

(技術資料)

高延性980/1,180 MPa級合金化溶融亜鉛めっき鋼板

村田忠夫*1・羽田佳哲*2・池田宗朗*3・二村裕一*1 (工学博士)・中山啓太*4

Galvanized Steel Sheets of 980 MPa Grade and 1,180 MPa Grade with Excellent Formability

Tadao MURATA・Yoshinori HATA・Muneaki IKEDA・Dr. Yuichi FUTAMURA・Keita NAKAYAMA

要旨

近年厳しさを増す温室効果ガス排出量規制と衝突安全性規制に対応するため、自動車では高強度鋼板への部材置換えによるボデー骨格の軽量化が進められている。中でも、自動車アンダーボデーでは複雑形状部品の部材置換えにあたり、防錆（ほうせい）能と高強度、高成形性を兼ね備える材料が望まれている。当社ではこの要望に対応するため、新焼鈍設備を活用し、優れた成形性、防錆能およびスポット溶接における継手品質を兼ね備える980 MPa級/1,180 MPa級合金化溶融亜鉛めっき鋼板を開発した。本稿では、開発材の組織制御指針と代表的な特性について紹介する。

Abstract

In response to increasingly stringent greenhouse gas emission regulations and concerns about crashworthiness in recent years, progress has been made in reducing the weight of automotive body skeletons by replacing their components with ones made of high tensile strength steel sheets. In particular, the replacement of components in complex shaped parts of automotive underbodies requires steel sheets that combine corrosion resistance with high tensile strength and high formability. To meet this demand, Kobe Steel has utilized a new annealing facility to develop 980 MPa grade/1,180 MPa grade galvanized steel sheets that combine excellent formability, corrosion resistance, and spot-welding joint quality. This paper introduces the microstructural control guidelines and typical properties of the newly developed steel sheets.

検索用キーワード

ハイテン、合金化溶融亜鉛めっき、残留オーステナイト、高成形性、スポット溶接、溶融金属脆化、新焼鈍設備、3CGL

まえがき = 近年、厳しさを増す温室効果ガス排出量規制¹⁾と衝突安全性規制²⁾に対応するため、自動車のボデー骨格、シートのレール・骨格への高強度鋼板の適用が推進されている^{3)~5)}。とくに温室効果ガスの排出に関しては、最近、自動車メーカーではBEVでの開発促進の指向ではあるが、依然、軽量化部品の適用は求められている。したがって、「車体の軽量化のための高強度化」に対する要望は根強く、高強度鋼板に対する強度 (Tensile Strength: 以下、TSと表記) および成形性の向上ニーズはさらに高まっていくと想定される。なかでも、ボデー骨格のアンダーボデーには、防錆 (ほうせい) 能に優れためっき鋼板が適用され、従来より、Dual phase鋼板 (以下、DP鋼板と表記) が使用されている^{6), 7)}。しかしながら、適用材料の高強度化に伴い、複雑形状部品において、従来のDP鋼板では成形性の不足が懸念され、より高い成形性を有する高強度鋼板が要望されている。

この状況を踏まえ、当社では、自動車向け高強度鋼板の需要拡大を見据えた生産能力の拡大と、将来的なさらなる高強度化・高機能化 (成形性や圧壊性能の向上など) ニーズへの対応を目的として、新焼鈍設備を建造した^{8), 9)}。当社新焼鈍設備は最新鋭の熱処理機能を備え、冷延鋼板・めっき鋼板双方の焼鈍設備を併せ持つ。当社

では、新焼鈍設備を活用し、高成形性冷延・めっき鋼板の製品メニュー拡充および既存鋼板の機能性向上による高付加価値鋼板の開発を進めている。

本稿では、高成形性を特徴とする980 MPa級および1,180 MPa級の合金化溶融亜鉛めっき鋼板 (以下、GA鋼板と表記) について、製品設計の考え方と主要特性を紹介する。

