

## HAPS移動通信システムの大容量化に向けた研究開発



ソフトバンク株式会社 テクノロジーユニット統括 基盤技術研究室  
無線技術研究開発部 部長

ほしの けんじ  
星野 兼次

### 1. まえがき

近年、デジタルトランスフォーメーション（DX）の進展やIoT機器の爆発的増加に伴い、無線通信の需要はますます高度化・多様化している。特に、産業活動を支える社会インフラとしての役割に加え、大規模災害時においても途絶することの許されないライフラインとしての機能が強く求められており、広域にわたり安定したカバレッジを確保することの重要性が高まっている。一方、地上の移動通信システムのみでは、山岳・海上・離島・被災地などにおける面的カバレッジや冗長性の確保には限界がある。この課題に対する有力な解として、成層圏通信プラットフォーム（HAPS: High Altitude Platform Station）が注目されている。HAPSは高度約20kmの成層圏を飛行し、衛星と地上のモバイルネットワークの中間層として機能する。低遅延かつ広域なエリアカバレッジを両立できる点が特長であり、次世代の三次元ネットワークを構成する重要な要素と位置付けられる。本稿では、ソフトバンクにおけるHAPSの研究開発の取組み、とりわけ大容量化を実現するためのサービスリンク技術及び実証試験について概説する。

### 2. HAPSの概要とソフトバンクの取組み

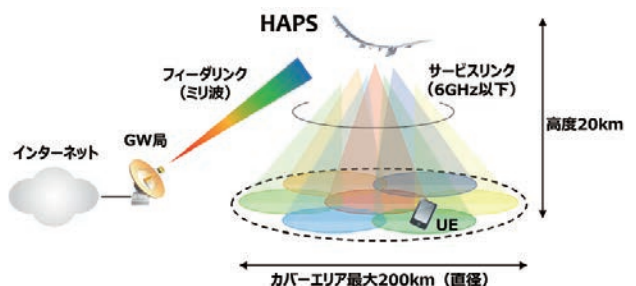
HAPSは、気流の安定している高度約20kmの成層圏を飛行する気球、飛行船、飛行機などの機体に無線中継局が搭載されたプラットフォームである。成層圏は対流圏の直上に位置し、36,000km上空の静止衛星や高度数百～数千kmの低軌道衛星と比較しても極めて低高度にある。このため、HAPSを用いた通信では伝搬遅延が小さく、例えば、地上端末との距離が最大約100kmの場合でも往復伝搬遅延は約0.67ms程度にとどまり、地上の通信網に近い低遅延特性を実現できる。また、高度約20kmという位置関係から、広域にわたって高い仰角が確保され、遠方に対しても良好な見通し条件が得られる。例えば、水平距離50km及び100kmにおける仰角はそれぞれ約22度、約11度となり、超広域で安定した通信が期待できる。さらに、地上端末との電波伝搬距離は最大でもおおよそ100km程度であることから、LTEや5G NRに準拠した通常の移動通信端末を利用可能である。これら低高度・低遅延・高仰角

といった特長により、HAPSは広域をカバーしつつ高信頼・低遅延通信を提供可能なプラットフォームとして期待されている。

ソフトバンクでは、「ユビキタストラansフォーメーション」というビジョンの下、HAPSを地上網及び衛星網とシームレスに連携させ、いつでもどこでもつながる世界の実現を目指し、機体技術や通信技術の一体的な研究開発を推進してきた<sup>[1]</sup>。HAPSは、成層圏において広域を面的にカバーしつつ、地上の無線通信システムや低軌道・静止軌道衛星と協調することで、空飛ぶクルマや物流・点検・農業用途のドローン、さらには貨物船など海上での利用など、多様なユースケースに対して通信サービスを提供する中間レイヤとして位置付けられる。HAPSの機体開発においては、太陽光パネル、蓄電池、モーター等の軽量化・高効率化を進め、2020年及び2024年に成層圏フライト試験に成功するなど、成層圏での長時間・安定飛行に関する技術的知見を蓄積してきた。さらに、2023年には世界で初めて成層圏からの5G通信を実証している。これら一連の機体・通信両面での実証成果を通じて、HAPSを用いた移動通信システムの技術的成立性を段階的に確認し、早期の実用化を見据えた研究開発を推進している。

