

## 2-4 宇宙・空・海・地上をつなぐ 3 次元宇宙通信ネットワーク

### 2-4 *Three-Dimensional Space Communication Networks Connecting Space, Air, Sea, and Ground*

阿部 侑真 六川 慶美 辻 宏之

ABE Yuma, ROKUGAWA Yoshimi, and TSUJI Hiroyuki

Beyond 5G においては、ネットワークの拡張性や広域性の観点から、非地上系ネットワーク (NTN : Non-Terrestrial Network) が注目されている。NTN とは、衛星、高高度プラットフォーム (HAPS : High-Altitude Platform Station)、ドローンなど多様な通信プラットフォームを活用し、宇宙・空・海・地上といった異なる空間を相互に接続するネットワークである。NICT では、NTN による通信ネットワークの構造や将来像を可視化し、来場者が直感的に理解できるような体験型の展示として、ジオラマと AR (拡張現実 : Augmented Reality) を組み合わせた展示品を制作した。本稿では、この展示品の概要と、大阪・関西万博内で開催された「Beyond 5G ready ショーケース」における展示の様子について紹介する。

In the Beyond 5G era, Non-Terrestrial Networks (NTNs) are attracting attention for their potential to expand network coverage and enable wide-area connectivity. NTNs make use of diverse communication platforms, including satellites, high-altitude platform stations (HAPS), and drones, to connect different domains such as space, air, sea, and land. At NICT, we developed an interactive exhibit to illustrate the structure and future vision of NTN-based communication networks. The exhibit combines a diorama with Augmented Reality (AR) technology, allowing visitors to understand the concept in an intuitive way. In this paper, we describe the exhibit in detail and report on its demonstration at the “Beyond 5G ready Showcase” held during Expo 2025 Osaka, Kansai, Japan.

#### 1 はじめに：非地上系ネットワーク (NTN) による通信ネットワーク

Beyond 5G では、拡張性・広域性という観点から非地上系ネットワーク (NTN: Non-Terrestrial Network) が注目されている。NTN とは、静止軌道 (GEO : Geostationary Orbit) 衛星、低軌道 (LEO : Low Earth Orbit) 衛星、高高度プラットフォーム (HAPS : High-Altitude Platform Station)、ドローンなどの多様な通信プラットフォームを介して、宇宙、空、海、地上などの異なる空間を相互につなぐネットワークである [1]。通常、スマートフォン等の端末がネットワークに接続するためには、近くにある基地局と通信する必要があるが、山、海、宇宙など、地上系のインフラが整っていない場所や存在しない場所では通信することが困難である。NTN は高い高度にある通信プラットフォームを用いるため、既存の地上系ネットワークが存在しない場所でも通信が可能となる。各通信プラットフォームが存在する高度によって遅延が異なるため、

アプリケーションに応じて通信プラットフォームを使い分けることが重要である。3GPP (Third Generation Partnership Project) などの標準化団体では 5G と NTN の接続に関する標準化が積極的に進められており、今後の発展も期待されている。また、2025 年には SpaceX 社の Starlink 衛星を用いたスマートフォンとの直接通信 (Direct to Device) に関するサービスが開始されており、日本においても KDDI がサービスを開始している [2]。

NICT で研究対象としている 3 次元宇宙通信ネットワークのイメージを図 1 に示す。従来、宇宙通信には電波が用いられてきた。一方、電波資源が逼迫していることから、国際周波数調整や免許が不要で、電波よりも大容量かつ高秘匿の通信を可能とする光を用いた空間光通信が期待されている。ただし、光通信を衛星地上間に適用する場合、光は雲や大気の影響を受けるため信号の途絶や劣化が起こる。このような状況においても安定かつ確実な衛星地上間の光通信を実現するため、NICT では大気ゆらぎを補正する補償光学や、

