

チタンアルミ翼が実現する 航空エンジンの軽量化

ネットシェイプ鑄造技術の開発現状

航空エンジン、そして航空機の大幅な軽量化につながる新しい材料、チタンアルミ。数百枚もあるタービン翼を正確に、そして安く大量に作るための生産技術が、鑄造という古来の手法の最先端「ネットシェイプ精密鑄造」であり、ここにさらに革新的な溶解技術を適用することでチタンアルミ翼の量産が可能となる。

株式会社 IHI

航空宇宙事業本部

技術開発センター 材料技術部

竹川 光弘

倉茂 将史



チタンアルミタービン翼

より軽く、より強く、より高温で

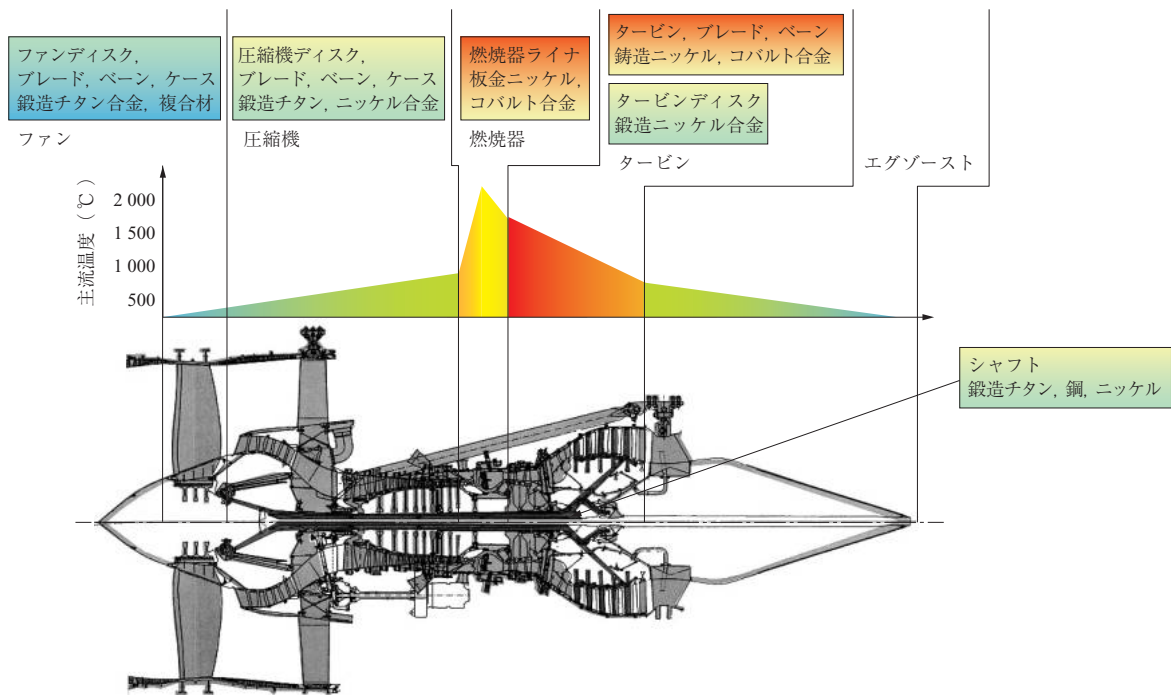
地球環境への負担を軽減するために、さまざまな分野で環境基準が年々強化される傾向にある。航空機に対しても燃費効率の向上や騒音の低減など、優れた環境性能が求められている。特に燃料価格が高騰している近年は、これまで以上に燃費効率向上のニーズが高まっており、この傾向は今後も続くものと予想される。

航空機の燃費効率の向上で大きな役割をもつのが、航空エンジンである。① 空を飛ぶ機体は軽ければ軽いほど燃費がいいのは当然で、メーカーはグラム単位の軽量化に知恵を絞っている。エンジンの軽量化はそれ自体のメリットにとどまらず、エンジンを支える構造の軽量化にもつながり、トータルの機体重量の軽減に

非常に大きな効果をもつ。② 燃料を消費しているエンジンの効率向上は燃費向上そのものである。このとき、熱力学の理論から燃焼温度が高ければ高いほどよい。

ジェットエンジンの基本構成は、ファン、圧縮機、燃焼器、タービンであり、最も高温となる燃焼器内では2000℃に近い高温に耐えなければならない。エンジンの高温化に伴い、燃焼器に続くタービンの材料は、鉄を主成分とした耐熱鋼から、ニッケルやコバルトを主成分とした耐熱合金が使用されるようになっていく。また、新しい素材としてセラミックス基複合材料(CMC)などの実用化も進められている。

