ビーム診断による レーザ積層造形製造の改善

ショーン・バーグマン

プロセスコストとスピードの改善が、優れたパーツの品質を達成するために必要とされている。

レーザ積層造形製造（LAM：Laser Additive Manufacturing）が、金属部品の試作及び製造の両方において、瞬く間に重要な製造手法になり始めている。しかしながら、この技術はまだその緒についたばかりであり、新しい材料の開発と様々なプロセスパラメータが結果に及ぼす影響を理解することは、未だ重要な仕事となっている。特に、LAM手法は、一般的にレーザの性能に対するプロセスウィンドウ（製造条件の最適範囲）が小さい。そのため、ビームや走査のパラメータの極僅かな位置的変化が、著しく加工品質に影響する。本稿では、最適な結果を得るためのレーザビーム特性の必要性を検証し、新しいビームモニタリングの技術が、レーザをベースにした３Ｄ製造システムで、どの様に高速測定を可能にするかを示す。この技術は、最終的に、LAMを利用して製造された部品の品質に重大な影響を与える前にビームの問題を特定、修正することが可能になる。

LAMの基礎

殆どの伝統的な加工技術は、切削を利用したもので、すなわち、要求された形状を作成するために、基板から材料を選択的に除去することである。積層造形（付加的製造）法は、全く逆で、何もない状態から、層を積み重ねていくものである。粉末溶融結合（PBF：Powder Bed Fusion）は、完成品を製造する主要なLAM技術（"LAM手法"を参照）であるが、金属粉末を用いて、レーザで溶融する3次元プリンターの基本的な形態である。PBFでは、まず、約20～60μmの厚さの金属粉末層が、リコーターブレードを用いて、ビルドプレート（垂直に移動可能なプラットフォーム）上に均一に広げられる。次に、レーザを粉末上に走査して、その層に求められるパターンで、選択的に溶融し、再凝固させる。層が完成した後、粉末床を層の厚さに相当する量だけ下ろし、新しい粉末層をその上に広げる。

レーザはその層を書き込み、プロセスは完了するまで反復される。最後に、残った溶融されなかった粉末を除去して、完成した部品を露出させる（**図1**）。

PBFでは、一般的に200～500W相応な出力クラスの近赤外（NIR）発振のイッテルビウム（Yb）ファイバレーザが使用される。これらは2次元（xとy）でスキャンされ、高品質のf-θ走査レンズで集光され、100μm程度のスポットサイズを実現する。出力とスポットサイズの組み合わせは、金属粉末を迅速に溶融するのに充分なフルエンスを容易に生成する。実際には、パワー密度は、ビルドプレートを切断ないしは穴を開けたり、金属粉末内に浸透するほど高くならないことが重要である。レーザは、新しい層の粉末および前の層の少量を完全に溶融して、最適に双方を完全に結合し、部品全体にわたって均一な材料特性を引き出す必要がある。

最近のLAM応用

ポリマー材料による3Dプリンターの柔軟性とスピードは、エンジニアリングやプロトタイピングの目的で広く使用されている。金属で作業し、堅牢な機械的特性を有する完成部品を提供

