

レーザースポット溶接部の疲労特性の考察

The Fatigue Characteristics of a Laser Spot Welding Part

及川 昌志 Masashi OIKAWA
越川 純 Jun KOSHIKAWA
遠藤 翔太 Shouta ENDOH

レーザースポット溶接は、低入熱で低歪みであり、また、接合部の直径がおよそ2mm以下である。このようなレーザースポット溶接を大型構造物に採用した例は鉄道車両以外には無く、その鉄道車両は筆者らが2002年に製作し営業線で試験運行した車両に用いたことが始まりである。現在はレーザースポット溶接部が低歪みな特性から溶接部の角変形が無い優れた外観を持つ鉄道車両を提供している。レーザースポット溶接は、従来の電気抵抗スポット溶接に比べ、あるいは従来の連続レーザー溶接に比べても短時間のプロセスであるので溶融凝固部の特性を詳細に調査する必要がある。本報ではレーザースポット溶接部の機械的特性の調査を行った結果と溶融凝固部の金属組織を調査した結果を述べる。

Laser spot welding is the method of optimizing time and spatial distribution of the output of pulse oscillation laser or the continuation oscillation laser in pulse gating mode, and has the feature of low distortion, with low heat input. The diameter of a laser spot welding of about 2 mm or less, it is for there to be no example adopted as the large-sized structure in addition to a railroad vehicle. Since laser spot welding is a short-time process even if it compares it with the conventional continuation laser welding, it needs to investigate the characteristic of a welded part in detail. This paper describes the result of having investigated the mechanical property of the laser spot welding part, and the result of having investigated the metal organization of the welded part.

1 はじめに

レーザースポット溶接は、パルス発振レーザー、もしくはパルスゲーティングモードの連続発振レーザーの出力の時間的分布や空間的分布を最適化して接合する方法であり、低入熱で低歪みであるという特徴を持つ。古くから剃刀の刃部分と支持部分の接合に用いられ、あるいは精密部品の接合に用いられていることが多い。接合部の直径がおよそ2mm以下のレーザースポット溶接を大型構造物に採用した例は鉄道車両以外には無く、その鉄道車両は筆者らが2002年に製作し営業線で試験運行した車両に用いたことが始まりであり、現在はレーザースポット溶接部が低歪みな特性から溶接部の角変形が無い優れた外観を持つ鉄道車両を提供している。

レーザースポット溶接は、従来の電気抵抗スポット溶接に比べ、あるいは従来の連続レーザー溶接に比べても短時間のプロセスであるので溶融凝固部の特性を詳細に調査する必要がある。

本報ではレーザースポット溶接部の機械的特性の調査を行った結果と溶融凝固部の金属組織を調査した結果を述べる。

2 実験方法

2.1 試験体

試験体には鉄道車両用ステンレス鋼板、SUS301L鋼を用いた。主要化学成分を表1に示す。なお、SUS301L鋼は、SUS304鋼とCrとNの含有量の差はわずか（SUS304鋼は18-8ステンレス鋼と言われ、SUS301Lでは17-7である）である。C量は実測値で190ppmであり、溶融凝固部とその周囲の熱影響層で生じるというCr欠乏層（腐食に対する鋭敏化組織）が成長しにくいと言われている。また、調質圧延により引張強度を約1200MPaまで選択することが可能である。調質と耐力および強度を表2に示す。今回の実験に用いた調質と板厚の組み合わせを表3に示す。

表1 SUS301L鋼の主要化学成分(実測値)

元素名	C	Si	Mn	P
含有量 %	0.019	0.51	1.25	0.024

元素名	S	Ni	Cr	N
含有量 %	0.006	6.77	16.84	0.119

表2 SUS304鋼とSUS301L鋼の調質，耐力および強度

調質	SUS301L 鋼					SUS304 鋼
	LT	DLT	ST	MT	HT	
耐力 MPa	215	345	410	480	685	205
強度 MPa	550	690	760	820	930	520

