

## 技術資料

## 溶融Zn-6%Al-3%Mg合金めっき鋼板の自動車ボディへの適用

清水 剛\* 朝田 博\*\* 森川 茂\*\*\*

## Application of Hot-dip Zn-6%Al-3%Mg Alloy Coated Steel Sheet to Automotive Body

Takeshi Shimizu, Hiroshi Asada, Shigeru Morikawa

## Synopsis :

For a purpose of applying a hot-dip Zn-6mass%Al-3mass%Mg alloy coated steel sheet (ZAM) to a use of automotive body panels, a laboratorial examination is performed with regard to general properties required for inner and outer panels of the automotive body. In terms of properties of both cosmetic and perforation corrosion, ZAM shows an excellent corrosion resistance even with a little coating weight in comparison to GI70 and GA45 of current material for the automotive body. In terms of spot weldability and press formability, it is confirmed that ZAM shows properties which are equal to or more than GI70. Further, as the coating weight can be reduced with ZAM for corrosion resistance, the laser weldability is more advantageous than GI and GA.

## 1. 緒言

当社は2000年に溶融Zn-6mass%Al-3mass%Mg合金めっき鋼板（以下、ZAMと記す）の営業生産を開始し、プレハブ住宅の構造材をはじめ建築資材、道路資材、農業資材、家電といった種々の用途への展開を図ってきた。最近ではZAMの高耐食性を活かし、自動車部品分野での採用量も増加しており、将来的には自動車ボディ材への展開も期待される。

自動車ボディ材料に関しては、1980年代に北米や北欧で融雪剤散布による穴あき腐食が問題視されると、その解決策の一つとして亜鉛めっき鋼板の使用が急速に広まった<sup>1,2)</sup>。さらに、自動車ボディの腐食に関する保証年数が引き伸ばされるにともない、亜鉛めっきの付着量を高める対策<sup>1,2)</sup>がとられてきた。その一方、とくに最近の欧州において自動車ボディの組み立てにレーザー溶接が積極的に取り入れられるようになり<sup>3)</sup>、溶接性の観点から亜鉛めっき付着量の低減が求められるようになってきている。それらを解決する方策として、低付着量でも高耐食性が得られる亜鉛-マグネシウム合金めっき鋼板の開発

が進められ<sup>4,5)</sup>、それをボディ材に適用する動きが欧州でみられる<sup>6-8)</sup>。また、新興国いわゆるBRICsの台頭による資源の大量消費により亜鉛も2050年に枯渇する金属の一つと予測され<sup>9)</sup>、このことも自動車ボディ材での亜鉛めっきの低付着量の動きに拍車をかけている<sup>10,11)</sup>。

これまでの調査から、ZAMは同じめっき付着量で比較した場合、自動車ボディ材に現在使用されている溶融亜鉛めっき鋼板（以下、GIと記す）や合金化溶融亜鉛めっき鋼板（以下、GAと記す）に対して数倍の耐食性を示すことが明らかとなっている<sup>12)</sup>。したがって、低めっき付着量のZAMを自動車ボディ材に適用することで、耐食性レベルを低下させずに亜鉛の省資源化とレーザー溶接性の向上の両立が期待できる。そこで本報では、ZAMについて自動車ボディの内外板に求められる一般的な特性を調査した結果について述べる。

## 2. 実験方法

## 2.1 供試材

供試材には連続式溶融めっきラインで製造した片面あたりのめっき付着量が35と66g/m<sup>2</sup>の2種類の溶融Zn-

\*表面処理研究部 表面処理第一研究チーム チームリーダー  
\*\*加工技術研究部 加工第一研究チーム チームリーダー  
\*\*\*加工技術研究部 加工第三研究チーム チームリーダー

6mass%Al-3mass%Mg合金めっき鋼板（以下、ZAM30、ZAM60と記す）を用いた。また、片面あたりのめっき付着量が83g/m<sup>2</sup>の溶融亜鉛めっき鋼板（以下、GI70と記す）、51g/m<sup>2</sup>の合金化溶融亜鉛めっき鋼板（以下、GA45と記す）、および冷延鋼板（以下、CRと記す）を比較材として評価した。いずれも後処理は施しておらず、板厚が0.7mmの極低炭素Ti添加鋼を母材としている。各供試材の機械試験値を表1に示す。

2.2 品質特性調査

車体組み立てにレーザー溶接を積極的に取り入れている欧州の自動車メーカーでは、ボディ材としておもにGIを使用<sup>1,2,13,14</sup>している。そのことから、ZAMはとくにGIの代替材として期待される。そこで本報では、塗装性や耐食性の評価に関し、GIの使用比率が高い欧米の自動車メーカーの塗装仕様、スペック試験に合わせて評価を行った。

2.2.1 塗装性

一連の塗装性の評価はフォードモータース社のFord

ESB-M2P130-Aスペックに準拠し、いずれもn数を3として実施した。塗装試験片は表2,3に示す条件で作製した。欧米の自動車メーカーと日本の自動車メーカーの塗装工程の違いとして、欧米ではリン酸塩処理工程後にクロムフリーシーリング処理が行われる<sup>14</sup>。塗装後耐食試験には上塗りとして白色の塗装を施した試験片を、耐水二次密着試験には上塗りとして黒色の塗装を施した試験片をそれぞれ用いた。

