

企画セッション | 部会・連絡会セッション：材料部会

2025年3月12日(水) 13:00 ~ 14:30 G会場(Zoomルーム7)

[1G_PL] 金属積層造形技術の現状とエネルギー機器材料応用への可能性

座長:岡 弘(北大)

[1G_PL01]

金属積層造形研究開発の現状

*千葉 晶彦¹ (1. 東北大)

[1G_PL02]

金属積層造形による耐熱合金の開発

*渡邊 誠¹ (1. 物材機構)

[1G_PL03]

金属積層造形の構造部材への適用に向けた取組

*藤谷 泰之¹ (1. MHI)

[1G_PL04]

総合討論

講演者全員

金属積層造形技術の現状とエネルギー機器材料応用への可能性

Current Status of Metal Additive Manufacturing Technology and Potential for Energy Equipment Material Applications

(1) 金属積層造形研究開発の現状

(1) Current Status of Metal Additive Manufacturing R&D

*千葉 晶彦¹¹東北大学

1. はじめに

金属積層造形（AM）技術は、航空宇宙、自動車産業などで革新的な製造技術として発展している。特に、電子ビーム積層造形（EB-PBF）は高エネルギー密度を持つ電子ビームを用い、従来の加工技術では困難だった形状や高性能部品の製造を可能にする技術として注目されている。しかし、EB-PBFではメルトプールの挙動や温度分布が製品品質に影響するため、欠陥を抑える高度なプロセス管理が求められる。本発表では、EB-PBFを中心に金属積層造形技術の現状を概説し、インシチュ監視技術を活用した無欠陥造形法について紹介する。特に、産業界での実用化に向けては、造形品質の安定化が重要な課題であり、EB-PBFやレーザー積層造形（LB-PBF）における欠陥低減や品質向上のための最新のプロセス制御技術についても紹介する。

2. EB-PBFとLB-PBFのプロセス特性の比較

近年、EB-PBFプロセスにおいてリアルタイムモニタリング技術が導入され、造形中にメルトプールの挙動を観察することで、欠陥の発生を予測し制御する研究が進められている。特に、EB-PBFとレーザー積層造形（LB-PBF）のプロセス特性を比較することで、それぞれの欠陥発生メカニズムを明らかにできる。EB-PBFではスパッタの発生が少なく、比較的安定したメルトプールが形成されるのに対し、LB-PBFでは蒸発反跳圧によるスパッタが多く、欠陥形成リスクが高い。特に、LB-PBFでは高エネルギー密度のレーザー照射によりキーホールモードの溶融が発生しやすく、これがポア（気孔欠陥）の主な原因となることがわかっている。

3. パウダーベッドの特性とメルトプールの形成

パウダーベッドの特性がメルトプールの形成に与える影響についても検討されている。粉末の形状や粒度分布、気孔率がメルトプールの安定性に影響を与えることが分かっており、球形度の高い粉末（PREP粉末）はエネルギー吸収率が均一であり、安定した造形が可能であるのに対し、不規則な形状を持つガスアトマイズ（GA）粉末では熱伝導率が低く、過度の溶融や未溶融が発生しやすい。さらに、粉末の充填密度や熱放射率の違いが、造形品質や内部欠陥の発生に関わることも明らかになった。

4. 天面平坦度による欠陥予測技術とプロセスマップ最適化手法

本発表では、メルトプールの直接監視ではなく、造形物の最上表面（天面）の平坦度を評価し、内部欠陥を予測する手法を紹介する。分析の結果、平坦な天面（Even Surface）を持つ試料は欠陥が少なく、不均一な天面（Uneven Surface）や多孔質な天面（Porous Surface）の試料ではポアや未溶融欠陥が多く発生することが確認された。この知見を基に、機械学習のサポートベクターマシン（SVM）を活用し、天面の平坦度と欠陥発生確率の関係を学習させ、最適なプロセス条件を導くプロセスマップ最適化手法を開発した。この手法により、ビーム電流、走査速度、エネルギー密度といったプロセス変数を最適化し、欠陥のない部品を製造する条件を特定できる。さらに、リアルタイム監視と組み合わせることで、造形中の異常を検出し、再溶融プロセスを適用して欠陥を修正するシステム構築にも応用可能である。

本発表で紹介する研究成果は、EB-PBFをはじめとする金属積層造形技術において欠陥の発生を抑えつつ高品質な部品を安定して製造するための基盤技術となる。特に、リアルタイム監視やプロセスマップ最適化手法の活用により、エネルギー機器を含む多様な産業分野への応用が期待され、高温高圧環境に耐える特殊材料や複雑形状部品の実用化を大きく前進させる可能性がある。今後は、完全自動化システムの開発や異なる材料系への適用研究を進めることで、従来の加工では困難だった高度な金属部品の製造領域をさらに拡張し、産業界における積層造形技術の活用を一層促進していくと考えられる。

*Akihiko Chiba¹¹Tohoku Univ.

