

# 宇宙光通信



国立研究開発法人 情報通信研究機構



国立研究開発法人情報通信研究機構

とよしま もり お **豊嶋 守牛** 

## 1. はじめに

2021年(令和3年)は、民間人のみによる宇宙旅行が世 界で初めて実現でき、世界が火星や月への探査に注目する など、宇宙への関心が高まる年となった。一方、通信の分 野でも2020年に始まった地上ネットワーク (Terrestrial Network: NT) の第5世代移動通信システム (5G) の次の システム、いわゆるBeyond 5Gや第6世代移動通信システム (6G) に向けた検討が世界各国で開始されている。同じく 2021年は、情報通信研究機構 (NICT) で、第5期中長期 計画が始まり、Society 5.0の早期実現に向けた次世代ICT 基盤に必要不可欠な先端技術として、研究4領域 (Beyond 5G、AI、量子情報通信、サイバーセキュリティ)について 重点的に研究開発を進めている。ワイヤレスネットワークの 研究開発では、陸・海・空・宇宙のあらゆる状況や環境の 下で「繋がる」研究開発や、Beyond 5Gや6Gを見据えて、 環境と調和した豊かなコミュニケーションを持続的に実現 できる無線技術・システムの普及に取り組んでいるところで ある。特にBeyond 5Gでは、地上、空、海、宇宙を3次元 にシームレスにつなぐネットワーク実現に向けて研究開発を 開始した。一方、3GPPでは、非地上系ネットワーク(Non-Terrestrial Network: NTN) が定義され、NTNがBeyond 5Gネットワークのなかで重要な位置付けとなっている。そ のなかで、光空間・宇宙光通信技術は干渉に強く、小型・ 軽量化に適した特徴を有し、電波(RF)では達成できな い高速・大容量な通信手段として注目されており、NTNに おける通信へ革新的な飛躍をもたらす手段であると期待 されている。ここでは、宇宙通信技術に関する研究開発 の最新動向として、宇宙光通信を取り上げ、世界動向や NICTの研究開発も交えて紹介する。

### 2. 最近の宇宙通信の動向

RFの衛星通信では、これまでは主にC/Ku帯の周波数

が用いられてきたが、近年ではKa帯を使い、多数のマルチビームと中継機を装備することで従来の10倍以上の通信容量を実現したHTS(High Throughput Satellite)衛星の市場投入が、欧米勢を中心に進められている[1]。代表的なHTSは数十~100ビームを有し、総スループットは数十~100Gbpsである。最近では、Very High Throughput Satellite(VHTS)と呼ばれる数千ビーム・1Tbpsクラスの衛星システムが計画されている[2-4]。

従来のHTSでは、マルチビームの各ビームに対する通信 容量の割当てが固定的であることから、運用期間中の通信 要求の要求帯域や利用地域等の変化に対応できず、通信 容量の不足や無駄が発生することが課題である。そこで次 世代HTSには、通信資源を効率的に利用するための衛星中 継器のフレキシブル化、デジタル化 [5] が鍵となる (チャネ ライザ、デジタルビームフォーマ (DBF)、ビームホッピング 等)。また、従来のHTSはKa帯の利用が中心であるが、よ り高い周波帯のQ/V帯を含め、ITUへのファイリングが多 数行われており、将来的な電波資源の枯渇を踏まえた大容 量化が課題である。そこで次世代HTSには、柔軟性の向 上・デジタル化、更なる大容量化、地上の5G/Beyond5Gと の連携が求められるなか、電波に比べ本質的に飛躍的な 大容量化が可能となる光通信を特に大容量化が必要な フィーダリンクに利用する技術が鍵となる。光通信はデー タ中継衛星への利用が進んでいるが [6]、大気揺らぎのある GEOのフィーダリンクと地上局間の通信利用は研究開発段 階である。

一方、小型の人工衛星の実用化が容易になったことにより、中・低軌道の多数の小型衛星を連携させて一体的に運用する衛星コンステレーション技術は、低遅延・高速大容量通信を実現できるため、民間の企業が通信ビジネスに参入する時代となった。さらに、航空機、船舶、衛星系を含めた移動体向けのNTNへの高速・大容量化では、高度約

