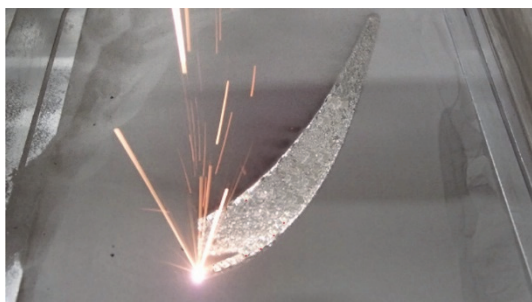


チャンバーフリーPBF で実現する 大型構造物の高精度ハイブリッド造形

High-Accuracy Hybrid Printing on Large Structures Enabled by Chamber-Free PBF



谷川 秀次*¹
Shuji Tanigawa

新井 貴*²
Takashi Arai

種池 正樹*³
Masaki Taneike

崎間 公久*⁴
Kimihiisa Sakima

小松 由尚*⁵
Yoshinao Komatsu

徳武 太郎*⁶
Taro Tokutake

Additive Manufacturing の造形方式の一つである Powder Bed Fusion プロセスを用いて、製品や部材上に複雑形状部材を直接積層造形することができれば、より多くのアプリケーションの創出が期待される。しかしながら、従来の Powder Bed Fusion プロセスでは、造形チャンバーに入らない大型部材や曲面上への造形が困難であるため、アプリケーションが制約されていた。そこで、チャンバー外で大型構造部材上に積層造形可能なチャンバーフリー Powder Bed Fusion プロセスの開発に取り組み、造形精度や材料特性の評価、及び実機部品を模擬した部材への造形検証を行い、実用性を評価した。

1. はじめに

金属材料の Additive Manufacturing (以下、AM) の造形方式の一つである Powder Bed Fusion (以下、PBF) プロセスは、基板上に敷き詰めた金属粉末をレーザーで溶融して積層造形する方式であり、複雑内部構造の積層造形が可能で、革新的な構造設計部材への適用が期待される。近年、PBF 装置の造形サイズの大規模化、マルチレーザスキャニングによる高速化、装置の低価格化が進んでいることから、アプリケーションのさらなる拡大が期待される。三菱重工業株式会社 (以下、当社) グループでは、2013 年度から各種製品への金属 AM の適用検討を進めており^{(1)~(5)}、発電用大型ガスタービン⁽¹⁾やロケットエンジン等では量産部品に適用済である。

PBF プロセスでは、基板 (ベースプレート) 上への積層造形が一般的であるが、製品や部材上に直接積層造形することができれば、より多くのアプリケーションの創出が期待される。しかしながら、従来の PBF プロセスでは、造形チャンバーに入らない大型部材や曲面上への造形が困難であるためアプリケーションが制約されている。

当社では、図 1 に示すとおり、チャンバー外で大型部材の曲面上に異材や微細構造物の積層造形が可能なチャンバーフリー PBF プロセスの開発に取り組んでいる。本報では、その開発状況と造形事例を記載する。

*1 総合研究所 ファクトリーイノベーションセンター 主席チーム統括 技術士 (金属部門)

*2 総合研究所 ファクトリーイノベーションセンター 主席プロジェクト統括

*3 総合研究所 強度・構造研究部 主席研究員 博士 (工学) *4 総合研究所 強度・構造研究部 技術士 (金属部門)

*5 総合研究所 流体研究部 主席研究員 博士 (工学) *6 総合研究所 流体研究部

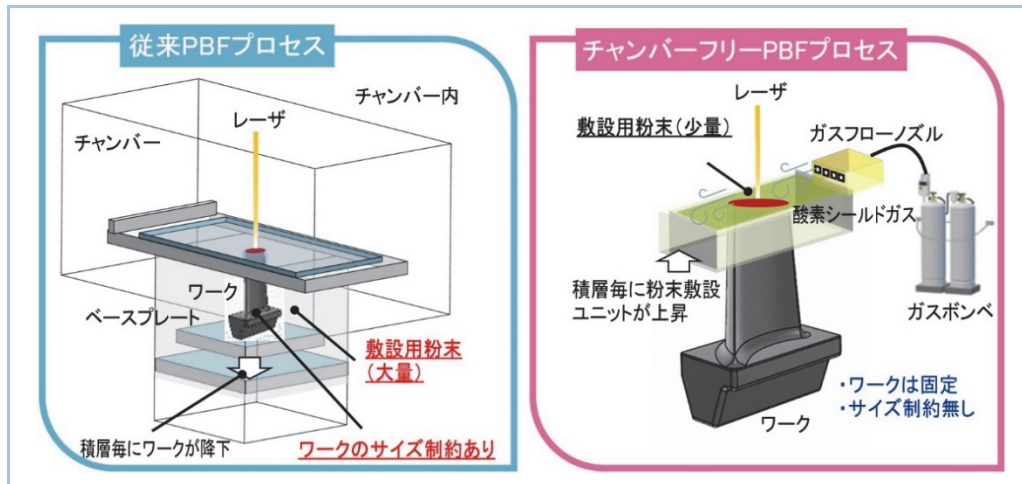


図1 チャンバーフリーPBF プロセスの概略図

2. チャンバーフリーPBF プロセスの特性

2.1 造形モデルの補正

造形対象部品(ワーク)には製作時の加工公差等が含まれるため、設計 CAD モデルどおりに積層造形すると部材と造形物の間で形状誤差が発生する。従って、事前に造形対象部品の積層造形部周辺を3次元形状計測し、計測結果に合わせて設計 CAD モデルの外形や内部構造の位置を補正した造形 CAD モデルを使用する。