(1) リン酸塩処理性

表2に示す条件でリン酸塩処理を実施し、各供試材の表面に形成したリン酸塩結晶の形態を走査型電子顕微鏡(SEM)で観察した。また、リン酸塩処理後の供試材を室温の20mass%ニクロム酸アンモン+28mass%アンモニア水溶液中に15分間浸漬させてリン酸塩結晶を溶解させた後、その前後の重量差からリン酸塩結晶の析出量を算出した。

(2) 塗装外観

リン酸塩処理したZAM30に表3に示す条件で電着塗装までを行い、圧延方向(L方向)と圧延に垂直な方向

表1 供試材のめっき付着量と機械試験値

Table 1 Coating weight and mechanical properties of materials used in this study

供試材	記号	めっき付着量(g/m <sup>2</sup> )	YS(N/mm <sup>2</sup> )	TS(N/mm <sup>2</sup> )	EL(%)
溶融Zn-6mass%Al-3mass%Mg	ZAM30	35	155	308	47
合金めっき鋼板	ZAM60	66	152	304	48
溶融亜鉛めっき鋼板	GI70	83	176	324	45
合金化溶融亜鉛めっき鋼板	GA45	51	168	308	46
冷延鋼板	CR	—	152	306	48

表2 リン酸塩処理条件

Table 2 Conditions for Zinc phosphating

工程	薬剤名	処理条件		
		処理形態	時間(s)	温度(℃)
脱脂	PPG社製/Chemkleen 163LF	浸漬	120	60
表面調整	PPG社製/Rinse Conditioner	浸漬	60	30
リン酸塩処理	PPG社製/Chemfos 700	浸漬	120	53
シーリング	PPG社製/Chemseal 59	浸漬	30	23

表3 塗装条件

Table 3 Conditions for paint coating

工程	塗料品番	塗装条件		
		塗装形態	焼付け温度(℃)	乾燥膜厚(μm)
電着塗装	デュボン社製/Cormax 6EP	浸漬	180	22
中塗り塗装	デュボン社製/708DM730	スプレー	150	23
上塗り塗装(白色*1)	デュボン社製/648DM640	スプレー	140	31
上塗り塗装(黒色*2)	デュボン社製/648D027	スプレー	140	17
クリア塗装	デュボン社製/RK8014	スプレー	140	50

\*1 塗装後耐食評価用, \*2 耐水二次密着評価用

(C方向)での表面粗度測定を行った。同様にCRをベースにして作製した電着塗装材の表面粗度測定を行い、この時の値と比較することでZAMをベースにした時の塗装外観を評価した。

(3) 耐水二次密着性

表3の塗装条件で黒の上塗り塗装を施した試験片を相対湿度100%、温度38℃の恒温恒湿槽に120時間放置し、恒温恒湿槽から取り出してすぐに基盤目試験を行うことで耐水二次密着性を評価した。

(4) 塗装後耐食性

表3の塗装条件で白の上塗り塗装を施した試験片にクロスカットを施し、図1に示すFord APGE腐食試験<sup>15)</sup> 30サイクルに供した後、クロスカット部の観察とクロスカット部からの最大塗膜膨れ幅を測定した。

2.2.2 耐穴あき腐食性

耐穴あき腐食性の評価は、Society of Automotive Engineers, Inc. (SAE) が推奨する図2の形状の試験片<sup>16)</sup>を作製し、実施した。リン酸塩結晶や電着塗膜が付き廻りにくい隙間部や袋構造部の評価を想定しているため、φ25の評価面にはリン酸塩処理、電着塗装とも施していない。最終的に図に示すように0.25mm厚のスペーサーを介して重ね合わせることで評価部位に隙間を設けている。

同形状の試験片を実車に取り付けて走行した場合と種々の加速腐食試験で評価した場合の相関が調査されて

おり<sup>15)</sup>、実車との相関性が高い加速腐食試験の一つとしてSAE J2334サイクル腐食試験(図3)が挙げられている。ここではSAE J2334サイクル腐食試験により耐穴あき腐食性を評価した。80, 120および160サイクルで試験片を取り出して解体した後、評価面に生成している腐食生成物を取り除き、ポイントマイクロメーターで侵食

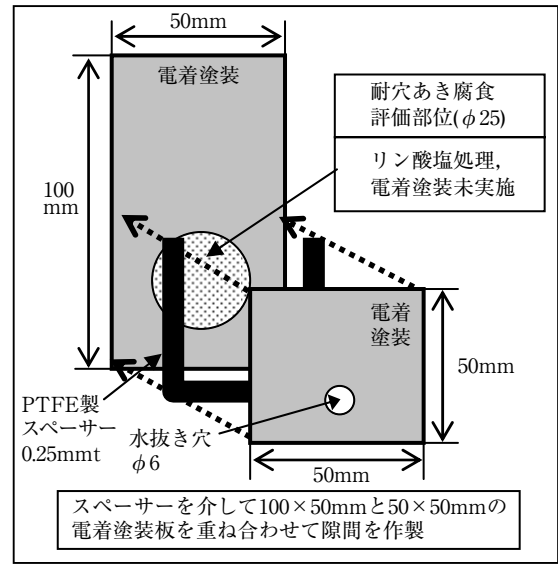


図2 耐穴あき腐食試験評価用サンプル形状  
Fig.2 Coupon for perforation corrosion test.

