

高強度・高信頼性を有する異材接着接合継手作製のための非破壊検査手法構築ならびにレーザプロセッシングの援用

広島大学 大学院先進理工系科学研究科 機械工学プログラム

小川 裕樹

1. はじめに

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。

本研究は自動車業界が着目するマルチマテリアル構造を形成する上で必要となる異材接着接合継手の高強度・長寿命化を目指した、損傷メカニズムを基に弱部を補完する接着条件の強度最適化を目的とする。そこで本研究は、①接着材塗布領域検出のための赤外線計測による非破壊検査手法の構築、および②高強度かつ長寿命な接着接合部の形成を目的としたレーザプロセッシングの援用ならびに接着接合部の損傷メカニズムの解明を目的に実験的検討を行った。

2. 接着材塗布領域検出のための赤外線計測による非破壊検査手法の構築

過去の知見において、ウェルドボンド継手を対象に赤外線計測を用いた接着部塗布領域の検出を試みている¹⁾。本研究では同様に図1に示すアクティブサーモグラフィによる赤外線非破壊検査手法²⁾を用いて、重ね接着継手の接着剤塗布箇所の検出を行った。本研究では、自動車用冷間圧延鋼板 JAC270C の合金化溶解亜鉛メッキ鋼板を用いた。上板 0.7mm、下板 2.0mm の鋼板を 14mm 重ね合わせ、その間に厚さ 0.15mm のエポキシ接着剤にて接着接合し供試状態とした。

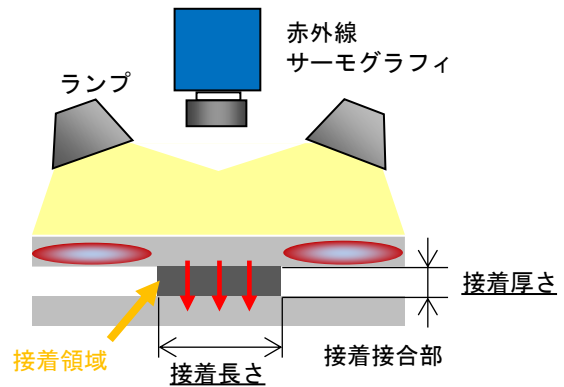


図1. アクティブサーモグラフィ法

本研究では、キセノンランプによるフラッシュ加熱アクティブサーモグラフィを実施した。フラッシュ加熱装置は Comet 社 NDT-24H を 4 灯使用し、加熱出力は 12,800Ws (3,200Ws×4 灯) とした。また赤外線サーモグラフィは FLIR 社 SC7500 を用い、フレームレートを 383 Hz、撮影時間を 10 s、インテグレーションタイムを 1000 μ s とし、3830 枚の時系列赤外線画像を取得した。実験結果を図2に示す。アクティブサーモグラフィにて、加熱装置と赤外線サーモグラフィの配置の違いによる差異を検討するため、図2(a)に示す加熱装置と赤外線サーモグラフィが同一側に配置し、対象物の加熱面を撮影し接着部を通じて熱が伝播し加熱面の冷却過程の違いを評価する反射法と、図2(b)に示す対象物を赤外線サーモグラフィと加熱源で挟

み込むよう配置し、赤外線サーモグラフィの計測面の背面から熱負荷を与えた際の、接合部における伝熱過程の違いを評価する透過法を実施した。いずれの結果においても接着領域の検知には至っていない。この要因は、上板および下板の重なる箇所への面内熱拡散により、下板から接着部を介して上板に至る熱伝導が発生した際、接着領域の検出に有効な十分な温度勾配が形成されず、接着剤塗布領域の検出が困難になったことが考えられる。そこで、図 2 (c) に示すフラッシュ加熱の範囲を上板と下板の重ね代のみとした場合、上板および下板から接着部への面内熱拡散が生じないため、下板から上板に至る部分の温度勾配が従来の透過法の場合よりさらに大きくなるため、接着剤塗布領域の検出精度が高くなることが分かった。

