

(技術資料)

自動車用高加工性590-980MPa級合金化溶融亜鉛めっき鋼板の特性

Characteristics of Highly Formable 590-980MPa Grade Hot-dip Galvanized Steel Sheets for Automobiles



二村裕一*¹(工博)
Dr. Yuichi FUTAMURA



三浦正明*¹
Masaaki MIURA



経澤道高*²
Michitaka TSUNEZAWA

A series of 590-980MPa grade hot-dip galvanized steel sheets has been developed in order to improve the formability of automotive body frame parts, such as lower pillars. These are either DP or TRIP steel sheets, designed 1) to have homogeneous microstructures, 2) to inhibit the precipitation of carbide, 3) to maintain ferrite as much as possible, 4) to harden the ferrite to prevent degradation of local deformability, and in TRIP steel sheet, additionally, 5) to obtain a large amount of retained austenite. The above microstructural controls are mainly accomplished by the addition of silicon, which can be adopted through a special surface preparation technology. The developed steel sheets have not only excellent formability but also practically required performance including good spot weldability and high coating quality.

まえがき＝近年、自動車の衝突安全基準の厳格化に対応した車体構造の強化と、環境対策としての排出ガス削減に向けた軽量化を目的として、車体構造部材への高強度鋼板の適用比率が一段と高まってきている¹⁾。なかでも、耐食性を要する部位には、合金化溶融亜鉛めっき(以下、GAという)鋼板が使用されており、とくにピラー下部やメンバ類などには加工性に優れた高強度GA鋼板が積極的に適用されている。最近では、高強度鋼板の使用部位拡大に伴い、さらなる加工性の向上も強く望まれている^{2), 3)}。

当社では、これらのニーズに対応すべく、590～980MPa級の強度クラスを対象に、従来材比で1.3倍の高い伸びを有したGAハイテンを開発した⁴⁾。本稿では、開発材の組織制御の考え方および主要特性について紹介する。

1. 開発材の組織制御の考え方

開発材は、フェライトとマルテンサイトから構成されるDP (Dual phase) 鋼板と、フェライトとベイナイト、残留オーステナイトからなるTRIP (Transformation induced plasticity) 鋼板である。いずれの鋼種においても、高い伸びを達成するため、①組織の均一化を図り、②炭化物の析出を抑制するとともに、③高延性のフェライトを最大限確保し、なおかつ局所変形能の劣化を極力抑える目的で④フェライト自体も固溶強化するような材料設計を採用しており、さらにTRIP鋼板では⑤多量の残留オーステナイトを得る組織制御も行っている。

これらの達成手段として、DP鋼板では当社でこれま

で培ってきた590～980MPa級のGA鋼板の技術^{5)～12)}を採用し、とくに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にしていることが挙げられる(②, ③)。さらに今回、DP鋼板およびTRIP鋼板のいずれにおいても、添加元素の中で最も重要な役割を担っているのがフェライト安定化元素であり、大きな固溶強化を示すシリコン (Si) である(③, ④)。従来、Siは加工性向上に有用な元素であると知られていたが¹³⁾、GA鋼板ではめっき性確保の観点からその適用は困難であった。この課題に対して当社では、特殊な表面改質を行うことにより、GA鋼板でも冷延鋼板と同様に1.0%以上のSi添加を可能とし、今回の開発に至った。

このように、Si添加によって材料特性としての伸びを大幅に向上させることは可能である。しかしながら一方で、組織としては冷却中にフェライトが析出しやすくなって降伏比が低くなり、引張強度を同レベルに調整した場合には顕著な降伏強度の低下を招く。そのため、製造面では、冷延により導入された加工組織の回復・再結晶挙動に着目して、成分や板厚ごとに冷延率を最適化し、焼鈍時に伸びを劣化させず降伏強度を調整する組織制御を行っている。この制御法は、板厚によらず、均一な複合組織を得るのに有用な手法である(①)。また、TRIP鋼板においても、残留オーステナイト量を最大限確保するような組織制御を行っている。TRIP鋼板では通常、未変態オーステナイト部へ炭素を濃化させるオーステンパ処理を施すが、GA鋼板の製造工程では、めっきの合金化時に鋼板が高温にさらされ、その際、組織変化としてオーステナイトの分解(炭化物として析出)というGA

*¹ 鉄鋼事業部門 技術開発センター 薄板開発部 *² 鉄鋼事業部門 技術開発センター 薄板開発部 (現 鉄鋼事業部門 薄板商品技術部)

