

論文・解説

28

新型ハイアルゴン溶接の技術開発

Development of New Welding Process in High Argon Gas

田中 正顕^{*1} 深堀 貢^{*2} 大谷 隆広^{*3}
Masaaki Tanaka Mitsugi Fukahori Takahiro Otani
渡邊 海香^{*4} 木村 大樹^{*5} 石田 広志^{*6}
Umika Watanabe Hiroki Kimura Hiroshi Ishida

要約

マツダでは全てのお客様に「走る喜び」と「優れた環境・安全性能」を提供するため、ダイナミクス性能向上と環境性能を両立する軽量化技術開発に取り組んでいる。しかし、厳しい腐食環境下で使用される足回りの板金部品は、溶接部近傍やエッジ部の錆による板厚減少の問題があり、薄板化による軽量化が難しい。更に、錆びにくい部品の実現はお客様がクルマを所有する喜びにつながり、魅力性能の一つになると考える。本技術は薄板に対する新しい溶接プロセスの開発と部品構造最適化により、従来工法と比較して、防錆性能を大きく向上させるとともに、大幅な軽量化を実現した。

Abstract

In order to provide “Celebrate driving” and “Excellent environmental and safety performance” to all customers, Mazda has been working on weight saving technologies by balancing both better dynamics performance and environmental performance. However, sheet metal parts for suspension, which are used under severe corrosive conditions, face issues of thickness reduction due to rust near welded areas and edges, making it difficult to achieve weight reduction with thinner sheets. Furthermore, creating rust-resistant parts leads to the customer’s joy of owning a vehicle and can be one of the attractive performances. This technology has significantly improved rust prevention performance and achieved substantial weight reduction compared to conventional methods, through the development of a new welding process and structural optimization.

Key words : Ultra-high tensile strength steel, High argon welding process, Arc welding, Low-slag, Slag concentrate wire, Slag de-concentrate wire, Corrosion resistance, Corrosion cyclic test, Fatigue strength

1. はじめに

近年、種々の環境問題・規制対応としてCO₂削減が強く求められている。マツダは、CO₂削減を実現しながら、「走る喜び」を実現し、お客様の期待に応えるクルマを提供し続けることを目指す。

環境問題には、走行時及び製造時に使用するエネルギー量の低減が不可欠である。前者は、走行抵抗低減に寄与する「軽量化」が必須となる。また後者は、高強度材料を省エネルギーで加工する技術が必要である。また、多くのユーザーに商品を購入いただくための低コスト化

にも取り組む必要がある。

これらの問題を解決するために、大物板金部品の高強度度及び薄板化を基軸とし、進化の弊害である、高強度化による防錆性能の悪化、また、薄板化（応力増大）による信頼性の悪化を、改善し続ける必要がある。MAG溶接（Metal Active Gas Welding）の進化により、これらを改善するオポチュニティが得られると考える。

2. マツダの防錆思想

2.1 板金部品の発錆メカニズム

足回り部品は高い剛性と過酷な使用環境における耐久

*1,3,4 シャシー開発部
Chassis Development Dept.

*2 技術研究所
Technical Research Center

*5,6 車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.

性確保が必要である。それゆえ、板金部品構造を採用する場合、厚板を連続溶接するのが一般的である。その際、溶接部近傍の発錆の抑制が必要となる。初期に生じた錆は外観を損ない、お客様に部品破損を想起させる。また、錆が進展すると、最終的に板厚減少が生じ、部品機能が劣化させる懸念がある。

錆の発生を抑制する手段として、金属表面に塗装を施し、母材金属と外部からの酸素供給源（水・酸素）との接触を遮断することが効果的であり、自動車用板金部品においてはカチオン電着塗装を施すことが一般的である。しかし、カチオン電着塗装の欠損がある場合、早期に水・酸素が母材金属に到達し、発錆につながる。自動車用足回り板金部品では、エッジ部、溶接ビード近傍のスラグ、スパッタ、酸化被膜が防錆上の弱点となる（Fig. 1）。

