

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560401

研究課題名(和文) 実用的な異方性メタマテリアル構築に向けた効率的材料定数測定法の確立

研究課題名(英文) Efficient measurement system for complex material parameters of practical anisotropic metamaterial

研究代表者

堀田 昌志 (HOTTA, Masashi)

山口大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：70229201

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：新しい性質を持つメタマテリアルは、その構造上、材料定数に異方性を示すことが多い。本研究では、等方性媒質の材料定数測定に用いられてきた導波管充填法を拡張し、一軸異方性媒質の材料定数測定法の確立を試みた。具体的には、規格は異なるが基本モードの動作周波数が重複する導波管を用意し、その中に被測定物を充填して反射透過特性(Sパラメータ)を求め、得られた一組のSパラメータを連立させることで、媒質の複素材料定数推定式の導出を行った。その結果、使用モードの影響で一部の成分以外について、その複素材料定数を求める定式化を行うことができた。また、その妥当性を電磁界シミュレータによるシミュレーションで明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Measurement system for tensor type material parameters of the uni-axial anisotropic material by using the reflection and transmission characteristics of electromagnetic waves through the waveguide which partly filled with the medium to be measured has been presented. To estimate the tensor type material parameters of the uni-axial anisotropic material, different two types of partly filled waveguides which have different aperture size but their operating frequency bands of fundamental modes is overlapped are used and by solving the system of the equations obtained from their paired reflection and transmission characteristics, formulas to estimate the components of tensor type material parameters for anisotropic medium. The validity of this method is verified by the comparison with the results obtained by the electromagnetic simulation.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：マイクロ波・ミリ波 一軸異方性 材料定数 導波管充填法 反射透過特性

1. 研究開始当初の背景

(1) 使用電磁波の波長よりも十分に小さい周期構造を利用した人工媒質であり、これまで自然界には存在し得なかった負の屈折率などの性質を持つ Metamaterial の開発やデバイス応用に関する研究が世界規模で活発に行われていた。

(2) 研究代表者らも、Metamaterial 構成の概念を用いれば、容易に実現可能な誘電率あるいは透磁率のどちらか一方が負になる Single-Negative 媒質中における電磁波モードに関する研究とそのデバイス応用に関する研究を行い、これまで Single-Negative 媒質中を電磁体積波モードは伝搬できないとこれまで考えられてきたが、その中の特殊な例として以下の様な知見を得ていた。

材料定数テンソル内における特定の成分が負の値を示す異方性 Single-Negative 媒質では、電磁体積波モードが伝搬可能である。

異方性 Single-Negative 媒質中の電磁波は負屈折率媒質中と同様に特異な電磁特性を有する。

負のテンソル成分を持つ材料定数が誘電率か透磁率かによって、存在可能なモードの種類が変化するため、媒質自身がモードフィルタなどとして機能する可能性がある。

(3) 上記の様な異方性 Single-Negative 媒質のみならず、Metamaterial は周期構造を有するため、その材料定数は異方性を示す事が多く、デバイス設計時には、その分散性も含めた異方性材料定数を明らかにしておくことが必要であった。

(4) 等方性媒質の材料定数測定法に関しては、共振器法や導波管充填法など様々な手法が提案、実用化されていたが、異方性を持つ媒質の材料定数を効率的かつ高精度に測定できる手法は未だ確立されていなかった。

平面波照射に代わって、導波管モードを利用する。(使用可能モード増加)

2. 研究の目的

(1) これまでの等方性バルク材料における材料定数測定は、媒質に平面波を照射した際の複素反射係数 S_{11} および複素透過係数 S_{21} から、その誘電率 ϵ および透磁率 μ を求める手法が多く用いられてきた。

