

連携記事

超短パルスレーザーによる 微細加工技術の進展と展望

Progress and Prospect of Ultrafast Laser Microprocessing

杉岡幸次

Koji Sugioka

(独) 理化学研究所 基幹研究所

緑川レーザー物理工学研究室

専任研究員

1 はじめに

超短パルスレーザーはパルス幅が概ね10ps以下のパルス幅のレーザーであり、フェムト秒レーザーおよびピコ秒レーザーの総称である。超短パルスレーザーは、その極短パルス性から加工領域に発生した熱の周囲への拡散を無視することができ、加工部周辺に熱影響をほとんど与えない加工を実現することができる¹⁾。一方その高強度性は、ガラスなどの透明材料に対して多光子吸収による加工を実現する。特にレーザー光を適度な強度で透明材料内部に集光すると、集光点でのみ多光子吸収を誘起でき、材料内部の3次元加工を行うことができる²⁾。これらの特長により、超短パルスレーザーは従来にはない高品質・高解像度・高機能加工を実現することができ、近年国内外を問わず研究・開発が盛んになっている。本稿では、今日レーザー微細加工の主流になりつつある超短パルスレーザー加工について、その黎明期から今日までの進展と今後の展望を解説する。

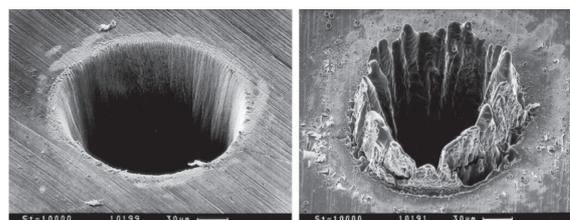
2 超短パルスレーザー加工の始まり

超短パルスレーザー加工は、1987年のSrinivasan等による160fsのXeClエキシマレーザー(308nm)を用いたポリメチルメタクリレート(PMMA)のアブレーション³⁾と、同年のKüper等による300fsのKrFエキシマレーザー(248nm)によるPMMAのアブレーション⁴⁾が最初である。アブレーションとは、強度の強いレーザー光を物質に照射することにより、物質の分解・蒸発が爆発的に生じ、物質がエッチングされる現象を言う。フェムト秒レーザーを用いると、ナノ秒レーザーを用いた場合と比較してアブレーションしきい値(アブレーションが生じる最小のレーザー強度、通常単位はmJ/cm²)が大幅に低下すること、加工部に熱変成が観られないことが示された。また加工メカニズムとして、多光子吸収による解離状態への励起が予想されることが報告された。実際超短パルスレーザー

は非常に強度が強いため、透明材料であってもあたかも仮想準位を介したかのように束縛電子を複数の光子で伝導帯に励起する(多光子吸収)ことが可能であり、透明材料の加工を実現する。その後、NaClやテフロン(PTFE)の加工に応用され⁵⁾、多光子吸収によって透明材料に対しても良好な加工が行えることが示された。このユニークな加工結果により、これ以降超短パルスレーザー加工の研究は活発になっていった。

3 金属加工

1987年のSrinivasan等ならびKüper等の論文の発表以降しばらくの間は、これまで高品質な加工が困難であった透明材料の加工が多光子吸収によって行えるといった興味から、透明材料の加工に関する研究がほとんどであった。その後1990年代半ばになると、レーザー波長に対して強い吸収のある金属やセラミックスでも、熱変成のない加工ができることが示され注目を集めた。超短パルスレーザーを金属に照射した場合、レーザーのエネルギーは逆制動放射過程によって自由電子に吸収される。その後吸収されたレーザーエネルギーは、電子系の加熱、格子系へのエネルギー移乗、金属内部への熱拡散に分配される。レーザー光のパルス幅が電子・フォノン結合時間(通常ピコ秒オーダー)よりも短い場合、金属内部への熱伝導による損失過程を無視できるため、レーザーエネルギーを格子系に効率良く注入できる。図1は、鋼箔をパルス幅(a)



(a) フェムト秒レーザー

(b) ナノ秒レーザー

図1 鋼箔のアブレーション加工

200fs と (b) 33ns のレーザー (波長 780nm) でアブレーションした結果である¹⁾。フェムト秒レーザーによる加工では加工穴の周辺に熱変成相の形成は観られないが、ナノ秒レーザー加工では溶融の痕が顕著に観察される。これはナノ秒パルスアブレーションでは熱が金属内部を伝導して、比較的大きな溶融相をつくり出すのに十分な時間があるためである。非熱加工は超短パルスレーザー加工の重要な特長の一つであり、今日では金属はもとよりセラミクスや半導体への加工にも応用されている。

