特集号

研究論文

5056アルミニウム合金の摩擦圧接条件の最適化

山口 博*・小川 恒一*・坂口 一彦**

Optimization of friction welding condition of 5056 aluminum alloy

Hiroshi YAMAGUCHI*, Koichi OGAWA* and Kazuhiko SAKAGUCHI**

The optimum welding condition for a 5056 aluminum alloy was investigated using a response surface method. The optimum welding condition to yield maximum tensile strength at the weld was attained through a steepest ascent path. A second-order equation predicting the weld strength accurately was established. The successful weld showed 89.2% joint efficiency in tensile strength. The optimum welding condition was obtained using a comparatively small up-set burn off. Therefore, the economical consideration such as a loss of material was not needed to be taken into account. The observation of the weld showed that the friction layer formed at the friction interface disappeared in the successful weld.

Keywords: solid phase welding, friction welding, joint efficiency, tensile strength, aluminum alloy

(Received June 10, 1991)

1. 緒 言

摩擦熱を利用する固相接合法がわが国に導入されてはや20数年余りが経過した。その間、同法は自動車部品を始め、その他の産業機械部品の接合に利用され著しい発展を遂げた。同法は再現性が良好で、しかも異種金属が容易に接合できるといった大きな利点を有することから、さらに今後の発展が期待されている。

一方、同法に関する過去の研究報告を圧接条件の選定に関してみると、製品化を主体とした材料、形状に関する研究報告がほとんどである。しかも、それらの報告は、使用される摩擦圧接機の容量に制限があるため、個々の圧接機に応じた比較的狭い条件範囲に基づいている。しかしながら今後は、多様化した製品の圧接や新材料の圧接の増加が予測されることから、これに対応し得る適切な摩擦圧接手法が望まれる。そのためには、幅広い圧接条件下における各種材料と形状に関する最適摩擦圧接条件の確立が切望されている。

現在のところ、最適な圧接条件を求める方法は確立さ

れておらず、圧接する材種や形状によってはかなりの努力を要する場合が多い。熱軟化によって継手効率が100%に達しないアルミニウム合金もその一例で、こうした材料ではとくに継手効率を高めるための圧接条件の選定が必要である。このようなことから、最適圧接条件を求めるための方策、あるいは、具体的な最適圧接条件の模索は、摩擦圧接法の適用範囲の拡大上欠くべからざるものである。

著者らは昨今、これらの目的のために圧接条件を比較的広範に設定し得るブレーキ式、イナーシャ式両用の実験用摩擦圧接機を製作した。そして、応答曲面法という一種の統計的手法を用いて最適摩擦圧接条件を求める研究を開始した。

本報告においては、5056アルミニウム合金を供試材とし、応答曲面法を用いてブレーキ、イナーシャ両方式のもとで摩擦圧接を行い、引張強さが最大となる最適摩擦圧接条件を求めた。さらに、最適圧接条件と摩擦挙動の関係、最適圧接条件による圧接部の様相などについても若干の検討を加えた。

* 大阪府立大学総合科学部（堺市）。College of Integrated Arts and Sciences, University of Osaka Prefecture (Sakai-shi, Osaka).

** 同志社大学工学部（京都市）。Faculty of Engineering, Doshisha University (Kyoto-shi, Kyoto).

2. 実験方法

従属変数 y と自変数 $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k$ の間の関係を表す関数

$$y=F(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k) \quad (1)$$

がわかれば、それを用いて最適な $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k$ の値を求めることができる。式(1)の F を応答関数、この関数の描く曲面を応答曲面と呼ぶ。通常、特別な場合以外は、式(1)の関数を正確に知ることはできないが、実験点近傍で多項式近似などを行うことにより、近似的な関数形を得ることができる。

