

自動車車体組立用の新溶接技術

Advanced Welding Technologies for the Assembly of an Automotive Body

池田 倫正 IKEDA Rinsei JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員(課長)
沖田 泰明 OKITA Yasuaki JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員(副課長)
小野 守章 ONO Moriaki JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部長・工博

要旨

JFE スチールが自動車組立用溶接技術として開発・検討したインテリジェントスポット溶接およびレーザー・アークハイブリッド溶接について紹介する。インテリジェントスポット溶接は、加圧力と電流を通電中に可変制御することを特徴とする抵抗スポット溶接技術であり、従来の抵抗スポット溶接では困難であった板厚比の大きな板組みにおいても安定した溶融部形成を可能とした。また、レーザー・アークハイブリッド溶接は、YAG レーザ溶接とガスシールドアーク溶接を複合した溶接技術であり、従来のレーザー溶接において課題であった狭い重ねギャップ裕度を拡大し、亜鉛めっき鋼板の重ね溶接においても無欠陥の溶接を可能とした。

Abstract:

JFE Steel has developed new intelligent advanced welding technologies, such as intelligent spot welding and laser-arc hybrid welding for the assembly of an automotive body. Intelligent spot welding, which is a resistance spot welding technique using multi current and force control steps to form a sound nugget among triple-sheet jointing of larger sheet thickness ratio compared to a conventional resistance spot welding. Laser-arc hybrid welding, which is YAG laser welding combined with metal active gas(MAG) arc welding, enables expansion of the gap tolerance in lap welding up to nearly thickness of sheet to be welded and decrease blowholes in lap welding of zinc coated steel sheets.

1. はじめに

自動車の軽量化および衝突安全性向上を達成する材料として、自動車車体には各種の高機能高張力薄鋼板の適用が検討されているが、車体の組立工程においては、これらの鋼板をより有効に活用するための溶接技術が重要になってきている。そこで、JFE スチールでは、各種の高機能高張力薄板を提供するとともに、これらの鋼板の適用拡大のために自動車車体組立用の新溶接技術についても積極的な研究開発を行い、一部の技術については自動車メーカーと共同で自動車組立溶接ラインにおける実用化に向けて検討を進めている。本報告では、JFE スチールが開発した車体組立溶接技術の中でも、今後の高張力薄板のさらなる適用拡大に寄与すると考えられるインテリジェントスポット溶接技術とレーザー・アークハイブリッド溶接技術について述べる。

インテリジェントスポット溶接は、薄板-厚板-厚板の三枚板の組み合わせなど、板厚比 (= 板組みの総板厚/板組

みの中で外側に配置された最も薄い板の板厚) の大きな板組みにおいても安定した溶接を可能とする抵抗スポット溶接技術である。また、レーザー・アークハイブリッド溶接は、重ね継手において厳密な隙間管理がなされていない場合でも、レーザー溶接法とほぼ同等速度での溶接を可能とするレーザー熱源とアーク熱源を組み合わせたハイブリッド溶接技術である。

2. インテリジェントスポット溶接

2.1 抵抗スポット溶接の現状

抵抗スポット溶接は、二つの水冷電極により鋼板を挟み、通電によるジュール発熱を利用して鋼板間に溶融部を形成させ、通電終了後、凝固部(ナゲット)を形成させる溶接法である。現在では、自動車車体組立において最も多く使用される溶接法であり、自動車の車種により1台当たり3000から6000点の溶接箇所がある。高張力薄板の抵抗スポット溶接性については、すでに多くの報告^{1~4)}がなされており、軟鋼板と比較して、適正溶接電流範囲が低電流側に移行する、あるいは、高加圧力が必要になるなどの特徴

が示されている。また、鋼板の炭素当量を所定の範囲内に規制すれば十分な継手強度が得られることが知られており^{2~4)}、高張力薄板の抵抗スポット溶接において継手性能に関する課題の多くは解決されているといえる。

