

## 旅客機用チタンの需要動向、供給体制および課題

### 1. 概要

環境問題のみならず石油の高騰を受け旅客機の燃費低減が強く求められている。さらに LCC (Low Cost Carrier) の台頭により機体の価格競争も激しくなっていると考えられ、機体およびエンジン用素材にもその影響が及んでいる。旅客機向け素材のなかでも最も高いと言われるチタンからより安い他素材への転換の動きすらある<sup>1)</sup>。実際、旅客機メーカーではチタンの優れた特性についてはよく認識されているが、加工技術等の進歩によって 1 機当たりの Ti 合金展伸材購入量は減る傾向にある。しかし、機体・エンジンメーカーが購入する Ti 合金展伸材量は新規製造の機体数の増加によって今後とも増加するものと予測されている<sup>2)</sup>。

本稿では機体およびエンジン用のチタンの現況、その供給体制ならびにチタン産業が直面している価格の課題を中心に考えてみたい。

### 2. 旅客機機体・エンジン用チタンの現況

#### 2. 1 旅客機にはどんな素材が使われているか

昔の航空機はほとんどが Al 合金製であったが、現在はそれぞれの箇所の部品・装置が必要とする特性に適した素材が幅広く使われている。

2013 年に軍用機、ヘリコプターなども含めた航空機用にメーカーが購入した各種素材量は約 65 万トンでその内訳は

Al : 31.8 万トン、 鋼 : 14 万トン、 Ti : 6.5 万トン、 スーパー合金<sup>注)</sup> : 5.8 万トン  
複合材 : 2.6 万トン、その他 : 3.9 万トン

であり、重量でみると Al が約半分を占めている<sup>2)</sup>。

注) スーパー合金 (super alloy) : 650℃以上の高温で耐食性・高強度を有する、ニッケル基、コバルト基 及び 鉄基のうち鉄以外の合金成分が 50%程度以上含まれるもの (Incoloy など) を言う。鉄が 50%を越える鉄基は、耐熱鋼 (heat resisting steel) と区別して称される。

航空機では、主にエンジン高温部に用いられている。

#### (1) 機体

ボーイング社の代表的機種 787 型機の機体に使われている素材の割合を図 1<sup>3)</sup>に示す。

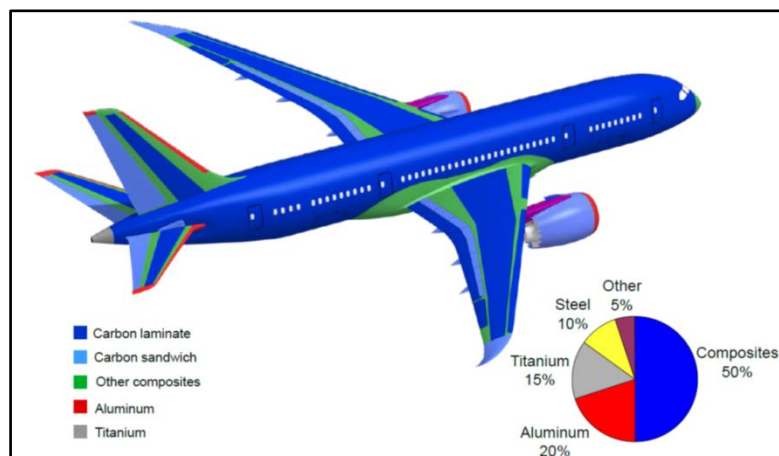


図 1 787 型機で使われる素材割合

エアバス社の未就航ではあるが代表的機種 A350 型機の使用素材構成もほぼ同じである<sup>4)</sup>。主素材は CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics : 炭素繊維強化プラスチック) などの複合材で機体重量の 50% 強を占めている。A380 型機、A350 型機、787 型機などの翼や胴体の外板などには Al-Li 合金が使用されており、複数部品の一体化なども進んでいる。また、A380 型機には Al 箔にガラス繊維布を組み合わせた複合材 GLARE (商品名) も使われている。

これらは旅客機燃費を抑えるための機体軽量化が主たる背景にあるが、787 型機のように胴体にも CFRP を用いることによって複数部品の一体化が進み、ファスナーなどの減少にもつながっている。CFRP などの複合材料の製造価格は必ずしも安くなくコストダウンが課題であるが、大型オートクレーブを使わない技術も開発されつつあるようである。

