

特 集

レーザー加工の現状と展開

大阪大学接合科学研究所 教授

片 山 聖 二 氏

●はじめに

テーマは「レーザー加工の現状と展開」ですが、本日のこれまでの講演を聞くと、実際に重要なレーザー加工として実施している領域は、溶接・接合、切断、穴あけ、表面改質としては表面変態硬化とクラディングで、最近はやはり3Dプリンティングです。本日は3Dプリンティングの話が多く、最初の話は微細加工が中心でしたので、私はマクロ加工の溶接・接合を中心に紹介させていただきたいと思います。

●レーザーの特徴と溶接

レーザーを考えた場合、どのような特徴があるのかということになりますが、溶接用レーザーは高パワー密度で高エネルギー密度の熱源です。溶接用の熱源としては、アークが最も広く使われています。これに対して、プラズマは、もう少しパワー密度が高い。電子ビームとレーザーはパワー密度が非常に高い。この熱源を使って大気中でできるというのがレーザーです。電子ビームは真空状態を必要とします。レーザーも真空状態で行うと、同じように深い溶込みが得られます。薄板の場合は、通常のアークに対して溶けて固まる溶接金属と横の熱影響部を足した溶接部（TIG、プラズマ、レーザー）がどんどん狭くなって、実際に変形の少ない、歪みが少ないものが作れます。つまり、深溶込みか低変形の溶接部を作ることができるという2つの特徴があります。最近さらにパワー密度の高いレーザーによる溶接部が作製されており、さらに深い溶込みも可能になっています。

●自動車

自動車の例を示しますと、従来はほとんどがスポット溶接で作られています。ビーム品質の良い高パワーのレーザーが開発されてきて、レーザーが適用されるようになってきました。通常、亜鉛めっき鋼板が使われますが、軽量ということからアルミニウ

ム合金なども使われています。これはアルミニウム合金の例で、使用されているレーザーは、半導体レーザー励起のYAGレーザーです。現在は、その後に開発されたディスクレーザー、ファイバーレーザー、半導体レーザーなどがその代わりとして使われています。日本では主にスポット溶接が使われ、レーザー溶接は高級車種に使われていますが、ドイツでは非常に広範囲の車種に使われています。ここで見られますように、ファイバーレーザーですが、1mくらい離れた所でも金属を溶かすことができます。スキャナを利用して広範囲の所を高速度に溶かして物を作っています。この物自体は自動車の後部座席で、離れた所でも溶けて溶接されています。

●レーザー溶接の動向・展開

レーザー溶接の動向について考えると、高速・高生産性の溶接に向いています。また深い溶込みの溶接も可能で、その場合は高パワー化が必要となります。深溶込みの溶接部を実際に作製しようとしますと、どうしても隙間に弱いという欠点があるので、アークと一緒に使うことが多くなっています。これをハイブリッド溶接と言います。深い溶込みや溶接



講師 片山 聖二 氏

部を速く作製しようとするすると溶接欠陥がどうしても発生します。研究としては、欠陥がどうして発生し、どうしたらそれを防止できるかが対象となります。また、レーザービームは小さい所に絞れるために0.1 mm程度の薄板の溶接も可能です。レーザーは高価というイメージがあるので、そうしたものを使うことから高品質・高機能な溶接部を作るということで、今は異種金属の接合、金属と樹脂の接合ができるという段階までできています。溶接欠陥ができる場合があるので、良し悪しを判断するためモニタリングをします。さらに、次の段階として、モニタリングをし、欠陥のない溶接部をつくってしまう適応制御法の研究開発をしています。

●レーザー材料加工

与えられた課題はレーザー加工です。ここに示したものは20年以上前につくったレーザー材料加工のグラフです。大きく分けて、表面改質処理法、接合法、物質除去加工法、材料合成法に分けることができます。表面改質は熱的プロセスと化学的プロセスに分けられます。そこでの温度は溶融までいかない状態から溶融させる場合もあります。最近では、クラディング、その応用として3Dプリンティングがあります。溶接法としては、溶接・接合、ろう付、はんだ付があります。除去加工には、穴あけ、切断などいろいろあり、最近では、マーキングが多く、クリーニングもできます。実用化された加工法をピックアップすると、ここに記載されている方法が挙げられます。ここでは、とくに3Dプリンティング、溶接、切断、マーキングが主なところです。その他に、ろう付やはんだ付も一部使われています。最初に使われたのは焼入れ変態硬化です。

●レーザーの種類と発振波長

レーザーについては波長を中心に考えてみます。考えやすく目に見える波長の範囲は0.4～0.8ミクロンくらいの波長になります。最初に発振したのはルビーレーザーで1960年、赤色でした。それからいろんなレーザーが開発されましたが、加工用にはまずCO₂レーザーが高パワー化できるということから、その後、YAGレーザーがファイバー伝送で柔軟性があるということから、そして、その後に短波長のエキシマレーザーが発展しました。その後

に、ファイバーレーザー、ディスクレーザーとか、ピコ秒、フェムト秒の超短パルスレーザーが出てきて、現在最も注目されています。

●レーザーの呼称

名前もたくさんあります。加工について主に使われるのはここに記載したものです。レーザーはそれぞれの特徴から名付けられています。CO₂は、発振媒体自身がCO₂ガスの振動エネルギー差で発振しているので名付けられています。YAGというのはNd（ネオジウム）イオンを含んだYAG（イットリウム・アルミニウム・ガーネット）のロッドからきていて、ディスク、ファイバーというのはYAGのロッドを1円硬貨のように薄くした形状や細長いファイバーであり、それぞれの形状から名付けられています。なお、ディスクおよびファイバーレーザーは、Nd（ネオジウム）に代わってドーピングされてYb（イッテリビウム）がレーザーを出します。

