

スモールスケール抵抗溶接

福 本 信 次*

Small-scale resistance welding

Key Words : resistance welding, metallic glass, nickel wire, small-scale

研究ノート

1. はじめに

抵抗溶接は電気的エネルギーを熱源とする加圧溶接法であり、その歴史は古く、1856年にジュールによって電気抵抗溶接法が発明されたことに端を発する。この溶接法はバリエーションが多く、スポット溶接、プロジェクション溶接、シーム溶接などによって板材や線材の溶接が頻繁に行われている。いずれにしても溶接箇所でのジュール発熱を利用し、接合面を溶融または高温状態に至らしめ、加圧・接合する方法である。代表的なプロセスである抵抗スポット溶接を図1に示す。2枚の被接合薄板材を銅合金電極で挟み、加圧、通電する。その際、次式で表されるジュール熱が接合界面に発生し、溶融ナゲットが接合界面に形成される。

$$Q = I^2 R t \quad (1)$$

(Q : 発生熱量, I : 溶接電流, R : 電気抵抗, t : 通電時間)

この電気抵抗 R は、被接合材間の接触抵抗のほか、被接合材自身の抵抗、電極 / 被接合材界面の接触抵抗および電極の抵抗を含む。ただし、電極の抵抗は極めて小さく、また電極 / 被接合材界面の接触抵抗も適切な条件下ではほとんど無視できるので、ナゲット形成に最も大きく寄与するのは被接合材界面の接触抵抗および被接合材の抵抗である。この溶接法は自動化が容易であるため、大量生産が必要な自動

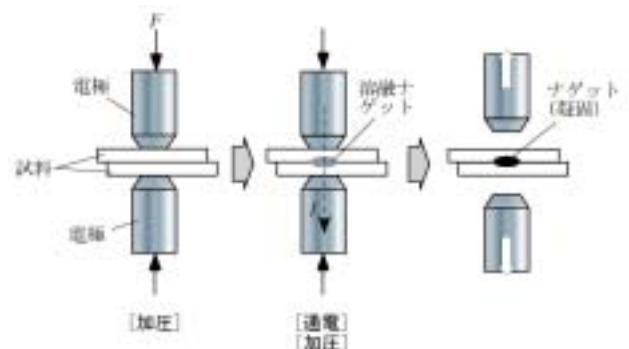


図1 抵抗スポット溶接

車産業において大きく発展してきた歴史をもつ。そのため板厚 1-2 mm 程度の鋼板の溶接を中心に研究・開発されてきた。

ところが近年、電子デバイスや医療用デバイスにおいてスモールスケール抵抗溶接 (Small-scale resistance welding: SSRW) が頻繁に利用されるようになってきた。この SSRW に対して従来の抵抗溶接を ‘ラージスケール’ 抵抗溶接 (Large-scale resistance welding: LSRW) としたとき、その明確なサイズの境界は定義されておらず、一般に板厚や線径が 0.1-0.5 mm 以下のものをスモールスケールあるいはマイクロスケールと呼ぶ場合が多い¹⁾。表1に LSRW と SSRW の比較を示す。SSRW は LSRW を単純にスケールダウンするだけでは解決できない多くの問題を抱えている。たとえば上述のように、従来の “ラージスケール” 抵抗スポット溶接は自動車産業中心に発達してきたため、その溶接ターゲットのほとんどが鉄鋼材料であった。これに対して医療および電子デバイスに求められる材料は Ni, Pt, Cu, 黄銅, Al, Ti など非鉄金属が多く、しかもその表面が Ni, Au, Ag, Sn など被覆されているものが多い。熱伝導率や電気抵抗などの材料物性値はナゲット形成能に大きく影響するので、これら被覆材



* Shinji FUKUMOTO

1966年3月生
大阪大学大学院 博士後期課程修了 (1997年)
現在、大阪大学大学院 工学研究科
マテリアル生産科学専攻 准教授
博士 (工学) 溶接工学
TEL : 06-6879-7549
FAX : 06-6879-7570
E-mail : fukumoto@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

表1 スモールスケール抵抗溶接(SSRW)とラージスケール抵抗溶接(LSRW)の比較.

	SSRW	LSRW
板厚(線径)	< 0.2 - 0.5 mm	> 0.6 - 0.8 mm
電極荷重	< 100 - 200 N	> 1,000 - 2,000 N
溶接電流	< 2,000 - 4,000 A	> 6,000 - 10,000 A
電極水冷	なし	あり
被接合材	主に非鉄金属 (コパール, Ni, Ti, Pt, etc.)	主に鉄鋼材料と Al 合金
めっき	Ag, Au, Ni, Pb, etc.	Zn
アプリケーション	電気および医療デバイス	自動車およびその部品

と基材の組合せにより溶接性が変わる．それゆえそれら個々についてそれぞれ詳しい情報が欠乏しているというのが現状である．ここでは，その中でも金属ガラス薄板とニッケル細線の抵抗溶接について紹介する．

