

レーザー加工技術

——新たな局面を迎えるフトン応用技術——

かつてSFの世界にはレーザーを用いた
光線兵器というものがしばしば登場した。
今、レーザー技術開発の先端では、人が両手で持てるほどの
小型・大出力レーザーの実現が目指されている。
むろん、日本では工業利用を目的とした
平和的な使用が前提ではあるが、
ここでも現実の技術がSFに追いつこうとしていることに
多くの人々は驚きを禁じえないだろう。
今回は加工・計測に革命をもたらすかもしれないという
そうしたレーザー技術の最前線をのぞいてみよう。

写真：CCコンポジットを母材とするタングステン
とニッケルの傾斜組成被膜の作成実験。プラズマ
溶射にレーザーを援用している。左からのびる光
の筋がレーザー、右の棒状の先端にある円盤形状
のものが母材。光を発する2本の筒からはプラズマ
が出ている。

レーザー技術の最前線フォトン応用技術が生産・計測技術に革命をもたらす

レーザーを応用した加工や計測の技術がさまざまな形で実用化されてきているが、出力と機動性の両立が難しく、今のところなかなかレーザー・マシンを工場の外へ持ち出すことができない。この巨大なレーザー加工機を技術革新によって小型・大出力化するとともにフレキシビリティをあたえロボット・ハンドの先に取り付けて使えるようにするための先端的研究が国のプロジェクトとしてスタートした。これによってレーザー加工システムの用途が大きく広がる可能性が出てきた。同時にレーザーを応用することで可能になる高機能材料創製技術や計測技術にも大きな期待がかけられており、レーザー応用技術の新たな潮流として、新たなジャンルが生まれようとしている。光の技術から生まれる先端での成果と取組に注目してみよう。

あらゆる加工分野に浸透するレーザー応用技術

レーザーを使った加工・計測技術は、この10年ほどでかなり一般化してきた感がある。その背景にはやはり国の主導で行われた開発プロジェクトがあったことを見落とせないだろう。レーザー加工に関する過去のプロジェクトとしてめざましい成果のあったのは、1977年から85年までの8年間で行われた「超高性能レーザー応用複合生産システム」があげられる。ここでは26.5kWと商用としては世界最大規模の大出力CO₂レーザーが実現し、厚板の切断や接合加工に道を開いた。また光ファイバーを通すことができるYAGレーザー（イットリウム・アルミニウム・ガーネットの固体結晶レーザー）では、300Wまでのものが実現している。プロジェクトでは自動組み立て技術や設計・管理など周辺の技術も同時に開発され、その後のレーザー加工機市場が形成してゆくきっかけとなった。

CO₂レーザーでは発振出力500W～2kWを中心に自動車、電気、機械工業分野での金属薄板の切断、穴あけ用として急速に出荷台数を伸ばし、従来の2次元加工のみならず立体加工が可能な3次元加工機やパンチプレスなどと組み合わせた複合機などもその後、市場を通じて登場してきている。さらには厚板切断、溶接、表面熱処理加工を目的とした大出力機（2kW以上）の開発も活発化してきた。

また光ファイバーとの相性がよくハンドリング面でのフレキシビリティに優れるYAGレーザーは、電子部品、半導体などのマーキングやハンダづけ用を中心に需要が伸び、ICメモリーやフォトマスクのリペア、セラミック基盤の穴あけなど、いわゆる高精度微細加工の分野で注目されてきた。その一方でマイクロスポット溶接やシーム溶接などの溶接分野でも実用化が進み、大出力機（4～5kW）なども開発されるようになってきている。

「複合生産システム」に次いで国のプロジェクトとなったレー

MEMO レーザーとは？

光の色や性質は、その波長で決まるが、波長が同じ光（同色光）でも自然の状態の光は、レーザーにはならない。それは光の波の山と谷がまじりまじり交じり、交錯しあっているからだ。たとえるなら自由きままな群衆のようなもので、足並みも動きもバラバラで存在している。

