多段適応制御を活用した短ピッチ抵抗スポット溶接技術の開発*

澤西 央海**, 沖田 泰明**, 松田 広志**, 池田 倫正***

Development of resistance spot welding technology applying multi-stage adaptive control for narrow pitch spot welding*

by SAWANISHI Chikaumi**, OKITA Yasuaki**, MATSUDA Hiroshi** and IKEDA Rinsei***

Narrow pitch spot welding causes decrease in nugget diameter due to shunting to existing welds under conventional resistance spot welding. This study aims to develop new resistance spot welding technology for ensuring required nugget diameter regardless of weld spacing. Adaptive control based on real-time feedback of heat quantity was applied for welding of mild steel sheets. However, expulsion occurred from steel sheet surface around the contact edge with electrode when weld spacing was shortened to 10 mm. To solve this problem, a new adaptive control method was developed. The method includes 2-stage adaptive control, in which heat quantity is controlled independently in each stage to obtain proper nugget diameter. It is effective to set relatively low heat quantity compared to conventional method in the 1st stage to ensure current pass between steel sheets, and then to apply enough current-flow to obtain proper nugget diameter in the 2nd stage. This method can decrease shunt current flow to existing welds, and excess increase in welding current and over-heating around contact edge with electrode was suppressed. Appropriate nugget diameter can be consequently ensured without expulsion from steel sheet surface even with 10 mm weld spacing.

Key Words: Resistance spot welding, Adaptive control, Shunting, Weld spacing, Nugget diameter, Expulsion

1. 語 言

近年、自動車車体の衝突強度向上および剛性向上のため、車体組み立て時の抵抗スポット溶接の打点間隔縮小が検討されている¹⁻⁶⁾。しかし、打点間隔の縮小は、溶接時に既溶接点へ電流が流れる現象（以下、分流と記す）を促進するため、ナゲット径が確保できないという課題が生じる⁷⁻¹⁰⁾。ナゲット径の縮小は接合部の強度を低下させるため、分流が生じる状態でも一定のナゲット径を得るための対策が必要となる。

分流によるナゲット径の縮小は、分流の程度に応じて打点毎に溶接条件を最適化することで抑制可能と考えられるが、これには多大な時間と工数を要する。そのため、近年、新たな溶接法として、従来の定電流制御ではなく、溶接パラメータをモニタリングし、リアルタイム制御する適応制御溶接技術が開発されている。その制御方法としては、これまで電極変位から溶接条件を決定する手法¹¹⁾、電極間抵抗から溶接条件を決定する手法¹²⁻¹⁵⁾などが提案されているが、本研究では溶接中の電流および電極間抵抗の変化から熱量を算出し、目標とする熱量に合致するように電流を逐次変化させる制御方法¹⁶⁻¹⁸⁾に着目した。本制御方法では、初めに適切なナゲット径が得られる溶接条件にて定電流制御での

溶接を行い、溶接電流および電極間抵抗から目標となる単位体積あたりの熱量パターンを設定する（以下、この溶接をリファレンス溶接と記す）。また、その後の適応制御溶接では、目標熱量に対する過不足分を補うため、溶接電流を逐次制御する。

本制御方法を用いることで、分流の程度に応じて溶接電流が増大し、ナゲット径の縮小をある程度抑制できると考えられる。しかし、抵抗スポット溶接の分流現象に関しては、溶接打点間隔や鋼板の材質・板厚等がナゲット径に及ぼす影響に関する報告例はあるものの^{19,20)}、通電中の分流の過渡変化や、分流状態での散り発生等の溶接現象に関しては検討されておらず、その要因は未だ明らかでない。そこで、本研究は、リファレンス溶接の通電区間および適応制御区間を多段階に分割し、適正化した目標熱量に従って適応制御溶接を行うことで、分流の程度によらず一定のナゲット径を安定して確保し、溶接打点間隔の縮小を可能とすることを目的とした。本報では、適応制御区間を適正に分割することで溶接電流の急激な変化を抑制し、軟鋼板の打点間隔縮小時の散り抑制およびナゲット径確保の両立を可能とする溶接方法（以下、多段適応制御と記す）に関する検討について報告する。まず、定電流制御および従来の適応制御におけるナゲット形成現象を評価したうえで、通電パターンが分流現象に及ぼす影響を数値シミュレーションによって検証した。そして、多段適応制御による散り抑制効果と、そのメカニズムを明確化した。