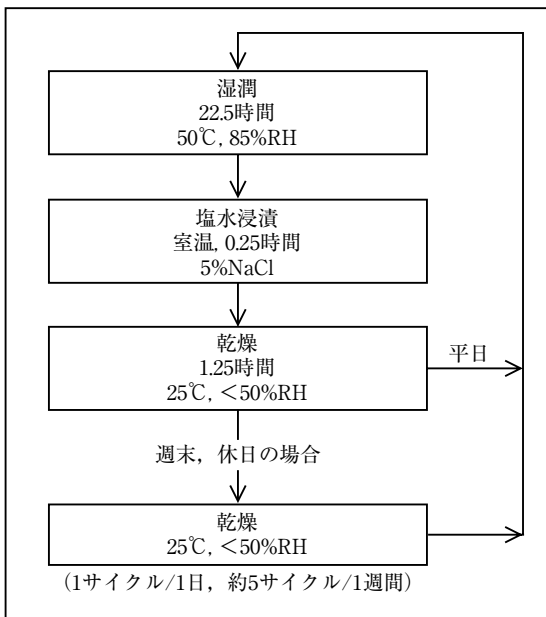


図1 Ford APGEサイクル腐食試験条件  
Fig.1 Cyclic corrosion test condition of Ford APGE.

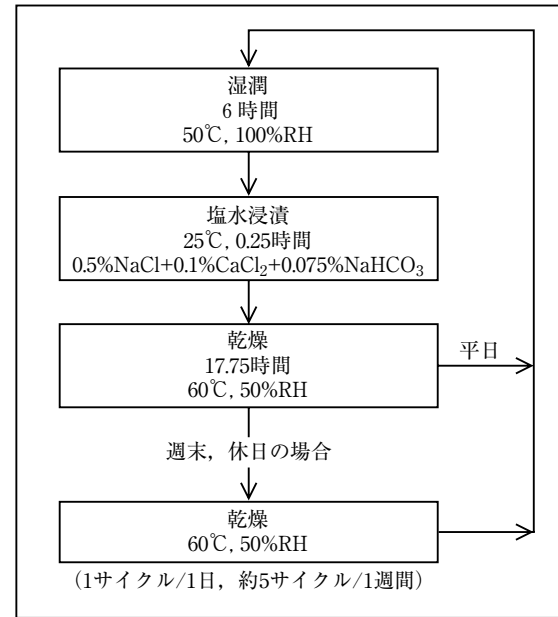


図3 SAE J2334サイクル腐食試験条件  
Fig.3 Cyclic corrosion test condition of SAE J2334.

深さを測定した。測定にあたっては、φ25の評価面を縦横4分割にして各部位の最大侵食深さを求め、その平均値をその試験片の侵食深さとした。なお、耐穴あき腐食性の評価もn数を3として実施している。

2.2.3 溶接・加工性

(1) スポット溶接性

単相交流型で定置式の溶接機を用い、表4に示す溶接条件で適正溶接電流範囲と電極寿命の調査を行った。適正溶接電流は、 $4\sqrt{t}$  [t=板厚 (mm)] のナゲットが得られる最小電流値から散りが発生する電流値までとした。電極寿命を求める連続打点試験時の溶接電流は、 $4\sqrt{t}$  のナゲット径が得られる最小電流値の1.4倍とした。100打点毎にサンプリングを行い、断面観察によってナゲット径が $4\sqrt{t}$ を満す最大の打点数を各供試材の電極寿命とした。

表4 スポット溶接条件

Table 4 Spot weldability test conditions

電極形状	ドーム型(φ6)	
電極材質	1%Cr-Cu 合金	
連続打点試験条件	設定電流値	$4\sqrt{t}$ のナゲット径が得られる最小電流値の1.4倍
	通電時間	12サイクル(60Hz)
	加圧力	1.5kN
	連続打点方法	2秒間隔で連続20打点実施⇔20秒間休止、の繰返し

(2) レーザー溶接性

レーザー溶接は表5に示すようにYAGレーザーを用い、試験片を板間隙無しで重ね合わせた状態で溶接速度を5m/minとして実施した。溶接後の外観を観察するとともに、溶接部のX線撮影を行い、溶接欠陥(ピット、ブローホール)の発生数を求めた。

(3) プレス加工性

196kNの油圧式深絞り試験機を用い、表6に示す条件で平頭パンチによる円筒絞り加工を行うことでプレス加工性を調査した。加工性の優劣は、フランジ部にしわが

表5 レーザー溶接条件

Table 5 Conditions for laser welding test

レーザー種	YAG
レーザー出力	3kW
溶接速度	5m/min
レーザービーム径	0.4mm
シールドガス	アルゴン(30L/min)
板間隙間	0mm
溶接長	100mm

表6 絞り加工条件

Table 6 Conditions for deep drawing test

ブランク径	230mm, 250mm
パンチ径	103mm
ダイ径	105mm
パンチ肩半径	5mm
ダイ肩半径	5mm
絞り高さ	65mm
加工速度	60mm/min

