

フェムト秒レーザー加工における加工開始の検出と穴深度のリアルタイム計測

レーザー計測制御プロジェクトスタッフ 神谷真好*

Detection of The Processing Start and A Real-time Measurement of The Hole Depth in The Femtosecond Laser Processing

Masayoshi Kamiya*

The detection technology of the processing start and a real-time measurement technology of the hole depth have been developed for the adoptive irradiation control in the non-thermal minute processing with the femtosecond laser. The processing start has been detected by analyzing a change of the reflected light energy from a processing sample surface. The hole depth has been measured during laser processing by analyzing the interference spectrum between the reference light and reflected light from the bottom of a hole. These technology makes processing precision better in the femtosecond laser processing.

1. はじめに

パルス幅が極めて短くピークパワーが大きいフェムト秒レーザーを利用すれば、さまざまな材料に対して熱影響の少ない微細加工が可能である¹⁻³⁾。

フェムト秒レーザー加工では、照射フルエンスがある閾値を越えると被加工物の表面でアブレーションが始まる⁴⁾。しかし、実際の加工現場では、同じ被加工物であっても集光レンズの種類や被加工物の配置などによって加工が始まる照射エネルギーが異なる。そこで、非熱的微細加工の照射光エネルギーを決定するため、照射中の被加工物から反射する光エネルギーの変化を測定することによって加工開始の検出を試みた。

一方、今まで被加工物の深さ方向の形状変化を加工中に知ることはできなかった。深さ方向の加工結果を得るためには、レーザー光の照射を止めた後に加工対象を治具から外して形状を測定する必要がある。このため、現状では精密かつ正確な加工制御ができるまでには至っていない。そこで、加工に用いるフェムト秒光パルスの広スペクトル帯域、高ピークパワーの特徴を利用して、被加工物からの反射光と、予め分岐しておいた参照光との干渉スペクトルを解析することにより、加工中の穴深度リアルタイムモニタリングを試みた^{5, 6)}。

従来のレーザー微細加工に関する研究の多くは加工結果についてのものが主であった。本報で紹介す

るような加工開始の検出や穴深度のリアルタイムモニタリングが可能となれば、制御性の高いフェムト秒レーザー加工が実現でき、加工精度や加工効率の向上が期待される。

2. 光学系および機器の構成

図1に、照射および観察の光学系と、反射光エネルギー測定（加工開始モニター）および反射光干渉スペクトル測定（穴深度モニター）のための光学系、およびそれらにつながるレーザー光源と機器の全体構成を示す。

2. 1 レーザー光源

フェムト秒レーザーは、中心波長約800nm、波長帯域幅約40nm、パルス幅約60fsの光を出力するチタン・サファイア再生増幅システムを用いた。なお、1パルスあたりの照射エネルギーは、回転ステージにマウントした反射型回転式NDフィルタ（減光フィルタ）により制御した。また、繰り返し周波数は、レーザーシステムに付属するタイミングコントローラにより1Hzから1kHzの範囲で制御した。

2. 2 照射光学系と観察光学系

フェムト秒レーザーから出力された光パルスをレンズ（L1）で集光し、焦点位置にセットした被加工物の表面に照射する。被加工物からの反射光の一部は、ビームスプリッター（BS3）を経由して $f=400\text{mm}$ の長焦点レンズ（L2）を装着したCCDカメラ