### 3. サービスリンクの大容量化

図1に、HAPS移動通信システム全体の基本構成を示す。HAPS移動通信システムでは、地上のユーザ端末に対して6GHz以下の周波数帯を用いたサービスリンクを形成し、HAPSと地上のゲートウェイ局との間は広帯域なミリ波帯を用いたフィードリンクにより接続される。HAPSは1機で最



■ 図1. HAPS移動通信システムの基本構成

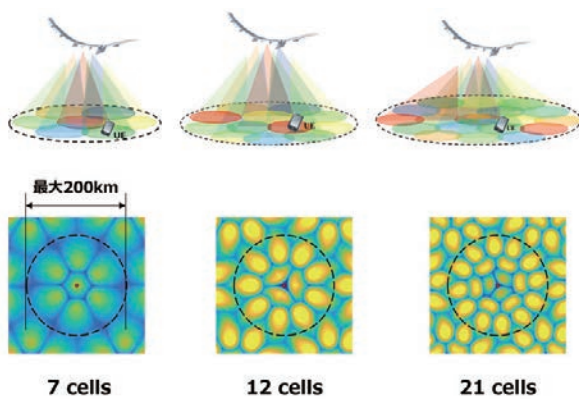


大半径100km規模の超広域エリアをカバーするため、移動通信システムでの利用においては、単位面積当たりの通信容量の向上や端末収容能力の改善が重要な技術課題となる。

筆者等は、2022年度から2024年度にかけて、NICTより革新的情報通信技術（Beyond 5G (6G)）基金事業「上空プラットフォームにおけるCPSを活用した動的エリア最適化技術」の研究開発を受託し、HAPS等を含む上空プラットフォームの高度化及び実運用に向けたサービスリンクの要素技術検討を進めてきた<sup>[2]</sup>。さらに、これらのサービスリンク技術を発展させ、フィーダリンク技術や電波伝搬推定技術も含めた研究開発として、2023年度からは「Beyond 5Gにおける超広域・大容量モバイルネットワークを実現するHAPS通信技術の研究開発」を受託し、HAPSの高度化と早期実用化に向けた研究開発に取り組んでいる<sup>[3]</sup>。HAPS移動通信システムの大容量化に向けては、広域なエリアカバレッジと高い通信容量が同時に求められるサービスリンクの研究開発が特に重要である。本稿では主にサービスリンクに関する研究開発について述べる。

#### 4. マルチセル構成技術

HAPSのサービスリンクにおいて広域なエリアカバレッジと大容量化を同時に実現するための方法として、地上基地局における複数セクタ構成と同様に同一周波数を用いるセルをエリア内に多数形成し、高密度に配置するマルチセル構成が有効である。図2に、マルチセル構成の設計例を示す。セル数を増加させることで、単位面積当たりの通信容量の向上が期待できる<sup>[4]</sup>。一方で、マルチセル構成により機体の移動や姿勢変化に起因する各セルエリアの安定性確保や、セル配置・干渉制御の高度化が重要な技術課題となる。



■図2. 多セル構成の設計例

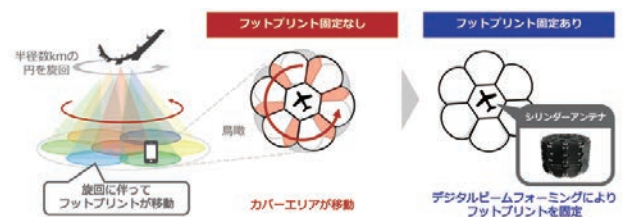
##### 4.1 フットプリント固定技術

HAPSはソーラープレーン、気球などいずれの機体であっ

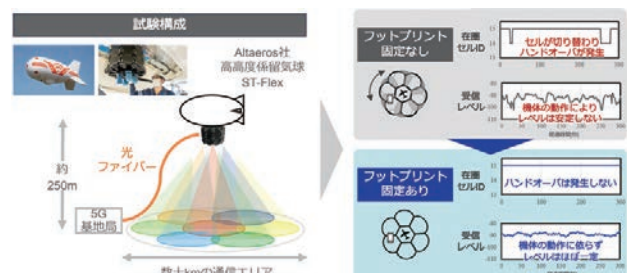
ても飛行するという特性上、鉄塔やビル屋上に固定設置される地上基地局とは異なり、飛行に伴って位置や姿勢が変化する。その結果、機体の移動や旋回に伴い、地上に形成されるセルの位置、すなわちフットプリントが時間とともに移動することが課題となる。固定アンテナを用いた場合、特にマルチセル構成においては在圏セルが頻繁に切り替わることで不要なハンドオーバーが多発し、受信品質の変動を招くなど、通信サービスの安定性が損なわれる。

