

学位論文審査報告

中田, 芳樹
九州大学大学院システム情報科学研究科

孟, 志奇
九州大学大学院システム情報科学研究科

南部, 幸久
九州大学大学院システム情報科学研究科

<https://hdl.handle.net/2324/1515699>

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学紀要. 2 (1), pp.167-172, 1997-03-26. Faculty of Human-Environment Studies, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

学位論文審査報告

氏名(本籍) 中田 芳樹 (福岡県)
学位記番号 シ情 博甲第1号 (工学)
学位授与の日附 平成8年9月25日
学位論文題名 レーザー誘起蛍光法によるパルス
レーザーデポジションプロセスの可
視化に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 前田 三男
(副査) " " 山藤 馨
" " 渡辺 征夫
" " 岡田 龍雄

論文内容の要旨

高出力レーザーの重要な応用分野の一つに、レーザーと固体物質の相互作用を用いた物質プロセッシングがある。その有効な手法の一つであるレーザーアブレーション法は、レーザー光によって物質を光化学的に解離させ気化する技術であり、物質の表面加工、ラジカル種の生成、薄膜作製などに広く用いられている。パルスレーザーデポジション(PLD)法は、レーザーアブレーションによってターゲットから放出された粒子を基板上に薄膜として堆積させる技術であり、様々な材料の膜作製に応用されている。特に $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (以下 YBCO と略す)等の酸化物高温超伝導体に適用した際、高品位の薄膜が作製されており、現在レーザープロセスにおいてもっとも研究が活発な分野の一つになっている。

PLD法による膜生成には複雑なプロセスが含まれているが、これまでの研究は、作製した薄膜の特性評価を行い、作製条件を最適化するものが多かった。しかし近年では、粒子がターゲットから放出され、薄膜を形成するまでのメカニズムを明らかにしようとする基礎的研究も盛んに行われるようになった。中でも、気相中における粒子挙動の測定が、プロセス診断の有力な方法として広く行われている。

これまでの気相中粒子挙動の研究には、PLDにおける主要な構成種である非発光の原子・分子を計測するには Time-of-flight (TOF) による一点計測のみが行われていたが、3次元の広がりを持つアブレーションルームの計測としては不十分であった。また、発光種を2次元で計測したものもあったが、非発光種との空間分布の違いや測定時間が限られることなどから PLD の計測としてはやはり十分でなかった。

本論文は、レーザー誘起蛍光法を用い、高度の時間・分

解能をもって特定のラジカル種の分布を *in-situ* に画像測定できる装置の開発に関するものである。それを用いて YBCO 膜の PLD プロセスを観測し、膜生成に關与する非発光の原子・分子の2次元的な密度分布の時間変化を初めて計測しただけでなく、分子種の回転温度分布を画像計測することに成功した。

本論文は5章から構成されており、以下のように要約される。

第1章は本論文の緒言であり、PLD法の特徴、PLD法の計測に対する研究の現状を述べた。

第2章では、2次元レーザー誘起蛍光法による画像測定装置の開発について述べた。レーザー誘起蛍光法において、プローブ用の可変波長レーザービームをシート状にし、蛍光測定装置にイメージインテンシファイア及び CCD 素子を用いて、2次元レーザー誘起蛍光法の測定装置を構成した。さらに、この2次元レーザー誘起蛍光法における検知感度、ドップラー効果、およびクエンチング効果について論理的・実験的に評価し、PLD法の粒子測定にレーザー誘起蛍光法を適用できる測定条件を明らかにした。

第3章では、YBCO 高温超伝導セラミクスターゲットを KrF エキシマレーザーでアブレートし、放出されたプラズマ中の非発光中性粒子の挙動を2次元レーザー誘起蛍光法を用いて計測し、そのメカニズムを明らかにした。まず、酸素雰囲気中でターゲットから放出された Ba, Cu 原子, BaO, YO 分子, および発光種の空間密度分布の遅延時間を測定し、酸素との反応の違いによって粒子種の分布が全く異なっていることを見出した。酸素ガス圧による各粒子の空間密度分布の変化から、レーザーアブレーションプロセスにおける気相中粒子挙動は、周囲気体との相互作用、特に酸化反応や衝撃波の発生によって大きく影響される事を明らかにした。輸送された各粒子の全体量の時間変化を求めた結果、アブレーションによって放出される粒子は原子種が主であるが、Ba 原子は酸化反応によって減少し、YO 分子は増加する事を示した。それに対して Cu 原子は反応性が低いため、長い時間空間に存在する。また、実際に基板を配置して、粒子が基板前面で反射する様子を初めて視覚的に捉える事に成功した。

