レーザ・アークハイブリッド溶接法による 薄鋼板重ね溶接特性*

小野 守章**, 真保 幸雄**, 吉武 明英***, 大村 雅紀***

Laser- Arc Hybrid Welding of Thin Steel Sheets

By ONO Moriaki**, SHINBO Yukio**, YOSHITAKE Akihide*** and OHMURA Masanori***

In recent years, laser welding has begun to be used for assembly welding of automotive bodies and parts, although it has not yet to be used widely. One restraint is that in laser lap welding, the gap between the lapped sheets must be controlled very tightly. If the gap is wide, burn-through occurs, and, if the gap is excessive, the two sheets cannot be welded together. For this reason, the gap is generally restricted to 0.2 mm or less for laser welding. Laser lap welding of zinc-coated sheets poses additional problems. When lap welding of zinc-coated sheets is performed without any gap, the zinc evaporated between the sheets tends to blow off weld metal, or the zinc vapor tends to remain in the weld metal and form blowholes. Laser-arc hybrid welding was developed to solve these problems. This newly developed welding method maintains the features of laser welding, in that it is highly efficient and does not cause much thermal deformation due to its low heat input. Its proven characteristics are as follows:

- (1) The gap tolerance in hybrid lap welding is nearly equivalent to the thickness of the sheets to be welded, which is significantly larger than with laser welding.
- (2) The hybrid lap-welded joint can attain a strength that exceeds that of the base metal, because the bead width is wider than that in laser welding.
- (3) In hybrid lap welding of zinc-coated steel sheets, the formation of blowholes is restrained significantly compared to laser welding, even when the gap is 0 mm, so that a sound welded joint can be obtained.

Key Words: Hybrid welding, Laser welding, Lap welding, Zinc-coated steel sheet, Blowhole

1. 緒 言

近年、自動車の車体・部品の組立て溶接にレーザ溶接法が適用されはじめている。しかし、その適用は未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、レーザ溶接では一般に隙間を0.2mm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溶接法は課題を有する。すなわち、隙間ゼロで溶接した場合、亜鉛の蒸発に起因してスパッタおよびブローホール等の溶接欠陥が多発することである。

このような問題を解決するため、レーザ・アークハイブリッド溶接法 (Laser Focussed Arc Welding)^{1,2)} の適用について検討した。本溶接方法は、YAGレーザとアーク溶接法とを複合したもので、レーザ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、レーザ溶接法とほぼ同等の溶接速度が得られ、レーザ溶接法の高エネルギーというメリットを享受できる。

2. レーザ・アークハイブリッド溶接法の構成

Fig.1 にレーザ・アークハイブリッド溶接法の装置構成を示す。レーザにはYAGレーザを用い、レーザ照射点の後方にアーク溶接電極を配置し、アークを発生させる。レーザ照射点とアークの狙い位置の間隔は1～3mm程度である。YAGレーザを用いる理由は、YAGレーザ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、炭酸ガスレーザはアークプラズマ

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

* 原稿受付 平成 14 年 9 月 5 日 平成 14 年度春季全国大会で発表

** 正 員 JFE スチール(株) Member, JFE Steel Corporation

*** JFE スチール(株) JFE Steel Corporation

に吸収されるため、アークをレーザ照射点から十分に離さなければならず、レーザとアークとの複合効果は少ない。

3. 実験方法

3.1 供試材

供試材には、板厚 0.8mm ～ 1.6mm および引張強さ 300 ～ 1200MPa の冷延鋼板および合金化溶融亜鉛めっき鋼板を用いた。供試材の機械的性質および化学組成を Table1 に示す。

3.2 溶接方法

レーザは定格出力 4.5kW の YAG レーザ (Luminics 製)、アークはガスマタルアーク溶接法 (MAG 溶接) を用いた。溶接ワイヤには 0.8mm ϕ 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。継手の形式は全て重ね溶接である。溶接条件を Table2 に示す。

3.3 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。

Table 1 Mechanical properties and chemical compositions of the materials

Spec.	YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)
JSC270CC	180	304	45.3
JAC270CC*	205	323	41.8
JSC440WN	336	469	33.8
JSC590YN	390	655	26.3
JSC590 γ	401	623	37.5
JSC780YN	429	807	22.1
JSC980YN	591	1038	15.4

Spec.	C	Si	Mn	P	S
JSC270CC	0.020	0.01	0.18	0.01	0.010
JAC270CC*	0.019	0.01	0.18	0.014	0.011
JSC440WN	0.077	0.08	1.66	0.011	0.003
JSC590YN	0.062	0.48	1.36	0.013	0.004
JSC590 γ	0.118	1.07	1.64	0.007	0.002
JSC780YN	0.078	1.42	1.63	0.012	0.010
JSC980YN	0.130	1.11	1.87	0.011	0.002

*合金化溶融亜鉛めっき鋼板 (Hot-dip galvanized steel sheets)

Table 2 Welding conditions of laser-arc hybrid welding

Laser output	2～4.5 kW
Welding speed	1.0～7.0 m/min
Arc current	100 A
Shielding gas	Ar+20%CO ₂ (20 l/min)
Welding wire	ϕ 0.8mm (for Mild steel)

3.4 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等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り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

Fig2 Time dependence of arc voltage with and without laser irradiation.

