

# 車体軽量化に寄与する自動車用ハイテン

## High Strength Steel Sheets for Weight Reduction of Automobiles

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)  
長滝 康伸 NAGATAKI Yasunobu JFE スチール スチール研究所 表面処理研究部長 (理事)・博士 (工学)

### 要旨

自動車の燃費向上要求はますます強まっており、先進国のみならず今後モータリゼーションが始まる国々でもほぼ同様の規制がかけられようとしている。燃費向上には電動化が有力な方法であるが、電気自動車でも車体軽量化は重要な技術であることに変わりはない。車体軽量化のための高強度鋼板適用は、10年前と比べて着実に進捗しており、980 MPa 級を超える高強度鋼板の使用が拡大してきた。さらには、冷間プレス工法に加えてホットスタンプ工法もレインフォース部品を中心に拡大してきた。これらの高強度鋼板を使いこなすための新たな課題も発生している。

主として硬いマルテンサイトを組織に加えることで強度を調整する高強度鋼板では、連続焼鈍工程における加熱後の冷却がポイントとなる。当社は極めて高い冷却速度を有する水焼入れ技術を駆使して低合金での高強度を実現し、溶接をはじめとする施工性を向上させている。さらに冷延鋼板に比べて表層の亜鉛により摩擦係数の大きな溶融亜鉛めっき鋼板では、成形性を向上させる技術として高潤滑皮膜を開発し、実用化した。

### Abstract:

Requirements to fulfil fuel efficiency regulation are becoming strict year by year. The developing countries are also establishing strict regulations similar to developed countries. Body weight reduction is still important even in electric car which is effective to improve fuel efficiency. Applying high strength steel more than 980 MPa grade in tensile strength has progressed in recent ten years. Moreover, hot stamping also becomes applicable to automobile reinforcement members. Along with the situation, many issues to use ultra high strength steels and hot-stamped members are newly presented.

Since the increase in volume fraction of martensite makes steels strengthened, water quench process in the continuous annealing line is key to develop and produce new high strength steels. Very rapid cooling rate in JFE continuous annealing process realizes excellent welding properties in newly developed low alloy steels. Surface treatment also improves press formability of high strength galvanized steel sheets and has been applied to automobiles.

## 1. はじめに

地球温暖化の原因となっている温室効果ガスである二酸化炭素は人類の経済活動で大気中に多量に放出されており、その濃度は年々高まっている。自動車の走行時に排出される二酸化炭素量は多く、二酸化炭素排出量を削減するには、自動車からの排出を削減する必要があると考えられている<sup>1)</sup>。自動車の走行で排出される二酸化炭素量は駆動方法によらず車体の重量に比例する<sup>2)</sup>ことから、車体軽量化は二酸化炭素排出量低減には重要な施策の一つである。たとえ電気自動車であっても、100~200 kg 近い電池を今の重量に加えて搭載せざるを得ないことと、一回の充電での走行距離をさらに伸ばすためにも車体軽量化は必要である。

車体軽量化は、自動車重量の60%以上を占める鋼製品の高強度化で推し進められてきた。現在、マルチマテリアル化による軽量化も考えられているが、コストや供給安定性を考慮すると鋼板が主たる自動車用材料であることは当面変わらない。本稿では、過去から現在、そして近未来で自動車軽量化に寄与する高強度鋼板の全体感を述べる。

## 2. 燃費規制と自動車駆動方法の変遷

図1に各国の燃費規制の推移<sup>3)</sup>と今後の規制強化値を示す。いずれの国または地域も年々燃費規制をほぼ直線的に強化してきており、今後も傾きは緩むことはないと考えられる。特に、今後モータリゼーションが進む中国やインドでも、すでにモータリゼーションを経験した国や地域と同等の燃費規制が課せられることが特徴である。

