

## 技術資料

## 低降伏比型590MPa級溶融Zn-6%Al-3%Mg合金めっき鋼板

平 田 健太郎\* 大 塚 雅 人\*\* 弘 中 諭\*\*\* 藤 原 進\*\*\*\* 森 川 茂\*\*\*\*\*

## Development of 590MPa Grade Hot-dip Zn-6%Al-3%Mg Alloy Coated Steel Sheets (ZAM) with Low Yield Ratio

Kentarou Hirata, Masato Ootsuka, Satoshi Hironaka, Susumu Fujiwara, Shigeru Morikawa

## Synopsis :

It is indispensable to use the highly corrosion-resistance and high tensile strength steel sheets to automobile bodies for the weight reduction of bodies, the improvement of collision safety and the highly corrosion-resistance of automobile bodies. However high tensile strength steels have generally poor press formability than mild steels. Therefore high tensile strength steel sheets with good press formability are strongly desired. Nisshin-Steel Corporation has been developed high tensile strength steel sheets with good press formability considered press forming processes of automotive parts. In this paper, various characteristics of newly developed 590MPa grade hot-dip Zn-6%Al-3%Mg alloy coated steel sheets (ZAM) with low yield ratio are described.

## 1. 緒 言

自動車用薄鋼板は、衝突安全性確保およびCO<sub>2</sub>排出抑制に繋がる車体軽量化の観点から、世界的規模で高強度鋼板の実用化開発が推進されている。

しかし、高強度化によりプレス成形性は一般に低下する傾向にある。通常複雑な形状にプレス加工される自動車用薄鋼板では、高強度・高延性鋼板が開発トレンドになり、590MPaを越える高強度鋼板の実用化が著しく進んだ。現時点でもその採用が拡大傾向にある<sup>1)</sup>。

図1に、種々の微細組織をもつ低合金系薄鋼板の引張強度と全伸び量の関係を示す。実用の高強度薄鋼板には様々なタイプがある。中でもフェライト+マルテンサイトの2相組織を持つDP (Dual Phase) 鋼は、低降伏比で高延性を有するため、難成形部品の高強度化に最も汎用的に適用される鋼板である。

1980年以降、北米、北欧などの苛酷な腐食環境地域では、車体の高防錆化が必要となった。自動車のアンダーボディーの高防錆化は、安価でグローバル調達性に優

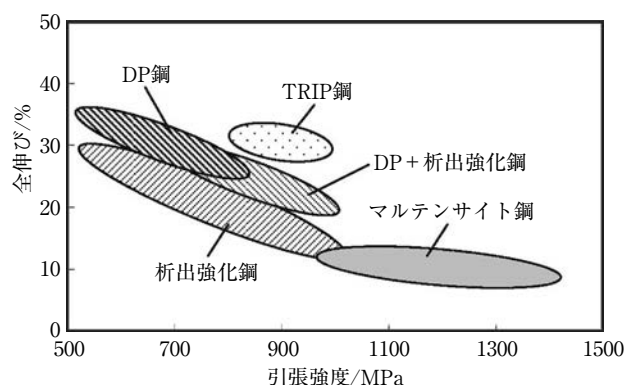


図1 各種高強度鋼板の引張強度と全伸びの関係

Fig. 1 Relationship between tensile strength and elongation of various high tensile strength steel sheets.

\*技術研究所 鋼材研究部 鋼材第一研究チーム

\*\*技術研究所 加工技術研究部 加工第三研究チーム 主任研究員

\*\*\*技術研究所 鋼材研究部 鋼材第一研究チーム 主任研究員

\*\*\*\*技術研究所 鋼材研究部 主任研究員

\*\*\*\*\*技術研究所 鋼材研究部 鋼材第一研究チーム チームリーダー

れる合金化溶融亜鉛めっき鋼板（以下、GA鋼板と記す）の適用が進んでいる。そこで、当社では加工性に優れた低降伏比型高強度GA鋼板の開発を行い、実用化を図ってきた<sup>2)</sup>。

