

|||||
 論 文
 |||||

溶融Zn-6mass%Al-3mass%Mg合金めっき鋼板の スポット溶接電極寿命に及ぼす溶接電流波形の影響

堀川 裕史* 細見 和昭** 仲子 武文***

Influence of Welding Current Waveform on the Spot Welding Electrode Life in Hot-Dip Zn-6mass%Al-3mass%Mg Alloy Coated Steel Sheets

Hiroshi Horikawa, Kazuaki Hosomi, Takefumi Nakako

Synopsis:

Hot-Dip Zn-6mass%Al-3mass%Mg alloy coated steel sheets (ZAM) have superior corrosion resistance. In the assembling process of automotive parts or structural members, spot welding is widely used. Although, short or insufficient electrode life in the spot welding of the hot-dip Zn or Zn alloy coated steel sheet is one of the major issue.

To improve the electrode life in spot welding of ZAM, a direct-current inverter spot welder was examined instead of single-phase alternating current spot welder.

The results are as follows.

- (1) By using a direct-current inverter spot welder for ZAM, the optimum welding range is expanded.
- (2) Since a direct-current inverter spot welder can make the heat generation even with low electric current density due to a continuous electrifying, a nugget with enough size in diameter can be obtained by using the worn electrode. Therefore the spot welding electrode life in ZAM is vastly improved by a direct-current inverter spot welder.

1. 緒 言

溶融Zn-6mass%Al-3mass%Mg合金めっき鋼板（以下、ZAM鋼板と記す）は、優れた耐食性を有しており、自動車、建材分野を中心として、幅広い用途に適用されている¹⁾。

自動車部品や住宅構造部材などの組立てにおいてはスポット溶接が多用されているが、めっき鋼板はめっきを施していない鋼板に比べてスポット溶接時の電極寿命が短いなどの問題があるため、適正な溶接条件を把握する必要がある。ZAM鋼板は、一般的な亜鉛めっき鋼板と比べてめっき層の融点が低く、めっき層中にAlを含有することから、適正なスポット溶接条件を見出すために、これまで種々の報告がなされている²⁻⁴⁾。

スポット溶接機は、装置の構造が簡単で安価な単相交流式スポット溶接機が広く使用されているが、近年では直流インバータ式スポット溶接機の普及が進んでいる⁵⁾。直流インバータ式スポット溶接機は、単相交流式スポット溶接機と比べて溶接トランスを小型・軽量化できるためロボット化に適しており、国内の抵抗溶接機保有台数の約75%と言われる自動車関連会社において組立工程の自動化とともに採用が広まっている⁵⁾。Fig. 1に単相交流式スポット溶接機と直流インバータ式スポット溶接機の電流波形を示す。直流インバータ式スポット溶接機は、単相交流式スポット溶接機と比べて溶接電流値の脈動がなく、温度の振幅の影響が大きい薄鋼板に対して効率的に入熱を与えることができる特徴がある⁵⁾。

溶融亜鉛めっき鋼板のスポット溶接では、直流インバータ式スポット溶接機を用いて正極側電極の表面にFe-Zn-O

*技術研究所 加工技術研究部 加工第一研究チーム

**技術研究所 加工技術研究部 加工第一研究チーム 主任研究員

***技術研究所 加工技術研究部 加工第一研究チーム チームリーダー

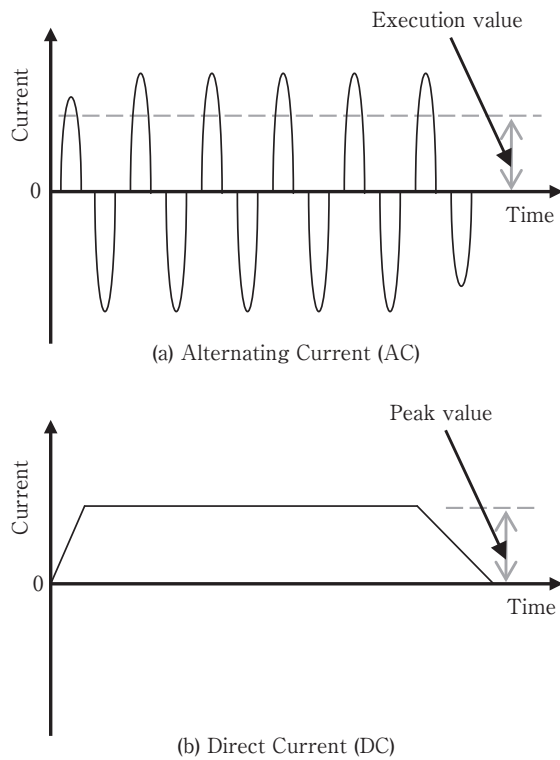


Fig. 1 Current waveform of AC and DC.

