

# 自動車部品向け溶融亜鉛めっき (GI) 鋼板

## Hot-dip Galvanized (GI) Steel Sheets for Automotive Use

吉田 裕美 YOSHIDA Hiromi JFE スチール スチール研究所 薄板研究部 主任研究員 (課長)  
星野 克弥 HOSHINO Katsuya JFE スチール スチール研究所 表面処理研究部 主任研究員 (副課長)  
荻原 裕樹 OGIHARA Yuki JFE スチール スチール研究所 薄板加工技術研究部 主任研究員 (係長)

### 要旨

JFE スチールは、鋼板の機械的特性の視点から自動車の構造骨格部品に適用可能な高強度溶融亜鉛めっき (GI) 鋼板と、表面制御の視点からパネル系部品に適用可能なプレス成形性に優れる高潤滑性溶融亜鉛めっき鋼板「GI JAZ<sup>®</sup>」(JFE Advanced Zinc for GI) を開発した。高強度 GI 鋼板は、最適なマイクロ組織制御で高強度化し種々の規格に対応した。そのうち低 YS 型と高 YS 型の 2 種の引張強さ 980 MPa 級高強度 GI 鋼板は、引張強さが 980 MPa を超えるような強度レベルで低下が懸念される曲げ加工性および耐遅れ破壊特性とも良好な結果を示した。GI JAZ は、当社独自の潤滑処理を GI 鋼板に適用することで、高潤滑性によるプレス成形性の向上を実現した。これら鋼板と表面潤滑処理の組合せで新たな高強度 GI 鋼板を開発した。本稿では、これら高強度 GI 鋼板の諸特性と GI JAZ のプレス成形性向上効果について述べる。

### Abstract:

JFE Steel has developed high strength hot-dip galvanized (GI) steel sheets for automotive structural parts and lubrication treated GI steel sheets, “GI JAZ<sup>TM</sup>” (JFE Advanced Zinc for GI), which provide excellent press formability to GI steel sheets. Microstructure of the high strength GI steel sheet was controlled to satisfy industrial standards. In a 980 MPa grade of tensile strength, both low- and high-yield strength types show excellent bendability and anti-delayed-fracture performance, which are important especially above 980 MPa. GI JAZ provides excellent press formability with reducing friction coefficient between dies and GI steel sheets due to the surface modified layer formed on GI with JFE Steel’s original lubrication treatment.

## 1. はじめに

自動車車体防錆のための亜鉛めっき鋼板には、日本の自動車メーカー向けの合金化溶融亜鉛めっき (GA) 鋼板と、欧米の自動車メーカー向けの合金化処理をおこなわない溶融亜鉛めっき (GI) 鋼板および電気亜鉛めっき (EG) 鋼板がある。これまで欧米の自動車メーカーでは、外観品質に優れる EG 鋼板を外板パネルに使用してきたが、製造コストがより安価な GI 鋼板への置き換えを拡大している<sup>1)</sup>。JFE スチールは、この需要に向けて外板に使用できる表面外観品質に優れた GI 鋼板を開発してきた<sup>2)</sup>。

これに加え、構造骨格部品では耐衝突性の向上と車体軽量化とを目的に高強度鋼板の使用が拡大している。また車両構造設計やデザイン性を重視する外板パネル系部品ではプレス成形性の飽くなき向上が求められている。本稿では、引張強さ 340 から 980 MPa 級の高強度 GI 鋼板およびプレス成形性に優れる高潤滑性 GI 鋼板「GI JAZ<sup>®</sup>」(JFE Advanced Zinc for GI) について述べる。

## 2. 高強度 GI 鋼板

### 2.1 高強度 GI 鋼板の規格と材料設計

欧米の鋼板規格では、降伏強さ (YS) が詳細に規定されている。ドイツの工業規格 (DIN: Deutsche Industrie Normen) の TS および YS と日本鉄鋼連盟規格 (JFS: The Japan Iron and Steel Federation Standard) との比較を図 1 に示す。590 MPa 未満の引張強さの規格では JFS に比べて DIN は引張強さも狭範囲に定められている。DIN の規格名接尾の「LA」はニオブ (Nb)、チタン (Ti)、バナジウム (V) のいずれかを一つ以上添加した鋼板を、また、接尾の「X」はフェライトとマルテンサイトの Dual Phase (DP) 組織のほかにベイナイトを含み得る鋼板と定義されている。規格範囲内の TS と YS を得るためには、フェライト、マルテンサイトおよびベイナイトの組織比率を狭範囲に制御しなければならない。

