

# 自動車のシャシー，トラックフレーム用途の 熱延超ハイテンとその利用技術

## Ultra-High Strength Hot-Rolled Steel Sheets for Automotive Chassis and Truck Frame Applications and its Utilization Technologies

後藤 聡太 GOTO Sota JFE スチール スチール研究所 薄板研究部 グループリーダー・博士 (工学)  
小西 恭平 KONISHI Kyohei JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員・博士 (工学)  
山口 尚記 YAMAGUCHI Naoki JFE スチール スチール研究所 薄板加工技術研究部 主任研究員・博士 (工学)

### 要旨

JFE スチールでは、靱性、打抜き加工性および曲げ性に優れた 980-1 180 MPa 級の熱延超ハイテンを開発した。これらのハイテン材は、特にシャシー部品に適用可能であり、部品の薄肉化によって運動性能や燃費の向上、CO<sub>2</sub> 排出削減に寄与することが期待される。材料開発と同時に、利用技術開発にも取り組み、従来のアーク溶接に比べて溶接継手の疲労強度ならびに耐食性を向上させることが可能な低 CO<sub>2</sub> ガスシールドアーク溶接および J-SKY MIG<sup>®</sup> 溶接を開発した。さらに、マイクロニードルピーニング (MNP) 法を開発し、アーク溶接継手の疲労強度を母材と同等に向上させることに成功した。これにより、自動車部品の耐久性と軽量化を両立させる新たな技術が実現し、今後の自動車産業における重要な進展が期待される。本稿では、これらの技術の詳細とその実用性について述べる。

### Abstract:

JFE Steel has developed hot-rolled ultra-high strength steel with tensile strengths of 980 and 1 180 MPa, offering superior toughness, punchability, and bendability. This development contributes to the lightweighting of automobiles. These high-tensile materials are ideal for chassis components, and thinner parts are expected to improve driving performance and fuel efficiency. Utilization technologies are also being developed, including low-CO<sub>2</sub> gas-shielded arc welding and J-SKY MIG<sup>TM</sup> welding, which improve the fatigue strength and corrosion resistance of welded joints compared to conventional methods. Furthermore, JFE Steel has developed a micro-needle peening technique that enhances the fatigue strength of welded joints to a level comparable to the base material. These technologies achieve both durability and lightweighting for automotive components, promising significant advancements in the automotive industry. This paper discusses the details and practical applications of these innovations.

## 1. はじめに

自動車産業では、車体の軽量化と高強度化が求められている。特に、近年の電動化の進展により、車両の重量は増加し、軽量化が重要な課題となっている。高張力鋼板（以下、ハイテン）を使用することで、部品を薄肉化でき、車両の運動性能や燃費が向上し、CO<sub>2</sub> 排出削減が実現できる。また、ハイテン材を用いることで、同じ重量でも部品強度が上昇する。トラック分野でも、衝突に関する法規制が強化され、ハイテン材の利点が増している。さらに、ハイテン材を用いてフレームを軽量化すれば、最大積載量が増加し、輸送コストを低減できる。

現在、シャシー部品では主に引張強さ 440-590 MPa 級の熱延鋼板が使用されているが、980 MPa 級を超える超ハイ

テンへのニーズが高まっている。自動車部品のなかでも、サスペンションアームやフレームなどのシャシー部品は、自動車の基本機能を支える重要な部品である。そのため、衝撃負荷時の脆性破壊や繰り返し負荷時の疲労破壊に対する信頼性が要求されるが、鋼板の強度が上がるにつれて靱性は低下する。また、自動車部品で多用される打抜き・せん断加工では、加工条件が適正でないと加工端面に欠けを生じる。鋼板の強度が上がるほど、欠けによって疲労強度が低下しやすくなるので、加工端面に欠けを生じにくい鋼板が求められる。

シャシー部品の製造にはガスシールドアーク溶接が用いられる。一般に、溶接部は止端部での応力集中が大きく、かつ引張残留応力が存在するため、ハイテン材を用いても、溶接継手の疲労強度はほとんど上昇しない<sup>1)</sup>。特に薄鋼板の重ね隅肉溶接継手では形状的応力集中が高いためその傾向が強<sup>2,3)</sup>、シャシー部品へのハイテンの適用拡大にあ

