

連携記事

3D金属積層造形技術の開発

Development of Metal Additive Manufacturing Technology

藤谷泰之

Yasuyuki Fujiya

三菱重工業(株)
総合研究所 製造研究部
主幹研究員

1 はじめに

複雑形状の部材を短時間に製造できる手法として、3次元積層造形 (AM: Additive Manufacturing) の開発・適用検討が広く進められるようになってきている。3次元積層造形技術は、造形装置を購入して3DCADの設計データをインプットさえすれば直ぐに使えると考えがちであるが、品質・コスト・製造期間に対する要求を満足し、その適用メリットを享受するためには、金属粉末の管理・低コスト化、施工条件・サポート条件の最適化、品質のインプロセスモニタ等様々な問題を解決するため、装置ユーザ側においても幅広い技術開発を行う必要がある。

ここでは、このような課題の解決にむけて三菱重工グループで行っているパウダーベッド方式の3次元金属積層造形の要素技術開発と実証を目指した実機適用技術の開発について述べる。

2 積層造形要素技術開発¹⁾

2.1 粉末管理技術

パウダーベッド方式の3次元金属積層造形では粉末材料を原料として使用しており、粉末タンクから供給した金属粉末を均一な厚さに敷設し、その後、必要部位にレーザや電子ビームなどの熱源を与え熔融・凝固させ、これを繰り返すことで3次元形状を造形する。

造形には一般的に球状粒子であるガスアトマイズ粉末 (図1) が用いられるが、粉末に求められる特性としては主に、①粉末が安定して均一に敷設できること、②熔融・凝固させた造形物が緻密であること、③造形物が必要な機械的特性を有すること、の3点が挙げられる。これらに対し、粒度分布等の因子の影響度を評価し、それぞれ基準となる管理項目を定め、材質により挙動が異なるものについては個別に管理範

囲の設定を行った。粉末特性の影響を評価した一例として流動性に差のある粉末の敷設状況を図2に示す。これらの実験データに基づいて現象を把握し、安定した品質を得るための粉末管理基準を定めて運用している。

また、パウダーベッド方式の造形においては、造形後に造形物の周囲の粉末が余剰粉末として残るため、これを回収して再利用すれば粉末を効率的に運用でき製造コストの低減に繋がる。しかし、造形時の熱影響等により粉末の状態が変化するため、安定した造形品質を維持するためには繰返し使用による粉末の変化を把握し使用限界を設定することが必要である。図3は繰返し造形した際の粉末酸素濃度の変化を示したものである。繰返し造形することにより粉末の酸素濃度が増加するため、当社では造形品の機械的特性を確保できる酸素濃度上限を材質ごとに設定し、再利用による粉末コスト低減につなげている。