鋼板特有の現象が起こる。そこで開発材では、従来のように炭素濃化を単に行うオーステンパ処理ではなく、合金化処理まで考慮したオーステンパ条件の適正化を行い、残留オーステナイト量の最大化を図っている (5)。

図1は、開発材の980MPa級DP鋼板 (a) および780MPa級TRIP鋼板 (b) の代表的なマイクロ組織を示す。いずれも、フェライトが多く含まれ、炭化物の析出は確認されない。さらに、DP鋼板では均一微細な複合組織が得られており、TRIP鋼板では塊状の残留オーステナイトが主に分布している中、針状の残留オーステナイト (図中矢印) もベイニティックフェライトのラス間に存在している。図2は、980MPa級DP鋼板を対象に、電子後方散乱回析像 (Electron Back Scattering Pattern, 以下EBSPという) 測定で結晶方位解析により得られた組織内部の粒界分布を示す。ここで、粒界分布 (図2 (b)) における黒実線は15度以上の大角粒界を、また灰実線は15度未満の小角粒界を表している。フェライト組織内には多くの小角粒界が含まれており、冷延で導入された加工組織が焼鈍によりサブグレイン化して残存していることがわかる。このような加工組織の活用により、開発材では強度特性を調整しつつ、後述するように高い伸びを実現している。さらに、開発材のめっき品質については、図3

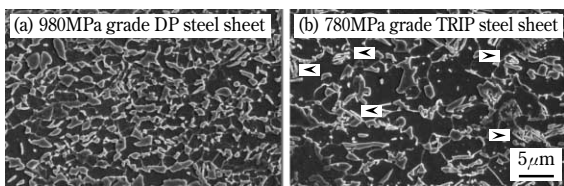


図1 開発材の代表的な組織写真 ((a) 980MPa級DP鋼板, (b) 780MPa級TRIP鋼板)

Fig. 1 SEM images of microstructure in developed steel sheets ((a)980MPa grade DP and (b)780MPa grade TRIP)

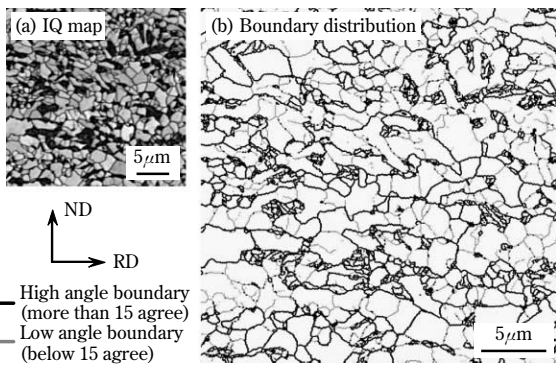


図2 開発材の980MPa級DP鋼板でのEBSP解析結果 ((a)IQマップ, (b)粒界分布)

Fig. 2 Image Quality map (a) and Crystal orientation image map with boundary distribution (b) in developed 980MPa grade DP steel sheet

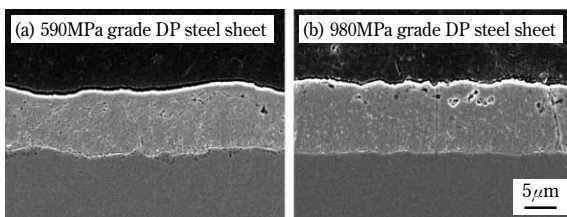


図3 開発材のめっき層断面 ((a)590MPa級, (b)980MPa級DP鋼板)

Fig. 3 SEM images of coating layer in developed steel sheets ((a)590MPa grade, (b)980MPa grade DP steel)

に示す590MPa級および980MPa級DP鋼板のめっき層断面 SEM からわかるように、均一なめっき層性状が確保されており、またこれらの耐パウダリング性も良好であることを確認している。

2. 開発材の主要特性

2.1 加工性

表1は、開発材 (板厚1.6mm) の代表的な引張特性を示す。この表には590~980MPa級冷延鋼板の代表値も比較として記載しており、そのうち980MPa級冷延鋼板については当社DP鋼板のメニューの中の伸び重視の品種¹⁴⁾の値を記した。開発材はいずれも、比較した同一強度クラスの冷延鋼板と同等の伸びを達成していることがわかる。図4は、開発材である980MPa級DP鋼板および780MPa級TRIP鋼板の引張強度 (TS) と伸び (EL) の関係を整理し、従来材と比較した結果である。両品種ともに、前述した成分設計や組織制御の適用により、当社従来材比で最大1.3倍もの高い伸びを実現している。また、TRIP鋼板では、張出し成形の評価において、ひずみの分散性が極めて高く、局所的な板厚減少が起こりにくいため、従来材でワングレード低い強度クラスの590MPa級DP鋼板に匹敵する限界成形高さを示すことも確認している。