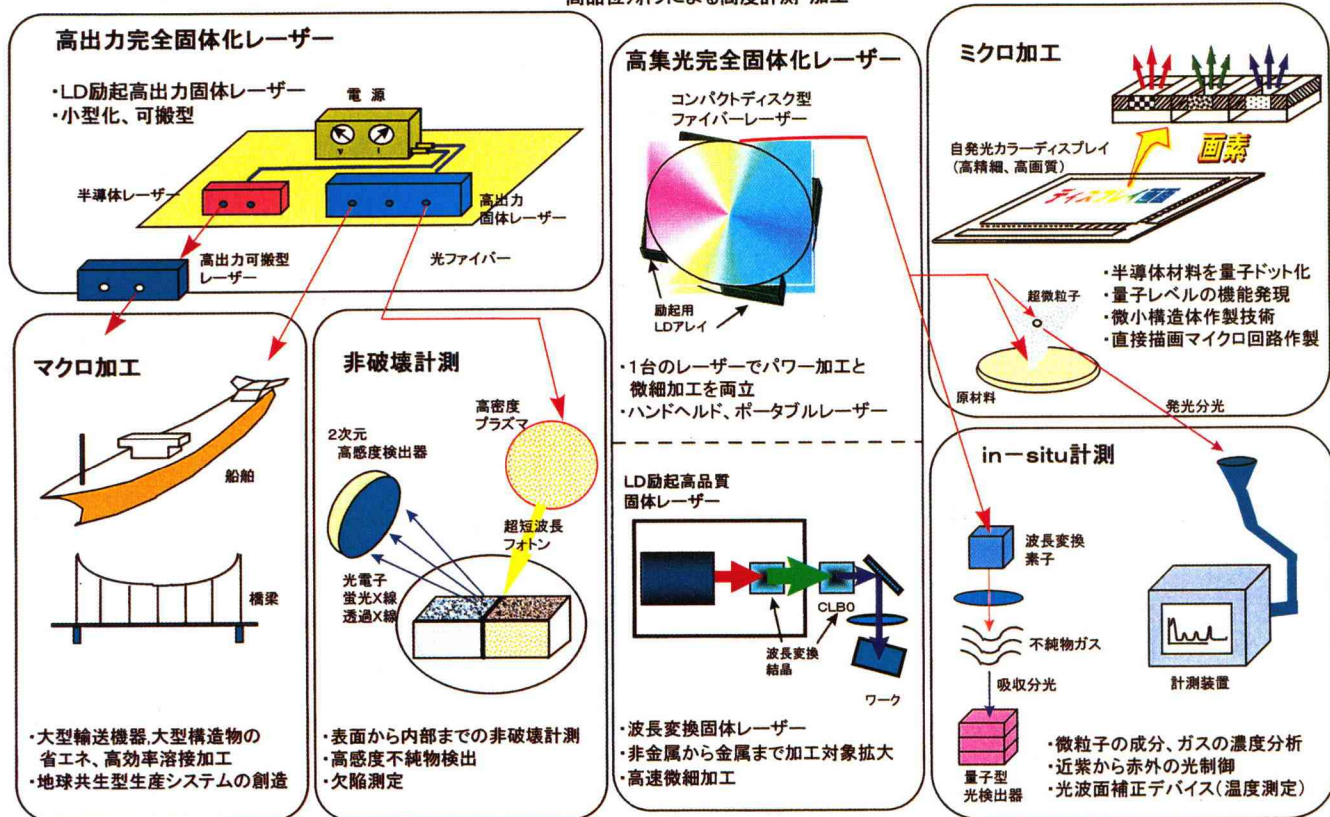
レーザーとは「位相がそろった」光であると説明される。これはたとえるなら衛兵の行進のようなものといっていこう。左右の足の運びまでピッタリと一致してきわめて力強くひとつの方向に向かっていく。つまり光の波の山と谷がほぼピッタリと一致して、1点に効率よく集光することができる。そのため切断や焼き入れなどの強力なエネルギーを供給することができるのである。

レーザーは物質の誘導放出という現象を利用してつくり出され、増幅される。高いエネルギーをもった（励起された）物質は、そのエネルギーを光として放出することがあるが、この光が同じように励起された物質に当たると、その物質からもまったく同じ性質の光が放出される。この現象を誘導放出という。媒体となる物質を励起した状態で何度も光を反射させながら誘導放出をくりかえしていくと、位相のそろった強力な光に増幅されることになる。これがレーザー（Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation）となるわけだ。気体を媒体とするガスレーザーと固体結晶を媒体とする固体レーザーとがあり、媒体とする物質によって、CO₂レーザーとか、ルビーレーザーといった呼び方をされている。

レーザー関連技術としてはエキシマーレーザーを対象にした「超先端加工システム」がある。エキシマーとは、励起状態と基底状態の原子・分子が結合したもので、レーザーの媒体としてはKrF（クリプトンフッ素）XeCl（キセノン塩素）ArF（アルゴンフッ素）などがあるが、切断加工などの際の加工面がきわめてなめらかなため、高品位な微細加工に適する。プロジェクト後の具体的な適用例としては、インクジェット式プリンターのノズルの穴あけ、ポリイミド薄膜層の配線切断、コンタクトレゾへのマーキングなど、きわめて「細かい」加工作業が対象となっている。少々粗っぽい比喩ではあるが、CO₂やYAGがオノやナタだとすると、エキシマーは彫刻刀や針のような繊細な加工道具だと考えればいいだろうか。先端技術向けの超微細加工には有効な加工システムだが、市場規模としては現状、比較的小規模にとどまっているようである。