第4章では YBCO のレーザーアブレーションにおける粒子温度の2次元分布の時間変化を、YO 分子をトレーサーとして初めて測定を行った。これは YO の回転スペクトルの温度変化を2波長の画像データから読みとって表示するものである。その結果によれば、アブレーションによって放出される粒子は 1000K 程度の温度を持つが、アブレート後 20 μs までに粒子の酸化熱及び衝撃波の発生によって温度が 2000K 以上に上昇する。その後、周囲の酸素によって外側から冷却される。また、基板温度によって粒子の温度が変化する事を明らかにした。

第5章では、以上の研究を総括し、今後の展望を述べた。

論文調査の要旨

可変波長レーザーを用いたレーザー分光法は、極めて高い検知感度、時間・空間分解能をもち、気相における複雑な化学反応の動的ふるまいを追跡する有力な手段となっている。なかでもレーザー誘起蛍光法は、低気圧下の原子・分子の計測に適用した場合、他の方法より検知感度が高く、密度の空間分布を *in situ* に計測することができるため、従来からもっとも広く適用されている手法である。

一方、パルスレーザーデポジション (PLD) 法は、紫外線レーザーでターゲット表面をアブレートし、放出した粒子を対向する基板上に堆積させる薄膜作製技術の一つであるが、特に酸化物高温超伝導膜等の多成分の単結晶膜作製において、他の方法では得られない高品位の膜を生成できることが報告され、現在活発な研究が行われている。しかしながら、ターゲットから放出された粒子が雰囲気ガスと衝突・反応を起こしつつ基板上に堆積するまでのプロセスは複雑で、成膜のメカニズムには不明な点が多かった。

PLD 法における気相プロセスの計測に、パルス可変波長レーザーを用いたレーザー誘起蛍光法を適用した場合には、プローブパルスに可変遅延時間をかけることで、ナノ秒オーダーの高い時間分解能で短寿命の中間生成物の密度変化を追跡することができ、反応プロセスの有力な計測手段として多くの成果が報告されてきた。しかし、これまでの研究は空間のある一点での観測によるものが多く、時間・空間にわたって複雑なふるまいをする粒子挙動を解明するには不十分なことが多かった。

本研究は、レーザー誘起蛍光法と高感度 CCD カメラを組み合わせた 2 次元レーザー分光計測装置を開発し、それを PLD 法による高温超伝導膜作製プロセスの計測にはじめて適用して、プルーム中のラジカルの動きを可視化し、高い時間分解能で空間分布の変化を計測することにより、その動的ふるまいを明らかにしたものである。

本研究により得られた重要な成果は以下のようにまとめられる。

(1) アブレーションプルーム中に、シート状に整形したパルス可変波長レーザービームを入射し、側面から高感度の CCD カメラでレーザー誘起蛍光を画像的に観測する 2 次元レーザー分光計測装置を開発した。この装置でアブレーションレーザーとプローブレーザーの間の遅延時間を変えて、ナノ秒オーダーの高い時間分解能で、特定の粒子種の空間分布の変化をコマ撮りにして観察することができた。

(2) 開発した 2 次元レーザー分光計測装置を PLD プロセスの観測に適用した際の検知感度、ドップラー効果およびクエンチング効果による密度計測誤差等について理論および実験的に検討し、計測システムの優れた性能を明らかにした。

