

板厚の異なるステンレス鋼板の レーザ突合せ溶接の異常検知手法

Defect Detection Technology of Different Thickness Stainless Steel Sheets Laser Butt Welding

吉澤 正 皓 Masaaki YOSHIKAWA
河田 直 樹 Naoki KAWADA
石川 武 Takeshi ISHIKAWA

板厚の異なるステンレス鋼板のレーザ突合せ溶接において、溶接時の狙い位置によりアンダーフィルや融合不良などの欠陥が発生することが分かっている。しかし、リアルタイムでレーザ光の位置を修正するには複雑なシステムが必要となる。開発した異常検知技術は溶接後にレーザ光の狙い位置のずれから溶接継手の異常を判断する。狙い位置のずれを判定する為に、レーザ溶接時に発生する光の挙動を溶接線の左右に配置した2台のフォトダイオードにより数値化した。この異常検知手法について報告する。

In different thickness stainless steel sheets laser butt welding, laser beam position causes the welding defect such as underfill and incomplete fusion. However, a complicated system is necessary to revise the position of the laser beam position during welding. Developed defect detection technology judged defect of weld joint from laser beam position after welding. In order to detect laser beam position, this technology quantify behavior of light induced by laser with arranged two photo diodes on both side of weld line. This paper reports defect detection technology of different thickness stainless steel sheets laser butt welding.

1 はじめに

レーザ溶接は、レンズによって微小サイズに集光されたレーザ光が熱源となる。集光されたレーザ光のサイズは様々であるが、おおよそ直径0.5mm程度である。

1両の全長が約20mあるステンレス鋼製の鉄道車両では、構成する部材も大きく、連続でレーザ溶接を行う長さがメートル単位におよぶ。しかし、大きな部材と溶接線の長さに対してレーザ光の集光される範囲は非常に小さい為、高精度な位置決め技術が必要となる。

レーザ溶接は高速でありリアルタイムでレーザ光の狙い位置を修正することは困難である。実現するには機械的または光学的な装置が必要となる⁽¹⁾⁽²⁾。そこでレーザ光の狙い位置をリアルタイムで修正するのではなく、結果として正常な溶接であったかを検知する手法を検討した。

本紙では2012年度報で報告した板厚の異なるステンレス鋼板の突合せ溶接について検討を行った。板厚が異なるステンレス鋼板の突合せ溶接ではレーザ光の狙い位置がずれることにより、溶接部の肉厚が減少するアンダーフィルや、開先面が溶融せずに残る融合不良が発生することが分かっている⁽³⁾。

今回検討した検知手法では既存のレーザ溶接装置に設置できるフォトダイオードを用いたシステムを構築した。

これらの結果について報告する。

2 実験装置および材料

図1に実験装置の概略を示す。使用するレーザ装置は波長940nmのダイレクトダイオードレーザ（以下、DDL）である。焦点位置でのスポットサイズは0.5mm×3.5mm（半値全幅）の矩形である。ビームの長手方向は溶接線方向と同一とした。

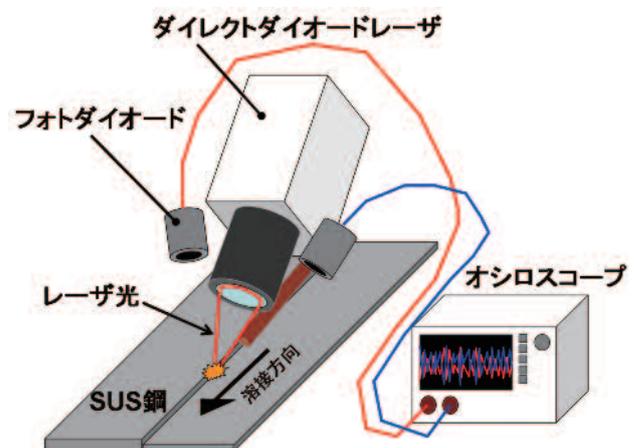


図1 実験装置の概略

DDLの左右にはフォトダイオードが取り付けられており、溶接時には一体で移動する。2台のフォトダイオードはオシロスコープに接続してあり、溶接時に発生する光を電圧波形として記録する。サンプリングレートは1kHzとした。

図2にレーザー装置、フォトダイオード、被接合材料の位置関係を示す。使用する材料はSUS304で厚さは3.0mmと4.5mmである。板の配置は常に溶接方向に対向した時に左が厚さ4.5mm、右が厚さ3.0mmとなるように配置した。フォトダイオードの受光部はレーザー光の焦点位置に向いている。

フォトダイオードは波長約400nmから1000nmの可視光から近赤外までの感度帯を持っており、DDLの940nmの反射光と溶接時に発生するレーザープルームの可視光域の光を合算した信号として電圧に変換している。フォトダイオードの受光部前方には受光可能な波長の光を全体的に減衰させるアッテネータを装着しているが、特定の波長をカットするようなフィルタ類は一切使用していない。

