◀ 資料 ▶

抵抗溶接現象

Resistance Welding Phenomenon

抵抗溶接現象の基礎*

西 口 公 之**

Fundamental Phenomena of Resistance Welding*

by Kimiyuki Nishiguchi**

1. はし が き

抵抗溶接法については 接手の種類・形式に応じて点溶接法、プロジェクション溶接法、シーム溶接法、アプセット・バット溶接法、フラッシュ・バット溶接法など種々なる方式のものが採用されている。したがって溶接現象に関しても それぞれの接合方式に応じて様相が異なり、また個々の接合方式に特徴的な現象も少くはない。これら抵抗溶接における諸現象については 今日までに数多くの研究成果が蓄積されて 明確となってきた基礎的な事項も多いが、早急に解明の待望されている重要問題も各所に散在している現状である。

このような事情から これら抵抗溶接現象を一括して論述するのははなはだ困難ではあるが、溶接方式は異なっているけれども 基本的には類似している現象も少くはない。その最も重要なものは 加熱機構についてである。たとえば 点溶接法など現在各方面に活用されている重ね抵抗溶接法は加圧下における融接法であるに対し、アプセット・バット溶接法は高温圧接法であって、溶接部はお互に異なる接合状態を示すが、その加熱過程については 全く同じ発熱機構——材料の固有抵抗による発熱を利用——によっている。また フラッシュ・バット溶接では フラッシュ過程における端面形状ならびに蓄熱現象が主要な役割をになっていることは言うまでもないが、アプセット過程における発熱現象については 点溶接などの場合と基本的にはならぬ異ならない。したがって まず 溶接方式のいかにかわらず理解しておくべき溶接部の加熱・冷却現象を熱伝導論的な観点から取り上げることとする。この問題を論考するに適した典型的な溶接方法は点溶接法であるから、ここでは 簡明に

解説を進めるため 点溶接部における熱輸送現象について述べることにする。また 点溶接にともなう諸現象の中には類似した溶接方法にも適合する共通的な現象がかなり見受けられるので、これらのうちの実用的な問題に関連した若干の事項を重点的に選択して解説する。このほかの溶接方法についても興味ある現象が多くあるが、紙面の都合もあるので、フラッシュ現象のみを紹介するに止める。

2. 点溶接部における発熱と熱伝導の基礎

概念——熱時間定数

点溶接においては 溶接結果を左右する主要な制御要素として 電流、通電時間、加圧力 の3者が挙げられる。このうちに加圧力についての考察は後に述べるとして、まず 適当な加圧下においてナゲット形成のために満足しなければならない 電流と通電時間との相関関係について考えてみよう。この問題に関しては すでに安藤、中村の報告において 熱伝導論的な立場から明快に基礎概念が提示されている¹⁻²⁾。すなわち 熱時間定数なる物理量を基準として、被溶接材の材質あるいは板厚などが異なる場合の電流および通電時間選定の目安を相似則によって表示している。そこで その論述の要点を抜粋して紹介することとする。

さて 点溶接は Fig. 1 にみるように電極間に板をはさんで適当時間通電することによって達成されることは言うまでもないが、通電にともなう 電極・板間、板・板間の接触状態が刻々に変化し、また温度上昇のために板の固有抵抗も変化するの、電流分布ならびにその密度も一定ではない。一方 電極端自身の温度も 熱の流入にともなう後述するように上昇するなど、点溶接部において現実には生じている現象をもうらして解析することは困難である。そこで つぎの仮定を設けて 考

* 原稿受付 昭和43年2月13日

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

Fig. 1 点溶接

察の基準となる熱時間定数を求めている。

(1) 電極と板とは Fig. 1 (a) にみるように平面接触をしており、この接触面積は時間的に変化しない。

(2) 熱の伝導は電極の方向 (x 方向) へのみとする。

(3) 板と電極との境界面の温度は零度に保持されているものとする。

(4) 電流は板中を Fig. 1 (a) の点線内に等斉に流れるものとする。

(5) 接触抵抗は無視する。

(6) 熱伝導度、比熱などは温度に無関係に一定であるとし、固有抵抗 ρ は $\rho = \rho_0(1 + \alpha\theta)$ で示されるものとする。(ρ_0 : 常温の固有抵抗, α : 抵抗の温度係数, θ : 温度上昇)

2. 1 一次元熱伝導の基本式、定常状態における板の温度分布

Fig. 1 (a) にみるように、板厚が比較的薄い場合には仮定 (2) に挙げたように通電によって生じた板中の熱はその大部分が電極方向 (x 方向) に伝導する³⁾。したがって溶接部の熱伝導に関しては、抵抗の温度係数が無視できる場合には

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\rho_0 \delta^2}{Jc\sigma} \quad \dots\dots(1)$$

[k : 熱拡散率, δ : 電流密度, J : 4.2 Joule/cal, c : 比熱, σ : 密度]

仮定 (6) に示す抵抗の温度係数を考慮に入れる場合には

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\rho_0 \delta^2}{Jc\sigma} (1 + \alpha\theta) \quad \dots\dots(2)$$

に基づいて考察を進めればよい。上に示すところは通電中の熱伝導についてであるが、通電を停止した後の冷却現象については

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad \dots\dots(3)$$

によればよい。

さて先に挙げた仮定条件のもとに通電した場合、時間が十分経過した定常状態における温度分布は抵抗の温度係数を無視すると、(1) 式から

$$\rho_0 \delta^2 x = -J \cdot K \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad [K: \text{熱伝導率} = k \cdot c\sigma] \quad \dots\dots(4)$$

で示され、これに $x = x_0$ において $\theta = 0$ なる条件を入れて解くと

$$\theta = \theta_{m0} \left(1 - \frac{x^2}{x_0^2}\right), \quad \theta_{m0} = \frac{\rho_0 \delta^2 x_0^2}{2JK} \quad \dots\dots(5)$$

となる。この温度分布は Fig. 1 (b) にみるように中心 0 点の温度を θ_{m0} とするパラボラである。

つぎに抵抗の温度係数を考慮した場合の定常状態における温度分布は (2) 式からつぎのように求められる。

$$\rho_0(1 + \alpha\theta) \delta^2 = -JK \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad \dots\dots(6)$$

