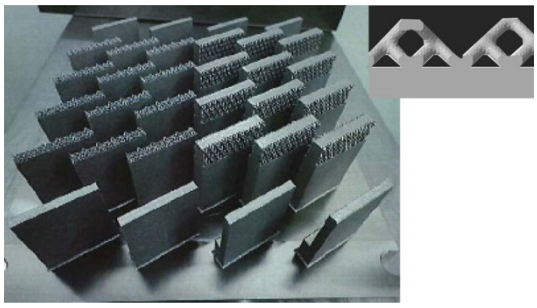
航空機における AM 技術開発の取り組み

Development of AM Technology for Aircraft Application



高橋 孝幸[*1] Takayuki Takahashi
笠見 明子[*2] Akiko Kasami
橘 孝洋[*3] Takahiro Tachibana
田中 章裕[*4] Akihiro Tanaka
武内 幸生[*5] Yukio Takeuchi
井野元 誠[*6] Makoto Inomoto

積層造形法(Additive Manufacturing, 以下 AM)は, 新たな製造技術として急速な進化を遂げており, 製品への適用により, 軽量, 高機能化, サプライチェーン革新など様々なアドバンテージが期待される。一方, 航空宇宙製品は, 品質管理要求が厳しく, 法令への適合性を示す認証も必要となることから, 安定した品質を得るためのプロセス管理手法の確立が重要である。そこで, 当社では, 品質に影響する物理現象を捉えた上で, 適用製品と品質要求に応じた金属, 樹脂 AM の要素技術開発を行い, AM 技術の航空宇宙製品への適用拡大に取り組んでいる。

1. はじめに

AM 造形法は, 粉末, ワイヤなどを原料として, 3次元データから直接, 部品を造形する製造手法であり, 機械加工, 溶接などの従来工法では実現不可能な複雑形状の造形, 部品一体化による加工・組立コスト低減, サプライチェーン革新による調達コスト低減・リードタイム短縮が期待され, ゲームチェンジとなり得る新たな製造技術として, 航空宇宙, エネルギー, 医療分野などを中心に世界的に精力的な研究開発が進められている。

当社でも事業部とシェアードテクノロジー(ST)部門が連携して要素技術開発と製品への適用検討を進めてきており, 特に航空宇宙分野では, その高い品質要求から適用の技術的ハードルは高いものの, AM 特有の設計手法の適用による重量軽減・高機能化及び製造コスト・リードタイム短縮など, AM 適用のメリットは大きい。

本報では, 航空宇宙製品及びそれらの製造に必要となる治工具類をターゲットとして, 当社にて取り組んでいる AM 技術開発状況について紹介する。

2. チタン DED 造形プロセスの開発

2.1 航空機用チタン部品への AM 適用

Ti-6Al-4V に代表されるチタン合金は高比強度, 高耐食性に加え, 炭素繊維強化プラスチック(CFRP)とのコンパチビリティも優れることから, 航空機への適用が増大している一方, 素材費が高く, 被加工性も悪いため, 製造コスト, 加工リードタイム低減が課題となっている。金属 AM 技術はデポジション方式(Directed Energy Deposition, 以下 DED)とパウダーベット方式(Powder Bed Fusion, 以下 PBF)に大別されるが, DED 方式は, PBF 方式に比べ, 造形速度が速く, サイズ制約も比較的少ないことから, 特に大型部品の多い航空機機体構造への適用に有利と考えられる。そこで, 当社では, 航空機用チタン部品への適用を狙いとして, チタン合金粉末を原料とした DED 造形プロセス(レーザ熱源)の開発に取り組んでいる。

*1 総合研究所 製造研究部 主席チーム統括 工博
*2 総合研究所 製造研究部 主席研究員 工博
*3 総合研究所 製造研究部 技術士(金属部門)
*4 総合研究所 製造研究部
*5 総合研究所 製造研究部 主席研究員
*6 総合研究所 製造研究部 技術士(機械部門)