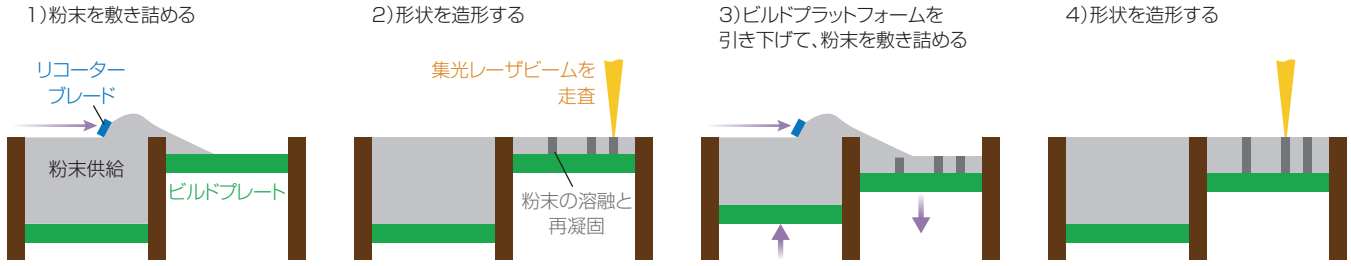

図1　PBFの基本ステップ。

する能力は、航空宇宙、歯科、自動車レース、さらには宝石加工を含む様々な産業において、実際の生産部品を製造するための有用な技術となっている。 具体的には、PBFは、機械的に複雑で、他の方法を用いて製造するのに費用がかかる高価で重要な部品を製造するのに最も効果的に利用されている。例としては、複雑な曲線や内部に穴や溝がある形状のものである(**図2**)。

PBFの優れた例は、GEアビエーション社(GE Aviation)の高バイパスターボファン(LEAP)ジェットエンジン用燃料ノズルの製造である[1]。 同社によれば、内部支持構造と冷却経路で作られたこの単一の部品は、18個の別個の部品からなる機械加工されたアセンブリに置き換わっている。LAMで製造された部品は、機械加工された同等品よりも25%軽く、約5倍の耐久性がある。各々のLEAPエンジンには19個のノズルが組み込まれているため、この軽量化の結果、燃費が大幅に向上している。

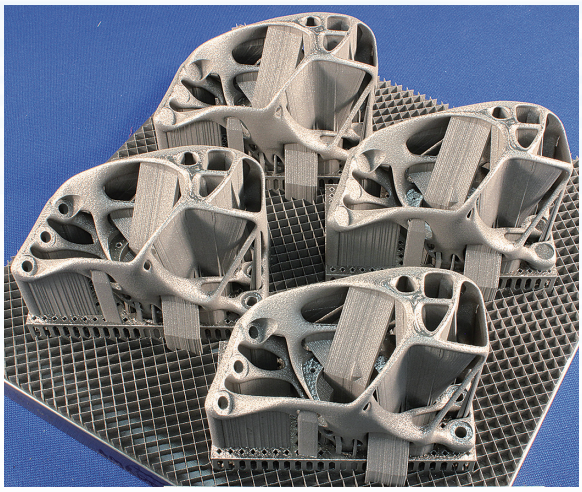

図2 PBF製センサブラケットは機械的安定性を最適化する複雑な形状をしているため、従来の製造方法では実現が困難である。(写真提供:ペンシルバニア州立大マテリアルサイエンス社CIMP-3D)

技術的なチャレンジ

市販されている洗練されたターンキーPBFシステムは既に数多く存在するが、これらは一部の用途で適切な結果を得るために必要なきめ細かなレベルのプロセス制御を提供するものではない。例えば、堆積プロセスに困難を生じさせる可能性がある製造中の部品の配置に関する様々な考慮事項が存在する、または完成品に望ましくない応力特性をもたらす。これらは、現在の商用システムでは、常に完璧に適応することはできない。

また、商用LAMシステムでは、材料に関連したコスト課題がある。例えば、これらのシステムは、アルミニウム、コバルト、チタン、ステンレス鋼、およびニッケル合金を含む様々な粉末に対応するが、粉末の種類により異なる堆積パラメータセットが必要となる。多くの場合、それは装置供給メーカーの専有技術であり、通常は1万～2万ドルの価格で個別に購入する必要がある。また、それらは装置に直接ダウンロードされるため、ユーザーは特定のニーズに合わせてプロセスを最適化または変更するために必要なすべてのパラメータにアクセスできるとは限らない。

材料に関しては、現在使用している粉末は、伝統的な鍛錬金属製造技術(通常、溶融、成形、およびその後の熱処理の複数の工程で構成)用に開発されたすべての合金であることも重要である。それらはまた、LAMの間に急速に溶融し、再凝固した際に、同じ望ましいバルクの物理的性質(例えば、引張強度)は得られない。したがって、LAMで利用された場合に特に改善された物理的特性をもたらす新しい材料の

