

2. プレス成形性

2.1 実験方法

2.1.1 供試材

表1および表2に供試材の化学成分ならびに機械的性質を示す。

表1 供試材の化学成分

Table 1 Chemical compositions of base metals and coated layer (mass%)

供試材	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	めっき層
ZAM	0.007	0.008	0.15	0.012	0.004	0.037	0.081	Zn-6%Al-3%Mg
SPCE	0.003	0.006	0.15	0.013	0.007	0.032	0.076	—
GA	0.003	0.005	0.15	0.014	0.006	0.032	0.074	Zn-10%Fe

表2 供試材の機械的性質

Table 2 Mechanical properties of specimens

供試材	板厚 (mm)	片面めっき 付着量(g/m ²)	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	n値	r値
ZAM	0.8	70	163	318	46	0.236	1.67
SPCE	0.8	—	185	321	46	0.225	2.02
GA	0.8	45	177	318	45	0.223	1.58

注) 試験片はJIS5号を使用, L方向

質を示す。ZAM鋼板は片面あたりのめっき付着量が70 g/m²で後処理として無機系クロムフリー処理を施したものを使用した。比較材には自動車分野向けを対象としてSPCEとGA鋼板を用いた。高加工用途を想定してめっき原板はSPCEを用い、板厚は0.8mmとした。表3に供

表3 供試プレス油の特徴

Table 3 Characteristics of lubricating oil

記号	製品名	メーカー名	粘度 (mm ² /S)	備考
3060	NOX-RUST 3060	パーカー興産	10	亜鉛めっき用防錆油
Z5	ダフニーオイルコート Z-5	出光興産	16	冷延・アルミめっき用防錆油 (S,N分の含有がほとんどない)

試プレス油の明細を示す。亜鉛めっき用防錆油として用いられるNOX-RUST3060 (パーカー興産株) と冷延・アルミめっき用防錆油として用いられるダフニーオイルコートZ-5 (出光興産株) を用いた。

2.1.2 プレス加工性の実験室的評価方法

(1) 絞り加工

絞り加工とは、平面ブランクをパンチとダイを用いて板の外周部（以下、フランジ部と記す）を縮みフランジ変形させてダイ内部へ絞り込み、継ぎ目のない中空の容器に加工する塑性加工である⁴⁾。成形過程においてパンチ肩部の材料には、フランジ部の材料をダイ内へ引き込むために必要な力（成形力）が作用しており、絞り加工性の優劣に対してはパンチ肩部の材料の破断強度とフランジ部材料の流入抵抗の影響が大きくなる。すなわち、フランジ部の流入抵抗がパンチ肩部の破断強度を上回ると割れが生じやすくなり、逆にパンチ肩部の破断強度がフランジの流入抵抗を上回ると割れが回避され、絞り加工が可能となる。したがって、絞り加工性を向上させるにはパンチ肩部における材料の破断強度を高いレベルに維持したままフランジの流入抵抗を小さくすることが有効である。

絞り加工性は、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加工により評価した。その時の優劣は、破断することなく絞り抜ける最大ブランク径Dとパンチ径Dp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4に絞り加工条件を、図1に絞

表4 絞り加工条件

Table 4 Conditions for deep drawing test

	条 件
パンチ径(Dp)	40.0mm
ダイ径(Dd)	42.0mm
パンチ肩半径(Rp)	5.0mm
ダイ肩半径(Rd)	5.0mm
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
プレス油	Z5

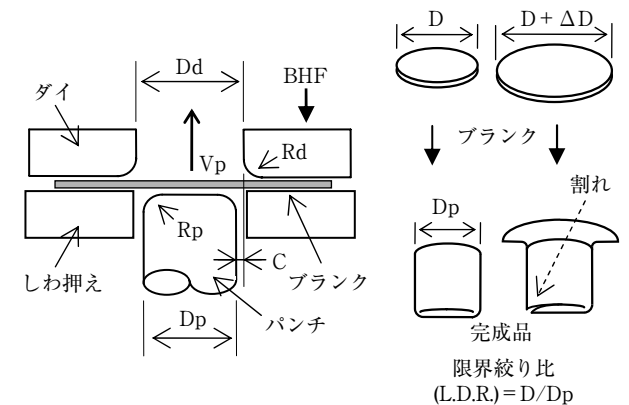


図1 絞り加工方法

Fig. 1 Schematic representation of deep drawing test.

