

車体軽量化技術を支える 自動車用高張力鋼板製造技術に関する展望

Forecast of the Manufacturing Technology of High Strength Steel Sheets for Light Weight Automobile Bodies

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
藤田 栄 FUJITA Sakae JFE スチール スチール研究所 表面処理研究部長・工博

要旨

車体軽量化，衝突安全性向上のためには自動車車体に使われている鋼板のハイテン化が必須である。しかし，ハイテン化によりプレス成形性は一般的に低下する傾向にあり，成形性を高めたハイテンの開発が待たれている。JFE スチールでは使用される部材の成形様式を考慮した成形性の優れたハイテンを開発している。そのベースには JFE スチール独自の材料技術，表面処理技術の開発がある。ここでは自動車用ハイテンの今後の動向と，それに資する JFE スチール開発の固有技術について概説する。

Abstract:

It is indispensable to use high tensile strength steel sheets to automobile bodies for the lightness of bodies and the improvement of collision safety. High tensile strength steels, however, have generally poor press formability than mild steels, therefore high tensile steel sheets with good press formability are strongly expected. JFE Steel has been developing high strength steel sheets with good press formability considering actual press forming processes of automotive parts. Original material design and surface treatment technologies at JFE Steel have been contributing to the development. Here the forecast of high tensile strength steel sheets for automobile bodies and original technologies to cope with future demands are described.

1. はじめに

近年自動車には，地球温暖化防止を目的とした CO₂ 排出抑制および衝突時の乗員，歩行者の安全性向上という社会的要望が増大してきている。自動車走行時の CO₂ 排出量削減のためには自動車車体重量軽減効果も大きい。平均的には 100 kg の軽量化により燃費約 1 km/l の節減になり排出ガスも削減できる。一方，衝突安全性向上は年々その基準が厳しくなっており，車体強度の向上，最適配分による乗員，歩行者安全性の確保が必要となってくる。これらの社会的要望は一般的に車体強度を向上させようと思えば車体重量が増加するといったように相反する特性とみられるが，素材の高強度化により安全性と重量のバランスをより好ましい方向に持っていくことが可能である。鉄鋼材料は平均的自動車の重量の約 7 割を占める主要な素材であり，中でも鋼板の高強度化は年々向上している。Fig. 1 はホワイト

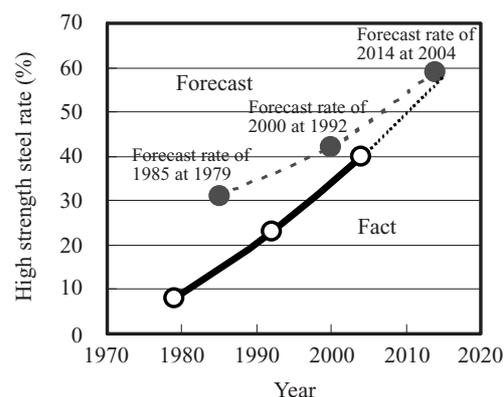


Fig. 1 Fact and Forecast of High Strength steel rate for Automobile Bodies

ボディに占めるハイテン化率の変遷を示したものである¹⁾。過去 20 年間で，ハイテン材の車体への適用比率が 10% から 40% にまで増加しており，さらに，予測では 2014 年には約 60% まで増大するとみられている。自動車のより一層のハイテン化による自動車軽量化，衝突安全性の向上を実現するためには，ハイテンそのものの性能もまだまだ進化

する必要がある。

自動車防錆は、防錆鋼板と、ワックスなどの腐食抑制剤、防錆シーラーとの組み合わせにより行われている。近年 VOC の低減などから塗料の水酸化、ワックスの使用制限などにより、防錆鋼板の適用率が增大してきた。現在、自動車用防錆鋼板は鋼板使用量の 6~8 割程度を占め、一部の車ではめっき鋼板使用率 100% を謳った full zinc ボデー車が登場している。国内の自動車メーカーは合金化溶融亜鉛めっき鋼板を採用している。高強度化のためにハイテン材に添加される Si, Mn などの易酸化性元素は鋼板表面の溶融亜鉛とのぬれ性を低下させて表面品質の劣化を引き起こしやすいことから²⁾、表面品質の劣化を防止することを目的として溶融亜鉛めっき技術に関する研究開発が数多く行われている。

