

# 航空機の発達と その構造材料の変遷 (第4回)



C-ASTEC 中澤隆吉/中菱エンジニアリング 伊原木幹成

## 4.2 チタンの工業化

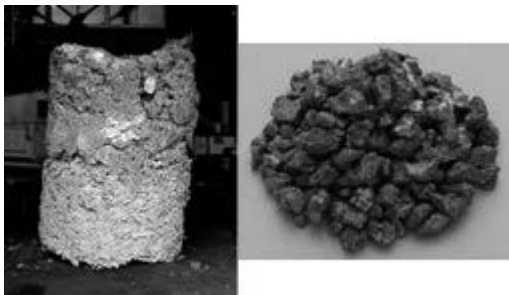
チタンは地球上では正確には二酸化チタン( $\text{TiO}_2$ )、一般的には単に酸化チタン呼ぶ酸化物の形で存在し、その鉱石はルチルと呼ばれています。しかし、ルチルの埋蔵量は少なく、現在はイルメナイトと呼ばれる鉱石が主に使用されています。イルメナイトは酸化チタンと酸化鉄の混合した鉱石で、酸化チタンの含有量が低く、チタンを濃縮する必要があります。そのために、酸により鉄を溶出除去して作った合成ルチルか、あるいは石炭と一緒に電気炉内で加熱して、銑鉄とチタンスラグに分離して得られるチタンスラグのどちらかがチタンの原料となります。

チタンもアルミニウムと同様に酸素との結合力が強く、金属チタンを得ることが難しい元素で、工業化されたのは 20 世紀の半ば頃でした。チタンの精錬法としてはベルギー人のウィリアム・J・クロールが開発したクロール法が使用されています。これはチタン原料を加熱して、塩素ガスで処理して四塩化チタンを得たあと、さらに高温で液化マグネシウムと反応させて金属チタンを得る方法です。この時、四塩化チタンから塩素が抜けて多孔質のチタンの塊が残ります。無数の穴があいたように見えるので、スポンジチタンと呼ばれます。このスポンジチタンを粉砕した後プレスで圧縮して棒状にし、真空中で消耗電極式アーク溶解によりチタン地金を得ます。図 11 にスポンジチタンと粉砕後のチタンの外観を示します。アルミニウムも電気分解で製造しますが、チタンの精錬でも、電力は必須で、更に真空技術も重要です。これは 20 世紀になって工業的に利用できるようになった技術であり、アルミニウムやチタンが 20 世紀になってやっと

工業化されたのはこのような産業基盤の整備が必要であったためです。

1937 年に発明されたクロール法の最も特徴的なのは四塩化チタンをマグネシウムで還元することです。クロールは、1938 年にはこの方法で作成したチタンの試料を持って米国企業にチタンの売り込みに出かけていますが、当時はまだチタンの工業的な需要が無く、成果は得られていません。1940 年にクロールはヨーロッパの戦火を逃れてベルギーから米国に移住しました。1945 年になって米国鉱山局がチタンの製造に乗り出し、特許を持っているクロールを招聘したことからチタンの生産に関与することになります。第二次世界大戦終了後の冷戦構造の中で兵器の性能が重視されるようになると、軽量高強度のチタンが有力な構造材料として認められました。1948 年頃から米国でチタンの工業的な製造が広がり、生産量が急拡大します。

このようにチタンの工業化は第二次世界大戦終結後で、それまでの飛行機にはチタンは使用されていません。レシプロエンジン時代の飛行機は構造材料としてチタンを必要としなかったとも言えます。しかし、ジェット機時代になると、エンジン周りの温度も上昇し、 $200^\circ\text{C}$ までしか使用できないアルミニウム合金では耐熱性が不足し、もっと耐熱性の良い材料が必要になりました。チタンが無ければステンレス鋼になりますが、耐熱性が十分過ぎ、さらに比重が大きくて重量増加が著しく、歓迎されません。チタンは飛行機の設計では通常  $450^\circ\text{C}$  迄使用可能とされており、そのうえステンレス鋼よりも大幅に比重が小さいので、飛行機の構造の軽量化に寄与します。それで主に軍用機のエンジン周辺にチタン合金が多量に使用されています。強度もアルミニウム合金の 2 倍以上を示すため、アルミニウム合金では静強度/疲労強度が心配される重要な部位には、強度は十分ながら比重の大きな低合金鋼に代わって軽量のチタン合金が使用されています。高力アルミニウム合金がレシプロエンジンを搭載した飛行機の発達と歩調を合わせてその構造材料として発達したように、チタン合金もガスタービンエンジンを搭載したジェット機の発達とともに工業化され発展した金属材料といえます。



