5G/6Gに向けた電波伝搬制御技術の開発に関する一検討

Development of Radio Propagation Control Technologies for 5G/6G

新井 圭祐*
Keisuke Arai

本稿では、5Gおよび6Gに向けた高周波数帯無線通信における電波伝搬課題に対し、空間的に電波を制御する手法としてメタサーフェス技術に着目し、その設計原理および実証事例について報告する。ミリ波帯をはじめとする高周波数帯では、伝搬損失の増大や非見通し環境による通信品質劣化が顕著であり、基地局アンテナや端末側の高度化に加えて、伝搬空間そのものを制御する新たなアプローチが求められている。本稿では、その要素技術となるメタサーフェスについて、位相分布に基づく電波伝搬制御の基本原理と、周期構造による位相制御の実装方法を整理した。さらに、反射型メタサーフェスを用いたローカル5G工場環境でのエリア化実証、および透過型メタサーフェスを用いた基地局アンテナのビーム成形・カバレッジ拡大に関する実証結果を紹介した。これらの検討を通じて、メタサーフェスが高周波数帯における電波伝搬制御技術として有効であることを示し、今後の無線システムへの適用可能性について述べる。

This paper presents the design principles and experimental demonstrations of metasurface-based radio propagation control technologies for 5G and 6G wireless communications. In high-frequency bands such as millimeter waves, radio propagation is strongly affected by large free-space path loss and blockage, leading to unstable communication quality in non-line-of-sight environments. Therefore, apart from advances in base-station antennas and user equipment, approaches that control the propagation environment itself have attracted increasing attention. Specifically, the fundamental principle of radio wave control based on phase-distribution design is described, and methods to realize required phase profiles using periodic unit-cell structures of metasurfaces are explained. Two experimental case studies conducted by AGC are also introduced. The first case employs a reflective metasurface to create a local 5G coverage area in an industrial factory, where radio shadowing and non-line-of-sight conditions are dominant. The second case applies a transmissive metasurface to a base-station antenna system, enabling functional beam shaping such as downtilt control, cosecant-squared beam formation, and widened beam-scanning angles. Simulation and measurement results confirm improvements in radiation characteristics and estimated coverage areas. These results indicate that metasurfaces are effective tools for spatial radio propagation control in high-frequency bands, with strong potential for practical wireless system applications in future 5G Evolution and 6G networks.

*AGC株式会社材料融合研究所（keisuke.arai@agc.com）

1. 緒言

近年、第5世代移動通信システム（5G）の普及が進み、そのさらなる高度化や第6世代移動通信（6G）を見据えた研究開発が加速している。特にミリ波帯をはじめとする高周波数帯域は、広帯域性を活かした大容量通信を可能とする一方、自由空間伝搬損失の増大や遮蔽物の影響の大きさなど、電波伝搬上の課題が顕著に表れることが知られている。直進性の強い電波特性は非見通し（Non-Line-of-Sight、NLOS）環境での通信品質を不安定にし、屋内外の複雑な構造を有する実利用環境においては、通信エリアの形成そのものが困難となる場合が多い。またローカル5Gは、通信事業者が提供する画一的なサービスとは異なり、ネットワークを利用者単位で個別最適化できることから、建設現場や農業、工場などでの活用が期待されている。一方で、多数の金属設備や遮蔽物が存在する工場空間ではNLOS環境や電波干渉による電波不感地帯が発生しやすく、通信品質の安定化が大きな課題となる。加えて、導入コスト削減の観点から基地局数の削減が求められることや、場外への電波漏洩を抑制する目的で送信電力を制限する必要がある場合もあり、所望エリアに十分な電界強度が届かない状況が生じやすい。

