

# レーザーパターニング表面処理による高耐久性能を 実現する接着接合接手の開発

岡山大学 学術研究院環境生命自然科学学域  
助教 荒川 仁太

(2020 年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2020236-C2)

キーワード：レーザーパターニング，アンカー効果，疲労強度，疲労き裂進展

## 1. 研究の目的と背景

接着接合継手は異種材料でも容易に接合が可能のため、今後多岐にわたり使用される可能性がある。しかしながら、その接着メカニズムは複雑に多くの因子が関係している上に、他のスポットやレーザー接合に比べて、著しく静的強度・耐久性能が低いことが問題である。また、被着材表面にレーザーパターニング処理を施すことで疲労強度と凝集破壊率の向上が報告されている<sup>(1)</sup>。しかし、レーザーパターニング処理の最適条件は明らかになっておらず、疲労強度向上メカニズムについても詳細な検討が必要とされる。さらに、接着層厚さを一定に制御するため、接着剤にガラスビーズを混合した後に接着を行う手法がいくつか存在するが<sup>(2)</sup>、ガラスビーズが接着部の強度に与える影響は不明であり、レーザーパターニング処理条件の違いが疲労強度に与える影響を調査する際の支障となり得る。そこで、本研究では、ガラスビーズを用いることなく接着層厚さの制御を行い、レーザーパターニング処理を被着材表面に施すことで優れた疲労特性と凝集破壊率を有する接着接合継手を創製し、その疲労破壊メカニズムを明らかにすることを本研究の目的とする。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試材

本研究では、被着材に冷間圧延鋼板 (SPCC) を、接着剤には 1 液熱硬化型エポキシ系構造用接着剤 (SW-601, サンスター技研 (株) 製) をそれぞれ用いる。SPCC は軟鋼板であり、コストの低さや優れた加工性を有するため、自動車に広く用いられている<sup>(3)</sup>。SPCC を幅×長さ×厚さ=25×75×1.2 mm の寸法に加工した状態を供試状態とする。SW-601 は自動車に使用されているエポキシ系の構造用接着剤であり、高いせん断強度を有する。SPCC の化学成分および機械的性質を表 1、表 2 にそれぞれ示す。また、SW-601 の諸特性を表 3 に示す。

表 1 供試材の化学的組成

C	Mn	P	S	Fe
0.04	0.17	0.17	0.06	Bal.

表 2 供試材の機械的特性

Yield stress	Tensile strength	Elongation
[MPa]	[MPa]	[%]
206	335	45

表 3 SW-601 の諸特性

Color	Share strength	Peel strength
	[MPa]	[N/25mm]
Black	26	171

### 2.2 レーザパターニング処理

レーザーパターニング処理には、図 1 に示すサンインスツルメント (株) 製のファイバレーザーマーカー (YS-P30) を用いる。同図 (a) に示すヘッドユニットと (b) に示す制御ユニットが制御ケーブルによって接続されている。制御ユニット内部の発振器から生じたレーザーは制御ケーブル内部の光ファイバケーブルによってヘッドユニットへと伝えられる。ヘッドユニットによってレーザーを焦光し、走査することでワークスペース内の試料に対して処理を行う。

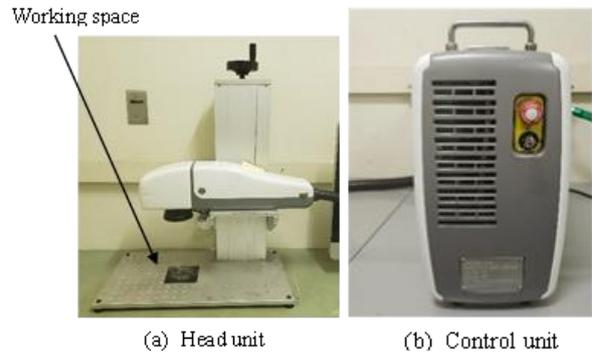


図 1 レーザパターニング処理装置

### 2.3 試験片形状

試験片形状は図 2 に示す単純重ね合わせ継手 (Single Lap Joint: SLJ) である。試験片長さ方向の両端部からそれぞれ 40 mm の領域を試験機に固定し、各種試験に供する。接着面積は幅×長さ=25×10 mm、接着層厚さは 150  $\mu$ m とする。フッ素樹脂 (Polytetrafluoroethylene: PTFE) テープを貼りつけるために、接着部の両側にはそれぞれ幅×長さ=25×5 mm の領域が設けられている。PTFE テープには中興化成工業 (株) 製の ASF-110FR を使用し、厚さ×幅

