電子ビームを用いた金属 Additive Manufacturing 技術の最新動向*

Recent Trends of Additive Manufacturing Using Electron Beam Melting

千葉晶彦**
Akihiko CHIBA

Key words

additive manufacturing, electron beam melting, powder bed fusion, direct energy deposition, incremental casting

1. はじめに

電子ビーム積層造形技術は、以下の二つのタイプが知られている。一つは、三次元 CAD データに基づく電子ビーム走査により、50~100 μm 程度の厚さに敷き詰めた金属粉末床（パウダーベッド）を選択的に溶融・凝固させた層を繰り返し積層させて三次元構造体を製作する（パウダーベッド溶融結合法）¹⁾。また、もう一つは、繰り出した合金ワイヤーを電子ビームにより溶融させ液滴を基板上に堆積（デポジション）させて、三次元構造体を製作するタイプ（指向エネルギー体積法）である。前者のタイプは、高精度な積層造形加工技術として航空機部品や人工関節などの医療用製品の製造技術として広く普及している。

本稿では、電子ビームパウダーベッド溶融（電子ビーム積層造形）法に焦点を絞り、いくつかの話題を取り上げ、電子ビーム積層造形技術の現状と最新動向について述べる。

2. 電子ビーム積層造形装置構成

市販されている電子ビーム積層造形（EBM）装置は、ArcamAB 社（1997 年創立）が製造する装置が現在まで唯一である。その開発の歴史は、レーザー積層造形に比較して浅い。電子ビーム方式による Additive Manufacturing（AM）技術は、真空中での造形を基本とするため、装置構成が複雑となる。パウダーベッド方式に限っていえば、電子ビームでの選択的溶融プロセスに入る前に、パウダーベッド表面を 700~1000℃ の高温に予備加熱する必要がある。この予備加熱プロセスは、レーザー方式ではなく、EBM に独特なプロセスである。その材料学的な意味については後述する。ここでは、Arcam 社の EBM 装置を例にとり、EBM 造形技術と装置概要について説明する。

2.1 装置構成と造形法

図 1 に (a) EBM 装置外観および (b) 造形装置概略図

を示す。また、図 2 には、造形プロセス開始時からの一層分のプロセス（①スタートプレート予熱→②パウダーベッド形成→③パウダーベッド予備加熱→④選択的溶融→⑤ステップダウン）を模式的に示す。次に述べる手順により造形を行う。以下の括弧内の数値は、図 1 (b) に現れる数字と対応している。

- A) 加熱されたタングステンフィラメント (1) から放出された電子はアノード (2) を通って加速される。
- B) 加速された電子はフォーカルコイル (3) により焦点が合わされ、ディフレクションコイル (4) により走査（偏向）される。
- C) 電子がパウダーベッドに照射されたときの運動エネルギーが熱に変換され、この熱によって金属粉末が加熱あるいは溶融する。まず、造形開始時に、電子ビーム照射によりスタートプレートのみを 600~1000℃ の温度に加熱する（図 2 ①）。この予備加熱されたスタートプレート上にレーキアームによって厚さ 50~80 μm のパウダーベッドを形成する（図 2 ②）

図 1 (a) EBM 装置の外観および (b) 装置チャンバの模式図

*原稿受付 平成 28 年 6 月 1 日

**東北大学金属材料研究所（宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1）

図2 電子ビーム積層造形の1層分の造形プロセス

表1 EBMとレーザー積層造形比較

	電子ビーム積層造形	レーザー積層造形
装置名	ARCAM社: EBM A2	EOS社: EOSINT M 280
熱源	電子ビーム (Wフィラメント)	Yb-fibre レーザー
造形可能サイズ (W×D×H)	200×200×350	250×250×325
最大出力	3500 W	400 W
ビーム径	0.2~1.0 mm	0.1~0.5 mm
最大スキャン 速度	8000 m/s	7 m/s
造形速度	15~22 mm ³ /s	2~8 mm ³ /s
造形雰囲気	高真空(10^{-5} mbar)後 Heガス導入(10^{-3} mbar)	(Ar or N ₂)ガス置換
予備加熱温度	(0.5~0.8) T _m (T _m : 融点 (K))	~90℃

と、余熱によってパウダーベッドは加熱され、スタートプレートと同程度にまで昇温させることができる。600~1000℃の温度に加熱されたパウダーベッドに電子ビームを照射し、あらかじめ定めていた温度に到達するまで加熱する(図2③)。その後、目的とする造形物の3DCADデータの2Dのスライスデータ領域を選択的に熔融する(図2④)。

