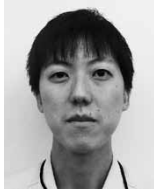


(技術資料)

# 自動車構造部材向けアルミニウム合金パネル材の抵抗スポット溶接

## Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy Sheets for Automotive Structural Members



青木拓朗\*<sup>1</sup>  
Takuro AOKI



松本 剛\*<sup>1</sup>  
Tsuyoshi MATSUMOTO

For weld joining in the application of aluminum panels to automotive structural members, there are high expectations that resistance spot welding will be adopted, since it has been widely used for steel and requires no secondary materials. This paper introduces a servo-electrical robot welding gun system, recently released in the market, which has been adopted to the resistance spot welding of aluminum alloy sheets with a thickness of 2 mm, examines the conditions of its application, and reports the evaluation results for the joints. For a sheet of KS6K21-T4 with a thickness of 2 mm and a sheet of JIS A5182-O with a thickness of 2.3 mm, 300-spot electrode tip life was verified by a tensile shear test and cross tension test, which confirmed that the strength was stably maintained, especially after 100 spots. As for fatigue strength, the fatigue limit strength was evaluated to establish a guideline for application to structural members.

まえばき = 地球温暖化防止に貢献する取り組みの一つとして自動車の軽量化が進められている。アルミニウム合金材（以下、アルミ材という）の採用は従来、その有効な手段の一つとしてフードやフェンダなどの主に外殻部材に採用されてきた。さらに、昨今の接合や成形技術の進展に伴い、ドアやボデー構造などへのアルミ材の適用箇所拡大が期待されている。

アルミ材が多く採用された自動車においては、接合技術としては現状、信頼性および高品質化の観点からセルフピアスリベット、フリクシヨンドリルスクリューなどの機械的締結が主流となっている。

いっぽう、抵抗スポット溶接は、アルミ材の特性である高い熱伝導率や低い電気抵抗、強固な酸化膜の存在などから、板厚 1 mm 前後のアルミ材への適用にとどまっていた。近年、サーボモータ加圧方式やデジタル式タイマを搭載した制御性能の高い抵抗スポット溶接ロボットシステムが台頭しつつあり、より板厚の大きいアルミ材への適用も視野に入ってきた。しかしながら、板厚 1 mm 前後のアルミ材では多くの検討事例があるもの<sup>1)~3)</sup>、厚板での検討事例は少ない。

本稿では、さらなる適用箇所拡大を想定し、自動車骨

格構造部材向けの板厚 2 ~ 3 mm のアルミ材について、サーボガン抵抗スポット溶接ロボットシステム（以下、サーボRSWロボットという）による溶接の指針となるベンチマーク試験を行ったのでその結果について報告する。

### 1. 6000系板材の抵抗スポット溶接性評価

#### 1.1 供試材および実験方法

まずは、供試材として板厚 2.0 mm の KS6K21-T4 板材（以下、KS6K21材という）を用いた評価結果について報告する。KS6K21材の成分および機械的性質を表 1 に示す。評価に用いた溶接装置は、直流インバータ制御式電源によるサーボRSWロボットである。加圧力および通電時間は、板厚  $t$  に対してナゲット径が  $5\sqrt{t}$  以上となる条件とした。溶接条件を図 1 (a) に示す。なお、一般的な溶接条件である単通電条件と、アルミモード溶接条件（ナ・デックス社製タイマーに搭載<sup>4)</sup>）にて比較を行った。アルミモード溶接条件とは、溶接直後に溶接電流を瞬時に停止せず、ナゲット近傍の温度勾配（こうばい）が緩やかになるように電流を制御することによって溶融部を徐冷し、溶接欠陥を抑制するものである。メイン通電は単通電条件とした。図 1 (a) に示した溶接条件は、単

表 1 KS6K21-T4 板材および JIS A5182-O 板材の成分および機械的性質

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of KS6K21-T4 and JIS A5182-O alloy sheets

Alloy	Chemical compositions (mass%)					TS (MPa)	YS (MPa)	El. (MPa)
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg			
KS6K21-T4	0.8~1.5	0.05~0.20	0.01~0.11	0.02~0.10	0.45~0.7	275	155	31
JIS A5182-O	≤0.2	≤0.35	≤0.15	0.20~0.50	4.0~5.0	290	145	21

