① レーザ・アーク複合溶接法の現状と将来*

阿 部 信 行**, 林 雅 一***

阿部 信行

林 雅一

Trend of Laser Arc Combination Welding Method*

by ABE Nobuyuki** and HAYASHI Masakazu***

キーワード：レーザ、アーク、複合溶接、基本特性、メカニズム

1. はじめに

レーザ・アーク複合溶接法は1980年に英国のW.M. Steenら¹⁾によって2kWのCWCO₂レーザとTIGアークの複合の研究が発表された。当時、レーザはまだ出力も小さく非常に高価な装置で、大出力を必要とする溶接に適用して価格に匹敵する効果を出せるとは考えられていなかった。そこで、小出力の比較的安価なレーザを用いてより大きい出力のレーザに匹敵する効果を出す工夫として、この溶接法は誕生した。つまり、アークによって予熱を行い、続いてレーザ溶接を行えば、比較的小出力のレーザでも溶接に適用することができ、溶込み深さの増大や、溶接速度の向上が図れるというものであった。それ以降の主な研究発表を表1に示す。Steenらの発表後、日本でも早速1983年に浜崎ら²⁾により5kWのCO₂レーザとTIGアークを用いて検討が行われた。その後、レーザの大出力化の流れや二つの熱源を用いることの複雑さにより、しばらく研究は中断し、再び注目を集めたのは1994年のBeyerら³⁾による2kWのNd:YAGレーザとTIGアークの複合溶接の発表であった。それ以後、レーザ・アーク複合溶接の効果は、溶込み深さの増加⁴⁾、溶接欠陥の抑制⁵⁾、あるいはアークの誘導⁶⁾などが報告されているが、まだ完全には解明されていない。この理由のひとつは、この溶接法が2つの特性の異なる熱源を組み合わせたために生じる複雑さを持っていることである。研究が進むに従って、レーザとアーク間の相互作用や、キーホールや溶融池の挙動、極点の動

き、プラズマやアシストガスの影響など、多くの現象が絡み合って複雑な挙動を示すことが明らかになってきた。

しかし、図1に示すように、これらの現象を目的に合わせてうまく組み合わせると生産効率や溶接品質の上で大きな効果が得られることも分かってきた。レーザ溶接は高エネルギー密度の溶接法として多くの長所を持った溶接法であるが、厚板溶接などの場合はブローホールや割れを生じやすい。これらの欠陥に対してレーザ単独の溶接条件の制御で対処することは困難で、他のレーザ、各種アーク、プラズマなどの他の熱源と複合して対処することが必要である。レーザ溶接の短所は、①深溶込み溶接でのポロシティの発生、②被溶接材の端面ギャップによる湯不足、③スポット径の小ささによる溶接線の目はずれ、④低いエネルギー利用効率、などが挙げられるのに対し、逆にアーク溶接の長所は、①添加剤の利用が容易、②大きな溶融部による大きな施工裕度、③高いエネルギー利用効率、などが挙げられ、これらを効果的に組み合わせれば非常に効率的な溶接法となると考えられる。レーザ・アーク複合溶接法は、単にレーザとアークの足し算ではなく、レーザとアークというエネルギー密度の異なる2つの熱源を効率的に組み合わせることで、各々の短所を補完するとともに長所を相乗させることで、さらに効率的な熱加工を行おうとするものである。

