

## 1. はしがき

今から約35年前の1977年に、日本特許：昭56-49195「ティグとレーザの併用溶接」が工業技術院の研究者により取得された<sup>1)</sup>。この中で、TIGのトーチとレーザを一体に組合せるとともにTIGトーチノズルの上部に穴を開けこの開口よりレーザをTIG電極先端に近接するように照射して、深溶込み溶接すること方法が提案された。これが世界最初のレーザ・アークハイブリッド溶接法である。

しかし、世界的には、1978年に英国ロンドンにあるインペリアル大学のW. M. Steen教授が"Arc Augmented Laser Welding"として図1に示すように鋼板の上面また裏面からTIGアークで加熱しレーザ溶接を行ない、アーク電流の効果として溶接速度および溶込み深さが増加することを報告した<sup>2)</sup><sup>3)</sup>。これがハイブリッド溶接の開発の最初とされている。

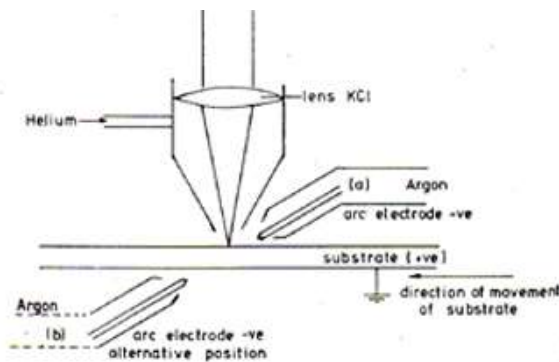


図1 ティグ溶接で補助されたレーザ溶接<sup>2)</sup>

では“Hybrid Welding：ハイブリッド溶接”の定義はなにか。時間的にも空間的にも、異なる溶接法で、それぞれの溶融池が同一である場合を言う。もともとハイブリッドの語意は動植物などで、「雑種」を意

味する言葉で、例えば、ロバと馬をハイブリッドしてできた雑種の動物は騾馬である。

日本溶接協会のHPL（大出力レーザ加工研究）委員会の調査団として、1982年に米国のオハイオ州立大学溶接工学科を訪問したとき、Albright助教授らが750WのCO<sub>2</sub>レーザとTIGのハイブリッド溶接の研究を行い、アーク溶接の溶込みへの影響を示してくれた<sup>4)</sup>。その後、日本では四国工業試験場でも浜崎氏らが4kWCO<sub>2</sub>レーザとTIGアークの併用による溶込み増加および溶接速度の増加を確認した<sup>5)</sup>。しかし、我が国でもさらに松田らの研究<sup>6)</sup>があるが実用化される事はなかった。1990年代前半は研究報告は少ないが<sup>7)</sup><sup>8)</sup>、1994年ドイツのBeyerらはTIGアークがレーザのキーホール内に入っていくことを報告した<sup>8)</sup>。1996年頃より、欧米や日本でアークとレーザの複合化がさらに研究され<sup>9)~11)</sup>、レーザがプラズマを安定化する効果も期待できることも確認された。

特に、TIG溶接でなく、ワイヤが溶融するMIG/MAGアーク溶接とレーザ溶接が研究されたのは1996年ごろからで、1999年のIIW（リスボン大会）では、ドイツのアーヘン工科大学のU, Dilthey教授がレーザ・アーク(GMA)ハイブリッド法をアルミ合金製自動車部品の溶接に実用化したことを報告し、急に注目されるようになった<sup>12)</sup><sup>13)</sup>。日本でも多くの溶接関係者がハイブリッド溶接の研究・開発を1997年ころより始めた<sup>14)~18)</sup>。2002年のIIW年次大会ではハイブリッド溶接を主題とした1日セミナーが開催された。その中で、ハイブリッド溶接に関する多くの報告がなされ<sup>19)~30)</sup>、自動車産業、造船業、電機産業での応用が紹介され、ますます、このフレキシビリティの高い溶接法への期待が高まった。

一方、レーザ加工機器の開発も2000年以降は急速に信頼性のある、高品質のレーザ装置が開発されてきた。高出力で安価なレーザバーが開発されると、

これにより励起、高出力化された加工用レーザ装置が開発された。高出力の半導体レーザ、ファイバーレーザ、ディスクレーザおよび超短パルスレーザなどが各種工業分野で、工作機器として利用されるに至ったのである。

特に、高出力ファイバーレーザやディスクレーザの発展はすばらしく、現在、50 kWのファイバーレーザ、および16 kWのディスクレーザが市販されるようになり、板厚30 mmの鋼材が溶接できるようになった。これらの高出力レーザとアーク溶接をハイブリッドすることにより、従来レーザ単独では解決できない問題が解決出来るという希望がわいてきた。

とくに、ビーム品質のよいファイバーレーザとMAG溶接のハイブリッド溶接の開発が図2に示すように進んでいる<sup>31)</sup>。2007年9月にデンマークのオデンセで開催されたI I Wの造船WGの第13回会議では、これらの技術に関する報告が「Laser Revolution in Shipbuilding」と題するセッションでたくさん報告された。欧州ではすでに5ヶ国の船級協会がCO<sub>2</sub>レーザの適用に関する技術基準を2000年に、レーザ・アークハイブリッド溶接の技術基準を2004年に承認している。そして、造船の中厚鋼板を溶接するハイブリッド溶接が実用化され、25ノ

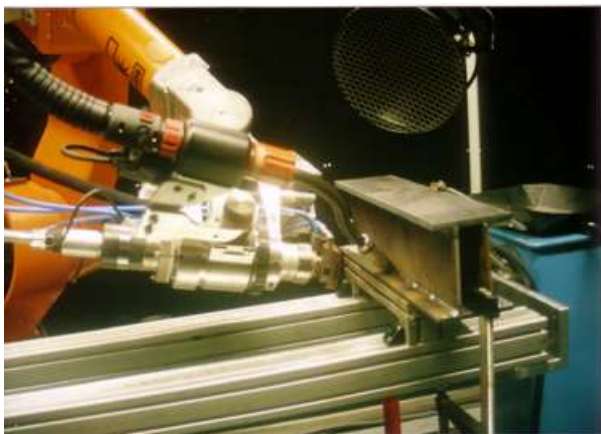


図2 4kw ファイバーレーザ・GMA ハイブリッド溶接による水平すみ肉溶接<sup>31)</sup>

ットで航行できる高速船が多く建造されている。

近年、ハイブリッド溶接が注目されるようになってきた。これらの研究開発の状況ならびに実用化の現状を紹介する。

## 2. ハイブリッド溶接の特徴

レーザ溶接法もアーク溶接法もそれぞれの利点、欠点を持っている。多くの研究によりレーザ・アークハイブリッド溶接法はレーザとアークの相互作用によって、二つの独立した溶接法の短所を補完するとともに長所を相乗させる効果があることが分かってきた。

