

GE9X エンジンの開発

Development of GE9X Turbofan Engine

笠原 知 諭 航空・宇宙・防衛事業領域民間エンジン事業部技術部 主幹
清水 達 航空・宇宙・防衛事業領域民間エンジン事業部技術部 主幹
西村 圭 司 航空・宇宙・防衛事業領域民間エンジン事業部 副事業部長

GE9X エンジンは、推力 414 ~ 467 kN という世界最大で最も燃料消費率の低い大型民間航空機用ターボファンエンジンである。現在、ボーイング社が 777 型機の後継機として開発中で、2021 年に就航予定である 777X 型機への独占搭載エンジンに選定されている。株式会社 IHI は、本エンジンの開発プログラムにおいて、低圧タービンの回転系部品を中心に、約 10% のプログラムシェアで参画している。本稿では、GE9X エンジンの開発概要、技術的特長および IHI 担当部位に採用した先進技術について述べる。

The GE9X engine is the next generation turbofan engine designed to be the largest and most efficient ever made in the world with 414-467 kN of thrust. The GE9X is developed to power the 777X exclusively that is being developed by Boeing as the successor aircraft to 777. The 777X will be in service at the beginning of 2021. IHI is responsible for designing and manufacturing approximately 10% of the engine, which mainly includes the rotating members of the low pressure turbine and the shafts. This paper describes an overview of the development of GE9X engine and IHI's contributions.

1. 緒 言

GE9X エンジンは、現在ボーイング社 (The Boeing Company, アメリカ) が開発中の次世代大型広胴機 777X 型機搭載用エンジンであり、777 型機搭載の GE90 エンジンの後継として、GE アビエーション社 (GE Aviation: GE 社, アメリカ) 主導で開発が進められている。第 1 図に GE9X エンジンの外観を示し、第 2 図にそのエンジンを搭載する 777X 型機を示す。GE9X エンジンは、2004 年に商用運航を開始した 777-300ER 搭載の GE90-115B エンジンと比較して、航空機ベースで約 10% の燃



(提供: ボーイング社)

第 2 図 ボーイング 777X
Fig. 2 Boeing 777X

料消費量削減を狙っている。性能達成のために、革新的な材料の採用による軽量化と、バイパス比拡大による推進効率の向上に加えて、高温高圧化による熱効率の向上など、大幅な改善をもたらす先端技術が導入されている。

777X 型機は、大型民間輸送機市場のベストセラーである 777 型機の後継機として、2013 年 11 月のドバイ・エアショーにて発表された。先進空力設計の複合材主翼、最新型の GE9X エンジンを採用することにより、信頼性、環境適合性、経済性を大幅に向上させている。

IHI は、GE9X エンジンの開発プログラムにレベニューシェアリングパーティシパント (RSP, プログラムの参加比率に応じて事業費の負担、収益配分を受ける共同事業者) として、低圧タービン部品などの開発・設計・製造を中心に約 10% のシェアで参画している。



(提供: GE 社)

第 1 図 GE9X エンジン外観
Fig. 1 GE9X engine appearance

本稿では、GE9X エンジンの開発概要、技術的特長および IHI 担当部位に採用した先進技術の概要について述べる。

2. GE9X エンジン開発概要

2.1 エンジン諸元

第 1 表に、GE9X エンジンの主要諸元を GE90-115B エンジンと比較して示す。GE9X エンジンには、世界最大のファン径 3.39 m (134 in) をもつ高バイパス比のターボファンエンジンであり、3 段低圧 + 11 段高圧軸流圧縮機、低 NO_x (窒素氧化物) 燃焼器、2 段高圧 + 6 段低圧タービンで構成されている。また、史上最高となる圧力比 27 の高圧圧縮機により全体圧力比を 60 以上としている。

