

令和 2 年 7 月 10 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06290

研究課題名（和文）新規損失材料探査のための透磁率・誘電率測定法の液体／半固体／磁性配向材料への拡張

研究課題名（英文）Expansion of permittivity and permeability measurement to liquid/gel/oriented magnetic materials aiming at search for new lossy materials

研究代表者

三浦 健司 (Miura, Kenji)

岩手大学・理工学部・准教授

研究者番号：90361196

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000 円

研究成果の概要（和文）：少量の非固体材料の誘電率・透磁率（材料定数）を同時計測する目的で、樹脂容器に被測定材料を充填して材料定数を測定する手法の確立を目指した。同軸管内に装荷可能な樹脂容器を3Dプリンタで試作して高周波回路理論により計測したSパラメータから材料定数の推定を行ったところ、高誘電率材料では誤差が認められたものの、粉体や磁性配向材料の評価が可能であることを実験で明らかにした。また、測定誤差は樹脂容器構造に起因して発生する高次モードの影響であることが電磁波シミュレーションで明らかとなっており、より高精度な計測が可能であることも明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本提案手法により、農林水産物由来の物質や生体物質、電磁波エネルギー損失材料といった非固体ならびに配向付与材料の測定がより簡便になることが学術的意義となる。また、これらの材料の新たな知見により、例えば、誘電率変化を捉えることで可能となる非破壊センシング技術（農作物の自動生育モニタリング、バイタルセンシング、それらを効率よく実現する電波吸収体）の実現に向けた材料科学への貢献が期待できる。これは Society5.0で掲げられている農業高度化や超高齢化社会の支援を可能とする技術でもあり、社会的意義は高いと考えられる。

研究成果の概要（英文）：For the purpose of measuring permittivity and permeability (material constants) of non-solid materials, a new method using plastic cases which can contain the material was examined. The case was manufactured using a 3-D printer. Material constants were estimated from measured S parameters using high-frequency circuit theorem. It was experimentally found that the proposed method enables to measure powder and oriented magnetic material. Moreover, it is expected that measurement error will be reduced by taking account of higher mode derived from a complex structure of the case.

研究分野：環境電磁工学，磁気応用工学

キーワード：同軸管法 誘電率 透磁率 材料定数 高次モード 複合材料

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ETC2.0, 自動運転システム等に代表される高度道路交通システムや, IoT における小電力無線通信, 医療・農業・建設分野における非破壊センシング, 宇宙太陽光発電における電力伝送システム等, 多分野において ICT と連携した高度な電波利用が進んでいる。公共空間等での設置を前提とした電波吸収体にとっては, 高い吸収特性に加え, 吸収体の減肉化が実用上の課題である。このうち, 前者の電波吸収体吸収量は, 複素比誘電率・複素比透磁率(本申請書ではこれら2つを併せて「材料定数」と呼ぶ)と吸収体厚さに依存する。したがって, 吸収体厚さを低減するためには, 高損失材料を自由空間に対して如何に適切に配置するかが鍵となる。すなわち, 電波吸収体の形状設計とともに GHz 帯高エネルギー損失特性を有する電波吸収材料の開発が必要である。特に電波到来方向が固定されたセンシングシステムにおいては配向性損失材料が吸収体の減肉化に大きく寄与すると予想されるが, 材料探査に適した磁性粒子配向材料試作法とその GHz 帯材料定数評価法の両者の確立が望まれる。また, 医療・農業・建設分野においては, 農水産物の加熱加工, 生体・動物センシング等で GHz 帯の電磁波を利用する研究例が増加している。これらにおいて電磁波が伝搬する物質状態は固体に限定されず, 液体, 半固体など幅広いが, 農林水産物由来の物質や生体物質の材料定数評価を通して新たな知見を得ることが, 今後のこの分野での電波利用システム発展の基盤になると考えられる。

