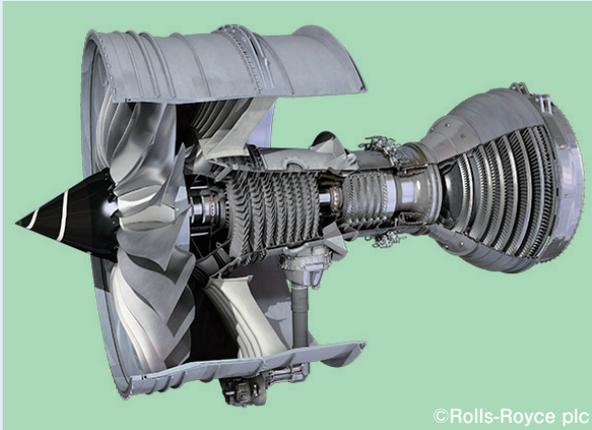


大型ターボファンエンジン「Trentシリーズ」の開発

Development of Trent Series Large Turbo Fan Engines



高木 郁 男① Ikuo Takagi
 安東 孝 浩② Takahiro Ando
 鈴木 晋③ Susumu Suzuki

航空機の需要が増加しているなか低燃費化も求められており、機体とともにエンジンの高性能化が必要となっている。

当社は、2004年に参画を開始したロールス・ロイス社（RR社）の大型ターボファンエンジン「Trent 1000」以降、すべての「Trentシリーズ」の開発において、RR社の戦略的パートナーとして中圧圧縮機（IPC：Intermediate Pressure Compressor）の設計・部品製造・モジュール組立を担当している。設計・製造における独自技術の開発を通して、今後はIPCモジュール・インテグレータとしてIPCモジュールを一手に担うべく活動を推進していく。

As the demand for aircraft has been increasing, fuel efficiency needs to be improved. Therefore, the performance of the engine as well as the fuselage must be enhanced.

We are in charge of design, part manufacturing and module assembly of the intermediate pressure compressor (IPC) at development of all the Trent Series large turbo fan engines from Rolls-Royce after the Trent 1000, the first model of which helped develop in 2004, as their strategic partner. Going forward, we will promote activities to take charge of the overall IPC module as an IPC module integrator by developing proprietary design and manufacturing technologies.

まえがき

航空機は、グローバル社会において必要不可欠な輸送手段であり、航空機メーカーは競って新型航空機を開発を行っている。これら新型航空機に搭載されるエンジンは、高い信頼性を持ち軽量で低燃費であるとともに環境に優しい（低NOx、低騒音）ことが要求されている。

1 背景

航空機の需要は、LCC（ローコストキャリア）などの力強い伸びに牽引され、長期的にも年間約5%程度の成長が見込まれている。この市場のニーズに応えるべく、アメリカのボーイング社やヨーロッパのエアバス社が新型の航空機開発を各種進めている。これらの新型航空機に対して、世界の主要航空エンジンメーカーのひとつであるイギリスのロールス・ロイス社（RR社）は「Trentシリーズ」の開発・供給を実施しており、当社はRRSP（リスク収益分担パートナー）として「Trentシリーズ」の製造などに参画している。