*) 現 材料科

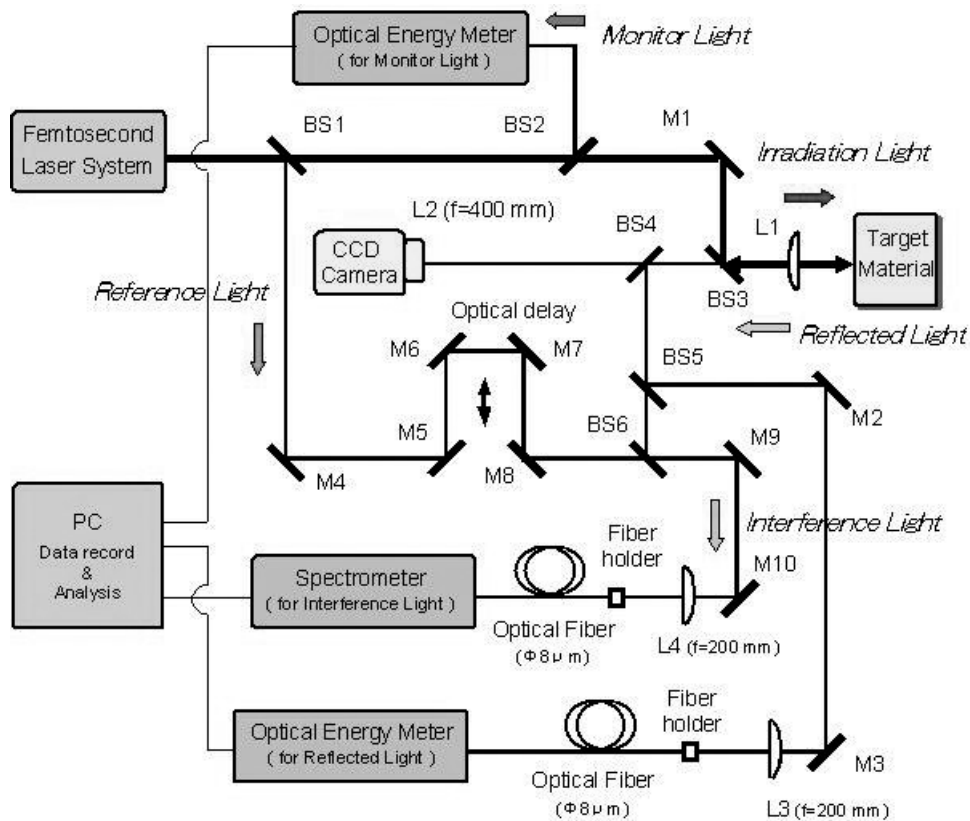


図1 光学系および機器の構成

に入力される。この系は結像系になっており、長焦点レンズ(L2)と集光レンズ(L1)の焦点距離比で決定される拡大率で加工表面の状態を観察する。この観察機能は、後で述べるように、被加工物表面のどの位置からの反射光を採光するかを調整する際にも利用される。

2. 3 加工開始モニター

被加工物に集光照射された光パルスの一部は、被加工物の表面で反射して集光レンズ(L1)を照射時とは逆向きに進む。この反射光は、3枚のビームスプリッター(BS3, BS4, BS5)と2枚のミラー(M2, M3)を介して伝送され、長焦点レンズ(L3)で光ファイバ端面に集光されて反射光用光エネルギーメータに入力される。また、フェムト秒レーザーの一部(約10%)をビームスプリッター(BS2)で分岐してモニター光用エネルギーメータに入力し、予め測定しておいたモニター光のエネルギーと照射光エネルギーとの比をもとに、照射中における照射光エネルギーを算定した。

2. 4 穴深度モニター

フェムト秒光パルスをレンズ(L1)で集光して被加工物に照射する系は、反射光エネルギーの測定光学系と共通である。反射光干渉スペクトル測定光学系の特徴は、この光路の途中に変形型のマッハツェンダー干渉光学系があり、フェムト秒光パルスを予め分岐して用意した参照光と、照射中の被加工物から反射する光とをビームスプリッター(BS6)で合波して干渉させることである。この干渉結果をファイバ入力マルチチャンネル分光器で分光計測してデータをPCに取り込み、干渉スペクトルを周波数軸に変換した後の周波数成分を解析することで、加工された穴深度を計測する。

穴深度の測定原理は以下のとおりである。反射光と参照光の振幅を1として、 Δd を穴深度(反射光と参照光と光路長差の半分)、 c を光速、 $I_0(\nu)$ を光源の光周波数スペクトルの包絡線波形とすると、干渉スペクトルの光周波数 ν に対する強度 $I(\nu)$ は、次式で与えられる。

$$I_{(v)} = \left\{ 1 + \cos\left(4\pi \frac{\Delta d}{c} v\right) \right\} \cdot I_{0(v)} \quad (1)$$

式(1)より、干渉強度 $I(v)$ は、穴深度 Δd に比例して決まる一定の繰り返し周波数で増減する。ここで、マルチチャネル分光器から取得するデータは波長軸上で等間隔のデータであるため、そのまま光周波数軸に変換したデータは等間隔にならない。このままではフーリエ変換できないため、光周波数軸上で等間隔となるように補間処理を行っている。