2017年10月2日受付

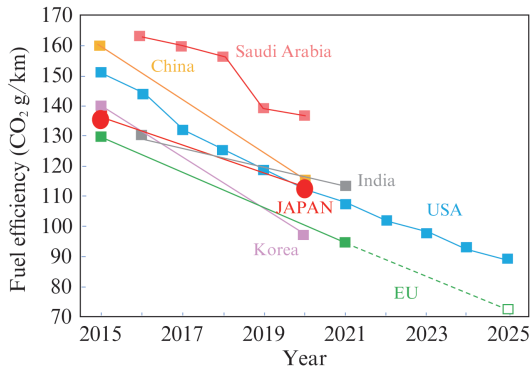


図1 各国のCO<sub>2</sub>排出量規制の推移  
Fig. 1 Change in mileage regulations<sup>3)</sup>

これらは、日本、北米、ヨーロッパに限らず、グローバルで同等の性能を持つ車の供給が必要となることを示しており、現地調達を前提とした自動車生産では日本国内と同等の性能を有する鋼板を各地で生産しなければならないことを示している。一方、衝突規制の強化や自動運転装置などによる重量増加は毎年増える一方であり、この増加を吸収する形で燃費向上が必要となる。エンジンのハイブリッド化による軽量化が主たる燃費向上手段であるが、重量増の一部は骨格構造軽量化で吸収しなければならないことから車体構造部品の高強度化が重要である。

先に述べたように、これらの燃費規制を解決するためガソリンエンジンから電動モーターへの流れができてきたが、現在の電気自動車はバッテリーに起因する航続距離やコストおよびインフラ整備、さらには電池のリサイクルの課題を有しており、完全な電動化にはかなりの時間を有すると考えられる。そのため、内燃機関を搭載しない純粋な電気自動車の急激な増加より前に内燃機関とモーターの両者を搭載したハイブリッドタイプの駆動が少なくともいったんは主流になると考えられる。図2に、駆動方法別の国内生産台数の推移予想を示す<sup>4)</sup>。至近での欧州および中国での内燃機関を搭載しない純粋な電気駆動自動車への生産シフトの発表な

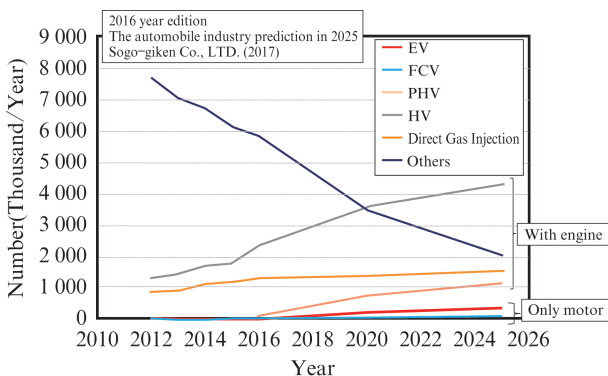


図2 駆動方法別自動車生産台数推移の予想

Fig. 2 Automobile production number prediction in each driving system<sup>4)</sup>

どもあり、予想機関ごとに大きな幅を有してはいるが、電動モーターのみを有する電気自動車の生産台数はおおむね2020年以降の増加であり、増加率は高いものの2025年の段階ではまだエンジン搭載した車の生産台数が多いと考えられる。

なお、電気自動車ではキャビン前部の余剰空間の体積減少（前輪周囲のホイールベースの短縮化）や100 kgを超える電池搭載による後輪への重量の配分変化がoccurすることから、

- (1) 電池保持、電池保護のための高強度化
- (2) 操舵性向上を目的とした重量配分適正化のための後方部軽量化
- (3) 下部重量低減のための足回り部品の軽量化

が10年後の自動車車体部品への要望となると考えられる。電気自動車の普及時期には今後絶えず注意しながら、当社は社会的ニーズに適合する素材供給を行っていく予定である。

### 3. 自動車用鋼板の強度と使用上の課題

図3に、自動車車体部位別に使用されている鋼板の引張強さを示す。図中のハッチングの帯（色の薄い部分）は2007年当時から用いられている強度を示し、塗りつぶした帯（色の濃い部分）はこの10年間で新たに採用された強度を示す。自動車車体で直接目視される外板部品には複雑な形状を優先して成形性を重視した270~340 MPaまでの鋼板が用いられてきたが、現在では440 MPa級の鋼板が用いられ始めた。この外板パネルは、アルミ板の使用例も多いことから材料置換の対象となりやすい部位である。一方、440 MPa級化への対応では、すでに0.6 mm程度まで薄肉化されていることから、耐デント性と張り剛性の両者での性能維持が課題である。