相を形成させて電極寿命を改善する方法が報告されている⁶⁾。しかしながら、溶融Zn-Al-Mg系合金めっき鋼板の電極寿命を改善するために直流インバータ式スポット溶接機を適用した時の溶接部の挙動に関する報告は見当たらない。

そこで、本報ではZAM鋼板に直流インバータ式スポット溶接機を用いて適正溶接電流範囲と電極寿命の改善効果を調査し、スポット溶接性に及ぼす溶接電流波形の影響について検討した結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 供試材

Table 1 に供試材の明細を示す。供試材には板厚0.7mm、片面あたりのめっき付着量が50g/m²で、化成処理なしのZAM鋼板を用いた。

2.2 溶接条件

Table 2 に直流インバータ式スポット溶接機と、比

Table 1 Specifications of specimen

Thickness (mm)	Coating weight per side (g/m ²)	YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	El (%)
0.7	50	150	315	46

Table 2 Specifications of the spot welders used

	Single phase alternating current spot welder	Direct current inverter spot welder
Rating capacity (kVA)	35	50
Max. current (A)	16,000	18,000
Max. welding input (kVA)	110	125
Max. welding force (kgf)	600	500

較に用いた単相交流式スポット溶接機の仕様を示す。Table 3 およびFig. 2 には使用した電極の材質と形状を示す。電極形状は自動車分野で一般的に使用されている先端径6mmのDR型とした。なお、電極の曲率半径は先端が40mm、肩部が8mmである。電極材質は建材、家電および自動車分野などで広く用いられている1%Cr-Cu合金とした。Table 4 に溶接条件を示す。溶接電流値に

Table 3 Electrode tip for spot welding

Shape	φ6DR (Dome Radius type)
	Diameter of electrode point : φ6mm
	R of tip point : 40mm R of shoulder : 8mm
Material	1%Cr-Cu Alloy

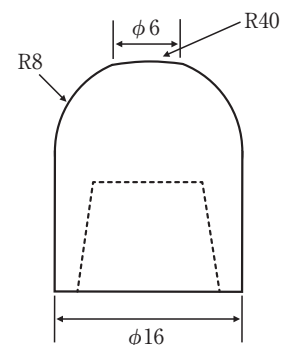


Fig. 2 Shape of electrode tip.

Table 4 Spot welding parameters for examination of proper welding conditions

Spot welder	Single phase alternating current spot welder	Direct current inverter spot welder
Electrode force (kN)	1.5	
Squeeze time	583ms (35cycle : 60Hz)	583ms
Weld time	200ms (12cycle : 60Hz)	200ms
Hold time	16.7ms (1cycle : 60Hz)	16.7ms
Welding current (kA)	4~11	
Cooling water flow (L/min)	3	

については設定値で表す。

2.3 溶接性評価方法

適正溶接電流範囲は自動車メーカーなどの評価指標であるナゲット径 $4\sqrt{t}$ (t : 板厚[mm]) が得られる電流値からチリが発生する電流値までとした。なお、ナゲット径はスポット溶接部の断面を光学顕微鏡観察して測定した。

連続打点試験による電極寿命の評価方法を以下に示す。溶接電流は直流インバータ式スポット溶接機と単相交流式スポット溶接機とも、それぞれのチリ発生電流値より0.2kA低い値とした。サンプリングは50打点ごとに行い、溶接部の断面観察によって、ナゲット径が $4\sqrt{t}$ を下回らない最大の打点数を電極寿命とした。また、Fig. 3に示すようにサンプリング時には感圧紙により電極先端部の形状を記録した。

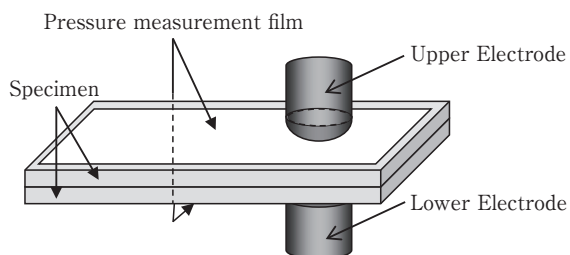


Fig. 3 The measuring method of contact area.

