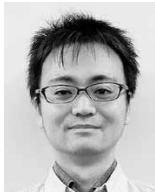


(技術資料)

1180MPa級合金化溶融亜鉛めっき鋼板

Hot-dip Galvanized Steel Sheet of 1180MPa Grade



池田宗朗*¹
Muneaki IKEDA



中屋道治*¹
Michiharu NAKAYA

With the growing awareness of global environmental issues, automobile manufacturers are promoting the weight reduction of vehicle bodies to improve fuel economy, and high-strength steel sheets are being increasingly used, particularly for body frames. Lately, the high-strength steel sheets are desired to have good workability. To meet these needs, Kobe Steel has newly developed a galvanized (GA) steel sheet of 1180MPa grade with good workability. Suppressing ferrite and taking advantage of Si have realized bendability and stretch-flangeability equivalent to those of conventional 980MPa grade dual-phase steel sheets. The newly developed steel also features favorable spot-weldability, delayed-fracture resistance and collision characteristics.

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ており、部材の衝突特性の向上も求められている。そのため、最近の自動車ではボデー骨格を中心に高強度鋼板（ハイテン）の使用比率が一段と上昇している¹⁾。なかでも耐食性を必要とするサイドシルやメンバ類などでは合金化溶融亜鉛めっき（以下、GAという）鋼板が積極的に採用されている。現在は、980MPa級GA鋼板の使用が拡大しており、最近では1180MPa級への置き換えも進んでいる状況である。置き換えにあたり、1180MPa級には980MPa級と同等の加工性が強く望まれている。とくに、サイドシルやその補強材などは、曲げ性や伸びフランジ性が求められることが多い。これらニーズに対応すべく、当社では優れた曲げ性と伸びフランジ性を有する1180MPa級のGA鋼板を開発した。本稿では、開発鋼の特長である加工性を中心とした諸特性について紹介する。

1. 開発鋼の設計の考え方

開発にあたり、成形時に重視される曲げ性と伸びフランジ性を980MPa級と同等レベルに確保しつつ、強度を1180MPa級に向上させるべく組織と成分の設計を行った。

従来のGAハイテンは、フェライトとマルテンサイトの複合組織であるDual Phase（以下、DPという）鋼板が主である^{2)~6)}。マルテンサイトの硬度と体積率で強度を調整し、軟質なフェライトにより高延性を示すのが特長として挙げられる。しかし、フェライトとマルテンサイトの硬度差が大きいことで、厳しい加工を受ける部位では界面からのき裂発生による局部変形能の低下は避

けられず、1180MPa級以上のハイテンでは、曲げ性や伸びフランジ性の向上が困難であった。それに加えて、低い降伏強度に起因し、高降伏強度材より部品の衝突特性が低い⁷⁾ことも問題であった。

これらの解決のため、開発鋼は、フェライトを極力抑制し、代わりにベイナイトを生成させた複合組織を採用した。フェライトとマルテンサイトの中間硬度であるベイナイトの適量導入により、必要量の延性を確保しつつ、マルテンサイトとの硬度差低減による局部変形能の改善効果が得られる。さらに、フェライト生成の抑制により高降伏比を達成でき、部品の衝突特性の向上も実現できる。

添加元素の中では、加工硬化能の向上⁸⁾、およびベイナイト中のセメンタイトの微細化を通じき裂抑制効果があるSiの活用を図った。当社では溶融亜鉛めっきラインでの酸化還元法によるめっき性改善技術により、GA鋼板でも冷延鋼板と同様に1.0%以上のSi添加を可能としており⁹⁾、開発鋼においても適用した。

上記の組織・成分の鋼板開発にあたっては、熱延工程からの原板組織の制御技術、連続焼鈍工程における組織の均質化技術やベイナイト分率の制御技術の確立も重要な役割を果たしている。

2. 開発鋼の主要特性

2.1 引張特性

開発鋼の特性評価にあたっては、980MPa級および780MPa級のGAハイテンを比較鋼として用いた。図1に開発鋼と比較鋼のマイクロ組織を、表1に代表成分と引張特性を示す。引張特性はJIS Z 2241に規定されている引張試験にて評価した。比較鋼はフェライトとマルテンサイトのDP組織であるが、開発鋼はベイナイトとマル