2.2 昇降式粉末敷設ユニット

図1に示すとおり、粉末敷設ユニットを積層毎(積層高さ:30~60 μm)に昇降させており、従来PBFのように大型部品等の重量物を昇降させる必要がない。

2.3 ガスフローノズル

図2に示すとおり、チャンバー外の環境下で積層造形面近傍の酸素ガスのシールド性(排除性能)と造形時に発生する金属ヒュームの除去性を確保するため、ガスフローノズルを開発した。具体的には、ガスボンベから配管を経由して供給されたアルゴンガスが積層範囲内に均一に流れるようにガスフローノズルを設計し、樹脂 AM プロセスでガスフローノズルを製作した。その結果、開発したガスフローノズルを用いて、造形エリア内(□140 mm)の酸素ガスシールド性(5 ppm 以下)を確保しつつ、金属ヒュームを除去することができた。

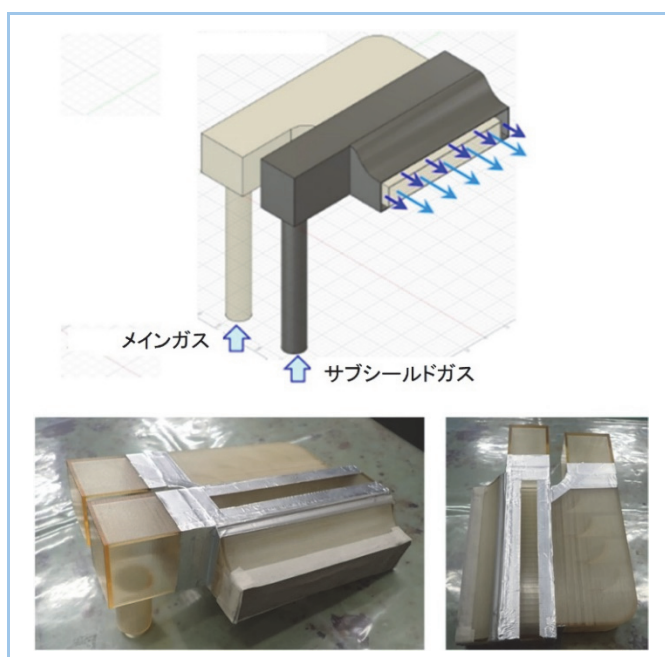


図2 チャンバーフリーPBF 用ガスフローノズル

2.4 チャンバーフリーPBF プロセスの手順

図3にチャンバーフリーPBFプロセスによるワーク上への積層造形の一例として、翼損傷部の補修手順を示す。上記の技術を適用することで、高品質高精度の積層造形を実現している。

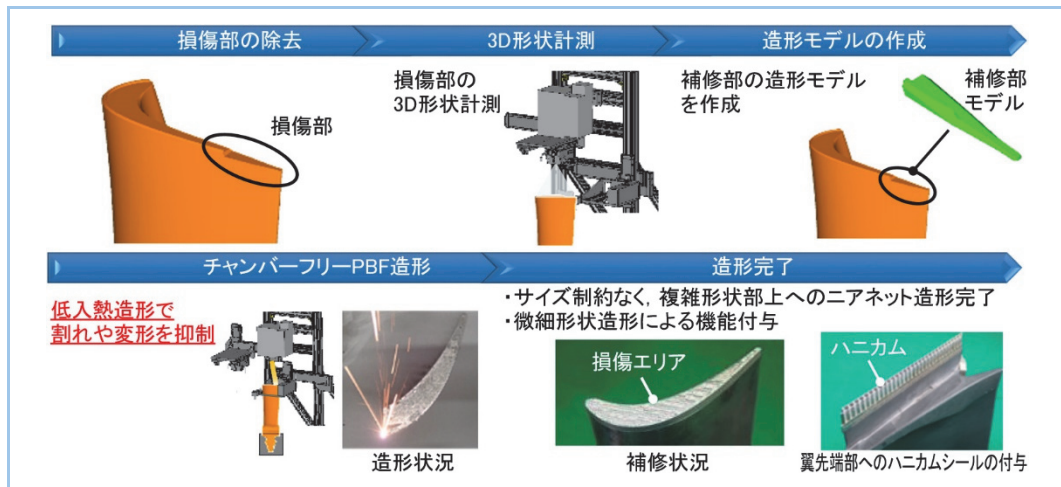


図3 チャンバーフリーPBF プロセスの造形手順

3. 曲面上への粉末敷設技術

曲面上に粉末を敷設する方法として、出口部に金属製メッシュ(金網)を備えた容器内に粉末を充填し、エアパルスや超音波等で容器を加振させて粉末を落下させながら、曲面上に容器を走査させて粉末を自動敷設する技術を開発した。具体的には、粉末の流動性を考慮した容器形状、及び振動の伝播特性を考慮した加振点の設置位置の適正化を行った。