電極寿命に及ぼす溶接電流波形と電極先端形状の影響を検討するために、損耗電極を用いてナゲットの成長挙動を調査した。損耗電極とは単相交流スポット溶接機にて溶接電流8.6kA、通電時間200msで500打点スポット溶接を行った後の電極である。この損耗電極を用いて直流インバータ式スポット溶接機と単相交流スポット溶接機で通電時間を変えてスポット溶接し、ナゲットの成長挙動を観察した。

2.4 解析方法および検証方法

ナゲットの成長挙動に及ぼす溶接電流波形の影響を調査するため、熱解析ソフトQuick Spotを用いて溶接部中心の温度を計算した。解析は熱弾塑性有限要素法を用い、解析モデルは軸対称モデルとした。メッシュは温度変化が激しい電極先端部分を細分化して配置した。境界条件は上側電極に下方向の荷重を加え、下側電極は固定とし、電流を印加した場合の抵抗発熱による溶接部中心の温度を計算した。

Fig. 4には解析過程の一例を示す。Fig. 4 (a)は初期状態、Fig. 4 (b)は加圧開始時、Fig. 4 (c)はナゲット成長時を示している。

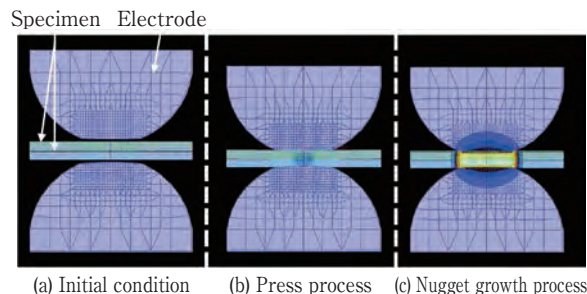


Fig. 4 Procedure of calculation.

解析の妥当性を検証するために、スポット溶接部近傍の材料温度を測定した。スポット溶接中における溶接部近傍の材料温度の測定方法をFig. 5に示す。直流インバータ式スポット溶接機と単相交流式スポット溶接機を用いてスポット溶接を行い、電極の直下に供試材端部を配置して溶接部近傍の材料温度を高速カメラを用いて断面方向から測定し、解析結果と比較した。

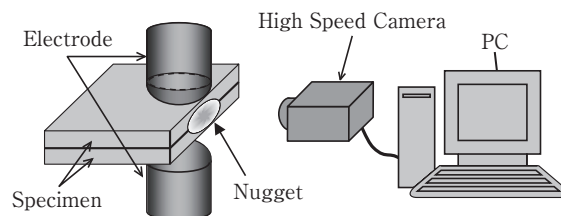


Fig. 5 The measuring method of temperature of heating zone.

2.5 電流密度の測定方法

適正溶接電流範囲と電極寿命の関係について、電流密度 δ (= 溶接電流/通電面積)を用いた考察を行うため、Fig. 6に示すようにめっき層が溶融し、電極と接触している領域の面積を通電面積と定義した。スポット溶接した試験片の溶接痕を撮影し、めっき層の溶融している領域の面積を算出した。

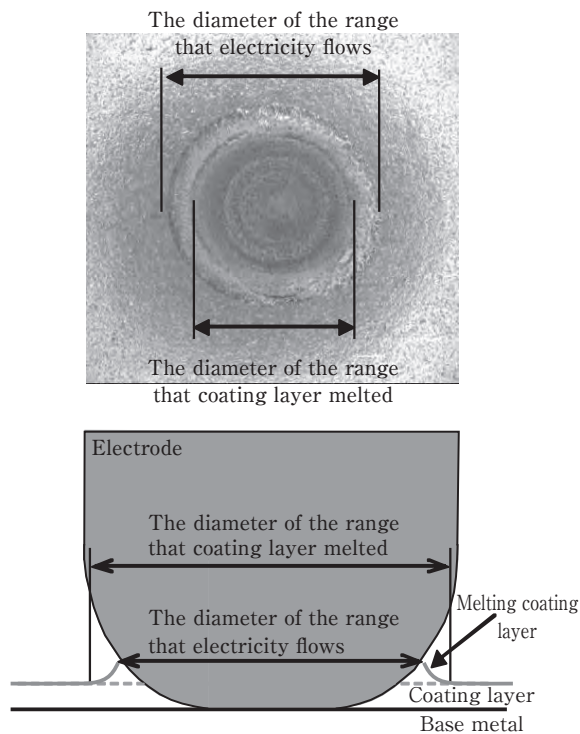


Fig. 6 Definition in the range that electricity flows.