レーザーの名称(呼称)について					
名称:呼称	発振媒質 材質	形状	発振媒体	発振波長 (nm)	パルス幅
CO ₂	Gas		CO ₂	10640	
YAG	YAG	棒, スラブ	Nd ³⁺	Base: 1064	連続, ms, ns
ディスク	YAG	Disk	Yb ³⁺	1030	連続, ms, ns
ファイバ	Crystal(SiO ₂)	Fiber	Yb ³⁺ , Er	1070	連続, ms
半導体(LD)	Semiconductor		AlGaAs(Diode)	800 - 1000	連続, パルス
グリーン(第2高調波)	YAG			532	
UV(第3・第4高調波)	YAG			355, 266	
エキシマ ナノ秒	希ガス+ハロゲン		ArF(193nm), KrF(248nm), XeCl(308nm)		Nano sec
超短 パルス	ピコ秒 フェムト秒		ファイバ, チタン・サファイア, ディスク		Pico sec Femto sec

三瓶(前田工業株)(片山追加修正)

●レーザー加工技術の開発動向

加工の開発動向をみてみます。レーザー装置で注目されているのは、半導体、ファイバー、ディスク、超短パルスレーザーなどです。切断については、リモート切断が一時注目されました。そして、ファイバーレーザー・ディスクレーザーとCO₂レーザーのどちらが速い切断が可能かどうか、厚鋼板において固体レーザーがCO₂レーザーほどの高品質が得られるのかどうかについて検討させています。また、レーザー溶接現象の解明の話があります。自動車ではリモート溶接が使われていて、スポット溶接部にリモート溶接部を足して剛性を上げることがトヨタ

自動車などではされています。航空機の加工ではCFRPのレーザー切断が注目されています。船舶ではハイブリッド溶接、鉄鋼・重工業では3Dプリンティングなどが注目されています。電機・電子では電池関係、自動車を含めて異種金属の接合などが今後重要となると考えられます。

●溶接用レーザー装置とパワーレベル動向

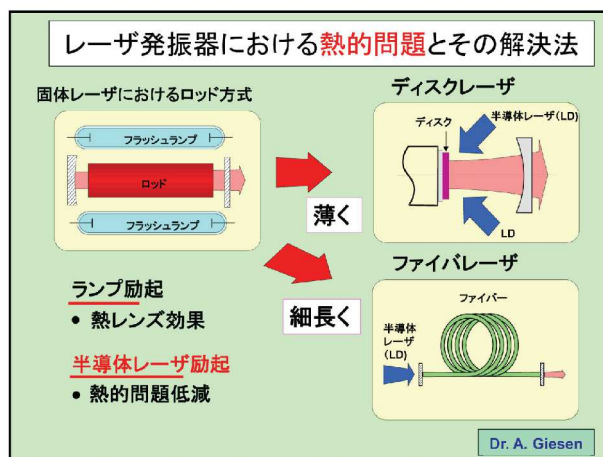
レーザーについて復習すると、数年前まではCO₂レーザーとYAGレーザーだけを知っていればよかったのですが、どんどん高効率で高輝度化の開発が進みました。ただしCO₂は45kWまで出たが、もう市販されていません。これはプラズマとの相互関係が大きく、高パワーではアルゴンとか窒素ガスが使えません。ヘリウムなど高価なガスは使えるが、それだと溶接欠陥が出てしまいます。YAGレーザーも大きなパワーまでできたのですが、ランプで励起した場合効率が悪いです。低効率ということから今は製造されていません。そのようなことから、半導体レーザーや、ファイバーレーザー、ディスクレーザーに注目が移りました。半導体レーザーは、効率が最も良いが品質が悪いのが欠点でしたが、最近高輝度のレーザーも開発されています。特に、ディスクレーザー、ファイバーレーザーとともに高パワー化と高輝度化が進んでいます。

●レーザー発振器における熱的問題とその解決法

YAGレーザーでは、ロッドをフラッシュランプで励起していると冷えにくく、ロッド内に温度分布ができて品質が悪くなりました。これを改良するために、半導体レーザーによる励起方式が日本の大型プロジェクトで行われましたが、そうこうしているうちに、薄くすることか細長くすることで熱を取る方式のディスクレーザーとファイバーレーザーが開発されました。現在、世界的に最も注目されているのは高パワー化・高輝度化が可能なファイバーレーザーと言えます。

●レーザー加工機

レーザー自体を分けてみると、直接使うタイプとYAGレーザーのようにファイバーで伝送するタイプがあります。ファイバー伝送の方が使い勝手がよいわけで、柔軟性があるということになります。



YAGレーザー加工装置の仲間としては、ファイバー、ディスク、半導体レーザーがあり、注目されて研究や実際に使われるのは後者の3つのレーザーです。

●溶接用レーザーの発振波形

それぞれのレーザーは連続かパルスで発振します。例えば、5kWとか10kWとか連続で出の場合と、YAGレーザーのように数ミリ秒という短時間のパルスの場合の大まかには2つでありましたが、最近は連続をパルス化して任意の波形を作って使うことができるようになっています。

●レーザーと各種加工法の条件範囲

レーザー加工については、この図を知ってもらいたいと思います。横軸をパワー、縦軸をビーム品質としています。昔はヨーロッパでK値、アメリカはM²が使われていました。M²はシングルモードの光では1で、最も良い値です。例えば同じ焦点のレンズで絞ったら、シングルモードに比べて何倍になるかというのがM²の値であり、それが評価に使われました。波長という因子があるので、ファイバーレーザーが開発されると、CO₂レーザーは波長が10.6ミクロン(μm)、ファイバーが10.7μmとかディスクが10.3μmとかであり、M²だけの値が一見10分の1で、いいようにみえます。このようなことから、絞られたレーザービームの半分の集光角度と半径を掛け合わせた値をBPPと定義して、ビーム品質として使うようになっています。そこでこれを見ていただくと、ビーム品質は小さい方です。レーザーパワーはどういう加工をするかで選べばよいことがわかります。この図から、CO₂レーザーとい