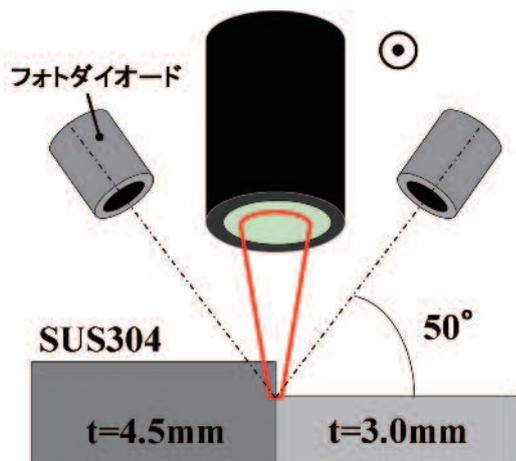


図2 装置の位置関係

溶接部の始末端にSUS304、厚さ3.0mmのエンドタブを設置した。溶接の始末端部は被接合材の板端から20mm程度の距離をエンドタブで除外した。各狙い位置で得られた電圧波形を比較し、それぞれを区別する為の解析を行った。

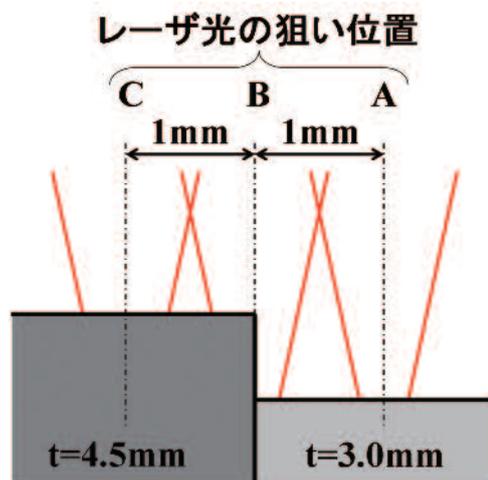


図3 レーザ光の狙い位置

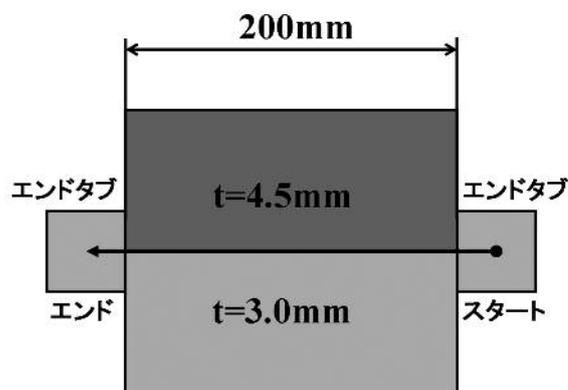


図4 継手の俯瞰図

3 実験方法

実験ではまず初めに同板厚での突合せ溶接実験を行い、フォトダイオードの特性確認を行った。次いで異板厚による実験を行いフォトダイオードによる狙い位置ずれの判別を行った。

同板厚の突合せ溶接では、レーザー光の焦点は板表面とした。また、レーザー光の狙い位置は突合せの中心とした。板厚が異なる突合せ継手の場合、レーザー光の焦点は3.0mm板表面の高さに合わせた。また、レーザー光の狙い位置は図3に示すA、B、Cの3パターンとした。

溶接条件はレーザー出力5kW、溶接速度1.2m/min、加工ガスは純Arを用いた。溶接の際には図4に示すように、

4 結果および考察

4.1 同板厚による実験結果と考察

4.1.1 断面マクロ観察

図5に板厚3.0mmの突合せ溶接継手の断面マクロ写真を示す。裏面には裏波ビードが発生し、溶接ビードは大きく凹んでいる。また、表裏面にスパッタが付着しており、入熱が過剰であると考えられる。

図6に板厚4.5mmの突合せ溶接継手の断面マクロ写真を示す。図5と異なり、貫通溶接されずに突合せ面が溶け残っている。今回の溶接条件では3.0mm板は貫通溶接できるが、4.5mm板を貫通溶接することはできない。

