

# JFE スチールの特徴的な自動車用鋼板とその利用技術

## Steel Sheets for Automobiles and its Application Technologies

玉井 良清 TAMAI Yoshikiyo JFE スチール スチール研究所 主席研究員・博士（工学）  
 高木 周作 TAKAGI Shusaku JFE スチール スチール研究所 薄板研究部長・博士（工学）  
 塩崎 毅 SHIOZAKI Tsuyoshi JFE スチール スチール研究所 薄板加工技術研究部長・博士（工学）  
 植田 圭治 UEDA Keiji JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部長・博士（工学）

### 要旨

JFE スチールでは、高性能な高強度鋼板（ハイテン）を開発するとともに、ハイテンの性能を最大限に引き出すための車体構造設計や自動車部品のプレス加工・溶接方法などの利用技術を開発している。材料と利用技術を組み合わせた総合的なソリューションをお客様に提供することにより、車体の軽量化と衝突安全性能向上の両立を支援し、車両走行時の CO<sub>2</sub> 排出量削減を通じて将来のカーボンニュートラル社会実現に貢献していく。本稿では、JFE スチールの特徴ある高強度冷延・合金化溶融亜鉛めっき鋼板および高強度熱延鋼板を紹介するとともにその利用技術について概説する。

### Abstract:

JFE Steel has developed application technologies to maximize the performance of high-strength steel sheets in addition to high-strength steel sheets with high performance, including vehicle body structural design and press forming and welding methods for auto parts. By providing comprehensive solutions that include materials and application technologies, JFE Steel supports customers to reduce vehicle body weight and improve crash safety performance, and contributes to the realization of a future carbon-neutral society through reducing CO<sub>2</sub> emissions during vehicle operation. This paper introduces JFE Steel's characteristic cold-rolled and galvanized high-strength steel sheets and hot-rolled high strength steel sheets, and outlines the application technology.

## 1. はじめに

2050 年のカーボンニュートラル社会の実現に向けて、素材製造における CO<sub>2</sub> 排出量の削減はもとより、多くの鋼材を使用している自動車車体の軽量化も重要な課題である<sup>1)</sup>。車体の軽量化と衝突安全性能の向上を両立させるためには、骨格部品にハイテンを適用し、薄くて強靱なボディを構成することが有効であり、骨格部品へのハイテンの適用が増加してきた<sup>2)</sup>。シャシー部品の軽量化も同じく重要な課題であり、ハイテンが採用されつつある。図 1 に示すように適用される鋼板の強度は年々上昇しており、骨格部品には引張強度 1 470 MPa 級鋼板、シャシー部品には 980 MPa 級鋼板が適用されている。近年、電気自動車をはじめとする新エネルギー車の製造・販売が拡大しているが、車体下部に大きなバッテリーを搭載する電気自動車では、バッテリー保護の観点からもキャビン周辺の骨格部品の高強度化は必須であり、今後もハイテンの適用は拡大すると予想されている<sup>3)</sup>。

自動車の車体は、乗員を保護するキャビンと衝突時のエネルギーを吸収する車両前後部のフレームに大別される。

キャビンを取り囲む骨格部品には衝突時に変形が生じないように超ハイテンの適用が求められ、部品が変形することで衝突時のエネルギーを吸収する車両前後のフレーム部品には、衝突変形時の破断を抑制できるハイテンの適用が求められる。JFE スチールではキャビン向け材料として 1 180～

