

水焼入れ方式連続焼鈍プロセス (WQ-CAL) を活用した自動車骨格部品用高強度冷延鋼板

High-Strength Cold-Rolled Steel Sheet for Automotive Structural Components Utilizing Water Quenching Continuous Annealing Process (WQ-CAL)

戸畑 潤也 TOBATA Junya JFE スチール スチール研究所 薄板研究部 主任研究員・博士 (工学)
木村 英之 KIMURA Hideyuki 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

要旨

JFE スチールは独自の水焼入れ方式の連続焼鈍プロセス (WQ-CAL) を活用し、自動車の骨格部品に適用できる 780~1 470 MPa 級の高強度冷延鋼板 (冷延ハイテン) を開発・商品化してきた。引張強さが 1 320 MPa 級以上の超ハイテンの部品適用には冷間プレス成形性、スポット溶接性の確保や遅れ破壊への考慮も不可欠であるが、超高強度化に伴うこれらの諸課題を、世界最高速の急速冷却能力を持つ WQ-CAL を駆使した低合金成分設計と金属組織制御により解決し、自動車の骨格部品に適用できる超ハイテンを製品化した。特に、1 320~1 700 MPa 級のマルテンサイト組織型鋼板は、熱間プレス材と比較して生産性やコスト、環境負荷の面で優れており、車体の軽量化に貢献する超ハイテンとして今後も更なる適用拡大が期待される。

Abstract:

JFE Steel has developed and commercialized high-strength cold-rolled steel sheets with a tensile strength range of 780 to 1 470 MPa, applicable to automotive structural components, by utilizing its unique water quenching continuous annealing process (WQ-CAL). For the application of ultrahigh-strength steel sheet with a tensile strength of 1 320 MPa or higher, it is essential to ensure cold press formability and spot weldability, and to consider delayed fracture. These challenges associated with ultrahigh-strength steel have been addressed through low-alloy component design and microstructure control, leveraging the world's fastest rapid cooling capabilities of WQ-CAL, resulting in the commercialization of ultrahigh-strength steel sheet suitable for automotive structural components. Martensitic steel sheet with a strength range of 1 320 to 1 700 MPa demonstrates superior productivity, cost-effectiveness, and low environmental impacts compared with hot-pressed steel sheet, and is expected to see further expansion in applications as ultrahigh-strength steel sheets, contributing to vehicle lightweighting.

1. はじめに

近年、自動車に求められる機能は多様化しており、Connected (コネクテッド)、Autonomous (自動運転)、Shared&Service (カーシェアリング)、Electric (電動化) を総称した CASE と呼ばれる技術革新が進んでいる。特に電動化は CO₂ 排出抑制に貢献する一方で、電気自動車はガソリン車に比べて航続距離が短いことから、電気自動車、ガソリン車ともにさらなる車体軽量化が課題である。このような CASE で代表される自動車の大きな変革に対応し、鉄鋼メーカーにも革新的な鉄鋼材料の開発が求められている。

図 1 に、JFE スチールの冷延鋼板の開発経緯を示す。1970 年代に世界で初めて連続焼鈍による冷延鋼板の製造を

開始し、写真 1¹⁾ に示す水焼き入れ (WQ) 設備を有する連続焼鈍ラインを最大限活用した低合金成分設計と金属組織制御により、ハイテンの適用拡大に必要な成形性、耐遅れ

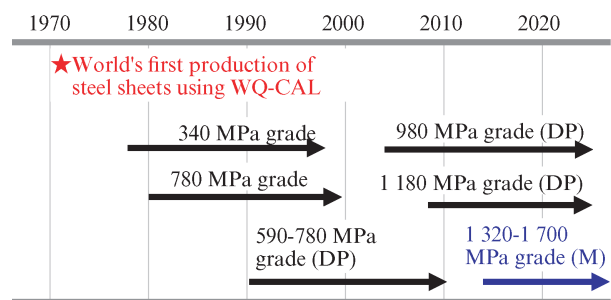


図 1 WQ-CAL 設備を用いた開発経緯

Fig. 1 Development process utilizing WQ-CAL equipment
DP: Dual phase, M: Martensite