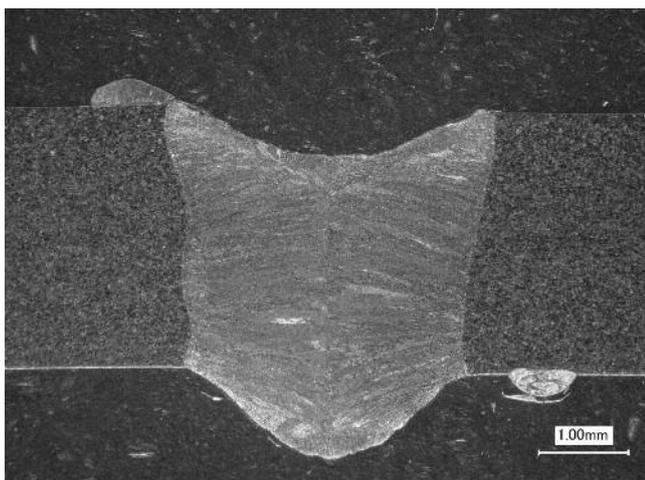


図5 板厚3.0mmの突合せ溶接継手の断面マクロ写真

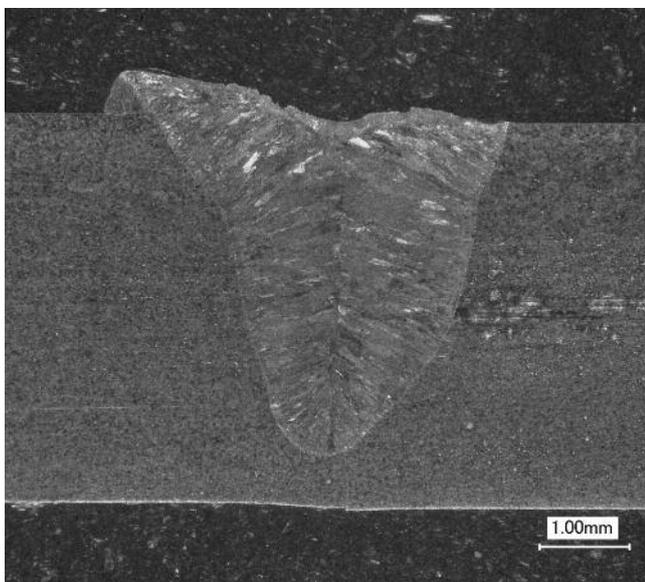


図6 板厚4.5mmの突合せ溶接継手の断面マクロ写真

4. 1. 2 フォトダイオードによる計測

図7に厚さ3.0mm板の突合せ溶接継手のフォトダイオードによる計測結果を示す。濃い線が4.5mm板側のフォトダイオード、薄い線が3.0mm板側のフォトダイオード結果である。

計測したままの波形では傾向が分かり難いため、計測結果を100点の移動平均で処理した。移動平均後の波形を図8に示す。4.5mm板側、3.0mm板側の波形を比較すると、ほぼ相似形で推移している。接合部が平面である為に、左右のフォトダイオードでほとんど同じ波形が得られたと考えられる。これ以降の波形グラフには全て同様の移動平均を適用して示す。

図8の波形を見ると1秒と11秒付近に波形の変化がある。板の端部にはエンドタブが設置してあり、エンドタブの上をレーザ光が移動する距離は20mmであるから、

溶接速度1.2m/minでは時間にして1秒である。よって、これはレーザ光がエンドタブと被接合材料の境界をまたぐ瞬間であると考えられる。

図8のグラフを数値的に表すために、エンドタブと被接合材料をまたぐ瞬間を計算から除いた2秒～10秒の区間の平均値と標準偏差を計算した。計算結果を表1に示す。

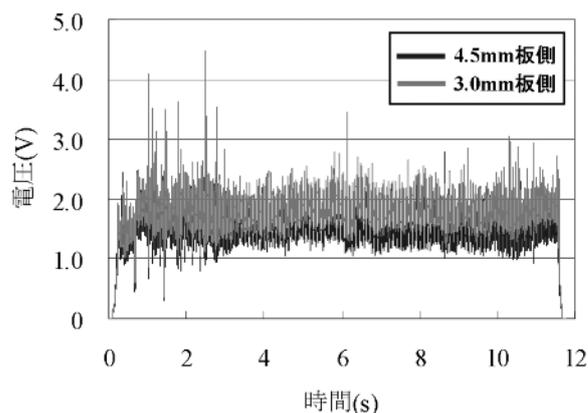


図7 厚さ3.0mm板の突合せ溶接継手の計測結果

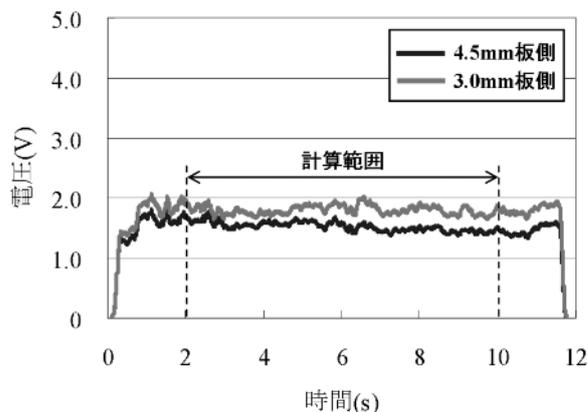


図8 移動平均処理後の厚さ3.0mm板の突合せ溶接継手の計測結果

表1 波形の数値計算結果

3.0mm 板同士の突合せ		
フォトダイオード	4.5mm板側	3.0mm板側
平均値 (V)	1.52	1.80
標準偏差 (V)	0.22	0.23

表1によると4.5mm板側と3.0mm板側のフォトダイオードの計測結果の平均値は異なるが、標準偏差はほとんど同じである。平均値に差が生じる原因としては、フォトダイオードの個体差、取り付け位置の影響が考えられる。