3. 実験結果および考察

3.1 適正溶接電流範囲

Fig. 7 にZAM鋼板における直流インバータ式スポット溶接機と単相交流式スポット溶接機の適正溶接電流範囲を示す。単相交流式スポット溶接機の適正溶接電流範囲は7.8～8.8kAであった。それに対して、直流インバータ式スポット溶接機では上限は8.8kAで変わらなかったが、下限は6.6kAと低くなり、適正溶接電流範囲は拡大

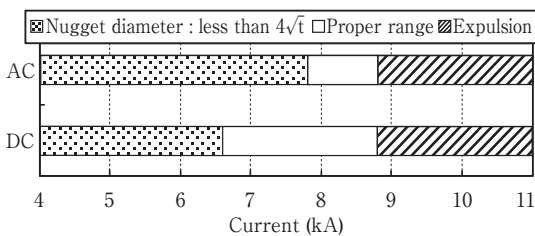


Fig. 7 Optimum welding current range.

した。Fig. 8 に直流インバータ式スポット溶接機と単相交流式スポット溶接機の適正電流密度を示す。単相交流式スポット溶接機では、基準となるナゲット径を形成するのに必要な電流密度は約325A/m²以上であった。こ

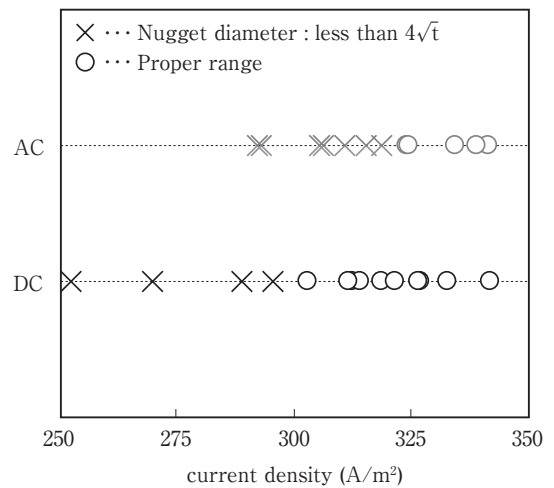


Fig. 8 Comparison of a proper current density of AC and DC.

れに対して直流インバータ式スポット溶接機では、約300A/m²以上で基準となるナゲット径が得られており、単相交流式スポット溶接機に比べて1割弱低かった。

次に直流インバータ式スポット溶接機と単相交流式スポット溶接機を用いて、通電時間を変化させてZAM鋼板をスポット溶接した場合のナゲットの成長挙動を調査した。Fig. 9 に溶接電流8.6kAにおける通電時間とナゲット径の関係を示す。また、断面観察結果の例としてFig.10に通電時間50, 100, 200msのスポット溶接部の断面観察結果を示す。

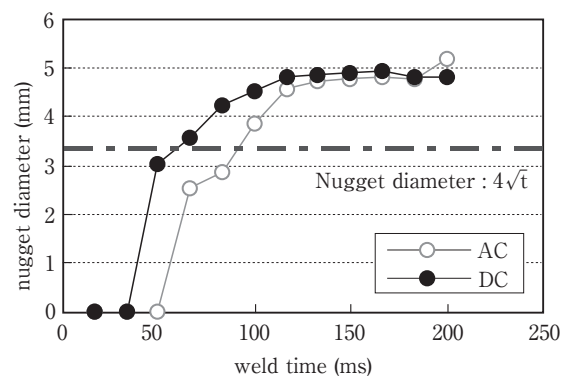


Fig. 9 Comparison of a nugget growth of AC and DC.

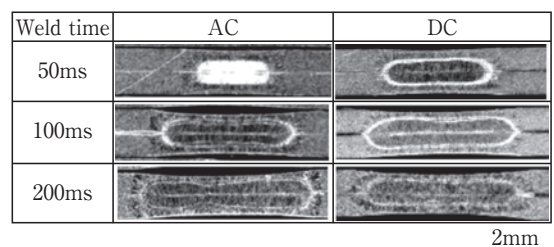


Fig.10 Cross-section of spot welded zone.