(3) 開発した 2 次元レーザー分光計測装置を PLD 法による $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) 高温超伝導膜作製プロセスの観測に適用し、酸素雰囲気中でターゲットから放出された Ba および Cu 原子、BaO および YO 分子の飛行の様子を可視化して観測することに成功した。また、得られた画像を従来から観測のあった発光種の分布と比較すると、大幅に異なることを明らかにした。

(4) ターゲットから放出される粒子は主に原子種であるが、Ba や Y 原子は基板表面に到達するまでにほとんど酸化されると同時に、初期の並進運動エネルギーを失って拡散した。それに対して、酸化反応が起こりにくい Cu 原子は異なった空間分布を示し、プルーム中に長い時間存在した。

(5) 基板表面に到達した粒子種の多くは直接表面に付着せず、表面で反射されて粒子のよどみができることを視覚的にとらえることができた。また粒子によって、そのふるまいには違いがあることが見いだされた。

(6) PLD 法による YBCO 膜作製時において、プルーム温度の 2 次元分布の時間変化を YO 分子をトレーサーとしてはじめて計測した。これは YO 分子の回転スペクトルを 2 波長で観測し、画像処理によって求めたもので、酸化や衝撃波によるショックフロント部の加熱や、拡散相での冷却を観察することができた。

以上要するに本研究は、レーザー誘起蛍光法と高感度 CCD カメラを組み合わせた 2 次元レーザー分光計測装置を開発し、化学プロセスにおける粒子種の動的挙動の解明に有効であることを、PLD 法による高温超伝導膜作製プロセスの観測に適用して示したもので、電子デバイス工学上価値ある業績である。よって博士 (工学) の学位論文に値するものと認める。

氏名 (本籍) 孟 志 奇 (中国)
 学位記番号 シ情 博甲第 2 号 (工学)
 学位授与の日付 平成 8 年 12 月 27 日
 学位論文題名 NUMERICAL ANALYSIS OF
 RADAR CROSS-SECTIONS OF
 CONDUCTING CYLINDERS
 EMBEDDED IN STRONG
 CONTINUOUS-RANDOM
 MEDIA (強い連続的ランダム媒質
 に囲まれた導体柱のレーダー断面積
 の数値解析)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 立居場 光 生
 (副 査) " " 安 元 清 俊
 " " " 赤 岩 芳 彦

論文内容の要旨

物体のレーダ断面積は、レーダ工学やリモートセンシング等の分野において最も基本的かつ重要な物理量の一つである。物体が霧、雨及び乱流等のランダム媒質に囲まれている場合があり、ランダム媒質が物体のレーダ断面積にどのような影響を与えるかという問題に関心が寄せられてきた。これまでの研究により、物体に入射する波が殆んどインコヒーレントとなる時、ランダム媒質中の後方散乱強調現象のため、物体を点と見なすことができる場合にはレーダ断面積は自由空間中のもののほぼ2倍になることが理論的及び実験的に明らかにされた。しかし、実際には多くの場合物体を点に近似することができない。任意形状の物体のレーダ断面積についてランダム媒質の影響を解明することは、実際の観点から重要な課題となっている。ところが、物体のサイズを考慮に入れると、この散乱問題は境界値問題となるため、取り扱いが極めて難しくなり、解析法が与えられていなかった。

本研究では、ランダム媒質中の任意形状の物体による散乱問題を境界値問題として取り扱い、解析方法を示した。更にその方法を用いて、強い連続的ランダム媒質に囲まれた導体円柱と楕円柱のレーダ断面積を数値的に解析し、レーダ断面積に及ぼすランダム媒質の影響を考察している。本論文はこれらの結果をまとめたもので、以下の4章から構成されている。

第一章は序論であり、ランダム媒質中の散乱問題についての研究の背景と現状を簡単にまとめ、本研究の目的及び本論文の構成等を説明している。

第二章では、ランダム媒質中の物体による散乱問題を一般的に考察する。ランダム媒質のパラメータの設定及び境界条件の取り扱いなどについて検討し、更に、ランダム媒質に囲まれた物体による波の散乱過程を考察した。その結果、ランダム媒質中を波が伝搬する過程と物体の表面で電流を生成する過程を繰り返し順次たどることでその散乱過程を記述できることが判明した。即ち、ランダム媒質中の散乱問題を物体上の表面電流の生成問題とランダム媒質中の伝搬問題に分けて解析すればよい。このため、電流生成作用素の概念を導入した。この電流生成作用素は入射波により生成された物体表面の電流を求める時の演算子であり、物体を囲んでいる媒質と関係なく、物体の幾何形状だけに依存する。従って、自由空間中の物体に対する電流生成作用素を求めればよく、それが安浦の方法で一般的に構成できることを示した。

