

ショットブラスト処理による自動車用薄鋼板アーク溶接部の 塗装後耐食性の改善

Improvement of Corrosion Properties after Electrodeposition of Arc Welds in Automotive Steel Sheets by Shot Blasting

富士本 博 紀*
Hiroki FUJIMOTO

秋 岡 幸 司
Koji AKIOKA

徳 永 仁 寿
Masatoshi TOKUNAGA

抄 録

自動車のスチール製シャシー部品ではカチオン電着塗装を主体とした防錆処理が行われているが、アーク溶接部が耐食性などの性能のネックとなるケースが多い。アーク溶接部の塗装後耐食性と疲労特性に及ぼすショットブラストの影響について検討した結果を紹介した。

Abstract

Steel chassis parts for automobiles are subjected to rust prevention treatment mainly based on cation electrodeposition coating. However, it is reported that there are many cases where arc welded parts are a bottleneck in performance. In this report, the results of corrosion resistance and fatigue property after electrodeposition coating in arc welded joints by shot blasting will be described.

1. 緒 言

地球環境保護の重要性が高まる中、自動車ではCO₂排出量を削減するため、軽量化に向けた取り組みが益々強く求められている。自動車のキャビンに相当するボディ部品では、高張力鋼板を適用することにより、衝突性能を確保しつつ薄肉化する取り組みが進んでいる。他方、足回りのシャシー部品（フロントおよびリアのサブフレーム、リアアクスルビーム、ロアアーム、アッパーアームなど）ではボディ部品ほど高張力鋼板の適用は進んでいない。これは、シャシー部品は静的強度だけではなく、剛性、耐食性、疲労強度が板厚の主要な制約因子となっており、単純に高張力鋼板を用いるだけでは薄肉化できないケースが多いとされている。

シャシー部品は部位により薄肉化の主要な制約因子が異なるため、それぞれの制約因子に合わせた対応が必要とされる。例えば、剛性に関しては、鋼材のヤング率は鋼種によらず概ね一定であるため、高張力鋼板を用いて薄肉化を進めるだけでは部品の剛性が低下し走行安定性の劣化、振動の増加などの悪影響を及ぼす。剛性が主要な板厚制約因子の部位では、施工面からの対応は困難であり、設計面か

らの対応が必要である。設計面の対応として、薄肉化しつつ必要な剛性を確保するために部品の断面形状の適正化、部品剛性に寄与が小さい部分の薄肉化と寄与が大きい部分の補強などが行われている。他方、部品に要求される耐食性、疲労強度が板厚選定における主要な制約因子となる部位も多い。特に近年、耐食性については重要性が高まっており、これらの特性向上のため、設計面のみならず施工面からの様々な取り組みが行われている。

自動車のシャシー部品では、鋼板をプレス成形し、ソリッドワイヤを用いた消耗電極式ガスシールドアーク溶接で組み立てた後、錆を防止する目的で電着塗装が施されるのが一般的である。電着塗装の前処理工程は、油分を除去する脱脂、表面調整、りん酸亜鉛、水洗工程からなり、鋼材表面に緻密なりん酸亜鉛結晶を生成させて、鋼材の防食性と塗膜密着性を向上させる。続く電着塗装工程では、部品を陰極としてカチオン型の電着塗装が施されることが多い。電着塗装の塗膜厚みは20~30 μ mが一般的である¹⁾。

図1は日本国内にて13年間で約10万km走行した自動車のシャシー部品の一例である。シャシー部品では、写真の通りアーク溶接部を中心に錆が発生し腐食が進行することが知られている。このため、シャシー部品では腐食によ