現在 IHI では、タービンの低圧部に使用するニッケル合金の代替材料として、より優れた特性をもつチタンアルミの実用化を目指した研究を進めている。



ジェットエンジンの模式図

複雑形状を実現する精密鋳造

ニッケル合金などの耐熱合金は、高温域の比強度（強度／密度）に優れているという特長をもつが、その一方で加工が難しい難加工材料である。1台のエンジンには数百枚のタービン翼が必要であり、複雑な形状のタービン翼を高寸法精度で量産しなければならないが、そこで用いられている成形法が「精密鋳造」である。

鋳造は最も古い金属成形技術の一つで、溶融した金属を型に入れて凝固させ、必要な形状を得る技術である。精密鋳造も古代から利用されている技術で、仏像、美術品、装飾品などの製造に用いられてきた。現在ではアクセサリーのほかゴルフヘッド、歯科治療などでも利用されている。

精密鋳造には幾つかの種類があるが、ここではター

ビン翼の製造に用いられている「ロストワックス法」について、その概略工程を説明する。

製品の「原本」となる型であるが、一般的な鋳造では製品と同じ形状の木型を繰り返し使用するのに対し、ロストワックス法では木型の代わりにロウ（ワックス）で作ったロウ型を用いる。まず金型を使用してロウ型をタービン翼の数だけ作製する。できあがったロウ型を、溶融金属を流し込む部品を中心に複数個まとめる。複数のロウ型を一度に処理することで生産性を向上させている。

組み立てられたロウ型に、スラリー（セラミックス粉をバインダに溶かした液状物）とスタッコ（砂）を交互に積層することで、外側に鋳型が造形される。次にオートクレーブで内部にあるロウ型を溶かして排出する（脱ロウ）。この鋳造方法を「ロストワックス」と呼ぶのはこのためである。その後鋳型は十分な強度を得るために焼成される。

ロウがなくなった空洞に、溶融した金属を流し込み、凝固した後に一つ一つの部品を切り離し、仕上げ加工、各種検査を行い、完成となる。

このような精密鋳造はタービン翼のほかには、自動車のターボチャージャー用のインペラやゴルフヘッド、装飾品などの民生品の製造に用いられている。

項目	ニッケル合金 (代表)	チタンアルミ 合金
比重 (g/cm ³)	約 8.2	約 4.2
高温域での比強度 (強度／密度)	高い	特に高い
鋳造による製造性	良い	悪い
製品製造コスト	(比較的)安価	高価

ニッケル合金とチタンアルミ合金の比較

チタンアルミを使いこなすための課題

開発中のチタンアルミ翼は、タービン低圧部の動翼への適用を目指している。タービン動翼の軽量化は翼を取り付けるディスクの軽量化にもつながり、軽量化の効果が大きいことが理由である。表に、従来のニッケル合金とチタンアルミ合金の材料特性を比較した。チタンアルミの比重はニッケル合金の約半分であり、高温域での比強度も十分であるが、铸造性が悪いため量産が難しく、製造コストも高いというデメリットを併せもっている。しかし、ニッケル合金と同様の精密铸造による量産が実現すればチタンアルミ翼が容易かつ低コストで製造することが可能になる。

そのためには、効率的なチタンアルミ翼の製造プロセスの確立が不可欠である。IHI では、従来のニッケル合金と同様の精密铸造プロセスを用いたチタンアルミ铸造プロセスの開発に取り組んでいる。

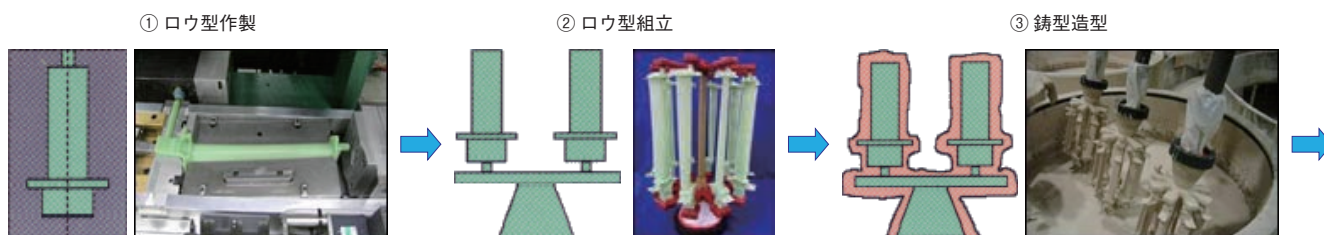
チタンアルミで精密铸造を行うには幾つもの課題がある。その一つ目がチタンアルミの反応性の高さである。铸造では熔融した金属を铸型に流し込むが、従来の手法では熔融するためのるつぼや铸型とチタンアルミが反応し、新たに生成した物質は不純物となって混入してしまう。また铸型と反応した部分は所定の成分とは異なるため、铸造後に機械加工（切削）または化学的な除去など何らかの方法で除去しなければならない。後でも触れるが、铸造後の機械加工工程をいかにして削減するかは、チタンアルミ铸造プロセスの実用化で避けて通ることのできない課題である。