2025 年 9 月 22 日受付

たっては、溶接部の疲労強度の確保が課題である。また、シャシー部品は走行中に路面からの水分飛散を受け錆が発生しやすい環境に曝されるため、耐久性という観点では耐食性（防錆性）も重要となる。シャシー部品は耐食性の保証のために塗装が施されるが、アーク溶接部は溶接ビード表面に付着する酸化物（溶接スラグ）などによって塗装性が低下し、結果として継手の耐食性を低下させることが問題となる。

このような背景を踏まえ、JFE スチールでは、独自の鋼板マイクロ組織制御技術を駆使して、韌性、打抜き加工性、曲げ性に優れた 980-1 180 MPa 級の熱延超ハイテンを開発している。さらに、それらの鋼板の利用技術として、溶接スラグ低減を目的としたアーク溶接技術と、溶接部疲労強度向上を目的とした溶接ビード止端部へのピーニング技術を開発した。本稿では、これらの技術の詳細とその実用性について紹介する。

## 2. シャシー用熱延超ハイテンの開発

### 2.1 材料設計コンセプト

シャシー部品はバーリング加工部や伸びフランジ成形部を多く含むため、優れた穴広げ性を示す鋼板マイクロ組織を選択する必要がある。Hasegawa ら<sup>4)</sup>は、Dual Phase 鋼において、フェライトとマルテンサイトの硬度差が大きいほど、界面でのポイド発生・成長が促進され、穴広げ性が低下することを示した。したがって、組織間の硬度差を小さくすることが穴広げ性向上に効果的と考えられ、均一な微視的硬さ分布を持つマイクロ組織鋼を志向した。微視的硬さ分布が均一であることは曲げ性向上にも有利に働く。

次に強化機構が異なる単相組織鋼を準備し、耐衝撃特性を評価した。引張強さが 980 MPa 級となるように合金成分と巻取温度を調整し、転位強化を主とするベイナイト組織鋼と、析出物分散強化を主とするフェライト組織鋼を作製した。ともに炭素量 0.1 mass% 以下の低炭素鋼である。これら 2 鋼種についてシャルピー衝撃試験を行い、延性脆性遷移温

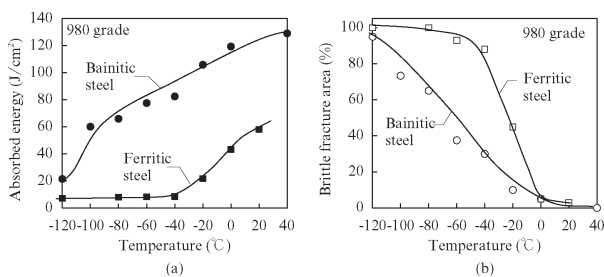


図1 ベイナイト鋼とフェライト鋼のシャルピー衝撃特性  
(a) エネルギー遷移曲線 (b) 破面遷移曲線

Fig. 1 Charpy impact test result in bainitic steel and ferritic steel (980 MPa-grade)  
(a) Energy transition curves and (b) ductile-brittle transition curves

度 (DBTT) を比較した。試験片は 10 mm×55 mm×2.9 mm t のサイズとし、圧延方向がき裂伝播方向となるように、深さ 2 mm の V ノッチを機械加工で導入した。

図1にシャルピー遷移曲線を示す。破面遷移曲線から、フェライト鋼の DBTT は -20℃ であるのに対し、ベイナイト鋼の DBTT は -60℃ であり、ベイナイト鋼の方が耐衝撃特性に優れることがわかった。

次に、打抜き穴を加工した際の端面性状を調べた。打抜き穴は直径 10 mm のポンチで打抜き、ポンチとダイスの対板厚比クリアランスは 10% と 20% に設定した。図2に打抜き端面の外観を示す。ベイナイト鋼では平滑な打抜き端面が形成されるのに対し、フェライト鋼ではクリアランスが 20% のときに打抜き端面に脆性破壊によって生じる割れや欠け<sup>5)</sup>が認められる。ベイナイト鋼で平滑で割れない打抜き端面が得られるのは、その優れた韌性のためと考えられる。

### 2.2 熱延超ハイテンの製造技術と適用事例

上記の結果、ベイナイト組織を主体とした材料開発を進めた。ベイナイト組織鋼板を製造するには、ランナウトテーブル上で 400~500℃ まで冷却する必要がある (図3)。この温度域は遷移沸騰域と呼ばれ、冷却停止温度が不安定になりやすく<sup>6)</sup>、材質制御が困難となるため、全温度域で核沸騰状態を維持できる冷却技術を自社開発し、これを活用し 980 MPa 級ベイナイト鋼板を開発した。また、この技術は急速冷却を実現できるため、マルテンサイト変態温度への焼

