

論文・解説

26

アルミニウムダイカスト／圧延材の摩擦攪拌点接合 Friction Stir Spot Welding of Aluminum Die-Cast/Rolled Plate

田中 耕二郎^{*1} 島田 聡子^{*2} 杉本 幸弘^{*3}
Kojiro Tanaka Satoko Shimada Yukihiro Sugimoto

要約

摩擦攪拌点接合のアルミニウム製車体骨格部材への適用性を明らかにするため、接合パラメーターの強度への影響を調査した。A6111/ADC3 ダイカストの板組みでは、プローブ径が大きいほど強度が高く、安定的に抵抗スポット溶接 JIS A 級平均を超えるせん断強度が得られることを確認した。断面観察の結果、安定して強度を得るためには、塑性流動状態や上板残厚、それらを決定付ける接合ツールの実挿入量を適切に管理することが重要であることが分かった。

Abstract

In order to clarify the applicability of friction stir spot welding method to aluminum car body frame members, the effect of joining parameters on strength was investigated. In A6111/ADC3 (die-cast material), it was confirmed that the larger the probe diameter is, the higher the strength is, and the shear strength stably exceeding the JIS A grade average for resistance spot welding can be obtained. From the cross-sectional observation result, it was found that it is important to appropriately control the plastic flow state, the residual thickness of the upper plate, and the actual insertion amount of the joining tool that determines them in order to obtain stable strength.

Key words : Materials, Aluminum alloy, Joining, Die-Cast

1. はじめに

カーボンニュートラル、脱炭素社会を目指すため、自動車や航空機などの輸送機器では大幅な CO₂ 排出削減に向けた研究開発が進められており、その中で燃費改善につながる軽量化は有効な手段である。自動車においては、質量割合が大きく車両性能の向上にもつながる車体の軽量化が重要であり、これまで筆者らは軽量車体構造を実現するための重要な要素技術の一つである点接合技術の開発を進めてきた⁽¹⁾⁻⁽³⁾。この中でアルミニウム／鋼板やアルミニウム／熱可塑性繊維強化樹脂 (FRTP) などの異種材料の接合と併せて進めているのが、車体骨格部材への適用を想定した比較的厚肉の展伸材やダイカスト板材を組合せたアルミニウム同士の接合技術の開発である。

アルミニウムの接合への一般的な抵抗スポット溶接の採用は、その材料特性に起因して大電流が必要であることや製造工程で重要となる生産性の確保につながる連続打点性についてなど、課題が多い。また、リベットなど

の副資材を使用する機械締結では重量、コスト増や接触腐食の課題もある。そこで開発されたのがアルミニウム同士の摩擦攪拌点接合 (Friction stir spot welding, FSSW) であり、マツダが 2003 年に実用化して以降、ボンネットやドアなどのパネル部材を対象に板厚 1mm 程度の薄板の接合法として定着している (Fig. 1)^{(4),(5)}。

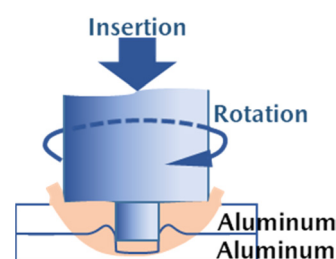


Fig. 1 Aluminum Joining by FSSW

本報では摩擦攪拌点接合のアルミニウム製車体骨格部材への適用性を明らかにするため、抵抗スポット溶接では電気抵抗や融点の違いにより健全なナゲットの形成が難しい

*1~2 技術研究所
Technical Research Center

*3 広島大学
Hiroshima University

ダイカスト板材を含む板組みを中心に、その接合強度に及ぼす接合パラメーターの影響を調査するとともに、断面観察から強度影響因子を検討した。また、実用化時の継手の設計や施工のデータベースとして活用するための、一般的な車体骨格部材を想定した板組みにおける強度評価や、強度予測のための接合 CAE の取り組みについて示す。

2. 実験方法

2.1 評価材料

アルミニウムダイカスト板材には板厚 2.5mm の ADC3 相当材 (T7 処理) を使用し、離型剤などの除去のため 240 番研磨紙により荒研磨したものを供試した。アルミニウム圧延材には板厚 2.0mm の A6111-T4, A5052-H34 を使用した。

