

文部科学省 御中

令和5年度地球観測技術等調査研究委託事業「将来通信衛星にかかる技術調査」

委託業務成果報告書

2024年3月

株式会社デジタルブラスト

本報告書は、文部科学省の令和5年度地球観測技術等調査研究委託事業による委託業務として、株式会社デジタルブラストが実施した令和5年度地球観測技術等調査研究委託事業「将来通信衛星にかかる技術調査」の成果を取りまとめたものです。

目次

1. 本検討の目的と全体像	12
1.1 委託業務の題目	12
1.2 目的	12
1.3 タスク全体像	14
2. 実施タスク成果	15
2.1 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析	15
1) 本節における基本的な考え方	17
2) 令和4年度の調査項目	17
A) 5G/6G に向けた衛星通信システムの調査	17
B) 新しい衛星通信システムの調査	19
C) 衛星システム IoT の調査	25
D) 衛星間通信による宇宙ネットワークの調査	42
E) 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査	44
2.2 マルチオービットアーキテクチャの調査分析	52
1) 本節における基本的な考え方	53
2) 大手オペレーターの事業動向、必要な搭載系技術・ネットワーク技術	54
A) SES S.A. (ルクセンブルク)	55
B) Eutelsat S.A. (フランス)	59
C) Intelsat S.A. (アメリカ)	61
D) Telesat (カナダ)	63
E) KT Sat (韓国)	65
F) Hispasat (スペイン)	66
G) Yahsat (アラブ首長国連邦)	68
H) Space Compass (日本)	69
3) 非地上系 NW の技術動向	71
A) NTN における HAPS-衛星間通信	71
B) 事業者の研究開発動向	71
4) 軌道上での衛星間通信 NW における技術的課題および標準化	72
A) 標準化	73
B) 衛星間光リンクの確立技術	78
C) 光衛星通信装置における主な課題と制御技術	85
5) 地上通信、NTN、衛星間通信を一体とする NW における技術課題	87
A) 地上通信、NTN、衛星間通信を一体とするネットワーク実現のための技術課題 (セキュリティ、レジリエンス、稼働率等)	88
B) 地上側の課題と技術的取組み	93
6) 日本の強み・弱み	103
2.3 トランスペアレントペイロード (透過性、非再生中継) の調査分析	104
1) 本節における基本的な考え方	105
2) SDS (Software Defined Satellite) の事例	106
A) Arabsat と Thales Alenia Space による Arabsat-7A 計画	106
B) Eutelsat と Thales Alenia Space による Flexsat 計画	107

C)	SES と Thales Alenia Space による ASTRA 1Q と SES-26 計画	108
D)	Intelsat と Thales Alenia Space による Intelsat 41/44 計画	110
E)	Intelsat と Airbus による OneSat 計画 (Intelsat 42/43 に対応)	111
F)	Eutelsat の QUANTUM	112
G)	Iridium NEXT	114
H)	SES と Boeing の O3b mPOWER.....	115
I)	Space Development Agency (SDA)の Tranche 1 計画における SDS 利用.....	117
J)	Spire Global 衛星での SDR 利用	118
K)	主な SDR および SDS 計画の経緯.....	119
3)	主な技術開発要素と開発計画.....	119
A)	SDS プラットフォーム.....	120
B)	SDS 個別技術.....	125
4)	標準化の動向.....	129
A)	SAVIOR	129
B)	地球局の SDR に関する DIFI コンソーシアム	130
5)	日本の強み・弱み	131
2.4	ノントランスペアレントペイロード (非透過性、再生中継) の調査分析	132
1)	本節における基本的な考え方	133
2)	3GPP での再生中継の検討状況と 5G ネットワークにおける再生中継の位置づけ	133
3)	海外および日本における再生中継技術の開発.....	134
A)	海外の再生中継ペイロード搭載衛星.....	134
B)	海外における衛星搭載再生中継ペイロードの最新技術	139
C)	日本における衛星搭載再生中継ペイロード技術	142
4)	要素技術 (研究開発が必要となる技術やデバイス、開発上の課題)	143
A)	SatixFy のオンボード処理技術	143
B)	再生中継オンボードプロセッサ (SEAKR Engineering LLC)	145
C)	地上と衛星との一体化 (オンボードプロセッサと連携するネットワーク マネジメント.....	146
D)	DVB-S2X	148
5)	日本の強み・弱み	149
2.5	Q/V 帯降雨減衰・大気湿度の影響調査.....	150
1)	本節における基本的な考え方	151
2)	高周波数帯の電波伝搬へ影響を及ぼすもの	152
A)	大気の影響	152
B)	降雨中の電波伝搬特性.....	154
3)	降雨減衰対策のキー技術	155
A)	概況	155
B)	ATPC (Automated Transmit Power Control : 自動送信電力制御)	156
C)	AMC (Adaptive Modulation and Coding : 適応変調符号化)	157
D)	ダイバーシティ法.....	157
4)	通信システムにおける高周波数帯活用のための企業・公的機関の取り組み	160
A)	スカパーJSAT.....	160

B)	Aldo Paraboni mission	163
C)	ESA ARTES	166
D)	大阪電気通信大学.....	169
5)	日本の強み・弱み	171
2.6	10～20年後の将来を念頭に、日本の地理的及び環境的なリスクの低減に資する技術	172
1)	本節における基本的な考え方	172
2)	リスク低減が要求される通信衛星.....	172
A)	日本の地理的及び環境的なリスクの低減に参考となる衛星	172
B)	日本の地理的及び環境的なリスクの低減に資する利用技術	173
C)	日本の地理的及び環境的なリスクの低減に資する衛星技術	174
3)	RF マッピング分野における取組	188
4)	日本の地理的及び環境的なリスクの低減に資する可能性	189
2.7	定常調査・動向分析	190
1)	国内学会の聴講（電子情報通信学会 SAT 研）	190
A)	2023年5月26日（オンライン参加）、詳細は別紙	190
B)	2023年7月12日～14日（オンライン参加）、詳細は別紙	190
C)	2023年8月31日～9月1日（オンライン参加）、詳細は別紙	191
2)	海外のワークショップの聴講（WSBW、The HTS Roundtable）	191
A)	WSBW：2023年9月11日～9月15日（オンライン参加）、詳細は別紙	191
B)	The HTS Round Table：2023年12月7日（オンライン参加）、詳細は別紙	192
2.8	適時調査・事実確認	193
1)	ユーザーが利用するマルチオービット対応端末（2023年6月14日）	193
2.9	研究開発に関する戦略マップのとりまとめ.....	199
1)	戦略マップ構築における基本的な考え方	199
2)	日本の強み・弱みと研究開発の方向性.....	199
3)	戦略マップ	201
4)	アクションプラン	203
A)	日本・海外の通信衛星に関する研究支援プログラム	203
B)	アクションプランの基本的な考え方.....	207
C)	アクションプランとレコメンデーション.....	208
3.	調査結果のとりまとめ.....	209

図表目次

図表 1 本業務の基本的な考え方	13
図表 2 タスクの全体像	14
図表 3 令和 4 年度の調査項目と本節記載項目との対応関係	17
図表 4 3GPP のスケジュール概要	18
図表 5 2023 年までに打ち上げ予定の HTS (R4 年度報告書抜粋)	19
図表 6 Jupiter 3(Echostar24)の主要諸元	20
図表 7 Jupiter 3(Echostar24)のイメージ	20
図表 8 Arcturus (Aurora 4 A)の主要諸元	21
図表 9 Arcturus (Aurora 4 A)のイメージ	22
図表 10 Ovzon 3 の主要諸元	22
図表 11 HummingSat のイメージ	23
図表 12 IS-45 の主要諸元	23
図表 13 Inmarsat 8 の主要諸元	24
図表 14 IoT 衛星の種類	26
図表 15 主な IoT 衛星	26
図表 16 Swarm Technologies の衛星	32
図表 17 Kepler 衛星のイメージ (Kepler4)	33
図表 18 Fleet Space の衛星イメージ (パッチアンテナ)	33
図表 19 Tianqi 11	33
図表 20 Myriota 衛星のイメージ	34
図表 21 Fossa 衛星のイメージ	34
図表 22 Apogeo のピコ衛星	35
図表 23 Tiger 衛星	38
図表 24 OQ Technology の地上端末	38
図表 25 低軌道衛星 MIMO/IoT 伝送装置 LEOMI	39
図表 26 システム構成図	40
図表 27 実証衛星 Pyxis	40
図表 28 Starlink Mobility アンテナ	43
図表 29 TESAT 社の光通信端末 SCOT80	46
図表 30 SCOT80 の主要諸元	46
図表 31 Quantum Communications Hub の CubeSat のイメージ	48
図表 32 光通信装置の外観	49
図表 33 仕様書 3-2 と本節の付番対照表	53
図表 34 本節各項目の対応イメージ	54
図表 35 マルチオービット化を実施・検討している事業者リスト	54
図表 36 2022 年度財務データ	56
図表 37 事業構成	56

図表 38 ネットワーク事業の売上先.....	56
図表 39 映像事業の売上先.....	57
図表 40 SES の GEO/MEO 運用イメージ.....	57
図表 41 「CRUISE mPOWERD + STARLINK」 のサービス概要.....	59
図表 42 「CRUISE mPOWERD + STARLINK」 で衛星と海上・地上を繋ぐネットワークダイアグラム.....	59
図表 43 2022 年度財務データ.....	60
図表 44 事業構成.....	60
図表 45 2019・2020 年度売上高.....	62
図表 46 2019・2020 年度修正後 EBITDA.....	62
図表 47 2022 年度財務データ.....	64
図表 48 主要事業.....	64
図表 49 2022 年度財務データ.....	66
図表 50 2020-2021 年度財務データ.....	67
図表 51 収益構成.....	67
図表 52 2022 年度財務データ.....	68
図表 53 収益構造.....	69
図表 54 会社概要.....	70
図表 55 事業概要.....	70
図表 56 多層型 NTN 実現のマイルストーン (NTT 研究所).....	72
図表 57 本章各項の対応イメージ.....	72
図表 58 CCSDS における各層の処理.....	74
図表 59 CCSDS において推奨規格として規定する方式.....	75
図表 60 CCSDS において推奨規格として規定する方式.....	76
図表 61 OCT チャンネルの定義.....	76
図表 62 OCT プロトコル.....	78
図表 63 捕捉フェーズのイメージ.....	79
図表 64 OSIRIS 4 CubeSat (O4C) のフライトモデル.....	80
図表 65 指向誤差とスキャン時間の関係.....	83
図表 66 捕捉パターンの例.....	84
図表 67 光通信端末を製造する主な事業者.....	85
図表 68 地上・非地上通信の一体化に伴い発生し得る主要な課題.....	87
図表 69 地上通信と NTN (衛星間通信を含む) を一体化した通信におけるセキュリティポイント.....	89
図表 70 各セグメントにおけるセキュリティ上の課題と対策技術.....	89
図表 71 通信衛星関連の近年の主要なセキュリティインシデント.....	92
図表 72 Intellian アンテナ.....	95
図表 73 ThinAir Ka 2517 概観.....	96
図表 74 アンテナの搭載.....	96

図表 75 All.Space アンテナ	97
図表 76 アンテナ外観	98
図表 77 SkyEdge IV Aquarius の外観.....	99
図表 78 NTN と TN (Terrestrial Network) の統合形態例	100
図表 79 TN と NTN 一体化の形態例	100
図表 80 NTN サポートにあたっての TN へのインパクト (1) (3GPP より)	101
図表 81 NTN サポートにあたっての TN へのインパクト (2)	101
図表 82 トランスペアレントペイロードによる NTN	105
図表 83 トランスペアレント衛星による無線アクセスネットワーク	105
図表 84 Arabsat-7A のイメージ	106
図表 85 Arabsat-7A の概要	107
図表 86 Flexsat のイメージ.....	108
図表 87 Flexsat の概要.....	108
図表 88 SES-26 のイメージ.....	109
図表 89 ASTRA-1Q/SES-26 の概要	109
図表 90 IS-41/44 のイメージ.....	110
図表 91 IS-41/44 の概要	111
図表 92 IS-42/43 のイメージ.....	112
図表 93 IS-42/43 の概要	112
図表 94 QUANTUM のイメージ.....	113
図表 95 Eutelsat QUANTUM の概要.....	113
図表 96 Iridium NEXT のイメージ	115
図表 97 Iridium NEXT の概要	115
図表 98 O3b mPOWER のイメージ.....	116
図表 99 O3b mPOWER の概要	116
図表 100 Tranche 0 Transport Layer 衛星のイメージ	118
図表 101 LEMUR の概観	118
図表 102 LEMUR の概要	119
図表 103 Space Inspire の概要	120
図表 104 LM 400 のイメージ	123
図表 105 LM 400 の概要	123
図表 106 LM 400 打ち上げ時コンフィギュレーション	124
図表 107 Boeing 702X のイメージ.....	124
図表 108 L3 Harris ペイロードのイメージ	125
図表 109 L3 Harris ペイロードの概要	125
図表 110 ETS-9 フルデジタルペイロードの開発項目.....	126
図表 111 従来型ペイロードとの比較.....	127
図表 112 ペイロードの比較	127

図表 113 PhLEXSAT コンソーシアム参加企業.....	128
図表 114 PhLEXSAT ペイロード.....	129
図表 115 DIFI スタンダード (v1.0)	131
図表 116 gNB 処理機能ペイロードを有する再生中継衛星 (衛星間リンク無し)	133
図表 117 gNB 処理機能ペイロード再生中継衛星 (衛星間リンク有り)	134
図表 118 Hispasat 36W-1(HISPASAT AG1)のイメージ.....	135
図表 119 Hispasat 36W-1(HISPASAT AG1)の概要	136
図表 120 AmerHis のイメージ.....	137
図表 121 AmerHis の諸元 (目標値)	138
図表 122 SpaceWay 3 のイメージ.....	139
図表 123 RedSAT の概観.....	139
図表 124 OneWeb の JoeySat の概要	141
図表 125 JoeySat 外観.....	141
図表 126 ETS-8 による移動体通信試験の回線構成.....	142
図表 127 WINDS の再生中継交換機の構成.....	143
図表 128 SatiFy が提案するペイロードアーキテクチャ.....	144
図表 129 SatixFy の再生 Processor	145
図表 130 HILINK の運用イメージ	147
図表 131 HILINK コンピュータの概観	148
図表 132 DVB-S2X による再生中継ペイロードの例.....	149
図表 133 大気影響や降雨減衰に関してレポートされている主要な ITU-R 勧告	151
図表 134 主要な降雨減衰対策技術とその特徴.....	151
図表 135 大気ガスによる吸収係数 [dB/km].....	153
図表 136 低仰角衛星回線での対流圏シンチレーション	154
図表 137 累積時間率 0.01%を超える降雨強度 $R_{0.01}$ の分布.....	154
図表 138 降雨減衰係数の降雨強度に対する周波数特性	155
図表 139 主要な降雨減衰対策技術とその特徴.....	156
図表 140 AMC 方式の運用イメージ.....	157
図表 141 ダイバーシティ法の分類.....	157
図表 142 シングルサイトダイバーシティの運用イメージ	158
図表 143 ダイバーシティ利得の計算例.....	159
図表 144 スカパーJSAT の衛星運用実績 (2021 年 11 月現在)	160
図表 145 宇宙コンピューティング・ネットワーク構想.....	161
図表 146 研究開発を進める HAPS システムの概要	162
図表 147 Q/V バンド通信ペイロード	163
図表 148 気候的特徴の異なる Tito Scalo、Spino d'Adda および Roma	164
図表 149 降雨強度と累積時間率分布	164
図表 150 Tito Scalo と Spino d'Adda における降雨減衰例.....	165

図表 151 Aldo Paraboni Q/V ペイロード関連の文献	165
図表 152 ARTES Competitiveness & Growth における開発フェーズ①.....	166
図表 153 ARTES Competitiveness & Growth における開発フェーズ②.....	167
図表 154 開発フェーズごとの資金提供レベル（上図：産業界、下図：研究機関等）	167
図表 155 ARTES で柱となるコア技術.....	168
図表 156 マレーシア工科大学における年間および長期の降雨減衰の累積時間率分布	168
図表 157 大阪電気通信大学の衛星通信研究施設における降雨減衰測定システム.....	169
図表 158 降雨強度と降雨減衰の関係	170
図表 159 安全保障分野で利用される衛星数.....	172
図表 160 安全保障分野の衛星の規模分類	172
図表 161 衛星イメージ	175
図表 162 衛星の概要.....	176
図表 163 ペイロードのイメージ.....	177
図表 164 ペイロード概要.....	177
図表 165 プラットフォームと衛星のイメージ.....	178
図表 166 衛星の概要.....	178
図表 167 WGS-11 のイメージ	180
図表 168 WGS-11 の概要.....	180
図表 169 衛星のイメージ.....	181
図表 170 衛星の概要.....	182
図表 171 ロケット搭載イメージ.....	183
図表 172 衛星の概要.....	184
図表 173 MUOS 概観	186
図表 174 MUOS 概要	186
図表 175 Starshield のイメージ.....	188
図表 176 Starshield の概要.....	188
図表 177 Intellian アンテナ	194
図表 178 ThinAir Ka 2517 概観.....	195
図表 179 アンテナの搭載.....	196
図表 180 All.Space アンテナ	196
図表 181 アンテナ外観	197
図表 182 SkyEdge IV Aquarius の外観.....	198
図表 183 調査結果のとりまとめ.....	199
図表 184 日本の強み・弱みと研究開発の方向性	200
図表 185 戦略マップ	202
図表 186 各国の研究開発プログラム	203
図表 187 ARTES プログラムの概要図.....	205
図表 188 CSP のロードマップと各フェーズ	206

図表 189 戦略マップを基にしたアクションプランの基本的な考え方	207
図表 190 アクションプランに関するレコメンデーション.....	208

1. 本検討の目的と全体像

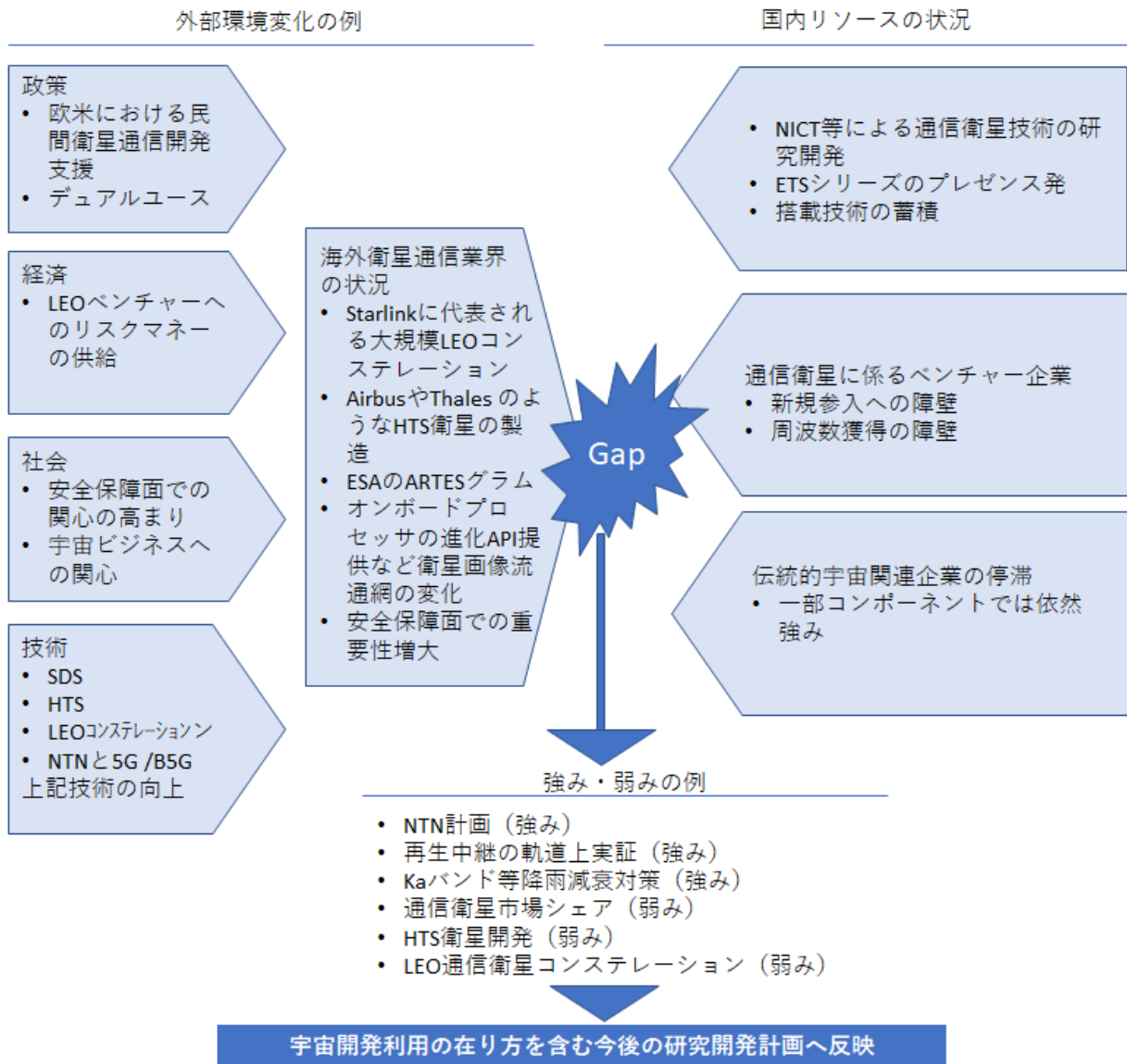
1.1 委託業務の題目

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

1.2 目的

- 通信衛星は、地上通信網がリーチできない地域のデジタルデバイドの解消、船舶・航空機などの移動体向における通信環境の整備などで利用されているが、昨今の国際状況を鑑み、安全保障における通信環境維持でも注目されている。そのような環境の中、高速・広帯域通信を実現するためのハイスループット衛星（HTS：High Throughput Satellite）や低遅延通信が享受できる低軌道衛星（LEO：Low Earth Orbit）コンステレーションによる通信ネットワークの構築、衛星間通信などの技術開発が国内外で進められている。従来の大型衛星による通信から小型衛星コンステレーションによる通信へと移行が進んでいることに伴い、通信衛星技術も大きな転換期を迎えている。
- 文部科学省殿は宇宙開発利用を国家戦略の1つとして推進しており、上述した転換期を踏まえながら、今後の宇宙開発利用の在り方および今後の通信衛星の研究開発計画を検討する必要がある。
- 通信衛星については早くから民間事業として成立しており、政策としての研究開発計画を立案するためには、通信衛星に関する政策的・経済的・社会的・技術的な外部環境変化（特に本件では技術とその背景）を導出すると共に、わが国の通信衛星事業や関連する技術等の強み・弱みを分析し、外部の変化と内部の状況のギャップを把握する必要がある。
- したがって弊社は、本業務の目的を、「通信衛星に係る外部環境変化とそれに伴う国内リソースの強み・弱みを分析し、外部の変化と国内リソースのギャップを埋めるに資する通信衛星の研究開発立案に資する示唆を導出する」ことと設定する。

図表 1 本業務の基本的な考え方



出所) デジタルプラスト作成

1.3 タスク全体像

- 主なタスクの全体像は図表 2 のとおりである。
- 調査手法は、当社知見の棚卸を行うと共に、デスクトップ調査、Seradata や OSCAR、Crunchbase 等のデータベース分析、国内外の会議やワークショップへの出席、インタビュー、メール照会などで検討の基礎となるデータ収集を行った。
- 収集したデータをもとにした事務局とのディスカッションを経て、各調査項目における日本の強み・弱みを整理するとともに、今後の研究開発に関する戦略マップ（案）をとりまとめた。

図表 2 タスクの全体像

タスク分類	論点	手法
令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析	<ul style="list-style-type: none"> • マルチオービットやペイロードの調査から情報の最新化を図る 	<ul style="list-style-type: none"> • 当社の既存知見整理 • 民間受託調査 • 経営コンサル案件 • デスクトップ調査 • 論文等購入 • データベース分析 • SeraData • Crunchbase、など • 国際会議出席 • インタビュー・メール照会 • 事務局 ディスカッション • 事務局 ディスカッション
マルチオービットアーキテクチャの調査分析	<ul style="list-style-type: none"> • NTNのビジネス化を含め、我が国のNTN研究開発の強み・弱み分析 	
トランスペアレントペイロード（透過性、非再生中継）の調査分析	<ul style="list-style-type: none"> • 非再生中継のPros/Consと5Gとの関係 • 搭載するメリットはどこにあるのか • 日本の技術力は？ 	
ノントランスペアレントペイロード（非透過性、再生中継）の調査分析	<ul style="list-style-type: none"> • 再生中継のPros/Consと5Gとの関係 • 搭載するメリットはどこにあるのか • 日本の技術力は？ 	
Q/V帯降雨減衰・大気湿度の影響調査	<ul style="list-style-type: none"> • 降雨量とITU-R勧告に基づく降雨減衰推定 • 降雨減衰対策 	
日本の地理的及び環境的なリスクの低減に資する技術の調査	<ul style="list-style-type: none"> • 地球観測衛星、情報収集衛星等との連携 • 諸外国における情報伝達方法 	
外部環境変化に関する調査（定常調査・動向分析・適時調査・事実確認）	<ul style="list-style-type: none"> • 通信衛星分野でのスタートアップの動向 • 国際会議での議論されているか 	
研究開発に関する戦略マップ（案）のとりまとめ	<ul style="list-style-type: none"> • 我が国の観測衛星の研究開発が目指すところ • そのためにどのような要素技術や研究体制が必要か 	

出所) デジタルプラスト作成

2. 実施タスク成果

2.1 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

サマリー

【5G/6Gに向けた衛星通信システムの調査】

- 今後の非地上系ネットワーク（NTN：Non-Terrestrial Network）と地上のネットワークの統合を見据え、NTNの仕様化状況、具体的には3GPP（3rd Generation Partnership Project）における衛星通信等のNTNの仕様化検討状況を調査した。
- リリース17ではNTNでの基本的課題に関する仕様、リリース18ではバックホール機能の定義がなされ、リリース19では再生中継の定義を予定している。
- リリース19ではシステムレベルの要求条件を検討している段階、「衛星コンステレーションにおいて衛星間リンクを構成する場合にはオンボードの再生ペイロードが必要になる」としており、今後も議論の進展を注視していく必要がある。

【新しい衛星通信システムの調査】

- 衛星ブロードバンド需要が増大しており、大容量通信を実現するために静止軌道（GEO：Geostationary Earth Orbit）衛星のHTS化が進められている。
- 一方で、コスト効率の良い小型GEO衛星の開発、およびHTS化の検討も進んでいる。
- スイスを拠点とするSwissto12はコスト効率の高い小型GEO衛星HummingSatを開発・製造し、世界に先駆けて商用化するなどこの分野をリードしている
- ESAのARTES（Advanced Research in Telecommunication Systems）プログラムでは小型GEO衛星向けのプラットフォームを開発している。

【衛星システムIoTの調査】

- 衛星IoTの方式は、5GやNB-IoTなどのライセンスが必要なものとLoRaや各社独自の規格などのライセンスが不要なものに大別されるが、2022年には3GPP Release 17において5G NB-IoT NTNが規格化され、衛星IoTのための規格が決定したことが注目を集めた。
- 2023年にはスペインのSateliotが3GPP Release 17の5G NB-IoT NTNに準拠した衛星を打ち上げ、Skylo Technologiesも計画を進めている。
- ライセンスが必要な衛星IoTサービスは、日本では携帯電話事業者のみが提供できるが、各社衛星IoTサービスは海外事業者（SpaceX、Iridium、Globalstar）と提携しており、日本の衛星事業者が参入する余地は少ないと考えられる。
- 一方で、ライセンスが不要な衛星IoTについては、利用できる周波数が国ごとに異なるため、海外事業者による輸出入は進んでいない。通信量が少ないため、超小型衛星で通信網を整備でき、日本の事業者の参入余地も十分あると考えられる。
- 日本では衛星IoTを含む船舶用双方向デジタル通信システム（VDES：VHF Data Exchange System）の開発を進めており、強みとなる可能性がある。

【衛星間通信による宇宙ネットワークの調査】

- Inmarsat は 2021 年 8 月、既存の ELERA (L バンド GEO 衛星) および Global Xpress (Ka バンド GEO 衛星) と LEO 衛星、地上の 5G サービスを統合したネットワークサービス「ORCHESTRA」を発表
- 2023 年 5 月に ViaSat による Inmarsat の買収が完了し、2023 年 7 月にはオーケストラ・コンステレーション運用のため V バンドの周波数スペクトル申請を撤回しており、今後計画が変更されることも考えられる。

【衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査】

- 世界の衛星による量子鍵配送 (QKD: Quantum Key Distribution) の研究開発状況としては、実証を行った国・企業が登場し始めているが、実証を行った国・企業も次のステップは商用化ではなく、更なる実証であり、商用 QKD の実現には相当の時間を要すると考えられる。
- 米国は衛星 QKD を研究していたチームも光通信に注力しており、国家方針としては既存のハードウェアでも対応が可能な耐量子計算機暗号 (PQC: Post-Quantum Cryptography) に注力している状況。
- 日本では、衛星 QKD 研究として、衛星 QKD の要素技術である光通信を用いた物理レイヤ暗号の実証実験を行っており、強みになる可能性がある。また、世界最先端の技術を保有する地上 QKD の技術を衛星 QKD 開発に活かすことが求められる。

1) 本節における基本的な考え方

- 本節では、令和4年度に調査が行われた調査項目について、新たに開始されたサービスや新たに導入されたシステム・機能などについて記載する。また、令和4年度の調査で言及されていない情報に関しても、注目すべきものは記載する。令和4年度の調査項目と本節記載項目の対応関係は下図の通りである。

図表 3 令和4年度の調査項目と本節記載項目との対応関係

R4年度の調査項目			本節における 記載箇所
章	調査内容	該当頁	
3-1	5G/6Gに向けた衛星通信システムの調査	p9～p32	2.1 2) A)
3-2	新しい衛星通信システムの調査	p33～p59	2.1 2) B)
3-3	衛星システム IoT の調査	p60～p78	2.1 2) C)
3-4	衛星間通信による宇宙ネットワークの調査	p79～p129	2.1 2) D)
3-5	衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査	P130～p135	2.1 2) E)

2) 令和4年度の調査項目

A) 5G/6G に向けた衛星通信システムの調査

i. 3GPP での NTN 仕様化状況

- 令和4年度の調査段階における3GPPの検討状況は下記の通り
 - ◇ 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（令和4年度報告書より抜粋）。
- 3GPPの仕様策定スケジュールの概要を下図表に示す
 - ◇ 2020年代後半の商用化に向けた5G Advancedは、2030年頃の商用化を見据える6Gへのステップとしても位置付けられており¹、リリース18、19、20の3フェーズで標準化が検討される。
 - ◇ R4年度報告書では、「リリース19では再生中継が定義される予定」とされており、今年度調査と関係が深いことからリリース19の検討状況を調査。

¹ <https://journal.ntt.co.jp/article/20142>

図表 4 3GPP のスケジュール概要

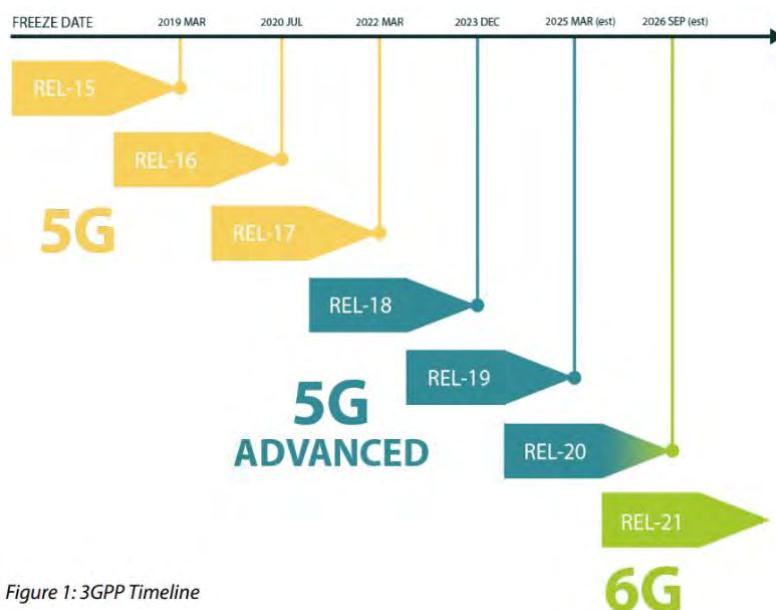


Figure 1: 3GPP Timeline

出所) 3GPP Rel-19 Toward 6G²

- ◇ 3GPP の標準化は要求条件規定 (ステージ 1)、アーキテクチャ規定 (ステージ 2)、プロトコル規定 (ステージ 3) の 3 ステージを経て段階的に標準化される³。
- ◇ 2022 年 9 月時点において、ステージ 2、3 はリリース 18 のアーキテクチャとプロトコルを検討している一方、リリース 19 ではシステムレベルの要求条件を検討している段階であり、このリリース 19 の動向は以下の通りである。
 - 3GPP TR 22.865 V1.0.0 (2023-03)⁴Tec “hnical Specification Group Services and System Aspects; Study on satellite access - Phase 3” : Technical Specification (技術仕様書) ではなく報告書 (Technical Report)
 - 衛星を介した 5G システムの拡張に関連するユースケースについて、下記項目が報告されている。
 - ① 遅延耐性通信サービス (delay-tolerant communication service) のための断続的／一時的な衛星接続による運
 - ② GNSS から独立した運用
 - ③ 同一衛星のカバーエリアにおける UE 間の通信
 - 衛星間通信運用が利用されるユースケース、IoT によるリモート監視などのユースケースにおける Store and Forward 運用など、サービスレベルの要求条件について報告されている。
- ◇ 3GPP TR 38.821 V16.2.0 (2023-03)⁵ “Technical Specification Group Radio Access Network ; Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) (Release 16)

² <https://ofinno.com/wp-content/uploads/2022/09/3GPP-Rel-19-Toward-6G-Digital.pdf>

³ https://www.soumu.go.jp/main_content/000683107.pdf

⁴ <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=4089>

⁵ <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3525>

- 衛星コンステレーションにおいて衛星間リンクを構成する場合は、オンボードの再生ペイロードが必要になるであろう、としている。

B) 新しい衛星通信システムの調査

i. GEO HTS システム事例

- 年々衛星ブロードバンド需要が増大していることから、大容量の通信を実現するために GEO の HTS 化が進められている。
- R4 年度報告書に記載された「GEO HTS システム事例 (40Gbps 以上)」のうち 2023 年までに打ち上げ、または打ち上げ予定の HTS の打上げ質量を下図表に示す (図表 5 は R4 報告書に掲載された HTS の一部に打ち上げ質量を加筆)。

◇ 衛星の質量は 3500kg 以上であり、5000kg 以上の超大型衛星も含まれている

図表 5 2023 年までに打ち上げ予定の HTS (R4 年度報告書抜粋)

Name	Launch date	Satellite Bus	Type	打上げ質量 (kg)
Hylas 4	05/04/2018	NGIS GeoStar3	BSS	4050
Telstar 19 Vantage	22/07/2018	SSL1300	FSS	7076
SES 12	04/06/2018	Airbus D&S E3000EOR	FSS	5384
Al Yah 3	25/01/2018	NGIS GeoStar3	FSS	3795
JCSat18/Kacific 1	17/12/2019	Boeing 702MP	FSS	6956
Inmarsat 5 - F5 (GX5)	26/11/2019	TAS Spacebus4000B2	MSS-VHTS	4007
Apstar 6D	09/07/2020	CAST DFH4E	FSS	5550
Konnect Africa (EUTELSAT KONNECT)	16/01/2020	TAS SpacebusNeo100	FSS	3619
Turksat 5B	19/12/2021	Airbus D&S E3000EOR	FSS	4500
SES 17	24/10/2021	TAS SpacebusNeo200	FSS	6411
VIASAT-3 AMERICAS (VIASAT-3-1)	2022	Boeing 702MP+	Broadband	6000
Konnect VHTS	2022	TAS SpacebusNeo200	Broadband	6300
VIASAT-3 EMEA (VIASAT-3-2)	2022	Boeing 702MP+	Broadband	6000
Inmarsat 6F2	2023	Airbus D&S E3000EOR	FSS/MSS	5470
GSAT 20 (CMS03)	2023	ISRO I3-K	FSS	不明 (2500~3500)
Jupiter3 / Echostar 24	2023	SSL1300	Broadband	9000
Satria (Nusantara Tiga)	2023	TAS SpacebusNeo200	Broadband	不明 (> 5000)

出所) R4 年度報告書に加筆

- Hughes の Jupiter 3 (Echostar24)

- ◇ 2023 年 7 月、Hughes が Maxar 製の Jupiter3 (Echostar24) の打ち上げに成功した。衛星の質量は、商用通信衛星として最も重い 9200kg である。⁶⁷
- ◇ 2023 年第 4 四半期にサービス開始予定であり、総通信容量は 500Gbps、ダウンロード速度は 100Mbps である。
- ◇ 衛星の主要諸元とイメージを下図表に示す。

⁶ <https://spacenews.com/falcon-heavy-sends-jupiter-3-broadband-giant-toward-geostationary-orbit/>

⁷ <https://www.hughes.com/what-we-offer/satellite-services/jupiter-geo-satellites/JUPITER3>

図表 6 Jupiter 3(Echostar24)の主要諸元⁸

項目	内容
質量	9200kg (打ち上げ時)
周波数帯	Ka バンド、Q/V バンド(Gateway 向け)
スループット	容量 : 500Gbps 伝送速度 : 100Mbps
バス	SSL-1300
打上げ	2023 年 7 月 28 日 (Falcon Heavy)
設計寿命	15 年以上

図表 7 Jupiter 3(Echostar24)のイメージ



出所) Hughes⁹

ii. 小型 GEO 衛星計画

- 2023 年 1 月に打ち上げられた APSTAR 6E (CAST 製造 DFH-3 E バス使用、APT Satellite Holdings 運用) は、打上げ質量 180 kg の小型 GEO の HTS である¹⁰。
- 近年、LEO/MEO コンステレーションなどの効率的な衛星の増加や打ち上げコストの低下により損益分岐点価格が低下しており、超大型で長寿命の GEO HTS は特定のエリアに対してサービスを提供することにリスクを伴う可能性がある。そのため、小型 GEO 衛星 (Small GEO) による HTS 化の検討も進んでいる¹¹。

⁸ <https://www.hughes.com/sites/hughes.com/files/2023-06/JUPITER-3-Fact-Sheet.pdf>

⁹ <https://www.hughes.com/what-we-offer/satellite-services/jupiter-geo-satellites/JUPITER3>

¹⁰ <https://www.seradata.com/long-march-2c-launches-small-geo-comsat-apstar-6e-htp-using-a-kick-stage/>

¹¹ <https://www.nsr.com/small-geo-satellites-viable-option-or-not/>

- 以下、Small GEO の計画について報告する。
 - ◇ ESA の Small GEO¹²
 - ESA の Advanced Research in Telecommunication Systems (ARTES)プログラムの中で OHB が開発した小型静止衛星用のプラットフォームである。
 - Small GEO プラットフォームを利用した最初の通信衛星が Hispasat 36W-1 であるが、詳細についてはノントランスペアレントペイロードの章で記載。Small GEO プラットフォームを適用した衛星は現在この衛星 1 機にとどまっている。
 - ◇ Astranis の小型 GEO 衛星¹³
 - Astranis は、Pacific Dataport, Inc. (PDI)がアラスカのブロードバンド通信サービスを提供するために使用する小型静止ハイスループット通信衛星 Arcturus (Aurora 4 A) を構築し運用
 - Aurora 4A は商用サービスとして、2023 年 8 月までにブロードバンドとセルラーバックホールを提供する予定¹⁴
 - 加入者 10,000 (Alaska 地域)
 - 衛星の主要諸元とイメージを下図表に示す。

図表 8 Arcturus (Aurora 4 A)の主要諸元^{15 16}

項目	内容
質量	300 kg
周波数帯	Ku、Ka バンド
伝送速度	容量：7.5Gbps ダウンリンク：25Mbps アップリンク：3Mbps
推進系	PPS-1350 (ホールスラスタ)
設計寿命	7 年
打上げ	2023 年 5 月 1 日 (Falcon Heavy)

¹²

https://www.esa.int/Applications/Telecommunications_Integrated_Applications/Small_Geostationary_Satellite_SGE_Q

¹³ <https://www.astranis.com/>

¹⁴ <https://myemail.constantcontact.com/PRESS-RELEASE---PACIFIC-DATAPORT-SUCCESSFULLY-LAUNCHES-HISTORIC-SATELLITE-MADE-FOR-ALASKA-.html?soid=1107588344703&aid=iGWQ4MPVVpg>

¹⁵ Seradata

¹⁶ https://space.skyrocket.de/doc_sdat/arcturus.htm

図表 9 Arcturus (Aurora 4 A)のイメージ



出所) PACIFIC DATAPORT¹⁷

◇ Ovzon-3

- 2018年12月、スウェーデンのOvzonは自動車、航空機、移動体ユーザーに汎用性の高いモバイルブロードバンド通信を提供するために静止衛星Ovzon 3をMaxarに発注。
- SSL-500をベースとするLegionクラスの静止衛星
- Ovzon 3の主要諸元を下図表に示す。

図表 10 Ovzon 3の主要諸元¹⁸

項目	内容
質量	1800 kg
周波数帯	Ku バンド
伝送速度	ダウンリンク : 120Mbps アップリンク : 100Mbps
運用寿命	18 年
打上げ	2023 年 8 月～
特徴 ¹⁹	<ul style="list-style-type: none"> ・ オンボードプロセッサ ・ ステアラブルスポットビーム (5 ビーム)

◇ Swissto12のSmall GEO

【HummingSat】

- Swissto12²⁰はコスト効率の高い小型の静止衛星であるHummingSatを製造する企業
- 2011年、Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne (EPFL)からのスピンアウト企業であり、3Dプリントによる高周波部品を製造

¹⁷ <https://www.auroraiv.com/>

¹⁸ Seradata

¹⁹ <https://www.ovzon.com/en/wp-content/uploads/sites/4/2021/11/ovzon-3-brochure-april-2022.pdf>

²⁰ <https://swissto12.com/>

- 現在、世界初の商用 GEO SmallSat である HummingSat で衛星通信業界をリード
- スイスを拠点とし、カリフォルニア、ニューハンプシャー、イスラエルに施設を有し、SIntelsat、Thales、Lockheed Martin、Elbit Systems、ESA などと協力し Satcom ソリューションを提供
- HummingSat のイメージを下図表に示す

図表 11 HummingSat のイメージ



出所) (Swissto12) <https://swissto12.com/hummingsat/>

【Intelsat-45 (IS-45)】

- 2022 年 11 月、Intelsat は小型の静止通信衛星 IS-45²¹を Swissto12 に発注したと発表。
- IS-45 の打ち上げは 2025 年予定であり、Ku バンド固定衛星サービスによりメディアおよび通信ネットワーク顧客に効率的なサービスを提供する。
- IS-45 の主要諸元を下図表に示す。

図表 12 IS-45 の主要諸元²²

項目	内容
質量	500~1000 kg
大きさ	約 1000×1000×1000 (mm)
ペイロード電力 (EOL)	2kW
周波数帯	Ku バンド
設計寿命	15 年
打上げ	2025 年 (ライドシェア)

【Inmarsat-8 (I-8)】

- 2023 年 5 月、Inmarsat は第 8 世代の L バンドネットワーク構築のために 3 機の

²¹ <https://www.intelsat.com/newsroom/intelsat-chooses-swissto12-to-build-intelsat-45/>

²² Saradata

SmallGEO を Swissto12 に発注²³。

- 2021 年 12 月および 2023 年 2 月に打ち上げられた 2 機の I-6 世代衛星と既存のコンステレーションを補完する
- 衛星航法補強システム（SBAS : Satellite-Based Augmentation System）用トランスポンダも搭載
- I-8 の容量は 1.5m³ で 2026 年打上げ予定。
- I-8 の主要諸元を下図表に示す

図表 13 Inmarsat 8 の主要諸元²⁴

項目	内容
質量	500～1000 kg
周波数帯	L バンド
設計寿命	15 年
打上げ	2026 年

iii. フィーダリンクへの光通信の適用検討

- Thales Alenia Space 社の Space Inspire の開発・運用等の状況
 - ◇ 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（令和 4 年度報告書より抜粋）。
- Airbus が製造した ARABSAT-7B（Badr 8）は 2023 年 5 月 27 日、Falcon 9 により打上げられた²⁵。
 - ◇ ARABSAT-7A と同様、ヨーロッパ、中東、アフリカ、中央アジアにわたる Arabsat の C バンド、Ku バンドの容量を置き換えるものである。
 - ◇ ARABSAT-7B には Airbus が CNES および Safran と共同開発したフィーダリンク向けの光通信ペイロードである Teleo を搭載しており、衛星—地球局間でのギガビット級の伝送実験を行う予定²⁶。
 - 光通信は従来の無線周波数技術と比較して信号妨害に対してより堅牢であり、実証により本分野での重要な役割を果たす。

²³ <https://swissto12.com/inmarsat-swissto12-hummingsat-i8-l-band-network/>

²⁴ Saradata

²⁵ <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2023-05-arabsat-badr-8-successfully-launched-featuring-airbus-innovative>

²⁶ <https://www.safran-group.com/pressroom/safran-airbus-and-cnes-forefront-earth-space-optical-communications-2022-07-22>

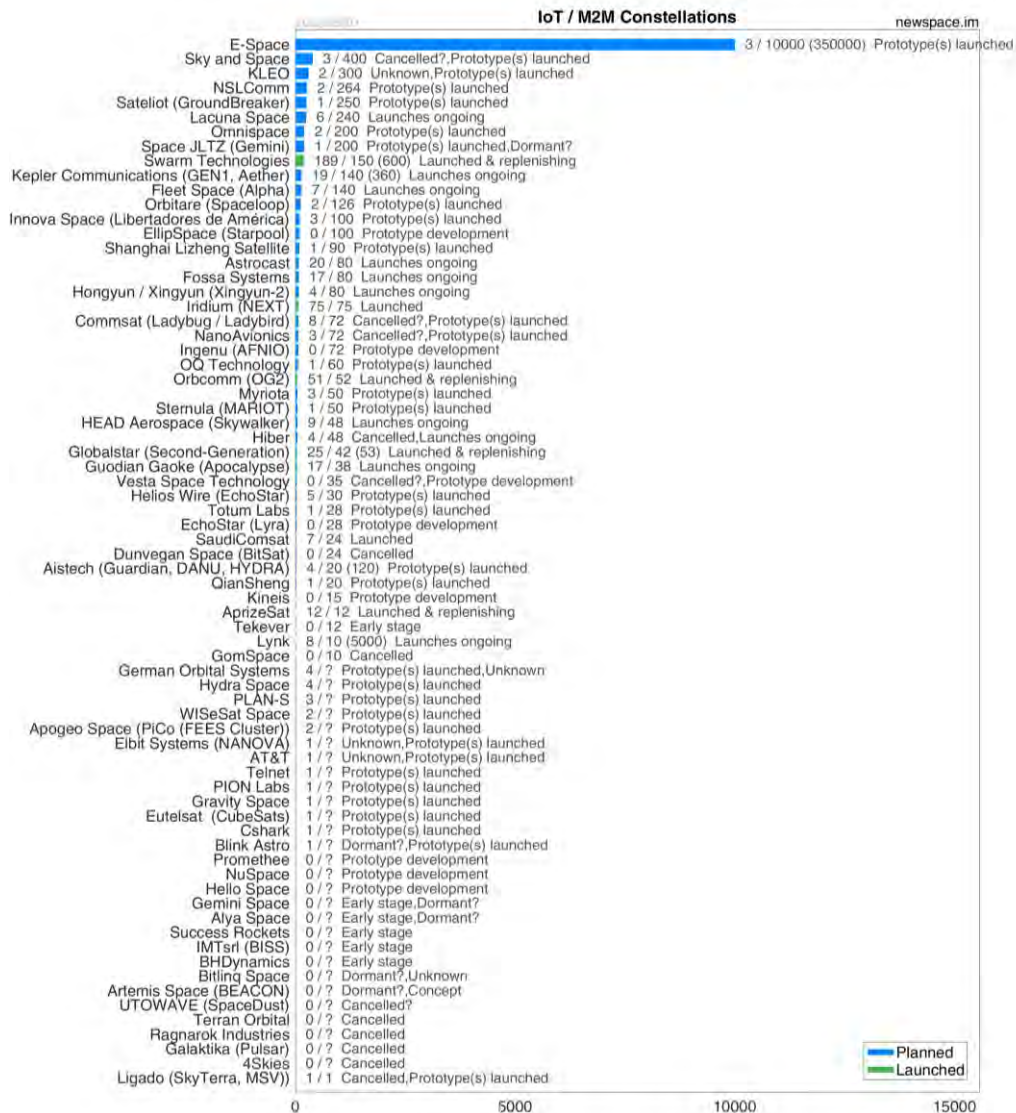
C) 衛星システム IoT の調査

i. IoT 衛星システムの例

- IoT 衛星は地上や海上に設置された IoT センサーが取得した情報をセンサー情報の集約局やユーザーに伝送するための衛星である。一般的に IoT は携帯回線や Wi-Fi など地上の通信設備を利用するが、衛星 IoT は地上の基地局から電波が届かない地域（山間部や海上など）における活用が期待されている。IoT センサーから伝送される情報量は小さいがセンサーの電力制限が厳しいことから、衛星の多くは低軌道を周回している。
- 衛星 IoT 用に規格化された通信方式は以下の 2 種がある。ライセンスが必要な方式の利用には、国内では携帯電話事業者として免許が必要である。
 - LoRa：ライセンス不要。通信速度は低いが、ネットワークカバレッジが広い。2022 年に策定された新変調方式「LR-FHSS」では、通信距離が延び、静止衛星と通信することも可能になった。
 - NB-IoT：ライセンス要。LTE の周波数帯の隙間（ガードバンド）を利用でき、省電力で大規模なシステムに対応可能。2022 年の 3GPP Release 17 で 5G NB-IoT NTN が規格化され、衛星 IoT のための規格が決定し、注目を集めている。
- また、LTE や 5G など携帯電話通信の規格を転用した衛星 IoT サービスもある。LTE は Iridium などこれまで衛星携帯電話サービスを提供してきた事業者が提供しており、5G は SpaceX 社の Starlink や Amazon 社の Project Kuiper などがサービス提供を予定している。
- この他に規格化されていない独自の通信方式を採用する企業も多い。独自の方式とすることで IP アドレスの送信なども省くことができ、通信量を最小限にすることができる。
- NewSpace Index²⁷によると、計画中あるいは運用中の IoT 衛星コンステレーションは下図表のとおりである。本項目では、この中から代表的プレーヤー及び 2023 年度に新たな動きが見られたプレーヤーを抽出した。
- また、国内については計画中の IoT 衛星コンステレーションは確認されなかったが、研究開発を実施している企業について取り上げる。

²⁷ <https://www.newspace.im/>

図表 14 IoT 衛星の種類



出所) NewSpace Index (https://www.newspace.im/assets/fig/Newspace_constellations_iotm2m_2023-05-01.pdf)

- 本項目で抽出した各衛星コンステレーションの概要を以下に示す。

図表 15 主な IoT 衛星

衛星 コンステレーション	企業名 (国)	衛星・サービス等概要
1	SpaceBEE ²⁸ Swarm Technologies ²⁹ (米国) 2021年8月SpaceXが	<ul style="list-style-type: none"> 2018年1月より打ち上げを開始、既に150機以上を打ち上げ 衛星サイズ: 0.25U (11×11×2.8 cm)、1U

²⁸ https://space.skyrocket.de/doc_sdat/spacebee.htm、等

²⁹ <https://swarm.space/>

	衛星 コンステレーション	企業名 (国)	衛星・サービス等概要
		買収 ³⁰	<ul style="list-style-type: none"> 軌道：SSO 打ち上げロケット：Falcon9、Astro Rocket 等 寿命：6 か月～2 年 通信規格：LTE 衛星、ユーザーモデムなどのハードウェアやソフトウェアを全て自社で開発 専用衛星に接続するための新規 IoT デバイスの販売は終了³¹。Starlink の開発に注力しており、同衛星で既製品の IoT デバイスで衛星通信を行えるようにすることを目指している。
2	Kepler (GEN1 等)	Kepler Communications ³² (カナダ)	<ul style="list-style-type: none"> 2018 年の初期タイプの打ち上げから現在まで約 20 機を打ち上げ 2020～2022 年に 16 機の GEN1 (6 U XL) を打ち上げ 衛星サイズ：6U 軌道：SSO、LEO 打ち上げロケット：Falcon9、Soyuz 寿命：3 年 通信規格：独自 (Ka、Ku バンドを使用) ペイロードは自社で開発した reconfigurable Ku バンド SDR (ストアアンドフォワード又はベントパイプ) 衛星 IoT サービスとして、EverywhereIoT を提供予定であったが、会社サイトの提供ソリューションページ³³に IoT の文言はなく、撤退した可能性がある。通信速度の高い K バンドや光通信が強みで、それらを利用して軍事向けサービスやリモートセンシング衛星データのダウンリンクサービスに注力している。
3	Alpha Centauri	Fleet Space ³⁴ (オーストラリア)	<ul style="list-style-type: none"> 140 機のコンステレーションを計画。2018 年以降 7 機を打ち上げ 衛星サイズ：6U、 軌道：SSO、LEO

³⁰ <https://www.space.com/spacex-to-acquire-swarm-technologies-starlink-satellites>

³¹ <https://www.satellitetoday.com/connectivity/2023/07/27/spacex-subsiary-swarm-ends-iot-device-sales/>

³² <https://kepler.space/>

³³ <https://kepler.space/network/>

³⁴ <https://fleetspace.com/>

	衛星 コンステレーション	企業名 (国)	衛星・サービス等概要
			<ul style="list-style-type: none"> 打ち上げロケット：Falcon9、Electron、PSLV 寿命：1年 通信規格：LoRa³⁵ 3Dプリントによるオールメタルパッチアンテナを搭載 主に資源探索向けのIoT製品を開発している
4	Tianqi (天啓)	Guodian Gaoke ³⁶ (中国)	<ul style="list-style-type: none"> 2018年10月29日に1号機を打ち上げ、累計で22機を打ち上げ 38機のコンステレーション構築を目指す 衛星サイズ：6U 軌道：SSO、LEO 打ち上げロケット：長征など 寿命：3年 通信規格：不明 海洋、環境保護、気象、林業、地質学、緊急対応、救助、スマートシティ産業分野などにおける地上ネットワークカバレッジ外でのデータ伝送を目的としている 8号機以降、Cubesatではなくなり、50kg以下の小型衛星になった様だが、詳細は不明³⁷。
5	Orbcomm OG2	Orbcomm ³⁸ (米国)	<ul style="list-style-type: none"> 1990年初頭からサービスを開始しており、これまでに23機打ち上げている Orbcomm OG2として11機が運用中 衛星重量：172kg 軌道：LEO 打ち上げロケット：Falcon9 寿命：5年以上³⁹ 通信規格：独自 衛星にはOrbcomm受信機とAIS受信機を搭載 物流、コールドチェーン、重機、海事、エネルギー、緊急時の連絡などの各産業に、単独でトータルな通信ソリューションを提供

³⁵ <https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2018/06/Fleet-Space-Technologies-unveils-launch-partners-for-first-nanosatellite-launches-Google-Docs.pdf>

³⁶ <https://dongfanghour.com/guodian-gaoke-chinas-first-constellations-to-take-shape/>

³⁷ https://space.skyrocket.de/doc_sdat/tianqi-8.htm

³⁸ <https://www.orbcomm.co.jp/>

³⁹ https://space.skyrocket.de/doc_sdat/orbcomm-2.htm

	衛星 コンステレーション	企業名 (国)	衛星・サービス等概要
6	Astrocast	Astrocast SA ⁴⁰ (スイス)	<ul style="list-style-type: none"> 2018年以降、20機を打ち上げている 衛星サイズ：3U 軌道：SSO 打ち上げロケット：Falcon9、PSLV 寿命：3～5年 通信規格：独自（1.5GHz） 2022年5月にオランダを拠点とするIoTプロバイダーであるHiberを買収する契約に署名した。しかし、資金調達に失敗し、買収を撤回 IoTチップセットは低消費電力でL-bandに対応している 23年4月に資金難に陥っていたことが報じられる⁴¹
7	MYRIOTA	Myriota ⁴² (オーストラリア)	<ul style="list-style-type: none"> 2018年と2021年に自社で衛星を1機ずつ打ち上げている。現在運用中の衛星のうち5機はexactEarth社から軌道上で購入 衛星サイズ：3U 軌道：LEO 打ち上げロケット：Electron 寿命：3年 通信規格：独自（160MHz又は400MHz） オーストラリアやニュージーランドで環境モニタリング、農業、鉱業などにサービスを提供 2021年、Spireと提携⁴³ 2022年、Spire Space Servicesが提供するSpire衛星に搭載された受信機によりサービスエリアを拡張⁴⁴ 50機のLEOコンステレーションを目指している
8	Kineis	Kineis (フランス)	<ul style="list-style-type: none"> 2024年第一四半期から打ち上げを開始する予定 衛星サイズ：16U 軌道：SSO 打ち上げロケット：Electron 寿命：4年 通信規格：独自

⁴⁰ <https://www.astrocast.com/>

⁴¹ <https://spacenews.com/thuraya-invests-in-astrocasts-leo-constellation/>

⁴² <https://myriota.com/>

⁴³ <https://myriota.com/2021/09/22/spire-global-and-myriota-partner-to-re-imagine-iot-connectivity/>

⁴⁴ <https://myriota.com/2022/05/19/spire-global-to-launch-five-satellites-on-spacex-transporter-5-mission/>

	衛星 コンステレ ーション	企業名 (国)	衛星・サービス等概要
			<ul style="list-style-type: none"> • CNES の研究プロジェクトの成果を利用して 2018 年に設立され、以降官民から 1 億ユーロを調達している⁴⁵ • 最終的に 25 機の超小型衛星からなるコンステレーションを整備する予定
9	Iridium NEXT	Iridium (米国)	<ul style="list-style-type: none"> • 2017 年から打ち上げを開始、80 機を運用中 • 低速のデータ通信を含む衛星携帯電話サービスを提供 • 衛星重量：860kg • 軌道：LEO • 打ち上げロケット：Falcon9 • 寿命：15 年 • 通信規格：LTE • 2015 年に LoRa のバックホール通信を Iridium 衛星で行う実証に成功した⁴⁶
10	Globalstar	Globalstar (米国)	<ul style="list-style-type: none"> • 31 機が運用中 • 低速のデータ通信を含む衛星携帯電話サービスを提供 • 衛星重量：450kg-700kg • 軌道：LEO • 打ち上げロケット：Falcon9、Soyuz • 寿命：15 年 • 通信規格：LTE • Apple 社が iPhone に Globalstar の衛星を利用した緊急通信サービスを搭載している • LTE を利用した IoT サービスも提供しており、サービス関連売上高の約 10% を占めている⁴⁷ • 将来的には、双方向 IoT 通信サービスを提供し、3GPP Release 18 NB-IoT を採用する予定である⁴⁸
11	ELERA	Inmarsat (英国)	<ul style="list-style-type: none"> • 6 基の衛星で L バンドの通信サービスを提供している⁴⁹ • 衛星重量：2000kg-6000kg • 軌道：GEO • 打ち上げロケット：H-IIA、Ariane 5 など • 寿命：15 年

⁴⁵ <https://www.kineis.com/en/about-us/#histoire>

⁴⁶ <https://www.telecomtv.com/content/iot/iot-takes-to-the-skies-as-iridium-looks-to-get-in-on-the-action-13015/>

⁴⁷ <https://investors.globalstar.com/news-releases/news-release-details/globalstar-announces-third-quarter-2023-results>

⁴⁸ <https://investors.globalstar.com/static-files/2a07d052-0d63-4ccb-80af-7b85c7b6e7a8>

⁴⁹ <https://www.inmarsat.com/en/about/technology/elera.html>

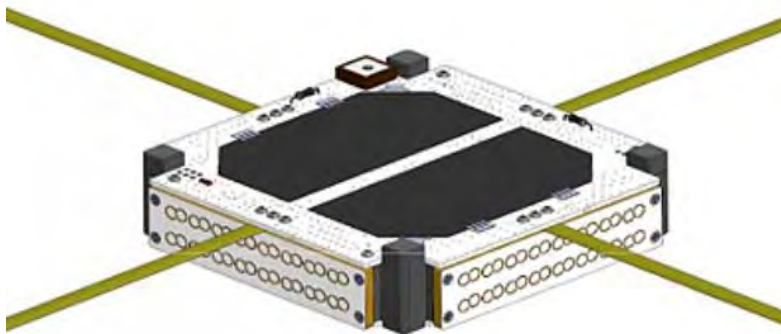
	衛星 コンステレーション	企業名 (国)	衛星・サービス等概要
			<ul style="list-style-type: none"> 通信規格：LTE 他の IoT コンステレーションのバックホールとしても機能しており、Hiber、Orbcomm、Skylo と提携している⁵⁰
12	Sateliot	Sateliot (スペイン)	<ul style="list-style-type: none"> 2021 年に実証機を打ち上げ、2023 年に 3 機を打ち上げた 衛星サイズ：6U 軌道：SSO 打ち上げロケット：Falcon9 寿命：5 年 通信規格：NB-IoT 最新の規格である 5G NB IoT NTN に準拠したサービスの提供を目指している
13	Apogeo Space	Apogeo Space (イタリア)	<ul style="list-style-type: none"> 2021 年に実証機を打ち上げ、2023 年に 9 基のピコサットを打ち上げた 衛星サイズ：0.25U 軌道：SSO 打ち上げロケット：Falcon9 寿命：3 年 通信規格：LoRa 今後、2027 年までに 96 機を配備する予定
14	Fossasat	FOSSA Systems ⁵¹ (スペイン)	<ul style="list-style-type: none"> 2019 年に初の打ち上げを実施、累計で 17 機が打ち上げられて、5 機が運用中 衛星サイズ：1.5U 軌道：SSO 打ち上げロケット：Falcon9、Electron、Firefly Alpha 寿命：1 年 通信規格：LoRa 2024 年末までに 80 機のコンステレーションを整備予定
15	Echostar Lyra (Echostar MMS Netwrk)	Echostar (アメリカ)	<ul style="list-style-type: none"> 2023 年 2 月に AstroDigital 社に 28 機の IoT 小型衛星を発注、2024 年に打ち上げ予定 衛星重量：不明 (10-40kg) 軌道：SSO 打ち上げロケット：Falcon9

