

特集

2-2

宇宙統合コンピューティング・ネットワーク構想の
実現に向けた基盤技術の研究開発Research and Development of Key Technologies for Achieving Space
Integrated Computing Network

山下史洋 堀 茂弘

abstract

NTT ではスカパー JSAT と連携して宇宙空間を活用した持続的社会的実現を目指して提唱している宇宙統合コンピューティング・ネットワークの構想を掲げている。本構想は宇宙センシング、宇宙データセンター、宇宙 RAN の三つのコンセプトから構成される。本稿では、宇宙統合コンピューティング・ネットワーク構想の実現に向け、関係機関と連携して取り組んでいる主要技術の研究開発について解説する。

キーワード：宇宙、衛星、通信、データセンター、センシング、RAN、NTN

1. はじめに

NTT（以下、当社）では最先端の光関連技術及び情報処理技術を活用した未来のコミュニケーション基盤として2019年にIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想を掲げ、“Digital to Natural”と“Electronics to Photonics”の二つの進化により、持続的成長、安心安全信頼、及び個と全体の最適等様々な価値を生み出していく研究開発を推進している⁽¹⁾。このIOWN構想におけるWireless Networkの柱の一つとして宇宙通信の拡張が位置付けられており、現在、関係機関と連携しながらRF無線や光無線を用いた宇宙通信インフラ構築を目指して研究開発を進めている⁽²⁾。図1に当社とスカパー JSAT で報道発表した宇宙統合コンピューティング・ネットワークの構想を示す。本構想は上空20 kmの成層圏に無人航空機を停留させる高高度プラットフォーム（HAPS）、宇宙空間の低軌道・静止軌道まで視野に入れた垂直方向の宇宙通信・コンピュー

ティングインフラである⁽³⁾。この統合インフラはRF無線や光無線で接続され、究極的にはコンステレーションの分散コンピューティングによって処理を分担し、宇宙で発生するデータを宇宙で処理・分析を完結させることで、地上の災害等の影響を受けず、宇宙で自立して持続可能なインフラを目指している。

宇宙統合コンピューティング・ネットワークは三つの機能に対応している。一つ目は宇宙センシングで、地上ネットワークが届かないエリアでのIoT（Internet of Things）通信と衛星からの観測により、地球規模の包括的なセンシングの実現を目指す。二つ目は宇宙データセンターで、光電融合による衛星搭載機器の低消費電力化を実現することで、大容量の光無線通信とコンピューティング処理を備えたインフラを整備し、より即応性のある様々なアプリケーションを開発可能にする。三つ目は、宇宙 RAN（Radio Access Network）で、Beyond5G/6G時代に向け、地上と静止軌道（GEO）、低軌道（LEO）、HAPS等の通信インフラを統合し、超カバレッジ・超耐災害性などを目指す。

本稿では宇宙統合コンピューティング・ネットワークを構成する宇宙センシング、宇宙データセンター、宇宙 RAN の概要とそれを支える主要技術について解説する。

山下史洋 正員：シニア会員 日本電信電話株式会社 NTT アクセスサービス
システム研究所

E-mail fumihiro.yamashita.vp@hco.ntt.co.jp

堀 茂弘 (株)Space Compass

E-mail s.hori@space-compass.com

Fumihiro YAMASHITA, Senior Member (NTT Access Network Service Systems Laboratories, NIPPON TELEPHONE AND TELEGRAPH CORPORATION, Yokosuka-shi, 239-0847 Japan) and Shigehiro HORI, Nonmember (Space Compass Corporation, Tokyo, 100-0004 Japan).

