

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：17301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630164

研究課題名(和文)無線電力伝送のための非回折波生成用アンテナシステムの開発

研究課題名(英文)Antenna system for generating diffraction free beam in wireless power transmission

研究代表者

藤本 孝文 (FUJIMOTO, Takafumi)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40264204

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本事業は、理論上その存在が証明された非回折波の生成システムを、ミリ波帯において数値シミュレーションにより構築することを目的としている。提案する非回折波生成システムは、1次放射器(ミリ波アンテナ)、円環スリット付導板、誘電体薄肉レンズおよび各素子のエッジ部で生じる回り込み波(回折波)を抑圧するための電波吸収体から構成される。本事業で提案したアンテナおよび設計した電波吸収体については良好な結果を得た。しかし薄肉レンズにおいては、計算機メモリの制限で十分な大きさの設計ができなかった。このため、すべての素子を組み合わせたシステムにおいて、レンズエッジからの回り込みにより非回折波は生成できなかった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this project is to generate diffraction free beam in millimeter-wave band by the simulation. Existence of the diffraction free beam has been already proved theoretically. The proposed generation system for diffraction free beam consists of an antenna, a conducting plate with an annular ring slit, a thin lens and wave absorbers which are used to suppress the diffraction wave at the edges of the conducting plate and the thin lens. In the proposed antenna and the designed wave absorbers, the favorable results were obtained. However, the sufficiently large thin lens couldn't be designed because of the limitation of the RAM of the computer for the simulation. Therefore, the diffraction wave at the edge of the thin lens was generated and it prevented the generation of the diffraction free beam.

研究分野：アンテナ工学

キーワード：非回折波(ビーム) 無線電力伝送 アンテナ ミリ波

1. 研究開始当初の背景

近年、無線を用いた電力伝送（無線電力伝送）が注目を集めており、多くの大学、企業で研究が進められている。無線電力伝送には、電磁誘導型、電磁界共振結合型、電波放射型の3つのタイプがある。電波放射型は、他の2つに比べその伝送距離は km オーダーと非常に長く利点は多いが、電力伝送効率が悪く、開発は遅れている。電波放射型の利点を生かした災害時での無線電力供給や、自動車、船舶等の移動体端末への無線充電など、使用用途は広くその早急な開発が望まれている。電波放射型無線電力伝送では伝送効率を上げるため、一般にアレイアンテナが検討されている。しかし、電波放射型無線電力伝送用アレイアンテナでは、数十個または数百個のアンテナ素子を使用するためシステムが大きくなること、また、アンテナでの消費電力損失が大きくなることなどの問題がある。

申請者はこれまでに、光工学分野において非回折波（回折をせず伝搬する電磁波）の研究を行ってきた[1]。非回折波とは、1987年、J. Durmin[2]によって波動方程式の1つの解として発見された波動であり、通常の電磁波の電力は距離の2乗に反比例して減衰（強度の場合、距離に反比例して減衰）するのに対し、非回折波は理論上、距離による減衰は生じない。つまり、非回折波は理論上、エネルギー損失がなく無限遠方まで伝搬可能な波動である。このように、非回折波は無線電力伝送に非常に適した電磁波である。光工学分野における非回折波の実現化に向けた研究は、著者らを含めいくつかの研究グループで、数値的および実験的に行っている。しかし、マイクロ波やミリ波帯での非回折波生成法に関する研究は行われていないようである。

2. 研究の目的

本研究では、ミリ波帯での非回折波生成法を提案し、非回折波の特性を利用した高い電力伝送効率と遠距離伝送が可能な電波放射型無線電力伝送用アンテナシステムの開発を行う。提案するシステムは、これまでにない新しい原理を用いた無線電力伝送システムである。本事業では、提案するシステムの実現化に向けた研究の第1段階として、シミュレーションによる設計を行う。

3. 研究の方法

図1に提案する非回折波生成システムの構成図を示す。提案するシステムは、1次放射器（アンテナ）、円環スリット付き導体板、誘電体薄肉レンズ、導体板と誘電体レンズのエッジでの回り込み波（回折波）を抑圧するための電波吸収体により構成される。

シミュレータによる解析では、非回折波生成システムの各素子の形状パラメータと各素子から出力される電界強度分布の関係を調べ、各素子の最適形状、最適寸法を決定する。次に、最適化された各素子を組み合わせ

たシステムを作成し、非回折波の特性を調査する。最後に今後の課題について検討を行う。シミュレーションでは、波長に比べシステムが大きい場合に高速かつ精度よく計算できる高速多重極モーメント法に基づく電磁界シミュレータ Feko ver.6.2 を使用する。

