

## 技術紹介

マイクロ波 WPT 機器の  
開発に向けた取り組み

関野 昇\* 佐藤 啓介\* 三浦 進\*

## Efforts Towards Developing Microwave WPT Equipment

Noboru Sekino, Keisuke Sato and Susumu Miura

マイクロ波を使用した電力送電(以下、WPT<sup>\*1</sup>)である空間伝送型 WPT システムについて、注目が集まっている。本稿では、当社が行っている空間伝送型 WPT システムの実用化に向けての取組や開発状況等について紹介する。

Space transmission type Wireless Power Transmission (WPT) systems, which use microwaves to transmit power, are attracting attention. In this article, we introduce our efforts and development status towards the practical realization of a space transmission type WPT system.

## 1. はじめに

マイクロ波を使用した WPT とは、電気的接触なしに他の場所に電力を伝送する WPT のうち、電波により数メートル程度の距離を有線で接続することなく電力を伝送するものであり、日本国内では「空間伝送型ワイヤレス電力伝送システム」とした無線局での実用化がなされたものである。

空間伝送型 WPT システムは、送電距離を長くできる反面、空間損失等により受電可能な電力は低くなる傾向がある。しかし、受電機器の設置の制限がなく、電気配線の必要性や製造工場でのライン変更による電源線の敷設変更などが不要となるメリットがある。併せてこのメリットを活かした利用方法として、近年の IoT<sup>\*2</sup> 社会を支えるセンサ機器への給電として、工場内で利用されるネットワーク向けセンサ機器、BEMS<sup>\*3</sup> などで空調管理するための環境センサなどへの給電利用が見込まれている。また、今後の利用範囲の拡大に向けた取組みとして、携帯端末やポータブル機器への充電を可能とする電力利用に向けての技術開発や制度化に向けての検討も進められている(図 1)。

本稿では、空間伝送型 WPT システムについて、現在の制度化と今後の制度化に向けた概要や、空間伝

図 1 空間伝送型 WPT システムへの期待<sup>(1)</sup>

送型 WPT 機器の開発状況など、当社が行っている取り組みについて紹介する。

## 2. 空間伝送型 WPT システムの制度化について

空間伝送型 WPT システムは、実験局での試験などは行われてきたが、長らく電波法上の区分が規定されていなかった。しかし、センサネットワークを活用したシステムの普及・拡大が進んでいる中、これらへ給電し、配線レスによる設置自由度の向上、電池交換不要になることなど、導入を希望する声の高まりから、2018年8月の「電波有効利用成長戦略

\*1 WPT : Wireless Power Transfer

\*2 IoT : Internet of Things

\*3 BEMS : Building Energy Management System

\* R&amp;D 統括センター ワイヤレス研究所

懇談会」の報告書<sup>(2)</sup>において、2030年代に実現すべき7つの次世代ワイヤレス技術の1つとして空間伝送型 WPT システムの実用化が挙げられ、その中で無線設備として規律していくことが適当との考え方が示された。

2018年12月に総務省情報通信審議会情報技術分科会にて諮問2043号「空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの技術的条件」により、情報通信技術分科会陸上無線通信委員会の下に、「空間伝送型ワイヤレス電力伝送システム作業班」(以下、作業班)が設置され、無線局として空間伝送型 WPT システムの技術的条件についての調査・検討が開始された。

作業班では、3つの周波数帯(920MHz帯、2.4GHz帯、5.7GHz帯)を対象に検討され、屋内での限定された使用方法として、「WPT 屋内設置環境」を定義した(図2)。また、一部の無線システムへの干渉対策として、「運用調整」を前提とした調整を行うことで、共用可能とする運用条件も明記された。ただし、運用調整の具体的な方法については今後の議論を踏まえて行うとした留意事項の報告として、技術的条件の答申がなされている。

答申後、「空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの運用調整に関する検討会」として総務省内で空間伝送型 WPT システムの運用調整に関する基本的なあり方について、運用調整の具体的な方法などが整理、検討された後、2022年8月に晴れて「無線電力

伝送用構内無線局」として制度化され、検討開始から4年の議論を経て、屋内限定の構内無線局として、正式に利用が可能となった。

空間伝送型 WPT システムが使用できる環境とした「WPT 屋内設置環境」の定義を表1に示す。2.4GHz帯及び5.7GHz帯での利用については WPT 管理環境でのみ使用可能となり、最初の制度では限定的な利用になった。ただし、この制度化による技術的条件等をステップ1とし、屋外利用や大電力化など利用範囲の拡大したものをステップ2として、技術や研究の進展、商用化の時期や実用化の取組状況等を踏まえての検討事項とされている。