融点が 1 500℃ 以上と高温であることもチタンアル

ミの精密铸造を難しくしている。金属素材の溶解は酸素との反応を避けるために真空中で行われる。このため溶解に時間を要すると、アルミが蒸発して成分が変化する恐れがある。タービン翼の組成は定められた規格を厳重に守る必要があり、溶解時の成分変動は避けなければならない。そのため、高い融点まで迅速に加熱し、溶解を実現できる大出力の加熱システムが必要になる。

熔融したチタンアルミは「湯流れ性」が悪く、この点もチタンアルミの精密铸造を困難にしている。熔融した金属を「湯」と呼び、湯流れ性とは、铸型の隅々にまで湯が行き渡る性質を指す铸造の用語である。タービン翼には肉厚が数 mm の薄い部分もあり、湯流れ性が悪いと製品形状ができなくなる。このため、IHI が従来開発に取り組んでいたチタンアルミ翼は、最終形状よりも一回り大きい、マシンストック（加工代）を多く設けた「ファットキャスト品」（太った铸造品）を铸造し、不要部分を機械加工で切削して最終形状としていた。今回の铸造プロセス開発では、铸造のみで最終形状に近い「ネットシェイプ品」（ほぼ完成形の铸造品）を铸造することが目的である。

従来、湯流れ性の悪い材料の铸造では、遠心力を利用した遠心铸造や、湯を吸引して铸込む吸引铸造などの技術が用いられてきた。しかし、今回の铸造プロセスでは、極力、現状のニッケル合金铸造プロセスを利用するプロセスであることを目指した。新たな設備投資を最小限にとどめ、製造コストを抑える工夫もプロセス開発では大きな課題である。





B787（ボーイング社ホームページより）と GEnx エンジン

英知を結集して 2020 年の空を目指す

前述のとおり、チタンアルミを精密鑄造してネットシェイプを実現するためには、さまざまな課題がある。IHI グループではこれまでに、ニッケル合金のタービン翼をネットシェイプ鑄造技術によって量産してきた実績がある。また、チタン合金部品の鑄造技術に関する豊富な知見も多数蓄積されている。しかし、精密鑄造プロセスの開発には、冶金や材料科学だけではなく、電気や化学、解析など多彩な分野の知識とノウハウが必要になる。今回のプロセス開発では、IHI グループの各分野の技術力を結集することで、主な課題に解決のめどをつけることができた。

チタンアルミの溶解については、チタン合金や高融点合金の溶解に用いられる「誘導溶解」を、電磁場応用技術、解析技術を駆使して改良した。また、迅速な加熱は溶解炉の制御技術によって実現している。

チタンアルミの湯流れ性については、高温での熔融金属の性質はよく分かっておらず、物性値の測定も難しいのが実情である。今回の開発では IHI のニッケル鑄造翼、チタン合金部品の鑄造に関する豊富な知見と経験、ノウハウの活用に加えて、鑄造解析技術を最

大限に活用した。

個々の課題については解決の見込みが付き、現在、製造プロセスとしての実用化を目指した開発の最終段階を進めているところである。

一般に航空エンジンの開発には 6～7 年の期間が必要と言われている。今回開発した精密鑄造プロセスによって製造されたチタンアルミ翼は、早ければ、これから開発が進む次の世代のジェットエンジンへの採用が期待される。

2020 年にオリンピックが開催される日本の空を、ネットシェイプ鑄造技術で製造したチタンアルミ翼を搭載したジェット機が飛ぶことを夢見て、実用化を目指したプロセス開発を続けていく。

問い合わせ先

株式会社 IHI

航空宇宙事業本部 技術開発センター

電話（042）568-7859

URL：www.ihico.jp/

