

# レーザーパルス波形制御・軸方向放電励起 CO<sub>2</sub> レーザーによる レーザー加工の研究

山梨大学 大学院 総合研究部  
准教授 宇野 和行  
(平成 27 年度 一般研究開発助成 AF-2015208)

キーワード：CO<sub>2</sub> レーザー，ポリマー樹脂，穴あけ加工

## 1. 研究の目的と背景

CO<sub>2</sub> レーザーは、波長 9.2–11.4 μm (主に 9.6, 10.6 μm) で発振する高平均出力あるいは高出力エネルギーのレーザーであり、発振波長がガラスや樹脂、水の吸収帯に一致するため産業や医療において重要なレーザーである。また、CO<sub>2</sub> レーザーは、励起方式や放電方式、発振方式の組み合わせにより、テールフリー短パルス (パルス幅 10 ns–200 ns) やテール付き短パルス (尖頭パルス幅 10 ns–200 ns, パルステール長 10 μs–200 μs), 長パルス (パルス幅 10 μs–10 ms), 連続波を出力する<sup>1-10)</sup>。CO<sub>2</sub> レーザー加工において、テールフリー短パルスは、アブレーション加工 (厳密には、熱影響の少ない熱加工) を与える。テール付き短パルスでは、尖頭パルスはアブレーション加工、パルステールは熱加工または熱影響、熱効果を与える。長パルスと連続波は、熱加工を与える。レーザーパルスによる熱は、加工対象に炭化やひび割れ、熔融、変質などの熱影響、あるいは加工の促進・効率化となる熱効果を与える可能性がある。また、加工対象により、吸収や熱拡散・熱伝導の特性が異なり、適切なレーザーパルス波形が異なるため、CO<sub>2</sub> レーザー加工において、レーザーパルス波形の制御は非常に重要である。

レーザーパルス波形が制御可能な CO<sub>2</sub> レーザーとして、我々は、軸方向放電励起 CO<sub>2</sub> レーザーを開発した<sup>5-8)</sup>。軸方向放電励起 CO<sub>2</sub> レーザーでは、長さ 30 cm–100 cm, 内径 1 cm–2 cm の誘電体チューブとその両端に取り付けられた電極により、放電管が構成される。広い電極間隔により、低ガス圧 (10 kPa) 以下でも高い放電開始電圧 (20 kV 以上) が達成されるため、低ガス圧動作が可能である。軸方向放電励起 CO<sub>2</sub> レーザーでは、長い放電長をもつ低ガス圧放電により、レーザーパルス波形が媒質ガス (混合比, ガス圧) と励起回路に大きく依存する。最近の我々の軸方向放電励起 CO<sub>2</sub> レーザーの研究では、1 台のレーザー装置において、テールフリー短パルス (パルス幅約 100 ns) とテール付き短パルス (尖頭パルス幅約 100 ns, テール長 10–100 μs, 尖頭パルスエネルギーに対するテールエネルギーの比 1:1–120), 長パルス (パルス幅 20–80 μs) の生成とその制御が実現した<sup>5-8)</sup>。

本研究開発では、我々の開発したレーザーパルス波形が制御可能な軸方向放電励起 CO<sub>2</sub> レーザーによるレーザー加工におけるレーザーパルス波形とフルエンス、照射パル

ス数に依存する、ガラス (合成石英ガラス, ソーダライムガラス, アルカリフリーガラス) の切削加工・マーキング加工やポリマー樹脂 (PET, PMMA, PTFE, PC, PI, Si ゴム) の切削加工・穴あけ加工, 人の歯牙 (エナメル質, 象牙質) の切削加工, 紙 (ろ紙, 薬包紙) の穴あけ加工の特性が調査された。

本報告では、照射フルエンス  $7.5 \pm 0.2 \text{ J/cm}^2$  におけるレーザーパルス波形と照射パルス数に依存するポリマー樹脂フィルム (PI, PTFE) の穴あけ加工と尖頭パルス幅 282 ns, パルステール長 66.9 μs, 尖頭パルス部分のエネルギーに対するパルステール部分のエネルギーの比 1:35 のテール付き短パルスにおける照射フルエンスと照射パルス数に依存するポリカーボネート (PC) ブロックの切削加工特性について述べる。

