



特集記事・1

地球環境に貢献する鉄鋼製品

自動車パネル用薄鋼板の進化

Current Evolution in High Strength Cold-rolled and Coated Steel Sheets for Automobile Body Panels

細谷佳弘
Yoshihiro Hosoya

JFE スチール (株) スチール研究所
理事・主席研究員

1 はじめに

今日の自動車パネル用薄鋼板は、1970年代の連続鑄造拡大に伴うリムド鋼からキルド鋼への鋼種転換、1970年代中旬から1980年代にかけての箱焼鈍法から連続焼鈍法への技術革新、1980年代以降の極低炭素鋼溶製技術の進歩によるIF (Interstitial Free) 鋼の汎用鋼化と防錆性能強化を目的とした合金化溶融亜鉛めっき (GA) 鋼板の適用拡大、1990年代以降のCAFÉ (Corporate Average Fuel Economy) 規制をクリアするための軽量素材 (Al, Mg, 樹脂など) との競合などを経て、製造技術面、品質面ともに世界をリードするレベルに達した。とくに近年、CO₂排出量低減のための車体軽量化と衝突安全性強化に対する社会的要請が一層強くなり、意匠性や外観品質が重視される外板パネルに関しても、440 MPa程度までの高強度化が現実味を帯びてきた。

本稿では、1990年代中旬までのパネル用薄鋼板の技術的進歩に関しては他の解説論文¹⁻³⁾に委ね、至近の10年間におけるパネル用薄鋼板の進化と技術革新の萌芽について展望する。

2 パネル用薄鋼板に求められる性能と材質設計指針

自動車のパネル部品は、サイドパネルアウターやフェンダーなどに代表される深絞り成形要素が支配的な部品と、ドア、フード、ルーフ、トランクリッドなどに代表される張り出し成形要素が支配的な蓋物と称される部品に大別される。前者は面積かつ複雑形状に成形されるため、深絞り成形性のみならず張り出し成形性も具備した複合成形性が、後者は比較的塑性変形量が小さい平坦な形状に成形されるため、パネルの寸法精度 (形状凍結性) に加えて、パネルのたわみ難さ (張り剛性) や凹み難さ (耐デント性) が求められる。パネル

部品に使用される薄鋼板の板厚は、内板類が0.6~1.2 mm、外板類が0.6~0.8 mmであり、部品の張り剛性や耐デント性確保などの点で、更なる薄肉化が困難な部品も少なくない。

外板パネル用薄鋼板の材質設計指針とも言えるデータをFig.1⁴⁾、2⁴⁾に示す。Fig.1より、ドアなど形状凍結性の厳しい部位に適用される鋼板の強度は、 $YS \leq 24 \text{ kgf/mm}^2$ (235 MPa), $TS \leq 45 \text{ kgf/mm}^2$ (440 MPa) であることが示唆される。また、Fig.2より、絞り深さが40 mm以下の浅絞りされたフェンダーの例では、深絞り性の指標となる鋼板の圧延方向 (0°), 45°方向 (45°), 直行方向 (90°) の平均r値 ($r_m = (r_0 + 2r_{45} + r_{90}) / 4$) と張り出し成形性の指標となるn値 (加工硬化指数) は補完関係にあり、両特性値をバラ

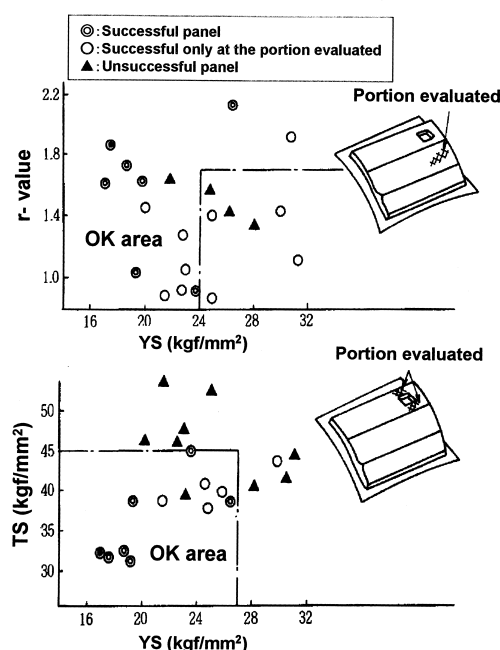


Fig.1 Typical results on the effects of mechanical properties of steel sheets on the quality of external appearance of door panels⁴⁾