「フォトン計測・加工技術」の研究開発

高品位フォトンによる高度計測・加工

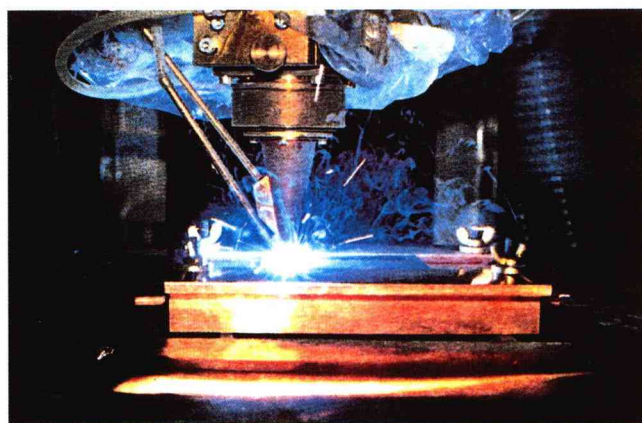


光ファイバーを通せる小型レーザー・マシンを

こうしたレーザー加工システム市場を俯瞰しつつ、今新たなレーザー技術開発のプロジェクトが進行している。「フォトン計測・加工技術」と銘打たれたこのプロジェクトは3年間の先導研究期間を経て昨年1997年度から5年計画・総予算70億円でスタートしている。フォトンとは、光量子を意味する言葉で、現状ごく一般にはこの言葉からすぐにレーザー加工技術を思い浮かべるのはなかなか難しいかもしれないが、光の発生から利用に至る、光に関する技術全般を表す新たなキーワードとして注目されつつあり、今後レーザー技術を中心とする光応用技術を総称する新たな言葉となっていくという。

同プロジェクトはNEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)を通じて、(財)製造科学技術センター内に設置されたフォトンセンターに委託する形で研究が進められており、13の企業と1大学が参画、ここに4国立研究所が関わっている。

「フォトン計測・加工技術」が目指している技術開発のポイントは、およそ6つの柱に集約されるが、理解するうえでの糸口として、まず第1にLD(レーザー・ダイオード)励起による高出力完全固体化レーザーの開発というテーマに目を向けてみると分かりやすいだろう。固体レーザーとは前述のYAGレーザ

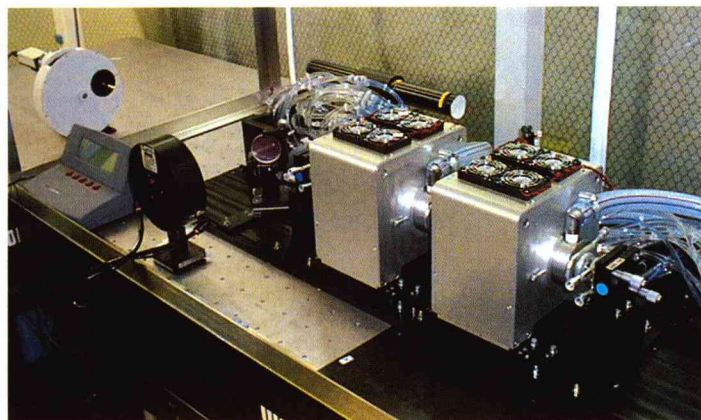


CO₂レーザーによるアルミ合金の溶接風景。プロジェクトではよりフレキシブルなLD励起固体レーザーによる溶接技術が目標とされている。

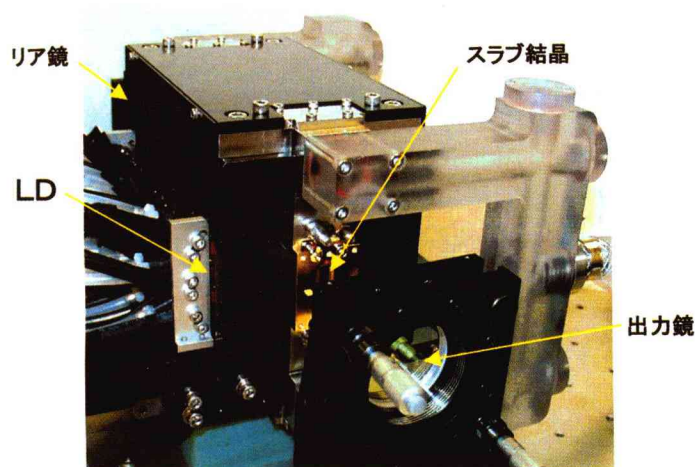
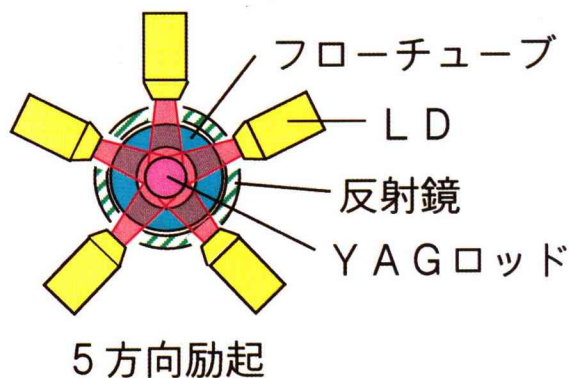
ーを指すが、その特徴は光ファイバーを用いて自由に誘導できる点にある。そしてLDによる励起は、レーザー発振器を大幅に小形化し、高出力・高効率化するために必要な技術である。

現状、レーザー加工の主流となっているCO₂レーザー発振器は、小さな部屋をまるまる占領してしまうほどの大きさがある。特定の工場内に設置する場合には問題がないが、移動作業、現場作業などでは、きわめて不利といえる。

