

(技術資料)

780MPaおよび980MPa級合金化溶融亜鉛めっき鋼板の特性

Characteristics of 780MPa and 980MPa Grade Hot-dip Galvanized Steel Sheets



二村裕一*(工博)
Dr. Yuichi Futamura



三浦正明*
Masaaki Miura

Hot-dip galvanized 780MPa and 980MPa, low grade YP (yield point) steel types have been developed in order to improve the formability of high strength steels which have been increasingly incorporated in automotive bodies to improve fuel economy through body weight reduction. These newly developed 780MPa and 980MPa grade steels have excellent formability characteristics and higher spot welded joint tensile strengths. Crash test results also revealed that these newly developed steels can effectively absorb more energy for axial crash and bending crash conditions. These results indicate that it is possible to replace conventional low TS grade steels with these newly developed steels in automotive bodies.

まえがき = 近年、地球環境問題に関する意識の高まりから、各自動車メーカーでは燃費向上を目的として車体の軽量化が進められている。また、乗員の安全性確保の観点から自動車の衝突安全基準が強化され、衝撃に対する部材の耐久性も求められている。そのため、最近の自動車ではボディ骨格を中心に高強度鋼板（以下、ハイテン）の使用比率が一段と上昇しており¹⁾、なかでも耐食性を要するピラー下部やメンバ類などでは合金化溶融亜鉛めっき（以下、GA）ハイテンが積極的に適用されている。一方で、こうしたハイテンの用途拡大は、材料への要求特性をますます高い水準へと指向させている²⁾³⁾。例えば、難成形部材では、母材の成形性の改善が一層強く求められ、それに関する研究開発が多くなされている^{4)~9)}。

ここでは、当社でこれまで開発してきた780MPaおよび980MPa級GAハイテンシリーズの一つで代表的な低YP型鋼種^{10)~13)}について、各種特性を評価したので、その内容を紹介します。

1. 開発鋼の設計の考え方

一般に、GA鋼板は連続溶融亜鉛めっきラインで製造されるが、冷延用の連続焼鈍ライン（以下、CAL）に比べると、溶融亜鉛ポット温度、めっきの合金化処理温度など、製造上の制約から自由な熱サイクルが取れず、GA鋼板の特性改善の方策は制限される。当社では、このような状況の中、590MPa級において低YP型GA鋼板の製造技術をすでに確立しており⁶⁾⁸⁾、今回、その技術を780MPa級および980MPa級GA鋼板まで拡張・応用し、製造設計指針を構築した。すなわち、当該強度クラスにおいて、要求特性（主に延性）を満足させようとした場合、母材組織をフェライト+マルテンサイトの複合組織（Dual Phase：DP）として低YP化を図ることが重要で

あり、本稿で紹介する鋼種では焼鈍後の冷却過程でベイナイト変態を極力抑制するような成分系を採用している。成分設計の基本的な考え方は、以下のとおりである。

- 1) C, Mnの添加は、ベイナイト変態を抑制して強度-延性バランスを増大させるが、過剰な添加はスポット溶接性などで顕著な特性劣化を引き起こすため、強度や延性の確保の範囲で最低限にとどめる。
- 2) Siの添加は、延性改善に大変有効であるが、めっき性確保の観点から極力低減する。
- 3) Pの添加は、溶接性改善のため可能な限り低減する。
- 4) Cr, Moの添加は、C, Mnと同様にベイナイト変態を抑制し、母材組織のDP化に寄与する。しかし、それぞれを単独で添加すると添加量が多くなり、Crの場合はめっき性の劣化を、またMoの場合は延性の低下を招いてしまうため、各特性を劣化させない範囲で複合添加する。

本開発鋼は、上述の成分設計により工業量産レベルにおいても安定した特性を得ることができる。

2. 開発鋼の特性

2.1 成形性と寸法精度

表1は、開発鋼の機械的性質を示す。比較として、同じ強度クラスの冷延鋼板の結果も示しており、CR980Yについては伸びと曲げの特性バランスが良い鋼種⁷⁾としている。一般に、GA鋼板は、熱サイクルの制約からCALで製造される冷延鋼板に比べて特性面で劣る傾向にあるが、開発鋼では冷延鋼板と同等の伸びが得られており、優れた強度-延性バランスを示している。これは、前述の成分設計や焼鈍時の冷却速度制御により、フェライト分率を最適化して均一変形能を高めたことに起因する。一方、局所変形能についても、開発鋼では、伸

*鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター

表 1 供試材の機械的性質
Table 1 Mechanical properties of steels

Steel	Category	TS grade	YP (MPa)	TS (MPa)	EI. (%)	(%)
Developed steel	Galvannealed	980MPa (GA980Y)	724	1,022	15	27
		780MPa (GA780Y)	456	837	21	33
Conventional steel	Cold-rolled	980MPa (CR980Y)	690	1,030	15	30
		780MPa (CR780Y)	502	833	21	45

- Specimen thickness : 1.4mm
- Tensile test : JIS Z 2241 (JIS No. 5 specimen in transverse direction)
- Stretch flanging (Hole expanding) test : Hole expansion ratio : -value obtained by method of JFST1001

表 2 供試材の曲げ性 (U 曲げ試験)
Table 2 Bendability for U-bending test in developed steels

Steel	Thickness (mm)	Limited bending radius Transverse direction (mm)
Developed steel	GA980Y	2
	GA780Y	1.5

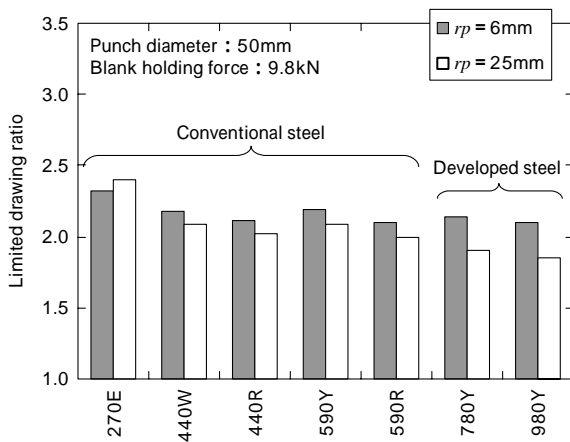


図 1 供試材の限界絞り率 (LDR)

Fig. 1 Limited drawing ratio (LDR) of various GA steels¹²⁾

びフランジ性の指標である穴拡げ率 (以下, ϵ) が冷延鋼板と同等であり, U 曲げ試験での限界曲げ半径も板厚の 2 倍以下と良好な値であることがわかる (表 2)。これは, 焼鈍温度の最適化により, 母材組織を均一化して局所的な応力集中を軽減しているためと考えられる。この開発鋼は, 伸びと ϵ が適度にバランスした鋼種として当社では位置付けており, 冷延鋼板の品ぞろえ⁷⁾と同様に GA 鋼板でも用途に合った品種を提供できる体制を整えている。例えば, 高伸び型の鋼種はすでに開発を完了し¹⁴⁾, 局所変形特性に優れた高 ϵ 型の鋼種も現在開発を行っているところである。

開発鋼については, 絞り成形性も評価している。図 1¹²⁾ は, 直径 50mm の円筒パンチにより絞り成形した開発鋼の限界絞り率 (Limited drawing ratio : LDR) を示す。なお, 比較鋼には成形性の良い低強度の GA 材を用い, パンチ肩 R (Punch radius : r_p) は 6, 25mm の 2 水準 [25mm は球頭パンチ] として試験を行った。 $r_p = 6$ mm の場合, 開発鋼は析出強化鋼の 590R, 440R, C-Mn 鋼の 440W と同等の深絞り性を有している。IF 鋼 (270E) のように, r 値の寄与により高い深絞り性を示す鋼種はあるが, DP 鋼のような複合組織鋼の場合, 集合組織の発達は小さく, 深絞り性には加工硬化特性が大きく寄与する¹⁵⁾。つ

