

半導体レーザによる異板厚突合せ溶接技術の開発

Development of Different Thickness Butt Welding Technology by Direct Diode Laser for Railway Vehicle

吉澤 正 皓 Masaaki YOSHIZAWA

河田 直 樹 Naoki KAWADA

石川 武 Takeshi ISHIKAWA

鉄道車両製造におけるレーザ溶接はステンレス鋼の薄板の突合せや重ね溶接への適用がある。これ以外では中板同士の異板厚突合せ溶接にYAGレーザを適用した例がある。YAGレーザではアンダーフィルの発生や、ギャップ裕度が小さいなどの課題があった。これらを解決するために、半導体レーザにより異板厚突合せ溶接技術の開発を行った。使用した半導体レーザのビーム形状は矩形であり、YAGレーザよりも溶接線方向に長い加熱時間がある。その結果、YAGレーザに比べて溶接入熱を低減できた。また、母材と同等の継手強度が得られた。

Laser welding is applied butt and lap joints of stainless steel sheet in manufacturing of railway vehicle. Here is another example of application laser-welding. It is different thickness butt welding by using YAG laser. These joints thickness are 3.0mm and 4.5mm. YAG laser welding has two problems. These problems are underfill of weld defect and little gap tolerance. This study use direct diode laser (DDL) to solve these problems. DDL has rectangle and long length beam spot. This beam spot can provide long heating time more than beam spot of YAG laser. As a result DDL welding can reduce welding heat input comparison with YAG laser welding. In addition, strength of welded joint is equivalent to base metal.

1 はじめに

鉄道車両製造における溶接技術は抵抗スポット溶接、アーク溶接が主流である。2000年以降はレーザ溶接を適用したステンレス製車両が登場しており、当社も2011年に横浜新都市交通2000型⁽¹⁾の外板と構体骨組の接合にレーザスポット溶接⁽²⁾を適用した実績がある。レーザ溶接は速い溶接速度でも深い溶込みが得られる。また、加熱される範囲は非常に微小であり結果として入熱が少なく熱ひずみの小さい溶接が可能である。これは後工程での修正作業の減少や、組み付けを容易にする等の利点がある。

ステンレス鋼製車両の外板や骨部材の板厚は1.0～1.5mmの薄板であるが、一部の部材には中板も存在し当社では厚さ3.0mmと4.5mmの中板同士の突合せ溶接にYAGレーザを適用した実績がある。しかし、YAGレーザの場合はアンダーフィルの抑制と、ギャップ裕度の緩和のためにビームを光学系で二つに分割し、なおかつファイアーワイヤを併用しての接合であった⁽³⁾。これに対して、YAGレーザのツインスポットの光学系を簡易化し、ファイアーワイヤを用いない接合を目指し、矩形のビームを持つ半導体レーザを用いて中板同士の異板厚突合せ溶接技術の開発を行った。結果、ファイアーワイヤを用いず接合が可能となり、なおかつ入熱量の低減に成功した。

この結果を報告する。

2 実験方法

2. 1 供試材および実験装置

供試材はオーステナイト系ステンレス鋼のSUS304を使用した。板厚は3.0mmと4.5mmである。継手形状は突合せ継手である。図1に示すように段差面をレーザ照射側、平滑面を裏側とした。板端の加工はシャー切断またはレーザ切断とした。シャー切断の場合、突合せの際にダレ面をレーザ照射側となるように組み合わせた。