2025年10月2日受付



写真1 連続焼鈍ラインに設置されたWQ設備¹⁾

Photo 1 Fukuyama No.3 continuous annealing line equipped with water quenching (WQ-CAL)¹⁾

破壊特性、スポット溶接性の改善を図り、安全性と実用性を兼ね備えた鋼板商品を展開している。

本稿では、JFE スチール独自の WQ-CAL 技術の概要と、WQ-CAL を用いて製造した 1 320-1 700 MPa 級のマルテンサイト組織型鋼板の特徴、材料設計の考え方、およびそれらの適用事例を紹介する。

2. WQ-CAL の製造技術とそれを用いた材料開発

JFE スチールでは、独自開発した世界最高速 (1 000℃/s 超) の冷却能力を有する WQ-CAL を活用し、780 MPa 級から 1 470 MPa 級までの冷延ハイテンの商品化に成功している¹⁻⁴⁾。WQ-CAL の設備概略と鋼板に施される熱サイクルを **図 2** に模式的に示す。WQ-CAL では、焼鈍条件に応じて、DP (Dual Phase) 組織型鋼板とマルテンサイト単一組織型鋼板を造り分けることができる。

DP 組織型鋼板の製造において、WQ-CAL では、焼鈍温度と水焼入れ温度による硬質な第 2 相の体積分率の制御、および焼戻し温度による硬質な第 2 相の硬さの制御をそれぞれ切り分けて実施できる。その代表例として、**図 3** に、980 MPa 級 DP 組織型鋼板の伸び-穴広げ性バランスを示す。一般に伸びを向上させると穴広げ率が劣化する傾向があり、これらの特性はトレードオフの関係にあるが、WQ-CAL によって製造された 980 MPa 級鋼板は、良好な伸びを維持しつつ優れた穴広げ性を実現している。これは、WQ-CAL の焼鈍温度と水焼入れ温度の最適化によるフェライト分率の制御により適度な延性が維持され、また焼戻し温度の最適化によりフェライトと焼戻しマルテンサイト組織間の硬度差が低減し、優れた穴広げ性を実現されたためである^{5,6)}。

