

中赤外線高出力レーザーの光情報機器への応用

Applications of mid-infrared, high power lasers as a novel optoelectronics information system.

櫻田 典世

指導教員 渡辺 一弘 教授

ABSTRACT

In this thesis, an artistic laser processing system using a slab CO₂ laser has been developed as applications of a mid-infrared, high power laser intended for an optoelectronics information system. For realizing high accurate and stable processings, it is indispensable that the processed surface conditions and the power intensity profile of the in-coming laser beam can be monitored and analyzed. In this system, laser profiling has been preformed by an innovative non-contact technique using an ultraviolet CCD camera. Monitoring for processed surface has been performed by analyzing thermal flow and time-integrated temperature using thermal camera system. A drawing which has 3 visual effects and 8 tones and 20 × 20cm² size have been successfully created on transparent plastics by a segmented pixel drawing (SPD) method which have been developed as one of the new laser processing method in order to improve its powers of expression. Introducing random arrangement to the SPD method, more natural and smooth artistic work can be created. A laser plastic coloring (LPC) method has been newly developed for colorful expression using a laser. In this method, four colors of cyan, magenta, yellow, and black figures and characters have been displayed. 18 hues and 8 tones color expression has been successfully created by changing the mixing ratio of the dots of two colors variously. A colorful image expression on a plastic object has been attractively obtained from a digital image by combining the LPC and the SPD method.

Keywords: Slab CO₂ Laser, Artistic Laser Processing, Laser Visualization, Segmented Pixel Drawing Method, Laser Plastic Coloring Method.

1. 序論

レーザー研究は、遠赤外、可視、紫外、そして、X線と広範囲の発振波長、フェムト秒オーダーの超短パルス、テラワット級のピークパワーと多種多様なレーザーが開発されるまでに至っている。その応用分野は、加工、計測、医療、通信、軍事など多岐にわたっており、さらに様々な分野・用途への応用が期待されている。従来、中赤外線高出力レーザーは、溶接、切断、穴あけ、エッチング、マーキングなど、様々な工業的加工用途に使われてきたが¹⁾⁻³⁾、その他の応用、特に光情報機器への応用に関しては、未だ発展していないのが現状である。

一方、レーザー加工分野では、微細穴あけ加工⁴⁾や銀超微粒子による着色⁵⁾を応用した芸術的加工と呼ばれる分野が発展してきている。しかしながら、従来の芸術的加工は、写真などを忠実に、いわゆる写實的に加工材料表面あるいは材料内部へドット加工するものであり^{6),7)}、また、着色といっても、加工対象へのマーキング照射などにより発色あるいは変色加工を行なうようなものであり、単色着色しか行なうことが出来ないものである。そのため、芸術的とはいつても、単調な加工・着色表現にとどまっているのである。

本研究では、中赤外高出力レーザーの可能性、芸術的加工における表現力の多様性を開拓すべく、レーザーによる新たな描画方法を考案し、それを実現する芸術的加工システムの構築を行なった。中赤外線高出力レーザーの光情報機器への応用としての本システムは、スラブ型 CO₂ レーザを用い、樹脂材料バルクへ画像表現加工できるという新規性を有しているプリンタのような出力装置である。本研究の内容は主に、1) 中赤外線高出力レーザーの新しいビームモニタリング法、2) サーモカメラによる熱可視化モニタリング技術、3) 芸術的加工の新しい手法としての小片分割加工法、4) レーザによる多色着色から構成されている。

まず、目的のレーザー加工システムでは、加工精度・再現性の確保の点からビームプロファイリング、モニタリングが必要不可欠となる。目視できない赤外線かつ高出力の集光ビームのために、本研究では、UV CCDカメラを用いたビームプロファイル法⁸⁾ならびにサーモカメラを用いたモニタリング法^{9),10)}を新たに考案し、その有用性について検討を行なった。ビームプロファイルにおいては、ガウス分布か

らの平均誤差が 5% となり、プロファイル法としての有用性を確認した。モニタリング法では、積分温度画像と熱流ベクトル画像を算出し、その結果より、加工機の制御に微調整を加え均一かつ再現性の高い加工結果を得ることが可能となった。