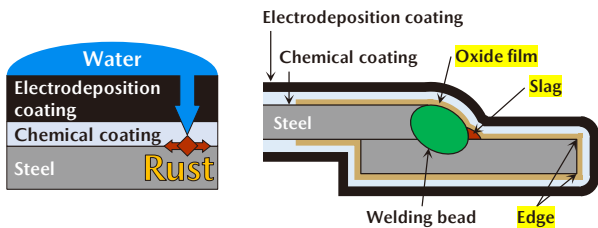


Fig. 1 Rusting Mechanism and Anti-Rust Weak Spots

ここで、錆の進展挙動を「腐食抑制期間」及び「腐食進展速度」の2つの指標で定義する。「腐食抑制期間」は錆が初めて発生するまでの時間、腐食進展速度は腐食面積の増加速度を示す（Fig. 2）。防錆性能向上には「腐食抑制期間の最大化・腐食進展速度の最小化」が必要である。

母材及びワイヤ中の合金成分とシールドガス中の酸素成分が溶接時のアーク直下で反応し、溶接スラグが生じる。スラグはガラス質で導電性が低いため、電着密着性を阻害し、腐食抑制期間を悪化させる。スラグを抑制することで、発錆までの期間を適切に確保できる。

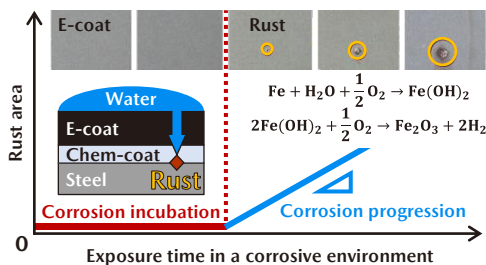


Fig. 2 Rust Growth Behavior

3. 新型ハイアルゴン溶接

3.1 新型ハイアルゴン溶接・スラグ分散ワイヤ開発

既報⁽¹⁾にて、防錆性能向上の重要因子である溶接ビード上のスラグ抑制のメカニズムと、それを実現するハイ

アルゴン溶接（High-Argon Welding Process: 以下HAEW）を提案した。

HAEWは、シールドガス中の不活性ガスであるアルゴンの比率を高く（80→95%）した「ハイアルゴンガス」を用いることで、スラグ発生源となる酸素を減少し、溶接ビード上のスラグ発生量を低減させる。更に、溶接ワイヤへの硫黄（S）添加により、溶融池の対流を制御し、溶接スラグを溶融池後方に位置制御し、最終的に溶接終端のクレータ部にスラグを凝集する。本報では「スラグ凝集ワイヤ」と呼称する。

薄板鋼板の高強度化には、超ハイテン材の適用拡大が効率的である。しかし、超ハイテン材には高強度化のためスラグの原因となる合金成分（Si, Mnなど）が更に添加され、スラグ発生量が大きく増加する。加えて、薄板化により剛性が低下する。従来の厚板構造の場合、施工性や入熱量低減をねらい、断続的な溶接施工が散見されるが、薄板構造では溶接がない不連続部分にて、剛性や強度の低下が生じる。この対策として溶接の連続性を確保するため、溶接長を延長する傾向にある。

HAEWは凝集機構により、スラグを溶接終端まで溶融金属上を移動させるため、凝集可能なスラグ量に制約がある。780MPa級ハイテン材の場合、溶接長200mm程度がスラグ凝集の限界である。

薄板高強度化による軽量化と、それを支える溶接長延長は、スラグ量を増加させる。したがって、剛性と防錆性能の両立には、スラグの無害化が必要である。既報⁽²⁾にて、スラグ微細化によるスラグ表面への電着塗膜付着のメカニズムを報告し、スラグ無害化のためのスラグ微細化の必要性を示した（Fig. 3）。

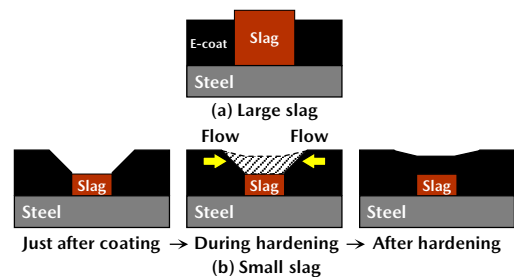


Fig. 3 Behavior of Electrodeposition Coating by Slag Size

本報では、更なる材料の薄板高強度化に対応すべく、新型ハイアルゴン溶接（以下HAEW2）を提案する。

HAEW2の基本コンセプトは、溶接ビード上に生じるスラグの分散・逐次無害化である。薄板高強度化により増大するスラグを、ワイヤ成分により早期に微細化・分散し、ノズル細径化と溶接高速化により溶融池後方を意図的に酸化させることで生じる強固な複合酸化物で微細なスラグを被覆する。加えて、ビード止端部に残留したSi-Mn系スラグをMn-Ti系スラグに改質し、電着密着性