こうした課題に対し、基地局アンテナや端末側の高度化のみならず、近年、電波が伝搬する空間そのものを制御対象とするアプローチが注目されている。その代表例が、人工的に設計された周期構造によって電磁波の特性を制御可能なメタサーフェス（メタマテリアルの平面構造）である。メタサーフェスは、入射電波に対して、位相や振幅を制御することにより、通常の鏡面反射や屈折とは異なる方向への反射・透過や偏波変換などを実現できることが知られている。また、薄型・軽量かつ平面構造であることから、壁面や窓ガラスなどの建材への実装が容易であるという特長を有する。さらに、電磁波の特性を電気的に動的制御できるReconfigurable Intelligent Surface（RIS）は大きく注目されている。一方で、動的制御しない静的なメタサーフェスは、費用の観点だけでなく無線システム全体の消費電力や構成の複雑化を抑えた電波伝搬制御が可能であり、RISだけでなく基地局や中継局を増設することなど他のアプローチと比較しても利点がある。そのため、国内外の研究動向においても、メタサーフェスを用いた電波誘導やエリア改善に関する実証が多く報告されている。

AGCにおいても、ガラスや樹脂材料を基盤とした材料設計技術を活かし、反射型および透過型のメタサーフェスを用いた電波伝搬制御技術の研究開発に取り組んできた[1-37]。これらの取り組みに対応する関連文献を時系列に整理して引用している。具体的には、窓ガラスへの適用を想定した透過型メタサーフェスの設計・評価や、ローカル5Gの実利用環境における反射型メタサーフェスを用いた通信エリア化の実証など、複数の検討を通じてその有効性を確認している。

本稿では、電波伝搬制御技術としてのメタサーフェスに着目し、主に位相分布設計による伝搬方向制御を対象とし、まず基本的な設計原理と設計手法について整理する。続いて、AGCにおいて実施してきた研究開発の中から、工場内ローカル5G環境におけるエリア化を目的とした反射型メタサーフェス、ならびに基地局アンテナへの適用を想定したビーム成形を目的とする透過型メタサーフェスの2つの事例の一部を紹介し、メタサーフェスを用いた電波伝搬制御技術の有効性と今後の展開可能性について述べる。

2. 設計方法

2.1. 電波伝搬制御の原理

電波の伝搬方向を所望方向へ向けるためのメタサーフェスにおける制御位相ϕは、入射波の位相ϕ_iを打ち消して所望波の位相ϕ_rを加えた形で表すことができる。

$$\phi = \phi_r - \phi_i \tag{1}$$

厳密には、メタサーフェスの表面インピーダンスを考慮することで、周期構造によって生じるグレーティングローブを抑制し、電力効率を改善することが好ましい。**Fig. 1**はメタサーフェスから電波が再放射されるときの所望方向（θ，φ）を示しており、所望方向へ平面波を伝搬させたい場合、所望波の位相は、

$$\phi_r = -k_0 \sin\theta\,(x\cos\varphi + y\sin\varphi) \tag{2}$$

と表される。ただし、k_0は波数、x，yはメタサーフェス表面における座標である。

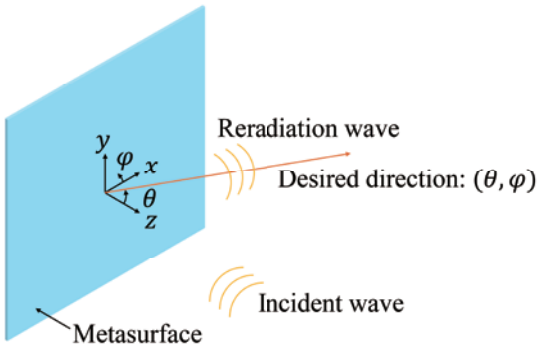


Fig. 1 Schematics of desired direction from the metasurface.