4 透明材料内部加工

超短パルスレーザーによる多光子吸収過程は、透明材料に対しあるしきい値以上のレーザー強度の場合効率よく生じる。従って適当なエネルギーのレーザー光を試料表面ではなくバルク透明材料の内部にレンズで集光すれば、その領域でのみ多光子吸収が生じ、固体内部の改質・加工が可能となる。この特徴を利用して、1990年代半ばにフェムト秒レーザーによりガラス内部が加工できることが初めて示された²⁾。これは超短パルスレーザーでのみ可能な加工であり、石英ガラスやカルコゲナイドガラスなどの無機透明非晶質材料に対して、局所的イオン価数変化、金属微粒子析出、微結晶析出、屈折率制御等が可能であることが示された⁶⁾。さらにレーザー光の集光点を固体内部で走査すると連続的な屈折率増加領域を形成することができ、各種ガラス材料やポリマー内部への光導波路形成に応用された⁷⁾。今日フェムト秒レーザーによる透明材料内部への光導波路描画は最も活発な研究分野の一つであり、数多くの研究がなされている⁸⁻¹⁰⁾。またガラス内部の屈折率制御による3次元フォトニックデバイスの作製も広く試みられており、光結合器・分波器¹¹⁾、ブラッググレーティング¹²⁾、回折型レンズ¹³⁾、導波路レーザー¹⁴⁾などが実際に試作されている。一方2000年代に入ると、フェムト秒レーザーを用いてガラス

内部に3次元中空マイクロ構造を形成し、マイクロ流体デバイス作製に応用する研究が盛んになってきた。3次元中空マイクロ構造は、まずガラス内部をフェムト秒レーザーにより改質し、その後フッ酸溶液を用いたウェットエッチングにより改質領域を選択的に除去することによって実現される^{15,16)}。さらにマイクロ流体素子に光導波路やその他のマイクロ光学素子を集積化したマイクロ光学流体素子 (Optofluidics) も作製されており、高感度のバイオ化学分析¹⁷⁻¹⁹⁾や微生物の動態・機能解明²⁰⁾に応用されている。一例として、図2 (a)、(b) に作製されたマイクロ流体デバイスの3次元模式図および光学顕微鏡写真を示す。基板表面より 150 μm 下に矩形断面形状のマイクロチャネルが埋め込まれていることがわかる。本マイクロ流体デバイスはミドリムシの動態観察に利用されたが、図2 (a) の①の方向より光学顕微鏡で観察することにより、ミドリムシを前方から観察することを可能にした。その結果、図2 (c) に示すようなこれまで誰も見たことのない進行方向正面からミドリムシが遊泳する映像を高速撮影することに成功した²⁰⁾。このような微生物観察用のマイクロチップはナノ水族館と呼ばれ、観察したい微生物の種類や調べたい内容により、異なる構造や機能を持ったナノ水族館が既に複数作製されている。

最近では、超短パルスレーザーによる多光子吸収を利用し、ガラス基板同士のマイクロ溶接の研究も行われている^{21,22)}。

5 3次元光造形、3次元リソグラフィ

透明材料の多光子吸収においては、非線形な吸収・反応のしきい値を利用することにより、波長よりもはるかに小さい 100nm 程度の加工解像度を達成する。この特長を利用したフェムト秒レーザーによる2光子光造形および2光子リソグラフィ技術による3次元ナノ造形が、2000年以降脚光を浴びている²³⁾。

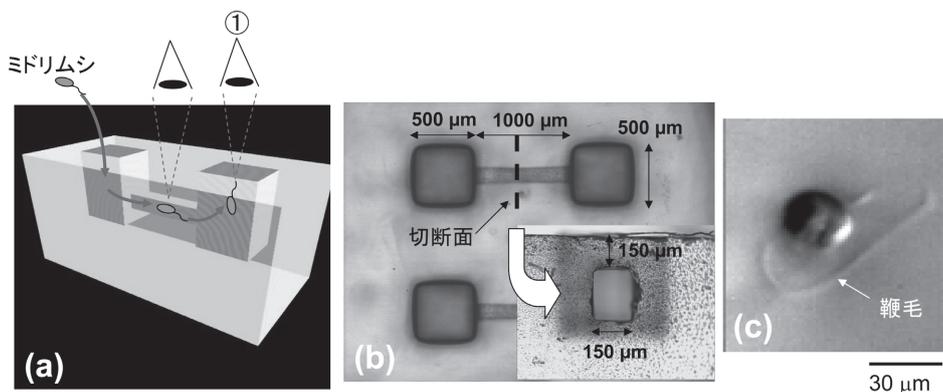


図2 フェムト秒レーザーにより作製された微生物動態観察用マイクロ流体デバイス (ナノ水族館) の (a) 3次元模式図、および (b) 光学顕微鏡写真。 (c) ナノ水族館を用いて前方から観察したミドリムシの光学顕微鏡写真