側に統一して試験を実施した。なお、穴広げ加工性は穴広げ率が大きいほど優れることを意味している。

2.1.3 成形可能範囲検討のための試験条件

表7に成形可能範囲を検討した際の試験条件を示す。

表7 成形可能範囲試験条件

Table 7 Conditions for drawability test

	条 件
パンチ径(Dp)	103.0mm
ダイ径(Dd)	105.0mm
パンチ肩半径(Rp)	10.0mm
ダイ肩半径(Rd)	10.0mm
しわ押え力(BHF)	20~260kN
試験速度(Vp)	333mm/sec
ブランク径(D)	250mm
成形高さ(H)	55mm
プレス油	Z5

ブランク寸法を250mm（絞り比：2.43）と大きくして、張出し要素の強い絞り加工を行い、しわが発生しない下限のしわ押さえ力と破断が発生しない上限のしわ押さえ力の範囲、いわゆる成形可能範囲を求めた。なお、成形可能範囲は広いほど金型、材料、プレス機などに起因する変動要因による不具合の発生が少なくなるため、実プレスでの成形の安定性に優れていることを意味している。図4に成形可能範囲の検討におけるしわ、OK（しわ、割れない状態）、割れ加工品の外観の一例を示す。



図4 円筒絞り加工品形状およびフランジしわと割れ発生状態

Fig. 4 Formed part of cylindrical drawing and conditions for flange wrinkles and crack.

試験には1960kNのメカプレスを使用し、成形高さが55mmの成形を行い、成形可能範囲におよぼす供試材の影響を評価した。

2.1.4 動摩擦係数測定方法

プレス加工は、金型（工具）を使って被加工材であ

る材料を所望の形状に変形させるものであり、変形の際、金型と材料の金属表面どうしが擦れあって摩擦による摺動抵抗力が生じる。摺動抵抗力の増大は、多くの場合変形を阻害することとなる。この金型と材料間に生じる摺動抵抗力を低減することにより、製品のかじりや金型への焼付きを防止すると同時に、成形力が低減し成形限界が向上することが知られている⁹⁾。このことから潤滑がプレス加工において非常に大きな役割を果たしていることが理解できる。本稿では供試材の潤滑性を評価する指標として、表面の動摩擦係数を測定した。表8に動摩擦係数の測定方法を、図5に動摩擦係数の試

表8 平板摺動試験条件

Table 8 Flat die sliding test conditions for dynamic friction coefficient

	条 件
供試材寸法	0.8t × W30mm × L300mm
潤滑油	Z5
押し付け圧力	0.72, 1.45, 2.90N/mm ²
押し付け力	1.0, 2.0, 4.0kN
押し付け面積	46 × 30mm ²
引き抜き速度	1000mm/min
金型表面粗さ	# 1000毎回研磨
金型材質	SKD11

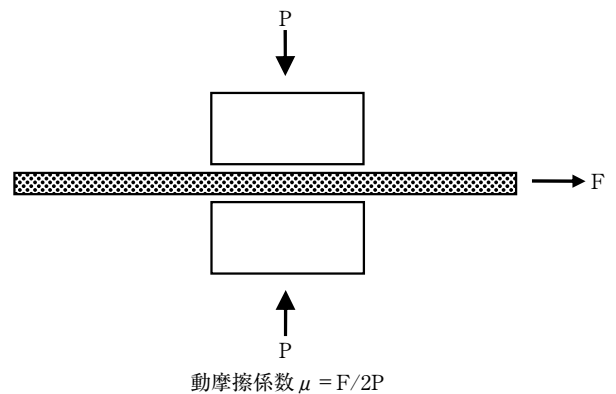


図5 平板摺動試験による動摩擦係数の測定方法

Fig. 5 Measurement method of dynamic friction coefficient in flat die sliding test.