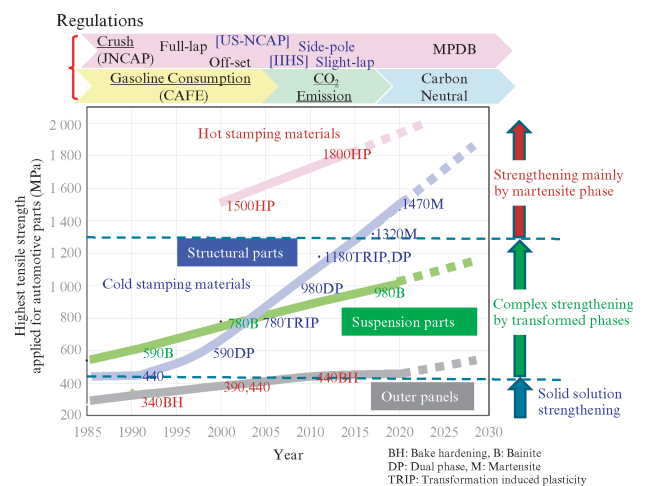


図 1 自動車部品へのハイテン適用の変遷

Fig. 1 Transition of application of HITEN to auto parts

2025 年 10 月 7 日受付

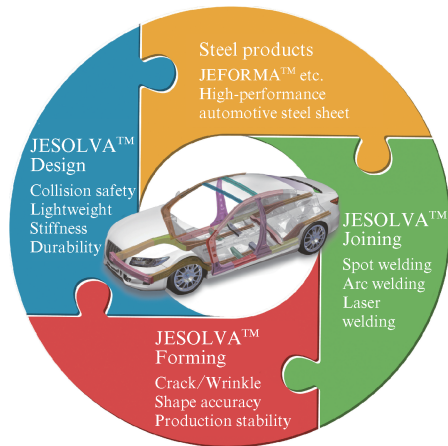


図2 自動車用鋼板の利用技術 JESOLVA®

Fig. 2 Application technologies for applying steel sheets to auto parts: JESOLVA™

1470 MPa 級の超高強度冷延鋼板を、エネルギー吸収部品向け材料に980~1180 MPa 級の合金化溶融亜鉛めっき鋼板を開発してきた。また近年では、複数の部品を統合し部品点数を削減することにより部品の製造コストを低減することが求められており、超ハイテンを適用した部品の統合技術の開発も進めている<sup>4)</sup>。高性能なハイテンと部品統合技術を組み合わせ、衝突時の変形に耐えうる軽やかなキャビンとエネルギー吸収に優れた車両前後フレームで構成された車体構造を、将来の車体コンセプトとして自動車メーカーに提案している。

一方、材料の高強度化にともない、プレス成形性や溶接性が低下することが知られており、ハイテンを使いこなすための成形方法や溶接方法が求められる。さらには、ハイテンを適用した軽量で高剛性な車体構造を設計する手法も必要とされている。このようなニーズに応えるため、JFE スチールでは高成形性ハイテンを『JEFORMA®』(JFE Excellent FORMAbility)として体系化し<sup>5)</sup>、自動車用鋼板の利用技術を『JESOLVA®』(JFE Excellent SOLution for Vehicle Application)として体系化した(図2)<sup>6)</sup>。自動車の製品開発・商品性能向上に貢献するため、車体の開発初期段階から協業するEVI活動(Early Vendor Involvement)を展開し、高性能な材料と利用技術をセットにした総合的なソリューションを提案している。

鋼は他の素材に比べて、大量生産が容易であり、低コストでリサイクル性が良いという利点があり、JFE スチールでは部品製造時のCO<sub>2</sub>排出量で有利である冷間プレス(鋼板を加熱せず室温でプレス成形する)を志向し、高性能な自動車用ハイテンを供給している。

本稿では、JFE スチールの特徴ある高強度冷延鋼板、合金化溶融亜鉛めっき鋼板、高強度熱延鋼板のラインナップを示すとともに、ハイテンの性能を最大限に引き出すための加工、溶接、車体設計などの利用技術について概説する。

## 2. JFE スチールの自動車用ハイテンおよびその製造技術

鋼は高強度化するに伴い、プレス成形性や溶接性が低下し、また強度が1180 MPa 以上になると鋼中に侵入した水素原子によって割れが発生する遅れ破壊という現象が顕在化しやすくなる<sup>7)</sup>。ハイテンの適用拡大のためには、部品に依りて必要な成形性や溶接性が確保され、さらに遅れ破壊が発生しづらいハイテンが必要となる。また、ハイテンはFe以外の合金元素を数%添加することで高強度を実現するが、それに起因して、熱処理中に鋼板表面の状態が変化し、化成処理性・塗装後耐食性の劣化や防錆のための溶融Znめっき処理時に欠陥が発生しやすくなる場合がある<sup>8,9)</sup>。ハイテンはこれらすべての課題を解決して初めて実用化が可能となる。JFE スチールでは、種々の鋼のマイクロ組織制御技術を駆使し、母材の成形性や遅れ破壊等の特性を高レベルに制御することに加え、鋼板の表面を化成処理やめっき付着に適する状態に改質することで高性能ハイテンの製造を実現している。本章では、JFE スチールで生産・開発している自動車用ハイテンについて概説する。

### 2.1 冷延・防錆ハイテン

JFE スチールでは、冷延ハイテンは1470 MPa 級まで、合金化溶融亜鉛めっき(GA: GALvanealed steel)ハイテンは1180 MPa 級までの量産を実施している。また、次世代ハイテンとして、冷延は1700 MPa、GAは1470 MPa 以上の強度の商品化を進めている。

