

自動車骨格部品用超高強度冷延・合金化溶融亜鉛めっき (GA) 鋼板

Cold-rolled and Galvanized (GA) Ultra High Strength Steel Sheets for Automobile Structural Parts

南 秀和 MINAMI Hidekazu JFE スチール スチール研究所 薄板研究部 主任研究員 (係長)
小林 崇 KOBAYASHI Takashi JFE スチール スチール研究所 薄板研究部 主任研究員 (副部長)
船川 義正 FUNAKAWA Yoshimasa JFE スチール スチール研究所 薄板研究部長・博士 (工学)

要旨

JFE スチールは、自動車車体の軽量化に資する種々の高強度冷延鋼板および合金化溶融亜鉛めっき鋼板を開発・商品化してきた。引張強さが980 MPa 級以上の超高強度鋼板で、より低強度の鋼板を置換して自動車部品の薄肉化を図る場合には、従来材を超えるプレス成形性が要求される。そこで、超高強度鋼板の伸びを一段と高めるとともに、加工方法や部品形状に応じて、伸びフランジ性も同時に向上させることが必要となる。さらに、超高強度鋼板の部品適用には、スポット溶接性の確保や遅れ破壊への考慮も不可欠となる。超高強度化に伴うこれらの諸課題を合理的な材料設計に基づいて精緻な金属組織制御技術と独自の製造プロセスにより解決し、自動車の骨格部品に適用可能な超高強度鋼板群を製品化した。これらの超高強度冷延・GA 鋼板は自動車用高成形性高強度鋼板「JEFORMA[®]」としてシリーズ化されており、今後もさらなる適用拡大が期待される。

Abstract:

JFE Steel has developed and commercialized a variety of cold-rolled and galvanized (GA) high strength steel sheets which significantly contribute to weight reduction of automobiles. In order to reduce the thickness of automotive parts through the application of 980 MPa or higher grade ultra-high strength steel sheets, it is necessary that they have the same level of press formability to that of lower strength steels. In addition to increase the elongation of ultra-high strength steel sheets, it is important to improve the stretch-flangeability, depending on manufacturing processes and part shapes. It is also necessary to consider the spot weldability and delayed fracture properties. These problems associated with ultra-high strength steel sheets have been solved by sophisticated microstructure control technology and unique manufacturing processes. Based on reasonable material design, ultra-high strength steel sheets have been commercialized for automotive structural parts. These cold-rolled and GA ultra-high strength steel sheets, which lined-up as JEFORMATM series, provide excellent formability. The application of these steel sheets is expected to be further increased in the future.

1. はじめに

車輛の軽量化による CO₂ 排出量削減と車体の高強度化による耐衝突性能向上の両立を目的に、自動車用薄鋼板の高強度化が弛むことなく進行しており、新たな法規制の導入も相次いでいる。そのため、車体強度の増加を目的として、自動車キャビンの骨格を形成する主要な構造部品では、引張強さ (TS: Tensile Strength) で 980 MPa 級以上の超高強度鋼板の適用事例が増加している。従来、このような超高強度鋼板は、単純な形状の補強部品にのみ適用されていたが、近年は複雑な形状の骨格構造部品への拡大も進められつつ

あり、優れた成形性を有する超高強度鋼板のニーズが高まっている。

JFE スチールは、超高強度鋼板の製造に不可欠である連続焼鈍設備を実用化し¹⁻⁴⁾、時代に先んじて超高強度鋼板を商品化した。以来、超高強度鋼板の適用拡大に必要な、伸び、伸びフランジ性、曲げ性などの成形性の改善を図り、自動車部品への適用に必要な各種成形性を具備する鋼板商品を展開してきた⁵⁻¹¹⁾。また、アンダーボディ部品への超高強度鋼板の適用に際しては、高い防錆性を付与するために合金化溶融亜鉛めっきが必須となり、超高強度の合金化溶融亜鉛めっき (GA: Galvanized) 鋼板も並行して商品化してきた^{11, 12)}。現在では、980~1180 MPa 級の各種冷延および GA 鋼板が実車部品に適用され、自動車車体の軽量化および

2017年12月11日受付

高強度化に大きく貢献している¹³⁾。

本論文では、超高強度鋼板に高延性をはじめとする優れた諸特性を付与するための材料設計指針について概説した後、伸びや伸びフランジ性などの個々の部品に求められる成形性に合わせて最適な素材鋼板を選択できるようシリーズ化した高成形性超高強度鋼板 (JEFORMA[®]) について、商品ラインアップと各商品の特徴、およびそれらの適用事例を紹介する。