第2に、芸術的加工法としては、小片分割加工 (SPD) 法を考案した¹¹⁾。アクリル部材に対し 8 階調・3 視覚効果の小片パレットを作成し、画像を元に趣のある 100 × 100pixel (20 × 20 cm²) のグレースケール画像表現を実現した。さらに乱数を用いることにより、自然で滑らかな風合を持った加工物を作成することにも成功した。この手法はピクセルベースの画像情報をそのままピクセルベースに描画加工する新しい手法といえる。

第3として、レーザープラスチック着色 (LPC) 法¹²⁾⁻¹⁴⁾では、レーザーによる自由度の高い画期的な着色法の開発に初めて成功し、マーキング実験によりシアン、マゼンタ、イエロ、ブラックの 4 原色による図形描画・印字を行なった。さらに、4 原色によるドット着色の配置割合を変化させることにより、18 色相・8 色彩表現を可能とし、画像を元に 30 × 30pixel (6 × 6 cm²) のカラー画像表現を可能とした。

2. システム構成

芸術的加工システムの構成図を Fig.1 に示す。本システ

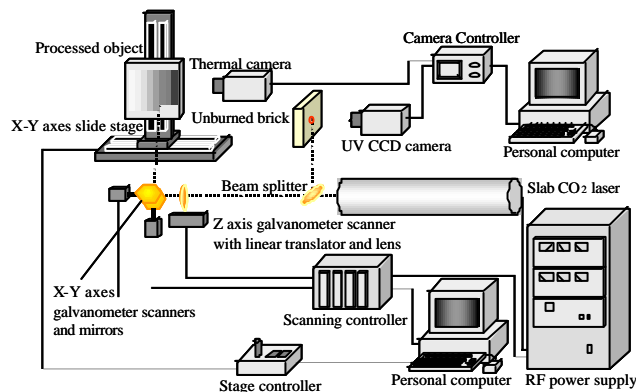


Fig.1 Artistic laser plastic processing system.

ムでは、本研究室にて構築した最大平均出力 200W の高周波励起スラブ型 CO₂ レーザを用いた¹⁵⁾。実験では、平均出力を 2~50W、繰り返し周波数を 0.5~4kHz、デューティ比を 10~90% に制御し加工を行なった。実際の加工作業に先立ち、UV CCD カメラを用いたレーザービームプロファイラによりレーザのビーム品質を確認し、さらに加工中の対象物についてサーモカメラにより熱モニタリングを行なうことにより、レーザ本体ならびに加工制御機の微調整を行ない、加工精度・再現性を確保した。加工制御系は、高周波電源と General Scanning 社製の X-Y-Z 軸ガルバノメータから構成されており、スキャニングコントローラを介してパーソナルコンピュータによって制御される。高周波電源は、周波数 100MHz、最高出力 2kW であり、スキャニングコントローラから送られるレーザのパルス幅と繰り返し周波数の情報を持った TTL 信号によってレーザ本体へ印加する電力の制御を行なった。本レーザは印加される電力により、スラブ電極間の放電状態が変化し、レーザ出力レベルおよび ON-OFF 動作を制御することが可能である。光学制御系では、Z 軸レンズならびに X-Y 軸ミラーを、前述のガルバノメータにより駆動し、さらに Z 軸レンズは、リニヤトランスレータを組み合わせる事により、回転運動から直線運動への変換を行ない駆動させた。Z 軸レンズによって焦点位置の制御を、X-Y 軸ミラーによって加工平面における照射位置の制御を行なった。レーザービームは複数のレンズとミラーから構成される光学系ならびに光学制御系を通過し加工対象物へ走査・照射される。X-Y スキャナによって加工対象面上にレーザを走査できる範囲は、約 8×8cm² 以内に限られており、より大きな加工物を作成するために X-Y スライドステージ (スライド幅 200mm) を用いた。これにより、加工対象物を X-Y 方向に移動させ、約 20×20cm² の加工物を作成することが可能である。