$x=0$ において $\partial \theta / \partial x = 0$, $x=x_0$ において $\theta=0$ なる条件を (6) 式に入れて解くと

$$\theta = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\cos r x}{\cos r x_0} - 1 \right), \quad r = \sqrt{\alpha \rho_0 \delta^2 / JK} \quad \dots\dots(7)$$

点溶接においてはナゲットの形成される板中心部の温度が問題となるが、電流密度 δ = 一定では (5) 式にみるように θ_{m0} は板厚 x_0 の 2 乗に比例することが直ちにわかる。(7) 式の場合でも中心部の温度 θ_m はやはり x_0^2 に比例することが証明できる。この θ_{m0} (あるいは θ_m) は板厚が異なっても材料の溶融点より多少高いば一定値を想定すべきである。したがって板厚 x_0 が異なる場合には電流密度 δ は (5) 式にみるように x_0 に反比例した値を選べばよい。この考察はアブセット・バット溶接にもそのまま適用できる。

Fig. 2 はこのように板厚が異なる場合の温度分布を上述の論考に従って図示したものであって、相似の温度分布となることは云うまでもない。いま板厚の比が 1: n であるとすれば、このような相似の温度分布にす

Fig. 2 相似則

るためには δ は 1: $1/n$, 通電時間 T は 1: n^2 にすればよい。さらに付言するに電流密度 δ が 1: $1/n$ の関係にあれば、任意の時刻 t_1 における板①の温度分布が図中の点線のように示されるとき、板②においては $n^2 t_1$ なる時刻において①の温度分布と x に関して相似の温度分布となる。ここに述べた関係は基礎方程式

(1) 式に代入してみれば容易に了解されるところであるが、もちろん 抵抗の温度変化を考慮した (2) 式の場合でも完全に成立する。

上に述べるところは 材質が同じで、板厚のみが異なる場合についてであるが、つぎに 熱伝導度 K 、比熱 c 、溶融点 (したがって中心部の温度 θ_m) などの物理定数すなわち材質が異なる場合について 相似則の成立を論考してみよう。いま 板厚が同一で、①なる板の物理諸量が $c_1, \sigma_1, K_1, \rho_1, \theta_{m1}$ ($x=0$ 点の温度)；②なる板のそれらが $c_2, \sigma_2, K_2, \rho_2, \theta_{m2}$ であるとする。この場合の通電時間 T_1, T_2 ；電流密度 δ_1, δ_2 の相対的な関係は 上述の板厚の異なる場合と同様な論法によって、次のように与えられる*。

$$\frac{\rho_1 \delta_1^2}{\rho_2 \delta_2^2} \cdot \frac{K_2}{K_1} = \frac{\theta_{m1}}{\theta_{m2}}, \quad \frac{T_1}{T_2} = \frac{K_2}{K_1} \cdot \frac{c_1 \sigma_1}{c_2 \sigma_2} \quad \text{.....(8)}$$

たとえば 一例としてアルミニウム、軽合金、軟鋼を考え、その θ_{m1}/θ_{m2} が溶融温度 θ_f の比 θ_{f1}/θ_{f2} に等しいとし、物理諸定数として 室温の値を用いて 通電時間および電流密度の比を求めてみると、Table 1 の

Table 1 通電時間、電流密度の相対的關係¹⁾

	アルミニウム	軽合金	軟鋼
通電時間の比	1	1.15	7.6
電流密度の比	1	0.64	0.35

ようになる。この表を通覧するに、電流密度の比はともかくとして、通電時間の関係は実情と大いに違い違っている。たとえば 板厚 1mm では、軟鋼の A 条件の場合 10 サイクル、軽合金では 8 サイクルが推奨されている⁴⁾。筆者はこの計算値と実用条件との差異について、実用においては 後述するように軟鋼に比べて軽合金の通電時間が不当に (?) 大きく選ばれている (電流値によっては 3 サイクルでも十分なはず) ことに大きな原因があり、一方理論計算においても δ, K, ρ などの取扱いおよび電極端温度の仮定などに多少の問題があることに起因するものと考えている。

上に論考した板厚および材質の異なる場合の電流密度、通電時間に関する相似則の関係を一括して示すと、つぎようになる。

$$\frac{\rho_1 \delta_1^2 x_{01}^2}{\rho_2 \delta_2^2 x_{02}^2} \cdot \frac{K_2}{K_1} = \frac{\theta_{m1}}{\theta_{m2}}, \quad \frac{T_1}{T_2} = \frac{K_2}{K_1} \cdot \frac{c_1 \sigma_1}{c_2 \sigma_2} \cdot \frac{x_{01}^2}{x_{02}^2} \quad \text{.....(9)}$$

2. 2 加熱、冷却の熱時間定数

上に述べたところは 板厚あるいは材質が異なる被溶接材に対する溶接条件の相対的關係についてであるが、

* この関係は y, z 方向への熱伝導を考慮しても完全に成立する。 ρ, K などについては その変化の比率が両者において同一ならば成立するが、実際にはこのような関係にあるものは見当らぬので 補正を要する。

つぎに定常状態の温度分布に到達するに必要な通電時間について考えてみよう。簡単のため まず抵抗の温度係数を無視した (1) 式を解いて求めた 任意の時刻 t における x 点の温度をフーリエ級数の形で示すと、つぎのようになる。

$$\theta = \frac{32}{\pi^3} \theta_{m0} \sum (-1)^{(n-1)/2} \cdot \frac{1}{n^3} \cos \beta_n x \cdot (1 - e^{-k \beta_n^2 t}) \quad \text{.....(10)}$$

ここに $\beta_n x_0 = n \cdot \frac{\pi}{2}$, $n=1, 3, 5, \dots$

上式において、高調波分は Fig. 3 にみるように基本波に比べてその振幅は格段に小さく、しかも その

Fig. 3 基本波と高調波

時間定数 $[1/(k \cdot \beta_n^2)]$ も短い。したがって $x=0$ なる中心部附近の温度の時間変化については 基本波のみを追跡すればよい。この基本波の時間定数 τ_{10} は (10) 式にみるように

$$\tau_{10} = \frac{1}{k \cdot \beta_1^2} = \frac{4x_0^2}{\pi^2 k} \quad \text{.....(11)}$$

