

レーザー重ね溶接継手の疲労強度特性 (第1報, 亜鉛めっき鋼板の基本特性)

高 行男・藤本正男・井藤賀久岳・田浦謙一・土屋 寛

1. 緒 言

レーザーとは、レーザー媒質を励起し、それから光を共振器で増幅し部分反射鏡でとりだしたもので、「Light Amplification by Stimulated of Radiation」(誘導放出による光の増幅)を語源としている¹⁾。レーザー溶接は、1980年頃から普及し始め、スポット溶接の代替加工法として注目されつつある²⁾。自動車工業においても、従来のスポット溶接では生産工程での車体デザインの制限が多いのに対し、レーザー溶接ではより柔軟に対応できるため、乗用車ボディなどの生産ラインに使用され始めている。しかし、実用上重要なレーザー溶接の疲労強度特性は、報告例が少ないこともあり、十分に明らかになっていない^{3)~6)}。

そこで、本研究ではまず亜鉛めっき鋼板におけるレーザー重ね溶接継手の疲労強度の基本的特性を検討した。スポット溶接の溶接部(ナゲット)は円形のため、ナゲット径により疲労寿命が変化する。これは、本実験の溶接長さに対応する。しかし、スポット溶接では上下の電極で圧接して溶接を行うため、ナゲットの周辺は密着状態になっている。これに対し、レーザー溶接では板間に若干の隙間が残る。また、ナゲットは円形であるので荷重方向への方向性はないが、レーザー溶接の溶接部は線状のため、同じ長さでも荷重方向との角度により疲労寿命が異なることが考えられる。そのため、検討にあたっては、疲労強度に及ぼす因子として溶接長さ、溶接角度および板間隙間について着目した。

2. レーザ溶接

2.1 レーザ溶接の原理

レーザー溶接は、レーザー発振器から放出され、共振器で増幅されたレーザービームを集光レンズなどで微小スポットに集光させ被加工物に照射し、溶解させ接合する方法である⁷⁾。産業用として、CO₂レーザーおよびYAGレーザーが実用化されている。

CO₂レーザー(図1)は、出力向上や定常性のためN₂、HeおよびCOを添加したCO₂の混合ガスを高速で、グロー放電しやすい低真空の発振管の中に流し、電極間に10~30kVの高電圧をかけて放電し、波長10.6μmのCO₂レーザーを発振させる。これに対し、YAGレーザー(図2)は、ネオジウム(Nd)をドーピングしたYAG(Yttrium Aluminum Garnetの結晶)ロッドにフラッシュランプに

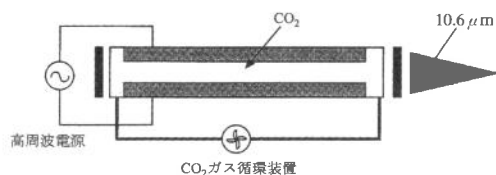


図1 CO₂レーザー

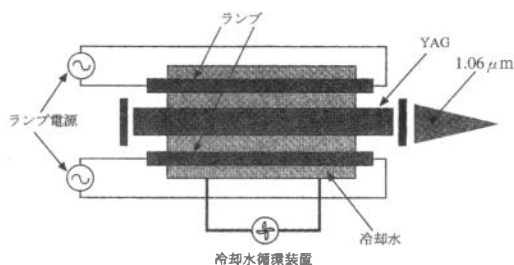


図2 YAGレーザー

よって誘起エネルギーを与え、エネルギー準位の高いNdイオンを誘起し、そのエネルギー準位が瞬時に低下することにより、波長 $1.06\mu\text{m}$ のYAGレーザーが発振される。

CO₂レーザーの出力は1～50kW程度であるのに対し、YAGレーザーの出力は0.5～5kWと低出力である。しかし、CO₂レーザーの波長(10.6 μm)に比べ、YAGレーザーの波長(1.06 μm)が短いため、光ファイバーでの伝送が可能である。そのため、製造ラインなどでの溶接ロボットのアームに取り付けて使用する場合にはYAGレーザーの方が有利である。

2.2 レーザ溶接の特徴

従来の車体溶接には主にスポット溶接が用いられている。スポット溶接は、重ね合わせた被溶接部材を電極で加圧しながら大電流を通電し、発生するジュール熱でその部材の接合面を熔融させ接合する方法である。レーザー溶接とスポット溶接とを比較すると、次の通りである。

