

## 学位論文題名

## Statistical Properties and Applications of Dynamic Speckles Produced by Double and Multiple Scatterings of Light

(二重及び多重散乱光による動的スペckルの統計的特性と応用)

## 学位論文内容の要旨

レーザ光を粗面に照射すると、その反射光はスペckルパターンと呼ばれる明暗の斑点模様を形成する。こうした1回の光散乱によって生じるレーザスペckル場の統計的性質は、基礎と応用の両面から広く研究されている。しかし近年、照明光自身が散乱光である場合に生じる二重散乱スペckルや、高濃度のコロイド溶液や生体などから生じる多重散乱スペckルに対する興味が非常に高まってきている。これらの散乱現象は多くの場合、照明光のゆらぎや散乱体の運動によって、時間的に強度変動する光の場として観察される。このような複雑な散乱光によって形成される動的スペckルに関する研究は、その理論的解析の困難さにより、あまり進んでいないのが現状である。本研究は、動的二重散乱および多重散乱スペckルの統計的特性を比較的簡単なモデルを用いて理論解析し、散乱体の運動とそこから生じるスペckルとの基本的な関係を明らかにするものである。さらに、多重散乱物体の速度測定への応用も検討した。以下、本論文の各章についての概略を述べる。

第1章では、二重散乱および多重散乱スペckルに関する研究の歴史的背景について説明したのち、本論文のあらましを述べる。

第2章では、現在までに得られている単一散乱スペckルについての基本となる理論を解説する。ここでは、スペckル場の形成過程を述べた後、光の場の複素振幅に統計的手法を導入することでさまざまなスペckルの特性を記述できることを示す。具体的には、強度および位相の確率密度関数、強度分布の空間相関関数、そして強度ゆらぎの時空間相関関数およびパワースペckトルを、もっとも一般的な自由伝搬系と結像系の二つの光学系についてそれぞれ求める。

第3章では、光ファイバプローブを用いてレーザ光を運動粗物体に照射したときに検出される、スペckル強度ゆらぎのパワースペckトルを理論的に求める。マルチモードファイバから出射したレーザ光はスペckルを形成するため、検出ファイバの特性だけでなく照射ファイバの特性もパワースペckトルに大きな影響を及ぼす。検出

ファイバの直径を大きくしていくとスペクトルは単調に狭くなっていくのに対し、照射ファイバ直径の増加に対してスペクトルは複雑に変化する。ただし、スペクトル幅と物体速度の比例関係は保たれるため、速度測定に光ファイバプローブが利用可能であることが確認される。以上の結果を実験により検証する。

第4章では、時間的に変動しているスペックルパターンを粗物体に照射したとき、その回折場に生じる二重散乱スペックルの強度ゆらぎを、理論と実験の両面から解析する。レーザビームを面内移動している透明な拡散板に照射し、透過光が形成する動的スペックルパターンで2枚目の運動拡散板を照射することによって、時間変動する二重散乱スペックルが生じる。各拡散板の速度とスペックルの強度ゆらぎとの関係を調べると、ある条件下で2枚の速度差が光強度ゆらぎの速さに比例することがわかる。しかし、1枚目の拡散板で与えられる照明光のゆらぎの影響は取り除くことができないため、2枚目の拡散板の動きだけを検出することは、困難であることも明らかとなる。

第5章では、自由伝搬系の代わりに結像系を用いたとき、照明スペックルパターンのゆらぎが像面スペックルの強度ゆらぎに及ぼす影響を実験的に調べる。開口直径の大きなレンズを用いると、照明光のゆらぎの影響を受けずに測定物体の動きだけを検出できることが明らかとなる。この場合、拡散板を照射するスペックルパターンはゆっくりとしたボイリング運動を行っていることが必要である。

第6章では、第5章の結果を焦点位置のずれも考慮にいったより一般的な形で定式化し、いくつかの特徴的な結果を実験により検証する。ここでは、2枚の拡散板を測定物体と考え、それぞれの動きを別個に検出するための条件を求める。細く絞ったレーザビームで1枚目の拡散板を照射し、大きな開口のレンズを通して二重散乱スペックルを検出すると、焦点を合わせた拡散板の速度を他の拡散板の動きに影響されずに測定できることが導かれる。また、その逆の条件下では自由伝搬系と同様に、2枚の速度差が測定できる。以上の結果を実験により確認する。

第7章では、複数枚の移動拡散板によって散乱された光が回折場に作る多重散乱スペックルの性質を理論的に研究する。まず、散乱回数の増加がスペックルパターンに及ぼす影響を強度の時空間相関関数から解析すると、強度ゆらぎの速さは増加し、パターンは並進運動からボイリング運動へと変化していくことがわかる。この傾向は、生体から生じるスペックルパターンにおいても見られる一般的なものである。さらに、拡散板が全体として速度勾配をもつ場合、各拡散板の速度に多少ばらつきが生じても、スペックル強度ゆらぎは全体の平均速度に比例する。しかし、速度勾配がないときには各拡散板の速度差が強度ゆらぎに大きく影響する。このことは、回折場の多重散乱スペックルの動きが散乱体同士の相対速度に依存し、全体としての運動に対してはほとんど影響されないことを示している。

第8章では、結像系で得られる多重散乱スペックルの特性を理論的に解析する。第

6章で述べた、個々の拡散板の動きを別個に検出できるという結像系特有の性質は、3枚以上の拡散板によって生じるスペックルには見られない。しかし、自由伝搬系では検出困難であった、速度にばらつきのある拡散板全体の平均速度は、大きな開口をもつ結像系を用いることで測定可能である。逆に、小開口の結像系によって各拡散板の速度差の平均が検出されることが示される。

