

# フェムト秒 レーザーの応用

サイバーレーザー(株)  
高砂一弥

## 1 はじめに ～フェムト秒レーザー～

レーザーが発明されてから既に40年以上が経過し、様々な種類のレーザーが開発・製品化されてきており、産業界でも数多くレーザーを使用されるようになってきた。フェムト秒レーザーは、1970年代に開発された色素レーザーが最初で、人類が得られる最速の信号であり、魅力的な応用が期待されていたにもかかわらず、①取り扱いが困難、②安定性が悪い、③寿命が短い等の理由から、フェムト秒レーザーの専門家以外が使用するのは非常に困難で広く普及することはなかった。しかしながら、1980年後半にMoultonらによって研究されたチタンドープサファイア（以下Tiサファイア）レーザー結晶の登場により、状況は大きく変わる事となる。これまでの色素レーザーは、液体媒質であるため、産業用レーザーとして成熟することはなかったが、Tiサファイアレーザー結晶は、①固体媒質である、②半導体レーザー励起の固体レーザーで励起可能、③安定した結晶供給が可能であることから、1990年後半に入り、各メーカーより製品も開発され、レーザーの専門家でなくても使用することが可能となってきた。フェムト秒レーザー装置は、出力レベルにより、以下の3種類に分けることができる。①繰り返し周波数が数10 MHz以上でパルスエネルギーはnJレベルのもの、②繰り返し周波数が数kHz～100 kHzでパルスエネルギーはmJレベルのもの、③繰り返し周波数が単発～10 Hzでパルスエネルギーが数Jレベルのものに分類される。①のものは、前述のTiサファイア媒質

を使用した固体レーザーとファイバーレーザーが計測を主な応用として、②はTiサファイア媒質を使用した固体レーザーが、加工を主な応用として市販されている。③に分類されるレーザーは、実験室内で宇宙の始まりであるビッグバンを作り出すことが可能なほど高強度なものであり、日本では日本原子力研究所、理化学研究所、産業技術総合研究所、東京大学物性研究所などを含む世界の先端研究所でのみ得ることが可能で、基礎物理の研究に使用されている。

本シリーズの第5回の解説で説明したように、産業応用に最も重要である②に分類されるレーザー装置は、国内のサイバーレーザー社を含む数社から市販されているが、サイバーレーザー社のものは100時間で0.9%以下の変動に押さえられた状態で現在4000時間を越えた連続運転を実現しており、産業用レーザーを容易に得ることが可能となった。

本稿は、以下のように構成される。第2章でフェムト秒レーザーの応用の概略について述べ、第3章では産業界において最も注目されているフェムト秒加工の応用について詳細に解説し、第4章で本稿をまとめる。

## 2 フェムト秒レーザーの応用

フェムト秒レーザーパルスは、①超高速性、②広帯域、③高強度ピークパワー、といった他のレーザーでは持ち得ない特徴を持つため、様々な応用に使用することが可能である。本章では、①加工、②通信、③計測、④新現象解明・基礎研究に分けて解説する。

## 2.1 加工

次章で詳細に解説するため、ここでは簡単に説明する。YAGレーザー、CO<sub>2</sub>レーザーなどがこれまで加工に使用されている。これらは、刃が入らない場所の切断、マーキングなどが可能であるが、加工精度に関しては、従来の技術とそれほど変わらなく、一部の材料においては熱作用の効果によって、機械的な加工と比較して悪い精度のものしか得ることができていなかった。一方、フェムト秒レーザーを用いて加工した場合、高速性、高強度ピークパワーの特徴から、熱影響の少なく、高効率、高精度な加工が可能となる。また、これまで加工することが困難であった熱伝導率の高い金属などへの加工や、吸収率が低く加工が困難であったガラスなどの透明材料の切断も可能となり、今後、従来技術での加工精度限界を迎えている様々な応用を使用することができると考えられている。

## 2.2 通信<sup>1)</sup>

現在インターネットをはじめとするIT技術において大容量化が進められており、個々の家庭まで動画をスムーズに伝送するためには、基幹においては、10 Tbit/s以上の速度で伝送することが必要になると考えられている。大容量化の方向としては、使用する信号の時間単位を細かくする時間多重（TDM）、複数の波長の光源を使用する波長多重（WDM）があり、それぞれにおいて開発が進められている。10 Tbit/s以上の通信速度を実現するためには、TDMもしくはTDM/WDMのハイブリッド化が必要であり、高繰り返しフェムト秒レーザーを使用することが必要条件となる。光源としては、高繰り返し半導体レーザーもしくはファイバーレーザーが使用される。現在研究レベルでは10 Tbit/s以上が達成されており、今後実用化に向けてS/N比、再現性などが課題となる。

