鏡面微細パターン形状を創成するレーザ微細加工*

若 林 正 毅** 池 野 順 一***

Laser Micro-Fabrication to Form Mirror-Dimple Structure

Masaki WAKABAYASHI and Junichi IKENO

In this research, we proposed to achieve the mirror surface with a minute concave on the fused silica glass by a mew method. The surface enabled to control the curvature and the concave was sphere shaped. This method was to combine the laser machining and the chemical etching. The mechanism and the processing property of this method were verified from both experiments and simulations. As a result, we achieved to develop the better control of a micro shape and to create the mirror surface with a sphere shaped concave on the glass. The surface roughness was 2nmRa 11nmPV without chipping. In addition, processing multiple concaves changed the pattern of the surface to polygons such as square shapes and hexagonal shapes.

Key words: micro-fabrication, functional surface, micro-lens, femtosecond laser, etching, mirror-concaves, fused silica glass

1. 緒 言

近年、携帯カメラやデジタルカメラ、フラットパネルディスプレイ(FPD)など IT 製品の普及、高機能化に伴い、光学機能表面を創成する微細加工技術がますます重要になってきている。例えば、FPD では正反射防止機能や導光機能を付与するため、透明樹脂表面にミクロンサイズの直径と高さをもつ鏡面凸形状(ノングレア形状)を作り込んでいる。これはガラス型などを使って量産されるため、一般的にサンドブラストで型表面を粗らし、鏡面微細凹形状の創成を行っている¹⁾。しかし、優れた光学特性をもつ表面創成は容易ではなく、熟練工の高い技が必要とされている。現在、職人が減りつつあり品質を維持するには、技能の解明が急務である。すなわち、職人はどのような微細形状を作り込み、機能を発現しているのかを詳細に調査し、機能と形状の関係を明らかにする必要があると思われる。そこで、その関係を明らかにするための基盤技術として、狙った形状を所定の位置に再現性良く確実に創成できる加工法が不可欠になるものと考えられる。

一方、光学機能表面を創成する微細加工技術では、表面性状も重要である。例えば、マイクロレンズアレイなど光学素子の作製に用いられる型では、形状以外にバリや欠け、スクラッチのない鏡面微細凹形状が求められている²⁾³⁾。今後、微細化が進むにつれ、数十 μm オーダの形状創成とナノオーダの表面粗さを容易に実現するには、超精密切削・研削加工に替わる新たな鏡面微細加工技術の開発も求められる。

そこで本研究ではガラス型を想定し、ガラス表面の所望の位置に数十 μm オーダの大きさでナノオーダの表面粗さを有する鏡面微細凹形状を再現性よく創成できるレーザ微細加工法を考案し、その有効性について検討を行った。

2. 鏡面微細凹形状創成法の検討

2.1 実験に用いるレーザの選定

鏡面微細凹形状の創成法を考案するにあたり、まずはレーザ光によって、ガラスがどのように除去されるのか基礎的な調査を行うことにした。本研究では全て被加工物には、熔融石英ガラス(鏡面研磨品、 $t=1.5\text{mm}$)を用いた。使用するレーザの選定には、次の点を考慮した。すなわち、ガラスの切断や穴あけには炭酸ガスレーザ($\lambda=10.6\mu\text{m}$)を用いるのが一般的である。しかし、集光径が大きくミクロンサイズの微細凹形状を創成するのは困難である。また、炭酸ガスレーザではガラスの加工部に変質層が生じ、残留応力による割れが発生し易いのが特徴である。一方、YAG レーザは炭酸ガスレーザに比べ集光径が理論的に 10 分の 1 になるため、微細加工には適している。ところが、石英ガラスに対しては吸収率が約 6%しかなく、加工は困難である。しかし、吸収物質を表面に適量塗布すれば、その吸収エネルギーによって表面のみがミクロンサイズで除去できるものと期待された。さらに、ガラスに吸収のない分、残留応力を伴う変質層は生じ難く、割れは生じないものと期待された。そこで本研究では、まず YAG レーザ($\lambda=1064\text{nm}$)を用いることにした。

