



航空エンジン



PHOTO/KENJI YOSHIDA



PHOTO/EAGLE305



ブルーインパルス

光和商事(株) 荒木 巍

H18.11.24

ジェットエンジンの原理と種類

ジェットエンジン: 基本的には空気**圧縮機**、**燃焼器**、**タービン**から構成されている。作動ガスが定常連続流れであるため、ピストン往復式エンジンと比べて、大流量の作動ガスを扱うことができ、軽量で大出力を発生させるのに適しているため、航空用エンジンとして最適である。

種類 狭義には: ターボジェットエンジン
ターボファンエンジン

広義には次のものも含む:

ターボプロップエンジン
プロップファン
ターボシャフトエンジン
ラムジェットエンジン

ターボジェットエンジン: タービンの回転力を利用して空気を圧縮し、そこに燃料を噴きつけ燃焼させ、後方に噴射する排気ガスによってのみ推力を得るエンジン。軍用機など。

ターボファンエンジン: ターボジェットエンジンの前方に、直径の大きなコンプレッサともいえる**ファン**を取りつけたエンジン。ファンは圧縮機と同じくタービンによって駆動される。大型民間機など。

ターボプロップエンジン: コンプレッサ駆動用のタービンと別に、**フリータービン**と呼ばれるタービンを備えるガスタービンエンジン。ヘリコプターなど。

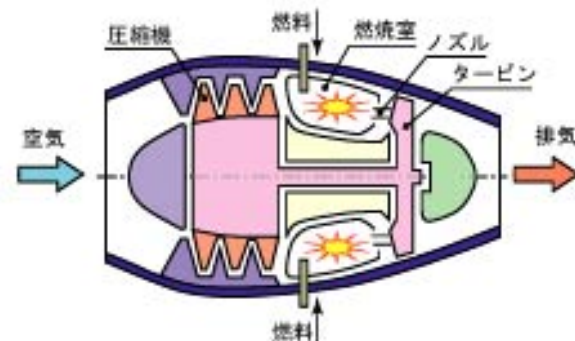


図16-1 ジェットエンジンの仕組み

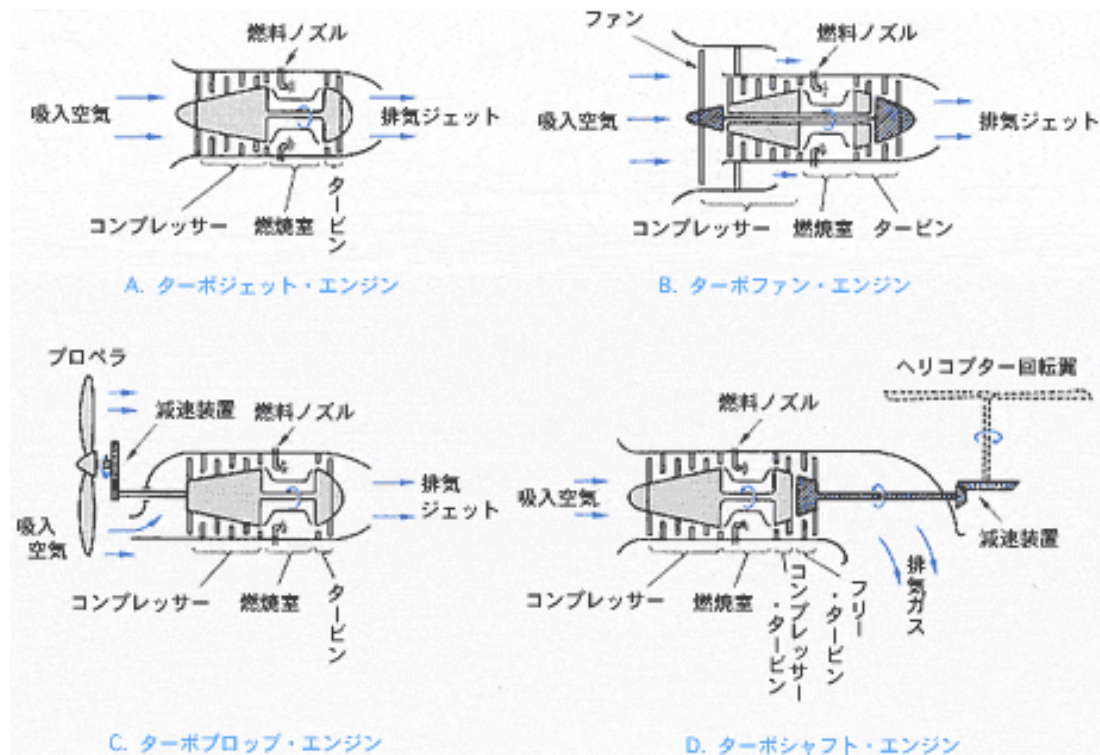


図16-2 ジェットエンジンの形式

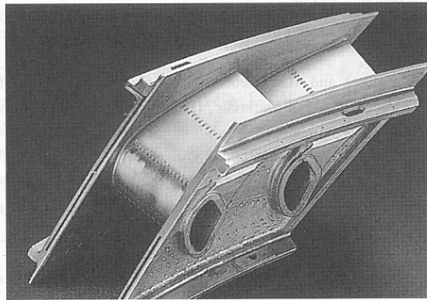


写真6 MA 754 製 空冷ノズルガイドベーン

図16-3 タービン冷却ノズル

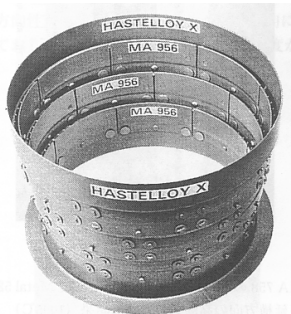


写真5 MA 956 を使用した高温燃焼筒

図16-6 燃焼器ライナー

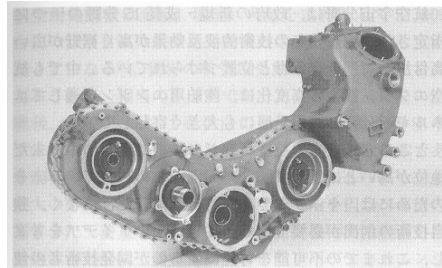


図11 アクセサリ・ギアボックス (AGB)