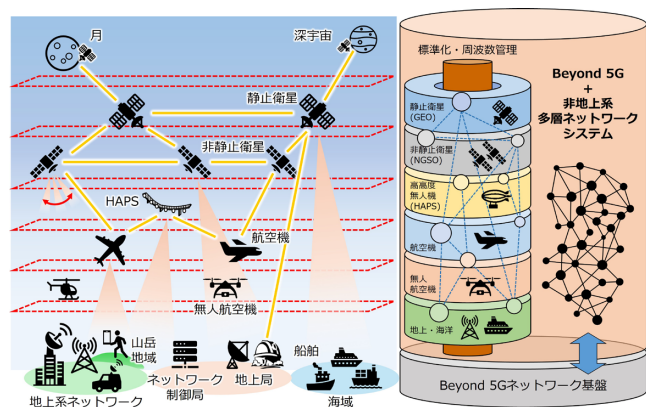


図1 3次元宇宙通信ネットワーク ([3] を一部改変)

複数の光地上局によって回線稼働率を上げるサイトダイバーシティなどの研究を行っている[1]。電波については、降雨がある場合でも、電波の減衰はするものの衛星地上間の通信が可能であることから、電波と光を併用したシステムが望ましい。このように、電波と光を組み合わせ、地上、航空機、HAPS、衛星、さらには月や深宇宙にある宇宙機とも接続することで、どこにいてもつながるネットワークを構築することが可能となる。

## 2 NTN ジオラマと AR アプリケーションの制作

本節では、1で述べた NTN による通信ネットワークをわかりやすく紹介するために制作した展示品について述べる。

これまでの展示会（特に NICT オープンハウスなど一般向けの展示）における課題として、衛星など動きがあるものや、目に見えない通信の説明することが困難であることが挙げられていた。そこで、「普段見えない通信を可視化し、将来 NTN がどのように通信ネットワークを構築するかをわかりやすく紹介する」ことを目的として、ジオラマと AR（拡張現実：Augmented Reality）アプリケーションを併用する展示品を制作した。展示会の来場者に対して、単に NTN で使われている技術や将来像の説明をするだけではなく、NTN が実現された未来の社会を来場者が「体験」できることを目指した。来場者がスマートフォンやタブレット端末をジオラマにかざすことで、AR アプリケーション内では衛星などのオブジェクトが動き、普段は目に見えない通信やそのネットワークが可視化される展示となっている。なお、このようなジオラマと AR の組合せは、米国カリフォルニア州にある Apple Park Visitor Center の展示 [4] を参考にした。



図2 完成した NTN ジオラマ。中央に市街地があり、手前側に海、奥側に山が配置されている。

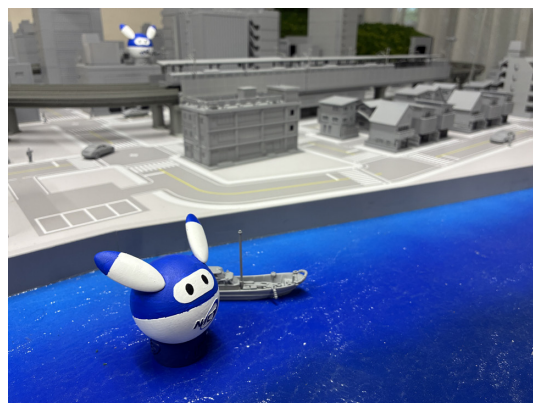


図3 「海での通信」シナリオの契機となる「N」の模型

### 2.1 NTN ジオラマ

制作した NTN ジオラマを図2に示す。サイズは縦160 cm、横160 cm であり、容易に運送するために4分割できるようにした。本ジオラマには、市街地としての陸地に加え、NTN のメリットを最大限発揮できる領域として海と山を配置した。体験者が AR を介してこのジオラマを見た際に与える印象を強くするため、街並みはグレーを基調とした無彩色で表現し、海と山のみを鮮やかに着色することでコントラストを際立たせた。