電子情報通信学会誌 Vol.106 No.5 pp.376-381 2023年5月

©電子情報通信学会 2023

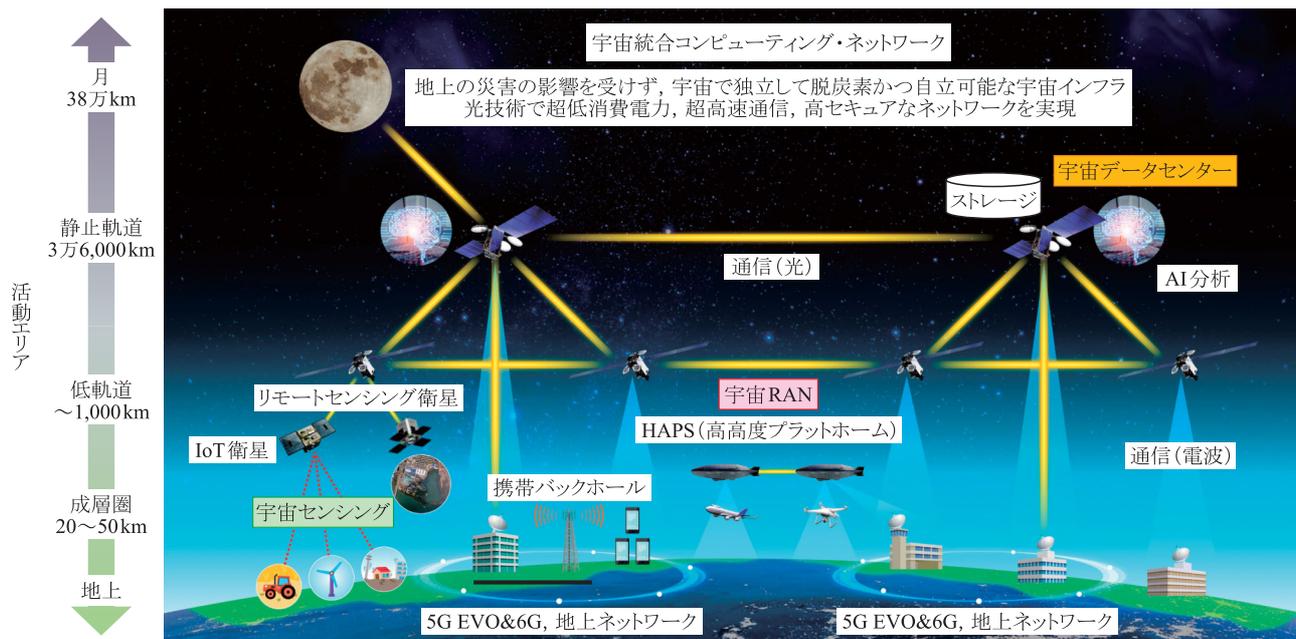


図1 宇宙統合コンピューティング・ネットワーク構想 上空20kmの成層圏に飛行船を停留させるHAPS、宇宙空間の低軌道・静止軌道まで視野に入れた垂直方向の宇宙通信・コンピューティングインフラ。

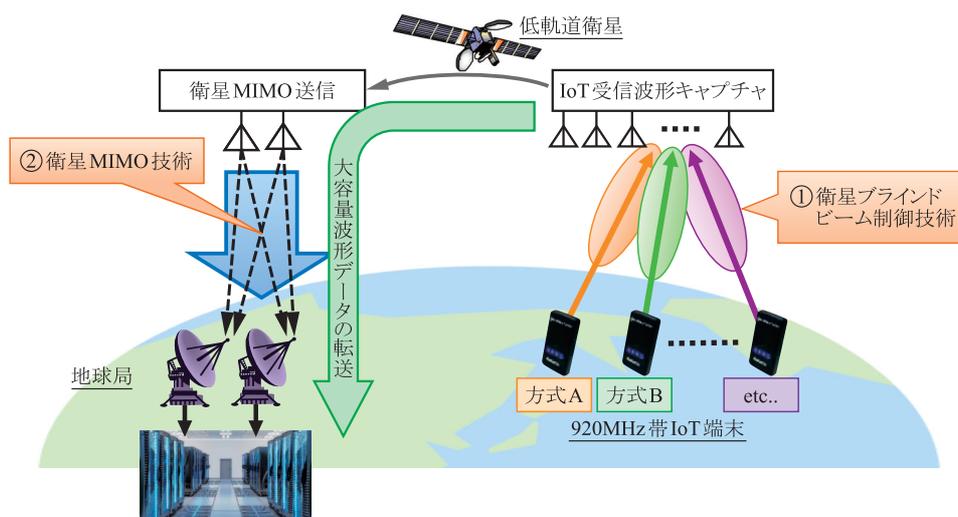


図2 衛星IoTプラットフォーム 地球上のあらゆる場所でつながる920MHz帯の安価なIoT端末で海洋など超広域かつ低頻度のセンシングデータ収集による新たな市場の開拓を目指す。