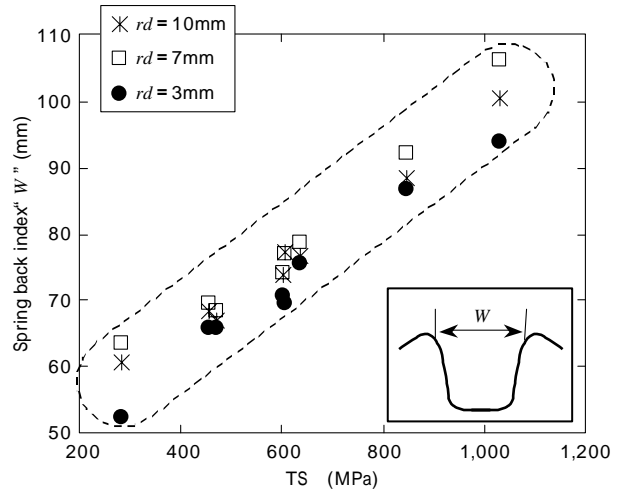


図 2 供試材のスプリングバック量と強度 (TS) の関係

Fig. 2 Relation between spring back index: W and TS in various GA steels¹²⁾ (W was examined by using a hat channel draw tool as shown in the figure)

表 3 スポット溶接の条件
Table 3 Spot welding conditions

Electrode tip	Dome type Cu-Cr
Tip diameter	6 mm
Electrode force	3,720 N
Welding time	23 cycle (60Hz)
Welding current	6-15 kA
Cooling water	2 L/min

まり, 比較鋼に比べて高い加工硬化能を有した開発鋼では, TS が高いにもかかわらず優れた深絞り性が得られると考えられる。

図 2¹²⁾ は, 幅 48mm のパンチにより種々のダイス肩 R ($r_d = 3, 7, 10$ mm) でハットチャンネル成形した前掲図 1 の GA 材について, スプリングバック量をそれぞれの強度 (TS) で整理した結果である。スプリングバック量は, 成形時に導入されるひずみ量が大きいために TS でうまく整理され, 強度が上昇しても顕著な特性劣化は生じていない。また, ダイス肩 R の影響は TS に比べて小さいが, r_d を小さくすると寸法精度が向上する傾向を示しており, 高強度材の成形時には有利に働くことが確認される。

2.2 スポット溶接性

スポット溶接性は, 板厚 : 1.2mm の供試材に対し, 表 3 に示す条件で溶接電流値を変化させて評価した。図 3 は, 良好な溶接性を示す GA590Y⁸⁾ (比較材) と開発鋼に

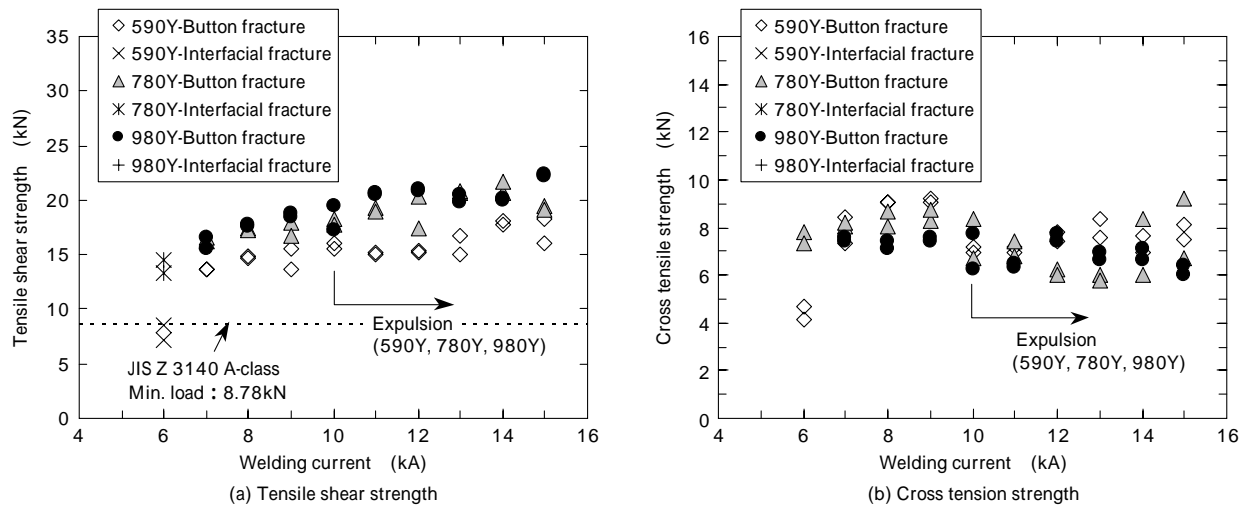


図3 せん断引張強度 (a) と十字引張強度 (b) に及ぼす溶接電流値の影響

Fig. 3 Effect of welding current on tensile shear strength (a) and cross tension strength (b) in the developed steels and GA590Y steel

