

微細加工を実現する レーザー加工

半世紀前に発明されたレーザーは、現在さまざまな分野で応用されている。ごく狭い範囲に、高いエネルギーを集中できるレーザーは、材料加工の手段として用いられてきた。近年、高出力、短パルスのレーザーの開発が進み、従来の加工法では実現できなかった微細加工がレーザーによって可能になっている。



直径90μmのステンレス管に直径20μmの孔を貫通させることができるレーザー電解複合加工は、極細管の複雑形状を実現する加工法として、普及が期待されている。(写真提供: (独)産業技術総合研究所)

多彩な分野で応用が進むレーザー

レーザー (LASER) とは、Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (輻射の誘導放出による光増幅) の頭文字から名付けられ、その基礎となる理論は1917年に、アインシュタインの「放射の量子論について」で提示された。1953年にはマイクロ波増幅器 (メーザー) が発明され、1960年にヒューズ研究所のセオドア・メイマンによって、ルビーレーザーが発明された。20世紀の偉大な発明のひとつと評価されるレーザーは、現代の生活のさまざまな分野で利用されている。

レーザーの特徴は、指向性・干渉性・単色性に優れていることに加え、高いエネルギー密度にある。そのため、レーザーは加工手段として、マクロな加工から微細な加工にまで適用されるが、レーザーの利用はそれだけではない。

レーザーの応用分野は、軍事利用からコンサートの演出までその利用範囲は多岐にわたる。もっとも身近なレーザーの応用例としては、情報・家電分野が挙げられる。CDやDVD、ブルーレイディスクなどの読み取りや書き込み、レーザープリンターなどの光源として利用されているほか、プレゼンテーションでは、レーザーポイン

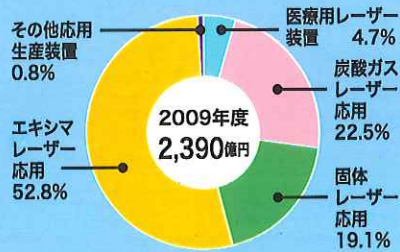
ターが使われるようになった。計測分野でもレーザーが広く利用されており、レーザー水準器は建築現場などで広く一般に利用されている。大がかりなものではアポロ宇宙船が月面に設置した反射鏡を利用して、レーザーで地球と月の距離が測定されている。その他、光ファイバーとレーザーを用いて、原子力発電所などのプラント配管の歪みを検出する研究なども行われている。

医療分野でもレーザーはなじみのある存在といえるだろう。よく知られているレーザーメスの他、眼球の水晶体がレーザーを吸収しないことを利用した眼底治療に利用されたり、レーザーを光ファイバーで誘導する内視鏡治療など、患者の負担が小さくて済むような治療を実現している。

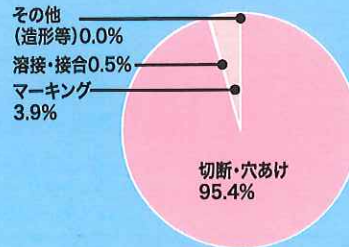
利用が拡大するレーザー加工

レーザープロセスとも呼ばれるレーザー加工は、レーザー光を細く絞って工作物に照射することにより、表面を局部的に加熱し熔融、蒸発させて加工する方法であり、穴あけ、切断や溶接などの高温のプロセスと、マーキングやガラス内部を加工する材内変質などの低温のプロセスがある。既に広く応用が進んでいる高温プロセスに