で示され、中心部の温度は Fig. 4 にみるように 時間に関して τ_{10} を時間定数とする指数函数的に上昇する。

Fig. 4 板の中心部の温度上昇と時間定数

抵抗の温度係数を考慮した場合の基本波の時間定数 τ_1 も上の場合と同様な方法で (2) 式を解けば、つぎのように求められる。

$$\tau_1 = \frac{4x_0^2}{\pi^2 \cdot k(1-q)}, \quad q = \frac{8}{\pi^2} \cdot \alpha \theta_{m0} = \frac{4}{\pi^2} \cdot x_0^2 \gamma^2 \quad \text{.....(12)}$$

(11), (12) 式にみるように τ_1 は τ_{10} の $1/(1-q)$ 倍であって、 δ が大きくなって $q \rightarrow 1$ となれば $\tau_1 \rightarrow \infty$

Table 2 被溶接材の物理定数と $x_0=1\text{ mm}$ の場合の熱時間定数^{2), 5)}

	単 位	銅	軽合金	アルミ	鋼
c : 比 熱	$\text{cal}/^\circ\text{C}\cdot\text{g}$	0.16	0.21	0.21	0.093
σ : 密 度	g/cm^3	7.6	2.7	2.7	8.9
ρ_0 : 固有抵抗 (20°C)	$\mu\Omega\cdot\text{cm}$	15	5.5	2.6	1.69
α : 抵抗の温度係数	$1/^\circ\text{C } 10^{-3} \times$	5.5	3.0	3.9	3.9
K : 熱伝導率	$\text{cal}/^\circ\text{C}\cdot\text{cm}\cdot\text{sec}$	0.10	0.43	0.50	0.93
$k=K/c\sigma$: 熱拡散率	cm^2/sec	0.083	0.75	0.88	1.12
θ_f : 溶 融 点	$^\circ\text{C}$	1535	660	660	1083
$\tau_{10} = \frac{4x_0^2}{\pi^2 k}$	sec	0.048	0.0053	0.0046	0.0036
	$\sim(60\sim)$	3.0 $\sim$	0.31 $\sim$	0.27 $\sim$	0.2 $\sim$
$\tau_1 = \tau_{10}/(1-q)$	sec	0.38	0.014	0.014	
($\theta_m = \theta_f$ の場合)	$\sim(60\sim)$	22.8 $\sim$	0.84 $\sim$	0.84 $\sim$	

となり, $x=0$ における温度は 実は無無限大と計算される。(詳しい計算は文献(2)参照.)

通電を停止した冷却時には発熱がないので, 熱伝導の基本式は(1)式の右辺第2項を欠いた(3)式となり, 熱時間定数は, 結局(11)式と同じ値となる。

Table 2 は 表中の物理定数を用いて 軟鋼, 軽合金, アルミニウムの熱時間定数 τ_{10} , τ_1 を $x_0=1\text{ mm}$ の場合について計算したものである。ただし τ_1 の値は板中心の温度 θ_m が溶融温度 θ_f に等しいとした場合について示している。なお 参考のため 銅の場合の τ_{10} も示している。

2. 3 交流加熱の場合の温度の変動

前項までに述べたところは 一定直流電流を流した場合の温度上昇についてであるが, 交流を流した場合には局所の温度は 発熱変化に応じて変化する。くわしい記述は省略するが, Fig. 5 は定常状態における $x=0$ 点の電流密度 δ , 発熱 ($\propto \delta^2$), 温度 θ の関係を示すもの

Fig. 5 交流加熱の場合の温度の変動

である (ただし $\alpha=0$ と仮定). この場合の温度変動の振幅の平均温度に対する比率 r は

$$r = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\omega\tau_{10})^2}}, \quad [\omega = 2\pi f] \quad \dots\dots(13)$$

と計算されている²⁾. Table 3 は $f=50$ サイクルに対しての r を計算したもので, 表には Fig. 5 の ϕ_1 の値も付記している。

Table 3 $x_0=1\text{ mm}$ に対する r, ϕ_1 の値²⁾

	r	ϕ_1
アルミニウム	0.33	19°
軽合金	0.29	17°
軟鋼	0.03	2°

3. 点溶接部における温度分布の計算と実測, 溶融金属内の挙動

2項では 点溶接部あるいはアプセット・バット溶接部における熱伝導の基礎的観念について解説したわけであるが, つぎに通電にともなう板中各部の温度分布について述べる。

3. 1 温度分布の理論計算

Fig. 6 は Greenwood⁶⁾ がコンピューターを用いて計算した点溶接部の温度分布を示す一例である。計算に当っては つぎのような仮定を設けている。すなわち

- (1) 接触抵抗は無視する。
- (2) 熱伝導率, 比熱, 固有抵抗は一定とする。
- (3) 板表面からの熱損失は無視する。

Fig. 6 の図中に記入している数字は温度上昇 $^\circ\text{C}$ を示すものである。(a) 図において 電極端周辺部および板・板接触面の周辺部に比較的温度的の高い部分がみられるのは 電流の集中のためである。

3. 2 温度分布の実測値

Fig. 7 は溶接後のナゲット部断面の顕微鏡組織の变

Fig. 6 点溶接部における温度分布の計算例

Fig. 7 実験的に求めた溶接部の温度分布 (22.9 kA, 23 cycle)

化模様から推定した等温度曲線の一例を示すものである⁷⁾。(図中に記入の数字は温度 $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 6 (b) と Fig. 7 とは 溶接条件がほぼ同一であり、両者を比較してみると 定性的には同様な傾向を示していることが認められる。しかしながら 細部にわたってはかなりの差異がみられる。これは 上記のように物理定数を一定としたことにも原因があると思われるが、電極端では電極への熱の伝わり方、板・板間の部分ではナゲット成長の過程がかなり影響しているのではないかと 筆者は考えている。ともかく このような試みはナゲット生成の考察に役立つ試みと云えよう。