2.2. 位相分布の実現

前節の方法で設計した位相分布を実現するために、周期構造が用いられる。周期構造を構成する単位構造の一例を**Fig. 2**に示す。単位構造の大きさは半波長以下であり、導体共振器の長さを適切に選択することによって、特定周波数において任意の位相を実現することができる。

本稿では、このような位相分布設計に基づき、所望方向への反射やビーム成形を実現するメタサーフェスの設計を行っており、具体的な設計結果および特性は後述の実証事例において示す。

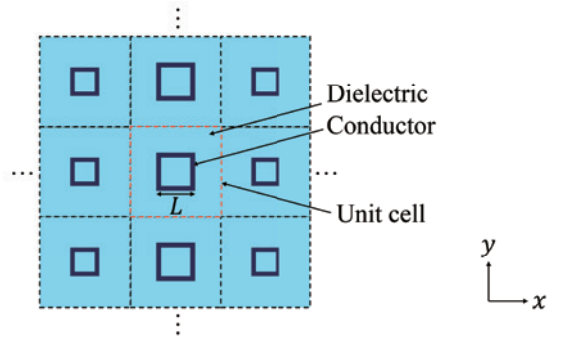


Fig. 2 Schematics of unit cell structure of the metasurface.

3. 反射型メタサーフェスの実証事例

3.1. 概要

反射型メタサーフェスを用いて、工場内ローカル5Gのエリア化について実証した[24, 31]。反射型メタサーフェスは、凸面鏡を平面化し、かつ、鏡面反射とは異なる方向へ異常拡散反射するような設計とした。ここでは、単位構造と連続波（Continuous Wave、CW）における指向性の評価結果について説明する。

3.2. 単位構造

工場内における安全性のため、透明な部材を用いて単位構造の設計を行った。反射型メタサーフェスの単位構造の構成を**Fig. 3**に示す。単位構造は、基板表面の矩形パッチ導体および基板裏面の接地導体層から構成され、単位構造の大きさPは5 mmとした。パッチ幅Wを変化させたときの4.7 GHzにおける反射特性のシミュレーション結果を**Fig. 4**に示す。縦軸左は反射位相、縦軸右は反射振幅を表しており、Wを適切に選ぶことで反射位相は360°を90°刻みの4値で離散化でき、反射振幅−1 dB以上が得られた。

3.3. 指向性

CWにおける反射指向性の測定系を**Fig. 5**に示す。電波暗室内において、ターンテーブル中央に被測定物（Device Under Test、DUT）である反射型メタサーフェス、ターンテーブル中央から3.0 m離れたターンテーブル上に送信アンテナ（Tx）、ターンテーブル中央から4.5 m離れたターンテーブル外に受信アンテナ（Rx）を設置した。ターンテーブルを回転させることで、DUTへの入射角を固定して、反射指向性を測定できる。反射型メタサーフェスの反射指向性を**Fig. 6**に示す。ただし、シミュレーションは実際の構造をモデル化して電磁界解析により求めたものであり、理論計算は数値上の振幅位相分布を用いて放射を求めたものである。実験結果は特にメインローブにおいてシミュレーションおよび理論計算結果と良く一致し、反射型メタサーフェスに垂直入射した電波が方位角約45°を中心に拡散反射することが確認できた。

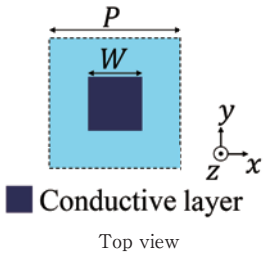


Fig. 3 Configuration of unit cell of the reflective metasurface.

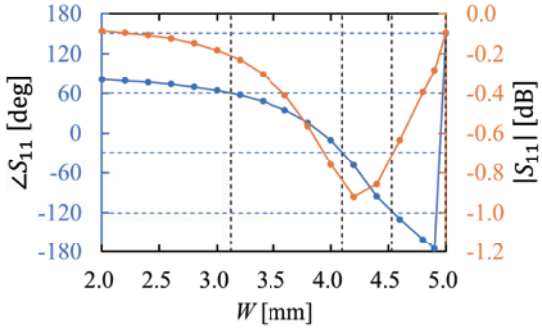


Fig. 4 Reflection coefficient of unit cell of reflective metasurface.