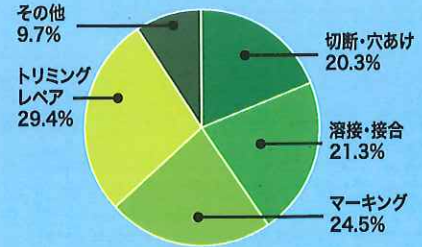
■2009年度レーザー装置生産額の分野別シェア



炭酸ガスレーザー生産装置の分野別シェア



固体レーザー応用装置の分野別シェア



(財)光産業技術振興協会「2009年度光産業国内生産額調査」より

■産業用微細プロセスレーザーの分類

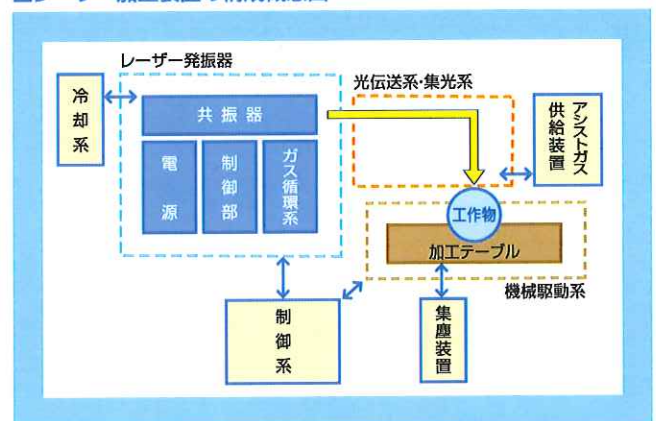
分類	波長領域	波長/nm	レーザー媒質
赤外レーザー	中赤外	10600	CO ₂ (CO ₂ +N ₂ +He)
	近赤外	1064	Nd:YAG
可視光レーザー	可視光	532	YAG第2高調波
紫外レーザー	近紫外	355	YAG第3高調波
		266	YAG第4高調波
	遠紫外	248	エキシマレーザー(KrF)
		193	エキシマレーザー(ArF)
超短パルスレーザー(ピコ秒)	近赤外	1064	Nd:YVO ₄ , YAGモードロック
超短パルスレーザー(フェムト秒)	近赤外	800	チタンサファイア

(出典:「絵とき「レーザー加工」基礎のき」新井武二、日刊工業新聞社)

■レーザー加工の種類



■レーザー加工装置の構成概念図



対して、低温プロセスは比較的新しい応用分野といえる。

レーザー加工装置の市場規模は景気による増減はあるものの、拡大傾向にある。その利用分野は、従来からの機械・金属加工分野に加えて、電子・半導体分野、自動車・鉄道分野、エンジニアリングプラスチック、樹脂などの高分子材料分野にも広がっている。生産額の分野別シェアでは、エキシマレーザーが約50%を占めているが、これはエキシマレーザーの用途の大部分が高額の半導体リソグラフィ装置に用いられているためである。加工用には炭酸ガスレーザーと固体レーザーが主に利用されている。炭酸ガスレーザーでは切断や穴あけ用途が多いことに対し、固体レーザーは溶接・接合やマーキングなど多様な分野で利用されている。この理由の一つとして、例えば溶接分野では、固体レーザーが光ファイバーで伝送可能であることが挙げられる。また、近年、固体レーザーでは、従来までのロッド(棒)状の結晶の他に、ファイバー状やディスク状の結晶を用いるファイバーレーザーやディスクレーザーなども用いられるようになってきた。

レーザー加工装置は、レーザー発振器の他にも様々な装置が組み合わされていることから、加工システムと呼ばれることもある。レーザー発振部は、レーザーを生み出す共振器、電源、制御部、冷却装置などから構成される。炭酸ガスなどのようにレーザーを発生す

る媒質がガスの場合には、ガス循環系も必要である。発振したレーザーは光伝送系・集光系を介して、工作物に到達する。加工テーブルなどの機械駆動系は、レーザーと工作物の位置を定める微細加工では、重要な部分である。さらに、これらを連携して動作させる制御系や、アシストガス供給装置や集塵装置などの補助システムが組み合わされて、全体のシステムが構成されている。

最近のレーザー加工技術はさらに応用範囲が広がり、CADデータなどを利用することで、ガラスの内部に三次元の複雑な形状を描写するレーザー工芸や、3Dプリンターともいえるレーザープロトタイプングなど、新しい利用分野も開拓されている。