(2) 異方性媒質では、材料定数がテンソル型となるため、等方性的場合に比べて求めるべき未知数(テンソル成分)が増加する。

(3) 未知数増加に対応できる測定系の考案とその測定精度に関する詳細な考察を行う。

(4) 未知数を求める際に出現が予想される複素多価関数を効率的かつ適切に解く必要がある(多価関数解の自動選択)。

(5) 上記の問題点等を解決および詳細に吟味し、異方性媒質の材料定数を、その分散性も含めて高精度かつ効率的に測定する手法

の確立を目指す。

(6) また、本手法が確立できれば、超高誘電率媒質や広帯域電波吸収材料など、様々な産業分野で利用されている材料の媒質定数測定が容易となり、新機能デバイス開発への可能性が広がる。

3. 研究の方法

これまで、異方性媒質のテンソル型材料定数に関する効率的かつ高精度な測定法は確立されていなかったため、従来、等方性媒質の材料定数を測定する手法として用いられてきた導波管充填法を取り上げ、その応用を検討する。

(1) 等方性媒質の材料定数を導波管充填法で測定する手順とその定式化を検討する。

導波管内に被測定媒質を部分充填した場合の電磁界関係式を解く。

得られた電磁界関係式に境界条件を適用し、導波管内での複素反射・透過係数 (S_{11} および S_{21}) を定式化する。

導波管内での反射・透過係数と充填媒質の材料定数間の関係式を導き、複素誘電率および複素透磁率を S_{11} および S_{21} から求める式を導出する。

(2) 等方性媒質の材料定数測定とその測定精度確認を行う。

実際に材料定数が既知の材料を用いて、複素誘電率および透磁率の測定実験を行う。

材料定数の広帯域な周波数特性を測定する。

測定精度に関する検討を行う。

(3) 導波管充填法で異方性媒質の材料定数を測定するために、材料定数がスカラー型からテンソル型になることによる未知数増加に対応可能かどうかを検討する。

複数の導波管を用いた測定結果を併用する。(動作周波数が重複する規格が異なる導波管の利用)

異方性媒質でも、比較的材料定数テンソルの成分数が少ない一軸異方性材料を当面のターゲットとする。

複数の導波管を用いることによる測定精度への影響を考察する。

(4) 一軸異方性材料の複素材料定数推定式の妥当性検討を行う。

電磁界シミュレータを用いて、各導波管に異方性媒質を充填した場合の複素反射・透過係数 (S_{11} および S_{21}) を求める。

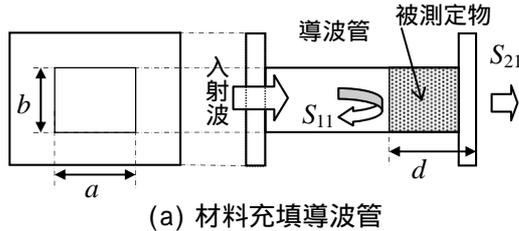
電磁界シミュレータで求めた S_{11} および S_{21} を連立させて複素材料定数推定式へ適用し、初期条件として与えた材料定数と比較することで、推定式の妥当性を検討する。

(5) 一連の研究を通して発生した諸問題を丹念に解決していくことで、一軸異方性媒質の複素材料定数テンソル測定系の実用化を目指す。

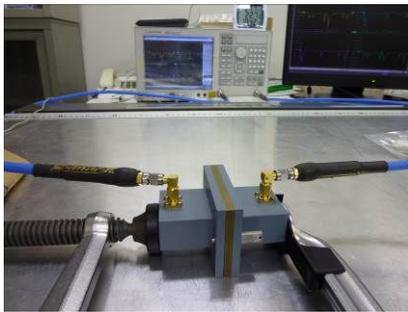
4. 研究成果

本研究では、等方性媒質の材料定数測定に用いられる導波管充填法を拡張し、一軸異方性媒質の複素誘電率と複素透磁率を実験的に測定する手法について検討している。

(1) 等方性媒質の導波管充填法による材料定数算定式



(a) 材料充填導波管



(b) 測定系

図1 導波管充填法による材料定数測定系

図1に示す様に、開口幅 a の導波管の一部に材料定数を測定すべき等方性の被測定物を充填し、その両端に同軸導波管変換器を接続して、ベクトルネットワークアナライザ (Agilent Technology 社製) によって複素反射係数 S_{11} および複素透過係数 S_{21} を測定する。

