

Techno Scope



最新の航空機開発を支える材料技術

民間の航空機需要が高まっている。

長らく低迷が続けてきた航空旅客数は、2004年より回復を見せ始めている。これを受けて航空機受注が増加しており、航空機メーカーは新型機の開発を進展させている。最新の航空機の開発には日本メーカーが深く関わっており、高い役割分担で開発にのぞんでいる。世界の注目を集める新型機の開発と搭載される技術の動向を紹介する。

2005年6月、パリ航空ショー（第46回フランス国際航空宇宙展）で公開されたA380。話題の新型機を一目見ようと多数の人が詰めかけた。（写真提供：ロイター＝共同通信社）

回復をみせる航空機産業

近年、米国同時多発テロ事件（9.11テロ事件）やイラク戦争、アジア地域での新型肺炎の流行等の影響を受けて、航空旅客数は低迷が続けていた。しかし2004年に入って回復の兆しを見せ、加えて中国をはじめとしたアジア地域の著しい経済成長がけん引役となり、2004年の航空旅客数は前年比11～12%増となっている。

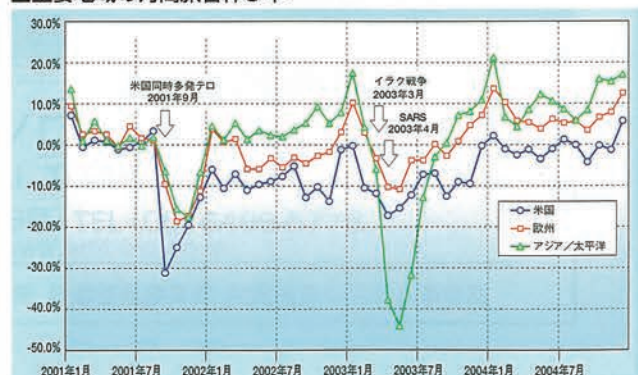
これを受けて、航空機受注が増加している。二大航空機メーカーの米国ボーイング社、欧州エアバス社の2005年の受注機数（座席100席以上、貨物機含む）は9.11テロ事件前のピークである1,211機を上回り、空前の受注増となる勢いである。

（財）日本航空機開発協会によれば、成長を続ける世界の航空旅客輸送量の状況から、現在約14,300機の民間ジェット機が2024年には約31,700機に増加するという見通しである。また、現在運航しているジェット機の半数以上が今後20年以内で退役を迎えることとなり、これらの代替需要もにらみ航空機産業はにわかに活気づいている。

このような状況を受けて、二大航空機メーカーは新型機の開発

に乗り出している。それぞれ最新技術を積極的に採用しており、その開発動向に注目が集まっている。最近では、旅客機の開発は国際共同開発が進展しており、高度な製造技術を保有する我が国も開発に深く関わっている。特に最近では我が国の役割はますます重要度を増しており、各メーカーは新型機の開発・製造への対応を積極的に進めている。

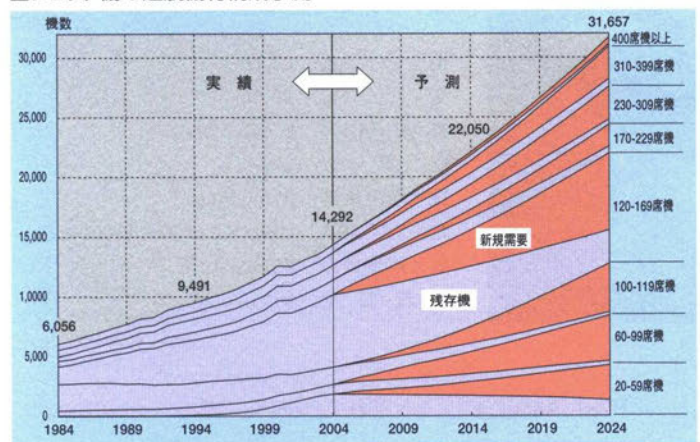
■主要地域の月間旅客伸び率



※上のグラフは、2001年の9.11テロ事件の影響と以後の回復を見るために、2000年1月のRPK値（米国74.05、欧州41.93、アジア35.87）を基準とし、その増減を示している。
※RPK: Revenue Passenger kilometers: 有償旅客キロメートル。地域別に1か月間に有償で旅客が搭乗した総距離を示す。単位はMillion kilometer。