を向上する⁽³⁾。これを実現するワイヤを「スラグ分散ワイヤ」と呼称する (Fig. 4)。

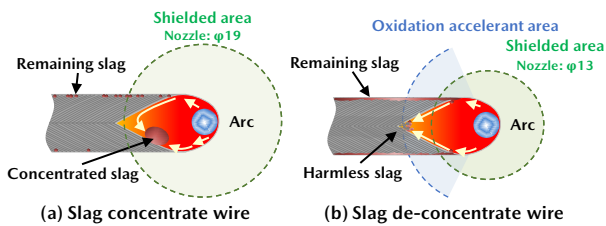


Fig. 4 Approaches from Welding Wire for Slag Reduction

3.2 評価用部品と評価水準

現行量産部品 (フロントロアアーム: 以下 Fr. LCA) を基に、熱延 980 材 (板厚 2.0mm) を適用した技術検証用部品を製作した。薄板化による剛性低下を担保するため複数部品で箱型断面を構成し、HAEW2 で接合した (Fig. 5)。カチオン電着塗装は量産仕様 (ねらい膜厚 35 μm) にて施工した。

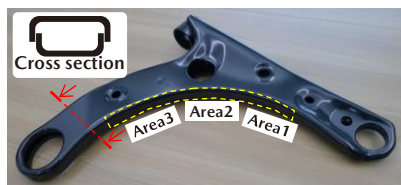


Fig. 5 New Concept Fr. LCA

評価仕様の詳細を Table 1 に、溶接条件を Table 2 に示す。WireA はスラグ分散ワイヤ, WireB はスラグ凝集ワイヤ, WireC は汎用ワイヤ (YGW12 相当) である。これらの仕様にて、防錆性能評価と信頼性評価を実施する。

Table 1 Sample for CCT Evaluation

ID	Base metal (MPa)	Wire type	Weld metal strength (MPa)	Shield gas CO ₂ ratio
#01	980	WireA	780	5%
#02	780	WireA	780	5%
#03	780	WireB	490	5%
#04	590	WireB	490	5%
#05	590	WireC	490	20%

WireA: Slag de-concentrate wire
WireB: Slag concentrate wire
WireC: Conventional wire (YGW12)

Table 2 Welding Conditions for CCT Evaluation

Welding machine/ power source	YASKAWA		
Welding mode	Pulse		
CTWD	15mm		
Torch angle	45°		
Base metal	980/780/590MPa (t: 2mm)		
Wire	WireA Slag	WireB Slag	WireC YGW12
Shield gas	95% Ar- 5% CO ₂		80% Ar- 20% CO ₂
Welding speed	109cm/ min	64cm/ min	

4. 防錆性能評価

Fr. LCA の防錆性能を確認するため、複合サイクル腐食試験 (CCT) を実施した。CCT は乾湿を繰り返し、大気腐食を加速させ、2.1 節で述べた腐食抑制期間と腐食進展速度を評価する。CCT の評価範囲を Fig. 6 に示す。Area1, 2, 3 はいずれも重ねすみ肉溶接の溶接ビードを示す。



Fig. 6 Areas for CCT Evaluation

4.1 試験結果

CCT 前の溶接ビード外観を Fig. 7 に示す。

従来溶接の #05 (590 材・YGW12) は、溶接ビード中央部に溶接スラグが点在し、止端部にも微小なスラグが存在する。対して、HAEW2 群の #01 (980 材・スラグ分散ワイヤ) は、カチオン電着塗装の欠陥が目視できないレベルまで改善した。

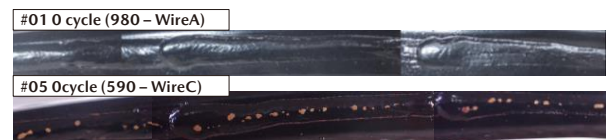


Fig. 7 Bead Appearances Before CCT Evaluation

CCT 結果について、Area1, 2, 3 それぞれの溶接ビードの始末端を基準とし、重ね継手部を全体面積とし、溶接ビード近傍の錆面積の割合を錆面積率と定義した。Fig. 8 に 30 サイクルまでの Area1, 2, 3 平均の錆面積率の変化を、Fig. 9 に、30 サイクル時点の各水準のビード外観を示す。