* 鉄鋼研究所 研究企画室 主幹 博士(工学) 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

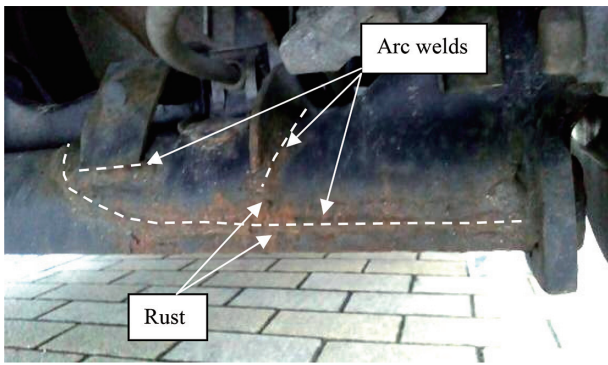


図1 13年走行した乗用車のリアアックスルビームの腐食事例
Example of arc welds in the rear axle of the 13 year-old field tested automobile

る板厚減少を見込んで板厚が設定されており、アーク溶接部の低い塗装後耐食性が薄肉軽量化の制約となることがある。アーク溶接部の塗装後耐食性が劣る要因として、溶接時に発生したスラグによる電着塗装不良や鋼板表面へのヒュームの付着による塗装密着性の低下が挙げられる。

とりわけスラグに起因する塗装欠陥の影響が大きいと報告されている²⁾。酸化物であるスラグは電気を通しにくいので、電着塗装されにくい。このため、アーク溶接部の塗装後耐食性を向上させるためには、スラグを減らすことが重要である。スラグの主成分はSi酸化物、Mn酸化物などである。これらの酸化物は主に溶接ワイヤに由来するSi、Mnと、溶接時に用いるシールドガス中の酸素から生成する。国内の自動車メーカーでは、シールドガスとしてCO₂もしくはArに20%程度のCO₂(+必要に応じて微量O₂)を混合したガスを用いることが多い。これらのCO₂中の酸素が酸化物を生成する要因となる。このためシールドガスをAr主体とし、CO₂、O₂などの酸化性ガスの混合量を5%以下まで減らすことでスラグの生成を低減し、塗装後耐食性を改善する手法が報告されている^{3,4)}。

しかしながら、本来アークを安定させることを目的として添加されているシールドガス中の酸化性ガスを減らすと、アークが集中せず溶込み不良やビード形成の不安定化が起きやすくなる。このため、高い信頼性が要求されるシャシー部位では適用に注意が必要と考えられる。また、溶接の入熱量の低減や、ワイヤ中のSi、Mnなど脱酸元素の低減によってもスラグは減少する傾向を示すが、これらの元素を下げすぎると、溶接金属の脱酸不足によるブローホールの発生、機械的特性の劣化など溶接品質の低下リスクが大きくなる課題がある。

また、シャシー部品は走行時に繰返し応力を受けるため、高い疲労信頼性も求められる。繰返し応力下では形状的不連続部であるアーク溶接部が最弱部となることが多いため、アーク溶接部には優れた疲労特性も要求される。鋼板を高強度化すると母材疲労強度(応力集中がない平滑材での疲労強度)は上昇するが、アーク溶接継手の疲労強度は

常に向上するわけではない^{6,7)}ため、アーク溶接継手の疲労強度の不足が薄肉軽量化の制約となることがある。このため、自動車用薄鋼板のアーク溶接部の疲労強度を向上させる手法として、局部加熱による引張残留応力の低減⁷⁾、プラズマアーク溶接併用によるビード止端部形状制御⁸⁾、低温変態溶材の適用による圧縮残留応力の付与⁹⁾などが検討されてきた。

本研究では、自動車用薄鋼板のアーク溶接部の塗装後耐食性と疲労特性を改善する手段として、ショットブラストの可能性に着目し検討した。ショットブラストは板厚の厚い鋼橋構造物では、アーク溶接部の疲労特性向上を狙い検討された事例¹⁰⁾が報告されているが、板厚が2mm程度の自動車用薄鋼板のアーク溶接部の塗装後耐食性と疲労特性について検討された報告は、筆者らが調べた範囲では認められない。