## 2. 実験方法

### 2.1 ポリマー樹脂シートの穴あけ加工

Fig. 1 は、本実験における加工試験の構成図である。加工試験には、軸方向放電励起 CO<sub>2</sub> レーザーと CaF<sub>2</sub> 減衰器、焦点距離 5 cm の ZnSe レンズ、サンプルが用いられた。Fig. 2 は、軸方向放電励起 CO<sub>2</sub> レーザーから出力された 3 種類のレーザーパルス波形を示す。レーザーパルス波形 1 は、パルス幅 289 ns のテールフリー短パルスであった。レーザーパルス波形 2 は、尖頭パルス幅 101 ns, パルステール長 27.1 μs, 尖頭パルス部分のエネルギーに対するパルステール部分のエネルギーの比 1:29 のテール付き短パルスであった。レーザーパルス波形 3 は、パルス幅 46.0 μs の長パルスであった。軸方向放電励起 CO<sub>2</sub> レーザーから出力されたレーザーパルスは、ZnSe レンズにより集光され、焦点平面にあるサンプル表面に照射された。照射フルエンスは、CaF<sub>2</sub> 減衰器により、全てのレーザーパルスにおいて、 $7.5 \pm 0.2 \text{ J/cm}^2$  に調整された。複数パルス照射では、サンプルの位置は動かさず、初期位置に固定された。

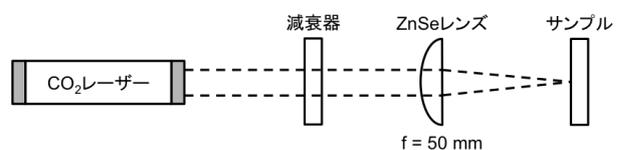


Fig. 1. 加工試験の構成図。

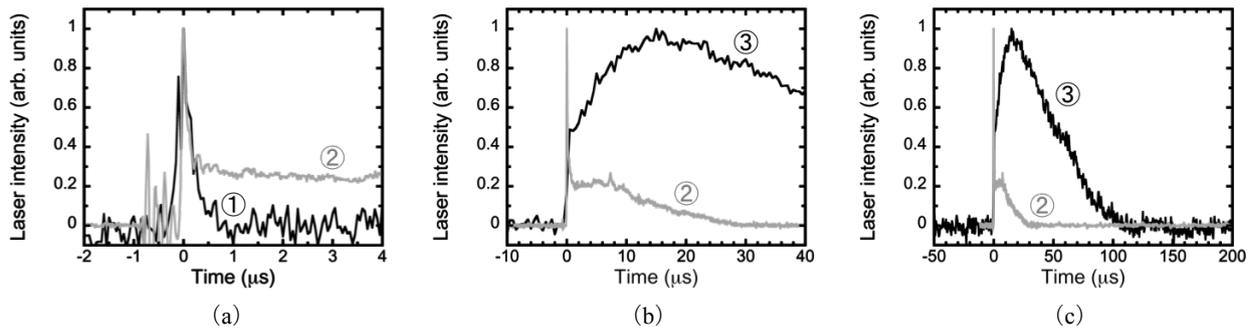


Fig. 2. PI フィルムと PTFE フィルムの穴あけ加工に用いたレーザーパルス波形.

(a) は尖頭パルス部分の拡大図, (b) はレーザーパルス波形 2 の全体図, (c) はレーザーパルス波形 3 の全体図を示す. 図中の番号は, レーザーパルス波形の番号に対応する.