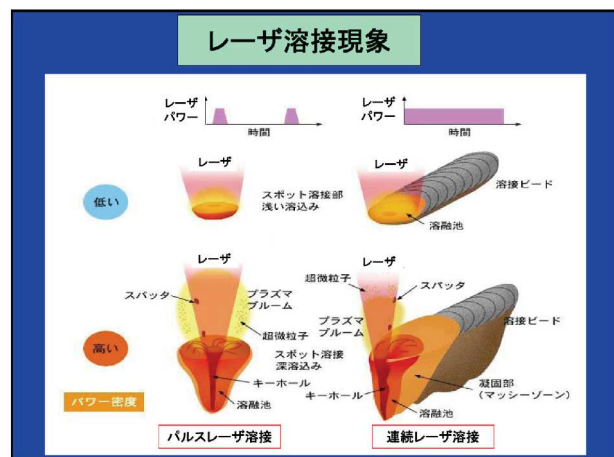
うのは、大きなパワーで、しかもビーム品質がよいという特徴があります。一方、YAG レーザーは小さなパワーではよいが、大きなパワーでは品質が悪くなります。そこで、半導体レーザー励起の YAG レーザーが出てきて、次に高パワーでも高品質なディスクレーザー、そしてその次にファイバーレーザーが開発されました。後者の2つのレーザーは、ほぼ全部の加工をカバーできるわけで、ビーム品質の良いものは悪いものをカバーできるようになります。効率の最も良い半導体レーザーについては、高品質化が行われ、当時の YAG レーザーと同等か、一部ディスクレーザーと同等なものが市販されるようになってきています。

●各種レーザーとレーザー加工法

実際の加工がどんな条件でされているかをビーム品質と合わせて示したのが図中の領域です。つまり穴あけやマーキングは比較的に小さなパワーで、ビーム密度のいいものを使っています。はんだ付けやプラスチック接合では、パワーは小さくてビーム密度はそんなによくなくてよいので広げています。焼入れには、半導体レーザーなどで大きなパワーが使われています。溶接になると品質がよいレーザーが必要になり、切断になるとさらに品質のよいものを使うようになります。どんな加工をするかによって、このようなさまざまな条件で使われています。実際には1つのディスクレーザーなら、このように3D的な切断やテーラード・プランクでの溶接、スキャン溶接、表面処理に使ったりしています。

●レーザー溶接現象

溶接を考えると、最初にパルス YAG レーザーというのが出てきて、CO₂ レーザーで連続のパワーが高くなってきました。これらは絞って使うのですが、パワー密度が低いと少しだけ熱伝導で溶かすという格好です。それからパワー密度を上げていくと、キーホールが形成され、溶融池ができて溶接する。ただし、スポット溶接は、溶込み深さが2 mm 程度までの溶接となります。実際はこれが使われているのは携帯用電池の溶接などですが、最近はもっと速い速度で連続でできています。現在はパルスレーザー溶接と連続レーザー溶接が、しのぎを削っている状況にあります。もう少しパワー密度が高くなると、



キーホールというカギ穴が開いて、溶融池ができて固まって、これがいちばん効率がよいので、実際に溶接としてはこのような条件・状況を使うのが多いことになります。

●実験装置と配置

今から、連続レーザーの深溶込みを中心に説明します。まず研究用に買ったファイバーレーザーがあります。これは10 kW のファイバーレーザーで、ファイバーレーザーがこの中にあって、それをまたファイバーで伝送する。小さい所から伝送するので広がります。いわゆるファイバーに入れた角度で広がる。それをコリメーションレンズで平行にしてフォーカシングレンズで絞って、焦点位置近傍でパワー密度の高いものにしています。どう溶けるかを検討するのが溶接には重要になります。研究ではそれらの溶接現象を観察します。

●ファイバーレーザーの集光特性

伝送したファイバーの径が0.3 mm のプロセスファイバーと0.1 mm のフィーディングファイバーのままを使いました。それをこのような焦点距離のもので絞ります。そしてこれがどんどん長くなると、絞り切れなくなります。レンズが薄すぎると熱レンズ効果が発生します。実際に使ったのはこれらの条件（焦点距離150 mm、250 mm のレンズ）でどれくらい溶けるかを試してみました。

●溶込み形状と深さに及ぼすパワー密度の影響

これがその例ですが、利用されるレーザーのビーム径はほとんどが0.5 mm か0.6 mm です。このビ

ーム径である程度速い速度で溶接しようとする、スパッタが発生してアンダーフィルの溶接欠陥が形成します。さらにパワー密度を上げていくと、比較的きれいな溶接ビードが形成します。さらに絞ったもので高パワー密度になると、ハンピングというコブが表面に出きます。良好な溶接は条件を選ばないとできにくくなります。ただし、パワー密度を上げていくと、この場合は溶込み深さが深くなりました。10 mm くらいまでは高パワー密度の条件で深くなります。

●溶込み深さに及ぼすパワー密度の影響

溶込み深さの条件を変えてみたのがこれです。ステンレスの8 mmの板厚に対して、ビーム径を通常使われているものから小さくしていくと、溶込みが深くなります。ただ、これを板厚20 mmのものに溶接すると、深くなっていきません。6 kWというのがよく使われるパワーですが、これで深いものにしようとするればパワー密度に関係なく深くなる。10 kWでは6 kWより低速度で顕著に深くなります。深いものはパワーが必要ということです。高速度で深いものはパワー密度の影響が大きく、よく絞った方が深いことを表しています。ただし、溶接部をよく観察すると、低速度ではポロシティという穴ができます。そして、高速にすると、スパッタが出てアンダーフィルが形成するかハンピングが形成します。良い条件はある限られた領域にある。こういうことが溶接に重要であり、同じレーザー溶接でも条件によって良いものか悪いものが作製され、違ってくるということです。

