



進化する ジェットエンジン

世界規模での人や物の交流が進み、航空需要は今後もますます増大することが予想される。ジェットエンジンは航空機の心臓である。短い年月に飛躍的に進化したジェットエンジン。その性能の向上を支えてきた大きな要素が、過酷な環境で十分な特性を発揮する先端材料の開発である。



(写真提供:日本航空(株))

ジェットエンジンの歴史はわずか70年余

1903年12月、アメリカ大西洋岸のキティ・ホークの町。初冬の朝、冷たい北風が吹く中、大きな物体がふらつきながら空に舞い上がった。翼幅12.3m、機体重量318kg。その距離はわずか40m程度に過ぎなかったが、これこそ人類が初めて動力(エンジン)付きの航空機で空に舞い上がった瞬間だった。有名なライト兄弟によるこの偉業が達成されてから今年でちょうど100年が過ぎた。ちなみにライト兄弟の航空機に搭載されていたのは、自動車用と同じくシリンダ内でピストンが往復するレシプロエンジンだった。

エンジン(engine)の語源は「ingenious」(工夫に富む、の意味)という言葉にあるといわれている。現在では、「動力を得るための熱機関」の意味で使われることが多い。大空を鳥のように飛びたいという夢をかなえるために、これまで多くの先駆者が、

創意工夫をこらして航空機の開発に取り組んできた。そして現在のような進歩した航空機を作り上げた最も重要な要素の1つが、ジェットエンジンの技術だといえるだろう。

ジェット推進の原理となるのは、後方に向けられた噴流の反動で逆向き(前向き)に推進するという、いわゆる「作用・反作用の法則」で、17世紀にニュートンが理論化した。この時代の推進力は主に蒸気噴射であり、航空機に搭載できるようなものではなかった。その後、20世紀に入りガスタービンが開発されて、これを利用



1945年に日本で最初に作られたジェットエンジン「ネ20」(写真提供:石川島播磨重工業(株))

したジェットエンジンの開発が行われるようになった。1930年代後半には、欧米各国でジェット機開発が本格化し、1939年、ドイツでジェット

エンジンを搭載した航空機が世界で初めて飛行した。

日本では、1938年に海軍がジェットエンジンの研究を開始し、終戦直前に試作ジェット機「橘花」に日本初のジェットエンジン「ネ20」を搭載し、試験飛行を行った。

終戦後、日本での航空機及びジェットエンジンの研究は一切禁止されていたが、徐々に外国製のエンジンのオーバーホールなどを行うようになり、1954年には戦後初の国産ジェットエンジンJO-1が誕生した。

現在では、世界的に航空機産業をリードするアメリカ、ヨーロッパに次いで、日本もジェットエンジンの開発、量産を進めている。

進化してきたターボジェットエンジン

現在、航空機には一般的にジェットエンジンが搭載されているが、最も基本的な形態は排気ガスを推進力に使うガスタービンで、ターボジェットエンジンと呼ばれている。

ターボジェットエンジンは、エンジン前方（空気の入り口側）から、圧縮機、燃焼器、タービン、排気ノズルの順で構成されている。まず、圧縮機に空気を吸入、高圧化し、これを燃焼器で燃料と混合して燃焼させる。燃焼によって急激に高温になった燃焼ガスでタービンを回転させ、入り口側の圧縮機を回し、タービンを通過した燃焼ガスを、排気ノズルで後方に高速で噴射する。

ターボジェットエンジンより以前の主流だったレシプロエンジンは、ターボジェットエンジンと同様に空気を吸入するエンジンであり、シリンダの中でピストンによって燃料と空気を圧縮、爆発させる仕組みである。レシプロエンジンではピストンが往復動作するため爆発が間欠的である。これに比べターボジェットエンジンの動作は回転であるため連続的で効率がよく、さらに、大出力、簡単な構造、低振動などの特徴を持つことから、主役の座を得ることになった。