⁵⁰ <https://www.inmarsat.com/content/dam/inmarsat/corporate/documents/enterprise/solutions-services/Inmarsat%20ELERA%20IoT%20Brochure.pdf.coredownload.pdf>

⁵¹ <https://fossa.systems/>

	衛星 コンステレーション	企業名 (国)	衛星・サービス等概要
			<ul style="list-style-type: none"> • 寿命：5年 • 通信規格：LoRa
16	Lacuna	Lacuna Space (イギリス)	<ul style="list-style-type: none"> • 2020年に初の実証機を打ち上げ、3機の実証機を運用中 • 衛星サイズ：6U • 軌道：SSO • 打ち上げロケット：Falcon9、Soyuz • 寿命：1年 • 通信規格：LoRa • 今後、32機体制の衛星コンステレーションを構築予定
17	Tiger	OQ Technology (ルクセンブルク)	<ul style="list-style-type: none"> • 2021年に初の実証機を打ち上げ、3機を運用中 • 衛星サイズ：6U • 軌道：SSO、LEO • 打ち上げロケット：Falcon9、VEGA • 寿命：1年 • 通信規格：NB-IoT

図表 16 Swarm Technologies の衛星



出所) Gunter's space page (https://space.skyrocket.de/doc_sdat/spacebee-10.htm)

(Credit: Swarm Technologies)

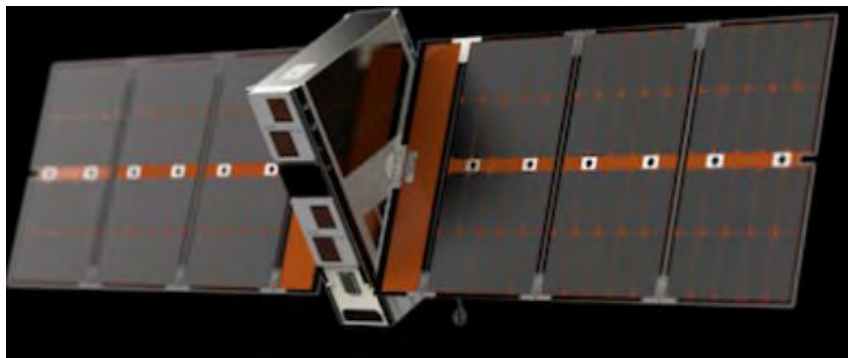
図表 17 Kepler 衛星のイメージ (Kepler4)



出所) Gunter's space page (https://space.skyrocket.de/doc_sdat/kepler-4.htm)

(Credit: UTIAS)

図表 18 Fleet Space の衛星イメージ (パッチアンテナ)



出所) Fleet Space (<https://fleetspace.com/about>)

図表 19 Tianqi 11



出所) Gunter's space page (https://space.skyrocket.de/doc_sdat/tianqi-10.htm)

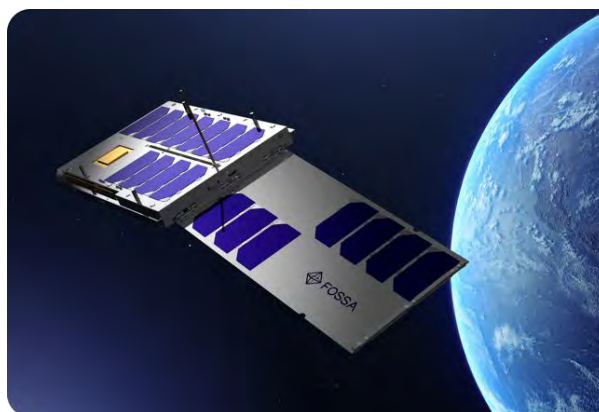
(Credit: Guodian Gaoke)

図表 20 Myriota 衛星のイメージ



出所) Myriota (<https://myriota.com/2021/03/23/myriota-launches-commercial-service-in-the-united-states-and-canada-with-second-generation-nanosatellites/>)

図表 21 Fossa 衛星のイメージ



出所) FOSSA Systems (<https://fossa.systems/dedicated-infrastructure/>)

- 以下の節では、2023 年度に新たな動きが見られた海外のプレーヤー及び日本での研究開発の動向について詳説する。

ii. Sateliot (スペイン)

- 2023 年 4 月、スペインの Sateliot は **3GPP Release 17 の 5G NB-IoT NTN に準拠**した通信を行う衛星を SpaceX 社の Falcon9 で打ち上げたと発表した⁵²。
- あらゆる地域にある NB-IoT デバイスが追加のハードウェアの購入なしに、衛星や携帯電話のネットワークとシームレスに接続できるようになり、遠隔地であっても IoT の大規模な導入が可能になるとしている。
- 2023 年 7 月には、宇宙空間における 5G ネットワークローミング実験の結果を発表した⁵³。ス

⁵²<https://sateliot.space/en/news-sateliot-space/sateliot-successfully-launched-the-groundbreaker-the-first-ever-satellite-under-5g-standard-to-democratize-iot-via-spacex-falcon-9/>

⁵³ <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/news/18/15726/>

ペインの携帯電話事業者 Telefónica（テレフォニカ）の技術部門 Telefónica Tech および Telefónica Global Solutions（TGS）と連携し、通常の SIM カードと IoT 端末で実験を行った。

- 2023 年 11 月に 2 号機を打ち上げた。
- 2024 年に 4 機を打ち上げる予定であり、その後 64 機の打ち上げを構想している。そのために 3000 万ユーロの資金調達を目指している⁵⁴。4 機体制で初期のサービスは展開できるが、迅速性向上のために衛星機数を増やし、最終的には 250 機体制とする予定である。

iii. Apogeo Space⁵⁵（イタリア）

- Apogeo Space 社は 2015 年に設立されたイタリアのスタートアップ企業でキューブサットの 3 分の 1 の大きさのピコ衛星による IoT 向けのコンステレーションの構築を目指している。
- 同社は、2023 年に最初の運用衛星 9 機を打ち上げ、2024 年にさらに 9 機、2027 年までに累計 96 機の衛星を社内で製造し配備する予定である⁵⁶。
- 2021 年、Soyuz 2.1 ロケットで初の実証機 FEES を打ち上げ、実証衛星 2 号機は、2022 年初頭に ISS から放出された。
- 実証機の大きさは 3U だったが、運用衛星のサイズは 1/3U 程度である。
- 通信規格は LoRa で、低電力で広範囲のデバイスに接続できるようにすることを目指している⁵⁷。
- 利用分野は、農業、石油・ガス産業、野生生物産業におけるデータ監視アプリケーションを想定している。20 機の衛星ネットワークにより、地球上あらゆる場所から最大 30 分の待ち時間でデータを取得でき、コンステレーション全体で継続的な通信が可能になるとしている。
- 同社は主にイタリアのアーリーステージの投資ファンドである Primo Space から既に 500 万ユーロを調達している。
- 2023 年 11 月に商用機第一弾である 9 機のピコ衛星を打ち上げたと発表した⁵⁸。
- Apogeo のピコ衛星のイメージを下図表に示す。

図表 22 Apogeo のピコ衛星

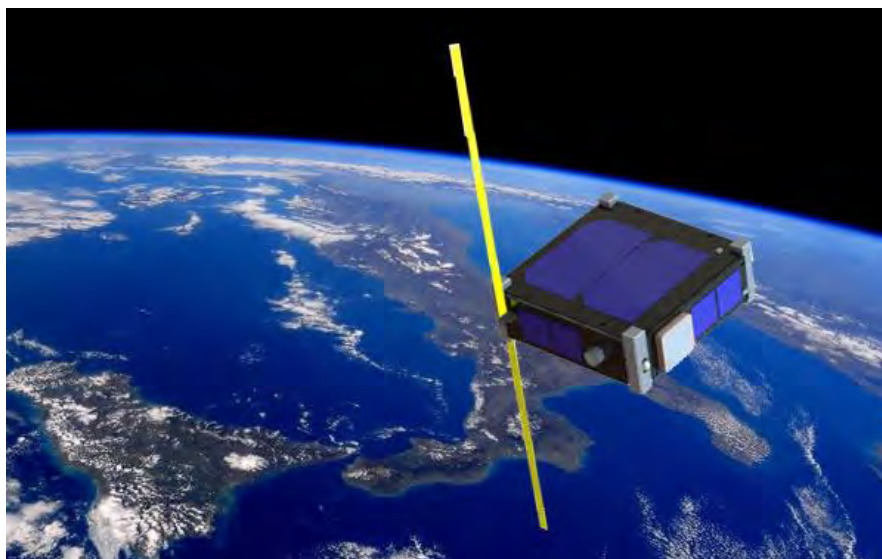
⁵⁴ <https://spacenews.com/spanish-startup-sateliot-seeks-funds-for-64-more-connectivity-satellites/>

⁵⁵ <https://www.apogeo.space/>

⁵⁶ <https://spacenews.com/apogeo-space-orders-second-space-tug-for-connectivity-constellation/>

⁵⁷ <https://www.apogeo.space/exploring-the-endless-possibilities-lora-satelliteiot-applications-for-the-maritime-industry-and-logistics/>

⁵⁸ <https://www.apogeo.space/we-did-it-our-picosatellites-have-been-launched/>



出所) spacewatch.global (<https://spacewatch.global/2023/06/momentus-to-deliver-nine-satellites-to-orbit-for-apogeo-space/>)

(Credit: Apogeo Space)

iv. Skylo Technologies⁵⁹ (アメリカ)

- Skylo Technologies 社は、自社で衛星を保有せずに他社の静止衛星の帯域を借りて NB-IoT による通信サービスを提供している⁶⁰。
- **3GPP Release17 に準拠**した衛星 NB-IoT サービスの提供を目指している。
- 2017 年末に設立され、2020 年 1 月に実施された直近の資金調達には SoftBank Group が主導しており、累計調達額は 1 億 1600 万ドルである⁶¹。
- Inmarsat 社と協業しており、Inmarsat の静止衛星を利用している⁶²。2020 年から同社が開発したゲートウェイ機器である「Skylo Hub」が NB-IoT⁶³で衛星と通信を行い、同機器を介して、地上の IoT 機器は Bluetooth や WiFi で通信を行うことができる⁶⁴。Skylo Hub の価格は 100 ドル以下で、低速だが低価格を実現している。
- 2023 年 7 月、Keysight Technologies 社 (アメリカ) は、3GPP Release 17 に準拠する NTN チップセット、モジュール、デバイスの認証プログラムを作成するために Skylo のテストケースを利用することで合意した⁶⁵。
- 日本では、23 年 7 月に KDDI 傘下の株式会社ソラコムと提携することを発表した⁶⁶。2023 年度末を目処に Skylo 社の衛星通信サービスが検証目的で提供される予定である。この協業によ

⁵⁹ <https://www.skylo.tech/>

⁶⁰ <https://techblitz.com/skylo-technologies/>

⁶¹ <https://www.satellitetoday.com/finance/2020/01/21/softbank-makes-big-investment-in-satellite-iot-startup-skylo/>

⁶² <https://www.satellitetoday.com/connectivity/2021/06/08/skylo-pairs-with-inmarsat-to-supply-satellite-for-its-narrow-band-iot-network/>

⁶³ ここでいう NB-IoT は、2022 年 3 月に策定された 3GPP Release 17 の NB-IoT NTN に準拠したものではないと考えられる。(地上用の) NB-IoT 自体は、2016 年の Release 13 で定義されている。

⁶⁴ <https://altair.sony-semicon.com/press-releases/skylo-partners-with-sony-semiconductor-israel/>

⁶⁵ <https://www.keysight.com/us/en/about/newsroom/news-releases/2023/0712-pr23-102-keysight-and-skylo-partner-for-narrowband-non-terr.html>

⁶⁶ <https://soracom.com/ja-jp/news/20230706-soracom-skylo-satellite-ntn/>

って、今後 3GPP Release 17 に準拠した NB-IoT NTN に取り組んでいく予定である。

- 23 年 11 月に、Inmarsat 社を吸収した Viasat 社との提携を発表した⁶⁷。2024 年初め以降に Viasat のパートナーである Ligado 社の SkyTerra 衛星を使って、3GPP Release 17 に準拠した通信サービスを全世界で提供する予定である。

v. Echostar (アメリカ)

- 既存の通信用静止衛星 EchoStar 21 から S バンドを使用して、ヨーロッパに LoRa 規格による通信サービスを展開中。
- 23 年 2 月に、更なる通信範囲の拡大のために LEO コンステレーションを構築し、同じく LoRa 規格で、静止衛星とシームレスに接続できるサービスの展開を計画していると発表した⁶⁸。サービス開始は 2024 年で、全世界を対象とする予定である。
- 23 年 7 月に、米軍は Echostar が開発中の IoT 衛星コンステレーション「Echostar Lyra」から通信サービスを調達する契約を締結したと発表した⁶⁹。
- 23 年 10 月に LoRa の規格を策定している LoRa Alliance は理事会に Echostar が加わったことを発表した⁷⁰。既に LoRa Alliance は長距離で衛星通信を行うための取り組みを行ってきたが、この動きが加速することが期待されている。

vi. Iridium (アメリカ)

- 中軌道の衛星から L バンドの衛星携帯通信サービスを展開している。
- 2024 年 1 月に直接デバイス接続を目指す「Project Stardust」を開始したことを発表した⁷¹。これまで Iridium 社は、スマホ用チップセット最大手の Qualcomm 社と提携しており、同社と共同で Iridium 社の衛星に接続するためのスマホ向けのパーツを開発していた。しかし、23 年 11 月に Qualcomm 社はこのパーツの開発と販売を停止することを発表した。
- Project Stardust では、Iridium 社独自で標準的な 5G 規格と通信に互換性を持たせ、携帯電話と衛星を直接接続できるようになることを目指している。
- Iridium 社は 3GPP に 11 月に正式加盟し、5G 標準規格の策定に参加した。
- 同計画は 2025 年にテストが開始され、2026 年にサービスが開始される予定である。
- この計画で用いられる通信規格は NB-IoT NTN であり、IoT 分野での展開も予定されている⁷²。

vii. Lacuna Space (イギリス)

- IoT 向けの地上端末と小型衛星を開発している。使用している通信規格は LoRa で最長 5 年の長寿命を実現している。ESA の ARTES や UKSA の投資プログラムから支援を受けている⁷³。

⁶⁷ <https://www.satellitetoday.com/connectivity/2023/11/16/viasat-and-skylo-to-launch-direct-to-device-service/>

⁶⁸ <https://spacenews.com/cash-rich-echostar-to-take-on-global-iot-market-next-year/>

⁶⁹ <https://www.satellitetoday.com/government-military/2023/07/26/16-companies-chosen-for-space-systems-command-leo-communications/>

⁷⁰ <https://www.computerweekly.com/news/366555514/LoRaWAN-Alliance-beefs-board-of-directors>

⁷¹ <https://spacenews.com/iridium-pivots-to-standardized-direct-to-device-satellite-services/>

⁷² <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/iridium-plans-new-direct-to-device-nb-iot-satellite-service/>

⁷³ <https://lacuna.space/supporters/>

- 23年9月に Viasat 社（アメリカ）、Omnispace 社（アメリカ）と共同で IoT 通信実証を行ったことを発表。欧州以外の環境での通信試験に成功した⁷⁴。
- 23年12月に Spire 社（アメリカ）に、最初の商用衛星 6 機の製造を発注した⁷⁵。
- ユースケースとして、油田監視に注力している。Aramco と提携⁷⁶しており、サウジアラビアや UAE にオフィスを設置している。

viii. OQ Technology（ルクセンブルク）

- NB-IoT に対応したキューブサットを開発し、打ち上げており、地上端末、ダウンリンクデータのネットワーク・データベースサービスを提供している。
- 23年1月に **3GPP Release17 に準拠**した衛星 NB-IoT の実証に成功したと発表した⁷⁷。
- Tiger 衛星と地上端末の画像を下図表に示す。

図表 23 Tiger 衛星



出所) OQ Technology (<https://www.oqtec.space/news/oq-technology-confirms-successful-launch-of-tiger-4-leo-satellite>)

図表 24 OQ Technology の地上端末



出所) OQ Technology (<https://www.oqtec.com/product>)

⁷⁴ <https://lacuna.space/omnispace-and-lacuna-showcase-breakthrough-ngso-iot-satellite-connectivity/>

⁷⁵ <https://www.satellitetoday.com/connectivity/2023/12/05/spire-to-build-and-operate-iot-constellation-for-lacuna-space/>

⁷⁶ <https://www.oqtec.space/news/aramco-and-oq-technology-strengthen-ties-with-new-technology-connectivity>

⁷⁷ <https://www.oqtec.space/news/pilot-test-of-our-satellite-5g-solution>

ix. NTT（日本）

- NTT 研究所は衛星 IoT の研究開発を行っており、低軌道衛星を介して小容量データを収集する 920 MHz 帯を用いた衛星システムを提案している⁷⁸。
- 本衛星システムは、ダウンリンク時に限られた帯域幅で大容量通信を行うため、JAXA と共同開発した同一周波数の異なる信号を複数アンテナで送受信する MIMO 技術を活用している。
- この技術を実証するため、NTT は JAXA の革新的衛星技術実証 3 号機に応募し、同衛星に搭載する「低軌道衛星 MIMO/IoT 伝送装置 LEOMI」の開発が行われた⁷⁹。
- 22 年 10 月に同衛星はイプシロン 6 号機の打ち上げが失敗したことにより、喪失した⁸⁰。
- 同装置は革新的衛星技術実証 4 号機に再度搭載される予定である⁸¹。2025 年度末の打ち上げが予定されている⁸²。
- 低軌道衛星 MIMO/IoT 伝送装置 LEOMI を下図表に示す。

図表 25 低軌道衛星 MIMO/IoT 伝送装置 LEOMI



出所) JAXA (https://www.kenkai.jaxa.jp/kakushin/interview/03/interview03_03.html)

(Credit: NTT)

x. IHI（日本）

- 「経済安全保障重要技術育成プログラム」の一環として、NEDO が「船舶向け通信衛星コンステレーションによる海洋状況把握技術の開発・実証」を 2022 年度から実施しており、株式会社 IHI を幹事会社とし、株式会社アークエッジ・スペース、LocationMind 株式会社の 3 社で受託している⁸³。事業期間は 2029 年度までで、事業規模は 147 億円である。
- 本開発実証では、現行の船舶自動識別システム (AIS) に代わり、国際標準化が見込まれる船舶用双方向デジタル通信システム (VDES) の技術を確立し、2026 年度までに複数の実証衛星

⁷⁸ https://journal.ntt.co.jp/wp-content/uploads/2022/09/nttjnl5004_20221001.pdf

⁷⁹ https://www.kenkai.jaxa.jp/kakushin/interview/03/interview03_03.html

⁸⁰ https://www.jaxa.jp/press/2022/10/20221012-2_j.html

⁸¹ <https://www.kenkai.jaxa.jp/research/innovative/theme04.html>

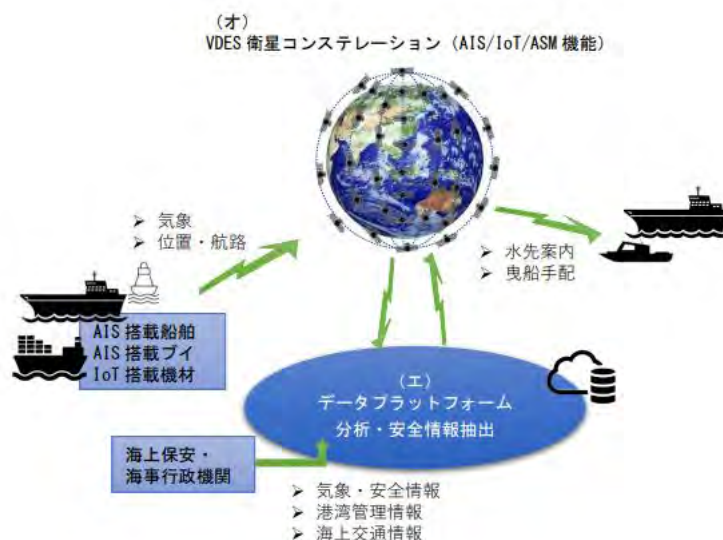
⁸² https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei_fy05/kaitei_fy0512.pdf

⁸³ <https://www.nedo.go.jp/content/100958637.pdf>

を打ち上げて、コンステレーションを構築することを目指している⁸⁴。

- ここで開発される衛星は、海上交通や港湾・物流の管理に必要な情報を一元的に収集するため、IoT 受信機（LoRa 受信機）を搭載する予定である。
- 本プログラムで目指すシステム構成図を以下に示す。

図表 26 システム構成図



出所) 内閣府 (https://www8.cao.go.jp/cstp/anzen_anshin/20221021_meti_3.pdf)

xi. アクセルスペース（日本）

- アクセルスペース社は、通常は2~3年がかかる小型衛星開発を最短1年で開発する「AxelLine r」サービスの提供を目指している。AxelLinerの実証機である「Pyxis」は2024年第一四半期にFalcon9で打ち上げられる予定である⁸⁵。
- 同衛星には、ソニー社と共同で開発したIoT向け衛星無線実験装置が搭載されている。この装置は、ソニー独自のIoT通信規格であるELTRESに対応したものである⁸⁶。
- ELTRESは920MHz帯を利用しており、ライセンス不要で利用できる。低消費電力であるため、コイン電池1個で動作可能である⁸⁷。
- 実証衛星Pyxisを下図表に示す。

図表 27 実証衛星 Pyxis

⁸⁴ https://www8.cao.go.jp/cstp/anzen_anshin/20221021_meti_3.pdf

⁸⁵ <https://news.yahoo.co.jp/articles/bfad126c4563f3c33adef6bfe2df96cf985ddf4>

⁸⁶ https://www.axelspace.com/ja/news/press_20221013_collaborativeprojectwithsgc/

⁸⁷ <https://www.sony-semicon.com/ja/eltres/index.html>



出所) SPACE Media (<https://spacemedia.jp/report/11602>)

(Credit:アクセルスペース)

xii. 日本の強み・弱み

- 衛星 IoT の方式は、5G や NB-IoT などのライセンスが必要なものと LoRa や各社独自の規格などのライセンスが不要なものに大別される。前者は通信容量を大きくできるが、消費電力が多く、後者は通信容量が少ないが、消費電力を少なくできる。どちらかが優れているわけではなく、利用用途によりどちらが最適になるかが決まる。
- ライセンスが必要な衛星 IoT サービスは、日本では事実上、携帯電話事業者のみが提供できる。衛星については、Space X 社の Starlink といった次世代の 5G 通信衛星コンステレーションや Iridium 社、Globalstar 社の従来の携帯通信衛星の NB-IoT への転用が主流であり、日本の携帯電話事業者もこれらの海外事業者と提携している。そのため、日本の衛星製造事業者の参入する余地は少ないと考えられる。
- ライセンスが不要な衛星 IoT については、利用できる周波数が国ごとに異なるため、海外事業者による輸出入は進んでいない。通信量が少ないため、超小型衛星で通信網を整備でき、日本の事業者の参入余地も十分あると考えられる。
- VDES に関する研究開発が進んでいる点が、日本の強みになりうる。違法漁業対策やシーレーン確保など安全保障上の要請もあり、政府として今後も注力していくべき領域である。VDES の研究開発や標準化への貢献によって、本領域でのプレゼンスを高め、コンテナ監視・海洋観測ブイなどの他の IoT も含めた海洋 IoT ネットを世界に先駆けて構築していくことも一つの方策である。
- 日本の弱みとしては、低容量通信を行う IoT 向けの超小型衛星コンステレーションの計画がなく、IoT 向け衛星の製造に関する研究開発が進んでいないことである。低容量通信については、制約が多いため地上の端末とサービスに合わせて個別最適化が必要である。政府による研究開発への補助金等を通じて、地上サービス事業者による衛星保有や地上サービス事業者と衛星製

造業者の提携を促し、超小型衛星コンステレーションの構築を目指すことも必要であると考え
る。

D) 衛星間通信による宇宙ネットワークの調査

i. 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

- Inmarsat による「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

◇ Inmarsat は 2021 年 8 月、既存の ELERA (L バンド GEO) および Global Xpress (Ka バンド GEO) と LEO 衛星、地上の 5G サービスを統合したネットワークサービス「ORCHESTRA」を発表⁸⁸

- 2023 年 2 月時点では LEO コンステレーションを自社で構築するか他事業者と連携するか方向が定まっておらず、計画は進展していない模様⁸⁹。

◇ 2021 年 11 月、Inmarsat と ViaSat は、ViaSat が Inmarsat の買収を計画していることを発表。

- 2023 年 5 月 9 日、英国当局は ViaSat による Inmarsat 買収を承認。米国および EU の当局による承認が残っているが、今後、Inmarsat および ViaSat によるマルチオービット戦略が明らかになると予想される。
- 2023 年 5 月 19 日、FCC は上記の買収を承認⁹⁰。
- 2023 年 5 月 25 日、EC が本買収を承認⁹¹
- 2023 年 5 月 31 日、ViaSat による Inmarsat の買収が完了
- 2023 年 7 月 6 日、Inmarsat はオーケストラ構想におけるコンステレーション運用のための周波数スペクトル (V バンド) の申請を撤回

- Capella X band SAR system

◇ Inmarsat は、シンガポールに本社を置く衛星通信を中心とする無線装置のベンダーである Addvalue Innovation と共に 5 年間をかけて Inter-satellite Data Relay System (IDRS) サービスを開発

◇ 2020 年 11 月、Inmarsat は米国のリモートセンシング衛星ビジネス企業の Capella Space が打ち上げた SAR 衛星である Sequoia と同社の制御局との間でのライブデータ伝送を行うことで同装置の実証を行ったと発表。

- Capella Space は静止軌道上の Inmarsat-4 を介した IDRS によって Sequoia に作業指令 (tasking orders) を送ることで、世界で初めてリアルタイム作業のために静止衛星を使用した民間 SAR 企業となった
- 配信時間が短縮されることで、より実用的な情報を宇宙から入手できるようになる、

⁸⁸ <https://www.inmarsat.com/en/about/technology/orchestra.html>

⁸⁹ <https://spacenews.com/inmarsat-remains-open-to-ordering-its-own-leo-constellation/>

⁹⁰ <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DA-23-427A1.pdf>

⁹¹ <https://www.inmarsat.com/en/news/latest-news/corporate/2023/viasat-inmarsat-acquisition-proceeds-close.html>

としている

- 衛星間リンクは画像データの伝送用としての利用ではない

ii. 宇宙ネットワークの構成要素

- ユーザーターミナル (UT) (Starlink)

- ◇ Starlink Maritime も提供中⁹²

- あらゆるサイズのボートを対象としてグローバルルカバレッジで最大 220 Mbps ダウンロード速度を提供

- ◇ Starlink Mobility⁹³

- 車での移動中でも最大 220Mbps の速度でダウンロード可能
- 視野の広角化と GPS 機能により、さらに多くの衛星接続可能となる
- ネットワーク内において、Starlink Mobility の接続は優先度が高く、ネットワークの混雑時でも接続が優先される
- Starlink では災害救援や緊急サービスに優先的に対応する旨を表明している⁹⁴
- Starlink Mobility 端末を下図表に示す
- Starlink Aviation も計画中

図表 28 Starlink Mobility アンテナ



出所) Starlink (<https://www.starlink.com/mobility>)

- ゲートウェイ (Starlink)

- ◇ Space X は FCC より米国内で 60 以上の Gateway 地球局の運用許可を得ている

- 2023 年 4 月、SpaceX は地上インフラを柔軟に拡張するための「包括的」ライセンスを FCC に申請した。
- SpaceX はこのライセンス(Open in a new window) を通じて、第 1 および第 2 世代の Starlink 衛星にブロードバンドデータを送信できる新しい Ka バンドゲートウェイ局の建設を目指している。
- 各地球局は最大 40 基の 1.85 m アンテナを利用。SpaceX の宇宙機の認可と併せて、地球局は最大 8 機の Gen 1 衛星と最大 32 機の Gen 2 衛星と同時に通信する。

⁹² <https://www.starlink.com/maritime>

⁹³ <https://www.starlink.com/mobility>

⁹⁴ <https://api.starlink.com/public-files/SpaceX-Starlink-Disasters-Case-Study.pdf>

E) 衛星による量子暗号配送システム・要素技術調査

- 量子コンピュータの進歩により、従来のコンピュータでは現実的な時間内で計算しきれない問題やシミュレーションを解けるようになることが期待されている。
 - 現在の暗号技術は、総当たりで解読しようとする莫大な時間が必要である数学問題を利用している。量子コンピュータは、近い将来に現在の暗号を現実的な時間内で解読してしまうほどの性能を獲得するとされている。
 - この問題に対処するために、同じく量子力学を利用し、完全に安全な通信を実現することを期待されているのが量子暗号である。量子暗号の代表的な方法が量子鍵配送 (QKD) である。
 - 現在、QKD は光ファイバーを用いた地上系 QKD と光通信を発展させた衛星 QKD の 2 つが開発されている。地上系 QKD は、現在の光ファイバーによるインターネット網と親和性が高いが、通信距離が短いという欠点がある。そのため、真空中で光が減衰しない宇宙を利用して、長距離通信を実現できる衛星 QKD と組み合わせ、通信網を構築することが想定されている。
 - QKD の方式としては、離散量 QKD、量子もつれ、連続量 QKD の 3 つのアプローチで研究が行われている。衛星 QKD では主に、離散量 QKD (代表的なプロトコルとして BB84 がある) と連続量 QKD が研究されている。前者の離散量 QKD は、1 粒の光子ごとに 1 ビットの情報を載せて送信する方式で、光子検出器に高い性能が求められることが課題になっている。後者の連続量 QKD は、微弱な光の電磁波の振幅を利用する方式で、一般的な光通信デバイスが利用でき、既存の光通信と同時に利用できるが、安全性の証明が難しいという課題がある。
- i. 中国の取り組み
- 衛星 QKD だけでなく地上の量子通信ネットワークの構築も行っており、最も量子暗号通信に注力している。
 - 2021 年、Micius 衛星と地上に設置された長さ 2,000 キロの量子通信ケーブル「京滬幹線」(北京・済南・合肥・上海の 4 都市をつなぐ量子通信ネットワーク) の接続により、距離 4,600 キロの衛星・地上間量子鍵配送実験に成功している。
- Micius
 - ◇ 2016 年に衛星-地上間で BB84 による QKD の実証実験を実施。
 - ◇ 1000 km の距離において 1kbps の通信を実施。
 - Jinan 1
 - ◇ 2022 年、中国科技大学が製造した量子科学衛星 Micius に次ぐ「Jinan 1」を打ち上げた。
 - ◇ Micius の 1/6 の質量で、今後は QKD に関する各種実証などが実施される予定。
 - 中高軌道に複数の衛星を投入することを計画⁹⁵
 - ◇ Chinese Academy of Sciences (CAS) と National Space Science Center が協力して中高軌道衛星を開発中。
 - ◇ 最初のステップとして、量子鍵として使用するもつれ粒子を生成する QKD に焦点を当て

⁹⁵ <https://spacenews.com/china-is-developing-a-quantum-communications-satellite-network/>

た 3 機または 5 機の 100 キログラム未満の小型衛星を 800km 太陽同期軌道 (SSO) に投入予定。

- ◇ 2023 年 10 月には、GPS 衛星の様に中軌道への投入を目指しており、高度 1 万 km に投入するために課題があると研究者が明らかにした⁹⁶。
- ◇ 中高軌道の衛星によって大陸間の量子通信が可能となる。
- ◇ 最初の中高軌道衛星には光子伝送のために直径 600mm の望遠鏡を搭載する。
- ◇ 中国は 2030 年までのブレークスルーを目指す技術メガプロジェクトの一環として、量子通信と量子コンピューティングを取り上げている。
- 天宮宇宙ステーションで量子のふるまいに関する研究を実施⁹⁷
 - ◇ 2023 年 5 月に打ち上げられた神舟 16 号のミッションの 1 つとして量子に関する研究を実施。
 - ◇ 研究の具体的内容については秘匿されている⁹⁸。

ii. 欧州の取り組み

- QUARTZ (Quantum Cryptography Telecommunication System)⁹⁹ (欧州)
 - ◇ SES 社を中心とする産業コンソーシアムが、LEO 衛星による QKD の商業サービスの提供を目指すプロジェクト。
 - ◇ EU や ESA が推進している量子通信インフラ EuroQCI と連携している。
 - ◇ 2022 年時点では、2024 年に打ち上げを予定していた Eagle-1 衛星で商用化を開始するつもりであると SES の CEO が発言している。
 - ◇ 量子鍵配布のプロトコルは BB84 で、光レーザー端末はドイツの TESAT 社が提供している。300kg の衛星 Eagle-1 を開発し、長距離量子暗号鍵配送 QKD サービスの実証を 2025 年末から 2026 年初頭に開始する予定である¹⁰⁰。
 - ◇ 2023 年 5 月に SES 社は、TESAT 社を主要パートナーとして、Eagle-1 衛星の QKD ペイロードの開発とインテグレーションを担当すると発表した¹⁰¹。
 - ◇ Eagle-1 衛星に搭載される光通信端末は、TESAT 社の SCOT80 が用いられる。SCOT80 の概観と諸元を下図表に示す。

⁹⁶ <https://www.space.com/china-quantum-communications-satellite-higher-orbit-plans>

⁹⁷ <https://spacenews.com/shenzhou-16-astronauts-arrive-at-chinas-space-station/>

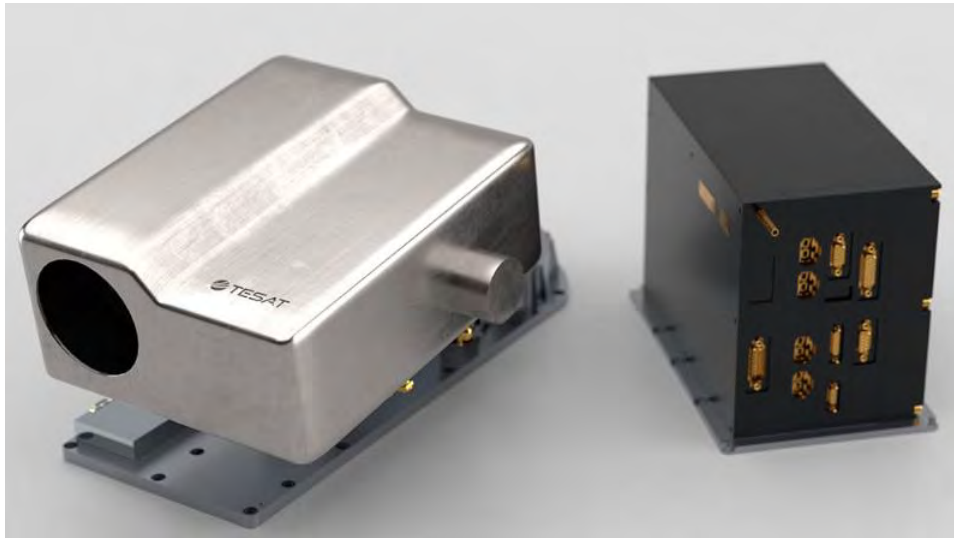
⁹⁸ <https://asiatimes.com/2023/06/china-to-boost-quantum-research-in-space/>

⁹⁹ <https://spacenews.com/ses-considering-quantum-cryptography-satellite-system/>

¹⁰⁰ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-quantum-communication-infrastructure-euroqci>

¹⁰¹ <https://www.ses.com/press-release/ses-and-tesat-develop-payload-europes-first-quantum-cryptography-leo-satellite-system>

図表 29 TESAT 社の光通信端末 SCOT80



出所) TESAT (<https://www.tesat.de/products>)

図表 30 SCOT80 の主要諸元

KEY PARAMETERS	KEY FACTS
<p>Application LEO Broadband Constellation</p> <p>Range 8,000 km</p> <p>Technical Features</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Running production (232 Terminals under contract) ▪ Scalable design (100 Mbps to 100 Gbps) ▪ Space quality delivery for 2,000 units per year ▪ Reliable Pointing, Acquisition, Tracking & Communication (+65,000 links performed) ▪ Validated Laser Communication performance since 2007 ▪ Compliant to SDA OCT Standard V3.0 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Channel Data Rate 10 Gbps, bidirectional ▪ Mass 15 kg ▪ Size (Optical Head) 50 x 18 x 26 cm³ Size (LCT Electronics) 26 x 11 x 17.5 cm³ ▪ Power Consumption 60 - 80 W, dep. on data rate ▪ Data Interface Ethernet

出所) SCOT80 Data Sheet (https://www.tesat.de/images/tesat/products/220607_DataSheet_SCOT80_A4.pdf)

- ◇ 衛星に搭載される量子乱数生成機器 (QRNG) は、TESAT 社とスイスの ID Quantique 社が共同で開発を行う¹⁰²。
- ◇ 2023 年 11 月、地上局についてはオランダ応用科学研究機構 (TNO) とオランダ Airbus 社が構築することが発表された¹⁰³。
- QKDSat (欧州)
 - ◇ Arqit 社 (イギリス) が率いる産業コンソーシアムによって提案され、ARTES 33 Partner

¹⁰² <https://www.idquantique.com/id-quantique-joins-eagle-1-europes-pioneering-quantum-key-distribution-initiative/>

¹⁰³ <https://www.ses.com/press-release/ses-led-eagle-1-onboards-tno-and-airbus-deliver-ground-station-quantum-key>

プログラムの下で共同資金援助を受けていた。2023年の商用サービス開始を目指していたが、2022年12月に Arqit 社が撤退を表明。

- ◇ 2023年5月には、同社がこの QKD 衛星に関する部門の売却する可能性が高いという情報も報じられている¹⁰⁴。
- TeQuantS (欧州)
 - ◇ Thales Alenia Space 社は、2026年までに長距離量子衛星通信の実証を目指す TeQuantS プロジェクトを主導している¹⁰⁵。このプロジェクトには、同社の他に Airbus 社や7つの中小企業が参加している。
 - ◇ 2023年1月に、このプロジェクトが ESA の ARTES 4.0 Core Competitiveness プログラムの一部として技術開発を行う契約を締結したと発表した¹⁰⁶。同契約は 1000 万ユーロ相当の価値があるとされる。
- QUDICE¹⁰⁷ (欧州)
 - ◇ 2023年1月に開始し、6か国から11の研究機関と企業が共同で実施している。前身のプログラムである「QUANGO」は12UのIoT用の5G規格QKD衛星の設計を行っていた¹⁰⁸。
 - ◇ 離散量 QKD と連続量 QKD の2つのコンポーネントを2024年末までに開発し、2025年に実証することを目指している。
 - ◇ オンボードで、5G規格を満たしつつ暗号を処理することも目指している。
- 量子通信ハブ (Quantum Communications Hub) (イギリス)
 - ◇ イギリスでは政府プログラムの量子通信ハブ (Quantum Communications Hub) が複数のベンチャー企業に資金提供を行い商用 QKD の開発を推進している。
 - ◇ 現在は、第2フェーズ (2019~2024年) にあり、従来の通信インフラストラクチャと統合し、あらゆる距離での量子通信技術を開発することを目指している¹⁰⁹。
 - ◇ 宇宙での QKD としては、フェーズ1で開発した技術を軌道上実証する12UのCubeSatを2024年に打ち上げる予定¹¹⁰。4つの大学と RAL Space 社が参加している。2つの大学がそれぞれ連続量 QKD と離散量 QKD の端末を開発しており、これらが同時に搭載されることが特徴である。
 - ◇ 軌道上実証衛星のプラットフォームは、オランダの ISISPACE 社が提供する¹¹¹。スコットランドの光通信地上局に設置された量子受信機と光、赤外線信号、無線チャンネルで通信す

¹⁰⁴ <https://www.spaceintelreport.com/arqit-quantum-seeking-a-buyer-for-its-esa-financed-quantum-key-distribution-satellite-and-40-member-satellite-team/>

¹⁰⁵ <https://www.thalesaleniaspace.com/en/press-releases/thales-alenia-space-and-partners-sign-contract-european-space-agency-tequants>

¹⁰⁶ <https://spacenews.com/thales-leading-another-esa-push-to-develop-quantum-communications/>

¹⁰⁷ <https://qudice.eu/about-qudice/>

¹⁰⁸ <https://quango.dei.unipd.it/objectives.html>

¹⁰⁹ <https://www.quantumcommshub.net/research-community/about-the-hub/phase-2/>

¹¹⁰ <https://www.quantumcommshub.net/research-community/about-the-hub/phase-2/work-package-5/the-hubs-spoqc-mission/>

¹¹¹ <https://www.isispace.nl/news/uks-quantum-communications-hub-satellite-rd-mission-awarded-to-isispace-group/>

る。

図表 31 Quantum Communications Hub の CubeSat のイメージ



出所) ISISPACE (<https://www.isispace.nl/product/12u-16u-cubesat-bus/>)

- Craft Prospect 社 (イギリス)
 - ◇ 6U サイズの CubeSat 衛星のコンステレーションによる QKD サービスに向けたミッションを主導している。
 - ◇ 2023 年 5 月に ESA OPS-SAT Versatile Optical Laboratory for Telecoms (OS2 VOLT) ミッションを発表¹¹²。約 1200 万ユーロのプロジェクトで、同社が開発した QKD のハードウェアを ESA と共同で軌道上実証をする。

iii. 日本の取り組み

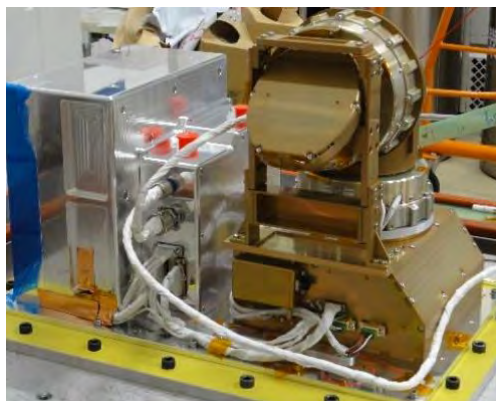
- 2010 年から首都圏での QKD ネットワーク実証が NICT を中心に行われたことが、我が国の量子暗号研究の始まりである。
- 東芝社が地上系 QKD に関する技術を有しており、2020 年に量子暗号通信装置を発売して事業化を開始し、2021 年には光ファイバーで世界最長となる 600km を超える伝送を実現している¹¹³。
- 衛星 QKD の研究開発は、2017 年に宇宙基本計画に明記されたことから開始された。

¹¹² <https://www.ukspace.org/craft-prospect-leading-os2-volt-mission-for-esa/>

¹¹³ <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/02438/080800015/>

- 但し、現在の我が国のこの分野の研究は物理レイヤ暗号に関するものが中心である。物理レイヤ暗号は量子暗号通信の技術要素である光通信に着目し、光通信で量子暗号よりは劣るが、実用上は十分にセキュアな通信を実現する技術である。1 ビットを送信するのに複数の光子を含んでおり、量子暗号ではない。
- 総務省「衛星通信における量子暗号技術の研究開発」
 - ◇ 総務省公募案件「平成 30 年度 情報通信技術の研究開発に係る提案」の「衛星通信における量子暗号技術の研究開発」課題として、2022 年度までの 5 年間で次世代宇宙システム技術研究組合 (NeSTRA) が受託し、研究開発を行っている¹¹⁴。小型衛星に搭載可能な QKD 技術を開発することが目標とし、物理レイヤ暗号通信の実証を行っている。
 - ◇ 2022 年 12 月に東京スカイツリーと可搬型光地上局との間の物理レイヤ暗号通信の模擬実証を実施した。低軌道衛星と地上局の通信で想定されるよりも厳しい条件でも微弱光信号の受信が確認された¹¹⁵。
 - ◇ 2023 年度は委託期間を延長し、ISS 上で軌道実証を実施¹¹⁶。
 - ◇ 2023 年 8 月、スカパーJSAT 株式会社は、原理実証実験に使用する光通信用装置の打ち上げに成功したと発表¹¹⁷。
 - ◇ 2023 年 9 月に実験を開始し、2024 年 2 月末まで実証を行う予定¹¹⁸。
 - ◇ 光通信装置の外観を下図表に示す。

図表 32 光通信装置の外観¹¹⁹



出所) スカパーJSAT ニュースリリース

【Credit : NICT、ソニーコンピュータサイエンス研究所、次世代宇宙システム技術研究組合】

- 総務省「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」
 - ◇ 総務省公募案件「令和 3 年度 情報通信技術の研究開発に係る提案」の「グローバル量子暗

¹¹⁴ https://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/ictR-D/ichiran30.html

¹¹⁵ <https://www.skyperfectjsat.space/news/detail/20230316.html>

¹¹⁶ https://www.soumu.go.jp/main_content/000873088.pdf

¹¹⁷ https://www.skyperfectjsat.space/news/detail/post_231.html

¹¹⁸ <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/02438/120500030/>

¹¹⁹ <https://www.skyperfectjsat.space/news/files/pdf/b50dcde9439bbd2f1de21696560cd5c6.pdf>

号通信網構築のための衛星量子暗号技術の研究開発」課題として、令和7年度までの5年間でスカパーJSAT株式会社が受託し、研究開発を行っている。初年度の実施予定額は15億円である¹²⁰。

- ◇ 本研究開発では、衛星に搭載する装置の研究開発と地上局の研究開発を行っている。他国の量子暗号衛星は低軌道だが、本研究では静止軌道までカバーできる革新的な衛星量子暗号の実現を目指している。
- ◇ 2022年度までは、衛星搭載装置の試作や設計、地上局の受信機の部分試作を行っていた¹²¹。受信機に関しては、静止軌道からの通信を実現するため、高感度・低雑音とすることを目指している。

iv. 米国の取り組み

- 米国は国家安全保障局（NSA）が QKD に対して否定的であり、量子自体は扱わずにアルゴリズムの変更で量子コンピュータの脅威に対応する耐量子計算機暗号（PQC）技術に注力している。そのため QKD に対する研究開発は少ない。
- NASA と共に量子通信の研究をしていたマサチューセッツ工科大学のリンカーン研究所は、レーザー通信の研究に注力している¹²²。
- QuSecure とアクセントゥアが PQC による衛星通信の実証実験を実施
 - ◇ 2023年3月に QuSecure 社はアクセントゥア社と協力して、PQC を用いた衛星通信の実証に成功したと発表した¹²³。
 - ◇ この実証では、LEO 衛星に加えて GEO 衛星も利用することで、冗長性を確保している。また、QuSecure 社のテクノロジーにより、この実証はソフトウェア面でのアップデートのみで実現した。

v. シンガポールの取り組み

- SpeQtral 社
 - ◇ シンガポール国立大学からスピンアウトしたスタートアップ企業。商用 QKD サービスの実用化を目指しており、2019年にキューブサットの SpooQy-1 で実証を行った。
 - ◇ 更なる実証試験のために、2024年に SpeQtre と SpeQtral-1 の打ち上げを予定している。
 - ◇ 2023年8月に SpeQtral-1 を開発するために、Kongsberg NanoAvionics（リトアニア）に衛星バスを、Mbrionics（アイルランド）に光端末を発注した¹²⁴。
 - ◇ また、2023年11月に同衛星に搭載する量子乱数生成器を Quantum Dice 社（イギリス）

¹²⁰ https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01tsushin03_02000323.html

¹²¹ https://www.soumu.go.jp/main_content/000873100.pdf

¹²² <https://www.ll.mit.edu/r-d/communication-systems/optical-and-quantum-communications-technology>

¹²³ <https://www.qusecure.com/qusecure-and-accenture-team-in-first-successful-multi-orbit-communications-link-showcasing-post-quantum-crypto-modernization/>

¹²⁴ <https://www.satellitetoday.com/manufacturing/2023/08/16/speqtral-taps-nanoavionics-and-mbrionics-for-quantum-mission/>

に発注した¹²⁵。なお、Quantum Dice 社はオックスフォード大学の量子研究室からスピノフした企業である。

vi. インドの取り組み

- 2023年4月にインド政府は、「National Quantum Mission（国家量子計画）」を発表した¹²⁶。2030年までに量子分野に600億ルピー（日本円で約1000億円）を投じる計画である。同計画では、量子コンピュータの開発の他に、インド国内で2000kmの長距離に対して衛星による量子通信を実現することを目指している¹²⁷。
- 2023年11月、インド宇宙機関（ISRO）は、量子通信機能を備えた衛星の打ち上げを目指していることを発表した¹²⁸。

vii. 日本の強み・弱み

- 世界の衛星 QKD の研究開発状況としては、実証を行った国・企業が登場し始めているところである。しかし、実証を行った国・企業でも次のステップは商用化ではなく、更なる実証であり、商用 QKD の実現には相当の時間を要すると考えられる。
- 米国は衛星 QKD を研究していたチームも光通信に注力しており、国家方針としては PQC に注力している。欧州では、各プロジェクトで実証に向けた準備が進みながらも、主導している企業が撤退を表明したプロジェクトも出ている。QKD はまだ技術的に未成熟であり、主流の通信方式として商用化されるかどうか不透明である。
- 日本では、衛星 QKD 研究として、衛星 QKD の要素技術である光通信を用いた物理レイヤ暗号の実証実験を行っている。物理レイヤ暗号と連続量 QKD は共通する部分が多く、物理レイヤ暗号用の機器はそのまま連続量 QKD 機器の構成要素として流用できる。
- 宇宙空間よりも光通信にとっては厳しい環境である地上—地上（大気圏内）での通信実験に成功しており、地上—衛星間向けの光通信端末に関する技術は我が国の強みである。大気圏内での減衰の影響から、これまでの光通信衛星は低軌道を飛び、通信距離が短いという課題があったが、上記の技術を発展することで、より長距離通信が可能な静止衛星の開発が期待される。
- 一方で、物理レイヤ暗号では量子を用いていないため、衛星に搭載できる量子暗号に対応した送受信機や量子乱数生成器の開発が遅れている。また、本格的な衛星 QKD 実現に向けた計画がないことも日本の弱みである。
- ファイバーを用いた地上 QKD については、東芝社が世界最先端の技術を保有している。衛星 QKD の実現にあたっては、物理レイヤ暗号とこれら地上系技術を組み合わせる研究開発プログラムを開始することが求められる。

¹²⁵ <https://www.satellitetoday.com/cybersecurity/2023/11/30/quantum-dice-releases-random-number-generator-secure-tech-for-space-systems/>

¹²⁶ <https://economictimes.indiatimes.com/news/science/why-is-india-spending-so-much-on-quantum-research-the-china-angle/articleshow/99645694.cms>

¹²⁷ <https://economictimes.indiatimes.com/news/science/why-is-india-spending-so-much-on-quantum-research-the-china-angle/articleshow/99645694.cms>

¹²⁸ https://spap.jst.go.jp/india/news/231104/topic_ni_03.html

2.2 マルチオービットアーキテクチャの調査分析

サマリー

- NTN（非地上系ネットワーク）と地上の通信システムを統合したネットワーク構築の構想が進む中、各事業者は現在衛星間通信ネットワークの構築や HAPS-地上間通信の研究開発・実証に注力している状況。
- 衛星間通信では、GEO 衛星を保有する事業者が MEO 衛星・LEO 衛星とネットワークを構築するための研究開発を進めている。このように衛星間光通信の重要性が増す中で、既に Mynaric 社や Tesat 社が SDA や CCSDS の規格に準拠した光衛星通信装置の商用での提供を開始しており、この領域でこれから日本の事業者がキャッチアップするのは困難だと考えられる。
- 費用対効果の点などで、LEO コンステレーションを構築する事業者が多いことから、GEO-LEO のマルチオービット化を目指す事業者が多い。
- SES は自社保有の GEO 衛星と MEO 衛星を連携した運用を開始しており、Intelsat も OneWeb とパートナーシップ契約を締結し、GEO 衛星と LEO 衛星を組み合わせた通信サービスの提供に向けて取り組みを進めるなど、海外プレイヤーを中心にマルチオービットの衛星運用が動き始めている。
- 一方日本でも、NTT とスカパーJSAT、および両社によって設立された Space Compass 社において、地上から HAPS、複数軌道の衛星を多層的に繋ぎ、統合した宇宙統合コンピューティング・ネットワークの構築を進めている。
 - ✓ 現在は HAPS・地上間通信の研究開発に注力
 - ✓ 今後 GEO 衛星-HAPS、GEO/LEO 衛星-HAPS 間の接続や、それら全体を統合した NW 構築を進めるべく研究開発を進めている状況
 - ✓ SES などの海外事業者と比較すると遅れている状況。
- NTN 構築に関する取り組みの中で、HAPS については国内外ともに研究開発・実証フェーズに留まっている状況である。日本でも大手通信事業者を中心に実証が進められており、将来的に日本として強みを発揮できる可能性のある領域である。

1) 本節における基本的な考え方

- 衛星通信においてマルチオービットアーキテクチャを構築することにより、ルーティングの選択肢やシステム容量の増加、冗長性の確保等が可能になり、サービスプロバイダーの次段階のビジネス展開へと繋がる。

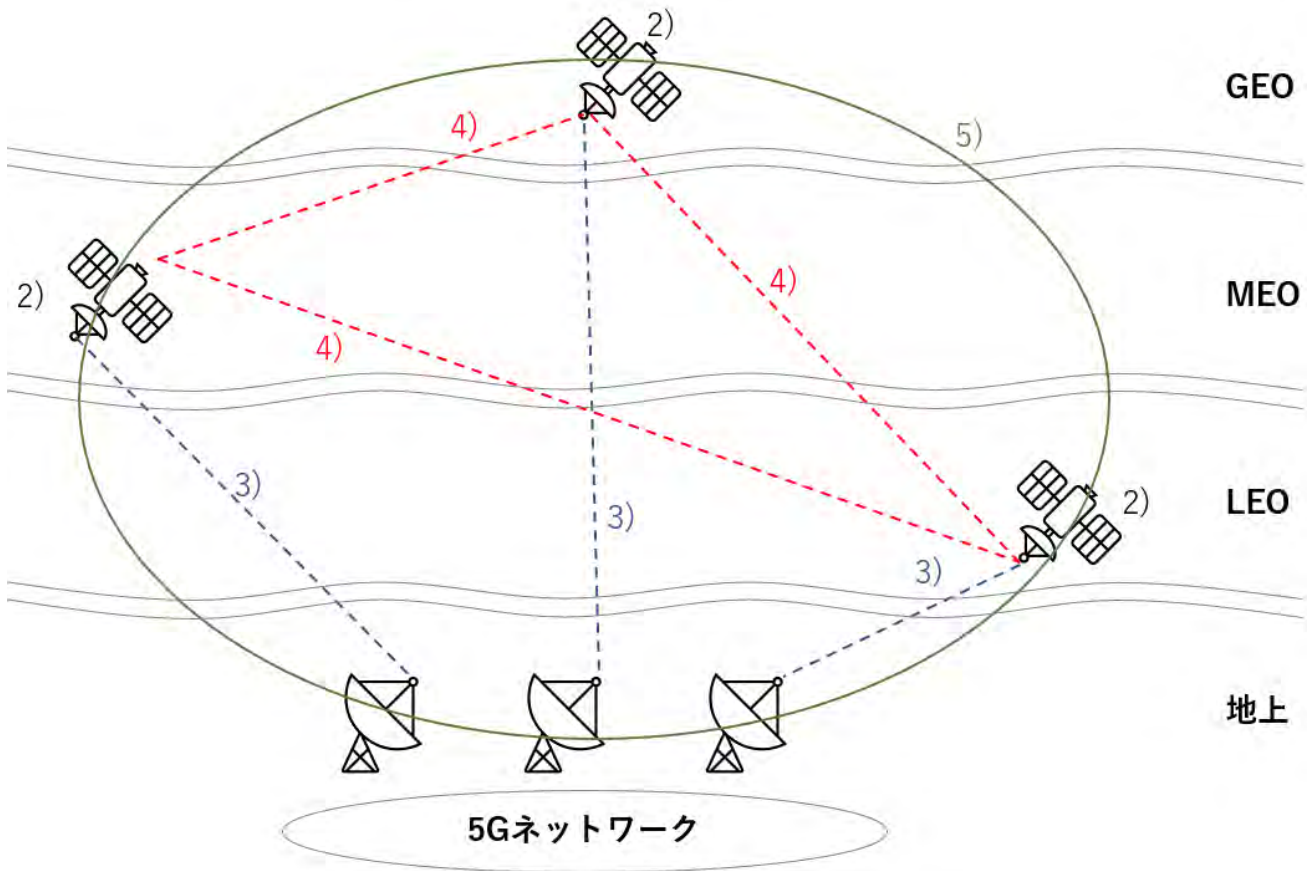
その実現のために、異なる通信衛星事業者間、もしくは自社内でのマルチオービット衛星の運用検討が進んでおり、マルチオービットネットワーク内の接続や、地上通信との接続をシームレスに行う技術が必要となる。

- 上記のようなマルチオービット衛星の運用に関する現況を把握すべく、以下の論点で調査を進める。なお、本調査における仕様書の付番と本報告書の付番の関係は図表 25 の通りである。
 - ◇ 2.2 2) 大手通信衛星オペレーターの動向
 - ◇ 2.2 3) HAPS-衛星間の通信を中心とした、非地上系 NW の技術開発動向
 - ◇ 2.2 4) 衛星間通信の接続技術とその課題
 - ◇ 2.2 5) 地上通信と NTN を一体とする NW 技術とその課題
 - ◇ 2.2 6) 日本が保有する技術等の強み・弱みの分析

図表 33 仕様書 3-2 と本節の付番対照表

仕様書における付番	内容	本節における付番	大分類
(1)	静止軌道（以下、GEO）の通信衛星、中軌道（以下、MEO）または低軌道（以下、LEO）における通信衛星、地上を接続するシステムを保有する国内外のオペレーターの事業動向や、そのために必要な搭載系技術・ネットワーク（以下、NW）技術を調査分析の上、まとめること。	2)	大手通信衛星オペレーターの動向調査
(2)	非地上系 NW（以下、NTN）について、他軌道（GEO/MEO/LEO）との接続技術も含め、国内外の技術動向やオペレーター側に必要な技術等について調査分析の上、まとめること。	3)	非地上系 NW の技術動向調査
(3)	軌道上での衛星間通信 NW に関して、通信制御方式および通信ターミナルの技術的課題や標準化について調査分析の上、まとめること。	4)	衛星間通信の接続技術およびその課題調査
(4)	地上通信、NTN、衛星間通信を一体とする NW について、セキュリティ、レジリエンス、稼働率等といった想定される技術課題を調査分析の上、まとめること。	5)	地上通信と NTN を一体とする技術およびその課題調査
(5)	本分野において、日本の保有する技術の強み・弱みを分析すること。また、本分野において、今後日本が取るべき戦略や取り組むべき研究開発計画について提案すること。	6)	日本が保有する技術の強み・弱み分析

図表 34 本節各項目の対応イメージ



2) 大手オペレーターの事業動向、必要な搭載系技術・ネットワーク技術

- 従来衛星アーキテクチャでは、単一の軌道に衛星を配置することが一般的であったが、カバレッジの向上や通信容量の増加等を目的に、近年マルチオービット化を進める・検討する事業者が増加している。本節では取り組みが盛んな欧米の事業者を中心に事業動向を整理する。

図表 35 マルチオービット化を実施・検討している事業者リスト

	GEO 事業者名	連携する MEO (LEO) 事業者名	マルチオービット化の状況	マルチオービット化の種類	マルチオービット化の目的
A	SES S.A. (ルクセンブルク) ¹²⁹	O3b Networks (買収済)	運用中	GEO+MEO	高スループット、低レイテンシの MEO 衛星保有によるサービス拡大、および顧客基盤の拡大を目的に O3b networks を買収
B	Eutelsat S.A. (フランス) ¹³⁰	OneWeb	研究開発中	GEO+LEO	高速インターネット接続の需要が高まっていることを背景に、GEO/LEO 統合ソリューションを提供するマルチオービット衛

¹²⁹ <https://www.ses.com/>

¹³⁰ <https://www.eutelsat.com/en/home.html>

	GEO 事業者名	連携する MEO (LEO) 事業者名	マルチオービット化の状況	マルチオービット化の種類	マルチオービット化の目的
					星事業者となるべく、OneWeb と経営統合
C	Intelsat S.A. (アメリカ) ¹³¹	OneWeb	研究開発中	GEO+LEO	航空会社およびその乗客に対してインフライト接続を提供することを目的に OneWeb とのパートナーシップ契約を締結
D		Telesat (カナダ) ¹³²	研究開発中	GEO+LEO	政府、電気通信、海事、航空分野の顧客向けに廉価で高速度・大容量通信を提供することを目的に自社で LEO コンステレーションを構築
E	KT Sat (韓国) ¹³³	未定 (Mangata Networks ※アメリカへ出資)	計画中	—	AI や IoT を強化する 6G 通信の実現
F	Hispasat (スペイン) ¹³⁴	未定	計画中	—	航空・海上輸送分野などに大容量モビリティサービスを提供し、新しい顧客と市場を開拓
G	Yahsat (アラブ首長国連邦) ¹³⁵	未定 (子会社の Thuraya が Astrocast (スイス) へ出資)	計画中	—	メガ・コンステレーションが増加することによる自社ビジネス縮小の危機からの脱却
H	Space Compass (日本) ¹³⁶	未定	計画中	—	宇宙統合コンピューティング・ネットワークにより、インフラ構築・運用・サービス提供を通じて地球の諸課題を解決

A) SES S.A. (ルクセンブルク) ¹³⁷

i. 概要

- SES S.A.はルクセンブルクに本拠を置く、人工衛星の保有、運用を行う多国籍企業である。2022 年度の売上高は 1,944M ユーロ、修正後 EBITDA は 1,105M ユーロ、修正後純利益は 189M ユーロであった。収益源は、ネットワーク事業と映像事業の大きく 2 つである。
- GEO 衛星と MEO 衛星を組み合わせる唯一の事業者である。LEO 衛星のペイロードでは処理できない、高い信頼性・スループットを提供する¹³⁸。