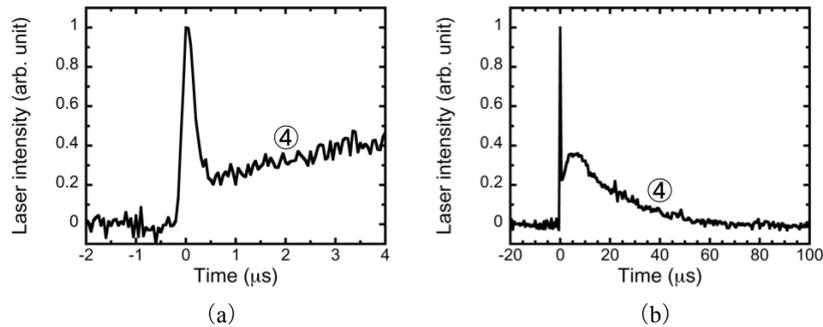


Fig. 3. PC ブロックの切削加工に用いたレーザーパルス波形.

(a) は尖頭パルス部分の拡大図, (b) はレーザーパルス波形の全体図を示す. 図中の番号は, レーザーパルス波形の番号に対応する.

複数パルス照射では, 繰り返し周波数 3 Hz で加工実験が行われた. サンプルには, 厚さ 50  $\mu\text{m}$  のポリイミド (PI) フィルム, または厚さ 100  $\mu\text{m}$  のテフロン (PTFE) フィルムが用いられた.

## 2・2 ポリカーボネートブロックの切削加工

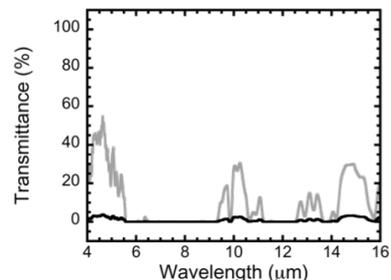
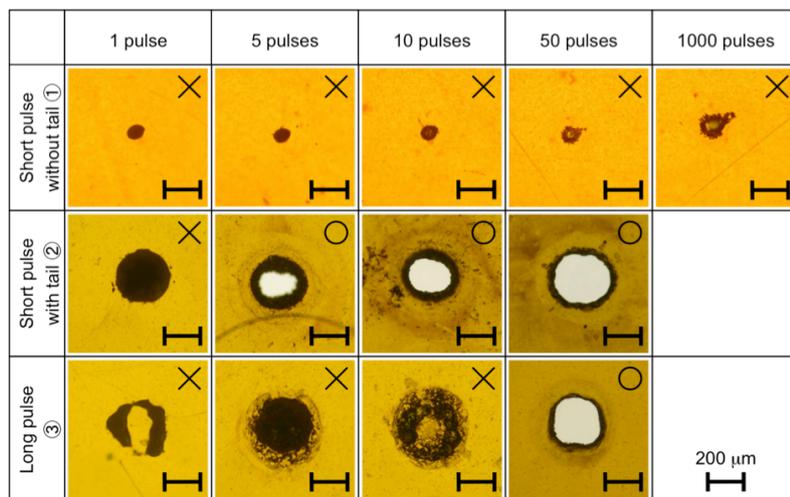
ポリカーボネートブロックの切削加工実験では, Fig. 1 と同じ構成図で加工実験が行われた. Fig. 3 は, ポリカーボネートブロックの切削加工実験に用いられたレーザーパルス波形を示す. レーザーパルス波形は, 尖頭パルス幅 282 ns, パルステール長 66.9  $\mu\text{s}$ , 尖頭パルス部分のエネルギーに対するパルステール部分のエネルギーの比 1:35 のテール付き短パルス (レーザーパルス波形 4) であった. 軸方向放電励起  $\text{CO}_2$  レーザーから出力されたレーザーパルスは, ZnSe レンズにより集光され, 焦点平面にあるサンプル表面に照射された. 照射フルエンスは,  $\text{CaF}_2$  減衰器により, 38  $\text{J}/\text{cm}^2$ , または 19  $\text{J}/\text{cm}^2$ , 8  $\text{J}/\text{cm}^2$  に調整された. 加工実験では, サンプルの位置は動かさず, 初期位置に固定された. 繰り返し周波数 3 Hz で加工実験が行われたため, パルス間の熱影響 (熱の蓄積) はないと考えられる. サンプルには, 切削深さの測定のために端面研磨されたポリカーボネート (PC) ブロックが用いられた.

