

24 GHzワイヤレス電力伝送向けフェーズドアレイアンテナ

電子応用技術R&Dセンター カウシャル シャレンドラ¹・須藤 勇気³・坂井 尚貴²・佐藤 亮輔²・
伊東 健治²・官 寧⁴

A Phased Array Antenna for 24 GHz Wireless Power Transfer Application

Shailendra Kaushal, Yuki Suto, Naoki Sakai, Ryosuke Sato, Kenji Itoh, and Ning Guan

無線電力伝送（WPT）では、長距離かつ大容量の伝送システムが求められている。その中で24 GHz帯WPTはアレイアンテナの鋭い指向性による空間的な人体暴露回避、公衆無線への非干渉、小型軽量に優れている。今回、フジクラで開発中の5Gミリ波通信モジュールであるフェーズドアレイアンテナモジュール（PAAM）と金沢工業大学のGaAs MMICベースのレクテナを用いた24 GHz帯WPTについて検討した。その結果、送電距離150 mmで2.8 WのDC電力を生成でき、Wクラスの電力伝送が見込めることを確認した。

Long-distance and high-capacity transmission systems are required for wireless power transfer (WPT). 24 GHz band WPT systems have the advantages of avoiding spatial exposure to the human body, avoiding interference with public wireless networks, and being small and lightweight because it is easy to construct array antennas with sharp directivity. In this study, we investigated a 24 GHz band WPT system using a phased array antenna module (PAAM) which is a 5G millimeter-wave communication module developed by Fujikura, and a GaAs MMIC-based rectenna developed by Kanazawa Institute of Technology. As a result, we confirmed that 2.8 W of DC power can be generated over a transmission distance of 150 mm, and that watt-class power transmission is possible.

1. ま え が き

無線電力伝送（WPT）では、伝送距離や目的によって使用される技術が異なる。数センチメートルまでの短距離でスマートフォンを充電する目的では、電磁結合型WPTが使用されている。また、数メートルまでの距離で大型の磁気コイルを必要とする電気自動車を充電する目的では、磁気結合型WPTが使用されている。一方、長距離でドローン、衛星、IoTセンサなどに電力を供給する目的では、無線周波数（RF）の電磁波を用いた空間伝送型WPTが使用され、近年注目を集めている¹⁾。このRF-WPTでは、これまでに920 MHz帯、2.4 GHz帯、5.7 GHz帯の制度化がされている。しかし、これらの周波数帯では、装置が小型化しにくい、広く普及している無線システムに干渉しやすい、送電に用いる電波の拡散のため大電力化しにくいといった課題がある。こういった課題に対し、複数のアンテナをアレイ状にし各アンテナの位相を適切に制御してビームフォーミングを行うフェーズドアレイアンテナモジュール

（PAAM）技術が有効である。PAAMの鋭い指向性により、伝送効率の向上や人体暴露回避、他の無線への干渉回避の実現が期待できる。

現在、WPTにおいて、新たな周波数帯である24 GHz帯での利用が検討されている。この周波数では、Wi-Fiなど広く利用されている無線への干渉の可能性が低い。また、アンテナサイズは波長に依存するため、波長の短い24 GHz帯では多数のアンテナを必要とするPAAMの小型化が可能である。24 GHz帯に近い周波数帯を用いている5Gミリ波基地局では、このPAAM技術を積極的に使用しており、PAAMのスケラビリティに関する詳細な議論が2023年のIEEE ECTC会議でなされている²⁾。24 GHz帯WPTと5G基地局用トランシーバ技術を活用する提案もされている^{3) 4) 5)}。文献3、文献4では、第5世代移動通信システム（5G）用送受信機にWPTによって電力を供給し、28 GHzでの通信を可能にする提案がされている。文献5では、屋内IoTアプリケーション向けに1 mの距離で5.7 dBmのDC電力を生成するWPTが提案されている。

