2 LEO constellations - Polar : 1000 km - Inclined : 1248 km	Ka Band commercial	4x Optical ISL 10 Gbps inter and intra plan No direct ISL link between Polar and Inclined
Starlink V2	30,000 satellites LEO Constellation in 9 shells between 340 and 614 km	Ku Band commercial User Ka Band commercial Feeder and User	4x Optical 10 Gbps inter and intra plan
Oneweb V2	1 LEO Constellation 6372 satellites	Ku Band commercial	Optical ISL 10 Gbps
Kuiper Amazon	1 LEO Constellation 3236 satellites	Ka band commercial	No data available
Boeing	1 LEO Constellation 132 satellites 15 GEO satellites	V band and Ka band Fillings	Ka and V band ISL request rejected by FCC New tentative for ISLs between GEO and LEO
Inmarsat Orchestra	1 LEO Constellation – 150 satellites L band GEO satellites Ku GX GEO satellites Terrestrial 5G	No data available for the LEO constellation	No data available
Transport Layer SDA	1 LEO Constellation between 300 and 500 satellites	Ka Band	Optical ISL between satellites. Development of interoperable ISL Standard Optical link to ground terminals
Iridium Next	1 LEO Constellation 66 satellites	L band User Ka band Feeder	4x Ka band ISL (8 Mbps)
CISCO IRIS router	GEO : CLEO router was installed on Intelsat 14 (launch 2009)	Two Ku band transponders One C band Transponder	No ISL

EU IRIS² (Infrastructure for Resilience, Interconnection & Security Satellites)

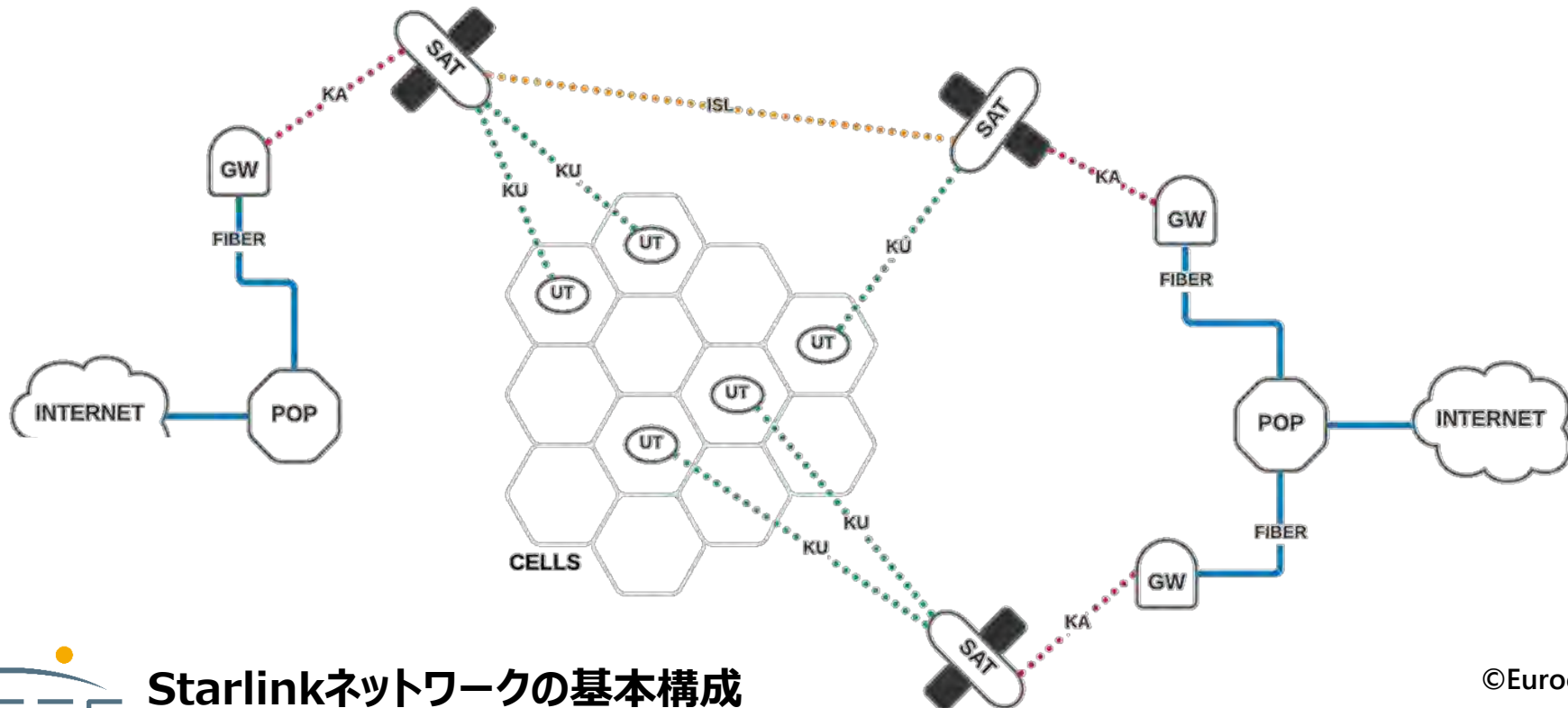
- EUとその加盟国に**安全な通信サービス**を提供するとともに、欧州市民、民間企業、政府当局に**ブロードバンド接続**を提供するために計画。
- 回復力のある安全な宇宙および地上システムを通じて、南北軌道コンステレーションを利用した欧州およびアフリカ全域のデッドゾーン解消を目指す。
- マルチオービット(GEO/LEO/MEO)の衛星群で構成。
LEOに関しては2025年から2027年にかけて、最大170機のLEO衛星の開発と打ち上げが含まれる可能性がある。
- 安全な通信のため、EuroQCIの宇宙・地上セグメントを統合、暗号鍵伝送を可能にする。
- 総額60億ユーロ。2月14日のEU議会で、EUの24億ユーロ拠出が承認された。

3-4.2 宇宙ネットワークの構成要素

LEO通信コンステレーションの構成を概観するために、典型例としてStarlink衛星を調査
Starlinkネットワークは衛星・ユーザー端末・ゲートウェイから構成される。

(1) Starlinkネットワークの構成

- ▶ 衛星-ユーザーターミナル(UT)間：Ku帯
ダウンリンク帯域幅 2GHz
アップリンク帯域幅 500MHz
- ▶ 衛星間通信(ISL)用に光通信
(第一世代後半の衛星に搭載、今後展開)
- ▶ 衛星-ゲートウェイ間：Ka帯
ダウンリンク帯域幅 2.25GHz
アップリンク帯域幅 4GHz
- ▶ ゲートウェイ-POP間：光通信
(POP: Point of Presence ユーザーがインターネットに接続する最寄りの接続点)



Starlinkネットワークの基本構成

3-4.2 宇宙ネットワークの構成要素

(2) Starlink衛星(第1世代)

Starlink衛星は平板状のパネルにユーザーリンク用、ゲートウェイ用、衛星間用の通信機器が組み込まれている。

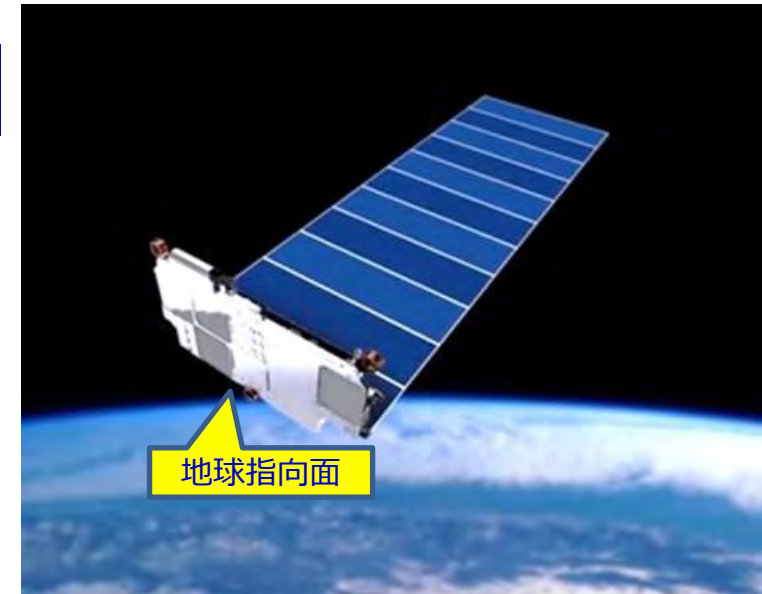
①ユーザー向けリンク.....Ku帯フェーズドアレイアンテナ使用

- ダウンリンク用フェーズドアレイアンテナ：3基
アップリンク用フェーズドアレイアンテナ：1基
- 各フェーズドアレイアンテナは左旋と右旋の2種の偏波を備え、それぞれ最大で8本のスポットビームを発生させる。ダウンリンクではアンテナが3基により、合計48本のスポットビームを生成できる。周波数再利用率は6。
- 各スポットビームは、地上の特定のユーザー向け六角形セルに最低15秒間割り当てられる。
- アップリンクのフェーズドアレイアンテナも二種の偏波で各8本、合計16本のスポットビームを生成。

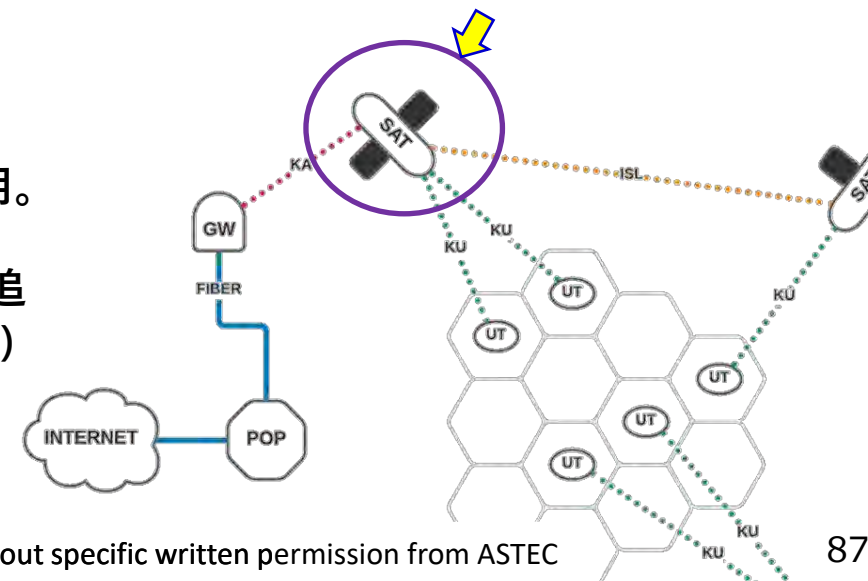
②ゲートウェイ向けリンク.....Ka帯ジンバル式ディッシュアンテナ2基

- ダウンリンクに2.25GHz、アップリンクにKa帯で4GHz帯域を使用。

③衛星間リンク(ISL: Inter-Satellite Link).....第1世代後半より追加。光通信端末を3台搭載。第2世代からは4台搭載の予定。(5項に詳述)



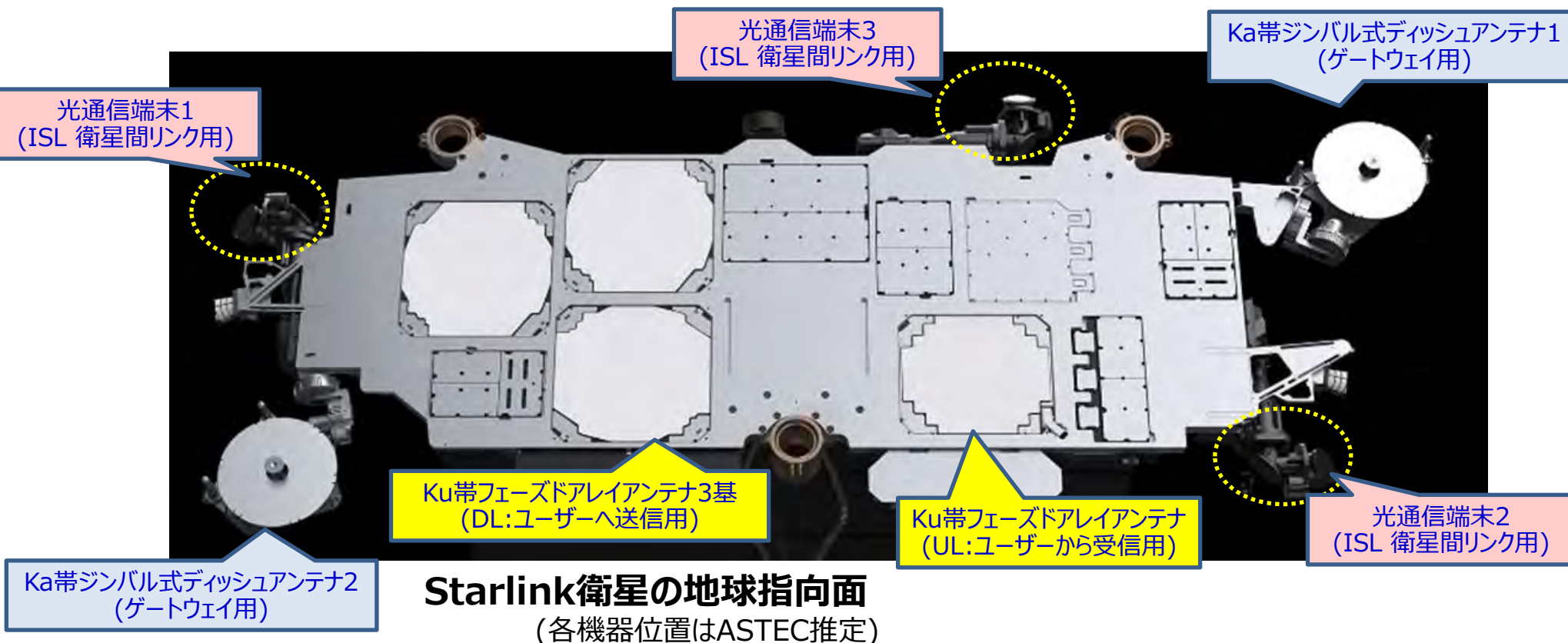
Starlink衛星(第1世代)



3-4.2 宇宙ネットワークの構成要素

(2) Starlink衛星(第1世代 後半版 v1.5)

各通信機器の配置を推定。(SpaceX公表の最新のStarlink衛星 地球指向面のイラストによる)
2021年以降打上げの1.5世代型には光通信端末が搭載されている。

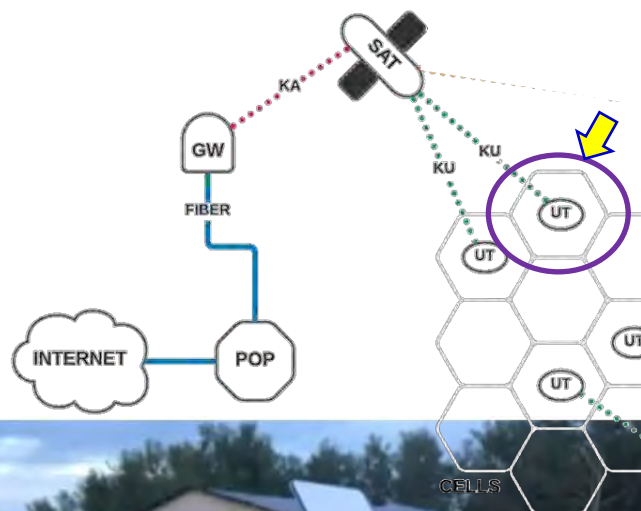


3-4.2 宇宙ネットワークの構成要素

(3) ユーザー端末(UT)

ユーザー端末はアンテナとWiFiルーターから構成される。簡便なセットアップ(スマホアプリ)で衛星とリンクできるように設計されている。通信速度はダウンリンク100Mbps以上が実現できている。

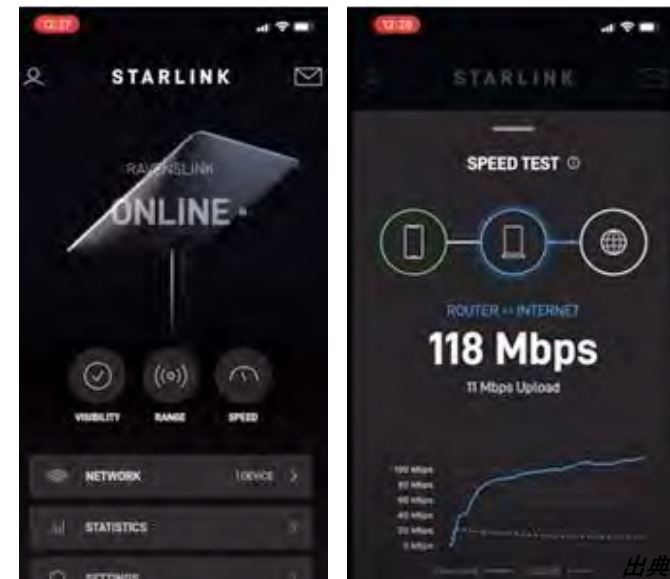
- 一般消費者向けのユーザー端末が2020年試験運用からサービスを開始。日本は2022年10月から。
- 端末セット主要機器は衛星用フェーズドアレイアンテナ(ジンバル併用)とWiFiルーター。



出典1



出典2



スマートフォン用アプリ (通信速度) (開通の表示) 出典1

出典1

アンテナの初期設定 出典2 (Starlink衛星を自動で探す)

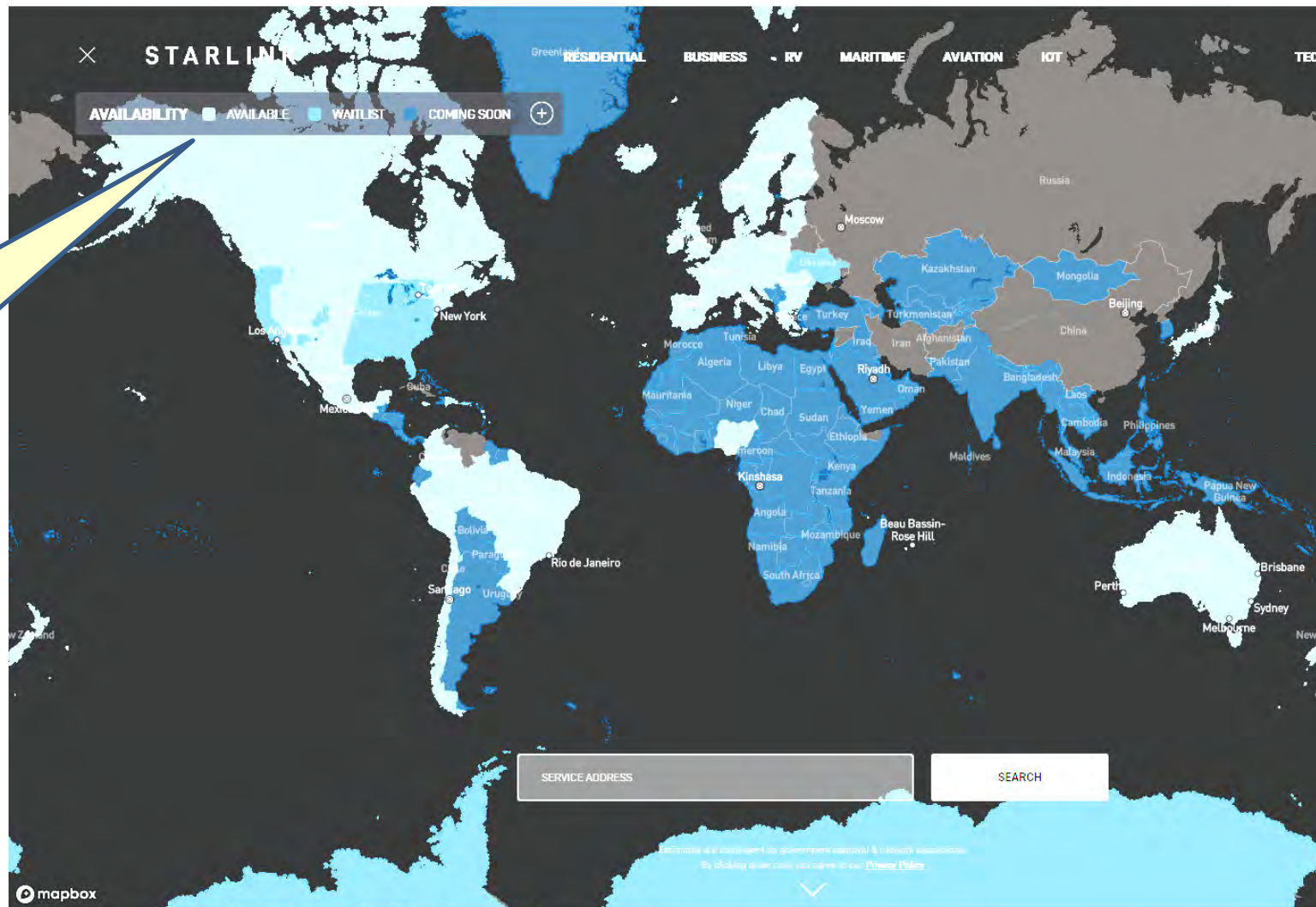
出典1 : Starlink設定手順(YouTube) 1
出典2 : Starlink設定手順(YouTube) 2

3-4.2 宇宙ネットワークの構成要素

(3) ユーザーターミナル(UT) (参考)

全世界に向けて事業を展開中。

世界48か国でサービス展開中(2023年1月末現在)
日本は42番目



AVAILABLE
 WAITLIST
 COMING SOON

加入数は100万人を超えた。(2022年12月末現在)

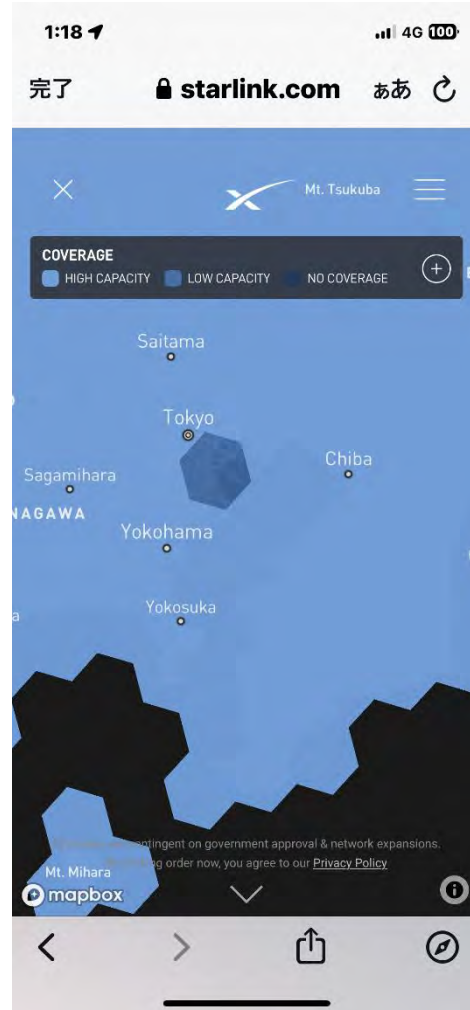
3-4.2 宇宙ネットワークの構成要素

(3) ユーザーターミナル(UT) (参考)

Starlinkのサイトには、日本も通信可能領域として記載されている。



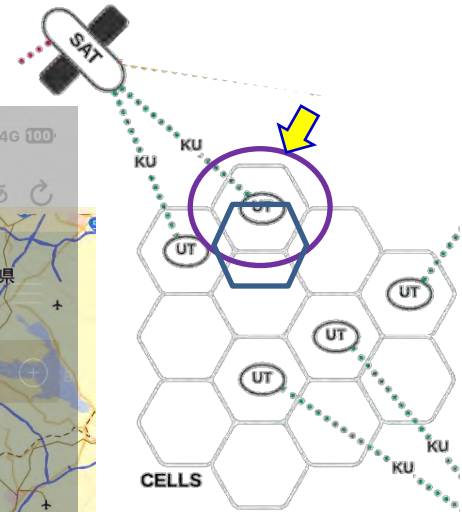
設置可能領域 (日本は全域が可能になっている。2023-1-26現在)



設置可能領域(関東地方拡大。六角形で表示されている)



設置可能領域(関東地方拡大。地図との対応)



3-4.2 宇宙ネットワークの構成要素

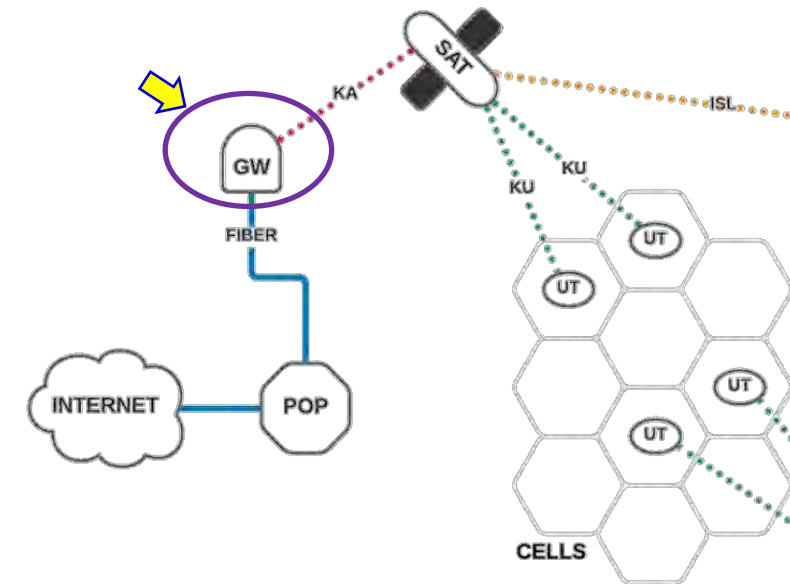
(4) ゲートウェイ

ゲートウェイは1か所9基のアンテナを基本として構成されている。

- 3x3または1x9のレドーム内の9基の高利得カセグレンアンテナで構成される。（一部のサイトでは4基のアンテナのみ）
- ゲートウェイのハンドオーバー
 - 各アンテナは衛星1機を追跡し、リンク → その衛星が見えなくなると、別の衛星を追跡する。
- ゲートウェイは光ファイバーでPOPに接続され、各POPはインターネットへのハンドオーバー点となる。
(POP: Point of Presence ユーザーがインターネットに接続する最寄りの接続点)
- 1つのPOPに複数ゲートウェイを集約できる。



Starlink用ゲートウェイの一例



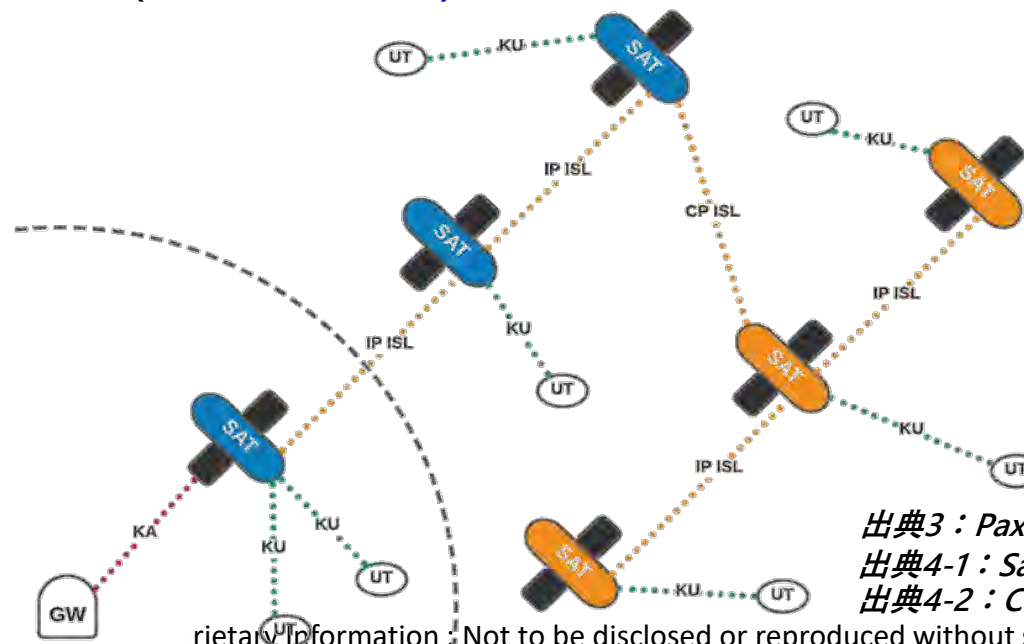
3-4.2 宇宙ネットワークの構成要素

(5) 今後の技術的展開…衛星間接続 (ISL: Inter-Satellite Link)