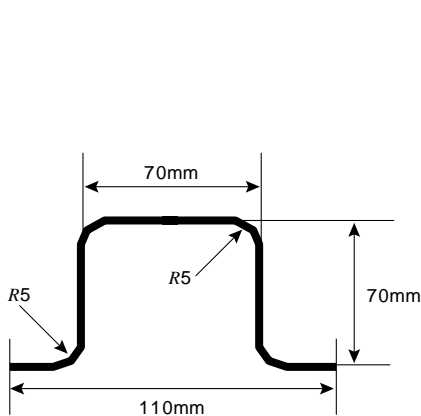


図4 圧壊試験体の断面形状

Fig. 4 Cross section geometry of crash test specimen

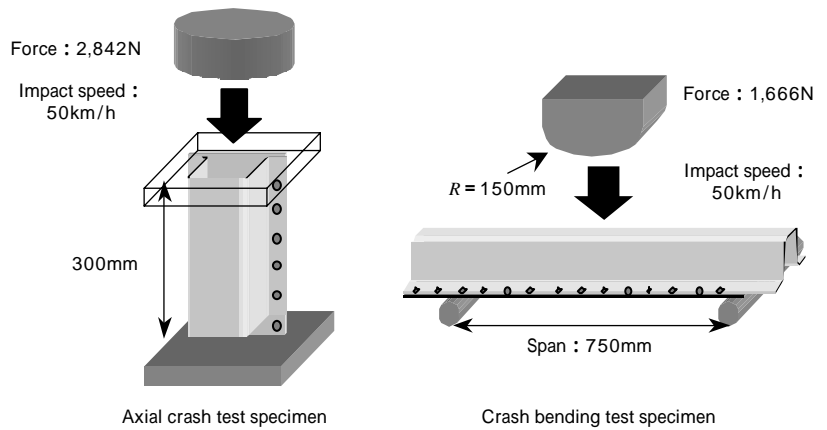


図5 軸圧壊試験および三点曲げ圧壊試験の概略回遊

Fig. 5 Description of the axial and bending crash tests

表4 供試材の衝撃圧壊試験の結果

Table 4 Results of crash test in the developed steels and conventional steel (440W)

Steel	Thickness (mm)	Axial crash test		Crash bending test	
		Maximum load (kN)	Absorbed energy 0-150mm (kJ)	Maximum load (kN)	Absorbed energy 0-100mm (kJ)
Developed steel	980Y	502	12.88	29.7	1.29
	780Y	428	10.72	23.4	1.05
Conventional steel	440W	261	6.24	15.5	0.58

ついて、溶接継手のせん断引張強度および十字引張強度をそれぞれ溶接電流値で整理した結果である。継手強度に関して、せん断引張強度は、従来の知見^{16)~18)}と同様に母材強度に対応して高くなる傾向にあり、ボタン破断が得られる電流値では JIS Z 3140 A 級規格の強度を大きく上回っている。また十字引張りでは、いずれの鋼種でもナゲット内破断は起らず、チリ発生後も顕著な強度低下は生じていないことが確認され、開発鋼は良好な継手性能を有していると判断される。さらに、ボタン破断を示す臨界からチリ発生までの電流範囲は4kA程度確保され、開発鋼でも高い溶接継手強度が安定して得られることを示唆している。これらの優れた溶接性は、Cr, Moの複合添加で溶接性に害のあるCを低減した成分設計によって発揮された効果と考えられる。最近では、さらに低C化を図り、溶接性を一層改善した鋼種も開発し

ている。

2.3 耐衝撃特性

780MPa や 980MPa 級のハイテンは、自動車の衝突安全対策としての適用用途が多いため、部材成形後の耐衝撃特性も重要となる。そこで、曲げ加工によりハット形状の試験体を作製し、圧壊試験を行うことで、開発鋼の耐衝撃特性を調査した。図4は、試験体の断面形状を示す。なお、背板はGA材の440W(板厚:1.4mm)を用い、打点間隔:50mmで試験体にスポット溶接した。部材の軸方向長さは、軸圧壊試験用で300mm、三点曲げ圧壊試験用では1,000mmとし、図5で示すように重錘を一定高さから落下させて衝撃荷重を測定した。衝撃荷重は試験体直下のロードセルによって、また変位出力はレーザ変位計によってそれぞれ測定した。表4は、開発鋼とGA440Wについて圧壊試験での荷重-変位曲線から求め