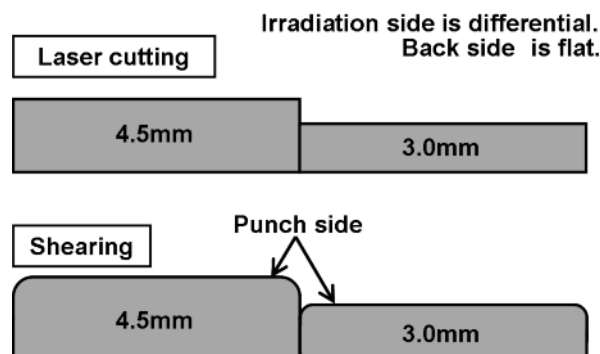


図1 突合せ継手の形状

図2に溶接装置の配置を示す。使用したレーザー装置の波長は940nmである。当装置はファイバ伝送ではなく、被加工物に直接レーザー光を照射するダイレクトダイオードレーザー (DDL)⁽⁴⁾ である。レンズの焦点距離は130mmであり、焦点位置でのビームサイズは半値全幅で幅0.5mm、長さ3.5mmの矩形である。ビームの長手方向は溶接方向と同一とした。加工ガスはサイドガスノズルから供給し、加工ガスは純Ar、流量は30L/minとした。接合には幅10mm、深さ10mmの溝付きの銅定盤を用いた。

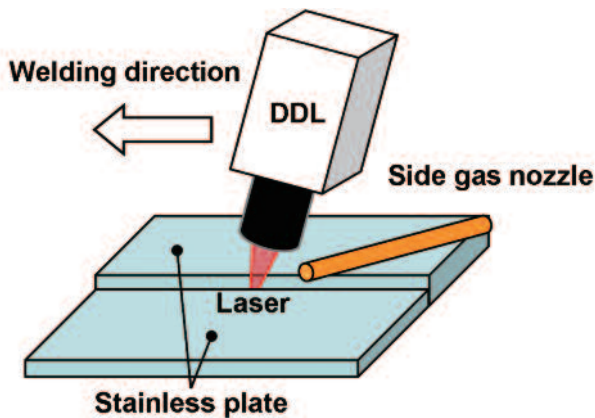


図2 溶接装置の配置

2. 2 焦点位置の検討

波長940nmに対し高吸収の黒アクリルに極低パワーのレーザーを高速で走査し、蒸発幅を計測し、これを簡易的にビーム幅とした。この結果を図3に示す。図中の点線または破線と実線の交点は、照射痕の幅が最も絞れた位置から $\sqrt{2}$ 倍、1.05倍になる位置である。半値全幅で定義されるビームサイズと照射痕に相似性があると仮定すると、それぞれの位置ではパワー密度が50%、90%相当となる。

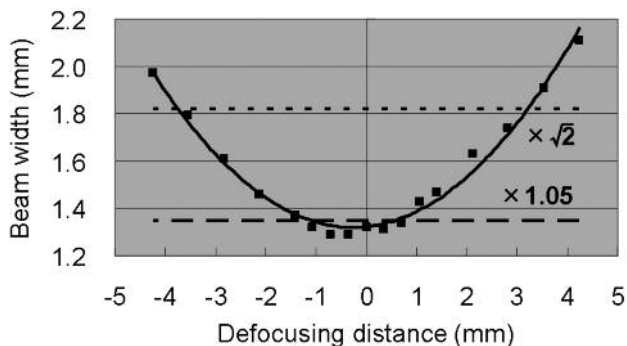


図3 ビーム幅の計測結果

レーザー照射部には板厚差により1.5mmの段差がある。溶接に際してこの段差部は溶融し、傾斜面を形成すると考えられる。仮に4.5mm板表面に焦点を合わせた場合、段差部が溶けるにつれて溶接ビードは焦点位置から遠ざ

かる（デフォーカスする）と考えられる。また、常に3.0mm板表面はデフォーカスであり、パワー密度は90%未満となる。3.0mm板表面を焦点位置とした場合は、反対に段差部が溶けるにつれて溶接ビードは焦点位置に近づくと考えられる。よって、3.0mm板表面に焦点位置を設定することとした。

3 結果と考察

3. 1 板の切断方法の違いによる接合

突合せ面がレーザー切断の場合とシャー切断の場合の溶接部断面マクロ写真を図4、5に示す。レーザー出力は5kW、溶接速度は1.2m/minである。ねらい位置を突合せの中心とし、溶接方向は紙面奥から手前である。

