

宇宙向けハイブリッド推進部品の レーザ金属堆積

ウリ・クラスケ

3Dプリントとしても知られる積層造形(AM)は、医療、自動車、民生製品、商用航空の他、最も興味深い分野として宇宙探査に利用されている。

電子ビーム積層造形(Electron Beam Additive Manufacturing : EBAM)、ワイヤーアーク積層造形(WAAM)、レーザハイブリッドアークなどの付加的なプロセスは、タンクや構造物の構築に対して実証されているが、太陽系やその外側の宇宙空間を本当に探査するには、打ち上げ機の推進装置をプリントするためのより良い方法を開発する必要がある。レーザ粉末床溶融結合法(Powder Bed Fusion : PBF)とも呼ばれるレーザ金属溶融(Laser Metal Fusion : LMF)と、レーザ指向性エネルギー堆積法(Direct Energy Deposition : DED)とも呼ばれるレーザ金属堆積(Laser Metal Deposition : LMD)は、そのような高

遠な目標の達成を支える手段である。

米国ミシガン州プリマス・タウンシップにある独トルンプ社(TRUMPF)のレーザ応用研究所は、LMFとLMDの両方を組み合わせた興味深い手法を用いて、ロケットエンジンのインジェクタとノズルを積層造形で作成した。

このプロジェクトではまず、NASAが開発した銅合金GRCop-42でプリントするように設計されたインジェクタを作成した。GRCop-42は熱伝導率が高く、LMFの粉末床装置でプリント可能である。続いてLMDプロセスを適用して、排気ガス用の幅広の円錐形のノズルをプリントした。

両方のプロセスを組み合わせることにより、インジェクタチャンバ内部で液体を流すための複雑な冷却路設計と、熱伝導に必要な薄壁構造を作成することができた。LMDのフリーフォームの性質により、幅広で裾野が広がった円錐形状を、粉末床に制約されることなくプリントすることができる。2つのAM手法を組み合わせることが、宇宙探査の可能性を開くための鍵である。

溶接部

レーザAMにおいてDEDは、従来の溶接手法との類似性を持つプロセスである。

LMDによって溶接部を生成するプロセスの基本的な流れは、以下のとおりである。レーザ誘起によって溶接池

を部品表面に生成すると同時に、金属粉末を粉末ノズルによってそこに添加する。すると、固体の金属粉末が溶融して、その下の材料との金属結合が生成される。溶融池を周辺環境から保護するために、シールドガスを使用することができる。熱伝導によって溶融池が凝固し、溶接ビードが形成されると、従来の溶接部の一般的な特徴が現れる(すなわち、溶融または希釈と、熱影響部が生じる)。

さらに多くの材料を溶融して堆積させ続けると、構造を増大させることができる。それは、1つの大きな溶着物とみなすことができる。CNC機械やロボットなどの動作制御システムを利用して、このプロセスに溶接ヘッドの動きを組み合わせれば、優れた精度と再現性で溶接ビードを部品の上に配置することができる。ビードの配置に応じて、このプロセスを接合、クラッディング、部品修復、積層造形に利用することができる。

宇宙探査分野の用途

宇宙分野には、積層造形を利用した製造に適した複数の用途が存在する。レーザAMは、微細形状、内部冷却路、突出部の生成など、従来の製造手法の限界を克服する。また、新たなイノベーションを可能にして、既存の製造プロセスチェーンの効率を高めることができる。

最新の技術進歩を利用することにより、DfAM(Design for Additive Manufacturing : 積層造形のための設

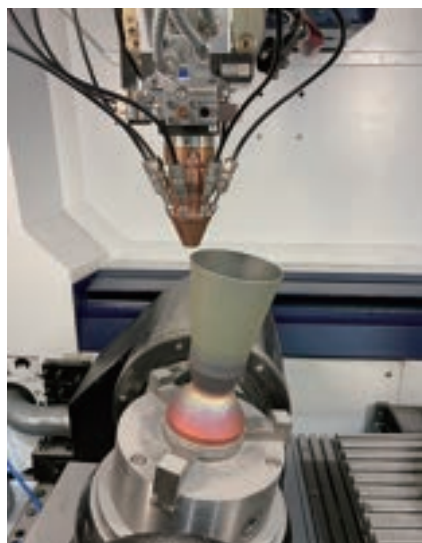


図1 ハイブリッド部品の718部分に対するLMD処理(提供:トルンプ社)

計)を適用した急進的な設計概念を実現し、機械学習や人工知能(AI)を活用したアルゴリズム設計によって、全く見たことも聞いたこともないデザインの作成を支援することができる。

当社は既に、粉末噴射によるLMDプロセスを使用して、スラストチャンバ(推力室)の延長ノズル用部品を、ほぼ完成形の状態ですべて印刷することに成功している(図1)。従って、このプロセスが宇宙探査に対して多大な可能性を秘めていることは明らかである。