*¹ 鉄鋼事業部門 技術開発センター 薄板開発部

表 1 開発鋼と比較鋼の代表成分と機械的特性

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of developed and conventional steels

Steel	TS grade	C (mass%)	Si (mass%)	Mn (mass%)	Thickness (mm)	YP/YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	YR (%)
Developed steel	1180MPa	0.13	1.0	2.4	1.4	864	1,189	10	73
	980MPa	0.12	-	2.7	1.4	677	1,026	15	66
Conventional steel	980MPa	0.10	-	2.4	1.4	515	834	20	62
	780MPa	0.10	-	2.4	1.4	515	834	20	62

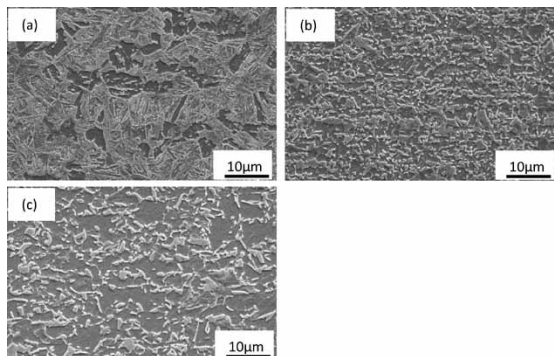


図 1 代表的組織写真 (a) 開発鋼 (1180MPa grade), (b) 比較鋼 (980MPa grade), (c) 比較鋼 (780MPa grade)

Fig. 1 Microstructure of (a) developed steel (1180MPa grade), (b) conventional steel (980MPa grade), and (c) conventional steel (780MPa grade)

テンサイトの複合組織で降伏比が高められている。

2.2 加工性

伸びフランジ性はJIS Z 2256に規定されている穴広げ試験 (穴広げ率: λ) にて評価した (図 2)。開発鋼は、比較鋼と同等以上の穴広げ率を有している。前述の成分設計と組織制御により、局部変形能を向上できたことが伸びフランジ性改善に起因していると考えられる。

曲げ性はJIS Z 2248にて規定されている曲げ試験にて評価した。30×100mm (t=1.4mm) の試料を、先端Rが0.5~2.5mm (0.5ピッチ) の90°パンチを圧下した際、試料にクラックを生じない最小曲げ半径を板厚で除したR/tを指標とした。曲げ稜線は、圧延方向に対して平行である。結果を図 3 に示す。一般に曲げ性は、伸びフランジ性と同様、強度の上昇とともに劣化することが知られており、比較鋼のR/tは、780MPa級のR/t<0.4から980MPa級ではR/t=1.4と劣化している。しかしながら、開発鋼は1,180MPa級でありながら980MPa級と同じR/t=1.4であり、優れた曲げ性を有していることが分かる。

図 4 は、開発鋼および比較鋼の成形限界線図を示す。スクライブドサークル径を6.35mmとし、潤滑としてポリシートを2枚重ねた条件で、破断限界ひずみを測定した。成形限界曲線の比較から、980MPa級は780MPa級と比べて成形性が劣り、強度に伴い成形性は低下している。いっぽう、開発鋼は980MPa級と同等の成形限界を示した。開発鋼は980MPa級と比べて引張試験における伸び特性には劣るが、伸びフランジ性と相関がある局部変形能には優れている。引張試験 (標点距離50mm) よりも、標点距離が6.35mmと短い本試験では、局部変形能の効果がより現れたものと推察される。

2.3 スポット溶接性

図 5 に、開発鋼と980MPa級を用いて、スポット溶接部のせん断引張強度 (Tensile Shear Strength: TSS)

