

Optical Diffraction Properties of Fractal Structures

(フラクタル構造による光回折の諸特性)

学位論文内容の要旨

マンデルブロによりフラクタル幾何学が提案されて以来、フラクタル構造は自然科学の様々な分野で確認され、研究がなされてきた。その結果、自然界における複雑な構造を持つ物体に対するフラクタル次元を用いた定量化が様々な分野で行われている。光学の分野では、フラクタル構造が光波に及ぼす作用という立場と、フラクタル画像を対象にした画像処理という立場より、多くの研究がなされている。前者の観点からは、光波による物体のフラクタル性の計測が行われている。また、フラクタル的特徴をもつ光の場を用いた物体の光計測、光情報処理の可能性も示唆されている。

本研究は、光波を用いたフラクタル構造の解析という観点、およびフラクタル的特徴をもつ光波の応用の可能性を探るという観点から、様々な性質を持つフラクタル構造からの回折現象を明らかにすることを目的としている。本論文は10章で構成されている。以下に各章についての概要を述べる。

第1章では、フラクタル幾何学の歴史的背景とフラクタル構造が波動に与える作用に関連した研究を概説し、本研究の目的について述べている。

第2章と第3章は、本研究の基礎となる事柄をまとめている。第2章では、フラクタル幾何学について、その特徴を解説している。具体的には、フラクタルにおける長さの概念と自己相似性、スケーリング性、およびそれらの関係を、簡単なモデルを用いて定性的かつ簡潔に述べている。さらに、フラクタル構造の定量化の手段として定義されたフラクタル次元について、数学的な概念とその定義の説明を行っている。

第3章では、フラクタル構造の光波に対する作用についての基礎的なモデルについて、規則的およびランダムなフラクタル物体をそれぞれ漸化式と物体の相関関数とで与えることにより、遠方場におけるそれらの回折場の性質を簡単にまとめている。

第4、5、6章では、フラクタル構造によるフレネル回折場の特性について議論している。第4章では、1次元的な規則的フラクタルからのフレネル回折場について数値計算による解析を行っている。フレネル回折においては光波の伝搬距離が重要なパラメータであることから、光波の伝搬に対する強度の変化を光軸上において調べ、フラクタルからの回折場特有の性質を明らかにしている。次に、回折光強度

分布が光軸に垂直な観測面における横方向の拡大に対して自己相似であることを示し、この性質を横方向のスケーリング性と名付けている。この様な回折場における自己相似性の定量的評価のために自己相似度を定義し、これによる回折パターンの評価を行っている。また、フレネル回折光による物体の次元計測についても議論している。

第5章では、スケーリング構造を有する物体からのフレネル回折場が、伝搬距離の異なる2つの観測面の間でスケーリングであることを理論的に示し、このスケーリング性を縦方向のスケーリング性と名付け、1次元フラクタルに対し数値計算によるシミュレーションを用いてその性質の確認を行うとともに、自己相似度を用いてその定量的評価を試みている。そして、横方向および縦方向の2つのスケーリング性を満たす4種類の子午面上の強度分布を求め、フレネル回折領域における場のスケーリングの全体像を可視化している。

第6章では、質量分布に自己相似性を持つ物体である質量フラクタルと、自己相似性を有する境界を持つ物体である面フラクタルの2種類の2次元フラクタルについて、第4、5章で議論したスケーリング性を実験と計算により確認し定量的評価を行っている。さらに二重のスケーリング性を持つ物体からのフレネル回折場は縦方向、横方向それぞれに二重のスケーリング性を持つことを理論的に明らかにし、その確認を行っている。また、フレネル回折光強度分布による2次元フラクタル物体のフラクタル次元計測の可能性を調べた結果、フラウンホーファー回折領域における場合とほぼ同じ振る舞いが確認され、フレネル回折光を用いたフラクタル次元計測の有効性を示している。

第7、8、9章では、主としてフラクタル構造によるフラウンホーファー回折場の特性を取り扱っている。第7章では、規則的な面フラクタルとそのフラウンホーファー回折場とを与える漸化式を理論的に導出し、それによって得られたフラクタルの回折光強度分布に対し、自己相似性に関する議論を行っている。さらに、回折光強度からの開口境界部分のフラクタル次元の計測に関する議論を様々な方法を用いて行っている。

第8章では、境界部がランダムな面フラクタルからのフラウンホーファー回折光強度分布に関して、境界部のランダム度の度合いに対するフラウンホーファー回折パターンの性質の変化を考察している。さらに、ランダムな境界を持つフラクタルからのフレネル回折領域の強度分布を調べることにより、フレネル回折光によるフラクタル次元計測の適用範囲に関する考察を行っている。境界部にランダムなフラクタル性を持つ物体は、表面の処理状態の悪い光学機器のモデルと考えられる。したがって、その回折場の解析はこの様な物体の定量化の手法として意義がある。

