

# ジェットエンジンを支える IHI のオンリーワン技術

## シャフト塗装の自動化

ジェットエンジンのシャフトの塗装工程は、従来、熟練工による手作業に頼っていた。熟練技能者の確保が困難になりつつある状況下で、世界で初めてエンジンシャフトの自動塗装装置を実用化した。これによって、塗装品質の向上を実現するとともに、今後の需要増加にも対応できる体制が整えられた。

株式会社 IHI  
技術開発本部 総合開発センター  
機械技術開発部, 電機システム開発部

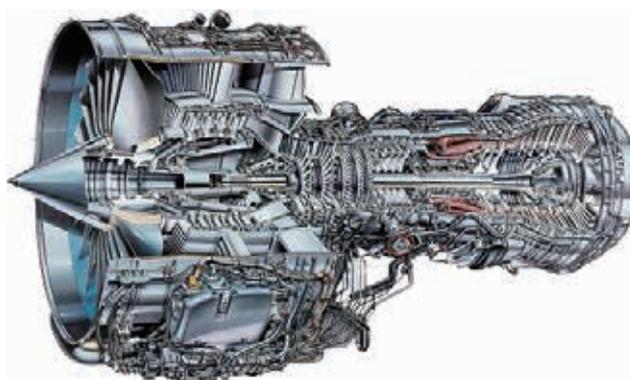


エンジンシャフト自動塗装装置

### 「職人技」が支えてきた塗装工程

民間航空機エンジンは、ファン、圧縮機、燃焼器、タービン、シャフトなどさまざまな部品が、それぞれの製造を得意とする世界各国のメーカから調達さ

れ、最終製品として組み立てられている。IHI はファン、ファンケース、圧縮機、タービン、シャフトなどの部品を製造し世界に供給している。なかでもエンジンシャフト、特にロングシャフトの供給は世界全体で70%以上のシェアを占めるまでに至っている。



V2500 エンジンカット図  
(提供：一般財団法人日本航空機エンジン協会)



エンジンシャフト

上図に示すように、エンジンシャフトはタービンによって得られた回転力をファンなどに伝える重要な機能が求められるが、単なる棒状の部品ではない。徹底した軽量化が求められる航空機では、機体だけでなくエンジンの軽量化も重要な課題である。断面図からも分かるように、エンジンシャフトは中空構造になっており、さらに必要な機能や強度に応じて外径や内径が定められ、肉厚が軸方向に変化する複雑な形状になっている。また、エンジンシャフトはジェットエンジンの低温部から高温部にかけて高速で回転するため、精密機械加工や熱処理、表面処理などの特殊工程が多用されている。防錆と耐熱性能の向上のための塗装工程もその一つである。高精度な機械加工などさまざまな製造工程を終えたエンジンシャフトには、特殊な塗料が塗布・焼き付けされ、最終的なバランス調整を行ったうえで、製品として出荷される。

この塗装工程は、これまで熟練工による手作業によって行うしか方法がなかった。特にシャフト内面の塗装については、ホースを通じて塗料の供給を受ける細い管の先に塗装ガンと呼ばれる塗料噴出機構の付いたものを、作業者が微妙な送り操作をすることによって行われる。塗膜の厚さは平均で数十  $\mu\text{m}$  で一定のばらつき範囲内に収めなければならない。

一方で、塗布する塗料は、アルミニウムの粉体を含み非常に沈殿しやすいという特性があり、液だれ・液づまりなどが生じやすい。さらに、エンジンシャフトの内部が軸方向に複雑な形状変化をしているような状

況のもとで、要求される品質の塗膜を実現することは困難を伴う。

それを解決してきたのが、熟練工のいわゆる「職人技」である。エンジンシャフトにもさまざまな形状があるが、短く比較的単純な形状のものでも塗装を任されるには2～3年の経験が必要とされている。特に、ロングシャフトと呼ばれる3mに及ぶ大型エンジン用シャフトの塗装ができるようになるには10年以上の経験が必要であると言われている。これは、シャフトが長くなると、特にエンジンシャフト内中央部の状況を目視などによって確認することが困難になり、経験と勘に頼る作業が増えるためである。