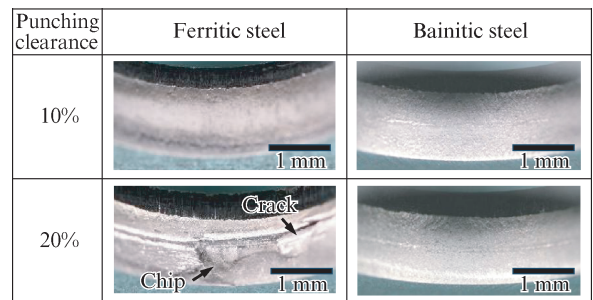


図2 打抜き端面性状の比較 (板厚: 2.9 mm)

Fig. 2 Appearance of punching shear edge (thickness: 2.9 mm)

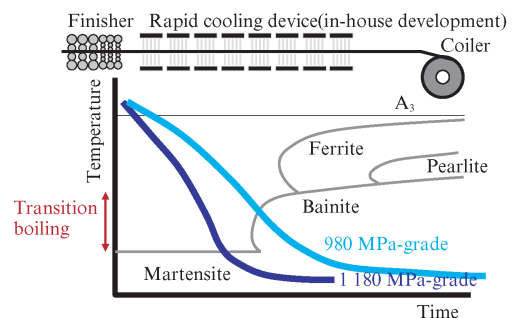


図3 980-1 180 MPa 熱延超ハイテンのランナウト温度履歴  
Fig. 3 Cooling process on run-out table for hot-rolled 980-1 180 MPa ultra-high strength steel (schematic image)

表 1 熱延超ハイテンの代表特性と実車適用事例

Table 1 Representative mechanical properties and applications of hot-rolled ultra-high strength steel

| Steel       | t (mm) | YS (MPa) | TS (MPa) | El (%) | $\lambda$ (%) | R/t | Car chassis<br>(arms, members) | Truck chassis<br>(cross members, underrun protectors) |
|-------------|--------|----------|----------|--------|---------------|-----|--------------------------------|---|
| JFE-HA780SB | 2.9    | 710      | 810      | 17     | 70            | 0.5 | Mass production                | Mass production                                       |
| JFE-HA980R  | 3.2    | 900      | 1 010    | 12     | 50            | 1.4 | Mass production                | Mass production                                       |
| JFE-HA980SB | 2.9    | 860      | 1 010    | 12     | 60            | 1.4 | Mass production                | Mass production                                       |
| 1180        | 2.9    | 1 040    | 1 220    | 9      | 35            | 2.4 | -                              | Development   |

t: thickness, YS: yield strength, TS: tensile strength, El: elongation,  $\lambda$ : hole expansion ratio, R/t: 90°-V-bendability (R: minimum bend radius)

入れが可能である。これにより、980 MPa 級から合金元素をほとんど増加させずに、引張強さを 1 180 MPa 級まで高められる。表 1 に、開発鋼の代表特性と実車への適用部品を示す。

### 3. シャシー向けアーク溶接技術の開発

#### 3.1 ハイテン材を用いたシャシー部品の溶接課題

前述したように、シャシー部品は耐久性および剛性の確保が重要とされ、溶接継手に対する要求特性として耐食性や疲労強度が挙げられる。JFE スチールでは、特殊な溶接設備や溶接材料を用いることなくこれらの継手特性を向上させる溶接技術を開発しており<sup>7)</sup>、ここでは低 CO<sub>2</sub> ガスシールドアーク溶接および J-SKY MIG<sup>®</sup> 溶接を紹介する。

#### 3.2 低 CO<sub>2</sub> ガスシールドアーク溶接による疲労特性向上効果

継手の疲労強度は溶接ビード止端部の応力集中により低下する。これに対して、活性ガス (CO<sub>2</sub>) の混合比率を 5% に低減した低 CO<sub>2</sub> ガスシールドアーク溶接を開発した<sup>8-10)</sup>。

図 4 に、100% CO<sub>2</sub> ガスを使用した場合と、CO<sub>2</sub> 比率を 5% に低減した Ar-5% CO<sub>2</sub> 混合ガスを使用した場合の溶接継手の断面マクロ組織を示す<sup>11)</sup>。溶接止端部形状に着目すると、Ar-5% CO<sub>2</sub> ではビード幅と止端半径が増大し、応力集中係数  $K_t$  値は小さくなる。CO<sub>2</sub> ガスは比熱が大きく、熱的ピンチ効果によってアークの緊縮を促すことが知られている<sup>12, 13)</sup>。Ar-5% CO<sub>2</sub> 混合ガスでは、CO<sub>2</sub> 比率が低く、アークの緊縮効果が弱まることで、止端形状が平滑化するものと考えられる。

