



国際競争力を強める 日本の航空機産業と材料技術

1903年にライト兄弟が初めて有人動力飛行に成功したライトフライヤー号の乗員はパイロットの1名だけであった。

その約100年後、2007年に就航した最大級のジェット旅客機であるA380は、500名以上の乗客を一度に運ぶことができるまでになった。

航空機技術の進歩は、材料技術の進歩が寄与するところが多い。現在も、チタン合金、ニッケル基超合金、アルミニウム合金や複合材料など、さまざまな材料の研究開発が進められている。

世界に先駆けて、日本の航空会社に納入されるB787型機。初号機には特別な塗装が施されている。(写真提供：ANA)

航空機材料の最近の動向

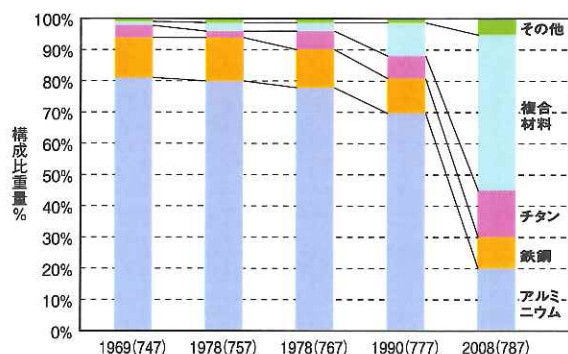
中長期的な成長が予想されている民間機市場では、2008年から2028年の20年間で累計2万6000機、約300兆円の新規需要が期待されている。特に主要国では、航空機産業を戦略産業として位置付け、積極的な育成を図っている。航空機産業の発展のためには、これまで以上の安全性向上と運航コスト低減、さらには環境への配慮が必須であるが、これを実現してきたのが、優れた特性を持つ新しい材料である。

1969年に初飛行した、いわゆる「ジャンボジェット」と呼ばれているB747では、機体構造材料の約80%にアルミニウム合金が使用されていた。これは、2024アルミニウム合金(超ジュラルミン)、7075アルミニウム合金(超々ジュラルミン)などだが、近年は、いっそうの軽量化を実現するために、アルミニウム合金に代わりCFRP(炭素繊維強化プラスチック)などの複合材料の使用量が増加している。CFRPの使用量は1990年代から増加し始め、約35%を我が国のメーカーが製造しているため「made with Japan」とも呼ばれる最新鋭のB787(2011年就航)ではその使用量が重量の50%を超えるまでになっている。なお、CFRPに使用されて

いる炭素繊維では、日本メーカーのシェアは世界の7割を占めており、我が国がトップクラスの技術を有する分野の1つである。

複合材料と共に使用量が伸びているのがチタン合金である。B787では、チタン合金の使用量は構造材料の十数%にまで増加し、1機あたり10t前後のチタン合金が使用されていると推測されている。チタン合金の使用量の増加の背景には、設計上アルミニウム合金よりも軽量化が可能であることや、複合材料との優

■ボーイング社における民間旅客機機体構造材料の推移



出典：Science and Engineering of Light Metals, Japan Inst. Light Metals, 1991 273, 日経産業新聞など

Topics

ジェットエンジンの最高温部に採用された日本の超合金

(独)物質・材料研究機構では、世界で初めて1100℃を超える耐用温度を持つニッケル基単結晶超合金などの開発に成功した。開発超合金は、次世代型旅客機のB787に搭載されるエンジンでタービンブレードに採用される予定である。これはタービンブレードに日本の材料が使用される初めての快挙であり、これを契機として、我が国の航空機産業の飛躍が期待されている。



タービン翼
(高性能Ni基超合金)



中・大型ジェットエンジン

(資料提供: (独)物質・材料研究機構)