たとえば、フェライト中に Nb, Ti, V 炭化物を分散させた鋼板では高い YR (YR=YS/TS: 降伏比) が得られ<sup>3-5)</sup>、マルテンサイトを分散させた鋼板では YR は低くなる<sup>5-7)</sup>。

高強度化のために添加されるマンガン (Mn) は焼鈍時に

2017年10月26日受付

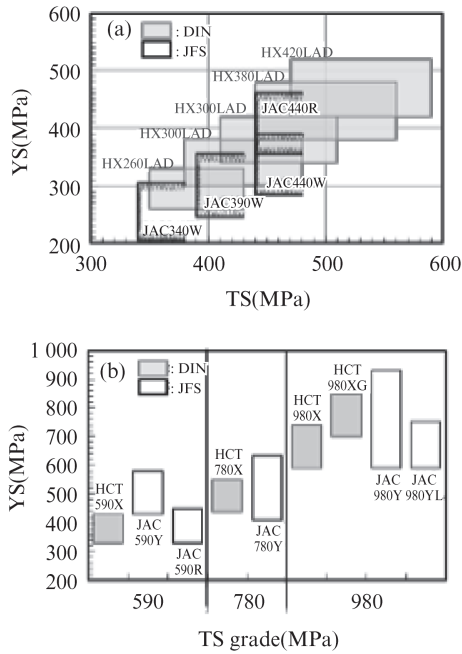


図1 ドイツ工業規格 (DIN) と日本鉄鋼連盟規格 (JFS) の TS と YS の範囲比較

(a) TS590 MPa 以下の規格 (b) TS590 MPa 以上の規格

Fig. 1 Range of TS and YS of the high strength steel sheets comparing DIN to JFS

(a) Under 590 MPa grade (b) Over 590 MPa grade

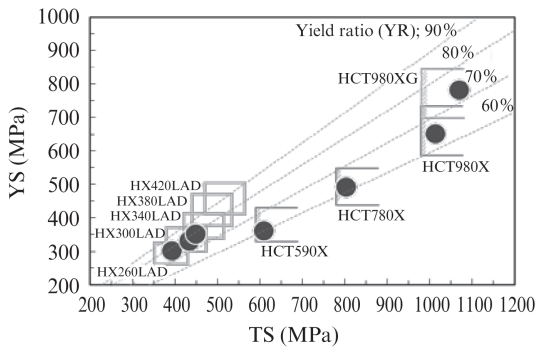


図2 JFE スチールで製造している冷延 GI 鋼板の代表 TS-YS 特性

Fig. 2 Representative values of the mechanical properties of the cold-rolled GI steel sheets being produced by JFE Steel

鋼板表面に拡散して選択外部酸化しやすく、この選択外部酸化物が溶融亜鉛との濡れ性を劣化させてめっきや耐食性の低下などを招くことがある。高強度 GI 鋼板では選択外部酸化を抑制するため合金元素量と焼鈍温度を適正化する必要がある。

開発した GI 鋼板の代表特性を図2に示す。590 MPa 未満の引張強さでは YR が高い HX260LAD, HX300LAD, HX340LAD, 590 MPa 以上の引張強さでは DP 組織で YR が低い HCT590X, HCT780X, HCT980X, さらに 980 MPa 級引張強さでは YR が高い HCT980XG に適合する商品を開発している。