補間再構築されたデータをフーリエ変換して強度変化の繰り返し周波数成分を求めることにより、穴深度 Δd を決定することができる。深度モニターのPCではこれら一連の処理を高速で行い、照射光パルス毎のリアルタイム計測を可能としている。

3. 反射光採光のための光ファイバ位置調整

反射光のエネルギーや干渉スペクトルを測定するためには、被加工物の照射中心から反射してくる光を光エネルギーメータやマルチチャネル分光器へ光ファイバを介して効率よく採光する必要がある。これを実現するには、測定の準備段階として、反射光採光のための光ファイバ端面の横位置調整が必要であり、前述のCCDカメラによる拡大結像系を用いて調整を行う。

加工されない程度のエネルギー(0.01 μ J/pulse、1kHz)に減衰させたフェムト秒光パルスを被加工材料に照射して、加工表面をCCDカメラで観測する。一方、反射光測定用エネルギーメータまたはマルチチャネル分光器を一時的に半導体レーザー(LD)に交換し、光ファイバを含めた光路を計測時とは逆向きに光を送り、被加工材料の表面にLD光を投影する。この状態を同じCCDカメラで観測する。

このとき、CCDカメラで観測される画像の例を図2に示す。このように、被加工材料表面から反射したフェムト秒光パルスとLD光とが同時に観測される。ここで、図2中のスケールは、結像系の倍率を考慮して算出した被加工材料表面のサイズを示している。CCDカメラの画像を見ながらLD光のスポット位置がフェムト秒光パルスの照射エリアの中心になるように、光ファイバ端の横位置を調整する。この時、

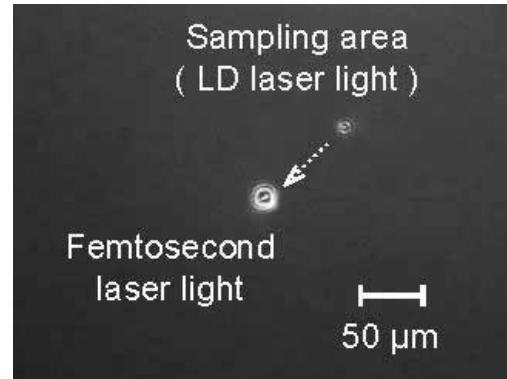


図2 照射スポットと採光スポット

CCDカメラのモニター画像を見ながらLD光のスポットが最も小さくなるようにして、LD光の焦点位置を被加工物表面に設定する調整も合わせて行う。これらの調整により、反射光測定用エネルギーメータおよびマルチチャネル分光器には照射中心から反射してくる光が効率良く採光されることになる。

4. 被加工物とその光学特性

被加工物としてスライドガラスを用いた。スライドガラスの分光透過特性を図3に示す。紫外から近赤外の広い波長域にわたって吸収率が非常に低いといえる。

5. 加工開始の検出

焦点位置にセットした被加工材料に10倍の対物レンズで集光したフェムト秒光パルスを繰り返し1kHzで照射し、照射光エネルギーに対する反射光エネルギーの変化を測定した。その結果を図4(a)の左図に示す。照射する場所を変えながら5回同じ実験を行ったが、いずれも、照射光エネルギーが増大

