

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04109

研究課題名（和文）特殊偏光ビームによる異形穴レーザー加工

研究課題名（英文）Odd-shaped hole drilling with a polarized laser beam

研究代表者

菊田 久雄（Kikuta, Hisao）

大阪公立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10214743

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：偏光変換素子を用いて、偏光分布を持つビームを生成し、フェムトパルスレーザーによって金属板に異形穴をあける技術開発に取り組んだ。とくに、適切な偏光変換素子を設計・作製することによって150umの微細十字穴の加工が行えることを実験により示した。  
また、四角穴加工において加工条件のトランスを広げるための偏光ビームを設計し、このビームを生成するための偏光変換素子を作製して、実際に加工条件が広がることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開口数の小さい光学系で微小な十字穴の加工ができることを実験により示すことができた。また、クロス偏光ビームを生成するための偏光変換素子を調整することで、集光ビームの強度分布を円形のものから丸みを帯びた四角形に変更することで、レーザービームの照射側の開口形状を鋭い角をもつ四角形にできること、および、四角穴を形成するための加工条件が広がることを示した。これらの成果により、低開口の光学系で微細な異形穴加工を可能になり、電子機器での製造に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：A laser processing to drill non-circular holes in a metal plate by a femtosecond laser beam of which the polarization distribution have been developed. A polarization converter for a cross-shape hole was designed and the cross-shape hole of a 150um-size was drilled successfully in experiments.

Not only polarization distribution but beam profile was designed to widen the processing conditions for drilling a square hole. Wide tolerances of laser processing with the designed laser beam were demonstrated on experiments.

研究分野：工学

キーワード：レーザー加工 偏光ビーム 異形穴加工 フェムト秒レーザー

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

レーザによって数  $10\mu\text{m}$  の径をもつ深穴加工が行われているが、その形状は丸穴に限られる。ビーム走査や強度分布の制御だけで、集光回折限界に近い開口穴の形状を制御することは原理的に困難である。集光ビーム内で偏光ラジアル偏光とアジマス偏光で交互する偏光配置をもつクロス偏光ビームを用いると微小四角穴の加工が行えることが分かっている。この原理は、偏光による吸収率の差を利用することで微細穴の形状を制御するものである。偏光配置を工夫することでより複雑な形状を持つ微細穴加工が可能になると期待される。本加工技術を実現できれば、微小ノズル穴の形成技術や電子部品の後工程等のモノ作り産業に寄与することが期待される。

### 2. 研究の目的

本研究では、フェムト秒レーザから射出されたビームの偏光を外部素子によって特別な偏光配置をもつビームに変換し、偏光による吸収率の差を利用することで微細穴の形状制御を可能にする研究を行う。とくに、三角形や十字などの複雑な開口をもつ微小穴を形成するための、偏光ビームの設計、および、偏光変換素子の試作とこれを用いたレーザ加工による実証実験を行う。

### 3. 研究の方法

四角形以外の異形穴加工として、十字穴、および三角穴の加工について検討した。また、より開口形状がきれいな四角穴を形成するための偏光ビームについて検討を行った。具体的には、レーザ加工シミュレータをそれぞれの穴形状における適切な偏光配置を用いて設計し、偏光変換素子を作製して、フェムト秒レーザを用いて実際に穴加工を行うことで、異形穴加工の実現を実証した。その他、レーザ加工シミュレータによる穴形状の予測精度を高くするために、材料除去モデルを変更して、より現実的な加工形状予測が行えるようにした。また、鉄系以外の試料（銅、樹脂、セラミックス）での加工実験を試みた。

### 4. 研究成果

#### (1) レーザ加工シミュレータの改良

クロス偏光ビーによる四角穴加工において、実験で期待通りの四角穴が得られているが得られているが、その加工条件はシミュレーションにおける条件を大きく異なるものであった。その理由は、フェムト秒レーザによるアブレーション加工の物理プロセスが通常のレーザ加工のものとは異なるためであると考え、シミュレータにおける材料除去のルールを従来の熱モデルからフルエンスモデル (B.N. Chichkov, et al., Appl. Phys. A 63, 109(1996)) に変更した。この材料除去モデルは、部材内部での光強度にアブレーション閾値を設けて除去深さを決定するものであり、1ps 以下の短いパルス幅でのレーザアブレーション加工において実験と比較的によく一致するとされている。

