

温度場制御技術による薄板構造物の極低歪レーザ溶接方法の開発 ～溶接継手の評価～

材料技術室 福島 清, 土井 敏照, 長瀬 尚樹
ものづくり技術部 大貫 幸男
プロジェクト推進室 岡村 成将

Development of The Extremely Low Distortion Laser Welding Method for Thin Plate Structures by Controlled Temperature Field Processes ～Mechanical Property Evaluation of Welded Joints～

Kiyosi FUKUSHIMA, Toshiaki DOI, Naoki NAGASE, Yukio ONUKI and Norimasa OKAMURA

高出力シングルモードファイバーレーザ溶接機により溶接した薄板SUS304ステンレス溶接継手の機械的性質を評価した。溶接入熱を抑えるため、ワークの表面裏面を銅板で挟んで吸熱源とした。これらのシステムにより溶接した結果、概ね、強度的には問題なく溶接ができていることが明らかになった。

1. はじめに

本研究は、菊川工業(株)らが中心となって平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業に応募し採択された首記の研究開発事業のうちの一部である。この事業の事業管理者はJFEテクノリサーチ(株)であり、再委託先は菊川工業(株)、愛知製鋼(株)、日本大学、(株)最新レーザ技術研究センター、大阪大学及び当研究所である。

ステンレス建築材料や航空機用Ni基耐熱合金材料の薄板を溶接するにあたっては、従来のMIG溶接法では著しい歪を生ずるため、溶接後の歪取を必要としていた。この研究開発の目的は、近年、開発が進んだ高出力シングルモードファイバーレーザ溶接技術を採用し、さらに、そこに加熱・吸熱複合熱源を用いた温度場制御技術を重畳させた極低歪溶接技術を確立することである。当研究所では、分担課題としてステンレス薄板のレーザ溶接継手部の機械的性質を評価した。

2. 実験方法

2.1 システムの概要

この事業で菊川工業(株)に導入されたシングルモードファイバーレーザ溶接装置の仕様は、(1)レーザ発信器型式YLR-3000-SM、(2)定格出力3kW、(3)波長1068～1080nmである。レーザ発信器から発生したレーザ光はビームカプラを經由して光ファイバで導かれ、溶接ロボットに取り付けられ

た溶接トーチに至る。

ワーク(試験体)はワーク固定用テーブルに固定され、突合せ部に正確にレーザ光が当たるよう溶接ロボットの設定を行った。また、溶接によるワークの温度上昇を抑制するため、今回は吸熱源として銅板を用いた。溶接部付近を除いて厚さ20mmの銅板でワークの表裏を挟んで固定した。図1に、溶接部近辺の概要を示す。

2.2 使用材料及び溶接条件

今回、ワークとして使用した材料は、公称板厚3mmのSUS304ステンレス鋼板である。寸法135×350mmの2枚の板を突き合わせて溶接した。板の端面はレーザカットしてあり、開先突合せ部はI型開先である。

今回行った溶接条件は次のとおりである。

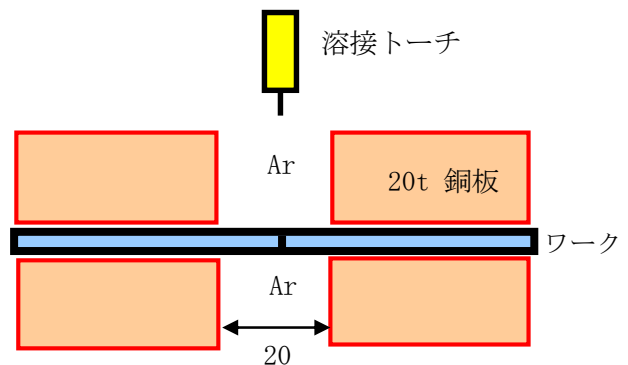


図1 溶接部近辺の概要

レーザ出力と溶接速度

- (1) 1kW 1.8m/min
- (2) 2kW 6.5m/min
- (3) 3kW 12.0m/min

シールドガス

- (1) トーチガス Ar
- (2) バックガス Ar

それぞれのレーザ出力条件で3枚ずつ溶接継手を作製した。溶接後は1枚の溶接継手毎に、引張試験片を2枚、曲げ試験片を2枚(表曲げ1枚、裏曲げ1枚)、衝撃試験片を2個(Vノッチ箇所が溶接金属1個、熱影響部1個)、硬さ試験片2個を概ねJIS規格寸法に準じて切削加工して採取した。

