

ガスタービン高温部品の金属 AM 技術開発

Development of Metal AM Technologies for Application of Real Gas Turbine Parts



谷川 秀次*1
Shuji Tanigawa

種池 正樹*2
Masaki Taneike

伊藤 竜太*3
Ryuta Ito

小牧 孝直*4
Takanao Komaki

本山 宜彦*5
Norihiko Motoyama

片岡 正人*6
Masahito Kataoka

三菱重工(以下, 当社)グループでは, 複雑形状の部材を製造できる手法として, AM (Additive Manufacturing) の開発・適用検討を進めている。大型ガスタービンでは, 高温部品の冷却空気量低減による性能向上を狙いとし, 従来工法では不可能な AM ならではの複雑内部冷却構造の採用を検討している。AM は, 造形装置に 3D CAD データをインプットすれば直ちに部品が造形・実用化できるものではなく, 造形条件, 後加工条件の適正化, インプロセスモニタリングによる品質保証等の技術開発に加えて, 積層造形物の特性や制約を踏まえた革新的な設計思想が必要である。本報では, ガスタービン部品を対象とした金属 AM 技術開発について述べる。

1. はじめに

金属 AM の造形方式の一つである LPBF (Laser Powder Bed Fusion) 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させて積層造形する方式であり, 複雑内部構造の造形が可能で, 革新的な構造設計部材への適用が期待される。近年, LPBF 装置の造形サイズの大型化, 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, 適用部材のさらなる拡大が期待されており, 当社グループでも, 2013 年度から各種製品への金属 AM の適用検討を進めている⁽⁴⁾。例えば, 大型ガスタービンでは, 高温部品の冷却空気量低減による性能向上を狙いとし, 従来工法では不可能な金属 AM ならではの複雑内部冷却構造の採用を検討している。また, 開発リードタイム短縮を目的とした燃焼器部品のラピッドプロトタイピングや従来製造工法の置き換え(溶接組立部品の一体造形)によるコスト低減に関しても金属 AM の適用を進めている。

一方, 金属 AM の適用に向けては検討すべき課題があり, 造形変形の抑制, 高温部材としての材料特性の確保, 品質保証等の技術開発に加えて, 積層造形物の特性や制約を踏まえた革新的な設計思想が必要である。本報では, ガスタービン高温部品を対象に, 金属 AM 技術の開発状況を報告する。

2. 高精度造形技術

金属 AM では, 造形中に熱変形が発生するため, 設計モデル通りの形状で造形する技術が必要である。円筒等の単純形状であれば, 熱変形による収縮分だけモデルを一律でオフセット(収縮率調整)して造形すれば, 造形精度を向上させることができる。しかし, 3次元形状の複雑構造部材では, 各種変形モード(収縮, 反り, 曲げ)が多方向に局所で発生するため(図1), 前述の一

*1 総合研究所 製造研究部 技術士(金属部門)

*2 総合研究所 製造研究部 主席研究員 工博

*3 総合研究所 ターボ機械研究部 技術士(機械部門)

*4 エナジートランジション&パワー事業本部 GTCC 事業部 高砂ブレード・燃焼器製造部

*5 エナジートランジション&パワー事業本部 GTCC 事業部 ガスタービン技術部 グループ長

*6 エナジートランジション&パワー事業本部 GTCC 事業部 ガスタービン技術部 主幹技師

律での収縮率調整では対処できない。そこで、積層造形シミュレーションで造形変形を予測し、変形を打ち消す方向に造形モデルをオフセット補正する手法と変形抑制用サポートを設置する手法を構築した(図2)。具体的には、造形部のサイズや材質に合わせて、市販の積層造形シミュレーションの計算式や入力値をカスタマイズして解析精度を向上させるとともに、造形解析での予測が困難な造形物同士の合流部における急峻な変形部に対しては、変形方向に対して高剛性となる形状のサポートを設置している(図3)。本手法を適用し、後述のガスタービン部品を含め、各種部材の高精度造形を実現している(図4)。