単相交流式スポット溶接機は通電開始から100ms後、基準ナゲット径の $4\sqrt{t}$ (約3.3mm) を満足するナゲットが形成された。また、通電時間とともにナゲットが成長し、通電時間130msでナゲット径は約5mmに到達して飽和した。一方、直流インバータ式スポット溶接機では通電開始から60ms後に基準ナゲット径を満足するナゲットが形成され、通電時間120msでナゲット径は約5mmに到達した。

以上の結果から、直流インバータ式スポット溶接機は単相交流式スポット溶接機よりも早期にナゲット形成が開始され、成長することがわかった。また、いずれの溶接機を用いても通電開始200ms後のナゲット径は同等であった。

この原因を明らかにするため、電流波形の測定を行うとともに解析にてそれぞれの溶接機における溶接部中心の温度を比較した。Fig.11に直流インバータ式スポット溶接機と単相交流式スポット溶接機の電流波形の測定結果を、Fig.12にスポット溶接部中心の昇温曲線の数値解析結果を示す。

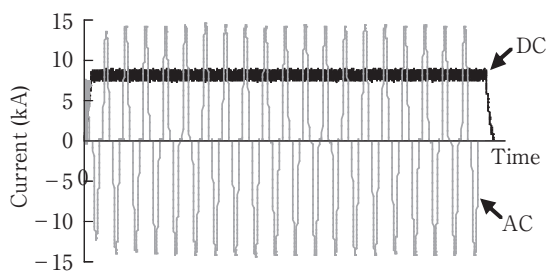


Fig.11 Current waveform of AC and DC.
(Weld current : 8.6kA)

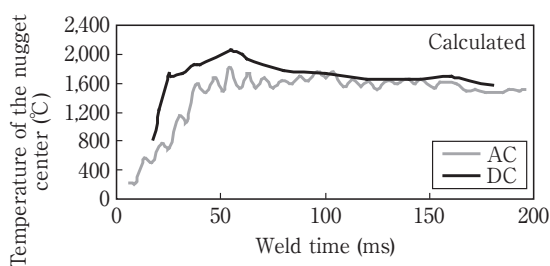


Fig.12 Relation between material temperature and weld time of AC and DC obtained by calculation.

Fig.11に示すように、単相交流式スポット溶接機は間欠通電であり、無通電となる間に電極からの抜熱により溶接部が冷却されてFig.12に示すように溶接部中心の温度は脈動が起きていると推察される。それに対して、

直流インバータ式スポット溶接機はFig.11に示すような連続通電であることから、Fig.12に示すように溶接部中心の温度は脈動が発生せず、同一溶接条件であれば単相交流式スポット溶接機よりも早期に溶接部中心の温度は高くなると考えられる。

また、Fig.12に示すように通電初期は直流インバータ式スポット溶接機の方が、単相交流式スポット溶接機に比べて溶接部中心の温度は高かったが、通電後期では溶接部中心の温度は同等であった。これはFig. 9 で示したナゲット径の形成挙動と一致している。チリの発生はナゲットがコロナボンドと呼ばれるナゲット周囲の圧接部より大きく成長することによって起こる。直流インバータ式スポット溶接機と単相交流式スポット溶接機で、通電後期のナゲット径および溶接部中心の温度が同等であることが、いずれの溶接機を用いてもチリ発生電流値に差がなかった原因と考える。

Fig.13に溶接電流6.8kAの場合の通電時間と溶接部近傍の材料温度の関係を、Fig.14に溶接電流値と通電開始

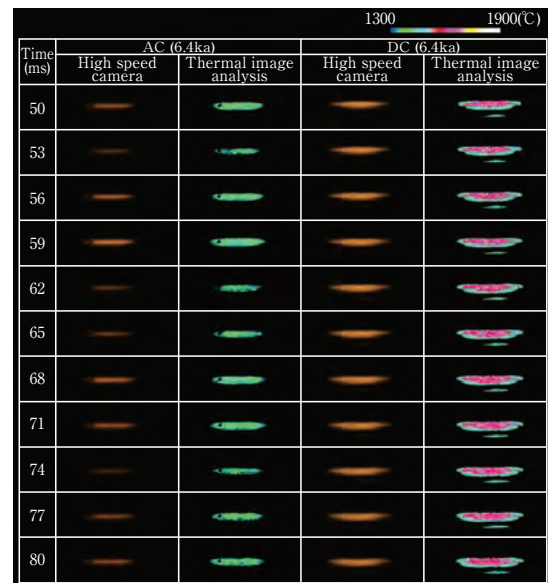


Fig.13 Effect of weld time and waveform on the temperature of welding area.