このような24 GHz帯でのWPTの実現には、高い送信性能を有するPAAMに加えて、送信された電磁波を受電側で効率良く直流（DC）電力に変換するレクテナ（整流器

1 ミリ波デバイス研究部
2 金沢工業大学
3 技術マーケティング部
4 電子応用技術R&Dセンター

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説 明
WPT	Wireless Power Transmission	ワイヤレス電力伝送 (Wireless Power Transfer, WPT) は、電力をケーブルで接続することなく伝送する技術。簡単にまとめると：電力を電磁界や電波に変換し、空間を介して受信側に伝送。受信側で整流回路 (Rectifier) を使って直流電力に変換。
PAAM	Phased Array Antenna Module	フェーズドアレイアンテナモジュール
IEEE (ECTC)	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Electronic Components and Technology Conference)	Electronic Components and Technology Conference (ECTC) は、IEEE Electronics Packaging Societyが主催する電子部品・実装技術分野の世界的な国際会議
RF	Radio Frequency	無線周波数
IF	Intermediate Frequency	中間周波数
BFIC	Beam Former Integrated Circuit	特定方向へ電波の送信/受信を行うIC
FCIC	Frequency Conversion Integrated Circuit	IF信号とRF信号を変換する周波数交換IC
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power	EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) は、アンテナから放射される電力を、等方性アンテナ (全方向に均等に放射する理想アンテナ) に換算した値
HFSS	High Frequency Electromagnetic Field Simulation	有限要素法を用いた、ANSYS製 3次元電磁界解析ソフトウェア
FADDM	Finite Array Domain Decomposition Method	FADDM (Finite Array Domain Decomposition Method, 有限大アレイ領域分解法) は、Ansys HFSSなどの電磁界解析ツールで、大規模なフェーズドアレイアンテナや大規模アレイ構造の効率的なシミュレーションを可能にする技術
GaAs MMIC	Galium Arsenide Monolithic Microwave Integrated Circuit	GaAs (ガリウムヒ素) は化合物半導体の一種。高周波特性に優れる。MMICは、増幅器、ミキサ、移相器などのRF回路を1つ以上単一チップに集積したもの。主にマイクロ波～ミリ波帯 (GHz～数百GHz) で使用
IoT	Internet of Things	IoT (Internet of Things) は「モノのインターネット」と呼ばれ、さまざまな物理的なモノ (デバイスや機器) をインターネットに接続し、情報をやり取りする仕組み

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説 明
Rectenna/レクテナ	Rectenna	電波（RF/マイクロ波/ミリ波）を受信して、直流電力（DC）に変換する装置
EVM	Error Vector Magnitude	EVM（誤差ベクトル振幅）は、デジタル変調信号において、理想的なシンボル点（IQ平面上）と、実際に受信されたシンボル点のズレを“ベクトルの大きさ”として測定したもののこと
遠方界距離	Far-field distance	アンテナから十分に離れた領域で、電磁波が“平面波（Plane Wave）”として振る舞う距離”のこと
近傍界	Near-field	アンテナのすぐ近くに存在する電磁界領域で、電界と磁界の関係が一定ではなく、波がまだ“完全な電磁波（平面波）”として成立していない領域”のこと

と一体となったアンテナ）が必要である。フジクラではWPTの送信側にも適用可能な5Gミリ波基地局用PAAMの開発をしており、小型、高出力、電波の放射方向（ビーム）の精度が高く、ビーム形成の自由度も高いといった特長を持つPAAMを実現している⁶⁾。一方、金沢工業大学ではGaAs MMICベースの非常に高効率な24 GHz帯レクテナの開発をしている⁷⁾。そこで、これらのPAAMとレクテナを組み合わせた24 GHz帯WPTについて検討を行った⁸⁾。本稿ではその結果を報告する。

2. 無線電力伝送用フェーズドアレイアンテナモジュール

フジクラのn258（24.25 GHz～27.5 GHz）用PAAMは、図1（a）に示すように、モジュールの表面にデュアル偏波ダイポールアンテナ64素子を、裏面にビームフォーマIC（BFIC）、周波数変換IC（FCIC）、バンドパスフィルタ、信号合成/分配器を搭載している。本PAAM（64素子）は、通信アプリケーション向けに、デュアル偏波モードで±60度に高速ビームスイッチングが可能で、誤差ベクトル振幅

