

5 軸レーザー加工法によるマイクロ機能要素の製作

松坂 壮太* 飯島 賢介* 渡部 武弘*

Fabrication of Micro-machine Elements by Five-axis Laser Processing System

MATSUSAKA Souta, IJIMA Kensuke and WATANABE Takehiro

*千葉大学大学院(〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)
matusaka@faculty.chiba-u.jp

(原稿受付 2007 年 6 月 29 日)

Laser micro-processing system consisted of five-axis PC controlled automatic stage and UV nanosecond laser oscillator was developed. This system enables both milling and lathe processing by the arrangement of stages. Micro-windmills with multiple blades and micro-cylindrical cantilevers were fabricated on polyimide films and silver-sodium ion-exchanged glasses by the milling and lathe methods. These micro-machine elements had sharp cutting angles and smooth cutting surfaces. The dimension errors of these elements were within five percent of designed diameters.

Key words: micro-machine element, five-axis laser processing system, polyimide film, silver-sodium ion-exchanged glass, micro-windmill, cylindrical cantilever

1. 緒 言

近年, MEMS/NEMS(Micro/Nano Electro-Mechanical Systems)技術に代表されるマイクロからサブマイクロメートルサイズの材料加工技術が急速に進展しており¹⁾, その加工法もフォトリソグラフィ/エッチング²⁾をはじめとして, マイクロ放電加工法³⁾, レーザアシストエッチング法⁴⁾⁶⁾, 光造形法⁷⁾⁸⁾等, 多岐に亘っている. しかしながら, これらの加工法はそれぞれ原理的に, 加工可能材料や加工可能形状が限定されるため, 今後, より多様な材質でかつ, 複雑な形状からなる微細構造を製作するためには, その加工法の選択が大きな問題になると予想される. これに対しレーザー直接加工法は, 様々な加工材料に対して任意の形状を比較的安価に形成できるという点で, 上述の方法に比べて大きな利点を有している. 例えば河村らは, Nd:YAG レーザ第 4 高調波を用いたレーザー旋盤加工法を提案し⁹⁾¹⁰⁾, ポリイミド樹脂で製作した直径 1 mm のマイクロファン形状を実際に回転させるまでに至っている¹¹⁾. しかし彼らの報告以降, 微細穴あけや溝加工等の比較的単純な形状作製¹²⁾¹⁴⁾を除けば, レーザ直接加工法による複雑形状加工が広く普及しているとは言えない. この理由の一つとしてレーザー直接加工法では加工精度の確保が容易でないことが挙げられる. 例えば, レーザ出力の不安定性に起因する加工底面粗さの増大, 硬脆材料の加工時に多発する加工部近傍の割れ・欠け, 切断面のテーパ化といった問題点は加工精度の低下に直結する. したがって今後, レーザ直接加工法の利点を最大限に活用するためには, これらの問題点を順次解決していくことが求められる. 本研究ではその前段階と

して, 異なるレーザー加工特性を有する材料に対して, 同一手法・装置により同程度の加工精度を保證できる微細加工システムの開発を行った. 構築した高精度微細加工システムは, 紫外線ナノ秒パルスレーザーと PC 制御 5 軸自動ステージからなる. その後, 加工の比較的容易なポリイミドを加工対象として, 加工システムの性能評価を行った上で, ソーダライムガラスに対して複雑形状加工を試みた.

2. 実験方法

2.1 5 軸レーザー加工システムの構成

実験に使用したレーザー発振器は Nd:YAG レーザ第 4 高調波(Lumonics, YM-200, 波長: 266 nm, パルス幅: 6 ns, 繰返し周波数: 10 Hz)である. 加工用サンプルは, ステージコントローラを介して PC に接続された自動 5 軸ステージ(駿河精機, KS201-20HD(x-y 軸), KS3232-8N(z 軸), KS401-60(θ, ω 軸))上に設置され, 鉛直上方よりレーザー光が照射される. Fig. 1 (a)に加工装置の概略を示す. サンプル上方(θ 軸上)および側方(ω 軸上)には CCD カメラを設置し, 後述の回転軸とレーザー照射位置の整合ならびに加工中のサンプル観察に利用した. それぞれの拡大倍率はモニタ上で約 700 倍, 270 倍であり, 目視による分解能は約 1 μ m である. なお本システムでは, 目標形状に応じて自動ステージを容易に組み換え可能であり, ここでは Fig. 1 (b), (c)に示すような 2 つのステージ配置を採用した(以下では配置 I, II と表記する). 個々の機能要素製作手法に関しては, それぞれの実験結果とともに次章で示している.