主な応用としては2つあり、1つはフォトニック結晶の作製²⁴⁾、もう一つはMEMSやマイクロ流体デバイス作製である²⁵⁻²⁷⁾。図3に、2光子光造形によりマイクロタービンおよびナノピンセットを作製した例を示す^{25,26)}。作製したマイクロ・ナノデバイスは光トラッピング技術により可動部を遠隔駆動することが可能であり、実際マイクロタービンでは数百rpmの回転数を実現している。

また最近ではメタマテリアルやマイクロ医療機器の作製への応用も検討されている²⁸⁾。

6 ナノ加工

前章でも簡単に述べたが、多光子吸収を用いた透明材料の加工では、レーザー光の回折限界をはるかに超える加工解像度を実現することができる²³⁾。それは、通常フェムト秒レーザー光はガウスビームであり、 n 光子吸収の場合実効的なビーム径は実際のビーム径の $n^{-1/2}$ 倍になるからである。一方、不透明な物質では1光子吸収で加工を行うため実効的なビーム径が小さくなることないが、超短パルスレーザーはパルス幅が非常に短いために加工部周辺への熱拡散を無視することができる。その結果、金属のような熱伝導率の高い材料においてさえ波長オーダー程度あるいはそれ以下のナノ加工を実行することができ、近年フェムト秒レーザーを用いたナノ加工技術が注目されている。フェムト秒レーザー光を回折光学素子で多ビームに分離し、その中の所望のビームを多光束干渉照射させることにより、金薄膜にナノ構造が作製されている²⁹⁾。2光束干渉ではナノペルトが、4光束干渉では照射強度により図

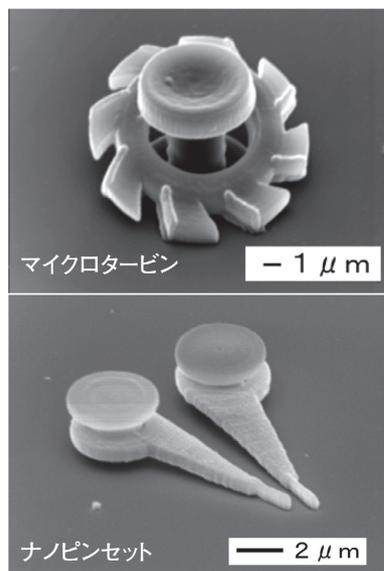


図3 2光子光造形によって作製されたマイクロタービンおよびナノピンセット

4に示すようなナノバンプやナノメッシュが形成される。一方、3次元光造形、3次元リソグラフィの場合と同様、高開口数の対物レンズを用いることにより、GaN表面にナノクレータを2次元に周期的に配列した例を図5に示す。この場合はフェムト秒レーザーの2次高調波(387nm)を対物レンズで集光し、塩酸溶液中のGaNに照射することによりアブレーション加工を行っている。2次元周期構造はレーザー光を走査することによって実現される。形成されたナノクレータの直径は約106nmである³⁰⁾。このようなGaN表面への2次元ナノ周期構造の形成は、青色・紫外発光ダイオードの光取り出し効率向上への応用が期待されている。

さらに加工解像度を向上することを目的として、AFM(原子間力顕微鏡)チップ、SNOM(走査型近接場光学顕微鏡)チップあるいは誘電体や金属の微小球等とフェムト秒レーザー光を組み合わせたナノ加工も最近のトピックスである³¹⁻³⁴⁾。

7 表面ナノ構造化による固体表面機能付与

フェムト秒レーザーを固体表面にアブレーションしきい値程度のフルエンスで照射すると、照射領域にナノ周期構造が形成されることが知られている³⁵⁾。形成される周期構造の向きはレーザーの偏光方向に対して垂直であり、その周期は波長の半分から数分の一程度である。これまでにすでに多くのグ