溶接金属の硬さに着目すると、Ar-5% CO<sub>2</sub> 継手で溶接金属の硬さ HV<sub>w</sub> が増加する傾向にある。これは、シールドガス中の CO<sub>2</sub> 比率が低い Ar-5% CO<sub>2</sub> では溶接時の酸化スラグ生成が抑制され<sup>14)</sup>、その結果、合金元素が溶接金属中に維持されやすくなったためであると考えられる。

各溶接継手の平面曲げ疲労試験結果を図 5 に示す<sup>11)</sup>。図中のプロットはすべて完全片振りでの疲労試験結果である。100% CO<sub>2</sub> 継手に比べ、溶接止端部が平滑化 ( $K_t$  値が低減) された Ar-5% CO<sub>2</sub> 継手では疲労寿命・疲労強度ともに大幅

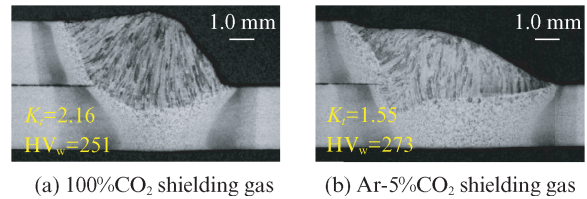


図 4 溶接部の断面マクロ組織  
Fig. 4 Cross-sectional macrostructures of weld

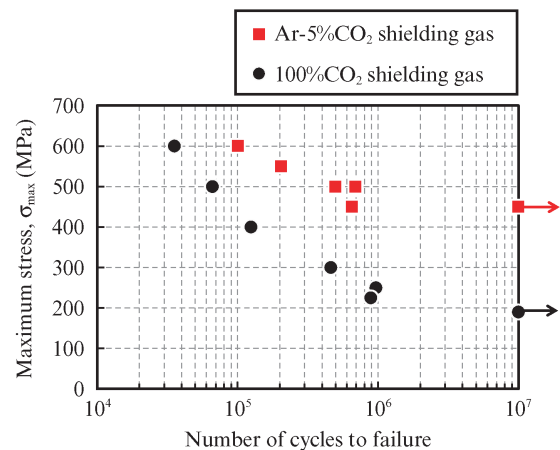


図 5 溶接継手の平面曲げ疲労試験結果 (S-N 線図)  
Fig. 5 Result of fatigue test of weld joint

に上昇している。

#### 3.3 溶接スラグ生成の極少化に貢献する J-SKY MIG<sup>®</sup> 溶接

溶接継手の耐食性低下の主な要因は、酸化物である溶接スラグの生成・付着である。スラグを低減するためには、酸化反応の抑制、つまり CO<sub>2</sub> ガス比率の減少が有効であり、その効果はシールドガスに CO<sub>2</sub> ガスを含まない純 Ar ガスを用いる MIG 溶接で最大となる。しかし、通常 CO<sub>2</sub> ガス比率が 5% より少なくなると、アークのふらつきや溶滴移行の不安定化が生じ、溶接ビードの蛇行や波打ちが発生する。この挙動を解消すべく、高電流パルス制御を活用した MIG 溶接技術 (J-SKY MIG) を開発した<sup>15, 16)</sup>。

従来の定電流 MIG 溶接ではワイヤ端からの溶滴の離脱に

作用する電磁ピンチ力が不十分で、溶滴移行が不安定になることに着目し、J-SKY MIG 溶接では、高電流パルスを活用して、**図6**のように溶滴移行を周期的な短絡移行に制御した<sup>16)</sup>。**図7**に溶滴移行挙動の撮影画像を示す<sup>15)</sup>。従来のMIG 溶接では連続的に液柱が発生し不規則な溶滴移行が生じる。J-SKY MIG 溶接では、ベース期間ではワイヤの溶融領域がワイヤ端に限定され、溶滴の安定成長・サイズ一定化が起こる。そしてピーク期間では、高電流パルスにより誘起された高速のプラズマ気流によってワイヤ端の溶滴が溶融池へと押し下げられ、1回のパルス電流に対して1回の短絡が生じるようになり、周期的で安定した短絡移行が実現

