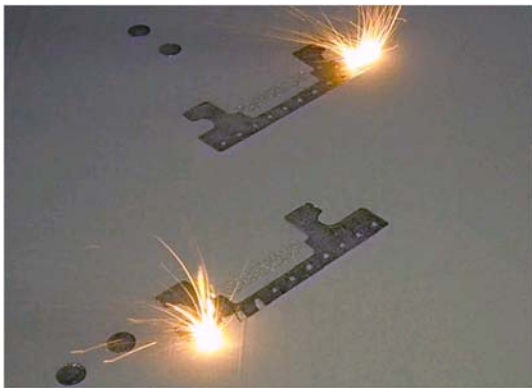


3次元金属積層造型技術実用化に向けた施工技術開発

Development of Additive Manufacturing Technology toward Practical Utilization



石出 孝*¹
Takashi Ishide

藤谷 泰之*²
Yasuyuki Fujiya

久我 和義*²
Kazunori Kuga

畑中 雅哉*³
Masaya Hatanaka

篠木 貴文*³
Takafumi Shinogi

成田 竜一*⁴
Ryuichi Narita

複雑形状の部材を短時間に製造できる手法として、3次元積層技術の開発・適用検討が広く進められている。各種方式の3次元積層装置が開発・販売されているが、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、装置ユーザー側においても幅広い技術開発を行う必要がある。当社においても粉末管理技術、サポート最適設計技術、施工条件最適化、品質モニタリング、内面研磨技術ほか、各種技術開発を行い、当社製品への3次元積層技術の適用を進めている。

1. はじめに

パウダーベッドの3次元積層造形(AM: Additive Manufacturing)は1980年に日本から発祥した技術で、金属に限って言えば、ブラウンホーファ研究機構でブロンズ粉末との混合粉末で成形していた手法から、初めて単一金属粉末で造形する技術が完成した。その後、様々なメーカーからAM装置が販売されるようになり、最近では大型化、高速化を目指したEB・レーザ Hybrid タイプ¹⁾、バインダージェットタイプ²⁾、面で成形する金属メッキタイプ³⁾、ワイヤを抵抗発熱で熔融したり、金属溶滴を直接吹き付けて高速成形⁴⁾を行う装置等 各種装置が販売され始めている。このような状況で、AM装置を購入すれば直ぐ使えると考えがちだが、金属粉末の仕様・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必要がある。ここでは、このような課題の解決にむけて当社が行っている技術開発について述べる。

2. 粉末管理技術

3次元金属積層造形では一般的に粉末材料を原料として使用する。現在広く検討されているパウダーベッド方式においては、粉末タンクから供給した金属粉末をスキージングブレードを用いて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。

3次元金属積層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、粒径や粒子形状などの粉末特性が造形品質に及ぼす影響が明確にできていないことが課題であった。これに対し、当社では各種粉末特性をパラメータとした造形試験にてその影響を明確にし、安定した造形品質を得るための粉末管理基準を策定した。

