加圧システムの設計・構築とその動特性*

—高電流密度短時間通電方式スポット溶接における加圧系の最適化 (第1報)—

藤本 公三**, 仲田 周次**, 西川 雅弘**

Design and Construction of Loading System and its Dynamic Property*

—Optimization of Loading System in High-Current Density Spot Welding (1st report)—

by Kozo Fujimoto**, Shuji Nakata** and Masahiro Nishikawa**

In a high-current density spot welding, the large electromagnetic force yields between electrodes. This electromagnetic force bring about the fluctuation of the loading force, and then, it has some adverse effect on weldability. The fluctuation of the loading force is changed by stiffness, friction, or response of a loading system. In this report, we designed a loading system which is able to control the movement of an electrode, and clarified the dynamic property in turning on electricity. The loading force is affected by the electromagnetic force and the thermal expansion. The electromagnetic force increases proportionally to the square of the maximum current in the reverse direction of loading, and as a consequence, it reduce the actual loading force to the specimens. The electrode movement is controlled by a stopper and a spring assembled into a loading system. In a rigid loading system with large spring constant, the electrode movement by the electromagnetic force is restrained, and so the loading force is increased by the thermal expansion. The other hands, in a loading system with small spring constant, the loading force is decreased, because the electrode movement caused by the electromagnetic force is larger than the thermal expansion.

Key Words: High current density, Spot welding, Loading system, Optimization, Electromagnetic force

1. はじめに

通電時間が数 ms から十数 ms の高電流密度短時間通電方式のスポット溶接では、板-板界面の接触抵抗による局部発熱により溶融層が薄く、圧痕の小さな接合部が形成される¹⁻⁴⁾。しかし、この溶接法においては、大電流を短時間に通電するため、上下の電極アームに反対方向の電流が流れ、電極アームを押し広げる方向に電磁力が働く。このため、通電中の加圧力変動は材料の熱膨張と電磁力の両者を考え併せる必要がある。特に電磁力による加圧力の変動が大きく、加圧系の摩擦が小さく外力に対して電極チップが即応して動くと、電磁力による電極チップの移動より材料の熱膨張量が小さくなり、溶接部に働く加圧力が低下する。この加圧力変動は溶接結果に大きく影響することが考えられる。

本研究では、加圧特性と接合性の関係を明確にし、本溶接法における最適な加圧システムについて検討することを目的としたものである。通電中の加圧力変動は、加圧系の剛性、摩擦、応答性等により変化する。このため、加圧特性と接合性の関係を明確にするには、これらを考慮した加圧系の構成ならびに特性を明確にする必要がある。そこで、本報では、電極チップの動きを規制できる加圧系を設計し、通電時の電磁力および材料の熱膨張による加圧系の動特性を明確にした。

2. 実験装置および供試材料

本研究で用いた溶接電源は、Fig. 1 に示すコンデンサ蓄勢式電源で、溶接はコンデンサに充電した電荷をイグナイ

Fig. 1 Electrical circuit diagram in condenser type resistance welding apparatus.

Fig. 2 Shape of current wave used in the experiment.

る。溶接電流波形は、コンデンサ容量 (C) と変圧器の巻数比 (n) を変えることにより任意に得られる。本研究では、Fig. 2 に示す通電時間 t_f が 4.2 ms, 16.0 ms の電流波形を用いて実験を行った。

Fig. 3 は本研究のため構築した実験装置の電極周りの概

*原稿受付 平成7年5月22日 昭和53年度春季全国大会で発表

**正 員 大阪大学工学部 Member, Osaka Univ. Faculty of Eng.

Fig. 3 Electric supply and measuring system for electrode force, welding voltage and current.

略図ならびに加圧力、電極間電圧、板-板間電圧、溶接電流値の測定方法を示したものである。電極チップへの給電は、電極ホルダーに一体成形した銅板（10 mm 厚）をステンレス板（10 mm 厚）で保持した構造とした。また、この銅板からトランスまでは銅編線を用いている。銅板をステンレス板で保持したのは、銅板だけでは電磁力により曲がってしまい、さらに電極チップの位置ずれが生じてしまうためである。加圧力は下部電極チップの下にロードセルを設置し、通電時における加圧力変化を測定している。また、溶接電流値は、トロイダルコイルにより測定している。