2. 宇宙センシング

2.1 コンセプト

上述したように、宇宙センシングはIoT通信と地球観測に大別される。まず、地球規模のIoT通信について説明する。図2に当社で研究開発を進めているIoT端末を用いた地球規模のIoTプラットフォームを示す。具体的には、地球上のあらゆる場所で行なわれる920MHz帯の安価なIoT端末で海洋など超広域かつ低頻度のセンシングデータ収集による新たな市場の開拓を

目指す⁽⁴⁾。ハードウェアは一般的な地上用LPWA (Low Power Wide Area) 端末を活用することで調達コストを抑制する。衛星はシンプルな構造で、受信した920MHzの信号波形をデジタルサンプリングして衛星搭載メモリに一旦ストアし、基地局上空を飛来するタイミングでメモリに蓄積されたデータを地球局にダウンリンクする。この際、LEO衛星が移動することでダウンリンクできる時間は限られ、更に利用できる周波数帯域も限られることから、異なる信号を同一周波数の複数アンテナで送受信するMIMO技術を活用することで

ウンリンクの大容量化を図る。

一方、リモートセンシング衛星からの地球観測は、高精細カメラ（光学センサ）画像と合成開口レーダ（SAR）衛星を用いたマイクロ波レーダの活用が有名であるが、当社では JAXA と連携し、テラヘルツのリモートセンシングにより雲降水システムにおける様々な凝結粒子を総合的に捉えるミッションを検討している。具体的には InP-HEMT/HBT の MMIC 技術を用いて試作された 300 GHz 帯のテラヘルツ帯無線デバイスを用いて、衛星搭載用 InP-HEMT/HBT 技術を用いた 325 GHz 帯の低雑音増幅器（観測用）の研究開発に取り組んでいる⁽⁵⁾。

2.2 主要技術

(1) 衛星ブラインドビーム制御技術

近年 920 MHz 帯を用いた地上 IoT 端末の台数はスマートメータの利用等により都市部で急速に伸びており、衛星に 920 MHz 帯の受信アンテナを搭載すると都市部からの干渉波も同時に受信する課題が予想される。そこで衛星に複数のアンテナを搭載し、大きな干渉源に対して衛星アンテナ指向性のヌル方向を向けて、他端末からの干渉を低減しつつ所望信号の受信利得を最大化するようにビーム指向性を制御する⁽⁶⁾。ただし、衛星が時々刻々移動することで衛星センサ端末と干渉源の相対関係も変化するため、リアルタイムでのビーム制御は困難である。そこで、衛星に搭載された複数アンテナで衛星センサ端末からの信号を一旦受信し、衛星を介して地上にダウンリンクした後、信号処理で端末単位に他端末からの干渉を低減しつつ所望信号の受信利得を最大化する方法を検討している。この地上での信号処理により、受信 SINR（Signal Interference Noise Ratio）向上を図る。

(2) 衛星 MIMO 技術

携帯電話や無線 LAN で使われている MIMO 技術は、アンテナを複数用いて限られた周波数で伝送容量を改善する技術であり、マルチパス環境で MIMO チャネルの相互相関が低いときに伝送容量が改善される。そのため、これまで衛星通信のような見通し環境ではパス間の相関が高く、MIMO 技術の適用が難しいとされてきた。この課題に対して当社では JAXA とともに、衛星に複数アンテナを搭載し、地上にも複数アンテナを設置するが、その地上のアンテナ間の距離を物理的に離すことでチャネル相関を下げる方法を提案している⁽⁷⁾。物理的に地上アンテナを離せばチャネル相関を下げるができるが、トレードオフとして受信チャネルの関係が相対的に非同期となる課題が生じる。この非同期受信環境において MIMO 干渉補償できる技術を考案した。原理的にはアンテナ数を増やせばスケラブルに容量が増えるの

