

## チャンネル分光偏光計の精度向上と小型化に関する研究

## 学位論文内容の要旨

光の偏光状態の波長分布を計測する装置である分光偏光計は、薄膜計測を目的とした分光エリブソメトリをはじめとして、光通信分野、生体・医用計測分野などにおいて広く研究されている。これらの応用分野では、分光偏光計を、薄膜蒸着装置や光通信システムなどの既存装置に組み込んで用いることが強く求められている。

このような背景の下、1998年に、これまでの分光偏光計測法とは異なり能動的な偏光制御素子を持たず、上記の既存装置への組み込み用途に適した分光偏光計測法が提案された。この計測法は、チャンネル分光偏光計測法と呼ばれ、一度の計測から偏光状態の波長分布を完全に決定することができるという利点も持つ。これまでに、本計測法の特長を活かした応用研究が、いくつかのグループによりなされてきた。しかしながら、いずれも、まだ実用化には至っていない。その要因として、チャンネル分光偏光計測法の原理に関する議論が不十分であり各用途に適した設計法が確立されていないこと、および測定精度と安定性が現用の装置に比べ劣っていたことが挙げられる。

そこで、本研究では、初めにチャンネル分光偏光計測法の定式化を行い、かつ偏光計の適切な設計法に関して考察を行う。また、その議論を踏まえた上で、超小型センシングヘッドを設計し、試作する。さらに、いくつかの偶然誤差要因、および系統誤差要因について、その解析と低減法の提案を行い、チャンネル分光偏光計による高安定性、高精度分光偏光計測の可能性を探る。また、チャンネル分光偏光計測法を応用した新しいミューラー行列偏光計測法の提案も行う。

本論文は以下の8章から構成される。

第1章では、本研究の背景と目的、および本論文の構成について述べた。

第2章では、代表的な分光偏光計測法をいくつか紹介し、本研究で用いたチャンネル分光偏光計測法との相違点を詳細に述べた。

第3章では、チャンネル分光偏光計測法の定式化を行った。これまでに報告されてきたチャンネル分光偏光計測法の原理に関する議論は、偏光素子の方位や高次移相子の厚さ比などが固定された、特別な場合のみであった。本研究では、それらをパラメータとして扱い、より一般的な光学系におけるチャンネル分光偏光計測法を定式化した。また、導出した方程式を用いて、分光偏光計として効率よく働くための、各パラメータの適切な値を考察した。今後、様々な用途においてチャンネル分光偏光計測法を利用するにあたり、設計の指針となることが期待される。

第4章では、チャンネル分光偏光計を実用化する上で大きな難点であった安定性の解決策として、自己較正法を提案した。これまで、チャンネル分光偏光計を構成する高次移相子のリタレーションが温度や圧力などの環境に大きく依存することが、測定値の安定性の低下を招いていた。この問題を解決するため、被測定光のチャンネルスペクトルから偏光情報のみならず、高次移相子のリタレーションをも導出することができる技術、自己較正法を提案した。自己較正法を適用するこ

とで、チャンネル分光偏光計測法の利点である、スナップショット計測、シンプルな光学系などを損なうことなく、偏光計測の安定化を図ることができる。さらに、自己較正法の計算手順は、そのほとんどが偏光計測の手順と同じであり、計算量、計算時間共に負荷はほとんどない。また、第4章で示した実験結果は、40°C という温度差、さらに10時間以上の長時間間隔計測においても、1分間隔の短時間間隔計測と同程度の安定性が得られることを示した。

第5章には、第3章で示した適切な設計法に基づき、超小型センシングヘッドを持つチャンネル分光偏光計を試作した。超小型センシングヘッドは、チャンネル分光偏光計測法の特徴である、能動的な偏光制御を必要としないこと、光学系がシンプルであることを活かしており、現用の分光偏光計測法では実現困難である。試作したセンシングヘッドは鉛筆程度の大きさであり、市販されている一般的な分光偏光計と比較し、体積は約1/1000であり、極めて小さい。また、偏光計測の実験を行い、被測定光の偏光状態によらず、短時間間隔の計測において、0.1%の安定性を得た。

第6章では、チャンネル分光偏光計に含まれるいくつかの誤差要因について解析、およびその低減法の提案を行った。特に、高次移相子の複屈折が波長に依存することによる誤差は、被測定光の偏光状態によっては、数10%もの大きな誤差を生むことがわかった。しかし、信号処理により複屈折の波長依存性を補正することにより、この誤差が大幅に低減しうることが示した。本研究では、可視域において、シミュレーションおよび実験を行ったが、可視域よりも複屈折の波長依存性が大きい傾向にある紫外域において、必須の技術となることが予想される。なお、本研究で示した信号処理による誤差低減法は、第6章の自己較正法との併用が可能である。また、上記の誤差解析の結果を踏まえて、チャンネル分光偏光計の測定精度を実験により明らかにした。あらゆる偏光状態の光を用いることにより、現状において、超小型センシングヘッドを持つチャンネル分光偏光計の測定精度は、方位角と楕円率角において $\pm 1.0^\circ$ であることがわかった。ただし、除去されていない誤差は系統的であることがあきらかとなるとともに、今後の誤差低減、もしくは複数の偏光状態光を用いた較正法の適用により、 $\pm 0.1^\circ$ での偏光計測の可能性があることも確認された。この値は、結晶型の偏光子の消光比 $10^6$ の限界値と同程度である。