供試材料は、板厚1.0 mm の Al 合金 5052H34 材 (Mg ; 2.20~2.8 mass%, Cr ; 0.15~0.35 mass%, Si+Fe ; 0.45 mass%, Cu, Mn, Zn ; 0.10 mass%以下) を用いた。実験に際し、Al 合金には両面ワイヤブラッシング処理と脱脂処理を施している。

溶接に用いた電極チップは直径22 mm の R 型電極 (100R) で、材質はクロム銅である。

3. 加圧系の構成とその静的特性

本研究では、通電時に働く電磁力による加圧力変化の接合性への影響を解明するため、加圧系を Fig. 4 に示すように門型構造にし、可動部をストッパーで止め、ばねを挿入することにより電極チップの動きを規制できる構造にしている。なお、ストッパーにはボルトを用いており、被溶接材を電極間に挿入し、加圧した状態で、ロードセルの出力により加圧力をモニターしながら締め付けている。また、電極上部の可動部および電極下部の電極ホルダーは高精度にすりあわせ加工し、軸の偏芯が無く低摩擦になるようにしている。

Fig. 5, Fig. 6 は各々用いたばねの形状とこれらのばねを用いたときの加圧系のばね定数を調べたものである。なお、加圧系のばね定数は、ばねを挿入した加圧系において、空

Fig. 4 Loading system in the welding machine.

圧シリンダーの空気圧を変化させ、その時のロードセルによる加圧力値と Fig. 4 に示したばねを加圧する治具 A の上面の変位量を差動トランス型変位計で測定し (Fig. 6) その傾きから算出した、これより、各加圧系のばね定数は、

加圧系 II ; 9.8 kN/mm

加圧系 III ; 61.3 kN/mm

加圧系 IV ; 81.0 kN/mm

である。なお、加圧系 I の変位は空圧シリンダを含んだ系の変位となり、本実験では測定していない。

Fig. 7 はシリンダの空気圧を増減させたときの加圧力の変化を求めた結果である。なお、空気圧をかけていない時において0.8 kN の加圧力を示しているのは、本装置の可動部の重量が荷重測定センサ（ロードセル）にかかっているためである。加圧力の変化がヒステリシスを示すのは加

	r_a	r_i	h	b
Spring A	30	15	5	1.5
Spring B	30	15	20	7

(dimension: mm)

	Stopper	Spring
Loading system I	X	X
Loading system II	○	A
Loading system III	○	B
Loading system IV	○	X

Fig. 5 Shape and size of spring used in loading system.

Fig. 6 Relation between load and displacement in each loading system.

圧系の摩擦のためであり、本装置の加圧系における摩擦 $2\mu\alpha$ は、この計測結果より 0.8 kN であることが分かる。

4. 加圧系の動特性

スポット溶接機では、Fig. 8 に示すように、溶接機の上下の給電アームに反対方向の電流が流れたとき、電極チップを押し広げる方向に電磁力 F が働く。ここで、溶接機のアーム長を L 、アーム間隔を D とすると、アーム部には

$$F_w = \frac{\mu I^2}{4\pi} \ln \left\{ \frac{4L}{d} \frac{1}{\sqrt{(L/D)^2 + 1}} \right\} \quad (\text{N}) \quad (1)$$

なる電磁力が働く⁵⁾。 μ は空気中の透磁率である。

Fig. 7 Relation between air pressure and load.

Fig. 8 Explanation on the electromagnetic force due to welding current.

本実験で試作した加圧系において、通電時の電磁力が加圧力にどのように作用するかを確認するため、Al 合金板を用いて通電実験を行った。Fig. 9, Fig. 10 は各々最大電流到達時間 t_{pi} が 1.6 ms , 4.0 ms の電流波形で Al 合金板(板厚 1.0 mm) を各加圧系を用いて溶接した時の加圧力変化とその時の電流波形を示したものである。なお、この実験における初期設定加圧力は 4.9 kN である。これらから分かるように、最大電流到達時間が 1.6 ms の電流波形を用いて溶接したとき、加圧力が最大になる時間は通電開始後約 2 ms で、電流値が最大になる時間 (1.6 ms) より少し遅れている。また、最大電流到達時間が 4.0 ms の電流波形を用いて溶接したときは、加圧系 I, II では加圧力が最大になる時間は電流値が最大になる時間とほぼ一致しているが、加圧系 III, IV では、加圧力が最大になる時間は通電開始後 6 ms であり、電流値が最大になる時間より約 2 ms 遅れている。

Fig. 9 Transition of electrode force in welding process. $t_{pi}=1.6$ ms.