技術背景

関連プロセスパラメータに関する一般的な知識は、付加的なLMD応用プロセスの適切な設定と運用において重要である。しかし、安定したプロセスに必要なものの中で最も重要なのは、レーザー出力、粉末供給速度、そして処理速度である。これら3つのパラメータを個々に切り分けて、さらに詳しく見ると、その影響は次のようにまとめることができる。

- ・レーザー出力は、関連材料を溶融するためのエネルギーを供給する。これは、希釈、溶融、熱影響部の規模を左右する最大の要素である。レーザー出力は、トラック幅と、部品に加わる全体的な熱入力にも影響を与える。
- ・粉末供給速度は、処理領域に供給される粉末の質量流量を定義する。このパラメータは主にビードの高さと、下の材料との希釈に影響を与えると、一般的にみなされる。
- ・処理速度は、加工対象物上をノズルが動く速度で、ビードまたはトラックの高さと希釈に影響を与える。

これら3つの基本パラメータの組み合わせが、LMDによる積層造形部品の層の高さに直接的に影響を与える。最適な処理条件において、層の高さが

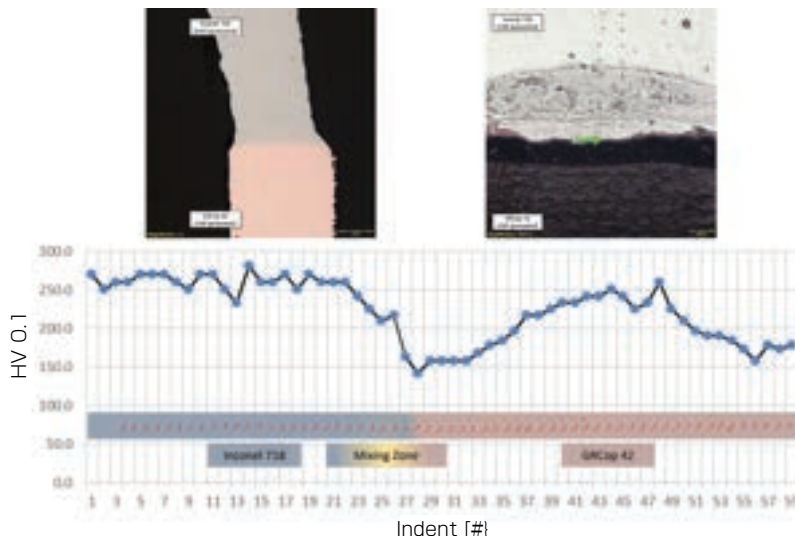


図2 ニッケルと銅の間の境界部分の断面とビッカース硬さ試験結果

安定すれば、造形プロセス全体の安定性が増し、より品質の高いプリント部品が得られる。

粉末噴射によるLMDプロセスが適用できる、宇宙探査分野の興味深い用途の1つが、ロケットエンジンの推力室の延長ノズルである。当社は、LMFでプリントしたGRCop-42製の銅ノズル部品の上に、ニッケル基超合金718を使用することにより、この構造のサンプルを作成した。

ハイブリッド部品の製造

本当の意味でハイブリッドなこの部品の作成には、異なるレーザーAMプロセスと材料が使用されている。部品の銅部分は、LMFプリントシステムによって波長515nmのグリーンレーザー源を使用して製造した。この波長は、レーザーエネルギーの吸収率が格段に高いため、銅のような高反射性材料に対してメリットがある。

部品の718部分は、波長1030nmの赤外線(IR)ディスクレーザーとLMDプリントプロセスを使用して作成した。この構成のIR部分の最大出力は12kWだが、ここでは、レーザー出力をわずか

1.4kWとし、毎分1200mmの処理速度と、毎分15gの粉末供給速度を適用したところ、最終的な造形速度は1時間あたり最大840gとなった。

その結果、粉末利用率は90%を超えた。マルチジェット粉末ノズルとレーザービームシェーピング(BrightLine溶接技術を搭載した2-in-1ファイバ)を使用して、これが達成されている。最終構造のz高さは100mmで、壁厚は約3mmだった。この部品の造形時間は、連続的ならせん状の動作を適用して45分未満で、最終的な層の高さは500 μ mだった。垂直から10度の角度の突出部を生成するために、傾いた回転台を使用して部品の位置を操作した(図1)。

造形の成功の鍵を握るのは、基本的に異種金属の溶接となる、GRCop-42と718の強力な結合の確保である。レーザー出力を上げて、最初の層の処理速度を下げることにより、2つの材料の間の溶融領域のサイズを大きくすることを試みた。

