

レーザー表面処理による直接造形 ABS 樹脂／Al 合金接合体の 接合強度向上

千葉大学 大学院工学研究院

准教授 山崎 泰広

(2020 年度 一般研究開発助成 AF-2020207-B2)

キーワード：アディティブマニュファクチュアリング，せん断接合強度，レーザー溶融処理

1. 背景と目的

輸送機器等の構造材には軽量化の目的から樹脂が積極的に活用されている。また、三次元積層造形技術により従来の加工法では製造できない複雑形状かつ高品質な製品の製造が可能となっている¹⁾。一方で、耐熱性や強度特性の問題から樹脂材料単体では構造部材として設計条件を満足しないことも多々あり、ボルト締結や接着技術により金属部材と複合化して活用されている。しかし、そのような場合、二次加工が必要なことも多く、コスト低減や軽量化の妨げとなる。以上のような課題を解決するため、“金属への樹脂直接造形技術”の着想に至り、これまでに、熱溶融積層法により Al 合金上に直接 ABS 樹脂を接合造形した ABS 樹脂/Al 合金接合体に対して接合強度に及ぼす造形条件の影響を検討した²⁾。その結果、直接造形 ABS 樹脂/Al 合金接合体の主要な接合メカニズムはアンカー効果であること、接合強度に対しては造形時の基材温度が重要であることを明らかにし、最適な造形条件を提示した。しかし、接合強度に及ぼす金属表面性状の影響については検討が不十分であった。一方で、金属表面テクスチャリングを施してアンカー効果を増大させることにより、樹脂そのものの強度と同程度の接合強度が得られる事例も報告されている。直接造形接合においても、その高接合強度化を目指すうえで、金属表面テクスチャリング技術は有益と考えられる。一方で、レーザー溶接や射出成型では樹脂を溶融し流動性を高くすることが可能であることからアンカー効果の発現は比較的容易であるのに対し、3 熱溶融積層法では樹脂の過度な流動性は造形形状精度の低下を引き起こすため、造形精度を保ちつつ金属凹部への樹脂の侵入を最大化することは容易ではない。したがって、低流動性樹脂の金属凹部への侵入を促進し、高接合強度を発現させる技術の確立も重要である。

以上の背景に鑑み、本研究では、金属表面に樹脂を直接三次元造形する技術の確立を目的とし、レーザー処理による金属表面テクスチャ技術を援用して、金属表面に直接造形した樹脂の界面強度に及ぼす金属表面性状の影響を調査した。

2. 実験方法

2・1 試験片作成方法

直接接合に用いる樹脂には、熱溶融積層 3D プリント用

の ABS 樹脂フィラメントを用いた。フィラメント径は 1.75 mm で、造形時の推奨ノズル温度は 230~260 °C である。一方、金属基材には Al 合金板 A5052 を用いた。基材形状は、20 mm×20 mm×厚さ 3 mm とし、表面の処理方法にはレーザー溶融処理を用いた。

本研究では、レーザーによる粗面化処理により構造サイズの異なる 3 種の表面状態を有する Al 合金基材を準備した。処理後の表面状態を図 1 に示す。図 1 に示すように処理条件によって基材表面の状態は異なるが、いずれも複雑な粗面構造となっている。一般的な表面粗さ計による定量化が困難であったため、本研究では試験片断面の SEM 写真を用いて表面粗さを評価した。画像の長さ・面積の測定には Image J を使い、評価長さを $1.1 \pm 0.2 \text{ mm}$ とした際の算術平均粗さ Pa、平均高さ Pc、凹凸の平均間隔 PSm を測定した。3 箇所測定した際の平均値を表 1 に示す。以下、各試験片を Fine 基材、Middle 基材、Coarse 基材と呼ぶ。

