

## フェムト秒レーザー加工におけるレーザービームの整形及び回転走査技術の開発

レーザー計測制御プロジェクトスタッフ 松田 稔\*

## Development of Batch Processing and Beam Rotating Method for Femto-second Laser Processing

Minoru Matsuda

We have been studying laser beam irradiating techniques for femtosecond laser processing. Femtosecond laser processing is able to process any materials without thermal collateral damage. However, its processing efficiency and processing precision is not so high. We developed a batch processing method with the spatial light modulator to increase processing efficiency, and demonstrated some batch markings on metal materials. We also manufactured a beam rotating device to improve processing precision, and demonstrated high precision drilling of CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic).

## 1. はじめに

我々はフェムト秒レーザー加工の産業応用を目的として、平成19～21年度静岡県プロジェクト研究「レーザーマイクロプロセッシングのための光計測制御技術の開発」に従事し、レーザー光の照射制御基盤技術の開発に取り組んできた。

フェムト秒レーザーは、極めて短い時間幅(≒ $100 \times 10^{-15}$ 秒)の光パルスを、一秒間に数千回(数kHz)程度の繰り返しで発する。フェムト秒パルス光のピーク出力は非常に高いため、フェムト秒レーザー光を用いた材料加工は、材料に依存しない非熱的な加工が可能であるという特長を持つ<sup>1)</sup>。また、1パルスあたりのエネルギーが小さく材料加工量が極めて少ないので微細な加工を実現できるが、繰り返し周波数がそれほど高くないので加工効率はよくない。さらに、レーザー光の強度分布が歪んでいるために、単純にレンズで集光しただけのビームを加工に用いると、精度の良い加工結果が得られない。フェムト秒レーザー加工の産業への適用を促進するためには、これらの問題を解決することが必要である。

そこで、①空間光変調器を用いてレーザービームを整形し加工効率を高める技術、②レーザービームを回転走査する装置を用いて加工精度を高める技術、の二種類のレーザー光照射制御技術を開発した。開発した各々の技術を用いて実証加工実験を行い、フェムト秒レーザー加工の産業応用への可能性を示した。

## 2. 方法

## 2. 1 レーザービームパターン整形

フェムト秒レーザー加工において、被加工物の形状は単純なものばかりでなく複雑なものも多い。複雑な形状を加工する際、レーザービームを集光し、その集光点を走査する方法では、形状の描画に長時間を要する。加工対象の形状に合うように、ビームパターンを任意の形状に整形して一括加工を行えば、加工時間の短縮・加工効率の向上が期待できる。

通常、レーザー光の強度分布を任意の形に整形するためには、マスクが使用されることが多い。複雑な形状に成形する場合は、マスクにより遮蔽される部分が多く、光の利用効率が低下する。しかし、空間光変調器(図1)を使用すれば、光の利用効率を高めることができる。

## 2. 1. 1 空間光変調器

空間光変調器は、平行配向ネマティック液晶空間光変調素子を利用して光の位相を変調する<sup>2)</sup>。空間



図1 空間光変調器(プログラマブル位相変調ユニット: 浜松ホトニクス製X7550DB-14L)

\*) 現 光科

光変調器にはコンピュータから計算機プログラムデータの映像信号が送出される。画素ごとに液晶の状態を制御することにより、レーザー光の強度分布の位相が空間的に制御されビームパターンが整形される。計算機プログラムのデータを変えることにより、任意の形状を実現することが可能である。