験方法を示す。動摩擦係数 μ は平板摺動試験によって測定した引き抜き力Fと押し付け力Pから（1）式により算出した。

$$\mu = F/2P \dots\dots\dots (1)$$

押し付け圧力は、0.72N/mm²~2.90N/mm²の範囲内で

試験を行い、これらの平均値を動摩擦係数とした。

2.2 実験結果および考察

2.2.1 プレス加工性の実験室的評価

(1) 絞り加工

図6に各供試材のL.D.R.を示す。ZAM鋼板はGA鋼板に比べて高いL.D.R.を示し、SPCEと同等レベルの絞り加工性を有する。図7に平板摺動試験時の各供試材の押し

し付け圧力と引き抜き力(F)との関係を示す。ZAM鋼板の絞り加工性が優れるのは、ZAM鋼板がGA鋼板やSPCEに比べて動摩擦係数が低く、プランクが工具面を移動するときの摩擦抵抗力が小さくなってフランジの流入抵抗が軽減されたためと推測する。

図8に各供試材の表面プロフィールを示す。GA鋼板

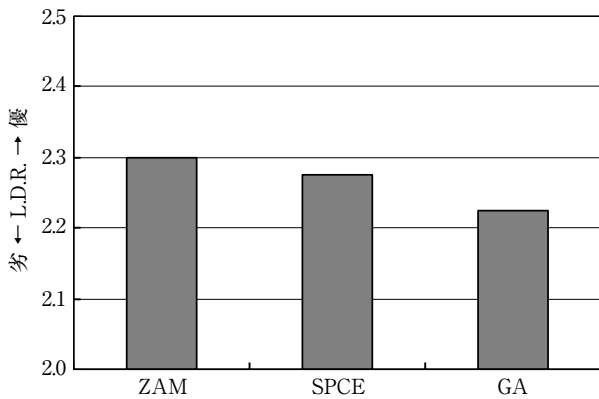


図6 各供試材の絞り加工における限界絞り比
Fig. 6 Limiting drawing ratio of specimens in deep drawing test.

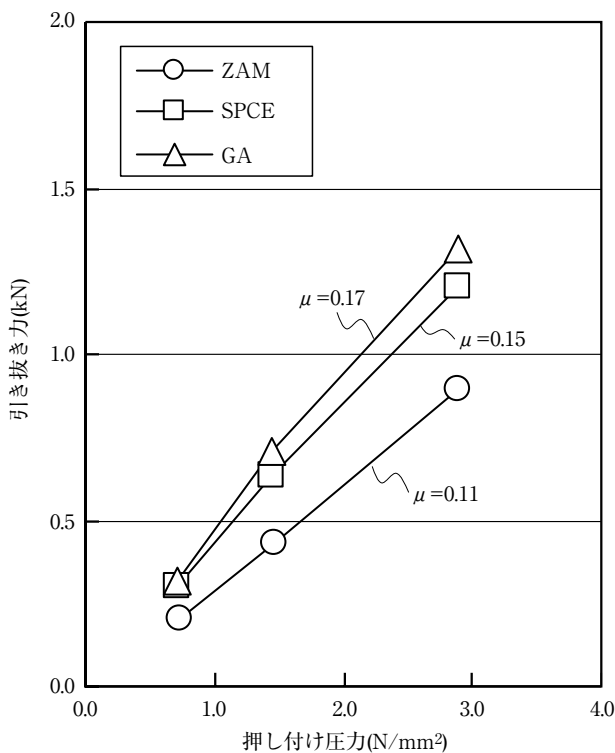


図7 各供試材の押し付け圧力と引き抜き力の関係
Fig. 7 Relation between sheet holding force and drawing force of specimens.