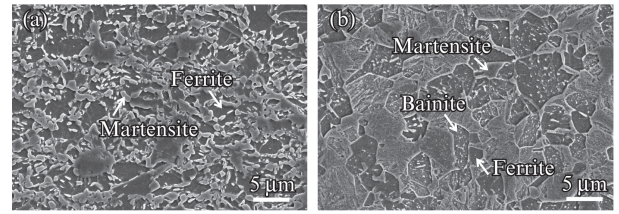


写真1 980 MPa 級 GI 鋼板の目標とするマイクロ組織 (a) 低YS型 (b) 高YS型

Photo 1 Targets of microstructure of 980 MPa grade GI steel sheets

(a) Low-YS type (b) High-YS type

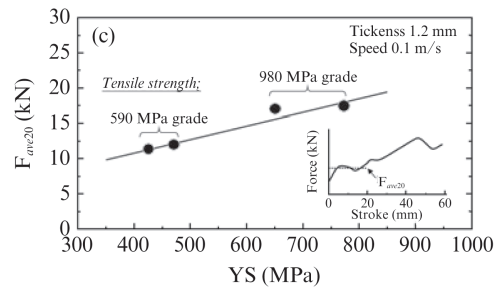
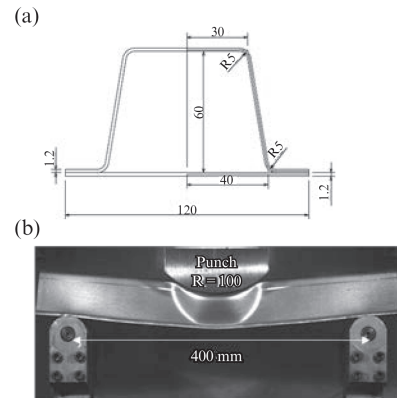


図3 圧壊荷重におよぼす YS の影響

(a) 試験片断面形状 (b) 試験片と試験器具の外観 (c) 圧壊荷重と YS の関係

Fig. 3 Effect of yield strength on average force in 3-point bending tests

(a) Dimensions of cross-section of the test specimen

(b) Appearance of 3-point bending fixture

(c) Relationship between average force and yield strength in 3-point bending tests

## 2.2 980 MPa 級 GI 鋼板

### 2.2.1 ミクロ組織

引張強さ 980 MPa 級の GI 鋼板では、マイクロ組織の制御により DIN の HCT980X (低YS型) と HCT980XG (高YS型) のそれぞれに適合する鋼板を開発した。組織分率の制御に加え、硬質相硬さと結晶粒径を調整して、YS, EI の規格を満たし、かつ曲げ加工性および耐遅れ破壊特性を優れたものとした。

写真1に980 MPa 級 GI 鋼板において低YS型、高YS型それぞれを製造するための目標とするマイクロ組織例を示す。

表1 引張強さ 980 MPa 級 GI 鋼板の機械的特性

Table 1 Mechanical properties of 980 MPa grade GI steel sheets

Steel type	Thickness (mm)	Tensile properties			Bendability <i>R/t</i>	
		Direction	YS (MPa)	TS (MPa)		El (%)
Low-YS	1.2	L	665	1 029	14	1.7
High-YS	1.2	L	785	1 090	12	2.1

(a) に示す低 YS 型は、フェライトとマルテンサイトから成る DP 組織とした。(b) に示す高 YS 型は、降伏強さの低下を招くフェライトを減じてマルテンサイトとベイナイトを主体としたマイクロ組織とし、El を規定の範囲としながら高 YS を得ることに成功した。

### 2.2.2 適用候補部品と耐衝突特性

引張強さ 980 MPa 級 GI 鋼板の想定部品はサイドシルアウタやリアサイドメンバおよびフロントサイドメンバ、フロアクロスメンバなどであり、耐衝突特性が重要である。

そこで耐衝突特性に及ぼす鋼板の YS の影響を調査した。引張強さが 590 MPa 級と 980 MPa 級鋼板を用いて、図 3(a) に示す断面形状を持つハット型部材 (長さ 500 mm, 長手方向が鋼板の圧延直角方向) を作製し、ストローク速度 0.1 m/s で図 3 (b) に示すような 100R のパンチを用い 3 点支持での曲げ圧壊試験をおこなった。耐衝突特性の指標となる変形初期 (0 から 20 mm) の平均荷重 ( $F_{ave20}$ )<sup>8)</sup> を図 3 (c) に示す。YS が高いほど圧壊荷重が高くなっており、高 YS 材は耐衝突特性に有利である。

### 2.2.3 引張および曲げ加工特性

2.2.2 節に示した 980 MPa 鋼板の想定部品への加工には、高い曲げ加工性が必要となる。曲げ加工では、曲げ頂点近傍の表層でくびれが生じる。くびれ前の均一変形特性、くびれ後の局部変形特性の両者を高めることで曲げ加工性が向上する。

表 1 に引張強さ 980 MPa 級 GI 鋼板の引張試験および曲げ試験結果の例を示す。引張試験は JIS13A 号試験片 (標点長さ 80 mm, 平行部幅 20 mm) を用い、引張速度 10 mm/min 一定の条件でおこなった。YS は 0.2% 耐力として求めた。曲げ加工性は ASTM E290-14 に準拠した 90° V 曲げ試験を実施し、亀裂が発生しない最小の曲げ半径で定義される限界曲げ半径 ( $R$ ) と板厚 ( $t$ ) の比  $R/t$  で評価した。供試材の板厚は 1.2 mm で、端面を研削処理した 35×100 mm の試験片とし、曲げの稜線が鋼板の圧延方向と平行になるようにして試験を実施した。割れが発生しない限界の曲げ半径は低 YS 型で 2.0 mm, 高 YS 型で 2.5 mm で、いずれの鋼板も  $R/t$  2.5 以下であった。

