研 究

抵抗スポット溶接機用位置・力複合制御シリンダの開発*

(第1報 力制御シリンダのパラメータ最適化)

荒木獻次**, 陳劍波**, 陳星橋***, 石野裕二**

Development of a Motion and Force Compound Control Cylinder for Spot-Welding
(1st Report, Parameter Optimization of the Force Control Cylinder)

Kenji ARAKI, Jian-Bo CHEN, Xing-Qiao CHEN and Yuji ISHINO

In the spot welding, the electrode force is usually kept constant during a short welding time because of a too low response speed of the air cylinder and it can not satisfy the developing requirements of spot welding technology. A new motion and force compound control cylinder has been developed to control the electrode force at a high speed. It is composed of a motion control piston and force control piston on the same rod.

The optimal structural parameters and operating conditions of the cylinder are analyzed in the paper. Experiments indicate that the response time of the system for a step input is improved from 0.2 [s] for the conventional cylinder to 0.010 [s] for the cylinder developed here, and the bandwidth is improved from 10 to about 100 [Hz]. It will be possible with using this cylinder to avoid spattering during spot welding and to reduce the welding defects, and increase the welding strength. It can also be applied in other fields of fast control.

Key words: Pneumatics, Cylinder, Brake, Force control, Resistance spot welding

1. はしがき

抵抗スポット溶接は、低コスト化や防錆、表面飾りのために、飛行機、列車、自動車、家電製品等において、種々のめっき鋼や被覆アルミニウム合金の結合に広く使われている。例えば、1台の乗用車にはナゲットが約4000個ある。これらの材料は膨張や収縮特性、熱伝導性、電気伝導性の異なった基部金属やめっき金属あるいは被覆金属の多層金属を含んでいるので、適切な可変加圧力制御は溶接の質の改善や電極の寿命の延長に非常に有効と考えられる。なぜならば、加圧力を制御して、ナゲットの電気抵抗を制御し、溶接温度を制御でき、更に可変な加圧力でナゲットを鍛造して材料の結晶粒を微細化させ、表面の欠陥（過度の凹み、穴、散り）や内部の欠陥（割れ目や穴）を減らしたり、

防いだりできる。例えば、2枚の飛行機用アルミニウム合金板のスポット溶接は0.02秒から0.05秒の溶接の間に、加圧し鍛造する必要がある。

応答速度の速い油圧シリンダを使えば、専用油圧動力源が必要となり、溶接機の値段が高くなるし、また火災に関する安全性の問題も生じる。そのような理由から油圧シリンダはスポット溶接機のアクチュエータとしてはあまり使われていない。空気圧は現代の工場に経済的な共通動力源の一つとして常備されているため、スポット溶接機のアクチュエータとしては、一般に、空気圧シリンダが使われている。従来の空気圧シリンダは、空気圧室が大きく、短い通電時間内に加圧力を制御することはできない。H. GÖDERT^{1),2)}の実験によると、空気圧1 MPaを用いても、ステップ応答の応答時間は0.2秒かかり、溶接の通電時間より遅い。そこで、加圧力を速く制御するために異なるストロークの空気圧シリンダを組み合わせ、新しい運動と力の複合制御シリンダの開発を行った。異なるストロークのシリンダを組み合わせる原理を用いた空気圧アクチュエータは、研究論文としては、中野、田中の開発

*平成8年1月23日 原稿受付

**正員、埼玉大学工学部機械工学科
(所在地 〒338 埼玉県浦和市下大久保255)

***埼玉大学大学院

研究論文³⁾あり、その他製品としても各社でストロークの小さい補助のシリンダをロック（またはブレーキ）用として用いる中間停止空気圧シリンダを製造している。しかし、これらの空気圧アクチュエータの主目的は、位置決め制御あるいは位置制御である。ここで開発をすすめている空気圧アクチュエータは、力制御を主目的にしている点が他と異なる。ここで、開発した力制御シリンダの動特性を向上するため、そのダミーを作製し、サーボ弁とダミーシリンダ間の空気通路直径とダミーシリンダストロークの最適値を求めた。このダミーシリンダを用いた閉ループ系のステップ応答と周波数応答試験より、このMFCシリンダが抵抗スポット溶接に使用できそうなので、それらについて述べる。