Starlink衛星(v1.5)には衛星間接続用光通信端末が同一軌道用に2台、他軌道用に1台搭載。

- 衛星間接続は光通信で行われる。
- 「2023年第一四半期に衛星間接続を開始」とアナウンスされた。(2022年7月時点)^{出典3}
- 各衛星には3台の光学端末が装備されている。(第一世代衛星の途中[v1.5]から搭載されている)^{出典4-1, 4-2}
 - 光学端末2台は同一軌道面上の衛星との交信用(In-Plane ISL)。
 - 3台目の光学端末は、同一高度の他軌道面衛星との交信用(Cross-Plane ISL)。

- 下の図に事例を示す。
 - ・ある衛星は、同じ軌道面内で前方と後方と接続する軌道面内衛星間リンク (IP ISL) を持つ。このリンクは地球を囲む同一軌道面内のすべての衛星を結ぶ。
 - ・3台目の光学端末を用いて軌道間ISL(CP ISL)リンクを行い、オレンジで表記した軌道上の衛星までカバー。
 - ・他の高度にあるシェルが完成すれば、シェルをまたいだISLも可能になる。



衛星間通信(ISL)

- ・ 同一軌道面 In-Plane ISL
- ・ 他軌道面 Cross-Plane ISL

出典3 : PaxEx "Starlink expects inter-satellite links fully online by Q1 '23" (2022-7-12)

出典4-1 : Satellite Today (2021-1-25)

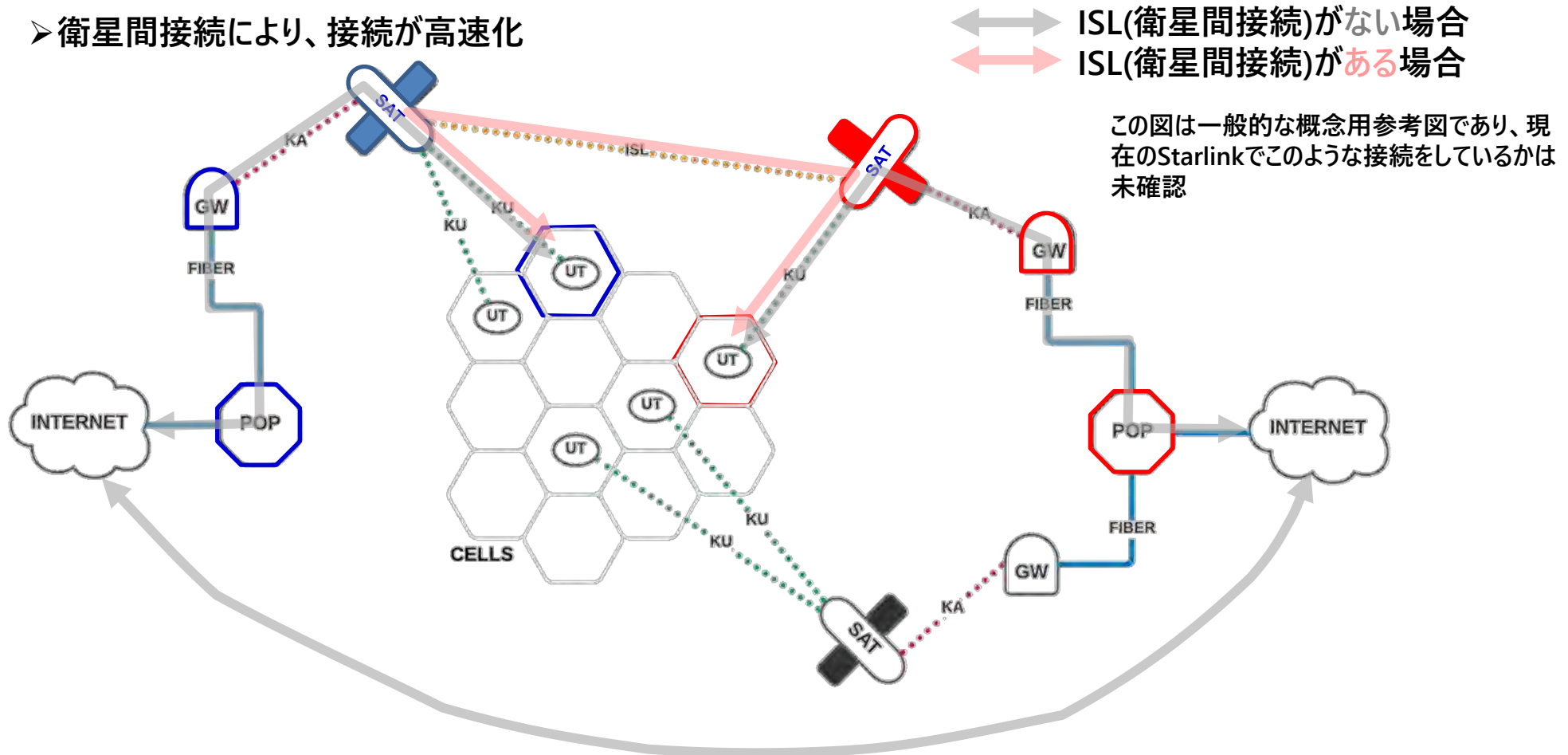
出典4-2 : Communication Technology Blog(2022-2-7)

3-4.2 宇宙ネットワークの構成要素

(5) 今後の技術的展開……衛星間接続 ISL

衛星間通信ができることにより、経路の選択肢が増え、二点間接続の高速化・効率化が図れる

➤ 衛星間接続により、接続が高速化



衛星間接続による通信経路短縮効果

3-4.2 宇宙ネットワークの構成要素

(5) 今後の技術的展開…衛星間接続 ISL

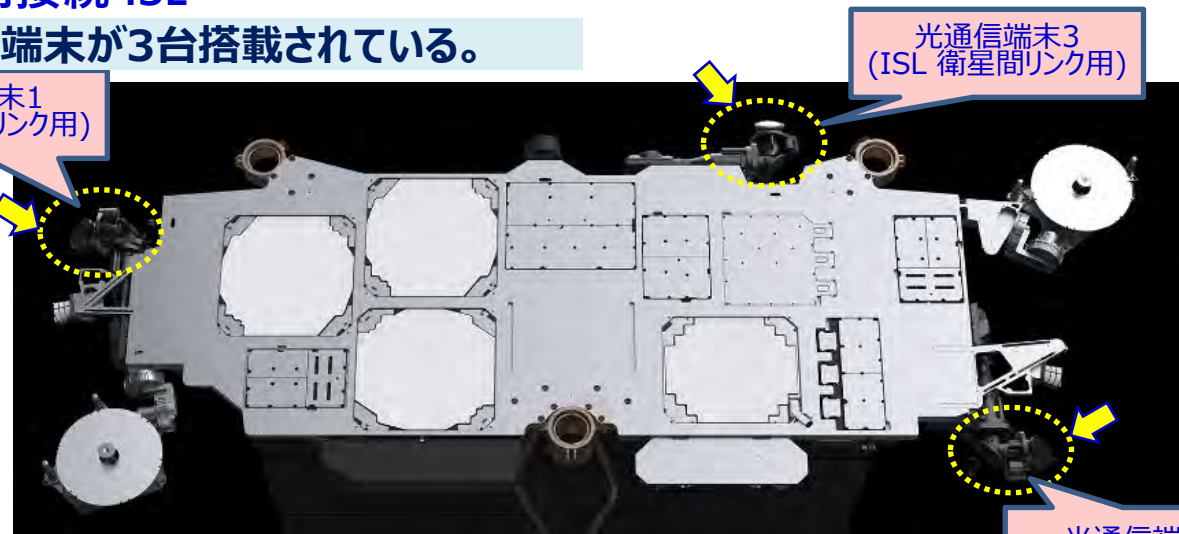
Starlink衛星(v1.5)には、光通信端末が3台搭載されている。

- 当初、光通信端末は4台と計画。
- 第1世代(2019年～)には搭載せず。
- 1.5世代(2021年～)のグループから搭載。ただし台数は3台。

(消費電力・質量等リソース配分上の課題等があると考えられる。[ASTEC検討])

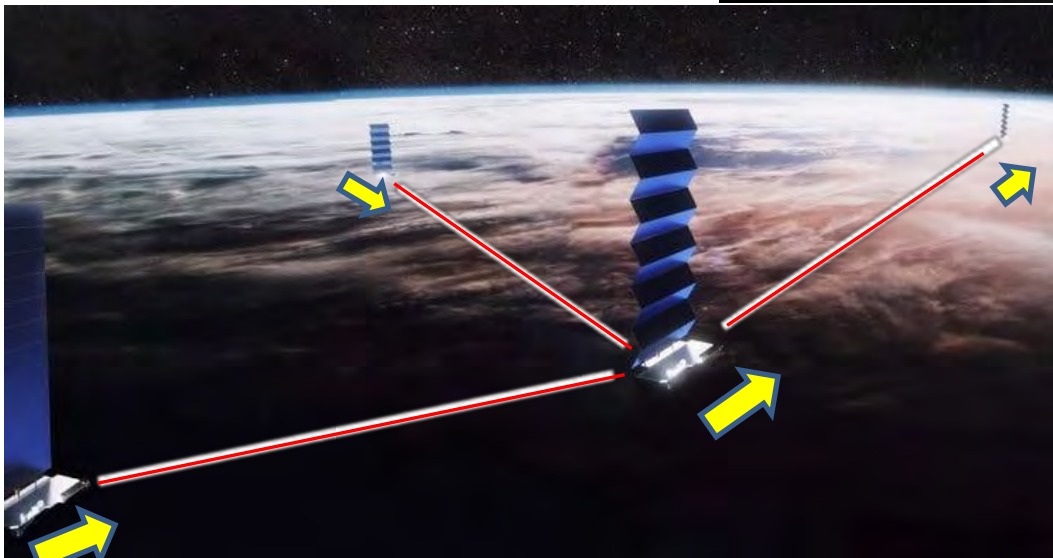
光通信端末1
(ISL 衛星間リンク用)

光通信端末3
(ISL 衛星間リンク用)



光通信端末2
(ISL 衛星間リンク用)

Starlink衛星の地球指向面
(機器位置はASTEC推定)



軌道上での衛星間接続模式図

(矢印等の記号はASTEC記入)

Starlink衛星の
衛星間通信用レーザー端末



3-4.2 宇宙ネットワークの構成要素

(5) 今後の技術的展開…衛星間接続 ISL 現在の運用状況(運用モニタソフトから)

- ・シミュレータによる日本付近のStarlink衛星の飛行状況を示す。
- ・このシミュレータによると、第1.5世代のISLは稼働中。
- ・日本付近では、日本のゲートウェイ4か所が第1世代とのリンクに使われており、第1.5世代衛星はISLで運用されていることが多い。

LINK SATS: 9

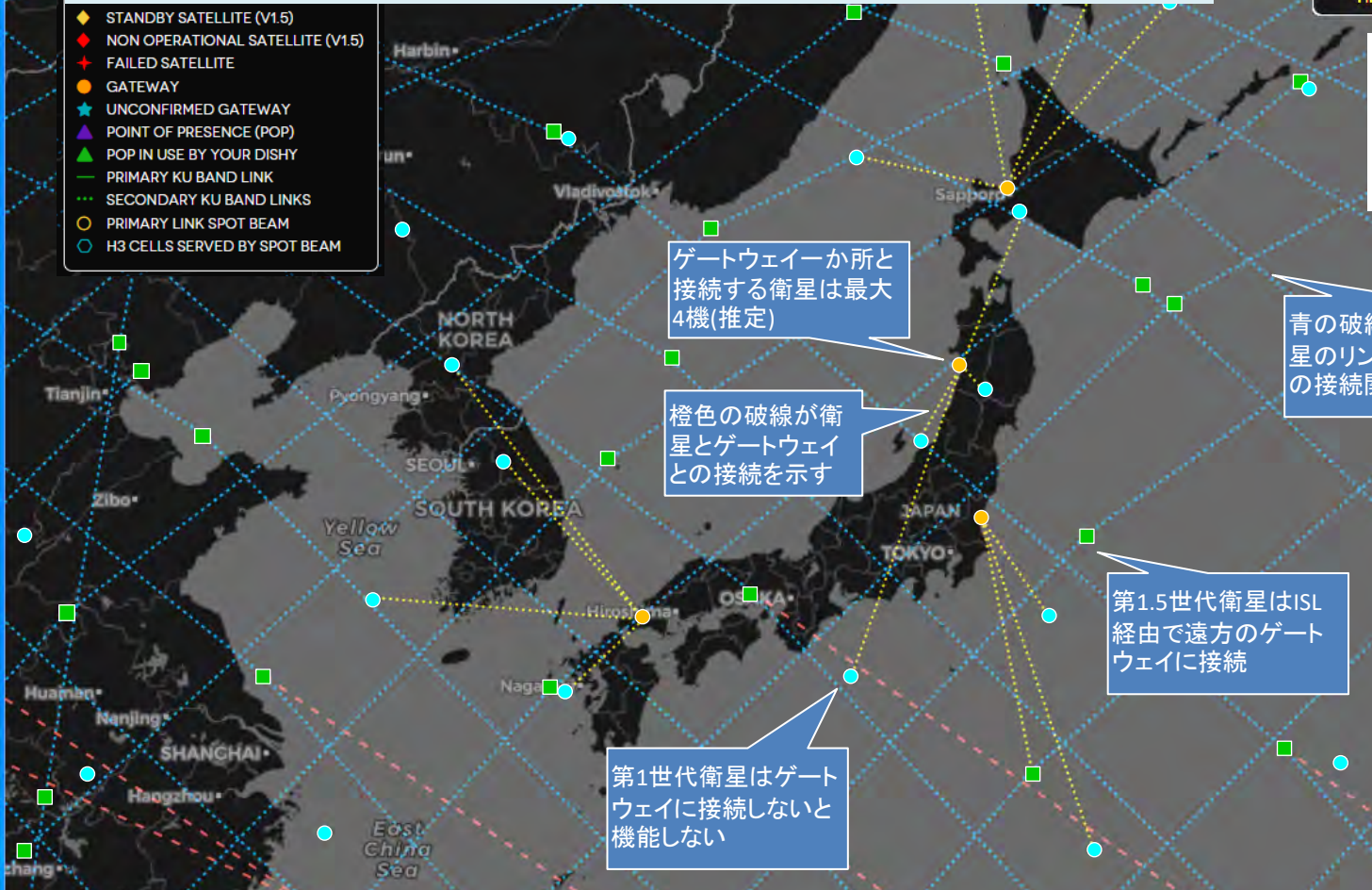
SESSION 5M 4S OUTAGE 1S

QUALITY 99%

TIP: TO SET HOME LOCATION, RIGHT CLICK / DOUBLE TAP ON THE MAP

- ◆ STANDBY SATELLITE (V1.5)
- ◆ NON OPERATIONAL SATELLITE (V1.5)
- ◆ FAILED SATELLITE
- GATEWAY
- ★ UNCONFIRMED GATEWAY
- ▲ POINT OF PRESENCE (POP)
- ▲ POP IN USE BY YOUR DISH
- PRIMARY KU BAND LINK
- SECONDARY KU BAND LINKS
- PRIMARY LINK SPOT BEAM
- H3 CELLS SERVED BY SPOT BEAM

- 第1世代
- 第1.5世代(ISLあり)
- 日本のゲートウェイ4か所 (山口、阿字ヶ浦、秋田、石狩)



ゲートウェイか所と接続する衛星は最大4機(推定)

橙色の破線が衛星とゲートウェイとの接続を示す

青の破線は第1.5世代衛星のリンク接続衛星どうしの接続関係を示す

第1.5世代衛星はISL経由で遠方のゲートウェイに接続

第1世代衛星はゲートウェイに接続しないと機能しない



出典: "Starlink Coverage Tracker" <https://starlink.sx/>

MOVING MARKERS DO NOT REPRESENT ACTUAL SIZE OF STA

3-4.3 宇宙NW技術的課題

■ 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）

- 通信ペイロードの機能をどこまで持たせるか？ **フルにノントランスペアレントとすると、衛星のSWaP (Size, Wight and Power) に影響**
 - 通常、ISLは面内軌道用に2式、クロス軌道用に2式搭載するが、光端末のコスト、さらに衛星の**SWaP、Capex、Opexを考慮したトレードオフが必要**。(Starlink1.5世代では3台のみ搭載)
 - 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)が実現できるが、**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となる。
 - これに伴い下記の課題もある。
 - 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。
- ISLは空間メッシュのためには必要だが、/質量/コスト/ネットワーク上の制約が加わるため、システム設計の初期段階に十分に検討する必要がある。
- 地上とのネットワークの観点では、**ユーザーターミナル、ゲートウェイとのハンドオーバーやローミング**の方式が運用上の課題となる。この運用方法によって、通信品質や運用効率が決まる。実施事例として、StarlinkとOneWebの場合を示す。

3-4.3 宇宙NW技術的課題

3-4.1 大規模メッシュネットワークの実現方法の分類

- 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、1tbps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台のみ。ゲートウェイの数はケース1と同規模必要。
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実現しやすい。	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	MPLSが再ルーティング機能を有するため、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)オンボード機能の複雑さと宇宙NW性能のバランスのとれた成立解。	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。

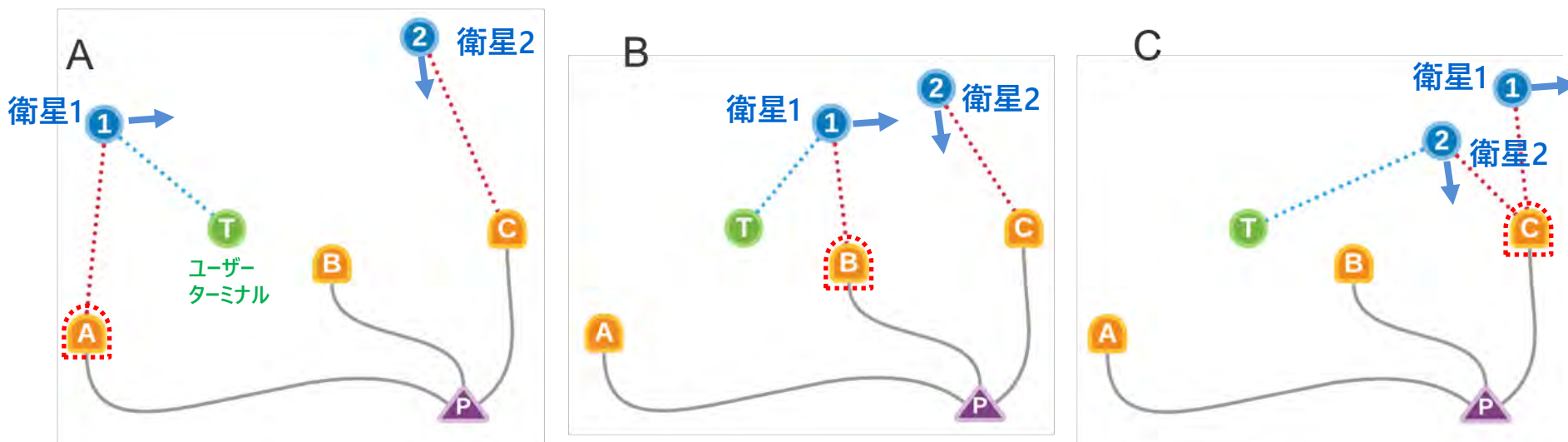
注* MPLS: Multi-Protocol Label Switching

3-4.3 宇宙NW技術的課題

ローミング

- 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最も重要な機能。
- 2種の切り替えモードのいずれかで運用
 - “break before make”
(リンク中断は数十msで、この間に次のリンクを生成)
 - “make before break” (次のリンクをあらかじめ準備)

Starlinkは、UTの接続を維持するために、下図のようなすべてのトポロジー変更イベント中にLTEスタックを採用している。この方式はモバイルネットワークのセルローミングシナリオに非常に類似している。SDNとLTEスタックはGoogleのLoonプロジェクトからライセンスされた可能性があり、Telesatにも彼らの “temporospatial SDN ”をライセンスし、彼らのLEOコンステレーションで使用した。



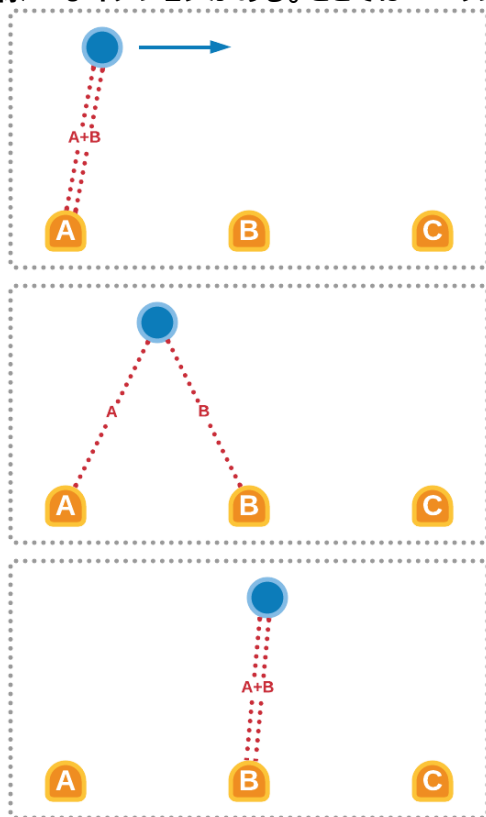
UTは衛星1によってサービスを受け、その衛星は現在ゲートウェイAに接続され、さらに地上ファイバーによってPoP (Point of Presence) Pに接続されている。

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。

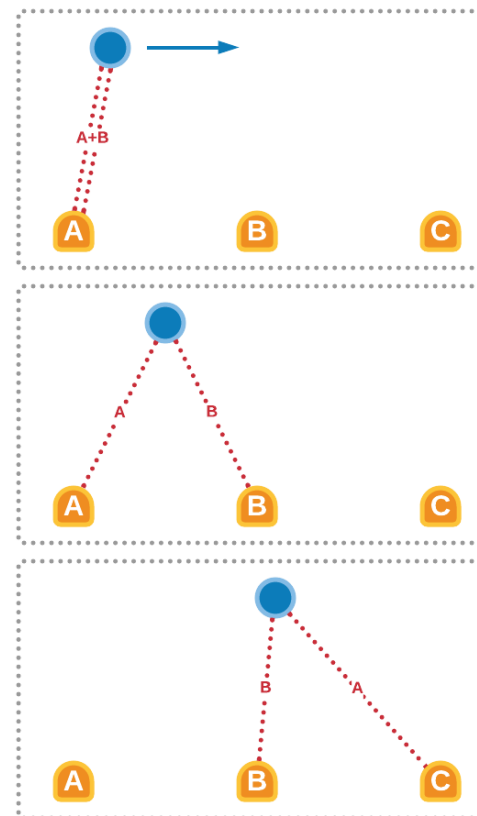
数秒後の3番目のステップでは、UTはよりよい位置にいる衛星2から衛星1にローミング(ハンドオーバー)する。衛星の変更(1→2)とゲートウェイの変更(B→C)を意味し、ダブルローミングイベントとなる。

3-4.3 宇宙NW技術的課題

衛星がゲートウェイからゲートウェイへローミングする際の手順（Starlinkの場合）
衛星が利用できる様々なオプションがある。ここでは2つのシナリオを紹介する。



ケース1: Kaバンドアンテナ(ビームAとB)両方を使用する場合
ゲートウェイでは、対応する2つのアンテナが使用されている。
最初の遷移では、ゲートウェイBに向けてアンテナBを調整し、
接続性を維持する。
次に、ゲートウェイBに向けてアンテナAを接続し、再びフル
キャパシティを実現する。この移行では休止時間はないが、
各アンテナの移行時にサービスキャパシティが50%減少する。



ケース2: アンテナを別々のゲートウェイに接続する場合
衛星はアンテナBもゲートウェイBに向けて移動させるが、アン
テナAはBに向けて調整する代わりに、衛星の経路のさらに
先にあるゲートウェイCに直接接続する。
→ケース1,2などのアプローチは、衛星の軌道、ゲートウェイの
密度と位置、ゲートウェイでの空きアンテナの有無など、さま
ざまな要因に依存する。

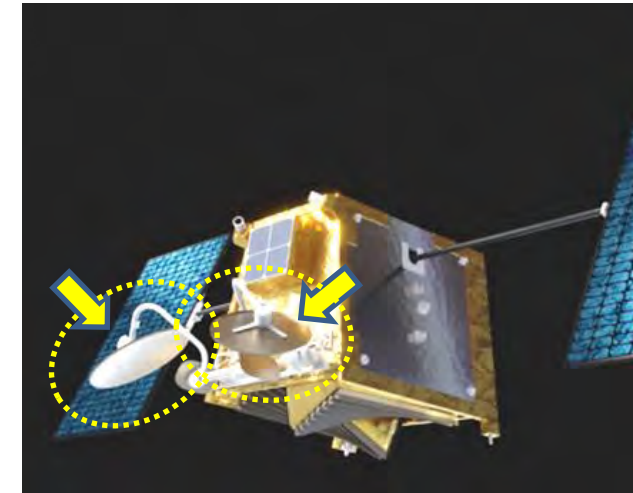
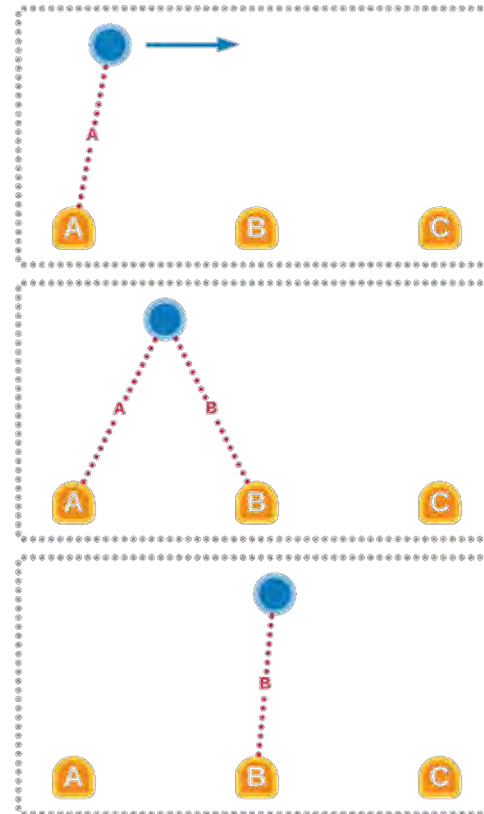
3-4.3 宇宙NW技術的課題

Roaming – Oneweb (1of2)

2つのジンバル式平面反射鏡アンテナは、2つのゲートウェイへの冗長リンクを提供する。
通常の運用では、各衛星のゲートウェイアンテナは1本がアクティブで、2本目は別のゲートウェイへのハンドオーバーに使用されスタンバイ状態になっている。

右の図は、衛星がKa帯でゲートウェイ間をローミングしている様子を示している。

- ① 最初は、衛星はアンテナAを使用してゲートウェイAに接続し、アンテナBは待機している。
- ② 次に、衛星はゲートウェイBにローミングする必要があると判断し、そのためにアンテナBを使用する。
- ③ ゲートウェイBへのリンクが確立すると、アンテナAはスタンバイ状態になる。