3. ビームプロファイリング

本研究では、中赤外線高出力レーザに対し UV CCD カメラによる新しい画像計測法を考案し、これまで困難とされてきた集光ビームプロファイルガラスによる反射を利用して計測する技術を構築した。加工溶融部の光は、紫外から赤外にわたる広範囲の光を含んでおり、この加工溶融部を定常的な黒体と近似すると、紫外線領域は、可視光領域に比べ溶融部の温度に対する感度が高く、溶融部の温度分布を測定するのに適し、精度の高い非接触計測が可能である。耐火レンガのビーム照射部においてゲインを 11 段階に変化させ、それぞれの段階の画像を 6 秒間隔で撮像し 11 枚の画像を記録した。そして、それらの画像について解析

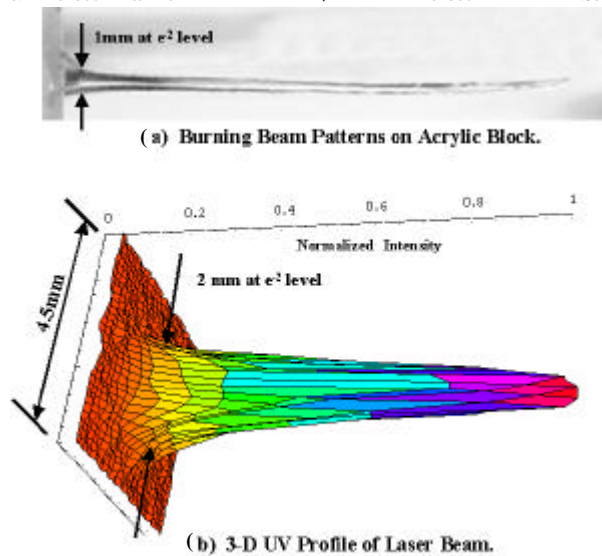


Fig.2 Profiles of focused laser beam.

を行ない、合成する 2 枚の画像の組み合わせを選択・合成し、三次元ビームプロファイル画像を作成し (Fig.2 (b))、従来のプロファイル法であるアクリルブロックの焦痕を見る方法 (Fig.2 (a)) と比較した。理想的なビームの強度分布はガウス分布に近似する事が出来るので、これらの結果をガウス分布と比較する事によって、本プロファイル法におけるビームプロファイラとしての有用性を確認することが可能である。Fig.3 の比較結果をみると、ガウス分布に対する従来法の平均誤差 18% であるのに対して、本プロファイル法の平均誤差は 5% となり、本計測方法に、ビームプロファイラとしての有用性を見出す事ができた。

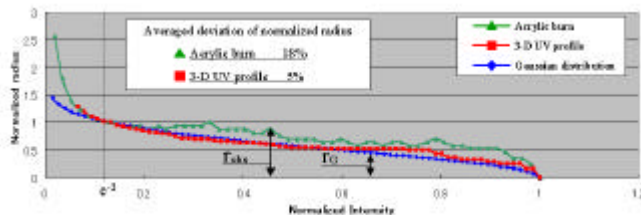


Fig.3 Comparison with Gaussian distribution.

4. モニタリング

サーモカメラを用いたモニタリングでは従来のモニタリング法である可視光 CCD カメラでは把握することが不可能であった表面的に変化の現れにくい熱加工でのモニタリングを可能とした。Fig.4 にモニタリング結果を示す。(a)では、レーザのドット照射時における、各ドットの照射エネルギーのばらつきを確認することができる。(b)では、ミラー走査からレーザ照射までの遅延時間を 10 倍の 5000 μs に増加させて加工を行なった。この場合では、スラブ電極の放電状態の立ち上がりを十分に安定させることにより、各ドットの照射エネルギーのばらつきを押さえ、加工結果の精度向上を果たすことができた。また、Fig.5 に示す熱流ベクトルを算出することにより、加工対象やレーザ照射の均一性を確認することも可能である。

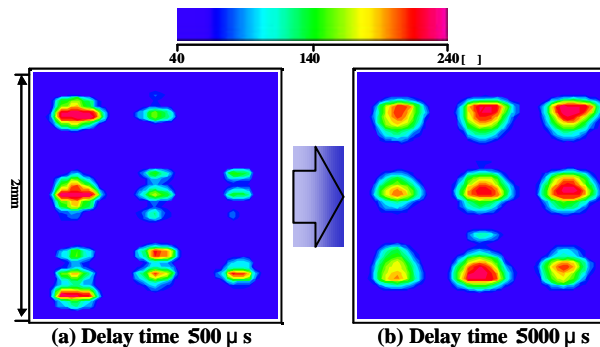


Fig.4 Time-integrated temperature contour maps.