3次元金属積層造形に用いる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

*1 総合研究所グローバルリサーチ&イノベーションセンター センター長 工博

*2 総合研究所製造研究部 主席研究員

*3 総合研究所製造研究部

*4 Mitsubishi Heavy Industries Europe. Ltd. Senior Manager

敷設できること、②溶融・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。



図1 ガスアトマイズ粉末

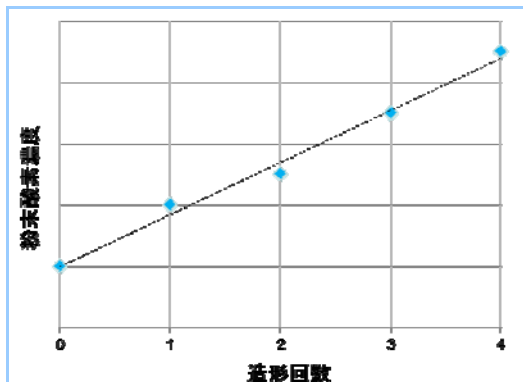


図3 再利用による粉末酸素濃度変化

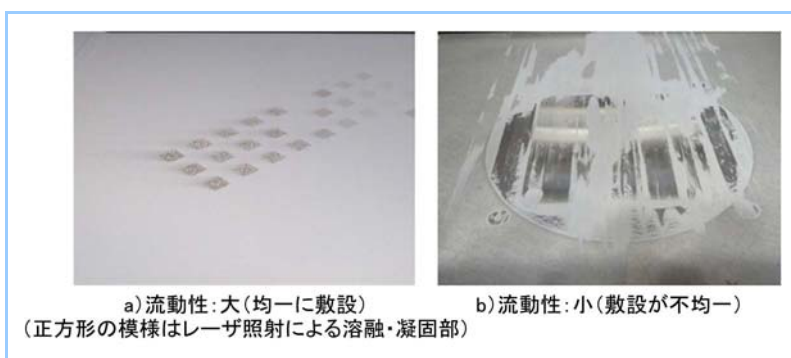


図2 粉末敷設性に及ぼす流動性の影響

また、パウダーベッド方式においては、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粉末の管理を行っている。

以上のように粉末管理基準、及び再利用粉末の使用限度を設定したことで、造形品質安定化と粉末コスト低減が可能となった。

3. サポート最適設計技術

3次元金属積層造形では、熱ひずみの抑制を主な目的として、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(a)), より実用的なシステムとした。また、一般的に積層直交方向に対する造形面の角度が、ある値を超えるとサポートが不要になるため(図5(b)), サポート要否の判断は、製品姿勢(角度)に対し、区分的に不連続な関数となるが、局所解に陥らないよう、最適解の探索アルゴリズムは、GA(遺伝的アルゴリズム)を用いている。ただし、GAは計算数が膨大となるため、モデル作成を含む計算時間を非常に要する。そこで、応答曲面を作成し、最適化解析を行った。この時、確認計算により応答曲面の精度確認を行い、応答曲面の更新をした後、再度最適解を探索させることを繰り返し、予測精度が向上し、より優秀な解を探索できた。

