

博士論文（要約）

タイコグラフィによる集光光渦の  
波動場計測法の開発

齋藤 貴宏

本論文は光渦や光格子の計測法としてピンホールを走査物体に用いたタイコグラフィを提案し、その開発と実証を取り扱った論文である。各章の内容を以下にまとめる。

第1章では光渦計測に関する既存の研究を踏まえ、本研究の目的を明らかにした。内容は以下の通りである。

波面が螺旋形状である光渦の利用が大きく広がっている。光渦を含むビームは複雑な強度分布や伝搬特性を持つ。光渦の応用分野において理想的な性能を目指すためには、強度分布と位相分布の双方を計測することが重要である。

光渦の位相分布を計測する方法として干渉法やシャック・ハルトマン法、タイコグラフィが存在する。干渉法やシャック・ハルトマン法は可視光における光渦を計測するのに、タイコグラフィはX線領域の光渦を計測するのに利用される。干渉法は計測精度が高い一方で光学系が複雑であり応用性が低い。シャック・ハルトマン法は光学系が単純であるが、光格子のような複雑なビームの計測に向かない。一方タイコグラフィの光学系は単純である上、集光された光渦や光格子の強度分布と位相分布を直接計測することが可能である。タイコグラフィは可視光波長域における光渦の計測にも有望である。

しかし、X線領域で用いられるタイコグラフィを可視光にそのまま適用することはできない。タイコグラフィでは計測対象の光渦を遮るように物体を挿入し、後方に設置した撮像素子で回折強度分布を計測するが、波動伝搬計算をフーリエ変換で行うためには物体と撮像素子の間にフラウンホーファー近似またはフレネル近似が成立している必要がある。しかしながら可視光タイコグラフィでは、X線の場合よりも物体に近い位置で回折強度分布の計測を行わなければならない、それらの近似が成立しない。

本研究の目的は可視光における光渦計測手法として、タイコグラフィをベースにした手法を開発・確立することである。近似が成立しないという問題を解決するために、Engelbergらが提案した高NA伝搬計算手法を利用する。開発した手法の有用性を示すために、シミュレーションや実験により計測精度の検証を行う。

第2章では物体としてピンホールを用いたタイコグラフィの開発を記した。また、計測精度をシミュレーションにより検討し、開発した手法が光格子や非整数光渦などの計測に十分な精度を持つことを示した。内容は以下の通りである。

フレネル・キルヒホッフの回折積分では、伝搬前平面上の点から伝搬後平面状の点までの距離が用いられる。それを近似することで波動伝搬計算をフーリエ変換で高速に行うことが可能となる。従来のフラウンホーファー近似やフレネル近似では伝搬後平面が十分に小さいという条件が課せられていた。Engelbergらが提案した伝搬計算手法では、距離の近似の方法を工夫することで、伝搬先の面が狭いという条件を取り払うことができる。

伝搬前平面上の光の拡がり、伝搬後平面上の各点までの距離と比較して十分に小さいという条件の下で近似を行う。フーリエ変換により計算された波動場の座標と、周波数座標の関係は非線形となる。

物体としてピンホールを用いたタイコグラフィを開発し、そのフローチャートを示した。ピンホールは伝搬前平面上の光の拡がり狭いという条件を満たすために利用する。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。

開発した手法の計測精度が、光渦計測に十分であることをシミュレーションで示した。計測対象の光渦のトポロジカルチャージや、ピンホールの径、走査ピッチ、集光ビームのNA等を変化させ、適切な条件の検討を行った。

第3章では開発した手法を実験的に応用し、螺旋位相板によって発生した光渦を計測した。3章の内容は以下の通りである。

螺旋位相板は螺旋形状をした透過型の基板である。透過した光に螺旋形状の光路長差が生じることで光渦が発生する。螺旋位相板の原理的に、非整数光渦の発生を避けることは難しい。螺旋位相板はSTED顕微鏡、レーザーアブレーション、系外惑星探索など広く用いられている。螺旋位相板によって発生した光渦を、開発した手法により評価することには手法の有用性を示す上で意義がある。