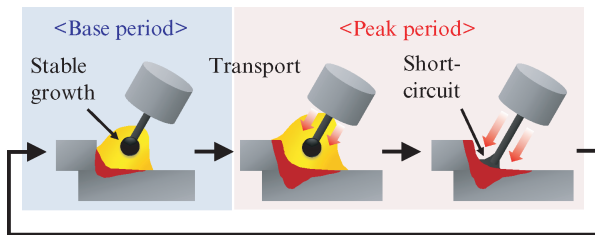


図6 高電流パルスによる短絡移行制御コンセプト  
Fig. 6 Concept of short-circuit transfer control

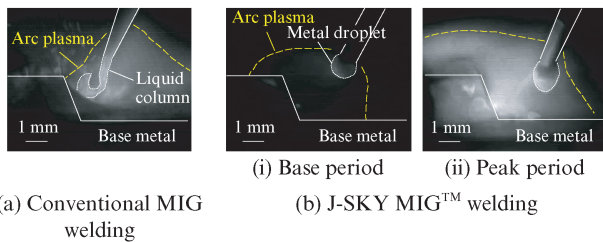


図7 溶滴移行挙動の撮影画像

Fig. 7 Photographs of metal transfer behaviors

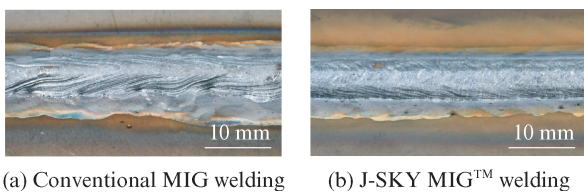


図8 溶接ビード外観画像

Fig. 8 Photographs of weld bead appearance

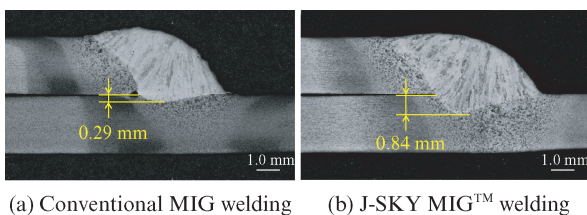


図9 溶接部の断面マクロ組織

Fig. 9 Cross-sectional macrostructures of weld

する。

**図8**に溶接ビード外観画像を示す。J-SKY MIG 溶接では、均一な溶接ビードを有する継手が得られている。また、純Arガスによって溶接スラグ(酸化物)の生成が抑制されており、溶接スラグの付着が極めて少ない。これにより、溶接継手の耐食性が向上すると考えられる。

**図9**に従来のMIG 溶接とJ-SKY MIG 溶接の断面マクロ組織を示す<sup>16)</sup>。一般に、純Arガスを用いたMIG 溶接では、アークの広がりが大きく入熱が分散しやすいことにより溶込み深さが得られにくいことが課題となるが、従来のMIG 溶接の溶込み深さ0.29 mmに対して、J-SKY MIG 溶接の溶込み深さは0.84 mmと約2.9倍に増加する。これは、ピーク期間の高電流パルスによってアークが高温化し、母材への入熱が増大するためと考えられる。

#### 4. アーク溶接部の疲労強度向上技術

##### 4.1 マイクロニードルピーニングによる溶接強度向上

自動車向けのアーク溶接部の疲労強度向上技術として、Fujimotoら<sup>17)</sup>はショットピーニング法によって1.5 GPa級鋼板のアーク溶接継手の疲労強度を向上させる方法を示した。この方法では、ショット材を投射して材料表面を塑性変形させ、圧縮残留応力と加工硬化層を導入して疲労強度を向上させる。しかし、ショット材の飛散防止措置や、次工程への残存防止措置が必要であることから実用化が進んでいない。一方、橋梁等の分野では、溶接止端部をピンで打撃するニードルピーニング法が知られている<sup>18)</sup>。この方法では、圧縮残留応力と加工硬化に加えて、大きな曲率半径のピン形状を止端部に転写することで止端部半径を拡大(応力集中を緩和)できる。

JFE スチールでは、ニードルピーニングをスケールダウンし、自動車生産ラインに適するように改良したマイクロニードルピーニング(MNP)法を開発した<sup>19)</sup>。MNP法では、打撃部に導入される圧縮残留応力と加工硬化層により、ショットピーニングと同等の疲労強度向上効果が得られる<sup>20,21)</sup>。

