

レーザー・アークハイブリッド溶接技術の現状と今後の課題

川口 勲*

Kawaguchi Isao

近年、レーザー発振器の高品質化・高出力化に伴い、レーザー加工技術はその適用先を広げている。特に、これまで課題となっていた大型構造物の厚板への適用に向け、レーザー・アークハイブリッド溶接の研究・開発が進み、実用化段階に来ている。このようなレーザー・アークハイブリッド溶接技術の現状や特徴、適用事例と共に、今後の課題について紹介する。

キーワード：レーザー加工、レーザー溶接、ファイバーレーザー、レーザー・アークハイブリッド溶接

1. 緒言

レーザー・アークハイブリッド溶接（以下、ハイブリッド溶接という）は、レーザー溶接とアーク溶接の長所を活かしながら、欠点を補完しあう溶接方法として注目されている。

レーザー溶接は、低入熱・高精度・高速溶接や深溶込み溶接という優れた特徴があり、各種産業において実用化されている。特に、近年、レーザー発振器のビーム品質・出力・信頼性が急速に進歩してきたことや発振・励起方式の異なるレーザー発振器が高出力レベルでの実用化を迎えていること、モニタリングやビーム制御技術等の周辺技術が進歩してきたことから、それらの特徴を活用した新しいレーザー溶接技術が提案されてきている。

しかし、レーザー品質が向上することは、突合せ溶接におけるギャップ裕度の低下、溶接金属中に発生する気泡（ポロシティ）などの発生量の増大、アンダーカット（溶接ビード止端部に発生するノッチ状の欠陥）などを招く可能性があることが

指摘されている。特に、重工業分野における大型構造物の施工へ導入する上で、これらの問題点の解決が不可欠である。

一方、アーク溶接は装置が比較的安価で、もっとも広範囲に利用されている溶接方法であり、その技術的蓄積、信頼性が高い溶接方法ではあるものの、レーザー溶接と比較して入熱が高いことから溶接変形が大きくなること、高速溶接時にはビード表面が不安定になりハンピングビードと呼ばれる不整ビードが形成されやすいなどの問題点がある。

このような背景から、各熱源を組合せることにより、より高効率・高品質な溶接を目指した技術がハイブリッド溶接技術であり、近年、研究開発が盛んに行われ、実用化されつつある技術である。

ここではハイブリッド溶接の特徴、およびその開発の状況を IHI 技術開発本部と共に行った IIC でのこれまでのハイブリッド溶接技術への取り組みと今後の展開を中心に紹介する。

* 研究開発事業部 生産技術部 専門課長

2. ハイブリッド溶接技術の特徴

2.1 ハイブリッド溶接技術の開発

ハイブリッド溶接は1970年代後半から研究開発が始まったものの、本格的な実用化に向けた開発は、ハイブリッド溶接による溶け込み深さの増大や溶接の高効率化に効果があることが示された90年代後半からであった。その後、レーザ熱源の高品質化、高出力化の急速な進歩や発振器の種類が多様化に伴い多くの熱源の組合せが試行され、同時に溶接ヘッドの開発もさかんに行われている。このような研究開発の成果として、自動車、船舶・橋梁などで、一部実用化されている。

2.2 ハイブリッド溶接の装置構成

ハイブリッド溶接装置は、レーザ溶接に使用するレーザ発振器と市販されているアーク溶接用の電源を組合せ、市販されているレーザヘッドや独自に開発したレーザヘッドにアーク溶接用のトーチを装着させることが、一般的である。ハイブリッド溶接に使用するレーザ発振器は通常のレーザ溶接と同様の発振器から選定される。この中でも、近年、ファイバーでレーザ光の伝送が可能で、より高品質なビーム品質が得られるディスクレーザやファイバーレーザの使用例が増加している。特に図1に示すファイバーレーザは従来の他のレー



図1 ファイバーレーザ発振器の例

ザと比較して、発振器の省スペース化が可能で、発振効率が高く、高ビーム品質が得られることから、従来のレーザ溶接以上の高速溶接や深溶込み溶接が可能となった。これらの性能向上がハイブリッド溶接においても期待され、各分野で適用のための研究開発が活発に展開されている。