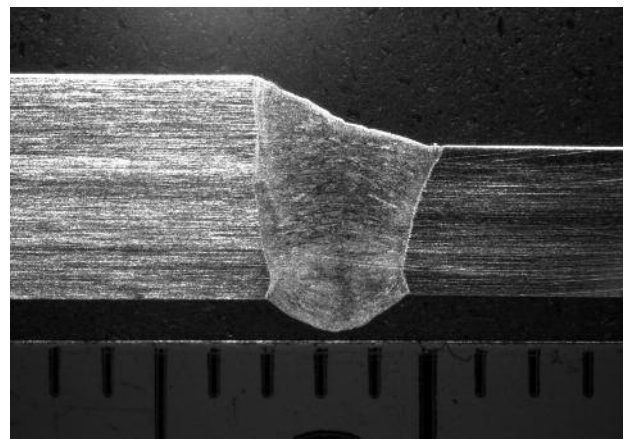


図4 レーザー切断の場合の溶接部断面マクロ写真
(レーザー出力：5kW、溶接速度：1.2m/min)

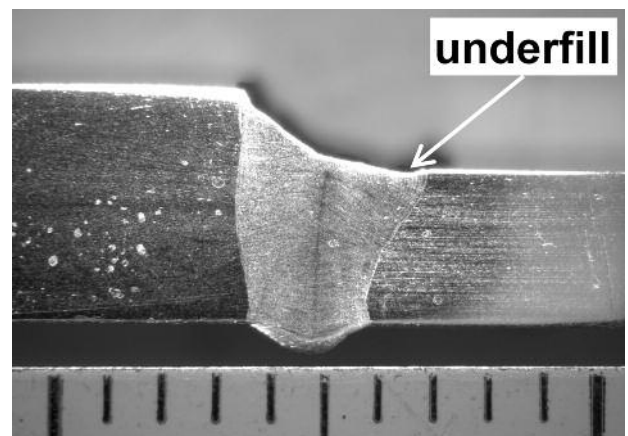


図5 シャー切断の場合の溶接部断面マクロ写真
(レーザー出力：5kW、溶接速度：1.2m/min)

レーザー切断、シャー切断のどちらにおいても溶接ビードが4.5mm板から3.0mm板にかけて傾斜面を形成し、裏面では約1.0mmの裏波ビードが発生している。シャー切断の場合、3.0mm板から見て若干のアンダーフィルが生じた。どちらの場合も溶接部にブローや割れ等の発生は無い。

2008年に報告したYAGレーザの溶接条件⁽³⁾は4kW、0.8m/minである。対してレーザ出力は若干の増であるが、溶接速度は向上した。単純にレーザ出力を溶接速度で除して投入熱量を計算するとYAGレーザでは3000J/cm、DDLでは2500J/cmとなり、計算では入熱を17%低減できている。また、板の切断方法に関わらず、フィラーワイヤを用いることなく接合できた。

DDLのビームは長手方向が3.5mmであり、YAGレーザのビームは0.6mmのスポットが直列に並んでいるので約1.2mmである。よってDDLとYAGレーザではビームの長さに約3倍の差がある。もし同じ速度で溶接するのであれば、ある点での加熱時間は3倍の差がある。ただし、溶接速度はDDLの方が1.5倍速い。よって、今回の溶接条件では約2倍の加熱時間の差となる。よって、4.5mm板の上端部が十分に溶融し3.0mm板側に流れ込み、シャー切断の場合はダレ面の空隙を埋めたと考えられる。また、YAGに比べて長い加熱時間により裏面までの溶込みを得られたと考えられる。

3. 2 ねらい位置の影響

3. 2. 1 水平方向のずれ

3.1の接合試験ではねらい位置を突合せの中心とした。本項では水平方向にねらいがずれた場合の影響を明らかにするために図6に示すように、突合せ面を中心として左右に最大1.0mmの距離をずらして接合を行った。焦点位置は3.0mm板の表面とした。板の端面はレーザ切断である。