=0.08×25 mm を使用する。2 枚の被着材の接合部両側にそれぞれ PTFE テープを貼りつけるため、1 つの試験片に対して 4 ヶ所の貼付を行っている。

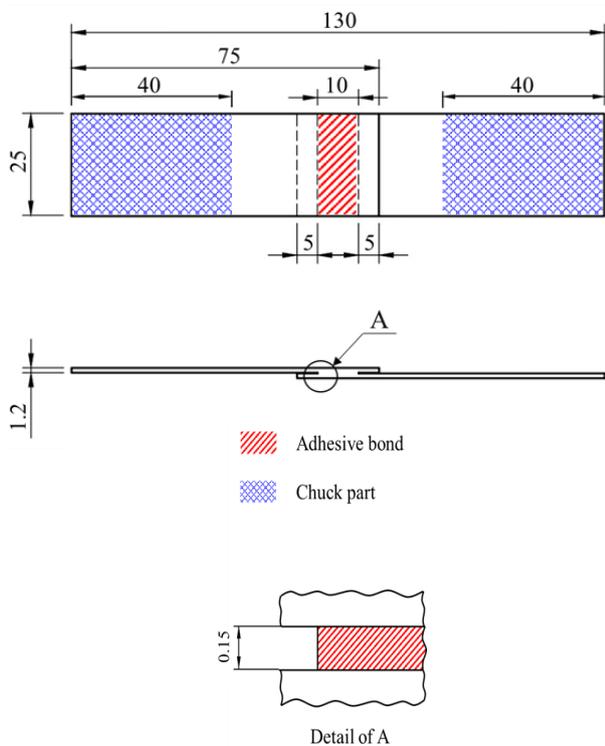


図 2 試験片形状

### 3. 実験結果

#### 3・1 パターニング形状

クリーニング継手は走査回数を 1 回とし、クリーニング+ (平均出力) で表記している。例として、平均出力が 0.5% の場合はクリーニング 0.5% 継手 (*Cleaning 0.5%*) と表す。図 3 (b) に示すように、クリーニング 0.5% 継手の断面では深さが 3  $\mu\text{m}$  程度の溝が被着面全面に隙間なく形成されていることが認められた。なお、平均出力の上昇に伴ってレーザー照射後の処理面は激しく酸化される。そこで、クリーニング 15+0.1% 継手 (*Cleaning 15+0.1%*) では、15% の照射後に 0.1% の照射を行い、15% 照射時に生じた酸化層を除去している。

アンカー継手 (*Anchor*) は走査回数を 5 回とし、図 3 (c) に示すように、深さが 13  $\mu\text{m}$  程度の溝が被着面全面に隙間なく形成されていることが観察された。

アンカークリーニング継手は、1 番目の処理でアンカー継手と同様の処理を施した後に、2 番目の処理で 0.1% のレーザーを照射し、表面の酸化層を除去している。1 番目の処理で照射するレーザーの走査回数を変化させており、アンカークリーニング+ (走査回数) で表記している。例えば、走査回数が 3 回のアンカークリーニング継手であれば、アンカークリーニング 3 継手 (*Anchor cleaning 3*) と表している。

クリーニングアンカー継手 (*Cleaning anchor*) は、クリーニング 0.5% 継手とアンカー継手を複合させた試験片である。図 3 (d) に示すように、1 番目の処理でクリーニング 0.5% 継手と同様の条件で施工し、2 番目の処理ではアンカー継手で確認された溝をライン間隔 130  $\mu\text{m}$  で設けた。

