



特 集

## 先端的光加工分野の現状紹介

大阪大学 e-square 特任助教  
郵 次 敦 氏

### ●はじめに

大阪大学サイエンス・テクノロジー・アントレナーシップ・ラボラトリー (e-square) の郵次です。今回は先端的光加工分野について紹介したいと思います。まずは簡単に光加工の歴史を振り返り、次に最近の光加工の現状について紹介します。最後に、現在大阪大学で行なわれている「EDGEプログラム」と「光加工プロジェクト」について紹介したいと思います。

### ●今年は「国際光年」

2015年はどんな年かご存知でしょうか。ユネスコが2015年は「国際光年」として宣言しました。なぜ2015年かというと、今年からちょうど1000、200、150、100、50年前に、それぞれ光にまつわる、革新的な出来事が起きた年であるためです。例えば1000年前の西暦1015年、当時はイスラム科学がヨーロッパよりも進んでいた時代でしたが、アラビア人のアルハザンが光学について研究した「光学の書」を出版しています。200年前の1815年には、フレネルが光の波動性を発表しました。さらに150年前の1865年には、マックスウェルが有名なマックスウェル方程式（電磁波理論）を発表、100年前の1915年にアインシュタインが一般相対性理論を発表しました。これは重力と光の関係を明らかにしたものです。50年前の1965年には、宇宙マイクロ背景放射の発見がありました。これはビッグバン理論を裏付ける発見です。また、今日の生活に欠かせない、光ファイバーの実用化に関する研究成果も、この年に発表されています。このように、光にまつわる重要な年から、きりのよい年に当たるのが2015年ということになります。

「国際光年」を契機として、光という視点で、より良い社会をめざすということを、ユネスコでは提唱しています。なぜ光なのか。光の科学と応用による革命的な技術を創出することで、世界の人々の生

活の質が向上していくと考えられます。光技術は21世紀をけん引する重要な技術であると考えられるので、2015年を「国際光年」として宣言したわけです。この宣言にあわせて、世界中で光にまつわるイベントが開催されています。例えば2015年2月にはドイツ、シュツットガルトにおいてシンポジウム「Light for the future」が開催されました。このシンポジウムでは、政府関係者や企業および大学の研究者、大学院生らが集まり、光を使ってどのような未来を創造していくか、というテーマについて、講演や議論が行なわれました。

このように、世界でも光にまつわる研究や技術に対して、過去にもまして関心が高まっています。光による加工も、未来の世界の創造に向けた、重要な技術として、大変注目を集めています。

### ●簡単な歴史とこの数年の傾向

レーザーが出現してからの簡単な歴史と、ここ数年の傾向について紹介します。1960年にマイマンがルビーレーザーを開発しました。CO<sub>2</sub>レーザー、YAGレーザー、エキシマレーザーなども60年代に開発されました。その後、レーザーを加工に利用す



講師 郵次 敦 氏

ることが1980年代から本格的に始まりました。それまで機械で行なわれていた切断加工や穴あけ加工を、レーザーで行い始めたのがこの時代にあたります。また金属表面の改質、溶接などにおけるレーザー利用もこの時代から始まっています。1990年代以降に性能が向上した超短光パルスレーザーによって、新たな加工が広まり始めました。最近では特に超短光パルスレーザーの利用が進み、透明材質の内部加工や超微細加工、表面改質、非熱加工などが可能になってきました。今日では、肉厚な金属等の切断や接合といった比較的大きなものの加工に対してはCO<sub>2</sub>、YAG、エキシマレーザー等が、微細加工には超短光パルスレーザーといったように、用途にあわせて様々なレーザーが用いられています。

アメリカの例ですが、レーザーの利用分野の中で最も多いのが、コミュニケーション分野です。これは光通信の分野で多く使われており、全体の利用分野の内32%を占めています。加工（マテリアル・プロセッシング）や医療（メディカル）、センサーなどはそれぞれ、全体の28、8、7%を占めています。産業用レーザーの需要予測（2013年～2015年）によると、最も伸びているのがファイバーレーザーであり、需要の伸びは年間で10%を上回るとされています。これは、ファイバーレーザーが、取り扱いが簡単であり、安価でしかも高性能であることが理由として考えられます。フェムト秒固体レーザーとフェムト秒ファイバーレーザーを比較すると、出力が同程度の場合、ファイバーレーザーは固体レーザーの3分の1の価格で、使用寿命は2倍以上となります。またファイバーレーザーは調整がほとんど不要であるため、サービス、メンテナンス料が少なく済むという特徴があります。