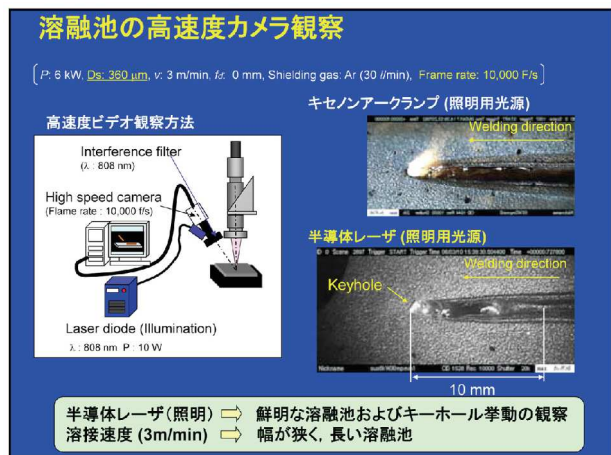
●溶融池の高速度カメラ観察

良い条件はある所にある。そして溶込みがどうして決まってくるかは観察を通して理解されます。これはレーザー溶接時の通常の状態です。高速度カメラで1万コマ/秒で撮っています。溶融池から溶融しているところです。キーホールという穴からブルームという明るい光が出ています。これは半導体レーザーで照明するとブルームを消すこともできて、キーホール周辺をよく観察することができます。そうすると、キーホール口からスパッタが発生していることが分かります。速度が速すぎると、溶融池に落ちてこないために、スパッタになってアンダーフ

ィルの表面がへこんだものになってしまいます。それが溶接に使用した場合の現象です。

●溶融池の高速度カメラ観察（高速溶接時）

2つのX線源と2つの観察装置で3次元に透視観察できるシステムを開発しました。まず1組だけを使って、つまりX線透視法で溶融池内部とキーホール挙動を観察し、高速度ビデオでブルーム挙動と表面における溶融池とキーホール口を同時に観察しています。レーザーを照射して、溶融池内部にはキーホールができ、キーホール口からブルームが上がっています。そして、2つのX線源で観察したら溶融池内部の湯流れがよく分かります。湯流れが分かるトレーサーとして、タングステンカーバイドを用いています。これがキーホールですが、トレーサー深さの位置を変えて溶融池の内部の湯流れを透視しています。溶接中は、それぞれの場所によって湯流れが違ってきます。その動きをとらえたのがこの画像で、同じ条件でも場所によって違います。こうしたことを多くの試料で行っていくと、キーホール底部先端から溶融池底部に沿って後方への流れとキーホール口から上方への流れがある。溶接速度1.5 m/minの場合、アークでは速い速度に相当しますが、レーザーでは通常の可能な速度であるとき、溶融池底部での速度が速いことが観測によって分かります。一方、高速度では、ブルームが上がり、スパッタの吹き上がる速度が速くなります。もう少しスパッタとはどんなものかを見ていきますと、キーホールの後ろ側、この辺りの融液が吹き上がっていく。表面の融液ではなく、ある程度下の融液が吹き飛ばされることが分かります。



●キーホールの形状とレーザー溶接現象

実際にどうなっているかを詳細に観察すると、高速溶接の場合、レーザーがあたった所から反射が起き、キーホール先端が後方へ曲げられることが起こります。レーザーのパワー密度の高い分布に変えると、このような形状になります。レーザーがあたった所、特に焦点位置近傍のところからの蒸発が激しいので、その蒸発の流れによって上方への流れが起こり、スパッタが発生します。これをどうしたら防げるかという、焦点位置を下へ下げてやると、スパッタを減らすことができますし、実際にはビームを斜めにすると、融液が上に上がっていたのをそれほど上に飛び出さなくなって減らせる。こんなことも観察から分かります。

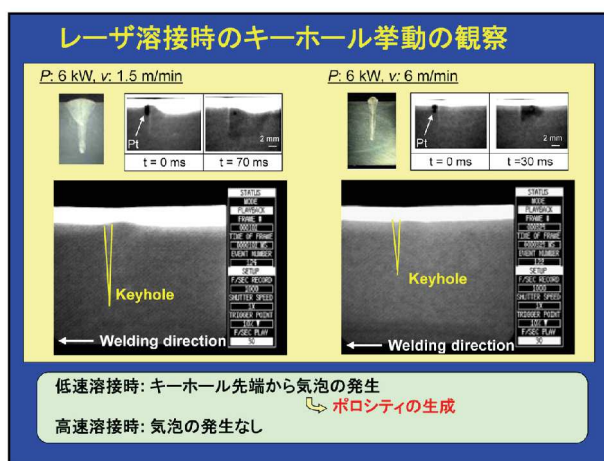
●X線透視観察結果

これらをまとめますと、溶融池内には、キーホール後方において底部と表面で2つの大きな回転流があります。すなわち、キーホール先端から後方へ溶融池底部に沿って流れ、その後、上方から前方への湯流れとキーホール口上方へ流れ、それが表面の後方へ流れ、後方で下方から前方へと変化する湯流れです。溶接速度が遅い場合はキーホール底部先端からの流れが強く、ポロシティという欠陥が発生する場合があります。溶接速度が速くなると、キーホール口から上方への湯流れが速くなり、融液がスパッタとして後方へ飛び出し、スパッタが激しいとアンダーフィルの溶接欠陥が発生します。アンダーフィルおよびポロシティとも機械的特性に影響を及ぼしますが、小さければ問題ない時があります。アルミニウム合金の場合は、ポロシティは溶接ビードの上方にでき、ステンレス鋼の場合、溶接ビードの底部に生成しています。ステンレス鋼の場合はキーホールというのがあり、これはCO₂レーザー溶接の例ですが、溶接は右方向に進んでいます。気泡がキーホールの先端からできて、湯流れが上方へ上がらないため底部に残ってしまっていてポロシティになる。それに対して、アルミニウムの場合、マグネシウムを多く含んでいるので、キーホールがかなり暴れ、気泡がやはりキーホール先端部近傍から発生し、上方への湯流れに沿って上がっていつています。表面にまで到達して消えるものもありますが、トラップ