2. レーザ・アーク複合溶接の特徴

レーザ・アーク複合溶接のメリットはレーザとアークのそれぞれの特長を活かして相乗効果を引き出すところにある。つまりアークは熱と溶融金属を供給し、レーザ

*原稿受付 平成13年3月6日

**正 員 大阪大学 Member, Osaka University

***正 員 ㈱クボタ Member, Kubota Corporation

表1 レーザ・アーク複合溶接法研究の流れ

1980年	W.M.Steen ら ¹⁾	Imperial College, UK	2kWCO ₂ +TIG	A
1983年	浜崎正信ら ²⁾	四国工業技術研究所、日本	5kWCO ₂ +TIG	A
1994年	E.Beyer ら ³⁾	Fraunhofer Institute, Germany	2kWNd:YAG+TIG	A
1995年	松田純ら ⁶⁾	四国工業技術研究所、日本	2kWCO ₂ +TIG	B
1996年	阿部信行ら ⁷⁾	大阪大学、日本	7kWCO ₂ +MIG	E
1997年	吉川光昭ら ⁴⁾	住友重機械工業、日本	4kW(p)Nd:YAG+TIG	A
1998年	石出孝ら ⁵⁾	三菱重工業、日本	1kWNd:YAG+TIG	D
1998年	U.Dilthey ら ⁸⁾	Aachen University, Germany	6kWCO ₂ +GMA	C

A: アーク支援レーザー溶接、B: レーザ安定化アーク溶接、C: アーク強化レーザー溶接、D: 複合熱源溶接、E: LPLAC溶接(Leading Path Laser Arc Combination welding)

図1 レーザ・アーク複合溶接

図2 レーザ・アーク複合溶接の分類

は深い溶込みを得ることやアークの安定化、極点の誘導などの役割を持ち、これらの効果の組み合わせによって生産性の増大や溶接品質を向上させることができる。具体的にレーザーやアーク単独溶接の場合と比較してみると、次のようなメリットが考えられる。

- ①レーザーやアーク単独よりも深い溶込み深さが得られる。
- ②レーザーやアーク単独よりも速い溶接速度が得られる。
- ③溶接突合せ面の精度やミスアライメントの裕度を緩和できる。
- ④高エネルギービーム特有の欠陥を抑制できる。
- ⑤溶接部の機械的性質を改善できる。

このような目的に対して、レーザー・アーク複合溶接は複合条件を様々に変えることにより対応する。主にレーザーの特徴を活かすのか、アークの特徴を活かすのかによって図2のように分類できる。

A: アーク支援レーザー溶接: アークによる予熱によって、レーザーを効率的に利用しようとするもので、深溶込みや高速溶接を目指したレーザー主体の溶接

B: レーザ安定化アーク溶接: レーザ照射で発生するプラズマを利用してアークの極点の移動をスムーズにしてアーク溶接の高速化や狭開先における溶接性の向上を図ろうとするアーク主体の溶接

C: アーク強化レーザー溶接: レーザ溶接部は硬化して衝撃値が下がることが多いが、これをアーク側から適当な金属を添加して改善しようとするレーザー主体の溶接

D: 複合熱源溶接: 高エネルギー密度ビーム溶接特有の溶接欠陥を低エネルギー密度のアークによって抑制しようとするものである。これらの欠陥は入熱条件やそれに起因するビード形状と密接な関係を持っているため、特性の異なる溶接熱源を利用し、加熱温度や冷却速度を適切にすることによってこれらの欠陥の抑制を図るレーザー主体の溶接

E: LPLAC溶接 (Leading Path Laser Arc Combination welding): アークによる溶融金属の供給を前提として、キーホールができやすいようにあらかじめ突合せ部にレーザーの通り道としてギャップ (Leading Path) を準備しておき、レーザー溶接の目はずれ精度を緩和するとともに、レーザーの深溶込み特性を増加させることを目的とする溶接

A, CおよびDはアークの大入熱を利用したレーザー主体の複合であり、Bはレーザープラズマのアーク安定化効果や極点誘導効果を利用したアーク主体の複合である。以下ではこれらをすべて含んだEを中心に、レーザー・アーク複合溶接法の基本特性について述べる。