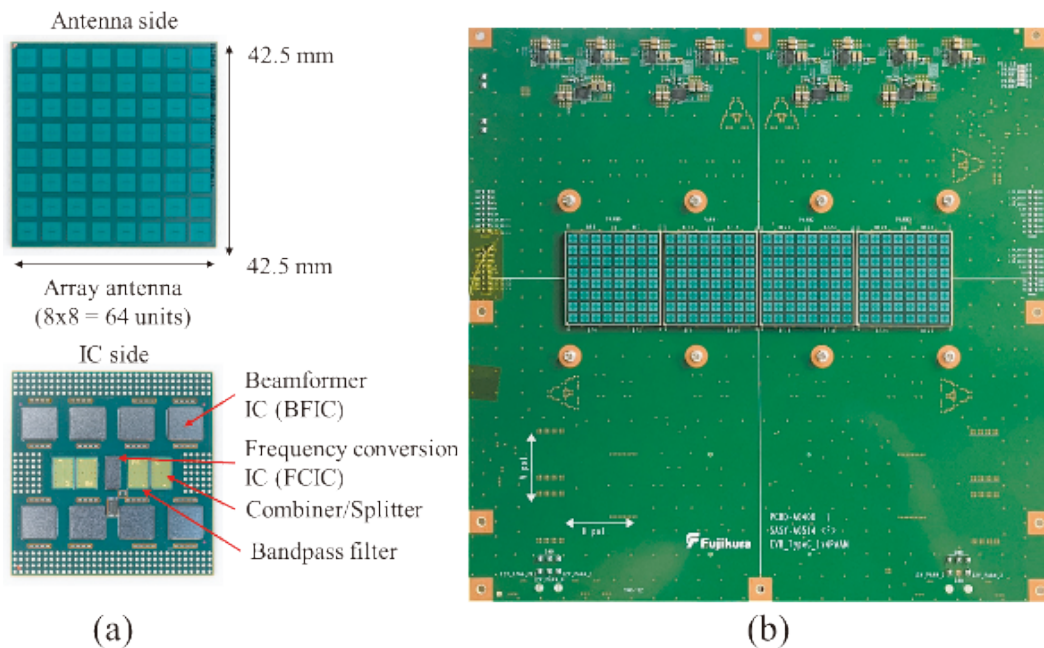


図1 (a) フェーズドアレイアンテナモジュール (b) 1x4 PAAM評価ボード⁸⁾

Fig. 1. (a) Phased array antenna module, (b) 1x4 PAAM on the evaluation board.

(EVM) 3%で最大48 dBmの実効等方放射電力 (EIRP) を出力できる. WPTアプリケーションの場合, 信号歪の影響を受けにくいのでさらなる高出力化が可能であり, シングル偏波で最大56 dBm, デュアル偏波で59 dBmのEIRPが出力可能である. 複数のPAAMを並列化し, WPTの出力電力を増やすことも可能であり, 図1 (b) に示すように1x4 アレイ (256素子) とした 場合, EIRP は偏波あたり 68 dBm, 総放射電力 (アンテナ利得を除いた実放射電力) 43 dBmである.

3. 近傍領域における集束ビームとフラットトップビームの形成

1x4配列PAAMの遠方界距離は, 24 GHzでは4 m超となる. PAAMを近傍界領域でWPTに使用するには, 単一のレクテナ受信ユニットに対してはビームを狭い領域に効率的に集束させることを, レクテナ受信アレイに対しては比較的広い領域に均等なビーム (フラットトップビーム) を放射することを, 近傍界領域において実現しなければならない. PAAM内の各アンテナ素子から放射される信号の位相は, 集束点からの距離によって決定され, 式1および式2に示すように波数に乘じられる. 2D位相計算モデルを図2 (a) に示す.