ここで、被測定物の厚さを d とすると、この時得られた S_{11} および S_{21} より、被測定物の複素透磁率 μ と複素誘電率 ϵ は次式で求めることができる。

$$\epsilon = \frac{1}{\omega^2 \mu} \left[\left(\frac{\pi}{a} \right)^2 - \left\{ \frac{1}{d} \cosh^{-1} \left(\frac{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2}{2S_{21}} \right) \right\}^2 \right] \quad \dots [1]$$

$$\mu = \frac{\mu_0}{j\beta_0 d} \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \cdot \cosh^{-1} \left(\frac{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2}{2S_{21}} \right) \quad \dots [2]$$

ただし、 $\beta_0 = \sqrt{\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - (\pi/a)^2}$ であり、式中の μ_0 および ϵ_0 は真空の透磁率および誘電率である。

これらの式は、入射波を導波管の基本 TE モードと仮定し、導波管中の被測定物が充填されている領域とされていない領域それぞれにおける電磁界表現式を求め、境界条件を適用して振幅反射および透過率を求め、それらを S_{11} および S_{21} として、式中の透磁率 μ と誘電率 ϵ について解くことにより得られる。

定式化においては、 S_{11} および S_{21} の基準面を被測定物の表裏面としているため、実際の測定の際には、基準面が被測定物の表裏面となる様に計算機上で校正する必要がある。

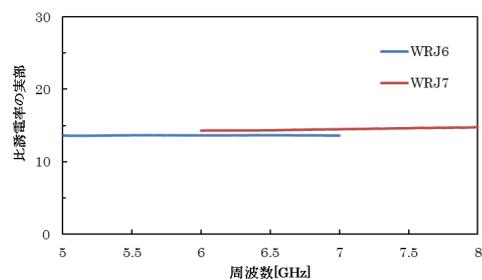
(2) 等方性媒質の複素誘電率および複素透磁率の測定結果

式[1]および[2]を用いて、実際に導波管充填法で電波吸収体 SI-58 ((株)タケチ)の複素透磁率および複素誘電率を測定した。なお、電波吸収体 SI-58 はシリコン系ゴムに軟質磁性体粒子を混入した電波吸収体で 5.8GHz 帯の電磁波を吸収する様に設計されている。

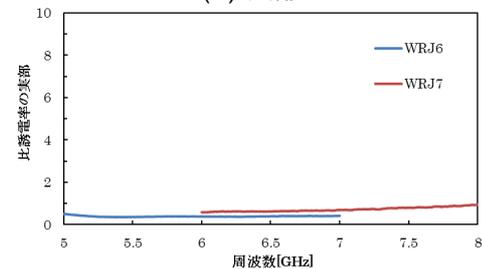
測定では、開口幅が 40.39mm の導波管 (WRJ-6; 4.65 ~ 7.05GHz) および開口幅が 34.85mm の導波管 (WRJ-7; 5.38 ~ 8.17GHz) を用いて、測定帯域を 5.0 から 8.0GHz とした。なお、WRJ-6 用および WRJ-7 用の被測定試料の厚さは、それぞれ、1.951mm および 1.952mm であった。図2に複素誘電率の測定結果を、図3に複素透磁率の測定結果を示す。

ここで、SI-58 の複素誘電率および透磁率の値は、製造会社提供のデータとも良く一致している。この他にも、発泡スチロール、アクリル板、フェノール基板など材料定数が既知の材料についても、同様の測定を行った結果、SI-58 と同様に文献等に示されている材料定数とほぼ一致する結果が得られ、等方性媒質に対する本測定法および材料定数算定式の妥当性が確認できた。

図2および3中で見られる様に、同じ試料を異なる導波管で測定した結果に若干の差異が見られる。同結果は、導波管や同軸導波管変換器をいくつか取り替えて、最も差異が小さくなる測定系で測定したものである。本来、同じ材料においては同周波数下では一意的な値が得られるべきであるが、この差異が複数導波管を使用した場合における測定精度にあたるのではないかと考えている。