### 2.2.4 耐遅れ破壊特性

SEP1970 に準拠した定荷重試験で打抜き端面の耐遅れ破壊特性を評価した。供試材の板厚は 1.2 mm で、30×

表2 引張強さ 980 MPa 級 GI 鋼板の遅れ破壊試験結果

Table 2 Results of delayed fracture test of 980 MPa grade GI steel sheets

Steel type	Thickness (mm)	Applied load (N)	Result (After 96 h)
Low-YS	1.2	8 880	No crack
High-YS	1.2	10 200	No crack

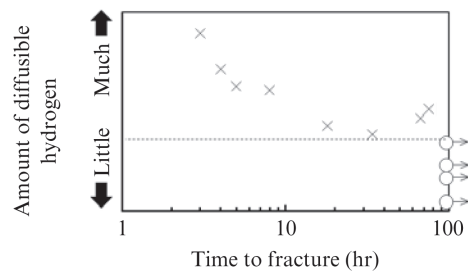


図4 980 MPa 級 GI 鋼板の遅れ破壊時間におよぼす鋼中の拡散性水素の影響

Fig. 4 Effect of amount of diffusible hydrogen in steel sheet on delayed fracture time of 980 MPa grade GI steel sheets

100 mm サイズの試験片中央にクリアランス 12.5% で直径 20 mm の穴を打抜き、DIN の YS 上限値 (低 YS 型=740 MPa, 高 YS 型=850 MPa) に相当する荷重として 8880 N および 10200 N を打抜き端面に負荷して 96 時間保持した時の割れの発生有無を調べた。表 2 に試験条件と結果を示す。低 YS 型および高 YS 型いずれのサンプルも、規格 YS 上限相当の応力を負荷しても打抜き端面からの割れは発生しなかった。この試験における、打抜き端面に割れが発生する時間と鋼中の拡散性水素量の関係を図 4 に示す。鋼中の拡散性水素量が多いと短時間で割れが発生する傾向があり、鋼中拡散性水素量を低減することが耐遅れ破壊特性には有効である。

以上のように、マイクロ組織の最適制御によって規格を満足する機械的特性に加え、良好な曲げ性と耐遅れ破壊特性を備えた HCT980X (低 YS 型) と HCT980XG (高 YS 型) を開発した。

## 3. 高潤滑性 GI 鋼板「GI JAZ<sup>®</sup>」

### 3.1 開発コンセプトと摺動特性

亜鉛めっき鋼板の摩擦係数は、亜鉛と金型の凝着性が高いことから冷延鋼板よりも高く、成形可能範囲が狭いため、量産プレスにおいては割れやしわの不具合につながりやすい。GA 鋼板や EG 鋼板ではプレス成形性向上のため、摩擦係数を低位安定化する潤滑処理を施した高潤滑性 GA 鋼板<sup>9-13)</sup> や高潤滑性 EG 鋼板が開発され<sup>14)</sup>、すでに広く使用されている。GI 鋼板においても同様のプレス成形性向上手段が考えられるが、潤滑処理の開発はほとんどおこなわれ

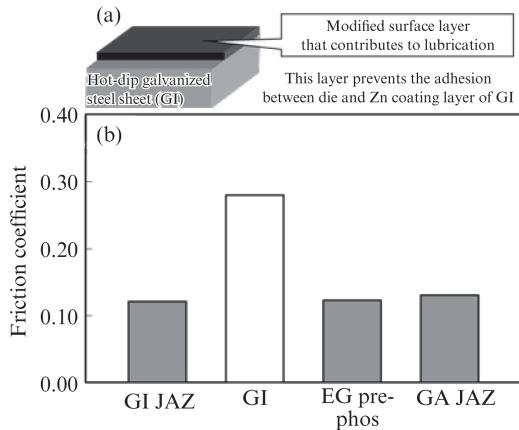


図5 高潤滑性GI鋼板「GI JAZ<sup>®</sup>」の模式図と摩擦係数  
(a) 模式図 (b) 摩擦係数

Fig. 5 Schematic image of the lubrication treated GI steel sheet "GI JAZ<sup>TM</sup>" and its friction coefficient  
(a) Schematic image (b) Friction coefficients