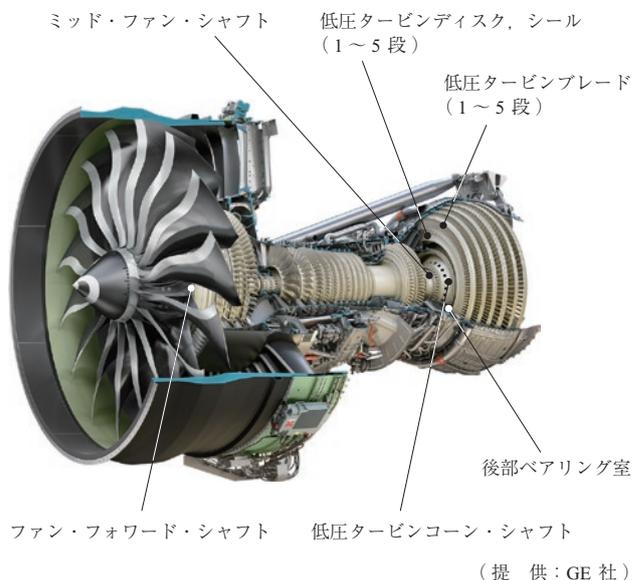
第 1 表 GE9X エンジンの主要諸元・比較
Table 1 GE9X specifications

項目	単位	諸元	
		GE90-115B	GE9X
エンジン			
最大離陸推力	kN (lbf)	512 (115 000)	467 (105 000)
ファン直径	m (in)	3.25 (128)	3.39 (134)
ファン枚数	枚	22	16
バイパス比 (BPR)	—	7.1	10.2
全体圧力比 (OPR)	—	45	60
高圧圧縮機圧力比	—	19	27
段数 (Fan/Booster/HPC/HPT/LPT)	段	1/4/9/2/6	1/3/11/2/6
航空機ベース燃料消費量	%	比較基準	-10

(注) Fan : ファン Booster : 低圧圧縮機
HPC : 高圧圧縮機 HPT : 高圧タービン
LPT : 低圧タービン

2.2 IHI 担当部位

IHI は、RSP として約 10% のプログラムシェアで GE9X 開発プログラムに参画している。第 3 図に、IHI が開発・設計・製造を担当している主な部位について示す。



第 3 図 IHI 担当部位
Fig. 3 IHI responsibility

2.3 開発日程

第 4 図に GE9X エンジンの開発日程表を示す。GE 社は、2012 年 7 月にイギリスで行われたファンボロー・エアショーにて、前身の GE90-115B エンジンに比べて、航空機ベースで 10% の燃料消費量削減を掲げ、その開発を発表した。翌 2013 年 3 月に 777X 型機への独占搭載が



第 4 図 GE9X エンジンの開発日程表
Fig. 4 GE9X engine development milestones

決定された。2016年3月には開発初号機のエンジン運転試験を開始し、2018年3月にはGE社が所有する飛行試験機ボーイング747-400に搭載して初のフライングテストベッド飛行試験を開始した。第5図に開発初号機のエンジン運転試験、第6図にフライングテストベッド飛行試験の状況を示す。そのほか各種地上運転試験を実施し、2020年にエンジンの型式承認を取得予定である。

また、777X飛行試験機に搭載して行う飛行試験を2020年1月に開始し、2021年には機体の型式証明を取得し、商用運航を開始する予定である。



(提供: GE社)

第5図 エンジン初号機試験
Fig. 5 The first engine test



(提供: GE社)

第6図 フライングテストベッド飛行試験
Fig. 6 Flying test bed test

3. GE9X エンジンの特長

GE9Xエンジンは、高い信頼性をもつGE90エンジンをベースに、GENxエンジンなどこれまでのエンジン開発、運用の経験から得られた知見を反映して開発が行われている。さらに、燃料消費率の低減に加え、騒音、排気、メンテナンス費用、信頼性、耐久性やそのほかの要求に対してバランスの取れたエンジンとするために、多くの先進技術も導入している。第7図にGE9Xエンジンで採用した先進要素技術を示し、以下に要素ごとの特長を述べる。

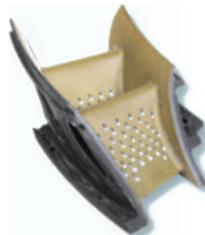
高全体圧力比/低NO_x 燃焼器



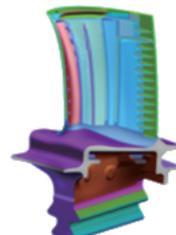
高圧力比圧縮機



セラミック基複合材料ノズル



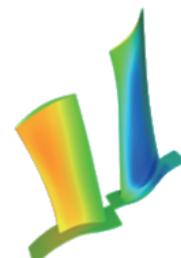
1 段動翼高効率冷却



第4世代複合材ファンブレード



低圧タービン空力



(提供: GE社)