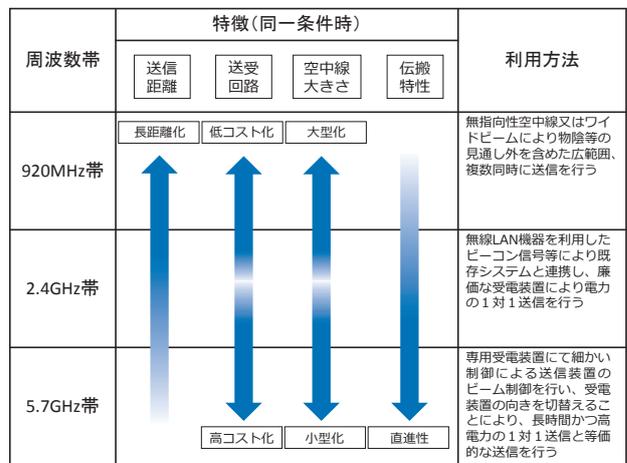


図2 利用周波数における特徴と利用方法<sup>(1)</sup>

表1 WPT 屋内設置環境の定義

	WPT 管理環境	WPT 一般環境
免許条件等	構内無線局	構内無線局
WPT の利用周波数帯	920MHz帯、2.4GHz帯、5.7GHz帯	920MHz帯
有人か無人か	無人 (無人と記載しているが、電波防護指針で定義される管理環境に対応する人は存在する可能性がある)	無人もしくは有人 (有人の意味は、電波防護指針で定義される一般環境を適用すべき一般人が存在するという意味)
環境の定義	<p>【WPT 管理環境】の定義 下記のa～dを全て満たす環境</p> <p>a. 屋内(※)、閉空間であること。</p> <p>b. 電波防護指針における管理環境の指針値を満足するものとする。 (電波防護指針における管理環境の指針値を超える範囲に人が立ち入った際には送電を停止することとする。)</p> <p>c. 屋内の管理環境に設置される空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの運用が、他の無線システム等に与える環境を回避・軽減するため、本システムの設置者、運用者、免許人等が、一元的に無線システムの利用、端末設置状況を管理できること。</p> <p>d. 当該屋内に隣接する空間(隣接室内、上下階等)においても他の無線システムとの共用条件を満たすか、当該屋内と同一の管理者により一元的に管理できること。 【2.4GHz帯、5.7GHz帯】 ※窓を含めた【WPT 屋内設置環境】の周囲にある壁損失が干渉検討に使用する壁損失以上を担保し、他の無線システム等への干渉を低減できる環境</p>	<p>【WPT 一般環境】の定義 左欄のa～dのどれかを満たさない環境</p> <p>WPT 一般環境においては、電波防護指針の一般環境の指針値を満たすものとする。</p>

また、運用調整では、運用調整の在り方を踏まえた調整団体としてワイヤレス電力伝送運用調整協議会(以下、JWPT<sup>\*4</sup>)が設立され、構内無線局として無線局免許を受けるにあたっての事前審査と運用調整支援を受ける事が可能となっており、JWPTのwebサイトを確認すれば、事前の調整支援やすでに運用が始まっている無線局のすべての情報を把握できるサービスも始まっている。

ステップ2へ向けた取り組みは、ブロードバンドワイヤレスフォーラム(以下、BWF<sup>\*5</sup>)を中心に検討が進められており、設置環境の細分化による使用環境の再定義、利用場所の拡大、新たな利用周波数として24GHz帯の追加などについて、技術面での検討や干渉先無線システムとの干渉評価など事前検討が開始されている。この検討には、後節の委託研究による検討結果、測定方法や干渉の実証評価など、技術研究にて取得したデータやその解析結果を活用して進められており、2025年度での制度化を目指して進めている。

### 3. SIP<sup>\*6</sup>委託研究での取り組み

SIP委託研究とは、内閣府の科学技術イノベーション実現のために創設した国家プロジェクト事業であり、SIP第2期として2018年から2022年の5年で実施された空間伝送型WPTシステムは、「IoE<sup>\*7</sup>社会のエネルギーシステム」<sup>(3)</sup>とした技術課題の中のテーマである。研究では、空間伝送型WPTシステムの開発として、3種類のテーマを主として、それらを補完する要素技術として6テーマについて、8つの企業と大学により実施された(図3)。