も MIMO 伝送の大きな魅力の一つである。

(3) テラヘルツ帯無線デバイス技術

一般的なシリコンを用いた IC では、CMOS のような大規模な集積化により高機能化が可能だが、高速化や高出力化に限界がある。一方、InP 化合物を用いた IC では、高集積化は不得手だが、シリコンよりも高速化や高出力化が可能である。衛星からの雲降水システムにおける様々な凝結粒子を総合的に捉えるため、現在 InP-HEMT/HBT 技術を活用した 300 GHz 帯無線デバイスの衛星搭載性評価（耐放射線評価等）を実施している⁽⁸⁾。

3. 宇宙データセンター

3.1 コンセプト

観測衛星から地球局に直接データ伝送をする既存サービスでは地球局と通信できるタイミングや利用できる電波の周波数帯域による通信容量に制約があるのに対し、静止軌道衛星経由での光データ伝送を用いることで、大容量・準リアルタイムのデータ伝送が可能となる。当社とスカパー JSAT は共同で Space Compass 社を設立し、軌道上での高速光データリレー及び宇宙エッジコンピューティングを駆使して、地球観測衛星等のボトルネックである通信容量不足の解決やリアルタイム性の向上に貢献するプラットフォームの提供を目指している（図 3）⁽⁹⁾。まずは、観測衛星等により宇宙で収集される膨大な各種データを 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検討している。

3.2 主要技術

(1) 光無線技術

一般に光無線は RF 無線に比べて、伝送容量が大きく電波免許も不要のため、見通し環境である宇宙空間での利用に適している。衛星と地上間の光無線通信については、雲の影響や大気揺らぎに応じて通信品質が劣化するため、品質を担保する技術が必要であるが、大気の影響がない衛星と衛星間の通信では早期利用が期待されている⁽¹⁰⁾。当社においても JAXA と連携し、一般に用いられる低雑音光増幅器よりも原理的に 3 dB 雑音指数が低く、より低雑音増幅が可能な位相感応増幅器とその宇宙光通信適用の研究を進めている⁽¹¹⁾。

(2) 光電融合技術

今後 GEO/LEO/HAPS での複雑なコンピューティング処理が実現し、搭載機器が高機能化するにつれて、消費電力が課題となる。特に小形衛星は排熱スペースが限られており、機器の低消費電力化が必要となる。当社では IOWN 構想のオールフォトニクスネットワークの研

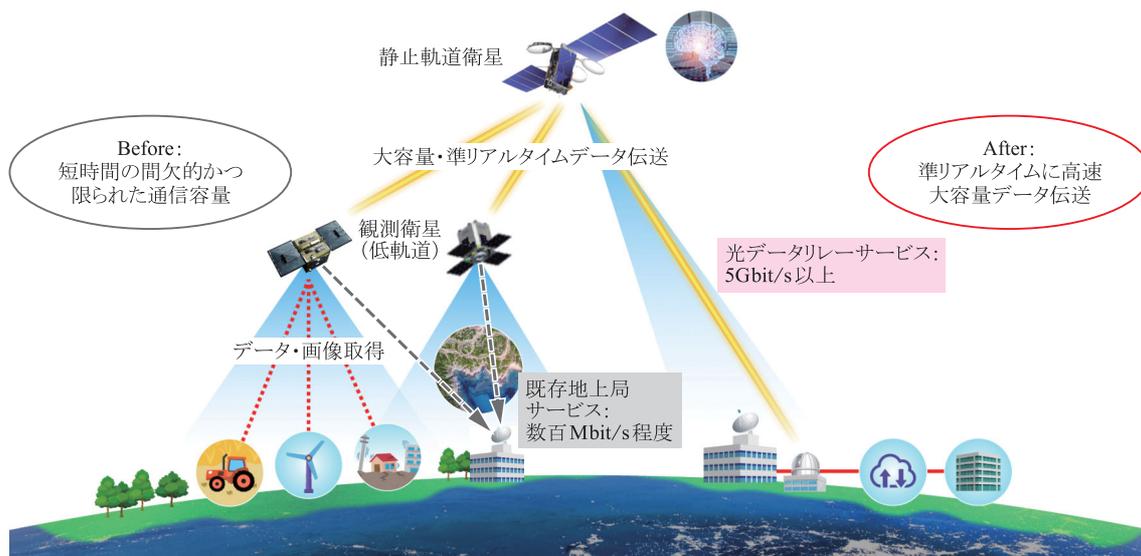


図3 宇宙データセンター構想 軌道上での高速光データリレー及び宇宙エッジコンピューティングを駆使して、地球観測衛星等のボトルネックである通信容量不足の解決やリアルタイム性の向上に貢献するプラットフォームを提供する。

