

	ふじもとみつお
氏名	藤本 光生
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成20年9月11日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)材料システム工学専攻
学位論文題目	アルミニウム合金摩擦攪拌点接合の開発に関する研究
指導教員	東北大学教授 粉川 博之
論文審査委員	主査 東北大学教授 粉川 博之 東北大学教授 川崎 亮 東北大学教授 丸山 公一

論文内容要旨

第1章 序論

近年、世界的に原油価格が高騰し、製造業における原材料価格の上昇や生産コストの増大が企業の成長を妨げている。一方、一般家庭においても光熱費の増加や輸送費高騰による生活物資の価格上昇により支出が増加傾向にある。我が国において消費されるエネルギーの約半分は石油であり、その石油は海外から輸入する原油にほぼ100%依存しているため原油価格の高騰が石油価格の上昇を招いている。そこで我が国では、エネルギーすなわち石油消費量の低減が産業界のみならず家庭レベルにおいても重要な課題と位置づけられている。

一方、CO₂を中心とした温室効果ガス排出量の低減についても地球規模の課題であり早急な解決が望まれている。しかしながら、エネルギー消費量の増大は温室効果ガスの排出量を急激に増加させており、地球全体の平均気温は今後100年で約2℃上昇すると報告されている。CO₂の排出量は製造業部門が最も多く約35%を占めているが、運輸部門も約20%を占めている。運輸部門については自動車による排出量が多く、この増減が今後の温室効果ガスの増減に大きく影響することが予想されている。CO₂の排出量低減策については、主要各国により定められた京都議定書に基づき実行されており、自動車から排出されるCO₂の量も数値目標が設定されており着実に減少している。また、CO₂の排出量に直接的に影響する燃費も数値目標が設定されており、自動車メーカーによる様々な改善の結果、新車については2010年度の基準値を達成している。今後、燃費の劣る従来車からの買い替えによりさらなる燃費の向上が実現できる見通しである。

CO₂排出量の目標値を達成するためには様々な改善の積み重ねが必要であるが、自動車重量の軽量化が極めて有効であることが報告されており、自動車ボディ外板に対してハイテン材の適用による薄板化や比強度高いアルミニウム合金の使用率が高まっている。しかしながら、切断、プレスおよび接合等の各種製造工程において、鋸を対象とした従来工法では品質、生産性の確保が困難となっている。特に点接合は、自動車ボディだけでも数千

点にも及び、従来の抵抗スポット溶接では電力消費量が大きく、また、熔融・凝固に伴う欠陥の発生が課題となっている。アルミニウム合金に有効な接合法として適用されているリベットやかしめ接合についてもコストや重量増、強度面に関していくつかの課題が残っている。

近年、アルミニウム合金を対象とした線接合については、摩擦熱により材料を軟化し塑性流動を生じさせることで接合を行う摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding; FSW) が開発された。本接合法は熔融・凝固に伴う欠陥が生じず、低入熱であるため歪も小さく、チリやヒュームも発生しないため作業環境は良好であることから、既に鉄道車両、船舶、航空機分野において実用化されている。そこで著者らは、本接合法と同じ摩擦攪拌現象を利用した摩擦攪拌点接合 (Friction Spot Joining; FSJ) を開発した。FSJ は図 1 に示すように、回転させた接合ツールを重ね継手に対して

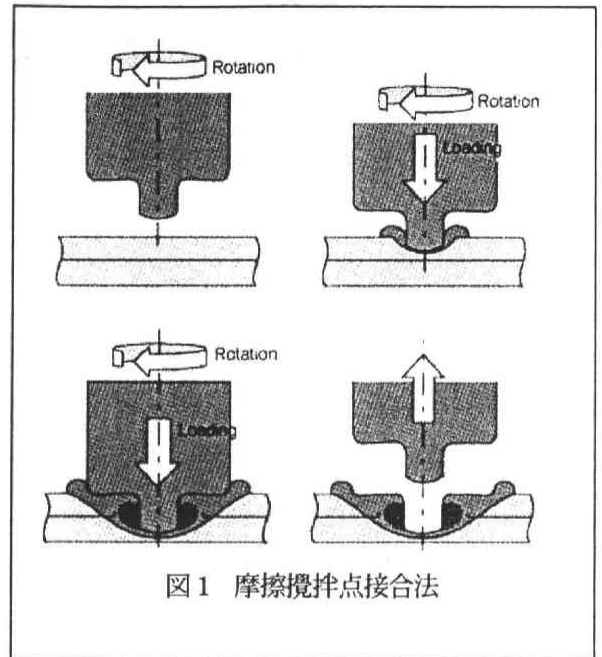


図 1 摩擦攪拌点接合法

圧入させることで摩擦熱を生じさせ、軟化された材料を塑性流動させることで界面を消失させるという非常にシンプルな接合法である。本接合法は、溶接電源や冷却装置のような付帯設備も不要であるため、設置スペースやメンテナンスコストの大幅な低減が実現できる。これらの特徴を活かして既に自動車製造工程に導入され、アルミニウム合金製のフロントフード、ハッチバックおよびドアを対象として実用化されている。