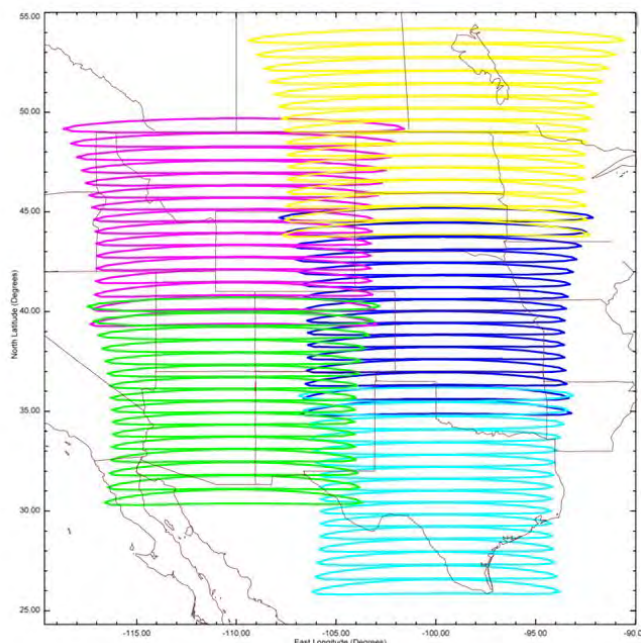


Oneweb衛星
ゲートウェイ用アンテナ

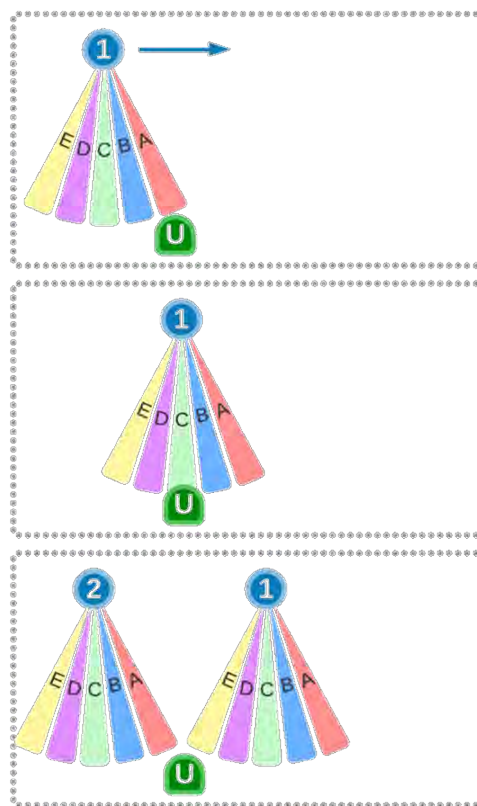
3-4.3 宇宙NW技術的課題

OnewebのUserアンテナは、衛星とともに移動する地上に、16本の偏心したビーム固定形状の楕円形スポットビームを作り出している。各ビームは8つの周波数のうちの1つを使用して放射され、各衛星で2回再利用される。

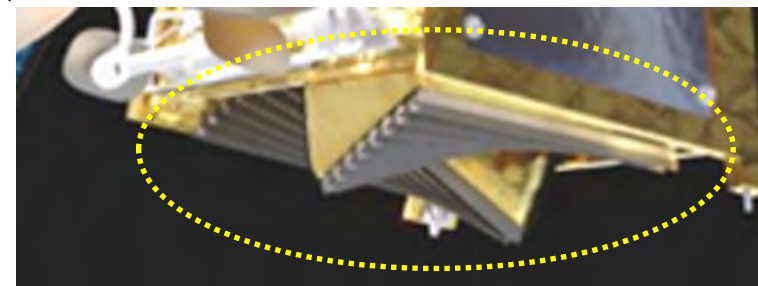
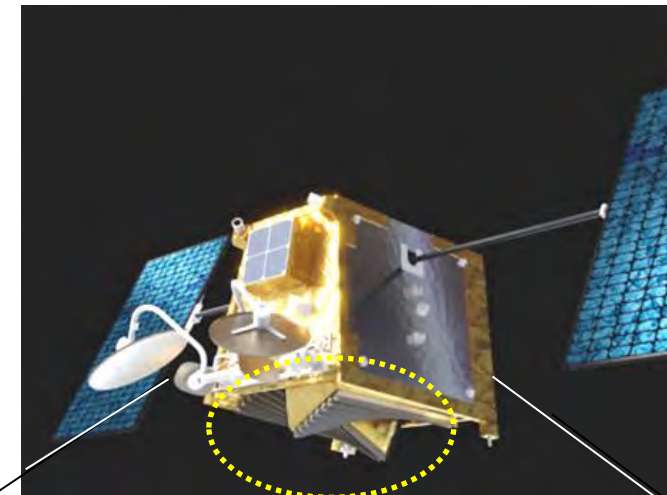
下の図は、UTがビームからビームへ移動する様子を示す。初期状態では、UTは衛星1のビームAでサービスを受ける。衛星が上空を移動するにつれて、UTはビームB、C、D、...の順に受信する。最後に、衛星1のビームEがUTの視野から外れた後、衛星2のビームAが引き継ぎ、シームレスな接続を維持する。



Oneweb – Beam patterns of several satellites



Oneweb – UT Roaming



Oneweb衛星 ユーザー用アンテナ (複数列のスポットアンテナが2組並んでいる)

3-4.4 オンボードプロセッサの検討

- 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）の実装が可能に。**
- 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。

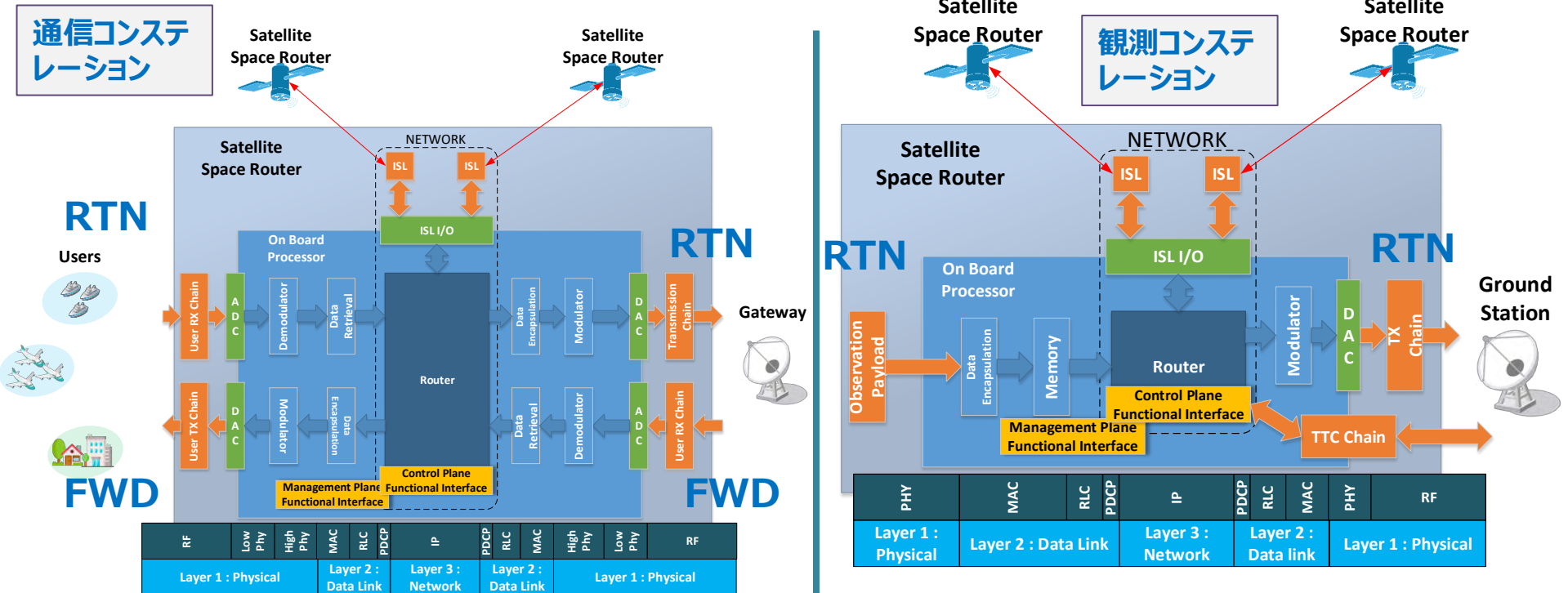
Manufacturer	Product	Processor	Pedigree	Vehicle
Gomspace	Nanomind A3200	Atmel AT32UC3C MCU	COTS	Cubesat
Isis	iOBC	ARM9	COTS	Cubesat
Pumpkin	PPM A1	TI MSP430F1612	COTS	Cubesat
	PPM A2	TI MSP430F1611	COTS	Cubesat
	PPM A3	TI MSP430F2618	COTS	Cubesat
	PPM B1	Silicon Labs C8051F120	COTS	Cubesat
	PPM D1	Microchip 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]。

3-4.4 オンボードプロセッサの検討 通信・観測コンステレーションにおける役割比較

- 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

3-4.4 オンボードプロセッサの検討 通信・観測コンステレーションにおける役割比較

オンボードOBP中心アーキテクチャは、構成要素の要求条件は異なるものの、機能性とOSI層分割の点で類似している。

Component	通信衛星用の典型的仕様	観測衛星の典型的仕様
DTP	大容量（数十/数百Gbps）かつデータ転送が可能 I/O数が多い（1ビームあたり2点（Rx、Tx）、ゲートウェイあたり2点）DC電力が高い数百W（> 500W）	リアルタイムデータ圧縮/フォーマット、マスメモリ管理 最大数Gbpsの出力 高DCパワー（～200W）
ADC	High speed RF ADC with Nyquist typically in C band, providing up to 3Gbps per input	No high RF ADC required
DAC	High speed RF DAC with Nyquist typically in C band, providing up to 3Gbps per output	N/A. Data input depends on EO payload
ISL I/O	～10 Gbps per link	～6 Gbps per link
Router	Telecom router including management of QoS and complex queuing systems (one per beam - could be hundreds of beams) and handover management	Router limited to other satellites and feeder (no multibeam management)
Modem	Full range of SNR has to be implemented to get the highest flexibility and provide optimal communication. On-board system for BB framing	Limited subset of MODCOD needed (only feeder)
Memory	Few Gbits of memory required for the various queuing systems	Big (several hundred of Gbps) and ultra reliable memory required

3-4.4 オンボードプロセッサの検討 通信・観測コンステレーションにおける役割比較

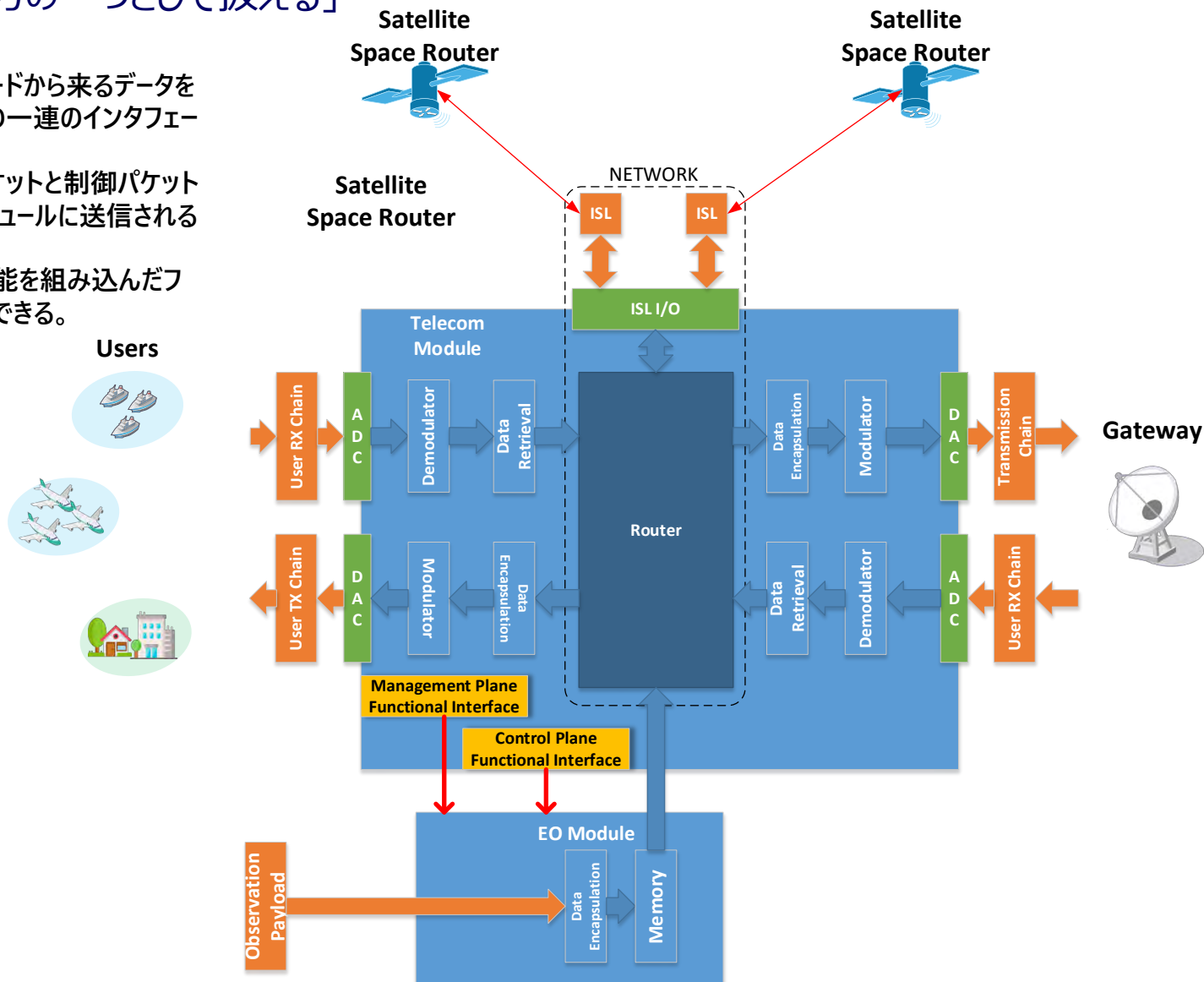
「観測データは通信の入力の一つとして扱える」

図に実装の可能性を示す。

COMM DTPモジュールは、EOペイロードから来るデータを取得し、ルータを介して送信するための一連のインタフェースを持つことができる。

COMMモジュールが受信した管理パケットと制御パケットは、専用インタフェースを介してEOモジュールに送信される必要がある。

このモジュール方式により、すべての機能を組み込んだフルDTPの開発リスクを軽減することができる。



3-4.5 光通信による衛星間リンク(ISL) ①光通信の特徴と機器構成(1/2)

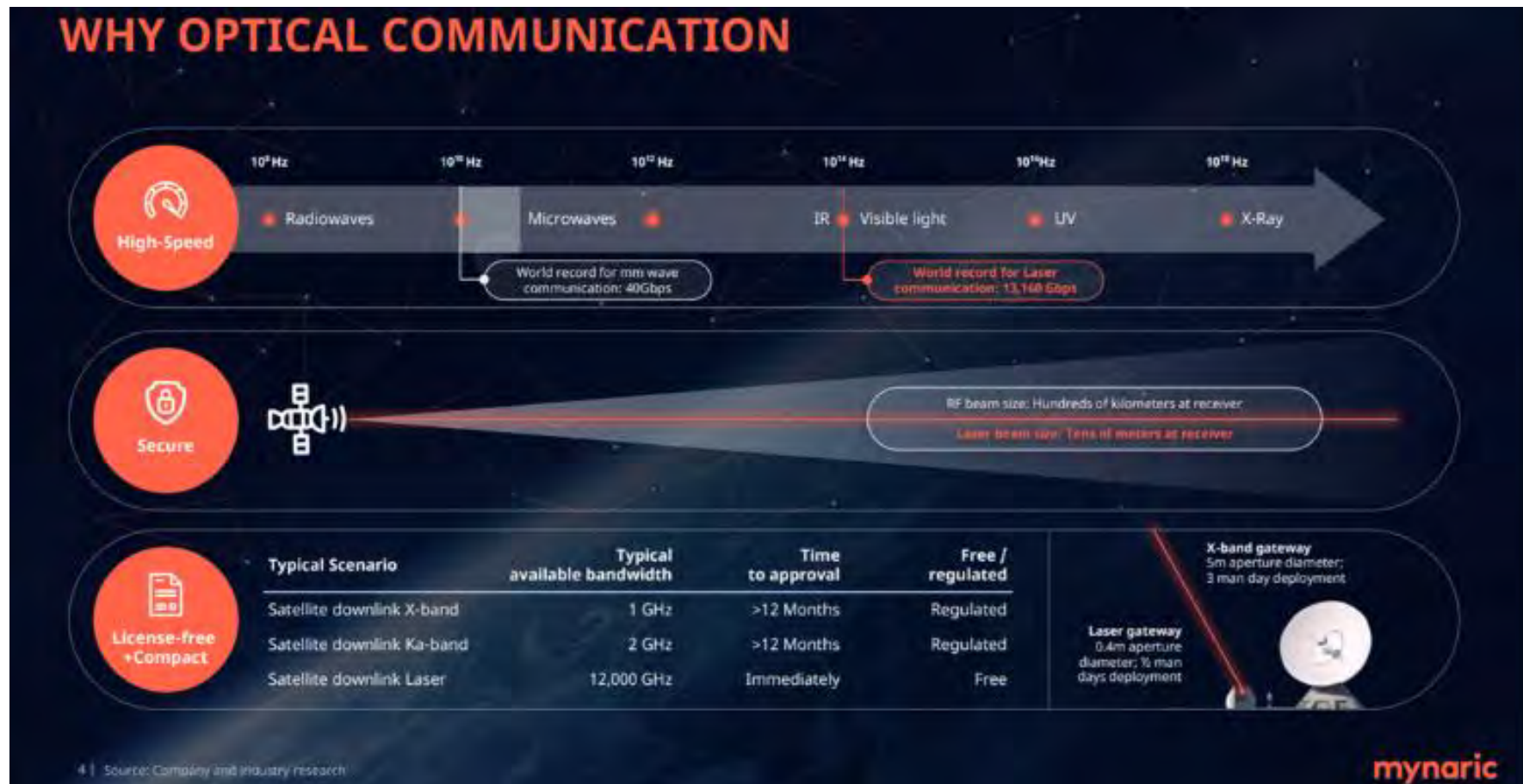
22-002-R-019

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



3-4.5 光通信による衛星間リンク(ISL) ①光通信の特徴と機器構成(2/2)

宇宙用光通信端末

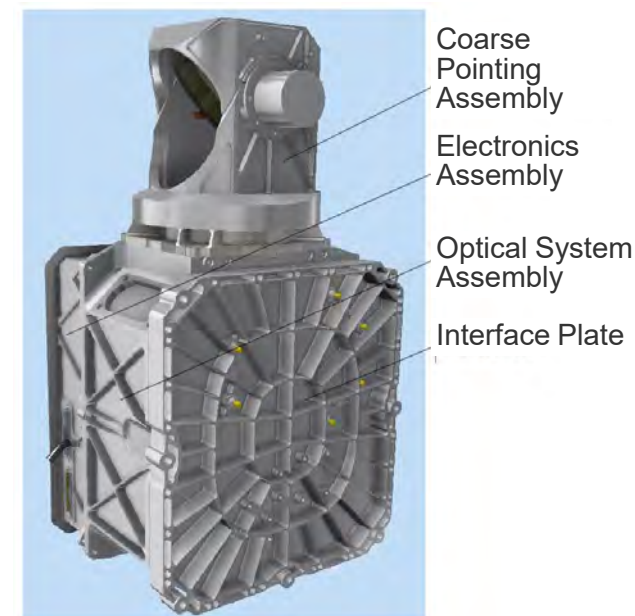
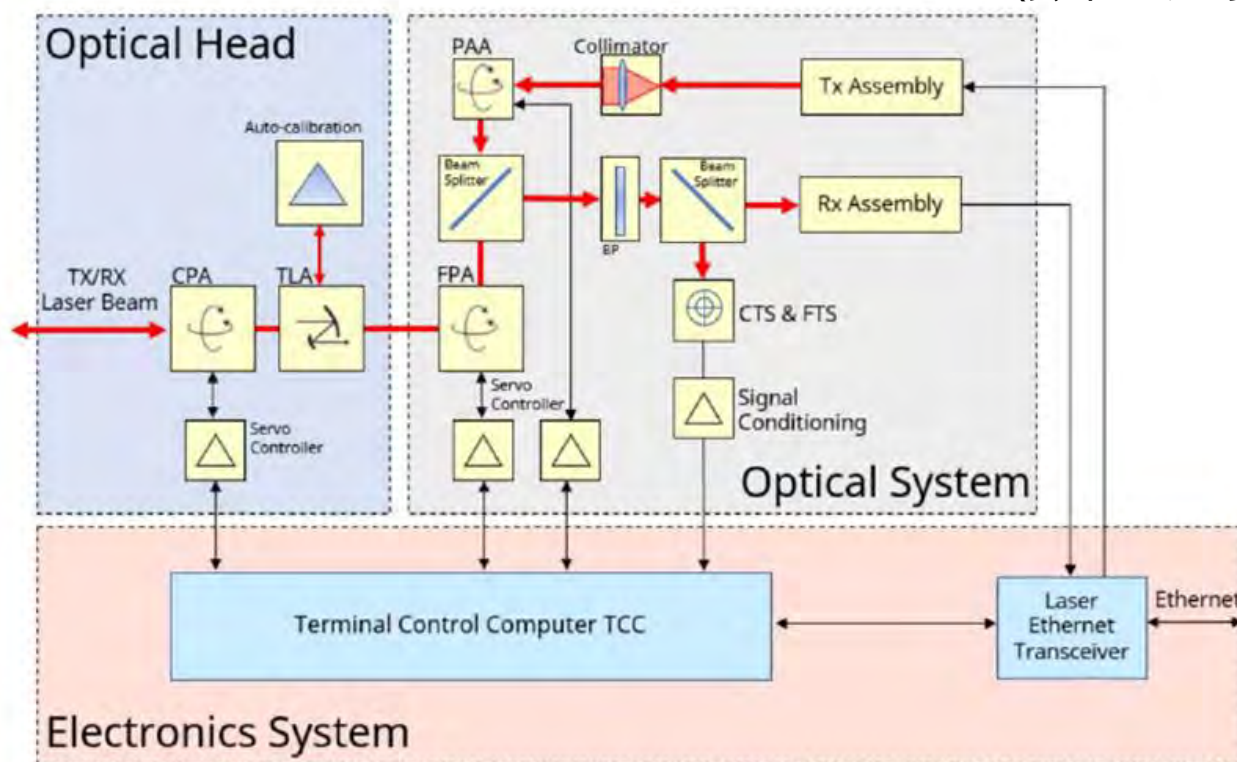
地上用光通信技術に合わせて波長 $1.55\mu\text{m}$ に合わせた開発が進んでいる。

- 地上用部品が $1.55\mu\text{m}$ 光ファイバー用途で開発されている。
- 原子力発電所のファイバーネットワーク用に耐放射線性の高い部品も開発されている。

最近の宇宙通信計画での開発課題事例

- 高出力ファイバーレーザー
- 高効率光増幅器
- 光変調器
- 室温動作の超高速InGaAs検出器

熱設計の課題: 小型・高出力なシステムでの検討課題
(ファイバーレーザーのプラグイン効率は10%未満)



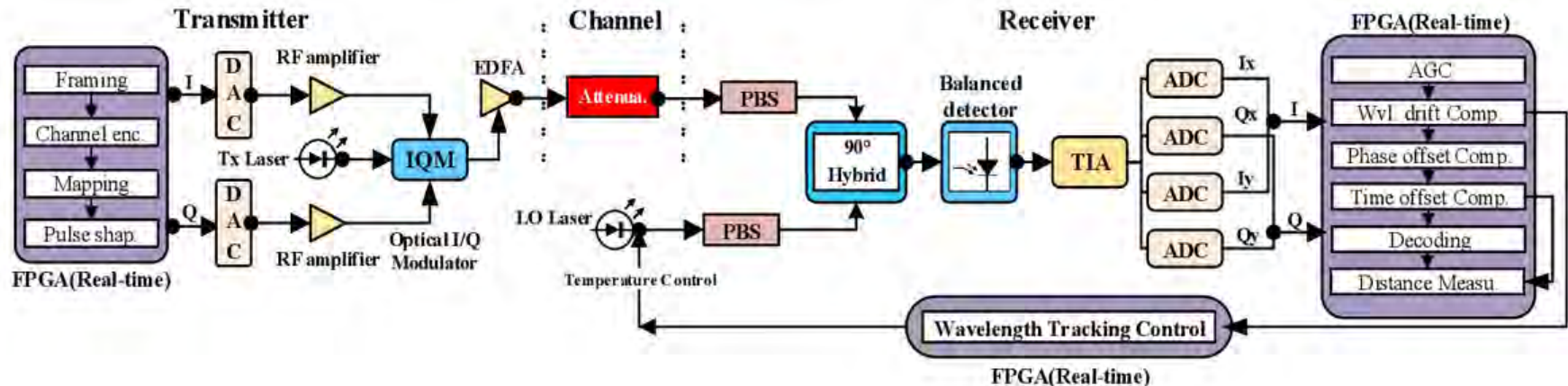
Condor Terminal Block Diagram
[Courtesy of Mynaric]

3-4.5 光通信による衛星間リンク(ISL) ② 基本機能(レンジング・捕捉・追尾) 22-002-R-019

レンジング (1/2)

衛星間測距は、衛星が編隊を組んで飛行しているときや、協調が必要なきにキーとなる基本情報である。通信では、ノード間レンジングと相対位置が衛星の同期の鍵となることがある。この情報は、GNSSシステム、PNT (Positioning, Navigation and Timing) システム、地球観測システムにおいては、さらに重要な情報となる。衛星間の直接接続を提供する衛星間リンクは、衛星間距離を計算するために使用されることがある。正確な測距は、GNSS衛星群の性能を大幅に向上させるとともに、地上システムへの依存を減らし、システムに自律性をもたらすことができる。これには以下の2種類の方法がある。

1. 最も正確な方法は、レーザー干渉法に基づいており、重力異常測定のためのGRACEのようなミッションで実装されている。2つの衛星に2つの位相同期レーザーを搭載する方法（高安定なレーザーと複雑なPLLソリューションが必要）と、1つだけ搭載する方法（高いコヒーレンスが必要：500km以上の距離では非常に困難）が提案されている。最近の論文では、1つの光ISLを測距と通信に同時に使用することが提案されている。これは24機のMEO衛星ケプラー-GNSSコンステレーションのケースである（下図参照）。



レーザー通信／測距リンクの統合化

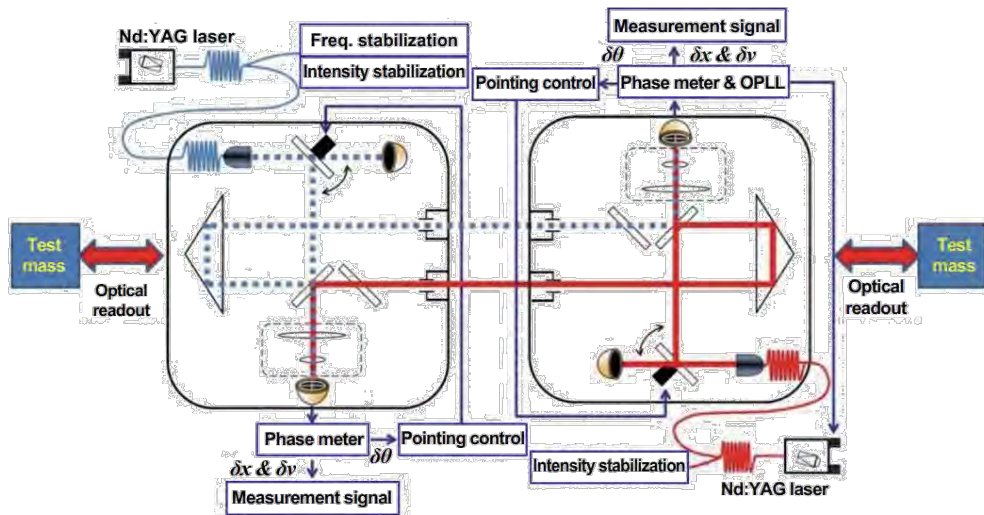
2. このクラスの方法は、2つの衛星間でキャリアを放出し、その伝搬遅延を測定することに基づいている。これは最も成熟した技術であり、RF ISLで実現可能である。DOWR (Dual One Way ranging) では、各衛星が測距信号を送り、測定した位相と時間を地上に送って距離を推定する。この方法では、2つの衛星の間に良好な同期が必要だ。一方、双方向の測距方式にはこのような欠点がない。これは、測距メッセージの送信と応答信号の受信の間の時間を測定するものである。衛星間の同期の問題を解決するために、様々な実装が提案されている。