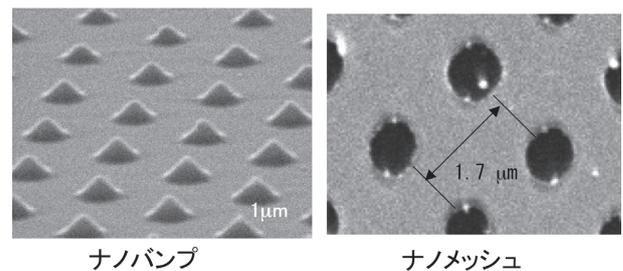


図4 フェムト秒レーザー4光束干渉による金薄膜へのナノバンプおよびナノメッシュの作製

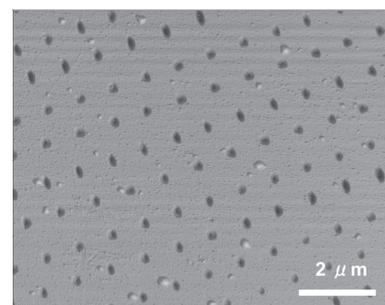


図5 塩酸溶液中フェムト秒レーザーアブレーションによるGaN表面への2次元ナノ周期構造の形成

ループが石英ガラス、Si、DLC (ダイヤモンド様カーボン) 薄膜、BaF₂、CaF₂、金属等多様な材料に周期的ナノリップル構造を形成できることを確認している。このような固体表面への周期的ナノリップル構造形成技術は、しゅう動部の摩擦低減、塑性加工特性の向上、微小物体の凝着力低減、薄膜の密着性向上、細胞の配向、濡れ性向上、無反射面の形成など広範囲な応用が期待されている。キャノンマシナリー(株)では、ナノリップル構造形成を行うフェムト秒レーザー表面改質装置を既に製造、販売している³⁶⁾。

一方、SF₆ガス雰囲気中でフェムト秒レーザーをSi基板表面に照射すると、図6 (a) に示すようなマイクロ～ナノスケールの周期的なピラー構造を形成することができる³⁷⁾。その後アルキルシランの単分子層でナノ構造化表面を被覆すると、図6 (b) に示すような超疎水表面が実現される。特に水よりも親水度の高いヘキサデカンでさえも、超疎水表面を実現できることは興味深い。このような表面は自浄作用がある。例えば超疎水表面を持つ建築資材で建物を建造できれば、常に外壁をきれいな状態に保つことができ清掃の必要がなくなる。

8 ビーム整形技術

特に最近研究が盛んになっているのがビーム整形技術である。ビーム整形技術には、空間的整形と時間的整形の2種類がある。

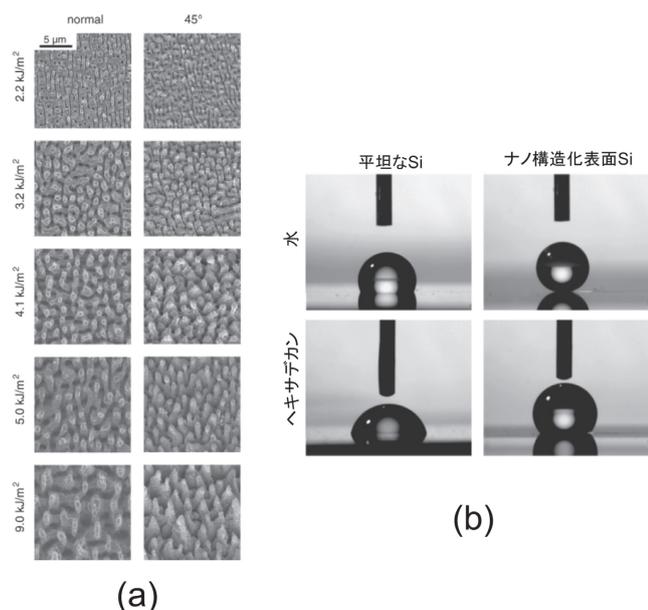


図6 (a) SF₆ガス雰囲気中でのフェムト秒レーザー光照射によってSi基板表面に形成されたマイクロ～ナノスケールの周期的ピラー構造
(b) ナノ構造化表面をアルキルシランの単分子層で被覆することにより得られた超疎水表面

空間的整形とはレーザービームの空間強度分布を制御することを意味する。超短パルスレーザーの空間的整形に最近よく用いられるのは、空間位相変調器 (SLM) である。SLMを用いると、パターン投影加工や多点一括加工を容易に実行することができ、加工の効率化を計ることができる³⁸⁾。