2.2 レーザ照射実験

実験に際し、熔融石英ガラス表面に YAG レーザを吸収させるため、吸収材を塗布することにした。微細加工を目指しているため、吸収材にはナノレベルの厚さで均一に塗布できる金スパッタ膜を選定した。基礎実験より、金スパッタ膜厚が 0.8nm のときでは 7.6%、4.5nm では 32%、10nm では 40%レーザ光を吸収することがわかった。また、金スパッタの塗布前後で表面粗さは変わらず、鏡面が維持された。以上より、本研究では熔融石英ガラス表面に金スパッタ膜を厚さ 10nm(40%吸収)で塗布し、加工実験を試みることにした。レーザ照射条件は Q-SW:YAG レーザ($\lambda=1064\text{nm}$, パルス幅:50ns, 発振周波数:10kHz, 横モード:TEM₀₀)の出力を

* 原稿受付 平成 20 年 9 月 1 日

** 学生会員 埼玉大学大学院(埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

*** 正 会 員 埼玉大学大学院

6Wとし、集光には対物レンズ($\times 50$, N.A.=0.8)を用いた。焦点は石英ガラス表面に合わせ、シャッターによりレーザ光を0.1秒間照射した。その結果、図1(a)に示すような微細な加工痕を得ることができた。加工痕は直径 $5.1\mu\text{m}$ 、深さ $4.0\mu\text{m}$ であった。しかし、観察の結果、加工痕の内部には熔融後

Fig.1 SEM images of laser machined surface and chemical etched surface

Fig.2 Cross section of a laser drilled hole after etching for 5 hours

(a) Cross section of dimple shape

(b) Variation of diameter and depth of hole

(c) Variation of curvature radius

Fig.3 Variation of a drilled hole during etching process

に固化した微細なガラス飛散物が散在していることがわかった。また、外周部には熱影響による盛り上がりもあった。

以上より、YAG レーザを用いてミクロンサイズの微細凹形状の創成は可能であったが、飛散物や熱影響部によって鏡面になっていないことがわかった。

2.3 エッチング実験

次に、加工後に残留する飛散物や熱影響部を化学エッチングによって除去すれば、加工痕内部が鏡面化できるのではないかと考えた。そこで、フッ酸と硫酸の等量混合水溶液(各 3wt%, 40°C)を用い、攪拌しながら 5 時間のエッチングを試みた。その結果、図 1(b)に示すように加工痕の直径は拡大されるものの、飛散物や熱影響部は除去され、鏡面化が促進されることがわかった。また、金スパッタ膜もエッチングによって完全に除去されることがわかった。非接触 3 次元形状測定機(Zygo 社製, New View6300)によって、5 時間エッチング後の凹面中央部を計測した結果を図 2 に示す。凹部粗さは 13nmPV と鏡面になっていることがわかった。さらに同図より凹形状は球面になっていることが予想された。

2.4 凹面創成メカニズムおよび加工特性の検討

エッチングによる凹面創成メカニズムを明らかにするため、形状変化を求めるシミュレーション(ソフト: MATLAB)を行い、実験結果と比較することにした。シミュレーションモデルとして使用する加工断面形状を図 3(a)の x - z 平面で考える。 x 軸はガラス試料表面と平行な軸であり、加工穴中心で $x=0$ とした。一方、 z 軸は x 軸に対して垂直な軸であり、レーザ加工前のガラス試料面を $z=0$ とした。加工深さは $z<0$ で表し、レーザ照射によって形成された加工痕形状の実測値は 2.2 で述べたように深さ $4.0\mu\text{m}$ 、直径 $5.1\mu\text{m}$ であった。これより、加工穴断面形状は(1)式で近似できる。

$$z = 0.6x^2 - 4 \quad (1)$$

ガラスはアモルファス材料であるため、エッチングは等方性とし、断面曲線に対して法線方向に単位時間あたり一定量が溶けるものとした。なお、エッチングレートは基礎実験で求めた $1.9\mu\text{m/h}$ を用いた。

図 3(a)は加工断面形状がエッチングによって 1 時間毎に変形していくシミュレーション結果を示している。この計算結果から加工痕の深さと直径の経時変化を求め、実験結果と比較したものが同図(b)である。図中の破線は計算結果、○印と▲印は実験結果を示しており、これらがよく一致することがわかった。したがって、形状創成メカニズムは、ガラスの等方性エッチングに基づいており、深さは一定のまま直径が拡大する加工特性を有していることがわかった。