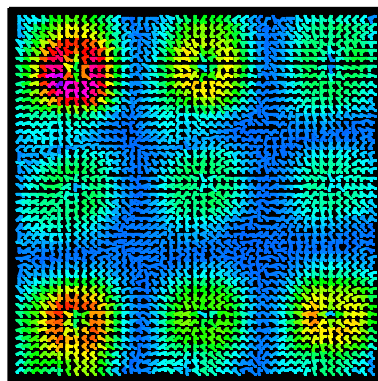


Fig.5 Thermal vector map.

5. 小片分割加工 (SPD) 法

本研究ではレーザー加工における表現の多様性を実現するために SPD 法を考案した。SPD 法の特長は、元画像中のいくつかの隣接画素を単位として小片に分割し解析することによって元画像の質感を判断し、加工対象も小片に分割し、その小片ごとにレーザー照射のドット配置、密度、パルス幅や繰り返し周波数といった制御パラメータをさまざまに変化させて加工を行なうことにより、元画像の質感をプラスチック加工材料表面に視覚効果として表現しようとする点にある。加工材料として CO₂ レーザに対する吸収率の高い透明アクリル部材を用い、加工結果の背景を暗色とし、制御パラメータに対する小片の階調と視覚効果をそれぞれ評価した。透明アクリル部材上のレーザー照射点は、レーザーアブレーションにより白濁した照射痕を形成し透明度が低下するため、背面を暗色することによってレーザー非照射部との明度差が視覚的差異を生み出すことになり、より良い評価が可能となる。アクリル部材の加工されるエネルギー閾値を超えるエネルギーが照射された部分のみ照射痕が形成されるため、ガウス分布を有するレーザービームのエネルギー強度分布によって、レーザーパワーと照射時間を制御することにより、照射痕の大きさを変化させることが可能である。

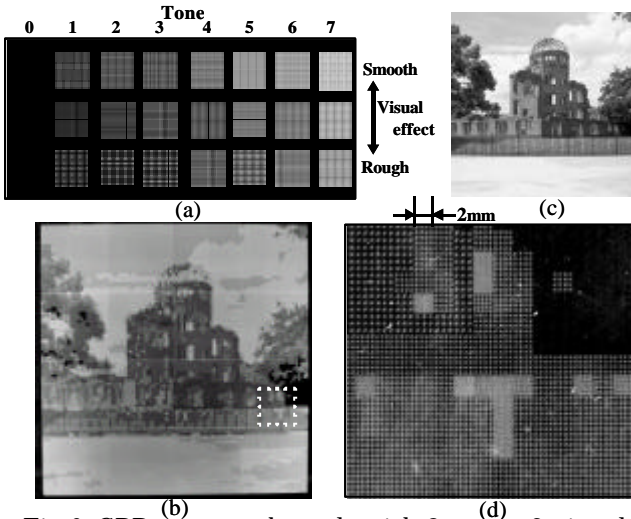


Fig.6 SPD processed result with 8 tones, 3 visual effects and 2 × 2mm² pixel size.

