

フェムト秒レーザーを用いた三次元金属加工機

独立行政法人理化学研究所 固体光学デバイス研究ユニット
ユニットリーダー 和田智之
(平成15年度研究開発助成 AF-2003005)

キーワード：フェムト秒レーザー、レーザーアブレーション、微細加工

1. はじめに

近年、超短パルス光源として注目されるフェムト秒レーザーの技術改新が進み、レーザーを専門としない人も取り扱えるようになり、加工においても次第に利用されるようになってきている。このレーザーは、熱緩和時間よりもパルス幅が短く高ピーク出力を有するため、多光子吸収を利用して材料を選ばず、非熱的にビーム径に匹敵する微細加工が行える。これらの理由により、フェムト秒レーザー加工は、機械加工やこれまでの熱により金属を溶融させるレーザーによる熱加工とは一線を画した新しい加工法として注目されている。

フェムト秒レーザーの加工では、多光子吸収を利用して光のエネルギーを加工材料に効率的に伝送することができ、さらに、光のパルス幅が熱の拡散速度に比べ短いことから、材料を限定しない微細加工ができることで注目を集めている。本研究では、材料ごとの加工特性に関する詳細なデータを取得し、さらに、CAD データとリンクした制御ステージとレーザー制御により、フェムト秒レーザーを用いた3次元微細形加工技術の開発を目的として研究を進めた。

2. 実験装置及び加工方法

本研究では、はじめに示したように、マイクロスケールの微細な3次元形状の構造物を作成することを目的としている。そのスケールは、ミリメートルからセンチメートルの大きさの材料を想定している。加工装置の概略を図1に示す。本研究で開発しているフェムト秒レーザー加工システムは、レーザー発振器、光学系、ステージにより構成されている。

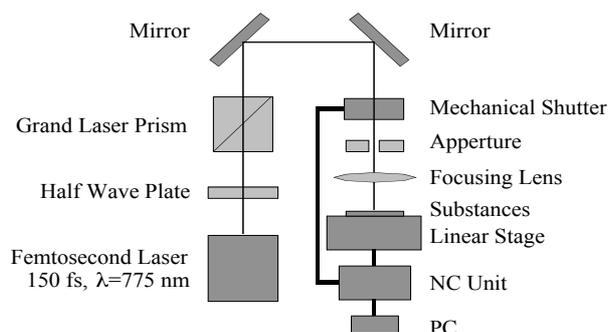


図1 フェムト秒レーザー加工装置の概略図

2・1 レーザー発振器

非熱的な加工を行うには、サブピコのパルス幅を有するパルスレーザーが必要となる。本研究では、安定性、メンテナンスの容易さを考慮し、Clark-MXR 社製のCPA-2001を選定した。本レーザーの基本スペックを表1に示す。

表1 フェムト秒レーザーの基本性能

パルス幅	150 fs
中心波長	775 nm
繰り返し周波数	1 kHz
平均出力	800 mW

2・1 光学系

ワークの種類および加工形状により、加工条件が変わることは容易に推測できる。その中に当然、レーザー出力は含まれる。レーザー発振器の方で、出力を変化させることはできるが、ビームの品質、安定性の問題からこの方法で出力を制御することは望ましくない。そこで、本研究では、出力を制御するための光学系（アテネーター）を採用した。本研究で用いる加工装置では、 $\lambda/2$ 板、グランレーザープリズムの対でアテネーターを構成している。また、レーザー照射の位置制御のため、最小分解能10msのメカニカルシャッターを導入している。なお、本研究で用いるレーザーは繰り返し周波数1kHzで作動するため、最小分解能の間に、10発のレーザーパルスをワークに照射することになる。境界の加工精度を高めるために、理想的には、パルスを1発毎に制御できる応答速度を有する高速シャッターを導入する必要がある。しかしながら、本報告では、フェムト秒レーザーによる境界よりはむしろ加工面の粗さを評価するために、シャッターの応答速度による依存性はほぼ皆無と考えられる。そのため、本加工システムで採用したメカニカルシャッターのような応答速度のシャッターを用いて、問題ないと言える。フォトン密度を高め、加工速度を上げるために、焦点距離50mmの平凸レンズを用いた。