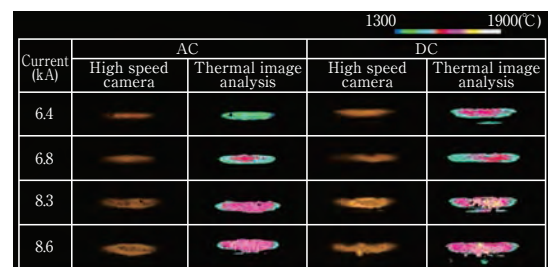


Fig.14 Effect of welding current and waveform on the temperature of welding area.

200ms後の溶接部近傍の温度の関係を示す。Fig.13に示すように、単相交流式スポット溶接機では、溶接部近傍の材料温度が脈動しており、直流インバータ式スポット溶接機では材料温度の脈動は確認されなかった。また、Fig.14に示すように、直流インバータ式スポット溶接機は、単相交流式スポット溶接機に比べ低い電流値においても溶接部近傍の材料温度の上昇が高いことが確認できた。更に、溶接電流値8.6kAの場合を比較すると、通電開始200ms後の溶接部近傍の温度は直流インバータ式スポット溶接機と単相交流式スポット溶接機で同等であり、解析結果と一致している。

以上の結果から、直流インバータ式スポット溶接機は加熱と冷却を繰り返す単相交流式スポット溶接機よりも効率的に加熱でき、低い溶接電流においてもナゲットが効率よく成長するため、適正溶接電流範囲が低電流側に広がったものと考えられる。

3.2 電極寿命

Fig.15に直流インバータ式スポット溶接機と単相交流

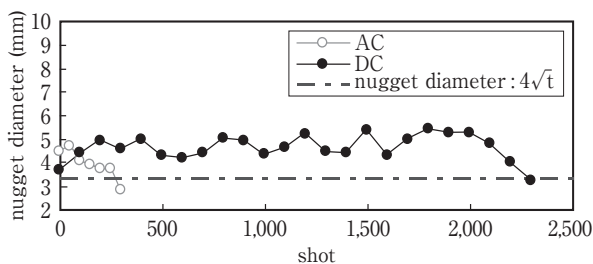


Fig.15 Change of nugget diameter with number of welds in electrode life test.

式スポット溶接機によるZAM鋼板の連続打点試験におけるナゲット径の推移を示す。4√t以上のナゲット径が得られる電極寿命は、単相交流式スポット溶接機では250打点であったが、直流インバータ式スポット溶接機では2200打点と単相交流式スポット溶接機の場合に比べて約9倍長くなった。

Fig.16に感圧紙による電極先端形状の測定結果を示す。単相交流式スポット溶接機の場合、上下電極とも同様に電極先端径が広がった後、電極先端中央部が凹むような損耗傾向を示した。それに対して、直流インバータ式スポット溶接機の場合は、上側電極の方が優先的に電極先端径が広がった。電流による熱的負荷が均等に与えられる単相交流式スポット溶接機に対して、電流が一方方向に流れる直流インバータ式スポット溶接機では、+極側である上側電極の方が-極側である下側電極よりも高温となるため、上側電極の方が下側電極よりも早く損耗したと考えられる⁷⁾。

Fig. 6 に示した方法で測定した連続打点試験における通電面積について、上下電極の平均値の推移をFig.17に示す。直流インバータ式スポット溶接機は単相交流式スポット溶接機に比べて、通電面積の広がりが緩やかである。Fig.18に通電面積の平均値から得られた連続打点試験における電流密度の推移を示す。Fig. 8 で示したように、連続打点試験においても直流インバータ式スポット溶接機では電流密度：約300A/m²を、単相交流式スポット溶接機では電流密度：約330A/m²を下回ったところで電極寿命を迎えた。

Current type / Electrode		Shot									
		1	100	200	250	300	500	1,000	1,500	2,000	
AC	Lower Electrode							-	-	-	
	Upper Electrode							-	-	-	
DC	Lower Electrode										
	Upper Electrode										

5mm

Fig.16 Transition of the contact state of the electrodes.