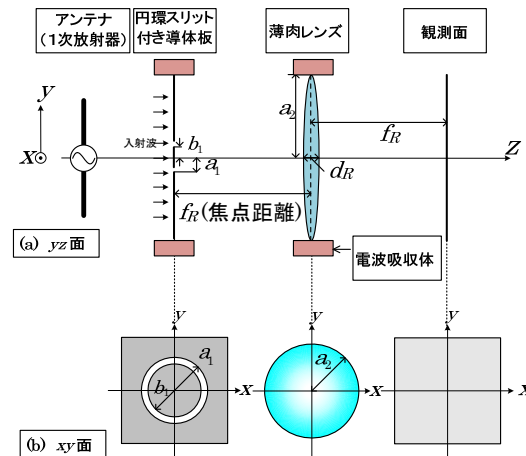


図1 提案する非回折波生成システム

4. 研究成果

最初に、システムを構成する4つの素子（アンテナ、円環スリット付導体板、誘電体薄肉レンズ、電波吸収帯）の研究結果を、次にすべての素子を組み合わせたシステムに関する研究成果を述べる

(1) 1次放射器（アンテナ）

本システムのアンテナに要求される条件は以下の2つである。

- ① 電界のベクトル分布が伝搬軸に対し放射状に一樣である。
- ② 電界の強度分布が円環状に一樣である。

上記2つの条件を満たすアンテナとして、本プロジェクトで同軸型円錐ホーンアンテナを提案した。図2(a)に提案する同軸型円錐ホーンアンテナの構造を示す。また比較のため同図(b)に従来型の円錐ホーンアンテナを示す。従来型に比べ、提案型ではアンテナ中心部に半径 e_p の導体円柱を装荷し、円筒導波管の導体部と円柱導体間に同軸給電によりアンテナを励振させる。30GHz でインピーダンスマッチングを取ると、アンテナのサイズは表1のようになる。

表1 アンテナサイズ [mm]

	提案型		従来型
a_p	1.415	a_c	3.0
b_p	0.56	b_c	2.9
c_p	1.87	c_c	9.8
d_p	2.785	d_c	20.0
e_p	0.705	l_c	60.0
l_p	15.5		

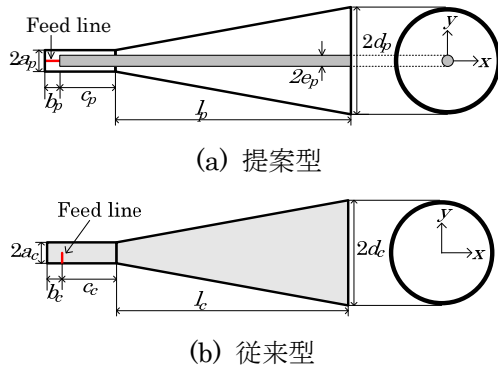
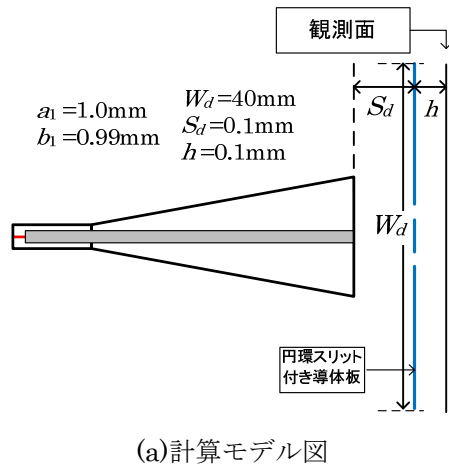
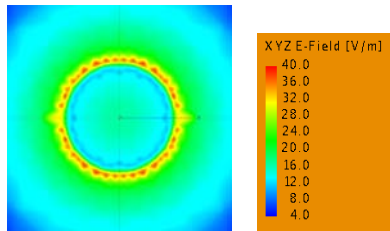


図2 アンテナの構成図

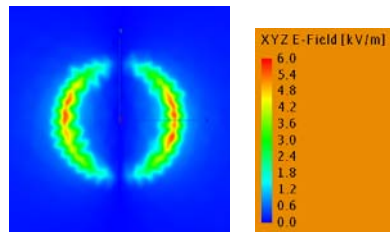
図3に提案するアンテナの電界強度分布を示す。図3(a)が計算のモデル図、同図(b)がシミュレーション結果である。また、比較のため同図(c)に従来型円錐ホーンアンテナのシミュレーション結果も示す。アンテナ開口から0.1mmの位置にスリット幅0.01mm(スリットの遮蔽率0.99)のスリット付導体板を配置している。シミュレーション結果は、このスリット透過後0.1mmの位置での電界強度分布である。図より従来型が開口部の上下部



(a)計算モデル図



(b)提案型



(c)従来型

図3 円環スリット透過後の電界強度分布

また、本誌では示していないが、電界ベクトルにヌルが生じているのに対し、提案型ではリング状にほぼ一様に電界分布が生じている。ル分布も提案型では放射状に一様に生じており、条件を満たす界分布であることを確認している。