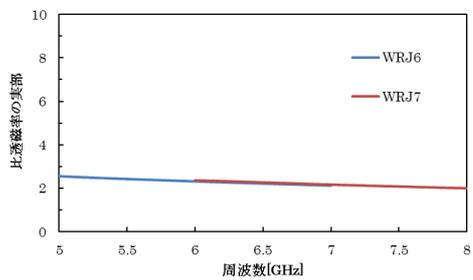


(a) 実部

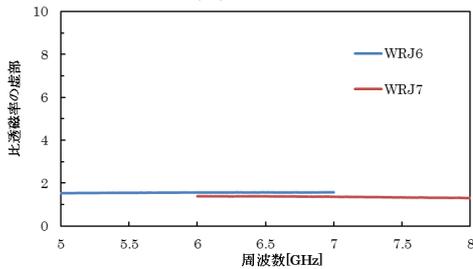


(b) 虚部

図2 比誘電率の測定結果(SI-58)



(a) 実部



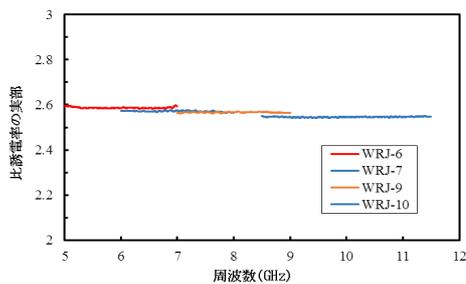
(b) 虚部

図3 比透磁率の測定結果(SI-58)

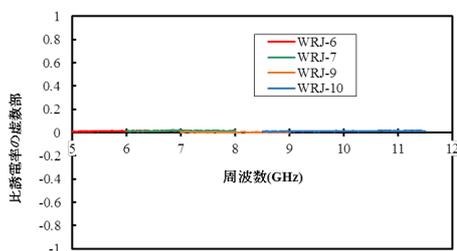
(3) 等方性媒質の複素誘電率および複素透磁率の広帯域測定結果

表1 測定系構成用導波管

旧 JIS 規格	開口寸法 $a \times b$ (mm)	厚さ l (mm)	基本 TE モードの 動作帯域 (GHz)
WRJ-6	40.0×19.8	10.0	4.64 ~ 7.05
WRJ-7	34.8×15.7	13.7	5.38 ~ 8.17
WRJ-9	28.3×12.3	12.0	6.57 ~ 9.99
WRJ-10	22.7×10.16	13.2	8.20 ~ 12.5



(a) 実部



(b) 虚部

図4 比誘電率の広帯域測定結果(アクリル)

本研究で用意した導波管規格を表1に示す。先に WRJ-6 および WRJ-7 を用いた電波吸収体 SI-58 の結果を示したが、これら全ての導波管を用いれば、5.0 ~ 11.5GHz 帯域での材料定数を求めることができ、広帯域材料分散特性も測定できる。

図4および5に、厚さ 5.0mm の市販のアクリル板について、その材料定数を測定可能範囲全域にわたって測定した結果を示す。

同結果を見ても、やはり基本モードの動作周波数重なり部分で若干の差異が見られるが、ほぼ全域にわたってアクリル板の材料定数としては理にかなった結果を示している。

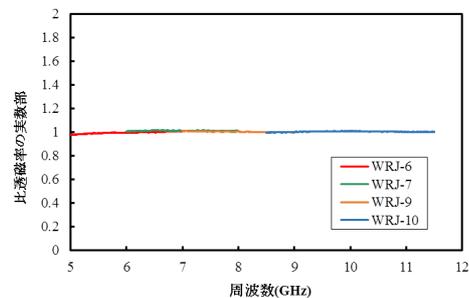
(4) 一軸異方性媒質の材料定数テンソル成分の算定式

先に等方性媒質に関する材料定数測定法について示したが、異方性材料の材料定数はテンソル型となり、求めるべき未知数が飛躍的に増加する。本研究では、次式のように導波管の伝送軸 (z 軸) 方向 (縦方向) とし、伝送軸に垂直な xy 面内の方向 (横方向) として、縦方向と横方向で材料定数テンソルの成分値が異なる一軸異方性媒質を測定の対象として選定した。