2. 主な記号

- A_f : カピストンの有効断面積 $(8^2 - 4.5^2) \times 10^{-4} [\text{m}^2]$
 A_m : 運動ピストン有効断面積 $(9^2 - 4.5^2) \times 10^{-4} [\text{m}^2]$
 b : サーボ弁制御オリフィス周方向幅 $0.008\pi [\text{m}]$
 B : カシリンダの粘性抵抗係数 $[\text{N}/(\text{m}/\text{s})]$
 C_d : サーボ弁の流量係数 0.69
 E : サーボ弁の電圧入力 $[\text{V}]$
 I : 溶接電流 $[\text{A}]$
 k : 空気の比熱比 1.4
 K_v : サーボ弁のゲイン $5 \times 10^3 [\text{V}/\text{m}]$
 p : 圧力比 p_v/p_s
 p_c : 臨界圧力比 0.5283
 p_e : 大気圧 $101.3 \times 10^3 [\text{Pa}]$
 p_p : カピストンに作用する絶対圧力 $[\text{Pa}]$
 p_f : 圧力センサの絶対圧力 $[\text{Pa}]$
 p_v : サーボ弁出力ポートの絶対圧力 $[\text{Pa}]$
 p_s : 絶対供給圧 $[\text{Pa}]$
 R : 空気の気体定数 $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$
 T_e : 大気温度 $[\text{K}]$
 V : カシリンダの容積 $[\text{m}^3]$
 w : 質量流量 $[\text{kg}/\text{s}]$
 x : サーボ弁制御オリフィスの開き $[\text{m}]$
 r : 圧力比 p_e/p_v
 μ : 空気の粘性係数 $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$
 ω_v : サーボ弁の固有角周波数 $[\text{rad}/\text{s}]$
 ξ_v : サーボ弁のダンピング係数

3. 抵抗スポット溶接の原理

抵抗スポット溶接機は本体、コントローラ、電気回路、アクチュエータ等から構成されている。抵抗スポット溶接は、接合すべき2枚またはそれ以上の金属

Fig. 1 Three main welding parameters

板を電極の間に置き、空気圧シリンダでしっかりとはさんで加圧し、電極直下の板間の接触面に高い接触抵抗 $R [\Omega]$ 発生させ、低電圧大電流を短時間通電し、この板間接触部に基石状のナゲット（溶接金属部）を形成する方法である。ここで、加圧下で低電圧大電流 $I [\text{A}]$ を板材に流すと、短時間 $t [\text{s}]$ の間に $H = I^2 R t [\text{J}]$ の熱量が電極直下の板間接触面に集中して発生する。そのとき、電極は十分に高い温度伝導性と電流伝導性を持つ水冷式電極を用いると適度の温度に留まり、最初に、電極直下の板間接触面のまわりにだけ溶融した領域がつくられる。そこで、抵抗スポット溶接では、例えば、Fig. 1に示すように、溶接の質を左右する通電時間、溶接電流、加圧力を適切に制御しなければならない。これら三つはスポット溶接の3要素と呼ばれている。通電時間とは材料に溶接電流が流れている実際の時間のことで、発熱量、熱損失、溶接の出来具合などに影響する因子である。溶接電流の瞬間値は主として溶接材料の物理定数（固有抵抗値、熱伝導率等）と接触抵抗などに定ってくるが、平均電流はサイリスタによって適切に制御しなければならない。電極の加圧力は、一般には、溶接材料の材質、形状、寸法に合わせて設定される。加圧力の主な作用は加熱現象を円滑にすることと溶接の質の改善とにある。加圧力は、溶接中の局部加熱を抑え、溶接を均一にし溶接部に鍛圧効果を与えて多孔質や内部亀裂の発生を防ぐ作用があるために必要となる。

もし、このように溶接中に加圧力、溶接電流、通電時間の全てがうまく制御できれば、最適な溶接条件が達成でき、十分な張力と剪断力、なめらかで平らな溶接表面、長い電極寿命が得られる。

