

Statistical Properties of Laser Speckles with Long Spatial Correlations

（長い空間相関を有するレーザスペックルの統計的特性）

学位論文内容の要旨

レーザの出現以来、この新しい光源は様々な光学技術に応用されてきた。しかし、その高いコヒーレンスゆえに、物体表面の微小な不規則性によってランダムな干渉現象が発生し、ランダムな明暗の斑点模様、すなわちスペックルが生じることがしばしば問題となってきた。一方、このスペックルには、物体表面の形状や統計的性質およびその動的な状態の情報が含まれていることから、スペックルを応用した光計測、光情報処理の手法が多く開発されてきた。その中には、スペックルの空間的な相関特性を利用したものも多い。これらの応用においては、スペックルの明るい斑点には平均的な大きさ（平均スペックル径）が存在し、その大きさがスペックルの空間相関の広がりを示すものとされてきた。これに対し、最近、ある種の光学系においては平均的スペックル径よりも長い空間相関が現れることが理論的に明らかとなってきた。そのようなスペックルは、スペックルの空間相関特性を利用した光計測法などの応用の観点から重要である。本研究は、そのような長い空間相関を有するスペックルについて、特定の観測面に関して導出されている理論的予測を実験により実証し、その性質を明らかにすると共に、より広い3次元空間に観測領域を拡張して実験および理論を展開することにより、スペックル場の3次元相関特性を明らかにすること、さらに、それらに基づいて、スペックルの空間相関特性を散乱場のフラクタル的性質の観点から考察することを目的としている。本論文は8章から構成されている。以下に、各章の概要を述べる。

第1章では、スペックルとフラクタルの研究を概観し、スペックルの研究における本論文の位置づけを行うと共に、本論文の構成について述べている。

第2章では、本論文で対象とするガウス統計に従うスペックルについての基礎的性質について概説し、スペックル場の1次統計および空間相関特性を与える2次統計について基礎的概念の導入を行っている。

第3章では、長い空間相関を有するスペックルが発生する2つの状況について、理論的背景をまとめている。すなわち、第1の状況として円環スリットで照射された粗面の光学的フーリエ変換面を、また第2の状況としてランダムなフラクタルによる散乱場に置かれた粗面の光学的フーリエ変換面を考え、これらの状況におけるスペックルの空間相関に関する理論式を与えている。

第4章および第5章は、第1の状況によって生じるスペックルの空間相関特性について実験及び理論的考察を行っている。まず第4章では、円環スリットで照射された粗面の光学的フーリエ変換面には、鎖状あるいはクラスタ状の様相を呈するスペックルが現れ、それが平均スペックル径よりも大きな空間相関の現れであることを示すと共に、円環スリット以外の幾つかの異なる照射条件を用いることにより種々の鎖状スペックルが生じることを示している。また、鎖状スペック

ルを生成する計算機シミュレーションを行い、円環スリットによる鎖状スペックルの発生機序について考察を行っている。さらに、粗面の粗さが比較的小さい場合には、光軸から放射状に延びる鎖状干渉パターンが現れ、粗面の粗さの増加に伴ってそれが鎖状スペックル構造へと変化することを実験により明らかにしている。

第5章では、スペックルの観測領域を粗面の光学的フーリエ変換面を含む3次元空間に拡張して考察を行っている。まず、レンズによるフーリエ変換光学系に生じるスペックルの相関特性を理論的に導き、それに基づいて、理想的な円環スリットを用いた場合にはレンズの後方において軸方向に完全な空間相関が現れること、すなわち軸方向に全く強度が変化しないスペックルパターンが生じることを理論的に示している。さらに、円形開口やスリット幅の異なる円環スリットを用いて実験を行い、円環スリットによるスペックル場には円形開口の場合よりも長い軸方向相関が現れること、またスリット幅が狭いほどその相関長が長くなることを明らかにしている。また、軸方向相関の定常性と対称性に関しても理論および実験による考察を行っている。

第6章および第7章では、第2の状況によって生じるスペックルの空間相関について考察を行っている。まず、第6章では、フラクタル性を持つランダム開口を作成し、それによるスペックル場を粗面に照射して二重散乱スペックル場を生成し、それを粗面の光学的フーリエ変換面において観測してその特性を解析している。また、比較のため、ランダムフラクタル開口の代わりに非フラクタル開口である円形開口および円環スリット開口を用いた場合のスペックル、および粗面を直接円形開口で照射して生じる最も典型的なスペックルについても考察を行っている。その結果、フラクタル開口による二重散乱スペックルは、通常のスペックルと異なり、大小さまざまな斑点模様が存在していて平均的スペックル径が定義できないという、フラクタル特有の性質を有する強度分布となることを明らかにしている。さらに、その自己相関関数を求め、それがフラクタル的長距離相関を有するべき関数に近似できることを明らかにするとともに、開口のフラクタル次元が増加するに従ってより強い長距離相関が現れ、スペックルのフラクタル次元も増加することを示している。また、非フラクタル開口である円環スリットを用いた場合にも、生じるスペックル場にはフラクタル性が現れることを示し、フラクタルスペックルの発生条件について考察を行っている。