\*<sup>1</sup> アルミ・銅事業部門 技術部

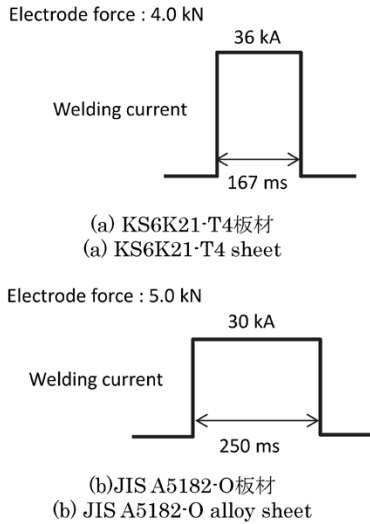


図1 KS6K21-T4板材およびJIS A5182-O 板材の溶接条件  
Fig. 1 Welding conditions of KS6K21-T4 and JIS A5182-O alloy sheets

通電条件である。また、電極はR型で、先端径 $\phi$ 19 mm, R100, クロム銅 (Cu-1%Cr) 製で導電率75%IACSのものをを用いた。光学顕微鏡によって溶接部の断面マクロ観察を行うとともに、溶接継手の機械的特性評価は、引張せん断試験および十字引張試験による300打点の連続打点試験、および動的疲労試験により行った。引張試験および疲労試験はそれぞれJIS Z3136, Z3137およびZ3138準拠の試験片を適用した。静的引張試験での引張速度は10 mm/min, 疲労試験の周波数は20~30Hz, 荷重比R=0.1 (正弦波) とし、軸力応力方向とした。

## 1.2 実験結果および考察

### 1.2.1 溶接条件の適正化

一般的な溶接条件である単通電条件を用いたときの溶接部断面マクロを図2 (a) に示す。KS6K21材は凝固割れ感受性が高いため、板厚方向に大きな溶接割れが発生していることがわかる。いっぽう、アルミモード溶接条件を用いて溶接したときの溶接部断面マクロを図2 (b) に示す。本溶接条件を適用することによって溶接割れが抑制可能となった。また、本溶接条件を用いて連続打点試験および疲労試験を実施した。

### 1.2.2 連続打点試験

引張せん断試験の300打点連続試験結果を図3<sup>4)</sup>に示す。1~100打点にかけては継手強度が減少していた。この原因は以下のように考えられる。すなわち、連続打点においてはクロム銅電極とアルミ材の間で銅とアルミ材の金属間化合物が形成され、電極からアルミ材へのピックアップ脱離が起こることによって銅電極が汚損損耗する<sup>1)</sup>。その結果、溶接時の通電径が打点初期よりも増加して電流密度が減少し、ナゲット径が減少したと考えられる。100打点近傍では強度が下げ止まり、これ以降は安定化する。この領域での継手強度の下限値は約3.7 kNであった。これは、電極汚損状態と溶接時の通電径が100打点近傍で安定化したことが要因と考えられる。なお、この下限値はJIS Z3410の最小強度を満足している。また、破断形態としてはいずれも界面破断 (Interface failure) となっていた。

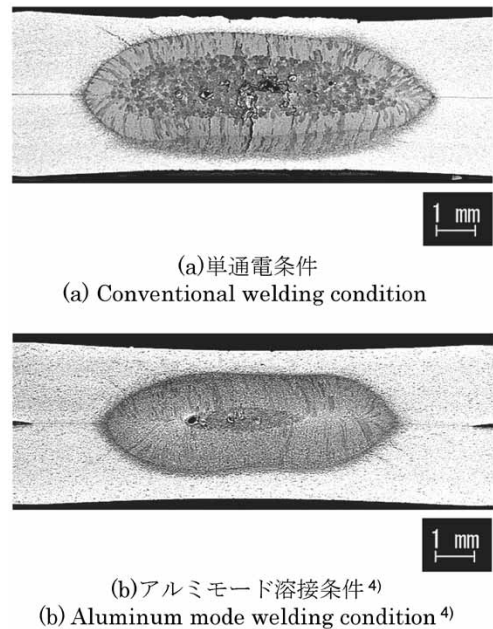


図2 KS6K21-T4板材の溶接部断面マクロ組織  
Fig. 2 Cross Section of KS6K21 alloy

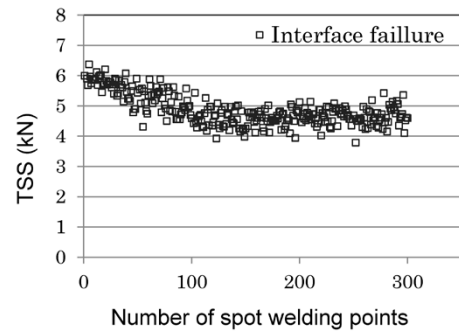


図3 KS6K21-T4板材継手の引張せん断強度に及ぼす溶接打点数の影響<sup>4)</sup>

Fig. 3 Influence of number of spot welding points on tensile shear strength of KS6K21-T4 alloy weld joint<sup>4)</sup>

