を行った結果、以下の結論を得た。

1) 加圧力 49 MPa, 接合電流密度 157 A/mm², 接合時間 0.2 sec の条件で接合した場合, 変形量が 0.1 mm と小さく, 引張強度が 600 MPa 以上 (母材並強度) の継手が得られる。

2) 接合時間 0.04 sec, 接合電流密度 254 A/mm², 加圧力密度 49 MPa の条件で接合すると, 接合界面の温度が 1000°C で接合界面から 1 mm 離れた被接合材の温度が 700°C の急激な温度分布が得られる。

3) 被接合材の変形量が同一となる条件においては, 入熱形態として大電流短時間型の方が接合部の品質に優れる。接合時間 0.08 sec, 接合電流密度 254 A/mm², 加圧力密度 49 MPa の短時間大電流条件では融点低下元素の Si が完全に母材レベルに達するのに対し, 小電流長時間型の接合時間 5.0 sec, 接合電流密度 58 A/mm², 加圧力密度 49 MPa の条件では高濃度の Si を含む共晶組成物が接合層中央にフィルム状に濃縮されて残存する。

謝 辞

本研究の遂行にあたり種々の有益な御討論を頂いた諏訪正輝氏, 松坂 矯氏に感謝の意を表します。

Fig. 10 Line analysis of insert material ejected from joint interface (Weld current: 58 A/mm², Weld time: 5.0 sec, Pressure: 49 MPa)

参考文献

- 1) 梶原, 小倉, 小園, 志田, 舟本: インサート材を用いた抵抗圧接における接合現象の研究: 溶接学会論文集, 3, 4, p. 9-16, (1985)
- 2) 有賀: Ni 系アモルファスろう材のろう接性: ぶれいず, 57, p. 44-49, (1982)
- 3) 恩沢, 満永, 鈴村, 田村, 森川: 耐熱合金 Inco. 713C の TLP Bonding に関する研究: 溶接学会誌, 47, 3, p. 35-40, (1978)

圧痕の形成要因およびその抑制方法*

—高電流密度・短時間通電方式スポット溶接の研究 (第3報)—

仲田 周次**, 藤本 公三**, 玉井 尚治***

Forming Factors of Indentation and its Suppression*

—Study of High-Current Density Resistance Spot Welding Process (3rd. Report)—

by Shuji Nakata**, Kozo Fujimoto** and Shoji Tamai***

In the spot welding process using high-current density (nearly 2.0 kA/mm²) and short current duration (4.0 ms), the indentation on sheet is smaller than one in the conventional spot welding process (heat conduction type). But, in case of welding using R type or CF type electrode tips, its indentation is clear in visual inspection at welds showing the tear rupture at the tensile shear testing.

In this report, it is cleared that the indentation is formed mainly by following three factors; the softening in sheet surface caused by heating by the contact resistance between electrode and sheet, the current concentration in the electrode edge, and electrode force.

Furthermore, it is shown experimentally that the joint of thin steel sheets or Al alloy plates with enough tensile shear strength and extremely small indentation (about 0.01 mm) are obtained easily by using the combination of R type and F type electrodes.

Key Words: Condenser spot welding, High current density, Indentation, Suppression of indentation, Tensile shear strength

*原稿受付 昭和61年6月21日 昭和55年度春季全国大会で発表

**正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Osaka University

***正 員 大阪大学工学部 (現在横河橋梁製作所) Member, Faculty of Engineering, Osaka University (Yokogawa Bridge Works Co., Ltd.)

1. はじめに

スポット溶接は自動車産業, 電機産業など各方面で使用されており, 使用に際し, 外観が重要視される場合が多々あるが, 通常のスポット溶接では, 板厚 1 mm の軟鋼板に対し, 通電時間が 10~20 cycle で熱時間定数¹⁾

の 4～8 倍と長く、熱伝導的に定常状態においてナゲットを形成させるため、一般に溶込みの大きなナゲットが形成される。このため、接合部全体が高温となり、材料強さの低下に伴って電極チップの先端が板中にめり込みやすくなる^{2,3)}。本方式のように、接合材の熱時間定数以下の極めて短時間の通電によるスポット溶接では、発熱が界面に集中し、試片表面および近傍の温度上昇・軟化程度が通常のスポット溶接に比較して小さいため、圧痕の形成を抑制することが容易であると考えられる。しかし、前報までもに示したように、一般の R 型、CF 型電極を用いた接合では、インデンテーションが約 0.05 mm 程度と通常のスポット溶接に比べ小さくなっている^{4,5)}が、目視で十分圧痕がわかり、実用上まだまだ不十分であると考えられる。

