

氏名（本籍）	森田 翔	（東京都）
学位の種類	博士（工学）	
学位記番号	甲第 196 号	
学位授与の日付	平成 29 年 3 月 22 日	
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当	
学位論文題目	屈折型非軸対称光学素子を用いたレーザの強度分布変換に関する研究	
論文審査委員	（主査） 教授	坂本 幸弘
	（副査） 教授	長瀬 亮
	教授	松井 伸介
	准教授	高橋 芳弘
	准教授	徳永 剛

## 学位論文の要旨

### 屈折型非軸対称光学素子を用いたレーザの強度分布変換に関する研究

本研究では、レーザによって一定領域へ熱加工するための屈折型強度分布変換素子を設計し製作するためのシステムの開発を行う。これは主としてレーザ加熱による材料表面の調質や改質に用いるための素子であり、現在行われている単純な焦点はずしによる加工の代替となるものである。ビームの強度分布を制御することにより、加工の均質性が向上すると期待される。また光線の制御によってパターンを照射することも可能である。本論文は 7 章から構成されており、以下のことが明らかとなった：

第 1 章では、屈折型強度分布変換素子の必要性について論じた。光利用効率が高く、小ロットあるいは単品生産でも製造しやすく、大パワーのマルチモードファイバレーザであっても変換可能な点が屈折型素子の利点であり、熱加工するにあたって治具や工具のように取り扱えるような簡便さを持ち合わせており、これからのレーザ加工の発展において必要な技術であることが分かった。軸対称な素子の設計手法について説明し、これが非軸対称素子には適用できないことを示した。

第 2 章では、非軸対称形状の分布変換素子設計手法について、分布変換と形状生成の点から解決策を述べた。分布変換プログラムでは光線要素に対し電荷を持った粒子とみなすことで要素間に発生する引力と斥力の合力によって要素の移動方向と量を決め、初期配置の隣接要素との間の線分を利用して光線の交差を防ぎながら繰り返し計算することで光線の照射位置を求めた。分布変換素子の形状は最長光路を基準としその他の要素の光路長を素子の厚みにより合わせるといった手法を用いて求めることができた。

第 3 章では、第 2 章で開発したプログラムが実際に成り立つ場合があるかどうかを凸レンズと比

較し検証した。その結果、100 mm 先の一点に集光する屈折率 1.49 の素子を計算した場合、中心部の曲率が 49.1 mm で放物面の非球面レンズをこのプログラムは出力することがわかり、実用可能であることが判明した。

第 4 章では、加工装置と加工法について述べた。設計した非軸対称形状を実現するため、2 台の加工装置を用いて、アクリルは切削により、またガラスや石英は電着ダイヤモンドボール砥石で形状を加工し、それに研磨を施すことで Ra 18 nm、研磨せずシリコンオイルを塗布することで Ra 38 nm まで表面粗さが向上し、この時の光透過率はバルク材料と同等となった。これらのことから、複数の加工を組み合わせることで実用可能な光学素子が簡便に製作できることが明らかになった。

第 5 章では、分布変換を行い投影するための素子を製作し検証した。軸対称分布変換素子ではなし得ない非対称形状の目標分布を実現するための非軸対称素子の例として、均一な強度分布を 3 つのビームに分け変形し文字列“CIT”へと変換する素子を設計製作し強度分布の変化を観察した。また、単純な入力ビーム形状ではない実際のパルスレーザの形状や強度分布を計算に用いて星形にビームを変換する素子では、ビームプロファイルが設計距離の 100 mm に対して 100~110 mm で星形の強度分布に変化していることがわかり、ステンレス薄板に 4.5 kW, 10 ms の変換したパルス照射することで幅約 4 mm の星形の加工痕ができることを確認した。

第 6 章では、ビーム走査加工のための素子を設計製作した。入力ビームの強度分布が大きく異なっているビームでも計算可能なことを示すため、また既存のレンズの組み合わせでは困難なパターンとするため、ガウスビームから線状の均一強度ビームに変換する素子を設計し製作した。12 mm 角の石英製分布変換素子を通過したビームは 100mm の設計距離において  $4.0 \times 0.7$  mm の線状のビームとなり、プラスチックへのバーンパターンは平坦部分ができ通常の焦点はずしでの加工形状とは異なるパターンが形成された。また、この線状ビームを用いて純鉄粉が溶融でき凝固物は平坦な板状になることから、粉末積層造形の工程用途に利用できることが分かった。

第 7 章では本研究を総括した。本研究の目的である屈折型レーザ強度分布変換素子が自動設計でき、簡便に製作でき、マーキングやビーム走査に対し機能することを確認し具体的な適用例を示した。

