ハイブリッドレーザアーク溶接：その時代は近づいているか？

ポール・デニー

非常に高輝度のレーザが登場し、開発課題は残されているが、「ハイブリッド時代」が近づいている。

2010年のFABTECHの会期中に、レーザハイブリッド溶接の現状に関して、二つの新しい出来事が起きた。まず、スウェーデンのエサブ社（ESAB：www.esabna.com）は同社のウエブサイトに、ハイブリッドレーザアーク溶接（HLAW）に関係する新しい情報を追加した（**図1**）。同じ週に、米リンカーンエレクトリック社（Lincoln Electric：www.lincolnelectric. com）はHLAW溶接システムの開発を目的にして、米IPGフォトニクス社（IPG Photonics: www.ipgphotonics.com）との戦略的提携を発表した。世界で最大のアーク溶接企業の両社がHLAWを推進することは、この技術が産業界のなかでどのように見られているかを示している。

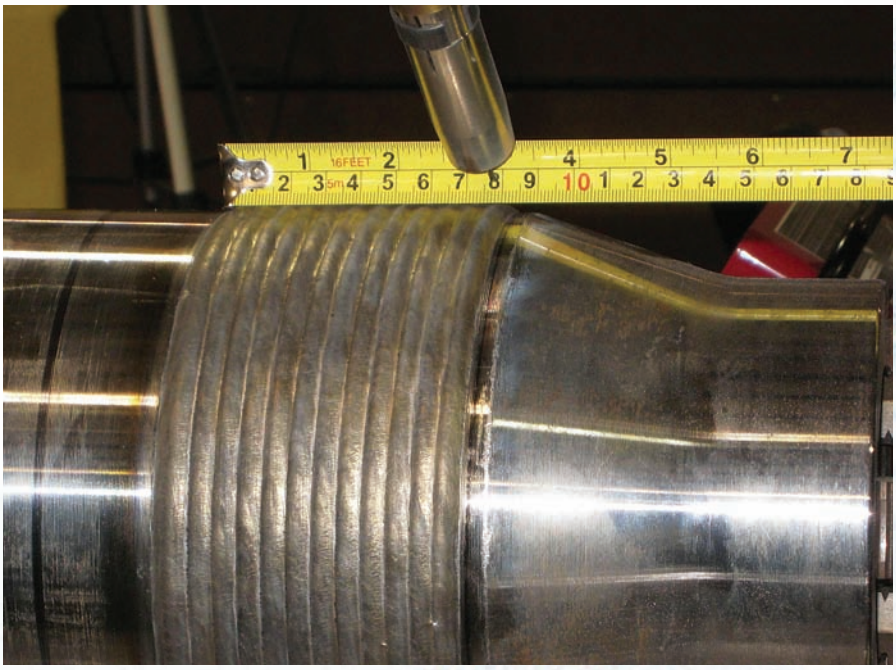

図1　代表的なロボット利用によるHLAW加工を示している。（資料提供：アラバマレーザ社）

HLAWの歴史

伝統的な溶接会社によるレーザ技術の採用は、一夜にして起きたことではない。この技術のいくつかの問題を解決するためのレーザとアーク工程との結合には、レーザ加工そのものと同じ程度の歴史がある。その証拠に、ビル・スティーン氏（Bill Steen）は1980年の米国物理学協会のJournal of Applied Physics誌のなかで「アークによって増強されるレーザ材料加工」と題する論文を発表している。ほとんどの場合、レーザとアーク工程とを組合せると、レーザの取付け、化学反応、パワー限界などの問題の解決が可能になる。また、ほとんどのハイブリッド加工はガス金属アーク溶接（GMAW）（**図2**）が主流であったが、レーザとガス・タングステン・アーク溶接（GTAW）を組合せる方法（ディーボルド氏およびアルブライト氏、Welding Journal、1984年）やプラズマを組合せる方法（ワルダック氏およびビッフィン氏、Welding Research Abroad、1995年）を研究する人もいた。