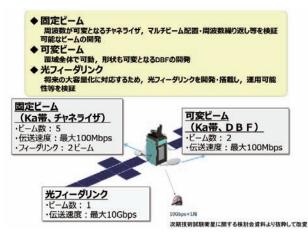
20kmで定点に滞空する高高度プラットフォーム局(HAPS)の開発が進められている[7]。

このようなNTNを実現するための通信技術として、宇宙 光通信技術は、干渉に強く小型化や軽量化に適しているた め、RFでは実現できない高速・大容量通信技術として光 通信が注目されている。光通信を用いると、搬送波周波数 が数百THzであり、帯域幅においてはほぼ制限がなく、干 渉に強く法的規制を受けないため、非静止衛星通信網の衛 星コンステレーションなどへの空間光通信技術の適用が期 待されている。

## 3. 技術試験衛星9号機の開発と光通信システム

#### 3.1 技術試験衛星9号機

2021年現在、次世代ハイスループット衛星通信システム の技術実証に向け2023年度打ち上げを目指して技術試験 衛星9号機(ETS-9)の開発が進められている[8]。本衛星 では、Ka帯を利用した伝送速度100Mbpsでの大容量移動 体通信と、ビーム可変、周波数帯域可変によるトラフィック 変動に対応するフレキシブルな中継技術の実証、レーザ光 による伝送速度10Gbpsでの光フィーダリンク回線の実証、 5G/Beyond 5Gとの連携の実証を目指している。ETS-9の 通信システムは衛星に搭載される4つの通信ミッションと地 上セグメント (Ka帯、光の地上通信システム) で構成される。 通信ミッションは、スケーラビリティを考慮したコア技術の 実証に絞り、総務省が固定ビーム通信サブシステムとして 広帯域チャネライザ・マルチビーム給電部技術 [9] 及び可変 ビーム通信サブシステムとして広帯域DBF技術<sup>[3]</sup>を開発し、 NICTが光フィーダリンク通信サブシステムとして光衛星通 信技術 [10] 及びビーコン送信等を目的とした共通部通信サ

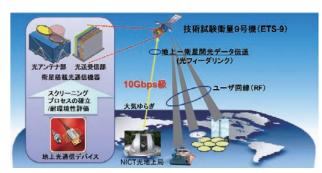


■図1. ETS-9通信ミッションの概要

ブシステム[11] の開発を推進している。図1に通信ミッション の概要を示すとともに、以下に光通信ミッションについて説明する。

#### 3.2 ETS-9の光通信ミッション

ETS-9の光通信ミッションでは、図2に示すように、周波 数ひっ迫の課題を解決する手段としてレーザ光を使い、最 大10Gbpsの世界最高レベルの通信容量を静止軌道一地上 局間にて実証する光衛星通信技術を目標としている。 ETS-9に搭載する光通信システムをHICALI (High Speed Communication with Advanced Laser Instrument) & 呼んでいる。HICALIでは、地上の光通信ネットワーク用 に開発された高速のデバイスを宇宙空間で使うため、NICT の高度通信・放送研究開発委託研究を通じ、環境耐性や 信頼性を確保するためのスクリーニングプロセスの確立を 目指している。HICALIを用いた静止軌道一地上間の光通 信実験では、軌道上における光通信デバイスの動作確認、 伝送速度10Gbpsの高速光通信機能の確認、レーザ光の 伝搬データの取得、気象条件に応じたサイトダイバーシティ 実験、補償光学を含む光地上局における新技術の検証を 計画している。



■図2. 10Gbps級ETS-9光通信ミッション

## 4. 光空間・宇宙光通信の非地上系ネットワークへの展開

近年、キューブサット級超小型衛星により、光通信の利用が軌道上で実証され、衛星通信分野で革新的な変化が起こっている。図3に、光空間及び宇宙光通信技術を用いた主なアプリケーション例を示す。Beyond5G/6G時代のNTNへの光通信技術の応用に向けて、様々な形態が考えられる。このとき、ドローンやHAPSを用いた地上での光空間通信、キューブサットなどの超小型衛星を用いた光通信、衛星コンステレーションのバックボーン通信網への応用、更には深宇宙へのバックボーンの構築が考えられる。