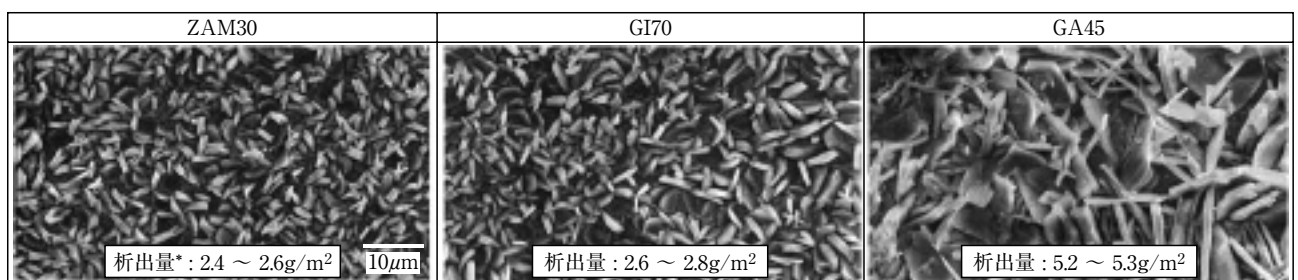
発生しないあるいは破断せずに加工できるしわ押さえ力の範囲(以下、成形可能範囲と記す)で評価した。なお、プレス油としてGIとGAの場合にはパーカー興産株製の亜鉛めっき用防錆油であるNOX-RUST550HNを使用し、ZAMにおいてはZAMへの適性が確認<sup>17)</sup>された出光興産株製のダフニーオイルコートZ-5を使用した。

3 実験結果

3.1 塗装性

(1) リン酸塩処理性

図4に各供試材の表面に形成したリン酸塩結晶の外観と析出量を示す。ZAMの表面には緻密で微細なリン酸塩結晶が生成しており、良好なリン酸塩処理性を示すことがわかる。GIやGAと比較すると、結晶サイズ、析出量においてGIに似た結晶形態を呈している。



\*リン酸亜鉛結晶析出量

図4 各供試材の表面に析出したリン酸亜鉛結晶の外観

Fig. 4 Surface morphologies of phosphate film formed on each specimen.



## (2) 塗装外観

表7にZAMとCRをベースとした時の電着塗装材の表面粗度測定結果を比較して示す。ZAMはCRと比べてほぼ同等の表面粗度を示し、良好な塗装外観性能を有している。

## (3) 耐水二次密着性

ZAMをベースとした塗装材の耐水二次密着性評価後の外観を図5に示す。塗膜剥離は認められず、ZAMをベ

表7 電着塗装面の表面粗度測定結果

Table 7 Surface roughness (Ra) after electro-coating

供試材	測定方向	Ra ( $\mu\text{m}$ )			
		n = 1	n = 2	n = 3	平均
ZAM30	L方向	0.13	0.11	0.12	0.12
	C方向	0.13	0.13	0.13	0.13
CR	L方向	0.13	0.13	0.13	0.13
	C方向	0.13	0.13	0.13	0.13

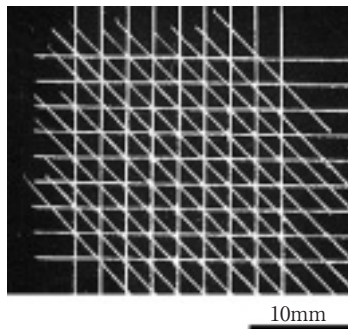


図5 耐水二次密着性評価後の外観 (ZAM30)

Fig. 5 Result of paint adhesion test after exposure to wet environment (ZAM30).

ースとした塗装材は十分な耐水二次密着性を有している。

## (4) 塗装後耐食性

図6にFord APGEサイクル腐食試験30サイクル後の各塗装材のクロスカットからの最大塗膜膨れ幅を示す。ZAM30の最大塗膜膨れ幅はGI70より小さく、GA45と同等である。その時のクロスカット部の外観を図7に示すが、GA45のクロスカット部には赤錆の発生がみられる。これらの中でZAMはめっき付着量が最も少ないが塗膜膨れ幅はGA45並に小さく、かつ赤錆の発生も抑制されている。このことから、ZAM30の塗装後耐食性は現行ボディ材に使用されているGI70やGA45よりも優れる。

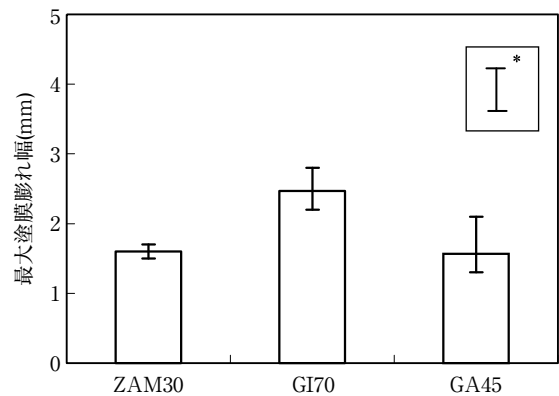


図6 Ford APGEサイクル腐食試験30サイクル後のクロスカットからの最大塗膜膨れ幅 (\*n=3評価での最大塗膜膨れ幅のバラツキ範囲)

Fig. 6 Maximum width of blister from cross scribed line of fully painted specimens subjected to 30 cycles of the Ford APGE corrosion test (\*the range of maximum width of blister among 3 specimens).

