

## 航空エンジン —生産技術の進歩—

石川島播磨重工業株式会社  
航空宇宙事業本部生産センター 高橋良二

### 1. はじめに

ジェット機の推進器であるジェットエンジンは、実用化されてから50年あまりの間に改良に改良を重ねて、性能を飛躍的に上げてきた。それは、ジェット機に要求される「安全に」、「より多くのものを」、「より速く」、「より遠くまで」に加え近年では「対環境性」、「小回りの効く利便性」などの実現のためであり、多くの技術が開発され、改良されている。

本稿ではジェットエンジンの製造に関わる技術を中心に、要求性能についても紹介する。

### 2. 求められるジェットエンジンの性能

ジェットエンジンに求められる性能の尺度として第1に挙げられるのは、推力／重量比（推力とエンジン重量の比、以後「推重比」）である。この改善のため、推力の向上、軽量化が設計段階で進められている。推力の向上では高温化や圧縮比の向上など、軽量化では新材料や中空構造が採用され、50年代4以下であったものが現在では6前後にまで向上している。次に挙げられるのは、燃料消費率（燃費）である。これは自動車などで馴染みがあるが、ターボジェットから低バイパスターボファン、高バイパスターボファンとエンジン形式の進歩に伴い、現在では開発当初の約半分（0.6kg／hr／kgf）にまで改善されている。

また、安全・環境についても注目されてい

る。安全については、航空機の運行が大量輸送に移行してきており、航空機運行時のエンジントラブルの頻度が、安全運行の目安として注目されている。開発当初、性能優先で環境への配慮がされていなかったが、近年の世界的な環境保全の流れの中で、運行時の大気汚染や騒音が取り上げられ、それぞれ改善が図られている。

### 3. 性能向上に対する加工技術

#### 3.1 高温化への対応

ジェットエンジンの性能向上の手段として、高温化（タービン入口温度の向上）は紹介したが、最新のものでは、民間用のエンジンで約1,600℃以上を実現している。ジェットエンジンの高温化が実現すると、それに伴い、その高温に耐える材料や部品構造が要求されている。

例えばタービンは、燃焼器の直後にあるためエンジンの中では最も高温に曝される部分であり、最高温度から700℃近くまでの温度に耐えることが要求される。さらに、タービン動翼は熱せられたガスを受けて高速で回転するため遠心力を受け、高温の環境下での強度も要求される。

**(1) 高温化に向けた素材の改良** ジェットエンジンを構成する部品の材料は、当初、鉄の合金が中心であった。しかし高温化の要求に伴い耐熱性や高温下での強度要求が高まり、耐熱鋼の採用、さらに耐熱性の高いニッ

ケルやコバルト合金が開発・採用されてきた。特に、高温部のタービンの動翼や静翼は、さらなる耐熱性向上を目的とした合金成分の調整が行われ、一方素材の製造手法として、精密鋳造法が採用されている。鋳造法は、部品形状が複雑なことや材料の加工性が悪いいため、その後の加工量を減らすことを目的に採用されている。

高温環境での強度維持を目的に、鋳物の結晶制御技術も実用化されている。結晶の向きに異方性を持たせた一方向性凝固合金、一つの結晶で構成される単結晶合金があり、高圧タービンなど高温部の部品に採用されている。

**(2) 耐熱材料に対する加工法** ニッケルやコバルト合金の採用による材料の耐熱性の向上は加工性の悪化を招き、それを克服するため素材製造技術や部品加工技術は、開発と改良が繰り返されている。素材加工では精密鋳造やニアネットシェーブ鍛造などが行われているが、精度の厳しい部位の加工は依然として必要である。

金属部品の加工には、切削加工が一般的に用いられている。ジェットエンジンの部品加工も同様であるが、部品の材料が耐熱化に向け推移するなか、工具の磨耗をおさえる超硬材質の採用や刃先の耐磨耗性を上げるコーティングが採用されている。近年では、セラミックスの工具も登場し実用化されている。

タービンの翼部品などに使われる材料は、耐熱性が極限まで追求されたため切削加工では刃が立たず、砥石による研削加工や電気加工である放電加工が用いられている。

研削加工では、あらかじめ砥石を部品形状に成形し加工する総型研削や、深い切り込みで一気に加工するクリープフィード研削などが開発された。また、使用される砥石も酸化アルミニウム系の砥石からセラミックスを含むものやダイヤモンドを含むものまで開発さ