表2は、開発材について、伸びフランジ性の指標である穴広げ率 (λ) および90度V曲げ試験での最小曲げ半径の代表値を示す。なお、最小曲げ半径は、先端 (R)

表1 GA鋼板 (開発材) と冷延鋼板 (比較材) の引張特性
Table 1 Tensile properties of developed GA (Galvannealed) steel sheets and reference CR (Cold-Rolled) steel sheets

Steel	TS grade	Category	YP (MPa)	TS (MPa)	EL (%)
Galvannealed (GA) steel (Developed)	590MPa	Dual Phase	387	613	34
	780MPa	Dual Phase	481	828	23
		TRIP	478	823	29
Cold-rolled (CR) steel	590MPa	Dual Phase	388	633	33
	780MPa	Dual Phase	509	838	22
	980MPa	Dual Phase	635	1,032	18

・ Specimen thickness : 1.6mm

・ Tensile test : JIS Z 2241 (JIS Z 2201 #5 specimen in Transverse direction)

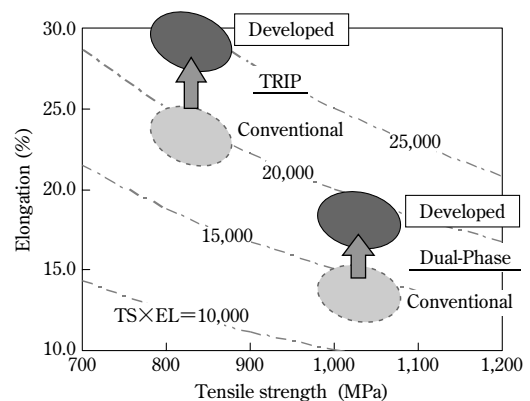


図4 開発材の引張強度と伸びの関係 (980MPa級DP鋼板, 780MPa級TRIP鋼板)

Fig. 4 Relationship between tensile strength and elongation in developed 980MPa grade DP and 780MPa grade TRIP steel sheets

表2 開発材と従来材の穴拡げ率と最小曲げ半径

Table 2 Hole expansion ratio and Minimum bending radius of developed and conventional steel sheets

Steel	TS grade	Category	Thickness (mm)	λ -value (%)	Minimum bending radius (Transverse direction)
Developed steel	590MPa	Dual Phase	1.6	74	0.0
	780MPa	Dual Phase	1.6	27	0.0
		TRIP	1.4	29	0.0
Conventional steel	590MPa	Dual Phase	1.6	68	0.0
	780MPa	Dual Phase	1.6	31	0.5
	980MPa	Dual Phase	1.6	25	2.0

・ Stretch flanging (Hole expanding) test :
 Hole expansion ratio : λ -value obtained by method of JFST1001
 ・ Bending test : V-block method (90 degree angle) according to JIS Z 2248 (JIS Z 2203 #3 specimen in transverse direction)

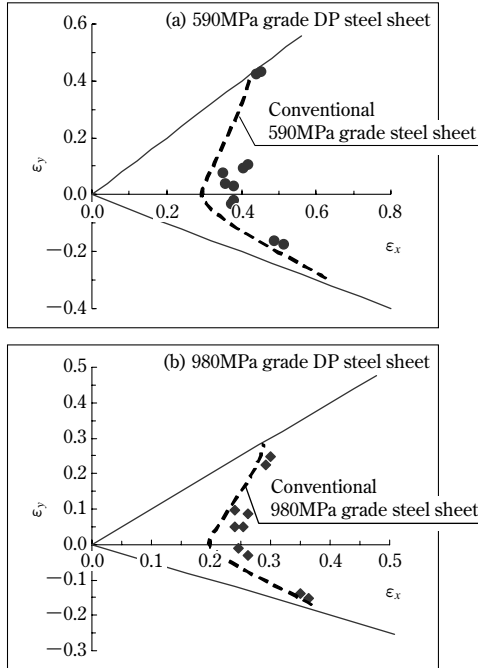


図5 開発材の成形限界線図 ((a)590MPa級, (b)980MPa級DP鋼板)

Fig. 5 Forming limit diagrams of developed steel sheets ((a)590MPa, (b)980MPa grade DP)