レーザ溶接は溶込み深さが深く、低歪みであるが、ギャップ裕度が狭い。入熱は小さく、高速溶接が可能である。

一方、アーク溶接は入熱が大きく、溶接速度が遅く、溶接変形が大きい。良い点は溶加材により溶接継手特性を調整できること、ギャップ裕度が大きいこと、装置が安価であることなどがある。

これらを1つの溶融池としてハイブリッドしたハイブリッド溶接はギャップ裕度もある高能率で、低歪みの理想な溶接法で、得られる溶接継手も欠陥の少ない、高性能の継手が得られる。

ハイブリッド溶接はさらに次に示すような役割も期待できる。

- 1) レーザによるアーク安定性の向上
- 2) より広いキーホールを生じてブローホール発生を抑制できる。

## 3. ハイブリッド溶接の種類

ハイブリッド溶接は、上述の多くの利点が期待できるため、この30年間に、各種の方法が提案され、実用性を証明するために、多く研究がなされた。

とくに、レーザとMIG/MAGの組合せは溶接材料を用いるので、溶接金属の形状、材質、性能を制御でき、近年、とくに研究が活発になってきた。用いら

れるレーザーの種類とアーク溶接の組合せはいくつかある。初期の段階では、CO<sub>2</sub> レーザと TIG 溶接との複合によるハイブリッド溶接法の研究が多く行われた。1990 年代になると高出力の YAG レーザが開発され、ハイブリッド溶接に YAG レーザも参加してきた。1995 年ころより CO<sub>2</sub> レーザと MIG/MAG 溶接のハイブリッド溶接が開発され自動車部品に適用されるようになった。1997 年からはレーザー溶接とプラズマ溶接のハイブリッド溶接も開発された<sup>3.2)</sup>

3.3)。さらに、2000 年代になり高出力のファイバーレーザーやディスクレーザーが開発されると、これらレーザーと MIG/MAG 溶接または TIG 溶接によるハイブリッド溶接が 2003 年ころから開発されてきた。2006 年頃からは欧州の造船所で高出力のファイバーレーザーを用いたハイブリッド溶接が開発され<sup>3.4)</sup>

3.5)、造船のパネルラインで適用されるに至った。ハイブリッド溶接トーチを形式で大別すると主に 2 つの機構に分けられる。図 2 に示す非同軸形のタイプ<sup>19)</sup>と図 3 に示すアークとレーザーを同軸化した同軸形機構である<sup>10)</sup>。この同軸形は溶接ヘッドの小型化や溶接方向のフレキシブル性と言う特徴がある。ブラウンホファーレーザー研究所では各種ハイブリッド溶接トーチを開発している<sup>34)</sup>。

ドイツの Dilthey 教授はレーザー・アークハイブリッド溶接とレーザー・アークコンビネーション溶接を別々の溶接方法として定義している。すなわち、図 5 に示すようにレーザーとアークが十分接近しており溶融池が 1 つとなるような場合をハイブリッド溶接と呼び、溶融地が 1 つでないものをコンビネーション (組合せ) 溶接と呼んでいる<sup>8)</sup>。レーザーとアークの距離はハイブリッド溶接では重要なプロセス因子である。

#### 4. ハイブリッド溶接の主な長所

##### (1) レーザ吸収率の向上

よく知られるように多くの金属はレーザー光を強く

反射するため、溶融の開始時間が遅くなり、且つレンズに有害の影響を与える。また、生じたプラズマ

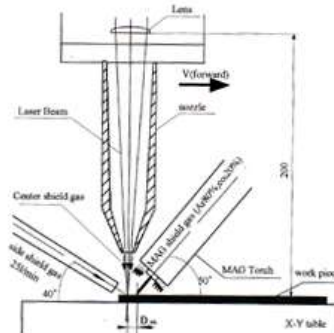


図 3 非同軸形組合せ機構

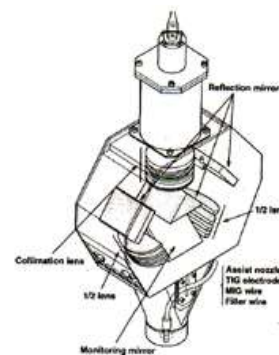


図 4 同軸形組合せ機構

によるレーザーの散乱、吸収・透過によりレーザー単独で溶接する場合は、実際に材料表面に到達し、吸収されるまでにエネルギーのかなりの部分が損失する。アーク先導のハイブリッド溶接場合、アークが材料を予熱する効果や図 5 に示すように溶融池に入射する時のレーザー入射点位置による溶込み深さの改善効果もある<sup>19)</sup>。また、レーザーとアークの距離 ( $D_{LA}$ ) によって、レーザーとアークの相互作用が異なるが、アークプラズマがレーザープラズマを引き寄せてレーザーのプラズマ吸収・散乱を減少することなどで、レーザーの吸収率が大幅に改善される<sup>19)</sup>。このメカニズムは Hu らが SPECTRAL LINE STARK 効果を利用して、電子密度を測定することにより明らかにしている<sup>3.4)</sup>。

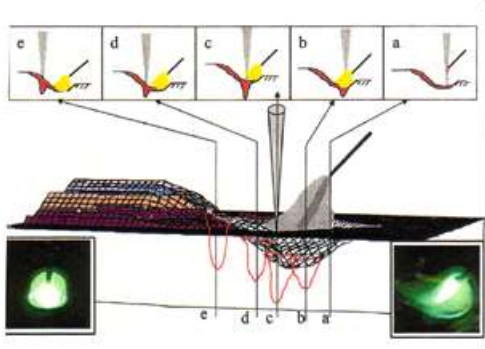


図5 溶融池へのレーザ入射位置の変化<sup>19)</sup>

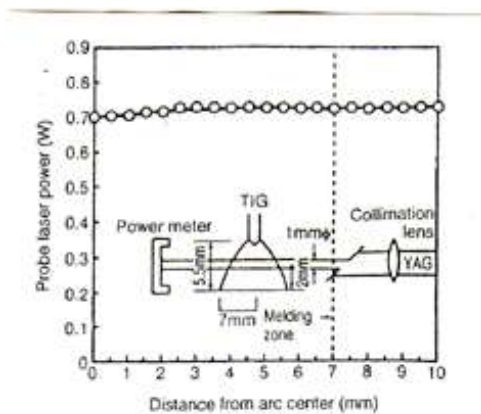


図6 アーク中のレーザの透過性<sup>17)</sup>

逆にアークの中を透過する時のレーザビームのエネルギー損失について、石出らは実験により明らかにした<sup>14)17)</sup>。すなわち、図.6に示

すように TIG アークの側方よりコリメートした YAG レーザビームを透過させ、ビームの透過出力を評価した。同図はアーク中心からの距離に対する透過出力を整理したもので、ビームの損失がないことからアークでのビーム吸収は無視できる事が分かる。