2.2 接合試験片の作製

位置制御接合装置を使用した場合のツール形状を含む主要な接合パラメーターを Fig. 2 に示す。今回はこの中のツールの挿入速度、回転速度、プローブ径の影響を見るため、Table 1 に示す接合条件とした。上記 3 種の 100 × 30mm サイズのアルミニウム板材を使用し、圧延材同士の組合せを含む板組み (以下、上板/下板で表記) について、ツール挿入量を変動させながら 30mm ラップの重ね部中央を接合した。

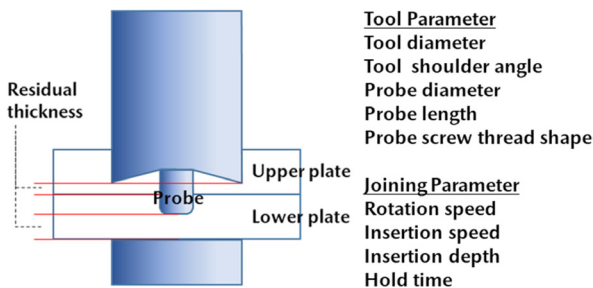


Fig. 2 Tool and Joining Parameter of FSSW

Table 1 Joining Condition

Parameter	Condition
Tool diameter	10mm
Probe diameter	3or5mm
Probe length	2.8mm
Probe screw thread	With
Rotation speed	1500or3000rpm
Insertion speed	12or30or60mm/min
Insertion depth	Change for weld lobe

2.3 評価方法

評価方法の詳細を以下に示す。

(1) ウェルドローブの作成 (せん断強度試験)

Table 1 の条件をベースにツール挿入量を変動させて接合した継手試験片について、Fig. 2 に示す接合点中央の下板残厚をマイクロメータで実測し、接合装置のたわみを含めたツールの実挿入量及び上板残厚を算出した。そ

の後、はく離方向の負荷を抑える治具を使用した引張せん断強度試験を試験速度 10mm/min にて実施した。

測定した上板残厚とせん断強度の関係から、各種板組み、条件におけるウェルドローブを作成した。

(2) 断面観察

せん断強度試験後も含めた接合部断面を光学顕微鏡、走査電子顕微鏡 (SEM) 及び電子線マイクロアナライザー (EPMA) 成分分析により観察し、板組み、接合条件の違いによる被接合材料の塑性流動状態の変化を見るときに、界面の接合領域及び破壊時の亀裂進展経路を調査した。

3. 実験結果及び考察

3.1 接合パラメーターの影響

(1) ツールプローブ径

A6111/A6111, A6111/ADC3, ADC3/A6111 の 3 板組みについて、ツール回転数 3000rpm, 挿入速度 30mm/min 一定でプローブ径を変えた場合のウェルドローブの比較を Fig. 3 に示す。プローブ径が大きい方がピーク強度は高く、そのピーク強度を示す上板残厚は増える方向にシフトした。また、プローブ径 5mm の場合、施工時に生じるツールの設定挿入量に対する実挿入量のバラツキに対し、JISA 級平均の強度をより安定的に得られることが分かった。