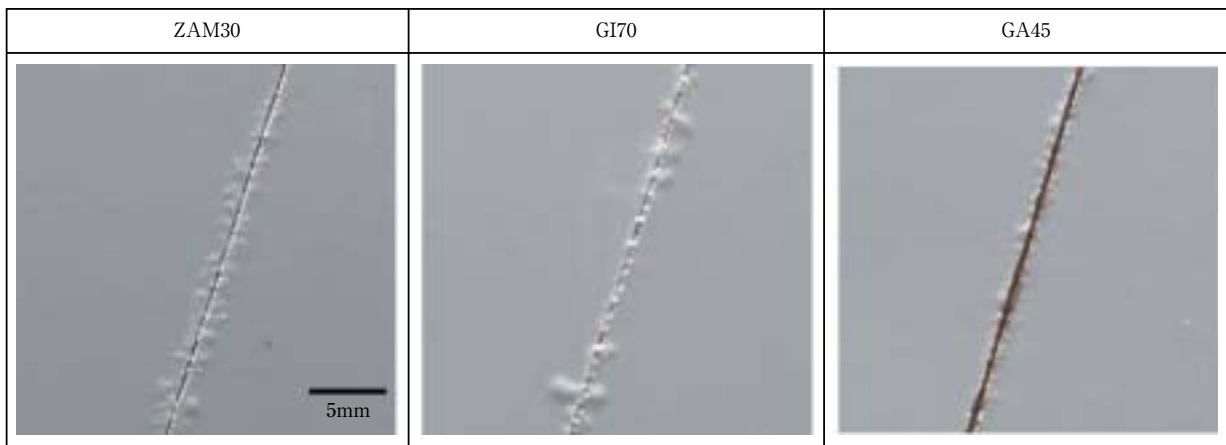


図7 Ford APGEサイクル腐食試験30サイクル後のクロスカット部の外観

Fig. 7 Appearance of cross scribed portion of fully painted specimens subjected to 30 cycles of the Ford APGE corrosion test.

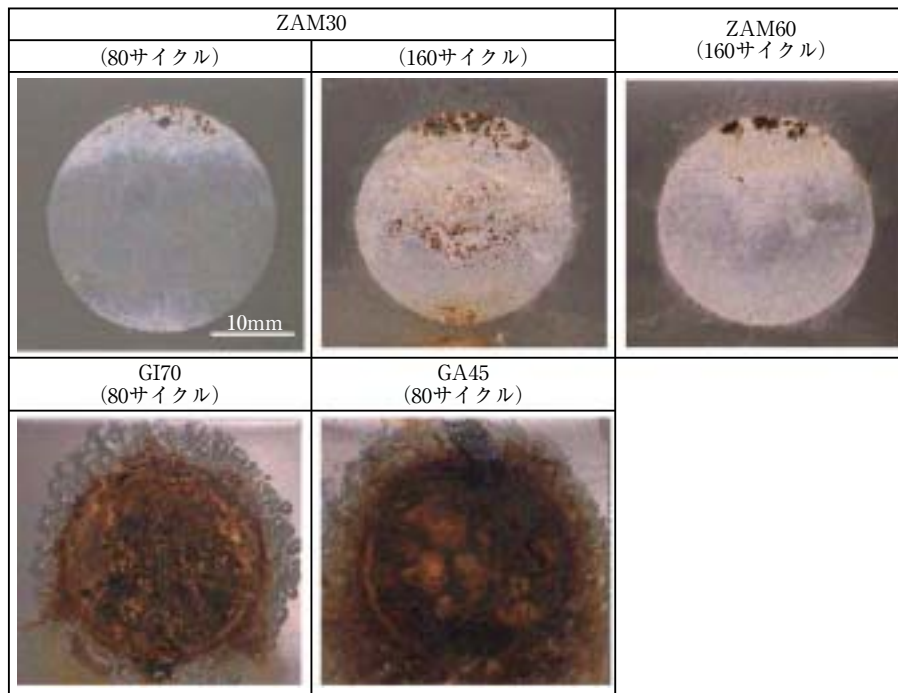


図8 耐穴あき腐食試験 (SAE J2334) 後の評価面の外観  
 Fig. 8 Appearance of evaluation area of each coupon subjected to perforation corrosion test (SAE J2334).

### 3.2 耐穴あき腐食性

図8に耐穴あき腐食試験後の評価面(φ25)の外観を示す。GI70とGA45は80サイクルですでに評価面全体が赤錆に覆われている。一方、ZAM30は同じ80サイクルで一部に点状の赤錆が見える程度である。160サイクル後もZAM30とZAM60の評価面は依然として白錆が大半を占めており、その中に点状の赤錆が混在し始めた程度である。赤錆発生量はめっき付着量の多いZAM60の方が少ない。

図9は耐穴あき腐食試験80, 120および160サイクル実施後の平均侵食深さを示した結果である。GI70とGA45においては80と120サイクルの間で貫通穴腐食に至っている。それに対し、ZAM30とZAM60の侵食深さは160サイクル後も0.05mm未満であり、ZAMの耐穴あき腐食性はGIやGAに比べて著しく優れている。