（（財）日本航空機開発協会資料より）

■ジェット機の運航機材構成予測



((財)日本航空機開発協会資料より)

■ボーイング社製主要航空機の構造材料重量構成比の変遷

B787では複合材、チタンの大幅な採用拡大が見られる

	アルミ	スチール	チタン	複合材	その他
B747	81%	13%	4%	1%	1%
B757	78%	12%	6%	3%	1%
B767	76%	14%	6%	3%	1%
B777	70%	11%	7%	11%	1%
B787	20%	10%	15%	50%	5%

((財)日本航空機開発協会資料等より作成)

世界が注目する新型機の開発と我が国の関わり

現在、開発中の新型機で、最も注目を集めているのがボーイング社の「B787」とエアバス社の「A380」である。

B787は200～300席クラスの中型双発機で、現行B767の後継機となる。ボーイング社は今後、主要拠点を結ぶ直行便の便数が増加すると予測し、高効率な長距離中型機の開発に着手した。計画では、基本型は同サイズ機より20%低燃費で、航続距離は約15,700kmに達する。これは東京～ニューヨーク路線やロサンゼルス～ロンドン路線をカバーするのに十分な距離である。原油価格が高騰するなか、運航費低減を図ることが可能な新型機は航空会社にとって大きな魅力となっている。B787の市場投入は2008年の予定である。

一方、A380は500～800席クラスの超大型機である。エアバス社は今後、大型機による大量輸送と小型機による乗客の振り分け輸送を組み合わせた「ハブ・アンド・スポーク」が増加するという予測から、超大型機の開発に着手した。特徴は類を見ないその大きさで、基本型の全長は70.8m、全幅は79.8mに及び、世界初の総2階建を実現している。これにより床面積は同クラスのB747(ジャンボ機)に比べ50%増となっている。A380の市場投入は2006年の予定である。

この他にもボーイング社はA380に対抗しB747の後継機の開発着手を決定したり(2005年11月14日の同社発表による)、エアバス社はB787と同クラスのA350の開発を進展させるなど、各クラスでの開発競争が激化している。

今回の新型機の開発には、日本のメーカーが深く関わっていることでも話題を呼んでいる。

B787の機体構造の価格における日本メーカーの役割分担は35%に達すると言われている。ボーイング社は垂直尾翼などを担当し、日本メーカーは主翼の構造部分、主翼前方の胴体部分、中央翼等を担当する。これまで日本メーカーはB767、B777の開発・

製造に従事し、その比率はそれぞれ15%、21%と着実に実績を増やしてきた。またA380の開発でも多数の日本メーカーが製造に関わっており、実績が評価され我が国はこれまでにない重要な役割を担うことになっている。

大幅な軽量化を試みた新機体

B787をはじめとして新型機は燃費向上を主要課題としている。各機は燃費向上に貢献する軽量化を図るため、軽量複合材の大幅採用を打ち出している。特にB787は尾翼等に加えて、旅客機では初となる主翼、胴体の主構造に炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP)を使用する予定で、複合材の使用量は機体重量の50%以上に達すると言われている。一方、A380では胴体にアルミニウム箔とガラス繊維布を接着した強化積層板が採用される。

また軽量化を図るため採用拡大が計画されているのがチタンである。B787では材料の重量構成比でチタンを15%にまで高める予定である。現行B767のチタン使用量が6%であるから2倍以上の拡大となる。これまでも軽量で高強度、耐食性に優れたチタンは航空機に多く使用されてきたが、最近では軽量化要求がますます強まりチタンの採用拡大が進展している。さらにCFRPの使用増加に伴い、チタンのCFRPとの適合性に注目が集まっている。これまで機体に多く採用されてきたアルミニウムは、炭素繊維と直接接触すると電食(ガルバニック腐食)を起こす。チタンは電食を起こす心配がなく、防食塗装が不要となる。またチタンはCFRPと比較的近い熱膨張係数を持つ。このような特性からチタンの採用が増加している。主には主翼、尾翼部の金具やピンジ類、エンジン取り付け金具、降着装置の構造材(ビーム、アームなど)、油圧アクチュエータ部品、空気ダクト、ボルト類などに使用されている。この他エンジンにも多用されている(後述)。