2 開発概要

「Trentシリーズ」とはRR社の民間航空機（広胴機）用

エンジンの総称であり、図1に示すように「Trent 700」以降のすべてのRR社製エンジンは「Trentシリーズ」となっている。

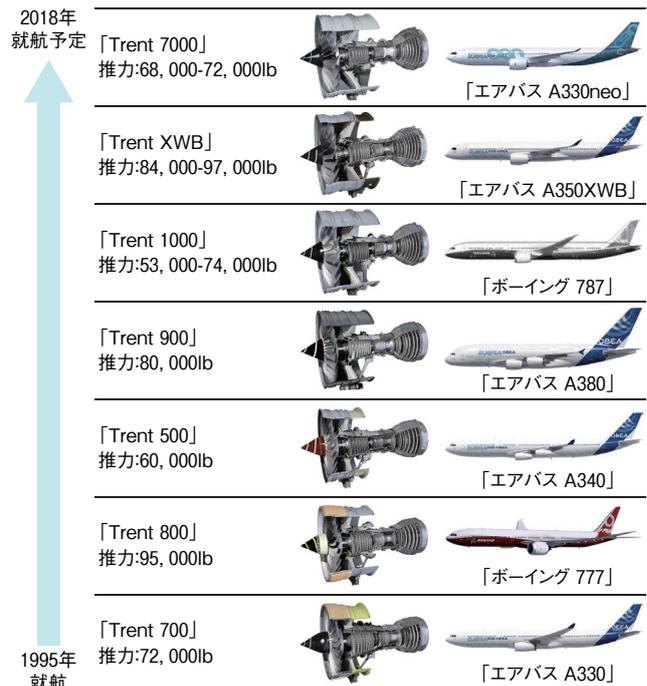


図1 「Trentシリーズ」
 Fig. 1 Trent Series

当社は、「Trentシリーズ」のすべてにおいて部品製造を担当している。特に「ボーイング787」向け「Trent 1000」では、開発段階からプログラムに参画して中圧圧縮機（IPC：Intermediate Pressure Compressor）モジュールの各部位の設計・部品製造・組立を実施するとともに、IPCモジュールとしてRR社へ供給している^{1) 2)}。それ以降の「エアバスA350」向け「Trent XWB」および「エアバスA330neo」向け「Trent 7000」においても、RR社の戦略的パートナーとしてIPCモジュールを一貫して担当している。今後IPCモジュール・インテグレータとして当社が生き残っていくためには、後述するような当社独自の技術開発を継続して、競争力のある製品やモジュールを顧客に提案できる能力を常に強化していく必要がある。

また、当社が保有している大型のエンジン試験設備を使用して、多くの「Trentシリーズ」の耐久試験などを実施することにより、エンジン全体の開発にも寄与している。

3 エンジン／モジュールの特徴と当社の開発課題

「Trentシリーズ」の特徴は、図2に示すように通常の高圧・低圧系の2軸に中圧系を加えた3軸構造となっていることである。この中圧系の採用により、通常は低回転数でしか仕事ができない低圧圧縮機（LPC）が、回転数を制限しているファンとは独立したIPCとして最適回転数で仕事ができるようになり、効率の良いシステムが可能となる。

このような「Trentシリーズ」特有のIPCモジュールの外観を図3に、断面図を図4に示す。また、IPCモジュールの特徴と当社の開発課題を以下に示す。

- ①フロント・ベアリング・ハウジングは、ファンからエンジンコアに流入する空気を整流する静翼としての機能とベアリングを保持するエンジン主要構造体としての機能をもつ。このため、強度を確保した上で、オイル・空気通路を有した複雑な設計が要求される。

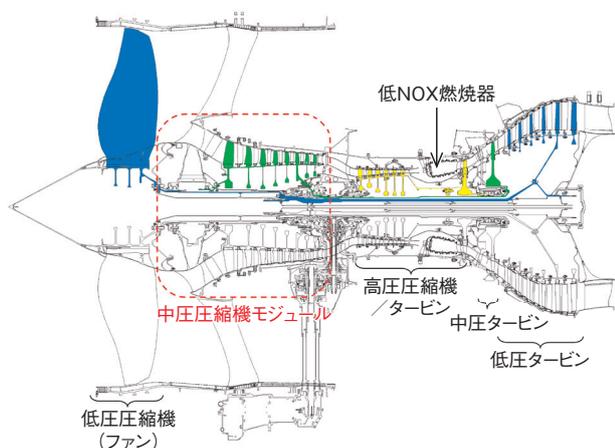


図2 「Trentシリーズ」の特徴（「Trent 1000」）
Fig. 2 Characteristics of the Trent Series (Trent 1000)



図3 IPCモジュールの外観
Fig. 3 Appearance of the IPC module

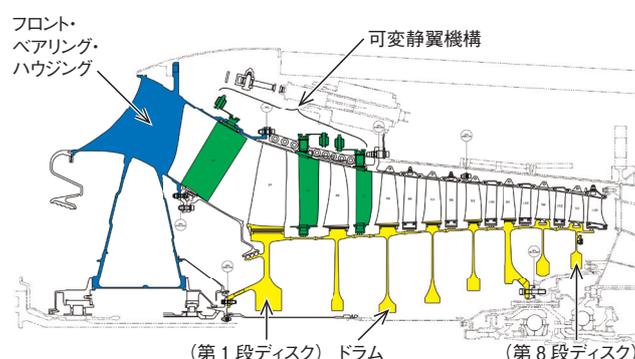


図4 IPCモジュール断面図
Fig. 4 Cross-section of the IPC module

- ②8段構成（高圧圧縮機HPCは6段）となっており、圧縮機としての主要部位となっている。通常の2軸エンジンのLPCよりも高回転で運転されるため、高強度が要求される。
- ③通常の2軸エンジンではHPCに適用される可変静翼機構が適用されている。IPCとしては部品点数が増えて構造が複雑になるが、エンジン運転条件に応じた制御を行う重要な部位であるため、高精度で作動することが要求される。