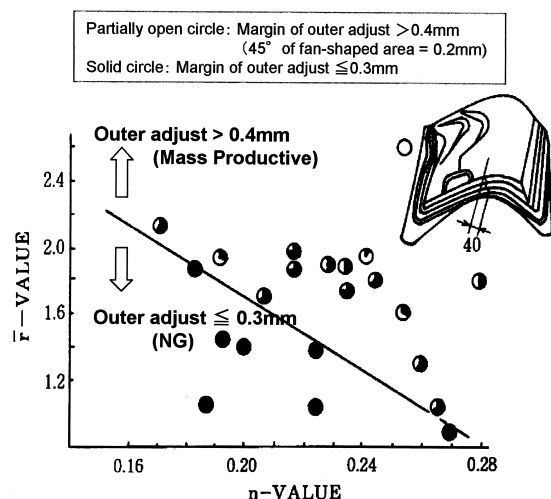


Fig.2 Typical result on the effects of the balance of mean r-value and n-value on the stampability of front-fender ⁴⁾

ンスさせることで安定したプレス成形が可能になる。

サイドパネル・アウターのような大物パネルは、変形様式、変形経路、変形量などが異なる部位が混在するため、鋼板の高強度化による薄肉化がより困難となる。該部品の高強度化（薄肉化）を図るための材質目標の設定は難しいが、上述した強度範囲を満足した上で、ダイ・フェースからの円滑な材料流入を可能にするため、鋼板のr値の向上や表面潤滑特性の改善などの方策が採られる。

3 焼付け硬化型 (BH : Bake Hardenable) 薄鋼板の進化

外板パネルの場合、塗装後の焼付け工程での鋼板のひずみ時効硬化 (BH 性) が耐デント性向上に有効である ⁵⁻⁷⁾。BH 鋼板の進化の過程を Fig.3 に示す。BH 鋼板は箱焼鈍法から連続焼鈍法へのプロセス変革を経て、1990 年代以降急速に拡大した低炭素鋼から極低炭素鋼への素材転換によって合金化溶融亜鉛めっきに適した鋼種設計に変化した。今日では、成形性と BH 量の制御の観点から、Nb, Ti など鋼中炭素を部分固定した鋼板が主流となっている。

極低炭素系 BH 鋼板における BH 量制御の例を Fig.4 ³⁾ に示す。炭素 (C) 過剰型は低温焼鈍で目標の BH 量が得られる半面、BH の変動量 (ΔBH) が大きい。これに対して、炭窒化物形成元素 (Nb) 過剰型は高温焼鈍が必須となるが、NbC の溶解度曲線から ΔBH が小さくなる事が理解される。BH 量の上限規格は規定されていないが、調質圧延後の常温遅時効性を兼備するため、一般に 30 (規格下限値) ~ 50 MPa の範囲を目標として、鋼成分と焼鈍条件が厳しく管理される。