次に、2.3 でエッチング後の形状は球面になっているのではないかと予想されたため、図 3(a)に示したエッチング時間毎の断面曲線における全ての連続する 3 点から曲率半径を算出した。その結果を同図(c)に示す。これにより、エッチングにともなって曲率半径は増大するが、そのばらつきは急激に減少することがわかった。よって、シングルモード(TEM₀₀)のレーザビームによる加工痕形状では、等方性エッチングによって自己収束的に球面に漸近していくことがわかった。

以上より、レーザ微細除去加工と化学エッチングを組み合わせた本加工法によって、一定深さの曲率制御可能な球面をもつ鏡面微細凹形状の創成が可能となった。

3. 複数加工痕の干渉を利用した鏡面微細凹形状創成法

3.1 微細形状創成法の提案

図1(b)で示したように創成された鏡面微細凹形状はワーク上方から見ると円形である。このワーク表面における円形を四角形や六角形などの多角形状に創成できれば、表面機能を発現する微細パターンの検討やレンズアレイの作製などで有益と考えられる。そこで前述した鏡面微細凹形状の創成原理に基づき、ワーク表面で多角形状を有する鏡面微細凹形状の創成法について考えた。その結果、ここでは複数の加工痕を配列し、その後エッチングによって隣接する加工痕が拡大し、干渉することで多角形状が創成できるのではないかと予想した。なお、目標とする形状サイズは $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ 内に収まる大きさに設定した。

いま、表1(a)に示すように、 $10\mu\text{m}$ 間隔の格子配列でレーザ加工痕を形成すれば、1個の加工痕は4個の加工痕と等間隔に隣接することになる。次にエッチングによって加工痕の円形直径を拡大し互いに干渉させれば、ガラス上方から見た形状は円形から自己収束的に正方形に変化するものと考えられる。同様に、同表中(b)に示すように1個の加工痕に対して6個の加工痕が等間隔に隣接する千鳥配列においては、エッチングによる加工痕の拡大によって凹面は円形から正六角形に変化するものと考えられる。その他にも配列によって、正三角形や何種類かの多角形の組み合わせが考えられる。

3.2 3次元形状創成シミュレーションによる実現性の検討

エッチング中に隣接する凹面同士が干渉し、所望の多角形状を有する微細凹形状創成が可能か3次元形状創成シミュレーションを行って検証することにした。ここでは、レーザ加工痕の形状モデルを単純化するため、深さ $4\mu\text{m}$ 、直径 $4\mu\text{m}$ とし、その断面は以下の(2)式で近似した。

$$z = x^2 + y^2 - 4 \quad (2)$$

エッチングレートは溶液濃度や温度で定められるが、ここでは計算を容易にするため $1\mu\text{m}/\text{h}$ とした。エッチング時間は20時間とした。計算に用いる配列は、表1に示す格子配列と千鳥配列とした。

シミュレーション結果を図4に示す。同図中(a)はエッチング前の加工痕の様子を示す。また(b)は3時間後の様子を示す。加工痕直径は $8.5\mu\text{m}$ に広がり、ガラス表面における平面部の面積が減少しているのが見て取れる。(c)は6時間後の様子を示しており、加工痕は互いに干渉し、格子配列では1辺が $10\mu\text{m}$ の正方形となった。一方、千鳥配列では1辺が $5.8\mu\text{m}$ の正六角形になった。(d)に示す15時間後の様子からは、辺の長さは一定で、深さのみが小さくなっていることがわかった。

格子配列における断面形状変化の詳細を図5(a)に示す。図中の各線はエッチング開始から1時間毎の表面位置の計算結果を示している。4時間後、干渉によって直径は拡大を停止し一定となった。同図(b)に直径および深さとエッチング時間の関係を示す。隣接する加工痕が干渉し始めると、直径は $10\mu\text{m}$ で一定となり、それまで一定であった深さが減少し始め、10時間後には $1.2\mu\text{m}$ 、20時間後には $0.6\mu\text{m}$ になることがわかった。

4. 鏡面微細凹形状の制御基礎実験

4.1 実験システムの構築

シミュレーション結果を受けて、基礎的な加工実験を行うことにした。2.2 ではガラスに対して透過性の高い YAG レーザ ($\lambda=1064\text{nm}$)を用いて鏡面微細凹形状の創成が可能であることを実証した。しかし、加工前にレーザ吸収物質を表面に塗布する必要がある。加工時には熱影響によって周囲の吸収物質が剥離することも見受けられた。これは複数の加工痕を近接して配列するには不都合である。ここでは配列加工に適したレーザの選定を再び行うことにした。

