

# 粉末床溶融結合に変革をもたらす リングビーム

アンドレアス・ルドルフ、ロブ・マルティンセン、ダーブ・クライナー

ファイバビーム成形は、レーザ粉末床溶融結合法の金属積層造形への適用に向けて重要な役割を担う。

積層造形にはさまざまな手法が存在し、生成される製品と同様に、使用材料も多岐にわたる。レーザは、その卓越した操作性と高い出力を理由に、積層造形のツールとして利用されるようになり、量産に必要な生産性を達成する可能性をもたらしている。

1996年に発明されたレーザ粉末床溶融結合法(Laser Powder Bed Fusion: L-PBF)は、金属積層造形の主要なプロセスになるまでに成熟している。材料層を繰り返し溶融することにより、以前は不可能だった設計自由度が得られる。L-PBFは当初、試作や開発目的のみに使用されていた。今日では、銅

などの難しい材料さえも加工できる産業用L-PBF装置が、直ちに入手可能な状態にある。医療、航空宇宙、自動車、機械など、ほぼすべての事業分野に、連続生産用途が存在する。

積層造形における設計自由度は、コミュニティにとって魅力的なものであるが、L-PBFによる部品製造は、コストと時間があまりにも高すぎるとまだ考えられている。従来のプロセスチェーンに代わって広く採用されるには、コストと時間を1ケタ引き下げることが不可欠だと一般的に考えられている。

レーザ光源は、そのための重要な役割を担う。一般的には、空間強度プロ

ファイルを固定にしたまま、周波数を上げることによって、その出力を一時的に調整することが可能である。生産性を高めるには、ビームプロファイルを、局所的に求められる構造サイズに合わせて、オンザフライで調整する必要がある。

非常に微細な構造(格子や薄壁など)を造形するために、L-PBF装置では、ガウシアン強度プロファイルを持つ、回折限界のシングルモードレーザが使用される。バルク部分を生成するとき、このビーム形状には、以下の深刻な速度制約がある。

- ・ビーム径が小さいことから、高密度部分に到達させるためにビームを細くハッチングする必要があり、エリア走査速度は低くなる。

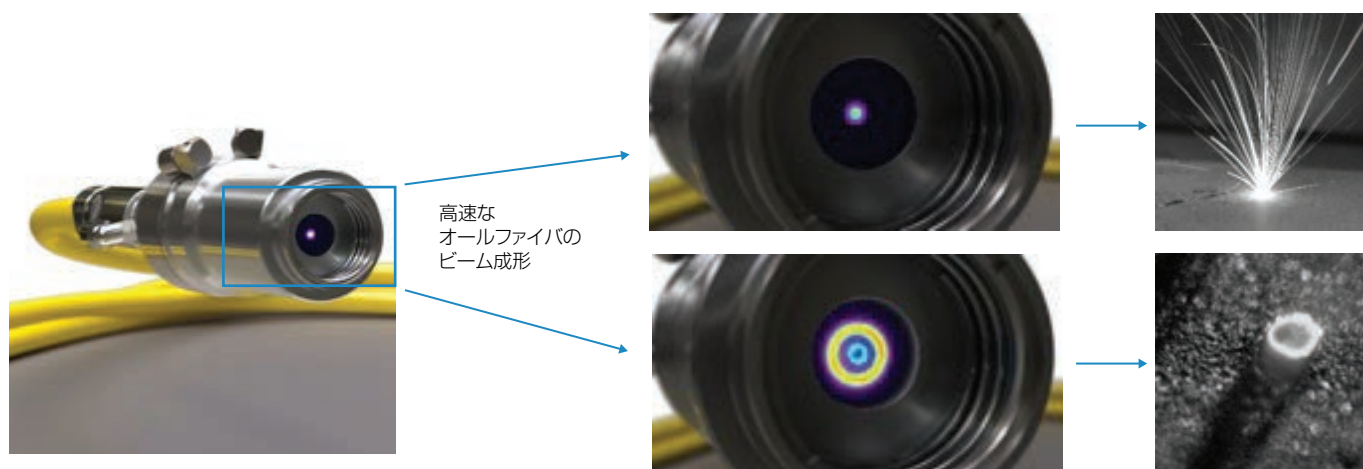


図1 AFXレーザには、出力ビームのサイズと形状をすばやく切り替えることのできる、オールファイバのビーム成形機能が搭載されている。ビームプロファイルは、真のシングルモードとリングに加えて、それらの中間のさまざまな形状に調整可能である。加工対象物との相互作用において、リングおよびサドル形状のビームは、生成されるすすとスパッタが著しく少ない。