が0~5.0mmの90度パンチで成形した際に供試材にクラックが生じない最小の曲げ半径とし、曲げ方向は圧延方向に対して垂直とした。また、比較として、従来材である590~980MPa級GA鋼板の代表値も記載している。開発材の λ は、同じ強度クラスの従来材のそれと同等の値を示しており、局所変形能の劣化は抑えられ、結果的に EL と λ のバランスは開発材の方が優れている。一方、曲げ性は一般的に、伸びフランジ性ととも局部延性と相関を持つ^{15), 16)}ことが知られており、最小曲げ半径と λ の間にもおおむね良好な相関関係が成り立つと考えられる。しかしながら、開発材では λ が従来材と同等であるにもかかわらず、曲げ性は優れた値を示している。このことは、曲げ性が必ずしも λ で整理できる訳ではなく、Siの添加によるフェライトとマルテンサイトの硬度差の減少が局所変形能を向上させるという一般的な λ への効果のみならず、他の効果も働いていることを示唆するものである。今のところ詳細なメカニズムは明らかでなく、現在その解明に向けさらなる調査を進めている。

図5は、開発材の590MPa級(a)および980MPa級DP鋼板(b)(いずれも板厚:1.2mm)の成形限界を示す。スライドサークル径は0.25inchであり、比較として同一強度クラスの従来材の成形限界も破線で示している。いずれの開発材も、成形時に最も厳しい条件である平面ひずみ状態で従来材より高い成形限界を示していることがわかる。これは、前述したように成分設計や組織制御の活用による伸び改善に起因した効果である。

2.2 スポット溶接性

図6は、開発材である590MPa級および980MPa級DP鋼板でのせん断引張強度(TSS)および十字引張強度(CTS)を溶接電流で整理した結果を示す。なお、供試材は板厚1.6mmであり、溶接は表3に示した条件にて行った。590MPa級、980MPa級ともに開発鋼では、ナゲット径5.4mmにおいてせん断引張強度はJIS-A級の規定である13.5kNを超えており、チリ発生までの適正溶接電流範囲も2.5kA以上と広い範囲を確保していることがわかる。

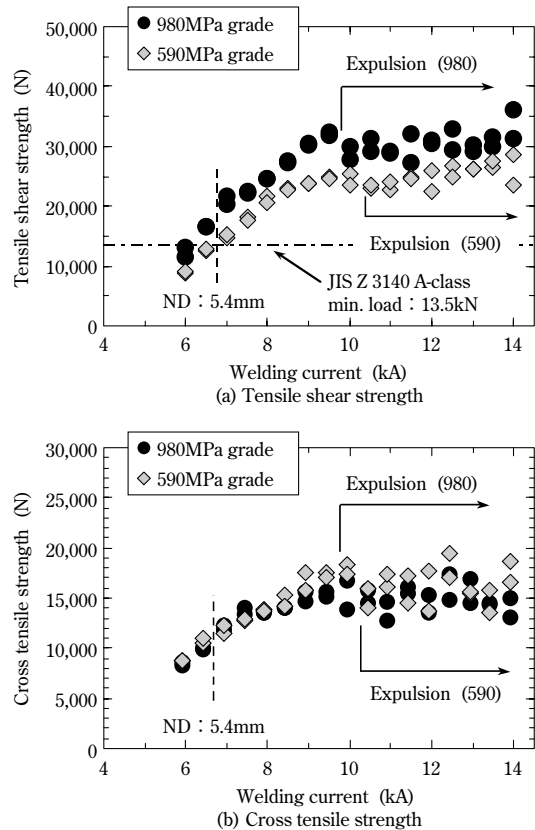


図6 開発材の(a)せん断引張強度、(b)十字引張強度と溶接電流の関係(590MPa級および980MPa級DP鋼板)

Fig. 6 Relationship between welding current and (a)tensile shear strength, (b)cross tensile strength in developed 590MPa and 980MPa grade DP steel sheets

表3 スポット溶接の条件

Table 3 Spot welding conditions for Fig.6

Electrode tip	Dome type Cu-Cr
Tip diameter	8mm
Electrode force	4,950N
Welding time	28cycle (60Hz)
Welding current	6-14kA
Cooling water (Upper, Lower)	1.5L/min

Thickness	1.2mm	1.6mm	2.0mm
Tip diameter	6mm	8 mm	8mm
Electrode force	3,750N	4,950N	6,450N
Welding time (60Hz)	23 cycle	28 cycle	29 cycle

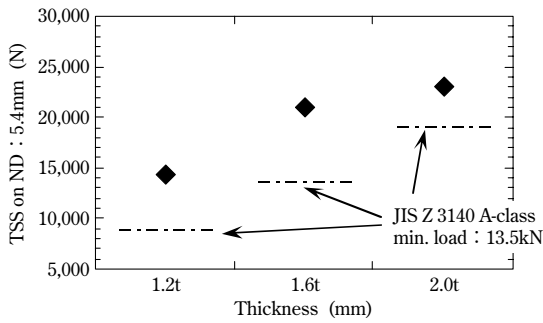


図7 開発材におけるせん断引張強度と板厚の関係(980MPa級DP鋼板)