されて大きなポロシティとなるものもあります。

●レーザー溶接時のキーホール挙動の観察

溶接方向が前の画像と違いますが、溶接速度が遅いと、キーホール底部先端から気泡が出てポロシティとなります。速度が速くなると、キーホール後壁の融液が上方への流れが強くなり、大きな気泡の発生はなく、湯流れの様相が違ってきます。速度によって湯流れの強弱が異なるために、気泡が出る出ないが分かります。スプリングエイトという超大型の特殊装置でアルミニウムのシングルモードのファイバーレーザー溶接中の溶融池を見ると、溶融池と細いキーホールの輪郭が明瞭に観察されます。特に、キーホールの先端から気泡が発生しているのが見られます。この場合、気泡をよく見ると消えるのが見えます。キーホールは、主に蒸発した金属蒸気からできています。キーホールが暴れて、シールドガスや大気などを巻き込んで気泡を発生すると、ポロシティとして残ってしましますが、巻き込まないと金属蒸気ですから温度が低くなると固体に変わるため、それは消えてしまっていて残らないと考えられます。



●レーザー溶接時のブルーム挙動とキーホール挙動

こうした観察から、ポロシティの生成状況をまとめますと、速度が遅いとキーホールが暴れて、キーホール先端から気泡ができてしまう。溶接速度が少し速くなるとキーホールが少し安定してきて、ポロシティは底部近傍だけに生成し、さらに速度が速くなると、キーホールはさらに安定し、この場合、上方への湯流れが顕著になって、気泡が発生しなくなります。最近のレーザーでは、絞りすぎて、高パワ

ー密度の場合、絞った焦点位置の少し下からの蒸発が激しく、気泡ができることもあります。レーザー溶接中の現象は、熔融池内部と気泡やポロシティの発生状況を含めると、以上となります。

●X線透視観察結果

気泡はキーホール先端の下からできてきたと言いましたが、ポロシティはどうしたら防げるのでしょうか。これは厚さ10mmのステンレス鋼板ですが、キーホールが十分に貫通していると、気泡の発生がなく、ポロシティは発生しません。貫通溶接では良好な溶接部を作製できます。連続レーザーで長く照射されていると、キーホールが不安定となり気泡ができてしまいますが、気泡ができる前にレーザーのパワーを落とすパルス変調化することによって、気泡の発生を防止することもできます。

●レーザー溶接現象

レーザー溶接のことを復習してみます。レーザーというのは、絞ってパワー密度を高くしてキーホールを作ります。レーザービームと蒸発物質やプルーム（高温領域）とのインタラクション（相互作用）は、10%弱はあります。レーザーを上方から垂直に照射する場合、10kWの高パワーでは、キーホールからスパッタが発生します。その場合、斜めに照射することで融液の飛び上がりを抑え、融液が再度熔融池に戻ってくるとアンダーフィルを防ぐことができます。レーザーの吸収というのは、キーホールがあるので、その内部にどの程度入るかで異なります。溶接速度が遅いとキーホール口が大きくなり、90%くらいレーザーのエネルギーが吸収されます。溶接速度が速くなると、キーホール口の前方にレーザービームの一部が照射されるようになり、吸収は60%~70%と少し低くなります。固体にあたると反射されます。このようにいろんなことが起こっているのがレーザー溶接です。

●レーザー溶接（アルミニウム合金の溶接）

レーザー溶接は、現在、自動車などでいろんな使われ方をしています。外国の例では、重ね溶接にディスクレーザーが使われています。自動車メーカーによっては半導体レーザーやファイバーレーザーが使われています。アルミニウム合金でしたら、レーザ

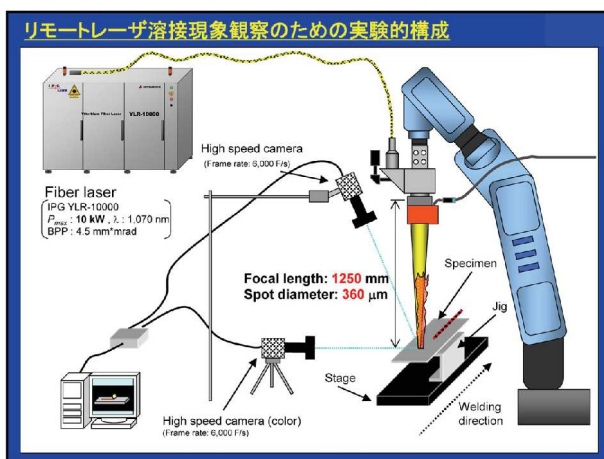
ーとアークの2つの熱源を使うハイブリッド溶接法も利用されています。

●新リモートレーザー溶接システム

これは、日本で最初に使われた日産自動車でのリモート溶接の例です。トヨタ自動車も同時期に適用されたようです。日産ではいろんな車種のものに対してレーザーを適用しています。半導体レーザー励起のYAGレーザーを投入し、これはドアですがスポットの代わりに2枚重ね溶接がされています。1台のレーザーで2つのステーションに設置されたドアを交互に溶接するシステムが構築されています。こうすることによって、グラフに示すように、スポット溶接でかかった時間が、レーザーの利用で大幅に時間短縮されています。