- ① レーザ溶接は、機械的圧力は特に必要としないため片側から溶接することができるが、スポット溶接は加圧下での溶接となるため、被溶接材の両面から押さえる必要がある。
- ② レーザ溶接は連続的に溶接することができるが、スポット溶接は任意の間隔ごとにしか溶接ができない。
- ③ レーザ溶接では汎用のレーザートーチを使用することができるが、スポット溶接では溶接用のジグは使用箇所ごとに取り替える必要がある。
- ④ 車体に一般的に使用されている亜鉛めっき鋼板をレーザー溶接する場合、重ね部にある程度の隙間(板間隙間)が必要となる。これは、溶接時に熔融部から亜鉛ガスが放出されるため、そのガスを排出することが必要となるためである。つまり、隙間が小さい場合、溶接により発生したガスが板間隙間から排出するときに溶接部に穴をあけてしまう。逆に隙間が大きい場合、溶接が不十分となり強度が低下する。

レーザー溶接は、①および②の利点よりフランジ等の縮小や削除が可能となり、設計の自由度が拡大する。また、③より同一の生産ラインにおいて多車種を生産することができ、コストを下げることができる。しかし、④より、精密な板間隙間の制御が必要であるため、設備が複雑になる。

3. 試験片および実験方法

3.1 供試材および試験片

供試材は、車体パネルで一般に使用されている亜鉛めっき鋼板であり、その化学成分および機械的性質を表1および2に示す。

表1 化学成分 (mass %)

C	Si	Mn	P	S	Al	Ti
<0.001	0.017	0.150	0.013	0.011	0.035	0.040

表2 機械的性質

Yield strength MPa	Tensile strength MPa	Elongation %
153	305	44.8

表3 溶接条件

Laser power (kW)	2.0
Welding speed (m/min.)	1.0
Focus spot diameter (mm)	0.72
Shielding gas	Argon gas

試験片には、表3に示す条件においてYAGレーザー溶接を行った。243mm×145mmの2枚の鋼板を重ね代40mmをもうけ、重ね面が一定の板間隙間となるように、2枚の鋼板の間にシクネスゲージを入れ溶接を行っている。その後、板幅40mmとなるようにレーザー加工により切断し、試験機取り付け用の孔加工もレーザー加工により行った。加工後の試験片の形状を図3に示す。また、本実験に用いた試験片の溶接状態（溶接長さ、板間隙間および溶接角度）を表4に示す。

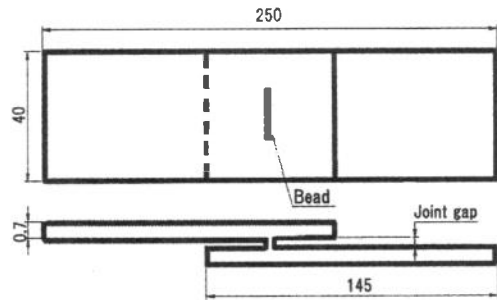


図3 試験片形状

表4 試験片

名称	溶接角度 deg.	溶接長さ mm	板間隙間 mm
72922	90	10	0.2
72932	90	15	0.2
72923	90	10	0.3
72933	90	15	0.3
72422	45	10	0.2
72022	0	10	0.2
72423	45	10	0.3
72023	0	10	0.3

レーザー溶接による供試材の組織変化を検討するため、溶接部断面をナイトール腐食液により腐食を行い、光学顕微鏡で観察を行った。その結果の一例（溶接長さ：15mm、溶接角度：90°、板間隙間：0.2mm）を図4に示す。レーザー照射方向は図に示す通りである。レーザー溶接部の断面形状はレーザーの照射側が広い台形となる。図より、母材部の組織に比べ溶接部のそれは粗大化していることがわかる。次に溶接部およびその周辺の硬さ分布を図5に示す。測定にはピッカース硬さ試験機を用い荷重は300gfとした。母材部の硬さは90程度であるのに対し、溶接部中央部の硬さは130程度と硬くなっている。また、溶接部中央から離れるにつれ硬さは徐々に低下し、溶接部から離れた箇所においては母材部と

