

# 形状創成原理に基づくレーザー微細加工システムの開発

上智大学 理工学部 機能創造理工学科

教授 坂本 治久

(平成 27 年度 一般研究開発助成 AF-2015223)

キーワード: レーザ加工, 微細除去加工, 形状創成原理, 加工形状シミュレーション

## 1. 研究の目的と背景

製品の微細化や高機能化の進展に伴って, 微細加工の重要性はますます高まってきている. 精密機械加工においても, 工具径 1mm 以下の極小径工具によるマイクロ切削技術の開発と活用が進んできている[1][2]. しかしながら, 極小径工具による加工では, 加工反力による変位が要求精度に対して相対的に大きくなるとともに, 工具摩耗の影響も出やすくなる. このため, マイクロ切削はかなり難易度の高い加工プロセスとならざるを得ない[3].

これに対して, レーザ加工や電子ビーム加工のようなエネルギービーム加工は, 工具とするレーザーや電子ビームの収束性が高いことから, 本質的に微細加工に適している[4]. さらに, これらの加工法は, 加工反力が無視できるほど小さく, 工具摩耗も生じない. 特に, レーザ加工は, 加工雰囲気に対する制約が少なく, また, 極めて多様な工作物材質を加工できるため, 適用性が極めて高い微細加工法である.

しかしその一方で, レーザ加工は, 加工条件を合理的に決定することが難しいプロセスでもある. 加工条件には, レーザ発振条件のみならず, 加工光学系や工作物材質の特性が複雑に影響する. このため, レーザ加工を実用化するには, 個々のプロセスに応じた加工条件を多くの予備実験により定めなければならない.

これに対して, 切削加工や研削加工などの機械加工においては, 除去加工プロセスを理論的にモデル化した形状創成原理が成り立っており, ある程度合理的に加工条件を定められる. 形状創成原理に基づく, 除去加工形状は, 工具形状とその運動による工作物と切れ刃の幾何学的干渉に基づいて一意に定まる. よって, 加工形状は, 予測的あるいは計画的に創成することが可能になる.

レーザー加工においては, 一般的に, 形状創成原理は確立

されていない. その要因は, 形状創成原理において必須な工具形状が明確では無いことと, 工具となるレーザー光の加工形状に対する転写特性が十分に把握できていないためである.

そこで本報告では, レーザ微細加工における形状創成原理の適用可能性について, 実験結果に基づいて検討してみる. 形状創成原理が成り立つためには, レーザ照射点における「相当工具形状」を定めることと, それを工作物との相対運動により転写して形状創成することを可能にすることが必要となる.

## 2. レーザ微細加工における加工形状の基礎検討

検討に用いたレーザー加工システムは, パルス YAG レーザ発振器, 加工光学系および工作物テーブルから構成されている. 発振器から出力されたレーザー光は, ミラーにより伝送され, 光路上にある照射強度調整デバイスにより強度の減衰度合いが制御される. その後, レーザ光は, 加工点の直前に配置した単焦点の対物レンズにより集光され, 小さく絞られた状態で工作物に照射される. レーザ発振器および加工光学系は, NC 制御工作機械上に設置されている. 工作物テーブルおよび対物レンズは, スケールフィードバックによる NC 制御が可能な 3 軸送り機構により, 精度  $1\mu\text{m}$  で位置決めおよび相対運動できる.

表 1 は, 本研究で提案する“レーザー微細加工システム”で用いるレーザー発振器の仕様を示している. 照射レーザー光の発振波長は, 355 nm であり, YAG レーザの第 3 高調波である. そのパルス幅は, EO-Q スイッチにより, 10 ns 以下に短縮されている. 発振器の平均出力は, パルス繰返し数 500Hz で最大で 660mW であり, すなわちパルスエネルギーは 1.32mJ に達する.