2.2 チタン DED プロセス開発の考え方

航空機部品への金属 AM 技術適用に当たっては部材に要求される機械特性を満足させるため，材料組織と内部品質両方の制御が必要である。材料組織，内部品質は原則として溶融池（メルトプール）の溶融・凝固，冷却速度などの物理現象に依存して変化するため，レーザ出力，走査速度，ビーム径など DED 造形における主要造形パラメータ（キープロセスパラメータ）がこれらの物理現象に及ぼす影響を把握し，再現性良く安定した品質を得るための適切なパラメータ範囲を設定することが極めて重要である。DED 造形プロセスの模式図とキープロセスパラメータの代表例を図1に示す。なお，航空機への適用が可能な AMS 規格（米国公共規格）を制定，運営する SAE（Society of Automotive Engineers）では，FAA（Federal Aviation Administration）との協議も踏まえ，2015 年から AM 造形プロセス，AM 素材粉末の公共規格を制定するための AM 委員会が設立され，エンジン・機体メーカ，材料・装置メーカ，政府機関などが参画する定期ミーティングでの議論を踏まえ，金属 PBF，DED 方式 AM 及び樹脂 AM に関する公共規格の制定が進められている。現在，Ni 系耐熱合金やチタン合金などの粉末，プロセススペックが制定され，利用可能となっている。図1に示すキープロセスパラメータは，認証機関の認める公共規格要求も踏まえ，プロセスパラメータの種類と範囲を検討している。

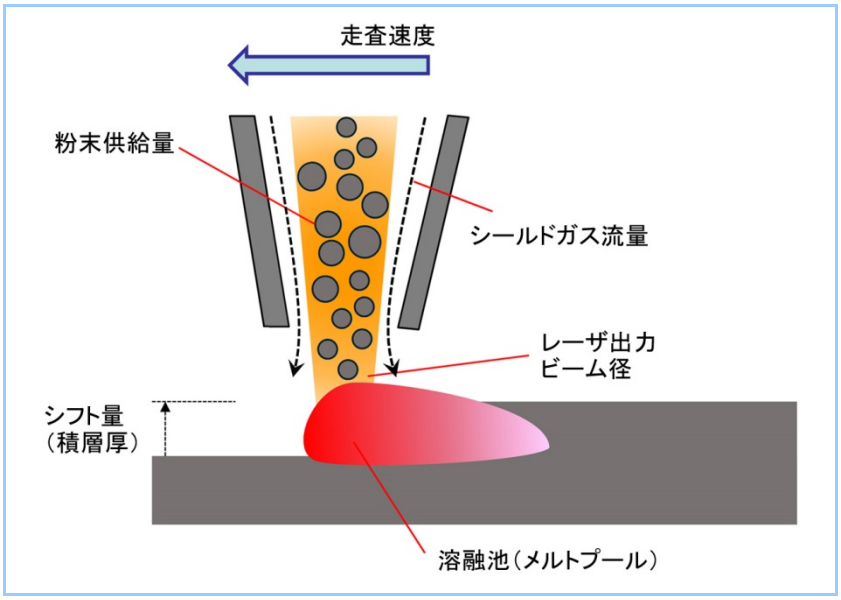


図1 DED 造形プロセス模式図とキープロセスパラメータの代表例

2.3 チタン DED プロセスの開発

当社では 2018 年以降，チタン DED 造形プロセスの開発に着手し，融合不良などの内部欠陥が少ない良好な内部品質が得られる標準造形条件を設定してきた。また，Ti-6Al-4V は，α，β 2相組織となることが知られており，DED 造形時はα－β変態温度（約 995℃）をまたいで凝固することから，β粒内に針状α相が析出した組織となる。この際，前述の通り，造形時の入熱と冷却速度に依存して結晶粒径，結晶形態などの材料組織が変化することとなる。代表的なチタン DED 造形組織を図2に示す。また，これまでの研究成果から得られたエネルギー密度（＝レーザ出力／（走査速度×ビーム径））と結晶粒径の関係を図3に示す。エネルギー密度が増加するにつれ，入熱も増大し，結果的に結晶粒径は粗大化する傾向となることがわかる。一方，エネルギー密度が低下すると図4に示すような融合不良などの内部欠陥の発生リスクが増大するため，内部品質と材料組織の両方が要求を満足できる造形パラメータ範囲を設定することが重要である。なお，材料組織，内部品質に影響する溶融池の凝固過程は造形パラメータだけでなく，粉末特性や造形物形状（造形パス）にも依存する複雑な現象であるため，当社では溶融凝固過程を含めたシミュレーション手法を活用したプロセス開発にも取り組んでいる。