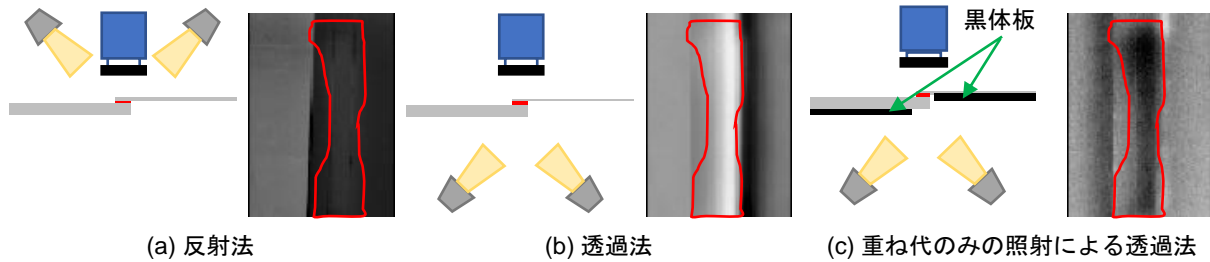


図 2. 各種アクティブサーモグラフィによる接着部領域の検出結果

3. 高強度かつ長寿命な接着接合部の形成を目的としたレーザプロセッシングの援用 ならびに接着接合部の損傷メカニズムの解明

本研究では、被着材として 270MPa 級の冷間圧延鋼板 SPCC を用いた。SPCC の特徴としては、冷間圧延による良好な表面性状と板厚制度を有しており、炭素含有量が 0.1%未満の軟鋼であることから加工性および成形性に優れる。SPCC 板材は $70 \times 25 \times t1.2\text{mm}$ の短冊状に加工した。次に、接着剤としては 1 液熱硬化型エポキシ系構造用接着剤(サンスター技研(株)製 SW-601)と 2 液混合型ウレタン接着剤(スリーエムジャパン(株)製 DP6310NS)を用いた。エポキシ接着剤は自動車用の構造用接着剤であり、硬質で高い接着強度を有する。また、軽量化やコスト削減の観点から添加物(フィラー)を充填していることが特徴である。ウレタン接着剤は、自動車に広く適用されている構造用接着剤であり、高い柔軟性と強度を有する。また、下地処理材(プライマー)を必要としないため適用材料の幅が広く異種材料同士の接合に適していることが特徴である。

レーザプロセッシング^{3),4)}は、アコン製ファーバーレーザマーカ AL20F-30W を用いて実施した。レーザ装置に関して、波長は 1064nm、パルス幅は約 100ns、1 パルスあたりの平均出力の最大値は 30W である。レーザプロセッシング条件は、スポット径 $32\mu\text{m}$ 、周波数 30kHz、走査速度 450mm/s とし、レーザ照射方向を荷重軸方向に対して垂直方向に対して、溝幅がレーザスポット径と同等の約 $32\mu\text{m}$ 、溝深さは約 $16\mu\text{m}$ とした。また、レーザプロセッシングを施した試験片との比較のために、接着面をエメリー紙で研磨を施した研磨継手を準備し比較した。各継手の試験片名称は、研磨継手を”接着剤名-Polished”，レーザプロセッシングを施工した継手を”接着剤名-Laser”とする。試験片形状を図 3 に示す。接着継手はいずれも、長手方向に 20mm を重ね合わせており、そのうち接着領域は試験片重ね合わせ部両端から長さ方向に 5mm ずつ離れた幅×長さ= $25 \times 10\text{mm}$ であり、接着層厚さは実用上エポキシ接着剤が 0.15mm、ウレタン接着剤が 0.46mm となるようテフロンテープにて制御した。疲労試験は島津製作所製

電気油圧式サーボパルサを用い、周波数 $f=20\text{Hz}$ 、試験力比 $R_p(=P_{\min}/P_{\max})=0.1$ 、未破断時の打ち切り回数は $N=1 \times 10^7 \text{cycles}$ とした。