いま、最適点を式(1)の関数値 F を最大にする点であると仮定する。応答曲面法による基本的な考え方は、まず関数値 F を低い次数の多項式で近似して、最小2乗法により係数を推定し、その適合性を評価した後、推定された曲面を用いて最適な条件を模索するものである。最適点への接近法として、Box と Wilson の方法¹⁾を用いた。この方法で式(1)を1次関数のモデルにあてはめる部分の計画を1次計画、2次関数のモデルにあてはめる部分の計画を2次計画といっている。

自変数 X_i である圧接条件因子（以後、圧接因子と呼ぶ）には、摩擦圧力 P_1 、アプセット圧力 P_2 、摩擦時間 t_1 、アプセット時間 t_2 、回転数 N 、ブレーキ時間 t_B 、アプセット圧力開始時期 P_{2t} 、ブレーキ開始時期 B_{tt} などがあるが、今回は自変数（圧接因子） X_i に $P_1, P_2, t_1, t_2, N, t_B$ の6因子をとり、従属変数 y に引張強さ σ_B をとって、 $1/2 \cdot 2^k$ 型要因計画に基づいて実験を行った。自変数である6個の圧接因子が1次関数のモデルにあてはまる場合には、データの構造式は次のように表される。

$$\begin{aligned} \hat{y} = & \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 \\ & + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 \pm e_i \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、

- $\hat{y}$: 引張強さの推定値
- $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_6$: パラメーター（回帰係数）
- $X_1, X_2, \dots, X_6$: コード化された変数²⁾
- e_i : 実験誤差

次に、実験結果を式(2)に代入してパラメーター β_i を求め、最適点の方向すなわち式(2)を大きくする方向(最大傾斜方向)に各因子の水準を上下させながら、逐次実験を繰り返して最適点を推定する。なお、実験を繰り返す、あてはまりの検定を行って実験点が1次関数のモデルにあてはまらなくなれば、式(3)で表される2次関数のモデルに移行し、さらに逐次、実験を繰り返して最適点を推定する。

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j \quad (3)$$

本実験に用いた供試材の化学成分と機械的性質を

Table 1 Chemical composition of base material (mass%)

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
A5056BD-H34	0.08	0.10	0.02	0.06	4.55	0.07	Tr.	Tr.	bal.

Table 2 Mechanical properties of base material

Material	Yield point $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile strength σ_B (MPa)	Elongation δ (%)	Reduction of area ψ (%)
A5056BD-H34	135	307	21	32

Fig. 1 Tensile test specimen for weld joint.

Table 1 および Table 2 に示す。供試材を全長80 mmに切断し、圧接面側を端面から20 mmの長さだけ直径14 mmになるように旋削加工して圧接母材とした。また、圧接後引張試験に用いた試験片の形状・寸法を Fig. 1 に示す。さらに、圧接部の組織を調べるために、圧接部断面を研磨し3%硝酸水溶液で腐食させた。

3. 実験結果と考察

3.1 応答曲面法による最適点の予測

応答曲面法を応用して次の順序で最適点を求めた。Table 3 に示す圧接条件で、1次計画1回目の実験を Table 4 の $1/2 \cdot 2^6$ 要因計画に基づいて行い、仮定した一次のモデル式が妥当かどうかを分散分析を行い検討した。その結果得られたモデル式は推定式としては十分ではないことが判明した。そこで、Table 5 に示すような圧接条件で1次計画2回目の実験を行った。計算の結果、次の推定1次関数を得た。

$$\begin{aligned} \hat{y} = & 233.3 + 0.4X_1 + 33.7X_2 - 6.0X_3 + 1.7X_4 \\ & - 25.1X_5 - 14.4X_6 \pm 9.38 \end{aligned} \quad (4)$$

1 回目の実験と同様の操作により、式(4)が妥当か否かについて中心点で検討した結果（付録の Table A.1 参照）、推定値と実験値との差が3%とわずかなので、式(4)は妥当な推定式と認められた。そこで、最大傾斜方向に変数の値を変化させて、逐次、実験を行った。付録の Table A.2 にその過程と結果を示す。

