

航空機エンジンの技術的課題や社会的要求に応える将来トレンドを、2編に分けて航空エンジンのエキスパートに語って頂きます。第1部ではジェット輸送機用エンジンについて、続く第2部では近年技術革新の著しいVTOL機の分野、UAM(Urban Air Mobility)のエンジンについて掲載いたします。著者の略歴は巻末に紹介いたします。

運航技術委員会

## 第1部 将来型ジェット輸送機エンジンが指向する技術と課題

会 員 小 野 敏 雄

### 1. 航空機エンジンのこれまでとGTFエンジンの登場

ジェットエンジンが英国のホイットル卿により実用化されたのが1937年、日本製初のジェットエンジン「ネ20」が開発・製造されたのが1945年、それから約3四半世紀の年月が経つ。量産化され現在運用中の純国産航空機エンジンはT-4練習機のF3-30エンジン、P-1哨戒機のF7-10エンジンとどちらも防衛航空機エンジンであり、民間航空機用の純国産エンジンと呼べるものは残念ながらまだなく\*1)、海外メーカーとの協業を通じ、サプライヤーとしての地位を確立後、現在はRSP(Revenue Sharing Partner)に参加する形で設計・製造等の応分の責任を果たしながら、担当責任分野拡大と将来のプライムメーカーへの機会を伺っている。

しかしながら、特にエンジン高圧部に関わる技術はGE(General Electric)、P&W(Pratt & Whitney)、RR(Rolls-Royce)等の海外OEM(Original Equipment Manufacturer)に握られているのが実情で、今後の新しいエンジン開発プロジェクトにおいても、エンジン高圧部への参画は難しい局面が続くであろう。なぜOEMがエンジン高圧部を手放さないかという、ジェットエンジンの性能向上・燃費低減に関わるコア技術だからで、高圧部以外の要素も含めると、ジェットエンジンの性能向上とは大別して次の3つのパラメータの向上と捉えれば整理し易い。

- ① TIT(Turbine Inlet Temperature) : タービン入口温度
- ② OPR(Overall Pressure Ratio) : 全体圧力比
- ③ BPR(Bypass Ratio) : バイパス比(ファン空気流量とコア空気流量の比)

本稿ではそれぞれの詳細な説明は省くが、端的に言うと①タービン入口温度の上昇、②全圧力比の上昇、③バイパス比の上昇がエンジン性能の向上・燃費低減につながり、いつてジェットエンジンの進化の歴史はこれらの技術革新の歴史であると言って良い。

これら3つのパラメータのうち①TITおよび②OPRの向上が次第に頭打ちになってきていると考えられる中、P&Wが最近市場投入したジェットエンジンがいわゆるGTF(Geared

Turbo Fan)エンジンである。これは③BPR の増加を狙って開発されたエンジンであり、ファンモジュールと低圧圧縮機モジュールとの間に遊星ギア(減速ギア)を配置することによって(図 1)、ファンの回転数を低く抑え、ファンの大口径化を実現している。<sup>\*2)</sup>また、ファンが低回転のため、従来のエンジンに比べファン騒音が小さいという特長も持つ。(実際、名古屋空港にて MRJ(P&W 社製 PW-1200G(GTF エンジン))の離着陸と ERJ-170(GE 社製 CF34-8E)の離着陸を空港デッキで体感すれば、その静かさは歴然である。<sup>\*3)</sup>この GTF エンジンと、CFM International 社<sup>\*4)</sup>の最新エンジンである LEAP エンジン<sup>\*5)</sup>の比較を行えば、ジェットエンジンの最新の技術動向が理解出来るので、次節で述べようと思う。

## 2. LEAP vs. GTF

言うまでもなく、ジェットエンジンの Major OEM と言えば既述の GE、P&W、RR の 3 社であるが、Narrow Body 機のシェアに関しては、CFM(GE)と IAE(P&W)の寡占市場となっており(図 2)、Airbus の最新機種の一つである A320neo<sup>\*6)</sup>のエンジン(LEAP-1A と PW1100G)の熾烈なシェア争いを紐解けば、GE vs. P&W のエンジン開発競争の一端を垣間見ることが出来る。

先に述べたように、③BPR の増加による燃費低減とファン回転数低下による騒音の低減を狙った GTF エンジンであるが、整備費増加等の可能性は P&W も否定してはおらず、これからの長い運用期間においてこのエンジンがエアラインにとって Total Cost of Ownership や Reliability で本当にメリットが出るかどうか勝負の分かれ目となり、成功すれば、GE にとって大きな脅威となっていくであろう。