高損失材料の GHz 帯材料定数測定には, 同軸管内部に被測定物(固体)を装荷し, 電磁波の反射・透過成分から材料定数を推定する同軸導波管法が長く用いられており, その代表的な測定アルゴリズムに Nicolson-Ross 法がある。液体, 半固体, 粉体状の被測定材料の場合, 同軸導波管の先端にオープンエンド同軸プローブを接続し, S11 パラメータ(反射成分)を得ることで誘電率評価が可能であることが知られている。しかしながら, 被測定材料に半無限厚さが要求されることから, サンプルが少量の場合は適さず, 透過パラメータ(S21)を計測できないことから, 非磁性材料に測定対象に限られるといった短所が存在する。以上より, 液体, 半固体, 粉体といった物質状態での GHz 帯複素比誘電率・複素比透磁率測定手法の確立が社会的・学術的にも強く要求されている状況にある。申請者はこの課題に対して, 小型の環状樹脂容器内部に被測定材料を充填させたものを同軸管内部に配置し, ベクトルネットワークアナライザで透過・反射パラメータ(S11, S21)を計測することによって材料定数を推定する手法を提案する。これにより, 上述した各状態の材料定数評価が可能となる他, 磁性複合材料を容器充填後に磁場配向させることも可能となるため, 電波吸収体用磁性粒子配向(透磁率制御)材料の評価や探査への貢献も期待できる。

### 2. 研究の目的

これまで被測定物質が固体に限定されていた同軸管法による GHz 帯複素比誘電率・複素比透磁率(以下, 材料定数)測定を, 3Dプリンタを活用して試作した小型環状樹脂容器内部に充填し, 計測後に高周波回路理論に基づき樹脂容器成分を除去することで, 測定対象を固体のみならず同軸プローブ法では測定不能だった磁気特性を有する粉体, 半固体, 液体状といった非固体物質へ拡張する測定手法の確立を本申請で実現する。本手法により, 容器充填後樹脂硬化前に磁場等を印加することで磁気異方性を付与した磁性複合材料のサンプル作製・評価を行うことも可能となる。この評価手法確立は, GHz 帯域での情報通信, センシング, 電力伝送の普及によって懸念されている電磁干渉を改善することができる新規な電磁波エネルギー損失材料の探査への貢献が期待される。

### 3. 研究の方法

#### (1) 回路理論に基づく被測定材料の材料定数を測定するアルゴリズムの確立

被測定材料(MUT)を含む円筒部と2つのキャップ部との四端子回路縦続接続で全体の高周波回路が構成される。容器の材料定数が既知であれば, そのS行列により, MUTを含む樹脂容器全体をT行列に変換し, その逆行列を両辺より乗ずるディエンベディング操作を施すことにより, 円筒部のS行列, すなわち材料定数が求まる。次に, 外側・内側円筒部+被測定材料を三層とみなし, キャパシタンスとインダクタンスの直列回路問題を解くことで, 被測定材料の材料定数(複素比誘電率, 複素比透磁率)を求める。この推定アルゴリズムのプログラム実装とともに, FDTD法を用いた電磁波シミュレータで同軸管内に環状樹脂容器を装荷した状況の電波伝搬をシミュレートし, 計算で得られる同軸管両端位置のSパラメータから被測定材料の材料定数を推定し, その妥当性と精度を検証する。

#### (2) 磁性複合材料の環状試験体円周方向への配向効果の検証

同軸管内 TEM モードでの磁界方向は円周方向であり, 同方向への配向付与が高周波帯における透磁率向上に寄与するものと期待される。一般に知られているスネーク(Snoek)の限界に関する新たな知見を磁性複合材料において得ることが期待される。