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。

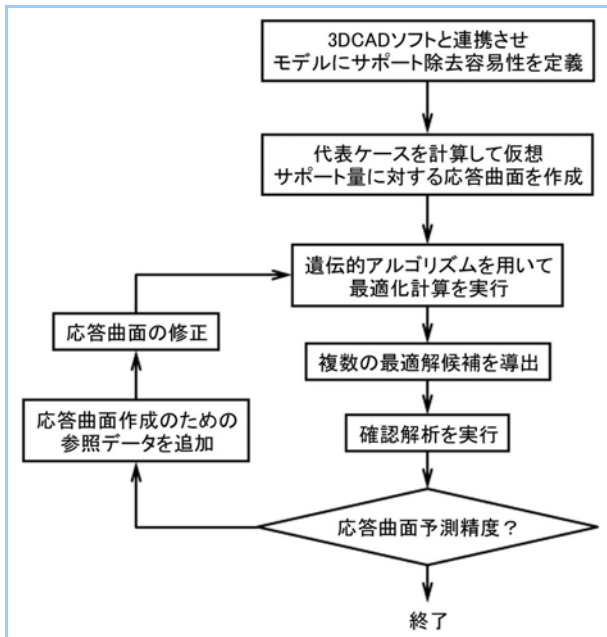


図4 サポート最適設計システムのプロセス

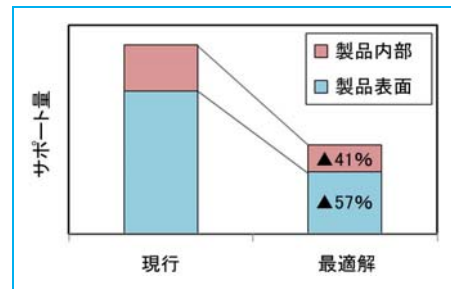


図6 試計算結果

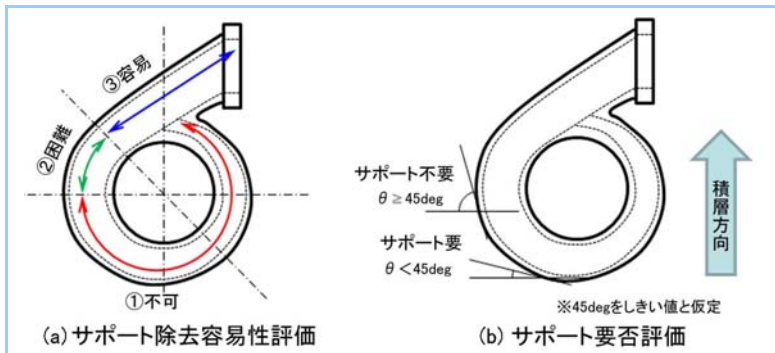


図5 サポート容易性および要否の評価

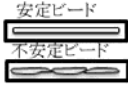


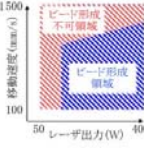
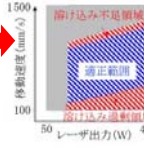
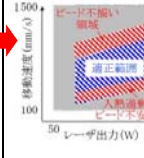
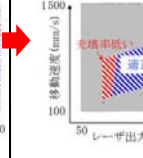
4. 積層条件最適化技術

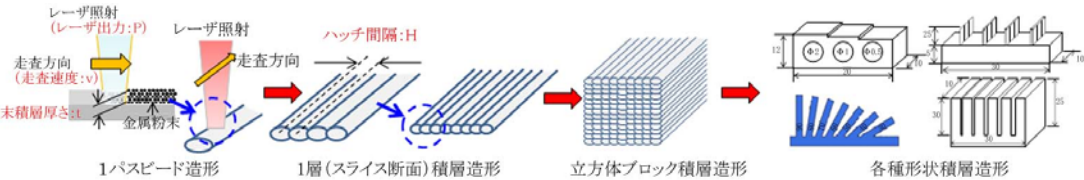
装置メーカーが推奨する積層条件は、装置メーカーからの材料に対する施工条件であるので、最適な施工条件が推奨されているかも不明である。また、施工実績のない材料や形状で積層を行う場合には、装置メーカーで積層条件を検討してもらう必要があり、最適な施工条件の選定には、長い期間及び膨大な費用が発生するため開発のボトルネックとなっている。そこで、新材料へ3D積層造形を適用する際に、適切な施工条件を得るための条件選定フローの標準化を行った。

即ち、未溶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、レーザーで溶融して

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積層条件設定の標準化を行った。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溶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)。

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) 安定ビード形成条件を選定 	②ビード断面形状評価 (1ビード) 適正溶け込み形状条件を選定 ・溶け込み深さ(d0) $1.5t \leq d0 \leq 2t$ 	③ビード重ね形状評価 (1層多パス重ねビード) 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(d1) $d1 > t$  ・重ね量(W0/2)
		
④充填率評価 (多層多パス積層ビード:立方体ブロック) 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)	⑤限界形状、表面状態評価 (各種形状積層) 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	



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)。

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。

5. 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ー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モニタリング技術を開発した。