HLAWは何年にもわたり研究されたが、その利用を妨げるいくつもの理由があった。1990年代の初めはカナダ防衛研究機構で研究に従事し、その後は独立してコンサルタント業を務めているビビアン・マーチャント氏（Vivian Merchant）は、「われわれは強く集光できない大型で不恰好な旧式のレーザを使っていたが、その動作には大きな欠点があると思っていた」と語っている。彼によると、HLAWを利用するメリットは、潜水艦の建造に使われるHY-80材料の溶接のような軍用加工や国土横断パイプラインに使われる高強度材料の溶接の場合に、高い生産性が得られることにある。マーチャント氏は「レーザを使わなければ、厚さ1インチの鋼板を溶接するには10パスも必要になる。しかし、レーザを使うと、加工溝が狭くなり、1インチの鋼鉄の溶接は2

パスで済む！」と語っている。

「無骨な」レーザではあったが、いくつかの応用は実験室を出て工場の現場へと移された。ドイツでは1990年代を通して、HLAWに対する活発な取組みが続けられた。RWTHアーヘン工科大学のISF溶接研究所（ISF-Welding and Joining Institute）などの研究者たちは、独マイヤー・ベルフト・シップビルディング社（Meyer Werft Shipbuilding）などの会社と共同して、この技術の開発と支援を行った。その結果、マイヤー・ベルフト・シップビルディング社では、2000年にCO_2レーザのHLAWを使用して、甲板や隔壁と補強材とを溶接する新しいパネル工法が開始された。このことは、この技術が広く受入れられたことを示しているだけではなく、ノルウェーのDNV（デット ノルスケ ベリタス）や英ロイドなどの組織による造船用の新しい仕様の開発と承認が必要になったことも意味していた。

大きな変革

1990年代終りおよび2000年代初めになると、HLAW加工に衝撃を与えるレーザ技術の大きな変革が起きた。半導体レーザ技術が進歩し、大きなパワーと良好なビーム品質が得られるようになり、価格も低下した半導体レーザは、単独での使用と最新レーザシステムの励起光源としての利用が可能になった。高出力のためのCO_2レーザ（固定光学式）やファイバによるフレキシブル伝送のためのNd：YAGレーザ（4kWまでに限られるが）の選択は不要になった。半導体レーザはファイバレーザやディスクレーザの励起光源として使われるようになり、ファイバによる伝送やCO_2レーザ以上の高出力が可能になったばかりでなく、レーザ装置の運用と保守も容易になった。