## 3. 実験結果

### 3・1 ポリイミドフィルムの穴あけ加工

Fig. 4 (a) は, 厚さ 50  $\mu\text{m}$  のポリイミドフィルムの穴あけ加工におけるレーザーパルス波形と照射パルス数に依存する表面写真を示す. 全てのレーザーパルス波形の照射フルエンスは,  $7.5 \pm 0.2 \text{ J}/\text{cm}^2$  に統一された.

パルス幅 289 ns のテールフリー短パルス (レーザーパルス波形 1) では, 1000 パルス照射しても貫通穴は形成されなかった. 本実験では, 照射フルエンスが低く, 貫通穴を形成するための閾値に達しなかったと考えられる. 尖頭パルス幅 101 ns, パルステール長 27.1  $\mu\text{s}$ , 尖頭パルス部分のエネルギーに対するパルステール部分のエネルギーの比 1:29 のテール付き短パルス (レーザーパルス波形 2) では, 5 パルス照射において, 貫通穴が形成された. レーザーパルス波形 1 のテールフリー短パルスとレーザーパルス波形 2 のテール付き短パルスでは, 同じ照射フルエンスであっても, テールフリー短パルスでは貫通穴は形成されなかったが, テール付き短パルスでは貫通穴が形成された. つまり, レーザーパルス波形のテール部分が, 貫通穴の形成に重要であると考えられる. パルス幅 46.0  $\mu\text{s}$  の長パルス (レーザーパルス波形 3) では, 50 パルス照射において, 貫通穴が形成された. 照射フルエンス  $7.5 \pm 0.2 \text{ J}/\text{cm}^2$  (1 パルスあたりのフルエンス) において, 長パルス

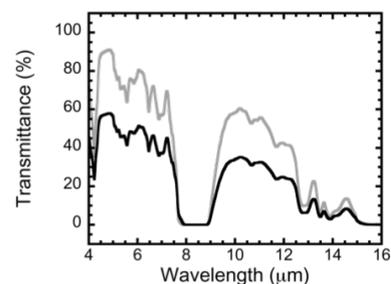
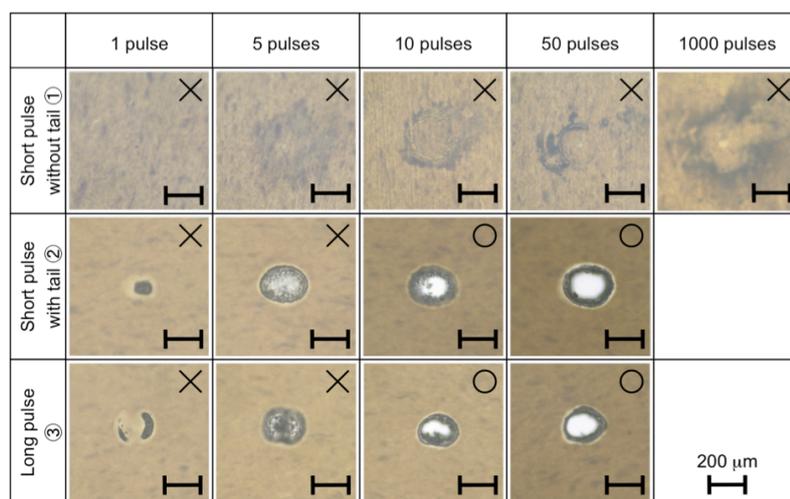


(a)

(b)

Fig. 4. 厚さ 50 μm の PI フィルムの穴あけ加工.

(a) は加工部分の表面写真を示す．図中の番号は，レーザーパルス波形に対応する．図中の○と×は，貫通穴の形成の有無を示す．(b) は透過率特性を示す．灰色は未照射サンプル，黒色は炭化を有する照射サンプルを示す．



(a)

(b)

Fig. 5. 厚さ 100 μm の PTFE フィルムの穴あけ加工.