3.3 ナゲット部溶融金属の運動

Cunningham ら⁸⁾は プロジェクション溶接部における溶融金属の運動を高速度写真撮影によって観察している。実験には 単一プロジェクションを用い、Fig. 8 にみるように プロジェクションの中心を通る垂直面で

切断した半板を電極ではさみ、この切断面を観察している。

Fig. 8 (a) は現実には生じている 溶融金属の流れの方向を図示したものである。この流れは電磁力のために生じたもので、アーク溶接の場合のプラズマ気流の機構と同様である。したがって 電流が(b)図の点線のように対称的に流れていれば、溶融金属の流れも 図の矢印のように対称的に生ずる。このようなナゲット部の攪拌現象はナゲット形成機構に関する研究の面からみて興味ある事項の一つであると思われる。

Fig. 8 溶融池金属の磁気攪拌

4. 通電電流値の変動の点溶接強度におよぼす影響

同一の電源に多数の抵抗溶接機が接続されていて、これらの溶接機が任意の作業条件で動作している場合には、溶接機相互の通電期間が重なり、そのために電流の低下をひき起すことがある。このような通電の重なりによる電流の低下がはなはだしい場合には 溶接強度の低下を招くことになるので、溶接機への給電設備の設計においては この通電の重なるの生ずる確率を設計上の重要要素として取扱っている⁹⁾。

いま 溶接機群のうちの特定の一台の溶接機に注目するとき、その通電期間が他機のそれと完全に重なって電流値が通電期間全体にわたって一様に低下することも起り得るが、半重なり状態が出現する場合の方が多い。この通電の半重なり状態における電流変動は他機の通電期間の大小関係にもよるが、電流変動の基本形式を示すと Fig. 9 の Mode A~D のようになる。さて

Fig. 9 通電期間中の電流変動の形式

Boice¹⁰⁾ は通電期間 T 中における実効電流すなわち $\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2 \cdot dt$ が等しければ 溶接強度におよぼす電流変動の影響の程度が等しいものと仮定して、点溶接における重なりが発生確率の問題を取扱っている。しかしながら ナゲット部における熱の蓄積を熱伝導論的な観点から考えると、Boice の与えた仮定は簡単には容認することができない。

通電期間中の電流低下の発生する位相と点溶接強度との関係については、Fig. 9 の Mode A, B の場合を対象として 橋本¹¹⁾が実験的研究を行っているが、安藤・西口¹²⁻¹⁴⁾はこれをさらに詳しく追求して、この問題をナゲット形成機構の立場から解明している。つぎにこれについて簡単に紹介する。

4. 1 軟鋼板の点溶接の場合

Fig. 10 は実験室的に Mode D の波形を作り、6500 A の基準電流に 1500 A の付加電流を 2 サイクルの期間だけ加えた場合の 溶接強度に対する付加電流の寄与を調べたものである*。図にみるように 付加電流の付

Fig. 10 付加電流を加えた位相と溶接強度の上昇

加開始時期が 8 サイクル目附近の場合に最も強度が大となっている。この時期はナゲット断面のマクロ写真観察結果より、ナゲット成長の最盛期に相当しており、この時期に電流を付加するのが最も効果的であることを示している。Fig. 11 は Mode A, B を比較したもので、付加電流の存在する期間（他機と通電の重ならない期間）が同一ならば Fig. 10 からわかるように ナゲット成長期を含む Mode A の方が常に高い溶接強度を示すのは当然である。とくに 付加期間が短い場合には

Fig. 11 溶接電流の Mode A, B と溶接強度

Fig. 12 Mode A, B, C による溶接強度の比較

その差が顕著に現われる。なお 全体の通電期間 T を 11 サイクルに選んだのは 図中の点線 O にみるように この程度の通電時間によって溶接強度がほぼ飽和に達するからである。Fig. 12 は Mode A, B, C の比較を示す図である。同一の付加電流通電期間 t_0 に対する溶接強度の大小関係は 上に述べたのと同様 ナゲット成長の最盛期前後の期間に付加電流が集積されている程度によって決まるとして明快に理解できる。

4. 2 アルミ板の場合

Fig. 13 は 通電時間と溶接強度およびナゲット径その他の関係を示す。図にみるように この溶接電流では 3 サイクル程度の通電によってすでにナゲット径は飽和に達しており、溶接強度も飽和に近づいている。そこで 通電時間 T を 3 サイクルに選び、軟鋼に対して行った Fig. 10, 11 の実験と同様な電流制御を 2S 材について行った結果が Fig. 14 である。図の Mode D の場合の強度曲線をみると、通電の後期に当る 2~3 サイクル附近に付加電流の印加位相があると 強度が顕著に増大している。この関係は軟鋼の場合 (Fig. 10) と類似しているが、その時期は 軟鋼の場合より相対的に

* 点溶接においては 溶接強度のパラッキが問題となる。軟鋼板の点溶接では R 形電極を使用する場合には 適当な一定電流値であらかじめ 300 回程度の打点を行うと、電極先端部に安定化した平坦な小突起を生じ、溶接強度のパラッキは小さくなる。しかも このように電極先端形状の安定化したものを用いると、設定電流値を変更しても しばらくの打点については このパラッキ幅はほとんど変わらない。ここに示す一連の軟鋼板に対するデータは このように電極先端を予備打点することによって安定化させた R 形電極を用いて得られたもので、グラフ上の測定点はその平均値で示している。(文献 (13) 参照。)

Fig. 13 通电時間と溶接強度，ナゲット径，圧接部径の関係

Fig. 14 Mode A, B, D による溶接強度の比較

後に移った ナゲット径および圧接部径が飽和しはじめた位相にあることがわかる。これに対する論議は省略するが、軟鋼では圧接部径が相対的に小さいので、これがあまり問題とならないのに対し、アルミニウムではナゲット径と圧接部径との相対的な寸法関係がナゲット周辺の電流密度に大きな影響を与えるからであると筆者は考えている。Mode A, B の溶接電流に対して、溶接強度の関係が Fig. 11 について述べたのと同様な特徴を示すのは、Mode D における付加電流の効果から容易に理解できる。