一方、高張力薄板は車体補強部材に適用される例が多く、その場合、溶接部は外板（軟鋼板）、補強部材（高張力鋼板）および内板（高張力鋼板）の三枚重ね溶接となる。抵抗スポット溶接では、溶接板組みの中央部付近でナゲットが形成されるため、薄板-厚板-厚板の板組みにおいて板厚比が大きい（板組みの総板厚に対して薄板の部分が相対的に薄い）場合は、薄板-厚板間でナゲットが形成されにくくなることから、一般に、板厚比の上限は4~5とされている。いわば溶接施工上の制約である。たとえば、板厚比の上限を5とした場合、外板を0.7 mmにすると、強度部材および内板の合計板厚は2.8 mm以下に制限されることになり、この範囲内の板厚で高張力薄板を適用しなければならない。このような背景から、溶接施工上の課題である板厚比制限を緩和し、高張力薄板の自動車車体への適用をいっそう拡大できる抵抗スポット溶接技術として、インテリジェントスポット溶接技術^{5,6)}を開発した。

2.2 高板厚比の板組み溶接におけるナゲット形成現象の検討

2.2.1 薄板-厚板間でのナゲット形成現象の検討

本報では、板厚0.7 mmの270 MPa級薄板（以下、270GA）および板厚2.3 mmの780 MPa級薄板（以下、780GA）を用い、高板厚比の三枚重ね板組みとして、0.7 mm + 2.3 mm + 2.3 mmの板組み（板厚比7.6）について抵抗スポット溶接性を検討した。鋼板はすべて目付量45 g/m²、両面めっきの合金化溶融亜鉛めっき鋼板である。

Photo 1に、短時間（0.08 s）通電した後の溶接部断面マクロを示す。板組みは上側から270GA、780GA、780GAの順で、溶接電流と加圧力を変えている。加圧力はこの板組みにおける通常の加圧力設定である4.90 kNと、それよりも軽荷重である1.96 kNと比較した。いずれの加圧力においても、通電初期に電流密度が高くなる領域、電極直下の鋼板部分で発熱が生じていたが、4.90 kNでは、溶接電流を11.0 kAまで増加させてもナゲット形成には至らなかった。一方、1.96 kNでは、4.90 kNの場合よりも低い溶接電流で顕著な温度上昇がみられ、溶接電流9.3 kAでは270GA-780GA間にナゲット形成が確認された。ただし、加圧力が低いため、通常用いられる0.60 s程度の通電をした場合には780GAと780GAの間から散りが過大に発生し、大きな溶接欠陥も発生すると推定される。以上より、低加圧力設定は、実際の溶接条件としては用いることはできないものの、薄板-厚板間でのナゲット形成という観点では非常に有効であるといえる。

次に、薄板-厚板間でのナゲット形成に及ぼす加圧力の

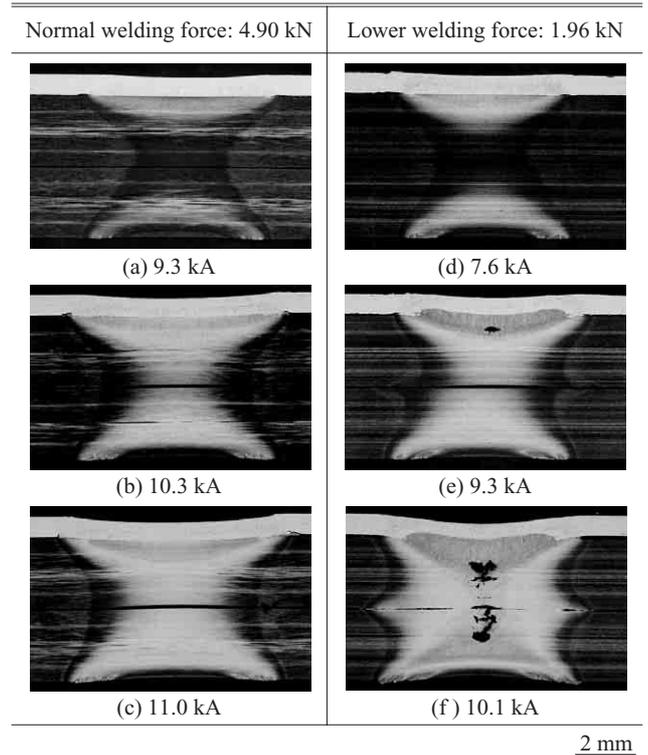


Photo 1 Effect of welding force and current on nuggest formation in the cross sections (Welding time: 0.08 s)