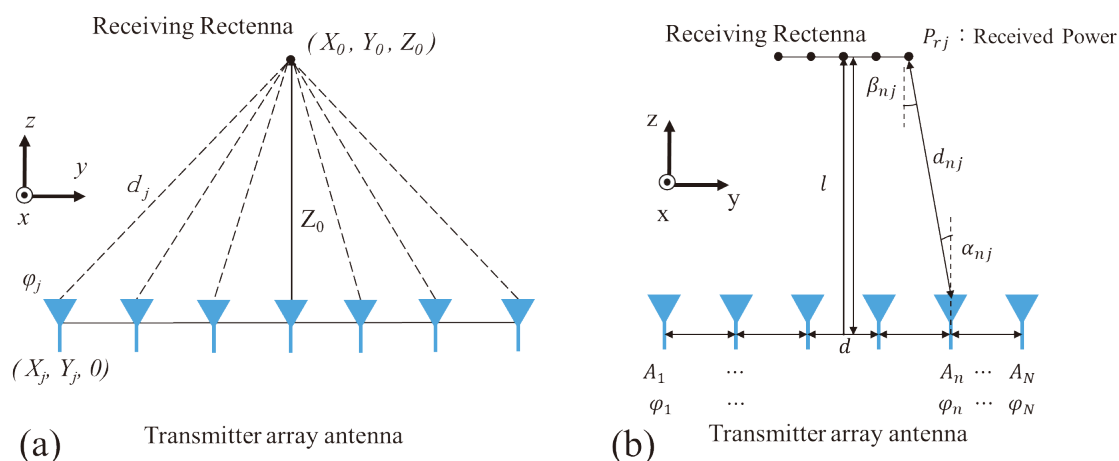


図2 (a) 集束ビーム生成法 (b) フラットトップビーム生成法⁸⁾

Fig 2. (a) Beam concentration method, (b) flattop generation method.

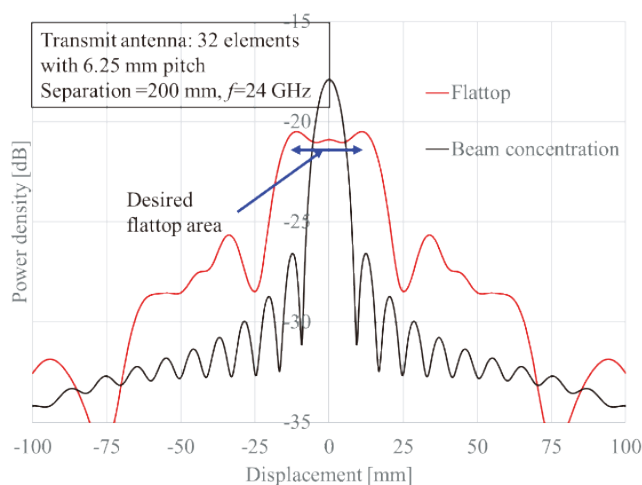


図3 近傍領域における集束ビームとフラットトップビームの比較⁸⁾

Fig. 3. Comparison of radiated beam in the near field for flattop and beam concentration.

フラットトップ放射は、図2 (b) に示すように、受信側において平均電力が最大となり、かつ各観測点における電力バランスが最も平坦となる複数の観測点を選択することで生成される。これらの観測点におけるテスト関数を用い、送信アンテナ素子における位相をそれぞれ調整することで、最適化する。

24 GHzにおけるフラットトップビームと集束ビームの近傍領域における電力密度の比較を図3に示す。この図から、集束ビームは、正面方向においてはフラットトップビームより電力密度が高いことがわかる。しかし、広い領域を考慮すると、フラットトップビームの方がより平坦な電力密度を生成する。この集束ビームまたはフラットトップビームは、PAAMのビームフォーミング機能を使用して任意の方向に向けることができる。

集束ビームとフラットトップビームの機能を検証するため、図4 (a) に示すように、FADDM技術を使用してAnsys® HFSSで 8×32 のアンテナアレイを作成し、PAAMの測定結果と比較した。アレイモデルから200 mmの距離にある近傍領域の電力密度を、集束ビームとフラットトップビームのどちらも形成しない場合 (図4 (b))、フラットトップビームのみ形成した場合 (図4 (c))、集束ビームのみ形成した場合 (図4 (d)) について、それぞれ示す。これらの図から、フラットトップビームを形成した場合は、形成しなかった場合より電力密度が4.9 dB増加し、目的の領域で平坦になっていることがわかる。また、図4 (d) より、集束ビーム形成により、電力密度が8.9 dB増加することがわかる。