2. 骨格部品用超高強度鋼板の材料設計

2.1 骨格部品用鋼板に必要とされる特性

超高強度鋼板においても、プレス成形により所定の形状に塑性加工され、抵抗スポット溶接により車体に組み付けられていくことは従来と変わらない。そのため、骨格部品素材としての超高強度鋼板には、従来の鋼板と同様にプレス成形性およびスポット溶接性に優れることが求められる。加えて、強度水準のさらなる上昇に伴って、低強度の鋼板では問題視されなかった耐遅れ破壊特性やスポット溶接時の耐液体金属脆化 (LME: Liquid Metal Embrittlement) 特性も必要とされつつある。

プレス成形性については、適用部品の形状や加工方法に応じて、最も必要とされる鋼板特性も変化する。たとえば、センターピラー下部の袋形状部のように張出し成形が主体となる部位には、伸びの高い鋼板が適している。一方、センターピラー上部のフランジ部では、伸びフランジ性に優れた鋼板が好適となる。伸びフランジ性の指標としては、穴広げ試験 (JIS Z 2256) による穴広げ率 (λ) が一般的である¹⁴⁾。この伸びと伸びフランジ性のバランスをとりながら両特性を向上させることができれば、成形性の自由度が大幅に拡大すると期待される。

部品の成形加工において、割れや亀裂による成形可否と並んで重要な課題が寸法精度である。鋼板をプレス成形した後に形状拘束を解くと、スプリングバックによる変形が発生する。スプリングバックによる部品の寸法精度の低下は、後工程の車体組付における生産効率を低下させる。スプリングバックは成形加工時に生じた弾性変形分の解放に起因するため、加工時の流動応力が大きい強度の高い鋼板ほど不利になる。超高強度鋼板を適用した部品で従来と同等の寸法精度を維持するためには、成形技術¹⁵⁾とあわせて、超高強度鋼板のスプリングバックを抑制することが必須となる。

自動車の車体は多数の部品をスポット溶接して組み立てられるため、超高強度鋼板にも種々の板組で適正にスポット溶接できることが求められる。高強度化のために合金元素の添加量を増加すると、溶接部が過度に硬化して韌性が損なわれ、ナゲット内で破断して溶接継手の強度が低下することがある¹⁶⁾。超高強度鋼板では、必要な強度を達成しつつ、

合金元素量を必要最小限に抑える、低炭素当量 (C_{eq}) の成分設計が肝要となる。

超高強度鋼板に特有の懸念点として、鋼板中への水素侵入による遅れ破壊がある。自動車の使用環境下で進行する腐食反応によって発生した水素が起因となる脆性的な破壊現象であり、鋼板のTSが980 MPaを超える水準に達すると、遅れ破壊への感受性が大きく高まるといわれている。また、最近になって、超高強度亜鉛めっき鋼板をスポット溶接する際に、めっき層の亜鉛が鋼板表層の結晶粒界に拡散侵入して粒界割れ (LME 割れ) が発生することが確認された¹⁷⁻¹⁹⁾。めっき層を有しない超高強度冷延鋼板であっても、溶接相手が亜鉛めっき鋼板であれば同様の割れが発生し得るため、いずれの超高強度鋼板でも問題視されつつある。超高強度鋼板の骨格部品への適用に際しては、使用環境での遅れ破壊や溶接板組に応じたLME割れへの配慮も必要である。

2.2 伸びの向上指針

プレス成形用の超高強度鋼板は、強度、成形性、溶接性などの総合的な特性バランスの良さから、軟質なフェライトと硬質なマルテンサイトで構成される複合組織を有するDP (Dual Phase) 鋼板が主流である。近年になって、超高強度鋼板の骨格部品への適用が拡大しており、DP鋼板よりも高い伸びを有する鋼板が強く要求されるようになった。このニーズに対しては、残留オーステナイトのTRIP (Transformation Induced Plasticity) 効果を利用することが有力な解決策となり、残留オーステナイトを含有する複合組織からなる超高強度TRIP鋼板の開発が進められている。

TRIP鋼板は、冷延後の焼鈍過程においてフェライトとオーステナイトの二相域もしくはオーステナイト単相域に加熱保持後、ベイナイト変態域まで冷却して保持するオーステンパー処理を施すことにより製造される。このオーステンパー処理時に、変態した相から未変態のオーステナイトへの固溶Cの排出を促進してオーステナイト中のC濃度を増加させることで、オーステナイトの安定性を高めている。安定化したオーステナイトは室温まで残留しやすく、かつ、変形時に効果的にTRIP効果を発現することで、汎用型DP鋼板と比較してより高い延性を実現することが可能となる (図1)。また、合金含有量の多い超高強度鋼板でTRIP鋼板の延性を高位安定化するためには、残留オーステナイト量および残留オーステナイト中のC量の制御のみならず、二相域焼鈍時のフェライトとオーステナイトでのMnおよびSiの分配²⁰⁾も延性を左右する重要な因子となる。