ていなかった<sup>15, 16)</sup>。

当社はこれまでに、従来の潤滑処理である固形潤滑皮膜とは全く異なる発想で、ナノメートルスケールの表面改質による独自の潤滑処理をGA鋼板向けに開発してきた<sup>9-11, 17-21)</sup>。本潤滑処理を適用した高潤滑性GA鋼板「GA JAZ<sup>®</sup>」(JFE Advanced Zinc for GA)は、めっき層の吸着物・酸化物等によってめっき層と金型の凝着を抑制する機構を応用することで、摩擦係数を低位安定化することを実現している<sup>9-11)</sup>。これらの原理はGI鋼板にも適用することができる。

そこで図5(a)に示す模式図のように、軟鋼板を母材とするGI鋼板に、本潤滑処理を適用したGI JAZを作製し、平板摺動試験機で摩擦係数を測定した。比較として従来GI鋼板や、一般的に広く使用されているGA JAZおよび高潤滑性EG鋼板「EGプレフォス」の摩擦係数も同様に測定した。試験片はアルコール超音波洗浄後、潤滑油として市販の防錆油を塗布した。防錆油の粘度は40°Cで60 mm<sup>2</sup>/s、密度は0.91 g/cm<sup>3</sup>である。摺動試験は接触面積10×50 mmのSKD製ビードを用い、摺動距離、速度、面圧はそれぞれ100 mm, 200 mm/min, 7.8 MPaとした。測定した押付け荷重(N)と引抜き荷重(F)から摩擦係数( $\mu$ :  $\mu = F/N$ )の平均値を算出した。図5(b)に結果を示す。GI JAZの摩擦係数は従来GI鋼板と比較して低く、GA JAZと同様に摩擦係数を低めるのに有効であった。その摩擦係数は自動車用鋼板で多くの実績を有するGA JAZやEGプレフォスと同程度であり、GI JAZがこれらの材料と同程度のプレス成形性であると期待できる。

## 3.2 プレス成形性

### 3.2.1 小型モデル試験機でのプレス成形性

自動車のパネル部品には、素材である鋼板の深絞り成形性と張出し成形性が重要である。ランクフォード値（以下、

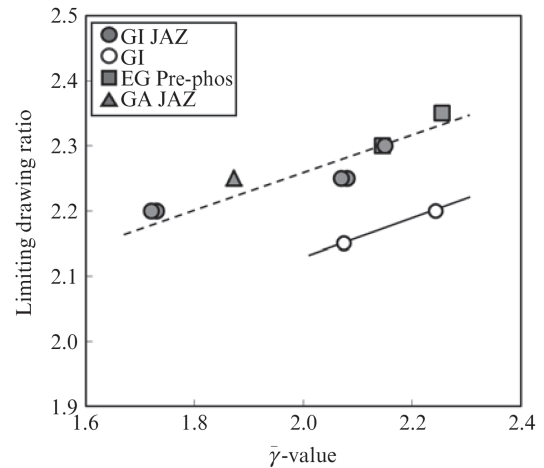


図6 深絞り成形試験によって得られた限界絞り比（LDR）と $\bar{r}$ 値の関係

Fig. 6 Relationship between the limiting drawing ratio obtained with the deep drawing tests and the  $\bar{r}$ -value of the steel sheets

$\bar{r}$ 値)や全伸び(以下、伸び)が異なる板厚0.75 mmの軟鋼板を母材としたGI JAZを用いて、深絞り成形性および張出し成形性を評価した。比較のため同一板厚の従来GI鋼板、GA JAZ, EGプレフォスも同時に評価した。

深絞り成形性評価は、直径50 mm、肩R 5 mmのパンチと内径53 mm、肩R 5 mmのダイス(いずれもSKD製)を用いた円筒深絞り試験をおこない、限界絞り比(LDR; Limiting Drawing Ratio)を指標とした。種々の直径に機械加工した円形ブランク材をアルコール超音波洗浄後、前節と同じ防錆油を塗布した。ブランクホルダ圧を変化させて成形し、割れやしわが発生せずに成形可能だった最大のブランク径( $D_{max}$ )とパンチ径( $d_p$ )との比からLDR ( $LDR = D_{max}/d_p$ )を求めた。