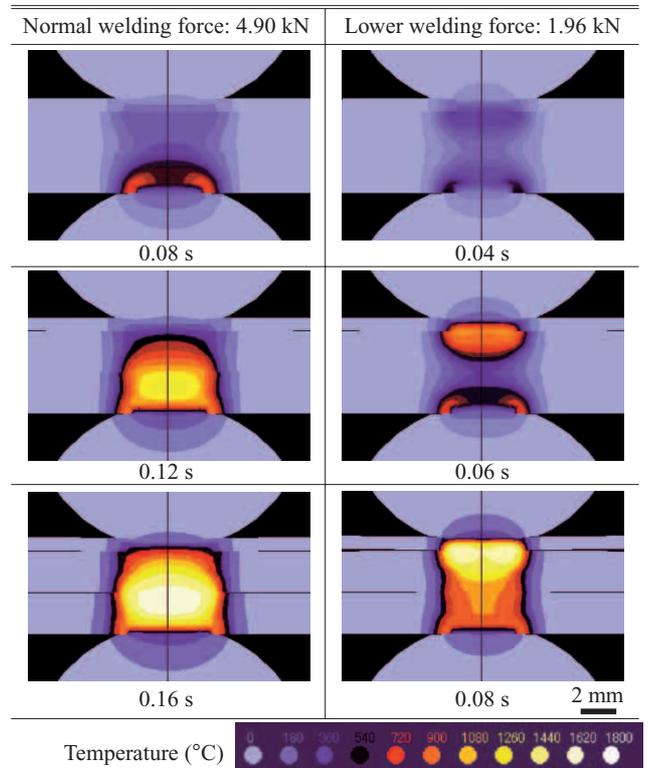


Fig. 1 Effect of welding force and time on nuggest formation

影響を明らかにするため、数値シミュレーションによる解析を実施した。シミュレーションは軸対称モデルでの熱弾塑性解析とし、Photo 1と同様、加圧力4.90 kNと1.96 kNで計算した。Fig. 1に、溶接部断面での温度分布変化を示

す。通電時間による発熱状態の変化を確認するため、溶接電流は9.5 kA固定とし、通電時間を変化させた。溶接部での発熱分布はPhoto 1とほぼ同様であり、Photo 1の(a)、(e)と通電時間0.08 sの計算結果を比較すると、かなり良い相関のあることが確認できる。また、計算結果から、通電中の270GA-780GA間での接触径変化を確認すると、加圧力4.90 kNでは通電前と0.08 s通電後の接触径の変化は小さいが、加圧力1.96 kNでは、0.06 s通電後の接触径が通電前の約半分に減少することが判明した。つまり、通電初期に電極直下の270GA側で発熱・膨張が生じる際、十分に加圧力が低い場合は、熱膨張により通電部の板が浮き上がり、接触径が減少、その結果、電流密度が増加し、270GA-780GA間でナゲットが形成されると考えられる。発熱源としては、通電面積の減少の他に接触抵抗の増大による発熱も想定されるが、Photo 1およびFig. 1は亜鉛めっき鋼板を用いていることから、通電初期段階でのめっき層の溶融により、接触抵抗は急激に減少すると推察され、発熱要因としては考え難い。