ここで、本来最大傾斜方向に沿ってすべての変数値を上下させて最適点を求めるべきであるが、今回は実験総

Table 3 Factor levels for 1st factorial design

Variables			Levels set for experiments			
Friction welding factors ζ_k		coded	Low(−1)	High(+1)	Center(0)	Unit size
Friction pressure	P_1 (MPa)	X_1	10	30	20	10
Up-set pressure	P_2 (MPa)	X_2	20	40	30	10
Friction time	t_1 (s)	X_3	1.0	3.0	2.0	1.0
Up-set time	t_2 (s)	X_4	1.2	1.6	1.4	0.2
Rotating speed	N (rpm)	X_5	1500	3000	2000	+1000, −500
Braking time	t_B (s)	X_6	1.0	3.0	2.0	1.0

Table 4 Design matrix and experimental results of the 1st factorial experiment

Trial No.	Design matrix						Tensile strength σ_B	Trial No.	Design matrix						Tensile strength σ_B
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6			X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	
1	1	1	1	1	1	1	160	17	−1	1	1	1	1	−1	216
2	1	1	1	1	−1	−1	209	18	−1	1	1	1	−1	1	277
3	1	1	1	−1	1	−1	203	19	−1	1	1	−1	1	1	90
4	1	1	1	−1	−1	1	263	20	−1	1	1	−1	−1	−1	174
5	1	1	−1	1	1	−1	219	21	−1	1	−1	1	1	1	292
6	1	1	−1	1	−1	1	239	22	−1	1	−1	1	−1	−1	182
7	1	1	−1	−1	1	1	217	23	−1	1	−1	−1	1	−1	246
8	1	1	−1	−1	−1	−1	243	24	−1	1	−1	−1	−1	1	152
9	1	−1	1	1	1	−1	177	25	−1	−1	1	1	1	1	145
10	1	−1	1	1	−1	1	192	26	−1	−1	1	1	−1	−1	—
11	1	−1	1	−1	1	1	204	27	−1	−1	1	−1	1	−1	146
12	1	−1	1	−1	−1	−1	—	28	−1	−1	1	−1	−1	1	—
13	1	−1	−1	1	1	1	185	29	−1	−1	−1	1	1	−1	158
14	1	−1	−1	1	−1	−1	189	30	−1	−1	−1	1	−1	1	—
15	1	−1	−1	−1	1	−1	175	31	−1	−1	−1	−1	1	1	74
16	1	−1	−1	−1	−1	1	255	32	−1	−1	−1	−1	−1	−1	—

Table 5 Factor levels for 2nd factorial design

Variables			Levels set for experiments			
Friction welding factors ζ_k		coded	Low(−1)	High(+1)	Center(0)	Unit size
Friction pressure	P_1 (MPa)	X_1	20	40	30	10
Up-set pressure	P_2 (MPa)	X_2	40	60	45	+15, −5
Friction time	t_1 (s)	X_3	1.0	3.0	2.0	1.0
Up-set time	t_2 (s)	X_4	2.5	5.5	4.0	1.5
Rotating speed	N (rpm)	X_5	2500	3500	3000	500
Braking time	t_B (s)	X_6	0.9	2.7	1.8	0.9

数を少なくするために、変動量の少ない $X_1(P_1)$, $X_3(t_1)$, $X_4(t_2)$ の3因子を変化させず、Table 5に示す中心値で固定し、他の3因子のみを増減させて実験を行うこととした。

1次計画3回目以降の実験は3因子2水準すなわち²³

要因計画で、2回目の実験と同様に推定1次関数の適合性を評価しながら、逐次、実験を行った。そして、いずれの因子も有意な差がなくなった*1時点で2次計画に移行した。このときの推定1次関数は次式のように求めら

*1 5%の有意水準でF検定を行った。

Table 6 Extended experimental points and results for composite design

Trial No.	Design matrix			Tensile strength σ_B (MPa)
	X_2	X_5	X_6	
93	1.68	0	0	275
94	-1.68	0	0	326
95	0	1.68	0	328
96	0	-1.68	0	319
97	0	0	1.68	324
98	0	0	-1.68	325
99	0	0	0	323
100	0	0	0	324
101	0	0	0	322
102	0	0	0	317