微細加工へのレーザーの適用

小さな範囲に大きなエネルギーを集中できるレーザー加工は、微細加工に適した加工法である。加工するサイズがミリメートル以下のマイクロメートルオーダーである場合に、微細加工やマイクロ加工と呼ばれることが多い。半導体製造をはじめとした分野では、ナノメートルオーダーの加工も可能になっているが、レーザーを利用した微細加工は、マイクロメートルオーダーからナノオーダーをカバーするメゾ領域の加工方法として注目されている。

特に高集積化が進む半導体分野では、半導体ウエハーを切削し、チップ化するダイシング技術でレーザー加工が期待されている。半導体ウエハーに対して透過性のある波長のレーザーを半導体の内部で焦点を結ぶように集光することで、従来のブレードダイシングと比較して、より精密な切削が可能になる。また、小型化・高機能化が進む携帯電話の回路基盤の穴あけなどの分野でも、従来までの微細加工方法では対応が難しい場合が増えてきており、レーザー微細加工が用いられている。

微細加工に用いられるレーザーの波長は、紫外～赤外であり、

いっそうの短波長化、短パルス化、エネルギーの高密度化を目指して開発が行われてきた。近年、レーザー微細加工では、パルス幅がピコ秒やフェムト秒である超短パルスレーザーが主流になりつつある(詳細は連携記事を参照)。

レーザー加工と電解加工を組合せた加工機の開発

メゾ領域での微細加工への利用に期待されているレーザー加工であるが、それを具現化する手段として、極細金属管を複雑形状に加工するレーザー電解複合加工装置が開発されている。例えば、医療用のカテーテルやステントは、脳などの細い血管に挿入できるサイズの製品ニーズが高まっている。心臓外科で使用するステントの直径が数mmであるのに対し、脳外科用ステントの直径は200 μ m以下であることが求められる。また、電子回路を検査するためのコンタクトプローブでは、回路の高密度化に伴いより細いプローブが必要であり、要求されている直径は100 μ m以下である。

従来の機械加工による複雑形状加工の限界は直径300 μ m

日本のレーザー加工の経緯と鉄鋼分野への導入

1960年に発明されたレーザーは、1960年代に炭酸ガスレーザーやYAGレーザーが発明され、1970年代にはエキシマレーザーが発明された。また1970年代には、炭酸ガスレーザーの高出力化に伴って、金属やプラスチックの切断などにレーザー加工が普及していった。

1970年前後から日本でもレーザー加工についての研究が行われはじめ、1978年には国のプロジェクトとして「超高性能レーザー応用複合生産システム」の開発が進められた。このプロ

ジェクトによって、20kWクラスの大出力炭酸ガスレーザーの国産化が可能になった。1971年に初めてレーザー加工装置が輸入された10年後の1981年には、国産の金属切断用の炭酸ガスレーザー加工機が商品化されている。

鉄鋼の分野では、いち早く1980年代の始めに当時の川崎製鉄(株)がシートコイルの突き合わせ溶接にレーザー加工を導入している。シートコイルの溶接では、従来までフラッシュバット溶接やシーム溶接が用いられていた。しかし、ビード余盛を避けたい冷延鋼帯や溶接入熱を抑えたいケイ素鋼帯の溶接には、これらの溶接法は適用が難しく、また、TIG溶接では生産性に課題が

あった。これに対し炭酸ガスレーザーによる溶接は単位入熱あたりの溶込み深さが大きく、低入熱高速度溶接が可能で、溶接変形や熱影響部の結晶粒粗大化が少ないという特徴を持ち、シートコイルの溶接に適した溶接法であった。現在、製鉄所で利用されているレーザー加工の例として、シートコイルの溶接の他に、自動車用薄板の表面に凹凸をつけるダール加工などが挙げられる。