Fig. 10 Transition of electrode force in welding process. $t_{pi}=4.0$ ms.

Fig. 11 Relation between square of peak current I_p and electrode force P .

る。また、両電流波形ともに加圧系 I, II では減衰振動しており、加圧系 III, IV では加圧力が最大を提示した後、設定加圧力へ減衰している。

以上に示した加圧力変化を示す原因について考察する。

加圧系 I においても電流値が最大となる時間近傍において、加圧力が極端に大きくなっており、 $t_{pi}=1.6$ ms, $I_p=91.0$ kA で $P=10.8$ kN, $t_{pi}=4.0$ ms, $I_p=65.9$ kA で $P=7.8$ kN であり、電極チップの動きを規制した他の加圧系での最大電流値到達時間でのロードセルからの出力値と同じである。これは、加圧力を下部電極チップ下にロードセルを置いて測定しているために、アームに働く電磁力によって電極チップを上下方向に押し広げる力が働き、ロードセルにこの電磁力による力が加わって増大したものである。Fig. 11 は、加圧系 I での最大電流値の 2 乗 I_p^2 と加圧力の最大値との関係を示したものであるが、これから分かるように、加圧力の増分と最大電流値の 2 乗とは比例関係にあり、

$$P - 4.9 = 6.8 \times 10^{-10} I_p^2 \quad (\text{kN}) \quad (2)$$

の関係になっている。本研究で使用した溶接機のアーム長 L 、アーム間隔 D 、給電アーム厚さ b は各々、 $L=260$ mm, $D=160$ mm, $d=10$ mm であり、(1)式によりアーム部に働く電磁力 F_w は

$$F_w = 3.6 \times 10^{-10} I^2 \quad (\text{kN}) \quad (3)$$

となり、ロードセルにより測定された最大電流到達時間における加圧力は、設定加圧力に通電による上下の電極アームに働いた電磁力 ($2F_w$) が加算された値となっていることがわかる。しかし、これはロードセルに働いている力であり、実際に被溶接材にかかっている加圧力ではない、通電中に被溶接材に働いている加圧力は、電流値が最大となった以降の加圧力変化ならびに電磁力による電極チップの動きと被溶接材の熱膨張の両者を考え併せる必要がある。

材料の熱膨張を考えると、ナゲット部は完全に溶融しており、板厚方向以外は材料自身で熱膨張が拘束された状態であり、板厚方向以外への熱膨張はなく、ナゲットの体積膨張がすべて板厚方向に現れると仮定すると、材料の板厚方向への熱膨張 Δt は、

$$\begin{aligned} \Delta t &= 3\alpha T \times 2t \\ &= 3\alpha \left(\frac{P_n}{2t} T_n + \frac{2t - P_n}{2t} T_a \right) \times 2t \end{aligned} \quad (4)$$

Table 1 Estimation of the quantity of the thermal expansion of the weld and displacement due to the electromagnetic force.

$t_{pi}: 1.6$ ms $I_p: 91.0$ kA

	P_n (mm)	Δt (mm)		Δl (mm)
		$T_a=623$ K	$T_a=823$ K	
Loading system I	0.77	0.084	0.11	
Loading system II	0.66	0.081	0.10	0.610
Loading system III	0.56	0.078	0.10	0.098
Loading system IV	0.42	0.074	0.10	0.067

$t_{pi}: 4.0$ ms $I_p: 65.9$ kA

	P_n (mm)	Δt (mm)		Δl (mm)
		$T_a=623$ K	$T_a=823$ K	
Loading system I	0.97	0.090	0.11	
Loading system II	0.84	0.086	0.11	0.300
Loading system III	0.70	0.082	0.11	0.048
Loading system IV	0.60	0.079	0.10	0.033

