同軸ワイヤを使用した高出力のレーザ指向性エネルギー堆積：最新情報

スタン・リーム、ジェイコブ・ヘイ、クレイグ・ウォルターズ

レーザワイヤ指向性エネルギー堆積は、堆積速度が高く、フィードストックコストが低いことから、競争の場に参入し始めている。

積層造形技術が次々に登場し、目覚ましいペースで成長し続ける中、米EWI社は、十分な開発が行われておらず、解決は困難であるものの、関心が高まっている分野を特定した。それは、今日の金属積層造形における一般的なサイズよりもはるかに大きな構造を造形する、高堆積速度の金属積層造形である。

EWI社は、「ブローンパウダー」（粉末供給式）のレーザ溶接、ワイヤ供給式の電子ビーム溶接、ガス金属アーク溶接の積層造形手法を使用して、大型造形物を製作した初期の経験から、複数の課題と機会を明確に特定した。そこで2年近く前に、大型造形物の積層造形を目的とした、高出力で高堆積速度のレーザソリューションの調査と開発を行う社内R&D活動に、出資することを決めた。本稿は、1年前の報告書（http://bit.ly/CoaxialAdditive2020）の続編で、未だ進化中のこの重要な積層造形技術に関する、新しい情報と知見を追加するとともに、残る課題を洗い出すものである。

数多くの形態の積層造形が、設計者やメーカーだけでなく、熱心なマニアまでをも魅了し続けている。ポリマーから砂や金属などに至るまでの幅広い材料を使用する、多数の積層造形技術が存在する。金属積層造形の中では、レーザ粉末床溶融結合法（Laser Powder Bed Fusion：LPBF）が最も高い関心を集めており、LPBFシステムは、他のどの種類の金属積層造形システムよりも多く製造されている。「CAD-to-part」（CADから部品）というその製造コンセプトの魅力と、明らかなシンプルさは、どれだけ誇張してもし過ぎることはない。

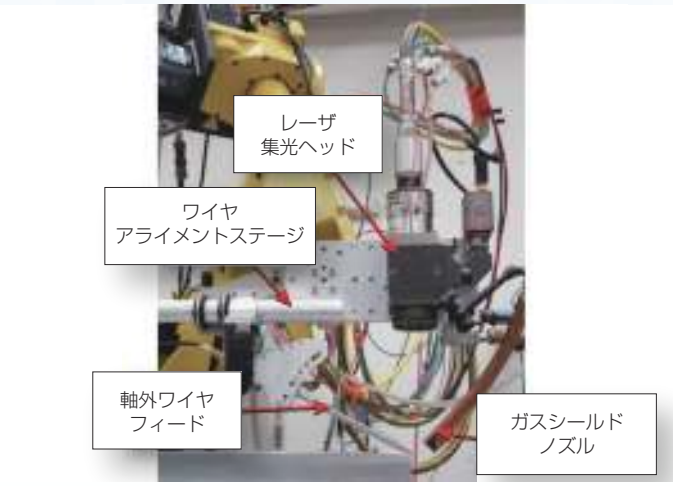

図1　軸外のレーザDEDワイヤ供給装置。

LPBFは、まだ多くの重要な細部がこれから固まっていく段階にあるが、それが他の積層造形ソリューションに与えてきた全般的な刺激は、かなり大きい。最も大きな点は、より堆積速度の高い金属積層造形に対する需要の高まりによって、従来のアーク溶接、電子ビーム、レーザの各手法によって金属融合を行う、指向性エネルギー堆積（Directed Energy Deposition：DED）ソリューションに対する関心が高まっていることである。レーザDEDは、さらに2つのカテゴリーに分類できる。すなわち、レーザ粉体肉盛法（Laser Metal Deposition：LMD）（「ブローンパウダー」DEDとしても知られる）と、ワイヤベースで金属を供給する方法で、後者は、あらゆる手法の中で最も開発が進んでいない。

ワイヤを使う理由とその溶融方法

積層造形が登場するはるか前に、アーク放電に基づくプロセスを熱源として使用する、金属クラッディング（肉盛り）方法があった。1925年に特許化された最初のガス金属アーク溶接（Gas Metal Arc Welding：GMAW）の積層造形プロセス（米国特許番号：1,533,300）は、「装飾的及び実用的な性質を持つ多様な物品」を作成するためのものだった。当時は「積層造形」とは呼ばれていなかったが、それは確かに今日の定義に当てはまるものである。