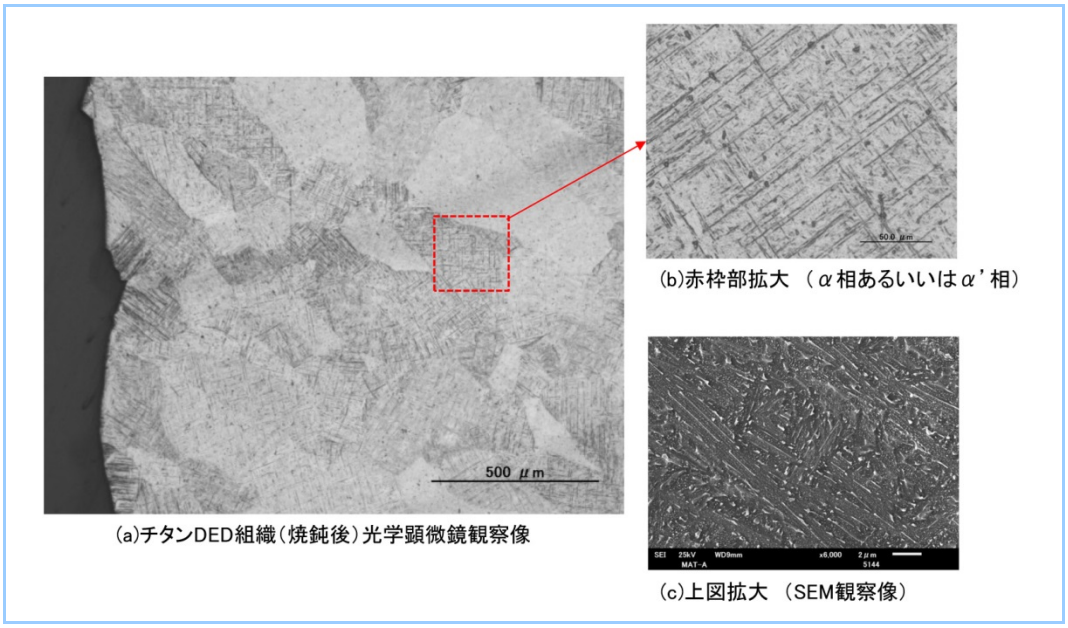


図2 代表的なチタン DED 造形材の組織

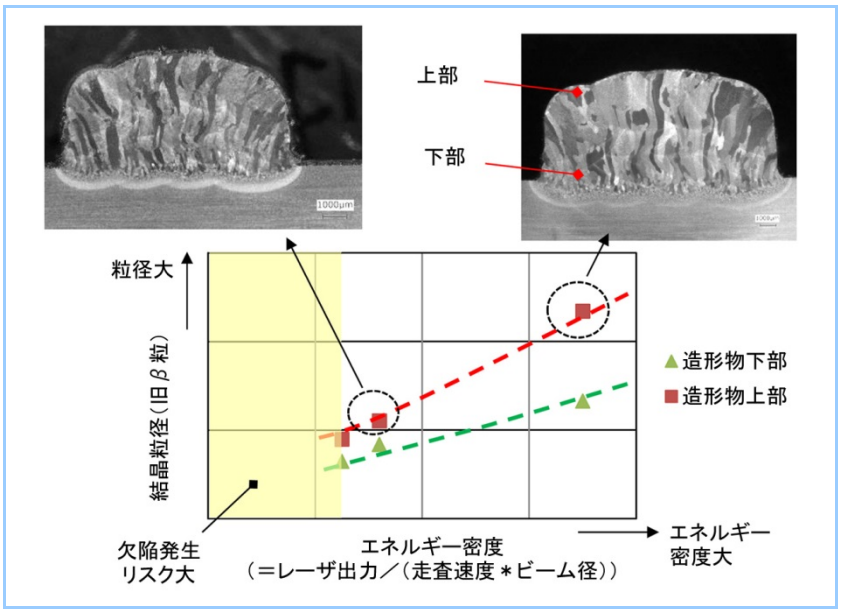


図3 チタン DED 造形におけるエネルギー密度と結晶粒径の関係

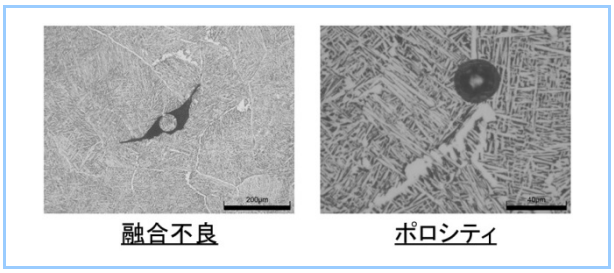


図4 チタン DED 造形における内部欠陥

標準的な造形パラメータにより試作したチタン DED 供試体の引張試験結果を図5に示す。従来のチタン鍛造材と同等レベルの引張強度特性が得られることを確認している。

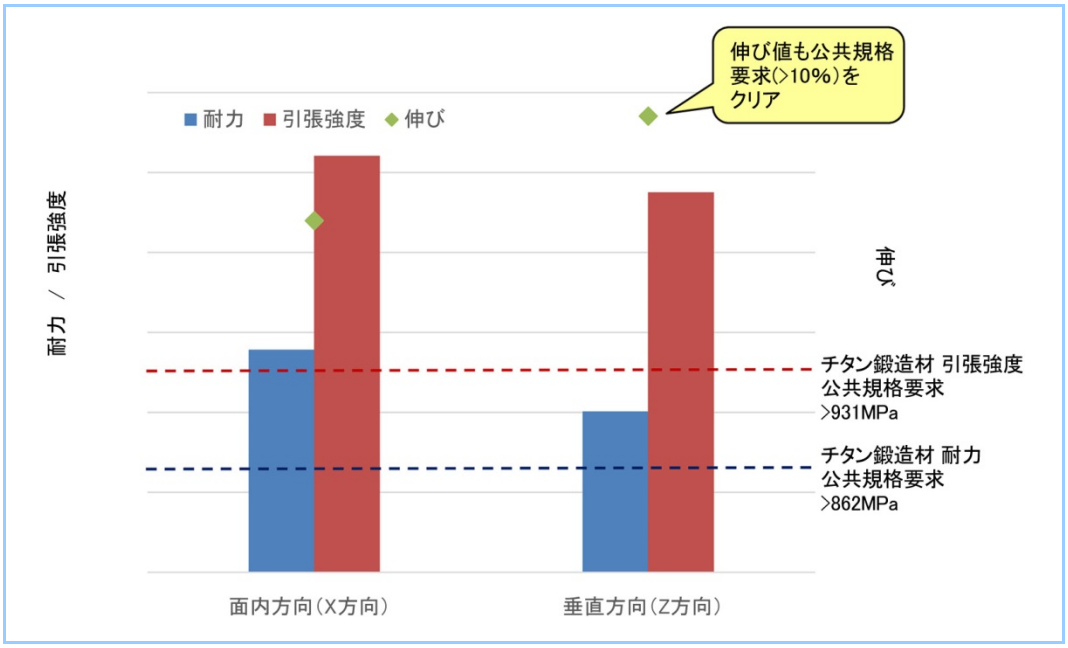


図5 チタン DED 造形材(焼鈍後)の引張強度特性

3. 金属/樹脂 AM 井桁接合技術の開発

近年，航空機，自動車をはじめとする輸送機器の軽量化の必要性がますます高まっており，金属構造の一部を樹脂材料へ置き換えるマルチマテリアル化(金属/樹脂一体構造化)の開発が盛んである。