自動車車体にはその部材ごとに要求される材料性能が異なる部分がある。以下、最初に外板パネル部材、構造骨格部材、フレーム・足回り部材に分けて、その要求される材料上の特徴について述べ、それらに対して JFE が有している材料技術について述べる。また、最新の自動車ハイテン表面処理技術についても述べる。

2. 自動車部材別の要求材料特性

2.1 外板パネル部材

外板パネルは、ドア、フード、ルーフなどの張り出し成形主体で加工されるものと、サイドパネル、フェンダーなど深絞り成形主体で加工されるものに大きく分けられる。両部材には基本的に自動車のデザインを実現するために優れた加工性、均一な表面品質が要求される。また、プレス後の表面の微小ひずみも抑制する必要がある。材質的には低降伏強度を有する必要がある。張り出し成形主体に加工されるドア、フード類のフラットな形状の部材には、さらに高い耐デント性が要求される。また、深絞り主体で加工される部材は、特に形状が複雑で大型の部品が多いため、深絞り性、延性が高い鋼板が要求される。このように、外板パネルはハイテン化が困難な部材が多く、一般的には、340 MPa 級ハイテンが使用されているのが上限である。しかしながら、材料機械特性が改善されれば、さらなるハイテン化による軽量化の可能性があると考えられる。

2.2 構造骨格部材

衝突時にその運動エネルギーを吸収し乗員を保護する必要がある。材料の上からも構造の上からも工夫がなされている。現在の構造においては 440 MPa 級ハイテンが量的に最も多く使われてきているが、590 MPa 級ハイテンの適用が急速に拡大しており、今後、590 MPa 級以上が主体となっていくものと思われる。さらに、乗員保護のために衝突時に変形しない部材で乗員スペースを囲う設計がなされ

るようになってきており、このような用途には 780 MPa 級以上のハイテンが使用される。材料の上からは高い降伏強度を有することが好ましいが、成形性を確保する観点から BH 効果 (BH: bake-hardening) を活用して加工塗装焼付け後に高い降伏強度を有する材料を活用する方法もある。

このようなハイテン化のニーズに対して、材料としては現行よりもさらに一段高い加工性を有する高成形性ハイテンの開発が必須である。加工性も延性向上のみならず、伸びフランジ性とのバランスで成形様式に合った材料設計が必要となる。また、必然的に添加元素が多くなるため、スポット溶接強度の確保や非めっき材の場合には化成処理性、めっき材の場合にはめっき品質の確保も重要な要素である。

ハイテンを使用する上で、材料上さらに重要な要素は機械的特性のバラツキ低減である。機械的特性のバラツキによりプレス加工後の寸法精度がばらつき、組み立て時に矯正できない場合が出てくる。このため降伏強度、引張強度のバラツキを抑制する必要があるが、この実現のためには成分バラツキの低減、溶鋼元素分析の迅速かつ高精度化、熱間圧延、焼鈍時の各種製造パラメータの高精度制御など、総合的な高度製造技術が必要となる。

2.3 フレーム・足回り部材

足回り部品には高い剛性を要求されるため、剛性を確保した上でハイテン化、薄ゲージ化が検討される。現在、440 MPa 級あるいは 590 MPa 級熱間圧延鋼板が使用されており、ハイテン化の当面の目標は 780 MPa 級となる。厚手の熱間圧延鋼板を折り曲げ加工を行い部品としての剛性を確保する方法が取られるため、端面からの割れが生じやすい。このため機械的特性としては穴広げ性が高い材料が要求される。

3. JFE スチールの持つ材料要素技術

3.1 析出物活用技術

JFE スチールではナノメートルサイズ析出を活用し、析出強化のみで 980 MPa 級にまで高強度化させる技術を開発し、高強度熱間圧延鋼板に適用している³⁾。微細析出物を活用しているので合金成分添加量も低く抑えることができる。この析出物は熱的に安定な析出物であることと、また強化量をほぼ析出強化でまかなっていることから、鋼板表面性状を劣化させる恐れのある Si を添加する必要がない。そのため、溶融亜鉛めっきラインを用いてめっきを行っても機械的特性、めっき性には問題ない。Table 1 に 590, 780, 980 MPa 級 NANO ハイテンの特性例を示す。従来、この強度クラスの鋼板は、変態組織強化を主として活用してきているが、フェライト単相に微細に分散した析出物を活用することにより、ミクロスケールでの強度均一性が高

Table 1 Mechanical properties of NANO HITEN

Grade	YP(MPa)	TS(MPa)	YR(%)	EI(%)	λ (%)
590	580	615	0.94	26	130
780	755	805	0.94	21	100
980	930	990	0.94	18	40-60