本ジオラマ内には様々な種類の模型を配置した。市街地には建物（家、ビル）、人、車、電車を配置した。後述する AR におけるシナリオに合わせ、海には船舶、山には登山客の模型を配置した。それらに加え、NTN を構成する要素として配置した模型は GEO 衛星、LEO 衛星、HAPS（両翼型、飛行船型）、航空機、ドローン、電波地上局（パラボラアンテナ）、光地上局（望遠鏡）である。また、NICT の公式キャラクター「N」[5]の模型を海と山、駅の近くのビルの屋上に配置し、AR によって体験者がジオラマを認識する際の契機とした（図3）。



## 2.2 NTN 可視化 AR アプリケーション

2.1 で述べたNTNジオラマを認識して動作し、NTNの通信の仕組みを可視化するARアプリケーションを制作した。このARアプリケーションはスマートフォンやタブレット端末にインストールして利用する。



図4 体験者の体験イメージ。端末をNTNジオラマにかざすことでAR内にNTNのイメージを表現する。

図4に体験者が体験する際のイメージを示す。本ARアプリケーションはNTNジオラマを認識すると、AR内の仮想オブジェクトとジオラマ上の物理オブジェクトの位置を同期させる。これにより、体験者が移動したり端末を動かしたりしてもAR内のコンテンツは常にジオラマと正確に重なった状態で表示される。

AR内では、物理的なジオラマで見せることができない衛星やHAPS、パラボラアンテナや光地上局のダイナミックな動きを表現した。さらに、ジオラマでは配置することが難しい月のオブジェクトもAR空間の上部に配置した。ジオラマではグレーとしていた市街地にはAR内で色を付け、街の中に配置された車や電車、人なども動かすことで細かい部分も体験者に楽しんでもらえるような仕様とした。通常目に見えない通信リンクはAR内の線で表現し、電波と光で線の色を変えることで、それらを使い分けながら通信ネットワークを構築することを示した。船舶や航空機、スマートフォンなどのユーザ局や電波地上局と衛星・HAPS間、HAPS-HAPS間の通信は電波(水色)、衛星間(LEO衛星-LEO衛星間、LEO衛星-GEO衛星間、GEO衛星-月面間など)や衛星と光地上局間の通信は光(黄色)とした。これらの通信リンクの色は、AR上で視覚的に認識してもらいやすい色合いかつ、AR上の他のオブジェクトを邪魔しないように工夫した。例えば、通信信号の線は単なる色付きの線ではなく、実際