第三章では、まず、ランダム媒質を連続的ランダム媒質と仮定し、任意形状導体柱のレーダ断面積の解析を定式化した。解析の鍵となるランダム媒質中のグリーン関数の4次モーメントを波が物体上でインコヒーレントになる状況(強いランダム媒質の仮定)で近似的に求めたが、直接数

値計算すれば多大な時間がかかり、実際には計算が実行し難い。このため、解析を更に進め、計算時間を節約できる形でそのモーメントを導出した。次に、ランダム媒質中の散乱問題を取り扱う際、入射波の空間相関長が重要なパラメータであると予測し、3つの異なる空間相関長を生じさせるランダム媒質において導体円柱のレーダ断面積を数値解析した。その結果、入射波の空間相関長が円柱の半径より充分大きい場合はランダム媒質中のレーダ断面積は自由空間中のほぼ2倍になることを定量的に示した。さらに、入射波の空間相関長が短い場合には、レーダ断面積は強調されたり減少されたりすることを明らかにした。これは良く知られている後方散乱強調現象とは異なる現象である。最後に、このレーダ断面積の異常な振舞いと物体表面の曲率の関係を解明するために、導体楕円柱のレーダ断面積の解析を行った。楕円座標系のマチュエ関数を用いて、簡潔な形で導体楕円柱に対する電流生成作用素を導出した。さまざまな形状の導体楕円柱に対するレーダ断面積の数値解析を通じて、後方散乱強調以外にランダム媒質のもう一つ重要な影響、即ち、入射波の空間相関長の影響を明らかにした。この影響は物体の表面曲率とサイズに大きく依存する。自由空間中のレーダ断面積に寄与する散乱表面の実効長より入射波の空間相関長が小さくなると、レーダ断面積は自由空間のと異なり、異常な振舞いを呈することを明らかにした。この結果は物体のサイズと形状を考慮に入れたもので、強い連続的ランダム媒質に囲まれた凸型物体について一般に成立すると考えられる。

最後に第四章において、本研究によって得られた結果を要約し、今後の課題について述べた。

論文調査の要旨

大気中の乱流、雨、霧、惑星を取り巻くガス、地中の小石、生体内の各種粒子等はランダム媒質とよばれ、光やマイクロ波を用いたセンシングでは、目標物体がランダム媒質に囲まれている場合が多い。ランダム媒質中の波動散乱に関する最近の研究から、後方散乱強調現象が理論および実験の両面から解明されつつある。その結果によれば、物体に入射する波が殆んどインコヒーレント状態であるとき、物体を点と見なすことができる場合にはレーダ断面積(RCS)が自由空間時に比べてほぼ2倍になる。しかし、実際には物体を点と近似できない場合があり、物体の大きさを考慮した正確なRCSの算定が重要な研究課題となっている。

物体の大きさを考慮すれば、ランダム媒質中の物体による散乱問題は極めて解析が困難な境界値問題となり、解析法が見出されていなかった。そこで著者は、電流生成作用素を導入し、その構成法を示すことによって、この散乱問題を任意形状の導体物体に対して解析できる方法を提案した。更に、その方法を用いていくつかのRCSの数値解析

