各種材料の抵抗スポット溶接*

鈴木 茂**, 長谷川 和 芳**

鈴木 茂

長谷川和芳

Spot Welding of various materials

by Shigeru SUZUKI** and Kazuyoshi HASEGAWA**

キーワード：スポット溶接，鋼，アルミニウム合金，チタン，ナゲット

1. はじめに

抵抗スポット溶接は，乗用車の部品・組立て工程を中心に，電機，家庭用品，鉄道車輛，航空機など広い分野で用いられている。ここでは，鋼のスポット溶接の基本を中心にしてアルミニウム合金，チタンなどの溶接施工について，現場における溶接現象の観点から述べてみたい。なお，スポット溶接では最高級といえる航空機用溶接の特徴についても紹介し，各種材料のスポット溶接性の特徴を強調してみたい。

2. 鋼のスポット溶接

まず，基本となる鋼のスポット溶接性について述べる。

2.1 ナゲット成長の様子

電極加圧力 200daN，通電時間 10 サイクル (50Hz) の一定条件下で，溶接電流を次第に上げて行った場合のナゲット径成長の様子を図 1 に示す。材料は SPCC，板厚は 0.75+0.75mm，電極は DR 電極 (先端 $\phi 6$ ，40R) である。

溶接電流を次第に上げていくと，

- (1) ナゲット径は増加してくる。
- (2) 散りが発生すると，ナゲット径は小さくなる。
- (3) 更に溶接電流を上げ続けると，再びナゲット径は増加する。
- (4) 更に溶接電流を上げると，遂には電極と鋼が溶着してしまう。

引張せん断試験結果は図 2 に示すように，散りが発生しナゲット径が小さくなくても，ほんの少し強さが低下するのみで，散り前後での明確な差はみられない。

合金化亜鉛めっき鋼板で，板厚 0.7+0.7mm，DR 電極 (先端 $\phi 6$ ，R40)，電極加圧力 250daN，通電時間 10 サイクルの場合を図 3 に示すが，傾向としては同様である。

合金化亜鉛めっき鋼板において，溶接電流の増加に伴うナゲットの成長の様子を図 4 に示す。

ナゲットの成長を模式的に示すと図 5 の如くなる。接合面にできた小さなナゲットは，溶接電流が増加する

図 1 溶接電流とナゲット径との関係 (SPCC)

図 2 溶接電流と引張せん断強さとの関係 (SPCC)

*原稿受付 平成 10 年 2 月 4 日

** (株)電元社製作所 Dengensha MFG. Co., Ltd.

図3 溶接電流とナゲット径との関係(合金化亜鉛めっき鋼板)

図4 溶接電流増加に伴うナゲット成長の様子(合金化亜鉛めっき鋼板)

図5 鋼のナゲット成長模式図

と板厚方向とナゲット径の成長と2方向に成長し、板厚方向のナゲットが飽和すると、ナゲット径が増加するようになる。

散りが発生したサンプルのナゲットの様子を調べてみると、

図6 A1100-O材ナゲット成長課程

- (1) ナゲットはセル状またはセル樹枝状組織でなく、一般に言われているリング模様となっている。
- (2) 散り発生により溶接後の板厚は薄くなっている。リング模様の発生原因を冷却凝固と考えると、散りによりナゲット径が小さくなる理由は、通電時間10サイクルの内4~5サイクル位の初期に発生した散りにより溶融した金属が飛散した分、板厚は薄くなり、電極への熱の逃げが多くなってリング模様が生成されたと推定できる。

3. アルミニウム合金のスポット溶接

3.1 ナゲット成長の一例

アルミニウムのナゲット成長過程の一例を図6に示す。これはA1100-O材、板厚1.0+1.0mmを単相交流式にて溶接したものである。電極形状100R、8サイクル、電極加圧力150daNである。純アルミ材の溶接では、Al-Mg系(JIS5000系)に比べ電極加圧力を下げる必要

がある。表面処理は特に行っていないが、電極形状がラジアス形で、また高電流形であるため、電極の両端付近からナゲットができ始め、電流を上げると両端のナゲットが繋がるようになる。