図16-7 歯車装置



図16-10 熱交換器

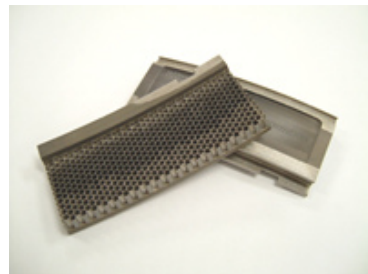


図16-11 タービンシュラウド
(ハネカム付き)

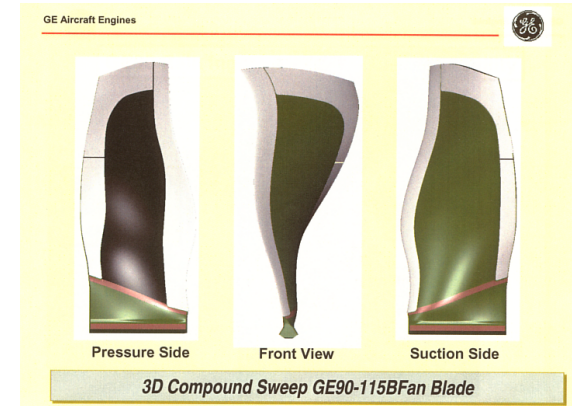
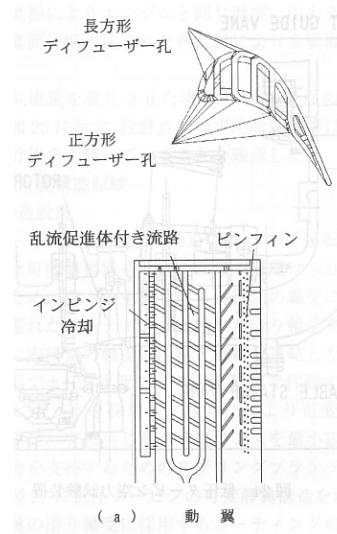


図16-5 ファンブレード



図16-8 大型民間機用ジェットエンジンシャフト(長尺中空加工)



図16-9 高合金・超合金・Ti合金ディスク(INCO718,WASPALLOY,A286,Ti合金等)



図16-12 各種高合金、超合金リング
(INCO718,A286,Ti合金,M50 等)



リンクされたイメージを表示できません。ファイルが移動または削除されたか、名前が変更された可能性があります。リンクに正しいファイル名と場所が指定されていることを確認してください。

組み立て

(航空実用辞典より)

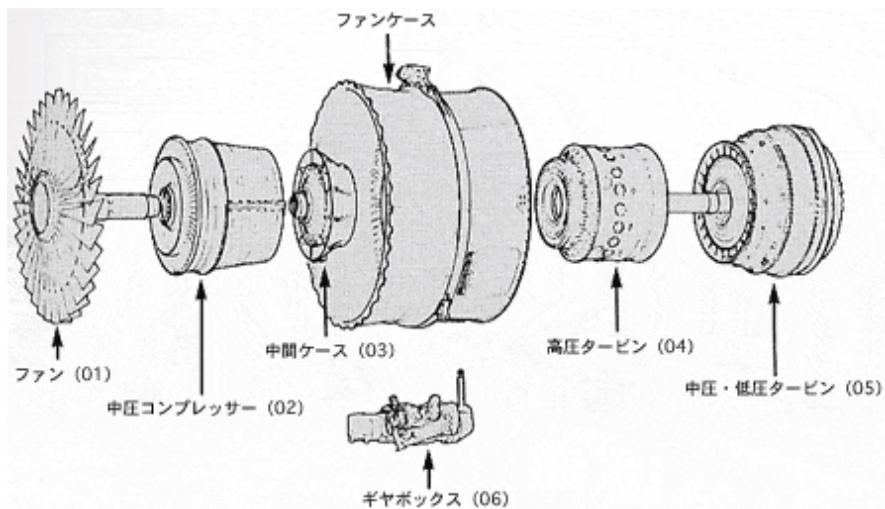


図16-13 エンジンのモジュール構造例



TF40エンジンの組立

図16-14 エンジン最終組立

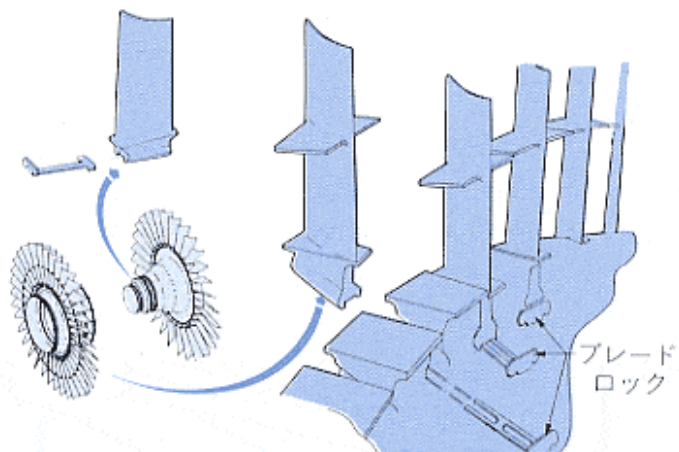


図16-15 コンプレッサ翼部

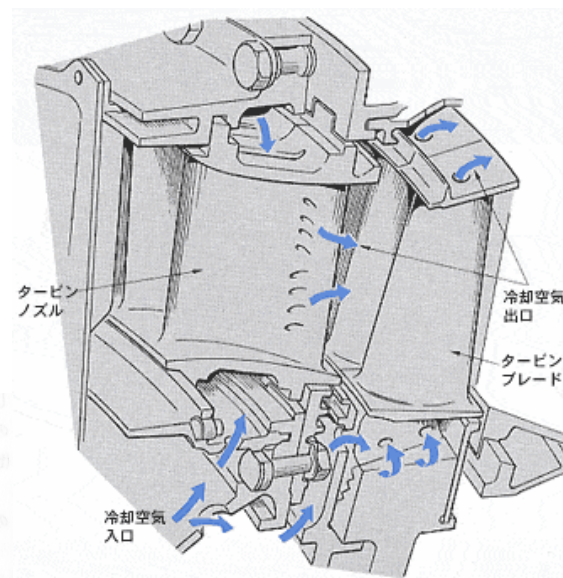
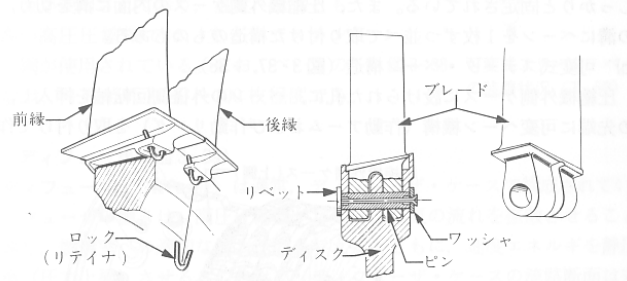