エネルギー吸収部材は、高い加工硬化で安定的に圧壊変形させる必要があることから440~780 MPa級までの鋼板が使用されている。これらについては高強度化はやや停滞している。

ピラーやロッカーなどのキャビンの中の乗員を保護する部品には、衝突の大荷重でも変形させないために高強度化が

Parts	Grade in Tensile Strength (MPa)										HS	
	270	340	390	440	590	780	980	1180	1320	1470		
Outer panel	Fender, Side panel											
	Hood, Roof, Door											
Structural parts	Energy Adsorption parts											
	Pillar, Rocker Cabin parts											
	Bumper, Impact beam											
Suspension												

図3 自動車部品ごとの適用鋼板強度水準

Fig. 3 Strength of steels in each automobile parts

進行している。従来の 590 MPa から 980 MPa 級を超えて 1 180 MPa 級の鋼板が用いられるようになった。さらには、鋼板を 950℃程度に加熱後に金型でプレスして急冷することで高強度部品を得るホットスタンプ (HS) による部品も増加している。

衝突の衝撃を直接受け止めるバンパーやインパクトビーム部品は従来より高強度化が顕著であったが、これにも HS 部品が積極的に用いられるようになってきた。

一方、サスペンション部品には 440~780 MPa 級熱延鋼板が用いられているが、近年では骨格材ほどには高強度化が進んでいない。これは、重要保安部品である足回り材では高強度化が慎重に進められるとともにゲージダウンによる剛性低下、腐食代の確保、溶接部の疲労強度などの骨格材とは異なる難しい課題に決定的な解決技術が無かったためである。しかし、近年では溶接条件適正化によるアーク溶接部のノロ発生抑制技術、止端部形状制御技術などの発展により課題解決に近づきつつある。

図 3 では、高強度材として冷間プレス工法用材料とさらに高強度化のための HS 材が用いられたことを述べた。HS 工法は高温に加熱した状態の軟らかい薄板を金型でプレスすることで、成形と同時に焼入れして高強度化する方法で

ある。高強度部品を製造する観点では 1 つの理にかなった方法であるが、高強度鋼板の冷間プレス工法とは異なる課題も有している。表 1 に冷間プレス工法と HS 工法の課題を示す<sup>5)</sup>。冷間プレス工法では (1) 低延性材の成形、(2) 高強度化に伴うプレス荷重の増加、(3) スプリングバック量の増加が顕著となる。HS 工法では、(a)生産性、(b)切断方法、(c)形状制約、(d)加熱に耐えられる防錆皮膜、(e)成形後の残留延性、(i) 部品強度の保証が新たな課題となる。なお、スポット溶接での液体金属脆性 (LME: Liquid Metal Embrittlement)<sup>6)</sup>、遅れ破壊、金型寿命等は、共通の課題である。

上記の共通課題の一つである LME が発生すると、垂鉛めっき鋼板の抵抗スポット溶接熱影響部で母材の粒界への垂鉛侵入が観察される<sup>7)</sup>。この LME は、抵抗スポット溶接時の高温で垂鉛が溶融している間に高い引張応力が負荷された時に発生する。これらの防止には、鋼板と工法の両者での技術開発が重要である。

#### 4. 自動車用高強度鋼板の製造方法とその特徴

図 4 に、冷間プレス用ハイテンを連続焼鈍設備で製造するときの熱履歴を示す<sup>8-10)</sup>。連続焼鈍設備では、表面の圧延油などを除去した冷間圧延材を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まで加熱する。二相域に加熱された鋼板では、フェライトが再結晶して延性が回復する一方で、オーステナイト部分は続く急冷でマルテンサイトとなる。冷却の仕方は、ロール冷却、ガス冷却、水焼入れ冷却があり、このうち水焼入れ冷却は冷却速度が速く、均一に冷却できることから強度の安定した低合金高強度鋼板の製造に最も優れている。焼入れで生成したマルテンサイトを続く加熱で焼戻し、韌性を出すと同時に硬さを調整する。これにより強度をマルテンサイトが加工性をフェライトが担う複合組織高強度鋼板を製造できる。また、冷却途中の 500℃以下で冷却を停止して保持するオーステンパ処理を行うことで、ベイナイト変態を促進し、室温で安定なオース