## (2) エンジン

現在使用されている素材を表 1 にまとめる<sup>5)</sup>。燃焼室では約 2,000℃にまで達するので耐熱性と高温での特性がとくに重視されるが、比重の重いスーパー合金が高温域では主素材であったのでそれらの軽量化もかねてからの問題であった。

表 1 エンジンに使用されている主な素材

エンジン部位	部品名	使用合金
ファン	ディスク	CFRP Ti 合金
	ケース	
	ブレード	
	ベーン	
	SGV <sup>注)</sup>	
圧縮機	ディスク	Ti 合金 Ni 合金
	ブレード	
	ベーン	
	ケース	
燃焼室	ライナー	Ni・Co 合金
タービン	ブレード	Ni・Co 合金 Ni 合金
	ベーン	TiAl 金属間化合物
	ディスク	
シャフト	シャフト	鋼、Ni 合金

注) SGV: Structural Guide Vane

最近、開発されるエンジンのファンは燃費改善のためにより長くしたブレードの CFRP 化が進んでいる。これはケースや SGV にも及んでいる。787 型機に使われている GEnx エンジンや LEAP エンジンなどでは CFRP 製ファンケースなどですでに実用化されている。図 2 に各種エンジン材料の比強度 (強度/密度) と耐用温度との関係を図示するが<sup>6)</sup>、FRP 複合材は約 200℃以下では比強度が飛びぬけて大きいことが明らかである。

注 1) MMC : Metal Matrix Composites = 金属基複合材料

注 2) CMC : Ceramic Matrix Composites = セラミック基複合材料

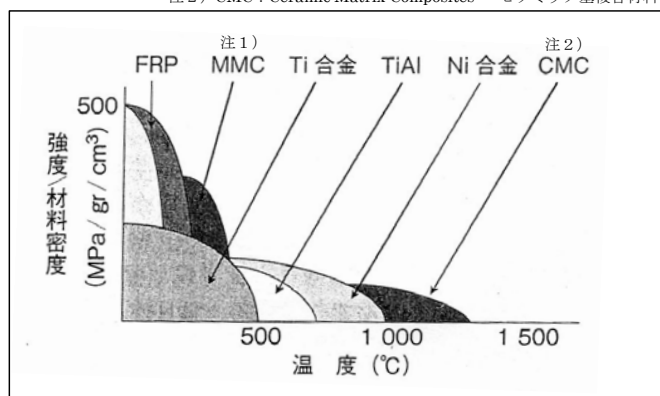


図 2 エンジン材料の耐用温度と比強度<sup>6)</sup>

## 2. 2 どんな Ti 合金が旅客機のどの部分に使われているか

### (1) 機体

機体に使われている代表的な Ti 合金を表 2 に示す。現用されている Ti 合金はこれら以外にもあり種類は多いが、Ti-6Al-4V 合金(以下 Ti-6-4 と略す)以外の合金はそれぞれの合金に適した部位のみに用いられ、Ti-6-4 がほとんどを占めている。この合金は各種の熱処理によって異なる材質を示すので多用されている。

表 2 機体に使われている代表的な Ti 合金

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、ブレーキヘッド
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)
β 21S*		ナセル
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	1240～1450	ばね

\* Ti-3Al-2.7Nb-15Mo-0.2Si-0.3Fe

Ti 合金製品のなかで最も大きい主脚には Ti-10V-2Fe-3Al-合金 (A380 型機および 777 型機が採用) かロシア VSMPO・AVISMA 社(以下 VSMPO 社という。)が開発した Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr 合金(787 型機が採用) が用いられているが、これを製造するのに超大型プレスが必要である。我が国にはこのような大型プレスはなかったが、2013 年に新倉敷に出来た日本エアロフォージ(株)に 5 万トンプレスが設置され、エアバス社から最新 A350XWB 型機の主脚の加工を受注した。

大手航空機メーカーでは Ti 合金製は高価なので、大きな負荷のかかる主脚、エンジンを支えるパイロン、垂直尾翼や APU 取付部等の尾翼を支える下部などに限定しようと考えている。

### (2) エンジン

エンジンに用いられている代表的 Ti 合金を表 3 に示す。エンジン用素材にもとめられる

表 3 エンジンに使われている代表的な Ti 合金

エンジン部位	合金	使用限界 温度(℃)
ファン	Ti-6Al-4V	300
	Ti-8Al-1V-1Mo	400
	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	450
圧縮機	Ti-6Al-4V	
	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	450
	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2MoS	520
	IMI834 *	590
タービン	Ti-48Al-2Cr-2Nb **	650
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