YP: Yield point, TS: Tensile strength,
YR: Yield ratio, EI: Elongation,
 λ : Hole expanding ratio

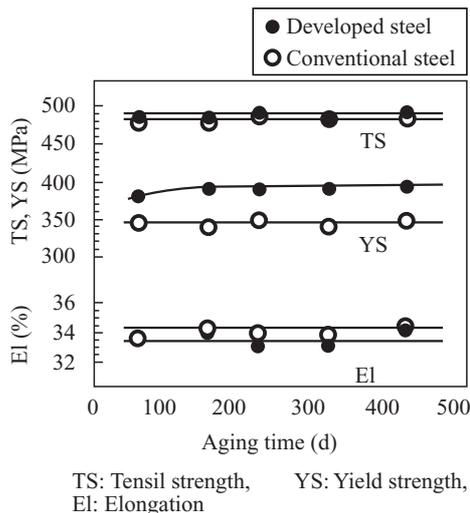


Fig.2 Changing in mechanical properties during room temperature aging of developed steel and conventional steel ($t = 1.6$ mm)

まり、高強度鋼板利用時にしばしば問題となる局部延性が優れるという本質的な特長を有する。また、析出強化鋼に特有の高 YR 特性 (YR: yield ratio) も有しており、90%を超える値が得られている。780 MPa 級以上の鋼板に活用されている DP 鋼 (DP: dual phase) が 70% 程度の YR であることを考えると、同強度クラスのハイテンに比べて衝撃吸収能に優れることが期待できる。

一方、固溶窒素を有効に活用し、プレス加工、焼付け塗装後に固溶窒素が導入された転位上にクラスター化あるいは析出し、強度が上昇する技術も開発している。固溶 N を残存させる技術、窒素時効を抑制する技術により、60~100 MPa の強度上昇が得られており、足回り部品、ボディ部品への適用が拡大してきている。Fig. 2 に BHT 鋼板の室温保持による機械的特性の変化を示す⁴⁾。高い BH 性を有していながら材質劣化は降伏強度で約 30 MPa 程度、延性で高々 2% 程度であり、室温時効が低く抑制されている。

3.2 低 YP 化技術

外板パネルの必要な特性のひとつに低降伏強度特性がある。IF 鋼のハイテン化を図る場合、固溶強化、析出強化に頼るが、降伏強度は引張強度とともに上昇してしまう。この降伏強度を極限まで下げるため、JFE スチールでは PFZ (precipitate free zone) 形成を活用した鋼を開発した⁵⁾。

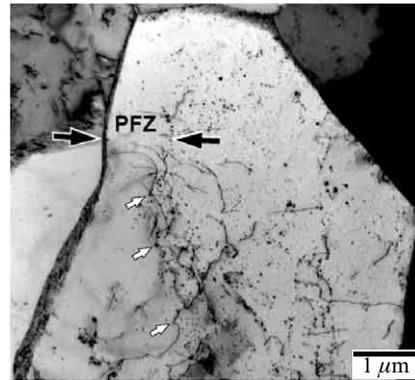


Photo 1 TEM micrograph of specimen annealed with the heating rate of 2°C/s and deformed with 0.5% tensile strain (This shows the NbC distribution and the dislocation morphology when the yielding has just occurred.)

PFZ とは、微細均一に粒内析出した析出物が粒成長時に粒界上にてオストワルド成長し、ピンニングが外れて再度結晶粒界が移動するため、結晶粒界が粒成長により移動した跡に粗大な析出物が残存し、ひとつの結晶粒内に最終的に微細析出物が存在する領域と粗大析出物が存在する領域の 2 つの領域が共存することを指している。PFZ は、結晶粒界近傍に生成するため初期変形時の転位生成が活発に行われる部分に当たっている。初期転位の移動が容易に行われるため、PFZ が多く含まれている鋼板は降伏強度が低い。Photo 1 に PFZ を含む鋼に 0.5% の予ひずみを加えたものの透過電子顕微鏡写真を示す⁶⁾。予ひずみによって導入された転位が微細析出物領域にてトラップされていることが分かる。JFE スチールでは、NbC、Nb(C, N) をこのような析出物として使うことにより、低降伏強度で高 r 値 (ランクフォード値) を有する鋼板を開発している。