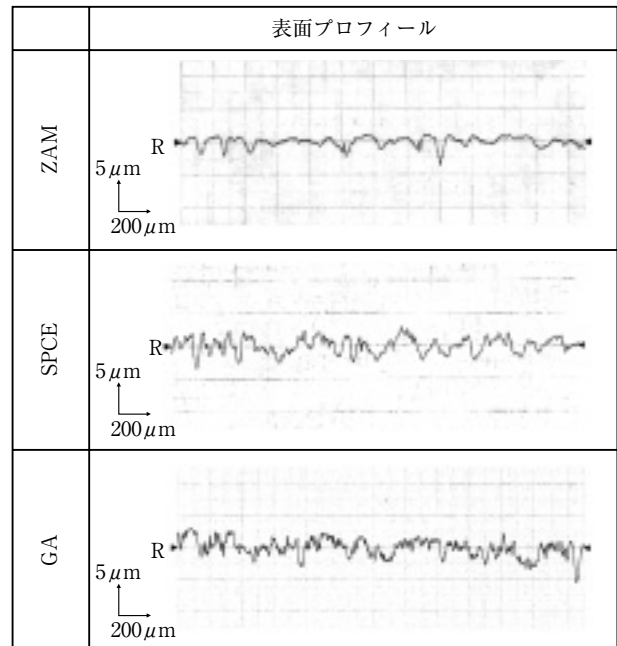


図8 各供試材の表面プロフィール
Fig. 8 Surface profile of specimens.

やSPCEは平均的に凹凸であるのに対して、ZAM鋼板は凸部の存在が少なく、比較的滑らかな表面を呈していることを特徴としている。2つの材料の表面が摺動する際に、接触面を覆う酸化皮膜が破壊されて直接新生面が接触するような凝着磨耗を考えた場合、表面に凸部が多いと摺動時に面圧が高くなり磨耗量が増える原因となる¹⁰⁾。ZAM鋼板のようにめっき表面が滑らかな場合、2つの材料が広範囲で接触するため、磨耗による抵抗が減り摺動性の向上に寄与するものと推測する。さらに、ZAM鋼板のめっき表面はビッカース硬さがおよそ140~160Hv¹¹⁾と約80Hv前後のSPCEに比べて硬い表面が特徴である。凝着磨耗のモデルでは、表面が硬いほど変形による酸化膜の破壊が少なくなって磨耗が減ると考えられており、工具に焼きを入れたり表面処理をしたりして表面を硬くするのは磨耗を減らすためである¹⁰⁾。平板摺動試験においてZAM鋼板の動摩擦係数が小さい理由として、ZAMめっき層が比較的硬い皮膜であり、かつ表面が比較的滑らかなため磨耗による抵抗が少ないことな

どが影響しているものとする。

(2) 張出し加工

図9に各供試材における張出し高さを示す。ZAM鋼板はSPCE、GA鋼板に比べて張出し加工性が優れている。

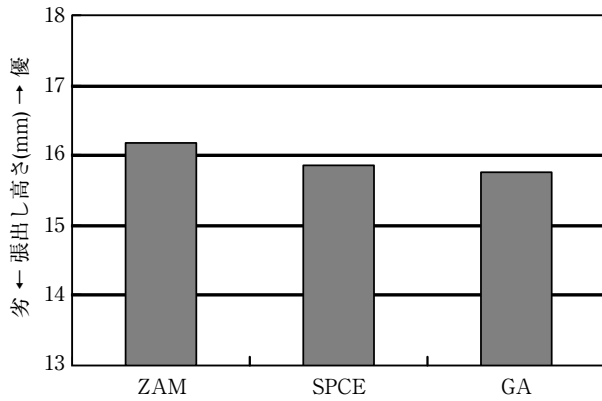


図9 各供試材の張出し加工における張出し高さ
Fig.9 Forming height limit of specimens in stretch forming test.

る。パンチ径40mmの実験室評価では、わずか0.5mm(3%)程度の差であるが、量産プレスでの張出し加工部での割れは、加工高さを数%程度低減することによりほとんどが解消できる効果がある。ZAM鋼板の張出し成形性が優れるのは、SPCEやGA鋼板に比べて摩擦係数が低く、ひずみを広範囲に分散させることができるためと考える。

(3) 穴広げ加工

図10に各供試材の穴広げ率を示す。穴広げ加工性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

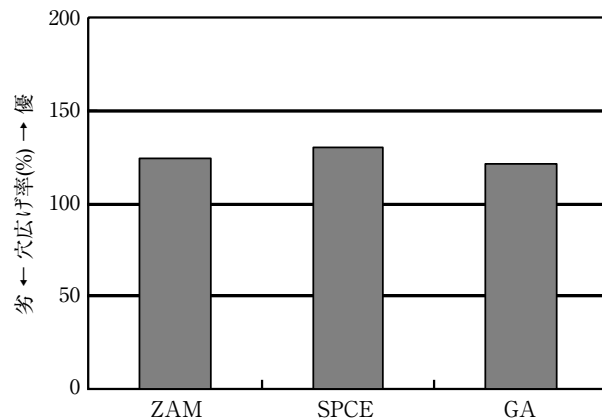


図10 各供試材の穴広げ加工における穴広げ率
Fig.10 Bore-expand ratio of specimens.