現在、レーザ微細加工装置として注目されているものに超短パルスレーザがある。その代表的なものはフェムト秒レーザである。波長 775nm のフェムト秒レーザはガラスに対して透過性が高い。しかし、YAG レーザに比べてパルス幅が約 10^{-6} 倍であるため、焦点位置で多光子吸収が生じ、ガラスのような透明材料に対しても吸収物質なしでアブレーション加工が可能である。また、フェ

Table1 Simulation conditions

Laser irradiation points	(a)		(b)

Length μm	L1	10	L2	8.66
	L2	10		5

Fig.4 Variation of dimple shapes during etching process by 3D simulation

ムト秒レーザは周囲への熱影響がきわめて小さく、非熱加工でできることが特徴である⁴⁵⁾。よって、ここではレーザ加工痕の配列形成にフェムト秒レーザ($\lambda=775\text{nm}$, パルス幅 200fs, 最大平均出力 800mW, 繰り返し周波数 1kHz)を用いることにした。

加工装置の概略を図6に示す。加工用光学系は $f=8\text{mm}$ の非球面レンズを用い、ステージ上の石英ガラス表面に焦点を合わせて照射した。ステージにはリニアモータ駆動の超精密 NC3 軸ステージ(位置決め精度 10nm)を用いた。また、ステージとメカニカルシャッタ(最小開放時間 10ms, 応答時間 3ms 未満)を連動させて所望の箇所にのみレーザ照射が可能な NC プログラムを構築した。

4.2 パターニング実験

表2に主な加工条件を示す。レーザ出力は発振安定領域での最小値である 3mW とし、シャッタの開放時間を 10ms とした。レーザの繰り返し周波数が 1kHz であるため、一箇所に照射されるパルス数は約 10 パルスとなる。なお、パターニング実験は石英ガラス上 $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$ の範囲にわたって行った。

格子配列および千鳥配列に加工したガラス表面の SEM 観察結果を図7(a), (b)に示す。このとき、ワークを 30 度傾けて観察した。直径 $7\mu\text{m} \sim 8\mu\text{m}$ の加工痕が所望の配列で加工されていることが確認できた。ただし、加工痕内部や外周部には、マイクロクラックが発生していることがわかった。

次に 2.3 節と同様の化学エッチングを行った。3 時間エッチング後の加工部の SEM 観察結果を図8に示す。これにより、加工部は局所的に見れば鏡面化が促進されているものの、配列とは無関係にさまざまな大きさの凹面が存在し、四角形や正六角形に凹形状を制御することはできなかった。

4.3 クラックが凹面形状創成に及ぼす影響

加工痕が所望の配列で形成されているにもかかわらず、所望の形状が得られなかった原因として、加工時に発生したマイクロクラックの影響が挙げられる。そこで、マイクロクラックの影響について考えてみることにした。

いま、2 次元シミュレーションとして、図9(a)に示すような放物線を断面とする 1 つの凹面形状を想定する。加工痕中心から半径方向の距離を x とし、レーザによる加工痕断面を仮に深さ $4\mu\text{m}$, 直径 $4\mu\text{m}$ とし、(3)式で近似した。(4)式は加工痕から伸びるマイクロクラック断面を同じく放物線で近似したものである。マイクロクラックの深さを $depth$ で表し、加工痕中心とマイクロクラックの中心間距離を dx で表した。

$$z_1 = x^2 - 4 \quad (3)$$

$$z_2 = 0.2(x - dx)^2 - depth \quad (4)$$

$depth$ の設定は、加工後に実際のクラック深さを測定すればよいが、マイクロクラックの深さを求めることは実験的には大変困難であった。そこで、深さを $1\mu\text{m}$ から加工痕の深さである $4\mu\text{m}$ まで仮定して計算することにした。エッチングレートは 3.2 節同様 $1\mu\text{m}/\text{h}$ とし、15 時間エッチング後まで計算した。図9(b)は時間毎の加工痕断面形状を示す。2.4 節で行った計算結果から深さは一定であるため、直径の変化を分かり易くするようにガラス表面位置を基準にして計算結果を表示した。なお、15 時間のエッチングで、マイクロクラックが加工痕の変形に影響を及ぼさなかった条件には○印を付し、影響を及ぼした条件には×印を付した。これにより、エッチングで加工痕の直径が増大していく範囲内にマイクロクラックが存在する場合は、エッチング中にマイクロクラックは消滅し、その影響は無視できること

