

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：12101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656095

研究課題名(和文) 金属基板表面への再帰性反射素子形成に向けた新規ビーム整形法の開発

研究課題名(英文) Development of laser-beam shaping method for retro-reflector fabrication on surface of metal substrate

研究代表者

山崎 和彦 (YAMASAKI, Kazuhiko)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：30436240

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：金属基板表面のレーザー微細加工技術として、円形ビームを三角形に整形するビーム整形法を提案する。構築した光学系を用いて得られた整形ビームのプロファイルを確認し、ステンレス基板表面に照射したところ、3光束の干渉によって周期約 $2.5\mu\text{m}$ の2次元周期構造物が形成された。一方、単一ビームの集光照射では幅約 $4\mu\text{m}$ 、深さ約 $0.7\mu\text{m}$ の溝加工を確認した。凹型三角形ピラミッド構造物の作製には至らなかったものの、短パルスレーザー光による微細加工技術としての発展性を示した。

研究成果の概要(英文)：We proposed new laser micro-fabrication process for stainless steel substrate using beam-shaping method to make triangle-shaped beam. Then we confirmed the profiles of the beam. After pulse irradiation to metal surface, formation of two-dimensional micro structures with 2.5 micrometer in pitch were observed. On the other hand micro grooves with 4 micrometer in width and with 0.7 micrometer in depth were fabricated by focused beam irradiation. Although fabrication of retro-reflector on stainless steel substrate could not be achieved, this indicates possibility of the micro-fabrication technology of metal surface using interference pattern of short pulse.

研究分野：工学、機械工学

科研費の分科・細目：生産工学・加工学

キーワード：ナノ・マイクロ加工 ビーム整形 短パルスレーザー

1. 研究開始当初の背景

短パルスレーザー光をサンプル表面に集光照射すると、加工部位周辺への熱影響が少なく、波長程度のサイズの微細加工が可能となる。そこで、これまでに単一集光照射によるステンレス基板表面への凹型三角形ピラミッド構造物の作製を試みてきた。このような凹型の機能性周期構造物の一例に、入射光の一部を入射方向に反射する再帰性反射素子があり、日本原子力研究開発機構では放射線損傷を受けた構造物の遠隔光診断技術への応用に関する研究開発が行われている。

しかしながら、単一集光光学系とステージの3次元走査による微細加工では、除去が必要な部分全体を走査するために加工時間が長くなる傾向にある。そこで本研究課題では、レーザ加工技術のための全く新しいビーム整形法を提案し、従来の単一集光光学系によるレーザ加工法と組み合わせて金属基板表面の3次元レーザ微細加工技術へと発展させる。

本研究課題では、六角錐プリズムを用いた新しいビーム整形法を提案する。この整形手法は、フォトマスクが必要なく、整形後のビーム強度が加工位置で平坦化されるため、1~数十パルスの照射で均一な加工深さでの面加工が可能と考えられる。加工位置とビームサイズの調整によって100~300 μ m前後の凹型三角形ピラミッドを加工し、従来の単一集光光学系の場合よりも加工時間の短縮化が期待できる。

2. 研究の目的

本研究課題では、レーザ加工技術のための全く新しいビーム整形法を提案する。円形のビームを三角形に整形するこの手法と、従来の単一集光光学系によるレーザ加工法と組み合わせ、金属基板表面の3次元レーザ微細加工技術へと発展させる。

まず三角形の整形ビームを得るための基本光学系の構築、および整形後のビームプロファイルの確認、光軸調整方法を確立する。この整形したレーザ光をステンレス基板表面に照射し、面加工や3次元微小再帰性反射素子の作製を試み、光学系や加工条件(レーザ波長、出力、照射パルス数など)の最適化を行い、3次元レーザ微細加工技術としての実用性を確認する。

3. 研究の方法

(1) 六角錐プリズムを用いたビーム整形光学系の構築

まず、微細な凹型三角形ピラミッドの加工を実現するため、六角錐プリズムを用いてビーム強度の平坦化、および三角形のビームへの整形を同時に行う、ビーム整形光学系を構築した。図1に光学系の概要を示す。頂点の角度が173度の六角錐プリズムにレーザ光を入射すると、XY平面上において60度の頂角を持った三角形の6つの光束に分割され