### 3.3 溶接・加工性

#### (1) スポット溶接性

図10に各供試材の適正溶接電流範囲を示す。ZAM30, ZAM60のいずれも適正溶接電流範囲はGA45より高電流側にあり、GI70とはほぼ同程度に位置する。

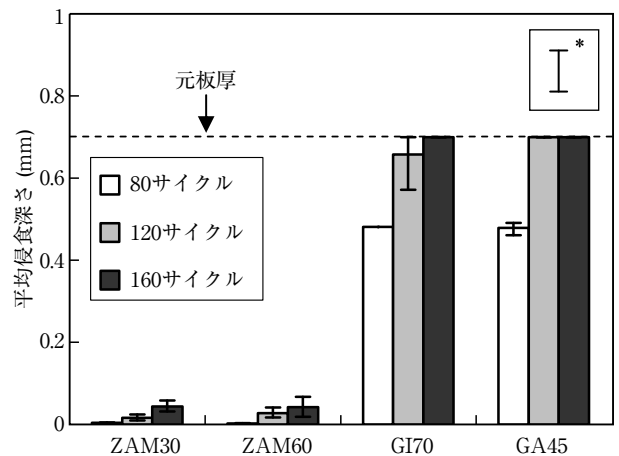


図9 耐穴あき腐食試験 (SAE J2334) 後の評価面の平均侵食深さ (\*n=3評価での平均侵食深さのパラッキ範囲)  
 Fig. 9 Average corrosion depth in evaluation area of each coupon subjected to perforation corrosion test (SAE J2334), (\*the range of average corrosion depth among 3 coupons).

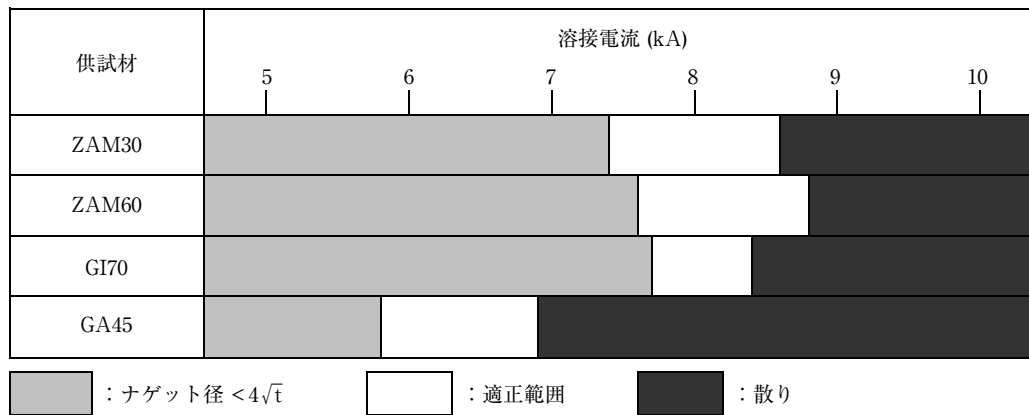


図10 適正溶接電流範囲  
Fig.10 Spot welding current range.

図11は各供試材の電極寿命を調査した結果である。このなかではGA45が優れた電極寿命を示す。ZAMとGIを比較した場合、ZAM30はめっき付着量が少ない分、GI70より電極寿命が長いと考えられる。めっき付着量が近いZAM60とGI70の比較によりZAMの電極寿命はGIより多少短いことがわかる。

(2) レーザー溶接性

図12にレーザー溶接後の外観を、図13に溶接欠陥の発生数をそれぞれ示す。溶接外観、溶接欠陥数ともめっき付着量の影響が強く現れており、めっき付着量が最も少ないZAM30は良好な溶接外観を示すとともに溶接欠陥もほとんどみられない。

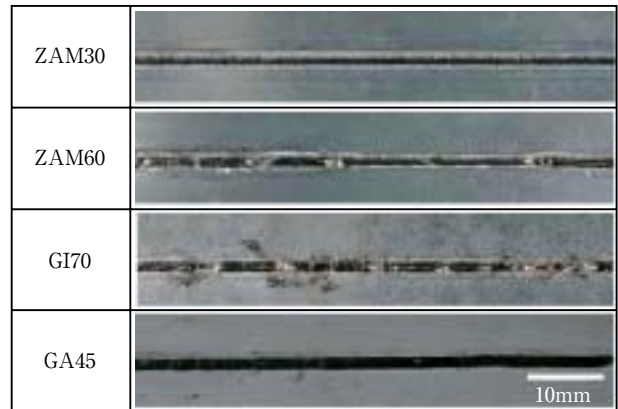


図12 重ね合わせレーザー溶接部の外観(板間隙間:0mm)  
Fig.12 Appearance of laser welding portion with lap joint (joint gap:0mm).

