平成 30 年度航空機産業調査報告サマリー
「チタン大型鋳造・鍛造の最新実態調査」

本調査は、我が国航空機産業のあり方を検討するために、チタンの大型鋳造・鍛造における現状の課題の整理と分析を行い、将来の航空機及びエンジン製造事業のあり方の判断に役立てることを目的として実施した。

チタンの大型鋳造・鍛造は、ロシア VSMPO-AVISMA、米国 Precision Castparts Corp（以下、PCC）など少数の企業に依存する構造であるため、日本を含む航空機関連企業各社においては慢性的な供給遅れが発生したり、安定的供給に不安を抱えたりしている。かかる状況を克服することは、足下の課題解決にとどまらず、日本の産業競争力強化にもつながると考えられる。

チタンの大型鋳造・鍛造を国内で行うためには、設備だけでなく、製造ノウハウやコストなどの課題があると言われる中、現状の分析と今後の対応策及びその実現可能性について調査・分析した。

以下、調査項目別に結果概要を報告する。

①チタン鋳造・鍛造品の市場分析

1）チタン鋳造・鍛造品の需要動向

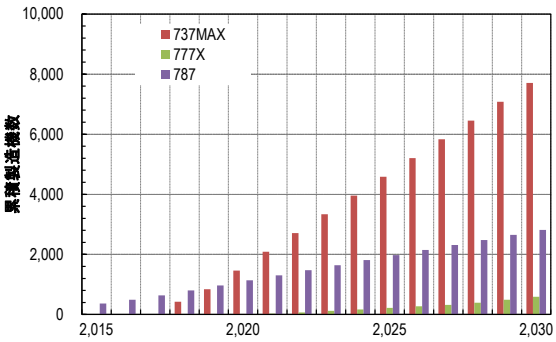
チタンの需要動向について、エンジン（鋳造）／機体（鍛造）別に足元の状況から 2030 年までの伸びを推計した。

航空機部材に使用されているチタン材には、展伸材、鍛造材、鋳造材があり、展伸材は、油圧管などに適用されている。チタン鍛造材は、機体ではファスナー、結合部品（コード）、ドアフレーム、ウィンドフレーム、エンジンナセル部品、パイロン部品、エンジンではファン、コンプレッサー、タービンのケース、ディスク、コンプレッサーのブレード、シュラウド、シャフト、および降着装置の脚柱などに使用されている。また、チタン鋳造材は、機体では、排気ダクト、ヒンジ（ブラケット）、ファンフレーム、複雑な形状をしたケース部品、低圧タービンブレード（TiAl）などに使用されている。

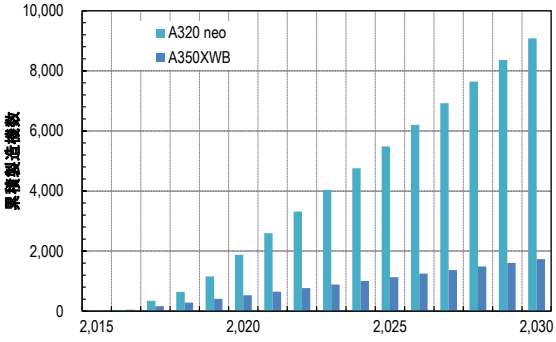
機体・エンジンの需要動向について、ボーイング社、エアバス社の生産計画に基づき、機体、およびエンジンの需要動向を予測した。

その結果、今後 2030 年までは、ボーイング社、エアバス社ともに席数 100～200 席クラスのナローボディ機（737MAX、A320neo）の生産（納入）機数が他のクラスの航空機に比べて著しく増加しており、2030 年には合計：約 16,800 機、また、ワイドボディ機は、合計：約 5,100 機に達すると推測される。