1. 開発材の製品設計の考え方

1.1 成分設計

開発材は、主に自動車アンダーボデーの複雑形状部品への適用を目的とした高成形性GA鋼板であり、TSと優れた成形性および合金化溶融亜鉛めっきにより担保される優れた防錆能を兼ね備える。プレス成形における割れを抑制するためには延性 (Elongation: 以下、Elと表記) に加え、伸びフランジ性の指標である穴広げ率 (λ) も重要である。

TSと成形性のバランス向上には、C、Siに代表される合金元素添加量の増大が有効であることが知られている。しかし、GA鋼板では合金元素添加量の増大により、鋼板-亜鉛の界面における亜鉛めっきに対するぬれ性低下¹⁰⁾や合金化処理におけるめっき層の反応性が低下¹¹⁾、均質なめっき層の確保が困難となる。また、鋼板

*1 鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター 鋼板開発部 *2 鉄鋼アルミ事業部門 企画管理部付 *3 鉄鋼アルミ事業部門 加古川製鉄所 鋼板技術部

*4 技術開発本部 材料研究所

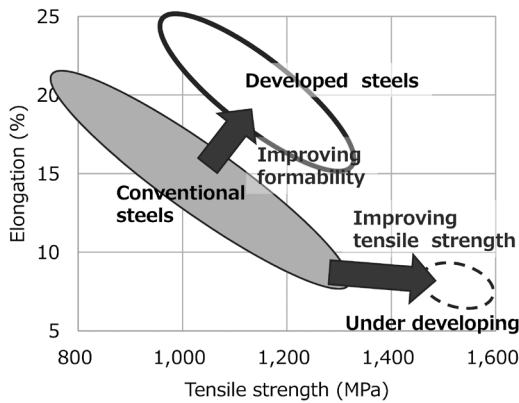


図1 GA鋼板のTS-EL特性バランス

Fig.1 Tensile strength and elongation of galvanized steel sheets

中の合金元素添加量の増大は、自動車部品の接合に広く適用されているスポット溶接において、適正溶接条件範囲の縮小や継手強度の低下¹²⁾、溶融金属ぜい化(Liquid Metal Embrittlement: 以下、LMEと表記)割れによる溶接継手強度の低下¹³⁾を招く。

このため、開発材では、以下の合金元素の添加量は必要最小限に抑え、組織制御の適正化による特性向上を図った。

- 1) C添加量増加による残留オーステナイト量の増大 (TSと成形性のバランス向上)
- 2) Si添加による鉄炭化物の形成阻害効果を活用したCによる特性向上効果の最大活用

1.2 組織設計

図1に、当社GA鋼板の代表的なTSとElの特性バランスを示す。従来より、TSと優れた成形性および実用特性を兼ね備えた鋼板を実現するために、様々な組織制御方策が開発されてきた。開発材では、DP鋼板における『①硬質組織・軟質組織の複合組織』や高成形性冷延鋼板における『②残留オーステナイト活用』に代表される組織制御技術に加え、さらなる特性向上方策として新焼鈍設備を活用する『③上部ベイナイト・下部ベイナイトの複合組織』を検討し、以下の組織制御を見出した。

- ①硬質組織(マルテンサイト)によるTS向上と軟質組織(フェライト)による均一変形能向上の両立
- ②残留オーステナイトによる均一変形能向上と組織微細制御による局所変形能の低下抑制
- ③上部ベイナイト・下部ベイナイトの複合組織による、さらなる軟質組織の活用拡大と組織間の硬度差低減(均一変形能・局所変形能の向上)

開発材では、残留オーステナイトの加工誘起塑性(Transformation Induced Plasticity: 以下、TRIPと表記)効果¹⁴⁾と軟質組織により、優れた均一変形能を発揮する。しかしながら、硬質組織と軟質組織には硬度差が存在するため、成形時の変形量が不均質となり、局所変形能の低下を招く。とくに残留オーステナイトはTRIP効果を発現した際、非常に硬質なマルテンサイト組織に変態するため、比較的軟質で成形時に優先的に変形される隣接組織との界面がボイド発生起点となる。開発材では、λに代表される局所変形能の劣化を回避する