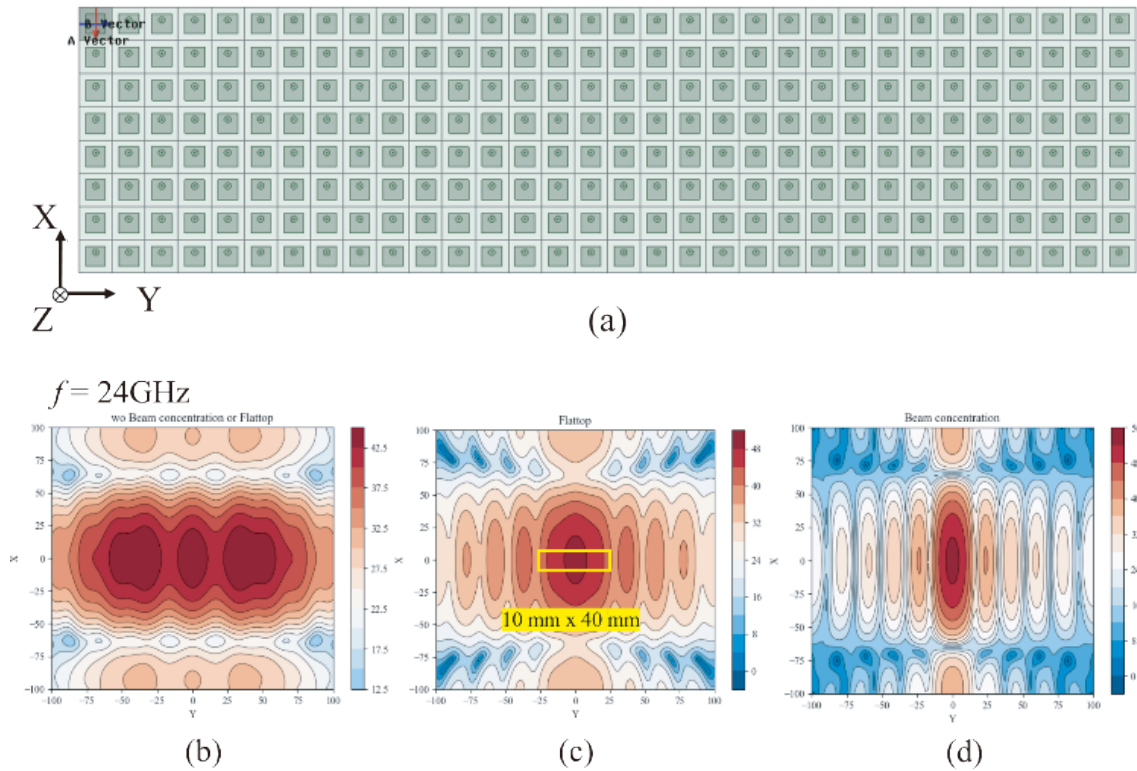


図4 (a) 集束ビームとフラットトップビームのシミュレーションモデル
 (b) 集束ビームもフラットトップビームも用いない場合の電力密度分布
 (c) フラットトップビームを用いた場合の電力密度分布
 (d) 集束ビームを用いた場合の電力密度分布⁸⁾

Fig. 4. (a) Simulation model for flattop and beam concentration,
 (b) power density contour plot without beam concentration and flattop,
 (c) power density contour plot with flattop, and
 (d) power density contour plot with beam concentration.