2・3 加工ステージ

本実験では、ソディック製の3軸リニアステージを使用した。その基本性能を表2に示す。現行のシステムで

は、同時多軸に制御はできないため、直線加工しかできない状況にあるが、本研究では直線の溝加工を重ね合わせて、三次元形状の作成を行うので、現行で全く問題はない。また、本装置では、サブミリのスケールから、数センチのワークまで加工できるように、比較的大きなステージを搭載している。また、ステージ自体の真直度は1.5 ミクロンほどしかない。これでは、マイクロ構造物を作成する十分な精度を有しない。そこで、数値的に補正を加えることにより、300 ナノまで真直度を高めている。この程度の精度があれば、上記の手法を用いて、マイクロスケールの構造物を作成できる能力を有すると考えられる。

表2 3軸リニアステージの基本性能

真直度	0.3 μm ×1.2 μm ×0.3 μm
ストローク	100mm×100mm×20mm
スケール分解能	10 nm
テーブルサイズ	180mm×180 mm

2・4 加工方法

レーザーを用いて、三次元形状の加工物を作成する方法には、光造形法がある。本研究では、図2のように、光造形法を真似て、レーザービームを直線状に照射して、溝加工を行い、それを重ね合わせ、面加工を行い、等高線状に面加工を重ね合わせ、三次元の構造物を作成する手法を試みた。光造形法では、樹脂を硬化させるためにレーザーを照射するが、本手法では不要部分を除去するために、レーザーを照射する違いがある。

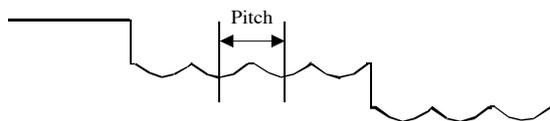


図2 3次元微細形状加工手法

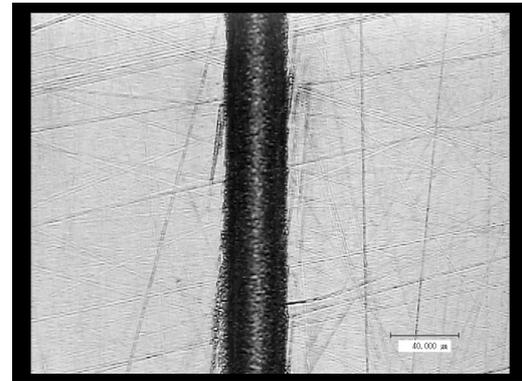
3. 実験結果及び考察

本章では、金属材料の代表として銅、結晶性材料としてサファイア、アモルファス材料の材料としてガラスの溝加工、面加工の加工特性を評価した。

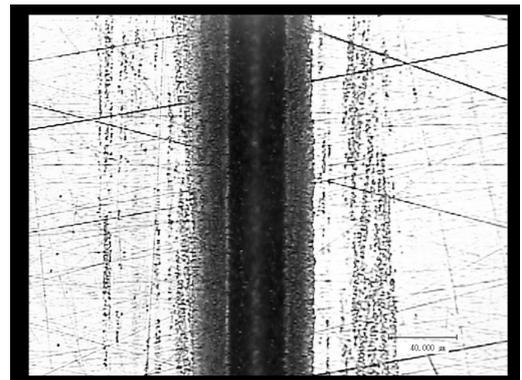
3・1 溝加工特性（銅、サファイア、ガラス）

本研究で提案する3次元微細加工は、溝加工を重ねて行う。従って、溝加工の大きさ、溝周辺に与える影響が3次元微細形状加工をする際の重要な要因となる。そこで、銅、サファイア、ガラスの加工特性を調査した。いずれのワークも溝加工前に研磨を施し、ワーク表面に、焦点位置がくるようにステージの高さを調整し、レーザー加工を行った。図3、4、5は、銅、サファイア、ガラスの溝加工の代表的な表面状態を示すC C D画像である。

図3は、ステージの走査速度を0.5mm/secに固定し、出力による加工部周辺のワーク（銅）表面状態の違いを示す。これより、照射レーザー出力が10mWと小さい場合、加工周辺部にはほとんど影響を与えないが、30mWになると、表面に大きな影響を与えることがわかる。ステージの走査速度を小さくした場合にも、この影響は顕著になることから、加工中に発生するプラズマによる熱影響によるものと思われる。