表 1 自動車部品適用時の課題

Table 1 Issues of steels applying to automotive parts<sup>5)</sup>

Press	Issue	Technique
Cold stamping	(1) Press formability	Development of high ductility steels
	(2) Press load	Process analysis
	(3) Spring-back, (Twist and camber)	Change in press sequence
	(4) Welding/LME	Laser welding, Change in spot welding conditions
	(5) Delayed fracture	Defense of hydrogen, sharing method, improvement of microstructure
	(6) Gallings/Die life	Hardening method
Hot stamping	(a) Production efficiency	Cooling method of die
	(b) Piercing	Hot piercing, Laser cutting
	(c) Shape constrains	Indirect hot stamping
	(d) Anti-corrosion property	Development of anti-corrosion plate
	(e) Ductility of parts	Development of new steels
	(f) Welding/LME	Laser welding, Change in spot welding conditions
	(g) Delayed fracture	Defense of hydrogen, sharing method, improvement of microstructure
	(h) Gallings/Die life	Release of the adhesive metal
	(i) Strength ensuring	Guarantee of strength

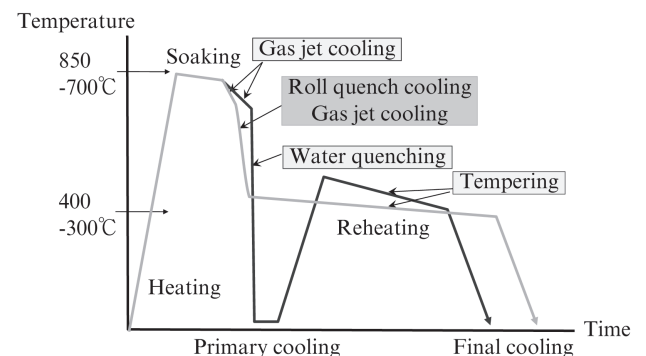


図 4 連続焼鈍ラインにおける熱履歴

Fig. 4 Thermal history of continuous annealing line

テナイトを残すことができる。この残留オーステナイトを含む鋼は高強度でありながら TRIP (Transformation Induced Plasticity:変態誘起塑性)効果で伸びが大きい。ただし、オーステナイトを大量に残すためには、セメンタイトの生成を抑制する必要があり、多量の Si や Mn の添加も同時に必要となる。この添加元素はスポット溶接をはじめこれら鋼板に適合する利用技術が必要となる場合があり、当社は各種ハイテンの利用技術開発にも積極的に取り組んでいる。

さらに高強度化する場合には、加熱温度の上昇とオーステナイトフォーマの添加を組み合わせることで加熱時のオーステナイト分率を上昇させる。図3の1320 MPa級や1470 MPa級の鋼板はマルテンサイト単相組織である。

以下に自動車部位ごとの最近の高強度鋼板を簡潔に示す。

#### 4.1 パネル用高強度冷延および合金化溶融亜鉛めっき鋼板 (440BH)

図5にパネル用BH鋼板の降伏強度の変化を示す。鋼板はプレス成形で加工硬化し、焼付塗装の熱でさらに時効硬化する。プレス成形においては素材の降伏点 (0.2%耐力) を低めることで良好な面品質を得ることができる。現在主に用いられている焼付け硬化型340BHおよび汎用型440Wと比べると、440BHの降伏点は440Wよりも低く340BHとほぼ同等である一方で、焼付塗装の熱処理後は340BH以上であり440Wの近傍まで降伏点が増加する。耐デント性は板厚の1/2乗に比例することから440BHの板厚低減効果は440Wと同等といっても過言ではなく、340BHと比べて0.05mmの板厚低減が可能と見積もることができる。この効果は、440BH材の低降伏点によるものであるが、これはフェライト組織中に微細なマルテンサイトを少量分散させることで実現した<sup>11)</sup>。