## 2.3 計測<sup>2)</sup>

通常のレーザーを使用した計測は、その可干渉性を利用して分解能を得ているが、高多重散乱体においては、伝搬するに従って可干渉性が失われてしまい、深層の可視化は困難であった。フェムト秒レーザーパルスを利用

した計測においては、これまでと全く逆の発想で、干渉性のなさを利用して後方散乱光に含まれる位置情報、振幅・位相から反射率・屈折率の情報を得ることができるとされている。深さ方向への分解能は、可干渉な範囲で決定され、数 $\mu\text{m}$ ～数10 $\mu\text{m}$ の領域である。これらの計測は、生体などの研究に応用されている。

## 2.4 新現象解明・基礎研究<sup>3)</sup>

フェムト秒光パルスは、その短時間性より、連続光、ナノ秒パルスと比較して極めて高いピーク光強度を得ることができる。日本原子力研究所で2003年に達成された850 TWという強度は、30フェムト秒という極めて短時間ながら世界の総電力を上回っている。得られたレーザーパルスは、10 $\mu\text{m}$ 以下のスポットへ集光することが可能であり、そこで得られる10<sup>21</sup>W/cm<sup>2</sup>を超える光強度が生み出す新たな基礎物理学・原子物理学を初めとする科学研究や、産業・医療などへの応用研究が、大きく進展するものと期待される。このようなレーザー装置は、理化学研究所、産業技術総合研究所、東京大学においても開発されており、世界に先駆けて様々な高強度物理の解明が日本においてなされることを期待する。

# 3 フェムト秒レーザーの加工応用

本章では、今後の国内外の産業界において最も重要となるであろうフェムト秒レーザーを用いた加工について説明する。特徴について説明したあと、材料別の加工例を示す。

## 3.1 特徴

従来のナノ秒レーザーパルスを用いた加工においては、物質がレーザーパルスを吸収し、融解温度まで上昇させたあと、材料を破壊するというプロセスをたどる。これらの加工では、①熱による拡散があるため、分解能が10 $\mu\text{m}$ 程度までしか取れない、②熱の吸収の度合いは、物質の表面状態、パルスエネルギー揺らぎなどに大きく依存するため、再現性が悪い、③材料により使用するレーザーを選択しなければならない、などの欠点があった。これらの欠点を全て解決するのがフェムト秒レーザーパ

表1 フェムト秒レーザー仕様

製品名	イフリート	イフリート・バイオ	FS-10
波長	780 nm	780 nm	780 nm
平均出力	1 W	1 W (20kHz)	10 W
繰り返し	1 kHz	10 kHz - 40 kHz	10 kHz
パルス幅	130 fs	130 fs	200 fs
パルスエネルギー	1 mJ	50 μJ (20 kHz)	1 mJ
平均出力安定性	0.9% @ 100 h	1% @ 2 h	3% @ 2 h
ビーム径	φ6 mm	φ6 mm	φ6 mm
ビーム品質	$M^2 < 2$	$M^2 < 1.5$	$M^2 < 2$
広がり角	< 1 mrad	< 1 mrad	< 1 mrad
サイズ	W600×D800×H290	W245×D530×H390	W1300×D2500×H18
レーザーヘッド重量	180 kg	82 kg	700 kg

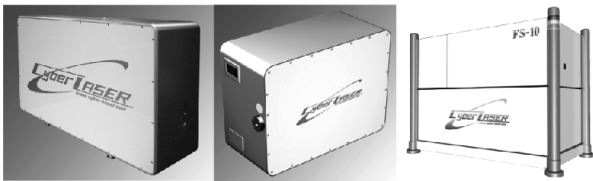


図1 サイバーレーザーのフェムト秒レーザー

ルスを用いた加工である。フェムト秒レーザーパルスを用いた加工には、下記のような特徴がある。

- ① 照射した領域からの熱拡散がほとんどなく照射された領域にのみ吸収されるため効率がよい
- ② 多光子吸収プロセスを介するため、全ての物質に吸収され、物質依存性が少ない
- ③ プラズマを介したエネルギー授受による変質のプロセスは加工形状の再現性を悪化させるが、フェムト秒レーザーを用いた加工ではこのプロセスを介さないため、安定な加工が可能

