

# YAG レーザーによる微細加工の研究

矢野 雅 昭\*・越 智 秋 雄\*  
中 本 修 樹\*\*・池 内 隆\*\*

(平成13年10月26日受理)

## A Study on Micro Material Processing by YAG Laser

Masaaki YANO, Akio OCHI, Syuuki NAKAMOTO and Takashi IKEUCHI

(Received Oct. 26, 2001)

### Abstract

The laser wavelength dependence on the micro laser material processing mechanism is investigated. Several material targets were irradiated by the focused Q-switched YAG laser and its second and forth harmonic light pulses.

After the laser pulses irradiated, a small hole of the focused laser light beam diameter was observed on the target surface. The depth of holes increase in the shorter wavelength laser pulses irradiation.

**Key Words:** Laser wavelength dependence, the micro laser material processing, Q-switched YAG laser, second and forth harmonic light pulses.

### 1. 緒 論

レーザー光は、平行性に優れた単一波長の光であることから、レンズで容易に集光でき、様々な加工に使用されている。現在行われているレーザー加工のプロセスは、基本的には熱的なものである。集光したレーザー光を材料表面に照射すると、材料の温度が上昇し、そのまま照射を続けると沸点に達し蒸発する。そして発生した蒸気の圧力により溶融物が飛散し除去加工が開始される。しかし、さらに加熱するとプラズマが発生し、レーザー光エネルギーを吸収するため加工の進行は妨げられる。従って、プラズマが発生しにくい長パルス光または連続光が使用され、熱伝導により加工精度に制限を受けていた。そこで、プラズマでの吸収の少ない短波長の短パルスレーザー光を用い、数 ns という非常に短い時間の間に加工をおこなう事で熱伝導の影響を抑える方法が提案されている。

本研究では、QスイッチYAGレーザー装置に高調波発

生装置を取り付け 7 ns パルスで 3 種類の違う波長のレーザー光を得て、レーザー波長依存性を中心に、短パルスレーザー光の集光照射時の材料除去効果について検討をおこなった。

### 2. 実験装置および実験方法

本研究では波長依存性を見るため、3種の違う波長のYAGレーザー光、基本波( $\omega$ 光)波長 $\lambda=1064\text{nm}$ 、第2高調波( $2\omega$ 光) $\lambda=532\text{nm}$ 及び第4高調波( $4\omega$ 光) $\lambda=266\text{nm}$ を石英製の集光レンズで絞り、種々の材料に照射した。集光レンズは焦点距離100mm。焦点深度は実測によると、1.0mm程度である。集光径は $\omega$ 光 $372\mu\text{m}$ 、 $2\omega$ 光 $364\mu\text{m}$ 、 $4\omega$ 光 $358\mu\text{m}$ である。