図16-16 タービン翼部

主要部材料

最近の大型で高性能のジェットエンジンのタービン入口温度は1500℃を越えている。このようなジェットエンジンの心臓部を作るための主要な材料は**超耐熱合金**(**耐熱合金**、**あるいは超合金**)である。基本的に重要なのは高温の強度と耐酸化・耐食性である。

圧縮機など低温部にはAl、Mgなど**軽合金**、**複合材**が使われる。

Ti合金は強度／重量の比が高いので中温部高強度材として好適。

金 属 系 材 料	金属間化合物	軽量高比強度金属間化合物：Ti-Al系、Ni-Al系など 高融点金属間化合物：Nb ₃ Al、MoSi ₂ など
	高融点金属の合金	W、Mo、Nb、Taなどの合金
セラミックス系材料	酸化物系	アルミナ(Al ₂ O ₃)、ジルコニア(ZrO ₂)、サイアロン(Si-Al-O-N)など 共晶一方向凝固セラミックス(Al ₂ O ₃ -YAGなど)
	非酸化物系	窒化けい素(Si ₃ N ₄)、炭素けい素(SiC)など
複 合 材 料	金属系、セラミックス系、炭素系	(C/C コンポジット)
	傾斜機能材料	

図16-17 超合金を超える高温材として期待される材料

表16-1 代表的な使用材料

部 品		代表的な材料	要 求 特 性
タービン	動翼	Ni基超耐熱合金、一方向凝固、単結晶合金	クリープ強度、クリープ破断強度、熱疲労強度、高サイクル疲労強度、耐高温ガス腐食性、高温組織安定性、铸造性
	静翼	単結晶合金＋耐熱コーティング	クリープ強度、熱疲労強度
	ロータディスク	Ni基鍛造合金(INCO718、WASPALLOY、Rene80など)	クリープ強度、高温強度、降伏強度、低サイクル疲労強度、
ファン・圧縮機	動翼	FRP、炭素繊維複合材、Ti合金、Ni合金	低サイクル疲労強度、高サイクル疲労強度、耐衝撃性(鳥吸込みなど)、耐エロージョン
	静翼	SUS、Ti合金、Ni合金(後段)	耐エロージョン、耐熱性(後段)
	ディスク	Ti基鍛造合金	比強度(強度／密度)、耐熱性(後段)
燃焼器	ライナ	Ni基合金、Co基合金、セラミック基複合材	耐高温ガス腐食性、クリープ強度、高温組織安定性、熱疲労強度、高サイクル疲労強度、溶接性、板金加工性
その他の部品		Al材、Ti合金、Mg铸造品	軽量、耐熱性、加工性

エンジンの耐空性証明のためには、各種のベンチエンジン試験、リグ試験(要素試験)、補機試験が要求される

表16-2 耐空証明用各種試験

ベンチエンジン試験				リグ試験	
No	試験項目	No	試験項目	No	試験項目
1	始動試験	14	ファンブレード飛散試験	1-5	過回転試験(ファンディスク、低・高圧圧縮機、低・高圧タービンディスク)
2-3	作動試験(地上、高空)	15-18	吸込み試験(ひょう、氷片、鳥、水)	6-10	ブレード高サイクル疲労試験(ファン、低・高圧圧縮機、低・高圧タービン)
4-5	排温過昇、最大排温試験	19	氷結試験	11	ギヤボックス150hr耐久試験
6	定格推力試験	20-21	冷却機能試験(地上、高空)		
7-8	軸回転試験(最大低圧軸150Hr、最大高圧軸)	22	初期整備検査試験	補機試験	
9-13	応力試験(ファン、低・高圧圧縮機、低・高圧タービン)	23-24	抽気清浄度試験、排ガス試験	約40項目	耐久、振動、環境試験



図16-18 ベンチエンジン試験
(アメリカ・ロビンソン空軍基)



図16-19 鳥吸い込み試験



図16-20 フライイングテスト
ベッド(FTB)航空試験

民間機エンジンのライフサイクル（開発－使用－引退）

1. 市場予測	5. エンジン試作、リグ試験用部品製作	9. 飛行試験	13. プロダクトサポート(フィールド不具合対策、性能、耐久性等改善)
2. 仕様決定(推力、燃費、ファン径、重量など)	6. 地上エンジン試作、リグ試験	10. 機体/エンジン形式承認	14. 引退
3. 基本設計	7. 空中エンジン試験(本エンジンに追加で機体に搭載)	11. エンジン量産	
4. 詳細設計	8. エンジン形式承認、製造承認	12. 就航	

エンジン原因の航空機事故

(全137件中エンジン起因のものは以下の14件)

いつ	航空会社	機種	場所	事象	説明	原因	死者	けが人
----	------	----	----	----	----	----	----	-----

表1. 今年のJALのトラブル — 2005.8.13朝日新聞他による

2005.6.21	C	JAL	B777	関西	エンジン異音で緊急着陸	原因調査中	M	0	0
2005.8.12	B	JAL	DC10	福岡	エンジン出火、部品滑走路に飛散	空港引き返し、エンジン1基損傷	M	0	0

表2. 日本の主な航空機事故(含む、海外での日本の航空会社による事故) — 国土交通省管理のもの全261件(2005.5.6まで)