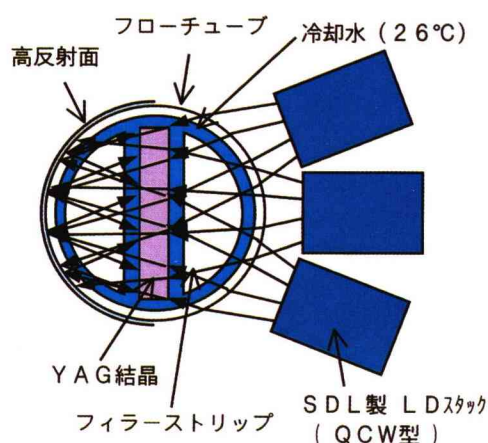
光ファイバーで伝送することができないCO₂レーザーは、フ



プロジェクトで開発されたLD励起によるロッド型YAGレーザー（東芝）。



プロジェクトで開発されたLD励起によるスラブ型YAGレーザー（ファナック）。



レキシビリティの点でも不便な部分が残されている。ロボット・ハンドの先に取り付けて自由自在にハンドリングするのが難しいのである。

またこれまでの固体レーザーでは励起の光源にランプが使われていたが、集光効率や熱の問題を考えると、小型で大出力のものをつくるには、LDを集積した新たな励起用の光源が不可欠になってくる。

こうしたところから、YAG、LD励起、大出力、という新たなレーザー発振器の開発目標が明らかになってくる。具体的な方法論としては、レーザー媒体 (YAG) の周辺に何重にも光源としてのLDを重ねたモジュールを設けコンパクトな装置で強い励起用の光を与えられる装置が考案されている。現在までに丸棒状のYAGロッドの周辺にLD光源を集約したロッド型と、断面が長方形のYAGの周辺にLD光源を集めたスラブ型の2種の実験機が試作され、それぞれに1.2kW、1.4kWという出力を実現している。

「開発担当者は、レーザー発振器開発は冷却技術との戦いだといっています。電気から光を得る際にいかに効率よく光に変換するかが重要で、LDを使うのもそのためですが、どんなに

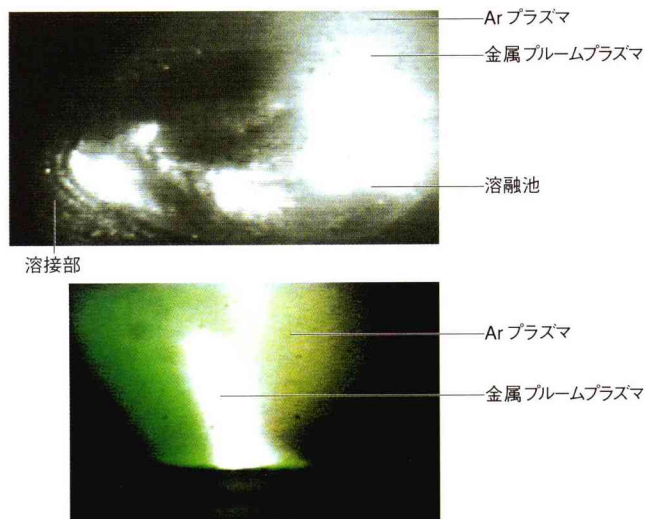
効率を上げても熱が発生します。熱は歪みを生みますから、光の技術には大敵です。水を流して冷却するわけですが、それを機械的にどう組み込んでいくかが技術者の腕の見せ所というわけです」(フォトンセンター所長・松野建一氏)。

次の段階としては3kW級のものを、また最終年度までには10kWの大出力、高効率、小型固体レーザーを実現することが目標とされているという。

「プロジェクト終了の頃までには、YAGレーザーのヘッドを電源は別にして人が両手で持てるくらいの大きさにできるでしょう」(前出・松野氏)

10kWの固体レーザーといえば、かなりの出力だが、プロジェクトが目標とする「30mmの鋼板を毎分1mという速度でレーザー溶接する」には、このYAGレーザーを2～3台組み合わせることが必要だという。高アスペクト比、すなわち細い幅で厚板を溶接でき、溶接部の強度も従来の溶接技術と同様に母材と同等以上に仕上げることを目指すという。同様にアルミでは板厚20mmが達成目標となっている。

「レーザー加工では切断・穴あけなどの「除去加工技術」については、開発すべき要素は、すでに終わっていると考えてい



レーザー溶接中のキーホール映像。キーホール制御技術がレーザー溶接の鍵となる。

ます。これからの技術としてはやはり溶接ということになるでしょう」(フォトンセンター首席研究員・吉田悦明氏)

レーザー溶接の場合、難しいのはキーホールと呼ばれる溶融部分の制御だという。レーザー溶接ではレーザーが当たった場所が溶融し、表面部分は蒸発するが、その反力によって溶けた部分(溶融池)の一部に穴が生ずる、この「溶融した穴」をキーホールと呼ぶ。溶接の進行とともに穴は移動していくわけだが、溶接欠陥がないスムーズなレーザー溶接を行うためにはキーホールをいかに巧みに制御するかが重要になってくる。そのためCCDカメラを使った画像処理やセンサーなど、監視・制御のための周辺システムとそのノウハウ開発が課題となっているようだ。