D) 2Dスライスデータによる熔融プロセスが終了した後、ステージ(9)が1層分降下し(図2⑤)、パウダーホッパー(5)からレーキアーム(6)を用いて新たにパウダーベッドを形成する。その際に供給される粉末の量は、センサー(7)を用いて一定量になるようにレーキアームの位置を随時調整する。

E) 以上の過程を繰り返し行い、2Dスライスデータの熔融層を繰り返し積層し、製品(8)形状に成形する。

2.2 EBM造形法の特徴

a. 熱源および出力

表1に、EBM装置(ArcamAB社, A2X)とレーザー積層造形(LBM)装置(EOS社, EOSINT M 280)の仕様を示す。熱源として、EBM装置ではタングステンフィラメントを用いており(ただし、最新鋭のEBM装置(Q20)ではLaB₆を搭載している)、LBM(装置)では

Ybのファイバーレーザーを使用している。EBM装置では、電子ビームの出力として、最大3.5kWであり、LBMの最大出力0.4kWに比べて大きい。このため、EBMではLBMに比べ高融点合金にも適用可能である。

b. スキャン速度

レーザービームのスキャン速度は7m/sであるのに対して、電子ビームのスキャン速度は8000m/sと極めて高速である。これは、電子ビームのスキャン方法が電子レンズによる電磁気的なビーム偏向であるのに対し、レーザーのそれはガルバノミラーの、機械的制御により偏向させることに起因する。ガルバノメーターミラーの、自重による慣性力の高精度な制御に限界があり、高速度で偏向させることが難しいためである。

c. 造形雰囲気

EBMプロセスでは、高真空中で熔融造形を行うため酸化の影響がない。むしろ、ニッケル基超合金やチタン合金などでは、造形物の酸素濃度が使用した粉末の酸素濃度よりも低下させる効果が認められており、高純度造形が可能である。実際には造形中にHeガスをわずかに導入するが、これは電子ビーム照射による金属粉末の帯電(チャージアップ)を防ぐためである。LBMではアルゴン等の不活性ガスを充填させて造形を行うため、EBMにおける真空チャンバーに必要な耐圧設計が不要であり、低剛性のチャンバー設計で足りるという利点がある。しかし、最近、LBMにおいても造形中の酸化を防止するため、真空中で造形するタイプの装置が開発されている²⁾。また、LBMの最新機種の中には、いったん真空排気を行ってからアルゴンガスを導入置換して造形する装置が開発されるようになった。

d. 予備加熱

EBM造形では、パウダーベッドの熔融プロセスの前にパウダーベッドの予備加熱を行う、ホットプロセス(Hot process)が基本であることは既に述べた。これは、電子ビームを予備加熱していないパウダーベッドに照射すると、粉末が霧状に舞い上がる(スモークと呼んでいる)現象が起こり、造形ができなくなる。このため、EBM造形

図3 金属積層造形技術の3要素と開発課題

図4 電子ビーム積層造形によって造形されたCCM合金製鎖帷子。サポートフリーで造形可能である。

プロセスでは、溶融プロセスの前にパウダーベッドの予備加熱のプロセスが必須である。予備加熱温度は金属粉末によって異なるが、およそ600～1100℃の間で加熱温度の設定が行われる。

EBMのホットプロセスの特徴は、造形中の熱応力による反りや曲がりの発生がなく、金属間化合物のような延性に乏しい材料においても、内部き裂が発生しない造形が可能となる点である。

一方、LBMプロセスでは、予備加熱はせず、室温と同程度の温度のパウダーベッドを溶融するコールドプロセス（Cold process）の場合が多く、造形物には残留応力が堆積する傾向が強い。EBMに比べて造形物に反りや曲がりが発生しやすく、脆性材料の造形時には内部き裂が発生しやすい。また、LBMプロセスでは、残留応力による造形物の変形を抑えるためのサポートの設計がより重要となる。

3. 金属積層造形技術の3要素と開発課題

図3に金属積層造形技術の主要な要素技術をまとめる。デザイン（構造設計）技術、マテリアル（金属粉末）技術、マシン（造形装置）技術の3要素により構成され、これらの3要素を有機的に連携させることによって金属積層造形技術は発展するものと考えられる。