表3 実験に用いた材料の調質と板厚

	1-1	8-12	15-8
レーザー照射側 (板厚/材質-調質)	1.0mm 301L-HT	0.8mm 304	1.5mm 304
裏面側 (板厚/材質-調質)	1.0mm 304	1.2mm 301L-DLT	0.8mm 304

(表中で SUS の標記は省略する)

2. 2 実験装置

レーザースポット溶接を行ったレーザースポット溶接システムの概要図を図1に示す。レーザー発振器は連続発振の半導体励起のYAGレーザーであり、最大出力は加工物上で4.0 kWである。レーザー発振器からのレーザーはSI型コア径0.6mmの光ファイバで伝送し、拡大倍率1倍の集光光学装置で加工物上に集光した。レーザー照射点には大気の入混入をできる限り防ぐためArを供給している。

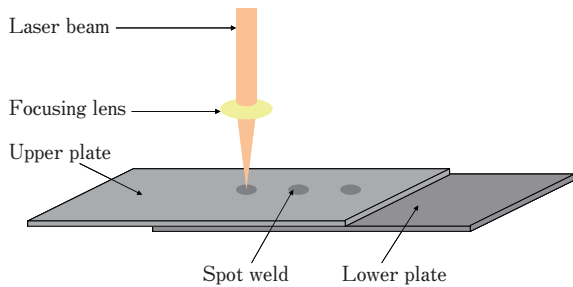


図1 レーザースポット溶接システムの概要図

レーザー溶接部の機械的特性は、静的および繰り返し荷重の引張せん断特性で評価した。いずれも試験でも試験装置はMTS社製、クロスヘッド速度制御方式の電気油圧式疲労試験装置を用いている。

3 実験結果

3. 1 レーザースポット溶接のレーザー照射条件最適化

レーザースポット溶接では照射したレーザーのエネルギーが熱エネルギーに急速に変換され、レーザー照射部の温度が上昇するので、短時間に溶融点や蒸発点に到達し、スパッタの発生が多くなり溶接品質に影響を与えることが多い。

レーザー照射時の出力の時間的分布を制御することで、スパッタ発生をほぼ抑制したレーザー照射条件を表4に示す。

表4 レーザースポット溶接条件

	前段			後段		
	出力 kW	時間 ms	速度 m/min	出力 kW	時間 ms	速度 m/min
1-1	3.75	7	1.5	2.25	20	1.5
8-12	1.00	6	6.0	2.80	22	6.0
15-8	3.00	2	1.5	2.50	55	1.5

図2にレーザー照射部の外観を示す。図に示すようにレーザー照射部は金属光沢を有している。これは、溶融凝固部の酸化膜の表裏面での外光の干渉による着色(酸化膜の厚さが数100nm)であり、溶融凝固部への大気の入混入が少なく健全な溶接を示している。また、レーザー走査方向に伸びた楕円形の形状である。