4 設計開発

(1) これまでの取り組み

民間航空機用大型ターボファンエンジンは、安全性、信頼性、重量、燃費、寿命、騒音への要求水準が年々高まっており、常に性能向上が追求されている。航空エンジン開発は、要素試験や解析で研究・評価・実証された空力設計などの要素技術とLFW（Linear Friction Welding）など最新の生産技術によって大幅な性能向上を達成している。たとえば、「Trent XWB」では、従来機に比べて燃料消費を15%低減、重量を15%低減した。

当社は、「Trent 1000」／「Trent 7000」／「Trent XWB」のIPCモジュール設計開発において構造・機構設計・解析を主に担い、特に可変静翼機構の高精度化やローター・ディスクの軽量化および長寿命化に貢献した。

(i) 可変静翼機構の高精度化

図5に示すIPCモジュールの可変静翼機構は、圧縮機静翼の角度を転向して圧縮機主流の整流化および流量のコントロールを行う機構であり、さまざまな条件下において圧縮機の効率を高めて圧縮機を安定的に作動させる役割を担っている。圧縮機効率の向上は燃料消費の改善に大きく寄与するため、可変静翼機構が空力設計通りに効率のかつ安定的に高精度で作動することが重要である。機構の高精度化は、構成部品の剛性を高めることや機械累積公差の低減などにより実現できる。

しかし、航空エンジンは軽量であることが求められ、加えて大型エンジンである「Trentシリーズ」では部品が大径かつ薄肉となるため、公差低減や剛性の向上が容易ではない。このため、可変静翼機構のレイアウトを徹底的に見直し、荷重に対して効率的に剛性を保てるよう構成部品の配置や製品形状を有限要素法FEM解析や要素試験により導き出し、重量を増加させずに機構精度を向上させた。また、圧縮機の高負荷化により機構にかかる荷重が従来機種以上に増大したが、それに耐えうる設計も実現できた。

(ii) ローター・ディスクの軽量化および長寿命化

近年、圧縮機の高効率化に伴い、より高負荷で回転速度は速く、温度は高くなる傾向にある。圧縮機ローターの運用条件は厳しくなる一方、さらなる軽量化に加えてライフサイクルコスト低減のためローターの長寿命化が求められている。応力レベルは従来機より大幅に増加し、一方軽量化によりディスク剛性は限界まで削られている。高応力に耐えて長寿命である一方、ローター・チップクリアランスを適正に保ち圧縮機効率を高く維持できるようにローターの剛性を最適化するなど、さまざまな相反する条件の並立が求められている。そのため、従来の低サイクル疲労寿命や

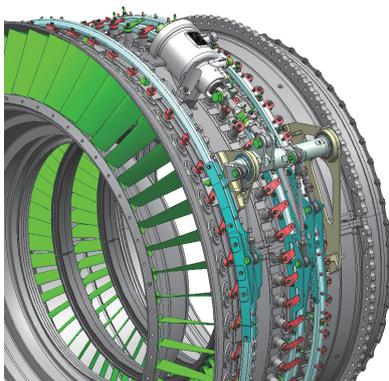


図5 IPCモジュールの可変静翼機構
Fig.5 Variable stator vane mechanism of the IPC module

き裂進展寿命評価に加え、あらゆる危険リスクを想定した設計クライテリアの再構築とさまざまな最新解析技術・加工技術などを取り入れた最適化設計により対応している。

(2) 今後に向けた取組み

当社は、これまで民間航空機用エンジン・プログラムにおいて、構造設計や強度・熱・振動などの各種解析を中心に担ってきた。今後は空力設計をはじめとする要素設計や圧縮機モジュール・システム設計（エンジン・サブシステム）まで役割を拡大して、いわゆるモジュール・インテグレーションを目指す。このため、将来の大型ターボファンエンジンを想定して、圧縮機モジュール開発に向けてさまざまな研究開発を行っている。

(i) 圧縮機要素技術開発

大型ターボファンエンジンの圧縮機のさらなる高性能化のため、ブリスク・プリング設計技術、エアシール高性能化設計技術、可変静翼機構高精度化設計技術の開発を重点的に進めている。

近年、圧縮機ローターは、軽量化・高性能化のためブレード・ディスクからブリスクに代わっている。大型ターボファンエンジンの圧縮機ブリスクは外径が大きく、今後、圧縮機の高負荷化や回転数の増加も考えられるため、翼列フラッタの低減技術などを発展させる必要がある。このため、従来の設計手法やクライテリアを見直し、解析や要素リグ試験を行っている。