このISL測距は、測位精度を上げるためにGPS受信機と併用して使用されることもある。

3-4.5 光通信による衛星間リンク(ISL) ② 基本機能(レンジング・捕捉・追尾)

22-002-R-019

レンジング (2/2)

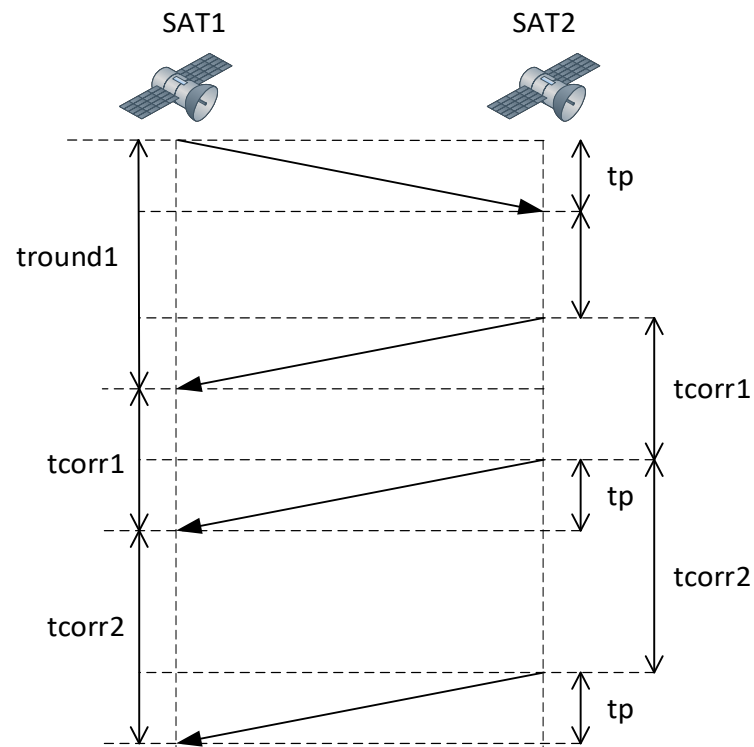


衛星間レーザー干渉計の模式図

マスター衛星は周波数とパワーを安定化させたレーザーを持ち、コヒーレント性の高い光源を生成する。

スレーブ衛星では、OPLLによりスレーブ・レーザーの位相を受信光にロックする。補正されたレーザー光は主衛星に戻り、位相計が衛星間距離の計算に必要な位相差を測定する。

[出典: Ultraprecision intersatellite laser interferometry (超精密衛星間レーザー干渉計)]



衛星間双方向測距信号の交換

衛星2から衛星1へ複数のレンジング信号を送り返し、水晶振動子の公差に伴う誤差を低減して精度を向上させる。

各衛星は、同一の送受信サブシステムを使用して、他方にキャリアを送ることができる。このため、他の方法でも同じプロトコルを使用することができる。精度は1 μ m/sのオーダー、すなわち1000kmの距離で1mとなる。

精度は1 μ m/sのオーダー、すなわち1000kmの距離で1mとなる。

3-4.5 光通信による衛星間リンク(ISL) ② 基本機能(レンジング・捕捉・追尾) 22-002-R-019

捕捉と追尾 (1/2)

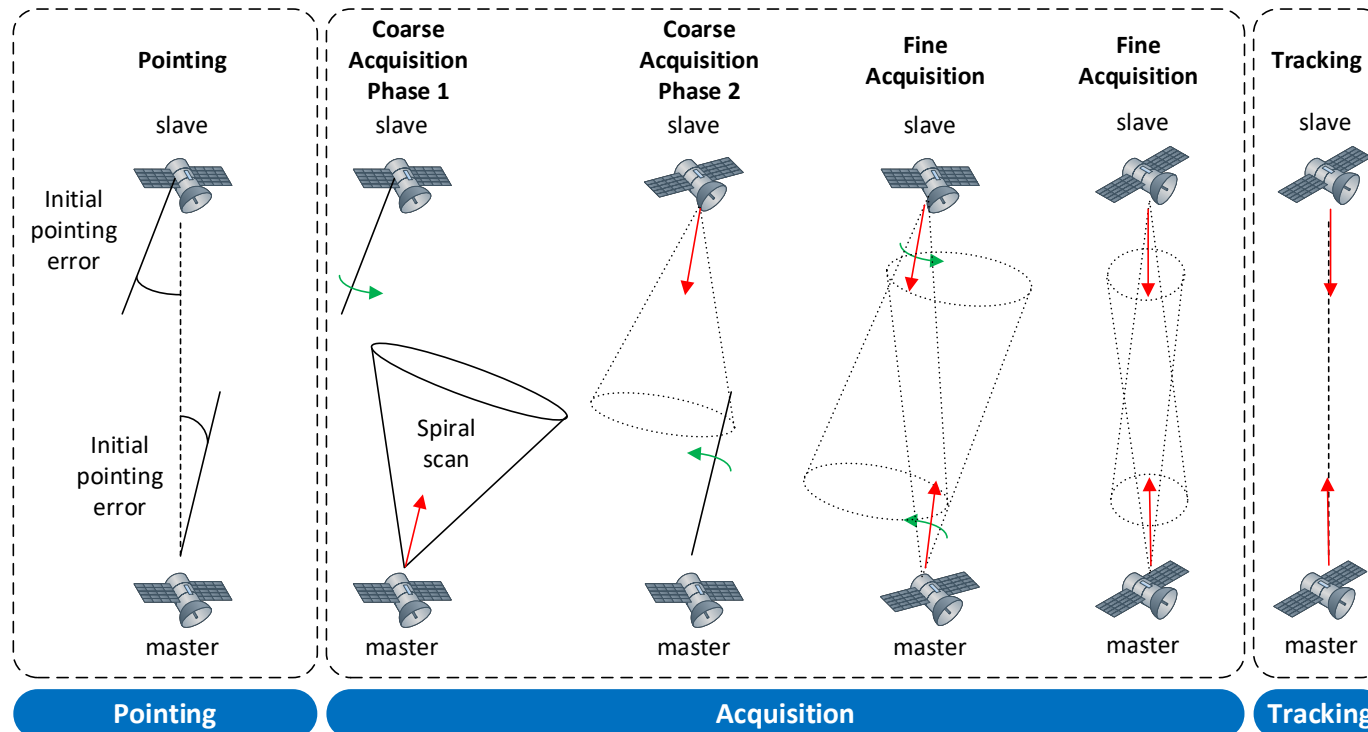
- 捕捉フェーズでは2台の端末のLOS: Line of Sightがそろるように調整される。ポインティングの目標精度は通常、 μrad のオーダーである。(一般的な衛星の姿勢制御精度は mrad のオーダー)
- 初期ポインティング取得は、衛星間で位置関連情報を交換し、初期LOSを確立することを想定する。
- 両端末は、限られた精度(通常約 0.2°)で、相手のLCTの方向を知る必要がある。捕捉はマスター・スレーブ方式でアライメント後に開始される。この方式は TESAT でも採用されている

Coarse Acquisition Phase 1: マスター端末はスレーブ端末に1回は当たるような大きな角度でスキャンを開始する。スレーブ端末は1回当たるごとに光パルスを検出し、スキャンごとにマスタービームの波面に次第に合わせる。最終的には小さな角度偏差が残るようになった段階でマスターはスキャンを停止する。

Coarse Acquisition Phase 2: スレーブ端末はマスターのスキャンに対して、残りの角度偏差分の角度をもってしっかりとアライメントされる。この角度は小さいので、シングルスキャンを素早く行うことができ、マスターはスレーブに対してアライメントを行う。

ファインアクイジションステップ: アライメントが正常に行われると、マスターは再びスキャンを開始する。1スキャンずつスキャン角度を小さくしていく。この段階は、2つの端子が $\sim 10\mu\text{rad}$ よりも良好にアライメントされたときに開始される。

トラッキング: このアライメントは、コヒーレントトラッキングセンサーが応答するまで改善される。トラッキングが開始されるとスキャンは停止し、端末がそのカウンター端末を追尾する。



捕捉フェーズの模式図

3-4.5 光通信による衛星間リンク(ISL) ② 基本機能(レンジング・捕捉・追尾) 22-002-R-019

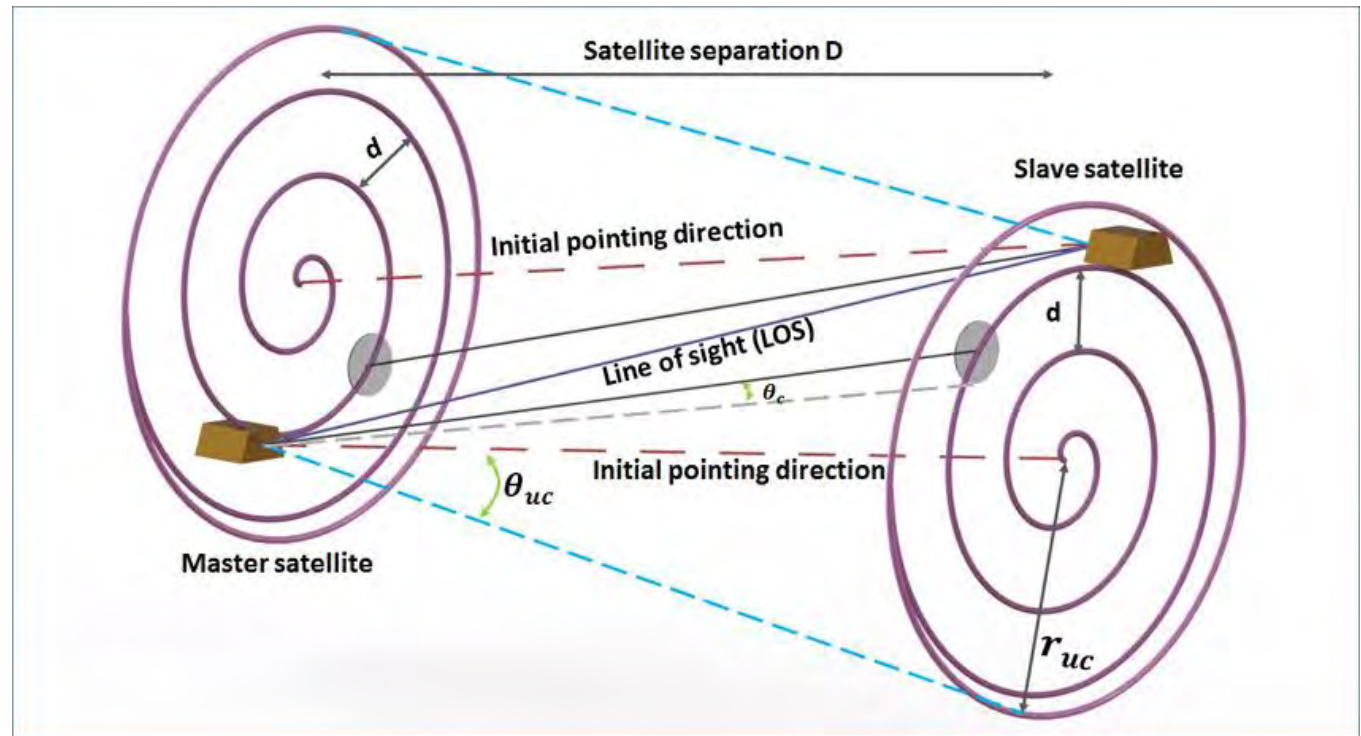
捕捉と追尾 (2/2)

捕捉フェーズ時間を短縮するために、いくつかのスキャンパターンが提案されている。

- 定角速度スパイラル
- 定接線速度アルキメデス・スパイラル
- リサーチパターン
- ランダムパターン
- レーザー変調方式

2台の端末の同期がとれると、走査フェーズは停止し、トラッキングフェーズが開始される。

トラッキングフェーズでは、端末検出器出力のアンバランスを利用して、方位角と仰角の補正を推定し、2台の端末のLOSが維持される。



捕捉過程の模式図

3-4.5 光通信による衛星間リンク(ISL) ③光端末の各国取組み状況

各国の取組み状況

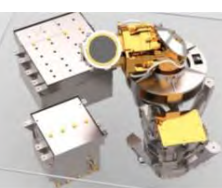

対象国	開発概況
欧州	ドイツのLCTメーカー2社はアメリカに拠点を構築 Tesat [1], Mynaric [2] ESA主導 : Hydron
米国	[Old Space] TDRS [オープン] NDSA Transport Layer 伝統的宇宙アプローチ [クローズ] Starlink, Kuiper 地上COTS品戦略 [R&D] DARPA Space-BACN 宇宙独自技術 LCT内の分業の加速
ロシア	情報量少なく詳細不明 (ウクライナへの侵攻以前は、製品の発表事例あり)
中国	情報量少なく詳細不明 (情報は少ないものの、開発は精力的に進めていると推察される)
インド	情報量少なく詳細不明 (開発品の発表事例もなく、また最近、Mynaricが進出との報道もあり、自国開発は進んでいないと推察される)
日本	[R&D] NICT Beyond 5G研究開発促進事業 [3]、NEDO経済安全保障重要技術育成プログラム [4] 光通信のコア技術とした宇宙データ中継サービス事業への参入が活発化

Reference

- [1] <https://www.tesat.de/news/press/925-tesat-spacecom-to-establish-us-manufacturing-facility>
[2] <https://spacenews.com/laser-communications-company-mynaric-opens-washington-office/>
[3] https://www2.nict.go.jp/commission/B5Gsokushin/B5G_keikaku/r03/B5G_006_keikaku_g_ver2.pdf
[4] https://www.nedo.go.jp/koubo/SM2_100001_00036.html

3-4.5 光通信による衛星間リンク(ISL) ③光端末の各国取組み状況

1 2 3 4 5 6
22-002-R-019

製品カテゴリ	光学部+トランシーバー	光学部+トランシーバー	光学部+トランシーバー	光学部+トランシーバー	光学部+トランシーバー	光学部+トランシーバー	光学部+トランシーバー
製造メーカ(国)			Tesat-Spacecom (独)			Mynaric (独)	
参考URL	https://www.tesat.de/					https://mynaric.com/products/pace/condor-mk3	
型名	LCT135(SCOT135)	Smart LCT	Tosiris (ISS向け、生産終了)	ConLCT (SCOT80)	CubeLCT	CONDOR Mk3	CONDOR Mk 2
外観							
サイズ[mm]	600x600x700	350x350x200 max/unit 4 unit構成	280x200x150	光学部:500x180x26 電気箱:260x110x175	90x95x35	光学部:344x210x170 電気箱:150x170x207	制御部込:533x272x230 制御部:340x259x163
質量[kg]	53	30	8	光学部:6.5kg 電気箱:8kg	0.397	-	-
電力[W]	150W (acquiisiton mode) 120W (comm. Mode)	150W max. (comm.mode)	40W	60-80W(データレートによる) (光学部:10W 電気箱:54W@1Gbps)	10W (ピーク)	3W	1 W
適用衛星	GEO	LEO	LEO (ISS)	LEO	LEO	LEO	LEO (500-1,250km)
送信速度[Gbps]	1.8 (bidirectional)	1.8	10/5/2.5/1.25 Gbps (LEO to GND) 1Mbps TC ch. (GND to LEO)	10 (bidirectional)	0.1	2.5 (>10,000km) Up to 10 Gbps fully support SDA T1 and T0 data rates Up to 100Gbps (option)	1.25 (5,000km)
受信速度[Gbps]	1.8 (bidirectional)	-	-	10 (bidirectional)	-	-	-
電源電圧[V]	-	-	-	-	-	22-38 V	28V /ミナル
送信波長[nm]	-	-	1,550nm	-	According to CCSDS (Telecom C-Band)	1,553/1,536 nm band	1,553/1,536 nm band
適用範囲	80,000km GEO-GEO / GEO-LEO / GEO-航空機 / GEO-地上	45,000km LEO-GEO	1,500km LEO-地上	8,000km LEO-LEO	1,500km LEO-LEO	-	-
データ/F	LVDS / Wizard Link	Wizard Link	Ethernet or Spacefiber	Ethernet	LVDS (for data) UART (for TM/TC)	-	Gigabit Ethernet, compliance with the 802.3 IEEE standard

3-4.5 光通信による衛星間リンク(ISL)





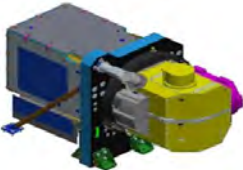
③光端末の各国取組み状況

1 2 3 4 5 6
22-002-R-019

製品カテゴリ	光学部+トランシーバー	光学部+トランシーバー	光学部+トランシーバー	光学部+トランシーバー	光学部+トランシーバー	—
製造メーカ(国)	テラス(仏)	Hyperion Technology(米) AAC Clyde Space(スウェーデン)	Skyloom/Honeywell(米)	MOSTCOM(露)	MOSTCOM(露)	Beijing Laser Starcom Technology Co., Ltd. (中)
参考URL		https://www.aac-clyde.space/who-we-are/our-brands/hyperion	https://www.skyloom.com/technology/	Home-MOSTCOM(moctkom.ru)		—
型名	OPTEL-μ	CubeCat	V'Ger10	SOT-90	SOT-150	—
外観						—
サイズ[mm]	207x277x65	96x96x96 (1U)	—	450x300x380	600x400x480	—
質量[kg]	8	1.33以下	—	16	40	—
電力[W]	45W	15W	—	60	100	—
適用衛星	LEO	LEO	—	LEO (ISS)	LEO	—
送信速度[Gbps]	1.25 Gbps	0.01/0.03/0.1 Gbps	—	10 Gbps (upgrade to 100 Gbps)	1.25 Gbps	—
受信速度[Gbps]	—	200kbps	—	—	—	—
電源電圧[V]	—	5V	—	—	—	—
送信波長[nm]	1,525~1,565	—	—	—	—	—
適用範囲	LEO/地上	1,000km (LEO-地上)	—	5,000km	50,000km	—
データ/F	—	—	—	—	—	—

3-4.5 光通信による衛星間リンク(ISL) ③光端末の各国取組み状況

1 2 3 4 5 6
22-002-R-019

製品カテゴリ 製造メーカ(国)	光送受信部	光送受信部	光送受信部	光AMP	光AMP	光学部
	OGL-OTRX	OLL-OTRX	HICALI-OTRX	OLL-OAMP(電源含む)	OLL-OAMP(電源含む)	OGL-OPT
型名	E3593	E3597	E4359	LNA/HPA		
外観						
サイズ[mm]	340x360x390	340x360x390	270x377x390	AMP:290x231x198 電源部:420x141x240	AMP:290x231x198 電源部:420x141x240	745x570x1,038
質量[kg]	19.9	20	15.9	AMP:8.98 電源部:7.20	AMP:8.98 電源部:7.20	75.7
電力[W]	61.6	66.42	94.8	AMP:85.5 電源部:28.5	AMP:80 電源部:45	10.31
適用衛星	GEO	LEO	GEO	LEO	GEO	GEO
送信速度[Gbps]	0.06	2.5	11.1	10 (bidirectional)	0.1	1.25 (5,000km)
受信速度[Gbps]	1.8	0.06	10	10 (bidirectional)	—	—
電源電圧[V]	32-35	48-52	96-103	—	—	28V ノミナル
送信波長[nm]	1,541	1,561	1,541	—	According to CCSDS (Telecom C-Band)	1,553/1,536 nm band
適用範囲	GEO-LEO	GEO-LEO	GEO-地上	8,000km LEO-LEO	1,500km LEO-LEO	—
データ/F	—	—	—	—	—	—



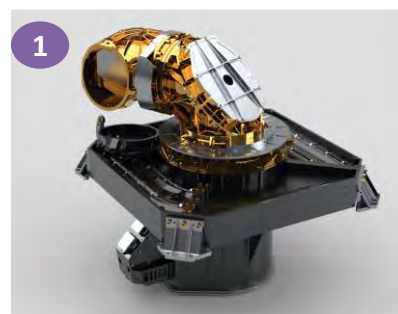
3-4.5 光通信による衛星間リンク(ISL) ③光端末の各国取組み状況

1 2 3 4 5 6
22-002-R-019

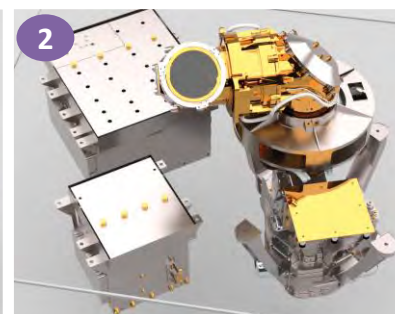
TESAT (独)

- 欧州における通信衛星用ペイロード機器の主メーカー
- 光通信機器についても、GEO、LEO、キューブサット用まで、幅広い用途に対応するレーザー製品群を開発

Product	Application
LCTI35	Gigabit Inter-Satellite Link (ISL) for Data Relay on GEO S/C working as reliable backbone; core element of the operational service for the European Data Relay Satellite System (EDRS); 14 flight models delivered / in production
Smart LCT70	Earth observation LEO satellites connected to GEOs in data relay scheme
SCOT80	LEO Broadband constellation
Cube LCT	CubeSat LEO to ground laser communication solution based on TESAT's long-term industrial experience and DLR Institute of Communications and Navigation's research knowledge



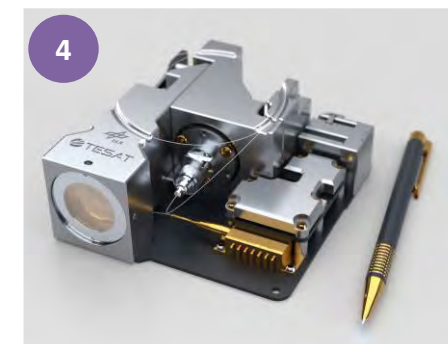
1/ LCTI35 – 1.8Gbps @ 80,000 km



2/ Smart LCT70 – 1.8 Gbps @ 45,000 km



3/ SCOT80 - 10 Gbps @ 8,000 km



4/ Cube LCT - 100 Mbps @ 1,500 km

[Source – TESAT]

3-4.5 光通信による衛星間リンク(ISL) ③光端末の各国取組み状況

Mynaric (独)

- 宇宙通信ネットワーク用レーザー通信機器メーカー
- Mynaric社とスペースリンク社は、2021年8月にMEO OISLに関する最終合意を発表した。総受注額は2800万ドル（約30億円）。
- Mynaric社のCondor Mk3端末は、Capella Spaceコンステレーションでも使用されている。

Product	Application
Condor Mk2	This terminal is built to address the LEO market of next-generation satellite constellations. It is fully compatible with SDA tranche 0.
Condor Mk3	The terminal is an evolution of CONDOR MK1 and SDA Tranche 0 compliant Mk2 terminals. This terminal presents a much smaller footprint, lower mass, and lower power consumption. These versatile terminals enable intra-plane and cross-plane inter-satellite connectivity in various orbits and Space-Space, Space-Air or Space-Ground communication. Mynaric claims a data rate up to 100 Gbps which seems quite high and is probably available for short distances only.



1



2

1/ Condor Mk2 – 1.25Gbps @ 5,000 km

2/ Condor Mk3 – 2.5 Gbps @ 10,000 km

3/ Electronic Box
[Source – Mynaric]



3

3-4.5 光通信による衛星間リンク(ISL)

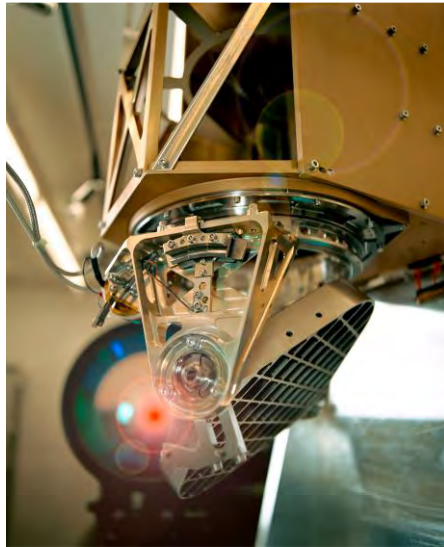
③光端末の各国取組み状況

1 2 3 4 5 6

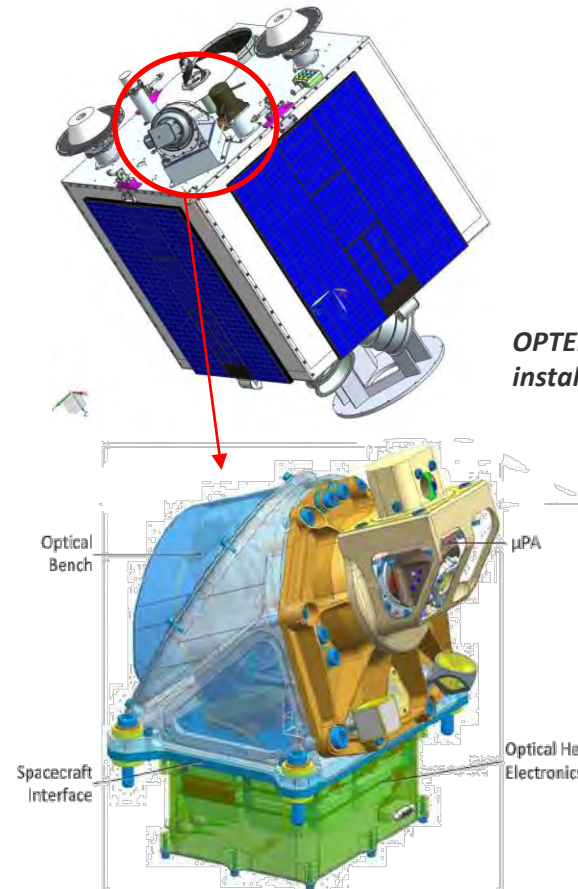
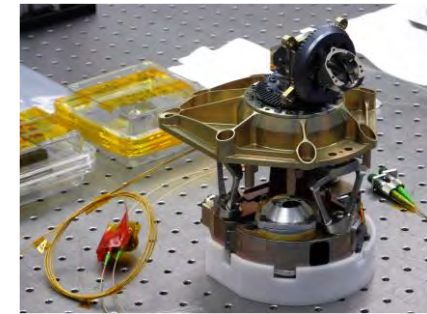
22-002-R-019

タレス/RUAG (スイス)

- タレス・アレニア・スペーススイス支社では、宇宙用の光学通信機器の製品ラインを担当。
- Lightspeedコンステレーション用のOPTEL-C端末の開発・製造中。
- 同部門は、元はRUAG社に属し、LEOの小型衛星用に設計されたOPTEL- μ を開発した。
- 5年前にThalesに買収された。



OPTEL-C (source : ESA)

OPTEL- μ : Optical head installed on a smallsatOPTEL- μ : detailed pictures

3-4.5 光通信による衛星間リンク(ISL)