空間光変調器をフェムト秒レーザー光に適用し、レーザー光を任意の形状に整形すれば、光の利用効率の高い一括フェムト秒レーザー加工の実現が期待される。

### 2. 1. 2 一括マーキング加工実証実験

一括マーキング加工実証実験の構成を図2に示す。光源には、フェムト秒レーザー再生増幅器光（波長801nm、最大平均出力300mW、パルス幅60fs、繰返周波数1kHz）を使用する。フェムト秒レーザー光を空間光変調器に入射し、位相変調を施した後に対物レンズ（10倍）で試料表面に集光し加工する。ここで、フェムト秒レーザー光を、空間光変調器の開口部（20x20mm）にできるだけ均一な強度分布で入射させることが望ましい。そこで、ビーム径が約10mmのフェムト秒レーザー光を、平凹レンズ（ $f=-50\text{mm}$ ）と平凸レンズ（ $f=300\text{mm}$ ）から構成するビームエキスパンダへ通過させて、ビーム径を拡大する。加工所望形状の画像は、逆フーリエ変換によってプログラムデータに変換し空間光変調器に送出する。加工対象材料として、これまでの知見から比較的加工し易いSUS304を選定した。フェムト秒レーザー光を空間光変調器によって位相変調し、任意の数種類のビームパターンに整形後、ステンレス表面を加工した。加工後に試料の加工部を光学顕微鏡で観察した。

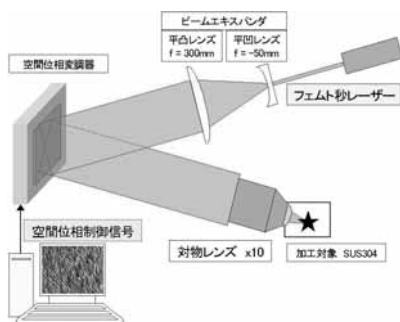


図2 空間光変調器を用いたフェムト秒レーザー一括マーキング加工実証実験

### 2. 2 レーザービーム回転走査

フェムト秒レーザー光を加工対象材料に集光照射すると、集光部におけるレーザー光のエネルギー密度分布に依存する相互作用によるアブレーション（蒸散）加工が起こる。フェムト秒レーザー再生増幅器光のビーム強度分布は歪んでいるため、高精度・高品質な加工結果を望む場合には、レーザービームの照射方法に工夫を施すことが必要である。特に、穴あけ加工においては、レーザービームを一点に照射し続ける方法（図3(a))よりも、回転走査を行いながら照射する方法（図3(b))の方が、高精度・高品質な加工結果が得られる。

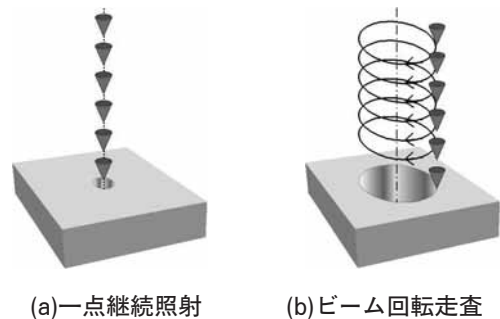


図3 パルスレーザー光による穴あけ加工法

#### 2. 2. 1 ビーム回転走査装置の製作と実証加工実験

図3(b)の方法を実現するための原理を、図4に示す。回転するクサビ形プリズムにレーザービームを通過させ、ビームを円形に回転走査する。複数のプリズムを組み合わせ、プリズム間の回転位相差（ $\phi$ ）と距離（ $\Delta$ ）を変化させることにより、走査半径(d)とビーム傾斜角度（ $\theta$ ）を制御する。図4の原理を具現化するためのビーム回転装置を設計・製作し、実証加工を行った。

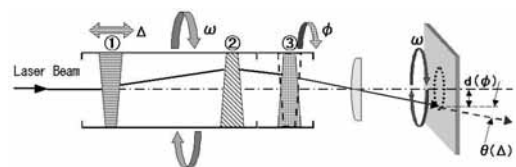


図4 ビーム回転走査を実現する原理

フェムト秒レーザー再生増幅器光（中心波長802nm、パルス幅約70fs、パルス繰返周波数1kHz、平均出力約400mW）をND フィルタ（減光フィルタ）で光量を調節後、製作した装置を使ってビームを回

【報告】

転走査し、平凸レンズで試料表面に集光して穴あけ加工を行った(図5)。加工後に、加工穴のレーザー入射側と出射側の様子を、目視及びSEM(走査型電子顕微鏡)で観察した。