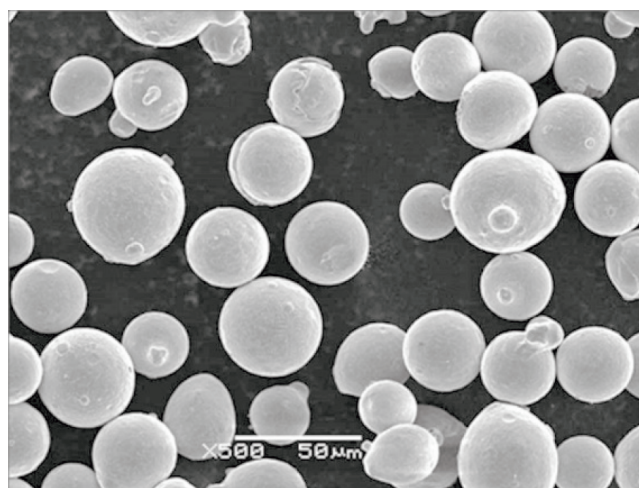


図1 ガスアトマイズ粉末

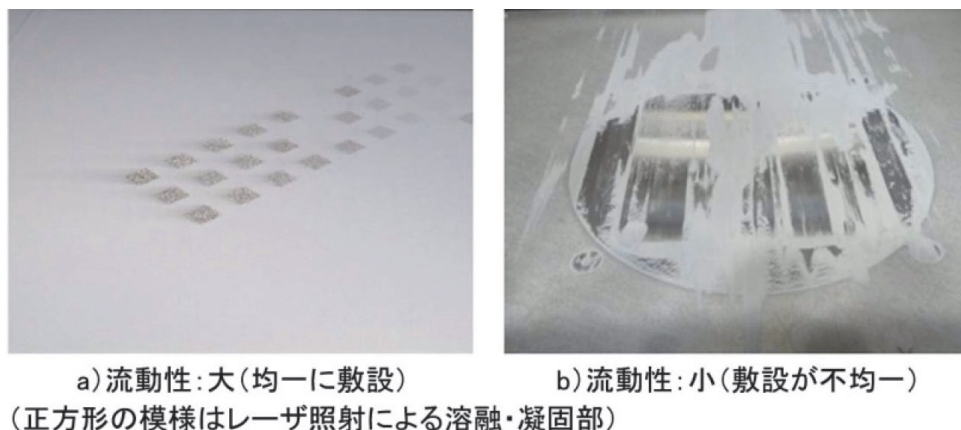


図2 粉末敷設性に及ぼす流動性の影響

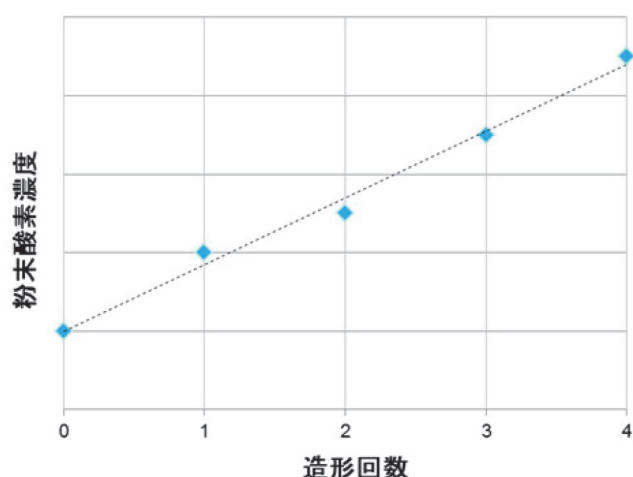


図3 再利用による粉末酸素濃度変化

2.2 サポート設計技術

3次元金属積層造形では、オーバーハング部や積層中に熱変形が生じる部位に、本来の造形物だけでなくサポート材も同時に造形する。サポート材の配置や形状は非常に重要であり、高剛性となる形状で、かつ造形物と連結する面積を広くすれば、熱ひずみの抑制効果は高いが、後工程でサポート材を除去する際、非常に時間を要する。また、サポート材を除去するための工具のアクセスが困難な造形品内部の空間にサポートを造形してしまうと後処理で除去することができない。そのため、少量かつ低剛性のサポート材とし、サポート除去工程の作業性を考慮しつつ、目的の形状公差内となるように造形し得るサポートとする必要がある。

そこで、製品姿勢を変数としたサポート最適設計システムを構築した。本システムのプロセスを図4に示す。本システムでは、まず単純な総サポート量を最小化するのではなく、サポート除去時の工具アクセスの容易性も評価し (図5)、よ

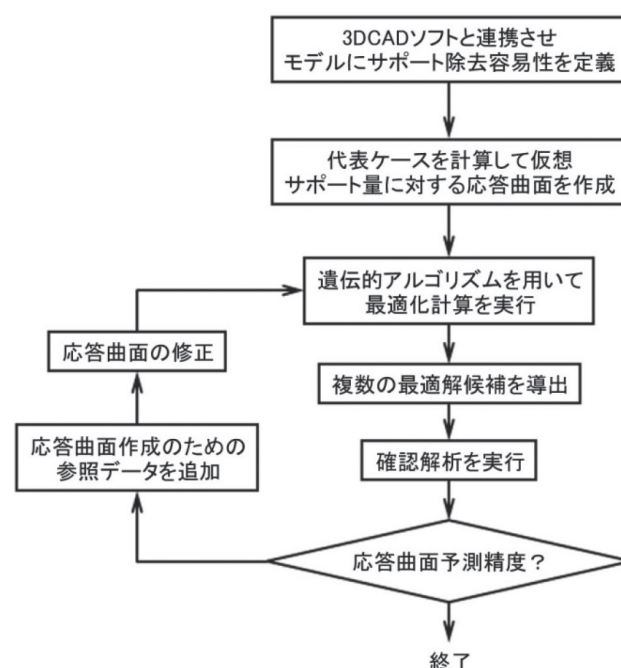


図4 サポート最適設計システムのプロセス

り実用的なシステムとした。図6にある機械部品を対象にした試計算の結果を示す。これにより、3次元金属積層造形の特徴に適したサポート最適設計システムを構築することで、サポート量を最小化可能な造形姿勢を導出することが可能となった。

2.3 積層造形条件最適化

装置メーカーが推奨する積層造形条件は、装置メーカーからの材料に対する施工条件であるので、適用部品に対して最適な施工条件が推奨されているか不明である。また、施工実績のない材料や形状で積層を行う場合には、装置メーカーで積