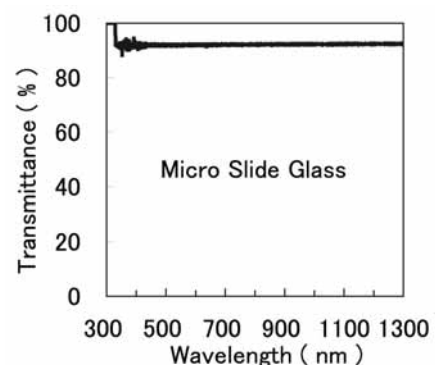
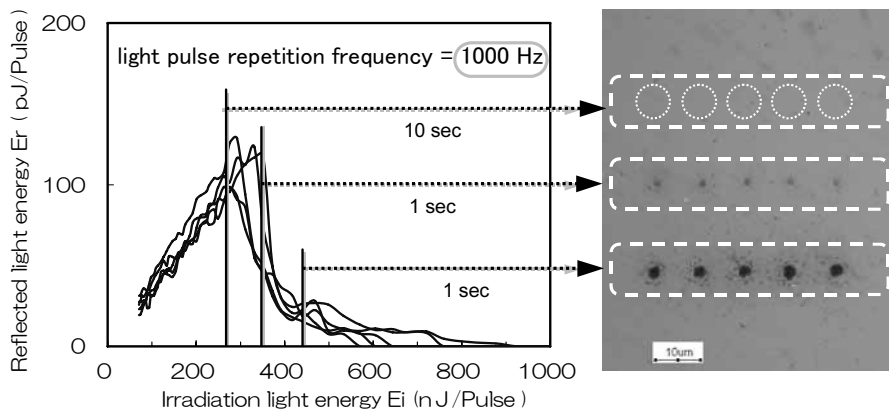
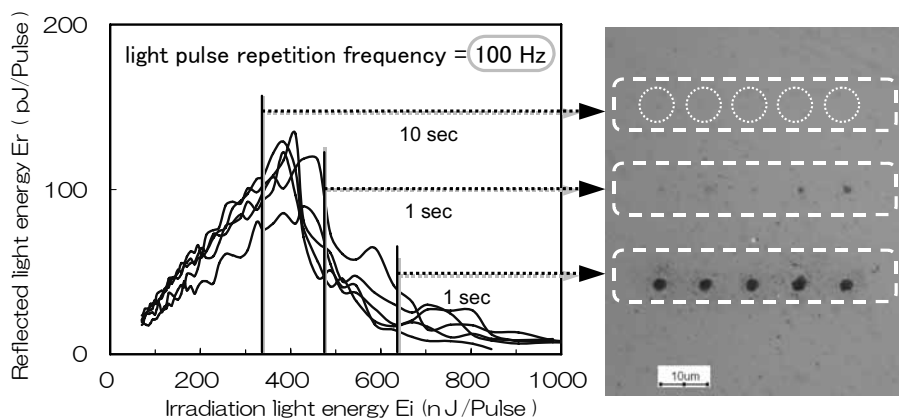


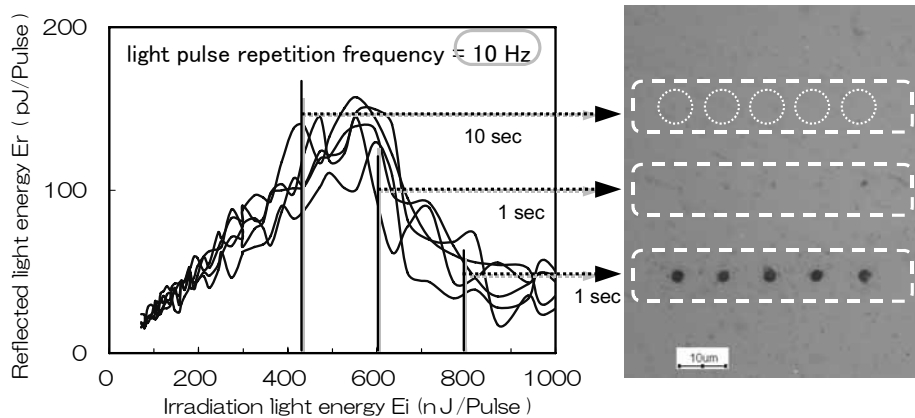
図3 スライドガラスの分光透過特性



(a) 繰り返し周波数 1 kHz



(b) 繰り返し周波数 100Hz



(c) 繰り返し周波数 10Hz

図4 照射光エネルギーに対する反射光エネルギーの変化と、照射エネルギー毎の加工痕

しているにもかかわらず、反射光エネルギーが急激に減少するポイントが存在することがわかった。

そこで、反射光エネルギーが急激に減少するポイントの照射光エネルギーを基準に、約70%のエネルギーで10秒間、同じエネルギーで1秒間、約130%のエネルギーで1秒間の照射を、それぞれ異なる位

置で5回ずつ行った。それらの加工痕を図4(a)の右図に示す。基準エネルギーの70%照射では変色はあるものの形状変化は認められなかった。基準エネルギーの照射では、いずれも開口が $2\mu\text{m}$ 程度の浅穴が開いていた。さらに、基準エネルギーの130%照射ではさらに大きく深い穴が開いていた。

【報告】

続いて、繰り返し周波数が100 Hzと10 Hzについても同様の実験を行った。その結果、図4(b)および図4(c)に示すように、反射光エネルギーが急激に減少するポイントの照射光エネルギーは多少ばらつくものの、1 kHzの場合と同じ傾向の結果を得た。