2.2 供試材料

加工対象としたサンプルは, ポリイミドフィルム(東レ・

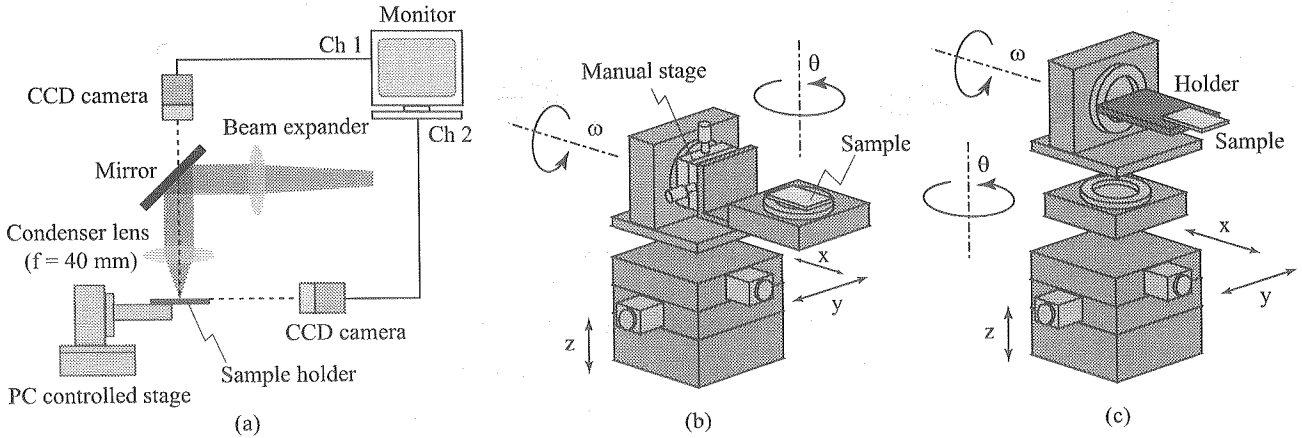


Fig. 1 Schematic illustrations of experimental set-up. (a) Overview, (b) stage arrangement I and (c) arrangement II.

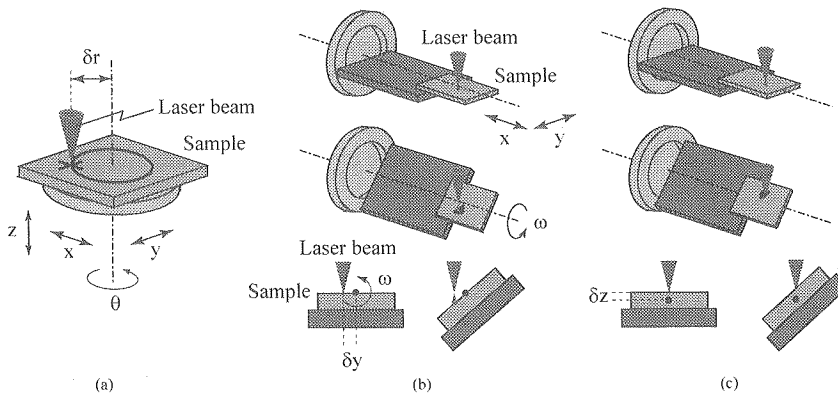


Fig. 2 Misalignment between laser irradiation point and rotation axis, (a) δr , (b) δy and (c) δz .