ただし、張り剛性については板厚とヤング率のみで決まることから、高強度化で向上することはない。そこで当社はパネル部品のゲージダウンのネックとなる張り剛性向上技術についても開発し、ソリューション技術を提供している<sup>12,13)</sup>。

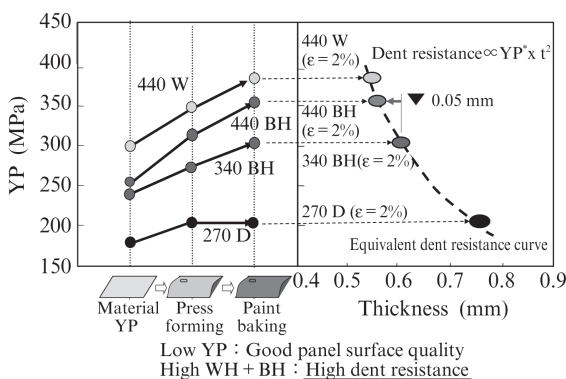


図5 440BH材の降伏強度と板厚低減効果

Fig. 5 Reduction of sheet thickness by increase in yield strength of 440BH after bake handering

#### 4.2 骨格構造用冷延鋼板

骨格構造部品には、鋼板面内での亀裂発生および剪断端面からの亀裂発生を抑制して部品とするために良好な加工性が必要とされる。これらは、それぞれ伸び性と伸びフランジ性と呼ばれている。これら高強度鋼板の加工性は伸び率と穴広げ率で表すことができる。伸び率 (EL: %) は、鋼板が面内でネッキングを起こして破断するまで膨らますように加工 (張出し成形) するときの加工性の指標であり、通常の引張り試験の伸び値である。穴広げ率 (λ: %) は、鋼板の剪断端面の加工性の指標で、鋼板内に打ち抜いた穴ふちを板厚を貫通する亀裂が生じるまでポンチで広げた時に、穴直径が増加した量を元の直径で除して求める。これは、打ち抜き端面を伸ばすこと (フランジ加工) を想定した試験方法である。いずれの指標も高い値ほど、加工量が大きくとれることを示すことから、これらの数値のできるだけ高い鋼板がより広範囲な部品形状に加工できる。

当社は、この2つの加工様式に対して成形しやすい鋼板を緻密な組織制御で実現し、JEFORMA<sup>®</sup>と名付けたラインナップを完成した。図6にJEFORMA<sup>®</sup>のラインナップの概念図を示す。Type1は従来材よりも高伸び率 (EL) とし、張出し成形しやすい特性を実現したもので、袋形状に成形しやすい。Type2は、これをさらに高穴広げ率 (λ) としたもので、さらにブランク端面の成形がしやすいものである。Type3は、Type1よりも高い伸びを実現した物で、深い袋形状を可能とする。これらの成形性は、複雑な部品形状を実現するために必要であることからラインナップとした。

#### 4.3 加工性を目的とした表面処理

高強度材の伸び率は低強度材よりも低いことは避けられない。この低い伸び率に起因する成形性、特に張出し成形性の低下を補完する技術として高潤滑溶融亜鉛めっき (JAZ<sup>®</sup>) を開発した<sup>14)</sup>。JAZ<sup>®</sup>は軟鋼の成形性を向上するた