1957.9.30	B	JAL	DC4	伊丹	離陸中失速し墜落炎上	4エンジン中3基出力低下、燃料弁作動不良	M		4
1958.8.12	C	ANA	DC3	下田沖	海上で墜落	伊豆沖墜落事故、エンジン不調	M	33	
1966.2.4	D	ANA	B727	羽田	着陸進入中墜落	羽田沖墜落事故、エンジン・スポンサー不調	M	133	
1996.6.13	B	ガルーダ	DC10	福岡	滑走中エンジン故障、オーバーラン	滑走路先で炎上、乗客脱出、タービン翼疲労破断	M	3	109
2003.2.13	C	JAA	B747	東シナ海	第2エンジン出力低下、緊急着陸	ファンブレード1枚折損、金属疲労	M	0	0
2004.7.29	B	NWA	B747	関西	離陸直後第1エンジン出火	貨物機、タービンブレード破断、緊急着陸	M	0	0
2004.9.13	B	ANA	A321	羽田	滑走中エンジン異常燃焼	離陸中止、タービン破損、滑走路に金属片散乱	M	0	0

表3. 世界の主な航空機事故(1990年以降) (2005.3.16まで全177件)

1991.12.29	B	中華航空	B747貨	台北	離陸4分後制御不能で墜落	第3エンジン脱落、第4エンジンに衝突、取付部疲労	M	5	
1997.2.1	B	セネガル	HS748	セネガル	離陸直後墜落	離陸30秒後エンジン停止、燃料に水分混入	M	25	
2002.11.6	D	ルクセンブルク	フォッカー	ルクセンブルク	着陸進入中牧草地に墜落	濃霧の中、交信に異常なし、多数の鳥吸込み	Z	20	2
2002.11.11	B	ラオス	フォッカー	マニラ	離陸後エンジントラブルで墜落	空港戻る途中高度不足で海上着水決行水没	M	19	
2004.10.14	B	MK Air	B747貨	カナダ	離陸滑走中オーバーラン、衝突炎上	エンジン不具合とテロの可能性について調査中	MorT	7	

A: 離陸前
B: 離陸中
C: 航行中
D: 着陸時
E: 着陸後点検

特記なければ
空港

P: パイロットミス
S: 客室乗務員ミス
C: 管制ミス
M: 整備/機材不良
Z: その他

太字は全
搭乗者死亡

図16-21 エンジン起因の航空機事故

チタン材の機械加工	圧縮機部品などに軽量で強度のあるチタン合金が多用されるようになっているが、チタンは難切削材のため機械加工では高速加工、発熱防止、熱を放散し易い工具などが必要
長尺穴加工	主軸シャフトは全長約3mでありながら、胴部では加工公差が0.03mm以内と非常に厳しい。中空シャフトは内・外径が偏芯しないように、軸のバランスを確保して旋削加工することが重要
ブローチ加工	圧縮機やタービンのディスク外周で動翼取付用スロット加工は、刃物が多数並んだ工具で、1往復1溝が加工できるブローチ加工が適用される
一方向凝固、単結晶 casting	タービン動翼など遠心力でかかる応力の方向が一定している部品の casting に採用される。とくに翼の長さ方向の強度が高められる
電子ビーム加工 (EBM)	薄肉構造のジェットエンジンでは熱負荷の小さいEBMの溶接が有効。タービン静翼とシュラウド、ディスクの接合などに使われる
摩擦攪拌接合	接合ツールを高速で回転して母材に押し付けながら接合部分を移動させて母材を熔融して接合する。特殊アルミ合金材の接合に用いられる
耐熱・耐酸化コーティング	タービンの動翼や静翼は精密 casting で中空の形に製造され、内側を空気で強制的に冷却するとともに、外面は耐熱性のよりすぐれたセラミックスなどの遮熱被膜TBC(Thermal Barrier Coating)を施して、1500℃以上の燃焼ガスの中でも耐えるように工夫している



図16-22 シャフトの加工

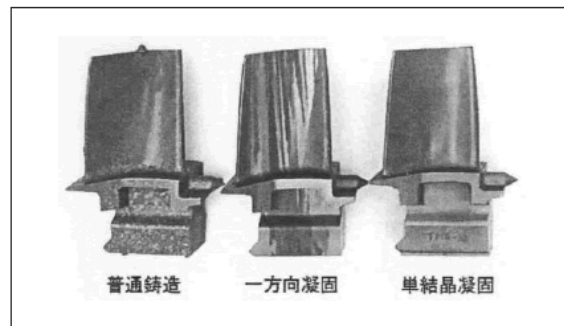
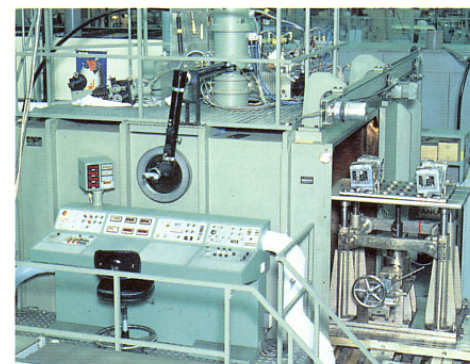


図16-23 一方向凝固、単結晶



CNC電子ビーム溶接機(タービン静翼の溶接組立)

図16-24 電子ビーム加工

航空エンジンの高度な整備技術は他の分野の機械メンテナンス向上にも応用可能

信頼性管理: 高推力、環境適合性、低燃費化対応するエンジンに新たな適応がもとめられる。過去の故障例に対する系統的な対策、モニタリングの充実、などで信頼性を確保。

故障対策: ブレード損傷対策などでは、メーカーでの破面調査、劣化調査のほか航空会社での使用環境、不具合発生時状況、整備履歴などの情報も十分加味する。

コンディション・メインテナンス: 使用中エンジン異常の有無を把握してその状態に応じた適切な整備処置を施す。必要以上の短期間のオーバーホールによる整備コストを削減。

例、内視鏡による定期的なエンジン内部の検査

潤滑油経路に磁石をつけて金属片を検知

トレンドモニタリング(エンジンパラメータ、潤滑油消費量の変化など)による不具合前兆握)

エンジン・フリートマネジメント・プログラム(EFMP): 同一機種の使用全エンジンを一括管理して、計画的に取卸すことで、過剰な部品在庫を防ぐ。エンジンごとの保証寿命を精度高く決定し、計画外取卸を最小限界に抑えることがポイント。