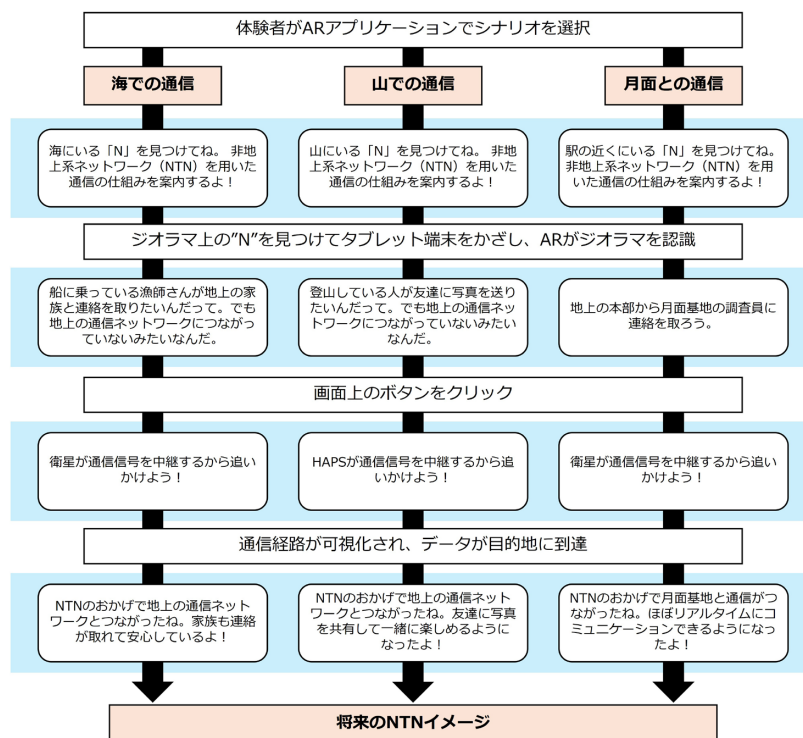


図5 ARアプリケーションにおけるシナリオの流れ。四角形が体験者の行動またはARアプリケーション内の動作、オレンジ部分がシナリオ、水色部分がARアプリケーションにおける「N」のセリフになっている。

## 2 Beyond 5G に向けた NICT の取組～ Beyond 5G ready ショーケースでの展示～



図6 各シナリオにおいて表示される通信経路

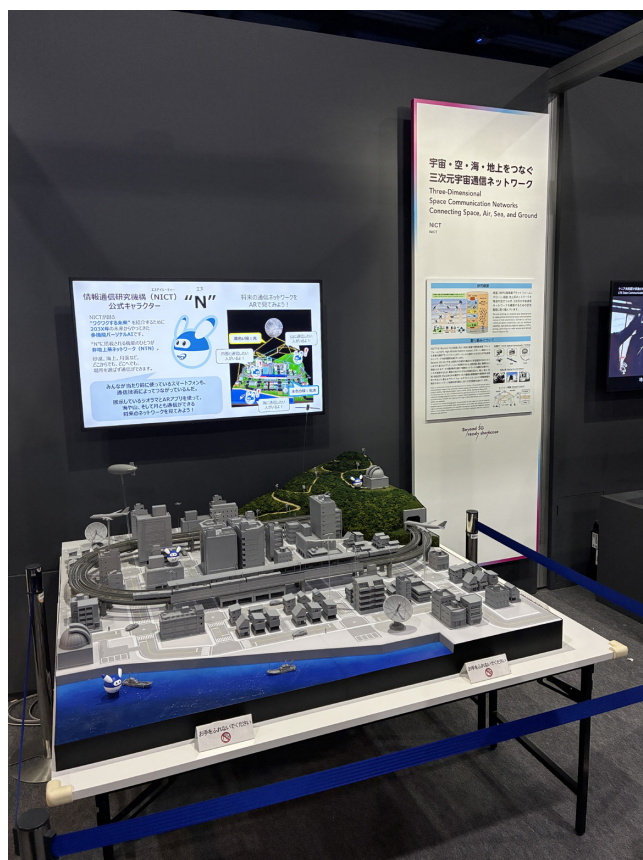


図7 大阪・関西万博の会場にNTN ジオラマを設置した様子

に信号を送っているように見せるために一部を点線で示したり、特に光については「光っぽさ」が伝わるような色合いにしたり、細かい表現を調整した。

AR アプリケーションでは、「海での通信」「山での通信」「月面との通信」の3つのシナリオを用意した。各シナリオでは、「通信したい人が地上のネットワークにつながっていないと困っている」状況を設定し、そのような状況においてNTNがどのように通信ネットワークを提供するかを示すシナリオとした。体験者が自分ごととしてシナリオをイメージできるよう、シナリオの起点は人とし、「海での通信」においては船に乗っている漁師、「山での通信」においては登山してい