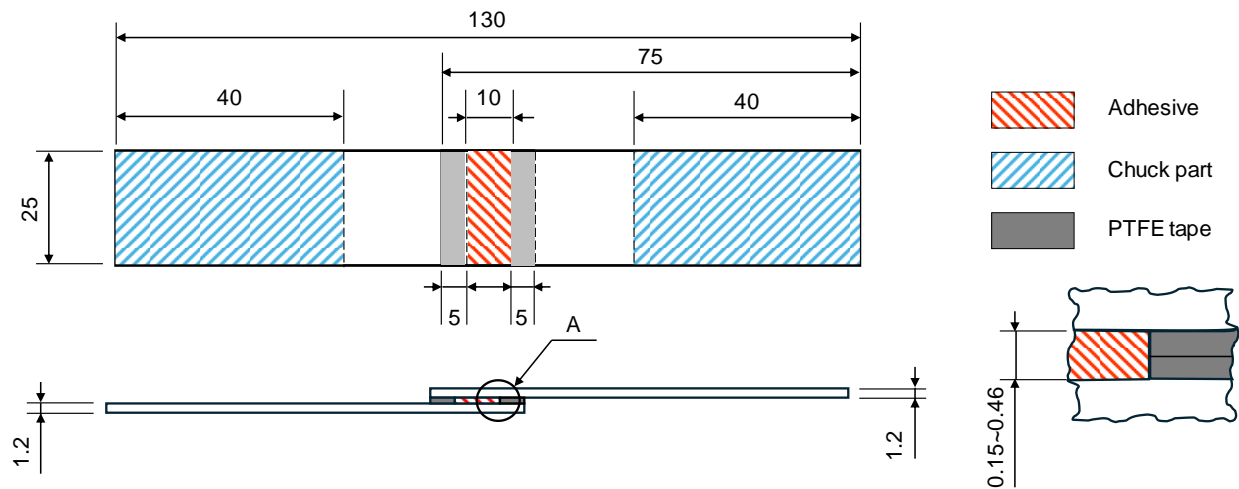


図 3. 疲労試験片形状

エポキシ接着剤およびウレタン接着剤を用いた接着継手における疲労試験結果を図 4 に示す。各図は、縦軸に試験力振幅 P_a を、横軸に破断繰返し数 N_f を示しており、図中の黒実線は各継手の疲労寿命回帰線を示している。エポキシ接着剤にて、*Epoxy-Laser* の方が *Epoxy-Polished* と比較して同一試験力振幅域において疲労寿命が約 70~100 倍程度向上し、優れた疲労強度を示した。疲労強度向上の主要な要因としては、レーザープロセッシングによるアンカー効果が考えられる。繰返し荷重下において、被着材と接着剤との界面近傍に生じると考えられる微小なき裂の発生および成長が、接着面に形成された幾何学的な溝形状によって *Epoxy-Polished* よりも緩和されたことで、大幅に疲労強度が向上したと考えられる。次に、ウレタン接着剤にて *Urethane-Laser* の方が *Urethane-Polished* より優れた疲労強度を示し、疲労寿命が約 6~10 倍程度向上した。疲労強度向上の主要な要因としては、レーザープロセッシングによるアンカー効果と接着剤の高い延性による相乗効果であると考えられる。レーザープロセッシングによって形成された凹凸形状に高延性のウレタン接着剤が食い込むことで、繰返し荷重による応力が集中する界面近傍での接着剤の変形および微小損傷の蓄積が抑制される。これにより、平滑な界面を有する *Urethane-Polished* よりも疲労強度が向上したと考えられる。