に成功し、その RCS と入射波の空間コヒーレンス長との関係を明らかにした。本論文は、これらの研究結果をまとめたもので、以下の4点で評価できる。

(1) ランダム媒質中の物体による散乱問題を境界値問題として解析する場合、先ず境界条件の設定を明確にする必要がある。ランダム媒質と導体物体との間に無限に薄い自由空間層を仮定し、最終的にその厚さを零に置くことで、物体面上で通常の境界条件を定めた。次に既存の解析法が直接に使用できない理由を明らかにして、散乱過程を次のように捉えることで、1つの解析法を提案した。ランダム媒質の外にある波源から放射された波がランダム媒質中を伝搬し、物体表面上に電流を誘起させ、その電流によって、散乱波が生じる。その散乱波の一部がランダム媒質によって散乱され、物体に再入射して、表面電流を再び誘起し、散乱波を発生させる。これを繰り返すことにより、表面電流と散乱波が求まる。この過程を定式化するには、入射波を表面電流に変換する作用素(電流生成作用素)と、波源から入射波、電流から散乱波をそれぞれ生成するランダム媒質中のグリーン関数が必要となる。電流生成作用素は任意形状物体に対して“安浦の方法”で構成できることを示し、グリーン関数はそのモーメントがランダム媒質中の波動理論から求められることにより、本散乱問題が境界値問題として解析できることを明らかにした。

(2) ランダム媒質を乱流のような連続的ランダム媒質と仮定し、導体円柱の RCS の解析を上記の方法で定式化して、後方散乱強調現象が生じる状況(強いランダム媒質の仮定)の下で、数値解析を実行した。無限級数表示の電流生成作用素を数値計算上有限項で断ち切るために内部共振解が混入し、共振点付近で誤差が生じ易くなる。この難点を物理的考察に基づき除去する方法を提案して、安定して RCS が求まるようにした。

(3) 入射波の空間コヒーレンス長が RCS 算定の重要なパラメータであると予測し、そのコヒーレンス長が円径より①充分長い場合、②同程度の場合、③短い場合について RCS の数値解析を行った。その結果、RCS は①では自由空間時の約2倍、②では1から3倍の間となり、③では1倍以下にもなりうる、ことなどが明らかになった。特に H 偏波の場合 RCS の空間コヒーレンス長への依存が E 偏波に比べて顕著であることが判明した。

(4) 上記の特徴が凸型物体の RCS に対して一般的に成立すること、更なる特徴を RCS と物体形状の曲率との関係を考慮に入れて示すため、導体楕円柱の RCS を数値解析により詳細に検討した。これにより、物体が強いランダム媒質に囲まれているとき、入射波の空間コヒーレンス長が既知の後方散乱強調現象に加えて RCS に多大な影響を与えること、その影響が物体のサイズと表面曲率に大きく依存することを定量的に明らかにした。

以上要するに、本論文は、光やマイクロ波を用いたセン

シングの研究に関して、ランダム媒質中の物体による散乱問題を境界値問題として解析する方法を提案し、強い乱流媒質に囲まれた凸型導体柱の RCS を数値解析して、その特徴を明らかにしたもので、電磁波工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士(工学)の学位論文に値すると認める。

氏名(本籍) 南部 幸久(長崎県)
 学位記番号 シ情 博乙第1号(工学)
 学位授与の日附 平成8年11月28日
 学位論文題名 多数の誘電体粒子からなるランダム媒質の等価誘電率算定に関する研究
 論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 立居場 光生
 (副査) // // 安元 清俊
 // // // 赤岩 芳彦
 // // // 渡辺 征夫

論文内容の要旨

媒質定数が時間的及び空間的に不規則に変動している媒質、例えば乱流、霧等は、ランダム媒質と呼ばれている。ランダム媒質中の波動解析に関する問題は、今世紀初頭より、波動伝搬に関する基本課題の1つとして、主に科学的観点から議論されてきた。近年は、衛星通信及びリモートセンシング技術の研究・開発のための重要な基礎研究として位置付けられ、理論及び実験の両面から盛んに研究が行われている。最近十数年では、“ランダム媒質の等価的な媒質定数の算定手法の開発”、“ランダム媒質における後方散乱強調効果の予測及び検証”等の研究に対して、多くの成果が報告されている。