*受付日 2019年3月15日 受理日 2019年8月31日

**正 員 JFE スチール株式会社 Member, JFE Steel Corporation

***正 員 JFE スチール株式会社（現：JFE テクノリサーチ株式会社） Member, JFE Steel Corporation (Present affiliation: JFE Techno-Research Corporation)

2. 実験および解析方法

2.1 実験方法

供試材料として、板厚 1.6mm の 270MPa 級冷延鋼板を用い、二枚重ね溶接を実施した。電極は先端径 6mm、先端曲率半径 40mm の DR 形 Cr-Cu 電極、溶接電源はインバータ式直流電源を用いた。

適応制御による抵抗スポット溶接方法を以下で説明する。本法は、予め定電流制御によるリファレンス溶接で設定した目標熱量と同じ熱量が得られるように、溶接中の溶接電流を制御する溶接方法である。本研究では、単位体積・時間あたりの熱量 (Q) を以下の式で定義して制御を行った¹⁸⁾。

$$Q = \frac{I^2 \cdot (R - R_0)}{S \cdot L} \quad (1)$$

$$R - R_0 = r \cdot \frac{L}{S} \quad (2)$$

(1), (2) 式より,

$$Q = \frac{I^2 \cdot (R - R_0)^2}{r \cdot L^2} \quad (3)$$

ここで、 I : 溶接電流、 R : 電極間抵抗、 R_0 : 鋼板無しで通電した際の電極間抵抗、 S : 通電面積、 L : 板厚の総和、 r : 電気抵抗率である。なお、電極間抵抗は、検出した電極間電圧値 (E) を溶接電流値で除した結果を用いた。上式 (1) では、単位時間あたりのジュール熱を、通電面積と板厚の総和の積で求まる体積で除した値を、単位体積・時間あたりの熱量 (Q) と定義している。ただし、溶接中の通電面積は実測することができないため、上式 (1), (2) から得られた (3) により、通電面積を用いずに Q を計算した。リファレ

ンス溶接は、既溶接点が無い状態で、 $5\sqrt{t}$ (t : 板厚) のナゲット径が得られる溶接条件にて実施した。リファレンス溶接中は、10ms 毎に溶接電流および電極間電圧を検出して上式 (3) から Q を算出し、 Q に単位時間 (ここでは 10ms) を掛けた値を通電開始から通電終了まで合算することで、単位体積当たりの目標熱量を求めた。その後の適応制御溶接では、Fig.1 のフローチャートに示すように、10ms 毎に検出した溶接電流および電極間抵抗から同様に Q を計算し、その時点までの Q と単位時間の積の総和が、リファレンス溶接と同じ値となるように、次の 10ms の電流値を決定した。これを通電終了まで繰り返し、最終的な単位体積あたりの投入熱量が目標熱量に達するように制御を行った。なお、制御のオーバーシュートを防ぐため、10ms あたりの溶接電流の最大増減量は 0.7kA とし、リファレンス溶接の Q と単位時間の積の総和に対して過不足が生じる場合は、次の 10ms で過不足分を補うように溶接電流を設定した。

続いて、本研究で提案した多段適応制御による抵抗スポット溶接方法を説明する。従来の適応制御では、リファレンス溶接の通電パターンは Fig.2(a) の 1 段通電であったのに対し、多段適応制御では Fig.2(b) に示した 2 段通電とし、単位体積あたりの目標熱量パターンを設定した。その後の適応制御溶接においては、各区分ごとに Fig.1 で示した制御を行った。以下、リファレンス溶接の通電パターンを Fig.2(a) とした場合を 1 段適応制御、Fig.2(b) とした場合を多段適応制御と記す。なお、1 段適応制御、多段適応制御ともに、リファレンス溶接はナゲット径が $5\sqrt{t}$ となる条件を選定した。それぞれの溶接条件を Table 1 に示す。

溶接試験の模式図を Fig.3 に示す。Fig.3(a) のように既溶接点の無い状態でリファレンス溶接を行って単位体積あたりの目標熱量を設定した後、Fig.3(b) のように 2 つの既溶接点間に適応制御で溶接を行い、ナゲット径を評価した。また、比較として、Table 1 の 1 段通電の溶接条件にて、定電流制御での溶接・評価も実施した。溶接打点間隔 (溶接点と既溶接点の中心間距離) L は 10~20mm、既溶接点のナゲッ

Fig.1 Flow chart of adaptive control welding.

