

# 紫外・赤外パルスレーザーを用いた微小立体加工法の研究

## Three Dimensional Micro Machining Using UV-IR Pulsed Laser

CM03004 甲斐 晶寛 (指導教員 河村 良行 教授)

Akihiro KAI, (Prof. Yoshiyuki KAWAMURA)

### Abstract

In this study, three-dimensional microstructures are manufactured using a laser micro machining system, which consists of an ultraviolet pulsed laser and a stage having five degree of freedom. The works are controlled to move by the five-axis stage to an arbitrary position and angle, to manufactured three-dimensional microstructures. In order to try to improve the laser ablation characteristics, we have irradiated materials by fourth harmonics and fundamentals of a Nd-YAG laser, simultaneously. We have found that it is possible to increase the ablation rate 20% by irradiating UV-IR laser simultaneously.

Key words: Laser processing, Laser ablation, Laser machining, simultaneous irradiation

### 1. 緒言

近年では様々な分野において微細加工の分野に注目が集まって来ており、その中でもレーザーを加工ツールとして加工を行う方法が有効であると思われる。

レーザー加工の持つ非接触性や加工材を選ばないという特徴が、高い付加価値をつける微細加工の分野に応用できると考えられる。このため、本研究ではレーザー光を集光照射し蒸散作用を起こす設備と、5自由度を持つステージを組み合わせる事により、微小な3次元形状加工を可能にする目的で研究を行ってきた[1-3]。これまでに、円柱形状や、四角柱、球などの単純な立体形状や、マイクロ風車、マイクロ地球儀、直径1 $\mu\text{m}$ に満たない微小先端を持った円錐形状などの複雑かつ精密な形状を作製することができた。

レーザーの蒸散効率を向上させることで、より精密で効率の良い形状加工が可能であると考えられるために、紫線の特徴を持った紫外レーザー(波長266nm)と、赤外線の特徴を持った赤外レーザー(波長1064nm)を同一点上に照射することで、蒸散効率の向上を計った。

本論文では、紫外レーザーと赤外レーザーを様々な条件で同一点に照射した場合の各材料における加工特性の変化について報告を行う。

### 2. 実験装置

実験装置の概要を Fig.1 に示す。実験装置は Q-sw Nd-YAG レーザー、5軸ステージ、各種ステージ動作用モータードライバ、微細加工 System 制御用パーソナルコンピュータ、CCD カメラ、観察用モニターで構成されている。

Q-sw Nd-YAG レーザー装置における紫外レーザーと赤外レーザーの各種基本性能を Table.1 に示す。

5軸ステージを Fig.2 に示す。5軸ステージは、X軸、Y軸、Z軸、X軸回りの回転軸、Z軸回りの回転軸で構成され、各ステージにおける最小送り量は1 $\mu\text{m}$ である。

軸においては一周10000ステップで動作させることで精密な動作が可能となっている。通常軸が0点にある場合、レーザーの光軸はY軸と平行なラインを通っている。

実験3.1の場合Polaris Nd:YAG Laser 装置のみを使用し、紫外レーザーと赤外レーザーを同時照射しているが、実験3.2での赤外レーザーの照射は、従来の Polaris Nd:YAG

Laser 装置から取り出す手法ではなく、新たに Minilite Nd:YAG Laser 装置を設置することで行った。基本波レーザーの光路に Fig. 3のビームエキスパンダーを取り付けることで、焦点距離を独自に調節できるように改良した。

レーザーと各ステージはパーソナルコンピュータを用いることで制御を行っている。

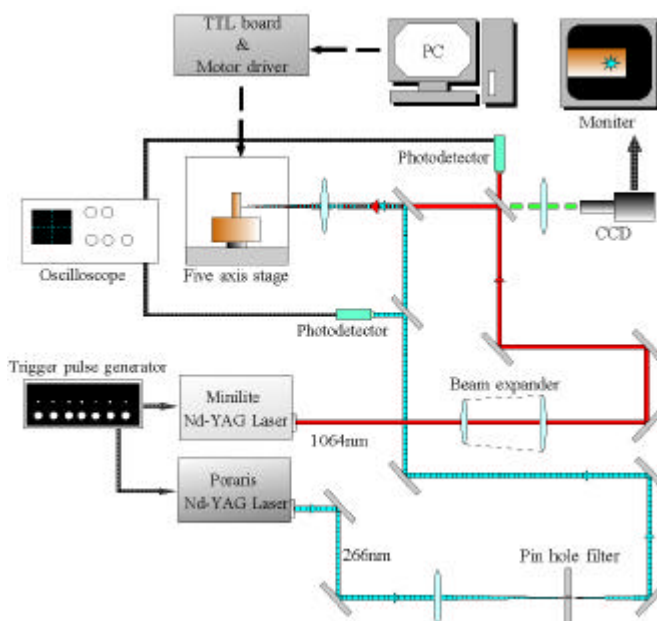


Fig.1 Experimental equipment for micro machining using pulsed laser.