2.3 ハイブリッド溶接技術の特徴

前述したように、レーザ溶接は、高速溶接や深溶込み溶接、入熱が抑えられることによる低ひずみ溶接という非常に有用な特徴を持つが、一方で、開先裕度が狭く、深溶込みになるに従いポロシティなどの溶接欠陥が発生するという欠点を持っている。本項目では、このような欠点を解消する手段のひとつとしてのハイブリッド溶接の利点について、述べる。

(1) アークの安定化

レーザ照射によってアークが安定化することについては、多くの研究報告があり、この特徴を利用することが、ハイブリッド溶接を使用する大きな目的のひとつである。溶接アークの指向性の欠如は、ビード蛇行や溶接欠陥の発生要因となり、低電流条件においてはアークの不安定性や電極の消耗などによる電極先端形状の変形などが発生する。ハイブリッド溶接は、溶接中になんらかの要因によってアークに偏向が生じた場合、アークプラズマをレーザプラズマが誘導して極点をレーザ照射点近傍に拘束できるため、より指向性の高い安定した熱源が得られる。特に、薄板溶接の場合に用いられる速度域では、アークの安定化に有効であるとする研究報告が多数あり、ハイブリッド溶接の有効性を示す特徴となっている。この作用により、アーク単独の溶接においては、図2(a)に示すようにハンピングが発生するような速度域においてもハイブリッド溶接を行うことによって(b)に示すような良好なビードを得ることが可能となる。

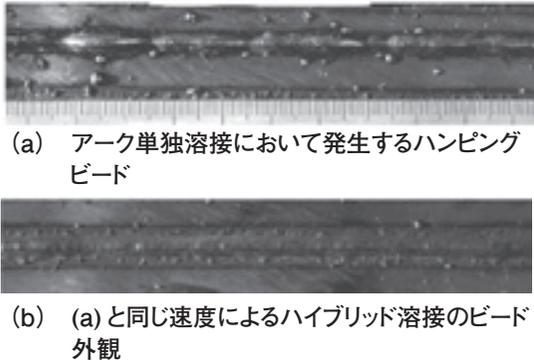


図2 ハイブリッド溶接によるビード形状の安定化

(2) 溶接速度の高速化

アーク溶接を単独で行った場合、溶接速度が速すぎると、極点移動がスムーズに行えなくなることから、アークが不安定化し、ハンピングビードが形成されることが知られている。しかしながら、ハイブリッド溶接を用いることにより、前項で述べたように、アークが安定化により高速域まで安定な溶接が可能となる。また、板厚 10 mm 前後のステンレス鋼板の 1 パス下向き突合せ貫通溶接においても、レーザー単独溶接と比較して、10 ~ 20% 程度の溶接速度の増加が可能である。

(3) 溶込み深さの増加

下向きの突合せ溶接の場合、ハイブリッド溶接は、レーザー単独溶接と比較して、溶込み深さが深くなるという特徴がある。しかし、溶接条件を選定する必要がある、どのような条件においても深くなるわけではない。特に、レーザーとアークの照射位置や、溶接の姿勢などによって大きく変化することが知られている。溶込み深さが深くなる溶接条件は、キーホールが形成されていて、かつ、レーザー照射位置でのアーク溶接により形成される熔融池の表面深さが重要であり、熔融金属層の厚い部分にレーザーを照射しないような、溶接条件を選定する必要がある。このような適正条件を用いることにより、ハイブリッド溶接における溶込み

深さは、図3に示すように、レーザー単独溶接と比較して溶込み深さが深くなる¹⁾。また、レーザー単独溶接における深溶込み溶接はポロシティなどの溶接欠陥の発生が懸念されるため、Y開先を用いて、1層目はレーザー単独溶接で行い、2層目にハイブリッド溶接を用いるなどの手法がとられる場合もある。