硬さ試験片については、継手断面を測定できるような硬化樹脂に埋込み研磨後、マイクロ組織判別のため、10%シュウ酸溶液中で電解エッチングした。図2に、断面硬さ測定位置を示す。鋼板の公称板厚は3mmであったが、実測値は約2.9mmであった。図に示したとおり、鋼板の表側及び裏側から0.5mmの深さと、板厚の中央部の3ラインを、点線矢印に沿って横一直線に測定した。なお、測定にあたってはX軸及びY軸を設定し、溶接金属の幅方向中央部をX=0mm、板厚の中央部をY=0mmとした。X軸方向の測定間隔は-2~2mmまでは0.2mmで、-7~-2mmおよび2~7mmまでは1mmである。試験力(測定荷重)は、2.942Nとした。

3. 結果及び考察

溶接継手試験片の引張試験結果を表1に示す。レーザ出力2kWの引張強さの平均値は773N/mm²であり、1kWの平均値740N/mm²より高い値となった。なお、破断位置は溶接金属が多かった。レーザ出

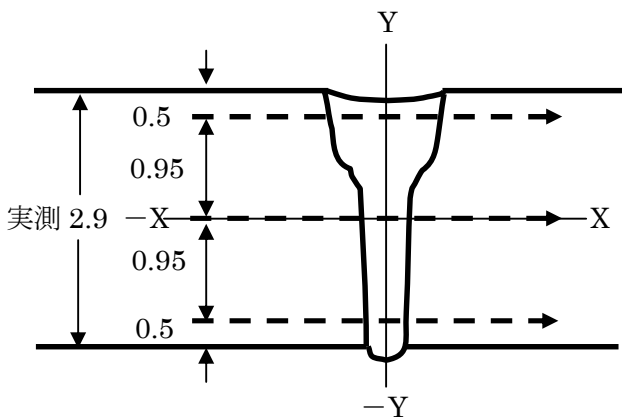


図2 溶接継手断面の硬さ測定位置 (単位 mm)

力 3kW では値のばらつきが大きく、最大値は779N/mm²、最小値は453N/mm²となった。後者の最小引張強さを示した試験片の破断面には部分的に融合不良(開先面がそのまま残った未溶接部分)が認められた。その破断面を観察すると、融合不良部の面積は全破断面積の10%未満にもかかわらず、引張強さは453/779=0.58で最大引張強さの42%減の値となり、欠陥面積が材料強度に及ぼす影響の大きさが認められた。

曲げ試験では内側半径6mmの雄型治具を用いて180度曲げを行った。表曲げについては全試験片9枚で欠陥が認められなかった。裏曲げについては9枚のうち、8枚には欠陥が認められなかったが、レーザ出力3kWの試験片1枚に割れ7mmが認められた。それは融合不良によるものであり、開先部分が溶融せずに残っていた。なお、その裏曲げ試験片の裏ビードは全長にわたって良く出ており、溶接線(開先突合せ部)をはずして溶接してしまったということである。

表1 溶接継手試験片の引張試験結果

試験片	寸法 (厚さ×幅)	引張強さ
レーザ出力	(mm)	(N/mm ²)
1kW	2.9×40.0	743, 743, 729, 738, 741, 743
2kW	2.9×40.0	759, 767, 776, 774, 784, 778
3kW	2.9×40.0	536, 645, 779, 453, 512, 521