ターボジェットエンジンより推進効率を高めたのが、ターボファン

エンジンである。これは、圧縮機のファンで圧縮された空気全部を燃焼器に送るのではなく、空気の一部を側方に導き、タービンの後方で排気ガスと混合して噴射する仕組みになっている。側方に空気を導くこの構造は「バイパス構造」と呼ばれている。バイパス側から噴射される空気は、ジェット噴流を包み込むようにして噴流の速度を低下させると同時に、噴流量を増大させる効果がある。一般に、噴流が低速でかつ量が多い場合は、噴流が高速かつ量が少ない場合に比べてエネルギー効率がよく、燃料消費の効率が高まる。噴流速度を抑制することによって燃費効率が高くなると同時にエンジン周囲の空気との間で摩擦を減少させ、騒音も低減できる。

タービン側空気量に対するバイパス側空気量の比はバイパス比と呼ばれるが、最近の民間航空機では高バイパス比のターボファンエンジンが使用され、推力増強、燃費低減、騒音緩和に大きな効果をもたらしている。

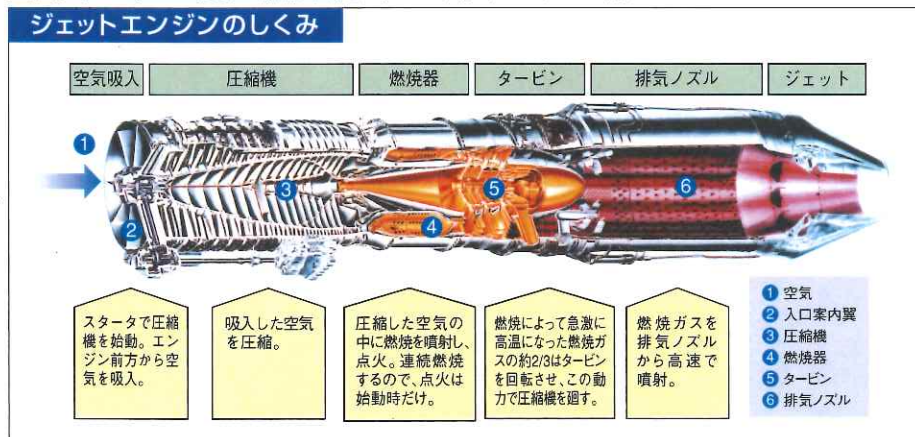
エンジンに要求される高度な特性

ジェットエンジンは多くの部位から成り立ち、そこに使用される材料にも、使用温度域の高低や、静止部と回転部などによって、さまざまな特性が要求される。これらの要求は、エンジンの高性能化に伴いますますます厳しくなりつつある。

ジェットエンジンの性能を表す際に用いられる指標に「推重比」がある。これは、ジェットエンジンの重量に対する推力の比を表したものである。例えば日本初のジェットエンジン「ネ20」は重量474kgで推力490kg、推重比はおおよそ1である。これに対し、1955年開発の国産ジェットエンジンJ3では、重量380kgで推力1,550kg、推重比はおおよそ4になった。また超音速機用エンジンのF100は推重比7.9である。推重比は近い将来10～20に達するとの予測もあり、軽量で高性能なエンジンを目指す傾向が強まっている。

このようなジェットエンジンの進化に合わせ、使用材料には、

■ジェットエンジンの推力の仕組み (図はターボジェットエンジンの例)



(石川島播磨重工業(株)資料より)

■ジェットエンジンの各部品用材料に必要な特性 (◎:不可欠,○:重要)