これらのことから、反射光エネルギーが急激に減少するポイントが加工開始のタイミングと考えられ、そのときの照射光エネルギーがこの加工光学系および被加工物における加工開始照射光エネルギーと見なすことができる。

6. 穴深度の計測

6. 1 分解能と測定レンジ

リアルタイム深度モニターの深度分解能*resolution*は、フェムト秒光パルスの可干渉光周波数帯域幅を $\delta \nu_{part}$ とすると次式で与えられる。

$$resolution = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{\delta \nu_{part}} \quad (2)$$

使用したフェムト秒光パルスの干渉可能な光周波数帯域幅は27.5THz（波長帯域幅に換算して60nm）であり、この値から計算される深度分解能は5.5 μm となる。この値は、光路長差がゼロ付近の分解能であり、予め一定の光路長差を確保したり穴深度が進展して光路長差が拡大したときの分解能はより向上し、さらに細かい変化を検知可能となる。

一方、計測可能な最大深度*range*は、分光器の光周波数帯域幅 $\delta \nu_{full}$ とリニアCCDの元素数 N によって次式で与えられる。

$$range = \frac{1}{4} \cdot \frac{c}{\delta \nu_{full}} \cdot N \quad (3)$$

ここで、分光器の分解能は0.146nmであるが、実際にはCCDの1元素あたりのスペクトル幅(0.09nm/element)の2倍に相当する周期の縞まで観測することができる。よって、測定レンジは、分光器の分解能によって制限されず、1元素あたりのスペクトル幅によって決定される。そこで、使用したマルチチャンネル分光器の測定可能な光周波数帯域幅は84.5THz（波長帯域幅に換算して180

nm）であり、元素数は2,048であるので、計測可能な最大深度は1,818 μm となる。また、計測開始原点を-1.8mmに設定しておけば、トータルで約3.6mmの範囲の計測が可能である。さらに、参照光の光路長を変化させて干渉の原点を移動させつつ計測することにより、より広い範囲のリアルタイム深度計測が可能となる。この方法は光路長の変化量を検知しつつおこなうことで実現できる。

次に、測定分解能と測定レンジを実験的に確認するため、加工されない程度の微弱なエネルギー(0.012 μJ 、1kHz)のフェムト秒光パルスをダミーターゲットに照射しながら、参照光の光路長を変化させて測定を行った。参照光路中に置かれた光学遅延系の参照ミラー(図1のM6、M7)の移動量に対するリアルタイム深度モニターの指示値を図5に示す。このとき、参照ミラーの移動量は、そのまま計測されるべき穴深度に相当することになる。また、各測定点における参照ミラーの移動量とリアルタイム深度モニターの計測値との差を、エラーとして図5に併せて示した。ここで、ゼロ点位置は、深度モニターが $\pm 200 \mu\text{m}$ を示した2点の間中点とした。その結果、計測値は、参照ミラーの移動量に対してゼロから1,800 μm まではほぼ直線的に変化した。また、この実験でのエラーは全域で $\pm 3 \mu\text{m}$ 以内であり、計算された分解能以内であることを確認できた。

一例として、参照ミラーの移動量が200 μm のときの深度モニターの画面を図6に示す。上段(a)が分光器から得られた干渉スペクトルであり、下段(b)が干渉スペクトルを周波数解析して得られた参照ミラーの移動量である。なお、これ以降に示す実際のモニ