デュポン, カプトン, フィルム厚: 125 μm) およびソーダライムガラス (松浪硝子工業, #0050, 板厚: 1 mm) である。なお, ソーダライムガラスは事前に, 目標形状寸法に合わせて 100 μm 程度まで研磨を行った後, 1.0% AgNO_3 - NaNO_3 の塩浴中に 643 K, 21.6 ks (6 hours) の条件で浸漬し, ガラス中の Na と浴中の Ag とのイオン交換を行うことで, 加工閾値の低下と割れ欠け感受性の低減を図った^{14), 15)}。電子プローブマイクロアナライザー (EPMA) (日本電子, JXA-8900) 分析の結果, 上記イオン交換条件における Ag イオン浸入深さは約 30 μm であり¹⁵⁾, およそこの程度の深さまでは, 加工性の向上が図られているものと予想される。

2.3 回転軸とレーザー照射位置との整合方法

Fig. 1 (b), (c) の各ステージ上にサンプルを設置した場合, ビーム照射点が回転軸上にないため, そのまま回転加工を行うと当然, 設計寸法との間に誤差を生じる。配置 I, II において発生する位置ズレは, それぞれ Fig. 2 (a) および Fig. 2 (b), (c) に示す 3 通りである。配置 I では, θ 軸の回転運動を行いながらレーザー光を照射することにより, 回転軸を中心とした円形痕 (半径 δr) が形成される。モニタ上で, このズレ量 δr がゼロとなるよう x-y ステージを駆動させ, 回転軸とビーム照射点の整合を図った。また配置 II では, y 方向のズレ量 δy および z 方向のズレ (微小な焦点ズレ) 量 δz が存在した場合, ω 軸の回転運動により扇形の加工痕が形成される。この場合も, それぞれ y 軸, z 軸の駆動により, モニタ上で回転軸とビーム照射点との整合を図った。

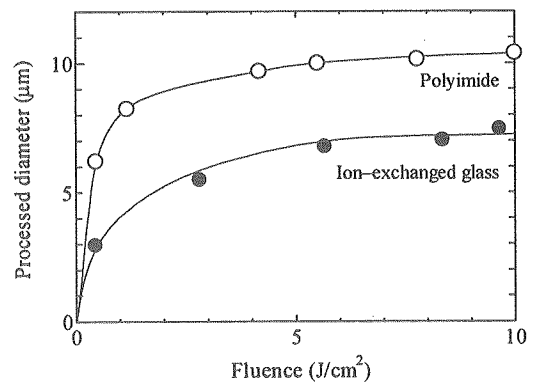


Fig. 3 Change in processed diameter with fluence formed on polyimide film and ion-exchanged glass.

3. 実験結果および考察

3.1 ポリイミドおよびイオン交換ガラスの加工特性

Fig. 3 に, ポリイミドおよびイオン交換ガラスに対して焦点位置で 50 パルス照射した場合の, フルエンスと加工径との関係を示す。フルエンスは, 照射エネルギーを増加させてもポリイミドの加工径がほぼ 10 μm で飽和したため, 焦点でのビーム径を 10 μm と仮定して算出した。また, このフルエンス範囲内では, イオン交換ガラスの加工穴周辺に割れ・欠けは一切認められなかった。Fig. 3 によって得られた加工径は, 次節以降で行われるレーザー切断・切削において, 切断しろの推定に使用される。

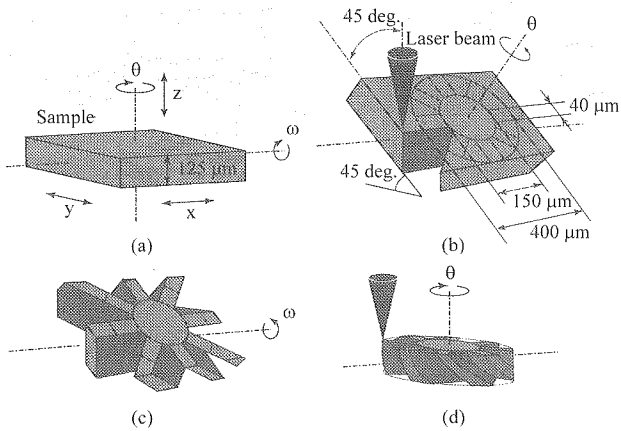


Fig. 4 Fabrication procedure of micro-windmill.