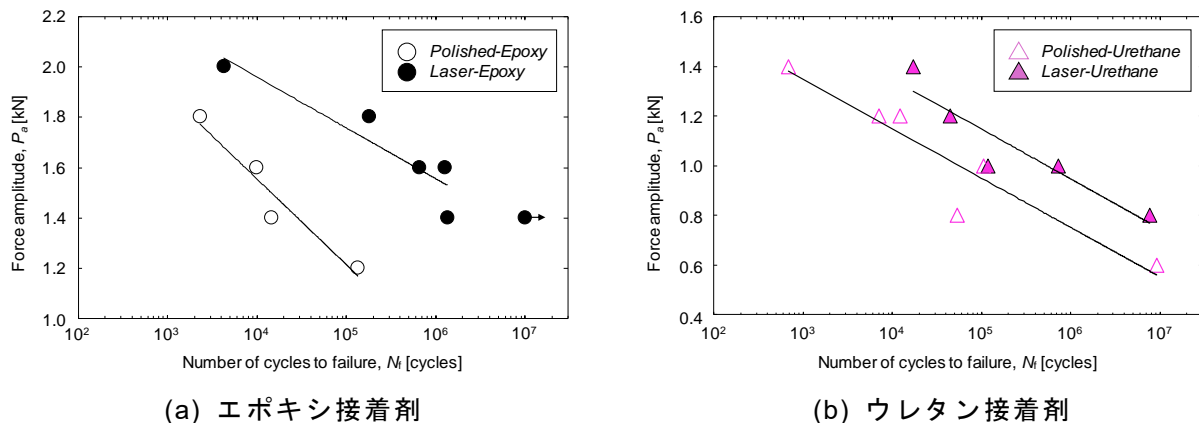


図 4. 各種接着剤における疲労試験結果

次に、各種接着剤の疲労破壊機構解明とレーザープロセッシングによる疲労強度向上の要因を明らかにするため、疲労試験を任意の繰返し数で中断し断面観察を実施する途中止め観察を実施し、接着部における疲労き裂進展挙動および破壊メカニズムの解明を行った。まず図5に *Epoxy-Polished* にて、途中止め観察を実施した結果を示す。図5 (a)に示す破断寿命率 $N/N_f=7.77\%$ にて接着端部の界面近傍にき裂が発生していることが確認された。図5 (b)の破断寿命率 $N/N_f=98.2\%$ に示すように、界面に達したき裂は界面に沿うようにして試験片長手方向へと進展している様子が見られ、図5 (c)に示すような最終破断に至った。最終破断面より、接着剤が平滑な面を有しながら図中下板側に残存しており、き裂は被着材と接着剤との界面を瞬間的に進展して破断に至ったと考えられる。したがって、*Epoxy-Polished* ではこのような疲労き裂進展挙動によって界面破壊を呈したと考えられる。一方、*Epoxy-Laser* にて途中止め観察を実施した結果を図6に示す。荷重負荷開始後すぐの図6 (a)に示す破断寿命率 $N/N_f=1.79\%$ にて、接着端部における界面近傍の接着層内および層内のフィラーを起点に複数のき裂が発生し、界面方向へと時間をかけてき裂が進展している様子が観察された。図6 (b)に示す破断直前の破断寿命率 $N/N_f=99.9\%$ では、き裂は大きく開口しながら界面近傍の接着層内を試験片長手方向に進展している様子が見られ、図6 (c)に示すような最終破断に至った。最終破断面より、き裂が接着層内を進展したことで粗い面を有しており、繰返し荷重負荷開始後すぐに発生したき裂は段階的に成長して破断に至ったと考えられる。したがって、*Epoxy-Laser* では、このような疲労き裂進展挙動によって凝集破壊を呈したと考えられる。以上のことから、レーザープロセッシングによる表面の凹凸形状に起因したアンカー効果によって、界面に沿ったき裂の進展が抑制されたためであると考えられる。