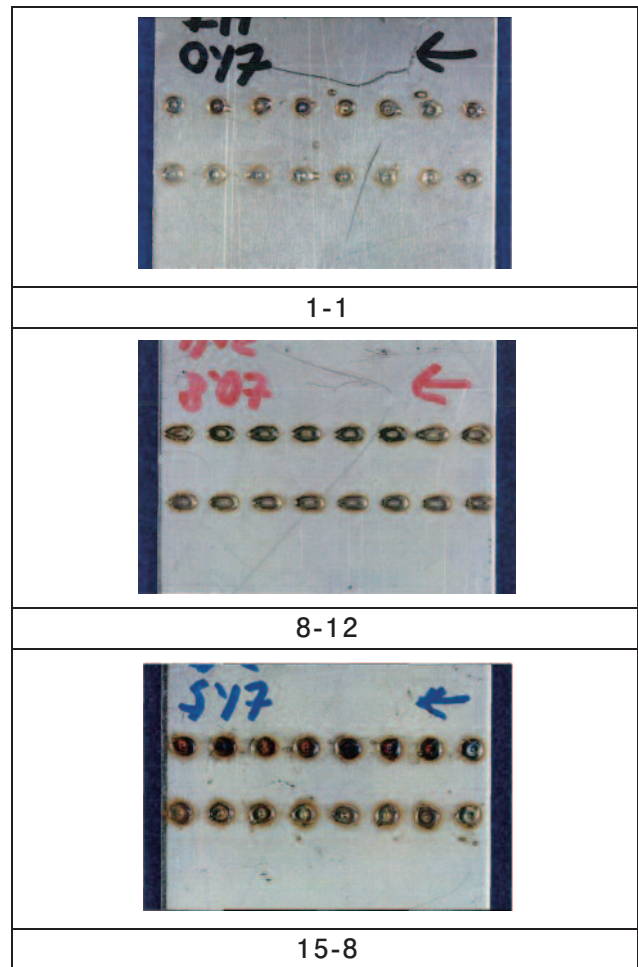


図2 レーザー照射部の外観

図2に示した試験体の引張試験後の破断面を図3に示す。レーザ照射部外観と同様にレーザ走査方向に伸びた楕円形である。

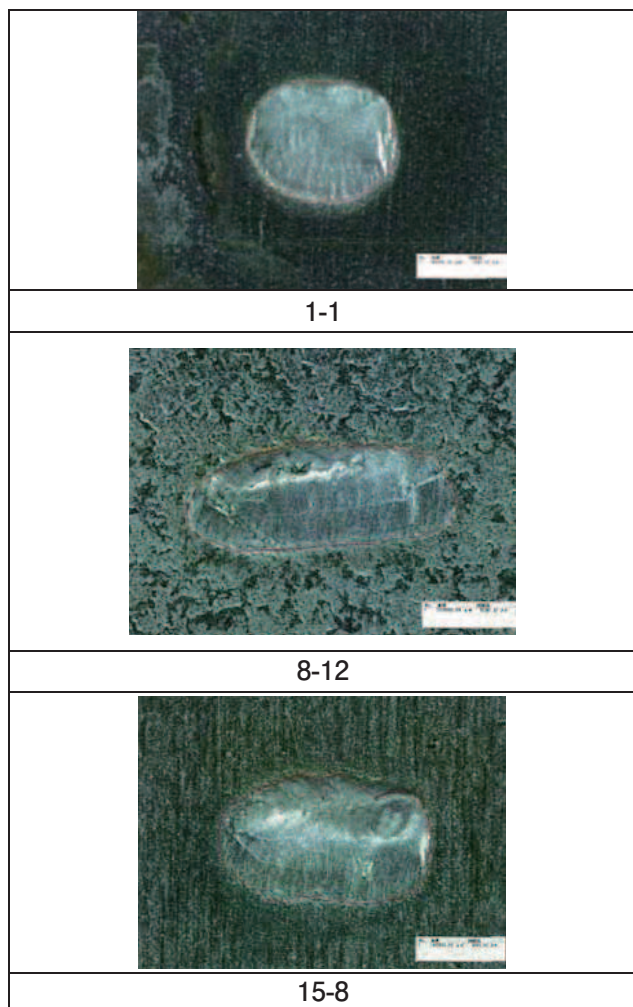


図3 レーザ照射部の破断面

3. 2 静的引張試験結果, および疲労試験結果

引張試験結果のうち0.2%耐力と引張強さを求め, その結果を表5に示す。また, 疲労強度試験結果を表6から表8と図4に示す。

表5 レーザ溶接部の耐力と引張強さ

試験体種別	0.2% 耐力 kN	引張強さ kN
1-1	8.602	9.949
8-12	9.148	13.012
15-8	8.383	13.211

表6 疲労強度試験結果 (1-1)

番号	最大荷重 kN	最小荷重 kN	荷重振幅 kN	周波数 cycle	繰返し数
1	1.5	0.15	0.68	20	1.00×10^7
2	2.5	0.25	1.13	20	1.00×10^7
3	3.5	0.35	1.58	20	6.97×10^5
4	3.0	0.30	1.35	20	2.16×10^6

表7 疲労強度試験結果 (8-12)

番号	最大荷重 kN	最小荷重 kN	荷重振幅 kN	周波数 cycle	繰返し数
4	2.0	0.20	0.90	20	9.64×10^6
5	1.5	0.15	0.68	20	1.00×10^7
6	1.8	0.18	0.81	20	1.00×10^7
8	2.5	0.25	1.13	20	2.86×10^6