3.2 フライス盤加工法によるファン形状の作製

Fig. 1 (b)に示すステージ配置 I を採用した場合、鉛直上方より照射されるレーザー光により、機械工作における立フライス盤に類似した加工が可能である。そこで、Fig. 4 に示す方法により、数枚の羽根を有するファン形状の製作を試みた。製作の手順は以下の通りである：(1) 加工サンプルを ω 軸の回転により所定の角度(=45度)で傾斜させ、x-y軸を台形状に駆動することで、羽根と羽根との隙間を形成する(Fig. 4 (b))。またこの際、焦点位置が常にサンプル上面に一致するよう、z軸を同時に駆動させる。(2) ω 軸を傾斜させたまま θ 軸を回転させ、順次、羽根間を切り離す(Fig. 4 (c))。 (3) ω 軸の回転により、サンプルを水平に戻し、最後に外縁を円形に切り抜く(Fig. 4 (d))。このようにして作製したポリイミド製マイクロファンのSEM写真をFig. 5に示す。加工時のフルエンスおよびビームの走査速度(x-y軸の移動速度)はそれぞれ9.3 J/cm²および20 μ m/sである。Fig. 5 (b)における計測の結果、設計寸法との誤差は外径、中心径のいずれもが5 μ m以内であり、またFig. 5 (c)から分かるように、各羽根は正確に45度の傾斜をもって形成されている。本ファンの寸法は、河村ら¹¹⁾のそれに比べて外径で約40%であり、このサイズの機能要素としては、これまでにない高い精度を有している。しかし、各羽根の表面に注目すると、全ての羽根表面において円周接線方向に若干の切断痕が残存していることが分かる(Fig. 5 (b), (d))。本実験では、上述のように焦点位置をサンプル上面に一致させているため、羽根下部ではビーム径が拡大しフルエンスが低下する。次節でも示されるように、低フルエンス条件下では、加工量はフルエンスの僅かな変動に大きく影響されるため、加工中の出力変動がこのような切断痕発生の原因になったと推察される。したがって、より平滑な羽根表面を得るためには、常に焦点位置付近で加工が行われるよう、加工深さのモニタリングとそれに追従するz軸制御方法の確立が必要である。

次にポリイミドと同様の加工条件で、イオン交換ガラスを対象としてファン形状の製作を行った。設計寸法はFig. 4 (b)と同様であるが、加工時間短縮のため羽根枚数は4枚

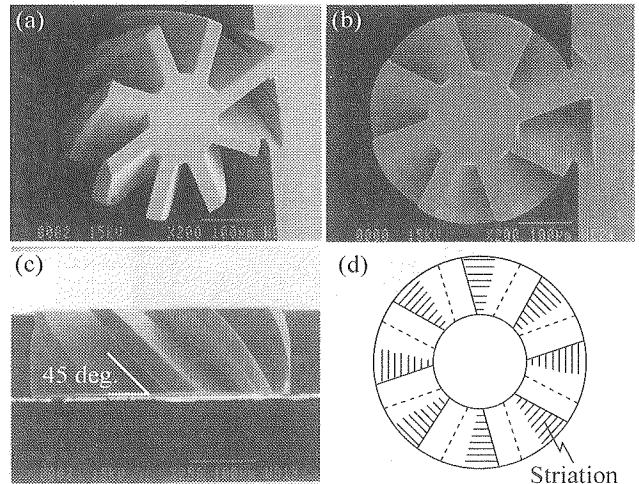


Fig. 5 SEM photographs of micro-windmill formed on polyimide film. (a) Overview, (b) front view, (c) side view and (d) striation on cutting surfaces.