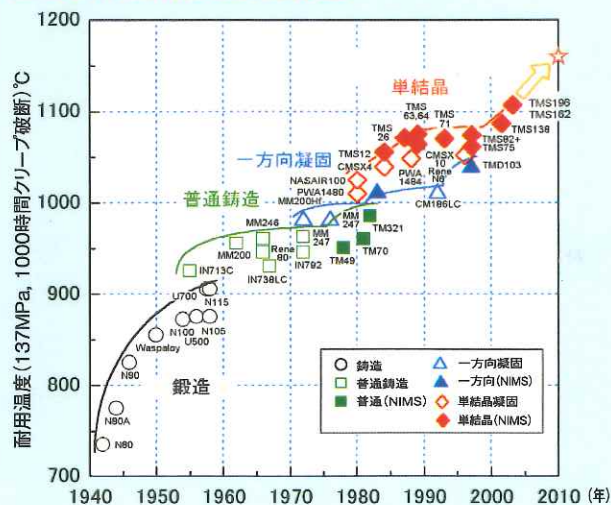
れた適合性を示すことなどがある。アルミニウム合金とCFRPとの接触面にはガルバニック腐食が生じる恐れがあるが、チタン合金ではその心配がない。さらに、チタン合金の線膨張率がCFRPの線膨張率に近いために、外気温の変化による歪みを抑えることが可能である。

鉄鋼材料としては、クロム-モリブデン鋼やニッケル-クロム-モリブデン鋼が、高強度が求められる脚部品や大型部品、エンジンなどで使用されている。また、ステンレス鋼も構造材として広く用いられている。

最近の新しい構造材料では、アルミチウム合金や、アルミニウムシートとガラス繊維シートの積層材料「グレア」等が注目される。いずれも2007年に就航した世界最大のジェット旅客機A380に採用されている。

構造材料と並んで、航空機材料で重要となっているのはエンジン材料の分野である。航空機の燃費の向上には、機体の軽量化とともに、高効率ジェットエンジンの開発が不可欠である。ジェットエンジンは、熱膨張した燃焼ガスのエネルギーを回転力に変換し、ファンを回すことで推進力の大部分を生み出している。燃焼ガスの温度が高温であるほど高効率を実現できるため、耐熱性の向上を中心にエンジン材料の開発が行われてきた。低温部分

■ニッケル基超合金の耐用温度向上



ニッケル基超合金製のタービンブレードは、多結晶から柱状結晶、単結晶の材料を使用することで、大きな遠心力に耐える高温クリープ強度を実現してきた。

■超合金タービンブレードの進化

●鋳造方法

普通鋳造

一方凝固

単結晶凝固

溶かして流し込む

結晶成長

結晶成長

結晶成長

下層を冷やしながら徐々に引き抜く

結晶組織

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

結晶

普通鋳造では多結晶のタービンブレードとなり、粒界部分から亀裂が生じてしまう。一方凝固鋳造では、柱状結晶であるため長手方向(遠心力のかかる方向)の強度は向上するが、亀裂の発生要因である結晶粒界が残ってしまう。単結晶では、結晶粒界がないため、亀裂が発生しにくい。

(資料提供: (独)物質・材料研究機構)

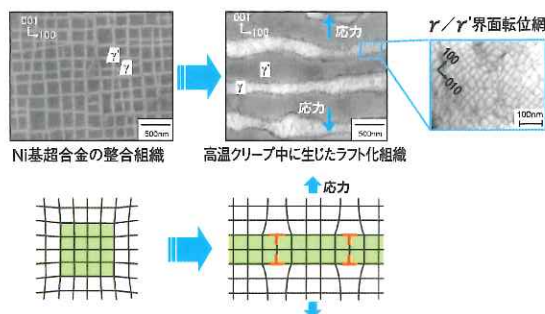
のファン部品やコンプレッサ部品等にはチタン合金が使用されているが、燃焼室やタービンなどの高温部分にはニッケル基やコバルト基の超合金(耐熱合金)が使用されている。

ジェットエンジンの効率化と共に進化してきた耐熱合金

1940年に軍用機に使用されたジェットエンジンの運転温度は、当初、750℃程度であったという。しかし、現在の民間航空機に使用されているジェットエンジンの運転温度は離陸や上昇時の最大