圧縮機モジュールには、ラビリンスシールを中心にエアシールが多く使われている。シールからの漏洩空気は圧縮機主流や二次空気の損失に影響し、圧縮機の効率を低下させる。また、シール性能はさまざまな飛行・運航条件に影響を受けるため、高いシール性能を引き出し、安定して維持することが難しい。さらに長期間の運用におけるシール劣化を低減させることで、ライフサイクルコストの低減にも寄与する。そのため、エアシールの高性能化・長寿命化を目指して新型シールの研究開発を行っている。

可変静翼機構の可動精度は圧縮機性能に著しく影響するため、その作動誤差の要因分析を行って、新しいコンセプトで機構部位の開発設計に取り組んでいる。機構システムのレイアウトを見直し、機構システムを構成する部品の一体化や高剛性化により、軽量化と高精度化を両立させる。今後は、さらにアクチュエータを含めた可変静翼システム全体として高精度化を目指す。

(ii) 圧縮機要素リグ試験

将来の圧縮機を想定してさらに高い要求や厳しい条件下においても耐えうる製品設計を実現するため、設計クライテリアの再構築を行っている。従来のリグ試験や材料試験のデータでは賄えない応力・サイクル・温度などの条件下におけるデータを要素リグ試験により取得する。図6に示す圧縮機ローターのサイクリックスピン試験をはじめ、飛



図6 サイクリックスピン供試体と試験装置
Fig.6 Cyclic spin test rig and test unit

散ブレード・コンテインメント試験やブレード衝突試験を計画している。

(iii) 圧縮機モジュールリグ試験

将来の大型ターボファンエンジン用圧縮機を想定して、空力設計とモジュール・システム開発を行っている。空力を含めた要素技術およびシステム技術を実証するため、社内で圧縮機リグ試験を実施する予定である。前述の要素技術開発と要素リグ試験を基に再構築したクライテリアで圧縮機モジュール設計を行い、圧縮機モジュールリグ試験で実証し、将来のエンジン・プログラムに向けて圧縮機技術を向上・成熟させる計画である。

5 エンジン運転試験

当社は明石工場に多くのガスタービンエンジン試験設備（テストセル）を保有している。その中の大型ファンエンジンテストセルにおいて、「Trentシリーズ」の開発運転試験を実施している。このテストセルは、2000年に「Trent 800」を用いてRR社のテストセルとの性能確認を実施したのち、「Trent 500」、「Trent 1000」、「Trent 7000」のサイクル試験や耐久試験を実施している。

テストセルへのエンジン搭載状態を図7に示す。サイクル試験とは、エンジン運転状態を模擬した運転パターンを数千回繰り返す試験である。この試験は、航空会社での運航に先駆けて各構成品やエンジン性能劣化状況を確認する目的で行われる。耐久試験とは、エンジンの型式承認時に行うことが定められた試験の一部で、米連邦航空局FAAや欧州航空安全局EASAなどの航空当局に申請する重要な試験である。これは、通常であれば連続5分しか許容されない最大出力定格を連続で30分運転するなど、非常に過酷な条件を含む150時間の試験である。

また、実際の運航で発見された不適合の再現試験や改善確認試験などを要求されることもあり、試験の要求元であるRR社だけでなく機体メーカーやエンジン構成機器サプライヤなどと一緒に試験をまとめている。



図7 テストセルに搭載された「Trent」エンジン
Fig.7 Trent engine in test cell

エンジンの設計開発は、想定された使用条件を基に実施されるが、最終的には実際のエンジン試験により検証することが必要である。ただし、これらのエンジン試験はあくまでも地上静止状態における試験であり、機体搭載状態や顧客における使用環境を完全に再現することは難しい。そのため、実運用からのフィードバックは必要であるが、地上におけるエンジン試験で可能な限り航空安全に寄与できるように取り組んでいる。

あ と が き

当社がIPCモジュールの開発を担当した「Trent 1000」は最新型のTEN形態も商用運航を開始しており、また「Trent XWB」は推力を増大した-97形態も商用運航を開始している。最新の「Trent 7000」も近々商用運航を開始する予定であり、全体で年間600台近いIPCモジュールを安定的に供給できる量産体制の構築を進めている。これと並行して、将来の航空用エンジンに向けて競争力のある部品やモジュールを提供できるよう、当社独自の技術開発を継続していく。

参 考 文 献

- 1) 加納：“大型ターボファンエンジン「Trent 1000」の開発”，川崎重工技報，No.161，pp.8-11（2006）
- 2) 世良，永井：“クリーンで静かな空を結ぶ - 航空機 - ”，川崎重工技報，No.169，pp.14-21（2009）



高木 郁男



安東 孝浩



鈴木 晋