マルチマテリアル構造では異材接合となることから，金属/樹脂接合技術の開発が必要であり，金属/樹脂の接合部には接着剤による接合や金属表面へ特殊な表面処理を行い射出成形で接合する方法などが提案されているが，このような従来接合法で得られる金属／樹脂継手構造は，接合前の界面状態による強度ばらつきや，運用中の環境からの吸湿による強度低下が生じるため，強度部材には適用されていないのが現状である。

当社では，強度部材への適用を目標として，高信頼性・高強度な金属/樹脂接合技術の開発に取り組んでいる。特に，金属 AM 技術を活用して機械的な嵌合が可能となる AM 井桁接合技術はその有力候補である。AM 井桁接合技術とは，金属側接合表面を井桁(ラティス)構造化し，井桁部に接着剤や射出成型などで樹脂を注入，固化させることで金属と樹脂の一体構造を得る技術であり，井桁構造を有する金属側部材は PBF 方式 AM 技術により造形する。図6に AM 井桁接合プロセスの模式図と井桁構造の一例を示す。AM 井桁接合では，環境による吸湿等の影響を受けやすい接着剤，樹脂等の接着力によらず，嵌合による機械的な結合力が主体となることから，従来工法に対し，接合強度，信頼性の観点で優位になると考えられる。