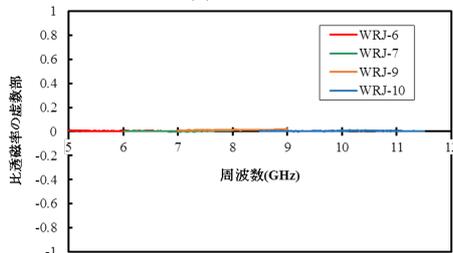
$$\hat{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_t & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_t & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{bmatrix}, \quad \hat{\mu} = \begin{bmatrix} \mu_t & 0 & 0 \\ 0 & \mu_t & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix} \quad [3]$$

この場合においても、未知数は4つとなり、等方性媒質の場合の2倍となっており、先に示した方法をそのまま適用することはできず、何らかの拡張を行う必要がある。

そこで、本研究では先の等方性媒質の材料定数測定の際にも既に示している様に、開口幅が異なるが、基本 TE モードの動作周波数が重複する複数の導波管を用いる方法を検討した。



(a) 実部



(b) 虚部

図5 比透磁率の広帯域測定結果(アクリル)

まず、図6に示す様に、基本 TE モードの動作周波数が重複している開口幅が a_I および a_{II} の導波管 I および II について、等方性媒質の導波管充填法の場合と同様に、各領域における電磁界表現式を求め、境界条件を適用すると、それぞれの導波管に対する複素振幅反射係数 S_{11}^I および S_{11}^{II} と複素振幅透過係数 S_{21}^I および S_{21}^{II} を導出する。そして、これら4式を連立させて解くことにより、一軸異方性媒質の材料定数テンソル成分が以下の様に導かれた。

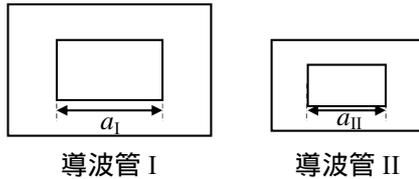


図6 異方性媒質測定用各導波管の開口幅

$$\mu_i = -\frac{\mu_0}{2} \left(\frac{\gamma_I \kappa_I}{\beta_I} + \frac{\gamma_{II} \kappa_{II}}{\beta_{II}} \right) \quad [4]$$

$$\mu_z = \frac{(\pi/a_{II})^2 - (\pi/a_I)^2}{\gamma_I^2 - \gamma_{II}^2} \mu_i \quad [5]$$

$$\varepsilon_i = \frac{1}{2\omega^2} \left\{ \frac{(\pi/a_I)^2 + (\pi/a_{II})^2}{\mu_z} + \frac{\gamma_I^2 + \gamma_{II}^2}{\mu_i} \right\} \quad [6]$$

ただし、

$$\beta_i = \sqrt{\omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 - (\pi/a_i)^2}$$

$$\gamma_i = \frac{1}{d_i} \cos^{-1} \left(\frac{1 - (S_{11}^i)^2 + (S_{21}^i)^2}{2S_{21}^i} \right)$$

$$\kappa_i = \sqrt{\frac{(1 + S_{11}^i)^2 - (S_{21}^i)^2}{(1 - S_{11}^i)^2 - (S_{21}^i)^2}}$$

である。式中の i は I または II であり、各々の量が、導波管 I あるいは II を用いた場合に得られた量であることを示している。また、 d_I および d_{II} は、それぞれ、導波管 I および II へ充填する被測定物の厚さである。

ここで、 ε_z に関する式が導けていない。この原因としては、本定式化において基本 TE モードを用いることを前提としているため、導波管内における電界の z 方向成分が存在しない事によるものだと考えられる。この解決方法については、TM モードを用いる方法や導波管内に構造変化を付ける方法などが考えられるが、今後検討を行っていききたい。