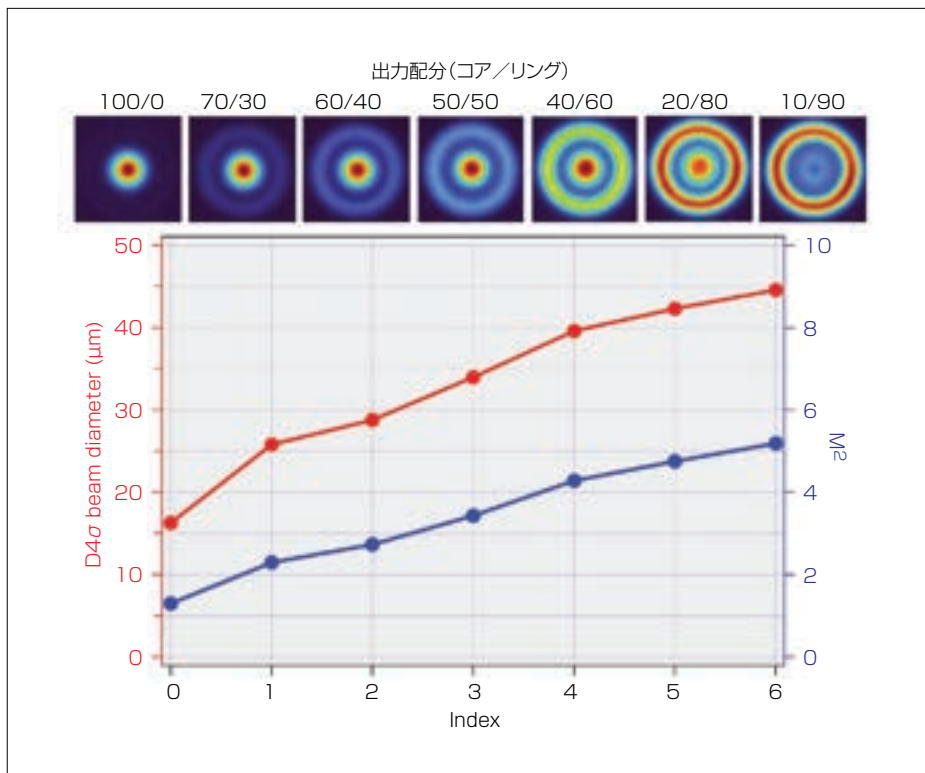


図2 AFXのIndex設定。上の画像は、中心のシングルモードコアと環状コアの間の各出力配分に対応する、近視野空間プロファイルである。グラフは、ビーム径 $D4\sigma$ の計算値とそれに対応する $M^2$ 値を示している。

・ライン走査速度はレーザ出力に強く関係するが、レーザ出力は数百Wに制限される場合が多い。ガウシアンの高いピーク強度によって、キーホールが生成される可能性があるためである。これによって過剰な量のスパッタやすすが生成され、造形プロセスは不安定になる。

ビームをデフォーカスしても拡大しても、ガウシアンビームのプロファイルが維持されるために、これらの問題は解決されない。繊細なフリースペースの光学設定をさらに複雑にすることなく、ビームプロファイルの形状や直径を調整することができれば、理想的である。初期解析では、リング形状のビームとサドル形状のビーム（いくらかの強度が中心にあるリングビーム）が、溶融粉末における均一な横方向の温度分布の生成に、最も適していることが示されている（図1）。従って、理想的なL-PBFレーザ光源は、微細構造の生

