

## 学位論文題名

## Polarization Effects in Multiple Light Scattering

(光多重散乱における偏光効果)

## 学位論文内容の要旨

光散乱現象は散乱媒質の時空間における特性を反映しており、単散乱を仮定した光散乱計測法は成熟の域に達した技術になっている。しかし、高密度散乱体や凝集体などのより複雑な系からの光散乱現象では多重散乱が支配的になり、単散乱では観測されない後方多重散乱光エンハンスメント、時間反転メモリー効果、長相関効果などの新しい現象が発見されている。このような多重散乱現象の研究では、光波の散乱・伝搬過程が複雑なためマックスウェル方程式に基づく電磁光学的解析手法はほとんどの場合適用できないため、媒質内の光波伝搬を光子の拡散現象ととらえる光子拡散輸送理論を用いて理論の解析がなされている。その理論的研究を背景にして、光応用計測における非接触・非破壊・非侵襲の特長を生かした拡散波分光や光CTという新しい計測技術が提案され研究されている。一方、光子拡散輸送理論がスカラー理論であるため、光のベクトル的性質、すなわち偏光特性を取り扱うことができない。多重散乱媒質における光波伝搬のベクトル解析は、多重散乱媒質と散乱メカニズムの定性的・定量的な解析に新しい可能性を示すものであり、光多重散乱現象における偏光特性の研究は重要な研究課題である。

本研究では、多重散乱媒質およびランダムな境界面を有する誘電体膜からの後方多重散乱光の偏光特性についての理論的解析および実験的検証を行っている。

第1章は序論であり、高濃度ランダム媒質における多重散乱光のベクトル的特性に関係した現象観測と理論的研究について、最近の研究動向を概説している。

第2章では、平行ビームで照射した高濃度ポリスチレン球溶液からの後方多重散乱光の出射面近傍における強度分布の観測と、その結果を現象論的モデルによって解析を行っている。多重散乱光の入射偏光方向と垂直な偏光方向の成分、すなわち垂直偏光成分は入射点を中心として入射偏光方向に対して $\pm 45^\circ$ 方向に十字像強度分布を形成し、そのコントラストが散乱粒子濃度に依存することを実験的に示している。実験結果を定性的に解釈するために、2回散乱成分の寄与を基に散乱媒質の均質性、光波の伝搬過程および偏光ベクトルの対称性からコーナリフレクタモデルを提案し、現象論的説明を行っている。さらに、平行偏光成分と垂直偏光成分

の比を分極係数と定義し、偏光十字像の分極係数依存性を理論的に解析し、実験結果との一致を見た。その結果、偏光十字像は2回散乱成分を主要素とする低次散乱成分の寄与で生じ、楕円偏光状態のカオス的なランダム化で生じる効果であることを示している。

第3章では、第2章の現象論的な研究を踏まえて、多重散乱光のストークスパラメータを導出し、より厳格な数学的取り扱いによって理論解析を行っている。ストークスパラメータは振幅相関関数と関係づけられ、振幅相関関数は出射境界面の変動の相関、その近傍における光子密度分布、および光子拡散がおのおのの独立であることを仮定して理論的に導出された。さらに、分極係数をストークスパラメータから理論的に導出し、偏光十字像のコントラストについて理論と実験に一致を見た。その結果、短い光路を伝搬する光波は境界面近傍に局在すること、および輸送平均自由光路長が偏光十字像の形状を決定することが示されている。本章の結果に基づき、偏光十字像の出射位置依存性から光波の浸透度の測定法が提案されている。

第4章においては、古典的拡散方程式の拡散解（拡散伝達因子）、Bethe-Salpeter方程式の拡散解（拡張された拡散伝達因子）、およびBethe-Salpeter方程式とマックスウェル方程式の結合解（偏光拡散伝達因子）の散乱次数依存性を研究している。散乱次数依存性の検証は、異なる輸送平均自由光路長を有するポリスチレン球溶液に対して、反射率と透過率の出射面上における動径距離依存性を調べることで行っている。高濃度溶液における多重散乱光では拡散近似が成り立つためすべての伝達因子が実験と一致するが、希薄溶液では低次散乱成分の寄与が増加するため拡張された拡散伝達因子のみが実験と一致するようになる。特に、偏光拡散伝達因子の垂直偏光成分は、もっとも実験に合致することを示し、多重散乱現象の解析における垂直偏光成分の重要性を明示している。

第5章では、ランダム境界面を有する誘電体膜からの後方散乱光の垂直偏光特性を研究している。ランダム境界面を有する誘電体膜の後方散乱光の垂直偏光成分が、 $\pm 45^\circ$ の方向に中心対称な十字像を示すことをスリガラスを用いた実験と光線追跡シミュレーションによって示した。さらに、ランダム境界面の散乱について、第2章で提案したコーナリフレクタモデルとフレネルの公式を結合し、偏光十字像の理論解析を行なっている。また、ランダム境界面の遠方界において、コヒーレント後方多重散乱ピークが生じることを実験で示し、コーナリフレクタモデルを用いて理論解析を行っている。本章の研究によって、固体内部における散乱や表面反射によっても偏光十字像が観測され、この現象が広く一般の物体からの後方多重散乱光において観測することができることを示している。さらに、コーナリフレクタモデルが光多重散乱現象の発生メカニズムの定性的な解釈および理論的解析の手法を与えることを実証している。

最後に、第6章では本研究の結果が総括されている。

# 学位論文審査の要旨

主査	教授	朝倉利光
副査	教授	小柴正則
副査	教授	大塚喜弘
副査	教授	清水孝一
副査	助教授	岩井俊昭

学位論文題名

## Polarization Effects in Multiple Light Scattering

(光多重散乱における偏光効果)