#### (3) 液状, 半固体状・粉体状物質の1~10 GHz 付近の材料定数の評価

液状, 半固体状・粉体状物質を被測定材料として充填した際の1~10 GHz 付近の材料定数を評価する。

#### 4. 研究成果

(1) 3D プリントによる樹脂容器作製と回路理論に基づく被測定材料の材料定数を測定するアルゴリズムの確立

本研究課題に取り組むにあたり、3D プリントによる樹脂容器作製と造形された容器の寸法精度の検証を行った。岩手大学高度試作加工センター所有の3D プリント (Stratasys 社 Objet260 Connex) により、フィラメントにアクリル系硬質樹脂を用いて容器を造形した (図1)。三次元測定機で造形された容器の寸法と設計寸法の差を確認したところ、 $50\ \mu\text{m}$  程度以内であり、同軸管内装荷には寸法面で問題がないことが確認された。

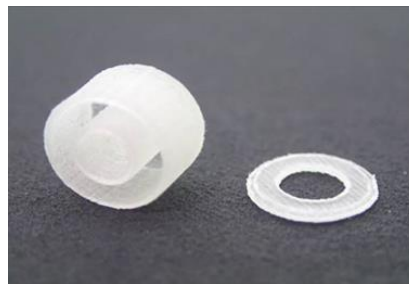


図1 試作した樹脂容器外観

次に研究の方法で述べた回路理論により材料定数の推定を試みた。その際、樹脂の水分吸着が容器の比誘電率を高め、結果的に材料定数の推定誤差を生じさせる一要因になっていることが認められたため、図2に示すように、用いた樹脂の比誘電率特性を相対湿度 30~80 vol% で予め測定しておき、測定環境の相対湿度を加味して材料定数推定を行ったところ、MUT が空気の場合において比誘電率が1に近づく結果が得られた。

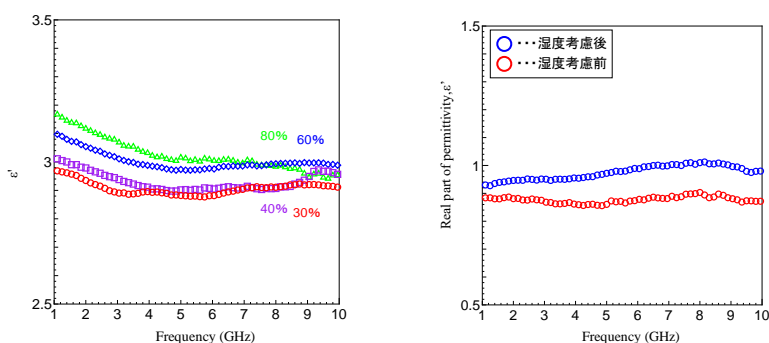


図2 アクリル系樹脂 (相対湿度 : 30, 40, 60, 80 vol%) における比誘電率特性と、相対湿度を考慮することによる MUT (空気) の比誘電率特性

しかしながら、MUT が高誘電率材料の際に測定誤差が大きくなる現象が確認できたため、樹脂容器構造とそれに起因する誘電率不連続性が生じさせる高次モード成分の電磁界シミュレーション解析と、高次モード成分を含む電磁波伝搬時の容器両端を基準面とするSパラメータ計算手法に関する検討を追加で行った。前者においては、FDTD 法による電磁界シミュレータ (科学技術研究所, KeyFDTD) を用いて樹脂容器と充填された被測定物質をモデリングして電磁波を伝搬させ、電磁波伝搬方向である軸方向の電界強度に着目することで主要伝搬モードの特定を試みた。その結果を図3に示すが、同軸管内は円筒対象性を有していることから円周方向に一定強度の  $E_z$  成分電界を有する  $TM_{0n}$  モードのみが存在し、 $TM_{02}$  モードが最も電界強度が高いモードであることが明らかになった。これは、半径方向の容器壁部/被測定材料/容器壁部の三層構造に起因するモードであることも電磁界シミュレーションにより確認した。この三層構造部分の準 TEM モードと高次 TM モードの伝搬定数をマクスウェル方程式の差分解析法により固有値問題を解くことで求めた後、誘電率不連続面における境界においてモードマッチング法を適用することにより、容器各部分の TEM モードならびに  $TM_{0n}$  モードの電磁界強度を算出し、さらに樹脂容器内を準 TEM モードと高次 TM モードで伝搬する際の S パラメータを算出できることを確認した。これにより、充填材料の材料定数を変数とする容器両端における S パラメータを半解析的手法で算出することが可能となった。これはいわゆる順問題であり、S パラメータから被測定物質の誘電率・透磁率を求めるにはこの逆問題を解く必要がある。