③光端末の各国取組み状況

1 2 3 4 5 6

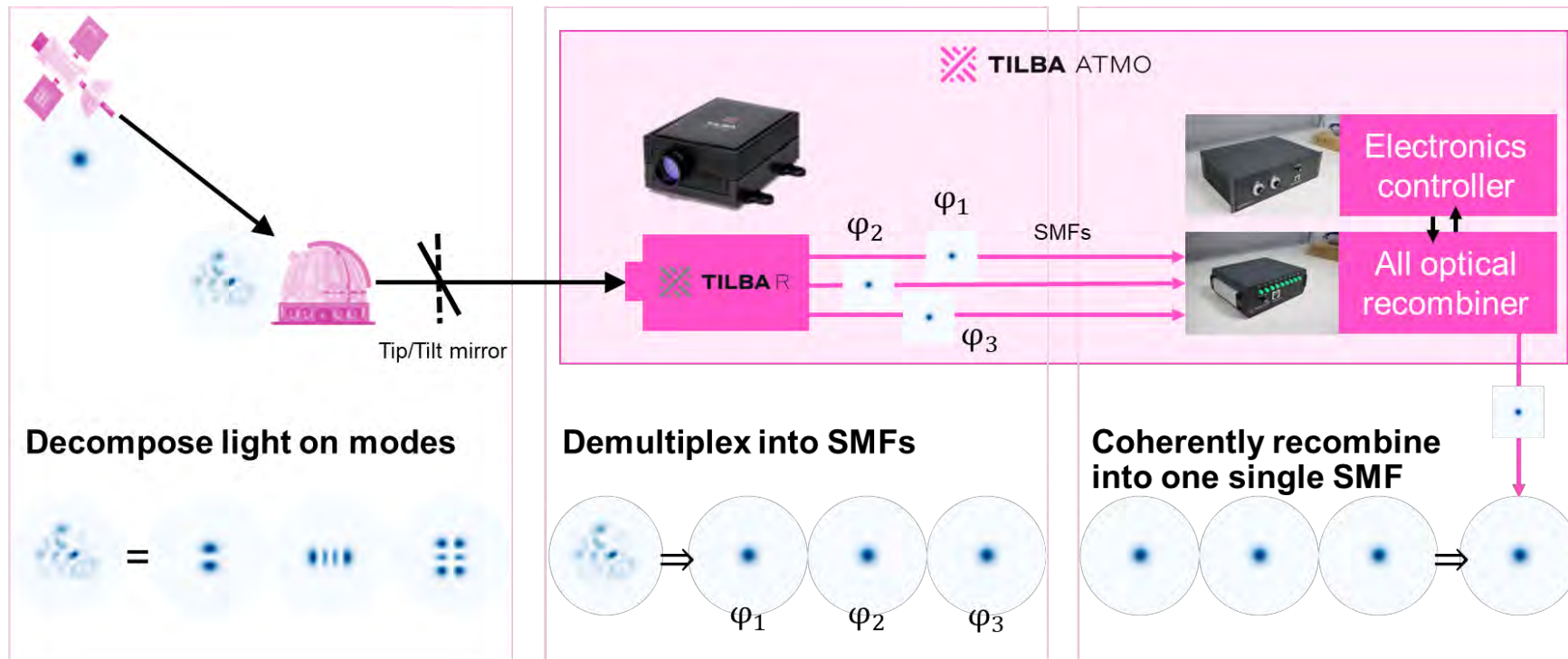
22-002-R-019

Cailabs (仏)

- 斬新な光学部品を開発。
- TILBAは、光の波面を適応的に変形させ、乱流効果を軽減する空間光合波器。
- 本製品は、地上の光端末出力に接続して使用され、様々な用途がある。

TILBA-ATMO(製品名)

- **衛星光通信の地上システム用**レーザービーム整形器
- 衛星からの光通信ダウンリンクで発生する大気による**ビームモードの崩れを整形**するためのモジュール
- レーザー波長1,550nmに対応



TILBA 適応型空間乱流緩和(出典:CAILABS)マルチプレーン光変換(MPLC)は、光のモード分解を行い、マルチモード変換を行うことで、受信光をシングルモードファイバー(SMF)に再形成する

出典:Euroconsult,
TILBA-ATMO(<https://www.cailabs.com/en/product/tilba-atmo/>)

3-4.5 光通信による衛星間リンク(ISL) ③光端末の各国取組み状況

HONEYWELL / BALL AEROSPACE (米)

- OISL端末(右図)は、新興の低軌道メガコンステレーション市場のニーズを満たすコンパクトなソリューション。
- この端末の構成
 - オプティカル ヘッド ユニット(OHU)：自由空間と光ファイバーのインターフェース
 - 送受信機：光と電気のインターフェース
 - 制御回路部：OHUを制御
- OHUは、望遠鏡に接続するジンバル式ミラーで構成され、捕捉・追跡システム(OPTRAC)に接続する。
- コンパクトなOPTRACユニットには、トラッキングセンサー、ファインポイントインテグレーション補正、ポイントアヘッド補正、チャンネル分離、光ファイバーカップリングが含まれる。
- この端末はモジュール設計になっており、特定のアプリケーションに合わせたカスタマイズが可能。例えば、波長選択、データレート、モデム処理、望遠鏡のサイズの変更など。
- モジュラー設計により、組み立てとテストが容易になり、経常的なエンジニアリングコストを最小化することができる。



Honeywell OISL

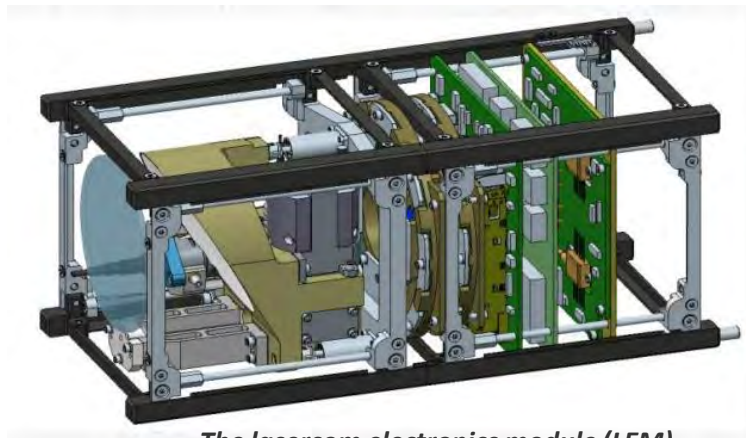
Three different aperture size configurations to suit SWaP constraints :

- High-speed, low power communication
- Full-duplex communication
- Fast and reliable link acquisition
- Independent pointing (does not rely on platform attitude control)
- Variable transmitter power, adaptable for data rates and operating conditions
- Optimized for cost-efficient volume production
- Modular design for adaptability to specific missions
- ITAR-free

3-4.5 光通信による衛星間リンク(ISL) ③光端末の各国取組み状況

Fibertek (米)

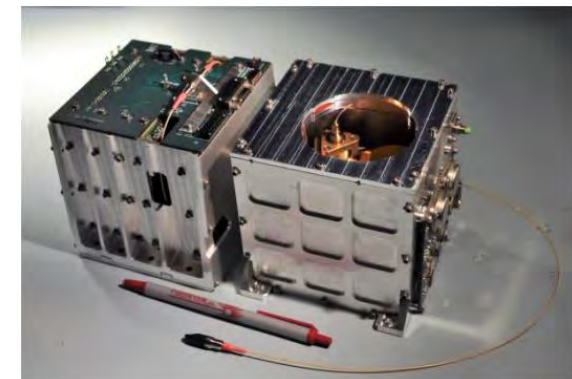
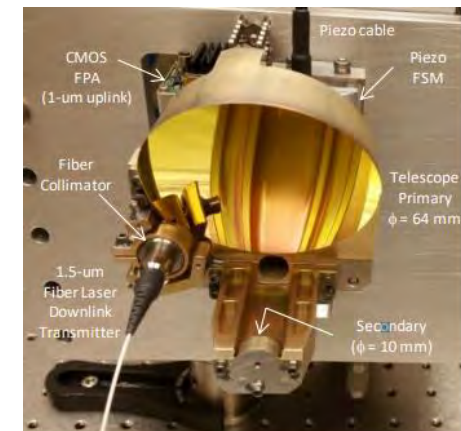
- 様々なプラットフォーム向けの光学機器を開発。
- すでにNASAのCALIPSOミッションにレーザー機器を提供している。
- 同社の光ターミナル LaserComは、NASAの様々なミッションに対応するために開発された。
- リングとメッシュのトポロジーをサポートし、粗いポインティングにはTRL9の技術を使用。
- モジュール式で拡張性があり、LEOで最大10Gbpsの通信が可能。



The lasercom electronics module (LEM)

It consists of the power distribution unit (PDU), RF modem with optical transceiver, erbium-doped fiber amplifier (EDFA), and a system controller. The PDU supports 12V or 28V unregulated bus supply and provides power to all LEM and LOM subsystems. The modem has a Gigabit Ethernet (GbE) client interface, field programmable gate array (FPGA)-based encoding/decoding, and an optical transceiver for the FSO interface.

CubeSat form-factor for up to Gbps data links from LEO to GEO orbits.



3-4.5 光通信による衛星間リンク(ISL)

③光端末の各国取組み状況

1 2 3 4 5 6
22-002-R-019

スペースマイクロ (米)

- 宇宙用レーザー通信システムに特化した会社。
- 同社の端末は、光モデム、光パワーアンプ、ポインティング、アキュジション、トラッキング(PAT)エレクトロニクスで構成されている。
- ハイスループット接続は、400Gbps以上とされている。



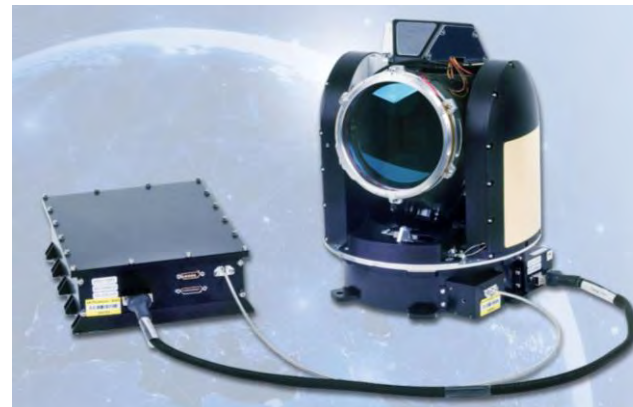
μLCT Laser Communication Terminal, Single aperture
Single Aperture Optical Head Assembly capable of providing full duplex GEO-to-GEO crosslinks at 80,000 km.



μLCT Laser Communication Terminal, Dual aperture
Dual Aperture Optical Head Assembly, ideal for most LEO and MEO applications. High throughput connectivity to 400+ Gbps

CACI INTERNATIONAL (米)

- CACI internationalは、2021年12月にSA Photonicsを買収し、フォトニック設計・製品開発に特化したCACI's Photonicグループを設立。
- 2022年5月には、米国国防総省のLEOプロジェクトで、宇宙間光通信のデモンストレーションを実施。



CrossBeam™ system for satellite crosslinks

3-4.5 光通信による衛星間リンク(ISL)

③光端末の各国取組み状況

1 2 3 4 5 6

22-002-R-019

[ロシア] 光通信関連の話題

10Gbps級光通信装置の開発を実施中、入手可能な情報は限定的。

◆ ロシアMostcom社による衛星間光通信装置
開発 [1]

- International Conference SATELLITE RUSSIA/ AND CIS 2021で発表
- 6年かけて衛星間通信用光ターミナルの開発に取り組んでいる
- 開発に6年、ターゲットは衛星間、衛星—地上局間通信への適用



The terminals are intended for the organization of high-speed communication channels at distances up to 50,000 km in outer space. The equipment can be used both in intersatellite communication channels and in the Space-Earth channels:

- unified optical receiving-transmitting path and service information exchange protocol for any application scenarios;
- function of measuring of the mutual angular coordinates and the inclined distance to the subscriber;
- hemispherical viewing area with a double loop of the direction of communication stabilizing;
- possibility of increasing the functions of equipment, considering the introduction of a quantum key distribution and video surveillance system (ERS);
- the best transmission speed, dimensions, weight and power consumption.

	SOT-90	SOT-150
Distance	5 000 km	50 000 km
Data rates	10 Gbps (upgrade to 100 Gbps)	1.25 Gbps
Weight	16 kg	50 kg
Autonomous Life	more than 7 years	more than 7 years
Dimensions	450x300x380 mm	600x400x480 mm
Power consumption	60 W	100 W

引用元：[2]

Reference

[1] <http://www.moctkom.ru/mostcom-took-part-in-satellite-russia-cis/>[2] <http://www.moctkom.ru/space-terminals/>

3-4.5 光通信による衛星間リンク(ISL) ③光端末の各国取組み状況

[中国] 光通信関連の話題

官、民の双方での注力が伺われるが、入手可能な情報は限定的。

- ◆ 第二世代データ中継衛星(天鏈2号03星)の打ち上げ (2022年7月) [1]
 - 役割：有人宇宙機へのデータ中継および計測制御サービス、宇宙機の打ち上げの際の計測制御サポート
 - 光通信の利用：不明
- ◆ 中国科学院 北斗衛星～地上間の光通信に成功 (2021年11月) [2],[3]
 - 機器製造メーカー：Changchun Institute of Optics and Mechanics
 - 達成技術：高高度 + 中高度衛星を使用した2-wayトラッキング、セルフトラッキング技術
- ◆ HiStarlink社による商用向け技術開発 [4]
 - HiStarlink社：低出力、小型光通信機に特化した設立5年の企業
 - 5,000kmまでの距離にて80Gbpsまでの2ch高速通信が出来る機器を開発済み

Reference

- [1] https://spc.jst.go.jp/news/220702/topic_3_02.html
- [2] <https://inf.news/en/science/ebb34e2b0944df8226d7cbf6e575a1e1.html>
- [3] <https://insidegnss.com/beidou-conducts-laser-communication-experiment-steps-ahead-of-u-s-could-improve-satnav-accuracy/>
- [4] <https://circleid.com/posts/20220117-the-us-china-technology-cold-war-battle-over-optical-communication-in-space>

3-4.5 光通信による衛星間リンク(ISL) ③光端末の各国取組み状況

[印] Indian Data Relay Satellite System (IDRSS)

インドによる有人ミッション：Gaganyaanのサポートが主目的 光通信の利用予定はなし

◆ IDRSS [1]

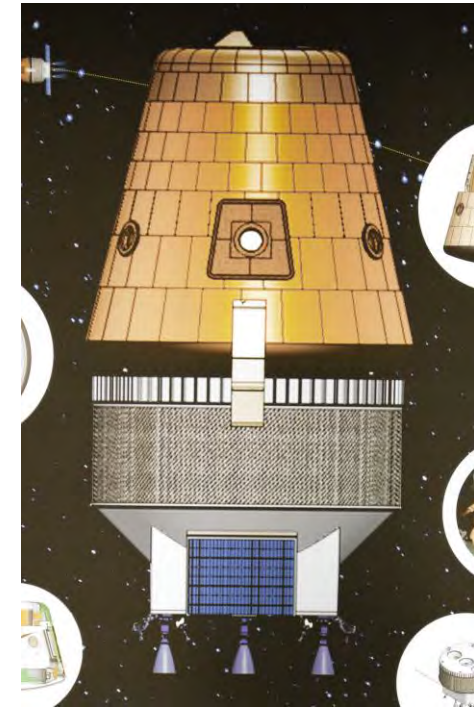
- ISRO(Indian Space Research Organisation)による宇宙データ中継システム
- 2023年にCMS-4, IDRSS-2の2機の衛星を打ち上げ予定
- 静止衛星軌道、2 ton級、S帯,Ku対,Ka帯の通知装置を装備、光通信は無し

◆ GaganyaanにおけるIDRSSの役割

- ロケットの状況確認、データ中継サービスの提供

◆ Gaganyaan [2]

- ISROによる有人宇宙飛行プログラム
- 最大3名の搭乗、400kmの低軌道で7日間程度
- 有人機打ち上げ時期：2024年以降 (大幅遅延中)



Gaganyaan イメージ図 [2]

Reference

[1] https://en.wikipedia.org/wiki/Indian_Data_Relay_Satellite_System

[2] <https://en.wikipedia.org/wiki/Gaganyaan>

3-4.5 光通信による衛星間リンク(ISL) ③光端末の各国取組み状況

[日本JAXA] JDRS, JDRS-2

**2027年にデータ中継衛星2号機を打ち上げ予定、光データ中継の扱いは未定
民間による宇宙データ中継サービスが日本においても近い将来に開始される見込み**

- ◆ 2020年10月にデータ中継衛星1号機(JDRS)を打ち上げ
 - 地球観測衛星向けの光データ中継システム(ODRS)を併設、2Gbps

- ◆ 宇宙基本計画工程表における扱い^[1]
 - 2027年にデータ中継衛星2号機(JDRS-2)を打ち上げ
 - 光データ中継システムの扱い：未定

- ◆ 日本における2027年までの環境変化：光通信を強みとした民間サービス提供の開始
 - Space Compass^[2]
 - WARPSPACE^[3]
 - Sony Space Communications Corporation^[4]

Reference

- [1] https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei_fy02/kaitei_fy02rev.pdf
- [2] <https://space-compass.com/>
- [3] <https://warpspace.jp/>
- [4] <https://www.sony.com/ja/SonyInfo/News/Press/202206/22-023/>

3-4.6 強み・弱み分析

- 欧米では衛星通信システムにおける軌道上ネットワーク化技術が進行している。
- 軌道上での通信手段は光通信が急速に進行中。

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LEO-GEO間の観測データのリー用途から衛星間通信へ需要拡大。 ・通信大手がGEO + LEOのマルチオービット通信網を計画。 ・Starlink(SpaceX) 衛星間通信機能を第一世代後半で開始と発表。第二世代で標準装備。 ・他の主要通信LEOコンステレーションも同様の計画を表明。OneWeb(Gen2)、Lightspeed(Telesat)、Kuiper(Gen2) ・トランスポートレイヤー(SDA*宇宙開発庁)が複数のLEOコンステレーション間での通信機能を計画。 <p>技術動向</p> <ul style="list-style-type: none"> ・衛星間通信では、ノントランスペアレント(再生中継)技術が必須となる。 ・地上系5Gで採用されているgNodeB機能の搭載化検討が必要。ただし消費電力・発熱量の制約とのトレードオフが必要。 ・通信手段としては光通信が主流になりつつある。 	<p>宇宙通信ネットワーク観測衛星のデータリレーで実績あり</p> <ul style="list-style-type: none"> ・DRTS-ALOS2 Ka帯240Mbps ・LUCAS⁽¹⁾(JDRS搭載) 光1.5μm, 1.8Gbps (今後ALOS3で実証) <p>光通信実績 JAXA開発実績あり</p> <ul style="list-style-type: none"> ・OISETS⁽²⁾で衛星間通信と地上局との通信を実施(ともに世界初)。 ・LUCASがJDRSに搭載されており、光地上局との間の捕捉・追尾を実施し光リンクの成立を実証('21-1月)。 	<p>強み</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 軌道上実績があること。DRTS、OISETS、LUCASの各衛星間通信システム・機器。 <p>弱み</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 通信回線に必要なノントランスペアレント(再生中継)技術の実績不足。 ✓ 機器レベルの輸出実績がない。(追尾受信機、光通信機器など)

日本における重要項目と目標とすべき達成レベル

先行する欧米へのキャッチアップをはかるべきではないだろうか。

継続的開発項目候補

- 1.衛星間メッシュ通信ネットワーク**
 - ✓ 宇宙メッシュネットワーク制御技術
 - ✓ ノントランスペアレント(再生中継)パイロード技術
 - ✓ 5G用gNodeB機能の搭載化
 - ✓ NTN・移動体通信トラフィック制御アルゴリズム
 - ✓ マルチオービット通信システム (G/Wや衛星間通信によるNW統合技術)
- 2.光通信システム技術**
 - ✓ 捕捉・追尾技術
 - ✓ 波長多重化、デジタルコヒーレント、バースト等
- 3.光通信端末機器技術**
 - ✓ 高出力光増幅器
 - ✓ 光マルチプレクサスイッチ等

*1) LUCAS: Laser Utilizing Communication System 光衛星間通信システム

*2) OISETS: Optical Inter-orbit Communication Engineering Test Satellite

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)

3-5 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査

22-002-R-019

(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。

(調査結果)

- (1) 各国の衛星を用いたQKDについて事業的側面と技術的側面で調査を実施した。
- (2) 調査結果をもとに、日本の強み・弱み分析を実施した、

3-5 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査 22-002-R-019

3-5 エグゼクティブサマリ

項目	重要なトレンド
3-5.1 衛星量子鍵配送 (QKD) の必要性	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 量子コンピュータによる暗号解読への対策として耐量子コンピュータ暗号(PQC)と量子鍵配送(QKD)に期待 ▶ 光ファイバによるQKDには距離的制約があり、グローバル規模で鍵配信実現するためには衛星QKDが必須
3-5.2 主要国のQKDおよびPQCの取り組み状況の概要	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 米国はQKDは民間に任せて、PQCの標準化と普及に注力 ▶ 欧州・中国はQKDに注力し、実用化に向けた実証を加速
3-5.3 QKDの利活用例	<ul style="list-style-type: none"> ▶ EU加盟国、欧州委員会およびESAが構築計画中のEuroQCI (EU全域をカバーするQKDをベースとする量子通信インフラ) では、宇宙を含む8つのユースケースを想定
3-5.4 各国の衛星QKDの取り組み状況	<ul style="list-style-type: none"> ▶ ESAはQUARTZ・QKDSat・SAGAの3プロジェクトをEU全体で推進 ▶ オランダ・ドイツ・イギリス各国も、民間を含む実証実験を多数実施 ▶ 中国は墨子号を運用延長し、重要な技術実証を次々と成功 ▶ 日本は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
3-5.5 日本の強み弱みと技術開発戦略	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 衛星QKDの早急な実証機会獲得に向けて開発項目を選択&集中 ▶ 技術的優位性を確保しながら、グローバルネットワーク実現に向けた国際協力関係を構築

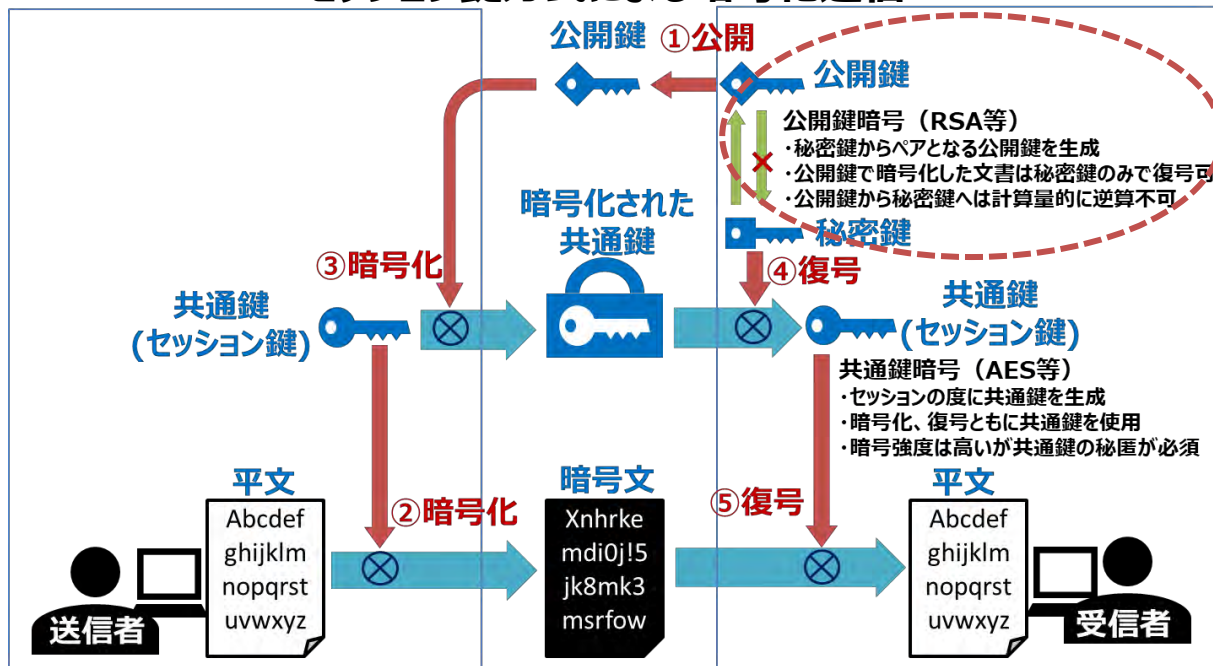
QKD : Quantum Key Distribution、PQC : Post-Quantum Cryptography



3-5.1 衛星量子鍵配送 (QKD) の必要性

量子コンピュータによる暗号解読への対策として、耐量子コンピュータ暗号(PQC)と量子鍵配送(QKD)に期待

セッション鍵方式による暗号化通信



送信者側

受信者側

- 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
- 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

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

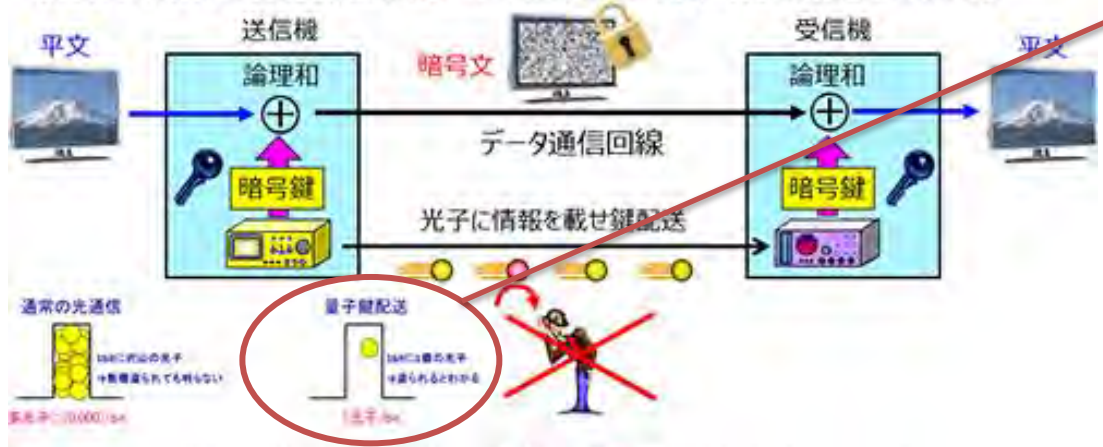
対策2

盗聴できない方法で共通鍵を送付
量子鍵配送
QKD: Quantum Key Distribution

3-5.1 衛星量子鍵配送 (QKD) の必要性

光ファイバによるQKDには距離的制約があり、グローバル規模で鍵配信を実現するためには衛星によるQKDが必須

- 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)



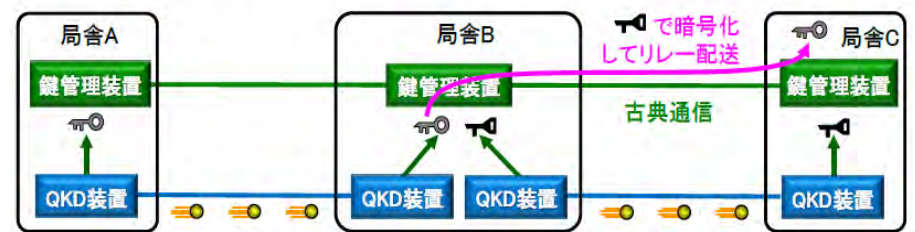
非常に微弱な光信号で通信するため
長距離(100km~)のファイバ伝送が困難

信頼できる中継局で中継
or
衛星を利用した中継・鍵配信

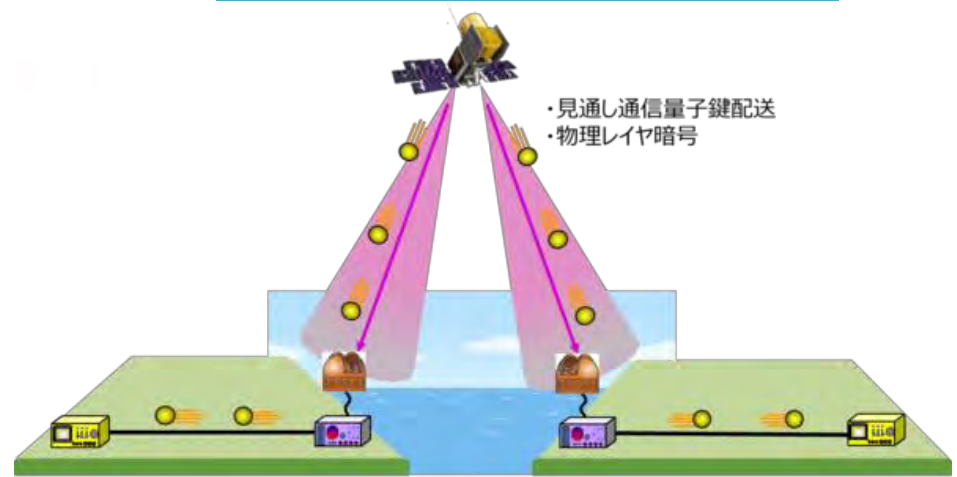
どんな盗聴も確実に検知 情報漏洩を完全に防止

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

ネットワーク化は、局舎(電気処理)を介した鍵のパケツリレーで実現。



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



地上系量子鍵配送 A地点ネットワーク 地上系量子鍵配送 B地点ネットワーク

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



3-5.2 主要国のQKDおよびPQCの取り組み状況の概要

22-002-R-019

米国ではQKDを民間に任せて政府はPQCの標準化と普及に注力しているが、欧州・中国はQKDに注力し実用化に向けた実証を加速（特に欧州各国は、戦前・戦後のエニグマ暗号に関する活動に見られるように、暗号技術の自国保有に強い執着があることが背景している）