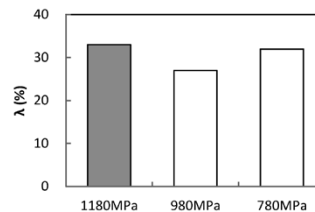


図 2 開発鋼 (1180MPa) と比較鋼 (980MPa, 780MPa) の穴広げ率
Fig. 2 Hole expansion ratio of developed steel (1180MPa) and conventional steels (980MPa, 780MPa)

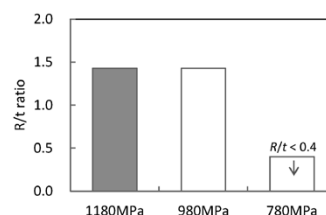


図 3 開発鋼 (1180MPa) と比較鋼 (980MPa, 780MPa) の曲げ性
Fig. 3 Bendability of developed steel (1180MPa) and conventional steels (980MPa, 780MPa)

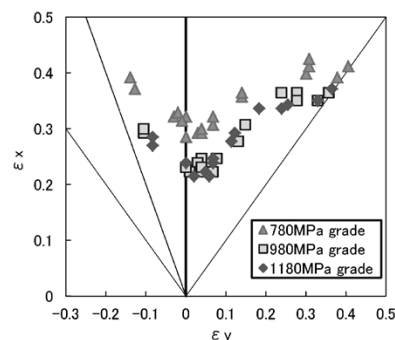


図 4 開発鋼 (1180MPa) と比較鋼 (980MPa, 780MPa) の成形限界線図

Fig. 4 Forming limit diagram of developed steel (1180MPa) and conventional steels (980MPa, 780MPa)

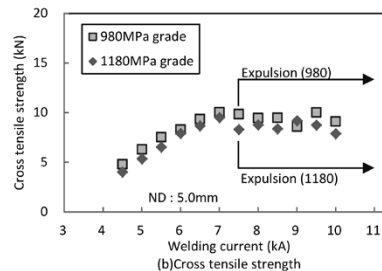
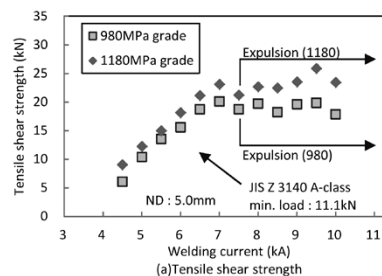


図 5 開発鋼 (1180MPa) と比較鋼 (980MPa, 780MPa) の (a) せん断引張強度と (b) 十字引張強度と溶接電流の関係

Fig. 5 Relationship between welding current and (a) tensile shear strength, (b) cross tensile strength in developed steel (1180MPa) and conventional steels (980MPa, 780MPa)

表2 スポット溶接の条件
Table 2 Spot welding conditions

Electrode tip	Dome type Cu-Cr
Tip diameter	6mm
Electrode force	3,500 N
Welding time	18 cycle(60 Hz)
Welding current	4.5-10 kA

および十字引張強度 (Cross Tension Strength : CTS) を測定し、溶接電流値で整理した結果を示す。なお、供試材の板厚は1.4mmであり、溶接は表2に示した条件にて行った。開発鋼のせん断引張強度は、従来知見¹⁰⁾と同様に母材強度に対応して高くなる傾向にあり、ナゲット径5.0mmにおいてJIS Z 3140A級規格である11.1kNを上回っている。十字引張強度は、高合金化や高強度化に伴い低下する傾向が知られているが、開発鋼は適正電流範囲内では980MPa級とほぼ同等の強度となっている。低炭素当量で、かつHAZ軟化抑制による継手強度改善効果を有するSi¹¹⁾を活用した成分設計によって発揮された特性だと考えられる。

2.4 耐遅れ破壊性

引張強さが1,180MPaを超える鋼材では、使用環境において鋼中に侵入する水素が原因と考えられる遅れ破壊の発生が懸念される。これまで種々の加速試験が提案されているが、本稿では酸浸漬法と複合サイクル試験 (Cyclic Corrosion Test, 以下CCTという) を用いた。CCTは、大気暴露と比較して、鋼中水素侵入速度を20倍にすることで、かつ腐食挙動を模擬できるため、加速試験として優れている¹²⁾。