究開発の中で、光変調や光トランジスタを基軸とした光電融合チップの研究開発を進めており、将来的にはこれらのチップを搭載機器に適用することで、衛星搭載装置の軽量化、低消費電力化を目指す⁽¹²⁾。

(3) コンピューティング技術

衛星で撮像する画像データは高精細になるほど容量が大きくなり、地上に伝送するのに時間を要する。一方、衛星で取得される画像データは全てが有用とも限らず、衛星上で必要なデータだけを選別して地上に転送することが期待されている。当社では限られた衛星上のコンピューティングリソースでできるだけ正確にイベントを判定する技術の研究開発を進めている⁽¹³⁾。

4. 宇宙 RAN

4.1 コンセプト

現在、B5G/6G時代に向けた研究や検討が各国で開始されているが、地上モバイルサービスエリアの超カバレッジ化もその研究の柱の一つと位置付けられ、衛星通信やHAPSの活用が議論されている⁽¹⁴⁾。超カバレッジの概念には地上のルーラルエリアだけでなく、空、海、宇宙も含まれ、NTN (Non-terrestrial Network) と呼ばれている。NTNでは通常のスマートフォンを用いた携帯電話サービスに加え、船舶・自動車・監視制御等の自動化/無人化で衛星通信が利用されると予想される。その際、地上ネットワークを利用できるエリアについては地上ネットワークを活用し、地上ネットワークのエリア外では衛星やHAPSを活用するなど、地上と上空のハイブリッドなネットワーク構成となる。これまで衛星

通信とモバイル通信は通信プロトコルが独立でI/F仕様も分かれており、それぞれで回線終端していた。今後はB5G/6G時代の超カバレッジサービスを見据え、5Gの通信仕様を一部衛星用にカスタマイズされた汎用チップを端末や基地局に実装することで、衛星と地上のシームレス通信接続が期待される。GEO/LEO/HAPSに対するアクセスサービスを統合した宇宙RANにより超広域カバレッジサービスを実現することで、災害対策だけでなく、離島やへき地のエリア化、飛行機や船などの通信環境の飛躍的な改善など、利便性の向上や新たな付加価値の提供が可能となる。

なお、上空方向のネットワークとして、GEO/LEO/HAPSは、カバレッジ・コスト・遅延・技術成熟度の観点で一長一短があり、いずれか一つに特定されない。例えば、GEOは1機の衛星でカバレッジが最大であるが、衛星伝搬遅延が250msとトレードオフがある。一方でLEOは伝搬遅延が数msであるが、上空を移動するためリアルタイム性を維持するには多数の衛星が必要となる。HAPSは伝搬距離が短く、スマートフォンからのダイレクトアクセスやスポットエリアでブロードバンドサービスを提供できる可能性が高いが、日本上空で安定した飛行/通信技術を確認し、低価格な通信機器が普及するまでに時間がかかる。その結果、各国の地域特性や通信事情も勘案し、地上とGEO/LEO/HAPSをベストミックスで柔軟に接続する世界になると考える。