本手法は、造形面の起伏や表面粗さの影響を受け難いという利点はあるが、粉末敷設厚みの安定性に課題がある。そこで、粉末敷設厚み、及び造形後の積層高さをレーザ変位計等のセンサで計測し、容器の走査速度(粉末敷設量)にフィードバックすることで粉末敷設厚みと積層高さを調整した。

開先試験片(深さ2 mm, 30° テーパー)上に金属粉末(インコネル 718)を敷設した結果を図4に示す。図4に示すとおり、粉末を5層分敷設した後の敷設厚みは0.15~0.25 mmであり、1層当たり換算すると0.03~0.05 mm/層であることから、PBF方式で積層造形可能な敷設厚み範囲内であることを確認した。

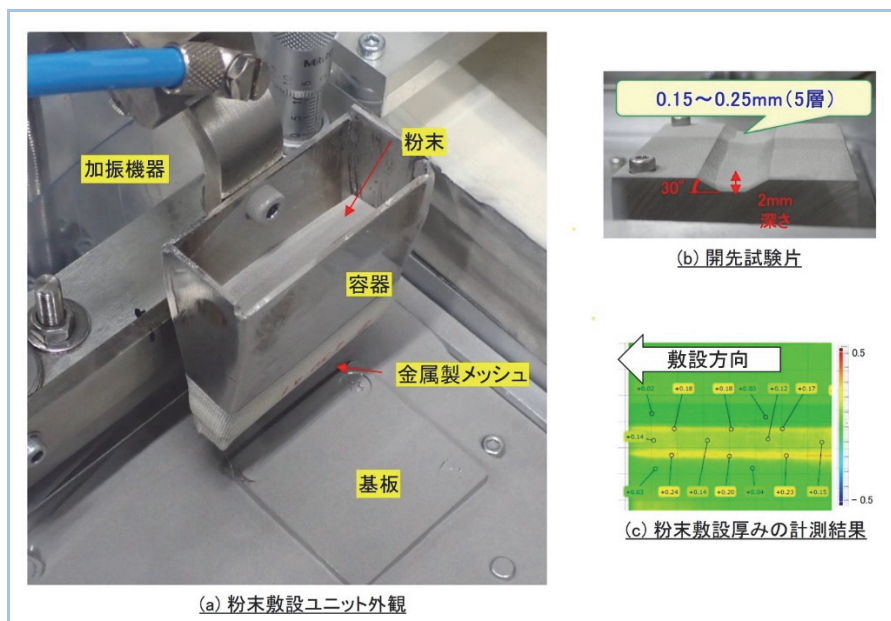


図4 曲面用敷設ユニット

4. 造形検証

4.1 要素試験

チャンバーフリーPBF プロセスの課題は、造形物の充填率、造形界面の位置決め精度、及び界面強度の確保である。そこで、造形エリア内に配置した円筒試験片上に(計 25 pc)、同じ断面形状を有する円筒モデルを造形し、造形物の断面組織観察(充填率計測)及び界面の位置決め精度(段差計測)を評価した。具体的には、造形位置とガスフローノズル近傍のガス圧(0.02 MPa, 0.04 MPa)を誤差因子として、円筒試験片(SUS316L 材)上に同じ断面形状を有する円筒モデル(SUS316L 材)を段差抑制のため0.8%膨張させてから、チャンバーフリーPBF 装置で円筒試験片上に積層造形した。また、造形前に各円筒モデルのレーザ照射位置をガイドレーザと同軸カメラで確認し、照射位置がずれている場合は補正した。このようにレーザ照射位置を容易に補正できる点は、チャンバーフリーPBF プロセスの利点の一つである。造形後、円筒部の断面組織観察、及び形状計測を行った。充填率は画像処理(二値化処理)で算出した。

その結果、図 5 と図 6 に示すとおり、造形エリア内の全造形物(計 25 pc)の充填率が 99.95% 以上、かつ造形界面における段差計測値が平均 0.037 mm(標準偏差 0.024 mm)であり、従来 PBF プロセスと同様に、チャンバーフリーPBF プロセスでも高品質かつ高精度の積層造形が可能であることを確認した。また、図 7 に示すとおり、薄肉円筒や薄板部材に対しても同様に精度良く積層造形可能であることを確認した。

続いて、造形界面の引張強さを評価するため、Ni 基合金基材上(インコネル 738 相当材)にインコネル 625 材をチャンバーフリーPBF プロセスで造形し、造形界面が評価部となるように試験片を作成し、常温で引張試験を行った。その結果、図 8 に示すとおり、耐力、引張強さ、及び伸びが ASTM 規格値を満足していること、引張試験片が造形界面で破断されず十分な界面強度が確保されていることを確認した。