技術	量子鍵配送(QKD)	耐量子計算器暗号(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。	◎ 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、現在は4つの暗号アルゴリズムまで絞り込んで、4回目(Round4)の評価を実施中。
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。	△ 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。	△ 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	○ 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。	△ 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。

◎:リーダーとして推進、○:積極的、△:追従的または消極的

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の利活用例（EuroQCIのユースケース）

EU加盟国、欧州委員会およびESAが構築計画中のEuroQCI（EU全域をカバーするQKDをベースとする量子通信インフラ）では、宇宙を含む8つのユースケースを想定

ユースケース名称	概要
通信ネットワーク	SDN（Software-Defined Networking）やNFV（Network Function Virtualization）等の仮想化技術は通信の経路管理を困難化し、盗聴等のリスクを高めるため、QKDの適用によって安全性を高めることが重要になる。
データセンター	サイバー攻撃が成功すれば、その影響は極めて大きく、データセンターの保護は最優先の課題である。適用例としては、データセンター本局とバックアップ局間の通信を、QKDで保護する活用方法が考えられている。
重要インフラ	エネルギー、デジタルサービス、航空輸送、銀行、水供給、医療等の重要インフラへのサイバー攻撃は脅威として認識されており、QKDはアクセスを必要とするエンティティの認証、および交換・保存されるデータの機密性と完全性を保証できる
時刻同期	時間に関連するネットワーク運用の正確な同期は、配電、通信、金融取引などの中核機能であり、時刻信号の配分をQKDで保護することで悪意のある同期を防止することができる。
政府機関のデータ保管・通信	政府機関のデータは最高レベルのセキュリティが要求され、機密保持の寿命は最大で50年と長いため、傍受・蓄積後の解読に対して、QKDによって提供される保護レベルの向上は間違いなく価値がある。
宇宙機器	宇宙システムは非常に大きな投資であり、その保護に多大なリソースを割くことは合理的である。QKDは、地上（宇宙） - 宇宙（地上）間の通信を保護するために使用される。
防衛	コマンド&コントロールシステムに関する機密情報の送信や、防衛機関、軍事基地、軍事プラットフォーム、センサー、その他の装置に対する鍵の配布などが考えられる。遠方の前方作戦基地にも届くような長距離の安全な通信ネットワークが望まれており、衛星量子インフラはこのギャップを効率的にカバーするのに強力な助けとなる。
分散型量子コンピューティング	今後40-50年の間、量子コンピュータは非常に高価なままであると予想され、量子コンピュータセンターでの遠隔量子コンピュータサービスの利用を促している。量子通信インフラを利用することで、遠隔地での量子コンピューティングが可能になる。

出典：<https://etendering.ted.europa.eu/document/document-file-download.html?docFileId=68917>

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 各国の衛星QKDの取り組み状況 (サマリ)

Country	Mission	Member	Satellite	Link*1	Protocol*2	Phase
米国	Marconi 2.0	NASA, MIT-LL, QKD研究環境 (NSQL)をISSに構築	ISS	DL (ISL)	ENT-	実験:2022-
中国	QUESS	CAS, USTC, 商用サービスに向けたQKD装置の小型化やQKD鍵配送の高速化とともに、コンステレーションでの量子ネットワーク化へ向けた開発を加速。	LEO (635kg) PL:230kg	DL	PM-/ENT-	実験:2017
	Tiangong-2		中国版ISS PL:53kg	DL	PM-/ENT-	実験:2018
	Jinan 1		LEO(100kg)	DL	PM-/ENT-	商用:2022-
ESA	QUARTZ	SES, TESAT(Scylight), EuroQCI(EU)として連携	LEO(Eagle1 300 kg)	DL	PM-	商用:2024-
	QKDSat	ArQit, BT, QinetiQ, Mynacric, G7 政府 FQS衛星としてEU以外(Five Eyes)とも連携	LEO(QKDSAT1,2 300 kg)	DL	PM-/ARQ19	商用:2023-
	SAGA1/2	EuroQCIへ向けたLEO/GEO衛星QKDの社会実装	LEO/GEO	DL	PM-/ENT-	2020-/2024-
オランダ	GEOQKD	TNOとEutelsat(仏)でSAGA 2 へ向けた先行取組	GEO PL: >570 kg	DL/UL	ENT-(MDI-)	実験: FS
ドイツ	QUBE I	DLRが保有するCubeSat技術とレーザー光端末技術を活用しつつQKDを推進	3U-Cubesat	DL	PM-	実験:-2022
	QUBE II		1-3U	DL(ISL)	PM-	実験:2023-
英国	QUARC	Craft Prospect社,15基衛星43地上局で英国カバー	6U	DL	PM-	実験:2024
	ROKS-IOD	Craft Prospect社/BT社	6U-Cubesat	DL	PM-	商用:2023
	QKD Qubesat	RAL Space社とCQT(シンガポール)	3U-Cubesat	DL	ENT-	実験:2021
カナダ	QEYSSat	CSA, Honeywell, COM-DEV	LEO	UpLink	PM-/ENT-	実験:2024
シンガポール	SpooQySat	CQTとSpeQtral社でエンタングル光源の搭載化	3U-Cubesat	DL	ENT-	実験:2019-
	SPEQTRE	RAL SPACE(英), SpeQtral	3U-Cubesat	DL	ENT-	商用:2024-
	SpeQtral-1	Thales Alenia Space ,SpeQtral/QCT	3U-Cubesat	DL	ENT-	商用:2024-
日本	衛星通信における量子暗号技術の研究開発		LEO(ISS)など	DL	PM-	地上実証:
	グローバル量子暗号通信網構築のための衛星量子暗号技術の研究開発		GEO/LEO	DL	PM-	地上実証:
ロシア	2019年に研究開始-2024年に軌道上実証のロードマップを策定		LEO	DL	-	実験:2024-

*1; DL: Downlink、UL: Uplink、ISL: Inter Satellite Link

*2; PM-QKD: Prepare and Measurement Quantum Key Distribution、ENT-QKD: Endangerment Quantum Key Distribution

3-5.4.1 米国の取り組み 1/2

- 2004年に世界に先駆けた量子ネットワーク構築・運用したものの数年で停滞[1]。
- 2018年に米国家量子イニシアティブ法の成立や最大 \$ 13億(5年) 投資確定といった動き。その一方で、**米国家安全保障局 (NSA) のQKD技術に対する否定的な評価**[2]があるため、QKD研究開発や人材育成の成長戦略の推進 (Science first 方針) に留まり、商用化へ向けた動きは見えていない。
- **NSAは耐量子計算機暗号 (PQC) 技術を推奨**しており、商用化も先行して進んでいる。
- NASAとMIT-LL主導で既存の光通信プログラムを活用しつつ、ISS上に量子通信インフラを構築して、新しい量子システム・サービス開発の推進を可能とするNational Space Quantum Laboratory (NSQL)という実験環境の提供構築を開始[3]。また、NASAを中心に量子衛星通信計画(Marconi 2.0)として欧州-北米間での量子暗号リンク計画を策定中[4]。

National Space Quantum Laboratory (NSQL)



- Integrated space and ground quantum network
 - Quantum downlinks, uplinks and crosslinks
 - NASA's International Space Station (ISS) will provide flexible access to space
 - A free-flyer option can be utilized to complement the ISS
- High-rate entanglement distribution for quantum-enabled sensing and timing applications
- Supports incorporation of future technology
 - Supports hybrid space/terrestrial quantum network architectures
 - Complementary to fiber-based quantum network effort



NSQL program 概要[3]

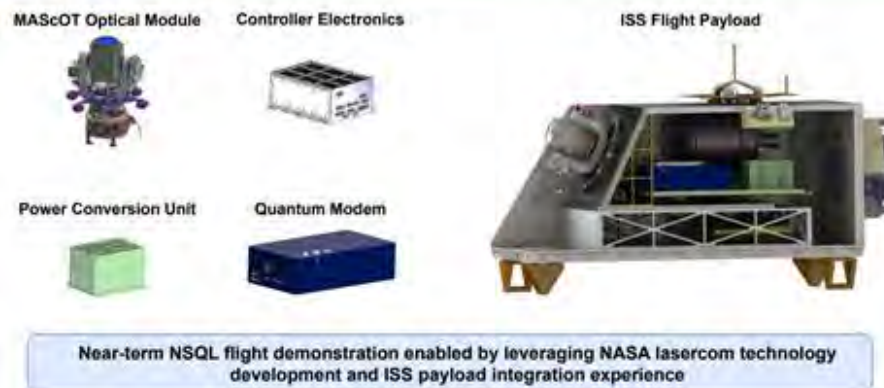
[Reference] [1]<https://arxiv.org/ftp/quant-ph/papers/0503/0503058.pdf>

[2] <https://www.nsa.gov/Cybersecurity/Quantum-Key-Distribution-QKD-and-Quantum-Cryptography-QC/>

[3] https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/iac-19-b2.7.12_overview_of_nasa_nsql_program_paper.pdf

[4]<https://www.wired.com/story/nasas-plan-to-turn-the-iss-into-a-quantum-laser-lab/>

Quantum Terminal Subsystems and Payload

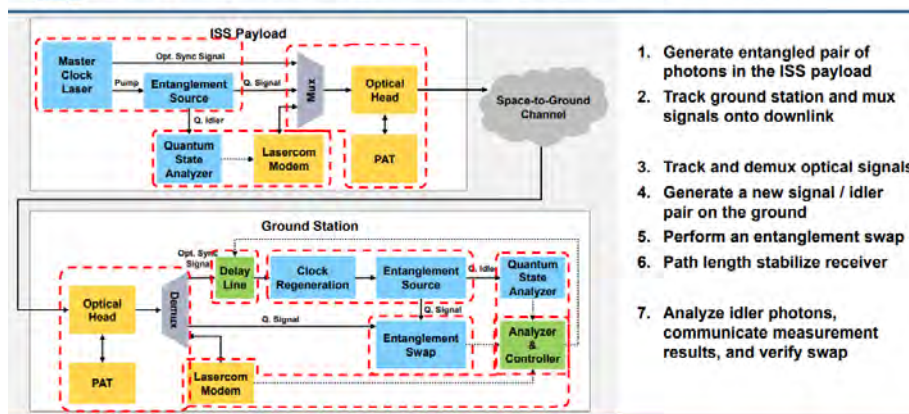


ISS搭載ペイロード[3]

3-5.4.1 米国の取り組み 2/2

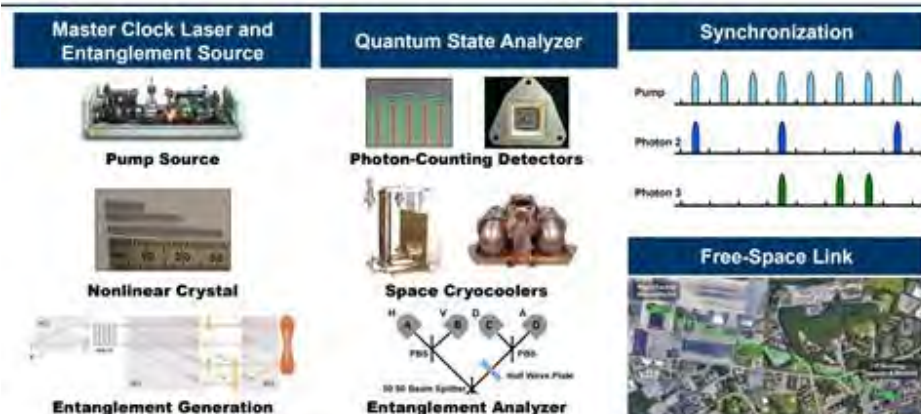
- E91(Ekert)プロトコルをベースとしたエンタングルメント配送を採用し、**Untrusted satellite QKDの実現**を目指している[1]。Untrusted node化は、Trusted node (BB84など) と比べて、衛星自体へのセキュリティ要件を緩和できることや、サイドチャネル攻撃に対する耐性向上といったメリットがある。
- さらに、**量子リピータや量子テレポーテーションといった次世代QKD-NW技術の先行獲得**を見据え、エンタングルスワッピング技術を導入したシステムアーキテクチャを導入。
- キーとなる搭載化技術： 高安定クロック光源/ エンタングルメント光源 (非線形結晶等)/ ベル測定器(SSPDデバイス/APDデバイス)量子状態測定器とその冷却技術/時刻同期技術/受信器間の同期情報を共有する (古典) 通信機器や計算機/自由空間リンク技術。
- 搭載側レーザ通信端末： ILLUMA-T プログラム開発品のMASCoT (Modular, Agile, Scalable Optical Terminal) を利用。地上局： LLCD, LCRD, ILLUMA-T等のレーザ通信プログラムで構築した地上局を利用

Single-Span Entanglement Swap System Architecture



エンタングルスワッピングシステムアーキテクチャ

Quantum Modem Technology Development



キーとなる搭載化技術

[Reference]

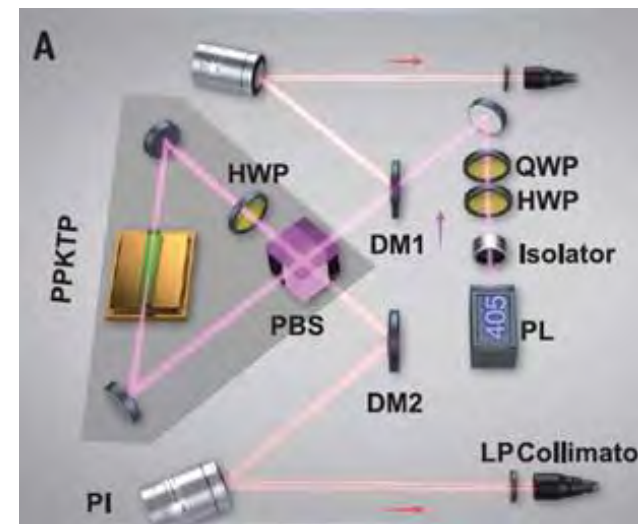
[1] https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/iac-19-b2.7.12_overview_of_nasa_nsql_program_presentation_0.pdf

3-5.4.2 中国の取り組み 1/2

- 中国科学院（CAS）主導のQUESSミッション（Micius LEO衛星）における**衛星から地上局へのセキュアなQKD配送**や、**衛星から2つの地上局へのエンタングルメント配送**さらに、**量子テレポーテーション（量子中継）**の成功は、QKD nodeとしての衛星利用の実現可能性を判断するうえで挙げられていた課題（マイルストーン）をすべてクリアしたという意味で大きく評価。
- キーとなる搭載技術：BB84プロトコル用QKD送信器とBBM92プロトコル用エンタングル光源
 - QKD送信器：波長850 nmパルスLD光源/偏波エンコーダ
 - エンタングル光源：サニャック干渉内にある KTiOPO_4 非線形結晶を波長405 nmで励起して波長810 nmのエンタングル光子対（偏波エンタングル）を生成。



BB84 プロトコル用送信器（波長850 nm）



2光子エンタングル光源（波長810 nm）

[Reference]

[1] <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.120.030501>

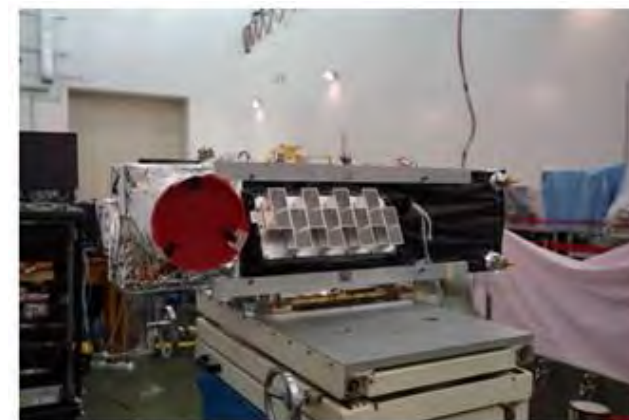
3-5.4.2 中国の取り組み 1/2

- Micius LEO衛星の質量は635kg に対し、ペイロードの総質量は230kg[1]。
 - Transmitter1 (QKD送信用/エンタングルメント配送用/テレポーテーション送信用)
 - Transmitter2 (エンタングルメント配送用)/レーザ光端末制御機器/エンタングルメント生成光源。
- Micius LEO衛星の運用期間延長に加え、商用サービスに向けた**QKD装置の小型化やQKD鍵配送の高速化**に注力、量子**衛星コンステレーションを用いた量子ネットワーク構築**に向けた取り組みを加速。
 - 2018年にTiangong-2 Space Labに搭載された小型QKD端末 (57.9 kg) と4つの地上局を使用して、宇宙から複数地上局への量子鍵配送を実験的実証[2]
 - 2022年7月にJinan 1衛星(100kgクラス)の小型QKD衛星を打上。商用サービスに向けてマイクロ・ナノ衛星と小型地上局でのQKD実証や日中における量子通信を維持するための技術開発を推進[3]。



FIG. 18 The full view of the Micius satellite and main payloads. (a) The photograph of the Micius satellite before launching. (b) The transmitter 1 for QKD, entanglement distribution and teleportation. (c) The transmitter 2 specially for entanglement distribution. (d) The experimental control box. (e) The entangled-photon source.

Micius LEO衛星搭載ペイロード



Jinan 1衛星搭載ペイロード

[Reference] [1] <https://arxiv.org/abs/2208.10236>

[2] <https://phys.org/news/2022-08-compact-qkd-paves-cost-effective-satellite-based.html>

[3] <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3186802/china-launches-new-satellite-important-step-towards-global>

3-5.4.3 ESAの取り組み 1/4

- ESA Agenda 2025 において、革新的なエンジン推進技術や軌道上サービス建設技術のほかに、**量子技術（量子鍵配送、冷却原子干渉計、原子時計と周波数安定）**に関する新技術研究開発の取り組みを推進することを宣言している[1]。
- 欧州宇宙機関（ESA）は、2020年代に**LEO-QKD商業サービス提供**を目指したQUARTZとQKDSatの両プロジェクトと、それらを補完する役割としてSAGAプロジェクトを設立し、欧州全体での宇宙量子ネットワークサービスのインフラ構築に向けたサポートをしている。
 - **QUARTZ(Quantum Cryptography Telecommunication System)**: 衛星通信事業者のSES（ルクセンブルク）を中心とする産業コンソーシアム（20社）が参加し、**ARTES ScyLightプログラムの共同資金で運営**されている。
 - **SAGA (Secure And cryptoGrAphic Mission)** : 補完的位置づけとしてGEO ベースの QKD システムのための研究を開始。それ以外に“Space segment for the EC Quantum Communication Infrastructure (QCI)”を実現することをミッションとしている。
 - **QKDSat** : Arqit社（英国）が率いる産業コンソーシアムによって提案され、ARTES 33 Partnerプログラムの下で共同資金援助を受けて運営されている。**2022年12月14日にArqitは衛星QKD事業からの撤退を表明**。同社独自で開発しているQuantum cloud技術(クラウドベースの共通鍵合意ソフトウェア)で、量子プロセス相当の鍵共有を実現できる見通しが得られたためとしている[3]。
- ◆ QUARTZ(Eagle-1)とQKDSatの2つのプロジェクトの最大の違いは、**QUARTZはEUのEuroQCIと連携**していること。一方、**QKDSatにはEU以外の国家も参加**しており、欧州連合（EU）はQKDSatには関与していない[2]。EuroQCIは、欧州量子セキュア通信ネットワークインフラの構築、開発、展開を目的とした欧州連合(EU)の取り組みである。

[Reference]

[1] https://www.esa.int/About_Us/ESA_Publications/Agenda_2025

[2] <https://spacenews.com/ses-considering-quantum-cryptography-satellite-system/>

[3] <https://www.satellitetoday.com/business/2022/12/14/arqit-quantum-ditches-plan-for-quantum-satellites/#>

3-5.4.3 ESAの取り組み 2/4

■ QUARTZ(Quantum Cryptography Telecommunication System)

- BB84プロトコルによるLEO衛星ベースQKD配送。光レーザ端末はTESAT社製LCT135[1]。
- 2022年9月にESAは、小型衛星Eagle-1（300kg）を開発し、長距離量子暗号鍵配送（QKD）サービスとして 2024年から3年間の実験ミッションの運用に調印。実現すれば欧州初[2]。

Space-based Quantum Key Distribution

Insight into the program

SES[^]

In a nutshell

- ▲ Design and implementation of a LEO satellite based QKD system
- ▲ QKD payload as trusted node - QKD protocol based on BB84 (Prepare & Measure)
- ▲ Encryption keys generated on board (QRNG)
- ▲ Key distribution only, no customer communication
- ▲ Driven by user requirements / business case and requirements for integration into the EuroQCI
- ▲ Full end-to-end system development and implementation including QKD Payload, Ground Terminals and Operations Center
- ▲ Full end-to-end system and service validation



SES Proprietary

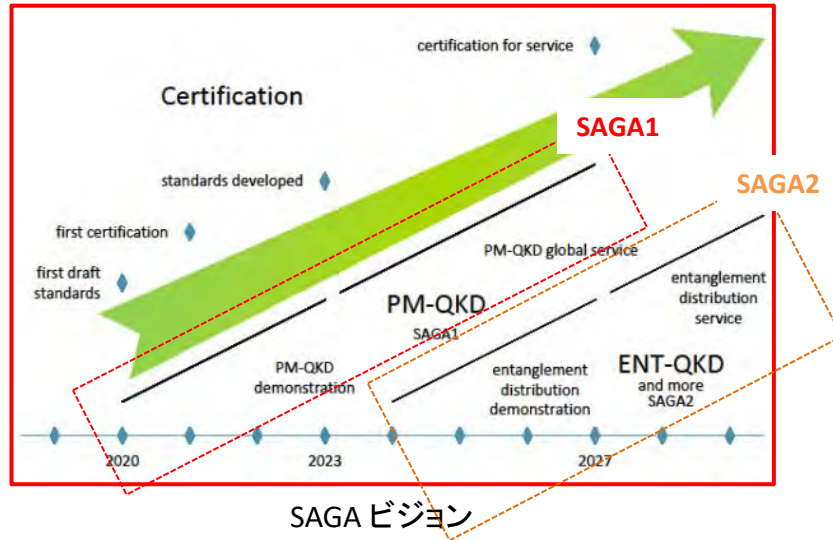
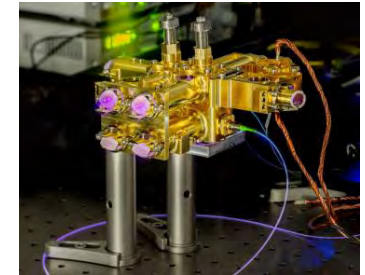
Thierry DRAUS | SES | EPIC Online Technology Meeting on New Space Communications and Monitoring 4

[Reference]

[1] https://epic-assoc.com/wp-content/uploads/2021/08/Thierry-Draus_SES.pdf[2] <https://spacenews.com/ses-considering-quantum-cryptography-satellite-system>

■ SAGA

- SAGA1:PM-QKD BB84プロトコルと信頼されたノードによるネットワークを用いた世界規模で安全な鍵配布を行うための衛星ベースの量子暗号を開発(実証実験。2020-23, サービス：2024-28年)
- SAGA2:ENT-QKD E91プロトコルとGEO衛星を用いた量子通信開発と量子リピータサービスを実現 (実証実験 2024- 27、エンタングルメント配信サービス：2027-33年)



Technical Challenges

- **Entangled Photon Source**
 - ✓ Entangled photon sources with the required performances have been demonstration in laboratories.
- **1m Optical Terminal for GEO and Course Pointing Mechanism**
 - ✓ Telescope fulfilling GEO specific tracking requirements needs to be designed and demonstrated
- **Optical Ground Station Development – cost optimised.**
 - ✓ Challenge to develop a cost efficient solution, which potentially can be deployed to the users.
- **Background Light Suppression Technologies**
 - ✓ Driver is usage in Urban environment

[Reference]

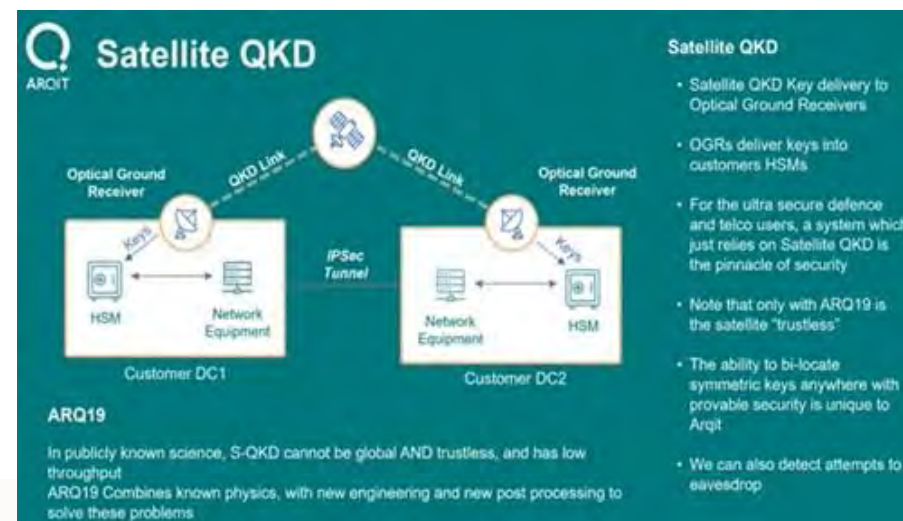
[1] <https://www.ffg.at/sites/default/files/AT%20Industry%20Day%20-%20ARTES%20presentation%2018.06.2019.pdf>

PM-QKD : Prepare - measurement- QKD, ENT-QKD : Entanglement-QKD

3-5.4.3 ESAの取り組み 4/4

■ QKDSat

- G7首脳会議で合意された企業や政府機関からなる国際コンソーシアムを結成し、Federated Quantum System (FQS) というコンセプトでArqit社の量子暗号技術を政府等の顧客に提供[1]。
- **衛星から顧客データセンタに量子鍵を配布**するシステムを構築。キー技術は、ARQ19と呼ばれるArqit社独自のQKDプロトコル。これにより唯一グローバルでトラストレスな衛星QKD配送が実現可能。光レーザー端末はMynaric社製[2]。
- 2023年にQinetiQ Space社製のQKDsatsat1とQKDsatsat2(FQS衛星として)の2衛星で商用サービスを開始を目指して、BT、住友商事、ノースロップグラマン、レオナルド、QinetiQ Space NV、qtlabs、Honeywellが参加
- 2022年12月14日にArqitは衛星QKD事業からの撤退を表明。同社独自で開発しているQuantum cloud技術(クラウドベースの共通鍵合意ソフトウェア)で、量子プロセス相当の鍵共有を実現できる見通しが得られたためとしている[3]。



[Reference]

[1] <https://spacenews.com/governments-ally-for-federated-quantum-encryption-satellite-network/>[2] https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1836935/000110465921093381/tm2122531d1_425.htm[3] <https://www.satellitetoday.com/business/2022/12/14/arqit-quantum-ditches-plan-for-quantum-satellites/#>

- TNO（オランダ応用科学研究機構）とデルフト工科大学によって設立されたQuTech研究機関（量子コンピュータ、量子インターネット）で、**MDI-QKDプロトコル**や**GEOベースエンタングルQKD配信**といったニッチな技術に取り組んでいる。
- SeQureプロジェクト：ABN AMRO、QuTech、TNO Spaceで、MDI-QKDプロトコルによるファイバQKD配送と自由空間QKD配送を組み合わせたシステム開発と金融取引サービス適用にむけた概念実証
- GEOQKD プロジェクト：TNOと衛星オペレータEutelsat（仏）が提携し、静止軌道上の衛星からエンタングルメント（BBM92）を用いたQKD配送に関するシステムの概念設計に関する研究

QuTech - Our Road to Quantum Internet

QuTech is a mission-driven institute that will develop scalable prototypes of a quantum internet... with local quantum processors enabling quantum computation

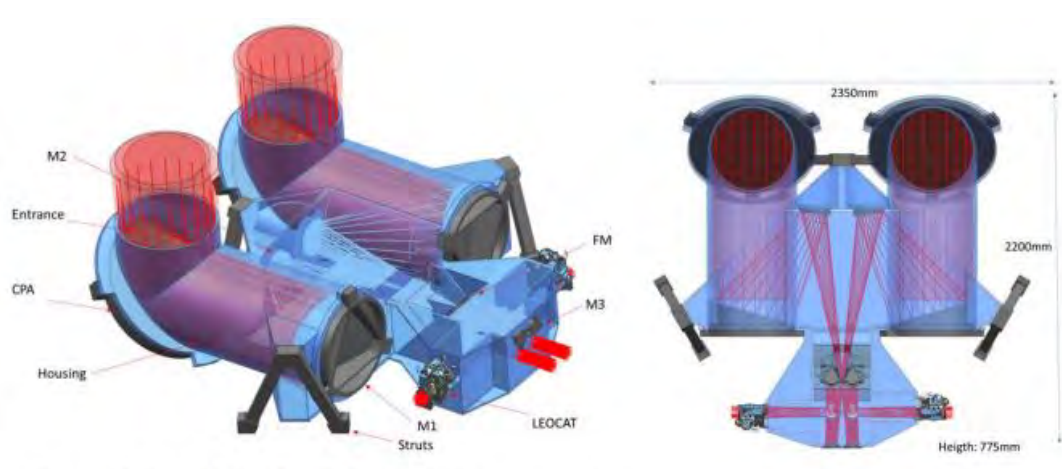


Figure 6. Mechanical design of the QKD payload in the space segment.