SIP研究開発のテーマは「センサネットワークおよびモバイル機器へのWPTシステム」として、2つの方式(分散アンテナ協調ビーム制御方式と高度ビームフォーミング方式)について3つのシステムで研究が行われた。

分散アンテナ協調ビーム制御方式は、920MHz帯にて多数の低出力な送電装置を配置して受電位置での位相合成により最大電力を得る方式である。この

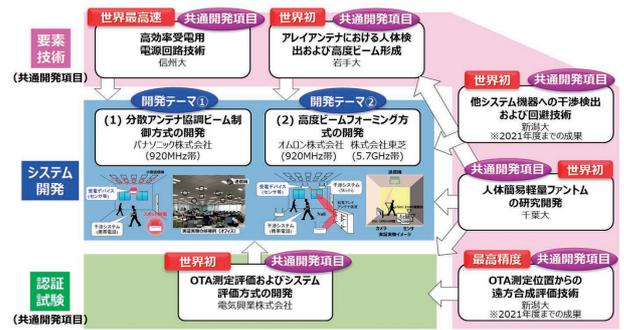


図3 SIP研究実施体制<sup>(3)</sup>

方式では送電装置が低出力であることから人体暴露影響も限定的としたものとなっている。一方の高度ビームフォーミング方式では、920MHz帯と5.7GHz帯を利用した2つのシステムにて実施し、920MHz帯では人が持つタグにより送電電力を人体暴露の許容値以下とするシステム、5.7GHz帯では反射波により検出した人体方向に指向性によるヌルを形成して許容値以下とすることで、有人環境下でも送電を可能とするシステムの開発を実施した。

当社は「OTA<sup>\*8</sup>測定評価およびシステム評価方式の開発」をテーマとした要素技術開発を実施し、OTA評価による無線特性評価と人体暴露の回避時の特性評価を可能とした評価方法について開発した。また、OTA評価を前提としたのは、ビームフォーミング方式などでは、空中線接続にコネクタを使用しない製造方法での送電装置が前提となること、空間伝送型WPTシステムでは、高いEIRP<sup>\*9</sup>で送電するが、人体暴露を回避できる低い電力までを容易に測定する必要があるためである。

実際のOTA評価では、送電装置から放射された電波の測定範囲は、+40dBmから-80dBmまで行う必要があり、併せて、小型・簡易な装置で評価できる測定装置を開発した。

OTA評価システムの構成を図4に示す。受信した電波は、RF回路を経由して、スペクトラムアナライザにて受信して測定する。RF回路は入力した電力に合わせて、RF回路の通過回路の一部を切り替え、スペクトラムアナライザの値を補正することで、広範囲での電力測定を可能としている。また、送電装置付近に設置した基準空中線からの入力と比較することで、相対位相の測定も可能としている。測定する

\*4 JWPT:Japan Coordinating Council for Wireless Power Transfer <https://jwpt.jp/>

\*5 BWF:Broadband Wireless Forum

\*6 SIP:Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program

\*7 IoE:Internet of Energy

\*8 OTA:Over the Air

\*9 EIRP:Equivalent Isotropic Radiation Power:等価等方放射電力



トップ1での仕様に近い空中線電力約90W, EIRP 70dBmの送電装置を試作した。また, 空中線に接続する終段アンプでは50Wクラスを使用したものとなり, アンプの熱対策としては水冷方式を採用し, アンプ表層での温度上昇は5度程度と安定した送電を可能としている。

#### 4. 総務省委託研究での取り組み

総務省の電波資源拡大のための研究開発として, 2022年度より「空間伝送型ワイヤレス電力伝送の干渉抑制・高度化技術に関する研究開発」が4年間で実施されている。研究開発では, 11の企業, 大学, 研究機関が参加し, 3つの課題解決へ向けての研究を実施しており, 当社は代表研究機関として参画している(図8)。

3つの主要課題は以下のとおりであり, 各課題での目標を達成と研究全体として, 空間伝送型 WPT システム全体での利用効率を現行の10倍以上を目標として実施している。また, 空間伝送型 WPT システム全体での利用効率とは, 空間伝送型 WPT システムの時間当たりの給電量としている。