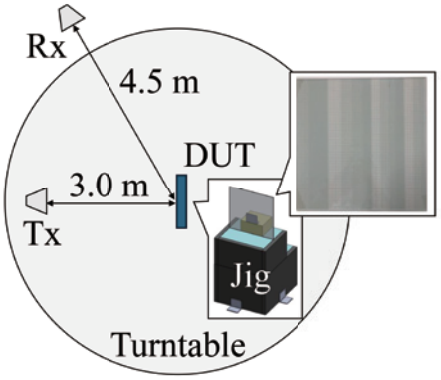


Fig. 5 Schematics of reflective directivity measurement.

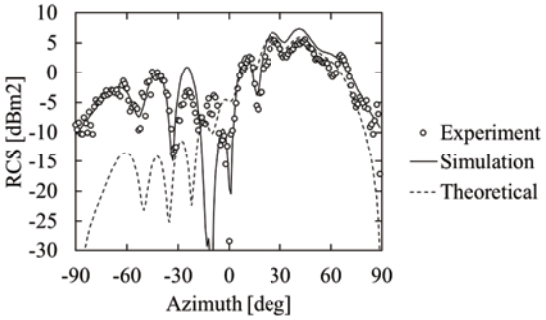


Fig. 6 Reflective directivity of reflective metasurface.

4. 透過型メタサーフェスの実証事例

4.1. 概要

透過型メタサーフェスを用いて、基地局アンテナの機能性ビーム成形について実証した[25, 34-37]。Fig. 7に示すように、アンテナは1×8マイクロストリップアレーアンテナとし、透過型メタサーフェスをアンテナ60 mm離して配置した。透過型メタサーフェスは、基地局アンテナからの電波をダウンチルトかつコセカント2乗ビーム成形し、ビーム走査角を広角化するような設計とした。なお、コセカント2乗ビーム成形は、地上の端末位置に依らず一定の通信電力を実現できる手法として知られている。ここでは、単位構造とCWにおける指向性の評価結果、およびカバレッジエリア推定結果について説明する。本検討では、従来構成と比較して広角化およびダウンチルトによるカバレッジエリアの拡大と、受信電力分布の均一化を目的とした。

4.2. 単位構造

透過型メタサーフェスの単位構造の構成をFig. 8に示す。(a) の側面視は厚み方向の断面（層構成）を示しており、両面の銅箔がパターニングされた誘電体基板が、空気層を介して4枚積層されている。(b) の平面視は誘電体基板上の銅箔をパターニングすることで形成された正方形ループ状のスロットを示しており、厚み方向には同一寸法、面内では異なる寸法のパターンが配列される。単位構造の大きさPは5 mm、スロット幅は0.65 mmとした。誘電体基板は厚み0.127 mm、比誘電率2.2であり、誘電体基板間の距離は2.5 mmとした。スロット長Lを変化させたときの29.7 GHzにおける透過特性のシミュレーション結果をFig. 9に示す。Lを適切に選ぶことにより透過位相の制御範囲360°超を透過振幅−2 dB以上で実現できた。

4.3. 指向性

方位角0°における仰角方向の指向性のシミュレーション結果をFig. 10に示す。黒破線はコセカント2乗の曲線を表しており、透過型メタサーフェスによって指向性がコセカント2乗ビームになることが確認できた。

4.4. カバレッジエリア推定

5Gミリ波のような高周波数帯においては、電波の直進性が強いため、フリスの伝達公式を用いて直接波の受信電力を算出することでカバレッジエリアを推定した。

$$P_r = P_t G_{\mathrm{BS}} G_{\mathrm{UE}} \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \qquad (3)$$