### 3. 実験結果および考察

図1、図2に出力4mJ/パルス、波長266nmのレーザー光をアルミニウムとアクリルの表面に1,000回照射した後

\*広島工業大学工学部機械システム工学科

\*\*広島工業大学大学院工学研究科機械システム工学専攻

に生じた穴の断面形状の測定例を示す。測定は、表面形状・粗さ測定機 (Form Taly surf series s6, Taylor Hobson) によった。

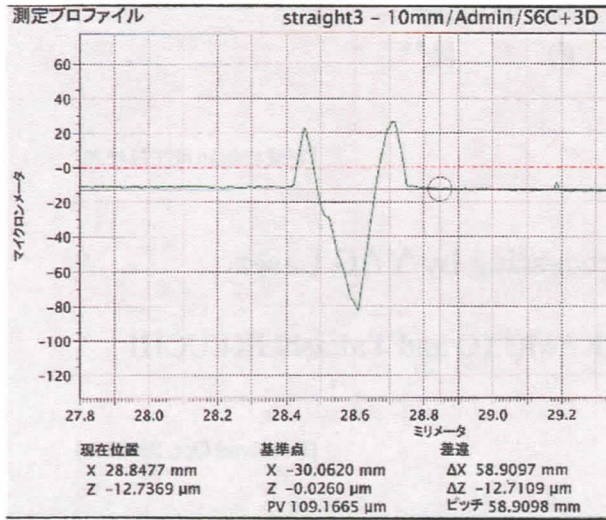


図1 アルミニウムの断面形状

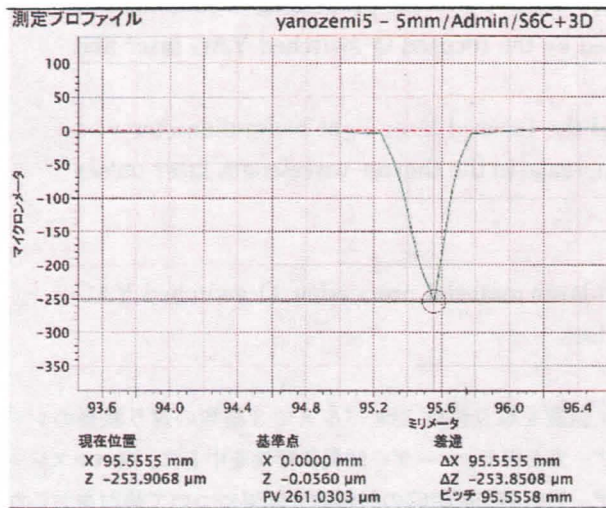


図2 アクリルの断面

レーザー光パルスの動作間隔は、100ms (10Hz 動作) であるので1照射パルスによる影響は次のパルスまでは残留せず、各レーザー光パルスごとの作用の積み重ねでこのような穴が形成されると考えられる。

アルミニウムのような金属材料の場合、深さ70μmと比較的浅いくさび型の断面形状を持つ穴が生成される。このように断面形状が、くさび型になるのは使用したレーザー光ビームが、ガウシアンビームであり、ビーム外周部にいくほどエネルギー密度が小さくなるためと考えられる。また、穴周辺に高さ30μm程度の盛り上がりが見られる。これは、レーザー照射により蒸発もしくは飛散した材料の圧力により、周囲の溶融している部分が押しされ盛り上がり、レーザー光の消滅後そのまま凝固して生成されたものであると思われる。盛り上がり部の外辺の直径 (盛り上がり径)

は400μm程度である。この穴の表面での穴直径は156μmである。

非金属材料であるアクリルの場合、アルミニウムと同条件で、開く穴の断面形状は穴直径が400μmであり、深さが250μmと金属材料に比べて、そのくさび型形状も鋭くなり、より深い穴が生成されている。この理由としては、熱的にもまた分子構造的にも脆いために、このような現象が起こると考えられる。また、アルミニウムで見られた穴周辺の盛り上がりアクリルではほとんど見られない。これは材質の飛散および蒸発するに要するエネルギーが、金属材料に比べて少なく、また、熱伝導が小さいこともあり、外周部で再固化する部分が小さくてすむためだと考えられる。

以下、盛り上がり径、穴径、穴の深さ、及び盛り上がり高さに注目して検討することとする。

### 3.1 金属材料における波長依存性

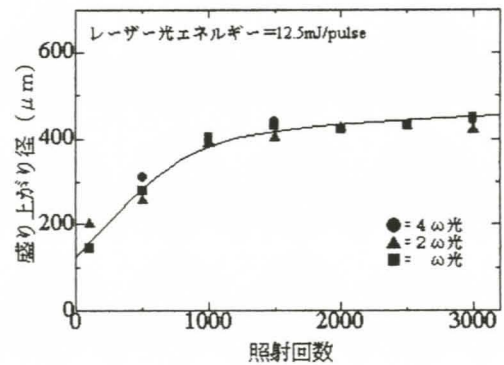


図3 盛り上がり径と照射回数の関係-アルミニウム

図3は、各レーザー光を一定レーザー光エネルギー (12.5mJ/pulse) にして、アルミニウムに照射し、その照射回数と盛り上がり径の関係を求めたものである。この結果ではレーザー光波長依存性は表れていない。後述のように波長による違いはプラズマ中でのレーザー光吸収が原因であると考えられる。しかし、盛り上がり部分の外辺部分は溶融するのみでプラズマ発生に到っていない。また、材料中の熱伝導による損失に打ち勝って、溶融するのに必要なレーザー光パワー密度のしきい値があるはずである。一方、レーザー光ビームはガウス分布をしているので、レーザー光エネルギーが小さい間はこのしきい値による溶融部分 (すなわち盛り上がり部分) の大きさの変化が激しく、やがてレーザー光ビーム径 (集光径) 付近で一定値になったと考える。