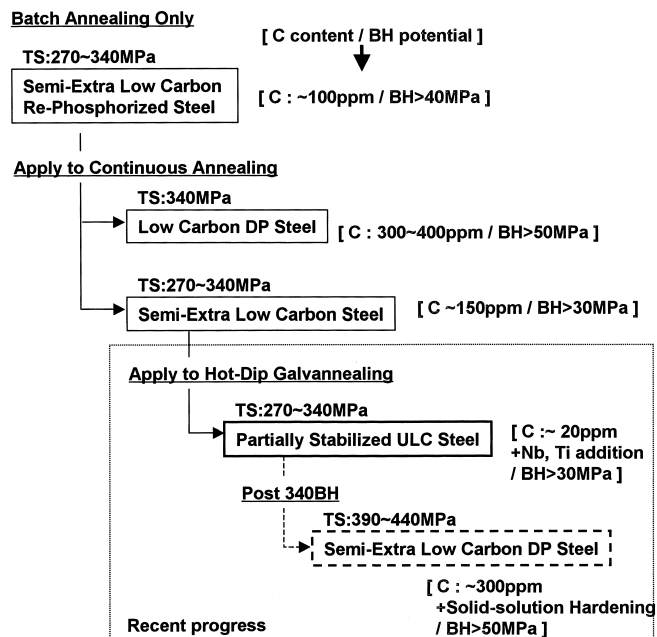


Fig.3 Progresses in both alloy design and processing condition in the bake-hardenable (BH) steel sheets

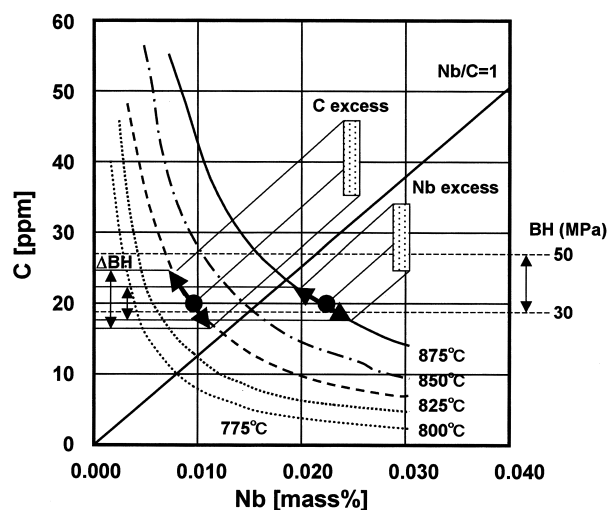


Fig.4 Influence of C fluctuation in both C excess type and Nb excess type steels on the BH stability ³⁾

ドアなどの耐デント性を確保する上で、一般には塗装焼付け処理後の降伏強度は 290 MPa 以上が求められる。そのため、塑性変形量の小さい蓋物パネルでは、低ひずみ域での加工硬化量の向上に加えてパネル面に如何に均一に塑性変形を与えるかが成形上のポイントとなる。後述する蓋物パネル部用途の高強度薄鋼板は、加工硬化特性に加えて高い BH 性を有しており、340 MPa 級 BH 鋼板に替わる次世代 BH 鋼板として期待される。

4 複雑形状の大型パネルへの適用が期待される高強度薄鋼板

サイドパネルアウターなどの大型パネルには、成形の難度からIF鋼を素材とした270 MPa級の高 r 値型鋼板が多用されている。IF鋼をベースとして鋼板の高強度化を図る場合、①固溶強化元素添加による降伏強度の上昇、②P, Mn, Si等の置換型固溶強化元素の多量添加による合金化溶融亜鉛めっき(GA)適性の劣化、③固溶強化された母相に対して粒界強度が相対的に低下することに伴う縮みフランジ成形部位での粒界割れ(二次加工脆化)の顕在化、などが問題となる。

近年、これらの問題解決に有望なパネル用高強度薄鋼板として、PFZ (Precipitation Free Zone) を活用した鋼板が開発・実用化された⁸⁾。該鋼板は、Fig.5⁸⁾に示すように、炭素量を60ppm程度まで高めてNbCによる析出強化と細粒化強化を重ねる事で、GA適性を阻害する固溶強化元素の低減を可能にした。該鋼板の金属組織上の特長は、粒界近傍に比較的析出物が疎に分布した領域(PFZ)が形成される点である。Fig.6⁹⁾に示すように、鋼板のYSと n 値はPFZの体積率に依存して変化するが、PFZ:4~9%の範囲ではTSはほぼ一定である。これは、Fig.7⁹⁾にTEM像と模式図で示すように、PFZは変形初期における粒界近傍からの微小降伏を促進する一方、フェライト粒内はNbCで析出強化されているため、細粒組織でかつ440 MPa級の強度を有しながら、比較的低いYSと高い n 値が得られるものと考えられる。また、熱延母板の組織が細粒化することで冷延再結晶焼鈍時の γ -fiber ($\langle 111 \rangle // ND$ 再結晶集合組織)の発達が顕著となるため、特筆すべき粒径- r 値バランスが得られることも確認されている⁸⁾。