(写真提供:AFP=時事)

B787-8 (基本型)

全長	56.7m
全幅	60.0m
胴体幅×胴体高	5.75×5.96m
座席数	223
最大離陸重量	218,000kg
エンジン名称×基数	GENx×2 or Trent1000×2
最大離陸推力	28,600kg/基
航続距離	約15,700km

*2005年12月現在

なかでも降着装置は、着陸時の大きな荷重がかかるため特に脚回りには高強度な材料が求められる。降着装置に用いられる材料には疲労強度や加工性はもちろんのこと、厳しい環境に曝されるため、応力腐食割れ性、水素脆性、破壊靱性等も求められる。主脚の材料には低合金系炭素鋼(Ni-Cr-Mo鋼)が主流となっているが、最近では軽量化および耐食性向上のため一部にチタンが採用されている。

一般に航空機の寿命は20年と言われるが、その間の整備や修理等のコストは膨大である。そのため新型機には高強度で、耐久性に優れた材料を積極的に採用する傾向にある。そのため最近では、我が国の高品質なチタン製品に需要が高まっている。

エンジンの燃費向上に貢献するチタン材料

新型機の主要課題とされている燃費向上には、エンジンの性能が大きく関わる。

B787、A380ともに、それぞれ二つのエンジンメーカーのエンジンを搭載候補とし開発を進めている(どのエンジンを搭載するかは航空会社を選択する)。この新型機のエンジン開発においても日本メーカーが深く関わっており、なかには今回15%という高い役割分担で参画するメーカーもあり、エンジン開発において日本の技術力に期待が高まっている。

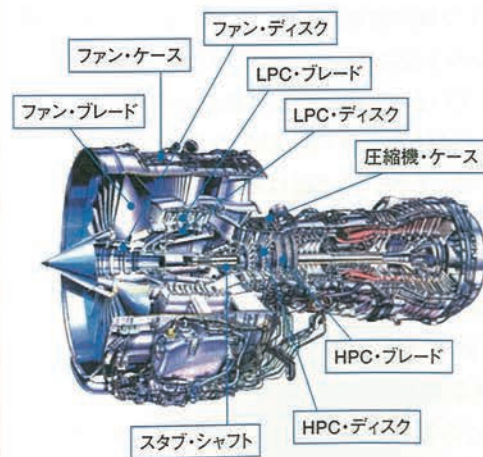
求められる燃費向上に対して、現在では主にファンの高バイパス比化、圧縮機の高圧縮比化、タービンの高温化等が進められている。

特に高バイパス比化は大きな燃費向上を生む。現在民間航空機に最も多く使用されているエンジンはターボファンエンジンであるが、このエンジンはファンで燃焼に必要な空気を取り込むとともに、空気をバイパス(迂回)させて後方に押し流し推進力を得る。最近では推進効率を高めるためバイパスする空気量の多い、高バイパス比ターボファンエンジンが開発されている。現行エンジンは燃焼させる空気量とバイパスさせる空気量の比が1:8程度であるが、B787に搭載候補となっている「Trent 1000」(ロールス・ロイス社製)は1:11となっ