a) Cross section of dimple shapes

b) Variation of diameter and depth of hole

Fig.5 Simulation of drilled holes during etching process

Fig.6 Experimental setup for laser micro-fabrication

Table2 Processing conditions

Workpiece	Fused silica glass
Laser power	3mW
Irradiation time	10ms
Lens	$f=8\text{mm}$ (N.A.=0.5)
Scanning area	$200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$

(a) Lattice arrangement

(b) Zigzag alignment

Fig.7 SEM images of laser machined surface

がわかった。また、*depth* および *dx* が小さいほど短時間のエッチングでマイクロクラックの影響はなくなり、1つの球面に収束することがわかった。

以上より、約10パルスを照射した場合、マイクロクラックの発生規模は、シミュレーションで示す×印を付与した領域に達したものと推察できる。

(a) Lattice arrangement (b) Zigzag alignment
Fig.8 Laser machined surface after etching for 3 hours (top view)

(a) Definition of dimple shapes

(b) Variation of dimple shapes during etching process
Fig.9 Creation mechanism of a spherical dimple

(a) Drilled hole by 1 pulse (b) Drilled hole by 10 pulses
Fig.10 SEM images of laser machined surface

Table3 processing conditions

Workpiece	Fused silica glass
Laser power	10mW
Number of pulse	1 pulse / point
Lens	f=8mm(N.A.=0.5)
Scanning area	200μm×200μm

5. 鏡面微細凹形状の制御本実験

5.1 クラックレス加工痕の形成

マイクロメートルオーダーのレーザ加工痕に対して、クラック発生規模をサブミクロンで制御することは不可能である。そこでクラックの発生しない加工痕の形成を試みた。

フェムト秒レーザ加工ではプラズマ膨張の反力によって衝撃波が材料内部に伝播することが知られている⁶⁾。基礎実験では一箇所に投入されるレーザが約10パルスであるため、衝撃波による残留応力が顕著となり、クラックが生じてしまったものと考えた。そこで、レーザ照射回数を10パルスから1パルスに減少させて加工痕を形成することにした。ただし、1パルスを確実に照射するには、10ms分解能のメカニカルシャッターでは不可能である。そこで、レーザ発振器のアンプを電氣的にON/OFFできる電子回路を作製し、NC装置と組み合わせることで1パルス照射を実現した。この場合、1パルスあたりのパルスエネルギーはこれまでの実験と同様であるため、10パルス照射の約10分の1の投入エネルギーとなる。

1パルス照射による加工痕の様子を図10(a)に示す。比較のため、10パルス照射による加工痕(直径約12μm、深さ約12μm)も同図(b)に示す。なお、ワークを30度傾けて観察した。これより、1パルス照射では加工痕の外周部におけるマイクロクラックが抑制されているのが確認できた。形状はビーム形状を反映して楕円形状となり、横幅7.0μm、縦幅5.3μm、深さ1.5μmであった。

5.2 パターニング実験

格子配列および千鳥配列で1パルス照射による加工痕を形成した⁷⁾。表3に主な加工条件を示す。レーザ出力10mW、非球面レンズ(f=8mm)を用いてガラス表面に集光して加工を行った。加工痕のSEM観察結果を図11(a)に示す。なお、ワークを30度傾けて観察した。これにより、大きなクラックは見られず、かつ所望の配列に加工されていることがわかった。非接触3次元形状測定機(KEYENCE社製、VK-8500)にて形状測定を行った結果、格子配列における凹面深さは1.4μm~1.7μmであり、凹面直径は4.9μm~7.7μmであった。