た最大荷重と吸収エネルギーを示す。なお、吸収エネルギーは、変形開始から重錘がストッパに当たる直前までの範囲で計算し、 $n = 3$ の平均値として評価した。軸圧壊試験、三点曲げ圧壊試験いずれの場合も、最大荷重は材料の母材強度の増大に伴って上昇しており、開発鋼は低強度の440Wより衝突に対する変形抑制効果が高いことが示唆される。また、吸収エネルギーについても、開発鋼は優れた値を示し、メンバなどの耐衝撃吸収部材への適用も十分期待される。

3. 今後の展開

本開発鋼は現在、ボディ骨格を中心に多く適用され、ユーザでの評価は非常に高い状況にある。一方、最近、各自動車メーカーから材料のグローバル調達性が叫ばれている中、当社では北米や欧州へ開発鋼の技術移転を積極的に進めている。とくに北米では、U. S. Steel社との合弁会社であるPRO-TEC COATING COMPANY社にて開発鋼の量産体制を整え、日系自動車メーカーを中心に納入を開始している。また、米系自動車メーカーでも、開発鋼の性能評価および内容紹介を通して^{11)~13)}開発鋼を含めた当社GAハイテンの品質が高く評価されてきており、量産車種への適用はますます加速していくと考えられる。

むすび = 一連の特性評価の結果、開発鋼をこれまでの低強度材に替えボディ骨格部材に採用するメリットは十分にあることが示唆された。しかし、近年、ユーザからの材料特性(成形性)の改善要望は高まる一方であり、ハイテンの適用用途は現状より複雑な部位へ指向していくと考えられる。当社では、今回の開発鋼をベースに、溶接性改善型の鋼種や、YP重視の海外規格に対応した高YR型の鋼種、さらに最近では新たに高伸び型の鋼種¹⁴⁾についてもすでに製造技術を確立しており、ユーザから

の多種多様な要望に応え得る品種を取りそろえてきている。今後は、素材の開発・提供を単に行うだけでなく、これまで以上に自動車メーカーや部品メーカーと一体となり、よりユーザ側に立った製品開発を実施する必要がある。そして、用途に合った各鋼種で業界トップクラスの品質を実現し、ハイテンのアイテムラインアップをさらに充実させていかななくてはならない。また、こうした取組みを当社独自の付加価値として位置付け、ユーザから高く評価される名実ともにオンリーワンの製品を提供できるように技術開発を進めていきたい。それにより、自動車業界全体での環境負荷低減にも大きく貢献できると考える。

参考文献

- 1) 栗山幸久ほか：自動車技報，Vol.55, No.4 (2001) p.51.
- 2) 小吹信三：TOYOTA Technical Review, Vol.52, No.1 (2002) p.8.
- 3) 柴田公博：日産技報，No.50 (2002)，p.26.
- 4) 大宮良信：R&D 神戸製鋼技報，Vol.50, No.3 (2000) p.20.
- 5) 向井陽一：R&D 神戸製鋼技報，Vol.55, No.2 (2005) p.30.
- 6) 中屋道治ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.50, No.1 (2000) p.75.
- 7) 田村享昭ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.52, No.3 (2002) p.6.
- 8) 大宮良信ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.52, No.3 (2002) p.10.
- 9) 鹿島高弘ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.52, No.3 (2002) p.19.
- 10) 嘉村 学ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.51, No.2 (2001) p.79.
- 11) M. Kamura et al. : IBEC2002, Proc. of the 2002 IBEC and ATT Conf. on CD-ROM, (2002) 2001-01-3094.
- 12) M. Kamura et al. : SAE Technical Paper, (2003) 2003-01-0522.
- 13) X. M. Chen et al. : SAE Technical Paper, (2005) 05-M83.
- 14) 二村裕一ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.57, No.1 (2007) p.109.
- 15) 薄鋼板成形技術研究会編：プレス成形難易ハンドブック，(1997)。
- 16) N. Yamauchi et al. : Welding Technique, Vol.32 (1984)。
- 17) K. Fukui et al. : JSEA Symposium, No.05-00 (2000)。
- 18) K. Takakura et al. : SAE Technical Paper, (2006) 2006-01-1586.