Fig3 Appearances of hybrid and arc welded bead surface. Fillet joint : upper thickness 0.8mm, lower thickness 1.2mm [Welding condition : Laser output 2kW, Arc current 100A, Speed 2m/min]

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隅肉溶接ビードの外観を示す。アーク溶接ビードは不連続的であるが、ハイブリッド溶接ビードは均一に形成されている。

Fig.4 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。

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、アークは銅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、レーザ照射によって形成されたキーホール内の電子密度は $1.5 \sim 4.0 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 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。

次いで、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）が銅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 ϕ のレーザ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.5 に示す。

Fig.6 にハイブリッド溶接法のビード断面形状を示す。レーザ単独、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、レーザ単独とアーク単独により得られる溶け込み形状を重ね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溶接法のそれとほとんど同じである。これは、溶け込み深さはレーザによって支配され、アークを複合化して入熱を増やしても、殆どの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、溶け込み深さの増加に寄与していないことを示している。ただ

Fig5 Mechanism of arc discharge with and without laser beam irradiation.

Fig6 Cross sections of hybrid, laser and arc welded beads. [Laser output 3kW, Arc current 100A, Welding speed 1m/min]

Fig4 Welding speed limit without humping in arc welding and that in hybrid welding.

し、ハイブリッド溶接法ではレーザ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溶接ビード幅に有利に働く。

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空いてしまう。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.7に示す。図中のプロットはハイブリッド溶接法の実験結果を示しており、健全な溶接ビードが得られる限界隙間量は、上板の板厚に依存するが約0.8mm以上となる。一方、比較のためレーザ溶接法における限界隙間量を破線で示しているが、0.2～0.4mmと狭い。したがって、ハイブリッド溶接法の隙間許容量はレーザ溶接法に比較して大きく、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ることがわかる。ハイブリッド溶接法およびレーザ溶接法で溶接した隙間のある重ね溶接部の断面写真をFig.8に示

Fig.7 Gap tolerance of lap joint in hybrid and laser welding.

Fig.8 Cross section of hybrid and laser welded joints.
[Laser output 3kW, Arc current 100A, Welding speed 3.0m/min]

す。ハイブリッド溶接法では、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。一方、レーザ溶接法では、溶融金属が不足し上下の鋼板はつながらず上側の鋼板に溶け落ちが生じている。

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、アンダーフィル或いは溶け落ちてしまう。

4.2.2 重ね溶接における溶接ビード幅の拡大

ハイブリッド溶接法は、フィラワイヤを供給するため溶接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溶接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.9に示す。隙間が0mmの場合には、ハイブリッド溶接法の溶接ビード幅はレーザ溶接法のビード幅とほぼ同じである。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、レーザ溶接法の溶接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。

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.10に示す。

種々の強度の鋼板（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 3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全て母材破断している。一方、

Fig.9 Bead width of hybrid and laser welded joints.

Fig.10 Testing specimen for tensile shear strength of lap welded joint.

Table 3 Tensile strength of lap joints by hybrid and laser welding

Welding method	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

レーザ溶接継手は溶接部で破断している。

レーザ溶接法による重ね継手の溶接部の破断強度； F_w (N) は以下の式で推定できる⁴⁾。この式はハイブリッド溶接継手にも適用可能である。

$$F_w = 1.9W \times h \times Hv$$

ただし、 W ；試験片幅 (mm)， h ；溶接ビード幅 (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溶接ビード幅に比例して大きくなる。また母材の強度は溶接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溶接ビード幅とせん断引張強さの関係および溶接金属のビッカース硬さを250と一定とした場合の推定式による関係を Fig.11 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溶接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.12 は、種々の強度の鋼板 (1.2mmt) を用いて作製した重ね継手の引張せん断強度および破断形態を示す。比較のために、スポット溶接継手強度を示す。

Fig.11 Relation between static tensile strength of lap joint and bead width.

Fig.12 Relation between static tensile strength of lap joint and base metal.

Fig.13 Relation between fatigue strength of hybrid, laser and spot welded joint.