図7 60Aのアーク溶接とそのハイブリッド溶接によるアークの安定化<sup>19)</sup>

## (2) .レーザによるアークの安定化

図7にハイブリッド溶接による低電流 (60A) のアークが安定化し、スムーズの溶接できることを示す<sup>19)</sup>。これはアークの母材側陰極点の移動がワイヤ側

に比べて遅れ気味であり、この極点が高速溶接ではスムーズに移動できず断続的な移動となりアークが不安定になる。これに対してレーザ・アークハイブリッド溶接では溶接速度が5m/minになってもアークの極点がワイヤ直下にある。これはレーザプラズマによってアークが安定化され、極点の移動がスムーズになっている事を示している<sup>17)</sup>。

しかし、全ての出力のレーザはアークを引き寄せるわけではない。Zhao, Hu らはこれについて研究した<sup>36)</sup>。被溶接物が運動のときに静止の場合よりアークが強く引き寄せられる。アーク単独溶接に比較して、低い電流値の時、ハイブリッド溶接はアークの安定性が明らかに改善される。

## (3) .溶込み深さの改善 (高速化)

ハイブリッド溶接はどんな長所を持っているかというと、まず、溶込み深さの改善であろう。ほとんどの研究者はハイブリッド溶接法を研究する最初の段階で、ビードの形状及び溶込みから入り、論文に溶込みについて必ず述べている。レーザ・アークハイブリッド溶接において溶込みに対して支配的な影響を与えるのはレーザによって生成されるキーホールである。キーホールは母材がレーザによって加熱されて金属蒸気が発生し、それが噴出する際の反作用で溶融金属が後方に押し流されることで形成される。(1)項で述べたようにハイブリッド溶接のアークによるレーザの吸収率の改善、入射位置の低下、材料の加熱などにより、深いキーホールが形成され、溶込み深さの改善が期待できる。図8はマグ溶接、フィラーを用いたレーザ溶接およびハイブリッド溶接の断面マクロ写真の1例を示す。ハイブリッド溶接は 入熱量がレーザより大きい、溶接速度も4m/min と大きい。単位ビード長さ当たりの入熱は最も小さい。ここで、溶接条件が溶込みへどのように影響するか示す。

### ①アーク電流及び溶接速度の影響：

レーザ・ティグ溶接とティグ独立した溶接におい



て、溶込みと溶接電流及び溶接速度の関係を図9に示す。同図によると、ハイブリッド溶接の溶込みがティグ溶接単独よりも20~50%深いことがわかる<sup>5)</sup>。ハイブリッド溶接では低い溶接速度の場合、溶接電流70Aの時の溶込みが30Aより2.5倍深いことに対して、高い速度の場合電流70Aの時の溶け込みが30Aより1.5倍浅い。図10に示したのはCO2レーザ・ティグ溶接における各種電流での溶接速度と溶け込みの関係である<sup>5)</sup>。溶接速度が遅くなるほど溶込みは大きくなっているが、遅くなるほど適正なレーザ焦点位置を選ぶ必要がある。溶込みが最大になる焦点位置は通常、溶接速度が速くなるほど、母材表面に近くなる。電流値が低い溶接ほど、やはり焦点位置は母材表面に近くなる。そして溶込みが浅くなる。