LAM手法

金属部品を製造するためのレーザ積層造形製造(LAM)手法には、指向性エネルギー堆積(DED:Directed Energy Deposition)と粉末床溶融結合(PBF)という2つの基本的な方式がある。DEDでは、金属粉末を可動レーザビームに供給し、表面に溶融および堆積させることによって各層を形成する。通常は、ビームと粉末の両方の供給機構が部品上を同時に移動することによって、必要な形状が生成される。

DEDには、500W～10kWの範囲の比較的高出力の近赤外ファイバレーザが一般的に使用される。Ybファイバレーザ、Nd:YAGレーザ、またはダイレクトダイオードが使用できる。加工面におけるスポット径は粉末によって異なるが、500μm～5mmである。DEDは高精度なプロセスではない。堆積後に正しい寸法の完成部品を得るために、通常は何らかの加工処理が必要になる。

本稿で詳しく説明したPBFは、DEDよりもはるかに空間的に高精度なプロセスである。ミクロンレベルの精度で、基本的に完成寸法で部品を生成する。しかし、このレベルの精度を維持するには、高度なプロセス制御が必要である。本稿では、PBF製造だけに対象を絞って、これを達成するために有効なビーム計測技術について詳しく解説する。

開発が、重要な研究分野となっている。

実際、このことは技術の実用性を拡大する上で不可欠である。このような背景から、既存のシステムを改良し、各プロセスパラメータを完全に調査して制御することができる独自のLAMシステムを構築したいと望む研究グループやエンドユーザーが多数存在する。これにより、結果を改善させ、より明確で決定論的なプロセスの開発が可能となる。

ビーム計測の必要性

ほとんどのLAMシステムのソフトウエアでは100以上のプロセスパラメータが指定されているが、最も重要なもの(オペレーターがほとんど制御できない)は、集光されたレーザビームの出力、形状、サイズに関係している。これらは最終的に、作成された形状と材料の物理的な特性を決定するためである。

これにより、ビーム計測がプロセスにとって特に重要になる。ビームの変動はいくつかの要因によって引き起こされる。第一に、レーザ出力には、本質的にある程度の出力ドリフトが起こりえる可能性がある。次に、PBFで使用される出力パワーレベルは、ビームを伝送するための光学系において、熱レンズ効果を引き起こすのに充分であり、ビームウエスト位置が変化し、スポット形状が歪む可能性がある。また、ビームは広いエリアにわたって走査されるので、スポット形状は、通常、フィールドの縁で細長くなる。これらを考慮すると、PBFシステム内のレーザー出力、スポット径、モードの詳細情報、およびビームウェスト位置を直接測定する必要性がある。

特に、ビームはそのことが起こるかもしれないすべての要因に遭遇している可能性があるため、光学システムの幾つかの中間点というよりむしろf-θスキャンレンズの後でこれらの測定が必要になる。さらに、最終的には、堆積速度を著しく減少させることなく、各層の書込みサイクル間に、パワー密度やビームウェスト位置を測定できるように、迅速な測定方法を開発することが望ましい。これにより、出力に対して必要な任意の修正が実行時に行える。あるいは、プロセスが適切な状態から大きく逸脱した際に自動的にビルドサイクルを中止することができる。(約10×10インチ(約25×25cm)のビルドプラットフォームにおける、PBFシステムのビルドサイクルは20～60時間に及ぶ場合がある)。

ビーム計測の新しいソリューション

残念ながら、レーザのモード、ウエスト位置、および出力を測定する従来の技術には、このアプリケーションでの使用において限界がある。特に、レーザモード測定機器は、通常、光源から複数の距離において、レーザビームを、スリットやアパーチャなどを用いて順次走査する。これにより、伝搬特性(モード)の完全な画像が取得され、正確なビームウエストの位置を特定する。しかし、この種の計測機器は比較的遅くて、体積も大きくなってしまう。