●航空機機体の需要動向



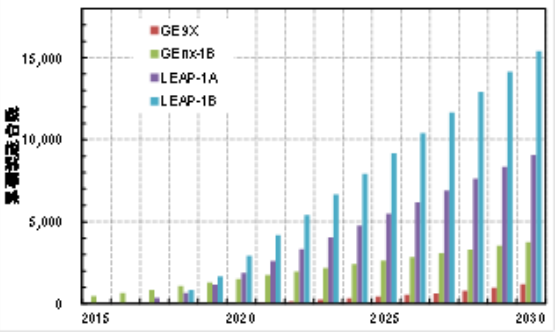
a)ボーイング社製航空機



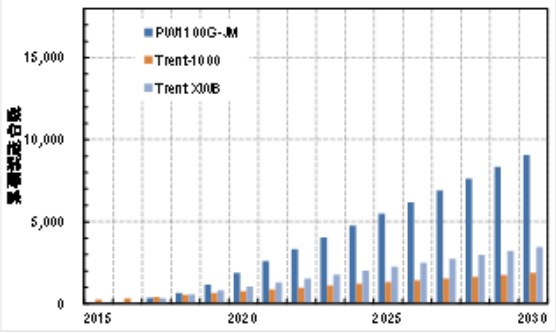
b)エアバス社製航空機

また、エンジンでは、ナローボディ機（737MAX、A320neo）に搭載される LEAP-1B、LEAP-1A、PW1100G-JM の生産台数が増加して、合計：約 25,000 台、GEnx-1B、Trent XWB が合計：約 7,000 台に達すると予想される。

●エンジンの需要動向



a)GE社製、CFMインターナショナル社製エンジン



b)P&W社製、ロールス・ロイス社製エンジン

さらに、2030 年には、これらのエンジンに必要とされる、TiAl 製低圧タービンブレードは約 11 万個、また、チタン製コンプレッサーケース、タービンケースには、約 7,000 t のチタン合金が必要になると予想される。

チタン市場は、欧米の航空宇宙産業の需要動向と中国の生産動向に大きく影響を受けると言われており、中国、米国、ロシア、日本で生産の 9 割以上を占めている。

調査会社のデータを用いて、チタンミルベースでの鋳造品／鍛造品別にみたチタン製品の割合は、前者が数%であるのに対して後者は 4 割を超えており、圧倒的に鍛造品の割合が高い。産業別では、航空宇宙産業がほぼ 5 割を占めるほか、産業向けが約 4 割で、この 2 業種で 9 割以上を占めている。

主要航空機用チタン製部品メーカーのサプライチェーンについては、金属チタンのサプライヤー（VSMPO-AVISMA、TIMET、RTI など）から、鍛造メーカー（Avio S.p.A、GKN Aerospace 、 ALCOA 、 Bharat Forge, Ltd. 、 PCC Aerostructures 、 Ducommun

AeroStructures, Inc.、Aubert & Duval、Asco Industries N.V、United Technologies Corporation)、鋳造メーカー（AeroEdge、Avio Aero、Mecachrome France、三菱重工業株式会社、ITP、MTU Aero Engines、IHI、Leistritz Turbomaschinen Technik GmbH、Alcoa Howmet、PCC Airfoils, Inc.など）にチタンが供給され部品に加工された後、Tier1メーカー（三菱重工、川崎重工、SUBARU、IHI など）でエンジンモジュール、機体モジュールに組み立てられ、最終的に航空機 OEM（ボーイング社、エアバス社）で製品となる。

2）VSMPO-AVISMA、PCC 等のビジネスモデル

今回調査では、VSMPO-AVISMA、PCC、ATI（Allegheny Technologies Inc)、RTI（RTI International Metals)、などの企業を採り上げ、航空機事業における取り組みなどを整理した。

各社とも 2000 年以降、チタンまわり、特に鍛造品、部品加工などを強化していることが推測され、収益的にも高いパフォーマンスをあげている企業が確認された。

特にチタン鍛造分野における VSMPO-AVISMA や、チタン大型鋳造分野における PCC の企業競争力は非常に高いものと考えられる。

②国内金属鋳造・鍛造産業の行方

1）チタン大型鋳造・鍛造における現状

チタン鋳造製品の生産量は、チタン展伸材、鍛造材に比較して少量であり、一部のエンジン部品に限定されている。これらのメーカーにおいては、鋳造部品については、一部のタービン翼などを除いて、チタンの小型、大型鋳造は行われていない。また、鍛造部品については、エンジンケースなどの小型部品の一部が日本で鍛造されている。また、大型鍛造部品としては、チタン製降着装置、主翼-胴体結合部品（コード）など一部の部品が国内で生産されているが、その量は少ない。

また、PCC、ARCONIC など海外の航空機部品メーカーは、コア技術・製品（PCC：鋳造、ARCONIC：Al 製錬・鋳鍛造・加工）を元に、他社の M&A などにより、保有する技術・製品の拡張に努めており、製品製造の川上～川下まで、アルミ、チタン、ニッケル基合金など航空機に使用される金属種の拡張を図っている。