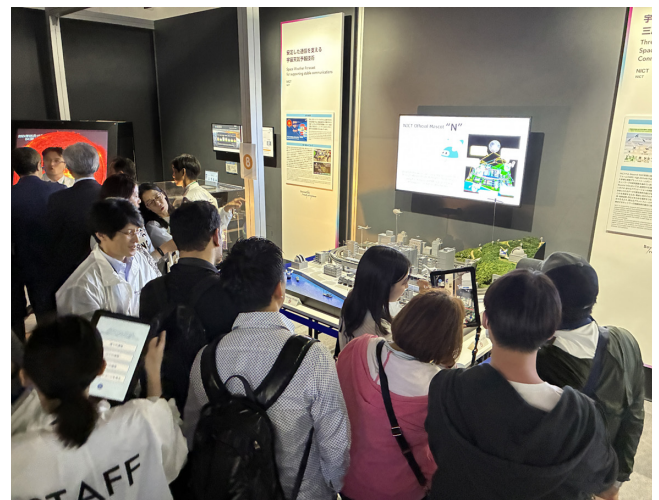


図8 NICT の研究者が来場者に説明している様子

る人、「月面との通信」においては、将来月に人が住んだことを想定し、地球の通信本部から月面基地の調査員が通信を要求するシナリオとなっている。

体験者が体験するシナリオの流れを図5に示す。体験者には、まず3つのシナリオの中から1つを選択してもらう。つぎに、選択したシナリオに応じてジオラマ上の異なる場所にある“N”の模型を探してもらい、端末をかざしてジオラマを認識することでシナリオのストーリーが開始する。AR内では、衛星やHAPSなどを用いた通信経路が可視化され、目的地までデータが送られる様子が示される。NTNの様々な利用パターンを示すため、図6に示すように各シナリオで異なる経路を設定しており、「海での通信」では、船から最も近いLEO衛星に電波で接続した後、光通信を用いて複数の衛星を経由し、電波で地上局につながることで通信ネットワークを構築できる様子を示した。「山での通信」では、登山客のスマートフォンから電波で直接HAPSに接続し、複数のHAPSを経由して電波で地上局につながる。「月面との通信」では、地球の通信本部を想定したビルが始点となり、光地上局を経由してLEO衛星とGEO衛星が光通信でつながることで月ま



で多層的なネットワークが伸びていく様子を示した。シナリオの最後には、「将来のNTN イメージ」としてAR内に配置したすべての衛星やHAPS、航空機、地上局、月面がつながってネットワークが構成される様子を示し、NTNによってあらゆる場所で通信が可能となる将来像を提示した(図4に示すタブレット端末の画面参照)。

### 3 大阪・関西万博における展示の様子

2025年5月24日から6月3日に大阪・関西万博内で開催された「Beyond 5G ready ショーケース」に2で示したNTN ジオラマとARアプリケーションを展示した。図7にNTN ジオラマを会場に設置した様子を、図8にNICTの研究者が来場者に説明している様子を示す。

本展示を体験した方からは、国籍や年齢を問わず「わかりやすい」「おもしろい」という意見をいただけたことが印象的であった。ARを介してジオラマを見ることで、画面の中では街に色が付き、衛星やHAPSが動き、上部には物理的な世界には見えていなかった月のオブジェクトが現れるなど、様々な仕掛けを楽しんでいただけたと考えている。また、NTNの通信イメージについては、通信リンクや通信経路の可視化により、Starlinkの台頭もあって話題になっている宇宙通信の仕組みや、実際にサービスが始まっているスマートフォンと衛星の直接通信の仕組みが理解できたという多くの意見をいただけた。特に、各シナリオでは通信経路の一部のみを提示しているが、最後に将来のNTNの全体像が現れることでその通信経路の多さに驚かれていた方も多く、体験者に強い印象を与えることができた。

以上のことから、NTN ジオラマとARアプリケーションを組み合わせることでNTNによる通信の可視化を実現したことにより、筆者たちの期待通り、来場者にはNTNによる通信ネットワークの将来像を理解していただけたと考えている。また、本展示のブースの隣にはHAPSを用いた通信サービスを展示したSpace Compass、NTTドコモ、NTT、スカパーJSATのブースがあったため、その展示内容と合わせて来場者にはリアリティのあるNTNのイメージを強く持ていただけたと感じている。