¹³¹ <https://www.intelsat.com/>

¹³² <https://www.telesat.com/>

¹³³ <https://www.ktsat.com/mainPage.do>

¹³⁴ <https://www.hispasat.com/en>

¹³⁵ <https://www.yahsat.com/>

¹³⁶ <https://space-compass.com/>

¹³⁷ <https://www.ses.com/insights/expertise/our-multi-orbit-strategy>

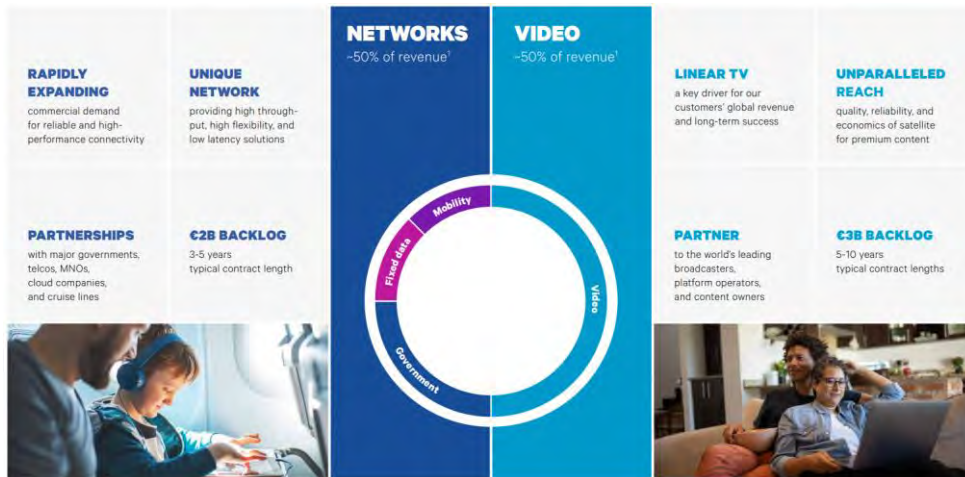
¹³⁸ <https://www.ses.com/press-release/ses-third-and-fourth-orbit-mpower-satellites-successfully-launched>

図表 36 2022 年度財務データ



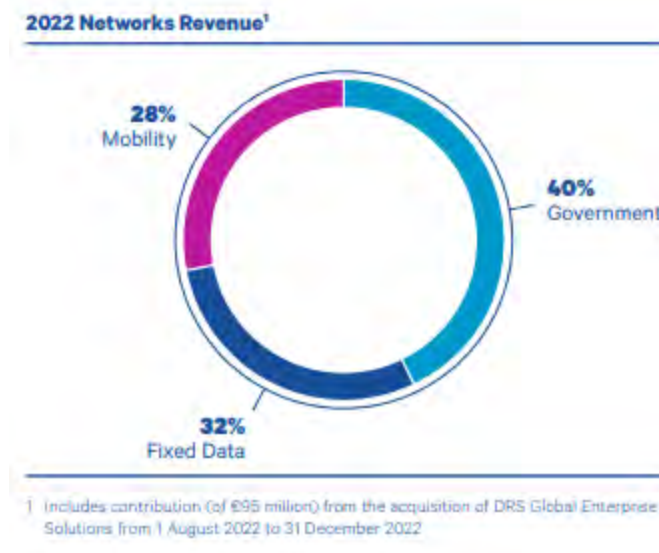
出所) SES S.A. ANNUAL REPORT 2022 P.9

図表 37 事業構成



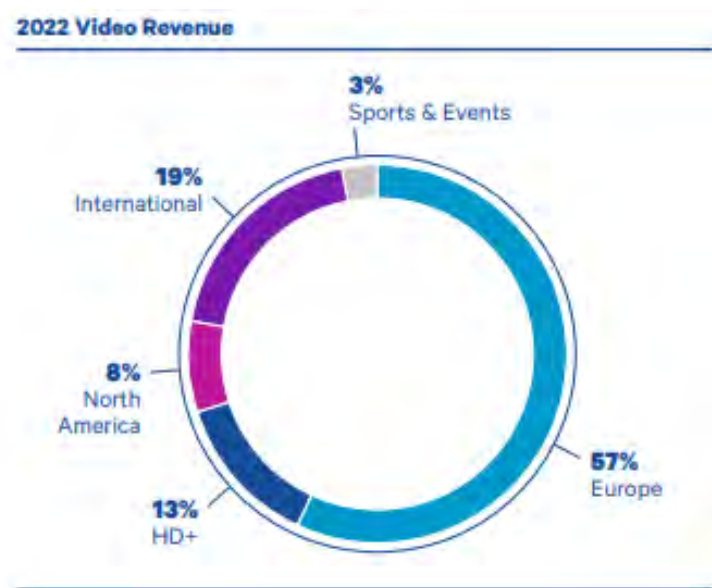
出所) SES S.A. ANNUAL REPORT 2022 P.7

図表 38 ネットワーク事業の売上先



出所) SES S.A. ANNUAL REPORT 2022 P.19

図表 39 映像事業の売上先

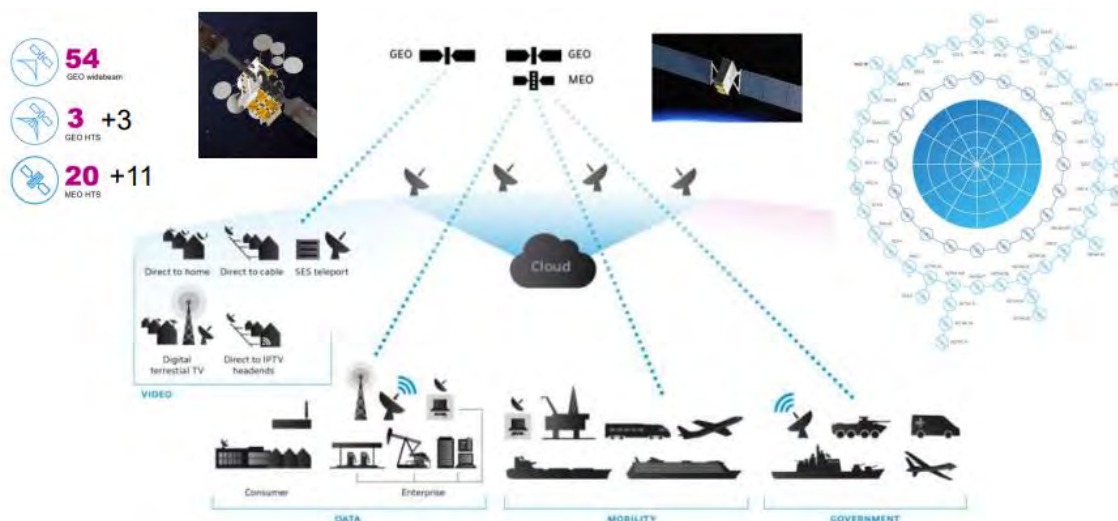


出所) SES S.A. ANNUAL REPORT 2022 P.20

ii. 取組内容

- 2016年、高スループット、低レイテンシのMEO衛星保有によるサービス拡大、および顧客基盤の拡大を目的にO3b networks社を買収した。^{139 140}
- 静止軌道(GEO)に約50基の静止衛星を、さらに中軌道(MEO)に20基のO3b衛星を運用している。

図表 40 SES の GEO/MEO 運用イメージ



出所) SES

¹³⁹ <https://www.ses.com/press-release/ses-take-control-o3b-networks>

¹⁴⁰ <https://www.ses.com/press-release/ses-exercises-call-option-acquire-100-o3b-networks>

- O3bの後継となる次世代MEO衛星のO3b mPOWERの展開を進めており、2022年12月に最初の2機を打ち上げ、2023年4月に3・4機目の衛星を打ち上げ。2023年中にサービスを開始予定。2024年にはさらに追加で5基のO3b mPOWERを打ち上げ、コンステレーションに加える予定。
- 同社が運用するGEO衛星、および次世代MEO衛星の概要と利用目的は以下の通り。
 - ◇ GEO衛星：SES-17等・・・総計200GHzの帯域幅を処理可能。高スループットや低レイテンシを必要としない用途（気象・テレビ放送・MEO衛星のバックアップ等）に高い信頼性を提供する。
 - ◇ MEO衛星：O3b mPower・・・GEO衛星の最大10倍のリンクあたりスループット（最小40Mbpsから複数Gbps）を処理可能であり、レイテンシは150ミリ秒未満。高スループット、低レイテンシが要求される用途（航空・商船・通信が困難な地形でのネットワークバックホール等）に高い信頼性を提供する¹⁴¹。
- 2023年、SES、ThinKomおよびHughes Network Systemsは共同で、政府の航空機ミッション向けに複数のソリューションをサポートできる高性能マルチオービットサービスを実証、成功裏に終える。
- 2023年、SESはSES-17（GEO）、O3b mPOWERおよびO3bのマルチオービット衛星を統合的に管理・運用するためのプラットフォームにGilat社のSkyEdge IVを採用。
- 2023年9月、SESのMEOとSpaceXのLEO（Starlink）を統合したサービス「CRUISE mPOWERD + STARLINK」を船舶向けに提供開始¹⁴²。
 - ◇ SESが提供する「CRUISE mPOWERD」とSpaceXの「Starlink」を組み合わせた船舶向け通信接続ソリューション
 - ◇ 業界初のMEOサービスとLEOサービスをシームレスに統合したサービス
 - ◇ MEOのカバレッジの外（極地を除く北部・南部）ではGEOを活用したサービスを提供
→GEOによるバックアップ
 - ◇ 1隻あたり1.5/3.0 Gbpsの帯域幅を保証する二つのサービスを提供
- 2023年10月、衛星のパワーモジュールの問題に対処するため、O3b mPOWERコンステレーションのサービス開始を2024年第2四半期に延期することを発表¹⁴³。
- 2023年11月、5・6機目のO3b mPOWERを打ち上げ。2024年にも追加で打ち上げ、総数13機で運用することを発表。¹⁴⁴

¹⁴¹ <https://www.ses.com/press-release/ses-enhance-and-expand-o3b-mpower-system-capabilities-dynamic-software-innovation>

¹⁴² <https://www.ses.com/press-release/ses-introduces-cruise-industrys-first-integrated-meo-leo-service-starlink>

¹⁴³ <https://www.satellitetoday.com/business/2023/10/31/ses-and-boeing-to-share-risk-and-capex-on-2-additional-mpower-satellites/>

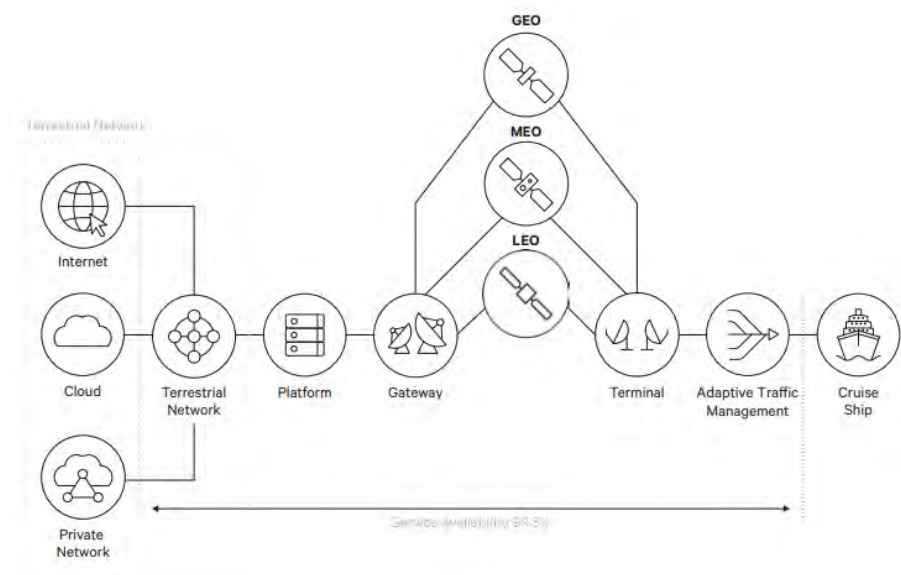
¹⁴⁴ <https://www.ses.com/press-release/ses-fifth-and-sixth-o3b-mpower-satellites-successfully-launched>

図表 41 「CRUISE mPOWERD + STARLINK」 のサービス概要

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

出所) SES

図表 42 「CRUISE mPOWERD + STARLINK」 で衛星と海上・地上を繋ぐネットワークダイアグラム



出所) SES

B) Eutelsat S.A. (フランス)

i. 概要

- Eutelsat S.A.はフランスに本拠を置く、通信衛星運営企業である。2021 年度の売上高は 1,152M ユーロ、EBITDA は 862M ユーロ、グループ純利益は 231M ユーロであった。主な収益源は、放送事業、データ・映像事業、行政向けサービス事業である。

- GEO 衛星と LEO 衛星を組み合わせたソリューションを提供する、最初のオペレーターを目指している¹⁴⁵。

図表 43 2022 年度財務データ

NET INCOME			
Extracts from the consolidated income statement in €m	FY 2020-21	FY 2021-22	CHANGE
Revenues	1,234	1,152	-6.7%
EBITDA ¹	922	862	-6.5%
Operating income	347	425	+22.3%
Financial result	(95)	(65)	-31.6%
Income tax	(24)	(49)	+101.1%
Income from associates	-	(72)	NA
Group share of net income	214	231	+7.8%

¹ EBITDA defined as operating income before depreciation, amortisation, impairments and other operating income/(expenses)

▶ Lower D&A reflecting notably KA-SAT disposal
 ▶ FY 22 Other operating income reflecting C-band proceeds (phase 1) partly offset by asset impairments
 ▶ Positive variation of FX gains and losses
 ▶ C-band proceeds from Phase 1 taxed at 30% rate
 ▶ Tax Rate of 14% vs 10% last year
 ▶ Negative contribution from OneWeb
 ▶ Net margin of 20% versus 17% last year

出所) Eutelsat FULL YEAR 2021-22 RESULTS P.25

図表 44 事業構成

FY 2021-22 REVENUES BY APPLICATION			
	REVENUE CONTRIBUTION ¹	REVENUES (€m)	LIKE-FOR-LIKE ² CHANGE
BROADCAST	61%	697	-6.9%
DATA & PROFESSIONAL VIDEO	14%	159	-4.2%
GOVERNMENT SERVICES	12%	144	-7.9%
FIXED BROADBAND	6%	69	+36.0%
MOBILE CONNECTIVITY	7%	80	+15.0%
TOTAL OPERATING VERTICALS		1,148	-3.8%
OTHER REVENUES		3	-€29m ³

¹ Share of each application as a percentage of total revenues excluding "Other Revenues".
² Change at constant currency and perimeter.
³ Of which -€27m related to hedging revenues.

出所) Eutelsat FULL YEAR 2021-22 RESULTS P.16

ii. 取組内容

- 2022 年 7 月、Eutelsat 社は同社の GEO と OneWeb 社（イギリス）の LEO を統合したマルチオービット衛星運用事業者となるべく経営統合の計画を発表¹⁴⁶、2023 年 9 月に Eutelsat の

¹⁴⁵ <https://spacenews.com/eutelsat-and-oneweb-discussing-multi-orbit-merger-plan/>

¹⁴⁶ <https://spacenews.com/eutelsats-board-approves-oneweb-merger/>

通常株主総会および臨時株主総会で承認され、経営統合が完了した¹⁴⁷。リアルタイムビデオゲームの成長と、日常業務をクラウドコンピューティングサービスに依存する企業からの高速インターネット接続の需要が高まっていることが背景となっている¹⁴⁸。

- 2023年3月、Eutelsat および OneWeb の LEO コンステレーションネットワークからの衛星容量を Intelsat に提供する、マルチオービット協定を締結。欧州、中東、太平洋地域で、空中、海上、地上を問わず全てのステークホルダーに最高品質の接続ソリューションを提供することを狙いとしている¹⁴⁹。
- 同社および協業事業者が運用する GEO 衛星、LEO 衛星の概要と利用目的は以下の通り。
 - ◇ GEO 衛星：Eutelsat10B・・・Thales Alenia Space 社が製造し、2022年11月に打ち上げ。2023年3Qにサービス開始予定。50GHzを超える帯域幅を処理、約35Gbpsのスループットを提供する¹⁵⁰。大量のダウンロードと一方向のビデオストリーミングサービスに対し高い信頼性を提供する。¹⁵¹
 - ◇ LEO 衛星：OneWeb 衛星コンステレーション・・・OneWeb 社の 618 基からなる衛星群¹⁵²。数百 Mbps から複数 Gbps を処理可能であり、レイテンシは 50 ミリ秒未満である¹⁵³。インタラクティブなやり取りが行われるサービスに対し、高い信頼性を提供する。
- 2023年5月には NATO 通信情報局向けに GEO/LEO を同一端末で接続するデモンストレーションを実施し、その有用性を示している。
- 2024年1月、アフリカの Paratus South Africa 社と南アフリカにおけるコネクティビティサービス強化を目的に提携契約を締結。マルチオービット運用のカバレッジがそれまでの欧州、中東、太平洋から南アフリカまで広がった。¹⁵⁴

C) Intelsat S.A. (アメリカ)

i. 概要

- Intelsat S.A.は、アメリカ合衆国に本拠を置く電気通信事業者である。前身は非営利の国際機関 INTELSAT(インテルサット) (International Telecommunications Satellite Organization = 旧、国際電気通信衛星機構) であるが、2001年7月に事業部門が分離され、民間会社として再編成された。2020年度の売上高は1,913Mドル、修正後 EBITDA は1,276Mドル。主な収益源は、レーダー・衛星運用事業、衛星通信プロバイダー事業である¹⁵⁵。

¹⁴⁷ <https://www.satellitetoday.com/business/2023/09/28/eutelsat-completes-oneweb-deal/>

¹⁴⁸ <https://www.reuters.com/business/media-telecom/eutelsats-q1-sales-down-by-45-driven-by-fall-broadcast-2022-10-12/>

¹⁴⁹ <https://smartmaritimenetwork.com/2023/03/10/eutelsat-oneweb-and-intelsat-to-partner-on-multi-orbit-vsat-services/>

¹⁵⁰ <https://www.eutelsat.com/satellites/future-satellites.html>

¹⁵¹ <https://www.verdict.co.uk/eutelsat-oneweb-geo-leo/>

¹⁵² <https://oneweb.net/resources/successful-launch-36-oneweb-satellites-isronsil-marks-key-milestone-enable-global>

¹⁵³ <https://www.canadasatellite.ca/OneWeb.htm>

¹⁵⁴ <https://www.satellitetoday.com/connectivity/2024/01/19/eutelsat-signs-geo-leo-deal-in-south-africa/>

¹⁵⁵ <https://www.ibisworld.com/us/company/intelsat-sa/10058/>

図表 45 2019・2020 年度売上高

Results of Operations

Years Ended December 31, 2019 and 2020

Revenue

The following table sets forth our comparative revenue by service type, with Off-Network and other Revenues shown separately from On-Network Revenues for the years ended December 31, 2019 and 2020 (in thousands, except percentages; some percentage changes were deemed not meaningful (“NM”)):

	Year Ended December 31, 2019	Year Ended December 31, 2020	Increase (Decrease)	Percentage Change
On-Network Revenues				
Transponder services	\$ 1,468,791	\$ 1,372,773	\$ (96,018)	(7)%
Managed services	374,026	298,638	(75,388)	(20)%
Channel	2,400	1,394	(1,006)	(42)%
Total on-network revenues	1,845,217	1,672,805	(172,412)	(9)%
Off-Network and Other Revenues				
Transponder, MSS and other off-network services	175,602	182,393	6,791	4%
Satellite-related services	40,646	42,297		4%
Total off-network and other revenues	216,248	224,690	8,442	4%
Inflight Services Revenues				
Services	-	14,122	14,122	NM
Equipment	-	1,463	1,463	NM
Total inflight services revenues	-	15,585	15,585	NM
Total	\$ 2,061,465	\$ 1,913,080	\$ (148,385)	(7)%

出所) Intelsat S.A. Consolidated Financial Statements P.12

図表 46 2019・2020 年度修正後 EBITDA

	Year Ended December 31, 2019	Year Ended December 31, 2020
Net loss	\$ (911,210)	\$ (909,271)
Add:		
Interest expense, net	1,273,112	813,603
Loss on early extinguishment of debt	—	—
Provision for (benefit from) income taxes	(7,384)	(7,055)
Depreciation and amortization	658,233	653,447
EBITDA	1,012,751	550,724
Add:		
Compensation and benefits	13,189	57,786
Non-recurring and other non-cash items	58,625	75,913
Satellite impairment loss	381,565	—
Impairment of non-amortizable intangible and other assets	—	191,943
Reorganization items	—	385,861
Proportionate share from unconsolidated joint venture:		
Interest expense, net	5,014	3,451
Depreciation and amortization	10,320	11,258
Adjusted EBITDA	\$ 1,481,464	\$ 1,276,936

出所) Intelsat S.A. Consolidated Financial Statements P.14

ii. 取組内容

- 2022年8月、GEO衛星とLEO衛星の組み合わせにより、航空会社およびその乗客に対してインフライト接続 (IFC) を提供することを目的に OneWeb 社とパートナーシップ契約を締結

156。

- 2023年3月、Eutelsat および OneWeb の LEO コンステレーションネットワークからの衛星容量を提供してもらうマルチオービット協定を締結。ヨーロッパ、中東、太平洋地域で、空中、海上、地上を問わず全てのステークホルダーに最高品質の接続ソリューションを提供することを狙いとしている。
- 同社および協業事業者が運用する GEO 衛星、LEO 衛星の概要と利用目的は以下の通り。
 - ◇ GEO 衛星：Intelsat シリーズ・・・ハブ空港を結ぶ、利用者が多い路線での IFC に対して大容量の通信を可能とする。¹⁵⁷
 - ◇ LEO 衛星：
 - IFC 向け：OneWeb 衛星コンステレーション・・・OneWeb 社（イギリス）の 618 基からなる衛星群。数百 Mbps から複数 Gbps を処理可能であり、レイテンシは 50 ミリ秒未満である。低遅延での IFC を可能とする。
 - 自動車向け：Starlink コンステレーション・・・SpaceX 社（米国）の衛星群。Intelsat は、同社と Starlink の両方の衛星で利用できる自動車向けフラットパネルアンテナを製造し、2023年11月の投資家向けイベントにて実演。¹⁵⁸
- 2024年2月、北極圏上空でインターネット接続を行うためのテスト飛行を実施。極地接続に成功し、航空ルートの中のどの地点においても低遅延で高スループットのサービスにアクセスできることを実証。¹⁵⁹

D) Telesat（カナダ）

i. 概要

- Telesat はカナダに本拠を置く、衛星通信事業会社である。2022年度の売上高は、759M カナダドル、修正後 EBITDA は 567M カナダドルであった。主な収益源はデータ通信事業、モビリティサービス事業、行政向けサービス事業である。

¹⁵⁶ <https://www.intelsat.com/newsroom/intelsat-and-oneweb-partnership-brings-multi-orbit-connectivity-to-airlines-worldwide/>

¹⁵⁷ <https://spacenews.com/intelsat-and-oneweb-to-provide-multi-orbit-inflight-connectivity/>

¹⁵⁸ <https://spacenews.com/intelsat-steps-up-partnership-with-spacex-in-multi-orbit-antenna/>

¹⁵⁹ <https://www.intelsat.com/newsroom/intelsat-makes-history-with-arctic-circle-high-speed-aircraft-connectivity/>

図表 47 2022 年度財務データ

Telesat's Adjusted EBITDA margin⁽¹⁾:

(in thousands of Canadian dollars) (unaudited)	Three Months Ended December 31,		Twelve Months Ended December 31,	
	2022	2021 ⁽⁴⁾	2022	2021 ⁽⁴⁾
Net income (loss)	\$ 92,340	\$ 112,935	\$ (80,117)	\$ 155,025
Tax expense (recovery)	1,786	30,786	49,929	78,377
(Gain) loss on changes in fair value of financial instruments	—	(1,673)	(4,314)	18,684
(Gain) loss on foreign exchange	(72,251)	(20,196)	239,591	(27,539)
Interest and other income	(12,915)	(632)	(23,476)	(3,418)
Interest expense	67,304	48,841	221,756	187,994
Gain on extinguishment of debt	—	—	(106,916)	—
Depreciation	46,691	50,370	188,755	203,772
Amortization	3,775	3,932	14,979	15,983
Other operating (gains) losses, net	(7)	(108,392)	(7)	(107,615)
Non-recurring compensation expenses ⁽³⁾	303	5,049	305	5,423
Non-cash expense related to share-based compensation	11,968	23,546	67,428	73,723
Adjusted EBITDA	\$138,994	\$ 144,566	\$ 567,913	\$ 600,409
Revenue	\$206,684	\$ 187,497	\$ 759,169	\$ 758,212
Adjusted EBITDA Margin	67.2%	77.1%	74.8%	79.2%

出所) Telesat Reports Results for the Quarter and Twelve Months Ended December 31, 2022 P.8

図表 48 主要事業

Data & Telecom	Mobility	Government	Video	Consulting
<ul style="list-style-type: none"> Internet Backhaul Wireless Backhaul Corporate Networks 	<ul style="list-style-type: none"> Inflight Connectivity Maritime Connectivity Oil & Gas Connectivity 	<ul style="list-style-type: none"> Universal Connectivity Defence First Responders Telesat Government Solutions 	<ul style="list-style-type: none"> Broadcast 	<ul style="list-style-type: none"> Consulting Services

出所) Telesat 社 HP より

ii. 取組内容

- GEO 衛星と LEO 衛星の組み合わせにより、政府、電気通信、海事、航空分野の顧客向けに廉価で高速度・大容量通信を提供する¹⁶⁰。
- GEO 衛星・LEO 衛星の概要と利用目的は以下の通り。
 - ◇ GEO 衛星：Anik 等・・・現在 14 基の衛星を運用しており¹⁶¹、政府、テレビ放送、インターネット接続事業者向けのサービスを提供している。¹⁶²
 - ◇ LEO 衛星：Lightspeed・・・当初、自社で約 300 基からなる LEO コンステレーションを構築する予定であったが 198 基に縮小した。最大で数 Gbps を処理可能であり、GEO の約

¹⁶⁰ <https://www.telesat.com/about-us/>

¹⁶¹ <https://www.telesat.com/geo-satellites/>

¹⁶² <https://jp.reuters.com/article/telesat-canada-satellite-race-idJPKBN2BZ0XF>

20 倍のレイテンシで処理する¹⁶³。海上や砂漠、遠隔地等、従来では通信が困難な場所に置いても高速なインターネット接続を提供する。¹⁶⁴

- 2023 年 8 月、MDA 社¹⁶⁵（カナダ）と Lightspeed 向けに 198 基の先進衛星を製造する契約を締結¹⁶⁶。MDA 社のデジタルビームフォーミングアレイアンテナや統合型再生プロセッサ等の技術により、これまで検討していた衛星よりも小型化できながら、ネットワークにおける最高レベルのサービス性能、回復力、使用可能容量は維持される。またこの契約により、衛星の打上げは 2026 年半ばに、極地およびグローバルでのサービスは 2027 年後半に開始される見込みとなった。
- 2023 年 9 月、SpaceX 社と Lightspeed の打上げ契約を締結¹⁶⁷。Lightspeed はファルコン 9 により 14 回打ち上げる契約であり、1 回の打上げで最大 18 基の Lightspeed が運ばれる。打上げは 2026 年に開始予定で、迅速に展開し、Telesat は 2027 年にグローバルサービスの提供を開始する予定である。
- 2024 年 1 月、Mage Networks 社（カナダ）と衛星サービスに関する覚書の締結を発表。カナダ政府とのパートナーシップを通じて設立された Telesat Lightspeed Capacity Pool を活用して、カナダにおいてサービスが行き届いていない地域・コミュニティにブロードバンドインターネットサービスを拡大する。¹⁶⁸
- 2024 年 2 月、Avanti Communications 社（英国）と LEO 衛星コンステレーションに関する覚書の締結を発表。同社のマルチオービットソリューションに Lightspeed サービスを組み込み、安価で高品質のブロードバンド接続を世界中に提供することを狙いとしている。¹⁶⁹

◇ LEO 3 と名付けられた重量 30 kg のマイクロ衛星を Space Flight Laboratory (SFL) が製造した。2023 年 7 月以降 Rocket Lab により打上げられる¹⁷⁰。

E) KT Sat（韓国）

i. 概要

- KT Sat は通信サービスプロバイダーである KT Corp. が 100% 出資する、韓国唯一の衛星通信事業者である。2022 年度の売上高は 185,313M ウォン、当期純利益は 28,073M ウォンであった。

¹⁶³ <https://www.telesat.com/leo-satellites/>

¹⁶⁴ <https://www.telesat.com/blog/doing-global-good-leo-satellites-bring-speed-capacity-to-human-welfare-initiatives/>

¹⁶⁵ <https://mda.space/en/>

¹⁶⁶ <https://www.telesat.com/press/press-releases/telesat-contracts-mda-as-prime-satellite-manufacturer-for-its-advanced-telesat-lightspeed-low-earth-orbit-constellation/>

¹⁶⁷ <https://www.telesat.com/press/press-releases/telesat-and-spacex-announce-14-launch-agreement-for-advanced-telesat-lightspeed-leo-satellites/>

¹⁶⁸ <https://www.telesat.com/press/press-releases/mage-networks-signs-memorandum-of-understanding-for-telesat-lightspeed-services/>

¹⁶⁹ <https://www.telesat.com/press/press-releases/avanti-communications-signs-strategic-collaboration-agreement-with-telesat-as-part-of-new-multi-orbit-strategy/>

¹⁷⁰ <https://www.satellitetoday.com/manufacture/2023/06/23/new-telesat-leo-demo-satellite-to-launch-in-july-on-rocket-lab-mission/>

図表 49 2022 年度財務データ

KT Corporation and Subsidiaries
Notes to the Consolidated Financial Statements
December 31, 2020, 2021 and 2022

(in millions of Korean won)

	December 31, 2022			
	Total assets	Total liabilities	Operating revenues ³	Profit (loss) for the year ³
KT Linkus Co., Ltd.	₩ 47,734	₩ 47,498	₩ 76,135	₩ (614)
KT Submarine Co., Ltd.	120,255	7,884	42,848	(12,126)
KT Telecop Co., Ltd.	370,004	230,965	517,406	4,267
KT Alpha Co., Ltd. ¹ (KT Hitel Co., Ltd.)	406,236	172,211	516,737	13,115
KT Service Bukbu Co., Ltd.	74,673	65,820	252,304	3,227
KT Service Nambu Co., Ltd.	80,450	66,479	301,720	3,067
BC Card Co., Ltd. ¹	5,666,075	4,109,200	3,897,090	148,341
H&C Network	82,737	6,640	27,392	992
Nasmedia Co., Ltd. ¹	516,945	275,730	153,211	27,691
KTDS Co., Ltd. ¹	401,932	228,474	723,161	30,941
KT M&S Co., Ltd.	255,310	204,336	730,802	8,105
KT MOS Bukbu Co., Ltd.	38,684	22,553	83,085	4,607
KT MOS Nambu Co., Ltd.	42,011	25,416	83,330	5,035
KT Skylife Co., Ltd. ¹	1,359,166	503,679	1,038,468	20,941
KT Estate Inc. ¹	2,480,333	833,842	478,188	58,780
KT GDH Co., Ltd.	12,059	1,596	4,323	451
KT Sat Co., Ltd.	677,980	89,644	185,313	28,073

出所) KT Business Report FY2022 Form 20-F F-20

ii. 取組内容

- AI や IoT を強化する 6G 通信の実現のために、マルチオービット戦略を検討している事業者である。
- マルチオービット戦略の一環として、2021 年に国際電気通信連合 (ITU) に LEO コンステレーション設計を申請。2022 年初には、MEO/HEO 衛星サービスの新興企業である Mangata Networks 社¹⁷¹ (米) へ出資した。
- 2025 年に打ち上げを予定している GEO 衛星の Koreasat 6A の製造について Thales Alenia Space 社と、技術的なアドバイスについて Satconsult 社と契約を締結している。また、衛星打ち上げについても SpaceX 社と契約を締結している¹⁷²

F) Hispasat (スペイン)

i. 概要

- Hispasat はスペインに本拠を置く、衛星通信事業会社である。2022 年度の売上高は、181M ユーロ、EBITDA は 136M ユーロであった。

¹⁷¹ <https://www.mangatanetworks.com/>

¹⁷² <https://www.prnewswire.com/news-releases/kt-sat-to-unveil-the-multi-orbit-satellite-business-strategy-at-wsbw-2022-in-paris-301623995.html>

図表 50 2020-2021 年度財務データ

Main Figures (EUR million)			
	2021	2020	%
Revenue ⁽¹⁾	181.0	157,5	15,0%
EBITDA ⁽²⁾	136,2	119,3	14,2%
Net result attributable to the parent company	55,8	-75,6	N.A.
Operating cash flow	161,9	161,4	0,3%
Dividend for the year	44,6	0,0	
Net worth (NP)	718,8	684,8	5,1%
Net bank financial debt	112,5	173,2	-35,0%
Investments	73,4	58,5	44,8%
Total assets	1.066,0	1.044,2	2,3%
Leverage ⁽³⁾	13,5%	20,2%	33,2%
Debt coverage ratio (Net Debt/EBITDA) Covenant ⁽⁴⁾	1,0	1,5	-39,7%
Covenant solvency ratio (equity/net debt) ⁽⁵⁾	6,1	3,6	68,7%

(1) Collects turnover, other income and work carried out by the company for fixed assets. Including the contribution from the profit or loss of consolidated companies by the equity method, revenues would amount to €191.9 million.
(2) Calculated as the operating result of the Income Statement minus depreciation, impairment and the result of investments accounted for by applying the equity method.
(3) Calculated as balance sheet Net Financial Debt (including derivatives and guarantees) divided by Equity plus Net Financial Debt.

出所) Hispasat Annual report 2021

図表 51 収益構成



出所) Hispasat Annual report 2021

ii. 取組内容

- 航空・海上輸送分野などに大容量モビリティサービスを提供し、新しい顧客と市場の開拓を狙っている事業者である¹⁷³。

¹⁷³ <https://www.hispasat.com/en/satellite-fleet/future-satellites/amazonas-nexus>

- 2023年2月に GEO 衛星である Amazonas Nexus を打ち上げ¹⁷⁴、7月に運用開始¹⁷⁵。当衛星は新世代のデジタル・トランスペアレント・プロセッサ（DTP）を搭載しており、これにより、衛星のペイロードはデジタル処理され、軌道上でいつでも必要な容量を割り当てることができるようになり、通信市場の進化（コネクティビティ、データ、コンテンツ伝送の両分野）に対応可能となる。
- 2023年5月、Intelsat に対し2019年から締結している Amazonas Nexus の通信容量のリース契約を拡大・延長することを発表。米国とブラジルで利用可能な通信容量全体と、北大西洋回廊での通信容量の大部分が長期リースされることとなった¹⁷⁶。

G) Yahsat（アラブ首長国連邦）

i. 概要

- Yahsat（正式名称：Al Yah Satellite Communications Company P.J.S.C）は、アラブ首長国連邦に本拠を置く衛星通信事業会社で、Mubadala Investment Company の子会社である。2022年度の売上高は433Mドルで、当期純利益は106Mドルであった。
- 欧州、中東、アフリカ、南アメリカ、アジアの150を超える国に衛星サービスを提供している¹⁷⁷。

図表 52 2022 年度財務データ



出所) Yahsat's Annual Report 2022 P2

¹⁷⁴ <https://www.nasaspaceflight.com/2023/02/amazonas-nexus/>

¹⁷⁵ <https://www.hispasat.com/en/press-room/press-releases/archivo-2023/469/amazonas-nexus-va-esta-operativo-hispasat-abre-una-nueva-era-en-las-comunicaciones-con-internet-de-calidad-en-barcos-y-aviones>

¹⁷⁶ <https://www.hispasat.com/en/press-room/press-releases/archivo-2023/467/hispasat-and-intelsat-expand-their-strategic-agreement-to-provide-inflight-connectivity-through-amazonas-nexus>

¹⁷⁷ <https://www.yahsat.com/>

図表 53 収益構造



出所) Yahsat's Annual Report 2022 P5

ii. 取組内容

- メガ・コンステレーションが増加することによる自社ビジネス縮小の危機感から、マルチオービット戦略を検討している。
- 2023年4月、Yahsatが所有するThuraya社が、LEOおよびIoTネットワーク事業者であるAstrocast社（スイス）と新たな投資契約を締結。Thuraya社はLEO衛星コンステレーションへの初の投資である¹⁷⁸。

H) Space Compass（日本）

i. 概要

- 株式会社Space Compassは、東京都千代田区に本拠を置く通信衛星事業会社で、主な事業は宇宙データセンタ事業と宇宙RAN事業である。
- HAPS、GEO、LEOを統合した、宇宙統合コンピューティング・ネットワーク事業を担う目的で、2022年7月にNTTとスカパーJSATの合弁で設立された事業者である¹⁷⁹。

¹⁷⁸ <https://www.yahsat.com/en/news-and-media/news/2023/yahsat-mobility-arm-thuraya-astrocast-strategic-investment-leo-iot>

¹⁷⁹ <https://group.ntt.jp/newsrelease/2022/04/26/220426a.html>

図表 54 会社概要

新会社の概要



- ・日本発の新たな宇宙インフラ「宇宙統合コンピューティング・ネットワーク」事業に挑戦
- ・社名の由来はNTTのN、スカパーJSATのSを合わせてコンパスになる事から未知の価値を発見する羅針盤のような存在となるインフラ企業をめざす

会社名	株式会社 Space Compass
代表者名	代表取締役 Co-CEO 堀 茂弘 代表取締役 Co-CEO 松藤 浩一郎
設立時期	2022年7月(予定)
所在地	東京都千代田区(予定)
資本金等	180億円※ (予定)
株主構成	NTT 50%、スカパーJSAT 50%

※設立時は60億円(資本準備金を含む)とし順次増資予定

出所) 株式会社 Space Compass 設立発表時プレゼンテーション資料 P3

図表 55 事業概要

事業概要



提供サービス名	概要	提供時期	顧客
・宇宙データセンタ事業 (宇宙光データリレーサービス)	衛星観測データなどをGEO・地上に光伝送するサービス (特徴) ・既存サービスより10倍程度の通信速度 ・任意のタイミングで即時伝送 ・免許調整不要 (顧客メリット) ・観測衛星能力の向上・業務効率向上	2024年度 開始	観測衛星 事業者など
・宇宙RAN事業 (HAPSサービス)	宇宙空間及び成層圏からの無線通信を実現するサービス (特徴) ・HAPSを利用したNW広域化・強靱化・省電力化 (顧客メリット) ・エンドユーザは普段使いのスマホ利用が可能	2025年度 開始	モバイル事 業者など

出所) 株式会社 Space Compass 設立発表時プレゼンテーション資料 P4

ii. 取組内容

- ・ LEO で収集したデータを GEO 経由で地上へ高速伝送する、「光データリレーサービス」を2024年度に開始予定。
- ・ Skyloom 社と協業し、アジア上空に GEO 衛星 SkyCompass-1 を2024年末までに打ち上げ予定¹⁸⁰。

¹⁸⁰ https://space-compass.com/files/SkyCompass_PressRelease_JA_20230131.pdf

3) 非地上系 NW の技術動向

- 本節では、非地上系ネットワーク（以下、NTN）の中でも、特に HAPS-衛星間通信に焦点を当て、技術動向や研究開発動向について調査を行った。

A) NTN における HAPS-衛星間通信

- 地上モバイルサービスエリアのカバレッジ拡張などを目的に、衛星通信や HAPS の活用が議論されている中、衛星同士や HAPS 同士の接続だけでなく、HAPS-衛星間の接続についても検討がなされている。
- 現在の衛星通信のアーキテクチャは、そのほとんどを無線周波数（RF）通信に依存しているが、RF 通信は、容量の制限、スペクトルの混雑、帯域幅の狭さ、規制上の制約といった問題を抱えている。
- また、RF 通信は傍受や妨害の影響を受けやすいため、セキュリティ上の問題が生じる。
- このような RF 通信の課題に対し、非常に高速な通信が可能であることやライセンス不要で見通し内接続が可能であることから、自由空間光（Free Space Optical、以下 FSO）通信の可能性が検討されており、HAPS-衛星間の通信においても強力な通信手段になり得る。

B) 事業者の研究開発動向

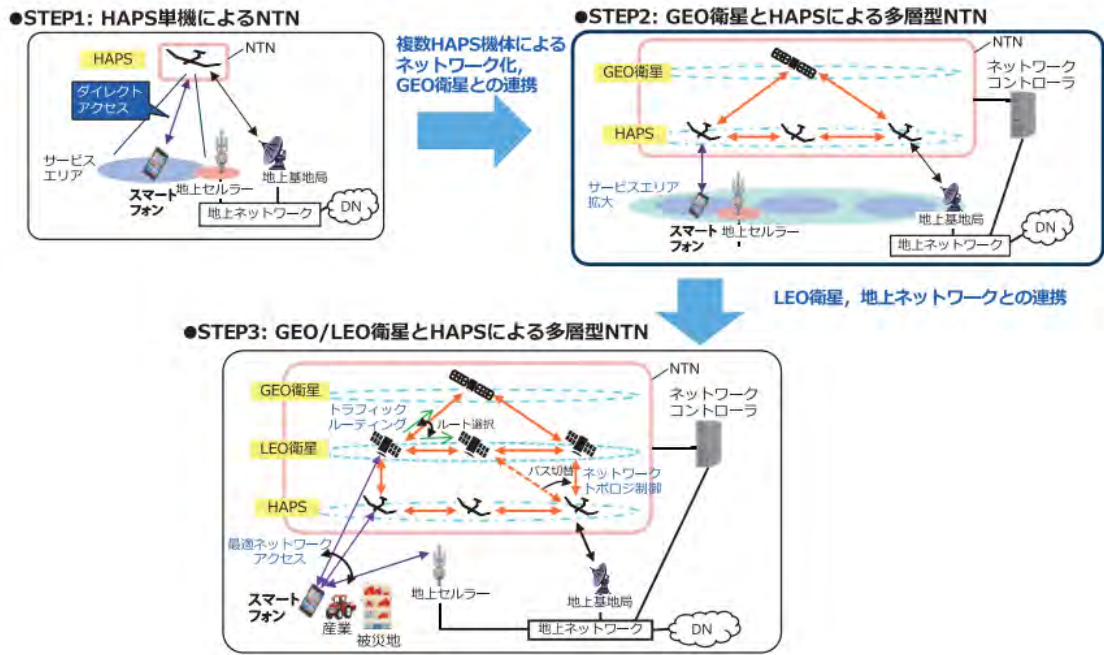
- NTT 研究所は、GEO・LEO・HAPS を柔軟に組み合わせる多層化 NTN の実現を目指している。¹⁸¹
- 多層化 NTN の実現にあたっては、設備投資や導入スケジュール、研究開発状況に鑑み、下図表の通り、3つのステップで研究開発を進めている。
 - ◇ STEP1：スマートフォンのサービスカバレッジ拡大を念頭に、軌道が低く、スマートフォンとダイレクトにアクセスすることができる HAPS 単機による NTN の構築
 - ◇ STEP2：HAPS 単体では日本全体といった広域をカバーすることが困難であることを踏まえ、複数の HAPS 機体のネットワーク化、GEO 衛星との連携を想定した研究開発を進める
 - ◇ STEP3：LEO 衛星との連携も組み込むことで、GEO・LEO・HAPS・地上全体のネットワークを統合した多層型 NTN を実現する
- 2023年12月、NTT、NTT ドコモ、Space Compass、スカパーJSAT の4社が、HAPS の2025年度商用化を目指した本格的な開発を開始。NICT が公募する「革新的情報通信技術（Beyond 5G（6G））基金事業」に採択されて取り組むものであり、HAPS を介して、スマートフォンやタブレットなどの携帯端末で直接通信ができるサービスを開発する。2024年度内には日本国内では初となる、HAPS 機体を用いた成層圏環境での携帯端末向け通信実験を行う予定。¹⁸²¹⁸³

¹⁸¹ <https://journal.ntt.co.jp/article/22157>

¹⁸² <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/12/07/231207a.html>

¹⁸³ <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/08844/>

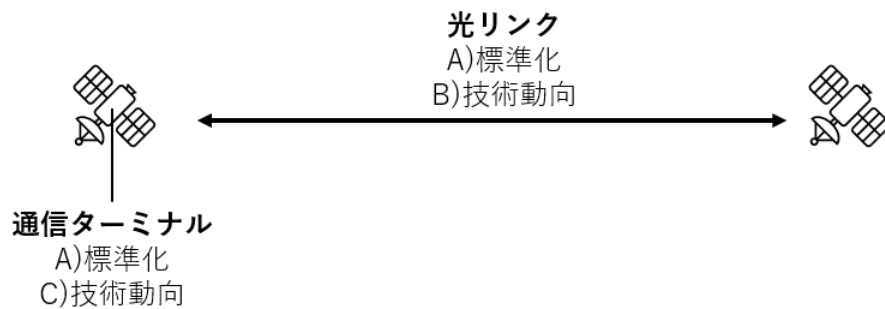
図表 56 多層型 NTN 実現のマイルストーン (NTT 研究所)



出所) NTT 技術ジャーナル/Beyond 5G/6G に向けた多層型 NTN の研究開発

- 現在は HAPS-地上通信の研究開発にフォーカスされており、HAPS-衛星間の研究開発はほぼ行われていない状況である。
 - 海上等のサービスでは、HAPS と地上基地局が大きく離れて運用するケースが想定され、HAPS と基地局を接続するための、HAPS 間および HAPS-衛星間のマルチホップ接続に関する研究開発が行われる予定である。
- 4) 軌道上での衛星間通信 NW における技術的課題および標準化
- 本節では、軌道上での衛星間通信 NW に関して、まず光リンク・通信ターミナルの標準化状況について調査を行った上で、光リンク、通信ターミナルそれぞれの技術動向について調査を行う。

図表 57 本章各項の対応イメージ



A) 標準化

- 本節では、主に **CCSDS¹⁸⁴** (Consultative Committee for Space Data System : 宇宙データシステム諮問委員会) における光衛星間リンクや、**SDA** (Space Development Agency) で昨年の調査では触れられていなかった変調方式の標準化の整理を行った上で、光通信の特筆すべき技術について調査を行う。

- i. **CCSDS における光衛星間リンクの標準化動向**
- **CCSDS** は、1982 年に各国の宇宙機関により設立された宇宙データ通信システムに関わる国際標準化検討委員会であり、宇宙データ通信システムの定義・規格化を進めている。
 - ◇ **CCSDS** が作成した文書 (推奨規格・推奨実践規範) には拘束力はないものの、**CCSDS** が国際標準化機構 (**ISO**) の宇宙データ通信分野の分科会の役割を担っていることから、それらの文書は発行後、自動的に **ISO** 文書化の審査・手続きへと移行する。
 - ◇ 検討領域は以下の 6 分野としている。
 - システムエンジニアリングエリア (**SEA**) : 宇宙機運用における通信、運用、クロスサポートのアーキテクチャを総合的に検討
 - ミッション運用/情報管理サービスエリア (**MOIMS**) : 宇宙機の軌道上での各運用フェーズにおける、宇宙機と地上のシステムを運用するための各種アプリケーションの標準化とミッション運用情報の管理に関わる規格及びプロセスについての検討・推奨
 - 相互支援サービスエリア (**CSS : Cross Support Service Area**) ; 相互運用支援を目的とした、他機関の地上ネットワークの相互利用の実現に向けたインターフェース及び地上通信サービスの標準化に関する検討・推奨
 - 宇宙機内インターフェースサービスエリア (**SOIS**) : 宇宙機のオンボードデータ通信に関するシステムにおける、オンボードソフトウェアとハードウェアとのインターフェース方式を簡略化するサービスや、各種通信プロトコル、各種データ処理アプリケーションの標準化について検討
 - スペースリンクサービスエリア (**SLS**) : 宇宙機—宇宙機間で相互運用を行う宇宙リンクサービスについて、効率の良い宇宙リンク通信システムの標準化を検討
 - 宇宙インターネットワーキングエリア (**SIS**) : 宇宙機～地上システム間、宇宙機～宇宙機間のネットワーク上におけるデータ通信サービス及びプロトコルについて、主にネットワーク層からアプリケーション層までの推奨項目に取り組み
- 光通信については、スペースリンクサービスエリアの **Optical Communications WG** にて標準化に関する検討が進められており、以下の文書が公表されている。
 - ◇ **Optical Communications Physical Layer¹⁸⁵** 【**CCSDS 141.0-B-1** 2019 年】
 - **RECOMMENDED STANDARD** (推奨規格)
 - ◇ **Optical Communications Coding and Synchronization¹⁸⁶** 【**CCSDS 142.0-B-1** 2019 年】
 - **RECOMMENDED STANDARD** (推奨規格)

¹⁸⁴ <https://public.ccsds.org/default.aspx>

¹⁸⁵ <https://public.ccsds.org/Pubs/141x0b1.pdf>

¹⁸⁶ <https://public.ccsds.org/Pubs/142x0b1.pdf>

- ◇ Optical High Data Rate (HDR) Communication-1550 NM¹⁸⁷ 【CCSDS 141.10-O-1 2022年】
 - EXPERIMENTAL SPECIFICATION (予備検討規格)
 - ◇ Optical High Data Rate (HDR) Communication-1064 NM¹⁸⁸ 【CCSDS 141.11-O-1 2018年】
 - EXPERIMENTAL SPECIFICATION (予備検討規格)
 - ◇ Atmospheric Characterization and Forecasting for Optical Link Operations¹⁸⁹ 【CCSDS 141.1-M-1 2022年】
 - RECOMMENDED PRACTICE (推奨手順)
- 光通信ネットワークにおける CCSDS の階層モデルと各レイヤにおける処理は下図表のとおりである¹⁹⁰。

図表 58 CCSDS における各層の処理

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

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

¹⁸⁷ <https://public.ccsds.org/Pubs/141x10.pdf>

¹⁸⁸ <https://public.ccsds.org/Pubs/141x11o1e2.pdf>

¹⁸⁹ <https://public.ccsds.org/Pubs/141x1m1.pdf>

¹⁹⁰ https://stage.tksc.jaxa.jp/ccsds/docs/files/bluebook/sls/141_0_b_1.pdf

図表 59 CCSDS において推奨規格として規定する方式

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

出所) https://stage.tksc.jaxa.jp/ccsds/docs/files/bluebook/sls/141_0_b_1.pdf

ii. Space Development Agency (SDA) による光通信端末の標準化

- SDA は DOD (米国防総省) の光通信端末の規格を策定
 - ◇ SDA は米国防相 (DOD) の構想する数百機以上の小型衛星コンステレーションによる NDSA (National Defense Space Architecture : 国家防衛宇宙体系) を主導
 - ◇ 2022 年、Transport Layer の独自基準「Tranche 1」に準拠した衛星 42 機の開発を Northrop Grumman、Lockheed Martin、York Space Systems の 3 社に発注
 - ◇ 光衛星通信端末で世界をリードする Mynaric が Northrop Grumman に、Tesat-Spacecom が Lockheed Martin に SDA 規格に準拠した光通信端末を供給
 - ◇ Tranche 1 では地上で使われている部品の転用も見据え、地上の光通信で一般的に使用されるレーザー波長である 1.55μm 帯を標準に据える (通信速度 : 2.5~10 Gbps)
 - ◇ 2023 年 3 月には Tranche 2 規格の草案を発表し、衛星選定プロセスを開始
- 例えば、光通信製品プロバイダーであるドイツの Mynaric が製造する CONDOR Mk3 は SDA 規格に準拠している¹⁹¹。
- 相互運用性を向上させるため、Optical Communications Terminal (OCT) Standard Version 3.0¹⁹²を公開しており、本バージョンに基づいて整理した光通信端末に対する要求は下図表の通りである。

¹⁹¹ <https://mynaric.com/products/space/condor-mk3/>

¹⁹² <https://www.sda.mil/wp-content/uploads/2022/04/SDA-OCT-Standard-v3.0.pdf>

図表 60 CCSDS において推奨規格として規定する方式

階層		規定される項目
Layer 1	物理層	<ul style="list-style-type: none"> 信およびアクジションチャンネル (PAT : Pointing、Acquisition、Tracking) の定義 レーザーパラメータ (波長、チャンネル間隔、スペクトル幅、など) と変調方式 (On-Off Keying Non Return-to-Zero (OOK-NRZ)など)の定義
Layer 2	同期とチャンネル符号化	<ul style="list-style-type: none"> 誤り訂正伝送 (Forward Error Correction、スクランブル、伝送路符号など) を実現するために必要なツールと、データの構造 (フレーム) の定義

- Layer 1 の具体的な技術規格の例は下記の通り
 - ◇ PAT (Pointing、Acquisition、Tracking)
 - 2機の衛星が Lead と Follow となってアクジションを行う方法について、「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」(公開版)」に調査結果が報告されている。本調査では最新の研究動向について「B)光通信を利用した通信技術」で報告する。
 - ◇ 変調方式
 - AM (Amplitude Modulation : 振幅変調) On Off Keying-NRZ と Manchester 符号を含む。
 - ◇ 遅延
 - 受信遅延は、OCT に到着したメッセージの最初の光子から、再構成されたイーサネットパケットが OCT の出口からホストの宇宙船に送信されるまでの時間 : OCT での受信遅延は 15ms 以下
 - 送信遅延は、ホスト宇宙船から OCT にイーサネットパケットがエントリされてから、そのパケットの最後の光子の送信までの時間として定義 : OCT での送信遅延は 15ms 以下
 - OCT の送受信遅延は、S2G (Space to Ground)、S2A(Space to、S2M(Space to Maritime)リンクの場合、大気条件によるフェードアウト時間と ARQ(Automatic Repeat Request)再送信時間によって延長される。
 - ◇ 送受信の波長

図表 61 OCT チャンネルの定義

チャンネル No	周波数(THz)	波長 (nm)
-1	193.100	1553.33
20	195.100	1536.61

- ◇ 送信信号電力
 - OCT は、ソフトウェアコマンドにより、送信電力を設定する機能を有する。選択可能な最小送信電力は 0 で、選択可能な最大送信電力は、システム設計によって達成可能な最大送信電力とする。
 - OCT は、送信開口面を介して 2.5 W 以上の最大送信電力束を達成
 - OCT は、3 dB 以下のレベル間隔で送信電力を選択可能とする。レベルの範囲は、0 または off を含み、範囲(off を含まない)は、1 μ W 以下から送信機のピーク出力までとする
- ◇ 送信ビーム
 - OCT は、5,500km の距離にある遠隔の受信開口部において 0 から 25 μ W/m² 以上の放射照度を発生させることができるものとする。
 - OCT は、大気の影響やポインティングエラーがない場合に、直径 1.5 m 以上の遠隔の円形開口部をオーバーフィルし、10⁻⁶ 以下の BER を達成するのに十分な半値幅 (FWHM : full width at half maximum) の送信ビームを 100 km 以上の距離で提供するものとする。
 - OCT は、ポインティングエラーが存在する場合に、ポインティング制御と直径 0.15m 以上の半値幅の遠隔の円形開口部をオーバーフィルし、10⁻⁶ 以下の BER を達成するのに十分な直径の送信ビームを 100km 以上の範囲で提供する
 - OCT は、大気の影響とポインティングエラーが存在する場合に、必要なポインティング制御と 0.5 m 以上の半値幅の遠隔の円形開口部をオーバーフィルし、BER \leq 10⁻⁶ を達成するのに十分な直径の送信ビームを 500 km 以上の範囲で提供する
- Layer 2 の具体的な技術規格の例は下記の通り
 - ◇ プロトコル
 - SDA OCT Standard 3 - 3GPP 5G NR LDPC
 - ◇ Re-Programming
 - OCT は、軌道上で再プログラム可能でなければならない。これには、プロトコルとすべての OCT ソフトウェアおよびファームウェアが含まれる。
 - 再プログラミング中にリンクが中断される可能性がある。
 - OCT は、リモートコマンドを介して、OCT のハードウェア機能内のプロトコルを更新、変更、追加するために必要な新しいソフトウェアおよびファームウェアをロードする機能を提供する
 - ◇ Optical Signal Rates: Baud Rates and Encoding

図表 62 OCT プロトコル

Protocol ID and Rate Designator (format: <Protocol ID><Optical Signaling Rate (GHz)><Encoding>)	Optical Signaling Rate	Baud Rate	Encoding
SDA3-5GNR-LDPC-2500-Manchester	2.5 GHz	1.25 Gbps	Manchester
SDA3-5GNR-LDPC-2500-OOK-NRZ	2.5 GHz	2.5 Gbps	OOK-NRZ

出所) Optical Communications Terminal (OCT) Standard Version 3.0

◇ Framing, Coding, and Encapsulation (フレーム、符号化、カプセル化) の主な項目

- フレーム構造、プリアンブル、ヘッダー、ペイロードなど
- 誤り制御
- イーサネットカプセル化
- LDPC 符号化率

B) 衛星間光リンクの確立技術

- 本節では、光衛星通信のキーとなる技術を抽出し、その技術に対する課題を調査する。
- 衛星間光リンクにおける課題

◇ スパイラルスキャンによる捕捉・追尾

- 衛星間における光通信リンクを設定し維持するための技術として PAT (Pointing、Acquisition、Tracking : 指向、捕捉、追尾) が挙げられる。
- 『光通信による衛星間リンク(ISL)の基本機能(レンジング・捕捉・追尾)』については、「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」(公開版)¹⁹³¹⁹⁴』に調査結果が報告されている。(以下、同報告書から引用)

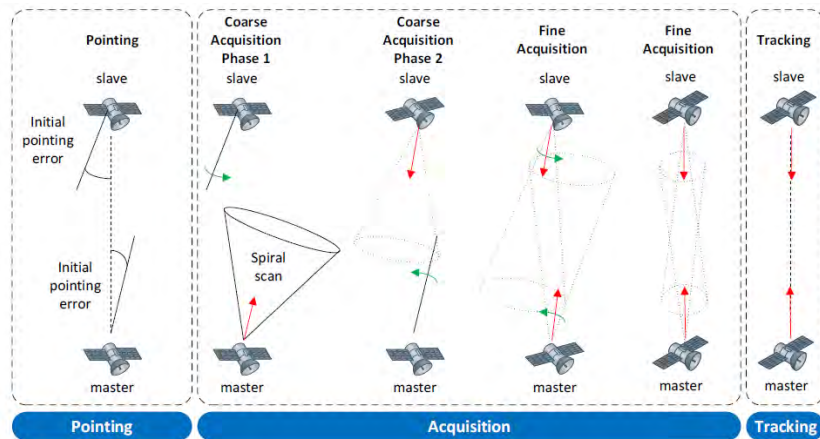
◇ 同報告書ではスパイラルスキャンによる捕捉について下図表を用い以下のように説明されている。

- 捕捉フェーズでは2台の端末の LOS: Line of Sight がそろそろように調整される。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

¹⁹³ https://www.mext.go.jp/content/20230420-mxt_uchukai02-000026968_6.pdf

¹⁹⁴ https://www.mext.go.jp/content/20230420-mxt_uchukai02-000026968_7.pdf

図表 63 捕捉フェーズのイメージ



出所)「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」(公開版)

◇ 上記の手順を要約すると以下のとおりである。

- 通信ビームのみで捕捉・追尾を行うもので、幅の狭い送信レーザービームを利用するため、slave側の端末の指向方向を固定し、master側の指向方向をスパイラル状にスキャンする。
- 送信ビームがslave側の捕捉センサーの視野を横切る瞬間ごとに、slave側でmasterから受信したレーザーの方向を検出し、自身の指向方向を修整する。
- この動作を一定時間繰り返した後、masterとslaveを入れ替えて同じ捕捉動作を繰り返す。
- 双方の指向誤差が小さくなり、捕捉センサーに一定の頻度でレーザー光が受信できるようになると、スキャン範囲を狭めて同時masterとslaveの指向方向をスキャンし両方の捕捉センサーで安定にレーザー光の受信ができるようにする¹⁹⁵

◇ 上記手順は、SDAの“Optical Communications Terminal (OCT) Standard Version 3.0”の「2.1.4 Acquisition Scheme」でも記載されている。

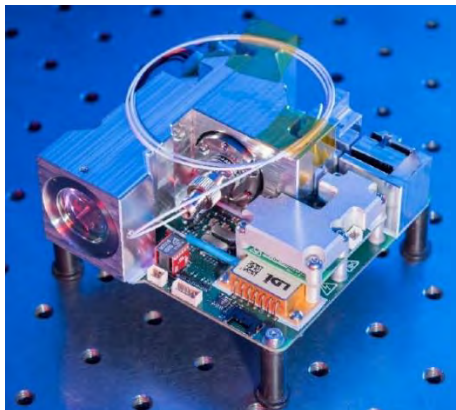
- 宇宙データシステム諮問委員会 (CCSDS) で光オンオフキーイング (O3K) の標準化グループを主導するDLRは、世界最小のCubesat用レーザー通信端末 (OSIRIS4CubeSat、O4C) を開発し、PIXL-1ミッションでCubeL衛星に搭載し実証を行っている。実証はDTE (Direct to Earth) に関するものであるが、衛星間通信 (ISL) への適用についての研究も進めている¹⁹⁶。
- 本調査では、DLRが検討を進めているCubesatにおける衛星間光リンク設定の課題や技術について新たに調査を行った。

¹⁹⁵ <https://annex.jsap.or.jp/photonics/kogaku/public/35-09-kaisetsu3.pdf>

¹⁹⁶ <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/small-spacecraft-community-of-practice/dlr-s-solutions-for-optical-communication-on-cubesats>

- DLR における PAT 技術¹⁹⁷
 - OSIRIS 4 CubeSat (O4C)
 - DTE への適用
- ◇ OSIRIS 4 CubeSat (O4C) は世界最小のレーザー通信端末であり、DLR とパートナー企業の Tesat Spacecom GmbH との協力で開発された。O4C ペイロードのパラメータは以下のとおりである。
- 大きさ : 1/3 U
 - 重量 t : 395 g
 - 最大消費電力 : 8.5 W
 - データ速度 : 100Mbps
 - 一般的な CubeSat バスは、 $\pm 1^\circ$ のポインティング精度を実現できるが、伝送ビームの発散角が 192.8 μ rad であることから、O 4 C はこの不一致を補正するための Fine Pointing Assembly (FPA) を搭載している。
 - O4C の外観を下図表に示す。