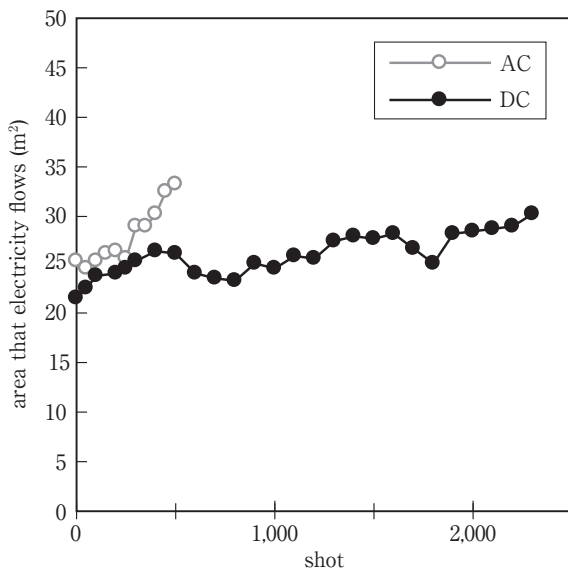


Fig.17 Change of the area that electricity flows with number of welds in electrode life test.

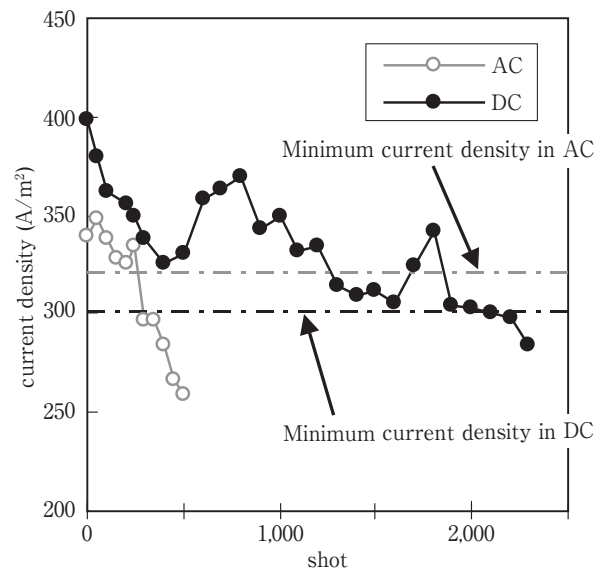


Fig.18 Change of current density with number of welds in electrode life test.

Fig.19に単相交流式スポット溶接機で500打点溶接を行った後の損耗電極を用いて、直流インバータ式スポット溶接機と単相交流式スポット溶接機におけるナゲットの成長挙動について調査した結果を示す。Fig.19(a)に示す単相交流式スポット溶接機の場合、未使用電極では通電時間120msでナゲットが形成され始めたが、損耗電極ではナゲットの形成開始時間が通電時間280msと未使用電極に比べて極端に遅くなり、通電時間が300msを越えてもナゲット径は $4\sqrt{t}$ (3.3mm) 以下の3mmまでしか成長しなかった。一方、Fig.19(b)に示す直流インバータ式スポット溶接機の損耗電極の場合では、ナゲットが通電時間150msから形成され始め、未使用電極と同様にナゲット径が約5mmまで成長することが確認できた。

一般にスポット溶接における発熱量はジュールの法則より(1)式で表され、特に電流密度 δ に大きく依存する。

$$Q = \rho \delta^2 L S t \dots \dots \dots (1)$$

ここで Q は抵抗発熱量(J)、 ρ は固有抵抗($\Omega \cdot m$)、 I は溶接電流(A)、 S は通電面積(m^2)、 δ は電流密度 I/S (A/m^2)、 L は通電長さ(m)、 t は通電時間(s)を表す。

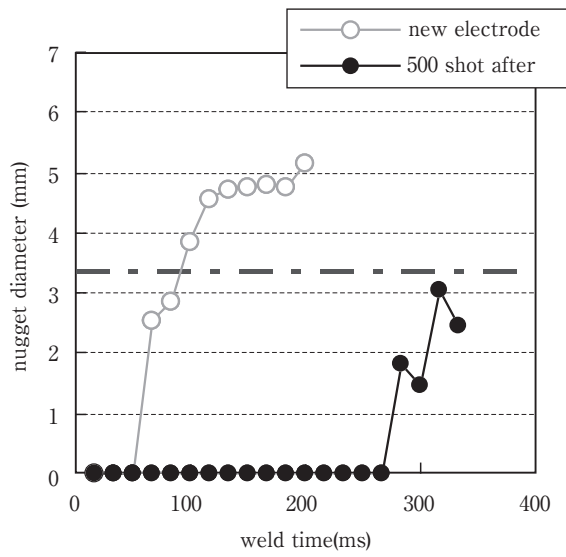
Fig.20に電流波形による電流密度とナゲット形成の模式図を示す。前項で述べたように、直流インバータ式スポット溶接機では低い溶接電流においてもナゲットが形成される。これは低い電流密度においてもナゲットが形成できることと同義である。直流インバータ式スポット溶接機は電極が損耗して接触面積が大きくなるのが単相交流式スポット溶接機よりも緩やかであることと、電極が損耗して単相交流式スポット溶接機ではナゲットが形