IF鋼で懸念される二次加工脆化に対する粒径とB添加の効果を図8¹⁰⁾に示す。延性/脆性遷移温度(DBTT)の改善

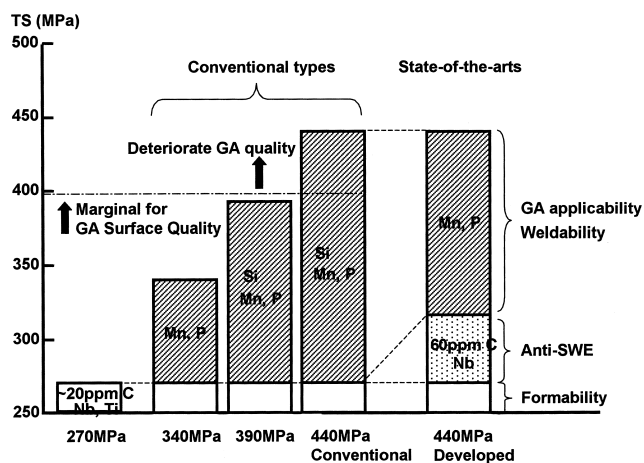


Fig.5 Material design concept for the grain refined high strength IF steel taking the GA applicability into consideration⁸⁾

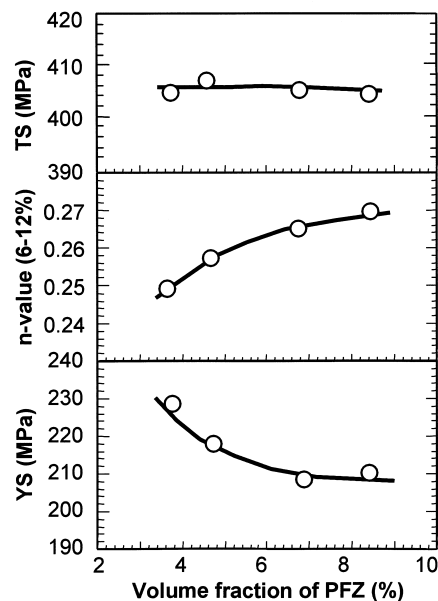


Fig.6 Effect of the volume fraction of PFZ on yield strength (YS), work-hardening exponent (n -value) and tensile strength (TS)⁹⁾

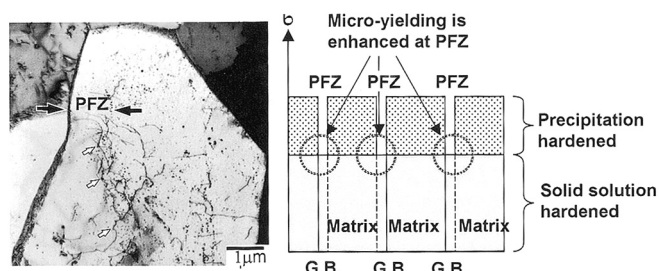


Fig.7 Appearance of PFZ (Precipitates Free Zone) and the schematic figure showing the enhancement of micro-yielding at the PFZs⁹⁾

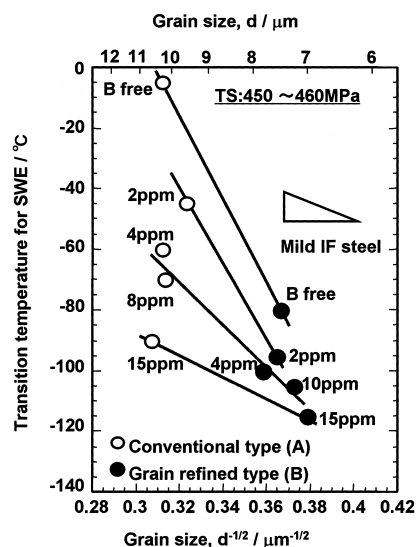


Fig.8 Effects of grain size and boron addition on the DBTT of the grain refined high strength IF steel¹⁰⁾