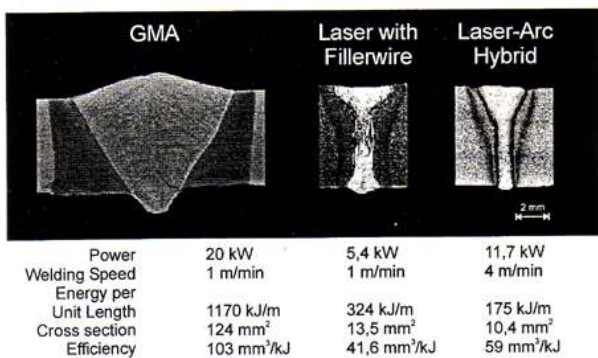


図8 アーク溶接、レーザ溶接およびハイブリッド溶接の比較<sup>1,2)</sup>

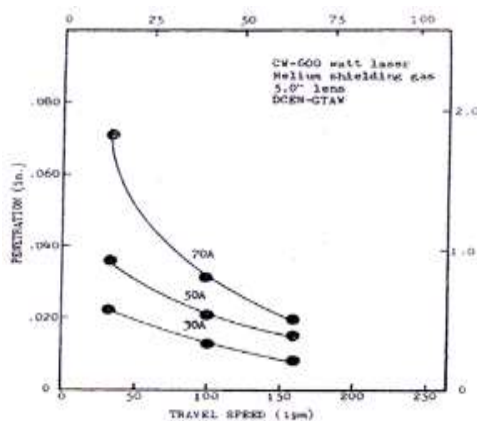


図9 速度と溶込み深さの関係<sup>5)</sup>

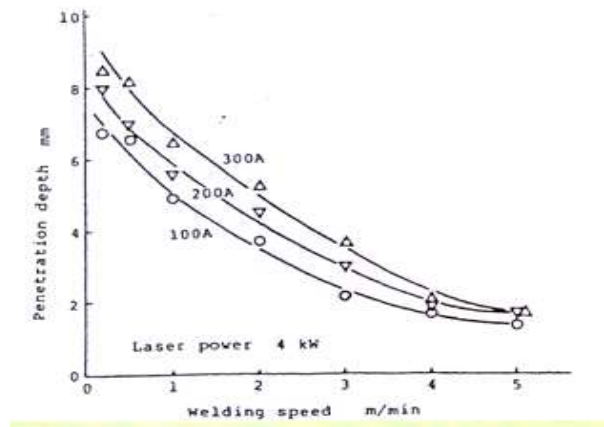


Fig.10 溶込みに及ぼす溶接電流の影響<sup>5)</sup>

②レーザ出力の影響：レーザ出力が高いほど溶け込みが深くなる。

③レーザ入射位置の影響：レーザの照射位置の影響を図5に示した。

④レーザの種類の影響：

4 kWファイバーレーザ・GMAハイブリッド溶接によるT継手の溶接で20mmの鋼板のT継ぎ手を図11のように溶接できる。

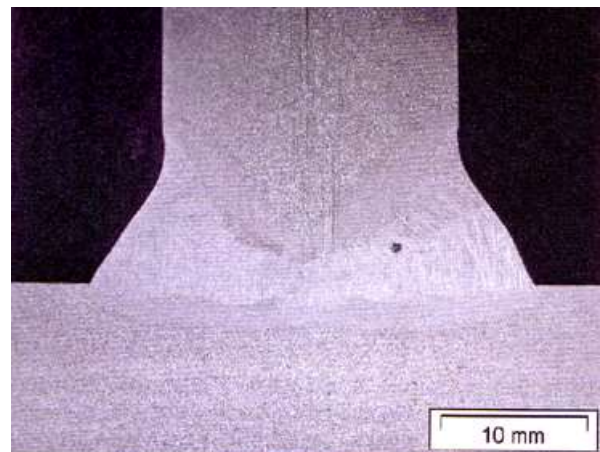


図11 4kWファイバーレーザ・GMAハイブリッド溶接によるT継手の溶接<sup>3,1)</sup>  
(速度：40cm/min, 縦板厚：20mm)

#### (4) . 溶接欠陥の防止

ハイブリッド溶接は溶接欠陥の低減にも効果があることがよく知られている。通常のレーザ溶接では

生じたキーホールが深くてガスの逃げるのが困難であるが、しかし、ハイブリッド溶接の場合、キーホール径が大きくなってガスが外に出るのに都合がよくなるということで、ポロシティーの発生率が減少するとされる。片山らはCO<sub>2</sub> レーザ・MIG ハイブリッド溶接でSM490 鋼（2.2mm厚さ）を溶接する際のポロシティーの発生現象をX線を用いて高速度カメラで撮影し、その発生についてより高速溶接で、かつ、継手ギャップが狭く、ポロシティーが発生しやすいことを示した。レーザ単独溶接では著しくポロシティーが発生したが、ハイブリッド溶接ではJIS放射線透過試験のフィルム等級は1級であった<sup>37) 38)</sup>。

また、アルミニウム合金は溶接時凝固割れが発生する場合がある。このとき、Al-12%Si系のフィラーワイヤを用いて溶接することにより凝固割れが防止できる。エアバスは旅客機のスキンパネルとスチフナーのすみ肉溶接はこのようにして、凝固割れを防止している。近い将来はファイバーレーザとGMAハイブリッド溶接を採用すると思われる。ほかにも低温割れに影響する水素の挙動、疲労強度に及ぼす融合不良や溶込み不良の影響、酸素によるポロシティーの防止方法などの報告がある。

### (5) 溶接継手性能の改善

著者等は590MPa級高張力鋼のレーザ溶接金属の切欠きじん性の改善のためにCO<sub>2</sub>レーザ・GMAハイブリッド溶接の効果を試した。図12はハーフサイズのシャルピー衝撃試験結果を示す。何れの試験温度でもレーザ溶接に比べて、高い吸収エネルギーを示した。それは従来のMAG溶接部の値に近い値を示した。延性破面率においても同じような傾向を示した。ハイブリッド溶接に用いるワイヤにより、溶接金属の化学組成および金属組織を調整できるメリットは大きい。

異種金属溶接継手などの継手性能を改善することも可能である、さらに研究が進められるであろう。

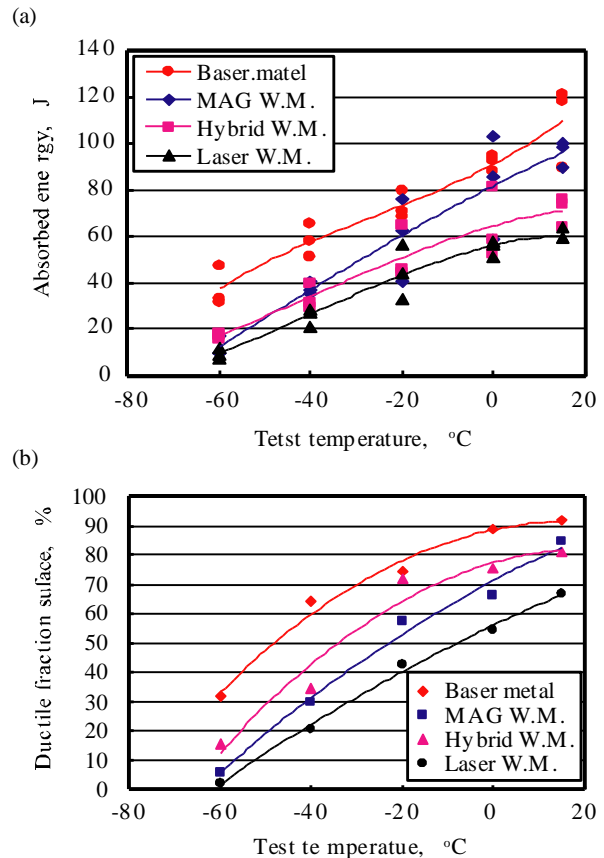


図12 590MPa級高張力鋼の各種溶接部の衝撃試験結果<sup>39)</sup>

## 5. 各種材料のハイブリッド溶接

### (1) 低炭素鋼・高張力鋼

炭素鋼をより能率よく高速溶接をすれば、鋼の特性上、溶接部および熱影響部がマルテンサイト変態を起して硬化が生じ、場合によっては低温割れが生じることがある。MAG溶接ではワイヤの化学組成や溶接施工条件（予熱などの）を工夫して、良好な溶接金属を得て、割れも防止している。ハイブリッド溶接ではワイヤの選択と溶接施工条件で溶接金属は解決できるが、溶接熱影響部は高速溶接すると硬化が問題になることがある。ポロシティーや割れの防止だけでなく、自動車の鋼板では成形性やじん性の評価など多くの研究がある<sup>40) -52)</sup>。

### (2) メッキ鋼板

亜鉛メッキ鋼板は亜鉛の金属蒸気は900°C以下でも生じるのでポロシティーの発生が問題となるが、溶融

池を長くすることやエア・ギャップを0.1～0.2mmとすることで、亜鉛蒸気は抜け易くなり、ポロシティ発生が少なくなる<sup>42)・56)</sup>。

### (3) ステンレス鋼

ステンレス鋼のレーザ溶接およびハイブリッド溶接は高速溶接が可能で、粒界腐食の問題を回避できるので、できる限り入熱の小さい高速溶接は望ましい。すでに、ハイブリッド溶接の研究および圧力容器への適用例もある<sup>57)・60)</sup>。将来はシングルモードのファイバーレーザでは200μ厚さのステンレス鋼を200m/minで溶接できるので、ハイブリッド溶接でもかなり高速の溶接が可能となろう。