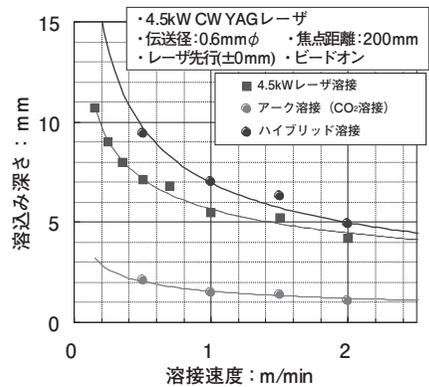


図3 ハイブリッド溶接による溶込み深さの増加¹⁾

(4) 開先裕度の拡大

レーザー溶接部にギャップが発生した場合、アンダーフィルや材料によっては溶接割れが発生しやすくなるため、レーザー単独で溶接を行う場合は一般的には開先加工に機械加工を行い、ギャップを極小化して施工する必要がある。しかし、寸法精度を出しにくい曲線部や、6 mm 程度以上の板厚の材料をレーザー切断のまま溶接を行う場合、さらに、大型構造物を製作する場合などではギャップをゼロに管理することが困難な場合が多い。ハイブリッド溶接は、寸法精度の緩和や許容ギャップを大きくできる特徴があり、レーザー単独溶接では困難である適用範囲への拡大が期待されている。ギャップ裕度は、図4に示すように、板厚 12 mm のステンレス鋼に対して、レーザー単独溶接においては 0.5 mm のギャップでアンダーカットが生じるが、ハイブリッド溶接を行うことにより

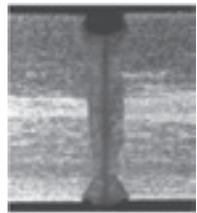
溶接方法	レーザー	レーザー	ハイブリッド	アーク (MAG)
ギャップ	0mm	0.5mm	2mm	2mm
マクロ観察結果				

図4 各種溶接方法のギャップ裕度²⁾

2 mm のギャップ裕度が得られることがわかる²⁾。

(5) 溶接変形の低減

前項で、レーザー溶接の弱点であるギャップ裕度をハイブリッド溶接を行うことにより解決できることを示したが、逆にアーク溶接の弱点である変形量もハイブリッド溶接を行うことにより低減することができる。

図5は、板厚12 mmのステンレス鋼を各溶接方法によって突合せ溶接を行った場合の角変形量を比較した結果である²⁾。ただし、開先は、レーザー溶接はギャップ0 mmのI開先、ハイブリッド溶接は0.5 mmギャップのI開先、アーク溶接(MAG溶接)は、60° V開先を用いている。その結果、ハイブリッド溶接はアーク溶接とレーザー溶接の中間の変形量に位置しており、アーク溶接

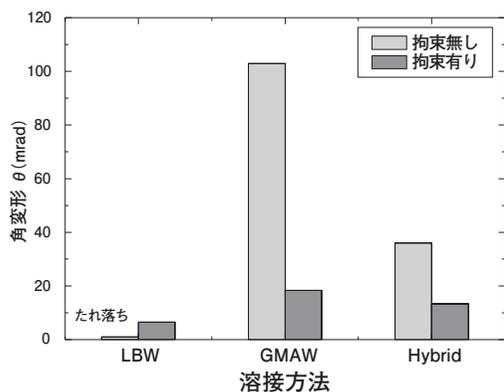


図5 ステンレス鋼の各種溶接方法の角変形量の一例²⁾

と比較して変形量が低減できることを示している。ただし、レーザー単独溶接と比較すると変形量が大きくなるため他のメリットなどもよく考慮してハイブリッド溶接を選定する必要がある。

(6) 継手強度の改善

レーザー溶接は、急熱急冷であることから溶接部の硬度が高くなったり、靱性が低下することがある。レーザー単独溶接においては、これらの機械的性質を改善することは困難である。しかし、ハイブリッド溶接は、入熱がレーザー溶接と比較すると高いため冷却速度が緩和されること、溶接ワイヤを使って成分調整を行うことができるため機械的性質の改善がレーザー溶接と比較して容易である³⁾。

(7) 溶接欠陥の抑制

レーザー溶接においては、溶込み深さが増加するにしたがって発生するポロシティや入熱などの溶接条件や継手形状などによって発生する割れが溶接欠陥として発生しやすくなる傾向にあるが、ハイブリッド溶接は、溶接条件を適正化することによりこのような溶接欠陥の低減に効果があることが示されている。特に、ポロシティの原因は、キーホールの不安定性が要因となったキーホール挙動が大きな影響を与えることが知られており、レーザー単独溶接においても種々の解決方法が検討されている。一方、ハイブリッド溶接は、レーザー溶接と比較して溶融プールが大きく、溶融プールの動きにも変化があり、発生したポロシティが溶融池