Fig.2 Welding current pattern of reference welding.

Table 1 Welding conditions for reference welding.

Welding pattern	Electrode force / kN	1st		2nd	
		I / kA	t / ms	I / kA	t / ms
1-stage	3.5	9.0	320		
2-stage	3.5	6.0	140	9.0	240

I : Welding current, t : Weld time

Fig. 3 Schematic illustrations of experimental set-up.

Fig. 4 Numerical calculation model.

ト径は $5\sqrt{t}$ とした。溶接後は、溶接部の中心をFig.3のxまたはy方向に切断し、断面の鏡面研磨およびピクリン酸飽和水溶液によるエッチングを実施した後、溶接部の断面マクロ組織を観察し、ナゲット径を計測した。

2.2 解析方法

通電パターンが分流現象に及ぼす影響について検証するため、有限要素解析ソフトウェア「SORPAS 3D」(SWANTEC Software and Engineering ApS 社製)による弾塑性応力、電位および伝熱に関する連成解析を実施し、抵抗スポット溶接中の温度分布および電流密度分布を計算した。解析モデルはFig.4に示す1/2対称モデルとした。板組みは板厚1.6mmの鋼板二枚重ねとし、打点間隔10mmの既溶接点を模擬した直径6.3mmの接触部(以下、分流点と記す)を板-板間に2つ設けた。鋼板および電極の物理的特性(熱伝導率、比熱、電気伝導率、ヤング率、降伏応力、線膨張率)は、温度依存性を考慮した。板-板間および電極-板間には接触部の抵抗に相当するエレメントを設け、その電気伝導率を、

Table 2 Welding conditions for numerical calculation.

Welding pattern	Electrode force / kN	1st		2nd	
		I / kA	t / ms	I / kA	t / ms
1-stage	3.5	12.0	480		
2-stage	3.5	8.0	200	12.0	280

I: Welding current, t: Weld time

Fig. 5 Relationship between nugget diameter and weld spacing in constant current control and 1-stage adaptive control.

材料の降伏応力および電気伝導率、接触部に付与される応力などから決定することで、接触部の抵抗を表現した²¹⁾。

解析における溶接条件をTable 2に示す。電流の制御方式は定電流制御、通電パターンは前節のFig.2(a), (b)のような1段階通電または2段階通電とした。1段階通電では、高電流通電によって通電径の拡大およびナゲット成長が生じる溶接条件を設定したのに対し、2段階通電では、低電流通電によって通電径が拡大した後に、高電流通電によってナゲットが成長する溶接条件を設定した。また、いずれも $5\sqrt{t}$ 以上のナゲット径が得られる溶接条件としている。

各通電パターンにおける溶接中の電流密度分布および温度分布を計算し、分流点に流れる電流を分流電流と定義して、分流電流およびナゲット径の時間変化を比較した。そして、ナゲット形成前に通電径を拡大する際の溶接電流が、分流電流の過渡変化に及ぼす影響について検証した。

3. 結果および考察

3.1 定電流制御および1段階適応制御におけるナゲット形成現象

本節では、定電流制御および1段階適応制御での溶接実験により、ナゲット形成現象に及ぼす分流の影響を明確化した。Fig.5に、各制御方式における溶接打点間隔とナゲット径の関係を示す。ナゲット径はFig.3のy方向に溶接部中央を切断して計測した。またFig.5中の点線は、既溶接点がないリファレンス溶接におけるナゲット径である。定電流制

御では、溶接打点間隔の縮小に伴い分流が生じやすくなるため、ナゲット径が縮小した。一方、1段適応制御では、溶接打点間隔20mmおよび15mmでは、既溶接点が無い場合と同程度のナゲット径が得られた。しかし、溶接打点間隔10mmでは散りが発生し、ナゲット径は縮小した。Fig.6に、各制御方式における既溶接点が無い場合および溶接打点間隔10mmの場合の断面マクロ組織を示す。切断方向は、1段適応制御の溶接打点間隔10mmの場合のみ散りの性状を確認するため溶接部中央をFig.3のx方向に切断し、他はすべてナゲット径の計測同様、y方向に切断した。1段適応制御の溶接打点間隔10mmでは、散りは電極との接触端近傍の鋼板表面から発生する表散りであった。