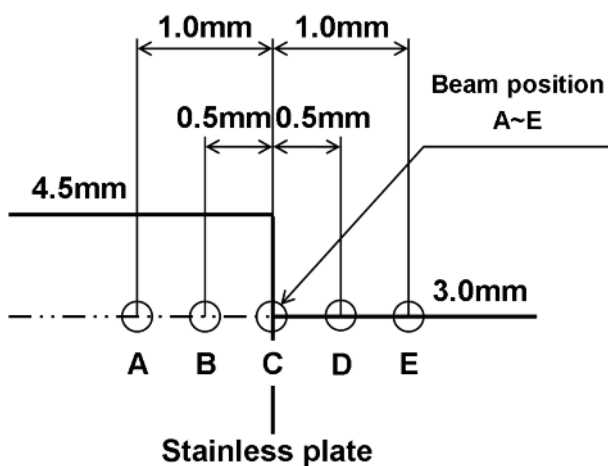


図6 ねらい位置の模式図

図7にねらい位置A～Eの断面マクロ写真を示す。レーザ出力は5kW、溶接速度は1.2m/minである。溶接方向は紙面奥から手前である。

図7(a) (b)のねらい位置が4.5mm板側に寄った場合は図7(c)の突合せ中心を狙った場合に比べてビード表面が

盛り上っており、まったくアンダーフィルを生じていない。

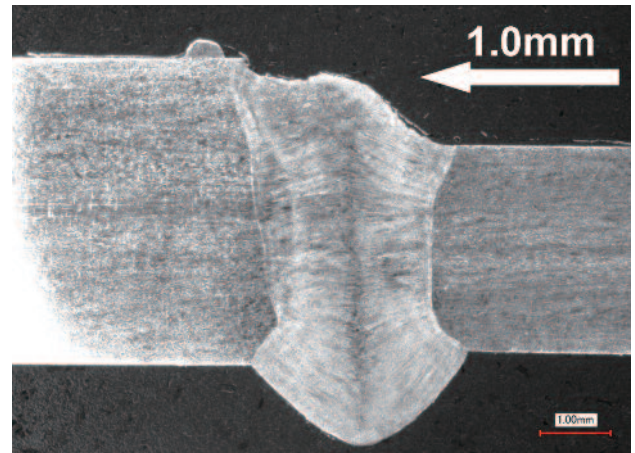


図7 (a) ねらい位置Aの溶接部断面マクロ写真

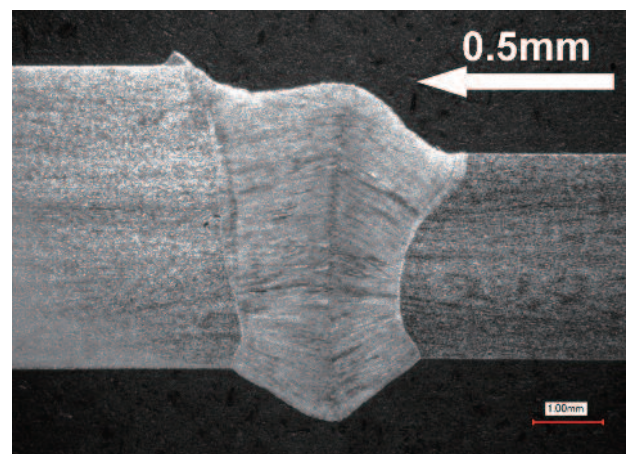


図7 (b) ねらい位置Bの溶接部断面マクロ写真

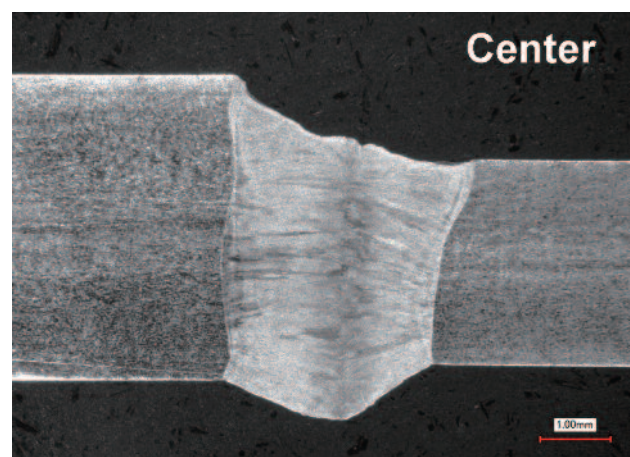


図7 (c) ねらい位置Cの溶接部断面マクロ写真

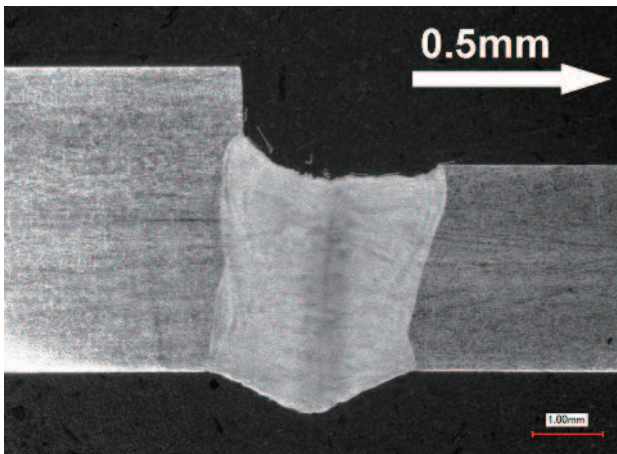


図7 (d) ねらい位置Dの溶接部断面マクロ写真

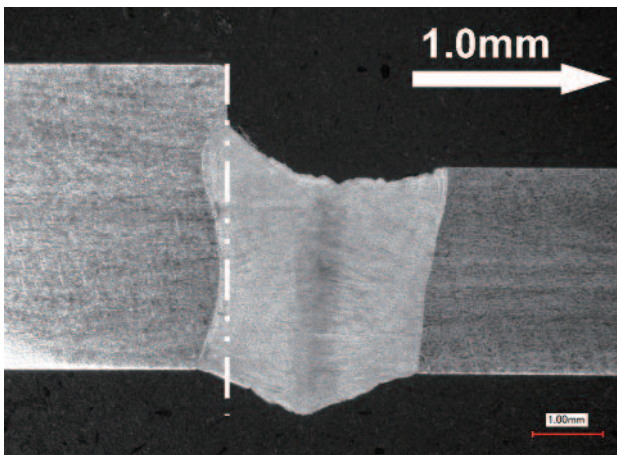


図7 (e) ねらい位置Eの溶接部断面マクロ写真