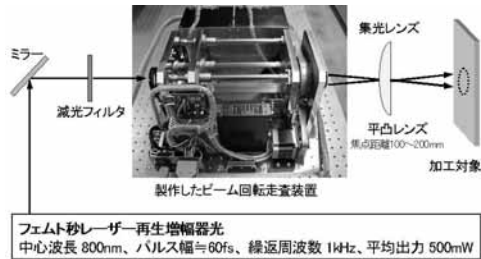


図5 ビーム回転走査装置の実証加工実験

2. 2. 2 フェムト秒レーザービーム回転走査装置を用いたCFRPの高精度穴あけ加工

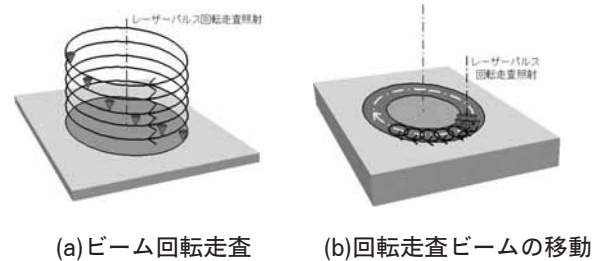
次世代輸送用機器に対する社会的ニーズの一つに、地球環境対応に伴う「軽量化」があり、様々な新素材の開発や活用が行われている。なかでもCFRP(炭素繊維強化樹脂)は、軽量で引張強度が高いために構造体として非常に魅力的な素材である。しかし、製造や成形にコストや時間がかかり、成形後の高精度な二次加工も容易ではない。これらの問題を解決しCFRPの利用を拡大するために、機械加工<sup>3)</sup>、YAGレーザー<sup>4)</sup>、エキシマレーザー<sup>5)</sup>等を用いた高精度加工技術の開発が行われている。

我々はCFRPの加工に、フェムト秒レーザー光を適用する。ネジやリベットによってCFRPを締結することを想定した「穴あけ加工」を目標として、2.2.1で述べたビーム回転走査装置を活用する。実験の構成は図5を流用し、加工対象としてCFRP(厚さ0.5mm、2層)を用いる。任意の径の穴を加工するために、図4中のプリズム③の位相を制御し、加工穴径の制御を試みる。加工後に、加工結果を目視及び走査型電子顕微鏡(SEM)で観察した。さらに厚い材料の加工可能性について検討するために、厚さ0.75mm、3層の構造のCFRPに対して加工を行う。加工後に、加工結果を目視及びSEMで観察した。

2. 2. 3 回転走査ビームの移動による加工深さの拡大

フェムト秒レーザービーム回転走査技術による穴加工では、加工が進行して加工反応部の位置が材料の表面から深くなるに従って、加工されずに残って

いる材料にレーザービームが遮られる。そのため、加工反応部に到達するエネルギー量が減少し、加工深さを拡大することが困難となる。そこで、図6(b)に示すように、回転走査をしているビームを円形に移動する。除去する材料の量を増やし、加工反応部に到達するレーザーエネルギー量の減少を抑えることにより、ビーム回転走査のみの加工よりも加工深さを拡大することが見込まれる。



(a)ビーム回転走査 (b)回転走査ビームの移動

図6 加工深さ拡大のためのビーム走査方法

図6(b)の方法による加工実験の構成を図7に示す。図中①は、ビーム回転走査によるビーム焦点の軌跡、②は回転走査されたビームが移動する軌跡である。加工対象としてCFRP(厚さ1.5mm、6層)を設置する。そして加工後に、加工結果を目視及びSEMで観察した。

