

鉄道車両用ステンレス鋼板のレーザ溶接部の検討 第一報 レーザ溶接部の塑性加工性の検討

Study of the Laser Welding Part of the Stainless Steel Sheets for Railway-car-body-shell
1st Report, Feasibility Study of the Plastic Processing of a Laser Welding Part

及川 昌志 Masashi OIKAWA
越川 純 Jun KOSHIKAWA

ステンレス鋼製鉄道車両構体のほとんどはJISで規定するSUS301Lと呼ぶステンレス鋼板を多用している。その特徴は、炭素量が300ppm以下と低く、溶接部やその周辺で生じるCr欠乏層の発生を抑制し耐食性を維持できることと、同じ鋼種でも調質圧延により耐力・強度を選択できるので鉄道車両に作用する応力に応じて使い分けができ、鉄道車両構体の軽量化に寄与できることである。本報では、ステンレス鋼製鉄道車両の軽量化や製造プロセスの簡素化を狙い、ステンレス鋼をレーザ突合せ溶接後に塑性加工する工法を検討したので報告する。

Many stainless steel sheets called SUS301L are used for the railway-car-body-shell of stainless steel. The feature is high corrosion resistance for low carbon contains which less than 30ppm and the weight saving of the car-body-shell for the yielding stress and tensile strength of base material.

We studied the weight saving of the railway-car-body-shell of stainless steel, and the simplification of the manufacturing process to be purposes, and we examined the new construction method which carries out the plastic processing of the stainless steel after laser butt welding.

1 はじめに

ステンレス鋼製鉄道車両構体のほとんどはJISで規定するSUS301Lと呼ぶステンレス鋼板を多用している。その特徴は、炭素量が300ppm以下と低く、溶接部やその周辺で生じるCr欠乏層の発生を抑制し耐食性を維持できることと、同じ鋼種でも調質圧延により耐力・強度を選択できるので鉄道車両に作用する応力に応じて使い分けができ、鉄道車両構体の軽量化に寄与できることである。

このようなステンレス鋼を用いた車両の組み立てには、ほとんどが電気抵抗スポット溶接法やアーク溶接法を用いているが、近年はレーザスポット溶接やレーザ連続溶接も用いられている。これらは高速溶接による低熱ひずみを目的にし、電気抵抗スポット溶接法の代用に留まり、自動車部品の組み立てで用いるテーラドブランク工法のような構造体の軽量化に寄与するような製造プロセス革新には至っていない。

そこで、本報では、ステンレス鋼製鉄道車両の軽量化や製造プロセスの簡素化を狙い、ステンレス鋼をレーザ突合せ溶接後に塑性加工する工法を検討したので報告する。

2 方法

今回、実験検討に用いた材料はステンレス鋼製鉄道車両に多く用いるSUS301Lで、板厚は0.6mmである。主要化学成分を表1に示す。また、本材料の塑性加工性の調査を目的に、 r 値⁽¹⁾と成形限界特性を求め、これらの値を用いて塑性加工性を数値シミュレーションモデルによって解析した。なお、塑性加工シミュレーションには市販のソフトウェアを用いている。同時にレーザ溶接部の機械的特性を調査し、レーザ溶接後の塑性加工の可能性を検討した。

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	1.250	0.024

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

3 結果

3.1 基本的機械的特性の調査

市場に多く流通するSUS304鋼やSUS430鋼の物性値は文献などで公開されているものの、SUS301L鋼の塑性加工性に関わる物性値は無く、SUS301L鋼の塑性加工数値シミュレーション実験をするにあたり、基本的な機械的特性を把握した。引張試験から母材の耐力と強度、および、r値を求めた。また、中島法⁽¹⁾による成形試験によって成形限界特性を求めた。

