特 集 号

研究論文

自動車ボディ用 Al-Mg 合金板の
スポット溶接継手の疲労強度*

水越 秀雄**・難波圭三**・佐野啓路**

Fatigue strength of spot welded joints
on Al-Mg alloy sheets for auto body*

Hideo MIZUKOSHI**, Keizo NANBA** and Hiromichi SANO**

With an increase in the automotive applications of Al-Mg alloy sheets, the fatigue strength of spot welded joints has become an important subject. In this paper, the influence of nugget diameter, successive spot welding and oxide film on the base metal surface on the fatigue property of spot welded joints were examined for the Al-4.5%Mg-Cu alloy sheets. The tensile shear fatigue strength of the spot welded joints increased in proportion to the nugget diameter. An acid cleaning of the base metal was fairly useful to prevent degradation of the mechanical property of the joints successively spot-welded. The cleaning significantly lowered the electric contact resistance of an Al-4.5Mg-Cu alloy and resulted in the improvement of the nugget quality.

Keywords: Al-Mg alloy sheet, spot welded joint, fatigue strength, auto body, acid cleaning

(Received June 10, 1991)

1. 結 言

排気ガス等による環境問題から自動車軽量化の要求が高まり、自動車ボディのアルミ化が進みつつある。自動車ボディ材についてはプレス成形性や機械的性質が重要であるが、スポット溶接性もアルミ化への重要な因子の一つであると考えられる。

スポット溶接継手の疲労強度について、自動車用鋼板に関する報告はある¹⁾が、アルミニウム合金板に関する報告は少ない²⁾。スポット溶接は、母材を重ね、溶接個所に母材両面から電極を当て、板厚方向に加圧・通電し、母材の抵抗発熱によって点状に溶接する方法である。アルミニウム合金板のスポット溶接の問題点は、電極加圧面の損耗が鋼板に比較して激しく、打点数の増大につれて電極損耗が進行し、これに起因する不良ナゲットの発生に付随して継手部の機械的性質が劣化することである^{3)~5)}。

筆者らは、主に自動車ボディ用アルミニウム合金板のスポット溶接継手の機械的性質のうち疲労特性に着目して、引張せん断疲労特性に及ぼす①ナゲット径、②連続打点、③母材の表面酸化膜の影響を明らかにしようとした。特に、Al-Mg系合金においては、表面の酸化膜の存在は、大きな接触抵抗の原因であり電極損耗を促進する重要な因子と考えられるところから、この点に留意して実験を計画した。

2. 実験方法

2.1 供試材

母材は自動車ボディ用 Al-4.5Mg-Cu 合金板 (O 材)⁶⁾ および SPCC 板 (標準調質) である。これらの板厚は 1.0 mm であり、その機械的性質を Table 1 に示す。繰返し数 10^7 における軸力疲労強度は Al-4.5Mg-Cu 合金板について 71 MPa、SPCC 板について 121 MPa であった。

* 軽金属学会第80回春期大会 (平成3年5月) で一部発表。

** 住友軽金属工業(株)技術研究所 (名古屋市)。Technical Research Laboratories, Sumitomo Light Metal Industries, Ltd. (Nagoya-shi, Aichi)。

Table 1 Mechanical properties of base metals

	0.2% proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Fatigue strength (MPa)
Al-4.5Mg-Cu	127	272	32	71
SPCC	164	296	50	121

Table 2 Welding conditions

			Base metal (1.0 mm)	
			Al-4.5Mg-Cu	SPCC
Pressure sequence	Force (kN)	Squeeze Weld	8.62~10.39	
	Time (s)	Squeeze Weld	3.14	
Welding current (kA)	Nugget diameter (mm)		0.3	
			0.53	
Welding current (kA)	Nugget diameter (mm)	4	18.0	9.3
		5	21.2	9.7
		6	24.7	11.5
		7	29.1	16.5

母材表面の酸化膜の影響を明らかにするため、製造のままの Al-4.5Mg-Cu 合金板のほかに、80℃の希酸浴に浸漬することにより酸化膜を除去した母材も供試した。**Fig. 1** に AES による Al-4.5Mg-Cu 合金板表面の原子濃度とスパッタリング時間の関係を示す。上述の酸洗浄処理により Al-4.5Mg-Cu 合金板表面の酸化層の厚さは、Mg を指標とすれば約1/5に減少していることがわかる。酸洗浄処理した Al-4.5Mg-Cu 合金板の接触抵抗値は製造のままの場合にくらべ、約1/10に減少した。

これらの母材を用いてスポット溶接継手を作製した。スポット溶接は先端 R100 mm の R 形電極を用い、三相低周波式溶接機で行った。溶接条件を **Table 2** に示す。

ナゲット径の影響を明らかにするため、溶接電流を変化させて目標ナゲット径 4 mm~7 mm の溶接継手を作製した。また、各溶接条件において800点まで連続して溶接を行い、連続打点の影響についても調査した。なお、連続溶接の打点間隔は2秒とした。