2.3 伸びフランジ性の向上指針

自動車の骨格部品には、張出し成形部と伸びフランジ成形部が混在した複雑な形状を有しているものもあり、こうした複雑形状の骨格部品に超高強度鋼板を適用する際はこれを高めることが要求される。ここで、伸びフランジ成形は、

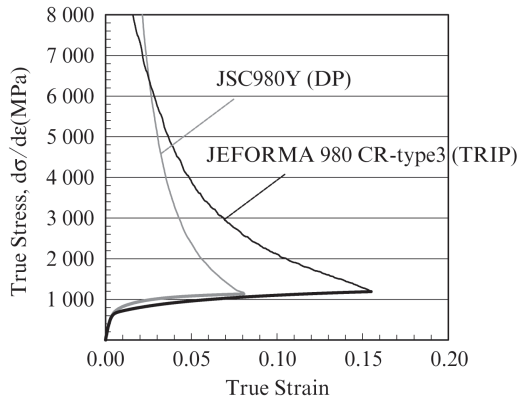


図1 980 MPa 級汎用型 DP 鋼板 (JSC980Y) と 980 MPa 級超高 EI 型 TRIP 鋼板 (JEFORMA 980CR-type3) の応力-ひずみ曲線
 Fig. 1 Stress-strain curve of JSC980Y (DP) and JEFORMA 980CR-type3 (TRIP)

平板の端部を立ち上げるようなフランジ長を伸ばす成形様式であり、伸びフランジ性は、鋼板の打ち抜き端部に引張応力を付与した際の亀裂の発生および進展のしやすさが主たる支配因子となる。通常、鋼板のフランジ部は剪断加工されるため、複合組織鋼板の場合、剪断端部の軟質相と硬質相の界面に写真1に示される微小なボイドが生成し、フランジ成形時に割れの原因となる。このとき、複合組織を構成する各相の相間硬度差を低減することで相界面での応力集中が低減でき、複合組織鋼板の穴広げ性を向上できることが知られている^{21,22)}。そこで、写真2 (b) に示すように、軟質相と硬質相の中間の強度および延性を有する第三相を導入した複合組織とすれば、軟質相と硬質相の界面での微小なボイドの生成を抑制することができると考えられる。このような新しい複合組織を調製することによって、図2に示すように、超高強度鋼板においても高い伸びフランジ性を実現できる。

2.4 スポット溶接性の維持

鋼板に超高強度と高延性を兼備させるための成分設計で

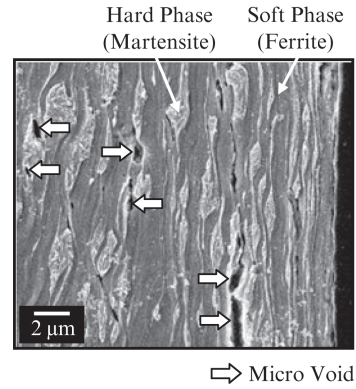


写真1 汎用型 DP 鋼板の打ち抜き端部における金属組織
 Photo 1 Microstructure at the punched edge of conventional DP steel

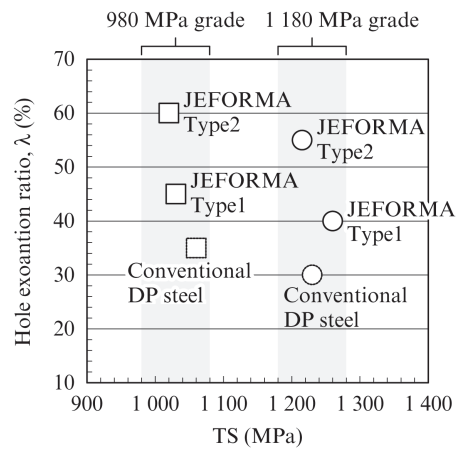


図2 汎用型 DP 鋼板, 高 EI 型鋼板 (JEFORMA Type1) および高 EI-高 λ 型鋼板 (JEFORMA Type2) の TS-λ バランス
 Fig. 2 TS-λ balance of conventional DP, high EI type (JEFORMA Type1) and high EI-high λ type (JEFORMA Type2) steels

は、合金添加量が増大することは避けられない。マルテンサイトの硬さは C 量に依存するため、超高強度鋼板では 0.15 mass% 以上の C を添加することが多く、他の合金元素とあわせて炭素当量が高くなる。こうした場合、通常のスポッ