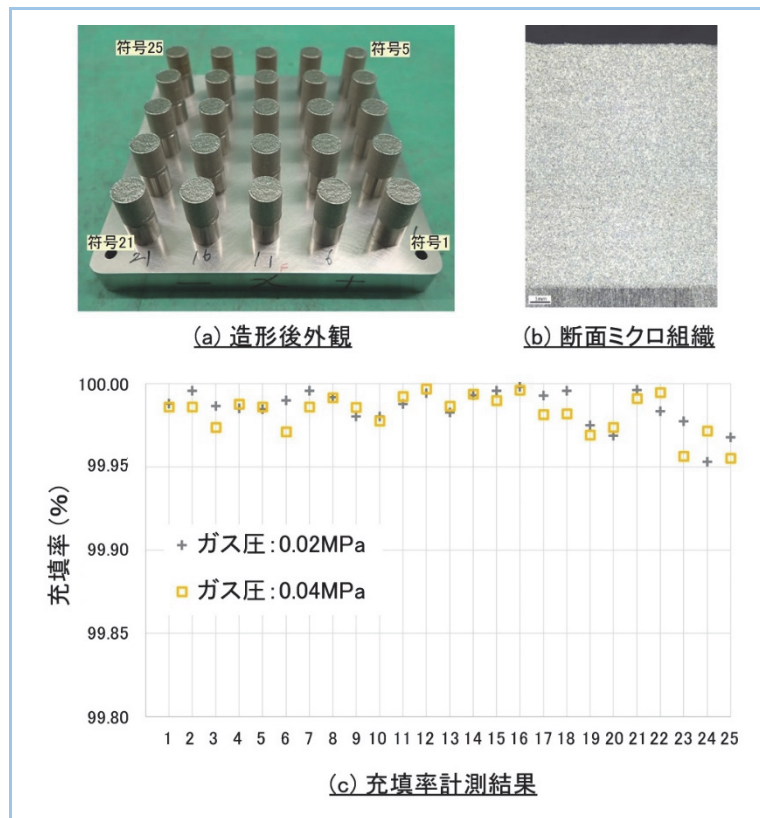


図5 円筒試験片の充填率計測結果

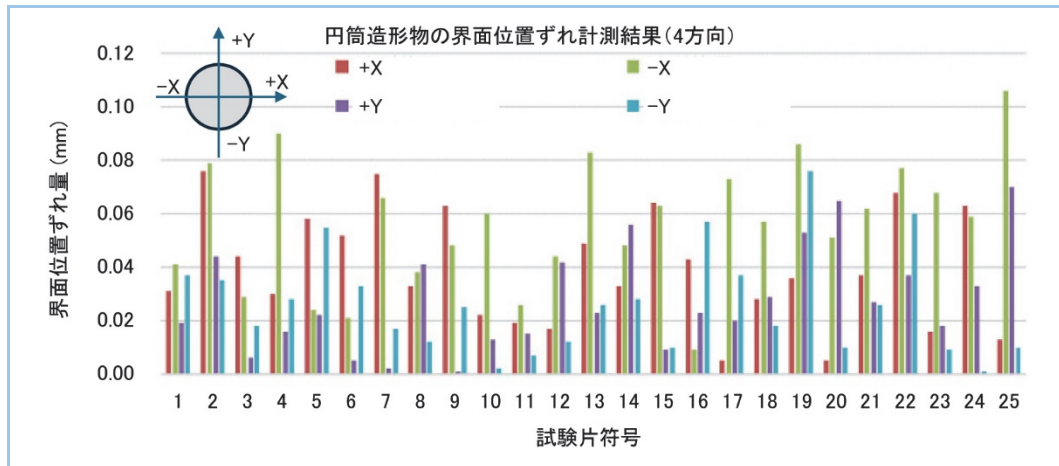


図6 円筒試験片の造形界面の位置ずれ量

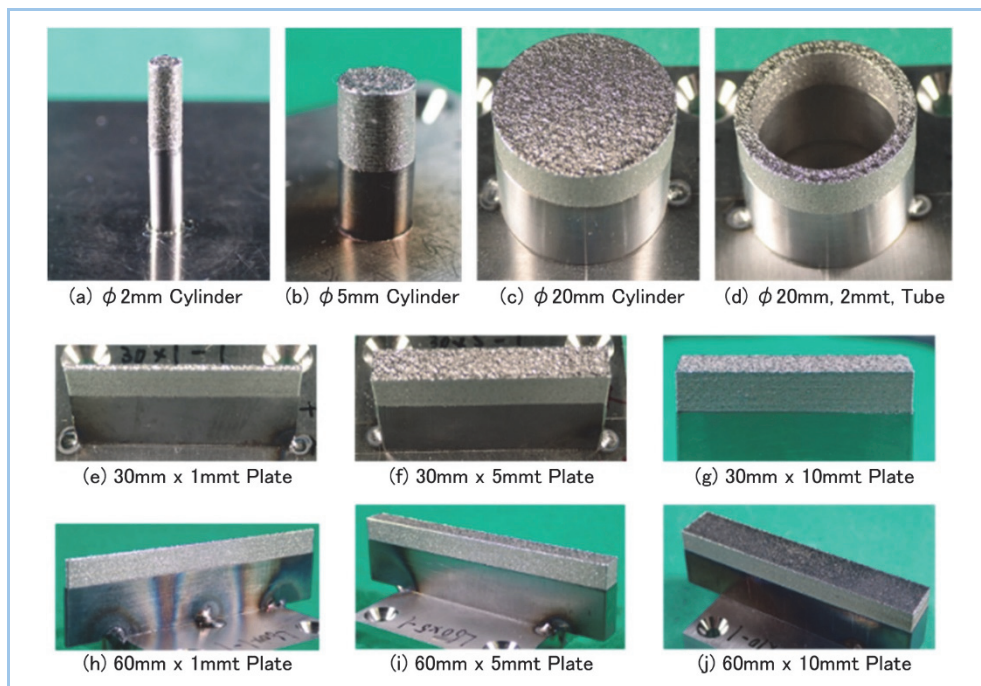


図7 各種試験片の造形後外観

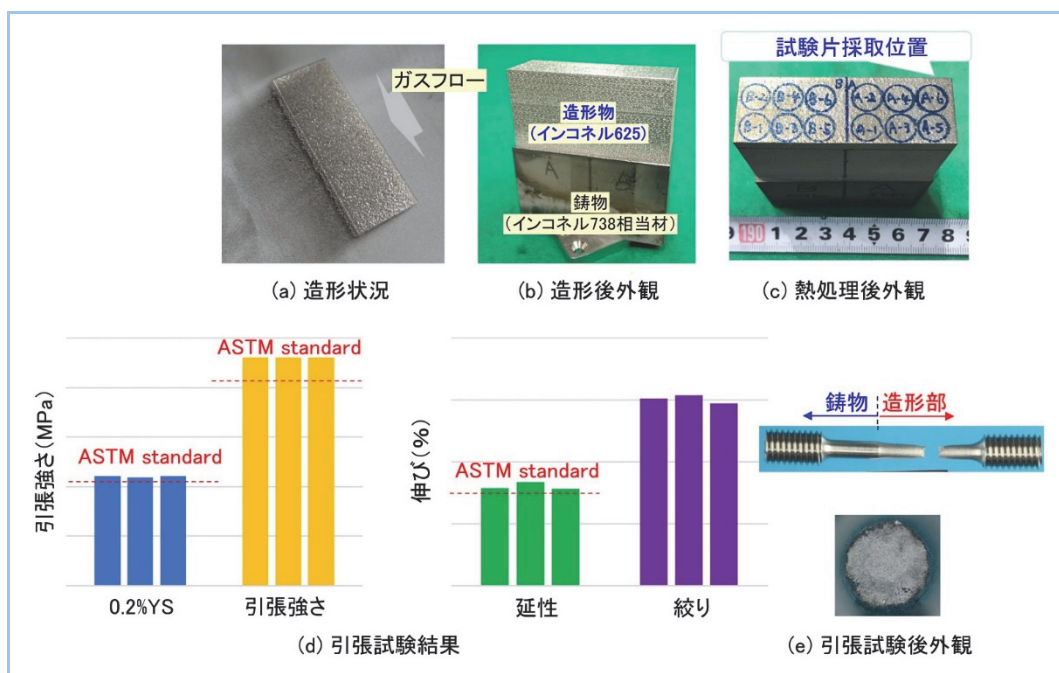


図8 基材と積層造形物の界面引張試験結果

4.2 微細内部通路上への積層造形

タービン翼先端の損傷を模擬した微細内部通路を含む鋳物部品上にチャンバーフリーPBF プロセスで補修部分(インコネル939 相当材)を積層造形した。具体的には、基材を3次元形状計測し、内部通路を含む輪郭線に沿うように造形モデルを微調整するとともに、同軸カメラを用いてレーザー照射位置を補正した。また、積層造形前に微細通路をマスキングし、粉末が敷設できるようにした。マスキング材は、造形後に熱処理または仕上げ加工で除去した。その結果、図9に示すとおり、微細内部通路を精度良く積層造形することができた。

また、製品性能向上を狙い、部材の表面上に微細内部冷却通路を備えた構造をチャンバーフリーPBF で局所造形する技術の開発にも取り込んでいる。図10に示すとおり、本プロセスを用いて微細内部冷却通路の形成が可能であることを確認した。