受信電力P_rは送信電力P_t、基地局アンテナ利得G_{BS}、端末アンテナ利得G_{UE}、アンテナ間距離$R(\theta, \varphi)$、波長λを用いて表される。結果をFig. 11に示す。ただし、P_tは 0 dBm、$G_{\mathrm{BS}}(\theta, \varphi)$は設計した基地局アンテナの指向性利得、$G_{\mathrm{UE}}$は等方性で0 dBi、周波数は29.7 GHz、基地局アンテナと端末アンテナの高低差は10 mとして計算し、1×8アレーによって方位角方向に6°刻みで±45°ビーム走査した最大値をプロットした。値は透過型メタサーフェスが無い場合の最大値で規格化した。基地局アンテナの座標は(x, y, z)=(0, 10, 0) [m] であり、端末アンテナの座標は$(x, 0, z)$である。透過型メタサーフェスが無い場合は、ビーム走査によって±45°、半径100 m以内が約−10 dB以上となったのに対し、透過型メタサーフェスがある場合は、広角化設計により±60°、半径175 mが約−10 dB以上、かつ、ほぼ均一の電力分布となった。以上より、設計した透過型メタサーフェスによって、ビーム成形が実現でき、カバレッジエリアが拡大することが確認できた。

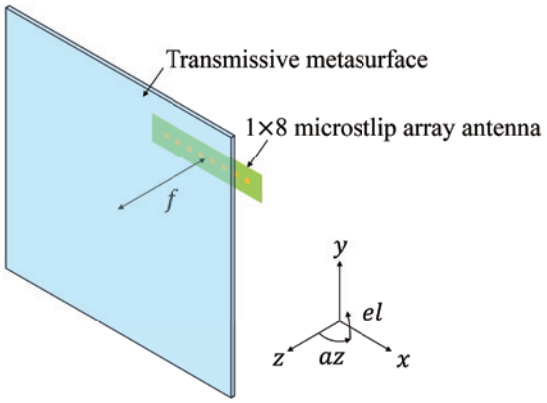
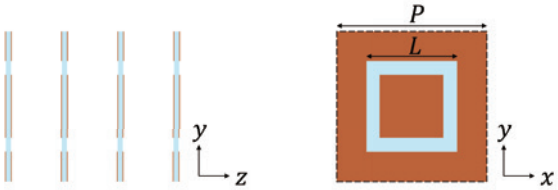


Fig. 7 Schematics of the antenna with transmissive metasurface.



(a) Side view　(b) Top view

Fig. 8 Configuration of unit cell of the transmissive metasurface.

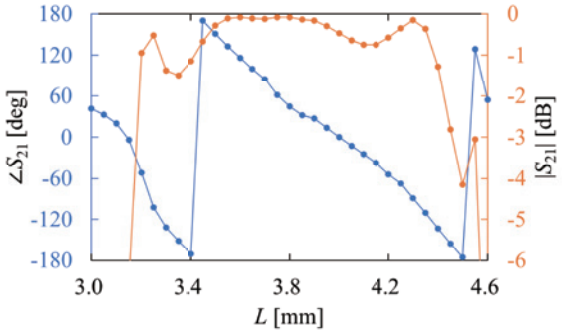


Fig. 9 Transmission coefficient of unit cell of transmissive metasurface.

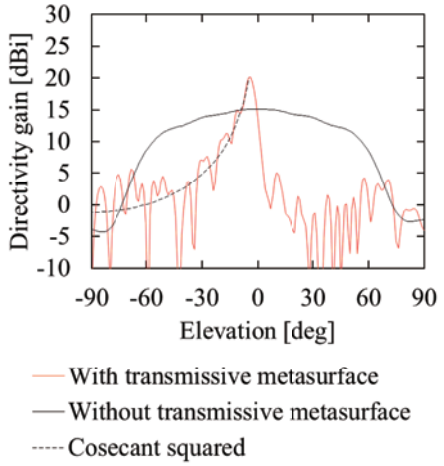
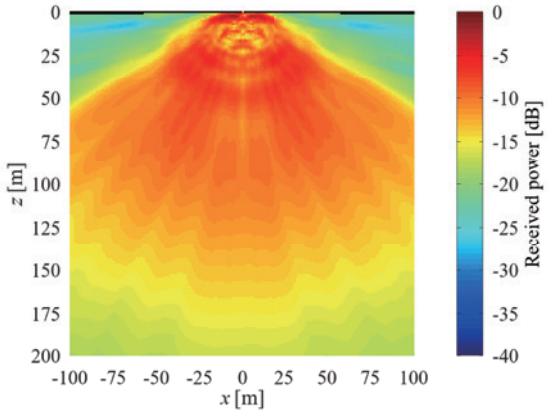
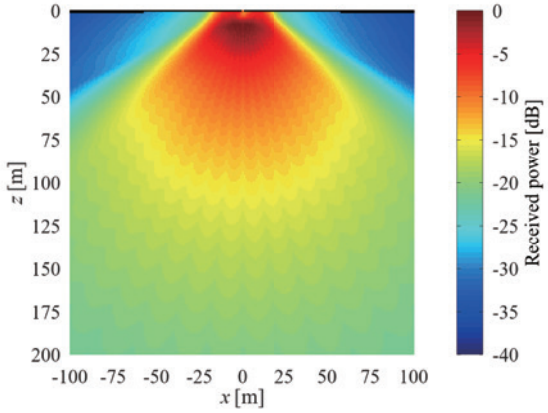