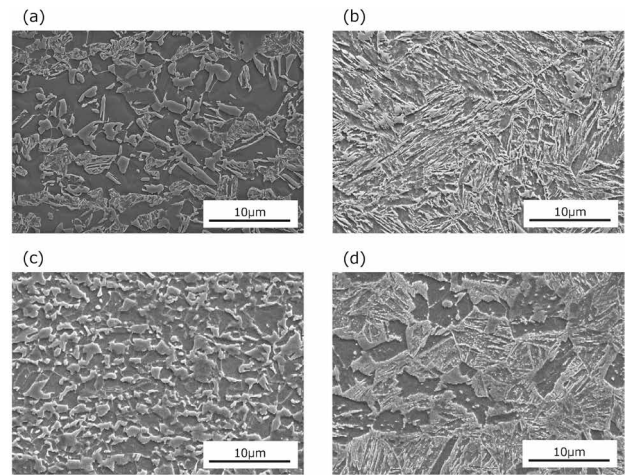


図2 代表組織写真 (a) 980 MPa級開発材, (b) 1,180 MPa級開発材, (c) 980 MPa級従来材, (d) 1,180 MPa級従来材

Fig.2 Microstructure of (a) developed steel (980 MPa grade), (b) developed steel (1,180 MPa grade), (c) conventional steel (980 MPa grade), (d) conventional steel (1,180 MPa grade)

ため、残留オーステナイトを微細分散させることで、隣接組織への変形集中を緩和し、ボイド生成を抑制している¹⁵⁾。

980 MPa級、1,180 MPa級の開発材および従来DP鋼板^{6), 7)}のマイクロ組織の一例を図2に示す。980 MPa級の開発材では、軟質組織であるフェライト・ベイニティックフェライト・上部ベイナイトと硬質組織であるマルテンサイト・下部ベイナイトより構成される複合組織中に、残留オーステナイトを微細分散させている。いっぽう、1,180 MPa級の開発材では、より高強度を確保するためにフェライトは含有させず、ベイニティックフェライト・上部ベイナイトと下部ベイナイト・マルテンサイトより構成される母相中に、残留オーステナイトを微細分散させている。

2. 開発材の主要な特性

2.1 成形性

[基本特性]

表1に、980 MPa級、1,180 MPa級の開発材および比較として、同等強度の従来DP鋼板の代表的な機械的特性を示す。開発材では、前述の組織制御にて非常に優れたTS, El, λの特性バランスを達成している。開発材は同等強度の従来材に比して1.5倍近いElを示しており、例えば、1,180 MPa級開発材では強度グレードが低い980 MPa級従来材と同等のElを確保しており、均一変形能に優れていると推察される。また、焼鈍条件を適切に制御することにより、めっき品質に関しても耐パウダリング性、耐食性ともに良好、かつ均質なめっき性状を実現している。

[成形性]

伸びフランジ性はJIS Z 2256に規定される穴広げ試験にて評価した。図3は、980 MPa級、1,180 MPa級の開発材および比較として従来材についてλを示す。開発材は従来材と同等のλを有しており、前述の組織制御による局所変形能の劣化回避が伸びフランジ性の維持に寄与

表 1 開発材と従来材の代表的な機械的特性 (980/1,180 MPa級)
 Table 1 Mechanical property of developed steels and conventional steels (980 MPa/1,180 MPa grade)

Steel	TS grade	Thickness (mm)	YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)
Developed steel	980MPa	1.4	625	1,022	22
	1,180MPa	1.4	957	1,241	16
Conventional steel	980MPa	1.4	677	1,026	15
	1,180MPa	1.4	864	1,189	10

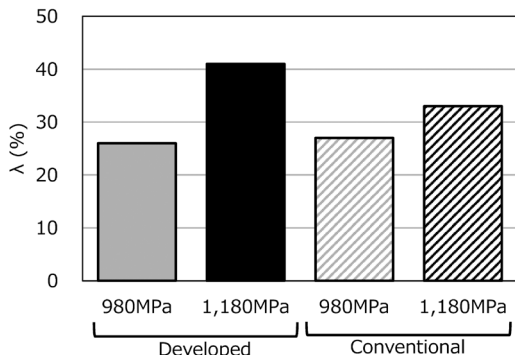


図 3 開発材と従来材の穴広げ率 (980/1,180 MPa級)
 Fig. 3 Hole expansion ratio of developed steels and conventional steels (980 MPa/1,180 MPa grade)