定される。今回の場合、供試材の機械的性質の差が小さいことからほぼ同等の穴広げ加工性となったものと推測する。

2.2.2 成形可能範囲

図11に円筒絞り加工における成形可能範囲におよぼす供試材の影響を示す。ZAM鋼板はGA鋼板に比べて成形

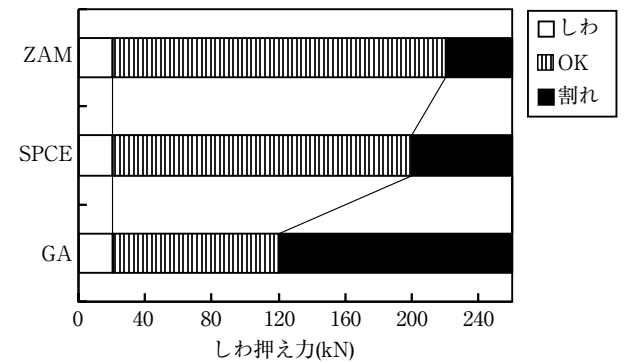


図11 各供試材の円筒絞り加工における成形可能範囲
Fig.11 Drawable condition range of specimens in cylindrical drawing test.

可能範囲が広く、SPCEと同等レベルの成形可能範囲を示すことから、実プレスでの成形の安定性に優れるめっき種であると考えられる。自動車用部品の実プレス加工においても、ラボ試験にて求めた動摩擦係数の低いものほど実プレスでの成形可能範囲が広くなるとの報告がある¹²⁾。したがって、ZAM鋼板の成形可能範囲が広い理由も、ZAM鋼板の動摩擦係数が低いことによりフランジ流入の際の摩擦抵抗が小さく抑えられる効果によるものと考えられる。

3. スポット溶接性

3.1 実験方法

3.1.1 供試材

実験で使用した供試材の明細を表9に示す。板厚は

表9 供試材の明細
Table 9 Coated steel sheets used

供試材	略号	板厚 (mm)	片面めっき付着量(g/m ²)	めっき層
ZAM	ZAM30	0.7	30	Zn-6%Al-3%Mg
	ZAM60	0.7	60	
GA	GA60	0.7	60	Zn-10%Fe

0.7mmで片面のめっき付着量が 30g/m^2 と 60g/m^2 のものを用いてめっき付着量の影響を調査した。また、現在、自動車分野で多く用いられているGA鋼板を比較材として用いた。

3.1.2 溶接条件

スポット溶接は単相交流型で定置式の溶接機を用いて実施した。表10および図12に実験に用いた電極の形状と材質を示す。電極は自動車分野で一般的に広く使用されている先端径6mmのDR型で材質は1%クロム銅合金である。

適正溶接電流範囲と電極寿命の調査は表11に示す溶接条件で実施した。適正溶接電流範囲は自動車メーカ

表10 スポット溶接用電極

Table10 Electrode tip for spot welding

形状	Φ6DR (先端径:Φ6mm, 先端R:40mm, 肩部R:8mm)
材質	1%Cr-Cu合金

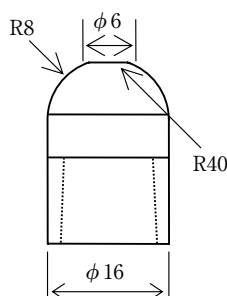


図12 電極形状

Fig.12 Shape of electrode tip.