る(図1上参照)。それぞれの光束自身は平行光束で、プリズムからの伝搬距離に依存して発散していく。このとき、本来ビーム中心の高強度部分が、プリズムを透過することで外側の頂点に位置する。

次に、2枚の縮小系レンズ対などを用い、ビームサイズを任意の倍率に縮小した(図1下参照)。このときの縮小倍率は、2枚のレンズの焦点距離の比 f_2/f_1 によって決定し、この比 f_2/f_1 を1/10から1/2程度に変化させることでビーム品質を検討した。2枚目のレンズ透過後の6光束は、2枚目のレンズの焦点位置で再び交差する。

このとき光路途中にビーム選択板を挿入し、6光束のうち隣同士でない3光束(ひとつ置き)を選択することで同じ方向に頂点を持つ三角形の3光束が重ね合わされ、三角形のビーム形状に整形される。

さらには、3光束の高強度な位置(頂点)は、重ね合わされた後の三角形のそれぞれ異なる頂角に位置し、三角形のビーム全体でビーム強度の強い部分と弱い部分が補間され、ビーム強度の平坦化が可能となる。

この3光束が重ね合わされた位置にサンプルを設置することで加工でき、加工位置におけるビームサイズは、光学系に導入するビーム径の調整によって制御できる。

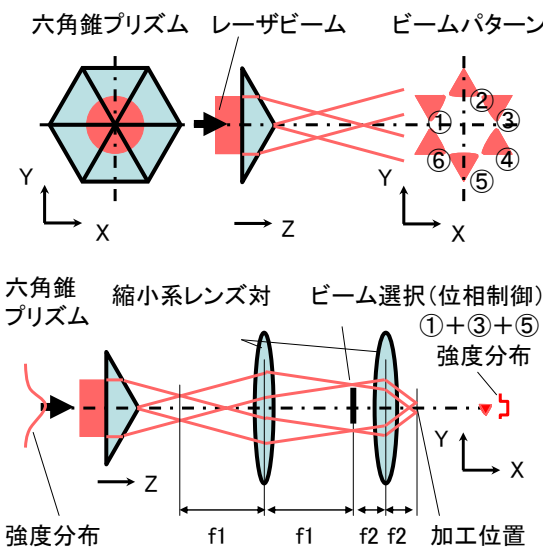


図1 六角錐プリズムの効果(上)と提案するビーム整形光学系(下)

(2) ビームプロファイルの確認および光軸調整方法の最適化

構築したビーム整形光学系に短パルスNd:YAGレーザー(波長1064nm、パルス幅~60ps、繰返し周波数1kHz、半径比約1.2)を導入し、ビームプロファイルを用いて加工位置でのビームプロファイルを確認した。整形光学系の各素子を調整し、プロファイルを最適化した。このとき、ビームを重ね合わせた位置での干渉が顕著であったため、整形光学系の各ビームの光路上に位相制御板として

光学窓（厚さ 1 mm）を導入し、それらを回転させることでビームプロファイルの変化を確認した。

(3) 加工形状の評価及び加工条件の最適化

整形したビームを金属基板表面に照射し、ビームプロファイルとの比較、最大/最小加工サイズの確認、加工形状、面粗さ等の評価し、加工条件（出力、照射パルス数など）を決定した。サンプルは、表面を#4000 の耐水性 SiC 研磨紙で研磨したオーステナイト系ステンレス基板（SUS316L、厚さ 1~5 mm）を用いた。また、レーザ加工の助力のため、研磨後の基板表面にグラファイト微粉末を塗布し、その効果を確認した。

(4) 仕上げ加工条件の検討

対物レンズ（倍率 10 倍、開口数 0.26）を用い、単一ビーム照射による仕上げ加工の精度や仕上げ工程の短時間化について検討した。集光ビームの直径は約 $5.0 \mu\text{m}$ （エムスクエア値 1.5 と仮定すると約 $7.5 \mu\text{m}$ ）と見積られる。照射エネルギーは $2\sim 5 \mu\text{J}$ 、走査速度は $100\sim 500 \mu\text{m/s}$ とした。また、加工デブリの発生が確認されたため、ガスノズル（ノズル孔径 1.0 mm）を用いて不活性ガスであるアルゴンガスを圧力 0.1 MPa の条件で吹き付けながら、レーザ加工を行った。