### (4) アルミニウム合金

各種アルミニウム合金のハイブリッド溶接の研究では溶接欠陥である凝固割れやポロシティの研究などがある<sup>61)・65)</sup>。自動車産業ではすでにドアパネルの溶接に実用化されている。

### (5) その他金属材料

その他金属および異種金属継手のハイブリッド溶接の報告もある<sup>66)・68)</sup>。今後はチタン合金、ニッケル合金、銅合金のハイブリッド溶接などの報告も増加してくると思われる。

## 6. ハイブリッド溶接の実用化例

### 6.1 適用例 (その1:造船)



図13 Meyer Werft社で建造される高速船 ドイツのMeyer Werft社は図13に示すような高速船を建造するPapenburg工場に1994年より研究開発してきたレーザ溶接を最近図14に示すようなサンド

イッチパネルの製造ラインに導入した。



図14 レーザ溶接されたサンドイッチ部材



図15 造船用フラットパネルへのハイブリッド溶接の適用状況

さらに、図15に示すように客船用フラットパネルの突合せ溶接継手及びすみ肉溶接継手にレーザ・アークハイブリッド溶接を導入した<sup>69)・72)</sup>。



図16 Fincantieri社に導入された10kWファイバーレーザによる溶接システム<sup>73)</sup>



図16は2009年にイタリアのFincantieri社のMonfalcone造船所に導入された10kWファイバーレーザーを用いたハイブリッド溶接システムを示す<sup>73)</sup>。EU諸国の造船各社が国際プロジェクトとして「Docklaser」を実施し、造船業へのレーザー加工の適用を格段と発展させた結果である<sup>72) 74)</sup>。米国の海軍でも2003年よりレーザー加工技術を艦船の工作に利用する研究プロジェクトが始まり、60億円余の予算で開発が進んでいる<sup>75) 76)</sup>。

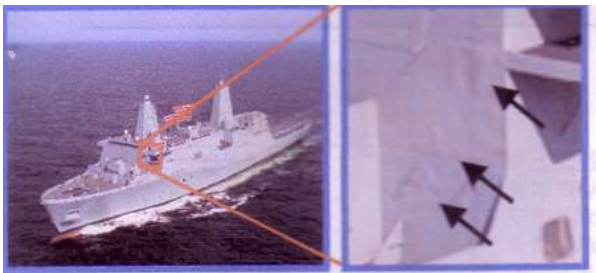


図17 艦船のパネルのハイブリッド溶接対象<sup>76)</sup>

我が国でも三菱重工業がコンテナ船の居住区など、板厚が5mm~12mmの部材の溶接に裏あて材を用いたハイブリッド溶接を適用している<sup>77)</sup>。

## 6.2 適用例 (その2:自動車・車輛)

すでに、2000年よりドイツのホルクスワーゲン社はレーザーハイブリッド溶接システムを3ステーション導入して、図18に示すアルミニウム合金製ドアパネルのテーラードブランク溶接に適用している<sup>28) 78)</sup>。また、アルミニウム鋳造合金の溶接にも導入している。ドアパネルのテーラードブランク溶接では1台につき3,570mm(全溶接長4,980mm)をハイブリッド溶接している。図19に示すハイブリッド溶接用のヘッドを開発し、4kWのYAGレーザーとMIG溶接トーチを結合させ、これによりロボット溶接している。

自動車の車体フレームやパネルにも図20に示すAudi A8モデルのようにハイブリッド溶接が1部適用されている。特に、アルミニウム合金では凝固割



図18 Volkswagen”Phaeton”車のFront door溶接例<sup>78)</sup>



図19 レーザ・MIGハイブリッド溶接用ヘッドの外観 (Fronius社製)<sup>28)</sup>

れが生じやすいので、シリコンを多く含有する溶接ワイヤをフィラーワイヤとしてMIG溶接に用いることで解決することもできる。

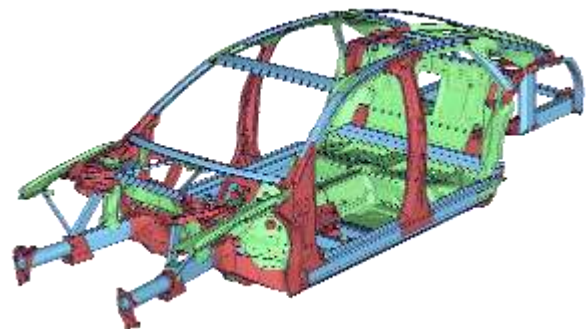


図20 Audi A8モデルにおけるハイブリッド溶接の適用部位(5m)<sup>79)</sup>



### 6. 3 適用例 (その3 : 重工業、エネルギー産業)

東芝は肉厚16mmのステンレス鋼製圧力容器の鋼板を溶接するのに6kWCO<sub>2</sub>レーザとMIG溶接のハイブリッド溶接を適用した<sup>21)</sup>。

そのビード断面を図21に示す<sup>21)</sup>。

Weiding condition		Laser power		
		3kW	4kW	5kW
1layer: Laser 6kW CO <sub>2</sub> , CW 700mm/min 2layer: Laser arc hybrid 700mm/min MIG 320A 30V	Angle 20°			
	JIS RT	2	3	4
Angle 25° 	Angle 25°			
	JIS RT	2	3	3