光散乱現象は散乱媒質の時空間における特性を反映しており、単散乱に基づく光散乱計測法は成熟の域に達した技術になっている。しかし、高密度散乱体や凝集体などのより複雑な系からの光散乱現象では多重散乱が支配的になり、単散乱では観測されない後方多重散乱光エンハンスメント、時間反転メモリー効果、長相関効果などの新しい現象が発見されている。このような多重散乱現象の研究では、光波の散乱・伝搬過程が複雑なためマックスウェル方程式に基づく電磁光学的解析手法はほとんどの場合適用できないため、媒質内の光波伝搬を光子の拡散現象ととらえる光子拡散輸送理論を用いて理論の解析がなされている。その理論的研究を背景にして、光応用計測における非接触・非破壊・非侵襲の特長を生かした拡散波分光や光CTという新しい計測技術が提案され研究されている。一方、光子拡散輸送理論がスカラー理論であるため、光のベクトルの性質、すなわち偏光特性を取り扱うことができない。多重散乱媒質における光波伝搬のベクトル解析は、多重散乱媒質と散乱メカニズムの定性的・定量的な解析に新しい可能性を示すものであり、光多重散乱現象における偏光特性の研究は重要な研究課題である。

本論文では、高密度散乱体およびランダムな境界面を有する誘電体膜からの後方多重散乱光の偏光特性についての理論的解析および実験的検証を行っている。

第1章は序論であり、高濃度ランダム媒質における多重散乱光のベクトルの特性に関係した現象観測と理論的研究について、最近の研究動向を概説している。

第2章では、平行ビームで照射した高濃度ポリスチレン球溶液からの後方多重散乱光の出射面近傍における強度分布の観測と、その結果を現象論的モデルによって解析を行っている。多重散乱光の入射偏光方向と垂直な偏光方向の成分、すなわち垂直偏光成分は入射点を中心として入射偏光方向に対して $\pm 45^\circ$ 方向に十字像強度分布を形成し、そのコントラストが散乱粒子濃度に依存することを実験的に示している。実験結果を定性的に解釈するために、2回散乱成分の寄与を基に散乱媒質の均質性、光波の伝搬過程および偏光ベクトルの対称性からコーナリフレクタモデルを提案し、現象論的な説明を行っている。さ

らに、平行偏光成分と垂直偏光成分の比を分極係数と定義し、偏光十字像の分極係数依存性を理論的に解析し、実験結果との一致を見た。その結果、偏光十字像は2回散乱成分を主要素とする低次散乱成分の寄与で生じ、楕円偏光状態のカオス的なランダム化で生じる効果であることを示している。

第3章では、第2章の現象論的な研究を踏まえて、多重散乱光のストークスパラメータを導出し、より厳格な数学的取り扱いによって理論解析を行っている。ストークスパラメータは振幅相関関数と関係づけられ、振幅相関関数は出射境界面の変動の相関、その近傍における光子密度分布、および光子拡散がおのおのの独立であることを仮定して理論的に導出された。さらに、分極係数をストークスパラメータから理論的に導出し、偏光十字像のコントラストについて理論と実験に一致を見た。その結果、短い光路を伝搬する光波は境界面近傍に局在すること、および輸送平均自由光路長が偏光十字像の形状を決定することが示されている。本章の結果に基づき、偏光十字像の出射位置依存性から光波の浸透度の測定法が提案されている。

第4章においては、古典的拡散方程式の拡散解（拡散伝達因子）、Bethe-Salpeter 方程式の拡散解（拡張された拡散伝達因子）、およびBethe-Salpeter 方程式とマックスウェル方程式の結合解（偏光拡散伝達因子）の散乱次数依存性を研究している。散乱次数依存性の検証は、異なる輸送平均自由光路長を有するポリスチレン球溶液に対して、反射率と透過率の出射面上における動径距離依存性を調べることで行っている。高濃度溶液における多重散乱光では拡散近似が成り立つためすべての伝達因子が実験と一致するが、希薄溶液では低次散乱成分の寄与が増加するため拡張された拡散伝達因子のみが実験と一致するようになる。特に、偏光拡散伝達因子の垂直偏光成分は、もともと実験に合致することを示し、多重散乱現象の解析における垂直偏光成分の重要性を明らかにしている。

第5章では、ランダム境界面を有する誘電体膜からの後方散乱光の垂直偏光特性を研究している。ランダム境界面を有する誘電体膜の後方散乱光の垂直偏光成分が、 $\pm 45^\circ$  の方向に中心対称な十字像を示すことをスリガラスを用いた実験と光線追跡シミュレーションによって示した。さらに、ランダム境界面の散乱について、第2章で提案したコーナリフレクタモデルとフレネルの公式を結合し、偏光十字像の理論解析を行っている。また、ランダム境界面の遠方界において、コヒーレント後方多重散乱ピークが生じることを実験で示し、コーナリフレクタモデルを用いて理論解析を行っている。本章の研究によって、固体内部における散乱や表面反射によっても偏光十字像が観測され、この現象が広く一般の物体からの後方多重散乱光において観測することができることを示している。さらに、コーナリフレクタモデルが光多重散乱現象の発生メカニズムの定性的な解釈および理論的解析の手法を与えることを実証している。

第6章では本研究の結果が総括されている。

これを要するに、著者は、多重散乱光の波動工学的理論を確立するとともに、光波の浸透度計測法において偏光効果を取り入れた新たな計測法の可能性を明らかにしており、光物理学および光計測工学の分野に貢献するところ大なるものがある。

よって、著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。