

研究題目：赤外線サーモグラフィを用いたマルチマテリアル接合の 疲労損傷過程のその場計測手法の構築

神戸大学大学院工学研究科 機械工学専攻
小川 裕樹

1. 研究背景

従来の自動車の車体構造は鋼材を中心とした設計であり、環境負荷低減のため重量削減が求められる。そこで強度や剛性と軽量化を同時に達成するマルチマテリアル構造が、自動車業界のキーワードである。マルチマテリアル構造の実現には、異材接合技術が必要となる。異材接合技術の実用化においては、高強度かつ長寿命な継手作製を実現する必要があるが、接合部の損傷過程を解明するには多くの時間を費やす。そこで、外部から接合部の疲労損傷過程を簡易に観察する手法がマルチマテリアル構造の早期実現のために望まれている。

2. 研究目的

本研究では、赤外線サーモグラフィによりマルチマテリアル接合部の疲労損傷の発生から進展までの全過程をその場計測し可視化する手法を構築する。継手の疲労損傷過程は、疲労き裂の発生段階とそのき裂の進展段階からなり、各段階で生じる現象を赤外線サーモグラフィにてその場計測を行う。まず、疲労損傷の発生過程においては、塑性変形による発熱を示す散逸エネルギーに着目した。接合部の疲労き裂の発生は、接合構造から生じるミクロな塑性変形の蓄積が起因する。そこで、散逸エネルギーを赤外線サーモグラフィにてその場計測することで、接合部の損傷起点を可視化する。また、マルチマテリアル接合部には、同材間と比較して化学結合や金属間化合物からなる複雑な接合構造が形成される。接合部に生じた疲労き裂は、形成された複雑な接合構造の内部を立体的かつ複雑に進展する。本研究では従来接合部の欠陥検出など非破壊検査法に適用されるアクティブ赤外線サーモグラフィ法を応用し、接合部の疲労損傷における進展過程を赤外線サーモグラフィでその場観察する。接合部に熱負荷を与え、損傷領域の断熱効果による温度変化と健全な接合部の熱エネルギーの伝播様相をその場観察することにより、接合部の健全箇所と損傷領域を分離同定し、接合部に生じる疲労損傷の進展過程を可視化する。

3. 疲労損傷発生過程の解明（散逸エネルギーその場計測）

まず、疲労損傷発生過程解明におけるその場計測法の確立を目的に、本研究は、板厚 3mm の Al 合金 A5052O 板と冷間圧延鋼板 SPCC 板の突合せ FSW 継手を対象に評価を行った。各材を短冊状に機械加工後、長辺側を突合せ FSW を施工した。接合時、ツールの回転方向と進行方向が同一な前進側（Advancing Side）に鋼板を配置し、ツールの回転方向と進行方向が反対な後退側（Retreating Side）に Al 合金を配置した。接合条件は、接合速度 0.8mm/sec,

ツール回転速度 250rpm, ツール前進角 3 度とし, プローブ側面が鋼板端面から 0.2mm の位置になるようツールをオフセットした. 作製した FSW 継手は, 放電加工によりツールの中心と試験片の長手方向の中心が同一となるよう幅 20mm の形状に切出し供試材とした. 接合部の硬さ分布を取得するため, Al 合金は押込荷重 490.3 mN, 押込時間 10 s, 鋼板は押込荷重 1.961 N, 押込時間 10 s のビッカース硬さ試験を実施し, 接合部およびその周辺の領域に対して 0.3 mm 間隔で計測を実施した. 疲労試験は電気油圧式サーボパルサを用い, 周波数 $f=7\sim 10\text{Hz}$, 応力比 $R=-1$, 未破断時の打ち切り回数は $N=1\times 10^7\text{cycles}$ とした. 散逸エネルギー計測では, 試験片に対して短い繰返し数ごとに応力振幅を階段状に増加させる階段状応力振幅増加試験を行った. 階段状応力増加試験終了後に最大の応力振幅で試験片が破断するまで繰返し負荷を与え, き裂の発生位置の確認を行った. 負荷条件としては, 応力比 $R=-1$, 負荷周波数 $f=7\text{Hz}$, 各応力振幅の繰返し数は 3300cycles とした. 負荷 1 サイクルの負荷変動において最大引張・圧縮応力付近で塑性すべり変形により不可逆的な発熱が生じる. 温度変動信号から取得される負荷周波数の 2 倍にあたる周波数成分を散逸エネルギーと定義した. 正弦波上の荷重を試験片に負荷した (Fig. 1 黒線) 際, 熱弾性温度変動は Fig. 1 の青線で示すように負荷周波数と同じ周波数の逆位相の正弦波状になり, かつ熱拡散の影響により θ_E の位相ずれが生じる. また, 散逸エネルギーによる発熱は, Fig. 1 の赤線で示す負荷した正弦波荷重の 2 倍周波数に当たる温度成分として赤外線サーモグラフィに観測され, 荷重信号との位相ずれ θ_D が存在する. 熱弾性温度変動に起因する温度変化の位相 θ_E と散逸エネルギーの位相 θ_D の差の絶対値を散逸エネルギーの位相差 $\Delta\theta$ と定義した.