本稿では、これらの3要素のうち、デザイン技術とマシン技術について述べる。

(1) デザイン（構造設計）技術

これまで、設計はできても機械加工では作れないものは、どんな優れた設計であっても形にならなかった。その場合は、機械加工が可能のように単純化された設計に変更を余儀なくされる。積層造形では、このような制約から解放され、いかなる複雑な設計であっても製造が可能である。「作れないものを作る技術」として期待が高い。

高付加価値化やコスト低減のため、製品の小型化・軽量化への要求はますます厳しくなるものと予想される。「剛性」と「軽量化」の両方を満足させる革新的な構造設計技

術として、「トポロジー構造最適化」が注目されている。このトポロジー構造最適化技術を取り入れたものづくりは、金属積層造形技術と組み合わせることで強みを発揮する。このように、金属積層造形技術は、設計技術の革新をも牽引するものづくり技術として発展するものと考えられる。

デザイン技術としてほかに、造形用3Dデータを扱うソフトウェアもまた重要となる。3Dデータの変換、修正から、サポートの設計、造形プレート（プラットフォーム）上への配置やスライスデータの作成に至るまで、3D積層造形プロセスの全体をカバーするソフトウェア技術も重要な技術である。

これらの工程を3Dモデルの前処理工程と呼ぶことにする。いかにこの前処理工程を機能的に実施するかが重要となる。例えば、電子ビーム積層造形では溶融プロセスに移行する前にパウダーベッドを600～1000℃の温度に予備加熱を行うことは前述した。この予備加熱により、パウダーベッドは仮焼結状態となり、造形中の造形物の自重を支える「サポート」としての役割を果たすことができる。この効果を3Dデータの予備処理プロセスに考慮することにより、より少ないサポート数の設定で造形が可能となる。図4に示したのは、サポートなしで造形されたCo-28Cr-6Mo合金製鎖帷子である。溶融部以外のパウダーベッドは仮焼結されているため、オーバーハングがある造形でもサポートフリーでの造形が可能となる造形例として象徴的である。このように、電子ビーム造形技術の特徴を詳細に分析することにより、3Dデータの予備処理プロセスに反映させることで、より複雑な形状の造形が容易となる。

今後の課題として、このような3Dデータの予備処理技術を高度化するためにも、造形プロセス中でのパウダーベッドの温度分布や、溶融池（メルトプール）の高精度なモニタリング技術の開発などが挙げられる。

(2) マシン（造形装置）技術

金属積層造形技術の実用化を促進するためには、造形速度の高速化のほかにも、機械加工技術に匹敵する造形精度

図5 電子ビーム積層造形での熔融部と未熔融部との境界領域のSEM像

および表面粗度の改善が求められる。以下に、造形装置技術に関するいくつかの問題について現状と開発課題について述べる。

① 電子ビーム制御技術の高精度化

パウダーベッドに電子ビームを照射してメルトプールを形成する際の電子ビームによるエネルギー密度 P は以下の式により表現することができる³⁾。

$$P (\text{J}/\text{mm}^3) = \frac{I \cdot V}{v \cdot d \cdot t} \quad (1)$$

ここで、 I は電流値、 V は電子線の加速電圧、 v は電子ビームの走査速度、 d は電子ビームの走査間隔、 t はパウダーベッドの積層厚さである。

まず、式(1)には表れていない電子ビーム径の大きさの、造形物品質に及ぼす影響について考える。図5に示す熔融部と未熔融部との境界領域（熔融領域端面）のSEM像から分かるように、熔融部端面の形状はビーム径（200 μm 以上）を反映して波状にうねっている。このことより、造形物の寸法精度や表面粗さの改善にとって、電子ビーム径の制御技術が重要であると理解することができる。ビーム径と表面粗さ、粉末粒径との関係について詳細な検討が必要であるが、電子ビーム径を小さくして、高精度に位置制御することができれば、熔融部端面をより微細化でき、表面粗さを改善することができる。したがって、電子ビーム径を現状の200 μm 程度から数 μm 程度までに絞り込む電子ビーム制御技術があれば、造形物の表面粗さを数 μm のオーダーまで改善することが可能になると考えられる。

以上のように、電子ビームの高精度な位置制御とビーム径の微細化技術により、造形物の寸法精度と表面粗さを機械加工仕上りのレベルまで改善することが可能となる。今後の電子ビーム制御技術のさらなる発展が期待される。