(a) は加工部分の表面写真を示す．図中の番号は，レーザーパルス波形に対応する．図中の○と×は，貫通穴の形成の有無を示す．(b) は透過率特性を示す．灰色は未照射サンプル，黒色は炭化を有する照射サンプルを示す．

(レーザーパルス波形 3) よりもテール付き短パルス (レーザーパルス波形 2) の方が，少ない照射パルス数 (小さい総照射フルエンス) で，貫通穴を形成した．従って，ポリイミドフィルムの穴あけ加工において，CO<sub>2</sub> レーザーパルスの制御は有効であると考えられる．

Fig. 4 (b) は，尖頭パルス幅 101 ns，パルステール長 27.1 μs，尖頭パルス部分のエネルギーに対するパルステール部分のエネルギーの比 1:29 のテール付き短パルス (レーザーパルス波形 2) を 1 パルス照射したポリイミドフィルムと未照射のポリイミドフィルムの透過率特性である．照射サンプルは，照射径 489 μm のレーザービームを 333

μm 間隔で照射した炭化を有するサンプルである．波長 10.6 μm において，未照射のサンプルの透過率は 1.9% であったが，照射サンプルの透過率は 0.2% であった．炭化により，ポリイミドフィルムの吸収率が増加したと考えられる．複数照射では，炭化による吸収率の増加が貫通穴の形成に寄与すると考えられる．

### 3・2 テフロンフィルムの穴あけ加工

Fig. 5 (a) は，厚さ 100 μm のテフロンフィルムの穴あけ加工におけるレーザーパルス波形と照射パルス数に依存する表面写真を示す．全てのレーザーパルス波形の照射

フルエンスは、 $7.5 \pm 0.2 \text{ J/cm}^2$  に統一された。パルス幅 289 ns のテールフリー短パルス（レーザーパルス波形 1）では、1000 パルス照射しても貫通穴は形成されなかった。本実験では、照射フルエンスが低く、貫通穴を形成するための閾値に達しなかったと考えられる。尖頭パルス幅 101 ns、パルスステール長 27.1  $\mu\text{s}$ 、尖頭パルス部分のエネルギーに対するパルスステール部分のエネルギーの比 1:29 のテール付き短パルス（レーザーパルス波形 2）では、10 パルス照射において、貫通穴が形成された。レーザーパルス波形 1 のテールフリー短パルスとレーザーパルス波形 2 のテール付き短パルスでは、同じ照射フルエンスであっても、テールフリー短パルスでは貫通穴は形成されなかったが、テール付き短パルスでは貫通穴が形成された。つまり、レーザーパルス波形のテール部分が、貫通穴の形成に重要であると考えられる。照射フルエンス  $7.5 \pm 0.2 \text{ J/cm}^2$ （1 パルスあたりのフルエンス）において、パルス幅 46.0  $\mu\text{s}$  の長パルス（レーザーパルス波形 3）とテール付き短パルス

（レーザーパルス波形 2）は、同じ 10 パルス照射により、貫通穴を形成した。

Fig. 5 (b) は、尖頭パルス幅 101 ns、パルスステール長 27.1  $\mu\text{s}$ 、尖頭パルス部分のエネルギーに対するパルスステール部分のエネルギーの比 1:29 のテール付き短パルス（レーザーパルス波形 2）を 1 パルス照射したテフロンフィルムと未照射のテフロンフィルムの透過率特性である。照射サンプルは、照射径 489  $\mu\text{m}$  のレーザービームを 200  $\mu\text{m}$  間隔で照射した炭化を有するサンプルである。波長 10.6  $\mu\text{m}$  において、未照射のサンプルの透過率は 54%であったが、照射サンプルの透過率は 34%であった。炭化により、テフロンフィルムの吸収率が増加したと考えられる。複数照射では、炭化による吸収率の増加が貫通穴の形成に寄与すると考えられる。