但し α : 固体の線膨張係数

P_n : 溶け込み深さ

t : 板厚

T : 溶接部の平均温度

T_n : 溶融部 (ナゲット) の温度

T_a : 溶融部位以外の材料の平均温度上昇

で近似される⁵⁾。なお、本実験において、電極と板間の発熱に伴う電極の膨張に関しては、電極を水冷しており、電極-板界面の顕著な温度上昇が接合部断面写真から認められなかったため、ここでは考慮していない。また、個体から液体への相変化に伴う体積変化が数%程度あるといわれているが、ここでは膨張量を近似的に取り扱っており、線膨張係数の温度依存性を含めて考慮していない。この(4)式を用いて十分強度を有しており、かつナゲットが十分に形成されている電流値 (最大電流到達時間が1.6 ms の電流波形で溶接したとき; $I_p=91.0$ kA, 4.0 ms の電流波形で溶接したとき; $I_p=65.9$ kA) において、各加圧系での熱膨張を考えると Table 1 に示すようになる。なお、この実験は板厚1.0 mm の Al 合金に対して溶接を行ったものであり、各物理定数値は $\alpha=29 \times 10^{-6}$, $t=1.0$ mm, $T_n=973$ K とした。また、溶融部位外の平均温度 T_a は623 K と823 K の2種類の温度で求めた。これは電極-板間温度上昇がわからないため、平均温度が決められないためである。また、最大電流到達時の電磁力 (Fig. 9, Fig. 10 の $di/dt=0$ の時のロードセルからの出力をもとに算出) を加圧系のばね定数により電極チップの移動に換算した値 Δl を求めて表に掲載した。

表から分かるように、電磁力による電極チップの動きは通電電流値の高い最大電流到達時間が1.6 ms の電流波形を用いて溶接したときの方が大きくなっている。

最大電流到達時間が1.6 ms, 4.0 ms のどちらの電流波形においても、加圧系 I, II では電磁力による電極チップの移動量 Δl が熱膨張量 Δt より大きくなっており、通電後、被溶接材に働く加圧力は低下するものと考えられる。このため、電流値が最大となった後、電流値の低下とともにロードセルに働く加圧力は低下し、減衰振動となっている。一方加圧系 III, IV では、電磁力による電極チップの移動量 Δl より熱膨張量 Δt の方が多少大きくなっている。ロード

セルに働いている加圧力からもわかるように、最大電流到達時点以降において加圧系Ⅰ，Ⅱのような急激な低下ならびに減衰振動は呈しておらず、最大電流到達時間が1.6 msの電流波形では単調減衰となり、最大電流到達時間が4.0 msでは、最大電流到達以降もロードセルに働く加圧力の増大が見られる。これは熱膨張量が電磁力による電極チップの移動量より大きくなっているためであると考えられる。

以上に示すように、加圧系の摩擦やこじれが小さく、外力によって電極チップが即応して動くと、通電中、加圧力が大きく低下する。このことは、最大電流到達時間が短いほど顕著である。また、加圧系をストッパーで止め、スプリングを挿入することにより電極チップの移動を規制する、すなわち加圧系のばね定数を大きくすると通電期間中の加圧力低下を抑制することができる。しかし、加圧系の拘束を大きくし過ぎると、材料の熱膨張により加圧力が増大することになる。

5. 結 論

本論文では、剛性が高く、ストッパーとばねにより電極チップの動きを規制できる加圧系を設計し、通電中の電磁力およびそれによる加圧力変動の測定を行い、加圧系の動特性を明確にした。

1) 通電中、電流値の2乗に比例した電磁力が電極チップを押し広げる方向（加圧力の作用方向と反対方向）に働く。

2) 通電初期では、材料の熱膨張がほとんどないため、最大電流値を呈する時間までは、電磁力により加圧力が減じられる。

3) 最大電流を呈する時間後の加圧力は加圧系により変化し、次のようになる。

ばね定数の大きな加圧系では、電磁力による電極チップの動きが規制されるため、電磁力による電極チップの動きより熱膨張の方が大きくなり、接合中の加圧力が大きくなる。

ばね定数の小さな加圧系では、電磁力による電極チップの動きの方が熱膨張量より大きくなるため、接合中の加圧力は設定加圧力より低くなり、減衰振動する。

参 考 文 献

- 1) 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)—”，溶接学会論文集，Vol. 2，No. 1，pp. 137-142 (1984)。
- 2) 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)—”，溶接学会論文集，Vol. 4，No. 3，pp. 581-586 (1986)。
- 3) 仲田，藤本，玉井；“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)—”，溶接学会論文集，Vol. 5，No. 1，pp. 64-69 (1987)。
- 4) 奥田，町田，出田；“高電流密度・短時間通電方式のスポット溶接の現状—新しい抵抗溶接現象(その1)—”，溶接学会誌，Vol. 56，No. 2，pp. 105-111 (1987)。
- 5) 溶接学会抵抗溶接研究委員会編；「抵抗溶接現象とその応用(I)」，生々文献サービス，1982，p. 56-59。