これに対して図7(d) (e)の3.0mm板側に寄った場合では、4.5mm板の上端部が溶け残っている。図7(e)の溶け残った4.5mm板の端部に沿って白い二点差線を引いたところ、4.5mm板側にはほとんど溶込みはない。また図7(d) (e)ともにアンダーフィルが生じている。

図7(a) (b)において、アンダーフィルが生じない理由は次のことが考えられる。4.5mm板側にねらいが寄った場合、3.0mm板側に溶け落ちさせる体積が増加する。また、4.5mm板表面では1.5mmのデフォーカス状態にありパワー密度が低下することから溶融能力が低下し端部が3.0mm板側に流れずに盛り上ったと考えられる。対して、図7(d) (e)のようにねらい位置が3.0mm板側に寄った場合は、マクロ写真からも明らかなように4.5mm板からの溶融金属の供給がなく、裏面に裏波として出た分の体積によりアンダーフィルが生じたと考えられる。

図8にねらい位置とアンダーフィルの深さの計測結果を示す。継手の薄い側の板厚3.0mmを基準として考えると、ねらい位置が3.0mm板側に1.0mmずれた時点でアンダーフィルの深さは板厚の10%を超える。よって、ねらい位置は3.0mm板側に0.5mmまでが良い。

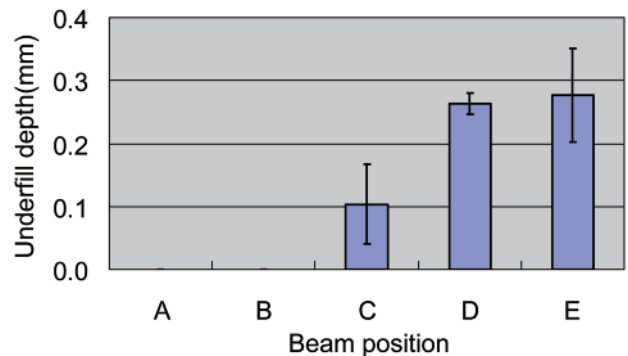


図8 ねらい位置とアンダーフィルの深さの関係

3. 2. 2 垂直方向のずれ (焦点位置のずれ)

