

需要が拡大する 航空機用チタン大型鍛造品



航空機の需要が高まっている。航空機の受注は好調であり、年率4~5%の勢いで市場は拡大している。最近の航空機は機体に炭素繊維強化樹脂(CFRP)を多く使用し、これに伴いCFRPとの適合性に優れたチタンの適用が拡大している。このほど、日本初の5万トン鍛造プレスが導入されたことにより、これまでチタン大型鍛造品を国内で製造できないことがネックとなっていたが、国内で航空機用チタン大型鍛造品の量産が始まっている。



A350XWB向けに、日本初となるランディングギア用チタン大型鍛造品が採用された。(資料提供: (株) 神戸製鋼所)

✈ 空の旅はより身近へ。増大する航空機需要

世界の旅客数は増加の一途をたどっている。国連の世界観光機関UNWTOは、世界における2030年の国際観光客到着数(宿泊者)は18億人に達すると予測している(図1)。これまでは欧州、米国、アジア・太平洋に集中していたが、近年はアジアや中央・東ヨーロッパ、中東、アフリカおよびラテンアメリカ等でも急速に増えている。2030年には、57%が新興国地域を、43%が先進国地域を訪れると予想されている。

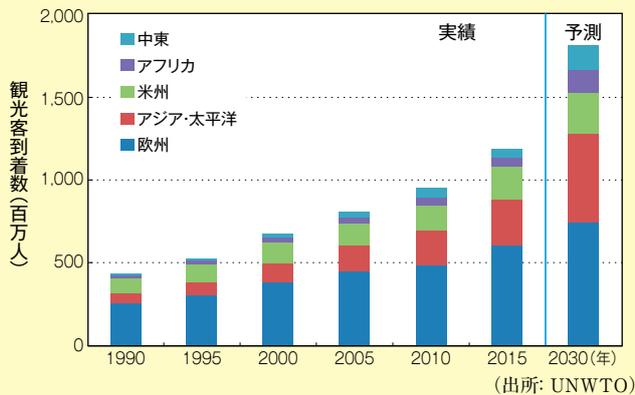
このような旅客数の増加を受けて、航空機の世界の運行機数は、2016年末から2036年末には1.8倍に大きく膨らむと考えられている。これに伴い、今後20年間で航空機の納入機数は約3万3000機以上となり、このうち約半数は現行機の代替需要であり、残りは新規需要となる(図2)。特にナローボディ(細胴機)でも席数120~169席クラスは運航数が多いため、需要が集中すると考えられている。これから大量に必要となる航空機を金額にすると5兆80億ドルにおよぶ。今後、航空機市場は年率4~5%の勢いで拡大していくと予想されている。

✈ 使用比率が増加するチタン合金

最近の航空機は環境規制から燃費を低減するため、アルミ合金に代わり、機体やエンジン部品へのCFRPの適用比率が高まっている。これに伴って採用が増えているのが、チタン合金である。飛行中の外気温は-60℃以下にもなるが、チタンは低温でも脆化しにくい特性を持ち、さらに気温変化で部品が結露しても腐食しにくく、またCFRPとの熱膨張率が近いことなどから採用が増えている。例えば、ボーイング社の最新の中型機B787の構造部材においてはチタン合金の比率は約15%と従来の2倍以上になり、1機あたりのチタン合金の使用量(推定)は100トン前後になる。

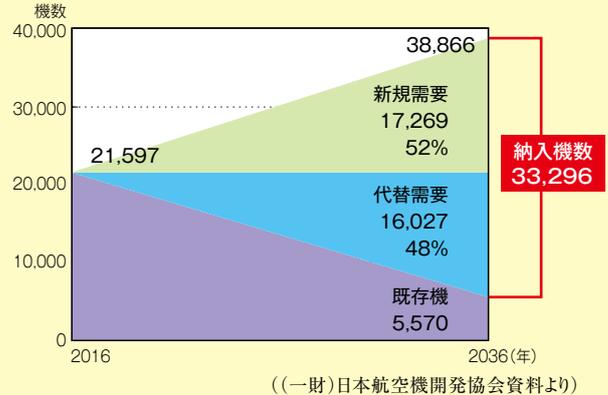
機体構造部品に用いられる一般的なチタン合金は(表1)Ti-6Al-4V(略称Ti-64)合金で、各種熱処理によって異なる特性を出すことができるため多用されている。Ti-64合金の加工性を高めるため、最近では高い熱間鍛造性(低い熱間変形抵抗)を持つチタン合金(図3)やさらに機械加工性を向上した合金の開発も進められている(NEDO委託事業「革新的新構造材料等研究開発」による)。

