複合材料のレーザクリーニングが接着を最適化

フランク・ゲブラ、ラルフ・デルムダール

エキシマレーザ表面処理が最良の選択

炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は、物理的な強度と軽量という非常に望ましい組み合わせを提供する複合材料。元は航空宇宙アプリケーション向けに開発されたが、今では自動車、ヨット、競技用自転車からゴルフクラブまで幅広く用いられている。

アセンブリでは、個別のCFRPピースの結合に接着剤が使われることが多い。機械的な締結法に対して接着にいくつかのメリットがあるためだ。とは言え、表面汚染があると高強度接着が妨げられる。接着に先立ってCFRPを洗浄するために様々な技術が用いられてきたが、これらの方法はそれぞれ、スピード、複雑さ、あるいはそれに続く洗浄の必要性などの点で制約がある。エキシマレーザベースの表面洗浄とアブレーションが現在は、実用的な代替手段となっている。エキシマベースの表面処理で、接着のために必要とされる特性をもつ元の状態が得られるからである。この記事は、エキシマレーザ洗浄がどのように実施され、この技術を使用した、接合強度の試験結果を議論する。

CFRPの背景

CFRPは、いわゆる強化部と母材からなる。強化部は、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。ケブラ、アルミ、ガラスなどの他の繊維も加えられることがよくある。母材は、強化部を囲み、それを結合するもので、エポキシまたは他の高分子樹脂が最も一般的だ。

CFRPコンポーネントは、あらゆる形状、サイズで製造される。テープ布設、成形、樹脂トランスファ成形（RTM）、あるいは編み込みなど様々な技術が使われる。より大きな複合材料、例えば航空機のパーツなどを構成するには、個別に製造したCFRPコンポーネントを結合する必要がある。この結合は、従来の機械的締結（ネジ、リベットなど）を使ってもできるが、このアプローチ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には貫通孔を開けることが必要になる。これは負荷支持繊維に損傷を与える。さらに、これらの留め具の周囲で内部応力レベルが高くなる。これは、留め具が負荷支持機能を狭い範囲に集中するためである。これらの応力ポイント周辺に強化が必要になる可能性があり、すると組み立て部全体の重量が増える。最後に、金属留め具そのものは組み立て部の重量を大幅に増やす。これら後の2要素は、CFRPの最も有用な特長である高強度重量比という特長を悪化させるものである。

接着

接着は、これらの問題を回避する代替となる。特に、接着ではCFRPに穴を開ける必要がない。したがって、接着面全体に機械的負荷が均等に広がる。さらに、仕上がった組み立て部の重量が大きく増えることがない。

高強度接着を達成するためには、前の製造工程で表面に残っている離型剤とその他の微量汚染物質を完全に除去する必要がある。接着強度が、接着前の表面洗浄度に大きく依存することは確実なので、表面洗浄は極めて重要である。しかし、表面洗浄は、下層のCFRP、特に負荷支持繊維に全く損傷を与えることなく完了しなければならない。

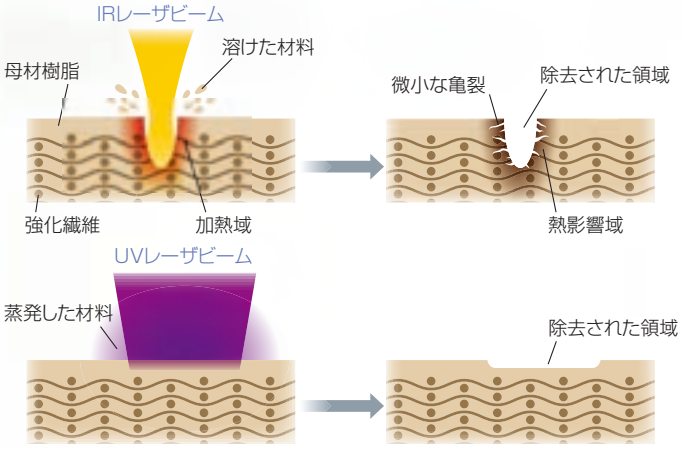


図1（上）赤外波長と可視波長レーザが熱的手段で材料を除去。その結果、材料内に大きな熱影響域（HAZ）と亀裂が生じている。（下）UVレーザはコールドアブレーションを用いる。これにより、正確な材料除去が行われ、HAZは生じない。

表面前処理技術

接着に先立つCFRPパーツの洗浄と準備には、機械研磨、グリットブラストを含め、現在いくつかの技術が用いられている。残念ながら、これらの方法はそれぞれ欠点がある。例えば、ほとんどの機械研磨加工はスループットが低く、通常はウエット状態で行うので、それに続く洗浄と乾燥が必要であり、製造コストと加工時間が増える。グリットブラストも残留物や細粉を残し、洗浄が必要になる。さらに、機械的な方法は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表面処理でピールパイルも使用される。ピールパイルとは、シート状の織物材料で、母材樹脂硬化前にCFRP表面にラミネート加工されている。ピールパイルは接着前に除去され、きれいな表面が現れる。ピールパイルの主要な欠点は、これによってCFRP製造が複雑になることだ。さらに、ピールパイルによって樹脂層の厚さに変動が生じるため、ピールパイル加工されたCFRPの再現性には限界がある。また、ピールパイルは、CFRP修復には適さない。