図表 64 OSIRIS 4 CubeSat (O4C) のフライトモデル



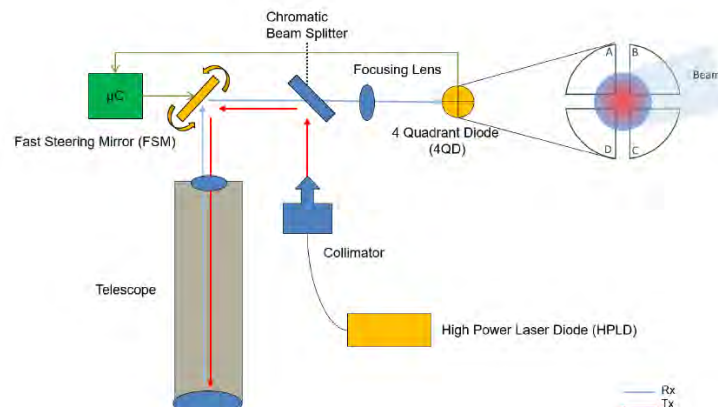
出所) Acquisition Concept for Optical Inter-Satellite Communication Terminals on Cubesats

- ◇ O4C で光リンクを確立するために、Pointing Acquisition and Tracking (PAT) システムを使用。
- Optical Ground Station (OGS) が衛星を指向し、比較的幅の広いレーザービーコンを衛星に照射する。
 - OGS はそれぞれ 0.5 mrad の発散角を有するビーコンが装備されており、0.1 mrad 以上のポインティング精度と、Two Line Elements (TLE) のような共通的な軌道ファイルの精度により、ビーコンを常に衛星を照射できる。
 - 同時に、衛星は Attitude and Orbit Control System (AOCS) により OGS を指向し、常に $\pm 1^\circ$ の範囲内でポインティングを安定させている。
 - 誤差は、下図表に示すように Fine Pointing Assembly (FPA) で補正される。

¹⁹⁷ <https://elib.dlr.de/187119/1/103Roediger.pdf>

◇ FPA は以下の機能で構成される。

- ① ビーコンを取得し角度オフセットを測定するための 4-Quadrant Diode(4QD)
 - ② 測定されたエラーを修正するための Fast Steering Mirror(FSM)
 - ③ 制御ループを処理するためのマイクロコントローラ(μ C)
- 4QD の視野角(Field of View : FoV)は 3.14 mrad。
 - ビーコンをするために捕捉するため、FSM は Field of Regard (FoR) 全体をスパイラルスキャンする。
 - 4QD がビーコンから光を受信し、4 象限にわたって合計された電力値がしきい値を超えたら、FPA は acquisition (捕捉) モードから tracking (追尾) モードに切り替わる。
 - μ C はエラーを処理し Fast Steering Mirror (FSM) のオフセットを修正するために逆方向に制御する。
 - 200 Hz で更新する閉ループにより、ビーコンビームは 4QD の中央に保持され、送信レーザーは、受信したビームが来るのと全く同じ光路に結合される。
 - 送信レーザー : C バンド (Conventional band) の 1550 nm
 - ビーコン : L バンド (Long-wavelength band) の 1590 nm



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

- 軌道上実証

◇ O4C の最初のペイロードは、GomSpace¹⁹⁸ (デンマーク) の 3U CubeSat である “CubeL” に搭載された 「PIXL-1」 ミッションで実証されている。

- 主な目的は、衛星のカメラで撮影した写真を OGS に送信する実証
- CubeL は 2021 年 1 月 24 日に Sun Synchronous Orbit (SSO) に投入され、レーザー通信端末の試験を実施。
- 最初のレーザー実験は Oberpfaffenhofen にある DLR の可搬型光地上局 (TOGS : Transportable Optical Ground Station) で実施され、2021 年 8 月 20 日に始めて光

¹⁹⁸ <https://www.nanosats.eu/org/gomspace>

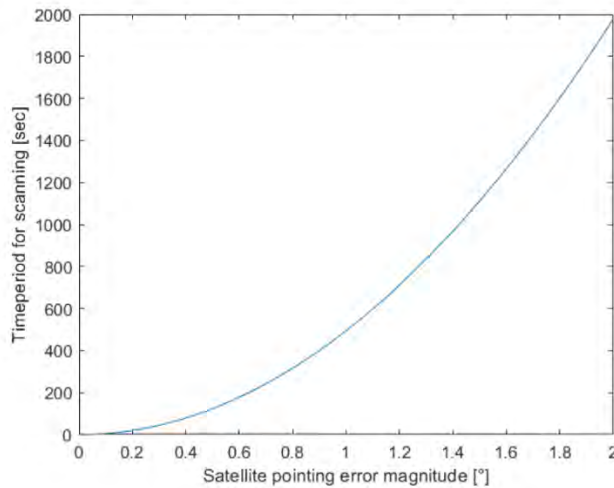
を受信した。ビーコンは最初の実験が成功した後に投入され、2021年9月8日、長期間にわたる追尾ロックに成功した。

- ◇ DLRは次のステップとして、Direct To Earth (DTE) から衛星間リンク (ISL) に光通信の技術に移転することを目指す。
 - O4Cのモジュラー設計により、多くのサブシステムはすでに認定されており、今後のプロジェクトでも再利用できる。
 - O4C技術をベースにCubeSat上のISL用レーザー通信端末を開発するプロジェクト“CubeISL”が開始された。
- O4CによるISLの開発
- 課題と対策
 - ◇ O4Cは送信機能のみしか具備しておらず、ISLで双方向データ伝送を確立するには、4QDが高速のデータレートを受信できないため、ペイロードには追加の受信機が必要。
 - アバランシェフォトダイオード (APD : Avalanche Photo Diodes)がDLRの地上局で使用されているため、これをCubeISLに適応し、追加サブシステムとして統合
 - ◇ ISLでは、DTEのようなOGSに設置する受信口径60cm望遠鏡は搭載できない。オプトメカニクスを含むO4Cの技術を適用しているため、受信開口径は2cmに制限
 - 受信電力の不足を克服するため、CubeISL端末にはO4Cの10倍の出力電力を得るための光増幅器を搭載。
 - ◇ ミッションの独立性
 - PIXL-1ミッションでは、チャンネル符号化やFEC (forward error correction : 誤り訂正) などの高処理タスクを衛星バスで担当していた。
 - CubeISLでは、衛星バスから独立性するため、Data Handling Unit (DHU : データ処理ユニット) として機能する独自のオンボードコンピュータを搭載。
 - ◇ Cubesatのリソースの制約

DTEの場合と異なり、送信ビームはデータを送信するだけでなく、対向する追尾センサーの唯一の光学基準ともなる。従来から提案されているような、ビームを粗い位置合わせ手順から微細な位置合わせ手順に導く多段アクチュエータとセンサーの概念から構成されるものもあるが、CubeISLでは、利用可能なスペースと電力の観点から容量が限られていることを考慮する必要がある。
- 目指す性能
 - ◇ CubeISLでは端末間の最大距離1500kmで、100Mbpsの双方向データ伝送を確立。
 - ISLの他に、1GbpsのDTEで地上にデータを送信
 - ISL用の送受信ビームを波長で分離することで、CubeISLには構成の異なる2台の端末 (端末Aと端末B) を設置し、端末Aの送信波長/受信波長が端末Bの受信波長/送信波長となる。どちらの波長 (1536.6nmと1553.3nm)もCバンド (Conventional band) で、DTEとの通信用のビーコンはLバンド (1590nm)を利用

- DLR における衛星間光リンクの確立技術の開発
- 目標
 - ◇ 時刻同期用の別チャンネルのような二次的な通信チャンネルに依存することなく、リンクを確立する時間を短縮することを重要視したスキームを開発することであった。
- 課題
 - ◇ 発散角が $192.8\mu\text{rad}$ (0.011°) のビームを視野角 3.14 mrad (0.180°) のセンサーFoVに合わせること。
 - サーチパターンの継続時間は、衛星の姿勢制御システムの不確実性範囲の大きさと、パターンが通過する速度に依存する（下図表）。

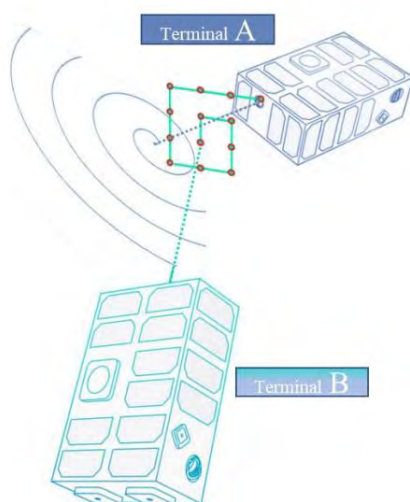
図表 65 指向誤差とスキャン時間の関係



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

- ◇ 同一のサーチパターンを利用すると 2 衛星間で時間的依存関係が生じる。2 つのスパイラルがお互いに無限に続くこともある
 - これを解決するため、両方のサーチパターンの繰り返し周期を異なるものとし、お互いに非同期とすることで効率的なサーチができるとしている。この場合、お互いの繰り返し周期が離れているほど効率的になり、遅いパターンの方の実行時間が短いほど効率的になる。
- ◇ 捕捉パターンの例
 - 下図表で、各ステップ（赤マーク）が 2 秒間保持されるスローグリッド（緑線）と、全期間で同様の時間を使用する高速スキャンスパイラル（青線）から構成
 - 端末 B は遅いサーチパターン。端末 A は高速サーチパターン。端末 B は 4-Quadrant Diode(4QD)の FoV よりも小さい間隔のグリッドに配置された個々の点を通り、各ポイントで、少なくとも端末 A が 1 回のサーチ実行に必要な時間、待機する。

図表 66 捕捉パターンの例



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

- ◇ 両方の端末が信号を受信した瞬間にアクティブ追尾に切り替えることで捕捉が達成できる。理論的には、両方の端末が同時に互いを捕捉すると同時に捕捉と追尾が行われる可能性がある。
 - ターミナル B のグリッドが受信機 FoV に最適化されているため、ターミナル B が最初に 4 QD で光を受信する。両端で捕捉できるか、または両方の端末が送信ビームの発散角の精度に一致するまで、細かい補正と待機のステップが繰り返される。
 - 安定したリンクが確立されるまで、初期の追尾フェーズでは、例えば端末 B では低い周波数 (<200 Hz) で再調整するといった、2 つのターミナルのいずれかによって、堅牢性をさらに向上させることができる。
 - 信号が失われた場合、端末 B はグリッド内の既知の最後のポイントに戻り、端末 A がサーチパターンを開始して一定時間経過しても信号が捕捉されない場合は、両方の端末が所定のパターンに戻る。
- 軌道上実証
 - ◇ CubeISLレーザー通信端末 (LCT) を、CubeISLミッションでの実証を予定している。
 - CubeISL ミッションは、2024 年に 6 機の CubeSat を使用して実施される予定。
 - 衛星は同じ軌道面上でコンステレーション飛行する。捕捉時間、データレート、達成可能な最大距離などを検証するために、衛星には軌道制御システムを搭載する。これを利用して、ステップごとに検証実験を行い、段階的に距離を最大 1500 km まで伸ばす。
 - ◇ 光ISLのデモンストレーションと、OberpfaffenhofenにあるDLRのメインのOptical Ground Station (OGS) への1 Gbps DTEも含まれる。

法がシンプルなことから、数 10Gbps 程度までの光信号の伝送に広く用いられている。

- CCSDS の O3K 規格を使用
- Mynaric :
 - ◇ CONDOR Mk2 : 次世代衛星コンステレーション向けの高性能、高帯域幅、安全で信頼性の高い通信リンクの高まるニーズに対応するために設計
 - SDA 規格のトランシェ 0 に完全準拠
 - 電磁干渉に強い耐性
 - 規制当局との周波数調整不要
 - 光通信コントローラは、デュアル構成で最大 2 つの光ヘッドを操作可能
 - ◇ CONDOR Mk3 : 次世代コンステレーション向けの高帯域幅、安全、ライセンスフリー、コスト効率の高い衛星通信のニーズの高まりに対応するために設計された光通信端末。CONDOR Mk2 の後継機。
 - SDA 規格のトランシェ 0・1 に完全準拠
 - 規制当局との周波数調整不要
 - 微振動環境と広い温度範囲に強い耐性
 - モジュラー設計により、光通信コントローラで複数の光ヘッドを操作可能
- Skyloom :
 - ◇ VGer10 : SDA に準拠しており、マルチ Gbps クラスの速度で衛星間通信が可能。地球規模のバックホールおよびネットワークサービスを提供するためのアーキテクチャをサポート。
- Mostcom :
 - ◇ SOT-90 ・ SOT-150 : 両端末ともに、さまざまなアプリケーションシナリオに適した統合光トランシーバーパスとサービス情報交換プロトコルを採用している。これらはすべて高速通信要件をサポートでき、SOT-150 は最大 50,000km の通信距離もサポート可能である。さらに、これら 2 つの端末は、半球状の表示エリアと安定した双方向通信をサポートする。また、端末の多様性を高めるために、量子鍵配布システムやビデオ監視システムも検討されている。
- Thales Alenia :
 - ◇ OPTEL- μ : 光学ユニット、電子ユニット、レーザーユニットの 3 つの主要ユニットで構成されるモジュラー設計を採用。

5) 地上通信、NTN、衛星間通信を一体とする NW における技術課題

- 遠隔地・僻地でのユビキタスネットワークへのニーズが強まる中で、衛星通信と地上通信の統合は次世代通信ネットワークの構築において必要不可欠である。陸・海、空、宇宙におけるサービスやインフラは、地上・非地上の通信の統合によってシームレスに接続することができる。
- 一方、地上と非地上の通信が統合されることで、地上通信および衛星通信のそれぞれ固有のセキュリティ上のリスクが他方へ移行し、新たなセキュリティの課題が生じる可能性がある
- また、地上通信と衛星通信という異なるシステムの非互換性や、セキュリティポリシーの違いなどによって課題が生じることも考えられる
- 地上・非地上通信の一体化は、孤立した遠隔地、航空機や船舶の機内、都市部や農村部での 5G サービスの強化や、地上車両、航空機、船舶、高速列車などの移動プラットフォームにおける M2M (Machine-to-Machine) および IoT (Internet of Things) デバイスによるサービスの継続性を維持することが主要なターゲットとなる
- これらのターゲットは重要なインフラであることからセキュリティインシデントによる影響は非常に大きいため、その対策は重要な課題である
- 地上・非地上通信の一体化に伴い発生することが想定されるセキュリティ上の課題は図表 68 の通りである

図表 68 地上・非地上通信の一体化に伴い発生し得る主要な課題²⁰⁰

課題の分類	具体的な内容
オープンネットワーク化に伴う課題	衛星ネットワークノードでは常に通信チャンネルが公開されており、衛星間および衛星・地上間の通信リンクは、自然環境や悪意のあるユーザーからの影響を受けやすくなる。ネットワーク内のノードは偽造やハイジャックの影響を受けやすく、通信リンクでは、干渉・妨害、盗聴などにより、ネットワークの機密性、整合性、可用性、信頼性のリスクが高くなる。
ネットワークトポロジィの変化に伴う課題	衛星は高速で移動しているため、頻繁にネットワークへの出入りを繰り返す。これによって、ネットワークトポロジィが動的に変更され、認証ポリシーの更新と同期、または元の IPSec/トランスポート層セキュリティ (TLS) トンネルの再ネゴシエーション ²⁰¹ など、ネットワークセキュリティ機能の切り替えとセキュリティ戦略の移行を行う必要がある。
異種システムの一体化に伴う課題	地上における 5G と衛星通信との一体 NW は、異なるシステムに基づいており、統一されたネットワークプロトコル仕様を確立することが困難である。従来の地上通信で利用されたセキュリティプロトコルが、衛星ネットワークには適用できなくなる可能性がある。

²⁰⁰ https://res-www.zte.com.cn/mediare/magazine/publication/com_en/article/202104/202104009.pdf

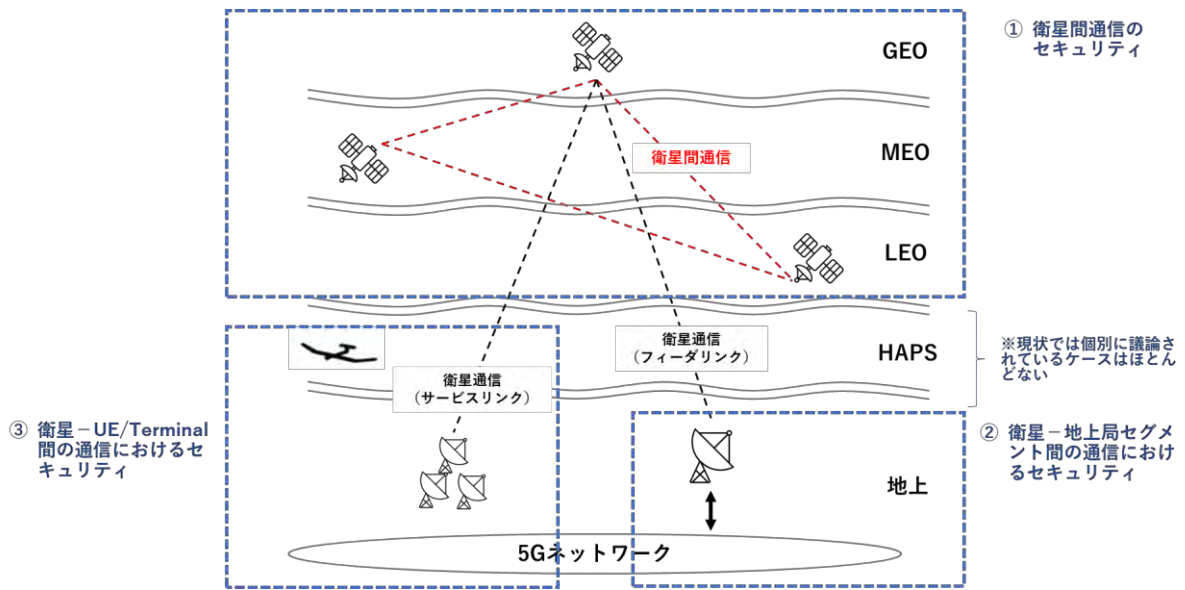
²⁰¹ 本来の通信に先だち、互いに正しく通信を行うための条件を確認し合い、ハードウェア的な通信条件（信号線の使い方など）や通信プロトコルなどを事前に決定すること

課題の分類	具体的な内容
	また、異種相互接続や長距離通信により、伝送中のデータ保護が困難になり、データの盗難、改ざん、および破損のリスクが増加する可能性がある。
衛星上のリソース制約に伴う課題	衛星通信では、過酷な宇宙環境（放射線等）に対応したチップを使用する必要がある。チップの信頼性を向上させるためには、衛星が搭載するソフトウェアの演算量に制約が生じる可能性がある。衛星の演算能力が地上の通信ノードよりも低くなるため、衛星ノードはDDoS攻撃などの攻撃の影響を受けやすくなる。従来の計算量の多い暗号化アルゴリズムの中には、衛星上で実行できないものもある。衛星ネットワークに適した新しいタイプのセキュリティアーキテクチャやセキュリティ技術の研究が必要となる。

A) 地上通信、NTN、衛星間通信を一体とするネットワーク実現のための技術課題（セキュリティ、レジリエンス、稼働率等）

- i. 地上通信と NTN（衛星間通信を含む）を一体化した通信におけるセキュリティポイント
 - 一体化通信におけるセキュリティ上の課題やその対応策は、①衛星間通信、②衛星－地上局間通信、③衛星－ユーザー間通信、の3つに分類することができる（図表 69）
 - ① 衛星間通信：衛星間通信： GEO、MEO、LEO 内のあらゆる種類の衛星間の通信、および GEO－MEO 間、GEO－LEO 間、MEO－LEO 間などの軌道間通信
 - ② 衛星－地上局間：衛星と、携帯電話ネットワークの基地局や、衛星とユーザー機器を接続するゲートウェイなどの地上局との間の通信
 - ③ 衛星－ユーザー間：都市部や農村部、高高度プラットフォームを含む、衛星と地上のユーザー機器（UE）との間の直接通信
 - HAPS に関しては、③のユーザー端末として考えることができるが、HAPS 通信固有のセキュリティ上の課題や対策法についての議論は現状ほとんどされていない模様

図表 69 地上通信と NTN（衛星間通信を含む）を一体化した通信におけるセキュリティポイント



- ii. 各セキュリティポイントにおけるセキュリティ上の課題と想定される対策法
- ①衛星間通信、②衛星-地上局間通信、③衛星-ユーザー間通信のそれぞれにおいて想定されるセキュリティ上の課題と、想定される対策技術を図表 70 にまとめる
 - 既存の地上通信と、衛星通信を統合したネットワークの課題は共通するが、地上における対策（例えば暗号化等）をそのまま適用できない点が課題になる
 - これは主に「衛星が高速で移動すること」、「衛星と地上の通信の長距離による高遅延」および「コンピューティングリソースの欠如」の 3 点に起因するところが多い

図表 70 各セグメントにおけるセキュリティ上の課題と対策技術

No	セグメント	課題	想定される対策技術
①	衛星間通信	<ul style="list-style-type: none"> • <u>衛星上ではストレージ、計算リソース、エネルギーリソースなどが限られている</u>ことや、衛星間通信がブロードキャスト方式で行われることなどから、通信の機密性・完全性が損なわれる可能性がある → 強力な暗号化が必要 • 軌道間の衛星間通信では、<u>高度や移動速度の差があるため暗号化の複雑さが増す</u> • TCP/IP の動作環境を改善するため衛星システムに実装されている PEP (Performance Enhancing Proxies) と、TCP/IP のセキュリティ技術で Ipsec の連携に課題がある • 衛星ネットワークのルーティングプロトコルへの攻撃の可能性 (通信の断絶や情報路漏洩の可能性) 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>衛星ダイバーシティ</u>による盗聴リスク軽減 • 非対称鍵とユーザーの ID を公開鍵として使用する <u>ID ベースの暗号化</u> → 公開鍵を必要としないため、簡素化できる • 長距離で安全に鍵を共有するために衛星中継を利用した <u>量子鍵配送 (QKD)</u> • 暗号化技術が実装不可な場合は <u>DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum: 直接スペクトラム拡散)</u>でもセキュリティ向上は可能

No	セグメント	課題	想定される対策技術
②	衛星－ 地上局間通信	<ul style="list-style-type: none"> • NTN と 5G の統合を念頭に、下記の課題が存在 <ul style="list-style-type: none"> ◇ 衛星ネットワーク用にも実装が進むソフトウェア定義ネットワーク (SDN) やネットワーク仮想化 (NFV) などの<u>プログラム可能なアーキテクチャは悪意あるソフトウェア進入を可能にする</u> ◇ <u>コンポーネントのオープン性</u>や、セキュリティに弱点を持つ IoT などとの統合によるリスク ◇ セキュリティ慣行が異なる衛星と地上のコンポーネントで整合性を担保すること • 衛星に搭載される gNB では<u>計算やストレージのリソースの問題</u>から、現状は地上局などと同様の効率的なセキュリティ技術を適用できない • 衛星のカバー範囲が広く、妨害攻撃にさらされる可能性が高くなる 	<ul style="list-style-type: none"> • 地上セグメント起因のセキュリティリスクの回避には強力な認証やアクセス制御が重要 <ul style="list-style-type: none"> ◇ アクセス制御 ◇ アプリケーションへのアクセスの最小限化 ◇ 制御プラットフォームの階層設定 • プログラムの書き換え権限の限定 • 妨害対策向けの妨害信号フィルタリングやアンテナアレイ設計 • ブロックチェーン技術
③	衛星－ ユーザー間通信	<ul style="list-style-type: none"> • ユーザー機器 (スマートフォン、HAPS、UAV、海上端末等) は多様であり、セキュリティ要件も多様 <ul style="list-style-type: none"> → IoT デバイス接続によるセキュリティリスク ◇ ユーザー機器の<u>コンピューティングリソース不足</u> ◇ ユーザー機器の<u>高い移動性によりハンドオーバーが頻繁に発生</u> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 以前の接続点に関する情報を伝えるシグナリングメッセージの盗聴・改ざん ✓ 軌道間衛星通信ではハンドオーバーの遅延が大きくなり、セキュリティ対策の複雑性が増す • ローミングにおけるユーザー認証 → 既存の技術では衛星通信適用には十分でない • 衛星の動く範囲やカバー範囲が地理的に広いため、暗号化における鍵管理が困難 	<ul style="list-style-type: none"> • ユーザーに匿名性を提供する AnFRA (Anonymous and Fast Roaming Authentication) <ul style="list-style-type: none"> → 認証プロセス中に衛星利用を最小限にする

- 各セグメントにおけるセキュリティ上の課題に対して、下記のような対策、および対策技術が提案されている

◇ 衛星ダイバーシティ (Satellite Diversity)

複数の衛星から同時に RF を送信することによって、電波の減衰を減らせたり、地上局から見た仰角が複数の衛星ごとに違うために受信できる可能性が高まったりするなどによっ

て、ジャミング攻撃からのリスクを軽減することができる。なお、3つの衛星によるダイバーシティシステムによって、1つのジャミング攻撃からの影響を完全に軽減できるとの研究報告もある²⁰²。

◇ ID ベースの暗号化 (Identity-based cryptography)

鍵の配布でプロセスを複雑にしない軽量の暗号化技術として、ID ベースの暗号化が選択肢として挙げられる。ID ベースの暗号化とは、認証、署名、暗号化等の方式を ID (個人を特定することが可能な情報を意味しており、例えば住所氏名、email アドレス、電話番号、基礎年金番号等は ID として扱うことが可能) に基づいて実現する方式である。事前に公開鍵を作成し、持ち主との対応を公開鍵証明書などで保証する必要がある公開鍵暗号とは異なり、特定の相手の ID をそのまま公開鍵として使用できる ID ベースの暗号化では、公開鍵証明書を必要としないため、鍵管理が簡素化できる。リソースに制限のある衛星通信において適用可能性がある一方で、ID の信頼性や変更可能性を検討する必要があることや、ユーザー宛の暗号文を(不正に)復号可能である鍵生成センターの信頼性が担保される必要があること、ユーザー鍵が漏洩した場合には ID を効率的に変更する必要があるなど、課題もある。

◇ 量子鍵配送 (QKD : Quantum Key Distribution)

QKD とは、1 ビットの暗号鍵情報 (乱数) を光子 (光の粒子) の 1 粒ずつに載せて伝送する技術であり、盗聴を確実に検知することができる。QKD は鍵を安全に共有するための効率的な方法であるが、地上の光ファイバーで送受信を行うと大きな伝送ロスが発生してしまい、通信距離に大きな制限が発生するといった課題がある。この長距離伝送の課題を解決する方法として、衛星中継を使用する新しい技術開発が行われている。詳細は 2.1 の 2) E) を参照。

◇ 直接スペクトラム拡散 (DSSS : Direct Sequence Spread Spectrum)

DSSS は、通信の信号を本来よりも広い帯域に拡散して通信する技術であるスペクトラム拡散の代表的な方式の一つである。DSSS では、送信時に送るべき信号の帯域よりも大きな帯域をもった拡散信号 PN (pseudo-random number) 符号を掛け合わせる。受信時には、送信時の拡散信号を掛け合わせて (逆拡散)、元の信号に復元 (復調) する。この方式では、PN 符号がわからなければ復元できないようになっているため、秘匿性が高く、ジャミング攻撃への対抗技術となる。

◇ 匿名性のある高速ローミング (AnFRA : Anonymous and Fast Roaming Authentication)

AnFRA は、グループ署名技術を使用し、ローミングユーザーに十分な匿名性を提供する認証セキュリティとして提案されている²⁰³。また、衛星の認証時にホームネットワークコ

²⁰² <https://ieeexplore.ieee.org/document/9473519>

²⁰³ <http://staff.ustc.edu.cn/~kpxue/paper/TIFS-AnFRA-2019.2.pdf>

ントロールセンターのリアルタイムの関与を避けることによって、衛星のコンピューティングリソースを最小限に抑えることができる。

iii. 宇宙におけるセキュリティ関連の動向

- 民間による衛星コンステレーションを中心に衛星の数が大幅に増加しており、衛星が新たな社会インフラとなりつつある中、社会インフラの信頼性確保という観点から衛星を含む宇宙システムに対するサイバーセキュリティの重要性が高まっている
- 1986年以降、国内外で宇宙システムに関連する90件以上のセキュリティインシデントが発生しており、通信衛星関連のセキュリティインシデントも多く含まれる

図表 71 通信衛星関連の近年の主要なセキュリティインシデント

年	対象	影響	
2015	イリジウム通信衛星	通信内容が見られる状態	<ul style="list-style-type: none"> ・ イリジウム通信衛星のページャ通信データが暗号化されていないという脆弱性が指摘される ・ 市販のアンテナ等でイリジウム通信衛星の通信データを解析・解読し、平文に変換するプレゼンが国際会議でなされる
2020	静止軌道上の18機の通信衛星	インターネット通信の盗聴	<ul style="list-style-type: none"> ・ 静止軌道上の通信用衛星 18機からの電波を市販のアンテナ等で受信し、通信データを分析したところ、18機すべてで暗号がかけられずに通信が行われ、機密情報が見られる状態になっていたと国際会議にて報告される ・ 危険物に関する情報や個人情報等が閲覧できる状態になる
2022	通信衛星 KA-SAT (Viasat)	衛星ブロードバンドへの接続が不能になる	<ul style="list-style-type: none"> ・ KA-SAT のサービスに利用する数万の通信モデムが標的型 DoS 攻撃を受け、当該サービスを利用するウクライナや欧州の組織からの衛星ブロードバンドへの接続が一時的に不能となる ・ ウクライナ軍の指揮系統に対して混乱を巻き起こしたほか、ドイツでは、複数の発電事業者が管理する 7,800 基を超える風力タービンのリモート制御が不能と
2022	Space X の衛星地上設備	インターネット接続サービスの停止	<ul style="list-style-type: none"> ・ ウクライナ政府に提供する衛星コンステレーションを用いたインターネット接続サービスである Starlink のサービスが、衛星信号を探知することで Starlink の地上設備の位置を特定できるため、ロシアによる攻撃対象となりうる可能性が示された。

出所) 経済産業省「民間宇宙システムにおけるサイバーセキュリティ対策ガイドライン Ver 1.1」

- 2023年にはルール大学ボーフムの博士課程の学生が3機の衛星に対するセキュリティ分析を実施した論文を発表し²⁰⁴、攻撃者によって乗っ取ることが可能な13の脆弱性を発見しており、

²⁰⁴ <https://publications.cispa.saarland/3934/>

反響を呼んでいる（44回 IEEE Symposium on Security and Privacy において優秀論文賞を受賞）

- 宇宙システムにおけるサイバーセキュリティの重要性が高まり、ビジネス課題としても認識されるなか、日本では2022年8月に「民間宇宙システムにおけるサイバーセキュリティ対策ガイドライン」を発表（2023年3月に Ver 1.1 にアップデート）²⁰⁵
 - ◇ 宇宙システム（衛星本体や衛星運用プラットフォームなど）によってシステム構成やビジネスリスクが異なるため、留意すべきセキュリティ事項やその対策を対象事業者分類ごとに用意
 - ◇ 現状ガイドラインの位置づけは任意であり、義務的なものではない
- 近年はサイバー攻撃の高度化に伴って、「ゼロトラストセキュリティ」という新たなセキュリティの考え方が注目されているが、この「ゼロトラストセキュリティ」を宇宙空間の適用する動きも出始めている
 - ◇ 従来のセキュリティ対策の考え方は、信頼できる「内部ネットワーク（LAN）」と信頼できない「外部ネットワーク（インターネット）」を分け、その境界で対策（ファイアウォール、プロキシ、IDS (Intrusion Detection System)/IPS (Intrusion Prevention System)などのセキュリティ機器設置）を講じる境界型セキュリティであった
 - ◇ ただし、クラウドが普及するなどして外部ネットワークに保護すべきものがあるのも珍しくない状況となったことから、境界型セキュリティには限界があり、内部ネットワークにも脅威が存在しうるとして、データや機器等の単位でのセキュリティ強化をうたった考え方である「ゼロトラストセキュリティ」の考え方が広まっている
- 衛星用のセキュリティソリューションを手掛ける Spideroak
 - ◇ 衛星のデータやコマンドを意図した受信者にのみ届くように強制して保護することができ、「ゼロトラスト」を前提としたセキュリティソリューション「OrbitSecure」²⁰⁶を提供
 - ◇ 2023年1月、「OrbitSecure」を搭載した衛星（Ball Aerospace 社製）を打ち上げ、6月に軌道上実証に成功
 - ◇ Axiom Space と Amazon Web Service のエッジコンピューティングデバイスと連携し、地上ネットワークから ISS への運用データの安全な送信に成功

B) 地上側の課題と技術的取組み

- 地上側の課題としては、ユーザーが利用する端末がマルチオービットに対応することが必要となる。以下、マルチオービット対応端末の調査結果を示す。
 - i. マルチオービットの対応端末
- マルチオービットの利用が拡大するに伴い、地上で利用される衛星通信端末に対して1台の端末で複数の軌道の衛星と通信できる機能が要求されている。
 - ◇ 1台の端末による複数の衛星との通信を可能とする方法としては以下のような技術が考え

²⁰⁵ https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/sangyo_cyber/wg_seido/wg_uchu_sangyo/pdf/20230331_1.pdf

²⁰⁶ <https://spideroak.com/orbitsecure/>

られる。

- 端末に複数のアンテナを搭載し複数リンクを構成する
 - 単一開口の Electronically Steerable Antenna (ESA) を分割する
 - Beam Splitting
- ◇ ビームを特定の衛星から他の衛星に切替える方法としては以下のような技術が考えられる。
- ビームを特定の衛星から他の衛星に高速（機械的あるいは電子的）に切り替える。
 - 1つのアレイに複数のアンテナモジュールを組み込む
- ◇ 切り替える衛星数や端末コストを勘案して、上記の技術を組み合わせて端末が構成される。
- 以下、マルチオービット端末を製造している企業や採用技術について調査を行った。主に、①複数の衛星と通信できるアンテナ単体、②複数の衛星と通信できる衛星端末に分類して報告する。

① アンテナ単体

- Kymeta（米国）のアンテナ
 - ◇ 2023年6月、OneWebとEutelsatは、NATO向けに、1台のモバイル端末とLEOあるいはGEO衛星とを接続する機能を実証している。また、ランドローバに搭載したKymeta Hawk u 8端末を用いてLEOコンステレーションに接続し高スループットと低遅延通信を実証している。
 - ◇ PoC (Proof of concept) として、4Kビデオのストリーミング、ダウンロード速度195MbpsでのTeams、Twitch、GoogleEarthアプリケーションを実施。アップロード速度32Mbps、遅延は70msであった。
 - ◇ ビームと衛星間のシームレスなハンドオーバーを実証し、1GBのファイル転送を8秒以内で完了した^{207 208}。
 - ◇ Kymetaは、多軌道衛星の同時接続に関する特許 (U.S. 11,063, 661 B2, was issued on July 13, 2021. 「Beam Splitting Hand Off Systems Architecture」) を取得している²⁰⁹。
 - ◇ 1つのアンテナパネルで2ビームを同時に発生させることができ、複数のコンステレーションの2機の衛星の追跡と衛星から他の衛星へのシームレスなトラフィックハンドオフを可能にする。Kymetaのメタマテリアルは、複数の異なるビームを形成、受信、送信し、それぞれが独自の受信/送信 (RX/TX) 接続を持ち、冗長な接続性とインテリジェントなデータ管理を実現する。
- Intellian（韓国）のアンテナ
 - ◇ 2023年1月、IntellianはKu/Kaを単一のフィードを介して電子的に切り替えるdual-band multi-orbit VSATアンテナであるXEOシリーズにX100DとX150Dを追加すると発表²¹⁰

²⁰⁷ <https://aviationweek.com/defense-space/space/oneweb-eutelsat-demo-multi-orbit-terminal-connection-nato>

²⁰⁸ <https://oneweb.net/resources/oneweb-and-eutelsat-demonstrate-multi-orbit-offering-and-global-connectivity-solution>

²⁰⁹ <https://www.kymetacorp.com/news/kymeta-announces-grant-new-u-s-patent-multi-beam-capabilities-enabling-simultaneous-multi-orbit-connectivity/>

²¹⁰ <https://www.intelliantech.com/en/news/newsroom/intellian-expand-their-ku-ka-band-multi-orbit-xeo-series/#>

- ◇ XEO シリーズは、政府、クルーズ、遠洋船、大型ヨット、エネルギー、海運向けのアンテナで、HTS Ka バンド GEO を含む LEO、MEO、GEO、HEO の追尾機能を備えている。
- ◇ アンテナの外観を下図表に示す。

図表 72 Intellian アンテナ



出所) <https://www.intelliantech.com/en/news/newsroom/intellian-expand-their-ku-ka-band-multi-orbit-xeo-series/#>

- ◇ ユースケースと特徴
 - 大容量トラフィックには Ka バンドを、カバレッジギャップには Ku バンドを使用
 - 衛星間をシームレスに電子的に切り替え、帯域幅とネットワークアクセスを最大化
 - 悪天候時は Ku バンドを使用
 - シンプルな RF 設計のために単一のセンターフィード設計と Ka バンド受信機を一体化
 - 電子的 RF スイッチによる Ku-Ka バンド切替えと偏波切替え
- ◇ マルチオービット追尾機能
 - GEO により提供される全ての Ku バンドおよび Ka バンド運用
 - NGSO の make-before-break HO (ハンドオーバー) のための Dual Antenna 搭載
 - MEO コンステレーションをカバーする Ka バンドフィード (2.5GHz 幅)
 - GEO、MEO 追尾 (プログラム追尾とコニカルスキャン)
- Thinkom (米国) のアンテナ
 - ◇ 航空機、車載、船舶、衛星などの移動体向けアンテナを製造²¹¹
 - ◇ mechanically steered と electronically scanned arrays (MSAs/ESAs)の利点を組み合わせた VICTS フェーズドアレイ技術を採用
 - ◇ VICTS フェーズドアレイは 800ms 未満で衛星を切り替える。GSO ping 時間よりも短い。モデムによってバッファリングが可能な時間としている。
 - ◇ VICTS アンテナでは、半二重での true make-before-break (Mbb) 、または全二重での高速な break-before-make (BbM) をサポートする。さらに、同時全二重ビームが必要な場合、小さなフットプリントを維持しながら 2 つの別々のアンテナを利用することが可能

²¹¹ <https://www.thinkom.com/>

(<https://www.thinkom.com/phased-array-specs/>)

- ◇ 2023年2月 SES、ThinKom、Hughes Network Systems は、多軌道衛星サービスのデモンストレーションを実施した。
- ◇ SES の MEO と GEO を介して ThinAir Ka 2517 端末をテストした。デモには、衛星間をローミングするための Hughes のソフトウェア定義の HM 400 航空機用 MODEM を利用。
- ◇ MEO と GEO 運用のため Hughes HM 400 モデムとインターフェースする最新の ThinAir Ka 2517 ソフトウェアを検証²¹²。
- ◇ アンテナの外観と航空機への搭載イメージを下図表に示す

図表 73 ThinAir Ka 2517 概観



出所) <https://www.thinkom.com/air/>

図表 74 アンテナの搭載



出所) <https://www.thinkom.com/wp-content/uploads/2023/05/thinair-ka2517-datasheet-may2023.pdf>

② アンテナを組み込んだ衛星端末

²¹² <https://www.satellitetoday.com/government-military/2023/02/08/ses-thinkom-and-hughes-report-multi-orbit-airborne-terminal-demonstration/>

- All.Space（旧 Isotropic Systems）（英国）²¹³の衛星端末
 - ◇ 単なる信号を送受するだけの反射鏡ではなく「software defined connectivity platform」として位置付けている。
 - ◇ いかなる時も、全ての軌道に配置された複数の衛星とリンクの性能が低下することなく同時に接続できる端末を指向している²¹⁴。
 - ◇ アンテナの外観を下図表に示す。

図表 75 All.Space アンテナ



出所) [https://www.all.space/wp-](https://www.all.space/wp-content/uploads/2022/07/SatelliteMobilityWorldIsotropicSystemsFeatureDecember2021.pdf)

[content/uploads/2022/07/SatelliteMobilityWorldIsotropicSystemsFeatureDecember2021.pdf](https://www.all.space/wp-content/uploads/2022/07/SatelliteMobilityWorldIsotropicSystemsFeatureDecember2021.pdf)

- ◇ iDirect との連携
- ◇ 2022年3月 Isotropic Systems 端末は、複数の iDirect プラットフォームで動作する COTM（Communication On The Move）向け衛星モデムである iDirect950mp や高速モデム MDM 5000 シリーズオプションと統合された。MDM 5000 シリーズは、Isotropic Systems の広範な端末オプションを使用してサービスを開始および開始する予定の SES O3b mPOWER システムで動作することも認定された²¹⁵²¹⁶。
- ◇ 2023年3月、ALL.SPACe は O3b および O3b mPOWER でのテスト用に、同社初のスマートターミナルを SES に納入したことを発表した。このマイルストーンは、同社が安全保障および商用市場向けにスマート端末を正式に発売する前の最終段階の1つとされている。
- ◇ S2000 は、Software Defined 端末で、1 台のデバイスで複数の衛星ネットワークと地上ネットワークに同時にアクセスできる。
- ◇ アンテナ外観を下図表に示す。

²¹³ <https://www.all.space/insights/isotropic-systems-reveals-commercial-launch-plans-for-multi-link-all-orbit-antenna-and-investments-in-additional-production-capacity-to-meet-demand>

²¹⁴ <https://www.all.space/wp-content/uploads/2022/07/SatelliteMobilityWorldIsotropicSystemsFeatureDecember2021.pdf>

²¹⁵ <https://news.satnews.com/2022/03/25/fully-integrated-multi-orbit-terminal-will-be-the-result-of-isotropic-systems-st-engineering-idirect-partnershi>

²¹⁶ <https://www.all.space/insights/isotropic-systems-partners-with-st-engineering-idirect-to-deliver-first-fully-integrated-multi-orbit-terminal>

図表 76 アンテナ外観



出所) <https://www.kratosdefense.com/constellations/articles/digital-ground-pioneers-advancing-multi-everything-satcom-terminal>

- Gilat (イスラエル) ²¹⁷の衛星端末
 - ◇ SkyEdge IV は単一のプラットフォームによるマルチオービット運用を可能にする
 - ◇ GEO VHTS および NGSO コンステレーションに適用可能で、中断を感じさせないような軌道間のシームレスなハンドオーバーのための **make before break** を実装。
 - ◇ SkyEdge IV はモデムのインストール、サービスのプロビジョニング、追尾アンテナインターフェース、コンステレーションリソースマネージャとのインターフェース、スマートモデムログオン、衛星とビームのシームレスな切替えなど、すべてのレイヤとにおける機能を導
 - ◇ 2019 年、SES は O3 bmPOWER 用のグローバルなマルチアプリケーション/マルチ軌道 VSAT プラットフォームの開発と展開に Gilat を選定した。
 - ◇ 2020 年、SES の O3b および O3bmPOWER MEO コンステレーションを介したハイエンドサービスをターゲットとした、マルチ Gbps スループットのモデムを購入
 - ◇ 2021 年、SES は Gilat とグローバルモビリティプラットフォームで提携し、SES の O3 b mPOWER と静止衛星群によって提供される衛星対応サービスにアクセスできるクルーズラインと海上サービスプロバイダーへのサービスを提供。
 - SES は固定およびモビリティサービスを提供するため VHTS である SES-17 で運用するために、Gilat の SkyEdge IV プラットフォームを選択。
 - ◇ SkyEdge IV Aquarius は、VHTS、GEO/ NGSO コンステレーションでの運用を目的として設計された超高性能 VSAT ファミリー
 - Aquarius ファミリーの VSAT は、ブロードバンド、4G、5G のバックホール、クルーズ船、エンタープライズサービスなど、複数の固定およびモビリティアプリケーションにサービスを提供する柔軟な衛星をサポート²¹⁸
 - VSAT は、2Gbps を超えるスループットと高いパケット処理を実現
 - 伝送インターフェース： DVB-S2X、 TDMA 、 Elastix-SCPC (eSCPC)
 - 標準アンテナインターフェース (OpenAMIP) および標準 BUC インターフェース (OpenBMIP)
 - ✓ OpenAMIP は 2006 年に iDirect が開発したアンテナ制御装置 (ACU : Antenna Control Unit) と衛星ルータ間での情報交換を容易にする IP ベースのプロトコル。これにより、ルータからアンテナに指示が可能となり例えば、船舶が、

²¹⁷ <https://www.gilat.com/blog-skyedge-iv-to-meet-multi-orbit-multi-service-satcom-needs/>

²¹⁸ <https://www.gilat.com/technology/aquarius-family/>

衛星ビーム間を移動する時、接続の変更を伝達できる。

- ◇ Aquarius VSAT ファミリーは、SDS をサポートし、中断のないサービスを提供するように設計されており、GEO と NGSO 間、または異なる GEO 衛星間の切替え、NGSO 衛星の make before break ハンドオーバー、シームレスな運用を可能にする。
- Aquarius は、軌道上での衛星構成変更をサポートする転送チャンネルとリターンチャンネルの両方に、デュアル送信/受信インターフェースと高速適応再構成機能を具備

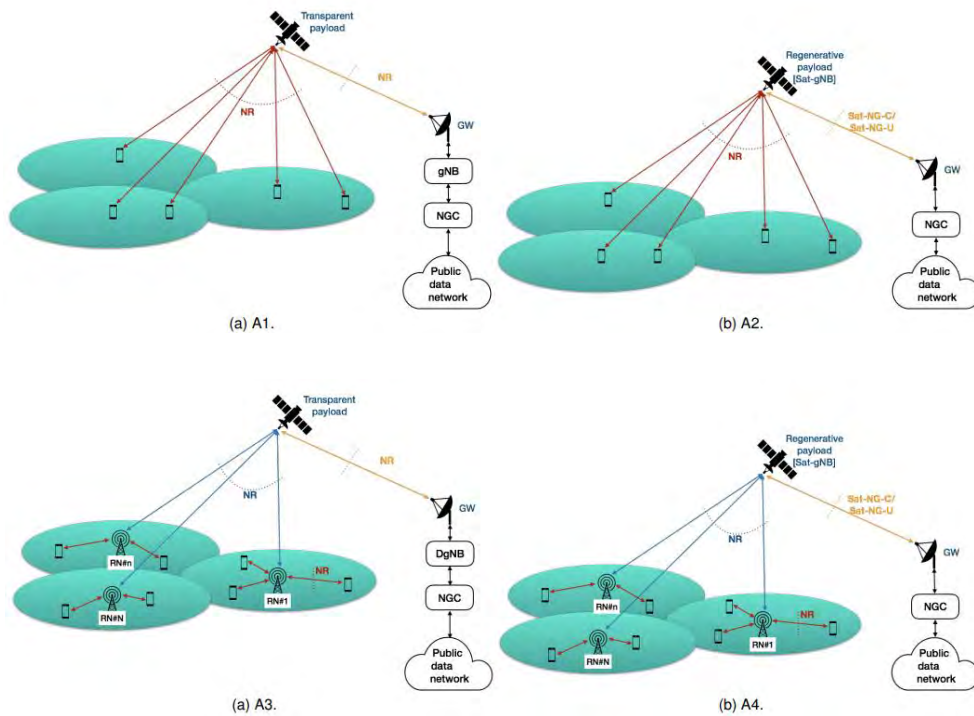
図表 77 SkyEdge IV Aquarius の外観



出所) SkyEdge IV Aquarius プロダクトシート

- ii. NTN をサポートするための地上通信の課題
 - 地上通信 (TN : Terrestrial Network)、NTN、衛星間通信を一体とする NW について 3GPP における検討内容およびセキュリティ関連論文に基づき以下の調査を行った。
 - ◇ TN が NTN をサポートするに際しての課題調査
 - ◇ TN、NTN、衛星間通信を一体とする NW に関する技術課題の調査
 - TN と NTN との統合例と各例の説明を下図表に示す。
 - ◇ 現時点では 3GPP は下図表の非再生中継のみをサポートしており、地上通信 (TN : Terrestrial Network) が NTN を利用するにあたっての課題については、NTN が高度やカバーエリアが異なる様々な衛星と接続することを踏まえて、3GPP が TN に NTN を組み込むため Release 15 で調査 TR 38.811 を実施している。

図表 78 NTN と TN (Terrestrial Network) の統合形態例



出所) Architectures and Key Technical Challenges for 5G Systems Incorporating Satellite

図表 79 TN と NTN 一体化の形態例

構成	概要			特徴
	ペイロード	サービスリンク	フィーダリンク	
A1	非再生	NR インターフェースで UE 直取	NR インターフェースで接続	遅延やドップラーシフトが物理層や MAC 層に影響を与える
A2	再生 (衛星 g NB)	NR インターフェースで UE 直取	DVB-S2X または Sat-NG-C/Sat-NG-U インターフェース	伝搬遅延を削減できる 衛星上で様々な制御ができる
A3	非再生	RN と NR インターフェースで接続	NR インターフェースで接続	バックホールの提供 遅延やドップラーシフトが物理層や MAC 層に影響を与える
A4	再生	RN と NR インターフェースで接続	DVB-S2X または Sat-NG-C/Sat-NG-U インターフェース	伝搬遅延を削減できる 衛星上で様々な制御ができる

注) NR : 5G 無線インターフェース (New Radio)、gNB : 5G 無線基地局 (gNode B)、NGC : 5G コア (Next Generation Core)、RN : 地球局機能を有する中継局 (Relay Node)

- 3GPP TR 38.811 「Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks」²¹⁹に記載された NTN と地上通信 (TN : Terrestrial Network) を一体化する場合の課題を下図表に示す。この中では主に、チャンネルモデルや展開シナリオに関する課題が取り上げられている。

図表 80 NTN サポートにあたっての TN へのインパクト (1) (3GPP より)

Non-Terrestrial network specifics	Effects	Impacted NR features
Motion of the space/aerial vehicles (especially for Non GEO based access network)	Moving cell pattern	Hand-over/paging
	Delay variation	TA adjustment
	Doppler	Init synchro downlink
DMRS time density		
Altitude	Long latency	HARQ
		MAC/RLC Procedures
		Physical layer Procedures (ACM, power control)
Cell size	Differential delay	TA in Random access response message
		RACH
Propagation channel	Impairments	DMRS frequency density
		Cyclic prefix
Duplex mode	Regulatory constraints	Access scheme (TDD/FDD)
Satellite or aerial Payload performance	Phase noise impairment	PT-RS
	Back-off	PAPR
Network architecture	RAN Mapping	Protocols

出所) 3GPPTR 38.811

- ◇ 上図表から「3GPP における NTN (Non-Terrestrial Network) 標準化動向 (Panasonic)」を参考に、NTN と地上通信 (TN : Terrestrial Network) を一体化する場合の課題を抽出し、対応方針とともに概要を下図表にまとめる。抽出と対応方針は標準化動向 (Panasonic) を参照している。

図表 81 NTN サポートにあたっての TN へのインパクト (2)

NTN の特性	影響を与える要因	影響を受ける TN 仕様	対応方針
衛星 (LEO) の移動	セルパターンの移動	ハンドオーバー/ページング	シーケンス見直し
	伝搬遅延の変動	タイミングアドバンス	シーケンス・頻度見直し
	ドップラーシフト	ダウンリンクの初期同期	パラメータ (サブキャリア) の適切な選択
DMRS の時間軸密度		パラメータ (密度) の適切な選択	
高度 (距離)	伝搬遅延 ; 大	HARQ	フィードバック
		MAC/RLC の手順	タイマー値見直し
		物理層の手順 (ACM、電力制御、等)	適応制御の変更
セルサイズ	セル内の伝搬遅延差大	ランダムアクセス応答メッ	ドップラー補償

219

<https://www.atis.org/wp-content/uploads/3gpp-documents/Rel15/ATIS.3GPP.38.811.V1530.pdf>

NTN の特性	影響を与える要因	影響を受ける TN 仕様	対応方針
		セージの TA	遅延補償
		RACH	
衛星特性	アンプでの非線形歪み・ バックオフ	PAPR	PAPR 抑圧

出所) Panasonic 資料 (https://www2.nict.go.jp/spacelab/wg/Satellite5GB5G_report_ref14.pdf)

を基にデジタルブラスト作成

【* : タイミングアドバンス (TA) : 上り送信タイミングの調整】

DMRS (DeModulation Reference Signal) : 復調用参照信号

HARQ(Hybrid Automatic Repeat Request) : 自動再送要求

MAC/RLC : Medium Access Control/Radio Link Control

RACH : Random Access Channel

PAPR (Peak to Average Power Ratio) : 平均電力と瞬時最大電力との比

- NTN を利用するユースケースとしては以下のようなものが挙げられる²²⁰。
 - ◇ 地上波ベースの 5G ネットワークのリーチエリアを広げることで、UE (IoT/MTC : Machine Type Communication など) に対して広く 5G サービスを提供
 - ◇ 衛星や飛行体が強固であることを利用し、物理的な攻撃や自然災害に対して信頼性と回復力を 5G サービスに提供
 - ◇ 航空機搭載 UE への 5G サービス提供
 - ◇ 船舶や列車など、移動するプラットフォームに搭載された UE への 5G サービス提供
 - ◇ A/V コンテンツ、グループ通信、IoT ブロードキャストサービス、ソフトウェアダウンロード (コネクテッドカーなど)、緊急メッセージなどのサービスの効率的なマルチキャスト/ブロードキャスト配信
- 上記ユースケースに対して、NTN と TN との間で、高いレイヤでの統合と無線インターフェースの共通化が必要となる。
- Release-18 以降、再生中継 Regenerative/Non-transparent) ペイロードを搭載する衛星へのアクセスに関する 5G コアアーキテクチャへの影響に関する検討を行う予定となっている。この、コアアーキテクチャへの影響としては以下のようなものが挙げられる。
 - ◇ カバレッジ不連続性 : 非静止衛星 (NGSO) コンステレーションの数が少ない場合、衛星のカバレッジが不連続カバレッジとなり、また衛星故障、コンステレーションのマイグレーションへの対応が必要となる。
 - ◇ UE は限定された時間や場所でのみ衛星にアクセスするため UE が移動する場合、ページング状態によってはネットワークが UE の位置を認識できない時間が発生する。これは、モビリティ管理を強化するという課題につながる。
 - ◇ IoT UE では、電力削減のため UE が間欠動作を行うことも考えられる。このため UE ウェ

²²⁰ <https://zenn.dev/nic/articles/309d1d6f3ffda9>

イクアップ時間の認識・通知、データの保存・転送に関するメカニズムが必要となる可能性がある。

- ◇ 静止衛星でビームを動的に構成する場合、ビーム/セルが断続的となり不連続なカバレッジが発生することも想定される。この場合、ブロードキャスト/マルチキャストの利用に課題を発生させることになる。

6) 日本の強み・弱み

- 日本においては、Space Compass 社がマルチオービットの衛星運用を含めた宇宙統合コンピューティング・ネットワークの実現に向けて研究開発を進めているが、海外では SES 社を中心にマルチオービット衛星運用による通信サービスを開始しており、海外が先行している状況となっている。
- 衛星間光通信の重要性が増す中で、既に Mynaric 社や Tesat 社が SDA や CCSDS の規格に準拠した光衛星通信装置の商用での提供を開始しており、この領域でこれから日本の事業者がキャッチアップするのは困難だと考えられる。
- NTN 構築に関する取り組みの中で、HAPS については国内外ともに研究開発・実証フェーズに留まっている状況である。日本でも複数の大手通信事業者を中心に実証が進められており、将来的に日本として強みを発揮できる可能性のある領域である。

2.3 トランスペアレントペイロード（透過性、非再生中継）の調査分析

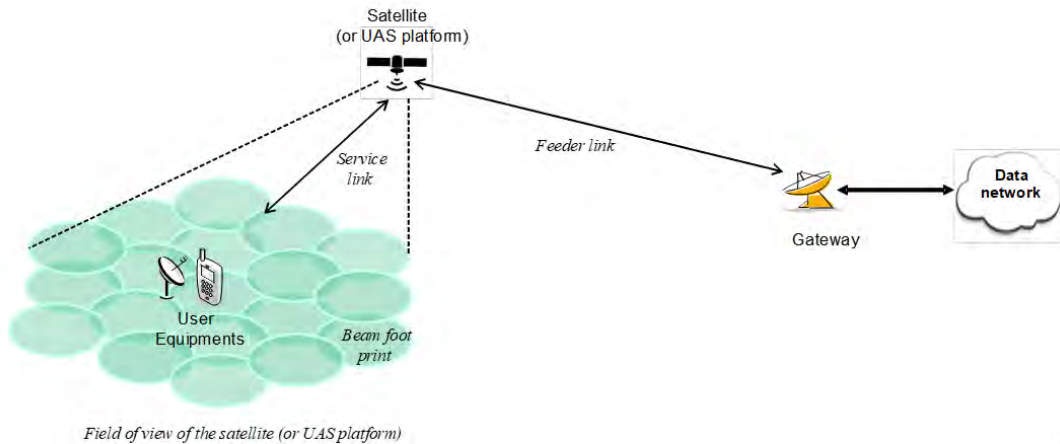
サマリー

- 通信衛星の高速大容量化、リソース（周波数や電力）割当の柔軟化、軌道上での機能再構成等が要求される状況
- 地上局から送信された信号（アップリンク）を衛星上で周波数変換し増幅して地上局に送信（ダウンリンク）する非再生中継ペイロード（ベントパイプペイロード）では、デジタルチャネライザーやデジタルビームフォーミングが開発され、これらのデジタルペイロードをソフトウェア制御する SDS（Software Defined Satellite）が世界で広く利用されようとしている。海外衛星製造事業者は独自の SDS ペイロードを保有し、既に活用を進めている。
- 海外では SDS プラットフォーム化が行われており、SDR ペイロードだけでなくフォトニクスデジタルペイロードの開発も行われている。
- NTN における非再生・再生中継技術については 3GPP でも議論が行われており、Rel.18 以降、NTN について議論が深まると考えられる。既に Rel.17 では非再生中継（トランスペアレント）ペイロードがサポートされている。
- 日本では技術試験衛星 9 号機（ETS-9）においてフルデジタル通信ペイロードの開発が進められており、デジタルチャネライザーの開発も進行中。
- 日本では ETS-9 の衛星が打ち上げられた後、軌道上実証した上で商用化という流れになるため、一定の時間がかかると考えられる。一方で、海外では非再生中継ペイロードも再生中継ペイロードも商用衛星への搭載実績がある。
 - ◇ 非再生中継だけではなく、再生中継と併せて検討する必要があるが、搭載ペイロードを制御するための地上局の制御機能や、地上ネットワークと連携した SDN 構成技術を強化することにリソースを集中するのも一つの方策だと考える
 - ◇ 上記機能を標準化し、SDS ペイロードの製造に反映することによって SDN 構成技術市場を拡大し、参入することができる可能性はある

1) 本節における基本的な考え方

- 3GPP TR 38.821 に記載されているトランスペアレントペイロードを搭載する衛星による NTN 構成の概要を下図表に示す。

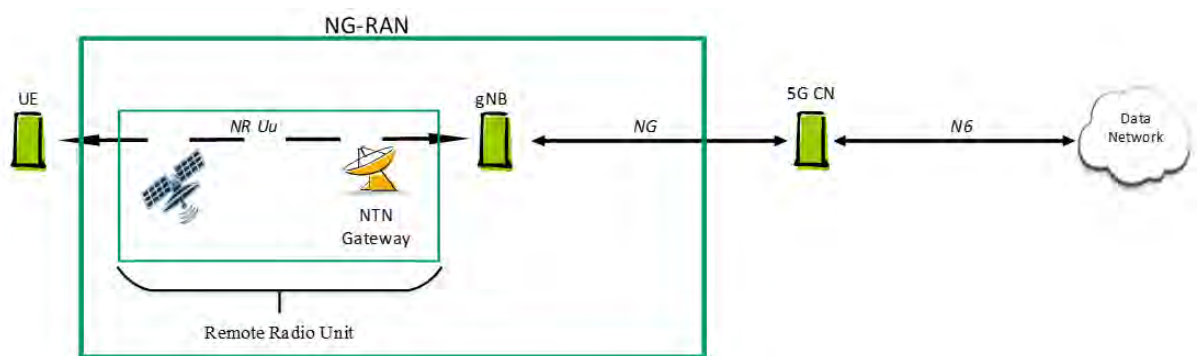
図表 82 トランスペアレントペイロードによる NTN



出所) 3GPP TR 38.821

- また、3GPP TR 38.821 に記載されているトランスペアレントペイロードを搭載するトランスペアレント衛星による無線アクセスネットワーク (NG-RAN) の構成を下図表に示す。
- 衛星区間は NR (New Radio) Uu インターフェース (無線端末から基地局へのアップリンク (上り回線) と基地局から無線端末へのダウンリンク (下り回線) から構成されるインターフェース) で接続される。
- トランスペアレントペイロードはアップリンクとダウンリンクを接続するために周波数変換、フィルタリング、信号の増幅などを行う。