第7章では、前章での考察を粗面の光学的フーリエ変換面を含む3次元空間に拡張して実験的考察を行っている。まず、レンズからの伝搬距離の異なる幾つかの観測面においてスペックルを観測し、異なる伝搬距離においてもフーリエ変換面と統計的にはほぼ同じ強度パターンが生じることを示し、光軸に垂直な面内でのフラクタル性はフーリエ変換面を含む3次元空間に広がっていることを明らかにしている。さらに、光軸方向の強度相関関数を求め、その相関にもべき関数的振る舞いが現れるものの、そのべきの指数は光軸に垂直な方向に観測される強度のべき指数とは異なることを明らかにしている。このことは、スペックル場が光軸方向にもフラクタル性を有しており、そのフラクタル次元は光軸に垂直な方向とは異なること、すなわち場のフラクタル性には異方性が存在することを示している。

最後に第8章では、本論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	永 井 信 夫
副 査	教 授	三 島 瑛 人
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 Laser Speckles with Long Spatial Correlations

(長い空間相関を有するレーザスペックルの統計的特性)

レーザは、その出現以来様々な光学技術に応用されてきた。しかし、その高いコヒーレンスゆえに、物体表面の微小な不規則性によって生じるランダムな干渉パターン、すなわちスペックルがしばしば問題となってきた。一方、このスペックルには、物体表面の形状や統計的性質およびその動的な状態の情報が含まれていることから、スペックルを応用した光計測、光情報処理手法が多く開発されてきた。これら従来の解析と応用においては、一般にスペックルの明るい斑点には平均的な大きさ（平均スペックル径）が存在し、その大きさがスペックルの空間相関の広がりを示すものとされてきた。これに対し、最近、ある種の光学系においては平均的スペックル径よりも長い空間相関が現れることが理論的に明らかとなってきた。そのようなスペックルは、スペックルの空間相関特性を利用した光計測法などの応用の観点から重要である。

本論文は、長い空間相関を有するスペックルについて、ある観測面に対する理論的予測を実験により実証し、その性質を明らかにすると共に、観測領域を3次元空間に拡張して実験および理論を展開し、スペックル場の3次元相関特性を明らかにすること、さらに、スペックルの空間相関特性を散乱場のフラクタル的性質の観点から考察することを目的としている。本論文の成果は以下のように要約される。

1. 円環スリットで照射された粗面の光学的フーリエ変換面には、鎖状あるいはクラスタ状の様相を呈するスペックルが現れ、それが平均スペックル径よりも大きな空間相関の現れであることを示すと共に、円環スリット以外の幾つかの異なる照射条件を用いることにより、特性の異なる種々の鎖状スペックルが生じることを示している。また、粗面の粗さが比較的小さい場合には、光軸から放射状に延びる鎖状干渉パターンが現れ、粗面の粗さの増加に伴ってそれが鎖状スペックル構造へと変化することを実験により明らかにしている。

2. レンズによるフーリエ変換光学系に生じるスペックルの相関特性を理論的に導出し、それに基づいて、理想的な円環スリットの場合にはレンズの後方において軸方向に完全な空間相関が現れること、すなわち軸方向に全く強度が変化しないスペックパターンが生じることを示している。さらに、円形開口やスリット幅の異なる円環スリットを用いて実験を行い、円環スリットに

よるスペックル場には円形開口の場合よりも長い軸方向相関が現れること、またスリット幅が狭いほどその相関長が長くなることを明らかにしている。

3. フラクタル性を持つランダム開口により発生したスペックル場を粗面に照射して二重散乱スペックル場を生成し、それを粗面の光学的フーリエ変換面において観測してその特性を解析している。その結果、このスペックルは、大小さまざまな斑点模様が存在していて平均的スペックル径が定義できないという、フラクタル特有の様相を呈することを示すとともに、その自己相関関数がフラクタル的長距離相関を有するべき関数に近似できること、および開口のフラクタル次元が増加するに従ってより強い長距離相関が現れ、スペックルのフラクタル次元も増加することを明らかにしている。また、非フラクタル開口である円環スリットを用いた場合にも、生じるスペックル場にはフラクタル性が現れることを示し、フラクタルスペックルの発生条件について考察を行っている。

4. 二重散乱場におけるフラクタルスペックルの発生に関して、粗面の光学的フーリエ変換面を含む3次元空間に拡張して実験的考察を行っている。その結果、レンズからの伝搬距離の異なる幾つかの観測面において、フーリエ変換面と統計的にはほぼ同じ強度パターンが生じることを示し、光軸に垂直な面内でのフラクタル性はフーリエ変換面を含む3次元空間に広がっていることを明らかにしている。さらに、光軸方向の強度相関関数にもべき関数的振る舞いが現れるものの、そのべきの指数は光軸に垂直な方向での強度のべき指数とは異なること、すなわち、スペックル場のフラクタル性が光軸方向を含む3次元領域に広がっており、そのフラクタル性には異方性が存在することを明らかにしている。

これを要するに、本論文は、円環状照射とフラクタルからの散乱場による照射という2つの異なる粗面照射条件によって発生する長い空間相関を有するレーザスペックル現象の統計的特性を理論的・実験的に明らかにすることにより、スペックル場の相関特性とフラクタル物体による散乱場の特性に関する有益な多くの新知見を得ており、光物理学及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。