レーザー溶接では、熱による溶接部材の歪みの問題もある。たとえば2枚の銅板を単純に片側からレーザー溶接でつないだ場合、大きな歪みが出るために板が反ってしまい、きれいに合わせることができなくなる。どこからどういう手順で溶接していけばよいのか、歪みをどのように相殺していけばよいかなどが研究課題の一部となってくる。

工場の外へ出てゆくレーザー加工機

プロジェクトの目標どおりの技術が実現した場合どんな加工システムが可能になるだろうか。鉄鋼材料で考えてみると、まずひとつには建築分野への適用がありえるという。大出力のレーザー溶接システムが小型化できた場合、高層ビルの建設現場などに持ち込むことが可能になる。光ファイバーを使ってフレキシブルにハンドリングできることから現場用ロボットと組み合わせる利用が考えられる。ビル建設技術の高度化・自動化を可能にするキーテクノロジーになりうる技術だというわけだ。同様に橋梁や造船といった分野でもこの新型レーザー溶接システムは有効だと考えられる。

光ファイバーでポイントまで引っ張れることから水中溶接もできるという。現状のアーク溶接では水中溶接は難しく「水抜き」をしてから溶接が行われている。たとえば本誌でも幾度か取り上げているメガフロート計画では100×20mの銅板の箱を海上で溶接接合して銅製の浮き島をつくらうとしているが、その溶接作業は2×1m程度の作業空間を海中に設け、水抜きをした状態で作業員がそこへ入って行っている。

もしメガフロートで5×1kmの海上空港を建設することを想定したとすると、2500もの銅製ユニットを接合してゆかねばならないことになる。現状の技術で水抜きしながら人力でアーク溶接していくことを考えると大変な作業量である。だがもしここにYAGレーザー溶接ロボットによる水中溶接が適用できたとすれば作業の大幅な合理化が図れ、安全面からもきわめて有効であると、プロジェクトの市場動向調査報告書は指摘している。

小型化すれば作業船にも搭載しやすくなるところから、海底パイプラインを船上で自動溶接で継ぎ足しながら敷設していくシステムなども考えられているようだ。

超微粒子によるマイクロ加工技術の驚異

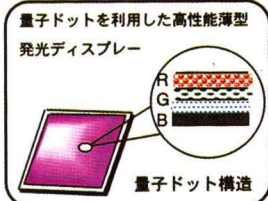
こうした小型・大出力のレーザー加工システムは、プロジェクトの6つの柱のうち「マクロ加工技術」に相当する。

同様にプロジェクトの大きな柱のひとつとして「マイクロ加工技術」という分野がある。「マクロ」が厚板溶接を対象としていたのに対し、「マイクロ」では、産官の集中研究として機械技術研究所において(1)超微粒子作製技術(2)超微粒子の集積・堆積による微小構造体作製技術(3)量子ドットディスプレイ(4)新たな同素体応用——といったジャンルでのレーザーの利用ノウハウが研究されている。

ここでいう超微粒子とは粒径が1～50nm(1nmは10億分の1m)という極度に微細でしかも純度の高い粉末であり、不活性ガス中または真空中でターゲット母材にレーザービームを照射した時の高温・高圧環境を利用して得られる。この微粒子を分級装置で同じ大きさにそろえ(半数以上の粒子が平均粒径の±約12%範囲内が目標値)、量子レベルでの機能を得ようというのがこの分野での大きなテーマである。るつぽを使って溶解する従来の方法では純度や組成の点で問題があり高融点材料には適用できないなどの欠点があり、また化学反応を利用するCVD法では粒子径がそろにくいなどの難点があった。その点レーザー法は、純度、材料選択性の点でも、また十分な高温高圧が得られるという点でも理想的な超微粒子作成法といえる。

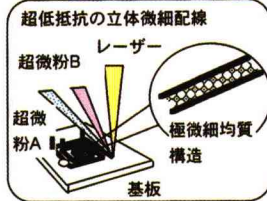
(2)の量子レベル機能を発現する微小構造体の作製にレーザーを使用しようという技術も、この超微粒子作製技術を前提としている。すなわち超微粒子を極度にしぼったレーザーを