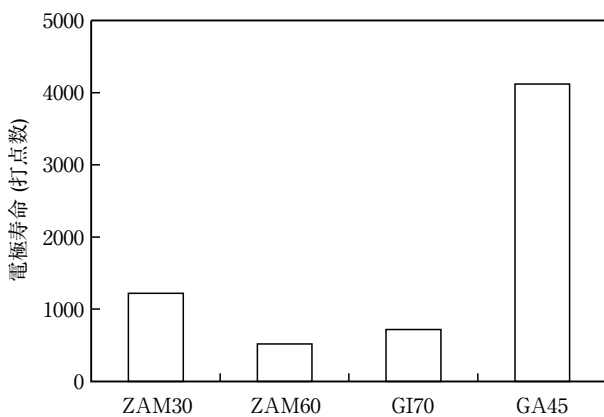


図11 連続打点時の電極寿命  
Fig.11 Electrode life in continuous spot welding test.

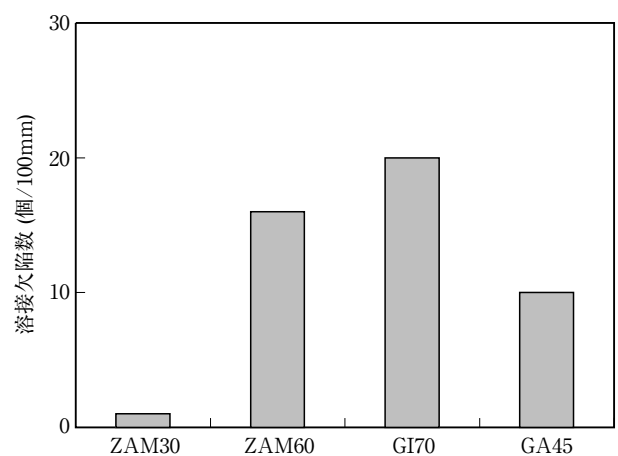


図13 重ね合わせレーザー溶接部の溶接欠陥 (ピット、ブローホール) 数  
Fig.13 Number of weld defects (pit and blow-hole) in laser welding portion with lap joint.

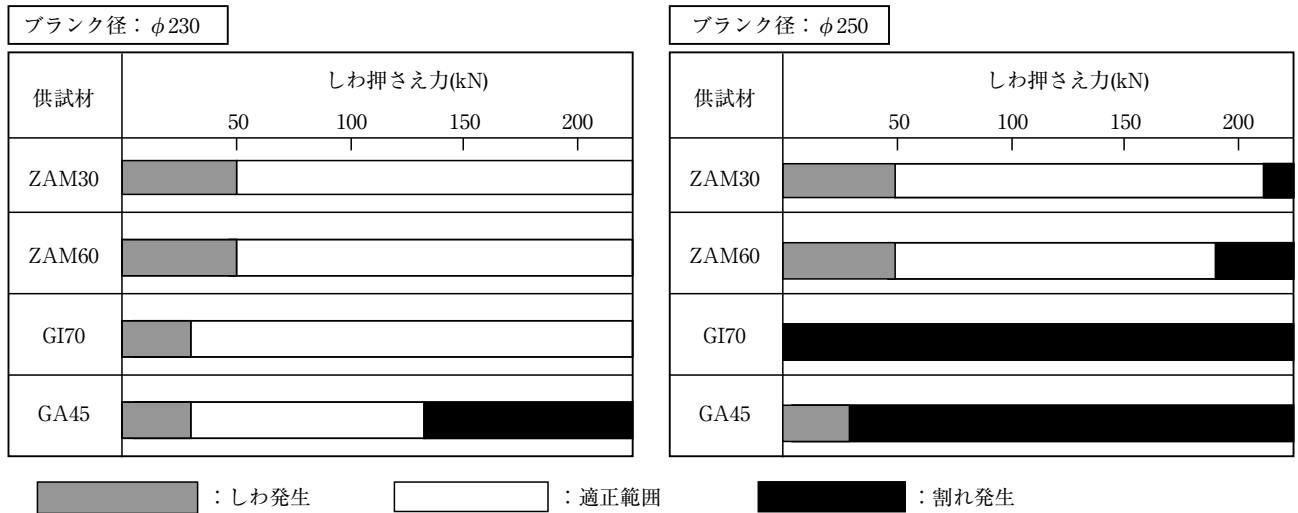


図14 円筒絞り加工における成形可能範囲  
 Fig.14 Drawable condition range in cylindrical drawing test.

(3) プレス加工性

図14に各供試材の成形可能範囲を示す。blank径がφ230の時のZAM30とZAM60の成形可能範囲はGI70と同等であり、GA45より広い範囲を示す。blank径をφ250と大きくした場合、GI70とGA45では成形可能範囲が存在しないのに対し、ZAM30、ZAM60はともに広い成形可能範囲を示す。表8にZAMとGIのめっき層のビッカース硬度を示すが、GIに比べてZAMのめっき層は硬く、フランジ流入の際の摩擦抵抗が低く抑えられるためGIより広い成形可能範囲が得られるものと推察される。

図15はZAM60を円筒絞り加工した時の立て壁部の断面組織である。めっき層には多数のクラックが発生しているが、鋼素地にしっかりと密着しており、パウダリングの発生はみられない。

以上のことから、ZAMは実プレス加工での成形安定性に優れるめっき鋼板と考える。



図15 円筒絞り加工側壁部の断面組織 (ZAM60)  
 Fig.15 Cross-sectional structure at the wall of drawn cup (ZAM60).