2. 金属ガラスの抵抗溶接

金属ガラスはいわゆるアモルファスであり，大きな過冷却領域を有するのが特徴である．その優れた機能性と機械的特性ゆえに新しい構造用材料として期待されているが，構造用材料として使用する際には溶接・接合といった加工技術の発展が不可欠である．しかしながら金属ガラスは加熱することで構造緩和あるいは結晶化を起こして脆化することが知られており，溶接することは非常に困難とされてきた．これに対して近年，ガラス形成能が著しく改善された合金が次々と開発され，溶接も不可能ではなくなってきており，摩擦圧接²⁾，レーザー溶接³⁾，電子ビーム溶接⁴⁾などのプロセスでの成功例が報告されている．これらの中で熔融溶接に共通する条件としては，大冷却速度および組成変動がないことである．ガラス形成のための臨界冷却速度が1 K/sと非常に小さい金属ガラスは別として，やはり一般的な金属ガラスの接合に熔融プロセスを用いるのであれば高密度熱源で大きな冷却速度が得られるプロセスが適していると考えられている．またたとえ大冷却速度で結晶化は避けられたとしても，Zr基金属ガラスのように非常に酸化しやすい材料の場合は，わずかな酸素の混入で脆化が生じるため，熔融溶接を行う場合は雰囲気制御が必須となる．また溶接部の組成変化も結晶化を起こす原因となりうるため，フィラーを用いるようなプロセスは原則適していないと考

えられる．スモールスケール抵抗スポット溶接は 10^5 K/s オーダーの冷却速度が得られるためこのような特性の材料に対して有効と考えられる．

図2に板厚260 μ mのZr₅₀Cu₃₀Ni₁₀Al₁₀金属ガラスの抵抗スポット溶接部を示す⁵⁾．比較としてほぼ同じ板厚のステンレス鋼の抵抗スポット溶接部を示す⁶⁾．どちらも接合界面およびその近傍に割れ，ポロシティなどの大きな欠陥は認められない．また過剰な溶接電流でなければ電極溶着も生じず，容易に溶接可能である．ただしステンレス鋼板の接合部断面に観察されるような熔融ナゲットは金属ガラスの場合は観察されない．これはマクロ的には結晶化が生じていないことを示唆している．またミクロ的に見ても図3の接合界面中心の高分解能透過電子顕微

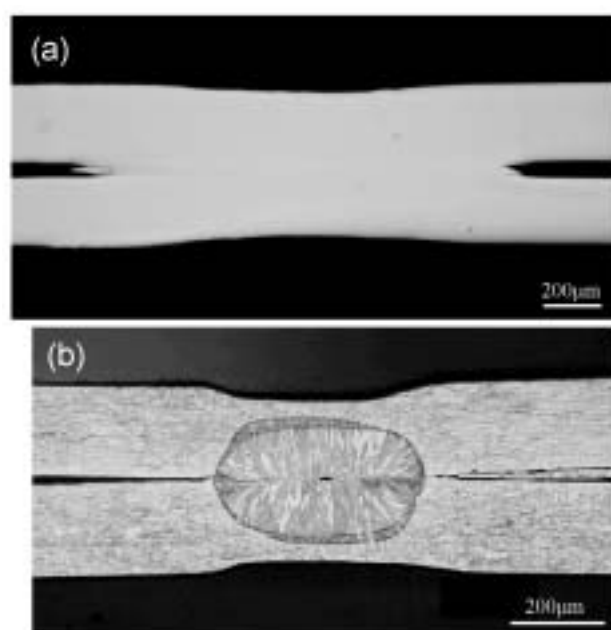


図2 スモールスケール抵抗スポット溶接部の断面
(a) Zr基金属ガラス，(b) ステンレス鋼

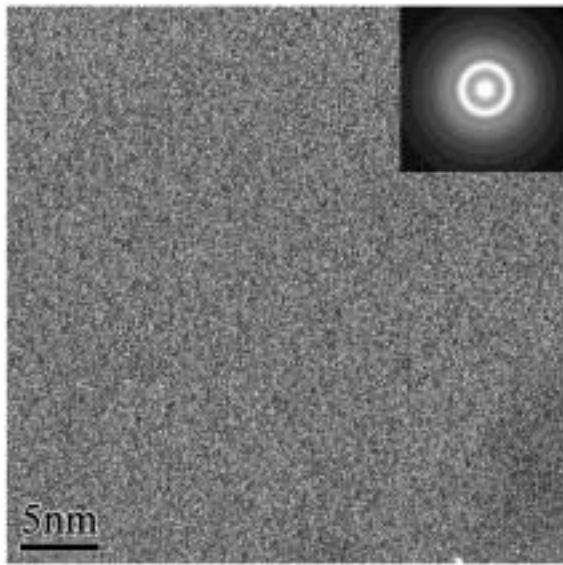


図3 Zr基金属ガラスの抵抗スポット溶接部の高分解能TEM写真⁵⁾

鏡 (HREM) 像に示したように、ナノ結晶すら認められず、接合部でアモルファス構造が維持されていることがわかる。また微小領域X線回折によって溶接部近傍の熱影響部 (HAZ) においても結晶化が生じていないことがわかっており、抵抗スポット溶接が金属ガラスを大気中で接合できる優れたプロセスであることが示されている。