表8 疲労強度試験結果(15-8)

番号	最大荷重 kN	最小荷重 kN	荷重振幅 kN	周波数 cycle	繰返し数
1	2.0	0.20	0.90	20	1.54×10^6
2	1.0	0.10	0.45	20	1.00×10^7
3	1.5	0.15	0.68	20	1.00×10^7

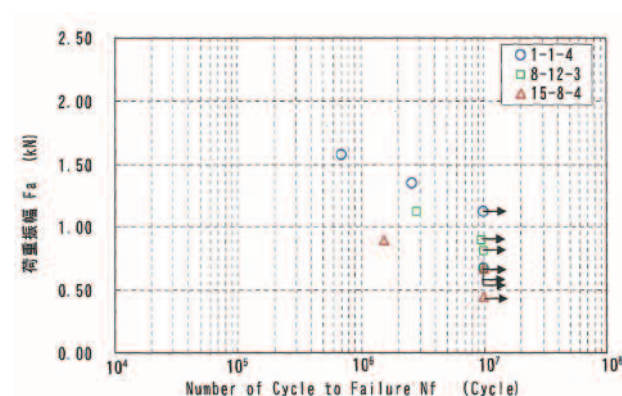


図4 疲労強度試験結果

3. 3 レーザスポット溶接部の金属組織観察結果

図5に試験体15-8のレーザスポット溶接部の断面を示す。なお, 金属組織の観察のため, 試験体は切断の後に樹脂に埋め込み鏡面研磨し, 10%シュウ酸溶液でエッチングを行っている。