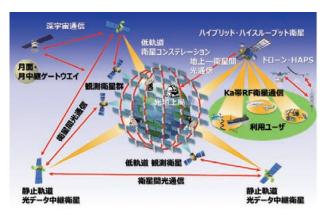
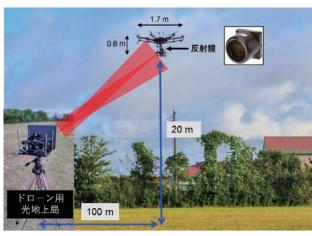


図3. 光空間及び宇宙光通信技術を用いた主なアプリケーション例

#### 4.1 NTNへの空間光通信技術の研究開発

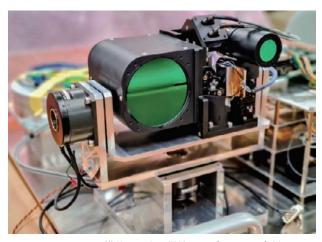
Beyond5G/6Gでは、NTNでの無線通信の速度と容量を向上させることが課題であり、HAPSや無人航空機に対して空間光通信技術を応用することが重要と考えられている。また、緊急時や臨時イベントの場合にドローンを使った光空間通信により一時的な高速通信回線を提供できる可能性がある。NICTは、ドローンなどの無人航空機に光宇宙通信技術を応用することを目的として、超小型光通信機器の研究開発を行っている。図4は、NICTが開発した小型無人機光学地上局を用いて、ドローンの捕捉追跡実験を行った様子を示している。

一方、ブレードを搭載したドローンは振動による姿勢の 乱れが大きいため、光通信機器を連続的に追尾するため にはプラットフォームの振動環境を把握する必要がある。 さらに、ドローンのホバリング時には、GPSの誤差や局所 的な風向き/速度による外乱により姿勢がランダムに変化す るため、これらの特性を考慮して機器を設計する必要があ



■図4. ドローンを用いた空間光通信の捕捉追跡実験

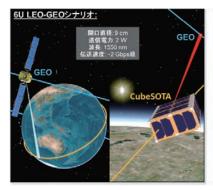
る。また、図5に、HAPS用光通信装置のプロトタイプの外観を示す。HAPSは、上空20kmの高度でのサービスとなるため、ドローンより広域なサービスエリアを提供でき、衛星よりも低遅延での通信サービスが可能であるという特徴がある。一方、HAPSへの搭載環境は、通信ペイロードの電力や重量が制限される上、成層圏環境下という動作環境も厳しく、通信機器の設計に配慮する必要がある。

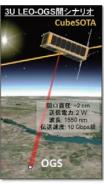


■図5. HAPS搭載用の光通信機器のプロトタイプ外観

#### 4.2 超小型衛星と光通信

超小型衛星の光通信技術の開発を目的に、NICTは、2015年6月に6kg級の小型光トランスポンダ(SOTA)を開発し、50kg級の超小型衛星に搭載された世界初のケースである光通信実験と衛星量子通信の基礎実験に成功した[12]。現在では、図6に示すようなキューブサット搭載用光通信機器(CubeSOTA)の研究開発を進めており、6U(1Uは10cm四方)の低軌道(LEO)一静止軌道(GEO)間で2Gbps級の光通信、3UのLEO一地上間で10Gbps級の光通信の宇宙実証を目指して研究開発を推進している。一方、ソニーコンピュータサイエンス研究所では、2019年9月に国





■図6. キューブサット用光通信機器の開発

際宇宙ステーション (ISS) に光通信機器を打ち上げ、NICTの光地上局 (OGS) を利用した光通信の実証実験を行い成功した[13]。海外では、2018年米国Aerospace Corporationが、1.5UサイズのOptical Communications and Sensor Demonstration (OCSD) キューブサット (AeroCube-7B, 7C) を用いて、LEOと地上の間で、波長1.06 μm帯強度変調法式による100Mbpsの光通信実験に成功している[14]。このクラスの衛星では世界初の成功となる宇宙実証のため、今後ますます普及が拡大すると考えられる。また、ドイツ航空宇宙センター (DLR) の光通信研究グループは、小型衛星用の光赤外高速通信回線システム (OSIRIS)計画において、軌道上実証を進めており、1Uのキューブサットで100Mbpsの光通信実験の実証を計画している[15]。その技術を利用し、2021年1月に3Uキューブサット (PIXL-1)の打ち上げに成功している。

