

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

Newly-developed Ultra-High Tensile Strength Steels with Excellent Formability and Weldability

松岡 才二 MATSUOKA Saiji JFE スチール スチール研究所 自動車鋼板研究部 主任研究員(部長)・工博
長谷川浩平 HASEGAWA Kohei JFE スチール スチール研究所 自動車鋼板研究部 主任研究員(課長)
田中 靖 TANAKA Yasushi JFE スチール スチール研究所 自動車鋼板研究部長・工博

要旨

JFE スチールは、当社独自の WQ 方式連続焼鈍プロセス（WQ-CAL, WQ：水焼入）を活用した低合金成分設計と金属組織制御により、キャビン周りのボディー構造部品に適用して、衝突安全性と軽量化の飛躍的向上を図ることが可能な、優れた成形性、溶接性および材質安定性を有する TS780-1470 MPa（TS：引張強さ）級超高強度鋼板を開発し、商品化した。特に、今後、適用の拡大が予想される TS1180 MPa 級鋼板では、従来の 1180 MPa 級鋼板と比較して、延性を 1.5 倍以上に向上させ、一般の 980 MPa 級鋼板と同等の延性、穴広げ性を達成した。また、開発した TS1180 MPa 級鋼板は、プレス成形時の加工硬化と、塗装焼付けにより大幅に強度上昇するため、ホットプレス部品の代替として、すでにユーザーの高い評価を得ている。

Abstract:

JFE Steel has developed and commercialized ultra-high tensile strength steel series from TS780 MPa to 1470 MPa with excellent formability and weldability which reduces weight and increases safety in collision when they are applied to the reinforcement parts around a cabin. Those ultra-high tensile strength steels are developed by applying JFE Steel's own technology, continuous annealing line water-quenching facilities which greatly contribute to reduce alloy elements in the steel. Especially, the TS1180 MPa steel which is expected to expand in application, excels in elongation. It is 1.5 times larger than the conventional one which is the same level with 980 MPa, and stretch-flangeability has also been achieved as the same level with TS980 MPa. It is remarkable work-hardening and bake-hardening make it possible to replace hot-stamping parts.

1. はじめに

近年、自動車の乗員の安全性確保のための衝突安全性向上と、CO₂ 排出削減のための車体軽量化による燃費向上を目的として、車体への高強度鋼板の適用が増加している。

1990 年までは、従来の軟鋼板に代えて、TS (tensile strength) 440-590 MPa 級の高強度鋼板の適用が検討された。本鋼板は、プレス成形性の困難さや溶接性、耐食性などの課題を克服すべく改善がなされ、フロントサイドメンバーなどの衝突時に変形してエネルギーを吸収する前面衝突部材として重要な役割を果たしている。

1990 年代に入り、TS780 MPa 級以上の超高強度鋼板の

検討が進められた。このような超高強度鋼板は、従来、バンパー補強材、ドアインパクトビームなどのキャビン周りから離れた安全補強部品に適用されていたが、安全性と軽量化の厳しい要求から、ピラーおよびその補強部材などにその範囲が拡大されてきている。このような傾向は 1994 年から開始された世界 15ヶ国 32 鉄鋼メーカーが共同で実施した ULSAB (Ultra Light Steel Auto Body) プロジェクトにおいても明確に示されており、自動車用構造部材のこれからの方向性と解釈できる¹⁾。

これに対して JFE スチールでは、自動車用ハイテンの総合メーカーとして、自動車市場が求める多様なニーズに応えるべく、世界をリードする自動車用鋼板の商品開発を進めてきた^{2,3)}。その中で、**Photo 1** で示される水冷 (WQ: water quench) 機能を有する連続焼鈍設備 (WQ-CAL プロセス) を最大限活用した低合金成分設計と金属組織制御に



Photo 1 West Japan Works (Fukuyama) No. 3 Continuous Annealing Line (WQ-CAL)