表 1 レーザ発振器の仕様

型式		IB Laser
レーザー発振媒体		YAGロッド
波長	nm	355
パルス発信方式		EO-Q スイッチ
パルス幅	ns	<8
繰返し数	kHz	<1
発振モード		TEM00

図 1 は、照射レーザー光の典型的なビームモードを示している。そのビームプロファイルの TEM00 モードに対する相関係数は 0.98 に達しており、このレーザー光は、シングルモードであるといえる。

図 2 は、溝加工時のレーザー照射の概略図を示している。同図(a)に示すように、評価のための加工溝は、集光したレーザー焦点に対して工作物を一方向に一定速度で往復させることにより形成できる。この時、レーザーパルスは、一定の出力と繰返し数で照射する。さらに、同図(b) に示すように、テーブルの送り速度は、パルス照射間隔が  $1/e^2$  スポット径の半分と等しくなるように定めている。

表 2 は、溝加工の実験条件を示している。光学系の構成条件の影響を評価するために、対物レンズの焦点距離は、50~140mm まで変化させている。加えて、工作物材質の影響を評価するために、その材質は、シリコン(Si)、アルミニウム合金(Al)および窒化けい素(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)としている。

図 3 は、加工溝の典型的な断面形状と加工幅の定義を示している。一定の送り方向に沿って繰返し照射するレーザーパルスにより、最終的に、加工溝は、V 字形状になっていく。同図に示すように、加工幅は、V 字形状の入り口幅から決定できる。シリコンの溝加工の場合には、その加工溝形状は、正確な V 字形となる。この照射条件において、レーザー光のスポット径は 40 μm 以上であるが、加工幅はそれよりも小さな約 30 μm に留まっている。

このプロセスでは、レーザーの照射強度を適切に弱め、材料除去の可否の臨界条件である加工しきい値の 3 倍までの範囲に抑えている。これにより、レーザーの焦点径のうちの、十分に強度の高い中心部のみで除去加工が生じる。その結果、除去加工は、特定の角度の V 字溝が形成されるまで進み、その後、(加工は)自動的に停止する。すなわち、レーザー照射により形成される加工溝の断面形状は、一定の V 字形に定まる。この V 字溝の加工は、剣先バイトを用いた形削りと類似し

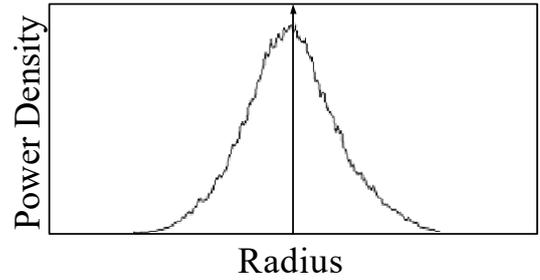
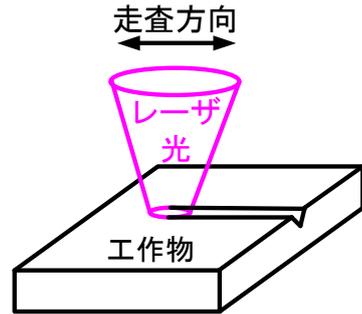


図 1 使用レーザー光の典型的な強度分布



スポット径に対するオーバーラップ比 = 50%

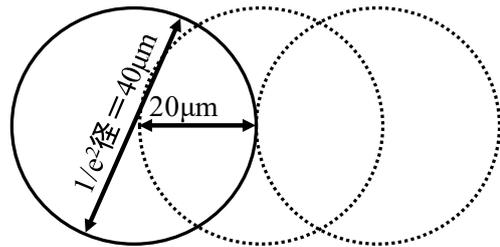


図 2 溝加工のためのレーザー照射の概略図

表 2 溝加工の実験条件

パラメータ	単位	値
対物レンズ焦点距離	mm	50, 100, 140
スポット径 : $1/e^2$ 直径	μm	30~50
繰返し数	Hz	500
テーブル送り速度	mm/s	10
工作物材質		Si, Al, Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
照射エネルギー密度	J/cm <sup>2</sup>	0.3~2.5
走査回数		1~40

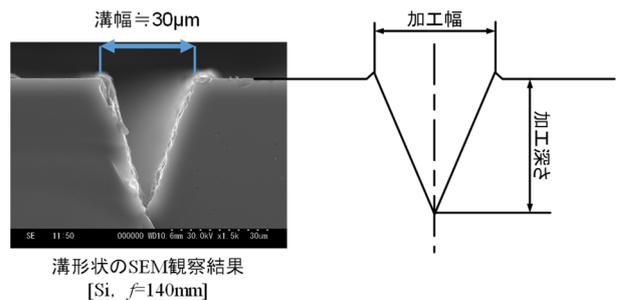


図 3 加工溝断面形状と加工幅の定義

ている。この時、形成される溝の断面形状は、レーザ光の相当工具形状と見做すことができる。

図 4 は、照射レーザ光の強度分布と加工幅の関係を示している。加工点における強度分布は、発振直後のレーザ光の強度分布とビームの伝送経路および集光光学系の特性を考慮して算出している。加工幅は、加工形状が強度分布の中心に対して軸対称であると仮定して、強度分布と重ねて示している。

