

## 学 位 論 文 題 名

Statistical Properties of Optical Coherent Phenomena  
in Multiple Scattering Media

(多重散乱媒質における光学的コヒーレント現象の統計的特性)

## 学位論文内容の要旨

コヒーレントな光の散乱現象に関する研究は、レーザ光源の出現以来、光計測技術への応用を目指して発展してきたが、多重散乱による効果は、伝播媒質の情報を持たないインコヒーレントな現象として扱われるに留まっていた。しかし、近年になり、電子系における量子干渉現象との類似性が指摘されたことから、光多重散乱現象への関心が高まり、現在活発な研究が行われている。特に、多重散乱光波によるコヒーレント現象は、伝播媒質の情報を反映しており、媒質に対するプローブとしての観点のみならず、電子系さらには複雑系における波動伝播現象を可視化する実験場としても期待されている。また、多重散乱の機構を積極的に利用した光学デバイスが考案されるなど、光多重散乱媒質におけるコヒーレント現象は、新たな研究領域に発展する可能性を持つ興味深い研究対象となっている。

本研究は、多重散乱光波によるコヒーレント現象の統計的特性と散乱媒質内部における光波の伝播現象との関係を明らかにすること、および、その特性を利用した光学技術を開発することを目的とし、その内容は3つの研究課題に大別される。第一は、散乱媒質表面の出射場における散乱光強度の統計的特性に関する研究であり、これは前者の研究目的に対応する。第二は、非線形吸収・増幅媒質におけるコヒーレント現象の特性変化に関する研究であり、散乱媒質内に生ずる干渉現象の制御を目指すものである。第三は、散乱光強度の角度相関特性を用いた被遮蔽物体の検出に関する研究であり、多重散乱光波によるコヒーレント現象の光計測技術への応用を図るものである。本論文は8章から構成され、上記の3つの課題についてはそれぞれ、第4、5章、第6章、第7章において論述している。以下に、各章の概要を述べる。

第1章では、本研究の背景として、光学の分野における光の単散乱現象から多重散乱現象に至るまでの研究、ならびに、電子系におけるアンダーソン局在現象を発端とする量子干渉現象から光多重散乱現象に至る研究の流れについて概観している。また、光多重散乱現象を利用した新たな研究領域としての最近の研究について概説し、この分野における本論文の位置付けを明確にしている。

第2章では、多重散乱光波により生じる幾つかのコヒーレント現象を取り上げ、現在まで明らかにされている重要な理論的概念、すなわち、散乱光強度ゆらぎ(スペックル)に現れるレイリー統計と非レイリー統計、コヒーレント後方散乱現象、および空間・角度領域における相関特性について説明し、統計的手法、および拡散近似理論を用いたその定式化を行っている。

第3章では、本研究で導入した数値シミュレーションの方法について説明している。光多重散乱現象の数値シミュレーション法としては、光子のランダムウォークモデルが広く用いられている。しかしながら、この方法には光の位相情報が欠落しており、多重散乱光波によるコヒーレント現象を再現する目的には利用できない。このため、本研究では、散乱方向を互いに直交する方向のみに制限し、散乱点間の距離が波長に対し十分に長いと仮定した散乱モデルを用いる。これにより、各散乱間の光波伝播が波動方程式を満し、かつ散乱光路の時間反転対称性が保証される。

第4章および第5章では、数値シミュレーションにより算出された散乱光強度の統計的特性について述べている。第4章では、散乱光強度の一次統計、すなわち強度ゆらぎの大きさに着目し、透過光強度におけるゆらぎの増加と反射光強度におけるゆらぎの減少を確認し、散乱の非等方性および散乱媒質の次元に対する依存性を明らかにしている。これらの統計的特性は、媒質内部で生じる散乱光路の交差現象が強度ゆらぎの増加に寄与し、低次回散乱成分がバイアス成分として強度ゆらぎの低下に寄与することによって生じる。また、吸収を含む散乱媒質において強度ゆらぎの特異な振る舞いが観測されることを明らかにし、低次回散乱と高次回散乱の寄与を考慮した理論的考察を行っている。

第5章では、散乱光強度の二次統計、すなわち相関特性について述べている。散乱媒質の出射表面上における強度相関特性に、正と負の空間相関が現れることを明らかにしている。この相関は、粗面等での単散乱過程に現れるスペックルとは異なる長距離の相関である。相関特性に寄与する散乱光路を推測し、その現象論的な考察を通して、正および負の相関の形成原理を明らかにしている。すなわち、正の相関は、コヒーレント後方散乱現象を形成する時間反転の散乱光路の寄与と、媒質内部で交差する散乱光路による寄与であること、また、負の相関は、同一散乱光路を途中で折り返す成分の寄与であることを示している。第4章と同様に、散乱媒質の持つ各パラメータに対する依存性に関しても考察を行っている。

第6章では、非線形吸収および増幅を持つ系による散乱光強度の統計的特性の変化について論じている。特に、飽和吸収媒質では多重散乱光波のコヒーレント現象の強調効果が観測されることを明らかにし、その原因が高次回の散乱光路の交差によることを理論的考察により示すとともに、数値シミュレーションにより検証している。また、散乱媒質全体の透過率のゆらぎ分布が局在現象への漸近現象と類似していることから、散乱媒質の非線形効果による局在現象の制御の可能性について触れている。これに対し、増幅媒質ではより長い散乱光路成分が支配的となるため、散乱光路の独立性が増し、散乱光強度の統計的特性におけるこれらの特異性は低下する。