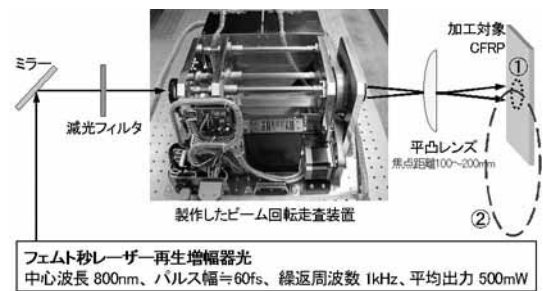


図7 回転走査ビームの移動による加工実験

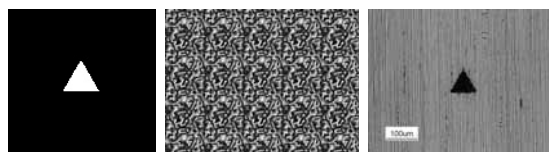
3. 結果と考察

3.1 レーザービームパターン整形

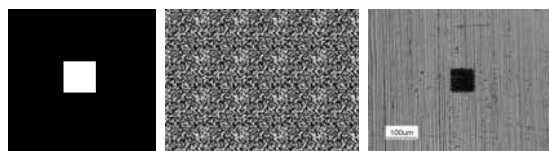
加工結果を図8に示す。図8①~⑥の各々で、目的とした整形パターン(ビットマップ画像データ)を(a)、位相変調のためにコンピュータプログラムで作製したデータを(b)、加工後の光学顕微鏡写真を(c)に示す。(c)内のスケールは100umである。パターン整形後のフェムト秒レーザー光で大きさが100um×100um以下の微細な一括マーキングを行うことができた。比較的単純な形状の加工は明瞭に行われてい

【報告】

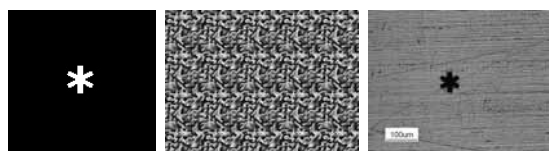
るが、整形後の形状によっては、一つの形状内においてマーキング加工にばらつきが見られた。



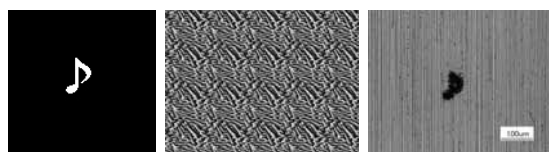
(a)目標整形形状 (b)位相制御データ (c)加工結果  
①「▲」マーキング



(a)目標整形形状 (b)位相制御データ (c)加工結果  
②「■」マーキング



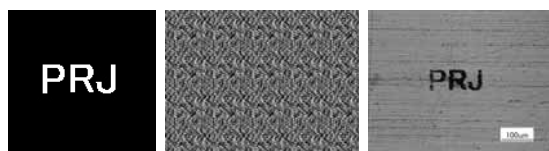
(a)目標整形形状 (b)位相制御データ (c)加工結果  
③「▲」マーキング



(a)目標整形形状 (b)位相制御データ (c)加工結果  
④「▲」マーキング



(a)目標整形形状 (b)位相制御データ (c)加工結果  
⑤「▲」マーキング



(a)目標整形形状 (b)位相制御データ (c)加工結果  
⑥「▲」マーキング

図8 レーザービームパターン整形による一括マーキング

3. 2 レーザービーム回転走査の有用性

厚さ0.3mmのステンレスに対して加工穴径の制御を行って加工した結果を図9に示す。プリズム③の位相 $\phi$ を変えると、ビームの進行方向の軸からのビ-

ムの変位量 $d$ が変化し、試料表面における円軌跡の半径 $d$ が変わる。電子顕微鏡写真の上段はレーザー入射側の試料表面、下段はレーザー出射側の試料表面である。③の位相 $\phi$ を0度から180度まで変化させると、加工穴径が約125~825 $\mu\text{m}$ まで約6倍変化することが確認できた。加工結果は、フェムト秒レーザー加工の特長を表しており、熱的な影響が極めて少ないシャープなエッジが確認できる。

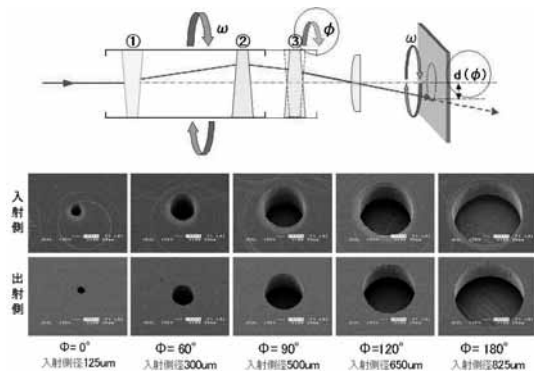


図9 ビーム回転装置による加工穴径の制御 (ステンレス厚さ0.3mm)

