

称号及び氏名 博士（工学） 菊池 弘

学位授与の日付 平成 28 年 3 月 31 日

論 文 名 「偏光レーザービームを用いたレーザー加工の高効率化と高機能化」

論文審査委員 主査 菊田 久雄

副査 三村 耕司

副査 杉村 延広

論文要旨

レーザー加工は、レーザー光の持つ高いエネルギー密度、非接触、局所加工などの特長を利用して、穴あけや切断の他、焼き入れをはじめとする表面熱処理、溶接、曲げ加工など、様々な種類の加工法として利用されている。近年のレーザー加工の研究開発は、加工の微細化や高効率化、難加工材料の加工、内部加工、加工形状の制御などに向けられている。特に加工の微細化は電子回路のビアホールとしてのマイクロホール形成やインクジェットノズルの小型化、シリコンウェハの切断、超小型機械部品の削りだしなどに必要な技術である。

微細加工や高効率化、高機能化を図る新しい取り組みとしてレーザービームの偏光を積極的に利用する方法が考えられている。ラジアル偏光やアジマス偏光のような軸対称の偏光ビームを用いることで穴あけや切断の加工効率を向上させることができる。しかし、切断や穴あけなどの加工の種類によって偏光ビームの加工効率の優位性が異なり、加工材料によって偏光ビームの優劣が逆転するなどの現象が見られ、偏光ビームを利用する効果が曖昧であった。偏光が加工効率に複雑に影響する理由として、加工部材表面での反射光の影響が指摘されている。しかし、加工中の反射光の振る舞いや加工への寄与について具体的な検討がなされておらず、切断や溝加工における反射光の加工効率への影響が不明であった。偏光ビームを利用するレーザー加工において適切な偏光ビームを選択するには、経験に基づく知識だけでなく、加工中の光の振る舞いを理解した光学的な知見が求められる。本研究では数値シミュレーションを用いてレーザー加工における反射光の振る舞いを解析し、反射光の加工効率への寄与について明らかにした。

一方、偏光ビームは加工効率だけでなく、加工形状にも影響することはよく知られている。偏光を積極的に利用することで、加工形状を制御することが考えられる。既存の偏光ビーム

を用いるレーザ加工の研究開発は加工効率の向上に限られており，加工形状制御のような加工の高機能化については検討されてこなかった．本研究では，偏光ビームを利用して四角穴を形成する方法を提案するとともに，四角穴加工のための偏光ビームを発生させる偏光変換素子を試作した．

具体的には，偏光ビームを用いたレーザ微細加工における高効率化，および，加工形状制御を目的として，次の4つの課題に取り組んだ．

- (1) ラジアル偏光などの軸対称偏光ビームを使ったレーザ加工における反射光の振る舞いを光学解析によって調べることで，穴加工や溝加工における反射光の加工への寄与を明らかにする．
- (2) 偏光レーザビームによって加工穴の形状を四角にする方法を提案するとともに，四角穴を形成するための偏光ビームの配置，および，偏光ビームの発生方法を示す．
- (3) 上記の偏光ビームを発生させる偏光変換素子の設計と試作を行い，光学実験によって四角穴加工のための偏光ビームが得られることを確かめる．
- (4) 上記の(1)から(3)の目的のために，入射レーザビームの偏光分布や加工形状が非軸対称な場合の光の振る舞いを解析する光学シミュレータ，および，これを利用したレーザ加工シミュレータを作成する．

本論文は6つの章で構成されている．

第1章では，偏光レーザビームを使ったレーザ加工の現状と課題について整理し，本研究で取り組む目的と研究の位置付けについて述べた．

第2章では，作成した光学シミュレータとこれを利用したレーザ加工シミュレータについて述べ，シミュレーション結果を実験報告例と比較することで数値シミュレーションの妥当性を示した．シミュレータは，軸対称問題において光の多重反射を考慮したMeierのシミュレーション方法を非軸対称な問題にも対応できるように拡張したものである．Meierのシミュレーションは蒸発プロセスに基づく穴加工において実験結果との一致が確かめられている．ここでは溝加工や切断，および非軸対称な偏光分布をもつレーザビームでの加工シミュレーションを可能にするために，反射による吸収と偏光変化を考慮しながら3次元空間での光線追跡を行うシミュレータを開発した．また，作成したシミュレータを使って偏光レーザビームによる加工の数値シミュレーションを行い，ラジアル偏光レーザビームとアジマス偏光レーザビームによる穴加工の深さの比，および，軟鋼材と銅材での穴加工の加工効率の比較結果が，Meierらの実験結果とよく一致することを確かめた．

第3章では，偏光レーザビームによる穴加工や溝加工のシミュレーションを行い，反射光の加工への寄与を調べることで，加工条件によって各種の偏光レーザビームで加工効率が異なる理由を明らかにした．穴加工においては，反射光による吸収エネルギー量が全体の吸収エネルギー量の半分以上を占め，反射光の寄与が顕著なアジマス偏光ビームでの加工穴の方がラジアル偏光ビームでの加工穴より深い結果が得られた．また，加工穴が深くなると，入射光のほとんどが加工穴の中で吸収されるため，ラジアル偏光ビームとアジマス偏光ビームでの加工レートに差がないことを示した．また，穴加工で一般に利用される円偏光ビームとの比較では，集光ビームの強度