図1、表2に引張試験結果を示す。試験体はJISで規定する5号引張試験体であり、材料の圧延方向のみの試験を実施した。なお、試験速度は10mm/minで一定とした。また、Swift式パラメータ算出を行った。表3にSwift式⁽¹⁾パラメータを示し、図2にFitting図を示す。図1に示す応力-ひずみ線図（真応力-真ひずみ）の塑性領域で変曲点が存在するので、Fitting範囲を変曲点以降（範囲ε 0.1~0.32）と全域の2通りで求めた。全域Fittingでは変曲点以降で差が生じている。

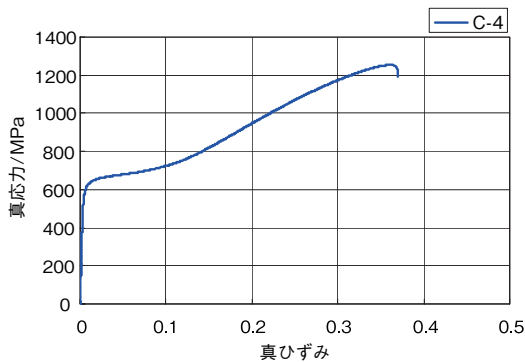


図1 SUS301L鋼の引張試験結果

表2 SUS301L鋼の引張試験結果

厚さ mm	幅 mm	標点距離 mm	降伏応力 MPa
0.60	25.02	50	646

引張強度 MPa	一様伸び %	全伸び %
880	41	45

表3 Swift式パラメータ

Swift Fitting 範囲	K	ε ₀	n
ε 0.1-0.32	2270	0.0688	0.664
ε 全域	2030	0.1320	0.673

なお、Swift式は、 $\sigma = K (\epsilon_0 + \epsilon^n)^n$ であり、Kは加工硬化係数、nは加工硬化指数である。試験後の試験体を図3に示す。

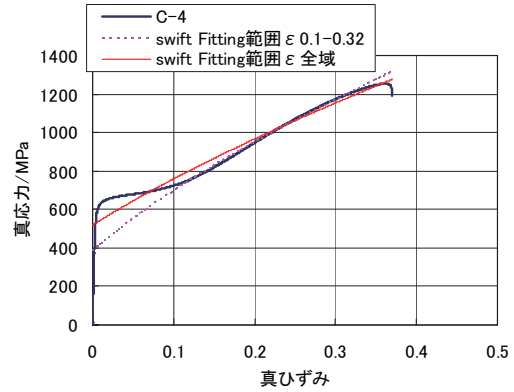


図2 Swift Fittingの結果

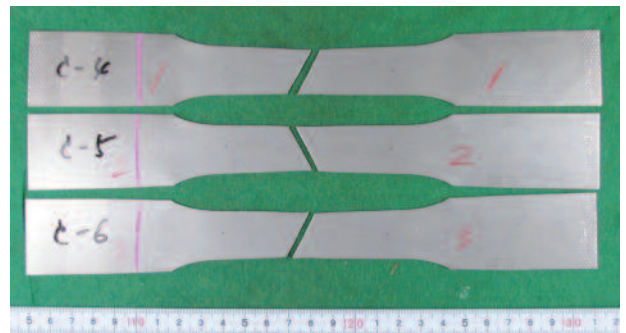


図3 引張試験後の試験体

表4、図4にr値測定結果を示す。r値は材料の圧延方向（L方向）、圧延方向とは直角方向（C方向）、圧延方向とは45度の角度をなす方向（D方向）を調査した。

表4 r値の測定結果

	歪量 %	試験前 GL mm	試験前 幅 mm	試験後 GL mm
L方向	20	20	25.02	23.84
D方向	20	20	25.02	23.83
C方向	20	20	25.02	23.83