垂直方向のずれ、すなわち焦点位置のずれの影響について実験を行った。焦点位置を図9に示すように始端は3.0mm板表面に合わせ、終端は4.5mm板表面に合わせた。ねらい位置は突合せの中心とした。

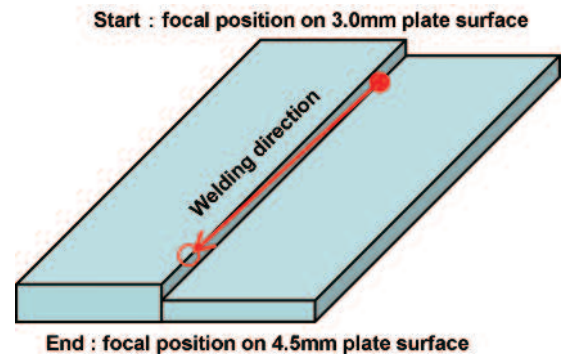


図9 始終端の焦点位置の模式図

溶接部始終端および中央での継手裏面の外観写真を図10(a) ~ (c)に示す。裏波は図10(a) (b)では安定して連続に発生しているが、図10(c)溶接部終端の手前30mmから不安定で断続的になり最終的には消滅している。

溶接部の始終端から30mmと溶接部の中央で断面マクロ観察を行い、各部を計測した。計測箇所を図11に示す。計測結果を表1に示す。ビード幅にほとんど変化は無いが、裏波幅は始端と終端で1mm減少している。アンダーフィルは3.2.1の図7(a) (b) ねらい位置が4.5mm板側に寄った場合のようにビードが盛り上がり発生していなかった。溶接部断面積も減少しており、吸収されたエネルギーに差があると考えられる。

終端の手前30mmの位置では、3.0mm板表面から焦点が上方に約1.2mm移動しており、図3の結果からパワー密度が始端に比べ10%ほど減少しているはずである。今回の実験では溶接部後方は貫通溶接されており、そこからの熱伝導の影響がある。よって、実際に裏波ビードが減少する焦点位置のずれはより小さいと考えられる。確実に貫通溶接をするためには、垂直方向のずれは1mmまでが良い。