第9章では、第8章で得られた結果を実際の多重散乱体である移動微粒子懸濁液で実験的に確認し、さらに粒子散乱特有の現象について考察する。具体的には、照明光のスポット径、結像系の開口直径および懸濁液の粒子濃度などを変化させて、像面スペックルの粒子速度依存性を調べる。懸濁液のような3次元物体からのスペックルは、粗面によって生じるスペックルとは違い、散乱体内部に形成される散乱体積の広がり動的スペックルの性質を決定することが明らかとなる。散乱体積が大きいときには、粒子のブラウン運動による影響が支配的となるのに対し、散乱体積を小さく抑えると、粒子が全体として移動する速度の影響を強く受ける。この速度依存性は、複数の移動拡散板によるモデルと定性的に一致していることが確認される。

第10章では、二波長スペックル相関法を微粒子懸濁液に応用し、実験的にその有用性を研究する。多重散乱の度合いが増すほど、照射光は散乱体内部で広がるため光路長分布も大きくなる。その結果、異なる波長によって生じるスペックルは相関が小さくなる。このことを利用して、散乱体の多重散乱の程度を知ることができる。さらに、互いに相関のある散乱光成分は、散乱体内部を直線的に進んだ光であるため、二波長の時間的相互相関関数は小さな散乱体積からの影響しか受けない。この結果、粒子濃度が増加してもブラウン運動の影響を受けずに粒子の平均移動速度の測定が可能となる。

第11章では、本研究で得られた結果をまとめている。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 朝 倉 利 光  
副 査 教 授 伊 藤 精 彦  
副 査 教 授 小 柴 正 則  
副 査 教 授 大 塚 喜 弘

## 学 位 論 文 題 名

Statistical Properties and Applications of Dynamic Speckles Produced  
by Double and Multiple Scatterings of Light

(二重および多重散乱光による動的スペckルの統計的特性と応用)

粗面からのレーザ反射光によって生じる単一散乱スペckル場の統計的性質は、基礎と応用の両面からすでに広く研究されている。しかし、照明光自身が散乱光である場合に生じる二重散乱スペckルや、高濃度コロイド溶液や生体などから生じる多重散乱スペckルの動特性に関する研究は、その理論的解析の複雑さにより、あまり進んでいないのが現状である。本論文は、動的二重散乱および多重散乱スペckルの統計的特性を比較的簡単なモデルを用いて理論解析し、散乱体の運動とそこから生じるスペckルとの基本的な関係を明らかにしたものである。

第1章では、二重散乱および多重散乱スペckルに関する研究の歴史的背景について説明したのち、本論文の概略が述べられている。

第2章では、現在までに得られている単一散乱スペckルについての基本となる理論を解説している。ここでは、スペckル場の形成過程を述べた後、光の場の複素振幅に統計的手法を導入することにより、さまざまなスペckルの特性を記述できることを示している。

第3章では、光ファイバプローブを用いてレーザ光を運動粗物体に照射したときに検出される、スペckル強度ゆらぎのパワースペクトルを理論的に求めている。多モードファイバから出射したレーザ光はスペckルを形成するため、照射ファイバの特性はパワースペクトルに大きな影響を及ぼす。ただし、スペクトル幅と物体速度の比例関係は保たれるため、速度測定に光ファイバプローブが利用可能であることが確認される。

第4章、第5章および第6章では、時間的に変動しているスペckルパターンを粗

物体に照射したとき、その回折場および像面に生じる二重散乱スペckルの強度ゆらぎを、理論と実験の両面から解析している。レーザービームを面内移動している透明な拡散板に照射し、透過光が形成する動的スペckルパターンで2枚目の運動拡散板を照射することによって、時間変動する二重散乱スペckルが生じる。自由伝搬系においては、1枚目の拡散板で与えられる照明光のゆらぎの影響は取り除くことができない。それに対し、結像光学系を用いた場合、焦点を合わせた拡散板の速度を他の拡散板の動きに影響されずに測定できることが示されている。

第7章および第8章では、複数枚の移動拡散板によって散乱された光が回折場および像面に作る多重散乱スペckルの性質を理論的に研究している。まず、散乱回数の増加がスペckルパターンに及ぼす影響を強度の時空間相関関数から解析すると、強度ゆらぎの速さは増加し、パターンは並進運動からボイリング運動へと変化していくことがわかる。さらに、回折場の多重散乱スペckルの動きは散乱体同士の相対速度に依存し、全体としての運動に対してはほとんど影響されないのに対し、結像系で得られる多重散乱スペckルからは、速度にばらつきのある拡散板全体の平均速度が測定可能であるという結果が得られている。

第9章および第10章では、第8章で得られた結果を実際の多重散乱体である移動微粒子懸濁液で実験的に確認し、さらに二波長スペckル相関法を応用した新たな計測法が提案されている。懸濁液のような三次元物体からのスペckルは、散乱体内部に形成される散乱体積の広がり動的スペckルの性質を決定する。散乱体積が大きいときには、粒子のブラウン運動による影響が支配的となるのに対し、散乱体積を小さく抑えると、粒子が全体として移動する速度の影響を強く受ける。この速度依存性が、複数の移動拡散板によるモデルと定性的に一致していることが示される。また二波長相関法では、測定した時間的相互相関関数は小さな散乱体積からの影響しか受けられないため、粒子濃度が増加してもブラウン運動の影響を受けずに粒子の平均移動速度の測定が可能となることが明らかにされている。

第11章では、本論文を総括し、新たに得られた知見がレーザー光による高密度散乱媒質の特性解析に寄与することが述べられている。

これを要するに、著者は、従来複雑な理論やシミュレーションに頼らざるを得なかった二重および多重散乱スペckルの動特性解析を、統計モデルによって比較的容易に行うことを可能とし、さらに、その解析結果を新たな速度測定法への応用に結び付けており、統計光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、博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。