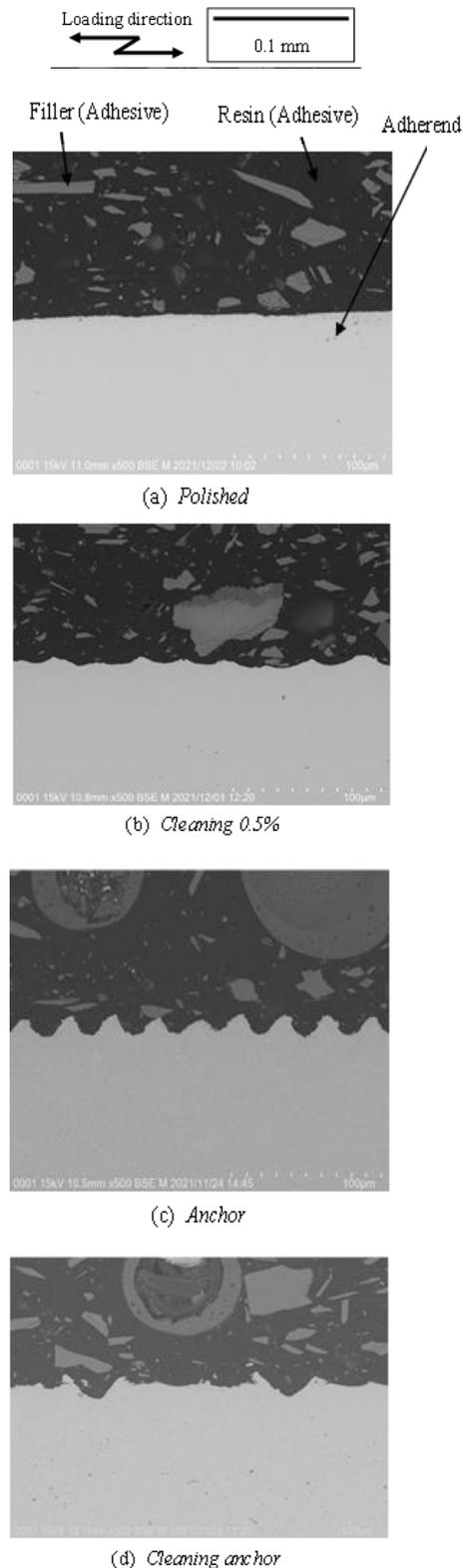


図 3 パターニング形状

### 3・2 静的試験結果

図4に静的試験を行った際の試験力と変位の関係を示す。各種試験片に対して5回ずつ静的試験を実施し、最も大きな静的強度を示した結果をそれぞれ示す。同図より、アンカー継手が最も低く、アンカークリーニング5継手が最も高い静的強度を示した。なお、アンカークリーニング5継手のみその他の試験片とは異なる製造ロットの接着剤を使用しており、接着剤の製造から静的試験の実施までの時間が最も短い試験片である。そのため、アンカークリーニング5継手の静的強度が最大値を示した原因は、接着剤の劣化が最も小さいことが考えられる。一方、アンカークリーニング5継手以外の4種類の試験片は同じ製造ロットの接着剤を用いて作製した。研磨継手はその中で最も高い静的強度を、レーザパターニング処理を施したクリーニング0.5%継手、アンカー継手、およびクリーニングアンカー継手は同程度の静的強度を示した。この静的強度の差異は試験片を作製した時期によるものだと考えられる。レーザパターニング処理を施した3種類の試験片は、研磨継手のおよそ2ヶ月後に作製されていることから、研磨継手の接着剤と比較して劣化していることが考えられる。したがって、接着剤の劣化が試験片の静的強度に与える影響は大きく、レーザパターニング処理による静的強度の変化は認められない。

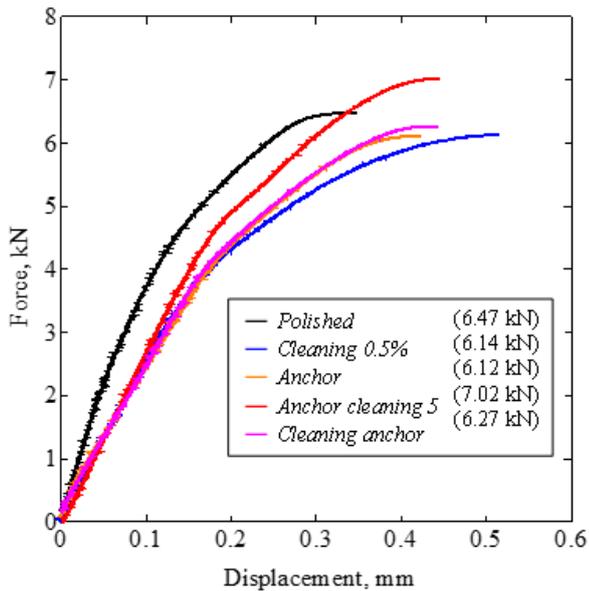
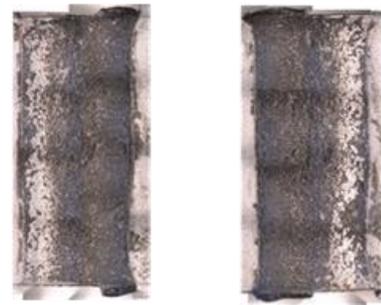