短冊状試験片を曲げ稜線が圧延方向と平行になるように半径5mmでU曲げ加工し、ボルト締めによって応力を負荷した。曲げ加工部凸側に一軸測定用ひずみゲージを貼り付け、(ヤング率) × (ひずみゲージで測定したひずみ量) が2,000MPa、つまり弾性ひずみのみと仮定した場合の負荷応力が2,000MPaとなるようにした。作製したサンプルは、酸浸漬法では5% HClに48h浸漬し、CCTではJASO M609-91で規定された試験に50日間供し、割れ発生有無を確認した。結果を表3に示す。いずれの促進試験においても遅れ破壊の発生は認められず、優れた耐遅れ破壊性を有していることが分かる。

2.5 衝突特性

部材を模擬したハット形状の試験体を曲げ加工により作製し、三点曲げ圧壊試験と軸圧壊試験を行うことで、衝突特性を評価した。図6に試験体の断面形状を、図7に圧壊試験方法を示す。なお、背板は590MPa級の冷延ハイテン (板厚: 1.4mm) を用い、打点間隔: 30mmで試験体にスポット溶接した。部材の軸方向長さや圧壊時の変位は、三点曲げ圧壊試験では900mmと80mm、

軸圧壊試験で300mmと30mmとした。荷重-変位曲線および吸収エネルギー線図を図8に示す。いずれの試験においても、最大荷重と吸収エネルギーは材料の母材強度の増大に伴って上昇している。圧壊試験後の部材の外観を図9に示す。材料間で座屈モードに大きな違いはなく、

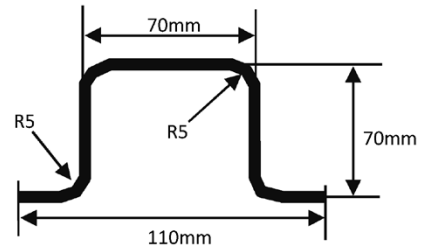


図6 圧壊試験体の断面形状

Fig. 6 Cross section geometry of crash test specimen

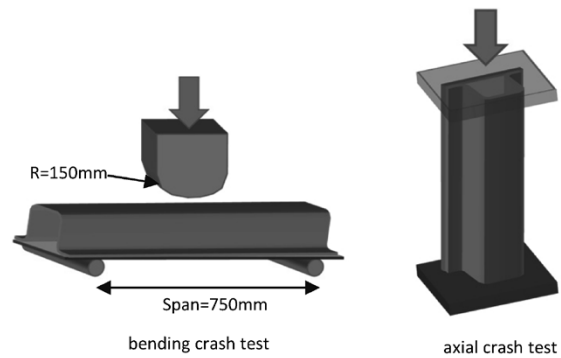


図7 三点曲げ圧壊試験と軸圧壊試験の方法

Fig. 7 Experimental procedure of bending and axial crash test

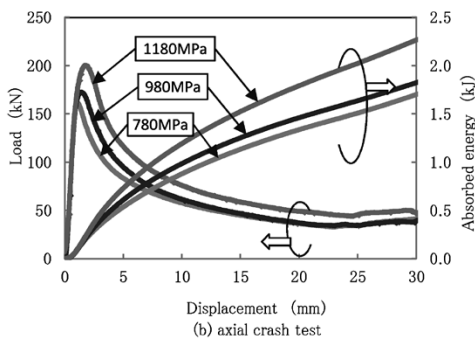
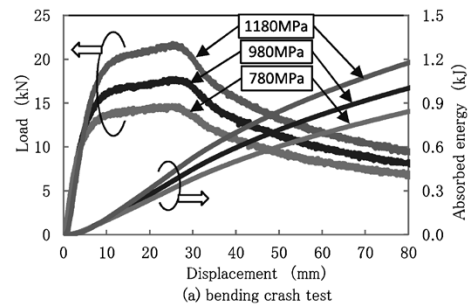


