

全反射トップハット型ビームシェーパ による自動繊維配置の改善

ジュリエン・バヨル

ロボット・オートメーションを利用した複合材のレーザ製造。

近年、環境に対する配慮と燃料消費削減のニーズに促されて、航空業界ではますます多くの複合材アセンブリが、航空機に使われるようになっていく。複合材には、金属材と同等の機械的強度を保ちながら軽量化できるというメリットがある。

Airbus A350は、その典型的かつ先駆的な例で、主要構造の半分以上に複合材が使われている。その結果、大型で複雑な形状の複合部品を、効率的かつ反復可能な形で製造するプロセスに対するニーズが出現している。規模はそれよりも小さいが、このニーズは、風力タービンのブレードの製造など、他の業界においても現れている。

このニーズを満たすプロセスの1つが、自動繊維配置 (Automated Fiber Placement: AFP) である。これを踏まえて仏カイルラズ社 (Cailabs) は、仏コリオリ・コンポジッツ社 (Coriolis Composites) の仕様表に基づいて、超小型レーザ繊維配置ヘッドを開発した。このヘッドは、AFP装置に組み込まれている。これによって複雑な形状の複合部品を、良好な品質を保証し

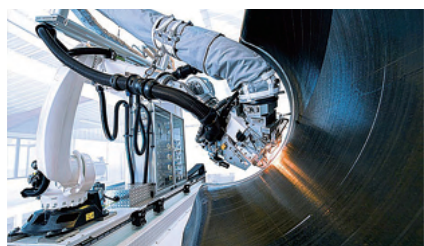


図1 曲面部品を製造するためのAFP装置。

つ製造することができる。

AFPとは

AFPとは、繊維テープを金型の上に連続的に配置して複合部品を製造する、積層造形 (付加製造) の一種である (図1)。テープは、スプールからロボットアームを通して、型穴または既に積層された構造の上に供給され、積層間を確実に接合するための十分な圧力が印加される。通常は処理中に、テープとその延長として基材を加熱することが必要である。中には、複数のテープを同時に配置でき、テープをさまざまな位置で個別に切断できる装置も存在する。

金型にも、オス型とメス型という種類がある。このプロセスは、熱硬化性または熱可塑性樹脂を繊維に浸み込ませたプリプレグや、ドライファイバなど、さまざまな種類の材料に対応する。また、より従来型の手法とは異なり、オートクレーブを必要としない。プリプレグは、金型の上で直接硬化し、ドライファイバは、低圧トランスファ成形によって樹脂とともに注入または射出することができる^{(1)、(2)}。

この手法には、従来型の方法に勝るメリットがある。曲率半径が小さいため、ロボットアームは、装置の造形体積内の複雑な形状の金型の上に、テープを配置することができる。このプロセスを自動化すれば、反復が可能となり、例えば、堆積構造の長さを最適化することにより、材料ロスを削減する



図2 カイルラズ社の繊維配置ヘッド (左側) を搭載した「Coriolis C-solo」のロボットアーム。

こともできる。

レーザ: 複合材の加熱に適した手段

重合温度が200℃の熱硬化性樹脂を使用する場合は、赤外線ランプを使用して複合材テープを加熱することができる。しかし、さらに高い加工温度 (300~400℃) を必要とする熱可塑性樹脂に対しては、赤外線ランプでは出力が足りない。熱可塑性樹脂の使用は増加している。ガラス転移温度が高い代わりに、リサイクル可能で、加工中のやり直しが可能といったメリットがあるためだ。従ってレーザが、テープの加熱に適切な手段ということになる。レーザは高い出力を、限られた表面に指向的に照射することができる。これによって、必要なすべての出力密度が加工対象の熱可塑性樹脂に、適切な加工速度で供給される。

繊維を加熱するレーザビームを成形 (シェーピング) することにより、ビームを加熱領域の形状に適応させて、積層間の接合品質を高めることができる。実際、接合品質に対するレーザ出力の卓越した効果 (79%) は、マジウムデー

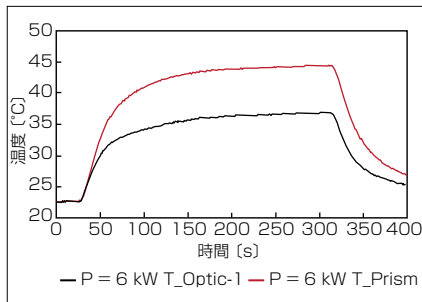


図3 遷移状態(レーザー起動時)におけるレンズ温度の時間軸変化。

ル (Mazumdar) とホア (Hoa) によって示されている⁽³⁾。

レーザー繊維配置ヘッドの開発

カイラズ社は、コリオリ・コンボジッツ社の AFP 装置「C-Solo」を特に対象として設計した、レーザービーム成形ソリューションを開発した(図2)。コリオリ・コンボジッツ社は、複合材の自動製造プロセスを専門とし、特に AFP 装置の設計と製造を手掛ける企業である。カイラズ社の Multi-Plane Light Conversion (MPLC) 技術に基づくレーザーヘッドは、コリオリ・コンボジッツ社が求めていた、矩形ビーム(ビーム寸法は社外秘)を生成するように設計されている。ビームは、両方の次元(長さ)と幅)においてトップハット型のような、均質なエネルギー特性を持つ形状に成形される。

