

# Dielectric Permittivity Estimation at Microwave Frequencies

Nguyen Ngoc An

## 論文の内容の要旨

本論文では自由空間中に置かれた誘電体材料からの電磁波散乱量から、その複素誘電率を推定する方法について新たな方法を提案し、その手法の妥当性について検討している。

最初に直方体形状をした誘電体固体材料からの電磁波の後方散乱量を精度良く推定するための散乱解析手法を考案している。ここでは、散乱体である誘電体の寸法が使用している電磁波の周波数よりも相対的に大きいことを利用して、高周波漸近解析手法の一つであるキルヒホッフ近似を適用することによって、散乱体表面の反射電磁界から、等価電磁流を用いて散乱界を定式化した。ここで提案する手法は比較的簡単な解析的表現となること、また他解法による計算結果や測定実験結果との比較により、高周波数帯で非常に精度のよい手法であること、特に誘電体平面に対して垂直に電磁波を照射した場合に、その反射方向の散乱量が相対的に大きく、かつ精度も高いことを示している。

次に電磁波を垂直に照射した場合に得られた誘電体からの散乱量を表す解析的な表現から、その複素誘電率を推定する関係式を導いている。その関係式から、被測定材料の寸法に応じてその材質の事前知識なしに、その複素誘電率を安定して広範囲に推定するアルゴリズムを考案している。ここで提案した推定アルゴリズムの有効性を検討するために、アクリルやゴム、ナイロン等、種々の誘電体材料から得られた後方散乱量を電波暗室内で測定し、それらを基に複素誘電率の推定を行うことで、その精度について議論している。

最後に、液体材料の複素誘電率の測定法についても検討している。ここでは非接触での測定のために、予めわかっている誘電体固体材料を使って方形容器を作り、その容器内へ被測定液を充填した場合の後方散乱量から、充填した液体の誘電率を推定する方法を提案している。実際に純水による測定の結果からその推定法の妥当性を検討している。

## 論文審査の結果の要旨

### ・論文の主題（テーマ）

自由空間中に置かれた誘電体材料のマイクロ波帯の複素誘電率を非接触で測定するための手法の開発

### ・当該研究分野における位置づけ

電子デバイス材料や絶縁材料として広く用いられている誘電体は、一般に使用する周波数によって、その電気的な特性が変化する、いわゆる周波数分散性を持つ。これは誘電体の持つ内部構造にも関係し、その電気的な特性は導電性を含めて複素誘電率で表すことができる。高周波数帯で使用する電子回路部品の材料を正しく選定するためには、こうした電気的な特性を正しく理解しておく必要がある。低周波における複素誘電率の測定には、平行平板コンデンサの極板間に被測定物を挿入してその静電容量の変化から推定するような方法が一般的であるが、周波数が高い場合や挿入に適さない物質や非接触で推定するための技術が必要になっている。こうした背景を基に、本論文では自由空間中に置かれた誘電体材料からの電磁波散乱量から、その複素誘電率を推定する方法について新たな方法を提案し、その手法の妥当性について検討している。

### ・論文の構成

#### 第1章 Introduction

最初に研究背景、本研究の目的について説明し、本論文の構成を示している。

#### 第2章 Some introductions on dielectric permittivity and estimation methods

一般的な誘電体の電気的な特性について述べた後、これまでに提案されている測定法についての特徴をまとめ、提案する自由空間法の考え方について述べている。

#### 第3章 High frequency electromagnetic scattering analysis of rectangular dielectric cuboids

直方体形状に切り出した誘電体固体材料からの電磁波の後方散乱量を精度良く推定するための散乱解析手法を、高周波漸近解析手法の一つであるキルヒホッフ近似を適用することによって導出し、その手法の精度について調べている。ここで提案する手法は比較的簡単な解析的表現となること、また他解法による計算結果との比較により、高周波数帯で非常に精度のよい手法であること、特に誘電体平面に対して垂直に電磁波を照射した場合に、その反射方向の散乱量が相対的に大きく、かつ精度も高いことを示している。

#### 第4章 Dielectric permittivity estimation for solid materials using free space method

第3章で得られた散乱量を表す解析的な表現から、その複素誘電率を推定する関係式を導き、被測定材料の寸法を基に、その材質の事前知識なしに、その複素誘電率を安定して推定するアルゴリズムを考案している。ここで提案したアルゴリズムの有効性を検討するために、アクリルやゴム、ナイロン等、種々の誘電体材料から得られた後方散乱量を電波暗室内で測定し、それらを基に複素誘電率の推定を行うことで、その精度について議論している。

## 第5章 Dielectric permittivity estimation for liquids

この章では、液体材料の複素誘電率の測定法について検討している。液状の複素誘電率の推定には、極板を液中に浸潤させて測定する方法が一般的であるが、液体の複素誘電率は実部、虚部共に固体の誘電率よりも大きな値をとり、特にマイクロ波帯においては強い分散性をもつので、測定が難しいのが現状である。ここでは非接触での測定のために、予めわかっている誘電体固体材料を使って方形容器を作り、その容器内へ被測定液を充填した場合の後方散乱量から、充填した液体の誘電率を推定する方法を提案している。実際に純水による測定の結果からその推定法の妥当性を検討している。

## 第6章 Conclusions

第5章までの研究内容を総括し、今後の課題について述べている。

### ・論文の独自性や成果および課題

本論文では散乱体からの後方散乱量を用いた自由空間法による誘電率の測定法を提案し、その方法の妥当性を種々の材料に対して測定することによって検討し、誘電体のマイクロ波帯における誘電率の測定法を示している。固体誘電体に対する測定は十分な精度が得られていると考えられるが、液体の誘電体材料に対する推定は、それを入れる容器の影響もあり、特に周波数の低いところでは今後さらなる精度向上のためのアルゴリズム改善が期待される。

### ・論文の評価

以上、本論文で得られた知見は、新しい高周波電気・電子材料の開発に重要なものであり、今後の誘電体材料工学の発展に貢献するものと考えられる。よって本論文は、博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。