項目 部位	部品	要 求 特 性							
		耐 環 境 性		機 械 的 特 性					
		耐食	耐酸化	剛性	耐衝撃	靱性	疲労	熱疲労	クリープ
ファン	動翼	○	—	—	◎	○	◎	—	—
	静翼	○	—	○	○	—	○	—	—
圧縮機	ディスク	○	—	—	—	◎	◎	—	—
	ケース	○	—	—	○	—	◎	—	—
燃焼器	ライナ	—	○	—	—	—	—	◎	◎
タービン	動翼	—	○	—	○	○	◎	◎	◎
	静翼	—	○	—	○	—	—	◎	○
	ディスク	—	○	—	—	◎	◎	—	○
	ケース	—	○	○	—	—	◎	◎	◎

(「航空・宇宙エンジン用材料開発の動向」服部博、正木彰樹:日本航空宇宙学会誌43.495より)

主として軽量化、高強度化、高温耐熱性、成形加工性などの特性改善が要求される。部位別に見ると、ファン、圧縮機などの入り口側には主にチタン合金系、燃焼器、タービンなどの後ろ側には主にニッケル基合金系が使用されている。

次に、ジェットエンジンの部位別に使用される代表的な材料を見てみよう。

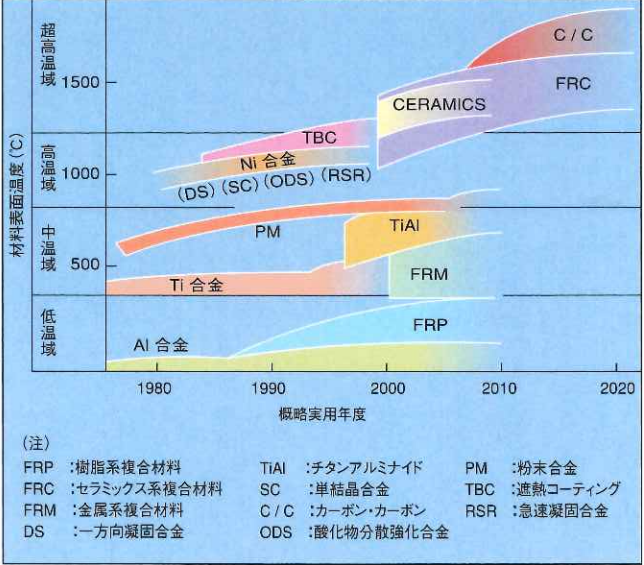
使用温度が500℃以下のファン、圧縮機のディスク動翼・静翼などに使用されるのは、高強度、軽量の特徴を有するチタン合金である。このうち回転部品には鍛造材、複雑形状の静止部品には鋳造材が使用される。ファンや圧縮機のディスク、シャフトには高強度、高靱性が要求され、チタン合金中でも強度、加工性などにすぐれたチタン合金が使われている。圧縮機後部では耐熱性にすぐれるチタンα合金系の実用化が進められている。

1,000℃以上の超高温下で使われる超合金

タービンは羽根車のような形状をしており、中心の軸と同軸に配置されたディスクを持ち、その周方向に多数のタービン翼が付いている。ジェットエンジンの中で最も過酷な環境はタービン入り口の動翼・静翼で、これは圧縮空気による濃縮酸素で燃料が爆発的に燃焼した後、高温高速のガスがそこに衝突するからである。初期のジェットエンジンでは、タービン入り口温度は800℃程度だったが、その後、エンジン性能向上とともに温度が上昇し、最近では1,400℃に達している。

タービンには、超耐熱合金(超合金ともいう)が従来から使用されてきた。超合金は強度、耐酸化性、耐腐食性などにすぐれ、ニッケル基、鉄基、コバルト基等の種類があるが、このうち主にニッ

■ジェットエンジン用材料の変遷



(「航空・宇宙エンジン用材料開発の動向」服部博、正木彰樹:日本航空宇宙学会誌43.495より)