●リモートレーザー溶接現象観察のための実験的構成

実際にリモートレーザー溶接でうまくいっているかということ、少し工夫が必要になります。ファイバーレーザー溶接時の現象を観察して明らかにしました。これはレーザー溶接後の鋼薄板の表面と裏面を見たものですが、溶接していくと、貫通していたものが貫通しなくなっています。レンズ自身の熱レンズ効果は起こらないことを確かめていますので、溶接中にプルームという明るい光が上がっていくのが影響していると考えられます。温度が高いということは、その大気密度が低いことになり、密度が低いということは、集光レーザーに対して凹レンズと同じような作用をする。つまり、集光レーザーの焦点位置が下方へ下がるのが考えられます。ある



いはプルームは暴れていて左右対称ではないので、レーザービームが曲げられる（屈折する）ことが考えられます。

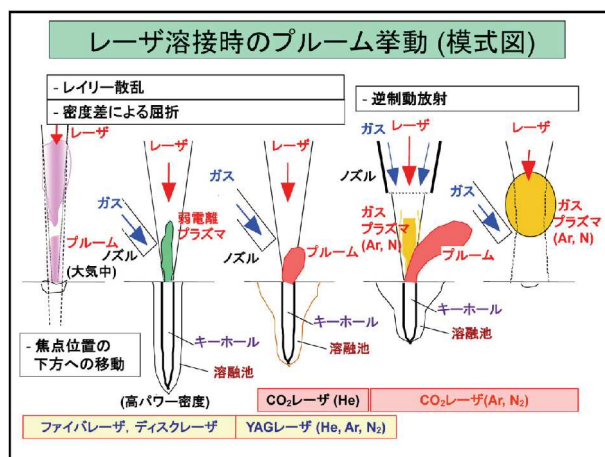
実際にどちらがどのように影響しているかで見ると、貫通溶接をしていたのが途中から部分溶込みになってしまい、銅板を初期の焦点位置から下にセットした場合、貫通溶接部が形成されるようになっていきます。このようなことから、焦点位置が下方に移動したと判断できます。溶接中のレーザーの反射光を観察すると、このようにフラフラと高速度に動いている。そして、溶融池の形状がいびつになっています。つまり卵形でなく、いびつになっていることはレーザービーム自体も動いていると判断できます。これらの結果から、レーザー溶接の場合、プルームは抑制しないといけない。高くなると、溶融池がいびつになって深い溶込みが得られなくなる。そういうことから、何をすればよいかといえ、ガスを吹き付けて、レーザービームと相互作用をする高温の領域を狭くする必要があります。今回の場合はファンとして扇風機を使い、常に貫通溶接部を作製できるなどの有効性を確認しています。CO₂レーザー溶接の場合も、同様にプルームを抑えてやると溶接ができます。

●プルーム除去時の観察結果

レーザー誘起プルームの熱い所はファンで吹いてやらないといけません。実際、プルームと干渉したのを見ると、凹レンズと屈折の作用によって深溶込みが得られなくなりますが、ファンを使うとプルームが上に上がってこないで、良い溶接部が得られます。観察することでそのようなことが分かってきます。今の方法ですと、高い所まで観察できないので、シャドウグラフ法でレーザー溶接中の上部の状況の全体を見ると、温度の高い所がずっと上がってきます。上がってくると、ある所から深溶込みをしなくなります。こうしたことから、レーザー溶接では、プルームとして見られる温度の高い所を抑えてやらないといけないことになります。

●レーザー溶接時のプルーム挙動（模式図）

これは通常の話ですが、CO₂レーザー溶接の場合、アルゴンガスだとプラズマができて溶け込まなくなる。YAGレーザーはあまりシールドガスの影響を



受けず、ファイバーレーザー、ディスクレーザーでパワー密度が高い場合、アルゴンガスでも溶込みの深いものが得られます。それはいいとしても、ガスの吹付とかの処理を何もしないとプルームの高温領域が高くなってしまい、レーザービームと相互作用をして溶接部は浅くなってしまいます。このように、いろんな結果が起こるので、レーザー溶接を複雑にしていますが、それぞれのレーザーの特性と条件を知ると、どのような現象が起こるか予想されますので、それに気をつけないといけないということです。

●レーザー重ね溶接法を適用したステンレス車輈

実際にどんなところに使われているかについて紹介します。電車はスポット溶接をしますが、例えばJR宝塚線のテレビがセットされた新型車両では、抵抗スポット溶接の代わりとして、内面側からレーザーを照射して剛性の強い筐体を作られています。

●アルミニウム合金車両へのハイブリッド溶接適用

近畿車両では、レーザーとミグアークによるハイブリッド溶接法を車両の製造に利用しています。ハイブリッド溶接とはどんなものを使うのでしょうか。当初は、CO₂レーザーまたはYAGレーザーが使われ、その後、効率のよいファイバーレーザーやディスクレーザーに変わっています。レーザーとアークを同個所に狙うと、溶滴にレーザービームが照射され、溶込みは浅くなりますので、少し離すと、アークによる融液があるところにレーザービームが照射されるためよい条件となります。なお、離し過ぎるとレーザービームが一部固体に照射され、効率が悪くなります。溶込みが深い溶接部は、2つの熱源を適度

に離すと良いことになります。これらは、動画の観察から理解されます。

●船舶に適用されるハイブリッド溶接

ハイブリッドが最も適用されているのが船です。とくに豪華客船での適用が多く、ドイツのマイヤーという造船所で最初に適用され、その後にイタリアやスウェーデンの会社でも適用されるようになりました。ハイブリッド溶接はどんな現象なのでしょう。ワイヤとレーザー、どちらが先の方がよいのかと溶接現象を観察してみると、突合せ溶接においてギャップがあることから、ミグのワイヤが先でレーザーが後ということで、溶接はこちらでやっています。ワイヤからの溶滴移行が見られ、溶融池内にキーホールが生成しているのが見られます。