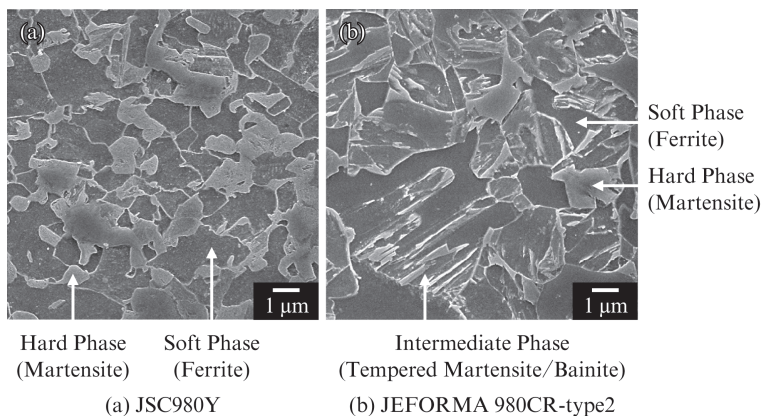


写真2 980 MPa 級汎用型 DP 鋼板 (JSC980Y) と 980 MPa 級高 EI-高 λ 型鋼板 (JEFORMA980CR-type2) の金属組織
 Photo 2 Microstructures of JSC980Y and JEFORMA 980CR-type2

ト溶接条件では溶接継手の強度が低下する懸念がある。鋼成分からの打ち手としては、継手強度に悪影響を及ぼすPやSといった不純物元素の低減があるが、その改善効果には限界もあり、他の解決策も必要となる。

溶接面からの対策としては、ナゲット部の靱性と硬度分布の制御が挙げられる。これらの最適化を目的に通電サイクルを新たに設計し、継手強度の確保に有効な手段としたものにパルススポット[®]溶接²³⁾がある。パルススポット[®]溶接は、ナゲット形成のための本通電後に冷却と短時間・高電流のパルス通電を繰り返すスポット溶接技術である。パルス通電によりナゲット周辺部を効果的に再加熱処理できることから、C含有量の高い超高強度鋼板においても継手強度の向上が可能となる。自動車部品に超高強度鋼板を適用する際には、従来鋼板と同等のスポット溶接継手特性が必要とされるケースが多く、最新の溶接技術とあわせてお客様へソリューションの提案を行っている。

2.5 遅れ破壊の抑制

1180 MPa 級以上の超高強度鋼板では、使用中の遅れ破壊が懸念される²⁴⁾。遅れ破壊とは、鋼に侵入した水素に起因する鋼の脆化・破壊現象であり、1960～1970年代に橋梁用のF11Tボルト（TS 1100 MPa 級）やF13Tボルト（TS 1300 MPa 級）で発生した事例がある。自動車用薄鋼板については、使用期間中の遅れ破壊発生事例は現時点では報告されていないが、超高強度鋼板の自動車部品への適用拡大のためには、遅れ破壊の抑制も考慮する必要がある。

鋼板をプレス成形した部品において、遅れ破壊の発生を支配する因子は、加工により導入されるひずみ、加工による引張残留応力と車体への組み付けによる引張の付加応力、および、使用環境から侵入する拡散性水素量の3つである。ひずみ、引張応力、拡散性水素量の各要素を座標軸とする空間に、各座標位置に対応する条件下での鋼板の遅れ破壊の発生有無を確認してマッピングすることで、その鋼板の遅れ破壊感受性の限界線図を作成することができる²⁵⁾。超高強度鋼板の部品適用に際しては、適用される部品とその使用環境が限界線ないしは限界面より安全側に位置することを事前に確認することが必要である。こうしたマッピング判定をベースに適正な安全率を見込むことで、超高強度鋼板の適用拡大を促進できると考えられる。

実際の自動車部品では、素材鋼板は剪断によりブランキングされた後、端面研削などの機械加工は施されずにプレス成形される。剪断端面は剪断時に破断に至るまでの塑性加工を受けているため、先述の3因子のうち、ひずみと応力が非常に高い水準にあり、遅れ破壊に対しては極めて不利な弱部となる。より実環境に即した超高強度鋼板の遅れ破壊挙動を評価することを目的に、剪断加工された端面近傍の耐水素脆化特性についても調査が進められている²⁶⁾。また、自動車の走行環境で腐食により鋼板に侵入する水素量

を定量的に評価するため、水素侵入量モニタリングシステムの開発を行っている²⁷⁾。

超高強度鋼板の遅れ破壊を抑制するためには、遅れ破壊の原因となる介在物および不純物合金元素量を極限まで低減する材質設計と同時に、超高強度鋼板の適用環境における遅れ破壊の発生懸念を定量的に把握することが重要である。加工ひずみや残留応力を安全範囲内に留めるための利用技術を含め、超高強度鋼板の遅れ破壊を回避する部品設計指針の確立に向けて検討を進めている。

2.6 LME 割れの回避

LMEは、固体金属に液体金属が接したときに固体金属が脆化する現象である。国内では、送電鉄塔用高強度鋼の溶融めっき処理時に発生することが知られており²⁸⁾、1980年代以降、LMEによる割れ防止のための研究がなされてきた。鋼板を素材とする自動車部品の場合、亜鉛めっき層を有する鋼板の溶接時に、固体の鋼板と溶融した亜鉛の異種金属が共存する状態が発生しうる。超高強度鋼板では、高強度化と高合金化に伴ってLMEに対する感受性が高まっていると考えられており、LME割れの抑制も最重要課題の一つである。

