

Bispectral Analysis and Optical Evaluation of Fractal Structures

(フラクタル構造のバイスペクトル解析と光学的評価)

学位論文内容の要旨

マンデルブロによるフラクタル概念の導入により、それまで物理的・数学的記述が困難であった自然界に存在する多くの複雑な構造を持つ物体に対する定量的な評価が可能となった。これらの物体は、フラクタル物体と呼ばれ、複雑さを定量的に表すフラクタル次元により評価される。その結果、自然科学の様々な分野で、フラクタルに関する研究がなされるようになり、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から、フラクタル物体による光波の回折・散乱現象に関する多くの研究がなされている。しかし、フラクタル物体が持つ情報を、非接触・非破壊的に得る方法として光学的方法が有望視されているにもかかわらず、フラクタル次元の計測に関する研究は充分ではなく、未だ多くの問題を残している。また、フラクタル性を有する光波の応用に関する研究はほとんど行なわれていない。

本研究では、物体のフラクタル性を評価する新たな方法を確立し、さらにフラクタル性を有する光波の光計測における応用の可能性を明らかにすることを目的とする。そのため本研究では、数値的方法としてバイスペクトルによる評価法を、また物理的方法としてアレイ状照射光による評価法を導入し、その解析を行なった。本論文は9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、フラクタル概念導入の背景とその概要について述べ、フラクタル物体と光波との相互作用に関する研究を概説し、光学における本研究の位置付けと、その目的について述べている。

第2章では、フラクタルとバイスペクトルの理論的背景について述べている。まずフラクタルの基礎理論として、自己相似性、フラクタル次元、スケーリング性、自己アフィン性の数学的な概念とその定義、および本研究で規則的フラクタル物体のモデルとして用いているカントール集合の数学的な定義について述べている。次に、本研究で数値的方法として導入しているバイスペクトルの数学的定義と性質について述べ、バイスペクトル解析の応用に関する研究を概説している。

第3章では、いくつかのフラクタル構造をバイスペクトルを用いて解析している。まず、第2章で与えた基礎理論を基にフラクタル構造のモデルとして導入したカントール集合のバイスペクトルを解析的に導き、この解析的表現を基に六つの異なったレベルのカントール集合のバイスペクトルを数値的に評価し、バイスペクトルパターンとして示している。これより、バイスペクトルにおける自己相似性とスケーリング性を明らかにしている。次いで、物体のフラクタル次元をそのバイスペクトルから求める方法として、閉曲線

平均と帯域平均を用いる方法を導入し、解析を行なっている。その結果、バイスペクトルから容易にフラクタル次元が得られることを明らかにし、さらにその他の重要ないくつかの関係も示している。

第4章では、バイスペクトル解析を用いたフラクタル構造の次元計測における様々な雑音の影響を解析し、その結果を従来のパワースペクトルを用いた方法と比較検討している。この解析より、雑音の平均値が零に近い場合はバイスペクトルが、またそうでない場合はパワースペクトルが有利であることを示している。さらに、低周波成分を含まない帯域平均操作を導入した場合には、雑音の平均値が零でない場合においても、バイスペクトルによる評価法が有利となることを明らかにしている。結論として、低SN比の条件下においてフラクタル構造の次元計測を行なう場合、バイスペクトルを用いる解析がパワースペクトルを用いる場合に対して有利であることを明らかにしている。

第5章では、ランダムフラクタルによる光波の回折現象において、ランダム化の仕方の違いが回折場に与える影響を解析している。ランダムなフラクタル物体と光波の相互作用の研究は、計測という観点からも重要であり、これまで盛んに研究がなされてきたが、ランダム化の仕方の違いが及ぼす影響についてはほとんど考察されていない。本研究では、まず四つの異なるランダム化法を導入し、それらにより生成される四種類のランダムコントロール集合状開口による回折場を解析している。その結果、スケーリング性を伴わないランダム化を行なった場合、回折場においてフラクタル性の情報が消えてしまうのに対し、スケーリング性を伴ったランダム化は、回折場におけるフラクタル性に大きな影響を与えないことを明らかにしている。さらに、ある特定のレベルだけをランダム化した場合、回折場からそのレベルが容易に特定できることを示し、フラクタル状照射を用いた計測法の可能性を示している。

第6章では、第5章で導入したスケーリング性を伴ったゆらぎの回折場に及ぼす影響についての考察をさらに押し進め、スケーリングなゆらぎを伴った格子による光波の回折を解析している。その結果、ゆらぎのスケーリング性は、回折場強度分布のピーク値の減少勾配に現れ、それがフラクタル特有のべき乗則となることを示している。この結果より、回折場強度分布の観測から、ゆらぎのスケーリング性を決定する重要な因子であるスケーリングファクターなどの計測の可能性を示している。

第7章では、第6章で明らかにした結果を基に、アレイ状照射光を用いたフラクタル状粗面の評価に関する解析を行なっている。その結果、アレイ状照射光を用いた場合、従来の一様照射による方法の諸問題を回避し、かつスケーリングファクターと表面粗さの同時計測なども容易に行なえることを、シミュレーションと実験により明らかにしている。

第8章では、第5章で示された結果を基に、フラクタル状照射光を用いたフラクタル状粗面の評価法を提案し、その解析を行なっている。その結果、第7章で述べたアレイ状照射光を用いた場合よりも、さらに高精度にフラクタル状粗面の計測が行なえることを、シミュレーションと実験により明らかにしている。

最後に第9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

Bispectral Analysis and Optical Evaluation of Fractal Structures

(フラクタル構造のバイスペクトル解析と光学的評価)