この課題に対し、筆者等は、図3に示すシリンダ形状の多素子フェーズドアレイアンテナ（以下、シリンダーアンテナ）を用い、機体の旋回や姿勢変化に応じてビームステアリングを行うフットプリント固定技術を開発した<sup>[5]</sup>。シリンダーアンテナの垂直及び水平方向に対してビーム制御を同時に行う三次元ビーム制御により、機体の方位角方向の回転に加え、移動や仰角方向の回転に対しても柔軟に対応し、地上の同一位置に安定したセルを形成することが可能となる。

提案方式の有効性を検証するため、試作したシリンダーアンテナを高高度係留気球に搭載した屋外実証試験を実施した。図4に、高高度係留気球に搭載したアンテナの外観写真及び実証試験結果の一例を示す。実証試験では、アンテナを高度約250mまで上昇させ、半径数十km規模のカバーエリア内において、受信レベル及び在圏セルの変化をカバーエリア内の定点で測定し、通信品質の時間的な安定性を評価した。その結果、上空の風の影響により機体が常に回転・移動する環境下においても、フットプリント固定制御によりハンドオーバーの発生を抑制でき、受信レベルを安定させられることを確認した<sup>[6]</sup>。



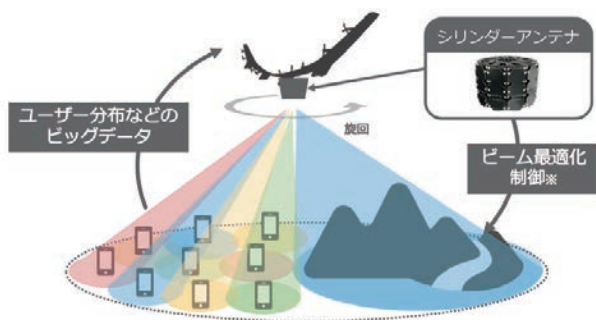
■図3. フットプリント固定技術



■図4. フットプリント固定制御の実証試験

## 4.2 エリア最適化技術

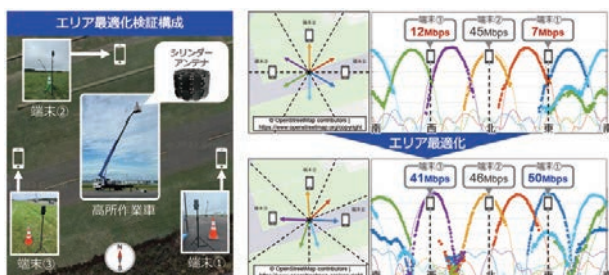
HAPSは超広域エリアを一括してカバーするため、そのエリア内は人口密集地から人が少ない山間部まで多様な地域が含まれ、ユーザ分布やトラフィック需要は地理的・時間的に偏在することが想定される。マルチセル構成において、このようなユーザ分布の偏りを考慮し、前節のアンテナを用いた三次元ビーム制御により、各セルの配置を適切に最適化することで、セルを一様に配置する場合と比較して通信容量やカバーエリアを大幅に向上させることが可能となる(図5)。しかしながら、最適化対象となるセル数が増加すると、制御すべきパラメータの組合せが指数関数的に増大し、現実的な時間内で最適解を探索することが困難となる。



■ 図5. エリア最適化技術

この課題に対し、筆者等は、遺伝的アルゴリズム（GA: Genetic Algorithm）を用いた低演算量のビーム最適化手法を提案している。例えば、複数のセルをグループ化し、グループごとにGAによる最適化を行う共進化アルゴリズムを組み合わせることで、20セルを超えるマルチセル構成においても効率的にビーム最適化が可能であることを示している<sup>[7]</sup>。

また、ユーザの位置情報に基づくビーム最適化制御の基本的な有効性を確認するため、屋外実証実験を実施した。本実験では、シリンダーアンテナを高さ約20mの高所作業車の作業床に搭載し、アンテナを中心として西・北・東方



