

レーザー・アークハイブリッド溶接技術

Development of Laser-arc Hybrid Welding

小野 守章	総合材料技術研究所	マテリアルズ・ソリューション研究センター	主任研究員	工博	Moriaki Ono
真保 幸雄	総合材料技術研究所	マテリアルズ・ソリューション研究センター	主任研究員		Yukio Shimbo
吉武 明英	総合材料技術研究所	マテリアルズ・ソリューション研究センター	主査		Akihide Yoshitake
大村 雅紀	総合材料技術研究所	マテリアルズ・ソリューション研究センター	センター長	Ph.D	Masanori Ohmura

近年，地球環境保全および安全性強化規制の厳格化により車体の軽量化と剛性向上が求められ，この対応技術として，レーザー溶接法による連続溶接の採用が検討されている。しかし，レーザー溶接は接合面間隔を厳密に制御・管理する必要があることや，亜鉛めっき鋼板同士の溶接では亜鉛蒸気によるブローホールが多発するなどの課題を有しており，その適用はあまり広がりを見せていない。そこで，これらの課題を解決する溶接プロセスとしてレーザー・アークハイブリッド溶接法（Laser-arc hybrid welding）を開発した。本稿では，本溶接法の概要を述べるとともに，重ね面間隔の拡大，継手強度特性および亜鉛めっき鋼板の溶接性について述べる。

Laser-arc hybrid welding is a combined process consisting of laser and arc welding. The laser-arc hybrid welding enables lap welding with a large gap comparing with laser welding. Blow-holes are formed in lap weld of zinc coated sheets because of zinc vapor. The laser-arc hybrid welding yields fewer blow-holes in the lap weld of zinc coated sheets than laser welding. The welding speed of the hybrid welding is almost as fast as that of the laser welding. Laser-arc hybrid welding produces good quality lap joints and is appropriate to assembly welding of automotive parts.

1. はじめに

近年，自動車の車体・部品の組立溶接にレーザー溶接法が適用され始めている。しかし，その適用はまだあまり広がりを見せていない。その理由の一つとしてレーザーの重ね溶接では鋼板間の隙間を極めて厳密に管理しなければならないことが挙げられる。すなわち，隙間が大きいと溶け落ちが生じてしまい，極端な場合には2枚の鋼板が溶接されなくなる。このため，レーザー溶接では一般に隙間を0.1mm程度以下に管理している。また，亜鉛めっき鋼板の重ね溶接においてもレーザー溶接法は課題を有する。レーザー溶接では隙間をゼロにして溶接するので鋼板間の亜鉛が蒸発し，溶接金属を吹き飛ばしたり，溶接金属中に残留してブローホールを形成したりする。

このような問題を解決するため，レーザー・アークハイブリッド溶接法（Laser-arc hybrid welding）を開発した。本溶接方法は，YAGレーザーとアーク溶接法とを複合したもので，レーザー溶接法と比べて重ね溶接における隙間余裕度が大きく，また亜鉛めっき鋼板の重ね溶接においてもブローホールの発生が少ない。このため，重ね溶接における隙間の厳密な管理が必要なく実用化が容易である。また，レーザー溶接法とほぼ同等の溶接速度が得られ，レーザー溶接法の高効率というメリットを享受できる。

2. レーザー・アークハイブリッド溶接の構成

Fig.1にレーザー・アークハイブリッド溶接法の装置構成を示す。レーザーにはYAGレーザーを用い，レーザー照射点の後にアーク溶接電極を配置し，アークを発生させる。レーザー照射点とアークの狙い位置の間隔は1~3mm程度である。YAGレーザーを用いる理由は，YAGレーザーのエネルギーがプラズマにほとんど吸収されず鋼板に到達し溶接できるからである。これに対し，炭酸ガスレーザーはアークプラズマに吸収されるため，アークをレーザー照射点から十分に離さなければならず，レーザーとアークとの複合効果は少ない。