2.2.2 加圧力・電流制御を利用した新溶接プロセス

加圧力を低減することで、薄板-厚板間でのナゲット形成が可能であることが確認されたが、低加圧力のままでは厚板-厚板間で十分なナゲットを形成できない。そこで、通電中に加圧力を変化させることで、薄板-厚板間および厚板-厚板間の両方にナゲットを形成する「2段加圧・2段通電」の新溶接プロセスを検討した。Fig. 2に新溶接プロセス（インテリジェントスポット溶接）の模式図を示す。一段目は、低加圧力・短時間通電・高電流とすることで、薄板-厚板間にナゲットを確実に形成させることを目的とし、二段目は、高加圧力・長時間通電とすることで、厚板-厚板間でナゲットを形成させることを目的とした。なお、短時間通電は過大な入熱投入による散り発生の抑制にも有効と考えられる。

通電中の加圧力変更には、サーボモータ加圧式の抵抗スポット溶接機^{7,8)}を用いて検討した。以前は、自動車組立

溶接ラインの抵抗スポット溶接機はエア加圧式であった。しかし、溶接点ごとの加圧力変更による溶接部品質の向上、あるいは電極動作の最適化による施工タクトタイム削減などが可能になることから、十年程前から、サーボモータ加圧式に置き換わりつつあり、現在では広く普及してきている。さらに、サーボモータ性能も向上したことから、通電制御と加圧力制御を溶接中に同期させることは十分可能と判断した。

2.3 高板厚比の板組みへのインテリジェントスポット溶接の適用

2.3.1 三枚重ね板組みへの適用

270GA + 780GA + 780GA (0.7 mm + 2.3 mm + 2.3 mm, 板厚比 7.6) の三枚重ね板組みを用いて、インテリジェントスポット溶接の適用性について検討した。まず、2段加圧・2段通電中のナゲット形成現象の特徴を把握するため、鋼板の端面を電極直下に配置して溶接し、高速度ビデオカメラを用いて通電中の溶融挙動の直接観察を行った。Photo 2に、一段通電を0.06 s、二段通電を0.50 sの条件で溶接し、撮影によって得られた画像を示す。一段目の低加圧力・短時間通電・高電流の条件では、これまでに得られた結果と同様、270GA-780GA間に溶融部が形成されてい

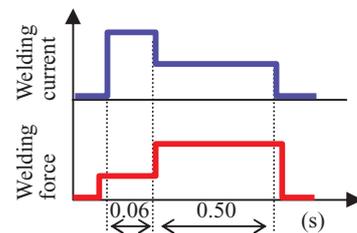


Fig. 2 Schematic illustration of Intelligent spot welding process for three sheets joint with higher sheet thickness ratio

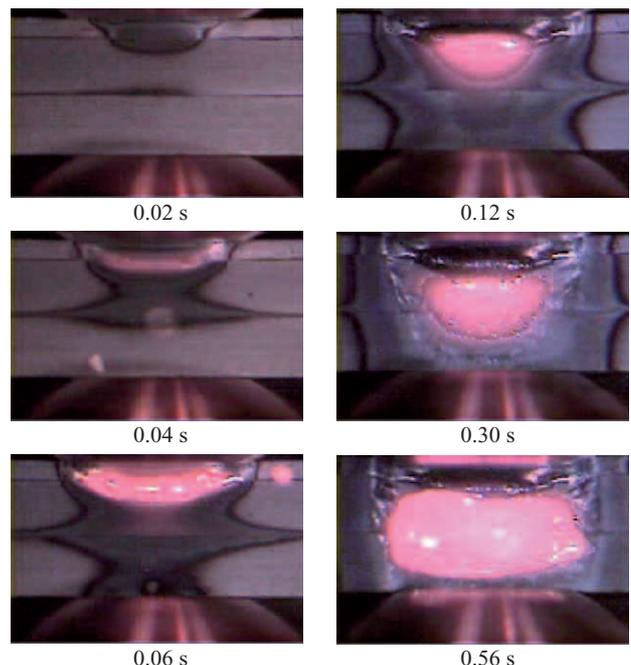
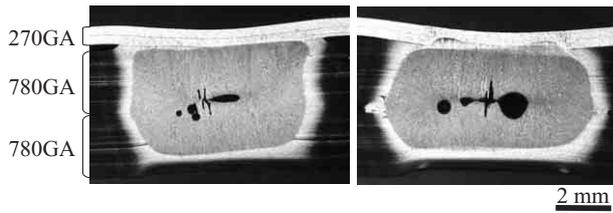