WQ-CAL の高い冷却能力は、C や焼入れ元素の添加を抑制しつつ高強度化を可能にしたため、遅れ破壊特性やスポット溶接性に優れたマルテンサイト組織型鋼板の製造に

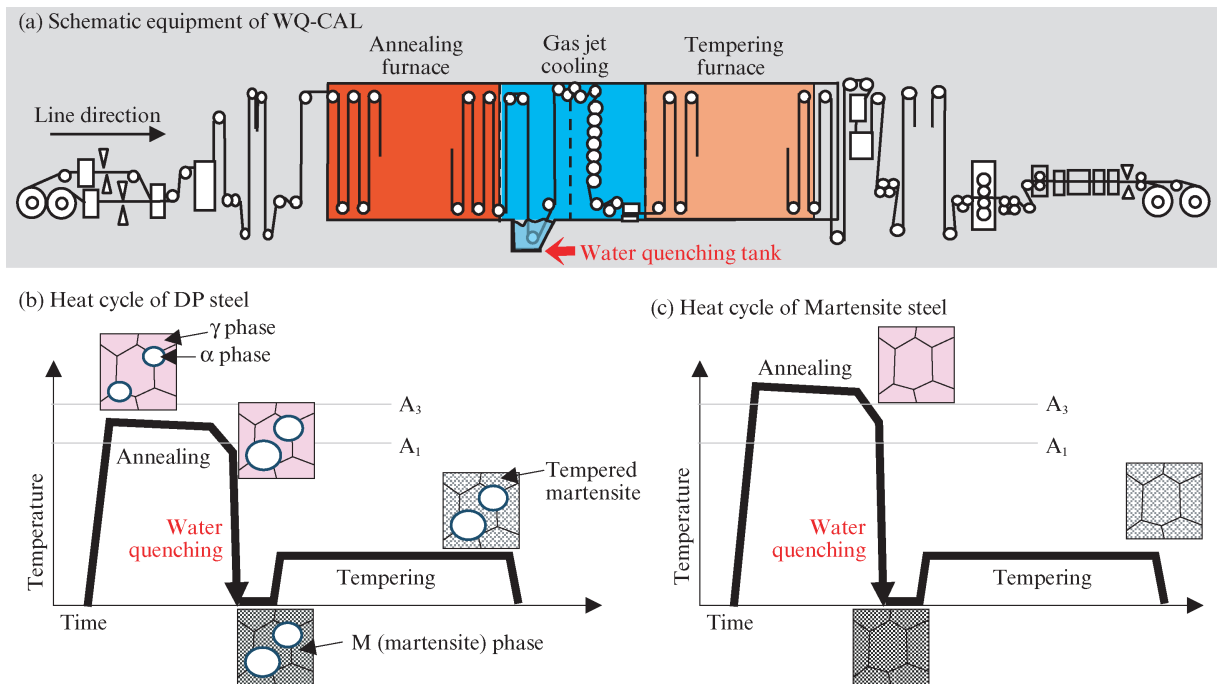


図 2 (a) 連続焼鈍ラインの設備構成, (b) DP 組織型鋼板および (c) マルテンサイト組織型鋼板の熱処理パターンおよび組織変化の模式図

Fig. 2 (a) Equipment configuration of a continuous annealing line, and heat treatment patterns and microstructural changes of (b) DP (Dual phase) steel sheets and (c) martensitic steel sheets
 γ phase: Austenite phase, α phase: Ferrite phase

表 1 1 320-1 470 MPa 級マルテンサイト組織型鋼板のラインナップ

Table 1 Line up of 1 320-1 470 MPa grade martensitic steel

TS grade	Name	Mechanical properties					C _{eq}
		YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	λ (%)	R/t	
1 320	1320CR	1 160	1 330	7	50	2.5	0.24
1 470	1470CR	1 270	1 510	7	50	3.2	0.27
1 700	1700CR	1 450	1 750	7	40	3.6	0.38

YS: Yield strength TS: Tensile strength El: Elongation

λ: Hole expanding ratio

R/t: Radius to thickness ratio. It indicates the limit at which cracking does not occur

C_{eq}: Carbon equivalent (= C + Si/30 + Mn/20)

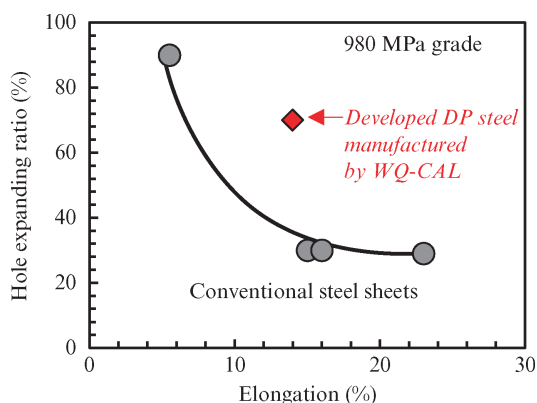


図 3 980 MPa 級 DP 組織型鋼板の伸び-穴広げ性バランス

Fig. 3 Elongation-Hole expanding ratio balance of 980 MPa grade DP steel sheets

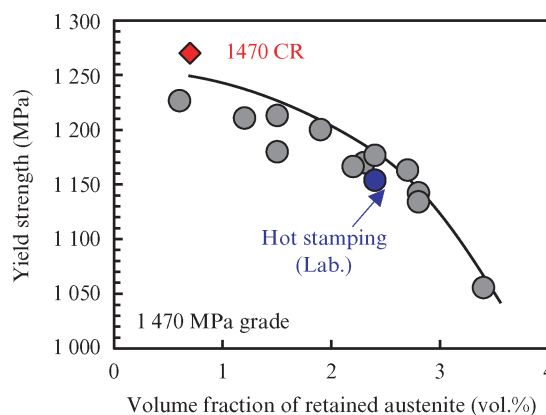


図 4 1 470 MPa 級鋼板における残留オーステナイト量と降伏強度の関係

Fig. 4 Relationship between the amount of retained austenite and yield strength in 1 470 MPa grade steel sheets