しかし、GA鋼板では耐塩害防錆性が不足するといった問題があり、更に優れた耐食性をもつ溶融めっき鋼板の開発が求められていた。その要求に応えるため、当社では耐食性に優れた溶融Zn-6%Al-3%Mg合金めっき鋼板（以下、ZAM鋼板と記す）を開発<sup>3)</sup>、2000年より実用化し、自動車用途への適用を図ってきた。

ところで、DP組織を得るには、オーステナイト单相もしくはフェライト+オーステナイト2相域に加熱した後、マルテンサイト変態開始温度以下に急冷する必要がある。しかし、GA鋼板製造のヒートサイクルでは急冷が難しく、鋼成分並びに合金化温度等の製造条件の厳格管理が必要となる。

他方、ZAM鋼板製造のヒートサイクルでは急冷が可能で、フェライト+マルテンサイトの2相組織が得られ易く、DP鋼の特性を損なわない製造が期待できる。また、Si、Mn等の焼入れ性を高める元素の添加を極力減らすことが可能となり、省資源化の観点から、低合金成分設計が可能となる。

本報では、ZAM鋼板の製造性の特徴を活かし、従来の低降伏比型590MPa級GA鋼板よりも、高防錆でかつ低合金成分設計で、プレス成形性に優れた低降伏比型590MPa級ZAM鋼板の開発を目的に、機械的性質、ミクロ組織に及ぼす製造条件を実験室的に検討した結果、およびその結果に基づき実機試作した開発材の諸特性について述べる。

## 2. 供試材および実験方法

### 2.1 供試材の化学成分

表1に供試材の化学成分を示す。A鋼を用いてZAM

表1 供試材の化学成分

Table 1 Chemical compositions of test specimen (mass%)

Steel	C	Si	Mn	P	Al	
A	0.14	0.3	1.8	0.02	0.04	比較材(低降伏比型GA鋼板)
B	0.11	0.1	1.8	0.02	0.04	開発材(低降伏比型ZAM鋼板)

鋼板およびGA鋼板の製造ラインを模擬したヒートサイクルの影響調査を行った。他方、B鋼を用いて実機で

低降伏比型ZAM鋼板（以下、開発材と記す）を製造し、A鋼の低降伏比型GA鋼板（以下、比較材と記す）と各種特性調査を行った。開発材は、比較材に比べ、C量を0.11mass%、Si量を0.1mass%と、低合金成分設計としている。低C化はプレス成形性向上、低Si化はZAMめっき浴との濡れ性を向上させ、めっきなどの表面欠陥の抑制効果が期待できる。

### 2.2 供試材の製造方法

図2にZAM鋼板およびGA鋼板の製造ラインを模擬したヒートサイクルの条件を示す。表1のA鋼を用いて、板厚1.2mmの冷延鋼板を作製し、供試材とした。ZAM鋼板を模擬したヒートサイクルは、還元加熱相当温度を800℃、ZAMめっき相当温度を400℃とし、その後、伸び率

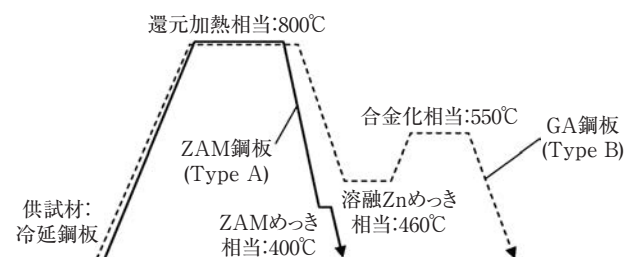


図2 ZAM鋼板とGA鋼板のめっきラインを模擬したヒートサイクル

Fig. 2 Schematic illustration showing typical heat cycle simulation of hot dip galvanized steel and ZAM steel.