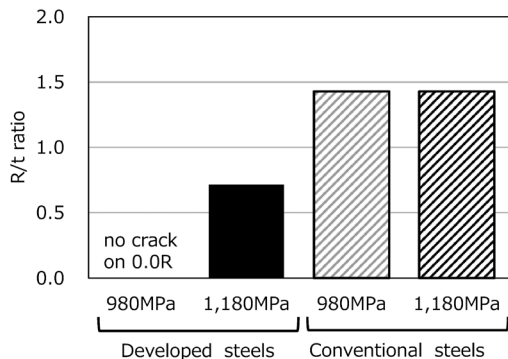


図 4 開発材と従来材の曲げ性 (980/1,180 MPa級)
 Fig. 4 Bendability of developed steels and conventional steels (980 MPa/1,180 MPa grade)

したことを示唆している。

曲げ性は JIS Z 2248 に規定される曲げ試験にて、金型に試料を曲げ稜線 (りょうせん) が圧延方向に並行となるように配置し、先端曲げ半径 (R) が 0.0~5.0 mm の 90 度パンチにて圧下した際に鋼板表面に亀裂が生じない最小曲げ半径 (R) を評価した。図 4 は、980 MPa 級、1,180 MPa 級の開発材および比較として従来材について、曲げ性の指標である 90 度 V 曲げ試験における最小曲げ半径 (R) を板厚 (t) で除した値を示す。開発材では、980 MPa 級、1,180 MPa 級ともに、従来材より小さい曲げ半径 (R) まで割れが発生せず、優れた曲げ性を有していることが分かる。これは、軟質組織および残留オーステナイトの活用により均一変形能が上昇したことに加え、残留オーステナイトを微細分散させたことで、亀裂の起点となるボイドの形成を抑制できたためと推察される。

図 5 は、開発材および比較として 980 MPa 級の従来 DP 鋼板の成形限界線図 (Forming Limit Diagram) を示す。開発材では潤滑材を使用せずに破断限界歪を測定

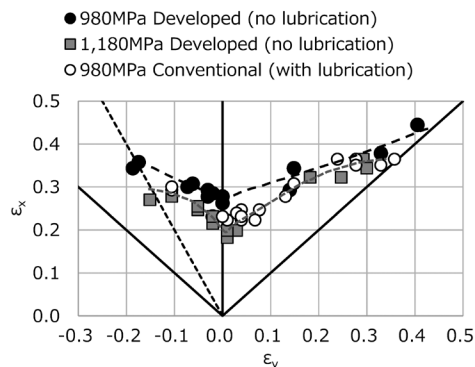


図 5 開発材 (980/1,180 MPa 級) と従来材 (980 MPa 級) の成形限界線図
 Fig. 5 Forming limit diagram of developed steels (980 MPa/1,180 MPa grade) and conventional steel (980 MPa grade)

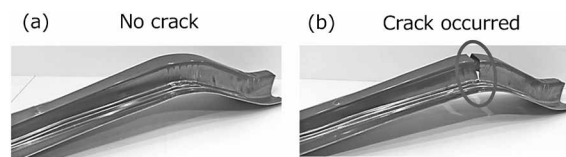


図 6 (a) 980 MPa 級開発材, (b) 980 MPa 級従来材の部品成形模擬試験
 Fig. 6 Forming trial of (a) developed steel and (b) conventional steel (980 MPa grade)

しているのに対し、従来材では潤滑材としてポリシートを 2 枚使用して破断限界歪を測定している。一般に潤滑材の使用により成形時の歪分布が均一化され、成形限界は向上することが知られている¹⁶⁾ が、980 MPa 級開発材の破断限界歪は 980 MPa 級従来材を上回っている。1,180 MPa 級開発材においても、破断限界歪は 980 MPa 級従来材と同等であり、開発材は 980 MPa 級、1,180 MPa 級ともに優れたプレス成形性を有している。