パターンがラジアル偏光ビームやアジマス偏光ビームのものと大きく異なるために加工効率を単純に比較することができず、集光レンズの焦点距離によって加工効率の優劣が異なることを示した。

溝加工においては、ラジアル偏光ビームはアジマス偏光ビームよりも深い溝になる一方、溝幅はアジマス偏光ビームの方が広くなるという結果が得られた。このようなビームの偏光による加工形状の差は、反射光の影響によるものであった。偏光ビームによって総吸収エネルギー量に大きな差はなく、いずれも総吸収エネルギーの半分以上を反射光による吸収エネルギー量が占めている。しかし、偏光ビームによって反射光が吸収される場所が異なり、ラジアル偏光ビームの反射光は主に溝深さを進展させるのに寄与し、アジマス偏光ビームの反射光は溝幅を広げるのに寄与することを示した。また、円偏光ビームとの比較においても、穴加工の場合と同様に集光ビームの強度パターンが大きく異なるため、加工効率の優劣をラジアル偏光ビームやアジマス偏光ビームと単純に比較することができず、集光レンズの焦点距離によって加工効率の優劣が異なることを示した。

第4章では、偏光レーザービームによるレーザー加工の高機能化の一例として、偏光レーザービームを使って四角穴を加工する方法を提案し、数値シミュレーションによって四角穴加工の実現性を示した。また、この偏光レーザービームを発生させるための偏光変換素子の構成を示した。

四角穴加工を行うための偏光ビームとして、直線偏光の方向が4回の回転対称性をもつクロス偏光ビームを考案し、位相の揃った同位相クロス偏光ビーム、および、ビーム軸に対して位相が反転している逆位相クロス偏光ビームを提案した。また、同位相クロス偏光ビームは直線偏光ビームを $1/2$ 波長板を組み合わせた分割型偏光変換素子に透過させることで発生できること、逆位相クロス偏光ビームは円偏光ビームを $1/4$ 波長板を組み合わせた分割型偏光変換素子に透過させることで発生できることを示した。

これらのクロス偏光ビームによって四角穴が形成されることを数値シミュレーションによって示した。いずれのクロス偏光ビームにおいても四角穴が形成されるとともに、従来の光強度分布だけでは形成できない鋭い角をもつ四角穴になることが分かった。なかでも、逆位相クロス偏光ビームで得られる穴開口の大きさは、円偏光ビームを集光して得られる回折限界の丸穴開口と同程度の小さいものであった。これらのシミュレーションによって、レーザー加工に偏光を利用することで従来の光強度分布の制御だけでは実現し得ない小さい領域での形状加工が行えることを示した。

第5章では、逆位相クロス偏光ビームを発生させるための分割偏光変換素子を設計・作製し、実際にクロス偏光ビームが発生することを実験により確かめた。耐光性に優れ、かつ、一体ものとして形成できる分割偏光変換素子として構造複屈折を利用する素子を提案し、光学機能を検証するための透明樹脂製の偏光変換素子を設計・試作した。設計において、偏光変換素子の $1/4$ 波長板の位相差が正確に 90° である必要はなく、 60° 以上の位相差で四角穴が形成できることを示した。シリコンモールドを用いたUVナノインプリント法によってサブ波長周期構造による複屈折を利用した波長 780nm 用の偏光変換素子を作製し、透過光および集光ビームの偏光分布を観察することで、逆位相クロス偏光ビームが生成されることを実証した。

第6章では、以上の研究結果をまとめ、本研究の展望について述べた。

審査結果の要旨

本論文は、偏光を利用したレーザ加工における加工効率の向上、および、加工の高機能化を目的として、加工における偏光ビームの振る舞いを明らかにするとともに、偏光による加工穴の形状制御技術を提案した研究であり、以下の成果を得ている。

- (1) ビームの偏光分布および反射光の影響を考慮した新しいレーザ加工シミュレータを開発した。蒸発プロセスを主とする加工において、加工部材中での光の多重反射を光線追跡法によってシミュレートする手法を導入することで、非軸対称な形状をもつ穴加工や切断での加工形状を予測する技術を確立した。
- (2) 穴加工や溝加工における反射光の振る舞いを数値シミュレーションすることで、反射光によって吸収されるエネルギー量が入射ビームで直接吸収されるエネルギー量を上回ることを示すとともに、反射光が加工形状の形成にどのように寄与するかを明らかにした。これにより、軸対称偏光ビームで加工効率が向上するメカニズムを明らかにした。
- (3) 4回の回転対称性をもつ偏光ビームによって四角の開口をもつ穴加工を行う加工法を提案した。偏光によって部材への吸収率が大きく異なることを利用して、加工穴の形状を制御する手法の提案であり、微小な四角形断面をもつ深い穴加工を可能にする新しい技術である。数値シミュレーションによって、四角形の開口をもつ穴加工が可能であることを示すとともに、4回の回転対称性をもつ偏光ビームの発生方法を提案した。
- (4) 構造複屈折を利用した偏光変換素子を試作し、4回の回転対称性をもつ偏光ビームが発生できることを実証した。また、数値シミュレーションによって偏光変換素子に求められる光学性能の許容範囲を明らかにすることで、偏光変換の精度が高くなくても4角穴加工が可能になることを示した。

以上の諸成果は、偏光を利用したレーザ加工において、光学的な理解と知見を与えるとともに、新しい偏光の利用技術を提案したものであり、本文分野の学術的・産業的な発展に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。