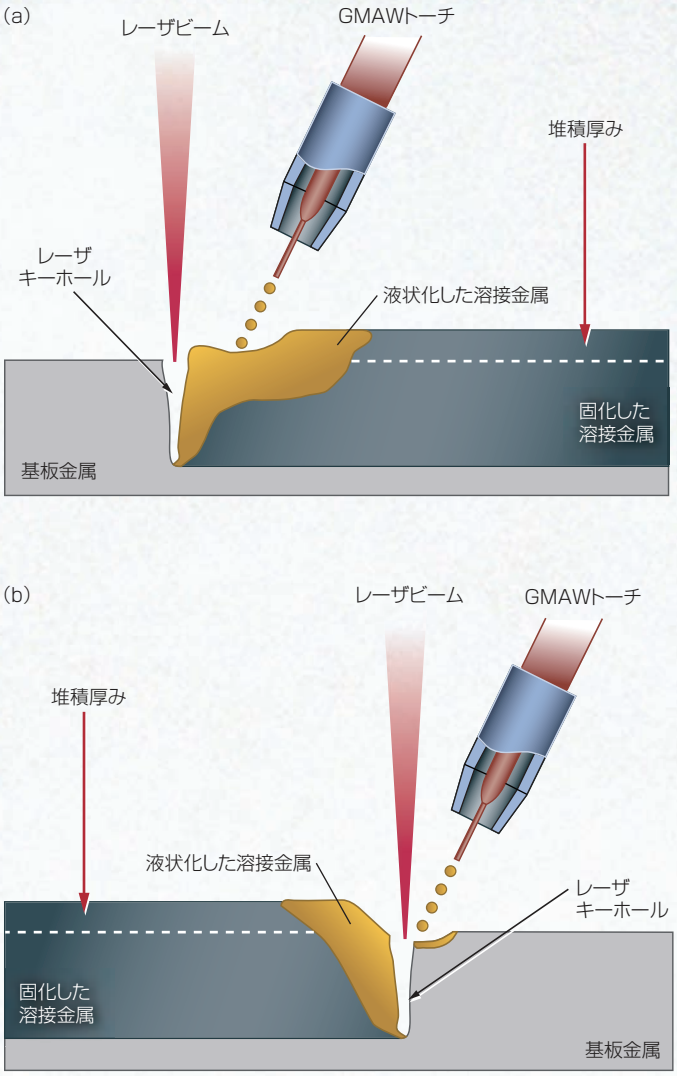

図2 HLAWの基本的な2種類の方法を示している。（a）はレーザが先行し、（b）はアークが先行する。これらの方法は用途に応じて選択されている。（資料提供：EWI社）

米国のオハイオ州コロンバスにあるEWI社のブライアン・ビクター氏（Brian Victor）は、「新しく登場した高輝度レーザの技術は大きな衝撃をもたらした。これらの新しいレーザはHLAWの潜在ユーザにとってあまり脅威にはならない。レーザ装置の運用と保守は容易になり、従来のレーザ技術よりもロバスト性が高く、フレキシブル生産用のファイバ伝送もできる。また、従来のファイバ伝送による産業用レーザより高い出力が得られ、kW当たりの価格も比較的低い」と語っている。

RWTHアーヘン工科大学のISF溶接研究所の主任技師を務めるシモン・オルスコク氏（Simon Olschok）は、ハイブリッド溶接は「造船（使用中）、自動車（使用中）、容器製造、軌道6mmまでのパイプ溶接およびJ-Lay 15mmまでのパイプ溶接」に使用できると述べている。彼によると、マイヤー・ベルフト・シップビルディング社が取組みを開始して以来、多数の会社がハイブリッド溶接の検討を始めている。現在は新しいロバストなレーザ光源が利用可能になり、世界中の多数の研究機関が導入した（これによって開発と導入が支援される）ため、ハイブリッド溶接への取組みは加速している。

ハイブリッド加工は欧州の造船所で

は2000年から利用されてきたが、その取組みは米国でも行われている。米アプライド・サーマル・サイエンシーズ社（Applied Thermal Sciences：ATS）は米国海軍と共同して、2重ステンレス鋼の軽量サンドイッチパネル（LASCORとして知られる）に加えて、構成成分であるHSLA 65の溶接の性能を調べている。LASCORパネルは新しい駆逐艦DDG 1000への応用を目指している。オルスコク氏の上述のコメントと同様、ATSの当初のハイブリッド溶接への取組みは高出力CO_2レーザを使用していたが、最近では高出力のファイバレーザやディスクレーザを使用している。

ハイブリッド溶接は造船所での応用だけではない。スウェーデンの場合、HLAWの初期の産業への応用は2005年の春に、ルーレオのデュロックレール社（Duroc Rail AB）から始まった。この応用はデュロック社において、20 kWのCO_2レーザとGMAW源との組合せを使用して、軌道車用の大きくて厚い高強度鋼板が溶接された。この応用はハイブリッド溶接技術のスカンジナビア諸国への普及を目的にしたハイブリッド溶接スカンジナビアネットワーク（NORHYB）によって開発された。

「非アーク」ハイブリッド加工

HLAWは「アーク」を暗示しているが、レーザをアーク以外の「電気的」工程と組合せた多数の「ハイブリッド」加工法も開発され、使用されている。これらのハイブリッド加工の場合、レーザは精密な加熱源として用いられ、電気的工程は安価な加熱源として使用される。

このような「非アーク」ハイブリッド加工の1例にはハイブリッドレーザ蝋付け加工がある。この加工は、まず部品とワイヤ供給システムのチップを抵抗加熱し、ワイヤの温度を高くする。次にレーザを用いて、蝋付け合金（一般に青銅合金）を融解温度にまで高め、同時に基板も十分な高温に加熱して、融剤を用いない濡れ状態を発生させる。この状態は非常に高速（＞5m/分）でも起こり、塗装できる接合品質が得られる。この方法はフォルクスワーゲン、メルセデスベンツ、クライスラーなどの多数の自動車会社が使用している。この方法の応用例にはトラックリッドや屋根の溝などの溶接がある。