Table 7 Tests of optimum experimental point

No.	P_1	P_2	t_1	t_2	N	t_B	σ_B (MPa)	δ (mm)
C-1	35	87	2	6	2175	0.8	338	7.8
C-2	35	87	2	6	2175	0.8	335	7.8
C-3	35	87	2	6	2175	0.8	337	7.8

れた。

$$\hat{y} = 324.4 + 5.0X_2 - 4.9X_5 + 5.7X_6 \pm 13.6 \quad (5)$$

次に、2次中心複合計画は **Table 6** のように行った。2次式のモデルは式(3)から

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 X_2 + \beta_2 X_5 + \beta_3 X_6 + \beta_4 X_2^2 + \beta_5 X_5^2 + \beta_6 X_6^2 + \beta_7 X_2 X_5 + \beta_8 X_2 X_6 + \beta_9 X_5 X_6 \pm e_i \quad (6)$$

となる。

回帰係数 β_i および標準誤差 e_i の計算は2次計画移行時の実験の数値も考慮して行った。まず、仮定した2次のモデル式が妥当かどうかを分散分析を行い検討した。その結果有意とは認められず^{*2}、式(6)は適合していると判断できた。**Table A.3** にその分散分析表を示す。また、1次、2次の項とも有意差が認められないので、応答曲面のいわゆる静止領域近傍に入ったものと考えてよい。すなわち、最適点近傍であるといえる。そこで、モデルの不適合の誤差をプールして再度分散分析を行い、回帰係数 β_i および標準誤差 e_i を求め、式(6)に当てはめると式(7)に示すような2次の多項式が得られた。

$$\hat{y} = 321.0 + 9.2X_2 - 4.0X_5 - 3.3X_6 - 5.5X_2^2 + 2.5X_5^2 + 3.0X_6^2 + 6.2X_2X_5 + 5.2X_2X_6 - 1.7X_5X_6 \quad (7)$$

この関数を最大にする最適点を求めるために、2乗の項だけを含むいわゆる2次式の標準形に座標変換を行うと次式となる。

$$Y - 324.7 = 3.7X_2^2 + 3.6X_5^2 - 7.3X_6^2 \quad (8)$$

^{*2} 5%の有意水準でF検定を行った。

Fig. 2 Relation between tensile strength and total burn-off quantity.

これから最適点を求め、圧接条件の値で表すと

$$P_1 = 35 \text{ MPa}, P_2 = 87 \text{ MPa}, t_1 = 2.0 \text{ s}, t_2 = 6.0 \text{ s}, N = 2175 \text{ rpm}, t_B = 0.8 \text{ s}$$

となる。最後に、得られた最適点の圧接条件のもとで圧接を行って、圧接部の引張強さを求めた結果、**Table 7** に示すように $\sigma_B = 335 \sim 338 \text{ MPa}$ という高い値を得た。

3.2 引張強さと寄りしろの関係

Fig. 2 に応答曲面法にもとづいて行ったすべての実験点で得られた引張強さ σ_B と寄りしろ U_i の関係を示す。図から、全実験点とも母材値 (377 MPa) に到達しないことがわかる。次に、応答曲面法で得られた最適点での引張強さをプロットすると (黒丸)、全実験点の最高点付近に存在し、継手効率では89.2%の高い値が得られた。さらに、比較的高い引張強さを得るのに必要な寄りしろは約5~22 mmの範囲にあるが、最適点を得るのに必要な寄りしろは約7.5 mmで比較的少ない。他方、S45C炭素鋼の場合には、寄りしろを少なくする方向に最適点を見いだす工夫が必要であるが³⁾、本研究に用いた材種では最適点が比較的少ない寄りしろで得られたことより、この種の材料に応答曲面法を応用する場合には、母材の過度の変形 (損失) による経済的配慮を従属変数に施す必要のないことが考えられる。

3.3 圧接部のマクロ組織

応答曲面法によって得られた各種条件の中で、引張強さの低い順から高い順に並べた圧接部断面のマクロ組織の例を **Fig. 3** に示す。図から、引張強さが低い場合に

Fig. 3 Macrophotographs of friction weld.