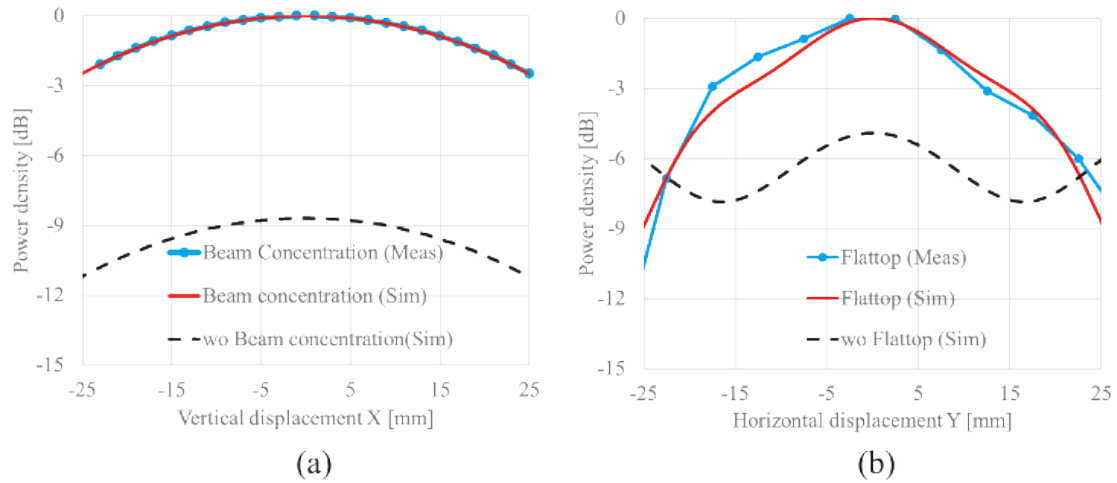


図5 測定およびシミュレーションによる正規化電力密度⁸⁾ (a) 垂直変位, (b) 水平変位

Fig. 5. Measured and simulated normalized power density for (a) vertical displacement, (b) horizontal displacement.

図5 (a) に、レクテナを垂直方向に移動させた場合の電力密度を示す。シミュレーション結果と測定結果がよく一致していることが分かる。また、集束ビームにより、8.9 dB以上の増加があることも分かる。図5 (b) に、レクテナを水平方向に移動させた場合の電力密度を示す。フラットトップビームを用いた場合のシミュレーション結果と測定結果もよく一致していることが分かる。また、フラットトップビームにより4.9 dB以上の増加があることも分かる。この集束ビームやフラットトップビームは、PAAMの各素子に対する位相設定（位相テーブル）を更新することで、任意の方向での実現が可能である。

4. 測定結果

今回使用したレクテナはGaAs MMICをベースにしている⁷⁾。サイズは10 mm×10 mmで、薄型、ワットクラスの電力に対応、70 %以上の整流効率と高効率である。1×4 PAAMでは、PAAMとレクテナ間の距離を150 mmに設定し、近傍領域で使用した場合、30 dBm (1 W) 以上のRF電力を生成できる。

図6に1×4 PAAMの測定系を示す。治具上でレクテナとPAAMの間隔を調整でき、また、レクテナを水平方向と垂直方向に動かすことによってビームフォーミング能力の確認が可能である。図7にレクテナとPAAMの間隔を変化させたときのDC出力電力の測定結果を示す。1cm²のレクテナ単体で集束ビームを用いた場合は、PAAMーレクテナ間200 mmのときに最大580 mW、PAAMーレクテナ間1 mでは21 mWのDC電力が得られることを示している（なお、RF周波数24 GHzで測定）。一方、集束ビームを用いない場合、同一条件での電力はそれぞれ93 mW、17.65

mWであった。また、4x1アレイレクテナで集束ビームを用いた場合はPAAMーレクテナ間150 mmのときに約2.8 Wであった（なお、RF周波数25 GHzで測定）。

さらに、PAAMーレクテナ間200 mmにおいて、レクテナの位置を水平方向に-80 mmから+80 mmまで変化させ、ビームフォーミングの有無でRF周波数24 GHzのときのDC出力電力を測定した（図8）。ビームフォーミングありでは、DC出力電力は最大580 mWで、他の位置でも400 mW以上であったが、ビームフォーミングなしでは中心方向以外では出力電力はごくわずかとなる。レクテナへの入力RF電力が減少すると整流効率が低下するため、DC出力電力はより減少が大きくなる。文献6では、レクテナへの入力電力に関してホーンアンテナを使用してWPTの検証がされている。図9に示すとおり、本PAAMにおいても同様の結果が得られている。