	試験後幅 mm	各方向 r値	平均r値
L方向	23.13	0.80	0.88
D方向	23.04	0.89	
C方向	22.98	0.95	

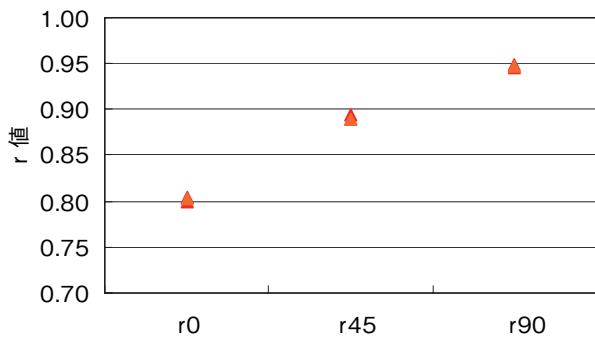


図4 r値の測定結果

次に本材料の成形限界線図を求めた。種々の試験体幅で球頭張出し試験を行う中島法によって成形限界特性を求めた。なお、成形限界線図を求める方法には、中島法他にM-K (Marciniak and Kuczynski) 法⁽¹⁾がある。実際にプレス加工では潤滑剤を使うが、潤滑剤の種類で変わる成形限界の調査は中島法が適しているので本手法を採用した。

試験体の寸法は圧延とは直角方向に200 mm、幅は110 mm, 120 mm, 130 mm, 140 mmとした。スクライブド格子は2 mmとし、ポンチは直径100 mmの球頭ポンチであり、ロックビードを加工している。試験速度は25 mm/min, BHFは30 tonであり、破断部のひずみを測定している。

なお、最大ひずみ (ϵ_1) と最小ひずみ (ϵ_2) は標点距離を2 mm格子5個分の10 mmとし、ひずみは (1), (2) 式を用いて算出した。

$$\epsilon_1 = \ln(l_1/l_0) \quad (1)$$

$$\epsilon_2 = \ln(l_2/l_0) \quad (2)$$

なお、 l_1 を最大ひずみ方向長さ (mm)、 l_2 を最小ひずみ方向長さ (mm)、 l_0 を10 mmとした。平面ひずみ測定結果およびFLD (成形限界線図) を表5、図5に示す。また、成形品外観を図6に示す。平面ひずみは0.28であった。

表5 平面ひずみ測定結果

試験体幅 mm	測定値 (mm)		ひずみ $\epsilon_{1(2)} = \ln(l_{1(2)}/10)$	
	l_1	l_2	Major strain ϵ_1	Minor strain ϵ_2
110	14.754	9.135	0.39	-0.09
120	14.158	9.441	0.35	-0.06
130	13.422	10.074	0.29	0.01
140	13.276	10.017	0.28	0.00

