

# アルミニウム抵抗溶接機における 新しい品質向上策

古川 一敏

ART-HIKARI(株)

東京工業大学 原子炉工学研究 非常勤講師

有富 正憲

東京工業大学 原子炉工学研究所 所長

## 1 はじめに

当社は、世界における機械製品および電子製品の製造において、とくに自動車産業向けに抵抗溶接の分野で古くから重要な役割を果たしてきた。

自動車産業のみならず、他のすべての産業における研究チームと連携したその経験は、当社における抵抗溶接の進歩のための原動力となった。

本稿では、アルミニウムのスポット溶接を中心に紹介するが、これはスチールのスポット溶接はかなり異なる。当社のスポット溶接機はスチールの溶接ばかりでなく、アルミニウムの溶接においても信頼性がある。

アルミニウムはもっとも広く使われている非鉄材料の一つであり、その極めて小さい密度と高い耐食性のため、航空機や自動車の重量を低減するための良い方策として、長年にわたり取り上げられてきた。

自動車メーカーは、アルミニウム板を接合するために、これまでアルミニウムのスポット溶接ならびに市販されている他の多くの接合プロセスを採用してきた。

本稿では、抵抗溶接が依然として低コストで信頼性があるプロセスとして考えられることを報告するとともに、アルミニウムのスポット溶接に関して、良い溶接を行うために何が必要かを説明し、当社が提案する技術的な対策をいくつかの用途も含めて報告する。

## 2 アルミニウムのスポット溶接

### 2.1 アルミニウムの特性と表面状態

アルミニウムは、種々の優れた特性を持った金属材料であるが、スポット溶接のしやすさという点からみると、その物理的抵抗溶接性は非常に悪いといいうことがわか

る。すなわち、アルミニウムの溶融点は660°Cと低く、溶接に有利である半面、比抵抗が低く、熱伝導度が高いため、きわめて大きな抵抗溶接電流が必要となり、溶接が難しくなる。

また、アルミニウム表面の特性は広範囲に変化するので、この特性の変化が板との間ならびに電極と板との間の接触抵抗が異なる原因となっている。

例えば、自動車産業の場合、航空機産業で使われているような化学処理を行わないでの、上記の接触抵抗を制御することが不可能である。表面の状態は多くのパラメータにより変わる。すなわち、合金の種類、表面処理(熱処理、潤滑化)、保管および最後に溶接である。

研究によると、抵抗スポット溶接のための表面処理を行わずに、アルミニウムパネルを溶接することは可能であり、また、ローリングパラメータ(圧延条件)と保管状態により生じるアルミニウム板表面の酸化物の変化は接合強度には影響しないが、ウエルドロープ(溶接条件)に影響を与える。

### 2.2 溶接電流と電流の種類

交流はアルミニウム溶接における電極の寿命にきわめて良い結果を与える。しかし、産業上の用途においては、アルミニウム溶接に高い電流が必要であることを考慮し、かつ、長いアームのガンの場合はトランスマントと2次インピーダンスを考慮すると、良い使用率で溶接強度を得るために、直流が必要で、直流の中には単相直流・3相交流・インバータ式直流と種類がある。

一方、アルミニウムの塑性範囲は狭いが、これは溶接時間の微調整および応答が良い電流調整により制御することができる。あまりに速すぎると上昇時間には注意を払う必要がある。

非対称チップの摩耗問題の研究において、陽極アノード摩耗が報告され、他方、陰極カソード摩耗は凹面で円形であることが報告されている。アルミニウムの場合、マイナスの極性は薄板に置く必要がある。

## 2.3 溶接加圧力

電極寿命に対する悪い影響を避けるために、電極と板との間の接触加圧力を制御する必要がある。この場合、一般的に電極が板に触れる前に板間の接触が良いということを前提にしている。そうでない場合、電極位置の制御のみでこの欠陥を検出することができない。したがって、高い範囲の加圧力を発生させ、金属の軟化に素早く対応し、体積膨張およびインデンテーション・フェーズ(indentation phase)の間に追従が良くできるようにする溶接ヘッドは即応型ヘッドある必要がある。システムがロックされ、ガンに弾性がない場合、加圧力は膨張期間中に高くなり、ワークに応力が生じて、散りが発生することがある。これを避けるために、一般的に、溶接時間を増加し、電流を減少させる。

当社では時間と電流(電気的エネルギー)を省エネするため、加圧力をコントロールすることを開発した。加圧力は膨張期間中に高くなる。その間、加圧を下げることで散りの発生を防ぐ。

## 2.4 鍛造加圧力

抵抗スポットの品質は顧客の要求により変わる。例えば、航空産業の場合、品質には各種のクラスがある。もっとも厳しいクラスでは、ナゲット径がそろっていること、X線検査で欠陥がないことなどが要求される。