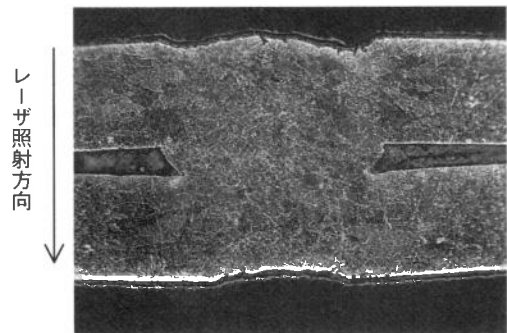


図4 溶接部

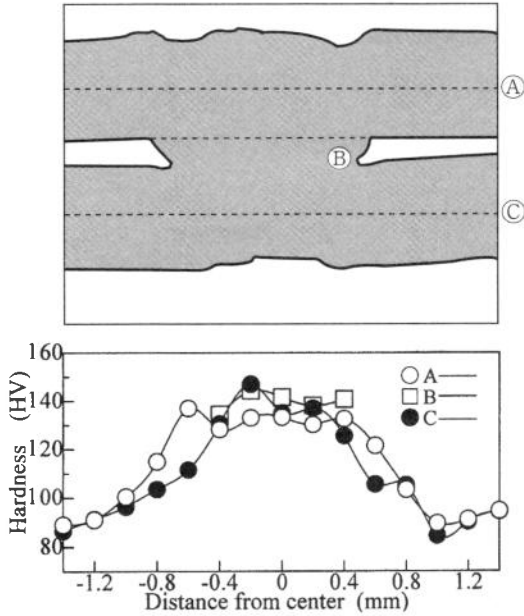


図5 硬さ分布

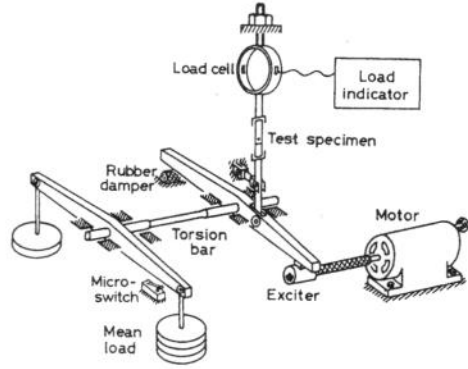


図6 疲労試験機

同じ90程度となる。

3.2 実験装置および方法

本実験では図6に示す共振型軸荷重疲労試験機を使用した。レバーの一端に取り付けてある回転質量型の加振器をモータで回転させることにより、試験片には繰り返し引張り荷重を負荷することができる。荷重振幅は、モータの回転数を変更することにより行う。また、平均荷重は平均荷重負荷用レバーに直接おもりを乗せることにより行う。荷重振幅には、試験片と直列に配置されているリング状ロードセルにより行い、荷重制御には、ロードセルからの信号をフィードバックすることによりモータの回転数を自動調節する制御装置を用いた。

表4に示した各試験片に対し、共振型軸荷重疲労試験機を用いて荷重比（最小荷重／最大荷重）を0.1、繰り返し速度20～25Hzとして疲労試験を行った。なお、試験打ち切り回数は、 10^7 回とした。

4. 実験結果および検討

4.1 溶接長さの影響

溶接部の疲労強度に影響する要因の一つとして、溶接面積の大きさが考えられる。つまり、従来のスポット溶接では溶接部（ナゲット）は円形であるためナゲット径が影響するのに対し、レーザー溶接では溶接長さが影響することが予想される。