低 YP 化のもうひとつの技術として DP 組織活用技術がある。DP 組織を持つ鋼ではマルテンサイト近傍でのマイクロールド現象により降伏強度が下がることが知られている。JFE スチールでは、この現象を極限まで活用し、390~440 MPa 級というような低強度においても安定してマルテンサイト組織を形成させ、また、その分布をコントロールすることにより低降伏強度を達成する技術を開発している。この結果、440 MPa 級においても 340 MPa 級 BH 鋼板レベルの降伏強度を得ることが可能となっている。この技術は外板パネルのハイテン化による車体軽量化に貢献できるものと期待できる。

3.3 DP 組織制御技術

ハイテンの材料設計において所定の変態組織を実現する場合、通常はオーステナイト相安定化元素を添加してフェライト、パーライト変態を抑制し、マルテンサイト、ベイナイト組織を実現する。さらに、冷却後の再加熱によりマルテンサイトの焼もどしが可能となり、所望のフェライト

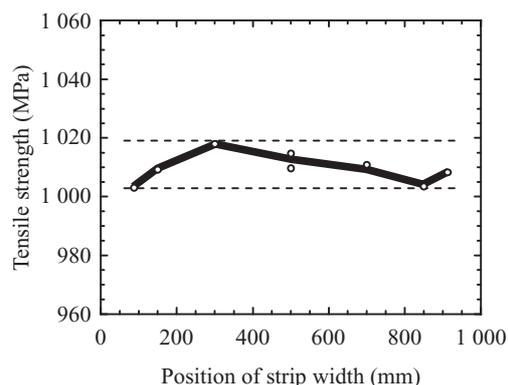


Fig.3 Tensile strength deviations in strip width (Example of 980 MPa grade)

組織，マルテンサイト組織を得ることができる。JFE スチールは、冷間圧延鋼板の連続焼鈍に水焼入れプロセスを組み合わせた JFE-WQ (WQ: water quench) プロセスを世界で初めて開発した。この WQ プロセスは高温から噴流水中に連続的に焼入れを行うため、冷却速度が 1000°C/s 以上と極めて速い上に、板幅方向の冷却速度均一性にも優れ、安定して急速冷却が行える技術である。冷却速度が速いことにより省成分で所定の強度を確保することが可能であり、これは延性、溶接性、耐遅れ破壊特性に本質的に有利に働く。

JFE-WQ プロセスのもうひとつの利点は、マルテンサイト相の硬度が、水焼入れ後の焼もどし帯の処理条件を制御することにより調整できることにある。硬質相であるマルテンサイト相と軟質相であるフェライト相の硬度差が小さいほど伸びフランジ性が優れることが分かっており、伸びフランジ性の優れたハイテンの製造が可能である。

Fig. 3 に WQ ハイテンのコイル幅方向の強度バラツキを調査した結果を示す。噴流水中へ焼き入れることにより安定した冷却速度が達成され、幅、長手方向に材質バラツキが抑制されていることが分かる。また、JFE スチールでは、FF 制御 (feed-forward 制御) 手法により、さらなる材質バラツキ低減を行っている。製鋼段階での高精度成分制御技術、熱間圧延から焼鈍に至るまでの材質変動要因の制御により強度バラツキを抑制することに成功している。

4. JFE スチールの有する表面処理技術

4.1 ハイテン材の溶融亜鉛めっき処理における技術課題

海外においては溶融亜鉛めっき鋼板が、一方、国内においては溶融亜鉛めっき後に素地である鉄と亜鉛を合金化させる合金化溶融亜鉛めっき鋼板が広く採用されている。合金化溶融亜鉛めっき鋼板のハイテン化に当たっては、強度アップや種々の機械特性の向上のため、一般に鋼中に Si, Mn などの元素を添加することが行われる。これらの易酸化性元素は連続式溶融亜鉛めっきラインでの再結晶焼鈍工

程で選択的に外部酸化し、鋼板表面に濃化する。これは冷間圧延鋼板の再結晶焼鈍は、Fe にとっては熱力学的に還元性であるが、Si, Mn などの易酸化元素にとっては酸化性である雰囲気中で行われるためである²⁾。そのため、焼鈍直後の溶融亜鉛めっき工程において、めっきをはじくいわゆる不めっき欠陥が発生することが知られている。したがって、Si, Mn を多量に含有する高強度合金化溶融亜鉛めっき鋼板の開発には、鋼板表面に対する溶融亜鉛のぬれ性の改善が重要である。