GEOQKD プロジェクト
光通信端末の口径は50cm×2, ~570 kg

QuTechの取り組み

[Reference] [1] <https://thenextweb.com/news/quantum-key-distribution-to-secure-bank-account>

[2] <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021SPIE11852E..0JD/abstract>

TNO: NEDERLANDSE ORGANISATIE VOOR TOEGEPAST NATUURWETENSCHAPPELIJK ONDERZOEK

- DLRは、CubeLやCubeISLといった**CubeSatプラットフォームの幅広い利活用**を目指して、地球観測や通信といったミッションを主導している。このCubeSatとQKD技術をコラボレーションしてQUBE (Quantum Key Distribution with CubeSat) ミッションを推進している。
 - QUBE：超小型光通信端末 (OSIRIS4CubeSat) をCubeLに搭載したQKD配送実験ミッション。偏波型BB84プロトコル, 3種波長 (VCSEL, C-,L-帯のLD)の送信器搭載, 追尾精度 $\sim \pm 1^\circ$ 。CubeL (ZfT 社製 3 U)
 - QUBE II：2022年にQUBEのフォローアッププロジェクト (BMBF：連邦教育科学技術省の基金)

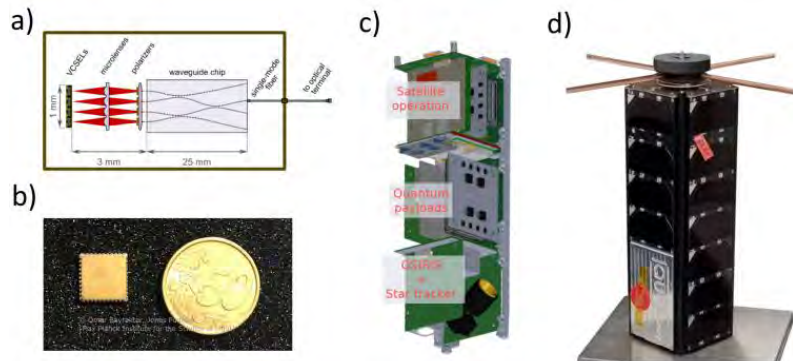


Fig. 1. (a) Scheme of the polarization-encoding source using micro-integrated optics: The polarized optical pulses of four vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) are focussed into a waveguide chip to overlap the four spatial modes in a single-mode fiber for transferring the QKD signals to OSIRIS. (b) Indium-Phosphite-based Photonic Integrated Circuit (PIC) for quantum random number generation inside a hermetically sealed ceramic package next to a 50 Cent coin. Another InP-based PIC as QKD sender is also connected to OSIRIS. (c) Rendering of the interior of the CubeSat showing the main modules for the satellite operation (e.g., power supplies, attitude control, UHF communication, on-board computer), the quantum payloads, the optical terminal OSIRIS and the star tracker. (d) Photo of the integrated 3U satellite QUBE (height: 30cm).



Cubesat姿勢制御性能テスト装置

[Reference]

[1] https://elib.dlr.de/187010/1/2022_ICsos_CubeSat.pdf

- 量子通信ハブ (英国国家量子技術プログラム: UKNQTPの一部) からの資金提供を受け、複数のベンチャー企業 (ArQit、 Craft Prospect、 RAL Space、 Nu Quantum Ltd) が産官学提携を伴い、商用QKDの開発を推進。
- ArQit社
 - QKDSat (Quantum Key Distribution Satellite) projectを主導し小型LEO衛星ベース商用QKDサービスを目指している。 **2022年12月14日にArqitは衛星QKD事業からの撤退を表明。**
- Craft Prospect社[1]
 - 6 U-Cubesat超小型衛星コンステレーションQKDサービスに向けた様々なミッションを主導している
 - QUARC (QUAntum Research CubeSat):15衛星と43の地上局でQKDコンステレーションネットワークを推進
 - ROKS-IOD (Responsive Operations Key Services In Orbit Demonstration)
 - ◆ QSTP(Quantum Space Technology Payload)
 - ◆ CASSA(COMPUTING FOR AUTONOMOUS AND SECURE SATELLITE APPLICATIONS)
 - ◆ AQKD(AUGMENTING QUANTUM KEY DISTRIBUTION WITH NANOSATELLITES) :
 - RefQ : QEYSSat(加)メンバーとのコンソーシアムプロジェクト
- RAL Space社[2]
 - 12 U-Cubesat超小型衛星ベース商用QKDサービスを主導。
 - QKD Qubesat (SPEQTRE) においてシンガポールと協業
- Nu Quantum Ltd[3]
 - ケンブリッジ大学からのスタートアップ
 - 独自の単一光子源の製品化に成功

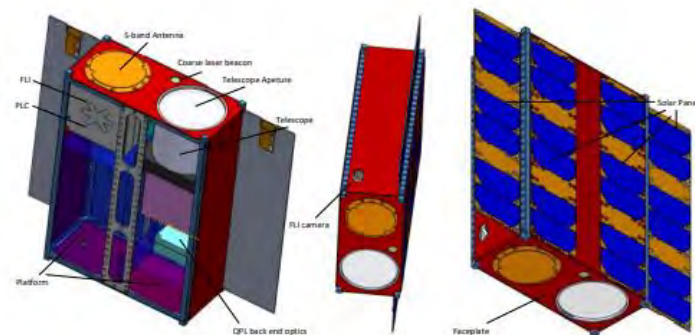


Figure 2 ROKS CubeSat Configuration

[Reference]

[1] <https://craftprospect.com/> , [2] <https://www.ralspace.stfc.ac.uk/Pages/home.aspx>, [3]<https://nu-quantum.com/>

- カナダ宇宙局 (CSA) からのファンドをもとにWaterloo大学、Honeywell Aerospace/COM DEVが参画してQEYSSat (Quantum Encryption and Science Satellite) projectを推進[1,2]。
 - 第1期 (2010-18) Cubesatや航空器等による基礎研究期間を経て、2018年に第2期が始動。2024年にQKD-LEO衛星の打上を計画。
 - 偏光型BB84の量子鍵配送と、アップリンク構成のBBM92エンタングルメントの量子鍵配送を計画。衛星オンボードでの高効率なベル測定を図るために、口径26 cm大型搭載用望遠鏡を開発している。
- その他に、2020年に量子通信ハブ (英) の資金提供を受け、大西洋間グローバルQKD-NW実現を目的として、カナダ-UK共同PJ (ReFQ) が発足。UK側はCraft Prospect社が担当[3]

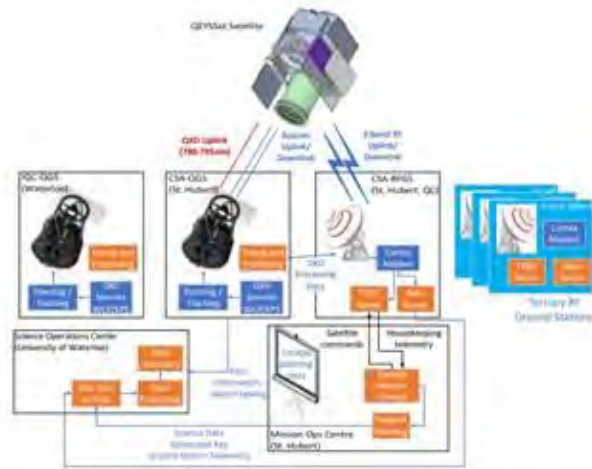
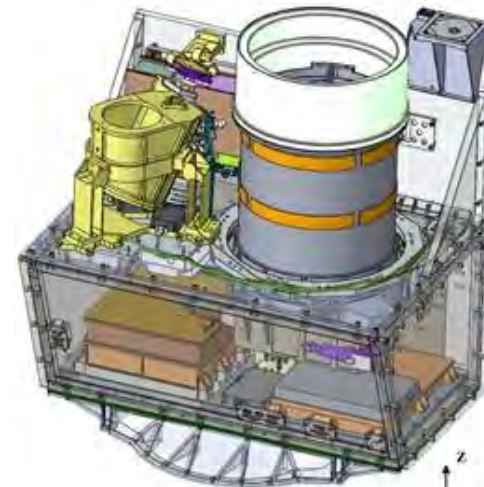


Figure 1. QEYSSat mission architecture. The satellite hosts the QKD terminal and acts as a trusted node in order to produce a shared encryption key between two ground stations separated by over 600 km (e.g. The University of Waterloo, and The Canadian Space Agency).



QEYSSatシステム

QEYSSatペイロード

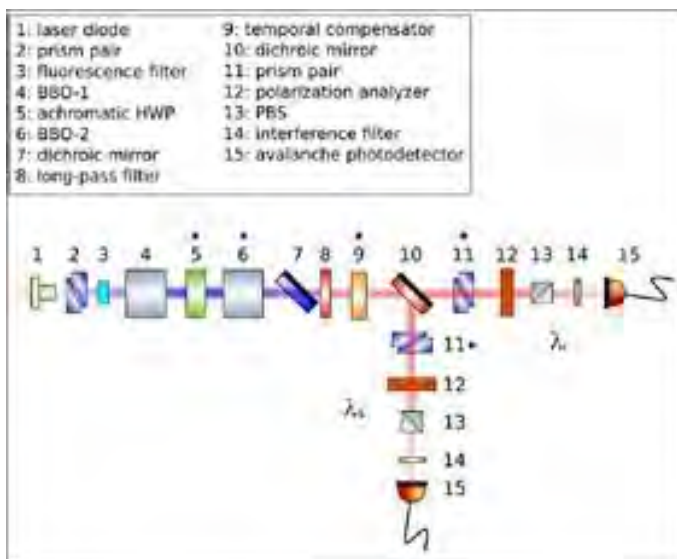
[Reference] [1] <https://uwaterloo.ca/institute-for-quantum-computing/qeyssat>

[2] <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11852/118520H/QKD-terminal-for-Canadas-Quantum-Encryption-and-Science-Satellite-QEYSSat/10.1117/12.2599162.full?SSO=1>

[3] ReFQ: NSERC UK-Canada Alliance Grant Reference-Frame Independent Quantum Communication for Satellite-Based Networks

3-5.4.8 シンガポールの取り組み

- シンガポール国立大学のCentre for Quantum Technologies (CQT) で開発されたエンタングル光源の技術をベースに、SpeQtral社が量子暗号通信ソリューション事業を国際的なコラボレーションを締結し推進している。
 - SpooQySat : CQT で 3 U Cubesatサイズの小さなエンタングルベース量子光源システムを開発し、SPEQS-CS (打上失敗) SpooQy-1(2019年)、SpooQy-2(計画中)で搭載化技術検証を推進。
 - SPEQTRE : 量子通信ハブRAL SPACE(英), ISISpace(蘭), CQT、SpeQtralによる商用QKD検証用衛星(2024打上)
 - SpeQtral-1 : Thales Alenia Space とSpeQtral, CQTによる大陸間の商用QKDサービス検証用衛星 (2024打上)



エンタングルベース量子光源

SPEQS (Small Photon Entangling Quantum System)

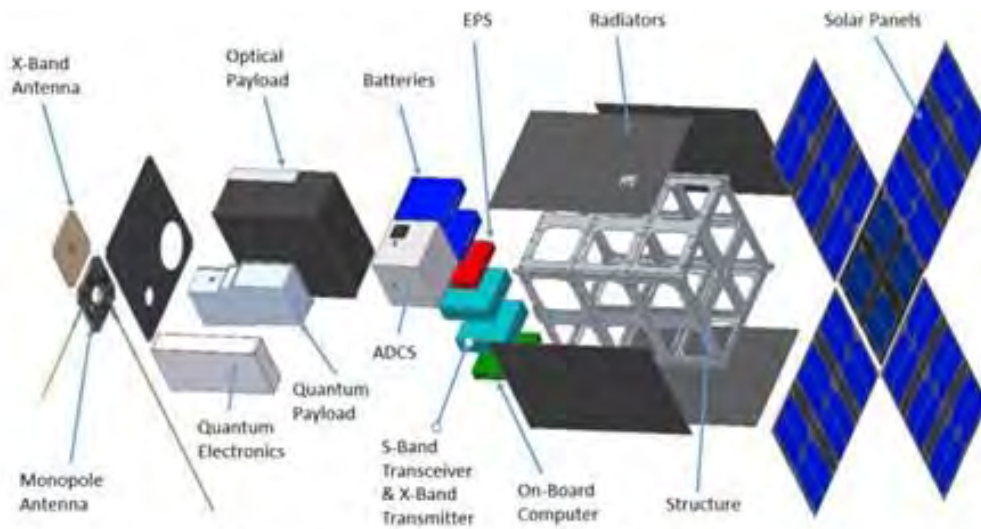


Figure 2. An exploded view of the SPEQTRE CubeSat

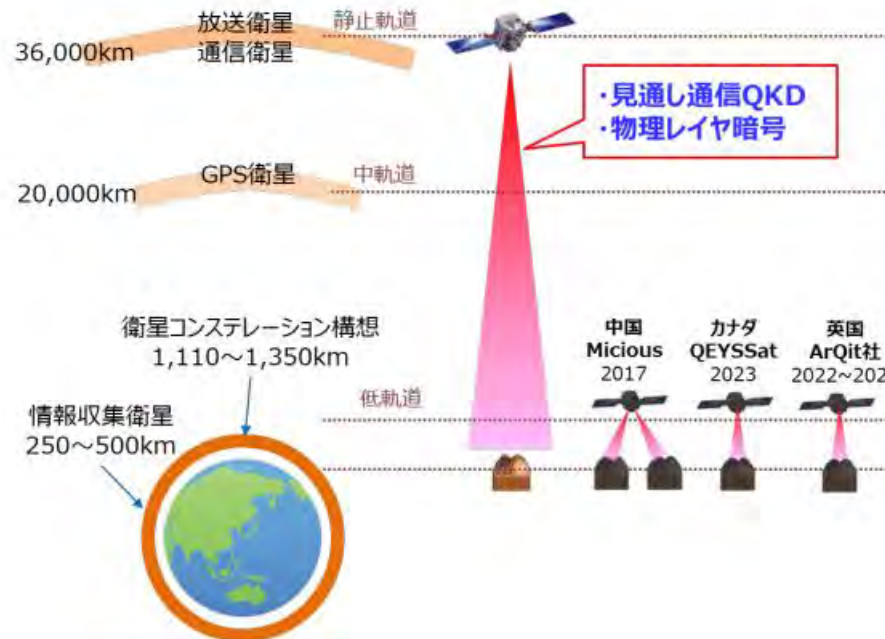
SPEQTREのCubesat

[Reference] [1] <https://www.eoportal.org/satellite-missions/spooqy-1#uhf-ground-station>

[2] <https://www.ralspace.stfc.ac.uk/Pages/home.aspx>

[3] <https://speqtral.space/speqtral-announces-speqtral-1-quantum-satellite-mission-for-ultra-secure-communications/>

- 2010年にImPACTによる量子セキュアネットワークプロジェクトにおいてNICTを中心に首都圏QKDネットワークの実証や、2018年に内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「光と量子活用によるSociety 5.0実現技術」で量子暗号と秘密分散を融合した社会実装がスタートしている。
- 2017年に衛星を用いたQKD研究開発が宇宙基本計画に明記され、総務省の研究費拠出を基に衛星QKDの研究開発がスタートしている。
 - 衛星通信における量子暗号技術の研究開発[1,3]
 - 研究期間 : 2018～2022年度
 - 参加メンバー：NESTRA、NICT、ソニーCSL、スカパーJSAT、東大
 - 空間光通信における航空機等との飛行体と可搬地上局を用いたセキュアな量子通信を実現
 - ◆ 小型衛星に搭載可能なQKD技術
 - ◆ 光地上局での高感度受信技術
 - ◆ 空間光学系の高精度撮像・追跡技術
 - グローバル量子暗号通信網構築のための衛星量子暗号技術の研究開発[2,3]
 - 研究期間 : 2021～2025年度
 - 参加メンバー：スカパーJSAT、NICT、NEC、東芝
 - 安全性と伝送効率のバランスを自在に制御できる新方式『見通し通信QKD』や『物理レイヤ暗号』を開発し、地上局から静止軌道までカバーできる革新的な衛星量子暗号を実現



[Reference]

[1] https://www.soumu.go.jp/main_content/000538843.f

[2] https://www.soumu.go.jp/main_content/000745825.f

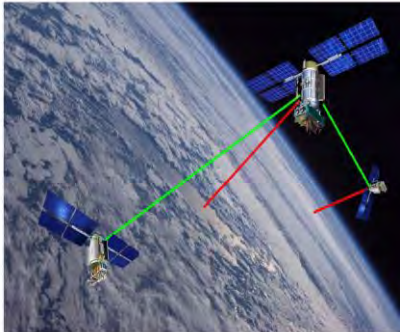
[3] https://www.soumu.go.jp/main_content/000790351.p

- ロシアにおける量子技術は、国家技術イニシアティブプログラムとデジタルエコノミー国家プログラムの枠組みにおいて、量子コンピュータ、量子シミュレーション、量子通信、量子計測、量子センシングなど戦略的に重要なリストとして挙げている[1]。
- ロシアの基幹系ファイバ網の一つを保有しているRussian Railways(ロシア鉄道) を中心に量子通信開発のロードマップを策定中(2020年)[2]
- NTI Quantum Technologies Centre(Moscow State University)とNTI Center for Quantum Communications (National University of Science and Technology MISiS) が量子研究開発の2大拠点
- 衛星QKDは2019年に開始し、2024年を目途にロードマップを策定。
 - 国営宇宙開発企業：ROSCOSMOS
 - Sferaコンステレーションシステム[4]

ITU Workshop on Quantum Information Technology for Networks
Shanghai, China, 5-7 June 2019

QKD in space: roadmap

Year	Activity
2019	Ground station prepared
2020	Satellite QKD prototype developed
2021	QKD module adapted for satellite
2022	Field test on the ground
2023	First satellite launched
2024+	Development of orbital group



Source: "Digital Economy: Quantum technologies" roadmap, 2019

- ✓ All main QKD groups in Russia are involved into free-space QKD research
- ✓ These activities are to be included into several Roskosmos development programs and supported by Union state of Russia and Belarus program "Complex-SG" (2019-2023).

ITU Workshop on Quantum Information Technology for Networks
Shanghai, China, 5-7 June 2019

Our view of secure quantum future

QKD: new international security opportunities



We are ready to work with our international partners on creating **regional and global quantum-secure infrastructures** involving backbone and metropolitan fiber QKD networks and satellite QKD channels.

Goal: transcontinental QKD line in Russia to unify Chinese and EU quantum infrastructures

Projected total length of quantum channels — 15 100

[Reference] [1] <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/ab4472/pdf>
 [2] https://tadviser.com/index.php/Article:Quantum_technologies_in_Russian_Railways
 [3] https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/2019060507/Documents/Vladimir%20Egorov_Presentation.pdf
 [4] <https://www.urdupoint.com/en/technology/roskosmos-needs-148-launches-to-put-over-600-814253.html>

3-5 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査

3-5.5 日本の強み弱みと技術開発戦略 (SWOT)

量子通信、光通信端末および小型衛星技術等の基本的な要素技術は有するものの、これらを統合した衛星QKDへの取り組みについては欧州に大きく後れを取っている

【Strengths】

- 小中型 (< 300 kg) 衛星バス製造技術を保有。
- 大型GEO衛星バス製造技術を保有。
- 衛星打ち上げ技術を保有。
- GEO/LEO用LCT製造技術を保有。
- ファイバ地上網向け量子通信技術を保有。
- 産官学連携による量子技術の共創機会。

【Weaknesses】

- 小型LCT製造技術とその搭載化実績が少ない。
- 地上局配備計画がなく、大気伝搬光の受信技術の情報蓄積不足。
- 衛星を含めたQKD-NWインフラ構築へ向けたロードマップがない。
- EU、5Eyesなどとの国際協力関係が乏しい。
- 鍵蒸留やルータ機能を実装する先端デバイスへの先行開発が少ない。
- 衛星QKD実証と商用化に向けた取り組みが少ない。

【Opportunities】

- 量子コンピュータの進展によるセキュリティ脅威
- 日本の地政学的な脅威 (保全・監視・防衛)
- 世界情勢不安 (紛争、経済ブロック)
- 高いセキュアな通信要求 (安全保障、外交、医療、金融など)
- 打ち上げ機会増大
- 衛星コンスタレーション構築計画

【Threats】

- 耐量子暗号 (PQC) 技術の劇的進展と普及
- EU/ESAや中国での商用化に向けた取り組み
- EuroQCI (国際標準化、顧客やサプライヤー囲い込み)
- New Space (CubeSatによる低価格化)
- シンガポールでの次世代QKDプロトコル (ENT-QKD) 先行開発

3-5 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査

3-5.5 日本の強み弱みと技術開発戦略（クロス分析）

日本の地政学的な環境に要求される衛星ミッションや高いセキュアな通信要求顧客に対して、セキュアな暗号通信を提供するシステムの一翼として衛星QKDは応える可能性がある

	Strengths	Weaknesses
Opportunities	<p>【SO Strategy: 積極攻勢】</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 衛星QKDは、TN/NTN[*1]における量子暗号サービスの距離問題を解決できる現状唯一の手段であり、早期に実証機会を創出する。 ■ 高いセキュアな通信を要求する顧客に対し、衛星を含めたQKDネットワークシステムを提供する。 ■ 日本の地政学的な環境に要求される衛星ミッション（偵察等）を検討提案し、それに適用する。 	<p>【WO Strategy: 弱点克服】</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 日本としてのQKD-NWのあり方を吟味。 ■ 既存技術（小型LCTや地上局）は海外調達し、衛星ミッションのシステム設計や鍵管理を含むネットワーク技術に注力し、衛星QKDの実証機会を増やす。 ■ 英国、米国、豪州との協力関係構築 ■ EUとの技術連携の可能性を模索
Threats	<p>【ST Strategy: 差別化】</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 光空間通信のセキュア性（見直し通信）を適用した方式で性能向上（鍵生成レート）を図り、日本の衛星QKD技術のプライオリティを市場に示す。 ■ シンガポールとの次世代ENT-QKDの共創（東大Cubesatも含め）を推進させる。 	<p>【WT Strategy: 防衛・撤退】</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 暗号化システムとしてPQC技術とQKD技術の連携を積極的に進める。 ■ New Spaceとの連携 ■ 東アジア、英国、米国、豪州との協力関係構築

[*1]TN:Terrestrial Network、NTN:Non-TN

3-5 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査

3-5.5 日本の強み弱みと技術開発戦略（重要項目の識別）

衛星QKDの早急な実証機会獲得に向けて開発項目を選択&集中し、技術的優位性を確保しながらグローバルネットワーク実現に向けた国際協力関係を構築

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><欧州> EU・各国とも小型衛星コンステを含む衛星QKDネットワークの構築を加速</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ ESAはQUARTZ・QKDSat・SAGAの3プロジェクトをEU全体で推進 ✓ オランダ・ドイツ・イギリス各国も、産官学で連携した実証実験を多数実施 <p><中国> 墨子(Micius LEO)を活用して、先進的な衛星量子通信技術を次々実証</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 衛星から地上局へのセキュアなQKD配送、2つの地上局へのエンタングルメント配送、量子テレポーテーションを成功 <p><米国> QKDは民間の活性化に任せて、PQCの標準化による暗号危殆化対策を優先</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 米国国家安全保障局（NSA）はQKD技術を推奨し、NISTが標準化を推進 	<p>地上で構築中のQKD実証ネットワークをグローバルに展開すべく、総務省・NICTを中心に衛星QKDに必要な要素技術の開発を推進中</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 首都圏QKDネットワークの実証や、量子暗号と秘密分散を融合した社会実装を開始 ✓ 衛星QKDの研究開発が宇宙基本計画に明記され、総務省の研究費を基に衛星QKDの研究開発がスタート 	<p>強み</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ ファイバでのQKD、光衛星通信・地上局、小型衛星等の、衛星QKDに必要な要素技術は既に保有済み <p>弱み</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ グローバルなQKDネットワーク構築については、具体的な計画がない ✓ 小型の光端末や光源の搭載化技術は実績が少ない ✓ 国際協力関係の乏しい

重要項目
<p>[考察] 暗号通信ネットワークは安全保障上重要なインフラであり、各国とも自国で保有することを志向する中、日本もグローバルなネットワークをどのように構築するのかを明確にすることが重要。</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 海外で開発済みの小型LCTや地上局等の既存技術は調達で実現 ➢ 小型衛星システムや鍵管理ネットワーク技術に注力して実証を加速 ➢ 見通し通信や物理レイヤ暗号のように差別化可能な技術を開発 ➢ 技術的優位性を確保しながら、海外との共同システム開発等に向けた協力関係を構築

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)**

下記シンポジウム・カンファレンスに参加し情報収集と分析を行い、結果に関して報告書を作成した。次頁以降に報告書を示す。

(1) Small Satellite Conference (2022年8月6日～11日)

(2) World Satellite Business Week (2022年9月12日～16日)

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と技術調査」

2022年 Smallsat Conference
@Utah大学

参加報告書



(財)衛星システム技術推進機構
Advanced Satellite Systems Technology Center

- 会期: 2022年8月6日(土)~11日(木) 会場: 米ユタ大学
- 小型衛星に関する主要カンファレンスで、今回が通算36回目の開催。小型低軌道衛星事業の急拡大により、年々規模が拡大している。
- 通信系関連のトピックスを以下に示す。

(1) SDR (Software Defined Radio) の深化

- SDR標準製品の概要紹介
- Tethers Unlimited社製SDR Modemは搬送波帯域幅1.5~1.8GHzでデータレート1Gbpsなので観測データ送信にも使用可能。
- ほかにAero-Visita社、Rincon Research社等のSDRが出品されていた。

(2) SaaS事業動向と技術動向

- Spire社/KP LABS社/Unibap社事業動向と製品ラインアップ紹介
- KP LABS社は、COTS部品の弱点であるTID(トータルドーズ:電子)およびSEE(陽子等重粒子の衝突)の両環境に対し、多くの対策をハード・ソフト両面で実施。

(3) オンボード処理技術

- RAMON Space社(イスラエル)紹介
- DSP主力製品RC64はマルチコア数64個、300MHz、40G FLOPSの性能。これを多数組合わせてデジタルパイロードを構成。3U向け送信機のほか、DBF, Channelizer, Modem等を政策。LEOだけでなく、GEO用(通信帯域100Gpbs級)も開発。