数のデブリが認められるが、これはファンと母材との接続部が脆弱であり、加工後の洗浄を行っていないためである。同図から分かるように、ビーム照射面近傍では非常にシャープな切断面が得られている一方で、羽根下部では切断痕の残存や若干の欠けが認められる。これらの原因としては、ポリイミドの場合と同様のフルエンス不足、および羽根間のガラスが完全に切断される前に自重により欠落した可能性等が考えられる。これらの詳細は現状では不明であるが、ガラスのような硬脆材料を加工する際には、大きな領域を一気に切断するのではなく、小領域に分割して切断する等の対策も必要であろう。なお、本ファンの寸法誤差は、外径で10 μ m以内、中心径はほぼ設計値に等しくなった。

3.3 旋盤加工法による円柱形状の作製

一方、Fig. 1 (c)に示すステージ配置 II を採用すると、機械工作における旋盤と同様な加工が可能となる。そこで、Fig. 7 に示す方法により、円柱形状の製作を行った。製作の手順は次の通りである：(1) サンプルをx-y軸の駆動により凸型形状に加工する(Fig. 7 (b))。 (2) ガラスサンプルでは切断による新生面近傍にはAgイオンが含有されていないため、再度、AgNO₃-NaNO₃融液中に浸漬しイオン交換を行う。(3) x軸を直線駆動、 ω 軸を回転駆動させながらレーザー照射を行い、円柱形状に加工する(Fig. 7 (c))。この際、ビームの焦点位置は板厚の中央に設定した。製作したポリイミド製円柱形状をFig. 8 (a), (b)に示す。加工時のフルエンスはそれぞれ、2.8 J/cm²および9.3 J/cm²であり、x軸の移動速度は20 μ m/s、 ω 軸の回転速度は1.25 degree/sである。両図から分かるように、いずれのフルエンスにおいても偏心のほとんどない円柱形状が製作されている。しかし、それらの側面形状は若干異なり、低フルエンスの場合、円周方向に大きな線状痕が存在し表面粗さの増大が認められた。Fig. 3 に示されるようにフルエンスが低い場合、僅かな出力変動により加工径は大きく変動する。円柱加工を行う場合、その側面ではビームの外形(空間プロファイル)がそのまま転写されるため、このような表面粗さの増大に至った

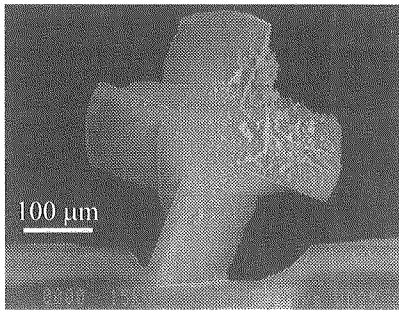


Fig. 6 SEM photograph of micro-windmill formed on ion-exchanged glass.

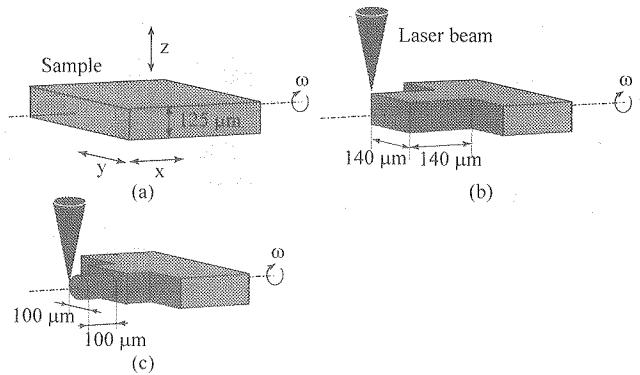


Fig. 7 Fabrication procedure of micro-cylindrical cantilever.