(5) 一軸異方性媒質の材料定数テンソル成分算定式に対する数値シミュレーションによる妥当性検証

先に示した式[3]で表される様な材料定数テンソルを持つ一軸異方性媒質について、電磁界シミュレータを用いた数式検証を行った。なお、現状では ε_z に関する算定式が求まっていないので、今回は誘電率に関しては異方性が無く $\varepsilon_z = \varepsilon_i$ として解析を行った。数値解析には有限要素法電磁界シミュレータ HFSS

(Ansys 社製)を用い、あらかじめ磁気的一軸異方性材料テンソルを持つ媒質を開口幅 a_I の導波管 I と a_{II} の導波管 II に充填して、導波管の S_{11} および S_{21} を求め、両導波管の基本 TE モードの動作周波数が重複する帯域内のある周波数におけるその値を用いて材料テンソル成分を式[4]から[6]より算定し、初期条件との比較を行った。

本研究では、表2に示す様な組み合わせの測定系を有しているため、表中に示す重複帯域での検討が可能であるが、ここでは WRJ-9 と WRJ-10 を用いた 8.2 から 9.99GHz 帯で、8.5, 9.0 および 9.5GHz における検討を行う。

なお、本研究では、上記の全ての組み合わせについて様々な磁気的一軸異方性媒質の材料定数と媒質厚さを設定して解析を行っているが、ここでは、厚さ 3.0mm、材料定数テンソル成分、 $\varepsilon_i = \varepsilon_z = (1.5 + j0.03)\varepsilon_0$ 、 $\mu_x = (1.0 + j0.02)\mu_0$ 、 $\mu_z = (2.0 + j0.04)\mu_0$ とした場合についてのみ表3に示す。

表2 基本 TE モードの重複帯域

導波管 I	導波管 II	重複帯域 (GHz)
WRJ-6 $a_I = 40.39\text{mm}$	WRJ7 $a_{II} = 34.85\text{mm}$	5.38 ~ 7.05
WRJ-7 $a_I = 34.85\text{mm}$	WRJ-9 $a_{II} = 28.50\text{mm}$	6.57 ~ 8.17
WRJ-9 $a_I = 28.50\text{mm}$	WRJ-10 $a_{II} = 22.86\text{mm}$	8.2 ~ 9.99

表3 磁気的一軸異方性材料定数のシミュレーション結果

周波数 (GHz)			8.5	9.0	9.5	
ε_i	Re.	設定値	1.5	1.49956	1.49957	1.49958
	Im.		0.03	0.02999	0.02999	0.02999
μ_x	Re.	設定値	1.0	1.00000	1.00000	1.00000
	Im.		0.02	0.01998	0.01997	0.01997
μ_z	Re.	設定値	2.0	2.00284	2.00296	2.00316
	Im.		0.04	0.04035	0.04037	0.04037

上記の結果より、電磁界シミュレーションではあるが、各導波管を用いた測定系において、複素反射係数 S_{11} および複素透過係数 S_{21} を正確に測定すれば、高精度に複素材料定数テンソル成分を求めることができる事が確認できた。

最後に、実際の異方性材料について実験的検討が行えなかった。特に金属等を含む周期構造からなるメタマテリアルの材料定数を本手法で測定しようとする際には、被測定物の切り出し方や充填の方法に更なる特別な工夫が必要であると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計7件)