近年、自動車用薄鋼板のLME割れに関する研究も多く進められており、例えば、超高強度亜鉛めっき鋼板のスポット溶接部において、鋼板の鉛直方向に対して電極軸に傾き（打角）がある状態では、溶接熱影響部（HAZ: Heat Affected Zone）でLMEによる割れが発生する場合があると報告されている¹⁷⁾。溶接時に打角が存在すると、電極間に挟まれた鋼板に曲げ応力が生じ、特定の位置関係にあるHAZは圧縮変形を受ける。電極解放時に圧縮されているHAZに反動の引張応力が作用する際、溶融状態の亜鉛が存在するとLME割れが発生するものと推定されている¹⁸⁾。

超高強度鋼板のスポット溶接部におけるLME割れの支配因子としては、鋼板の強度や組織、合金成分、亜鉛めっき層の融点等の材料因子の他、上記した通電終了後の電極解放時に発生する引張応力の大きさなど、溶接条件側の要素も考えられる。スポット溶接部でのLME割れの抑制については、加圧保持時間の増加が有効である¹⁹⁾と判明している。LME割れを回避するために、上記材料因子の最適化と同時に、溶接プロセスでの抑制策を提案している。

3. 最新の超高強度鋼板製品

3.1 高加工性高強度鋼板シリーズ

JFEスチールでは自動車部品用の優れた加工性を有する高強度鋼板を「JEFORMA[®]」としてシリーズ化している。JEFORMA[®]シリーズの高強度鋼板は、従来の鋼板よりも伸びの高い高EI型（Type 1）、伸びおよび伸びフランジ性の高い高EI-高λ型（Type 2）、高EI型よりさらに伸びの高い超

表 1 JFE スチールの超高強度冷延鋼板の機械的特性

Table 1 Mechanical properties of cold-rolled ultra high strength steel sheets of JFE Steel

TS grade	Type	Name	Mechanical properties				Development stage
			YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	λ (%)	
980	Conventional DP	JSC980Y	690	1 060	14	35	Commercial production
	High El (DP)	980CR-type1*	750	1 030	15	45	Commercial production
	High El-high λ	980CR-type2*	820	1 020	16	60	Developed
	Super high El (TRIP)	980CR-type3*	640	1 030	23	30	Commercial production
1 180	Conventional DP	JSC1180Y	890	1 230	10	30	Commercial production
	High El (DP)	1 180 CR-type1*	910	1 260	12	40	Commercial production
	High El-high λ	1 180 CR-type2*	1 060	1 215	15	55	Developed
	Super high El (TRIP)	1 180 CR-type3*	950	1 240	16	40	Commercial production
1 320	—	—	1 160	1 330	7	50	Developed
1 470	—	—	1 270	1 510	7	40	Developed

*JEFORMA series

YS: Yield strength TS: Tensile strength El: Elongation

 λ : Hole expanding ratio TRIP: Transformation Induced Plasticity

高 El 型 (Type 3) の 3 タイプに区分されており、冷延鋼板および GA 鋼板がそれぞれ 590, 780, 980, 1 180 MPa 級グレードでラインアップされている。本論文では特に、980, 1 180 MPa 級について詳しく紹介する。

3.2 超高強度冷延鋼板

3.2.1 超高強度冷延鋼板の製品ラインアップ

冷延鋼板では、980 MPa 級と 1 180 MPa 級の両グレードで、JFEFORMA[®] シリーズとして上記の 3 タイプ、および、汎用タイプを製品化している。

高 El 型に分類される鋼板は、従来からあるフェライト-マルテンサイトの二相組織 (DP) 鋼板をベースとするもので、軟質なフェライト相で延性を、硬質なマルテンサイトで強度を担保するように組織設計されている。DP 鋼板はフェライトとオーステナイトの二相域温度での焼鈍後に急冷し、オーステナイトをマルテンサイト変態させることによって製造される。このような DP 鋼板の製造に適した焼鈍設備が水焼入れ方式の連続焼鈍設備 (WQ-CAL) であり、水冷によって大きな冷却速度での均一冷却が可能となることから、低炭素当量設計による優れたスポット溶接性、強度バラツキの少ない優れた材質安定性を有する鋼板を製造できる。高 El 型の DP 鋼板は自動車部品用高加工性鋼板のベースとなる製品であり、既に多くの自動車部品に適用されている。

残留オーステナイトの TRIP 効果を活用して極めて優れた延性を付与した高延性鋼板は超高 El 型として分類される。このタイプの鋼板は、高 El 型の DP 鋼板よりも高い延性を有し、より多くの自動車部品、すなわちより形状が複雑で超高強度鋼板の適用が容易でないとされていた部品までを適用対象とするべく展開されている。

