

# パウダ DED 方式3次元金属積層造形機 LAMDA の造形技術

## Manufacturing Technology of Three-Dimensional Metal-based Additive Manufacturing System LAMDA with Powder DED Method



石井 浩\*<sup>1</sup>  
Koh Ishii

倉本 博久\*<sup>2</sup>  
Hirohisa Kuramoto

田内 拓至\*<sup>2</sup>  
Hiroyuki Tauchi

山本 雄介\*<sup>3</sup>  
Yusuke Yamamoto

若名 智宏\*<sup>3</sup>  
Tomohiro Wakana

吉村 仁\*<sup>3</sup>  
Hitoshi Yoshimura

パウダ DED (Directed Energy Deposition) 方式の金属積層造形は造形速度が速く、装置の大形化が容易であるという特徴があるが、造形プロセスの熔融・凝固の過程で発生する酸化による金属劣化や、形状寸法の確保が課題である。三菱重工工作機械(株) (以下、当社) のパウダ DED 方式3次元金属積層造形機 LAMDA はローカルシールドを用いることで、活性金属であるチタン合金の酸化を抑制して航空機部品サンプルを造形した。また、モニタリング機能による入熱量の最適コントロールにより、造形中の形状崩れを抑制できた。

## 1. はじめに

金属積層造形を用いることで、従来の除去加工では実現できなかった形状の実現による部品の軽量化や一体化、デザイン性の向上、異種金属の複層造形による高機能化、在庫部品の削減などが可能になる。そのため、金属積層造形が製品性能の向上やサプライチェーンの革新に貢献できる次世代技術として注目されている。当社が開発したパウダ DED 方式3次元金属積層造形機 LAMDA (以降、LAMDA) は、その積層原理から造形速度が速く、装置の大形化が容易であるという特徴を有している。一方で、造形金属の機械特性や形状寸法の確保、長時間の安定造形といった課題がある。本報では LAMDA の概要と課題に対する取り組み、造形事例について述べる。

## 2. DED 方式の積層原理と特徴

パウダ DED は指向性エネルギー堆積法ともいわれ、熱源であるレーザーにより、局所的に供給した金属粉末を基材とともに熔融・凝固させることで、肉盛溶接しながら 3 次元形状を造形していく技術である(図1)。その積層原理から次の特徴を持っている。

- (1) 造形速度がパウダベッド方式と比較して約 10 倍程度と早い。
- (2) 造形箇所に金属粉末を直接供給する方式であり、装置の大形化が容易である。
- (3) 既存部品上に造形できるため、形状付加や補修、コーティングが可能である。
- (4) 造形中に材料を切り換えることで、異種金属を複層造形することができる。

以上の特徴から、航空・宇宙やエネルギー、自動車分野における高機能部品の製造や使用済み部品の補修、あるいは部品製造プロセスの革新等が期待されている。一方で、高機能材として航空機部品への採用が進んでいるチタン等の活性金属は、造形中の熔融・凝固の過程で酸化

\*1 三菱重工工作機械(株) 技術本部 主席プロジェクト統括

\*2 三菱重工工作機械(株) 技術本部 首席技師

\*3 三菱重工工作機械(株) 技術本部

により金属劣化が発生するという問題がある。また、大型部品を高精度で安定して造形するためには、部品形状に合わせた入熱量のコントロールが必要になり、造形プロセスの異常を検知して設備を安全に停止させる仕組みも必要になる。

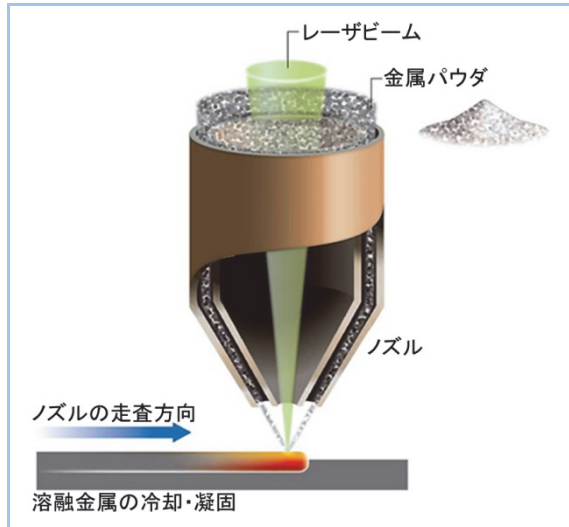


図1 パウダ DED 方式金属積層方法

### 3. LAMDA の概要

当社は、造形サイズ別に LAMDA シリーズを用意している(図2)。LAMDA200 は造形サイズを小さく絞っており、小型部品の造形に加えて造形工法の開発や造形ノウハウの蓄積、試作評価に適したモデルになっている。LAMDA500 と LAMDA2000 はより大型の部品まで造形でき、LAMDA2000 の最大造形サイズは 2000×1500×1600mm である。



