

拡散溶接接合過程の解明への試み

圓 城 敏 男* 池 内 建 二**

1. はじめに

金属を固相状態で接合して、母材と同等の機械的性質を持った継手を得るためには、接合界面で両母材の原子の間に、金属結合が形成されねばならない。現在、固相接合法として、拡散溶接、摩擦圧接、冷間圧接など各種の方法があり、すでに多くの分野で実用化されている。しかし、これらの接合法の基礎となる接合機構、すなわち接合界面で金属結合がどのような過程を経て形成されるのかは、まだ必ずしも明らかではない。

この接合過程が解明されていない原因は、接合状態を正しく評価し得る観察あるいは測定が困難で、いまだにその例が見られないことにある。例えば、従来より一般に行なわれてきた光学顕微鏡による金属組織観察では、写真1に示すように、接合界面は単なる線状に見えるだけである。このような金属組織写真からは、はたしてこの界面内でどの程度金属結合が達成されているのか、またそれを妨げているものがあるとするれば、それは何かを判断する根拠は得られ

ない。このことは、拡散溶接のような固相接合の接合機構を解明するためには、光学顕微鏡では観察できないほど微視的なスケールでの接合状態を明らかにせねばならないことを示している。

このような微視的な接合状態を明らかにする方法として、著者らは、拡散溶接の接合界面の電気抵抗測定と透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察を行なってきた。これら2つの方法は、接合機構の解明において互いに相補的な意義を持つと考えられる。すなわち、電気抵抗測定は、拡散溶接の初期過程の接合状態を調べるのには適しているが、測定精度の限界のために、接合過程の進行と共に、接合状態の変化を検出するのが難しくなる。一方、TEM観察の場合は、観察可能な薄膜試片の作製が接合過程の進行と共に容易になるため、後期過程の接合状態を調べるのに適している。すなわち、初期過程においては、未接合部が大量に存在するため、薄膜作製のための電解研磨のさいに、接合界面が優先的に研磨され、脱落してしまう。

ここでは、著者らが電気抵抗測定およびTEM観察によって、アルミニウムの拡散溶接の接合界面を調べてきた結果を紹介する。

2. アルミニウムの拡散溶接における接合界面の電気抵抗変化

拡散溶接の接合過程の進行に伴う、接合界面の電気抵抗の変化は、以下のように測定した。すなわち、一对のアルミニウムの母材を、所定の溶接圧力でつき合わせて接触させておき、これを真空中 (10^{-5} Torr 台) で一定速度で加熱して行った場合に、加熱温度と共に接触抵抗 (接合界面を横切る方向の電気抵抗) がどのように変化するかを調べた。その結果を図1に示す。図の縦軸の ρ は、接合界面の単位面

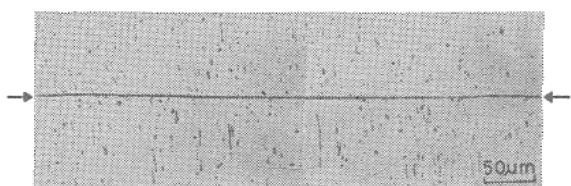


写真1 アルミニウムの拡散溶接継手の光学顕微鏡による観察例 (接合表面の前処理: 電解研磨, 溶接温度=620°C, 溶接圧力=0.2kg/mm², 溶接時間=30分). 矢印は接合界面を示す。