4. 2 異板厚による実験結果と考察

4. 2. 1 断面マクロ観察

板厚が異なる板同士の突合せ溶接の断面マクロ写真を以下に示す。図9に狙い位置A、図10に狙い位置B、図11に狙い位置Cをそれぞれ示す。

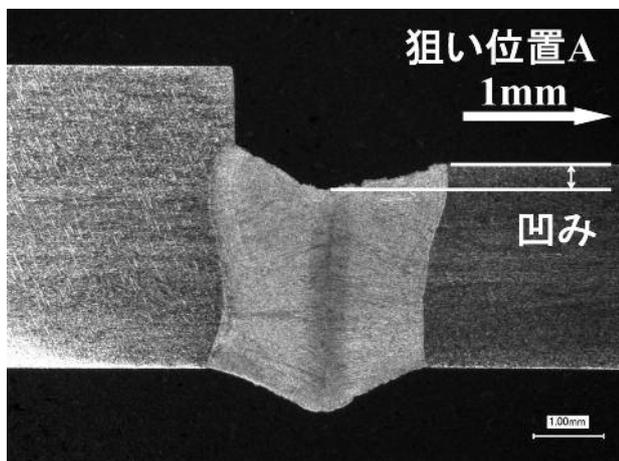


図9 異板厚の継手断面マクロ写真 (狙い位置A)

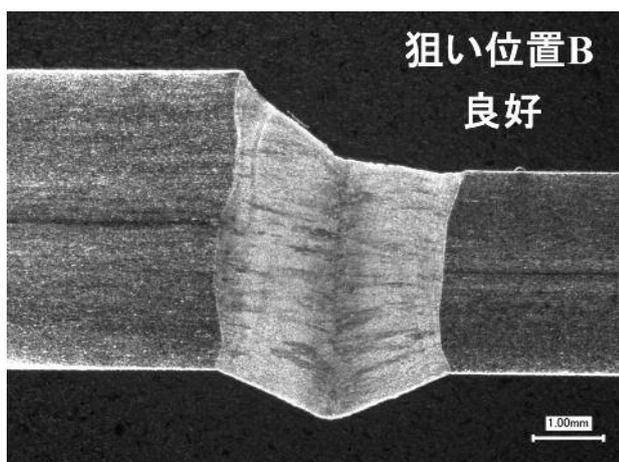


図10 異板厚の継手断面マクロ写真 (狙い位置B)

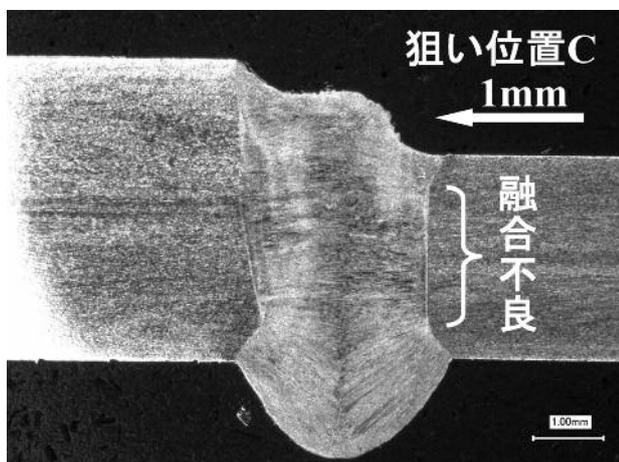


図11 異板厚の継手断面マクロ写真 (狙い位置C)

図9、図10、図11で全て貫通溶接を行うことができています。図6の4.5mm板同士では貫通溶接はできないが、片側が3.0mm板になることで溶接部近傍の体積が減り、貫通溶接に必要な熱量が減少した為と考えられる。また、レーザ光の焦点位置におけるビーム幅は約0.5mmであるから、狙い位置AとCでは、レーザ光は片側の板を直接加熱できていない。しかし、断面マクロ写真では4.5mm板と3.0mm板が接合できている。今回使用した材料の端面はレーザ切断であり、突合せ面のギャップは極めて小さい。また、通常の円形ビームとは異なり溶接線方向に3.5mmの長さを持つ矩形ビームである。以上のことから、レーザ照射側の板からもう一方の板に対して熱伝導により接合が行われたと考えられる。

図9では溶接ビードの表面が大きく凹んでおり板厚が減少している。また、4.5mm板の角が溶け残っており、接合部付近の断面の変化が非常に急峻である。図10は融合不良やビード表面の凹みがなく、4.5mm板から3.0mm板にかけてなだらかに傾斜した溶接ビードとなっており、良好な接合である。図11は断面マクロ上では接合ができていますが、引張試験を実施した結果、突合せ面が一部溶け残る融合不良が発生することが分かっている。

図9、図10、図11はレーザ光の焦点の状態から次の三つに分けられる。図9は3.0mm板表面に完全にジャストフォーカスであり、図5の3.0mm板の溶接に近い状態となっている。図10は突合せ面を狙っていることから、レーザ光の半分は3.0mm板表面にジャストフォーカス、残り半分が4.5mm板の内側に約1.5mmのデフォーカスとなる。図11の場合は、レーザの焦点が3.0mm板表面に合わせていることから、4.5mm板の内側に約1.5mmのデフォーカスとなる。これらのフォーカス状態の変化によって、各狙い位置では溶接部からの反射光、レーザプルームの挙動が異なると考えられる。したがって、フォトダイオードにより溶接部からの種々の光の挙動を定量化することで、狙い位置のずれに起因する溶接の異常検知を試みた。