より、TS780-1 470 MPa 級の高成形性超高強度鋼板を商品化した⁴⁾。

本論文では、自動車車体のさらなる軽量化と衝突安全性の向上に寄与できる JFE スチールの TS780-1 470 MPa 級冷間圧延鋼板を紹介し、特に最近、キャビン周りのボディー構造部品に適用が拡大している TS980 MPa 級および TS1180 MPa 級鋼板を中心に材料設計の基本的考え方と特性について概説する。

2. ボディー構造部品用鋼板に必要とされる特性

キャビン周りのボディー構造部品には、耐衝突特性の確保から TS780 MPa 級以上の高強度冷間圧延鋼板が使用される。これらのボディー構造部品用鋼板に必要とされる特性には、(1) プレス成形性、(2) スプリングバック特性、(3) スポット溶接性、(4) 耐遅れ破壊特性がある。

プレス成形性については、適用される構造部品によって必要とされる鋼板特性が異なる。たとえば、センタービラーに代表される張出し成形が主体となるような部品には、延性の高い高伸び型鋼板が適している。また、メンバー類のような伸びフランジ成形には、高穴広げ型鋼板が適している。特に TS1180 MPa 級冷間圧延鋼板は、ロール成形などの曲げ加工を主体とした成形によりバンパーや補強部品などに使用されていたが、キャビン周りのボディー構造部品への適用に際しては、よりいっそうの高延性が必要となる。

プレス成形性とともに重要な特性が、スプリングバック特性である。高強度冷間圧延鋼板をプレス成形するとスプリングバックが発生するが、このスプリングバックにともなう部品寸法精度不良は、その後の組立ておよび溶接工程に弊害をもたらす。これに対して、自動車メーカーでは、スプリングバックをあらかじめ考慮してプレス成形を行っ

ているが、材料強度のバラツキが大きいとスプリングバックの問題は解消できない。そのため、スプリングバック特性を改善するため、材料強度のバラツキの少ない高強度冷間圧延鋼板が適している。

また、鋼板強度が高くなると、一般的には C 含有量が増加し、それにともないスポット溶接部が脆化するので、引張応力が生じた時にナゲット内破断を助長し、溶接強度の低下をもたらす。したがって、十分な溶接部の強度を確保するためには、低 C 当量の成分設計が必要となる。

さらに TS1180 MPa 以上の超高強度鋼板では、腐食環境下での遅れ破壊が懸念される。この遅れ破壊特性を改善するためには、低 C 当量成分設計と焼もどしマルテンサイト組織制御が有効となる⁵⁾。

3. 高強度冷間圧延鋼板の開発コンセプト

JFE スチールでは、独自開発した世界最高速（1 000°C/s 超）の冷却能力を有する WQ-CAL を活用することで、TS780 MPa 級から 1 470 MPa 級までの超高強度冷間圧延鋼板の商品化に成功した。WQ-CAL により製造される鋼板は、以下の特長を有する。

- (1) 幅広い強度と成形ニーズに対応できる TS780-1 470 MPa 級高成形性鋼板の品揃え
- (2) 低 C 当量成分設計による、優れたスポット溶接性と耐遅れ破壊特性
- (3) WQ による均一冷却とフィードフォワード管理による優れた材質安定性

WQ-CAL の熱サイクルを Fig. 1 に示す。焼鈍条件により鋼の組織形態（マルテンサイト単相組織、DP (dual phase) 組織）を制御することができる。さらに、DP 組織では、水焼入温度と焼もどし温度の適正化により、硬質な第 2 相の体積分率と硬さを幅広く制御することが可能である。このような熱履歴を実現できる設備機能により、理想的な組