Table.1 Performance of The Q-sw Nd-YAG laser

Laser	UV-laser	IR-laser
Wave length (nm)	266	1064
Repetition rate (Hz)	30	30
Maximum power (mJ)	3	15
Maximum Energy density (J/cm <sup>2</sup> )	$1.8 \times 10^3$	$3.8 \times 10^2$
Minimum focusing size ( $\mu\text{m}$ )	8	100

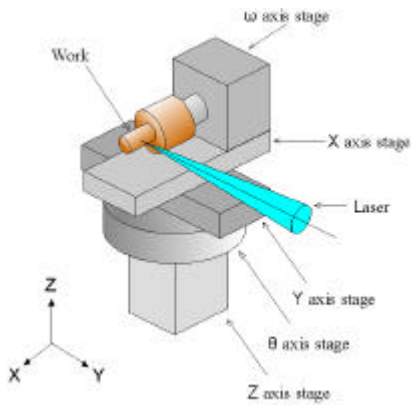


Fig.2 Five axis stage.

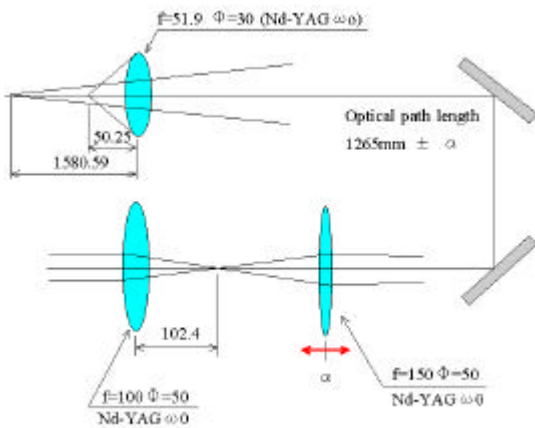


Fig.3 Adjustment of focusing length using the beam expander.

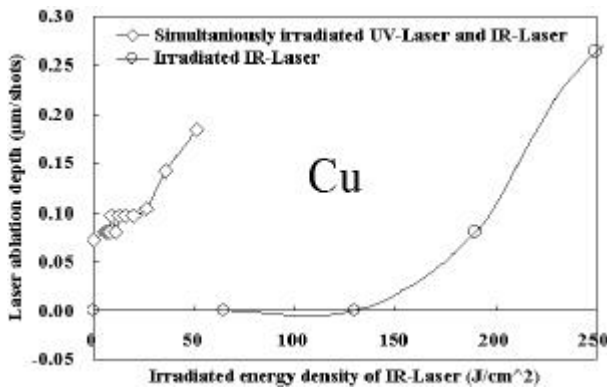


Fig.4 Laser ablation depth as a function of irradiated energy density of IR-laser for the copper.

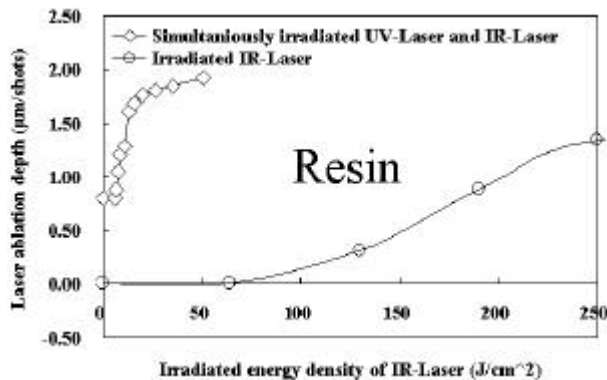


Fig.5 Laser ablation depth as a function of irradiated energy density of IR-laser for the acrylic acid resin.