0.3%の調質圧延を行った。他方、GA鋼板を模擬したヒートサイクルは、還元加熱相当温度を800℃、溶融亜鉛めっき相当温度を460℃、合金化相当温度を550℃とし、その後、伸び率0.3%の調質圧延を行った。

開発材の製造条件は、熱間圧延での巻取り温度は500～550℃、冷間圧延率は40～50%とし、板厚1.2mmの冷延鋼板とした。連続溶融めっきラインでの還元加熱温度は770～830℃とし、めっき浴温は約400℃とした。めっき付着量は片面45g/m<sup>2</sup>である。めっき後、伸び率0.3～0.5%の調質圧延を行った。

### 2.3 各種特性の評価条件

#### 2.3.1 機械的性質

引張試験はJIS Z 2241に準拠し、圧延方向に直角に採取したJIS5号試験片を使用した。クロスヘッド移動速度は1.5mm/min（ただし、伸び1.5%以降は10mm/min）

にて、引張試験を行った。また、塑性ひずみ比（以下、 $r$ 値と記す）はJIS Z 2254に準拠して測定した。

### 2.3.2 ミクロ組織

ミクロ組織は、鋼板の圧延方向に平行な板厚断面を研磨した後、2%ナイトールで腐食し、走査型電子顕微鏡（SEM）を用いてミクロ組織観察を行った。マルテンサイト相、パーライト相の面積率は、2000倍の倍率で10視野観察し、各相の面積率を測定して10視野の平均値とした。

<試験機：摩擦磨耗試験機>

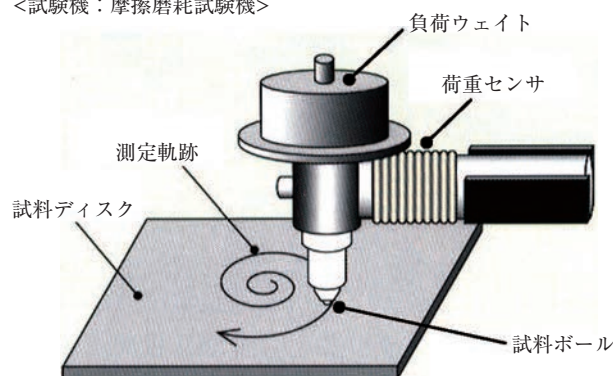


図3 動摩擦係数の測定方法

Fig. 3 Measurement method of dynamic friction coefficient test.

### 2.3.3 めっき品質

めっき品質は、鋼板の圧延方向に平行な板厚断面を研磨した後、走査型電子顕微鏡（SEM）を用いてめっき層断面組織観察で評価した。

### 2.3.4 動摩擦係数

図3に動摩擦係数（ $\mu$ ）の測定方法を示す。動摩擦係数は、摩擦磨耗試験機を用いて測定した。

### 2.3.5 プレス成形性

自動車用部品等の複雑なプレス成形は、複数の基本変形様式の組合せである。プレス成形の基本変形様式は4つあり、深絞り成形、張出し成形、穴広げ成形および曲げ成形である。表2にプレス成形の4つの基本変形様式と対応する成形性試験方法および薄鋼板の材料特性の影響をまとめた結果を示す。

プレス成形性は、3つの主要な成形モードである、深絞り成形性、張出し成形性および穴広げ成形性で評価した。

#### (1) 深絞り成形性

表3に深絞り成形性の試験条件を、図4に試験方法を示す。深絞り成形性は、最大加圧能力196kNの油圧式深絞り試験機を用い、平頭パンチによる円筒絞り成形により評価した。深絞り成形性の優劣は、破断することなく絞り抜ける最大プランク径Dとパンチ径D<sub>p</sub>の比で表される限界絞り比（以下、L.D.R.と記す）で判断した。

表2 プレス成形の基本変形様式と対応する成形性試験方法及び材料特性の寄与

Table 2 Elementary deformation modes of press formability test methods and influence of material characteristics

	深絞り成形	張出し成形	穴広げ成形	曲げ成形
基本変形様式				
成形性試験	深絞り試験	純粋パンチ張出し試験	穴広げ試験	曲げ試験
	エリクセン試験　コニカルカップ試験, 剛体球頭パンチ試験			
成形性に寄与する材料特性	塑性ひずみ比( $r$ 値) 加工硬化指数( $n$ 値)	全伸び 加工硬化指数( $n$ 値)	極限変形能(切欠伸び) 析出物の分散状態 介在物の分散状態 (清浄度)	全伸び 析出物の分散状態 介在物の分散状態 (清浄度)