図6 電子ビーム積層造形パラメータの最適化

② プロセスパラメータの最適化

欠陥のない健全な造形物の作製には、形成されたパウダーベッドに最適なエネルギー密度の値を選択することが重要であるが、式(1)はエネルギー密度が同じであっても、走査速度、走査間隔、積層厚さなどのプロセスパラメータをさまざまに選択し得ることを意味している。すなわち、エネルギー密度を一定に制御するだけではプロセスパラメータの選択の仕方によって形成されるメルトプールの形状や温度分布などに違いが生じて凝固形態や凝固組織に違いが表れると予想される。

実際に、エネルギー密度一定でも、上述のプロセスパラメータを変えることにより形成される造形物の品質は大きく変わることが知られている。すなわち、プロセスパラメータの選択を最適に行わなければ、装置側の制御技術がいかに優れていても、欠陥のない健全な造形物を製作することができない。

図6に電子ビーム積層造形技術に関するプロセスパラメータをまとめる。ビーム条件（Beam strategies）として、ビーム電流、ビーム電圧、フォーカスオフセット（ビーム径）などがある。ビーム走査条件（Scan strategies）として、ビーム走査パターン、ビーム走査ルート、ビーム走査速度、ビーム走査間隔などがあり、これらの多数のパラメータを最適に制御することによりメルトプールの形状、温度分布を最適化し、メルトプールの balling 現象や溶け残りの発生に起因する欠陥が形成されない凝固プロセスとなる電子ビーム照射条件を最適化する必要がある。

さらに、以上のビームに関する最適パラメータ一つひとつに、粉末条件（Powder strategies）を最適に設定することが求められる。このように、電子ビーム積層造形技術において、装置側の電子ビームに関する制御技術がいかに高度化したとしても、造形パラメータの最適化が行われなければ、健全な造形物を製作することができない。すなわち、装置技術のほかにも、造形パラメータを最適化する技術があつて初めて電子ビーム積層造形技術による高度なもののづくりが可能となる。

電子ビーム（レーザー）積層造形技術の難しさは、以上述べた多数の造形プロセスパラメータの最適化が必要であること、その最適化には経験と勘だけに頼ったノウハウ構築だけでは完成させることが困難である点を挙げることができる。その意味からも、材料科学的な知見を基礎として、電子ビームと金属合金粉末との間で生じる相互作用を詳細に記述する学理の確立とともに、高精度なメルトプールの溶融・凝固プロセスのシミュレーション技術の開発が重要となる。

4. お わ り に

金属積層造形技術は、金属合金粉末を用いて、数十～数百 μm の局所領域の溶融ゾーン（メルトプール）を形成させ、その凝固過程の最適化に関する金属加工学的な学術分野であるといえる。既存の鑄造工学技術（Casting）に基礎を置いてはいるが、局所領域に関する溶融凝固現象を2次元と3次元にわたって incremental に高精度に制御する鑄造技術（Incremental casting）と捉えることができる。これに関連して、最近、電子ビーム積層造形技術を用いて、単結晶のガスタービンブレード製造や、金属ガラス部品の製造に関する研究開発が行われるようになってきている。今後、組織制御や新たな材料開発ツールとしての電子ビーム積層技術の可能性についても注目される。

謝 辞

電子ビーム積層造形技術について共同研究で取り組んでいる、小泉雄一郎、山中謙太、青柳健太、佐々木信之の各氏に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) L.E. Murr, S.M. Ramirez, D.A. Martinez, E. Hernandez, J. Amato, K.N. Shindo, P.W. Medina, F.R. Wicker and R.B. Gytan: Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies, J. Mater Sci Technol., **28** (2012) 1-14.
- 2) 中野弾, 清水透, 佐藤直子: レーザー積層法を用いた金属部品の積層技術, 型技術, **29** (2014) 28-31.
- 3) S. Bontha, N.W. Klinbeil, P.A. Kobryn and H.I. Fraser: J. Mater. Thermal process maps for predicting solidification microstructure in laser fabrication of thin-wall structures, Process. Technol., **178** (2006) 135-142.

千葉晶彦

1982 年東北大学工学部金属材料工学科卒業, 工学博士。1982 年東北金属工業(株)入社。1985 年(株)日立製作所入社。1988 年岩手大学工学部助手。2002 年岩手大学教授。2006 年東北大学教授。現在に至る。