図4は、照射回数と穴深さの関係を求めたものである。短波長ほど深くなった。材料の溶融した部分にさらにレーザー光エネルギーが注入されると、材料は飛散または蒸発し穴が形成される。この過程で蒸気はレーザー光の電界で

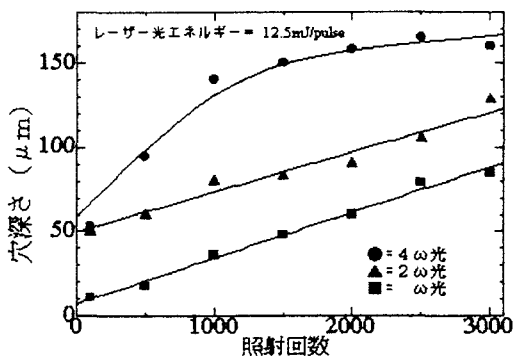


図4 穴深さと照射回数関係-アルミニウム

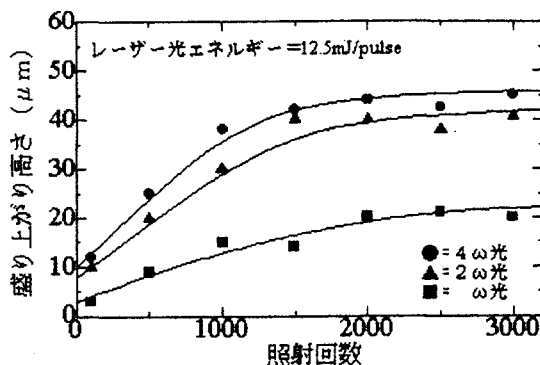


図6 盛り上がり高さとの照射回数関係-アルミニウム

電離しプラズマが発生する。プラズマ中では電子がレーザー光の電界で振動（プラズマ振動）することにより、電子の運動エネルギーとしてレーザー光エネルギーを吸収する。プラズマ中での熱伝導は非常に小さいので、レーザー光エネルギーはプラズマの加熱に消費され、材料まで届きにくくなる。このプラズマ振動はレーザー光の波長が短いほど励起されにくく、4ω光が最もプラズマの影響を受けずに材料表面に到達でき、深い穴を開けることができたと考えられる。なお、4ω光で照射回数の増加とともに穴深さに飽和傾向が見られるが、これは穴が深くなるにつれ材料表面からプラズマの拡散が困難になり、プラズマ中での吸収が増加するためと考えられる。

以上のように、穴周りに生成される盛り上がり部分を含んだ領域は、3つの光とも、殆んど同じ径であったのに対して、穴の深さや穴径、盛り上がり高さは波長依存性を持ち、短波長のレーザー光のほうが溶融量、除去量も大きいことから、深い穴となるが、穴径は小さく、穴周辺の盛り上がりが大きくなったと考える。

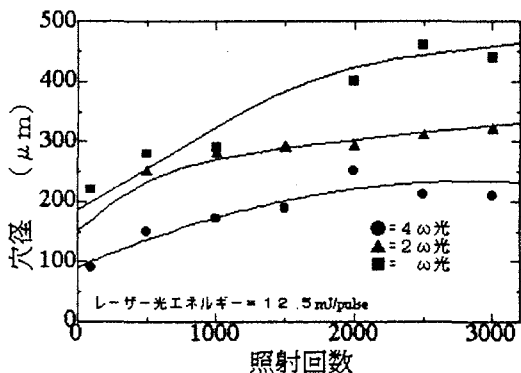


図5 穴径と照射回数関係-アルミニウム

図5は、照射回数と穴直径の関係を示したものである。

図6は、照射回数と盛り上がり高さの関係を示したものである。盛り上がりが生じるのは、レーザー光照射により液化した材料が、中心部の圧力により穴壁面をつたい押し上げられ、穴周辺で冷えて再び固体化し、付着することの繰り返しによりおこると思われる。よって、プラズマで吸収されにくく、大量の材料を溶融できる短波長の光のほうが盛り上がり高さは高くなったと考える。また、穴径は、飛散もしくは蒸発により除去された材料の量だけでは決まらず、この押し上げられた溶融物の量に左右されることになる。そこで、この溶融物の多い短波長の光で穴径は小さくなると思われる。