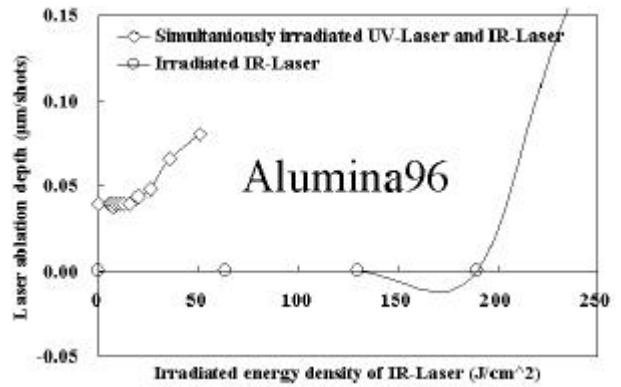


Fig.6 Laser ablation depth as a function of irradiated energy density of IR-laser for the alumina96.

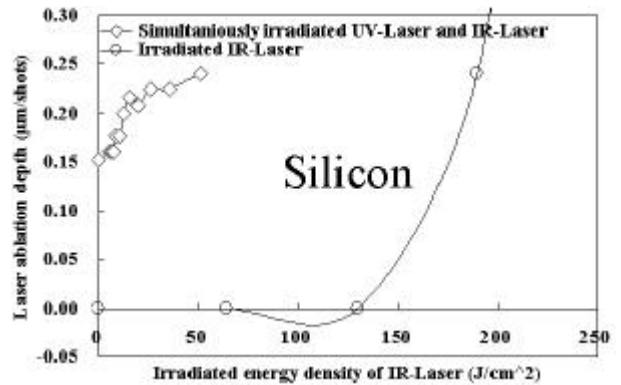


Fig.7 Laser ablation depth as a function of irradiated energy density of IR-laser for the single crystalline silicon.

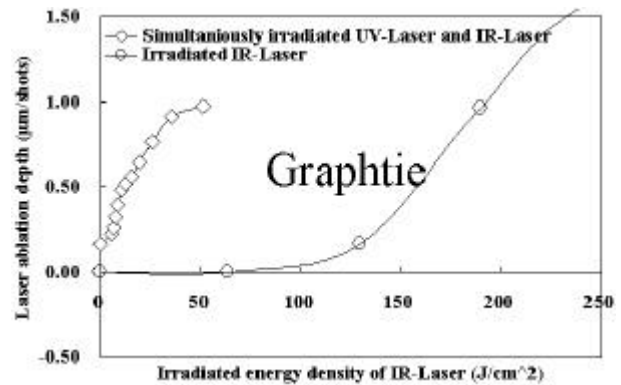


Fig.8 Laser ablation depth as a function of irradiated energy density of IR-laser for the graphite.

### 3. 実験方法及び実験結果

#### 3.1.4 同時照射加工特性 (4次高調波出力一定)

紫外レーザーと赤外レーザーを同時照射した場合に、赤外レーザーが蒸散効率にどのような影響を与えているのか調べるため、以下のレーザー照射方法で実験を行った。

紫外レーザーと赤外レーザーを同時に照射した場合、赤外レーザーのみで照射を行った場合の二通りの照射方法を用いた。

これまでに行った実験では紫外レーザーと赤外レーザーの照射エネルギー密度を同時に調整しなければならない機構になっていたため、2種類のレーザーを同時に照射した場合の現象を調べることはできたが、補助レーザーとして使用した赤外レーザーが同時照射した場合、どのように影

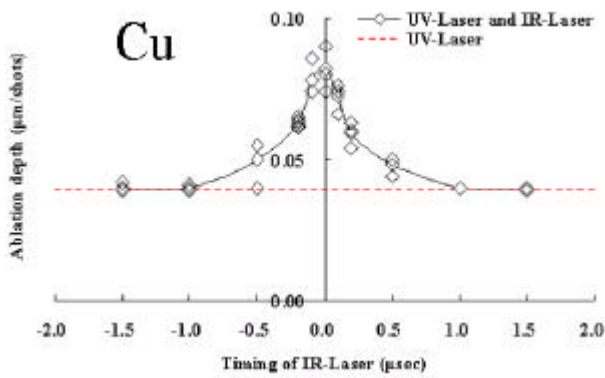


Fig.9 Laser ablation depth as a function of irradiated timing of IR-laser for the copper.