冷延ハイテン製造において重要なポイントは、成形性・溶接性・遅れ破壊抑制等、必要な材質を得るためのマイクロ組織制御と良好な塗装性を発現するために必要な化成処理性確保のための鋼板の表面状態制御である。材質制御については、冷延鋼板は溶融亜鉛めっきを付与する必要がないため、熱履歴に対する制約が少なく、材質を重視したプロセスを用いて商品設計が可能である。JFE スチールでは、980 MPa 以上の冷延ハイテンは主として、JFE スチールが開発した焼鈍後に水焼き入れによる高速冷却を行うWQ-CAL(Water Quenching Continuous Annealing Line)を利用して低C当量成分で高強度化する設計としており、優れた溶接性と極めて高い耐遅れ破壊特性を有する。また、焼鈍温度制御により、軟質相のフェライト分率を高精度に制御でき、同一強度グレードでも、成形性のバランスの異なる商品を生産できる<sup>10)</sup>。また、焼鈍後にガス冷却を行うGJ-CAL(Gas Jet Continuous Annealing Line)では、特に伸び特性を向上しやすい残留オーステナイトを利用した高成形性鋼板を生産できる。一方、表面状態制御については、鋼中に添加されている合金元素の焼鈍炉内での酸化状態を明確にすることを通じて生産条件を最適化し、化成処理時に問題とならない鋼板表面状態を実現している。これらの技術によ

表1 JEFORMA®のラインアップ  
Table 1 Lineup of JEFORMA™

Product type	Strength grade	Conventional	JEFORMA		
			Type1 (High El)	Type2 (High El-high λ)	Type3 (Super high El)
CR	590	●	●	△	●
	780	●	●	○	●
	980	●	●	○	●
	1180	●	●	○	●
GA	590	●	●	○	●
	780	●	●	○	●
	980	●	●	●	△
	1180	●	○	△	△

●: Commercial production ○: Developed △: Under development

り、2019年に1310MPa級鋼板が、2020年に1470MPa級鋼板が自動車車体骨格用として実用化された。

GAハイテンは、鋼板に溶融亜鉛めっきを施す必要があるため、焼鈍後に鋼板を450～500℃程度まで冷却後に溶けた亜鉛めっき浴に浸漬するめっき処理工程と、その後鉄と亜鉛を合金化させる500～600℃程度での加熱工程が必要であるため、水焼き入れプロセスを適用しづらく、必要強度を発現させるために冷延ハイテンよりも多くの合金を添加する機会が多い。その制約の中でも、成分設計および熱履歴を工夫することで、高強度を得つつ必要な特性を実現している。また、ハイテンでは焼鈍時にMn、Si等の合金元素が鋼板表面で酸化物を形成しめっき処理を阻害する場合がある。この課題を鋼板表面の酸化状態を雰囲気制御等により精緻に実施することで、安定しためっき付着を実現している。

自動車部品は形状が多様であり、部品に応じて必要な成形性、特に伸びおよび伸びフランジ性が異なる。JFEスチールでは、種々の技術を駆使し、2017年に汎用ハイテンよりも成形性に優れた高成形性ハイテンJEFORMA®をシリーズ化してきた。最新のJEFORMAシリーズのラインアップを表1に示す。JEFORMAシリーズでは、部品に応じて必要な特性を有する鋼板を提供できる。また、海外ニーズを捕捉するため、これらの技術を用いてthyssenkrupp Steel Europe (tkSE)と共同で、欧州でGI供給可能な高成形性ハイテンjetQ®を開発している<sup>11)</sup>。

## 2.2 熱延ハイテン

JFEスチールでは、熱延ハイテンは980MPa級まで量産済みであり、さらに、1180MPa級の商品化を進めている。

熱延ハイテンも冷延・GAハイテンと同様に、強度以外に種々の特性が要求されるため、マイクロ組織制御が必須である。熱延鋼板は、800℃以上の高温で数百m/min.以上の速度で圧延され、引き続き、400～600℃程度の所定の温度に

冷却してコイルに巻き取られる。ハイテンを製造する場合は、仕上げ圧延から巻取りまでの数秒～数十秒の短時間で熱履歴を高精度に制御し、必要な特性を発現するマイクロ組織を得ている。特に、高成形性ハイテンを製造するためには、高強度化および特性向上に有効なベイナイトを生成させることが重要<sup>12)</sup>であり、そのためには、550℃以下の適切な温度に精度よく冷却する必要がある。しかし、550℃以下の温度では、水冷する際に鋼板表面に発生する水蒸気膜が不安定になりやすく、精緻な温度制御が困難であることが知られている。JFEスチールでは、この温度域でも精度よく冷却可能な冷却技術を開発している。伸びフランジ性に優れた780～980MPa級ハイテンはこの技術を用いて実用化され適用が広がっている。