各溶接打点間隔での1段適応制御における溶接電流の時間変化をFig.7に示す。溶接打点間隔の縮小に伴い溶接電流は増加したが、これは分流により減少した溶接点に流れる電流が、適正に補正された結果と考えられる。一方、溶接打点間隔10mmでは最大13.2kAまで溶接電流が増加し、表散りが発生した。また、いずれの溶接打点間隔においても通電開始から80ms程度までの通電初期に最も溶接電流が増加した。なお、通電初期の溶接電流の増加量は溶接打点間隔によらず一定であったが、これは2.1節で述べたとおり、10msあたりの溶接電流の増加量に上限を設けたためである。リファレンス溶接および各溶接打点間隔での1段適応制御における電極間抵抗の時間変化をFig.8に示す。リファレンス溶接では、通電初期に一旦電極間抵抗が増加し、その後は緩やかに低下した。通電初期は板-板間の通電径が狭く、溶接部は通電による温度上昇で固有抵抗が急激に増加するため、電極間抵抗は増加するが、その後は通電径が拡大して電極間抵抗は低下する。一方、1段適応制御では、最初の10msは接触抵抗の存在によりいずれも電極間抵抗は高いものの、その後は接触抵抗が速やかに消失し、溶接打点間隔の縮小に伴って分流が大きくなるため、リファレンス

溶接に対して電極間抵抗が低下した。また、特に10ms以降の通電初期における電極間抵抗の低下が顕著であった。上述したとおり、通電初期は電極直下の板-板間の通電径が狭く、板-板間を通る電流経路の抵抗が高い。そのため、通電初期は既溶接点への分流が生じやすく、電極間抵抗が大きく低下したと考えられる。電極間抵抗が低下すると、リファレンス溶接に対して熱量が小さいと判定されるため、いずれの溶接打点間隔においても通電初期に最も溶接電流が増加したと推察される。また、溶接打点間隔10mmでは、通電時間150ms以降で再び溶接電流が増加した。これは、鋼板表面付近における過度の温度上昇に伴う電極-板間の接触面積の拡大や、電極によるインデンテーションの促進などが原因で、電極間抵抗が低下したためと考えられる。

以上の結果から、定電流制御では溶接打点間隔の縮小に伴いナゲット径が縮小するのに対し、1段適応制御は溶接打点間隔の短ピッチ化時においてナゲット径を確保する手法として有効であった。しかし、溶接打点間隔を10mmまで短ピッチ化した場合は、過大電流により電極表面近傍までナゲットが成長し、表散りが発生することが明らかとなった。

Fig.7 Change in welding current during the 1-stage reference welding without existing-welds and adaptive control with existing-welds.

Fig.6 Cross-section of welds in several welding conditions.

Fig.8 Change in resistance between electrodes during the 1-stage reference welding without existing-welds and adaptive control with existing-welds.

Fig.9 Temperature distribution of welds in numerical calculation.

3.2 多段適応制御によるナゲット形成安定化

3.2.1 通電パターンが分流現象に及ぼす影響に関する数値シミュレーション

本節では、適応制御溶接における表散りを抑制する溶接プロセスの開発を検討した。前節の1段適応制御溶接における短ピッチ化時の表散り発生の推定要因として、通電初期における大幅な溶接電流の増加が挙げられる。そのため、通電初期の分流を低減し、短ピッチ化時においても溶接電流が過大に増加しない溶接プロセスにより、表散りの抑制を試みた。前節で述べたとおり、通電初期は分流による電極間抵抗の低下が顕著であり、分流量も大きいと推定される。よって、ナゲット成長を開始するまでの通電初期において、電極直下の板-板間の金属接触により通電径を確保するまでは、溶接電流を低下させて分流自体を低減することが、溶接電流の過大増加の抑制に有効と考えられる。そのため、本項では低電流通電によって通電径が拡大した後に、高電流通電によってナゲットが形成・成長するプロセスを想定する2段通電パターンを提案した。そして、数値シミュレーションを活用し、通電パターンが分流現象に及ぼす影響を検証した。