井桁接合を活用した金属/樹脂接合部の高強度化のためには井桁形状の適正化が重要である。接合部の荷重伝達，温度変化による熱ひずみ緩和の観点に加え，樹脂が井桁内部に欠陥なく充填できる製造プロセスの点で問題のない井桁形状を設定し，これまで，接合部の検証試験を重ねてきた。金属/樹脂 AM 井桁接合供試体の外観を図7に示す。静強度，疲労特性評価の結果から，従来の接合技術に対して AM 井桁接合技術で得られる接合継手は,強度が高く，吸湿後の強度低下もなく，強度のばらつきも非常に小さいことを明らかとした。射出成型樹脂(PEEK-CF30)と Ti-6Al-4V 合金造形体を組み合わせた継手部引張強度試験結果を図8に示す。継手部の引張強度は 70MPa を超え，樹脂母材部で破断する。また，継手部の疲労試験結果を図9に示す。同様にせん断引張り疲労寿命は，最大 20MPa 程度の応力(応力比 0.1)で 10^6 回を超え，樹脂と金属の接合事例としては驚異的に高い接合強度を示し，破断も吸湿の有無に関わらず，樹脂母材部で生じることを確認している。

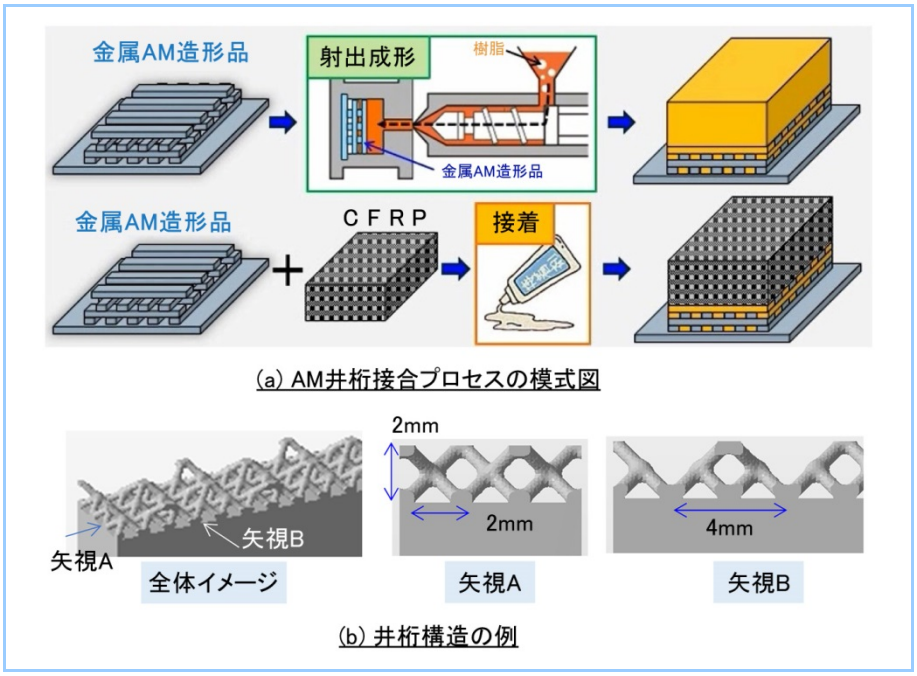


図6 井桁構造例と AM 井桁接合プロセスの模式図

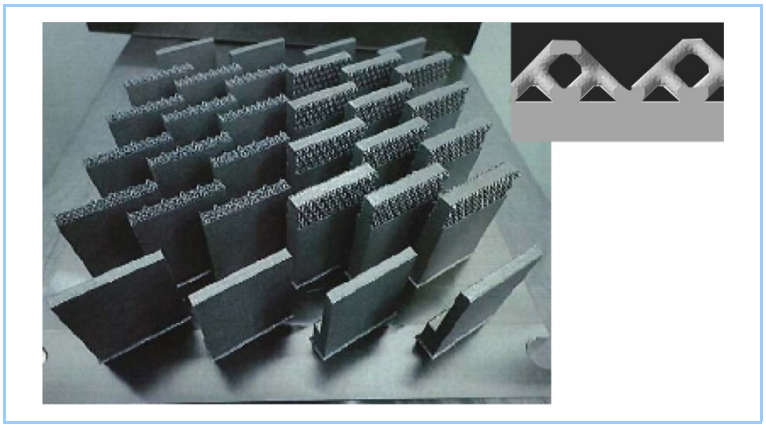


図7 金属/樹脂 AM 井桁接合供試体の外観

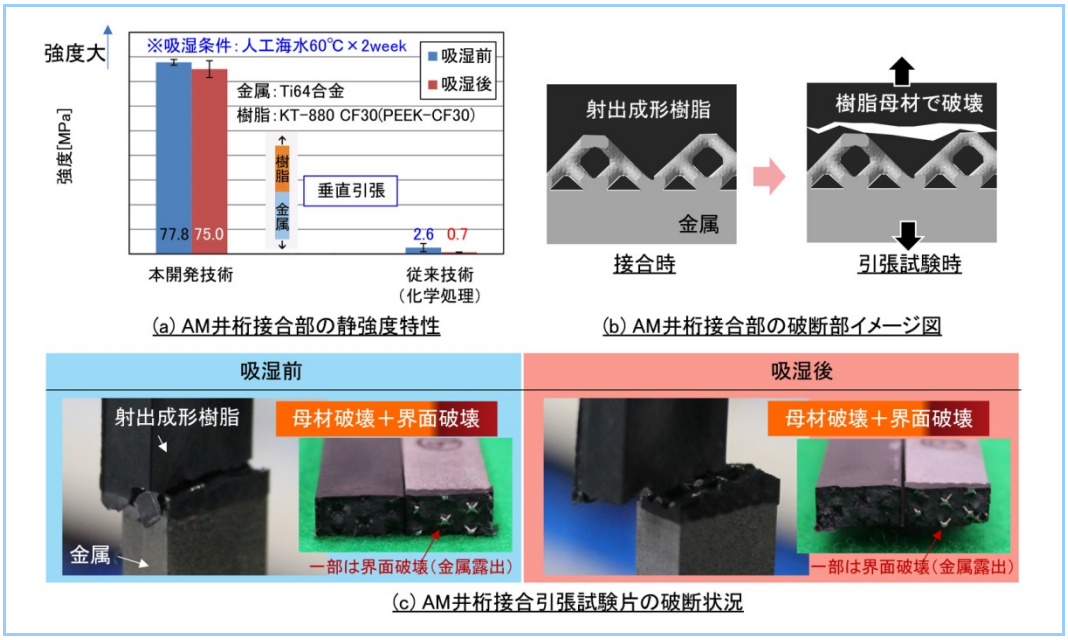


図8 AM 井桁接合部の静強度特性

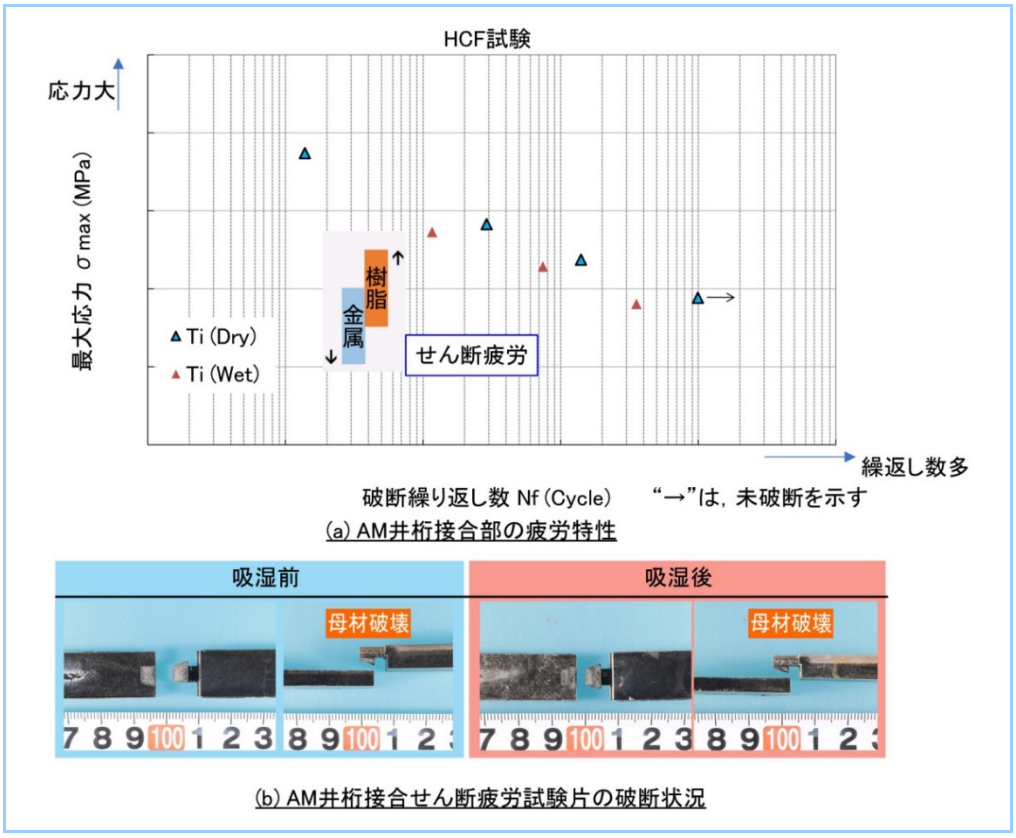


図9 AM 井桁接合部の疲労特性