表11 溶接条件

Table11 Welding parameters

溶接機	単相交流型定置式
初期加圧時間(サイクル)	35
通電時間(サイクル)	12
保持時間(サイクル)	1
加圧力(kN)	1.5
連続打点設定電流値(kA)	$I_a = I_n \times 1.4$ I_n : ナゲット径 $4\sqrt{t}$ が得られる電流 t : 板厚
サンプリング	100打点間隔
電極寿命	100打点毎に断面観察を行ない、ナゲット径が $4\sqrt{t}$ を維持する最大打点数

一の評価基準の1つである、ナゲット径が $4\sqrt{t}$ (t : 板厚 [mm]) となる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 (I_a) は $4\sqrt{t}$ のナゲット径が得られる電流値 (適正溶接電流範囲の下限值) の1.4倍とした。電極寿命は100打点毎にサンプリングを行ない、断面観察によってナゲット径が $4\sqrt{t}$ を維持する最大の打点数とした。また、サンプリング時には感圧紙により電極当り形状を記録し、電極先端径の推移を調査した。

3.2 実験結果および考察

3.2.1 適正溶接電流範囲

図13にはZAM鋼板の適正溶接電流範囲をGA鋼板と比較して示す。ZAM鋼板の適正溶接電流範囲はめっき付着量が少ない場合でもGA鋼板よりも高電流側に位置

めっき鋼板	溶接電流(kA)					
	4	5	6	7	8	9
ZAM30	ナゲット径 $4\sqrt{t}$ 未満		適正	散り		
ZAM60	ナゲット径 $4\sqrt{t}$ 未満		適正	散り		
GA60	ナゲット径 $4\sqrt{t}$ 未満		適正	散り		

図13 各種めっき鋼板の適正溶接電流範囲

Fig.13 Optimum welding current range for GA and ZAM steel sheets.

していることを確認した。これはGA鋼板のめっき層の融点が約 880°C であるのに対して、ZAM鋼板のめっき層の融点が約 330°C と低い。そのため、ZAM鋼板の方が通電の初期段階において溶融するめっき金属量が多く、板間での通電面積が拡大する。これにより、電流密度が低下し、ナゲットを形成するにはより多くの電流が必要になると考えられる。また、めっき付着量の影響についても同様に、めっき付着量が多くなると通電初期段階における溶融量が増大し、通電面積が拡大するために、めっき付着量が多くなるほど高電流側に位置するものと考えられる。

3.2.2 電極寿命

図14には連続打点試験におけるナゲット径の推移を、図15には電極先端径の推移を示す。ZAM鋼板はめっき付着量に関わらず、GA鋼板よりもナゲット径が縮小するのが早くなり、電極寿命が短くなっている。また、電極先端径はGA鋼板よりも急激に拡大している。

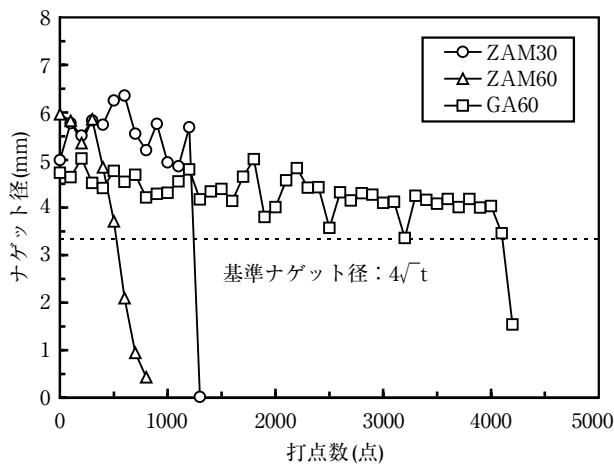


図14 各種めっき鋼板の連続打点試験におけるナゲット径の推移
 Fig.14 Change of nugget diameter with number of welds in electrode life test for GA and ZAM steel sheets.

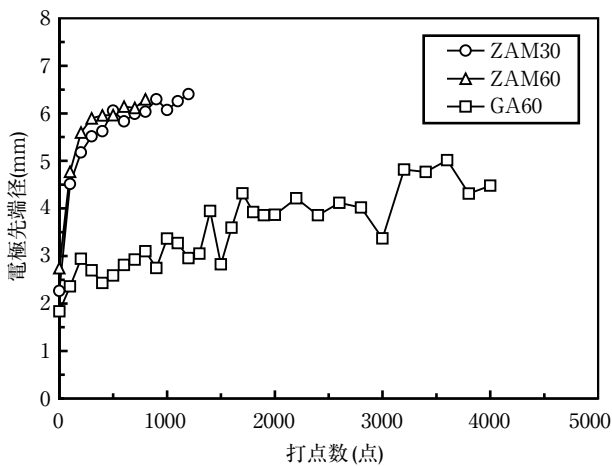


図15 連続打点試験における電極先端径の推移
 Fig.15 Change of electrode tip diameter with number of welds in electrode life test.