表面状態を把握するためフリッ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。

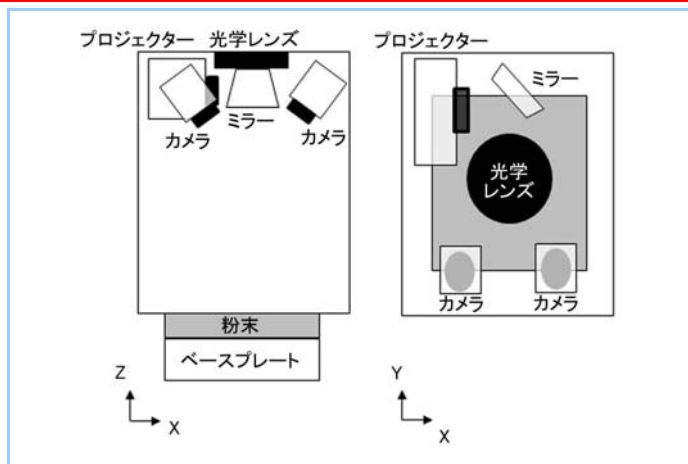


図7 フリンジプロジェクション法の3D造形適用

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。

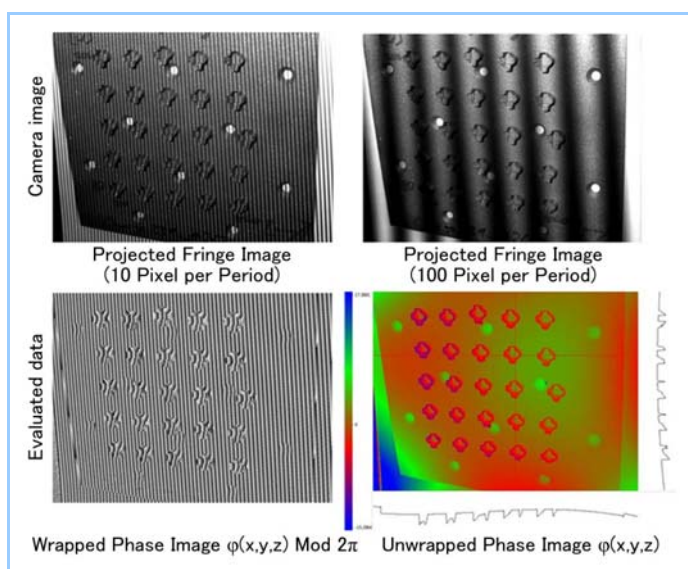


図8 フリンジプロジェクション法の計測例

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。装置のZ軸を機械的に10 μmおよび100 μm上下させ、造形面の高さ変化を両者により計測した。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。また、高さ1mmの段付き平板をフリンジプロジェクション法で計測した結果と、3次元計測器で計測した結果の比較を表2に示す。フリンジプロジェクション法の計測結果は、3次元計測器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。以上2つの検証結果より、フリンジプロジェクション法で高精度な計測が可能であることが確認できた。

表2 フリンジプロジェクション法と3次元計測器の計測結果比較

	計測結果
フリンジプロジェクション	1.032 mm +/- 17.8 μm (1σ)
3次元計測器	1.037 mm +/- 9.7 μm (1σ)

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、粉末敷設が不均一な箇所(b-1)や、レーザ照射後の変形(b-2)を確認できた。