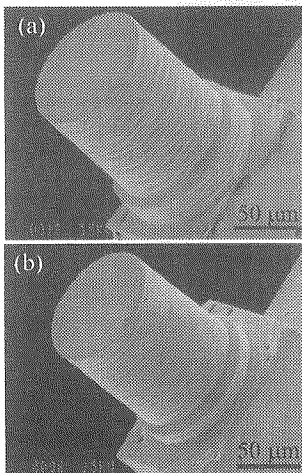


Fig. 8 SEM photographs of micro-cylindrical cantilevers formed on polyimide films when the fluences were (a) 2.8 J/cm² and (b) 9.3 J/cm².

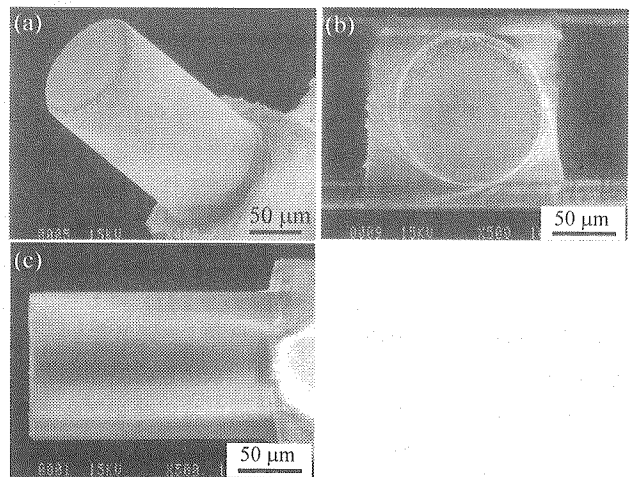


Fig. 9 SEM photographs of micro-cylindrical cantilever formed on ion-exchanged glass. (a) Overview, (b) front view and (c) side view.

ものと考えられる。一方、円柱直径の設計寸法との誤差は、それぞれ 1 μm (2.8 J/cm²), 5 μm (9.3 J/cm²)であり、高い寸法精度を有している。このような寸法誤差が生じた原因としては、フルエンスの差によるものと言うよりむしろ、目視により CCD モニタ上で回転軸とビーム照射点との位置合わせを行う際に、照射点の輪郭の若干のボケや目視による識別限界(約 1 μm)といった理由から、数ミクロン程度の位置ズレが生じたためと考えられる。

次に、イオン交換ガラスを対象として円柱形状の製作を行った。フルエンスは 9.3 J/cm²とし、ステージの移動・回転速度はポリイミドの場合と同様である。この際、イオン交換ガラス内の Ag イオン浸入深さが約 30 μm であることから、加工深さがこれを超えないよう留意した。ここでの設計寸法はポリイミドの場合と若干異なり、板厚 150 μm、円柱長さ 200 μm、円柱直径 120 μm(すなわち片側の加工量が 15 μm)である。Fig. 9 に製作したガラス製円柱の SEM 写真を示す。同図より割れ・欠けや偏心がなく、かつ非常に滑らかな側面を有する円柱形状が製作できたことが分かる。また設計寸法との誤差も約 2 μm であり、高精度な加工が実現されている。このような形状は、例えば前節で製作したファン形状の回転軸として利用可能である。本手法によれば、原理的にはどのような長さの円柱形状をも製作可能であり、この点でエッチングを利用した他の手法に比べて

優位性を有している。

ここに示したいくつかの製作例においては最大 5 %程度の寸法誤差が存在し、実際に複数の要素を組み合わせるにはまだ十分な加工精度が保証できるとは言えない。本実験で使用した各ステージの 1 パルスステップあたりの駆動量は、ビームの直径に比べてはるかに小さく、このような誤差が生じた原因はモニタ上での位置合わせ誤差ならびにレーザー出力の不安定性によるものと推察される。したがって今後は、モニタ視認性の向上や、出力変動に対して裕度を持つ高フルエンス域での加工等の方法により、加工精度の向上を図る必要がある。

4. 結 論

本研究では、紫外線ナノ秒パルスレーザーと PC 制御 5 軸自動ステージからなる微細加工システムを構築し、ポリイミドおよび Ag-Na イオン交換ガラスに対してマイクロ機能要素の製作を試みた。フライス盤加工法では外径約 400 μm のファン形状を、旋盤加工法では直径約 100~120 μm の円柱形状を製作し、ポリイミドとガラスのいずれの場合においても最大寸法誤差 5 %以下の高い精度で加工が可能となった。しかし加工面の一部に、レーザービームの線状痕の残存やガラス材料の微細割れが認められる場合が存在した。