5. 板・板間の初期接触抵抗

Fig. 1 (a) のように電極において交流電流を流すと、電極間電圧は時間とともに Fig. 15 のように変化する⁴⁾。したがって電極間の抵抗は (b) 図にみるような変化をたどり、初期の比較的大なる接触抵抗は半サイクルも経過すればほぼ消滅してしまう。このような事実

Fig. 15 接触抵抗の変化

から実際の溶接においては、通电時間がその板の熱時間定数よりもかなり大きいので、初めの大なる接触抵抗による中心部の発熱は、通电の終りにはほとんど逃げ去っていて、ナゲット形成には役立たないのではないかと想像される。Fig. 10~14 の実験結果にみるように、通电初期の付加電流は溶接強度の向上にほとんど寄与しておらず、上の考察によく符合している。ふつうアルミニウムの点溶接では、初期接触抵抗が溶接部の形成に重要な役割をしていると云われているが、Fig. 14 はこのよう

な考えに大いに疑念を与える。

Fig. 16 は¹⁵⁾初期接触抵抗の効果を調べるために行った実験結果であって、一度予通電を行ってナゲットを形成させた後 一たん冷却し、その後改めて本通電を行った場合の溶接強度を示している。図にみるように 予通電によって かなりの溶接強度を有する程度にまでナゲット面積を拡張しておいても、本通電開始のしばらくの後には 初期接触抵抗を殺さずに通電し続けた場合の値に収れんしている。これは 初期接触抵抗による発熱が本質的に重要ではないことを示している。しかしながら

Fig. 16 予通電→冷却→本通電を行った場合の溶接強度

アルミニウム一枚板では この電流値ではナゲットの形成が困難であることも事実である。この事実ならびに上の実験結果より、板・板間の接触抵抗の存在は 電流通路を適当に制限して溶接部の電流密度の低下を阻止していることに大きな意義があるものと理解される。

6. 点溶接ナゲット内に生ずるリング模様

軽合金の点溶接において 通電時間が不必要に長い場合には ナゲット内の周辺に近い部分にリング状の模様のみられることがすでに示されているが¹⁶⁾、最近 中村・浜崎¹⁷⁻¹⁸⁾は軟鋼においても同様な現象のあることを見出し、興味ある研究を行っている。つぎにこれについて簡単に紹介する。

先に述べたように、点溶接におけるナゲット面積は通電時間の増加とともに増大してゆき、やがて飽和状態に達する。この通電時間以内でのナゲット組織はセルと

Fig. 17 リング模様を生ずる場合のナゲット断面組織 (電流: 8800 A, 加圧力 500 kg, 通電時間 19 サイクル, R 形電極)

Fig. 18 ナゲット組織の変化

かセラー・デンドライトを含む組織となる。通電時間がさらに増すと、ナゲットの外周部は通電中であるにもかかわらず凝固してしまい、溶接終了後のナゲット断面組織は **Fig. 17** にみるように 外周部にリング模様を伴ったサブストラクチャーを含まない柱状晶部分を形成し、通電終了時に溶融状態にあった中央部分のみが柱状晶内にセルまたはセラー・デンドライトを含む組織となる。

Fig. 18 は 上記の現象を図解的に示したもので、(a) は適正通電時間の場合、(b) は通電時間が過大となった場合である。通電時間を増し続けてゆくと、**Fig. 18** (b) のリング模様部分が増大してゆき、ついには ナゲット部全体が柱状晶のみの平滑界面組織となる。このようなリング模様を形成するに至る時間経過は たとえば 1 mm 厚の軟鋼に R 形電極を用いて溶接した場合、普通の溶接条件では 10~12 サイクル程度でナゲット寸法は飽和に達し、17~20 サイクル程度からは明らかに冷却過程に入り、リング模様を形成する。なお リング模様の発生時期は 同一電流値に対しては加圧力が大なるほど早くなるが、これは大なる加圧力のために早期に電流密度が低下し始めるからである。

ナゲットの周辺部に生ずるリング模様の個々のリング帯は交流電源の半サイクルに対応して生じていることが実験的に明かに証明されている¹⁷⁾。すでに 2・3 項に述べたように、交流電流では ナゲット部の温度は電源周

波の2倍の周波数で変動するから、その度毎の温度低下に対応して凝固が進むことになり、結果として 温度変動の1サイクルすなわち交流の半サイクル毎に凝固帯を生ずるのである。

Fig. 19は 電流：9200 A、加圧力：240 kgで 1 mm厚の軟鋼板を溶接した場合の通電時間と溶接強度との関係を示す曲線である。図にみるように 引張剪断強度は

Fig. 19 通電時間と溶接強度の関係

20サイクル程度も通電すればほぼ飽和に達しているが、これは 上に述べたように この程度の通電時間でナゲット断面積が飽和に達していることから理解できる。

一方垂直引張強度は10サイクル程度までは通電時間の増加とともに上昇しているが、さらに通電時間を増すとかえって低下し、そのバラツキも大となっている。溶接部の破断形式も10サイクル附近までは ふつうの溶接でよく知られているティア破断を示し、これ以上の通電時間では ほとんどがナゲット自身で破断している。この溶接強度および破断形式が特徴的な変化をする時期は 前述のリング模様の発生時期に一致していることが示されている。この場合 とくに圧接部に近接したナゲット端でのリング模様の発生時期が問題となるが、これはナゲット生成過程から 比較的早い時期から出現しやすいことが示されている。(詳しくは文献(17~18)参照)。

中村・浜崎¹⁸⁾はこのような現象に対し ナゲット組織に注目して破断部の状況を追跡し、ナゲット周辺のリン

グ模様部に生ずる特徴的な柱状晶の形成に起因した割れ(柱状晶の粒界からの割れ)によって起るものであることを明らかにしている。

7. 点溶接における電極の即応性と散り現象

点溶接電極は 通電による被溶接材局部の温度上昇、通電終了に伴う冷却現象に応じて移動するが、この電極移動が円滑に行われないと 溶着不足をきたしたり、あるいは逆に 散りを発生したりして、良好なナゲットを得るのが困難となる。溶接中の電極運動およびこれに関連する現象については多くの報告があり¹⁹⁻²¹⁾、興味あるいくつかの事実が明らかにされているが、ここでは散り現象に関連した事項のみを取り上げて述べることにする。