3. 金めっきニッケル細線の抵抗溶接

電気配線にはニッケルがよく用いられるが、この

ような材料は金などで被覆されている場合が多い。図4にNiワイヤ ($\phi 400 \mu\text{m}$) および金メッキNiワイヤ (メッキ厚さ: $4 \mu\text{m}$) のクロスワイヤ継手を示す。ワイヤ同士の初期接触面積は小さいため、初期電流密度および接合面にかかる圧力は極めて大きくなる。通電開始後、接合界面で抵抗発熱によって溶融が開始する。同時に2本のワイヤが変形しながら互いに食込み、生成した液相を排出しながら接合が進む。金メッキNiワイヤの場合は、AuとNiが溶融し、排出されることによって継手部にきれいなフィレットを形成する。このフィレット形成は継手性能に大きな影響を与える。上記2種類の継手にそれぞれ引張負荷を与えたものを図4にあわせて示す⁷⁾。メッキなしの裸Niワイヤの継手の場合、接合界面の端部が切り欠きとして作用し、接合界面から破断が生じていた。これに対して金メッキNiワイヤ継手の場合は、形成したフィレットによって切り欠き効果が緩和されており、接合界面において破断が生じず、ワイヤ自身においてネッキングが始まっていた。もちろんこのような被覆がすべて強度特性にプラス側に作用するわけではないが、適切なメッキがあることでこのように接合界面端部の応力集中を緩和でき、継手性能が向上する場合がある。メッキの種類、厚さ、基材との組合せなどに応じて溶接プロセスを最適にデザインする研究が必要になるであろう。Niワイヤと金メッキNiワイヤの接合メ

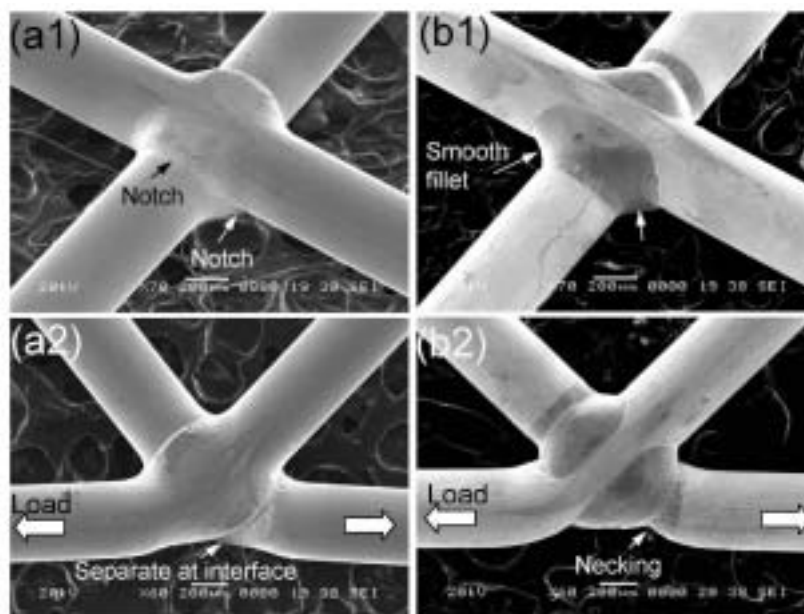


図4 Ni細線 (a1, a2) およびAuめっきNi細線 (b1, b2) のクロスワイヤ溶接。a2およびb2は引張負荷した状態 (图中太矢印は負荷方向)⁷⁾

カニズムの違いについては文献(7)(8)を参考にしていただきたい。

4. おわりに

冒頭で述べたように抵抗溶接は古典的プロセスであるため最近はあまり注目を浴びていなかった。しかしながら金属ガラスのような新材料に対する有効性も示され、スモールスケールでの用途が見直され始めている。今後、さらにバラエティに富んだ材料のマイクロ接合に適用されることを期待している。

参考文献

- 1) D. Steinmeier: Welding Journal, 77-7(1998) 39-47.
- 2) Y. Kawamura: Mater. Sci. Eng. A, 375-377(2004) 112-119.
- 3) B. Li, Z.Y. Li, J.G. Xiong, L. Xing, D. Wang and Y. Li: J. Alloys and Compounds, 413(2006) 118-121.
- 4) Y. Yokoyama, N. Abe, K. Fukaura, T. Shinohara and A. Inoue: Mater. Trans. 43 (2002) 2509-2515.
- 5) K. Fujiwara, S. Fukumoto, Y. Yokoyama, M. Nishijima and A. Yamamoto, Mater. Sci. Eng. A, 498, (2008) 302 - 307.
- 6) S. Fukumoto, K. Fujiwara, S. Toji and A. Yamamoto, Mater. Sci. Eng. A, 492, (2008) 243 - 249.
- 7) S. Fukumoto, Zheng Chen and Y. Zhou, Metall. Mater. Trans. A, 36A, (2005)2717-2724.
- 8) S. Fukumoto and Y. Zhou, Metall. Mater. Trans. A., 35A, (2004) 3165-3176.