自動車産業ではナゲット径が鋼板の品質の基準として

用いられる。自動車メーカーによってはアルミニウム溶接の場合、同じ厚さではスチールに比べて大きめのナゲット径が要求され、また、細孔のないことが要求される。

細孔、とくに周辺の細孔は、アルミニウムのスポット溶接に疲労強度に著しい影響を及ぼすことが示されている。

加圧力システムは、可変加圧プログラムが得られることが必要である。固化段階の間に加圧して内部欠陥を減らすために、鍛造加圧力を溶接加圧力より高くする。接触抵抗による電流変化(増減)が生じないようにするために、鍛造加圧力を加えるタイミングは通電時間と同期させ正確である必要がある。

また、アルミニウム溶接は、接触抵抗の変化によりウエルドロブの変化があるため、通電前の加圧をコントロールすることでばらつきを抑える研究も行った。

## 2.5 スポット溶接の実験

以上の知見に基づいて、材料として乗用車に用いられているアルミニウム合金AA6022-T4(板厚1.2mm)を用いて各種条件でスポット溶接を行った。

その結果、良好なナゲットを得るために、比較的大きな基本加圧力を与え、一次加圧力を低下させることによって大きな最大引張せん断荷重を得ることが可能であることが明らかになった。

## 2.6 溶接部の検査

細孔の有無を検査するために各ケースのマクロ撮影が行われた。ケース毎に新しい電極が使われた。アノードはスライドの上部に置かれた。

アルミニウム合金AC3002(板厚2.5mm)を用い、サ

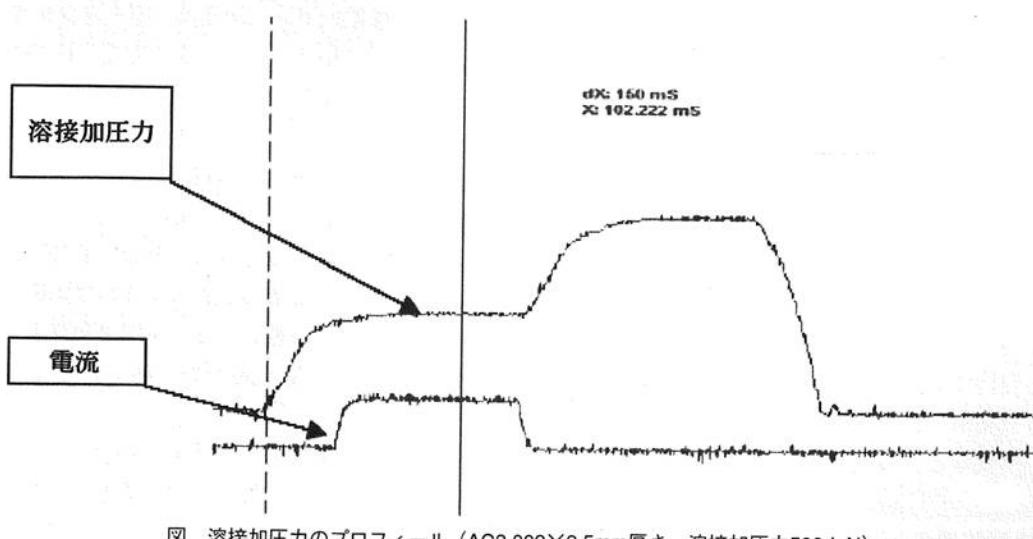


図 溶接加圧力のプロフィール (AC3,002×2.5mm厚さ、溶接加圧力500daN)

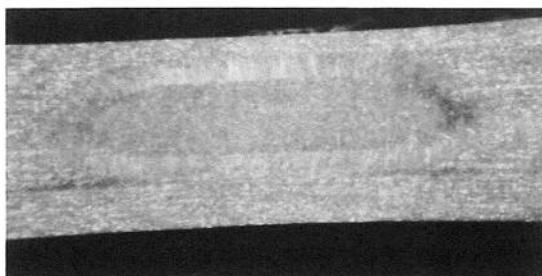


写真1 ケース2.5+2.5mm, 加圧力のプロフィール500/1,000daN

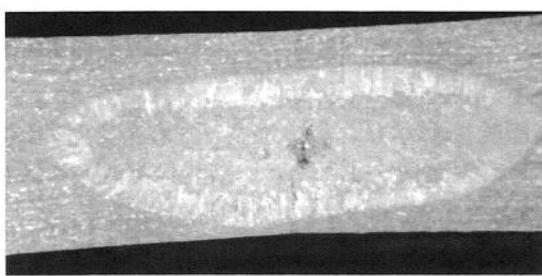


写真2 ケース2.5+2.5mm, 空気圧式500daN

一ボモータによる溶接加圧力のプロフィール（図、前ページ）の場合のスポット溶接部のマクロ検査写真を写真1に示す。また、空気圧式溶接加圧力の場合のマクロ写真を写真2に示す。