一方、ガラスの内部加工においては、レーザー光をレンズで集光した時の集光径とレイリー長が一致しないため、加工領域の断面形状が常にレーザー光進行方向に伸びた楕円形状になるといった問題点がある。これを解決するために、2枚組のシリンドリカルレンズ³⁹⁾、あるいは幅数百マイクロンのスリット⁴⁰⁾を用いてレーザー光を細い矩形に整形し、レンズに入射する手法が開発された。これにより断面形状が真円に近い光導波路やマイクロ流体チャンネルが作製されている。この手法は簡便であるが、レーザー光の走査方向が整形を行ったビームの長尺方向にのみ制限されるため、レーザー光の走査方向を変える場合、シリンドリカルレンズあるいはスリットの向きを走査方向に合わせてその都度調整する必要がある。この問題点を解決する手法として、最近フェムト秒レーザーの時空間ビーム整形技術が提案された⁴¹⁾。図7に、フェムト秒レーザー時空間整形ビームを用いた透明材料内部加工装置の概略図を示す。時空間ビーム整形を行うには、まずフェムト秒レーザー光の周波数成分を2枚組のグレーティングにより空間的に分散し、対物レンズに入射する。対物レンズ入口では各周波数成分は空間的に重なり合っていないので、パルス幅は長くなる。分散された各周波数成分は対物レンズによって集光され集光点で重なり合うため、集光点で最短のパルス幅が実現される。なぜなら超短パルスは、異なる周波数の発振線の位相をそろえ (モードロック)、空間的に重ね合わせた場合に発生するからである。その結果、集光点で空間的にも時間的にも最大のピーク強度が得られる。一方、光軸方向において集光点からずれてくると、急速にパルス幅が長くなるためピーク強度も急速に減少する。図8に、本手法を用いてガラス内部にマイクロチャンネルを作製した結果を示す。対物レンズへの

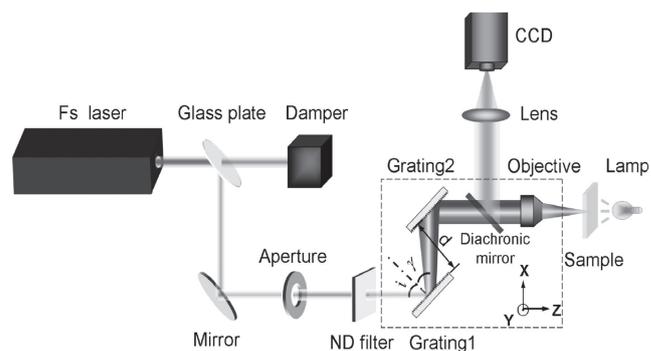


図7 フェムト秒レーザー時空間整形ビームを用いた透明材料内部加工装置の概略図

入射径を調整し、適当なレーザー出力で照射すると、x、yいずれの方向に走査してもほぼ円形の断面形状が得られている(図8(c)、(g))。

時間的整形とはパルス波形整形を意味する。フェムト秒レーザーパルス整形における最初の実験として、ダブルあるいはトリプルパルス照射(パルス間隔0.3ps)によってクラックの発生のないCaF₂の高品質アブレーション加工が報告されている⁴²⁾。図9に、シングルパルス照射とトリプルパルス照射によってアブレーションされたCaF₂の電子顕微鏡像を示す。トリプルパルス照射により明らかに加工品質が改善されている。さらに、一つのフェムト秒レーザー光を隣接した複数のパルス列に整形して石英ガラスに照射すると、照射径が1μm程度にもかかわらず直径100nm程度の加工痕が得られ

ることが示された⁴³⁾。石英ガラスなどの誘電体にフェムト秒レーザー光を照射すると、まず多光子吸収あるいはトンネルイオン化により自由電子が生成される。生成された自由電子はさらなるフェムト秒レーザーの光子を吸収しさらに上準位(真空準位)に励起されイオン化されるか、あるいは生成された自由電子がフェムト秒レーザーの強い電界によって加速され周囲の原子に衝突することによって2次電子(アバランシェ電離)が生成される。フェムト秒レーザー加工においては、これら複数の過程を経て加工へと進展すると考えられている。それぞれの過程は数百フェムトから数ピコ秒のオーダーで起こるといわれており、ダブル、トリプルパルス照射あるいはパルス列照射によってそれぞれの過程をある程度独立して制御することにより、優れた加工結果が得られたのではないかと推察される。