第9章では、自然界に存在する物体の現実的モデルとして、質量フラクタルの表面が面フラクタルである結合物体を考え、それによるフラウンホーファー回折光強度分布を調べ、結合物体における2種類のフラクタル性が回折場に及ぼす影響を、実験とコンピュータシミュレーションにより明らかにしている。

最後に、第10章において本研究を総括している。

学位論文審査の要旨

主査	教授	朝倉利光
副査	教授	北島秀夫
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

Optical Diffraction Properties of Fractal Structures

(フラクタル構造による光回折の諸特性)

マンデルブロによりフラクタル幾何学が提案されて以来、自然科学の様々な分野で、フラクタル構造に関する研究がなされてきた。その結果、自然界における複雑な物体に対するフラクタル次元を用いた定量化が様々な分野で行われている。光学の分野では、フラクタル構造が光波に及ぼす作用という立場と、フラクタル画像を対象にした画像処理という立場より、多くの研究がなされている。前者の観点からは、光波による物体のフラクタル性の計測が行われている。また、フラクタル的特徴をもつ光の場を用いた物体の光計測、光情報処理の可能性も示唆されている。以上を背景として、本論文では、質量フラクタルと面フラクタルおよびそれらの結合物体などの様々なフラクタル構造からの回折現象を理論的および実験的に研究している。

第1章では、フラクタル構造が波動に与える作用に関連した研究を概説し、本研究の目的と各章の概要について記述している。

第2章では、本研究の基礎となるフラクタル幾何学について、その特徴を解説している。

第3章では、フラクタル構造の光波に対する作用についての基礎的なモデルについて、規則的およびランダムなフラクタル物体をそれぞれ漸化式と物体の相関関数とで与えることにより、遠方場におけるそれらの回折場の性質を簡単にまとめている。

第4章では、1次元的な規則的フラクタルからのフレネル回折場について、数値計算により光波の伝搬に対する光軸上の強度の変化を調べ、フラクタルからの回折場特有の性質を明らかにしている。次に、光軸に垂直な観測面での強度分布が横方向の拡大に対して自己相似であることを示し、これを横方向のスケーリング性と名付けている。さらに回折場の自己相似性の定量的評価のために自己相似度を定義し、その評価を行っている。また、フレネル回折光による物体の次元計測についても議論をしている。

第5章では、スケーリング物体からのフレネル回折場が、伝搬距離の異なる2つの観測面の間でスケーリングであることを理論的に示し、この性質を縦方向のスケーリング性と名付け、1次元的フラクタルに対し数値計算によりその性質の確認を行うとともに、自己

相似度を用いた定量的評価を試みている。そして、横方向および縦方向の2つのスケールリング性を満たす4種類の子午面上の強度分布を求め、フレネル回折領域におけるスケールリング性の全体像を可視化している。

第6章では、質量分布が自己相似な質量フラクタルと、自己相似性を有する境界を持つ面フラクタルの2種類の2次元フラクタルについて、第4、5章で議論したスケールリング性を実験と計算により確認し、定量的評価を行っている。さらに二重のスケールリング性を持つ物体からのフレネル回折場は縦方向、横方向共に二重のスケールリング性を持つことを理論的に明らかにし、その確認を行っている。また、フレネル回折光強度分布による2次元フラクタル物体のフラクタル次元計測の有効性を、数値計算により示している。

第7章では、規則的な面フラクタルとそのフラウンホーファー回折場とを与える漸化式を理論的に導出し、それによって得られたフラクタルの回折光強度分布の自己相似性に関する議論を行っている。さらに、回折光強度からの開口境界部分のフラクタル次元の計測に関する議論を様々な方法を用いて行っている。

第8章では、境界部がランダムな面フラクタルからのフラウンホーファー回折光強度分布に関して、境界部のランダム度の度合いに対するフラウンホーファー回折パターンの性質の変化を考察している。さらに、ランダムな境界を持つフラクタルからのフレネル回折領域の強度分布を調べることにより、フレネル回折光によるフラクタル次元計測の適用範囲に関する考察を行っている。

第9章では、より一般的なフラクタル物体のモデルとして、質量フラクタルの表面が面フラクタルである結合物体を考え、結合物体における2種類のフラクタル性が回折場に及ぼす影響を、実験とコンピュータシミュレーションにより明らかにしている。

第10章では、本研究によって得られた結果を総括し、結論を述べている。

これを要するに、著者は、さまざまなフラクタルモデルからの回折現象を理論的および実験的に解析することにより、フラクタルによる光回折の特性、および回折場からのフラクタル次元計測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があるものと認める。