4. 研究成果

(1) 六角錐プリズムを用いたビーム整形光学系の構築

図 2 に本研究課題で構築したビーム整形光学系の外観を示す。短パルス Nd:YAG レーザ（波長 1064 nm、パルス幅 ~ 60 ps、ビーム径 1.5 mm）をビームエキスパンダー（ $\times 1\sim \times 3$ ）でコリメートし、六角錐プリズムに導入したところ、60 度の頂角を持った三角形の 6 つの光束に分割された。

次に縮小系レンズ対である、レンズ 1（ $f_1=350, 500$ mm）、レンズ 2（ $f_2=40, 50, 70$ mm）を組み合わせ、 f_2/f_1 の比を $1/10$ から $1/2$ 程度に変化させたところ、 $1/7$ を超える縮小比では、プリズムからレンズまでの伝搬距離が長くなり、縮小レンズ系の外側を光が通過し、収差が発生した。

また、レンズ 1 とレンズ 2 の間にビーム選択板を挿入し、6 光束のうち隣同士でない 3 光束（ひとつ置き）を選択し、2 枚目のレンズの焦点位置で再び交差するビームを観察したところ、縮小された 3 光束が確認された。(2) ビームプロファイルの確認および光軸調整方法の最適化

構築したビーム整形光学系において、ビームエキスパンダー（なし、または $\times 1\sim \times 3$ ）、プリズムへの入射方向、縮小比 f_2/f_1 など主要なパラメータとし、2 枚目のレンズの焦点位置での 3 光束のビーム形状とプロファイルを観察した。

その結果を図 3 示す。ビームエキスパンダーを使用しない場合や $\times 1$ の場合は、プリズム中心を通過することによるゆがみが観察

され、一方、ビームエキスパンダー $\times 3$ の条件では、ほぼ全てのレンズの組み合わせで一辺 $300 \mu\text{m}$ 程度の三角形のビーム整形が可能となった。このビームプロファイルは、ビームコリメータや、2 枚目のレンズの XY や傾きの調整に大きく影響された。一方、光束が重ね合わされた位置でのビーム強度は、3 光束で補間されたものの、端や中心の強度が比較的高く、強度の平坦化までは至らなかった（図 4 参照）。この現象はプリズムに導入するビーム径が小さいほど顕著であった。

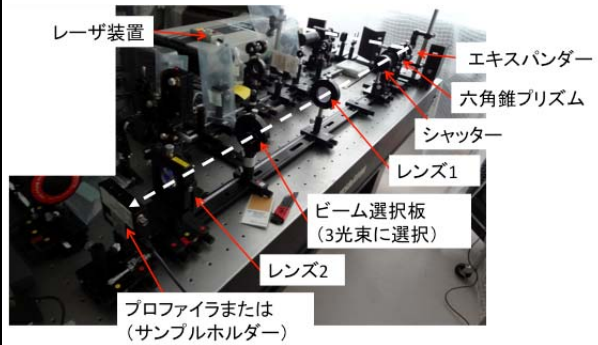


図 2 ビーム整形光学系の外観

| | ビームエキスパンダー倍率 | レンズL1 | レンズL2 | ビーム形状 |
|---|---------------|--------|-------|-------|
| ① | なし | f=350 | f=50 | |
| ② | なし | f=500 | f=70 | |
| ③ | $\times 1$ | f=500 | f=70 | |
| ④ | $\times 1.25$ | f=500 | f=70 | |
| ⑤ | $\times 3$ | 六角プリズム | f=50 | |
| ⑥ | $\times 3$ | f=350 | f=40 | |
| ⑦ | $\times 3$ | f=350 | f=50 | |
| ⑧ | $\times 3$ | f=350 | f=70 | |
| ⑨ | $\times 3$ | f=500 | f=70 | |