■ 図6. エリア最適化制御の実験結果の一例

向に3台の端末を配置した。エリア最適化前後における6セルのビームパターン及びスループット特性の一例を図6に示す。合計スループットを目的関数として最適化制御を行った結果、端末の位置情報に基づいて各ビームが自動的に端末方向へ指向し、カバーエリア全体としての合計スループットが大幅に改善されることを確認した<sup>[8]</sup>。

## 4.3 セル高密度化技術

更なる大容量化を実現するため、従来の6セル構成に代えて、12セル以上へと拡張するセル高密度化技術の検討も進めている。ここでは、セル数の増加に伴い、セル間干渉の抑制とセル端における受信品質の確保が重要となることから、狭ビーム化及びアンテナ利得の改善に着目した検討を行っている。

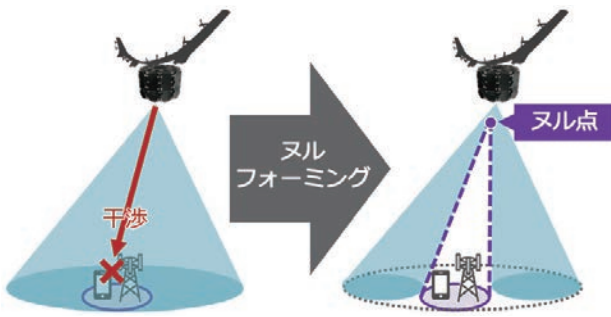
具体的には、シリンダーアンテナをベースとし、エリア内の受信電力を改善するアンテナ構成を提案している。多素子アレーアンテナのチルト角最適化により、サービスリンクにおける受信特性を改善できることを示している<sup>[9]</sup>。また、シリンダーアンテナ構成に基づき、セル構成及びアンテナウェイト制御を同時に考慮したセル設計の検討も行い、周波数利用効率の向上を確認している<sup>[10]</sup>。

## 5. HAPS・地上間周波数共用技術

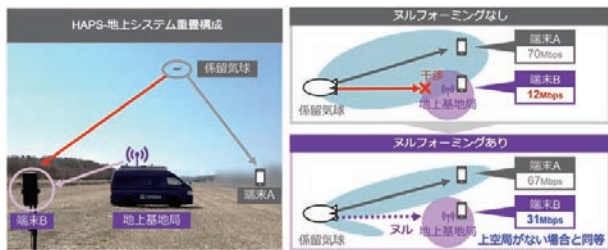
現在HAPS移動通信システム向け周波数として、地上システムで広く利用されている周波数帯がITU-Rにおいて特定されている<sup>[11]</sup>。HAPSに地上の移動通信システムとは異なる専用周波数を割り当てることができれば、HAPS及び地上システムで独立したエリア展開が可能となるが、周波数資源の有効利用の観点から、HAPSと地上システムとで同一の周波数帯域を使用してサービス展開できることが望ましい。この場合、HAPS・地上システム間で相互に発生する同一周波数干渉により、周波数利用効率が劣化することが課題となる。そこで、同一周波数干渉を抑圧または回避することにより、HAPSと地上基地局とを含めたシステム全体で、高い周波数利用効率と広域カバレッジを同時に実現する周波数共用技術の確立が求められる。

### 5.1 ヌルフォーミング技術

マルチセル構成においては、前節で述べたエリア最適化技術を拡張し、地上システムに対するSINRの劣化量などを制約条件として最適化問題に組み込むことで、HAPSエリアと地上セルとの共存を図る方式を提案している<sup>[12]</sup>。一方、マルチユーザMIMO伝送を想定した通信方式においては、図7に示すように地上基地局の方向に対して意図的



■ 図7. ナルフォーミングによるHAPS・地上間周波数共用



■ 図8. ナルフォーミング制御の実験結果の一例

に利得を低下させるヌル点を形成するナルフォーミングを適用することで、地上セルへの干渉を抑圧しつつ、高い周波数利用効率を実現する周波数共用方式を検討している<sup>[13]</sup>。