## 3. ハイテンを使いこなす利用技術

軽量化と衝突安全性向上を両立するため、車体骨格部品およびシャシー（足回り）部品は高強度化が進み続けており、JFEスチールではハイテンを使いこなす各種利用技術の開発を推進してきた。ここでは、難成形部品のための冷間プレス成形技術、ボディおよびシャシーの信頼性と安全性を向上させる溶接技術、さらには最近採用が始まってきている1470MPa級鋼板に対する重要課題である遅れ破壊に関する評価技術について紹介する。

### 3.1 難成形部品のための成形技術

ハイテンの冷間プレス成形では割れ、しわ、スプリングバックの増大が大きな課題である。これらの課題を事前検討するため、有限要素法を用いた成形CAE解析による予測と原因検討が重要となっている。

割れ予測では、広く用いられている成形限界図（FLD: Forming Limit Diagram）では割れと破断に至るメカニズムが異なるため評価できない伸びフランジ割れと曲げ外表面の曲げ割れを予測する技術を開発した<sup>13,14)</sup>。また、スプリングバック予測では、プレス成形の下死点と除荷時に生じる鋼板の応力一ひずみ関係を正確に表現することで高精度化が実現できる。そこで、ハイテンの単軸および二軸応力状態での除荷および再負荷特性を調査し、種々の変形形態における応力反転時の非線形応力一ひずみ関係を再現する材料モデルを提案して、その有効性を示した<sup>15)</sup>。さらに、スプリングバック低減にはスプリングバックの発生要因となる応力を特定し、その応力を低減する対策が有効である。そこで、プレス成形解析で得られた成形下死点での応力とスプリングバック挙動とを関係づけ、原因を明らかにするスプリングバック要因分析手法を開発した<sup>16)</sup>。

これら予測、要因分析技術に加えて割れ、しわ、スプリングバックへの対策技術も開発している。

湾曲した難成形部品は割れ・しわが生じやすい。そこで、

成形工程を複数に分け、最終成形工程に至る前段階の成形工程について最適形状を設計する予成形技術を開発した。

側面視で湾曲した部品を成形する場合、通常の絞り成形では天板とフランジの湾曲部に材料の過不足が生じて割れとしわが課題となる。これらを抑制するために部品の縦壁に面内せん断変形を生じさせることが有効である。そこで、予成形工程を短冊ブランクの深絞り成形として縦壁に相当する領域に面内せん断変形を付与し、次工程で稜線を曲げて最終部品形状とする「せん断予成形工法」を開発し、1180 MPa 級材を適用した試作品で効果を実証した<sup>17)</sup>。さらにこの工法を発展させ、部品の縦壁を面外ねじり成形させて面内にせん断変形が付与できることに着目した「ねじり予成形工法」も開発した<sup>18)</sup>。

一方、上面視で湾曲した部品の成形ではフランジ部で伸びフランジ変形や縮みフランジ変形が起これ、これらが割れとしわの原因となる。パンチ底での材料移動を促進させることができれば変形の分散が期待できる。そこで、予成形において金型のパンチ肩半径を大きくして材料移動を促進させた後、稜線部を再成形することで目標形状とする「大Rドロワー予成形工法」を開発し、1180 MPa 級鋼板を適用したS形状試作品で有効性を示した<sup>19)</sup>。さらに、この考え方をフォーム成形にも適用した「大Rフォーム予成形工法」も開発し、1470 MPa 級鋼板のL形状試作品で効果を実証した<sup>20)</sup>。

スプリングバックは成形下死点でブランク内部に生じた応力が弾性回復するために生じる変形であり、鋼板の高強度化にともないスプリングバック量は増大する。ここでも成形工程を分けることでスプリングバックの要因となる応力を制御できる技術を開発している。

側面視で湾曲したハット断面部品ではプレス成形下死点でのパンチ底の引張応力とフランジの圧縮応力の応力差に起因する曲げモーメントによってキャンバーバックと呼ばれるスプリングバックが発生する。パンチ底とフランジの応力を低減させる方法としてひずみをわずかに戻して応力を反転させると降伏応力が小さくなるパウシンガー効果を活用した「ストレスリバース<sup>®</sup>工法」を開発した<sup>21)</sup>。

また、上面視で湾曲したハット断面部品の成形では、下死点で生じたフランジ面内での引張と圧縮応力が離型時に解放され部品がねじれるスプリングバックを起こす。ここでも、ねじれの要因となるフランジの応力を低減させるのにひずみをわずかに戻して応力を反転させることが有効であることを見出し、部品の天板と縦壁を成形した後にその状態を維持しつつフランジを成形する「フランジポジションコントロール工法」を開発した<sup>22)</sup>。