### 3.2 金属材料における材料依存性

金属材料における材料依存性について、最も除去効率の良い4ω光の場合について述べる。

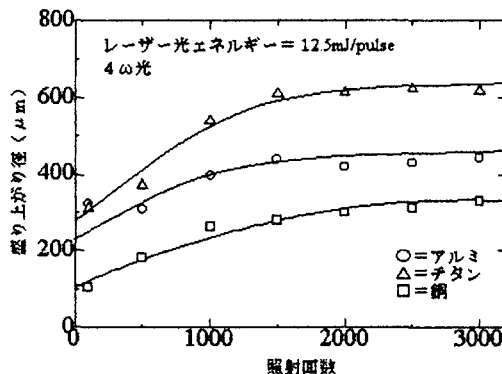


図7 金属材料における材料依存性盛り上がり径とレーザーエネルギーの関係

図7は、4ω光でレーザー光エネルギーを一定にして、各種金属材料に照射したときの照射回数と盛り上がり径の関係を示したものである。最も小さいのは、銅で、次にアルミニウム、チタンの順であった。これは盛り上がり径が、レーザー光ビームの周辺部の低エネルギー密度領域で、熱伝導による損失と注入レーザー光のエネルギー収支バランスにより決まると考えられることから、熱伝導率が小さければレーザー光ビーム中のレーザー光パワー密度の小さい周辺部でも材料の溶融が起こりやすいため、盛り上がり径が大きくなると思われる。

図8は、照射回数と穴深さの関係を示したものである。最も深い穴を得た材料は、やはりアルミニウムであり、続いて銅、チタンの順であった。材料による穴深さに差がで

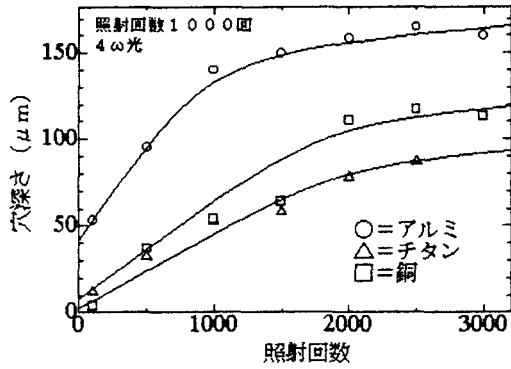


図8 金属材料における材料依存性穴深さと照射回数との関係

きた原因に関しては、融点および沸点が低いほど、材料が溶融もしくは蒸発しやすかったためと思われる。

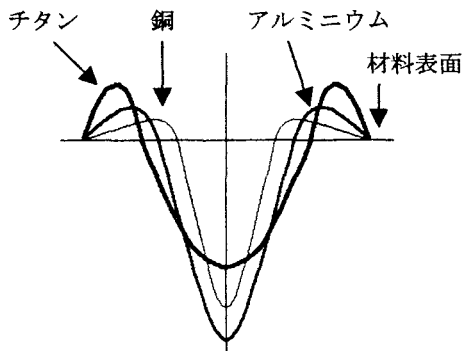


図9 3種類の金属材料の穴形状の模式図

3種の金属材料で得られた、穴形状の断面を模式的に示すと図9の様になった。これはチタンが他の2種の金属と比べて融点が高く、溶融量が少ないが、沸点が高く蒸発潜熱が非常に大きいため、他の2種の金属と比べて蒸発しづらく、液状で残る材料の比率が高くなり、浅い穴で高い盛り上がり形成したと考えられる。これに対してアルミニウム、銅は蒸発しやすく深い穴を形成したが、このときアルミニウムの方が溶融量、蒸発量とも多いため、このような結果になったと考えられる。