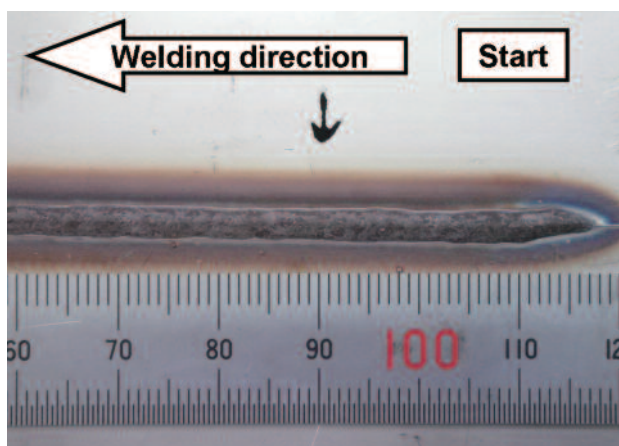


図10 (a) 始端付近の継手裏面の外観

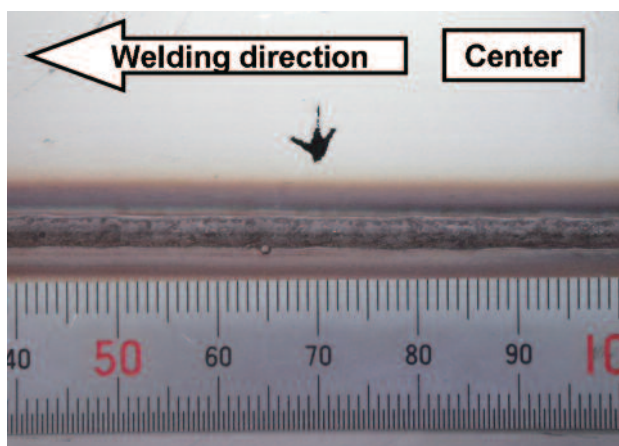


図10 (b) 中央付近の継手裏面の外観

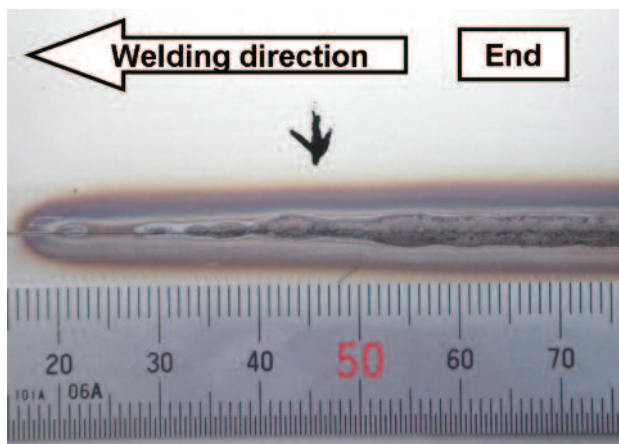


図10 (c) 終端付近の継手裏面の外観

3. 3 引張試験

3.2.1で作製した継手の引張試験を行った。試験片形状は突合せ溶接継手の引張試験方法 JIS Z 3121の1A号試験片とした。継手には1.5mmの板厚差があり、このままでは引張試験の際に軸がずれる。そこで図12に示すように4.5mm板の裏面に1.5mmのSUS304板をスポット溶接で取り付けた。比較として3.0mm板から母材の引張試験片を採取した。こちらは、金属材料の引張試験方法 JIS Z 2201の13B号とした。引張速度は熱間圧延ステンレス鋼板および鋼帯 JIS G 4304により試験片平行部のひずみ増加率を40～80%/minとするために36mm/minとした。

引張試験の結果を図13に示す。ねらい位置Aの4.5mm板側に1.0mm寄った継手以外はほとんど母材と同等であった。図14にねらい位置Aの継手の引張試験後の破断面を示す。破断面には引張りで破断した濃いグレーの面と縦に筋の入った銀光沢の面がある。この銀光沢の面にある縦筋は、光学顕微鏡での観察から供試材端面のレーザ切断の加工痕と考えられる。図7(a)を見ると3mm側の溶接部の境界に垂直な部分があり、これが供試材の切断面(突合せ面)であると考えられる。ビームの幅は0.5mmであるから、4.5mm側にねらい位置が1.0mm寄った場合、3.0mm板は直接加熱されず4.5mm板からの熱伝導により溶融すると考えられる。このため、突合せのギャップにより熱が伝わらず切断面の一部が接合されずに残ったと考えられる。引張試験の結果を考慮し、4.5mm板側へのねらい位置のずれは0.5mmまでが良い。

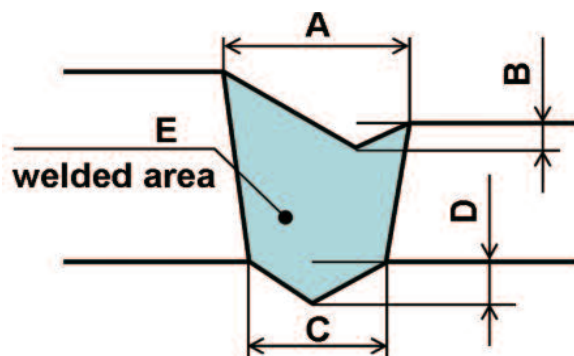


図11 溶接部の測定箇所

表1 溶接部の測定結果

	start	center	end	average	σ
A (mm)	3.1	3.2	2.9	3.1	0.1
B (mm)	0.2	0.1	-	0.2	0.1
C (mm)	3.2	3.0	2.1	2.8	0.5
D (mm)	0.9	0.7	0.6	0.7	0.1
E (mm ²)	11.4	12.1	10.8	11.4	0.5