ナルフォーミングを用いたHAPS-地上システム間の周波数共有の有効性を検証するため、係留気球を用いた屋外実証試験を実施した。図8に、ナルフォーミング制御の実証試験結果の一例を示す。実証試験の結果、ナルフォーミング制御を適用することで、地上基地局エリアに対する干渉を十分に抑圧でき、地上局に在圏する端末のスループットが、上空からの干渉が存在しない場合と同等の水準に維持されることを確認した。これにより、HAPSと地上システム間において、同一周波数帯を用いた周波数共有が可能であることを実証した<sup>[14]</sup>。

### 5.2 無線リソース割当てを用いたナルフォーミング技術

ナルフォーミングにより地上システムへの干渉を低減することは可能であるが、地上基地局方向に広いヌルを形成した場合には、地上基地局近傍に位置するHAPSユーザに対するアンテナ利得が大きく低下し、HAPSにも地上システムにも接続できないカバレッジホールが発生する。これは、HAPSが本来有する広域かつ連続的なカバレッジの特長を損なう要因となる。

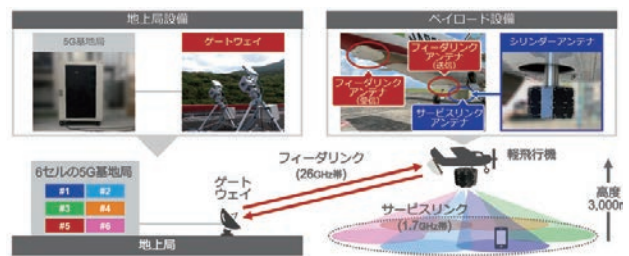
この課題に対し、空間軸におけるナルフォーミング制御に加え、周波数軸における無線リソース割当てを組み合わせる周波数共有技術を検討している<sup>[15]</sup>。具体的には、HAPSがすべての無線リソースにおいて常時ヌルを形成するので

はなく、ヌルを形成するリソース（ヌルオン）と意図的にヌルを解除するリソース（ヌルオフ）を周波数領域で割り当てる。これにより、地上基地局近傍のHAPSユーザはヌルオフのリソース上で通信を行うことで十分な受信電力を確保でき、一方で地上システムに対する干渉は、ヌルオンのリソースにより抑圧される。提案方式により、カバレッジホールの抑制と地上システムへの干渉抑圧を両立するとともに、HAPS・地上システム全体として周波数共有技術を用いない場合に対して通信容量の改善も期待できることを明らかにしている。

## 6. 軽飛行機を用いた実証試験

前章までに述べたサービスリンクの提案方式の一部について、ファイダリンク装置と組み合わせた統合システムによる実証試験も行っている。図9に実証試験の構成を示す。本実証試験では、HAPS機体を模擬した上空約3,000mを巡回飛行する軽飛行機に通信ペイロードを搭載して試験を行った。機上には、地上ゲートウェイと接続するファイダリンク装置及び地上ユーザ端末への通信を担うサービスリンク装置を搭載している。地上側には、5G基地局設備及びゲートウェイ局を設置し、ゲートウェイ局とペイロードとの間は26GHz帯のファイダリンクで接続した。一方、ペイロードから地上のユーザ端末に対しては、1.7GHz帯を用いたサービスリンクを形成し、6セルのマルチセル構成によるエリアカバレッジを実現している。

図10に示す構成で東京都八丈島周辺において屋外実証試験を実施した。本実証では、軽飛行機の巡回中心付近



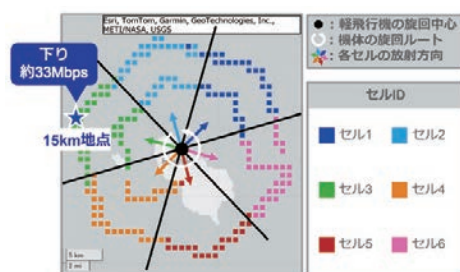
■ 図9. センサ機を用いた実証試験の構成



■ 図10. 八丈島における実験構成図

に地上局設備及びゲートウェイ局を配置した。島内では電波測定車を用いて道路を走行しながら通信品質の測定を行い、海上については漁船を用いて島周辺海域における通信特性を評価した。

図11に実証試験結果の一例を示す。本試験により、地上の5G基地局からファイダリンク及びサービスリンクを経由して端末に至るエンドツーエンド通信が成立することを確認した。また、6セル構成によるサービスリンクにおいて、機体が旋回・移動する環境下でもフットプリント固定技術が有効に機能し、広域にわたって安定したセル配置が維持されることを実証した<sup>[16]</sup>。