ケル基超合金がジェットエンジンに使用されている。

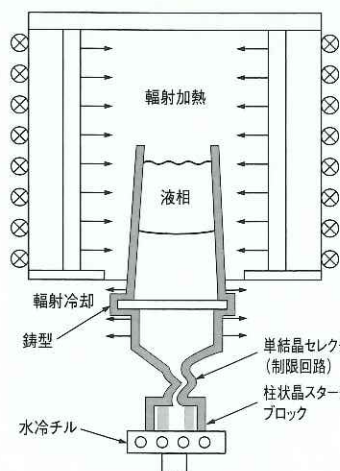
タービン翼に使用されるニッケル基合金では、合金元素添加による改善が図られている一方で、結晶制御により疲労特性向上が図られている。これは、一方向凝固合金や単結晶合金による鋳造材で、疲労とクリープ破壊が発生しやすいタービン翼の長方向に垂直な結晶粒界をなくしたものである。方向性凝固により優先的に成長する結晶方位は、クリープ強度にすぐれ、弾性係数が小さく、熱疲労に強い、という特性を持つ。

また酸化物分散強化合金の開発も進められ、長時間の高温下使用でも析出物の形態変化が生じにくい酸化物を微細均一に分散させ、高温下のクリープ強度を高めている。

タービンディスクには、600～750℃の温度域で十分な強度を有することが求められる。最近では、ニッケル基合金の結晶粒微細高強度材、結晶粒微細化を図るための粉末冶金材の適用などによる疲労強度の向上が進められている。なかでも粉末冶金材は、合金元素の均質化やニアネット成形が可能なことから、実用化が図られている。

次世代材料として現在研究段階にあるのが、チタンアルミ金属間化合物やセラミック基複合材などである。チタンアルミ金属間化合物は、比重がニッケル基合金の約1/2で、比強度、比クリープ強度がニッケル基合金と同等、比剛性が高い、などの特徴を持ち、750℃程度までの温度域での軽量耐熱材料として期待されている。現在では、複雑形状を可能にする成形技術の確立や高温強度の向上を図る研究開発が進められている。セラミック基複合材は、比重がニッケル基合金の約1/3～1/4、耐熱温度1,200℃超というセラミックスと、炭化けい素などの強化繊維を組み合わせた材料で、超軽量・超高温域対応の材料としての

■単結晶合金による部品の製造方法



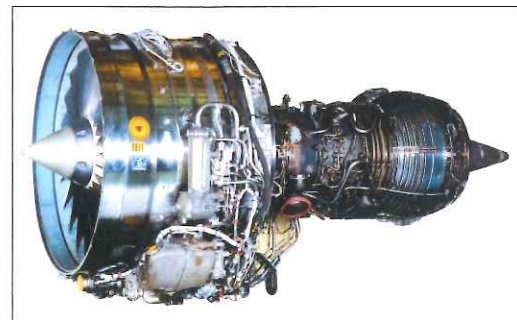
(「航空・宇宙エンジン用材料開発の動向」服部博、正木彰樹:日本航空宇宙学会誌43.495より)



単結晶合金によるタービン動翼(右側は内部で、複雑形状をした冷却空気通過部分がわかる)



ニッケル基合金粉末冶金によるタービンディスク



5カ国の国際共同事業として開発、量産された民間航空機用エンジンであるV2500ターボファンエンジン



B777などの民間航空機用に開発、量産された大型エンジンのGE90

(写真提供:石川島播磨重工業(株)(4点とも))

適用が検討されている。

これらの材料はきわだった特性が注目され研究開発が進んでいるが、複雑形状の成形や、高温下での耐環境性などの解決すべき課題があり、現在のところ実用化に至っていない。今後は材料特性の向上に加え、成形加工技術の確立、信頼性の向上などが図られ、次世代エンジンを実現する基盤技術となることが期待されている。

超音速への挑戦と環境対応技術

第二次世界大戦後、それまでの軍用機の技術が民間機の開発に応用され、長距離航行が可能な大型旅客機が登場した。その後1969年のボーイングB747ジャンボジェット旅客機やコンコルド超音速旅客機の初飛行を機に、本格的な大量航空輸送の時代が到来したといえる。現在の航空機やジェットエンジンはこの世代の設計を基本とし、推力増強や軽量化などの改善が行われており、航続距離を伸ばしている。