4. 治工具への樹脂 AM 技術の適用

航空機は，一般的に 100 万個以上の部品から構成され，単品部品の製造から組立，各種機能試験に至るまで，多種多様な治工具類の適用が不可欠である。特に多品種少量生産であるがため，手のひらサイズの手工具から数メートル以上の組立治具に至るまで数十万個に及ぶ治工具類の製作・管理は，製作コスト，管理コスト，製作リードタイムの観点で長年の課題となっている。そこで，当社では，製作コスト低減，製作リードタイム短縮を狙いとして，治工具類への樹脂 AM 技術の適用検討を進めている。市販されていない特殊形状を有する治工具類は一品一葉図面を基に特注製作する場合が多く，特に製作コスト・リードタイムが課題となっていることから，まずは，それらの中でもショップエイドと呼ばれる治工具類をターゲットとして，樹脂 AM 技術の適用を進めている。なお，ショップエイドとは製品品質への影響が比較的軽微であるために精度保証や耐久性保証の要求が無い治工具類の総称である。ショップエイドには樹脂 AM の一般的な造形精度（±0.2 mm）や剛性（1～3 GPa）で，製品品質上，問題なく適用できるものが多く，考案・造形・実機検証のサイクルを短時間で回すことが可能である。

治工具製作に適用する FFF（Fused Filament Fabrication）方式 AM 装置の造形原理を図 10 に示す。FFF 方式はフィラメント状の材料をヘッド内のヒータで溶融・堆積させることで3次元的な形状を製作する造形方式である。