4. MFCシリンダ

スポット溶接機の上にあるアクチュエータは、上部の電極を垂直に動かし、加圧力を与えるために使用される。一般に、アクチュエータとしては空気圧シリ

ンダがよく用いられる。これは、空気圧縮機が経済的な動力源として工場に常備され、溶接機自体が圧縮機を備える必要がないから、溶接機のコストが低くなるためである。

しかし、通常スポット溶接機に使用されている空気圧シリンダは、力制御に必要な大きなピストン直径を有しており、また溶接作業でワークにつかえないように電極を逃がすのに必要なだけのストロークを有しているので、シリンダ室容積がかなり大きくなる。シリンダ操作時に、電極を下げて、下側シリンダヘッドからピストンまでの距離（間隙）をできるだけ小さくし、例えば1 [mm] 以下にすれば下側シリンダ容積を小さくでき応答速度を大きくできそうに思えるが、実際には、電極の消耗を配慮しなければならないので、それほど小さい間隙に設定することができないし、また、ワークの板厚も変わることがあるので、この間隙は普通10 [mm] 程度に設定されているようである。したがって、力制御の応答速度は、圧力制御弁を用いた開ループ制御系、あるいは圧力制御弁か流量制御弁を用いた閉ループ制御系いずれにせよ、せいぜい帯域幅10 [Hz] 前後、ステップ応答の立ち上がり（立ち下がり）時間0.3秒程度である。従って、0.06~0.2秒というような短い溶接時間の間に、加圧力を任意の値に制御することは難しい。くわえて、この大きなシリンダ室の空気圧シリンダをかなりの速度でピストンを運動制御するとすると、それだけ多量の空気流量を供給できるサイズの大きな制御弁やパイプが必要となってくる。したがって、制御弁からシリンダの制御室までの容積がますます大きくなり、応答が遅くなるばかりでなく、空気消費量も大きくなる。それゆえ、通常、やむをえず、加圧力が溶接中一定値にセットされた定加圧力式空気圧溶接機が使われている。また、特に高い溶接の質を求められるときには、他の高価な電気サーボアクチュエータが選ばれる。しかし、これとでも、加圧力に制限があり、大きな加圧力を必要とするときは問題がある。

抵抗スポット溶接機の空気圧シリンダは運動制御と力制御の2つの基本機能に分けられる。

電極移動（運動）制御中のシリンダの負荷は、ピストンその他の摺動部の摩擦であり、小さな力で打ち勝てる。また、電極移動はワークをよけるためなので、あまり位置精度を必要としない。従って、直径の小さい運動シリンダで事足りる。小径シリンダなら電極移動に要する空気が節約でき、シリンダも軽くなる。

また、電極を加圧するときの力制御は大きな力（4 kN以上）が必要であり、大きな直径のピストンが

必要であるが、ストロークは極めて小さいたとえば0.2mm程度で事足りる。従って、力（ちから）シリンダの容積を極めて小さく、例えば5~15 [cm³] することが可能となり、高速応答が期待される。

それ故、小径の運動制御ピストンと極めて短いストロークの大きな直径の力制御ピストンとを結合して、別々または複合して制御できるようにした、新しいシリンダを開発すればよいことになる。この運動と力とを制御できる複合制御シリンダをここではMFCシリンダまたは簡単にMFシリンダと呼ぶことにする。

新しく開発したMFCシリンダをFig. 2に示す。この位置制御シリンダの直径は力制御シリンダのそれよりかえって大きくなっているが、これはスポット溶接機に合わせて試作したものの組立図であり、その基本機能を果たすことがチェックされ、スポット溶接に要求される仕様に近い性能を持つことが確認されたものであり、後でこの特性例を示すので、この図を用いた。

MFCシリンダは、同じロッドに運動制御ピストンと

Fig. 2 Newly-developed MFC cylinder

力制御ピストンが作用できるようにしたものである。前者は普通のピストンである。後者は、ロック装置のオン、オフで力制御ピストンを作用させたり、作用させなくできる特殊な構造となっている。

作動方法：ロック弁オフの状態では、運動制御ピストンでロッドを動かして溶接材料を挟み、ロック弁をオンにすると、ブレーキシューが同じロッドを締め付けて、力制御ピストンを同じロッドの上にロックする。ブレーキシュー下端にある支持ばねが可能な限り力制御ピストンを押し上げ、シリンダ室の容積を小さくする。すると、力制御の応答速度がそれだけ増大するこ

Fig. 3 New spot welding machine with MFC cylinder

Input = 2 ± 0.5 [V],
Supply pressure = 0.3 [MPa (abs.)]