Fig. 20は溶接中の加圧力および電極(可動部)の動きを示す図である。通電加熱に伴う板の膨張の結果として 上部可動電極は上方に移動し、加圧力も電極支持部の摩擦力のために多少増加するのである。なお 各曲

Fig. 20 溶接中の加圧力の変化および電極の移動

線上にみられるリップルは 電源交流の半サイクルに対応した周期を有しており、Fig. 5について述べた交流加熱に伴う局部の温度変化に対応した板の膨張・収縮によるものである。このような現象からも推察されるように、散りの発生* に対しては 加圧力および電流値のほかに加圧系統の即応性も無視できない要因となる。

散りに対する設定電流と加圧力との関係については電流が大なるほど加圧力も大きく選ばなければならないことは云うまでもないが、加圧力を不必要に大きく設定すると、電流密度が不足して 溶着不良を招くことになる。したがって 効率のよい溶接を行うためには 電流と加圧力との関係は なるべく散り発生限界に近く選ぶべきである。軟鋼板に対する電流、加圧力についての

* 「散り」には 通電開始後1~2サイクルの期間内で生ずる いわゆる初期散りと、ナゲットの形成過程の期間(たとえば1 mm厚の軟鋼板では4サイクル程度以後)に生ずる中・後期散りとがある。このうち 初期散りは主として表面処理の不良あるいは板のなじみの不足などに起因して生ずるものであるから、ここでは考察の対象とはせず、もっぱら ナゲット形成に直接関連する中・後期散りのみを取り上げることにする。

Fig. 21 アルミニウム点溶接において 散りを生ずる限界条件 (板厚: 0.2 mm)

Fig. 22 散り溶の接強度におよぼす影響 (軟鋼: 1 mm 厚)

R.W.M.A. その他の推奨条件は まさにこれに近い値に選ばれている²²⁾。Fig. 21 は電極の即応性が散りの発生におよぼす影響を示すもので²²⁾、各曲線の下側が散りの発生領域である。図にみるように、電極可動部の質量を小さくすれば 散り限界は多少低下するが、即応性の良好なローイナーシャ・ホルダを用いると、ふつうの電極を用いる場合よりも かなり低い加圧加まで散りが発生しない。なお この散り発生限界曲線に大きな影響を与えるものに電極加圧保持部分の摩擦力がある。これに対し、中村・浜崎は最近興味ある実験を進めている。

散りの発生は 点溶接作業のさまたげになるばかりでなく、溶接部の外観上あるいは溶接強度の面から問題となることがある。Fig. 22 は散りの溶接強度におよぼす影響を示す一例である²¹⁾。図にみるように 散りの発生は引張剪断強度にはあまり顕著な影響をおよぼさないが、垂直引張強度にはいちじるしい影響を与える。すなわち (a) 図についてこれをみるに、一定加圧力に対して電流の増大とともに垂直引張強度はほぼ一定のパラッキ幅をもって増加しているが、散り発生限界を境として強度は頭を打ち さらには低下の傾向を示し、そのパラッキ幅は著しく大となっている。電流を一定として加圧力を変化させて求めた (b) 図についても同様なことがみられ、この場合には 散りの発生によって 強度の低下しているのが明らかに認められる。この原因はいまだ究明されていないが、Fig. 19 に関連した中村・浜崎らの研究結果から推測して、ナゲット部の溶融金属飛散に伴うナゲット再生長過程において、圧接部に近接したナゲットの周辺部に 前項に述べたリング模様部分と同様な組織を形成し、このために Fig. 15i の場合と似た垂直引張強度のパラッキ乃至はその値の低減を生じたのではないかと考えられる。ともあれ 上の実験事実より、垂直引張強度が問題となる接手においては 散りの発生を防止するよう心懸けるべきである。

8. 点溶接電極先端部の温度上昇

点溶接における電極先端部の温度上昇は 溶接作業条件の選定の見地から、また電極材料の開発研究の面からも重要な課題の一つである。この電極の温度上昇に関する問題点はすでに安藤らによって理論的および実験的に明らかにされ、本誌にまとめて誌されているので²³⁾、ここでは 理論考察は割愛し、実験結果の一部を引用してその論考の要点のみを簡単に紹介する。

電極先端の温度上昇は 溶接条件のみならず、電極形状、冷却水量などによっても異なることは言うまでもない。Fig. 23 は電極の温度上昇を示すオシログラムの一例であって、板厚 1.6 mm の軟鋼板を A クラスの溶接

溶接条件 (軟鋼: 1.6 mm×2, 溶接電流: 11500 A, 通電時間: 13 cycle, 加圧力: 360 kg, 打点速度: 1 spot/sec, ホールド・タイム: 4.5 cycle, 冷却水量: 1.35 l/min)

Fig. 23 点溶接にともなう電極および冷却水の温度上昇

条件にて 毎秒 1 回の打点速度で 20 点だけ溶接した場合の

- ① 電極先端部より 2 mm だけ水冷端寄りの電極表面
- ② 電極先端から 15 mm へだたった水冷端部
- ③ 冷却水 (還流側)

の 3 ケ所の温度上昇を測定したものである。電極形状は C.F. 形であり、その冷却水量は 22.5 cm³/sec である。各温度上昇曲線上にみられる 50 c/s のリップルは溶接電流による電磁誘導電圧であるが、これにより かえて通電時期が明瞭に判定できる。

さて 図にみるように、電極の温度上昇は数回の打点によって定常状態に達しており、これより電極の平均の温度上昇に関する時間定数は 2～3 秒であることがわかる。(この値は理論考察によって 合理的に了解される。)

Fig. 24 打点速度、冷却水量を変えた場合の電極の温度上昇 (溶接条件は一定)

また ①点の温度上昇が通電によって大幅に脈動しているのに対して、②点のそれはほとんど脈動していない。これは注目すべき事柄であって、冷却水の冷却効果について つぎのことを物語っている。すなわち 冷却水は電極の温度上昇を抑制することに役立ってはいるが、これは ②点のような平均化したほぼ一定の温度上昇値の抑制に役立っているのである。