第7図 GE9Xで採用した先進技術
Fig. 7 Advanced element technologies

3.1 ファン・低圧圧縮機

エンジンの推進効率を向上するためには、高バイパス比が必要であり、ファンの大型化と軽量化の両立が課題となる。GE9Xでは、ファンブレードに第4世代複合材や最先端の空力設計技術を採用することで、従来エンジンに比べてファンブレードの大型化、薄肉化および枚数の削減（GE90-115B：22枚、GENx：18枚、GE9X：16枚）を達成して課題を克服している。また、これらの先端技術によりファン回転速度を上げることが可能となり、低圧タービン効率の向上にもつながった。複合材はファンケースやファン出口ガイドベーンなどにも適用され、重量軽減を図っている。

また、ブースター（低圧圧縮機）ダクト流路の最適化や後流に配置された可変抽気バルブを最適に作動させることで、高圧圧縮機の着氷による失速リスクを低減した。

3.2 高圧圧縮機

GE9Xエンジンの全11段による高圧圧縮機は、高い圧力比を実現するために重要な要素であり、燃料消費率低減

に非常に大きな役割を担っている。この新しい圧縮機の設計は GE90, GENx, LEAP エンジンと受け継がれ、GE9X では安定した作動性能を維持しつつ、史上最も高い圧力比 27 の高効率高圧圧縮機を実現した。

3.3 燃焼器

航空機の排出ガスに対する規制は年々厳しくなっており、航空機エンジンにとって排出ガスに含まれる有害物質の低減は大きな課題の一つである。GE9X エンジンでは、第 3 世代 TAPS (Twin Annular Pre-Swirl) 燃焼器と呼ばれる希薄予混合燃焼システムの採用により、国際民間航空機関 (International Civil Aviation Organization : ICAO) により設立された航空環境保全委員会 (Committee on Aviation Environmental Protection : CAEP) の会議で決定された航空機エンジン排ガスの規制値 CAEP/8 の要求に対し 30% 以上の NO_x 排出量を低減している。

3.4 高圧タービン

高圧タービンモジュールは、2 段の回転体、ノズル、ディスク間シール、ケースなどから構成される。エンジン性能は燃焼ガスの温度が高いほど向上するが、一方で温度が高すぎると、燃焼ガスの流路となるタービン部の損傷が問題となる。そのためエンジン効率向上には、タービン部の耐熱性および冷却性の向上が必要不可欠である。GE9X の高圧タービンブレードでは、翼の冷却孔や冷却空気循環の改善などにより冷却効率を向上し、また、次世代耐熱コーティングを採用することで、より耐久性の高いタービンを実現した。また、ノズルなど静止部品にはセラミック基複合材料 (Ceramic Matrix Composites : CMC) を採用することで耐熱性を向上している。

3.5 低圧タービン

低圧タービンモジュールは 6 段の回転体、ノズル、ディスク間シール、ケースおよびタービンリアフレームなどで構成され、空力計算や摩耗劣化のない非接触回転シール技術の導入により、大幅な効率改善が試験にて実証されている。前・中段ブレードには中空構造を採用、後段ブレードにはチタンアルミナイド材を採用、また、タービンディスクに新材料を採用することで、重量軽減およびエンジン燃料消費率低減を実現した。

4. GE9X におけるデジタル化の推進

GE9X エンジンでは、先述のエンジン本体に採用される先端技術に加え、ものづくりにおけるデジタル化の中核技術として近年注目されているデジタルツインを導入して

いる。

製造時の部品情報やフィールド運航情報などを基に、実際のエンジンと双子のようなエンジンをデジタル上に作成し、実エンジンの挙動をデジタルで再現・評価するという技術である。膨大なデータからの解析・分析をとおして、エンジン性能予測を行い、また、部品の劣化損傷を予測してエンジンメンテナンス予測の精度を向上させ、エンジンの整備間隔の最大化を図り、航空機の稼働率を高めることを狙っている。

5. IHI 担当部位における先進技術

IHI は、短い開発期間のなかでエンジンの型式承認のための設計・製造・試験に対応してきた。さらに、航空機用としては世界最大の低圧タービンディスクの開発、また、単結晶材を用いた低圧タービン動翼の中空化など、新技術の導入に挑戦し、燃料消費率低減と重量軽減に貢献した。