Fig.9に1段通電および2段通電パターンにおけるナゲット形成直前および通電終了時点の温度分布の解析結果を、Fig.10に各通電パターンにおけるナゲット径、溶接電流および分流電流の時間変化の解析結果を示す。なお、Fig.9の電極直下における灰色で示した領域がナゲットであり、1段通電および2段通電パターンの通電終了時点のナゲット径は同程度である。1段通電パターンの場合、Fig.10(a)で示すように通電初期が最も分流電流が大きく、その後は徐々に減少したが、これはナゲット形成・拡大に伴い電極直下の通電径が拡大することで抵抗が低下するためである。一方、

Fig.10 Change in nugget diameter, total current and shunting current during welding.

2段通電パターンの場合、Fig.10(b)で示すように1段階目ではナゲットは形成せず、2段階目からナゲット成長が開始した。また、1段通電パターンと同様に通電初期が最も分流電流が大きいものの、その値は1段通電パターンに対して大幅に低減された。これは、1段通電パターンに対して2段通電パ

ターンの1段目の溶接電流を低下させた効果と考えられる。加えて、Fig.9に示すように2段通電パターンではナゲット形成前の温度上昇がわずかに抑制されたことも影響を及ぼしている可能性がある。Fig.11に、ナゲット形成開始前後における各通電パターンでの分流の時間変化を示す。ナゲット形成前のみでなく、ナゲット形成後100ms程度までの期間においても、1段通電より2段通電パターンの方が分流電流が小さいが、これは1段目の通電によって、1段通電パターンと比較して通電径が拡大した状態でナゲットが成長するためと考えられる。そして、ナゲットの成長に伴って通電径は飽和していくため、ナゲット形成後100ms以降は1段通電と2段通電パターンの分流電流は同等となったと推定される。

以上の数値シミュレーションにより、低電流の通電で通電径が拡大した後に、高電流の通電でナゲットが成長する2段通電パターンを適用することで、通電開始からナゲット成長初期までの期間における分流量を低減可能となることが示唆された。本通電パターンを多段適応制御のリファレンス溶接に適用することで、短ピッチ化時における溶接電流の過大増加および表散りを抑制する効果が期待される。

3.2.2 多段適応制御による表散り抑制効果とそのメカニズム

前項で実施した数値シミュレーションにおいて、通電中の分流抑制にはナゲット形成開始までの溶接電流を低く設定した通電パターンが有効であった。本項では、リファレンス溶接の通電パターンを2段通電とした溶接実験を行い、多段適応制御によって短ピッチ溶接を実施した際のナゲット形成安定化および表散り抑制の効果を検証し、そのメカニズムを考察した。

目標熱量パターンとなるリファレンス溶接の溶接条件はFig.2(b)およびTable 1に示した2段通電とし、溶接打点間隔を変化させて多段適応制御溶接を実施した。Fig.12に、多段適応制御における溶接打点間隔とナゲット径の関係を示す。また、比較として前節で実施した定電流制御および1段適応制御における結果も併記した。Fig.13に既溶接点が無い場合および溶接打点間隔10mmの場合における溶接部の断面マクロ組織を示す。前節の1段適応制御と異なり、多

段適応制御では、溶接打点間隔にかかわらずリファレンス溶接と同程度のナゲット径が得られており、表散りは発生しなかった。Fig.14に、既溶接点が無い場合および溶接打点間隔10mmの場合における溶接電流の時間変化を示す。多段適応制御では1段適応制御に対して表散りの原因となる溶接電流の過大増加が抑制されており、通電中の溶接電流の最大値は11.6kAであった。

多段適応制御による表散りの抑制機構を明確化するため、溶接打点間隔10mmでの1段適応制御（表散り発生まで）および多段適応制御の溶接電流波形を模擬した電流制御での溶接を行い、通電時間を変化させて溶接した際の溶接部の

Fig. 12 Relationship between nugget diameter and weld spacing in each welding control method.

Fig. 13 Cross-section of welds applying 2-stage adaptive control.

Fig. 11 Relationship between shunting current and time from the formation of nugget.

Fig. 14 Change in welding current during the 2-stage reference welding without existing-welds and adaptive control with existing-welds (weld spacing: 10mm).