**図10**に工具と処理の様子を示す。ここでは先端径約0.2 mmの打撃ピンを有する電動マーキングペンを使用した。この工法は、工具と対象物の接触面積が小さいため、ロ

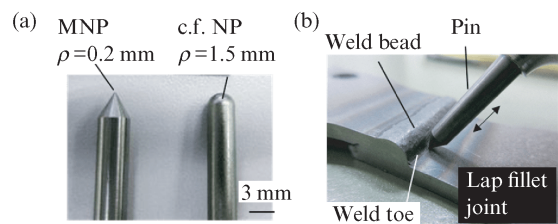


図10 マイクロニードルピーニング(MNP)法<sup>19)</sup>

Fig. 10 Micro needle peening (MNP)<sup>19)</sup>

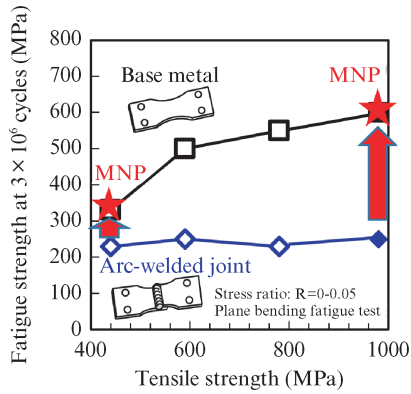


図 11 MNP によるアーク溶接継手疲労強度の向上<sup>19,22,23)</sup>

Fig. 11 Improvement in fatigue strength of arc-welded joint<sup>19,22,23)</sup> (revised)

ポットでハンドリングでき、ショットピーニングや従来のニードルピーニングと比べて生産性の向上を図れる。また、局所的な加工が可能であるため、部品の変形を最小限に抑えられる。

図 11 に、重ね隅肉溶接継手における MNP 法による疲労強度向上の効果を示す。アーク溶接のシールドガスは Ar-20% CO<sub>2</sub> である。MNP 処理をしない場合は、母材強度が向上しても溶接継手の疲労強度は向上しないが、MNP 処理によって疲労強度は大きく向上し、母材同等の疲労強度が得られるようになる。

## 4.2 自動処理システムの開発

生産性向上のため MNP 法の自動化を検討した。一般的なエア式のニードルピーニングでは処理時の衝撃荷重が数 kN に及ぶので（代表値として 4 kN<sup>20)</sup>、剛性の高い大型の装置を製作する必要がある。一方、MNP の衝撃荷重は約 200 N である<sup>20)</sup> ことから、ロボットアームなどの比較的剛性が低い機械に搭載可能である。図 12 に試作した MNP の自動処理装置を示す。処理ステップは①形状測定機で溶接ビードの形状測定、②溶接止端部の座標を解析し、ロボット動作プログラム作成、③MNP 処理、の 3 段階からなる。このシステムにより、再現性よく正確に打痕を配置できるように

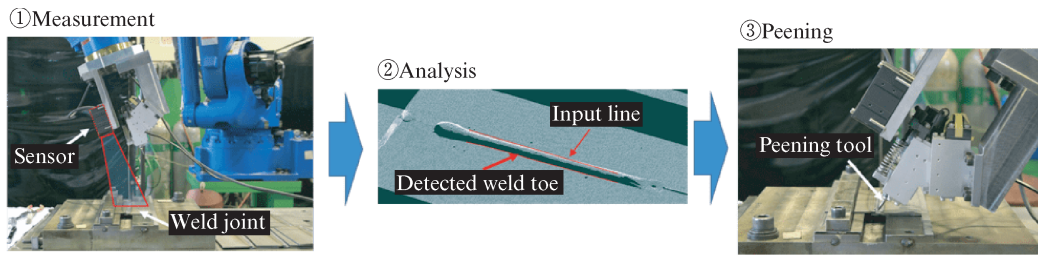


図 12 形状測定機と止端部検出ソフトを組み込んだ自動処理システム<sup>19)</sup>

Fig. 12 Automated processing system incorporating shape measurement device and weld toe detection software<sup>19)</sup>