しかしながら、FSJ で得られた継手の強度特性、接合機構およびマイクロ組織などの基礎的な検討は行われておらず、被接合部材の材質による接合性の違いについても検討が行われていない。また、接合に最も大きく影響されと考えられる塑性流動現象については、接合ツールが接合線に沿って移動する FSW と全く異なることが推察されるが、詳細な検討は行われていない。これらを解明することで接合方法の最適化が図られるだけでなく、適用材料の最適化も行われ、FSJ の適用が飛躍的に拡大されることが期待される。

本研究は、FSJ で得られた継手の強度特性を把握し、接合領域を特定するとともに接合中の塑性流動現象を解明することにより最適な接合方法を得る指針を示すことを目的とした。

第 2 章 摩擦攪拌点接合における継手強度支配因子の解明

本章では、アルミニウム合金の重ね継手に対して FSJ を行い、得られた継手の引張せん断強度特性を示した。また、材料の違いによる FSJ 接合性への影響を明らかにするとともに、ツール先端のプロープにおけるねじの有無による継手強度ならびに接合領域への影響を示すことにより継手強度の支配因子に関する検討を行った。

自動車外板用材料として多く用いられている 6000 系アルミニウム合金および FSW 接合性が劣るとされてい

る 5000 系アルミニウム合金に対して接合時間を種々変化させて接合した結果、継手の破断形態は接合時間が長くなるに従って界面破断からプラグ破断に移行し、これらの遷移条件近傍において最大強度が得られた。それぞれの引張せん断強度の最大値は、抵抗スポット溶接で得られる継手の JIS 規格 A 級平均強度に対してほぼ同等、もしくは上回っており、5000 系アルミニウム合金 A5052-H34 材も 6000 系アルミニウム合金 A6061-T6 材と同等以上の FSJ 接合性を有することを示した。

次に、破面を詳細に観察した結果、接合ツールで押圧した領域より 1mm 程度内側の円周状の領域において延性破面が観察され、この領域は断面マクロ写真において界面が不連続となった領域に相当することを示した。図 2 に示すように断面マクロ写真のプロープ穴左右に楕円形領域が明瞭に観察される。この領域はねじが加工されているツールで施工した場合にのみ形成されるが、継手強度には影響を及ぼさない。この理由は、楕円形領域では界面が完全に消失しているが、さらに外側の領域においても十分に接合されているためであると考えられる。

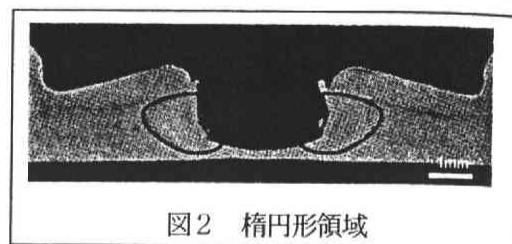


図2 楕円形領域

FSJ の接合メカニズムについては、ツールの押圧、回転による摩擦熱で材料強度が低下し、ツール直下の材料がツール回転方向に塑性流動することで、板間界面において摩擦圧接のような状態になったためであることを示した。

第3章 摩擦攪拌点接合継手の組織学的検討

本章では、6000 系アルミニウム合金重ね継手に対して摩擦攪拌点接合を行い、得られた継手の集合組織を解析し、組織学的特徴を示した。また、塑性流動現象の痕跡を示し接合中の塑性流動現象解明に結びつけた。さらに、硬さ分布を計測し、析出状態の変化と硬さの関係について検討を行った。

6000 系アルミニウム合金 A6061-T6 材に対して FSJ を行った結果、プロープ穴の外周に楕円形領域が形成されており、この楕円形領域ならびにその外側の領域において板間界面が消失し、上下の板が接合されていることを示した。また、接合部の板間界面は最高約 750K にまで加熱されており、接合後、等軸的な微細結晶粒組織を呈していることから、この領域では接合中に著しい塑性ひずみが導入され動的再結晶が生じていると推察される。