断面マクロ組織を観察した。通電中における板-板間の接触径とナゲット径の経時変化を評価した結果を Fig. 15 に示す。なお、継手の切断方向は Fig. 2 の x 方向とした。Fig. 15(a) の 1 段階適応制御では、通電初期から板-板間の接触径、ナゲット径ともに急激に拡大して表散りが発生したのに対し、多段階適応制御では板-板間の接触径、ナゲット径は緩やかに拡大する傾向となった。Fig. 16 に、Fig. 15 の結果から整理した板-板間の接触径とナゲット径の関係を示す。1 段階適応制御に対して、多段階適応制御では板-板間の接触径がより大きく

Fig. 15 Change in contact diameter between steel sheets and nugget diameter during adaptive control welding (weld spacing: 10 mm).

拡大してからナゲットが形成開始し、成長することがわかった。板-板間の接触径が大きい場合、板-板間の通電径も大きくなるため、1 段階適応制御に対して多段階適応制御では通電中の分流が低減すると考えられる。前節の数値シミュレーションでは、2 段階通電によって通電径が拡大してからナゲットが成長し、分流が低減することを示した。本節の結果により、数値シミュレーションにおける上記の現象が、実験的に確認されたと言える。また、板-板間の接触径が 6.5 mm 以上の場合、1 段階適応制御と多段階適応制御における板-板間の接触径とナゲット径の関係は同等であるにもかかわらず、1 段階適応制御でのみ表散りが発生した。これは、分流による溶接部の発熱形態が表散り発生に影響を及ぼしたためと考えられる。

Fig. 17 に、1 段階適応制御と多段階適応制御での短ピッチ溶接における通電・発熱プロセスの模式図を示す。1 段階適応制御の場合、ナゲット形成前は板-板間の接触径が小さいため分流が大きく、電極間抵抗の低下を補うために溶接電流が大

Fig. 16 Relationship between nugget diameter and contact diameter between steel sheets during adaptive control welding (weld spacing: 10 mm).

Fig. 17 Comparison of welding phenomena between 1-stage and 2-stage adaptive control welding.

幅に増加する。そして、電極との接触端において電流密度が高くなることで、電極との接触端方向への溶融が促され、表散りが発生したと考えられる。一方、多段適応制御では、板-板間の接触径の拡大によって分流が低減するため、溶接電流を大幅に増加させることなくナゲット成長が促進される。そのため、電極との接触端近傍の電流密度増加および発熱が抑制され、扁平なナゲットが成長することで、表散りを発生させることなく所定ナゲット径が得られたものと考えられる。以上のように、多段適応制御では通電初期の目標熱量を低下することで短ピッチ溶接における発熱形態をコントロールし、表散りを抑制することが可能であること、溶接打点間隔にかかわらずナゲット径の安定確保に有効であることが明らかとなった。

4. 結 言

軟鋼板の適応制御抵抗スポット溶接における、打点間隔縮小時の散り抑制およびナゲット径確保の両立を目的とし、適応制御区間を適正に分割した多段適応制御について検討を行い、以下の知見を得た。

1. 定電流制御では、溶接打点間隔の縮小に伴って分流が生じやすくなり、ナゲット径が縮小した。一方、1段適応制御では、一定以上の溶接打点間隔においてナゲット径の縮小を抑制することが可能であったが、溶接打点間隔10mmでは分流による電極間抵抗の低下を補うために溶接電流が過大に増加し、表散りが発生した。
2. 数値シミュレーションにより、通電パターンが分流およびナゲット形成現象に及ぼす影響を解析した。その結果、高電流の1段通電における分流量に対し、電極直下の板-板間の金属接触により通電径を確保するまでの溶接電流を低下させた2段通電の場合、ナゲット形成前および成長中の分流が低減可能であった。
3. リファレンス溶接を、2段目に対して1段目の溶接電流を低下させた2段通電パターンとした多段適応制御溶接では、溶接打点間隔にかかわらず一定のナゲット径を安定確保可能であった。多段適応制御は、1段適応制御に対して板-板間の接触径がより拡大した後にナゲットが成長することで分流が低減し、短ピッチ溶接においても溶接電流の過大増加による電極との接触端近傍の発熱が抑制され、表散りが発生しなかったと考えられる。