■転位網微細化による耐熱性の向上

γ/γ'2相界面の転位網



ニッケル基超合金ではNi固溶体のγ相にNi₃Alと金属間化合物のγ'相が析出した基本構造を持ち、これによって高い高温強度を実現している。その理由のひとつはγ/γ'2相界面が転位の運動を阻害する障壁となることであるが、その効果はクリープ中にγ'析出物が立方体状から板状のラフト組織へ変形することでさらに助長される。

(独)物質・材料研究機構では、添加元素であるモリブデン、レニウム、ルテニウム等の量を最適化し、γ相とγ'相の格子定数差を大きくすることによって、ラフト化を促進させるとともにγ/γ'2相界面に生成する転位網を微細化することに成功した。この網目が細かいほど、界面を横断する可動転位の障壁となり、耐用温度がいっそう向上する。

(資料提供: (独)物質・材料研究機構)

出力時には、1600℃を越える高温に達する。ジェットエンジンは高温部材特にタービン翼材の耐用温度が40℃上昇するごとに熱効率が1%向上するとされ、1%の効率向上はジェット旅客機1機あたり1年で約1億円の経費節減につながると言われている。そのため、耐用温度の向上は、エンジン材料開発の重要課題であった。

高温になる燃焼室にはニッケル基超合金のハステロイ、タービンの静翼にはコバルト基超合金、動翼にはニッケル基超合金が使用され、従前まで最も高温に曝される部分にはニッケル基超合金の中空精密鍛造品が主として使用されてきた。ニッケル基超合金の融点は1200℃～1350℃であるため、タービンプレードは、その内部に空冷用の流路を設け、さらに表面にジルコニア遮熱コーティングを施すことで、融点を越える高温に耐えるよう工夫されている。

また従来は精密鍛造で製作された多結晶のタービンプレードが用いられていたが、真空中で引き下げながら凝固させることで、遠心力のかかる長手方向に対して直角方向に現れる結晶粒界を減らし、より大きな遠心力に耐えうる柱状結晶を得る一方向凝固鍛造法が開発された。しかし、柱状結晶型タービンプレードの場合でも、結晶粒界から亀裂が生じるという課題があった。これを克服したのが、らせん状に細く絞った結晶セレクターを利用した単結晶鍛造法であり、1980年代に実用化されている。

ジェットエンジンの高圧高温部分は、最も高度な技術力が要求される部分であり、メーカー各社の最重要機密になっている。そのため、エンジン部品ではなく、全体を製造するためには、高温

■航空機に使用されるチタン材料

●構造材料

材 質	熱処理*	引張強度 (MPa)	適 用
純チタン	Ann.	345-550	ブラケット、ダクト、配管、非構造部材(良成形性、耐食性)
Ti-3Al-2.5V	CWSR/Ann.	860,690	油圧配管、ハニカム材
Ti-6Al-4V	Ann.	895	一般構造材—鍛造品、鋳造品、板等すべての形態
	β-Ann.	895	破壊抵抗強度部材
	β-STOA	965	破壊抵抗強度部材—軍用機:F-22用鋳造品、ペリコターのローター用鋳造品
	RA		破壊抵抗部材—軍用機:B-1、F-15、F-18
Ti-6Al-6V-2Sn	STA	1100	ボルト、独立構造部品(高強度部品)
	Ann.	895	構造部品(初期非重要部品)
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	STA	1100	軍用機用非重要部品
	DA	895	鍛造品、鍛造品(耐熱材)
Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr	TA	1035	鍛造品、厚板(高強度高靱性材)
Ti-10V-2Fe-3Al	STA	1190	着陸装置用桁部品(鍛造品—高強度高靱性材)
Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn	STA	1035	薄板(高強度、形成性)、鋳造品(少量)
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	CWA	1240-1450	バネ