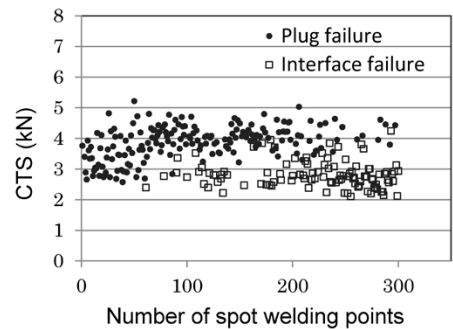


図4 KS6K21-T4板材継手の十字引張強度に及ぼす溶接打点数の影響<sup>4)</sup>

Fig. 4 Influence of number of spot welding points on cross tension strength of KS6K21-T4 alloy weld joint<sup>4)</sup>

十字引張試験の300打点連続試験結果を図4に示す。破断形態として、界面破断と、母材で破断し溶接部がボタン状に残存するプラグ破断 (Plug failure) とが混在しており、連続打点数の増加に伴って界面破断の割合が増加する傾向がみられた。これは、引張せん断試験と同様、電極損耗によるナゲット径の減少が要因と考えられる。また、継手強度の下限値は約2.1 kNとなっていた。

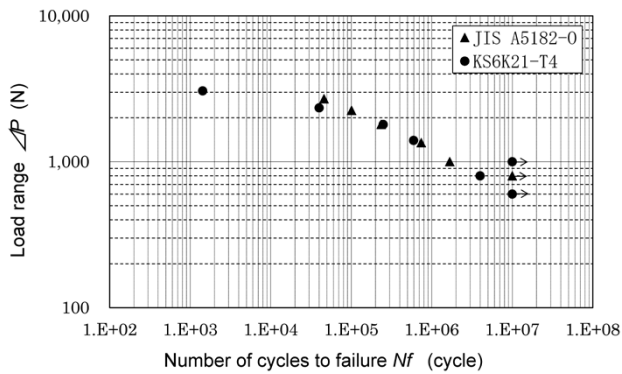


図5 KS6K21-T4板材およびJIS A5182-O板材継手の疲労試験結果  
Fig.5 Fatigue test results of KS6K21-T4 and JIS A5182-O alloy weld joint

### 1.2.3 疲労試験

疲労試験結果を図5に示す。繰返し数 $1.0 \times 10^7$ 回以上で破断に至らない荷重範囲値を疲労限界強度とした場合、その値は600 Nであることが検証された。また、繰返し数が高サイクル側では、溶接ナゲットと母材界面から母材方向にき裂が進展しており、溶接ナゲット内にはき裂が進展していなかった。このことから、疲労特性に関して、溶接継手の健全性が示された。

## 2. 5000系板材の抵抗スポット溶接性評価

### 2.1 供試材および実験方法

つぎに、板厚2.3 mmのJIS A5182-O板材（以下、5182材という）を供試材として用いた評価結果について報告する。5182材の成分および機械的性質を表1に示す。加圧力および通電時間は、板厚 $t$ に対して $5\sqrt{t}$ 以上のナゲット径が得られる条件とした。溶接条件を図1(b)に示す。そのほかの溶接条件はKS6K21材の評価と同様である。なお、5000系材料ではナゲット内にブローホールが残留しやすい。これは、材料中のMg蒸発とその蒸気の凝固過程での封じ込みが原因である。その抑制のため、溶接施工条件を適正化する余地はあると考えられているものの、まだ達成されていない。いっぽうで既往の研究では、ナゲット内のブローホールが強度に与える影響はほとんどない<sup>5)</sup>とも報告されていることから、今回は単通電・単加圧条件にて溶接を行った。

### 2.2 実験結果および考察

#### 2.2.1 連続打点試験

引張せん断試験の300打点連続試験結果を図6に示す。1～3打点目、100～150打点近傍の範囲に限り継手強度が減少し、下限値は約6.6 kNとなっていた。なお、この下限値はJIS Z3410の最小強度を満足している。継手強度が減少した理由としては、KS6K21材同様、電極損耗による電流密度の減少であると考えられる。本グラフから、電極損耗は初期段階から発生していると考えられるが、100～150打点近傍にかけて電極損耗に大きな変化が発生したものと推察される。また、150～300打点近傍においては継手強度が安定していたが、これについてもKS6K21材同様、150打点近傍で溶接時の通電径が安定化したものと考えられる。なお、破断形態としてはいずれも界面破断となっていた。