金属積層造形技術の現状とエネルギー機器材料応用への可能性

Current Status of Metal Additive Manufacturing Technology and Potential for Energy Equipment Material Applications

(2) 金属積層造形による耐熱合金の開発

(2) Development of Heat-Resistant Alloys by Metal Additive Manufacturing

*渡邊 誠¹、草野 正大¹、北嶋具教¹、北野 萌一¹¹物質・材料研究機構

1. 概要

金属積層造形 (AM) プロセスは、コンピュータ上の CAD モデルに基づいて、複雑形状を実現する新しい製造加工技術として多くの関心を集めている。レーザ粉末床溶融結合法 (Laser Powder Bed Fusion, PBF-LB) は、最も広く使用されている AM プロセスの一つであり、プラットフォーム上に敷いた金属粉末層に対し選択的にレーザ照射を行う課程を一層ずつ繰り返すことで、三次元形状を造形する。PBF-LB ではレーザによる急速加熱と急冷によって微視組織が形成されるため、従来の casting や鍛造とは異なる AM プロセスに特徴的な異方性を有する微視組織が形成される。このため、プロセス-組織-特性の相関関係を理解し、要求される力学特性を実現するための組織制御技術を確認する必要がある。また、レーザによる溶融凝固過程では、凝固完了時に生じる凝固割れや、過入熱によるガス欠陥等の欠陥が生じる場合があり、これらを抑制することも重要である。さらに、部材形状が造形中の温度場に大きな影響を与えるため、同じレーザ条件でも部位によって組織が大きく変化する。新規部材の開発においては、このような AM プロセスならではの特徴についても理解し、プロセス最適化に取り組むことが不可欠である。このため実験による試行錯誤と共に計算による予測技術の活用も必須となる。

図 1 は Ni 基合金(Hastelloy X)について、PBF-LB を適用しレーザ出力と走査速度を変化させて円柱状試料を作成した場合の造形可否と xz 断面での欠陥状態を示している (z:造形方向)。入熱が高すぎると造形が困難となり、一方で、低くなると多くの欠陥が断面にて形成されていることが明らかであり、適切なプロセスウインドウの把握の重要性を示している。本講演ではジェットエンジンや発電タービンにおいて重要な耐熱合金を対象とし、PBF-LB プロセスにおけるプロセス条件と欠陥発生挙動の相関や、レーザ照射による溶融凝固挙動の予測、造形形状と微視組織や温度場の相関、造形体の力学特性等について紹介する。

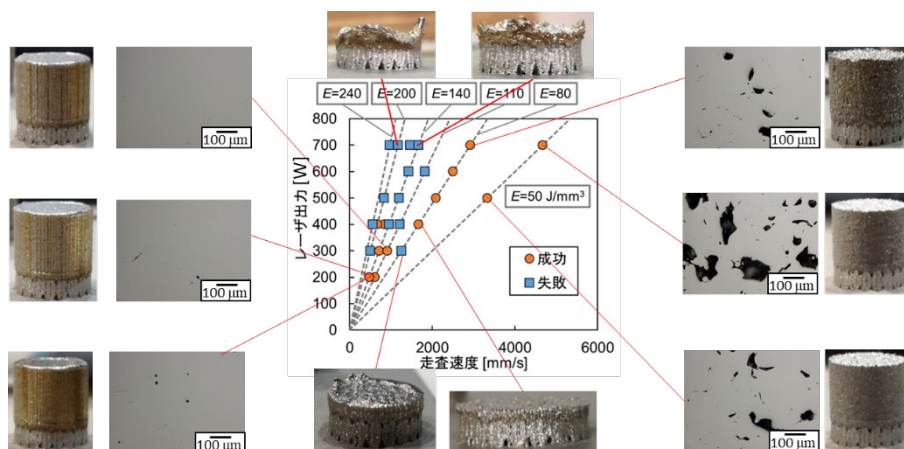


図 1. PBF-LB 法にて作成された Ni 基合金における、レーザ出力と走査速度が造形性および欠陥状態へ与える影響。

*Makoto Watanabe¹, Masahiro Kusano¹, Tomonori Kitashima¹, Houichi Kitano¹

¹National Institute for Materials Science, Research Center for Structural Materials.