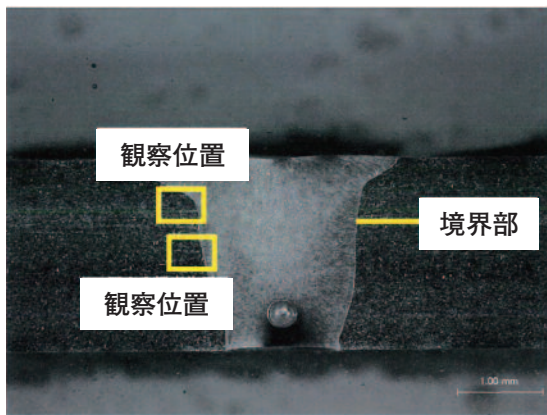


図5 試験体15-8のレーザーポット溶接部断面

図5中に示す2カ所の観察位置で倍率を変えて金属組織を観察した。図6から図9に示す。

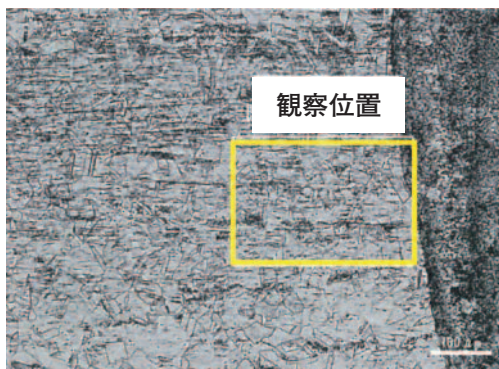


図6 試験体15-8のレーザーポット溶接部断面上部



図7 試験体15-8のレーザーポット溶接部断面上部



図8 試験体15-8のレーザーポット溶接部断面下部



図9 試験体15-8のレーザーポット溶接部断面下部

同様に図10に試験体8-12のレーザーポット溶接部の断面を示す。

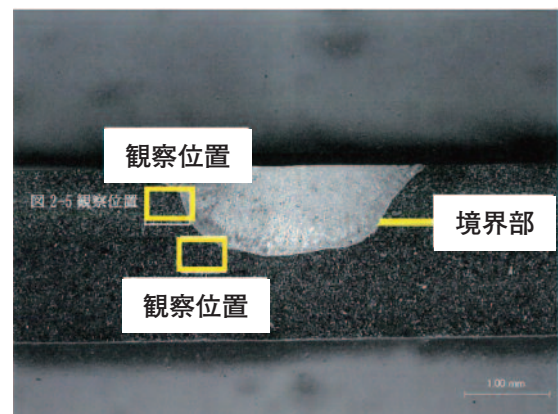


図10 試験体8-12のレーザーポット溶接部断面

図10中に示す2カ所の観察位置で倍率を変えて金属組織を観察した。図11から図14に示す。

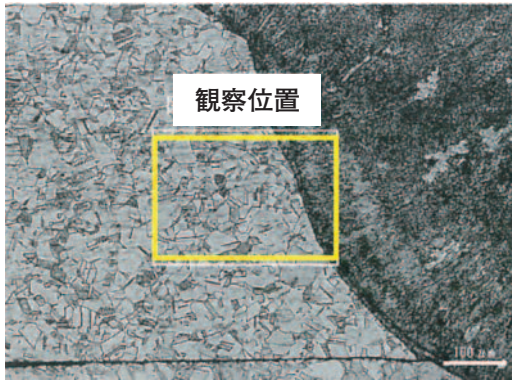


図11 試験体8-12のレーザスポット溶接部断面上部



図12 試験体8-12のレーザスポット溶接部断面上部



図13 試験体8-12のレーザスポット溶接部断面下部

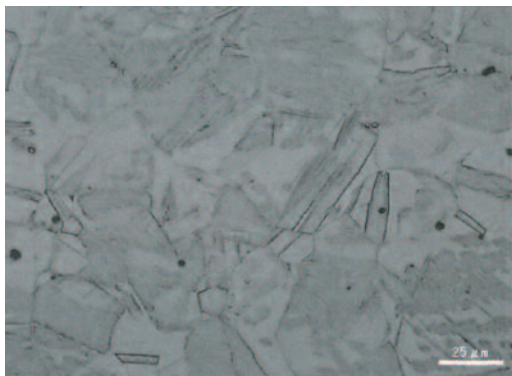


図14 試験体8-12のレーザスポット溶接部断面下部

いずれの試験体でも大きな差異は無く、溶融凝固部および母材との境界部分に鋭敏化組織は観察できなかった。なお、溶融凝固部は段状組織であった。

4 考察

4.1 母材強度が接合強度に与える影響

表5に示した静的引張せん断試験結果と破断面の面積から、0.2%耐力と引張強度の応力を求め、表9にその結果を示す。SUS301L鋼の耐力と強度は、HTが最も高く続いてDLTとなる。SUS304鋼の耐力と強度はSUS301L鋼の調質材と比べても低い。引張せん断特性は溶融凝固金属の特性のみによって決まるのでは無く、抵抗スポット溶接法と同様に母材の強度も影響することを確認した。なお、試験体1-1の平均破断面積は0.95mm²、試験体8-12は同様に1.38mm²、試験体15-8は1.47mm²である。一つの試験体あたり16点のレーザスポット溶接部を形成しているため、平均断面積を16倍して応力を算出した。

表9 静的引張せん断試験結果

	0.2%耐力 MPa	引張強さ MPa
1-1	568	657
8-12	415	591
15-8	356	561

疲労強度も同様の傾向にあり、1000万回に達成する応力は、最大荷重で換算すると表10に示す通りとなる。

表10 疲労強度試験結果

	1000万回に到達した 最大荷重 kN	1000万回に到達した 最大応力 MPa
1-1	2.5	164
8-12	1.8	82
15-8	1.5	63

また、1000万回を達成する応力と引張強度の差を表11に示す。引張強さと疲労強度には相関が見られるが、今回の実験では静的試験から疲労強度を予測するには至らなかった。これは図3に示すレーザ溶接部破断面が楕円であることも関連すると考える。

表11 引張強さと疲労強度の関係

	引張強さ MPa	1000万回に到達した 最大応力MPa	引張強さ /疲労強度
1-1	657	164	4.00
8-12	591	82	7.21
15-8	561	63	8.90