応用例 1



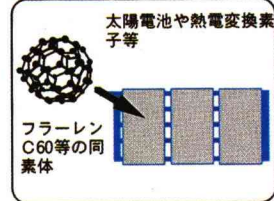
量子箱効果の発現技術
超微粒子の分散・整列技術

応用例 2

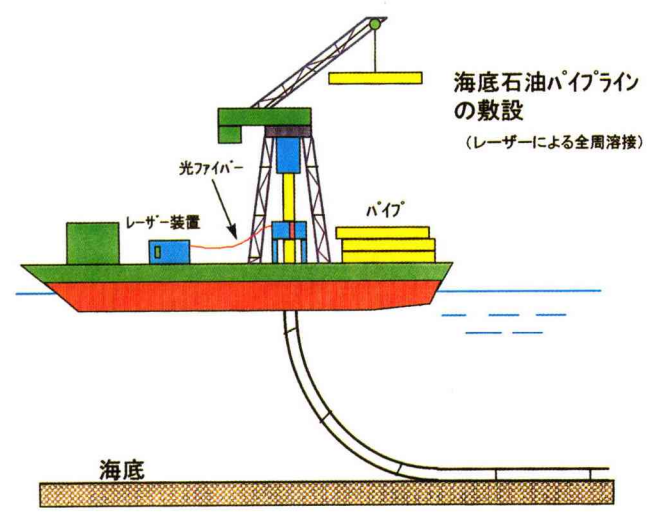
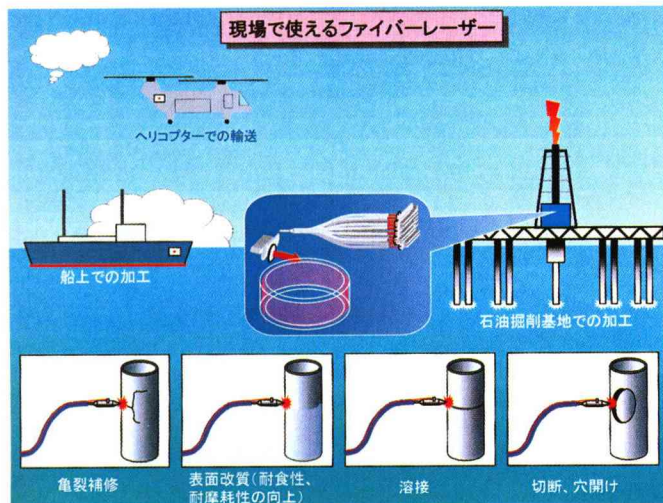


3次元構造体作製技術
超低抵抗構造体加工技術

応用例 3



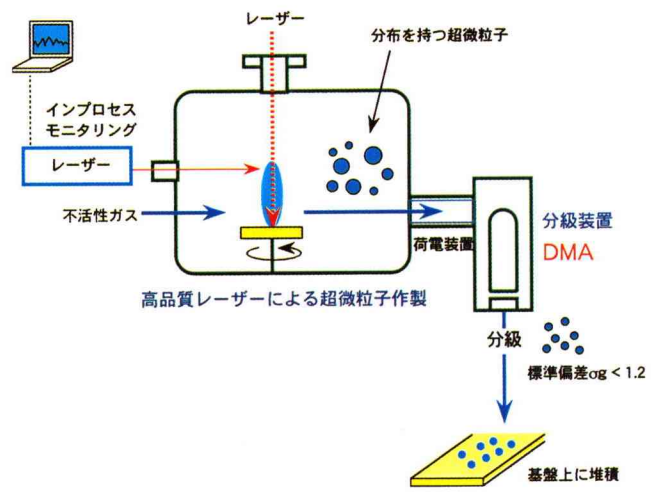
同素体等の作製と機能
発現技術
機能構造加工技術



使って電子回路の微細配線を直接描画していこうという技術である。超低抵抗の配線を立体的に組み立てることが可能になるという。集積回路につながる配線部分をコンパクトにし、付加的な機能をもたせることができる技術である。

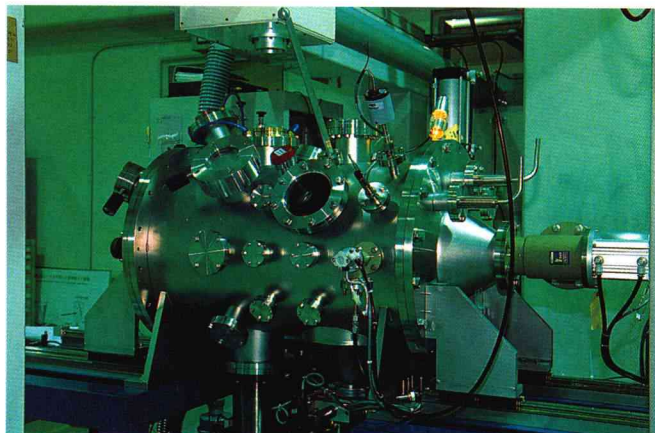
回路描画や表面改質とは別の超微粒子を用いた技術として、(3)の量子ドットディスプレイというまったく新しい小・薄型ディスプレイの可能性も提案されており、その開発もプロジェクトの守備範囲に入っている。これは結晶性シリコン超微粒子の発光現象を利用するもので、微粒子が粒径によって異

フォトンビームを用いた超微粒子応用微小機能構造体作成技術



なる発光色を示すところから、これをRGBの3色に相当する画素として3層に組み合わせ、カラーディスプレイにしようというものだ。この方式で作られるディスプレイはきわめて小型軽量でハイビジョンに対応しうる超高精細な画像が期待される。消費電力も小さく、CRT式（ブラウン管）に比べれば約50分の1、ヘッドマウント型液晶式と比べても約4分の1の消費電力で利用できる。工業用微細加工モニターや航空機などの計器表示板などに用いられ、大幅な省電力化が可能になると予想され、いわゆるマルチメディアへの適用にも期待がもてる。