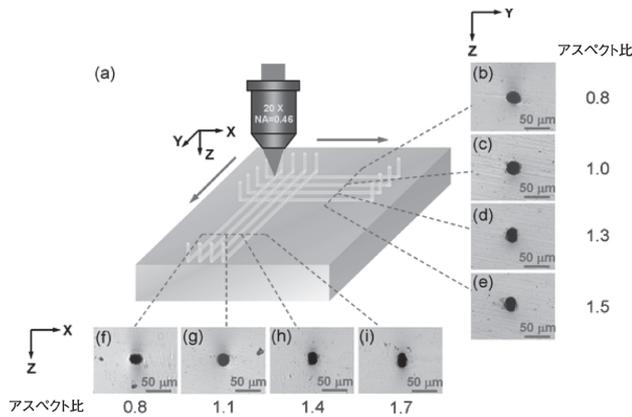


図8 (a) 時空間ビーム整形を用いた石英ガラス内部へのマイクロ流体チャンネル作製模式図
(b)~(i) 作製されたマイクロチャンネルの断面形状を光学顕微鏡で観察した結果
(b)~(e) : x軸方向に走査
(f)~(i) : y軸方向に走査
(b)、(f) : 入射ビーム径2mm、レーザー平均出力4mW
(c)、(g) : 3mm、3.5mW
(d)、(h) : 4mm、2mW
(e)、(i) : 5mm、2mW

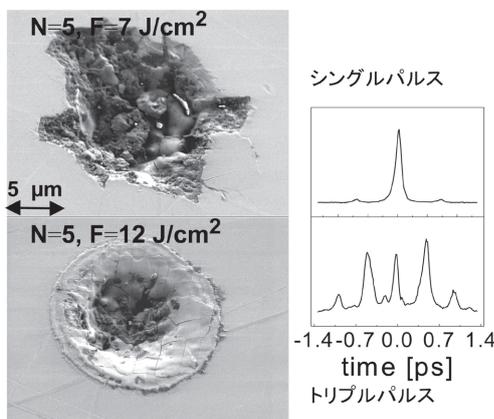


図9 フェムト秒レーザーのシングルパルス(上)およびトリプルパルス(下)照射によるCaF₂のアブレーション加工

9 産業応用

超短パルスレーザー加工の研究が始まって既に二十数年が経過し、今日では産業応用への検討もなされている。レチクルといわれる深紫外リソグラフィ用フォトマスク(石英基板にCrのパターンが施されたマスク)のリペアが、半導体デバイス製造業において最初のフェムト秒レーザー加工の応用である。これはフォトマスクの黒欠陥である余分なCr薄膜をフェムト秒レーザーアブレーションにより除去するものであるが、「6.ナノ加工」で述べたフェムト秒レーザー加工における超解像度の特長を利用して、80nm程度の解像度をもつリペアを実現している⁴⁴⁻⁴⁵⁾。本技術は、米国ヴァージニア州バーリントンにあるIBMマスク製造部門において実用化されている。

大量生産における最初の実用例は、ピコ秒レーザーによるインクジェットノズルの穴あけである。パナソニックUSAでは、ピコ秒レーザーとPC制御のガルバノミラーを用いて、高再現性、高精度、かつ高速にステンレス鋼に穴をあけることに成功している⁴⁶⁾。

一方ドイツでは、ピコ秒レーザーを自動車部品の製造に応用している。図10(a)に自動車の排ガスセンサの作製にピコ秒レーザートリミングが、(b)にディーゼルエンジンインジェクタ作製にピコ秒レーザーマイクロ加工が応用された例を示す⁴⁷⁾。また欧州では、近年ピコ秒レーザーによる太陽電池のスクライビングならびにパターニングの研究も精力的に行われている⁴⁸⁾。

10 まとめ

1980年代後半に、Srinivasan等やKüper等により初めてフェムト秒レーザーアブレーションに関する報告がなされて以

来、年々超短パルスレーザー加工の研究は活発になっている。その間多様なプロセスが開発されることにより応用分野も広がってきた。今日超短パルスレーザー加工はレーザー加工分野において最も活況な研究・開発分野であり、実用化もされつつある。本稿では超短パルスレーザー加工におけるこれまでの進展と主な研究のいくつかを紹介したが、数ある超短パルスレーザー加工に関する研究の全てを網羅するわけにはいかず、重要なものも多数漏れていることをお詫びする。

超短パルスレーザー加工がこれほど盛んに研究されるようになったのは、従来のレーザー加工にはない超短パルスレーザー加工特有の優れた特長によるところが大きいのはいうまでもない。さらには、超短パルスレーザー自体の性能向上も重要な要因の一つである。初期においてはエキシマレーザーをフェムト秒パルスにしたものが用いられたが、1990年代に入りチタンサファイアレーザーの出現がフェムト秒レーザー加工の研究を加速した。今日ではファイバレーザーやYb:YAGも超短パルスレーザーの媒質として広く使われている。価格も以前に比べてから比較的安くなり、高出力で高安定性のものが提供されている。また超短パルスレーザーの内部のことをよく知らなくてもスイッチ一つで容易に発振できるようになっており、確実にユーザの拡大に寄与している。一方産業応用においては、現時点ではフェムト秒レーザーは高出力性、安定性、信頼性の点から未だ開発の余地が残されており、多くの場合ピコ秒レーザーが優勢である。実際産業用ピコ秒レーザーも既に数社から販売されている。今後フェムト秒レーザーも含め超短パルスレーザーの性能はますます向上することが予想され、基礎研究だけでなく産業にも広く利用されることが期待される。