この圧痕抑制法として、電極チップの改良⁶⁾や R 型—F 型電極組合せによる方法^{7,8)}が報告されているが、接合部の強度が十分高く^{*}、かつ圧痕量が 10 μm 以下と非常に小さな接合部が得られた例はなく、又、これらのものはいずれも試片の熱時間定数と同等かそれ以上の長さの通電時間でのスポット溶接におけるもので、前報までに示したような熱時間定数の 1/10 程度と非常に短い通電時間でのスポット溶接における圧痕抑制の例はない。

そこで、本研究ではこの短時間通電方式のスポット溶接において、圧痕の形成に寄与する要因を明らかにした上で、圧痕の抑制方法、ならびにその時の接合部形成現象について検討を行ったものである。

2. 実験装置、供試材料および実験方法

本研究は、前報⁵⁾と同様にコンデンサ式電源を用いて、最大電流到達時間 (t_{pi}) が 1.6 ms、通電時間 (t_f) が 4.0 ms のインパルス状の電流を被接合材に通電して接合を行っている。なお、本研究で用いた実験装置ならびに電流値、チップ間電圧値、電極加圧力などの測定方法は第 1 報⁴⁾で示した通りである。

試片表面でのインデンテーションの測定は、Fig. 1 に示すように、可動台上に接合された試験片を固定し、可動台を移動させながら、固定台に取り付けられたマイクロメーターにより測定している。なお、一部の試験片に対しては、表面粗さ計による確認を行った。

使用した電極は、R 型電極 (100R)、CF 型電極 (先端径: 4.5 mm, 5.5 mm, 6.1 mm, 7.5 mm) および F 型電極 (22 mm ϕ) の 6 種類である。

Fig. 1 Measuring method of the indentation.

*1 本報告における十分な接合強さとは、引張剪断試験において、破断形態がティア破断を呈する接合部に対して使っている。

Table 1 Chemical composition of the specimens.

Material	Chemical composition (wt%)									
	C	Si	Mn	P	S	Al	N	Ni	Cr	Cu
SPCC 0.8mm	0.045	0.001	0.26	0.011	0.012	0.001	0.0022	0.030	0.017	0.040
SPCC 1.0mm	0.041	0.030	0.16	0.016	0.009	0.001	0.0011	0.015	0.012	0.012

Material	Chemical composition (wt%)			
	Mg	Cr	Si + Fe	Cu, Mn, Zn
5052H34 1.0mm	2.20~2.80	0.15~0.35	0.45	<0.1

(a) Steel (SPCC)

(b) Aluminium alloy 5052 H34

Fig. 2 Shape and size of the specimen for testing of tensile shear strength.

供試材料は、板厚 0.8 mm, 1.0 mm の冷間圧延鋼板 (SPCC) および板厚 1.0 mm の Al 合金 (5052H34) の 3 種類で、各々の組成は Table 1 に示す通りである。なお、実験に際し、冷間圧延鋼板の試片表面は脱脂処理を行い、Al 合金は両面ワイヤブラッシング処理後脱脂処理を施している。又、引張剪断試験用の試片形状、寸法は Fig. 2 の通りである。

3. R 型、CF 型電極使用時の試片表面の圧痕 (インデンテーション)

本接合法において、軟鋼板を R 型および CF 型電極を用いてスポット溶接を行った時の試片表面のインデンテーションと溶接電流値 (I_p) および電流密度 (i_a) の関係を示したものが Fig. 3, Fig. 4 である。なお、図中の黒塗りプロットは引張剪断試験においてティア破断を呈したことを示している。さらに、この Fig. 4 において、ティア破断を呈し始める電流値におけるインデンテーションとチップ先端径 (D_e) の関係を示したものが Fig.

Fig. 3 Influence of the shape of the electrode tip and peak current on indentation value.

Fig. 4 Influence of peak current on indentation under various electrode tip diameters.

Fig. 5 Relation between electrode tip diameter and indentation value at the welding with the current value beginning to saturate in tensile shear strength.