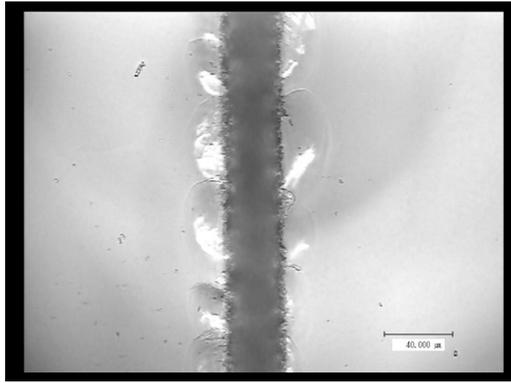
(a) 10mW, 0.5 mm/s



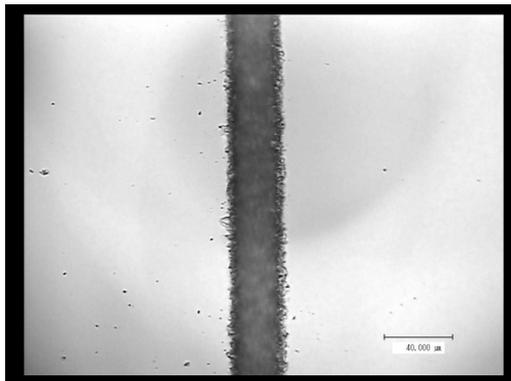
(b) 30mW, 0.5 mm/s

図3 銅の溝加工

図4は、出力を50mWに固定し、ステージの走査速度の違いによる加工部周辺のワーク（サファイア）表面状態の違いを示す。これより、走査速度が0.1mm/sと小さい場合、加工周辺部にクラックが見られるが、1mm/sと大きくすると、クラックの発生が見られない。サファイアの場合、出力が10mWに抑えても、走査速度が0.1mm/sの場合、クラックが起きる。このことから、加工中に発生した衝撃波により、クラックが起きたものと思われる。図5は、サファイアの場合と同様に、出力を50mWに固定し、ステージの走査速度の違いによる加工部周辺のワーク（ガラス）表面状態の違いを示す。これより、ガラス加工では、サファイア加工とは違い、走査速度の違いによりクラックの発生は確認できないが、走査速度が小さい方が、溝と表面の界面状態は鮮明である。ガラスの場合、出力を20mW、走査速度を0.1mm/sとして加工すると、図5(b)のように、境界が不鮮明になる。このこと