Fig. 4 Frequency responses of MFC cylinder applied in spot welding machine

とになる。その後、サーボ弁などを使って高速で力制御シリンダの内圧を高速制御して力制御することができる。

新しく開発したロック装置は、柔軟なシールとブレーキシューとばねで構成されている。通常はブレーキシュー間のばねがブレーキシューを円周方向に押し広げ、ブレーキシューはロッドの周りに極めて僅かな隙間を形成し、ロッドとは無接触状態となり、その間の摩擦はなくなる。その隙間は極微量であり、更にフレキシブルシールでシールされた空間はできる限り小さくしてあるので、ロック装置は素早くオン・オフできるし、作動空気消費量も小さくなる。Fig. 3はこのMFCシリンダを抵抗スポット溶接機の加圧力制御に応用した図である。抵抗スポット溶接機に応用したMFCシリンダの実験結果をFig. 4に示す。空気圧システムの帯域幅は元のシリンダの1 [Hz] 前後から新しいシリンダの100 [Hz]を超えるところまで改善された。その構造パラメータを最適化すれば更に広い帯域幅が得られるものと思われる。そこで、ここでは、他の要素の影響が排除でき、実験を便利にするため、ダミーシリンダを用いてその構造パラメータの最適化について調べる。

5. 数学モデル

ここでは、Fig. 5のように、MFCシリンダのダミーを使用したスポット溶接機の力制御システムについて

Fig. 5 Force control system with a dummy MFC cylinder

考察する。

5.1 サーボ弁の運動方程式

電気空気圧サーボ弁の伝達関数は次式で表されるものとする。

$$\frac{X}{E} = \frac{K_v}{1 + 2\xi_v \left(\frac{s}{\omega_v} \right) + \left(\frac{s}{\omega_v} \right)^2} \quad (1)$$

5.2 サーボ弁の流量方程式

電気空気圧サーボ弁の二つの三方弁の片方を使い、その出力ポートを力制御シリンダの空気圧室に接続する。ここで、操作空気は理想気体の断熱流れと仮定する。供給ポートから力制御シリンダ空気圧室の方に流入する空気の質量流量 w は次の式によって与えられる。

$$w = C_{ab} x p_s \sqrt{\frac{2}{RT_e}} f(p) \quad (2)$$

ここで

$$f(p) = \begin{cases} \sqrt{\frac{k}{k-1} \left(p^{\frac{2}{k}} - p^{\frac{k+1}{k}} \right)} & (p_c \leq p \leq 1) \\ \sqrt{\frac{k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \left(\frac{p_e}{p_s} \right)^{\frac{2}{k}}} & (p_s \leq p \leq p_c) \end{cases} \quad (3)$$

力制御シリンダの空気圧室の方からサーボ弁制御オリフィスを経て、大気中に流出する空気の質量流量は次の式によって与えられる。

$$w = C_{ab} x p_s \sqrt{\frac{2}{RT_e}} F(r) \quad (4)$$

ここで

$$F(r) = f(r) \sqrt{\frac{k+1}{k} \left(\frac{p_e}{p_s} \right)^{\frac{k-1}{k}}} \left(r = \frac{p_e}{p_s} \right) \quad (5)$$