4. 2. 2 フォトダイオードによる計測

狙い位置A、B、Cにおけるフォトダイオードによる計測結果を図12、図13、図14にそれぞれ示す。これらのグラフの2秒から10秒の区間を表1と同様に計算した。計算結果を表2に示す。

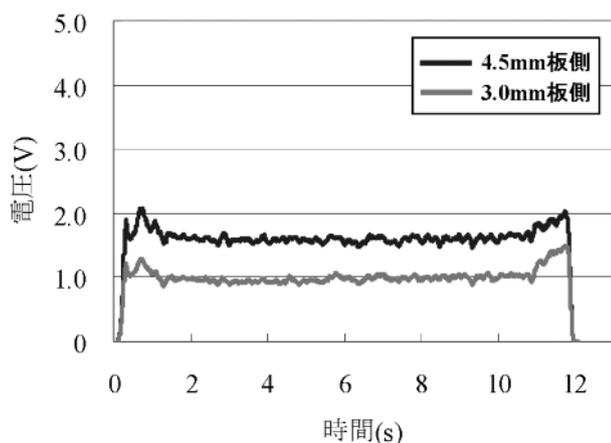


図12 狙い位置Aでの計測結果

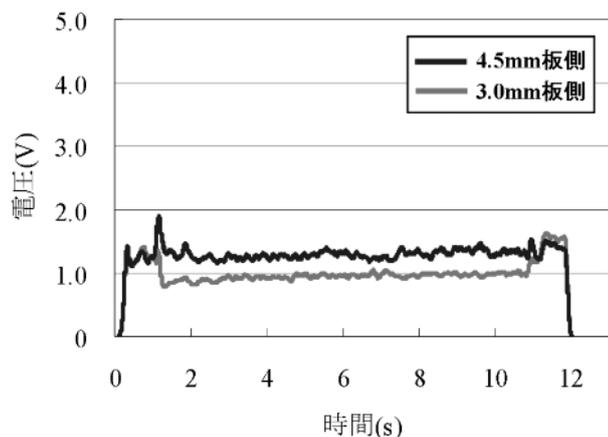


図13 狙い位置Bでの計測結果

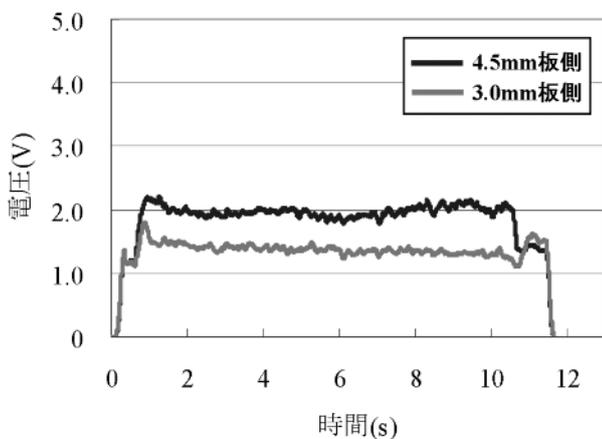


図14 狙い位置Cでの計測結果

表2 各狙い位置での計測結果

		狙い位置 A	
フォトダイオード	4.5mm 板側	3.0mm 板側	
	平均値 (V)	1.59	0.97
	標準偏差 (V)	0.17	0.13
		狙い位置 B	
フォトダイオード	4.5mm 板側	3.0mm 板側	
	平均値 (V)	1.28	0.95
	標準偏差 (V)	0.18	0.11
		狙い位置 C	
フォトダイオード	4.5mm 板側	3.0mm 板側	
	平均値 (V)	1.96	1.36
	標準偏差 (V)	0.30	0.15

表1と表2を平均値に着目して比べると、4.5mm板側のフォトダイオードでは平均値の変動が大きい。また、3.0mm板側のフォトダイオードでは狙い位置Cの時に平均値、標準偏差の値が最も大きくなった。

平均値の増減の原因として考えられるのは各狙い位置におけるデフォーカスの差による反射光、レーザープルームの発光の増減である。この二つはデフォーカス量の増加に対して単調増加する報告がある⁴⁾。しかし、前述の通りレーザーの反射光とレーザープルームの光の合算値を電圧に変換している為に、これら二つの影響を分離することはできない。

良好な継手ができる狙い位置はBであるので、狙い位置A/狙い位置Bおよび狙い位置C/狙い位置Bを表2から計算した。この計算結果を表3に示す。

表3 狙い位置Bとの比較結果

		狙い位置 A / 狙い位置 B	
フォトダイオード	4.5 mm 板側	3.0 mm 板側	
	平均値の比	1.2	1.0
	標準偏差の比	0.9	1.2
		狙い位置 C / 狙い位置 B	
フォトダイオード	4.5 mm 板側	3.0 mm 板側	
	平均値の比	1.5	1.4
	標準偏差の比	1.6	1.3