表3 深絞り成形性評価の試験条件

Table 3 Conditions of deep drawing test

	条件
パンチ径(Dp)	40mm
ダイ径(Dd)	43mm
パンチ肩半径(Rp)	6mm
ダイ肩半径(Rd)	6mm
しわ押え力(BHF)	ジーベルの 半理論式で補正
試験速度(Vp)	60mm/min

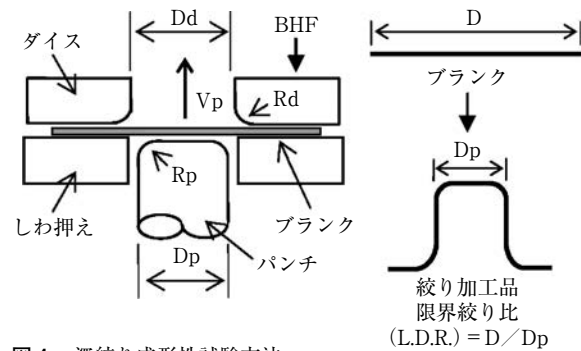


図4 深絞り成形性試験方法

Fig. 4 Evaluation method of deep drawing.

表4 張出し成形性評価の試験条件

Table 4 Conditions of stretch forming test

	条件
パンチ径(Dp)	40mm
ダイ径(Dd)	43mm (ビード付き)
パンチ肩半径(Rp)	20mm
ダイ肩半径(Rd)	3mm
しわ押え力(BHF)	99kN
試験速度(Vp)	3mm/min
ブランクサイズ	92mm

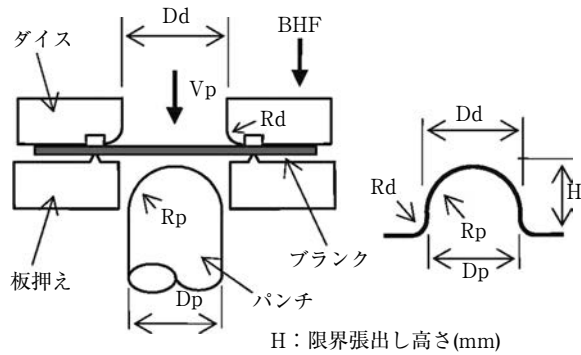


図5 張出し性成形性試験方法

Fig. 5 Evaluation method of stretch forming.

## (2) 張出し成形性

表4に張出し成形性の試験条件を、図5に試験方法を示す。張出し成形性は、最大加圧能力196kNの油圧式深絞り試験機を用い、球頭パンチによる球頭張出し成形により評価した。張出し成形性の優劣は、板厚を貫通する

割れが発生した時の張出し成形高さ（以下、限界張出し高さと記す）で判断した。

## (3) 穴広げ成形性

表5に穴広げ成形性の試験条件を、図6に試験方法を示す。穴広げ成形性は最大加圧能力196kNの油圧式深絞り

表5 穴広げ成形性評価の試験条件

Table 5 Conditions of hole expansion test

	条件
パンチ形状	円錐(60°)
パンチ径(Dp)	40mm
ダイ径(Dd)	42mm
ダイ肩半径(Rd)	5mm
しわ押え力(BHF)	90kN
初期穴径(D0)	9.7mm
打抜きクリアランス	11%
かえりの方向	ダイス側
試験速度	5mm/min

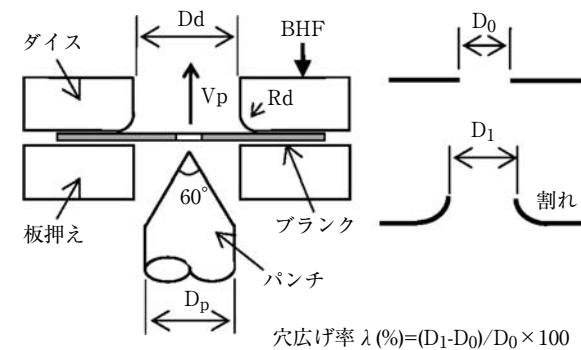


図6 穴広げ成形性評価試験方法

Fig. 6 Evaluation method of hole expansion.