Fig.6 に SPD 加工実験結果を示す。Fig.6 (a) はデータベースとして作成した各種小片のパレット、(b) は SPD 加工実験結果、(c) は元画像、(d) は (b) 内の点線範囲の拡大図である。小片パレット (a) は、レーザー照射の配置、密度、パルス幅や繰り返し周波数といった制御パラメータのさまざまな組み合わせにより作成された約 200 個の小片群より、階調表現と視覚効果表現に適した小片のみを選択し列挙したものである。各小片の大きさは 2 × 2 mm² であり、図中の小片パレットは、各小片を 16 個正正方配列したものである。左右で階調 (Tone) の変化、上下で視覚効果 (Visual effect) の変化を示す。階調は小片内における加工占有面積の違いによって表現され、左側が暗階調 (黒) で右側に向かって順に明階調 (白) になるよう整理している。加工による階調は図に示すとおり 7 段階あり、無加工部分を最暗階調として、合計 8 階調を作成した。他方、視覚効果は加工照射点数の違いによって表現され、粗密の 3 段階を作成し、上段のドット数の多い方が滑らかな、下段の少ない方が粗い視覚効果を有している。制御パラメータの例として、第 1 階調の粗い視覚効果の小片は 3 × 3 ドット、パルス幅 0.45ms、繰り返し周波数 2kHz にてレーザー制御を行ない、その 1 ドットあたりの照射エネルギーは 22.5mJ/dot

である。SPD 加工実験結果 (b) は画像 (c) を元に、2 × 2 mm² の小片を 100 × 100 個配列し制作したもので、全体の大きさは 20 × 20cm² である。手前の地面や建物といった人工的な部分と、空の雲や木といった自然対象の部分では、同一階調による加工でも異なる視覚効果にて加工を行なっているため微妙な違いを表現できている。拡大図 (d) を見ると、階調ならびに視覚効果がドット照射の集合によって表現されていることがわかる。

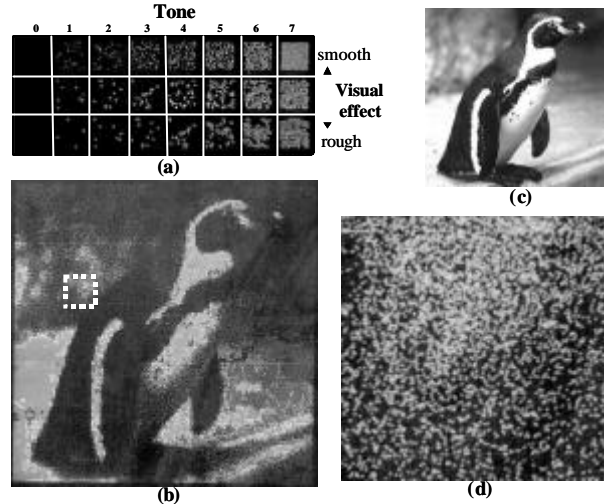


Fig.7 Random SPD processed result with 8 tones, 3 visual effects and 2 × 2mm² pixel size.

前述までの SPD 法では小片内のドット照射位置を正正方配列状に配置して行なっていたが、Fig.7 に乱数を用いてドット配置を行なった加工実験結果を示す。人の目の明度に対する視覚感が、絶対的な明度値よりはむしろ明度レベルの比率に対して高いことをふまえ、加工占有面積を等間隔にではなく対数関数的に変化させ視覚的に等間隔の階調を得た。Fig.5 では、小片サイズを 2 × 2 mm² とし、8 階調・3 視覚効果を作成した。加工実験結果の大きさは 20 × 20cm² である。加工実験結果を見ると、前述までの SPD 法とは異なった、滑らかで自然な風合の点描画のような視覚効果を得ることができた。

6. レーザプラスチック着色 (LPC) 法

芸術的加工システムとしてグレースケール表現のみならずカラー表現も可能とするために LPC 法を考案した。LPC 法は、着色対象としてプラスチック材料全般、熱源としてスラブ型 CO₂ レーザ、着色媒体として樹脂用染料を用いた、全く新しい着色法である。樹脂用染料は水で希釈し、加熱することによってプラスチック材料全般を染色することができる染料であり、通常、この染料は材料全体を染料に浸し、満遍なく染色するために用いられている。本方法では、レーザーを熱源として利用することによって、レーザー照射部の染料を局所的に加熱し、加熱された染料の接しているプラスチック材料を局所的に着色することが可能である。本実験では各色の着色状況をよく把握するために、着色対象として白色アクリル部材を用いた。