Photo 2 Nugget formation process in intelligent spot welding observed by high speed video camera



(a) Conventional welding (b) Intelligent spot welding
Photo 3 Cross sections of three sheet welded joints

た。2段目の高加圧力・長時間通电の条件では、まず270GA-780GA間の溶融部が凝固し、その後、発熱領域が270GA-780GA間から780GA-780GA間へと移動していく様子が明瞭に観察された。溶融部の凝固は、2段目条件で加圧力が增大することにより270GA-780GA間の接触面積が拡大し、かつ溶接電流が減少したため生じたと推定された。また、発熱領域の移動は、電極冷却と発熱のバランスにより生じたものと推定されるが、一段目での発熱が予熱の役割を果たし、二段目で780GA-780GA間の発熱を助長する効果もあったと推察される。

次に、270GA+780GA+780GA(0.7 mm+2.3 mm+2.3 mm)の三枚重ねで、従来の抵抗スポット溶接(加圧力3.0 kN、通电時間0.4 s、溶接電流7 kA)とインテリジェントスポット溶接(一段目条件:加圧力0.6 kN、通电時間0.1 s、溶接電流8.5 kA、二段目条件:加圧力3.0 kN、通电時間0.4 s、溶接電流7 kA)を実施した。溶接部断面マクロをPhoto 3に示す。インテリジェントスポット溶接では、270GA-780GA間にナゲットが形成されており、その有効性が実溶接でも確認された。

2.3.2 四枚重ね板組みへの適用

270GA + 780GA + 780GA + 780GA (0.7 mm + 2.3 mm + 2.3 mm + 2.3 mm, 板厚比 10.9) の四枚重ね板組みに対して、インテリジェントスポット溶接の適用性を確認した。Photo 4の溶接部断面マクロに示すように、三枚重ねと同様、270GA-780GA間にナゲットが形成された。1段目条件を低加圧力・短時間通电・高電流に設定することで、通电初期に電極直下の薄板・厚板間の接触面積を狭くし、電流密度を増加させ、ナゲットを形成させるというメカニズムは、板厚比が10以上になった場合でも十分に適用されることが明らかになった。四枚重ね溶接の実用化に向けて、

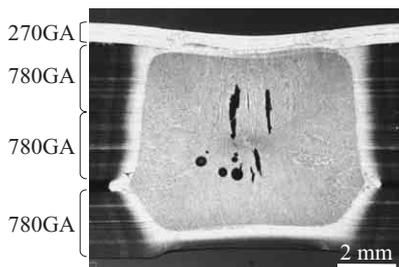


Photo 4 Cross sections of four sheets welded joints by intelligent spot welding

鋼板の重ねギャップの制御、厚板側でのナゲット確保のための加圧力確保など、施工上、設備上の課題解決をお客様と協力して進めていきたい。

3. レーザ・アークハイブリッド溶接

3.1 レーザ溶接の現状

軽量化を目的に自動車車体に高張力薄鋼板を適用する場合、鋼板の強度上昇にともなう板厚減少が期待されているが、部材によっては板厚減少による部材剛性の低下が生じることがあり、何らかの手法による剛性確保が重要な課題となっている。連続溶接はこのような剛性低下を補う有効な手段であり、レーザー溶接はその代表といえる。

しかし、最近、欧州の自動車メーカーを中心にレーザー溶接は積極的に採用されているものの、その適用ははまだ広がりを見せていない状況にある。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あげられる。すなわち、隙間が大きいと溶け落ちが生じ、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0.2 mm程度以下に厳密に管理することが求められている。また、亜鉛めっき鋼板の重ね溶接においては、隙間ゼロで溶接した場合、亜鉛の蒸発に起因したスパッタおよびブローホールなどの溶接欠陥が多発するという課題も抱えている。