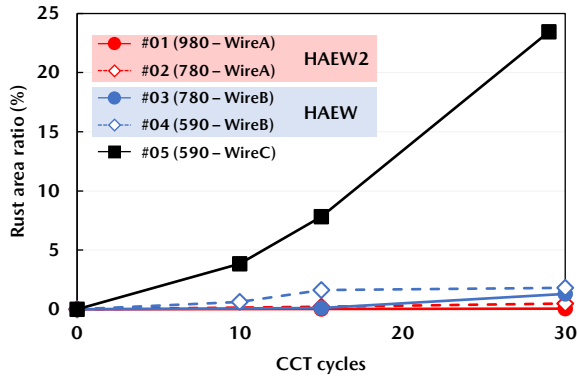


Fig. 8 Rust Area Ratio Trends by Specification

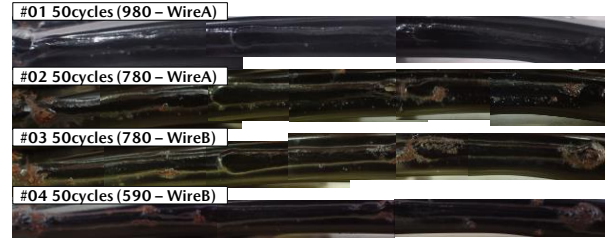


Fig. 11 CCT Tested Bead Appearances (50 Cycles)

#01 (980 材・スラグ分散ワイヤ) は、スラグ分散効果を最大化し、HAEW2 によるスラグ無害化の有用性を明示している。一方で、#02 (780 材・スラグ分散ワイヤ) は、母材成分中のスラグ源 (Si, Mn) は減少しているにもかかわらず、#01 と比較し発錆面積率は高く、30 サイクル時点で、若干の錆が認められた。

これは、スラグ分散効果を発揮する熔融金属及びスラグ成分には最適な範囲があり、適用する鋼板強度低下 (980→780MPa) により、母材由来の合金元素量が低下し、スラグ分散効果に影響を及ぼしたためと考えられる。

更に、溶接スラグを起因とする錆が進展する際、熱影響による酸化被膜の影響を受けていると考えられる。#02 (780 材・スラグ分散ワイヤ) と #03 (780 材・スラグ凝集ワイヤ) を比較すると、#03 の腐食進展速度が大きい。

これは、各溶接ワイヤの特性に合わせた溶接速度の差により生じた、酸化被膜面積の違いによるものとする。酸化被膜により、電着塗装の密着性が阻害され、腐食進展速度が大きくなったと考える。

酸化被膜量は、入熱量に比例し増加し、入熱量 Q は下式の関係で示される。

$$Q = E \cdot I / V \quad [E: \text{電圧 (v)}, I: \text{電流 (A)}, V: \text{溶接速度 (cm/min)}]$$

HAEW2 群の #01, #02 は、スラグ分散効果を発揮するため溶接速度高速化による低入熱施工を採用しており、酸化被膜量が低減されたためと考察する。

5. 信頼性評価

5.1 高強度化による疲労強度への影響

部品には外力により応力が発生する。金属の疲労強度は S-N 線図で示されるように応力に依存する。応力は外力と断面積によって決まるため、軽量化をねらい薄板化すると、応力が増大し疲労強度が低下する。疲労破壊は、金属結晶粒内の微細なき裂が、繰り返し入力によって成長して引き起こされる。よって、高強度化により降伏応力を上げ、き裂の発生を抑制することで疲労強度が向上することが知られている⁽⁴⁾。

しかし、溶接金属の強度不足や、入熱による母材強度低下により、材料を高強度化しても、溶接部は疲労強度が向上しない。よって、スラグ分散ワイヤの高強度化と

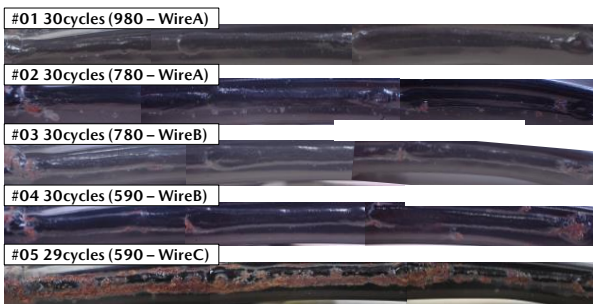


Fig. 9 CCT Tested Bead Appearances (30 Cycles)