この時、照射エネルギー密度が  $0.64 \sim 1.11 \text{ J/cm}^2$  の範囲では、加工幅に対応する局所的なパワー密度は、 $80 \text{ MW/cm}^2$  で一定値となる。このことは、照射点における強度分布に着目すると、除去加工しきい値は、一定の局所のパワー密度により定まることを示している。この関係は、実験的には、単結晶シリコンだけでなく、アルミニウム合金、銀、窒化けい素などの多様な材料において成り立っている[5][6]。また、その値は、工作物材質により異なり、故にレーザ微細除去加工における材料物性パラメータの一つとして活用できる。

図 5 は、各種の工作物材質における加工溝形状を比較している。いずれの材料においても、加工溝の形状は、一定の角度の二つの傾斜面で形成される V 字溝形状となっている。しかしながら、その傾斜角(以下では“溝傾斜角”と称す)は、材質により異なっている。その値は、シリコン、窒化けい素およびアルミニウム合金に対してそれぞれ  $19^\circ$ 、 $38^\circ$  および  $12^\circ$  である。いずれにしても、これらの加工において、レーザ光は、V 字溝の平削りにおける剣先バイトのように作用する。

### 3. レーザ微細除去加工への形状創成原理の適用

レーザ照射による加工形状は、次のように定まる。加工の最初においては、レーザ光は、平坦な工作物表面に垂直に照射される。すると、工作物が吸収するレーザ光の強度分布はガウス分布状となるため、溝の断面形状は、この光の吸収強度分布を反映した曲面となる。引き続きレーザ光は、既にある加工溝の曲面に照射される。この時、レーザ光の吸収率は照射面の傾きに伴って減少する[7]ため、吸収強度分布は、初期に平面へ照射した場合のそれとは徐々に異なっていく。このため、溝の断面形状は、ガウス分布状から V 字形へと徐々に変化していく。

このプロセスでは、照射するレーザ光の強度を加工しきい値の 3 倍未満に抑制している。このため、加工の進行に伴っ

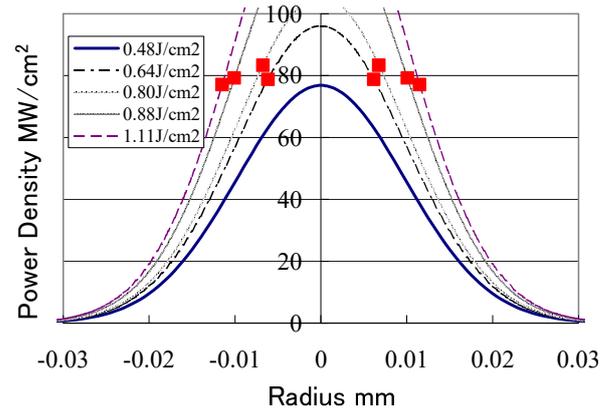


図 4 照射レーザ光の強度分布と加工幅の関係

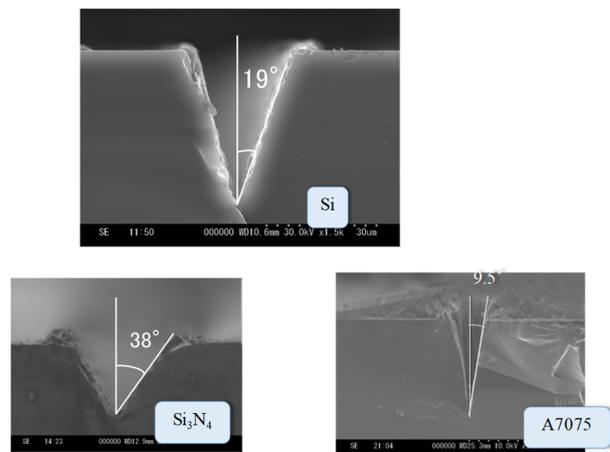


図 5 各種工作物の加工溝形状の比較

て加工溝の表面の傾きが増加していくと、局所的な吸収強度は、材料の除去しきい値と等しくなるまで徐々に低下していく。このため、加工溝の表面は、吸収強度が除去しきい値と等しくなるまで傾斜を増していき、その後、一定となる。この時、除去加工は、飽和して停止するように振舞い、溝の断面形状が定まり、すなわち相当工具形状が定まる。