表2 溶接継手試験片のシャルピー衝撃試験結果

試験片	吸収エネルギー (J)	吸収エネルギー (J)
レーザ出力	Vノッチ 溶接金属 :(平均値)	Vノッチ 熱影響部 :(平均値)
1kW	20, 23, 23 : (22)	21, 22, 21 : (21)
2kW	19, 23, 26 : (23)	27, 26, 26 : (26)
3kW	25, 21, 29 : (25)	26, 19, 26 : (24)

備考(1)寸法(厚さ×幅×長さ) 2.9×10×55mm

(2)試験温度 12℃

次に、シャルピー衝撃試験結果を表2に示す。レーザ出力が1kWより、2kWないしは3kWの方が僅かに高い値を示した。Vノッチ位置については、溶接金属と熱影響部とでは、ほぼ同等の値であった。

表2では衝撃試験結果を吸収エネルギー(J)で表したが、

$$\text{衝撃値 (J/cm}^2\text{)} =$$

吸収エネルギー/ノッチ部断面積
であり、衝撃値で表す場合もある。例えば、表中のレーザ出力 2kW 溶接金属の吸収エネルギー23Jは、衝撃値では99J/cm²となる。また、別途、当

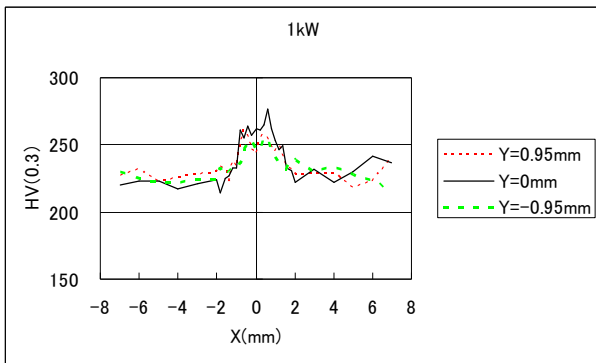


図3 レーザ出力 1kW の硬さ測定結果の一例

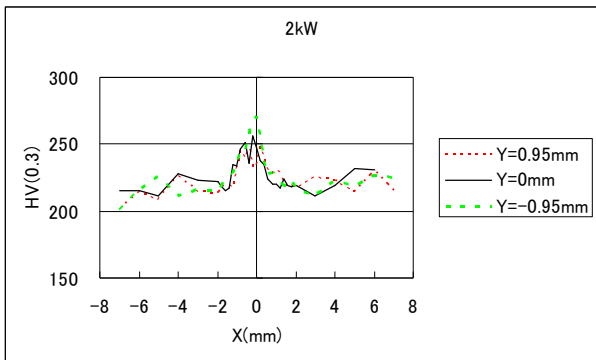


図4 レーザ出力 2kW の硬さ測定結果の一例

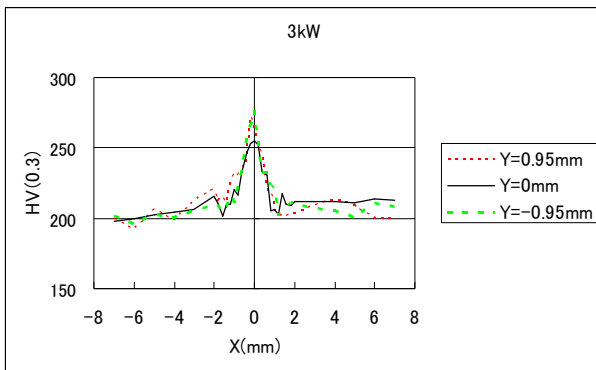


図5 レーザ出力 3kW の硬さ測定結果の一例

該ステンレス鋼板の母材を衝撃試験したところ、衝撃値は164J/cm²となり、前記の溶接金属99J/cm²は母材の40%減の値となった。ところで、他の普通鋼の母材部の衝撃値、例えばJIS-G-3106溶接構造用圧延鋼材のSM400Bは衝撃値で表すと34J/cm² (0°C)、SM400Cでは59J/cm² (0°C)となる¹⁾。今回のステンレス鋼の溶接金属衝撃値が99J/cm²であっても、それらと比べると充分強く、特に支障の無い限り、一般建材として使用するには問題にはならないと思われる。