開発材は、従来材より高い成形限界を有することから、例えば、980 MPa 級従来材から 1,180 MPa 級開発材への置換えを活用した衝突安全性と部品薄肉化による軽量化の両立やさらなる複雑形状部品の実現に貢献できる。また、開発材は優れた曲げ性により、部品曲げ肩部の形状をより小さな曲げ半径 (R) とすることで、部品剛性改善による衝突安全性の向上や部品の省スペース化に貢献し、車体構造設計におけるフレキシビリティ創出にも寄与するものと考えている。前述の特徴から、開発材の適用部位として、例えば、複雑形状成形および部品一体化が望まれる各種ピラー (ロア部) や乗客保護の観点で剛性確保が重要となるサイドメンバー、サイドシルが挙げられる。図 6 に、試作段階における 980 MPa 級の開発材および従来材にて、フロントサイドメンバーリアを模擬した形状の成形試験結果を示す。従来材では張出し部にて割れが発生しているが、開発材では割れずに成形できており、厳しい張出し成形性が要求される部品への適用に好適である。

2.2 スポット溶接性

近年、自動車用鋼板では、合金元素添加量の増大に伴い、スポット溶接における溶融金属侵入起因の LME 割れが問題視されている。鋼板の LME 割れに対する感受性は、Si に代表される合金元素添加量の増大により高ま

ることが知られている。当社では、成形性とLEM割れ感受性を両立するため、合金元素がLME割れ感受性におよぼす影響を調査し¹⁷⁾、成分設計に織り込んだ検討を行っている。また、開発材では、高強度と優れた成形性を両立するために合金元素添加量の増大が不可欠である。このとき、溶接ナゲットが硬質となるため、ナゲット内での破断による溶接継手強度の低下が懸念される。溶接継手強度の向上にはナゲット径の拡大が有効だが、高電流通電時には急速に昇温・膨張することで溶融金属が爆飛（チリ）することにより溶融部が流出するため、ナゲット径の安定確保は困難である。開発材の適用に際しては、溶接継手強度の安定確保を指向し、以下の溶接条件での改善を適用した。

- 1) ナゲット形成後の後通電によるナゲット品質の改善（ナゲット内破断の抑制）
- 2) 低電流の予通電によるチリ発生抑制（急速昇温の抑制）

溶接継手強度として、板厚1.6 mmの開発材を溶接し、せん断引張強度（Tensile Shear Strength：以下、TSSと表記）と十字引張強度（Cross Tension Strength：以下、CTSと表記）を評価した。図7、8に開発材の溶接継手特性について、溶接電流とTSSの関係およびCTSの関

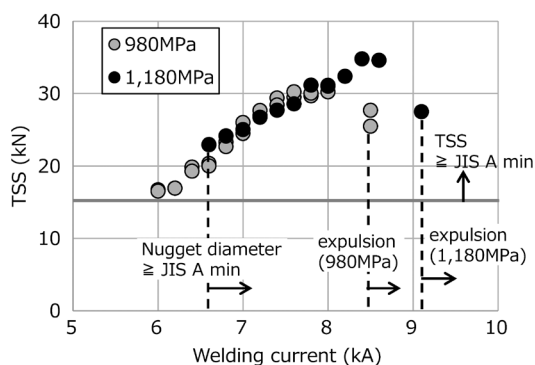


図7 開発材（980/1,180 MPa級）の溶接電流とせん断引張強度の関係
Fig.7 Welding current and tensile shear strength of developed steels (980 MPa/1,180 MPa grade)

