

論文の内容の要旨

氏名：高橋正詞

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：異種アルミニウム合金インサート材を用いた半溶融成形アルミニウム合金板の摩擦攪拌接合に関する研究

摩擦攪拌接合法（Friction Stir Welding: FSW）は、低入熱の固相接合法であることから、溶融溶接が適用困難とされているダイカストを含む鋳造用アルミニウム合金や熱影響を受けやすい熱処理型アルミニウム合金に利用でき、接合に伴う変形も少ないとされている。現在では鉄道、船舶等輸送機器や土木・建築構造物等における軽量化需要の増大を受け、適用分野が拡大している。このような構造物の部品には鋳造材が用いられるものも多い。一方、棒状や板状の単純形状品や大型品の製造には鋳造ではコストがかかり展伸材の方が有利となることが多い。これらのことから鋳造材と展伸材の接合に利用できれば両材料の特長を生かしたものづくりを実現できると期待される。

本研究では、これまでに幅広くアルミニウム合金でFSWの研究が行われている中で、少数である鋳造材、さらに特殊な鋳造法である半溶融成形したアルミニウム合金に適用した際に接合条件が組織や機械的性質におよぼす影響について明らかにする。そして、用途拡大を図るため、展伸材との接合性および展伸材を利用したインサート材を用いたFSWを行い、特性を調査する。FSWはツール先端の有するプローブが供試材内に挿入し供試材を攪拌することにより接合をおこなう。このプローブがどれだけ供試材を攪拌したかにより接合強度への影響、攪拌不足や攪拌過剰となり接合欠陥が発生するかの研究はされているが、実際の攪拌量を数値化してその値を議論している研究はない。そこで本研究では接合条件から求められる「攪拌量L」を定義し、その計算上の攪拌量Lと実際に接合した継手の機械的性質や組織への影響を明らかにして、攪拌量Lの有用性を確かめる。

第1章「序論」では、本研究の背景、摩擦攪拌接合の現状、本研究の立場と研究の目的および本論文の構成を記述する。

第2章「使用した合金、鋳造法および接合法」では、供試材である半溶融成形したAC4CH材について各種鋳造法と比較して説明する。また、その供試材の接合に使用する摩擦攪拌接合の技術概要をその他の接合法と比較して説明する。

第3章「供試材および実験方法」では、本研究で使用した供試材の製造方法、接合方法、評価方法について記述する。本研究では複数ある接合条件パラメータを統合して1つの指標で制御するため、新たに「攪拌量L」を定義して使用する。AC4CHアルミニウム合金板は、以下の方法で半溶融成形した。市販のAC4CHインゴットを溶解し、直径75mmの円筒金型に鋳込み重量1.3kgを目標としたピレットを溶製した。このピレットを高周波誘導加熱装置で858Kに加熱し半溶融状態にした。成形には型締力3500kNのダイカストマシンを用いた。ダイカストマシンに設置した段付試験片金型に半溶融状態のピレット射出成形した。金型温度、プランジャ速度、鋳造圧力はそれぞれ443K、0.5m/sおよび60MPaとした。成形品の板厚5mm部分を供試材とし、T6に相当する溶体化処理を808Kにて28.8ks、水冷後時効処理を428Kにて21.6ks行った。展伸材は市販の6061-T6アルミニウム合金板（以下A6061）を用いた。AC4CH板は成形品の5mm部分のものを、A6061は板厚5mmのものをそれぞれ湯流れ方向および圧延方向に長さ90mm、幅55mmに機械加工したものを実験に供した。

第4章「半溶融成形AC4CH-T6の同種材摩擦攪拌接合」では、今回使用する半溶融成形したAC4CH材の直接摩擦攪拌接合において接合条件が継手の組織および機械的性質に及ぼす影響について検討し、基準となるFSW継手の状態と性能を把握する。本研究で用いた半溶融成形したアルミニウム合金組織は、他の鋳造アルミニウム合金と異なりこれまでにFSWした研究例は少ない。特に初晶 α -Alや共晶組織が攪拌の影響を受けて変質する可能性があるため、攪拌部やその周辺組織にも着目して評価する。

半溶融成形した AC4CH 材どうしの接合は、接合条件は工具回転数 600~1800 rpm、接合速度 1~15 mm/s と変化させ、前進角 3°，予熱 15 s 一定とした。回転工具は合金工具鋼 (SKD61) 製とし、ショルダー直径 20 mm、ショルダー角 4°、プローブは M6 ねじ形状、プローブ長さ 4.5 mm とした。

接合部横断面の板厚中央の硬さ分布は工具回転数に関係なく軟化が認められ、接合速度の低い 1 mm/s で接合した継手の接合部が著しく軟化しており、AS に比較して RS の軟化が大きくなっている。また、SZ に相当する RS、AS それぞれ 5 mm までの範囲の硬さ分布は、接合速度の高い条件と同程度となった。接合速度が高くなるのに伴い、熱影響部(Heat Affected Zone: HAZ)および熱加工影響部(Thermo-Mechanically Affected Zone: TMAZ)の軟化量は少なくなる傾向にあった。