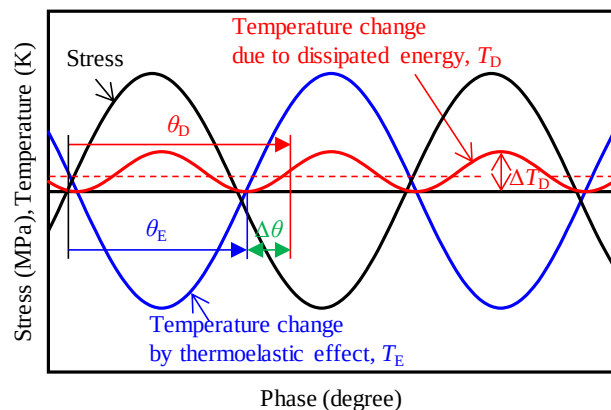
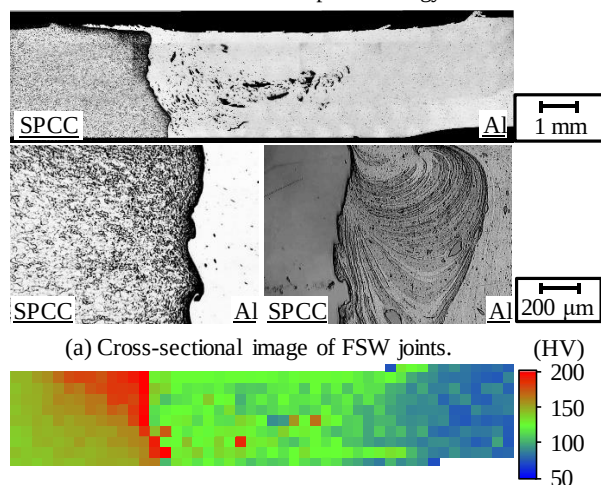


Fig. 1 Measurement principle of the temperature increase due to the dissipated energy.

FSW 接合部の接合方向と垂直な方向に対する接合断面を Fig.2(a)に示す. 断面の全体図より, FSW 接合部に接合時の鋼片が内在している. 異材界面近傍の Al 合金は強い塑性流動の様相が現れていることから, 鋼板表面を削り取った鋼片が接合部に分布していると考えられる. また, 接合部およびその周辺のビッカース硬さ分布を Fig.2(b)に示す. 同図より, 接合部の異材界面近傍ほど FSW の影響により硬さが増加し, FSW 接合部の硬さは Al 合金母相より高くなることが分かった.



(b) Vickers hardness map of FSW region and its surroundings.

Fig. 2 Cross-sectional image of FSW joints and corresponding Vickers hardness distribution.

異材 FSW 継手および各材料の疲労試験結果として $S-N$ 曲線を Fig. 3 に示す。FSW 継手の 10^7 回時間強度は 70~80MPa に存在するものと考えられる。各材料の疲労限度はそれぞれ 120~140MPa 程度であることから、FSW 継手の疲労限度は各材料自身のそれと比較して小さいものと考えられる。

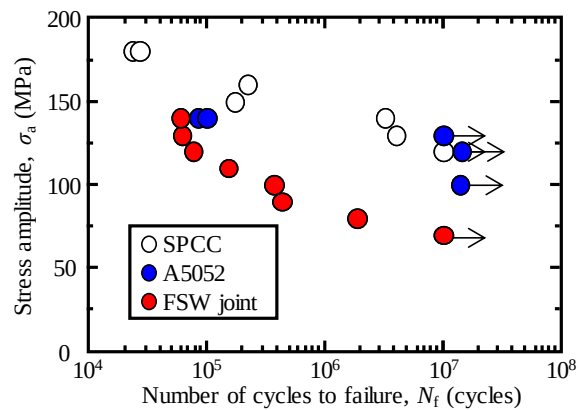


Fig. 3 S-N curves.