Fig.8 にマーキング実験の結果を示す。シアン、マゼンタ、イエロ、ブラックの 4 色について着色を試みた。加工パラメータとして、走査速度は 9.08mm/sec、走査回数は 5 回、レーザー平均出力を 2.2W とした。レーザーの ON/OFF・走査により、レーザーを照射した部分のみの染料の温度を局所的に高め、通常マーキング法と同等の文字やロゴマークなどを、着色することに成功した。着色に若干斑が見受けられるが、これは染料を供給する際に長繊維セルロースを用いたため、その繊維質が着色結果に影響を及ぼしたのである。

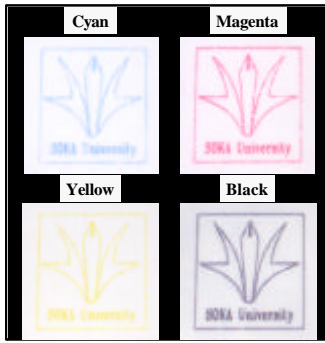


Fig.8 Laser color marking for CMYK color.

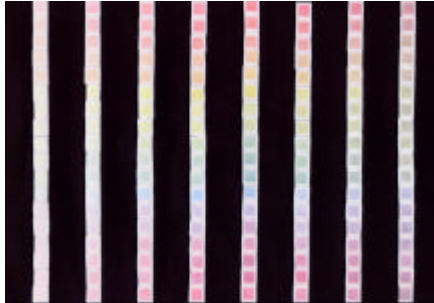


Fig.9 Multi-color pallet with 18 hues and 8 tones.

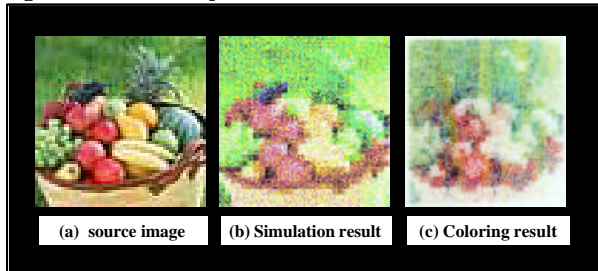


Fig.10 LPC image expression.

Fig.9 にカラーパレット実験結果を示す.この実験では SPD 法概念であるドット照射による小片構成によって多色相・多色彩を実現した.色相は異なる二色の占有密度の割合の変化によって,色彩は色のドット占有密度,黒色のドット数の変化,そして背景の白色によって表現した.加工パラメータとしては,シアン,マゼンタ,イエロ,ブラックについて1ドットあたりの照射エネルギーは5.3,5.0,5.6,4.7mJ/dot となり,光に対する吸収率の高い色が少ない照射エネルギーによって着色可能であることがわかる.この手法により18色相・8色彩表現を実現し,従来のレーザーによる着色法ではなし得なかった自由度の高い着色を実現することができた.

さらに,LPC法とSPD法を組み合わせることによってデジタルカラー画像を元に画像表現を試みた.元画像を Fig.10(a),シミュレーション結果を(b),LPC着色結果を(c)にそれぞれ示す.実際の着色実験に先立ち,制御データ作成中に生成される各色の座標データより着色シミュレーションを行なった.これにより,得られる着色結果を事前に予測することが可能となり,各制御パラメータの設定も容易となる.LPC着色結果ではCMYKの4色の染料および背景の白により元画像の色情報を表現することができてだけでなく,点描画のような趣を有した独特の絵画表現が可能となった.

7. 結論

本研究では,樹脂材料に芸術的バルク加工を行なうために必要となるレーザー加工による表現力の多様化を目指し,SPD法ならびにLPC法を考案した.そして,これら芸術的

加工法を実現するために,中赤線外高出力レーザーの光情報機器への応用として,スラブ型CO₂レーザーを用いた芸術的加工システムを構築した.加工システムに不可欠なUV CCDカメラを用いた新たなビームプロファイル法ならびにサーモカメラを用いたモニタリング法を考案し,加工精度・再現性の向上を実現した.SPD法により透明アクリル部材に対し8階調・3視覚効果の小片パレットを作成し,画像を元にグレースケール画像表現を実現した.さらに乱数を用いることにより,自然で滑らかな風合を有した加工物を作成することに成功した.レーザープラスチック着色法では,レーザーによる自由度の高い画期的な着色法を開発し,白色アクリル部材に対し,マーキング実験により図形描画・印字を行なった.さらに,18色相・8色彩パレットを作成し,画像をもとに30×30pixelのカラー絵画を作成した.