図3 レーザ・アーク複合溶接とアーク単独溶接における溶接現象の比較

3. レーザ・アーク複合溶接の基本特性

3.1 レーザによるアークの安定化

アーク溶接の母材側極点は溶接の進行に伴って、存在しやすい溶融池から相対的に存在しにくい冷たい母材部へと移動していかねばならない。したがって移動速度（溶接速度）が速くなると追従が困難になる傾向がある。図3に溶接速度を変化させたときに、高速度ビデオカメラで撮影したレーザ・アーク複合溶接とアーク単独溶接の溶接現象を示す。アーク単独溶接のプラズマ状態を見ると溶接速度が速いほどアークの主流が後傾していることがわかる。これはアークの母材側極点の移動がワイヤに比べて遅れ気味であることを示している。さらに溶接速度が速くなると極点はスムーズに移動することが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・アーク複合溶接では、溶接速度が5 m/minになってもアークの極点はワイヤ直下にあることがわかる。これはレーザプラズマの存在によってアークの極点の移動がスムーズになったためと考えられ、レーザとアークの複合によってアーク単独溶接より高速度まで安定的に溶接できることを示している。

3.2 レーザプラズマによるアーク極点の誘導

厚板の溶接をアーク溶接で行う場合、開先を設けて多層溶接を行う。この時生産性を上げるためにできるだけ狭開先にするのが通常である。しかし、開先を狭くしすぎるとアークはルートまで届かず溶込み不良をおこすことになる。レーザ・アーク複合溶接ではレーザプラズマの存在でアーク単独よりも深い部分にまでアークを誘導

図4 レーザ・アーク複合多層盛り溶接ビード

図5 溶融金属とレーザ照射位置の影響

する事が可能である。図4に20 mm 厚の鋼厚板への多層盛り溶接にレーザ・アーク複合溶接を適用した場合のビードの形状を示す。1層目をレーザ溶接し、2層目をレーザ・アーク複合溶接で行ったものとアーク単独溶接を行ったものを比較した。レーザ・アーク複合溶接を行ったものは1層目と2層目が融合しているのに対して、2層目がアーク単独溶接の場合は出力を増加させても融合不良をなくすことは困難であった。これはレーザ・アーク複合溶接においてはレーザプラズマがアークの極点を開先の深部まで誘導しているためと考えられる。またこのことは、アーク溶接とレーザ・アーク複合溶接を比較した場合、同じ深さにアークを届かせるには複合溶接の方が開先を狭くすることができることを意味している。

4. レーザ・アーク複合溶接に影響を与える因子

4.1 レーザアーク間距離—溶融金属とレーザ照射位置の影響—

品質の良いレーザ溶接を行うためにはキーホールが安定していることが重要である。レーザ・アーク複合溶接においてはレーザ照射位置によってキーホールの形成は大きな影響を受ける。レーザ・アーク複合溶接中の溶融金属とキーホールの様子をレーザ・アーク間距離を変えて高速撮影した写真を基に、レーザの照射位置と溶融金属の相対的な位置関係を模式的に描いたものを図5に示す。レーザ照射位置がアークの溶着金属の中にある場合(図5A)は溶着金属が豊富なためキーホールの生成と維持に注意を要する。つまり、溶着金属が多すぎる所で深いキーホールを生成させようとする、その生成・維持が難しくなり、溶込みが浅くなったり、キーホールが不安定になってブローホールが発生したりする。レーザの照射位置がアークの溶融池の前縁部でレーザの溶融池との境界付近にある場合は、溶融金属が少なくキーホールの生成・維持が容易であり溶込み深さが大きくなる。そしてすぐ後ろからアークの溶融池がくるためうまくレーザの溶融池と融合させることができる(図5B)。図5Cのようにレーザの照射位置がアークの溶融池から離れたところにあるとレーザ、アークの溶融池が分離してしまい融合不良を生じやすくなる。

4.2 アシストガス

CO₂レーザとアークとの複合では、レーザプラズマによりレーザが吸収されたり散乱されたりするため母材への入熱が減少し溶込み深さが浅くなる。そのためアシストガスを吹き付けてプラズマを除去することが必要となる。しかしレーザプラズマを完全に除去してしまうとアークの誘導効果も減少してしまううえ、アシストガスは溶融池やキーホールの形状にも影響を与えるため、プラズマの発生量(レーザ出力)に対して最適な値に制御する必要がある。