ランダム媒質の等価的な媒質定数の算定手法の開発は、リモートセンシングにおける各種レーダの分解能の向上、マイクロ波回線の設計や評価技術の向上、高周波電磁界で用いられるアモルファスや高誘電体粉末材料等の開発及び特性評価等を開発の目的とし、主に理論的立場で研究が行われてきた。ランダム媒質の等価的な媒質定数の例としては、等価誘電率がよく用いられ、静電近似や多重散乱理論に基づいてこれまでに多くの等価誘電率算定法が提案されている。しかし、その適用範囲には厳しい制限があり、近年の通信やリモートセンシングで研究対象となっているマイクロ波領域から光波領域の電磁界に対しては適用できない場合があることが指摘され始めた。

本論文では、従来の等価誘電率算定法に比べて適用範囲が広い算定法を開発することを目的として、1987年に提案された新しい多重散乱理論に基づいてランダム媒質中の波動を解析し、新しい算定法を提案している。さらに、従来の方法及び本方法による等価誘電率の数値結果の比較・

検討を行い、従来の方法の適用範囲を明確にすると共に、本方法の妥当性を示している。以下、本論文の内容を各章ごとに要約して述べる。

第1章では、本研究の意義と歴史的背景及び本論文の構成について述べる。

第2章では、まず、多数の誘電体粒子が規則的配置からランダムに位置変動しているような媒質による散乱問題を考え、媒質中の波動方程式を定式化する。この波動方程式を解析することにより、媒質中の平均グリーン関数の満たすべき方程式を導く。この方程式は、誘電体粒子の分布に規則性及び不規則性の要素を同時に含んでいることから、厳密に解を得ることは解析上困難であり、近似解法が必要となる。本研究では、ランダム媒質の巨視的な誘電率を求めることを目的としているので、誘電体粒子の分布の規則性が無視できる条件、即ち、“ランダム分布条件”を、多数の誘電体球からなるランダム媒質を具体的な解析の対象として導出する。さらに、波長、誘電体球のサイズ及び誘電率等をパラメータとして数値的な検討を行い、その条件を定量的に明らかにする。最後に、本章の結論として、次章で等価誘電率算定式を導くための基礎となるランダム分布条件下における媒質中の平均グリーン関数の近似解を導く。

第3章では、前章の誘電体球からなるランダム媒質に対して、ランダム分布条件下の平均グリーン関数の近似解より等価誘電率の算定式を導出する。その算定式を用いて、球の密度、サイズ及び誘電率、周波数をパラメータとして変化させ、まず多数の無損失誘電体球からなるランダム媒質の等価誘電率の数値解析を行う。更に、他の方法(EFA, QCA, QCA-CP)による等価誘電率を同様のパラメータで数値計算し、各方法による等価誘電率の違い及び適用範囲を明確にすると共に、本方法の有効性を示す。次に、損失を持つ誘電体球からなるランダム媒質として、球状の水粒子からなる媒質等の等価誘電率についての数値例を示す。先と同様、各方法による等価誘電率の比較を行い、損失のある誘電体球からなる媒質についても、本方法が有効であることを示す。

第4章では、誘電体球等からなる3次元ランダム媒質に比べて誘電体の配置の制御が容易で実験を行いやすい2次元ランダム媒質について、等価誘電率算定式を導く。まず、多数の誘電体円柱からなるランダム媒質を考え、媒質中の波動方程式を定式化する。この波動方程式より、ランダム分布条件下における平均グリーン関数の近似解を導出し、E波及びH波入射に対する等価誘電率の算定式を導く。次に、その算定式の数値解析を行い、偏波方向による等価誘電率の違いを定量的に示す。さらに、誘電体球からなるランダム媒質の等価誘電率と比較して、2次元問題における等価誘電率の特徴を明らかにする。

第5章では、本研究で得られた結果を各章ごとに要約

し、本論文で提案した等価誘電率算定法について結論を述べる。また、本方法の問題点及び今後の課題等について検討する。

論文調査の要旨

大気乱流、電離層乱流、雨、霧、各種粒子を含む地中などのランダム媒質中の波動伝搬は、今世紀初頭から、電磁波工学の基本的課題の1つとして研究されてきた。近年は通信やセンシングの分野で、マイクロ波から光に至る高周波の電磁波を積極的に利用するようになり、ランダム媒質が及ぼす影響を的確に算定して、その結果を活用する研究が基礎研究として位置付けられ、数多くの成果が報告されている。

