

学 位 論 文 要 旨

題 目 摩擦攪拌点接合による熱溶着技術を用いた Al 合金/CFRP 異種材料継手の
疲労特性および疲労寿命評価手法の確立
(Establishment of evaluation method for fatigue life and fatigue characteristics for aluminum
alloy/CFRP dissimilar heat welding joints by friction stir spot welding)

氏 名 小 川 裕 樹

近年の輸送機器に対するマルチマテリアル化の流れにより、高強度鋼や軽金属材料、樹脂材料など軽量材料などへの置換が求められている。そのうち、比強度・比剛性の高い CFRP は鉄鋼材料の代替材として特に注目されているが、これは同時に、幅広い材料を組み合わせる異材接合が重要となる。特に CFRP の接合技術においては、従来接着接合や機械締結を主としているが、接合技術自体の軽量化とともに、高効率な接合技術の開発が急務とされている。そこで近年では、CFRP の直接接合として、簡易かつ低コストで接合可能な熱溶着技術が注目を集めている。同技術については従来の溶接技術を加熱源として用い、CFRP を加熱熔融することで他材と接合する方法である。加熱源として摩擦攪拌接合やレーザ溶接などがあるが、自動車の生産ライン導入を目的とする本研究の場合、従来の溶接技術であるスポット溶接の置換が求められる。そのため本研究では点接合が可能でスポット溶接への置換が容易な摩擦攪拌点接合を加熱源として使用し、同接合技術を応用した熱溶着継手を試験対象としている。

しかしながら、摩擦攪拌点接合自体が近年に開発された接合技術のため、熱溶着技術に応用した検討については、材料やそれらの特性向上に対する表面処理、施工コストの高効率化を目的とした接合条件に関する知見などの接合技術自体の知見拡充は進められているものの、接合技術の開発・進展に対しては同時に、実機適用において強度信頼性が担保される必要性があり、特に接合部の疲労信頼性は極めて重要とされる。また、摩擦攪拌点接合による熱溶着技術の実用化においては疲労設計指針を規定する際の評価指標が必要とされ、継手強度を支配する各因子や継手の破壊機構などを総合的に含めた疲労寿命予測技術の開発が、輸送機器など構造体の耐疲労設計に有用と考えられる。しかしながら、過去の知見にて寿命予測技術に対し各パラメータに対し評価した例はあるものの、熱溶着技術を破壊機構などと総合し予測した研究報告は非常に僅少である。

そこで本研究では、アルミニウム合金と CFRP の異種材料間を摩擦攪拌点接合による熱溶着技術を施工した継手を対象とし、基礎的な接合継手の疲労特性の取得ならびに、材料や接合条件など各因子が疲労特性に与える影響について、継手の破壊機構との関連性も含め実験的検討を行った。また、それらの検討とともに解析的手法を用い得られた継手の疲労特性との相関関係を明らかにするとともに、継手の疲労寿命評価に対し高精度に評価可能とする評価指標の確立を行った。

本論文は 6 章で構成されており、第 1 章は緒論として、近年のマルチマテリアル化における各種材料の歴史から、それらを組み合わせたマルチマテリアル構造の核となる接合技術について、近年着目される熱溶着技術に対する過去の知見を示した。また著者が採用した摩擦攪拌点接合を応用した熱溶着技術について接合機構や各因子に対する接合強度等への影響評価について研究報告を行うとともに、本研究の目的について述べた。

第2章では、摩擦攪拌点接合を用いた熱溶着技術によるアルミニウム合金/CFRPの異種材料間接合継手にて、継手の基礎的な疲労特性を解明するとともに、継手の表面処理の影響評価を目的に、CFRPの基材樹脂と相溶性の高い有機皮膜を付与した化学的処理と、陽極酸化処理により微細な凹凸を持つ酸化皮膜を付与した機械的処理の2種類の表面処理をアルミニウム合金表面に施工した材料を使用し、摩擦攪拌点接合による熱溶着継手の疲労強度に対する表面処理の影響について未処理材と比較検討を実施した。その結果、継手の静的強度および疲労強度向上に対して、アルミニウム合金の表面処理は大変有効であるとともに、特に継手の疲労強度は陽極酸化処理による機械的処理が最大となることが明らかになった。また継手の疲労破壊形態については、表面処理の有無によらずアルミニウム合金表面が露出した領域とアルミニウム合金表面にCFRPが凝着する領域が確認され、前者は両材界面を疲労き裂進展する界面破壊、後者はCFRP内部を疲労き裂進展するCFRPの母材破壊の2種類の疲労破壊機構が認められた。また、これらの破壊機構と表面処理との関係性については、表面処理を施工することによって両材間の界面強度が向上し、両材間の疲労き裂進展抵抗が増加した。その結果、表面処理を施工した継手においてCFRPの母材破壊を呈する割合が増加し、継手強度向上との関連性についてその要因を明らかにした。