Fig. 10 Directivity of the antenna with/without transmissive metasurface.



(a) With transmissive metasurface



(b) Without transmissive metasurface

Fig. 11 Coverage area estimation using simulated directivity.

5. 総括

5G/6Gに向けた電波伝搬制御技術に関して、AGCで取り組んだメタサーフェスの研究開発について、基本的な設計原理と実証事例の一部を紹介した。今後は、実装に向けた検討が課題である。

—参考文献—

(1) NTTドコモ, “（お知らせ）世界初、28GHz帯5G電波の透過・反射を動的制御する透明メタサーフェス技術の実証実験に成功, ”2020年1月. https://www.docomo.ne.jp/info/news_release/2020/01/17_01.html

(2) NTTドコモ, “（お知らせ）メタサーフェス技術により窓ガラスの電波レンズ化に世界で初めて成功, ”2021年1月. https://www.docomo.ne.jp/info/news_release/2021/01/26_00.html

(3) AGC, “メタサーフェス技術により窓ガラスの電波レンズ化に世界で初めて成功, ”2021年1月. https://www.agc.com/news/detail/1201960_2148.html

(4) D. Kitayama, Y. Hama, K. Goto, K. Miyachi, T. Motegi, and O. Kagaya, “Transparent dynamic metasurface for a visually unaffected reconfigurable intelligent surface: controlling transmission/reflection and making a window into an RF lens,” in *Optics Express*, vol. 29, no. 18, Aug. 2021.

(5) V. Popov, M. Odit, J.-B. Gros, V. Lenets, A. Kumagai, M. Fink, K. Enomoto, and G. Lerosey, “Experimental demonstration of a mmWave passive access point extender based on a binary reconfigurable intelligent surface,” in *Front. Commun. Netw.*, vol. 2, Art. no. 733891, Oct. 2021.

(6) NTTドコモ, “世界初、6G時代の超カバレッジの実現に向けたユーザー追従型メタサーフェス制御の実証に成功, ”2021年11月. https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/topics/2021/topics_211112_00.pdf

(7) AGC, “屋内5Gエリア改善に向けRIS反射板を開発, ”2021年11月. https://www.agc.com/news/detail/1202587_2148.html

(8) 坪井淳, 茂木健, 加賀谷修, 来山大祐, 宮地健介, 浅井孝浩, “高周波数帯の屋内エリア改善に向けたメタサーフェス, FSS, 中継局技術の有効性の評価, ”信学技報, vol. 121, no. 302, RCS2021-187, pp. 63-68, 2021年12月.

(9) 今井哲朗, 熊谷翔, 高橋幸一郎, “物理光学近似に基づくRIS散乱モデルの提案, ”信学技報, vol. 121, no. 370, AP2021-163, pp. 26-31, 2022年2月.

(10) 大宮陸, 岩渕匡史, 来山大祐, 小川智明, 後藤健太, 坪井淳, 宮地健介, 熊谷翔, 加賀谷修, “強化学習を用いた28GHz帯Reconfigurable Intelligent Surfaceの制御実験, ”信学総大2022, B-5-31, 2022年3月.