それだけ早くに誕生したGMAW DEDプロセスだったが、これまでは主に、修復、腐食保護、耐摩耗性表面の作成に使われてきた。GMAW DEDは現在、積層造形の分野に回帰しており、レーザ粉末DEDは、造形物全体の製作に適用されている。後者のDEDソリューションは、最終的な精密加工部品寸法を達成するためのミリング（フライス加工）やターニング（旋盤加工）機能を含む工作機械に組み込まれている。ではなぜDED積層造形において、ワイヤへの関心が高まっているのだろうか。

何よりもまず、あらゆる形態の積層造形が高い関心を集め、広く受け入れられていることがある。目新しいだけで大型造形物に対して検討する価値はなしとして、積層造形をかつては却下していた業界が、はるかに高い関心を持ってこの技術に着目している。航空宇宙、輸送、金属成形、海軍などの分野で、大型部品のレーザ積層造形に対する関心が高まっており、金属原料として粉末とワイヤのどちらを選択するかは、以下の理由に基づき、極めて明白である。

- ワイヤは粉末よりも、重量あたりのコストにおいてはるかに経済的である
- ワイヤは粉末よりも、利用効率がはるかに高い
- ワイヤDEDは粉末堆積と比べて、「飛び散り」がはるかに少ない
- ワイヤには、爆発や呼吸器系に関する問題がない

その一方で、ワイヤにも次のような欠点がある。

- ワイヤはレーザを熱源とする場合に、粉末よりも加熱／溶融が難しい
- ワイヤの供給と直線性（ワイヤがまっすぐに供給されないこと）が問題になる可能性がある
- ワイヤ表面の放射率の幅広いばらつきによって、プロセス開発がより困難になる

レーザ処理ゾーンへの金属ワイヤの供給は、レーザによるろう付けや溶接において何十年も前から行われており、これらの用途においてワイヤ供給方向は、ほぼ必ず処理方向に揃えられる。従って、初期のほとんどのレーザワイヤDED装置で、ワイヤの供給方向と処理の移動方向を同一とする配置が採用されていた。ワイヤ供給方向を軸外とする配置（**図1**）は、レーザによる加熱と溶融が容易になる一方で、積層造形プロセスは複雑になる。ワイヤ供給機構とそれに付随するすべての支持配線や配管を、部品造形中に調整することが必要となるためで、それは、大きな積層造形部品を造形するロボット動作に対して、非常に難しい処理である。

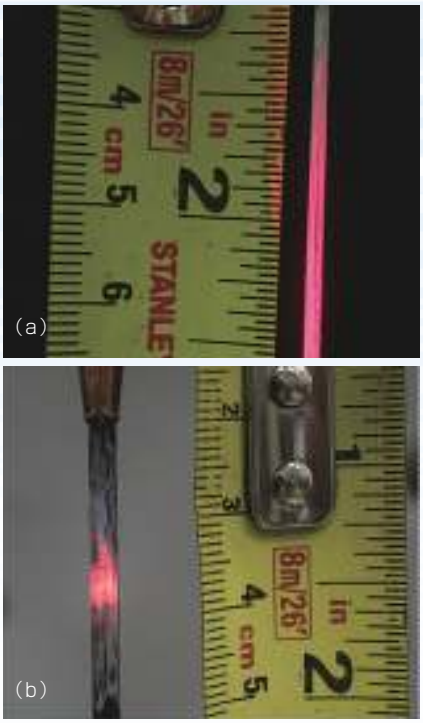

図3　ワイヤ上の同軸ビーム。(a)は初期設計、(b)は改良版。

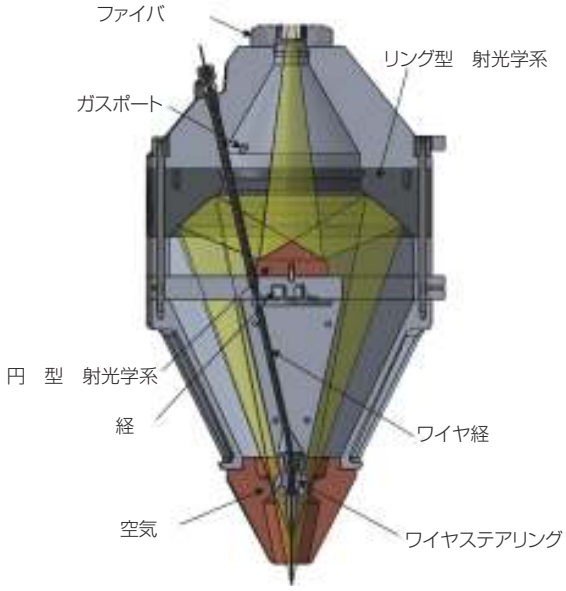

図2　EWI社のレーザワイヤ積層造形光学ソリューション（特許申請中）。

その代替策となる、無指向性のアプローチを採用したレーザワイヤDEDは、作業面に垂直にワイヤを供給しながら、ワイヤ外周にレーザ出力を供給するものである。この「同軸式」のアプローチは、独プレシテック社（Precitec）、米レーザメカニズムス社（Laser Mechanisms）、独フラウンホーファー研究機構（Fraunhofer）、米メルティオ社（Meltio）や、EWI社を含む、数多くのレーザシステムビルダー、積層造形システムメーカー、光学部品