スプリングバックとして部品の縦壁に生じる壁反りも課題となっている。壁反りの発生要因は縦壁位置の鋼板で成形中に生じる反り方向のモーメントが成形下死点まで残留することであるが、その要因に対して逆成分のモーメントを前工

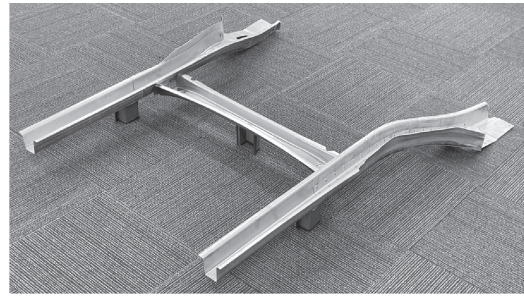


写真1 冷間プレス成形技術により3部品に統合されたリアメンバーモジュール試作品

Photo 1 Prototype of rear member module integrated into three parts by cold press forming technology

程で付与し、相殺することが有効となる。そこで、これを実現する方法として、前工程で縦壁に折り形状を形成し、後工程でリストライクする「壁折り予成形工法」を開発した<sup>23)</sup>。

近年、モーターのみを駆動力とした電気自動車 (BEV) の開発が増えつつあるが、大型バッテリー搭載に伴う車両重量の大幅な増加と製造コスト上昇を抑制することが重要課題となっている。このため、車体の構造と製造工程が自動車メーカーや部品メーカーで見直されており、部品の一体化や機能統合による点数削減が注目されている。そこで、JFE スチールでは、これまで蓄積してきた冷間プレス成形技術および構造設計技術をベースにした冷間プレス成形による部品統合技術の開発に注力している。リアモジュールの部品統合では11部品からなる元構造を1470 MPa 級までの超ハイテンを適用して3部品化する技術開発を行った。実際に作製したプレス部品例を写真1に示す<sup>4)</sup>。これを実現する独自の要素技術として、2枚重ねのブランクをスポット溶接した後に一体で成形する「冷間パッチワーク工法」を開発しており、成形時のスポット溶接部破断を抑制する予成形技術も検討している<sup>24)</sup>。

### 3.2 ハイテンの溶接技術

車体部品へのハイテン適用の自由度を高めるためには要求品質を満足する溶接技術が必要不可欠である。例えば近年、車体製造における生産性向上や製造コスト削減の観点から、部品統合に対するニーズが高まっている。自動車車体構造の製作においては、主に抵抗スポット溶接、レーザ溶接、ガスシールドアーク溶接などが用いられており、適材適所で各種溶接法が利用され、その溶接部品質の確保が重要となる<sup>4)</sup>。近年、ハイテンを利用する部品形状はますます多岐に広がっており、接合部に求められる品質は高度かつ複雑になっている。これまで、溶接欠陥を防止し安定した溶け込み形状を確保したうえで、溶接継手の強度特性を確保する溶接技術が開発されてきた。加えて、骨格部品に用いられるハイテンの抵抗スポット溶接部では遅れ破壊や液体金属脆化 (LME: Liquid Metal Embrittlement) 割れの抑止、

また、足回り部品に用いられるハイテンのガスシールドアーク溶接部では耐食性や耐疲労特性の確保が求められるようになってきている。これら車体接合部の要求性能を満足するため、当社が開発した溶接技術について紹介する。

### 3.2.1 ボディ向け溶接技術

自動車骨格部品へのハイテンの適用が拡大しており、母材だけでなく抵抗スポット溶接部においても高い破断強度の確保が必要となる。抵抗スポット溶接継手のはく離強度を向上しつつせん断強度の低下を抑止する独自溶接技術として、短時間・高電流のパルス後通電による発熱を活用した「パルススポット<sup>®</sup>溶接」<sup>25-32)</sup>を開発した。これは、短時間・高電流のパルス後通電により、ナゲット中のP偏析軽減による韌性改善、および焼戻し効果による応力集中緩和を図るものである。

骨格部品の高強度化は防錆部品にも拡大しており、高強度溶融亜鉛めっき鋼板に対する抵抗スポット溶接技術の重要性が高まっている。高強度溶融亜鉛めっき鋼板の抵抗スポット溶接特有の技術課題として、溶接熱影響部におけるLME割れの防止が挙げられる。溶接部のLME割れを抑止しつつ高い継手破断強度を確保する新技術として、「J-NEKST スポット<sup>®</sup>溶接技術」<sup>33-35)</sup>を開発した。本技術は、「パルススポット溶接」をさらに進化、発展させたものであり、LME割れの懸念部位であるコロナボンド部にパルス通電加熱により適正な熱履歴を与えることで、溶接熱による溶融ZnをFe-Zn合金層として凝固、無害化し、LME割れを抑止する画期的な溶接技術である。