- ①技術課題ア 新たな高周波数帯を活用した電力伝送効率化技術

課題目標 準ミリ波帯における受電装置の動作必要電力について, 7.5W程度を実現

- ②技術課題イ 空間環境に応じた多数デバイス給電制御技術

課題目標 給電時間割合について, 現行の20%程度から80%への向上を実現

- ③技術課題ウ 共存性評価技術

課題目標 建物内外の電波強度および共用可能な要件(出力, 離隔, 時間等)を解析することが可能なシミュレーションシステムを実現

当社は, 技術課題アのサブテーマ「WPTシステム構成設計と全体最適化」と「5G準ミリ波との共用化技術」の2つを実施している。また, 技術課題アの新たな高周波数帯とは24GHz帯の周波数としている。

サブテーマ「WPTシステム構成設計と全体最適化」は, 研究全体のとりまとめと各研究機関で行っている成果をステップ2の制度化に向けて取り組んでいるBWFと連携し, 制度化に向けて技術的条件や検証方法等を提供する一方で, 制度化に向けての課題や干渉システム側の条件等を研究機関にフィードバックを行い, 研究のマイルストーンを示す活動を実施している。併せて, 研究成果をJWPTなどと連

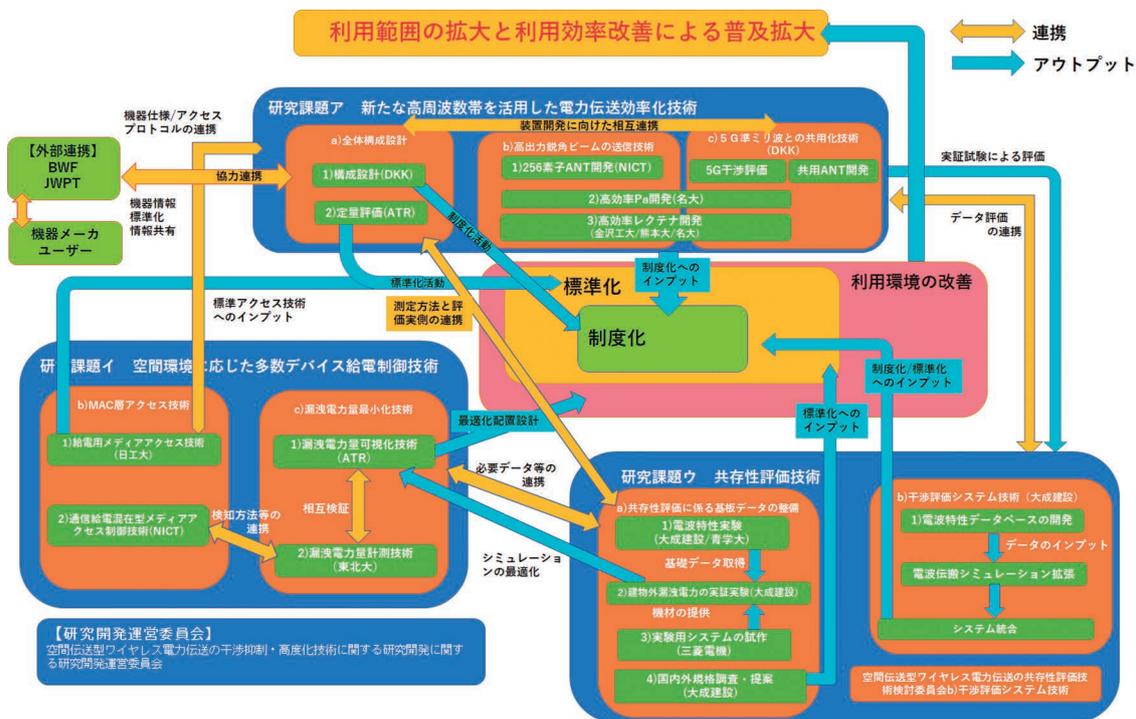


図8 総務省委託研究の研究機関連携



図9 5G/WPT 共用基地局イメージ

携した標準化への貢献として、ITU-R<sup>\*10</sup> や CISPR<sup>\*11</sup> などへ国際標準化に向けた情報提供なども実施している。

もう一方のサブテーマ「5G 準ミリ波との共用化技術」は、空間伝送型 WPT システムにおいて 24GHz 帯を使用し、5G 通信の 28GHz 帯と一つの装置として共用することで通信と送電を融合した装置開発を目的としている。周波数帯が比較的近く伝搬特性も同等であることから 5G 通信を行う機器に対して空間伝送型 WPT システムでの給電を行うユースケースを想定し、5G 通信時の干渉影響を制御し限定的と両立できる装置システムを目指している(図9)。