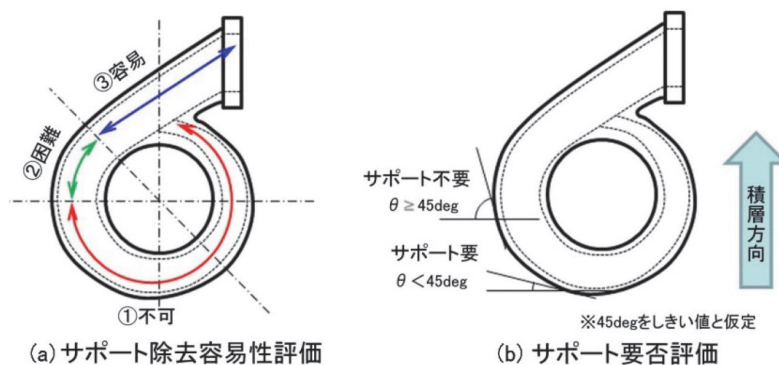


図5 サポート容易性および要否の評価

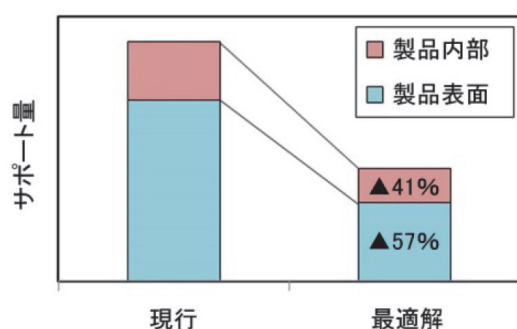


図6 試算結果

層条件を検討してもらう必要があり、最適な施工条件の選定には、長い期間及び膨大な費用が発生するため開発のボトルネックとなっている。そこで、新材料へ3D積層造形を適用する際に、適切な施工条件を得るための条件選定フローの標準化を行った。

標準積層造形条件選定フローとしては、未熔融層やポロシティを残さず充填率の高い積層造形物を得るため、レーザで熔融して形成されるビードの安定性、断面形状を考慮し、各ビードの重ね条件、積層パターンを段階的に選定し積層条件を絞り込んでいく。施工条件選定フローを表1に示す。パウダーベッド方式のレーザ粉末熔融積層装置においては、積層の基本パラメータは、レーザ出力・走査速度・ビード重ね量（ハッチ間隔）であるため、はじめに1ビードで安定したビードが得られるレーザ出力、走査速度範囲を選定し、その条件範囲内において、適切なハッチ間隔を選定することで1層の積層条件範囲を選定する（STEP1）。次に、所定の積層厚さとハッチ間隔においてレーザ出力、走査速度及び基本セルのパターン・重ね代・回転角度を変化させ施工条件範囲を絞り込みながら、立方体のブロックを用いて充填率を評価し、充填率が高い条件範囲を絞り込む（STEP2）。最後に充填率が確保される条件範囲において、各種形状での積層評価を行い、形状や面粗度要求に応じて条件を設定する（STEP3）。

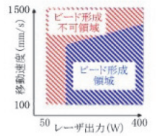
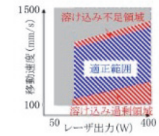
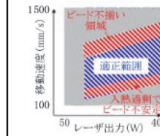
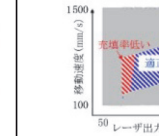
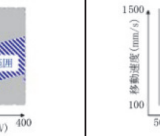
本標準設定フローに基づき、造形に多く適用されている標準的な材料（SUS316およびインコネル718）を用いて、適正施工条件範囲を選定した結果、充填率99.9%以上となる施工条件範囲が得られることが確認できており、新材料適用時の積層条件の最適化が低コスト・短期間で行えるようになった。

2.4 品質モニタリング技術

3次元金属積層造形は、造形完了までの積層時間が数十時間にも及ぶが、現状では造形中に施工不良が発生した場合に施工を止める判断方法や判断基準がなく、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サビリティ確保を目的とし、造形中の施工状況として粉末敷設状態及びレーザ照射後の表面状態を対象としたインプロセスモニタリング技術を開発した。

積層部の表面状態の把握にはフリンジプロジェクション法を採用した。装置構成を図7に示す。3次元造形装置中央には、レーザ照射用の光学系があるため、プロジェクターを3次元造形装置内の隅に置き、ミラーで反射させ向きを変えることで造形面に縞模様を発生させ、計測の安定化を図るため2台のカメラで計測するシステムとし、装置内に収まるよう配置した。フリンジプロジェクション法による計測例を図8に示す。計測は、対象面に図8の上段に示すような2種のフリンジパターンを投影し、それらデータを処理することで、左下に示すような立体視化を行い、右下のようにコンター表示することで凹凸を確認する仕組みである。フリンジプロジェクション法の計測精度を確認するために、レーザ変位計（LK-G System）の計測結果と比較検証を実施した。フリンジプロジェクション法の計測結果は、レーザ変位計による計測結果と遜色ない結果であることが確認された。フリンジプロジェクション法による3次元積層造形中の形状計測結果を図9に示す。粉末敷設後においては、リコーターのゴムのへたりや、押しつけの不均一が原因と思われる筋（a-1）や、異物（a-2）が確認された。レーザ照射後においては、粉末敷設が不均一

