

偏光モード変換器による既設レーザー加工機の省エネルギー化

兵庫県立大学 工学研究科 機械系工学専攻

助教 吉木啓介

(平成22年度 一般研究開発助成 AF-2010214)

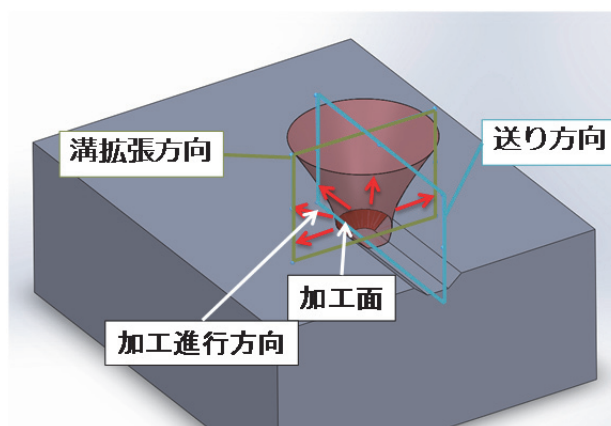
キーワード：偏光モード変換器，ラジアル偏光，フェムト秒レーザー

1. 研究の目的と背景

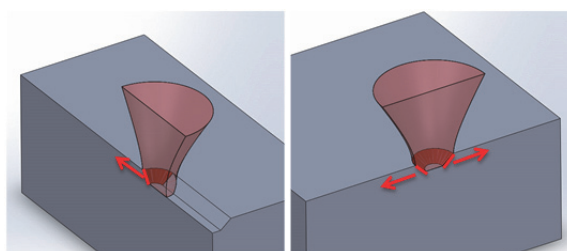
金属材料のレーザー溝加工，レーザー切断加工において，エネルギー効率は加工コストを決定する重要な性能である．さらに近年ナノ秒からフェムト秒のパルス幅を持つ超短パルスレーザーを用いたレーザーアブレーション加工が広まっており，熱の影響による材料劣化が懸念される部位に対して熱影響のない断熱的な加工を行うことが出来る．しかし，本加工方法に必要なレーザー本体はもちろん，ランニングコストも嵩むため，従来のレーザー加工を代替するには至っておらず，両者を組み合わせた加工も採用されている．そのため，超短パルスレーザー加工の加工効率が上昇すれば，そのコスト面の欠点を補うことができ，CWレーザーによる加工はもちろん，超短パルスレーザー加工の普及を推進する事ができる．そこで我々はレーザー加工の効率にはレーザーの偏光が影響することを利用し，ラジアル偏光によるレーザー加工の高効率化を目指し，直線偏光からラジアル偏光への変換を行う偏光モード変換器の既設のレーザー加工機への導入の検証を行った．

2. 原理

図1にレーザーによる溝加工の進行過程を示す，レーザーが集光された点では光の吸収によって，アブレーションによる体積除去が起こっており，被加工物を送ることによって送り方向に沿って溝が形成される．進行方向の加工面はすり鉢状になっており，体積除去は送り方向，および送り方向に垂直な方向にも進行する．この時，加工面に対して入射光の偏光がp偏光であれば光の吸収率は最大となり，s偏光であれば最小となる．そのため，図2(a)に示す通り，レーザーの進行方向に対して平行な直線偏光を入射した場合，加工の進行方向面した加工面対