FSW 継手の階段状応力増加試験結果の代表例として、Fig. 4(a)に試験後の破壊様相、Fig. 4(b)および 4(c)に応力振幅 150MPa における散逸エネルギー分布および位相差分布をそれぞれ示す。Fig. 4(a)より、FSW 継手の疲労き裂の発生および進展は接合部内で生じていることが分かる。散逸エネルギー分布にて、FSW 接合において高い散逸エネルギーが現れており、き裂発生位置とほぼ一致している。すなわち、散逸エネルギー分布から継手の疲労破壊起点を検知できることが分かる。また位相差分布にて、各母材および FSW 接合部で異なる位相差を示した。

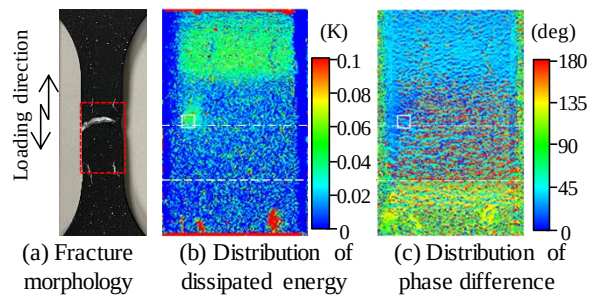


Fig. 4 Distribution of temperature increase due to dissipated energy and phase difference of FSW joints.

階段状応力振幅増加試験における散逸エネルギー計測結果を Fig. 5 に示す。散逸エネルギーとして、階段状応力増加試験終了後に破断させた試験片から確認されたき裂発生位置を中心とする 10×10 pixels の平均値を用いた。

同図より、FSW 継手は応力振幅 $\sigma_a = 70 \sim 80$ MPa を境に散逸エネルギーの増加率が変化していることが分かる。散逸エネルギーが増加に転じる応力振幅を鉄鋼材料と同様に疲労限度推定値と定義すると、疲労限度推定値と $S-N$ 曲線における 10^7 回時間強度程度が近い値を示している。以上のように、散逸エネルギーを用いて異材 FSW 継手の疲労限度を評価できることが分かった。

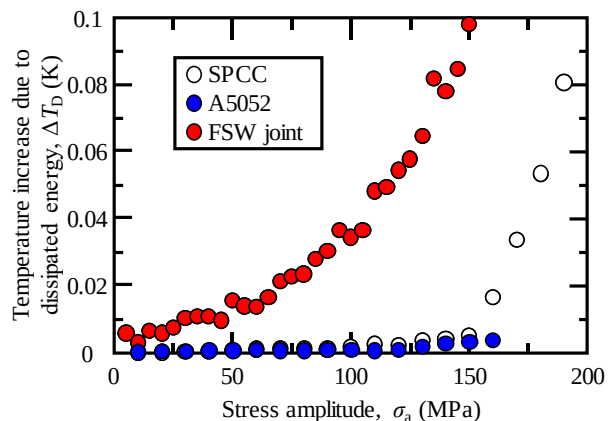


Fig. 5 Measurement results for the temperature increase due to dissipated energy for each specimen.

4. 疲労損傷進展過程の解明（アクティブ赤外線サーモグラフィその場計測）

次に、疲労損傷進展過程を解明するアクティブ赤外線サーモグラフィ法によるその場計測法を確立した。本研究は、板厚 1.2mm の A5052 相当の Al 合金と板厚 3.0mm の 40wt%炭

素繊維が含有した PP 母材の CFRP を用いた. 両材を Fig.1 に示す短冊状に機械加工後, CFRP 板の上に Al 合金板を重ね, Al 合金側から摩擦攪拌点接合を施工した. 接合継手は Fig. 6 に示すように Al 合金板の一端にヒンジを接着しており, ヒンジの一端から 40mm の長さを挟み治具で固定し, 疲労試験を行った. 疲労試験は, 電気油圧式サーボパルサを用いた. 試験条件は, 周波数 $f=1\sim 20\text{Hz}$, 荷重比 $R_p=0.05$, 2 つの材料が完全に分離した時点を疲労破壊と定義とした. 継手の疲労破壊機構を明らかにするため, 本研究では疲労き裂の三次元観察を行う. この手法は, 疲労破壊前の任意の繰返し数で中断した継手内部に発生する疲労損傷を, 数百 μm 毎に研磨と観察を繰り返すことで得られた二次元断面をもとにき裂の進展様相を三次元画像で構成する.