●国際観光客到着数(宿泊者)の推移(図1)



機体構造部品のなかでも、脚部の降着装置であるランディングギアは、自動車の100倍以上となる重量を支え、着陸時の衝撃に耐え、走行時にはおよそ300km/hというレーシングカー並みのスピードを支えなければならない。そのため使用される材料には、優れた機械的特性に加えて、疲労強度特性、鍛造成形性等が求められる。また応力腐食割れ性、切り欠き感受性、水素脆性、破壊靱性等も考慮される。これまではNiCrMo鋼が主流であったが、大型機を中心にチタン合金に代えられている。例えばボーイング社のワイドボディ双発機B777やエアバス社のA380では高強度チタン合金Ti-10V-2Fe-3Alが使用されている。この合金を使用することで軽量化とともに耐食性において大きな改善がなされ、脚部にチタン合金が多用されるきっかけとなった。最近ではB787がロシアで開発された新しいチタン合金Ti-5Al-5Mo-5V-3Crを採用している。いずれにしても高強度・高靱性なチタン合金が選ばれ、大型鍛造プレスで製造されている。このランディングギアに、このほどA350XWB向けに初めて日本製のチタン大型鍛造品が採用され、大きな話題を呼んでいる。

●ジェット旅客機の需要予測(図2)



待望の日本初5万トン鍛造プレスが稼働

B787などで高い製造分担比率を担い、国産航空機の開発も進めている日本ではあるが、その産業規模といえば世界の数%に過ぎず、国際競争力が十分にあるとはいえない。欧米に後れをとった理由の一つが、大型鍛造プレスがなく、主要大型部品を国内で製造できないということであった。これまで日本に存在した鍛造プレスは1.5万トン(油圧)が最大であり、ロシアやフランス、米国等には大きく劣る(表2)。そのため航空機用チタン大型鍛造品は大型鍛造プレスを保有するメーカーによって寡占化しているのが現状だ。

このような不利な状況を打開すべく、2013年4月、5万トン鍛造プレスが岡山県倉敷市に設置された(図4)。これは油圧鍛造プレスとしては世界最大級となる。最大で5,500mmまでのチタン機体部材を鍛造することができ、例えば約5mにおよぶ主翼付根結合部品の大型鍛造品もプレス可能である。さらには500トン~5万トンまで広い範囲で加圧力を制御することができた

熾烈な空の競争

航空機の需要増大を受けて、世界を代表する航空機メーカーであるボーイング社、エアバス社の航空機の受注状況は好調となっている。

長年にわたってほぼ互角のシェアを競ってきた両社であるが、日本においてはこれまでジャンボジェット機として有名なB747やB787などを多く使用するなど、ANAもJALも主力機はボーイング機が占めていた。ところがここ

●ボーイング社、エアバス社の2016年の業績

	純受注数	引き渡し機数	受注残数
ボーイング社	668	748	5,715
エアバス社	731	688	6,874

(ボーイング社、エアバス社資料より作成)

数年、変化が起きている。JALがエアバス社の中型ワイドボディ機A350XWBを大量発注したり、国内で便数を増やしている低コスト航空会社(LCC)の多くが小型のA320を使用するなど、エアバス機の存在が目立ってきている。最近発表されたエアバス社の2016年度の業績によると、受注機数ではエアバス社が上回っている。

最近の傾向として、エアバス社は世界最大級となるA380、ボーイング社はB747という最も大きいタイプの不振が目立っているが、一方で小型機は受注数を伸ばしている。

現在、両社とも受注残を5千機以上抱えており、受注から引き渡しまで通常6~7年かかるとされ、受注残の解消に向けて生産体制の強化に動いている。

り、高い精度で水平に圧力をかけることができたり、速度、温度等も緻密に制御できるのが特長である。これらの条件を最適化することで品質の高い鍛造品をつくることができるため、ランディングギアやエンジン部品等のハイスベックな部品で、日本製品の優位性を発揮することができると期待されている。

日本で5万トン鍛造プレスが順調に稼働したことで、いち早く動いたのはエアバス社であった。A350XWB向けに、日本初となるランディングギア用チタン大型鍛造品を発注したのである。エアバス社にとって、信頼性を重視するランディングギアに日本製品を新規採用することは、大きな挑戦であった。今回の採用は寡占状態である部品に日本企業を参入させ、競争を促そうという狙いがあるようだ。日本としてはランディングギアを実績として、他の部品への適用拡大に弾みをつけたいところである。