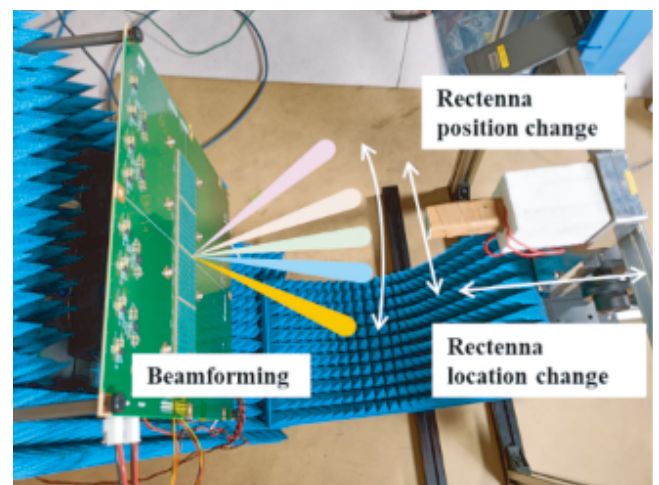


図6 測定系⁸⁾

Fig. 6. Measurement setup.

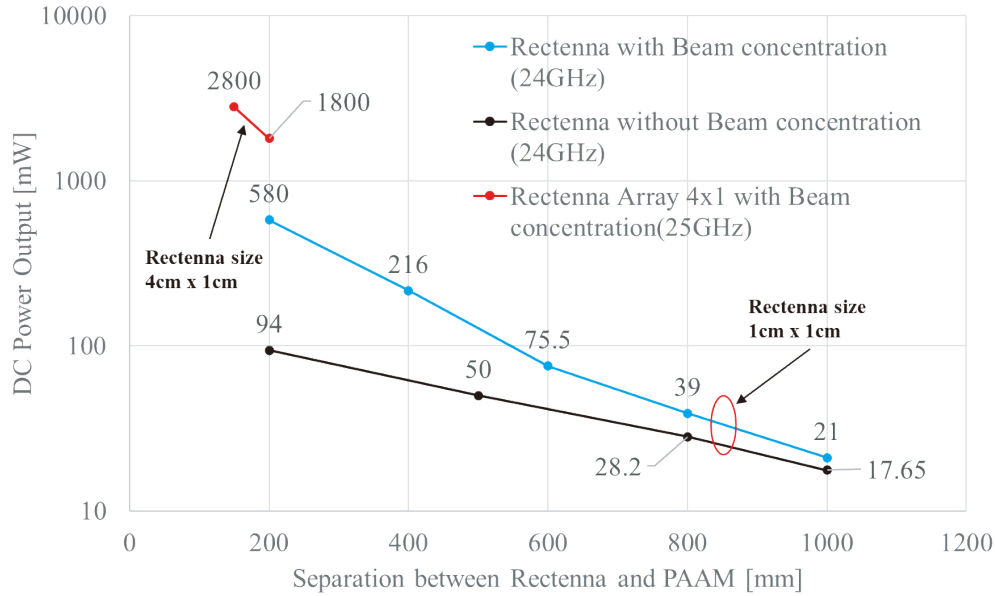


図7 単一のレクテナと4x1レクテナアレイにおける送受信間距離とDC出力電力の測定結果⁸⁾

Fig. 7. Measured DC power with a single rectenna and 4x1 rectenna array with respect to the separation.

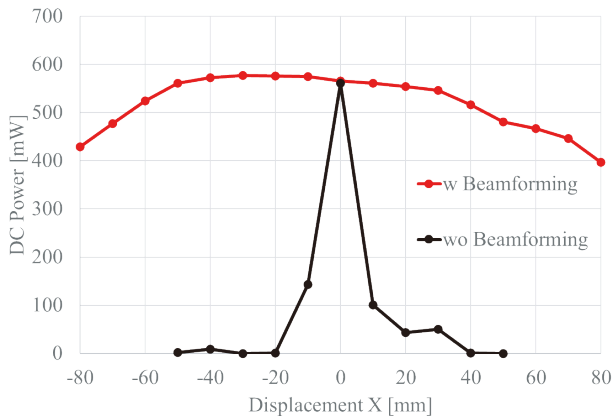


図8 単一レクテナにおけるビームフォーミング有無とDC出力電力の測定結果⁸⁾

Fig. 8. Measured DC power using a single rectenna with and without beamforming.