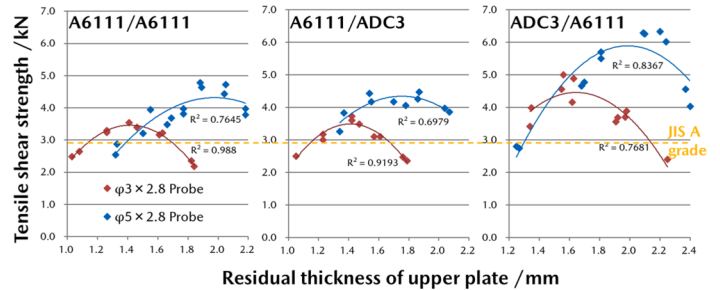


Fig. 3 Comparison of Weld Lobes by Probe Diameter⁽⁶⁾

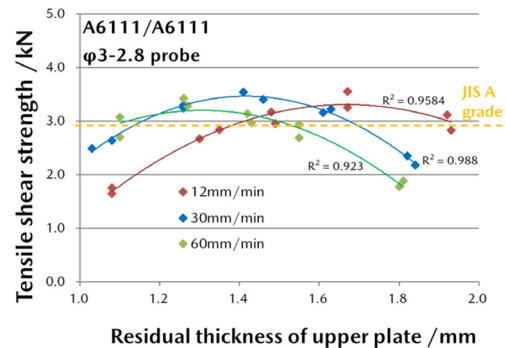


Fig. 4 Comparison of Weld Lobes by Tool Insertion Speed⁽⁶⁾

(2) ツール挿入速度

上記 3 板組みのうち、A6111/A6111 においてプローブ径 3mm, ツール回転速度 3000rpm とし、ツール挿入速度を変化させた場合のウェルドローブ比較を Fig. 4 に

示す。ピーク強度を示す上板残厚は変化するが強度に大きな差は見られず、他の板組みでも同様の傾向であった。接合中の材料の発熱量に影響を与えるツール-材料間の面圧と接合時間はツール挿入速度により相対的に変化することが影響し、今回の調査範囲では強度レベルに大きな差が表れなかったと考えられる。

(3) ツール回転速度

ADC3/A6111においてプローブ径3mm, ツール挿入速度30mm/minとし、ツール回転数を変化させた場合のウェルドローブ比較をFig. 5に示す。回転速度が速いほどピーク強度を示す上板残厚は増える方向にシフトするが、強度レベルに大きな差はない結果となり、これは他の板組みも同様であった。

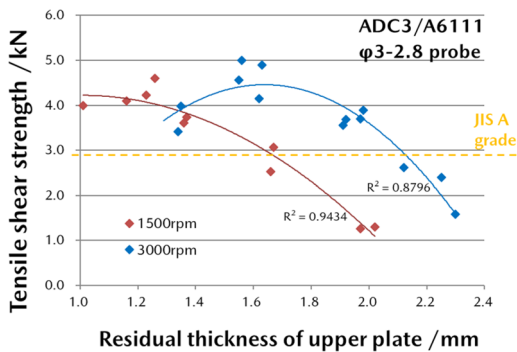


Fig. 5 Comparison of Weld Lobes by Tool Rotation Speed⁽⁶⁾

3.2 断面観察による強度影響因子の検討

A6111/ADC3において、ピーク強度を示した接合条件で作製した継手断面のSEM観察を行った (Fig. 6)。板間に塑性流動して混ざり合った領域は存在せず、プローブ周囲において下板材料が大きく巻き上がるように接合界面が変形していた。また、下板の巻き上がりの頂点から接合部外周側に向けての途中に接合/未接合領域の境界が存在しており、その境界間が接合ナゲット径となる。塑性流動した領域では上板、下板ともに結晶粒が微細化しており、プローブ近傍及び界面近傍に材料の流動方向への粒子の変形が観察された。

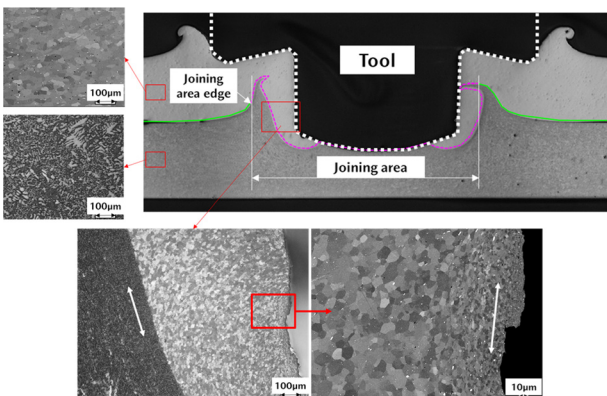


Fig. 6 SEM Survey Results on Cross-Section

ツール挿入量の違いにより破断形態が変化した継手3種について、材料の境界が見えやすいようEPMAによるSi成分の面分析で断面を可視化した結果と、破断後の継手外観の比較をFig. 7に示す。挿入量が増えるほど上板残厚が減少し、破断形態は界面→部分プラグ→プラグと変化する。また、ピーク強度は部分プラグ破断時に示した。継手強度は破断亀裂が走る際の材料強度と進展距離(面積)によって決まる。そして、亀裂の進展経路は材料の塑性流動状態、材料界面における接合/未接合の境界位置、上板残厚、熱影響後の材料強度などの影響を受けて変化すると考えられる。