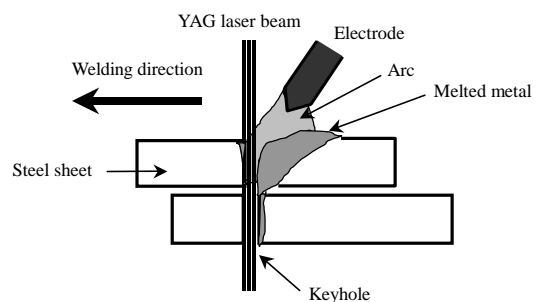


Fig.1 Configuration of laser beam and arc electrode in laser-arc hybrid welding

3. 実験方法

3.1 溶接方法

レーザーは定格出力 4.5kW の YAG レーザ (Luminics 製), アークはガスメタルアーク溶接法 (MAG 溶接) を用いた。溶接ワイヤは、0.8mm の軟鋼用ソリッドワイヤを用いた。供試材には、板厚 0.8mm ~ 1.6mm の冷延鋼板および合金化溶融亜鉛めっき (GA) 鋼板を用いた。継手の形式はすべて重ね溶接である。溶接条件を Table 1 に示す。

Table 1 Welding conditions of laser arc hybrid welding

Laser resonator	Max. output 4.5kW (luminics)
Laser output	3kW
Welding speed	1.0 to 5.0m/min
Arc current	60 to 150A
Shielding gas	Ar+20%CO ₂ (20 l/min)
Consumable	Kobe MGS50 (0.8mm)

3.2 溶接現象解析

ハイブリッド溶接におけるアーク溶接の溶滴移行現象を調べるため、アーク電圧の時間変化を測定した。

3.3 溶接継手特性評価

溶接後の継手は外観から目視によりブローホールやピットなどの溶接欠陥の有無を確認し、さらに断面マクロを観察して溶接部の形成状況および内部のブローホールを調査した。また溶接継手の強度はせん断引張試験により調査した。

4. 実験結果

4.1 溶接現象

ハイブリッド溶接における溶接ワイヤと鋼板間のアーク電圧の時間変化を Fig.2 に示す。溶接条件は、レーザー出力 3kW (加工点出力), アーク電流 100A, 溶接速度 2m/min である。比較例として、アーク溶接の電圧変化を併せて

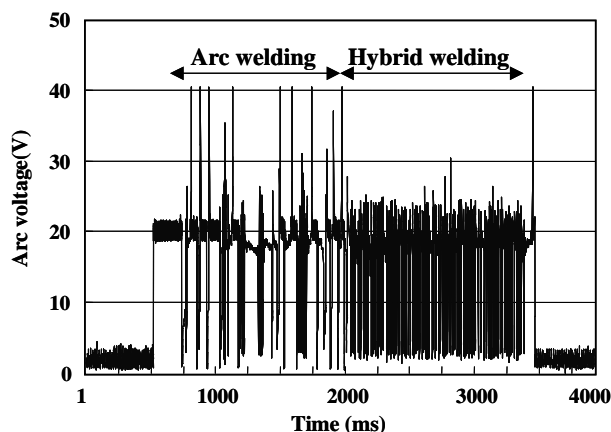


Fig.2 Time dependence of arc voltage with and without laser radiation

示す。ハイブリッド溶接では電圧が 0 から約 20V の範囲を高い周波数で振動しており、約 10ms 周期でワイヤから溶滴が短絡移行していることがわかる。一方、アーク溶接は、ハイブリッド溶接に比較して電圧変動幅が大きく、短絡移行の周期は 50 ~ 100ms と長くなっていることがわかる。

一般に、アーク溶接法は、溶接速度が速くなるとビード形状が不均一になる。ハイブリッド溶接法はワイヤからの溶滴移行が極めて短い間隔で起こるため、溶接速度が速い場合でも均一なビードが形成されることが期待できる。

Fig.3 は、ハイブリッド溶接法とアーク溶接法における、均一な溶接部が形成される限界速度を示す。図から明らかなようにハイブリッド溶接法の限界速度は、アーク溶接法の限界速度に比較して 7 倍以上であることがわかる。