Fig. 6 Photograph of the surface of welded joint by using R type electrode tips. ($I_p=51.7$ kA, SPCC 1.0 mm)

5である。これらの図からわかるように、R型電極を用いたものの方が電流値の増大に対するインデンテーションの増大が小さく、又、CF型電極を用いた場合、引張剪断試験において十分な強さを有し、ティア破断を呈し始める接合部におけるインデンテーションは、電極先端径の大きなものを用いる方が小さくなっている。又、いずれの条件のものでも強さを十分に有し、ティア破断を呈し始める電流値でのインデンテーションは、板厚の5%程度(0.04~0.05 mm)であり、従来のスポット溶接(熱伝導形)に比べると小さくなっている。しかし、Fig. 6に示した接合部の板表面写真(R型電極、 $I_p=$

51.7 kA)からもわかるように、圧痕は目視で十分わかり、外観を重視する箇所にはまだ不十分である。

以上のことより、本接合法における圧痕生成の要因として以下の点が考えられる。

- 1) 電極一板間接触抵抗による発熱によって生じる試片表面の軟化
- 2) 電極周辺部への電流集中
- 3) 試片に働く加圧力^{*2}

上記要因1の試片表面の軟化は、特に電極の周辺部が試片に当たっている箇所(Fig. 6参照)の発熱に伴う軟化が問題となる。この部分は電流のエッジ効果、加圧応力分布^{9,10)}による電極周辺部への電流集中により発熱が大きくなる。特にCF型電極の場合は、電極周辺部の応力が高くなるため、この傾向が顕著である。又、要因3の加圧力は、一般的には溶接中の実加圧力が問題となるが、本方式のスポット溶接の場合、溶融層が極めて薄く(0.1 mm程度)⁴⁾熱膨張が小さく、さらに、通電中には電極を押し広げる方向に電磁力が作用するため、圧痕形成の要因となるのは通電終了時に働く加圧力つまり設定加圧力が問題となる。

つまり、板表面の圧痕を抑制するには、板表面の発熱を小さくし、かつ、試片表面に働く単位面積当りの加圧力を小さくする必要がある。本接合法においては数ms間にインパルス状の大電流を被接合材に通電するため、電極間を押し広げる方向に電磁力が働くため、加圧力を小さくすることはできない(本実験装置において、電極加圧力を3.9 kN以下にすると表面散りが増大する)。次に、板表面での発熱であるが、前報⁹⁾において示したように、電極先端径の小さな電極を用いると、板一板間電流密度に比べ、電極一板間電流密度が非常に大きくなり(例えば、板厚0.8 mmの冷間圧延鋼板を先端径3.8 mmφのCF型電極を用いて、溶接電流56 kAで接合した時、板一板間電流密度が2.0 kA/mm²であるのに対し、電極一板間電流密度が2.4 kA/mm²になる。)、板表面の発熱が大きくなり、圧痕が大きくなる。つまり、板表面の発熱を小さくするには、先端径の大きな電極を用いる必要がある。しかし、試片両側の電極ともに先端径の大きな電極を用いると、電極先端径の増大に伴い通電路が広がってしまい、接合時に大電流が必要となり、装置上の制約および前述した電磁力(電流値の2乗に比例)の問題が生じる。さらに、前報⁹⁾で示したように、電極周辺部の発熱に伴って生じる試片表面への電極の溶着が生じる電極一板間電流密度(溶接最大電流値を電極一板間通電で除した値)が電極先端径にかかわらず(先端径が4.5 mmから7.5 mmの間)一定であることより、CF型電極で先端径だけを大きくしても電極周辺部への電流集中に伴う発熱を小さくできない。

一般に、試片表面の圧痕が問題になるのは片側の面(表面に出る側)の場合がほとんどであるので、圧痕を抑制したい側の電極にF型電極を用い、電極一板間電流密度の低減ならびに電極周辺部への電流集中の低減および試片に働く単位面積当りの電極加圧力の低減を図り、反対側の電極には通電路確保の目的でR型電極(100R)を用いて接合を行った。以下、その結果について述べるとともに考察を加える。

*2 本研究で用いた加圧系は空圧式であり、すり合せによるガイドを設けてあり、ガタ付き等はなく、又、ロードセルによる通電中の加圧力測定から応答性が十分に早いことを確かめている。