### 3.3 非金属材料における波長依存性

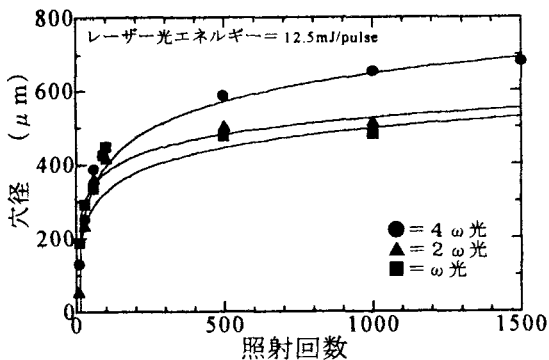


図10 穴径と照射回数との関係—ベークライト

図10は、各レーザー光のレーザー光エネルギーを一定にしてベークライトに照射し、その照射回数と穴径の関係をもとめたものである。金属と比べて熱伝導率が小さいため、しきい値が小さくなり、穴径が金属材料の場合よりも大きくなったと考える。また、そのため周辺部でプラズマが発生し、穴径に関しても波長依存性があり、短波長レーザー光の場合のほうが大きくなっている。穴の深さも当然短波長で深くなった。

### 3.4 非金属材料における材料依存性

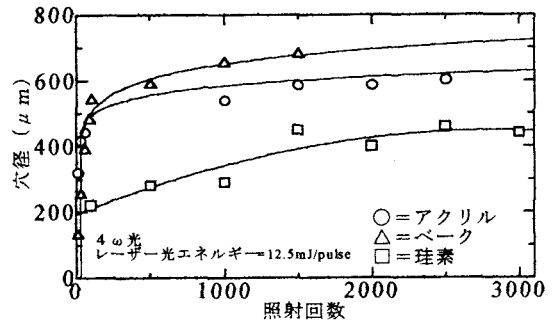


図11 非金属材料における材料依存性 穴径と照射回数との関係

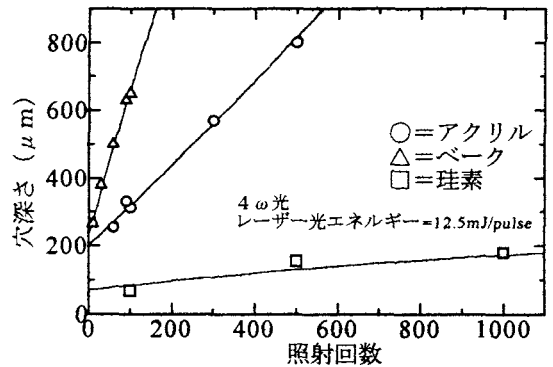


図12 非金属材料における材料依存性 穴深さと照射回数との関係

図11は、4ω光でレーザー光エネルギーを一定にして、各種非金属材料に照射したときの穴径と照射回数との関係を示したものである。図12は照射回数と穴深さの関係を示したものである。このように珪素と他の2種類の材料とは熱的性質の違いが原因と思われる大きな差が見られた。アクリルおよびベークライトは実験した範囲内では、穴深さに対し顕著な飽和現象は見られず、照射回数を増やしていくと4ω光、2ω光については板材を貫通した。これにより、プリント基板穴あけ加工などで実用的な範囲に達していると考えられる。

#### 4. 結 論

- ・レーザー波長と除去効率には密接な関係があり、短波長のレーザー光ほど材料表面でのプラズマの影響を受けにくく、除去効率が高い。
- ・短パルスのレーザー光を照射することにより形成された穴は、いずれも上限値がレーザー光ビーム集光径程度であり、材料の熱伝導の影響による加工精度の劣化を抑えることができる。
- ・形成される穴の形状はレーザー光ビームの集光エネルギー分布に依存する。また照射回数およびレーザー光エネルギーを増加させてもそれ以上は変化をしない上限がある。

以上より、短パルスレーザー光と材料の相互作用における波長依存性と材料依存性の一端を明らかにできたと思う。これは、レーザー光による微小除去加工の高精度化や薄膜製作時の粒子源の高効率化などに資することができると思う。

#### 謝 辞

表面粗さゲージの測定で御指導頂きました松岡泰弘先生に心から御礼申し上げます。

この研究は、文部科学省私立大学ハイテク・リサーチセンター整備事業による知的機能保有型機械機器の開発に関する研究の一部としておこなわれました。