そもそも遊星ギアを使って回転数を減速するという考え方はターボプロップエンジンでは従来からあり、ターボファンエンジンの GTF という概念も、遡ること 1970 年代から GE や P&W によって研究開発が始まっている。その後 GE は GTF 形態の追求を断念し、現在もなお従来のアーキテクチャである 2 軸のターボファンエンジンにこだわり続けている。一方 P&W はその後も GTF の開発を着実に続け、実に 2016 年に A320neo で PW1100G エンジンの商用運航を開始した。<sup>\*7)</sup>

この GTF の技術を巡って GE と P&W が特許係争にまで及んでいることは記憶に新しい。というのも P&W は GTF に関する米国特許を取得したからである(特許番号:US8935913、出願日 2012.10.5、公開日 2015.1.20)。特許内容は、遊星ギアに対するものではなく、遊星ギアをガスタービンに適用しファンスピードを減速することに対する特許となっている。これは GE にとっては驚きだったようで、2016 年、記事<sup>\*8)</sup>にあるように米国特許庁に異議申し立てを行っている。1970 年代からあるコンセプトに対し新規性が認められるのか、というのが GE の論点ではあるが、一度認められたものが覆ることは極めて難しいと考えられることから、ジェットエンジンの GTF 化技術に関しては P&W に軍配が上がった形である。但しこの GTF エンジン、順風な船出とは言えない運航開始であったことも事実である。当初懸念された遊星ギアそのものの品質の問題ではなく、いわゆる「ボード・ローター(Rotor

Bow)」に起因するエンジン再スタート時の始動時間が長いことがネックとなり、A320neoのローンチカスタマーであったカタール航空は全オーダーをキャンセルする珍事となった。それらに端を発し、A320neoに対するPW1100Gエンジンの市場占有率は44%(2018年2月現在)に留まっている。<sup>\*9)</sup>

GTFに対し、従来アーキテクチャを踏襲する形で開発されたCFMのLEAPエンジンではあるが、各要素にCutting Edge Technologyを織り混ぜ、エンジン効率の向上すなわち燃費低減を目指している。具体的にはCMC(Ceramic Matrix Composite)をタービンノズルに適用し①TITの向上を図ったり、燃料ノズルをAdditive Manufacturing(3Dプリンタ)で製造しその精度向上ならびに製造コストの低減を実現している。CFMはこのCMCの素材であるニカロンの供給元として富山の日本カーボン(株)を選定しており、また低圧タービンプレードは栃木のAeroEdge(株)も供給しているなど、日本の中小企業の技術が最新のジェットエンジンの重要部位に必要不可欠な存在となっていることは強調しておきたい。

これら GE,P&W のエンジン技術のトレンドは今後もしばらく続くと思われるが、中期的に見た各社の Propulsion System の方向性を次節で解説しようと思う。

### 3. 将来エンジンの方向性

これからのエンジンに求められる要求事項としては、前節までに述べた燃費低減に加え、Emission, Noise, Cost of ownershipの低減、そしてReliabilityの向上等様々な項目が挙げられる。特にEmissionやNoiseなどはICAOのAnnex16で明確な基準が規定され、今後も益々厳しくなっていくことが予想される。Cost of OwnershipやReliability等も運用者(エアライン)にとってはもちろん重要な項目で、エンジンOEMの悩みは将来に渡って尽きそうにない。

長期的にはPropulsion Systemを含む機体全体がElectric Airplaneを目指していくのは疑いようのない流れであるものの、バッテリーから得られるエネルギー密度は燃料によるそれよりまだ低いのが実情であるため、小型機の電動化が当面のマイルストーンであり、旅客機サイズの機体の完全電動化にはしばらく時間がかかるであろうことは大方一致した見方である。ちなみにAirbus / SIEMENS / Rolls-Royceが取り組んでいるE-FANというプロジェクト<sup>\*10)</sup>は、4発のエンジンのうち1発を電動モーターで置き換えたもので、2020年に試験飛行が予定されている。これらを踏まえて、主要エンジンOEM3社(GE, P&W, RR)の今後の中期的動向を端的に示すと図3のようになる。

#### 3.1 GE

CFMとしては、将来のGTF化を排除しないというコメントをプレスリリースしているが<sup>\*11)</sup>、GEとしては上述の特許係争の経緯等もあり、GTF化は意地でも避けたいところ。信頼性が確立された従来のアーキテクチャ(2軸)を維持し、CMCのように要素技術を進歩させて燃費の良いエンジンを追求していく方向性と考えられる。同時にハイブリッドエンジン(簡単に言えばモーターアシスト・ジェットエンジン)の開発にも力を入れており、2020年代半