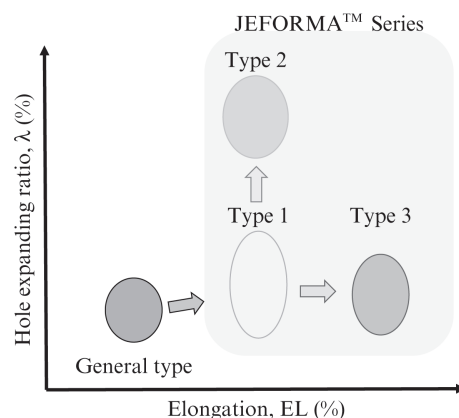


図6 JEFORMA<sup>®</sup>の概念図

Fig. 6 Schematic illustration showing the concept of JEFORMA<sup>™</sup>

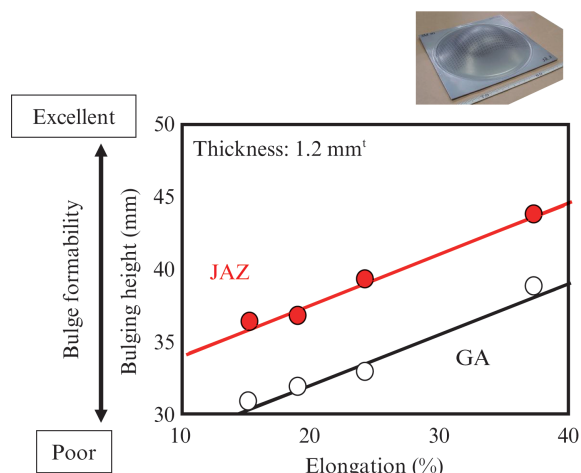


図7 高強度鋼板の張出し高さに及ぼすJAZ<sup>®</sup>皮膜の効果  
Fig. 7 Effect of JAZ<sup>TM</sup> on bulge forming height of high strength steels

めに開発された高潤滑皮膜であり、すでに広く普及しているが、高強度鋼板への適用も有効である。図7に高潤滑皮膜を付けた合金化溶融めっき高強度鋼板の張出し成形性を示す。鋼板の伸びと球頭張り出し成形高さとの関係では、鋼板の伸びが上昇すると張出し高さは直線的に上昇する。高潤滑皮膜を付与した合金化溶融亜鉛めっき鋼板の張出し高さは、同等の伸びを有する高潤滑皮膜のない鋼板よりも高い。この高潤滑皮膜により高強度鋼板でも金型との摩擦抵抗が低減し、素材の伸びから期待できる張出し高さよりも高い張出し成形性が実現できる。JAZ<sup>®</sup>は高強度鋼板の成形性向上でも有効な表面処理である。

## 5. おわりに

今後自動車に要求される規制から、この10年での鋼板強

度は上昇してきた。さらに強化される規制に沿う電動化の大きな流れの中で、車体構造はさらに高性能化していく。これを実現するには、工業的にLCAの高い鋼板への高強度化・高延性化の社会的期待は今後ますます強まると考えられる。JFE スチールはこれからも高性能高強度鋼板の商品開発と技術開発を精力的に行っていく予定である。

### 参考文献

- 1) 環境省. 日本の温室効果ガス排出量の算定結果. 2013.
- 2) 国土交通省自動車燃費一覧. ([http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha\\_fr10\\_000024.html](http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_fr10_000024.html))
- 3) 西野浩介. “世界で強化される燃費規制とその影響” 三井物産戦略研究所. 2016.
- 4) 総合技研株式会社. 2016年版2025年における自動車産業予測.
- 5) 瀬戸一洋. 特殊鋼. 2017, vol. 66, no. 3, p. 1.
- 6) Takashima, K.; Sawanishi, H.; Taniguchi, K.; Matsuda, H.; Ikeda, R. 溶接学会講演集, 2017.
- 7) 高島, 澤西, 谷口, 松田, 池田. 溶接学会全国大会講演概要. 2017, 第100集, p. 16.
- 8) 栗原, 逢坂, 岩瀬, 大沢. 鉄と鋼. 1982, vol. 68, no. 2, p. 144-149.
- 9) 松藤, 下村, 大沢, 奥山, 木下, 逢坂. 日本鋼管技報. 1980, no. 84, p. 14-24.
- 10) 中岡, 荒木, 高田, 能勢. 日本鋼管技報. no. 75, p. 14-19.
- 11) JFE 技報. 2012, no. 30, p. 48.
- 12) Iwama, T. SAE Technical paper. 2016, no. 2016-01-0355.
- 13) 岩間, 藤田, 山崎, 稲積, 鈴木, 笠原, 中野, 古居. 自動車技術会論文集. 2013, vol. 44, p. 1125-1130.
- 14) 星野, 樋貝, 平. JFE 技報. 2012, no. 30, p. 13.



船川 義正



長滝 康伸