4.2 主要技術

地上とGEO/LEO/HAPSを柔軟に接続するNTNの実現に向けて、以下の技術の研究開発を進めている。

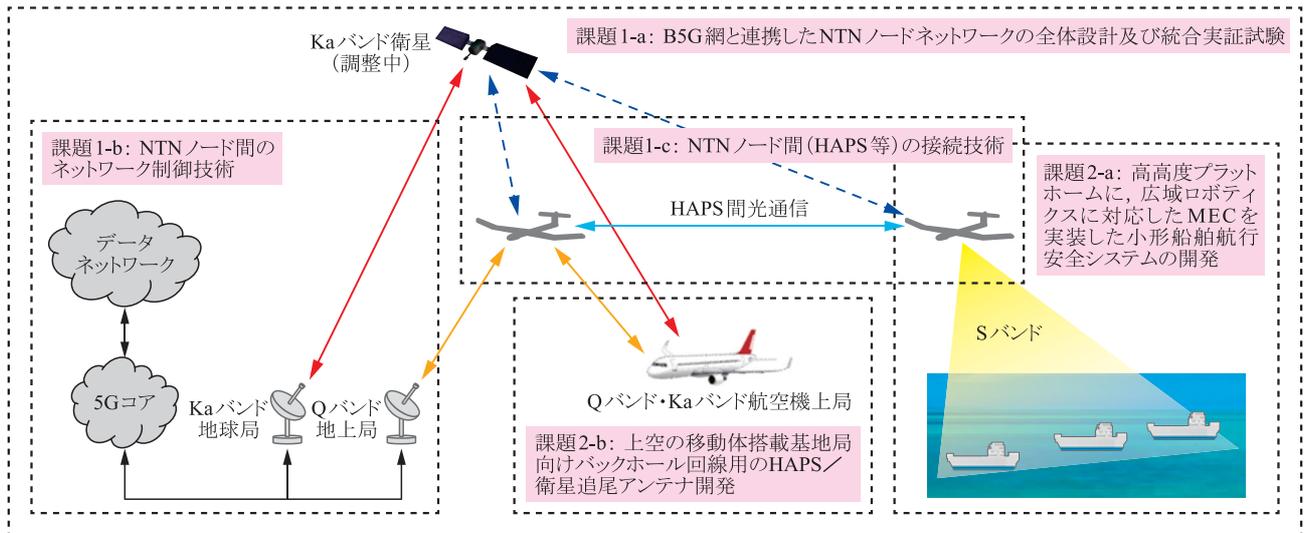


図4 非地上系ネットワークによるカバレッジ拡張通信システムの研究開発 スカパー JSAT, NTT, NTTドコモ, パナソニックで NICT Beyond 5G 研究開発促進事業委託研究を受託。

(1) NTN アーキテクチャ

GEO/LEO/HAPS 及び地上セルラ網を組み合わせてトラフィックを収容する場合、ネットワークのアーキテクチャ設計が重要となる。本技術を確立するため、現在 NICT の Beyond 5G 研究開発促進事業委託研究を活用し、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研究開発を進めている(図4)⁽¹⁵⁾。例えば GEO/LEO/HAPS に gNB の搭載有無によりネットワークアーキテクチャやトラフィックのルーティング方法が異なる。多層ネットワークをエンドツーエンドでシームレスに接続する転送アーキテクチャの確立が重要となる。一方で、GEO/LEO/HAPS の上空ネットワークは地上 5G や光ファイバ網に比べて伝送容量が限られるため、ふくそう時・降雨時・災害時などの周辺環境の変化に柔軟に対応するオペレーションが求められる。それぞれのインフラの特徴を加味しながら柔軟にトラフィックを収容する技術を確立するため、現在 NTN シミュレータを開発している⁽¹⁶⁾。また HAPS と地上 5G で同じ周波数を利用する場合は干渉が生じるので、シミュレータによる干渉評価や干渉回避技術の研究開発も進めている^{(17), (18)}。

(2) HAPS 搭載技術

現在 HAPS に搭載できる通信機器の重量/消費電力は限られており、現時点では HAPS 上で地上の携帯基地局相当の信号処理の実施は難しい。更なる HAPS 機体の進化が期待される。また、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も想定され、HAPS と基地局を接続するために、隣接する HAPS 同士や、HAPS と衛星を接続するマルチホッ

プ接続が必要となる。現在、マルチホップ接続実現の鍵となる HAPS 同士の光無線接続に関する実証実験に向けて研究開発を進めている⁽¹⁹⁾。

(3) ミリ波伝送技術

NTN サービスにおいて、モバイルユーザを想定したサービスリンクの高速化に伴い、それを束ねる衛星/HAPS と基地局間のフィーダリンクにはより高速な伝送容量が求められる。このため、フィーダリンクの周波数として WRC-19 で新規に割り当てされた Q バンド (30~40 GHz 帯) を活用することを想定している。しかしながら Q バンドは降雨減衰が大きく、日本のような多雨地域では降雨減衰補償技術が必要となる。従来からのダイバーシチ技術に加え、降雨予測に基づいてプロアクティブに基地局を切り換える技術や、前述した衛星/HAPS の光無線接続による降雨迂回制御技術についても研究開発を進めている⁽²⁰⁾。