LAMDA200 DED System



LAMDA500 Hybrid DED System  
(プロトタイプ)



LAMDA2000 DED System  
(プロトタイプ)

	LAMDA 200	LAMDA 500	LAMDA 2000	
最大造形サイズ [mm]	200 × 200 × 200	500 × 500 × 500	2000 × 1500 × 1600	2500 × 900 × 1000
レーザー出力 [kW]	1, 2, 4, 6			
粉末供給ポット数	1 (オプションで最大2ポットまで対応)			
不活性ガスシールド	対応可能			
主軸仕様	対応可能			N/A
NC軸テーブル	1軸・2軸テーブル対応可能			
治具冷却	対応可能			
機械サイズ (設置スペース) [mm]	4000 × 2600	4100 × 5000	12000 × 6500	7000 × 5500
機械質量 [kg]	2500	7500	44000	12000
金属材料	チタン合金, インコネル, ステンレス, *マルエージング鋼, *コバルトクロム合金, *インパー (*開発中)			

図2 LAMDA シリーズ

LAMDA 本体と周辺装置について説明する。装置本体は XY 軸駆動のテーブルと Z 軸駆動の積層ヘッドを有しており、2軸回転テーブルを付加することで5軸積層造形も可能になっている。積層ヘッドに組み込まれた集光レンズにより、レーザを基材上に集光する。レーザ光と同軸上にカメラ

ラなどのセンサを設置することで溶融池の観察もできるようになっている。ヘッド先端には粉末供給ノズルが装着されており、金属粉末を正確に基材上のレーザ集光位置に供給する。切削用主軸を搭載することで、補修造形前の準備加工や、造形後の仕上げ加工にも対応可能である。

周辺装置はレーザ発振器とチラー、粉末供給装置、粉末回収用の集塵機で構成される。粉末供給装置のポットは2台まで設置可能であり、造形中に供給材料を切り換えることができる。

## 4. LAMDAの特徴

LAMDAでは、目的に応じて様々な造形に対応できる粉末供給ノズルと、長時間の安定造形のためにモニタリング機能を用意している。

### 4.1 粉末供給ノズルとローカルシールド

高精度な積層造形とは、求められる機械特性を持つ金属を高い形状精度で造形することである。当社は3ポート供給タイプと、全周供給タイプの2種類のノズルを用意し、部品形状や要求精度、造形速度に応じてノズルを選択できるようにしている。図3に各ノズルの粉末収束状態を示す。金属粉末は造形時のノズルスタンドオフ設定位置に集束し、その集束径は積層ヘッド光学系の集光スポット径程度に収まっている。正確に金属粉末を集束することで目標の形状寸法で造形が可能になる。また、造形中における活性金属の酸化を防止するために、ローカルシールドを付加できるようにしている。図4にローカルシールドとシールド状況の流体解析結果を示す。ノズル外周から不活性ガスを噴射することで溶融・凝固位置に対して局所シールドをつくり、空気の流入を防止して酸化を防止する。

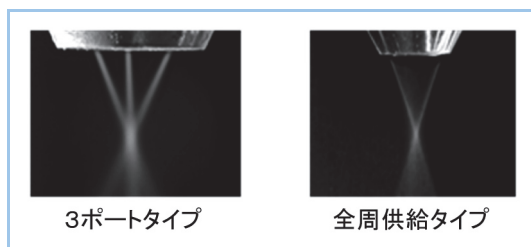


図3 粉末供給ノズル



図4 ローカルシールドと流体解析結果

### 4.2 モニタリング機能

パウダ DED 方式ではレーザで基材を溶融させながら造形するが、基材の材料種類や形状、また造形中の過熱と冷却の程度によって金属の溶融する程度が変化するため、レーザパワーを状態に応じて変化させてやるのが望ましい。金属3D プリンタが積層の状態に応じてレーザパワーを最適にコントロールする機能を有していれば、長時間の安定した造形が可能になる。この実現に向けて LAMDA にモニタリングフィードバック機能を付加している。また、造形中はスパッタやヒュームなどに起因する設備へのダメージが発生する可能性があり、これらの検知のためにAI異常検知機能の開発に取り組んでいる。

#### (1) システム構成

モニタリングフィードバック機能のシステム構成図を図5に示す。レーザ光と同軸上にカメラを設け、造形中にメルトプール(溶融池)を真上から観察できるようにしている。これは、基材の状態変化がメルトプールの変化として現れるとの考えに基づいているためである。撮影したメルト

プール画像は専用 PC で造形中にリアルタイムに分析され、造形途中の変化を即座に検出することが可能である。検出した変化量に基づいて、造形位置やレーザ出力指令をフィードバック制御できるようになっている。スパッタ等の異常についても同時に検知することで、設備を安全停止させてダメージを防止できるようになっている。