図 6 は、上述のメカニズムを反映した単一溝のレーザ形削り加工に対するシミュレーションの結果を示している。シミュレーションは、局所のパワー密度でパラメータ化される工作物材質の除去しきい値と工作物表面の傾きに対して一様に吸収率が減少するモデルに基づいて計算されている。

シミュレーションにおける収束形状は、実験で得た加工形状とよく一致している。シミュレーション結果が示すように、初期段階の加工形状は、レーザ光の強度分布を反映して曲面になっている。その後、加工形状は、加工深さの増大とともに

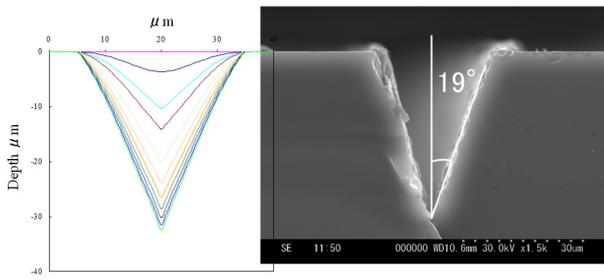


図6 加工溝形状のシミュレーションの例

壁面が徐々に傾いていく。その傾きは、変化の飽和に伴い、一定値となって収束する。これらの検討の結果より、強度を抑制したレーザ光を走査して繰返し照射することは、“剣先バイトによる形削り”に相当した加工を可能にし、「レーザ光の工具形状を定められる」ことを明らかにしている。すなわち、加工幅がスポット径よりも小さな範囲に留まる微細除去加工においては、レーザ加工といえども、一般的な切削加工と同様に形状創成原理が成り立つと言える。

そこで、レーザ光による“相当工具形状”の同定法を具体的に検討する。“相当工具形状”は、レーザ照射条件によって定まる“加工幅”と工作物材質(とレーザ光源)によって定まる“溝傾斜角”の二つに基づいて決定できる。“溝傾斜角”については2で既に言及しているので、ここでは、“加工幅(記号を  $w$  とする)”の定め方を論述する。

パルスレーザ光の照射条件は、記号群{平均出力  $P_a$ 、パルス繰返し数  $f$ 、パルス幅  $\tau$ 、スポット直径  $d$ }で表すことができる。ここでレーザ光の強度分布は、本研究と合うように、ガウス分布に従うものとする。また、スポット直径は、“ $1/e^2$  直径”すなわち軸対称のガウス分布に従って照射強度がピーク値の  $1/e^2$  まで減衰する円周の直径とする。ガウス分布の場合、この直径は、いわゆる半値幅(FWHM)の約 1.7 倍となる。

強度分布がガウス分布に従うことから、直径  $w$  に相当する位置でのレーザ光の局所的パワー密度  $P(w)$  は、式(1)で表される。

$$P(w) = \frac{8P_a}{\pi\tau d^2 f} \exp\left(-2\frac{w^2}{d^2}\right) \quad (1)$$

前述の図4に示すように、この微細V溝加工における加工幅  $w$  は、その位置での照射強度が材質によって決まる加工閾値  $P_{th}$  と一致することにより定まる。すなわち  $P_{th} = P(w)$  で

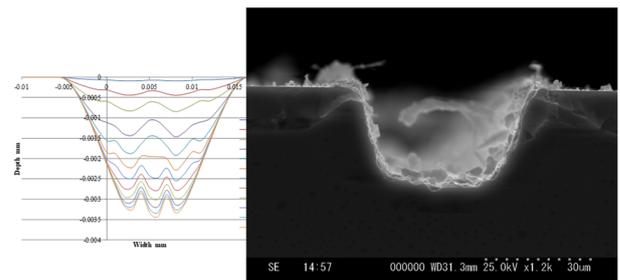


図7 平坦底の溝加工の試み

あり、これを前述の式(1)に代入することにより、 $w$  は、レーザ照射パラメータ  $\{P_a, f, \tau, d\}$  により、式(2)により定めることができることになる。

$$w = d^2 \sqrt{2 \ln\left(\frac{8P_a}{\pi\tau d^2 f P_{th}}\right)} \quad (2)$$

最後に、レーザ光に対して工作物を2次元的に走査することによる平削りを試みた。レーザ光がオーバーラップ率50%で照射されるように、工作物を一つの参照ラインに沿って往復走査し、その後、加工幅の50%に相当する幅  $15 \mu\text{m}$  で直交方向に送り、隣接した参照ラインに沿って工作物を往復操作することを繰り返して、3ライン分の幅に2次元的に走査した。