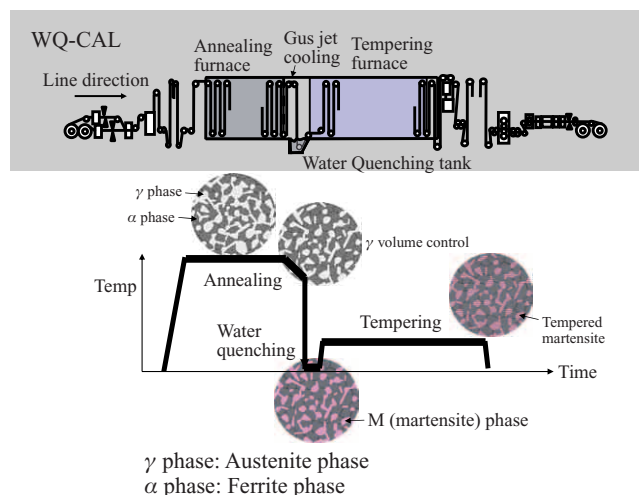


Fig. 1 Typical heat cycles of WQ-CAL, and schematic microstructures

Table 1 Line up of TS780-1 470 MPa grade cold rolled high strength steels

TS grade	JFE Steel Standard	JFS Standard*1	Type	Thickness (mm)	Mechanical properties*2				C _{eq} *4 (mass%)
					YP (MPa)	TS (MPa)	El (%)	λ (%) ^{*3}	
780	JFE-CA780Y2	JSC780Y	Low YR	1.4	430	810	22	30	0.15
	JFE-CA780SF		High λ	1.2	600	830	19	80	0.12
980	JFE-CA980Y2	JSC980Y	Low YR	1.2	610	1 010	18	30	0.18
	JFECA980SF		High λ	1.2	740	1 020	15	60	0.18
	JFE-CA980SF2	-	Super λ	1.2	900	1 020	7	100	0.09
1 180	JFE-CA1180Y2	JSC1180Y	Low YR	1.2	950	1 210	14	30	0.23
	JFE-CA1180SF	-	High λ	1.6	1 030	1 230	7	60	0.17
1 370	JFE-CA1370	-	-	1.6	1 130	1 450	7	60	0.23
1 470	JFE-CA1470	-	-	1.6	1 200	1 510	7	60	0.23

YP: Yield point, TS: Tensile strength, El: Elongation

*1 The Japan Iron and Steel Federation Standard

*2 Tensile specimen: Transverse direction, JIS No.5

*3 λ: Hole expanding ratio according to JFST 1001

*4 Carbon equivalent for spot welding: C_{eq} = 1.5C + P + 3S

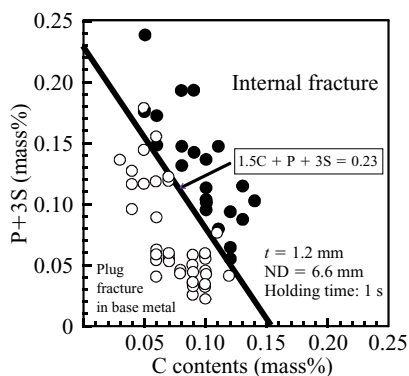


Fig.2 Effect of C, P and S contents on fracture type of spot-welded joint in cross tension test (t: Thickness, ND: nuggest diameter)

織制御が達成され、幅広い強度と用途に応じた材質の造り分け技術が確立された (Table 1)。

また、WQ-CALを活用することで、Cをはじめとする添加元素を極限まで低減した低C当量成分設計が可能となり、超高強度鋼板で懸念される溶接部の健全性が確保できることも大きな特長である。Fig. 2 にスポット溶接部の十字引張特性に及ぼす添加元素の影響を示す⁵⁾。C、PおよびS量の増加は、溶接部の十字引張試験時のナゲット内破断を助長し、溶接強度の低下をもたらす。JFE スチールでは、TS780 MPa を超えた超高強度鋼板においても破断がナゲット内で起こる形態を維持するため、C 当量を Fig. 2 に示される限界線範囲内 (C_{eq} ≤ 0.23) に厳格管理した材料設計を行っている。また、TS1180 MPa 以上の超高強度鋼板で懸念される腐食環境下での遅れ破壊に関しても、低C 当量成分設計と焼もどしマルテンサイト組織制御により克服した⁶⁾。