に対して細粒化と微量B添加ともに有効であり、両者を複合する事で優れた耐二次加工脆性が得られる。

5 蓋物パネル部品への適用が期待される高強度薄鋼板

日本におけるパネル用薄鋼板開発の歴史を振り返ると、集合組織制御に着眼した高r値型鋼板の開発が重視されてきた感がある。しかしながら、Fig.9に模式的に示した板成形時の平面応力状態 ($\sigma_3 = 0$) での降伏曲線から示唆されるように、鋼板の平均r値を高める(鋼板に塑性異方性を付与)ことは蓋物パネルの変形モードである平面ひずみ～等二軸張り出し変形領域のYS上昇をもたらす。その結果、比較的小さい塑性変形量で形状凍結性が求められる蓋物パネルなどでは、意匠面における均一な塑性変形の伝播が抑制され、面ひずみの発生傾向が増す。とくに、鋼板の高強度化を図る場合には σ_0 が不可避免的に上昇するため、平面ひずみ～等二軸張り出し変形領域における降伏応力は更に高くなる。欧州自動車メーカーで実用化されているI-Steel (Isotropic Steel)¹¹⁾ は、平均r値がほぼ1.0でかつ $|\Delta r| < 0.15$ ($\Delta r = (r_{0^\circ} + r_{90^\circ} - 2r_{45^\circ})/2$) の面内等方性を有しており同様の効果が期待できるが、Ti添加低炭素鋼であるため、TS: 340～440 MPa級の鋼板における σ_0 は300～340 MPaである。

そこで、 $|\Delta r| < 0.01$ のr値の面内等方性を有し、かつ340 MPa級BH鋼板と同等のYS (σ_0) と440 MPa級のTSを有する高n値型の等方性パネル用薄鋼板の実用化が期待され

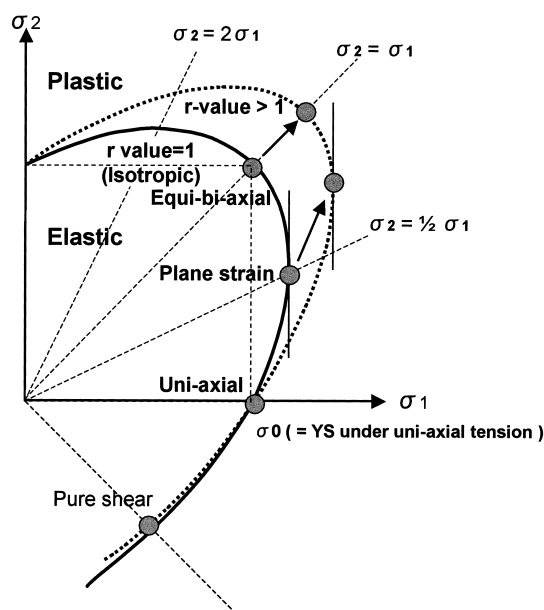


Fig.9 Schematic diagram showing the effect of providing plastic anisotropy (increasing r-value) on the yield locus under the sheet forming

る。上記特性を目標として開発された440 MPa級合金化溶融亜鉛めっき鋼板の例をFig.10に示す。YSはほぼ340 MPa級BH鋼板と同等レベルを維持しながら高い加工硬化特性(WH)と焼付け硬化特性(BH)を有しているため、塗装焼付け後のYSは350 MPaに到達し、耐デント性を損なうことなくドアパネルの更なる薄肉化が期待される。Fig.11に、該鋼板をドア・モデル型を用いて成形したパネルの外観と取手部周辺および意匠面で評価した耐デント性の結果を示す。該鋼板の平均r値はほぼ1.0で、かつ $|\Delta r| < 0.1$ の等方性を有するため、意匠面および取手部周辺の面精度に関しては340 MPa級BH鋼板と同等の品質が得られ、耐デント性に関しては340 MPa級BH鋼板を大幅に上回る性能が確認された。