提案する同軸型円錐ホーンアンテナの電界強度は従来のホーンアンテナによる電界強度い比べ、 10^{-2} のオーダーと非常に小さい。これはアンテナサイズが従来型に比べ円錐開口の径方向で約1/7、伝搬軸方向で約1/4と非常に小さいためである。

(2)電波吸収体

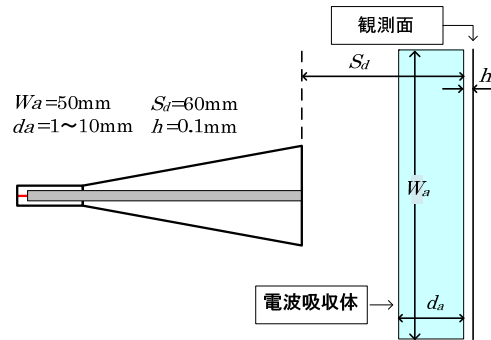
電波吸収体は、エポキシ変性ウレタンゴムにカーボンブラックを混入したゴムシートの複素比誘電率 $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ および誘電正接 $\tan \delta$ を用いて設計を行った[3]。 ϵ_r' 、 ϵ_r'' は次式で与えられる。

$$\epsilon_r' = 3.0 + 2.881G^{1.236} f_0^{-0.610} \quad \dots(1)$$

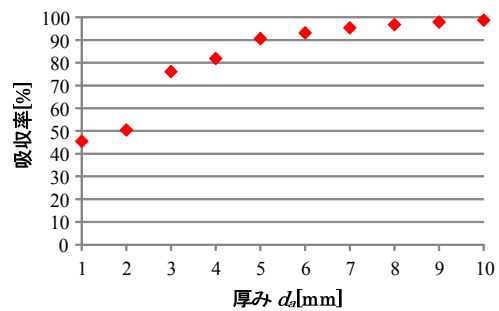
$$\epsilon_r'' = 0.3 + 0.832G^{1.777} f_0^{-0.782} \quad \dots(2)$$

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad \dots(3)$$

G はゴムに対するカーボンブラックの混合比であり、 f_0 は周波数である。 $G = 6.26$ 、 $f_0 = 30\text{GHz}$ を式(1)、(2)に代入し ϵ_r' 、 ϵ_r'' を求め、さらに式(3)を利用すると、誘電正接 $\tan \delta$ は0.2796となる。



(a)計算モデル図

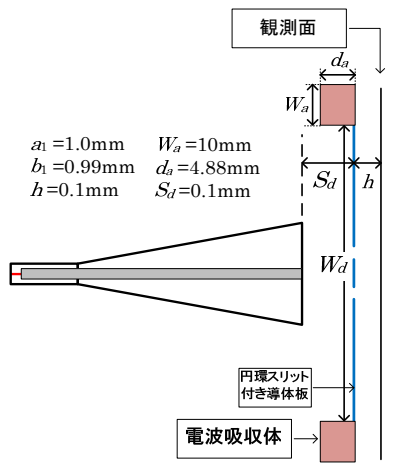


(b)シミュレーション結果

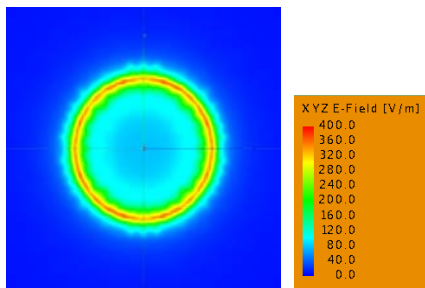
図4 電波吸収体の吸収率

図4(a)に電波吸収体の厚さの最適値を求めるためのシミュレーションモデルを示す。アンテナ開口から電波吸収体の端の位置 S_d および観測面の位置 $S_d+h=60\text{mm}$ は固定している。観測面と電波吸収体間の距離は $h=0.1\text{mm}$ である。同図(b)に吸収体の厚さ d_a の変化に対する吸収率のシミュレーション結果を示す。 d_a が大きくなると吸収率が高くなることからわかる。 $d_a=5\text{mm}$ 以上で吸収率90%以上となる。このため、本システムでは5cm厚の電波吸収体を使用することにした。

図5(a)に円環スリット付導体板の周りに電波吸収体を装荷した図を示す。同図(b)に円環スリット透過後の電界強度分布を示す。導体板のエッジからの回折波が抑圧され、図3(b)の電波吸収体がない場合に比べ更に円環状に様な分布になっていることが確認できる。



(a) 計算モデル



(b) 提案型

図5 円環スリット透過後の電界強度分布 (電波吸収体有)