日本においては、材料メーカー（チタン：2 社、アルミ：4 社、Ni 基超合金：4 社)、加工メーカーが分散しており、国内競合状態に陥っている。

2）国内における課題

チタンは反応性が高く、雰囲気、鋳造型と反応して酸化物などを生成しやすい。製品に混入した反応生成物は疲労き裂の起点となるなど、不具合の原因となる。このため、チタンの鋳造においては、雰囲気制御、不純物混入のない溶解方法などの確立が必要であり、

これらがチタンの鋳造のハードルを上げている。特に大型部材を鋳造する場合には、これらの装置の規模が大きくなりより参入障壁は高くなるため、国内におけるチタン鋳造はブレードなどの一部の小型部品に限定されており、海外から部品を調達しているのが現実である。

また、大型鍛造においては、VSMPO-AVISMA は、ソ連当時から鍛造部品の生産を継続しており、装置、ノウハウなどを十分に保有している。一方、日本は、降着装置などの比較的単純な形状の鍛造品を供給しているが、コードなどの複雑形状の部品に関しては、型設計、鍛造プロセスに関するノウハウの蓄積が課題となっている。

③大型鋳造の代替技術及び素材の動向

1)金属積層造形法

近年、航空機用部材の製造方法として、鋳造、鍛造の他に、金属積層造形法が注目されている。金属の積層造形には、粉末床溶融結合法（Powder Bed Fusion: PBF)、指向性エネルギー堆積法（Directed Energy Deposition: DED）が使用されており、粉末床溶融結合法は、レーザーの熱エネルギーにより、粉末を敷き均したシートの特定領域を選択的に溶融・結合させる積層造形法、指向性エネルギー堆積法は、金属材料（粉末、ワイヤー）を供給しながらレーザー等で溶融・堆積させる積層造形法である。

粉末床溶融結合法では、中空部品、入れ子になった部品など、鋳造、鍛造では得られない複雑形状が成形可能であるが、造形速度が低く、造形できる大きさが小さい（1 m 四方程度)、造形後に熱処理、HIP などによる欠陥除去工程が必要という課題が残る。一方、金属積層造形法は、積層ヘッドの移動範囲、または装置を設置する真空チャンバーなどの大きさに制限されるが、粉末床溶融結合法と比較して大型の部品を製造することができ、既存製品の修理にも適用可能、複数の材料を用いた造形が可能、高速度造形が可能などの利点がある。また、金属積層造形法は、従来の鋳造、鍛造では製造不可能である複雑形状部品（冷却空気通路を有するタービンブレード）が作製可能、ニアネットシェイプで製造することによる切削時間短縮、廃棄原料の低減によるコスト低減が可能である。

欧米においては、GE などの企業、国研などにより金属積層造形の研究が推進されており、航空機関系では、エンジン部品（TiAl 製タービンブレード、燃料噴射ノズル、ドアヒンジ、内壁補強材）などの実用化が進められていると共に、積層造形技術の主翼スパーなど大型部品への適用が研究・開発されている。また、米国においては、国家的推進組織（America Makes）によって、製造条件のデータベース化が図られており、積層造形技術の開発・普及が国家ベースで進められている。

日本においては、TRAFAM（技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構）にて製造装置などの開発が行われているが、積層造形装置、適用などにおいては、欧米に遅れを取っているのが現実である。