図21 肉厚16mmのステンレス鋼製圧力容

器のハイブリッド溶接部のビード断面<sup>21)</sup>

英国溶接研究所では 図21に示すようにパイプライン用鋼管のハイブリッド溶接法を開発した<sup>80)</sup>。

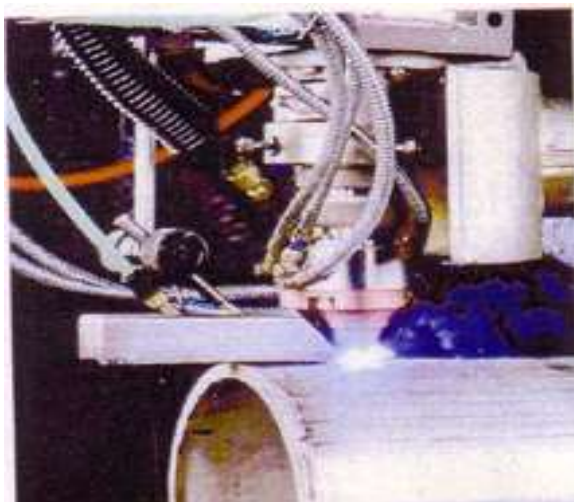


図22 パイプライン用鋼管のファイバーレーザ・

MAGハイブリッド溶接部の断面マクロ

図22はラインパイプの長手継手のハイブリッド溶接状況を示す。また、その断面マクロ写真を図23に示す。肉厚3mmから12mmまでのパイプが溶接されている。

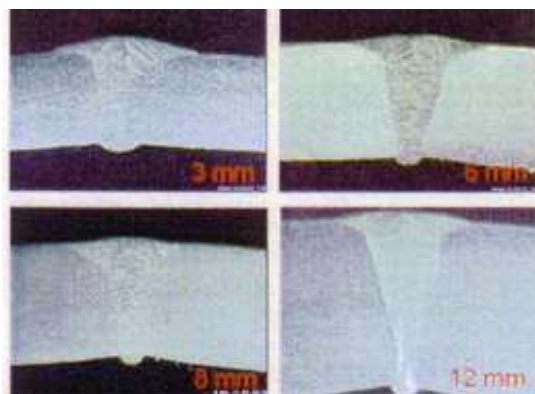


図23 ラインパイプの長手継手のハイブリッド溶接部の断面マクロ写真<sup>80)</sup>

最近、インドや中国で、3000kmや4000kmもある油輸送用のパイプラインの建設が検討されており、レーザ・アークハイブリッド溶接の研究開発が欧州の研究所で進められている<sup>81) 82)</sup>。

図24はベルリンにあるBAM研究所の研究報告で、板厚20mmのパイプ鋼管のハイブリッド溶接例を示す<sup>82)</sup>。Y形開先のものとしてI形開先のものそれぞれ1パスで溶接している。これらの結果から、図25に示すような固定管の円周溶接装置が開発された<sup>82)</sup>。4000kmのパイプラインを20m長さのパイプで建設すると、溶接継手数は20万カ所あり、1つの継手を溶接して施工する時間がハイブリッド溶接により4時間短縮されたとすれば、80万時間の溶接工数が短縮できる。

Without preheating	With preheating at ca. 160°C	
Y-groove	Y-groove	Butt joint
$P_L = 18 \text{ kW}$ , $v_w = 2.3 \text{ m/min}$ , $v_t = 20 \text{ m/min}$ , $I_{MIG} = 466 \text{ A}$ , $U_{MIG} = 39.3 \text{ V}$	$P_L = 17 \text{ kW}$ , $v_w = 2.0 \text{ m/min}$ , $v_t = 18 \text{ m/min}$ , $I_{MIG} = 480 \text{ A}$ , $U_{MIG} = 35.4 \text{ V}$	$P_L = 19 \text{ kW}$ , $v_w = 1.9 \text{ m/min}$ , $v_t = 16.5 \text{ m/min}$ , $I_{MIG} = 422 \text{ A}$ , $U_{MIG} = 33.7 \text{ V}$

図24 パイプ鋼管のハイブリッド溶接断面<sup>82)</sup>

このように、ハイブリッド溶接するメリットは非常に大きい。

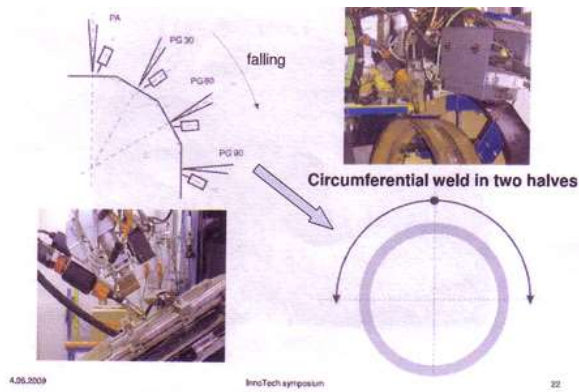


図 25 固定管の円周溶接装置<sup>8.2)</sup>

#### 6. 4 適用例 (その4 : その他)

国際核融合炉 (ITER) の開発が国際共同開発されているが、我が国では IHI や東芝がこれらの大型コンポーネントを高精度に製作するためにレーザー・アークハイブリッド溶接の適用も含めて検討をしている<sup>8.3) 8.4)</sup>。

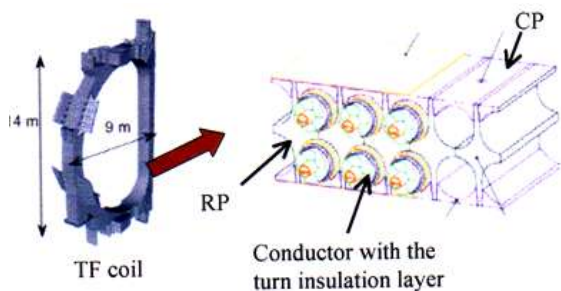


図 26 核融合炉のカバープレートのハイブリッド溶接<sup>8.3) 8.4)</sup>

図 26 はそのカバープレートの溶接部を示す。非常に複雑な溶接部をハイブリッド溶接することも検討されている。

アルミニウム合金車両や鋼車両の溶接にもレーザー溶接またはハイブリッド溶接の適用が始まっている。高出力ファイバーレーザーの出現により図 27 に示すような厚板のアルミニウム合金パネル製車両のハイブリッド溶接がドイツでは高速列車の構体溶接に使われている。溶接速度が 4 m/min ~ 15 m/min と FSW の 5 倍から 10 倍も速いので、今後は、量産製品の溶接に益々適用されると考えられる。