非常に適している。また、急速冷却により鋼板の微視組織の不均一性を極限まで低減することで、優れた穴広げ性や曲げ性などの冷間プレス成形性も実現できる。1 470 MPa 以上の強度を必要とする部品の製造方法として熱間プレス工法が知られているが、高温への加熱や酸化スケール除去、プレス成形後のレーザートリム等の後処理が必要で、設備コストや加熱工程における熱エネルギー消費が大きく、環境負荷の課題もある。これに対して、冷間プレス工法は生産性、コスト、環境負荷の観点で優れており、1 470 MPa 級のマルテンサイト組織型鋼板は、熱間プレス部品の代替としてお客様から高い評価をいただいている。

3. WQ-CAL で製造される最新のマルテンサイト組織型鋼板の開発状況

表 1 にマルテンサイト組織型鋼板の各製品とその代表特性を示す。1 320, 1 470 および 1 700 MPa 級のマルテンサイト組織型鋼板 (以降、それぞれ 1320CR, 1470CR, 1700CR と称す) は冷間加工用の鋼板として世界最高レベルの強度を有している。これらの鋼板は、前章で述べたとおり C や焼入れ元素の添加を抑制しつつ効果的に高強度化され、高

い衝突性能と良好な耐遅れ破壊特性、スポット溶接性を有する製品として、自動車の耐衝突部品用素材として使用されている。また、急速冷却により鋼板の微視組織の不均一性を極限まで低減したことで、優れた穴広げ性 (λ) や曲げ性 (R/t) などの冷間プレス成形性も有している。本章では WQ-CAL の利点を最大限に活用したマルテンサイト組織型鋼板の特長について紹介する。

3.1 耐衝突特性

マルテンサイト組織型鋼板の第一の特徴は、高い降伏強度に起因した優れた耐衝突特性である。マルテンサイト組織型鋼板の高降伏強度は、降伏強度の低下の原因となる残留オーステナイトを極限まで低減する組織設計により実現する。図 4 に 1 470 MPa 級鋼板における残留オーステナイトと降伏強度の関係を示す。ここで、ラボで作製した 1.5 GPa 級の熱間プレス材の結果も併せて示す。残留オーステナイト量の増加に伴い降伏応力が低下する傾向が確認されるが、1470CR は WQ-CAL の高い冷却能力により、冷却中のマルテンサイトとオーステナイト間の炭素分配⁷⁾ が抑制されるため、残留オーステナイトがほとんど形成されず、1.5 GPa 級の熱間プレス材よりも高い降伏強度を示すことが分かる。

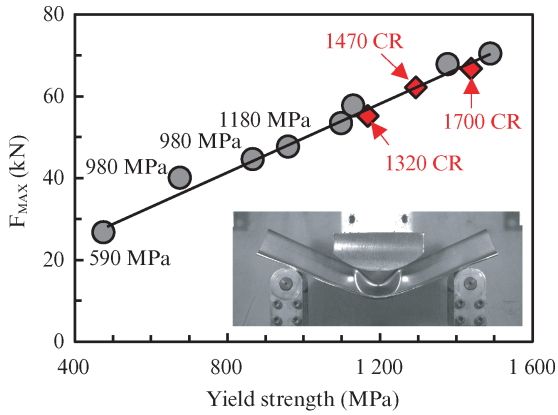


図5 耐衝突特性と降伏強度の関係⁸⁾

Fig. 5 Relationship between impact resistance and yield strength⁸⁾

強度レベルが 590 MPa から 1700 MPa の鋼板を用いて自動車部品を模擬した M 字ハット部品 (長さ 400 mm) を作製し、部品の中央部で半径 R100 の鋼製パンチで 3 点曲げ試験を行い、耐衝突特性と降伏強度の関係を整理した結果を図 5 に示す⁸⁾。1470CR の降伏強度は 1270 MPa、1700CR の降伏強度は 1430 MPa と高いため、降伏強度が 1000~1200 MPa⁹⁾ の 1.5 GPa 級の熱間プレス材や降伏強度が 1100~1400 MPa の 1.8 GPa 級の熱間プレス材と比較すると、同一強度の熱間プレス材を凌駕する耐衝突特性を有することがわかる。