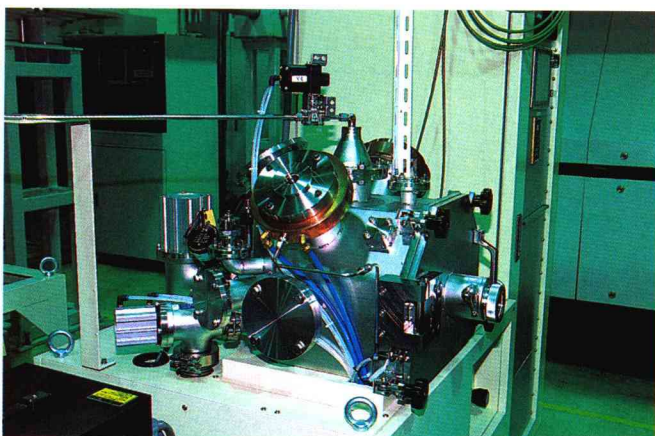
(4)の同素体に関しては新たな機能材料そのものの探求を目的とする研究である。たとえばレーザーの高温高压環境からはさまざまな同素体を作り出すことが可能となる。黒鉛とダイヤモンドは炭素の同素体であるが、結晶構造の違いによって異なる物理的性質を発現する。炭素の同素体としては六角形結晶が球状に組み合わせられたフラーレンといわれるものが太陽電池や熱電変換素子の新たな素材になりうるとして注目されているが、こうした同素体の超微粒子を作り出すうえでレーザーは、きわめて有効な手段となっている。同素体を作り出す作業は、新たな表面改質技術のフロンティアを拓くうえで必要な基礎研究になるという。「たとえば熱や磨耗に強く、潤滑



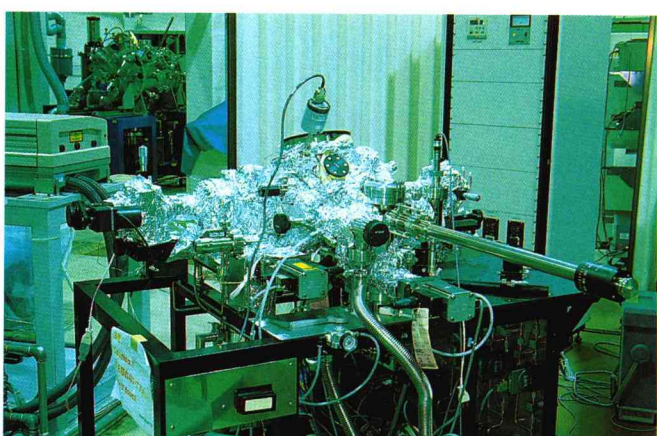
シリコン同素体探索用装置（機械技術研究所）。



炭素同素体作製装置（機械技術研究所）。



高融点金属超微粒子作製装置（真空冶金）。



量子ドット用超微粒子作製装置（松下技研）。

油との化学的な相性のよい同素体を見つけることができれば、機械的な稼働部分の耐久性を飛躍的に高めることが可能になるわけです」（機械技術研究所トライボロジー研究室・志村洋文氏）。

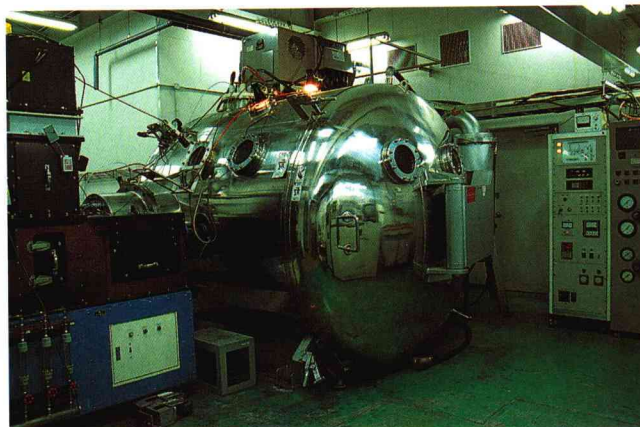
高度な機能性素材を可能にする技術

超微粒子は表面改質の分野でも、大きな可能性が期待されている。つくば市にある工業技術院・機械技術研究所では「フォトン計測・加工技術」プロジェクトとは別のプロジェクトだが、レーザー応用表面改質の技術開発研究にも着手している。

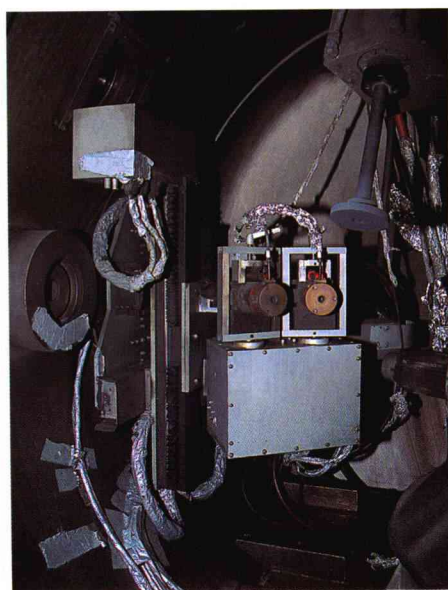
本記事の扉写真（2ページ）は、CCコンポジットの母材表面にタングステンとニッケルの超微粒子をプラズマ溶射して傾斜組成で付着させたうえに、レーザービームをあてて定着している工程を撮影したものである。写真の実験ではCCコンポジット表面にタングステンからニッケルへという傾斜組成で超微粒子金属材料を定着している。ごく薄い被膜ながら、いわゆる傾斜機能材料である。CCコンポジットは、熱膨張係数がゼロに近く、高効率ガスタービンなどの素材としても有望視されているが、繊維状の構造をもっており表面が粗い。金属系の