現在、航空機用チタン大型鍛造品は、例えばロシアで素材を溶解、鍛造、粗加工したものを北米に運び仕上加工し、日本で組立を行い、最後に北米で航空機として完成する、というような世界の工場を行き来しながら製造を行っており、膨大な輸送コストや製造時間がかかっている。これを日本国内で素材の溶解、鍛造、粗仕上加工を行い、さらに国内重工メーカで組立を担う

ことで、コストや時間等で競争力を持つようになる(図5)。この国内完結型サプライチェーンの構築に、5万トン鍛造プレスの導入は大きな足がかりとなったと言える。

近年では航空需要の増大を見越して、中国が8万トン級(油圧)を新設するなど、大型鍛造プレスがぞくぞくと導入されており、競争は激しくなっている。そのため、日本の航空機産業全体の競争力強化を目指して、国を挙げた取り組みが必要となっている。

鍛造プロセス技術で差別化を図る

日本初の5万トン鍛造プレスの稼働によって、国内での製造が困難とされてきた航空機用エンジンに使用されるチタン大型鍛造品についても採用が決まった。

航空機用エンジンに使用されるシャフトやディスク等の大型鍛

●機体に使われている代表的なチタン合金(表1)

合金	引張強さ(MPa)	適用部位例
Ti-6Al-4V	900~1170	一般構造材(鍛造品、鋳造品、板など) ファスナー、排気ダクト(鋳造) テールコーン(板)、エンジンパイロン
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	900	エンジンマウント、排気システム
Ti-10V-2Fe-3Al	1270	主脚(B777、A380)
Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-0.3Fe	1155	主脚(B787)上下リンク、プレーキヘッド
Ti-13V-11Cr-3Al	1220	軍用機SR-71の翼、外皮、バルクヘッド
Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn	1230	ダクト(厚さ0.5mm)
β21S*		ナセル
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	1240~1450	ばね

*Ti-3Al-2.7Nb-15Mo-0.2Si-0.3Fe
((公財)航空機国際共同開発促進基金解説概要26-5より)

●Ti-64合金の代替を目指す独自チタン合金の開発(図3)

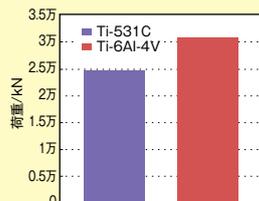
● Ti-531C鍛造品の外観
(Ti-4.5Al-2.5Cr-1.20Fe-0.10C)



Ti-64合金に比べて高い熱間鍛造性を発揮し、同等以上の室温機械特性を持つ

※経済産業省「次世代構造部材創製・加工技術開発」プロジェクトの1テーマである「次世代チタン合金構造部材創製・加工技術開発」の一環として、素材センター(RIMCOF)との契約に基づき実施した成果を含む。

● Ti-531C鍛造品の荷重



この形状の鍛造品を鍛造するのに、Ti-531CはTi-64に比較して約20%低い荷重で成形可能となる。

(資料提供: (株)神戸製鋼所)

●世界の大型鍛造プレス(表2)

	国)会社	力量(万トン)
水圧	露) VSMPO / Alcoa Samara	7.5
	仏) AD	6.5
	米) PCC - Wyman Gordon	4.5
	米) Alcoa	4.5
油圧	中) 中国第2重型機械(2013年)	8.0
	米) Weber Metals(2017年)	(5.5)
	仏) AD(2006年)	4.0
	中) 中航重机宏遠航空鍛造(2013年)	4.0
	国内従来最大) UACJ	1.5

*()は未完成のもの

●5万トン油圧鍛造プレス(図4)



【主仕様】
最大プレス荷重 50,000トン
プレス速度 可変
機械自重 6,600トン

© Japan Aeroforge, Ltd.