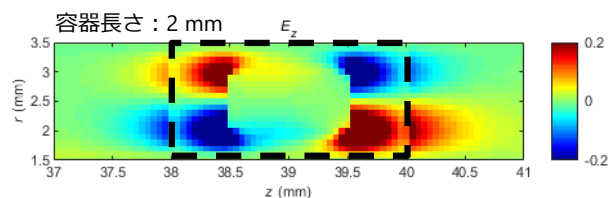


図3 高誘電率材料 (比誘電率 : 80) を充填した樹脂容器に TEM 波を入射させた際に生じる同軸管軸方向 ( $z$  方向) の電界  $E_z$  分布

(2) 磁性複合材料の環状試験体円周方向への配向効果の検証

この課題に対し、母材として二液性エポキシ樹脂を、混合媒質として Mn-Zn フェライト磁性粉を用い、材料を脱泡攪拌機（株式会社シンキー、AR-100）を用いて均質な混合物質を作製して樹脂容器に充填した後に、硬化前に磁界を円周方向に印加した。磁界印加の有無による複合材料の比透磁率実部の周波数依存性を図4に示す。低周波帯で比透磁率が実部・虚部ともに向上しており、比透磁率虚部においてはピークが低周波側にシフトしていることから、磁気緩和現象が低周波側にシフトしていることが考えられた。これらの結果より、磁性粉は複合材料内で硬化前に凝集し、磁界印加方向である円周方向に数珠つなぎを形成することで磁気回路が形成され、結果として配向が付与されていることが示唆された。またこの材料が平面で長手方向に配向が付与されて作製されたと仮定した場合、電波吸収特性を求めたところ、磁界印加なしの条件よりも薄く所望の周波数を吸収できることが試算された。

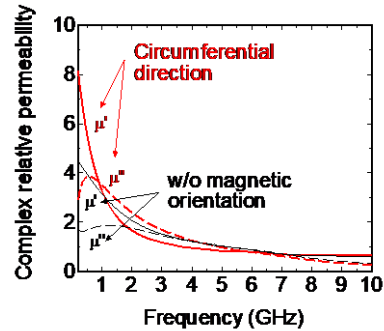


図4 容器円周方向での磁界印加有無による比透磁率実部・虚部の周波数依存性

(3) 液状、半固体状・粉体状物質の1~10 GHz 付近の材料定数の評価

粉体状測定サンプルとして Mn-Zn ソフトフェライト磁性粉（平均粒子サイズ：約  $50 \mu\text{m}$ ）を採用し、測定を行った。磁性粉真密度と容器充填後の増加重量から、磁性粉体積割合は 48.0 ~ 53.9 vol%（11 サンプル）であった。図5には1~10GHzにおける比透磁率実部・虚部を、図6には1GHzにおける比透磁率実部・虚部の体積割合依存性を、比較用として作製した複合材料（10~45 vol%）の結果と併せて示すが、体積割合に対し、磁性複合材料と磁性粉体では連続した増加特性を示すことが確認できた。また磁気回路モデルを用いて1GHzにおける磁性粉体の比透磁率の値を推定し、約10程度であることが明らかになった。