スポット溶接継手のナゲット径と引張せん断荷重の関係を **Fig. 2** に示す。スポット溶接継手の引張せん断荷重は、ナゲット径の増加と共に増大した。また、酸洗浄処理した Al-4.5Mg-Cu 合金板のスポット溶接継手の引張せん断荷重は製造のままの場合よりも約10%大きく、酸洗浄による継手効率の向上がみられた。Al-4.5Mg-Cu 合金板の引張せん断荷重は SPCC 板のほぼ1/2であった。

スポット溶接継手の連続打点と引張せん断荷重の関係

Fig. 1 Distribution of oxygen and other main elements near surface of Al-4.5Mg-Cu alloy sheets. **Fig. 2** Influence of nugget diameter on tensile shear load of spot welded joints.

を **Fig. 3** に示す。800打点の連続溶接により、製造のままの Al-4.5Mg-Cu 合金板の引張せん断荷重は約30%低下したが、酸洗浄材の低下は約12%にすぎなかった。一方、SPCC 板については連続打点による引張せん断荷重の低下はみられなかった。

以上のようにして得られたスポット溶接継手を実験に供試した。

2.2 疲労試験

疲労試験は JIS Z 3138 スポット溶接継手の疲れ試験方

Fig. 3 Influence of number of welds on tensile shear load of spot welded joints.

Fig. 4 Shape and size of tensile shear fatigue specimen.

法に準拠して、引張せん断疲れ試験を行った。試験片形状を Fig. 4 に示す。試験には油圧サーボ疲労試験機を用い、最小最大荷重比 $R=0.1$ で行った。繰返し速度については、自動車ホワイトボディの曲げ固有振動数に近い 30 Hz とした⁷⁾。

3. 実験結果および考察

3.1 ナゲット径の影響

スポット溶接初期15打点までの継手の繰返し数 10^7 における疲労強度（荷重範囲）とナゲット径との関係を Fig. 5 に示す。Al-4.5Mg-Cu 合金板および SPCC 板スポット溶接継手の疲労強度は、いずれの材質もナゲット径の増加につれてほぼ比例的に増大し、ナゲット径 7 mm においては 4 mm の場合に比べ約 40% 増大した。なお、SPCC 板のスポット溶接継手の疲労強度は Al-4.5Mg-Cu 合金板のその約 3 倍であった。

3.2 連続打点の影響

ナゲット径 5 mm のスポット溶接継手の疲労強度と連続打点との関係を Fig. 6 示す。酸洗浄処理をした Al-4.5Mg-Cu 合金板および SPCC 板については、800 打点の連続溶接による疲労強度の低下はみられなかった。し

Fig. 5 Influence of nugget diameter on fatigue strength of spot welded joints. (Number of cycle: 10^7)

Fig. 6 Influence of number of welds on fatigue strength of spot welded joints. (Number of cycle: 10^7)

かし、製造のままの Al-4.5Mg-Cu 合金板のスポット溶接継手の疲労強度は 800 打点までの連続溶接により約 12% 低下した。

3.3 母材酸化膜の影響

スポット溶接初期15打点までの継手の疲労強度においては Fig. 5 に示したように、母材の酸洗浄の影響はほとんどみられなかった。この段階ではいずれの母材の場合も電極先端の損耗が生じていなかった。しかし、Fig. 6 に示したように、スポット打点数の増加により、母材の酸洗浄の効果がみられるようになった。製造のままの Al-4.5Mg-Cu 合金板のスポット溶接継手においては、その表面に残留している酸化膜が母材と電極との接触抵抗を増加させ、このため接触面における発熱量が増

Fig. 7 Appearance of electrode tips deteriorated with number of welds.

大する。この場合、母材のピックアップ量は、酸洗浄処理をした場合よりも顕著となり、連続溶接による電極先端の損耗速度が早められる。Fig. 7 に示したような電極表面の凹凸のため電極と母材の接触が不均一となり、半円や空洞を有する形状不良のナゲットが出現しやすくなる³⁾。したがって、母材表面の酸化膜を除去することにより、電極先端の損耗によるナゲット形状不良がかなりの連続打点数になるまで抑制され、その結果引張せん断荷重および疲労強度の低下度合を減少させることができた。

3.4 応力集中の影響

破断後のスポット溶接継手疲労試験片を Fig. 8 に示す。スポット溶接継手の疲労試験においては、ナゲット端部の母材に発生した疲労き裂が母材を伝播して破壊に至る。また、D. Radaj らは引張せん断時の FEM による計算結果から、ナゲット端部での応力集中係数 K_{ts} ($=\sigma_{\max}/\sigma_{ns}$) は 1.26 であると報告している⁸⁾。ここで、 $\sigma_{\max}$ は最大応力、 σ_{ns} は公称応力である。したがって、ナゲット周囲の応力集中が疲労強度に影響を及ぼしていると考えられる。

Al-4.5Mg-Cu 合金板および SPCC 板のスポット溶接継手のナゲット周囲の応力集中度を比較するため、ナゲット軸方向中心線上のひずみ分布を測定した。ゲージ長

Fig. 8 Sequence of fracture in spot welded joint during fatigue test.