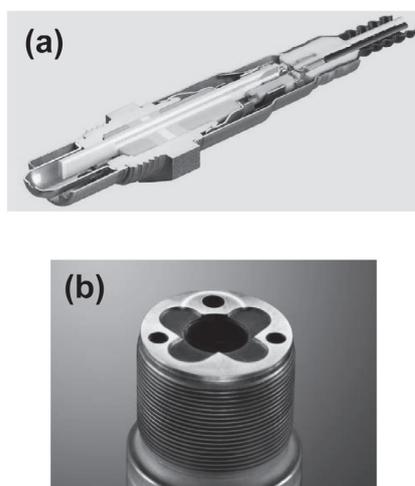


図10 超短パルスレーザーの自動車部品作製への応用
 (a)自動車の排ガスセンサのピコ秒レーザートリミング
 (b)ディーゼルエンジンインジェクタのピコ秒レーザーマイクロ加工

参考文献

- 1) C.Momma , B.N.Chichkov, S.Nolte, F.Alvensleben, A.Tünnermann, H.Welling and B.Wellegehausen : Opt. Commun., 129 (1996) , 134.
- 2) K.M.Davis, K.Miura, N.Sugimoto and K.Hirao : Opt. Lett., 21 (1996) , 1729.
- 3) R.Srinivasan, E.Sutcliffe and B.Braren : Appl.Phys.Lett., 51 (1987) , 1285.
- 4) S.Küper and M.Stuke : Appl.Phys., B44 (1987) , 199.
- 5) S.Küper and M.Stuke : Appl.Phys.Lett., 54 (1989) , 4.
- 6) 平尾一之：応用物理, 67 (1998) , 950.
- 7) K.Miura, J.Qiu, H.Inoue, T.Mitsuyu, and K.Hirao : Appl. Phys.Lett., 71 (1997) , 3329.
- 8) K.Yamada, W.Watanabe, T.Toma, K.Itoh and J.Nishii : Opt.Lett.26 (2001) , 19.
- 9) M.Will, S.Nolte, B.N.Chichkov and A.Tünnermann : Appl.Opt.41 (2002) , 4360.
- 10) G.Cerullo, R.Osellame, S.Taccheo, M.Marangoni, D Polli., R.Ramponi, P.Laporta and S.De Silvestri : Opt. Lett.27 (2002) , 1938.
- 11) W.Watanabe, T.Asano, K.Yamada, K.Itoh and J.Nishii : Opt.Lett., 28 (2003) , 2491.
- 12) L.Sudrie and K.A.Winick : J.Lightwave Technol., 21 (2003) , 246.
- 13) E.Bricchi, J.D.Mills, P.G.Kazamsky, B.G.Klappauf and J.J.Baum-berg : Opt.Lett., 27 (2002) , 2200.
- 14) G.D.Valle, S.Taccheo, R.Osellame, A.Festa, G.Cerullo and P.Laporta : Opt.Exp., 84 (2007) , 3190.
- 15) A.Marcinkevicius, S.Juodkazis, M.Watanabe, M.Miwa, S.Matsuo and H.Misawa : Opt.Lett., 26 (2001) , 277.
- 16) K.Sugioka, Y.Cheng and K.Midorikawa : Appl.Phys., A81 (2005) , 1.
- 17) R.Osellame, V.Maselli, R.M.Vazquez, R.Ramponi and G.Cerullo : Appl.Phys.Lett., 90 (2007) , 231118.
- 18) Z.Wang, K.Sugioka and K.Midorikawa : Appl.Phys., A93 (2008) , 225.
- 19) R.Vazquez, R.Osellame, D.Nolli, C.Dongre, H.Vlekkert, R.Ramponi, M.Pollnaub and G.Cerullo : Lab.Chip, 9 (2009) , 91.
- 20) Y.Hanada, K.Sugioka, H.Kawano, I.S.Ishikawa, A.Miyawaki and K.Midorikawa, Biomed.Microdevices, 10 (2008) , 403.
- 21) T. Tamaki, W. Watanabe, J. Nishii and K. Itho : Jpn J. Appl. Phys., 44 (2005) , L687.
- 22) I.Miyamoto, A.Horn, J.Gottmann, D.Wortmann and F.Yoshino : J.Laser Micro/Nanoeng., 2 (2007) , 57.