### 3・3 ポリカーボネートブロックの穴あけ加工

Fig. 6 は、ポリカーボネートブロックの切削加工にお

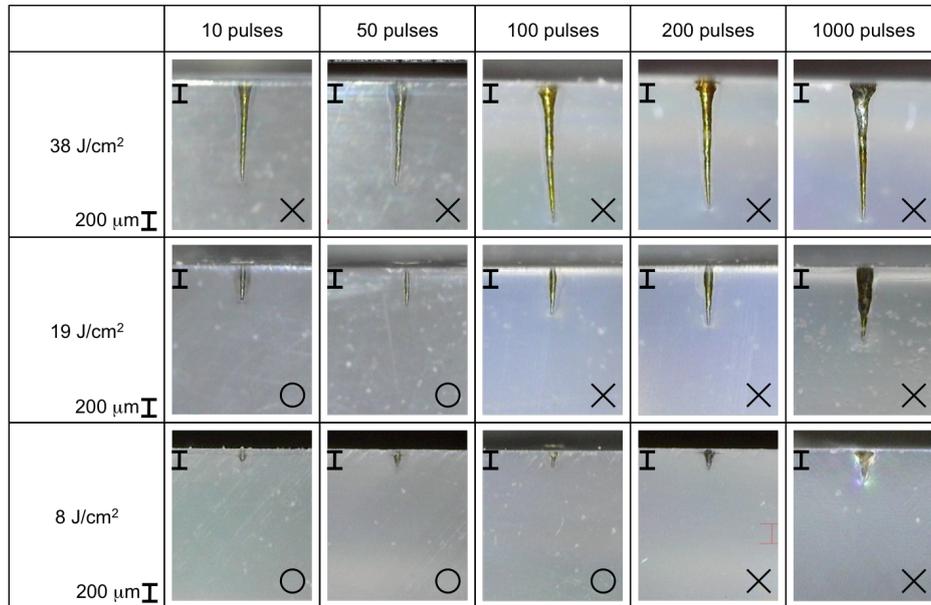


Fig. 6. PC ブロックの切削加工における加工写真。

図中の○は炭化のないきれいな加工，×は炭化の生じた加工を示す。

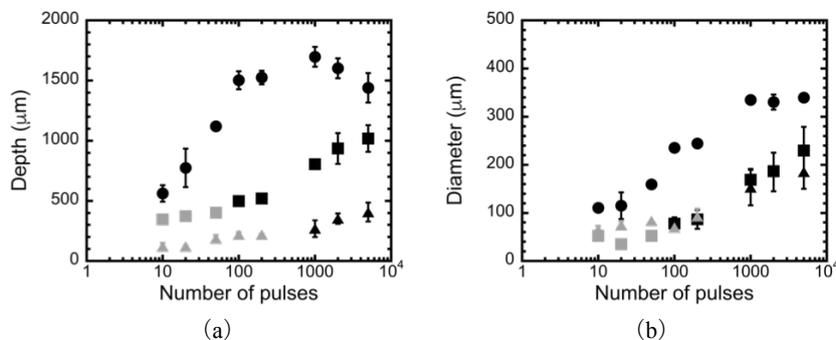


Fig. 7. PC ブロックの切削加工における照射フルエンスと照射パルス数に依存する切削深さと表面加工径の特性。

(a) は切削深さ，(b) は表面加工径を示す。丸は  $38 \text{ J/cm}^2$ ，四角は  $19 \text{ J/cm}^2$ ，三角は  $8 \text{ J/cm}^2$  を示す。黒は炭化が生じた加工，灰色は炭化のないきれいな加工を示す。

る照射フルエンスと照射パルス数に依存する加工写真を示す。レーザーパルス波形は、尖頭パルス幅 282 ns, パルステール長 66.9  $\mu$ s, 尖頭パルス部分のエネルギーに対するパルステール部分のエネルギーの比 1:35 のテール付き短パルス（レーザーパルス波形 4）であった。フルエンス 38 J/cm<sup>2</sup>では、全ての条件において、炭化が生じた。フルエンス 19 J/cm<sup>2</sup>では、50 パルス以下の照射パルス数において、炭化のない切削加工が実現した。フルエンス 8 J/cm<sup>2</sup>では、200 パルス未満の照射パルス数において、炭化のない切削加工が実現した。本実験において、炭化のない切削加工において、最も深く切削した条件は、フルエンス 19 J/cm<sup>2</sup>, 50 パルス照射であり、このとき、表面加工径は 53  $\mu$ m, 切削深さは 403  $\mu$ m であった。