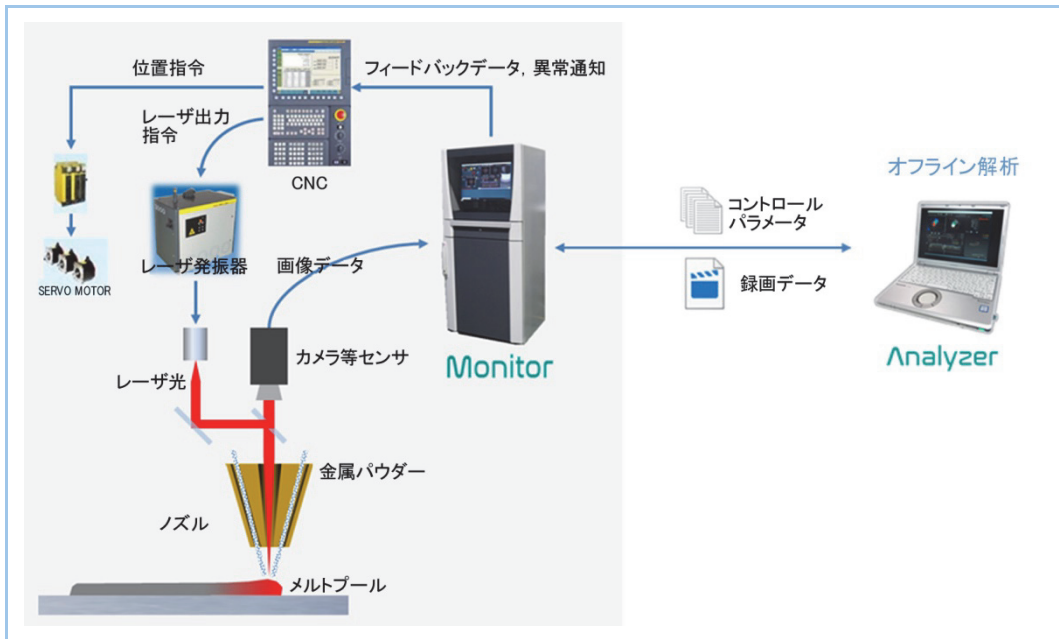


図5 モニタリング機能のシステム構成

## (2) フィードバック効果

フィードバック ON と OFF で造形した結果を図6に示す。フィードバック OFF では積層高さが増していくにつれ、レーザによる入熱と冷却のバランスが崩れて入熱過大となったことにより、メルトプールサイズが大きくなり、結果的に形状崩れとなった。フィードバック ON ではレーザ出力コントロールにより造形中のメルトプールサイズを安定化させることで、形状崩れを発生させず最後まで造形することができた。

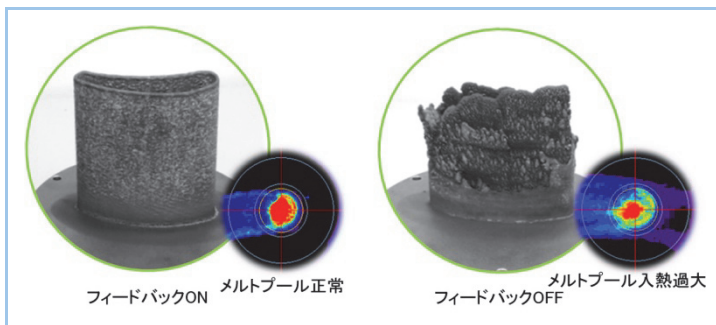


図6 モニタリングフィードバックの効果

## (3) 造形プロセス中の異常検知

異常発生時のメルトプール画像には正常状態からの何らかの変化が現れるため、これを捉えることにより異常を検知できる。代表的な異常の種類には以下がある。

### ① スパッタ

造形条件が不安定な時に発生する可能性がある。造形後の金属品質に影響する。

### ② 保護ガラス汚れ

造形条件の不良等に起因するスパッタやメルトプールから発生するヒュームの影響により、造形ノズル内の保護ガラスに汚れが付着する可能性がある。保護ガラス汚れはレーザ透過率を低下させ、造形不良やノズルへのダメージを引き起こすことがある。

### ③ ノズル異物付着

造形中に発生したスパッタ等がノズルへ付着することにより、付着部が発熱源となってノズルへダメージを引き起こす場合がある。

異常検知は閾値オーバの有無をチェックするような単純なものではなく、人間の感覚に近い複雑な判断基準が必要になる。そのため、当社はモニタリングシステムに AI を搭載することにより異常の検知に取り組んでいる。造形中に発生した異常の例を図7の左側に、右側に発生時の画像を示す。正常時と異常時の画像に差異があることが分かる。造形中の異常を迅速に検知することで造形不良を防止できるだけでなく、造形ヘッドをダメージから保護できるようになりダウンタイムも削減できる。