成されないような低い溶接電流密度となってもナゲットを形成することが可能なため、電極寿命は長くなったと考えられる。

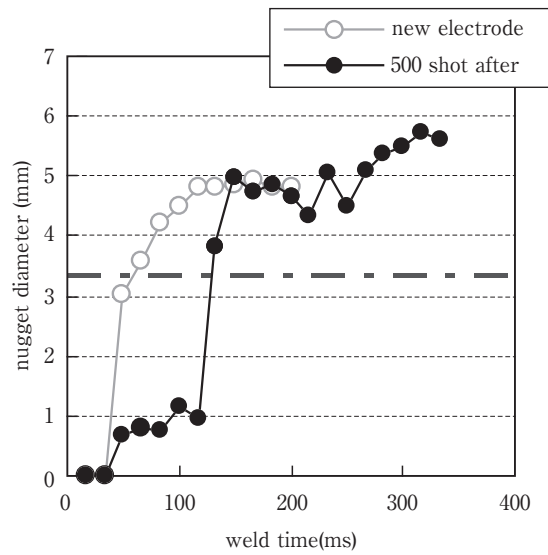
4. 結 言

ZAM鋼板のスポット溶接における電極寿命改善を目的として、直流インバータ式スポット溶接機の適用を検討した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 直流インバータ式スポット溶接機における適正溶接電流範囲は単相交流式スポット溶接機に比べて低電流側が広くなり、適正溶接電流範囲は約2倍拡大した。
- (2) 直流インバータ式スポット溶接機における基準ナゲット径を満足するために必要となる電流密度は、単相交流式スポット溶接機に比べて、約1割低い。
- (3) 直流インバータ式スポット溶接機における電極寿命は単相交流式スポット溶接機に比べて、約9倍長くなった。
- (4) 単相交流式スポット溶接機は間欠通電のため、無通電期間中に電極からの抜熱により溶接部が冷却されて溶接部中心温度が脈動している。一方、直流インバータ式スポット溶接機は連続通電で、溶接部中心温度が脈動しないことから低溶接電流でもナゲットが形成するのに必要な温度まで溶接部温度が上昇する。これが低溶接電流側に適正溶接電流範囲が広くなることと、電極寿命が長くなることの要因であると考えられる。



(a) AC



(b) DC

Fig.19 Relation between weld time and nugget growth by the worn electrode.

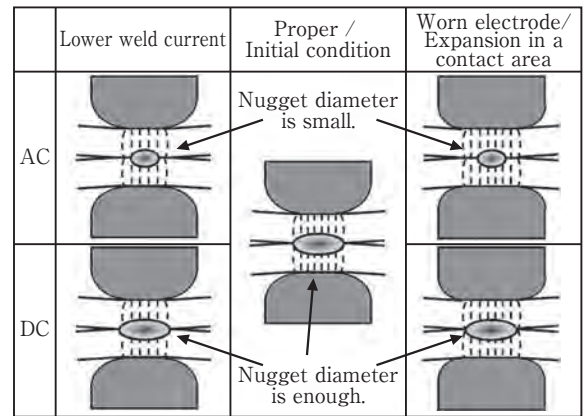


Fig.20 Relation between current densities and nugget growth by current waveform of AC and DC.

参考文献

- 1) 小松厚志, 泉谷秀房, 辻村太佳夫, 安藤敦司: 日新製鋼技報, No.81 (2001), 10.
- 2) 江里口徹, 曾我聡, 朝田博, 井上正二: 日新製鋼技報, No.72 (1995), 35.
- 3) 堀川裕史, 朝田博: 日新製鋼技報, No.92 (2011), 39.
- 4) 桜田康弘, 朝田博: 日新製鋼技報, No.92 (2011), 48.
- 5) 市川欣也, 三野政信, 福澤毅, 古川浩人: 溶接学会誌, 第75巻 (2006), 第5号, 341
- 6) 阪口修一, 安田功一: 溶接学会春季全国大会講演概要, No.78 (2006), 168-169.
- 7) 松山欽一, 高橋靖雄, 長谷川和芳: 抵抗溶接の基礎と実際, 産報出版, 東京, (2011), 115.