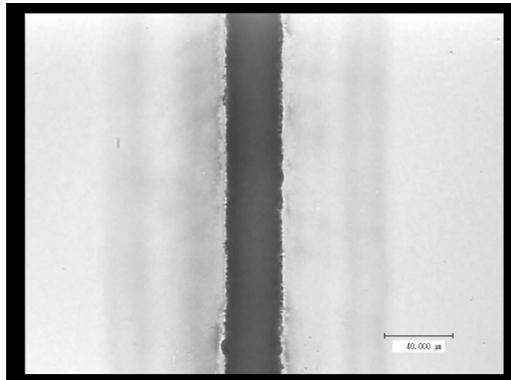


(a) 50mW, 0.1mm/s

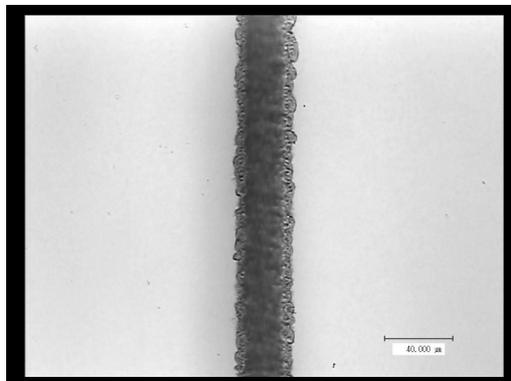


(a) 50 mW, 1.0 mm/s

図4 サファイアの溝加工



(a) 50 mW, 0.1 mm/s



(b) 50 mW, 1.0 mm/s

図5 ガラスの溝加工

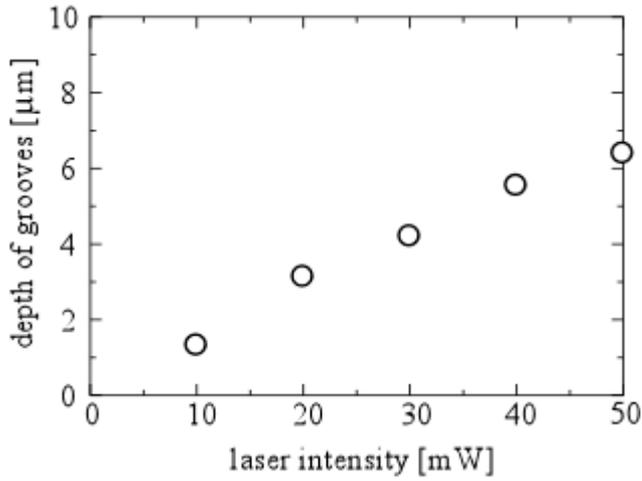
から、できるだけ周辺に影響のない溝加工を行うためには、金属材料の場合、出力を抑え、走査速度を高める必要があり、結晶性材料の場合、出力よりも走査速度に対する影響が顕著であり、走査速度を高める必要があり、アモルファス材料の場合、出力を高め、走査速度を遅くする必要があることがわかる。微細加工を行うためには、表面状態の他に、溝の大きさが重要な要因となる。そこで、溝の深さの走査速度、出力依存性を調査した。図6に銅、サファイア、ガラスの溝深さの走査速度、出力依存性を示す。いずれの材料に関しても溝深さのレーザー強度依存性評価の場合、走査速度を1mm/secに固定しており、走査速度依存性評価の場合、出力を20mWに固定した。これより、いずれの材料に関してもレーザー強度と溝の深さには、比例関係があり、サファイア、ガラスの場合、10mWのレーザー光を照射しても、全く加工できないことがわかる。これより、加工閾値は、銅はサファイア、ガラスに比べて低いことがわかる。走査速度と溝の深さの関係は、銅、ガラスの場合、速度が小さくなるにつれ、指数関数的に溝の深さが大きくなるが、サファイアの場合、一定の深さになる傾向があることがわかる。また、走査速度が0.1mmsecの場合、加工速度は、サファイア、銅、ガラスの順に加工速度が高くなるが、走査速度が0.5mmsecの場合、銅、ガラス、サファイアの順に加工速度が高くなる。以上のことから、加工速度は、加工条件、材料により、顕著に変化するといえる。故に、加工を行う場合、これらの事柄を踏まえながら、加工条件を割り出す必要がある。

3.2 面加工特性 (銅, サファイア, カバーガラス)

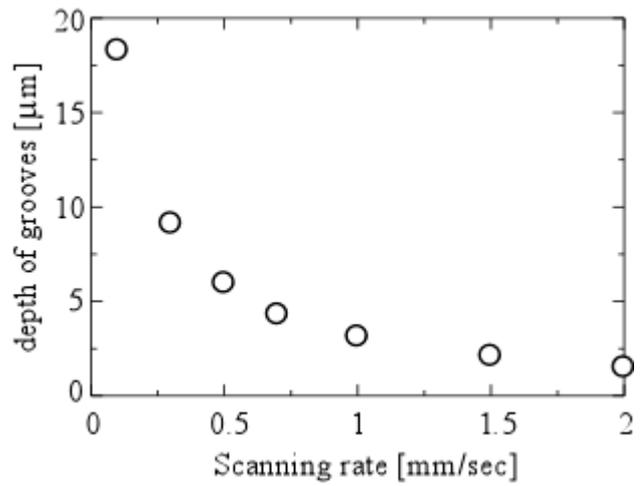
前節で、溝加工の特徴を紹介した。次に、溝加工を重ね合わせ、面走査を1回した場合の表面の状態が問題となる。そこで、銅 (出力20mW, 走査速度1mm/s)、サファイア (出力20mW, 走査速度0.5mm/s)、カバーガラス (出力20mW, 走査速度1mm/s) を、ピッチ幅 (7.5, 10.0, 15.0 μm) で面加工を行った。いずれの場合も溝幅が約30ミクロンとなるように加工条件を設定した。