図8 開発鋼 (1180MPa) と比較鋼 (980MPa, 780MPa) の圧壊試験結果

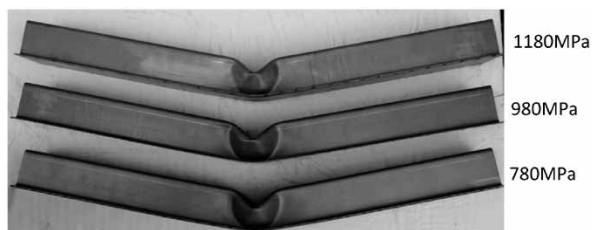
Fig. 8 Results of crash tests in developed steel (1180MPa) and conventional steels (980MPa, 780MPa)

表3 開発鋼 (1180MPa) と比較鋼 (980MPa) の遅れ破壊評価結果

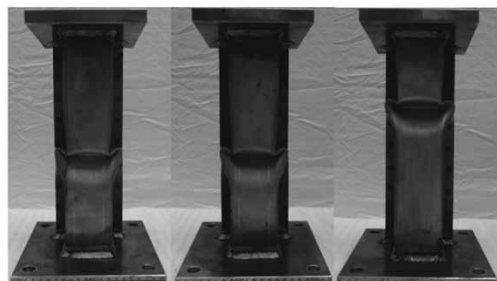
Table 3 Evaluation result of delayed fracture of developed steel (1180MPa) and conventional steel (980MPa)

Steel	TS grade	Thickness (mm)	Bending radius (mm)	Applied stress (MPa)	5% HCl (hr)					JASO-CCT (Day)				
					1	4	8	24	48	10	20	30	40	50
Developed steel	1180MPa	1.4	5	2000	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Conventional steel	980MPa	1.4	5	2000	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

○: No Fracture ×: Fracture



(a) bending crash test



(b) axial crash test

図9 圧壊試験後の開発鋼(1180MPa)と比較鋼(980MPa, 780MPa)
Fig. 9 Developed steel (1180MPa) and conventional steels (980MPa, 780MPa) after crash test

母材およびスポット溶接部での破断も発生していない。
以上より、開発鋼は低強度材よりも最大荷重および吸収エネルギーに優れることが分かった。今後、サイドシルやメンバなどの衝突特性が必要となる部材への適用拡大が期待される。

むすび=今回、980MPa級と同等の曲げ性や伸びフランジ性を有する1180MPa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。加工性や継手強度の向上効果があるSiの活用に加え、従来のDP組織とは異なる複合組織の適用によって、優れた曲げ性や伸びフランジ性のみならず、良好なスポット溶接性、耐遅れ破壊性、および衝突特性を兼備していることが特長である。

開発鋼は現在、ボデー骨格部品に適用され、顧客から高い評価を得ている。しかしながら、材料特性に対する最近の顧客ニーズは一段と厳しくなっている。今後も顧客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. 自動車技術. 2001, Vol.55, No.4, p.51-57.
- 2) 中屋道治ほか. R&D 神戸製鋼技報. 2000, Vol.50, No.1, p.75.
- 3) 大宮良信ほか. R&D 神戸製鋼技報. 2002, Vol.52, No.3, p.10-14.
- 4) 嘉村 学ほか. R&D 神戸製鋼技報. 2001, Vol.51, No.2, p.79.
- 5) M. Kamura et al. IBEC2002, Proc. of the 2002 IBEC and ATT Conf. on CD-ROM, 2002, 2001-01-3094.
- 6) M. Kamura et al. SAE Technical Paper, 2003, 2003-01-0522.
- 7) 渡辺憲一ほか. CAMP-ISIJ, 1996, Vol.9, No.6, p1381.
- 8) 弘中 諭ほか. CAMP-ISIJ, 2009, Vol.22, p1330.
- 9) 二村裕一ほか. R&D 神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.2, p.41-44.
- 10) K. Takakura et al. SAE Technical Paper, 2006, 2006-01-1586.
- 11) 須藤正俊ほか. 鉄と鋼. 1982, Vol.68, No.9, p.1411.
- 12) 衣笠潤一郎ほか. R&D 神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.2, p.65-68.