*圓城敏男 (Toshio ENJO), 大阪大学, 溶接工学研究所, 材料学部門, 教授, 工学博士, 溶接材料学

**池内建二 (Kenji IKEUCHI), 大阪大学, 溶接工学研究所, 材料学部門, 助手, 工学博士, 溶接材料学

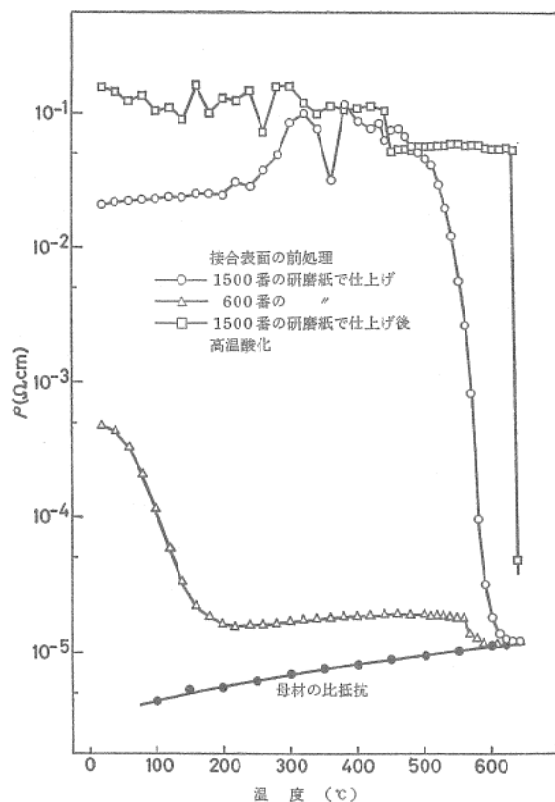


図1 室温で接触させた1対のアルミニウムを等速加熱した場合の接合界面の電気抵抗 ρ と加熱温度との関係(加熱速度 $=15^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 溶接圧力 $=0.2\text{kg}/\text{mm}^2$).

積当りの接触抵抗と母材の比抵抗との和をとったものである。この図には、接合表面の前処理として、1,500番のエメリー紙による研磨仕上げ(—○—), 600番のエメリー紙による研磨仕上げ(—△—), および1500番のエメリー紙による研磨仕上げの後、大気中で酸化(873Kで7.2ks)した(—□—)場合の結果が示されている。

図1のように、接合界面の電気抵抗 ρ の初期値(室温での値)は、いずれの表面仕上げの場合も、母材の比抵抗(—●—)に比べて、はるかに高い値をとる。このように高い ρ の値は、以下に述べるように、接合表面が清浄な金属表面とは、見なせないことを意味している。

すなわち、拡散溶接の初期過程のように、一対の金属間の接触が接合界面のごく一部でしか行なわれていない場合には、接触抵抗はいわゆる集中抵抗によって与えられるといわれている¹⁾。この集中抵抗を用いると、本研究で用い

た ρ の値は次式で表わされる。

$$\rho = \left(\frac{\sqrt{\pi} \cdot S_M}{2\sqrt{N \cdot S_M}} + 1 \right) \rho_M \quad \dots\dots(1)$$

但し、 ρ_M は母材の比抵抗、 S は見掛けの接合面積、 S_M は真実接触面積、 N はその個数である。(1)式の S_M として、溶接圧力 P_w を支えるのに必要な面積をとると次式が成立する²⁾。

$$S_M = \frac{P_w}{\alpha \cdot P_Y} \cdot S \quad \dots\dots(2)$$

但し、 P_Y は母材の降伏応力、 α は定数(~ 1.5)である。(2)式を(1)式に代入すると

$$\rho/\rho_M = \left(\frac{\sqrt{\pi \alpha S}}{2\sqrt{N}} \cdot \sqrt{\frac{P_Y}{P_w}} + 1 \right) \cdot \dots\dots(3)$$

上式において、実験値として $P_w=0.2\text{kg}/\text{mm}^2$, $S=0.16\text{cm}^2$, $P_w < 6\text{kg}/\text{mm}^2$ とおき、接触点数 N として平面同志が安定に接触するのに必要な最小値3を代入すると、

$$\rho/\rho_M < 2.5.$$

この(ρ/ρ_M)の値は、図1に示す室温での ρ と ρ_M の比よりはるかに小さい。この結果は、接合界面において母材と同程度の電導度を持った接触が行なわれている部分(真実接触部)は、溶接圧力を支えるのに必要な接触面積の極一部でしかないことを示している。したがって、アルミニウムの接合表面には、清浄な金属表面同志の接触を妨げるものが存在すると考えられる。