図6に各種鋼板の $\bar{r}$ 値とLDRの関係を示す。LDRは $\bar{r}$ 値の増加に伴い増加する。同一 $\bar{r}$ 値でGI JAZと従来GI鋼板のLDRを比較するとGI JAZの方が高かった。深絞り成形では、フランジおよびダイ肩部と材料とが接触する部分の摩擦係数がたて壁への材料流入に影響を及ぼす<sup>22)</sup>。GI JAZの摩擦係数は従来GI鋼板と比較して低いため、フランジからたて壁への材料流入が増加してLDRが上昇したと考えられる。GI JAZのLDRがGA JAZやEGプレフォスのLDRと同程度であることは、GI JAZの摩擦係数がGA JAZやEGプレフォスと同程度であることによると考えられる。また、同じLDRに対する $\bar{r}$ 値のシフト量から、従来GI鋼板に対するGI JAZの深絞り成形性向上効果は、 $\bar{r}$ 値で0.2以上であると見積もられる。

張出し成形性の評価では、直径100 mm、肩R 10 mmの平底円筒パンチと内径153 mm、肩R 10 mmのビード付ダイス(いずれもSKD製)を用いた円錐台張出し試験をおこない、成形可能高さを求めた。試験片のサイズを200 mm

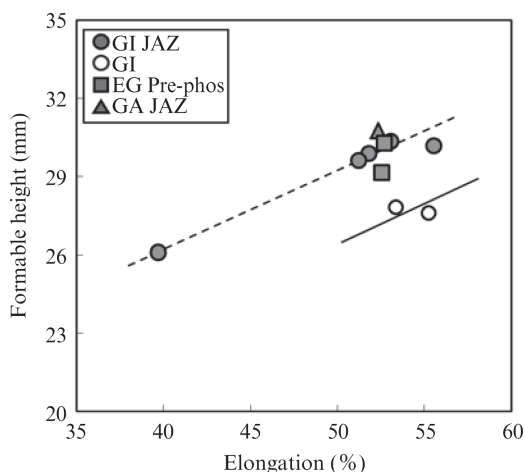


図7 円錐台張出し成形によって得られた成形可能高さと伸びの関係

Fig. 7 Relationship between the formable height obtained with the truncated conical stretch forming tests and the elongation of the steel sheets

角とし、アルコール超音波洗浄後、前節と同じ防錆油を塗布した。しわ押さえ荷重を一定にしてフランジからの材料流入を抑制し、割れが発生する直前の成形高さを測定し、成形可能高さとした。

図7に各種鋼板の伸びと円錐台張出し成形可能高さとの関係を示す。成形可能高さは伸びの増加に伴い上昇する。同一の伸びでGI JAZと従来GI鋼板との成形可能高さを比較するとGI JAZの方が高い。また、伸びに対するGI JAZの成形可能高さの傾きはGA JAZやEGプレフォスと同程度であった。円錐台張出し成形では、パンチ底およびパンチ肩部と材料が接触する部分における摩擦係数が、割れ危険

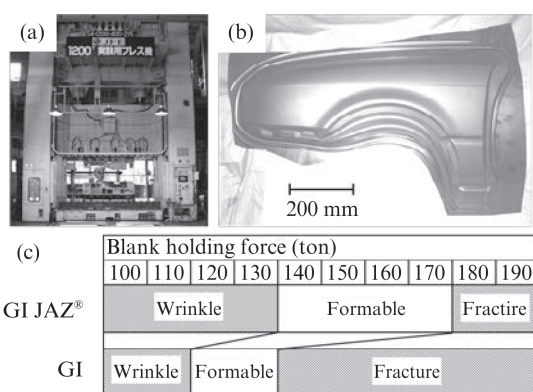


図8 フロントサイドフェンダのモデル金型を用いたプレス評価結果

(a) プレス機の外観 (b) プレス品の外観 (c) GI JAZ<sup>®</sup>と従来GIの成形可能範囲

Fig. 8 Press formability in actual press forming tests with the model front side fender

