

# CFRP材料の接着強度を向上させる エキシマレーザクリーニング

ラルフ・デルムダール、トーマス・ルカスジク、  
マルクス・ベルトラップ、ラルフ・アイド

接着材接合は、多種多様なアプリケーションや業界で表面接合の手法として用いられており、その接着強度をあげる重要な要素の1つに表面のクリーン度が大きく関わっている。成形によって製造されるポリマー部品の場合、表面に残っている離型剤などが、接着強度に悪影響を及ぼす。そのため接着の前に、エキシマレーザによるアブレーション加工によって、残っている微量の汚染物質と不安定な界面層を除去することが、高強度の接着を実現するために重要となる。そしてこのレーザアブレーションによる方法は、他のウエット状態で行なう方法や機械的な技術に比べ、非常に優れた表面洗浄つまりクリーニングの手法として注目されている。本稿では、航空宇宙、航空機、自動車、船舶の各業界の製造分野でその重要性が増しているCFRP(炭素繊維強化プラスチック)を接着する前処理としての、エキシマレーザによるクリーニングについて解説する。

接着前のエキシマレーザによるアブレーション加工により、残っている微量の汚染物質と不安定な界面層を除去することが、高強度接着を実現するために重要であり、他のウエット状態で行なう方法や機械的な技術に比べ、非常に優れた表面洗浄つまりクリーニングの手法として注目されている。

## CFRPについて

CFRPは、物理的な強度と軽量という非常に望ましい性質を併せ持つ複合材料で、強化材と母材で構成される。強化材は、耐荷重性と剛性を与えるもので、通常は布のように編まれた炭素繊維である。母材は、強化材を囲みそれを結合するもので、エポキシまたはその他の高分子樹脂が最も一般的である。CFRPには複数の作製方法が用いられているが、そのほとんどで、金型などの型で成形された強化材に母材となる液体樹脂を流し込む方法がとられ

ている。そして硬化工程後に樹脂を金型から簡単に取り出せるように、離型剤が一般的に用いられる。また、金型の形状によっては、樹脂を金型に適切に浸潤させる(樹脂が金型の表面をまんべんなく流れるようにする)目的としても、離型剤がよく用いられる。

CFRP材料を使い軽量の構造物を製造する場合、CFRPと金属を結合しなければならない場合や個別に製造したCFRP部品を結合して、より大きなパーツを構成しなければならない場合がある。しかし、従来の機械的な留め具(ネジやリベットなど)を用いる方法には、いくつかの欠点がある。まず、従来の留め具を使うための貫通孔を開けるとなると、内部応力が集中して、負荷の掛かる繊維に損傷を与える恐れがあるため、強化材をさらに追加しなければならない。また、金属の留め具を使うことで全体の重量が大幅に増加する可能性がある。それに対し接着剤接合という手法は、これらの問題を回避できる代替策である。つまり、CFRPに穴を開ける必要がないので、機械的負荷は接着面全体に均等に拡散され、また、完成した構造物の重量が大きく



レーザ照射によりCFRP上に形成されたフラウンホーファーIFAMのロゴ。

増えることもない。

ただし、高強度接着を実現するには、接着前の製造工程で表面に残っている離型剤や、その他の微量汚染物質、不安定な界面層を完全に除去する必要がある。そして、この表面前処理は下層のCFRP部とその繊維部の両方にまったく損傷を与えることなく行わなければならない。

### 表面前処理技術

接着剤接合前のCFRP部品のクリーニングには、機械研磨やグリットブラストなど、いくつかの手法が現在用いられているが、残念ながらこれらの方法にはそれぞれ欠点がある。ほとんどの機械研磨加工はスループットが低く、通常はウエット工法で行われるため、その後クリーニングと乾燥が必要になる。またグリットブラストでは、表面に残留物や細粉が残るために、クリーニングが必要になり、どちらの機械的な方法も炭素繊維に損傷を与える危険性がある。