4.3 Leading Path

通常レーザ溶接は溶加材を使わず母材を溶融して接合させる。したがって、溶接合わせ面に隙間があるとアンダーフィルや割れあるいはポロシティが生じるため、隙間がない状態で溶接を行う。しかし、レーザ・アーク複合溶接の場合、アークから溶着金属が供給できるため隙間をなくす必要はない。逆に隙間のあるほうがレーザにとってはキーホールの形成が容易で、より深い溶込みを得ることができる。このことを狙って意図的につけた隙間をLeading Pathと呼び、これを利用して深溶込み溶接を行うレーザ・アーク複合溶接をLPLAC溶接: (Leading Path Laser Arc Combination Welding)と呼んでいる。Leading Pathの最適幅はレーザのビーム径、発散角、出力などに依存している。

4.4 溶接欠陥

レーザ・アーク複合溶接においてはアーク溶接条件と

図6 アーク条件による欠陥発生

図7 アーク電圧と溶滴移行

ブローホールの発生とが密接に関係しており、シールドガスが不十分な場合やアシストガスや金属蒸気を巻き込んだ場合にはブローホールが発生する。図6はアーク電流を縦軸に電圧を横軸に取り、割れやブローホールの発生域と健全ビード領域をプロットしたものである。比較的電流が低く、アーク電圧の高い範囲でブローホールが発生していることがわかる。また図7はアーク電圧を変えて溶滴の移行状態を観察したものである。電圧が低いうちはストリーミング移行を行っているが電圧が高くなるとストリームが見えなくなって移行形態が変わってい

ることがわかる。この時溶滴が撮影できていないことから細かい粒状で移行していると考えられる。移行形態が変わるアーク電圧とブローホールの発生する電圧がほぼ一致していることから、熔融金属のこのような細かい粒状の移行が雰囲気ガスを巻き込みブローホールの原因となっているものと考えられる。熔融金属に巻き込まれたガスは、入熱が大きく凝固までの時間が長い方が逃げ出しやすいため、アーク電流の大きい範囲（大入熱条件）でブローホール発生域が高電圧側にシフトしていると思われる。

5. おわりに—レーザー・アーク複合溶接法の将来—

レーザー・アーク複合溶接法は、基本的には高エネルギー密度を持つレーザーと高エネルギー効率を持つアークを補完的に組み合わせて、お互いの長所を強調するため溶接法である。レーザーには CO_2 、Nd: YAG、半導体など、アークには TIG、MIG、プラズマなどが考えられるが、基本的なレーザー・アーク複合溶接現象には大きな違いはなく、レーザーとアークのどのような組み合わせが良いのかは、複合効果の主目的をどこに置くかで決定される。半導体レーザーは他のレーザーと比べてきわめて高いエネルギー効率をもち、非常に小型軽量であるため、もともと小型のアーク機器との複合には最も適していると考えられる。

レーザー・アーク複合の最近の報告では、ポロシティの低減に及ぼすアーク電流やガス種の影響の研究⁹⁾や、開先内部の溶融現象の観察¹⁰⁾、あるいはアークの点弧時にレーザーを照射してプラズマチャンネルを作り、点弧を容易にすることなどが報告されている¹¹⁾。このようにレーザーの持つ機能を積極的に利用することでレーザー・アーク複合溶接法もさらに進化していくことと思われる。

レーザー・アーク複合溶接法の適用については、 CO_2 レーザあるいは Nd: YAG レーザと TIG アークの複合溶接を薄板のテーラードブランク溶接に適用したり¹²⁾、 CO_2 レーザと MIG アークの複合溶接をオイルタンクの製作に適用する試み¹³⁾など幅広い範囲での検討が報告されている。最近までレーザー・アーク複合溶接機としては特に市販されているものはなく、アプリケーションに合わせてレーザーとアーク溶接機を組み合わせ研究されていた。しかし、現在では、レーザー・アーク複合溶接用トーチとして、 CO_2 レーザと MIG アーク、Nd: YAG レーザと TIG アークを組み合わせたものや、 CO_2 レーザや Nd: YAG レーザとプラズマアークを組み合わせたものが発表されており、この溶接法を実用化するインフラが整いつつある。また、高出力レーザーの価格が下がり性能的にも安定してきたため、レーザー溶接を本格的に実用