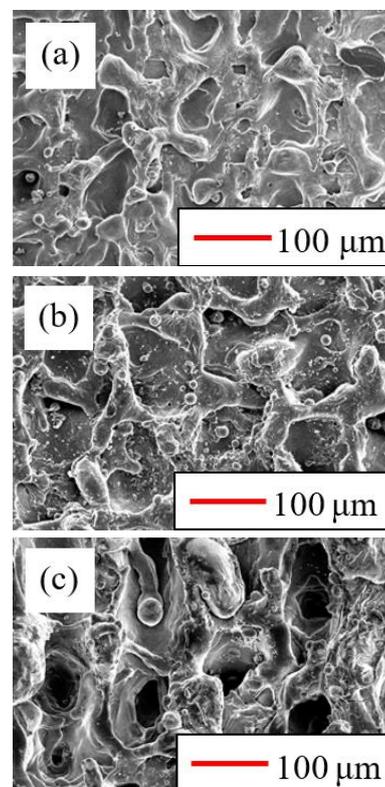


図 1 Al 合金のレーザー溶融処理状態：
(a) Fine 基材，(b) Middle 基材，(c) Coarse 基材

表1 レーザー溶融処理した Al 合金の表面粗さ

基材名称	Fine	Middle	Coarse
Pa [μm]	10.6	18.4	23.3
Pc [μm]	29.8	50.7	62.4
PSm [μm]	111.2	154.0	185.6

Al 合金基材への ABS 樹脂の造形は熱溶融積層 3D プリンタ内で行った。その際、樹脂直径、ノズル温度、基材表面温度は既報の結果²⁾に基づきそれぞれ 0.4 mm, 230 °C, 240 °C で一定条件とし、造形後は約 20 °C/min で室温まで空冷した。樹脂は単層の直線群として造形し、冷却後に両端部を切断して試験片とした。熱溶融積層造形の模式図を図 2 に示す。造形・冷却中に Al 合金基材を 100 Hz で微小振動させながら造形する条件も実施した。以下、それぞれを Fine-V, Middle-V, Coarse-V と記載する。

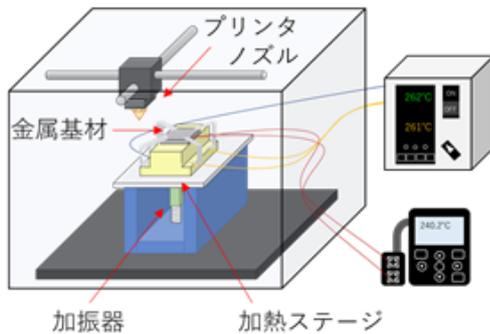


図2 造形装置の模式図

2・2 接合強度評価試験方法

せん断剥離試験には図 3 に示すせん断試験機を用いた。図 3 中に示すように、直線状に造形された ABS 樹脂の側面が荷重負荷軸と直交するようにリニアガイド上に試験片を固定する。シヤツールと試験片のクリアランスを 10 μm とし、荷重は負荷速度 1 $\mu\text{m/s}$ で与え、試験中の負荷力を ABS 樹脂が剥離するまで記録した。本研究では、記録した最大せん断荷重を接合面積で除した値をせん断界面強度として評価した。なお、各条件でせん断剥離試験を 5 回以上実施した。

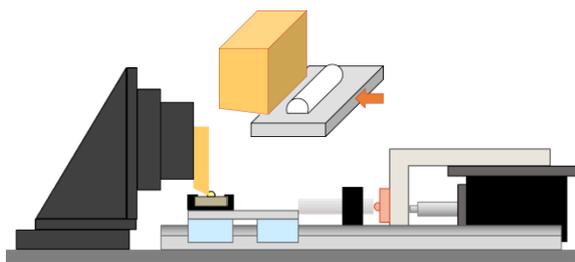
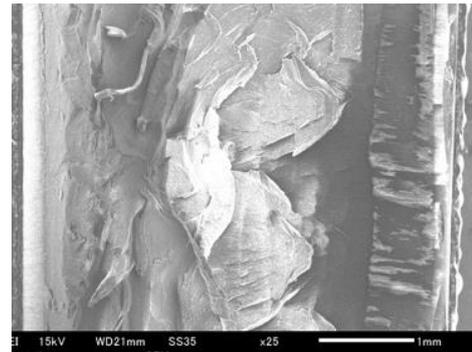