第3章では前章の検討に加えて、摩擦攪拌点接合を用いた熱溶着技術によるアルミニウム合金/CFRPの異種材料間接合継手の接合時間短縮ならびに、高効率な接合技術の確立を目的として、接合時間を1秒、2秒、5秒の3条件で変更し、継手の疲労特性に及ぼす影響について実験的検討を行った。併せて高信頼性を有する接合継手作製に必要とされる継手の疲労破壊機構を解明することを目的として、疲労き裂の三次元的観察による疲労き裂進展の可視化を行い、それらと解析結果との整合性について詳細な検討を行った。試験結果として、まず接合時間の増加により熱溶着におけるCFRPの基材樹脂熔融に対する時間が増加するため、継手の接合面積が増大するとともに、継手の静的強度ならびに疲労強度向上の傾向が認められた。また、本研究で対象とする継手の疲労破壊機構を上記の疲労き裂の三次元的観察により可視化すると、複数の疲労き裂が発生・進展する様相が確認され、そのうちアルミニウム合金の治具固定側に存在するスリット先端から生じる疲労き裂が、最も優先的に進展する様相を示した。そのため、同疲労き裂が継手全体の疲労寿命に与える影響が大きくなることがわかり、継手のFEM解析結果について実験結果との整合性が認められた。

第4章では、アルミニウム合金とCFRPの摩擦攪拌点接合による熱溶着技術の適用範囲拡大を目的として、高強度かつ高融点の樹脂材料であるエンジニアリングプラスチックPAおよびPPSを基材樹脂とするCFRPを用いた熱溶着継手を試験対象として、それら継手の接合特性および疲労特性を取得し、材料変化に伴う影響について実験的検討を行った。その結果、継手の接合特性および強度特性はCFRPの基材樹脂に依存する傾向がみられ、PAおよびPPSを基材樹脂としたCFRPの継手は、基材樹脂PPの継手に比べ疲労強度は低下し、疲労信頼性も低くなることが示された。また継手の疲労破壊機構に対してもCFRPの基材樹脂に依存する傾向が認められ、FEM解析結果との整合性については、基材樹脂PAおよびPPSのCFRPを用いた継手に対しては空きあらかにされなかった。したがって、CFRPの基材樹脂に応じた接合条件の策定など、前章にて基材樹脂PPのCFRPを用いた継手で実施した同様の検討を図る必要があることが示唆された。

第5章では、本研究で取得したアルミニウム合金とCFRPの摩擦攪拌点接合による熱溶着継手の疲労試験結果に対して、継手の疲労寿命評価を目的に各種パラメータを評価指標とした疲労寿

命評価を実施したとともに、高精度な疲労寿命評価を行う指標の推定を行った。その結果、異材間の特異応力性を考慮した疲労き裂進展に寄与する応力拡大係数による評価を実施することで、接合時間の影響を含め基材樹脂 *PP* の *CFRP* を使用した継手の疲労寿命を統一的に評価できることが明らかになった。したがって、アルミニウム合金と基材樹脂 *PP* の *CFRP* 間熱溶着継手については、実験的および解析的検討とともに疲労寿命評価において統一的な評価が行えているため、本研究で得られた成果は価値のあるものといえる。しかしながら、*CFRP* の基材樹脂の差異による疲労寿命評価については材料依存性が認められたため、同評価因子についてはさらなる考察の必要性が示唆された。

第6章は結論として、本研究によって得た研究成果をまとめた。