モジュール整備: 最近のエンジンは「モジュール構造」となっていて、検査の結果、不具合が発見されたモジュールのみを交換する“modular maintenance (モジュール整備)”方式が主流。エンジンを取卸し、全体を検査・整備することは珍しいこととなりつつある。

航空会社の地上整備レベル(機体およびエンジン):

T整備(飛行前点検)ーボアスコープによる内部点検、潤滑油の採取・分析、ロータ回転状況確認

A整備(飛行約600Hrごと)ーエンジン外・内部点検(動翼関係)

C整備(飛行約6000Hrごと)ー配線、配管の不具合

M整備(飛行約5年ごと)ー腐食除去、防錆措置、諸系統検査 (エンジンモジュールはその前にオーバーホール)

取卸: オーバーホールのためにエンジンを機体から卸すこと



図16-25 ボアスコープによるエンジン内部検査

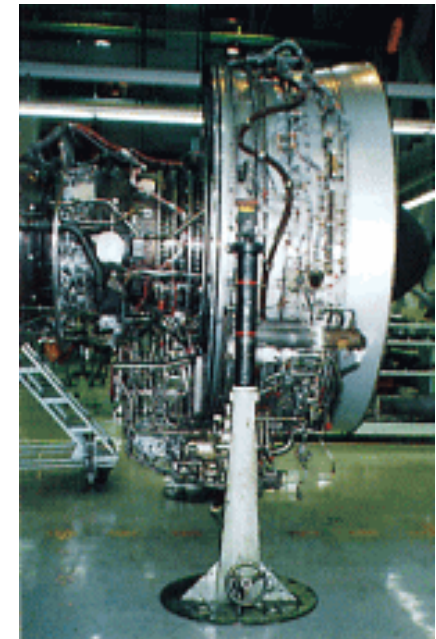


図16-26 エンジン整備スタンド

UR(不具合報告)	飛行運用中あるいは地上試験運転で確認された本体・装備品の不具合はURとして文書で報告され、整備部門により原因究明、再発防止措置がとられる
LO/FO漏れ	エンジンの燃料・潤滑油が配管 とくに接ぎ手部分から漏れてエンジン本体の高温部に接触すると発火してエンジンー機体の火災・爆発の原因となる。離陸前の漏れ検査、飛行中の潤滑油量の監視、燃料消費量の異常監視などでチェックする
動翼のクラック・溶損	異常な過負荷、燃焼器での燃焼パターンの不良、タービン冷却空気通路の目詰まりなどにより、タービン動翼に規定以上の熱負荷がかかると、タービン動翼にクラック、溶損などを引き起こす。クラック等が進行すれば、動翼が折損して、出力の急激な低下などで事故となる
燃焼器ライナのクラック	圧縮機内での空気流れの乱れ、燃焼の異常などで、燃焼器内で局部的な高温部が生じると、燃焼器ライナはクラック、溶損を発生し、その結果タービンの熱的な損傷につながる
FOD(Foreign Object Damage)	エンジンへの異物吸入。異物としては滑走路上の小石、鳥、エンジン入口に堆積した氷などがある。吸い込んだモノが大きいとエンジンが破損して、離陸失敗、墜落の危険もある。エンジン形式認定でその耐性試験が課せられる
ストール	ジェットエンジンは、急激な横風など乱れた空気を吸い込むと、圧縮機動翼、静翼に沿って流れなくなり、翼面から流れが剥離するストール現象を生じ、エンジンサージ(回転振動)を発生させて、止まってしまう。回転をアイドルまで急減速して、運がよければ再度加速が可能となる
オーバヒート	エンジン内の温度レベルは排気温度計でモニタする。操縦不良などによるオーバヒートはその運転時間により、オーバホールまでの寿命時間を縮めることになる
フレイムアウト	エンジンが運転中に、突然燃焼焰が消えて、運転停止状態になる現象。燃料内の水分が凍結して供給経路を一時的に塞いだり、悪天候などで燃焼室への空気供給が一時的に異常を起こすことなどがおもな原因となっている。上空で再着火に成功する場合もある
振動	吸込み空気の乱れ、回転部品の損傷は規定値を超える大きな振動の原因となる。その結果、軸受の損傷、、回転部と静止部の接触、破壊につながる

事業		代表的な企業例
エンジン本体	組立、試験	IHI、KHI、MHI、ホンダ
	整備	全日空整備、JAL(飛行前整備)、オリンパス工業、町田製作所(ボアスコープ)、堀口エンジニアリング(モジュールスタンド)、協和高圧機工、東明工業(エンジンコンテナ)、ジャムコ航空機整備(エンジン補機)、エーピーシーエアロスペシャルティ(化学洗浄、防錆・梱包)
	修理事業	KHI、MHI、JAL、IHI、ANA(エンジンオーバーホール)
	テストセル	IHI、MHI(エンジンセル)、INC(無響室)、小野測器(計測装置)、パイオニア(防音工事)
部品加工	精密加工	一宮精工、放電精密加工研究所、水野鉄工所(部品加工)、広島工具製作所(工具・加工)
	表面処理	旭金属工業
部品	補機	島津製作所、住友精密工業、ダイキン工業、帝人製機、三菱電機(燃料ポンプ)
	ベアリング	日本精工、ミネベア(株)、NTN、光洋精工、不二越
	電気、ゴムなど	古川電気工業、アンフェノールジャパン(株)(電装品)、イーグル・エンジニアリング・エアロスペース(株)(シーリング)、横浜ゴム(圧縮機静止部品)、櫻護謄(株)(ホース・金具類、複合材成形品)、三菱電線工業(O-リング)、トキメック(電子機器・油圧機器)、日本特殊陶業(スパークプラグ)
	計器	東京航空計器、トキメック、横河電機、富士精工(センサー)
	その他	昭和飛行機工業(ハネカムサンドイッチパネル)
材料	金属材料	日立金属(株)、大同特殊鋼(耐熱材料)、三菱マテリアル(株)、神戸製鋼所、住友軽金属工業(航空機部材)、安来製作所(航空機器鋳造部品)、
	非金属材料	東邦テナックス、三菱化学(航空機材料)、東レ、三菱レイヨン(複合材料)
油脂	潤滑油	昭和シェル石油

