

学 位 論 文 題 名

Optical Studies on Random Media  
with Fractal Structure

(フラクタル構造をもつランダム媒質の光学的研究)

学位論文内容の要旨

フラクタルとは、Mandelbrot がスケーリングな性質をそなえた様々な構造に対して与えた総称である。フラクタルには、その任意の一部分が全体と同様な形をしている、したがって、それを特徴づける特定の長さが存在しないという性質がある。これまでのところ、フラクタルのスケーリング理論は、微視的領域から巨視的宇宙にわたる多様な現象を記述し、特徴づけるのに成功してきた。

光学の領域においては、つぎの2点において、フラクタルへの関心が高まっている。すなわち、一つはフラクタル構造の研究に有効な方法として光波を広く利用すること、もう一つは、フラクタル構造との相互作用を通して、光波それ自体を研究することである。この第二のアプローチを強く動機づけているのは、フラクタルによって回折・散乱された光波 (diffractal) が、通常の散乱場とは異なった注目すべき性質を示すという事実である。しかし、これまでフラクタル光学の研究に膨大な努力が払われたにも関わらず、いくつかの特異的な実験結果を説明する一般的・統一的理論はまだ現れていない。一方、現在の諸理論から導かれる多くの予測が実験による検証を待っている。

本論文は、この魅力ある研究領域における一つの総合の試みとして、多様なフラクタル構造についての光学的研究の結果をまとめたものである。その中心課題は、新しい diffractal 特性を発見すること、およびフラクタル次元を測定するための新しい方法を開発することである。その範囲は、フラクタル的外観を呈している粗面からの光散乱の問題から、フラクタル的相関を持つ平面および空間構造の問題に渡っている。本論文の構成は、下記のとおりである。

第1章では、光波とフラクタル構造との相互作用に関するこれまでの研究について概説し、さらに本論文の具体的内容と、この領域に対するその新しい寄与について述べる。

第2章は、2次元ユークリッド空間上に存在するフラクタル構造の次元の定量化を扱っている。まず、フラクタル次元の光学的測定法として、従来の光回折的アプローチに代わる新しい可能性を二つ示す。これらの手法は、光学的自己相関関数に基づくもので、規則的および統計的な自己相似フラクタルの2次元図形を用い、実験的に比較、検証している。さらにこの章では、平面的フラクタル図形の定量化のためのもう一つの新しい方法を導入する。この新しい手法は、図形の角度パワースペクトルが示すスケーリングな振舞い

に基づくもので、実際の凝集体の図形とコンピュータによりシミュレートしたランダム飛跡の2種類のランダムフラクタル構造に適用して、その有効性を確認している。また、この章では、フラクタル次元の光学的測定における誤差の評価の問題に触れている。その動機は、測定精度の物理的限界および具体的実験自体に起因する誤差についての厳密な研究が不足していることによる。すなわち、光学的実験に起因する外的要因が誤差へ及ぼす影響、たとえば、対象物体の有限な大きさ、物体の構造単位の大きさと形状、実験に固有の加算的ノイズの影響などを定量的に評価するとともに、平均スケーリング則からのズレとして起きる空隙性 (lacunarity) の影響についても考察している。

第3章では、3次元ユークリッド空間上の実際の構造から生ずる diffractal を取り扱う。特に、粒子のクラスタからなる散乱媒質による光散乱現象を記述することが目的である。この種の構造からの光散乱の研究は、従来、粒子クラスタの分布が粗である特殊な場合に限られ、多重散乱現象の効果が無視されていた。本研究では、この新しい散乱領域を対象としており、フラクタル凝集体の集合媒質と光との相互作用において生じる特異な性質について論じている。まず、フラクタル・ゲル中の弾道的透過光が興味ある振舞いを示すことを明らかにしている。また、散乱光の平均自由行程とフラクタル・ゲル内の平均クラスタサイズとの関係に基づき、凝集ゲルのフラクタル次元を定量化するための新しい実際的方法を提案している。

この章では、つぎにランダム媒質からの光の増強された後方散乱 (enhanced backscattering) に関する諸現象、およびフラクタル凝集体の場合におけるその特異な振舞いについて組織的に考察を行っている。特に、異なる2種類の一樣なランダム媒質を用いて詳細な実験を行い、その結果を基準として、フラクタル媒質からの散乱の振舞いを論じている。その結果、物体のフラクタル性が多重散乱の領域にも現れること、そして後方散乱の増強という現象においては、それが散乱強度の角度分布のクロスオーバーのしかたに反映されることを実験的に明らかにしている。この研究は、この現象がフラクタル次元の定量化のための実際的な手法を与えるという点で意義のあるものである。特に、前方散乱と比較した場合、両者が互いに補完的な関係にあるということが多くの実際的場面において大いに注目されよう。