加圧力調整付きのサーボ駆動システムの場合、割れと細孔が大幅に少なくなっていることがはっきりと分かる。

過去に、動的抵抗を測定して溶接品質を制御する試みがいくつか行われた。この抵抗が溶接中に変化するスチールに比べて、アルミニウムの場合、サイクルの最初に接触がなくなるため、曲線の最初の部分で変化が生じる。きれいな電極では、曲線は短回路の曲線に比べて変化がほとんど見られない。

### 3 アルミニウム用抵抗溶接機

アルミニウムの抵抗溶接にはきわめて大きな溶接電流を必要とすることから、装置は大型大重量になり、大電流が必要なため大容量で消費電力も膨大なものになる。

アルミニウムの抵抗溶接において良好な溶接品質を得るために、溶接に必要として十分な溶接電流を供給することができる大容量の溶接機が必要となる。

アルミニウムの抵抗溶接においては優れた加圧力に関する性能が必要であり、溶接加圧力に関する主要な問題は加圧力の再現性である。実験室での再現性の達成は容易であっても、実用上、ガンの位置、モータの温度、ガン機構内部の摩耗など、再現性を悪くさせる多くの妨害要因がある。

従来、抵抗溶接機の加圧力は人力、水圧、空気圧、

油圧などが使用されてきたが、近年優れた加圧力としてサーボモータの技術が発達してきた。

仏・ARO社は抵抗溶接用加圧用サーボモータの分野で多大な経験を有している。1999年にAROは独自の開発を行った。当社も同時にその技術を共有して販売のために実験を重ねてきた。供給者の不安定さを避けるため、AROはとくに抵抗溶接向けのサーボアクチュエータの研究開発と製造の開始を決定した。2004年に4極サーボモータが製造され、世界各地の顧客に出荷された。

次にAROは新しい6軸サーボモータの開発に成功した。

#### ◇ 4軸サーボモータの再設計の必要性

- ・ある部品、例えば、ステンレス鋼鋳造ハウジングは製造が困難である。
- ・幅広い多様性は当初予測されていなかった。顧客の仕様を満足すること、

#### ◇ ユーザーから学んだ教訓

- ・頑丈さを向上する余地がある。
- ・さらに増加する用途に適合し得ない熱容量の制限がある。
- ・加圧力の再現性が要求レベルに達していない。

#### ◇ サーボガンに対する顧客の関心により、高い要求と多様化の要望が増えてきた。

- ・価格に対する要望
- ・軽量化の要望
- ・空冷のサーボモータの依頼
- ・新しいロボット（例えば、Kuka, Fanuc, Nachi, 安川、川重）への適合性の改善
- ・通電中の加圧力プログラム

#### ◇ 新しいオプションの実施

- ・遊星ローラネジに代わるボールネジ
  - ・他の種類のガン、例えば、ポータブルガンへの適応
- 当社は、8極サーボモータの開発に成功した。遊星ローラネジに代わるボールネジ、他の種類のガン、例えば、ポータブルガンへの適応、専用ドライバーによる5段加圧コントロール等、長い間のサーボガンの経験から理想的な中空サーボモータを完成させた。

溶接加圧力の性能を改善するとともに、溶接加圧力の柔軟性を向上させることもアルミニウムの溶接品質向上のために重要な課題である。主要な条件として、自動車産業における大量生産という厳しい作業条件も考慮した。

サーボモータ技術は、近年自動車製造ラインで広く認められているが、市販されている方策（ロボットの7番目の軸または外部のサーボボックス）には、溶接トラン

ス用のコントローラとは別に、モータ用のコントローラが常に備わっていた。溶接プロセスのプログラミング・インターフェースを2つに分割することに加えて、これは溶接サイクルにおける溶接電流と加圧力を正確に同期させるという必要性と相反する。この結果、FFHCと呼ばれる包括的な溶接プロセスコントローラを開発することになった。

当社はこれら幾多の問題点を解決して優れたアルミニウムの溶接品質を保証できる溶接機（写真3）を開発した。

- ・MFトランス（スポット溶接機用）：小型軽量抵抗溶接機用トランス（写真4、5）
- ・MFコントローラ：MFトランス用インバータ電源
- ・加圧コントロール式サーボモータ：小型軽量ハイスピ

