

審査の結果の要旨

論文題目：

タイコグラフィによる集光光渦の波動場計測法の開発

氏名 齋藤 貴宏

本論文は、タイコグラフィによる集光光渦の計測法の開発について行った一連の研究をまとめたものである。

第一章では光渦の評価法に関して既存の研究を踏まえ本研究の目的を設定している。波面が螺旋形状である光渦は、ドーナツ状の強度分布を持ち、軌道角運動量を持つなど特異的な性質を持つため、レーザー加工や超解像顕微鏡など応用が広がっている。応用の多くは光渦を微小に集光して使用されており、集光光学系の波面誤差を含めた光渦の波動場計測の重要性を述べている。波動場計測として、干渉計、シャック・ハルトマン法、タイコグラフィ法の3つを挙げ、それらの特徴を比較することにより、タイコグラフィ法の優位性を述べている。X線領域において発展してきたタイコグラフィ法を、本研究が対象とする可視光領域へ展開するために解決すべき波動伝播計算における問題を提示し、その解決法としてEngelbergらが提案した高NA伝搬計算手法を挙げている。こうした背景の下、タイコグラフィ法による可視光領域の集光光渦の波動場計測法の開発を本研究の目的としている。

第二章では物体としてピンホールを用いたタイコグラフィ法を提案し、計測精度をシミュレーションにより検討し有効な手段であることを示している。従来のフラウンホーファー近似やフレネル近似は、開口数の大きなビームの伝搬計算に用いることができないが、Engelbergらが提案した高NA伝搬計算手法は、フーリエ変換による計算が可能であることを示している。タイコグラフィ法で用いる走査物体としてピンホールを挙げている。ピンホールは単純な形状であるためアライメントが不要であり、光の広がりを抑えることができ、フランフォーファー近似を満足するなどの利点を述べている。高NA伝搬計算では、計算される波動場の座標と周波数座標の関係が非線形となるため、実験的に計測された強度分布を樽型に歪める手法を提案している。そして、開発した手法の計測精度が、従来手法に比べて改善することをシミュレーションにより定量的に示している。

第三章では、螺旋位相板によって発生した光渦を実際に計測し、開発した計測手法の計測精度を定量的に評価している。螺旋位相板によって発生した光渦をタイコグラフィ法で計測するための光学系を構築し、光学系の焦点位置に発生した集光光渦を計測している。3つの螺旋位相板を利用し、それぞれを利用した際に得られた集光光渦を比較し

ている。非整数のトポロジカルチャージを持つ集光光渦の計測に成功し、さらに、焦点面上の波動場を逆伝搬計算することで螺旋位相板の形状を求め、白色干渉顕微鏡により測定した形状と比較し、 $\lambda/5$ の精度で結果が一致していることを確かめている。

第四章では、開発したタイコグラフィ法により複雑な光渦や光格子の計測が可能であることを示している。実際に光学系に導入された空間光位相変調器を用いて発生させた光渦や光格子を計測している。タイコグラフィによる計測結果の精度を検証するために、計測された強度分布を、事前に予測された強度分布と比較し、両者が相関係数において平均0.92で一致していることを確認している。最後に、計測された光格子を起点として、角スペクトル法により焦点近傍での光格子の分布を計算し、焦点近傍での光格子の回転が予測結果と一致していることを確認している。

第五章では微小に集光された光渦が開発手法により計測可能であることを示している。高倍率の対物レンズで集光した光渦を計測する際には、ビームがCCDカメラの大きさよりも大きくなり、ビームの全体をCCDカメラで計測することができなくなるという問題が発生する。この問題を解決するため計算範囲の拡張と入射開口制限を利用したタイコグラフィを開発している。シミュレーションにより光渦の計測が可能であることを示し、STED顕微鏡や光マニピュレータにおいて実際に用いられる光学系を念頭に、同等の光学系を構築し、半値幅 $1.6 \mu\text{m}$ の微小光渦の計測に成功している。本研究で提案している座標変換手法と、本章の提案手法の効果を検証し、これらが集光光渦の波動場計測において有用であることを示している。

このように、本研究はレーザー加工や超解像顕微鏡などへの応用が進む集光光渦の波動場計測を、提案したタイコグラフィ法により、従来にない高い精度で測定することに成功し、実際の応用を想定した光学系に対しても有用であることを示している。

一連の成果は、光学分野と精密工学分野の発展に大いに貢献するものである。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。