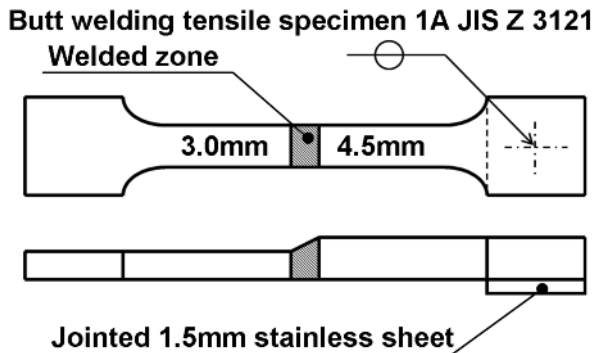


図12 引張試験片の模式図

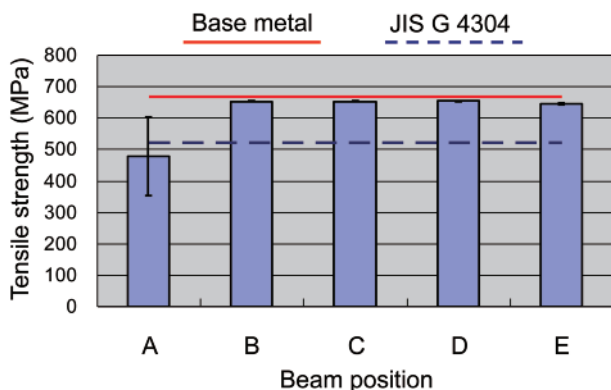


図13 各ねらい位置における引張強さ

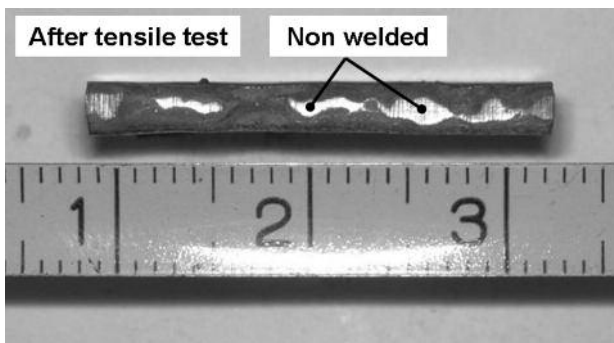


図14 引張試験後の破断面 (3mm板側)

4 まとめ

異板厚の突合せ溶接にDDLを用いて実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) DDLの場合、フィラーワイヤを必要とせず、その為、余分な余盛が無い。なおかつ、YAGレーザーに比べて入熱を低減できる。
- (2) 焦点位置にずれが無い場合、ねらい位置は突合せ中心から左右に0.5mmを許容できる。
- (3) ねらい位置が突合せ中心の場合、焦点位置のずれは垂直上方に1mmを許容できる。

- (4) 焦点位置にずれが無い、ねらい位置のずれが突合せ中心から左右に0.5mm以内の場合、引張強さは母材と同等である。

本研究の成果をMIG溶接で施工していた製品に適用した結果、工数を50%以上低減できた。これは溶接入熱が減少しひずみが低減できたことと、MIG溶接に比べて余盛が少なくグラインダ仕上げの時間が減少したことにより修正作業が不要となったためである。

参考文献

- (1) 原茂幹大, 他: 「横浜新都市交通 金沢シーサイドライン2000型車両」, 車両技術 241号, 131, (2011), 社団法人日本鉄道車両工業会
- (2) 河田直樹, 他: 「パルス波形制御によるステンレス鋼板のレーザースポット溶接の最適化技術の開発」, 東急車輛技報 60号, 26-35, (2010), 東急車輛製造(株)
- (3) 越川純, 他: 「ステンレス鋼板のレーザーによる突合せ溶接に関する安定化手法の開発」, 東急車輛技報 58号, 26, (2008), 東急車輛製造(株)
- (4) 宮島博文, 他: 「kW級半導体レーザー発振機の開発と溶接特性(第1報): kW級半導体レーザー発振機の開発」, 溶接学会全国大会講演概要 第82集, 23, (2008), 一般社団法人溶接学会

著者紹介



吉澤正皓
生産本部
技術部(基礎開発)



河田直樹
博士(工学)
生産本部
技術部(基礎開発) 主査



石川 武
博士(工学)
生産本部
技術部(基礎開発) 課長