加工部材が  $0.1\text{mm}$  のステンレス板を  $129\mu\text{J/pulse}$  のエネルギーで 4000 パルス照射したときの実験結果を図 1 (a) に示す。従来の熱モデルにおいて同じ加工条件で形状を求めても、パルスエネルギーが閾値を下回るために加工穴が得られない。加工条件を  $10\text{mW/pulse}$ 、300 パルスにすることで図 1 (b) の結果が得られる。一方、フルエンスモデルでの結果を図 1 (c) に示す。シミュレーションでの加工条件は  $120\mu\text{J/pulse}$ 、4000 パルスである。実験での条件とほぼ同じである。また、加工閾値は、実験により求めた値 ( $46.8\text{ mJ/cm}^2$ ) を用いた。フルエンスモデルを採用することで、より実験結果に近い条件で形状予測ができることが分かった。

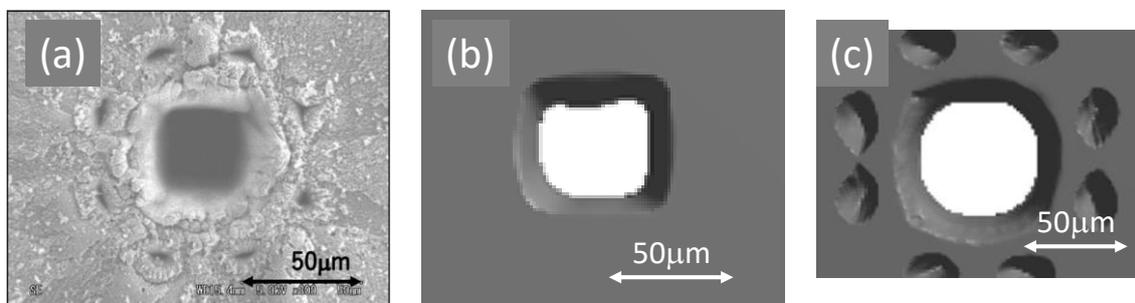


図 1. 材料除去モデルの偏光による加工推定形状の違い。(a) 実験結果。ビーム照射側からの観察。加工条件： $129\mu\text{J/pulse}$ 、4000 パルス。(b) 熱モデルによるシミュレーション結果。加工条件： $10\text{mW/pulse}$ 、300 パルス。(c) フルエンスモデルによるシミュレーション結果。加工条件： $120\mu\text{J/pulse}$ 、4000 パルス。

#### (2) 偏光と強度分布を制御したレーザービームによる四角穴加工の高精度化

クロス偏光ビームを用いて四角穴が得られているが、加工条件によって穴開口の形状（とく

にビーム照射側の開口)が変化することが実験で示されていた。このときのクロス偏光ビームの強度分布は中心が暗いドーナツ状の円形ビームであった。穴形状は偏光による光吸収率の差だけで設けられている。ビーム照射側での加工の初期は試料表面はビームに対して垂直であるので、偏光の影響を受けにくく、開口は円形になりがちである。

ビームの強度分布を四角形にすれば開口部も四角の穴が得られるが、光学系の開口数を大きくする必要がある。本研究は、光学系の開口数を小さいままで四角穴を設けることを考えている。ここでは、光変換素子の設計を変更することで、開口数は低いままに、集光ビームを少し丸みを帯びた四角形にすることで、強度分布と偏光分布の両方の効果で四角形の穴開口を得る方法を考えた。

図2に丸みを帯びた四角形状をもつクロス偏光ビームを示す。図2(a)は偏光変換素子の構造を示している。8分割の1/2波長板を組み合わせたものであり、図の斜線方向が1/2波長板の主軸方向を表している。従来の偏光変換素子では、各1/2の頂角は均等(いずれも45°)になるように作成していた。ここでは図のように頂角が30°と60°で構成される偏光変換素子を考えた。この素子を使って集光した場合の強度分布と偏光配置の計算結果を図2(b)に示す。偏光配置はクロス偏光を保ちながら、ビームの強度分布は角が大きく丸まった四角形になる。角部はラジアル偏光の向きで偏光が配置されているので鋭い角をもつ四角穴の形成が期待される。図2(c)はレーザ加工シミュレータを用いて求めた加工形状である。なお、素子設計では様々な分割角度で加工シミュレーションを行っているが、ここで示した30°/60°の構成が最も適していたので、この分割を採用した。