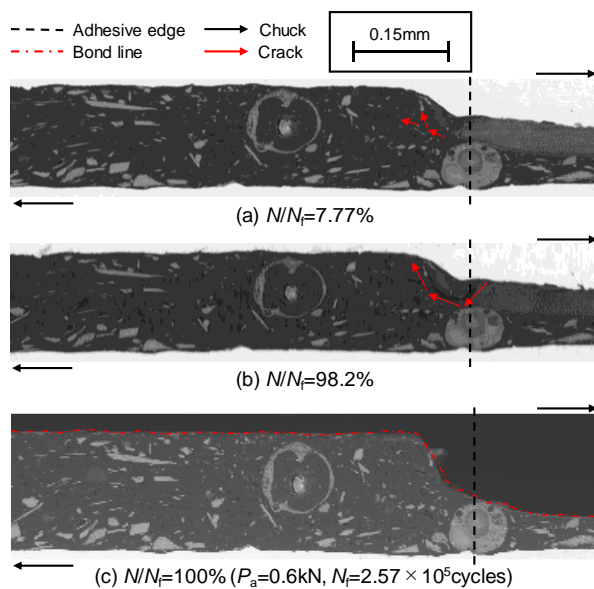


図5. *Epoxy-Polished* における途中止め観察による接着部の疲労き裂進展挙動

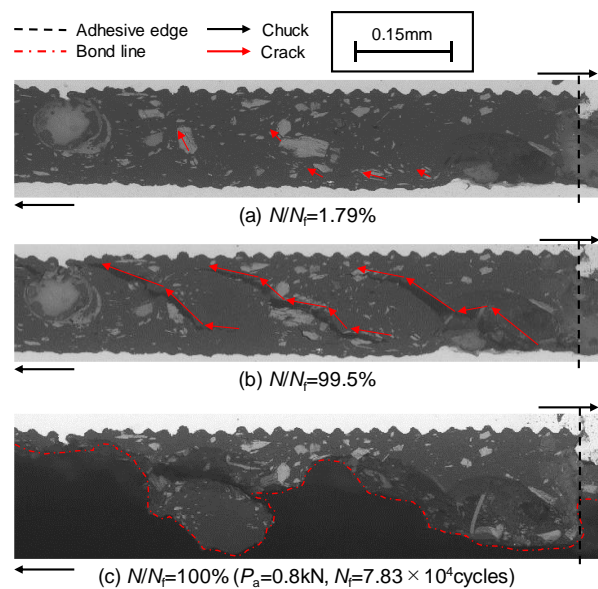


図6. *Epoxy-Laser* における途中止め観察による接着部の疲労き裂進展挙動

ウレタン接着剤にて途中止め観察を実施した結果を以下に示す。まず、*Urethane-Polished* にて途中止め観察を実施した結果を図7に示す。疲労試験開始後も目立ったき裂の進展は確認されず、破断直前である破断寿命率 $N/N_f=97.5\%$ (図7 (b))においても、き裂に大きな進展は見られなかった。その後、数千サイクル程で図7 (c)に示すような最終破断に至った。最終破断面より、

き裂は界面方向へと進んだ後に，界面に沿って進展した様子が観察された．したがって，*Urethane-Polished* における破壊形態は *Epoxy-Polished* と同様に，き裂の開口ではなく界面の瞬間的な剥離が支配的であったと考えられる．したがって，*Urethane-Polished* では，このような疲労き裂進展挙動によって界面破壊を呈したと考えられる．次に，*Urethane-Laser* に関して途中止め観察を実施した結果を図 8 に示す．図 8 (a) に示す破断寿命率 $N/N_f=17.8\%$ にて PTFE テープ角部にてき裂が発生している様子が観察された．その後，図 8 (b) の破断寿命率 $N/N_f=60.0\%$ に示すように，き裂は被着材と接着剤との界面方向へと進展している様子が観察された．界面近傍に到達したき裂は，界面を沿うようにして試験片長手方向へと進展している様子が見られ，図 8 (c) に示すような最終破断に至った．最終破断面より，き裂が界面近傍の接着層内を進展した結果，図中上側の被着材には接着剤が薄く残存しており，*Urethane-Laser* では，このような疲労き裂進展挙動によって薄層凝集破壊を呈したと考えられる．