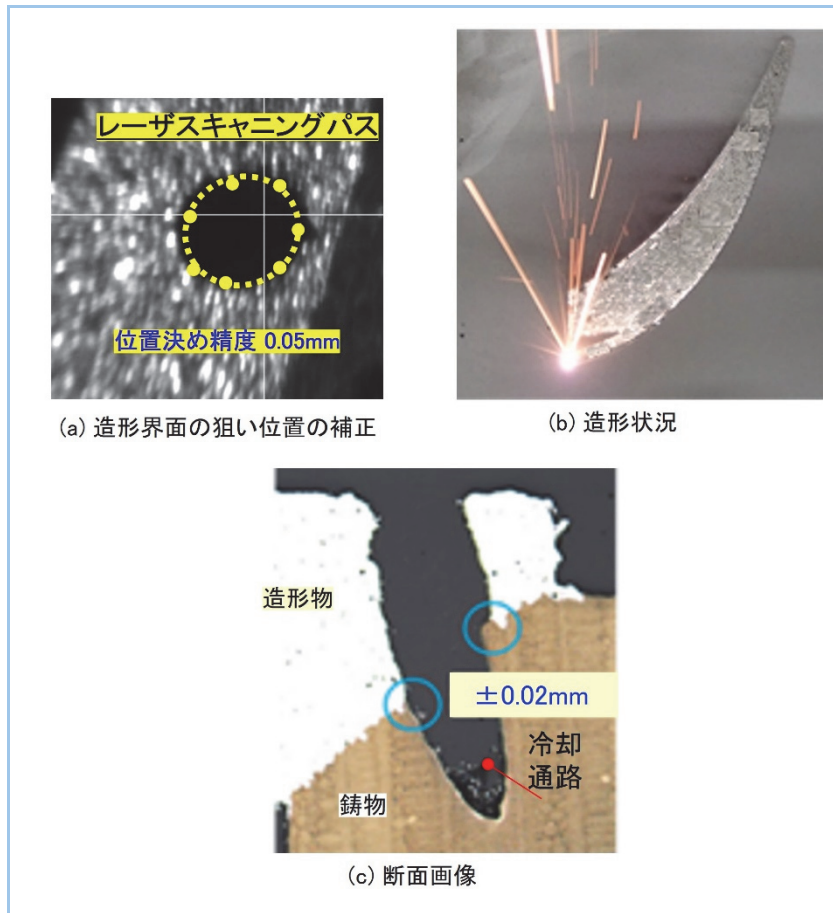


図9 タービン翼模擬部品上への微細通路造形

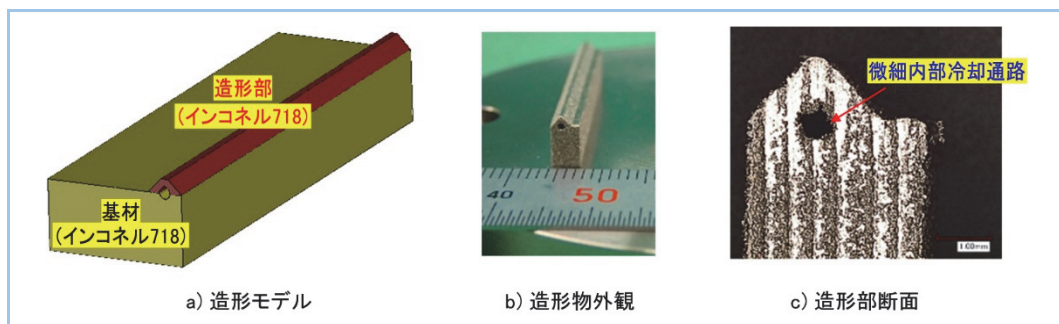


図10 チャンバーフリーPBF による微細内部冷却通路の造形

4.3 薄肉部上へのハニカム造形

タービン翼の翼頂先端を模擬した薄板上に、チャンバーフリーPBF プロセスで薄板(板厚0.2 mm)のハニカムシール(インコネル 625 相当材)を積層造形した。図11に示すとおり、薄板部材であっても精度良く積層造形できることを確認した。

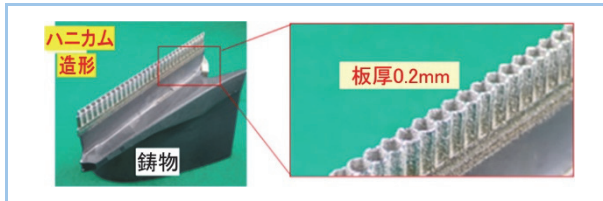


図 11 チャンバーフリーPBF による薄板上へのハニカムシールの造形

4.4 開先内の積層造形

部材のき裂や欠陥部の局所補修を模擬し、き裂部を除去した開先内部への積層造形を行った。具体的には、Ni 基合金の鋳物部品（インコネル 738 相当材）を開先加工し、形成した開先部の 3 次元形状計測結果に基づき、開先内部を充填する造形モデルを作成した。造形モデルは、開先の斜面部での融合不良の防止や余盛部の加工代確保のため、0.5 mm の余肉を付与した。また、開先内への粉末敷設は、3 章に記載した曲面上への粉末敷設技術を適用し、チャンバーフリーPBF プロセスで開先内部をインコネル 738 相当材で積層造形した。その結果、図 12 に示す通り、開先内部を高充填率、かつ傾斜部で融合不良なく積層造形できることを確認した。

続いて、チャンバーフリーPBF プロセスで Ni 基合金（インコネル 738 相当材）の強度試験片を積層造形し、鋳物と同条件で熱処理を行った後、高温引張試験を行った。その結果、図 13 に示す通り、鋳物と同等以上の耐力であることを確認した。また、引張試験片が造形界面で破断されず、十分な界面強度が確保されていることを確認した。

