

氏 名 石川 顕

学位（専攻分野） 博士（学術）

学位記番号 総研大甲第1363号

学位授与の日付 平成22年3月24日

学位授与の要件 先導科学研究科 光科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 媒質中を伝わる波動の分散の推定

論文審査委員 主 査 准教授 瀧澤 由美  
特任教授 猿倉 信彦  
准教授 上野 玄太

## 論文内容の要旨

自然界の多くの物理現象は、測定・実験において測定点、測定条件、ノイズ環境等がその結果に影響する。しかし、実際の測定・実験ではこれらパラメータの最適値を事前には知ることが困難で、特に実験により対象を破壊する必要がある現象、実験に多大な費用のかかる現象である場合は、数理物理的性質から条件を推定し、実験系の最適設計が求められる。

本論文は、媒質中を伝わる波動という一般性のある対象を取り上げ、その分散測定に最適な測定・実験条件およびシミュレーションにより事前に与える数値解析的な方法を提案している。

具体的には、テラヘルツ導波路の分散パラメータを評価するためのカットバック法による実験における最適のファイバー長の決定のための、数値解析的な方法を提示する。

信号データに比較的大きな白色雑音（観測ノイズ）を含むようなテラヘルツ波の伝搬波形の数値シミュレーション解析によって、最も正確な吸収係数と分散パラメータを与える最適ファイバー長が、伝搬パラメータの関数とした場合、経験的なべき乗則に従うことがわかった。

この方法によるテラヘルツ導波路の伝搬特性の評価方法は、導波路の分散と損失パラメータの正確な制御への適用の点で大きな助けになると考えられる。

さらに本方法は、その他の波長領域の導波路システムにおいても、条件が制限された実験に対して、伝搬パラメータの有効な評価手段として適用できると期待される。

## 博士論文の審査結果の要旨

本論文は、テラヘルツ導波路の分散パラメータを評価するためのカットバック法による実験における最適のファイバー長の決定のための、数値解析的な方法を提示する。全体で50頁、4章および結論から成り、日本語で執筆されている。

第1章は、一般的な波動の分散の現象について説明する。多くの物理現象について、媒質中を伝わる波動は、周波数（波長）によって群速度または位相速度が異なる「分散（dispersion）」の性質を示す。速度、周波数、波長の関係を示す関数を分散関数（dispersion function または dispersion relation）と呼ぶ。

第2章では、本論文で扱う導波路を伝わる THz 波について説明する。THz（テラヘルツ）波とは、光と古典的電磁波の中間、周波数 100GHz~10THz の周波数領域の電磁波で、近年光通信技術においてその重要性が注目されている。導波路を伝わる THz 波は分散特性が顕著であり、その測定・予測が重要である。さらに THz 導波路としてのフォトニック・クリスタルファイバー(PCF)の重要性が高まっている。導波路伝搬特性の測定実験として時間領域分光（TDS法：Time Domain Spectroscopy：電磁波の電場の時間波形を直接測定する方法）が用いられる。この TDS 法で単位長さ当たりの導波路の伝搬特性を測定するためにカットバック法（ファイバー長を変えて複数回の測定を行う）が用いられるが、このカットバック法を行う場合、ファイバーの切断長が重要な測定条件となる。

第3章では、第2章で述べた TDS 法による実験データ波形から、伝搬パラメータを推定する方法について述べる。

第4章では、本論文の主目的である、カットバック法による最適導波路長をあらかじめ決定するための、導波路伝搬シミュレーションに基づく方法について述べられている。ある入力波形を定義し、伝搬特性を仮定すると導波路を伝搬した出力波形を数値計算により求めることができる。ある長さ  $L$  の導波路を伝搬した後の出力波形をフーリエ変換によって計算し、さらに入力波形、出力波形の両方に独立なノイズ（白色ノイズ）を加え、この入力波形と出力波形を比較し、解析ウィンドウ時間の範囲で2つの波形の振幅誤差を求め、その総和が最小になるような分散、減衰パラメータの推定値を、最小二乗法によって決定する。この推定値と初期設定値（真値）を比較する。石川君はこの過程をさまざまなパラメータ、長さについて繰り返すことで、導波路の長さパラメータの推定精度の関係を求め、最適な計測条件が存在することを示した。

石川君は、伝播パラメータのラフな推定値とシミュレーションを活用することによって、この最適な計測条件を推定する方法を提案し、この方法の有効性を最適導波路長決定法の統計的妥当性を確認する総合シミュレーションによって確認している。総合シミュレーションにおいては初めの0次近似モデル（前述のパラメータ設定、波形合成、パラメータの推定、パラメータ推定誤差の計算という過程）を付加する白色ノイズを変えて繰り返し計算を行った結果、最も外れた推定値を取り出し、これを真値と置き換えて、同様の計算過程を行い、これを1次近似モデルとする。この結果、1次近似モデルと0次近似モデルがほぼ同様のパラメータ推定誤差の極小値を示す長さであることを確認し、2つの段階の結果がほぼ一致することを確認した。

さらに、シミュレーションの結果から最適な測定導波路長が、パラメータについての経験的べき乗則に近似できることを示している。一般的に物理学において、多くの現象が多変数のべき乗則によって表現されており、実際に、経験的べき乗則は、対象を理解する堅実な方法である。ただし、導かれたべき乗則から物理的な意味を考察することは今後の研究の課題とした。

本論文の内容にかかわる研究に関して、Japanese Journal of Applied Physics への掲載が確定している。

公開の論文発表会に引き続き審査委員による論文審査及び学力確認を行った。その結果、博士（学術）を授与するのに十分な内容を備えていると判断した。