板間隙間が0.2mmおよび0.3mm、溶接角度が90度において、溶接長さの違い（15mmおよび10mm）

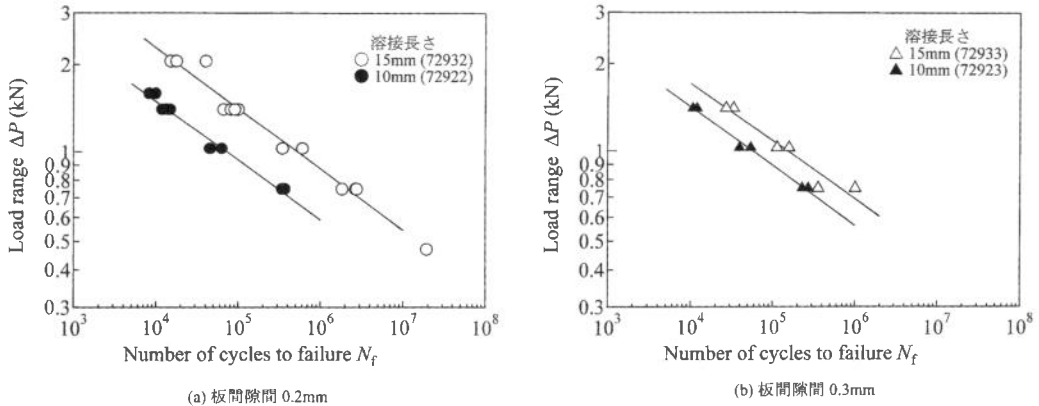


図7 溶接長さの影響

による荷重範囲 ΔP と破断寿命 N_f の関係をそれぞれ図7(a) および (b) に示す。両板間隙間においても、溶接長さが15mmのものに対して10mmのほうが疲労寿命は低下している。これは、単位溶接長さに対する荷重が15mmに対し10mmの方が大きいためである。溶接長さを考慮し単位溶接長さ当たりの荷重でそれぞれを整理した結果を図8に示す。本実験条件では疲労寿命に顕著な相違が認められない。つまり、単位長さ当たりの疲労寿命はほぼ同様と考えられる。しかし、(溶接長さ) $^{1/2}$ をパラメータとする考え方もあり、今後検討する必要がある。

4.2 板間隙間の影響

スポット溶接では加圧して溶接を行うため、ナゲット周辺では密着状態であり、ナゲットから離れるとセパレーションにより板の隙間が生じている。しかし、レーザー溶接では2.2節で述べたように板間隙間が必要となり、溶接端部の板間隙間は疲労強度に影響を及ぼす要因の一つと考えられる。

溶接角度が90度において溶接長さが15mmおよび10mm、の板間隙間の違い(0.2mmおよび0.3mm)による荷重範囲 ΔP と破断寿命 N_f の関係をそれぞれ図9(a) および (b) に示す。両溶接長さとも板間隙間が狭いもの(0.2mm)に比べ広いもの(0.3mm)が疲労寿命は低下している。これは、板間隙間が広くなると、溶接部に作用する曲げ応力は大きくなることによるが、その低下の様子は溶接長さの影響を受けることを示している。