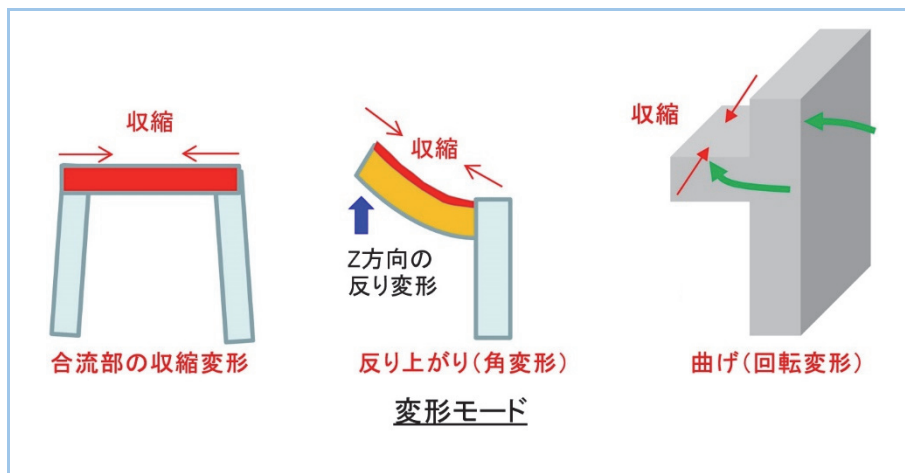


図1 変形モード

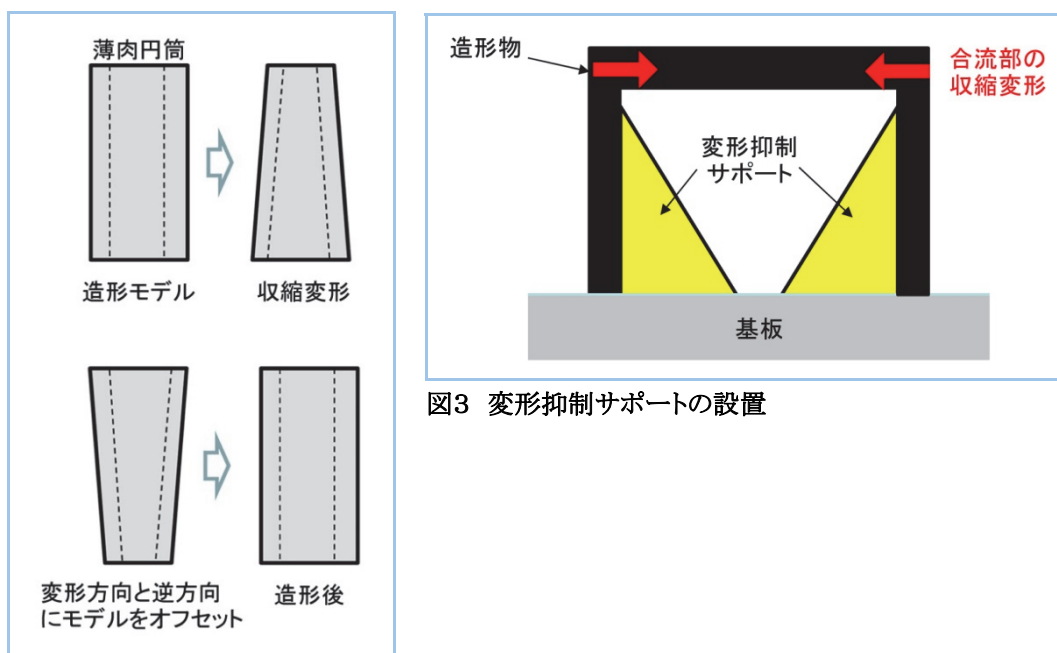


図2 造形モデルのオフセット補正

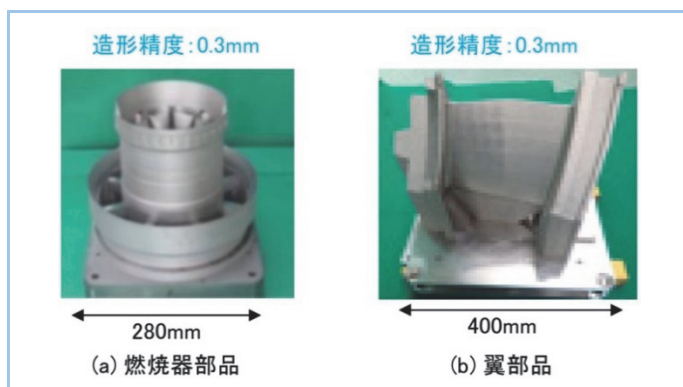


図4 高精度造形の事例

3. AM 造形物の材料特性改良

ガスタービン高温部品では高温強度の高いニッケル基超合金の鍛造・圧延材や鋳造材が主に使用されている。これら合金の粉末を用いて LPBF プロセスで造形した AM 材料は、造形時の熔融・凝固における冷却速度が、従来製造法に比べ極めて大きいため、材料組織が従来材とは大きく異なり、結晶粒径や析出物が微細化する傾向にある(図5)。高温で使用される部材については、微細すぎる結晶粒径は高温クリープ等の材料強度に悪影響を及ぼす場合が多い。また造形後の材料組織は造形方向に伸長した微細な柱状晶となるため、材料特性に強い異方性が生じ、応力負荷方向によっては強度特性が著しく低下する場合がある⁽⁶⁾。よってこれら AM 材料の特性を理解した材料組織制御が重要になる。