レーザ処理のメリット

レーザ表面処理では、CFRPから材料の薄い層を除去する必要がある。これは他のアプリケーションでは実績のある洗浄法であり、実際上、他の方法の欠点の一切を回避し、すべての汚染残留物を効果的に除去できる。機械的な技術と異なり、レーザ洗浄は実質的に表面の準備を必要とせず、ドライ状態で行い、後で表面の残骸を処理することも不要であり、適切なパラメータを選択すれば、繊維損傷も避けられる。さらに、レーザ加工は大きな表面積にも適用可能であり、自動化も容易である。また、摩耗も接触もない工程であるので、結果に高い一貫性がある。加えて、レーザ表面処理はCFRP修復用途にも適用できる。

とは言え、機械的な方法やピールパイル以上の結果を出すレーザ加工には、バルク樹脂や負荷支持繊維に全く損傷を起こさないことが極めて重要である。遠赤外CO_2や近赤外固体レーザ、ファイバレーザのような波長の長いレーザを使うと問題が起こる。というのは、これらは全て熱的手段で材料を除去するからである。バルク材料の加熱は、繊維に損傷を与え、母材に亀裂が生ずる。これと対照的に、UVレーザは、主に光アブレーションで材料を除去し、熱的方法ではない。その結果、本質的に熱影響域（HAZ）はなく、精密な材料除去が可能になる（**図1**）。

現在利用できるUVレーザ技術の中で、エキシマレーザのパルスエネルギーが最も高い（最高2J）。それに、エキシマレーザは大きな矩形のビームを作れるので、一般的なCFRP表面処理用途の形状に合うような形状と均一性が容易に達成できる。また、これらの特長により、CFRPパーツがさらに大きな場合でも、素早い材料除去と高スループットが可能である。現在のエキシマレーザは、三交代、高稼働率で1年経過しても基本的にメンテナンスフリーで使えることから、他の産業応用ですでに優れた実績を確立している。

エキシマレーザ洗浄

エキシマレーザを所定の表面処理用途に用いる正確な方法は、CFRPの特殊形状、特定のレーザモデルの出力フルエンス、それと所望のスループットに依存する。とは言え、すべてのCFRP加工スキームは一般に2つの基本アプローチの変形である。つまり、ラインスキャンかステップ＆リピート法のいずれかである（**図2**）。

ラインスキャン法では、レーザビームは線形状（非常に高いアスペクト比の矩形）にして、連続的に表面をスイープして洗浄する。材料の所定箇所に対して露光するパルス数は、線幅、ラインの移動速度、レーザの繰り返しレートによって決まる。線幅が、洗浄面の幅より狭い場合は、そのエリアの隣接箇所を数回通ることになる。

ステップ＆リピート法では、方形もしくはほぼ方形に近い矩形形状になる。レーザスポットはCFRP面の固定位置に置き、露光する（1またはそれ以上のレーザパルスで構成）。次に、ビームは、その幅に合わせて移動し、そのプロセスが繰り返される。洗浄面全体が、こ

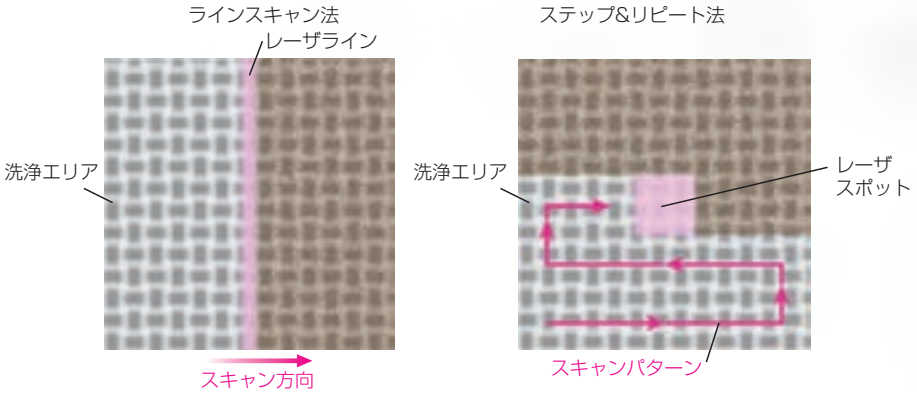


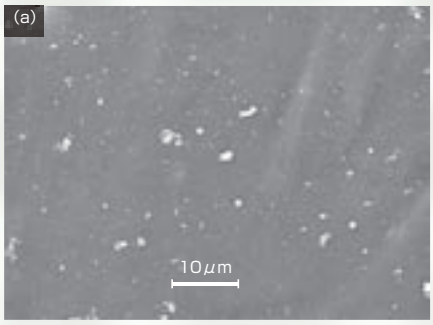
図2　エキシマレーザ洗浄のラインスキャンとステップ＆リピート法との図解比較。両方法とも、一般にCFRPを動かし、レーザを固定してスキャンする。