図表 83 トランスペアレント衛星による無線アクセスネットワーク



出所) 3GPP TR 38.821

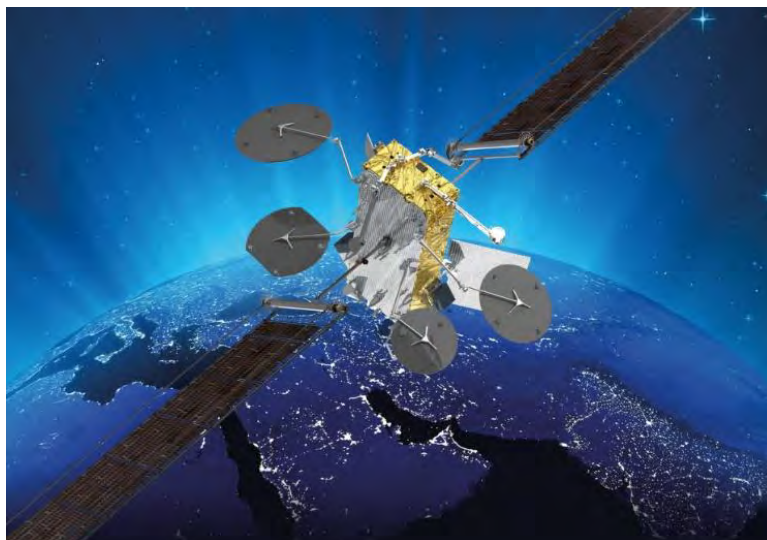
- NTN ネットワークにおいて衛星のリソースを有効に利用するためには、トランスペアレントペイロード（透過性、非再生中継）を有する衛星において、①衛星のビーム方向の変更を行う Steerable beams 機能、②ビームあたりのリソース（容量）の再配分を行う Digital channelizer 機能、③ビームあたりの電力や周波数帯域の変更を行う性能の変更を行う Power/spectrum configuration、などの機能が必要となる。
- これらの機能をソフトウェア的に実現する SDS（Software Defined Satellite）の調査を行った。調査は、既に軌道上で利用されている SDS および計画中の SDS を公表資料より抽出し、国内外において検討されている技術開発要素、通信容量、開発計画、企業連合等を調査・分析した。

2) SDS（Software Defined Satellite）の事例

A) Arabsat と Thales Alenia Space.による Arabsat-7A 計画²²¹

- 2022 年 4 月、中東・アフリカ地域の衛星運用会社である Arabsat と、Thales Alenia Space（Thales が 67%、Leonardo が 33%を出資）は、Thales Alenia Space の Space Inspire (INstant Space In-orbit RE-configuration) プラットフォームをベースとした SDS（Software-Defined Satellite）である Arabsat-7 A の製造契約を締結した。（Arabsat-7 A のイメージと概要を下図表に示す。）
- ◇ Space Inspire プラットフォームにより、ARABSAT-7 A ではシームレスな通信、サービスの再構成、ブロードバンド接続需要への軌道上での速やかな対応、衛星リソースの利用効率を最大化しながら優れたビデオ放送を可能となる、としている。

図表 84 Arabsat-7 A のイメージ



出所) Thales

²²¹ https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/press_release/arabsat-invests-cutting-edge-satellite-technology-signing-contract

図表 85 Arabsat-7A の概要

項目	内容
企業連合（本社所在地）	事業者：Arabsat（サウジアラビア） 衛星製造事業者：Thales Alenia Space（フランス）
衛星名	Arabsat-7A
衛星概要（サイズ・重量等）	不明
打上げ日時	未定（2026 年以降 ²²² ）
軌道位置	東経 30.5 度
周波数帯	Dual C バンド・Ku バンド
伝送速度	高スループット Ku バンド
SDS 機能	Space Inspire ベース

- Thales Alenia Space の Space Inspire プロダクトラインは、CNES の Space Inspire PIA (Plan d'Investissement d'Avenir) および ESA の専用パートナーシップ・プロジェクト契約 (dedicated Partnerships Project contract) でサポートされている²²³。
- ◇ Thales Alenia Space の Space Inspire プラットフォームを利用する予定の衛星は以下のものがあり²²⁴、これらについて以降で詳細を述べる。
 - Flexsat (Eutelsat)
 - Astra 1Q (SES)
 - SES26 (SES)
 - Intelsat 41、44 (Intelsat)

B) Eutelsat と Thales Alenia Space による Flexsat 計画²²⁵

- 2022 年 12 月、Eutelsat Communications は、次世代の柔軟性に優れた SDS を構築するために、Thales Alenia Space を選定した。
- ◇ 急増する Connectivity 市場をサポートするために、南北アメリカで 100Gbps 以上の容量需要増に対応でき、Eutelsat の軌道上資産の使用を効率化する。カバレッジ、帯域幅の割り当て、電力レベルの柔軟性を組み合わせた性能により Eutelsat の顧客に対して、バックホール、企業、政府、航空、海上ソリューション分野においてこれまでにない品質のサービスを提供する、としている。
- ◇ 特に需要が集中する地域では、Eutelsat と合併した OneWeb の LEO コンステレーションとの連携サービスにも対応できる。
- Flexsat のイメージと概要を下図表に示す。

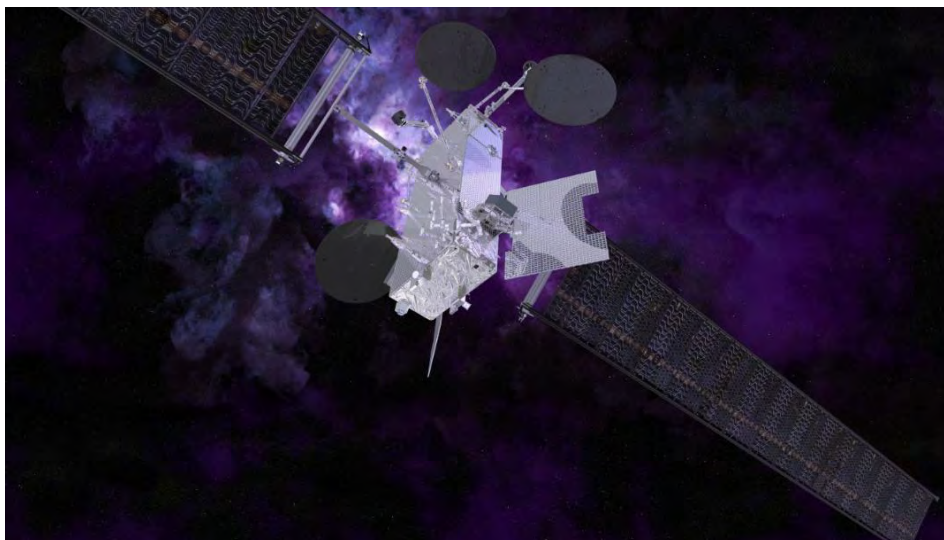
²²² https://space.skyrocket.de/doc_sdat/arabsat-7a.htm

²²³ <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/press-release/thales-alenia-space-put-track-its-space-inspire-product-line>

²²⁴ https://space.skyrocket.de/doc_sat/tas_space-inspire.htm

²²⁵ https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/press_release/eutelsat-selects-thales-alenia-space-build-new-flexible-software

図表 86 Flexsat のイメージ



出所) Thales Alenia Space

図表 87 Flexsat の概要

項目	内容
企業連合 (本社所在地)	事業者 : Eutelsat (フランス) 衛星製造事業者 : Thales Alenia Space (フランス)
衛星名	Flexsat
衛星概要 (サイズ・重量等)	不明
打上げ日時	未定 (2026 年予定)
軌道位置	不明
周波数帯	再構成可能な C バンドと Ku バンド
伝送速度/スループット	100Gbps
SDS 機能	Space Inspire ベース

C) SES と Thales Alenia Space による ASTRA 1Q²²⁶と SES-26 計画²²⁷²²⁸

- 2021 年 11 月、SES は Thales Alenia Space に東経 19.2 度で運用中の既存衛星の代替用として 2024 年に打ち上げを予定する ASTRA-1P と ASTRA-1Q を発注。
 - ◇ ASTRA-1P は Thales Alenia Space のオール電化である Spacebus NEO をベースとしたワイドビーム衛星であるのに対して、ASTRA-1Q は DTH 放送市場の需要に柔軟に対応できるように、軌道上でペイロードを再構成できる SDS である。

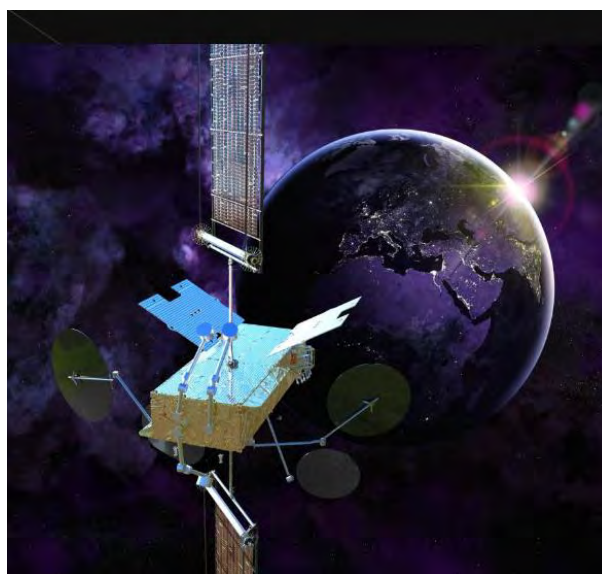
²²⁶ <https://spacenews.com/ses-orders-two-replacement-satellites-for-broadcast-market/>

²²⁷ <https://spacenews.com/ses-orders-software-defined-replacement-satellite-from-thales/>

²²⁸ <https://www.ses.com/press-release/ses-adds-third-satellite-thales-alenia-space-extend-services-across-europe-africa-and>

- 2022年3月 SES は、Thales Alenia Space に SDS 静止衛星 SES-26 を発注。ASTRA-1P、ASTRA-1Q に続く 3 機目の衛星で、ミッションニーズの変化に合わせて軌道上で再プログラムできる通信ペイロードを搭載。
- SES-26 は、ヨーロッパ、中東、アフリカ、アジアの交点となる東経 57 度の NSS-12 を代替するもので、欧州、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や接続サービスの提供を維持し拡大する。
- SES-26 のイメージを下図表に示す。

図表 88 SES-26 のイメージ



出所) SES

- ASTRA-1Q と SES-26 の概要を下図表に示す。

図表 89 ASTRA-1Q/SES-26 の概要

項目	内容	
企業連合（本社所在地）	事業者：SES（ルクセンブルグ） 衛星製造事業者：Thales Alenia Space（フランス）	
衛星名	ASTRA-1Q	SES-26
衛星概要（サイズ・重量等）	不明	不明
打上げ日時	2024 年打上げ予定 ²²⁹	2024 年打上げ予定 ²³⁰
軌道位置	東経 19.2 度	東経 57 度
周波数帯	再構成可能 Ku バンド	再構成可能 Ku および C バンド

229

<https://www.ses.com/sites/default/files/2022-05/SES%20Q1%202022%20Results.pdf>

230 同上

項目	内容	
伝送速度/スループット	不明	不明
SDS 機能	Space-Inspire ベース	

D) Intelsat と Thales Alenia Space による Intelsat 41/44 計画^{231 232}

- 2022年1月、Thales は Intelsat と Intelsat 41 (IS-41)と Intelsat 44 (IS-44) の2機の Space Inspire をベースとする SDS を納入する契約を締結したと発表。
 - ◇ これにより、Intelsat のグローバルな SDS ベースのネットワークを発展させることができ、アフリカ、ヨーロッパ、中東、アジアにおける商用および政府向けのモビリティサービスと携帯電話のバックホール用に高速かつ動的な接続を可能とする。
- IS-41/44 のイメージを下図表に示す。

図表 90 IS-41/44 のイメージ



出所) Thales Alenia Space

- IS-41/44 は、2021年1月8日に Intelsat が発表した Airbus が製造する SDS である Intelsat 42 (IS-42) と Intelsat 43 (IS-43)に追加される (IS-42/43 は事項参照)。
 - ◇ この2機の SDS の追加により、エッジ、衛星、コアに渡ってより高い機敏性、柔軟性、オーケストレーションを可能にするように設計される Intelsat の 5G SDN(Software Defined Network)にとって不可欠な進歩である。
 - ◇ IS-41/44 の運用開始は 2025 年の予定
- IS-41/44 の概要を下図表に示す。

231

<https://www.intelsat.com/newsroom/intelsat-continues-investment-in-global-5g-software-defined-network-with-acquisition-of-two-software-defined-satellites-from-thales-alenia-space/>

232

<https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/press-release/thales-alenia-space-build-state-art-intelsat-41-and-intelsat-44>

図表 91 IS-41/44 の概要

項目	内容	
企業連合（本社所在地）	事業者：Intelsat（米国） 衛星製造事業者：Thales Alenia Space（フランス）	
衛星名	IS-41	IS-44
衛星概要（サイズ・重量等）	4000kg(打上げ重量)	
打上げ日時	2025 年以降	
軌道位置	不明	
周波数帯	不明	
伝送速度/スループット	不明	
SDS 機能	Space-Inspire ベース	

E) Intelsat と Airbus による OneSat 計画²³³²³⁴（Intelsat 42/43 に対応）

- 2020 年 12 月 31 日、Airbus は Intelsat の次世代 SDN（Software Defined Network）のために 2 機の OneSat 衛星を製造する契約を Intelsat と締結。2 機の衛星は Intelsat 42/43 に相当する。
 - ✧ これらの衛星は、Airbus の OneSat プロダクトラインに基づいており、柔軟で軌道上での再構成可能な SDS である。
 - ✧ Airbus は、衛星の設計・製造を含むエンドツーエンドの統合ソリューションを提供する。高性能な地上セグメントソフトウェアコンポーネントが、Intelsat の次世代 SDN エコシステムと高度なデジタル構成部品に統合されれば、衛星リソースをエンドツーエンドで動的に運用を可能となる。
 - ✧ 航空機内ブロードバンドサービスに活用予定
 - ✧ 2023 年打上げ予定。
- IS-42/43 のイメージと概要を下図表に示す。

233

<https://www.intelsat.com/newsroom/airbus-signs-multi-satellite-contract-with-intelsat-for-onesat-flexible-satellites/>

234

<https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2021-01-airbus-signs-multi-satellite-contract-with-intelsat-for-onesat>

図表 92 IS-42/43 のイメージ



出所) Airbus

図表 93 IS-42/43 の概要

項目	内容	
企業連合（本社所在地）	事業者：Intelsat（米国） 衛星製造事業者：Airbus Defence and Space（フランス）	
衛星名	IS-42	IS-43
衛星概要（サイズ・重量等）	不明	
打上げ日時	2023 年以降	
軌道位置	不明	
周波数帯	マルチバンド（詳細不明）	
伝送速度/スループット	不明	
SDS 機能	OneSat ベース	

- OneSat は Inmarsat GX7、GX8、GX9 およびオーストラリアの衛星通信事業者である Optus の Optus 11 にも利用されている²³⁵。
- スカパーJSAT も東経 144 度で運用中の通信衛星 Superbird-C2 の後継衛星となる Superbird-9 として、フルデジタル化ペイロードを搭載するフレキシブル衛星である Airbus の OneSat 型衛星を選定している²³⁶。

F) Eutelsat の QUANTUM²³⁷

- 2021 年 7 月に打上げられた SDS であり、中東・北アフリカ（MENA 地域）にサービスを提供中
- 主なユーザーと対応
 - ◇ 移動体向け通信：動的ビーム形成と船舶追跡機能により、海洋、航空、陸上の輸送で必要と

²³⁵ <https://www.airbus.com/en/space/telecom/onesat>

²³⁶ <https://www.skyperfectisat.space/news/detail/superbird-9.html>

²³⁷ <https://www.eutelsat.com/en/satellites/eutelsat-48-east.html>

される電力とスループットの最適化を行う

- ◇ データネットワーク：どんな場所や時間の需要にも対応するための広域ネットワーク設計と動的トラフィックシェーピング
- ◇ 政府ユーザー：最新の暗号化技術を使用した安全な制御および公共の保護と災害復旧のための迅速な対応
- ESA、Eutelsat、Airbus Defense and Space による PPP 体制で構築
- QUANTUM のイメージと概要を下図表に示す。

図表 94 QUANTUM のイメージ



出所) Airbus

図表 95 Eutelsat QUANTUM の概要²³⁸

項目	内容
企業連合（本社所在地）	事業者：Eutelsat（フランス） 衛星製造事業者：Airbus Defence and Space（フランス）
衛星名	QUANTUM
衛星概要（サイズ・重量等）	3461kg
打上げ日時	2021年7月、Ariane 5
軌道位置	東経 48 度 サービスエリアはフレキシブル
設計寿命	15 年
アンテナ	フェーズドアレイ
周波数帯（GHz）	Uplink：13.75～14.5 Downlink：10.95～12.75
ペイロード	電力：5kW、重量：450 kg
伝送速度/スループット	不明
SDS 機能	再構成 Ku バンド

²³⁸ SeraData 等

G) Iridium NEXT²³⁹²⁴⁰

- 各衛星には、加入者との通信のために、地表面に直径 4,700km の範囲に 48 ビームのセルラーパターンを構成する L バンドのフェーズドアレイアンテナを採用
- Ka バンドリンクは、地上のゲートウェイとの通信および軌道上の隣接する衛星とのクロスリンクにも使用。衛星コンステレーションをクロスリンクすることで、ほぼグローバルに地上や航空機のユーザーからの通信を可能にする。各。
 - ◇ 各衛星は最も近い他の 4 つの衛星と前後左右にリンクしているが、サービスは地上ネットワークから完全に独立している。軌道上ルーティングは、onboard processor (OBP) と platform computer (PFC) によってソフトウェア制御される。ソフトウェアプログラムは、地上からアップロードも可能で、地上オペレーターは必要に応じて更新プログラムを送信したり、より高性能なバージョンを展開したりすることができ、Iridium は顧客サービスの拡張と強化を行うことができる。
 - ◇ Iridium-NEXT では、50 kg の二次センサーペイロードを提供することができる。データ配信やホスティッドペイロードへのアクセスは、Iridium インフラストラクチャまたはプライベートゲートウェイを介して実行できる。
 - ◇ Iridium とカナダの air traffic agency である NAV CANADA は、米国 Federal Aviation Administration (FAA) 、サプライヤーの Harris Corporation と ITT Exelis の支援を受けて Aireon LLC に共同出資し、Iridium NEXT に搭載した Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B)受信機を使用して海上や遠隔地の上空でも、全地球規模での航空機の監視・制御を提供する。
 - ◇ 一部衛星 (58 機) には 1 分の再訪時間でリアルタイムの船舶追跡データを可能とする AIS ((Automatic Identification System)を搭載している。ペイロードは Harris Corporation の AppStar 再構成可能プラットフォームをベースとしている。
- Iridium NEXT のイメージと概要を下図表に示す。
- なお、Iridium NEX は Software Defined の再生中継処理ペイロードを搭載しているとされている²⁴¹。

²³⁹ <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/press-release/iridium-next-setting-standard-constellations>

²⁴⁰ <https://www.thalesgroup.com/en/taxonomy/term/7560?page=1>

²⁴¹ <https://www.aerospace-technology.com/projects/iridium-next-satellite-constellation/>

図表 96 Iridium NEXT のイメージ



出所) Thales Alenia Space

図表 97 Iridium NEXT の概要²⁴²

項目	内容
企業連合（本社所在地）	事業者：Iridium Communications Inc.（米国） 衛星製造事業者：Thales Alenia Space（フランス）
衛星名	Iridium NEXT
衛星概要（サイズ・重量等）	860 kg（打上げ重量）、2.4×3.1×1.5（m）
打上げ日時	2017年～
軌道位置	高度：約 780km、軌道傾斜角：約 86.4 度
設計寿命	10 年、運用寿命：15 年
周波数帯（GHz）	L バンド, Ka バンド（クロスリンク） Ka バンド（フィードリンク） ADS-B ペイロード、AIS 受信機
伝送速度 ²⁴³ /スループット	アップリンク：1.5Mbps ダウンリンク：512kbps
SDS 機能	AIS 対応

H) SES と Boeing の O3b mPOWER²⁴⁴²⁴⁵

- Boeing の 702X を利用した最初の 2 機の O3b mPOWER を 2022 年 12 月、Space X Falcon 9 により打上げ

²⁴² <https://spaceflight101.com/spacecraft/iridium-next/>

²⁴³ https://www.soumu.go.jp/main_content/000463131.pdf

²⁴⁴ <https://www.ses.com/newsroom/o3b-mpower#tab-introduction>

²⁴⁵ https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/space/boeing_satellite_family/pdf/Bkgd_SES_O3b_mPOWER.pdf

- 2023年第3Q サービス開始予定
- グローバル視点で、O3b mPower の容量の約 50%は、米国を含む政府機関向けの安全保障市場へ投入したいとの意向。
- 2019年9月、SESは米国の Kythera Space Solutions (<https://kythera.space/>) と連携して開発中の dynamic software solution である Adaptive Resource Control (ARC)を発表²⁴⁶
 - ◇ ARC は、O3b mPOWER システムの宇宙および地上リソースの全てにわたって、電力、スループット、ビーム、周波数の動的な割り当て制御と最適化を行うことで、低遅延のデータサービスを効率的に提供する。
 - ◇ ARC は Open Network Automation Platform (ONAP)に基づく SES のサービスオーケストレーションソリューションに統合できるよう API を使用している。ARC と ONAP が連携することで、ARC は ONAP がエンドツーエンドで調整するサービスに割り当てられた物理ネットワークリソースを管理する。
- O3b mPOWER のイメージと概要を下図表に示す。

図表 98 O3b mPOWER のイメージ



出所) https://space.skyrocket.de/doc_sdat/o3b-mpower1.htm (Credit: Boeing)

図表 99 O3b mPOWER の概要

項目	内容
企業連合 (本社所在地)	事業者: SES(ルクセンブルク) 衛星製造事業者: Boeing (米国)
衛星名	O3b mPOWER
衛星概要 (サイズ・重量等)	1200 kg
打上げ日時	2022年12月～
軌道位置	高度: 約 8000km、軌道傾斜角: 0°、70°
設計寿命	10年
周波数帯 (GHz)	Ka バンド

²⁴⁶ <https://www.ses.com/press-release/ses-enhance-and-expand-o3b-mpower-system-capabilities-dynamic-software-innovation>

項目	内容
ペイロード	衛星あたり 5000 ビームを生成 ²⁴⁷
伝送速度/スループット	～10Gbps (Throughput)
SDS 機能	リアルタイムで変化する需要に応じて、容量を動的に変更可能

I) Space Development Agency (SDA)²⁴⁸の Tranche 1 計画における SDS 利用

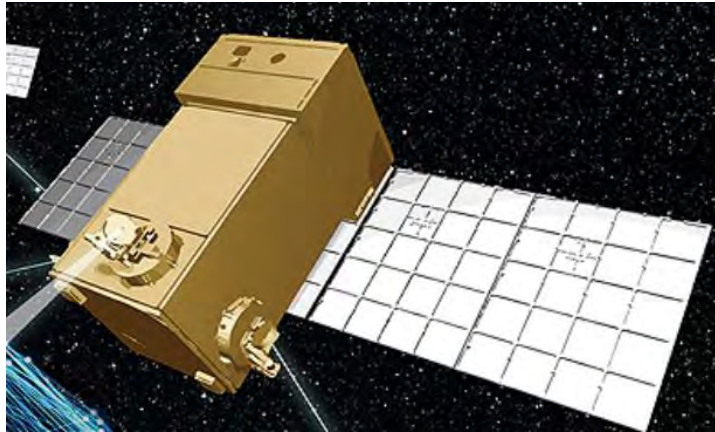
- Space Development Agency (SDA)は Lockheed Martin と 42 機の小型衛星の設計・製造(\$700 million の可能性) のための試作契約を締結²⁴⁹
 - ✧ これらの衛星は、SDA の Transport Layer の初期の戦闘能力である Tranche 1 の一部であり、高度な能力を備えたネットワーク化された全領域共同作戦環境で宇宙と地球上の他の領域を接続する。これらの衛星は、Joint All-Domain Operation のネットワークにおいて宇宙と地球の他のドメインを接続する SDA の Transport Layer の初期戦闘能力である Tranche 1 の一部である。
 - ✧ 小型衛星によるメッシュネットワークが、地上の戦闘領域を宇宙センサーとリンクさせ、戦闘員がデータにより迅速にアクセスできるようにすることで脅威を避けることができる。
 - ✧ SDA は、最大 126 機の宇宙機を 6 軌道面に分割したコンステレーションのプロトタイプを開発しており、Lockheed Martin は Transport Layer コンステレーションのための宇宙機 42 機を開発する予定。Link-16 アンテナとレーザー光衛星間リンクにより、あらゆる戦闘員プラットフォームに対して安全でレジリエンスのある低遅延の軍事データとワールドワイドの接続性を提供。
- Link 16 は、F-16、F-22、F-35 などの戦闘機や PAC-3、THAAD などの統合防空・ミサイル防衛機能を含むシステムに接続され、陸・海戦闘員に sensor-to-shooter のターゲティングと状況認識を提供する。
- Transport Layer 衛星は、簡易なアプリのアップロードによって軌道上のミッションを動的に追加しかつ迅速に変更することを容易にする Lockheed Martin の software-defined platform である SmartSat™ によりソフトウェア定義される。
- 下図表では Tranche 0 の Transport Layer 衛星 (A-Class) のイメージを示す (Tranche 1 も同様のイメージと想定される)。

²⁴⁷ <https://spacenews.com/spacex-launches-first-pair-of-o3b-mpower-satellites/>

²⁴⁸ <https://www.sda.mil/>

²⁴⁹ <https://news.lockheedmartin.com/2022-02-28-Lockheed-Martin-to-Deliver-42-Small-Satellites-for-Space-Development-Agency>

図表 100 Tranche 0 Transport Layer 衛星のイメージ



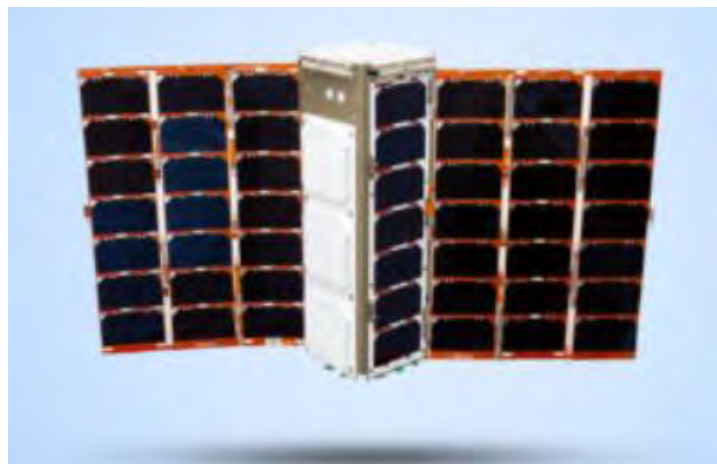
出所) https://space.skyrocket.de/doc_sdat/transport-layer-tranche-0-a-class-lm.htm

(Credit : Lockheed Martin)

J) Spire Global 衛星での SDR 利用²⁵⁰

- 米国に本社を置く Spire Global は weather forecast データ、AIS (Automatic Identification System : 船舶自動識別装置) データ、ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast) データ、RO (Radio Occultation データ、GNSS reflectometry データ) などのさまざまなタイプのデータを収集するために SDR (Software Defined Radio : ソフトウェア無線) を適用した LEO コンステレーションを構築している。
- Spire の LEMUR (Low Earth Multi-Use Receiver) 衛星の概観と概要を下図表に示す。
- Spire は Inter-satellite link 構築も計画している²⁵¹。

図表 101 LEMUR の概観



出所) Spire (<https://spire.com/spirepedia/low-earth-multi-use-receiver/>)

²⁵⁰ <https://spire.com/blog/space-services/space-as-a-service-spaas-the-next-generation-of-space-based-business/>

²⁵¹ <https://spire.com/press-release/spire-global-to-launch-six-satellites-on-spacex-transporter-6-mission/>

図表 102 LEMUR の概要

項目	内容
企業連合（本社所在地）	事業者：Spire Global(米国) 衛星製造事業者：Spire（米国）
衛星名	LEMUR
衛星概要（サイズ・重量等）	10×10×34.5 cm（3 U）、< 6 kg
打上げ日時	2015 年～
軌道位置	高度：400～650km、 軌道傾斜角：51.6°、83°/85°、37°
ペイロード	AIS, GNSS-RO, and ADS-B 受信機
SDS 機能	

K) 主な SDR および SDS 計画の経緯

- 各国の衛星事業者や衛星製造事業者では 2019 年以前より SDR および SDS 計画の開発を進め、SDS システムの発表は 2019 年頃から盛んになったとみられる。
- ◇ Spire は 2012 年より、画像処理ではなくソフトウェア定義の RF ペイロードを実現したいと考えていた唯一の企業であったとしている。以下に、主な SDR の開発経緯を Via Satellite の記事から引用する²⁵²。
- ◇ 2013 年：Spire Global は最初の SDR 衛星 ArduSat-1 と ArduSat-X (1 UCubesat) を ISS から放出し、Spire サーバへのデータ送信を開始
- ◇ 2015 年：Eutelsat が、柔軟なアーキテクチャとカスタマイズ可能なカバレッジを特徴とする Eutelsat Quantum を発表
- ◇ 2019 年 2 月：Iridium が、Thales Alenia Space が製造した 75 機の Iridium NEXT コンステレーションの配備を完了。Iridium NEXT では搭載プロセッサにより、ソフトウェアを再プログラムしてアップグレードすることができる。再生中継ペイロード
- ◇ 2019 年 3 月：Lockheed Martin が SDS アーキテクチャである SmartSat を発表
- ◇ 2019 年 5 月：Airbus は Inmarsat と次世代の Ka バンド静止衛星である GX 7、8、9 の設計、製造、製造契約を締結。これらの衛星は、Airbus の SDS である OneSat をベースにした最初のものであった。
- ◇ 2019 年 9 月：Boeing は SDS 702 X ファミリーを発表。702 X は、SES の O 3 b mPOWER MEO システム構築にあたりデジタルペイロードとリソース管理技術を組み合わせている。
- ◇ 2021 年 1 月：Intelsat は Airbus と 2 機の SDS の設計、製造、納入契約を締結

3) 主な技術開発要素と開発計画

- 本節では SDS のベースとなっている大手衛星製造事業者の要素技術と SDS 個別技術の調査結果を報告する。

²⁵² Via Satellite (<https://interactive.satellitetoday.com/via/april-2021/how-software-defined-satellites-will-shape-communications/>)

A) SDS プラットフォーム

- i. Space-Inspire (INstant SPace In-orbit Reconfiguration) プラットフォーム²⁵³
 - Thales Alenia Space のオール電化プラットフォーム
 - 2020年11月 Thales Alenia Space は、Space Inspire 開発における大きなマイルストーンである PDR (Preliminary Design Review) の終了を発表。
 - ◇ 周波数や電力などの衛星リソースを最大限、効率的かつ効果的に利用しかつ、シームレスな通信とサービスの再構成、需要に対する速やかな軌道上での調整、放送とブロードバンド接続サービスの柔軟性確保を目的としている。
 - ◇ Space Inspire は、衛星の設計・製造において、柔軟で効率的かつ信頼性の高い方法を提供する。
 - Space Inspire の概要を下図表に示す。

図表 103 Space Inspire の概要²⁵⁴

項目	内容
打上げ時重量	<2500 kg
ロケット	Ariane 5、Ariane 6、Falcon 9
プラットフォーム重量 (ドライ)	2000 kg
発生電力	<18kW
ペイロード供給電力	<14kW
軌道	静止軌道
運用寿命	15 年
推進システム	電気推進

- ii. OneSat プラットフォーム
 - 2021年4月、Airbus は OneSat プロダクトラインの最終設計審査を終え重要なマイルストーンを通過したと発表²⁵⁵
 - 再構成可能な OneSat プロダクトラインは、最新のデジタル処理や数千ビームの構成を可能にするアクティブアンテナを備えている。
 - OneSat は、標準的でモジュラー型の製造設計アプローチに基づいており、既存の通信衛星よりも迅速に、低コストで提供することができる。さらに、軌道上の衛星に対して、動的に適宜 (rolling basis) 新しい技術を採用できるようにすることで、将来の課題に対応する。
 - OneSat を利用する衛星としては先に述べた Intelsat の IS-42/43 の他、以下のような衛星が

²⁵³ <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/press-release/thales-alenia-space-put-track-its-space-inspire-product-line>

²⁵⁴ https://nebula.esa.int/sites/default/files/neb_study/2526/C4000133850FR.pdf

²⁵⁵ <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2021-04-onesat-final-design-review-successfully-achieved>

ある。²⁵⁶

- ◇ Inmarsat GX7/8/9 : オンボード処理とアクティブアンテナを搭載する Inmarsat の Ka バンド衛星。OneSat を利用する最初の衛星で、2019 年に製造契約を締結。
- ◇ オーストラリアの Optus も、オーストラリアとニュージーランドにおいて Ku 帯の放送およびブロードバンドの VHTS ミッションを提供する同社の Optus 11 向けに OneSat を選択
- ◇ 2021 年 3 月、スカパーJSAT は東経 144 度で運用中の通信衛星 Superbird-C2 の後継衛星となる Superbird-9 の設計・製造、それに伴うサービスおよび軌道上運用や地上セグメントのサポート、デジタルペイロードの管理とエンドツーエンドの衛星リソースの運用を行うデジタル機器などのターンキーソリューションを提供する企業としてエアバスを選定した。日本の通信事業者として欧州の衛星製造事業者に発注した初めてのケース。
- 2021 年 4 月の設計審査終了を受け、Airbus は OneSat の製造を開始し上記のように、Optus、Intelsat、スカパーJSAT などと製造契約を締結。その中で Airbus は 3D プリントによる衛星搭載アンテナアレイを考案している 3D Systems の Application Innovation Group (AIG) に依頼²⁵⁷。
- ◇ OneSat の送信用および受信用アレイは LaserForm AlSi 10Mg (*) から作成される。これらを同社の AIG が開発したパラメータを用いて三次元印刷することで、厚さ 30 μ m の部品を得られるとしている。そのために同社の金属 3D プリンターである DMP Factory 500 と真空チャンバーを利用して、表面の均質性を得るとしている。
- (※) AlSi10Mg : 鋳物で使われるシリコン系のアルミ合金。アルミニウムはその軽さや加工性の良さから幅広い用途で用いられる非鉄金属の代表的な材料であり、目的とする特性に応じて各種添加元素を加えて幅広い種類の合金として使うことができる。金属 3D プリントでアルミといえば多くの場合 AlSi10Mg の粉末が使用される (Kabuku Connect より引用 : <https://www.kabuku.io/guide/metal-3d-printer/alsi10mg/>)
- ESA の ARTES プログラムでは OneSat の Mechanical プラットフォームと推進系の開発を実施している。²⁵⁸
- ◇ プラットフォーム開発は Mechanical 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ことを目的としており、これには、プライマリーな構体の開発および熱制御システム、流体システム、機器推進システムの開発と認定および機器や展開可能な付属品をサポートするための二次構体の開発も含まれる。
- ◇ Onesat はソフトウェア定義されたソリューションであり、Ka あるいは Ku バンドの複数の衛星ペイロードミッション間に適応することができ、DTH から高スループットのミッションまで対応できる。Onesat の設計により、ミッションの範囲を目に見える地球全体に向けることができる。これらのペイロードの柔軟性を組み合わせることで、エアバス・ディフェンス・アンド・スペースの顧客は、急速に進化する通信市場に対応するためにミッション

²⁵⁶ <https://www.airbus.com/en/products-services/space/telecom/onesat>

²⁵⁷ <https://3dprintingindustry.com/news/3d-systems-selected-to-3d-print-critical-components-of-airbus-onesat-satellites-209835/>

²⁵⁸ <https://artes.esa.int/projects/onesat-platform-and-propulsion-development>

を動的に適応させる柔軟性を得ることができる。

- ◇ Onesat の Mechanical プラットフォームでは、製造時の並行作業をベースとしたモジュラー方式で設計され、装置とペイロードを使用して衛星を効率的に組み立て、個体数を増やす。衛星モジュールは、ペイロードと付属物の収納のために体積効率を維持した **stacking function** を提供する。
- ◇ キセノン推進システムは、すべてのミッションの **orbit raising** と **station keeping** 維持のためのインパルス要求をサポートするホール効果スラスタを提供

iii. SmartSat™を具備する LM-400 プラットフォーム²⁵⁹

- LM-400 は軍事、公共、民間ユーザーにサービスを提供できる Lockheed Martin の最もフレキシブルな中型の衛星バスである。
- LM 400 は、Lockheed Martin の SDS アーキテクチャである SmartSat™により、ミッションの柔軟性と搭載データ処理能力が向上しており、地上のミッションオペレーターや意思決定者に実行すべきデータを提供するまでの時間が大幅に短縮できる。
- ◇ 軍用途のために、LM 400 では Modular Open Systems Architecture (MOSA) に準拠して、他のサービスのプラットフォームとの相互運用性を実現しており、Joint All-Domain Operations/Joint All-Domain Command and Control (JADO/JADC 2) に関する国防総省ビジョンを可能にする。
- ◇ LEO/MEO/GEO に適用可能
- LM 400 のイメージと概要、および打ち上げ時コンフィギュレーションを下図表に示す。
- 2023 年 4 月、Electromagnetic Interference/Electromagnetic Compatibility (電磁干渉/電磁互換性) テストに成功した、と発表。この試験は、運用中に衛星バスコンポーネントからの信号が重要なペイロードに干渉しないようにするためのものである。²⁶⁰
- ◇ 2022 年 12 月にアセンブリを終えた衛星は TVAC (thermal vacuum) テストの準備が進められていると伝えられている。

²⁵⁹ <https://www.lockheedmartin.com/en-us/capabilities/space/lm400.html>

²⁶⁰ <https://news.lockheedmartin.com/2023-04-19-Lockheed-Martins-First-LM-400-Multi-Mission-Space-Vehicle-Completes-Demanding-Testing-Milestone>

図表 104 LM 400 のイメージ



出所) Lockheed Martin LM 400 Brochure

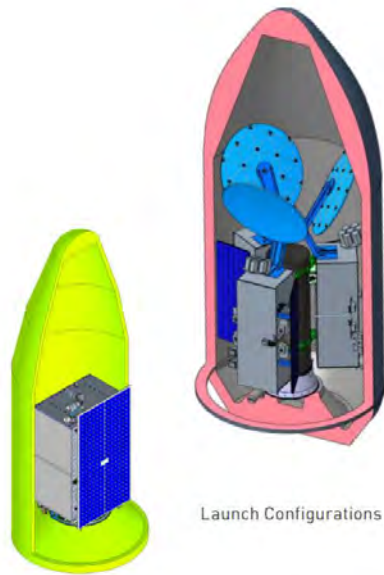
図表 105 LM 400 の概要²⁶¹

項目	内容
バス重量	≤1000kg
適応軌道	LEO/MEO/GEO
設計寿命	2～15 年
打ち上げロケット	5m EELV* Category B (Multi-SV) <3m Fairing (Single-SV)
ペイロード電力	最大 14kW
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・ Multi-vehicle Launches (コンステレーション対応) ・ Software-Reconfigurable Payload Interface ・ SmartSat™ Multi-Core Mission Processing and Planning
ミッション	画像、リモートセンシング、通信、レーダ

* EELV : Evolved Expendable Launch Vehicle

²⁶¹ https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/space/documents/lm400/22-02556_LM400_Asize_2022_02.pdf

図表 106 LM 400 打ち上げ時コンフィギュレーション



出所) Lockheed Martin LM-400 Brochure

iv. Boeing の 702X プラットフォーム²⁶²

- 702 X を利用する、SES の O3b mPOWER システムでは、オペレーターは地上からペイロードを再プログラムすることでリソースを再割り当てすることができる。
- ✧ 製造工程中でも事業計画やミッションプランの変更に対応できるため、リスクを軽減することができる。
- 従来の 702 プラットフォームをベースとする SDS
- 702X のイメージを下図表に示す。

図表 107 Boeing 702X のイメージ



出所) Boeing

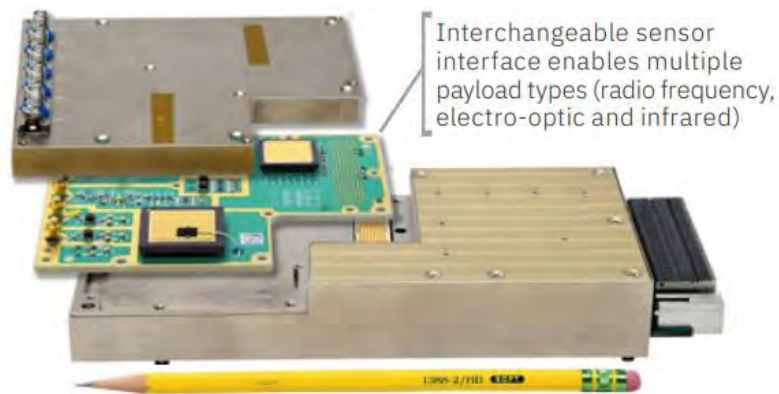
²⁶² <https://www.boeing.com/space/boeing-satellites/702X/index.page>

- 702X の概要²⁶³
 - ◇ 2019年8月時点で小型 GEO への適用が可能
 - ◇ 発生電力は 25kW まで拡張可能
 - ◇ 想定運用寿命は 15 年
 - ◇ リアルタイムで変更可能な 5000 以上の可動ビーム

B) SDS 個別技術

- L3 Harris の RECONFIGURABLE MULTIMISSION PAYLOADS²⁶⁴
 - L3 Harris の再構成可能なマルチミッションペイロードが、政府および商業ミッションで使用されており、それらの中の Iridium NEXT に搭載されている ADS-B 受信機ペイロードは Aireon のリアルタイム航空交通監視システムを可能にしている。
 - L3 Harris の再構成ペイロードのイメージと概要を下図表に示す。

図表 108 L3 Harris ペイロードのイメージ



出所) L3 Harris

図表 109 L3 Harris ペイロードの概要²⁶⁵

項目	内容
重量	0.84 kg
大きさ	3u SpaceVPX* 9.025×4×1.76 インチ (約 23×10×4.5cm)
無線周波数 mezzanine IBW (瞬時帯域幅)	750MHz

²⁶³ https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/space/boeing_satellite_family/pdf/Bkgd_702X.pdf

²⁶⁴ <https://www.l3harris.com/all-capabilities/reconfigurable-multimission-payloads>

²⁶⁵ <https://www.l3harris.com/sites/default/files/2020-11/l3harris-reconfigurable-multimission-payload-spec-sheet-sas.pdf>

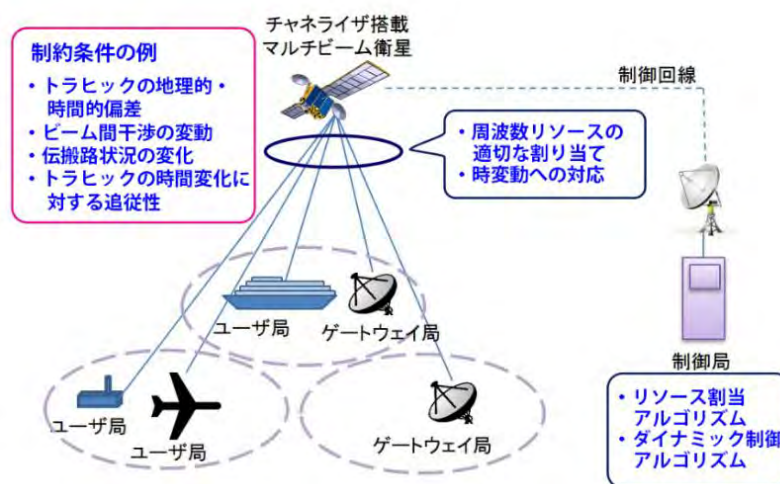
RF mezzanine (Fs)	≤2GHz
信頼性 (残存確率)	0.995 (3年) (LEO)
耐放射線	TID : 30 Krad(Si) SEL : <1 latchup/7 years Heavy ions LET: >15 MeVcm ² /m
電力	5 W(standby) 35W (typical) 65W(maximum)
温度	-20°C~+50°C
オンボード処理性能	350GFLOPS (FLoating point number Operations Per Second)

(※) SpaceVPX : SpaceVPX は、スロットプロファイルとモジュール (プロトコル) プロファイルから plug-in cards (PICs)を作成するための標準²⁶⁶

ii. 日本におけるデジタルペイロード開発の例

- 技術試験衛星 9 号機 (ETS-9) においてフルデジタル通信ペイロードの開発が進められている。
 - フルデジタル通信ペイロードの開発項目を下図表に示す。
- ☆ 新しい技術として周波数フレキシビリティを有するチャネライザ、マルチビーム給電部を搭載する衛星通信システムを取り上げ、有効な制御の仕組みの構築、なやの周波数利用効率 (トラヒックの収容率)の向上が課題、としている²⁶⁷。

図表 110 ETS-9 フルデジタルペイロードの開発項目



出所) NICT

²⁶⁶ <https://spacenews.com/spacevpv-vita-78-and-the-world-of-interconnect/>

²⁶⁷ https://www2.nict.go.jp/spacelab/pj_ets9.html

- 従来型ペイロードとフルデジタル通信ペイロードとの比較とイメージを下図表に示す。

図表 111 従来型ペイロードとの比較

項目	従来型ペイロード	フルデジタル通信ペイロード
ビーム照射位置・ビームサイズ・照射サイズ	固定	可変 ・需要やビジネスモデルの変化に応じて軌道上でカバーエリアを変更できる
通信帯域幅	固定	可変 ・変化するトラフィック需要に対応でき衛星リソースの有効利用につながる
システム	ビームを構成する給電素子の組み合わせが変更できない。 ・1:1 あるいは複数の給電素子でビームを構成するが打ち上げ後構を変更できない	ビームを構成する複数の給電素子の組み合わせを変更できる。 ・給電素子アレイがカバーするエリア内では自在にビーム形成ができる。

出所) JAXA 資料等を参考にデジタルブラストが作成

図表 112 ペイロードの比較



出所) JAXA

iii. EU の PhLEXSAT における Photo-Digital Channelizer の開発²⁶⁸

- PhLEXSAT プロジェクトは EU の資金提供を受けて、将来の Terabit/s 通信衛星のための宇宙グレードのフォトニクスハードウェアをサポートするフォトニクス技術の準備を進めている。プロジェクトのコンソーシアムを下図表に示す²⁶⁹

²⁶⁸ <https://cordis.europa.eu/project/id/101004253>

²⁶⁹ <https://www.phlexsat.eu/>

図表 113 PhLEXSAT コンソーシアム参加企業

参加企業	企業概要
DAS Photonics	SATCOM フォトニックペイロードの設計、製造
MDA Space and Robotics Limited (MDA)	通信衛星製造のリーダー、通信衛星のフォトニック技術のパイオニア
aXenic	高度な高速 GaAs 変調器の製造
FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V.	高速 InP (インリジウム) 光検出器の製造
Argotec AS	アセンブリラインを含むフォトニクスのパッケージングと関連デザインハウス。RF シミュレーションおよび設計、光結合などのパッケージングの専門企業
Eutelsat S.A.	大手の衛星通信事業者

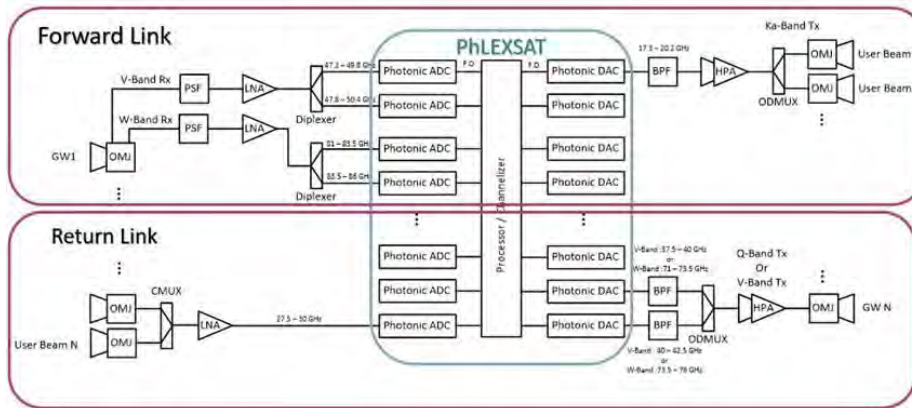
☆ 以下の項目の設計、製作、テストを行う

- 1) Photonic sampler
- 2) 正確なサンプリングのための超低ジッタフォトニッククロック
- 3) Q/V バンド運用のためのデジタルチャネライザー用フォトニック ADC/DAC
- 4) オンボードのデジタル処理ファームウェア

☆ PhLEXSAT は最大 1 GHz/チャンネルまでの柔軟な帯域幅割り当てを備えた数百チャンネルの Tbps の software defined HTS ペイロードとして提案されたアーキテクチャが適していることをビルディングブロックで実証するテストベッドであり、大容量の再構成可能ペイロードのための柔軟なフォトデジタルチャネライザの実証と、Ku/Ka/Q/V 動作のための柔軟な周波数計画とチャネライゼーションおよび動的カバレッジを可能とする。

- 成果の一部であるペイロードの構成を下図表に示す。

図表 114 PhLEXSAT ペイロード



iv. 通信衛星以外におけるソフトウェア定義による再構成可能ペイロード

- SDR や再構成可能ペイロードは通信衛星以外の分野でも利用されており、以下に例を示す。日本においても測位衛星への適用例が案として三菱電機より提示されている²⁷⁰。

◇ Northrop Grumman の DARPA 向け LEO ペイロード²⁷¹

ソフトウェア定義の PNT (Positioning, Navigation and Timing) ペイロードで、既存の衛星航法システムに依存しない、LEO からの新しい信号を軍用ユーザーに提供

- ◇ スウェーデンの SAAB は Orbcomm や AAC Clyde とともに次世代の海上通信サービスを開発している。その中で、Saab の事業部門であり AIS メーカーである TransponderTech は、ソフトウェア定義無線プラットフォームをベースにした、船上 VDES、陸上ベース VDES、衛星 VDES トランスポンダなどを提供している²⁷²。

4) 標準化の動向

- 衛星搭載ソフトウェア間で通信を行うオンボードの衛星バスや地球局の SDR 促進のための表標準化について報告する。

A) SAVIOR²⁷³

- SAVOIR (Space AVionics Open Interface aRchitecture) は space avionics コミュニティを統合し、ヨーロッパの宇宙コミュニティが avionics サブシステムを構築する方法を改善するために協力するイニシアティブである。
- SAVOIR Advisory Group は、オンボードソフトウェアリファレンスアーキテクチャに関する特定のサブグループとして SAVOIR Fair Architecture and Interface Reference Elaboration ワーキンググループを立ち上げ²⁷⁴

²⁷⁰ <https://www8.cao.go.jp/space/committee/27-kiban/kiban-dai46/pdf/siryou2-4.pdf>

²⁷¹ <https://news.northropgrumman.com/news/releases/northrop-grummans-leo-satellite-payload-for-darpa-revolutionizes-positioning-navigation-and-timing>

²⁷² <https://aos-vdes.com/who-we-are/>

²⁷³ <https://savoir.estec.esa.int/>

²⁷⁴ <https://savoir.estec.esa.int/SAVOIRFAIRE.htm>

- ◇ サブグループでは、オープンなインターフェース標準に基づくソフトウェアリファレンスアーキテクチャを定義し、再設計の労力を最小限に抑え、信頼性とパフォーマンスを最大限に提供し、使用と実装が簡単なビルディングブロックを特定することを目的としている。
- ◇ SAVOIR-FAIRE の主なアウトプット。
 - ソフトウェア・リファレンス・アーキテクチャ (software reference architecture)
 - スペースコンポーネントモデルの仕様 (space component model specification)
 - 実行プラットフォームの仕様 (execution platform specification)
 - ソフトウェア機能チェーン汎用仕様 (software functional chains generic specification)
- ◇ Onboard Software Reference Architecture (OSRA) は、宇宙船のオンボードソフトウェアのための包括的なリファレンスアーキテクチャであり、コンポーネントベースおよびモデルベースのアプローチを使用し、堅牢で効率的かつ柔軟な方法で開発を可能にする。²⁷⁵
- ◇ ドキュメントは SAVOIR On-board Software Reference Architecture [OSRA] (SAVOIR-TN-002) としてリリースされている²⁷⁶。

B) 地球局の SDR に関する DIFI コンソーシアム²⁷⁷

- 2023年3月、Hughes、Inmarsat、Airbus Defense and Space が DIFI コンソーシアムに参加した²⁷⁸。DIFI によると 2022 年後半におけるその他の新規参加企業は以下のとおり²⁷⁹。
 - US Army C5ISR Center (米国)
 - SES Engineering (英国)
 - Safran Data Systems (米国)
 - Aurora Borealis Networks (米国)
 - Rincon Research Corporation (米国)
- ◇ DIFI (Digital Intermediate Frequency Interoperability) コンソーシアムのミッションは、加工しないアナログ IF 信号の相互運用にとって代わりまた、ベンダーロックインを防ぐシナリオで、オープン、かつ相互運用可能な Digital IF/RF 標準を提供することによって、宇宙、衛星、および関連業界のデジタルトランスフォーメーションを可能にすることである。地上局における IF インターフェースを対象としており、衛星通信分野における、HTS や VHTS、SDS、LEO および MEO コンステレーションなどの進歩と、トラフィックがデータ中心になっていることから旧来のアナログ構成では、SDR 無線を含む地上局での柔軟な対応が困難になっているといった背景がある。
- 2021年8月、DIFI コンソーシアムは最初の Standard をリリースした。
- 下図表に DIFI のプロトコルスタックと Open Standards Interface (OSI) プロトコルスタックを基準とした関連プロトコルを示す²⁸⁰。

²⁷⁵ <https://essr.esa.int/project/osra-onboard-software-reference-architecture>

²⁷⁶ <https://savoir.estec.esa.int/SAVOIRDocuments.htm>

²⁷⁷ <https://dificonsortium.org/>

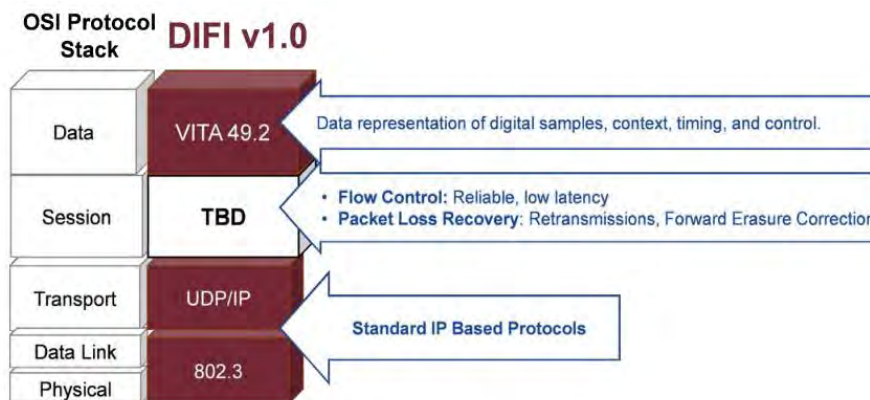
²⁷⁸ <https://www.satellitetoday.com/technology/2023/03/06/hughes-inmarsat-airbus-defense-and-space-join-difi-consortium/>

²⁷⁹ <https://dificonsortium.org/top-satellite-companies-and-users-join-the-difi-consortium/>

²⁸⁰ https://csiac.org/wp-content/uploads/2022/03/CSIAC_SOAR_Digital-Transformation_Deaton-004.pdf

- ◇ DIFI v 1.0 標準では単純に、ユーザーデータグラムプロトコル (UDP)、802.3 標準を介していくつかの VITA 49.2 パケットを指定する。セッション層は UDP パケットの転送に対処する必要があるため、将来的には信頼性の高いパケット配信に必要なトランスポート機能を指定する。

図表 115 DIFI スタンドアード (v1.0)



- ◇ 現在、DIFI v 1.0 標準はスケルトンに過ぎず、ユーザーデータグラムプロトコル (UDP) および 802.3 標準を介していくつかの VITA 49.2 パケットを指定しています。将来のバージョンでは、DIFI は信頼性の高いパケット配信に必要な重要なトランスポート機能を指定します。具体的には、セッション層は UDP パケットの信頼できる転送に対処する必要がある。
- ◇ VITA 49 は、無線のアナログとデジタルのセクション間のインターフェースを定義する一般的な標準である²⁸¹。
- DIFI コンソーシアムにより、衛星通信ネットワークのデジタルトランスフォーメーションの促進が進むと想定される。

5) 日本の強み・弱み

- 日本では技術試験衛星 9 号機 (ETS-9) においてフルデジタル通信ペイロードの開発が進められており、デジタルチャネライザーの開発も進行中ではあるが、軌道上実証した上で商用化という流れになるため、一定の時間がかかると考えられる。
- 一方で、海外では非再生中継ペイロードは商用衛星への搭載実績がある。非再生中継だけでなく、再生中継と併せて検討する必要があるが、搭載ペイロードを制御するための地上局の制御機能や、地上ネットワークと連携した SDN 構成技術を強化することに日本としてリソースを集中するのも一つの方策だと考える
- 上記機能を標準化し、SDS ペイロードの製造に反映することによって SDN 構成技術市場を拡大し、参入することができる可能性はある

²⁸¹ https://www.welkinsciences.com/wp-content/uploads/2021/03/Digital_IF_white_paper.pdf

2.4 ノントランスペアレントペイロード（非透過性、再生中継）の調査分析

サマリー

- 通信衛星の高速大容量化、リソース（周波数や電力）割当の柔軟化、軌道上での機能再構成等が要求される状況
- 地上局から送信（アップリンク）された信号を衛星上でベースバンド信号に復調し、誤り訂正やスイッチングなどの処理を行った後、再度変調して地上局に送信（ダウンリンク）する再生中継ペイロードを搭載する通信衛星の開発も進んでおり、今後、衛星間光通信などを見据えてオンボード処理による再生中継ペイロードの開発が激しくなると考えられる。
- NTNにおける非再生・再生中継技術については3GPPでも議論が行われており、Rel.18以降、NTNについて議論が深まると考えられる。
- 日本では技術試験衛星8号機（ETS-8）や超高速インターネット衛星「きずな」（WINDS）において再生中継技術の実証が行われたが、その後の技術開発の継続や市場展開は見られていない。
- 一方で、海外では既に商用導入実績があり、Thales Alenia Spaceなどは長期にわたり開発や軌道上実証を実施している。
- 2000年初頭から継続して開発が行われ、海外では既に商用フェーズにある再生中継技術を活用した衛星搭載ペイロードをこれからキャッチアップし、市場を獲得することはかなり難しい状況だと考えられる
- 今後のNTNと地上とのネットワーク統合を見据え、海外でも開発が始まったばかりである、地上局および地上ネットワークと連携したペイロード制御の開発に注力することが一つの方策だと考えられる

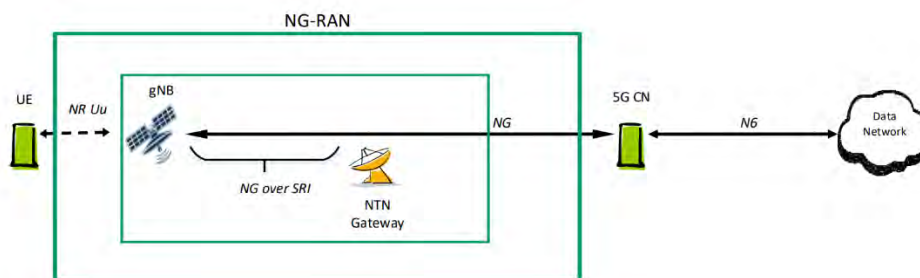
1) 本節における基本的な考え方

- 国内外におけるノントランスペアレントデジタルペイロードの開発計画、検討されているユースケース及びその背景、研究開発が必要となる技術やデバイス、開発上の課題について調査分析する。
- 3GPP (NTN) で議論されるノントランスペアレントデジタルペイロードの技術条件と、これまで国内外において実施・または計画されているノントランスペアレントデジタルペイロードの技術開発を抽出し、検討されているユースケース及びその背景、研究開発が必要となる技術やデバイス、開発上の課題について調査分析する。3GPP で議論される条件との差分を示すことで新たな研究課題を明らかにする。
- ユースケースとしては、衛星ペイロードが地球からの信号を再生する機能を持つ衛星が親局 (CU : Central Unit)として主に複数の子局 (DU : Distributed Unit)の制御を行い、UE と基地局間の通信プロトコルである RRC(Radio Resource Control)の制御を行う場合と、信号の変調復調や信号の再送を行う子局 (DU : Distributed Unit)となるケースを考える。

2) 3GPP での再生中継の検討状況と 5G ネットワークにおける再生中継の位置づけ

- 3GPP の NTN アーキテクチャで検討されたノントランスペアレントペイロード (再生中継ペイロード) 衛星の位置づけを下図表に示す。
 - ◇ 地球局から送信した信号は衛星ペイロードで再生され、衛星区間は gNB (NR 基地局) となる。
 - ◇ UE (User Equipment : 端末) と衛星間のサービスリンクインターフェースは NR Uu (NR radio interface)
 - ◇ 衛星区間と CN(Core Node)は NG (Next Generation) インターフェースで接続されるため、衛星と NTN Gateway 間のフィードリンクは SRI (Satellite Radio Interface) 上での NG インターフェースで接続される。

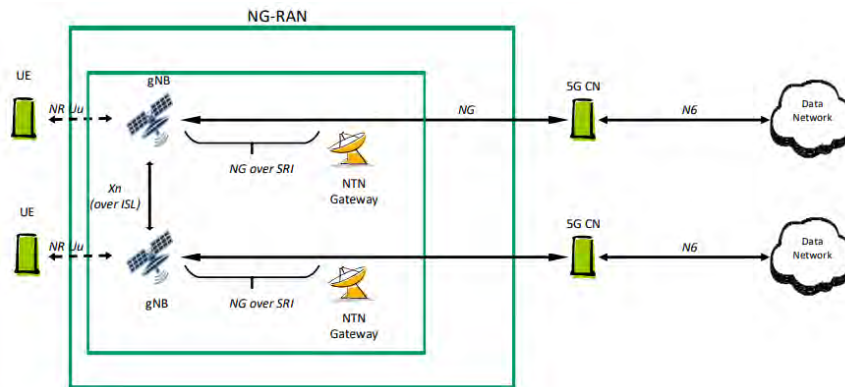
図表 116 gNB 処理機能ペイロードを有する再生中継衛星 (衛星間リンク無し)



出所) 3GPP TR 38.821 Figure 5.2.1-1

- 衛星ペイロードは、衛星間のトランスポートリンクである ISL (Inter Satellite Link : 衛星間リンク) も提供する。ISL は 3GPP のスタディー範囲外となっている。ISL ありの場合のシステム構成を下図表に示す。