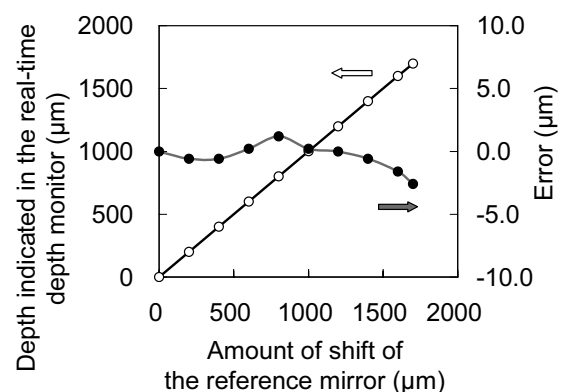


図5 参照ミラー移動量に対するモニター指示値

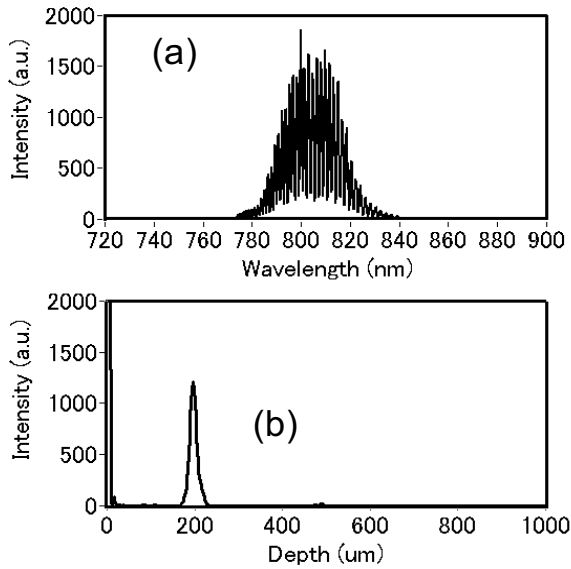


図6 深度200 μm 相当のときのモニター画面

タリング実験では、参照光の光路長を一定に保持して、ターゲットで反射する反射光の光路長変化を検出している。

6. 2 穴深度モニタリング下微細穴加工

スライドガラスを被加工物として、穴深度モニタリング下で微細な穴加工を施した。レーザーの焦点を加工端面に設定し、採光位置を改めて調整し直した後、加工実験を行った。実験では、深度モニターがそれぞれ40 μm 、80 μm 、120 μm 、160 μm 及び200 μm の深さを示すまで高強度フェムト秒光パルス(50 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ 、70fs (FWHM)、1Hz)を照射し、ガラスに深さの異なる5本の穴を開けた。全ての穴を加工した後にガラスを治具から外して、加工穴を横から観察したときの顕微鏡写真を図7に示す。その結果、開口径が16 μm 程度の微細な穴加工においても、本研究のリアルタイム深度モニターの指示値が顕微鏡観察による測定深度と良く一致していることを確認した。

7. まとめ

フェムト秒レーザー微細加工における照射エネルギーの適応制御をめざして、穴のあき始めである加工開始の検出技術と、それに続く穴深度のリアルタイム計測技術を開発した。加工開始は、照射光エネ

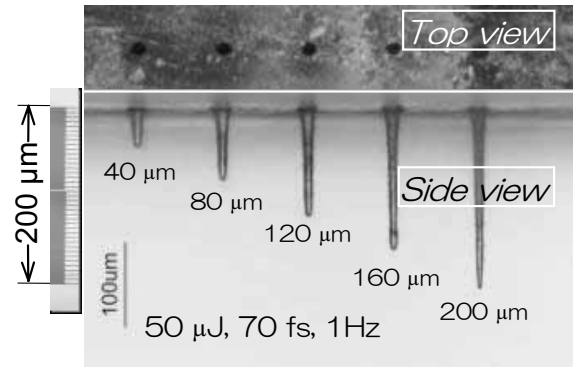


図7 深度モニター下で加工された微細穴

ルギーを徐々に増大させながら被加工物から反射する光エネルギーの変化を解析して検出した。

また、加工中の穴深度は、照射光から予め分岐した参照光と、被加工物からの反射光との干渉スペクトルを解析することによりリアルタイムで計測した。これらの技術によって制御性の高いフェムト秒レーザー加工が可能となり、加工精度や加工効率の向上が期待される。

参考文献

- 1) 熊谷寛:「フェムト秒レーザー加工」, 応用物理, 67-9, (1998), pp.1051-1055.
- 2) 緑川克美:「フェムト秒レーザー加工」, O plus E, 21-9, (1999), pp.1130-1136.
- 3) K.Furusawa, et al.: “Femtosecond laser micromachining of TiO₂ crystal surface for robust optical catalyst”, J. Appl. Phys., 87-4, (2000), pp.1604-1609.
- 4) 橋田昌樹:「フェムト秒加工によるナノ構造物形成」, Laser Cross, 181, (2003), pp.1-3.
- 5) M. Kamiya, et al.: “Monitoring of Target Material Change in Femtosecond Laser Processing by Measurement of Spectral Reflectance”, Proc. 3rd Asian Pacific Laser Symposium, (2002), pp.458-461.
- 6) 神谷真好, 青島紳一郎, 「フェムト秒レーザー加工における加工穴深度のリアルタイムモニタリング」, レーザー研究, 33-10, (2005), pp. 685-689.