化する動きが広がりつつあり、レーザー・アーク複合溶接法はこれらの高出力レーザーの弱点を補完強化できる溶接法としても将来ますます用いられるようになるであろう。

参 考 文 献

- 1) J. Alexander and W.M. Steen: Penetration Studies on Arc Argumented Laser Welding, Proc. Int. Conf. on Welding Research in The 1980's, Osaka, 1980, pp. 121-126.
- 2) 浜崎正信, 勝村宗英, 松田純, 永田重幸: ティグ・レーザー併用溶接におけるティグ電流の影響について, 高温学会誌, Vol. 9, No.2, 1983, pp. 79-83.
- 3) E. Beyer, U. Dilthey, R. Imhoff, C. Majer, J. Neuenhahn and K. Behler: New Aspects in Laser Welding with an Increased Efficiency, Proc. 13 th Int. Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, Orlando, 1994, pp. 182-192.
- 4) 吉川光昭: YAG レーザ溶接における周辺機器の開発, 溶接学会第 25 回高エネルギービーム加工研究委員会資料, HEB-266-97, 1997.
- 5) 石出 孝, 橋本義男, 赤羽 崇, 長島是, 濱田彰一: The Latest YAG Laser Welding System —Development of Hybrid YAG Laser Welding Technology—, 溶接学会第 27 回高エネルギービーム加工研究委員会資料, HEB-294-98, 1998.
- 6) 内海明博, 松田 純, 米田理史, 勝村宗英, 荒木孝雄, 田中元太郎: CO_2 レーザによるアークの遙動—レーザー・アーク併用高速表面処理法の研究, 溶接学会全国大会講演概要集, 第 60 集, 1997, pp. 38-39.
- 7) N. Abe, Y. Agano, M. Tsukamoto T. Makino, M. Hayashi and T. Kurosawa: Effect of CO_2 Laser Irradiation on Arc Welding, Proc. 15 th Int. Congress on Applications of Laser & Electro-Optics, Detroit, 1996, pp. D 64-D 73.
- 8) U. Dilthey, F. Lueder and A. Wieschmann: Process-Technical Investigations on Hybrid Technology Laser Beam-Arc-Welding, Proc. 6th Int. Conf. on Welding and Melting by Electron and Laser Beams, Toulon, 1998, pp. 417-424.
- 9) 牧野吉延, 椎原克典, 木村盛一郎, 浅井 知, 多紀圭史, 南 勝則: レーザ・MIG アークの複合化溶接—ステンレス鋼の厚板高品質溶接 (第 1 報) —, 溶接学会全国大会講演概要, 第 60 集 (2000-9), pp. 118-119.
- 10) 中嶋 徹, 櫻井茂行, 三柳直毅, 高野悠敏: レーザ・アーク併用溶接の開先内現象に関する検討, 溶接学会全国大会講演概要, 第 60 集 (2000-9), pp. 116-117.
- 11) 塚本雅裕, 村井健介, 田中 学, 阿部信行, 中田一博, 牛尾誠夫: レーザプラズマによるアーク放電誘発に関する研究, プラズマ科学シンポジウム 2001, 第 18 回プラズマプロシーディングス研究会プロシーディングス, pp. 83-84.
- 12) U. Dilthey and A. Wieschmann: Prospects by Combining and Coupling Laser Beam and Arc Welding Processes, IIW Doc. XII-1565-99.
- 13) S. Kaierl, K. Bongard, M. Dahren, R. Poprawe: Innovative Hybrid Welding Process in an Industrial Application, Proc. 19 th Int. Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, Orlando, 2000, pp. C 91-98.