全伸び（以下、T.Elと記す）は、Type-Aで22%、Type-Bで27%である。

図9に模擬ヒートサイクルを施したマイクロ組織を示す。Type-Aでは、フェライト+マルテンサイト（面積率：25%）の2相組織であった。他方、Type-Bでは、フェライト+マルテンサイト（面積率：12%）+パーラ

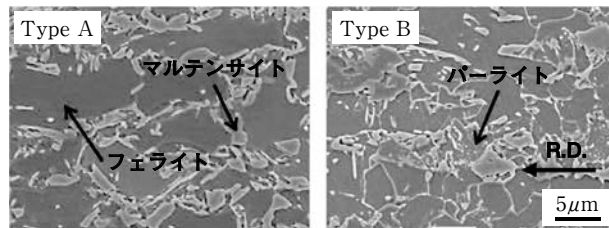


図9 ミクロ組織に及ぼす模擬ヒートサイクルの影響

Fig.9 Influence of typical heat cycle simulation of hot dip galvanized steel and ZAM steel on microstructure.

イト（面積率：2%）の3相組織であった。パーライト組織の析出はTSの低下を招き、低降伏比の阻害要因となるため、ミクロ組織としては望ましくない。

上記の通り、ZAM鋼板製造のヒートサイクルは、フェライト+マルテンサイトの2相組織（DP組織）が得られ易いことが確認できた。

なお、上記実験に使用した供試材は、低降伏比型590MPa級ZAM鋼板のベース鋼に使用するには、TSが800MPaと高い。そこで、TS範囲が590～690MPaとなるように、C量とSi量の検討を行い、適正な鋼成分として、0.10%C-0.1%Si-1.8%Mnを抽出した。以下、この抽出鋼を用いて低降伏比型590MPa級ZAM鋼板の実機試作を行い、機械的性質、ミクロ組織、めっき品質及びプレス成形性の調査を行った。

### 3.2 低降伏比型ZAM鋼板と低降伏比型GA鋼板の各種特性比較

#### 3.2.1 機械的性質、ミクロ組織及びめっき品質

表7に開発材の機械的性質を示す。開発材は、比較材

に比べ、YSが低く、また、T.Elおよび加工硬化指数（以下、n値と記す）が高い。他方、r値は開発材と比較材で差は認められない。開発材は、YSが低く、かつ強度-延性バランス（TS×T.El）に優れている。

図10に開発材のミクロ組織を示す。開発材では、フェライト+マルテンサイト（面積率：13%）の2相組織に

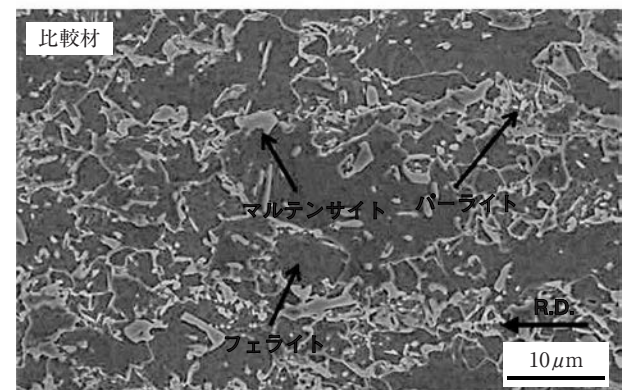
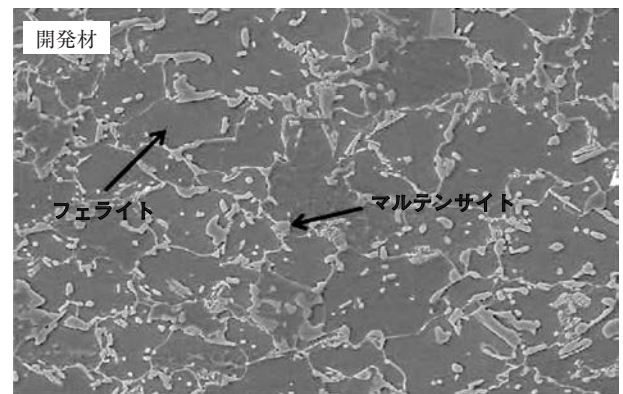


図10 開発材のミクロ組織

Fig.10 Microstructures of developed steel sheets.