成に対してはシングルモードのビームを供給し、それよりも大きな構造の生成に対しては、より大きなリングやサドル形状の一連のビームを供給するものである。

上記のすべての要件を満たすことのできる独特のビーム成形技術が、米エヌライト社(nLIGHT)の「Corona」ファイバレーザファミリーの基盤である。その一つが「AFX」というL-PBF向けに最適化された製品で、最大出力は1.2kWである。AFXの供給ファイバは、シングルモードのコア（モードフィールド径： $14\mu\text{m}$ ）の周囲が、環状のコア（直径： $40\mu\text{m}$ ）によって取り囲まれている。シングルモードと環状の2つのコアの間の出力ビームの配分は、高速かつ再現可能な形で変更できるため、ビームプロファイルは、真のシングルモード（ガウシアン）と $40\mu\text{m}$ のリング形状に加えて、それらの中間のさまざまな形状に調整可能である（図2）。対応するビー

ム径（二次モーメント $D4\sigma$ ）は、 $15\sim 45\mu\text{m}$ で、ビームエリアのダイナミックレンジは約10倍となる。AFXのすべてのビーム形状が、レーザ出力や変調レートと同じように簡単に、レーザ通信インタフェースを介して電子的に操作可能で、切り替えにかかる時間は25ms未満である。

加速寿命試験では、2000万回を超えるビーム変更によって性能は変化しないことが示されている。ビームが光ファイバ経路からそれることは決してないため、標準のQBH互換の出力コネクタに達する前に異物の混入や位置ずれが生じることはない。AFXは、すべてのビーム（「Index」）設定に対して優れたビーム品質を提供し、 $M^2$ 値は約1～5の間で、長い焦点深度が得られる。例えば、倍率が5倍（L-PBF装置の標準）の場合、レイリー長（ZR）は、シングルモード設定（Index 0）で3.4mmで、最も大きなリングビーム

(Index 6)で8.1mmまで増加する。また、AFXビームは、ビームウエストの両側において、かなり長い距離(約1/2 ZR)にわたってその形状を維持する。そのためAFXは、すべてのIndex設定に対して大きなプロセスウィンドウを提供する。

### L-PBFの速度と安定性の向上

複数のL-PBF装置インテグレーターや研究機関が、L-PBFの生産性と部品品質に対するAFXのメリットを実証し、定量的に評価している。具体的には、AFXによってL-PBFの造形速度は大幅に向上(最大で7.8倍)すると同時に、プロセスウィンドウは拡大し、卓越した材料品質が維持されることが明らかになっている。このような比類ない組み合わせのメリットが得られるのは、加工対象物に対する熱蓄積を正確に制御できるAFXの能力のたまものである。標準的なシングルモードビームと比較して、AFXの最適化されたビームプロファイルは、溶融池の不

安定性を著しく低減することで、材料品質や製造歩留まりに悪影響を与えるすすやスパッタの生成を抑える。このメリットが、レーザ出力、走査速度、L-PBFの造形速度の大幅な向上を可能にする。最近の成果としては、以下のようなものがある。

- ・独アコニティ 3D社 (Aconity3D)は、AFXによってチタン合金の造形速度が7.8倍になることを示した。標準的なシングルモードファイバレーザでは毎時5.4cm<sup>3</sup>だったのに対し、AFXでは毎時42.1cm<sup>3</sup>になったという。この速度増加は、優れた材料品質を維持しつつ(密度は99.8%以上)、溶融体積が4倍、走査速度がほぼ2倍に増加することに起因する<sup>(1)</sup>。
- ・独ミュンヘン工科大 (Technical University of Munich: TUM)のグリューネヴァルト氏 (Grünewald)らは2021年、AFXによって、ステンレス鋼316LのL-PBFの造形速度を(約2倍に)増加すると同時に、プロセスウィンドウを拡大できることを示し