3.2 耐遅れ破壊特性

1180 MPa 級以上の超ハイテンでは、自動車部品として使用中の遅れ破壊が懸念される¹⁰⁾。遅れ破壊とは、鋼中に侵入した水素に起因する鋼の脆化・破壊現象であり、その支配因子としては、強度や組織などの材料因子、負荷応力、侵入水素量が考えられる。このため、超ハイテンを自動車部品に適用する際には、遅れ破壊の抑制も考慮する必要がある。

超ハイテンの遅れ破壊を抑制するためには、焼入れ元素である Mn の添加を抑制することが有効であることが知られている。遅れ破壊の材料因子としては Mn の存在が重要な役割を果たし、具体的には MnS が応力集中部や水素侵入の起点となり、耐遅れ破壊特性を低下させる原因と考えられている¹¹⁾。当社の 1320CR、1470CR および 1700CR は、WQ-CAL の高い冷却能力を活かし、焼入れ元素である Mn の添加量を最小限に設計することで、遅れ破壊に対する耐性を向上させている。図 6 に強度レベルが異なる鋼板を用いて 4 点曲げで応力を負荷した試験片を作製し、0.1N-HCl に浸漬することで水素を吸蔵させる遅れ破壊試験を行い、浸漬後 96 時間経過時点で破断しない破壊限界応力を調査した結果を示す。ラボで製造した高 Mn 鋼は、降伏強度の上昇に伴い破壊限界応力が低下する傾向が認められたが、当社の

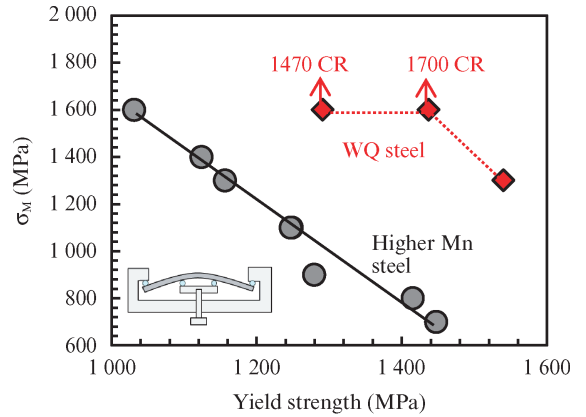


図6 耐遅れ破壊特性と降伏強度の関係

Fig. 6 Relationship between maximum unfractured stress and yield strength σ_M : Maximum unfractured stress

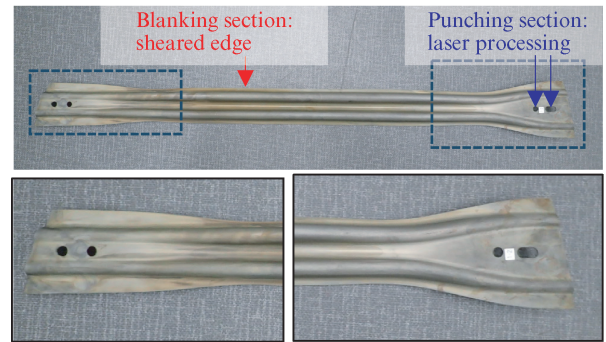


写真2 1700CR のモデル部品の遅れ破壊評価結果 (pH1 塩酸 96 時間浸漬後)

Photo 2 Delayed fracture evaluation results of 1700CR model components (after 96 hours of immersion in pH1 hydrochloric acid)

1470CR および 1700CR は、最大 1600 MPa の応力を負荷しても割れの発生は認められなかった。この遅れ破壊評価により、1470CR および 1700CR が十分な性能を有していることが確認できたため、遅れ破壊に及ぼすプレス成形の影響を考慮し、1700CR のドアインパクトビームのモデル部品を pH1 の塩酸水溶液に 96 時間浸漬した。その結果を写真 2 に示す。浸漬後の部品にも割れの発生は認められず、当社の 1700CR は実部品形状でも優れた耐遅れ破壊特性を有していることが確認された。

このように急速冷却により鋼板の微視組織の不均一性を極限まで低減し、かつ Mn の添加量を最小限に設計した 1470CR および 1700CR はミクロン単位で硬さが均一なため、水素脆化特性にも優れていることが確認された。