②の多光子吸収プロセスとは、複数の光子が同時に吸収されることであり、その吸収率は、N個の光子の場合、強度のN乗に比例する。第5回の解説記事で書かれているように、通常のレーザー加工においては、材料に応じてレーザーの波長を選択する必要があったが、フェムト秒レーザーを用いた加工においては、ピーク強度がナノ秒レーザーと比較して4桁以上も高いため、上記のような多光子吸収プロセスによる加工が可能となる。ナノ秒パルスでも強度を高くすると多光子吸収が起きると考えることができるが、ナノ秒パルスを用いた場合、多光子吸収よりも先にプラズマが発生し、多光子吸収を妨げてしまうことからこの現象は、フェムト秒レーザーを用いた場合のみ顕著にみられる現象である。

①～③のような特徴があるため、これまでのNd:YAGレーザー、CO<sub>2</sub>レーザーなどを用いた加工では不可能であった高精細な加工が全ての物質において安定に行うことができるようになった。唯一の課題であるショット当たりの加工量が少ないという問題もサイバーレーザー社において発売されている10 kHz、1 mJ、10 Wのフェムト秒レーザー「FS-10」、20 kHz、50 μJ、1 Wの「イフリート・バイオ」を利用すれば、これまでのレーザーの10倍～数10倍の速度で加工することができる。産業界では、より高速な加工が必要になると考えられており、サイバーレーザーでは、2004年に20W、2005年に30Wの製品を発売するロードマップで製品開発を進めている。表1にサイバーレーザー社より発売されているフェムト秒レーザーの製品仕様を、図1に外観図を示す。

### 3.2 理論<sup>4)</sup>

フェムト秒レーザーを用いた加工については、いくつかのモデルが提案されているが、ここでは一例を挙げる。次元の熱が伝搬するモデルを考える。細かい説明は付録及び参考文献に譲るが、電子の冷却時間（物質により異なるが一般的に1 ps以下）、格子の熱上昇時間（一般に数十ps～数百ps）と照射される光パルスの時間幅の関係で、加工形状が大きく異なる。加工しきい値と比較すると提案されているモデルの妥当性を判断できる。図2に概念図を示す。電子の冷却時間よりも短いパルス幅（100 fs程度）の場合は、加工しきい値はパルス幅によらず一定であるが、格子の熱上昇時間よりも長いパルス幅で照射された場合は、しきい値は $\tau^{1/2}$ に比例する。

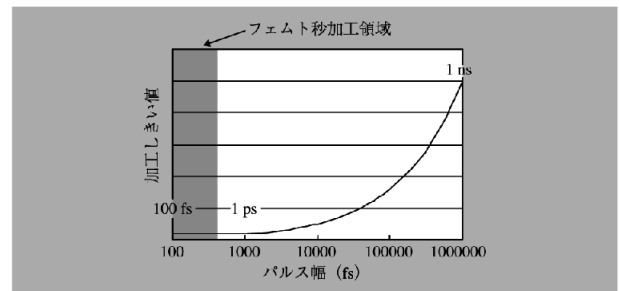


図2 加工しきい値のパルス幅依存性（概念図）

この理論に従うと、熱変性がほとんどない加工を行うためには、パルス幅は少なくとも数百 fs 以下であることが望ましい。

### 3.3 材料別加工例

本節では、フェムト秒レーザーによる加工を材料別に分けて、研究開発の状況について概説する。材料は、①金属材料、②透明材料、③半導体材料、④その他の材料の四種類に分類した。

#### ① 金属材料

ディーゼルエンジンのノズルの先端に細かい穴をあけることにより燃費がよくなることが知られているが、従来の機械加工では 100 μm 程度が精度の限界であるため新たに、フェムト秒レーザーを用いた手法が提案され研究されている。金属材料は、熱伝導性が高いため、ナノ秒パルスを用いた加工では、融解により照射した箇所が溶けてしまい、高精細な加工は困難であった。フェムト秒レーザーの登場により、熱拡散の少ない加工が可能となり、かつ多光子吸収により金属表面にもかかわらず十分に大きな吸収係数を持つことから高精細かつ高効率な加工が可能となる。