手作業による塗装作業の場合、最も時間の掛かるロングシャフトの塗装では、熟練工でも1日に2本程しか塗布することができなかった。エンジンシャフトの増産に対応するためには、熟練工の養成が必要であるが、それには長い時間が必要になる。この課題の解決策として、世界でもまだ実現していないエンジンシャフト自動塗装装置の開発に挑戦することになった。

## 匠の技を「再現」するのではない

熟練工の「匠の技」とは、具体的にどのようなものであろうか。塗料を噴出する「塗装ガン」は、エンジンシャフト内で塗料を噴出する際、方向によって噴出量の変動する。また、気温、湿度などによる微妙な噴

出量の違いもある。さらに、塗料タンクからホースを経て塗装ガンまでの圧送行程で塗料が沈殿しないように、ときどきホースに振動を与えてやることも必要となる。このように、従来の塗装装置の機械的な癖を人間の熟練した技能で補い、必要な塗装膜厚を実現するのが「匠の技」である。

しかし、種々の検討を加えた結果、これらをそのまま自動化するのは困難であることが分かった。人間による熟練した技能をそのまま模倣するという考え方を離れ、自動化に適した機械装置を新たに創作・導入し、そのもとで最新の制御手法に基づいた制御装置との組み合わせで、従来の塗装装置に置き換えていったことが、エンジンシャフト自働塗装装置の成功へ導いたと言えるだろう。

右図に今回実用化したエンジンシャフト自働塗装装置の概要を示す。工場には空調設備の整った専用エリアが設けられ、作業環境の改善が図られるとともに、気温、湿度による塗装への影響が回避されている。

従来は、シャフト内で径方向全方位に塗料を噴射する塗装ガンを軸方向にストロークし、シャフト内上下の塗膜厚さを均一化するためにシャフトを 180 度回転させるという手順を必要としていた。自動化に当たっては、これを一方向（鉛直上向き）にのみ噴出するように塗装ガンを固定し、代わりにシャフト本体を連続的に回転させるようにした。これによって、噴出方向によって塗料の噴出量が変わるという従来装置の不確定要因を取り除くことができ、かつ 180 度ごとにシャフトを回転させる手間も不要になった。

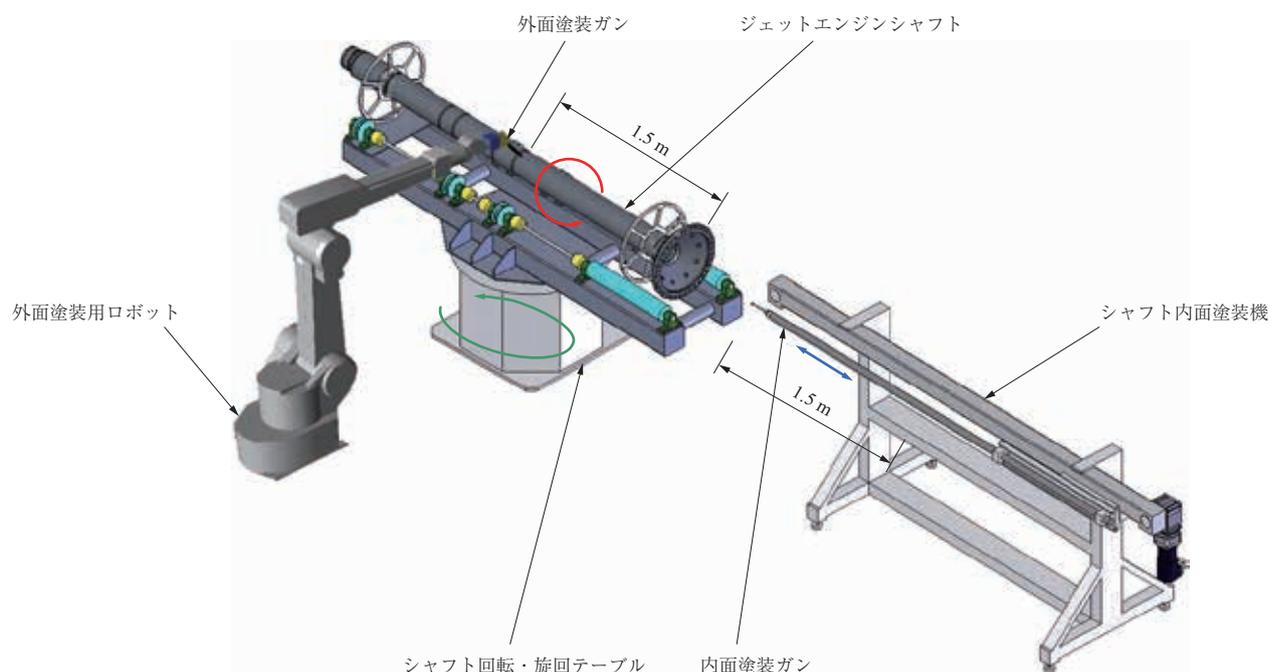
また、塗料の供給方法の変更も重要なポイントである。アルミニウム粉末を含んだ塗料は、いわば「研磨剤」のようなもので、通常のポンプを使用することはできない。塗料の沈殿を回避し、安定して圧送できる機構・システムについて、さまざまな方式を試行したが、最終的に、チューブポンプ圧送方式の供給法を新たに考案し採用した。チューブポンプは、弾力性のあるチューブをローラが回転してチューブ内の液体を押し出す方式である。ローラの 1 回転で押し出される容量が一定なので、精密な定量供給が可能となり、人工心臓などにも用いられている。この方式のメリットは、ローラの回転速度によって供給量をコントロールできるだけでなく、輸送用のチューブ径を小さくすることによって流速を増大できるため、小流量でも塗料の沈殿防止を可能とすることにある。