これらの課題を解決するため、レーザー・アークハイブリッド溶接法^{9,10)}の自動車車体組立溶接への適用について検討し、薄板の重ね溶接性に優れたレーザー・アークハイブリッド溶接技術¹¹⁾を開発した。

3.2 レーザ・アークハイブリッド溶接法の特徴

レーザー・アークハイブリッド溶接法は、YAGレーザー溶接とガスシールドアーク溶接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、隙間の厳密な管理が必要ないため実用化が容易になるというメリットが期待できる。

Fig. 3にレーザー・アークハイブリッド溶接プロセスの模式図を示す。レーザー照射点の後方にアーク溶接電極を配置してアークを発生させ、レーザー照射点とアークの狙い位置の関係は1~3 mmに管理した。YAGレーザーを用いる理由は、YAGレーザーのエネルギーの大部分がプラズマに吸収されずに鋼板に到達して溶接できるためである。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. 4に示す。溶接条件は、レーザー出力3 kW(加工点出力)、アーク電流100 A、溶接速度2 m/minである。比較例として、アーク溶接の電圧変化を合わせて示す。ハイブリッド溶接では電圧が0から約20 Vの範囲を高い周波数で振動しており、約10 ms周期でワイヤから溶滴が短絡移

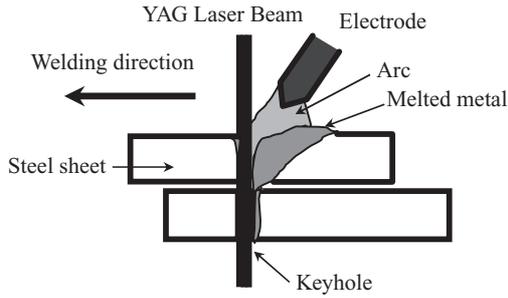


Fig.3 Configuration of laser beam and MAG arc electrode in laser arc hybrid welding

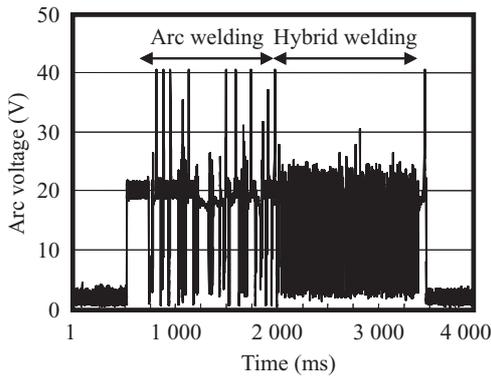
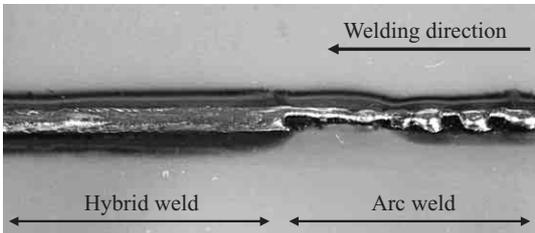


Fig.4 Time dependence of arc voltage with and without laser radiation



Fillet joint; Upper thickness: 0.8 mm, Lower thickness: 1.2 mm (Laser output: 2 kW, Arc current: 100 A, Speed: 2 m/min)

Photo 5 Appearances of hybrid and arc welded bead surface

行していることが分かる。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50～100 msと長くなっていることが分かる。一般に、アーク溶接では、溶接速度が速くなるとビード形状が不均一になるが、ハイブリッド溶接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。Photo 5は、ハイブリッド溶接法とアーク溶接法における重ね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。