他方、自動車のプレス成形部品の製造では、非めっきホットスタンプ鋼板の熱間プレス成形部品の製造工程において、熱間プレス工程で鋼板表面に生成した鉄スケールを除去するため、2000年初頭からショットブラストが日本国内でも用いられている¹¹⁾。このため、アーク溶接された薄鋼板の自動車部品でも部品精度に大きな影響を及ぼさずに、ショットブラストを適用できる可能性があると思われる。本報では、引張強さが440MPa級と1500MPa級の自動車用薄鋼板を用い、ショットブラストによるアーク溶接部の塗装後耐食性と疲労特性の改善について検討を行った結果¹²⁾について紹介する。

2. 実験方法

本試験では引張強さが440MPa級の非めっき熱間圧延鋼板と1500MPa級の非めっきホットスタンプ鋼板を用いた。鋼板の化学成分と機械的特性を表1に示す。アーク溶接のままの試験片とアーク溶接後ショットブラストを実施した試験片を作製し、塗装後の耐食性と疲労特性を評価した。図2(a)に耐食性評価試験片の形状を示す。耐食性評価試験片は、板厚2.3mmの鋼板に、表2に示す条件でビードオンプレート溶接を行い作製した。ショットブラストは直圧式の装置を用い、表3に示す条件でスチールビーズを投射した。ショットブラストの様子を図3に示す。表3の投

表1 供試鋼板の化学成分と機械的特性 (mass%)
Chemical compositions and mechanical properties of steel sheets (mass%)

Steel grade	C	Si	Mn	P	S
440 MPa	0.10	0.05	1.14	0.019	0.003
1500 MPa	0.20	0.20	1.30	0.010	0.002

Steel grade	Y.S. (MPa)	T.S. (MPa)	El. (%)
440 MPa	304	462	37
1500 MPa	1130	1553	8

Y.S.: Yield strength, T.S.: Tensile strength, El.: Elongation

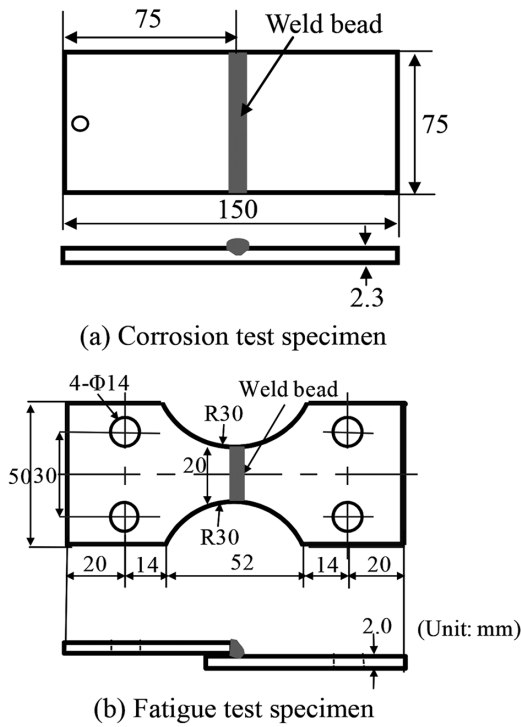


図2 アーク溶接試験片の形状
Shapes and dimensions of arc welded specimens

表2 アーク溶接条件
Arc welding conditions

	(a) Corrosion test specimen	(b) Fatigue test specimen
Current (A)	94	135
Voltage (V)	20	23
Travel speed (cm/min)	50	
Shielding gas	Ar+20%CO ₂ , 20 l/min	
Wire	NSSW YM-24T (diameter: 1.2 mm)	

表3 ショットブラスト条件
Shot blasting conditions

Machine	Atsuchi Tekko Co. BA-1
Blast material	Steel beads (diameter: 0.3 mm, HV 390-510)
Air pressure	0.35 MPa
Distance	200 mm
Blasted area	All surface of both sides