■ 図11. 実証試験結果の一例

## 7. まとめ

本稿では、ソフトバンクにおけるHAPS移動通信システムの研究開発の取組みについて、主にサービスリンクの大容量化に向けた技術を中心に紹介した。特に、マルチセル構成技術及びHAPS・地上間周波数共用技術に関するこれまでの検討及び実証試験について説明した。今後は、これらの取組みを踏まえて、国際標準化活動と連携しながらHAPSの早期実用化を進める予定である。

(2025年12月18日 ITU-R研究会より)

### 謝辞

本研究成果の一部は、国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究 (JPJ012368C07701) により得られたものである。

### 参考文献

- [1] ソフトバンク, UTX (ユビキタストランスフォーメーション), <https://www.softbank.jp/corp/philosophy/technology/special/utx/>, Feb. 2026.
- [2] NICT, 革新的情報通信技術 (Beyond 5G (6G)) 研究開発委託研究, 採択番号05701, [https://www.nict.go.jp/collabo/commission/B5Gsokushin/B5G\\_05701.html](https://www.nict.go.jp/collabo/commission/B5Gsokushin/B5G_05701.html), Feb. 2026.

- [3] NICT, 革新的情報通信技術 (Beyond 5G (6G)) 研究開発委託研究, 採択番号07701, [https://www.nict.go.jp/collabo/commission/B5Gsokushin/B5G\\_07701.html](https://www.nict.go.jp/collabo/commission/B5Gsokushin/B5G_07701.html), Feb. 2026.
- [4] Y. Shibata, et al., "System Design of Gigabit HAPS Mobile Communications," IEEE Access, vol. 8, pp. 157995–158007, 2020.
- [5] K. Hoshino, et al., "A Study on Antenna Beamforming Method Considering Movement of Solar Plane in HAPS System," IEEE VTC2019-Fall, 2019.
- [6] ソフトバンク株式会社, "フットプリント固定技術を活用した高高度係留気球基地局の実証に成功 [プレスリリース]," [https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2022/20220622\\_01/](https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2022/20220622_01/), 2022年6月22日.
- [7] Y. Shibata, et al., "Two-Step Dynamic Cell Optimization Algorithm for HAPS Mobile Communications," IEEE Access, vol. 10, pp. 68085–68098, June 2022.
- [8] ソフトバンク株式会社, "HAPSの通信容量の最大化を実現するエリア最適化技術の実証実験に成功 [プレスリリース]," [https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2023/20231220\\_01/](https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2023/20231220_01/), 2023年12月20日.
- [9] K. Maki, et al., "Downtilt Optimization of Array Antennas Based on Envelope Radiation Patterns for HAPS Service Links With Massive MIMO," IEEE Access, vol. 13, pp. 34307–34320, Feb. 2025.
- [10] K. Maki, et al., "HAPS Cell Design Considering Array Antenna Configuration for Improving Spectral Efficiency," ISAP2025, 福岡, Oct. 2025.
- [11] 総務省, "2023年世界無線通信会議 (WRC-23) の結果概要," [https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000925690.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000925690.pdf), 2024年1月.
- [12] Y. Shibata, et al., "HAPS Cell Design Method for Coverage Extension Considering Coexistence on Terrestrial Mobile Networks," IEEE Access, vol. 12, pp. 55506–55520, Apr. 2024.
- [13] K. Tashiro, et al., "Nullforming-Based Precoder for Spectrum Sharing between HAPS and Terrestrial Mobile Networks," IEEE Access, vol. 10, pp. 55675–55693, May 2022.
- [14] ソフトバンク株式会社, "HAPSと地上基地局との周波数共用を実現するヌルフォーミング技術の実証実験に成功 [プレスリリース]," [https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2024/20240626\\_01/](https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2024/20240626_01/), 2024年6月26日.
- [15] T. Ishikawa, et al., "Interference Management With Nullforming and Resource Allocation for Coverage Expansion in Integrated HAPS–Terrestrial Networks," VTC2025-Spring, Oslo, Norway, June 2025.
- [16] ソフトバンク株式会社, "HAPS向け6セル対応の大容量のペイロードを開発、上空からの5G通信に成功 [プレスリリース]," [https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2025/20250918\\_02/](https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2025/20250918_02/), 2025年9月18日.