また、高強度鋼板のプレス成形時に課題となるスプリングバックに対しては、WQ-CAL の特長である急速かつ均一な冷却制御により、コイル長手、幅方向の強度のバラツキ

を抑えることにより改善している。さらに、コイル間の強度バラツキについては、鋼組成を高精度に制御する製鋼技術と、熱間圧延から連続焼鈍に至る一貫製造プロセスでの強度変動因子の制御により、TS780-1 470 MPa 級の超高強度鋼板においても TS590 MPa 級冷間圧延鋼板と同程度までの強度変動を抑制している。

4. 最新の超高強度冷間圧延鋼板の開発状況

4.1 車体構造（補強）部品・シート骨格部材に適した TS980 MPa 級冷間圧延鋼板

JFE スチールでは、最近の自動車用部材の幅広い要求に応じた高成形性 TS980 MPa 級冷間圧延鋼板を開発した。部材に特有の要求特性に適応し得るように、Table 2 に示す低 YR (yield ratio) 型、高λ (穴広げ率) 型、および、超高λ型の3タイプの TS980 MPa 級鋼板を商品化した。低 YR 型は、YP (yield point) が低く高延性で、ピラー部品などの張出し成形部品を対象とした高伸び DP 組織鋼板である。高λ型も DP 組織であるが、YP が高く伸び・穴広げ性

Table 2 Feature of mechanical properties of 3 types of TS980 MPa grade cold rolled steels and their application to automotive parts

Type	Mechanical properties			Applicable parts
	YP	El	λ	
Low YR	Low	High	Low	· Structural parts of body in white ex. Center pillar (Reinforcement)
High λ	Medium	Medium	Medium	· Bumper reinforcement · Seat frame, Seat rail
Extra high λ	High	Low	High	· Seat parts (Mechanical clinch)

YR: Yield ratio

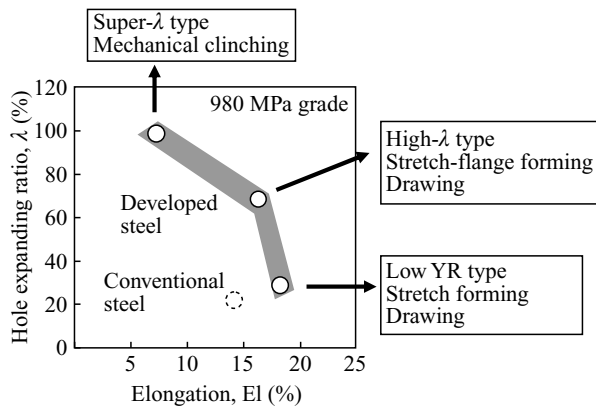


Fig. 3 Typical El(elongation)-λ balance of newly developed TS980 MPa grade ultra-high strength steels

のバランスに優れており、張出し成形部品やシート部材などに幅広く適用されている。超高λ型鋼板は、TS440 MPa級冷間圧延鋼板を凌ぐ穴広げ率を達成し、従来、軟鋼やアルミニウムなど低強度材に限定されていた機械かしめにも適しており、自動車用シートフレームの軽量化などとともに溶接工程の省略による部品製造コスト低減も実現し、新たな分野で適用できるようになった⁷⁾。

Fig. 3 に伸び-穴広げ性バランスをベースとした品種展開を示す。これら3タイプのTS980 MPa級冷間圧延鋼板は、従来材に比べて伸び-穴広げ性のバランスが大幅に改善されている。一般にDP組織型高強度鋼板では、伸びを向上させると穴広げ率が劣化する傾向にあり、両特性はトレードオフの相関関係にある。高λ型のTS980 MPa級鋼板は、DP組織をベースとし、フェライトとマルテンサイトの強度差を低減し、マルテンサイトの体積分率を適正化することによって、良好な伸びを維持しつつTS590 MPa級冷間圧延鋼板と同程度の高い穴広げ性を維持している。これは、組織間の硬度差低減により、打ち抜き時のせん断面近傍での初期マイクロポイド発生が抑制されるとともに、穴広げ加工時のマイクロポイド生成と連結が抑制されたことと、フェライトの存在により、適度な延性が維持されることによるものと考えられる^{8,9)}。