このビーム成形に加えて、レーザーヘッドは、サイズと重量に関する厳しい要件を満たす必要があった。モジュールのサイズが小さければ、ロボットアームのサイズを小さくすることができるため、より曲率の大きい部品の積層が可能である。また、モジュールは装置の可動部に搭載されるため、軽量化も重要である。軽量であるほど、ロボットアームの慣性力が低減されて、より正確で高速な位置決めが可能になる。従ってこのレーザーヘッドは、全体

サイズが $127 \times 94 \times 70 \text{mm}^3$ と超小型で、重量は1kgだが、その約半分は標準的な独プレシテック社 (Precitec) 製コネクタが占めている。これによってこのヘッドは、航空分野の一部の用途ではオス型よりも好まれることが多い、曲率半径が小さなメス型金型に対応する。

低出力仕様では、矩形の2つの次元(辺)に対するビーム硬度を測定することができる。この値は、最大強度の90%以上となる部分(トップハットのトレイ部分)の幅に対する、最大強度の10%から90%までの間となる領域の比として定義される。このモジュールは、硬度が0.14の形状を生成した。測定により、トップハットのトレイ部分は両方の次元において均質性が高く、分散は短辺上で3.6%RMS、長辺上で2.7%RMSであることも示されている。

高出力時の安定性も確認されている。冷却システムにより、光学系は3分で許容される定常状態温度に抑えられる(図3)。光学モジュールは、被写界深度も $\pm 15 \text{mm}$ 以上と大きい。この範囲全体で、トップハット型の矩形形状が維持され、その範囲を超えても、形状寸法は $\pm 3\%$ しか増加しない。さまざまな作動距離(最大295mm。公称条件は240mm)での高出力試験も実施した。

結果

以上により、カイラズ社のソリューションは、コリオリ・コンボジッツ社がC-Solo装置に組み込むために提示した仕様を満たしている。ビーム成形モジュールは、LLK-Dコネクタを介して独レーザーライン社 (Laserline) の半導体レーザー「LDM 6000-100」(900~1080nm)に接続された。6kWを連続的に出力するLDM 6000-100は、装置とその冷却システムの機械式インターフェースに組み込まれている(図4)。

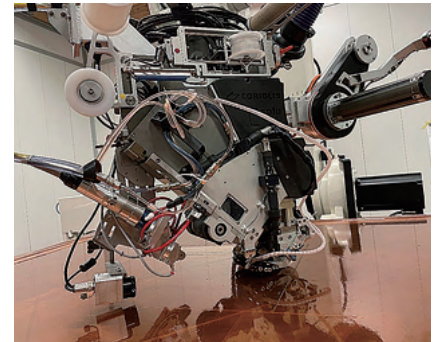


図4 光学モジュールをアーム上に搭載し、積層を開始できる状態にあるC-solo。

スペースの制約に対応するために、ビームを 17.5° 偏位させる厚みのある光学プリズムが、モジュールの出力に追加された。これによって、出力ビームがシステムに対して傾けられて、装置/ビーム成形システムアセンブリをさらにコンパクトにすることができた。

この装置によって、幅1.5インチの熱可塑性樹脂プリプレグテープを 380°C の温度で、最大1.2m/sの配置速度で2次元表面上に堆積することができるようになり、二重曲率を持つ凹型や凸型パネルの製造に向けた、道すじが開かれた。このモジュールは、小さなフットプリントを維持しつつ、安定性、堅牢性、柔軟性に優れた正確な加熱プロセスを提供する。また、均質な強度特性によって、部品品質を保ち、層間を確実に接着及び結合する。加えて、高品質のビーム成形には、樹脂漏れを防ぐ効果もある。

参考文献

- (1) O. Baho, G. Ausias, Y. Grohens, and J. Férec, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 110, 7-8, 2105-2117 (2020).
- (2) See <https://bit.ly/3yvuoYf>.
- (3) S. K. Mazumdar and S. V. Hoa, Composites, 26, 9, 669-673 (1995).

著者紹介

ジュリエン・バヨル (Julien Bayol) は、仏カイラズ社 (Cailabs) のアシスタント製品マネージャー。
e-mail: julien.bayol@cailabs.com
URL: www.cailabs.com

LFWJ