また、車体の衝突特性や剛性のさらなる向上に対する要望は強く、その対策の一つとして、抵抗スポット溶接の打点数の増加、すなわち打点間隔短縮が有効である。しかし、従来、溶接打点間隔が極端に小さい場合、既溶接点への分流が顕著となり、安定したナゲット形成が困難であった。この課題に対して、「J-MAC スポット<sup>®</sup>溶接技術」<sup>36, 37)</sup>を開発している。最適化した多段通電パターンに適應制御区間を分割して熱量制御を行うことにより、分流状態および鋼板強度にかかわらず一定のナゲット径を確保する技術である。

### 3.2.2 シャシー向け溶接技術

シャシー部品においても軽量化のニーズは強く、使用される鋼板の高強度化が進んでいる。シャシー部品では主にガスシールドアーク溶接を用いた重ね隅肉継手となる。母材のみならず溶接継手部についても疲労強度や耐食性の確保が重要である。これに対して、シールドガス中のCO<sub>2</sub>比率を低下させた「低CO<sub>2</sub>ガスシールドアーク溶接技術」を開発した<sup>38-40)</sup>。本技術により、疲労破壊の起点となる溶接止端部半径を拡大し、継手疲労特性を改善できる<sup>41)</sup>。

さらに近年、シャシー部品に用いられるハイテンを想定した新しいガスシールドアーク溶接技術として「J-SKY MIG<sup>®</sup>溶接技術」を開発した<sup>42, 43)</sup>。本溶接法では、シールドガスにCO<sub>2</sub>ガスを含まず純Arガスを用いたMIG溶接が前提とな

る。本技術の特徴は、高電流パルスを活用することで溶滴移行を安定化させて健全な溶接ビードを形成することである。従来溶接に比べて溶接スラグ量が格段に低下し、継手の耐食性向上に効果的である。

また、ガスシールドアーク溶接部の疲労特性を改善する手法として、橋梁等大型構造物向けに技術確立されているニードルピーニングを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法」を開発した<sup>44)</sup>。シャシー部品で疲労亀裂の発生が懸念される溶接止端部に対して、形状を最適化したピンでの打撃による圧縮残留応力の付与と加工硬化層の形成により疲労強度を格段に向上した<sup>45, 46)</sup>。

## 3.3 遅れ破壊評価技術

JFE スチールでは超ハイテンの実用性能としてせん断端面の遅れ破壊特性を明確にする研究および技術開発に注力している。

自動車部品の製造工程まで考慮して、せん断条件、せん断端面に対する成形ひずみ量、焼き付け処理の影響をそれぞれ試験により評価した<sup>47-49)</sup>。これらの知見と成形CAE解析を組み合わせた遅れ破壊予測手法を開発しており、1470MPa級鋼板を適用したモデル部品でその有効性を検証した。

さらに、自動車の実使用時の遅れ破壊特性を再現するため、実環境での水素侵入挙動を模擬した遅れ破壊評価用サイクル試験HeTsACE<sup>®</sup>(Hydrogen embrittlement Test to simulate actual corrosion environment)を開発した。曲げ負荷量を変化させた試験片と侵入水素量モニタリングシステム<sup>50)</sup>をこの環境に置き、遅れ破壊の発生有無と水素侵入量の測定結果から遅れ破壊限界応力と最大侵入水素量をマップ化し、材料の使用限界を定量的に評価できる。

## 4. おわりに

JFE スチールの特徴ある高性能自動車用鋼板と鋼板の性能を最大限に引き出すための利用技術について概説した。自動車車体軽量化のニーズは高く、今後も自動車部品へのハイテンの適用は拡大すると予想される。JFE スチールでは、高性能で使いやすいハイテンの商品開発を推進するとともに、自動車の車体設計や製造を支援するための技術開発にも注力し、車体性能向上や軽量化の実現に貢献していく。

### 参考文献

- 1) 田中秀尚. 自動車産業の環境変化とカーボンニュートラル社会へ向けた新潮流. 自動車技術. 2023, vol. 77, no. 3, p. 12-16.
- 2) 楨徹雄. 衝突安全技術から見た自動車車体の現状と将来. 自動車技術. 2024, vol. 78, no. 3, p. 13-18.
- 3) 斎藤守, 井上心, 岡村純也, 白昌高, 人見真央. 新プラットフォーム