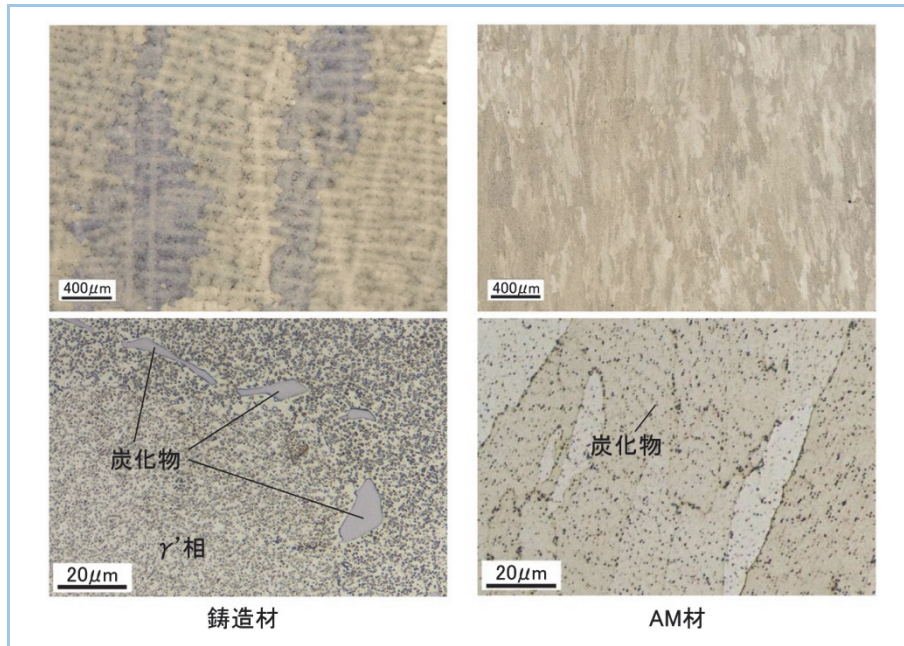


図5 鋳造材・AM 材の結晶組織と析出物の違い

これまでの鋳造、圧延材についての材料特性の知見を踏まえ、AM 材特有の急冷凝固の影響を考慮し、材料計算技術も活用しながら、材料成分、造形条件、熱処理条件等のパラメータ調整を進めてきた。一例として、熱処理前後での結晶形態変化及び残留歪 (Kernel Average Misorientation, KAM 値) を EBSD 分析にて調査した結果を図6に示す。造形後の微細な柱状晶及び高い残留歪を解消すべく熱処理条件等の調整を行うことで、比較的等軸な結晶粒を得ることができ、強度特性の異方性を大きく低減した。合わせて高温クリープ寿命についても従来の鋳造材と同等の特性を得ることができた(図7)。本知見は実証試験に供した分割環だけでなく、各種ニッケル基 AM 材へも展開し、順次材料強度データ整備を進めている⁽⁷⁾。