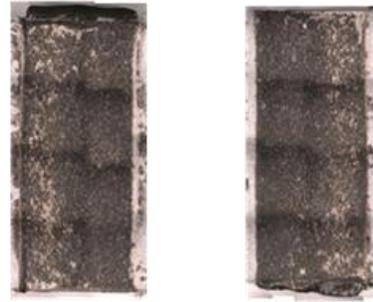
図4 各種静的試験結果

### 3・3 静的破壊の凝集破壊率

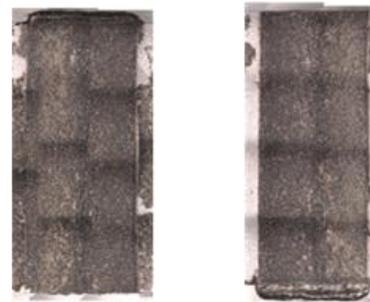
試験片の破面を光学顕微鏡で観察した結果を図5に示す。同図より、研磨継手と比較して、レーザパターニング処理を施した試験片の凝集破壊率 CFR は上昇していることが認められた。また、研磨継手では接着部の両端から界面破壊していることが観察されたが、レーザパターニング処理を施した試験片ではそのような傾向は認められない。



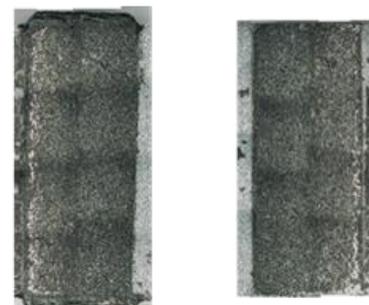
(a) Polished (CFR=50.8%)



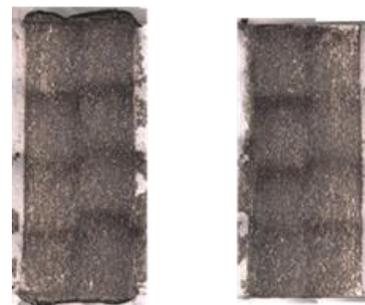
(b) Cleaning 0.5% (CFR=82.1%)



(c) Anchor (CFR=90.1%)



(d) Anchor cleaning 5 (CFR=85.4%)



(e) Cleaning anchor (CFR=85.4%)

図5 静的破面の凝集破壊率

### 3・4 疲労強度

4種類の試験片を用いて行った疲労試験結果を図6に示す。同図は試験力振幅  $P_a$  と破断繰返し数  $N_f$  の関係を表しており、最小の破断繰返し数と、繰返し数  $N=1 \times 10^7$  cycles にて打切った際の試験力振幅の最大値との平均を疲労限度と定義する。疲労限度はそれぞれ、研磨継手が 0.9 kN, クリーニング継手が 1.55 kN, アンカー継手とアンカークリーニング5継手はどちらも 1.7 kN を示した。結果より、研磨継手が最も低く、アンカー継手およびアンカークリーニング5継手が最も高い疲労強度を示す。さらに、研磨継手と比較して、レーザパターニング処理を施した全ての試験片の疲労強度は向上している。これは、レーザパターニング処理による被着材表面に存在する弱境界層の除去やアンカー効果によるものと考えられる。また、被着材表面に生じる酸化層を除去したアンカークリーニング5継手の疲労強度は、アンカー継手のそれと変わらないため、酸化層が疲労強度に及ぼす影響は認められない。一方、アンカー継手はクリーニング0.5%継手と比較して疲労強度が向上しており、深い溝を設けたことによるアンカー効果が認められた。