今回の開発で最も工夫を要したのは、制御系の調整であった。塗装は、回転しているエンジンシャフトの内部に、塗装ガンが軸方向に入っていくことでらせん状に進められる。塗膜厚さは、エンジンシャフトの回転速度と塗装ガンの移動速度、そして塗料の噴出量で決まるが、最大の課題は、軸方向に内径が変化する部位において、いかに適切な塗装条件を実現して塗膜厚さを要求値内に収めるかであった。この部分は従来、熟練工の「匠の技」に頼っていた。

この課題を克服するため、まず平板を用いた試験片レベルで、エンジンシャフトの回転速度、塗装ガンの移動速度、塗料の噴出量などに対応するパラメータ条件のもとに、得られる塗膜厚さの基礎データを取得し



熟練工による塗装作業の様子



エンジンシャフト自動塗装装置の概要

た。これをベースに実機のエンジンシャフトの塗装条件を設定し、これを実現する制御システムを設計した。そして、制御システムを実機へ適用することによって調整・改良を加えていった。この調整・改良作業は難航したが、最終的に所期の塗膜厚さを実現することに成功した。

なお、エンジンシャフトは外面にも塗装が施されるが、これには市販されている産業用ロボットを活用することで対応している。

### 需要増加に対応し、一層の品質向上を目指す

エンジンシャフトの自動塗装装置の開発によって、特にロングシャフトの塗装工程の生産性は大幅に向上した。従来は1日に2本の塗装が精いっぱいであったが、自動化後は1本当たり2時間程度にまで短縮された。

また、塗装の自動化には、品質向上というもう一つのメリットがある。すなわち、塗膜厚さ精度の向上および均一化である。自動化によって「匠の技」を超える精度を実現できる可能性が見えてきている。これは、塗装後のバランス調整工程の削減にもつながる可能性がある。バランス調整工程とは、エンジンシャフトの質量分布が回転軸に対して対称でないと回転時に

遠心力による振動が生じるため、この質量分布を微妙に調整することを言う。

しかし、塗装作業の自動化が実現したとはいえ、熟練工の役割は依然として重要である。エンジンシャフトにはロングシャフトのほかにもさまざまな種類があり、自動化するためにはそれぞれに最適な設定作業を行う必要がある。少量多品種への対応は、従来どおり熟練工が行い、大量生産には自動塗装装置を使用することで、柔軟な生産計画を実現することが可能になる。

なお、高品質のエンジンシャフト生産のため、IHIでは機械加工の精度向上、特殊表面処理などにさまざまな先進的な技術を適用している。エンジンシャフト自動塗装装置もその一つである。これらの努力が高い評価を受け、エンジンシャフトの納入先の一つであるPratt & Whitney社からは、優れた部品メーカーに贈られる「サプライヤー・ゴールド賞」を受賞している。

問い合わせ先

株式会社 IHI  
 技術開発本部 総合開発センター  
 機械技術開発部  
 電話 (045) 759-2823  
 URL : [www.ihico.jp/](http://www.ihico.jp/)