次に、アーク電圧が低いのがよいのか、高いのがよいのかという話になります。結論から言えば、アーク電圧はある程度高い方がよいです。電圧が低すぎると、ワイヤの溶滴と溶融池が引っ付いて短絡が起こり、スパッタが出やすい。レーザーが先行でワイヤが後方であると、ワイヤは狙った位置より前に移行するので固体表面に当たり、スパッタとして飛ぶ場合があります。したがって、高アーク電圧で、ワイヤが先行でレーザーが後行の場合、溶滴が溶融池入りやすくなり、良好な深溶込みの溶接部が作製されます。

●ハイブリッド溶接時の溶融池の観察

ギャップのあるものに対しても良好な溶接部が得られます。これは鉄鋼ですが、1 mm くらいのギャップがあるものに溶接をしようとする、レーザーで狙うと突き抜けるのでワイヤで溶融池をつくって、そこにレーザーを照射します。

アークはパルスがよいのか連続がよいのかの話ですが、できればいつの場合もパルスが良いです。パルスの方が溶滴は移行しやすいです。連続の方は溶滴が大きく、長くなったりしてスパッタが多くなるので、通常、パルスの方がよいです。

●造船用ハイブリッド溶接装置と溶接部

従来、ヨーロッパでは、鋼板のハイブリッド溶接用ガスとしてはマグガスを使っています。マグガスというのは、日本ではアルゴンガス 80%、CO₂ ガ

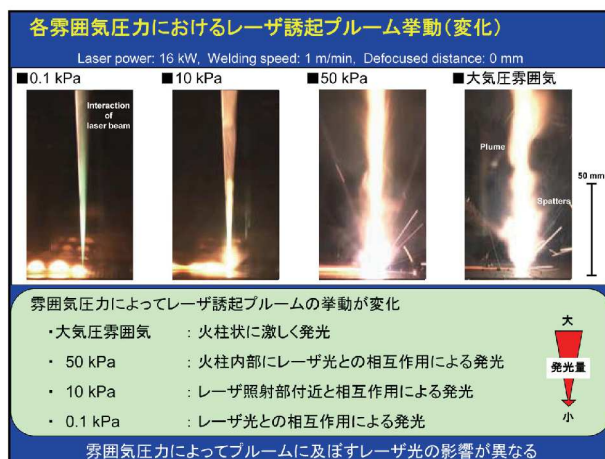
ス 20%ですが、ヨーロッパでは、83%のアルゴンと 17%の CO₂ で作られています。日本では CO₂ ガスの方が安いので 100% CO₂ ガスとのハイブリッド溶接の利用が要望されています。これは三菱重工業が船用に実用化し、板厚 13 mm まで貫通できたハイブリッド溶接部の例です。実際に CO₂ ガスアークとのハイブリッド溶接では、ギャップがいろいろ開いたものに対して埋もれアークといいます。アークが溶融池内に埋もれると、スパッタが減少し、良好な溶接部が得られます。

●高輝度レーザーによる深溶込み溶接

深溶込みの話をしてします。まだ実用化例はないですが、日立製作所では 50 mm とか 60 mm の厚板の溶接ができる技術を開発しました。試験段階に行われたものですが、ステンレス鋼や鋼板に対してレーザー溶接部を何層も積み上げる多層盛り溶接法で成功しています。

●低真空レーザー溶接による深溶込み

私たちのところでは、真空中で、ビーム品質の良いレーザーを超焦点で集光して 1 パスで深溶込みの溶接部が作製できる技術を開発しました。大気より若干低真空にすることによって、電子ビームと同じように深い溶込みが得られました。しかも気圧はロータリーポンプで引ける 0.1 キロパスカルです。1 点だけ、電子ビーム溶接に代われないところがレーザー溶接にはありました。レーザー溶接はどうしてもスパッタが発生します。それに対して、真空度を下げていくとスパッタの発生がどんどん減りました。低真空中のレーザー溶接では電子ビーム溶接と同様



にスパッタが減るというのが大きな特徴です。溶融池を見ると、通常なら溶融池から融液が吹き上がってスパッタになるのですが、低真空中であるとスパッタが激減します。

●レーザー装置

ファイバーレーザーで 100 kW のものが開発されたので、それを使ってどのくらい溶け込むかを見たのがこれになります。これは 1.2 kW のシングルモードレーザーを 90 台足して 100 kW が発振します。しかも、良いのは 0.5 mm の直径のファイバーで 50 m 伝送されるということです。焦点距離 1 m のミラーで集光した場合、溶接速度が 2 m / 分で、非常にスパッタが多いですが、断面形状の比較的良好な溶接部が得られました。ただ期待していたほど深くなかったです。

●低真空中レーザー溶接と欠陥の防止策

もう少し深くしたいということから、私たちのところで持っている低真空用容器で溶接してみました。これは横向きですが、レーザーは縦向きに照射されています。実際に、高パワーのレーザーにより低真空中溶接を行うと、気泡・ポロシティができます。ポロシティが出るというのは絞られた焦点値マイナス 30 mm 下に行っているの、絞られた少し下が膨れて気泡ができやすいことが分かりました。こうしたことから、少しでも雰囲気を変える、あるいは窒素ガスをアルゴンにすると、気泡のないものをつくられることを確認しています。レーザーも電子ビームと同様に大きなパワーにすることによって、100mm とか 125mm という溶込みの深いものができることになります。そして、アルゴンにするとか、高真空中にあまりしないほうが、ポロシティのない良好な溶接部がつけられることになります。

●電池

電池の話ですが、携帯用電池は通常 A3003 アルミニウム合金でつくられています。最初はパルス YAG レーザーによるスポット溶接で作られていましたが、最近は、リモート溶接で作る試みがされています。また、自動車の電池ですが、リチウムイオン電池のある所には銅とアルミを付けないといけない箇所があります。実用化は超音波溶接が適用され