図 3 素子の組み合わせと整形後のビーム

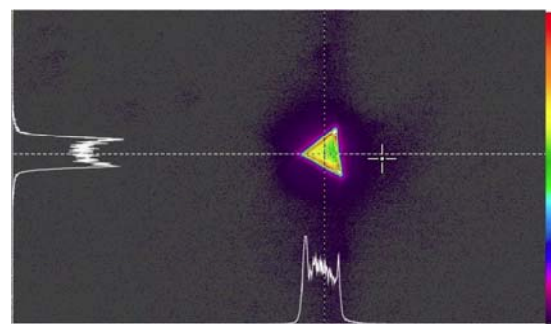


図 4 整形したビームプロファイルの例

以上のことから、図3の⑤以降のプリズムに導入するビームサイズ 4.5 mm を超える条件では、加工のためのフルエンスが得られなくなるため、ビーム形状とフルエンスのバランスから、①のビームエキスパンダーなし、 $f_1=350$ mm、 $f_2=50$ mm や、④のビームエキスパンダー $\times 1.25$ 、 $f_1=500$ mm、 $f_2=70$ mm の組み合わせが比較的良好い。

(3) 加工形状の評価及び加工条件の最適化

図5に、表面研磨前後のオーステナイト系ステンレス基板 (SUS316L) の反射スペクトルを示す。研磨によって基板表面の平均粗さ R_a は、 $0.77 \mu\text{m}$ から $0.19 \mu\text{m}$ (測定範囲 $500 \times 500 \mu\text{m}$) に改善し、レーザ波長の 1064 nm における反射率 R も約 67.4% となり、未研磨の約 61.8% からわずかに上昇した。また、膜厚約 $0.4 \mu\text{m}$ のグラファイト微粉末を塗布した基板の反射率は約 19.8% で、吸収率 ($1-R$) は研磨後の基板と比較して約 3.5 倍大きい。

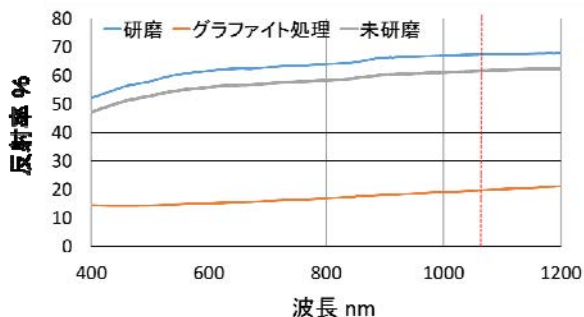


図5 SUS316L 基板表面の反射スペクトル

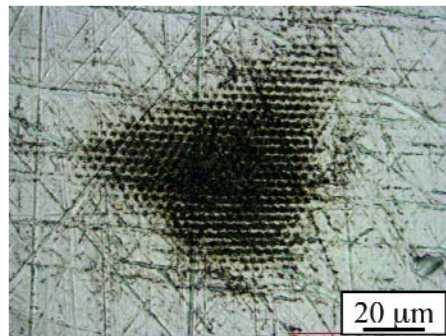
研磨後の SUS316L 基板を 2 枚目のレンズの焦点位置に設置し、①のセットアップで整形したビームを照射した。3 光束の合計の出力は $18 \sim 19 \mu\text{J}$ 、照射パルス数は $500 \sim 60,000$ パルスとした。その結果、SUS316L 基板表面には図6のような 2 次元の周期構造物が形成された。周期構造が確認できる範囲は 1 辺約 $90 \mu\text{m}$ の三角形で、このような加工が可能な 3 光束のビームが重なる z 方向の領域は約 $50 \mu\text{m}$ であった。そこで重ね合わされたビームを、対物レンズ (倍率 20 倍、開口数 0.42) を用いて拡大観察したところ、不鮮明ながらビームの中央に同様の干渉縞が観察された。整形光学系に位相制御板を導入したものの、位相制御板の調整による干渉パターンの消滅は確認できなかった。