(11) J. Tsuboi, T. Motegi, O. Kagaya, D. Kitayama, K. Miyachi, T. Okuyama, and S. Suyama, T. Asai, “Evaluation of Indoor Area Improvement in the High Frequency Band Using Metasurface Lenses, FSS Technology and Relay Stations,” *2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring)*, Helsinki, Finland, pp. 1-5, Jun. 2022.

(12) NTTドコモ, “世界初、透過型メタサーフェスで屋内の電波を屋外の建物の足元に届ける実証に成功, ”2023年1月.

https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/topics/2022/topics_230130_04.pdf

(13) 後藤健太，山田貴之，須山聡，新井圭祐，松本章代，加賀谷修，“透過型メタサーフェスによる屋外カバレッジ測定実験，”信学総大2023，B-5-29，2023年3月．

(14) T. Imai, A. Kumagai, K. Takahashi and O. Kagaya, “Proposal on RIS Scattering Model Based on Physical-Optics Approximation,” *2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Florence, Italy, pp. 1-5, Mar. 2023.

(15) 後藤健太，須山聡，山田貴之，新井圭祐，加賀谷修，“複数の透過型メタサーフェスとビームフォーミングを用いた28 GHz帯伝送実験，”信学技報，vol. 123，no. 76，RCS2023-78，pp. 294-299，2023年6月．

(16) 後藤健太，須山聡，山田貴之，新井圭祐，加賀谷修，“複数の透過型メタサーフェスを用いた容量改善に関する一検討，”信学ソ大2023，B-5-59，2023年9月．

(17) K. Goto, S. Suyama, T. Yamada, K. Arai and O. Kagaya, “Experimental Trials with Combination of Multiple Transmissive Metasurfaces and Beamforming for mmW Coverage Enhancement,” *2023 IEEE 98th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Fall)*, Hong Kong, Hong Kong, pp. 1-5, Oct. 2023.

(18) A. Kumagai, Y. Ui and O. Kagaya, “Design and Measurement of a Subarray Element Reconfigurable Intelligent Surface,” in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 10, pp. 8040-8047, Oct. 2023.

(19) A. Ebihara, A. Kumagai, M. Kataoka, Y. Ui, O. Kagaya, H. Morikawa and Y. Narusue, “Multi-user beamforming with a reconfigurable intelligent surface using stereo camera images,” in *Electron. Lett.*, 59: e13061, Dec. 2023.

(20) 新井圭祐，加賀谷修，後藤健太，須山聡，“複数の透過型メタサーフェスを用いた28 GHz帯カバレッジ改善実験における透過型メタサーフェスの設計と伝搬解析，”信学技報，vol. 123，no. 262，AP2023-149，pp. 98-103，2023年11月．

(21) 飯塚大翔，今井哲朗，佐山稔貴，宇井裕，加賀谷修，“市街地マクロセル環境におけるRIS設置効果に関する一検討，”信学技報，vol. 123，no. 336，AP2023-169，pp. 52-57，2024年1月．

(22) 海老原晃，熊谷翔，加賀谷修，森川博之，成末義哲，“チャープ系列を用いたメタサーフェス反射板におけるビーム幅制御，”信学技報，vol. 124，no. 84，AP2024-47，pp. 118-122，2024年6月．

(23) A. Ebihara, A. Kumagai, M. Kataoka, Y. Ui, O. Kagaya and H. Morikawa, “Multi-user Beam Tracking with a Reconfigurable Intelligent Surface Using Stereo Camera Images,” *2024 54th European Microwave Conference (EuMC)*, Paris, France, pp. 505-508, Sep. 2024.