表1 3D 積層条件選定フロー

[STEP1] 一層施工による施工条件の絞り込み(積層厚さ毎に設定)			[STEP2] 積層条件選定	[STEP3] 部材形状に応じた条件選定
①ビード安定性評価 (1ビード)	②ビード断面形状評価 (1ビード)	③ビード重ね形状評価 (1層多パス重ねビード)	④充填率評価 (多層多パス積層ビード: 立方体ブロック)	⑤限界形状、表面状態評価 (各種形状積層)
安定ビード形成条件 を選定 	適正溶け込み形状条件 を選定 ・溶け込み深さ(d_0) $1.5t \leq d_0 \leq 2t$ 	適正ビード重ね条件 を選定 ・重ねビード凹凸 ・重ね部溶込み深さ (d_1) $d_1 > t$  重ね量($W_0/2$)	1層の積層適正条件範囲を ベースに、造形品質を均質化 させる適正パターンを選定 ・基本セル(単位塗り潰し領 域)のパターン (ストライプ、チェス) ・基本セル重ね代 ・基本セル回転角度(θ)	Step2の充填率が確保されている適正条件範囲内 の条件において、部材の形状に応じて適正な入 熱条件を選定 ・横穴(サポートなしでの上限、造形可能な下限) ・造形可能なスリット下限 ・造形可能な板厚下限 ・限界角度
				

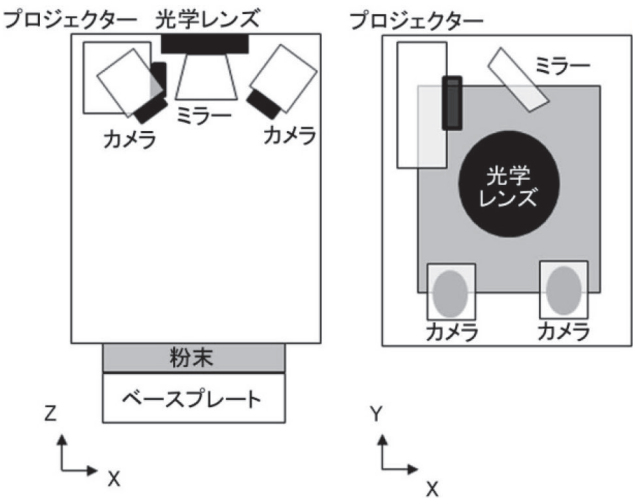
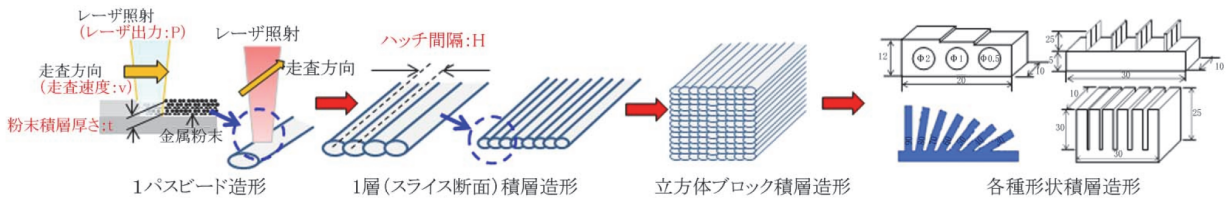


図7 フリンジプロジェクション法の3D造形適用

な箇所 (b-1) や、レーザー照射後の変形 (b-2) を確認できた。

2.5 内面研磨技術

3次元金属積層品の共通課題として、表面粗さが粗いことが挙げられ、特に流体流路等では表面粗さが製品性能に大きく影響することから、工具が届かない複雑形状内面に対しての研磨技術の確立が求められている。

複雑形状内面の一例として、コンプレッサカバー部品を対象に内面研磨手法を検討した。コンプレッサカバー内面への

研磨工具のアクセスは困難であることから、研磨手法としては、粘弾性砥粒流動研磨、遠心バレル研磨、化学研磨等が候補として挙げられる。今回は、研磨効率や狭小空間の型崩れ防止の観点から、遠心バレル研磨を選定し、研磨性能を評価した。