れ、それらは材料の加工性とコストのバランスを見ながら使い分けがされている。

**(3) 耐熱皮膜の生成** 高温化に対する部品の耐熱性の要求は、部品を構成する材料の改良だけでは対応できなくなっている。高温のガスに曝される部分に耐熱性の高い皮膜を形成させるなど、部品のごく一部に耐熱性の機能を付加することが行われている。

例えば、高圧タービン翼や燃焼器などの高温に曝される部分に、耐熱性の高いセラミックスの皮膜を施している。皮膜の形成法は、溶射が一般的である。

また、低圧タービン翼など(1000℃前後の部分)には、高温での耐腐食性の向上を狙い、アルミニウムを部品表面に拡散させる拡散コーティングが行われている。

溶射は、皮膜成分の粉末や線材などを電気やガスを熱源として溶融させ、後方からアルゴンなどのガスでその溶融された材料を吹き飛ばし部品表面に付着させる技術である。電氣的に発生させたプラズマを熱源とするものをプラズマ溶射といい、一般的にセラミックスの皮膜形成に使われている。

拡散コーティングは、高温下でアルミニウムの反応ガス中に部品を置くことで、そのガス中のアルミニウムが部品表面から拡散し高温耐食性の高いアルミニウムとニッケルの合金層を形成させる加工法である。

**(4) 部品表面の冷却—中空構造** タービン翼部品の耐熱性能を上げる設計技術として、中空構造にした部品の内部から部品表面にあけた穴を通して部品表面に冷却空気層を形成させる方法が採られる場合がある。

中空構造は鋳物を製作する段階で中子と呼ばれるセラミック製の部品を鋳型の内部に設置し、そこに湯(溶けた金属)を流し込む。中子は後工程で溶かし出し、中空の鋳物が完成する。

(5) 部品表面の冷却-冷却穴加工 翼部品の表面にあける冷却穴は、ものによっては1部品で100か所を超えるものもあり、放電加工やエレクトロストリーム、レーザー加工法であけられる。

放電加工法は、銅やカーボンで作られた電極と部品を絶縁油の中に浸漬し、その間に電位差を設けることで放電を起し、そのエネルギーで部品表面を除去する加工であり、電極の断面形状を転写した穴をあけることができる。近年は細い中空電極を使い、それを回転させながら純水中で加工する水放電加工という加工法も開発され利用されている。この方法は、従来の放電加工法よりも高速に加工ができる点が有利である。

電解現象を利用したエレクトロストリーム法は、放電加工よりも加工速度が速く、細い穴をあけることができる。

レーザービームを利用した穴明けでは加工時間が速く、数秒で穴加工ができるため穴数の多い部品の加工には有利である。しかし、穴形状の精度は放電加工などと比較すると低い。

また、加工時に貫通したビームが対面する部品の面に当たらないような工夫をしなければならぬ。

### 3.2 軽量化への対応

(1) 材料軽量化の変遷 航空エンジンの軽量化を目的とした材料の選定は、比重の小さいアルミニウム合金やマグネシウム合金が当初行われた。しかし、これらは機械的強度が低く耐食性も悪いことなどから使用範囲が限定されていた。70年代頃から、チタニウムを主成分とする合金が、比強度（比重に対する材料強度の比）の高さから採用された。

チタニウム合金は400℃以下では、

高い強度を持ちながら比重は鉄の6割程度であり、耐食性も良いことから、航空エンジンのファンから圧縮機の比較的使用温度の低い、強度が要求される部位に使用されている。

プラスチックを主成分とするFRP（Fiber Reinforced Plastic）やFRM（Fiber Reinforced Metal）などに代表される複合材料は、軽量であることが利点であるが、使用温度、強度では金属材料に劣る。近年では温度、強度で改善が図られ、使用が広がりつつある。図1にその例を示すが、エンジン前部の低温部分を中心に使用されている。

(2) 薄肉部品の加工 部品の軽量化のため、無駄な肉を削ぎ落とす努力は当初から行われていた。近年、構造解析等を駆使し肉厚を極限まで薄くすることや、溶接技術の発展により部品の組立てをボルト締めから溶接へと変更することが行われてきた（図2）。