厚さ0.3mmのステンレス板に対して、加工穴テーパの制御を行った結果を図10に示す。プリズム①と②の間の距離 $\Delta$ を変えると、加工対象に入射するビームの角度 $\theta$ が変化し、加工穴のテーパが制御できる。電子顕微鏡写真の上段はレーザー入射側の試料表面、下はレーザー出射側の試料表面である。距離 $\Delta$ を50mmから200mm変化させるに従い、加工穴テーパの度合いを示す入射径と出射径の比が、約1.27から1.06まで、約20パーセント変化することが確認できた。

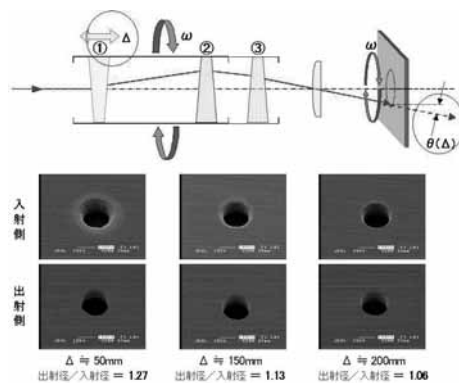
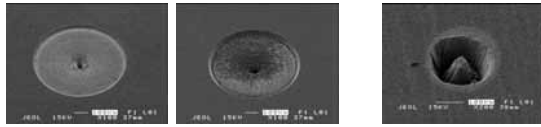


図10 ビーム、回転装置による加工穴テーパの制御 (ステンレス厚0.3mm)

その他の加工痕バリエーション例を図11に示す。加工対象は厚さ0.5mmのステンレス板である。円錐の雌型を作製しようと試みた結果を(a), (b)に示す。

各写真の中央部に円錐の雌型が確認できる。各々、円錐形の底面の大きさ、テーパの角度が異なる。

円錐の雄型の作製を試みた結果を(c)に示す。製作した物体の表面は若干荒れているが、加工条件を探索すれば、円錐の雄型を作製できる見込を得た。



(a)円錐の雌型 1 (b)円錐の雌型 2 (c)円錐の雄型  
図11 ビーム回転走査による加工のバリエーション例

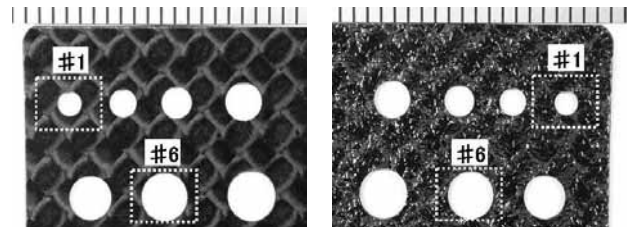
### 3. 3 CFRPの穴あけ加工

CFRP（厚さ0.5mm、2層）に貫通穴あけ加工を行った結果を図12に示す。照射パワーは150mW、レンズ焦点距離は100mmである。図4中のプリズム③の位相を制御することにより、加工穴径の制御を行った。加工穴径は2～4mmで制御され、フェムト秒レーザー加工の特長が十分に発揮された高品質な加工が施された。図12中の#1と#6の加工穴について、電子顕微鏡観察を行った結果を図13に示す。エッジ部、壁面共に溶融痕等は認められない。

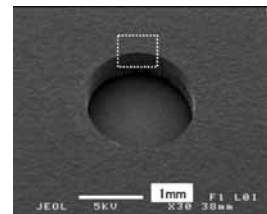
加工穴径と加工深さを拡大することを試すために、CFRP（厚さ0.75mm、3層）に、貫通穴あけ加工を行った。照射パワーは150mW、レンズ焦点距離は200mmである。加工結果を図14に、SEM像を図15に示す。バリ等の無い、直径6mmの貫通穴をあけることができた。この加工穴の真円度を測定した結果を図16に示す。真円度は約18umであった。