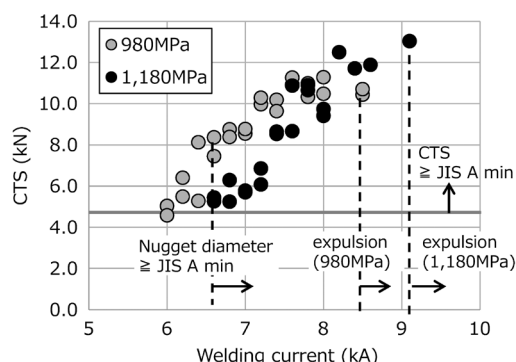


図8 開発材（980/1,180 MPa級）の溶接電流と十字引張強度の関係
Fig.8 Welding current and cross tension strength of developed steels (980 MPa/1,180 MPa grade)

係を示す。開発材では、980 MPa級、1,180 MPa級ともにJIS Z 3140 A級の規定ナゲット径（5.4 mm）を満足する溶接電流からチリ発生電流まで、2.0 kA程度の適正溶接条件を確保した。適正溶接条件において、開発材の溶接継手のTSS、CTSはともにJIS-A級の基準強度を満足しており、良好な溶接継手を安定的に形成できることを確認した。また、開発材溶接継手の外観観察および断面観察にて、LME割れが発生しないことも確認している。

むすび = 今回、新たに開発した優れた成形性を有する980 MPa級および1,180 MPa級の高成形性GA鋼板について、組織制御の考え方と主要な特性を紹介した。開発材は成分設計および残留オーステナイトに代表される組織制御により、良好なTSと成形性を有することに加えて、めっき品質、溶接性も兼備することが特徴であり、当社では開発材を高強度GA鋼板の中で高成形性品種と位置付けている。

今後、自動車業界を取り巻く環境として、CO₂排出量低減、リサイクル性確保、さらには原価低減などが推進され、材料に要求される課題は一段と厳しさを増す見込みである。当社では、本稿にて紹介した高成形性980 MPa級、1,180 MPa級GA鋼板をはじめとして、これまでに蓄積した技術および最新鋭の新焼鈍設備を活用した材料開発に取り組んでいく。とくに鋼板のさらなる成形性や溶接性などの特性向上に取り組むとともに、前述の環境変化に対応して材料特性の第三軸を考え、社会貢献に寄与できる材料開発を推進していく所存である。

参考文献

- 1) 国土交通省HP. https://www.mlit.go.jp/report/press/jidoshal0_hh_000228.html, (参照2024-06-07).
- 2) 独立行政法人 自動車事故対策機構HP. https://www.nasva.go.jp/mamoru/assessment_car/newtest.html, (参照2024-08-29).
- 3) 福井孝之. 日産技報. 2019, No.85, p.3-7.
- 4) 瀬井洋一. ふえらむ. 2013, Vol.18, No.12, p.48-53.
- 5) 大宮良信ほか. R&D神戸製鋼技報. 2000, Vol.50, No.3, p.20-23.
- 6) 二村裕一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.2, p.41-44.
- 7) 池田宗明ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.8-11.
- 8) 神戸製鋼所HP. https://www.kobelco.co.jp/releases/1199218_15541.html, (参照2024-06-07).
- 9) 神戸製鋼所HP. https://www.kobelco.co.jp/releases/1208049_15541.html, (参照2024-06-07).
- 10) 鈴木善継ほか. 鉄と鋼. 2002, Vol.88, No.11, p.61-68.
- 11) 宮田麻衣ほか. 鉄と鋼. 2019, Vol.105, No.7, p.9-18.
- 12) 溶接学会軽構造接合加工研究委員会. 薄鋼板及びアルミニウム合金板の抵抗スポット溶接. 2008.
- 13) 前田恭兵ほか. R&D神戸製鋼技報. 2023, Vol.72, No.1, p.107-114.
- 14) 田村今男. 鉄と鋼. 1970, Vol.56, No.3, p.429-445.
- 15) 鹿島高広ほか. R&D神戸製鋼技報. 2002, Vol.52, No.3, p.15-18.
- 16) 薄鋼板成形技術研究会編. プレス成形難易ハンドブック. 第3版. 2007.
- 17) 中田啓亮ほか. 溶接学会講演概要集. 第114集. 2024, p.90-91.