図3にサイバーレーザー社のフェムト秒レーザーシステム「イフリート」で加工したSUSの加工例を示す。結果を見ると、加工周辺部分における熱変性が観測されていないことが分かる。また、図4に金属膜のついたガラス上の金属膜のみを除去した例を示す。フェムト秒レーザーは、全てのものを加工することができるが、ショット数を制御することによりこのように選択的な加工も可

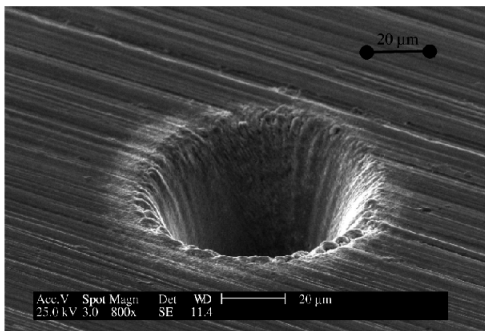


図3 フェムト秒レーザーでSUSへ加工した例

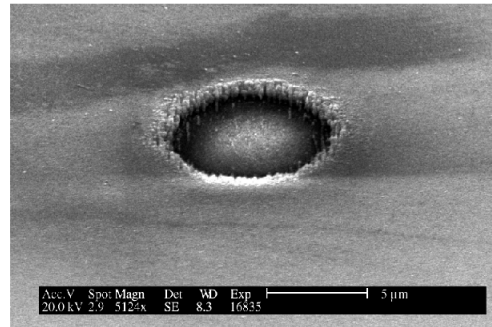


図4 フェムト秒レーザーを用いてガラス上の金属を除去した例

能となる（サイバーレーザー社製イフリート、ショット数制御機能を用いて加工）。

#### ② 透明材料

ガラス材料の加工が主であるが、他にサファイア結晶、水晶などの加工がフェムト秒レーザーを用いてなされている。透明材料は、一般に吸収係数が小さいために加工が困難であるが、フェムト秒レーザーを用いることにより、多光子吸収が起こるため、3次元の屈折率変化を利用した導波路作成をはじめとして、カットイング、穴開け等が可能となる。図5にガラス材料にフェムト秒レーザーで文字を彫り込んだものを示す。5層にわたって彫り込んであるが、深さ方向には非常に薄い範囲で加工されていることが分かる。さらに興味深い使用法としては、ガラス表面にフェムト秒レーザーをクラックの起こらない範囲内で照射することで強度を強くする手法が提案されている。これらの研究は、京都大学平尾教授がプロジェクトリーダーを務め経済産業省・NEDOが出資している、社団法人ニューガラスフォーラム及び独立行政法人・産業技術総合研究所が主体となって構成されている

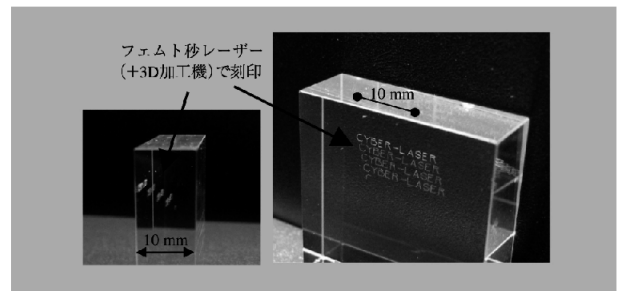


図5 フェムト秒レーザーを用いたガラスへの内部加工例

「ナノガラス技術プロジェクト (<http://www21.big.or.jp/~ngf4/>)」において精力的に研究されており、今後もさらなる研究が期待される。

### ③ 半導体材料

シリコン基板のダイシングが主である。現在 600～800 μm 厚のシリコンウェハーが半導体業界では主に使用されているが、省スペース化及び軽量化のために、50 μm を切るウェハーが今後使用されてくると考えられている。このような薄いウェハーのダイシングには、現在の主流であるダイヤモンドカッターを使用する手法では非常に困難である。フェムト秒レーザーを使用するとこのような薄い薄膜のダイシングも可能となることから、各所で研究されている。ダイシングスピードが現在の課題であるが、サイバーレーザー社では、この問題をショット数で解決するために、「FS-10」, 「イフリート・バイオ」において高繰り返しレーザーを開発している。