図表 117 gNB 処理機能ペイロード再生中継衛星（衛星間リンク有り）



出所) 3GPP.38.821. Figure 5.2.1-2

- NTNにおける再生中継ペイロードのユースケース
 - ◇ 衛星ペイロードが地球からの信号を再生する機能を有しており、ユースケースとしては、①衛星が親局(CU : Central Unit)として主に複数の子局 (DU : Distributed Unit)の制御を行いまた、UE と基地局間の通信プロトコルである RRC(Radio Resource Control)の制御を行う場合と、② 信号の変調復調や信号の再送を行う子局 (DU : Distributed Unit)となるケースがある。
 - ◇ 既に、再生中継ペイロードの開発は日本を含む各国で実施されている
 - ◇ 今後は、NTN における利用が見込まれることから上記のユースケース等を念頭に置いて、
 - ◇ 3GPP での要求条件とこれまで開発された技術や事業者が想定するユースケースを調査し、現在計画されている開発計画や研究を必要とする技術を抽出する。

3) 海外および日本における再生中継技術の開発

- 現時点において再生中継ペイロードを搭載した通信衛星やこれを利用する衛星通信ネットワークについて調査を行った。
- Thales Alenia Space の Onboard Processor である Redsat を搭載する再生中継衛星が軌道投入到されている。同社は 2000 年初頭より、AmeHis プロセッサの開発、軌道上実証を行っており世界的に技術をリードしていることが窺える。
- 一方、Airbus はトランスペアレントペイロードに注力している。

A) 海外の再生中継ペイロード搭載衛星

- i. Hispasat 36W-1²⁸² (Thales Alenia Space)
 - ドイツの OHB System AG、ESA、スペインの通信衛星事業者である HISPASAT が開発した

²⁸² https://space.skyrocket.de/doc_sdat/hispasat-ag1.htm

SmallGEO プラットフォームに RedSAT regenerative ペイロードを搭載。

- ◇ 2008年5月、ESA と Hispasat S.A.は小規模 GEO ミッション Hispasat AG 1 (HAG 1 : Hispasat Advanced Generation 1) を進めることで署名。2016年3月、Hispasat 36 W-1 と改名
- ◇ ESA は ARTES (Advanced Research in Telecommunications Systems)プログラムの要素として ARTES 11 とした。プログラムは、最大質量 300kg のペイロード、最大 3kW のペイロード電力要求、最大 15 年の運用寿命をサポートするプラットフォームの開発をカバーしている。
- HISPASAT は衛星の電力を機敏かつ効率的に使用できるようになり、通信コストの低減によって伝送容量を大幅に増加させることが可能となった。
- Hispasat 36W-1 には、再構成可能なビームを成形するアクティブアンテナ、Ku バンドおよび Ka バンドのトランスポンダが搭載される。
- RedSAT には、再構成可能な 4 本の Ku バンドアップリンクビーム (受信ビーム) を構成するアクティブ直接放射アンテナ (DRA : Direct Radiating Antenna) と、36MHz の再生 4 チャネルを構成するオンボードプロセッサが含まれる。
- Hispasat 36 W-1 のイメージと概要を下図表に示す。

図表 118 Hispasat 36W-1(HISPASAT AG1)のイメージ



出所) HISPASAT (<https://www.hispasat.com/en/satellite-fleet/hispasat-36w-1>)

図表 119 Hispasat 36W-1(HISPASAT AG1)の概要²⁸³

項目	内容
重量（ドライ/打上げ）	1700 kg/3200kg
主契約者	OHB-System AG
ペイロード主契約者	Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG（ドイツ） ・ Tesat が製造する Transparent Repeater REDSAT ペイロードのインテグレーション
反射鏡、DRA アンテナ	EADS CASA Espacio（スペイン）
バス	SmallGEO
発生電力	>6.0kW
ペイロード電力	>3.4kW
ペイロード	24 Ku バンド、 3 Ka-band transponders, RedSAT
搭載プロセッサ REDSAT ペイロード	Thales Alenia Space
設計寿命	15 年
軌道位置	西経 36 度
打上げ	2017 年 1 月（Soyuz）

ii. Amazonas 1 に搭載された AmerHis²⁸⁴（Thales Alenia Space）

- 2004 年 8 月に打ち上げられた HISPASAT に搭載され世界で最初に運用された再生中継、オンボードプロセッサ、衛星上交換システム。
 - ◇ Eurostar-3000S バスに基づく重量 4545 kg の静止衛星。軌道位置は西経 61 度
 - ◇ 製造は当時の Astrium
 - ◇ 2017 年 6 月運用終了
- ESA の資金提供を受け Thales Alenia Space のリードで開発された AmerHis（Advanced Multimedia Enhanced Regenerative Hispasat）プロセッサが搭載されていた
 - ◇ AmerHis-2 も、同じく西経 61 度にある Amazon-2 で大規模なテストを実施²⁸⁵。
- AmerHis は、Alcatel の A9343 DVB OBP プロダクトに基づく再生型 DVB-S/DVB-RCS プロセッサであり、衛星ブロードバンドメッシュソリューションを構築できる。
- AmerHis は約 20 年前のプロダクトであるが、世界初の軌道上運用された再生中継ペイロードであることから、AmerHis のイメージと諸元（目標値）を下図表に示す²⁸⁶。
 - ◇ 全てのユーザーからの衛星へのアップリンクは標準的な DVB-RCS リターンチャンネルが適

²⁸³ <https://www.hispasat.com/en/satellite-fleet/hispasat-36w-1>

²⁸⁴ <https://www.esa.int/esapub/br/br226/br226.pdf>

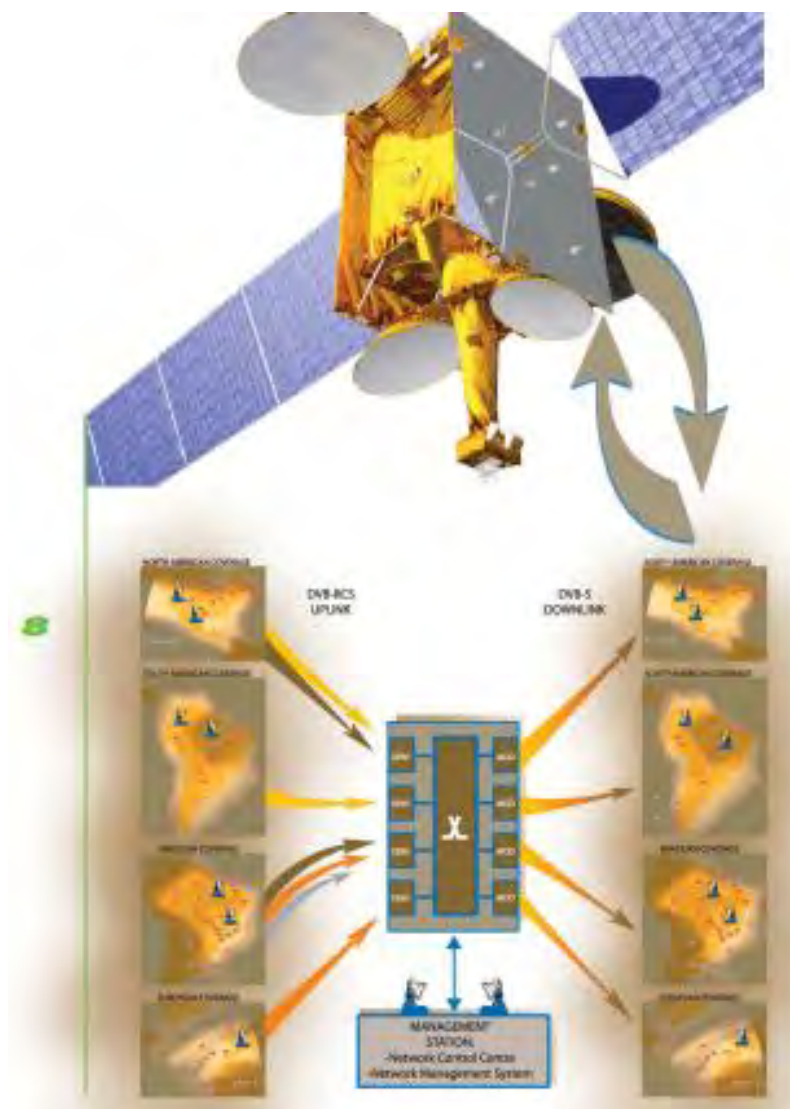
²⁸⁵ <https://spacenews.com/processor-being-tested-aboard-amazonas-2-aimed-us-military-customers/>

²⁸⁶ <https://artes.esa.int/projects/interactive-broadband-dvbrcss-obp-communication-system-amerhis>

用される。

- ◇ オンボードの再生ペイロードは、多様なソースからの情報を標準的な IRD (Integrated Receiver Decoders) 機器で受信できる DVB-S データストリームに多重化する。オンボード中継器は、アップリンク信号を多重化するだけでなく、別々のアップリンクカバレッジから送られる信号を異なったダウンリンクのカバレッジエリアにクロス接続した、ブロードキャストすることもできる。
- ◇ 統合システムを管理するために、Management Station が必要となる。同一の DVB-RCS 規格を使用し、異なるリターンチャンネルを受信することで、ネットワーク運用のための信号やタイミング情報を衛星に直接送信できる。

図表 120 AmerHis のイメージ



出所) ESA (<https://www.esa.int/esapub/br/br226/br226.pdf>)

図表 121 AmerHis の諸元 (目標値) ²⁸⁷

項目	内容
Uplink	
フォーマット	DVB-RCS 規格 (MPEG-2 オプション)に基づく MF-TDMA
Granularity	64 キャリア/トランスポンダ(各 0.5Mbps)
データレート	0.5、1、2、4、8Mbps, (同一トランスポンダ内で混在可能)
符号化	ターボ符号化 (符号化率: 3/4 又は 4/5)
ダウンリンク	
フォーマット	DVB-S 規格
データレート	54Mbps/トランスポンダ
誤り訂正	畳み込み符号化 (符号化率: 1/2、2/3、3/4、5/6、7/8)
オンボード運用性	
相互接続	入力/出力トランスポンダ間でフルルーティング
容量管理 (2モード)	TTC チャンネルによる準静的管理 (TTC 局経由)
	通信チャンネルによる動的管理 (NCC 局経由)
オンボード諸元	
トータル処理容量	216Mbps
消費電力	210W (52.5W/チャンネル)
質量	29.5 kg (7.4 kg/チャンネル)

iii. Iridium NEXT (Thales Alenia Space)

- Thales Alenia が初めて商用化した再生中継ペイロード
- Iridium NEXT 衛星についてはトランスペアレントペイロードの章で再構中継処理ペイロードとして紹介している

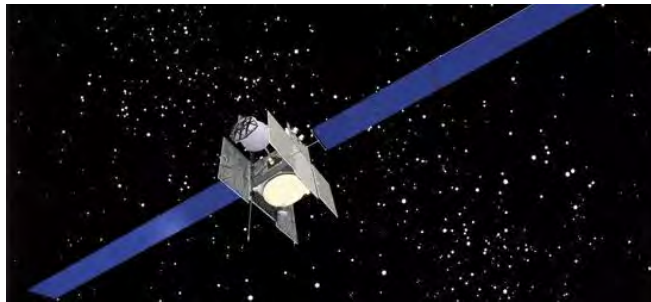
iv. SpaceWay 3 (Boeing)

- Hughes Network Systems が運用する再生中継方式 Ka バンドペイロード搭載衛星
- Boeing の 702HP バスをベースとし、2007 年 8 月に打ち上げられた HTS
- ☆ オンボードのスイッチングおよびルーティング機能を採用することで、ブロードバンドオンデマンドサービスやブロードバンド IP サービスを提供
- ☆ スポットビーム形成、地上端末間のシングルホップネットワークをサポート。
- ☆ スループットは 10Gbps
- ☆ 北米を 24 のダウンリンクホッピングスポットビームでカバー

²⁸⁷ <https://artes.esa.int/projects/interactive-broadband-dvbrcss-obp-communication-system-amerhis>

- SpaceWay 3 のイメージを下図表に示す。

図表 122 SpaceWay 3 のイメージ



出所) Boeing(<https://www.hughes.com/what-we-offer/satellite-services/jupiter-geo-satellites>)

B) 海外における衛星搭載再生中継ペイロードの最新技術

i. Thales Alenia Space の RedSAT

- RedSAT については Hispasat-36W で一部記載したが、本節では詳細な調査結果について記載する²⁸⁸。
- RedSAT の直接放射アンテナ (DRA : Direct Radiating Antenna)は、36 MHz 帯域の Ku バンドビームにより、4つの再構成可能な領域に対してサービスを提供可能。
- 4チャンネルすべてを一度に処理可能で、DVB-RCS 規格の受信したデータを DVB-S2 (Digital Video Broadcasting Second Generation) 規格信号に変換
- EADS CASA Espacio と共に製造したフライトユニットを搭載。TESAT は Hispasat-36W で、Ka バンドおよび Ku バンドで動作する Tryo Aerospace が製造した機器を含む H36 W-1 ペイロードと RedSAT 機器の結合試験を実施。
- RedSAT の概観を下図表に示す。

図表 123 RedSAT の概観



出所) ESA

(https://www.esa.int/Applications/Telecommunications_Integrated_Applications/SmallGEO/Redsat)

²⁸⁸ https://www.esa.int/Applications/Telecommunications_Integrated_Applications/SmallGEO/Redsat

ii. Airbus Defense Space の取り組み²⁸⁹

- オンボード処理により、オンボードのスペクトル分析や再生通信リンクなど高度な機能が実現できるとともに、細かなチャンネル化やルーティングを可能にする。
- Airbus Defense Space でデジタル処理ペイロードのプロジェクトを開始した時点では、トランスペアレントデジタルプロセッサ (Transparent Digital Processor : DTP)を開発し、2018年6月に打ち上げられた SES-12 で軌道上実証することによって、周波数の有効利用の推進を図った。ペイロードの柔軟性を利用するために必要な技術と制御システムの開発も含むものであった。
 - ◇ 以降、トランスペアレント型の SDS の開発や製造にフォーカスしている模様。
 - ◇ 光衛星間通信コンステレーションの構築に向けた再生中継に関する検討も行われている模様²⁹⁰。

iii. OneWeb の JoeySat ^{291 292}

- 2023年5月20日、Space X の Falcon 9 により打ち上げられた 16 機の OneWeb のうちの 1 機は JoeySat と名付けられた OneWeb の第 2 世代 LEO 衛星のプロトタイプ (OneWeb 0721)。陸、海、空の移動体に対する宇宙からの 5G サービスの提供を実証することが目的。
 - ◇ JoeySat は、ESA と OneWeb の Sunrise Partnership Project の下で開発されたもので、英国宇宙庁 (UKSA : UK Space Agency) の支援を受けた ESA Sunrise project の一部としてキー技術の実証を行う。
 - ◇ Sunrise Project は ESA の通信システム先端研究プロジェクトで、OneWeb や SatixFy、Celestia UK、などが参画しており、日本のアストロスケールも 2019 年から本プロジェクトに参加しデブリ除去の商用サービス化に向けた技術開発を行っている。
- ペイロードは再生型のデジタルビームホッピング (Beam-hopping) であり、1 秒間に最大 1000 回の切り替え、および出力変化が可能であり、緊急時など顧客の需要の変化に柔軟に対応できる。デジタルペイロードは、SatixFy が製造、試験、認証などを行っている。
 - ◇ 最先端のペイロードは、市販のコンポーネントを使用し、リーンマネジメント (lean management) による徹底したプロセス管理の下、ESA と OneWeb の契約締結後 1 年未満で製造された。
 - ◇ SatixFy は Quantic X-Microwave の Modular RF & Microwave Building Blocks を利用。
- ほぼ極軌道 (near-polar orbit) に配置され、ノルウェイとスウェーデンの地上局経由で信号を送信。
- JoeySat の概要と概観を下図表に示す。

²⁸⁹ <https://artes.esa.int/projects/development-and-orbit-validation-digital-processed-payload-without-converters-atlas>

²⁹⁰ https://epic-assoc.com/wp-content/uploads/2021/04/190912_EPIC_ESA2019_P34.pdf

²⁹¹ https://www.esa.int/Applications/Connectivity_and_Secure_Communications/Beam-hopping_JoeySat_ready_for_launch

²⁹² https://www.esa.int/Applications/Connectivity_and_Secure_Communications/Beam-hopping_JoeySat_launched

図表 124 OneWeb の JoeySat の概要²⁹³

項目	内容
主契約者	Airbus OneWeb Satellites
バス	Arrow 150 バス
ペイロード主契約者	SatixFy
重量	100～500 kg
ペイロード	デジタルビームホッピング、ビームステアリング
設計寿命	7 年
軌道位置（目標）	高度：1200km、軌道傾斜角：87.9 度
打上げ	2023 年 5 月 20 日（Falcon 9）

図表 125 JoeySat 外観



出所) SatixFy (<https://www.satixfy.com/news/satixfys-fully-digital-beam-hopping-payload-successfully-launched-on-onewebs-joeysat-satellite/>)

C) 日本における衛星搭載再生中継ペイロード技術

i. 技術試験衛星VIII型（きく8号：ETS-8）^{294,295}

- 2006年12月に打ち上げられた技術試験衛星VIII型「きく8号」（ETS-8）ではNICTが担当したオンボードプロセッサが搭載され、フォワード・リターンリンク接続用の非再生中継（スルーリピータ）ペイロードとオンボード回線交換のための再生中継ペイロードが搭載された。
- ETS-8は主に移動体通信用の技術試験を目的とした衛星で、通信形態として衛星上でのパケット交換、音声チャンネルの交換、周波数変換のみのスルーリピータ方式が、また衛星回線の構成は基地局→衛星→移動体（フォワードリンク）、移動体→衛星→基地局（リターンリンク）および移動体→衛星→移動体（クロスリンク）がある。
- 衛星回線構成を下図表に示す。

✧ パケット交換機は、信号の変調・復調、交換機能を有し、数百kbps以上の伝送速度高速による移動体通信システムを実現した。パケット交換を行なうための制御情報はパケット内に含まれているため、伝送するパケット信号の再生中継を行ない、得られた制御情報をもとにして交換制御する方式がとられた。

✧ 変/復調はπ/4シフトQPSK/同期検波であった。

図表 126 ETS-8による移動体通信試験の回線構成



出所)「技術試験衛星VIII型（きく8号）の開発と運用」

ii. 超高速インターネット衛星「きずな」（WINDS）²⁹⁶

- 2008年に打ち上げられたWINDSではNICTが開発したATM (Asynchronous Transfer Mode)

²⁹⁴ https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/2007/3/2007_3_3_64/pdf

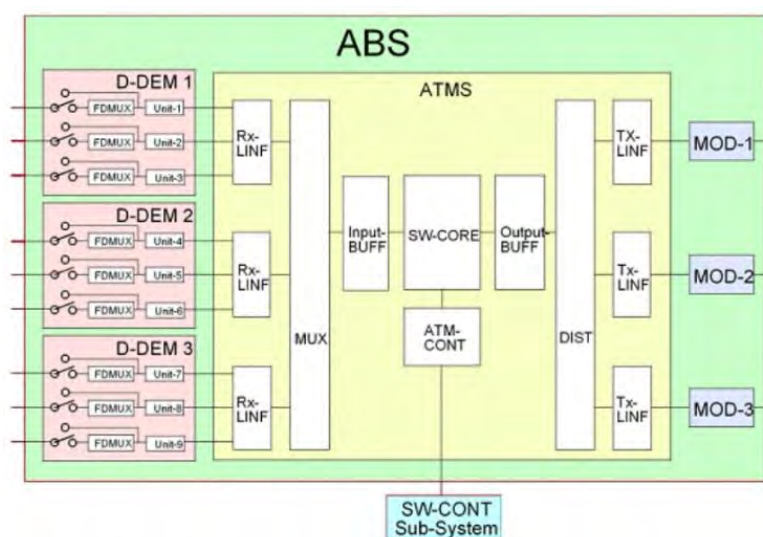
²⁹⁵ <http://satcom.jp/61/selectedpaperj.pdf>

²⁹⁶ https://www2.nict.go.jp/spacelab/pj_winds.html

セルをベースバンドで交換するための再生交換中継器（ABS：ATM-based Baseband Switching Subsystem）が搭載された。

- ◇ ABS では、複数の地上局から送信される信号のセルヘッダによって高速に振り分け、同一ビームに送る情報を多重化して送信する機能を有し、複数の信号を効率的に交換できる。
- ◇ ABS はデジタル復調器（Digital Demodulator：D-DEM）3台、ATM スイッチ（ATMS）2台（うち1台は冗長系）、変調器（Modulator：MOD）3台で構成する。
- ◇ 受信信号は、1.5、6、24、51Mbps および 51Mbps×3 波
- 変/復調器を含む WINDS の再生中継交換機の構成を下図表に示す。

図表 127 WINDS の再生中継交換機の構成



出所) NICT

4) 要素技術（研究開発が必要となる技術やデバイス、開発上の課題）

A) SatixFy²⁹⁷のオンボード処理技術

- SatixFy はイスラエルに本社を置く 2012 年に設立の通信衛星向けチップセットの開発・製造棟を行う企業。米国、英国、ブルガリアなどに拠点を置いている。
- 2022 年 10 月 SPAC の Endurance Acquisition Corp.と経営統合し NASDAQ に上場²⁹⁸しており、注目企業として調査を行った。
- DVB-S2X などの最先端規格をサポートする SDR（Software Defined Radio）や ESMA（Electronic Steered Multi Beam Antenna）を有する衛星通信モデムを開発している。
- ◇ ASIC による、端末、ペイロード、ゲートウェイ機器の重量、電力要件を軽減し、最小の VSAT や multi-beam electronically steered antenna arrays 提供している。
- OneWeb、Satixfy、CGI（英国の Consultants to Government and Industries を行う企業）が連携して、シームレス 5G、LEO、GEO のハイブリッドソリューションを実証²⁹⁹している。

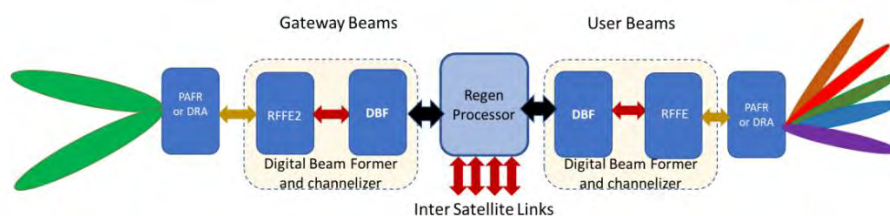
²⁹⁷ <https://www.satixfy.com/>

²⁹⁸ https://www.jetro.go.jp/ext_images/Reports/02/2022/5623113461a83aee/202203.pdf

²⁹⁹ <https://oneweb.net/satixfy>

- ◇ UK Space Agency と ESA からの資金提供を受け、Satixfy の electronically steered array antenna 技術によって、航空、列車、バスなどのモビリティ顧客が、OneWeb LEO ネットワークだけでなく、地上の 5G、GEO 衛星ネットワークを利用する方法を検証。ハイブリッド、マルチビーム、マルチコンステレーションソリューションにより場所の制限なく接続されることを実証。
- SatixFy Communications Ltd. (米国) は、2023 年 3 月、SDS プロバイダーの ReOrbit と Reorbit の Gluon プラットフォーム用の通信サブシステムの購入契約を発表した³⁰⁰。
 - ◇ Gluon は、地球観測からリレーレーザー通信まで様々な種類のペイロードに対応することができ、Reorbit の衛星と地上セグメント間の通信を行うための高データレートリンクに対応するために SatixFy 無線を利用する。
 - ◇ SatixFy の regenerative On-Board-Processor は、2022 年に発売された Sx 3099 DVB-S 2 X SDR ASIC ベースの Gen 1 を再利用した初の製品で、2023 年の第二四半期に出荷される予定である。本、regenerative On-Board-Processor は地球観測や通信ミッション用のモジュールあるいはスケーラブルソリューションに基づいて再構成や構築が行われる。
- SatixFy の Regenerative processor payload の構成イメージを下図表に示す³⁰¹。
 - ◇ 数十～数百のビームを生成し、需要に応じてスペクトルを分割できるデジタルビームフォーマとチャネライザ、多数の SDR 変調器/復調器を含む再生プロセッサから構成される。
 - ◇ 所要容量に応じて、オンボードプロセッサは相互に接続される汎用プロセッサチップのマルチプルインスタンスで作られる。

図表 128 SatiFy が提案するペイロードアーキテクチャ



出所) 「On Board Processing Payload」, Gil Shacha

- SatixFy の再生 Processor (ASIC SX-4000) の構成を下図表に示す。
 - ◇ 特徴は以下のとおり
 - 複数の広帯域 (>500MHz) DVB-S2X 変調器
 - 複数の広帯域 DVB-S2X 復調器
 - 複数のバースト RCS2 復調器
 - ビームホッピング機能
 - 256APSK～低 SNR までの DVB-S2X M レンジ (変調方式と符号化率) をサポート

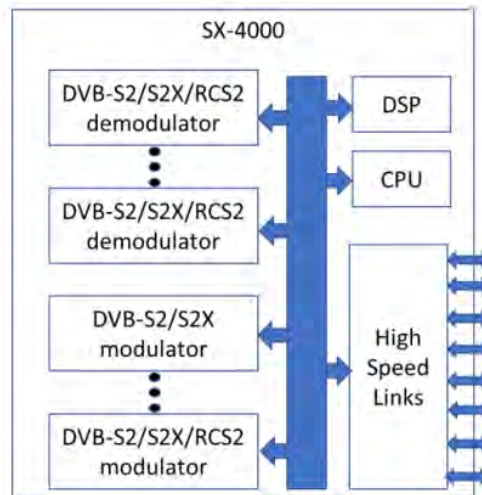
³⁰⁰ <https://www.satixfy.com/news/reorbit-signs-a-deal-with-satixfy-to-co-develop-the-on-board-processor-for-reorbits-highly-flexible-software-defined-satellite-gluon/>

³⁰¹ <https://www.satixfy.com/wp-content/uploads/2020/01/Ka-Conference-2018-On-Board-Processing-Payload-Paper.pdf>

H

- TID > 100KRad (Total Ionising Dose)
- SEUth > 30MeV*cm²/mg (Single-Event Upset)
- SEL > 60MeV*cm²/mg (Single-Event Latch up)

図表 129 SatixFy の再生 Processor



出所)「On Board Processing Payload」, Gil Shacha

B) 再生中継オンボードプロセッサ (SEAKR Engineering LLC)

- Raytheon Technologies の子会社である SEAKR Engineering LLC (1982 年創立) は Digital Channelizer/Beamformers、変復調器、Software-Defined Radios,などを製造しており、Iridium NEXT の再生中継オンボードプロセッサも提供し³⁰²、Iridium NEXT における RF channelization、regeneration、packet switching 処理を行う。
- 2017 年に打ち上げられた 10 機の Iridium NEXT に搭載された SEAKR Engineering の OBP では、Xilinx の航空宇宙グレード Virtex-5QV デバイスが組み込まれている³⁰³。
- ☆ OBP の処理能力は最大 1T FLOP (浮動小数点演算を 1 秒間に 1 兆回行うことを表す単位)
- DARPA が進めている LEO コンステレーション Blackjack 向けのミッションデータ処理ペイロードである Pit Boss を製造している。Pit Boss は、オンボードでのミッション自律運用、DevSecOps Docker アプリケーション用プラットフォーム、光衛星リンクのネットワークルーティング、高速リンク暗号化の AI 処理を提供するもので、AI 処理による自律運用を計画している³⁰⁴。
- 2022 年 8 月、米国の SpaceLink は、DARPA が民間衛星コンステレーションと防衛・軍事衛星を光リンクでシームレスに接続するためのネットワーク構築を目指す Space-Based Adaptive Communications Node (Space-BACN) への参加を発表。SpaceLink の MEO ネット

³⁰² <https://www.seakr.com/our-technology/>

³⁰³ <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000170.000005196.html>

³⁰⁴ <https://www.raytheonintelligenceandspace.com/news/2022/09/06/bct--seakr-engineering-deliver-first-flight-unit-and-payloads-for-darpa-blackjack-program>

トワークを利用し、民間地球観測衛星から地上の軍事拠点へデータを転送する計画である。同社は 2024 年には、4 機の衛星からなる中継ネットワークを展開する³⁰⁵。

- ◇ SpaceLink は、中継衛星システムの主要ペイロード技術を提供する SEAKR Engineering, Inc (SEAKR)を選定。
- ◇ SEAKR は SpaceLink と協力して、光信号と RF 信号の両方を統合する高度で高性能なプロセッサを開発。SpaceLink の MEO 衛星のプロセッサでは、顧客の要求に応じてネットワークの容量と可用性を最適化するためにデータトラフィックを制御する。

C) 地上と衛星との一体化（オンボードプロセッサと連携するネットワークマネジメント

i. Kythera Space Solutions³⁰⁶

- 2023 年 5 月、米国 Space Systems Command (SSC)が、GRIFFON (Ground Resilient Integration & Framework for Operational NC 3) として知られる Evolved Strategic Satcom (ESS) 地上セグメントのフレームワークとインテグレーションのプロトタイプ実証の契約を Raytheon チームと締結。
- ◇ Kythera Space Solutions は、次世代の柔軟な SATCOM アーキテクチャの動的リソース計画、管理、最適化を専門とする非 Non-Traditional Defense Contractor (NDC)として Raytheon チームに参画。
- 2023 年 3 月、Kythera は Thales Alenia Space の SDS 製品ラインである Space Inspire 用の Ground Mission Segment System (GMSS) が利用可能になったことを発表している³⁰⁷。
- ◇ Kythera Operating System (KOS)を搭載することで Thales Alenia Space の Space Inspire ミッションセグメントは、Space Inspire 衛星やさらには SATCOM ネットワークのための動的、自律的、回復力のある SATCOM 管理、最適化、制御の先駆けとなり得るとしている。
- ◇ 最初の GMSS リリース版は夏から Space Inspire の顧客に提供され、ペイロードの設定、ペイロード機能のシミュレーション、ペイロードの動作とパフォーマンスの計算が可能となる。
- 2023 年 3 月、Kythera と SatixFy が LEO コンステレーション向けの高度なペイロードソリューションを提供するために提携したことを発表した。
- ◇ 両者のパートナーシップにより、Kythera の KOS を活用して SatixFy の SDS ペイロードの管理と最適化を行い、リソースだけでなく、LEO コンステレーション最適化のための宇宙および地上セグメント管理とオーケストレーション機能を含む統合ソリューションを提供する。

³⁰⁵ <https://www.eos-aus.com/seakr-selected-for-on-board-processing>

³⁰⁶ <https://kythera.space/>

³⁰⁷ <https://kythera.space/news/kythera-space-solutions-and-thales-alenia-space-announce-early-availability-of-space-inspire-mission-segment-software-product>

ii. ESA の HILINK（地上からの制御による軌道上再構成）^{308 309}

- ESA の HILINK（high-speed bridge between ground and payload）の目的は、直接インターフェースと再構成機能による軌道上での柔軟性を備えたデジタル通信ペイロードサービスの提供に特化したフライト品の開発と認定を行うことで、ユニットの開発と認証テストをおこなうことであった。
 - 主契約者は Thales Alenia Space であり、リアルタイムの動的・仮想・共有かつホスト型ペイロード管理、およびスマートペイロードサービスに適したペイロード管理のための新しい概念を可能にする再構成可能なペイロードコンピュータである。
 - ペイロードコンピュータはペイロード制御センターに接続され、ペイロード全体を制御および監視することができる。一方の core telecom signal processor を含むペイロードの様々なエレメントに接続され、またも専用の無線インターフェースを介した。
 - 2020 年 1 月に軌道に投入された Ka バンド HTS 衛星である Eutelsat KONNECT 衛星は、最初の HILINK を搭載しており、アフリカとヨーロッパで高速インターネットサービスを提供している³¹⁰。
- ◇ 2022 年 8 月には 500Gbps の容量を有する VHTS を打上げている³¹¹。
- HILINK の運用イメージとコンピュータの概観を下図表に示す。

図表 130 HILINK の運用イメージ



出所) ESA (<https://artes.esa.int/news/hilink-%E2%80%93-highspeed-bridge-between-ground-and-payload>)

³⁰⁸ <https://artes.esa.int/projects/hilink>

³⁰⁹ <https://artes.esa.int/news/hilink-%E2%80%93-highspeed-bridge-between-ground-and-payload>

³¹⁰ https://www.tedae.org/uploads/files/1642665285_proespacio-45-en-pdf.pdf

³¹¹ <https://crds.jst.go.jp/dw/20221020/2022102033679/>

図表 131 HILINK コンピュータの概観



D) DVB-S2X³¹²³¹³

- SatixFy は DVB-S2X などの最先端規格をサポートする SDR (Software Defined Radio) や ESMA (Electronic Steered Multi Beam Antenna) を有する衛星通信モデムを開発していることから DVB-S2X について調査を行った。
- DVB-S2X は、主に Direct To Home (DTH) ネットワーク向けである DVB-S2 規格の拡張として 2014 年 3 月に提案された。DVB-S2 と比較してスペクトル効率を向上させたもので、振幅位相シフトキーイング変調として 64APSK、128APSK、256 APSK をまた LDPC 符号化比、低ロールオフ係数、小さいキャリア間隔が追加されている。
- さらに、衛星トランスポンダや地上局で使用される高出力増幅器 (HPA) の線形領域での動作に応じて、線形衛星チャネル専用に最適化された変調・符号化 (Modulation and Coding : MODCODs)が導入。
- DVBS-2X の特徴は以下のとおりである。
 - 従来の変調方式 (～32APSK) に加えて 64 APSK、128 APSK、256 APSK を追加
 - 低ロールオフ値(5%,10%及び 15%)による帯域幅縮小 :
 - DVB-S2 (35%,25%) →DVB-S2X(15%,10%,5%)
 - フィルター特性の改善による隣接キャリア間隔縮小
 - より細かな変調コードにより最適な変調モード選択が可能
 - リニア運用における効率向上 (L モード)
 - チャンネルボンディング
- DVB-S2X を利用する再生中継ペイロードの例を下図表に示す。

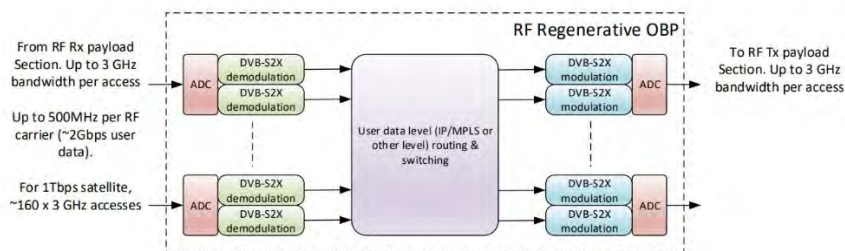
312

<https://jp.mathworks.com/discovery/dvb-s2.html>

313

https://dvb.org/wp-content/uploads/2015/11/A171-2_DVB-S2X_Implementation-Guidelines_Draft-TR-102-376-2_v121_Feb-2020.pdf

図表 132 DVB-S2X による再生中継ペイロードの例



出所) CNES (Digital transition for satcom payloads)

5) 日本の強み・弱み

- ノントランスペアレントペイロードについては 2000 年初頭から継続して開発が行われており、海外では既に商用フェーズにある再生中継技術を活用した衛星搭載ペイロードを日本がこれからキャッチアップし、市場を獲得することはかなり難しい状況だと考えられる
- 今後の NTN と地上とのネットワーク統合を見据え、海外でも開発が始まったばかりである、地上局および地上ネットワークと連携したペイロード制御の開発に注力することが一つの方策だと考えられる

2.5 Q/V 帯降雨減衰・大気湿度の影響調査

サマリー

- 近年は更なる大容量、低コストの衛星通信システムへの顧客の関心度が高まっており、Q/V 帯 (40/50 GHz) や W 帯 (70/80 GHz)、光通信技術等を活用した VHTS (Very-HTS) の開発を複数の企業や公的機関が進めている。
- 高周波数帯の電波は大気や降雨の影響を受けやすいため、影響把握のための大気モデルや降雨減衰モデルの開発・整備が必要であり、そのために実証実験による観測データの取得が現在積極的に行われている。
- 国内ではスカパーJSAT やソフトバンクが HAPS による NTN 通信ネットワークの構築を目指しており、この研究開発の中でミリ波通信の電波伝搬実験や降雨減衰対策技術の検証などを実施している。
- また、国外においても Airbus が HAPS の開発を進めており、ESA の ARTES や EC の QV-LIFT などの公的機関のプロジェクトにおいても Q/V 帯を含む高周波数帯を利用した通信システムの開発や電波伝搬実証などが行われている。
- 降雨対策技術に関しては、従来の静的にリンクマージンを確保する方法ではなく、ATPC (Automated Transmit Power Control) や AMC (Adaptive Modulation and Coding)、ダイバーシティ法などを単独、もしくは組み合わせて利用するための開発・検証が進んでいる。
- 高周波数帯における降雨減衰については、欧州や日本において数多くの研究が継続的に行われており、欧州では、技術実証としての Q/V ペイロードを搭載した Inmarsat の衛星 Alphasat が 2013 年に打ち上げられ、このペイロードを活用した降雨減衰関連の研究が現在も進められている。
- 日本では学術研究に加え、近年は HAPS の開発が進む中で、スカパーJSAT やドコモなどの企業が中心となってミリ波帯の伝搬実験、および高解像度の降雨レーダーを用いた降雨減衰推定法の開発も行われている。
- 世界でも今後降雨レーダーに準じた伝搬推定は今後ニーズが高まると考えられているが、日本は先進的な降雨レーダーを持っていることから、降雨レーダーを活用した降雨減衰推定法を確立することができれば、他国に転用できるという点で強みになると考えられる。

1) 本節における基本的な考え方

- 2000 年代以降、衛星通信の大容量化への要求や、衛星サービスの拡大に伴う周波数枯渇の問題から、より高い周波数で帯域を確保できる Ka 帯 (26.5GHz~40GHz) を活用した高速大容量の HTS (High Throughput Satellite) の普及が進んできた。
- 近年は更なる大容量、低コストの衛星通信システムへの顧客の関心度が高まっており、Q/V 帯 (40/50 GHz) や W 帯 (70/80 GHz)、光通信技術等を活用した VHTS (Very-HTS) の開発を複数の企業や公的機関が進めている。
- 一方で、Q/V 帯などの高い周波数帯の電波伝搬は大気ガスや降雨の影響を大きく受けるため、衛星システムの設計には大気モデルや降雨減衰モデルの精度が重要になるが、このような電波伝搬特性の把握手法は ITU 勧告³¹⁴において示されている。

図表 133 大気影響や降雨減衰に関してレポートされている主要な ITU-R 勧告

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

- ただし、これらの伝搬モデルの実際の性能は必ずしも信頼できる評価がなされているわけではないため、Q/V 帯を含む高周波数帯の活用に向けて降雨減衰の影響などの評価を行うための実証実験が各社で進められている。
- 高周波数帯を活用することで通信品質に及ぼす降雨減衰などの影響が大きくなるため、地上無線回線・衛星回線それぞれに対して種々の降雨減衰対策技術が提案されている。

図表 134 主要な降雨減衰対策技術とその特徴

降雨減衰対策技術		詳細	特徴
静的方法	① マージン確保	場所によりアンテナ径を大きくしたり送信機出力を大きくしたりするなど、回線設計に余裕をもたせる	<ul style="list-style-type: none"> ・ 降雨減衰が小さい場合に有効 ・ アンテナ径や出力に制約がある
動的方法	② ATPC (自動送信電力制御)	降雨のリアルタイムモニタリングを実施することで、降雨減衰量の観測値に応じた送信電力の増力制御を自動で行う	<ul style="list-style-type: none"> ・ 1 対 1 通信において、悪条件下のスループットを最適にできる ・ 回線資源を最適化する

³¹⁴ 無線通信システムを設計する上で重要な電波伝搬特性の推定方法 (伝搬モデル) が ITU-R 勧告 P (Radiowave Propagation) シリーズとしてレポート化されている。

	③ AMC (適応変調符号化)	降雨時には降雨耐性の強いモードに自動的に切り替える	機構が必要となるためリンクの複雑度が増す <ul style="list-style-type: none"> ・ 局在した強雨には効果が小さい
④ ダイバーシティ法 (サイトダイバーシティ、ルートダイバーシティ、周波数ダイバーシティ、タイムダイバーシティ、衛星軌道ダイバーシティ)	関連の小さい複数のルートを設定、劣化の少ないルートを採用することで通信品質を確保	<ul style="list-style-type: none"> ・ 降雨減衰が大きい場合に有効 ・ 複数のルートを設置するため、コストやリンクの複雑度が増加 	

- ・ 上記の背景を踏まえ、本章では Q/V 帯を中心とした高周波数帯を活用した衛星通信システムを設計する上で重要となる大気や降雨減衰の影響を整理するとともに、特に影響が大きいと考えられる降雨減衰の対策技術について調査した。
- ・ また、現在 Q/V 帯などの高周波数帯を活用した通信システムの研究開発を進めている企業や公的機関の取り組みをとりまとめた上で、日本の強みとなる要素の抽出を行った。

2) 高周波数帯の電波伝搬へ影響を及ぼすもの

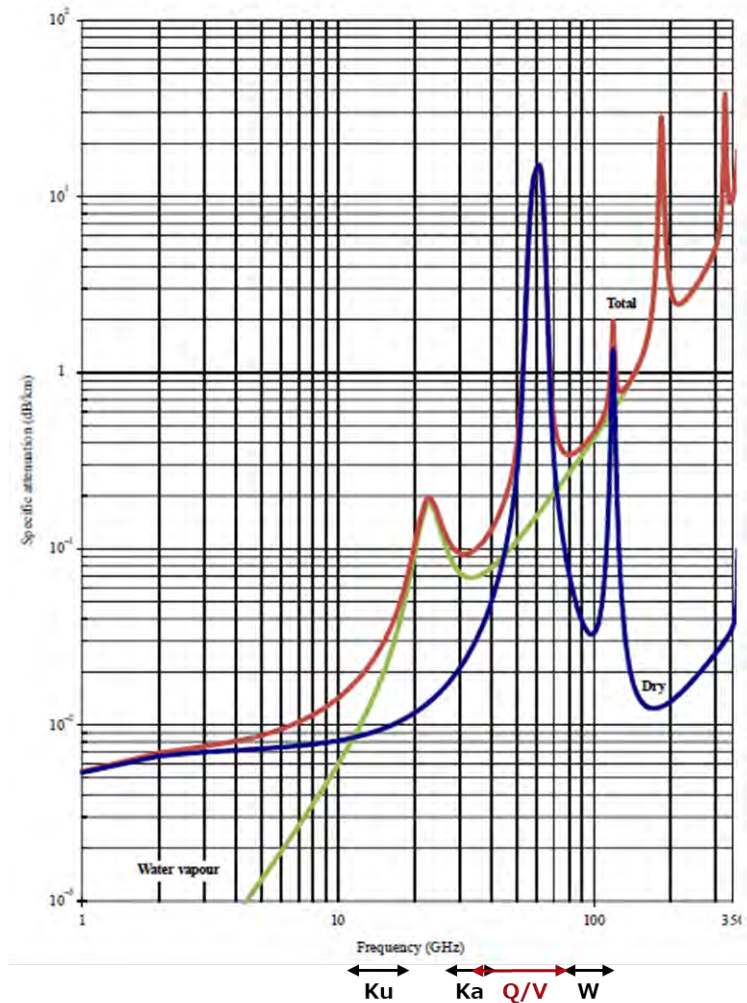
A) 大気の影響

i. 大気ガスによる吸収

- ・ 損失を伴う媒質中では電波は指数関数的に減衰するが、大気ガスによる減衰は 10 GHz 以下の周波数では通常無視してよい。
- ・ 一方で、低仰角で 10 GHz 以上、特に準ミリ波 (20~30 GHz) 以上の高周波数では大気による減衰の重要度が増す。
- ・ 大気ガスによる減衰は主に吸収によるもので、周波数や仰角、海拔高度、水蒸気密度 (温度) などに依存する。
- ・ また、大気中における酸素の割合はほぼ一定だが、水蒸気量は湿度に依存する。
- ・ 下図に示すように、主に水蒸気と酸素による吸収が大きくなり、水蒸気は 22 GHz 近辺に、そして酸素は 60 GHz 近辺に吸収のピークが現れる。
- ・ 全体で見ても周波数が高くなるにつれて大気による吸収が大きくなる傾向にある

図表 135 大気ガスによる吸収係数 [dB/km]

(大気圧 = 1013.25 Pa、温度 = 15°C、水蒸気密度 = 7.5 g/m³)

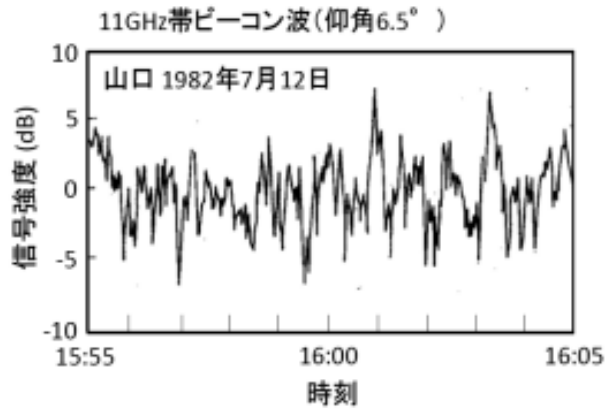


出所) ITU-R P.676-11 “Attenuation by atmospheric gases”

ii. シンチレーション

- 電子密度が不規則な電離層や屈折率が空間的・時間的に変動する大気中を電波が通過する際に振幅（強度）や位相、偏波面が短期的に変動するシンチレーションの影響もある。
- 衛星通信に影響を与えるシンチレーションは、電離層に起因する電離層シンチレーション（Ionospheric Scintillation）と対流圏に起因する対流圏シンチレーション（Tropospheric Scintillation）が存在する。
- 電離層シンチレーションは周波数の 1.5~2 乗に反比例するとされており、**10 GHz 以上の衛星通信システムでは対流圏に起因するもの比べて無視できるものとなる。**
- 対流圏シンチレーションは時と場合によっては信号の変動が強く無視できない現象だが、**具体的には対流圏シンチレーションは低仰角で、かつ無降雨時や弱降雨時の運用においては問題になり得る。**

図表 136 低仰角衛星回線での対流圏シンチレーション

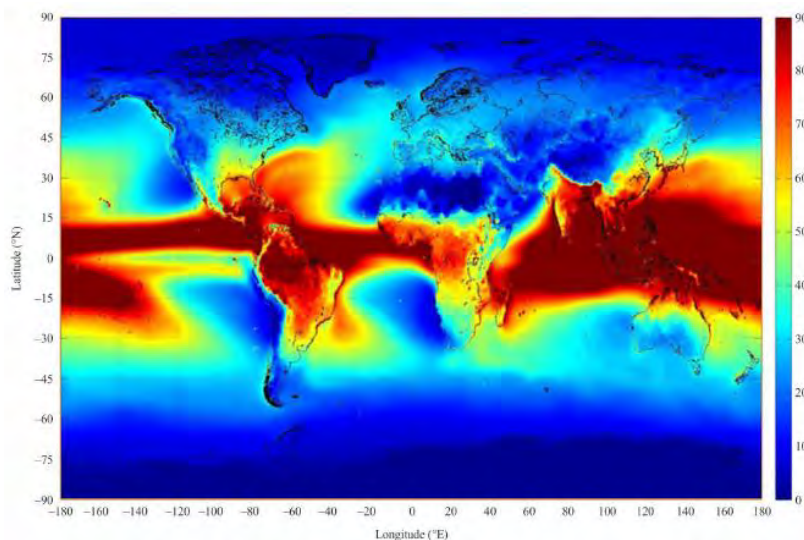


出所) 唐沢好男, "衛星伝搬の壺: 第3講 シンチレーション,"
電波技術 協会報 FORN, no. 350, pp. 28-31, 2023.01.

B) 降雨中の電波伝搬特性

- **10 GHz 以上の周波数帯の伝搬**では対流圏での降雨粒子による吸収・散乱の影響が大きくなる。
- 降雨は電波伝搬路に常に存在するわけではないので、ある降雨減衰値をこえる事象の年間発生時間割合といった時間率の概念が導入される。
- 降雨減衰が X dB を超える年間の時間率が P%であることがわかれば、降雨減衰 A に耐えうる回線設計により年間の稼働率 (100 - P) %の無線通信回線を実現することができる。
- 国際衛星回線の稼働率基準が 99.99%であることから、それに対応する年間累積時間率 0.01%における降雨強度 $R_{0.01}$ (mm/h) ³¹⁵が重要なファクターとなる。
- なお、累積時間率 0.01%を超える降雨強度 $R_{0.01}$ のマップは下図の通り。

図表 137 累積時間率 0.01%を超える降雨強度 $R_{0.01}$ の分布

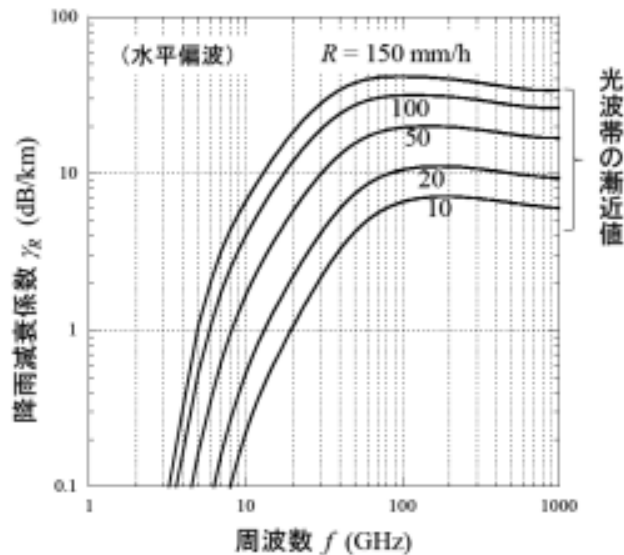


出所) ITU-R P.837-7 “Characteristics of precipitation for propagation modelling”

³¹⁵ 1 分間毎の雨量[mm]を 60 倍して 1 時間あたりに換算した雨量[mm/h]であり、1 分間降雨強度と呼ばれる。

- 雨滴の大きさも加味した降雨減衰係数と降雨強度、周波数の関係は明らかにされており、降雨減衰係数は降雨強度と共に、また 100 GHz 以下では周波数と共に大きくなることが下図からわかる。

図表 138 降雨減衰係数の降雨強度に対する周波数特性



出所) 唐沢好男, "衛星伝搬の壺: 第2講 降雨減衰: ミリ波利用時の大問題,"
電波技術 協会誌 FORN. no. 349. pp. 36-39, 2022.11.

- 降雨減衰の予測法に関しては、上記の $R_{0.01}$ などを用いて降雨減衰の長期的な統計を推定する方法や伝搬路に沿った降雨減衰がゼロでない確率を予測する方法などがあるが、予測に必要なデータが所望の周波数と異なる場合、この異なる周波数から所望の周波数の降雨減衰を予測する方法（周波数スケーリング）を用いることが好ましいケースが多い。

3) 降雨減衰対策のキー技術

A) 概況

- 全体で見ても周波数が高くなるにつれて大気による吸収が大きくなる傾向にある
- 衛星通信システムにおいては、一定の通信品質を担保するためにシステム設計（アンテナや送信電力の大きさを適切に設計）を行う必要がある。
- 従来の低周波数の電波を活用した衛星通信システムでは、伝搬路のある場所での降雨の静的な統計特性を利用してあらかじめ降雨減衰の発生を予測し、その予測をもとにあらかじめ送信電力を増やしておく**静的な手法（降雨減衰マージンの付加）**が用いられていた。
- ところが、ミリ波帯などの高周波数の電波になると上記のような静的な手法ではシステムコストが増大してしまうなど実用的に難がある。
- そのため、降雨強度の動的な性質を把握して、実際に降雨が発生している場所のみに対策を行

うといった**動的降雨減衰対策技術**の重要性が増している。

- また、相関の少ない複数の伝送手段を準備しておき、その中から条件の良い（降雨のない等）伝送手段を選択する**ダイバーシティ技術**も不可欠になっている。
- 個々の降雨減衰技術を単独で利用するのではなく、コストを勘案して各技術を組み合わせて対策を行うのが一般的となっている。
- 上記のような降雨減衰対策技術を整理すると下図（再掲）のようになるが、本章のこの後では動的降雨減衰対策技術およびダイバーシティ技術に関して詳細を記述する。

図表 139 主要な降雨減衰対策技術とその特徴

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

B) ATPC（Automated Transmit Power Control：自動送信電力制御）

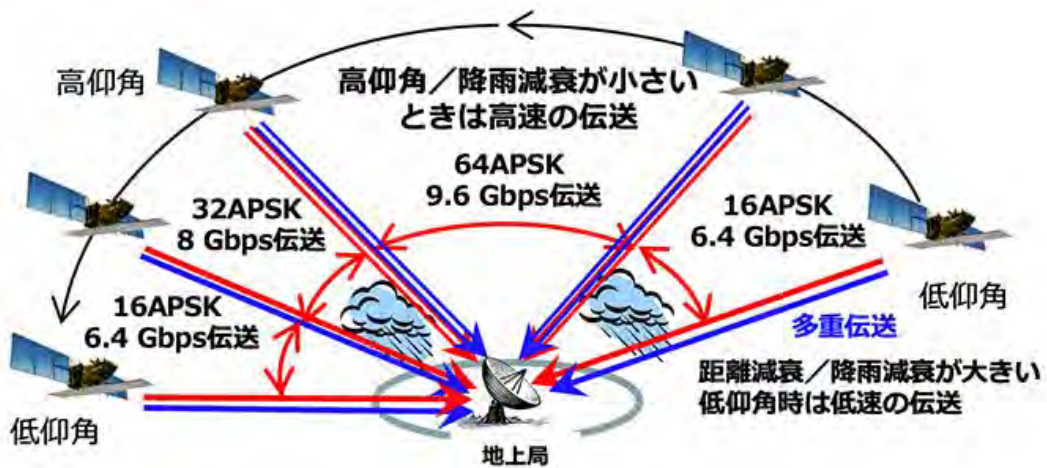
- 全体で見ても周波数が高くなるにつれて大気による吸収が大きくなる傾向にある
- ATPCは、天候条件や受信機で変化する信号レベルをモニターし、それに基づいて送信機の出力量を調整するデジタルマイクロ波無線機能であり、降雨減衰を補償するために用いられる。
- ATPCを搭載した通信システムでは、送信機はほとんどの時間において最大電力以下で動作し、降雨による信号損失などのフェージング状態が発生すると、最大値に達するまで必要に応じて送信電力が増加する。
- ATPCは本質的には不要な送信電力を減少させる技術であるため、干渉軽減の観点から有用な技術である。
- ATPCを搭載した通信システムは、送信機の消費電力の低減、アンプ部品の長寿命化、他のマイクロ波システムへの干渉の低減など、固定送信電力システムと比べて多くのメリットを有する。

- ATPC は、AMC と一緒に使用して通信リンクの稼働時間や安定性、可用性を最大化することができる。

C) AMC (Adaptive Modulation and Coding : 適応変調符号化)³¹⁶

- 全体で見ても周波数が高くなるにつれて大気による吸収が大きくなる傾向にある
- 電波伝搬路の環境条件（降雨等）に応じて適応的に伝送方式を切り替えることでリンクマージン³¹⁷（降雨マージン）を確保し、通信のロバスト性を高める技術。
- 具体的には、晴天時にはスループットを最大化して運用し、降雨時には適応変調によりスループットの運用下限値にまで落とすことで両者の差分のマージン（例えば晴天時 SNR が 20 dB、運用下限値が 5 dB であればマージンは 15 dB）を捻出するといった方法をとる。

図表 140 AMC 方式の運用イメージ



出所) JAXA

D) ダイバーシティ法

- ダイバーシティ法は、降雨減衰量の相関の小さい複数の伝送ルートを用意し、その中で降雨減衰の影響が少ないルートを適切に選択するものであり、下表に示すように複数の方式の提案がなされている。

図表 141 ダイバーシティ法の分類

ダイバーシティ法	特徴
サイトダイバーシティ	・ 一定以上離れた 2 地点にそれぞれ地上局を設置し、降雨によって一方の地上局の回線品質が基準値を下回った場合に、他方の地上局に切り替えて回線の品質を確保する方式。

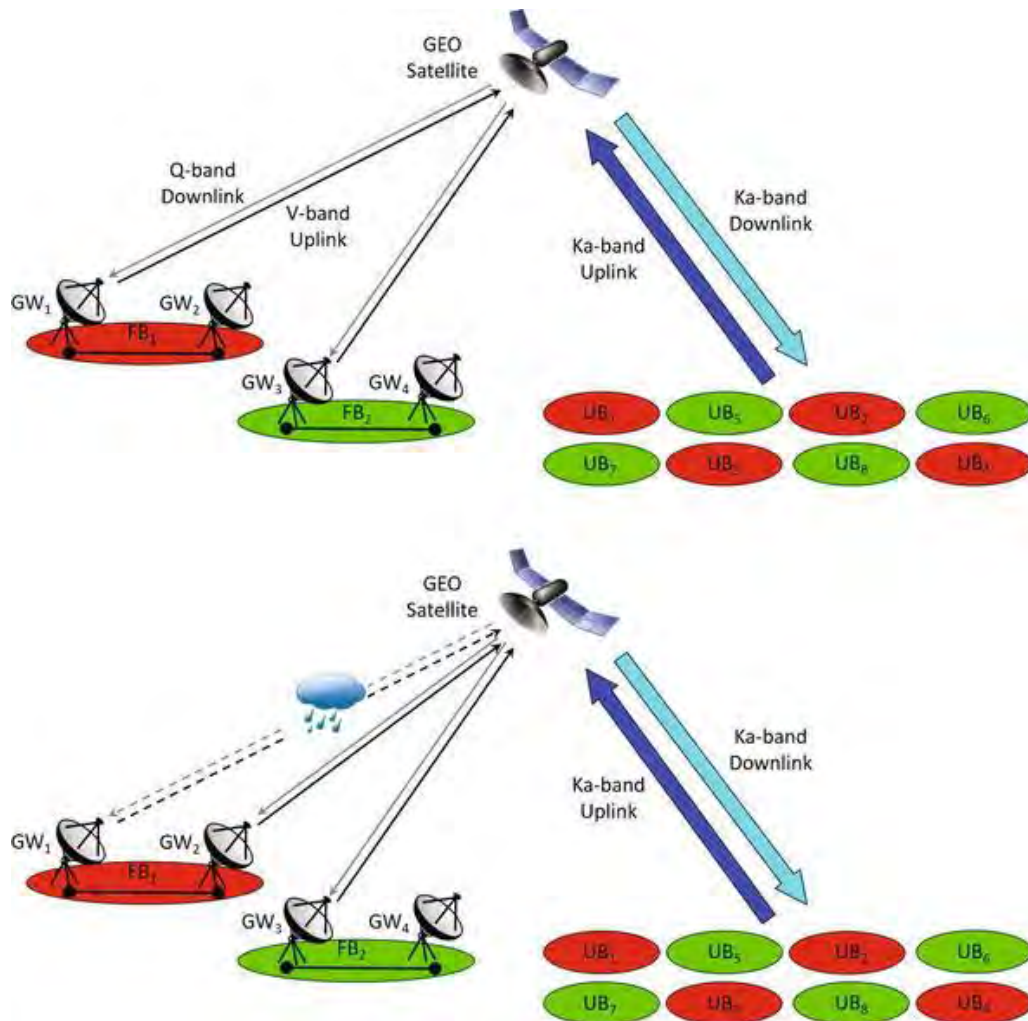
³¹⁶ 資料によっては ACM (Adaptive Code and Modulation : 適応符号化変調) と記載。

³¹⁷ 受信機側で期待される受信最小電力と受信機の感度（受信検出閾値）との差であり、15 dB のリンクマージンは、送信機と受信機の間で 15 dB の減衰を許容することに相当する。

周波数ダイバーシティ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 周波数のわずかに異なる二つ以上の電波に同一の通信情報をのせて伝送する方式 ・ 狭帯域信号の場合は、複数のキャリア周波数を用いて送信し、受信側においてキャリア周波数に対応したバンドパスフィルタを用いて信号を分離・抽出する
タイムダイバーシティ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 時間をずらして複数回コンテンツを送信する方式であり、受信側は降雨減衰の影響の少ないコンテンツを選択して合成する。 ・ リアルタイムの通信・放送が必要でない場合に有用な方式。
衛星軌道ダイバーシティ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 二つ以上の複数の衛星通信回線を確保し、電波伝搬路の環境条件（降雨等）に応じて通信回線を切り替えることで通信品質を確保する方式。