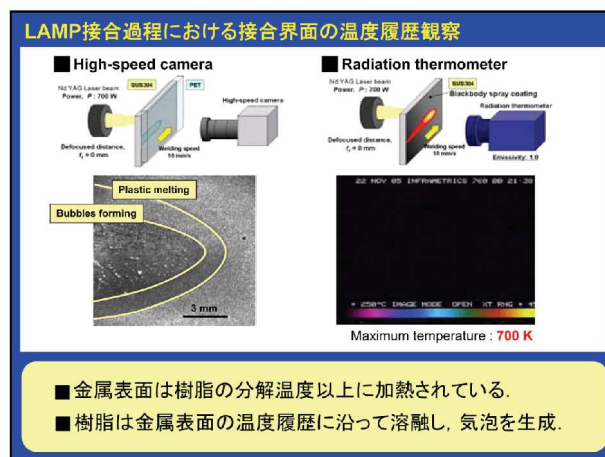
ていると聞いていますが、それに代わる方法として、レーザーは必ず溶接されるので、その溶接法の確立が期待されています。これはアルミニウムと銅ですが、アルミニウム側からレーザーを照射しています。こちらは銅側から照射しています。いろんなレーザーが試されています。溶けやすいのはアルミ側から照射して、少しでも溶け込む形に持っていけば機械的特性も良い継手が得られると思われます。

●LAMP 接合継手の強度評価方法

金属と樹脂は、従来、まったく引っ付かないものという認識がありましたが、透過する樹脂をもってきて、レーザー直接重ね接合を行い、継手を引っ張ると、横の熱影響部が伸びるほど良好な接合部が作製できることが確認されました。これはペットですが、接合したものを引っ張るとプラスチック母材が伸び、母材の強度に相当する継手が得られました。その接合部を観察すると、金属とペットが非常によく引っ付いています。

●LAMP 接合部界面の観察

レーザー直接重ね接合部を透過電子顕微鏡で見ると、金属には必ず酸化膜があり、酸化膜を通じてプラスチックと接合していることがわかります。レーザーは透過する側から照射する必要はなくて、金属側から照射し、樹脂側表面に少し気泡をつくってやると接合強度の強いものが作れます。この樹脂をとって観察し、金属の温度をある程度溶融する、少し高めの温度まで金属を加熱して引っ付けてやることになります。



●ファイバーレーザーによるリモート切断事例

少し話は変わりますが、シングルモードというのは、最もよい特性をもったレーザーといえます。これは溶込みという意味からは、深い溶込みもできています。これを切断に使うと、非常に速くて良い切断品が得られると思います。実際のレーザー切断については映像を少しだけ見ていただきます。これはCO₂レーザーの例です。このCO₂の代わりに薄板3mmくらいまでの切断については、ファイバーレーザー、ディスクレーザーの方が速いということで、最近ではそちらの方も出るようになっていきます。リモート切断は速いと言いますが、今のような直接吹き付ける方がもっと速い切断ができます。

●レーザーリモート切断 VS. 高速度レーザー切断

板の厚いもののファイバーレーザー切断はどうしても品質がCO₂レーザー切断品の域に至っていません。これは吸収がいいから薄板ではいいのですが、厚板になると切断品質が悪くなるという話です。酸化の影響などとも言われていますが、例えばこれをパルス化することによって、いいものがつくれます。数mmくらいまでならつくれると言う人もいます。

CFRPのレーザー切断ですが、一時期はだめだということになっていました。それは広い熱影響が形成したためです。実際にトライされたレーザー切断を見ると、金属切断と同様にガスが吹き付けられ、同時にプルームの熱がCFRPに吹きかけられ、その結果として広い熱影響部が形成していると解釈されました。私たちはガスを吹き付けない方法でレーザー切断をした結果、熱影響を狭くでき、リモート切断法で高速に切断するとさらに狭くできることがわかりました。実際には、速い速度の切断では、1回の切断では切断溝深さが浅いので3mm板を切断するためには、何回か繰り返す必要があります。一方、パルス幅の短い、ピコ秒レーザー、フェムト秒レーザーによる切断があります。熱影響のきわめて狭いものができるのですが、繰り返しをすると熱影響が出てきました。超短パルスレーザーは熱影響がほとんどないものもつくれるのですが、その時は回数を増やしても3mm板の切断もできず、時間がかかりました。時間がかかってもいいのなら、薄い板に適用できるかもしれません。速い速度になりますと、

リモート切断法で高速で走るのが熱影響部の狭いものが速く作製できるために良いというのが私たちの主張です。

●まとめ

これまでの話をまとめると、レーザーについては、現在、しのぎを削っているのが半導体レーザーとファイバーレーザーの高輝度化、高パワー化です。ただし、高輝度のシングルモードレーザーの使い道としては現在のところあまりないのが実情です。リモート切断、リモート溶接というのがあります。そして、穴あけ、クラッディングの適用、CFRPのレーザー切断、金属と樹脂の接合。また造船業界ではハイブリッド溶接法が注目され、いろいろと新しい溶接方法が各分野で検討されています。電池業界では、異種金属、特に銅とアルミニウムのレーザー溶接が注目され、研究が進められています。

●実用化したレーザー溶接眼鏡フレーム

私たちは大きなものを対象とするレーザー溶接も行いますが、小さいもののレーザー溶接も実施してきました。その一環でチタンの溶接を試み、メガネフレームの溶接にレーザーを使う実用化に協力しました。これは日本初の取り組みで、世界に先駆けて実用化されました。その結果、第4回日本ものづくり大賞特別賞や文部科学大臣技術開発賞をいただいております。今後も、日本の産業界において、レーザー溶接の実用化に貢献・協力していく所存ですので、よろしくお願いいたします。