射条件は、事前調査により溶接ビードのスラグ、ヒュームを除去できるように選定した。本検討では変形を抑制するため試験片表裏の全表面に均等にショットブラストを行った。

アーク溶接のままの試験片とアーク溶接後ショットブラストを行った試験片について電着塗装を行った後、塗装後耐食性を2枚の試験片で評価した。塗装は試験片を脱脂し、下地処理として粉体表面調整剤を用いたトリカチオンタイプのりん酸亜鉛処理を行った後、カチオン型電着塗装を行った。塗装の目標膜厚は平面部で20 μ mとし、175 $^{\circ}$ Cで焼付けを行った。塗装後の耐食性は、5%NaCl溶液を用い

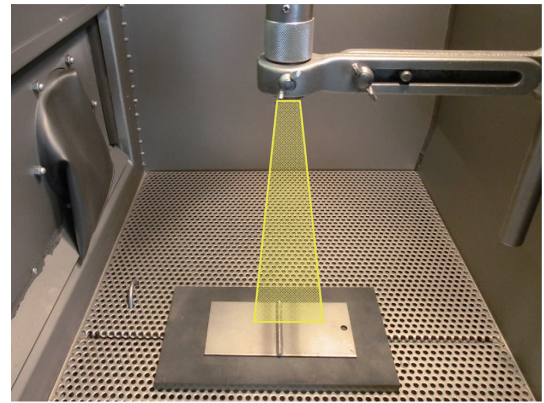


図3 ショットブラストの様子
Shot blasting method

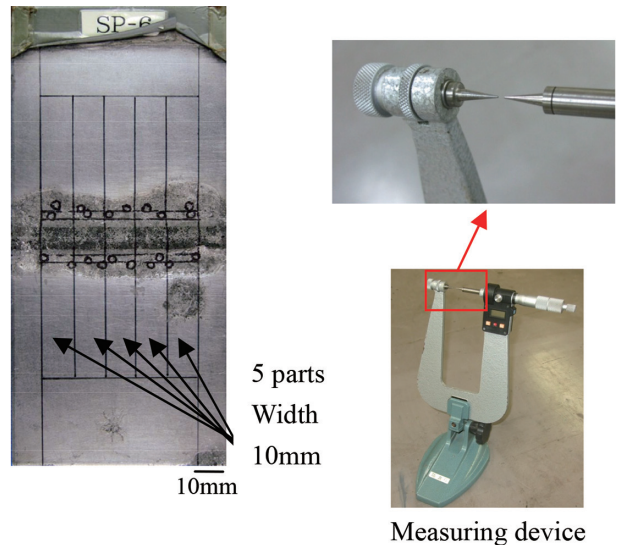


図4 最大腐食深さの測定法と測定機器
Method of measuring maximum corrosion depth

た塩水噴霧および、乾燥、湿潤からなる複合サイクル腐食試験にて評価した。腐食試験のWet率は67%とし、1サイクルは24時間で評価した。120サイクルの腐食試験後、塗膜を剥離し錆を除き、図4に示すように、幅10mmの5区画での板厚減少を各10か所測定し、試験片の最大腐食深さを求めた。測定には図4に示す先端径0.3mmのポイントマイクロメーターを用いた。

疲労試験片の形状を図2(b)に示す。シャシー部品は重ねすみ肉溶接構造が多いため、疲労試験片は重ねすみ肉溶接で作製した。鋼板の板厚は2.0mmとし、引張強さが440MPa級と1500MPa級の鋼板を用いた。溶接条件を表2に、ショットブラスト条件を表3に示す。アーク溶接のままの試験片とアーク溶接後ショットブラストを行った試験片について、自動車の足回り部品の荷重モードである ψ 片振りの平面曲げ疲労試験(応力比=0)を実施した。疲労試験機は(株)島津製作所製の曲げ・ねじり疲労試験機TB-10を用い変位制御で試験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 アーク溶接部の耐食性の評価

図5(a)に440MPa級鋼板のアーク溶接後のビード外観を示す。アーク溶接のままのビードにはビード上とビードと母材の境界部(止端部)にスラグの付着が認められ、溶接ビード近傍の母材部にはヒュームの付着も認められた。図5(b)はアーク溶接後にショットブラストを行った試験片の外観である。溶接ビードのスラグと母材部に付着したヒュームとも十分に除去されていた。