次に、継手断面硬さ測定結果の例を、図3～図5に示す。溶接金属から熱影響部にかけては母材より硬くなっている。試験片の硬さ測定結果を見ると、X=±2mm以内くらいまでが溶接の熱影響を受けている範囲と思われる。

また、各レーザ出力の溶接金属および母材の硬さをまとめた平均値を、表3に示す。ここで、母材とはX軸方向の-7～-3 mm および 3～7 mm までの範囲とした。表に示したとおり、母材の硬さ219～221HV0.3に対し、溶接金属は239～247HV0.3と硬くなった。レーザ出力の違いが溶接金属の硬さに及ぼす影響については、明瞭な差は認められなかった。

次に、溶接金属の幅寸法を測定した結果を、表

表3 溶接金属および母材の硬さ(6個の平均値)

試験片	硬さ HV(0.3)	
	母材	溶接金属
レーザ出力		
1kW	221	240
2kW	211	239
3kW	219	247

表4 溶接金属の幅(6個の平均値)

試験片	溶接金属の幅(mm)		
	Y軸位置		
レーザ出力	Y=0.95	Y=0	Y=-0.95
1kW	0.56	0.40	0.32
2kW	0.35	0.32	0.31
3kW	0.30	0.24	0.22

4に示す。ここで、Y=0mmの板厚中央における溶接金属幅はレーザー出力1, 2, 3kWでそれぞれ0.40, 0.32, 0.24mmとなり、レーザー出力が大きいほど幅が小さくなった。これは溶接速度の影響である。

また、溶接時の入熱については一般的には概略的に次式で表される²⁾。

$$\text{入熱量 (J/cm)} = 60EI/v$$

ここで、Eは溶接電圧(V)、Iは溶接電流(A)、vは溶接速度(cm/min)である。ただし、実際はこの熱量がすべてワークに伝わるということではなく、輻射熱などを差し引かなければならない。

今回の溶接条件についてこの式で計算すると、入熱量はレーザー出力1kWで333、2kWで185、3kWで150(J/cm)となり、3kWの溶接継手が最も入熱量が少ないということになり、実際に溶接金属幅は小さかった。

引張試験や曲げ試験で、レーザー出力が3kWの試験片に融合不良が発生した部分があるが、裏ビードは問題なく出ていることから、溶接線（開先突合せ部）の中央にレーザー光を正確に照射する、あるいは溶接速度を少し低速側に設定すればこの問題は解決できると考えられる。今後の検討課題として、レーザー溶接はビーム幅が小さく、したがって溶接金属幅が小さいのが特長であるというものの、溶接線を正確に捉えるシームトラッキング技術を確立させる必要がある。

次に、レーザー出力2kW溶接継手断面部の光学顕微鏡写真を、写真1に示す。写真2～写真4は各部位の、より高倍率な写真である。写真2は溶接金属であり、大きな結晶粒はあるがそれ以外は微