5. おわりに

本稿では宇宙統合コンピューティング・ネットワーク構想を支える宇宙センシング、宇宙データセンター、宇宙 RAN プロジェクトとその主要技術を紹介した。いずれのプロジェクトもサービス化に向けて現在研究開発を遂行中である。今後とも実用化・商用化の出口を意識して、関係機関と連携しながら基盤技術の研究開発に取り組んでいく。

謝辞 衛星 MIMO 技術の研究開発、300 GHz 帯のテラヘルツ帯無線デバイスの衛星搭載によるセンシング技

術の研究開発，位相感応増幅器とその宇宙光通信適用の研究開発は日本電信電話株式会社と国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構との共同研究によるものである。

非地上系ネットワークによるカバレージ拡張通信システムの研究開発は国立研究開発法人情報通信研究機構の委託研究（採択番号 01501）によるものである。

文 献

- (1) IOWN 構想。
<https://www.rd.ntt/iown/>
- (2) NTT/JAXA 報道発表，“NTT と JAXA 地上と宇宙をシームレスにつなぐ超高速大容量でセキュアな光・無線通信インフラの実現に向けた共同研究を開始，” Nov. 2019.
<https://www.ntt.co.jp/news2019/1911/191105c.html>
- (3) NTT/スカパー JSAT 報道発表，“NTT とスカパー JSAT 持続可能な社会の実現に向けた新たな宇宙事業のための業務提携契約を締結，” May 2021.
<https://group.ntt.jp/newsrelease/2021/05/20/210520a.html>
- (4) 糸川喜代彦，五藤大介，小島康義，坂元一光，藤野洋輔，山下史洋，加藤智隼，中台光洋，谷島正信，岩田隆敬，“低軌道衛星 MIMO 技術を活用した 920 MHz 帯衛星 IoT プラットフォームの軌道上実証と開発状況，” 第 65 回宇宙科学技術連合講演会，OS-16-5, 2021.
- (5) N.T. Trung, 田村亮介, 西堀俊幸, 堤 卓也, 濱田裕史, 徐 照男, I. Abdo, 佐々木太郎, 高橋宏行, 中島史人, “300 GHz 帯直接検波型ラジオメータ研究開発とその宇宙実証ミッション検討状況について，” 第 66 回宇宙科学技術連合講演会，IAIZ, Nov. 2022.
- (6) 坂元一光, 景山知哉, 吉澤健人, 藤野洋輔, 小島康義, 糸川喜代彦, 山下史洋, “920 MHz 帯衛星 IoT プラットフォームにおける各 LPWA 方式の端末収容台数評価，” 信学技報，SAT2020-35, pp. 35-40, Feb. 2021.
- (7) D. Goto, K. Itokawa, F. Yamashita, C. Kato, and M. Nakadai, “Clock timing synchronization among distributed multiple antennas for LEO-MIMO communications system,” B1-4, ICETC 2020, Dec. 2020.
- (8) 堤 卓也, 濱田裕史, 徐 照男, 杉山弘樹, 佐々木太郎, ゲン タットトルン, 西堀俊幸, 高橋宏行, 中島史人, “宇宙応用に向けたテラヘルツ帯 InP-HEMT-IC のデバイスプロセス技術，” 第 156 回結晶工学分科会研究会，April 2022.
- (9) NTT/スカパー JSAT 報道発表，“NTT とスカパー JSAT, 株式会社 Space Compass の設立で合意～持続可能な社会の実現に向けた新たな宇宙統合コンピューティング・ネットワーク事業をめざして～，” April 2022.
<https://group.ntt.jp/newsrelease/2022/04/26/220426a.html>
- (10) 小竹秀明, 阿部侑真, 高橋靖宏, 大倉拓也, 布施哲治, 佐藤洋平, 板橋孝昌, 山川史郎, 辻 宏之, 豊嶋守生, “光データ中継衛星搭載 “LUCAS” を用いた地上-衛星間光通信の初期実験結果，” 信学技報，SAT2022-41, pp. 65-70, Aug. 2022.
- (11) 橋本洋輔, 風間拓志, 荒木智宏, 渡邊 啓, “位相感応増幅を用いた低雑音光増幅器とその宇宙光通信応用，” 2022 信学ソ大, no. BCS-1-7, Sept. 2022.
- (12) 寒川哲臣, 富澤将人, 岡田 顕, 後藤秀樹, “IOWN 構想特集—オールフォトニクス・ネットワーク実現に向けた光電融合技術—，” NTT 技術ジャーナル，vol. 32, no. 8, pp. 5-28, Aug. 2020.