Fig. 7 は、照射フルエンスと照射パルス数に依存する切削深さと表面加工径の特性を示す。照射フルエンスの増加とともに、また照射パルス数の増加とともに、切削深さも表面加工径も増加した。

#### 4. まとめ

本報告では、照射フルエンス 7.5  $\pm$  0.2 J/cm<sup>2</sup>におけるレーザーパルス波形と照射パルス数に依存するポリマー樹脂フィルム（PI, PTFE）の穴あけ加工と尖頭パルス幅 282 ns, パルステール長 66.9  $\mu$ s, 尖頭パルス部分のエネルギーに対するパルステール部分のエネルギーの比 1:35 のテール付き短パルスにおける照射フルエンスと照射パルス数に依存するポリカーボネート（PC）ブロックの切削加工特性について述べた。ポリマー樹脂フィルムの穴あけ加工では、テール付き短パルスにより低照射パルス数、つまり低総照射フルエンスで、貫通穴が形成された。ポリカーボネートブロックの切削加工では、フルエンス 19 J/cm<sup>2</sup>, 50 パルス照射において、表面加工径 53  $\mu$ m, 切削深さ 403  $\mu$ m の炭化のない切削加工が実現した。CO<sub>2</sub> レーザー加工では、レーザーパルス波形の制御は非常に重要であると考えられる。

また、本研究開発では、レーザーパルス波形とフルエンス、照射パルス数に依存する、ガラス（合成石英ガラス、

ソーダライムガラス、アルカリフリーガラス）の切削加工・マーキング加工やポリマー樹脂（PET, PMMA, PTFE, PC, PI, Si ゴム）の切削加工・穴あけ加工、人の歯牙（エナメル質、象牙質）の切削加工、紙（ろ紙、薬包紙）の穴あけ加工の特性が調査された。

今後は、さらに光のパラメータ（レーザーパルス波形、波長、偏光、繰り返し周波数）を制御した CO<sub>2</sub> レーザーによる様々な材料の加工特性（フルエンス依存特性、照射パルス数依存特性）の調査により、照射対象に熱影響を与えない加工や高効率加工の実現を目指す。

#### 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究開発助成により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) Q. Wang, Z. Tian, Y. Wang, *Infrared Phys. Technol.* 41 (2000) 349-352.
- 2) Y. Zhang, Z. Tian, Z. Sun, S. Fu, J. Sun, Q. Wang, *Infrared Phys. Technol.* 58 (2013) 12-14.
- 3) P. Raote, G. Patil, M.B.S. Prasad, J.P. Nilaya, D.J. Biswas, *Opt. Commun.* 281 (2008) 2213-2217.
- 4) V.M. Oriovskii, A.N. Panchenco, V.F. Tarasenco, *Quantum Electron.* 40 (2010) 192-194.
- 5) K. Uno, T. Yamamoto, M. Watanabe, T. Akitsu, T. Jitsuno, *Proc. of SPIE* 9735 (2016) 973519.
- 6) K. Uno, T. Sasaki, T. Yamamoto, T. Akitsu, T. Jitsuno, *Proc. of SPIE* 9692 (2016) 96920K.
- 7) K. Uno, M. Kato, T. Akitsu, T. Jitsuno, *Proc. of SPIE* 10091 (2017) 1009115.
- 8) K. Uno, T. Jitsuno, *Opt. Laser Technol.* 101 (2018) 195-201.
- 9) S.J. Park, W.Y. Kim, *Opt. Laser Technol.* 42 (2010) 269-273.
- 10) J. Choi, *Rev. Sci. Instrument.* 81 (2010) 064901.