第7章では、高次移相子と液晶可変移相子を用いたミューラー行列偏光計測法を提案し、現用法に比べ計測回数的大幅な低減を実現した。これまでも、高次移相子を利用したミューラー行列偏光計測法が提案されているが、偏光素子の機械的な回転が必要であった。一方、本計測法は、光学系に含まれる2つの液晶可変移相子を電気的に制御した計4回の計測から、試料のミューラー行列要素16個の波数分布を全て求めることができる。したがって、液晶可変移相子の動作速度、および分光器の検出時間に依存した高速計測が可能となる。また、効率的に各ミューラー行列要素を導出することができる、液晶移相子の適切な方位とリタレーションの選択方法についても考察を行った。適切な光学系の下では、1回の計測からミューラー行列の9要素が、4回の計測から全ての要素が効率よく導出できることを示した。

最後に、第8章にて、本研究の結論を述べた。

# 学位論文審査の要旨

主 査 准教授 岡 和 彦

副 査 教 授 折 原 宏

副 査 教 授 森 田 隆 二

副 査 教 授 馬 場 直 志

## 学位論文題名

### チャンネル分光偏光計の精度向上と小型化に関する研究

光の偏光状態の波長分布を計測する装置である分光偏光計は、薄膜の精密評価や生体細胞の検査などに有用な計測器である。近年、半導体、液晶ディスプレイ、光通信機器などの製造分野において、薄膜製造中の *in situ* もしくは *in line* での分光偏光計測が強く求められている。また、医療光学の進展に伴い、生体組織の偏光特性の *in vivo* での検査もニーズが高まっている。このような用途への利用を目指して、1998年にチャンネル分光偏光計測法が発明された。この方法は、従来の他の分光偏光計測法とは異なり、能動的な偏光制御素子が不要で、一度のスペクトル計測から偏光状態の波長分布を完全に決定できるという利点を持っている。ただし、これまでに作成されたチャンネル分光偏光計は、測定精度や安定性などが従来法に比べ大きく劣っており、実用への大きな障害となっていた。このような背景の下で著者は、このチャンネル分光偏光計測法の基礎特性を多方面から精査し、かつその向上を図った。この論文では、その成果が述べられている。

本論文の第1章では、研究の背景と目的について述べられている。続く第2章では、まず従来の代表的な分光偏光計測法が説明され、続いてチャンネル分光偏光計測法の利点が、従来法との比較の上で論じられている。

第3章では、チャンネル分光偏光計測法の定式化がなされている。過去のチャンネル分光偏光計測法に関する研究が限られた構成条件のみに基づいて議論されてきたことを踏まえ、本章ではより一般的な構成での定式化と、構成パラメータに課せられた条件が導出されている。さらに、導出された条件に基づいて、効率的な動作のための設計指針が論じられている。

第4章では、チャンネル分光偏光計の安定性向上策として、高次移相子の自己較正法が提案されている。これまでチャンネル分光偏光計の安定性を阻害してきた主要因は、高次移相子のリタレーションが、温度や圧力などにより変動することであった。この問題を解決するため、偏光測定と並行して、高次移相子を自己較正する方法が発案された。この自己較正法を適用することで、スナップショット計測やシンプルな光学系などの利点を損なうことなく、偏光計の安定度を大きく向上させることができる。実験により、40°C という温度差、また10時間以上の長時間間隔計測においても、1分間隔の短時間間隔計測と同程度の安定性が得られることが示されている。

第5章では、超小型センシングヘッドを持つチャネルド分光偏光計の試作について述べられている。チャネルド分光偏光計測法には、能動的な偏光制御が不要、また光学系がシンプルであるなどの特徴がある。著者はこれらの特徴を生かして、直径が鉛筆と同程度の超小型センシングヘッドを試作した。その体積は、一般的な分光偏光計に比べて約 1/1000 である。さらに、その短時間の安定性として 0.1% が示されている。

第6章では、チャネルド分光偏光計のいくつかの主要な誤差要因について、その解析と低減が述べられている。特に、高次移相子の波長分散が、数 10% もの大きな誤差の原因となることが明らかにされている。そしてこの誤差の低減のために波数軸を意図的に湾曲させて信号解析する方法が提案されている。さらに本章では、実験的な測定精度の評価についても論じられている。試作された超小型センシングヘッドを持つチャネルド分光偏光計の測定精度が精査され、残余の誤差は方位角と楕円率角それぞれで  $\pm 1.0^\circ$  以下であることが示された。また、この残余誤差は系統的であり、較正の工夫などで  $\pm 0.1^\circ$  レベルまでさらに低減可能であることも述べられている。ちなみにこの値は、結晶型の偏光子による限界値と同程度である。

第7章では、高次移相子と液晶可変移相子を用いたミューラー行列偏光計測法が提案されている。この計測法は、光学系に含まれる 2 つの液晶可変移相子を電氣的に制御しながら計 4 回のスペクトル測定を行い、それから試料のミューラー行列要素 16 個の波数分布を全て求める。この方法によると、液晶可変移相子の動作速度、および分光器の検出時間に依存した高速計測が可能となる。

第8章は、本研究の結論である。

これを要するに、著者は、チャネルド分光偏光計測法の様々な誤差要因を体系的に解析し、各々について効果的な改善法を提案した。さらに、極めて小さなセンシングヘッドを試作し、それによって高安定かつ高精度な分光偏光計測が可能であることを示した。本研究によって得られた知見は、光応用計測、応用物理学の発展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。