■レーザー技術の変遷

年 代	1960	1970	1980	1990	2000	2010
主要な発明	●1960 レーザーの発明 ●1961 He-Neレーザー ●1962 Nd:ガラスレーザー ●1962 半導体レーザー ●1964 炭酸ガスレーザー ●1964 YAGレーザー	●1970 エキシマレーザー				
国のプロジェクト			●1978～1983 超高性能レーザー応用複合生産システム		●1997～2002 フォトン計測・加工技術	
主な用途			表面加工 穴あけ 切断 溶接		極厚板加工 微細加工 非熱加工	

であった。これには、大きく3つの理由がある。それは①工作物と工具の相対位置の精密な制御が難しい、②加工点以外で工作物と工具が接触し、加工できない形状が存在する、③機械加工では工作物に力を加えるため、変形を抑えるために細管化に限界がある、の3つである。さらに、極細管を精度よく保持することも、極細管の複雑形状加工を行ううえで課題となっていた。

これらの課題を解決するために、開発されたのが、「レーザー電解複合加工機」である（独）産業技術総合研究所による）。レーザー加工は非接触であるために、工作物とレーザー照射位置の相対位置を検出・設定することが難しい。通常は計測用のレーザーを使用するが、その場合、計測用と加工用のレーザーの光軸を合わせる必要がある。この作業は複雑で、測定と加工の誤差要因となっていた。「レーザー電解複合加工機」では、計測用と加工用のレーザーを同一の光源とすることで、この問題を解決している。同一光源の使用は、同時に装置の小型化の実現にも大きく寄与している。さらに、レーザー電解複合加工機では、レーザー加工を施した後に、工作物を保持したままで、電解加工を行うことができる。この際、工作物の位置制御は、先にレーザーで計測した姿勢計測結果を用いるため、仕上げ加工を施す位

■レーザーによる微細加工の例



(a) ブレードダイシング



(b) ステルスダイシング
(レーザーダイシング)

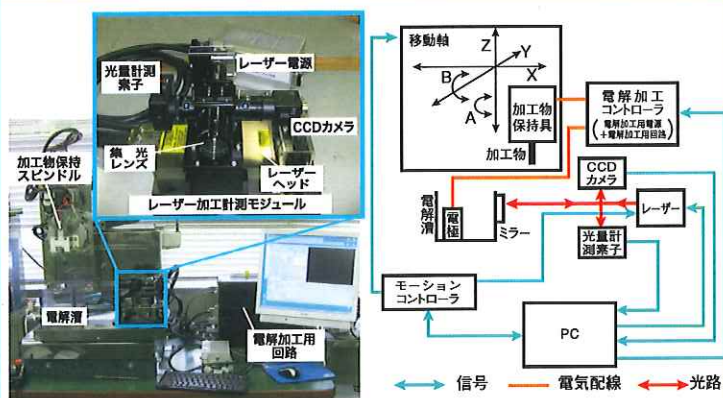
ブレードダイシング(a)と比較して、表面加工型レーザーダイシング(レーザーアブレーション)では、カーフロス(切断幅)を小さくできる。さらに、内部加工型レーザーダイシング(ステルスダイシング(b))では、このカーフロスを1μm以下にまで極小化でき、切断時に微小な欠け(チッピング)が生じず、強度を保つことができる。また、加工時に飛散物が生じないため、洗浄工程が不要、レンズの汚染がない、等の特長がある。(写真提供: 浜松ホトニクス(株))

置や加工量の高精度な制御が可能になった。

レーザー測定による高精度の位置情報と高度な保持誤差補正機能によって、微細レーザー加工(形状加工)と微細電解加工(仕上げ加工)を連続して行うことによって、加工時間の最小化・効率化が実現できる。このような複合加工機は、レーザー加