またフルエンスを向上するために③のセットアップでビーム径を小さくして照射したところ、図7のように加工領域が円形に近づいた。中心の周期構造が確認できる範囲は約 $74 \mu\text{m}$ の円形で、その周囲にも基板の改質と推測される周期構造が確認される。レーザ顕微鏡像で測定した結果、周期 Δ は約 $2.54 \mu\text{m}$ で、干渉によって加工された各点での加工深さは約 $0.4 \mu\text{m}$ であった。

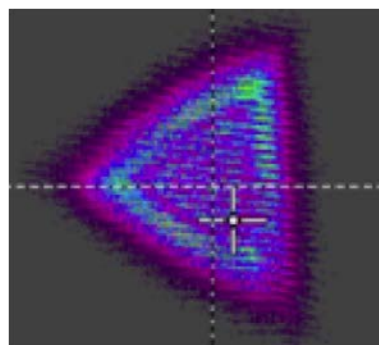
一方、グラファイト微粉末を塗布した部位に同様の条件でレーザ照射を行ったところ、グラファイト表面に周期構造が確認された。

しかしながらアセトンによる超音波洗浄後の基板表面には、周期構造物がランダムな分布で残るのみで、ほとんどのレーザエネルギーがグラファイト粉末に吸収されるのみで、基板の加工に寄与しないことが分かった。

ビームサイズをさらに小さくしてフルエンスを高めると、図8のような単一ビーム照射時と類似した直径約 $30 \mu\text{m}$ の穴加工が確認され、このときのフルエンスは 2.7 J/cm^2 以上と見積もられた。

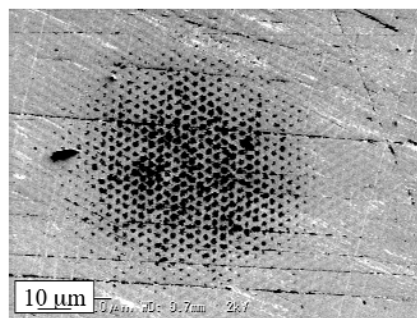


(a) $19 \mu\text{J}$ 、60,000 パルス

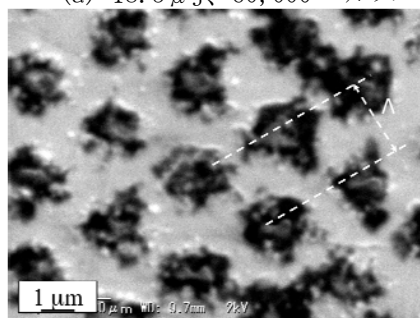


(b) ビームプロファイル

図6 整形ビーム照射後の基板表面の (a) レーザ顕微鏡像と (b) ビームプロファイル



(a) $18.5 \mu\text{J}$ 、60,000 パルス



(b) (a) の中央部の拡大像

図7 ビーム照射後の基板表面の SEM 像

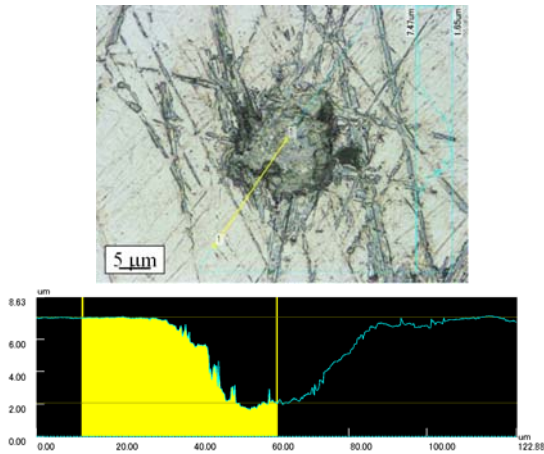


図8 ビーム照射後の基板表面のレーザ顕微鏡像（上）と断面プロファイル（下）

(4) 仕上げ加工条件の検討

対物レンズ（倍率 10 倍、開口数 0.26）を用いて単一ビーム照射による仕上げ加工について検討した。照射エネルギーと走査速度をパラメータとし、レーザ照射後の基板表面を観察した。このとき、ガスノズルを用いてアルゴンガスを吹き付けたところ、基板に再付着する加工デブリが減少した（図9参照）。このとき走査速度 100 μm/s 以下の低速条件下では、発生するデブリ量が多いため、ガスの吹きつけ効果が薄れた。