■エンジンに使用されている主要チタン製品の代表材質、要求特性

部 位	代表材質	要求特性	製造法	特記
ファン・ケース	Ti-6-4	高強度、耐衝撃	リング圧延	競合材:Al合金+FRP
ファン・ブレード(動翼)	Ti-6-4	耐衝撃、疲労	鍛造/超塑性成形+拡散接合	競合材:CFRP
ファン・静翼ケース	Ti-6-4	強度、靱性	鍛造	
ファン・ディスク	Ti-6-4	低サイクル疲労、靱性	鍛造	
圧縮機・ケース	Ti-6-4	クリープ、疲労、熱疲労	リング圧延	
圧縮機・ブレード(動翼・静翼)	Ti-6-4 Ti-6-2-4-6 Ti-8-1-1	耐衝撃、疲労、靱性	鍛造 (静翼は鍛造品もあり)	
圧縮機・ディスク	Ti-6-4 Ti-6-2-4-6 Ti-17 Ti-6-2-4-2 IMI834	低サイクル疲労、靱性、 高温強度、クリープ	鍛造	
スタブ・シャフト	Ti-6-4	疲労、靱性		

※材質 Ti-6-4: Ti-6%Al-4%V、Ti-6-2-4-6: Ti-6%Al-2%Sn-4%Zr-6%Mo、Ti-8-1-1: Ti-8%Al-1%Mo-1%V
Ti-17: Ti-5%Al-2%Sn-2%Zr-4%Mo-4%Cr、Ti-6-2-4-2: Ti-6%Al-2%Sn-4%Zr-2%Mo
IMI834: Ti-5.8%Al-4%Sn-3.5%Zr-0.7%Nb-0.5%Mo-0.35%Si

■航空機エンジンに使用されている主要チタン製品部位

LPC:低圧圧縮機、HPC:高圧圧縮機

((株)神戸製鋼所資料より)

A380-800 (基本型)

全長	70.8m
全幅	79.8m
胴体幅×胴体高	6.95×8.47m
座席数	555
最大離陸重量	540,000kg
エンジン名称×基数	Trent900×4 or GP7200×4
最大離陸推力	31,300kg/基
航続距離	約14,800km



© AIRBUS S.A.S. 2005 photo by e'm company / H. GOUSSÉ

(写真提供:エアバス社)

ており、超高バイパス比となっている。

高バイパス比ファンの動翼は、三次元の複雑な形状を持つものが増えている。動翼にはチタンや樹脂が使用されているが、Trent1000では中空チタン製動翼が採用される。これは3枚のチタン板材を重ね、拡散融合により必要な部分を接合した後、加熱し超塑性状態で板材の間にガスを注入し中空にした軽量な翼である。

高バイパス比化に加え、圧縮機の高圧縮比化も燃費向上に寄与する。圧縮機は、ファンが取り入れた空気を圧縮し燃焼器に密度の高い空気を送る働きをする。最近では高圧、低圧の2種の圧縮機を設けるエンジンが多い。特に高圧圧縮機は高圧力比状態と

なる。この高圧圧縮機に使用されるディスク(回転体部品の一つ)は、高い耐久性が求められる。これにはチタン鍛造品が用いられることが多いが、チタン合金の清浄度に問題があれば部品の劣化に繋がる恐れがあり、チタン製品の中で最も製造が困難とされる最重要保安部品に位置付けられている。信頼性向上を図るため、最近では圧縮機の各段のディスク接合には電子ビーム溶接技術が適用されるなどしている。また、A380に搭載候補となっている「Trent 900」(ロールス・ロイス社製)の中圧圧縮機のケースには、チタン製リング品が使用されているが、これには我が国で開発された複雑な断面形状をリング圧延により直接成形するニアネットシェイプリング圧延技術が生かされている。

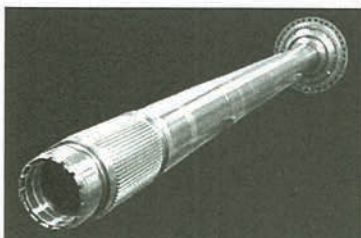
この他にも、航空機エンジンには多数のチタン製品が使用されている(4ページ下表参照)。特に回転体などはエンジンの重要部品であり、鋳塊溶解技術や検査(超音波探傷)技術の開発等により、信頼性向上が図られている。



B787に搭載候補となっているエンジンTrent1000には、中空チタン製動翼が採用予定となっている。(写真提供:ロールス・ロイス・インターナショナルリミテッド、(株)日本航空技術協会)