表3から狙い位置A/狙い位置B、すなわち、狙い位置が突合せ面から3.0mm側に1mmずれる場合は変化が小さく、4.5mm側のフォトダイオードの平均値と3.0mm側のフォトダイオードの標準偏差が2割ほど増加する。

対して、狙い位置C／狙い位置B，すなわち狙い位置が突合せ面から4.5mm板側に1mmずれる場合は、左右のフォトダイオードの平均値、標準偏差ともに増大する。

表3の結果から狙い位置Bの測定結果に対して2割以上の増減があった場合を○、そうでない場合を×として表4に示した。

表4 狙い位置ずれの判定

	狙い位置A／狙い位置B	
フォトダイオード	4.5mm板側	3.0mm板側
平均値	○	×
標準偏差	×	○
	狙い位置C／狙い位置B	
フォトダイオード	4.5mm板側	3.0mm板側
平均値	○	○
標準偏差	○	○

表4より、狙い位置が突合せ面から4.5mm板側に1mmずれる場合は全て○、3.0mm板側に1mmずれる場合はいずれかが○となる。溶接中の種々の光の挙動を2台のフォトダイオードによって計測し、計測結果を表4の判定基準に当てはめれば、レーザ光の狙い位置が突合せ面に対して平行にずれていた場合に起こる溶接の異常を検知できると考えられる。

4. 3 狙い位置が徐々に変化する場合

次にレーザ光の狙い位置が徐々に変化する場合について実験を行った。レーザ光の軌跡の模式図を図15に示す。スタート位置を3.0mm板側に1mm、エンドでは4.5mm板側に1mmずらした。

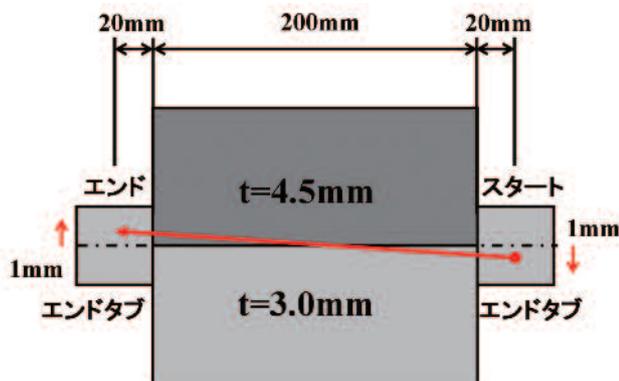


図15 レーザ光の軌跡の模式図

4. 3. 1 断面マクロ観察

図16、図17、図18にそれぞれ、レーザ光の狙い位置を

徐々に変化させた場合の断面マクロ写真を示す。図16、図18は溶接のスタート、エンドから40mmの位置とした。図17は中央の位置である。

計算上では溶接のスタートから90mmの位置で突合せ面にレーザ光が重なるが、図16では4.5mm板の角が溶けている。対して突合せ面から常に1mm離れた位置を狙った図9では4.5mm板の角が完全に溶け残っていた。レーザビームの幅が0.5mmであるから図16の断面を観察した位置では、突合せ面とレーザビームの距離は0.75mm未満となる。この距離ではレーザビームの散乱光により直接加熱されたか、またはレーザプルームからの輻射熱や、熱伝導により4.5mm板の角が溶融したことが考えられる。

図17はレーザ光がちょうど、突合せ面の真ん中に位置する。これは図10の狙い位置Bと比較しても大差ない。図18では起伏はあるが溶接ビードが3.0mm板側へ傾斜した形状となっている。また、溶接部の形状が4.5mm板側に膨らんだ形状となっている。