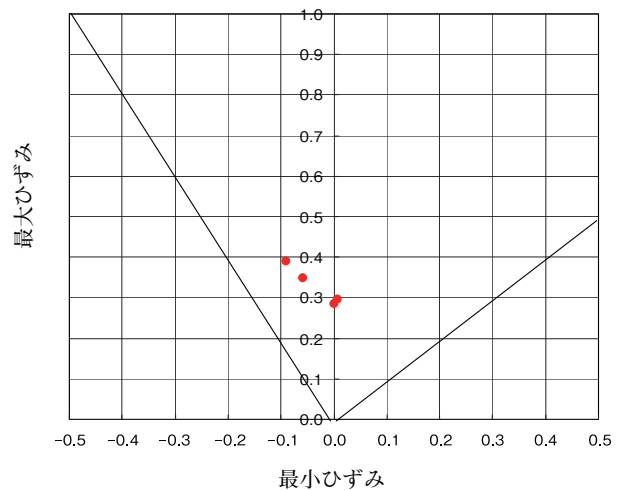


図5 成形限界線図

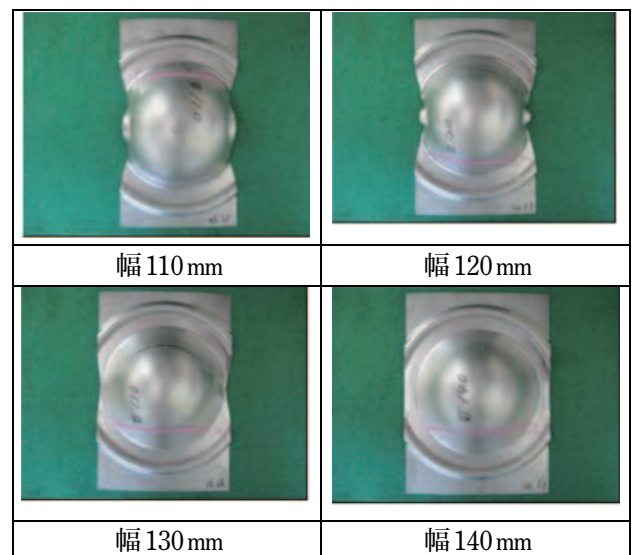


図6 試験後の試験体

3. 2 塑性加工性の検討

前節で求めた機械的特性をもとに、成形性を検討したモデルを図7に示す。本モデルは鉄道車両用屋根材を想定した。板幅は815 mmとし、この間に9山の凸部を形成した。なお、両端 (図では上下の凸部) はロックビードである。なお、連続加工を想定し位置決めのためのロックピンを配している。凸部の高さは15 mmであり、すそ野の長さは30 mm、凸部の間隔は76 mmである。今回は材料の長手方向 (凸部が連続する方向) の検討を行わず、幅方向の成形性の検討を行った。シミュレーションの結果を図8に示す。図中の緑部分は板厚の減少がほとんど無い部位であり、黄色から赤色になるにしたがい板厚の減少値が大きくなる。図中に示すように、凸部の頂部よりやや下がった部分の板厚の減少値が大きくなり、最大で約15%減少していることがわかる。

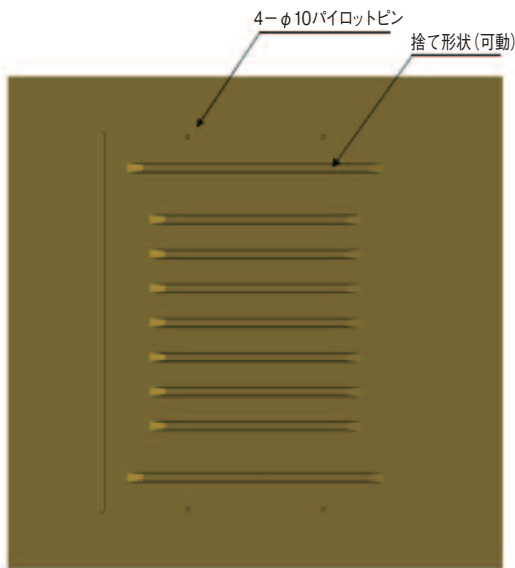


図7 鉄道車両用屋根の解析モデル

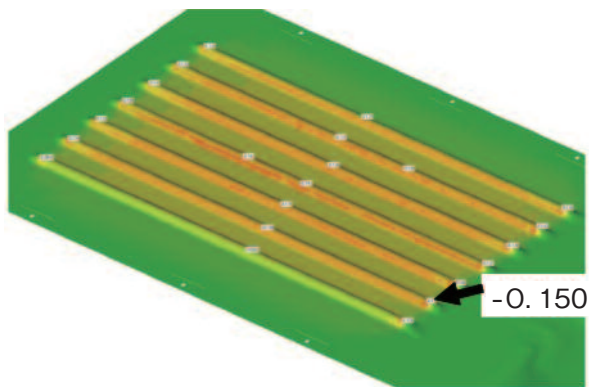


図8 塑性加工の数値シミュレーション解析結果

3. 3 シミュレーションモデルの妥当性検討

鉄道車両用屋根材に用いるSUS301L鋼の塑性加工数値シミュレーションを、実験検討によって求めた物性値を用いて解析することができた。本シミュレーションモデルの妥当性を検討するため、図7に示す仕様の金型を試作しプレス加工を行い、板厚の減少値を実測した。図9に試験結果を示す。