響を与えているのか詳細に調べることができなかった。このため、3.1の実験ではPolaris Nd:YAG Laser 装置の照射エネルギーは調整せず、Fig.2のビームエキスパンダーのみで照射エネルギー密度を調整した。このことにより、紫外レーザーの出力一定で赤外レーザーのみ出力を変えた場合に、加工効率が受ける影響の調査を行った。また、赤外レーザーのみを照射した場合の加工面におけるレーザー蒸散の閾値を調べることで、同時照射時に赤外レーザーの持つ有用性を調べた。

実験の手順は、二通りの照射方法で各試験片上に 500 μm × 500 μm の平面加工を行い、各条件別の削り量を比較することで照射方法の違いによる蒸散効率の変化を評価した。この時、紫外レーザーの照射エネルギー密度は  $3.2 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$  一定で行った。赤外レーザーの照射エネルギー密度については、紫外・赤外同時照射法の場合  $5.7 \text{ J/cm}^2$  から  $5.1 \times 10 \text{ J/cm}^2$  の範囲でエネルギー密度を調整し、赤外レーザーのみ照射の場合は0から  $3.8 \times 10^2 \text{ J/cm}^2$  の範囲でエネルギー密度の調整を行った。

同時照射時の赤外レーザーのエネルギー密度の調整は集光径を直径 500 μm から 1500 μm まで微調節する事で行った。実験に用いた材料は、銅、アクリル、アルミナ 96、単結晶シリコン、セラミックス、グラファイトの 5 種類の試験片を使用した。

各試験片における実験結果を Fig.4 から Fig.8 に示す。紫外・赤外同時照射を行った結果を赤外レーザーの照射エネルギー密度 0 の場合と比較すると、5 種類すべての材料において削り量を増加させることができた。これは、加工面における蒸散効率が向上していることを示している。

紫外・赤外同時照射結果と紫外レーザーのみの照射結果を比較すると、どの材料においても赤外レーザー単独でレーザー蒸散の閾値に達する前から削り量の増加作用があり、明らかに同時照射することで蒸散効率が向上している。

実験結果における、同じ照射エネルギー密度上での同時照射時の削り量と赤外レーザーのみ照射時の削り量を比率で比べると、銅やグラファイトなどの材料では削り量の上昇率が高く、セラミックでは比較的低い値にとどまっている。これらのことから、赤外レーザーの持つ熱的な効果が同時照射における削り量の増加に影響していると過程した。

### 3.2.4 デレイバルサーを用いた同時照射加工特性

3.1の実験で、5 種類の材料に対する紫外・赤外同時照射法が十分に有効であることが分かった。しかし、紫外レーザーと赤外レーザーを同時照射することで削り量が上昇する過程での現象解明が出来ておらず、どのような効果が発

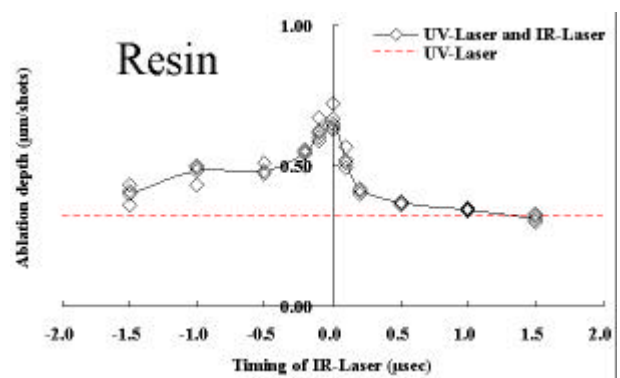


Fig.10 Laser ablation depth as a function of irradiated timing of IR-laser for the acrylic acid resin.

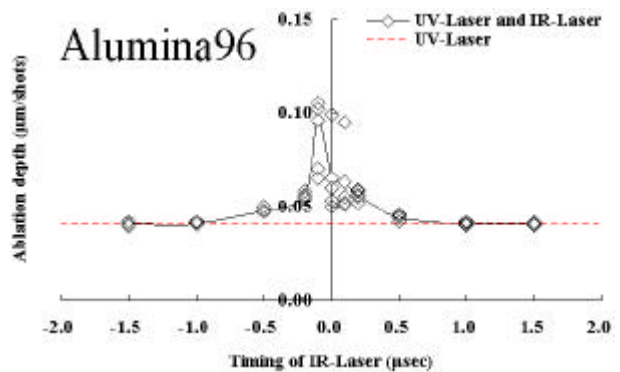


Fig.11 Laser ablation depth as a function of irradiated timing of IR-laser for the alumina96.