最近のジェットエンジンでは、代表的なものにV2500がある。これは日本、米国、イギリス、ドイツ、イタリアの国際共同事業により開発された低燃費、低公害、高信頼性の民間航空機用エンジンで、日本はファンモジュールとシャフトを担当した。また世界最大級の推力のターボファンエンジンであるGE90では、フランス、イタリアとともに日本の石川島播磨重工業(株)がパートナーとして参加し、高信頼性エンジンとしてボーイングB777などに搭載されている。

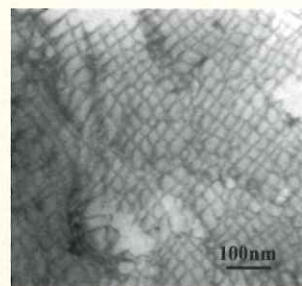
日本のジェットエンジン開発プロジェクトとしては、「超音速輸送機用推進システムの研究開発(略称:HYPRプロジェクト)」ター

世界最高の耐用温度を有する超合金の開発

(独)物質・材料研究機構では1999年度から「新世紀耐熱材料プロジェクト」を実施してきたが、その成果として、世界最高の耐用温度1,100℃のニッケル基単結晶超合金を開発した(石川島播磨重工業(株)との共同研究)。この合金は、燃焼温度1,700℃の発電ガスタービン開発や、純国産ジェットエンジン開発のキーテクノロジーとなることが期待される。

同プロジェクトでは、すでに耐用温度1,083℃のニッケル基単結晶超合金を開発しているが、これをベースとして新合金では、モリブデン添加量を増量し、合金中の析出物と母相との界面に形成された界面転移網*を25nm(従来合金は60nm)にまで微細化、強化するとともに、ルテニウムを増量して組織を安定化させている。

新合金を10mm径単結晶鋳造棒とし、熱処理の後、クリープ試験を行ったところ、1,100℃、1.137MPaで1%クリープ変形する時間は730時間以上となり、現在ジェットエンジンに実用化されている合金の約5倍のクリープ寿命が得られることがわかった。



ニッケル基単結晶超合金の γ/γ' 界面に生じた微細転移網(「白金族元素ルテニウムを含む次世代Ni基単結晶超合金の開発」小泉、張、小林、横川、原田、青木、荒井、日本金属学会誌67-9号468-471頁より転載)

*界面転移網:単結晶超合金は、単結晶ではあるがミクロで見ればガンマ相とガンマプライム相の2領域が存在する。その境界に発生する転移が互いに絡み合って規則的なネットワークを作り、動きにくくなった状態。

が挙げられる。これは、現在までの最高速超音速輸送機であるコンコルドの後継機として期待される超音速輸送機推進システムの研究プロジェクトである。コンコルドの飛行速度がマッハ2であるのに対し、同プロジェクトではマッハ2～5クラスの実現を狙う。1989年度から当時の通商産業省工業技術院の大型プロジェクト制度として発足し、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)が研究開発を実施し、1998年にプロジェクトを終了した。この間、超音速輸送機に関する各種の要素研究が行われ、さらにラムジェットエンジン(輸送機が推進するエネルギーで、自然に圧縮される空気を利用するエンジン)、ターボジェットエンジン、及び2つのエンジンを融合したコンバインドサイクルエンジン等を実際に試作、システム実証研究が行われた。

このうちコンバインドサイクルエンジンは、マッハ3を超える極超音速飛行時に使用するラムジェットエンジンと、離陸からマッハ3以下で使用するターボジェットエンジンとを組み合わせたエンジンで、低速からマッハ5程度の広範な速度域での飛行が可能である。またタービン入り口温度の高温化を図ったことにより、エネルギー効率が高く、低騒音、排気が少ないなどの特徴を持つ。HYPRプロジェクトではシステム実証運転に成功し、エンジンの心臓部となる超高温ガスジェネレータにおいて、世界最高レベルのタービン入り口温度1,700℃の保持運転に成功した。