- (13) 江田毅晴, 内藤一兵衛, 山崎育生, 田端啓一, 史 旭, “宇宙コンピューティングに向けたイベント駆動型推論の検討，” NTT 技術ジャーナル，vol. 34, no. 10, pp. 14-16, Oct. 2022.
- (14) NTT ドコモ, “6G White paper.”
https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/whitepaper_6g/
- (15) 北之園 展, 箕輪祐馬, 鈴木 淳, 山下史洋, 浅井孝浩, 外山隆行, “非地上系ネットワークによるカバレージ拡張通信システムの開発—複数の NTN ノードの接続およびネットワーク制御技術とそのユースケース開発実証計画—，” 2022 信学総大, no. B-3-16, March 2022.
- (16) 加納寿美, 松井宗大, 阿部順一, 外園悠貴, 小原日向, 岸山祥久, 山下史洋, “非地上系ネットワークによるカバレージ拡張通信システムの開発～降雨時における UE の可用性評価～，” 信学技報，SAT2022-37, pp. 48-53, Aug. 2022.
- (17) 外園悠貴, 小原日向, 室城勇人, 岸山祥久, 浅井孝浩, 加納寿美, 松井宗大, 阿部順一, “非地上系ネットワークによるカバレージ拡張通信システムの開発—HAPS と地上ネットワークの周波数共用に向けた 3D セル制御技術による 2 GHz 帯の干渉回避評価—，” 2022 信学ソ大, no. B-3-13, Sept. 2022.
- (18) 外園悠貴, 岸山祥久, 浅井孝浩, “宇宙 RAN における HAPS 実用化に向けた取り組み，” NTT 技術ジャーナル，vol. 34, no. 10, pp. 17-22, Oct. 2022.
- (19) 岸山祥久, 浅井孝浩, 阿部順一, 山下史洋, 箕輪祐馬, 鈴木淳, 北之園 展, 大内幹博, 外山隆行, “非地上系ネットワークによるカバレージ拡張通信システムの開発—Beyond 5G に向けた NTN ノードのネットワーク化技術とカバレージ拡張，” 2022 信学総大, no. BI-3-7, March 2022.
- (20) 北之園 展, 鈴木 淳, 外園悠貴, 岸山祥久, 浅井孝浩, “高高度プラットフォーム (HAPS) による 5G 網と連携した 38 GHz 帯の無線通信システム開発—フィードリンクにおけるサイトダイバーシチの検討—，” 2022 信学ソ大, no. B-3-15, Sept. 2022.

(2022 年 11 月 28 日受付 2022 年 12 月 8 日最終受付)



やました みひろ
山下 史洋 (正員：シニア会員)

平 8 京大・工・電子通信卒。平 10 同大学院修士課程了。同年日本電信電話株式会社入社。以来、衛星通信用変復調技術、衛星 MIMO/IoT 技術の研究、B5G/NTN 技術の研究、離島・災対・船舶衛星通信インフラシステムの実用化開発に従事。現在、同社アクセスサービスシステム研究所衛星通信グループリーダー、ネットワークイノベーションセンタ無線エントランスグループリーダーを兼務。主幹研究員。工博。平 15 年度 IEEE PIMRC 論文賞、平 16 年度本会学術奨励賞、令元年度電波功績賞、電波産業会会長表彰各受賞。令元年度衛星通信研究専門委員会委員長、現在、同委員会顧問。



ほり しげひろ
堀 茂弘

平 8 日本電信電話株式会社入社。平 19 ワシントン大 MBA 了。平 12 から NTT 西日本で複数の新規事業・サービス開発の PJ に立上げから携わり、平 29 NTT 研究企画部門で宇宙事業の立上げに従事。令 4 Space Compass Co-CEO 就任。