図6にりん酸亜鉛処理後の溶接ビード近傍部の走査型電子顕微鏡(SEM)観察結果を示す。アーク溶接のままの試験片の表面にはりん酸亜鉛結晶が葉状となっており、結晶が生成していない透け部が多く観察された。他方、ショットブラストを行った試験片の表面にはりん酸亜鉛結晶が均一な粒状で、透けなく緻密に形成されていた。これらの違いは母材表面に付着したヒュームに起因しており、ショット

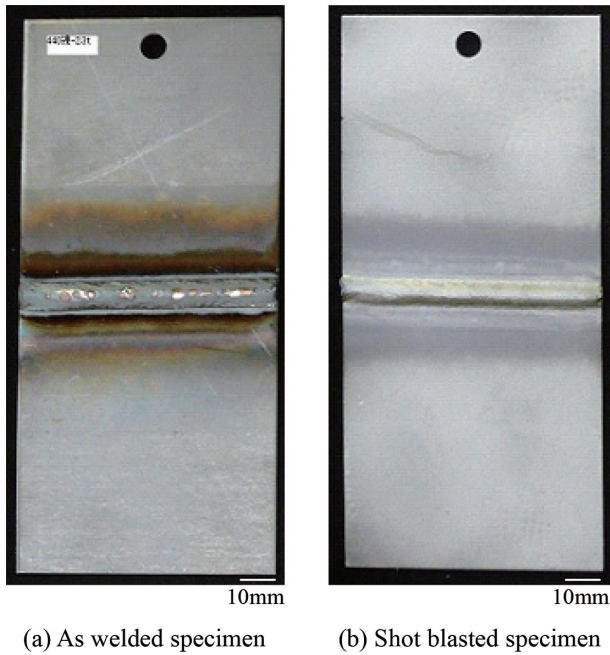


図5 アーク溶接した試験片の外観 (440 MPa steel)
Surface of the arc welded specimens (440 MPa steel)

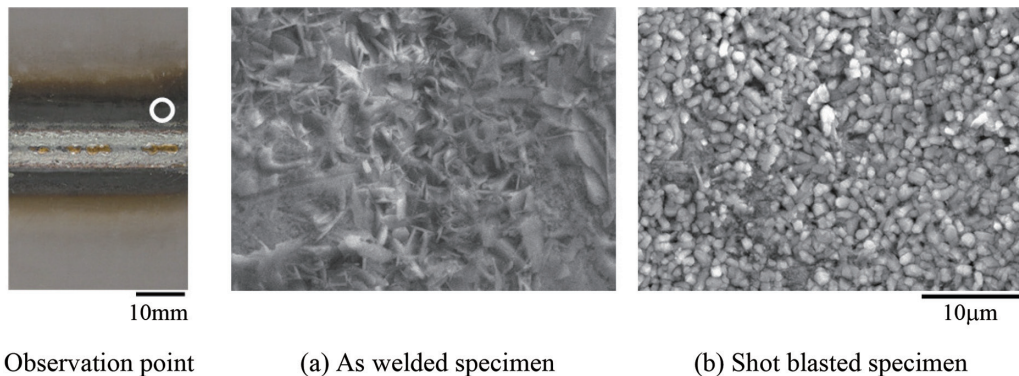


図6 りん酸亜鉛処理後の鋼板表面 (440 MPa steel)
Surface of the specimens after phosphate coating (440 MPa steel)

トブラストによりヒュームを除去することで、りん酸亜鉛処理性が向上し電着塗膜の密着性が改善するものと思われる。

図7に電着塗装後の溶接ビード表面の拡大写真を示す。アーク溶接のままの試験片では、ビード上とビード止端のスラグ付着部に塗装不良が認められた。他方、ショットブラストを行った試験片には、塗装不良が認められなかった。図8は電着塗装後のビード止端部を拡大した断面写真である。溶接のままのビード止端部にはスラグの付着が認められ、スラグがある部分は塗装がほとんど付着していないことがわかる。他方、ショットブラストを行ったビードではスラグが認められず、ビード表面が目標膜厚である20µm程度の厚みで完全に電着塗装されていることが断面からも確認された。