果を表9に示す。塗装後耐食と穴あき腐食の両特性においてZAMは現行の自動車ボディ材に使用されている

表8 めっき層ビッカース硬さ  
 Table 8 Vickers hardness of coating layer (Hv 10gf)

ZAM	GI
140~160	55~65

表9 自動車ボディ材料としてのZAMの品質特性  
 Table 9 The quality characteristics of ZAM for automotive body panels

	GI70	GA45	ZAM30	ZAM60
塗装性				
1) リン酸塩処理性	○	○	○	—
2) 耐水密着性	○	○	○	—
3) 塗装後耐食性				
・最大塗膜膨れ幅	○	◎	◎	—
・腐食後外観	○	△	○	—
耐穴あき腐食性	○	○	☆	☆
溶接性				
1) スポット溶接性	○	☆	◎	△
2) レーザー溶接性	○	◎	☆	○
加工性	○	△	◎	◎

☆: GI70に対し非常に優れる, ◎: GI70に対し優れる,  
 ○: GI70と同等, △: GI70に対し劣る

4. 結 言

ZAMの自動車ボディ用途への展開を目的に、自動車ボディの内外板に求められる一般的な特性を調査した。ZAMの品質特性をGI70との相対比較としてまとめた結



GI70やGA45に比べ、少ないめっき付着量でも優れた耐食性を有する。また、スポット溶接性やプレス加工性においてGI70と同等かそれ以上の特性を示すことが確認された。さらに、耐食性の面でめっき付着量を低減できる分、GIに比べてレーザー溶接性は有利となる。

以上のように、ZAMは将来の自動車ボディ材に求められる省亜鉛化と優れた加工性の確保、レーザー溶接性の向上を実現できる材料として期待される。

#### 参考文献

- 1) M.R.Ostermiller, L.Singer, L.L.Piepho and L.Raymond : Proc. of 4th Int. Conf. on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (GALVATECH '98), ed. by N.Masuko, The Iron and Steel Institute of Japan, Chiba, (1998), 678.
- 2) 日本鉄鋼協会 : 亜鉛系表面処理鋼板の防錆機構フォーラム活動記録, (2001), 49.
- 3) D.Petring : 溶接学会誌, 73 (2004), 539.
- 4) B.Scheffel, O.Zywitzki and C.Metzner : Proc. of 7th Int. Conf. on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (GALVATECH '07), ed. by T.Tsuru, The Iron and Steel Institute of Japan, Osaka, (2007), 556.
- 5) M.Vlot, M.Zuijderwijk, M.Toose, L.Elliott, R.Bleeker and T.Maalman : Proc. of 7th Int. Conf. on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (GALVATECH '07), ed. by T.Tsuru, The Iron and Steel Institute of Japan, Osaka, (2007), 574.
- 6) T.Koll, K.Ullrich, J.Faderl, J.Hagler and A.Spalek : Proc. of 6th Int. Conf. on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (GALVATECH '04), ed. by M.A.Baker, Association for Iron & Steel Technology, Chicago, (2004), 803.
- 7) C.Schwerdt, M.Riemer, S.Köhler, B.Schuhmacher and M.Steinhorst : Proc. of 6th Int. Conf. on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (GALVATECH '04), ed. by M.A.Baker, Association for Iron & Steel Technology, Chicago, (2004), 783.
- 8) R.Bleeker, F.Hannour, C.Goos, T.F.J.Maalman, S.M.Smith, M.J.Vlot and W.Vrenken : Proc. of 7th Int. Conf. on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (GALVATECH '07), ed. by T.Tsuru, The Iron and Steel Institute of Japan, Osaka, (2007), 510.
- 9) 独立行政法人 物質・材料研究機構 webサイト
- 10) J.Faderl : Proc. of 7th Int. Conf. on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (GALVATECH '07), ed. by T.Tsuru, The Iron and Steel Institute of Japan, Osaka, (2007), 14.
- 11) B.Schuhmacher, T.Heller, M.Steinhorst and W.Warnecke : Proc. of 7th Int. Conf. on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (GALVATECH '07), ed. by T.Tsuru, The Iron and Steel Institute of Japan, Osaka, (2007), 397.
- 12) T.Shimizu, A.Andoh, H.Asada and S.Morikawa : Society of Automotive Engineers World Congress, Detroit, (2005), SAE Technical Paper No.2005-01-1330.
- 13) D.Quantin, M.Babbit, B.Chardon and M.Chérault : Proc. of 4th Int. Conf. on Zinc and Zinc Alloy coated Steel Sheet (GALVATECH '98), ed. by N.Masuko, The Iron and Steel Institute of Japan, Chiba, (1998), 583.
- 14) American Iron and Steel Institute-Auto/Steel Partnership : Automotive Steel Design Manual Rev.6.1, (2002).
- 15) D.Davidson, L.Thompson, F.Lutze, B.Tiburcio, K.Smith, C.Meade, T.Mackie, D.McCune, H.Townsend and R.Tuszynski : Society of Automotive Engineers World Congress, Detroit, (2003), SAE Technical Paper No.2003-01-1238.
- 16) T.E.Dorsett and D.D.Davidson : Proc. of 6th Automotive and Corrosion Prevention Conf., P-268, Society of Automotive Engineers, Warrendale, (1993), 403.
- 17) 中村尚文, 桜田康弘, 森川茂, 朝田博 : 日新技報, No.88 (2007), 36.