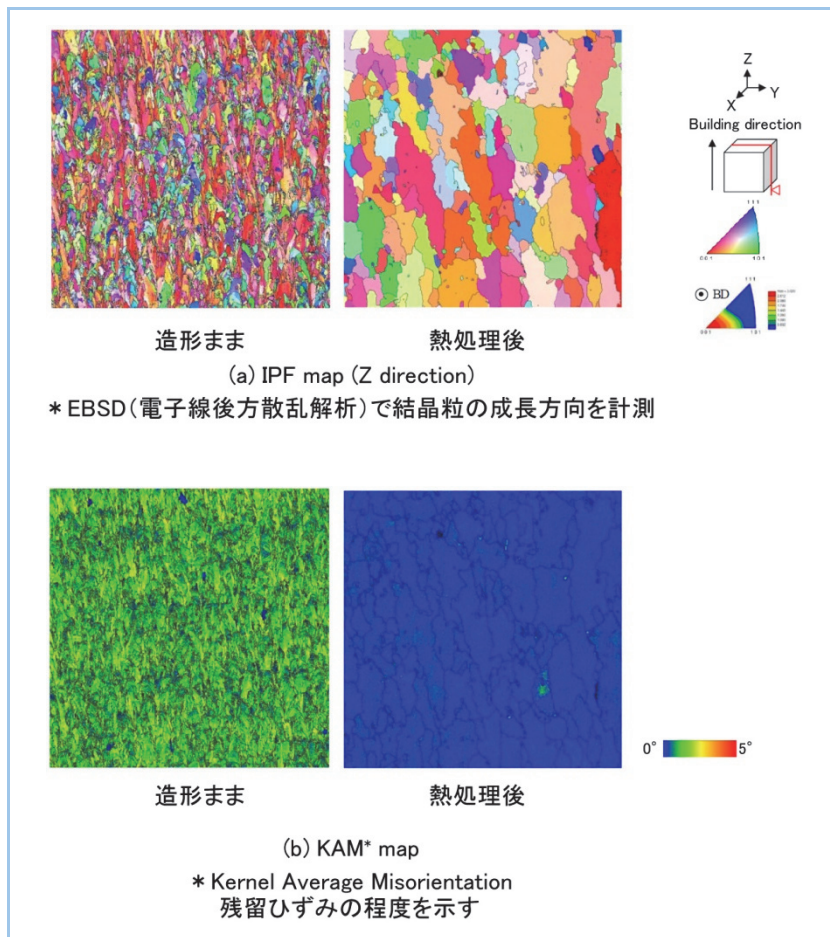


図6 熱処理による組織異方性, 残留ひずみの低減

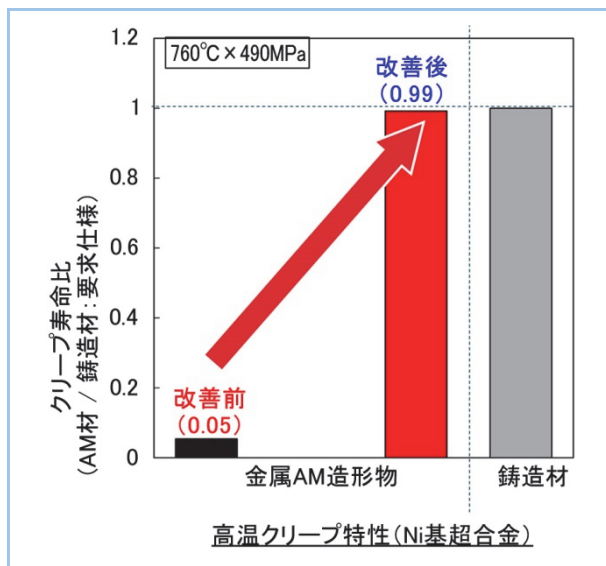


図7 積層造形条件と熱処理条件による高温クリープ特性の改善

4. 品質モニタリング技術

金属積層造形は、造形完了までの積層時間が数十時間にも及ぶが、施工後の品質検査で不合格となると大きな手戻りとなる。そこで手戻り防止及びトレーサビリティ確保を目的とし、造形中の施工状況としてレーザー照射部の状態(熔融池からの発光)を対象としたモニタリング技術と品質判定手法の開発を進めている⁽⁴⁾。本報では、造形プロセス監視手法として、OT (Optical Tomography) の適用検討状況について述べる。