さらに付言するに、冷却水の冷却作用を強力にしても電極端では ①点の温度上昇の脈動分 (1 回の通電による温度上昇——第 1 点目の温度上昇の最高値 228°C) は抑制することができない。

理論計算によれば、ふつうの冷却状態で 通電加熱時間が 1.0～1.5 秒以下の 1 回の通電のみを考えると、上の例のように冷却端までの距離が 1～1.5 cm と言う比較的大なる場合には、加熱の最後の瞬間においても 熱はいまだ冷却端にはあまり到達していないことが論証できる。これがため 電極端の温度上昇は冷却端の存否によってほとんど影響を受けず、むしろ逆に 冷却水路のための電極実断面の減少による熱容量の減少によって 電極端温度はかえって少し高くなることがある。冷却端までの距離を 0.5 cm 程度に縮めても 通電加熱時間が 0.5 秒程度以上となつてはじめて冷却水の効果が効いてくるに過ぎない。このことは 冷却水の効果を勘案する場合に注意しておかねばならぬ重要な点である。

Fig. 24 は溶接条件を一定として 打点速度、冷却水量を変えた場合の 前記①および②点の脈動温度の最高値をオシログラムから求めたものである。たとえば 冷却水量 2 l/min の場合、打点速度を 17 点/分から 39 点/分に増しても 定常状態における①点の最高温度上昇値は 223°C から 84°C 上廻った 307°C に増大しているに過ぎない。注目時における最後の打点による温度上昇 (約 190°C) は両者において同等であることから、この温度上昇の差は 打点速度の増加に伴う平均の流入熱量の増加によるものであることが明瞭に論証できる。

浜崎、小保方は³⁾ 板厚 0.8～3.2 mm の鋼板の点溶接をいわゆる A, B, C クラスの標準溶接条件で行った場合の電極への流入熱量を測定している。この実測値から 1 回の通電による電極先端の最高温度上昇を推算した結果によると、根本に近い太い部分の電極径を想定しても 500°C を超える場合が多く、先端断面の縮小を考慮に入れると 680°C を超えることになることが示されている²³⁾。繰返

し点溶接が行われる場合には 前述の繰返し通電による温度上昇分が加算されることは云うまでもない. Fig. 23 の実験では ①点の最高温度上昇が 425°C と測定されており, 上の値と大いに異っているように思えるが, これは先端より 2 mm 離れた点の温度であり, 端面の温度は この場合 ①点の温度に 360°C 程度を加算した 800°C に近い温度を想定しなければならない.

9. 軟鋼材のフラッシュ現象

フラッシュ・バット溶接においては フラッシュ過程が重要な部分を占めるのにもかかわらず, フラッシュ現象の研究はあまり行われていなかった. 最近 安藤, 仲田らはフラッシュ溶接現象研究の一環として, 軟鋼材(比較的小断面積のもの——たとえば $\frac{1}{2}$ インチ ϕ) のフラッシュ現象について いくつかの興味ある事実を報告しているので²⁴⁻²⁵⁾, その若干について紹介する.

フラッシュ過程の初期においては Fig. 25 にみるよ

Fig. 25 フラッシュ過程初期におけるフラッシュ電圧, 電流のオシログラムの例
(二次無負荷電圧 V_{20} : 10V)

うに 短絡・アークを連続的に繰り返している期間(図の AC 期間)と休止している期間(CD)とが交互にある程度周期的に現われるという特徴を有している. Fig. 25 の例では 通電期間 5 サイクル, 休止期間 12 サイクルであり, 約 1.2 秒経過すると この周期性は崩れてくる.

図の AB 期間中での短絡・アークの交互現象は フラッシュ端面に存在する溶鋼中に発生する CO ガスに起因するものであることが示されている. また 短絡の形成は 1 ヶ所のみの場合も多く認められるが, 部材断面が大きい場合などでは これが数ヶ所並列に生ずることがある. この並列短絡部は 将棋倒れ式に短時間内(1/7 m sec 以下)につぎつぎに破られて飛散することが高速度写真観察によって明らかにされている.

Fig. 26 はフラッシュ端面の温度が上昇しているフラッシュ過程後期における電圧, 電流のオシログラムの一例である. その様相は電源回路定数, 無負荷電圧, フラッシュ速度などによってかなり異なるが, 図は二次無負荷電圧が 5 Volt の場合の一例である. 図にみられるよ

Fig. 26 フラッシュ過程後期におけるフラッシュ電圧, 電流のオシログラムの例
(二次無負荷電圧 V_{20} : 5V)

うに半サイクルの内でも 短時間の短絡・アークをひんぱんに繰り返している点は注目すべきである.

さて 軟鋼材のフラッシュ溶接部では ふつうサード・リップ形状の接合状態となるのが好ましいとされている. これに関連して興味ある事実が報告されているので²⁶⁾, 簡単に誌しておく, すなわち 比較的低い無負荷電圧に設定すると(たとえば 5 Volt), フラッシュ端面に均一でしかも比較的厚い溶融層を保ったままフラッシュが進行するので, アプセット過程でアプセット電流を流さなくても 容易にサード・リップを形成する. 設定無負荷電圧が高くなるにつれて フラッシュ過程におけるアーク力は強力となり, 溶融した金属はこの強力なアーク力のために吹き飛ばされるようになる. そのためフラッシュ端面に残存する溶融金属量が漸次減少し, たとえば 二次無負荷電圧 10 V の場合, アプセット時にサード・リップを形成せしめるためにはフラッシュ時に端面に残存していた溶融金属量のみでは不足であって, アプセット電流による溶融層の増大を待たねばならないことなどを明らかにしている.