た。AFXにより、より大きなプロセスウィンドウに対してより高いレーザ出力とより高速な走査速度を使用することが可能になった(つまり、一連の出力において高い部品品質が得られる)。具体的に説明すると、シングルモードの gaussian ビームの出力を上げようとする、望ましくないポーリング効果やキーホール効果が生じ、それによってL-PBFの生産性は制限される。これに対して、Indexを4~6に設定した場合のAFXの出力は、そのようなプロセスの不安定性を引き起こすことなく増加させることが可能で、より高い造形速度が得られる<sup>(2)</sup>。

・独フラウンホーファー研究機構の付加製造技術研究所 (Fraunhofer IPT)の粉末床金属 (Powder Bed Metal)グループは、十分に広いプロセスウィンドウを提供しつつ、アルミ合金 (AlSi10Mg)の造形速度が3倍増加することを示した(図3)。さらなる最適化によって、生産性はさ

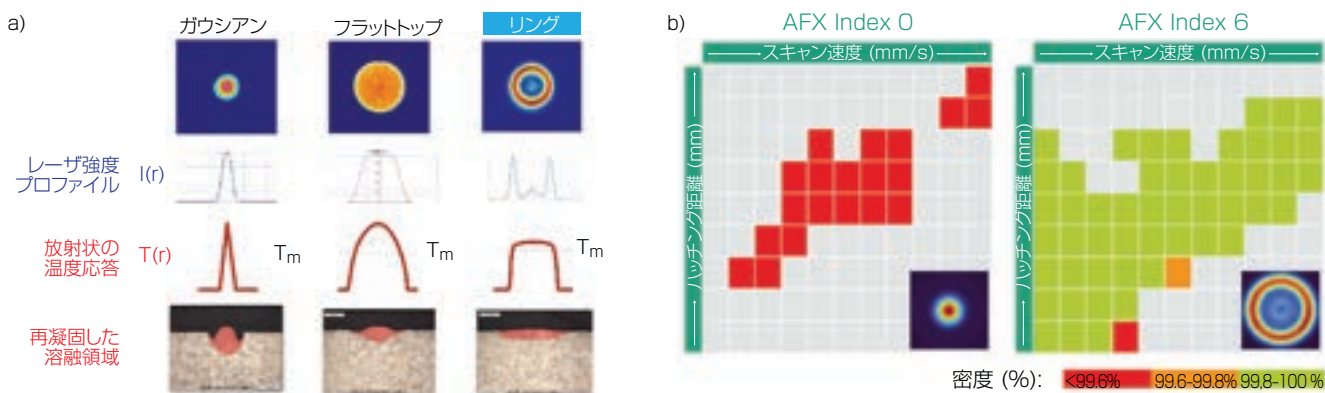


図3 溶融池の温度プロファイルと再凝固材料の形状は、レーザ強度プロファイルに強く依存する。GaussianビームとFlat Topビームの両方で、過度の熱が中心に集まり、溶融跡の断面は最適とは言えない状態になる。一方、Ring状のプロファイルは、フラットな温度分布を生成し、広くて平坦な溶融跡断面が得られる(a)。AFXのRingビームは、高い走査速度に大きなハッチ間隔を組み合わせ、Gaussianビームよりも高い生産性を実現する。部品密度を損なうことなく、プロセスウィンドウは格段に広がる(b)。

らに向上すると期待されている<sup>(3)</sup>。  
・フラウンホーファー研究機構のレーザ技術研究所 (Fraunhofer ILT) のレーザ粉末床結合 (Laser Powder Bed Fusion) グループに所属するランチュ氏 (Lantsch) らは2022年、AFXによって、ニッケル系合金625の造形速度、プロセスウィンドウ、材料品質が向上することを示した<sup>(4)</sup>。  
AFXによる造形速度の向上は、アルミニウム製の標準的な積層造形部品のプリントにかかる全体的なコストの大幅な削減に直接的につながり、60%のコスト削減が示されている。

## 材料特性の局所的制御

生産性とコスト上のメリット以外にも、AFXは、局所的な微細構造と材料特性の制御を可能にすることによって、L-PBF製造の新たな次元を切り拓いている。AFXはその独特のモードプロファイルによって、溶融池内の温度勾配と凝固動作を制御する。それによって材料の微細構造が決まることが判明しているため、全く新しい設計の可能性もたらされる。AFXのビーム形状はオンザフライで変更できるため、微細構造を局所的に操作することが可能で、以下のような新しい機能と最適化された特性が、部品全体にもたらされる。