(a) Appearance of the press

(b) Model front side fender

(c) Formable range of the GI JAZ<sup>™</sup> and conventional GI steel sheet

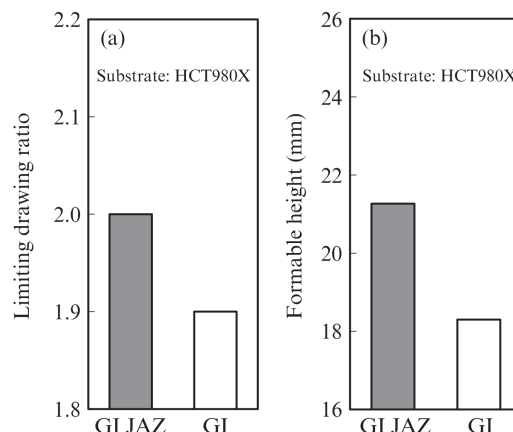


図9 引張強さ 980 MPa 級 GI 鋼板 (HCT980X) を母材とした GI JAZ<sup>®</sup>のプレス成形性

(a) 深絞り成形によって得られた限界絞り比 (LDR), (b) 円錐台張り出し成形によって得られた成形可能高さ

Fig. 9 Press formability of the 980 MPa grade GI JAZ<sup>™</sup>

(a) Limiting drawing ratio obtained with the deep drawing tests

(b) Formable height obtained with the truncated conical stretch forming tests

部への材料流出に影響を及ぼす<sup>22)</sup>。GI JAZの摩擦係数は従来GI鋼板よりも低いいため、割れ危険部へ材料が流出しやすく、ひずみが均一に分散して成形可能高さが上昇したと考えられる。GI JAZの成形可能高さがGA JAZやEGプレフォスと同程度であることは、GI JAZの摩擦係数がGA JAZやEGプレフォスと同程度であることによると考えられる。また、同一成形可能高さが得られる伸びのシフト量から、従来GI鋼板に対するGI JAZの張出し成形性向上効果は、伸びで約4%以上であると見積もられる。

### 3.2.2 モデル金型を用いた実プレス成形性

当社の1200 tシングルアクションメカニカルプレス機を用いたフロントサイドフェンダのモデル金型によるプレス成形試験結果を図8に示す。板厚が0.75 mmの軟鋼を母材とする機械的特性が同等のGI JAZと従来GI鋼板を供試材とし、しわや割れの発生がない成形可能範囲を評価した。GI JAZの成形可能範囲は従来GI鋼板と比較して広く、優れたプレス成形性を実車スケールで確認した。

### 3.3 高強度GI鋼板への適用

980 MPa級GI鋼板の成形では曲げ加工性が重要であるが、今後部品の一体化によるコスト削減等の目的から、絞りや張出しを含む形状も近年増えると考えられる。GI JAZは第2章で述べた全ての高強度GI鋼板に適用可能であり、同様の成形性向上効果が期待できる。例えば、板厚1.2 mmの低YS型980 MPa級GI鋼板(HCT980X)にJAZを適用した場合の成形性について、前節と同じように深絞り成形性は円筒深絞り試験によるLDRを指標として、また張出し成形性は円錐台張出し試験による成形可能高さで評価した結果を図9に示す。前節で述べた軟鋼板を母材としたGI JAZと同

表3 GI JAZ<sup>®</sup>の溶接性とリン酸亜鉛処理性のまとめTable 3 Summary of the weldability and phosphate treatability of GI JAZ<sup>TM</sup>

Specimens	Weld ability		Phosphate treatability	
	Electrode tip life (welds)	Available welding current ranges (kA)	Coating weight (g/m <sup>2</sup> )	Uniformity
GI JAZ	800	0.9	2.0	Good
GI	800	0.8	1.7	Good

程度の成形性向上効果が HCT980X を母材とした場合でも得られた。

### 3.4 諸特性

自動車の組立や塗装工程で重要視される性能の一つである抵抗スポット溶接性やリン酸亜鉛処理性を、軟鋼板を母材とする板厚 0.75 mm の GI JAZ と従来 GI 鋼板を用いて調査した結果を表 3 に示す。これらの特性は、GI JAZ と従来 GI 鋼板で同等であり、GI 鋼板への本潤滑処理の適用により阻害されない。

## 4. おわりに

本稿では、高強度 GI 鋼板の特徴と、高潤滑性 GI 鋼板「GI JAZ<sup>®</sup>」（JFE Advanced Zinc for GI）のプレス成形性向上効果について述べた。

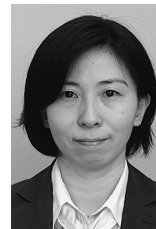
引張強さ 980 MPa 級では HCT980X（低 YS 型）と HCT980XG（高 YS 型）の 2 鋼種を開発した。鋼板成分と溶融亜鉛めっきラインでの焼鈍温度の精密な制御で良好な表面品質を確保しつつ、規格を満足する機械的特性と良好な曲げ加工性および耐遅れ破壊特性を実現した。