### 3. 4 加工深さの拡大（CFRPの穴あけ加工）

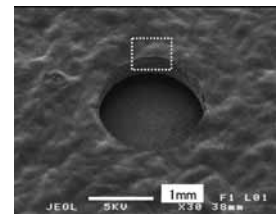
加工深さを拡大するために行った「回転走査したビームを移動する方法」による加工結果を、図17に示す。比較のために、回転走査したビームのみでの加工結果を図18に示す。厚さ1.5mm、6層のCFRP板に、バリ等が無く品質の良い直径6mmの貫通穴をあけることができた。比較のために行った回転走査のみによる穴加工結果（図18）と比べると、観察倍率を高くした際の観察において、加工穴周縁部の状態に大きな差がみられる。フェムト秒レーザー加工における穴加工で加工深さを拡大するためには、「回転走査したビームを移動する方法」が有効であった。



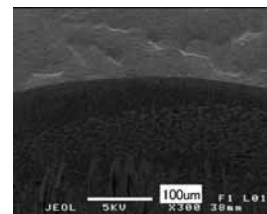
(a)ビーム入射側 (b)ビーム出射側  
図12 CFRP(厚0.5mm、2層)への穴あけ加工（1mm/一目盛）



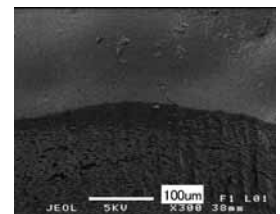
(a)図12(a)の#1×30



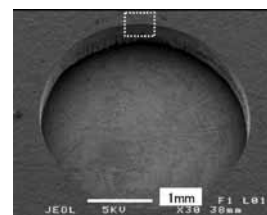
(b)図12(b)の#1×30



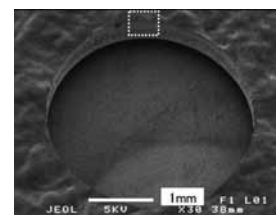
(c)図13(a)の口部×300



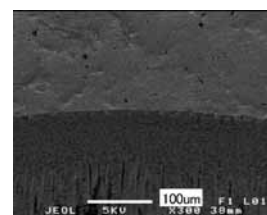
(d)図13(b)の口部×300



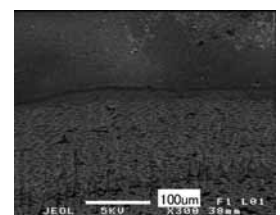
(e)図12(a)の#6×30



(f)図12(b)の#6×30



(g)図13(e)の口部×300



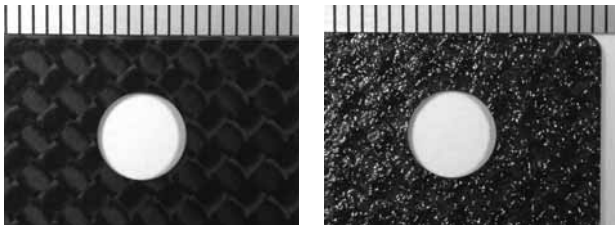
(h)図13(f)の口部×300

図13 CFRP(厚0.5mm、2層)への穴あけ加工

## 4. まとめ

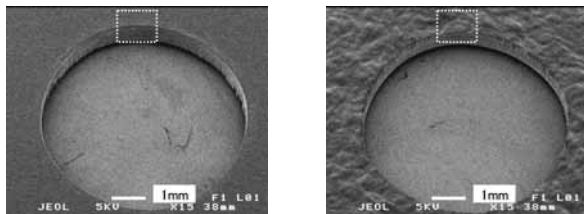
フェムト秒レーザー加工におけるレーザービームの整形及び回転走査技術を開発し、実証加工実験を行った。

最初に、加工効率を向上させることを目的として開発したレーザービーム整形技術を用いて、フェムト秒レーザー一括マーキングを実証した。実現しようとするパターン形状、面積、データの作り方が、加工の成否に大きく影響するので、実用化のために

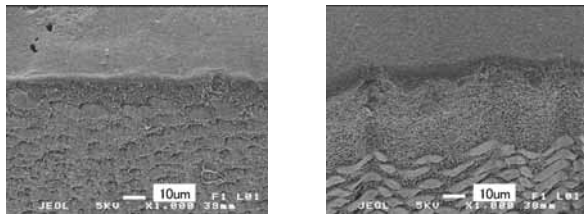


(a)ビーム入射側 (b)ビーム出射側

図14 CFRP(厚0.75mm、3層)への穴あけ加工(1mm/一目盛)