遠心バレル研磨は、複雑形状内面全体に効率的に研磨メディアを衝突させることが課題となるため、解決手法としてワーク内面に研磨メディアを封入する方式を採用した。図10に研磨メディア封入方式の遠心バレル研磨の模式図を示す。研磨メディアは、ワーク内面での可動性の観点から、内面形状に応じた形状、サイズ、材質、封入量等が重要となるため、事前要素試験にてこれら研磨条件を決定した上で、コンプレッサカバーの研磨試験を実施した。図11にコンプレッサカバー内面の研磨前後の表面粗さを示す。研磨前の表面粗さは、内面全域に渡り要求値を満足しておらず、研磨後は比較的大きい空間から狭小空間まで内面全域が要求値を満足する結果が得られた。この結果から、ワークの自転・公転運動により、適量封入した研磨メディアがワーク内全域で可動して研磨力が付与されていることが分かり、本手法が複雑形状内面に対する表面粗さ改善手法の一つとして有効であることが確認できた。

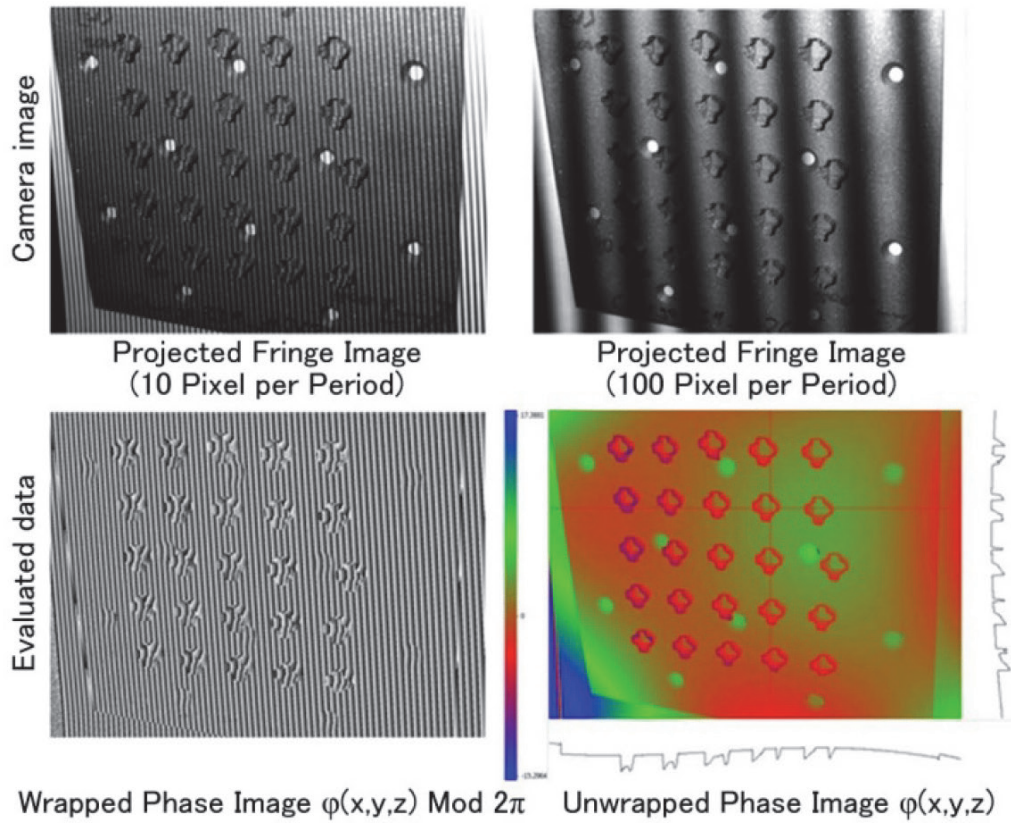


図8 フリンジプロジェクション法の計測例

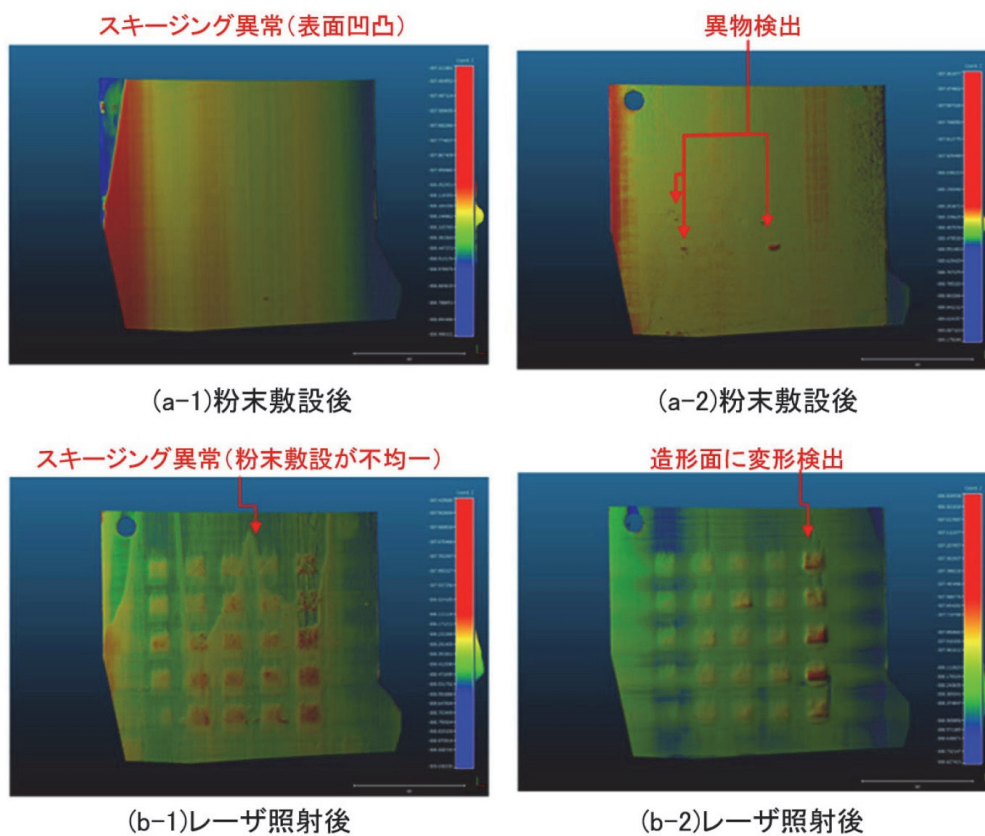