残留オーステナイトを含む TRIP 鋼板は、焼鈍時にオーステナイトに合金元素を濃化させ、オーステナイトを室温まで

安定化する必要があるため、焼鈍後の冷却過程で 400°C 前後のベイナイト変態温度域で保持する工程を経て製造される。JFE スチールでは、焼鈍保持後の冷却熱履歴を精度良く制御できるガスジェット冷却方式の連続焼鈍設備 (GJ-CAL) を用いて製造しており、材質と形状の安定性に優れた製品を作り込んでいる。

また、高い延性に加えて良好な伸びフランジ性も兼ね備えるのが高 El-高 λ 型の鋼板である。従来、実用上一様伸びが重視される高 El 型の鋼板と、局部伸びと相関の強い伸びフランジ性に優れた高 λ 型の鋼板とでは、特に超高強度鋼板では製品設計原理の背反性が強まり、高延性と高伸びフランジ性の両立は困難とされてきた。JFE スチールでは、合金成分と併せて複合組織鋼の相構成や各相の分布様態を最適化し、その理想的な製造条件を実現することで、超高強度冷延鋼板においても高い延性と良好な伸びフランジ性を両立した鋼板の製品化に成功し、自動車部品素材として実用化している。

3.2.2 超高強度冷延鋼板の機械的特性と開発状況

表 1 に超高強度冷延鋼板の各製品とその代表的特性値を示す。980 MPa 級と 1 180 MPa 級の強度グレードでは、低降伏比 (YR: Yield Ratio) 型の汎用鋼種その他、特性バランスの異なる 3 タイプの鋼板の品揃えを有しており、適用ニーズに応じて広く使い分けられている。

超高 El 型の鋼板は、980 MPa 級および 1 180 MPa 級の両強度グレードで既に量産段階にあり、今後も生産量の拡大が見込まれている。高 El-高 λ 型の鋼板も既に製品化は完了しており、お客様からの御要望に応じて自動車部品への適用が検討されている。

1 320 MPa 級および 1 470 MPa 級の鋼板は、マルテンサイトの単相組織からなる鋼板で、冷間加工用の鋼板として世界最高レベルの強度を有する鋼板である。WQ-CAL の利点

表2 JFE スチールの高強度合金化溶融亜鉛めっき（GA）鋼板の機械的特性
Table 2 Mechanical properties of galvanized (GA) ultra high strength steel sheets of JFE Steel

TS grade	Type	Name	Mechanical properties				Development stage
			YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	λ (%)	
980	Conventional DP	JAC980Y	630	1 030	14	25	Commercial production
	High El (DP)	980GA-type1*	650	1 020	18	30	Commercial production
	High El-high λ	980GA-type2*	800	1 020	16	60	Developed
1 180	Conventional DP	JAC1180YL	830	1 230	11	20	Commercial production
	High El (DP)	1 180GA-type1*	800	1 220	13	20	Commercial production
1 320	—	—	980	1 330	9	40	Developed
1 470	—	—	1 070	1 510	9	30	Developed

*JEFORMA series

YS: Yield strength TS: Tensile strength El: Elongation

λ : Hole expanding ratio TRIP: Transformation Induced Plasticity

を最大限に活用し、優れた曲げ性と良好な溶接性、耐遅れ破壊特性を有する製品として、自動車の耐衝突部品素材として使用されている。

3.3 超高強度 GA 鋼板

3.3.1 超高強度 GA 鋼板の製品ラインアップ

自動車車体のうち、アンダーボディを主体としてベルトラインより下方に配置される骨格部品では、耐食性の観点から防錆性能が要求される。このような部品の素材として、日系自動車メーカー各社では合金化溶融亜鉛めっきを施した GA 鋼板が使用されている。したがって、防錆仕様部品のさらなる軽量化には超高強度の GA 鋼板が必要となる。

防錆性能が必要な骨格構造部品としては、サイドシルやフロアクロスメンバーなどが代表的である。これらの部品は、高強度化に際して直線的な形状を有する成形難易度の低い部品である一方、伸びフランジ性が必要となる部位が多いのが特徴である。超高強度冷延鋼板と同様、さまざまな部品に超高強度 GA 鋼板の適用を拡大するには、成形性のバランスの異なる複数のタイプの製品を揃えることが望ましい。

3.3.2 超高強度 GA 鋼板の機械的特性と開発状況

GA 鋼板の製造ライン（CGL）では、一般に焼鈍後の冷却過程の途中で亜鉛の溶融めっき浴が設置されており、亜鉛浴への浸漬とめっき層の合金化処理が連続して行われる。したがって、焼鈍後の鋼板の冷却が中断される上、冷延鋼板の製造時に比べて冷却速度も低くなりやすい。低冷却速度でも必要量の低温変態相を生成させる必要があることから、高強度 GA 鋼板においては合金元素量の添加量を増すことで焼入性を高めることが不可欠となる。しかし、合金添加量の増加は、鋼板の溶接性を低下させる他に、亜鉛の濡れ性やめっき層の合金化処理時の反応性を阻害し、めっき性の低下を招きやすい。そのため、GA 鋼板を超高強度化することは冷延鋼板よりも難易度が高く、材質設計の自由度が小さくなる。