●積層造形法の分類

大分類	分類	代表的な材料	材料の形態	接合方法	加工法の例	概要
選択的固化方式	液槽光重合法 Vat Photopolymerization: **VP**	光硬化性樹脂、セラミックス？	液体	光重合・接着	・光造形法	液槽に溜めた光硬化性樹脂をレーザー等により部分的に選択、効果させて積層する造形方法
	粉末床溶融結合法 Powder Bed Fusion: **PBF**	**金属**、樹脂、セラミックス	粉末	**溶接**	・レーザー焼結（Laser Sintering: **LS**） ・レーザー溶接（Selective Laser Melting: **SLM**） ・電子線溶融（Electron Beam Melting: **EBM**）	レーザーや電子ビームの熱エネルギーにより粉末材料の特定領域を選択的に溶融・結合させる積層造形方法
	結合剤噴射法 Binder Jetting: **BJ**	樹脂、**金属**、砂、石膏、セラミックス	粉末	接着	・3DP（Three Dimensional Printing）	液状の結合材（バインダー）をノズルより噴射して、粉末材料を結合させる積層造形方法
選択的材料供給方式	材料押出法 Material Extrusion: **ME**	熱可塑性樹脂	フィラメント	**溶接**	・溶融物堆積法（Fused Deposition Modeling: **FDM**）	加熱することにより溶融状態になる樹脂をノズルより押し出して積層させる造形方法
	材料噴射法 Material Jetting: **MJ**	光硬化性樹脂、ワックス	固体または液体	**溶接**、重合・接着		液体材料をノズルより噴射して選択的に堆積させていく積層造形方法
	指向性エネルギー堆積法 Directed Energy Deposition: **DED**	**金属**	粉末または固体	**溶接**	・Laser Engineerd Net Shaping: **LENS**、 ・Laser Additive Manufacturing Process: **LAMP** など	金属材料を供給しながらレーザー等で熱エネルギーを与えて溶融・堆積させる積層造形方法
その他	シート積層法 Sheet Lamination: **SL**	紙、樹脂、**金属**	シートまたはテープ	接着、**溶接**	・Laminate Object Modelling: LOMなど	シート状の材料を層ごとにレーザーやカッターで切断しながら積み重ねていく積層造形方法

出典）みずほ情報総研レポート Vol.9　2015、新野俊樹；型技術 第 29 巻 第 2 号 2014 年 2 月号 p.18 より整理した。

2）耐熱性改善版 CFRP の動向

航空機用炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の材料開発、構造成形製造技術においては、日本の優位性はあるものの、欧米との厳しい競争に晒されている。SIP　革新的構造材料では、現用の CFRP プリプレグ利用オートクレーブ成形材の高生産性化・強靭化に加え、日本独自の脱オートクレーブ成形材、熱可塑性樹脂 CFRTP 材、耐熱 CFRP 材の開発を進め、国際競争力のある最先端、かつ、適用拡張性のある材料技術構築を目的として研究開発が進められている。現在、耐熱温度は 300℃程度であり、チタンが使用されるエンジン部位への適用は困難であると考えられる。

④調査のまとめ

チタンは反応性が高く、鋳造においては雰囲気制御、不純物混入のない溶解方法などの確立が必要である。これらがチタンの鋳造のハードルを上げており、特に、大型部材を鋳造する場合には、これらの装置の規模増大により参入障壁は高くなる。現在、国内におけるチタン鋳造はブレードなどの一部の小型部品に限定されており、海外から部品を調達しているのが現実である。

また、大型鍛造においては、海外メーカーは装置、ノウハウなどを十分に保有している。一方、日本メーカーは、降着装置などの比較的単純な形状の鍛造品を供給しているが、コードなどの複雑形状の部品に関しては、型設計、鍛造プロセスに関するノウハウの蓄積が課題となっている。

近年、鍛造・鋳造に加えて、金属積層造形が航空機部品の製造方法として注目されている。積層造形法は、複雑形状部品を生産でき、かつ大型の部品の生産にも対応できるという特徴がある。欧米では、ナショナルプロジェクトなどにより大学・公立研究所などを巻き込んで、新規部材の開発から既存部品の修理に至るまで、製造方法・応用に関する様々な知見が蓄積されている。また、航空機用部品メーカー、機体 OEM、エンジン OEM は、これらの技術を積極的に取り込んでいる。さらに、欧米では、開発された積層造形装置などを製造・販売するベンチャー企業が、大学・公立研究所からスピンアウトして誕生しており、最新の技術が容易に市場に出現する環境が整っている。

日本においても、積層造形装置開発などのナショナルプロジェクトが進められているが、その応用に関しては各サプライヤーに任されており、大学などの参加も少ない。このように、積層造形に関する人材が限られており、このままでは、欧米の後塵を拝す懸念がある。

金属積層造形では、造形方法の大規模化、造形条件の探索と共に、製品の欠陥除去、材料となる金属粉末に関する研究開発が進められている。また、米国などは、造形条件のデータベース化を進め、造形技術に関する属人的な要素を排除して、いかなる環境でも一定の品質の製品を入手出来るシステムの実現を目指している。航空機ビジネスに積極的に取り組んでいくためには、積層造形技術に関する情報・データ共有などを進め、産官学で協力して、積層造形技術の研究開発を進めるべきと考えられる。

以上