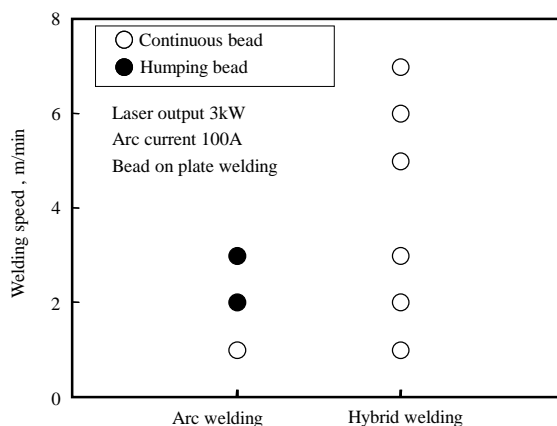


Fig.3 Welding speed limit without humping of arc welding and that of hybrid welding

ハイブリッド溶接法において、高速でもアークが安定に発生する理由は、以下のように説明できる。アーク溶接法では、アークは鋼板からの熱電子放出により維持されるが、溶接速度が速くなると加熱が不十分になり不安定になる。

一方、ハイブリッド溶接法は、レーザー照射によって形成されたキーホール内の電子密度は $10^{17} \sim 10^{20}$ 個/cm³ に達しており、またその周辺も溶融状態にあるため熱電子放出は極めて容易である。この領域にアーク溶接を複合するとアークは、高速で移動させても安定に形成される。

短絡移行の周期が短い理由は以下のように説明できる。アーク溶接法では、アークは熱電子放出点 (陰・陽極点) が鋼板上を移動しながら維持されるためエネルギーは広範囲に分散しているが、ハイブリッド溶接法では、アークは約 1mm のレーザー照射点から発生するため細く絞られ、エネルギーは集中している。したがって、ワイヤは溶け易くかつアーク長 (電位傾度が高い) は短くなるため、溶滴は細かく高い周波数で母材に移行することになる。アーク溶接法とハイブリッド溶接法におけるアークの発生機構を Fig.4 に示す。

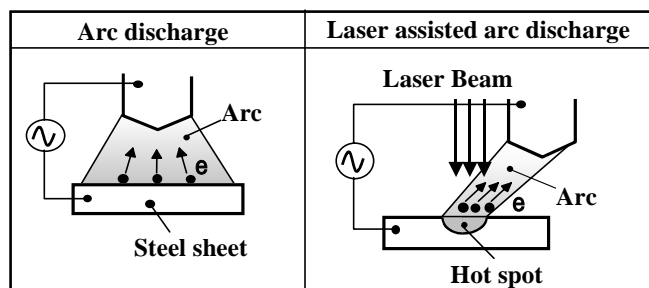


Fig.4 Mechanism of arc discharge with and without laser beam radiation

Photo 1 にハイブリッド溶接法の断面形状を示す。レーザー単独、アーク単独のビード断面形状も比較のため併せて示す。ハイブリッド溶接法の溶け込み形状は、レーザー単独とアーク単独を合わせた形状になっている。表面近くはアークの熱で溶融され、ワイヤが供給されるため余盛りができています。ハイブリッド溶接法の溶け込み深さはレーザー溶接法とほとんど同じである。これはレーザーによって溶け込み深さが決定され、アークを複合化して入熱を増やしても、アーク熱は表面近くを溶融させるのに消費されるだけで、溶け込み深さを増加させることはできないことを示している。ただし、ハイブリッド溶接法ではレーザー単独より溶融金属が多い点は後述する重ね溶接における隙間許容度やビード幅に有利に働く。



(a) Hybrid welding (b) Laser welding (c) Arc welding

Laser output; 3kW, Arc current; 100A, Welding speed; 1m/min

Photo 1 Cross sections of hybrid, laser and arc welded beads

4.2 溶接部形成特性

4.2.1 重ね溶接における隙間許容量の拡大

前節で述べたようにレーザーによる重ね溶接では重ね合わせた鋼板間の隙間を小さく保たなければ、上側の鋼板が溶け落ちてしまい、アンダーフィルが生じ、極端な場合には穴があいてしまう。ハイブリッド溶接法による重ね溶接における隙間許容量を調べるため、種々の板厚の鋼板を重ねて、上下の鋼板間の隙間を変化させて溶接を行った。結果を Fig.5 に示す。比較のためレーザー単独溶接法の調査結果を Fig.6 に示す。レーザー溶接法に比較してハイブリッド溶接法の隙間許容量は大きく、板厚と同程度の隙間があっても健全な溶接ビードが形成されていることがわかる。