(a)図14(a)×30 (b)図14(b)×30



(c)図15(a)の□部×1000 (d)図15(b)の□部×1000

図15 CFRP(厚0.75mm、3層)への穴あけ加工

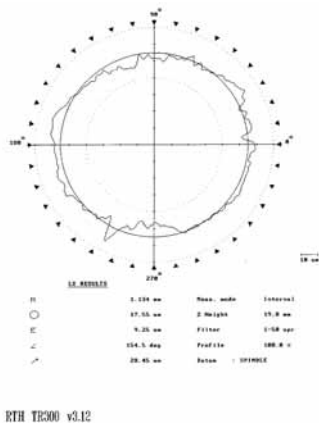


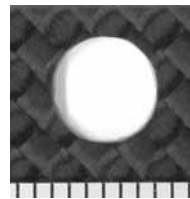
図16 加工穴の真円度測定結果

はさらに検討を要する。

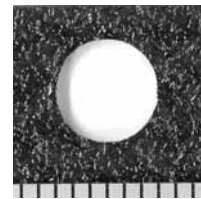
次に、フェムト秒レーザーとビーム回転走査技術を用いて、CFRP板への穴あけ加工を行った。加工部周辺への熱影響が非常に少ない高精度な穴加工が実現でき、加工技術の有用性を実証した。今後はさらに加工効率を高める方法を検討し、フェムト秒レーザーによるCFRP加工の実用化を目指す。

参考文献

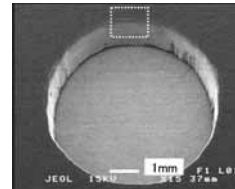
1) 緑川克美:フェムト秒レーザー加工,O plus E, 21-9,(1999),1130,



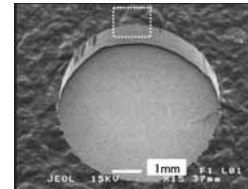
(a)ビーム入射側



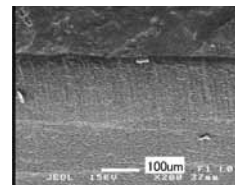
(b)ビーム出射側



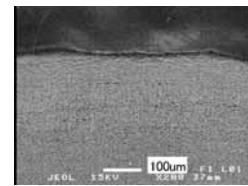
(c)図17(a)×15



(d) 図17(b)×15

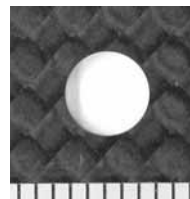


(e)図17(c)の□部×200

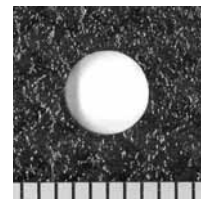


(f)図17(d)の□部×200

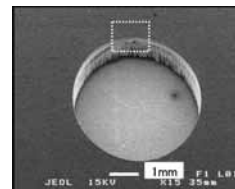
図17 ビーム回転走査の移動による加工



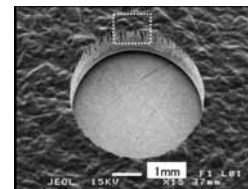
(a)ビーム入射側



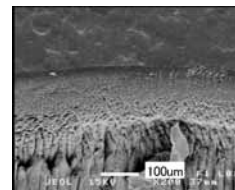
(b)ビーム出射側



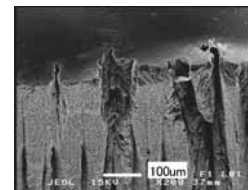
(c)図18(a)×15



(d)図18(b)×15



(e)図18(c)の□部×200



(f)図18(d)の□部 ×200

図18 ビーム回転走査のみによる加工(図17との比較)

2) 浜松ホトニクスホームページ:[http://jp.hamamatsu.com/products/other/1013/index\\_ja.html](http://jp.hamamatsu.com/products/other/1013/index_ja.html)  
 3) 坂本重彦,東二町圭介:2008年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集,59-60  
 4) 熊谷実,松田伸慶,宍戸郁郎:宮城県工技センター研究報告,24(1992),126-130  
 5) 電気学会:レーザアブレーションとその応用,コロナ社,(1999),169-176