従来溶接の #05 に対して、HAEW/HAEW2 群 #01～#04 (5% CO₂ ガス) は、大幅に錆面積を抑制した。HAEW2 群の #01 は 30 サイクル時点での発錆が認められず、HAEW 群の #03, #04 は、溶接終端部に凝集したスラグからの発錆が顕著である。シールドガス中の CO₂ 量の低減で、溶接ビード全体の溶接スラグを減らした効果であると考えられる。

4.2 考察

HAEW/HAEW2 群 #01～#04 の 50 サイクルまでの錆面積率変化を Fig. 10 に、50 サイクル時点の各水準のビード外観を Fig. 11 に示す。いずれも 30 サイクルまでは錆面積率 2%以下と高い防錆性能を示したが、#02～#04 は、30～50 サイクル間で、微小な錆から錆面積が増大した。

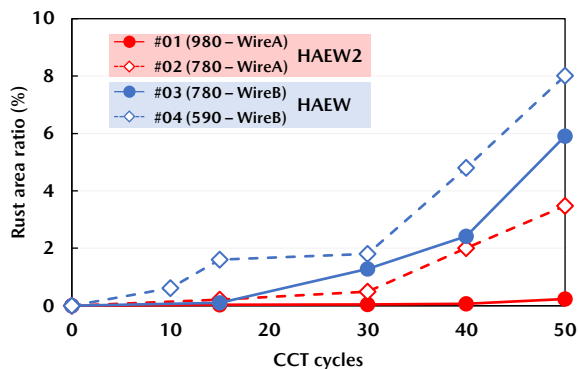


Fig. 10 Rust Area Ratio Trends with HAEW

溶接プロセス改善により、疲労強度向上を図る。本報では、ワイヤの高強度化において生産性が確保しやすい、複合ワイヤ (Flax Cored Wire: FCW) を採用した。

5.2 溶接部の強度向上

最初に、重ねすみ肉溶接継手試験片を用いて、スラグ分散ワイヤ (WireA) を用いた新型ハイアルゴン溶接による硬さ及び強度への影響を調査した。

(1) 硬さ試験条件

溶接金属継手の断面マクロ試験片を採取し、ビッカース硬さ試験を実施した。比較材として、スラグ凝集ワイヤ (WireB) を供試した。硬さ測定位置は、溶接継手のうち疲労強度に影響を与える溶接ビード下側止端部とし、溶接金属部、溶接熱影響部 (Heat Affected Zone: 以下 HAZ)、母材部のそれぞれを測定した。硬さ測定時の荷重は 3 (N) とした。

(2) 硬さ測定結果

ビッカース硬さ試験の結果を Fig. 12 に示す。WireA の適用により溶接金属の硬さは熱延 980 材と同程度まで向上することを確認した。一般に硬さと強度は比例するため、溶接金属部強度が向上したといえる。また、980 材・WireA 試験片は、980 材・WireB 試験片より、HAZ の強度低下が小さい。これは WireA の溶接プロセスは、施工速度が速く入熱量が低減したためと考えられる。

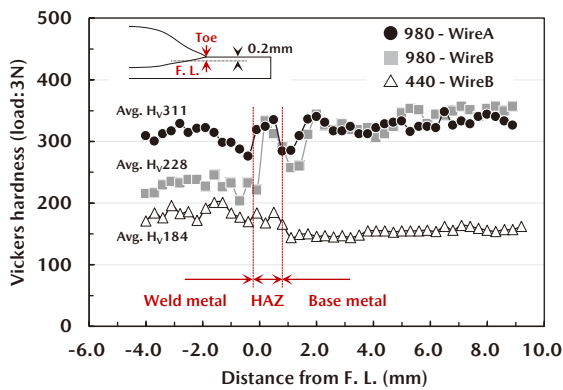


Fig. 12 Vickers Hardness around Lower Side Weld Toe

5.3 溶接部の強度向上による疲労特性への影響

次に、重ねすみ肉溶接継手試験片にて疲労強度への影響を確認した。

(1) 曲げ疲労試験条件

応力比 R=0 の片振りによる平面曲げ疲労試験を実施した。試験条件を Table 3 に、溶接止端部形状の評価指標である止端半径及びフランク角の模式図を Fig. 13 に、断面マクロ写真及び止端形状の測定結果を Table 4 に示す。