材料で表面処理をしてやればいいが、熱膨張係数が比較的大きなニッケルを直接付着させた場合、剥離する確立がきわめて高くなる。熱膨張係数がより小さいタングステンなら剥離は起こりにくいですが、タングステンでは硬すぎて加工性が悪い。そこでタングステン100%からニッケルの比率を増やしてゆき表面がニッケル100%になるような傾斜組成とするような表面処理が有効になってくるというわけだ。高効率のガスタービンやセラミックエンジンなどを可能にする技術が、実はこうしたレーザー応用技術とその地平に広がる表面改質技術にあるという。

「結晶構造によっては、同一元素組成で耐摩耗性を100倍にするということも可能なんです」（前出・志村氏）。たとえば通常の材料では摩擦などの応力がかかると破壊の方向へ向かうのが常識だが、レーザー焼き入れ技術によってえられる準結晶（準安定状態の結晶）では残留応力がたまっていくほど結晶が安定化していく現象が見られるという。理想的なイメージとしては、こすられると本来減っていくはずの接触面が、摩擦の応力を吸収して減った分ずつ膨張していくととらえればよいだろうか。減っても補充されるのだから摩耗には強いというわけだ。金属のもつきわめて高度な機能性を引き出す技術といえるだろう。こうした表面改質技術を可能にする手段としてレ

機械技術研究所の実験用CO₂レーザー。

表面改質実験用チェンバー。扉（2p）の写真の実験はここで行われたもの。



チェンバーを開けたところ。奥に2つ並んでいるのが超微粒子プラズマの噴出口、左手がレーザーの発射口。

ーザーが不可欠のものとなっている。

その他にも超微粒子とレーザーを応用した表面改質技術としては、たがいに固溶しにくい2種の金属（難固溶性材料）を共存させたり、摩擦を逆に利用して電導性や潤滑油との親和性を引き出すという技術も、さまざまな角度から模索されており、金属の新たな機能性を開発していくうえで興味深いものといえる。

フォトン技術が加工・計測を変える？

「マクロ加工技術」が小型で高出力の固体レーザーを必要としているように、「ミクロ加工」分野では、レーザーをいかに微細なレベルまで絞り込むかが重要な課題になってくる。6つの柱のひとつである「高集光完全固体化レーザー技術」は、この「絞り込む」技術を受け持つパートである。この分野では日本で生まれたディスク型ファイバーレーザーの技術や波長変換結晶を用いた微細加工用のシステムなどの研究が進行している。

その他にもプロジェクトでは、レーザーを応用した新たな計

測技術の確立も研究開発目標の主眼に置かれており、「In-Situ状態計測技術」と「非破壊組成計測技術」が大きな柱のうちの2つとしてあげられている。

前者はレーザーを用いて気体や微粒子の成分をその場で高感度計測しようというもので、感度1ppb以上、粒径30nm以下で成分含有率の精度10%以上、温度では常温から1000℃までで感度1℃で計測する技術が達成目標として掲げられている。半導体の高度な製造プロセスなどでの活躍が期待できるという。

また後者は、レーザーX線を用いて不純物や内部欠陥などを検出する非破壊検査技術で、30nm以上の不純物を検出できる空間分解能、 μm レベルの微小領域で検出感度1ppb以上、内部欠陥計測では空間分解能1 μm 以上という性能達成を目標としている。実現すれば鉄鋼分野でも、たとえば連続製造時の内部欠陥計測などに適用の可能性がある技術である。

こうした技術の数々はいずれも現在進行形で開発が進められているものだが、実例を外観してみると、フォトン技術という新しい言葉で代表されるレーザー加工ならびに計測技術がいかに未来の製造技術を大きく変革する潜在的な可能性を秘めているかが分かるだろう。「成功すれば従来の生産・計測技術が画期的に変わる」（前出・松野氏）という言葉にも確かに説得力がある。いつの時でも最新技術の導入で問題になるのはコスト面だが、LD励起式固体レーザーなどは、LDがより大量に普及し、量産されるようになることで将来の大幅なコストダウンも期待されるという。

海外で現在進行中のレーザー関連プロジェクトとしては米国の「PLM プレジジョン・レーザー・マシニング」やドイツの「レーザー2000」などがあるが、世界の趨勢としてもレーザーによる新たな加工・計測技術の模索という方向性は明かなようだ。21世紀は刃物や火のかわりにレーザーを多用するフォトン技術の時代になるのだろうか。

取材・写真協力：(財)製造科学技術センター・フォトンセンター、
機械技術研究所トライボロジー研究室