4.2 自動車ボディー構造部品に適した TS1180 MPa 級冷間圧延鋼板

JFE スチールでは、自動車ボディー構造部品の軽量化ニーズに対応して、プレス成形性に優れたTS1180 MPa級高強度冷間圧延鋼板を開発した。**Table 3** に示すように、従来のTS1180 MPa級高強度冷間圧延鋼板と比較して伸びが1.5倍以上に向上し、一般のTS980 MPa級ハイテンと同等の伸び-穴広げ性を示す。またプレス成形時の加工ひずみによる高い加工硬化と、塗装焼付けによる大幅な強度上昇により、**Fig. 4** に示すように部品強度がホットプレス部品と同等程度になり、ホットプレス部品の代替も可能となる。

Table 3 Feature of mechanical properties of newly developed TS1 180 MPa grade cold rolled steel compared with conventional one

	JFE Steel Standard	Thickness (mm)	Mechanical properties		
			YP (MPa)	TS (MPa)	El (%)
Newly developed	JFE-CA1180Y2	1.2	950	1 210	14
Conventional	JFE-CA1180SF	1.6	1 030	1 230	7

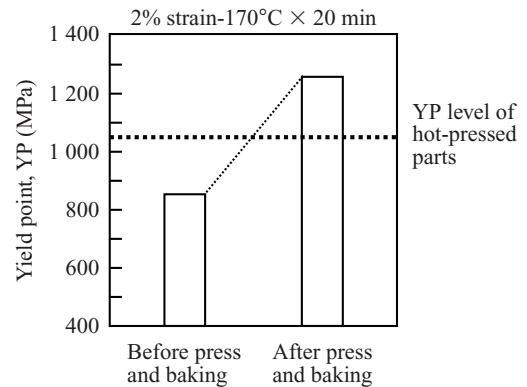


Fig. 4 Change of YP of newly developed TS1180 MPa grade ultra-high strength steel

一般に、TS1180 MPa級高強度冷間圧延鋼板は、ロール成形などの曲げ加工を主体とした成形によりバンパーや補強部品などに使用されていたが、キャビン周りのボディー構造部品への適用に際しては、より高度なプレス加工成形が必要となるため、絞り成形性の向上が課題であった。JFE スチールでは、独自のWQ-CALを活用した金属組織制御により、優れた伸びおよび穴広げ性を兼ね備えた鋼板を開発し、良好なプレス成形性を実現した。また、WQ方式の採用により、低炭素当量設計が可能となり、遅れ破壊特性および溶接性にも優れた性能を有する。一般に、遅れ破壊に対しては鋼板材質に加えて、加工ひずみ、荷重応力、環境からの浸入水素量が影響すると考えられている。そこで、**Fig. 5** に1180 MPa級開発鋼の遅れ破壊懸念領域マッ

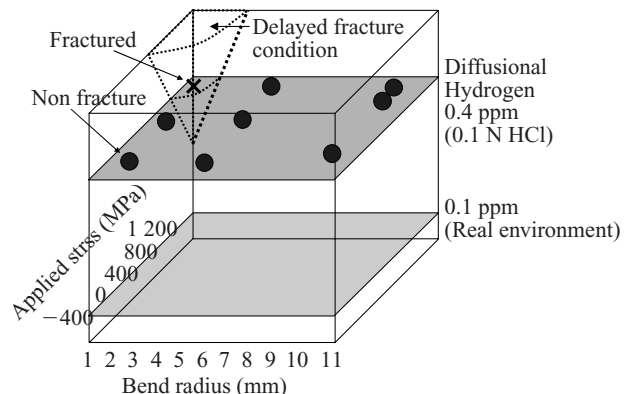


Fig. 5 Delayed fracture condition of the newly developed TS1 180 MPa grade ultra-high strength steel