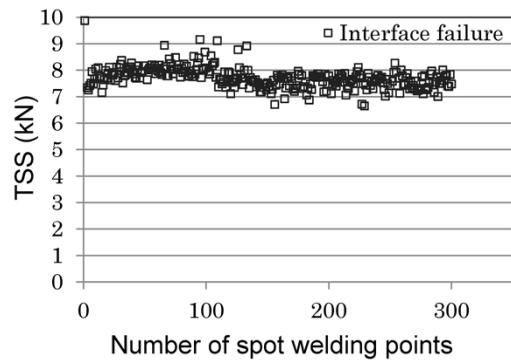


図6 JIS A5182-O板材継手の引張せん断強度に及ぼす溶接打点数の影響  
Fig.6 Influence of number of spot welding points on tensile shear strength of JIS A5182-O alloy weld joint

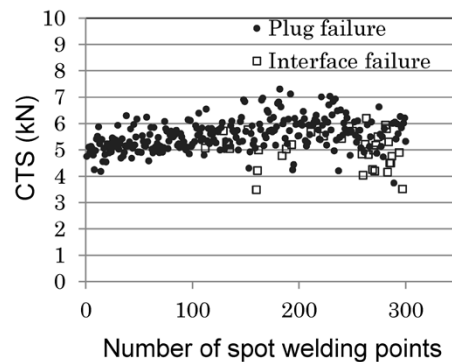


図7 JIS A5182-O板材継手の十字引張強度に及ぼす溶接打点数の影響  
Fig.7 Influence of number of spot welding points on cross tension strength of JIS A5182-O alloy weld joint

KS6K21材の結果と比べて連続打点カーブ形状が異なる理由としては、電極表面に形成される金属間化合物相の種類や量がKS6K21材のときと異なっており、それに伴い電極損耗や経時変化の程度に差が現れたことが考えられる。

つぎに、十字引張試験の300打点連続試験結果を図7に示す。破断形態として、プラグ破断および界面破断が混在しており、連続打点していくにつれて界面破断の割合が増えていく傾向がみられた。これは、引張せん断試験と同様、電極損耗によるナゲット径の減少が要因と考えられる。また、下限値は約3.4 kNとなっていた。

#### 2.2.2 疲労試験

疲労試験結果を図5に示す。繰返し数 $1.0 \times 10^7$ 回以上で破断に至らない荷重範囲値を疲労限界強度とした場合、その値は800 Nであることが検証された。また、繰返し数が高サイクル側では、溶接ナゲットと母材界面から母材方向にき裂が進展しており、溶接ナゲット内にはき裂が進展していなかった。このことから、疲労特性に関して、溶接継手の健全性が示された。KS6K21材の継手疲労特性に比べ、大きな差はみられなかった。

これら試験片による疲労試験結果は、アルミ材の抵抗スポット溶接部における設計指針として有効な参考データになるものと考えられ、今後はさらに構造体での評価も検討していきたい。

むすび=アルミ材の抵抗スポット溶接は、その特性上、大電流かつ高加圧力が必要であり、所定強度確保のためのナゲット径 ( $5\sqrt{t} \sim 6\sqrt{t}$ ) を得るのに板厚 1 mm レベル同士の施工が現実的とされてきた。今回、最新のロボット式抵抗スポット溶接システムを用いることによって得られた知見やデータは、板厚 2 mm レベルでも所定のナゲット径および継手強度を安定して得られることが検証され、実用的な接合手法の選択肢として取り扱うことができると考える。自動車ボデー構造部位へのアルミ材と抵抗スポット溶接の適用裾野拡大を期待したい。

#### 参 考 文 献

- 1) 溶接学会軽構造接合加工研究委員会. 薄鋼板及びアルミニウム合金板の抵抗スポット溶接. 産報出版, 2008, p.195-246.
- 2) 今村美速ほか. 溶接学会論文集. 1995, Vol.13, No.1, p.54-64.
- 3) 岩瀬 哲ほか. 軽金属溶接. 2002, Vol.40, No.5, p.8-14.
- 4) 佐橋賢治ほか. 溶接技術. 2018, Vol.66, No.3, p.59-64.
- 5) 阪口 章. 軽金属. 1978, Vol.28, No.9, p.469-480.