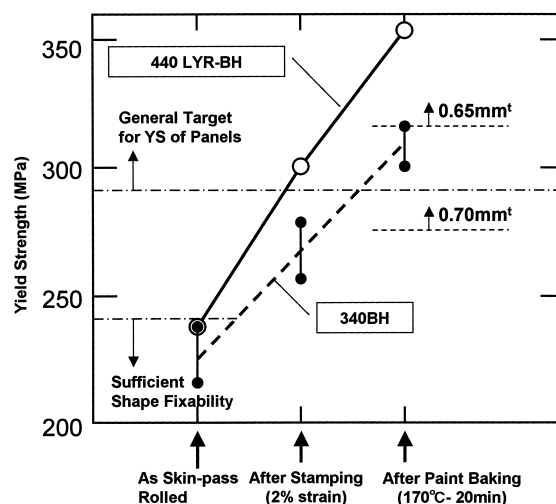


Fig.10 Comparison between conventional 340MPa-BH steel and isotropic low YR 440MPa-BH steel on the hardenability due to stamping and subsequent paint-baking

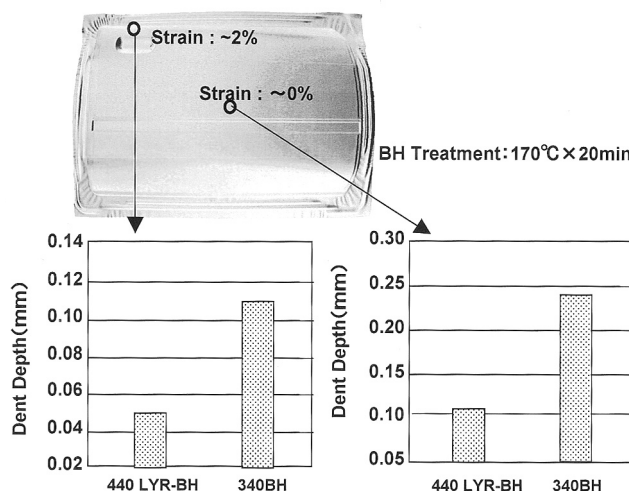


Fig.11 Comparison between the conventional 340MPa-BH steel and the isotropic low YR 440MPa-BH steel on the dent-resistance of door model panel

6 パネル用薄鋼板の防錆設計の統合

自動車パネル部品の防錆性能は、①外観腐食 (Cosmetic corrosion)、②端面腐食 (Edge corrosion)、③穴明き腐食 (Perforation corrosion) に対する寿命で評価される。とくに、板厚の薄いパネル用鋼板では、ヘム加工部など鋼板合せ部の穴明き腐食寿命が車体の防錆設計を左右する。近年、実車の腐食解析結果より、Fig.12¹²⁾に示すように、亜鉛めっき鋼板においても、めっきの防錆効果が失われるとめっき処理を行っていない鋼板と同様の腐食挙動に移行するため、塗料の付き回り不良が起り易い部位の耐穴明き腐食性を改善するためには、防錆副資材や亜鉛めっきの厚目付け化による防錆強化が不可避であることが明らかにされた。

一方、パネル成形の観点からは、めっき層による鋼板の機械特性 (とくに延性、深絞り性) の劣化、低融点金属である亜鉛とプレス型との凝着による摺動抵抗の上昇、ビード通過時や型との摺動によるめっき相の剥離、剥離粉による意匠面の押し疵など、様々な問題が顕在化する¹³⁻¹⁵⁾。こうした問題を解決するため、プレス成形性とめっき相の耐剥離性が比較的両立する範囲にめっき相中のFe%が管理されており、難成形部品の成形に対しては、摺動特性を改善するため潤滑皮膜処理が施される。