国産エンジンの開発	現在の日本での航空エンジンのは、アメリカ(GE、PWA)、イギリス(RR)企業主導の開発に生産分担、または共同開発として参加しているが、独自の開発技術を持っていない。要素技術は相当のレベルに達しているが、将来の航空機産業発展のためには自主技術によるエンジンの出現が強く要望されている。そのためには全体のまとめ、評価・認証、東南アジア市場の確保、開発資金の調達など独自の体制整備が必要
騒音	航空機騒音は間歇騒音で、国際民間航空機関が提案の指標は加重等価平均感覚騒音レベル(WECPNL)を使う。(規制は住宅地で70以下)。エンジンとしては、ファン風切音、エンジン内部から放射される燃焼音、ジェット噴流などが対象となる。タービン翼形状などの対策がとられる
NO _x	エンジンから排出されるNO _x は燃焼器内の燃焼過程で生成される。NO _x の発生を可能な限り抑え、負荷変動でも燃焼効率を高く維持するために、燃料の微粒化、一次燃焼と主燃焼の2段燃焼が採用される
微細加工	エンジンの性能向上はきめ細かい空気冷却と動翼先端のクリアランス極小化によるところが大きい。複雑で細かい空気通路の形成、クリアランスの寸法管理には、最先端の微細加工技術が要求される
FADEC	エンジンの始動、加減速、定常運転、停止のすべての制御をデジタル電子制御により行う装置。きめ細かい制御とエンジン本体の性能、劣化状態を判断する情報も付加することが可能
燃料・潤滑油の漏れ防止	燃料等の配管は薄肉で、無理な応力、振動で破損し、漏れが生じやすい。配管の継ぎ手部分は無理な応力が残らないよう、予め組み付け前の配管単体の加工で、継ぎ手部の正確な位置決めを行う
アフターマーケットビジネス	既存のエンジンに対して、部品の修理開発、より信頼性／経済性の高い部品・コンポーネントを開発して整備、改修を行う事業が有望視されている。当然、新部品に対して認証を受ける実力が要求される

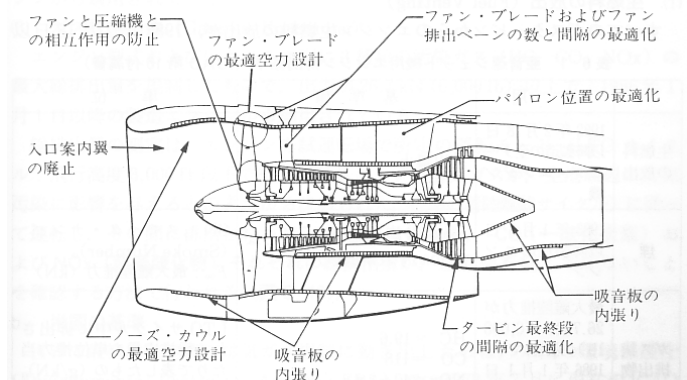


図16-26a ファンエンジンの騒音対策

工業会など	設立年	会員企業数	趣 旨
(社)日本航空宇宙工業会 (SJAC)	1952	約150社	航空宇宙機器の生産の振興と貿易の拡大を通じて我が国航空宇宙工業の健全な発展を図り、産業の高度化に寄与するとともに、世界の航空宇宙産業の健全な発展に貢献することを目的とする民間公益団体。
宇宙航空研究開発機構 (JAXA)	2003	独立行政法人	航空宇宙技術研究所(1955年設立)、宇宙開発事業団(1969年設立)などを統合して発足。宇宙・航空関連の基礎研究から開発・利用まで一貫して推進する。
(財)日本航空機エンジン協会 (JAEC)	1981	3社(IHI、KHI、MHI)	日米英独伊の5カ国共同のV2500エンジン開発における日本の分担分を担当する協会。主として低・高圧圧縮機、高圧タービン(一部)、ファン、補機類を担当。
超高温材料研究所 (JUTEM)	1900	株式会社	最新の設備を利用して使用温度の高い耐熱材料研究を遂行することにより、研究テーマの受託が主な業務。
超音速輸送機用推進システム技術研究組合(ESPR)	1999	3社(IHI、KHI、MHI)	次世代の超音速機用エンジン、環境にやさしい航空機用エンジン等の研究開発を行っている。前身のHYPRプロジェクト(高性能ターボジェット、ラムジェットの開発研究－1989年設立)を引き継いだもの。

キーワード

アフターバーナー (afterburner)	ジェット・エンジンの推力を一時的に増加させるために、排気管中に燃料を噴射し、タービン出口ガスを再燃焼させて推力の増強を行う装置。離陸時や、上昇時に使用。この方法によると20～30%程度の推力増強が得られるが、燃料消費率が非常に大きくなるので一般の民間機では用いられない
バイパス比	ファンジェットエンジンにおいて、ファンを通過する空気量／燃焼に使う空気量一の比。民間機エンジンは効率上この比が4～6の高バイパスエンジンとなっている
マッハ数	航空機の速さと同様に、圧縮機・タービン翼内の流れも音速(マッハ1)前後となっている。超音速翼にすると、段数が減ってエンジンの小型軽量化が可能であるが、負荷変動の対応が難しくなる
失速	圧縮機翼の回転周速と空気の流れ速度の比率が不釣り合いとなると、空気がよく表面に沿って流れなくなる翼面失速現象を起こし、性能の急激な低下をもたらす。激しい音と振動を伴う