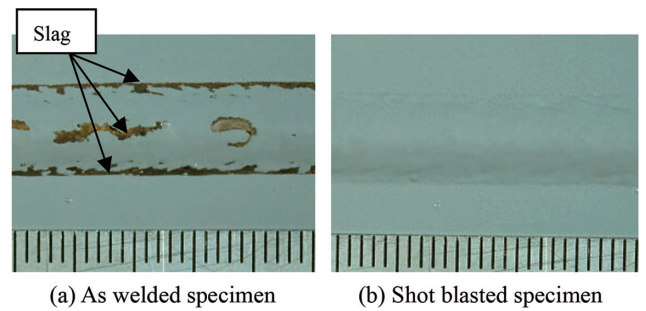


図7 電着塗装後のアーク溶接部外観 (440 MPa steel)
Surface of the arc welds after electrodeposition (440 MPa steel)

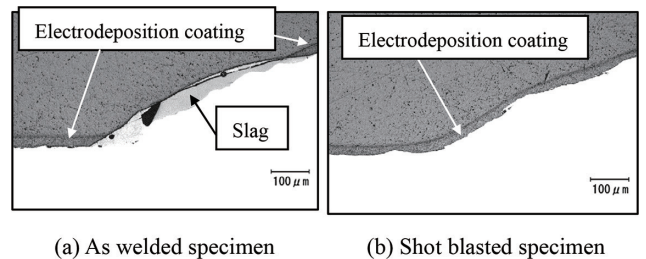


図8 電着塗装後のアーク溶接止端部の断面 (440 MPa steel)
Cross section of toe of arc welds after electrodeposition (440 MPa steel)

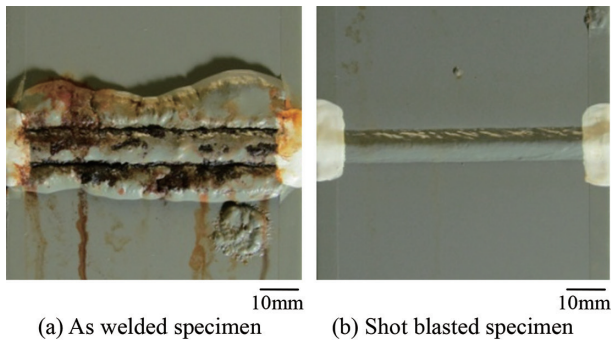


図9 120サイクルのCCT試験後のアーク溶接部外観 (440MPa steel)

Surface of the electrodeposition coated specimen after combined cyclic corrosion test of 120 cycles (440 MPa steel)

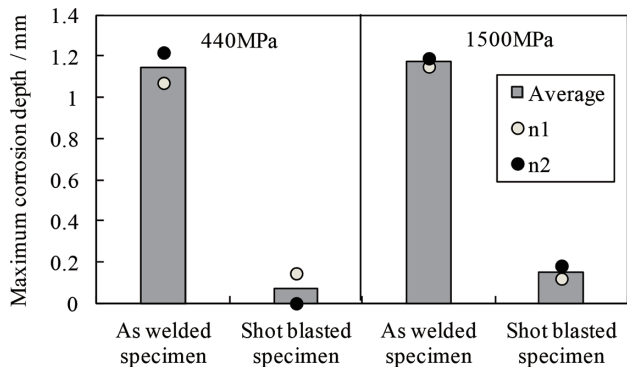


図10 120サイクルのCCT試験後の最大腐食深さ
Maximum corrosion depth after a combined cyclic corrosion test of 120 cycles