図3 せん断剥離試験装置の模式図

2・3 ABS 樹脂単体積層材のせん断試験

せん断接合強度を評価するにあたり、比較のため ABS 樹脂のせん断強度を測定した。せん断試験は熱溶融積層 3D プリンタを用いて樹脂単体のブロックを造形後、研磨により 5 mm×10 mm×約 20 mm の直方体とした樹脂に対し行った (5×10 mm の断面が積層面と平行となるよう造形した)。積層面と平行にせん断負荷を加えて樹脂のせん断強度を評価した。せん断試験後の破面を図 4 に示す。樹脂が荷重負荷方向に引き伸ばされた様子が認められる。



せん断方向

図4 ABS 樹脂単体積層材のせん断破面

3. 実験結果と考察

3・1 接合状態へのレーザー溶融処理条件の影響

せん断接合強度とレーザー溶融処理状態の関係を図 5 に示す。図 5 では、樹脂単体積層材のせん断強度で基準化したせん断接合強度を示している。図 5 より、せん断接合強度はレーザー溶融条件に依存して変化することが明らかである。そして、本研究の範囲では Middle 材で樹脂単体積層材の約 70% と最も高い接合強度が得られている。この接合強度は 20 MPa を優に超える接合強度であり、工業的に十分な接合強度が得られている。

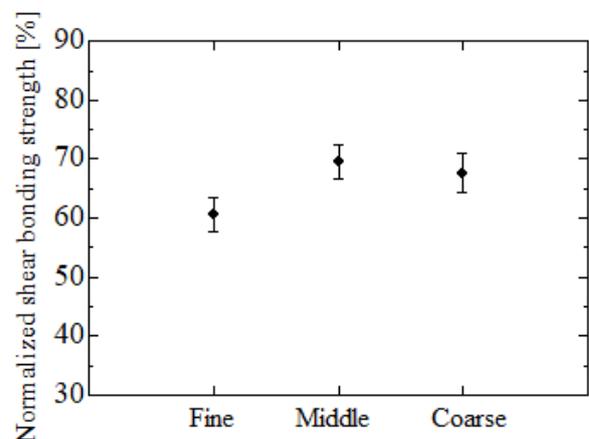


図5 せん断接合強度とレーザー溶融処理状態の関係

Fine 材, Middle 材, Coarse 材の剥離試験後の Al 合金基材側破面の様子を図 6 に, ABS 樹脂側破面の様子を図

7に示す。なお、剥離試験時のせん断荷重は図中右側から負荷している。Al 合金基材側破面では、基材表面の構造サイズに寄らず凹部に樹脂が残留している。また、樹脂破面には、図4で示した樹脂単体積層材のせん断破面と同様に荷重負荷方向に引き伸ばされた形態を呈しており、凝集破壊が生じていることを示している。そこで、画像処理ソフトを用いて金属破面中央部の接合部領域において残留樹脂面積が占める割合を計測した。接合面積に対する残留樹脂面積の割合とせん断接合強度の関係を図8に示す。残存樹脂面積割合の増加とともに接合強度が増加していることから、接合強度は樹脂の浸潤によるアンカー効果に支配されていることが示唆される。また、Middle材の残留樹脂面積割合は67%程で樹脂せん断強度に対する接合強度割合とほぼ一致している。この結果はMiddle材がABS樹脂の強度と実質的にはほぼ同等の接合強度を有していることを意味している。