(a) レーザー溝加工

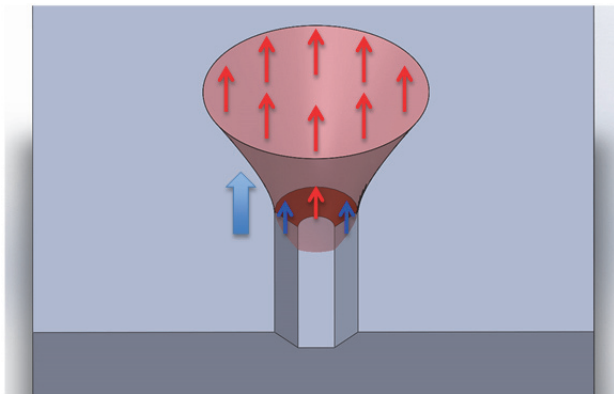


(b) 送り方向断面 (c) 溝拡張方向断面

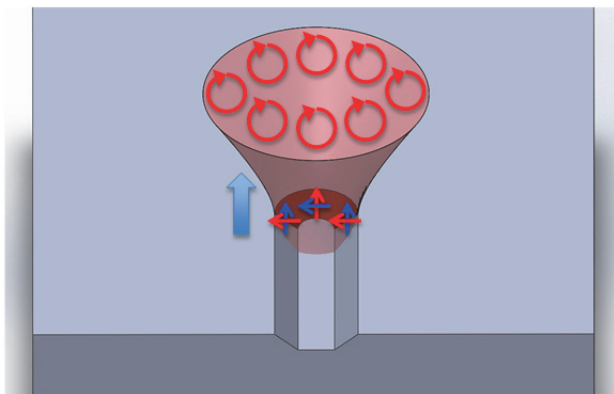
図1 レーザー溝加工における加工の進行としてはp偏光であるが，進行方向に垂直な方向に面した加工面に対してはs偏光となり効率が悪い．また，送り方向の変化とともに，偏光方向も変化させなければならない．一方，図2(b)のように円偏光を用いた場合，どの方向にもp偏光とs偏光がほぼ同じ強度含まれている．よって，送り方向を選ばない他，直線偏光より深い溝加工が可能である¹⁾．そのため，一般の加工機においては様々な方向に加工する可能性があることから，円偏光が多く用いられているが，s偏光が含まれているので加工効率にはまだ向上の余地がある．

そのため，レーザー断面内に偏光分布を持つ特殊な偏光を生成することによって，この問題を解決する手法が提案されている^{1,2)}．図2(c)に示すラジ

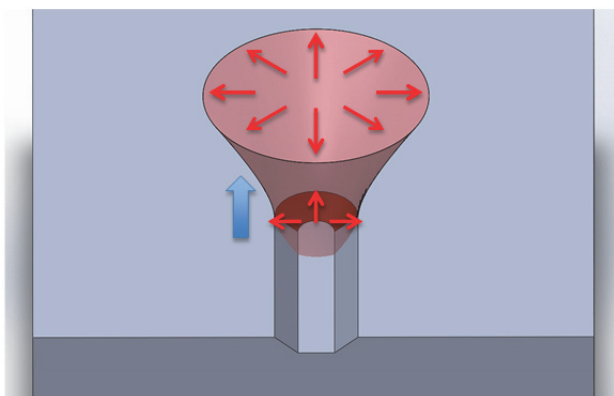
アル偏光というレーザー断面内に放射状の光電場分布を持つビームを生成し、試料に集光すれば、どの加工面に対しても p 偏光で入射し、加工効率を向上させることが出来る。



(a) 直線偏光 (偏光 // 送り方向)



(b) 円偏光



(c) ラジアル偏光

図2 レーザー溝加工における加工の進行

ラジアル偏光の発生には、干渉計を用いる方法³⁾、コーン型共振器を用いる方法⁴⁾、分割波長板を持ちする方法等が提案されてきたが、干渉計を用いる方法

では安定性に問題があり、また、共振器を改造する場合は、装置の大規模な改造が求められる。また、分割波長板は複数の偏光を切り替えることが出来ない。

一方、我々は偏光モード変換器という液晶デバイスを開発し、ラジアル偏光を初め、円偏光、直線偏光等、加工に適用可能な多くの偏光を生成し、さらにそれらを切り替えることが出来る⁵⁾。図3に示すように、偏光モード変換器は液晶は2枚の平行配向ネマチック液晶と $\lambda/4$ 板で構成されている。入射光は直線偏光とすると、まず、偏光方向に平行な配向をもつ液晶によって位相を調整する。次に2枚目の液晶を偏光方向に対して配向方向が 45° の傾きを持つように配置する。この液晶の複屈折位相量を変換することによって、直線偏光は楕円偏光へ変換され、その後方に配置された $\lambda/4$ 板によって再び直線偏光に変換される。ただし、2枚目の液晶によって与えられた複屈折位相量に応じて直線偏光の偏光方向が変化する。この偏光方向の回転を放射状に8分割された液晶素子に与える電圧によって調整することにより、任意の偏光分布を作りだすことができる。この装置は単純な構造の液晶素子で構成されているため、小型、安価であり、既設のレーザー加工機に追加実装が可能である。この装置をさらに改良し、既設の装置に容易に着脱可能なパッケージにし、本装置が適用可能なレーザー加工光源の仕様を特定し、加工効率を評価した。