こうした制約の下、独自の熱処理により鋼板のマイクロ組織を精緻にコントロールする組織制御技術を駆使することによって、980 MPa 級では高 El 型と高 El-高 λ 型、1 180 MPa 級では高 El 型の超高強度 GA 鋼板を製品化している。表 2 にこれらの製品のラインアップを示す。また、両強度グレードにおいて、超高 El 型 GA 鋼板の開発も進めており、製品化に向けて実機試作を重ねている。さらに、冷延鋼板と同様に、1 320 MPa 級および 1 470 MPa 級の GA 鋼板の開発が完了しており、自動車部品用 GA 鋼板として世界で初めての実用化を目指している。

4. 適用可能部品例

前章までに紹介してきた超高強度冷延鋼板・GA 鋼板は、高 El 型の製品を中心に自動車の骨格部品用素材として既に実用化が進んでいる。一例として、写真 3 に 1 180 MPa 級冷延鋼板（JEFORMA 1 180 CR-type1）を用いた A ピラーアップパー R/F 部品を示す。成形難易度の比較的低い形状の部品については、超高強度鋼板への材料置換により、所望の車体軽量化効果が得られている。

より成形性に優れる高 El-高 λ 型、超高 El 型の製品については、車体軽量化をさらに進めるための素材鋼板として、2020 年台に発売される次期型車への適用が広く検討されている。これらの超高強度鋼板の適用可能部品例を図 3 に示す。成形性の制約から、現行車では 590~780 MPa 級の鋼板が使用されている部品についても、980 MPa 級以上の鋼板への置換が想定され、多くの自動車メーカーで実車適用に向けて評価が進められている。

5. おわりに

本稿では、自動車骨格部品用の超高強度鋼板に関して、さらなる車体の軽量化に貢献すべくよりいっそうの成形性向

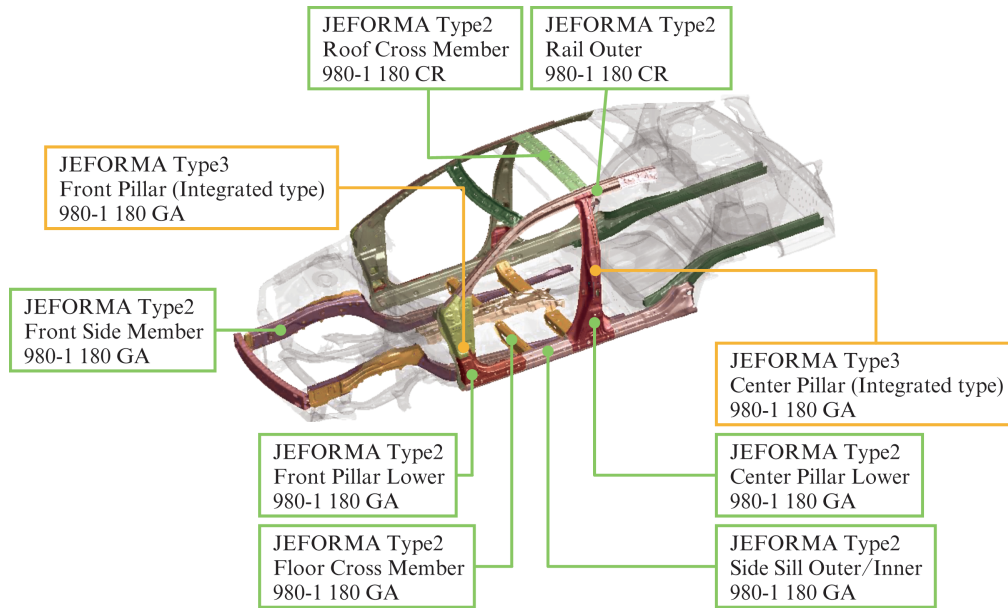


図3 JFE スチールの超高強度鋼板の適用可能部品例

Fig. 3 Suitable parts for ultra high strength steel sheets of JFE Steel



写真3 高引型 180 MPa 級冷延鋼板 (JEFORMA 1180 CR-type1) を用いた A ピラーアッパー R/F (レインフォースメント、補強材) 部品

Photo 3 A pillar upper reinforcement made of JEFORMA 1180CR-type1

上を達成した冷延鋼板と GA 鋼板について、特性発現の基本原則、商品の品揃えと特徴、適用想定事例を紹介した。これらの超高強度鋼板を実際に自動車部品に適用する際には、プレス成形上の課題の他に、車体組立時のスポット溶接や使用環境における遅れ破壊など、関連する諸課題をすべて解決する必要がある。JFE スチールは、お客様との協業を深めながら、利用技術も含めた包括的なソリューションを