2000年代初めに高出力ファイバーレーザーが商品化されました。その後にアメリカを中心に、例えばアリゾナ大学、サウサンプトン大学などの研究室発のベンチャー企業が、ファイバーレーザーのメーカーとして市場に乗り出しています。ファイバーレーザーの研究開発は大学レベルでも続いており、ドイツではフラウンホーファー研究機構に代表されるような、産学連携での研究活動も進んでおり、今後さらにファイバーレーザーの発展が見込まれます。加工に使用される代表的なレーザーに用いられているレーザー媒質は、CO<sub>2</sub>、YAG、エキシマ、チタン

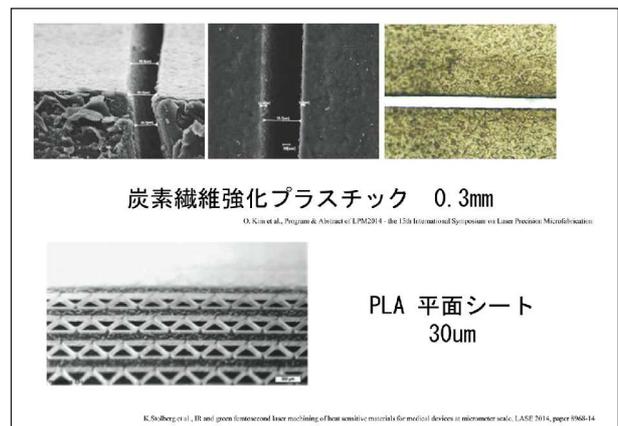
サファイア、Yb ドープ光ファイバーなどがあります。チタンサファイアやYb ドープ光ファイバーレーザーは超短光パルス、つまりピコ秒やフェムト秒のパルス幅で、発振します。今回はこれら主に超短光パルスレーザーによる、材料や加工の現状について紹介したいと思います。

典型的なフェムト秒レーザーは波長が1 μm、パルスエネルギーは1 mJパルス幅は0.1 psです。一つのパルスあたりのエネルギーが非常に高いことから、多光子吸収や非線形屈折率変化などの非線形光学現象を生じさせることができます。このような非線形光学効果を利用するという点が、フェムト秒パルスレーザーを用いた加工を行なう上で大きな特徴です。

### ●光加工の分野（加工）

光加工について、加工分野と製造分野に分けて紹介します。加工では、切断、穴あけ加工、接合、表面加工、内部加工に分類しました。レーザーによる切断加工は、試料を動かしたり、レーザーを走査したりして対象となる物質を切断します。特徴的なところは非接触であるという点です。材質に応じて、パルスのエネルギーや繰返し周期などを変えることで適切な加工を行ないます。フェムト秒パルスレーザーの場合、非常に短い時間のみ照射されるため熱の影響が少なく、光が吸収された層のみを飛散させるという加工ができます。加工する対象としては、ガラス、サファイア板、生分解性物質、炭素強化プラスチック、そして金属などがあります。

切断加工が難しい材料の例として、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）、ポリ乳酸樹脂（PLA樹脂）



の加工について紹介します。超短光パルスレーザーではCFRPを毛羽立たせることなく、スムーズな切り口の切断が可能です。PLA樹脂は生分解性プラスチックであり、シート状のものを加工することで、医療用カテーテルなどへの応用が期待されています。フェムト秒レーザーでは、幅30 μm程度の穴をあけるなどの微細加工が可能です。また化学強化ガラスや、1mm厚のソーダ石灰ガラスも、断面を滑らかに切断できることが報告されています。スマートフォンのガラストップや、液晶の窓に用いられる、硬度の高いサファイア板もレーザーによって自在に切る技術が報告されています。

穴あけ加工も、切断加工と同様な材料に対して行なうことが可能です。ステンレスや酸化アルミニウム、さらにソーダ石灰ガラスのようなもろいガラスであっても、断面が非常に滑らかな加工が可能となっています。穴あけ加工の中で、最近とくに注目されているのが、ガソリンエンジンの燃料噴射口の加工です。エンジン内に噴射する燃料の形状や速度の制御のためには、噴射口を高い精度で加工する必要があります。燃費問題や排気ガス規制問題を背景とした、ヨーロッパやアメリカでの法規制をクリアするために発展してきたのが、穴あけ加工技術の歴史であるとも言えます。