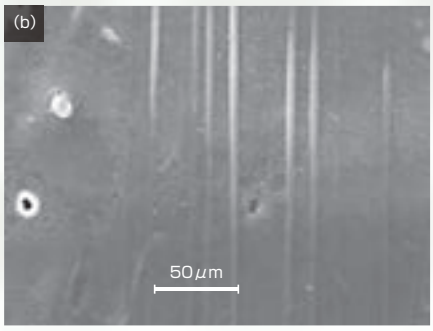
のようにして連続的に露光される。両方の方法にとって、一般的なエキシマビームデリバリオプティクスのサイズと重さを考えると、レーザビームに対してCFRPを動かす方がより実用的であり経済的である。

エキシマレーザテスト結果

ドイツ、ブラウンシュヴァイク工科大、接着・複合材技術学部が、Coherent LPXpro 305エキシマレーザで処理したCFRP表面の接着強度をテストした。次にこれを、従来の表面処理法を用いて得られた接着強度と比較した。この研究では、エキシマレーザは、波長308 nm、パルス幅28nsで出力するように設定されている。元のレーザ出力を照射野30㎜×1.8㎜に変更し、全長にわたりフルエンス均一性が1% rms以下、幅方向はガウシアン分布となっている。露光はラインスキャン法を用い、レーザフルエンスは400～800mJ/cm^2。レーザ繰り返しレートとラインスキャン速度を変えれば、CFRPの所定の点に対するパルス露光全体が1～48の幅で変えられる。テストしたCFRPは一般的な航空宇宙材料であり、ポリシロキサンベース離型剤で意図的に汚染してある。SEM写真(**図3**)はこの技術の能力を示すものであり、高度に制御された接合、露光繊維に損傷を与えることのない材料除去に適していることがわかる。

レーザ洗浄後、被検査物を接合し、接合強度を計測した。この実験では最大接合強度は、600mJ/㎠で2パルス露光で得られた。さらに、達成された接合強度は、研磨もしくはピールパイルを使用して得られた強度よりも高かった。破損が起こったとき、それは接続面ではなく、母材そのものの内部だった。これは、接着が、バルク母材よりも高強度であったことを示している。





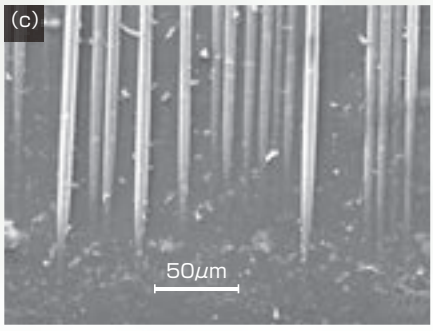


図3　エキシマレーザで処理した表面のSEM写真、処理に使用したのは800mJ/cm^2。(a)繊維に対する露光はない。(b)2個のレーザパルスが繊維に露光。(c)6個のレーザパルスが繊維に露光していることは明らかであるが、損傷はない。

最適レベルよりも露光が低いと、全ての表面汚染を完全に除去できなかった。これは、結果的に接合を弱める。この場合の破損は接合層で起こった。

露光レベルが適切なショット数/フルエンスを超えている場合、レーザは上層の純エポキシ樹脂層を完全に除去し、最高レベルの露光では繊維のサイジングに損傷が出始めた(サイジングは、炭素繊維に塗りつけた化学被覆、これが炭素繊維と母材樹脂との接合を強化する)。結果は、剪断強度全体の低下と、接合面か繊維内部のいずれかの破損だった。

適切なパルス数とフルエンスの組み合わせが、他の接合や母材形成によって異なる可能性があるが、このテストは適切なパラメータでエキシマ処理をすると、研磨を用いて得られた最大剪断強度を達成できる、あるいはそれを上回ることを明確に示した。このテストで用いたパラメータでエキシマレーザの洗浄レートは、0.16m^2/min(9.6m^2/h)だった。これは商用利用では若干遅い。しかし、ここで用いた30W(平均出力)モデルよりも大幅に強力な産業用エキシマレーザがある。例えば、Coherent LSXシリーズレーザは、平均出力540W。このテストで用いたのと同じパルスエネルギーとオーバーラップで、繰り返しレート600Hzとして、このレーザを使うと、洗浄レートは0.97m^2/min(58.3m^2/h)となり、多くの一般的なCFRP製造用途に適することになる。

結論、接着に先立って表面が適切に処理できれば、CFRPの接着は他の接合技術に対して複数のメリットがある。エキシマレーザ表面処理は、最終的な接着強度の点では、他の方法よりも優れた結果を提供できると断言できる。また、導入すれば経済性も高まる。さらに、非常に再現性が高いことが実証されており、量産用途、修復作業にも適した、一貫性があり安定した工程を提供できる。

著者紹介
フランク・ゲブラ(Frank.Gabler@coherent.com)は、コヒレントのマーケティングディレクター。ラルフ・デルムダールは、コヒレントの製品マーケティングマネージャー。

ILSJ