- による BEV の開発. 自動車技術. 2023, vol. 77, no. 3, p. 18-23.
- 4) JFE スチール ニュースリリース <https://www.jfe-steel.co.jp/release/2025/04/250424-1.html>
  - 5) 高加工性高強度鋼板シリーズ「JEFORMA®」. JFE 技報. 2018, no. 41, p. 83-84.
  - 6) JFE スチール ニュースリリース <https://www.jfe-steel.co.jp/release/2019/12/191224.html>
  - 7) 例えば, 田路勇樹, 高木周作, 吉野正崇, 長谷川浩平, 田中靖. 高強度薄鋼板の耐水素脆化特性評価法. 鉄と鋼. 2009, vol. 95, no. 12, p. 887-894.
  - 8) 古谷真一, 知場三周, 岡井和久. 冷延ハイテンの表面酸化挙動とりん酸亜鉛処理性に及ぼす鋼中 B の影響. JFE 技報. 2026, no. 57, p. 21-27.
  - 9) 例えば, 鈴木善継. スマートモビリティ社会に貢献する自動車用高強度鋼板の表面処理技術の最新の進歩. 表面技術. 2016, vol. 67, no. 12, p. 633-638.
  - 10) 松岡才二, 長谷川浩平, 田中靖. キャビン周りの衝突強度向上と軽量化に寄与する高加工性 WQ (水焼入) 超高強度冷間圧延鋼板. JFE 技報. 2007, no. 16, p. 16-20.
  - 11) JFE スチール ホームページ <https://www.jfe-steel.co.jp/en/products/sheets/pdf/thyssenkrupp.pdf>
  - 12) 後藤聡太, 小西恭平, 山口尚記. 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. JFE 技報. 2026, no. 57, p. 28-33.
  - 13) 飯塚栄治. 伸びフランジ成形限界の数値シミュレーション. 塑性と加工. 2016, vol. 57, no. 662, p. 220-224.
  - 14) 新宮豊久, 藤井祐輔, 樋貝和彦, 山崎雄司, 稲積透. 高強度鋼板における限界表面ひずみを指標とした割れ予測方法の検討. 塑性と加工. 2014, vol. 55, no. 640, p. 423-428.
  - 15) 澄川智史, 石渡亮伸, 平本治郎. 応力反転後の非線形弾塑性挙動の考慮によるスプリングバック予測精度向上. 塑性と加工. 2016, vol. 57, no. 666, p. 635-640.
  - 16) JFE スチール. 卜部正樹. 特許第 4894294 号.
  - 17) 藤井祐輔, 卜部正樹, 山崎雄司, 玉井良清. 面内せん断変形を用いた曲がり自動車部品のプレス成形法の開発. 塑性と加工. 2020, vol. 61, no. 710, p. 63-68.
  - 18) 澄川智史, 揚場遼, 新宮豊久, 卜部正樹, 玉井良清. 面外ねじり変形を活用した湾曲部品の成形技術. 2023 年度塑性加工春季講演会講演論文集. 2023, p. 7-8.
  - 19) 藤井祐輔, 卜部正樹, 山崎雄司, 玉井良清. 曲がり骨格部品の成形性に及ぼすパンチ肩半径の影響. 第 69 回塑性加工連合講演会講演論文集. 2018, p. 259-260.
  - 20) 藤井祐輔, 卜部正樹, 飯塚栄治, 塩崎毅. 超ハイテン適用 L 字骨格部品のプレス成形性に及ぼす金型肩半径の影響. 第 75 回塑性加工連合講演会論文集. 2024, p. 71-72.
  - 21) 飛田隼佑, 新宮豊久, 山崎雄司, 平本治郎. バウシंगाー効果活用による自動車部品の寸法精度変動低減技術の開発. 塑性と加工. 2019, vol. 60, no. 701, p. 155-160.
  - 22) 澄川智史, 石渡亮伸, 卜部正樹, 玉井良清. フランジ応力制御による湾曲骨格部品のねじれスプリングバック抑制技術. 塑性と加工. 2020, vol. 61, no. 710, p. 57-62.
  - 23) 揚場遼, 石渡亮伸, 玉井良清. 高強度鋼板のプレス成形においてスプリングバックによる断面開きが長手方向のねじれに及ぼす影響. 塑性と加工. 2023, vol. 64, no. 755, p. 225-230.
  - 24) 美能孝行, 澄川智史, 新宮豊久, 塩崎毅. 重ね合わせブランクの溶接部破断抑制工法—予成形によるブランク同士のずれ抑制—. 2025 年度塑性加工春季講演会講演論文集. 2025, p. 21-22.
  - 25) 松田広志, 木谷靖, 松下宗生, 谷口公一, 澤西央海, 池田倫正. 自動車ボディ用溶接技術の開発. JFE 技報. 2018, no. 41, p. 47-54.
  - 26) 谷口公一, 沖田泰明, 池田倫正, 遠藤茂. 高張力鋼板のパルス通電抵抗スポット溶接技術の開発 (第 1 報). 溶接学会全国大会講演概要集. 2010, no. 87, p. 96-97.
  - 27) 谷口公一, 貞末照輝, 伊木聡, 池田倫正, 遠藤茂. 高張力鋼板のパルス通電抵抗スポット溶接技術の開発 (第 2 報). 溶接学会全国大会講演概要集. 2011, no. 89, p. 4-5.