図3は、従来の45°均等分割の偏光変換素子(素子A)と新たに設計した30°/60°構成の偏光変換素子による加工の結果を示している。ビームプロファイルは、30°/60°構成の方が少し大きくなっている。ビーム形状が複雑になるほど小さい範囲に集光させることは難しくなるのは、光の回折現象のためであるが、従来の円形に比べてビーム形が極端に大きくなるわけではない。加工部材は0.1mm厚さのステンレス板を用いた。貫通側の開口はいずれも四角形であるが、ビーム照射側においては30°/60°構成のほうがより顕著な四角形の穴開口が得られている。

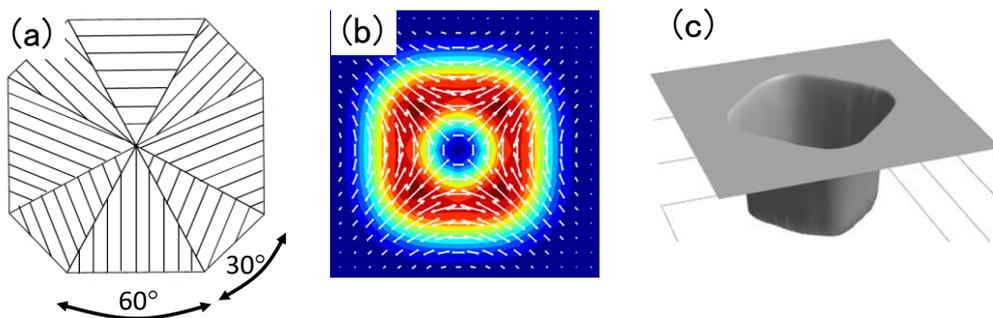


図2. 丸みを帯びた四角形偏光ビーム。(a)偏光変換素子の構造、(b)集光ビームの強度分布と偏光配置、(c)シミュレーションによる予測形状。

	斜めから(照射側)	照射側	貫通側	光強度分布
30°/60°分割素子		 50μm	 53μm	 53μm
45°均等分割素子		 46μm	 49μm	 49μm

図3. 均等分割偏光変換素子と30°/60°構成の偏光変換素子による集光ビームプロファイルと加工形状。試料は厚さ0.1mmのステンレス板。加工条件は、64μJ/pulse×16000パルス。集光レンズの焦点距離は50mm。

30°/60°構成の偏光変換素子を利用した四角穴加工では、従来の等分割構成のものに比べて、広い加工条件で四角穴を設けることができた。とくに、レンズ焦点位置からの光軸方向での試料ずれに対する影響が小さくなり、等分割構成では四角穴を得るための許容範囲が0.4mmであったものが、30°/60°構成では許容範囲が1.1mmになり、約3倍に広がった。このことは、実際のレーザ加工時において加工条件のトレランスを広くとれることを意味しており、実用化において意義ある結果である。

これらの偏光ビームを用いて樹脂板やガラス板に加工を試みたが、四角穴は得られず、レーザを照射した痕跡だけが残った。一方、銅板への加工においては四角穴が得られた。加工結果を図4に示す。銅板の厚さは0.1mm、64μJ/pulseのパルスを8000発照射した結果である。従来の均等分割素子と30°/60°構成の双方で四角穴が得られているが、均等分割素子の方がきれいな四角穴になり、30°/60°構成では角が強調され過ぎた形状になっている。銅材はアブレーションのためのフルエンス閾値が低いこと、および、ステンレス材に比べて光の反射率が高く、吸収率の偏光依存性も大きいことが原因だと考えられる。