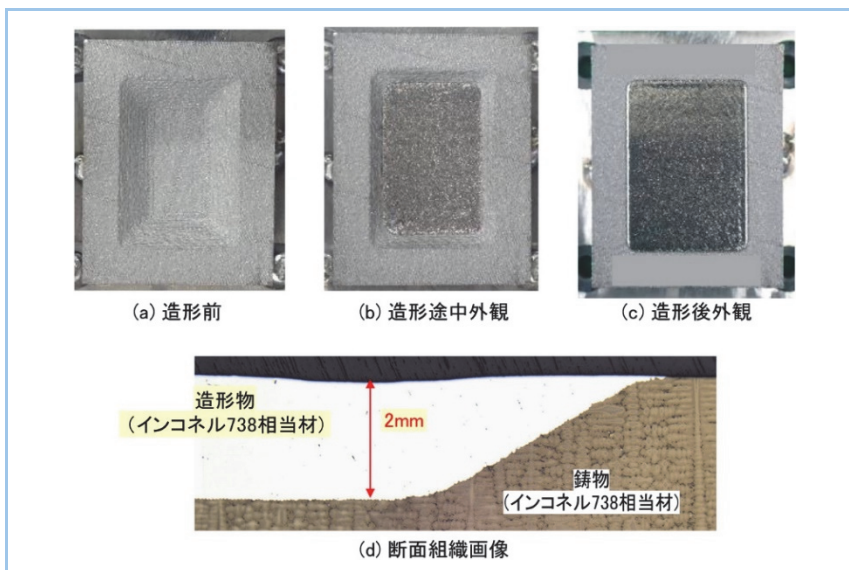


図 12 チャンバーフリーPBF による開先面上への積層造形

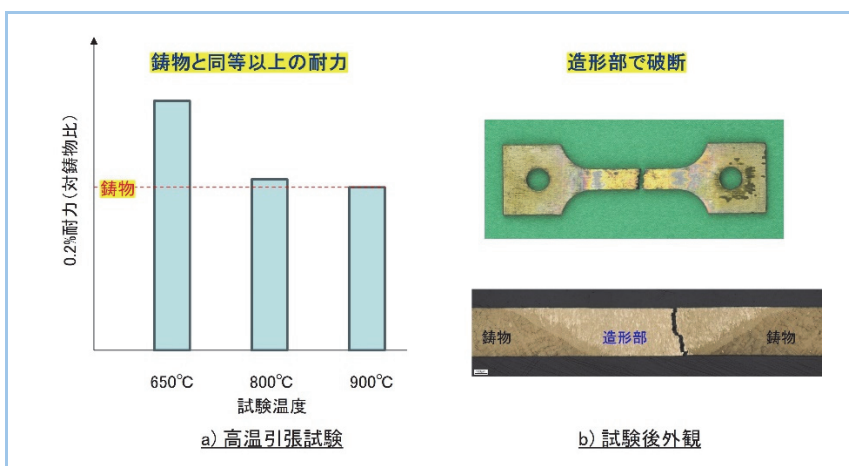


図 13 開先内の積層造形物の高温引張試験結果

4.5 試験用サンプルへの積層造形

試験用サンプルの採取が困難な実機製品や、数量が限られているサンプルでは、材料試験に使用するサンプルのサイズを小さくしたいというニーズがある。そこで、チャンバーフリーPBF で小サイズのサンプル上に試験片掴み部を積層造形し、通常寸法の試験片を製作する手法を試行した。チャンバーフリーPBF は、極低入熱プロセスで熱影響部が極めて小さいため、サンプルの材質劣化や変形を抑制することができる。

具体的には、低合金鋼サンプル(SQV2A 材)に対して、図 14 に示す手順で試験片掴み部を積層造形し、シャルピー試験片を製作した。図 15 にシャルピー試験片のサンプル部と積層造形部の断面組織観察結果とビッカース硬さ試験結果を示す。図 15 に示すとおり、熱影響部(HAZ)が 0.1 mm と極めて小さいことを確認した。シャルピー試験結果を図 16 に示す。吸収エネルギーは通常試験片と同等であること、試験後の外観から、AM 積層造形部ではなく、サンプル部で破断していることを確認した。本プロセスによる適用性が確認されたことから、今後、実用化検証を検討していく。