Fig. 7 Relationship between tensile shear strength and sheet thickness in developed 980MPa grade DP steel sheet

表4 スペーサ有/無の場合の開発材のスポット溶接性(590MPa級および980MPa級DP鋼板)

Table 4 Spot weldability in developed 590MPa and 980MPa grade DP steel sheets welded with/without gap (1mm) between sheets

TS grade (steel)	Gap between sheets	Welding current		
		ND:5.4mm	A-class TSS: 13.5kN	Expulsion
590MPa (Developed steel)	0mm	6.5kA	6.5kA	9.0kA
	1mm	6.5kA	6.5kA	9.0kA
980MPa (Developed steel)	0mm	6.0kA	5.5kA	8.0kA
	1mm	6.0kA	5.5kA	8.0kA

十字引張強度は、成分の影響を受けて継手強度は低下する場合がある¹⁷⁾が、開発材では顕著な強度劣化は生じておらず、せん断引張強度と十字引張強度の比である延性比(CTS/TSS)も適正溶接電流範囲内において590MPa級の開発材で0.65以上、980MPa級開発材では0.48以上と良好な値を示している。図7は、980MPa級の開発材を対象に、ナゲット径5.4mmでのせん断引張強度に及ぼす板厚の影響を調査した結果である。板厚が厚いほど、電極径や加圧力を大きくし、また電流時間を長くしているが、いずれの板厚でもせん断引張強度はJIS-A級の規定を大きく上回り、良好な継手強度が得られていることがわかる。

表4は、実用面でのスポット溶接性を評価する目的で、表3の条件よりも電極先端径を細く(6mm)、加圧

力も低減(3,430N)した上に、溶接板間へのスペーサ(1mm)の有/無それぞれの条件下で溶接した590MPa級および980MPa級の開発材の試験結果である。なお、表中には、規定ナゲット径(5.4mm)、JIS-A級規定(13.5kN)、およびチリ発生の電流値をまとめている。規定ナゲット径とJIS-A級規定の両方を満たし、なおかつチリ発生が生じない電流範囲は、すべての場合で1.5kA以上を確保している。したがって、開発材では、良好な加工性のみならず、高い溶接継手強度を安定して得ることができると示唆される。

むすび=今回、従来材比で1.3倍もの高い伸びを示す590~980MPa級のGA鋼板を新たに開発し、その組織制御の考え方や主要特性について紹介した。開発材は高い伸びを有するだけでなく、曲げ性にも優れ、スポット溶接性やめっき品質についても十分にユーザ要求を満足する特性を示す。当社では、今回の開発材を高強度GA鋼板のメニューの中で高伸び型鋼種として位置付けており、他にも当社は、ユーザニーズに応える形で溶接性改善型鋼種、高YS型鋼種などのラインアップを有している。しかしながら、材料特性に対する最近のユーザニーズは数年前と比べると一段と厳しくなっており、今後もユーザの抱える課題に対して、当社は材料面での特性改善を行うことで貢献し、高強度鋼板の適用拡大に寄与していく所存である。

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) 二村裕一ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.57，No.1 (2007)，p.109.
- 5) 中屋道治ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.50，No.1 (2000)，p.75.
- 6) 大宮良信ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.52，No.3 (2002)，p.10.
- 7) 嘉村 学ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.51，No.2 (2001)，p.79.
- 8) M. Kamura et al.：IBEC2002，Proc. of the 2002 IBEC and ATT Conf. on CD-ROM，(2002)，2001-01-3094.
- 9) M. Kamura et al.：SAE Technical Paper，(2003)，2003-01-0522.
- 10) X. M. Chen et al.：SAE Technical Paper，(2004)，2004-01-1048.
- 11) X. M. Chen et al.：SAE Technical Paper，(2005)，2005-01-0354.
- 12) 二村裕一ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.57，No.2 (2007)，p.11.
- 13) 宮原征行ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.35，No.4 (1985)，p.92.
- 14) 田村享昭ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.52，No.3 (2002)，p.6.
- 15) 田中福輝ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.42，No.1 (1992)，p.20.
- 16) 岩谷二郎ほか：塑性と加工，Vol.35，No.404 (1994)，p.1122.
- 17) 野村伸吾ほか：抵抗溶接研究委員会，(1981)，RW-192-81.