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

図表 142 シングルサイトダイバーシティの運用イメージ

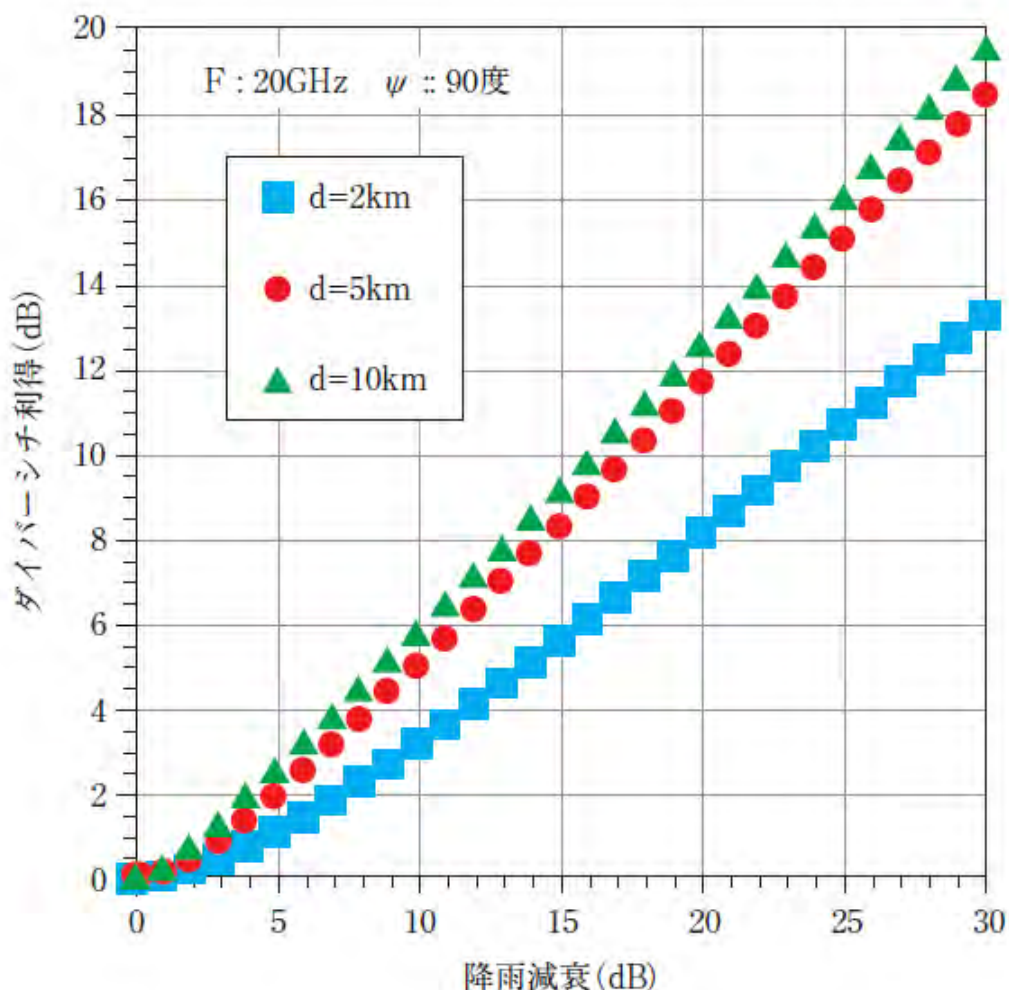


出所) 「Ka-to-W Band EM Wave Propagation: Tropospheric Effects and Countermeasures」, Lorenzo Luini et.al. 2017 (<https://www.intechopen.com/chapters/53573>)

- サイトダイバーシティは、一定程度以上離れた 2 地点間では同時に強い雨の降る確率が小さいことを利用したものであり、地上局間の距離は一般的には 20 km 程度離れば良いとされている（ただし、台風の頻度が多い日本ではより大きな距離が必要とされている）。
- 一方で ITU 勧告では、ダイバーシティを施した場合と施さない場合の実効的な降雨減衰量の差であるダイバーシティ利得の、地上局間距離の影響を推定する手法も示している。
- 地上局間距離が小さい場合にはダイバーシティ利得が大きく増加するものの、一定程度以上距離を離すとその効果が飽和することがわかっている。

図表 143 ダイバーシティ利得の計算例

(周波数 : 20 GHz、 ψ : 90°³¹⁸)



出所) 講座 : 電波伝搬 第 5 回「マイクロ波・ミリ波帯の電波伝搬」、福地 一

- 複数サイトでの降雨予測を正確に実施し、適切なタイミングでダイバーシティ切り替えを行うためのアルゴリズム開発なども行われている。

³¹⁸ ϕ : 衛星方向と主局～副局 (地上局) 間方向とのなす角度。

- 例えば、副局側で晴れているのが明白なのであれば、主局において雨が降る前に事前にサイトダイバーシティ切り替えを行うことでスループット低下を防げる（ただし、切り替えが頻繁になってしまう可能性もある）。

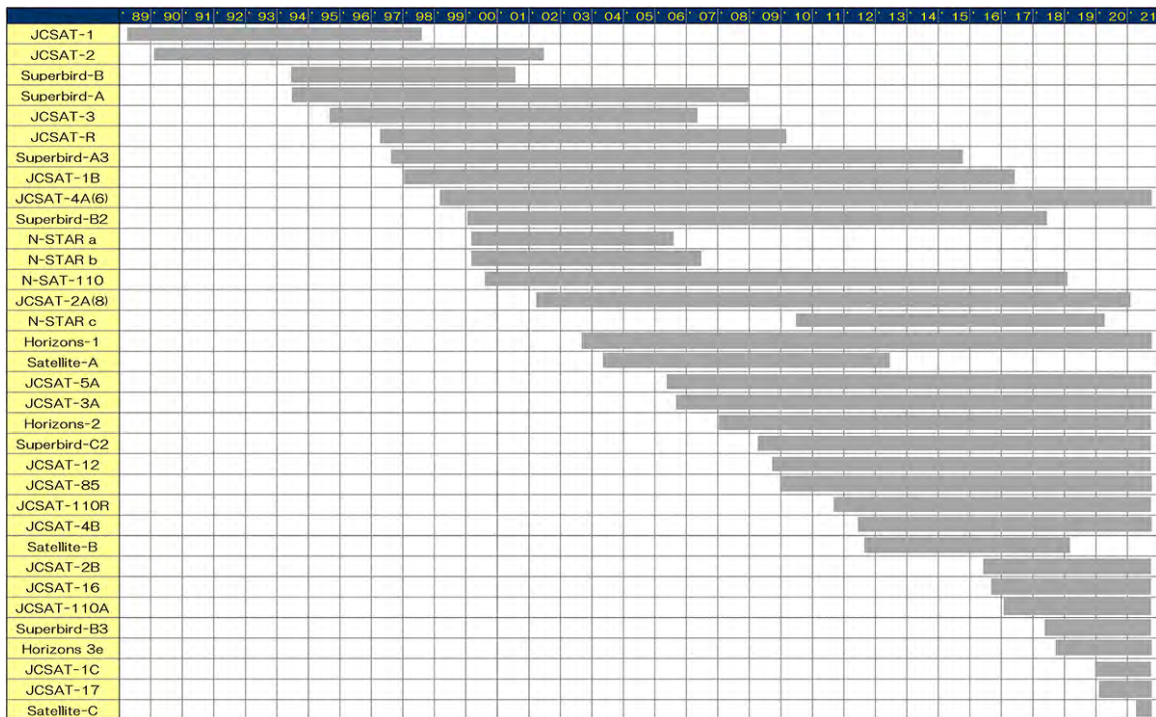
4) 通信システムにおける高周波数帯活用のための企業・公的機関の取り組み

A) スカパーJSAT

i. 概要

- 日本で唯一、かつアジア最大規模の衛星通信事業者。
- 1989年のJCSAT-1から30年以上にわたり、これまで30機以上の衛星運用の実績を持つ（2021年11月現在で累積運用衛星機数は34機）。
- 現在は17機の衛星を保有する（2021年11月現在）。
- 衛星管制サービスも提供しており、超高速インターネット衛星の「きずな」やHTS衛星の「Kacific1」、光データ中継衛星の「JDRS」におけるサービス提供実績を持つ。
- 2023年打上げ予定のJAXAのETS-9（技術試験衛星9号）の定常運用業務も担う予定。

図表 144 スカパーJSATの衛星運用実績（2021年11月現在）



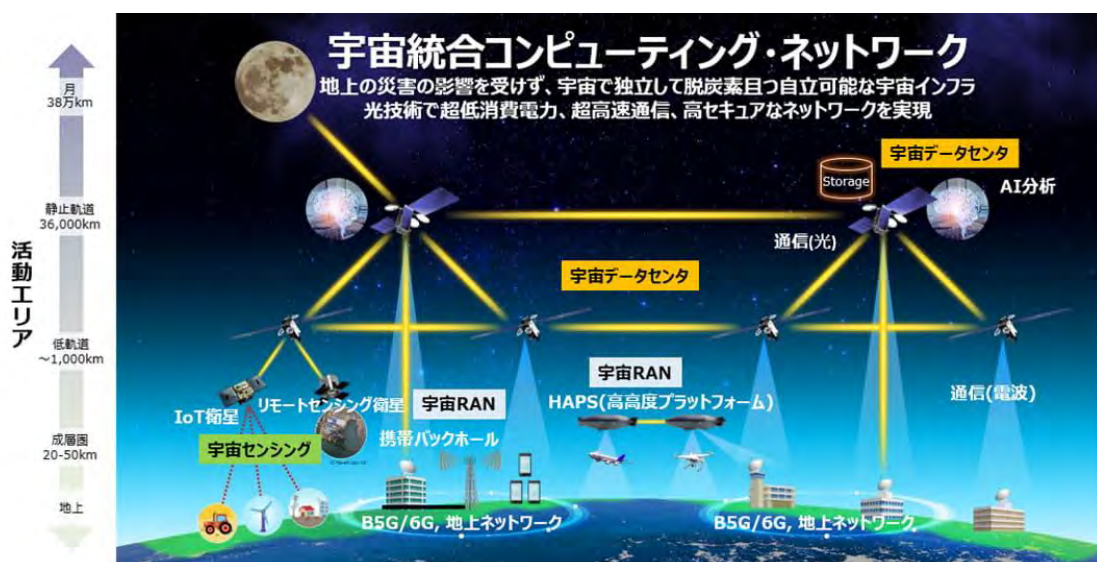
出所) スカパーJSAT

ii. 取り組み内容

- スカパーJSATの宇宙アセット・事業とNTTのネットワーク・コンピューティングインフラを統合して構築する新たな宇宙インフラである「宇宙統合コンピューティング・ネットワーク」構想を2021年に発表。
- 宇宙コンピューティング・ネットワークでは、宇宙空間の静止軌道・低軌道の複数軌道から

HAPS（High Altitude Platform Station：高高度プラットフォーム）、地上までを統合し、光無線通信ネットワークと分散コンピューティングによるデータ処理の高度化によって超カバレッジで超高速通信を実現する宇宙インフラの構築を目指す。

図表 145 宇宙コンピューティング・ネットワーク構想



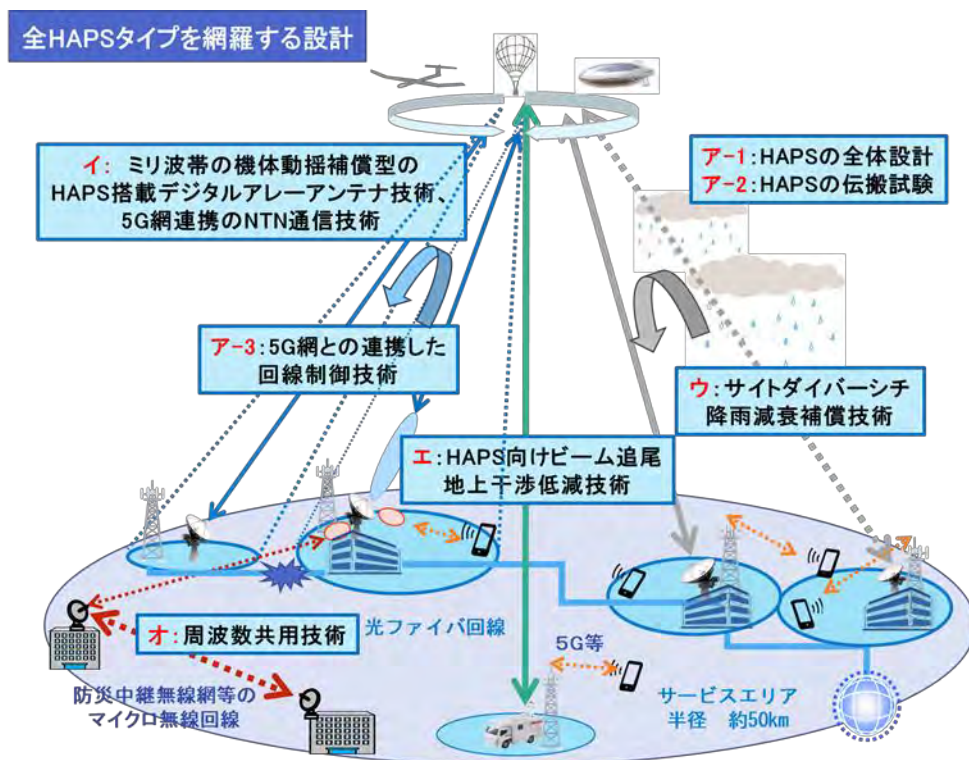
出所) スカパーJSAT

- この宇宙統合コンピューティング・ネットワークの実現に向けて、スカパーJSAT と NTT は合弁会社である Space Compass を 2022 年 7 月に設立（出資比率はスカパーJSAT 50%、NTT 50%）。
- 宇宙統合コンピューティング・ネットワークによるサービス実現に向けて、以下の 3つの事業を推進。
 - ◇ **宇宙データセンタ事業**：観測衛星等により取得した各種データを静止軌道衛星経由での光データ伝送を用いること高速通信を実現する光データリレーサービスの提供を目指す。これにより、観測衛星から地上局に直接データ伝送をする既存サービスでは地上局と通信できるタイミングや通信容量に制約があるのに対し、大容量・準リアルタイムのデータ伝送が可能となる。
 - ◇ **宇宙 RAN 事業**：HAPS を用いた低遅延の通信サービスを 2025 年度に国内で開始することを目指す。HAPS による容易なカバレッジ拡張によって、災害時の高信頼通信や、船舶や航空機等への大容量通信の提供、離島やへき地への通信サービスの提供を見込む。
 - ◇ **宇宙センシング事業**：世界で初となる低軌道衛星 MIMO 技術により、グローバルに設置されている地上の IoT 端末データを収集する、宇宙と地球を統合したセンシング基盤の提供を目指す³¹⁹。

³¹⁹ 当初革新的衛星技術実証 3 号機にて衛星 MIMO 技術の実証を予定していたが、2022 年 10 月のイプシロンロケット 6 号機の打ち上げ失敗により実証ができなくなったため、2024 年度に打ち上げ予定の革新的衛星技術実証 4 号機において衛星 MIMO 技術の軌道上実証を行うこととなった。

- 2022年10月には成層圏下層（上空約14km）から地上の受信機への38GHz帯の電波伝搬実験を実施し、世界で初めて電波伝搬測定に成功。
- 降雨の影響を受けやすいミリ波の伝搬に対して、従来の国内における静止衛星システムを利用した携帯電話のバックホール回線と同等の接続性を確保することを目指し、複数の地上局を切り替えて通信品質を担保するサイトダイバーシティ技術の実証なども実施している。
- 実証において以下のことを確認。
 - ◇ 厚い雲を電波が通過する場合であっても、38GHz帯の電波に対する影響は小さい
 - ◇ 傘が不要な程度の小雨においては、机上計算値と同等の電波減衰を確認

図表 146 研究開発を進める HAPS システムの概要



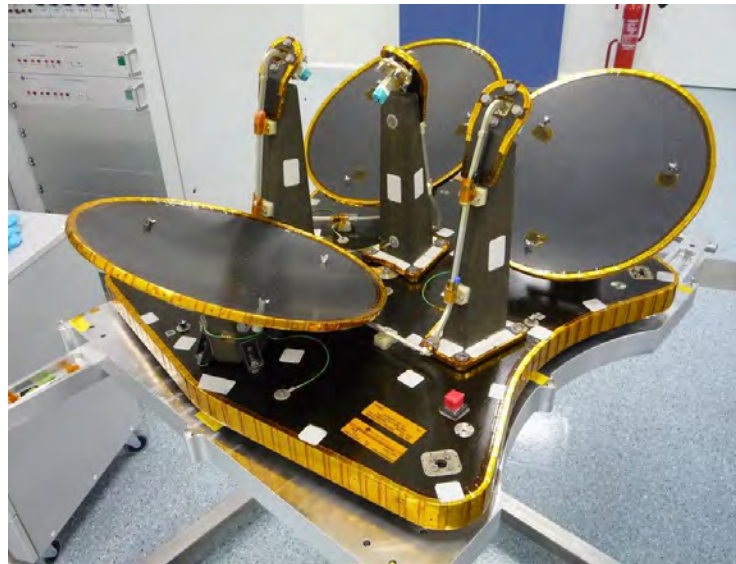
出所) スカパーJSAT

B) Aldo Paraboni mission

i. 概要

- Aldo Paraboni Q/V Communications and Propagation は、Alphasat が搭載する 4 つの技術実証ペイロードのうちの一つで、将来の通信アプリケーションのため新しい周波数を探索するもの。
- Alphasat は Inmarsat が開発した静止通信衛星であり、2013 年 7 月にフランス領ギニアから打ち上げに成功している。
- 本プロジェクトと搭載ペイロードは ESA、Inmarsat 他欧州の約 12 の機関および産業界のパートナーが参加する官民パートナーシップによる成果。
- 搭載ペイロードはイタリアの ASI（イタリア宇宙機関）の支援のもと、Thales Alenia Space 社と Space Engineering 社（現 Airbus Italia S.p.A.³²⁰）が開発した。

図表 147 Q/V バンド通信ペイロード



出所) ESA

ii. 取り組み内容

- Aldo Paraboni ペイロードの目的は、衛星通信実験および伝搬実験を実施すること。
- Ka バンドおよび Q バンドにおける大気伝搬特性をより明確にすることを目的にしたもので、19.701 GHz と 39.402 GHz で動作する二つのコヒーレント連続波ビーコンを使用している。
- 打上げ当初、イタリアの Tito Scalo（南イタリア）と Spino d'Adda（北イタリア）の 2 つの ASI 主要地上局、およびローマ（中央イタリア）の La Sapienza-FUB 局の 3 つの地上局が設置され、上記のビーコン信号を受信。

320

<https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2019-09-space-engineering-becomes-airbus-italia-spa>

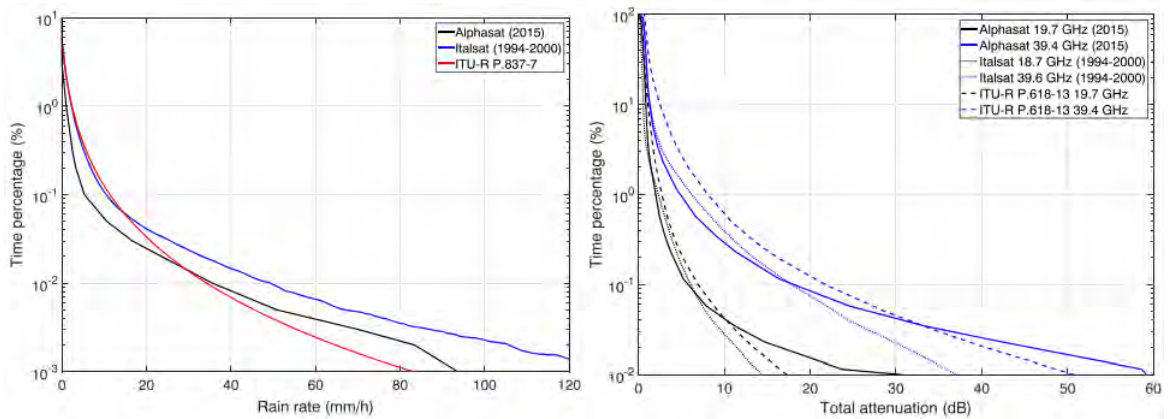
図表 148 気候的特徴の異なる Tito Scalco、Spino d'Adda および Roma



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

- 受信データをもとに、過去の実験 (Italsat による 1994-2000 の Ka/Q/V 帯の研究) や ITU の推定値と比較し、良い一致を示すことを確認。

図表 149 降雨強度と累積時間率分布

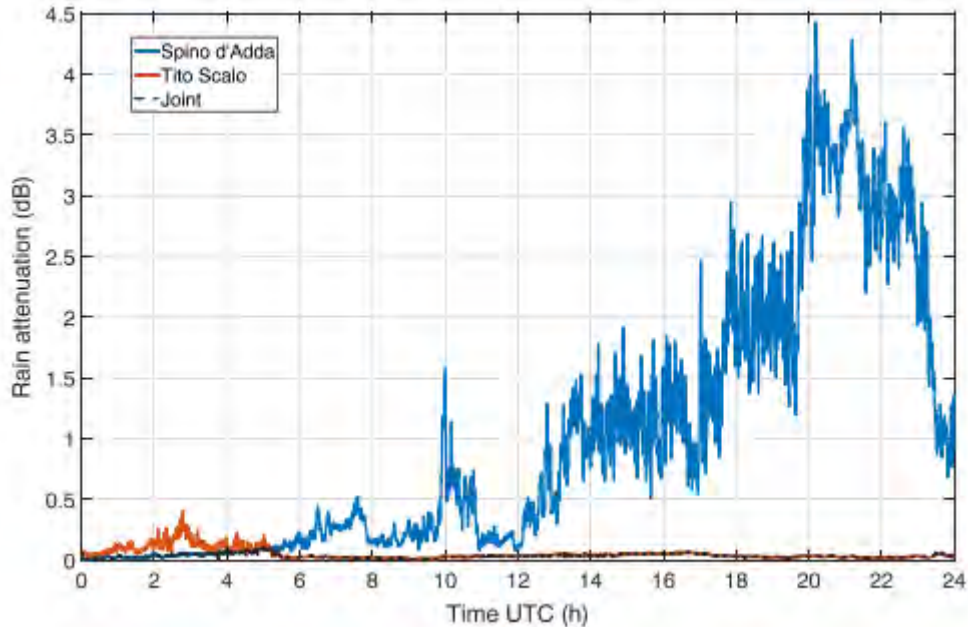


出所) C. Riva et al. 2018, “ropagation experiment:
Measurement campaign at the Italian ground stations”

- Tito Scalco (南イタリア) と Spino d'Adda (北イタリア) は 700 km 離れており相関が小さい (気候特徴も異なる) ことから、サイトダイバーシティによって降雨減衰を抑えられることがわかった。

図表 150 Tito Scalco と Spino d'Adda における降雨減衰例

(周波数 : 39.402 GHz、2015 年 1 月 15 日)



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

- 上記地点以外も含め、その後も Aldo Paraboni の Q/V ペイロードを利用した降雨減衰評価が様々な機関・研究者によって行われているが、その多くが降雨減衰の評価 (ITU-R 推定値との比較等) や降雨減衰モデルの提案、サイトダイバーシティ技術の評価等の研究にとどまる。Aldo Paraboni ペイロードを活用した降雨減衰関連の文献の一部を以下の表に示す。

図表 151 Aldo Paraboni Q/V ペイロード関連の文献

年	文献名	目的
2018	The Alphasat Aldo Paraboni propagation experiment: Measurement campaign at the Italian ground stations ³²¹	<ul style="list-style-type: none"> • Ka/Q バンドの伝搬特性の理解 • イタリア 3 地点における観測データの処理&分析、および降雨減衰特性の評価
2019	Assessment of spatial and temporal properties of Ka/Q band earth - space radio channel across Europe using Alphasat Aldo	<ul style="list-style-type: none"> • 将来のモデリング、およびフェージング軽減技術のためのデータ収集 • Ka/Q バンドの無線チャンネルの欧州における空間的および時間的相関を実験的に特徴付ける

³²¹ <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sat.1249>

	Paraboni payload ³²²	
2019	Prediction of Channel Excess Attenuation for Satellite Communication Systems at Q-Band Using Artificial Neural Network ³²³	・ 過去データや気象データを用いた人工ニューラルネットワークによる Q バンド衛星チャンネルのフェージング推定
2020	Enhancement of the Synthetic Storm Technique for the Prediction of Rain Attenuation Time Series at EHF ³²⁴	・ 1 年間の伝搬データに対して、雨の減衰予測モデル (E-SST) と周波数スケールリングによる予測精度の評価を実施
2023	Site Diversity Experiment in Q-Band Satellite Communications in Slovenia and Hungary ³²⁵	・ リュブリャナ (スロベニア) とブタペスト (ハンガリー) における大規模サイトダイバーシティシステムの性能評価

C) ESA ARTES

i. 概要

- ・ ARTES (Advanced Research in Telecommunications Systems) プログラムは、ESA TIA (Telecommunications and Integrated Applications) が実施する衛星通信に関する大規模産業支援プログラムであり、通信衛星関連製品・サービスの開発を支援するもの。
- ・ また、研究開発支援だけでなく、欧州およびカナダの産業発展を目的とした、産業界におけるパートナーシップの枠組みを提供する。
- ・ ARTES の 3 つの部門で下記の内容を実施。
 - ◇ 次世代衛星通信製品・技術の初飛行までの開発をサポートする。
 - ◇ ESA が衛星通信事業者やメーカーと PPP (Public Private Partnership : 官民連携) を結び、新技術への投資に伴うリスクを共有するたえの共同出資を支援する。
 - ◇ 衛星通信技術を利用して既存のソリューションの改善や、地上のソリューションでは提供できない領域を補完するようなアプリケーション/サービスを開発する。
- ・ ARTES Competitiveness & Growth は、衛星通信市場向けの製品開発や検証、デモンストレーションに特化した成長プログラムを準備し、4つの開発フェーズでサポートを実施している。

図表 152 ARTES Competitiveness & Growth における開発フェーズ①

No	フェーズ	概要
1	Definition Phase	製品の初期定義とトップレベルの設計、および製品のターゲット市場に最適なソリューションの特定に必要なシステムエンジニアリングをサポートする。
2	Technology Phase	主要な技術的リスクを軽減するために産業界をサポートする。このフェーズでは宇宙機器の認定などはしない。
3	Product Phase	製品の開発と検証をサポートし、実際の運用環境での製品化の準備を行う。

³²² <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sat.1313>

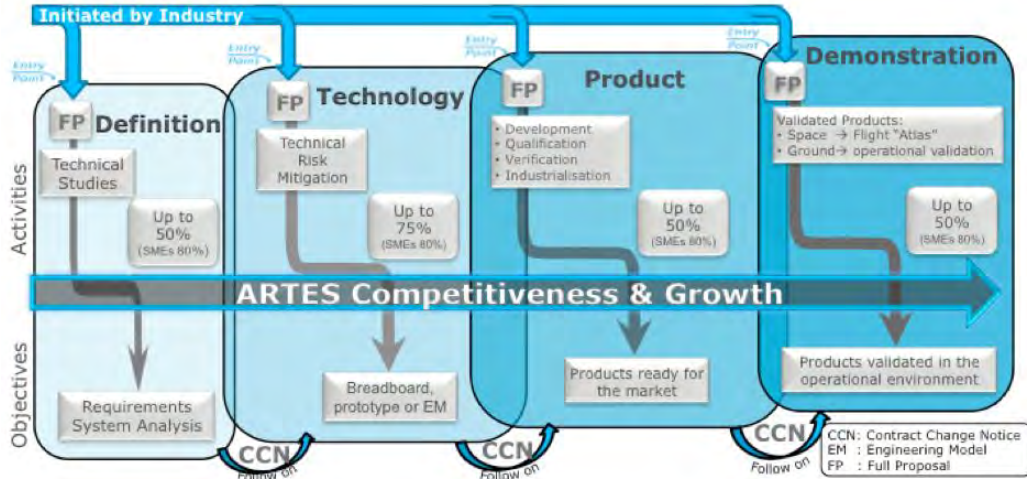
³²³ <https://ieeexplore.ieee.org/document/8786170>

³²⁴ <https://ieeexplore.ieee.org/document/9046250>

³²⁵ <https://ieeexplore.ieee.org/document/10109773>

4	Demonstration Phase	宇宙製品としての市場参入、および運用環境における地上製品のサポートを実施する。
---	---------------------	---

図表 153 ARTES Competitiveness & Growth における開発フェーズ②



出所) ESA





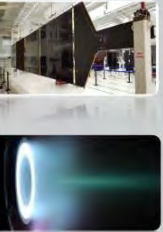

図表 154 開発フェーズごとの資金提供レベル (上図: 産業界、下図: 研究機関等)

C&G Development Phase	Main goal(s)	Funding level up to	
		Non-SME	SME
Definition Phase	Establish user requirements / spec. and define baseline	50%	80%
Technology Phase	De-risking; tested BB or EM; early in-orbit test	75%	80%
Product Phase	Qualification / industrialisation; (E)QM	50%	80%
Demonstration Phase	Validate the product in its operational environment; PFM	50%	80%

ARTES C&G Development Phase	Maximum Funding Level for Universities or Research Institutes		
	With commercial interest in the product (Non-SME status)	With commercial interest in the product (SME status)	No commercial interest in the product (up to 30% of the total contract cost)
Definition Phase	50%	80%	50%
Technology Phase	75%	80%	100%
Product Phase	50%	80%	50%
Demonstration Phase	50%	80%	50%

出所) ESA

図表 155 ARTES で柱となるコア技術

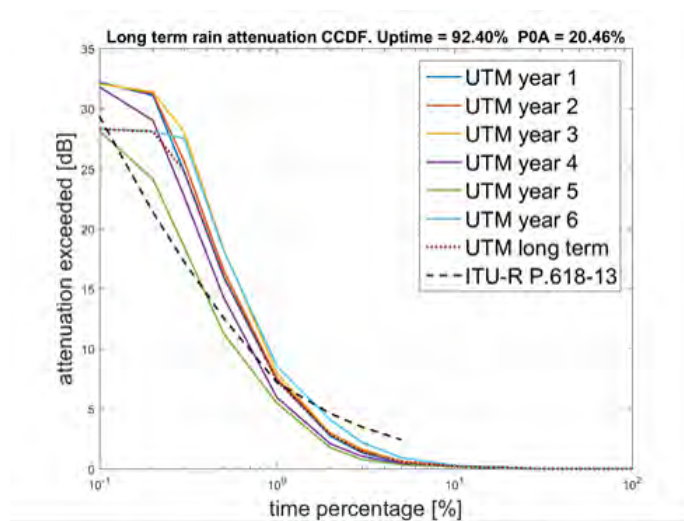
mm Wavelength Communication	Digital Processing Cloud & AI	Optical Communication	Smart Antennas	Disruptive Platform Sub-systems	Smart Design & Manufacturing
					
mm-wave communication techniques, devices, equipment and systems from mW to kW power range	Scalable and efficient digital signal processing, virtualisation and orchestration hardware and techniques	Optical devices, systems, techniques and equipment	Steerable multi-beam antennas, Large lightweight, stowable reflectors	Electrical, mechanical and advanced thermal, propulsion satellite platform subsystems	Augmented Reality, digital twin, AI supported development, advanced manufacturing

出所) ESA

ii. 取り組み内容

- 熱帯地域における Ka バンド衛星通信システムの統計データの測定と評価を行うプロジェクト「KaTropical」を実施
- 熱帯地域をカバーする Ka バンド SatCom システムの開発のための無線チャンネルモデリングと地上システム要件の特性評価を改善することを目的とする。
- 降雨や雲による減衰の統計的分布に関する現在の予測モデルの精度評価やフェージングの持続時間、サイトダイバーシティおよび時間ダイバーシティに関する統計モデルを改善が重要な要素として含まれる。
- マレーシア工科大学のサイトにおける年間および長期の降雨減衰の累積時間率分布と ITU-R との比較では傾向の一致は示すものの、モデルについて議論の余地があることがわかった。

図表 156 マレーシア工科大学における年間および長期の降雨減衰の累積時間率分布



出所) ESA

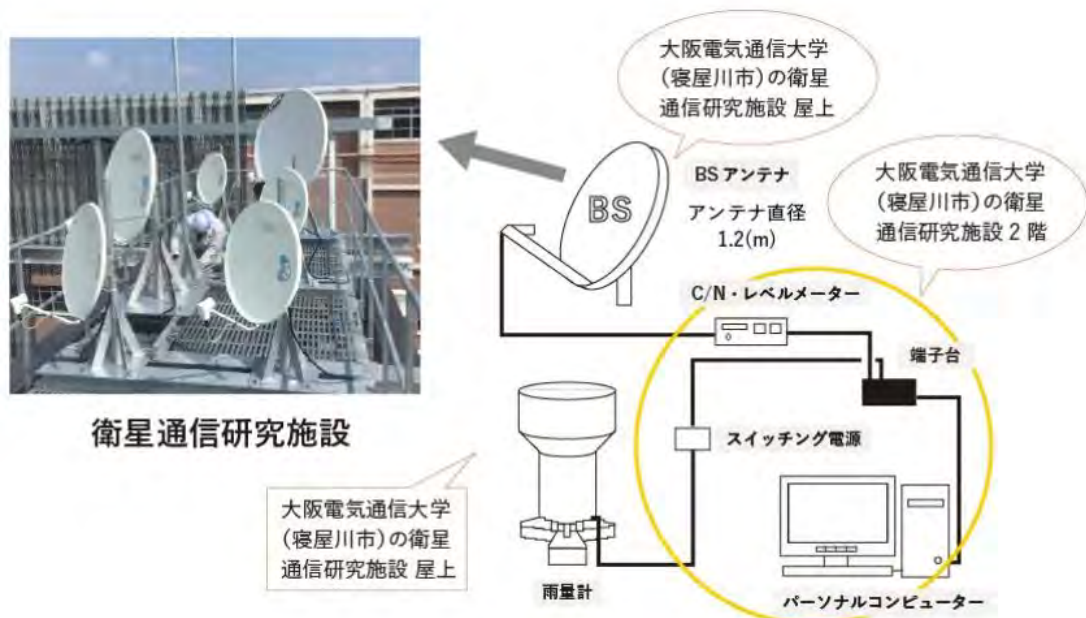
- マレーシア工科大学、およびトゥン・フセイン・オン・マレーシア大学の 2 地点間（2 地点間の距離は 70 km）でのサイトダイバーシティ効果測定の実験も実施。

D) 大阪電気通信大学

i. 概要

- 大阪電気通信大学の前川研究室では、高周波数帯の衛星電波が気象にどのような影響を受けるかについて 30 年以上にわたって研究を実施。
- 昭和 60 年に発足した衛星通信研究施設の屋上に BS・CS・JCSAT のアンテナと雨量計を設置して衛星から常時送られてくるビーコン波を記録し、レベルメーターで信号品質を測定している。

図表 157 大阪電気通信大学の衛星通信研究施設における降雨減衰測定システム



出所) 大阪電気通信大学

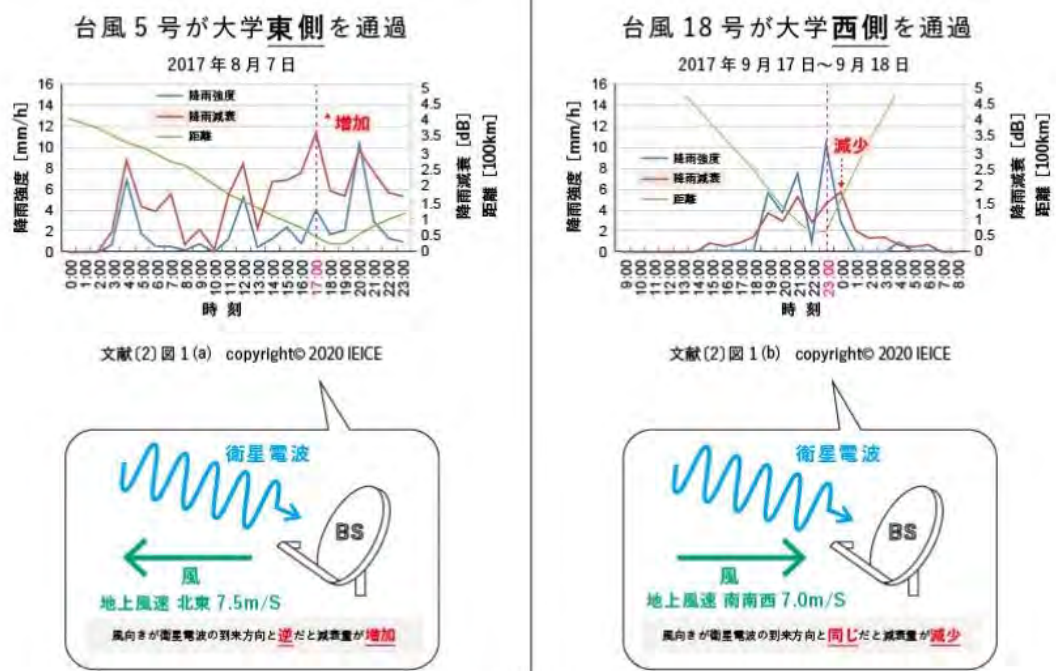
ii. 取り組み内容

- 上記の衛星通信の長期データをアメダスからの気象情報を 32 年間にわたり突き合わせて降雨減衰の検証を実施しており、その結果 CS と BS の降雨減衰の年間時間率は ITU-R が推奨する予測値とほぼ一致することを示した。
 - 大阪電気通信大学寝屋川局近隣や、北海道から九州までの 6 大学間の共同観測などによりサイトダイバーシティの効果検証も実施しており、いずれの検証においても ITU-R 勧告に適合することを示した。
 - 台風の風向きと降雨減衰の影響関係を解明。
- ☆ 台風が大学の東側を通過する時の方が、西側を通過する時よりも降雨減衰が大きくなるこ

とを発見。

- ◇ 32年にわたる60以上の過去の事例を検証した結果、台風の風向きが衛星電波の到来方向と逆向きの時に減衰量が大きくなるが判明。
- ◇ 世界で初めて、電波の減衰が雨量や雨雲の高さの他に地上風速の影響も受けることを示した。

図表 158 降雨強度と降雨減衰の関係



出所) 大阪電気通信大学

5) 日本の強み・弱み

- 高周波数帯における降雨減衰については、欧州や日本において数多くの研究が継続的に行われている。
- 欧州では、技術実証としての Q/V ペイロードを搭載した Inmarsat の衛星 Alphasat が 2013 年に打ち上げられる。
 - ◇ このペイロードを活用した降雨減衰関連の研究が現在も進められている。
 - ◇ 研究内容に関しては、統計データの取得や降雨減衰モデルの評価・検証、新たな降雨減衰推定法の提案といった内容が中心になっている。
- 日本でも学術研究として降雨減衰の評価・検証や、降雨減衰対策法の一つであるサイトダイバーシティ技術の検証などが行われている。
- また、近年は HAPS の開発が進む中で、スカパーJSAT やドコモなどの企業が中心となってミリ波帯の伝搬実験が行われている。
 - ◇ 高解像度の降雨レーダーを用いて電波伝搬の途中をモニターし、それに基づいた降雨減衰推定法の開発も行われている。
 - ◇ 世界でも今後降雨レーダーに準じた伝搬推定は今後ニーズが高まると考えられているが、日本は先進的な降雨レーダーを持っていることから、降雨レーダーを活用した降雨減衰推定法を確立することができれば、他国に転用できるという点で強みになると考えられる。

2.6 10～20年後の将来を念頭に、日本の地理的及び環境的なリスクの低減に資する技術

1) 本節における基本的な考え方

- リスクの低減を図る公共衛星（「耐リスク衛星」と称する）に適用される技術が、民間通信衛星で指向される性能・機能を実現するための技術としての適用性を調査する。

2) リスク低減が要求される通信衛星

A) 日本の地理的及び環境的なリスクの低減に参考となる衛星

- Seradata から抽出した安全保障分野で利用される衛星数を下図表に示す。

図表 159 安全保障分野で利用される衛星数

ミッション	個数 / ミッション
Communications- Data Relay	23
Communications- Experimental	18
Communications- General	95
Communications- Store/Forward/IoT	19
Communications- Tracking, Maritime/Aviation	1
Signals Intelligence- Communications	1
Signals Intelligence- Electronic	93
総計	250

- 上記を衛星規模で分類したものを下図表に示す。

図表 160 安全保障分野の衛星の規模分類

重量	個数 / 重量
1 - 10kg - Nanosatellite	18
10.01 - 40kg - Microsatellite (Small)	3
40.01 - 100kg - Microsatellite (Large)	1
100.01 - 500kg - Minisatellite	65
500.01 - 1000kg - Small Satellite	23
1000.01 - 2500kg - Medium Satellite	23
2500.01 - 3500kg - Large Satellite	31
3500.01 - 5000kg - Very Large Satellite	29
> 5000kg - Extra Large Satellite	57
総計	250

- 安全保障分野の通信衛星は、5,000kg 以上の大型衛星や 100-500kg の小型衛星が主流となっている。
- 安全保障分野の通信衛星は、兵士、基地や司令部に信頼性の高い安全な接続を提供する必要がある。そのためには、大量のデータをリアルタイムで処理できる高度なペイロードを搭載した衛星が必要である。このため大型の通信衛星が投入されることが考えられる一方、開発・打ち上げコストが膨大になるため、小型衛星も注目されている。

B) 日本の地理的及び環境的なリスクの低減に資する利用技術

- 該当する技術としては以下のような項目が考えられる。
 - 非透過型ペイロード
 - 非透過型衛星は、衛星から送信されるデータを高度な暗号化技術で暗号化して運用することができる。司令部とフィールドユニット間の通信、艦船や航空機の通信、監視や諜報のための通信など、戦略的な通信に用いられることが多い。一方、非透過型ペイロードに関する情報は機密扱いとされ、一般には公開されないことが多い。
 - 量子鍵配送 (QKD)
 - QKD は、量子暗号技術の一つで、光子を用いて暗号鍵を作成し、当事者間で安全に分散させる技術である。この技術を利用して地上局と衛星間の通信を保護することで、権限のない第三者による傍受や攻撃を防止することができる。なお、QKD 技術はまだ比較的新しい技術であり、耐リスク通信に使用するための開発が行われている。
 - 欧州の SAGA (Security And cryptoGraphic mission) では、QKD 技術を利用した安全な衛星通信が行われる予定である。このプロジェクトは、欧州の部隊が確実に通信できる安全な衛星通信システムを開発することを目的としている³²⁶。
 - アメリカの Quasar (Quantum-Assisted Sensing and Readout) プロジェクトも、衛星通信に QKD 技術を使用する予定である。このプロジェクトは開発中で、世界中の活動に安全な接続を提供することを目的としている³²⁷。
 - 帯域管理システム (Band Management Systems)
 - 耐リスク通信衛星では、利用可能な無線周波数の使用を最適化するために、バンドマネジメントシステムを使用する例がある。このシステムにより、衛星は異なる周波数を切り替えて干渉を回避し、現場部隊との信頼できる接続を確保することができる。
以下のような衛星が該当する。

³²⁶https://www.esa.int/Applications/Telecommunications_Integrated_Applications/European_quantum_communications_network_takes_shape

³²⁷<https://www.darpa.mil/news-events/2021-08-04>

- ◇ 米国/AEHF (Advanced Extremely High Frequency) : 帯域変調技術により、非常に高いデータレートで信号を伝送する米国の AEHF (Advanced Extremely High Frequency) 通信衛星
- ◇ フランス/SyracuseKa : バンドと Ku バンドを使用する通信衛星
- ◇ イギリス/Skynet : L、X、UHF バンドを組み合わせて使用する通信衛星。
- ◇ ロシア/Meridian : L バンドを使用するロシアの通信衛星。
- 大規模災害時のトラヒック状況に応じた帯域マネジメント
 - ◇ 総務省主管の「ニーズに合わせて通信容量や利用地域を柔軟に変更可能な ハイスループット衛星通信システム技術の研究開発」では、トラヒックの少ないビームとトラヒックの多いビームでの割当周波数の最適化を目指し、限られた衛星リソースで HTS の周波数利用効率を向上させる技術の開発が行われている³²⁸³²⁹。
 - ◇ 自然災害により、通信施設の損傷や電力供給の不足は通信障害を引き起こす。特に、セルラー通信システムのような階層型ネットワークでは、コアノードが破損したり混雑したりした場合、広範囲で著しい通信障害が発生する。高スループット衛星 (HTS) は地上インフラの可用性に関係なく、広域の運用可能な通信を提供することができ、代替的な通信能力を提供する有力な手段である、
 - ◇ HTS を利用する場合でも、あらかじめ決められたビーム帯域と接続でデータを中継するため、災害地域で通信需要が爆発的に増加した場合には非効率である。我が国では、大規模災害の発生時等における HTS の周波数割当手法の開発が行われている³³⁰。

iv. マルチ周波数時分割多元接続 (MF-TDMA)

- 耐リスク衛星は、マルチビームアンテナを使用することで、干渉や妨害があっても安全で弾力的な伝送を行う例がある。これらのアンテナは、干渉や妨害信号を検出・監視することができ、衛星信号の伝送を強化するために使用される。

C) 日本の地理的及び環境的なリスクの低減に資する衛星技術

- 通信衛星 : XVI³³¹
- Link 16 は Tactical Digital Information Link J として知られ、米軍と NATO 同盟国が重要な情報を共有するために広く使用している、暗号化されたデータリンクである。Link 16 の端末は、航空機、陸上車両、船舶に配備され、標準的なメッセージフォーマットでデータや画像の交換を容易にする。

³²⁸ https://www.soumu.go.jp/main_content/000398902.pdf

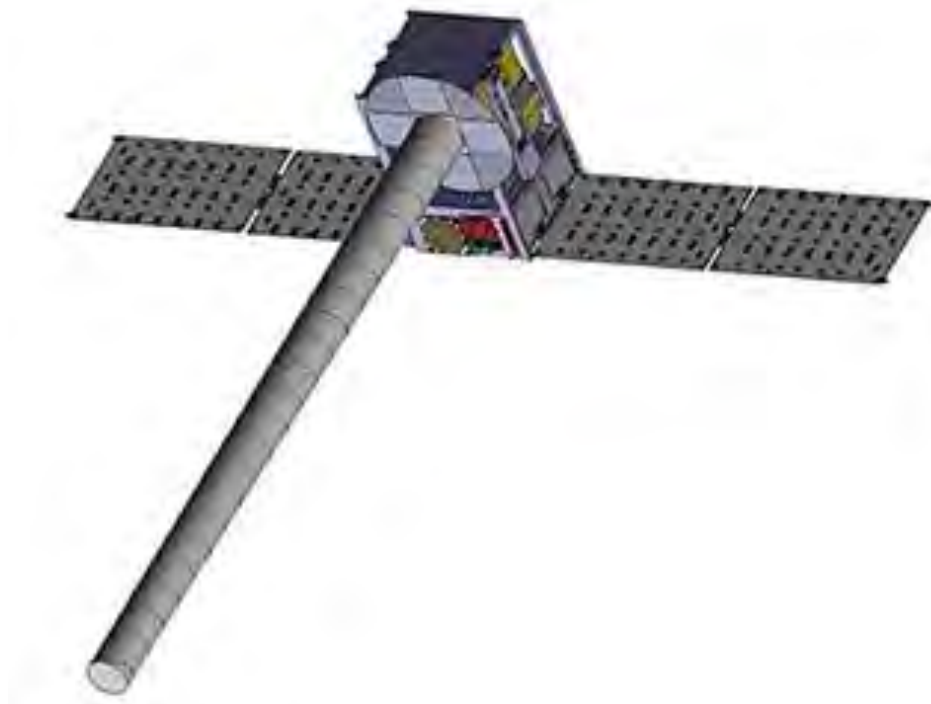
³²⁹ https://www.tele.soumu.go.jp/resource/i/fees/purpose/pdf/R1_RD03.pdf

³³⁰ <https://ieeexplore.ieee.org/document/7887657>

³³¹ <https://spacenews.com/viasat-taps-blue-canyon-technologies-to-build-link-16-satellite/>
<https://spacenews.com/air-force-to-launch-link-16-tactical-communications-cubesat/>
<https://spacenews.com/cesiumastro-wins-sda-contract-for-link-16-antennas/>
<https://spacenews.com/viasat-sells-tactical-data-communications-business-to-l3harris-for-1-96-billion/>
https://space.skyrocket.de/doc_sdat/xvi.htm
<https://missiledefenseadvocacy.org/defense-systems/link-16/#:~:text=Link%20is%20a%20Tactical%20Data%20Link%20%28TDL%29,and%20coalition%20forces%20operating%20within%20a%20single%20battlespace.>

- ViaSat 社は、2019 年に受注した 1,000 万ドルの契約に基づいて、AFRL (Air Force Research Laboratory) 向けに衛星を製造しており、Blue Canyon Technologies 社製の 12U Cubesat バス、同社製の Link 16 ペイロード、Redwire 社製の L バンドアンテナを使用した。
- L3Harris Technologies 社は 2022 年 10 月、ViaSat 社の Link 16 事業を 19 億 6,000 万ドルで買収する計画を発表した。
- CesiumAstro 社は、500 万ドルの宇宙開発庁 (SDA) の契約により、Link 16 データネットワークと互換性のあるアクティブ電子走査アレイアンテナ (L バンド) を開発。ソフトウェア定義された CesiumAstro 社のアンテナは、状況の変化に合わせて迅速に再プログラムすることができ、分散したユーザーと衛星を同時に接続することができる。
- Link16 のネットワークは、3 つの通信モードで構成されている。モード 1 は周波数ホッピングにより複数のネットワークがと同時に送受信できる。モード 2 と 4 は周波数ホッピングを行わずに 1 つのネットワーク内でメッセージ交換が可能

図表 161 衛星イメージ



出所) ViaSat (https://space.skyrocket.de/doc_sdat/xvi.htm)

図表 162 衛星の概要

項目	概要
事業者	Space Development Agency (SDA) / Air Force Research Laboratory (AFRL)
衛星製造事業者	ViaSat (ペイロード)、Blue Canyon Technologies (バス)、Redwire (アンテナ : Roccor を買収) L3Harris Technologies (オペレーター)、CesiumAstro (アンテナ) (2022)
衛星名	XVI (Link-16 戦術データネットワーク)
プラットフォーム	Blue Canyon Technologies : CubeSat (12U)
ロケット	Falcon-9 v1.2 (Block 5)
打上げ日時	2023年6月12日 ³³²
重量	23 kg
設計寿命	0.5年
軌道	LEO/太陽同期軌道
能力・スペック	<ul style="list-style-type: none"> - Solar cells batteries - 周波数ホッピングスペクトラム拡散(FHSS)

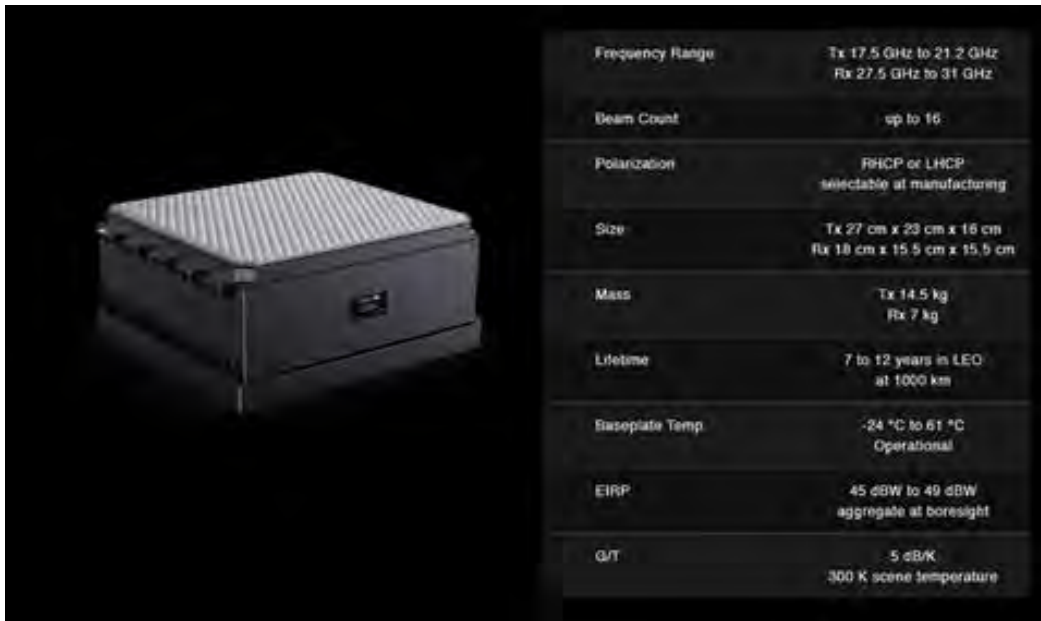
i. 通信ペイロード : Vireo³³³

- CesiumAstro 社が開発した Vireo アクティブ電子走査アレイ (AESAs : Active Electronically Scanned Array)、RF 通信ペイロード (Ka バンド) は、独立したビームにより容量を最大化する動的スループット管理により、衛星からのマルチユーザー接続を可能にする。宇宙開発庁 (SDA) のトラッキング層は、トランスポート層のメッシュ通信ネットワークと宇宙空間の光リンクで接続される。
- CesiumAstro 社は、SDA の Tracking Layer Tranche 1 早期警戒コンステレーション用に Raytheon Technologies 社が製作した 7機のミサイル探知センサー衛星に搭載される電子フェーズドアレイ通信ペイロードを提供する。
- ミサイル追跡衛星が収集したデータは、光リンクを通じて、SDA が構築中の通信衛星のコンステレーションである Transport Layer に送信される。これにより、ミサイルの脅威が検知された場合、その位置と軌道のデータを安全に送信し、司令部にダウンリンクすることができるようになる。

³³² <https://spacenews.com/spacex-launches-eighth-dedicated-smallsat-rideshare-mission/>

³³³ <https://spacenews.com/cesiumastro-to-supply-communications-payloads-for-space-development-agency-satellites/>
<https://www.cesiumastro.com/systems/vireo-new>
https://space.skyrocket.de/doc_sdat/tracking-layer-tranche-0-wfov-spx.htm
<https://spacenews.com/space-development-agency-to-acquire-28-missile-tracking-satellites-to-launch-in-late-2024/>

図表 163 ペイロードのイメージ



出所) <https://www.cesiumastro.com/systems/vireo-new>

図表 164 ペイロード概要

項目	概要
事業者	Space Development Agency (SDA)
ペイロード製造事業者	Cesium Astro
ペイロード	Vireo
プラットフォーム	Tracking Layer Tranche 1
ロケット	不明
打上げ日時	2024年(予定)
重量	Tx 14.5 kg Rx 7 kg
能力・スペック	<ul style="list-style-type: none"> - Tx アレイ: 17.5 GHz to 21.2 GHz / 27 cm x 23 cm x 16 cm - Rx アレイ : 27.5 GHz to 31 GHz / 18 cm x 15.5 cm x 15.5 cm - 独立した 16 の可動ビーム - EIRP : 45 dBW~49 dBW@ボアサイト - 周波数帯 : Ka バンド

- ii. 通信衛星システム：Defense Satellite Communications System III³³⁴
- 米国の Space and Missile Systems Center（宇宙ミサイルシステムセンター）は 2020 年 2 月と 3 月に、Protected Tactical SATCOM プログラム（PTS）のプロトタイプペイロードを設計するために、Boeing 社、Lockheed Martin 社、Northrop Grumman 社の契約をそれぞれ 1 億 9,100 万ドル、2 億 4,000 万ドル、2 億 5,300 万ドルで締結。
 - Boeing 社と Northrop Grumman 社だけが、このプログラムの次の段階に進むことを承認された。米宇宙軍は AEHF の補完を目的に、ペイロードの追加製造を 1 社または 2 社に依頼する可能性があり、どちらの PTS バージョンが選ばれても、次世代安全通信衛星となる。
 - 国防総省（DoD）は、2024 会計年度に PTS プログラムに 3 億 6,000 万ドルを要求しており、2028 年までに最大 24 億ドルを費やすと予測している。PTS の両バージョンが評価された後、宇宙軍は 2028 会計年度と 2029 会計年度に打ち上げられるホスト型またはフリーフライヤー型のいずれかの構成をサポートすることを決定することができる
 - DoD は、Boeing 社の WGS-11 衛星（ホスト型）と Northrop Grumman 社の ESPASStar-HP 衛星（フリーフライヤー型）のペイロードとして、2 つの PTS プロトタイプが 2025 会計年度に打ち上げ可能になることを期待している。

図表 165 プラットフォームと衛星のイメージ



出所) <https://www.northropgrumman.com/wp-content/uploads/DS-15d-ESPASStar-HP.pdf>

図表 166 衛星の概要

項目	概要
事業者	US Space Force (USSF) / Space and Missile Systems Center
製造事業者	Northrop Grumman
衛星名	Protected Tactical SATCOM (PTS)
ペイロード	フリーフライヤー型

³³⁴ <https://www.northropgrumman.com/wp-content/uploads/DS-15d-ESPASStar-HP.pdf>
<https://spacenews.com/northrop-grumman-developing-military-communications-satellite-for-2025-launch/>
<https://spacenews.com/space-force-selects-boeing-northrop-grumman-to-develop-jam-resistant-communications-satellites/>

プラットフォーム	ESPASatellite-HP
ロケット	Vulcan (United Launch Alliance)
設計寿命	15 年
打上げ日時	2025 年 (予定)
重量	3500~5000 kg
軌道	GEO
推進	不明
能力・スペック	<ul style="list-style-type: none"> - 3 軸 - データ蓄積 : ~ 48 GB - 電力 : kW~4kw - 伝送容量 : 2.0 kbps via AFSCN uplink / 400 kbps/5.6Mbps via AFSCN*/1.6 Mbps downlink - 暗号化 : NSA Type 1

注) AFSCN : Air Force Satellite Control Network

iii. 通信衛星 : Wideband Gapfiller Satellite³³⁵

- Wideband Global SATCOM (WGS) システムは、耐リスク通信のための広範なカバレッジ、大容量、シームレスな接続を提供するために特別に設計されている。各 WGS 衛星は、遠隔操縦航空機からのフルモーションビデオやセンサーデータ、ビデオテレコンファレンス、重要な通信など、高データレートの通信に最適化されている。
- Xバンドと Kaバンドの両方で動作し、Command、Control、Communications、Computers、Intelligence、Surveillance、and Reconnaissance (C4ISR) ネットワークをサポートしている。デュアルバンド機能により、ワイドバンド端末を持つ数万人のユーザーが、いつでもどこでもシームレスに操作できるようになる。WGS は、米国防総省の衛星通信のバックボーンとして、戦術的な広帯域通信の 75%以上を提供している。
- 容量面では、変調方式によって、2.1Gbps から 3.6Gbps を超える容量をユーザーに提供することが可能である。この容量は、DSCS-3 (Defense Satellite Communications System 3) Service Life Enhancement Program (SLEP) 衛星の容量を 10 倍以上上回る。WGS の設計では、19 の独立したカバーエリアが組み込まれており、北緯 65 度から南緯 65 度の範囲を包括的にカバーすることが可能である。
- WGS システムは、衛星の帯域幅を効率的に使用し、あらゆるユーザー間のシームレスな通信を可能にすることで、接続性に優れたシステムである。デジタルチャネライザーは、アップリンク帯域幅を約 1900 の独立したルーティング可能な 2.6MHz サブチャンネルに分割し、Xバンドと Kaバンドのクロスバンドを含む柔軟なエニーカバレッジ間接続を実現する。これにより、運用の柔軟性が向上し、マルチキャスト、ブロードキャストサービス、ネットワーク制御

³³⁵https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/space/boeing_satellites/pdf/Bkgd_SatFam_WGS.pdf
https://space.skyrocket.de/doc_sdat/wgs-11.htm

のためのスペクトルモニタリング機能をサポートする。包括的なカバレッジ、大容量、強化された接続機能により、WGS システムは、厳しい通信ニーズを満たす上で重要な役割を果たす。

- WGS11 衛星は、新型の BSS-702X に基づいて、Protected Tactical SATCOM Prototype (PTS-P) ペイロードを搭載している。PTS-P は、ジャマーの位置特定、リアルタイム・アダプティブ・ヌリング、周波数ホッピングなどの技術を含む自動アンチジャム機能を備え、米軍の Protected Tactical Waveform (PTW) の力を活用し、要員が競合環境下で接続を維持できるようにする。

図表 167 WGS-11 のイメージ



出所) https://space.skyrocket.de/doc_sdat/wgs-11.htm

図表 168 WGS-11 の概要

項目	概要
事業者	US Space Force / Space and Missile Systems Center
ペイロード製造事業者	Boeing Satellite Systems
衛星名	Wideband Global Satcom (WGS-11)
プラットフォーム	BSS-702X SDS
ロケット	Vulcan Centaur VCxx
設計寿命	14 年
打上げ日時	WGS-11 : 2024 年 (未定)
重量	5987 kg ³³⁶
軌道	GEO
衛星の能力・スペック	<ul style="list-style-type: none"> - 展開型ソーラアレイ 周波数帯 <ul style="list-style-type: none"> - Upgraded Cross-band - Xバンド、Global Broadcast、双方向 Ka バンド

iv. 通信衛星：Advanced Extreme High Frequency Satellite³³⁷

- Advanced Extremely High-Frequency (AEHF) システムは、米国および国際的なパートナーにグローバルで安全な衛星通信を提供する。Lockheed Martin Space Systems 社は、ミッションコントロールやシステムインテグレーションを含む AEHF 衛星の宇宙および地上セグメントを担当した。Northrop Grumman Aerospace Systems 社は、ペイロードを供給した。
- AEHF 衛星は空軍宇宙司令部によって運用され、Milstar 衛星システムと MILSATCOM アーキテクチャを改良したもので、アンチジャム性、安全性、生存性、保護性を備えている。戦略核・防衛作戦、ミサイル防衛、宇宙作戦、諜報活動など、様々なミッションをサポートしている。
- アンチジャムペイロードは、SHF ダウンリンクとクロスリンク機能、EHF アップリンク、ビームフォーミング、オンボードヌリングなどを制御する。また、極めて高いデータレート、中程度のデータレート、低いデータレートの運用のための信号処理、時間、周波数も制御する。
- 衛星からのアンテナビームは電子的にステアリング可能で、必要な伝送容量を達成するためにチャンネルからビームへのマッピングを行うことが可能である。衛星をクロスリンクさせ、異なる地上ゲートウェイから全世界の通信を可能にすることもできる。
- このコンステレーションは、南緯 65 度から北緯 65 度までを 24 時間連続的にカバーし、ミッションコントロールセグメントは軌道上の衛星を扱い、衛星の健康状態を監視し、運用の監視と計画を提供する。

図表 169 衛星のイメージ



出所) <https://www.airforce-technology.com/projects/advanced-extremely-high-frequency-aehf/>

³³⁷ https://space.skyrocket.de/doc_sdat/aehf-1.htm
<https://www.airforce-technology.com/projects/advanced-extremely-high-frequency-aehf/>