4. R型-F型電極組合せによる接合部形成と圧痕

R型電極同志およびR型電極(100R)-F型電極組合せで、板厚 1.0 mm の冷間圧延鋼板を接合した接合部の引張剪断強さおよび圧接径 D_b 、ナゲット径 D_n を示したものが Fig. 7, Fig. 8 である。これらからわかるように、R型-F型電極を組合せて接合した場合は、接合部が形成され始める電流値が高くなり、R型電極同志で接合した場合と同程度の継手強さを得るには 10 kA 程度高い電流値を必要とするが、強さの飽和値はほぼ同等で、継手強さにおいてはR型-F型電極組合せの接合でも問題はないと考えられる。又、この時の接合部表面の圧痕(インデンテーション)を示したものが Fig. 9, Fig. 10 である。Fig. 9 は、R型-F型電極組合せで接合した時の各電流値におけるR型電極側、F型電極側のインデンテーションを示したもので、Fig. 10 は、F型電極側の試片表面の圧痕形状を示したものである。R型電極側のインデンテーションが 0.05 mm 程度とR型電極やCF型電極を用いて接合したものとあまり変わらないのに対し、F型電極側の圧痕は 0.01 mm 以下と非常に小さくなっている。又、F型電極側の圧痕は Fig. 10 から

Fig. 7 Relation between tensile shear strength and peak current at using a couple of R type electrode tips or R type and F type electrode tips combination.

Fig. 8 Relation between bond and nugget diameter and peak current at using a couple of R type electrode tips or R type and F type electrode tips combination.

Fig. 9 Relation between indentation and peak current at using R type and F type electrode tips combination.

Fig. 10 Shape of indentation on F type side under various values of welding current.

わかるように、溶接電流値が高い場合にはへこみとして生じているが、溶接電流値が低い場合には逆にふくらみとして生じている。

Fig. 11 は、R型-F型電極組合せでスポット溶接をした時の板表面写真である。これからもわかるように、R型電極側の圧痕は Fig. 6 に示したR型電極を用いた接合部の圧痕に比べ、インデンテーションの大きさは同程度 (0.05 mm) であるが、目視では判別しにくくなっている。さらに、F型電極側の圧痕は、目視ではほとんどわからない程小さくなっている。この写真は溶接最大電流値 I_p が 56.0 kA のものであるが、電流値がさ

Fig. 11 Photograph of the surface of welded joint at using R type and F type electrode tips combination. ($I_p=56.0$ kA, SPCC 1.0 mm)

らに高いものでは、インデンテーションの大きさはさほど変わらないが、表面チリの発生による傷が残るようになる。

このように、本接合法で軟鋼板をR型-F型電極組合せでスポット溶接を行った場合、接合強さを十分に有し(R型電極やC F電極を用いて溶接した場合と同程度)、F型電極側の圧痕が0.01 mm以下と非常に小さな接合部を容易に得ることができる。

5. 圧痕抑制法の Al 合金板への適用

前節において、軟鋼板を対象にR型-F型電極組合せで接合することにより、継手強さを十分に有し、かつ圧痕の非常に小さな接合部を容易に得ることができることを示したが、本節では、軟鋼板より板表面の軟化度合が大きく、圧痕の抑制がより困難な Al 合金板に対し、軟鋼板と同様にR型-F型電極組合せで接合を行った場合の結果を以下に示す。

Fig. 12 は、R型電極同志およびR型-F型電極組合

Fig. 12 Relation between tensile shear strength and peak current at the welding to the Al alloy sheets using a couple of R type electrode tips or R type and F type electrode tips combination.

Fig. 13 Relation between indentation and peak current at using R type and F type electrode tips combination.

せで接合した時の引張剪断強さを示したものである。これからわかるように、R型-F型電極組合せで接合した接合部の引張剪断強さの飽和値はR型電極を用いて接合したものに比べ、多少低くなっているが、90 kA においてほぼ同程度の強さを有しており、十分な接合強さが得られている。

Fig. 13, 14, 15は、このR型-F型電極組合せで接合した時の試片表面のインデンテーション (Fig. 13) および表面状態 (Fig. 14, 15) を示したものである。これからわかるように、R型電極側のインデンテーションは0.05 mm 以上と大きくなっている。特に、100 kA 以上

Fig. 14 Shape of indentation on F type side under various values of welding current at using R type and F type electrode tips combination.