特性は耐熱性、抗クリープ性（一定の荷重下で時間とともに伸びる現象をクリープと言い、これに抗する性質）、比強度などであり、約 590℃ぐらいまでは主として表 2 にあるような Ti 合金が使われてきた。しかしファンは CFRP に代わりつつある。高温側では金属間化合物 TiAl が約 700℃ぐらいまで期待されているが、耐熱性、比強度にすぐれた CMC(セラミックス複合材)にとって代わられる可能性も考慮に入れておく必要がある。

## 2. 3 Ti 合金はどのくらい使われているか

世界全体では機体およびエンジンに使われているチタン展伸材は約 6.5 万トンである。国内チタンメーカーが国内機体・エンジンメーカーに提供しているチタン展伸材は 2013 年で約 701 トンでしかない。この内、合金がどのくらいかは不明であるが、製造が増加している A320 シリーズ機向け V2500 エンジンのファンケース半製品は Ti-6-4 で神戸製鋼でつくっている。

代表的な旅客機機体向けの購入チタン展伸材量と 2014 年 9 月末現在の確定受注機数<sup>8)</sup>から納入機数を差し引いた未納機数を掛け合わせたチタン展伸材予測量を表 4 に示すが、年平均 1,000 機つくるとすれば、これらの機種だけでおよそ年 3 万トンのチタン展伸材需要が見込めることになる。

表 4 1 機あたりチタン展伸材所要量と代表的旅客機の予測購入量

機種	必要量 <sup>7)</sup> (トン)	未納機数	購入予定量 (トン)	* 未就航 ** A321も含む
787	77	861	約66,000	
777	56	566	約32,000	
747	43	42	約2,000	
737	18	4033	約73,000	
A380	79	175	約14,000	
A350*	65	750	約49,000	
A330	17	234	約4,000	
A320**	12	4654	約56,000	

MRJ のような 100 席以下の小型の旅客機でも 1 機当たり約 10 トンのチタン展伸材を購入しているものと考えられる。機体・エンジンメーカーが入手した Ti 合金展伸材量と機械加工して旅客機で使用する部品量の比を buy-to-fly 比（歩留まり）と言い、現在は 6 : 1 以上と言われている<sup>9)</sup>。約 20 年前の 777 型機の機体向け歩留り約 25%、エンジン向け約 20%であった。この歩留りアップが課題であるが、この歩留まりがよくなればなるほど 1 機当たりの購入 Ti 合金量は減ることになる。

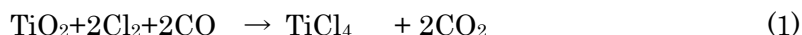
## 3. 旅客機用チタンの供給体制

### 3. 1 旅客機用 Ti 合金展伸材の製造加工工程

Ti 合金展伸材の製造加工工程は大凡下記の通りである。

① 鉱石（TiO<sub>2</sub> を約 50% 含有）を製錬し、TiO<sub>2</sub> を約 95% にする。

② 下記の化学反応による工程を経て金属 Ti(スポンジ Ti)を得る。(クロール法)



反応(1)および(2)は約 1000℃の真空容器中で行われる。さらに(2)の反応で生成した  $\text{MgCl}_2$  を(3)で電解生成した  $\text{Cl}_2$ 、 $\text{Mg}$  はそれぞれ(1)および(2)の反応の原料になるが、この電解に Ti 1 トン当たり約 1.7 万 KWh の電力が必要となる。電力コストが問題である。

- ③ この反応 (2) で生成したスポンジ Ti (以下スポンジと略称) と合金元素を混ぜて真空アーク溶解炉で均質化のために 2 回溶解して円柱状鋳塊 (ビレット) を得る。
- ④ 約 900℃で鍛造して厚板状ビレットをつくる。
- ⑤ ビレットを熱間型打ち鍛造または圧延して所期の形状を有する半製品を得る。

この熱間加工は図 3 にみられるように Ti-6-4 の場合で 800～1,000℃の狭い温度範囲で行わねばならない。800℃を切ると割れの恐れが、1,000℃を上回ると  $\beta$  相になって材質に影響が出る。Ti 合金は熱容量が小さく冷め易いし、変形抵抗の温度依存性も大きいという弱点がある。現状では安全をみた厚さの段階で鍛造圧延を止めて熱処理後出荷している。