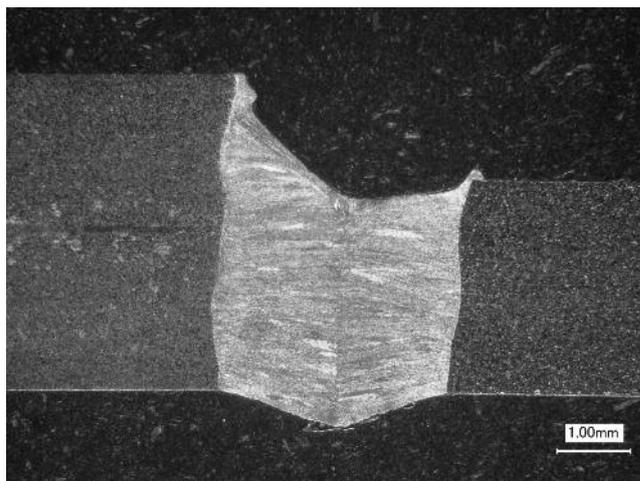


図16 スタートから40mmの位置

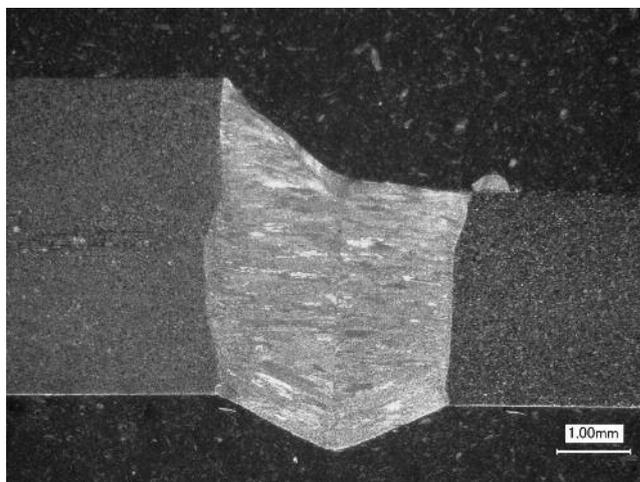


図17 溶接線の中央の位置

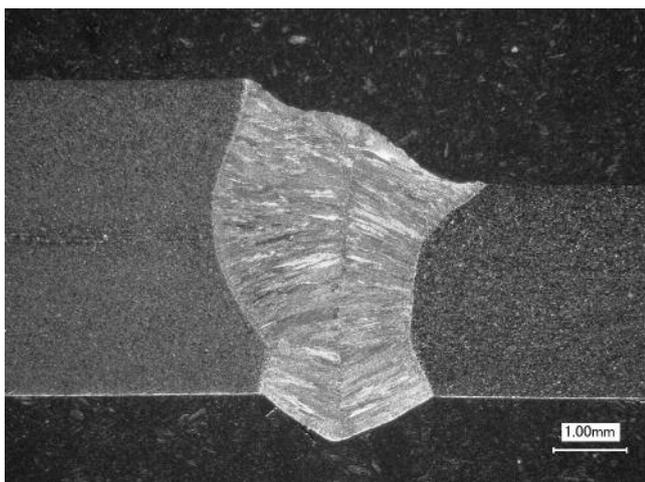


図18 エンドから40mmの位置

図18の溶接ビードの傾斜は、狙い位置が図11より突合せ面側にあることにより、4.5mm板の角が溶け流れた結果と考えられる。この溶接ビードの傾斜に平行な線Aと、線Aに直角で溶接ビードの中心を通る線Bを引いた図を図19に示す。図19によると、線Bはいびつに膨らんだ溶接部の先端と合致する。使用したレーザーの焦点深度は約1.5mmである。傾斜面の落差は板厚の差に等しいので1.5mmである。よって、傾斜面には殆ど水平面と同様なエネルギー分布でレーザー光が照射され、4.5mm板側に膨らんだ溶接部が形成されたと考えられる。

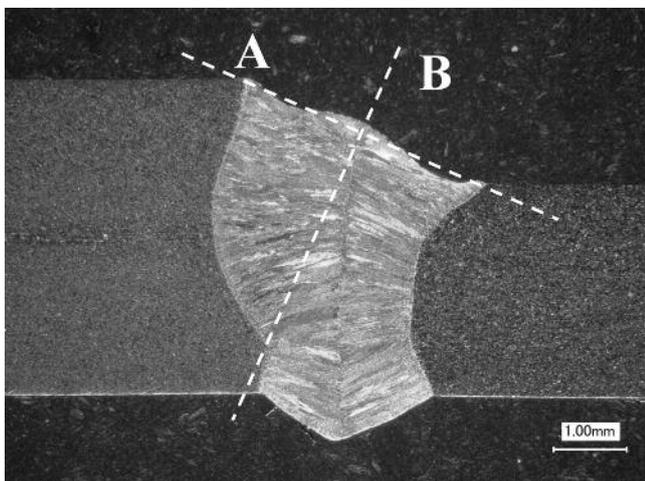


図19 溶接部の傾斜と溶込みの方向

4. 3. 2 フォトダイオードによる計測

フォトダイオードにより計測した波形を図20に示す。4.5mm板側の波形はスタートから中央にかけて減少し、中央からエンドに向かって増加している。3.0mm板側は中央付近まで徐々に減少し、エンドにかけて増加している。この増減の傾向は狙い位置を1mmずらした表2の傾向と一致している。

図20の波形の2秒から10秒の区間と2秒毎に区切った区間で平均値および標準偏差を計算した。計算結果を表5に示す。4.5mm板側のフォトダイオードでは平均値がエンドに向かって増加している。また、標準偏差に着目すると2秒から4秒区間とそれ以降で倍の差がある。図20を見ると6秒を過ぎたあたりから、波形に乱れが生じている。