ボルトで部品を組付ける方法は、ボルト自身の重量、締め付け部分が二重になることによる重量増加などがあり、この点の改善のため溶接による組付けへの変更が行われてきた。溶接は一度部品を溶融させるため、溶接部の材料強度低下や部品の変形が発生する。これを最小限にするため、溶融部を最小にし変形を小さくできる電子ビーム溶接やレーザービ

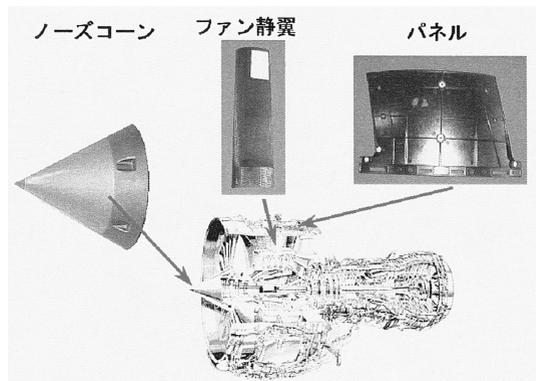


図1 複合材料使用例（FRP）

イラスト提供：(財)日本航空機エンジン協会

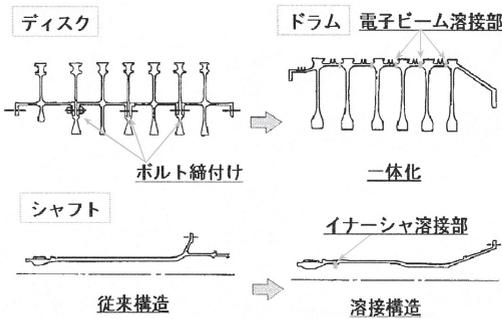


図2 部品一体化/薄肉溶接構造

ーム溶接が開発され、利用されている。

また、摩擦を利用した溶接も採用されている。摩擦溶接は摩擦熱を利用するもので、部品を熔融させないため変形、強度低下が見られない。軸対照の部品では、溶接したい部品を高速で回転させながら接触させ、そこで発生した摩擦熱で融合させるイナーシャ溶接法が採用され、シャフトやドラム（圧縮器動翼を組み付ける円盤状のディスクの何段かを一体にした部品）の接合に利用されている。

(3) 余肉除去 前に紹介した切削加工や研削加工、放電加工などが、航空エンジンの代表的な余肉除去加工技術である。

この他に化学反応を利用したディープケミカルミーリングや電解加工などが除去加工として採用され、設計の軽量要求に対応している。

ディープケミカルミーリングは部品の必要な強度を保持しつつ不要な肉を削ぎ落とす方法で、強度を持たせるリブを製品全体に張り巡らし、それ以外の部分は化学的に薄肉にするもので、障子のような構造を作り出す。チタニウム合金製のダクトな



図3 ディープケミカルミーリングダクト

どの軽量化に利用されている（図3）。

### 3.3 信頼性向上～工程凍結、工程管理

ジェットエンジンの製造方法は何度かのテストエンジンの製作、テストを繰り返して製造工程、加工方法やその加工条件を最適化し、量産に向けて固定される。これは、工程凍結と呼ばれている。工程凍結は、事前のテスト加工で安定した品質の得られる条件を見つけ出し固定することで、常に同じ品

質の部品が生産されることを狙っている。工程凍結されるまでには工程、加工方法、加工条件について十分な試験と、評価が行われる。

固定された工程、加工方法、加工条件は文書にして明示され、その後の作業はその文書に従って行われる。

量産開始後に、その工程、加工法や加工条件の変更が必要となった場合には、初めに行ったのと同様の確認行為を行い、要求される基準を満足することを確認することで変更が承認されている。また、特に品質的に重要な加工法については定期的に装置設備の校正・点検・検査、作業者についても技量の維持を確認する試験が行われる。

## 4. むすび

日本のジェットエンジン産業は戦後の、空白の後、海外からのライセンス生産を経てようやく、海外メーカーとの共同開発の一員として名を連ねるようになった。しかし、まだまだ肩を並べたとは言えず、今後は多様な市場のニーズに応じた独自技術を開発していくことで世界のトップランナーの仲間入りができるものと考えており、自らも柔軟な発想と着眼を心掛けている。

参考文献：落合宏行他：航空エンジンの特徴とその加工技術（「塑性と加工」vol44, NO.513, 2003）