Fig. 15 Shape of indentation on R type side under various values of welding current at using R type and F type electrode tips combination.

R type side

F type side

Fig. 16 Photograph of the cross-section and the surface of welded joint at using R type and F type electrode tips combination. (I_p = 90.8 kA, Al alloy 1.0 mm)

になるとインデンテーションの増大度合が大きくなっており、これはF型電極側でも同様の傾向にある。F型電極側のインデンテーションは最大電流値が60 kA~90 kAにおいて、0.01 mm程度と小さくなっている。Fig. 16は、最大電流値が90.8 kAで接合した接合部の断面写真ならびに表面写真で、これからわかるように、R型電極側は圧痕がよくわかるのに対し、F型電極側は

圧痕が目視ではわからない程度(0.012 mm)である。なお、F型電極側の同心円状の痕跡は、F型電極の機械加工痕である。又、接合部には溶融層(ナゲット)が形成されているが、このナゲットはR型電極側に片寄っており、F型電極側で通電路が広がっていることを示唆している。なお、この接合部の引張剪断強さは3.3 kN(340 kgf)と十分な強さを有している。

6. 結 論

本研究では、軟鋼板およびAl合金板を対象に、本接合法における圧痕の形成を支配する因子の検討、ならびにその抑制方法について実験的検討を行った。以下にその結果の要約を示す。

1) 溶接電流値の増大に伴い、インデンテーションは大きくなる。これは、電極一板間の接触抵抗による発熱が電流値の増大に伴って大きくなるためである。

2) R型電極を用いて接合したものより、CF型電極を用いて接合したものの方が、電流値の増大に伴うインデンテーションの増大が大きい。これは、CF型電極を用いて接合を行う方が、電極周辺部への電流集中度が大きいためである。

3) 電極先端面における単位面積当りの加圧力を等しくして接合した場合、電極先端径の大きな電極を用いて接合する方が、インデンテーションの小さな接合部が得られる。

4) R増-F型電極組合せで接合することにより、F型電極側で、電極一板間電流密度、電極周辺部への電流集中および試片に働く単位面積当りの電極加圧力が低減され、接合強さが十分で、かつF型電極側のインデンテーションが0.01 mm程度と非常に圧痕の小さな接合を容易に得ることができる。

参 考 文 献

- 1) 安藤, 中村: 「点溶接における通電加熱, 冷却に関する熱時間定数について」溶接学会誌, 26-9, 12 (1957), 558-563, 742-747
- 2) W. Spraragen, M.A. Cordovi: "Mechanical Characteristics of Resistance Welds in Plain Carbon Steels", W.R.S. (in W.J.), Vol. 23 (1944), No. 7, p. 305-s-340-s
- 3) K.C. Wu: "Electrode Indentation Criterion for Resistance Spot Welding", W.R.S. (in W.J.), Vol. 47 (1968), No. 10, p. 472-s-478-s
- 4) 仲田, 西川, 藤本, 玉井「高電流密度・短時間通電方式スポット溶接法とその特徴・特質—高電流密度・短時間通電方式スポット溶接の研究(第1報)」本誌2-1 (1984), p. 137-142
- 5) 仲田, 藤本, 玉井: 「接合部形成現象の検討および接合条件の選定—高電流密度・短時間通電方式スポット溶接の研究(第2報)」本誌4-3 (1986), p. 581-586
- 6) 中根, 善利: 「圧痕のつかない電極チップ」溶接技術 1978年 3月号, p. 20-23
- 7) 平塚, 奈良岡: 「圧痕防止を目的としたシリーズスポット溶接の応用」溶接技術, 1970年, No. 6, p. 71-78, No. 7, p. 79-83
- 8) 佐藤, 田中: 「薄板の抵抗溶接におけるひずみ対策」溶接学会, 抵抗溶接研究委員会資料, RW-115-77, 溶接技術, 1977年, 3月号, p. 32-37
- 9) 大塚: 「点溶接における加圧時の応力分布」電溶機部会, 抵抗溶接機小委員会, 1968年, EW-17-110
- 10) J.L.A. Tajinh著, 佐藤訳: 「弾性接触論」現代工学社, 1974年, p. 33-46