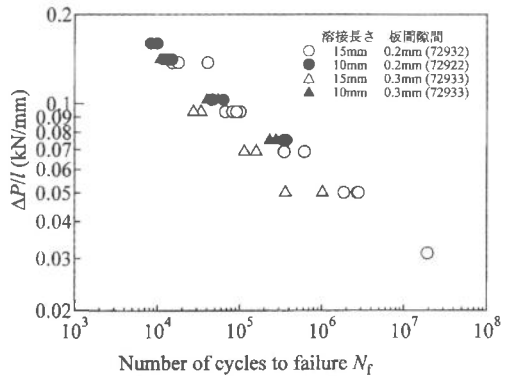


図8 疲労寿命と単位溶接長さの関係

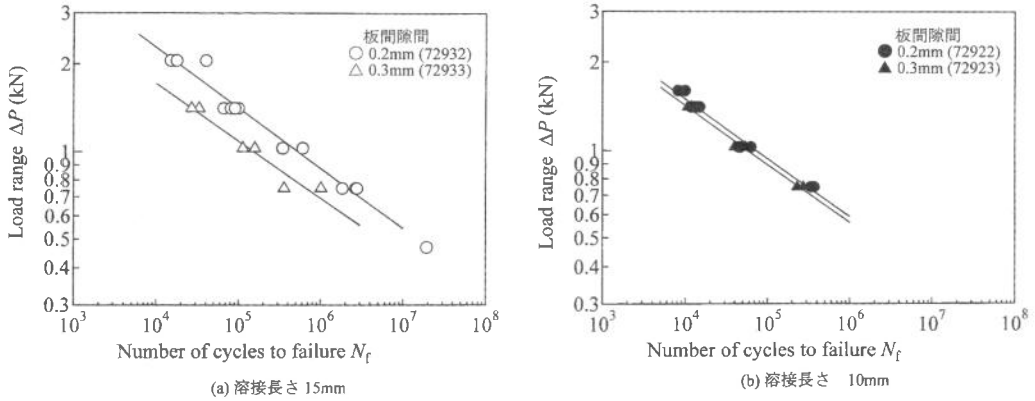


図9 板間隙の影響

4.3 溶接角度の影響

スポット溶接の溶接部(ナゲット)は円形であるので、荷重方向に対する方向性はないが、レーザ溶接の溶接部は線状のため、角度により疲労強度が異なることが考えられる。

板間隙間が0.2mmで溶接長さが15mmおよび10mmにおいて、溶接角度の違い(0度、45度および90度)による荷重範囲 ΔP と破断寿命 N_f の関係をそれぞれ図10(a)および(b)に示す。両溶接長さにおいて、溶接角度の相違による寿命の差異は明確に認められない。前述の通り、①荷重負荷方向に垂直な面に対する投影面積の増加は、単位面積当たりの荷重が低下することにより疲労寿命を向上させる。また、②荷重負荷方向に溶接部の長さが増加することも、溶接部に作用する曲げ応力が低下することにより疲労寿命を向上させる。つまり、疲労寿命は①および②の両方の影響を受ける。溶接角度90度のものは①の影響により疲労強度が向上し、0度のものは②の影響により疲労強度が向上するため、疲労寿命に明確な差異が生じなかったと考えられる。また、45度のものは90度および0度の場合の中間的な特性を有するため、45度もほぼ同様の疲労強度となったと考えられる。

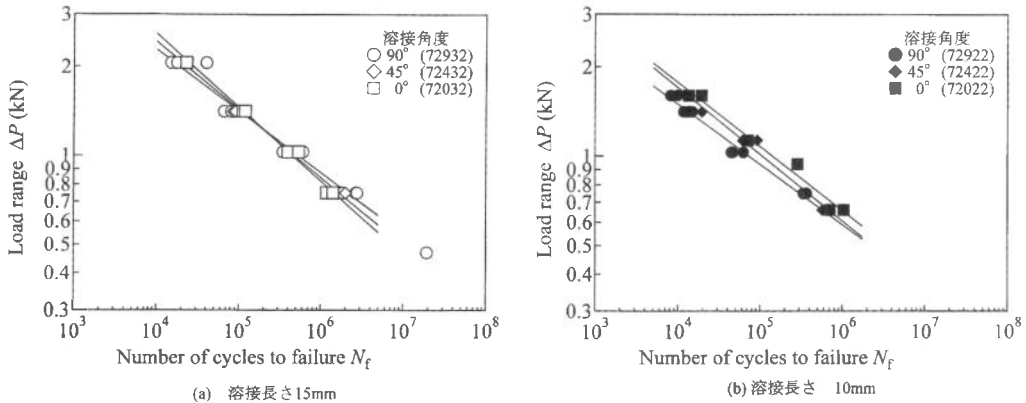


図10 溶接角度の影響

5. 結 言

車体に使用されている亜鉛めっき鋼板(板厚0.7mm)のYAGレーザー重ね溶接継手の疲労強度の基本特性を調査した。

溶接長さによる影響は明確に認められたが、溶接角度の影響は顕著でないこと、また、板間隙間は小さくなると強度上昇の傾向を示すが、その様子は溶接長さによって異なることが確認された。試験片の破断は溶接端部近傍の母材部から開始している。今後、得られた実験結果に対し、有限要素法によるレーザー溶接部の応力解析や疲労強度の下限界値について調査し、破壊のメカニズムを検討したいと考えている。

終わりに、本研究を遂行するに当たり、協力していただいた関係各位に謝意を表す。

付記 著者の田浦謙一、土屋 寛は、ともに本学専攻科自動車工学専攻の第7期生(1998年度)である。

参 考 文 献

- 1) 上田修三, 構造用鋼の溶接, 地人書館(1997).
- 2) 金岡優, レーザ加工, 日刊工業新聞社(1999).
- 3) 板垣修, 吉村達彦, 坪井学, 薄鋼板YAGレーザー重ね溶接継手の強度特性, 日本機械学会1999年度年次大会講演論文集(1999).
- 4) 小野守章, 梅津享, 大村雅紀, 樺澤真事, 自動車用薄鋼板のレーザー溶接, NKK技法, 154(1996).
- 5) 小野守章, 梅津享, 大村雅紀, 樺澤真事, 森清和, 亜鉛めっき鋼板のレーザー重ね溶接性, 溶接学会論文集, 15, 3(1997).
- 6) 小野守章, 樺澤真事, 大村雅紀, 薄鋼板のレーザー重ね溶接継手の強度特性, 溶接学会論文集, 14, 3(1996).
- 7) 曾我聡, 朝田博, 井上正二, レーザスポット溶接部の強度, 日新製鋼技報, 68(1993).