J79-11Aターボジェットエンジン

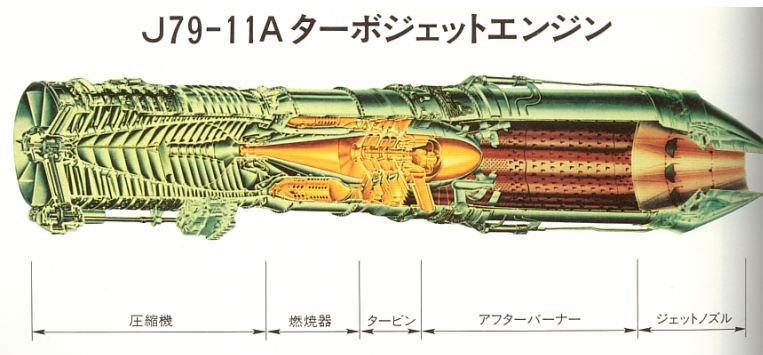


図16-26b アフターバーナー付きエンジン

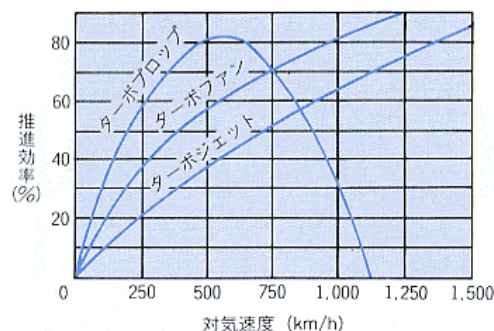


図16-26c 推進効率の比較

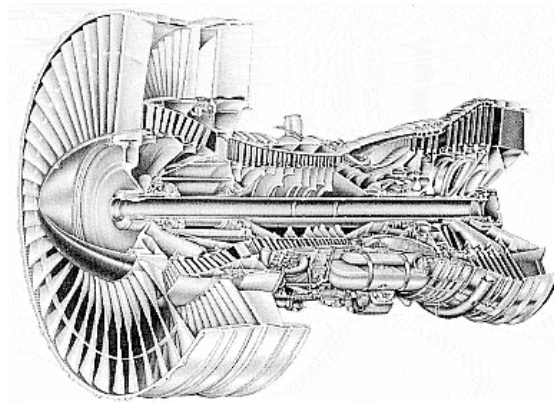


図16-26d 高バイパスターボファン
JT9D-7R4

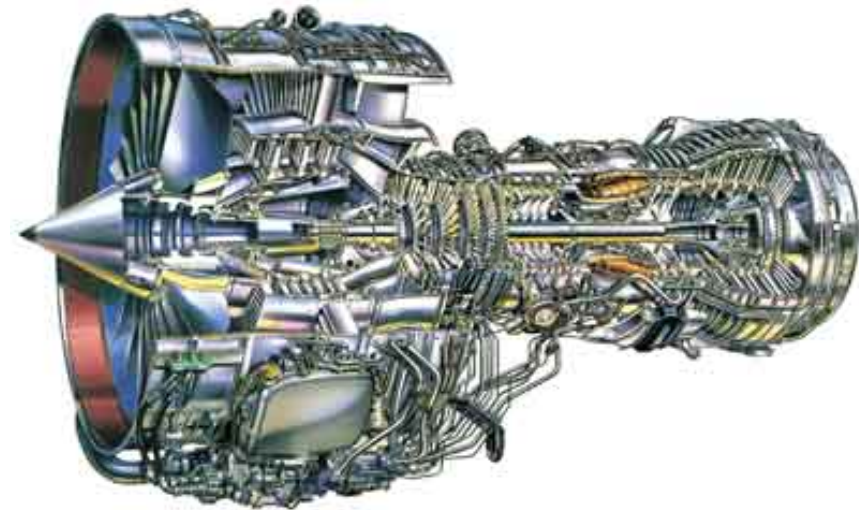
ジェットエンジン

狭義には次の2つを指す。

- ターボジェットエンジン(「ピュア」ジェットエンジン)
- ターボファンエンジン

広義には以下のものも含む。

- ターボプロップエンジン
- プロップファン
- ターボシャフトエンジン
- ラムジェットエンジン
 - ターボラムジェットエンジン
- スクラムジェットエンジン
- パルスジェットエンジン
- パルスデトネーションエンジン (PDE, Pulse Detonation Engine)



V2500ターボファンエンジン

ターボジェットエンジン:タービンの回転力を利用して空気を圧縮し、そこに燃料を噴きつけ燃焼させ、後方に噴射する排気ガスによってのみ推力を得るエンジン。

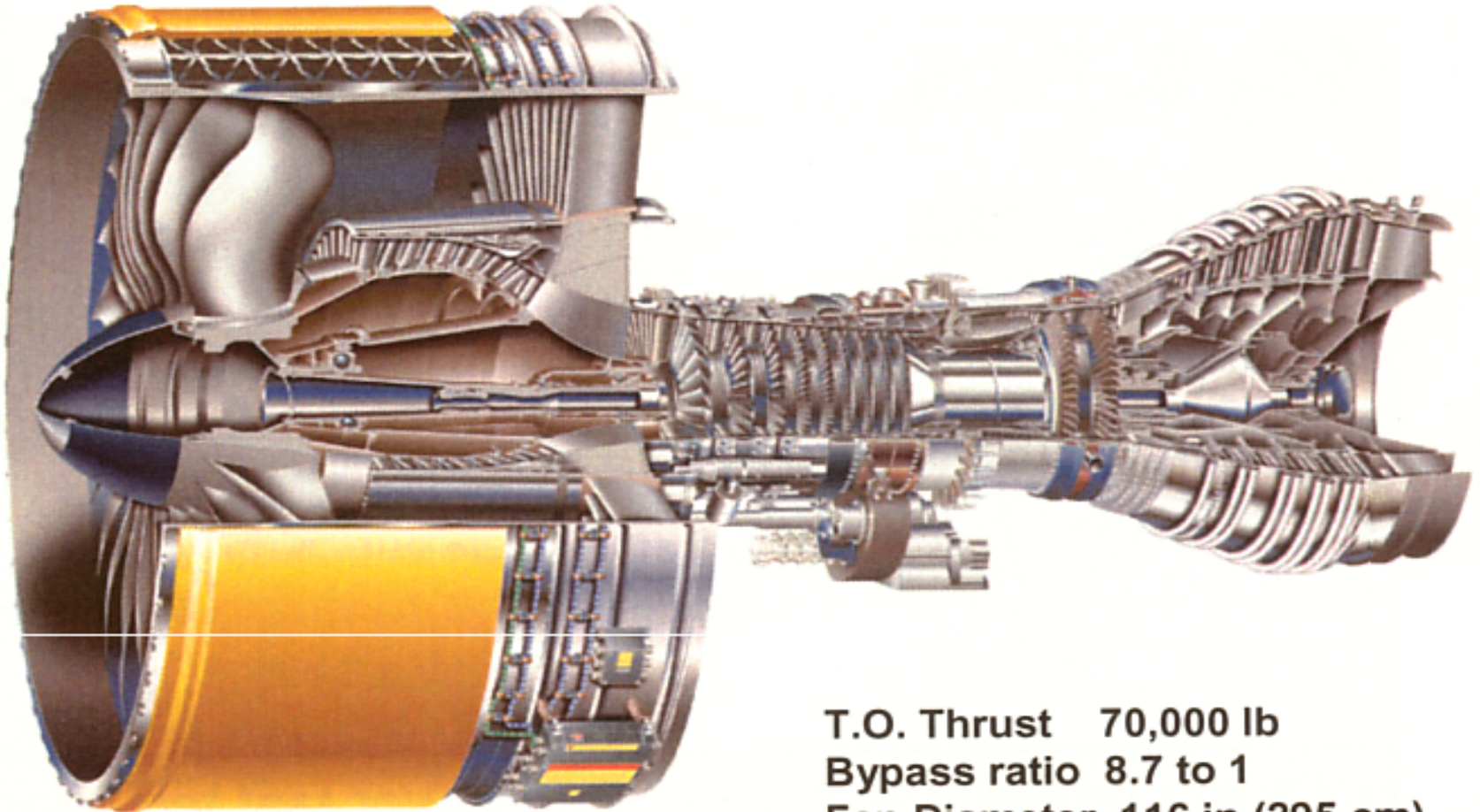
ターボファンエンジン:ターボジェットエンジンの前方に、直径の大きなコンプレッサともいえるファンを取りつけたエンジン。ファンはコンプレッサと同じくタービンによって駆動される。ジェットの噴出速度と飛行機の巡航速度をなるべく近づけることで燃料消費の改善を図ったもので、飛行高度や巡航速度の変化が少ない旅客機に多用される