5.1 世界最大の低圧タービンディスク開発

GE9X では、燃料消費率低減策の一つとして、低圧タービンの冷却空気量削減を追求している。これによる低圧タービン部品高温化に対応するため、従来エンジンの低圧タービンディスクで使用されてきた耐熱合金インコネル®718 に替えて、GE 社が高圧圧縮機・高圧タービン用に開発した高耐熱性合金 Rene 65 を大型低圧タービンディスクとしては世界で初めて採用した。

ディスクの素材は熱間鍛造方法で成型するが、Rene 65 は高温でも強度低下が少ない合金であるため、従来と同じ鍛造条件では成型できず、新しい製造方法の開発が必要であった。加えて外径 1.5 m の巨大リング状ディスクへの適用実績もないため、多くの鍛造の試作を重ね、素材供給会社および GE 社と協力して、鍛造工程の確立を進めた。第 8 図に鍛造リング製造のトライアルを示す。

また、金属は熱処理した後に急激に冷却すると材料強度



第 8 図 鍛造リング製造トライアル
Fig. 8 Forging trial

が増すが、表面と内部で冷却速度に差が生じ、その差により高い残留応力・ひずみが発生して加工変形の原因となる。そのため、IHI 呉第二工場（広島県）にて機械加工試作を重ね、強度と加工変形のバランスが取れた素材冷却方法および鍛造工程を決定した。

一方、このバランスを考慮した鍛造工程においても、Rene 65 材を使用したディスクは鍛造時に生じる残留応力が主要因となり、エンジン高回転・高温運転の際に径方向へ塑性変形する。変形量が大きいと、エンジン運転中にロータアンバランスが発生するリスクや、オーバーホール時にタービン分解をして再組立の際に前後段のディスクと組み付かない可能性がある。これらを防ぐために、エンジン運転でディスクが経験する高負荷を、素材の段階で高速回転して与えることにより、あらかじめ塑性変形させるプレスピニング工程を導入した。外径サイズ約 1.5 m の巨大なリングを高速回転する間中、しっかり保持しながら径方向に均一に変形させる必要があるため、コントロールが非常に難しく、有限要素法による解析のシミュレーションや実機試験をとおして方法を確立した。

これら一連の開発を経て、高温環境に耐えられる大型低圧タービンディスクの製品化に成功し、タービン冷却空気量削減および重量削減に貢献した。

5.2 単結晶材大型低圧タービン中空動翼の開発

GE9X の低圧タービン最前段は使用環境温度が高いため、耐クリープ性に優れた単結晶鑄造翼を用いている。全体翼列設計の制約上、翼枚数があらかじめ決まっており、設計的な自由度が小さく、運転領域内で主要な振動モードとの共振を避けることが困難であった。このため GE9X では、性能を左右する翼面形状および重量の制約のもと

で、翼の剛性分布ならびに質量分布を検討することにより、共振を避け要求仕様を満足する中空動翼を開発した。

製造面では、一般的な中空タービン翼で採用されている冷却用流路目的と異なり、翼の剛性変化と軽量化が目的のため、中空部の体積が大きく、その位置や変形のコントロールが難しかったが、多くの試作を経て工程の確立に成功した。

この中空動翼の導入により、低圧タービンの性能向上およびエンジンの重量削減に大きく貢献した。

6. 結 言

GE9X エンジンに関する開発の概要、その技術的特長、IHI 担当部位での先進技術の取組みについて紹介した。

民間航空機エンジンとして世界最大サイズとなる GE9X エンジンは、社会的要求である環境面での改善に加え、市場ニーズであるエアラインの運航コストの低減をも同時に満足し、従来にはない大容量長距離輸送を最も効率的に実現する、次世代を代表するエンジンとなることが期待される。IHI も低圧タービン部を中心に、独自技術によって性能向上および軽量化に大きく貢献した。

— 謝 辞 —

GE9X エンジンの開発を進めるに当たり、多大なるご協力をいただいた国内外の関係各位に感謝の意を表します。また、エンジン全体を取りまとめ、本稿にも情報提供いただいた GE 社、多大なるご支援をいただいている経済産業省、一般財団法人日本航空機エンジン協会 (JAEC) のご厚誼^きに対して、ここに記し、深謝いたします。