3.3 重ね溶接継手への適用

3.3.1 重ね溶接における隙間許容量の拡大

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

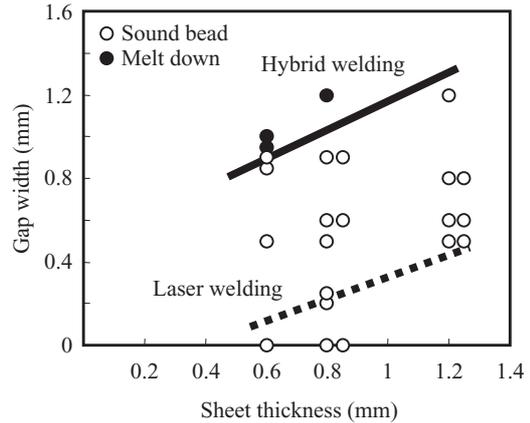


Fig.5 Gap tolerance of lap joint in hybrid and laser welding

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。比較のためレーザ溶接における限界隙間量を破線で示しているが、実線で示されるハイブリッド溶接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ていた。ハイブリッド溶接法で重ね溶接の隙間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融金属が供給されるためである。

3.3.2 亜鉛めっき鋼板の溶接性

亜鉛の沸点は約 900°C と鉄の融点 (約 1500°C) より大幅に低いため、亜鉛めっき鋼板を重ね継手でレーザ溶接する場合は、亜鉛の蒸発に起因するスパッタおよびブローホールなどの溶接欠陥が発生しやすい。Photo 6 に合金化溶融亜鉛めっき鋼板 (目付け量: 45 g/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裏面の外観写真を示す。ビームが未貫通あるいは部分貫通の溶接条件 (レーザ出力: 2.5, 2.7 kW, アーク電流: 100 A, 溶接速度: 2 m/min) では、ビード表面にスパッタやピットが多数発生している。これに対し、ビームが貫通する溶接条件 (レーザ出力: 3.2, 3.7 kW, アーク電流: 100 A, 溶接速度: 2 m/min) では、スパッタおよびピットが大幅に抑制されており、レーザビームの貫通の有無が溶接部健全性を支配しているといえる。また、さらにレーザ出力が高い場合は、スパッタやピットなどの欠陥は発生していないものの、溶接入熱が過大になるためビード溶け落ちが発生していた。

次に、合金化溶融亜鉛めっき鋼板 (目付け量: 45 g/m², 両面めっき) を、レーザ出力: 3.2 kW, アーク電流: 100 A および溶接速度: 2 m/min でハイブリッド溶接した。Photo 7(a) にハイブリッド溶接時のビード横・縦断面写真を示す。比較例として、Photo 7(b) にレーザ出力: 3.2 kW, 溶接速度: 2 m/min でレーザ溶接したビード縦断面写真も合わせて示している。レーザ溶接では、溶接ビード内に亜鉛蒸気

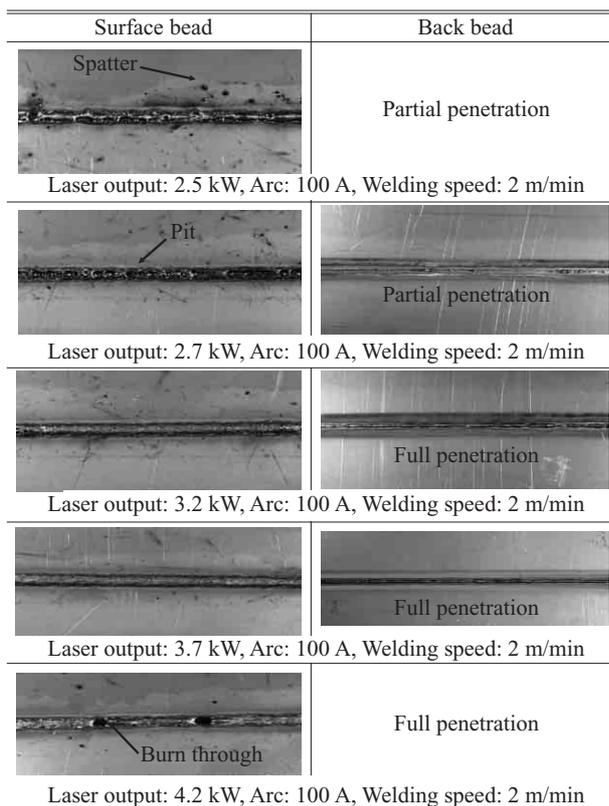
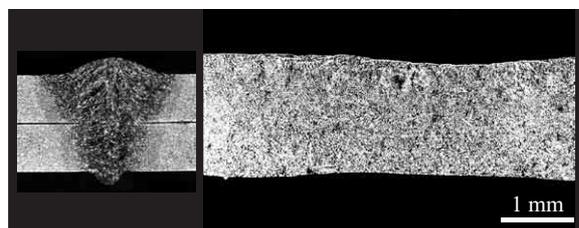