GI JAZ の摩擦係数は従来 GI 鋼板より低く、広く使用されている高潤滑性 GA 鋼板「GA JAZ<sup>®</sup>」（JFE Advanced Zinc for GA）および高潤滑性 EG 鋼板「EG プレフォス」と同程度であり、プレス成形性も GA JAZ や EG プレフォスと同程度であることを示した。GI JAZ は上記高強度 GI 鋼板への適用も可能である。

両製品は当社西日本製鉄所（倉敷地区）で営業生産を開始している。当社はこれらを自動車車体に適用することで、軽量化と衝突安全性の両立、車両構造設計やデザイン性の向上に寄与してゆく。

### 参考文献

- 1) Quantin, D.; Ronin, E. 40th. MWSP Conf. Proc. ISS. 1998.
- 2) 飛山洋一, 阿保谷和洋. JFE 技報. 2004, No. 4, pp. 48-52.
- 3) 大内千秋, 大北智良, 山本定弘. 鉄と鋼. 1981, vol. 67, No. 7, p. 969-978.
- 4) 占部俊明, 細谷佳弘. 塑性と加工. 2005, vol. 46, no. 534, p. 560-564.
- 5) 武智弘. 鉄と鋼. 1982, vol. 68, no. 9, p. 1244-1255.
- 6) 橋口耕一, 西田稔, 加藤俊之, 田中智夫. 川崎製鉄技報. 1979, vol. 11, no. 1, p. 68-77.
- 7) 松藤和雄, 下村隆良, 大沢統一, 奥山健, 木下正行, 逢坂忍. 日本鋼管技報. 1980, vol. 84, p. 14-24.
- 8) Sato, K.; Inazumi T.; Yoshitake A.; Liu, S-D. International Journal of Impact Engineering. 2013, vol. 54, p. 1-10.
- 9) 自動車用高潤滑 GA 鋼板「JAZ<sup>®</sup>」（JFE Advanced Zinc）. JFE 技報. 2007, no. 16, p. 54-55.
- 10) Yoshimi, N.; Masuoka, H.; Taira, S.; Imokawa, T.; Nagoshi, M.; Yamasaki, Y.; Sugimoto, Y.; Fujita, S. Proceedings of GALVATECH 2007, Osaka, Japan, ISIJ. 2007, p. 504-509.
- 11) Hoshino, K.; Taira, S.; Yoshimi, N.; Higai, K.; Yamasaki, Y.; Nagoshi, M.; Sugimoto Y. SAE Tech. Pap. Ser. 2011, Paper no. 2011-01-1056.
- 12) Sakurai, M.; Yamasaki, Y.; Hashimoto, S.; Inoue, S.; Hiraya, A.; Urakawa, T.; Inagaki, J. Proceedings of GALVATECH' 98, Chiba, Japan, ISIJ. 1998, p. 620-625.
- 13) 中島清次, 片桐知克, 加藤千昭. 川崎製鉄技報. 2002, vol. 34, no. 2, p. 76-80.
- 14) 青山雅之, 野村信治. 日本パーカライジング技報. 1995, no. 8, p. 33-40.
- 15) Payen, G. R.; Felder, E.; Repoux, M.; Mategne, J. M. Wear 276-277.2012, p. 48-52.
- 16) Cardoso, A. P. D.; Costa, C. E.; Oliverira, F. C.; Souza, F. B. P.; Proceedings of GALVATECH 2015, Toronto, Canada, AIST. 2015, p. 112-120.
- 17) 星野克弥, 樋貝和彦, 平章一郎. JFE 技報. 2012, no. 30, p. 13-18.
- 18) Hoshino, K.; Higai, K.; Taira, S. JFE TECHNICAL REPORT. 2013, no. 18, p. 89-95.
- 19) 星野克弥, 平章一郎, 樋貝和彦, 新宮豊久, 山崎雄司, 吉見直人. 自動車技術会論文集. 2014, vol. 45, no. 4, p. 751-756.
- 20) 星野克弥, 山崎雄司, 名越正泰, 谷本亘, 平章一郎, 吉見直人. 塑性と加工. 2015, vol. 56, no. 658 p. 986-992.
- 21) Hoshino, K.; Yamasaki, Y.; Nagoshi, M.; Tanimoto, W.; Taira, S.; Yoshimi, N. Mater. Trans. 2017, vol. 58, no. 6 p. 873-879.
- 22) 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. 日刊工業新聞社. 2007, p. 434-436.



吉田 裕美



星野 克弥



萩原 裕樹