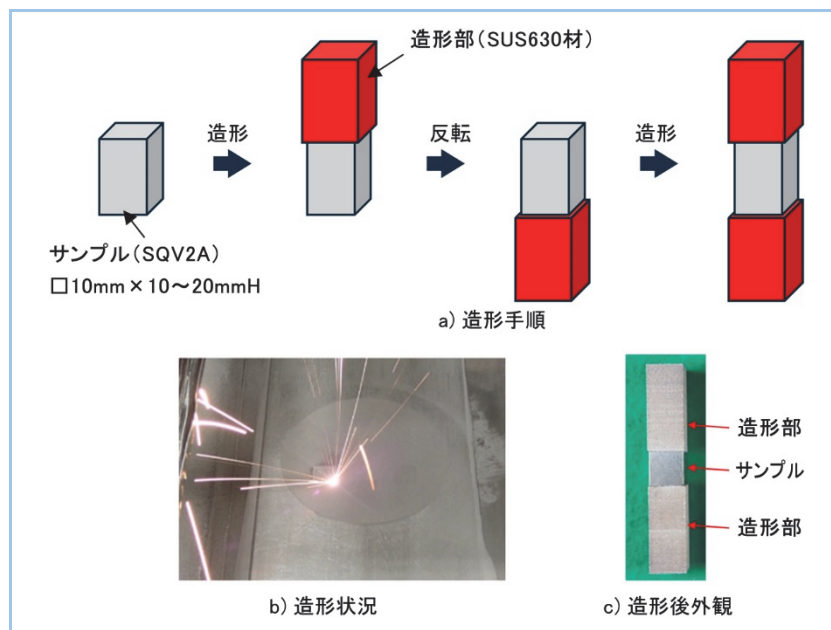


図 14 チャンバーフリーPBF による試験片持ち手部の再生造形

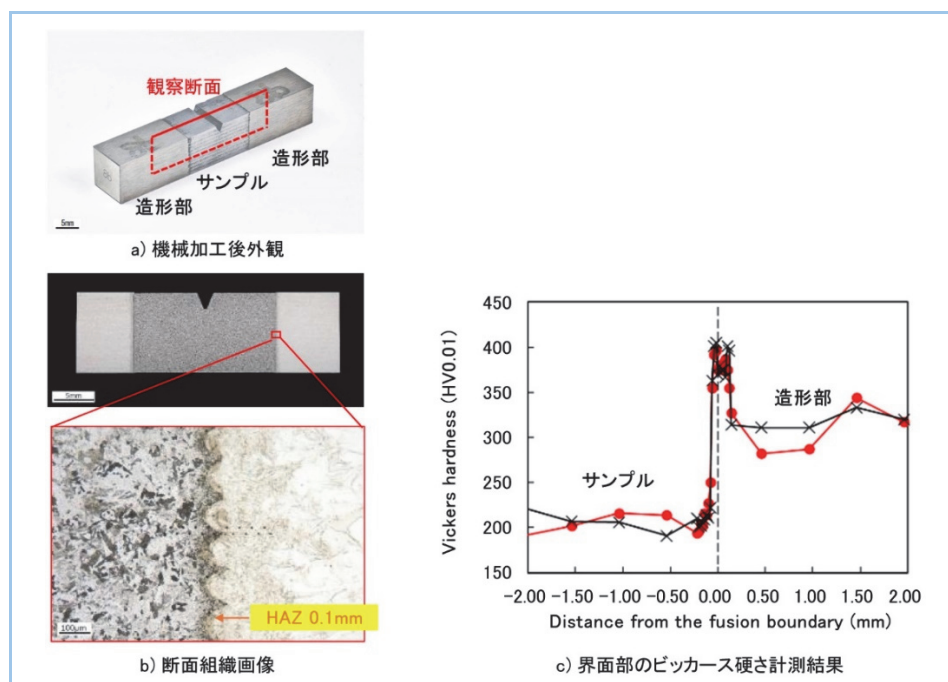


図 15 サンプルと積層造形部界面の断面組織及びビッカース硬さ試験結果

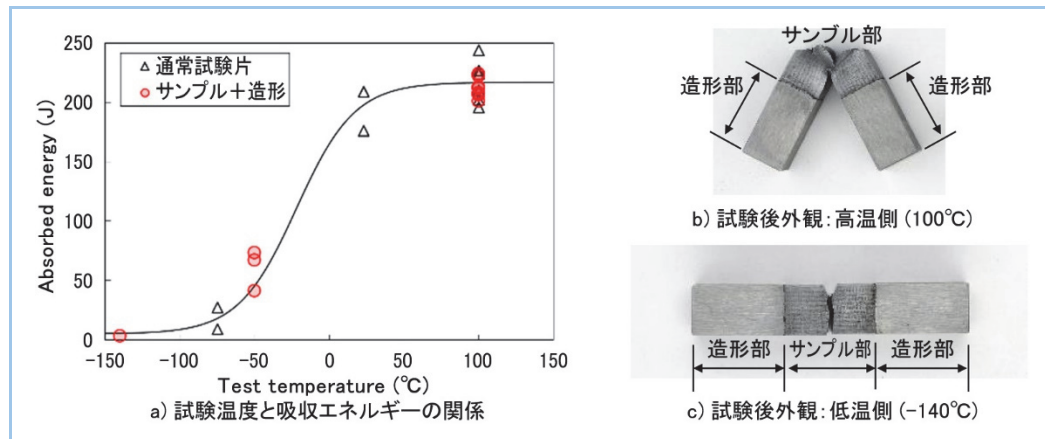


図 16 シャルピー試験結果

5. まとめ

当社グループにおける金属 AM 技術開発の取組みとして、チャンバーフリーPBF プロセスによる大型部品や曲面上への直接造形技術の開発状況と造形事例を記載した。今後の課題は、本プロセスの自動化や量産適用を踏まえた関連技術の確立であり、実機適用候補部材を対象に開発を進め、早期実用化を目指していく。また、本プロセスに限らず、AM 技術全般の開発に取り組む、当社製品の Quality, Cost, Delivery を向上させていく。

参考文献

- (1) Masahito Kataoka et al., DEVELOPMENT OF METAL AM TECHNOLOGY FOR GAS TURBINE COMPONENTS, J. Glob. Power Propuls., Soc. 2023: 49-65
- (2) 石出孝ほか, 3 次元金属積層造形技術実用化に向けた施工技術開発, 三菱重工技報, Vol.55 No.2 (2018)
- (3) 高橋孝幸ほか, 航空機における AM 技術開発の取り組み, 三菱重工技報, Vol.58 No.4 (2021)
- (4) 谷川秀次ほか, ガスタービン高温部品の金属 AM 技術開発, 三菱重工技報, Vol.59 No.1 (2022)
- (5) 中拂博之ほか, 金属 Additive Manufacturing 技術を活用したコンパクト高性能熱交換器の開発, 三菱重工技報, Vol.60 No.1 (2023)