*Ann: Annealed(焼鈍), CWSR: Cold Worked and Stress Relieved(冷間加工+応力除去焼鈍), β-Ann: β域加熱焼鈍, STOA: Solution Treated and Overaged(溶体化処理+過時効処理), RA: Recrystallized Annealed(再結晶化焼鈍), STA: Solution Treated and Aged(溶体化処理+時効処理), DA: Duplex Annealed(二重焼鈍), TA: Triplex Annealed(三重焼鈍), CWA: Cold Worked and Aged(冷間加工+時効処理)

●エンジン部分

部 位	代表材質	要求特性	製造法
ファンケース	Ti-6Al-4V	高強度、耐衝撃	リング圧延
ファンブレード(動翼)	Ti-6Al-4V	耐衝撃、疲労	鍛造/超塑性形成+拡散接合
ファン静翼ケース	Ti-6Al-4V	強度、靱性	鋳造
ファンディスク	Ti-6Al-4V	低サイクル疲労、靱性	鍛造
	Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Cr-4Mo		
	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo		
圧縮機ケース	Ti-6Al-4V	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-6Al-4V	耐衝撃、疲労、靱性	鍛造、鋳造品(静翼)
	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo		
	Ti-8Al-1Mo-1V		
圧縮機ディスク	Ti-6Al-4V	低サイクル疲労、靱性、高温強度、クリープ	鍛造
	Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Cr-4Mo		
	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo		
	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Si		
	Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb-0.5Mo-0.35Si		
スタブシャフト	Ti-6Al-4V	疲労、靱性	鍛造

出典: 現場で生かす金属材料シリーズ「チタン」(社)日本チタン協会

タービンの自主開発が不可欠となる。我が国では、世界最高の耐用温度1100℃を超えるニッケル基単結晶超合金が、(独)物質・材料研究機構により開発された。今後多くのジェットエンジンに採用されることが期待される。

■航空機機体へのβ型チタン合金の適用

チタン合金はその組織によりα型、α+β型、β型に大別できる。よく知られている「ロクヨン」はTi-6Al-4Vのα+β型合金で、アルミニウム合金よりも軽量化を図ることができるため、主翼付根、降着装置桁などの機体構造材等に使用されている。また、Ti-6Al-4V合金は、高い比強度とアルミニウム合金より高い耐熱性を持つため、ジェットエンジンのファンケースやファンブレードに用いられている。B777が登場する以前、チタン合金は高張力鋼の使用分野の置き換えで拡大した。最近のB787では、従来のアルミニウム合金使用部材からの置き換えも進み、さらに、複合材料との適合性が優れることから、複合構造材のファスナーに適用されるなど、大幅に適用範囲と使用量が増加している。

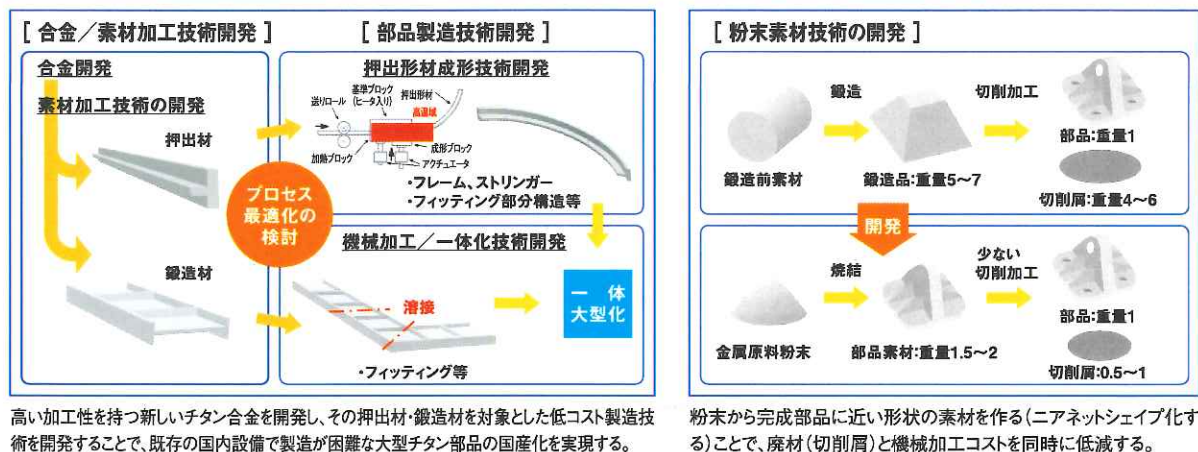
「次世代チタン合金構造部材創製・加工技術開発」プロジェクト(平成20～24年度)の概要