マンデルブロによるフラクタル概念の導入により、それまで物理的・数学的記述が困難であった自然界に存在する多くの複雑な構造を持つ物体に対する定量的な評価が可能となった。これらの物体はフラクタル物体と呼ばれ、複雑さを定量的に表すフラクタル次元により評価される。その結果、自然科学の様々な分野でフラクタルに関する研究がなされるようになり、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から、フラクタル物体による光波の回折・散乱現象に関する多くの研究がなされている。しかし、フラクタル物体が持つ情報を、非接触・非破壊的に得る方法として光学的方法が有望視されているにもかかわらず、フラクタル次元の計測に関する研究は充分ではなく、未だ多くの問題を残したままである。また、フラクタル性を有する光波の応用に関する研究は現在までほとんど行なわれていない。

本論文では、物体のフラクタル性を評価する新たな方法を確立し、さらにフラクタル性を有する光波の光計測における応用の可能性を明らかにすることを目的とした研究を行なっている。そのため本論文では、数値的方法としてバイスペクトルによる評価法を、また物理的方法としてアレイ状照射光による評価法を導入し、その解析を行なっている。

第1章では、フラクタル概念導入の背景とその概要について述べ、フラクタル物体と光波との相互作用に関する研究を概説し、光学における本研究の位置付けと、その目的について記述している。

第2章では、フラクタルとバイスペクトルの理論的背景について述べている。まず、フラクタルの基礎理論として、自己相似性、フラクタル次元、スケーリング性、自己アフィン性の数学的な概念とその定義、および本研究で規則的フラクタル物体のモデルとして用いているカントール集合の数学的な定義について記述している。次に、本研究で数値的方法として導入しているバイスペクトルの数学的定義と性質について述べ、バイスペクトル解析の応用に関する研究を概説している。

第3章では、いくつかのフラクタル構造をバイスペクトルを用いて解析している。第2章で与えた基礎理論を基にフラクタル構造のモデルとして導入したカントール集合のバイスペクトルを解析的に導き、この解析的表現を基に六つの異なったレベルのカントール集合のバイスペクトルを数値的に評価し、バイスペクトルパターンとして示している。これ

より、バイスベクトルにおける自己相似性とスケーリング性を明らかにしている。次いで、物体のフラクタル次元をそのバイスベクトルから求める方法として、閉曲線平均と帯域平均を用いる方法を導入し、解析を行なっている。その結果、バイスベクトルから容易にフラクタル次元が得られることを明らかにし、さらにその他の重要ないくつかの関係も示している。

第4章では、バイスベクトル解析を用いたフラクタル構造の次元計測における様々な雑音の影響を解析し、その結果を従来のパワースペクトルを用いた方法と比較検討している。この解析より、雑音の平均値が零に近い場合はバイスベクトルが、またそうでない場合はパワースペクトルが有利であることを示している。さらに、低周波成分を含まない帯域平均操作を導入した場合には、雑音の平均値が零でない場合においても、バイスベクトルによる評価法が有利となることを明らかにしている。結論として、低S/N比の条件下においてフラクタル構造の次元計測を行なう場合、バイスベクトルを用いる解析がパワースペクトルを用いる場合に対して有利であることを明らかにしている。

第5章では、ランダムフラクタルによる光波の回折現象において、ランダム化の状態の違いが回折場に与える影響を解析している。これまでランダムなフラクタル物体と光波の相互作用の研究は盛んに行なわれてきたが、ランダム化の状態の違いが及ぼす影響についてはほとんど考察されていない。本研究では、四つの異なるランダム化法を導入し、それらにより生成される四種類のランダムカントール集合状開口による回折場を解析している。その結果、スケーリング性を伴わないランダム化を行なった場合、回折場においてフラクタル性の情報が消えてしまうのに対し、スケーリング性を伴ったランダム化は、回折場におけるフラクタル性に大きな影響を与えないことを明らかにしている。さらに、ある特定のレベルだけをランダム化した場合、回折場からそのレベルが容易に特定できることを示し、フラクタル状照射を用いた計測法の可能性を明らかにしている。

第6章では、第5章で導入したスケーリング性を伴ったゆらぎの回折場に及ぼす影響についての考察をさらに押し進め、スケーリングなゆらぎを伴った格子による光波の回折を解析している。その結果、ゆらぎのスケーリング性は、回折場強度分布のピーク値の減少勾配に現れ、それがフラクタル特有のべき乗則となることを示している。この結果より、回折場強度分布の観測から、ゆらぎのスケーリング性を決定する重要な因子であるスケーリングファクターなどの計測の可能性を示している。

第7章では、第6章で明らかにした結果を基に、アレイ状照射光を用いたフラクタル状粗面の評価に関する解析を行なっている。その結果、アレイ状照射光を用いた場合、従来の一様照射による方法の諸問題を回避しつつ、粗面のフラクタル性を決定する重要な因子であるスケーリングファクターを容易に計測できることを、シミュレーションと実験により明らかにしている。

第8章では、第5章で示された結果を基に、フラクタル状照射光を用いたフラクタル状粗面の評価法を提案し、その解析を行なっている。その結果、第7章で述べたアレイ状照射光を用いた場合よりも、さらに高精度にフラクタル状粗面の計測が行なえることを、シミュレーションと実験により明らかにしている。

第9章では、本研究によって得られた結果を総括し、結論が述べられている。

これを要するに、著者は、フラクタル構造を解析するいくつかの新しい光学的方法を提案し、それらの基本特性と有効性を理論的・実験的に明らかにすることにより、フラクタル物体の光学的評価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。