めっき鋼板を連続的にスポット溶接すると、電極の主成分である銅とめっき成分が合金化し、電極先端に合金層が形成される。この合金層はめっき層中にAlが含有するほど硬くなり、電極先端径が拡大すること起因している^{3,13)}。ZAM鋼板は6mass%のAlを含有していることから、Alをほとんど含有していないGA鋼板よりも電極先端径が拡大しやすくなり、電極寿命が短くなったものとする。

この理由により、ZAM鋼板の電極寿命は短く、GA鋼板と比較した場合、同一の片面めっき付着量(60g/m²)では約1/8、半分の片面めっき付着量(30g/m²)では約

1/3であった。

電極寿命を延ばす手法としては、電極材質に高温強度の高いものを用いたり、表面に特殊なコーティングをすることで電極寿命が延びることが報告されている^{14,15)}が、これらの方策はコストアップが懸念される。また、溶接条件面からの方策としては、打点数を重ねるにつれて電極先端径が広がることによる電流密度の低下を防止するために、打点数の増加とともに電流を上げていくステップアップ法が多く利用されている¹⁶⁾。その他の手法としては通電時間を増加させることで、適正溶接電流範囲を拡大させて電極寿命を延ばす方策があり¹⁷⁾、本報ではこの通電時間の増加による電極寿命の延長方法について紹介する。

図16には表9に示した供試材のうち片面めっき付着量30g/m²を用いて、表11に示した溶接条件の通電時間を7、12および20サイクルと変化させて求めた適正溶接電流範囲を示す。図17には通電時間を変化させた場

供試材	通電時間	溶接電流(kA)					
		4	5	6	7	8	9
ZAM30	7サイクル	ナゲット径4√t未満				適正	散り
	12サイクル	ナゲット径4√t未満				適正	散り
	20サイクル	ナゲット径4√t未満		適正		散り	

図16 適正溶接電流範囲に対する通電時間の影響
 Fig.16 Effect of welding time on optimum welding current range.

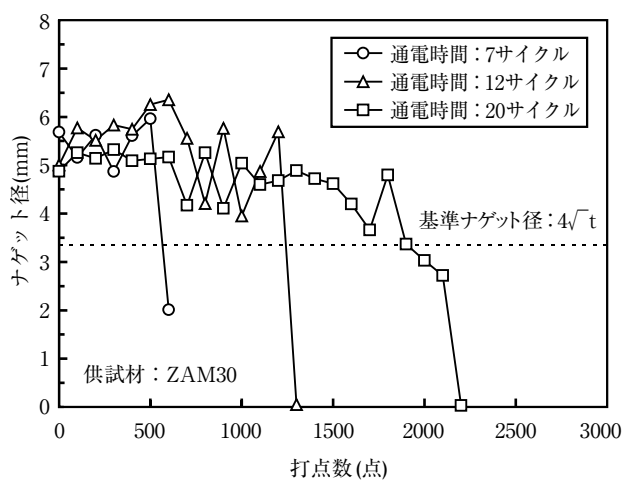


図17 電極寿命に対する通電時間の影響
 Fig.17 Effect of welding time on electrode life.