・アコニティ 3D社は、インコネル718のL-PBFを対象に、AFXのリング形状のモードプロファイルと、有効径が同等のデフォーカスされたガウシアン (シングルモード) ビームの比較を行い、AFXのリングビームによって、生成物の強度と伸張性の両方が高くなることを発見した。これらの主要材料特性は反相関の関係にある場合が多く、トレードオフが必要だが、AFXは両者の関係を断ち切る

という。この能力は、新しいコンポーネント機能と性能、特に、単一部品における可変の材料特性につながる可能性がある<sup>(5)</sup>。

・TUMグループは、AFXによってステンレス鋼316Lの微細構造と材料特性を制御できることを示した。AFXの異なるビーム形状によって、溶融跡の形状と温度プロファイルの最適化が可能で、それによって、材料特性を左右する粒子の成長方向とテクスチャを制御することができる。この研究を率いたウーディ教授 (Wudy) は、次のように述べている。「(そうした粒子成長の戦略的制御によって、) 得られるコンポーネントの特性をきめ細かく調整することができる。例えば、後処理を追加することなく、剛性や弾性が特に高いコンポーネントの部品を製造することが可能である。高度な露光戦略を適用することにより、単一のコンポーネント内で特性を可変とすることも可能である」<sup>(6)</sup>。

## L-PBFの限界の引き上げ

AFXファイバレーザは、さまざまな金属と合金に対するL-PBFの生産性を大幅に引き上げ、L-PBFによる製造部品の経済的側面に抜本的な変革をもたらす。最大の実現技術は、L-PBF向

けに最適化されたビーム形状である。これには、真のシングルモード (14mmのガウシアンビーム)、コンパクトなリング (直径40mm)、その中間の複数の形状が含まれ、すべてで卓越したビーム品質が提供される。ビームプロファイルは、性能、安定性、信頼性の低下につながる、フリースペースオプティクスなどのコンポーネントを使用することなく、供給ファイバから直接、高速に調整することができる。AFXファイバレーザは、最大で1.2kW出力のものが提供されているが、この技術は、より高い出力やその他のビーム形状に拡張可能である。

本稿で紹介した成果は、AFXのシングルレーザ設定で達成されたものだが、マルチレーザ構成 (2台、4台、8台など) においても、同じメリットが得られる。この手法は、マルチレーザ搭載のL-PBF装置の生産性を、さらに高いレベルに引き上げることを可能にする。AFXは、生産性の高い新世代のL-PBF装置を実現し、L-PBFを連続生産用の主要な金属積層造形技術にするための道を切り拓くものである。また、AFXは、局所的な微細構造と材料特性を制御できるその独特の能力によって、これまでの製造技術では得られなかった材料特性、機能、性能を持つ部品を製造する可能性をもたらす。

## 参考文献

- (1) See <https://youtu.be/TsumIEibbk8> (see results at time 49:45).
- (2) J. Grünwald, F. Gehringer, M. Schmöller, and K. Wudy, *Metals*, 11, 12, 1989 (2021); <https://doi.org/10.3390/met11121989>.
- (3) See <https://youtu.be/bvqBRtGxwCY>.
- (4) See <https://youtu.be/OVemoWOtu5w>.
- (5) See <https://youtu.be/OjUj23tH4fg>.
- (6) See <https://youtu.be/wbMEfli28Ko>.

## 著者紹介

アンドレアス・ルドルフ (Andreas Rudolf) は、米エヌライト社 (nLIGHT) の積層造形市場開発マネージャー、ロブ・マルティンセン (Rob Martinsen) は、同社最高技術責任者 (CTO)、ダーブ・クライナー (Dahv Kliner) は、同社ファイバレーザ技術担当副社長。e-mail: [andreas.rudolf@nlight.net](mailto:andreas.rudolf@nlight.net) URL: [www.nlight.net](http://www.nlight.net)