電着塗装後、120サイクルの複合サイクル腐食試験を行った試験片の外観を図9に示す。アーク溶接のままの試験片には、溶接ビード周辺に塗膜膨れが生じ、激しい腐食が認められた。他方、ショットブラストを行った試験片は、溶接ビード周辺に腐食がほとんど認められなかった。図10に440MPa級鋼板と1500MPa級鋼板の最大腐食深さの測定結果を示す。アーク溶接のままの最大腐食深さは約1.1mm程度であったが、ショットブラストを行った試験片の最大腐食深さは0.2mm以下であった。ショットブラストにより最大腐食深さが1/5以下となり大幅に改善されることがわかった。ショットブラストにより溶接ビードのスラグが除去されることで塗装欠陥がほぼ無くなるとともに、ビード近傍のヒュームが除去されることで塗装の密着性も向上したためと思われる。特に、塗装欠陥の原因であるスラグが除去されたことが、塗装後耐食性向上の主要因であると考えられる。

3.2 アーク溶接部の疲労特性の評価

図11に重ねすみ肉溶接したアーク溶接継手の平面曲げ疲労試験結果を示す。440MPa級鋼板の場合、アーク溶接のままでは疲労限は360MPaであった。また、1500MPa級鋼板も、アーク溶接のままでは440MPa級鋼板と疲労特

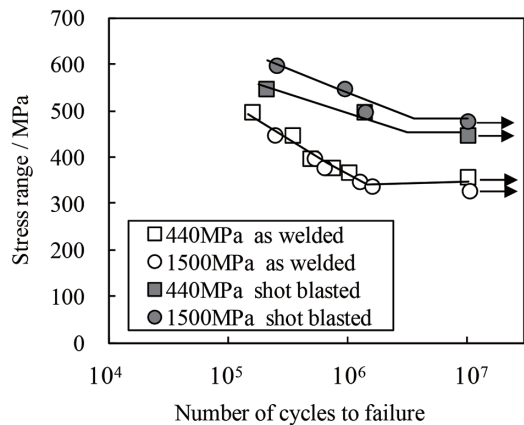


図11 アーク溶接継手の平面曲げ疲労強度に及ぼすショットブラストの影響

Fatigue test results of arc welded specimens with and without shot blasting

性はほぼ同等であった。アーク溶接後、ショットブラストを行った440MPa級鋼板の継手の疲労限は450MPaであり、ショットブラストにより疲労限が約25%向上した。さらに、ショットブラスト後の疲労強度は440MPa級鋼板より1500MPa級鋼板の継手の方が若干高め傾向を示した。これらはショットブラストにより溶接部表面に付与された圧縮残留応力の影響によるものと考えられ、特に、1500MPa級鋼板では疲労き裂発生位置である溶接熱影響部(HAZ)が硬いため、ショットブラストにより付与された圧縮残留応力が疲労試験中に抜けにくいと推察された¹²⁾。

以上の結果より、ショットブラストによりアーク溶接部の塗装後耐食性と疲労強度が大幅に向上することが明らかとなった。ショットブラストの適用は工程が1つ増えるものの、特に高張力鋼板と用いると、母材の静的強度と平滑疲労強度、溶接部の塗装後耐食性と疲労強度が向上する。実際のシャシー部品へのショットブラスト適用では、投射材の材質、部品形状に応じたショット処理条件、投射材の除去方法など、適用する部品に応じた検証が必要になると思われるが、ショットブラストの適用はシャシー部品の軽量化、商品性向上に寄与する可能性があると考えられる。

4. 結 言

自動車のシャシー部品のアーク溶接部の特性向上を目的として、自動車用薄鋼板のアーク溶接継手の塗装後耐食性と疲労特性に及ぼすショットブラストの効果について検討を行った結果を以下に示す。

- 1) アーク溶接後にショットブラストを行うと、複合サイクル腐食試験での塗装後耐食性が著しく向上し、未ショット品と比較すると最大腐食深さは1/5以下となった。
- 2) ショットブラストによるアーク溶接継手の塗装後耐食性の向上の主要因は、塗装欠陥の要因であるスラグの除去によるものであると考えられる。
- 3) ショットブラストにより、440MPa級鋼板の重ねすみ肉