超短光パルスレーザーによる接合では、非線形効果を利用した技術が開発されています。同種または異なる材質のものを上下にかさね、接触している面にレーザーを集光することで接合することができます。ただし上に重ねた材料はレーザー光が透過する材質です。透明材質中の非線形効果によりフィラメント領域を発生させることで、局所的な領域で、材料の熔融と固着というメカニズムで接合ができます。接合が起きる領域はレーザーの集光径程度であるため、レーザーが照射されていない領域では、ほとんど温度に変化が無いことも特徴です。このため、液晶ディスプレイや太陽電池、さらにLEDやMEMSなど、高温に弱く繊細な素子の気密封止を可能にする技術として注目されています。また熱膨張率が異なる物質同士、例えば銅とガラスや、ホウケイ酸ガラスとアルミナの接合技術が開発されています。異なる種類のガラス同士を接合することも可能で、ソーダ石灰ガラスとノンアルカリガラスを接合し、その中に太陽電池を入れて気密封止ができることも実



証されています。熔融石英とシリコンの基盤や光ファイバーの先端と接合することで、光学的な機能を持たせたデバイスも提案されています。

表面加工は大きく分けて3つの方法で行われています。1つ目は、レーザーを基板表面上に素早く走査することでテクスチャーを描いていく方法です。2つ目は、自己組織化による周期構造の作製です。これは超短光パルスレーザーを当てた所に、自発的に周期構造ができる性質を利用するものです。3つ目は、レーザーを用いて作る干渉縞の周期構造を利用するものです。表面加工によって次のような機能性を持たせることができます。すなわち、超撥水性や超親水性、吸着性、化学反応性、電気的特性、摩擦特性などが挙げられます。さらに生体適合性、例えば抗体の付着のしやすさを制御することができます。

表面加工の事例として次のものを紹介します。1つ目は高速レーザー走査によって、スイスの山岳地形の地図のような複雑な形状のものを高速度で描く技術、2つ目は金属表面上にクレーターや突起のような形状をつくることで摩擦係数を変化させるという報告、3つ目は表面加工による回折格子や、光ファイバーの先端を加工してカンチレバーの作製技術です。

内部加工は、レーザーが透過するガラスやポリマーなどの内部に微細加工を行なう技術です。多光子吸収やフィラメンテーションを利用して、加工を行っています。加工した部分では屈折率が変化するため光学的な機能を持った集積デバイスや、光導波路や光結合器などを作ることが提案されています。

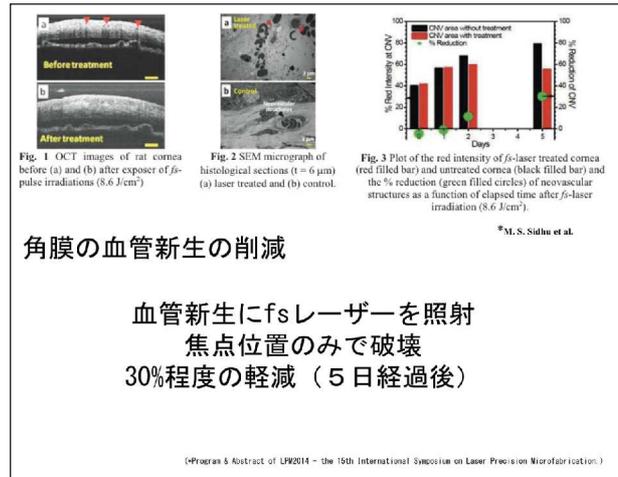
●光加工の分野（製造）

次に製造に関する分野について説明します。超短光パルスレーザーによる微粒子やナノ粒子の作製、重合反応や結晶化のコントロール、そしてバイオ分野や医療分野への応用について紹介します。

ナノ粒子や微粒子を作製する方法として、液体中のバルク素材にレーザーを当て、アブレーションによるものが提案されています。これらの粒子はセンサーや光スイッチ、発光素子などへの利用が検討されています。液体中で作製することの利点は、最終生成物が液中に分散するので回収が容易ということ、また化学的製造法に比べて直接的であり、人工物の後処理なども不要だということ注目されています。

ZnO (Zinc Oxide) のナノ粒子は、紫外のLED や紫外のレーザーダイオードをつくる物質の候補として研究が進んでいます。シリコンはナノサイズにしていくと、発光体として機能することが知られています。さらに生体物質との結合性がよく、しかも毒性が小さいのでイメージングのラベル粒子として有力視されています。また、放射性同位体自体をナノ粒子にして、それを生体内に入れてイメージングに利用するということが検討されています。金と鉄の両方の性質をあわせ持つ、合金ナノ粒子を作製し、磁気共鳴イメージング、X線トモグラフィー、ラマンイメージングなどに使うことが検討されています。その他には、金属単体、酸化チタン、セラミック、半導体 (CdSe, CdS)、などのレーザーによるナノ粒子作製の研究も進んでいます。

光による重合反応を利用した加工には、次のようなものがあります。光感受性ポリマーをレーザーで重合反応させることによって、三次元微細構造やレ



角膜の血管新生の削減

血管新生にfsレーザーを照射  
焦点位置のみで破壊  
30%程度の軽減（5日経過後）

(Program & Abstract of LP2014 - the 15th International Symposium on Laser Precision Microfabrication.)

