

学位論文題名

Statistical Properties of Unconventional Speckles

(特異なスペックルの統計的特性)

学位論文内容の要旨

近年、自然界に存在する多くの複雑な形状・構造を定量的に記述する概念として、フラクタルが注目されている。光学の分野では、フラクタル構造と相互作用する光波の諸特性に関する研究が盛んに行われている。それらは、大きく二つの流れに大別される。第1は、光をプローブとした、フラクタル構造の決定に関するものである。第2は、フラクタルと出合った光波自体の特異な性質の研究である。一方、ランダムな物体からのコヒーレントな光の散乱場にはスペックルと呼ばれるランダムな干渉パターンが生じることが知られており、その性質の解析には統計的な手法が用いられている。

本研究は、ランダムなフラクタルによる光の回折・散乱現象によって生じる特異なスペックルを、確率的物理過程における秩序現象としてとらえ、その統計的解析を行い、従来からの典型的なスペックルの統計との比較検討を通して、その秩序性を示すことを第1の目的としている。特に、ある種のフラクタルによる回折場のスペックルに生ずるクラスター現象に着目し、その定量的解析を重点的に行っている。さらに、従来知られていない、いくつかの特異なスペックル現象の統計的特性を明らかにすることを第2の目的としている。本論文は、7章で構成されている。

第1章では、本研究の背景となるフラクタルによる光波の散乱に関する研究の動向について概説し、本研究の目的、および本論文の概要について述べている。

第2章では、ランダムフラクタルの回折場を数値計算により求め、その1次統計について、従来のガウスのスペックルと比較している。まず、ランダム性を有するフラクタルの構成法とその数学的定義、および次元の定義を与え、そのフラクタルの遠方回折場における複素振幅を定式化している。その式にもとづいて数値計算された回折場に対する1次統計について、強度、位相および複素振幅の確率密度、およびコントラストを求め、通常のガウス統計に従うスペックルとの比較検討を行っている。また、物体のフラクタル次元とランダム度に対するスペックル統計の変化を解析し、回折場が物体の不規則性を敏感に反映することを示している。さらに、物体の規則性によるスペックルコントラストの強調現象を示し、場の複素振幅の非円形性との関係を考察している。

第3章では、第2章で議論したフラクタルによる回折場スペックルのクラスター現象に着目し、ラキユナリティを用いたスペックルの構造解析を行っている。ラキユナリティは分布のゆらぎを表す統計量で、フラクタル次元と同様にフラクタルを定量的に評価する量として知られている。まず、定常なガウスのスペックルの強度分布と、物質の相転移時に見られるパーコレーションフラクタルに対するラキユナリティの振る舞いの違いを示したのち、フラクタルによるクラスター化したスペックルに対して、ラキユナリティを評価している。その

結果、このスペックルが通常のガウスのスペックルに比べて大きな強度変動成分を持つことを示し、クラスターの存在を定量的に明らかにしている。さらに、クラスターを引き起こす原因についても考察し、それが物体の円環状スリット構造による回折現象にあることを示唆している。

第4章では、スペックルのクラスター現象に対する理論的および実験的検証を行っている。まず、van Cittert-Zernike の定理を用いて、スペックルの強度相関が物体の照射形状により一義的に決まることを示し、円環状スリットの強度分布を持つランダムな物体によるスペックルがリング状の長い相関の尾部を持つことを理論的に示している。さらに、スリガラスを円環状スリットによりマスクした物体によるレーザー光の散乱実験により、遠方界に生じるスペックルにひも状のクラスター構造が観測され、その強度相関関数が理論予測の通りに強いリング状の尾部を持つことを示している。これらの結果に基づき、フラクタルによるスペックルのクラスター構造の原因を、フラクタル物体と円環状スリットの構造上の類似性から考察している。この章の結論では、さまざまな相関関数を持つスペックルを、物体の照射強度分布を制御することにより生成することが可能であることを強調している。

第5章では、ある特定の照射光強度分布のもとで散乱場のスペックルに現れるフラクタル的性質について議論している。フラクタル凝集体の密度相関は、ベキ関数で与えられ、その凝集体による小角散乱光強度分布が、ある散乱角の範囲で平均的にベキ関数により近似されることが知られている。本章では、この議論を逆にたどり、ベキ関数的強度分布を持つ物体が、ベキ的相関を有するフラクタル的なスペックルを生成することを明らかにしている。具体的には、フラクタル物体の回折パターンを用いて拡散板をベキ的に照射し、その結果遠方に生じるスペックルの強度相関を理論的に解析している。その際フラクタルの回折場を Fisher-Burford の近似式により表し、拡散板が十分粗いという仮定のもとで、フラクタルと拡散板による2重回折場スペックルの強度相関を理論的に導出している。その結果、物体のフラクタル次元が1と2の間である場合に、最終的なスペックルがベキ的相関を持つフラクタルとなることを明らかにしている。