4. 2 金属組織からの考察

従来の電気抵抗スポット溶接部の金属組織を図15から図17に示す。図5から図14に示すレーザースポット溶接部分と電気抵抗スポット溶接部の金属組織に大きな差異は無いことがわかった。一般にレーザー溶接部の冷却速度はおよそ1000℃/secとされているが、特異な組織を観察することはできなかった。

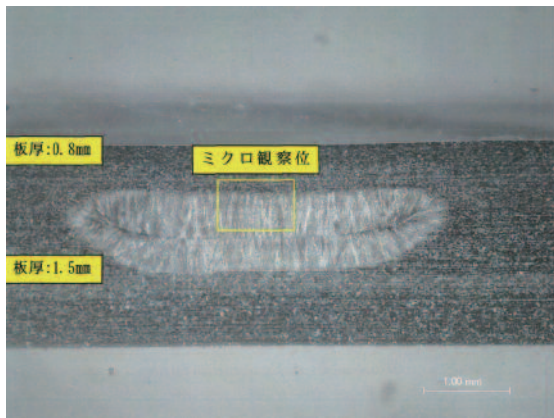


図15 電気抵抗スポット溶接部の断面

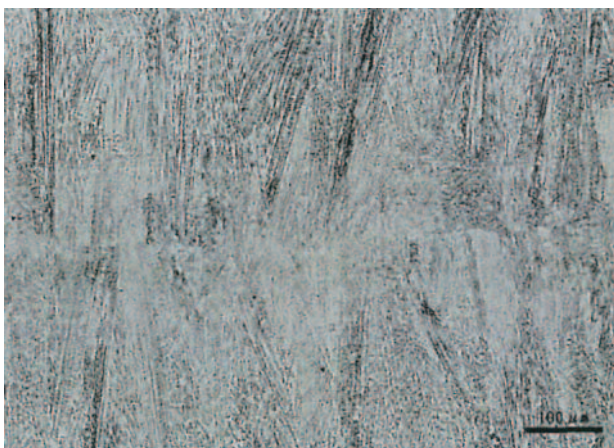


図16 電気抵抗スポット溶接部の断面

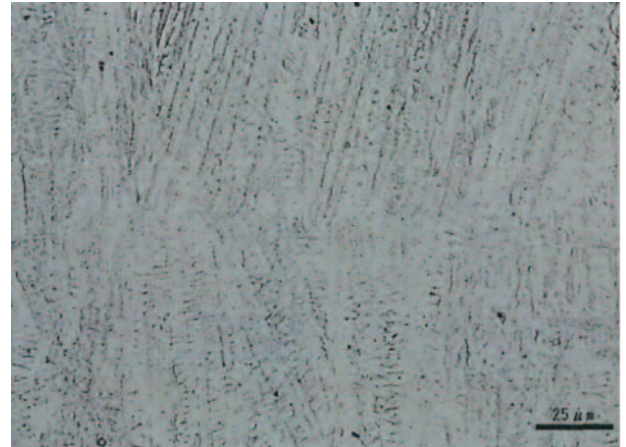


図17 電気抵抗スポット溶接部の断面

5 結論

鉄道車両用ステンレス鋼板に対してスパッタ発生を抑制した入熱条件でレーザースポット溶接を行い、機械的特性の確認と金属組織の観察を行った。その結果、次のことがわかった。

- (1) レーザースポット溶接部の静的強度のうち0.2%耐力と強度は母材と同じように、それらが高いと溶接部の0.2%耐力と強度も高い傾向にある。
- (2) レーザースポット溶接部の疲労強度も同様の傾向があるが、接合界面の溶融凝固形状が異なること、疲労強度を厳密に求められなかったため、静的強度から疲労強度を予測するには至らなかった。
- (3) レーザースポット溶接部の金属組織の観察から、耐食性に影響を与える鋭敏化組織は無く、また、従来の電気抵抗スポット溶接の溶融凝固部の金属組織と比べても大きな差異は無かった。

著者紹介



及川昌志
博士（工学）
生産本部
技術部 (sustina) 主任技師



越川 純
生産本部
生産管理部（生産技術）



遠藤翔太
生産本部
技術部 (sustina)