- 23) S.Kawata, H.B.Sun, T.Tanaka and K.Takada : Nature, 412 (2001) , 697.
- 24) B.H.Cumpston, S.P.Ananthavel, S.Barlow, D.L.Dyer, J.E.Ehrlich, L.L.Erskine, A.A.Heikal, S.M.Kuebler, I.-Y. S.Lee, D.McCord-Maughon, J.H.Qin, Röckel, M.Rumi, X-L.Wu, S.R.Marder and J.W.Perry : Nature, 398 (1999) , 51.
- 25) S.Maruo, K.Ikuta and H.Korogi : J.MEMS, 12 (2003) , 533.
- 26) S.Maruo, K.Ikuta, and H.Korogi : Appl.Phys.Lett., 82 (2003) , 133.
- 27) J.Wang, Y.He, H.Xia, L-G.Niu, R.Zhang, Q-D.Chen, Y-L. Zhang, Y-F.Li, S-J.Zeng, J-H.Qin, B-C.Lin and H-B.Sun : Lab.Chip, 10 (2010) , 1993.
- 28) M.Farsari and B.Chichkov : Nature Photonics, 3 (2009) , 450.
- 29) Y.Nakata, T.Okada and M.Maeda : Jpn.J.Appl.Phys., 42 (2003) , L1452.
- 30) S.Nakashima, K.Sugioka and K.Midorikawa : J.Laser Micro/Nanoeng., 5 (2010) , 21.
- 31) A.Chimmalgi, T.Y.Choi, C.P.Grigoropoulos and K.Komvopoulos : Appl.Phys.Lett., 82, (2003) , 1146.
- 32) Y.Lin, M.H.Hong, W.J.Wang, Y.Z.Law and T.C.Chong : Proc.SPIE, 5662 (2004) , 77.
- 33) Z.B.Wang, M.H.Hong, L.Yin and T.C.Chong : Proc.SPIE, 5662 (2004) , 215.
- 34) P.A.Atanasov, H.Takada, N.N.Nedyalkov and M.Obara : Appl.Surf.Sci., 253 (2007) , 8304.
- 35) 例えばJ.Reif, F.Costache, S.Eckert, S.Kouteva-Arguirova, M.Bestehorn, I.Georgescu, A.Semerok, P.Martin, O.Gobret and W.Seifert : SPIE, 5662 (2004) , 737.
- 36) <http://www.canon-machinery.co.jp/new-business/SUB2/surfbeat/sub.htm>
- 37) T.Baldacchini, J.E.Carey, M.Zhou and E.Mazur : Langmuir, 22 (2006) , 4917.
- 38) H.Takahashi, S.Hasegawa, A.Takita and Y.Hayasaki : Opt.Exp., 16 (2008) , 16592.
- 39) G.Cerullo, R.Osellame, S.Taccheo, M.Marangoni, D.Polli, R.Ramponi, P.Laporta and S.D.Silvestri : Opt.Lett., 27 (2002) , 1938.
- 40) Y.Cheng, K.Sugioka, K.Midorikawa, M.Masuda, K.Toyoda, M.Kawachi, and K.Shihoyama : Opt.Lett., 28 (2003) , 55.
- 41) F.He, H.Xu, Y.Cheng, J.Ni, H.Xiong, Z.Xu, K.Sugioka and K.Midorikawa : Opt Lett., 35 (2010) , 1106.
- 42) R.Stoian, M.Boyle, A.Thoss, A.Rosenfeld, G.Korn, I.V.Hertel and E.E.B.Campbel : Appl.Phys.Lett., 80 (2002) , 353.
- 43) L.Englert, B.Rethfeld, L.Haag, W.Wollenhaupt, C.Sarpe-Tudoran and T.Baumert : Opt.Exp., 15 (2007) , 17855.
- 44) R.Haight, D.Hayden, P.Longo, T.E.Neary and A.Wagner : Proc.SPIE, 3546 (1998) , 477.
- 45) R.Haight, D.Hayden, P.Longo, T.E.Neary and A.Wagner : J.Vac.Sci.Technol., B17 (1999) , 3137.
- 46) C.H.Chen and X.B.Liu : Proc. of ICALEO 2005 (Laser Institute of America) , M401.
- 47) T.H.Bauer and J.König : Technical Digest of LPM, 2010 (2010) , 127.
- 48) H.J.Booth : Technical Digest of LPM, 2010 (2010) , 45.

(2011年1月24日受付)