3.2 アルミニウム合金の表面処理について

アルミニウム合金のスポット溶接で一番苦労するのは、表面に存在する酸化膜による電極表面の汚れ、品質のばらつきである。

近年、乗用車用にアルミニウム合金を使用するに当たり、アルミメーカは製造ラインにおいて、表面酸化膜の酸洗処理を施すようになってきた。表面酸化膜の厚さを薄くすると高い溶接電流が必要となり、厚いと電極の寿命が短くなるので、どの位の厚さにするかはノウハウとして、アルミメーカがコントロールしている。

(以前、アルミニウム合金のスポット溶接は、電極寿命が極端に短いと言われていたが、最近酸化膜管理を施しているため、乗用車用としてDR電極を使用すれば、鋼なみ、或いはその以上の電極寿命を得られるようになってきた。)

アルミニウム合金をスポット溶接すると溶接部引張りせん断強さがばらつくということが、古くから問題となっていた。

この原因の一つに表面処理の影響があり、以下のような考えが一般的である。

両面をワイヤ・ブラッシングによりクリーニングした材料と、特にクリーニングしない(電極に当たる面のみビックアップ防止のためワイヤ・ブラッシングした)材料で引張りせん断強さのばらつきをみると、両面ワイヤ・ブラッシングした方が、はるかにばらつきが多い¹⁾。また、ワイヤ・ブラッシング直後のものは引張りせん断強さは大きい、ばらつきも大きく、時間の経過とともに強さ・ばらつきも小さくなる。この原因は、ナゲット周辺のコロナボンド部の清浄度によるもので、クリーニングするとコロナボンド部も圧着され、ここも強さを受け持つため、引張りせん断強さが大きくなるが、ばらつきも大きくなるという結果となる。長時間放置したものは、酸化膜の成長によりコロナボンド部強さの寄与の度合いが小さくなるため、強さも下がると同時にばらつきも小さくなると考えられている²⁾。

この引張りせん断強さのばらつきについて我々には次のような経験がある。

航空機用米軍規格 MIL-W-6858 に、クラス A, B(クラスは品質の重要度を示す)の場合、アルミニウム合金は105点中100点を引張りせん断試験して(残り5点は断面試験)、溶接点数の90%が平均値の0.875~1.125倍の範囲内、残り10%が平均値の0.75~1.25倍の範囲内になければならないという規格がある。溶接機検定の重要な試験の一つである。この試験にばらつきが出て、なかなか

表1 表面処理方法と引張りせん断強さとの関係
(A2024-T3 材, 板厚 0.8+0.8 mm)

表面処理条件	引張りせん断強さ	ナゲット径
化学処理後ワイヤブラッシングのみ、粉塵は叩いて落とす。	平均 297 kgf (305, 301, 285, 296)	平均 4.0 mm (4.0, 4.0, 3.8, 4.0)
化学処理後ワイヤブラッシング、その後両面きれいな軍手で一回拭く。	平均 168 kgf (171, 164)	平均 4.0 mm (3.8, 4.1)
化学処理後ワイヤブラッシング、その後両面きれいなガーゼで一回拭く。	平均 174 kgf (180, 167)	平均 3.9 mm (4.0, 3.7)

か合格しない例があり、調査してみた。

表面処理はまず(1)化学処理を施し、(2)溶接前にステンレス・ワイヤを用いて手により、板両面ブラッシング処理するという二工程を経る。化学処理された平板をワイヤブラッシングすると粉塵が出るが、その粉塵をきれいなガーゼで拭き取り溶接した場合と、ワイヤブラッシング後その面には何も接触させず、粉塵は端部を叩いて落とす程度とし溶接した場合と、明らかに引張りせん断強さに差があることを確認した。

表1に試験結果を示すが、まとめると次のようになる。

(1) 引張りせん断強さはワイヤブラッシング後の管理の仕方で異なり、まったく何も接触しない場合高めに出るが、軍手・ガーゼなどの接触があると低くなってしまう。しかし、ナゲット径は3者とも同じである。