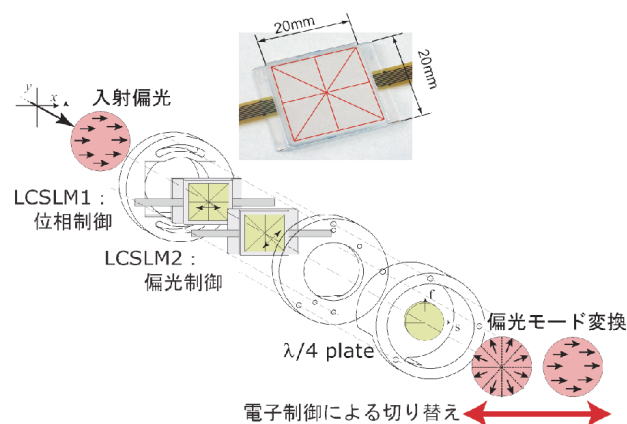


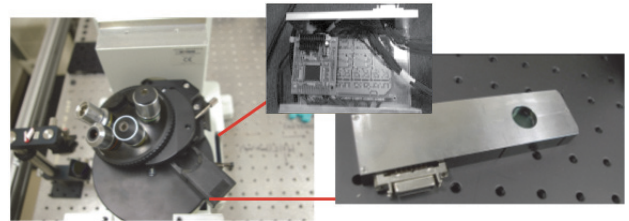
図3 偏光モード変換器の構造

3. 研究方法

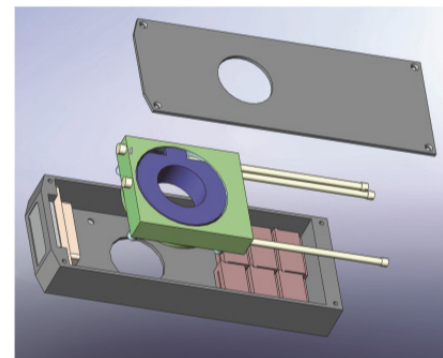
始めに偏光モード変換器に適用可能なレーザーの選定を行った。加工用高出力レーザーには CO_2 レーザーなどがあるが、この波長は液晶を透過しないため、偏光モード変換器は使用できない。また、ナノ秒パルスレーザーを用いた場合、1パルス当たりのエネルギーが高すぎ、液晶が破損した。そのため、小さいパルスエネルギーでも瞬間的に高い光強度をもつフェムト秒パルスレーザーによる加工を試みた。使用したフェムト秒パルスレーザーは、800nm、120fs のモードロック Ti:S レーザーを用いた。集光用の対物レンズは NA1.45 の油浸対物レンズ、および NA0.7 の対物レンズとした。また、偏光モード変換器によって生成した偏光は直線偏光、円偏光、ラジアル偏光とした。既設装置用に新規開発した偏光モード変換器を図4に示す。改良前は液晶素子からの配線がそのまま外部へ露出しており、故障も多く、液晶素子の光学配置の微調整もできなかった。改良後の装置はオリンパス製の顕微鏡のレボルバ直下に装着可能な形状になっており、適当な治具を作成することによって加工機一般に着脱可能な装置となった。また、本体内部に十字直動ステージ、回転ステージを備え、装着後でも微細な位置調整が可能となった。また、駆動はADコンバーターが必要なアナログ信号による駆動ではなく、デジタル信号による駆動信号の周波数制御を用いた制御とすることで、駆動回路を小型化することに成功した。加工効率評価実験に用いた被加工物は50nm厚のアルミニウム薄膜で、薄膜表面にレーザーで穿孔加工を行った。加工後、それぞれの穴の有無をSEMで確認した。加工は入射レーザーのパワーを変えながら行い、レーザーの強度と加工痕の有無の関係を調査した。この実験から、アブレーションを起こすための入射レーザーパワーの閾値が分かり、閾値が低い方が加工効率のが高いといえる。



(a) 改良前の偏光モード変換器



(b) 改良後の偏光モード変換器、ドライバの外観



(c) CAD 図面

図4 偏光モード変換器の構造

4. 研究成果

図5に NA0.7 の対物レンズで 0.22 J/cm^2 のパルスをアルミ薄膜上に20秒間集光した時の加工痕のSEM写真を示す。直線偏光を集光した時、図5(a)に示すような楕円状の加工痕が観察された。これは、高いNAの対物レンズで直線偏光をした時にはレーザースポットの形状が光軸に対して軸対称にならず、偏光方向へ長い楕円状になることに起因する。また、円偏光を集光したときは図5(b)に示すような若干大きな円形の加工痕が観察された。また、図5(c)に示すラジアル偏光の加工痕は最も小さい大きさを持つことが分かった。これは、集光点においては光軸方向の電場が発生し、そのサイズが直線偏光や円