- 江藤悟, 堀田昌志, 羽野光夫, “スパイラル共振器対を用いた共鳴型無線給電システムに関する一検討,” 第15回 IEEE 広島支部学生シンポジウム(HISS)論文集, no.A-1, 2013-11, pp.3-5, 査読有.
- 堀田昌志, 坂田季之, 多良信太郎, 羽野光夫, 導波管充填法による異方性媒質の材料定数測定に関する研究(I), 山口大学工学部研究報告, 63巻, 2号, 2013-03, pp.23 - 27, 査読無.
<http://www.lib.yamaguchi-u.ac.jp/yunoca/handle/A010063000203.pdf>
- 安井誠一, 神田敬浩, 岡田成仁, 只友一行, 堀田昌志, “基板表面に加工を施したLED内部における光伝搬のFDTD解析,” 第14回 IEEE 広島支部学生シンポジウム(HISS)論文集, no.A-24, 2012-11, pp.68-71, 査読有.
- 春山隆行, 結城亨, 堀田昌志, 羽野光夫, 栗井郁雄, “共鳴型無線給電システムへの水の影響に関する検討,” 第14回 IEEE 広島支部学生シンポジウム(HISS)論文集, no.B-17, 2012-11, pp.326-329, 査読有.
- 坂田季之, 多良信太郎, 堀田昌志, 羽野光夫, 導波管充填法による異方性媒質の材料定数測定, 第13回 IEEE 広島支部学生シンポジウム(HISS)論文集, no.A-3, 2011-11, pp.5 - 8, 査読有.
- 羽野光夫, 田中良, 堀田昌志, 有限要素法による無限周期構造導波管の位相定数解析, 日本 AEM 学会誌, 19巻, 2号, 2011-06, pp.366-371, 査読有.
- 結城亨, 堀田昌志, 羽野光夫, 栗井郁雄, “共鳴型無線給電システムの伝送効率改善に関する検討,” 第13回 IEEE 広島支部学生シンポジウム(HISS)論文集, no.B-3, 2011-11, pp.220-223, 査読有.

[学会発表](計8件)

- 羽野光夫, 廣石堯之, 堀田昌志, 電磁界解析における高次ベクトル要素の部分空間と基底関数について(その2), 電気学会静止器・回転機合同研究会, no.SA-14-12 (RM-14-12), 2014-01-23, 東京工科大学(八王子市).
- 江藤悟, 堀田昌志, 羽野光夫, “スパイラル共振器対を用いた共鳴型無線給電シ

テムに関する一検討,” 第15回 IEEE 広島支部学生シンポジウム(HISS)論文集, no.A-1, 2013-11-16, 17, 鳥取大学(鳥取市).

- 羽野光夫, 廣石堯之, 堀田昌志, 電磁界解析における高次ベクトル要素の部分空間と基底関数について, 電気学会静止器・回転機合同研究会, no.SA-13-75 (RM-13-89), 2013-09-27, 秋田市にぎわい会館(秋田市).
- 安井誠一, 神田敬浩, 岡田成仁, 只友一行, 堀田昌志, “基板表面に加工を施したLED内部における光伝搬のFDTD解析,” 第14回 IEEE 広島支部学生シンポジウム(HISS)論文集, no.A-24, 2012-11-17, 18, 岡山県立大学(総社市).
- 春山隆行, 結城亨, 堀田昌志, 羽野光夫, 栗井郁雄, “共鳴型無線給電システムへの水の影響に関する検討,” 第14回 IEEE 広島支部学生シンポジウム(HISS)論文集, no.B-17, 2012-11-17, 18, 岡山県立大学(総社市).
- 岡本光平, 直原知也, 羽野光夫, 堀田昌志, 無限周期構造導波路の有限要素法解析における基礎的検討, 電気・情報関連学会中国支部連合大会, no.11-8, 2012-10-20, 島根大学(松江市).
- 羽野光夫, 岡本光平, 堀田昌志, 高次ベクトル要素による3次元電磁界解析について,” 電気学会静止器・回転機合同研究会, no.SA-12-84(RM12-99), 2012-09-10 函館市民会館(函館市).
- 坂田季之, 多良信太郎, 堀田昌志, 羽野光夫, 導波管充填法による異方性媒質の材料定数測定, 第13回 IEEE 広島支部学生シンポジウム(HISS), no.A-3, 2011-11-12, 13, 広島大学(東広島市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀田 昌志 (HOTTA, Masashi)
山口大学大学院・理工学研究科・准教授
研究者番号: 70229201