3.3 スポット溶接性

マルテンサイトの硬さは C 量に依存するため、鋼板の高強度化に伴い、添加される C 量は必然的に増加するが、1320CR、1470CR および 1700CR は、WQ-CAL の高い冷却

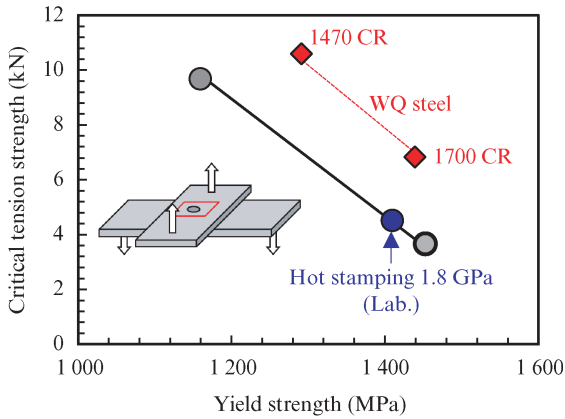


図7 溶接部強度と降伏強度の関係

Fig. 7 Relationship between critical tension strength of welded points and yield strength

能力を活かし、スポット溶接性に影響を与えるC当量を最小限に設計している。図7に、同鋼種で強度レベルが異なる鋼板をスポット溶接したナゲット径 $5\sqrt{t}$ の十字引張試験片を作製し、10 mm/minの引張試験で破断までの最大荷重（溶接部の継ぎ手強度）を評価した結果を示す。降伏強度の増加に伴い溶接継手の強度が低下する傾向が確認されるが、1470CRおよび1700CRは、WQ-CALの高い冷却能力によ

り、Cや焼入れ元素の添加を抑制しつつ効果的に高強度化でき、同一降伏強度レベルの熱間プレス材よりも溶接継手の強度が高いことが分かる。

4. マルテンサイト組織型鋼板の適用事例

前章で紹介したWQ-CALで製造した1320 MPaおよび1470 MPa級のマルテンサイト組織型鋼板は、耐衝突性能が要求される自動車の骨格部材を中心に実用化が進んでいる。図8にこれまでに採用された部品、写真3に1470CRが適用された事例として、ルーフセンターリインフォースメント部品を示す¹²⁾。これらの部品について超ハイテンを適用することで、従来の構造に対して約13%軽量化できる。

より大きな軽量化効果を得るために開発した1700CRを用いて、バンパーリインフォースを模擬した実験金型でプレス成形した結果を写真4に示す。世界最高レベルの1700 MPa級のバンパーが冷間プレス成形で製造できることが確認できた。これにより、更なる軽量化が期待されるとともに、1.8 GPaおよび2.0 GPa級の熱間プレス材からの置換も想定され、実際に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。

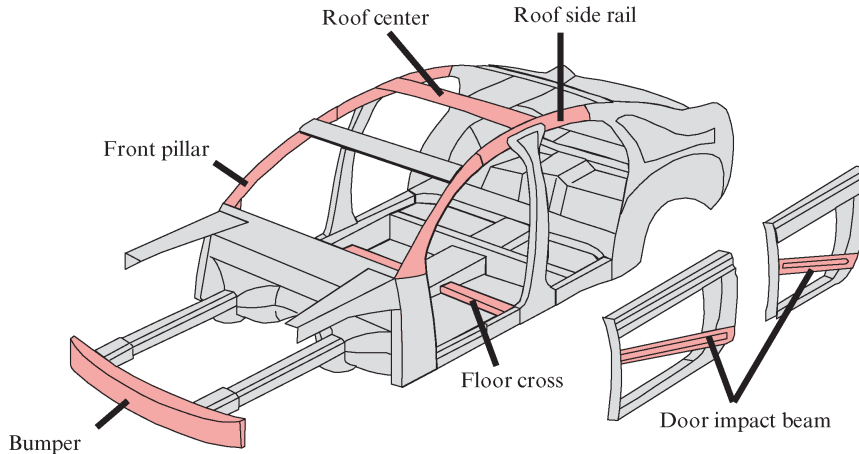


図8 マルテンサイト組織型冷延鋼板が採用された部品

Fig. 8 Automotive structural parts that utilize martensitic cold-rolled steel sheet