偏光に比べて小さくなるためであると考えられる。

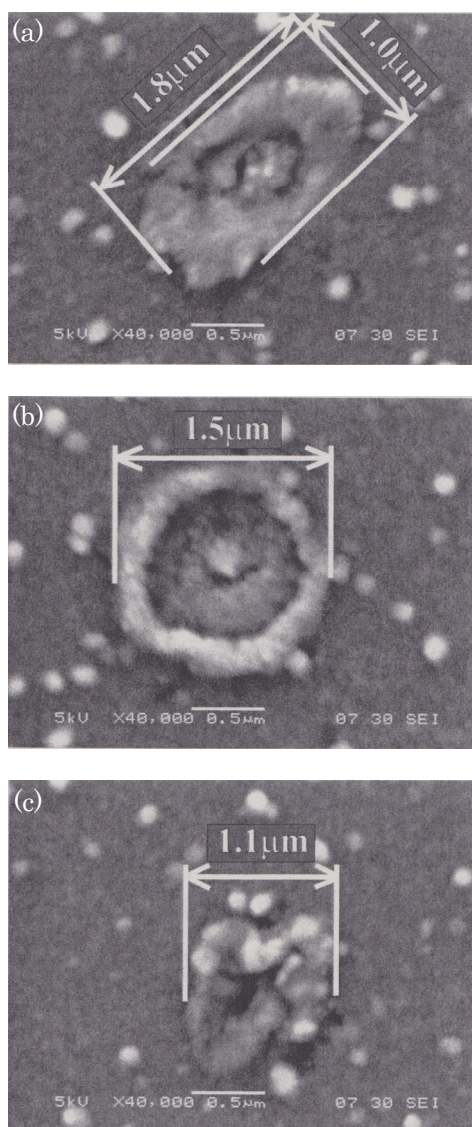


図5 「偏光による加工痕の変化：
(a)直線偏光, (b)円偏光, (c)ラジアル偏光」

加工閾値は直線偏光, 円偏光共に 0.17 J/cm^2 , となり, ラジアル偏光は 0.43 J/cm^2 と高くなったため, ラジアル偏光の加工効率は低くなった。

5. 結論

既設のレーザー加工装置に着脱可能な偏光モード変換器を新たに開発し, 偏光モード変換器によって, フェムト秒パルスレーザーによる加工を行った。本研究で用いたレーザーでは, ラジアル偏光による加工効率の向上は観察できなかったが, その理由は, レーザーの強度が足りず, 薄膜しか加工できなかったため, すり鉢状の加工面が形成されなかったため,

ラジアル偏光の効果が十分に発揮されなかったためであると考えられる。そのため, より高強度のレーザーによる加工によって,十分に厚みのある材料を加工する場合には効果が期待される。

一方で, 本研究に用いた偏光モード変換器は CO_2 レーザー, ナノ秒パルスレーザーには適用できなかった。 CO_2 レーザーに関しては従来法通りの共振器の改造による方法が必要であるが, ナノ秒パルスレーザーに関しては, 液晶の動作温度を高温側に調整したり, 液晶セルの素材や構造を放熱性を高めたものにすることで使用できるようになると考えられる。

今後, 加工用に特化した液晶素子の製造を行うことで, 加工に使用できる偏光モード変換器の作成を行っていく。

謝辞

本研究を遂行するにあたり, 公益財団法人天田財団助成を頂きました(一般研究開発助成 AF-2010214)。ここに心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) V. Niziev, A. Nesterov: Journal of Physics D: Applied Physics, 32, (1999), 1455-1461.
- 2) K. Venkatakrishnan B. Tan: Journal of Micromechanics and Microengineering, 16, (2006), 2623-2607.
- 3) S. C. Tidwell G. H. Kim W. D. Kimura: Applied optics, 32, (1993), 5222-5229.
- 4) A. V. Nesterov V. G. Niziev, V. P. Yakunin: Journal of Physics D: Applied Physics, 32, (1999), 2871-2875.
- 5) K. Yoshiki K. Ryosuke M. Hashimoto N. Hashimoto T. Araki: Optics Letters, 32, (2007), 1680-1682.