(2) 引張りせん断強さにはナゲット径のみでなく、コロナボンド部の圧着も強度を受け持つが、軍手・ガーゼなどの接触により、コロナボンド部の圧着は強度に寄与しなくなるようである。

(3) ワイヤブラッシング処理後材料の管理を3者のいずれかに決めておけば、十分ばらつきはMIL規格に合格する。ただし、電極のチップドレスも数点に一回という具合に頻繁にドレッシングして、電極の汚れも極力小さくする必要もある。

(4) ばらつきの原因は酸化膜よりも、溶接しようとする面に接触したか、しなかったかの方が大きい。

3.3 可変加圧方式について

アルミニウム合金を溶接する場合、乗用車用として一定加圧力が使用されているが、ブローホール(空孔)や割れ(クラック)の発生を最小限にするなど品質を要求される航空機などの場合、図7のような可変加圧方式が採用される。

この可変加圧の思想は、まず電極下降を衝撃のないよう差圧下降方式で降ろし、初期は高加圧で被溶接物のなじみを良くし(初期の高加圧は表面抵抗を均一にするためと言われているが、材料によっては高加圧としても酸化膜はそれ程破壊されず、その効果は薄い)、溶接加圧という低加圧のときに溶接電流を流し、ここで溶融部を形

図7 可変加圧モード

図8 通常加圧方式

成させ、この溶接電流通電終了と同時に高加圧（鍛圧）を加えてブローホールの発生を抑える。また、割れは溶接部が通電終了後急冷されることにより発生すると考えられるので、急冷を防止するため、しばらく小電流（ディケイ電流あるいは後熱電流ともいう）を流している。鍛圧は溶接電流が、ディケイ電流に切換わるところでかけるのが一般的であり、この鍛圧の立上がりスピードはアルミニウムの熱伝導性の良さから速い方が良いとされている。

3.3.1 ソフト加圧

ダイヤフラムシリンダを用いた溶接機に一般的に使用されている自重下降方式で電極を下降させた場合、電極が被溶接物に接触する際大きな衝撃がかかり、ひどくなるとバウンドする。0.6mm以下の薄板では被溶接物に歪みが生じたりするので、一部の溶接機においては前述したように差圧下降方式が採用されている。

一般のピストンシリンダに差圧下降方式を転用した場合にも衝撃が非常に少なくなっていることを図8及び図9に示す。図8はスピコンを使用した通常下降であり、図9は差圧下降とした場合である。

参考までに、このソフト加圧を合金化亜鉛めっき鋼板のスポット溶接における電極長寿命化を期待して実験したことがあるが、衝撃による電極損耗よりも、めっきに

図9 差圧下降方式

図10 鍛圧立上がりタイミングと引張せん断強さのばらつきの関係 (A6061-T6材, 4.0+4.0mm)

よる損耗の方が大きいらしく、効果はほとんどなかった。

3.3.2 鍛圧をかけるタイミング

ブローホールや割れの発生を最小にするための特徴的な溶接モードは、図7のような可変加圧と、ディケイ電流を含んでいることである。鍛圧は溶接電流がディケイ電流に切換わると同時にかけるのが標準であるが、この鍛圧をかけるタイミングを調整することにより、引張せん断強さのばらつきを抑えることができる。

図10はA6061-T6材、板厚4.0+4.0mmの場合で、鍛圧をかけるタイミングを変化させ、引張せん断強さのばらつきをみたものである。

溶接電流がディケイ電流に切換わる時より早く鍛圧をかけてしまうと、強さのばらつきが大きく、遅らせるとばらつきが小さくなる。早くから鍛圧をかけると、溶接加圧が高くなるのでナゲット径は小さくなっているが、コロナボンドでの圧接部により強さが高くなり、これがばらつきの原因となっていると考えられる。遅らせると、この測定範囲では強さは上昇しているが、ばらつきは再び大きくなってきて、また内部欠陥も出てくる。