A380に搭載候補となっているエンジンTrent900の中圧圧縮機ケースには、チタン製リング品(外径:約φ1200mm、高さ:500mm、材質:Ti-6Al-4V合金)が採用されている。(写真提供:(株)神戸製鋼所)



GENxの低圧タービンのメインシャフトにはマルエージング鋼の改良により引張強度を高めた開発鋼が使用される。この開発鋼の実用化には日本の材料メーカーが関わっている。強度向上をめざし、清浄度の高い鋼を得るために溶解法の改良が重ねられた。こうして実用化された開発鋼は、引張強度が従来鋼1,840MPaに対し1,965MPaに達している。(写真は開発鋼が使用された「GE90-115B」エンジンの低圧シャフト)(写真提供:石川島播磨重工業(株))



単結晶鋳造合金を使用したタービン動翼。単結晶鋳造合金は、第二世代合金、第三世代合金と開発が進み、最新では第四世代合金の開発も進行している。(写真提供:石川島播磨重工業(株))

新型機への搭載をめざし 結集された日本のものづくり技術

大型機ともなると300万点以上におよぶ部品で構成される航空機。現在では、世界規模での部品調達が進んでいる。航空機部品の製造には精度が厳しく求められるが、一度採用されれば交換需要も見込める。しかし技術動向や要求レベルについての情報入手が難しく、中小企業参入の障壁となっている。

中小企業が集中する大阪市では、航空機産業に関わる企業が約100社存在する。2004年、関連企業が連携し、新型機向けの部品供給をめざした「次世代型航空機部品供給ネットワーク」が設立された。航空機開発に携わったOBも参加し、技術交流や情報収集等を通じ販路開拓を進めている。B787などの新型機には、特殊加工を施したチタン合金ボルトや高輝度LED照明、ステアリングやブレーキ等のコン

ロール部品用試験機などが供給目標となっており、活動の進展が図られている。



次世代型航空機部品供給ネットワークは、新型機用部品開発への参入をめざす。写真は「世界ものづくりサミット」展の様子(2005年7月・大阪市)(写真提供:(株)帝国データバンク)

活発な研究開発が進む超耐熱合金

エンジンの燃費向上のために、最も効果的なのがタービンの高温化である。タービンは燃焼器で燃焼した排気気流を利用してファンや圧縮機を回転させる。最近の航空機エンジンではタービン入口温度が1,600℃を超えている。そのため材料は過酷な環境に曝され、高温化に対応した超耐熱合金の開発が進められている。

タービンの回転体である動翼、ディスクには主にニッケル基合金が使用されている。特に動翼に使用されるニッケル基合金は、1950年代に普通鋳造合金が開発され、1970年代には一方向性凝固鋳造合金、1980年代には単結晶鋳造合金が開発され(右表参照)、耐用温度を上げてきた。これらは使用温度に応じて使い分けられているが、特に高温部には単結晶鋳造合金の使用が一般的となってきた。

単結晶鋳造合金は、レニウム(Re)を3%程度添加した第二世代合金、Reの添加量を5~6%に増加した第三世代合金が開発されている。また最近ではルテニウム(Ru)、あるいはイリジウム(Ir)を添加した第四、第五世代合金の開発も進行している。特に国内で開発されたTMS-162は世界初の第五世代合金として海外から注目されている。

一方、ディスクも温度上昇を受けてディスク外周部の温度が高温になる傾向にあり、特に高温に曝される高圧タービンのディスクには、

粉末冶金合金の適用が進んでいる。A380の搭載候補となっている「GP7200」(エンジン・アライアンス社製)やTrent900では、高圧タービンの燃焼器に最も近い第1段目のディスクにニッケルをベースとした粉末冶金合金を採用する予定となっている。

この他にも金属間化合物や金属基複合材料、セラミックス基複合材等が次世代の耐熱材料として研究開発が行われている。

新型機の開発は、高性能材料や技術の実用化の契機であり、新たな材料技術や加工技術が積極的に採用されることになる。さらに新型機で試みられた技術は波及効果が高く、他分野への応用が期待できる。現在、開発中の航空機であるため材料技術の公開は一部に限られているが、新型機が次の大空の主演となる時、搭載された先端技術が他分野へ向けて大きな飛躍を見せていることを期待する。