スポンジチタン

破砕後のチタン

図 11 金属チタン<sup>10)</sup>

チタンは機体構造用材料としても使用されますが、ガスタービンエンジン用材料としても使用されています。1900年初頭の頃、チタンは電球のフィラメントに使用するために精錬方法が電気会社で研究されていました。それまでは純度の高い金属チタンが得られず、チタンの特性が明らかにされていなかったため、非常に高い融点をもっており、耐熱材用として使用できると誤解されていたからです。1910年にニュージーランド人のマシュー・アルバート・ハンターが米国で高温高压容器中で四塩化チタンをナトリウムにより還元して99.9%の純チタンを得て、ハンター法と呼ばれるチタン精錬技術を確立しましたが、ナトリウムの反応が爆発的で工業的な大量生産には向いていませんでした。しかし、ここで得られたチタンの物性測定により、チタンの融点がほぼ鉄と同様であることが判明し、電球フィラメントへの応用は諦められました。チタンの融点は1668℃です。

ガスタービンエンジンは、前段の圧縮器で空気(酸素)を圧縮して高濃度にし、後段の燃焼器でジェット燃料と混合して燃焼させ、タービンを高速回転させます。チタンの熔融温度が鉄並みに低いため、燃焼器のタービンにチタンを使用することはできません。一方、圧縮機は、温度が低いので当初はアルミニウム合金が使用されていましたが、エンジンの出力、効率を高めるために圧縮率が高くなるに従って圧縮機の温度が上昇し、アルミニウム合金では耐えられなくなりました。そこで、現在のジェット機用ガスタービンエンジンの圧縮機はチタン合金製のブレードが使用されてジェット機用ガスタービンエンジンの高性能化に大きく寄与しています。

チタン合金は先に述べた様に工業化が始まって未だ一世紀も経っていない若い金属材料で、アルミニウム合金のように化学成分を登録して固有の番号を割り振る仕組みが確立していないため、現在の処、則物的に主要添加元素とその公称含有量を示す数字を組み合わせて固有の公称合金名称として使用しています。例えば、飛行機の構造材料用チタン合金として現在最も多用されているのはTi-6Al-4V合金です。これは、チタンに6%のAlと4%のVを添加した合金です。その他に化学成分の規格上は微量添加元素や不純物元素が規定されていますが、合金名を示す場合は省略されます。このTi-6Al-4V合金は更にTi-6-4合金と数字のみで表されることもあります。チタン合金の種類は、参考書<sup>11)</sup>や日本チタン協会のホームページ<sup>12)</sup>をご覧ください。

#### 4.3 アルミニウム合金の落目

第2次世界大戦では機体用構造材料はアルミニウム合金が主体でしたが、ジェット機の時代が到来して以降、

軍用機ではチタン合金の使用割合が増加しており、民間旅客機においてもチタン合金の割合は増加傾向にありました。

ボーイング社の旅客機を例として民間旅客機の構造材料の変化を見たのが図12です。B747及びB777は20世紀に設計された機体で、B787は21世紀になって設計された機体です。B747はアルミニウム合金が81%を占めており、アルミニウム合金の箱であるといっても過言ではありません。B747が設計された時、チタン合金はそれ程工業化されていなかったため、チタン合金の使用比率は4%と低くなっています。20世紀の最後に設計されたB777でもアルミニウム合金は70%を占め、最も使用されている材料です。しかし、二番目に多く使用されている材料は、同じ比率の鉄鋼材料と複合材料です。B747では複合材料は金属材料に比べて非常に少なく、アルミニウム合金、鉄鋼材料、チタン合金に次いで4番目の使用比率でしたが、B777では複合材料の使用比率が大幅に高くなり、2番目の使用量になっています。これはアルミニウム合金が複合材料に置換えられていると見られます。チタン合金の使用比率は7%とB747からは大幅に増加しています。これはチタン合金の開発が進み、価格も下がったので、安価だが重量的に不利な鉄鋼材料を価格が許す範囲内で軽量なチタン合金に置換えて重量を削減したことによると考えられます。

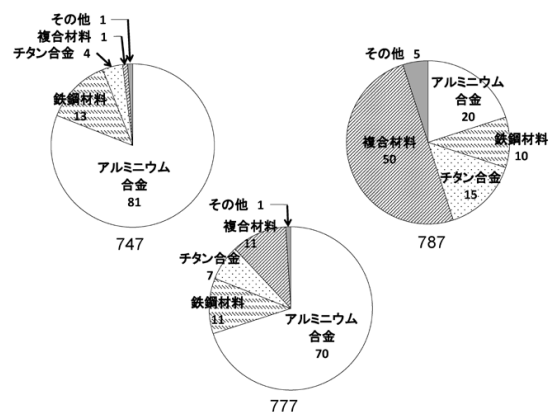


図12 ボーイング民間旅客機の構造材料比率<sup>13)</sup>

#### 参考文献

- 10) 東邦チタニウム株式会社ホームページ:  
[www.toho-titanium.co.jp/](http://www.toho-titanium.co.jp/)
- 11) 例えば:金属チタンとその応用, 日刊工業新聞社, (1983).
- 12) 一般社団法人日本チタン協会ホームページ:  
[www.titan-japan.com](http://www.titan-japan.com)
- 13) 中澤隆吉, 伊原木幹成:航空機におけるアルミニウム合金の利用の概況と今後, JFA, 45, (2014)17.

注:本連載は6回に分けて掲載されております。項目、回数および参考文献は第1回から連続しています。