  - 28) 澤西央海, 小椋智, 廣瀬明夫, 谷口公一, 池田倫正, 遠藤茂, 安田功一. パルス通電法を用いた高張力鋼板の抵抗スポット溶接継手における変形挙動のその場観察. 溶接学会全国大会講演概要集. 2011, no. 89, p. 8-9.
  - 29) 谷口公一, 池田倫正, 遠藤茂. 高張力鋼板のパルス通電抵抗スポット溶接技術の開発 (第 3 報). 溶接学会全国大会講演概要集. 2012, no. 90, p. 240-241.
  - 30) 谷口公一, 澤西央海, 池田倫正, 小椋智, 廣瀬明夫. 高張力薄鋼板の溶接継手強度を向上させるパルススポット溶接技術の開発. あたりあ. 2014, vol. 53, no. 2, p. 63-65.
  - 31) 谷口公一, 松田広志, 池田倫正, 大井健次. 短時間・高電流後通電による発熱形態および十字引張強さの向上. 溶接学会論文集. 2014, vol. 32, no. 3, p. 164-171.
  - 32) Taniguchi, K.; Matsuda, H.; Ikeda, R.; Oi, K. Resistance Spot Welding Process with Pulsed Current Pattern to Improve Joint Strength of Ultra High Strength Steel Sheets. SAE Technical Paper. 2015-01-0705.
  - 33) 小峯慎介, 金澤友美, 谷口公一, 高島克利, 松田広志, 池田倫正. 超ハイテンの抵抗スポット溶接継手における耐 LME 割れ特性および継手強度の両立技術の開発 (第 1 報). 溶接学会全国大会講演概要. 2023, no. 113, p. 4-5.
  - 34) 金澤友美, 小峯慎介, 澤西央海, 高島克利, 谷口公一. 超ハイテンの抵抗スポット溶接継手における耐 LME 割れ特性および継手強度の両立技術の開発 (第 2 報). 溶接学会全国大会講演概要. 2023, no. 113, p. 6-7.
  - 35) 遠藤玲子, 小峯慎介, 金澤友美, 高島克利, 谷口公一. 超ハイテンの抵抗スポット溶接継手における耐 LME 割れ特性および継手強度の両立技術の開発 (第 3 報). 溶接学会全国大会講演概要. 2023, no. 113, p. 8-9.
  - 36) 澤西央海, 沖田泰明, 松田広志, 池田倫正. 多段適応制御を活用した短ピッチ抵抗スポット溶接技術の開発. 溶接学会論文集. 2019, vol. 37, no. 4, p. 173-180.
  - 37) 澤西央海, 松田広志, 沖田泰明, 池田倫正. 多段適応制御を活用した高強度鋼板の短ピッチ抵抗スポット溶接技術の開発. 溶接学会論文集. 2023, vol. 41, no. 1, p. 1-10.
  - 38) 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.
  - 39) 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.
  - 40) 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.
  - 41) 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.
  - 42) 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.
  - 43) 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.
  - 44) 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.
  - 45) 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.
  - 46) 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.
  - 47) 戸畑潤也, 木村英之, 金子真次郎, 松木優一, 新宮豊久. 超高強度薄鋼板の耐遅れ破壊特性に及ぼすせん断端面の影響. 自動車技術会論文集. 2024, vol. 55, no. 1, p.193-198.
  - 48) 戸畑潤也, 木村英之, 松木優一, 新宮豊久, 池田幸平, 松原和輝, 友澤方成. 超高強度薄鋼板の耐遅れ破壊特性に及ぼす塗装後焼付け処理の影響. 自動車技術会論文集. 2025, vol. 56, no. 2, p. 274-279.

- 49) 松木優一, 戸畑潤也, 新宮豊久, 木村英之, 塩崎毅. せん断端端面の遅れ破壊特性に与える端面二次成形の影響について. 自動車技術会学術講演会講演予稿集. 2025, no. 99-25, p. 1-6.
- 50) Ootsuka, S.; Fujita, S.; Tada, E.; Nishikata, T.; Tsuru, T. Evaluation of hydrogen absorption into steel in automobile moving environments. Corrosion Science. 2015, vol. 98, p. 430-437.