#### 4.3 衛星コンステレーション

近年、複数の非静止小型衛星との通信サービスをグロー バルに提供する衛星コンステレーションの概念が世界中か ら登場している。頭角を現しているのは、米国のSpace-X のスターリンクプロジェクトであり、既に1,000機以上の衛星 をLEOに打ち上げている。将来的には12,000機の衛星を 軌道に乗せ、最大1Gbpsのグローバルインターネット接続を 提供する予定である。米国アマゾンは、LEOで3.236衛星 を打ち上げる計画 (Project Kuiper) を公表しており、地 球上のどこでも高速、低遅延のブロードバンドインターネッ ト接続サービスを提供する計画である。また、光通信の利 用についても言及している。米国Laser Light Communications社は、12個の中高度軌道(MEO)衛星を使用した 33Tbps以上の通信容量の光通信サービスを検討しており、 2018年8月にEmpower Space Allianceを設立した。2019年 5月にNASAから宇宙通信及びナビゲーション(SCaN)プ ログラムの宇宙中継パートナーシップの契約を締結した。ま た、小型衛星を利用した計画では、米国Analytical Space 社がLEOへのナノ衛星の打ち上げ、衛星データ中継ネット ワークの構築を目指しており、RF通信と光通信の両方を利 用する予定である。中国のHuaweiは、Beyond 5Gの時代 を見越して、10,000個のLEO衛星(Massive VLEO)を使 用するプロジェクトを発表した。複数の衛星で単位面積あ たりの端末数を確保し、テラヘルツや光を利用した異種ネッ トワークを構築することで、数億人のユーザーの市場を目 指す計画である[16]。日本では、NICTがBeyond 5G研究

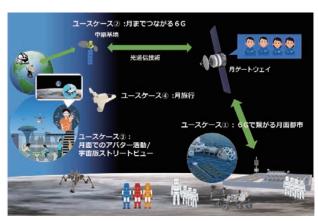
開発促進事業において、小型衛星コンステレーション向け の衛星搭載光通信技術の研究開発を推進しており、日本 での研究開発が加速することが期待されている。

## 5. 深宇宙用光データ中継衛星と光通信技術の研究開発

光データ中継衛星については、欧州ではコペルニクスプ ロジェクトと呼ばれるLEO観測衛星を用いた地球環境測定 の方針が推進されている。欧州宇宙機関(ESA)は、 GEOを介して光データを中継する欧州データ中継システム (EDRS) を運用し、1.8Gbpsの光通信回線を実用化して いる<sup>[17]</sup>。日本では、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が 2020年11月29日にGEOで光データ中継衛星システムを打ち 上げ、沖縄のNICT光地上局を利用した衛星搭載光通信 機器の健全性を確認済みであり、今後、観測衛星からの 光データ中継を計画している[18]。米国では、NASAの光 データ中継衛星デモンストレーションシステム(LCRD)が 2021年にGEOに打ち上げられる予定である[19]。また、米国 のSkyloom Global社は、軌道高度約32,000kmに配置され たMEO衛星を利用し、ユーザーのLEO衛星と光地上局を 光通信で接続することで、衛星と地球の通信のボトルネッ クを解消することを目指している。また、リトアニアの Space Unionや日本のワープスペースも同様のサービスを検 討しており、民間企業による光データ中継サービスの新た な動きも見られる。

深宇宙への開発では、NASAが2025年にISSへの予算 配分の終了を宣言する一方で、国際協力等による月への有 人宇宙探査計画「アルテミス計画」が推進されている。こ の計画では、月近傍において、1Gbps級の光通信インフラ を構築することが検討されており、高感度なパルス位置変 調(PPM) 方式を用いた光通信技術の利用が検討されて いる。NICTは、2021年4月1日、Beyond 5G/6G技術の進 歩によって実現が見込まれる社会的イメージとユースケース 及びそのために必要な要素技術や研究開発ロードマップな どをまとめたホワイトペーパーを作成及び公開した[20]。そ のなかで、図7のように月面都市を想定し、利用シーンから 必要なユースケースを検討し、それに必要な要素技術を検 討している。ここでは月面都市の開発は2035年ごろに始ま り、多くのアバターが月面で作業を行い、月ゲートウェイと 地球からリモートで人によって制御されていると考えられて いる。そのような時代には、地球と月をつなぐ高速・大規 模な光通信技術が不可欠であり、将来に向けた通信技術 の研究開発が必要と考える。