Table 3 Plate Bending Fatigue Test Condition

Test temperature	RT	
Stress ratio	$R \doteq 0$ (pulsating fatigue test)	
Frequency	25Hz	
Number of cycles to failure	2×10^6 cycles or 10% less than initial torque	
		Shape of test piece

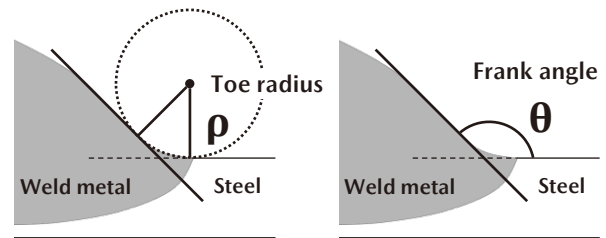


Fig. 13 Schematic Diagram of Toe Shape

Table 4 Cross Section of Rap Fillet Weld Joint

Micro section	Toe radius (mm)	Frank angle (deg.)
	1.1	152
	0.8	149
	1.0	150

(2) 曲げ疲労強度評価結果

疲労試験結果を Fig. 14 に示す。980 材・WireA 試験片は 980 材・WireB 試験片に比べより疲労限度が長寿命側にシフトすることが確認された。これは溶接部の強度向上に加え、止端半径とフランク角の増加によるものと考えられる。

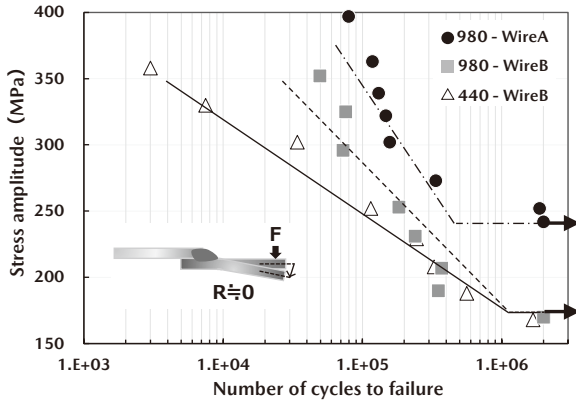


Fig. 14 Fatigue Strength of Rap Fillet Weld Joint

5.4 実部品における溶接部の疲労強度

実部品において、材料強度を効果的に利用するために、連続接合で断面を構成することが望ましい。しかし、生産都合上、板金部品の重ねや突合せ継手接合部において、全ての部位で連続的な溶接施工は困難であり、溶接の不連続部は避けられない。不連続となる溶接始末端部は、ビード形状・入熱量が連続溶接部と異なり、疲労強度に差があると予測される。そこで、Fr. LCAに熱延980材を適用し、解析と実部品にて溶接始末端部の疲労強度を検証した。

(1) 解析結果

有限要素法 (Finite Element Method : FEM) を用いて、溶接部応力を予測した結果を Fig. 15 に示す。最大応力が発生するのは連続溶接部 A、次点は溶接終端部 B であった。

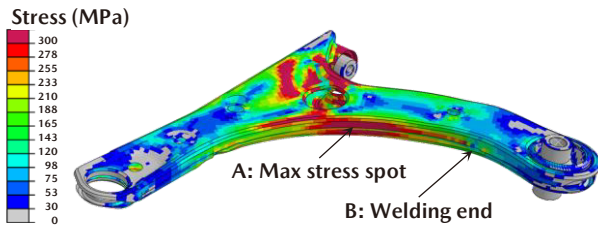


Fig. 15 Stress Distribution Diagram by FEM

(2) 実部品評価結果

疲労試験後、浸透探傷検査によりき裂を顕在化させた外観を Fig. 16 に示す。最も早くき裂が発生したのは B 部であり、発生位置は重ねすみ肉溶接継手の下板側溶接終端部であった。その後、き裂部を補強し追試験を実施したが、き裂が生じるのはいずれも溶接始末端部であり、連続溶接部ではき裂が発生しなかった。