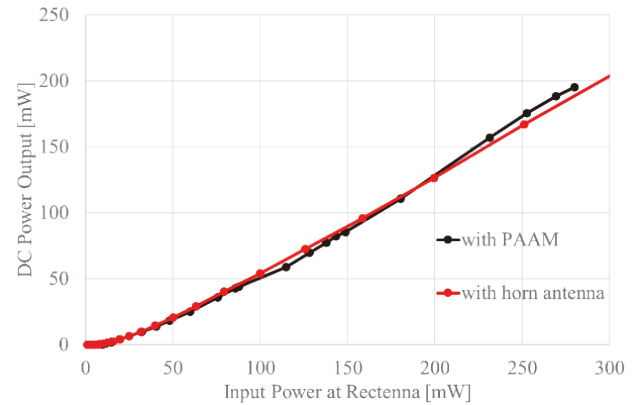


図9 ホーンアンテナを用いた場合とPAAMを用いた場合の伝送電力の比較⁸⁾

Fig. 9. Comparison of output DC power (mW) w.r.t input power (mW) at the rectenna for the horn antenna transmitter and PAAM.

5. むすび

本報告では、1×4構成のフェーズドアレイアンテナモジュール (PAAM) と金沢工業大学のGaAs MMICベースのレクテナを用いて24 GHz帯における無線電力伝送 (WPT) の有効性を実証した。ビーム形成にビームフォーカス手法を用いた結果、送電距離150 mmかつ受電面積4 cm²の4×1配列レクテナで2.8 Wの給電を確認した。さらに、PAAMのデュアル偏波機能を活用することで、前記条件において最大5.6 Wの給電が見込める。以上より、フジクラのPAAMと金沢工業大学のレクテナを基盤とする

24 GHz帯WPTは、短距離・高電力給電の有望な手段であることが確認できた。今後は、送電効率の向上、より長距離への送電などの検討を進める予定である。

参考文献

- 1) N. Shinohara, "Recent wireless power transmission via microwave and millimeter-wave in Japan," 42nd European Microwave Conf., pp. 1347-1350, Amsterdam, Netherlands, Oct. 2012.
- 2) D. Liu, X. Gu, C. Baks, K. Masuko, Y. Tojo, A.O. Watanabe, A. Paidimarri, Y. Hasegawa, G. Chandran, X. Lei, N. Guan, A. Valdes-Garcia and B. Sadhu, "A scalable heterogeneous AiP module for a 256-element 5G phased array," IEEE 73rd Electronic Components and Technology Conf. (ECTC) , pp. 467-474, Orlando, FL, USA, May 2023.
- 3) A. Shirane, "Millimeter-wave 5G relay transceivers using wireless power transfer and backscatter," 2024 IEEE Wireless Power Technology Conf. and Expo (WPTCE) , pp. 876-879, Kyoto, Japan, May 2024.
- 4) K. Yuasa, M. Ide, S. Kato, K. Okada and A. Shirane, "Beam control free 28GHz 5G relay transceiver and 24GHz wireless power receiver using on-chip butler matrix," 2023 IEEE/MTT-S International Microwave Symp., pp. 199-202, San Diego, CA, USA, Jun. 2023.
- 5) B. Jiang, P. Li, S. Zheng, Y. Lin and H. Xu, "A 24-GHz beam-steerable multi-node wireless power transfer system with a maximum DC output of 5.7 dBm at 1-m distance," IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. 72, no. 11, pp. 6774-6789, Nov. 2024.
- 6) 徐, Fabricio Dourado, 東海林, 藤乗 : 「28 GHz 256素子タイリングフェーズドアレイアンテナモジュールのOver-The-Air評価」, フジクラ技報, 第138号, pp.19-33, Jul. 2025.
- 7) K. Itoh, R. Sato, Y. Hirose, N. Sakai, M. Tsuru, K. Noguchi, "A 24 GHz band highly efficient GaAs 1 W rectenna MMIC electromagnetically coupled with an external AlN antenna for thermal dispersion," 2025 IEEE Wireless Power Technology Conf. and Exp o (WPTCE) , Rome, Jun. 2025.
- 8) S. Kaushal, Y. Suto, N. Sakai, R. Sato, K. Itoh, N. Guan, "A phased array antenna for 24 GHz wireless power transfer applications," Proc. IEEE Asia-Pacific Microw. Conf. (APMC) , FA4-4, Dec. 2025.