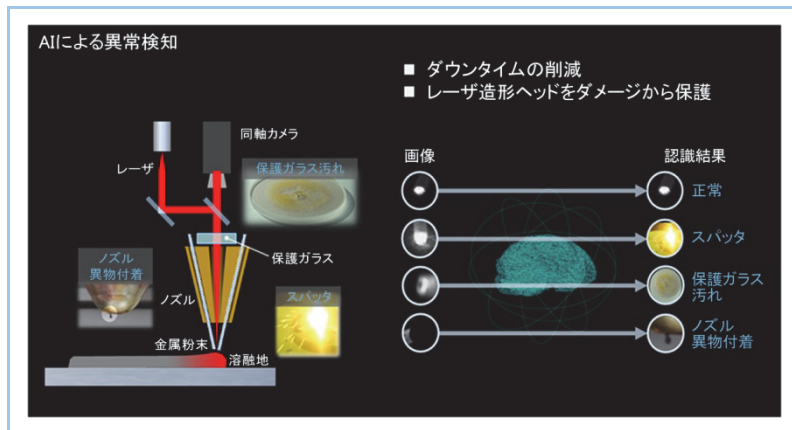


図7 造形中の異常検知

## 5. 造形事例

LAMDA の造形事例を紹介する。

### 5.1 航空機チタン合金部品

大気環境下でローカルシールドノズルを用いて、一般の航空機部品を想定した傾斜円筒部とリブを有する模擬形状をチタン合金 ( $Ti_6Al_4V$ ) で造形した。造形結果を図8に示す。本サンプルは切削用主軸を有する LAMDA500 プロトタイプ機にて造形したのもので、造形途中に切削工程を追加することにより高精度に仕上げている。チタン合金部品をニアネット造形することにより、製品リードタイムの短縮と加工コストの低減が期待できる。

### 5.2 低熱膨張合金ブラケット

低熱膨張合金であるスーパーインバーの造形サンプルを図9に示す。線膨張率が鉄の約1/100 と非常に小さく、温度変化の激しい環境や精密部品に用いられることが多い。一方で、熱伝導率が低く難加工材であるため、ニアネット造形によるメリットが大きい材料である。一般に高性能材の素材は調達リードタイムが長くなることも多いが、金属粉末を保有しておけば必要に応じて素材を造形できるため、調達リードタイムも大きく短縮できる。

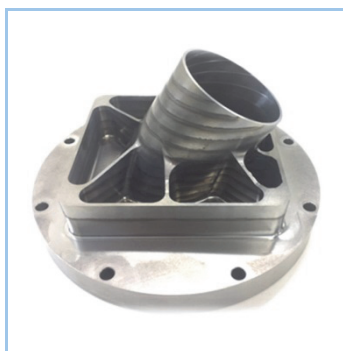


図8 チタン合金部品

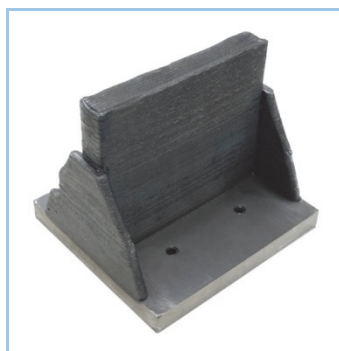


図9 低熱膨張ブラケット



図10 中空ギアサンプル

### 5.3 中空ギア

母材 SS304 上にステンレス鋼 SUS304 で展示用サンプルとして中空ギアを造形したものを図 10 に示す。金属積層を用いることにより、従来の除去加工では不可能であった中空形状部品の製作も可能になる。

## 6. まとめ

本報では、パウダ DED 方式金属積層の原理と特徴、及び高精度部品の安定造形を実現する LAMDA の粉末照射ノズルとローカルシールド、及びモニタリング機能について紹介した。独自開発のモニタリング機能により、長時間安定した造形が可能になり、お客様のさまざまな造形ニーズに対応することができる。今後、これら技術の更なる高度化を図ると共に、試作評価を積極的に推し進めて適用先アプリケーションを拡大し、金属積層技術の普及と実用化に取り組んでいく。

本研究開発は、経済産業省の委託事業“三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム（次世代型産業用3Dプリンタ技術開発及び超精密三次元造形システム開発）”，及び国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業の成果を活用している。

## 参考文献

- (1) 技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構，“ひらめきを形に！設計が変わる新しいものづくり，第4回シンポジウム講演集，(2018)，p.54～60
- (2) 二井谷春彦ほか，デポジション方式3次元金属積層造形装置の開発，三菱重工技報 Vol.55 No.3 (2018)