以上の経緯を経て、Fig.13¹⁶⁾に示すように内外板パネル用鋼板は合金化溶融亜鉛めっき鋼板へ集約された。

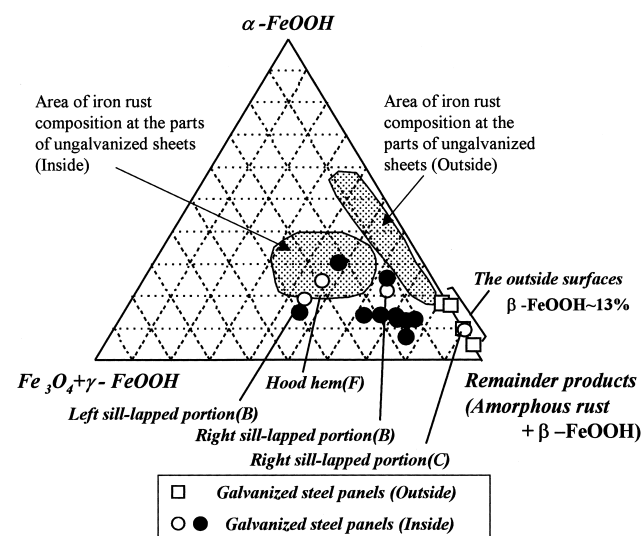


Fig.12 Ternary phase diagram for the rust composition at the parts where galvanized or galvanized steel sheets were applied in comparison with those of similar parts of ungalvanized sheets¹²⁾

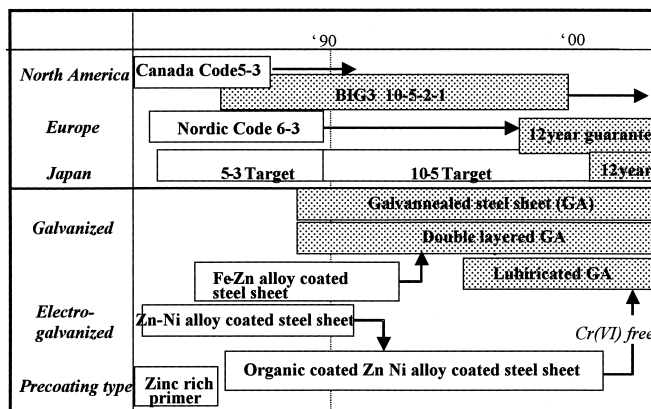


Fig.13 Changes of the types of zinc coated steel sheets applied to the automobile body panels in Japan to meet the global corrosion targets¹⁶⁾

7 パネル部品の更なる高強度化技術

国際鉄鋼協会 (IISI) による ULSAB (UltraLight Steel Auto Body) および ULSAC (UltraLight Steel Auto Closures) プロジェクトは、パネル部品への結合素材の適用と更なる高強度化に対して有益な指針を示した^{17, 18)}。ULSAB では、サイドメンバーアウトターの軽量化と高剛性化を実現するため、TWB (Tailor Weld Blank) の適用が具体的に示された。ULSACでは、ドアの軽量化をターゲットとして、板厚: 0.6 mmの590 MPa級DP鋼板がシートハイドロ成形によってドアパネル意匠面に成形できることが示された。とくに、フレームレス構造を採用することで部品剛性を維持しながら46%の軽量化 (フレーム構造で27%) が可能であることが実証された¹⁸⁾。

シートハイドロ成形パネルの性能を確認するため、590 MPa級DP鋼板をドアモデル型で成形した例をFig.14¹⁹⁾に示す。シートハイドロ成形を行う事で、YP>300 MPaのDP鋼板でも、従来法で成形したYS<240 MPaの鋼板に匹敵する面精度が得られる。また、意匠面の耐デント性に関しては、原板のYSが高いことと液圧によってパネル面に均一に塑性ひずみが導入されることで、全ての評価位置で優れた耐デント性が確認されている¹⁹⁾。

8 まとめ

自動車パネル用薄鋼板に関する最近のトピックスを紹介した。構造骨格部品の高強度化が進む一方で、パネル部品においては270 MPa級の軟鋼板が使われているケースが少なくない。これは、高強度・薄肉化に伴う形状凍結性の問題が容易に解決できない点と、剛性面で更なる薄肉化効果が期待できない部品が少なくない点に起因する。しかしながら、近年、