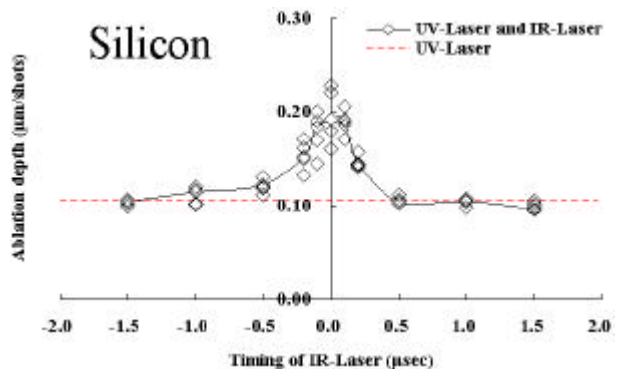


Fig.12 Laser ablation depth as a function of irradiated timing of IR-laser for the single crystalline silicon.

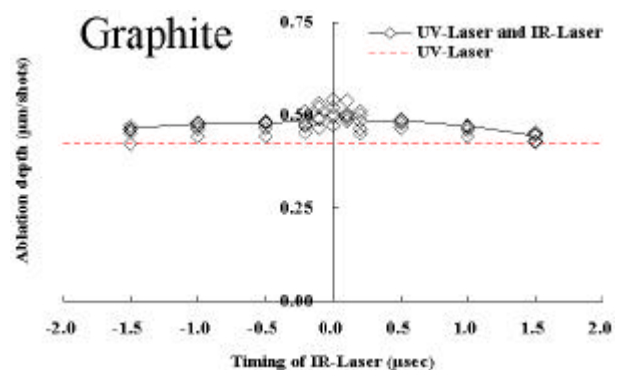


Fig.13 Laser ablation depth as a function of irradiated timing of IR-laser for the graphite.

生しているのか調べる必要があった。先に行った実験で紫外レーザーと赤外レーザーを用い十分に時間を空けて個別に照射した場合には、紫外・赤外同時照射法のような大幅な削り量増加が見られなかったことから、削り量の増加には各レーザーの照射タイミングが起因しているのではないかと仮定した。この実験は、紫外レーザーと赤外レーザーの照射タイミングを微調整する必要がある。そのためには各レーザーの照射タイミングをリアルタイムで計測する必要があった。そこでレーザーの照射タイミングを光検出器を用いて検出し、その情報をオシロスコープによって観察した。2種類のレーザーを個別のタイミングに微調整するためにディレイパルサーを使用した。

実験での照射タイミングは以下 12 種類で行った。

Fig.8 に銅材料における実験データを示す。Fig.8 から分かるように、紫外レーザーのみをエネルギー密度  $5.5 \times 10^2$  J/cm<sup>2</sup> 一定で照射した場合、1 回の照射で削り量は  $0.039 \mu\text{m}$  となった。紫外レーザーを 0sec としたとき赤外レーザーの照射タイミングを前後に変化させた結果、銅試験片については、紫外レーザー照射から  $-1.0 \mu\text{sec}$  から  $+1.0 \mu\text{sec}$  の間で削り量が上昇し 0sec の前後では急激に削り量が増加している事が分かった。全体的に見ると、赤外レーザーを紫外レーザーより前に照射した場合に削り量が多少だが増加しやすいことが分かった。

Fig.9 にアクリル材料における実験データを示す。Fig.9 から分かるように、紫外レーザーのみをエネルギー密度  $5.5 \times 10^2$  J/cm<sup>2</sup> 一定で照射した場合、1 回の照射で削り量は  $0.320 \mu\text{m}$  となった。アクリル試験片についても銅試験片と同等の現象がおきている事が分かる。やはり紫外レーザーよりも赤外レーザーを先に加工面に照射することでより効率よく削り量が増加している。

Fig.10 に焼結アルミナ材料における実験データを示す。Fig.10 から分かるように、紫外レーザーのみをエネルギー密度  $5.5 \times 10^2$  J/cm<sup>2</sup> 一定で照射した場合、1 回の照射で削り量は  $0.040 \mu\text{m}$  となった。焼結アルミナ試験片の場合は他の試験片とは多少異なった実験結果となっている。特に、紫外レーザーに対して赤外レーザーを 0sec のタイミング照射した場合ではなく、赤外レーザー照射後から  $0.1 \mu\text{sec}$  前後後に紫外レーザーを照射した場合の削り量が多くなっている。これは材質の性質が原因とも考えられるが、Minilite Nd:YAG Laser 装置に  $100 \mu\text{sec}$  のジッタが存在することを考慮すると実験装置の問題による誤差とも考えられる。