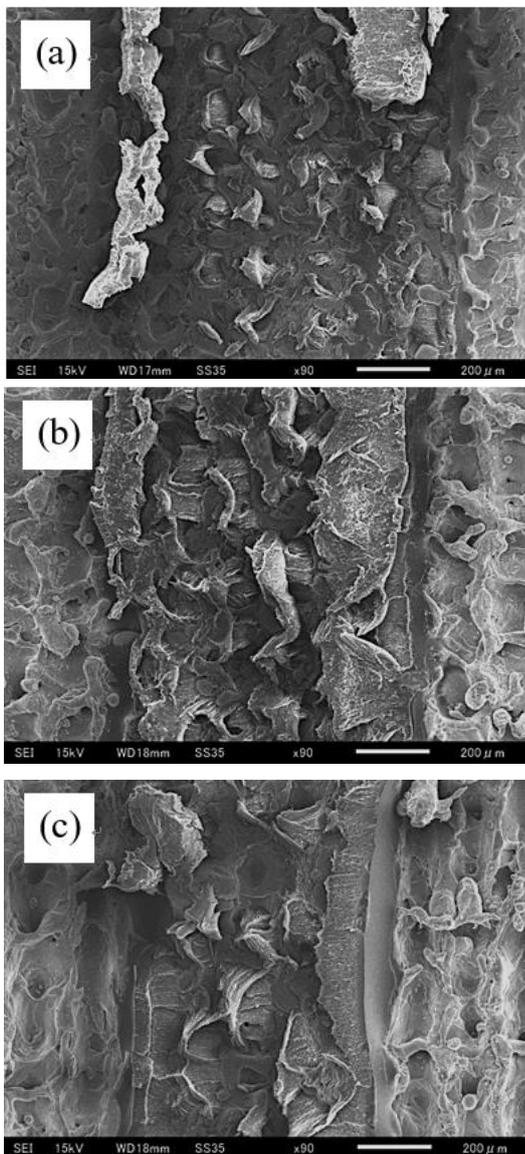


図6 せん断試験後のAl基材側破面の様子：
(a) Fine, (b) Middle, (c) Coarse

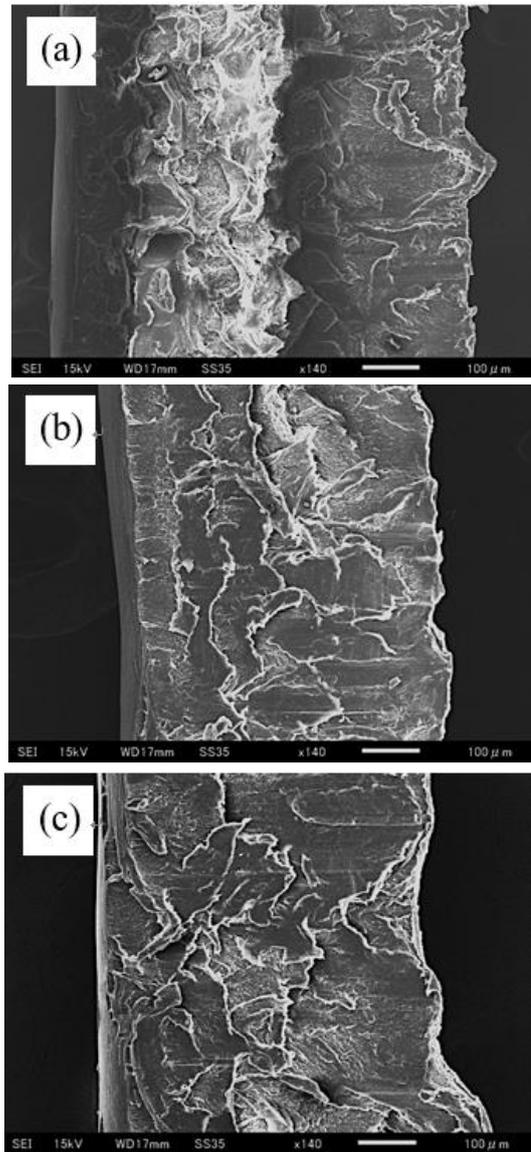


図7 せん断試験後のABS樹脂側破面の様子：
(a) Fine, (b) Middle, (c) Coarse

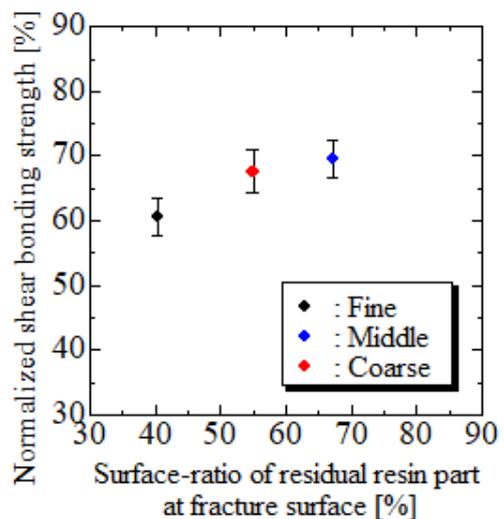


図8 接合面積に対する残留樹脂面積の割合とせん断接合強度の関係

3・2 造形時に加える微小振動の影響

樹脂造形に Al 合金基材を加振した試験片のせん断試験結果を、加振を加えなかった場合の結果と比較して、図 9 に示す。図 9 に示すように樹脂造形時に基材に加振を加えても接合強度の向上はほとんど認められず、Middle 材や Coarse 材では逆に接合強度が低下している。この要因を検証するため、せん断試験前の試験片を対象として接合部の断面観察を行った。代表的な断面観察結果を図 10 に示す。図 10 より、基材加振なしの場合でも、ABS 樹脂は Al 合金基材凹部に十分に侵入しており、また、接合面全面にわたって ABS 樹脂と Al 合金は良好に接合されている。一方、基材加振を加えた場合、ABS 樹脂は Al 合金基材凹部に十分に侵入しているものの、接合界面に隙間が形成されている。一般に、溶融積層造形法においてはノズルと基盤間のすきま、いわゆる、クリアランスが大きくなりすぎると正常に定着しないことが知られている。表面に凹凸が存在するレーザー溶融材では凸部に合わせてクリアランスを設定するため、平均高さ P_c (Middle 材と Coarse 材で 50 -60 μm 程度) 分だけ凹部では実質的なクリアランスが大きくなる。したがって、構造サイズの大きな Middle 材と Coarse 材では、加振によるノズル距離の変動に伴い造形時の実質的なクリアランスが大きくなったため接合不良が生じ、その結果として接合強度が低下したものと考えられる。また、図 10 に示すように、基材加振を加えると接合強度のばらつきが大きくなっているが、この要因も基材加振によるクリアランスの変動に起因するものと考えられる。なお、表面の凹凸が比較的小さい Fine 材では凹部におけるクリアランスの増加が抑えられたため、接合強度の低下が抑制されたものと思われる。