このプロジェクトでは、航空機構造用チタン合金について、これまで抱えてきた成形・加工性の問題を解決し、チタン部材の製造コストを30%低減することを目的としている。

■期待される4つのブレイクスルー

- 1 素材の開発
 - ・冷間成形性素材や押出成形素材の開発
- 2 成形加工技術の開発
 - ・局所加熱による成形加工技術の開発
 - ・押出材成形技術の開発
- 3 大型一体化技術の開発
 - ・低コスト機械加工技術の開発
 - ・接合技術の開発
- 4 粉末素材技術の開発
 - ・粉末焼結技術の開発
 - ・複合材による高機能化

■期待される研究成果の例



(資料提供: (財)素形材センター)

強度、延性、靱性のバランスがよいとされるTi-6Al-4V合金であるが、生産歩留まりが低い、加工性が悪いなどの欠点も指摘されている。そこで、熱処理特性や塑性加工性(冷間加工性)の優れたβ型チタンの実用化が進められている。最近ではβ型チタン合金で従来より約20%の強度向上と成形性を改善したTi-10V-2Fe-3Al合金が使用されるなど、加工性に加え靱性や疲労強度、焼入性などにすぐれた各種のチタン合金が開発、実用化されている。なお、Ti-10V-2Fe-3Al合金がはじめて航空機で使用されたのは、B777の降着装置の桁材である。

チタン合金の加工性を改善する取り組み

市場拡大が期待されている航空機産業では、今後、ますます複合材構造の部品の使用量が増加していくものと考えられる。それに伴いチタン合金の使用拡大が見込まれるが、そのためには塑性加工性、機械加工性などが悪く、素材・加工コストが高いという課題を解決する必要がある。このため、経済産業省では「次世代チタン合金構造部材創製・加工技術開発(平成20～

24年度)」を実施している。この研究プロジェクトでは、これまでチタン合金が抱えてきた課題である、成形・加工性が悪いために廃材率が90%程度と高く、さらに航空機構造部材に必要な大型部材の製造が難しいという点を解決し、チタン部材の製造コストを30%低減することを目的として掲げている。プロジェクトを受託した(財)素形材センター 次世代材料技術室では、大学、航空機メーカー、材料メーカーとともに、素材、成形加工技術、大型一体化技術、粉末素材技術の開発に取り組んでいる。

その中でもコスト削減に大きな寄与が期待されるのが、大型一体化の技術である。大型一体化技術は、素材加工技術、押出材の逐次成形法や低温／局所加熱成形技術等の低コストの機械加工技術、摩擦攪拌接合(FSW)等の接合技術の適切な組み合わせによってその実現を目指している。

もう1つの注目したいアプローチは、廃材率の低下によるコスト削減である。現在、複雑形状の部材の製作は、厚板や鍛造品を切削加工して製造している。そのため、部品重量の数倍の素材が必要であり、チタン製部品の製造コストを押し上げる要因になっている。これを解決するために、粉末から部品に近い形状の部材を焼結製造(ニアネットシェイプ化)することで、材料の効