ターボシャフトエンジン:コンプレッサ駆動用のタービンと別に、フリータービンと呼ばれるタービンを備えるガスタービンエンジン。フリータービンにより取り出された出力(トルク)はシャフトとギアボックスを介してロータや車輪に伝達される。

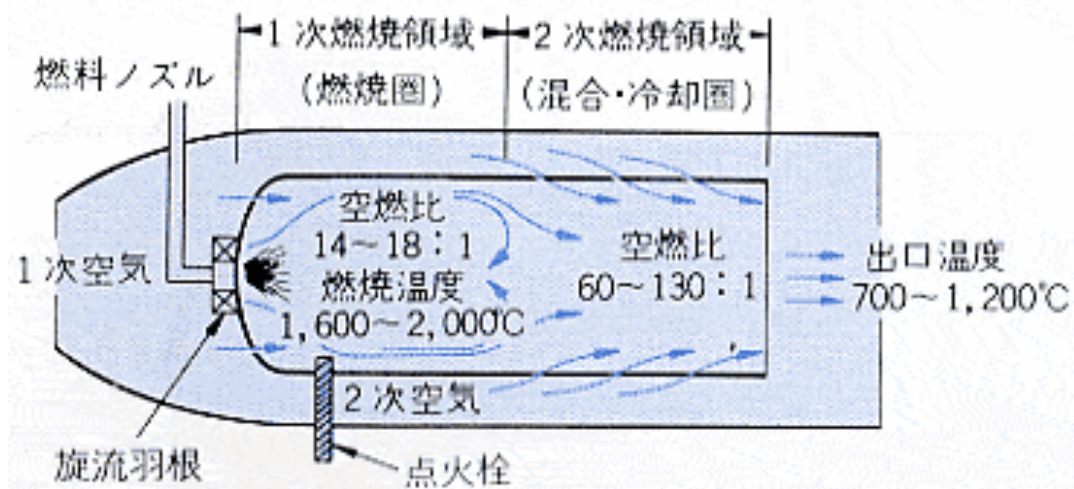


日本初のジェットエンジンーネ20/1945

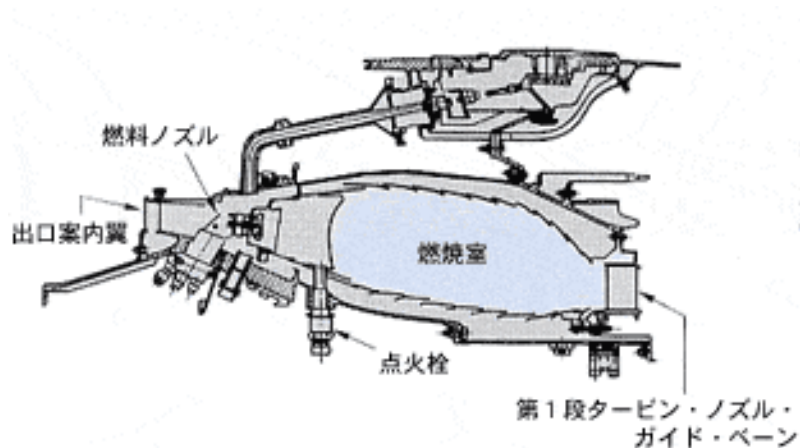
GP7200 for the Airbus A380



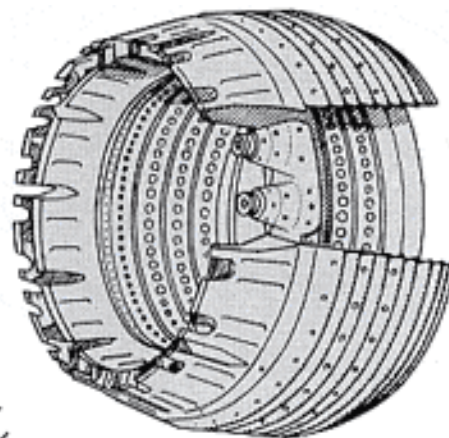
T.O. Thrust 70,000 lb
Bypass ratio 8.7 to 1
Fan Diameter 116 in (295 cm)



燃焼室の作動原理



断面図



外観図

アニュラー型燃焼器(JT9D)

参考図16-3 航空エンジンの燃焼器

参考資料

1. 航空宇宙工業年鑑 各年 航空ニュース社
2. 航空実用事典 JAL HPより用語索引可能
3. 新航空工学講座8ージェットエンジン 松岡増二 1991.5.20 日本航空技術協会
4. IHI航空宇宙30年の歩み IHI航空宇宙事業本部 1987.6.30
5. 日本ガスタービン学会会誌 各号
6. 各社HP