ード中空モータ

- ・加圧モニタ装置（写真6）：サーボガン（写真7）の加圧力をグラフィックに表示とポイントごとの加圧力を記憶表示できる。
- ・サーボ加圧式スポット溶接機

## 4 おわりに

プロセス、とくに抵抗スポット溶接のような複雑なプロセスを制御することは、すべてのパラメータ、すなわち溶接時間、電流、加圧力および位置を全体として制御することを意味する。

今回報告した内蔵システムにより、電流と加圧力の複雑な形態を制御し、良好な溶接結果をもたらすことができる。まもなく動的な溶接品質も制御できるようになる。

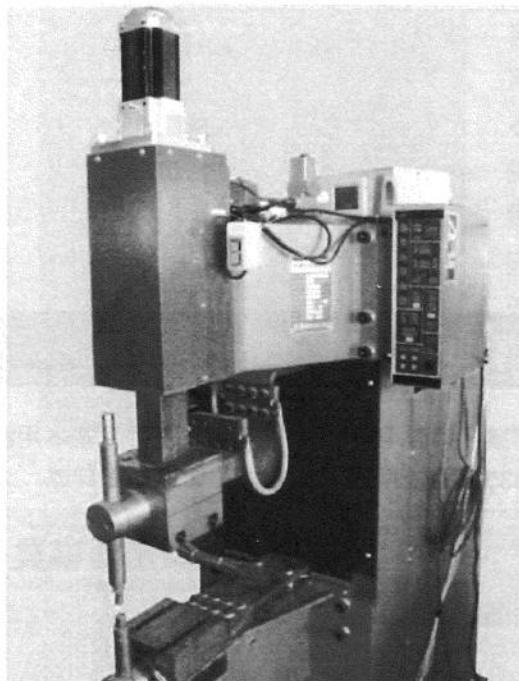


写真3 サーボ加圧式スポット溶接機

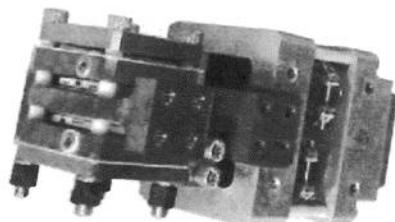


写真5 小型軽量抵抗溶接用トランス



写真6 加圧力モニタ装置



写真4 MFトランス用インバータ電源

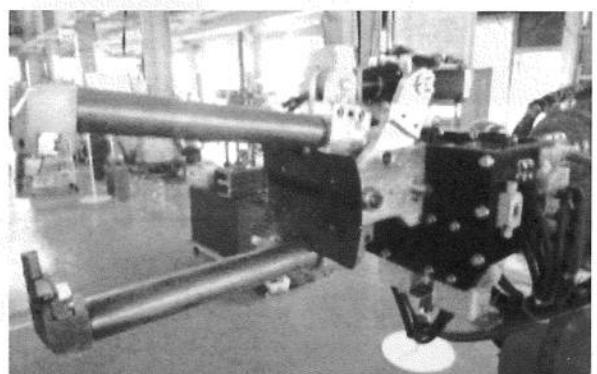


写真7 アルミニウム用サーボガン

この新しい手段は、アルミニウムのスポット溶接に良く適しているが、スチールのスポット溶接への適用、とくに特別の電流形態の使用が必要である高強度鋼への適用が今後行われると思われる。また、将来、特別の加圧力の設定が行える可能性もある。

接触抵抗に関しては、製造者からラインへの安定した材料のルートを維持する必要がある。電極に関しては、自動化により頻繁に電極の保全を行うという戦略を採用することが必要である。さらに、事後対策的な思いつきのように追加するのではなく、この重要な特徴をラインの最初の設計に取り込むことが重要である。

アルミニウムのスポット溶接にとって理想的なことは、寿命が尽きるまで電極を新品同様に状態に保つことである。この要因 $k$ そが一貫性と信頼性であり、したがって、抵抗スポット溶接プロセス全体コストに最良の影響を与える。

要約すると、FFHCは、時間、電流および加圧力を統一的に管理する全面的に統合された溶接プロセスコントローラであり、次の特徴を備えている。

- ・全面的に同期化された加圧力と電流のプロフィール
- ・加圧力の調整（電流の調整に加えて）

FFHCの利点の一つには、同じコントローラが任意の用途、すなわちロボット、定置式機械、マニュアルガンにも使えることである。また、これは溶接プロセス全体を扱うので、どの用途においても、例えば、使用されるロボットの種類と関係なく性能は同じである。したがって、アルミニウムの抵抗溶接における研究を行うためにはFFHCは理想的なツールである。

### 参考文献

- 1) 加圧力可変型重ね抵抗スポット溶接機を用いたアルミニウム合金AA6022の溶接部の評価（軽金属学会誌）