(3) 誘電体薄肉レンズ

幾何光学理論により、薄肉レンズの曲率半径 R と焦点距離 f_R の関係および曲率半径 R とレンズ厚 d_R の関係はそれぞれ以下の式で与えられる。

$$R = 2(n-1)f_R \quad \dots(4)$$

$$d_R = 2\left(R - \sqrt{R^2 - a_2^2}\right) \quad \dots(5)$$

ここで n はレンズの屈折率、 a_2 はレンズの半

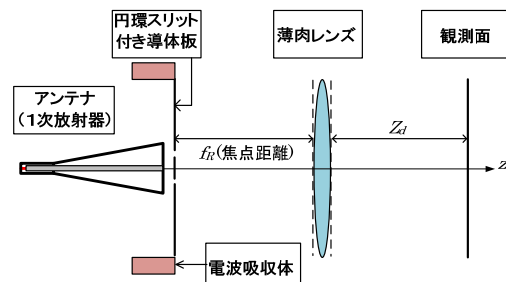
径である。レンズエッジからの回折波はできるだけ小さくする必要があるので、レンズ半径 a_2 はできるだけ大きいほうがよい。しかし、レンズ半径 a_2 が大きくなると、計算機のメモリの使用量が多大となり、計算ができなくなる。このため、半径 a_2 を計算可能な最大の大きさとした。表2に設計したレンズのサイズをまとめておく。これらの値により設計したレンズを使用して、焦点距離での電界強度分布を計算した。その結果、焦点距離の電界強度分布はレンズなしの場合のフラウンホーファ一回折界分布に近く、設計パラメータが正しいことを確認している。

表2 レンズの設計パラメータ

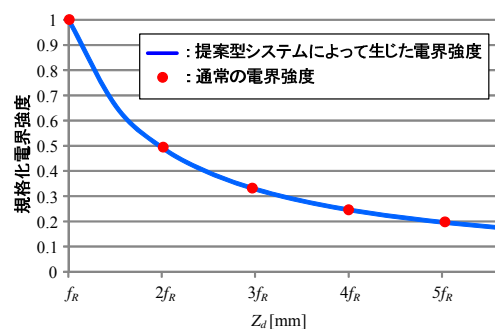
a_2	100mm
R	250.2mm
f_R	920mm
d_R	40mm
n	2.36

(4) システムと非回折波の伝搬特性

上記設計に基づき、非回折波生成システムの構築を行い、非回折波の有無および特性を調査した。図6(a)にシステムの構成図(計算モデル)を示す。また、同図(b)に薄肉レンズ透過後の、伝搬軸上(z 軸上)での電界強度分布を示す。縦軸は焦点距離 f_R での値で規格した値を示している。また比較のため通常の電磁波(回折波)の分布も示している。従来の電磁波はその強度は距離に反比例して減衰する。レンズ透過後の電界強度分布が従来型の分布とほぼ一致している。つまり、非回折波の確認はできなかった。



(a) システム構成図 (計算モデル)



(b) 提案型

図6 レンズ透過後の電界強度分布

(5) 研究成果のまとめ

本研究ではミリ波帯での非回折波生成システムを数値シミュレーションにより構築することである。このため、アンテナ、電波吸収体、薄肉レンズの最適設計が必要となる。アンテナ、電波吸収体においては最適設計ができたものの、これまでの数値実験では、ミリ波帯での非回折波の存在を証明することができなかった。著者らは、光工学の分野において、数値シミュレーションおよび測定実験の両方において、非回折波生成に成功している。今回の結果を光工学の成功例と比較すると、計算用コンピュータのメモリ不足のため、薄肉レンズが波長に比べ十分な大きさに設計できなかったこと、また薄肉レンズの周りに電波吸収体を装荷しなかったため、レンズエッジからの回折波が生じたことが、非回折波が生成できなかったことの原因と推測する。

(6) 今後の課題および展望

現在、計算機メモリの使用量を削減するため、スリット付導体板透過直後の電磁界を一旦計算し、この電磁界を等価波源として、薄肉レンズに入射する計算法の検討を行っている。この計算法は2回のシミュレーションが必要となるが、大幅なメモリ使用量削減が期待できる。

数値シミュレーションによる非回折波生成システムを完成させた後、各素子の試作、測定による検討、さらにはシステム試作機による非回折波生成および特性解明を行う予定である。

(7) 参考文献

- [1] 馬渡、荒巻、藤本：電子情報通信学会総合大会総合大会、C-3-99、2012.
- [2] J. Durnin : J. Opt. Soc. Am. A、4(4)、pp.651-654、1987.
- [3] 橋本修 著、電波吸収体入門、森北出版株式会社、1997

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤本 孝文 (FUJIMOTO, Takafumi)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40264204