HYPRプロジェクトに引き続いて開始したプロジェクトが「環境適合型次世代超音速推進システムの研究開発(略称:ESPRプロジェクト)」である。これは、将来、次世代超音速機が実用化したとき、推進システムから発生するCO₂、NO_x、騒音が大幅に増加することが予想されるため、これを解決し、エンジン重量軽減及び燃料消費率低減を図る技術の開発に取り組む

もので、1999～2003年までの期間で実施される。

じつは、コンコルドでは、離陸の際に推進システムがアフターバーナー*を使用するため、極めて騒音が大きく、多くの国際空港の現行騒音基準に適合し

ていない。また超音速巡航時には多量のNO_xを発生するなど、環境への影響が懸念されている。現在のジェットエンジン開発において、環境対応技術の重要性はますます高まっている。これに対応し、ESPRプロジェクトでは、エンジンの高性能化を図るとともに、低騒音ファンの開発、セラミックス吸音材を装着した騒音低減ノズルの開発などの研究が行われている。

日本では、9月20日は「空の日」として、各地で航空イベントが行われ、多くの観衆を魅了している。現代の航空機産業は、航空機メーカーを始めとして、エンジン、各種装備、部品、材料メーカーによって支えられている。航空機産業は、先端技術の集約である。航空機需要の高まりが予想される今日、今後の航空機の歴史の中に、日本のエンジン技術や材料技術が新たな1ページを加えることを期待したい。

[取材協力:(社)日本航空宇宙工業会、石川島播磨重工業(株)]

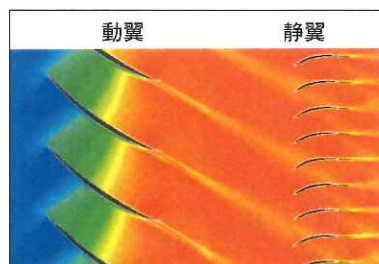
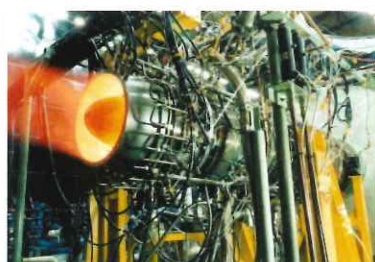
*アフターバーナー:タービンを通った空気に燃料を噴射し、もう1度燃焼を行う装置。



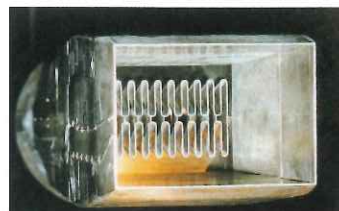
将来的な航空機需要の増加を見込んで、航空機及びジェットエンジンの製造に注目が集まっている(写真はHonda小型航空機用ターボファンエンジンHFX-01)



HYPRプロジェクトでは、ラムジェットとターボジェットを組み合わせたコンバインドサイクルエンジンを試作、システム実証研究が行なわれた。写真は次世代超高速旅客機のイメージ(左上)、コンバインドサイクルエンジンのイメージ(左下)、エンジン性能実験風景(右下)(写真提供:新エネルギー・産業技術総合開発機構)



タービンにおいて騒音源となる、静翼面の非定常圧力分布の予測。静翼表面の非定常圧力をCFD(計算流体力学)技術で計算できるように、発生音を抑え、かつ空力的な損失を減少できるような最適形状を得るための研究が行われている。(写真提供:石川島播磨重工業(株))



ミキサエジェクタノズルの試験模型。次世代超音速機における騒音低減に役立つ。(写真提供:石川島播磨重工業(株))