表3に加工結果を示す。これより、銅は本研究で行った中で最も表面粗さが小さく、ピッチ幅を溝幅の10.0 μmとした場合に一番粗さが小さくなっている。一方、サファイアやガラスの場合、ピッチ幅が小さくなるほど表面粗さが小さくなっていることがわかる。

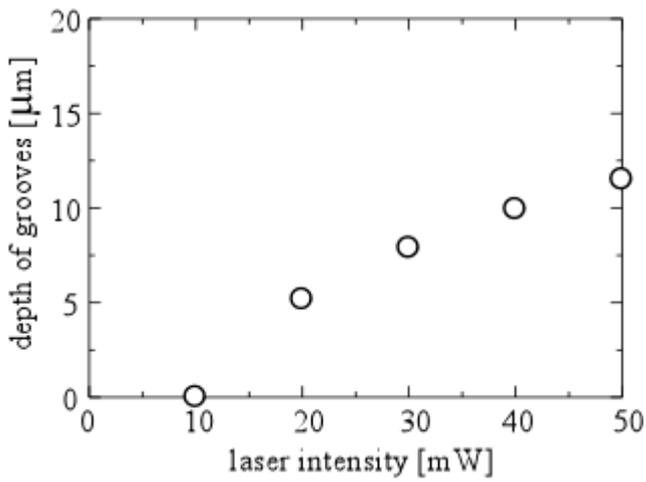
また、図7に示すように、サファイアの場合、ピッチ幅を溝幅の10.0 μmではクラックが入らないが、7.5 μmにするとクラックが入った。銅やガラスでは、ピッチ幅を小さくしてもクラックは入らなかった。これより、金属系の材料は、面粗さを小さくするために、ピッチ幅を適当な値に設定する必要があり、無定形材料の場合、ピッチ幅を小さくして、加工する必要性のあることがわかる。また、結晶性材料の場合、クラックの発生を考慮にいれながら、ピッチ幅を設定する必要があることがわかる。



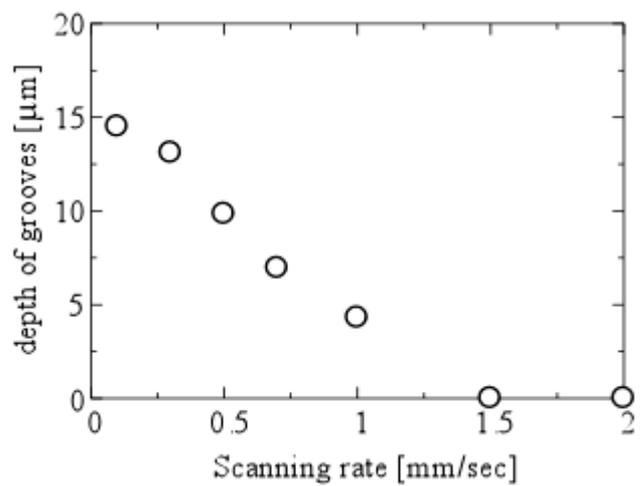
(a-1) レーザー強度と溝の深さの関係 (Cu, 1mm/s)



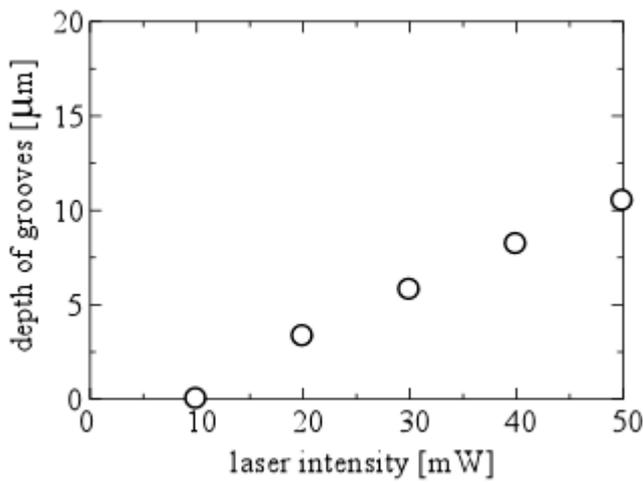
(a-2) レーザー強度と溝の深さの関係 (Cu, 20mW)