- ⑥ この半製品を機械加工して旅客機に使用する部品に仕上げる。

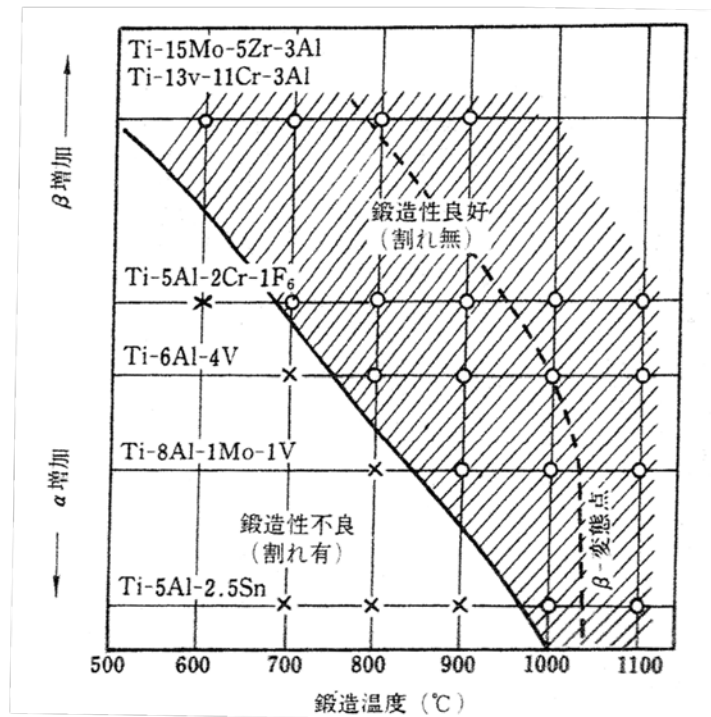


図 3 チタン合金の鍛造変形能

### 3. 2 スポンジおよび展伸材メーカー

#### (1) スポンジ

スポンジは世界でわずか 6 か国しか生産していない。2013 年には世界全体で約 23 万トン(航空機用以外の用途も含む)生産されると予測している<sup>10)</sup>。6 か国の生産比率を示す。中国 39%、日本 22%、ロシア 17%、カザフスタン 9%、アメリカ 9%、ウクライナ 4%

2014 年のウクライナ紛争でウクライナでの生産がどうなっているか不明である。最大の需要国 アメリカでは Titanium Metals Corporation, Allegheny Technologies および Honeywell Electronic Materials の 3 社が年 3.4 万トン生産しているが、なお約 3 万トン

不足している。この不足分の約半分は大阪チタニウムおよび東邦チタニウムの 2 社から輸入しており、航空機用としてロシアおよびカザフスタンからも輸入している。中国からのスポンジは一般工業用である<sup>10)</sup>。

## (2) 展伸材

世界の機体・エンジンメーカーが購入するチタン展伸材量は 2013 年では約 6.5 万トンでその内訳は

機体用 4.3 万トン、 エンジン用 1.8 万トン、 修理その他 0.4 万トンであるが、この数字には旅客機以外に軍用機、ヘリコプター用なども含まれている。エンジンなども含む旅客機用は 4.6 万トンとのことである<sup>2)</sup>。

2013～23 年の 10 年間の航空機用 Ti の需要増加率は年 4.6%との予測がある<sup>2)</sup>。1 機当たりのチタン使用量は減少傾向にあるので、新規製造航空機数の増加によるものと考えられる。

これら航空機用 Ti 合金展伸材メーカーは下記の通りである。( ) 内の数字は 2012 年のシェアである<sup>2)</sup>。

ロシア VSMPO 社 (30%)、アメリカ ATI 社 (25%)、アメリカ TIMET 社 (20%)、  
アメリカ RTI 社 (10%)、その他 (15%)

エアバス、ボーイング両社、とくにエアバス社は VSMPO 社の Ti 合金展伸材にかなり依存している。

①エアバス社は VSMPO 社と 2013 年にエアバス機に使うチタンの開発・生産等について提携した。2020 年までの航空機用チタンを提供する契約も結んでいる<sup>11)</sup>。

②ボーイング社は 2014 年 7 月に VSMPO 社と 777X 型機向け半製品提供の契約を 3 年間延長し 2022 年末までの契約を結んでいる<sup>12)</sup>。