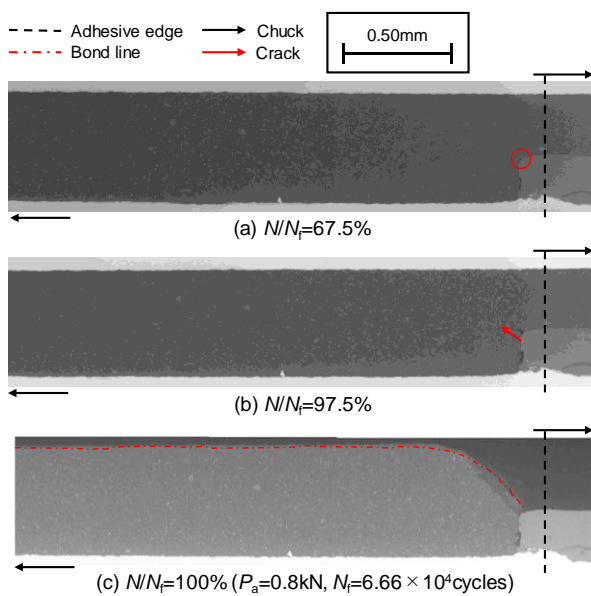


図 7. *Urethane-Polished* における途中止め観察による接着部の疲労き裂進展挙動

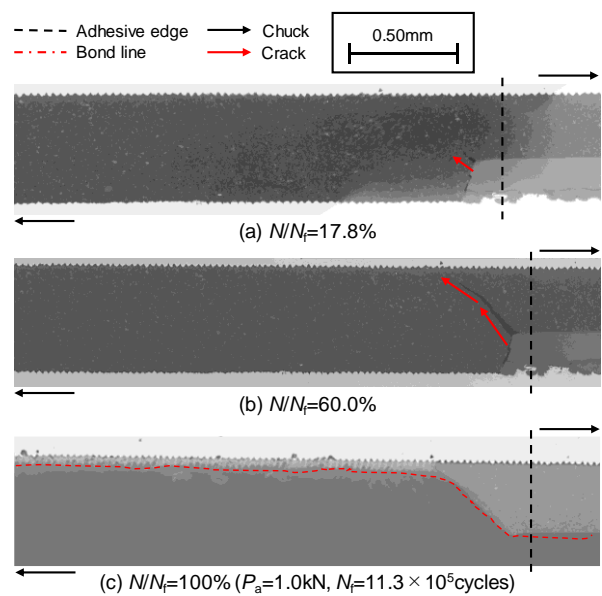


図 8. *Urethane-Laser* における途中止め観察による接着部の疲労き裂進展挙動

4. まとめ

本研究はマルチマテリアル接着接合部の実現に向け，赤外線計測による非破壊検査手法による接着材塗布領域検出による接着部の高信頼性化，およびレーザープロセッシングを援用した接着部の耐疲労性向上と損傷メカニズムの解明実施した．その結果，まず非破壊検査手法として，アクティブサーモグラフィにて従来実施される透過法を工夫し，接着部のみを限定的に加熱することで，高精度に接着剤の塗布領域を検出できた．また，レーザープロセッシングによる被着材のマイクロオーダーの溝を設けることで機械的なアンカー効果を付与することによって，本研究で用いたエポキシおよびウレタン接着剤の疲労強度は向上した．

謝辞

本研究は（公益財団法人）天野工業技術研究所，2025年研究助成を受けて実施された．ここに謝意を示す．

参考文献

- 1) 阪上 隆英, 塩澤 大輝, 小川 裕樹, 竹内 謙太, 伊藤 薫平, 伊東 海, 大磯 昇馬, 三井 雄二郎, 小池 正俊, 飯塚 隆, ”パルス加熱後の時系列温度分布のサーモグラフィ計測ならびにデータ解析による接着部材の非破壊検査,” 日本機械学会 2022年度年次大会講演集 J043-11, 2022.
- 2) Shoma Oiso, Daiki Shiozawa, Yuki Ogawa and Takahide Sakagami, “Defect Identification in Thermographic Nondestructive Testing under Cyclic Heating Using SVD Thermo-Component Analysis,” Engineering Proceedings, vol. 51, no. 1, pp. 42, 2023.
- 3) Katsuki Shikimoto, Shogo Ishida, Wataru Jinnouchi, Yuki Ogawa, Hiroyuki Akebono, Atsushi Sugeta, “Effect of Laser Patterning Preprocessing on Fatigue Strength of Adhesive Bonded Joints Using Thin Steel Plate,” Materials Transactions, vol. 61, no. 3, pp. 469-474, 2020.
- 4) 川端 彩文, 林 美佑, 小川 裕樹, 曙 紘之, 菅田 淳, ”レーザパターニング処理を施した各種接着剤による接着接合継手の疲労特性,” 日本材料学会 第 22 回破壊力学シンポジウム講演論文集 2025.