図10のように、加工溝の幅と深さ、加工溝両端の隆起部位から加工溝の底までの高さを計測した。照射エネルギー2 μJ、走査速度 300 μm/s でアルゴンガスを吹き付けながら照射した場合、幅約 4 μm、深さ約 0.7 μm の溝が形成した。溝底面の平均粗さ Ra は約 0.2 μm であった。照射エネルギーを増大すると、溝幅は 5 μm、深さは 2 μm を超えた。一方、ガスを使用しない場合には、発生した加工デブリの影響で溝深さが得られなかった。

最後に、図11のような1辺が 300 μm の凹型三角形ピラミッド作製のための仕上げ用走査プログラムについて検討した結果、上述の走査速度 300 μm/s でラインピッチ 2 μm の場合、レーザ走査時間は約 40 秒と見積もられるが、レーザ加工部位からの反射特性の評価が必要と考えられる。

本研究では、提案したビーム整形光学系を用いて三角形のビーム整形効果を確認したが、3光束の干渉によってビームプロファイルが均一でなく、基板に照射すると2次元周期構造物が形成された。単一ビーム照射による加工技術と組み合わせ、波長オーダーの微細加工技術としての発展が期待できる。また、次のような課題が示された。

- ① 干渉縞を抑制するためのビームプロファイル観察方法の確立と、位相制御板調整機構の導入
- ② レーザ加工部位からの反射特性の評価

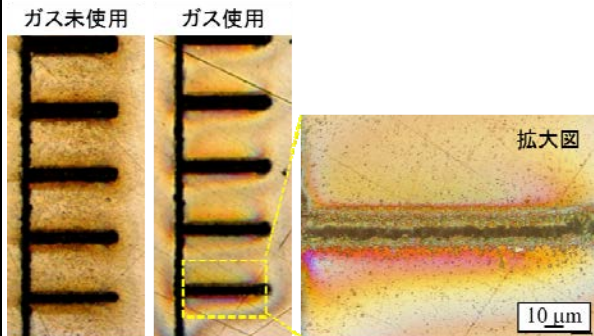


図9 加工後の基板表面の様子：照射エネルギー2.5 μJ、走査速度 300 μm/s、アルゴンガス 0.1 MPa

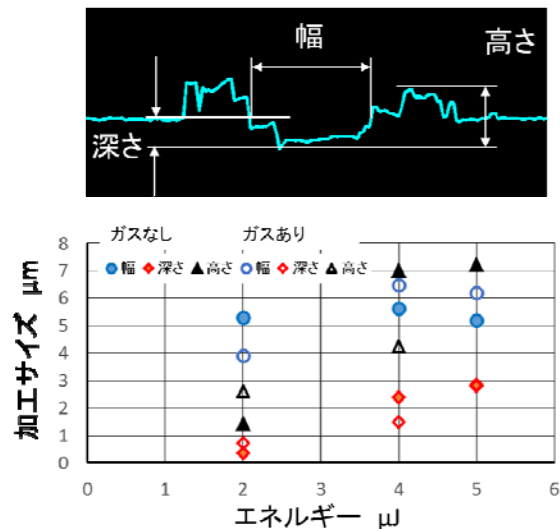


図10 単一集光ビーム照射で形成した溝のサイズ：走査速度 300 μm/s、アルゴンガス 0.1 MPa

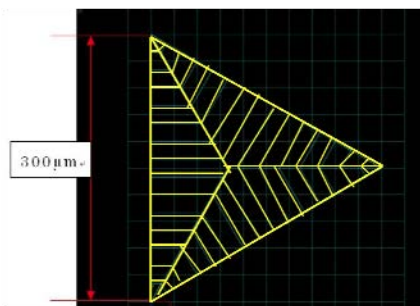


図11 仕上げ加工用の3次元レーザ走査パターンイメージ図

5. 主な発表論文等 特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 和彦 (YAMASAKI KAZUHIKO)
茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：30436240