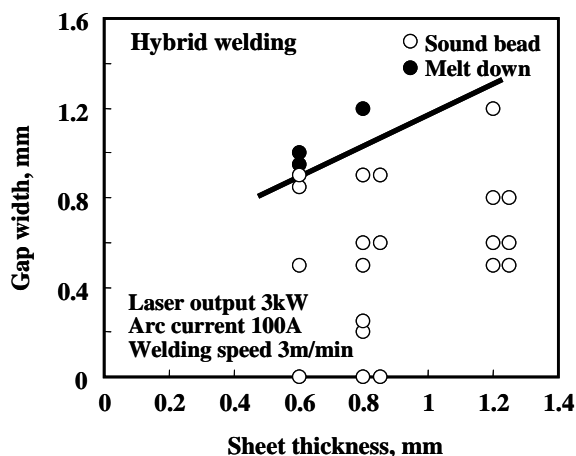


Fig.5 Gap tolerance of lap joint in hybrid welding

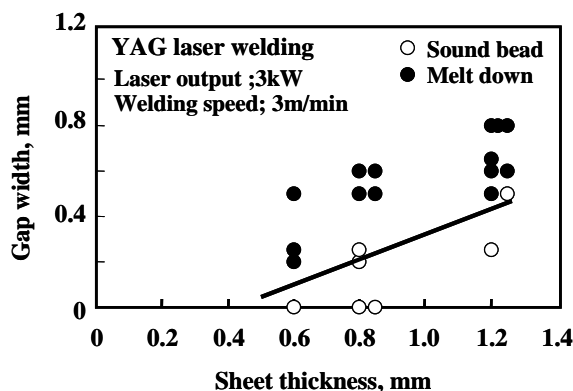


Fig.6 Gap tolerance of lap joint in laser welding

ハイブリッド溶接法により溶接した隙間のある重ね溶接部の断面写真を Photo 2 に示す。上下の鋼板が完全につながり、アンダーフィルも生じていないことがわかる。

ハイブリッド溶接法で重ね溶接の隙間の許容量がレーザー溶接法と比べ大幅に大きいのは、ハイブリッド溶接法ではフィラワイヤを供給しているため、隙間を埋めるだけの溶接金属が供給されるからである。これに対しレーザー溶接法では溶接金属が供給されないため、隙間が存在すると溶接金属が不足し、アンダーフィルあるいは溶け落ちてしまう。

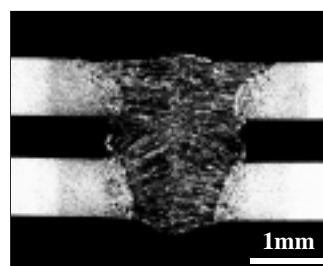


Photo 2 Cross section of lap joint by hybrid welding (Laser output ; 3kW, Arc current ; 100A, Welding speed ; 3.0m/min)

4.2.2 重ね溶接における溶接幅の拡大

ハイブリッド溶接法は、フィラワイヤを供給するためビード幅の点でもレーザ溶接法と比べ有利である。レーザ溶接法とハイブリッド溶接法で重ね継手を作製しビード幅の鋼板間の隙間による変化を測定した。結果を Fig.7 に示す。隙間が 0mm の場合には、ハイブリッド溶接法のビード幅はレーザ溶接法に比較してわずかに広がるがほぼ同じである。隙間が大きくなるにしたがいハイブリッド溶接法のビード幅は広がるが、レーザ溶接法のビード幅はほとんど変わらない。これはハイブリッド溶接法では隙間が存在する場合、レーザ溶接法によって形成された溶融池にアーク溶接により溶融金属が供給され隙間を埋めるためである。これに対し、レーザ溶接法では溶融金属が供給されないためこのような効果は少ない。