図9 試作した鉄道車両用屋根材

3. 4 プレス加工前のレーザー溶接適用の検討

本試験に用いたSUS301L鋼をレーザーによって突合せ溶接を行い接合した。レーザーはファイバ伝送型であり、加工点のビーム径を0.6mm、出力4.0kW、溶接速度6.0m/minとした。なお、レーザー照射点とその裏面にはArを供給している。レーザー照射部裏面へは、レーザー照射部の裏面に配置したチャンネルにArを供給し、レーザーブルームの成長を抑制させ、過度な熔融を防止した。レーザー溶接部の外観を図10に示し、断面写真を図11に示す。

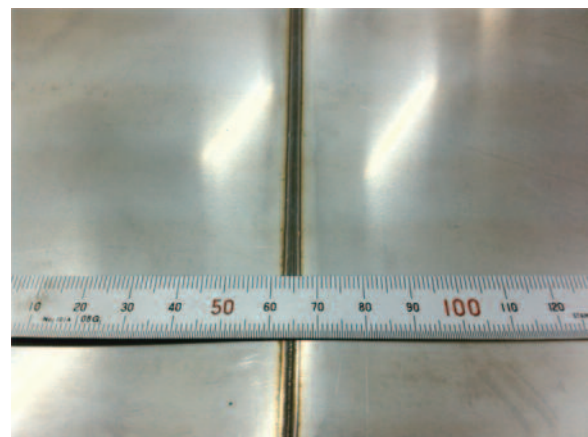


図10 レーザ溶接部の外観
(写真中央の上下に伸びる変色部分がレーザー溶接部である)



図11 レーザ溶接部の断面

図10に示すレーザ突合せ溶接後のSUS301L鋼にプレス加工を行った材料を図12に示す。溶接部からの破断は無く健全な形成ができることがわかった。

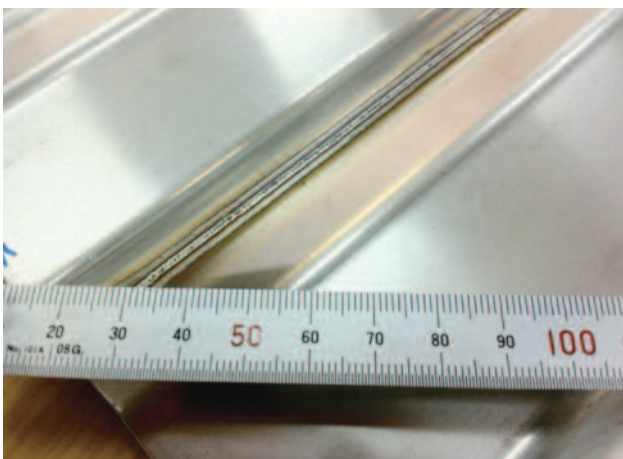


図12 レーザ溶接後にプレス加工した材料の外観
(凸部表面の変色部分がレーザ溶接部である)

4 考察

本試験で得たr値はC方向が高い傾向にある。これと比較して図13に示すようにSUS304鋼ではD方向が高い傾向にある。これは、一般にr値は圧延条件（圧延率），すなわち，すべり方向が影響するためである。結晶構造がBCCの場合には，圧延率は高くなるとすべり方向が揃い圧延方向のr値も高くなる。一方，ステンレス鋼板（FCC構造）の場合には，すべり方向が異なり，圧延条件にもよるがD方向が高くなると考えられる。