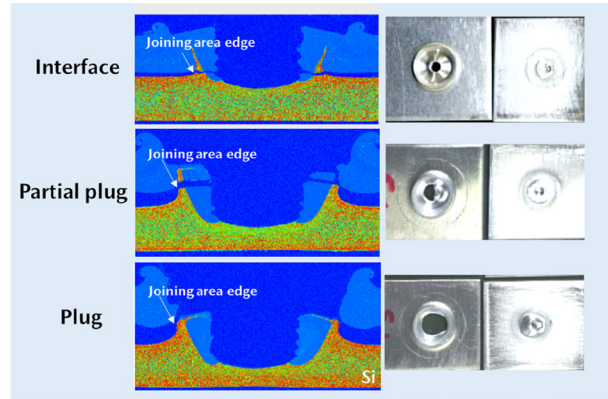


Fig. 7 Comparison of Fracture Form

3.3 実用化を想定した取り組み

実用化時の継手の設計や施工のデータベースとして活用することを目的に、一般的な車体骨格部材を想定した板組みに対し、ここまでの調査結果をベースとした適正条件下におけるウェルドローブを取得した。A6111, A5052, ADC3を含む各板組みにおけるウェルドローブをFig. 8に示す。これらの板組みでは安定的にJISA級平均強度を確保できることを確認した。

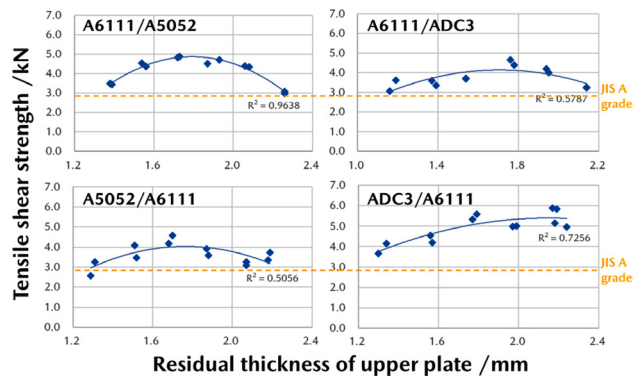


Fig. 8 Weld Lobes of Each Material Specification

A6111/A5052及びA6111/ADC3におけるピーク強度を示す継手のマクロ断面観察結果をFig. 9に示す。接合界面を破線で表示した。異なる強度特性をもつ材料の組合せによりプローブ周囲の下板の巻き上がりの形状は大きく変化する。その中でツール挿入量を制御し、各板組みごとに材料の塑性流動状態及び上板残厚を適正にすることが重要となる。

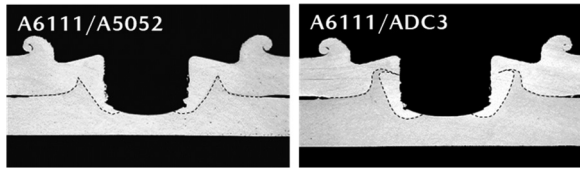


Fig. 9 Macro Survey Results on Cross-Section

実用化にあたり確立すべき強度予測技術においては、粒子法 CAE を用いてツール形状、接合条件、材料特性から接合後の塑性流動状態（接合界面形態）を解析することをはじめとして、破壊メカニズムを考慮した強度、信頼性が予測可能なモデルを構築する取り組みを進めている。プロメテック・ソフトウェア（株）製の流体解析ソフトウェアである Particleworks を使用した粒子法 CAE による塑性流動状態の解析結果の一例を Fig. 10 に、検討中の接合継手モデルを用いたせん断引張時の応力解析結果の一例を Fig. 11 に示す。