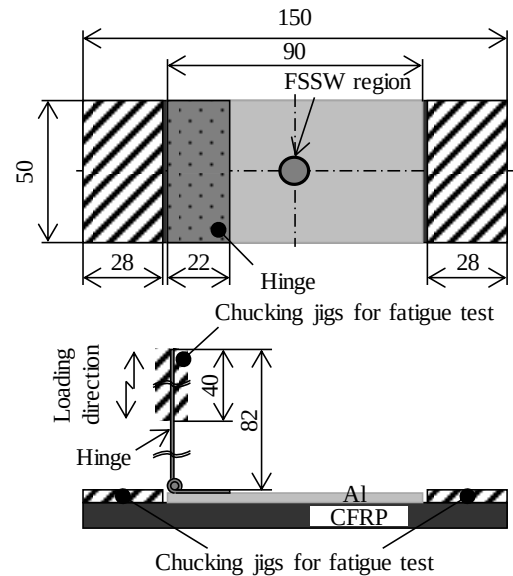


Fig. 6 Shape and dimension of peel joint.

本研究では, 赤外線サーモグラフィ法のうち Fig. 7 に示すアクティブ赤外線サーモグラフィ法を用いる. アクティブ赤外線サーモグラフィ法は検査対象に対して強制的に熱負荷を与えることで熱移動を発生させ, 欠陥の有無により表面に表れる温度変化を赤外線サーモグラフィ装置で計測する手法である. 本研究では, 熱負荷を与える方法としてハロゲンランプによる周期加熱法を用いた. ハロゲンランプによる周期加熱法は, 検査対象に周期的な熱負荷を与えることにより, 検査対象に厚さ方向の熱移動を生じさせる. その時の非接合部の断熱作用で発生する局所的高温部, およびその時系列変動を赤外線サーモグラフィ装置で計測し, 疲労き裂進展による剥離面を検出する.

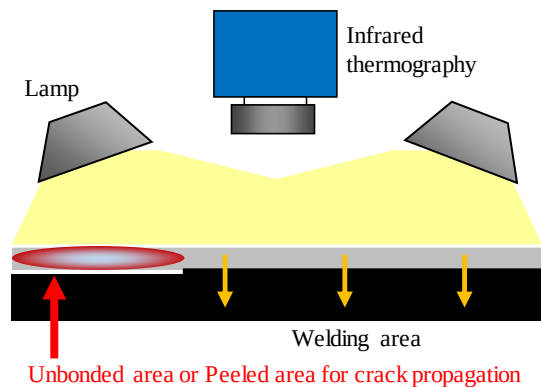


Fig. 7 Active infrared thermography method.

疲労試験を任意の繰返し数で停止した際の継手に生じた疲労き裂およびその模式図を Fig. 8 に示す. 同図より, 剥離型継手の疲労き裂は, ヒンジ側の未溶着部端から CFRP 母材内部に存在する 10 μm 厚程度のスリットを起点と

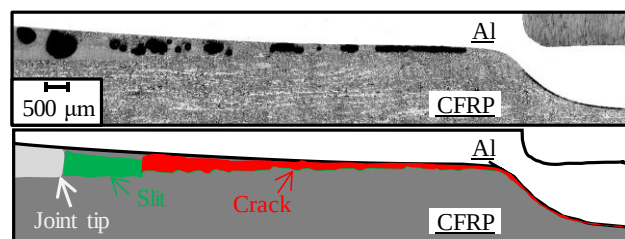


Fig. 8 Fatigue crack in FSSW region of the joint.