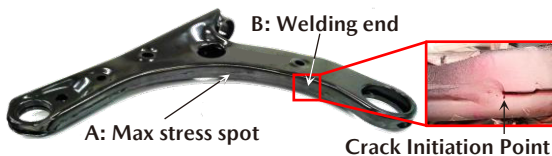


Fig. 16 Crack Initiation Point in Fatigue Test

これは連続溶接部と溶接始末端部で、フランク角や止端半径といったビード形状による応力集中、入熱による残留応力、溶接部の強度が異なるためと推測されるが、それぞれの寄与度を明確にすることは難しく今後の課題である。一方、別のアプローチとして、連続溶接長の延長により、実部品の発生応力を低減すると同時に溶接の不連続部を減らし、弱点となる溶接始末端部数を削減することは、溶接部の疲労強度向上を図る有効な手段と考える。

6. おわりに

鋼板部品の発錆原因の一つである、「溶接スラグ」を極小化するハイアルゴン溶接を進化し、980MPa 級高強度材に対応する新プロセスを開発、その開発の過程で以下の知見を得た。

- (1) 「スラグ分散ワイヤ」を用いた新型ハイアルゴン溶接は、合金成分が増大する高強度材 (980MPa) を用いた部品に対して、溶接スラグを分散・逐次無害化することで、防錆性能を大幅に改善できることを確認した。
- (2) 薄板・高強度材を用いる場合、応力が増加し、接合部が弱点となるため、信頼性確保には溶接ワイヤの高強度化が有効である。一方で、溶接ワイヤの高強度化は材料の合金成分の増加を伴い、防錆性能が低下する。強度と防錆性能の両立に、新型ハイアルゴン溶接プロセスが有効である。
- (3) 新型ハイアルゴン溶接は、スラグ無害化を効果的に行うため、溶接速度を従来プロセスの約2倍とした。この入熱量低減により、熱影響による酸化被膜が抑制され、腐食進展領域の発錆拡大が緩和されると同時に、母材 HAZ 部の強度低下を抑制したと推測する。

一方、今後の課題として以下の検討が必要である。

- (1) 溶接ビード近傍の酸化被膜により、微小スラグを起点とした初期錆は、進展挙動が大きく変化する。溶接プロセスでの酸化被膜抑制及び、カチオン電着工程での無害化の検討が不可欠である。
- (2) 溶接はアークによる入熱により、金属の相変態を連続的に生じさせる。本報の対象部品は比較的単純な構造であるが、複雑構造の部品の場合、同じ位置に複数回の入熱が付加されることで、金属組織、酸化被膜の状況が変化する。更には、入熱による残留応力も複雑に影響する。信頼性の向上、更なる軽量化を実現するために、これらを考慮した構造設計技術の進化を目指す。

最後に、本研究開発を進めるにあたり多大なご協力をいただいた(株)神戸製鋼所様、(株)ヨロズ様の皆様に深くお礼申し上げます。

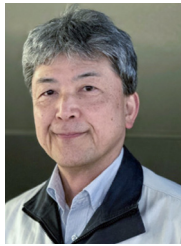
参考文献

- (1) 田中・斉藤・深堀ほか：ハイアルゴン溶接の技術開発，[マツダ技報，No. 34，pp.122-127 \(2017\)](#)
- (2) 田中・家永・浅田ほか：次世代足廻り部品向け防錆技術開発，[マツダ技報，No. 35，pp. 26-31 \(2018\)](#)
- (3) 古川・井海：超ハイテン鋼板向け電着塗装性向上溶接プロセス，R&D 神戸製鋼技報，No. 73-2，pp. 252-258 (2024)
- (4) 石上ほか：疲労破壊のプロセスと疲労強度向上手法，圧力技術，No. 38-4，pp. 9-19 (2000)

■著者■



田中正顕



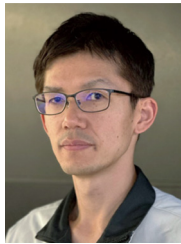
深堀 貢



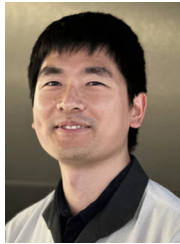
大谷 隆広



渡邊 海香



木村 大樹



石田 広志