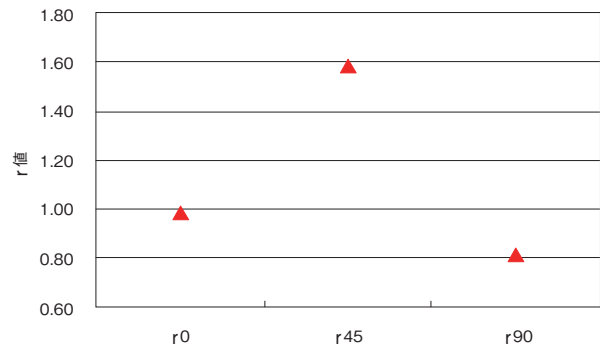


図13 SUS304鋼のr値の測定結果

また，試験によって得たSUS301L鋼の機械的特性を用いた塑性加工の数値シミュレーション解析では，実際に試作した屋根材と一致する傾向にあった。板厚の減少値は，シミュレーションでは最大15%であったが，実測値では約16.7%であった。

板厚が減少することによって，機械的特性が変化すると考え，試験に用いた同様のSUS301L鋼を塑性加工（圧延）によって20%減厚させ，機械的特性を調査した。また，レーザ溶接部の引張試験を行い破断箇所とその応力を求め，拡張性を検討した。図14に示すように板厚を20%減少させた材料の0.2%耐力と引張強度は，母材L方向の0.2%耐力646MPa，引張強度880MPaと比較し20%以上高くなっていることがわかった。圧延による減厚とプレス加工による伸びでは残留応力が異なり，耐力，強度ともに差があるが，減厚した分の耐力と強度の低下は補える範囲であると考えられる。

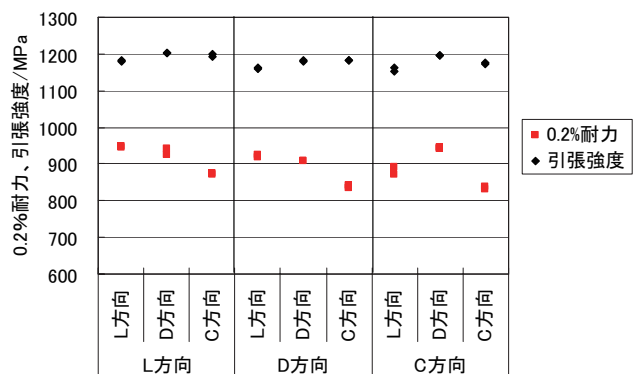


図14 20%減厚したSUS301L鋼の機械的特性

また，図15にレーザ溶接部の引張試験結果を示す。図15から破断箇所は溶接部近傍の熱影響部が起点であり，その耐力は377MPa，引張強度は752MPaである。母材の耐力646MPaに比べ，熱影響部の耐力と考えられる値は377MPaと大きく減少している一方，引張強度は母材880MPaに対し，752MPaであり減少はするが，耐

力ほど減少の割合は大きくない。これはレーザー溶接に伴い強度は低下するものの、耐力が低下し塑性加工しやすくなったとも考えられる。したがって、図12に示すようにSUS301L鋼であってもレーザー溶接後に塑性加工できる可能性を得たと考える。



図15 レーザ溶接部の引張強度の調査

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）

5 結言

SUS301L鋼の機械的特性の調査と塑性加工数値シミュレーションモデルの妥当性を検証し、さらにはレーザー溶接後に塑性加工を行う探索的実験を行い次の結論を得た。

- (1) SUS301L鋼の塑性加工に関わる基本的な機械的特性のうち r 値と成形限界特性を調査した。
- (2) SUS301L鋼の r 値と成形限界特性を用い、鉄道車両用屋根材の塑性加工数値シミュレーションを行った結果と、試作した金型によってプレス加工した実サンプルを比較し、板厚の一致を確認し、また、数値シミュレーションの妥当性を確認するとともに、その実用の可能性を得た。
- (3) SUS301L鋼に対して、レーザー溶接後にプレス加工するテーラドブランク加工を探索的に実施し、その実現の可能性を得ることができた。

今後はレーザー溶接部の詳細な解析を行い、課題の抽出と解決を行う。

参考文献

- (1) 薄鋼板成形技術研究会，プレス成形難易ハンドブック 第3版，(2007)，日刊工業新聞社