OT は、造形中のレーザー照射部の熔融池からの発光強度を CMOS カメラで露光時間を一定時

間設けて捉え、その積算値及び最大値より、プロセスの異常(レーザ出力の変動や保護ガラスの汚れによるレーザビームの散乱等)や造形面近傍の開口欠陥を検知する技術である。

エネルギー密度(レーザ出力, 走査速度, ハッチ間隔をパラメータとして変更)を各種変化させた際に OT で捉えた発光の検出画像及び発光強度の積算平均を図8に示す。図8より, エネルギー密度に対応して発光強度の積算平均が変化していることがわかる。発光強度の積算平均はエネルギー密度だけでなく, 造形物の温度や形状によっても変わる。今後, 取得データを増やし, プロセス異常の検出精度を高めることで, 造形物の品質(充填率)を保証するための発光強度のクライテリアを求める等, AM の品質管理としてモニタリング技術を活用していく予定である。

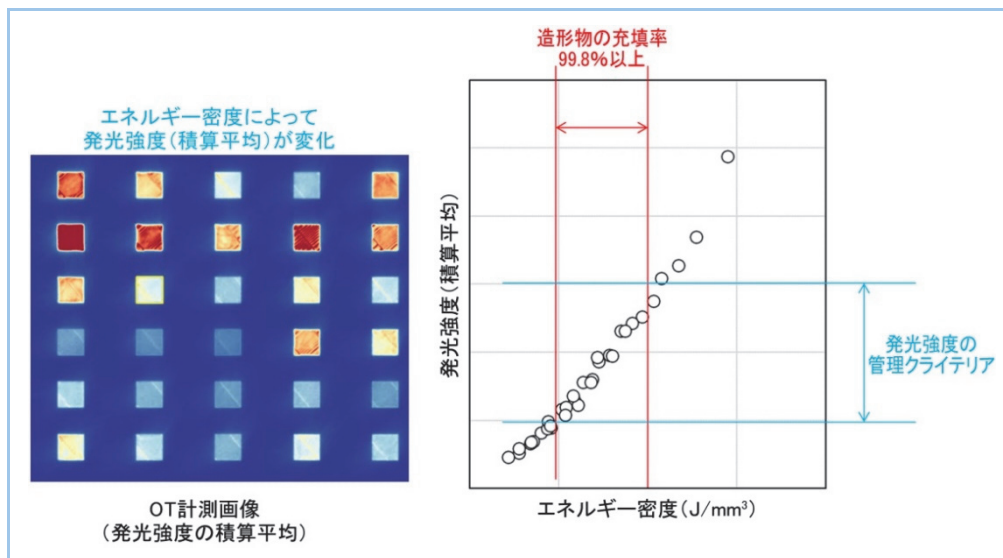


図8 エネルギー密度と発光強度(積算平均)の関係

5. ガスタービン部材への適用状況

ガスタービン複合発電は, 再生可能エネルギーと共存する最もクリーンで経済的な火力発電所を提供できるシステムで, 今後も発電市場をリードすると予想されており⁽¹⁾, 当社でも機種開発を進めている。本報では, 大形ガスタービン部品へのAM適用例の中から(図9), AMならではの複雑冷却構造による性能向上, ラピッドプロトタイプングによる開発期間の短縮, 溶組部材の一体造形によるコスト低減技術の開発状況について述べる。