金属積層造形技術の現状とエネルギー機器材料応用への可能性

Current Status of Metal Additive Manufacturing Technology and Potential for Energy Equipment Material Applications

(3) 金属積層造形の構造部材への適用に向けた取組

(3) Activities for Application of Metal Additive Manufacturing to Structural Components

*藤谷 泰之¹¹三菱重工業株式会社

1. はじめに

原子力の安全性・信頼性の確保には、構成機器の安全性・信頼性が重要である。これらの機器の製造には、高度な製作ノウハウと作業者の技量と共に、材料調達から納入まで長期のリードタイムが必要となっている。他方、国内では市場が見通せないことから、重要な機器の部品や材料を供給するサプライヤーの撤退など、サプライチェーンの衰退が始まりつつある。金属積層造形技術は、従来工法では高度な製作ノウハウと作業者の技量を要した複雑形状部品を、高品質でタイムリーに安定して供給できる可能性がある。金属積層造形技術には、主にパウダーベッド方式 (Powder Bed Fusion; PBF) とデポジション方式 (Directed Energy Deposition; DED) の2種類があるが、原子力機器へ適用する場合、大型機器への適用性が高い DED 方式が有力であることから、レーザを熱源とし、ワイヤを溶加材として用いた DED (Directed Energy Deposition) 方式の金属積層造形技術の開発を行った。

2. 概要

2-1. 高能率造形技術

大型部材へ金属積層を適用する場合、寸法制約や溶着効率の観点からレーザを用いた DED 方式が候補であり、製品適用に向け、経済性の観点から能率向上が必要となる。そこで、炉心槽の出口ノズルのように、比較的単純形状かつ調達リードタイムが長い部材を適用対象と想定し、大型レーザ熱源による均一な熔融池の形成と、熱源に対し効率的かつ安定的に溶加材を供給する造形システムを構築するとともに高能率造形材の特性評価を行った。構築した造形システムではレーザ発振器を最大5台、ワイヤを最大6系統同時に制御することにより1パスで幅約30mmのビードを16.5kg/hで造形できる目途が得られた。また、造形材の0.2%耐力、引張強度は最も入熱の大きい34.1 kJ/cmの条件において、いずれの造形方向についても SUSF316 規格値を満足する値であった。本造形手法は、単純な形状の造形に適しており、鍛造品・鋳造品を溶接・組立・加工して製作する部品の代替として付加造形することで、材料確保、リードタイムの短縮、製造コストの削減につながる可能性があることを確認した。

2-2. 高精度造形技術

原子炉容器の RCCA (Rod Cluster Control Assembly) ガイドチューブのように、複雑形状かつ調達リードタイムが長い部材を適用対象と想定し、レーザ熱源と細径ワイヤを利用した溶着分解能の微細化による高精度ニアネット造形により、造形後加工の最小化を実現するためのφ0.2mm 溶加材制御手法を検討した。厚さ1.2mm以下を狙った高精度造形の供試体の側面、および上面からは目視で識別可能なクラックや凹凸は認められず、観察した断面から内部欠陥は認められなかった。また、供試体の断面寸法に着目すると、観察した3断面のいずれも板厚は1.2mm以下、板厚精度は0.05mm以内であり、市販されている中で最も細いΦ0.6mmのワイヤを用いて造形した供試体と比較して、造形可能な最小板厚、および板厚精度が向上することを確認した。本造形手法は、精密な造形に適しており、ターゲット形状に合わせて高能率造形用と高精度造形用のビード生成条件を使い分けることで、造形後の機械加工を最小限にできる可能性があることを確認した。

*Yasuyuki Fujiya¹¹Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

企画セッション | 部会・連絡会セッション：材料部会

2025年3月12日(水) 13:00 ~ 14:30 G会場(Zoomルーム7)

[1G_PL] 金属積層造形技術の現状とエネルギー機器材料応用への可能性

座長:岡 弘(北大)

[1G_PL04] 総合討論

講演者全員

金属積層造形技術は、高度なものづくりが要求される複雑な形状の部品を、高い品質と高い設計自由度で短期間に安定供給できることから、産業界で普及が進んでいる。本技術の原子力産業分野への応用により、産業界のサプライチェーンの維持・強化に貢献するとともに、次世代エネルギープラント向け高信頼性原子炉構造材料の効率的な開発に寄与することが期待される。本セッションでは、金属積層造形技術の開発の現状と具体的な取り組みを紹介するとともに、エネルギープラント用構造材料への応用（次世代原子炉や小型モジュール炉への適用を目指す）の可能性について議論する。