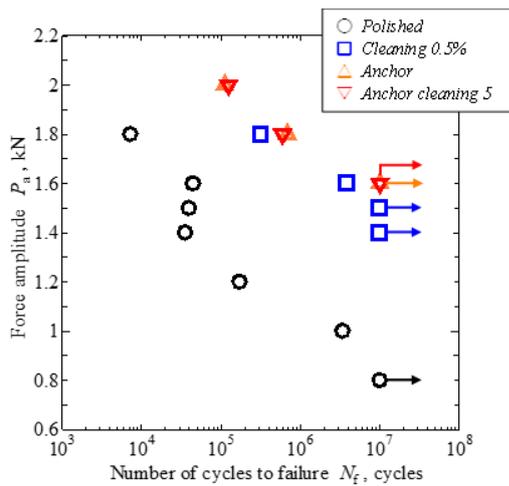


図6 疲労試験結果

### 3・5 疲労破壊の凝集破壊率

各試験片の破面を光学顕微鏡で観察した結果を図7に示す。なお、試験力振幅の違いによる破面の様子の变化は認められなかった。同図(a)より、研磨継手では静的試験で得られた破面と同様の傾向を示し、接着部の両端で広く界面破壊が確認された。一方で同図(b)に示す疲労試験で得られたクリーニング0.5%継手の破面と、静的試験で得られたそれは大きく傾向が異なり、研磨継手と同様に接着部の両端で界面破壊が確認されている。また、同図(c), (d)にそれぞれ示すアンカー継手およびアンカークリーニング5継手はどちらも凝集破壊率が90%を超えており、極めて高い値を示している。これは、深い溝を設けたことによるアンカー効果に起因していると考えられる。

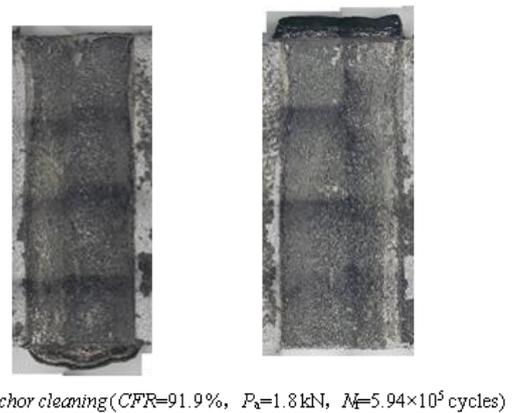
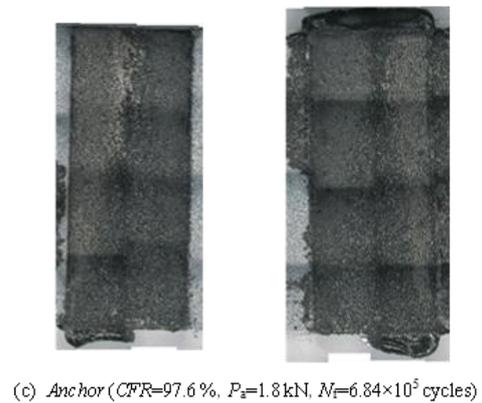
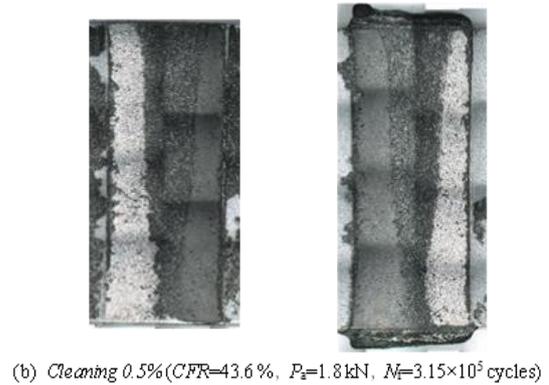
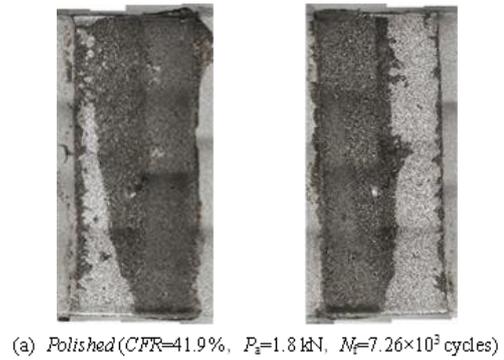


図7 疲労破面の凝集破壊率

### 謝辞

本研究は天田財団助成金(助成番号: AF-2020236-C2)を基にして実施された。ここに深く謝意を表す。