合の連続打点試験におけるナゲット径の推移を示す。通電時間を増加させた場合、適正溶接電流範囲は低電流側に変化し、かつ範囲は広がり、電極寿命は通電時間を20サイクルにすることで12サイクルに比べて約1.5倍延長する。今回の調査で得られた通電時間の延長とステップアップ法を組合せることで、更なる電極寿命の改善が可能であると予想される。

めっき鋼板のスポット溶接における電極寿命は電極先端がめっき成分と合金化することで電極の先端径が広がり、それによって一定電流で溶接する場合には電流密度が低下し、十分な強度が得られるナゲットが形成されなくなる。この現象は、電極先端径が変化しない状況で電流を徐々に下げながら連続打点溶接を行なっていることと同等と考える。したがって、適正溶接電流範囲が広がるほど電極寿命には有利に働くことが分かる。このことから、通電時間を増加させることで電極寿命を延ばすことが可能である。

現在、自動車業界で多く使用されているGA鋼板からZAM鋼板への切替えを検討する際には、単にスポット溶接性だけで判断するのではなく、ZAM鋼板の特徴である高耐食性を考慮して、めっき付着量の低減や後塗装の省略などについても検討し、コストも含めて総合的に判断する必要があると考える。

4. ZAM鋼板の適用事例

ZAM鋼板の自動車・家電関連部材への適用例として、プレス成形後のモーターケース部材とステアリングシャフト支持部材の外観を図18に示す。モーターケース部



(モーターケース部材)

(ステアリングシャフト支持部材)

図18 自動車および家電関連部材へのZAM鋼板の適用例

Fig.18 Example of application of ZAM to automotive and household electrical appliance parts.

材は、ZAM鋼板の優れた耐食性と加工性をステアリングシャフト支持部材は、ZAM鋼板の優れた摺動性を特

徴として製品化されている。

5. 結 言

優れた耐食性を有するZAM鋼板を供試材としてプレス加工性とスポット溶接性について検討した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) ZAM鋼板の絞り加工性、張出し加工性はGA鋼板に比べて優れており、SPCEと同等レベルにある。
- (2) ZAM鋼板が高い加工性を示す理由はめっき表面の動摩擦係数が低いことに起因するものと考えられる。
- (3) ZAM鋼板の適正溶接電流範囲はGA鋼板よりも高電流側に位置することを確認した。
- (4) ZAM鋼板の電極寿命は、めっき層中のAlの影響により、同一のめっき付着量でGA鋼板に対し、約1/8程度となることがわかった。
- (5) 通電時間を増加させることにより、適正溶接電流範囲は低電流側にシフトし、範囲も広がるため、電極寿命の改善が可能である傾向が見られた。

参考文献

- 1) 小松厚志, 泉谷秀房, 辻村太佳夫, 安藤敦司: 日新技報, No.81 (2001), 10.
- 2) 清水剛, 吉崎布貴男, 三吉泰史, 安藤敦司: 日新技報, No.85 (2004), 11.
- 3) 江里口徹, 曾我聡, 朝田博, 井上正二: 日新技報, No.72 (1995), 35.
- 4) 金属塑性加工用語編集委員会: 図解金属塑性加工用語辞典, 日刊工業新聞社 (1974), 306.
- 5) 金属塑性加工用語編集委員会: 図解金属塑性加工用語辞典, 日刊工業新聞社 (1974), 282.
- 6) 金属塑性加工用語編集委員会: 図解金属塑性加工用語辞典, 日刊工業新聞社 (1974), 10.
- 7) 吉田清太: 薄板のプレス成形の成形域区分と体系化に関する研究 (1959), 133.
- 8) 竹添明信, 川瀬尚男: 日新製鋼技報, 35 (1976), 79.
- 9) 片岡征二: プレス加工のトライボロジー, 日刊工業新聞社 (2002), 33.
- 10) 片岡征二: プレス加工のトライボロジー, 日刊工業新聞社 (2002), 13.
- 11) 日新製鋼株式会社: ZAM商品カタログ, 日新製鋼株式会社 (2007), 22.
- 12) 薄鋼板成形技術研究会: プレス成形難易ハンドブック第2版, 日刊工業新聞社 (1997), 324.
- 13) 松田広志, 松田恭典, 樺沢真事: 溶接学会論文集, 14 (1996)1,47.
- 14) 溶接学会抵抗溶接研究委員会編, 溶接学会技術資料, No.7 (1982), 204.
- 15) 溶接学会抵抗溶接研究委員会編, 溶接学会技術資料, No.8 (1983), 142.
- 16) 溶接学会抵抗溶接研究委員会編, 溶接学会技術資料, No.7 (1982), 207.
- 17) 溶接学会抵抗溶接研究委員会編, 溶接学会技術資料, No.7 (1982), 199.