(4) 米SDA庁PWSA(Proliferated Warfighter Space Architecture)

- Tranche 0で20機、Tranche 1で126機、Tranche 2で約400機の低軌道衛星網を計画。
- 通信系として光学系とKa帯を装備。
- 光通信では5,500kmまでの範囲で最大2.5Gbpsを計画。

(5) コンステレーションの軌道制御最適化

- 米Planet社事例
- 伊AIKO社事例

関係者外秘

将来衛星通信にかかる技術調査

World Satellite Business Week 調査概要

一般財団法人衛星システム技術推進機構

Advanced Satellite Systems Technology Center
(ASTECC)

World Satellite Business Week

- 会期: 2022年9月12日(月)～16日(金) 会場: パリ
- Euroconsult主催。欧州での主要カンファレンス。25年目。

(1) 25年で膨大な変化

- 衛星コンステレーション：53機→2500機～
- 打ち上げコスト：\$30K/kg→\$6K/kg
- 衛星オペレータ：34社→53社
- 16Tbpsのスループットを実現
- 静止軌道通信衛星の7割がSDS(21～22年発注)

(2) 通信市場の成長の余地がまだある

- ブロードバンド(BB)接続市場のうち衛星分は1割、移動体通信でも2割→成長の余地あり
- BB未接続 30億人(2018年)→29億人(2022年)→4年間でたった1億人しか減らせなかった
- 各種意見あり→「接続環境がない場所では2Gでも需要がある」「いまのアプリ (YouTube、Netflix 等) が使えなければ無料でも使われない」

(3) 投資の世界でのキーワード：「Edge Computing」「Fleet Management」「Mobility」「Cyber Security」「Zero Trust」「Laser Com」「Data Fusion」「End to End Mobility Service」「In-Orbit Service」

(4) 光通信：注目技術

- LEO間で最大10Gbpsを実現。ESAとTbps通信を開発中 (独Mynaric)
- 生産台数：1台/年→5台/週 (独TESAT)
- 2000台/年の規模実現を計画 (Mynaric)

(5) 5Gとの微妙な関係

- 5GのTNとの接続の話が出るが、衛星通信の標準化等、接続に関する意見表明がない
- TNマーケットへの進出による衛星通信の成長が言われるが具体的な話はない。
- 衛星通信はオペレータごとに異なり標準化されていないため、TN側から見ると取り込みにくい状況

(6) 欧州主権のための多軌道通信コンステレーション

- 米国の各コンステレーションに危機感を覚えて低遅延通信コンステレーションを検討中。
- 23年にスタート切るべく準備中。商用・安全保障兼用。量子暗号QKDの適用も検討

文科省殿のご指定に基づき、下記の適時調査・事実確認を実施した。

- (1)通信衛星の受注推移
- (2)通信技術の国内外比較
- (3)大型・中型・小型通信衛星の長短所、各軌道組み合わせの長短所

令和4年度地球観測技術等調査研究委託事業

衛星通信にかかる技術調査

「事実確認・適時調査 その1」

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

2022年9月30日

【ご依頼内容】

通信衛星の受注推移

横軸：年（または年度でも可）／縦軸：世界（日本除く）の通信衛星の受注数＋日本の通信衛星の受注数の積み上げ棒グラフ（バックデータとしてExcel）

※対象期間は、日本企業の受注がまだある年から、直近まで（日本企業は近年は受注していないと認識）

※特筆すべき技術（HTS₁、フルデジタルなど）があればexcelデータに注記

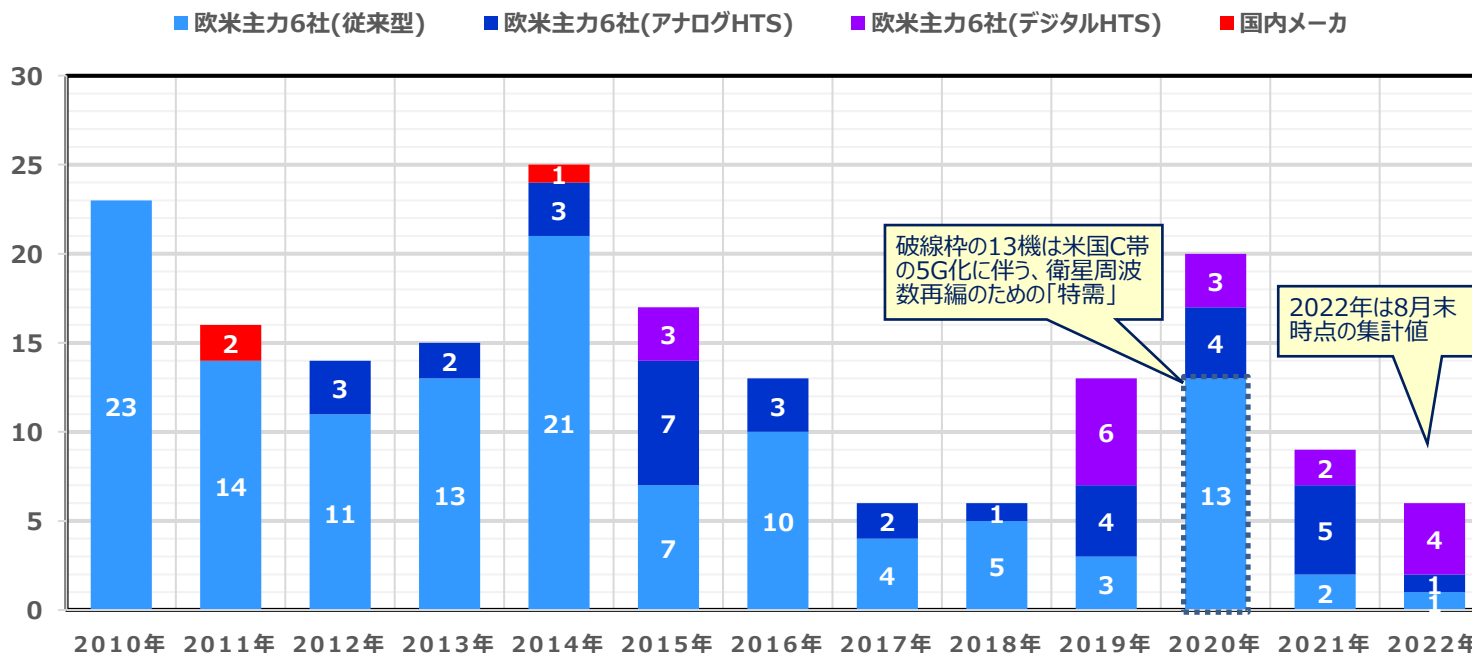
※イメージとしてはPPTの棒グラフ等で、直近の世界の通信衛星受注状況が見えるようにし、上部に解説（何故日本で受注が取れないかなど）をつけるイメージ。

3-7 適時調査・事実確認

図表1に世界の商用静止軌道通信衛星の発注推移を示す。

通信事業の需要の変化に伴い、2010年台初めごろからアナログ・ハイスループット(HTS)型（図表中 ■ ）が採用され始め、2010年代半ば以降、より可変性を高めたデジタル型HTS（図表中 ■ ）が急増している。

図表1 世界の商用衛星の衛星メーカー別受注推移



注1 主要メーカーは以下の6社。（）内は調査期間中の旧社名を示す）
 米国系：ボーイング、マクサー(SSL)、ロッキード・マーチン、
 ノースロップ・グラマン (Orbital, Orbital ATK)
 欧州系：エアバス (EADS Astrium)、タレス・アレニア・スペース

注2 発注後のキャンセル分は除外した。

注3 2022年8月末時点での集計値とした。

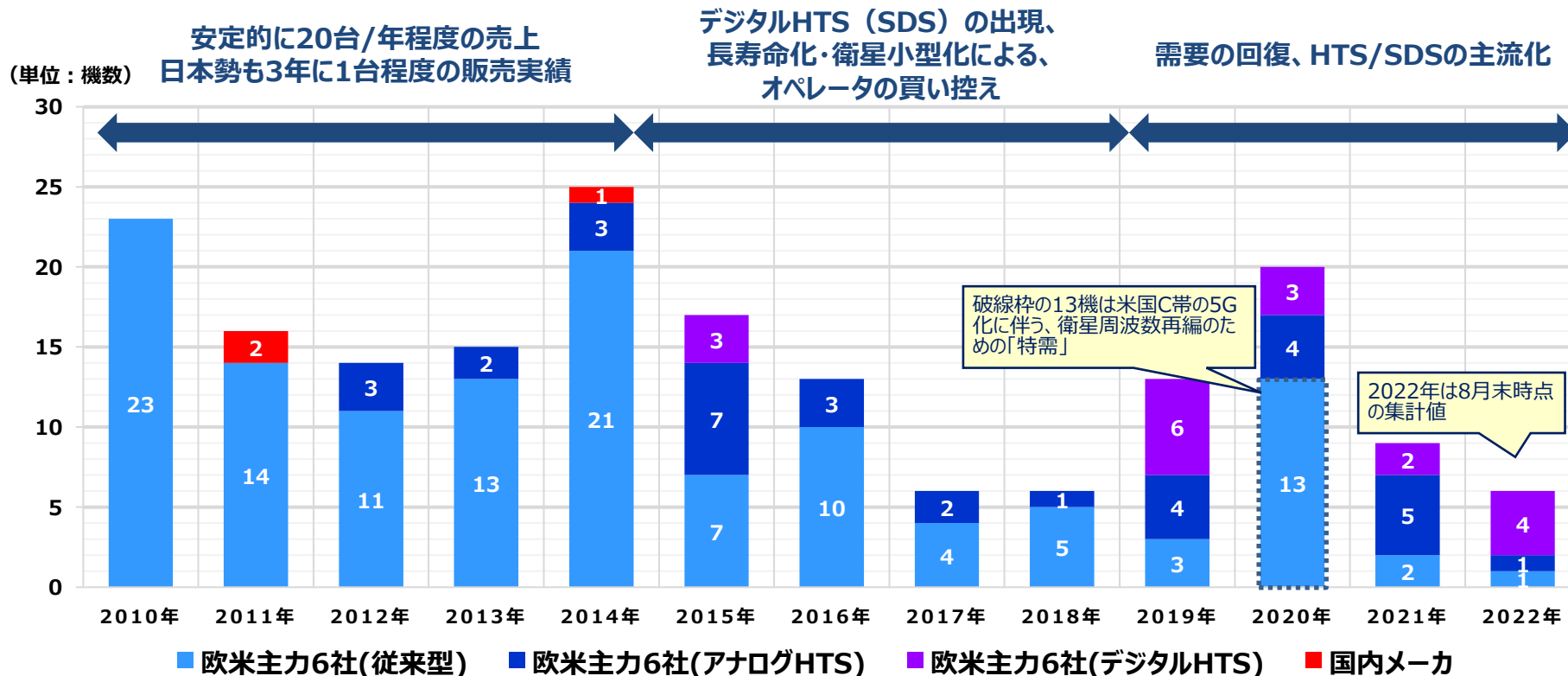
注4 衛星バスとミッションを複数社で分担した場合には、バス担当で表記した。

3-7.1 【事実確認（通信）】通信衛星の受注推移

- 日本企業は、需要が安定しており、かつ従来型衛星が中心であった14年までは3年に1台程度の販売実績を有していたが、商用静止衛星市場の停滞とHTS/SDS*1台頭が顕著な15年以降の受注実績はない

*HTS: High-Throughput Satellite, SDS: Software Defined Satellite

世界の商用静止衛星の衛星メーカー別受注推移



注1 主要メーカーは以下の6社。()内は調査期間中の旧社名を示す)

米国系：ボーイング、マクサー(SSL)、ロッキード・マーチン、
ノースロップ・グラマン (Orbital, Orbital ATK)

欧州系：エアバス (EADS Astrium)、タレス・アレニア・スペース

注2 発注後のキャンセル分は除外した。

注3 2022年8月末時点での集計値とした。

注4 衛星バスとミッションを複数社で分担した場合には、バス担当で表記した。

出所：Gunter HP (<https://space.skyrocket.de/>)よりASTEC分析

令和4年度地球観測技術等調査研究委託事業

通信システムにかかる技術調査

「事実確認 通信技術の国内外比較」

2022年11月21日

一般財団法人衛星システム技術推進機構

Advanced Satellite Systems Technology Center (ASTEC)

・【事実確認（通信）】

世界（主に欧米）の最新の通信衛星動向に関する技術と、それと比較した日本のレベル・立ち位置を示した図をpptで一枚。

・【事実確認（通信）】

上記に関連し、世界と日本の差（ある場合）をもたらしている要素技術について、技術の概要・日本における状況を整理したもの（様式問わず）。

世界（主に欧米）の最新の通信衛星動向に関する技術と、それと比較した日本のレベル・立ち位置

	衛星動向	キーとなる技術	欧米	日本の状況と立ち位置
①GEO・MEO高速ブロードバンド通信衛星	静止またはMEOにおいて、数10～数100Gbps級の通信信号を全デジタル化処理を行い、帯域やアンテナフットプリント形状、ビーム数等を柔軟に変更可能なデジタルマルチビーム通信衛星が最新動向である。	全帯域をデジタル処理しサブチャンネルごとに周波数・帯域・ビーム接続を需要に合わせたオンラインコマンドで制御。DTP・DBF・ASIC・FPGA・マルチビームフェーズドアレイ・直接放射アンテナ(DRA)・熱制御・電気推進・地上Gateway制御(DPRM)・複数打ち上げ等の技術。今後5Gの地上局機能を衛星で段階的なレベルで実現することも想定される。	Boeing・MAXAR(旧SSL)・TAS・Airbus等で製造され欧米で運用されている。パイロードは年々進化しており、搭載する衛星も欧州ではNEOシリーズからTAS・Airbusでそれぞれ最新の3機同時打上のフラットな衛星に進化。5G地上局を衛星で実現する技術開発も2020年ころからEUで計画立案されている。	国産の実用通信衛星はアナログのHTS(Hi throughput Satellite)は輸出しているが、大容量デジタルマルチビーム通信衛星の製造はまだない。 [状況と立ち位置] ETS-9でデジタル通信系(実証、総スループット20Gbps規模)と全電化バスを開発中。
②LEO通信コンステレーション	LEOの多数(数100～数1000機規模)の衛星コンステレーションと場合によっては衛星間通信で宇宙ネットワークを構成することで、静止よりも遅延量が少なく、故障機数に対するロバスト性のある通信システムが最新動向である。	上記のデジタルペイロード技術に加え、地上ユーザの追尾や衛星間通信のための宇宙ネットワーク制御技術や一部の再生中継デジタル技術、搭載系光通信端末技術、静止よりも動作範囲が広い(約8倍)直接放射アンテナ(DRA)技術。	米ではStarlinkがコンシューマ向けサービスやジャミングの多い紛争地域での通信への貢献を実現し、英国ではOnewebが稼働中、カナダ・欧州共同でLightspeedが開発中、更にEUでSymphonie計画公表など、多くのプログラムが動いている。	楽天+AST-Scienceで既存スマートフォンへのナローバンドダイレクト通信を進めている。但し衛星は米国の事業者ASTであり、日本衛星企業は参画できていない。 [状況と立ち位置] SpaceCompassで宇宙サーバの計画が進められている。将来の日本の観測衛星コンステレーションの中継網の整備が今後議論されるものと考える。
③マルチオービット通信システム	上記の各軌道の通信衛星やHAPSなどの非衛星系、地上とのNW、衛星間NWを相互接続して全体としてレジリエントな通信システムを構築しようとする動向がある。	ユーザの通信トラフィックを静止とLEOの全体で最適化するための総合的なネットワーク技術や地上システム技術(ML/AI等を多用)、それに対応できる衛星デジタル通信制御系とそのソフトウェア。	世界最大の静止オペレータである欧SESは現行のGEO/MEOに加えLEOを自前で整備することを発表。米Viasatと合併するInmarsatはOrchestraと呼ばれるLEOシステムを発表し、静止専門であったEutelsatはOnewebと本格的に提携する等事業環境の変化が速い。	[状況と立ち位置] 上記の通り、日本は静止衛星のデジタル化とマルチビーム化によるスループット拡大と軌道上フレキシビリティの向上の技術獲得が現状の課題。 世界オペレータがマルチオービットを計画する現状では、現在開発中の①の技術に加えて②、③の技術を獲得することが産業上も宇宙インフラ能力維持のためにも重要。

世界と日本の差（ある場合）をもたらしている要素技術について、技術の概要・日本における状況

ID	差異のあるキー技術	具体的な技術内容の説明	欧米の状況	日本の状況
1	通信系デジタルパイロードプロセッサ (DPP)	DPP(デジタルパイロード計算機)の帯域向上、先端産業用FPGAの適用、民生SEU・SEL対策、光I/O(フォトニクス)技術、光G/WビームとのI/F、軌道上でこれら通信コンフィギュレーションを最適化するSDS技術。	既に数100Gbps級のデジタル通信衛星が稼働中。調達機数の約7割をこのSDSが占める。	ETS-9でデジタル通信系(実証、総スループット20Gbps規模)と全電化バスを開発中。キャッチアップ中。
2	Software Defined Radio (SDR)	抗堪性(拡散符合変更等)・周波数干渉対策(拡散符合系列の変更)・耐ジャミング用ホッピング等の方式のSW化。通信容量が増えるとハードルは高くなるため専用計算機となるが観測伝送では標準品も多く出ている。	Starlinkは既に実装中と想定される(内作の通信計算機と想像)。観測衛星の伝送用では既に数Gbps級ではあるが標準品が多く存在。	SDRを製品として市場に出している企業はない。また専用のSDR計算機の製造例は公表されていない。
3	LEO間光衛星間通信機器	LEOコンステ用に端末の小型軽量化・低コスト化、COTS品の宇宙転用技術、デジタルコヒーレントなど帯域拡大のための地上技術の搭載化。	Mynaric、TESAT、SA Photonic等、SDA庁の調達方針により多くの企業。	総務省・経産省で開発が進められている。WarpSpace等光を前提とした中継事業を進めている。
4	スペースメッシュ通信制御	LEO用通信ネットワーク制御技術（再生中継・送達先制御・レイテンシ低減・伝送効率・信頼性[再送性]など）、ネットワーク運用評価技術	軌道上実証は最近実施。段階的にStarlink、NDSA等で進められていくと予測。	まだ検討段階。
5	アンテナシステム DRA またはESA+反射鏡	APAA技術による数10～数100ビーム成形・ステアリング技術。増幅器やLNA、熱制御、DPPとの組合せ技術であり要素とともにシステム技術。	既に数100Gbps級のデジタル通信衛星が稼働しておりアンテナも電子ステアリング。	ETS-9でデジタル通信系とともに実証用アンテナシステムを開発中。
6	デジタルやSSPA、給電部の効率的熱制御	デジタル化・SSPA化に伴い増加する局所的な発熱密度の機器レベルの対策と、絶対値自体が増大する通信系の熱のActiveな輸送と廃熱技術	TASがメカニカルポンプルーブのNEOシリーズ衛星を打ち上げ、新しいInspire等でも進められている。	ETS-9でデジタル通信系の廃熱用に左記と同等方式を開発中。

世界と日本の差（ある場合）をもたらしている要素技術について、技術の概要・日本における状況

ID	差異のあるキー技術	具体的な技術内容の説明	欧米の状況	日本の状況
7	Regenerative (Non-transparent)通信系	ブロードバンド衛星ではGEOもLEOも3GPPを考慮しつつ進める必要あり。一方衛星間の送達制御やNB(IoT等)では実現のために前提となる技術。	EUの開発計画（ESAの上位の検討）で5GのgNodeBの搭載化実証の計画がある。詳細は未入手。	ない。検討レベル。
8	小型低価格高効率増幅器(GaN等MMIC/SSPA技術、ミニTWTA技術)	上記DRAやHTSではミニTWTAや高効率化したSSPAのニーズ高い。マルチビームが精細化するにつれ静止でもLEOでも増幅器の高周波化と小型化・高効率化は重要な機器技術。台数も1機数10～数100と多い。	米L3社はKaバンド廉価版ミニチューブを開発済み、Q/Vバンドのミニチューブも認定済。	日本としてTWTA技術は保有していないがMMIC/SSPAでの製品競争力の可能性はある。日本はKa-MMICの高効率化を推進中。
9	衛星内フォトニクス伝送(光電融合技術・デバイス含む)	DPPの光I/Oに対応したフォトニクス技術であり、高速化・小型低消費電力化が期待できる。	ARTESで5年前から開発中。Airbus・TESAT、TASもARTESで開発を進めている。	ない。検討レベル。
10	RF通信広帯域化(衛星-地上間MIMO)	MIMOのアンテナ切替技術、干渉補償技術などにより一系統で数十Gbps級のフィードリンク速度を実現見込み。(なお現在のSDSの数100ビーム級の変マルチビームは一種のMIMOであり。この定義においては実現されている。)	DAFRやDRA以外の搭載MIMO開発の情報は入手されていない。	携帯無線局(RAN)では多用されているが、衛星ではDRA・ESA（電子走査アンテナ）技術としてETS-9で開発中(10ビーム規模)。
11	テラヘルツ通信(100GHz～10T)	衛星内やGWなどでのローカル通信のワイヤレス化・超高速化	Starlink第二世代ではGatewayビームとしてQ/Vバンドより高い周波数を使うことを公表。EUも同様な開発計画を2020年度に公表。今後主流になることが予想される。	地上近傍通信で開発が計画されている。搭載に向けた開発は検討段階レベル。
12	マルチオービット技術	前頁参照	SESが先行(GEO/MEO)、Eutelsat(Oneweb)やInmarsat(自社内)で事業を推進していくことを公表。	ない。

令和4年度地球観測技術等調査研究委託事業

通信システムにかかる技術調査

“事実確認

大型・中型・小型通信衛星の長短所、
各軌道組み合わせの長短所”

2022年12月7日

一般財団法人衛星システム技術推進機構

Advanced Satellite Systems Technology Center (ASTECC)

Proprietary Information : Not to be disclosed or reproduced without specific written permission from ASTECC

・【事実確認（通信）】

通信衛星

大型・中型・小型の各衛星サイズにおける通信衛星のメリットデメリットとLEO/MEO/GEOの各軌道を組み合わせたメリットデメリットを、記載した表をお願いいたします。

3-7 適時調査・事実確認

3-7.3 大型・中型・小型通信衛星の長短所、各軌道組み合わせの長短所 22-002-R-019

(1) 大型・中型・小型の各衛星サイズにおける通信衛星のメリットデメリット

	大型通信衛星	中型通信衛星	小型通信衛星
通信衛星規模の定義	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 軌道はGEO/MEO。 ➤ データ通信の場合は100Gbps～数100Gbps規模、最大1Tbps(100ビーム～数100ビーム)のスループット ➤ 放送の場合は70ch～の中継器を有するペイロード(GEO対象) ➤ ペイロード電力10kW～最大20kW程度。打上4～6トン程度(電気推進換算) ➤ 例：GEOでは欧州Airbus、TAS、米国Boeingの大型衛星等。MEOではSES O3B。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 軌道はGEO/MEO/LEO。 ➤ データ通信の場合は数10Gbps～100Gbps規模(数10ビーム～100ビーム規模)のスループット ➤ 放送の場合は数10ch規模の中継器を有するペイロード(GEO対象) ➤ ペイロード電力数kW～10kW以下。 ➤ 打上2～4トン程度(電気推進換算) ➤ 例：GEOでは中東やアジアオペレータのHTS(放送相乗り)、LEOではGlobalstar、LEOではStarlink第二世代、LightSpeed等 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 軌道はGEO/MEO/LEO。 ➤ データ通信の場合は10Gbps規模(10ビーム規模)のスループット ➤ 放送の場合は10ch～20規模の中継器を有するペイロード(GEO対象) ➤ ペイロード電力2～3数kW。 ➤ 打上数100kg～2トン程度(電気推進換算) ➤ 例：GEOではIntelsatのCバンド通信衛星10機(各10ch規模)、LEOではStarlink第一世代、Onewebなど
メリット	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 1機で多くの通信容量とカバレッジ(放送の覆域やマルチビーム数)を有する。 ➤ 衛星製造や打ち上げの固定費に対して通信の単価が安価になる。数の多いLEO通信で大型(3～5トン)は現状存在しない。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ GEOでは通信需要が限定される地域の場合、製造コスト絶対値が相対的に安価な中型衛星が向いている。 ➤ LEOでは各第一世代の小型から中型へ変更することで通信容量を上げるメリットが出てくる。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ GEOでは10ch規模の非常に需要の小さい放送や局所的なマルチビームによるデータ通信が求められる場合に適しているメリットがある。 ➤ LEOでは第一世代が概ね小型であり製造コスト・量産性に優れる。 ➤ LEOでは数10台同時打上等が可能になる。 ➤ 中型よりは設計・製造の実現ハードルは低い。
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 製造試験規模が大きくコスト大、長い工期、設計の複雑さなど、設計製造ノウハウや大規模設備を有する従来大企業だけが供給可能。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 衛星設計製造コストが大型より相対的に低い为数分の一ではないこと、打ち上げの固定費は殆ど変わらないこと(最大1/2)から、通信の単価は大型より高くなる。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ GEOでは市場が限定的 ➤ LEOでは電力やビーム数による通信性能制約がある。 ➤ 中型より通信の単価が高くなる。

3-7 適時調査・事実確認

3-7.3 大型・中型・小型通信衛星の長短所、各軌道組み合わせの長短所 22-002-R-019

(2) LEO/MEO/GEOの各軌道を組み合わせたメリットデメリット

	LEO	MEO	GEO
通信衛星規模の定義	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 明確な定義はないが、軌道高度約300km(Starlink第二世代)~約1200km程度(Oneweb等)の周回衛星、1日13周~16周 ▶ Starlink、Oneweb、Lightspeed等 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 明確な定義はないが、軌道高度約8000km程度(O3B)/1日5周の例を中心に数千km~1万km高度が、目安。衛星機数(周回数)と通信強度(高度)のバランスから設定される。 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 軌道高度約35786km、1日1周回(地球自転同期軌道)
組み合わせ1	○	NA	○
メリット	<ul style="list-style-type: none"> ▶ LEOの通信強度とGEOの広域性を組み合わせたGlobalで特定地域に通信を集中できる付加サービスが可能 ▶ 事業の例：Inmarsatが自身のGEOと今後整備を表明しているLEOを組み合わせる計画を発表。 		
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> ▶ LEOである程度データ容量を確保する場合必然的に何百台(例：現Oneweb650機)必要であり、GEO単独よりも巨額の整備費用と運用維持費用がかかる。大手事業者による単独事業か、乃至は大手のLEOと大手のGEO同士の提携が前提。 ▶ またLEOは寿命が5-7年と短いため、煩瑣な新規衛星の整備が必要であり、維持費用は高い。 		
組み合わせ2	NA	○	○
メリット	<ul style="list-style-type: none"> ▶ MEOのある程度の通信強度(GEOに対して高度は約1/4.5)と機数の少なさ(最低7~8機)を活用しつつ、GEOの広域性を組み合わせたGlobalかつ最小機数でのサービスが可能で特定地域へ通信を集中させる付加的サービスが可能。例：SES ▶ MEOもGEOとほぼ変わらない10年以上の設計寿命であり、LEOよりはコンステレーション維持費用は経済的。 		
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> ▶ LEOほどではないが、最低7~8機は必要であり、GEOと合わせるとGlobal展開には大型衛星最低10機以上は必要となる。 ▶ Global市場を視野に入れてかつ投資能力を有するオペレータに限定される。また既にGEO多数機や周波数権益を有するオペレータが有利。 		
組み合わせ3	○	○	○
メリット	<ul style="list-style-type: none"> ▶ LEOの通信強度とレジレンス(複数機の故障ではサービスの質は落ちない)、MEOの中程度の通信強度と広域性、GEOの広域性をすべて組み合わせたサービスが可能。上記組み合わせ1、2のメリットを含むサービスとなる。例：SES 		
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> ▶ LEOの初期費用と維持費用の大きさ、MEOやGEOの機数による初期費用等莫大な投資が必要で、確実な通信需要を取り込む事業的な先見性が必要で、超大手の通信オペレータのみが可能。Regionalなオペレータでは採算等考えると非常に難しい。 		



(財)衛星システム技術推進機構