2014 年のウクライナ紛争は VSMPO 社との取引にはあまり影響は出ていないようであるが、機体・エンジンメーカーでは Ti 合金展伸材の入手先についてなんらかの動きがあるのではないだろうか。

いずれにしても上記のように航空機用 Ti 合金展伸材メーカーは少なく、機体・エンジンメーカーが安定して Ti 合金展伸材を入手するには課題が残されている。

## 4. チタンはなぜ高い

航空機に使われる素材のなかで最も高いと言われるチタンについてその根拠についてまとめてみると次の 2 点に絞られる。

### ① 鉱石からの製錬コストが高い

Ti は酸素との親和力がきわめて強いのでこれを断ち切るのに真空ないしは不活性ガス状態が必要でありかつ現行のクロール法では約 1000℃の高温が必須条件である。

### ② 加工性が悪い

工業用純チタンでも加工性はいいとはいえないが、Ti 合金になるとさらに悪くなる。Ti 合金には組織によって 3 種類の合金がある。すなわち  $\alpha$ 、 $\alpha-\beta$ 、および  $\beta$  合金である。航空機用に多用されている Ti-6-4 合金は  $\alpha-\beta$  合金で冷間加工性はもとより、熱間加工性、機械加工性も問題が多い。

この熱間加工は図 3 にみられるように Ti-6-4 の場合で 800～1,000℃の狭い温度範囲で

行わねばならない。800℃を切ると割れの恐れが、1,000℃を上回るとβ相になって材質に影響が出る。(β相で処理する場合もある。) Ti 合金は熱容量が小さく冷めやすいし、変形抵抗の温度依存性が大きいという欠点もある。現状では安全をみた厚さの段階で鍛造圧延を止めて熱処理後出荷しているのは前述のとおりである。機体メーカーが所定の寸法まで切削等により加工するのであるが、チタンは焼き付きやすいので切削工具の選択、ゆっくりした切削速度、熱伝達が悪いので冷却が必要であり、工数も多くなる。

機体メーカーができるだけチタンを避けようとする根拠はこのようなところにある。これらの課題はチタンを使い始めてから今まで続いてきており、残念ながらまだ解決されていない。チタン産業としては歩留りのよいニアネットシェイプ（最終製品に近い形）の半製品を提供できる新製法を開発する必要があると思う。たとえば粉末冶金プラス HIP 処理、精密鍛造、精密鍛造、恒温鍛造、超塑性成形プラス拡散接合などを再検討してみるとともに 3D プリンターのような技術の発展を期待したい。

#### 参考文献

- 1) J. Boyrne ; ITA's 29<sup>th</sup> Annual Conference & Exhibition, October 6-9, 2013, Las Vegas, Nevada, USA
- 2) K. Michaels; ITA's 29<sup>th</sup> Annual Conference & Exhibition, October 6-9, 2013, Las Vegas, Nevada, USA
- 3) BOEING EDGE “787 Aircraft Rescue & Firefighting Composite Structure”, April, 2013, [http://www.boeing.com/assets/pdf/commercial/airports/faqs/787\\_composite\\_arff\\_data.pdf](http://www.boeing.com/assets/pdf/commercial/airports/faqs/787_composite_arff_data.pdf)
- 4) A. Lilly; ITA's 29<sup>th</sup> Annual Conference & Exhibition, October 6-9, 2013, Las Vegas, Nevada, USA
- 5) H. Dalton ; ITA's 29<sup>th</sup> Annual Conference & Exhibition, October 6-9, 2013, Las Vegas, Nevada, USA
- 6) 今成邦之; 日本機械学会誌、Vol.114, No.1116 (2011 年 11 月) p.826
- 7) D. S. Hickton ; ITA's 29<sup>th</sup> Annual Conference & Exhibition, October 6-9, 2013, Las Vegas, Nevada, USA
- 8) 日本航空機開発協会ホームページ 航空機受注データ
- 9) EXECUTIVE SUMMARY REPORT by ITA “TITANIUM”, Sept.21-24, 2014, Chicago, USA
- 10) P. Dewhurst ; ITA's 29<sup>th</sup> Annual Conference & Exhibition, October 6-9, 2013, Las Vegas, Nevada, USA
- 11) FLY TEAM ニュース (VSMPO-AVISMA 社ホームページ)、2013 年 9 月 4 日
- 12) (独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構ホームページ ニュース、2014 年 10 月 30 日