4.2 優れためっき品質を確保するための JFE スチールのハイテン溶融亜鉛めっき技術

再結晶焼鈍時における易酸化性元素の表面濃化を抑制する観点から、JFE スチールではこれまでに多くの研究開発を行っており、Si, Mn などの添加元素の添加許容範囲を拡大した機械特性に優れた合金化溶融亜鉛めっき高強度鋼板を開発してきた。たとえば、焼鈍前の鋼板表面へ電気めっきを施すことにより鋼板表面への濃化を遅延させる技術、特殊薬液の塗布により表面改質を行い表面濃化を抑制する技術、焼鈍炉内雰囲気における酸素ポテンシャルを制御することで易酸化性元素を外部酸化から内部酸化へ移行させ、表面濃化を抑制させる技術⁷⁾、さらに、本特集号に掲載している冷間圧延工程の前工程である熱間圧延工程を活用した表面濃化抑制技術^{8~10)}などが挙げられる。現在、自動車製造現場でのハイテンの使用しやすさを可能な限り向上させることと、さらなる軽量化のための高強度化を達成することを目的として、ハイテン材料の開発・実用化とともに、めっき技術についてもより高度化に応えた技術開発を行っている。さらに、鋼板の薄肉化により、表面処理鋼板、副資材のさらなる防錆力向上が期待されており、JFE スチールでは防錆鋼板の防錆寿命予測技術の開発¹¹⁾を行うとともに、実車において適正な防錆性を発揮するハイテン溶融亜鉛めっき鋼板の防錆皮膜設計・技術開発を実施している。

5. 今後の展望

地球環境保全のための CO₂ 削減は待ったなしの状況にきており、排出ガス規制も厳しさを増している。我が国の自動車は世界最高水準の燃費を達成しているが、さらに高い目標が設定され、新たな技術開発が必要となっている。また、衝突時の乗員保護の観点からは、衝突時に変形量が少ない部材が客室空間周囲に多用される傾向にあり、新たなハイテンの適用が始まっている。

このような動向の中で、自動車車体に適用される鋼板も強度だけを考えると 980 MPa 級を超え、さらに高い強度部材がボデー用途に使用される可能性がある。しかしながら、

成形性のみならず、溶接性や耐遅れ破壊特性など、現在の材料設計思想だけでは解決が難しい問題も残されている。このような中で、自動車車体軽量化、衝突安全性向上のためには、材料特性改善、優れためっき性確保のための新技術開発のみならず、成形技術、溶接技術など、ハイテンを使用していく上での新技術の進歩が不可欠である。多くの革新的要素技術の集成により、地球環境保全、衝突安全性に優れた車体を実現されるものと考ええる。

参考文献

- 1) 杉山隆司. 高強度鋼板の車体への適用の変遷. 塑性と加工. vol. 46, no. 534, 2005, p. 8.
- 2) 加藤千昭. 自動車用合金化溶融亜鉛めっき鋼板の開発. 西山記念賞受賞講演. CAMP-ISIJ. vol. 18, 2005, p. 580.
- 3) Funakawa, Y. et al. Development of high strength hot-rolled steel sheet consisting of ferrite and nanometer-size precipitates. ISIJ Int. vol. 44, no. 11, 2004, p. 1945-1951.
- 4) 金子真次郎ほか. 焼付硬化により引張強度が上昇する高強度熱延鋼板の強化機構. 鉄と鋼. vol. 89, no. 10, 2003, p. 53.
- 5) Kitano F. et al. ISIJ Int. vol. 41, 2001, p. 1402.

- 6) Ono Y. et al. Materials Science Forum. vol. 426-432, 2003, p.1481-1486.
- 7) 鈴木善継, 杉本芳春, 藤田栄. CAMP-ISIJ. vol. 19, 2006, p. 1142.
- 8) 瀬戸一洋, 船川義正, 金子真次郎. サスペンション, シャシー部品用高強度熱間圧延鋼板「NANO ハイテン」, 「BHT[®] 鋼板」. JFE 技報. no. 16, 2007, p. 28.
- 9) 鈴木善継, 京野一章. 表面技術. vol. 55, no. 1, 2004, p. 48.
- 10) 鈴木善継, 杉本芳春, 藤田栄. 表面技術. vol. 58, no. 3, 2007, p. 183.
- 11) Fujita, S.; Mizuno, D. Corrosion Science. vol. 49, 2007, p. 211.



田中 靖



藤田 栄