第6章では、第2章において指摘された高コントラストなガウスのスペックルの議論を、より一般的なモデルを用いて展開している。まず、議論の基礎となるガウスのスペックルの1次統計について、複素振幅、強度および位相の確率密度、およびコントラストの最も一般的な式を示している。次に、振幅分布の円形性と非回折成分を表す2つのパラメータを定義し、強度の確率密度とコントラストが、この2つのパラメータに対しどのように依存するかを示し、コントラストの強調現象が起こる条件を理論的に明らかにしている。次に、物体面内にランダムに分布する開口による回折場スペックルの振幅分布を理論的に導出し、物体に中心対称性が存在する場合に、その遠方回折場のスペックル場にコントラストの強調現象が起こり、その強度分布が十分発達した典型的なガウスのスペックルが示す負指数強度分布からのずれを生じることなどを明らかにしている。さらに、円形領域内に円形微小開口がランダムに分布し、その一部あるいは全部が中心対称性を持つ物体による回折光が遠方界に生成するスペックルについて、コントラストおよび強度の確率密度を実験的に求め、理論が予測するコントラストの強調現象や、負指数強度分布からの逸脱が起こることを示している。

最後に、第7章では本論文で行われた議論を総括し、結論を述べている。

学位論文審査の要旨

主査	教授	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
副査	助教授	魚住純

学位論文題名

Statistical Properties of Unconventional Speckles

(特異なスペックルの統計的特性)

近年、自然界に存在する多くの複雑な形状・構造を定量的に記述する概念として、フラクタルが注目されている。光学の分野では、フラクタル構造と相互作用する光波の諸特性に関する研究が盛んに行われている。それらは、主にフラクタルと出合った光波の特異な性質の解明と、それを利用したフラクタル構造の決定に関するものである。一方、ランダムな物体からのコヒーレントな光の散乱場にはスペックルと呼ばれるランダムな干渉パターンが生じることが知られており、その性質の解析には統計的な手法が用いられている。

本論文は、ランダムなフラクタルによる光の回折・散乱現象によって生じる特異なスペックルを、確率的物理過程における秩序現象としてとらえ、その統計的解析を行い、従来からの典型的なスペックルの統計との比較検討を通して、その秩序性を示すことを目的としている。特に、ある種のフラクタルによる回折場のスペックルに生ずるクラスター現象に着目し、その定量的解析を重点的に行っている。さらに、従来知られていない、いくつかの特異なスペックル現象の統計的特性を明らかにしている。

第1章では、本研究の背景となるフラクタルによる光波の散乱に関する研究の動向について概説し、本研究の目的、および本論文の概要について述べている。

第2章では、ランダムフラクタルの回折場を数値計算により求め、その1次統計について、従来のガウスのスペックルと比較しており、その回折場が物体の不規則性を敏感に反映することを示している。さらに、物体の規則性によるスペックルコントラストの強調現象を示し、場の複素振幅の非円形性との関係を考察している。

第3章では、フラクタルによる回折場スペックルのクラスター現象に着目し、分布のゆらぎを表す統計量であるラキュナリティを用いたスペックルの構造解析を行っている。その結果、このスペックルが通常のガウスのスペックルに比べて大きな強度変動成分を持つことを示し、クラスターの存在を定量的に明らかにしている。さらに、クラスターを引き起こす原因についても考察し、それが物体の円環状スリット構造による回折現象にあることを示唆している。

第4章では、スペックルのクラスター現象に対する理論的および実験的検証を行っており、円環状スリットの強度分布を持つランダムな物体によるスペックルがリング状の長い相関の尾部を持つことを理論的に示している。さらに、スリガラスを円環状スリットによりマスクした物体によるレーザー光の散乱実験により、遠方界に生じるスペックルにひも状のクラスター構造が観測され、その強度相関関数が理論予測の通りに強いリング状の尾部を持つことを示している。これらの結果に基づき、フラクタルによるスペックルのクラスター構造の原因を、フラクタル物体と円環状スリットの構造上の類似性から考察している。

第5章では、フラクタル物体の回折パターンに生じるベキ関数的強度分布によって拡散板を照射することによって遠方場に生じるスペックルの強度相関を理論的に解析している。その結果、物体のフラクタル次元が1と2の間である場合には、最終的なスペックルパターンがベキ的相関を持つフラクタルとなることを明らかにしている。

第6章では、第2章において指摘された高コントラストなガウスのスペックルの議論を、より一般的なモデルを用いて展開している。具体的には、物体面内にランダムに分布する開口による回折場スペックルの振幅分布を理論的に導出し、物体に中心対称性が存在する場合には、その遠方回折場のスペックル場にコントラストの強調現象が起こり、その強度分布が十分発達した典型的なガウスのスペックルが示す負指数強度分布からのずれを生じることなどを明らかにしている。さらに、円形領域内に円形微小開口がランダムに分布し、その一部あるいは全部が中心対称性を持つ物体による回折光が遠方界に生成するスペックルについて、コントラストおよび強度の確率密度を実験的に求め、理論が予測するコントラストの強調現象や、負指数強度分布からの逸脱が起こることを示している。

第7章では本論文で行われた議論を総括し、結論を述べている。

これを要するに、著者は、特殊な形状を有する物体によるスペックル場の統計的特性について、従来知られているガウスのスペックルの統計との比較において有益な知見を得ており、統計光学及び物理光学の進歩に寄与するところ大である。

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。