今後、より高精度な加工を実現するためには、位置合わせ時のモニタ視認性の向上、レーザー出力の安定化、加工対象に合わせた加工手順の最適化を図る必要がある。

5. 謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金(若手研究(B)、課題番号 16760583)の助成により実施された。深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Fujita, H.: Technical Trends of MEMS and Role of Design Tools, *J. Jpn. Soc. Precision Eng.*, **70** (2004) 1133. (in Japanese)
- 2) Park, J. H., Lee, N. E., Lee, J., Park, J. S. and Park, H. D.: Deep Dry Etching of Borosilicate Glass using SF₆ and SF₆/Ar Inductively Coupled Plasmas, *Microelectron. Eng.*, **82** (2005), 119.
- 3) Yan, B. H., Wan, A. C., Huang, C. Y. and Huang, F. Y.: Study of Precision Micro-holes in Borosilicate Glass using Micro EDM Combined with Micro Ultrasonic Vibration Machining, *Intl. J. Machine Tools and Manufacture* **42** (2002), 1105.
- 4) Hanada, Y., Sugioka, K., Gomi, Y., Yamaoka, H., Otsuki, O., Miyamoto, I. and Midorikawa, K.: Development of Practical System for Laser-induced Plasma-assisted Ablation (LIPAA) for Micromachining of Glass Materials, *Appl. Phys. A*, **79** (2004), 1001.
- 5) Ding, X., Kawaguchi, Y., Sato, T., Narazaki, A., Kurosaki, R. and Niino, H.: Micron- and Submicron-sized Surface Patterning of Silica Glass by LIBWE Method, *J. Photochem. Photobiol. A*, **166** (2004), 129.
- 6) Li, C. and Nikumb, S.: Ultra-fine Surface Machining of Glass using Laser-produced Charged Particles, *Appl. Surf. Sci.* **219** (2003), 264.
- 7) Kawata, S., Sun, H. B., Tanaka, T. and Takada, K.: Finer Features for Functional Microdevices, *Nature*, **412** (2001), 697.
- 8) Maruo, S. and Ikuta, K.: Submicron Stereolithography for the Production of Freely Movable Mechanisms by using Single-photon Polymerization, *Sens. and Act. A*, **100** (2002), 70.
- 9) Kawamura, Y.: Laser Lathe Machining, *Review of Laser Eng.*, **24** (1996), 460. (in Japanese)
- 10) Kawamura, Y. and Takenaka, A.: Development of a Five Axis Laser Micromachining System, *Review of Laser Eng.*, **27** (1999), 45. (in Japanese)
- 11) Kai, A. and Kawamura, Y.: Laser Micro Machining of Ultraviolet and Infrared Simultaneous Irradiation, *Proc. of SPIE*, **5662** (2004), 538.
- 12) Nikumb, S., Chen, Q., Li, C., Reshef, H., Zheng, H. Y., Qiu, H. and Low, D.: Precision Glass Machining, Drilling and Profile Cutting by Short Pulse Lasers, *Thin Solid Films*, **477** (2005), 216.
- 13) Tseng, A. A., Chen, Y. T. and Ma, K. J.: Fabrication of High-aspect-ratio Microstructures using Excimer Laser, *Opt. Lasers Eng.*, **41** (2004), 827.
- 14) Koyama, T. and Tsunetomo, K.: Laser Micromachining of Silicate Glasses Containing Silver Ions using a Pulsed Laser, *Jpn. J. Appl. Phys.* **36** (1997), L244.
- 15) Matsusaka, S. and Watanabe, T.: Micro-machinability of Silver-sodium Ion-exchanged Glass by UV Nanosecond Laser, *J. Mater. Process. Tech.* (to be published)