引 用 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・第 1 報」, 溶学誌, Vol. 26, 558 (1957)
- 2) 安藤, 中村:「同上・第 2 報」, 溶学誌, Vol. 26, 742 (1957)
- 3) 浜崎, 小保方:「点溶接における電極チップへの熱伝導」, 溶学誌, Vol. 33, 484 (1964)
- 4) 溶接学会編:「溶接便覧」丸善 (1966)
- 5) 安藤弘平:「抵抗溶接の熱伝導」大阪大学工学部講義テキスト (1958)
- 6) J.A. Greenwood: "Temperatures in Spot Welding", British W. J., Vol. 8, 316 (1961)
- 7) K.P. Bentley, J.A. Greenwood, P. Mck Knowlson, R.G. Baker: "Temperature Distributions in Spot Welds", British W. J., Vol. 10, 613 (1963)
- 8) A. Cunningham, M.L. Begeman: "A Fundamental Study of Projection Welding Using High Speed Photography", W.J., Vol. 44, 381-s (1965)
- 9) 日本溶接協会・電気溶接機部会:「抵抗溶接機への電力供給」, 溶接技術, Vol. 15, No. 9, 69; No. 10, 69; No. 11, 71; No. 12, 61 (1967)
- 10) W.K. Boice: "Probabilities of Interference between Resistance Welders", Tr. A.I.E.E., Vol. 70, 775 (1951)

- 11) 橋本:「スポット溶接中の電流変化が溶接強さに及ぼす影響について」, 日本溶接協会・電溶機部会・技委委員会資料, EW17-43 (1965)
- 12) K. Ando, K. Nishiguchi, N. Inui: "Effect of the Mode of Current on the Strength of Resistance Welded Spot", Tech. Rep. of Osaka Univ., Vol. 17, 47 (1967)
- 13) 安藤, 西口, 乾:「点溶接における同時通電の影響」, 溶学誌, Vol. 35, 888 (1966)
- 14) 安藤, 西口, 乾:「点溶接部形成機構からみた溶接強度」, 溶学誌, Vol. 36, 328 (1967)
- 15) 安藤, 西口, 乾:「点溶接における同時通電の影響について」, 日本溶接協会・電溶機部会・技委資料, EW17-66 (1967)
- 16) 石井:「デュラルミン板点溶接部の断面について」, 航空研究所報告第16巻, 第7冊
- 17) 中村, 浜崎:「点溶接におけるナゲットの生成機構に関する研究・第1報」, 溶学誌, Vol. 37, 84 (1968)
- 18) 中村, 浜崎:「同上・第2報」, 溶学誌, Vol. 37, (1968)
- 19) 佐藤, 片山:「点溶接と電極運動: 第1報」, 溶学誌, Vol. 33, 889 (1965); 「点溶接と電極運動Ⅳ~Ⅵ」, 溶学誌, Vol. 34, 1028 (1965), Vol. 35, 134, 887 (1966)
- 20) 中村, 浜崎, 小保方:「点溶接における電極の即応性について」, 溶学誌, Vol. 34, 1031 (1965); 「点溶接中の電極運動」, 日本溶接協会・電溶機部会・技委資料, EW17-42, -51 (1965)
- 21) 安藤, 西口, 長谷川:「点溶接におけるチリと引張強さについて」, 日本溶接協会・電溶機部会・技委資料, EW17-67 (1966)
- 22) 中村:「点溶接における加圧力の実験的研究」, 学位請求論文(大阪大学), (1961)
- 23) 安藤, 中村, 西口, 浜崎:「点溶接機電極の先端部の温度上昇の実測と計算」, 溶学誌, Vol. 35, 1103 (1966)
- 24) 安藤, 仲田, 杉本:「フラッシュ溶接におけるフラッシュ現象について・第1, 2, 3報」, 溶学誌, Vol. 34, 266 (1965); Vol. 35, 927, 928 (1966)
- 25) 安藤, 仲田, 福井:「フラッシュ溶接現象について」, 溶接学会昭和42年度秋季大会講演概要, p. 221 (1967)

点溶接からみた板材の表面状況*

—主として航空機用アルミ合金板について—

木村 君 男** 大隅 真**

A Study on the Influence of the Surface Condition on the Quality of Spot Welding*

by Kimio Kimura** and Makoto Ohsumi**

1. 緒 言

本資料はアルミニウム合金板の点溶接において、準備工程として行なわれる表面処理が、溶接結果を改善する機構につき概観してみるものである。

“アルミ合金の点溶接は前処理を必要とする”ということは、昭和12年頃、わが国でアルミ合金の点溶接を、航空機機体の組立に用いようとして研究を開始したところからいわれていたことである。すなわち「アルミ合金は、板材メーカーより納入のままで溶接結果が悪く、これは板材表面に絶縁性の酸化皮膜があるためで、これを除去して、板と板との接触面での電気伝導をよくし、かつ接触面の状況を均一にする必要がある。」とされていた。このため第2次大戦の航空機大増産時には、米国をはじめ諸外国およびわが国でも酸化皮膜除去に関して、数多くの工業的研究が行なわれ、接触抵抗を唯一の指標として、これを下げるとともに均一にすることに莫大な努力がはらわれた。

当時の米国における研究、試験データおよび規格は、その後の点溶接の標準化のもとをなし、世界的に影響を与えている。

いっぽうわが国においては当時工業的研究とともに大学、研究所における基礎的な研究が行なわれた。これらの研究は、主として接触抵抗と、それが点溶接における発熱量におよぼす影響について検討している。

さて表面に関する現象は、一般に現象が複雑で取扱いにくいものである。上述の数多くの研究が行なわれたにもかかわらず、問題は完全に明らかになったわけではなく、むしろますますその包蔵する分野の多様性があらわれてきた感がある。

生産現場においては、このつかみにくい現象に対して正面からとりくむことをせず、ただ“アルミニウムはともかくも、前処理をして絶縁性の酸化皮膜を除去しないと溶接結果が悪い”という概念のもと、経験的に前処理のプロセスをきめ、仕事を行ってきた。

最近にいたり、航空機における点溶接は、ますます高度の品質と均一性を要求され、溶接機も優秀なものが使用されるようになった。このため、じゅうらい他の要因

* 原稿受付 昭和43年2月8日

** 正 員 三菱重工業(株)名古屋航空機製作所
Member, Mitsubishi Heavy Industries Ltd.,
Nagoya Aircraft Works