ンズといった光学素子をつくることができます。この技術を用いて細胞外マトリックス、すなわち細胞の外にある構造をまねた組織をレーザー重合反応で作り、それを用いて擬似的に細胞の動きや性質を調べようという研究がなされています。また流路や光学的な素子が一体化した光流体デバイスや、干渉縞のパターンを利用したマイクロレンズアレーの作製の研究も進められています。

フェムト秒レーザーを物質に当てることで、物質内部が結晶化するという現象も注目されています。この現象を応用して、物質内に何らかの機能を持たせ、光集積デバイスのようなものに使えるのではないかと考えられています。例えば特殊なガラス (25La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>25B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>50GeO<sub>2</sub> ガラス) の中に強誘電体結晶の LaBGeO<sub>5</sub> を、レーザーを照射した位置にのみ、特異的に発生させることが可能であると報告されています。このことから、レーザーを照射した部分のみ光学的な性質が変わった、機能性をもつ材料をつくることができると期待されています。

次にバイオや医療応用についてです。生体物質や組織にレーザーを照射し、組織の切除や破壊して行なう外科的治療に加えて、その他の加工技術や、微粒子、ナノ粒子の作成技術が複合的に応用される領域と考えられています。外科的手術の例として、角膜の血管新生の抑制の研究を紹介します。目の角膜上の血管新生に対して、フェムト秒レーザーを当てることで破壊すると、治療後の血管新生が抑制されることが報告されています。レーザーの集光位置でのみ破壊が起きるため他の部分には影響がなく、その他の外科手術においても超短光パルスレーザーの

ナノ粒子の素材

- ・ZnO
- ・UV-LED, UV-LDの候補
- ・Si
- ・ナノラベル、イメージング
- ・生体結合性、毒性小
- ・I-123
- ・医療用放射性同位体
- ・イメージング
- ・Au-Fe 合金
- ・磁気共鳴イメージング
- ・X線トモグラフィー
- ・ラマンイメージング
- ・Ag-Cu, Ag-Au
- ・Au, Ag, Pt, Co, Ni, W, Mo
- ・TiO<sub>2</sub>
- ・セラミック
- ・半導体 (CdSe, CdS)

使用は、有用ではないかと考えられています。

これまでの話を簡単にまとめてみます。超短光パルスレーザーを用いた光加工は、高付加価値部材の加工方法としてすでに実用化されているものもあれば、発展途上の技術もあります。また加工プロセスについては、その物理的な現象の解明を目指すべく、研究が行なわれているものもあります。超短光パルスレーザーを用いた新物質製造については、微粒子、ナノ粒子の製造など、実用化されているものもありますが、今なお新規機能を有する材料の開発や、応用の研究が進んでいます。光加工にせよ新物質加工にせよ今後の発展が期待される分野だと考えられます。

### ● EDGE プログラム

ここで大阪大学 EDGE プログラムについて紹介します。EDGE プログラムとは文部科学省が実施している、「日本におけるイノベーション創出の活性化のために、大学等の研究開発成果を基にしたベンチャーの創業や、既存企業による新事業の創出を促進する人材の育成と関係者・関係機関によるイノベーション・エコシステムの形成を目的」[\*]とし

たプログラムです。大阪大学はこのプログラムに参加しており、e-square はその活動拠点でもあります。私は「光加工プロジェクト」として EDGE プログラムに参加しており、「事業志向研究デザイン」を考えています。「事業志向研究デザイン」とは、社会的なニーズを発見し、それに対する解決策を提案するだけでなく、解決したことでどのようなメリットがあるのか、その解決策が他の物と比べて、なぜ良いのかといった視点から研究をデザインしていくというものです。光加工の分野において、超短光パルスを使った加工や製造技術がどのような社会的ニーズを満足させ、あるいは社会的な問題を解決するために今後何を開発しなければならないのかについて「光加工プロジェクト」では考えています。このプロジェクトを進めるためには、大学内で課題解決型の研究を進めるチーム以外に、産官学の幅広い分野の方々との交流が不可欠です。「光加工プロジェクト」では、プロジェクトへの参加者、パートナーを募集していますので、興味をもたれた方は、ぜひご参加いただければと思います。

[\*]<http://edgeprogram.jp/about/> より引用