この混合層の断面は図2のとおりで、2つの材料の結合部の視覚的な質の高さが見て取れる。断面を切断してエツ

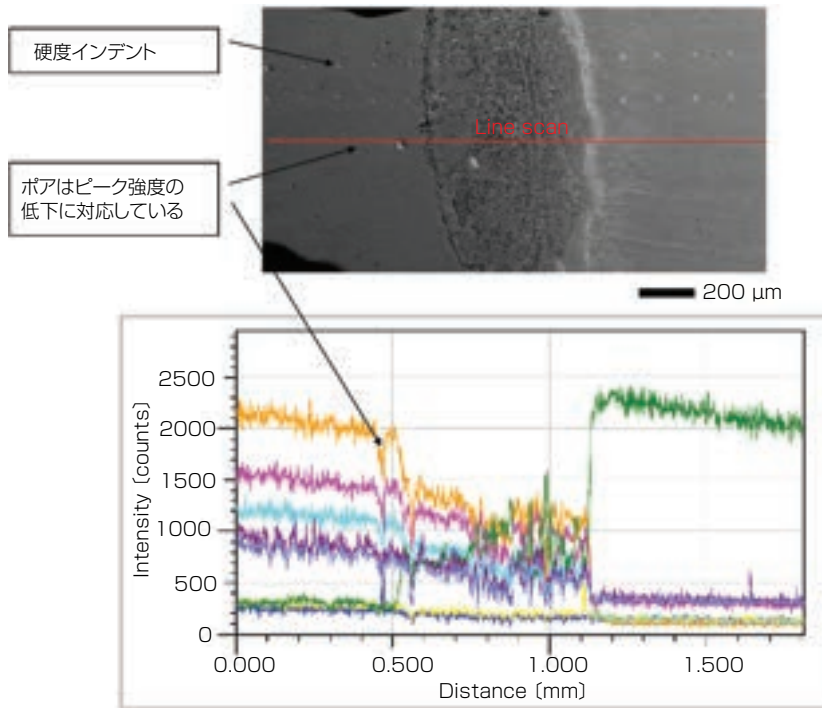


図3 境界部分のライン走査EDXによる分析結果と、高出力SEMによるインライン画像

チングすると、2つの材料の間に2層からなる溶融領域が存在することがわかる。混合領域は、構造の718側で明らかに大きく、銅側では層が薄くなっている。

特に2つの材料の間の溶融領域の材料特性を簡単に評価するために、ビッカース硬さ試験(HV0.1)を使用した。その結果、718側では値は比較的一定で、2つの材料の間の混合層では硬度が低下した。銅側では、硬度値は最初は増加するが、境界に近づくにつれて再び減少する。測定された硬度値が最も低いのは、718と銅の間の遷移領域の中間部分である(図2右上の矢印部分)。

ライン走査モードのエネルギー分散型X線(Energy Dispersive X-ray: EDX)分析と高出力SEM画像を使用して、境界領域も簡単に調査した(図3)。金属間結合を挟んだニッケル合金側から銅合金側への化学組成が示されている。ピーク強度が低い部分が、欠陥／

ポア(スパッタ)が存在する部分と一致しており、明らかに、高い波長の高いレーザー出力を照射したときの金属の噴出がその要因である。SEM画像ではその他に、718側に溶融がないこと、欠陥が存在すること(それらは、ビッカース硬さ試験のインデントとは全く異なる)、銅側のプリント密度が非常に良好であることなどが確認できる。

今後の取り組み

異種材料であるニッケルと銅に対して、2つの異なるレーザーAMプロセスであるLMFとLMDを組み合わせたこの初期調査により、真にハイブリッドな部品が作成された。宇宙探査などの分野を対象とした新しい部品を作成するために、この研究をさらに発展させることへの関心は、間違いなく存在する。

著者紹介

ウリ・クラスケ(Uli Kraske)は、独トルンプ社(TRUMPF)米国法人に所属する高出力レーザーアプリケーションエンジニア。e-mail: ulli.kraske@trumpf.com URL: www.trumpf.com

2つの材料の間の結合を、より詳しく分析することが推奨される。プロセスパラメータの調整や、加工後の熱処理の適用(応力除去など)は、混合領域の特性の強化、特に強度などの機械的性質の改善につながる可能性がある。この研究の情報は、レーザーワイヤや、さらには最初にLMFを適用するWAAMなど、別の積層造形手法で作成された、2つの材料の間の結合を評価するためのさらなる実験の設計にも、利用できる可能性がある。

材料側からの別の最適化手法としては、モネル(主にニッケルと銅からなる合金)による「バタリング層」の使用や、傾斜材料を堆積する方法などが考えられる。銅からニッケルへと材料の組成比率を徐々に変化させることにより、より適切に混合した境界領域が生成される。LMDを使用した傾斜機能材料は、混合領域の化学組成の調整を可能にし、ニッケル基超合金と銅合金の結合の最適化と、全体的な材料特性の改善につながる。

最終的に、両方のプロセス(LMFの高い分解能とLMDのフリーフォームの性質)を組み合わせることにより、両方の長所を生かして、ロケットエンジンなどの宇宙用部品を作成することができる。LMFは、インジェクタチャンバ内部で液体を流すための複雑な冷却路と、薄壁構造の造形に使用でき、LMDは、幅広で裾野が広がった円錐形状を、傾いた回転台を使用することにより、粉末床に制約されることなくプリントすることを可能にする。これらのレーザーAM手法を組み合わせることが、宇宙探査の可能性を開くための鍵である。