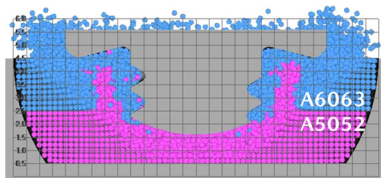


Fig. 10 Analysis Result Sample by Particle Method CAE

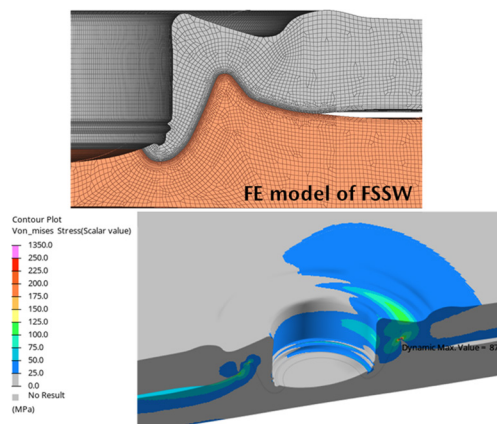


Fig. 11 Stress Analysis Result Sample of Shear Tensile Test

4. まとめ

車体軽量化のための重要な要素技術としてさまざまな材料の組合せでの点接合技術の開発を進めている。本報では摩擦攪拌点接合のアルミニウム製車体骨格部材への適用性を明らかにするため、ダイカスト材を含む板組みを中心に、その接合強度に及ぼす接合パラメーターの影響を調査した。また、強度予測のための接合 CAE を含めた実用化に向けた取り組みについて示した。

接合パラメーターの影響

A6111 と ADC3 の組合せにおける調査では、直接的に接合ナゲット径に影響を与えるツールプローブ径が大きいほど強度が高く、プローブ径 5mm のツールにおいて、

安定的に抵抗スポット溶接 JISA 級平均を超えるせん断強度が得られることを確認した。

断面観察による強度影響因子の検討

断面観察を行い、接合状態、亀裂進展部から強度影響因子を検討した。プローブ周囲において下板材料が上板側に巻き上がるような塑性流動が生じており、その形状、界面間の接合領域、接合／未接合境界位置の上板残厚により、破断時の亀裂進展経路は複雑に変化し強度に影響を与える。位置制御式装置を使用する上で強度を確保するためには、塑性流動状態や上板残厚を決定付ける接合ツールの実挿入量を適切に管理することが重要といえる。

実用化を想定した取り組み

パラメーター影響調査の結果を基に、データベースの構築を目的に実施した一般的な車体骨格部材を想定した種々の板組みでの強度評価では、全ての板組みのせん断荷重は JISA 級平均を上回り、本接合技術が JIS の「特に強さを要する溶接部」に適用できる水準にあることを確認した。これら実用化時の継手の設計や施工のためのデータベースをばく離強度や強度バラツキ要因の影響も含めて構築する他、接合 CAE を活用した強度、信頼性予測モデルの開発など、引き続き実用化に向けた取り組みを進めていく。

本成果は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP14014）の取り組みで得られた。

参考文献

- (1) 西口勝也，田中耕二郎，森田泰博，杉本幸弘：アルミニウム／CFRP の異種材料点接合技術，自動車技術会 2018 年秋季大会学術講演会講演予稿集，文献番号 20186086（2018）
- (2) 田中耕二郎，杉本幸弘，西口勝也，小川裕樹：アルミニウム／樹脂異種材料点接合の強度特性に及ぼす表面処理の影響，自動車技術会 2019 年秋季大会学術講演会講演予稿集，文献番号 20196111（2019）
- (3) 田中耕二郎，深堀 貢，西口勝也：マルチマテリアル車体の実現に向けたアルミニウム／鋼板抵抗スポット溶接技術の開発，溶接学会誌，第 90 巻，第 7 号，pp.497-500（2021）
- (4) 村上士嘉，山下浩二郎，妹尾安郎，橋 昭男：アルミ材新接合技術の開発，マツダ技報，No.21，pp.86-91（2003）
- (5) 藤本光生，附柴祐一，野村浩二：ハイブリッド車における FSSW 技術，溶接学会誌，第 80 巻，第 3 号，pp.227-230（2011）
- (6) 杉本幸弘，田中耕二郎：アルミニウム合金ダイカストと圧延材の摩擦攪拌点接合，軽金属，第 70 巻，第 1 号，pp.8-13（2020）