5.3 力制御シリンダ

サーボ弁の出力ポートから力制御シリンダの空気圧室まで空気通路は内径 d_p 、長さ l_p の円筒形絞りの層流流れとして、その質量流量が次式で与えられるものとする。

$$w = \frac{\pi d_p^4}{128 \mu l_p R T_e} \frac{p_v^2 - p_p^2}{2} \quad (6)$$

空気はこの通路の出口からシリンダ室にシリンダヘッド面力制御ピストン端面の平行二円板の隙間を経て圧力センサの空気圧室に流入する。ピストンの円板内径を d 、円板外径を D 、円板の隙間をピストンのストローク L とすれば、層流で等温変化のときの質量流量は

$$w = \frac{d^3 h^3}{12 \mu l_p R T} \frac{p_p^2 - p_f^2}{2} = \frac{3(d_1 - d_2)L^3(p_p^2 - p_f^2)}{16 \mu \pi (d_1 + d_2) R T_e} \quad (7)$$

$$b_f = (d_1 - d_2)/2 \quad (8)$$

$$l_f = \pi(d_1 + d_2)/3^2 \quad (9)$$

Fig. 6 Comparison between simulation and experiment

ここで b_f : 隙間の幅, l_f : 隙間の有効長さ。

理想気体の断熱変化として、この容積室の連続方程式は、

$$w = \frac{V}{kRT_e} \frac{dp_f}{dt} + \frac{pA_f}{RT_e} \frac{dy}{dt} \quad (10)$$

となる。

以上の数学モデルを用いてスポット溶接機の空気圧システムFig. 5のシミュレーションを行う。Fig. 6にそのシミュレーション結果の一例と対応するは実験結果の比較を示す。位相特性は両者に若干の相違が見られるが、ゲイン特性はかなり良い一致が見られる。

6. カシリンダのパラメータ最適化

ここではストローク (L) 、シリンダ空気通路直径 (d) の各パラメータが力制御シリンダの動特性に及ぼす影響を調べるため実験を行う。Fig. 5のようなパラメータ実験解析用ダミーシリンダは空気通路直径と長さピストンの内外直径つまり有効面積がMFCシリンダと同じである。また、このシリンダはねじによりピストンのストロークを調整することでシリンダ容積の調整が可能で、空気通路直径が異なるパイプを入れ換えることにより空気通路直径を段階的に変化させることができる。これにより各パラメータを変化させた状態でステップ応答試験、周波数応答試験を行い最適

(7a) Step response for piston stroke $L=0$ [mm] (8a) Step responses for pipe diameter $d=2, 4, 6$ [mm] (7b) Step response for piston stroke $L=0.5, 1, 2$ [mm] (8b) Pressure responses for pipe diameter $d=2, 4, 6$ [mm]

(7c) Frequency responses for piston stroke 0, 0.5, 1, 2 [mm]

Pipe diameter 4 [mm], Supply pressure 0.5 [MPa(abs.)], Input maximum 5 [V], Pressure feedback gain 15.6 [V/MPa]

Fig. 7 Pressure responses for piston strokes

Piston stroke $L=1$ [mm], Supply pressure 0.5 [MPa(abs.)], Input maximum 5 [V], Pressure feedback gain 15.6 [V/MPa]

Fig. 8 Pressure responses for pipe diameter $d=2, 4, 6$ [mm]

値を求めた。

6.1 ピストンストロークの影響

実験結果をFig. 7に示す。ステップ応答試験の結果をみると、立ち上がりとしち下がりとの応答に著しい相違が見られるのがわかる。立ち上がり時間はほぼ3 [ms] 前後で、 $L=0.5$ [mm] のときは100%に近い大きな行き過ぎが見られ、 L が増加すると減少する。一方、立ち下がり時間は20 [ms] 前後で過減衰になっている。立ち下がり時間は、立ち上がり時間の約10倍に近い。これは空気圧抵抗容量系の充填と放出時の特性に起因するものであり、充填、放出のそれぞれの場合に適切な制御方法（制御アルゴリズム）を導入するこ

とによって、立ち上がりとしち下がりとをほぼ同じような適度のダンピングのきいた応答にすることができると思われるが、これは次の機会に報告する。立ち下がり立ち上がりの傾きはストローク (L) の値が小さいほど大きい。

しかし、 $L = 0$ [mm] 近傍ではシリンダ内への空気流入に対しシリンダ室表面の抵抗が大きいため、入力に対する応答の遅れが大きい。また、 $L = 2$ [mm] 以上ではシリンダ容積の増加に伴う空気流入、流出の遅れがみられる。周波数応答試験の結果からも $L = 0 \sim 0.5$ [mm] に最適値があると考えられる。