プを示す。開発鋼は、自動車用プレス部品としての通常の使用条件において、遅れ破壊に対して十分な余裕度があると考えられる。

5. 開発鋼の適用事例の紹介

開発鋼が、自動車用シート骨格部材として適用された例を **Photo 2** に示す。本シートの特長であるバックサイドフレームには、超高λ型 TS980 MPa 級鋼板が適用されており、1枚の鋼板を曲げ加工後、機械接合で BOX 構造としている。またクッションサイドフレーム部には、高λ型 TS980 MPa 級鋼板が適用されている。

Photo 3 には、低 YR 型 TS980 MPa 級鋼板を用いて、センターピラーアウターを模した実験金型でプレス成形した

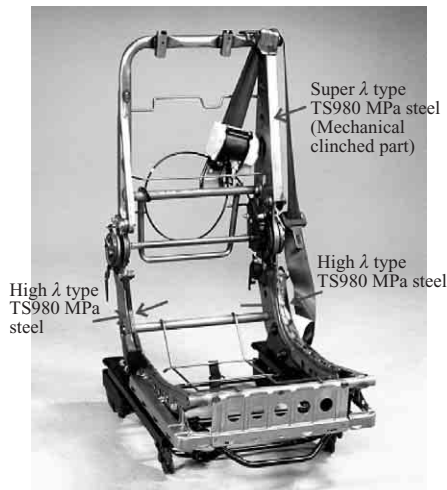


Photo 2 Automotive seat frame to which newly developed TS980 MPa grade steels were applied



Photo 3 Applied example for center pillar reinforcement of TS980 MPa steel (lor YR type) (Formed by the experimental stamping tools in JFE Steel)

結果を示す。加工の厳しい絞り成形部品への適用も十分可能である。

また、TS1180 MPa 級開発鋼板は、ホットプレス材と同等の耐衝突特性を有することから、従来、ホットプレスを使用されていた部品へ、冷間プレスでの適用が検討されている。

6. おわりに

本稿では、最近開発した自動車の軽量化と衝突安全性の向上に貢献する、成形性に優れた TS980 MPa 級および TS1180 MPa 級超高強度冷間圧延鋼板の特長と適用事例を紹介した。

- (1) 開発鋼は、優れた特性と、適用される部位に合わせた特長ある材質の製品を取り揃えており、お客様にご提供している。
- (2) TS1180 MPa 級開発鋼板は、従来の TS1180 MPa 級鋼板と比較して、伸びが 1.5 倍以上に向上し、一般の TS980 MPa 級鋼板と同等の伸び、穴広げ性を有する。また、プレス成形時の加工ひずみによる高い加工硬化と、塗装焼付けによる大幅な強度上昇により、ホットプレス部品の代替も可能となる。

参考文献

- 1) 吉武明英, 岩瀬耕二. Proc. of the 2000 Annual Meeting of JSAE/MMD. WS(2)-4, 2000.
- 2) 実川正治, 細谷佳弘. NKK 技報. no.179, 2002, p.36-44.
- 3) 安田顕, 古君修, 清野芳一. 川崎製鉄技報. vol.32, no.1, 2000, p.1-6.
- 4) 関田貴司, 金藤秀司, 蓮野貞夫, 佐藤昭夫, 小川隆生, 小倉邦明. JFE 技報. no.2, 2003, p.1-16.
- 5) 田中甚吉, 樺澤真事, 小野守章. 高強度薄鋼板のスポット溶接性. 日本鋼管技報. no.105, 1984, p.32-42.
- 6) 長滝康伸, 津山青史, 細谷佳弘, 金藤秀司, 奥山健. 日本金属学会報. vol.32, no.4, 1993, p.238-240.
- 7) 長谷川浩平, 占部俊明, 山崎喜政, 吉武明英, 細谷佳弘. あたりあ. vol.42, no.1, 2003, p.76-78.
- 8) 中村展之, 占部俊明, 細谷佳弘, 海津亨. CAMP-ISIJ. vol.13, 2000, p.391-394.
- 9) 河村健二, 長谷川浩平, 占部俊明, 細谷佳弘. CAMP-ISIJ. vol.15, 2002, p.1229.



松岡 才二



長谷川浩平



田中 靖