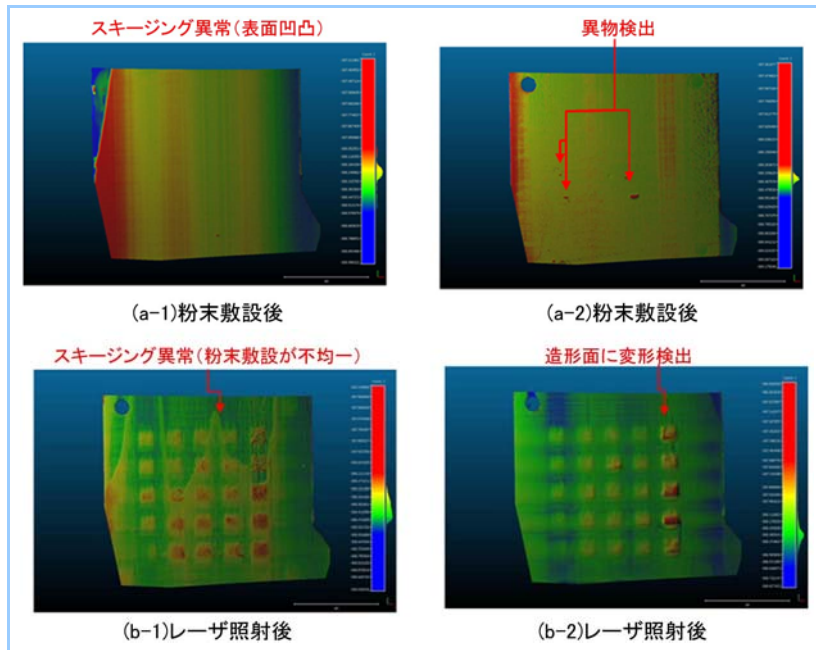


図9 フリンジプロジェクション法による3D積層造形中の形状計測結果

6. 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する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、ターボチャージャ部品を対象に内面研磨手法を検討した。図10に検討対象のコンプレッサカバーの概略形状を示す。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11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。

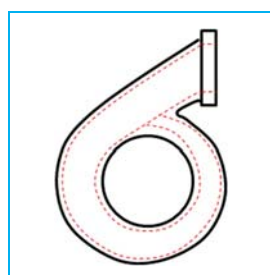


図10 ターボチャージャ部品コンプレッサカバーの概略形状



図11 研磨メディア封入方式の遠心バレル研磨

図12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。

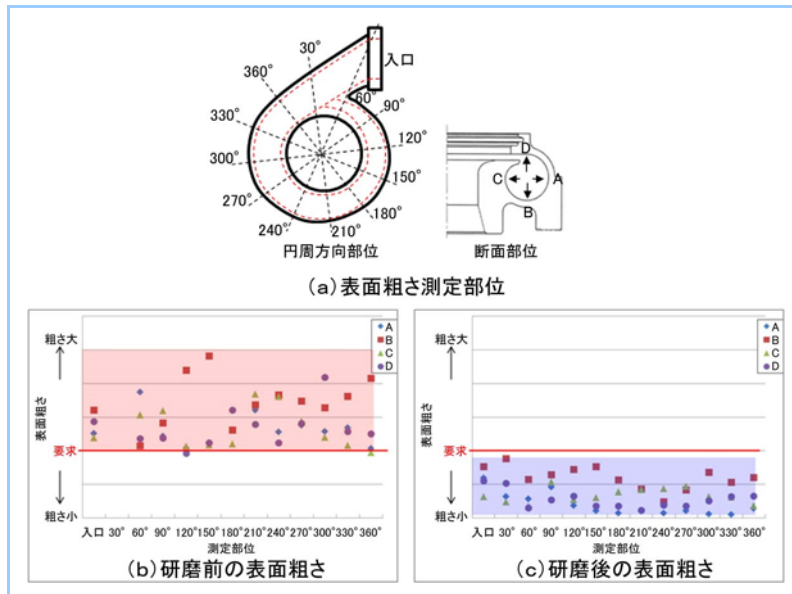


図12 コンプレッサカバー内面の研磨前後の表面粗さ

現在、本結果を基に各種ターボチャージャ部品への適用性を継続評価しており、異種材質、主要サイズ毎に検証を行い、表面粗さや製品性能向上効果を評価して実用化を図る計画である。

7. 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。本稿では三菱重工業(株)総合研究所におけるそれら技術開発の取組みとして粉末管理技術、サポート最適設計技術、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。開発した最新製造技術の一部はその有効性の検証を経て既に当社製品の製造に適用されている。引き続き当社製品の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すすめていく所存である。

参考文献

- (1) Bin Zhou. et al., Fabrication and characterization of Ti6Al4V by selective electron beam and laser hybrid melting, Solid Freeform Fabrication 2017: Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (2017) p.1924-1934
- (2) Peeyush N. et al., Powder bed binder jet 3D printing of Inconel 718: Densification, microstructural evolution and challengesq Current Opinion in Solid State and Materials Science 21 (2017) p.207-218
- (3) 3D natives.com
<https://www.3dnatives.com/en/fabric8labs-interview-050220184/>
- (4) 3D Printing Media Network
<https://www.3dprintingmedia.network/additive-manufacturing/am-technologies/what-is-nanoparticle-jetting/>