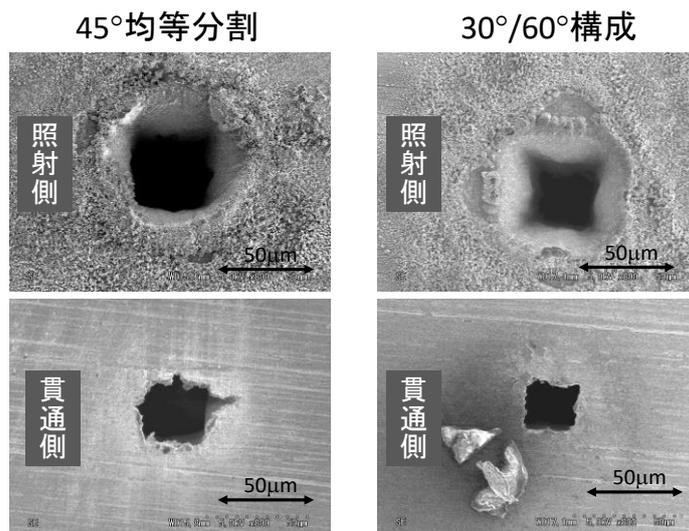


図4. クロス偏光ビームを用いて0.1mm厚さの銅板を加工した結果。

### (3) 偏光ビームによる十字穴加工の実証

十字穴加工用の偏光ビームは、加工形状が四角穴に比べて複雑なので、強度分布も加工穴形状に近いものになる。このような光強度と偏光の配置を実現するために、図5に示すような四角穴加工用の45°均等分割偏光変換素子に一部に180°の位相遅れを生じさせる位相板を重ねることで実現した。十字の腕部には光吸収率が低くなるように、腕先端部には光吸収が強くなるように偏光を配置している。

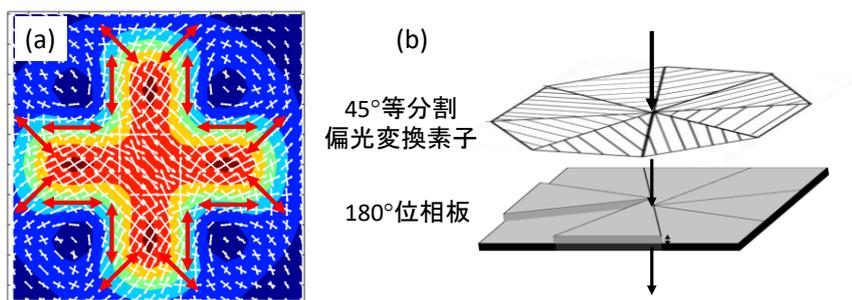


図5. 十字穴加工用の偏光ビームと偏光変換素子

図6は偏光変換素子部を加工用光学系に設置したときの集光ビームプロファイルである。中央部は十字形になっているが、周辺部に弱い強度の分布がみられる。設計でのビームプロファイルにおいても、周辺部にわずかな強度分布がみられるが、実験の配置ではより顕著である。これはレーザービームがきれいなガウス形でないこと、および、アライメント誤差によるものである。実際の光学素子のアライメント作業は、ビームプロファイルの確認だけでなく、偏光板を用いて各偏光方向での強度分布を確認しながら慎重に行う必要があった。

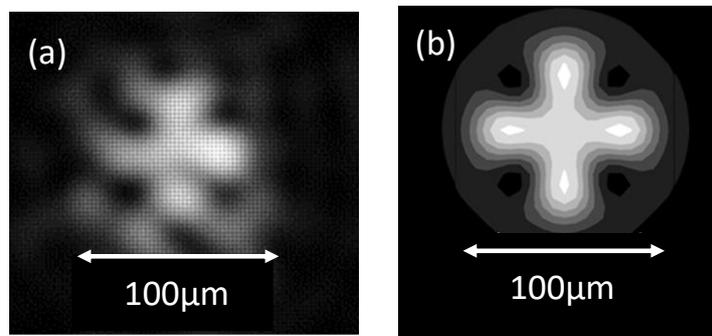


図6．集光ビームのプロファイル (a)実際の観測ビーム、(b)設計時のビームプロファイル (計算値)