第4章では、小さな粗さを持つ粗面からの光散乱を扱っている。はじめに、新しく、簡単かつ実際的な粗さ測定法を提案し、実験的にそれを検証している。この方法は、非線形的に面積が増加する一連の空間フィルタを通して散乱光の積分強度を測定し、その振舞いから粗面の情報を引き出すものである。さらに、この新しい表面粗さ測定法を、ウェーブレット変換理論に基づく新しいアプローチにより説明している。すなわち、ウェーブレット領域での積分強度は、表面形状の自己相関関数のウェーブレット変換とみなすことができ、したがって、その逆変換により自己相関関数を求めることができる。表面形状の特徴的長さに対応できるウェーブレット変換の「顕微鏡」的作用を明らかにしている。最後に、自己相似的表面および自己アフィンの表面に対してこの新しい手法を試みている。前者の場合、表面のスケーリングな振舞いはウェーブレット変換においても現れる。また、より実際的な後者の場合には、ウェーブレット変換が表面形状の特徴的な長さ (topothesy) を映し出すことを明らかにしている。

第5章では、本論文によって得られた結果を総括し、結論を述べる。

# 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  | 武笠幸一 |
| 副査 | 教授  | 小柴正則 |
| 副査 | 助教授 | 魚住純  |

## 学位論文題名

### Optical Studies on Random Media with Fractal Structure

(フラクタル構造をもつランダム媒質の光学的研究)

近年、自然界の種々の現象や形状がフラクタルの概念によって記述できることが明らかとなり、光学の分野においても、フラクタル構造と光波との相互作用に対する関心が高まっている。本論文は、多様なフラクタル構造を対象として、フラクタル構造が光波に及ぼす影響、及びフラクタル特性の光学的測定についての研究の結果をまとめたものである。

第1章では、光波とフラクタル構造との相互作用に関するこれまでの研究について概説し、さらに本論文の目的と各章の構成について述べている。

第2章は、2次元ユークリッド空間上に存在するフラクタル構造の次元の定量化を扱っている。まず、フラクタル次元の光学的測定法として、従来の光回折的アプローチに代わる新しい可能性を二つ示している。これらの手法は、光学的自己相関関数に基づくもので、規則的および統計的な自己相似フラクタルの2次元図形を用い、実験的に比較・検証している。さらに、図形の角度パワースペクトルが示すスケーリングな振舞いに基づいて、平面的フラクタル図形の定量化のための新しい方法を導入し、それを実際の凝集体の図形と、コンピュータによりシミュレートしたランダム飛跡の2種類のランダムフラクタル構造に適用して、その有効性を明らかにしている。また、この章では、フラクタル次元の光学的測定における誤差の評価の問題にも触れている。すなわち、光学的実験に起因する外的要因が誤差へ及ぼす影響、たとえば、対象物体の有限な大きさ、物体の構造単位の大きさと形状、実験に固有の加算的ノイズの影響などを定量的に明らかにするとともに、平均スケーリング則からのズレとして起きる空隙性 (lacunarity) の影響についても考察している。

第3章では、3次元ユークリッド空間上の実際のフラクタル構造として、粒子の凝集クラスタからなる媒質から生ずる散乱を取り扱っている。この種の構造からの光散乱の研究は、従来、粒子クラスタの分布が粗である特殊な場合に限られ、多重散乱現象の効果が無視されていた。本研究では、多重散乱を含めた新しい散乱領域を対象としており、フラクタル凝集体の集合媒質と光との相互作用において生じる特異な性質について論じている。具体的には、まず、フラクタル・ゲル中の弾道的透過光が興味ある振舞いを示すことを明らかにしている。また、散乱光の平均自由行程とフラクタル・ゲル内の平均クラスタサイズとの関係に基づき、

凝集ゲルのフラクタル次元を定量化するための新しい実際的方法を提案している。つぎに、ランダム媒質からの光の後方散乱エンハンスメントに関する諸現象、およびフラクタル凝集体の場合におけるその特異な振舞いについて組織的に考察を行っている。その結果、物体のフラクタル性が多重散乱の領域にも現れること、そして後方散乱エンハンスメントという現象においては、それが散乱強度の角度分布のクロスオーバーのしかたに反映されることを実験的に明らかにしている。

第4章では、小さな粗さを持つ粗面からの光散乱を扱っている。はじめに、粗面からの散乱光を非線形的に面積が増加する一連の空間フィルタを通して検出して得られる積分強度に基づいて、簡単な実際的粗さ測定法を提案し、実験的にそれを検証している。つぎに、この新しい表面粗さ測定法を、ウェーブレット変換理論に基づく新しいアプローチにより解析し、積分強度の逆変換により粗面の自己相関関数を求めることができることを明らかにするとともに、表面形状の特徴的長さに対応できるウェーブレット変換の「顕微鏡」的作用を明らかにしている。最後に、自己相似的表面および自己アフィンの表面に対してこの新しい手法を適用し、前者の場合には、表面のスケーリングな振舞いがウェーブレット変換としての積分強度においても現れること、また後者の場合には、ウェーブレット変換が表面形状の特徴的な長さを映し出すことを明らかにしている。

第5章では、本論文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、種々のフラクタル構造からの光散乱現象を解明し、さらにそれを応用したフラクタル特性の光学的測定に関する有益な新知見を得たものであり、光物理学及び光計測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。