Fig. 9 Strain distribution measured along axial direction.

1 mm の応力集中測定用ひずみゲージをナゲット端部から 3 mm~50 mm の位置に 10 点貼付し、引張せん断荷重は 980 N とした。

Al-4.5Mg-Cu 合金板および SPCC 板のスポット溶接継手の軸方向ひずみ測定結果を Fig. 9 に示す。Al-4.5Mg-Cu 合金板のスポット溶接継手の引張せん断荷重には酸洗浄の影響がわずかにみられたが、軸方向ひずみには、酸洗浄の影響はみられなかった。Al-4.5Mg-Cu

Fig. 10 Stress distribution calculated by FEM for spot welded joint under tensile shear.

Fig. 11 Relation between measured axial strain and distance from nugget edge.

合金板のスポット溶接継手のナゲット端部から3 mmの位置におけるひずみは約 1800×10^{-6} であり、ナゲット端部からの距離が増加するにつれて急激に減少して、50 mmの距離においては約 400×10^{-6} となった。一方、SPCC板のひずみは小さく、Al-4.5Mg-Cu合金板のその1/2~1/3であった。Fig. 10にはFEM解析による軸方向の応力分布を示す。計算にあたっては3次元有限要素法プログラムCOSMOS/M(横河技術情報製)を利用した。Fig. 10では軸方向のナゲット端部に応力集中がみられ、応力の計算値は測定値とはほぼ一致していた。両対数表示したひずみ分布曲線をFig. 11に示す。ひずみ ϵ とナゲット端部からの距離 L の関係は次式で表される。

$$\log \epsilon = \alpha + \beta \log L \quad (1)$$

式(1)において、 α はひずみ軸との切片すなわちナゲット端部から1 mmの位置におけるひずみ量を、 β はひずみ分布曲線の傾きをそれぞれ意味する。 β は、Al-4.5Mg-Cu合金板については-0.55、SPCC板については-0.44であり、Al-4.5Mg-Cu合金板の方が約20%大

きかった。また、ナゲット端部から1 mmの位置におけるひずみは、Al-4.5Mg-Cu合金板について 3350×10^{-6} 、SPCC板について 930×10^{-6} と算出され、Al-4.5Mg-Cu合金板の方が約3.5倍大きい。これは両材質の縦弾性係数の比を超えている。本実験に用いた単点試験片においては、引張荷重に対してナゲット周囲の母材に曲げ変形が生じる。この曲げ変形量は縦弾性係数が小さいAl-4.5Mg-Cu合金板の方がSPCC板より大きくなる。その結果、両材質の軸方向ひずみ量の比は縦弾性係数比以上となり、それに応じてナゲット周囲の応力集中度が高められると考えられた。

したがって、Al-4.5Mg-Cu合金板のスポット溶接継手のナゲット端部ではSPCC板よりかなり応力集中度が高められ、Fig. 5に示したようにAl-4.5Mg-Cu合金板のスポット溶接継手の疲労強度がSPCC板のそれと比較してかなり低下したと考えられた。しかし、応力集中の影響については疲労き裂発生部分近傍のミクロ的な観察等さらに詳細な検討が必要である。

4. 結 言

自動車ボディ用Al-4.5Mg-Cu合金板およびSPCC板のスポット溶接継手の疲労強度を調査した結果、以下のことが明確となった。

- (1) スポット溶接継手の疲労強度はナゲット径が増大するにつれてほぼ比例的に増大した。
- (2) Al-4.5Mg-Cu合金板においては、母材表面の酸化膜を除去することにより接触抵抗値が激減し、これに伴い電極先端の損耗によるナゲット形状不良がかなりの連続打点になるまで抑制され、その結果疲労強度の低下度を減少させることができた。

参 考 文 献

- 1) たとえば、岩崎紀夫、田中甚吉、樺沢真事、長江守康：日本鋼管技報，**91** (1981)，359。
- 2) 阪口 章：軽金属溶接，**17** (1979)，126。
- 3) 田中一雄、笹部誠二：軽金属溶接，**16** (1978)，402。
- 4) 軽金属協会：自動車のアルミ化技術ガイド接合編，(1981)，17。
- 5) 難波圭三、佐野啓路、水越秀雄、長谷川義文：住友軽金属技報，**32** (1991)，No. 1，56。
- 6) 吉田英雄、平野清一：住友軽金属技報，**32** (1991)，20。
- 7) 飛田幸司、原 寿広、藤瀬一基、木下喜彰：マツダ技報，(1987)，107。
- 8) D. Radaj, Z. Zhaoyun and W. Mohrmann : Engineering Fracture Mechanics, **37** (1990)，933。