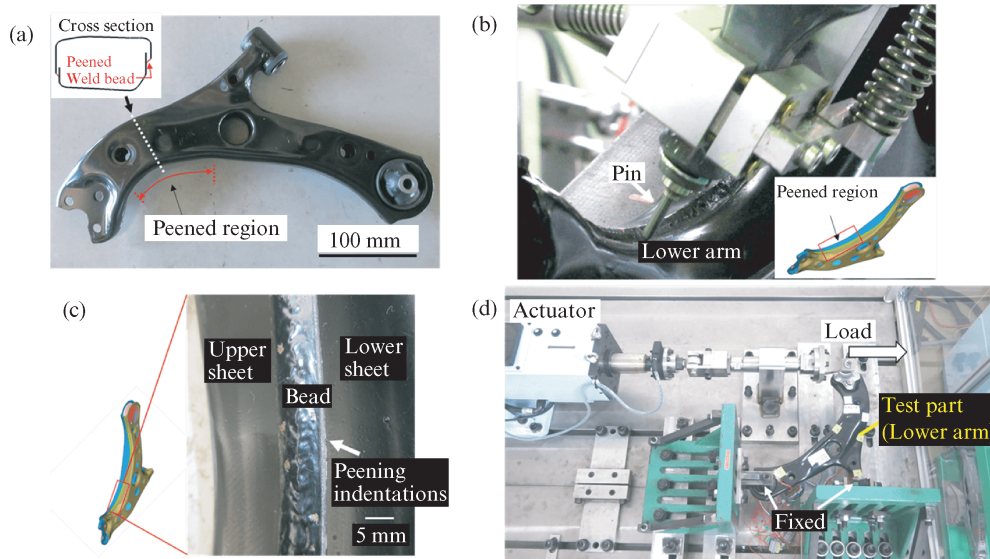


図 13 実部品での効果検証試験

(a) ロアアーム (b) 処理の様子 (c) ピーニング後の溶接ビード (d) 疲労試験<sup>19)</sup>

Fig. 13 Application test to actual part

(a) Lower arm (b) Appearance of peening operation (c) Weld bead after peening (d) Fatigue test<sup>19)</sup>

なった。多様な打撃パターンで処理し、ロバスト性の検証を行った結果、止端部に残存スラグを破壊し金属光沢が露出すれば、概ね疲労強度向上効果が飽和することがわかった<sup>19)</sup>。

### 4.3 実部品での疲労向上

試作した自動処理システムを用いて市販の実部品（ロアアーム）を対象にMNP処理を行い、疲労試験を実施して効果を検証した。図13に試験の概略図を示す。湾曲した溶接ビードの止端部に対してMNP処理を行い、その後疲労試験を行った。入力荷重は応力範囲10.5 kN、応力比-0.5とし、繰り返し周波数は1 Hzとした。疲労試験の結果、受け入れままの部品は $3 \times 10^5$  サイクルで破壊したが、MNP処理した部品は $1 \times 10^6$  サイクル負荷後も疲労き裂は認められず、MNP処理の自動車足回り部品の疲労寿命向上効果が確認された。

## 5. おわりに

本稿では、自動車シャシー部品における高強度薄肉化の実現に向けた熱延超ハイテンの開発と、それらをシャシー部品に適用するための溶接技術および溶接部疲労強度向上技術について述べた。特に、980 MPa級から1180 MPa級の鋼板を対象に、靱性や加工性を考慮したマイクロ組織の制御技術を駆使し、優れた特性を持つ鋼板の開発に成功した。また、低CO<sub>2</sub>ガスシールドアーク溶接技術やJ-SKY MIG®溶接技術を導入することで、溶接部の疲労強度や耐食性の向上を図り、シャシー部品の信頼性を高めることができた。さらに溶接部疲労強度を飛躍的に向上させるマイクロニードルピーニング技術の開発にも成功した。

これらの技術は、実際の自動車部品への適用が検討されており、一部は実用化もされている。JFEスチールは、引き続きお客様との協業を深め、革新的なソリューションを提供することで、持続可能な自動車産業の発展に貢献していくことを目指していく。