Topics

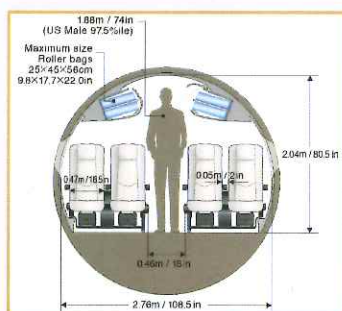
国産技術が世界の空へ—MRJ

YS-11以来、国産旅客機は製造されていなかったが、MRJ(三菱重工業(株)が開発)は、世界最高レベルの運行経済性と快適性を兼ね備えたリージョナルジェット機として、注目を集めている。これまで培ってきた技術力をベースに、空力設計技術、騒音解析技術などの適用と、最新鋭エンジンの採用により、大幅な燃費低減を実現している。すでに130機の受注が確定している(2011年9月現在)。MRJは2010年より製造が開始され、2011年4月には機体の組立がはじまっており、2012年の初飛行を目指している。MRJには、90席クラスと70席クラスの2種類の機体が用意されていて、1列4席の座席配置を採用した機内は、従来よりもスリムな座席を使用するなどして、空間に余裕を感じることができる設計になっている。

(資料提供:三菱航空機(株))



MRJの完成予想図。最新技術を駆使した国産リージョナルジェット機は、2012年の就航を目指している。



MRJの機内空間(断面図)。座席配置やシートのサイズ等を工夫することで、快適な客室空間を実現している。

率的な利用と機械加工コストの削減を同時に実現しようという試みがある。そのひとつが、この研究プロジェクトで取り組んでいる先端粉末造形技術であるレーザーフォーミング技術である。これは、立体モデルを造形する3Dプリンターのように、チタンの材料粉末をレーザーで溶融しながら完成品に近い素材を製造する技術である。このほかにもニアネットシェイプを実現する技術としては、樹脂製品の製造方法を応用した金属粉末射出成形技術があり、研究が進められている。

現在、研究プロジェクトは基礎研究を終了し、試作品製作のための準備段階まで進んでいる。この研究プロジェクトの成果による、チタン部材の製造コストの大幅削減実現が期待される。

成長が期待される航空機産業

航空機の大きさは、運航する路線に適したサイズが選択される。A380に代表されるような大型のジェット旅客機はハブ空港を結ぶ主要幹線を飛行する。ハブ空港と各地の拠点空港などの2地点間の直接運航にはB787などの中型機が用いられる。それ以外の地域の航空輸送サービスはコミューターサービスと呼ばれ、座席数が100席未満のリージョナル機が用いられている。

国産の旅客機では、第二次大戦後に初めて日本メーカーが開発し2006年に日本国内の民間定期路線より引退したYS-11がリージョナル機に相当する。我が国でも成長が期待できるリー

ジョナルジェット市場に参入すべく、新たな国産機の開発が進められており、実用化・就航が間近である。リージョナルジェット機の市場は、今後20年間で5000機以上の需要が見込まれている。

経済産業省では、現在の1兆円規模の売上高がある航空機産業を2030年には3倍にする目標を掲げている。その実現のためには、航空機産業の高付加価値化による、国際競争力の強化が不可欠である。研究開発、設計、製造、保守までの一貫したソリューションの提供を実現することが現在の課題であるといえよう。

このような動向の中で、先ごろ、素材メーカーと重工メーカーが共同で航空機部品等大型鍛造品の製造会社を設立した。同社では国内初の5万トンクラス的大型鍛造プレスを導入する計画(2012年3月工場完成予定)を発表している。チタン、ニッケル合金、高合金などの大型鍛造品の国内一貫製造体制を敷くことにより、高い品質を確保することに加え、工場スクラップの再生利用も可能となるため、コスト競争力の向上も図れるとしている。

低コスト化は、航空機業界全体に共通するキーワードである。官民学が一体となり、意欲のある中堅・中小企業など幅広い産業の裾野を活用した一貫生産体制を実現し、部品やモジュールの分担から脱却した総合航空機メーカーの育成が急務である。我が国が次世代航空機の世界的な拠点となるために、今後も材料分野・加工分野での活発な研究開発が必要である。

●取材協力 (独)物質・材料研究機構、(財)素形材センター
●文 杉山香里