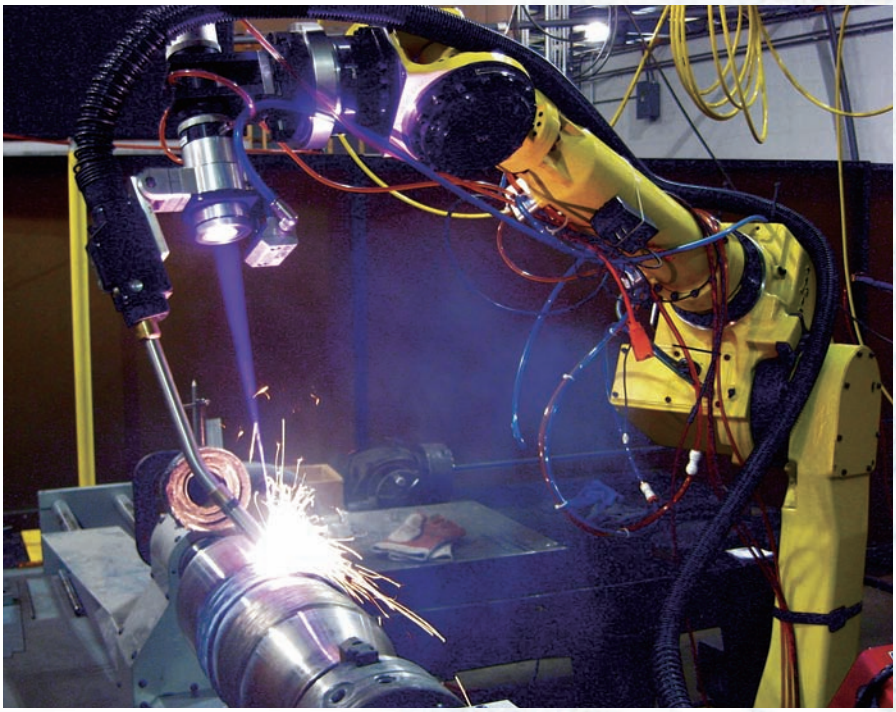

図3　HLAW法で蒸着中のクラッド材料の写真。（資料提供：アラバマレーザ社）

HLAWのもう一つの「多様な」加工はレーザクラッディングだ。この方法は簡単な抵抗加工とレーザを組合せることで、アークを使わないレーザ蝋付けと同様の加工を行うことができる。あるいは、レーザとGMAW加工を組合せると、消耗ワイヤの蒸着にも使える。一般に、これらの加工を用いると、擦り切れた表面や損傷した表面を修復し、基板や蒸着材料の化学的性質を調整し、部品の表面を操作して、耐腐食性や耐摩耗性の改善を実行できる。

米アラバマレーザ社（Alabama Laser）のウェイン・ペン氏（Wayne Penn）は、Laser Additive Manufacturing（LAM）2010ワークショップにおいて、抵抗加熱ワイヤ-レーザ「ハイブリッド」加工への取組みを報告した。**図3**はHLAWクラッディング加工の一例を示している。アラバマレーザ社は、このハイブリッド加工法を使用して、耐腐食性と耐磨耗性をもつ大面積の材料のクラッド加工を行い、従来のGMAW加工よりも少ない希釈と良好な表面状態を実現した。また、LAM 2010では、米プレコ社（Preco：www.precoinc.com）のジョエル・デコック氏（Joel DeKock）が、耐間磨耗性材料を高い速度と少ない希釈で蒸着する同社の「真正」ハイブリッド溶接加工を報告した。

GMAWは大部分の「ハイブリッド」応用へのレーザ加工を支援できる。すなわち、

・レーザから高温のフィラー材料を低いエネルギーまたはエネルギーなし

で付加できる。

・通常の内溶性レーザ溶接に比べると、溶接部における大きなフィットアップと間隙の問題が許容される。

・溶接金属の化学的性質を修正できる。

一方で、レーザがGMAWを支援する場合もある。ブランドン・シン氏（Brandon Shinn）がFABTECH 2005のAWS技術部会において報告したように、レーザとパルスGMAWを組合せると、チタン溶接は高い品質が得られる。一般に、GMAW加工によるチタンの溶接は難しいが、それはアーク陰極が「不安定」になり、ビードの周りを移動することによる。その結果、ビードは不均一となり飛散する。しかし、シン氏は200Wの低いレーザパワーを溶融たまりに集光して陰極位置を「固定」すると、非常に均一なビードが得られることを見出した。この「レーザアシストGMAW」ハイブリッド加工によって、航空宇宙などの用途に使われる薄いチタン構造の溶接を非常に高速かつ小さなビードで実現可能になった。