表面から抜け、ポロシティの低減に有効であると
する報告もある³⁾。しかし、溶接条件によっては、
アーク溶接の溶融金属の移行時にキーホール挙動
が不安定化し、ポロシティの発生量が増加する場
合もあり、注意が必要である。

3. ハイブリッド溶接の最近の適用

3.1 薄板への適用例

薄板は、寸法精度の向上と共に高速溶接が行え
る点と継手特性の向上が図られる箇所に適用が進
められている。その例としてフォルクスワーゲン
ではドア部分へのハイブリッド溶接の適用が行わ
れている³⁾。そのほか、国内でもテラードブラ
ンク材や車輛のアルミ溶接へのハイブリッド溶接
の適用もされている⁴⁾。

3.2 厚板への適用例

厚板の場合は、変形が少なく後工程の仕上げ調
整や組立て工数の削減が期待できる箇所への適用
が考えられる。ヨーロッパでは、図6に示すよ
うな装置を用いた造船用部材の隅肉溶接や、サン
ドイッチパネルへのハイブリッド溶接が実用化さ
れ³⁾、また、橋梁部材への適用も行われている⁵⁾。



図6 ハイブリッド溶接の造船部材への適用例⁴⁾

3.3 自動化への動き

ハイブリッド溶接は、アーク溶接条件やレーザ
溶接条件などのパラメータが多く、また、レーザ

溶接を用いる特質上、自動化は不可欠である。基
本的には、複雑な溶接線や比較的小型な部材には
図7に示すような多関節ロボットが多く用いら
れ、直線の溶接には精度に優れた図8に示すよ
うなカンチレバータイプやガントリータイプのロ
ボットが多く用いられる。また、大型構造物にな
るに従って図6で示したような大型装置が必要
になるが、コスト面からの制約も大きくなる。こ
のような観点から、走行台車を用いたハイブリ
ッド溶接装置の開発が必要であり当社グループにお
いても図9に示す自走式の溶接装置を開発し²⁾、
良好な溶接継手を得ている。また、大型部材を溶
接する場合には、狙い位置精度、溶接変形などの
観点から、拘束方法や開先倣い機構を用いた溶接



図7 多軸ロボットによるハイブリッド溶接の例



図8 カンチレバー式のハイブリッド溶接装置の一例

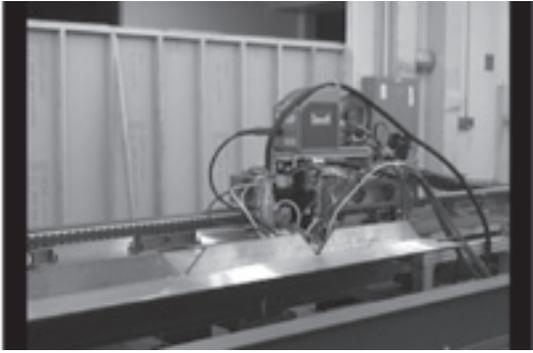


図9 走行台車を用いたハイブリッド溶接装置の一例²⁾

装置の開発・適用が重要な課題となる。

4. 今後の展望

現在、ハイブリッド溶接は、その使用目的による熱源の選択、溶接条件の適正化、自動化、溶接現象の可視化および品質管理技術などのシステム化が課題であり、その中でも、材質・板厚に適合したシステムの供給を迅速に行える技術の構築が重要である。

参考文献

- 1) 河合、岩見、馬場、小川：“レーザー・アークハイブリッド溶接現象の観察”、第153回溶接アーク物理研究委員会資料
- 2) 山岡：“各種材料のレーザー溶接とその応用”、溶接技術 Vol.55 (2007)、No.11 pp.93-97
- 3) 安部、林：“レーザー・アーク複合溶接法とその将来”、溶接技術 Vol.51 (2003)、No.7、pp.62-67
- 4) 片山：“レーザー・アークハイブリッド溶接はど

う進んでいるか”、溶接技術 Vol.56 (2008)、No.2 pp.51-58

- 5) 猪瀬、神林、井戸、大脇、宮地：“レーザー・アークハイブリッド溶接の橋梁部材への適用”、IHI 技報 Vol.49 No.1 (2009-3) pp.60-63



研究開発事業部
生産技術部 専門課長
川口 勲
TEL. 045-759-2120
FAX. 045-759-2155