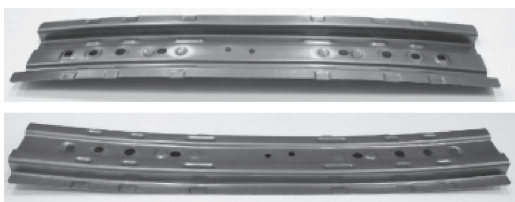


写真3 1470 MPa級マルテンサイト組織型冷延鋼板を用いたルーフセンターリインフォースメント部品¹²⁾

Photo 3 Roof center reinforcement component made of 1470 MPa grade martensitic steel sheet¹²⁾



写真4 1700 MPa級マルテンサイト組織型冷延鋼板を用いたバンパーリインフォース部品

Photo 4 Bumper reinforcement parts component made of 1700 MPa grade martensitic steel sheet

5. おわりに

JFE スチールでは急速冷却が可能な WQ-CAL の利点を最大限生かして 780-1470 MPa 級冷延ハイテンを商品化し、自動車骨格部品用素材として製造・販売している。本稿ではその中で、1470 MPa 級を中心としたマルテンサイト組織型鋼板の特長と適用事例を紹介し、また更なる高強度化ニーズに対応して開発した 1700 MPa 級超ハイテンについても紹介した。

これらのマルテンサイト組織型鋼板は、同一強度レベルの熱間プレス材よりも優れた耐衝突特性、耐遅れ破壊特性およびスポット溶接性を有していることから、熱間プレス部品の代替としての適用が期待される。

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) 例えば、妻鹿哲也, 長谷川浩平, 川邊英尚. 補強・シート部品用高強度鋼板—衝突安全性を飛躍的に高めることが可能な超高強度鋼板—. JFE 技報. 2004, no. 4, p. 33-38.
- 2) 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.
- 3) 木村英之, 大久保智幸, 新宮豊久. 自動車の革新に貢献する先端鉄鋼材料とそれを支える応用技術. ふえらむ. 2022, vol. 27, no. 1, p. 15-20.
- 4) 南秀和, 小林崇, 船川義正. 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. JFE 技報. 2018, no. 41, p. 20-27.
- 5) Hasegawa, K.; Kawamura, K.; Urabe, T.; Hosoya Y. Effects of Microstructure on Stretch-flange-formability of 980 MPa Grade Cold-rolled Ultra High Strength Steel Sheets. ISIJ-Int. 2004, vol. 44, no. 3, p. 603-609.
- 6) Takashima, K.; Hasegawa, K.; Toji, Y.; Funakawa, Y. Void Generation in Cold-rolled Dual-Phase Steel Sheet Having Excellent Stretch Flange Formability. ISIJ-Int. 2017, vol. 57, no. 7, p. 1289-1294.
- 7) Tobata, J.; Minami, H.; Toji, Y.; Kaneko, S. Yielding Behavior of Low Carbon Martensitic Steel Sheet Containing Retained Austenite. ISIJ-Int. 2024, vol. 64, no. 2, p. 439-448.
- 8) 小野義彦, 船川義正, 吉岡真平, 二塚貴之, 佐藤健太郎. 自動車の CO2 排出抑制に貢献する「1.5 ギガパスカル級冷延鋼板」. ふえらむ. 2024, vol. 29, no. 5, p. 304-307. 一部改訂して引用
- 9) Çavuşoğlu, O.; Çavuşoğlu, O. Yılmazoğlu, A.G.; Üzel, U.; Aydıncı, H.; Güral, A. Microstructural features and mechanical properties of 22MnB5 hot stamping steel in different heat treatment conditions. J. Mater. Res. Technol. 2020, vol. 9, no. 5, p. 10901-10908.
- 10) 例えば, 松山晋作. 遅れ破壊. 日刊工業新聞社, 1989. 208p.
- 11) 岡田秀弥, 島田春夫. 鋼板表面における硫化マンガンと錆発生との関係. 鉄と鋼. 1974, vol. 60, no. 5, p. 540-548.
- 12) JFE スチール ニュースリリース. <https://www.jfe-steel.co.jp/release/2021/10/211022.html> (2025 年 10 月 2 日アクセス)