アーク溶接継手の疲労限が約 25%向上した。また、溶接のままでは 440MPa 級鋼板と 1500MPa 級鋼板のアーク溶接継手に疲労強度は同程度であったが、ショットブラストによる疲労強度の向上は 1500MPa 級鋼板の方が若干大きかった。

- 4) 高張力鋼板とショットブラストを適用することで、母材の静的強度および平滑疲労強度、アーク溶接部の塗装後耐食性と疲労強度が向上するため、これらの特性が板厚の制約因子となっている部位の薄肉軽量化に寄与できる可能性があると考えられる。

参考文献

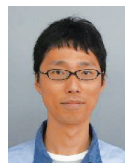
- 1) 杉崎勝久：自動車の電着塗装. 表面技術. 53 (5), 293-298 (2002)
- 2) 高橋通泰, 内原正人, 迫田章人, 植木光彦, 新里文明：アーク溶接部の塗装後耐食性 - 第 1 報：溶接部腐食挙動の解明. 自動車技術会論文集. 28 (2), 143-148 (1997)
- 3) 内原正人, 高橋通泰, 迫田章人, 高隆夫, 中田実雄：塗装後耐食性に優れたマグ溶接用シールドガスの開発. までりあ. 36 (4), 388-390 (1997)
- 4) 山本俊佑, 鈴木幸子, 安藤聡, 片岡時彦, 上田聡, 中澤嗣夫：自動車部材溶接部の耐食性と疲労強度向上技術の開発 (第 2 報). 溶接学会全国大会講演概要. 304-305 (2015)
- 5) 河西龍, 鈴木励一：自動車用鋼板のアーク溶接部における塗装性, 耐腐食性の向上策. 溶接学会全国大会講演概要. 90,

88-89 (2012)

- 6) 内原正人, 栗田真人, 高隆夫：熱延鋼板アーク溶接継手の疲労限度に及ぼす金属学的性質の影響. 鉄と鋼. 86 (5), 336-342 (2000)
- 7) 大沢紘一, 塩崎毅, 占部俊明, 吉武明英, 齊藤孝信, 樺沢真事：薄鋼板のアーク溶接部の疲労強度向上に対する局部加熱の効果. 溶接学会論文集. 17 (2), 319-325 (1991)
- 8) 松下宗生, 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一：プラズマ・アークハイブリッド溶接技術の開発 (第 2 報). 溶接学会全国大会講演概要. 80, 14-15 (2007)
- 9) 遠山敬助, 真柄秀一, 鯉渕興二：低変態温度溶接材料の自動車シャシ構造部への適用 (疲労強度改善スマートマテリアル「低変態温度溶接材料」の効果と適用性). 溶接学会全国大会講演概要. 72, F39-42 (2003)
- 10) 山田健太郎, 小塩達也, 鳥居詳, 白彬, 佐々木裕, 山田聡：面外ガセット溶接継手の曲げ疲労強度に及ぼすショットブラストの影響. 構造工学論文集 A. 54A, 522-529 (2008)
- 11) 中嶋勝司, 蟹江鋭夫, 小澤正史, 遠藤孝義, 岡崎他家蔵：ダイクエンチ工法によるインパクトビームの開発. 素形材. 43 (12), 31-35 (2002)
- 12) 富士本博紀, 秋岡幸司, 徳永仁寿：自動車用薄鋼板のアーク溶接部における電着塗装後の耐食性と疲労特性に及ぼすショットブラストの影響. 塑性と加工. 58 (675), 299-303 (2017)



富士本博紀 Hiroki FUJIMOTO
鉄鋼研究所 研究企画室
主幹 博士(工学)
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



徳永仁寿 Masatoshi TOKUNAGA
鉄鋼研究所 接合研究部
主任研究員



秋岡幸司 Koji AKIOKA
鉄鋼研究所 表面処理研究部
主幹研究員