航空宇宙業界では、CFRPの表面前処理技術としてピールパイル手法も用いられている。ピールパイルとは、母材樹脂の硬化前にCFRP表面にラミネート加工されるシート状の織物材料である。接着前にこれを除去することで、きれいな表面が現れるが、ピールパイルの主な欠点は、CFRPの製造が複雑になることである。また、界面層が不安定になり、例えば、最上部の樹脂層にワックスが付着すると、再現性が低下する原因にもなり得る。さらに、ピールパイルはCFRPの修復には適していない。

### レーザー処理のメリット

レーザーによる表面処理(レーザーアブレーション)は、CFRP樹脂の表面から薄い

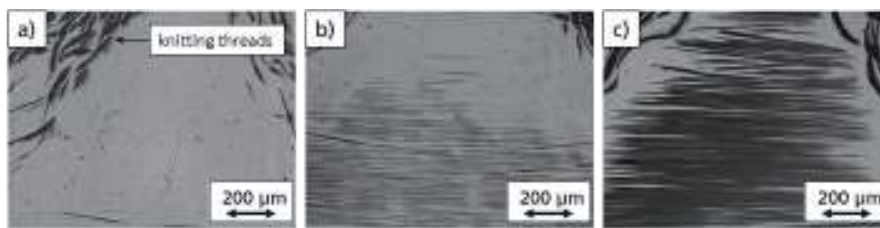


図1 エキシマレーザーは、CFRP上の材料除去を、精密かつ柔軟に制御しながら行うことができる。これらの画像は、共焦点レーザー走査型顕微鏡(Laser Scanning Confocal Microscopy: LSCM)で撮影したもので、a)は未処理の状態、繊維がまったく露光されていない状態、b)はエリアあたり2発のレーザーパルスを照射し、繊維が露光されつつある状態、c)はエリアあたり20発のレーザーパルスを照射し、繊維がはっきりと露光されているが損傷はない状態を示している(画像は、フラウンホーファーIFAMのマルクス・ベルトラップ氏の未発表の博士論文から転載)。

材料層を除去する方法で、すべての汚染残留物を効果的に除去することができる。機械的な手法とは異なり、レーザーアブレーションは、表面の前処理が不要で、ドライ状態で行われるため、後で表面のデブリ(加工屑)を除去する必要もない。また、大きな表面積の前処理にも適しており、自動化も容易であるため、安定した加工結果が得られる。そして摩擦や接触がない処理なのでCFRPの修復にも適用可能である。

ただし、レーザーアブレーションでも、バルク樹脂や繊維部に損傷を与えないことが最も重要で、それを実現するた

めにはエキシマレーザーが、CFRPのクリーニングに対し最も有効な選択肢となる(図1)。エキシマレーザーは、エネルギーの高い深紫外パルスによって、熱的方法ではなく主に光アブレーションによって材料を除去するため、熱影響部(Heat Affected Zone: HAZ)は非常に少ない。また、パルス数を制御することによってアブレーションの深さを高い精度で制御することができる。