対し、比較材は、第2相としてマルテンサイト（面積率：12%）の他、パーライト（面積率：2%）が観察された。比較材におけるT.Elの低下及びYRの上昇は、合金化処理中にパーライトが生成したためと考えられる。

表7 開発材の機械的性質

Table 7 Mechanical properties of developed steel sheets

	板厚 /mm	YS /MPa	TS /MPa	YR	T.El /%	U.El /%	L.El /%	TS×T.El /MPa·%	n値 (5-10%)	r値 (10%)
開発材	1.2	350	615	0.57	31	18	13	19065	0.193	0.80
比較材	1.2	400	615	0.65	27	15	12	16605	0.188	0.79

図11に開発材のめっき層の断面組織を示す。開発材のZAMのめっき層は、デンドライト状に晶出した初晶Al相とZn/Al<sup>II</sup>/MgZn<sub>2</sub>の3元共晶の微細組織を呈する。Mgがサブミクロンサイズでめっき層全体に均一に分散しており、それによってMgを含む保護性の高いZn系腐食生成物にめっき表面が覆われることで高い耐食性が発現される<sup>3)</sup>。

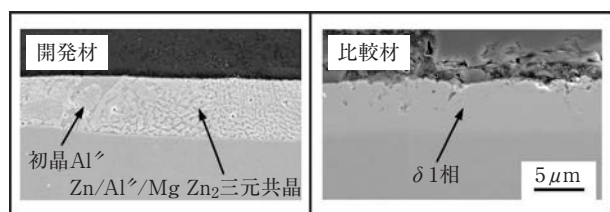


図11 開発材のめっき層

Fig.11 Coating layers of developed steel sheets.

他方、比較材のGAではパウダリング性を劣化させると言われるΓ相は少なく、δ1相を主体とした組織を呈する。

図12に開発材の動摩擦係数(μ)を示す。開発材の動摩擦係数は、比較材のそれに比べ、小さく、摺動

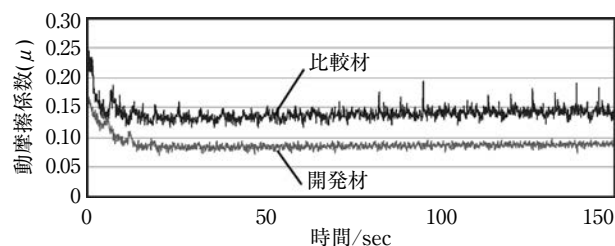


図12 開発材の動摩擦係数

Fig.12 Dynamic friction coefficients of developed steel sheets.

性に優れる。開発材の摺動性が優れる理由としては、図13に示すようにZAMはGAに比べ、表面の凸部が少なく、滑らかであるため、金型と材料が広範囲で接触して接触時の面圧が低くなる。その結果、平滑化されることによる抵抗の増加が少なく、摺動性の向上に寄与したものと考えられる<sup>4)</sup>。

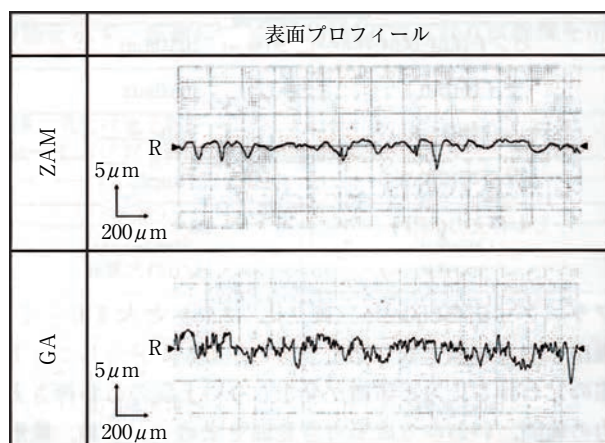


図13 開発材の表面プロフィール

Fig.13 Surface profiles of developed steel sheets.