### 4 おわりに

本稿では、NTNの概要と、NTNによる通信ネットワークのイメージをわかりやすく伝えるために制作したNTNのジオラマとARアプリケーションについて

紹介した。また、それらを大阪・関西万博に展示した際の概要と、展示を体験した方々からの声やコメントの一部を紹介した。

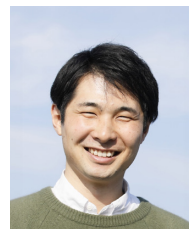
本ジオラマとARアプリケーションは2025年6月に開催されたNICTオープンハウスでも展示し、多くの来場者を楽しんでいただいた。今後もNICTの様々な展示会で展示する予定であるため、是非体験していただきたい。

### 謝辞

本稿で紹介したNTNジオラマとARアプリケーションの制作及び展示会場に合わせたキャリブレーションを行っていただいたTOPPAN株式会社の北野希美氏、永見卓也氏、関係者の皆様に感謝する。“N”の模型制作や着色については、広報部、業務企画部電波利用管理・ものづくり室、宇宙通信システム研究室 久保岡俊宏研究マネージャーのご尽力によって実現することができた。最後に、展示対応に協力していただいた宇宙通信システム研究室のメンバー及び展示サポートスタッフの皆様に感謝する。

### 【参考文献】

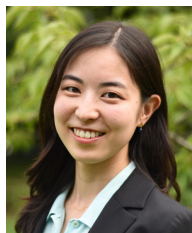
- 1 三浦 周, 関口 真理子, 大倉 拓也, 小竹 秀明, 白玉 公一, 斉藤 嘉彦, カラスコ-カサドルベルト, 阿部 侑真, 辻 宏之, “衛星通信/NTNと5G/Beyond 5Gの連携の動向と研究開発の取組み,” 電子情報通信学会論文誌C, vol.J106-C, no.9, pp.344-353, 2023.
- 2 KDDI: au、日本全土をエリア化、衛星とスマホの直接通信サービス「au Starlink Direct」を提供開始(2025年8月26日閲覧)  
[https://newsroom.kddi.com/news/detail/kddi\\_nr-533\\_3815.html](https://newsroom.kddi.com/news/detail/kddi_nr-533_3815.html)
- 3 NICT:衛星通信と5G/Beyond 5Gの連携に関する検討会報告書、2020年2月  
<https://www2.nict.go.jp/wireless/sat5g-scl.html>
- 4 Apple: Apple Park Visitor Center、一般に公開(2025年8月29日閲覧)  
<https://www.apple.com/jp/newsroom/2017/11/apple-park-visitor-center-opens-to-the-public/>
- 5 NICT: Nの取扱説明書(2025年8月29日閲覧)  
<https://www.nict.go.jp/publication/N-torisetsu/index.html>



**阿部 侑真 (あべ ゆうま)**

ネットワーク研究所  
ワイヤレスネットワーク研究センター  
宇宙通信システム研究室  
主任研究員  
博士(工学)  
宇宙通信、ネットワーク最適化、制御工学  
【受賞歴】

2021年 第36回電気通信普及財団賞  
テレコムシステム技術学生賞 入賞  
2018年 2018年度計測自動制御学会 論文賞・武田賞



**六川 慶美**（ろくがわ よしみ）

ネットワーク研究所  
ワイヤレスネットワーク研究センター  
宇宙通信システム研究室  
研究技術員  
補償光学、大気ゆらぎ、空間光通信  
【受賞歴】

2025 年 Student Poster Award, Wide-field Adaptive Optics for Astronomy and Astrophysics



**辻 宏之**（つじ ひろゆき）

ネットワーク研究所  
ワイヤレスネットワーク研究センター  
宇宙通信システム研究室  
上席研究員  
博士(工学)  
宇宙通信システム、アレイアンテナ、信号処理  
【受賞歴】

2014 年 日本 ITU 協会 国際活動奨励賞 功績  
賞対象分野

2013 年 第 2 回アンテナ伝搬アジア太平洋会議 (APCAP2013) ベストペーパー賞

2010 年 第 58 回電気科学技術奨励賞