このような用途の拡大によっても、受け入れられるハイブリッド溶接はどのようなものかという検証が牽引されている。前述したように、DNVとロイドはすでに造船用のハイブリッド溶接の標準を開発した。しかし、他の国々における最近のHLAWへの活発な取組みによって、他の機構による別の標準／仕様開発への関心と必要性が高まっている。米国機械技術者協会（ASME）と米国溶接協会（AWS）は、いずれも長年にわたりレーザ仕様を開発してきたが、ハイブリッド加工用の標準や勧告のための開発も活発に行っている。いずれの協会も所属企業が使用している仕様の提出を要請して溶接施工方法確認試験記録（PQR）と溶接施工要領書（WPS）を開発している。これらの仕様の開発では、まず、どのようなパラメータの文書化が必要となり、どれだけの変動と変化が許されるかを明確にし、次に、部分的または全面的な規格の再定義を行う。

用途拡大への課題

ハイブリッド加工の利用は増加していると思われるが、用途の拡大には課題が残されている。EWI社のスタン・リーム氏（Stan Ream）とブライアン・ビクター氏（Brian Victor）に何が「課題」なのかと質問したところ、「大きな課題はコストにある。HLAWの重要な潜在市場の多くは、現在のところ、従来のアーク溶接を使用している。レーザと関連機器の購入は大幅なコスト増加をもたらす。HLAWシステムへの大きな設備投資を行うには、HLAW加工の生産性や投資回収率（ROI）などの利点が前もって十分に理解される必要がある」という答えが返ってきた。

コストは一つの課題だが、この加工には物理的な開発課題もあると考えている人もいる。オルスコク氏は溶接の厚さが増加すると、「自由形成ビードルート」が発生可能になる限界に到達すると考えている。彼によると、現在のところ、この限界は使用するレーザによるが12～15mmまでの範囲にある。EWI社の代表も、このような物理的課題について、薄い金属板の場合のHLAW加工は、一般に内溶性レーザ溶接よりも大きなフィットアップ変化を許容できるが、厚さが増すと、フィットアップ公差の改善が重要となり、現在のアーク加工の公差を広げる必要があると述べている。このような改善にはHLAW加工がもつ利点の一部を犠牲にする必要があると考えられる。

さらなるR&D

HLAW加工の利用は始まったが、用途を拡大するためのさらなるR&Dも行われている。今日のHLAW加工の場合、25mm厚の鋼板の単一パスによる溶接は不可能だが、多重パスを行えば可能になるだろう。研究者たちはルートパス用のHLAWと、その後のパス用のHLAWまたは従来のアーク溶接を使用して、パイプラインやその他の厚い部材のHLAW加工を検討している。また、大きなフィリングやクラッディングに対して多重ワイヤを使用する研究やレーザとGMAW粉体供給器を一緒に「調整」して性能と制御性の向上を実現する研究も行われている。

上述したように、「ハイブリッド時代」の到来には長い年月を要したが、ここ数年で利用と開発が加速されている。こうした加速はレーザ、とくに高輝度レーザの改良に牽引されてきた。これらの新しいレーザはシステムへの統合が容易であり、加工のROIも改善されるため、所有コストが低下する。また、新しい標準が利用可能になると、この技術の受容と利用は拡大する可能性がある。レーザと加工法のさらなる改良によって、今後の進歩は牽引されると予想される。

謝辞

著者は、この記事を可能にしたEWI社のスタン・リーム氏とブライアン・ビクター氏、アーヘン工科大学のシモン・オルスコク氏およびビビアン・マーチャント氏から受けた広範囲な助言とコメントに感謝している。

著者紹介

ポール・デニー（Paul Denney）は米リンカーンエレクトリック社のシニアレーザアプリケーションエンジニア。e-mail: paul_denney@lincolnelectric.com

ILSJ