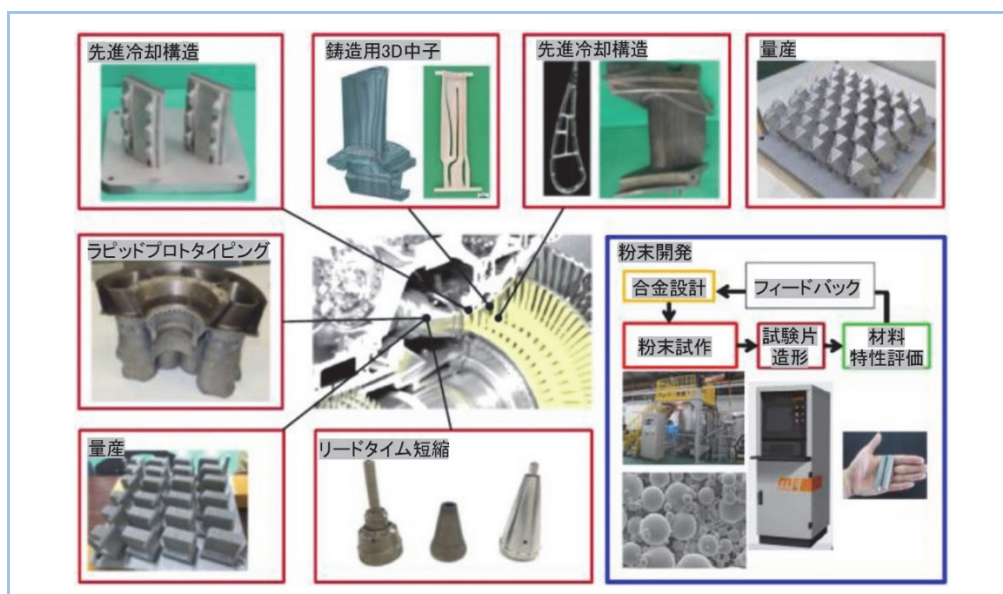


図9 大形ガスタービン部品への金属AM適用例

(1) ガスタービン分割環

高温部品の一つである分割環に対して、AMならではの内部冷却通路を設計し、ガスパス面の温度分布のばらつきを減らし、従来よりも冷却性能を向上させた。造形側では、変形シミュレーション、材料組成改良、熱処理条件の適正化に取り組み、要求品質（強度、形状精度）を確保することができたため、当社高砂地区の実証発電設備で実機環境下での信頼性評価を行っている（図 10）。

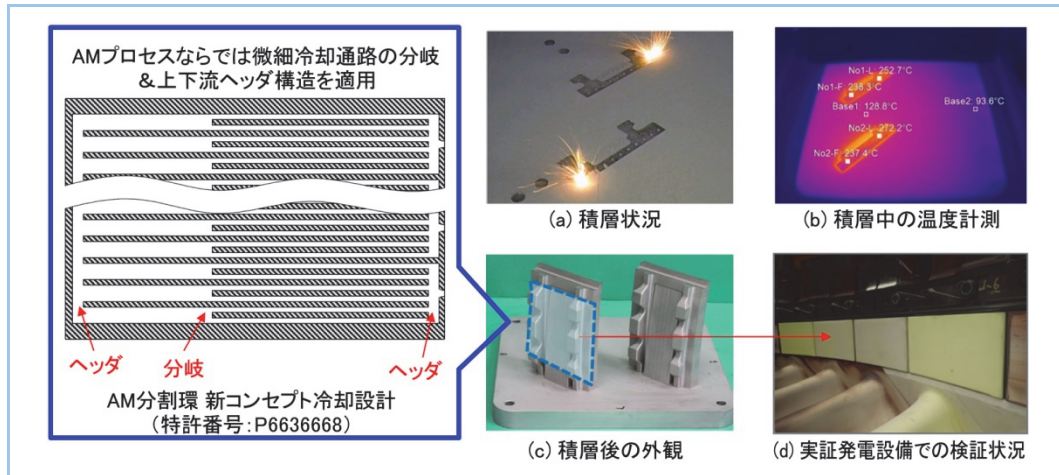


図 10 ガスタービン分割環への適用検討状況

(2) ガスタービン燃焼器部品のラピッドプロトタイピング

ガスタービン燃焼器スワラブロックは、多数の部品の板金加工や溶接を要している部材であるため、開発時の供試体の製作に時間がかかる。そこで、スワラブロックの構成部品の一部をAMで造形し（図 11）、供試体の製作コスト低減と製作期間短縮を実現するとともに、燃焼試験で従来部品と同等の性能が得られることを確認した。今後、AMを活用し、新機種の開発期間短縮を図る予定である。