継手の引張強さは接合速度が高くなるのに伴って上昇する一方、工具回転数には依存しない。工具回転数 1000 rpm および 1400 rpm、接合速度 10 mm/s の接合条件において母材の 82%となる 230 MPa の値が得られた。伸びも接合速度が高くなるのに伴って上昇し、工具回転数 1800 rpm を除く各工具回転数で最高接合速度の条件で母材を超える値が得られた。継手の破断は全条件で AS、RS いずれかの熱影響部であり、接合条件に依存せず AS および RS のいずれかで破断する。

第 5 章「半溶融成形 AC4CH と A6061 の異種材摩擦攪拌接合」では、半溶融成形した AC4CH 材と A6061 で異種材料接合した、前章同様に半溶融成形したアルミニウム合金組織は、他の casting アルミニウム合金と異なりこれまでに FSW した研究例は少ない。展伸材との攪拌により、初晶 α -Al や共晶組織が攪拌の影響を受けて変質する可能性があるため、攪拌部やその周辺組織にも着目して評価する。

半溶融成形した AC4CH 材と A6061 の接合は継手において AS、および RS では一般的な溶融溶接と異なり左右非対称の接合組織となるため、AC4CH を AS に配置した場合および RS に配置した場合の両方について接合を試みた。回転工具はプローブ長さを 4.7 mm とし、その他は AC4CH 材どうしの接合同様の形状とした。接合条件は、接合速度を 1~15 mm/s に変化させ、工具回転数を 1400 rpm、前進角を 3°，予熱 15 s 一定とした。

AS に AC4CH を配置した条件で接合速度を変化させた継手板厚中央における硬さ分布は、全ての接合速度の条件で SZ から TMAZ、HAZ に亘って軟化が認められる。特に、接合速度が低い 1 mm/s の条件では HAZ が拡大し、軟化域幅および軟化量も大きい。また、最軟化部の硬さは A6061 側より AC4CH 側の方が低くなる。接合速度 5 mm/s 以上の条件では、AS、RS とともに大きく軟化域幅および軟化量は減少し、最軟化部の硬さの差は小さくなる。

AS に A6061 を配置した条件で接合速度を変化させた硬さ分布においても HAZ 及び TMAZ に軟化が認められる。特に接合速度の低い 1 mm/s で接合した継手の熱影響部付近の軟化が著しい。また、AS に比較して RS の軟化が大きくなっている。

継手の引張強さは接合速度が高くなるのに伴って上昇する一方、材料配置には依存しない。接合速度 15 mm/s の AS に A6061 を配置した接合条件において継手効率 AC4CH の 85% が得られた。伸び率も接合速度が高くなるのに伴って上昇し、AC4CH の 90% が得られた。継手の破断は全条件で AS、RS いずれかの熱影響部であり、接合速度の低い 1 mm/s の条件においては材料配置に関係なく AC4CH 側の熱影響部で破断する。接合速度 5 mm/s 以上では材料配置に依存せず AS および RS のいずれかで破断する。

第 6 章「A6061 インサート材を用いた半溶融成形 AC4CH-T6 の摩擦攪拌接合継手におけるインサート材幅と攪拌量の効果」では、第 4 章、第 5 章の結果をもとにインサート材を用いた半溶融成形した AC4CH の FSW を行う。接合条件による FSW 継手の状態と性能を把握する。インサート材を使用することから接合界面が 2 つとなり、それを同時に接合することから接合界面底部に欠陥が発生する可能性があるため組織にも着目して評価する。本研究で定義した攪拌量とインサート材、オフセット量、機械的性質の関係性明らかにして機械的性質が良好な最大のインサート材幅が有効となる攪拌量と接合条件を調査する。前章で良好な継手効率が得られた A6061 材をインサート材として半溶融成形した AC4CH 材を FSW し、インサート材幅により変化する攪拌量を指標として最適な接合状態を達成した。

第 7 章「結論」では第 4 章から第 6 章までの実験結果の総括的結論を述べ、今後に残された課題を示した。半溶融成形した AC4CH-T6 材どうしおよび展伸材 A6061-T6 材の異種材の FSW 適用が有効であり、材料配置にも依存せず高い継手効率、伸び率が得られることを示した。A6061-T6 をインサート材として利用した FSW において適切な接合条件とそれから求める攪拌量を指標とすることで、高い継手効率と伸び率が

得られることを示した。今後の課題として、他のアルミニウム合金や接合条件に攪拌量を適用して攪拌量の有用性を示すこと、他のアルミニウム合金でもインサート材を適用する FSW が有用であるかを検討事項として挙げた。