同様に、高出力レーザの直接出力測定には、従来、サーモパイル検出器が使用されていた。この技術はLAMシステムで高い平均レーザ出力の測定には適応できるが、部品製造時の各粉末層間のインプロセスモニタリングを達成するためには遅すぎる。(測定には通常数秒かかる)。

この双方の問題を解決するシステムが、現在、Haas Laser Technologiesから提供されている。高出力の連続波(CW)から提供されている。高出力のCWないしパルスのレーザに対して、ビームモードと出力の非常に高速な測定を実現できる。具体的には、ビームウェストアナライザカメラ(BWA-CAM)は、1回の高速(<1秒)測定で高出力レーザのビームウェスト位置、ビーム径、ビーム品質(M^2)を含む、いくつかのレーザパラメータを測定できる。さらに、システムは、十分にコンパクトであるためLAMシステムのビルドエリア内に組み込むことも可能である(**図3**)。

このような非常に包括的な一連の測定を行うために、この装置は、巧妙な光学的配置を採用して、レーザスポットでのスルーフォーカス画像を同時に取得できる(**図4**)。集光された入射光は、まず減衰されてから、光軸に対して傾けられた一対の平行プレートに導かれる。プレートの内面は、高反射性材料でコーティングされているため、各反射によって、わずかな割合の出力がシステムから出射される。この透過光は、アレイ検出器上に一連のスポットを形成し、各スポットは、光軸に沿って一連の距離間隔におけるビームプロファイルを示す。この光学配置は、検出器上に隣接するスポット間の増分を、光軸に沿って100μm～12mmまで調整することができる。システムソフトウエアは、この一連のスポット像を解析して、前述のビームモードおよびウエスト位置パラメータのすべてを導き出す。

最終的には、PBFにおける重要なレーザパラメータは、粉末が溶融する正確な位置における出力密度である。ビームサイズが決定されると、コヒレント社製 PowerMax-Proディテクタ(検出器)を利用して、BWA-CAM内で、レーザの出力は直接測定される。(こ

れにより、出力密度を計算することができる）この検出器には、2014年に市場に初めて導入された比較的新しいタイプの横方向熱電検出技術が採用されている。この技術は、サーモパイルの広い波長感度、ダイナミックレンジ、高レーザ損傷抵抗、半導体フォトダイオードの応答性を兼ね備えている[2]。

このような独自の特性を併せ持っていることが、この用途には特に有効である。非常に低い光のレベルでサチュレーション（飽和）してしまうフォトダイオードとは異なり、この検出器は、直接高い出力を数十マイクロ秒で測定できる。このことにより、減衰光学部品をビーム光路に配置する必要がなくなり、絶対測定誤差の要因を取り除くことができる。また、フォトダイオードとは対照的に、この検出器の非常に直線的（リニア）な応答が得られるため、出力計測システム（検出器／電子機器／ソフトウエア）全体が校正され、NIST追跡可能である。従って、レーザ出力の非常に高精度な絶対計測をすることもできる。

このことは、プロセスパラメータの最適化を行うため、または新しい合金の開発における正確なレーザ／材料の相互作用の解析を行うために、重要だと知られている。検出器の応答速度が速いため、単に平均出力だけでなく、パルス形状を直接観測することもできる。堆積品質（例えば、粒径や引張強度など）は、ピーク出力や立ち上がり時間などのパルスパラメータに依存するのでとても有用である。また、CWレーザを使用して作業する場合でも、電源投入時にレーザが最大出力に達する時間がかかるかを知ることは重要である。

結果的に、LAMは金属製作技術の革新的な一歩を踏み出している。しかし、この技術で最大の成果を得るためには、プロセスコスト、加工スピード、部品品質の改善が重要となっている。ビームウエストの位置、ビーム径、および出力密度情報を1秒未満で測定可能な、高速かつ小型で費用対効果の高いビーム診断ツールは、このような目的の達成に向けて重要な要素となるであろう。