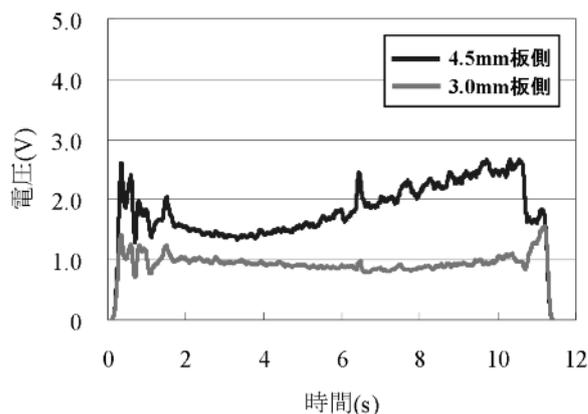


図20 レーザ光の狙い位置が徐々に変化する場合の計測結果

表5 狙い位置が徐々に変化する場合の計算結果

		2秒～10秒	
フォトダイオード		4.5mm 板側	3.0mm 板側
平均値 (V)		1.85	0.91
標準偏差 (V)		0.46	0.12
		2秒～4秒	
フォトダイオード		4.5mm 板側	3.0mm 板側
平均値 (V)		1.42	0.97
標準偏差 (V)		0.15	0.12
		4秒～6秒	
フォトダイオード		4.5mm 板側	3.0mm 板側
平均値 (V)		1.58	0.90
標準偏差 (V)		0.36	0.11
		6秒～8秒	
フォトダイオード		4.5mm 板側	3.0mm 板側
平均値 (V)		2.01	0.85
標準偏差 (V)		0.32	0.10
		8秒～10秒	
フォトダイオード		4.5mm 板側	3.0mm 板側
平均値 (V)		2.38	0.93
標準偏差 (V)		0.30	0.11

レーザビームの幅は0.5mmであり、このレーザビームの中心が突合せ面から1.0mm離れたとすると、理想的には突合せ面とビームの端の距離は0.75mmである。レーザ光の軌跡は突合せ面に対して約0.5度の角度をもっている。レーザ光が突合せ面にかかるのはスタートから約90mmの位置であり、時間にして4.5秒後となる。この時間は標準偏差の値が増加するタイミングと一致する。また、平均値の増加もグラフから約4秒の付近から始まっている。これはジャストフォーカスの状態から徐々にデフォーカス量が増加していった事が原因と考えられる。

以上のことから、4.5mm板側のフォトダイオードはレーザ光の軌跡が0.5度という微小な角度で変化しても、平均値、標準偏差の値に着目すれば、レーザ光が突合せ面を通過する変化を検知可能であると分かった。また、平均値と標準偏差の傾向は狙い位置を突合せ面と平行に1mmずらした場合の傾向と一致している。

3.0mm板側のフォトダイオードの計測結果は4.5mm板側のフォトダイオードとは異なり、変化が少ないことが表5の2秒から10秒の区間の標準偏差から分かる。また、8~10秒区間の平均値は表2の狙い位置Aの場合に比べて4割ほど小さい。

3.0mm板側のフォトダイオードは、4.5mm板側のフォトダイオードに比べて狙い位置の微小な変化に対して、感度が小さいと分かった。

以上のことから、4.5mm板側のフォトダイオードの計測結果から、狙い位置が徐々に変化していく場合を判別可能であると考えられる。スタートとエンドの位置ずれが共に突合せ面へ近づくとつれて、狙い位置Bと同様の波形が得られると予想できる。

実際のレーザ溶接はロボットによって、教示したポイントからポイントへレーザ光が移動していく。そこで、レーザ光の狙い位置が徐々にずれる場合の異常判別方法としては、例えば教示したポイント間で平均値、標準偏差の増減に閾値を設定することが考えられる。

5 まとめ

フォトダイオードを用いて、レーザ溶接中の状態を観察した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 2台のフォトダイオードにより狙い位置がずれていたことを判別する手法が得られたことにより、板厚の異なるステンレス鋼板の溶接の異常が検知可能となった。
- (2) 溶接線が突合せ面に対して平行に狙い位置がずれた場合は、左右のフォトダイオードで計測した結果の

平均値および標準偏差を比較することで溶接の異常を検知できる。

- (3) 溶接線に対して狙い位置が徐々にずれていった場合は、4.5mm板側に配置したフォトダイオードで計測した結果の平均値、標準偏差の値により溶接の異常を検知できる。

参考文献

- (1) J.P.Boilot, 他：「レーザ溶接のトラッキングと検査」, 溶接技術 Vol.52, 72-73, (2004), 産報出版 (株)
- (2) 吉川暢広, 他：「YAGレーザ溶接におけるシームトラッキング技術の研究」, 溶接学会全国大会講演概要 第70集, 88, (2002), 一般社団法人溶接学会
- (3) 吉澤正皓, 他：「半導体レーザによる異板厚突合せ溶接技術の開発」, 総合車両製作所技報 Vol.1, 18-19, (2013), (株) 総合車両製作所
- (4) 森清和, 他：「YAGレーザ溶接のインプロセスモニタリング技術の研究」, 溶接学会全国大会講演概要 第66集, 8-9, (2000), 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 (接合技術センター)



河田直樹
博士 (工学)
生産本部
技術部 (接合技術センター) 主査



石川 武
博士 (工学)
生産本部
技術部 (接合技術センター) 課長