本研究の芸術的レーザー加工システムは,レーザーを用いたプラスチックなどのバルク樹脂部材に対する新しい描画原理を実現したものと見える.さらに,ピクセル内へ暗号もしくは符号をドット構成や色情報によって埋め込むことにより,コピー不可能な情報コードの生成といったセキュリティへの応用も可能となるだろう.

謝辞

本研究を行なうにあたって,御助言戴いた石井助教授に心から感謝いたします.実験をサポートしてくれた研究室の後輩の河原崎君,藤原君,また,卒業された浦井氏,斎藤氏,戎谷氏,岩本氏に感謝を申し上げます.

参考文献

- 1) K.Bondelie : Sealed carbon dioxide lasers achieve new power levels : Laser Focus World, Aug.(1996) p.95.
- 2) G.Ogura, J.Angell, and D.Wall : Applications test potential of laser micromachining : Laser Focus World, Jun.(1998) p.117.
- 3) 永井 治彦 : 最近のレーザー技術と加工への応用 : レーザー研究28 (2000) 2
- 4) 窪田 恵一 : 半導体レーザー励起固体レーザーによる微細加工 : レーザー研究28 (2000) 3
- 5) S.Chen, T.Akai, K.Kadono, and T.YAZAWA : Reversible control of silver nanoparticle generation and dissolution in soda-lime silicate glass through x-ray irradiation and heat treatment : Apl.Phys.Lett. Vol.79 No.22 (2001)3687
- 6) 林 健一 : 制御可能な光学的損傷を用いたガラス基板の内部マーキング : レーザー研究28 (2000) 40
- 7) S.Kawata, H.Sun, T.Tanaka, and K.Takada : Finer features for functional microdevices : Nature 412 (2001) 697
- 8) N.Sakurada, Y.Ishii, K.Watanabe, and Y. Kubota : Visualization of molten pools and invisible laser beam profile using an ultraviolet CCD camera : Journal of Visualization Vol.4 No.4 (2001) 349
- 9) N.Sakurada, Y.Ishii, H.Ebisutani, K.Watanabe, and Y. Kubota : Visualization of thermal phenomena on acrylic surface processed by a SPD method using a slab-RF excited CO₂ laser : CDROM proceedings of the 9th International Symposium on Flow Visualization, Edinburgh, August, 2000, No.261
- 10) N.Sakurada, M.Iwamoto, H.Ebisutani, Y.Ishii, K.Watanabe, and Y. Kubota : In-line thermal monitoring of acrylic surface processed by a segmented pixel drawing method using a slab-RF excited CO₂ laser : Proceedings of SPIE, Florence, September, 2000, Vol.4184, p.607
- 11) 櫻田 典世, 石井 良夫, 久保田 謙, 渡辺 一弘 : スラブ型CO₂レーザーを用いた小片分割加工法の芸術的プラスチック加工 : レーザー研究30 (2002) 396
- 12) M.Kawarazaki, N.Sakurada, Y.Ishii, K.Watanabe, and Y.Kubota : Color printing on plastics using a slab, RF excited CO₂ laser : proceedings of the International Congress of Laser Advanced Materials (2002)
- 13) 特許出願,着色方法および着色システム,特願2001-230525,平成13年7月30日
- 14) M.Kawarazaki, N.Sakurada, Y.Ishii, K.Watanabe, and Y.Kubota : Digital color printing on plastics using a slab, RF excited CO₂ laser : proceedings of SPIE (2002)
- 15) 渡辺 一弘 : 高周波励起スラブ型炭酸ガスレーザーの出力特性 : レーザー研究21 (1993) 1245