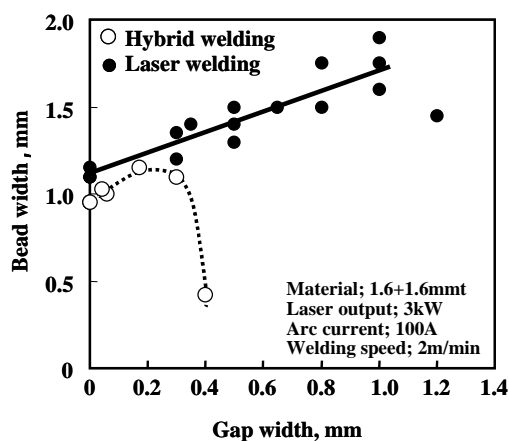


Fig.7 Bead width of lap joint by laser and hybrid welding

4.3 重ね溶接継手強度

ハイブリッド溶接継手のせん断引張強度を調査した。試験片形状を、Fig.8 に示す。

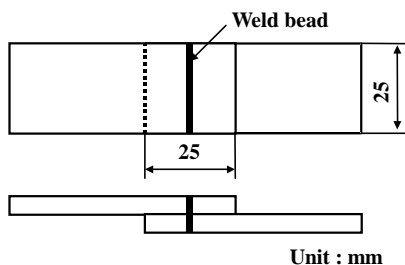


Fig.8 Testing specimen for tensile shear strength of lap welded joint

種々の強度の鋼板 (t = 1.2mm) を用いて作製した重ね継手の引張せん断強度、ビード幅および溶接金属の硬さを Table 2 に示す。比較のためにレーザ溶接継手の結果も併せて示す。ハイブリッド溶接継手はすべて母材破断している。一方、レーザ溶接継手は溶接部で破断している。

Table 2 Tensile strength of lap joints by hybrid and laser welding

Laser or hybrid welding	TS of BM (MPa)	Joint strength (kN)	Failure position	Bead width (mm)	Bead hardness (Hv)
Hybrid	304	9.4	BM	1.6	220
Hybrid	650	18.1	BM	1.5	250
Hybrid	650	18.1	BM	2.0	250
Hybrid	650	17.4	BM	1.6	250
Hybrid	807	21.1	BM	2.1	280
Hybrid	1038	23.4	BM	1.6	380
Laser	650	13.7	WM	1.0	250
Laser	650	10.4	WM	0.8	260
Laser	650	7.8	WM	0.6	260

* BM : Base metal, WM : Weld metal

レーザ溶接法による重ね継手の溶接部の破断強度；Fw (N) は以下の式(1)で算出できる³⁾。この式はハイブリッド溶接継手にも適用可能である。

$$F_w = 1.9W \times h \times H_v \quad \dots\dots(1)$$

ただし、W；試験片幅 (mm)，h；ビード幅 (mm)，Hv；溶接金属のビッカース硬さである。

溶接継手の引張試験による破断位置は、溶接部と母材強度の大小関係で決められる。すなわち、溶接部の強度が母材の強度を上回る場合に母材破断となり、下回れば溶接部破断となる。この式(1)から明らかなように溶接部の強度はビード部の硬さが一定であればビード幅に比例して大きくなる。また母材の強度はビード幅とは無関係に一定である。

TS=650MPa の鋼板の溶接継手についてビード幅とせん断引張強さの関係および溶接金属の硬さを 250 と一定とした場合の推定式による関係を Fig.9 に示す。図から明らかなように、ハイブリッド溶接法はレーザ溶接法に比べ幅の広いビードが得られるため溶接部の強度が高く、母材で破断することがわかる。