図9 フリンジプロジェクション法による3D積層造形中の形状計測結果

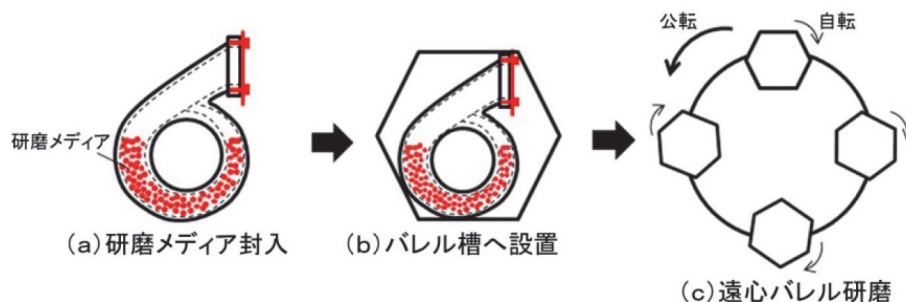


図10 研磨メディア封入方式の遠心バレル研磨

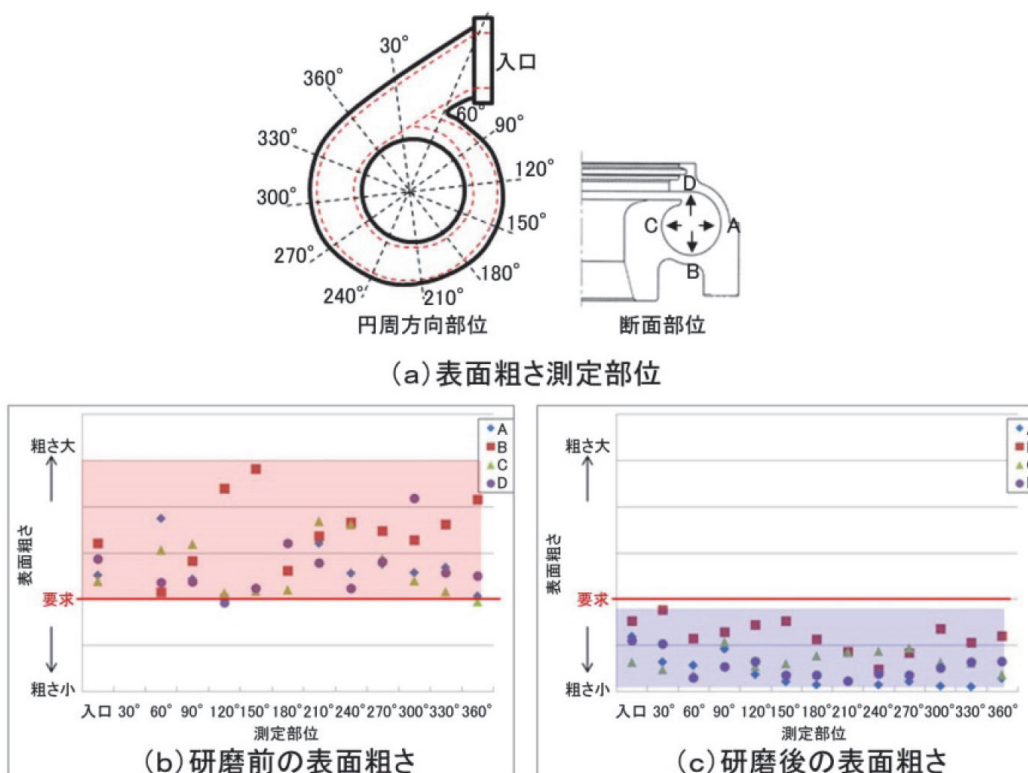


図11 コンプレッサカバー内面の研磨前後の表面粗さ

3 実機適用開発事例²⁾

ガスタービン複合発電 (図12) 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することにより、発電市場をリードすると予想されている。ガスタービンの高温部品の冷却風量を減らすことでガスタービンの性能を向上させることを目的として、AM技術の適用が検討されており、既存の加工技術では得られない複雑な冷却チャネルを製作している。(図13)。

タービン部品については、温度モニタリングによる層間の温度制御と、変形シミュレーションによる変形予測により、必要な品質 (微細構造、強度、欠陥サイズ、形状精度) を確保している。現在、当社の実証発電プラントでそれらの検証試