(24) 新井圭祐，加賀谷修，木村健一，藤野学，大前秀樹，“自動車工場におけるメタサーフェス反射板を用いたローカル5Gのエリア化実証実験，”信学技報，vol. 124，no. 341，AP2024-177，pp. 55-59，2025年1月．

(25) 保前俊稀，豊見本和馬，山口良，田淵駿平，新井圭祐，佐山稔貴，加賀谷修，“ミリ波帯屋外基地局用トランスミットアレーアンテナを用いたエリア形成の一検討，”信学技報，vol. 124，no. 379，AP2024-189，pp. 1-5，2025年2月．

(26) 米田拓海，村上友規，吉田翔，佐山稔貴，加賀谷修，毛利檀，須山聡，張裕淵，蒋恵玲，鷹取泰司，“ミリ波帯マルチパス環境構築のための大規模メタサーフェス反射板の実験検討，”信学技報，vol. 124，no. 409，RCS2024-277，pp. 90-95，2025年3月．

(27) 米田拓海，村上友規，吉田翔，佐山稔貴，加賀谷修，毛利檀，須山聡，張裕淵，蒋恵玲，鷹取泰司，“メタサーフェス反射板における入射方向ずれに関する評価，”信学総大2025，B-5A-7，2025年3月．

(28) 毛利檀，須山聡，張裕淵，蒋恵玲，新井圭祐，吉田翔，佐山稔貴，加賀谷修，米田拓海，村上友規，“半球面上のS11測定によるメタサーフェス反射板の開口励振係数・反射パターンの推定，”信学総大2025，B-1C-10，2025年3月．

(29) A. Ebihara, A. Kumagai, O. Kagaya, H. Morikawa and Y. Narusue, “Chirp Sequence-Based Beamwidth Control in a Reconfigurable Intelligent Surface,” *2025 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS 2025*, San Francisco, CA, USA, pp. 295-298, Jun. 2025.

(30) 米田拓海，村上友規，吉田翔，佐山稔貴，加賀谷修，毛利檀，須山聡，張裕淵，蒋恵玲，小川智明，“屋外環境における大規模メタサーフェス反射板の実験評価，”信学ソ大2025，B-5A-07，2025年9月．

(31) K. Arai, O. Kagaya, K. Kimura, M. Fujino and H. Ohmae, “Pilot Test of Coverage Expansion in Local 5G Using Metasurface Reflector in a Factory,” *2025 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Fukuoka, Japan, pp. 1-2, Oct. 2025.

(32) 吉田翔，李相文，佐山稔貴，加賀谷修，米田拓海，村上友規，毛利檀，須山聡，“ミリ波向け透明大面積メタサーフェス反射板の設計と実験評価，”信学技報，vol. 125，no. 241，AP2025-166，pp. 83-88，2025年11月．

(33) T. Yoneda, T. Murakami, S. Yoshida, T. Sayama, O. Kagaya, D. Mohri, S. Suyama, Y. Chang, H. Jiang and Y. Takatori, “Massive Metasurface-Assisted Multidirectional Beam Shaping: Prototyping and Outdoor Experimental Results in Millimeter-Wave Band,” in *IEEE Access*, vol. 14, pp. 11942-11952, Jan. 2026.

(34) 田淵駿平，保前俊稀，豊見本和馬，山口良，新井圭祐，佐山稔貴，加賀谷修，“ミリ波帯屋外基地局用トランスミットアレーアンテナの垂直面指向性の検討および実環境評価，”信学技報，vol. 125，no. 357，AP2025-214，pp. 26-30，2026年2月．

(35) 新井圭祐，佐山稔貴，加賀谷修，田淵駿平，保前俊稀，豊見本和馬，山口良，“ミリ波帯屋外基地局用トランスミットアレーアンテナ向け透過型メタサーフェスの検討，”信学技報，vol. 125，no. 357，AP2025-215，pp. 31-35，2026年2月．

(36) SoftBank，“6Gに向けて基地局アンテナの簡素化・省電力化技術を開発，”2026年3月．
https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2026/20260319_01/

(37) AGC，“6Gを見据えた「機能性ビーム成形レンズアンテナ」を開発、屋外実証に成功，”2026年3月．
https://www.agc.com/news/detail/1211003_2148.html