図7は、レーザ光の照射による平削りを行った結果を示している。同図(a)のシミュレーション結果が示すように、この加工は、底面の粗さを小さな凹凸に抑えた平面になる幅広の溝を形成できる。同図(b)に示すように、上述のレーザ平削りプロセスは、確かに底面の凹凸を抑制した平底の溝を加工できる。実験により得た溝の底面の粗さは、シミュレーション結果より少し複雑になっており、結果的に粗さが抑制されている。この結果は、強度を十分に抑えれば、照射レーザ光の相当工具形状が予測可能になり、その結果、形状創成原理に基づいたレーザ除去加工が可能になることを、示している。

一方、レーザ光の照射強度の抑制は、加工能率を低下させる。この課題を解決するためには、精密機械加工を模範とするべきであろう。すなわち、機械加工において能率向上を図る場合、単純に主軸やテーブルの駆動モータを強力にするだけに留まらず、むしろ構成要素の改善や複合化などの機械構造設計の改善を図るものである。したがって、レーザ加工システムも、同様に、工作機械におけるモータに対応する

レーザー発振器を強力にするだけでなく、出力レーザー光の伝送、光学特性制御および集光特性などの加工光学系の構成と設計を改善することに注目すべきである。今日のレーザー加工の研究においては、加工条件の決定が一大課題となることが多いが、今後は、多様性と高機能化を指向した加工光学系の設計技術の向上が重要な技術課題となっていくであろう。

#### 4. 結言

本論文では、形状創成原理に基づくレーザー微細加工システムについて、その基礎的検討を行い、シミュレーション方法を確立した。以下に得られた結果をまとめる：

- (1) 強度を加工閾値の 3 倍以下に抑えた照射によるレーザー除去加工においては、切削における剣先バイトと同様な工具形状を定めることができる。
- (2) 加工溝形状は、入射角に依存する吸収特性と除去加工閾値を考慮することにより、シミュレートできる。
- (3) 形状創成原理と等価工具形状に基づいて、平らな底面を有する微細溝を実現するパルスレーザー照射条件を定めることができる。このことは、レーザー除去加工を形状創成原理に基づいて実現できることを示している。

#### 謝 辞

本研究は、公益財団法人 天田財団による平成 27 年度一般研究開発助成により実施された。同財団の科学技術の発展振興に寄与する理念に賛同し、深く感謝申し上げる。

#### 参考文献

- [1] S. A. Tajalli, M. R. Movahhedy, J. Akbari: Investigation of the Effects of Process Damping on Chatter Instability in Micro End Milling, *Procedia CIRP*, Volume 1 (2012) pp.156-161.
- [2] X.Lai, H.Li, C.Li, Z.Lin and N.Jun: Modelling and analysis of micro scale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, 1 (2008) pp.1-14.
- [3] S. Filiz and O. B. Ozdoganlar: A three-dimensional model for the dynamics of micro-endmills including bending, torsional and axial vibrations, *Precision Engineering*, 35, 1 (2011) pp.24-37.
- [4] V. Lendraitis, M. Brikas, V. Snitka, V. Mizariene and G. Raciukaitis: Fabrication of actuator for nan positioning using laser micro-machining, *Microelectronic Engineering*, 83, 4-9 (2006) pp.1212-1215.
- [5] H. Sakamoto, K. Morioka and S. Shimizu: Determination method of removal threshold in laser ablation considering laser intensity distribution, *Proc. of 4th Int. Conf. on Leading Edge Manufacturing in 21st Century* (2007) pp.857-860.
- [6] H. Sakamoto and K. Morioka: Practical Definition Method of Laser Ablation Threshold in Nano-second Order Pulse Duration Considering Intensity Distribution at Focal Point, *J. of Micro/Nano Eng.*, VOL.8, No.1 (2013) pp. 45-50