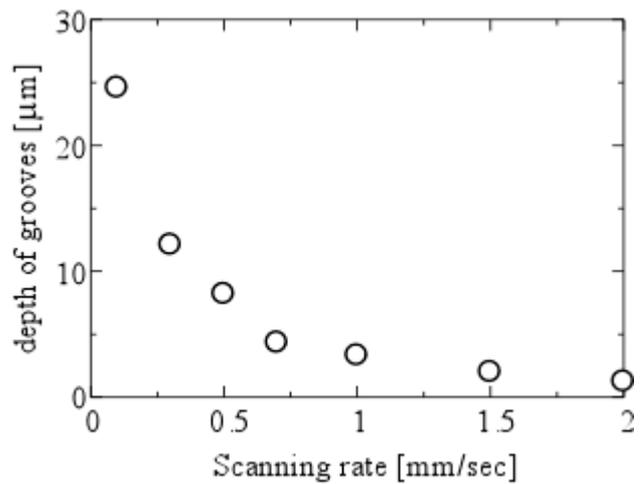
(b-1) レーザー強度と溝の深さの関係 (サファイア, 1mm/s)



(b-2) 走査速度と溝の深さの関係 (サファイア, 20 mW)

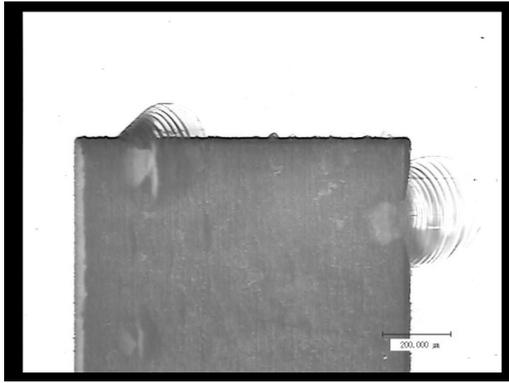


(c-1) レーザー強度と溝の深さの関係 (ガラス, 1mm/s)

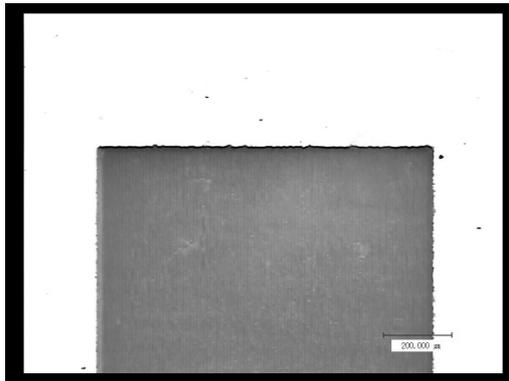


(c-2) 走査速度と溝の深さの関係 (ガラス, 20 mW)

図6 各種材料の溝加工特性



(a) 20mW, 0.5 mm/s, 7.5micron pitch



(b) 20mW, 0.5 mm/s, 10.0micron pitch

図7 サファイアの面加工

表3 表面粗さ

ピッチ幅	銅	サファイア	ガラス
7.5 μm	421 nm	600 nm	488 nm
10.0 μm	355 nm	598 nm	641 nm
15.0 μm	383 nm	888 nm	736 nm

3. 3 面走査加工特性

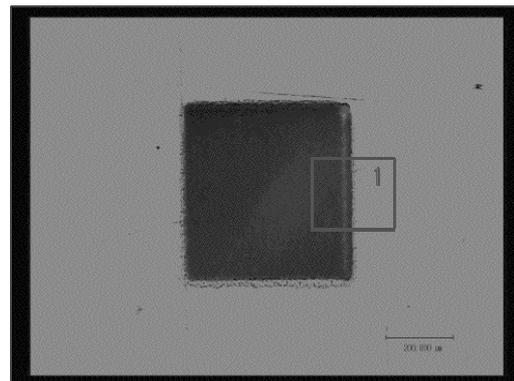
3次元加工を行うには、面走査を重ね合わせが必要になる。そこで、面走査を複数回重ね合わせるにより、三次元微細形状を作成できる可能性はあるのか、また可能であるならば、面走査数と表面粗さ、面走査数と深さの関係が3次元形状を行う基本的な情報となる。