(資料提供: 日本エアロフォージ(株))

●国内完結型サプライチェーンの構築(図5)

現在のサプライチェーンの例(チタン大型鍛造品)



国内完結型サプライチェーンの構築



(資料提供: (株) 神戸製鋼所)

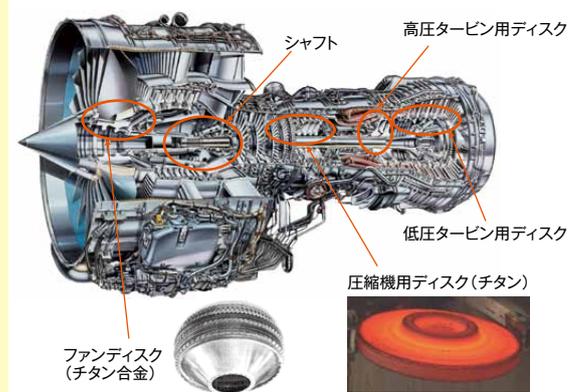
造品は(図6)、耐熱性、抗クリープ性、強度などが求められる。シャフトや低圧圧縮機ディスクにはTi-64合金が用いられ、中圧圧縮機ディスクにはTi-6Al-2Sn-4Zr-6Mo (Ti-6246) 合金などが使用されている(表3)。

チタン鍛造品は、鍛造中の温度と加工歪をいかに制御するかで、得られる組織や特性が異なってくる。例えば、チタン合金は、 α 、 β の2種類の組織からなるが、Ti-6246合金を β 変態点以下の温度($\alpha+\beta$ 域)で鍛造すると、等軸 α 粒を有する $\alpha+\beta$ の二相組織となり、この組織では破壊靱性値が低くなってしまふ。これを β 域の温度で鍛造すると、全面針状組織となり、高い破壊靱性値を得ることができる(図7)。この β プロセスは鍛造時の温度および加工歪にその特性が大きく左右されるため、 β プロセス鍛造加工条件の高度な制御が必要となる。

このように鍛造プロセスによって製品の特性が大きく変化するため、チタン合金は加工が難しい一方で、鍛造技術による差別化を図りやすい材料ともいえる。

内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム革新的構造材料(SIP)の「革新的プロセスを用いた航空機エンジン用耐熱材料創製技術開発」のなかで、航空機材として使用されるチタン合金やニッケル基合金に関して、「大型精密鍛造シミュレータを用いた革新的新鍛造プロセス開発と材料・プロセスデータベース構築」が進められている。航空分野の先進国となる欧米では空軍を中心とした長年の実績から、材料に関する豊富なデータベースを保有し、さらには航空機メカ、素材、製造メカが一体となって材料開発を続けている。これに対して、後発の日本は

●航空機用エンジンにおける大型プレス鍛造品(図6)



(資料提供:日本エアロフォージ(株))

●エンジンに使用される代表的なTi合金(表3)

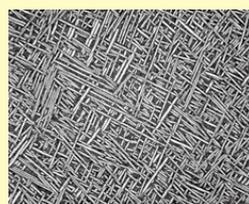
エンジン部位	合金	使用限界温度
ファン	Ti-6Al-4V	300°C
	Ti-8Al-1V-1Mo	400°C
	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	450°C
圧縮機	Ti-6Al-4V	
	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	450°C
	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2MoS	520°C
	IMI834*	590°C
	Ti-48Al-2Cr-2Nb**	650°C
スタブシャフト	Ti-6Al-4V	

*Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb-0.5Mo-0.35Si-0.06C

**GENxエンジン低圧タービン動翼

((公財)航空機国際共同開発促進基金解説概要26-5より)

● β プロセス鍛造ディスクのマイクロ組織(図7)



圧縮機用ディスクで使用されるTi-6246を β 域の温度で鍛造すると、全面針状組織となる。従来の $\alpha+\beta$ 域鍛造ディスクの室温での破壊靱性値は $30\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ に対し、 β プロセス鍛造材は $50\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 以上の値が得られる。(資料提供: (株) 神戸製鋼所)

材料に関するデータベースが圧倒的に不足するなかで、依頼案件に対して、より短時間で要求特性を満たす部材を提供しなければならない。そのため、まずは1500トン級の鍛造シミュレータを開発し、さまざまな条件の下、鍛造シミュレータで得られたデータを蓄積し、鍛造条件と組織構造、材料の特性を関連づける。そして予測計算ツールを活用しながら、最適な鍛造条件を割り出し、新材料実用化までの時間短縮を目指す。プロジェクトの要となる鍛造シミュレータは2015年12月に設置された。ここで得られた成果は5万トン鍛造プレスへ応用していく予定で、国を挙げた取り組みから今後、新たな加工技術、材質制御技術が誕生するものと、期待されている。

- 取材協力 (株) 神戸製鋼所、日本エアロフォージ(株)
- 文 藤井 美穂