

氏名	岡田 孝雄
所属	システムデザイン研究科 システムデザイン専攻
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	シス博 第108号
学位授与の日付	平成30年3月25日
課程・論文の別	学位規則第4条第1項該当
学位論文題名	航空機用外板への適用に向けた摩擦攪拌接合の強度特性の評価
論文審査委員	主査 准教授 渡辺 直行 委員 教授 北菌 幸一 委員 教授 笥 幸次 委員 教授 小笠原 俊夫（東京農工大学大学院・工学研究院）

### 【論文の内容の要旨】

摩擦攪拌接合（FSW: Friction Stir Welding）は、従来の溶接方法では接合が困難であった2000系、7000系のアルミ合金の接合が可能であることから、航空を含む分野での適用及び適用拡大が期待されている。航空機への適用拡大のためには、疲労や運用環境の特性の把握が不可欠である。本論文では、航空機構造への適用を拡大させるために、2024-T3アルミ合金を対象として、FSWの疲労特性及び耐環境性に関する研究を行った。

第1章では、FSWに関する概要説明、関連する文献の調査及び、本論文の目的と構成の説明を行う。FSWは既存の溶接技術と異なり材料の融点以下で材料を接合できる点が利点であり、接合による金属組織や接合方法、条件、強度特性について様々な研究がなされている。しかし、FSWのき裂進展を含む疲労特性及び耐環境性に関する研究は十分とは言えないため、FSWにおける疲労損傷の起点となる部位及び疲労強度特性、FSW接合部近傍におけるき裂進特性、FSWの耐環境性に関する研究を行った。

第2章では、接合部の材料特性を調べるために、接合部断面のマイクロビッカース硬さ試験を行った。母材及びHAZ(Heat Affected Zone)では、硬さ分布の板厚方向変化はほとんどみられないこと、一方で、TMAZ(Thermo-Mechanically Affected Zone)及びSZ (Stir Zone) の場合、塑性流動及び接合時の入熱により、硬さ分布が板厚方向に変化することを硬さ分布と組織観察から考察した。次にFSWの疲労試験及び、破断後の破面観察を行った。表面処理なし（接合まま）の場合、接合のツールマーク

近傍のバリ、接合裏面のLOP(Lack of Penetration)が破壊の起点となることを把握した。また、接合ツールの移動軌道上に生じた接合不良を起点とした疲労破壊が起りうること、さらに、これらの接合に起因する破壊起点を除いた場合、母材と同様に試験片表面の析出物を起点とした疲労破壊を生じることを明らかにした。

第3章では、疲労き裂進展試験及び解析を行い、FSWの疲労き裂進展特性の評価を行った。接合線と試験片中心の距離及び応力比をパラメータとした場合、き裂

先端が接合線中心から2mm程度離れた位置で、残留応力場による影響を考慮した修

正応力比が最も大きいこと、母材のき裂進展速度に対する残留応力場によるき裂進展速度の加速割合が最も大きいことを実験及び解析により実証した。加速率は、接合線と試験片中心の距離が離れるに従い、また、応力比が高い場合、実験値と解析値の差が小さくなった。この結果に基づき、解析によりき裂進展挙動の傾向の予測が可能な範囲を示した。

第4章では、弾塑性有限要素法解析と母材のき裂進展試験データを用いてFSWのき裂進展挙動を評価する手法の検討を行った。解析では、母材の引張試験結果をもとに弾塑性挙動について区分線形を仮定し、材料硬化は等方硬化則を採用、降伏条件はミーゼス則を採用した。また、平面応力場を仮定して2次元解析を行った。き裂前方の1要素ずつき裂を進展させ、繰り返し荷重を負荷することによりき裂縁近傍に塑性変形を与えつつき裂進展を行い、各き裂長さにおけるき裂開口応力を求めた。き裂縁のメッシュ数が増加するに従い、き裂開口応力の値が漸近する特性を有することを確認した。残留応力場にき裂先端がある場合、残留応力によりき裂先端の塑性変形が母材と異なり、引張残留応力下ではき裂開口応力が低下し定性的に妥当な結果を得た。母材、FSWのき裂開口応力と母材のき裂進展データをもとにFSWのき裂進展速度を予測した結果、実験値と同様の傾向であり、同手法による残留応力場におけるき裂進展挙動予測の妥当性を示した。

第5章は、FSWを食塩水に暴露した耐腐食性の評価を行うとともに、食塩水暴露後に腐食の様子をCCD観察を行った。母材は暴露部全体にランダムに腐食ピットが形成されるのに対して、FSWは、接合中央部及び接合端部近傍に腐食ピットが集中すること、FSWに形成される腐食は母材よりも

平均で深さが10 $\mu$ m程度深いこと、腐食ピットのアスペクト比は母材、FSWとで大きな差は見られないこと等の定量的違いを得た。母材とHAZ、TMAZとSZで析出物の傾向が異なることを、母材及び接合各部のTEM観察及びEDX計測により証明し、腐食特性の違いの要因として考察した。また、腐食環境暴露の後の疲労試験により、FSWは母材よりも疲労寿命が低い傾向となること等の特性の違いを把握した。

第6章では、2つの異なる接合条件のFSWとリベット継手の疲労試験を行った。FSWの接合条件により、疲労破壊の起点となる要因が異なること、リベット継手の疲労破壊の起点が摩耗跡であることを確認した。また、FSWの疲労寿命は、接合条件により応力集中係数が1から2のS-N線図に近い結果を示すのに対して、リベット継手の疲労寿命は応力集中係数が5の場合に近く、FSWはリベット継手と比較して明らかに高い疲労寿命を有することを定量的に示した。

第7章は本論文のまとめである。はじめに、FSWの表面処理の違いが破壊起点及び疲労寿命に与える影響を確認した。次に疲労き裂進展特性について、応力比、接合線の位置がき裂進展挙動に与える影響について定性的傾向と、解析により傾向の予測可能な範囲を示した。また、き裂進展挙動について弾塑性有限要素法解析による評価方法の妥当性を明らかにした。FSWの耐環境性として、食塩水暴露時間が腐食損傷に与える影響及び腐食損傷が疲労寿命に与える影響、及び、FSWとリベット継手の疲労試験による疲労寿命の比較に関して実験結果による考察を行った。