薄板の場合は、ディケイ電流に切換わるとほとんど同時位が良く、厚板になる程少しづつ遅らせた方がよくなっていくようである。

3.4 偏析

アルミニウム合金のスポット溶接部を断面試験すると、図11のようにナゲット内に割れのような部分（ナゲット右側の黒い部分）を発見することがある。

図 11 ナゲット内の割れのような部分（右側の黒い部分）

図 13 ナゲット中央部に黒く割れのように見える部分

図 12 割れのように見える部分の SEM 像

図 14 割れのように見える部分の SEM 像

これは A2024-T3 材，板厚 2.6+2.6mm をケラー液でエッチングしている。右端部近く，厚さ方向で中央付近に黒く割れのように見える所を，走査電子顕微鏡で SEM 像を撮った結果を図 12 に示す。EPMA 分析結果も含めて判断すると割れでなく，Cu と Mg の偏析であった。

ところが，図 13 のように光学顕微鏡で観察すると，ナゲットの中央部付近に黒く割れのように見える場合がある。これが偏析であるか，割れであるかを区別するため，エッチングしない状態で走査電子顕微鏡を使用して観察した結果を図 14 に示す。これは明らかに割れであること

図 15 エッチングしていない状態での割れが判る。

5000A

6300A

6700A

7900A

図 16 溶接電流増加に伴うナゲット成長の様子 (純チタン)

- (1) 現場で、このような高倍率を使用するのは困難なため、割れか、偏析かを低倍率のルーペ等を用いて簡易的に判別するためには、エッチングしない状態でナゲットを観察する必要がある。割れがあれば、ここで図 15 のようにすでに黒い線が見えるが、偏析の場合、白く何か詰まっているので区別がつく
- (2) ナゲットの両端部付近に発生するものは、偏析の確率が高く、ナゲットの中央部付近に発生するものは、割れの確率が高い。
- (3) 偏析が出てても引張せん断強さには影響しないので許容されるが、割れは許容されず、ナゲットの溶込み深さを小さくすることにより消去する必要がある。

4. チタンのスポット溶接

チタンのスポット溶接における特徴的なことのひとつに、ナゲットの成長が鋼と異なることがあげられる。

鋼の場合のナゲットは図 5 に示した如く、溶込み (板

図 17 チタンのナゲット成長模式図

厚方向) とナゲット径が同時に成長してゆき、ある程度の溶込みができると、こんどはナゲット径が成長して行く。

しかしチタンの場合、図 16 に示す如くナゲットはまずほとんど全板厚方向に溶込みができ、後、ナゲット径が成長して行く。模式図で書くと図 17 のようになる。

これは純チタン、板厚 1.5+1.5mm を、電極加圧力 500daN、通電時間 3 パルスで溶接したものである。5000A では、まだナゲットはなく熱影響部のみであるが、6300A からナゲットはでき始めている。

腐蝕液はクロール氏液を使用している。

MIL 規格には、最大溶込み深さは板厚の 0.9 倍以内という規定があるが、チタン合金の溶接の特徴から、この溶込み深さの管理が大事となる。

しかし、アーク溶接のようにシールドに気を使う必要もなく、比較的溶接しやすい材料とすることができる。

5. お わ り に

鋼、アルミニウム合金、チタンのスポット溶接について、現場から見た各種材料の特徴を紹介した。鋼やアルミニウム合金のスポット溶接に比べ、チタン合金のナゲットの成長過程が、特に特徴的である。

ナゲット中にできるブローホールや割れなどを減らそうとした場合、ナゲット溶込み深さをコントロールすることが第一の方法である。よって、鋼、アルミニウム合金、ここでは説明しなかったがステンレス合金のスポット溶接で、これらいわゆる欠陥と称する現象を減らすためには散り発生をなくし、溶込み深さを小さくすれば良いとなる。このためのポイントは加圧制御と、通電形態のコントロールであると著者らは考えている。

6. 参 考 文 献

- 1) 浜崎正信「重ね抵抗溶接」産報
- 2) R.A.Chihoski「Variation in aluminum spot weld」Welding journal 49-12 (1970)