## 審査結果の要旨

この研究はレーザの強度分布を任意な分布に変換するための光学素子の設計法からその製法までの一連の技術を明らかにしている。ここで扱う光学素子はレーザ熱処理を意図しており、ある程度の面積に対し一括照射した際に入熱が最適化されたり、ビーム走査をすると適切な入熱が与えられるような高品位な熱処理を実現するために必要な技術である。従来のレーザ熱処理は集光に用いている凸レンズの焦点位置から離れた位置でビーム照射する方法が主流であるが入熱の最適化は難しい。ビーム拡大率を変える方法なども工夫されているが、自由な強度分布に変えることは唯一コンピュータプログラムを応用した回折光学素子しか実現できていない。この素子の製作には半導体プロセスが不可欠で、入手に時間を要することや極めて高額であることなど大きな問題である。

本研究では非軸対称形状の素子によりビームを局所的に偏向し、様々な強度分布を実現することを試みている。さらに、回折光学素子では0次光と呼ばれる不要ビームが屈折型では無いことや、大出力ファイバレーザで一般的なマルチモードビームであっても変換可能な点が特筆すべきことである。熱処理対象が小ロットあるいは単品生産品であると素子はその都度変わるが、アクリル樹脂・ガラス材料など入手が容易な材料を使うこと、卓上NC加工機で製作できること、光学部品の加工で最も時間を要する研磨加工を廃したことなど、光学素子が簡便かつ迅速に製作できる手法を提示している。

本論文は7章から構成されており、以下のようなものである。

第1章では本研究の目的のほか、強度変換に関する従来の研究事例を整理し屈折型強度分布変換素子の必要性を示している。また先行研究にある軸対称な素子の設計手法について説明し、非軸対称素子の優位性を論じている。

第2章では非軸対称形状の強度分布変換素子の設計法について、ビーム断面を微小領域に分割し隣接関係を維持しながら最適配分する考え方と、算出された配分先を実現する屈折面形状生成について述べている。前者については微小領域の各光線要素と目標の分布は電荷を持った粒子とみなし、要素間に発生する静電気力の合力によって要素の配分先を算出している。このとき初期の要素の配置を維持することで断面内の光線の交差を防ぎつつ計算を繰り返すユニークな計算法を提案している。また後者の分布変換素子の形状生成は波動光学的な考え方を取り入れている。すなわち各光線要素の光路長の中から最長光路を基準とし、その他の要素の光路長も同じになるように素子の厚みを局所的に調整している。これらの方法により位相のそろった光線であるレーザが干渉せずに目的の強度に変換されることになる。

第3章では前章で明らかにした設計法が成り立つかを検証している。光を1点に集めるという設定を与え、生成された素子形状と凸レンズの際を比較している。材料をアクリル(屈折率1.49)とし、100 mm先の一点に集光するとして計算した結果、素子中心部の曲率半径が49.0655 mmで放物面の非球形状が算出された。同じ仕様の凸レンズでは曲率半径は49.1 mmであることから、本設計法の妥当性が示されている。

第4章では非球面形状の加工装置と加工法について述べている。2種類の加工装置を用いて設計した素子を製作している。樹脂材料(アクリル)の場合は切削により、またガラス(石英)は電着ダイヤモンドのボール砥石で形状を加工している。仕上げ加工は研磨を施すことで表面粗さはRa 18 nmになるが、研磨せずシリコンオイルを塗布するだけでRa 38 nmが得られ、光透過率はバルク材料と同等となっている。これらのことから、従来ながらの加工法と、それに匹敵するオイル塗布という簡便な作業で光学素子が簡便に製作できることを明らかにしている。

第5章では本設計法に基づいた応用例として、ロゴマークのマーキングを意図したレーザのパルス照射によるパターンニングの事例を取り上げている。均一な強度分布の入射光を文字列“CIT”へと変換する。単純な形状変化とは異なり、この例は連続した光線が強度の無い部分を挟んで3つに分割しており、興味深い事例である。強度分布の測定の結果、文字列として十分判読でき、回折型素子の自由度に匹敵することを明らかにしている。また、固体レーザにみられる複雑な強度分布を幾何学パターン(星形)に変換する例では、設計距離の100 mmに対して100~110 mmで目的の強度分布に変化していること、数kWのレーザ照射に耐えうること、ステンレス薄板に目的形状の加工痕ができることを示している。

第6章ではビーム走査による焼き入れ加工を想定して、加工用ファイバレーザで一般的なガウスビームから線状の均一強度ビームに変換する素子を設計し製作している。12 mm 角の石英製分布変換素子を通過したビームは100 mm の設計距離において4.0 × 0.7 mm の線状のビームとなり、プラスチックへ走査した際に加工痕底面は平坦であり(従来の凸レンズで得られるV溝)、均一な加熱ができることを示唆している。また、純鉄粉に照射すると凝固物は平坦な板状になることから、ビーム走査により加熱する用途にも適用可能なことが示されている。

第7章では本研究を総括している。本研究の目的である屈折型レーザ強度分布変換素子の自動設計、簡便な製作法、具体的な適用例としてパルス照射による一括加熱やビーム走査による加熱に対し機能することを示した。

以上のように本研究はレーザの強度分布変換という分野で素子の新しい設計法・簡便な製作法・応用例を示し、一連の価値ある知見を提示した。従って、学位申請者の森田翔は博士(工学)の学位を得る資格があると認める。