多数の粒子からなるランダム媒質の等価誘電率の算定問題も、上記研究の一環として、最近十数年の間に精力的に研究されてきた。この算定問題は所謂多重散乱理論に基づいて解析され、解析精度はその理論が各粒子による波の多重散乱をどの程度精度よく取り入れているかに依る。多重散乱を取扱う有力な方法として広く用いられてきたFoldy-Twerskyの方法は、粒子の密度が高くなってくると、理論的に破綻することから、Laxによって提案されたQCA(Quasi Crystalline Approximation)が最近ではよく用いられる。密度が極めて高い場合にはQCAをより高精度にしたQCA-CP(QCA with Coherent Potential)が有用とされ、現時点では最も優れた方法といわれている。

ところが、高周波デバイス材料として注目されている二酸化チタンやフェライトの粉末材料の特性評価、土中の水分含有率の推定といった、高誘電率や高透磁率の粒子からなるランダム媒質の等価媒質定数の算定問題には、QCA-CPが適用できないことを著者は数値例によって指摘した。そこで著者は、QCA-CPを超える、より適用範囲の広い算定法の開発を目指して、Tateibaによって提案された多重散乱理論に基づき、新たな算定法を提案した。それにより多数の誘電体球からなるランダム媒質の等価誘電率を数値解析し、QCA-CP等の結果と比較してその有効性を検討してきた。これらの研究結果をまとめた本論文は、以下の3点で評価できる。

(1) 多数の同一誘電体粒子が規則的配置からランダムに変位している媒質中の平均グリーン関数が系統的方法で近似的に与えられていた。しかし、この関数を用いてランダム媒質の等価媒質定数を算定するには、配置の規則性を表す項がこの関数表現式の中で無視できる条件(ランダム分布の条件)を導出する必要がある。粒子を誘電体球と仮定し、波の波長、誘電体球の密度、サイズ、誘電率をパラメータとしてランダム分布の条件を定量的に明らかにした。この結果は、コヒーレントな波からみて多数の誘電体球がランダム分布であるか否かの判定を与えたもので、媒質の特性探査の分野等でも有用である。

(2) ランダム分布の条件下で平均グリーン関数を簡潔な形にまとめ、等価的な波数の解析を行い、等価誘電率を算定する一般式を導出している。特に QCA-CP などによって等価誘電率が簡潔な形で表されている周波数領域において、等価誘電率を簡単に計算できる形で与え、式の上で各手法による等価誘電率を比較できるようにしている。QCA, QCA-CP では粒子間に特定の相関関数を用いなければ、等価誘電率が非現実な値を呈するのに比べ、本算定法はそのようなことがなく、より汎用性がある。

(3) 数値解析により、QCA-CP 等による結果と詳細に比較・検討している。QCA や QCA-CP が有効とされている領域では本算定法は同じ結果を与えている。それら従来の方法が有効でなくなる領域、即ち、比誘電率が 10 以上の高誘電率の粒子で構成され、かつ粒子密度がおよそ 0.1 から 0.3 となる領域において、これまでの方法とは異なり、

物理的に妥当な結果を示している。このことから、QCA や QCA-CP より優れた等価誘電率算定法が得られたものといえる。本算定法が今後種々の実際的问题に適用され、その有用性を発揮することが期待される。更に、誘電体の配置の制御が比較的容易で、綿密な実験が可能な、誘電体円柱からなる 2 次元ランダム媒質に本算定法を適用して、波の偏波特性と等価誘電率との関係を明らかにしている。

以上要するに、本論文は、通信とセンシングの分野で基本的な課題である、多数の誘電体粒子からなるランダム媒質の等価誘電率算定に関し、これまで最適とされていた方法の問題点を指摘して新たな算定法を提案し、数値解析により従来の結果と詳細に比較してその有効性を実証したもので、電磁波工学に寄与するところが大きい、よって、本論文は博士（工学）の学位論文に値すると認める。