図1において、接合表面を1,500番のエメリー紙で仕上げたままの場合と、その後大気中で酸化した場合とを比較すると、大気中で酸化によって ρ の初期値が増加し、また ρ の大きく低下する段階(500°C以上)が高温側へずれる。この結果は、接合表面の酸化皮膜が、清浄な金属表面同志の接触を妨げる非常に重要な因子であることを示している。さらに、大気中で高温酸化した場合、融点近傍の630°C付近でも、 ρ が母材の比抵抗に一致しないことは、このような高温でも酸化皮膜が金属表面同志の接触を妨げる効果を持つことを示している。

一方、接合表面を600番のエメリー紙で仕上げて粗くした場合は、1,500番で仕上げた場合と比べて、 ρ の初期値が非常に小さくなり、ま

た220°C以下に ρ の大きく低下する段階が新たに現われてくる。この結果は、接合過程の初期においては、接合表面の凹凸は、金属表面同志の接触を妨げるよりも、むしろ酸化皮膜の破壊を促進することを示している。これは、接合表面の凹凸の変形に伴って、酸化皮膜の破壊が進むためと考えられる。

3. アルミニウムの接合界面のTEM観察

写真2は、アルミニウムの接合界面（矢印で示す）をTEMにより観察した結果を示すものである。写真2において、接合界面に沿って黒く見えるのが酸化膜で、この酸化膜は、場所に

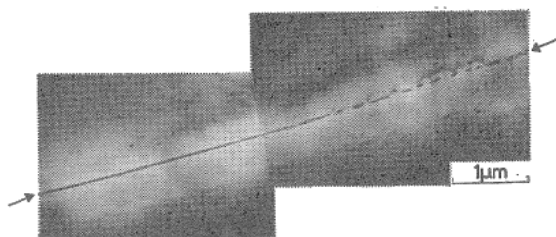


写真2 アルミニウムの接合界面のTEMによる観察例（接合表面の前処理：電解研磨，溶接温度=650°C，溶接圧力=0.2kg/mm²，溶接時間=30分）。矢印は接合界面を示す。

よって連続的に存在する部分と、細かく破壊されて分散されている部分とがあるのが分かる。この写真の接合界面は、融点直下の650°Cで溶接されたものであるにもかかわらず、かなりの量の酸化物の存在が認められる。この結果は、酸化膜が接合界面に存在し、接合過程を妨げる重要な因子となっていることを示すもので、接合界面の電気抵抗測定から得られた結果を裏づ

けている。実際、溶接温度が上昇し、接合強さが高くなるほど、酸化膜が破壊・分散された部分が増加する傾向が認められる。

一方、図1に示すように、630°C以上では、接合界面の電気抵抗 ρ と母材の比抵抗との差が検出できない。したがって、写真2の結果より、電気抵抗 ρ の変化が検出できないほど接合が進んだ場合には、TEMによって接合状態の変化を調べればよいことが分かる。また、写真2から分かるように、酸化膜の厚さは500Å以下であり、現在ではTEM以外に、このような微細なものを直接観察する手段はない。

4. む す び

以上のように、接合界面の電気抵抗測定とTEM観察によって、アルミニウムの拡散溶接においては、接合界面に酸化膜が存在し、これが接合過程を妨げる最も重要な因子となっていることを明らかにした。現在、この酸化膜の形態と分布に及ぼす、接合表面の前処理と接合条件の影響を調べ、さらにこれが接合強さとどのような関連を持つかについて検討を加えている。今後、酸化膜の安定性の異なる各種の金属、また拡散溶接以外の固相接合法についても、同様の研究を行ない、金属の固相接合の機構を統一的に解釈できるモデルを確立したいと考えている。

参 考 文 献

- 1) R. Holm: Electric Contacts Handbook, Springer-Verlag, (1958), P. 13.
- 2) A.H. Uppal and S.D. Probert: Wear, 20 (1972), 381.