細な鑄造組織である。写真3は熱影響部であり、写真左端にはボンド部がある。この熱影響部と写真4の母材とでは結晶粒の形状や大きさなどに、特に大きな差は認められない。

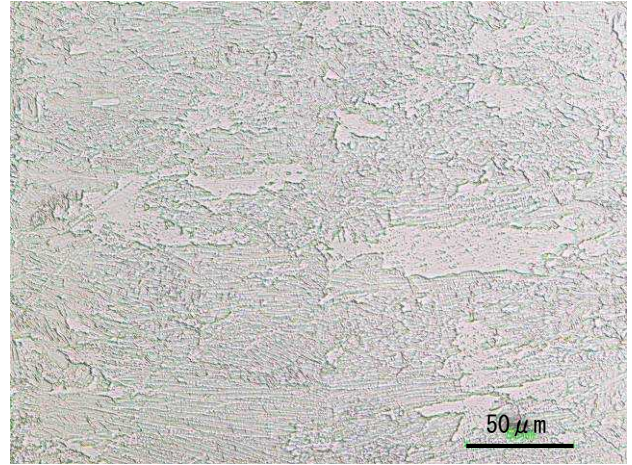


写真2 レーザ出力2kW溶接金属の写真

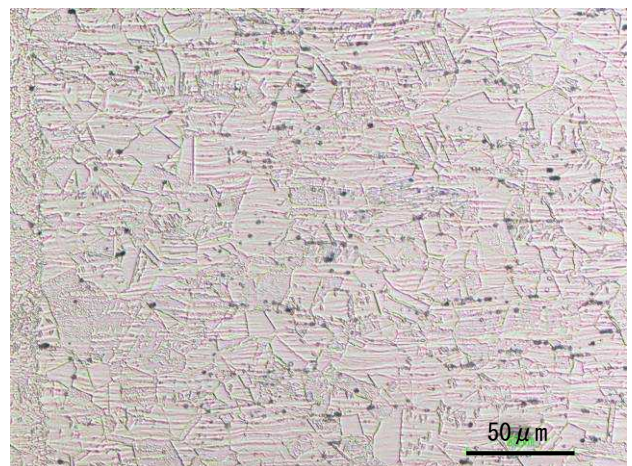


写真3 レーザ出力2kW熱影響部の写真



写真1 継手断面部の光学顕微鏡写真
(レーザー出力2kW)

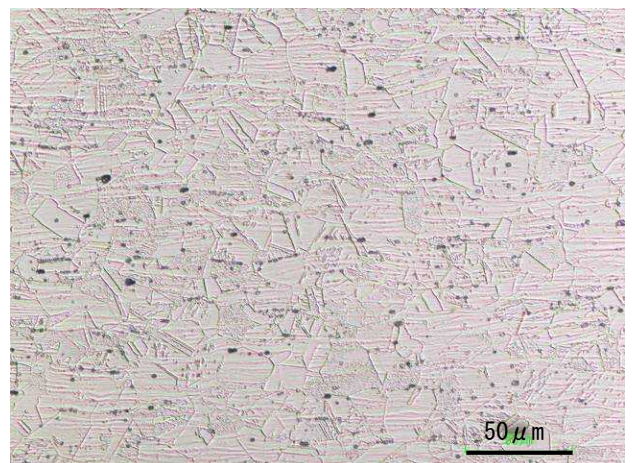


写真4 レーザ出力2kW母材の写真

次に、レーザ出力 2kW 溶接継手断面部を電子線マイクロアナライザーで分析した。炭素(C)その他の主要元素をマッピングしたが、熱影響部や溶接金属に偏析や炭化物の析出は特に認められなかった。なお、ニッケル(Ni)及びクロム(Cr)のマッピング像に関しては、熱影響部に横すじ状の濃淡模様が観察された。しかし、これは熱影響部から離れた母材にも同様に生じており、熱影響部特有の現象ではなかった。

現在までのところ、溶接金属や熱影響部が母材より硬くなった原因について解析しきれていない。熱影響部と母材とに顕微鏡組織の明瞭な差は認められなかったが、硬さ試験結果からは明らかに母材よりは硬い熱影響部が存在している。今後、更なるミクロ的解析をする必要があると考える。

4. まとめ

今回の溶接条件では、レーザ出力が 2kW の試験片が強度的には最良であった。本溶接システムにより強度的には問題なく溶接ができていることが明らかになった。3kW のものは高速溶接したため、溶融金属幅が小さく融合不良を生じていたものもあった。

今後の検討課題として、次の事項が挙げられる。

- (1) シームトラッキング技術や溶接速度の検討が必要である。
- (2) 溶接金属や熱影響部のミクロ組織、構造解析、成分分析など更なる解析が必要である。

参考文献

- 1) 日本鉄鋼協会原案：日本工業規格 JIS-G-3106 溶接構造用圧延鋼材，6(2008)
- 2) 尾上久浩，小林実：溶接施工管理・安全衛生，産報出版，78(1978)