6.2 シリンダ管路直径による影響

実験結果をFig. 8に示す。ステップ応答の立ち上がりとしち下がりとの違いは6.1で述べたのとほぼ同様である。ステップ応答試験の結果をみるとシリンダ空気通路値 $d = 2$ [mm] では、空気通路の抵抗が大きいため、 $d = 4, 6$ [mm] のときに比べ応答の遅れがみられる。また、周波数応答の方も他に比べて遅れがみられる。 $d = 4, 6$ [mm] の場合の立ち上がり時間にはあまり大きな差がないといえる。しかし、立ち下がり時、すなわち空気流出時に関しては、僅かではあるが $d = 6$ [mm] の結果は他に比べて遅れが見られ、シリンダ側負荷容積増加の影響がみられる。周波数応答試験の結果からも $d = 4$ [mm] の時のほうがやや応答性が良いことが分かる。

7. む す び

新たに開発したMFCシリンダを抵抗スポット溶接機に応用する実験より、以下のことが明らかとなった。

1) 立ち上がりとしち下がりとの応答に、空気圧系の非線形特性に起因する著しい相違がみられ、立ち上がり時間はほぼ3 [ms] 前後であり大きな行き過ぎがみられストローク L の増大と伴に減少する。立ち下がり時間は20 [ms] 前後と大きく、極めて過減衰になっている。また、力制御系の帯域幅約200 [Hz] が得られた。

2) 適切なパラメータは、力制御シリンダのストロークについては $0 \sim 0.5$ [mm] (または初期容積にして $6 \sim 12$ [ml]) の間にあり、シリンダ空気通路直径については $4 \sim 5$ [mm] 前後であった。

3) スポット溶接機において、空気圧アクチュエータによる電極の加圧力制御実現の可能性がでてきた。

終わりに実験に協力いただいた本学学生厚木雄幸君に感謝します。また、MFCシリンダの開発製造に協力頂いたトキワ工業の近藤茂社長、シールを提供いただいた藤倉ゴムの佐藤雄治部長、染谷課長に謝意を表し

ます。

参 考 資 料

- 1) H. GÖDERT: Kombinierte Lage-/Kraftregelung an einer pneumatischen Punktschweißzange, Ölhydraulik und Pneumatik, 36-8, 509/511 (1992)
- 2) H. GÖDERT: Der geregelte Pneumatikantrieb -eine interessante Alternative, Ölhydraulik und Pneumatik, 39-5, 397/400 (1995)
- 3) 中野・オズワルド・浅蔭・田中: 空気圧・圧電超音波複合形アクチュエータによる精密位置決めシステム, 日本油空圧学会, 油圧と空気圧, 24-3, 102/106 (1993)
- 4) 荒木・土屋・陳・湯室・石野: Development of a New Actuator for Spot Welding Machine, 日本油空圧学会, 平成5年春季油空圧講演会講演論文集113/116 (1993)
- 5) K. ARAKI, J.B. CHEN, A. YUMURO, Y. ISHINO: High Speed Force Control of Spot Welding Machine, First Asian Control Conference, Japan, 247/250 (1994)
- 6) K. ARAKI, J.B. CHEN: A New Motion & Force Parallel Control Cylinder for Fast Response and High Precision, The 4th Triennial International Symposium on Fluid Control, Fluid Measurement and Visualization, France, 919/924 (1994)
- 6) 荒木・陳・湯室・石野: A New Motion & Force Parallel Control Cylinder and Its Application to Spot Welding Machine, 日本油空圧学会, 平成6年秋季油空圧講演会講演論文集, 125/128 (1994)
- 7) 荒木・陳・石野: 力・位置複合制御シリンダの開発及び溶接機への応用, 日本機械学会第73期全国大会「ニューアクチュエータ」, 294/295 (1995)
- 8) J.B. CHEN, K. ARAKI, Y. ISHINO: A New Motion & Force Control Cylinder and Its Application to Spot Welding Machine, The 2th International Symposium on Fluid Power Transmission and Control, China, 42/47 (1995)
- 9) 日本油空圧学会: 油空圧便覧, 68/72, オーム社 (1989)
- 10) T. Lyman: Metals Handbook, Vol. 6, 401/475, American Society for Metals (1971)