■代表的なタービン翼用Ni基合金の組成(wt%、残Ni)

合金名		Co	Cr	Mo	W	Al	Ti	Nb	Ta	Hf	Re	Ru	C	B	Zr	世代	耐用温度
鋳造合金	IN-713C	—	12.5	4.2	—	6.1	0.8	2	—	—	—	—	0.12	0.012	0.1	—	925
	IN-738	8.5	16	1.7	2.6	3.4	3.4	0.9	1.75	—	—	—	0.17	0.01	0.1	—	930
	TM-321	8.2	8.1	—	12.6	5	0.8	—	4.7	—	—	—	0.11	0.01	0.05	—	985
一方向性凝固鋳造合金	MM247LC	9	8	0.5	10	5.6	0.7	—	3.2	1.4	—	—	0.07	0.015	0.01	1st	980
	CM186LC	9.6	0.5	8.4	4	5.7	0.7	—	3.4	—	3	—	0.07	0.015	0.005	2nd	1010
	TMD-103	12	3	2	6	6	—	—	6	0.1	5	—	0.07	0.015	—	3rd	1039
単結晶鋳造合金	PWA1480	5	10	—	4	5	1.5	—	12	—	—	—	—	—	—	1st	1010
	CMSX-4	9.6	6.4	0.6	6.4	5.6	1	—	6.5	0.1	3	—	—	—	—	2nd	1040
	CMSX-10	3	2	0.4	5	5.7	0.2	0.1	8	0.03	6	—	—	—	—	3rd	1062
	TMS-138	5.8	3.2	2.8	5.9	5.9	—	—	5.6	0.1	5	2	—	—	—	4th	1083
	MX-4	16.5	2	2	6	5.55	—	—	8.25	0.15	5.95	3	—	—	—	4th	1060
	TMS-162	5.8	2.9	3.9	5.8	5.8	—	—	5.6	0.1	4.9	6	—	—	—	5th	1102

((独) 物質・材料研究機構資料より)

動き出した小型国産機の開発

近年、航空需要が多様化を見せ、このようなニーズにきめ細かく対応する小型旅客機に注目が集まっている。(財)日本航空機開発協会の予測によれば、20年後、20~59席クラスは約2.3倍、60~99席クラスは約5倍に成長する見通しである。このような市場動向から日本のメーカーが相次いで小型機の開発に関心を示している。

2003年度からは経済産業省が推進する環境適応型高性能小型航空機の研究開発が始まっている。現在開発を目指しているサイズは70~90席クラスで材料、構造、システム関連等の中核的要素技術の向上や機体、エンジンの開発能力の向上、環境適合性に優れた民間航空機の開発を通じて、我が国の航空機産業の国際競争力の強化を目指している。具体的には軽量化等の環境負荷低減に貢献する材料の開発、安全性向上に寄与する操縦のための情報技術等の実証を行い、これらを活用した小型航空機の試作、試験を行う。



国内外顧客獲得の可能性がより大きいという市場分析から、事業化検討が始まっている70~90席クラスの国産機(事業化の可否は2007年度までに決定)
(写真提供:三菱重工業(株))

日本メーカーの強みは技術力にある。1970年代から国際共同開発に参画し、ノウハウや高い技術を蓄積してきた。今回の新型機では高い役割分担で開発に参加している。ただ市場への参入は、技術力以上に市場調査や分析、販売網の確保、資金調達、顧客のサポート等が重要となる。事業化に向けた課題は山積していると言える。しかし我が国は世界屈指の旅客数を誇る大きな航空市場を有しており、国産機を望む声はますます高まっている。

●取材協力 (財)日本航空機開発協会、石川島播磨重工業(株)、次世代型航空機部品供給ネットワーク、(株)帝国データバンク、(独)物質・材料研究機構、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構、三菱重工業(株)、(株)神戸製鋼所
●取材・文 杉山 香里