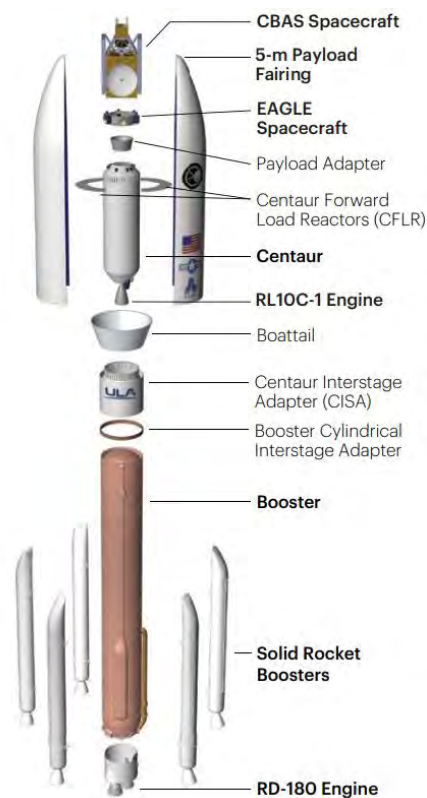
図表 170 衛星の概要

項目	概要
事業者	US Space Force (USSF)
衛星製造事業者	Lockheed Martin Space Systems (バス), Northrop Grumman (ペイロード)
衛星名	Advanced Extreme High Frequency Satellite (AEHF) 1→6
プラットフォーム	A2100M
ロケット	AEHF 1→3 : Atlas-5(531) AEHF 4→6 : Atlas-5(551)
打上げ日時	AEHF-1 : 2010 年 AEHF-2 : 2012 年 AEHF-3 : 2013 年 AEHF-4 : 2018 年 AEHF-5 : 2019 年 AEHF-6 : 2020 年
重量	6168 kg
設計寿命	14 年
軌道	GEO
推進	<ul style="list-style-type: none"> - 12 モノプロペラント(MMH)スラスタ - 1 IHI BT-4 bi プロペラント (N2H4/N2O4) (orbit raising 用) - 4 XR-5 ホール電流スラスタ (軌道制御用)
能力・スペック	<ul style="list-style-type: none"> - 3 軸、展開型ソーラアレイ アンテナ <ul style="list-style-type: none"> - 2 SHF downlink フェーズドアレイ - 2 crosslinks - 1 uplink/down ホーンアンテナ - 2 (uplink/downlink) Nulling Antennas, - 6 uplink/downlink 反射鏡 周波数帯 <ul style="list-style-type: none"> - VHF、S、Ka、Q、V-バンド 伝送速度 <ul style="list-style-type: none"> - 75~2,400 bps (Low Data Rate) - 4.8kbps~1.544 Mbps (Medium Data rate) - ~8.192Mbps/user (Extreme Data Rate)

v. 通信衛星：Continuous Broadcast Augmenting SATCOM³³⁸

- Continuous Broadcast Augmenting SATCOM (CBAS) は、既存の耐リスク衛星通信能力を増強し、宇宙ベースの衛星通信中継リンクを通じて機密データを連続的に中継する。
- シリーズの最初の衛星である CBAS-1 は、2018 年の米空軍の AFSPC 11 ミッションの主要なペイロードとなった。このプログラムは、米空軍の宇宙・ミサイルシステムセンターによって管理された。
- 2023 年には、USSF-67 ミッションの一環として、Space X の Falcon-Heavy ロケットで 2 機目の CBAS 衛星が打ち上げられた。このミッションでは、CBAS-2 と、最大 6 個の小型衛星を搭載できる宇宙船、Long Duration Propulsive ESPA リングの 2 つのペイロードを搭載した。SpaceX は 2020 年 8 月、USSF-67 の打ち上げのために 3 億 1600 万ドルの契約を獲得した。
- 衛星の運用の詳細、ペイロード、運用周波数、静止軌道での希望位置は明らかにされていない。CBAS の打ち上げ質量は 1,960~3,100kg と推定され、米国の主要な衛星ベンダーはすべてアポジ推進システムを備えた衛星プラットフォームを提供しているため、CBAS を直接 GEO へ配送する

図表 171 ロケット搭載イメージ



出所) https://www.ulalaunch.com/docs/default-source/launch-booklets/av_afspc11_mob.pdf

³³⁸ https://space.skyrocket.de/doc_sdat/cbas.htm

<https://spaceflight101.com/afspc-11/cbas/>

https://www.ulalaunch.com/docs/default-source/launch-booklets/av_afspc11_mob.pdf

<https://www.eoportal.org/satellite-missions/afspc11#eagle-esp-augmented-geostationary-laboratory-experiment>

<https://spacenews.com/spacex-gearing-up-for-falcon-heavy-s-second-national-security-launch/>

図表 172 衛星の概要

項目	概要
事業者	US Space Force (USSF) / US Space Systems Command (SSC)
衛星製造事業者	Boeing Satellite Systems
衛星名	Continuous Broadcast Augmenting SATCOM (CBAS) 1、2
プラットフォーム	BSS-702SP
ロケット	CBAS-1 : Atlas-5(551) CBAS-2 : Falcon-Heavy (Block 5)(px)
打上げ日時	CBAS-1 : 2018 年 CBAS-2 : 2023 年
重量	2000～3000 kg
軌道	GEO
推進	不明
能力	<ul style="list-style-type: none"> - 開型ソーラアレイ、 batteries - 3 軸 - 周波数帯 : S、X、Ka

vi. 通信衛星 : Mobile User Objective System³³⁹

- MUOS (Mobile User Objective System) は、移動する米軍の地上通信を強化するために設計された次世代狭帯域戦術衛星通信システムである。MUOS プログラムには、静止地球軌道 (GEO) 衛星 4 機と軌道上の予備衛星 1 機が含まれている。
- FLTSATCOM 衛星と同様に、MUOS コンステレーションは UHF システムで運用されているが、UHF フォローオン (UFO) システムを改良した UHF システムで置き換えるように設計されている。
- Common air interface (CAI) と Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) ペイロードにより、モバイルおよび固定サイト端末ユーザーの通信能力を向上させることができる。
- 各 MUOS 衛星は、MUOS UHF WCDMA 信号の送信と受信の両方に、14m の反射板を持つ 16 ビームのマルチビームアンテナ (MBA) を使用している。衛星の送信電力は 9.8W で、シ

³³⁹<https://spaceflight101.com/spacecraft/muos-multi-user-objective-system/>
https://space.skyrocket.de/doc_sdat/muos-1.htm
<https://www.naval-technology.com/projects/mobile-user-objective-system-muos/>
<https://secwww.jhuapl.edu/techdigest/Content/techdigest/pdf/V30-N02/30-02-Oetting.pdf>
<https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/muos.html>
<https://www.c4isrnet.com/battlefield-tech/space/2023/03/31/space-force-seeking-more-narrowband-communication-satellites/>

システムは光ファイバーによる地上波ネットワークで運用される。

- アップリンクとダウンリンクの帯域幅は、4つの5MHzのWCDMAチャンネルに分割されている。5MHzのチャンネル内の各ユーザーには異なる拡散コードが割り当てられ、データレートや端末の種類に応じて、最大500ユーザーが1つのチャンネルを共有することが可能である。MBAでは、16本のビームごとに4つのチャンネルを再利用できるため、衛星あたり64のWCDMAチャンネル(16ビーム×1ビーム4チャンネル=64チャンネル)を実現する。ユーザーから基地への経路では、64チャンネルのそれぞれがデジタルKaバンドフィーダーダウンリンクを経由して無線アクセス施設にダウンリンクされ、視界に入る2つの無線アクセス施設にそれぞれ32チャンネルが送られる。
- Lockheed Martin社はMUOSの主契約者兼システムインテグレーターであり、コンソーシアムはGeneral Dynamics C4 Systems社、Northrop Grumman社、Boeing社で構成されている。
 - ◇ General Dynamics C4 Systems社は、2004年9月にLockheed Martin社と契約し、MUOS衛星のユーザーエントリーおよび関連地上システムを提供した。General Dynamics C4 Systems社は、最初の2機の衛星に対して、JTRS準拠の端末ソリューション、安全な地上ネットワーク、衛星制御、ネットワーク管理を提供した。
 - ◇ Northrop Grumman社は、2006年7月にLockheed Martin社から400万ドルの契約を獲得し、最初の2つのMUOS衛星にScalable SIRU慣性航法システムを提供した。
 - ◇ 2009年2月、Lockheed Martin社は、Boeing Integrated Defense SystemsからUHFレガシー通信ペイロードと最初のデジタルチャネライザーを受け取った。
- 米宇宙軍は、安全な通信を行うためのMUOS衛星をさらに2機購入する予定である。契約は最大2社まで行われ、2025年までに1社が選定される。このプログラムは、2024年から2028年の間に25億ドルかかると見積もられている。この買収は、MUOSコンステレーションの寿命を延ばし、狭帯域通信能力を強化することを目的としている。新しい衛星に関する具体的な詳細は明らかにされていない。

図表 173 MUOS 概観



出所) <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/muos.html>

図表 174 MUOS 概要

項目	概要
事業者	US Navy / Naval Warfare Systems Command (SPAWAR)
衛星製造事業者	Lockheed Martin Space Systems
衛星名	Mobile User Objective System (MUOS) 1→5
プラットフォーム	A2100
ロケット	Atlas-5 (551)
打上げ日時	MUOS 1 : 2012 年 MUOS 2 : 2013 年 MUOS 3, 4 : 2015 年 MUOS 5 : 2016 年
重量	6740 kg
軌道	GEO
推進系	<ul style="list-style-type: none"> - 12 MR-103G モノプロペラント (N2H4) スラスタ (軌道制御) - 6 MR-106L モノプロペラント (N2H4) スラスタ (軌道制御) - 1 IHI BT-4 bipropellant (N2H4/N2O4) thruster (AKM および orbit raising)

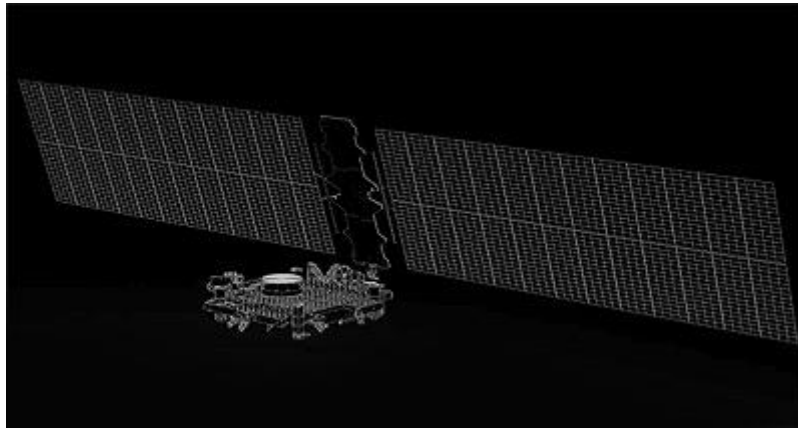
能力・スペック	<ul style="list-style-type: none"> - 大きさ : 1.830 x 6.600 x 3.660 m - 電力 : 15.400 kW (BOL) - 2 展開型ソーラアレイ、Ni-H2 batteries (171.6 Ah) - ビーム : 16 communication beams <p>周波数帯 (ペイロード)</p> <ul style="list-style-type: none"> - VHF、UHF、S バンド、Ka バンド、V バンド <p>ユーザーリンク</p> <ul style="list-style-type: none"> - UHF - 直接拡散スプレッドスペクトラム <p>ファイダリンク</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ka バンド <p>伝送レート</p> <ul style="list-style-type: none"> - Data rates : 2.4~384kbps
---------	--

vii. 通信衛星 : Starshield³⁴⁰

- Starshield は、機密ペイロードのホスティングやデータの安全な処理のための高保証暗号機能の追加など、より高度なセキュリティを提供する衛星コンステレーションである。既存の Starlink コンステレーションは、世界中のお客様にブロードバンドサービスを提供しているが、Starshield は、地球観測、通信、ホスティングペイロードを通じて、特に国家安全保障分野での政府利用向けに特別に設計されている。
- Starlink との違いは、厳格な暗号化機能を備えている点である。Starlink は既にユーザーデータのエンドツーエンド暗号化 (E2EE) を提供しているが、Starshield ではさらに高いレベルの暗号化が実装されている。
- Starshield 衛星はモジュール設計を採用しており、顧客は独自のペイロードを統合することができる。また、Starlink で使用されている衛星間レーザー通信技術を利用して、顧客の既存の衛星に通信端末を追加することで、衛星を Starshield のネットワークに接続することができる。
- 最初の 4 つの衛星は、2022 年 1 月 13 日に Falcon-9 v1.2 (Block 5) の打ち上げで、共有の Transporter-3 ミッションで打ち上げられた。第 2 陣の 4 機の衛星は、2022 年 6 月 19 日に Falcon-9 v1.2 (Block 5) での共有ミッションで打ち上げられた。

³⁴⁰<https://www.spacex.com/starshield/index.html>
<https://www.space.com/spacex-starshield-satellite-internet-military-starlink>
<https://www.itmedia.co.jp/news/articles/2212/08/news076.html>
https://space.skyrocket.de/doc_sdat/usa-320.htm

図表 175 Starshield のイメージ



出所) https://space.skyrocket.de/doc_sdat/usa-320.html

図表 176 Starshield の概要

項目	概要
事業者	US Space Force (USSF)
衛星製造事業者	SpaceX
衛星名	USA 320、328→331
プラットフォーム	Starshield
ロケット	Falcon-9 v1.2 (Block 5)
打上げ日時	2022年～
重量	100～500kg
軌道	LEO/太陽同期軌道
推進系	SpaceX Krypton HET electric thruster (orbit raising および軌道制御)
能力・スペック	<ul style="list-style-type: none"> - 大きさ : 3.200 x 1.600 x 0.080 m - 1 展開型ソーラアレイ - 3 軸

3) RF マッピング分野における取組

- 自社が運用する衛星コンステレーションで電波をマッピングし、無線周波数の地理空間情報を提供している HawkEye360 のデータ伝送は以下のような状況である³⁴¹。
 - 2022年1月、米国の BitRipple は、HawkEye360 が BitRipple のネットワーク技術を利用して、LEO 衛星から地上局への大規模なデータ配信を行っていると発表した。
- ◇ BitRipple の技術は、政府・国防、ストリーミングビデオ、自動車、宇宙通信、ネットワークの制限がユーザーエクスペリエンス、効率、データ配信に関連するセキュリティに重大な

³⁴¹ <https://www.bitripple.com/hawkeye360-to-deliver-large-data-files-over-leo-satellite-using-bitripple-technology>

課題与えるような産業分野で利用されている。

- LEO 衛星を介して効率的に大量のデータを配信するために同社の Liquid Networking Technology を利用する。
 - BitRipple の Liquid Networking Technology は、データを Liquid に相当するようなデジタルデータに変換することで、大容量のデータを超低レイテンシで配信することで、ネットワークに固有の配信制限を排除する。
- ◇ リアルタイムのボリュームエクスペリエンスが必要とされるメタバースのようなリアルタイムな仮想空間での体験に適しているとしている。
- ◇ BitRipple ソリューションの基盤は、IETF RFC 6330 で規定される RaptorQ erasure codes に基づく Liquid Data によるデータ配信アプローチである。基本的なアイデアは、RaptorQ を使用して、送信者が各データブロックの Liquid packet を生成して受信者に配信する。Liquid packet とは、液体の交換可能と意味である。RaptorQ を使用して、十分な液 Liquid packet が受信機に到着するとブロックを回復する³⁴²。

4) 日本の地理的及び環境的なリスクの低減に資する可能性

- 大規模災害発生時においては、発災直後の状況確認フェーズ、救援・救護フェーズ(緊急対策)、応急対策フェーズ(生活支援)、復旧・復フェーズにより、被災地や対策本部に集中するトラヒック量や利用形態(緊急通報、救護要請、情報連絡)が異なるため、今後、我が国でも利用が想定される HTS において、これらのトラヒック要求に応じて通信帯域を動的に割り当てる衛星搭載のチャネライザや制御技術などの実現が望まれる。
- リスクの低減を図る公共衛星(「耐リスク衛星」と称する)に適用される技術と民間通信衛星が指向する日本の地理的及び環境的なリスクの低減に資する技術の方向性は同一である。
- 耐リスク衛星で特に注目すべき領域は、非透過型ペイロード(2.4 節で説明)、量子鍵配送(QKD)、周波数帯域システム、マルチ周波数時分割多元接続(MF-TDMA)、Active Defense システムなどである。こうたん性を有する通信衛星では耐干渉性や妨害に強く、セキュアな通信が求められる。

³⁴² <https://www.bitripple.com/technology>

2.7 定常調査・動向分析

1) 国内学会の聴講（電子情報通信学会 SAT 研）

A) 2023年5月26日（オンライン参加）、詳細は別紙

- 衛星搭載用ソフトウェア受信機の開発、長崎啓志・吉賀大道・川崎絢介（NEC スペーステクノロジー）
- 異衛星/複数地点の Ku 帯衛星電波を用いた減衰継続時間特性の一検討、前川泰之（阪電通大）・原田耕一・阿部順一・山下史洋（NTT）
- 低軌道衛星 MIMO における大容量化のための衛星/地上局のアンテナ構成検討、五藤大介・立神光洋・糸川喜代彦・山下史洋（NTT）
- ハイスループット衛星通信システムにおける降雨量の変化に対する ACM の通信速度改善効果の検討、海老原孝広・井家上哲史（明大）
- 衛星搭載 RF 通信機器の発展の歴史及び最新動向、岡田俊輔（NEC スペーステクノロジー）

B) 2023年7月12日～14日（オンライン参加）、詳細は別紙

- 将来の衛星コンステレーションに向けた取り組み、若藤健司・吉田昂平・林 和幸・船田純一（NEC）
- 固定ビット polar 符号による連続量量子鍵配送の情報整合高効率化の検討、浦健介（名工大）・遠藤寛之（NICT）・岡本英二（名工大）・豊嶋守生・藤原幹生・佐々木雅英（NICT）
- polar 符号による自由空間光通信における物理レイヤ暗号の鍵生成効率の向上、寺田龍人（名工大）・遠藤寛之（NICT）・山浦健介・岡本英二（名工大）・北村光雄（NICT）・清水亮介（電通大）・豊嶋守生・藤原幹生・佐々木雅英（NICT）
- 見通し通信 QKD 実現に向けた量子信号伝送実験、遠藤寛之・北村光雄・小澤俊介（NICT）・清水亮介（電通大）・藤原幹生・佐々木雅英（NICT）
- HAPS 通信システム実現に向けた成層圏下層からの 38GHz 帯電波伝搬測定、外園悠貴・小原日向・室城勇人・深澤賢至（NTT ドコモ）・鈴木 淳・北之園 展（スカパーJSAT）
- HAPS 通信システム実現に向けた 38GHz 帯干渉回避および降雨減衰補償技術評価、小原日向・外園悠貴・室城勇人・深澤賢至（NTT ドコモ）・鈴木 淳・北之園 展（スカパーJSAT）
- 非地上系ネットワークによるカバレッジ拡張通信システムの開発 ～ HAPS 通信システム実現に向けた 2GHz 帯干渉回避および降雨減衰補償技術評価、室城勇人・外園悠貴・小原日向・深澤賢至（NTT ドコモ）・加納寿美・松井宗大・阿部順一・山下史洋（NTT）
- 非地上系ネットワークによるカバレッジ拡張通信システムの開発 ～ 非再生中継ルーティング方式の評価、加納寿美・松井宗大・阿部順一・山下史洋（NTT）・外園悠貴・小原日向・深澤賢至（NTT ドコモ）
- 基地局-衛星間ハンドオーバーにおける所要時間短縮のためのバッファデータ分割手法に関する一検討、加藤 航・川本雄一・加藤 寧（東北大）
- 地上-衛星ネットワークにおける eVTOL 及び LEO 衛星の位置に応じたスループット向上のためのハンドオーバータイミングに関する検討、松浦大裕・川本雄一・加藤 寧（東北大）

- ハイブリッド FSO/RF 通信を用いた宇宙・空・地上統合ネットワークにおける送信電力制御による低消費電力化に関する検証、益子和真・川本雄一・加藤 寧（東北大）
- 超小型衛星を用いたコヒーレント光通信用レーザー光源の軌道上評価の初期運用結果、竹本裕太・西岡隼也・藤江彰裕・原口英介・安藤俊行（三菱電機）

C) 2023年8月31日～9月1日（オンライン参加）、詳細は別紙

【8月31日】

- 「上空プラットフォームと地上ネットワークとの周波数共有を実現するヌルフォーミング技術と連携制御方式」 田代晃司・星野兼次・長手厚史（ソフトバンク）
- 「B5G時代の宇宙・空・地上統合ネットワーク実現に向けた研究開発動向」 川本雄一（東北大）
- 「宇宙・空・地上統合ネットワークにおける HAPS 中継局を用いた双方向伝送技術と今後の展望」 高橋昌希・川本雄一・加藤 寧（東北大）
- 「光データ中継衛星搭載”LUCAS”を用いた地上・衛星間光通信特性の季節依存性評価」 小竹秀明・阿部侑真・高橋靖宏・大津留 豪・菅 智茂・コレフ ディミタル・斉藤嘉彦（NICT）・佐藤洋平・板橋孝昌・山川史郎（JAXA）・辻 宏之・豊嶋守生（NICT）
- 「次世代光データ中継衛星システムにおける性能向上のための通信路符号化手法の比較検討」 岡本英二・山下裕真（名工大）・佐藤洋平・中台光洋・板橋孝昌・山川史郎（JAXA）

【9月1日】

- 「3GPPにおける NTN 標準化動向」 西尾昭彦（パナソニックホールディングス）
- 「宇宙光通信とその標準化の国際動向」 荒木智宏（JAXA）
- 「Beyond 5G/6G時代における Non-Terrestrial Networks の現状と課題」 辻 宏之（NICT）
- 「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」 秋山貴宏・瀬川哲哉・山崎将也・根本和哉（スカパーJSAT）
- 「回線計算に基づく静止軌道-地上間の物理レイヤ暗号と見通し通信 QKD の実現性検討」 遠藤寛之・佐々木雅英・藤原幹生（NICT）

2) 海外のワークショップの聴講（WSBW、The HTS Roundtable）

A) WSBW : 2023年9月11日～9月15日（オンライン参加）、詳細は別紙

【9月11日】

- “Optical Comms: Interconnectivity & High-speed Data” Mina Mitry (CEO & Co-founder, Kepler Communications), Mustafa Veziroglu (Co-CE, Mynaric) etc.
- “Smart Antennas for the Digital Future” Nir Barken (CEO, Satixfy), John Finney (Founder & CEO, All.Space) etc.
- “Launch Service Leaders Expanding Access to Space” Jarrett Jones (SVP, New Glenn Heavy-Lift Orbital Launch Vehicle, Blue Origin), Iwao Igarashi (Vice President & General Manager, Mitsubishi Heavy Industries) etc.

【9月12日】

- “Operators: from Broadcast to Broadband” Sulaiman Al Ali (CCO, Yahsat), Huang Baozhong (EVP, Sales, Marketing & Legal Affairs, APT Satellite) etc.
- “Mobile Satellite Connectivity Services: Direct to Cellular” Scott Wisniewski (EVP & Chief Strategy Officer, AST SpaceMobile), Jay Yass (Chief Corporate Development and Strategy Officer, Omnispace) etc.
- “Ground Segment Integration Outlook: VSATs, User Terminals” Hagay Katz (Chief Products and Marketing Officer (CPMO), Gilat Satellite Networks), Javier Recio (CCO, SpaceBridge) etc.
- “Automotive Connectivity: The Role of Satellite Networks” Katrin Bacic (CEO, UNIO), Olaf Eckart (Cooperations R&D, Industry Customers, BMW) etc.
- “Next Steps for Mobile Satellite Service & IoT Connectivity”, Ben Cade (CEO, Myriota), Omar Qaise (Founder & CEO, OQ Technology) etc.

【9月13日】

- “Smallsat Manufacturing”, Marco Molina (Managing Director – Sales and Products, Sitael), Sethu Suvanam (Founder & CEO, ReOrbit) etc.
- “NGSO Broadband Constellations: Keystones to Global Connectivity” Declan Ganley (Chairman & CEO, Rivada Space Networks), Neil Masterson (CEO, OneWeb) etc.
- “The Role of HAPs in Multi-Orbit Networks”, Samer Halawi (CEO, AALTO HAPS), Gregory Ewert (Vice President, Business Development, Intelsat) etc.

B) The HTS Round Table : 2023年12月7日 (オンライン参加)、詳細は別紙

- “The Future of Satellite Communications” Antonio Castillo (Airbus Defence & Space)
- “Ground and Space Harmony in The New Elastix Space Era” Gil Elizov (Gilat Satellite Networks)
- “High Throughput LEO Constellations + Terrestrial.. How to Provide Rail Connectivity, even in the Most Challenging Conditions?” Gareth Hartwell (CGI)
- “Re-defining HTS” Steve Good (Ramon.Space)
- “Orchestrating Space and Ground” Russ Palmer (Calian Advanced Technologies)
- “High and Very High Throughput Satellite Systems: Trends, Challenges and Enablers” Sandro Scalise (DLR (German Aerospace Centre))

2.8 適時調査・事実確認

1) ユーザーが利用するマルチオービット対応端末（2023年6月14日）

- マルチオービットの利用が拡大するに伴い、地上で利用される衛星通信端末に対して1台の端末で複数の軌道の衛星と通信できる機能が要求されており、要求される機能・技術として考えられるのは以下の通り。
 - ◇ 1台の端末による複数の衛星との通信を可能とする方法としては以下のような技術が考えられる。
 - 端末に複数のアンテナを搭載し複数リンクを構成する
 - 単一開口の Electronically Steerable Antenna (ESA) を分割する
 - Beam Splitting
 - ◇ ビームを特定の衛星から他の衛星に切替える方法としては以下のような技術が考えられる。
 - ビームを特定の衛星から他の衛星に高速（機械的あるいは電子的）に切り替える。
 - 1つのアレイに複数のアンテナモジュールを組み込む
 - ◇ 切り替える衛星数や端末コストを勘案して、上記の技術を組み合わせて端末が構成される。
- 以下、マルチオービット端末を製造している企業や採用技術について調査を行った。主に、①複数の衛星と通信できるアンテナ単体、②複数の衛星と通信できる衛星端末に分類して報告する。

① アンテナ単体

- Kymeta（米国）のアンテナ
 - ◇ 2023年6月、OneWebとEutelsatは、NATO向けに、1台のモバイル端末とLEOあるいはGEO衛星とを接続する機能を実証している。また、ランドローバに搭載したKymeta Hawk u 8端末を用いてLEOコンステレーションに接続し高スループットと低遅延通信を実証している。
 - ◇ PoC (Proof of concept) として、4Kビデオのストリーミング、ダウンロード速度195MbpsでのTeams、Twitch、GoogleEarthアプリケーションを実施。アップロード速度32Mbps、遅延は70msであった。
 - ◇ ビームと衛星間のシームレスなハンドオーバーを実証し、1GBのファイル転送を8秒以内で完了した³⁴³ ³⁴⁴。
 - ◇ Kymetaは、多軌道衛星の同時接続に関する特許（U.S. 11,063, 661 B2, was issued on July 13, 2021. 「Beam Splitting Hand Off Systems Architecture」）を取得している³⁴⁵。
 - ◇ 1つのアンテナパネルで2ビームを同時に発生させることができ、複数のコンステレーションの2機の衛星の追跡と衛星から他の衛星へのシームレスなトラフィックハンドオフを

³⁴³ <https://aviationweek.com/defense-space/space/oneweb-eutelsat-demo-multi-orbit-terminal-connection-nato>

³⁴⁴ <https://oneweb.net/resources/oneweb-and-eutelsat-demonstrate-multi-orbit-offering-and-global-connectivity-solution>

³⁴⁵ <https://www.kymetacorp.com/news/kymeta-announces-grant-new-u-s-patent-multi-beam-capabilities-enabling-simultaneous-multi-orbit-connectivity/>

可能にする。Kymeta のメタマテリアルは、複数の異なるビームを形成、受信、送信し、それぞれが独自の受信/送信 (RX/TX) 接続を持ち、冗長な接続性とインテリジェントなデータ管理を実現する。

- Intellian (韓国) のアンテナ

- ◇ 2023年1月、Intellian は Ku/Ka を単一のフィードを介して電子的に切り替える dual-band multi-orbit VSAT アンテナである XEO シリーズに X100D と X150D を追加すると発表³⁴⁶
- ◇ XEO シリーズは、政府、クルーズ、遠洋船、大型ヨット、エネルギー、海運向けのアンテナで、HTS Ka バンド GEO を含む LEO、MEO、GEO、HEO の追尾機能を備えている。
- ◇ アンテナの外観を下図表に示す。

図表 177 Intellian アンテナ



出所) <https://www.intelliantech.com/en/news/newsroom/intellian-expand-their-ku-ka-band-multi-orbit-xeo-series/#>

- ◇ ユースケースと特徴

- 大容量トラフィックには Ka バンドを、カバレッジギャップには Ku バンドを使用
- 衛星間をシームレスに電子的に切り替え、帯域幅とネットワークアクセスを最大化
- 悪天候時は Ku バンドを使用
- シンプルな RF 設計のために単一のセンターフィード設計と Ka バンド受信機を一体化
- 電子的 RF スイッチによる Ku-Ka バンド切替えと偏波切替え

- ◇ マルチオービット追尾機能

- GEO により提供される全ての Ku バンドおよび Ka バンド運用
- NGSO の make-before-break HO (ハンドオーバー) のための Dual Antenna 搭載
- MEO コンステレーションをカバーする Ka バンドフィード (2.5GHz 幅)
- GEO、MEO 追尾 (プログラム追尾とコニカルスキャン)

- Thinkom (米国) のアンテナ

³⁴⁶ <https://www.intelliantech.com/en/news/newsroom/intellian-expand-their-ku-ka-band-multi-orbit-xeo-series/#>

- ✧ 航空機、車載、船舶、衛星などの移動体向けアンテナを製造³⁴⁷
- ✧ mechanically steered と electronically scanned arrays (MSAs/ESAs)の利点を組み合わせた VICTS フェーズドアレイ技術を採用
- ✧ VICTS フェーズドアレイは 800ms 未満で衛星を切り替える。GSO ping 時間よりも短い。モデムによってバッファリングが可能な時間としている。
- ✧ VICTS アンテナでは、半二重での true make-before-break (MbB) 、または全二重での高速な break-before-make (BbM) をサポートする。さらに、同時全二重ビームが必要な場合、小さなフットプリントを維持しながら 2 つの別々のアンテナを利用することが可能 (<https://www.thinkom.com/phased-array-specs/>)
- ✧ 2023年2月 SES、ThinKom、Hughes Network Systems は、多軌道衛星サービスのデモンストレーションを実施した。
- ✧ SES の MEO と GEO を介して ThinAir Ka 2517 端末をテストした。デモには、衛星間をローミングするための Hughes のソフトウェア定義の HM 400 航空機用 MODEM を利用。
- ✧ MEO と GEO 運用のため Hughes HM 400 モデムとインターフェースする最新の ThinAir Ka 2517 ソフトウェアを検証³⁴⁸。
- ✧ アンテナの外観と航空機への搭載イメージを下図表に示す

図表 178 ThinAir Ka 2517 概観



出所) <https://www.thinkom.com/air/>

³⁴⁷ <https://www.thinkom.com/>

³⁴⁸ <https://www.satellitetoday.com/government-military/2023/02/08/ses-thinkom-and-hughes-report-multi-orbit-airborne-terminal-demonstration/>

図表 179 アンテナの搭載



出所) <https://www.thinkom.com/wp-content/uploads/2023/05/thinair-ka2517-datasheet-may2023.pdf>

② アンテナを組み込んだ衛星端末

- All.Space (旧 Isotropic Systems) (英国)³⁴⁹の衛星端末
 - ◇ 単なる信号を送受するだけの反射鏡ではなく「software defined connectivity platform」として位置付けている。
 - ◇ いかなる時も、全ての軌道に配置された複数の衛星とリンクの性能が低下することなく同時に接続できる端末を指向している³⁵⁰。
 - ◇ アンテナの外観を下図表に示す。

図表 180 All.Space アンテナ



出所) <https://www.all.space/wp-content/uploads/2022/07/SatelliteMobilityWorldIsotropicSystemsFeatureDecember2021.pdf>

³⁴⁹ <https://www.all.space/insights/isotropic-systems-reveals-commercial-launch-plans-for-multi-link-all-orbit-antenna-and-investments-in-additional-production-capacity-to-meet-demand>

³⁵⁰ <https://www.all.space/wp-content/uploads/2022/07/SatelliteMobilityWorldIsotropicSystemsFeatureDecember2021.pdf>

- ◇ iDirect との連携
- ◇ 2022年3月 Isotropic Systems 端末は、複数の iDirect プラットフォームで動作する COTM (Communication On The Move) 向け衛星モデムである iDirect950mp や高速モデム MDM 5000 シリーズオプションと統合された。MDM 5000 シリーズは、Isotropic Systems の広範な端末オプションを使用してサービスを開始および開始する予定の SES O3b mPOWER システムで動作することも認定された³⁵¹³⁵²。
- ◇ 2023年3月、ALL.SPACE は O3b および O3b mPOWER でのテスト用に、同社初のスマートターミナルを SES に納入したことを発表した。このマイルストーンは、同社が安全保障および商用市場向けにスマート端末を正式に発売する前の最終段階の1つとされている。
- ◇ S2000 は、Software Defined 端末で、1台のデバイスで複数の衛星ネットワークと地上ネットワークに同時にアクセスできる。
- ◇ アンテナ外観を下図表に示す。

図表 181 アンテナ外観



出所) <https://www.kratosdefense.com/constellations/articles/digital-ground-pioneers-advancing-multi-everything-satcom-terminal>

- Gilat (イスラエル) ³⁵³の衛星端末
 - ◇ SkyEdge IV は単一のプラットフォームによるマルチオービット運用を可能にする
 - ◇ GEO VHTS および NGSO コンステレーションに適用可能で、中断を感じさせないような軌道間のシームレスなハンドオーバーのための **make before break** を実装。
 - ◇ SkyEdge IV はモデムのインストール、サービスのプロビジョニング、追尾アンテナインターフェース、コンステレーションリソースマネージャとのインターフェース、スマートモデムログオン、衛星とビームのシームレスな切替えなど、すべてのレイヤとにおける機能を導
 - ◇ 2019年、SES は O3 bmPOWER 用のグローバルなマルチアプリケーション/マルチ軌道 VSAT プラットフォームの開発と展開に Gilat を選定した。
 - ◇ 2020年、SES の O3b および O3bmPOWER MEO コンステレーションを介したハイエンドサービスをターゲットとした、マルチ Gbps スループットのモデムを購入
 - ◇ 2021年、SES は Gilat とグローバルモビリティプラットフォームで提携し、SES の O3 b mPOWER と静止衛星群によって提供される衛星対応サービスにアクセスできるクルーズ

³⁵¹ <https://news.satnews.com/2022/03/25/fully-integrated-multi-orbit-terminal-will-be-the-result-of-isotropic-systems-st-engineering-idirect-partnershi>

³⁵² <https://www.all.space/insights/isotropic-systems-partners-with-st-engineering-idirect-to-deliver-first-fully-integrated-multi-orbit-terminal>

³⁵³ <https://www.gilat.com/blog-skyedge-iv-to-meet-multi-orbit-multi-service-satcom-needs/>

ラインと海上サービスプロバイダーへのサービスを提供。

- SES は固定およびモビリティサービスを提供するため VHTS である SES-17 で運用するために、Gilat の SkyEdge IV プラットフォームを選択。
- ◇ SkyEdge IV Aquarius は、VHTS、GEO/ NGSO コンステレーションでの運用を目的として設計された超高性能 VSAT ファミリー
- Aquarius ファミリーの VSAT は、ブロードバンド、4G、5G のバックホール、クルーズ船、エンタープライズサービスなど、複数の固定およびモビリティアプリケーションにサービスを提供する柔軟な衛星をサポート³⁵⁴
 - VSAT は、2Gbps を超えるスループットと高いパケット処理を実現
 - 伝送インターフェース： DVB-S2X、 TDMA 、Elastix-SCPC (eSCPC)
 - 標準アンテナインターフェース (OpenAMIP) および標準 BUC インターフェース (OpenBMIP)
 - ✓ OpenAMIP は 2006 年に iDirect が開発したアンテナ制御装置 (ACU : Antenna Control Unit) と衛星ルータ間での情報交換を容易にする IP ベースのプロトコル。これにより、ルータからアンテナに指示が可能となり例えば、船舶が、衛星ビーム間を移動する時、接続の変更を伝達できる。
- ◇ Aquarius VSAT ファミリーは、SDS をサポートし、中断のないサービスを提供するように設計されており、GEO と NGSO 間、または異なる GEO 衛星間の切替え、NGSO 衛星の make before break ハンドオーバー、シームレスな運用を可能にする。
- Aquarius は、軌道上での衛星構成変更をサポートする転送チャンネルとリターンチャンネルの両方に、デュアル送信/受信インターフェースと高速適応再構成機能を具備

図表 182 SkyEdge IV Aquarius の外観



出所) SkyEdge IV Aquarius プロダクトシート

³⁵⁴ <https://www.gilat.com/technology/aquarius-family/>

2.9 研究開発に関する戦略マップのとりまとめ

1) 戦略マップ構築における基本的な考え方

- 文部科学省殿が今後研究開発を行うにあたって目標とすべきところは、日本の通信衛星の便益がプラスであり、持続的に新規の衛星開発が可能な状態になっていることだろう。
- そのためには、日本の通信衛星の活用が、国・自治体、衛星観測事業者や地上の通信事業者など十分な数の顧客の意思決定やビジネス実行支援に貢献できるものでなければならない。そのような観点から、日本の通信衛星、およびその関連技術の他国に対する優位性だけでなく、地上の通信との統合を見据えてどのような優位性を発揮できるかを見極める必要がある。したがって、日本の通信衛星、およびその関連技術にどのような強みがあるかを整理した上で、今後とるべき戦略について考察する。

図表 183 調査結果のとりまとめ

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

2) 日本の強み・弱みと研究開発の方向性

- 本調査にて導出した日本の強み・弱みを整理・評価し、それを踏まえた研究開発の方向性を以下の図表 184 に示す。

図表 184 日本の強み・弱みと研究開発の方向性

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

- ここでは各分野・領域に対して、○、△、×での評価を実施した。評価基準は以下のとおり。
 - ◇ ○：現状の官による支援を継続して実施する等により将来的に世界レベルでのプレゼンスを発揮できる可能性あり
 - ◇ △：海外勢に劣後する分野・領域であり、将来的にプレゼンスを発揮するためには、これまでの延長線上には無い積極的かつ大胆で新たな官による支援・介入等が必要
 - ◇ ×：海外勢に大きく劣後する分野・領域であり、キャッチアップするには相当な労力が必要、又は、他の分野・領域に注力すべき
- 全体の傾向として、日本は商用化の面では他国に劣後するものの、個別の要素技術では強みを出せる分野・領域もあり、その分野に対して選択と集中でリソースを投下し、いか強みを伸ばしていけるかが重要。
- 本調査において強みのある領域として「○」と評価されるの以下の3つの領域であり、どのように強みを伸ばすかの検討が必要。
 - ◇ マルチオービット衛星運用：マルチオービット衛星運用の商用サービスの面では海外事業者が先行するものの、HAPSは日本国内外ともに研究開発・実証フェーズに留まっている状況であり、日本でも複数の大手通信事業者を中心に実証が進められていることから、将来的に日本として強みを発揮できる可能性のある領域
 - ◇ 降雨減衰予測・対策技術：日本が持つ先進的な降雨レーダーを活用した降雨減衰推定法が確立できれば大きな強みになり得る、また降雨減衰対策法の一つであるサイトダイバーシティ技術の検証などもHAPSを活用した実証が進む
 - ◇ 衛星による量子鍵配送システム：日本で研究開発・実証が進む物理レイヤ暗号や地上における量子鍵配送の技術を活かすことで当該領域で大きな強みを発揮できる可能性あり

3) 戦略マップ

- 調査・分析結果を踏まえて整理した戦略マップは以下のとおりである。

【財務】

- 今後、文部科学省殿が今後研究開発を行うにあたって目標とすべきところは、日本の通信衛星の便益がプラスであり、持続的に新規の衛星開発が可能な状態になっていることである。

【顧客】

- 日本の通信衛星の便益がプラスであり、持続的に新規の衛星開発が可能な状態を維持するために、顧客に対してどのような価値を提供するかという視点からは、日本の通信衛星の活用が、国・自治体、衛星観測事業者や地上の通信事業者など十分な数の顧客の意思決定やビジネス実行支援に貢献できる必要がある。
- そのような状況に至るために、日本の通信衛星、およびその関連技術単体で他国に対して優位性を持つだけでなく、今後想定される地上の通信と衛星通信を統合したネットワークとして強みを発揮できる必要がある。

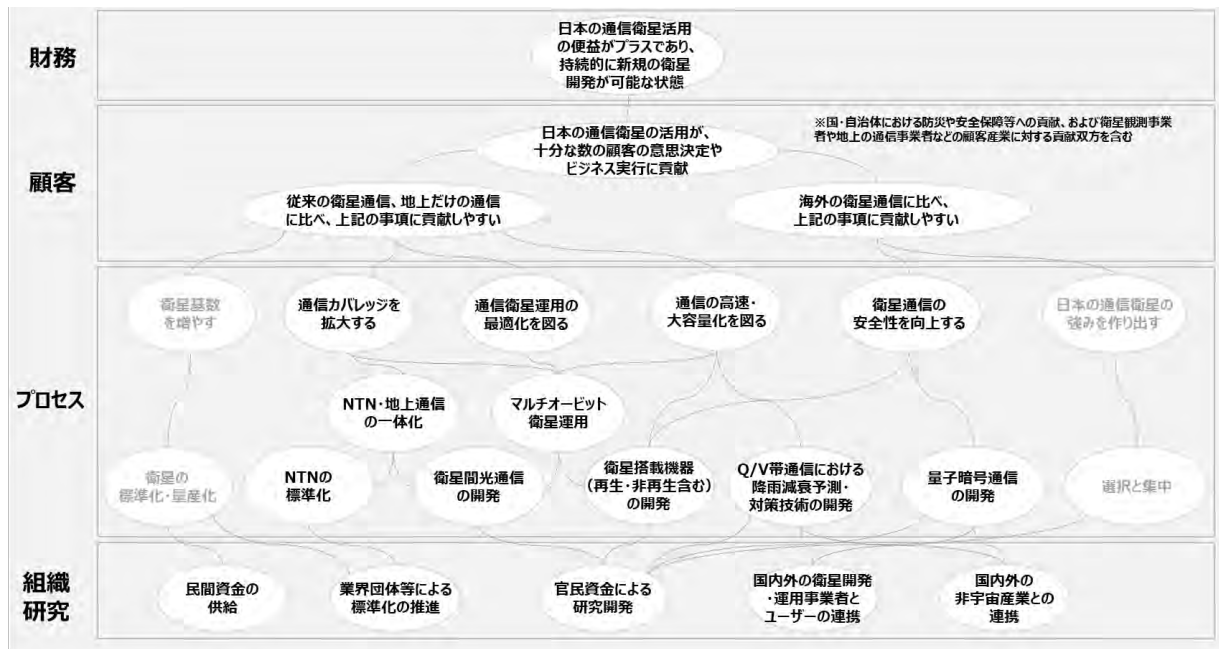
【プロセス】

- 従来の大型衛星による通信から LEO における小型衛星による通信へと移行が進んでいるが、この LEO 衛星で広範囲に持続的な通信を実現するには、多数の衛星を配備するコンステレーションの構築が必要である。
- 通信カバレッジの拡大、通信の高速・大容量化、およびリソース割当の柔軟化等の通信衛星の最適運用を進めるためのマルチオービット衛星運用の開発・実証等が進む中、それを実現するための衛星間通信や非再生・再生中継の技術開発は重要な要素となる。
- 今後の NTN と地上通信の統合を見据えると、NTN と地上との一体化技術も注力すべき領域の一つと考えられる。また、3GPP では NTN の標準化が進められているため、標準化動向のキャッチアップは必要不可欠である。
- NTN と地上の通信を統合する上では、セキュリティも重要な要素であり、地上通信および衛星通信のそれぞれ固有のセキュリティ上のリスクが他方へ移行し、新たなセキュリティの課題が生じる可能性がある。衛星のセキュリティの脆弱性が指摘される中で、統合ネットワークにおける衛星のセキュリティ担保は早急に対応すべき事項である。量子鍵配送 (QKD) は注力すべき重要なセキュリティ技術の一つである。
- 通信の高速・大容量化のための Q/V 帯活用においては、降雨減衰は解決すべき重要な課題である。降雨減衰予測や対策技術に関しては主に研究レベルでの取り組みが多いため、今後の実証や商用フェーズへの移行に向けて、事業者とアカデミアの協業が求められる。
- 日本の通信衛星技術のプレゼンスを維持することが重要だが、限られたリソースの中でこれを実現するためには、日本の強み・弱みなどを踏まえた上での選択と集中が必要である。

【組織・研究】

- 上記の業務プロセスを達成するためには、組織的な取り組みや研究開発が必要となる。
 - ◇ 衛星の標準化・量産化にあたっては、民間資金によるリスクマネーの供給が期待される。
 - ◇ NTN と地上通信の一体化に関しては、3GPP における NTN の標準化が進む中、事業者と標準化団体の連携した取り組みが必要となる。
 - ◇ 衛星間光通信や再生・非再生中継技術などの各種要素技術の研究開発は、官民双方からの資金を原資とした研究開発が必要だと考えられる。
 - ◇ NTN と地上通信の一体化した統合ネットワークにおける衛星周辺のセキュリティについては、その多くが地上通信のセキュリティ技術をベースとしているため、非宇宙産業（地上におけるサイバーセキュリティ）との連携した取り組みは欠かせない。

図表 185 戦略マップ



4) アクションプラン

A) 日本・海外の通信衛星に関する研究支援プログラム

- 今後進めるべき組織的な取り組みや研究開発を検討する上で、既存の日本及び海外における通信衛星技術に関する研究開発プログラムについて調査し、特徴や取り組みの違い等を整理した。

i. 各国の研究開発プログラム一覧

図表 186 各国の研究開発プログラム

	国名	プログラム名	実施機関	対象技術	支援内容・金額	プログラム概要
A.	日本	革新的衛星技術実証プログラム	JAXA	衛星全般	軌道上実証機会の提供	企業・大学等で開発した機器や部品を JAXA の人工衛星に搭載して軌道上実証機会を提供するプログラム。IoT や X バンドでの通信の実証が行われている。
B.		「Beyond 5G 研究開発促進事業」及び「革新的情報通信技術 (Beyond 5G (6G)) 基金事業」	NICT	通信衛星全般	最大 24 億円/年	5G の次世代技術について NICT から民間企業や大学等への公募型研究開発を実施するプログラム。HAPS や Q/V 帯、LEO コンステレーションに関する研究開発を行っている。
C.		情報通信技術の研究開発に係る提案 (ICT 重点技術の研究開発プロジェクト)	総務省	量子暗号・光通信	2-14 億円/年	総務省から企業・大学等に研究開発を委託するプログラムである。一部は内閣府のスタダーストプログラムによるものである。量子鍵配送や光通信に関する研究開発が行われている。
D.		経済安全保障重要技術育成プログラム (通称「K プロ」)	内閣府/NEDO	IoT・光通信	18-75 億円/年	内閣府が中長期的に必要な先端技術について、省庁横断的に実施される研究開発プログラム。通信に関しては NEDO が研究推進法人となり、船舶向け衛星コンステレーションや光通信衛星に関する研究開発を委託している。
E.		日本版 SBIR 推進プログラム (一気通貫型)	内閣府/NEDO	衛星全般	0.2-1 億円/年	日本版 SBIR 制度の一環として、研究開発の初期段階や実用化開発に対する支援を行うプログラム。光通信に関する研究が採択されている。
F.	米国	SBIR	NASA	宇宙全般	25-85 万ドル/年	連邦政府の 11 省庁が協調して実施する、中小企業の研究開発の事業化を目的とした資金支援プログラム。宇宙に関連したテーマについては NASA が統括しており、光通信や月面との通信に関する研究が採択されている。
G.		Communications Services Project (CSP)	NASA	衛星通信全般	500-1750 万ドル/年	NASA の既存の通信システムを代替するための民間システムの研究開発を支援するプログラム。
H.		Space-BACN	DARPA	光通信	不明	国防高等研究計画局 (DARPA) が、軍民で相互運用可能な技術を開発するために実施しているプログラム。LEO コンステレーション同士でシームレスな通信を可能にすることを目指しており、第一段階で 11 チームが選抜されている。
I.	欧州 カナダ	ARTES	ESA	通信衛星全般	10 万ユーロ以上	ESA が衛星通信技術の研究開発活動を促進するために衛星通信のあらゆる分野に対して支援を行うプログラム。
J.	英国	National Space Innovation Programme	UKSA	宇宙全般	100-500 万ポンド/年	2020 年に開始されたイノベティブな技術開発プロジェクトを UKSA が支援するプログラム。宇宙技術全般を対象としており、通信分野では量子鍵配送や光通信に関する研究を採択している。

K.	Space Cluster Funding	UKSA	宇宙全般	60万ポンド	英国内の各地域の宇宙ビジネスを支援するプログラム。各地域で大学と産業界の連携を行う施設の設置等を行っている。
L.	Satellite Applications Catapult	Innovate UK	衛星全般	不明	衛星サービスに関して、産業界と学術界をつなげる取り組みをし、研究成果の速やかな市場投入を目指すプログラム。通信分野では5Gに関するプログラムを実施している。

ii. 日本における支援プログラム

- 我が国の研究開発支援制度については、光通信、5G、量子暗号、IoTなどの先端分野に特化した支援プログラムから、衛星全般を対象としたものまで各種分野への支援制度が用意されている。予算規模については、内閣府や総務省が比較的大型の支援プログラムを主導している。
- 本調査の調査項目で見ると再生・非再生中継に関する研究開発への支援は見られなかった。

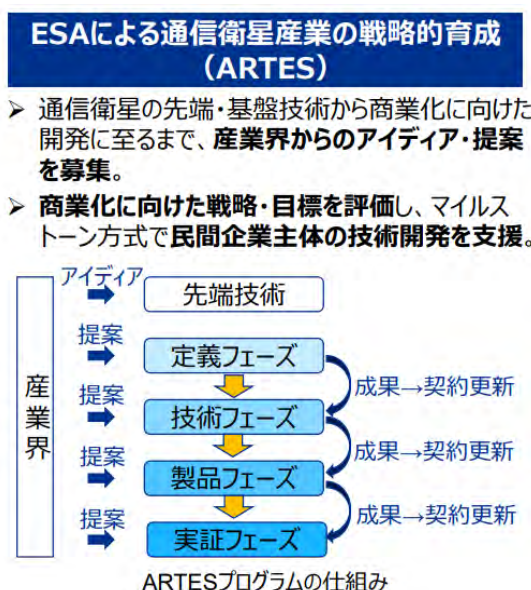
iii. 海外における支援プログラム

- 欧州ではARTESがあらゆる領域・ステージに対する支援を実施している。英国では、各地方に宇宙産業に特化した研究開発拠点の設置を支援しており、特色のある取り組みである。米国では、従来のISS向けの通信システムを代替するための研究開発プログラムを実施している。
- ESAのプログラムであるARTESは、衛星通信に関するあらゆる分野・ステージの企業及び企業連合体（コンソーシアム）に対して支援を実施している。支援額は10-50万ユーロ程度である。また、技術成熟度により支援割合が50-100%で変動する³⁵⁵。1回当たりの支援額は少ないが、ステージに応じて契約更新がなされる。
- 支援対象は、三種類に大別されており、次世代通信技術に投資をする「Core competitiveness」、官民連携のプロジェクトに投資をする「Partnership Projects」、衛星通信の地上での新たな応用例に投資をする「Business Applications and Space Solutions (BASS)」がある。
- 支援対象の選定に当たっては、特定のテーマに対する入札による選定以外に、提案募集(CfP)やアイデア募集(CFI)を実施していることが特徴である³⁵⁶。これにより産業界からのアイデアや提案を吸収し、柔軟に先端技術を支援することが可能になっている。

³⁵⁵ <https://connectivity.esa.int/how-apply>

³⁵⁶ <https://connectivity.esa.int/open-call-proposals>

図表 187 ARTES プログラムの概要図



出所) 内閣府³⁵⁷

- 英国では、地域ごとに宇宙産業に特化した研究開発拠点を置いている。これらの研究開発拠点は Space Cluster Funding 及び Satellite Applications Catapult が支援を行っている。ここでは、通信分野に特化した二つの拠点について紹介する。
- イングランド北東部に設置されている「Space North East England」では、Northumbria University が中心となって光通信に関する研究開発を実施。2023年11月には、UKSA とロッキード・マーチン社から総額 5000 万ポンドの資金提供を受けることが発表されている³⁵⁸。また、インキュベーション施設も設置され、大学と産業界の連携が取れるようになっている。
- ロンドンから 80km 北西にある「Westcott Space Cluster」では 5G に関する研究開発を実施している。Satellite Applications Catapult が出資した試験センターも設置されている。研究開発用のライセンスが付与されているため、5G のテストを実施することができる³⁵⁹。実際に OneWeb が実証実験を行っている³⁶⁰。
- 米国では、NASA が保有している従来のデータ中継衛星システムである TDRS を代替する衛星通信網を構築するための研究開発プログラムが実施されている。TDRS システムは ISS や観測衛星との通信に用いられる静止衛星による通信網である。「Communications Services Project (CSP)」では、この TDRS を民間の衛星通信網で代替するためのプログラムで、民への置き換えと同時に、双方向の大容量通信といった追加機能の搭載も目指している³⁶¹。
- プログラムは、三段階からなっており、第一段階で要件定義を行い、第二段階で開発と実証、第三段階で複数企業から通信サービスの調達が行われる予定である。現在はフェーズ 2 で 2022

³⁵⁷ https://www8.cao.go.jp/space/committee/dai107/siryout2_1.pdf

³⁵⁸ <https://www.northumbria.ac.uk/about-us/news-events/news/north-east-space-skills-and-technology-centre/>

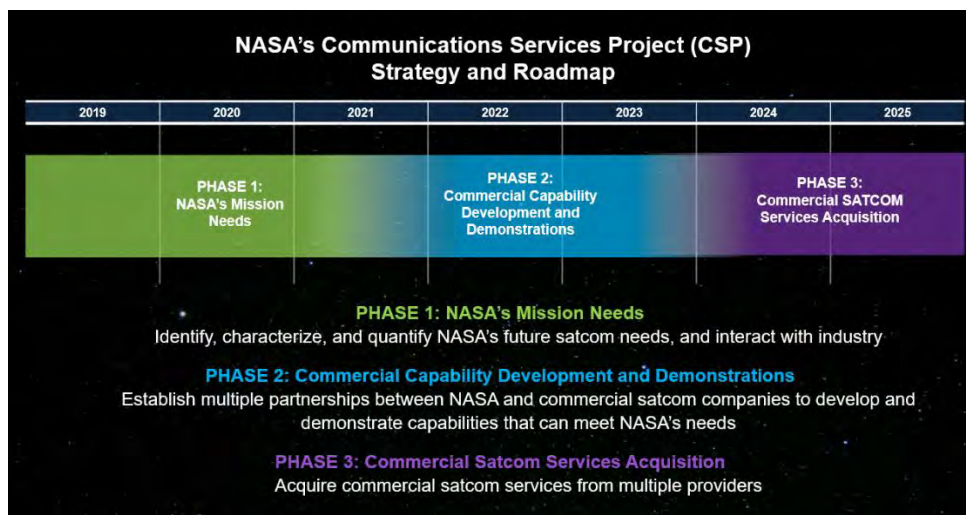
³⁵⁹ <https://westcottspacecluster.org.uk/centres/future-networks-development-centre/>

³⁶⁰ <https://sa.catapult.org.uk/news/oneweb-to-open-its-first-sales-and-demo-experience/>

³⁶¹ <https://www1.grc.nasa.gov/space/scan/communications-services-program/>

年 4 月の発表では、Inmarsat、SpaceX、Kuiper、SES、Telesat、Viasat の 6 社のプロバイダーが選定されたことが発表された³⁶²。これらのプロバイダーは政府拠出額と同等以上の投資を行う必要がある。Amazon の Kuiper や SpaceX は低軌道衛星による光通信を提案しており、SES や Telesat は静止軌道衛星の C、Ka バンドによる通信を提案している。

図表 188 CSP のロードマップと各フェーズ



出所) NASA³⁶³

iv. 日本の今後の研究開発支援策についての考察

- 今後の我が国の新たな研究開発支援策として、考えられる施策について示す。
- NASA の CSP プログラムは、NASA のニーズに沿って各企業に研究開発を委託し、将来的な調達を約束しているという点で新たな取り組みである。企業側にとっては、完全に希望通りの研究開発を実施することはできないが、将来の調達を期待し、またその規模も予測することができるというメリットがある。CSP プログラムは NASA の既存の通信システムを置き換えるものである。我が国で導入する場合、政府が保有している通信衛星としては、防衛省の X バンド防衛通信衛星「きらめき」と内閣官房の情報収集衛星のデータ中継衛星（JAXA 側の呼称としては光衛星間通信システム「LUCAS」）がある。CSP プログラムでも 5 年以上かけて、調達する衛星の研究開発を各企業に委託している。我が国でも将来のこれらの衛星の更新を見据えて、民間から通信サービスの調達に切り替えることも検討していくべきだろう。
- また、通信衛星技術に特化した研究開発拠点を設置することも考えられる。英国の Space Cluster Funding 及び Satellite Applications Catapult は英国内の地方に研究開発拠点を整備し、テスト環境の提供や研究施設及びインキュベーション施設の設置を行っている。我が国で実施する場合、NICT が Beyond 5G 共用研究開発テストベッド³⁶⁴を整備しており、これらと連携することが考えられる。

³⁶² <https://www.nasa.gov/news-release/nasa-industry-to-collaborate-on-space-communications-by-2025/>

³⁶³ <https://www1.grc.nasa.gov/space/scan/communications-services-program/>

³⁶⁴ <https://www.nict.go.jp/collaboration/utilization/B5G/index.html>

C) アクションプランとレコメンデーション

- 上記基本的な考えの下、本調査から得られた今後の文部科学省殿のアクションプランに関するレコメンデーションは下記のとおりである。
 - ◇ まずは本調査にて抽出した日本の強みを踏まえ、「HAPSの研究開発」、「Q/V帯通信向け降雨減衰予測モデルの確立」、「一体化通信に向けたセキュリティ技術（量子鍵配送等）の開発・実証等」において優位性を保持、もしくは新規に優位性を作り出すために選択と集中の方針を策定すべきである。なお、次期計画立案に向けて、日本や他国の動向調査を引き続き実施する必要がある。
 - ◇ 研究開発そのものに加え、標準化や宇宙通信関連のセキュリティガイドラインなど、研究開発を推進する上で重要な環境整備の領域のキャッチアップも必要である。
 - ◇ 下図表はその全体像を示したものであるが、特にオレンジ部が技術開発の点で特に重要な部分であり、文部科学省が主として担当すべき領域と考えられる。

図表 190 アクションプランに関するレコメンデーション

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

技術開発の点で特に重要

3. 調査結果のとりまとめ

- 通信衛星に係る外部環境変化とそれに伴う国内リソースの強み・弱みを分析し、通信衛星の研究開発立案に資する示唆を得ることを目的とした。
- 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析では、衛星システム IoT や衛星による量子暗号配送システムの研究開発やサービス展開の動向変化が大きいことが把握できた。
 - ◇ ライセンスが必要な衛星 IoT サービスは、日本の携帯電話事業者は海外の衛星通信事業者と提携しており、日本の衛星事業者が参入する余地は少ない。一方で、ライセンス不要な衛星 IoT については、利用できる周波数が国ごとに異なることから海外事業者による輸出入は進んでいない。通信量が少ないことから超小型衛星で通信網を整備でき、日本の事業者にも参入余地が十分あることがわかった。
 - ◇ 世界の衛星による QKD の研究開発状況としては、各国で進められているが、基本的には研究開発・実証フェーズであり、商用 QKD の展開にはまだ一定の時間を要することが把握できた。その中で、日本は光通信を用いた物理レイヤ暗号の技術で先行しており、また地上 QKD で培った技術を活かすことで衛星 QKD の領域ではプレゼンスを高められる可能性があることがわかった。
- マルチオービットアーキテクチャの調査分析では、GEO/MEO や GEO/LEO の組み合わせによる通信サービスを開始している海外事業者もあり、多軌道衛星による通信サービスの展開という点では日本が大きく劣後していることがわかった。一方で、NTN の一要素である HAPS に関しては、国内外ともに研究開発・実証フェーズに留まっている状況の中、日本でも複数の大手通信事業者を中心に実証が進められており、将来的に日本として強みを発揮できる可能性があることが把握できた。
- トランスペアレントペイロードの調査分析では、日本がこれから軌道上実証という段階である一方で、海外では既に商用衛星への搭載が始まっている。また、ノントランスペアレントペイロードに調査分析においても、日本では継続的な研究開発が確認できない一方で、海外では継続的な研究開発から商用フェーズへと移行しており、日本がこれからキャッチアップして市場を獲得することは難しい状況であることが判明した。
- Q/V 帯降雨減衰・大気湿度の影響調査では、高周波数帯における降雨減衰に関する取り組みが欧州や日本を中心に進められているが、そのほとんどが研究フェーズであることが判明した。日本でも HAPS を活用した降雨減衰対策の実証が進められており、また日本は先進的な降雨レーダーを持っていることから、降雨レーダーを活用した降雨減衰推定法を確立などでも強みを出せる可能性があることが判明した。
- 10～20 年後の将来を念頭に、日本の地理的及び環境的なリスクの低減に資する技術の調査では、リスクの低減を図る公共衛星（耐リスク衛星）に適用される技術について調査を行い、日本の地理的及び環境的なリスクの低減に資する技術という観点で、研究開発の方向性が民間と一致することが確認できた。
- 全体の傾向として、日本は各領域で商用化の面では他国に大きく劣後するものの、個別の要素技術では強みを出せる分野・領域もあることが確認できた。

- 上記の調査結果を踏まえた上で、戦略マップおよびアクションプランに関するレコメンデーションを以下のようにとりまとめた。
 - ◇ まずは本調査にて抽出した日本の強みのある分野・領域に対して、優位性を保持、もしくは新規に優位性を作り出すために選択と集中の方針を策定することが、アクションプランの最初のステップとなる。
 - ◇ また、研究開発そのものに加え、NTN と地上通信の一体化を見据えた標準化の動向や、宇宙通信関連のセキュリティガイドラインなど、研究開発を推進する上で重要な環境整備の領域でのキャッチアップも必要である。