思われる。薄板の分野でも、プレス加工時の部品

精度が不十分であるので、ハイブリッド溶接が適用されると思う。



図 27 厚板アルミニウムのハイブリッド溶接

(板厚 8 mm、溶接速度 4 m/min)<sup>6.5)</sup>

建設機械の油圧シリンダーとプレートとのハイブリッド溶接も図 28 のように検討されている。

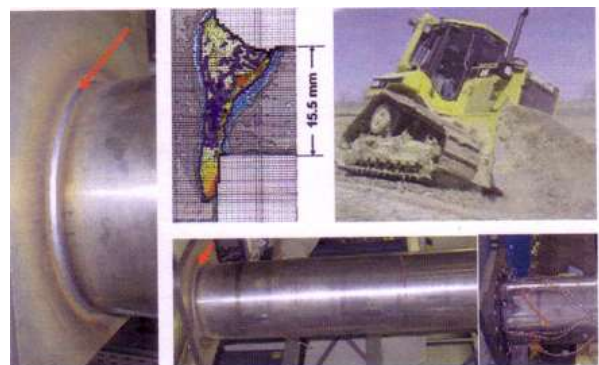


図 28 建設機械の油圧シリンダー (15.5 mm 厚) とプレートとのハイブリッド溶接<sup>8.5)</sup>



図 29 ハイブリッド溶接されるアルミニウム合金製船体構造<sup>8.6)</sup>

フィンランドの造船業では図 29 に示すように、アルミニウム合金製船体構造の小組立てにハイブリッ

ド溶接が検討されている。溶接変形の大きなアルミニウム合金構造物をハイブリッド溶接するとアーク溶接時の歪は一15mmに対して、一4mmに収まることを実証している。

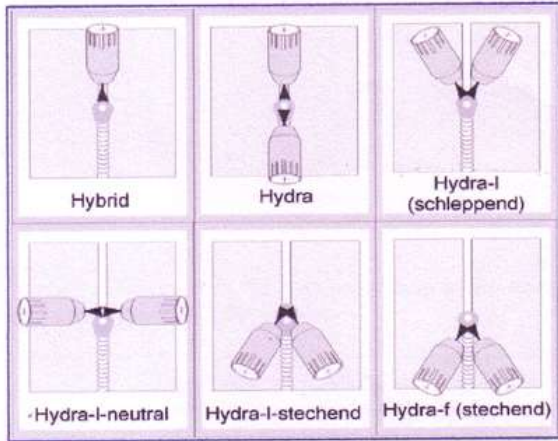


図 30 2つのアークトーチを持つ Hydra 溶接法の開発<sup>87)</sup>

## 7. まとめ

レーザー・アークハイブリッド溶接も発案からすでに30年余が経ち、その実用化もやっと高出力のファイバーレーザーやディスクレーザーという相棒を得て、ますます適用分野が中厚板から厚板構造物の分野に広がってきた。ドイツではさらに高効率なハイブリッド溶接の改良型が図30に示すように2ヘッドのアークトーチをもつハイブリッド溶接「HYDRA」やSAW溶接とレーザー溶接のハイブリッド溶接「LUPUS」溶接が開発されて、実用化が進められている。レーザー技術の発展はまだまた続く。

## 参考文献

- 1) M.Eboo, W.M.Steen, J Clarke : proc. of 4<sup>th</sup> Int.Conf. on Advances in Welding Processes, May 9/11 1978,Harrogate UK, p.257-365
- 2) W.M.Steen and M.Eboo: Metal Construction, 21-7(1979), p.332-335
- 3) W.M.Steen: Jour. of Apply Physics, 51-11(1980), p.5636-5641
- 4) T.P.Diebold, C.E.Albright: Welding J., 63-6(1984), p.18-24
- 5) 浜崎ら : 高温学会誌、9-2(1983),p.79-83
- 6) J.Matsuda, A.Utsumi,et al: Joining and Materials, No7(1988),p.31-34
- 7) K.H.Magee, et al:proc. of ICALEO, Nov.4-9,1990, Boston section A-p.382-398
- 8) E.Beyer,U.Dilthey et al:proc. of ICALEO, Oct.17-20 1994, Orlando, section A p.183-192
- 9) N.Abe et al: proc. of ICALEO'1996, section D, p.D64-D73
- 10) T.Ishida, M.Hirokawa,ら : proc. of 6<sup>th</sup> CiSFFEL, June 15-19,1998 Toulon, France p.399-406
- 11) J.Tusek, M.Suban : Science and Technology of Welding And Joining, 4-5(1999), p.308-311
- 12) U.Dilthey, F.Lueder, A.Wieschemann : proc. of Int. Conf. by IIW, Lisbon, July 19/20 (1999), p.141-151
- 13) U. Dilthey, A. Wieschemann : IIW Doc. XII-1565-99(1999),
- 14) 石出、長島ら : 溶接学会、第 169 回溶接法研究委員会資料,SW-2671-2000
- 15) 阿部、林 : 溶接学会、第 33 回高エネルギービーム加工研究委員会資料、HEB-349 – 2000
- 16) 阿部、林 : 溶接学会誌、70-4(2001),p.389-393
- 17) 石出、名山、渡邊、長島 : 溶接学会誌、70-4(2001),p.394-399
- 18) 牧野、椎原、浅井 : 溶接学会誌、70-4(2001),p.400-404
- 19) Kutsuna,Chen Liang : IIW Doc.XII-1708-02 (2002.June Copenhagen)
- 20)U.Dilthey,A.Brandenburg: IIW Doc XII-1710-02,(2002.June Copenhagen)
- 21) K. Minami, S. Asai, et al: IIW Doc XII-1704-02, (2002.June Copenhagen)
- 22) L. Brown, M. Fallara, P. Denney: IIW Doc