### ④ その他の材料

その他に、セラミック、誘電体などの加工もフェムト秒レーザーを用いて行われている。セラミックは、従来は、材料が脆く機械的な加工が困難であったが、フェムト秒レーザーを用いると、脆い材料においても加工が可能であることから注目を集めている。誘電体もこれまで加工が困難であったものの一つであり、基礎研究から研究開発が進められている。

最後に、全ての加工対象に言えることであるが、最近注目を集めている研究として、フェムト秒パルスを時間的に整形することによって加工品質を改善できるという報告がある。Max-Born 研究所の報告では、石英ガラスにパルスを3つに分割し、その間隔を 300 fs で照射したときに、加工品質が最も改善された<sup>5)</sup>。Purdue 大学でも金属、半導体、誘電体などへの照射を試み始められ、国内でも研究は既に始まっている。サイバーレーザー社より、高強度フェムト秒レーザーパルスを容易に整形することが可能な空間位相変調器を用いた波形整形システム(図6)が発売されており、今後このような研究が活発になることが予想される。

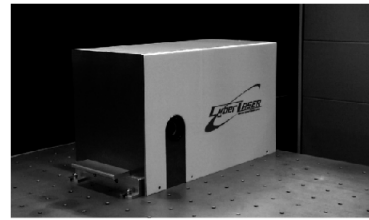


図6 フェムト秒レーザーパルスの時間波形整形用空間位相変調器

## 4 まとめ

本稿では、フェムト秒レーザーパルスを用いた応用について、加工を中心に概説した。フェムト秒レーザーは、人類が得ることのできる最速のパルスであるため、金属の高精細加工、透明材料への加工など、これまでの装置ではできなかったことが可能になることから非常に高い注目を集めているが、その研究はまだ創成期にある。

フェムト秒レーザーを用いた加工は、これまでできなかった様々な加工を可能にするが、材料、加工方法、出力などの条件によって加工結果が異なることが知られている。サイバーレーザー社では、これまでに多くの材料の加工を行ってきており、数多くの知見を得ている。これからフェムト秒レーザーを用いて加工を始める際には、連絡をいただければ、本シリーズ第7回で紹介させていただいたレーザーステーションを用いて試射も可能である。本稿がフェムト秒レーザーを使用した応用のさらなる発展にお役に立てれば幸いである。

### 【付録】

フェムト秒加工の理論の部分で式を用いて説明しておく。レーザーによって誘起される電子及び格子の温度上昇を  $T_e$ ,  $T_i$  とすると、熱の流れは次の式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} &= -\frac{\partial Q(z)}{\partial z} - \gamma(T_e - T_i) + S, \\
 C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} &= \gamma(T_e - T_i) \\
 Q(z) &= -\frac{k_e \partial T_e}{\partial z}, \\
 S &= I(t) A \alpha \exp(-\alpha z)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

ここで、 $z$  はターゲット表面に対して垂直方向  $Q(z)$  は、熱の流れ、 $A$  は物質の透過率、 $\alpha$  は吸収係数、 $C_e$ ,  $C_i$  は

単位体積当たりの熱容量,  $k_e$ は電気伝導率,  $\gamma$ は電子-格子結合係数を示す。

(1) の方程式には次の3種類のタイムスケールが存在する。 $\tau_e=C_e/\gamma$ は電子の冷却時間,  $\tau_l=C_l/\gamma$ は格子の熱上昇時間,  $\tau_L$ はレーザーのパルス幅を示すが, ここでは①  $\tau_e \ll \tau_l$ の場合, ②  $\tau_e \ll \tau_L$ の場合に分けて考える。 $\tau_e$ は, 数百フェムト秒,  $\tau_L$ は数10ピコ秒であるため, ①はフェムト秒レーザーを用いた場合, ②はナノ秒レーザーを用いた場合の加工に対応する。

### ① フェムト秒パルスを用いた場合

フェムト秒パルスを用いた場合, すなわち電子の冷却時間よりもレーザーのパルス幅が十分に短い場合は, 電子-格子の結合が無視されるため, (1) 式は簡単に解くことができる。

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = 2I_a \alpha \exp(-\alpha z) \quad (2)$$