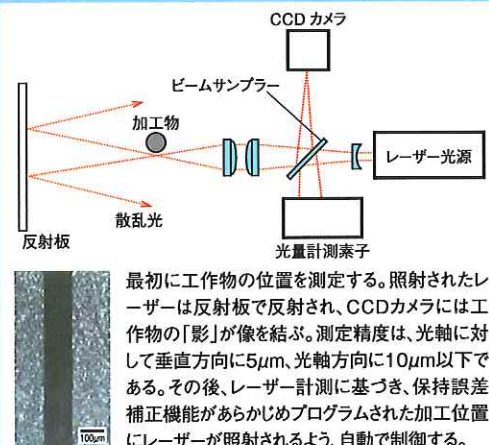
■高精度位置制御と加工の効率化を図ったレーザー電解加工機

●レーザー電解複合加工機の外観と構成図



幅1200mm × 奥行き800mm × 高さ1700mm, 重量:約200kg, 移動軸数:5

●レーザーによる計測と加工の仕組み



最初に工作物の位置を測定する。照射されたレーザーは反射板で反射され、CCDカメラには工作物の「影」が像を結ぶ。測定精度は、光軸に対して垂直方向に5μm、光軸方向に10μm以下である。その後、レーザー計測に基づき、保持誤差補正機能があらかじめプログラムされた加工位置にレーザーが照射されるよう、自動で制御する。

●レーザー電解複合加工の結果



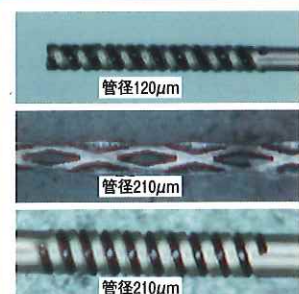
(a) φ120μmステンレス管レーザー加工後



(b) φ110μmステンレス管電解加工後

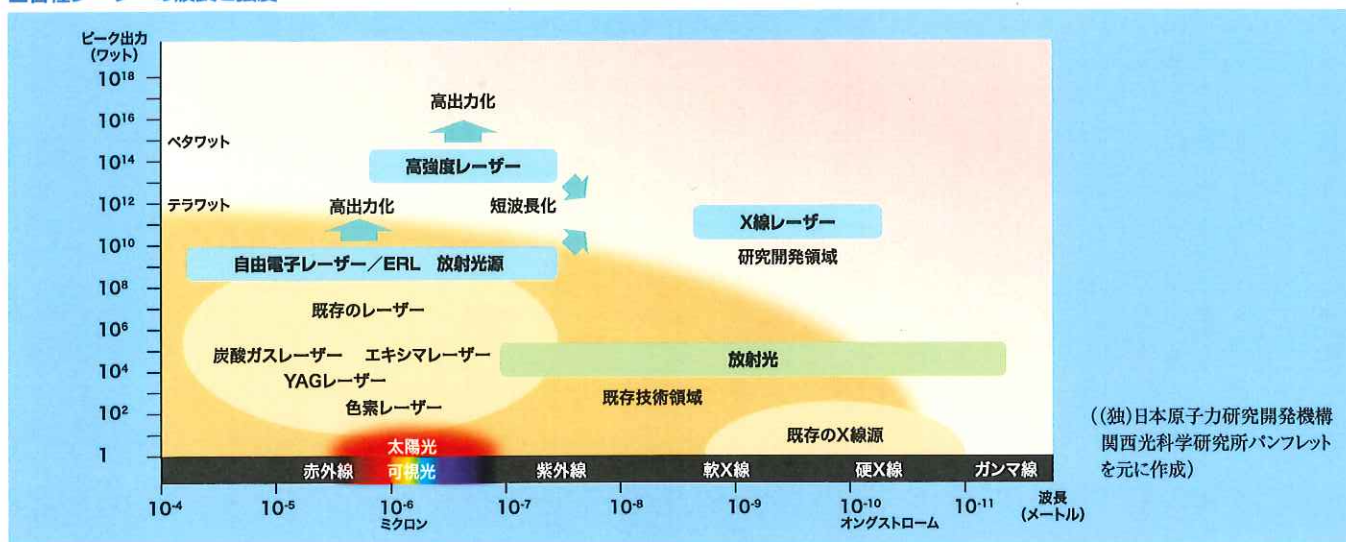
(a)はレーザー加工を施したもの。加工断面などにバリや再凝着物が認められる。
(b)は電解加工を施したもの。バリや再凝着物は認められず、平滑な表面を実現している。