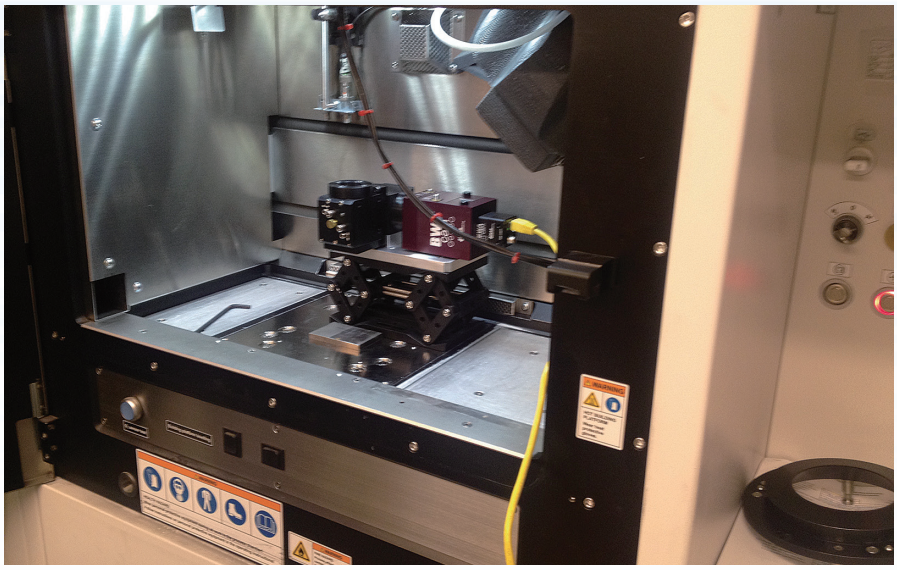

図3　ほぼ瞬間的なビーム形状、寸法、焦点、および出力測定が可能なコンパクト設計のBWA-CAM（2.4×2.4×3.3インチ）は、ほとんどのPBFシステムのビルドプラットフォームに容易に適合する。（写真提供：ペンシルバニア州立大応用研究所）

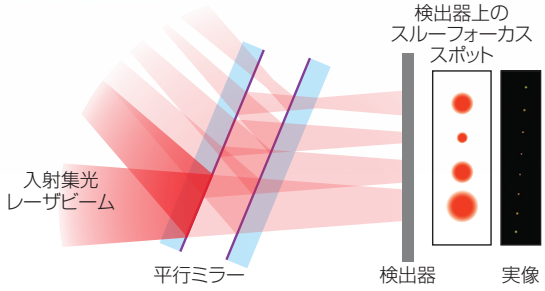

図4　光学配置の簡略図、BWA-CAMにおいて光軸に沿って、ビームを多数位置で同時に記録する。

謝辞

本稿執筆にあたり、貴重な支援をいただいたペンシルバニア州立大（Pennsylvania State University）のCIMP-3D（Center for Innovative Materials Processing through Direct Digital Deposition）所長を務めるリチャード・マーツカニッツ博士（Richard Martukanitz）と、ハース・レーザ・テクノロジーズ社のマイケル・スカッグス氏（Michael Scaggs）およびギルバート・ハース氏（Gilbert Haas）に謝意を表する。

BWA-CAMは、ハース・レーザ・テクノロジーズ社の登録商標。

参考文献

(1) T. Rockstroh, D. Abbott, K. Hix, and J. Mook, "Additive manufacturing at GE Aviation, "Industrial Laser Solutions, 28, 6, 4-6（Nov/Dec. 2013）

(2) S. Bergman, "Laser power measurement: Time is money," Industrial Laser Solutions online（Aug. 2015）; see http://bit.ly/1DYC1Z2.

著者紹介

ショーン・バーグマン（SEAN BERGMAN）は、米コヒレント社（Coherent）のレーザ計測機器担当製品マネージャー。 email: sean.bergman@coherent.com URL: www.coherent.com

ILSJ