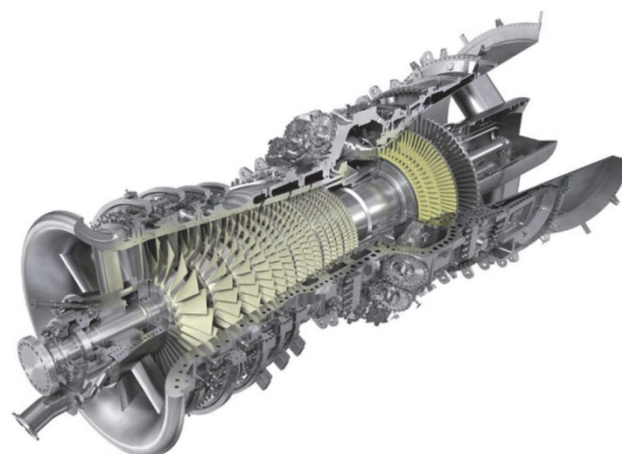


図12 ガスタービン概略図

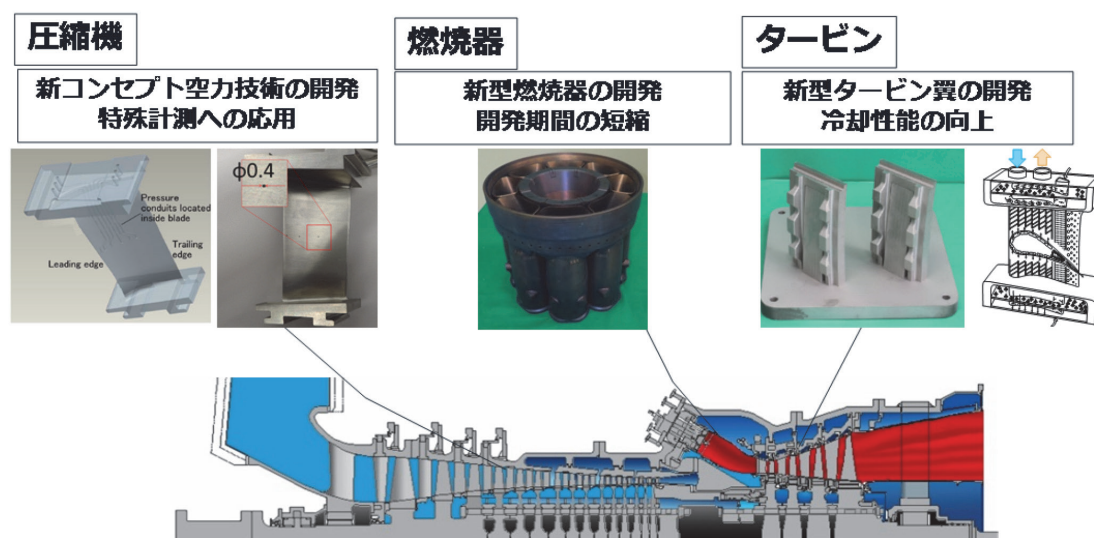


図13 ガスタービン部品への3次元積層例

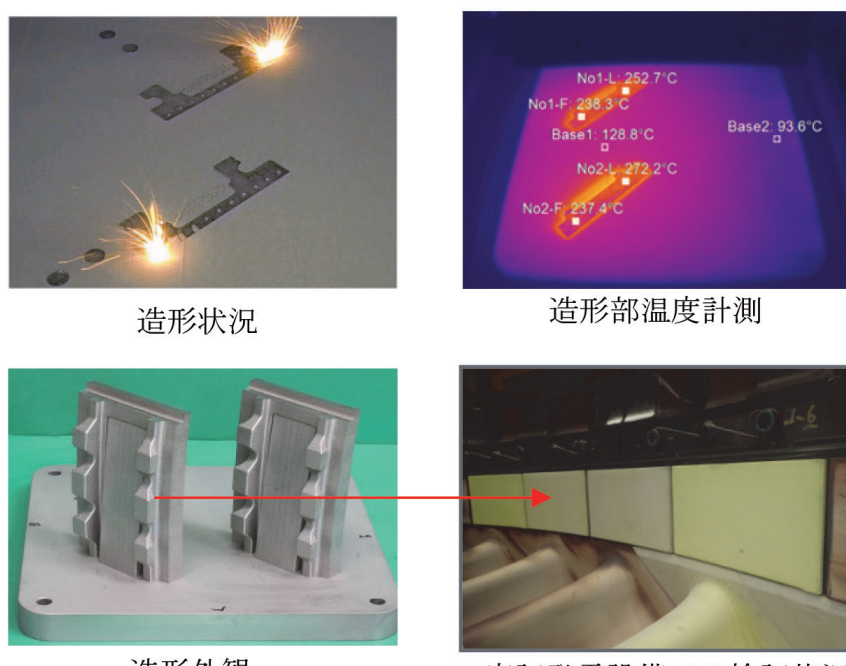


図14 タービン部品への3次元造形への適用例

験を進めており(図14)、将来的には、AM技術に特有の複雑な内部構造を持つリングセグメントの開発を計画している。

また、サイズの大きい燃焼器部品については、開発のリードタイム短縮を目的として、造形時間を短縮し、形状精度を向上させるために、マルチレーザースキャンによる高速造形と造形時の変形解析による造形モデル設計を適用している。4本のレーザによる造形を適用することにより、従来の1本のレーザでの造形に比べて造形時間が28%に短縮されており、変形解析を用いることでAM設計モデルと造形部品の寸法誤差が60%削減されていることが確認できた(図15)。

4 まとめ

複雑形状の部材を短時間に製造できる手法として開発が進められている3次元積層技術の適用メリットを享受するためには、装置ユーザ側においても幅広い技術開発を行う必要がある。本稿では三菱重工グループにおけるそれら技術開発の取組みとして粉末管理技術、サポート設計技術、施工条件最適化、品質モニタリングおよび内面研磨技術を紹介した。