参 考 文 献

- 1) K. Pal and D. L. Cronin: Static and Dynamic Characteristics of Spot Welded Sheet Metal Beams, Transactions of the ASME, 117-3 (1995), 316-322.
- 2) Y. W. Lee, Y. W. Kwon, S. Y. Kwon and W. S. Cho: A Study on the Improvement of the Structural Joint Stiffness for Aluminum BIW, SAE Technical Paper, (1997), 970583.
- 3) A. Yoshitake and R. Ikeda: Weight Reduction Procedure by Utilizing High Strength Steel Sheets, Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, 52-606 (2011), 766-771. (in Japanese)
- 4) H. Ooka, A. Suzuki, M. Goto, K. Otsuka and Y. Okada: Development of Short Pitch Resistance Spot Welding Technology, HONDA R&D Technical Review, 25-2 (2013), 81-86. (in Japanese)
- 5) H. Ooka and T. Nomura: Journal of the Japan Welding Society, Weight Reduction of Car Body Using Short Pitch Resistance Spot Welding, 84-7 (2015), 509-513. (in Japanese)
- 6) R. M. Kuhn and P. K. Mallick: Effect of Weld Pitch Variation on the Performance of a Two-Piece Spot-Welded Body Structure, SAE Technical Paper, (2002), 2002-01-0152.
- 7) H. Zhang and J. Senkara: RESISTANCE WELDING: Fundamentals and Applications, Taylor & Francis group, (2006) 26.
- 8) H. Eisazadeh, M. Hamed and A. Halvae: New parametric study of nugget size in resistance spot welding process using finite element method, Materials and Design, 31 (2010), 149-157.
- 9) N. Nakagawa: 人に、地球にやさしい抵抗溶接機器をめざして, Welding Technology, 46-3 (1989), 87-92. (in Japanese)
- 10) H. Wang, Y. Zhang and G. Chen: Resistance spot welding processing monitoring based on electrode displacement curve using moving range chart, Measurement, 42-7 (2009), 1032-1038.
- 11) L. Gong and C. Liu: Electrode Displacement Patterns Inferred as the Optimal Control Criteria during the Resistance Spot Welding Process, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1 (2011), 148-152.
- 12) T. Taylor: Adaptive Control of Resistance Welding, Assembly, 55-2 (2012), 44-47.
- 13) S. Nakata and A. Nishimura: 電極チップ間抵抗による溶接中の溶接部通電面積の推定とその精度 抵抗スポット溶接における適応制御I, Preprints of the National Meeting of the Japan Welding Society, 27 (1980), 348-349. (in Japanese)
- 14) U. Matuschek and K. Poell: SPOT WELDING WITH ADAPTIVE PROCESS CONTROL, IIW Annual Assembly Meeting Commission III, (2005), 1346-05.
- 15) Y. Cho, I. S. Chang and H. B. Lee: Advanced Resistance Spot Welding Technologies: New Machine, Adaptive Control and FEM Simulation, Materials Science Forum, 580-582 (2008), 367-370.
- 16) K. Uota, Y. Nishiwaki and S. Kawamatsu: インバータ制御装置によるスパッタレス化への取り組み, Welding Technology, 60-3 (2012), 42-47. (in Japanese)
- 17) D. Yasue, K. Sahashi and Y. Hara: The Latest Spot Welding Technology for the High Tensile Steels, Journal of the Japan Welding Society, 84-6 (2015), 452-457. (in Japanese)
- 18) 西脇由起男: 抵抗溶接での適応制御応用について, 第41回溶接学会東部支部実用溶接講座, 溶接学会東部支部編, (2013), 14-30. (in Japanese)
- 19) B. Wang, M. Lou, Q. Shen, Y. B. Li and H. Zhang: Shunting Effect in Resistance Spot Welding Steels - part 1: Experimental study, Welding Journal, 92 (2013), 182-189.
- 20) P. Howe: SPOT WELD SPACING EFFECT ON WELD BUTTON SIZE, Sheet Metal Welding Conference VI, AWS Detroit Section (1994), C03.
- 21) SORPAS 2D Version 12 User Manual, SWANTEC Software and Engineering ApS, Diplomvej 373 2800 Kongens Lyngby, Denmark (2016), 64.