図4　改良された光学部品による「壁」の造形性能。

供給メーカーによって導入されている（「coaxial laser wire DED」（同軸レーザワイヤDED）でGoogle検索すると、多数の例が簡単に見つかる）。

同軸ワイヤDEDソリューション

現在利用可能な「同軸」ワイヤDEDソリューションのほとんどが、複数の個別のレーザ集光素子を使って、ワイヤと作業面の加熱と溶融を行う。一般的に3本のビームを、ワイヤ外径上にそれぞれ正確に配置する必要があり、ワイヤはまっすぐで緩みがあってはならない。EWI社の設計では、レーザビームは完全に同軸方式でワイヤ外周に供給される（**図2**）。

このレーザワイヤDEDのコンセプトは、非常に高出力のレーザを使用することが可能で、EWI社の最新レーザ出力機能である20kWまでテスト済みである。2つの反射型のビーム成形光学部品が、クレイグ・ウォルター博士によって設計され、米ツーシックス社（II-VI）によって製造されている。これらの光学部品は水冷式で、作業ゾーンからは離れているため、カバー窓を追加することなく空気窓で保護することができる。この初期設計により、以下のような卓越した光学性能と溶融能力が得られることが確認されている。

・20kWまでテスト済み
・出力供給：ファイバ出力の94%
・ワイヤ：ステンレス鋼製、直径1.6mm
・ワイヤ供給速度：855ipm
・溶融速度性能：46lb/hr
・溶融効率：36mm^3/kJ

ワイヤ外周上に「円筒形」のレーザ光を供給するための最初の光学設計は、ワイヤに沿って意図的に長い照射ゾーン（**図3**a）を生成するもので、ワイヤの直線性に一貫性がなく変動があるために、望ましくない積層造形堆積感度が生じた（「投影」や「らせん形状」が生成された）。

この最初のワイヤ照射ソリューションで遭遇した、堆積プロセスの不安定性の問題に格闘した後、集光光学部品の改良版を設計し、搭載した。改良版は、はるかに短くて放射照度が高い円筒形のレーザ光を、積層造形ワイヤ上に生成した（図3b）。高い放射照度によって、プラズマが形成され、作業面上にある程度のスパッタが発生するといった影響が生じたが、ワイヤの直線性に対する感度は明らかに低下し、プロセスの安定性が向上した。今思えば、光学部品を改良する際に、輝度を高くする方向にやや行き過ぎてしまったのが明らかだが、それでも妥当な造形能力を達成することができた（**図4**）。

図4の308ステンレス鋼の「壁」を造形する場合の金属堆積速度は28lbs/hrで、一般的なGMAW積層造形の造形速度よりも高い。レーザDEDによる造形物は、金属組織的に非常にクリーンで、母材への金属融合とパス間の金属融合は完ぺきである。

まとめ

・EWI社のレーザワイヤDED積層造形ソリューションは、積層造形において最も高いレベルの造形速度を達成する。
・この同軸設計の光学的コンセプトは、幅広い範囲のワイヤ照射オプションを提供する。
・このレーザDEDコンセプトの堆積速度は、最終的に100lb/hrを超える可能性がある。
・加熱／溶融速度と堆積フローダイナミクスの数値モデリングが必要である。
・他の多くのワイヤ材料、ワイヤ構成、レーザ波長、レーザ出力を、今後調査及び実装する必要がある。

著者注記

本件は、ジェイコブ・ヘイ、ディーン・ランゲンカンプ氏（Dean Langenkamp）、マーク・モーラー氏（Mark Mohler）、クレイグ・ウォルターズ博士、スタン・リーム、そしてツーシックス社を含む、EWI社のレーザ同軸積層造形開発チームの功績であり、ここに謝意を表する。

著者紹介

スタン・リーム（STAN REAM）とジェイコブ・ヘイ（JACOB HAY）は米EWI社所属、クレイグ・ウォルターズ博士（CRAIG WALTERS）は米CWAレーザーズ社（CWA Lasers）所属。
e-mail: stan@srlaser.net

ILSJ