図7は、厚さ 0.03mm のステンレス板に加工を行ったときの結果である。65μJ/pulse で、8000 発を照射した。貫通側で十字穴が形成されていることがわかる。ビーム照射側では 4 つの突起を囲むように穴が形成されているが、貫通しているのは中央の十字部である。周辺の穴は図 5 (a) に現れている青色で表示された部分による加工の影響である。

厚さ 0.1mm のステンレス材で加工を行ったが、照射側は図 7 (a) の形状と同じものが得られたが、貫通穴は得られなかった。照射パルス数を増やして加工を行っても貫通穴が得られなかった。この原因は、集光ビームが約 100μm の領域に広がることで、単位面積当たりのレーザーエネルギーが四角穴加工時に比べて低くなっており、穴加工中の斜面に入射すると加工閾値の条件を超えないフルエンス値になっているためである。より強いレーザー光で加工を行えば貫通穴が得られると予測されるが、利用したフェムト秒レーザーの出力限界の為に、実際に試すことはできなかった。

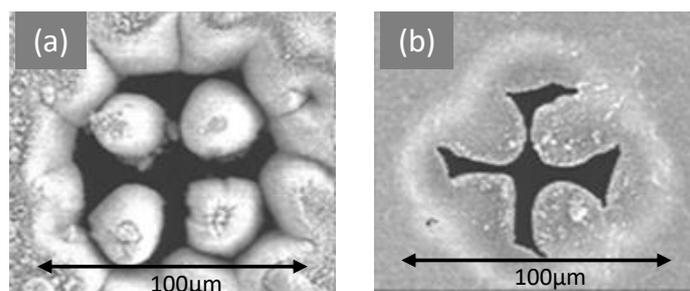


図5．十字穴加工の結果。(a)レーザービームの照射側、(b)貫通側

#### (4) まとめ

今回の研究を通して、形状をより正確に加工したり、複雑な形状を実現したりするには、偏光配置を工夫するだけでなく、強度分布も同時に制御する必要があることが分かった。また、ビームの強度分布を適切に設定できれば、加工条件のトレランスが広がることが分かった。

一方、十字穴加工においてはレーザー照射側での広がった光が加工に影響を与えることが分かった。複雑な穴加工のためには偏光配置と光強度分布を同時に制御する必要がある。これまでは、試行錯誤で偏光変換素子の設計を行っていたが、偏光と強度を同時に j に配置できる新しい設計方法の確立が課題になる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 隈川顕, 菊田久雄, 水谷彰夫, 渡邊歴, 吉名香介
2. 発表標題 フェムト秒偏光レーザービームを用いた異形穴加工のための数値シミュレーションによるレーザー・フルエンスの穴形状に与える影響の解析
3. 学会等名 2021年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菊田久雄, 渡邊歴, 江畑恵司, 仲前一男
2. 発表標題 偏光ビームによる異形穴加工
3. 学会等名 第94回レーザー加工学会講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菊田久雄, 門田直己, 隈川顕, 水谷彰夫, 渡邊歴, 吉名香介, 江畑恵司, 仲前一男
2. 発表標題 非等分割偏光変換素子を用いた フェムト秒レーザー加工による微小四角穴の形成
3. 学会等名 精密工学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菊田久雄
2. 発表標題 偏光変換素子を用いた フェムト秒レーザー加工による 微小四角穴の形成
3. 学会等名 光産業技術振興協会 多元技術融合光プロセス研究会 第4回講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青山周平, 隈川顕, 水谷彰夫, 菊田久雄
2. 発表標題 偏光レーザービームによる異形微小穴加工のための吸収エネルギー分布の電磁場解析
3. 学会等名 精密工学会2021年度春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 隈川顕, 水谷彰夫, 菊田久雄, 渡邊歴, 吉名香介
2. 発表標題 フェムト秒偏光レーザービームを利用した異形穴加工の形状形成メカニズムの数値シミュレーションによる解明
3. 学会等名 日本光学会 Optics & Photonics Japan
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 偏光変換素子、光学系及びレーザー加工機	発明者 菊田久雄、渡邊歴、 江畑恵司	権利者 住友電気工業、 公立大学法人大 阪、学校法人立
産業財産権の種類、番号 特許、2020-141067	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関