24GHz 帯は、空中線の大きさを小さくできることから 5.7GHz 帯などと比較し、同じ大きさで空中線利得を高くでき、高い EIRP が実現できる。一方で空間に放射された電波の減衰量は多くなるため、近距離における大電力給電に有効とされ、距離が遠くなると減衰が多くなることから他の無線システムへの干渉が軽減されることが期待できる。24GHz 帯を利用した空間伝送型 WPT システムの特性案を表2に示す。EIRP は 82.0dBm と 5.7GHz 帯の約 20 倍となるが、大きさは 5.7GHz 帯 64 素子ビームフォーミング空中線と同等で実現を可能としている。

5G との共用化では、24GHz 帯を使用した 1024 素子の空間伝送型 WPT 装置と 28GHz 帯 5G NR O-RAN 対応無線装置(以下、O-RU<sup>\*12</sup>)を一つの装置筐体に組み込んだ装置としている。28GHz 帯 O-RU は、当社が開発してきた 28GHz 帯の 5G 基地局の技

表2 24GHz 帯空間伝送型 WPT システムの特性案

項目	特性案
無線周波数帯	24.253MHz ~ 24.257MHz
中心周波数	24.255MHz (1cH)
変調方式	CW
空中線電力	合算値で 40W 以下
空中線利得	36dBi 以下 ただし、等価平方輻射電力が 82.0dBm 以下となる場合は、その低下分を送信空中線の利得で補うことができる
空中線指向性	ビーム指向性を任意に形成・制御できること
空中線電力の許容偏差	上限 20%、下限 50%以内
受電装置からのビーコン信号	特定小電力設備等を使用した送信設備からの指示により、送信装置と同一周波数帯の電波を放射するものとする。 ただし、特定小電力無線設備等を使用した情報により、受電装置の位置を特定可能な装置については、この機能を有しないものとする。
人体検出機能	電波防護指針の指針値を超える範囲に人が立ち入ったことを検出し、送信を停止する、もしくはビーム制御する機能を有する
送信空中線	ビームフォーミングによる可変ビーム指向性空中線
設置環境	[WPT 管理環境] (閉空間・一般人有) [WPT 管理環境] (閉空間・一般人無)

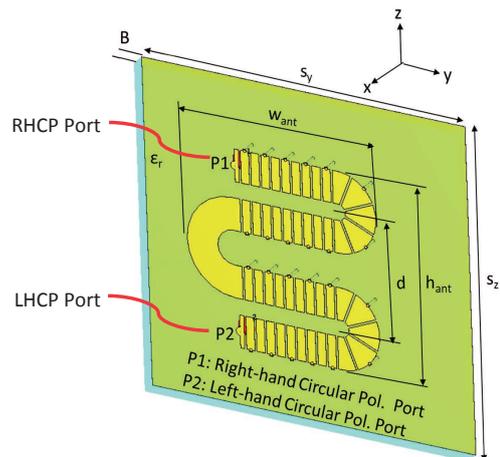


図10 円偏波共用メタラインアンテナ例(@2.65GHz)<sup>(4)</sup>

術に 24GHz 帯からの干渉抑圧効果を含めて再設計したものとなる。一方の空間伝送型 WPT システムは、空中線素子にメタマテリアル技術を応用した円偏波共用メタライン空中線<sup>(4)</sup>を用いて進めている(図10)。この円偏波共用メタライン空中線では、一方の偏波面入力では右旋(又は左旋)円偏波となり、2偏波面同時の入力では入力位相により、任意の傾きを持つ直線偏波とすることが可能なものである。また、ハイブリッド回路など給電等損失を含む周辺電回路を用いなくても円偏波を実現でき、低損失な給電にて、受電側の空中線形式や空中線の傾きに合

\*10 ITU-R : International Telecommunication Union-Radiocommunication Sector 国際電気通信連合 (ITU) 下部組織の無線通信部門

\*11 CISPR:Comite International Special des Perturbations Radioelectriques (フランス語)

\*12 O-RU : O-RAN Radio Unit

わせて、最適な偏波面とした(偏波面損失を抑えた)形で送電することが可能である。

### 5. 受電装置の取り組みについて

受電装置としては、整流素子の提供を受けての評価を主に5.7GHz帯32素子ビームフォーミング装置を使用して実施している。ビームフォーミングをしながらの評価試験では、動く鉄道模型に合わせて給電させることに成功している。この時の供給電力は、ビーム可変により鉄道模型にビームを向け続けることで0.7W程度を常時供給している。また、この時のビーム可変角度は±20度の範囲で行っている(図11)。