図 11 AMによる燃焼器部品のラピッドプロトタイピング

(3) 溶接組立部品のコスト低減

AMプロセスは、単純に従来部品と置き換えるだけではコストメリットが得られないため、いかにして付加価値を見いだすかが重要である。ガスタービン関連の部品で、薄板の板金部材を10pc溶接組立している部材があり、加工費用がコストを占めていた。そこで、AMを活用し、本部品を一体造形して溶接組立工程をなくす付加価値を付与するとともに、1バッチあたりの造形数量を増やす等のコスト低減対策に取り組むことで60%のコストダウンに成功した（図 12）。また、本部品が実機要求品質を満足していることを確認し、2017年から量産を開始し、累計35000個のAM部品を出荷済みである。

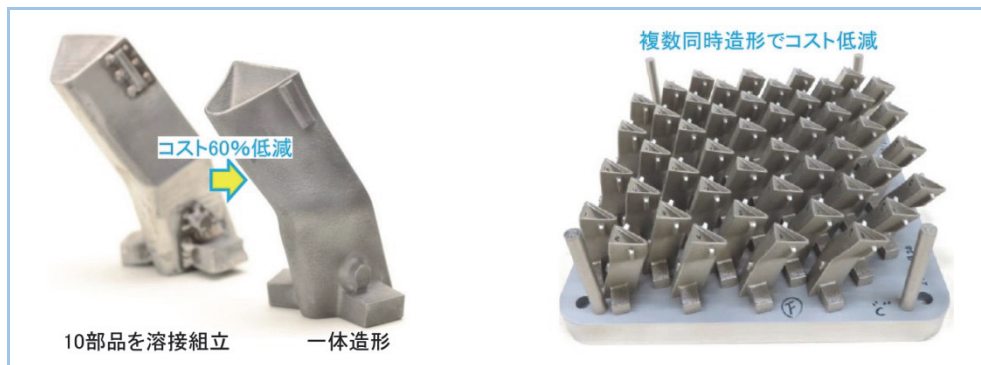


図 12 溶接組立部品の一体造形によるコスト低減

6. まとめ

当社グループにおける金属 AM 技術開発の取り組みとして、発電用大型ガスタービン部品を対象とした要素技術の開発状況を紹介した。引き続き、AM プロセスを活用し、当社製品の Quality, Cost, Delivery を向上させ、お客様のニーズに応えるべく技術開発を進めていく所存である。

本成果の一部は、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) の助成事業の結果から得られたものである。

参考文献

- (1) 小森豊明ほか, 低炭素化発電技術の最新動向と将来展望, GTSJ ガスタービンセミナー (第 41 回) 資料集, 2013, pp. 57-64.
- (2) 渥美秀勝ほか, 電力用ガスタービンの開発と最新要素技術について, 日本機械学会, 第 24 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, 2019, No.19-16.
- (3) 小熊英隆ほか, 高効率ガスタービン実現のための先進材料・製造技術開発, 三菱重工技報, Vol.52 No.4, pp.5-14.
- (4) 石出孝ほか, 3次元金属積層造型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, pp.1-8.
- (5) 北村仁ほか, ガスタービン部品の金属 3D 積層造型技術の開発, 第 48 回日本ガスタービン学会定期講演会論文集, A- 1 (2020).
- (6) 種池正樹ほか, Ni 基積層造形材の高温強度特性に及ぼす材料組織の影響, 日本金属学会 2021 年秋期 (第 169 回) 講演大会概要集, 2021, p.227.
- (7) 赤間大地ほか, 高温部品用 Ni 基 AM 材の材料特性に及ぼす造形および熱処理条件の影響, 第 49 回日本ガスタービン学会定期講演会論文集, B-26 (2021).