前節で銅の場合、ピッチ幅が10ミクロンの場合、面粗さが小さくなることを示した。そこで、サンプルは銅、レーザー出力20mW、スキャン速度は1mm/s、ピッチ幅は10ミクロンの条件で、400ミクロン×400ミクロンの範囲で面走査を複数回行い、キャビティを作成した。

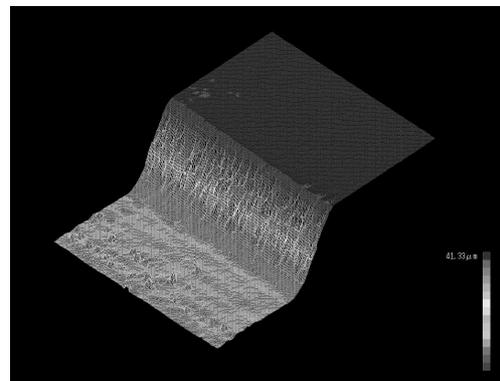
5面走査した場合、CCDカメラで撮影した画像を図8(a)に示す。下から上に走査して加工を行い、左から右へと溝加工を重ね合わせて面走査を行っている。こ

れより、加工境界には、わずかな変質部が確認できる。これは、アブレーションの際発生するプラズマにより変質したものと思われる。図8(b)は、図8(a)の領域1を走査型レーザー顕微鏡で撮影した3次元の形状画像である。これより、加工部周辺部にはテーパ部ができ、キャビティの底部は、非常に滑らかな面が作成されることがわかる。従って、本稿で提案した手法を用いて、微細な三次元形状加工を行えるといえる。

図9に面走査回数とキャビティの深さの関係、面走



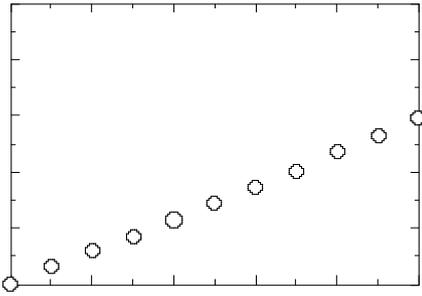
(a) CCD 画像



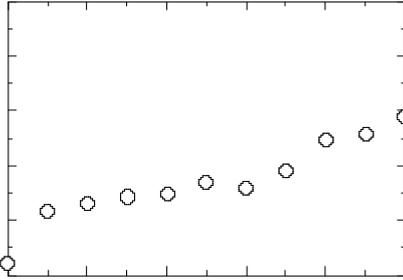
(b) 走査型共焦点レーザー顕微鏡画像

図8 銅のキャビティ加工
(Cu, 20mW, 1mm/sec, 10μm pitch, 5面加工)

査回数とキャビティ底部の表面粗さの関係を示す。これより、面走査とキャビティの深さには、比例関係が成り立ち、また表面粗さは面走査数の増加とともに悪くなる事が分かる。これより、面走査を制御することにより、3次元微細形状の作成が容易に制御できることが分かる。



(a) 面走査数とキャビティの深さの関係



(b) 面走査数とキャビティ底部の表面粗さの関係

図9 銅の面走査加工特性

(Cu, 20mW, 1mm/sec, 10 μ m pitch)

4. まとめ

本報告では、フェムト秒レーザーによる銅、サファイア、ガラスの溝加工、面加工特性を調べ、3次元微細加工の可能性を検討した。本研究を通じて、以下のような結果を得ることができた。

- 1) 材料により、加工特性は大きく変わる。
- 2) 走査速度、レーザー出力により、大きく加工速度が変化する。
- 3) 溝加工において、溝の深さはレーザー出力と比例関係がある。
- 4) 面走査過程において、キャビティの深さは、面走査数と比例関係がある。
- 5) 本加工システムを用いて、3次元微細形状加工を行うことは可能である。

謝 辞

本研究を行うに当たり天田金属加工機会技術財団より多大なる助成をいただいたことに感謝いたします。