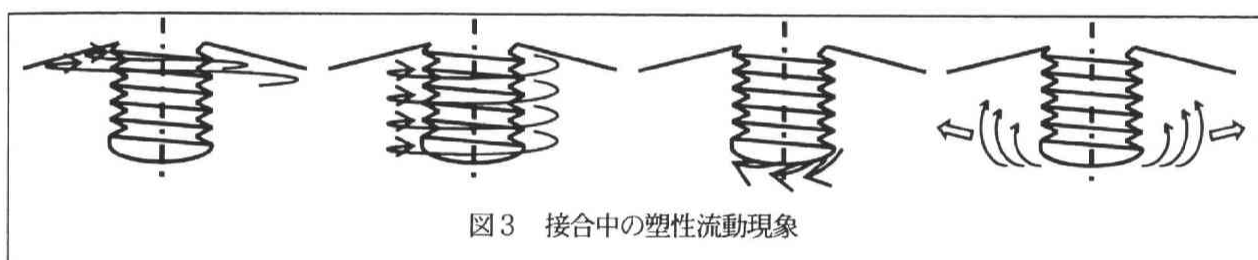
次に、母材の結晶粒径は約 $14.5\mu\text{m}$ であるが、楕円形領域の内側だけでなく外側においても広範囲において結晶粒が $7\sim 9\mu\text{m}$ と微細化されていた。また、集合組織も楕円形領域の内側と外側では急激な変化は無く、プロープ穴近傍からショルダ直径方向に緩やかに変化していることが示された。一方、楕円形領域外縁部が明瞭に観察できた理由は、介在物等の影響ではなく、近傍の領域に比べて約 $6\mu\text{m}$ と局部的に微細化されているためである。さらに、母材の硬さはおよそ 100Hv_1 であるが、接合後は広範囲において軟化が認められた。最低硬さは HAZ で得られその値はおよそ 70Hv_1 であるが、プロープ周辺では 90Hv_1 まで硬さが回復していた。硬さ分布は温度履歴による析出物の溶解・粗大化の違いにより説明できることを示した。

第4章 摩擦攪拌点接合における塑性流動現象の解明

本章では、6000系アルミニウム合金重ね継手に対して、適正な接合時間に至るまでの各接合時間で接合を強制的に終了させ、楕円形領域の形成ならびに成長過程を解明するとともに、各種実験を行うことにより材料中の塑性流動現象に関する系統的な検討を行った。

6000系アルミニウム合金A6061-T6材および5000系アルミニウム合金A5052-H34材に対してFSJを行った結果、プローブ穴周辺に形成される楕円形領域は接合時間が長くなるに従って板厚方向ならびにツール直径方向に成長することを示した。接合初期はツール接触面を底面とした逆円錐状の領域においてツール回転方向に塑性流動が生じ、摩擦熱で材料が十分に軟化した後は、図3に示すようにプローブに加工されたねじの回転による板厚方向の塑性流動が生じることで楕円形領域が形成されることを示した。

材質の違いによる塑性流動現象への影響については、A6061-T6材に比べてA5052-H34材の方が早期に楕円形領域が形成され、板間界面が鋸歯状に不連続となる時間も早くなっていることを示した。また、鋸歯状となっている部分での板間界面の振れ幅はA6061-T6材に比べて大きくなっていることがA6061-T6材に比べて短時間で高い継手強度が得られている原因であることを示した。



第5章 結論

本章では、第2章から第4章までの内容を要約し、全体を通した総括ならびに摩擦攪拌点接合における今後の展望について述べた。

論文審査結果の要旨

エネルギー消費およびCO₂排出量の観点から輸送機器の軽量化が進められており、自動車においてはアルミニウム合金の適用が拡大している。しかし、従来法によるアルミニウム合金の点接合には、大量エネルギー消費や付加材料による重量増加など、多くの課題が残されている。そこで、本論文では、それらの課題を克服する新しい点接合法として、摩擦攪拌現象を利用した摩擦攪拌点接合法を開発し、その接合強度と接合機構に関して材料科学的な検討を行っている。

本論文は全5章から構成される。

第1章では、本研究の背景とともに、開発した摩擦攪拌点接合法の概要を述べている。

第2章では、摩擦攪拌点接合時の温度測定を行い、継手界面における最高温度が約750Kで、固相接合であることを確認している。また、摩擦攪拌点接合継手の引張せん断強度特性を調べ、破面観察ならびに断面マイクロ組織との比較検討を行っている。その結果、板間界面の材料がツールの回転方向に塑性流動していることを明らかにしている。また、継手強度は、板間界面に形成された上下の材料の攪拌領域の増加、ならびに、板間界面が不連続になった領域の増加に伴って向上するが、ツール圧入による上板板厚の減少により破断位置が上板になった時に最大値を示し、さらに上板厚が減少すると低下することを示した。

第3章では、継手断面のマイクロ組織観察およびマイクロ集合組織解析から、摩擦攪拌点接合部の微細等軸結晶粒組織および塑性流動域が楕円形領域の外まで広範囲に及んでいることを明らかにしている。さらに、析出硬化型合金の接合部の硬度分布が、接合時の温度履歴による析出状態の変化で主に説明できることを示している。

第4章では、種々の実験により接合中の塑性流動の解明を試み、塑性流動の駆動源がツールの回転とプローブに加工したねじの回転であることを明らかにした。さらに、板間界面における塑性流動域と板間界面が不連続になった領域が一致していることから、継手強度が塑性流動域の大きさならびに板間界面の不連続性に支配されることを明らかにしている。

第5章は本研究の結果をまとめた総括である。

以上要するに本論文は、アルミニウム合金摩擦攪拌点接合部の継手強度特性と組織学的特徴を調べ、接合時の塑性流動現象を解明するとともに、その継手強度との関係を明らかにしたものであり、材料システム工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文を博士（工学）の学位論文として合格と認める。