### 3.2.2 プレス成形性

#### (1) 深絞り成形性

表2に示すように、深絞り成形性は材料特性のr値、n値と強い相関がある。また、材料以外の要因として、プレス金型とめっき面との摺動性が挙げられる<sup>4)</sup>。

図14に深絞り成形性評価結果を示す。開発材は、比較材に比べ、高いL.D.R.を示し、深絞り成形性に優れる。開発材の深絞り成形性が優れる理由は、n値が高く、かつプレス金型とめっき面との摺動性がよく、プレス金型への材料の流れ込みが容易となるためと考えられる。

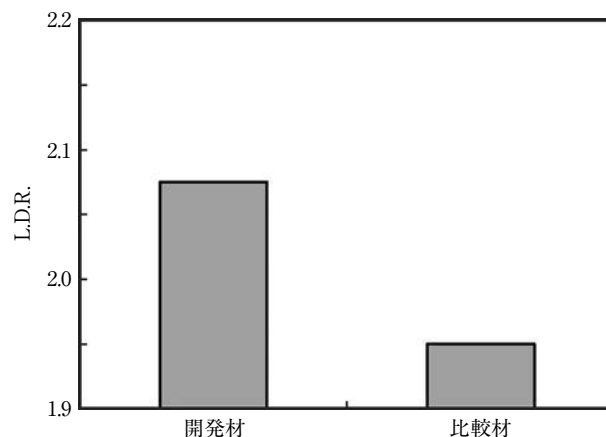


図14 開発材の限界絞り比

Fig.14 Limited drawing ratio of developed steel sheets.

## (2) 張出し成形性

張出し成形性は、 $n$ 値と強い相関がある。 $n$ 値が高い程、ひずみや板厚減少の局所化を抑えるため、張出し高さが高くなる。

図15に張出し成形性評価結果を示す。開発材は、比較材に比べ、高い限界張り出し高さを示し、張り出し成形性に優れる。開発材の張出し成形性が優れる理由としては、 $n$ 値が高く、かつ摺動性がよいことから、ひずみが広範囲に分散するためと考えられる。

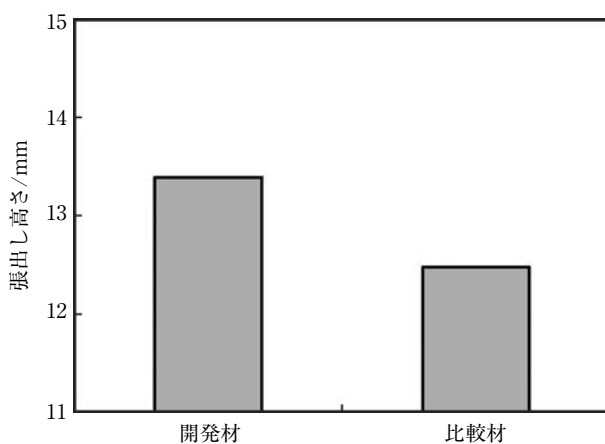


図15 開発材の張出し成形高さ  
Fig.15 Stretch forming height of developed steel sheets.

## (3) 穴広げ成形性

穴広げ成形性に及ぼす影響因子としては、①素材の成分、②ミクロ組織、③介在物、④打ち抜き端面性状（粗さ、ミクロクラック等）の材料因子の他、打ち抜き条件といった端面の加工条件等の諸々の因子に依存することが知られている。

図16に穴広げ成形性評価結果を示す。開発材の穴広げ率は、比較材と同等であった。穴広げ率に差が認められなかったのは、開発材の局部伸び（L.EI）がGA材とほぼ同等であること、穴広げ成形は潤滑の影響をほとんど受けない穴縁の伸び変形により決定されることなどが影響しているものと考えられる。