ばまでには中型機で試験飛行をする計画を持っている\*12)。

### 3.2 P&W

既述の通り、2016年にA320neoで商用運航が開始されて以来、GTFエンジンはジェットエンジンの新しい潮流になりつつある。A320neoではDual Source(エアラインはLEAP-1AとPW1100Gのどちらかを選択可)だが、MRJはもとより、エンブラエルの新機種E2シリーズもGTFエンジンのSingle Sourceでエンジン選定されており、Narrow Body機およびRegional Jet機市場において今後しばらくは市場規模を拡大して行きそうである。Wide Body機への適用がキーとなるものの、中期的にはGTFエンジンを軸にBusinessを展開していくものと考えられる。

### 3.3 RR

これまでRRはTrentシリーズに代表されるような3軸エンジンを特徴とするジェットエンジンをラインナップの中心に据えてきた。しかしながら昨今はUltra Fanと称する高バイパス比エンジンを開発中で、事実上のGTF化を宣言しており、技術上の大きな方針転換となる。Electric Engineの分野においては上述の通り、Airbus/RR/Siemensで小型機を使用しているプロジェクトが進行中である。

## 4. むすび

最近のジェットエンジンの技術トレンドをGTFエンジンを中心にまとめてみた。意地でもGTF化したがるGEと、GTFを訴求するP&Wとの対決はしばらくは民間機Narrow Body市場で続くと思われるが、どちらに軍配が上がるか注目である。将来的にはPropulsion Systemも電動化されていくのは既定路線であるが、バッテリーの性能向上に帰するところが大きいので中・大型旅客機レベルでのElectric Engineの登場はしばらく待たなければならぬまい。ハイブリッドエンジンは現実的なマイルストーンだと考えられる。今後もジェットエンジンの将来技術動向に注目していきたい。

#### 小野敏雄氏のプロフィール

生年 1968年 出身地 兵庫県

名古屋大学卒 航空宇宙工学修士

職歴: GE Aviation・(株)IHI・三菱航空機(株)で防衛・民間の多様なエンジンプログラムと研究開発に従事

現職: Boeing Company Global Service 部門で日本の防衛部門サービスを統括・中部大学特別講師

# GTF (Geared TurboFan) / Pratt & Whitney

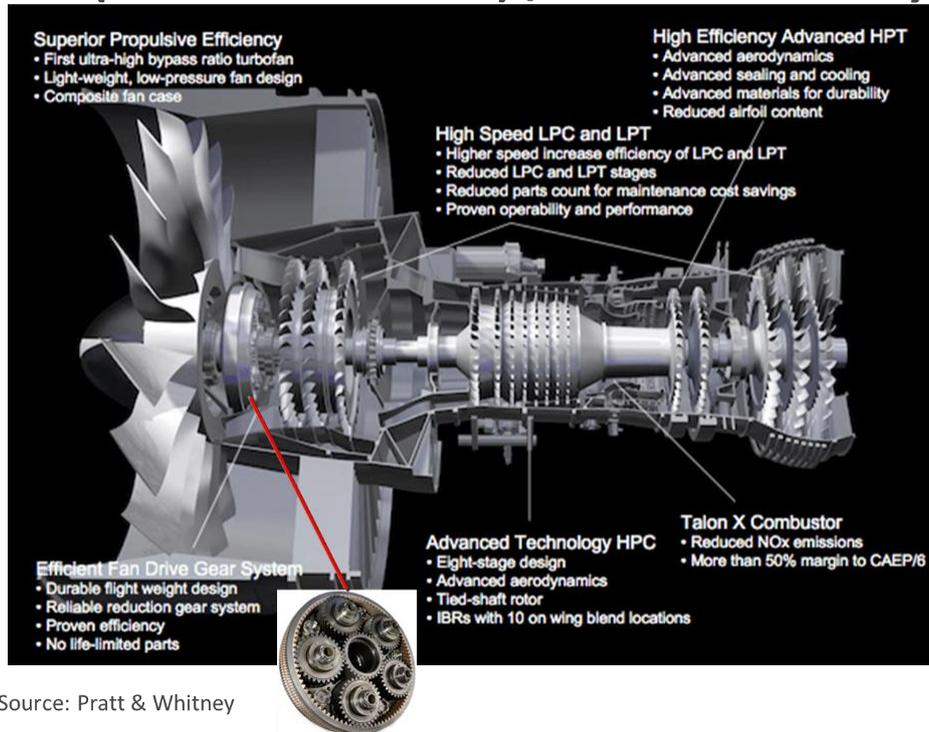
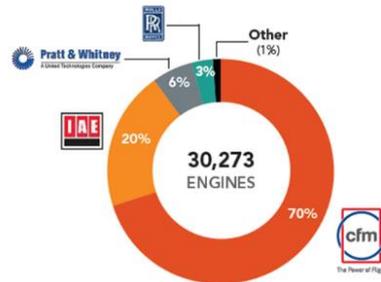