次に2.3節と同様の条件で化学エッチングを行った。エッチング時間毎のSEM観察結果を図11(b)~(e)に示す。同図(b)は3時間エッチング後の観察結果であるが、エッチングによって加工痕直径が拡大したことがわかる。また、加工痕内には複雑な微小凹凸が見てとれた。しかし、隣接する加工痕に影響を与えることはなかった。同図(c)は、5時間エッチング後の様子を示しており、加工痕内部の微小凹凸が減少し鏡面化が促進されたことがわかる。同図(d)、(e)からは、10時間以上エッチングすると加工痕内部の微小凹凸はなくなり、配列に応じて所望の四角形と六角形の微細凹形状になっていることが確認できた。15時間エッチング後の格子配列における加工痕深さは0.5μm~1.2μm、直径は8.6μm~10.5μmとなった。

鏡面化、球面収束の観点から、15時間エッチング後の加工痕形状と表面粗さを評価した。評価には非接触3次元形状測定機(Zygo社製、NewView6300)を用いた。図12(a)に形状、(b)に粗さの測定結果を示す。曲率半径16.4μmの球面であり、2nmRa、11nmPVの鏡面を有した微細凹形状が創成されていることが確認できた。

以上、本研究で提案したレーザ微細除去加工と化学エッチングを組み合わせた新たな加工法によって、石英ガラス表面で多角形を有する鏡面微細凹形状の創成が実現できた。

Fig.11 Variation of laser machined surface during etching

a) 3D image of dimple shape

b) Surface roughness

Fig.12 Measurement results of a micro concave

6. 結 言

本研究では、レーザ加工とエッチングを組み合わせ、干渉によって鏡面かつ球面凹形状の制御を可能とする新しい加工法を提案し、その加工法の有効性を実証した。本研究で得られた結果は以下のとおりである。

＜鏡面微細凹形状創成に関する知見＞

- 1)YAG レーザによって、マイクロメートルサイズの微細凹形状は創成できたが、飛散物や熱影響部によって鏡面には至らなかった。
- 2)レーザ加工痕をエッチングすると、深さ一定で直径のみが拡大していった。表面粗さを測定した結果、13nmPV の鏡面が創成された。
- 3)形状創成メカニズムは実験結果とシミュレーション結果から、ガラスの等方性エッチングに基づいていることが明らかになった。
- 4)加工痕形状はエッチングによって自己収束的に球面に漸近し、その曲率半径はエッチング時間とともに大きくなることがわかった。

＜多角形状を有する鏡面微細凹形状創成に関する知見＞

- 5)複数の加工痕がエッチングで直径を拡大していくことに着目し、それらの配列をもとに干渉による鏡面微細凹形状創成法を考案し、シミュレーションによってその可能性が検証できた。
- 6)単独で鏡面微細凹形状を創成する時とは異なり、隣接する複数加工痕が干渉し始めると深さが減少し、直径は一定になった。また、曲率半径が大きくなることがわかった。
- 7)フェムト秒レーザを用いて格子配列と千鳥配列のパターニング実験を行った。レーザ出力 10mW、1 パルス照射の結果、ワーク表面における加工形状は 15 時間エッチング後に格子配列で四角形、千鳥配列で六角形の形状にすることができた。表面粗さは 2nmRa、11nmPV の鏡面であった。

謝 辞

最後に、本研究を進めるにあたり、多大なるご協力を賜った(独)理化学研究所 安斉正博博士、洲之内啓博士、埼玉大学 鈴木章彦教授に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1)若林正毅、池野順一他：表面機能を発現するレーザ微細加工、2005 年度砥粒加工学会学術講演論文集、(2005) 107.
- 2)鈴木浩文、木村剛之他：マイクロブライズ工具を用いた焼入れステンレス鋼の鏡面切削、日本機械学会第 5 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集、(2004) 35.
- 3)Suehisa KAWAMURA et al. : On the Formation Mechanism of Side Burr in Orthogonal Cutting, Journal of JSPE, **53**, 08 (1987) 1240.
- 4)緑川克美：フェムト秒レーザと物質の相互作用、レーザ加工学会誌、**8**, 3(2001)2.
- 5)永井治彦：レーザプロセス技術、オプトロニクス社、(2000)211.
- 6)佐野智一他：フェムト秒レーザ照射による高配向性グラファイトからのダイヤモンド多形体の合成、溶接学会全国大会講演概要、81(2007)356.
- 7)若林正毅、池野順一他：表面機能を発現するフェムト秒レーザ微細加工に関する研究～微細ディンプルの形状制御～、2007 年度精密工学会春季大会学術講演論文集、(2007) 257.