### 参考文献

- 1) 一般社団法人溶接学会 溶接疲労強度研究委員会 編. 溶接構造の疲労. 産報出版. 2015, 285p (p. 81).
- 2) 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. 2000, vol. 86, no. 5, p. 336-342.
- 3) 山口尚記, 塩崎毅, 玉井良清, 市川裕士, 小川和洋. 溶接止端部の応力集中と金属組織が超高張力鋼板アーク溶接継手の疲労強度に及ぼす影響. 材料. 2025, vol. 71, no. 12, p. 779-786.
- 4) Hasegawa, K.; Kawamura, K.; Urabe, T.; Hosoya, Y. Effect of microstructure of stretch-flange-formability of 980 MPa grade cold-rolled ultra high strength steel sheets. ISIJ Int. 2004, vol. 44, no. 3, p. 603-609.
- 5) Goto, S.; Yamazaki, K.; Doan T.H.; Funakawa, Y.; Umezawa, O. Modeling of surface crack defects developed on shear edge in high-strength automotive steel sheets. ISIJ Int. 2020, vol. 60, no. 1, p. 143-152.
- 6) 福田啓之, 上岡悟史, 中田直樹. スケール厚さがスプレー冷却特性に及ぼす影響. JFE 技報. 2018, no. 42, p. 34-39.
- 7) 木谷靖, 松田広志, 松下宗生, 山本俊佑, 安藤聡, 池田倫正. 自動車シャシー用溶接技術の開発. JFE 技報. 2018, no. 41, p. 55-61.
- 8) 片岡時彦, 池田倫正, 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. 溶接学会全国大会講演概要. 2014, no. 95, p. 50-51.
- 9) 山本俊佑, 鈴木幸子, 安藤聡, 池田倫正, 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). 接学会全国大会講演概要. 2015, no. 97, p. 304-305.
- 10) 池田倫正, 山本俊佑, 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3報). 接学会全国大会講演概要. 2015, no. 97, p. 306-307.
- 11) 澤西央海, 松田広志, 田川哲哉, 池田倫正, 堤成一郎. 高強度薄鋼板GMA溶接重ね隅肉継手の疲労特性に及ぼす溶接止端部形状および溶接金属硬さの影響. 溶接学会論文集. 2020, vol. 38, no. 4, p. 448-457.
- 12) 田中学, 田代真一. 溶接アークの熱的ピンチ効果に関する一考察. 溶接学会論文集. 2007, vol. 25, no. 2, p. 336-342.
- 13) Shigeta, M.; Nakanishi, S.; Murphy, A. B. Analysis of dynamic plasma behaviours in gas metal arc welding by imaging spectroscopy. Welding International. 2017, vol. 31, no. 9, p. 669-680.
- 14) 山本俊佑, 鈴木幸子, 安藤聡, 池田倫正, 片岡時彦. 自動車部材アーク溶接部の腐食挙動と耐食性向上. 溶接学会論文集. 2018, vol. 36, no. 1, p. 77-85.
- 15) 小西恭平, 松田広志, 澤西央海, 伊木聡. 炭素鋼を対象としたパルスMIG溶接における短絡移行の安定化. 溶接学会全国大会講演概要. 2022, no. 111, p. 32-33.
- 16) 小西恭平, 澤西央海, 松田広志, 伊木聡. 高強度鋼板のスラグ低減アーク溶接技術の開発. 溶接技術. 2023, vol. 71, no. 2, p. 45-50.
- 17) Fujimoto, H.; Akioka, K.; Tokunaga, M. Effects of shot blasting on corrosion properties after electrodeposition and fatigue properties of arc welds in automotive steel sheets. Mater. Trans. 2017, vol. 58, no. 12, p. 1715-1720.
- 18) 森影康, 半田恒久, 田川哲哉, 池田倫正. ハンマーピーニング施工による溶接継手の疲労寿命向上機構. 溶接学会論文集. 2019, vol. 37, no. 1, p. 17-23.
- 19) 山口尚記, 塩崎毅, 玉井良清. マイクロニードルピーニング法による足回り部品アーク溶接部の疲労強度向上. 自動車技術会論文集. 2021, vol. 52, no. 2, p. 511-516.
- 20) Yamaguchi, N.; Shiozaki, T.; Tamai, Y. Micro-needle peening method to improve fatigue strength of arc-welded ultra-high strength steel joints. J. Mater. Process. Technol. 2021, vol. 288, 116894.
- 21) Yamaguchi, N.; Nishiyama, T.; Shiozaki, T.; Tamai, Y.; Ichikawa, Y.; Ogawa, K. Nanotwinning grain refinement induced by micro-needle peening in arc-welded ultra-high strength steel sheet. Materialia. 2024, vol. 38, p. 102231.
- 22) 橋本勝太, 小川和洋, 中川大隆, 吉武明英, 樺沢真事. 熱延高張力鋼板重ね隅肉溶接継手の疲労特性. 溶接学会全国大会講演概要. 1994, no. 55, p. 402.
- 23) Shiozaki, T.; Yamaguchi, N.; Tamai, Y.; Hiramoto, J.; Ogawa, K. Effect of weld toe geometry on fatigue life of lap fillet welded ultra-high strength steel joints. Int. J. Fatigue. 2018, vol. 116, p. 409-420.