■図7. NICTホワイトペーパーにおける月面都市のシナリオ例

# <u>6. おわりに</u>

本稿では、宇宙通信技術に関する研究開発の最新動向及び宇宙光通信を取り上げ、世界や日本の研究開発について紹介した。Beyond 5G/6G時代には地上とNTNが一体となるネットワーク開発が重要であると考えられ、特にNTN及び宇宙では、光通信の役割が重要となると予想される。これまで宇宙通信の開発は公的な機関が主なプレーヤーであったが、今後は民間での開発が期待される。

#### 参考文献

- [1] High Throughput Satellites: On Course for New Horizons, Euroconsult, 2014.
- [2] "ViaSat-3 satellite constellation," https://www.viasat. com/space-innovation/satellite-fleet/viasat-3/
- [3] "KONNECT VHTS, Delivering high-speed broadband across Europe," https://www.eutelsat.com/satellites/future-satellites.html
- [4] "NEW TO O3b mPOWER," https://o3bmpower.ses. com/newsroom/new-o3b-mpower
- [5] "702X: The Flexibility to Meet Changing User Needs," https://www.boeing.com/space/boeing-satellite-family/702X/index.page
- [6] "光衛星間通信システム (LUCAS)," https://www.satnavi.jaxa.jp/project/lucas/

- [7] 長手, "成層圏プラットフォーム及びHAPS移動通信システムの研究開発," ITUジャーナル、Vol.51、No.10、pp.26-29、2021年10月.
- [8] 三浦他, "技術試験衛星9号機通信ミッションの概要と固定ビーム系通信ミッションの状況," 第63回宇宙科学技術連合講演会、1K05、2019年11月.
- [9] 草野他, "技術試験衛星9号機Ka帯デジタルビームフォーミングの開発," 第63回宇宙科学技術連合講演会, 1K06, 2019年11月.
- [10] 宗正他, "技術試験衛星9号機光フィーダリンク通信サブシステムの開発," 第63回宇宙科学技術連合講演会, 1K07, 2019年11月.
- [11] 織笠他,"技術試験衛星9号機搭載共通部通信サブシステムの開発,"第63回宇宙科学技術連合講演会,1K08,2019年11月.
- [12] H. Takenaka, et al, "Satellite-to ground quantum-limited communication using a 50-kg class microsatellite", Nature Photonics, Vol. 11 (8), pp. 502-508, 2017.
- [13] K. Iwamoto, et al., "Small optical inter-satellite communication system for small and micro satellites", Proc. SPIE, 100960T, pp. 212-218, 2017.
- [14] T. S. Rose, et al., "Optical Communications Downlink from a J.5U Cubesat: OCSD Program," ICSO 2018, Proc. of SPIE, 11180J, pp. 201-212, 2019.
- [15] C. Fuchs et al., "Update on DLR's OSIRIS program", ICSO 2018, Proc. of SPIE, 111801, pp. 192-200, 2019.
- [16] W. Tong, "A Perspective of Wireless Innovations in the Next Decade", IEEE Globecom 2018, Keynote Session, Abu Dhabi, UAE, December, 2018.
- [17] H. Hauschildt, et al., "Global quasi-real-time-services back to Europe: EDRS Global", ICSO 2018, Proc. of SPIE, 11 I 80X, pp. 353-357 (2019)
- [18] NICT プレスリリース "光データ中継衛星搭載の光通信機器チェックアウトにおける光地上局との捕捉・追尾成功について", 2021.
- [19] B. L. Edwards, et al., "An Overview of NASA's Latest Efforts in Optical Communications", IEEE ICSOS 2015, Proc. IEEE Xplore, pp.1-8, 2015.
- [20] NICT プレスリリース "Beyond 5G/6G及び量子ネットワークに関するホワイトペーパーの公表", 2021. https://www2.nict.go.jp/idi/#whitepaper