螺旋位相板によって発生した光渦を開発した手法で計測するための光学系を構築した。使用する螺旋位相板の形状は、Zygo社のNewView干渉計を用いて計測した。形状計測結果から、非整数の光渦が発生することが予想された。

開発した手法により、光学系の焦点位置に発生した光渦を計測した。計測された光渦は非整数の光渦の特徴を示した。計測された光渦と、螺旋位相板の形状から想定された光渦は一致していることを示した。デフォーカス位置における光渦についても同様に計測を行った。焦点面上流と下流で、振幅分布が180度回転していることを計測した。

計測された光渦を起点として、逆伝搬計算を用いることで、タイコグラフィの結果のみから螺旋位相板の形状を計測した。タイコグラフィによる螺旋位相板の計測結果を干渉計による計測結果と比較し、 $\lambda/10$ の精度で結果が一致していることを確かめた。

第4章では、開発した手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すために、SLMで発生させた光渦の計測を行った。4章の内容は以下の通りである。

SLMは光の位相を空間的に制御できる装置である。光の位相を螺旋形状に変化させることで光渦や光格子の発生が可能である。SLMは光ピンセットや冷却原子気体のトラッピングなどにおいて用いられている。SLMによって発生した光渦や光格子を計測することは手法の有用性を示す意義がある。

SLMを制御し光渦や光格子を自由に発生させるためのソフトウェアを作成した。正しく光渦や光格子を発生させられることを確認した。SLMによって作られる光渦や光格子をタイコグラフィにより計測するための光学系を構築した。

SLMによって発生した光渦や光格子をタイコグラフィにより計測した。計測結果はシミュレーションと比較し、正しくビームの計測ができていることを確認した。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た。

焦点近傍での光格子の回転がタイコグラフィにより求められ、その結果はシミュレーションと一致した。

第5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と示すため、光渦や光格子を高倍率の対物レンズで集光し、その計測を行った。

光渦の応用分野においては、光渦を高倍率の対物レンズで集光して利用する。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。

外挿を利用したタイコグラフィを開発し、その問題の解決を図った。シミュレーションによりビームが CCD カメラからはみ出る状態でも、光渦の計測が可能であることが分かった。

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、光渦を発生させタイコグラフィにより計測する光学系を構築した。構築した光学系では SLM の 1 次回折光を有限遠補正の対物レンズで集光する。

市販のピンホールの厚さが対物レンズの焦点深度よりも厚く、タイコグラフィに用いることができないことが想定された。そこで、SiN 薄膜を用いてサブミクロン厚のピンホールを作製した。作製した光学系での集光限界を確かめる試験を実施し、対物レンズの NA を最大で 0.64 にできることを確かめた。

SLM に入力するホログラムにより、集光ビームの NA を変化させる原理を示した。高 NA 条件、中 NA 条件、低 NA 条件にてガウシアンビーム、光渦、光格子を発生させ、タイコグラフィによる計測を実施した。

高 NA 条件における光渦・光格子の計測実験により、暗点のサイズが  $0.7 \mu\text{m}$  である光渦の計測と、光点のサイズが  $3 \mu\text{m}$  である光格子が回転する様子を計測することに成功した。開発した手法により、高 NA 光学系で微小に集光された光渦、光格子の波動場の計測が可能であることを実証した。

以上のように、本論文はピンホールを走査物体として用いたタイコグラフィの開発と、それによる光渦の計測について記した。可視光波長域においてタイコグラフィによる光渦計測を実現するために座標変換や外挿といった手法を導入し、それらが光渦計測に有用であることを示した。光格子の計測では、強度分布と位相分布を両方評価できるタイコグラフィは非常に有用であり、ビームウェスト近辺での回転現象を評価できることを示した。