5.7GHz帯の送電装置を使用した基礎評価として、受電する空中線の利得を含まない空間電力を測定した例を図12に示す。6dBi程度の平面空中線を使用した場合には、送電装置から0.4mにて約8W、1mの位置にて2W程度のRF電力の供給は可能となるが、整流素子やDC変換器を経て、実際に供給出来る電力は、半分程度と想定している。また、0.4mより近づいても空間電力は頭打ちとなっている(図12の●)。これは空中線から近傍であるために空中線素子から放射された電波が同位相となっておらず、アレイ利得による効果が得られないためである。

京都大学は、近傍界領域での効率劣化の回避手法として、空中線近傍での受電装置等に対して素子位相を制御し、同相合成するフォーカスビームを提唱している。当社でも、図13に示す様な簡易的な位相制御にてフォーカスビームを構成し空間電力の測定を行っている(図12の■)。フォーカスビームを用いることで、0.2mでは5W、0.1mの位置で約10Wの空間電力が確認できた。金沢工業大学からご提供頂いたGaAs GAD(GaAs E-pHEMTのゲートとドレインを接続し構成)10W耐電力の整流素子<sup>(5)</sup>を使用したフォーカスビームでの給電試験では、距離0.1mに設置した受電空中線出力40dBmを整流した出力電力にて、約7.5Wを得ることに成功した。

今後の実用化に向けては、主には5.7GHz帯にて100mW~1W程度の電力供給を可能とする受電装置の開発を進め、電源供給する利用形態に合わせた空中線を提供する装置の製品化に取り組む予定である。また、24GHz帯では、総務省委託研究の課題目標となる受電装置の動作必要電力7.5W以上を実現した上で、これに対応する受電装置の開発を進める

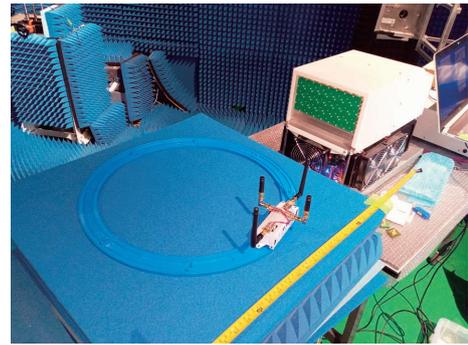


図11 鉄道模型への送電試験

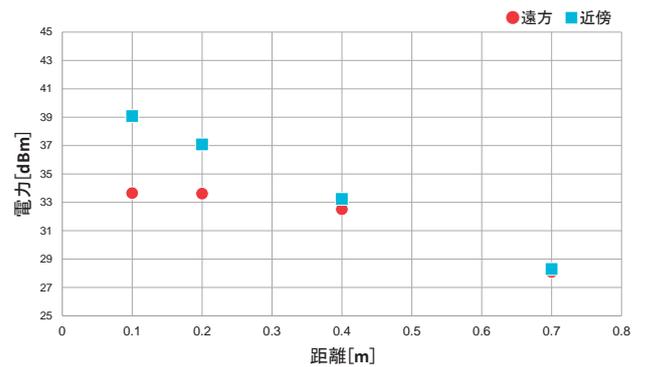


図12 5.7GHz帯での空間電力の測定例

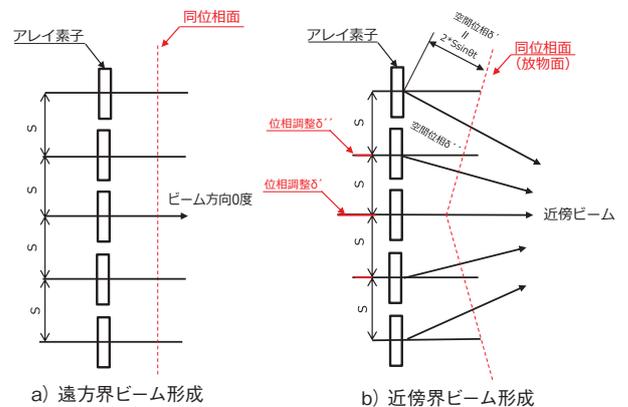


図13 アレイアンテナの近傍での指向性形成

予定である。

### 6. むすび

空間伝送型 WPT システムは、現在進行形で利用範囲や供給電力の拡大を目指したステップ2に向けて色々なことが進められている。また、国際標準化でも空間伝送型 WPT システムの利用周波数帯の勧告 (ITU-R Recommendation SM.2151-0) が成立するなど、より一層の利用が期待される分野である。今