ここで (1) 式の  $C_e$  は電子温度がフェルミエネルギーより小さい場合は, 電気伝導率は, 温度に比例するため,  $C_e=C_e' T_e$  とした。上式は簡単に解くことが可能で, 次式で与えられる。

$$T_e(t) = \left( T_0^2 + \frac{2I_a \alpha}{C_e'} t \exp(-\alpha z) \right)^{1/2} \quad (3)$$

ここで,  $I(t)$  は一定で,  $I_0$  ( $I_a=I_0 A$ ) と仮定した。レーザーパルスが照射された後の電子の温度は,  $T_e(\tau_L) \gg T_0$  を仮定すると, アブレーション深さは, 次の式で表される。

$$L \cong \alpha^{-1} \ln(F_a / F_{th}) \quad (4)$$

$F_a$  は, 吸収されるレーザーエネルギー密度,  $F_{th}$  は, 加工しきい値を指し次式で表される。

$$F_{th} \cong \rho \Omega / \alpha \quad (5)$$

ここで,  $\rho$  は, 密度,  $\Omega$  はアブレーションに必要な熱量をさし, 加工しきい値はパルス幅には依存せず物質の特性にのみ依存することが分かる。

### ② ナノ秒パルスを用いた場合

ナノ秒パルスを用いた場合は,  $\tau_e \ll \tau_L$  であるため,  $T=T_l=T_e$  となり, (1) 式は次のように簡略化される。

$$C_l \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{k_0 \partial T}{\partial z} \right) + I_a \alpha \exp(-\alpha z) \quad (6)$$

熱が到達する深さは  $(Dt)^{1/2}$  ( $D$  は熱拡散係数で  $k_0/C_l$ ), 蓄えられるエネルギー  $E_m$  は  $I_a t / \rho l$ , アブレーションに必要な熱量を  $\Omega$  をとすると, アブレーションしきい値  $F_{th}$  は, 次のように表される。

$$F_{th} \cong \rho \Omega D^{1/2} \times \tau_L^{1/2} \quad (7)$$

ナノ秒パルスを用いた場合, アブレーションしきい値は  $\tau_L^{1/2}$  に比例することが分かる。

上記より, アブレーションしきい値のパルス幅依存性は, 図2の様に表されることが分かる。

### 参考文献

- 1) M. Nakazawa, T. Yamamoto, and K. R. Tamura, *IEICE Trans. Electron.*, **E85-C** pp. 117 (2002).  
<http://www.festa.or.jp/festa-j.html> など
- 2) M.E. Brezinski and J. G. Fujimoto, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **5**, pp. 1185(1999).  
<http://www.oitda.or.jp/main/hw/hw2k22-j.html> など
- 3) M. Aoyama, K. Yamakawa, Y. Akahane, J. Ma, N. Inoue, H. Ueda, H. Kiriya, *Optics Letters*, **28**, pp. 1594 (2003). Y. Fukuda, K. Yamakawa, Y. Akahane, M. Aoyama, N. Inoue, H. Ueda, J. Abdallah Jr., G. Csanak, A. Ya. Faenov, A. I. Magunov, T. A. Pikuz, I. Yu. Skobelev, A. S. Boldarev, and V. A. Gasilov, *JETP Lett.* **78**, pp. 115 (2003) など
- 4) B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben, A. Tunnermann, *Appl. Phys.*, **A63**, pp. 109 (1996)
- 5) R. Stoinm N, Boyle, A. Thoss, A. Rosenfeld, G. Korn, and I. V. Hertel, *Riken Review*, **50**, pp. 71(2003)

### Applications of femtosecond lasers

■ Kazuya Takasago

■ Cyber Laser Inc.



タカサゴ カズヤ

所属: サイバーレーザー(株) 開発第一部 上級主任研究員

連絡先: 〒212-0054 神奈川県川崎市幸区小倉308-10 KBIC 205号室

Tel. 044-588-3854 Fax. 044-588-3808

E-mail: takasago@cyber-laser.com

経歴: 1999年3月慶應義塾大学大学院電気工学専攻博士課程修了, 1999年4月住友重機械工業

入社, フェムト秒テクノロジー研究機構への出向を経て, 2002年7月サイバーレーザー株式会社へ入社し現職。学生時代はフェムト秒レーザーを用いた波形整形とその応用, 現在は高出力フェムト秒レーザー装置の開発に従事。博士(工学)。趣味, スキー, ダイビング。