また、GT適用に向けた開発内容は、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)の助成事業として実

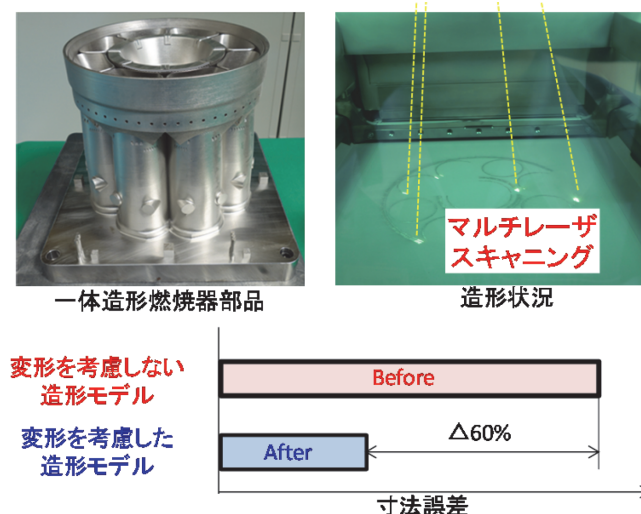


図15 燃焼器部品への3次元造形への適用例



図16 MHIグループ製品適用例

施中の高効率ガスタービン技術実証事業（1700℃級ガスタービンの超高効率化）の一部であり、実用化に必要な要素技術の開発と実証を目指した実機適用技術の開発を実施中である。今後、3次元積層技術の適用範囲をMHIグループ内の製品と部品（コンプレッサ、ターボチャージャー、宇宙システム）（図16）に拡大していく予定である。

参考文献

- 1) 石出孝, 藤谷泰之, 久我和義, 畑中雅哉, 篠木貴文, 成田竜一: 三菱重工技報, 55 (2018) 2.
- 2) S.Tanigawa, S.Tsubota, M.Kataoka and N.Motoyama: Proceedings of LAMP2019 - the 8th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, (2019)

(2019年9月2日受付)