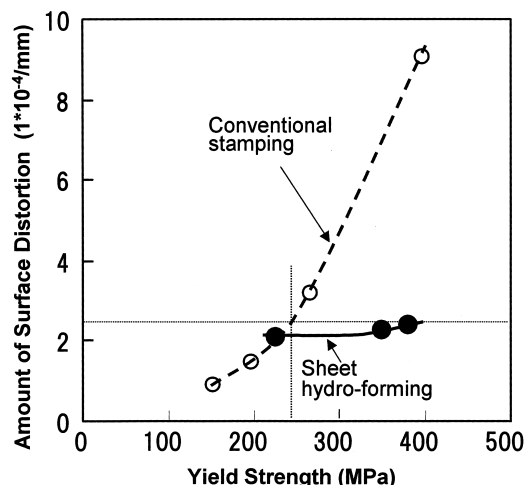


Fig.14 Correlation between YS and surface distortion showing the notable effect of sheet-hydro forming for improving the shape fixability in comparison with the conventional mechanical stamping ¹⁹⁾

コンピュータ支援による設計技術 (CAE) を駆使した最適型設計、有限要素法解析 (FEM) による薄鋼板の成形解析と予測、液圧やサーボ機構を駆使した高精度成形技術、TWB に代表される結合素材のパネル部品への適用などが着実に進歩しており、今後、鋼板の作り込み技術と成形技術が連携する事によって、鋼板の特性を最大限に引き出した軽量かつ高剛性パネル部品の実用化を期待したい。

参考文献

- 1) H. Takechi : ISIJ Int., 34 (1994) 1, 1-8.
- 2) 細谷佳弘 : 自動車技術会1997材料フォーラム-9735466, (1997), 13-18.
- 3) T. Senuma : ISIJ Int., 41 (2001), 520-532.
- 4) 佐藤 満 : 第74・75回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (1981), 163-178.
- 5) A. Nishimoto, Y. Hosoya and K. Nakaoka : Trans. ISIJ, 21 (1981), 778-782.
- 6) 黒澤光正, 佐藤 進, 小原隆史, 角山浩三 : 川崎製鉄

技報, 19 (1987) 2, 47-51.

- 7) N. Yoshinaga, K. Ushioda, A. Itami and O. Akisue : ISIJ Int., 34 (1994), 33-42.
- 8) F. Kitano, T. Urabe, T. Fujita, K. Nakajima and Y. Hosoya : ISIJ Int., 41 (2001), 1402-1410.
- 9) Y. Ono, T. Fujita, Y. Nagataki, T. Urabe and Y. Hosoya : Materials Science and Forum, 426-432, (2003), 1481-1486.
- 10) T. Urabe, Y. Ono, H. Matsuda, A. Yoshitake and Y. Hosoya : ISIJ Conference Volume of International Forum for the Properties and Application of IF Steels, IF STEELS 2003, ed. by H. Takechi, (2003), 170-177.
- 11) SALZGITTER FLACHSTAHL, SZFG material data sheet 11-110, Edition 02/05.
- 12) 藤田 栄, 梶山浩志 : 材料と環境, 20 (2001), 115-123.
- 13) 櫻井理孝, 張 力偉, 田尻泰久, 近藤隆明 : 鉄と鋼, 77 (1991) 7, 121-128.
- 14) 足立吉隆, 荒井正浩, 中森俊夫 : 鉄と鋼, 80 (1994) 3, 225-230.
- 15) 宮坂明博 : 第186・187回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (2005), 1-21.
- 16) 加藤千昭 : 日本塑性加工学会, 第224回塑性加工シンポジウム, (2003), 29-34.
- 17) 栗山幸久, 山崎一正, 橋本浩二, 大橋 浩 : 溶接学会誌, 71 (2002) 8, 554-558.
- 18) ULSAC Overview Report, May (2001), 1-42.
- 19) T. Saito, T. Hira, Y. Yamasaki, A. Yoshitake, K.W. Blumel, G. Hartmann and F.-J. Lenze : SAE Technical Paper, (2006), 01-0546.

(2006年8月14日受付)