特徴として，装置価格・材料価格が安価であること，装置自体がコンパクトであることから実験棟，工作現場，オフィスなど場所を選ばず装置を設置できること，また造形物内部をハニカムや格子などの形状で造形可能であることなどが挙げられ，当社でも総合研究所，エアロストラクチャー事業部などのいくつかの部門で利用されている。なお，FFF 方式 AM 造形では，3D データを用意すれば，概ね1～2日程度の短時間で造形を完了できるため，製造現場のカイゼンアイデアをいち早く検証し，現場適用を可能とできるため，航空機部品の生産性向上に大きな力を発揮している。

一例として，江波工場・大江工場の航空機胴体パネル組立ラインで使用されているハンドツールアタッチメントへの適用事例を紹介する。胴体パネルの組立は，ハンドドリルによる穴あけ，ハン

ドリベッターによる打鋲，シールガンによるシール剤塗布作業などから構成されるが，パネルは機種や部位により異なる曲率を持っているため，市販の工具では片当たりやガタつきが生じることが多い。そこで実機曲面に合致した形状を持つツールヘッドを樹脂 AM 装置で製作，既存のハンドツールに装着して組立作業に適用できるようにした。また，大江工場では穴あけと同時に集塵可能なドリルガイドを樹脂 AM で試作し，金属工具製作前の寸法確認などの用途に用いている。樹脂 AM により製作したハンドツールアタッチメントの事例を図 11 に示す。

このようなハンドツールは機体サイズ，部位ごとに多種多量に製作する必要があるが，樹脂 AM を活用することで短時間かつ低コストに試作，実機適用検証が可能となるとともに，作業性，安全性向上や作業員の負担軽減にも貢献することができた。現在，このような AM 製治工具は大江工場における航空機生産ラインで活用されており，既に数百種類，数千個以上が実用化されている。