## (4) プレス成形可能範囲

図17に成形可能範囲を示す。開発材は比較材に比べ、高いしわ押さえ力の領域で成形可能範囲が存在し、その範囲は広い。

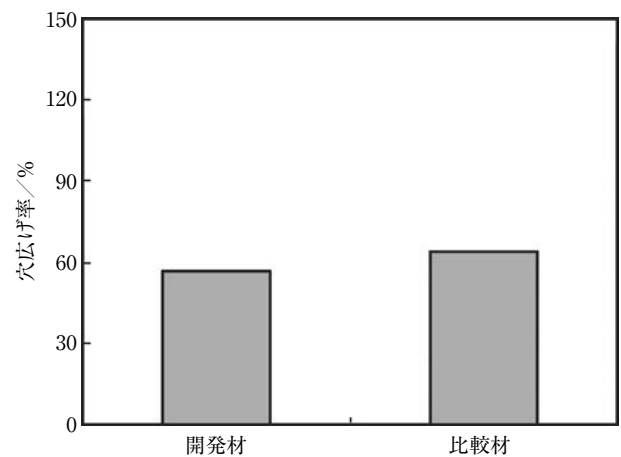


図16 開発材の穴広げ率  
Fig.16 Hole expansion ratio of developed steel sheets.

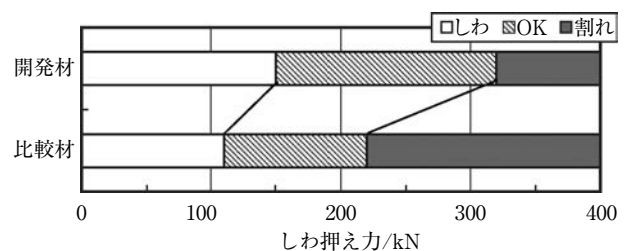


図17 開発材の円筒絞り加工における成形可能範囲  
Fig.17 Drawability condition range of developed steel sheets in cylindrical drawing test.

成形可能範囲が広い理由としては、 $n$ 値が高く、かつ摺動性がよいことから、プレス金型への材料の流れ込みが容易となるためと考えられる。この結果から、開発材は実プレスでの成形の安定性に優れると考えられる。

## (5) 模擬プレス金型を用いたプレス成形性

図18に開発材と比較材のプレス成形品の外観を示す。開発材はプレスの下死点である成形高さ60mmでも割れは発生していない。他方、比較材は成形高さ30mmで、側壁で割れが発生している。開発材は、比較材に比べ、成形高さが高く、プレス成形性に優れる。この理由として、開発材の深絞り成形性及び張出し成形性が、比較材に比べ、優れているためと考えられる。



図18 模擬プレス金型を用いたプレス成形性

Fig.18 Press formability of developed steel sheets by simulated press die.

#### 4. 結 言

当社既存の低降伏比型590MPa級GA鋼板よりも，高防錆及びプレス成形性に優れる低降伏比型590MPa級ZAM鋼板の開発を目的に，機械的性質に及ぼす製造条件を実験室的に検討した結果，およびその結果に基づき実機試作した開発材の諸特性を調査し，以下の結果を得た。

- (1) 開発材（ZAM鋼板）のミクロ組織はフェライト＋マルテンサイトの2相組織（DP組織）であり，既存GA鋼板よりも，低降伏比で，強度-延性バランスに優れる。
- (2) 開発材は，既存GA鋼板に比べ，動摩擦係数が小さく，優れた摺動特性を有する。
- (3) 開発材は，既存GA鋼板に比べ，深絞り及び張出しのプレス成形性に優れる。

以上のように，開発材は自動車分野における省資源・

省エネルギー対策及びCO<sub>2</sub>排出量低減のための低燃費化（地球環境対策）といった社会的要請に貢献するものである。今後，高耐食性の要望の強い自動車のアンダーボディー等へ幅広く適用されていくことが期待される。

#### 参考文献

- 1) 薄鋼板成形技術研究会：プレス成形難易ハンドブック第3版，日刊工業新聞社，東京，(2007)。
- 2) 弘中論，細見和昭，田中宏，松本孝：日新製鋼技報，87 (2006)，27。
- 3) 浦中将明，清水剛：日新製鋼技報，92 (2011)，9。
- 4) 中村尚文，桜田康弘，森川茂，朝田博：日新製鋼技報，88 (2007)，36。