は、界面に幅広く、しかも明瞭な摩擦層（写真の白い線条痕）が形成されるのが認められる。他方、引張強さが高くなるにつれ（すなわち、最適点に接近するにつれて）摩擦層の幅が狭くなり、ついには軸中心近傍の明瞭な摩擦層が消失する。この結果から、巨視的にみて圧接部全域で明瞭な摩擦層が消失すれば、理想的な継手が作製できるものと推測できる。実際、摩擦層が明瞭な場合に

は、明瞭でない場合に比較して疲労強度が低下するといわれている⁴⁾。

最後に、本研究においては圧接面直径を14 mm一定として実験を行った。しかし、実際には圧接面直径は無数にあり、これらを考慮した最適化を行う必要がある。こうした研究によって始めて普遍的な最適摩擦圧接条件が確立されるものとする。今後の課題としたい。

4. 結 言

5056アルミニウム合金の最適摩擦圧接条件を求めるために、圧接条件因子を自変数、圧接部の引張強さを従属変数として、応答曲面法を用いて圧接実験を行った。その結果、圧接部の引張強さを最大とする最適点が得られた。そして、その最適点について再度確認実験を行った結果、89.2%の高い継手効率が得られた。また、この最適点が寄りしろの比較的小さい圧接条件で得られたことから、寄りしろを加味した最適化を行うことができ、強度および経済性の両面からの検討が可能と思われる。

また、マクロ組織の観察によると、最適点、すなわち良好な圧接継手では界面の明瞭な摩擦層は消失する傾向があった。

参 考 文 献

- 1) G. E. P. Box and K. B. Wilson: J. Roy. Statist. Soc., Ser. B, **13** (1951), 1.
- 2) S. M. Wu: J. Eng. Ind., Trans. ASME, Ser. B, **86** (1964), 105.
- 3) 山口 博, 小川恒一, 加賀精一, 越智 秀, 坂口一彦: 溶接学会全国大会講概, 第48集, (1991), 136.
- 4) 小川恒一, 中山英明, 大植義夫, 蓮井 淳: 軽金属溶接, **25** (1987), 6.

付 録

Table A.1 Comparison of estimated value and observed value

Trial No.	variables						estimated value y	observed value σ_B (MPa)	ratio σ_B/y
	P_1	P_2	t_1	t_2	N	t_B			
201	30	45	2	4	3000	1.8	233	265	1.14

Table A.3 Analysis of variance for composite design

Factors	Sum of squares	Degree of freedom	Mean squares	F ratio
Regression	2.777×10^2	9	3.085×10	3.08
(1st order)	1.518×10^2	3	5.059×10	5.05
(2nd order)	1.259×10^2	6	2.098×10	2.09
Lack of fit	7.266×10	5	1.453×10	1.45
Pure error	3.005×10	3	1.002×10	—
Total	6.823×10^2	17		

Table A.2 Calculation of steepest ascent path and subsequent trials on the path

variables	P_1	P_2	t_1	t_2	N	t_B	estimated value γ	observed value σ_B (MPa)
base level	30	45	2	4	3000	1.8		
unit (X)	10	15	1	1.5	500	0.9		
estimated slope (b)	0.44	33.7	-6.0	1.67	-25.1	-14.4		
unit (Xb)	4.4	505.5	-6.0	2.51	-12550	-13.0		
possible trials on the path of steepest ascent	35	52.5	1.5	4.75	2750	1.35	282	282
	40	60	1.0	5.5	2500	0.9	330	320
	45	67.5	0.5	6.25	2250	0.45	378	337