第7章では、散乱光強度の統計的特性を光計測技術へ応用する一例として、高密度散乱媒質に遮蔽された物体の検出の可能性について、散乱光強度の角度相関特性における入射場の寄与に基づいて考察を行っている。入射場の強度分布と散乱光強度の角度相関関数とがフーリエ変換の関係にあることを導出し、数値シミュレーションとの比較を行っている。このことから、散乱光強度の角度相関関数には、照射面積と物体の大きさとの相対的な情報が反映されることを明らかにしている。このフーリエ変換の関係はスペックルサイズを決める短距離相関にのみに当てはまる近似であることから、長距離相関のもたらす影響についても考察を行っている。

最後に、第8章では、本研究で得られた結果を総括し、結論を述べている。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 末 宗 幾 夫  
副 査 教 授 小 柴 正 則  
副 査 教 授 笹 木 敬 司  
副 査 助 教 授 魚 住 純

学 位 論 文 題 名

## Statistical Properties of Optical Coherent Phenomena in Multiple Scattering Media

(多重散乱媒質における光学的コヒーレント現象の統計的特性)

光多重散乱現象に関する研究は、様々な自然現象に物理的な解釈を与え、また幾つかの有用な光計測技術の発展に寄与してきた。しかしながら、レーザ光による光多重散乱現象の研究は、そのインコヒーレントな現象のみに焦点が当てられるに留まってきた。近年になり、電子系における量子干渉現象と多重散乱光波による干渉現象との類似性が指摘されたことにより、多重散乱光波に観測されるコヒーレントな現象が注目を浴び、新たな研究分野として盛んな議論が行われてきている。現在は、光多重散乱現象の理論解析とその基礎的な検証実験を中心とした研究が行われているが、今後、光計測技術・光学デバイス等、多岐に渡る応用が期待される研究課題であると言える。

本論文は、多重散乱光波によるコヒーレント現象の統計的特性と散乱媒質内部における光波の伝播現象との詳細な関係を明らかにすること、および、その特性を利用した光学技術を開発することを目的とし、散乱媒質表面の出射場における散乱光強度の統計的特性に関する研究、非線形吸収・増幅媒質におけるコヒーレント現象の特性変化に関する研究、散乱光強度の角度相関特性を利用した被遮蔽物体の検出に関する研究の3つの研究課題について論述している。本論文の成果は、以下のように要約される。

1. 散乱光強度の1次統計、すなわち強度ゆらぎの大きさの特性に関し、透過散乱光における強度ゆらぎの増加、および、反射散乱光における強度ゆらぎの減少特性を数値シミュレーションと理論的考察により示し、粒子の非等方散乱性、散乱媒質の大きさ、および次元に対する依存性を明らかにしている。また、散乱媒質における吸収の影響について考察を行い、低次回および高次回散乱が異なる吸収依存性を示すことに由来する強度ゆらぎの特異な振る舞いが反射散乱光において観測されることを明らかにしている。

2. 散乱光強度の2次統計、すなわち空間相関特性に関し、出射場における強度ゆらぎに正と負の相関が出現することを数値シミュレーションにより明らかにしている。また、これらの相関特性に寄与する散乱光路を推測し、その現象論的な考察を通して、正の相関が時間反転対称性を

もつ散乱光路の寄与および散乱媒質内部で交差する散乱光路の寄与により生じること、また負の相関が同一の散乱光路を途中で折り返す成分の寄与により生じることが明らかにしている。

3. 非線形吸収および増幅媒質における強度ゆらぎ統計の特性変化を数値シミュレーションにより算出し、飽和吸収媒質において強度ゆらぎの強調効果が観測されることを明らかにし、その原因が散乱光路の高次回の交差にあることを理論的に示している。また、飽和吸収媒質における散乱媒質全体の透過率のゆらぎ分布の振る舞いが局在状態への漸近現象と類似することから、非線形吸収効果による光局在現象の制御の可能性について考察している。なお、増幅媒質では、媒質内部を長く伝播する散乱光路が支配的となるため、散乱光路の独立性が増し、強度ゆらぎの統計的特性の特異性が低下することを数値シミュレーションにより確認している。

4. 散乱光強度の角度相関関数が高密度媒質に遮蔽された物体の照射面の強度分布とフーリエ変換の関係にあることを理論的に導出し、散乱光強度の統計的特性を利用した被遮蔽物体の検出が可能であることを明らかにしている。また、理論結果の妥当性について、数値シミュレーションによる比較、検証を行っている。その際、本研究で用いた拡散近似理論の範疇を越える散乱光強度の長距離相関特性がもたらす影響についても考察を行っている。

これを要するに、著者は、多重散乱光波のコヒーレント現象の統計的特性に反映される物理現象に関し、理論および数値シミュレーション解析により幾つかの新知見を得るとともに、その光計測技術への応用を考案し、さらに媒質の非線形効果と光局在現象との関連性についても有益な研究成果を得ており、光物理学および光工学の進歩に寄与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あるものと認める。