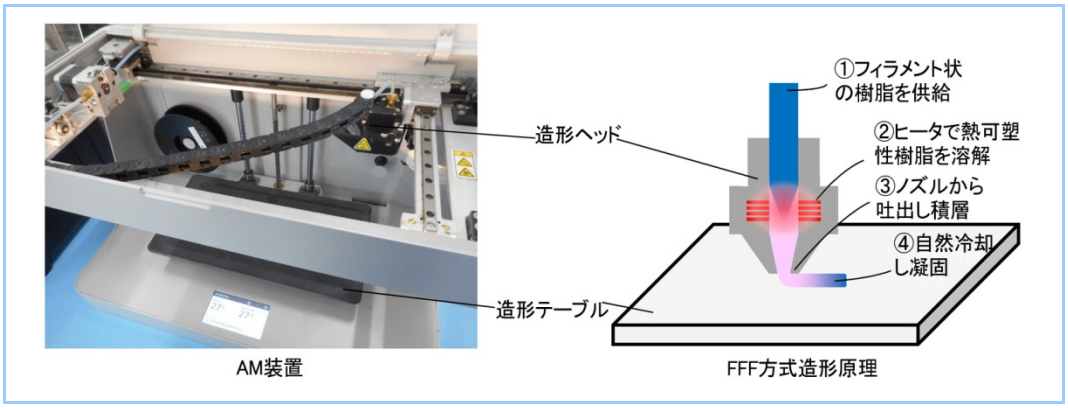


図 10 FFF 方式樹脂 AM 造形原理

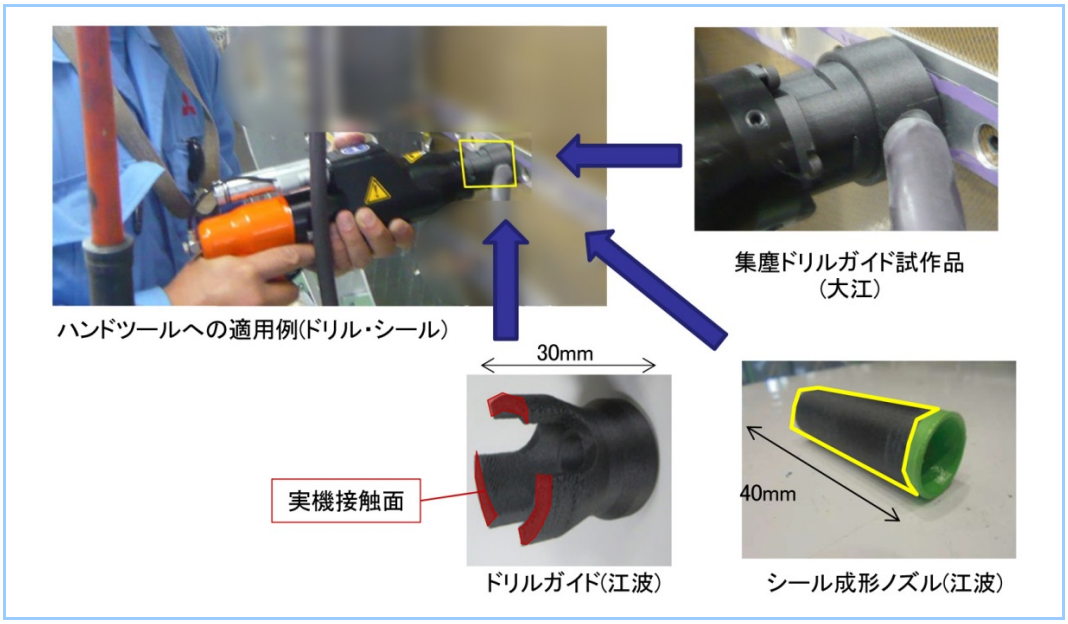


図 11 樹脂 AM を活用したハンドツールアタッチメントの試作例

5. まとめ

AM は，材料，装置，造形プロセス，品質保証など複数の分野をまたぐ技術開発が必要であり，世界的に技術開発のスピードの速い分野であるが，製品への適用に当たっては，溶融・凝固，伝熱，相変態など，基礎的な物理現象を理解した上で，適用部品に応じた品質要求を満足できる適切なプロセスを設定することが肝要である。

また，航空宇宙製品への適用に当たっては，政府機関等による認証も必要となることから，当社は，グローバルな国際規格の動向も注視しながら，これまでの設計・製造手法にとらわれず，AM の特長を生かした製品開発，要素技術研究を加速していく。