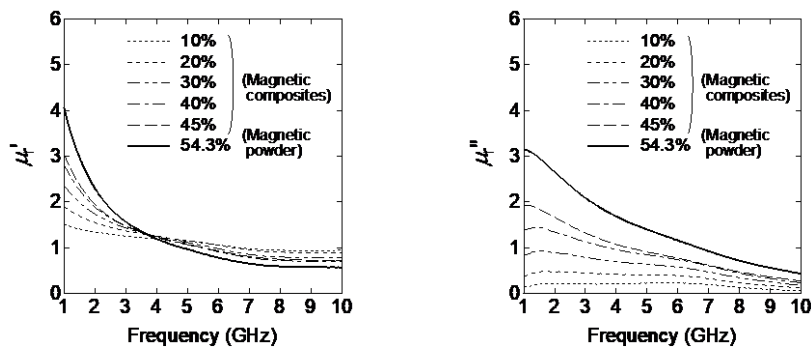


図5 Mn-Zn ソフトフェライト磁性粉末（48.0~53.9 vol%）とそれを用いた複合材料（10~45 vol%）の1~10GHzにおける比透磁率実部と虚部

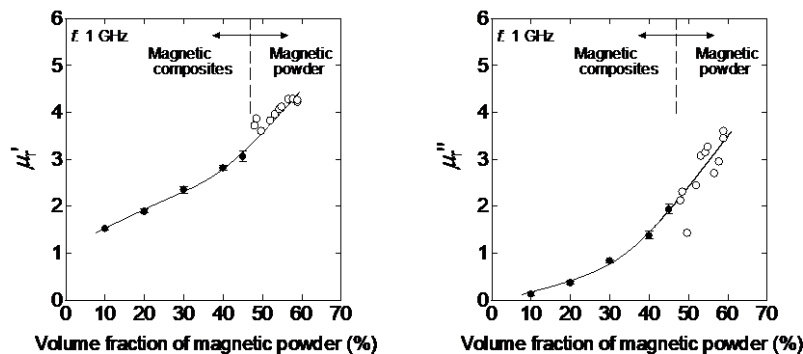


図6 Mn-Zn ソフトフェライト磁性粉末（48.0~53.9 vol%）とそれを用いた複合材料（10~45 vol%）の1GHzにおける比透磁率実部と虚部の体積割合依存性

(1)～(3)により、当初計画していた研究成果を得ることができた。高誘電率物質を計測する際の測定誤差を低減するためのアルゴリズムを確立することが課題として挙げられるものの、非固体材料の材料定数の評価ならびに材料充填後の配向付与が可能となったことから、同軸管法に分類される新規材料定数推定法として本手法を提案できることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kenji Miura, Yudai Odagiri, Seiya Kubo, Tsukasa Umehara, Daiki Suzue, Hiroshi Osada	4. 巻 54, 11
2. 論文標題 New Measurement Method of Broadband Permittivity and Permeability of Non-Solid Materials in Small Quantity	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 4002604
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2018.2847457	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 菅原光司, 三浦健司, 長田 洋
2. 発表標題 樹脂容器を用いた材料定数評価法における容器近傍の電磁界解析
3. 学会等名 2019年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 及川莉奈, 三浦健司, 長田 洋
2. 発表標題 同軸管内の軸対称三層構造物質における伝搬定数の算出
3. 学会等名 2019年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Miura, Yudai Odagiri, Tsukasa Umehara, Daiki Suzue, Hiroshi Osada
2. 発表標題 New Measurement Method of Broadband Permittivity and Permeability of Non-Solid Materials in Small Quantity
3. 学会等名 Intermag 2018 Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小田桐雄大, 三浦健司, 鈴江大樹, 長田洋
2. 発表標題 樹脂容器内充填型複素誘電率・透磁率評価手法の検討
3. 学会等名 平成29年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 梅坂司, 三浦健司, 長田洋
2. 発表標題 FDTDシミュレーションによる樹脂容器充填法を用いる比誘電率・比透磁率計測手法の 妥当性検証
3. 学会等名 平成29年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----