- XII-1709-02, (2002.June Copenhagen)
- 23) K. Nilsson, E. Engström, A. Kaplan:IIW Doc IV-810-02/XII-1732-02
- 24) S.E. Nielsen, M.M. Andersen, J.K. Kristensen, IIW Doc IV-811-02/ XII-1731-02
- 25) J.H. Moon, M. Mizutani, et al: IIW Doc IV-816-02/XII-1706-02(2002.June Copenhagen)
- 26)T. Ishide, S. Tsubota,et al: IIW Doc XII-1705-02 (2002.June Copenhagen)
- 27) T. Ueyana, H. Tong, I. Yazswa, et al: IIW Doc No: XII-1707-02 (2002.June Copenhagen)
- 28)T.Graf, H. Staufer: IIW Doc IV-809-02 /XII-1730-02,
- 29) G.S. Booth: IIW Doc IV.808-02,
- 30) S. Williams, S.A. Morgan: IIW Doc IV-815-02 (2002.June Copenhagen)
- 31) J.Neubert, S.Keitel, H.Butth:proc. of 6<sup>th</sup> Int. Conf. Beam Technology, DVS, April 26-28 2004, Halle,Germany, p.16-20
- 32) John Bifin : Welding & Metal Fabrication, 64-4(1997),
- 33) C.J.Page, T. Devermann,et al: Science and Tech. of welding/joining, 7-1(2002), p.1-10
- 34) D.Petring, C.Fuhrmann, N.Wolf, R.Poprawe: proc. of ICALEO2003, Jacksonville,USA,sect.-A, p1
- 35) H.Piili, A. Salminen, P.Harkko, J.Letinen: Proc. of ICALEO 2008, CD-ROM p.506-515
- 36) Hu Shengsun 胡 : 溶接学報,1 4-1(1998),(中国語)
- 37) A.Matsunawa, M.nizutani, et al: welding international, 17-6(2003),p431-437
- 38) T.Hayashi, S.Katayama,A.Omori:Welding international 18-9(2004),p. 692-701
- 39) Z.J Liu, M.Kutsuna, G.J Xu: proc. of LAMP' 2006, May 16-19,2006, Kyoto,
- 38) C.V.Hyatt, K.H.Magee et al:Welding Journal, 80-7(2001) ,p163s-172s
- 41) D.Dilthey, A.Wieschemann, Welding in the world, 44-3(2000),p.37-46
- 42)小野守章 : 溶接技術、 51-7(2003),p.73-78
- 43)M.Kutsuna, Liang Chen:proc. of 7<sup>th</sup> Int. Symp.,JWS,2001 Nov. Kobe, p.403-408
- 44)沓名、陳 : レーザ加工学会誌、 10-2(2003), p.127-132
- 45)P.L.Moore, D.S.Howse et al:Science and tech.of welding& joining,9-4(2004), p.314-322
- 46) M.Uchihara, K.Fukui: IIW Doc.XII-1854-05
- 47)C.Bratt, J.Noel: proc. of ICALEO'2004, SanFransico, Sec.Hybrid Welding p.1-8
- 48)Anna Fellman, Veli Kujanpaa: journal of laser application, 18-1(2006),p.12-20
- 49) C. H. J. Gerritsen, C. M. Allen, J.Mawella: Development and evaluation of CO2 laser-MAG hybrid welding for DH36 shipbuilding steel, TWI technical report,2006
- 50),E.W.Reutzler, L.A.Kern, J.F.Tressler: proc. of ICALEO ' 2006, CD-ROM #1906, p976
- 51)B.Victor, B.Nagy, D.Farson, proc. of ICALEO ' 2009, CD-ROM paper#106, p79
- 52)F.Vollertsen, S.Grunenwald; proc. of ICALEO ' 2008, CD-ROM paper#1004, p489
- 53) D.Petring, C.Fuhrmann, N.Wolf, R.Poprawe: proc. of ICALEO2007, CD-ROM Paper#604 p.300
- 54)H.P. Gu ,R.Mueller :proc. of ICALEO'2001, Sec.-A,p.304
- 55)H.Haferkamp, A.Ostendorf, et al: proc. of ICALEO ' 2002, Oct. 14-18 Arizona, US Sec-A, CD-ROM
- 56) A.F.H. Kaplan, G.Wirland, T.Nilsson; proc. of ICALEO 2007, CD-ROM paper #610, p.345
- 57) T.Jokinen, et al:Jour. of Laser application. 15-4.(November 2003),p.220-224
- 58) 浅井知 : ステンレス鋼のハイブリッド溶接特性、日本溶接協会 LMP 委員会主催 2 0 0 5 年度レー

- ザシンポジウム講演集、(2006年1月)、つくば市、p.71-81
- 59) E.V.Couso, J.L.Arias Otero, et al; proc. of ICALEO 2007, CD-ROM Paper #603 p.293
- 60) M-Y. Lee; proc. of ICALEO 2009, CD-ROM Paper #1806, p.788
- 61) 上山、H.Tong, 矢澤、中田、牛尾; レーザ加工学会誌、Vol.10-No.2(2003), p.151-157
- 62) K.Shibata, H.Sakamoto, T.Iwasa, Welding in the world, 50-1/2(2006), p. 28-34
- 63) T.Ueyama, H.Tong, et al: Welding international 18-5(2004), p. 345-350
- 64) R.S.Xiao, H.Hugel et al; proc. of ICALEO'2004, San Francisco, sec. Hybrid welding p.70-74
- 65) S.Katayama, S.Uchiumi, F.Briand; proc. of ICALEO 2006, CD-ROM Paper #1903, p.953-959
- 66) G.Casalino, C.Rella; proc. of ICALEO 2007, CD-ROM Paper #602, p.287-292
- 67) F.Vollertsen, C.Thomy; proc. of ICALEO 2009, CD-ROM Paper #107, p.89-97
- 68) L.Cui, M.Kutsuna, T.Shimizu, K.Horio; J. of Materials and Design. 30(2009), p109-114
- 69) F.Roland, T.Reinert, G.Pethan: Proc. of IIW Int. Conf. June 2002, p.B-II
- 70) U.Dilthey, et al: Welding international, 16-9 (2002), p.711-719
- 71) P. Seyffarth: proc. of SAIL Conf. June 2-4, 2003, Williamsburg, US, Sec.-2, paper #3
- 72) J.Neubert: proc. of 7<sup>th</sup> Beam Technology, Apr.17-19, 2007, Halle Germany, p.112-116
- 73) I.P.G. 技術資料
- 74) S.Olschok, U. Reisgen, U.Dilthey; proc. of ICALEO 2007, CD-ROM Paper #605, p.308-315
- 75) G.Sturtevant; proc. of 2<sup>nd</sup> SAIL, Aug. 18-19, 2008, Williamsburg, US, Keynote address
- 76) S.M.Kelly, E.W, Neutzel, et al; proc. of 2<sup>nd</sup> SAIL, Aug. 18-19, 2008, Williamsburg, US, Technical Forum A
- 77) 古賀; 日本溶接協会 LMP 委員会主催レーザーシンポジウム 2010 論文集、) 2010 年 3 月 8 日、東京、p 81-87、
- 78) H.Staufner :Welding in the world, 50-7/8(2006), p. 44-50.
- 79) Audi 技術資料
- 80) David. S. Howse, S. Booth, et al: The evolution of Yb fibre laser/MAG hybrid processing for welding of pipelines, TWI technical report, 2006
- 81) S.Gook, A.Gumenyuk, M.Rethmeier; proc. of ICALEO 2010, CD-ROM Paper #202, p.62-69
- 82) A.Gumenyuk BAM technical report, 2010, Oct
- 83) K.Shiihara, Y.Makino, et al; proc. of ICALEO 2007, CD-ROM Paper #606, p.316-324
- 84) 山岡; 日本溶接協会 LMP 委員会主催レーザーシンポジウム 2008 論文集、) 2008 年 1 月 22 日、東京、p 159-164
- 85) D.Petring, C.Fuhrmann, N.Wolf, R.Poprawe; proc. of ICALEO 2007, CD-ROM Paper #604, p.300-307
- 86) A.Salminen, T.Rurtonen et al; proc. of ICALEO 2009, CD-ROM Paper #1608, p.697704
- 87) U.Reisgen, S.Olschok, et al; proc. of ICALEO 2010, CD-ROM Paper #203, p.70-77