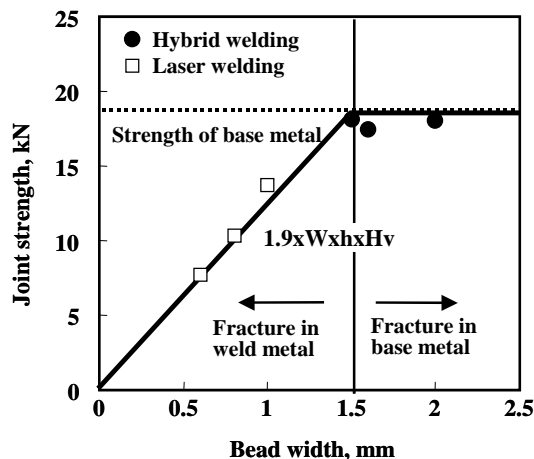


Fig.9 Relation between tensile strength of lap joint and bead width

4.4 亜鉛めっき鋼板の溶接性

亜鉛の沸点は約 900 と鉄の融点(約 1500)より大幅に低いため、亜鉛めっき鋼板の重ね溶接では亜鉛が蒸発し、亜鉛蒸気が溶融金属内に入ってブローホールを生じたり溶融金属を吹き飛ばして穴があいたりする。Photo 3 に合金化溶融亜鉛めっき鋼板(目付け量: 45g/m², 両面めっき)をレーザー溶接法により重ね溶接したビード縦断面を示す。ビード中に多数のブローホールが存在している。

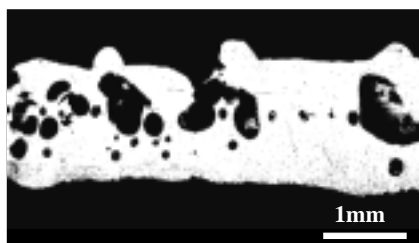


Photo 3 Longitudinal cross section of lap joint of GA steel sheet welded by laser beam

一方、Photo 4 は、ハイブリッド溶接法による重ね溶接部の縦断面を示す。ビード中にはブローホールは認められず健全な溶接部が形成されている。

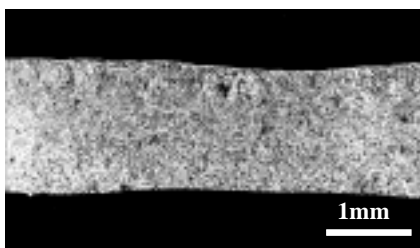


Photo 4 Longitudinal cross section of lap joint of GA steel sheet welded by hybrid welding

亜鉛めっきの重ね溶接において、ハイブリッド溶接法がレーザー溶接法と比較してブローホールが大幅に抑制された理由は、レーザー溶接法と比べてハイブリッド溶接法はレーザー溶接の後にアーク溶接をされるため溶融金属が凝固するまでの時間が長く亜鉛蒸気が溶接金属から脱出する時間的余裕があることと、レーザー溶接において亜鉛蒸気によって溶融金属が吹き飛ばされて生じた不足分をワイヤ供給で補うためと考えられる。

5. おわりに

自動車の車体および部品の組立溶接におけるレーザー溶接法の問題点、すなわち重ね隙間余裕が小さいことと亜鉛めっき鋼板の重ね溶接においてブローホールが発生するという課題を解決し、同時にレーザー溶接の高エネルギーおよび小入熱により熱変形が小さいという特長を有する溶接プロセスとしてレーザー・アークハイブリッド溶接法(Laser-arc hybrid welding)を開発し、以下に示す特長を明らかにした。

(1) 重ね溶接における隙間許容量

ハイブリッド溶接法の重ね溶接の隙間許容量は、被溶接材の板厚程度であり、レーザー溶接法に比べて大幅に拡大できる。

(2) 溶接継手強度

ハイブリッド溶接法による重ね継手の強度はビード幅がレーザー溶接法と比べて広いと、母材を上回る強度が確保できる。

(3) 亜鉛めっき鋼板の重ね溶接性

亜鉛めっき鋼板の重ね溶接において、隙間を 0mm にしてもハイブリッド溶接法は、レーザー溶接法に比べて大幅にブローホールが抑制でき、健全な溶接継手を得ることができる。

参考文献

- 1) 浜崎正信ほか. “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, pp.79-83(1983).
- 2) U. Diltthey et al. Prospects by Combining and Coupling Laser Beam and Arc Welding Processes, IIW Doc. XII-1565(1999).
- 3) 小野守章ほか. “薄鋼板レーザー重ね溶接継手の強度特性”. 溶接学会論文集. Vol.14, No.3, pp.586-591(1996).

<問い合わせ先>

総合材料技術研究所 マテリアルズ・ソリューション研究センター
Tel. 0849 (45) 3624 小野 守章
E-mail address : mono@lab.fukuyama.nkk.co.jp