レーザ溶接継手はスポット溶接継手に比較して約2倍の強度を有している。引張試験後の破断位置は、レーザおよびスポット溶接継手とも母材強度が590MPaを超えると溶接部になる。一方、ハイブリッド溶接継手は、溶接ビード幅がレーザ溶接継手より広がるため、特に母材強度が590

MPaを超えても破断位置となりレーザ溶接継手に比較して高い継手強度が得られる。

Fig.13は、板厚1.2mm、母材強度590MPaの重ね継手の疲労試験結果を示す。ハイブリッド溶接継手は、レーザ溶接継手より溶接ビード幅が広いため疲労強度は高い値を示している。スポット溶接継手に比較すると、約2倍高い値を示している。

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。隙間ゼロで亜鉛めっき鋼板を溶接する場合には、亜鉛の蒸発に起因してスパッタおよびブローホール等の溶接欠陥が多発する。

Fig.14に合金化溶融亜鉛めっき鋼板（目付け量：45g/m²、両面めっき）をハイブリッド溶接法により重ね溶接したビード表面の外観写真を示す。未貫通および部分貫通の溶接条件（レーザ出力2.5、2.7kW、アーク電流100A、溶接速度2m/min）では、ビード表面にスパッタやピットが多発している。貫通する溶接条件（レーザ出力3.2、3.7kW、アーク電流100A、溶接速度2m/min）では、スパッタおよびピッ

Fig.14 Appearance of lap joint of zinc coated steel sheet welded by hybrid welding method.

トが大幅に抑制されている。さらに、レーザ出力が高い場合にも、スパッタやピット等の欠陥は発生していないが、溶接入熱が過大のためビードが溶け落ちている。

Fig.15は、合金化溶融亜鉛めっき鋼板（目付け量：45g/m²、両面めっき）を、レーザ出力3.2kW、アーク電流100Aおよび溶接速度2m/minでハイブリッド溶接した溶接ビードの横・縦断面写真を示す。比較例として、レーザ出力3.2kW、溶接速度2m/minでレーザ溶接した溶接ビードの縦断面写真も併せて示す。ハイブリッド溶接法では、アークプラズマにより鋼板が熱変形して隙間が形成され、この隙間が溶接欠陥を抑制させることが考えられるが、本写真には隙間は観察されていない。溶接ビードの横・縦断面にも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。

一方、レーザ溶接法では、溶接ビード内には多数のブローホールが存在している。

鋼板を貫通する溶接条件においてレーザ溶接では溶接欠陥が多発するのに対して、ハイブリッド溶接では溶接欠陥が抑制される理由は、以下のように推察される。

レーザビームにより形成されたキーホールは、鋼板を貫通しているため未貫通および部分貫通溶接条件に比較して、溶接欠陥を誘発する亜鉛蒸気が排除されやすくなったことがあげられる。レーザ溶接では、キーホールが貫通してもブローホールが多発したのはハイブリッド溶接よりキーホールのサイズが小さかったことも原因の一つと考えられる。

さらに、ハイブリッド溶接では、レーザ溶接の後方でアーク溶接が行われるため、レーザ溶接より溶融池が大きくなる。したがって、溶融金属が凝固するまでの時間が長くなり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

(a) Hybrid welding
[Laser output 3.2kW, Arc current 100A, Welding speed 2m/min]

(b) Laser welding
[Laser output 3.2kW, Welding speed 2m/min]

Fig.15 Appearance and longitudinal cross section of lap joint of zinc coated steel sheet welded by hybrid and laser welding.

に加えて、レーザ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えることができるためと考えられる。

5. 結 言

自動車の車体および部品の組立て溶接におけるレーザ溶接法の問題点、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・アークハイブリッド溶接法 (Laser Focussed Arc 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は、ビード幅がレー

ザ溶接法によるそれと比べて広いため、母材を上回る静的強度が確保でき、疲労強度もレーザ溶接継手に比較して高い値となる。

(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してもハイブリッド溶接法は、レーザ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) M.Hamazaki et.al: Effect on Welding current in TIG-Laser combined welding, High Temp. Society, 19-2 (1983), 79-83 (in Japanese)
- 2) U.Dilthey et al: Prospects by Combining and Coupling Laser Beam and Arc Welding Processes, IIW Doc. XII-1565 (1999)
- 3) M.Ono, S.Kosuge, K.Nakada: An Investigation on CO₂ Laser-Induced Plasam Ⅱ Study on CO₂ laser Welding Phenomena (Reprt Ⅱ) --, Quar.J.JWS, 10-2 (1992), 31-37. (in Japanese)
- 4) M.Ono, M.Kabasawa, M.Ohmura: Static and Fatigue Strebgth of Laser Welded Lap Joints, Quar.J.JWS, 14-3 (1996), 586-591 (in Japanese)