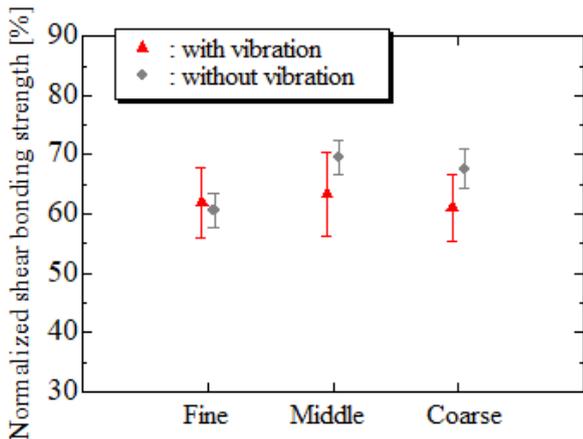


図 9 せん断接合強度に及ぼす基材加振の影響

4. まとめ

本研究では、Al 合金基材に ABS 樹脂を直接三次元造形する技術の確立を目指し、高接合強度を有する表面性状を検討した。

得られた知見を以下に示す。

レーザー溶融処理による金属表面の粗面化は、構造内部

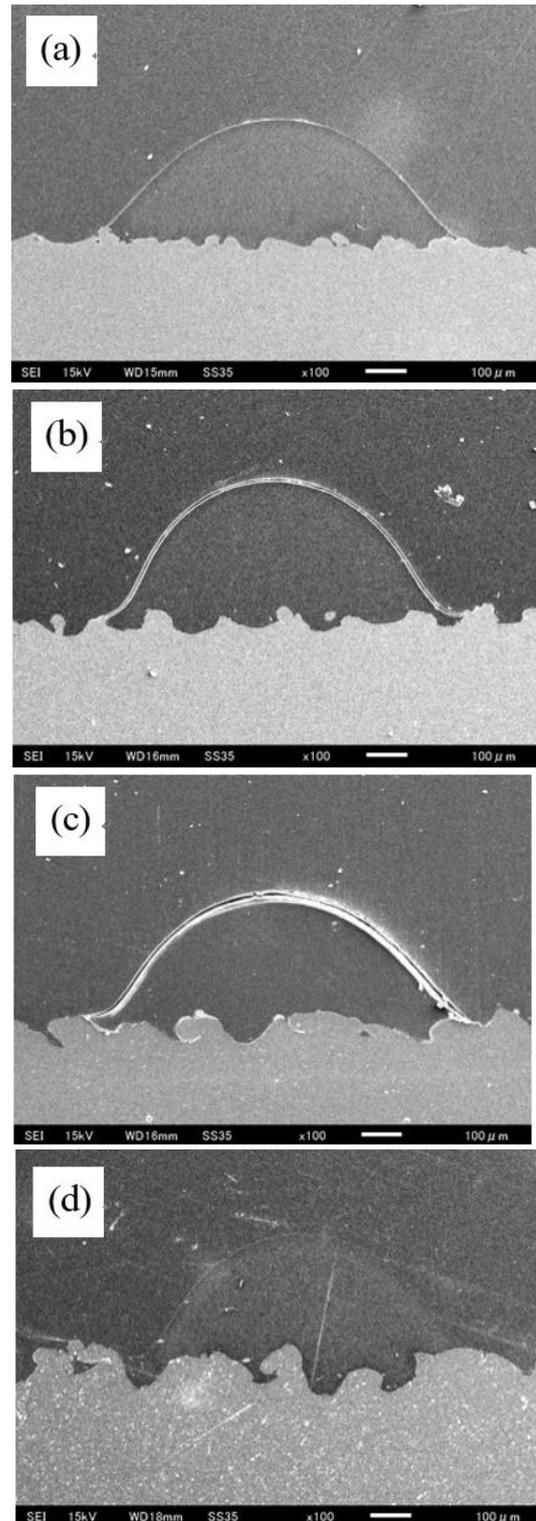


図 10 接合界面の断面観察結果 : (a) Fine 材, (b) Middle 材, (c) Coarse 材, (d) Coarse-V 材

に浸潤した樹脂が強いアンカー効果を発揮し、高い接合強度をもたらす。一方、造形時の加振は、陽極酸化材では微細孔構造の過度の成長による樹脂の濡れ性低下に伴う接合強度の劣化を低減するが、レーザー溶融材では接合強度の向上に寄与しなかった。

5. 今後の展望

実機実装に向けて、今後、せん断負荷のみならず引張負荷に対する接合強度の検証を行うとともに、構造部材において重要な特性である疲労特性についても検証を行い、直接接合造形技術の基盤の確立を目指す。また、実機実装と大型構造物製造に向けて、ロボットアームを用いた製造プロセスの開発を検討する必要がある。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり公益財団法人天田財団(2020年度一般研究開発助成 AF-2020207-B2)の助成を受けた。記して関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 京極秀樹：日本機械学会誌，122-120（2019），4-7.
- 2) 山崎泰広・梅村昂佑・渡海充・松葉希展：日本機械学会論文集，86-892（2020），20-00253.