●レーザー電解複合加工装置による加工例



(資料提供: (独)産業技術総合研究所)

■各種レーザーの波長と強度

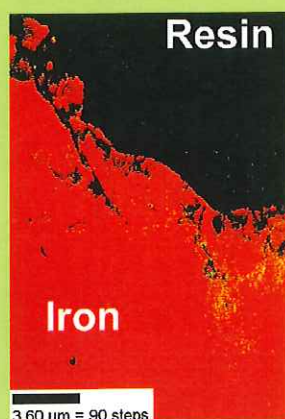


フェムト秒レーザーによる鉄の高圧相凍結

フェムト秒レーザーは、新物質(高圧相)の生成という、新しい学問領域や新しい産業分野を開拓するツールとして注目されている。

鉄の平衡状態は、低温低圧領域の α 相(bcc)、高温低圧領域の γ 相(fcc)と δ 相(bcc)、高圧領域の ϵ 相(hcp)が知られている。フェムト秒レーザーを鉄に照射することで、従来の衝撃圧縮法では実現できなかった高圧相の ϵ 相が凍結されていることが、確認されている。

フェムト秒レーザーを材料に照射すると、表面の影響を受ける領域はごく短時間だけ高温高圧状態になる。この手法は、鉄やその他の材料にも適用が可能と考えられ、高圧相の生成・研究に大きく役立つものと期待されている。



鏡面研磨した鉄表面に、アルゴン雰囲気中でフェムト秒レーザー(強度 10^{14} W/cm²)を照射した試料の断面のEBSP(電子線後方散乱回折パターン)法による分析結果。 α 相(赤色)中に ϵ 相(黄色)が点在していることが分かる。
(佐野ら「フェムト秒レーザー駆動衝撃による鉄の高圧相凍結」プラズマ・核融合学会誌 Vol.80, No.6(2004)482)

(資料提供:大阪大学大学院・佐野智一准教授)

工と電解加工の組み合わせだけでなく、機械加工、放電加工なども組み合わせることが可能で、デスクトップ複合加工機として、普及が期待される。

新たな産業を生み出すレーザー

極短パルスレーザーによる微細加工分野は、今後、大きな発展が期待される分野であるが、特に欧米を中心に医療分野でのレーザー利用にも関心が高まっている。現在わが国は、レーザー発振器など、レーザー関連機器の多くを国外メーカーからの輸入に頼っている。レーザー技術の発展を促し、国際的な競争力を高めるために、例えば文部科学省では「光・量子科学研究拠点形成に向けた基盤技術開発」プロジェクトを開始し、関東と関西にそれぞれネットワークを構築して、研究体制の強化を図り新しい光源の開発などに取り組んでいるところである。

また、レーザー発振器などデバイス面では欧米にやや後れをとっているが、それらを組み合わせた応用面では、先進的な成果を上げていることも指摘しておきたい。一例として、(独)理化学研究所・高輝度光科学研究センターに建設されたX線自由電子レーザーでは、世界最強クラスのレーザーを用いて、これまで観察することができなかった物質の反応過程が観察可能になっている。

レーザーは材料科学をはじめとして基礎科学の分野でも重要なツールであり、加工をはじめとした幅広い応用分野を持っている。さらに今後、国際的な競争力をもつ産業として育成していくためには、レーザーの応用分野まで含めた研究の裾野を拡げていくことが重要であろう。

●取材協力 (独)産業技術総合研究所、(独)理化学研究所
●文 杉山香里