図 1. GTF エンジン概観

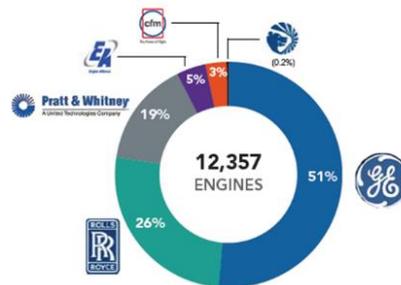
## Commercial Engine Market Share (2017)

### Engine market share by market group

COMMERCIAL NARROWBODY AIRCRAFT		
MANUFACTURER	AIRCRAFT	ENGINES
CFM International	10,598	21,202
International Aero Engines	2,978	5,954
Pratt & Whitney	863	1,783
Rolls-Royce	575	1,150
Other	67	182
<b>TOTAL</b>	<b>15,081</b>	<b>30,273</b>



COMMERCIAL WIDEBODY AIRCRAFT		
MANUFACTURER	AIRCRAFT	ENGINES
GE Aviation	2,759	6,267
Rolls-Royce	1,413	3,254
Pratt & Whitney	800	1,886
Engine Alliance	127	508
CFM International	105	420
Aviadvigatel	5	20
<b>TOTAL</b>	<b>5,209</b>	<b>12,357</b>



Source: Flightglobal

図 2. 航空機エンジンのマーケットシェア

## 各Engine OEMのApproach

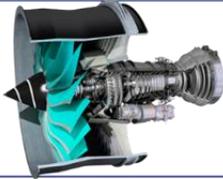
OEM	Current	Future
	2-Spool Engine	Hybrid Engine 
	2-Spool Engine GTF	GTF 
	3-Spool Engine	Ultra Fan (事実上のGTF化) 

図 3. 主要エンジン OEM3 社(GE, P&W, RR)の今後の中期的動向

- \*1) 日本航空宇宙工業会(SJAC)の最新の資料によれば、2016年の日本メーカーの航空機エンジン分野でのシェアは僅か6.6%程度に過ぎない。因みに開発中の国産ジェット旅客機MRJ(Mitsubishi Regional Jet)のエンジンは米国P&W(Pratt & Whitney)社製PW-1200G。
- \*2) ファンブレードの翼長を長くすればバイパス比は向上するが、翼端の周速がマッハ数を超えるとファン効率が大きく下がるので、それがしきい値の一つとなっていた。(もちろん地面とのクリアランスもファン径を制限する要因の一つ。)
- \*3) 現在MRJは米国Washington州Moses Lakeで試験中のため、名古屋空港での比較はしばらくは行えない。
- \*4) 米GEと仏SAFRANの50:50の合弁会社。
- \*5) LEAPはLeading Edge Aviation Propulsionの略。
- \*6) A320neo(neoはnew engine optionの略)のエンジンはDual SourceでエアラインはCFMのLEAP-1AあるいはP&WのPW1100G(GTFエンジン)を選択可能。2018年現在、LEAP-1Aがシェア56%とリードしている。
- \*7) 余談ではあるが、MRJは機体として世界で初めてGTFエンジン(PW1200G)の採用を決定した機種であり、P&Wにとっては三菱航空機(株)はローンチカスタマーであった(当時)。

\*8) 出典:

<https://www.cincinnati.com/story/money/2016/02/02/ge-aviation-pratts-new-patents-use-old-ideas/79700544/>

\*9) 出典:

<https://centreforaviation.com/analysis/reports/a320neo-aircraft-engines-cfm-achieves-56-share-of-orders-pratt-whitney-remains-active-401868>

\*10) 出典:

<http://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2017/11/airbus--rolls-royce--and-siemens-team-up-for-electric-future-par.html>

\*11) 出典:

<http://aviationweek.com/commercial-aviation/cfm-does-not-rule-out-geared-engine-bid-nma>

\*12) 出展:

<https://www.flightglobal.com/news/articles/ge-reveals-major-achievements-in-hybrid-electric-pro-440602/>