そしてエキシマレーザーで適用されるエネルギー密度は、繊維をアブレーションしてしまうレベルからは十分に低く、実用的にもエキシマレーザーから照

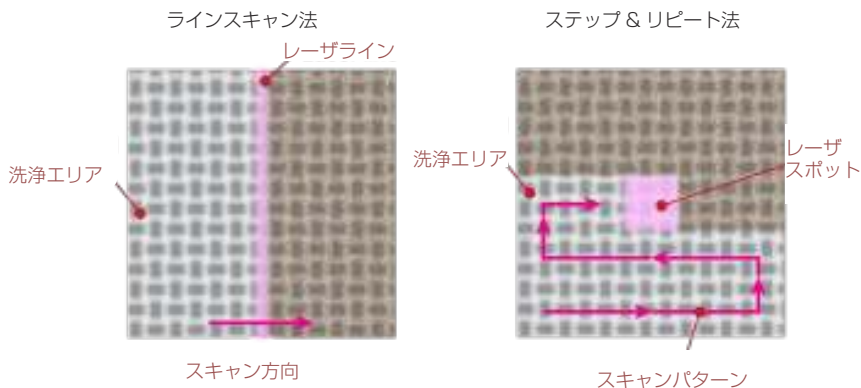


図2 エキシマレーザークリーニングのラインスキャン法とステップ&リピート法の図解比較。

射される大きな矩形ビームを、一般的なCFRPの表面前処理に合わせて、簡単に成形して均一化することができることから、早い材料除去と高いスループットが得られる。

### エキシマレーザークリーニング技術

エキシマレーザーにてCFRPの前処理をするための2つの基本的な方法として、ラインスキャン法とステップ&リピート法がある(図2)。ラインスキャン法では、レーザービームをラインビーム状に成形し、連続的に表面をスイープすることによりクリーニングする。材料の所定箇所を照射するパルス数は、ラインビームの短軸幅、ラインビームの移動速度、レーザーの繰返し周波数によって決まる。ラインビームの長軸幅が、クリーニングエリアの幅より狭い場合は、照射したエリアの隣接箇所へラインビームを移動させスキャンさせる処理を必要回数行うことになる。

ステップ&リピート法では、レーザービームは矩形状に成形され、CFRP面の固定位置に1発または複数パルスを照射する。続いて照射位置を移動させ同じプロセスを繰り返す。この方法により、クリーニングエリア全体が順次露光されていく。

### フラウンホーファー研究所事例

エキシマレーザーによるCFRP表面クリーニングの加工結果やスループット、コスト特性などを最適化するための研究が、複数のグループによって現在も継続的に進められている。その1つが、ドイツのプレーメンを拠点とするフラウンホーファー生産技術・応用材料研究所(Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Advanced Materials:IFAM)である。フラウンホーファーIFAMのマルクス・



フラウンホーファーIFAMにて、エキシマレーザークリーニングされたCFRP部品。左から順に、コヒレント社のラルフ・デルムダール博士、フラウンホーファーIFAMのラルフ・アイド博士、マルクス・ベルトラップ氏、トーマス・ルカスジク博士。

ベルトラップ氏は次のように説明している。「われわれの研究所では、レーザーによる繊維への露光効果と、レーザー照射後のCFRP表面へのアブレーション材料の再堆積を研究しています。この再堆積物つまり表面汚染は、その後の接着強度を低下させるため、エネルギー密度とパルスオーバーラップが表面汚染に与える影響を調査するためのテストを行ない、数学的モデルを作成しました」。

フラウンホーファーIFAMのレーザー技術グループは、米コヒレント社(Coherent)の「COMPex」シリーズの波長248nmのエキシマレーザーを採用し、所定の材料に対して最小の加工時間で、デブリが全くない表面加工を実現するための、最適なエネルギー密度とパルスオーバーラップのパラメータの組み合わせを確認した。その結果、

ある特定のエネルギー密度とパルスオーバーラップの組み合わせでは、衝撃波面が生成され、それまでの照射による再堆積物はすべて除去されるため、その後の接着工程に対し、デブリのまったくないきれいな表面が得られることがわかった<sup>(1)</sup>。

接着剤接合は、昨今ますます広い用途で活用されており、CFRPにおいては他の接合手法に勝る多くのメリットがあるが、接着剤接合を行うには、表面の適切な前処理が必要となる。エキシマレーザーアブレーションは、シングルステップのドライなプロセスで、他の方法よりも優れた結果が得られる上、再現性も高いことが実証されている。そのため、量産用途や、さらには修復にも適しており、その他多くの繊細な材料の表面クリーニングにも優れた手法であるといえるだろう。

#### 参考文献

- (1) Veltrup, M., Lukasczyk, T., Ihde, J., and Mayer, B. (2018). Distribution and avoidance of debris on epoxy resin during UV ns-laser scanning processes. Applied Surface Science: volume 440, May 15, pp.1107-15.

#### 著者紹介

ラルフ・デルムダールは、米コヒレント社、エキシマレーザーのプロダクトマーケティング・マネージャー。ほか、独フラウンホーファーIFAMより、ラルフ・アイド博士、マルクス・ベルトラップ氏、トーマス・ルカスジク博士が研究および執筆に協力。