提案し、人と環境に優しい先端的な車体開発に貢献する鋼板の提供を目指して開発を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 中岡一秀, 荒木健治, 久保寺治朗. 鉄と鋼. 1976, vol. 62, no. 6, p. 634.
- 2) 苗村博, 福岡嘉和, 逢坂忍, 石岡弘之. 日本鋼管技報. 1977, no. 73, p. 47.
- 3) 柳島章也, 下山雄二, 鈴木宗利, 角南秀夫, 芳賀雄彦, 井田幸夫, 入江敏夫, 川崎製鉄技報. 1981, vol. 13, no. 2, p. 195.
- 4) 金藤秀司, 岩藤秀一, 松井直樹, 山崎雅之, 本田昭芳, 久世裕. NKK 技報. 1989, no. 12, p. 16.
- 5) 松藤和雄, 下村隆良, 大沢紘一, 奥山健, 木下正行, 逢坂忍. 日本鋼管技報. 1980, no. 84, p. 14.
- 6) 福岡嘉和, 西本昭彦, 野副修. 日本鋼管技報. 1984, no. 105, p. 29.
- 7) 細谷佳弘, 津山青史, 長滝康伸, 金藤秀司, 出石智也, 高田康幸. NKK 技報. 1994, no. 145, p. 33.
- 8) 阿部英夫, 佐藤進. 川崎製鉄技報. 1989, vol. 21, no. 3, p. 208.
- 9) 川邊英尚, 金本規生. 川崎製鉄技報. 2000, vol. 32, no. 1, p. 65.
- 10) 松岡才二, 長谷川浩平, 田中靖. JFE 技報. 2007, no. 16, p. 16.
- 11) 長谷川浩平, 金子真次郎, 瀬戸一洋. JFE 技報. 2012, no. 30, p. 6.
- 12) Kimura, Hideyuki; Kawasaki, Yoshiyasu; Kaneko, Shinjiro; Suzuki, Yoshitsugu; Seto, Kazuhiro. 9th International Conference on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (GALVATECH 2013). 2013, p. 103.
- 13) 平出卓也, 増尾英樹, 石内健太郎, 波入厚, 吉田健, 山口信幸. 公益社団法人自動車技術会 2017 年春季大会学術講演会講演予稿集. 2017, p. 2245.
- 14) 船川義正. 特殊鋼. 2017, vol. 66, no. 3, p. 9.
- 15) 新宮豊久, 卜部正樹, 藤井祐輔. JFE 技報. 2018, no. 41, p. 34.
- 16) 田中甚吉, 権沢真事, 小野守章, 長江守康. 日本鋼管技報. 1984, no. 105, p. 72.
- 17) 高島克利, 澤西央海, 谷口公一, 松田広志, 池田倫生. 溶接学会全国大会講演概要. 2017, vol. 100, p. 16.
- 18) 澤西央海, 谷口公一, 高島克利, 松田広志, 池田倫生. 溶接学会全国大会講演概要. 2017, vol. 100, p. 18.
- 19) 谷口公一, 澤西央海, 高島克利, 松田広志, 池田倫生. 溶接学会全国大会講演概要. 2017, vol. 100, p. 20.
- 20) 中垣内達也, 松田広志, 長滝康伸, 瀬戸一洋. 鉄と鋼. 2015, vol. 101, no. 8, p. 426.
- 21) Hasegawa, Kohei; Kawamura, Kenji; Urabe, Toshiaki; Hosoya, Yoshihiro.

- ISIJ-Int. 2004, vol. 44, no. 3, p. 603.
- 22) Takashima, Katsutoshi; Hasegawa, Kohei; Toji, Yuki; Funakawa, Yoshimasa. ISIJ-Int. 2017, vol. 57, no. 7, p. 1289.
- 23) 松下宗生, 谷口公一, 遠藤茂. JFE 技報. 2012, no. 30, p. 32.
- 24) 例えば, 松山晋作著. 遅れ破壊. 日刊工業新聞社, 東京, 1989.
- 25) 田路勇樹, 高木周作, 吉野正崇, 長谷川浩平, 田中靖. 鉄と鋼. 2009, vol. 96, no. 12, p. 887.
- 26) 吉野正崇, 田路勇樹, 高木周作, 長谷川浩平. 鉄と鋼. 2013, vol. 99, no. 4, p. 302.
- 27) 大塚真司, 水野大輔, 松崎晃. JFE 技報. 2018, no. 41, p. 62.
- 28) 武田鐵治郎. 溶接学会誌. 2002, vol. 71, no. 4, p. 234.



南 秀和



小林 崇



船川 義正