Photo 6 Appearance of lap joint of zinc coated steel sheet welded by hybrid welding method



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



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

Photo 7 Appearance and longitudinal cross section of lap joint of zinc coated steel sheet welded by hybrid and laser beam welding

ド溶接では溶接ビードの横・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た。

鋼板を貫通する溶接条件において、レーザー溶接では溶接欠陥が発生するのに対して、ハイブリッド溶接では溶接欠陥が抑制される理由として、以下の3点が推察された。第一は、レーザービームにより形成されるキーホールが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

すると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。この場合、レーザー溶接でもキーホールは貫通しているが、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ためブローホールが多発したと考えられる。第二は、ハイブリッド溶接ではレーザーの後方でアークプラズマが発生するため、レーザー溶接より溶融池が大きくなり、溶融金属が凝固するまでの時間が長くなることがあげられ、亜鉛蒸気が溶接池から脱出する時間的余裕が生じたと考えられる。第三は、高周期での短絡移行の発生により、溶滴移行時に溶融池振動が生じていることがあげられ、振動により亜鉛蒸気の溶融池内部からの浮上が促進されたものと考えられる。

4. おわりに

自動車車体に対して、各種の高機能高張力薄板を有効に活用し、その適用拡大を図るためには、鋼板材質の高性能化とともに、プレス技術、溶接技術などの工法開発が重要である。本報告では、これらの中で、自動車車体組立用の新溶接技術の開発事例を紹介した。今後は、インテリジェントスポット溶接技術あるいはレーザー・アークハイブリッド溶接技術など、JFE スチールの保有技術の実適用を推進するとともに、さらに有効かつ効果的な車体組立溶接技術の開発に注力し、高張力薄鋼板の適用拡大による車体軽量化および衝突安全性向上に貢献していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 斎藤亨. 溶接技術. vol. 30, no. 3, 1982, p. 34-38.
- 2) 小野守章. 西山記念講座. 鉄鋼協会. vol. 184, 2005, p. 135-165.
- 3) 小野守章. 溶接技術, vol. 57, no. 3, 2003, p. 77-82.
- 4) 西武史, 斎藤亨, 山田有信, 高橋靖雄. 製鉄研究. no. 307, 1982, p. 56-63.
- 5) 沖田泰明, 池田倫正, 小野守章, 安田功一. 溶接学会全国大会講演概要. no. 78, 2006, p. 164-165.
- 6) 沖田泰明, 池田倫正, 小野守章, 安田功一. 溶接学会全国大会講演概要. no. 78, 2006, p. 166-167.
- 7) 長島伸匡, 山崎貴司. 溶接技術. vol. 48, no. 4, 2000, p. 71-75.
- 8) 吹田和嗣, 鈴木清司, 坂本好隆, 柴田洋一. 自動車技術. vol. 50, no. 12, 1996, p. 57-63.
- 9) 浜崎正信, 勝村宗英, 松田純, 永田重幸. 高温学会. vol. 9, no. 2, 1983, p. 79-83.
- 10) Dilthey, U. et. al, IIW Doc. XII-1565, 1999.
- 11) 小野守章, 真保幸雄, 吉武明英, 大村雅紀. 溶接学会論文集. vol. 21, no. 4, 2003, p. 515-521.



池田 倫正



沖田 泰明



小野 守章