し, CFRP 母材内部へ進展する. その後, 両材の接合界面近傍に遷移し, 異材界面を進展する界面破壊を呈する様相が確認された. 次に, 観察された疲労き裂の三次元観察結果を Fig. 9 に示す. なお同図(a)はプロットするための座標系の方向を示しており, 同図(b)および同図

(c)は継手の破断寿命に対して 10%, 60%程度の繰返し数で疲労試験を停止した際の結果である。同図より、破断寿命に対して 10%程度の寿命初期において、継手内部に疲労き裂が発生・進展する様相が確認されていることから、剥離型継手の疲労寿命はき裂進展が支配的であることが明らかになった。

周期加熱によるアクティブ赤外線サーモグラフィ法から得た時系列赤外線データに対し、大津の二値化にて二値化処理を行った結果として、継手の破断寿命に対して 25%, 50%程度の繰返し数で疲労試験を停止した際の結果を Fig. 10 に示す。なお同図は、疲労き裂進展による剥離面の検出において、周期加熱による加熱および冷却と連続加熱による平均温度上昇を捉えたデータを基に画像処理を行ったものである。Fig. 10

より、剥離型継手の接合部におけるき裂開口およびき裂進展の様相を、アクティブ赤外線サーモグラフィ法にて捉えることができた。したがって、赤外線サーモグラフィ法にて、外部より継手内部の疲労損傷状態を検出できることが明らかになった。

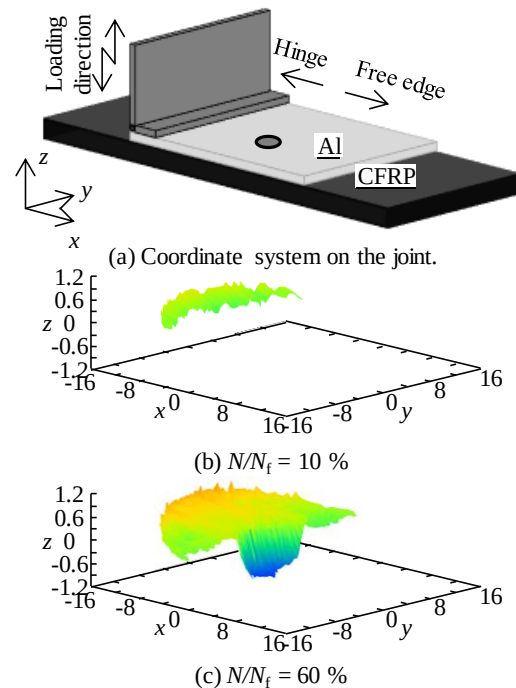


Fig. 9 Three-dimensional observation results of fatigue crack growth of peel joint.

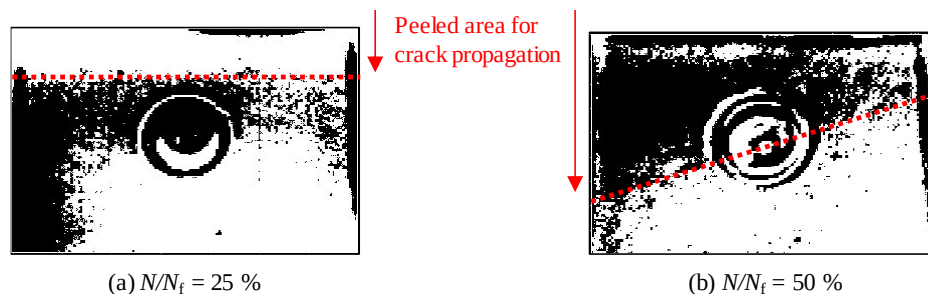


Fig. 10 Processed image of peel joint by active infrared thermography method.

謝辞

本研究を遂行するにあたって多大なご支援をいただきました、公益財団法人川西記念新明和教育財団およびご関係の皆様にご感謝申し上げます。

研究成果

・ Tenyu Hidaki, Naoki Iwatani, Yuki Ogawa, Miu Hayashi, Daiki Shiozawa, Takahide Sakagami. Evaluation of fatigue strength by dissipated energy of dissimilar FSW joints of aluminum alloy and steel sheets. 13th International Fatigue Congress. (2023 年 11 月発表, 国際会議)

・ 小川 裕樹, 齋藤 健次朗, 峯岡 誠太郎, 林 美佑, 塩澤 大輝, 阪上 隆英, 曙 紘之, 菅田 淳. Al/CFRP 異材接合継手の疲労損傷過程のアクティブサーモグラフィその場観察. 日本材料学会第 36 回疲労シンポジウム. (2024 年 9 月発表, 国内会議)