Fig.11 に単結晶シリコン材料における実験データを示す。Fig.11 から分かるように、紫外レーザーのみをエネルギー密度  $5.5 \times 10^2$  J/cm<sup>2</sup> 一定で照射した場合、1 回の照射で削り量は  $0.104 \mu\text{m}$  となった。単結晶シリコン試験片の場合、 $-0.2 \mu\text{sec}$  から  $+0.2 \mu\text{sec}$  の広い範囲で急激に削り量が増加していることが分かった。

Fig.12 にグラファイト材料における実験データを示す。Fig.12 から分かるように、紫外レーザーのみをエネルギー密度  $5.5 \times 10^2$  J/cm<sup>2</sup> 一定で照射した場合、1 回の照射で削り量は  $0.042 \mu\text{m}$  となった。他の材料と削り量の上昇率を比較すると低い結果となっているが、グラフ全体で観察すると、照射タイミングが 0sec に近づくにつれて削り量が増加していることが分かる。

#### 4. 結言

レーザーの照射条件を変更させつつ複数の実験を行い、同時照射法で加工効率を向上させることが可能であることが明らかとなった。4 種類の材料それぞれで削り量の上昇

率には差があるが、結果として紫外レーザーに対し、1/100 前後のエネルギー密度の赤外レーザーをアシスト照射することで、削り量を 1.5 から 2 倍程度増加させることに成功した。特に焼結アルミナにおいては、熱的な影響を受けにくい材料であるにも拘わらず、熱的な加工を行う赤外レーザーの影響を大きく受けたことにより、同時照射を行うことで、4 次高調波のみを照射した場合以上に削り量を増加させることに成功した。

紫外レーザーと赤外レーザーの照射タイミングを  $\mu\text{sec}$  単位で変化させて行った実験の結果、2 種類のレーザーの照射タイミングは、同時照射の加工効率を重視すると、レーザーの照射間隔が  $0.2 \mu\text{sec}$  以内で行うことで最適な加工が可能であることが分かった。

複数回行った実験結果のばらつきが、紫外レーザーと赤外レーザーの照射タイミングが 0sec 前後で特に見られることから、赤外レーザーを照射した Minilite Nd:YAG Laser 装置の持つ  $0.1 \mu\text{sec}$  のジッタが同時照射の蒸散特性に影響及ぼしていることが分かった。

また、同時照射のタイミングが  $1 \mu\text{sec}$  以上広がると同時照射したことによる効果が著しく低下している点、赤外レーザーを紫外レーザーよりも先に照射した場合に削り量の増加が多く見られる点の 2 点から同時照射法による削り量の増加が熱的な効果との相乗効果によって発生していると言える。

これまでに行った紫外・赤外同時照射法の各種実験結果から、微量の赤外レーザーを紫外レーザー照射点にアシスト照射することで、容易に削り量を増加させることが分かった。さらに、多種類の材料に対してその効果を発揮することが望める。ただし、本研究では  $1.8 \times 10^3$  J/cm<sup>2</sup> 以下での照射エネルギー密度域でのみ効果を確認しているため、それ以上にエネルギー密度が高い状態で蒸散効率が向上する確証はないと言える。

#### 参考文献

- [1] Y. Kawamura and K. Toyoda, The review of laser engineering, Vol. 23, pp.54, 1995 in Japanese.
- [2] Y. Kawamura and A. Takenaka, "The review of laser engineering", Vol. 27, pp.45, 1999 in Japanese.
- [3] Y. Kawamura and A. Takenaka, Report of the Electronics Research Laboratory Fukuoka Institute of Technology, Vol. 15, pp.61 1998 in Japanese.

#### これまでの研究業績

- [1] 甲斐晶寛、河村良行「フェムト秒レーザーによる微小ダイヤモンド工具の刃先形成」、平成 14 年度 レーザー核融合研究センター共同研究成果報告会 ILE Annual Report of collaboration Research April 2002 – March 2003. Institute of Laser Engineering Osaka University.
- [2] Akihiro KAI, Yoshiyuki KAWAMURA 「Laser Micro Machining of Ultraviolet and Infrared Simultaneous Irradiation」, LPM.2004. Fifth International Symposium on Laser Precision Microfabrication in Nara, 11-14 May 2004. SPIE-The International Society for Optical Engineering.
- [3] 甲斐晶寛、河村良行「紫外・赤外パルスレーザーを用いた微小立体加工」、平成 16 年度 日本機械学会 The Japan Society of Mechanical Engineers.