

# 空と宙

2010 MAY/JUN  
<http://www.ard.jaxa.jp/>

隔月刊発行 ISSN 1349-5577

## 研究開発

さらなる燃費向上につながるエンジンを目指して  
安全に、軽くする

## 横路散歩

ファン—エンジン前方の大きな羽根車

## 空宙情報

JAXAの不思議な建造物 その1

鳥だ! 飛行機だ!!・・・うん、飛行機だ。



高負荷遷音速ファン

No. **36**

研究開発本部

Aerospace Research and Development Directorate

## さらなる燃費向上につながるエンジンを目指して

## ジェットエンジンのファンとは

今日の航空機に広く使われている、排気ガスをジェットとして後方に噴き出すことによって推進力を得るジェットエンジンには大きく分けてふたつあります。ターボジェットエンジンとターボファンエンジンです。ターボジェットは、エンジンの吸い込んだ空気が全て燃焼器を通してジェットとして噴き出されるものです。このためターボジェットの排気ガスは高温で速度が速いのが特徴です。エンジンを前方に推す働きをした後に排気ガスにまだ残る熱エネルギーと運動エネルギーは無駄になってしまいますが、ターボジェットはこの無駄が多いということです。できる限り排気ガスの温度を低くし、また排気速度を遅くして飛行速度に近づけると効率（推進効率）が良くなります。ターボファンはターボジェットの排気ガスの温度と速度を低くするために考案されたもので、前から見るとわかるようにエンジンの一番前に径の大きなファンを配置し、エンジンが吸い込む空気の一部を燃焼器を通さずに排出する（バイパスする）ことにより、平均した場合の排気ガスの温度を下げ、速度を遅くすることを狙ったものです（図1）。

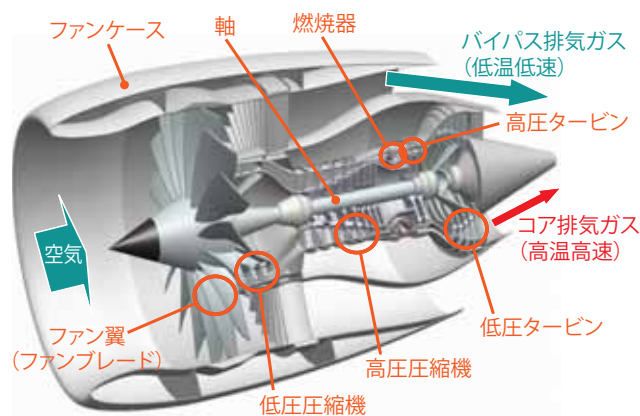


図1 高バイパスターボファンエンジン

燃焼器を通らないバイパス側の空気量と燃焼器を通るコア側の空気量の比をバイパス比と言います。バイパス比が大きくなればなるほど排気ガスの平均温度と平均速度が下がり、推進効率が良くなり、結果として燃費を良くすることができます。今日の民間ジェット機のほとんどは高バイパス比のターボファンエンジンを採用しています。

## ファン・圧縮機とエンジン重量の関係

ファンと、その後位置し空気の圧力を上げる働きをする圧縮機は、エンジンのサイクル効率を決める主要な変数である「総圧力比（出口と入口の圧力の比）」を決定する重要な要素で、いかに効率良く総圧力比を上げるかは、燃料消費率に直接効いてきます。最近のターボファンエンジンは燃費重視の観点からこの総圧力比がますます高くなる傾向にあります。一方ファンや圧縮機は圧力の低い方から高い方へと、ある意味無理をして空気を流そうとするので一気に圧力を高めることは難しく、これに対処するため圧縮機を縦に何段にも並べて徐々に圧力を高めていく手法を取ります。従って総圧力比を高く設定すると必然的にファンや圧縮機の段数を増やすことになり、それはすなわち重量と部品点数の増加を招きます。現在のターボファンエンジンに占めるファン・圧縮機の重量と部品点数は既にかかなりの割合を占めていますが、燃費を良くしようと総圧力比を上げると、エンジンの重量増を招き、結果として効率の改善分がこの重量増によって相殺されてしまうというジレンマを抱えています。同時に部品点数の増加は、部品の製造から組立、メンテナンスにかかる費用や手間を増やすなどトータル所有コスト（TCO）も押し上げます。

### 現在推進中の研究

JAXAではファンや圧縮機に関わるこのような相矛盾する問題を解決するため、ファン・圧縮機の段当たりの圧力比を高める（高負荷化する）ことで総圧力比を向上させつつ段数と重量、部品点数を削減して、エンジン全体の効率の改善につなげる研究に着手しました。こうした高負荷化設計では、前述のように、より高い逆方向の圧力の勾配に打ち勝って空気を流さなければならなくなるため、流れが剥離しやすくなるなど高効率を維持する事が難しく、また一般的に失速やサージ<sup>※1</sup>といったファン・圧縮機特有の不安定現象に対する安定作動範囲のマージン（余裕）が減少する傾向があります。高効率と安定動作を確保しながらファン・圧縮機の高負荷化を実用化するためには、このような課題をあらかじめ解決しておく必要があります。実機レベルでこれらの課題を解決するため、ファン・圧縮機を要素単体で試験するための回転要素試験設備を整備し（図2）、またこれを用いて駆動する実機レベルのファン試験機を設計製作しました（図3）。このファンは数値流体力学（CFD）を重点的に駆使して設計が行われています。設計点での高い圧力比を得るため翼先端では音速の1.3倍であるマッハ1.3もの円周速度が必要となる一方、これによりブレード先端付近で生ずる衝撃波<sup>※2</sup>を弱め、損失を低減して高い効率を達成するため先進の3次元翼型を採用しており、直径は50cmで推力1t級のターボファンエンジンのファ

ンに相当する高負荷遷音速ファンです。このファン試験機を用いて、先に述べたような、ファン・圧縮機の高負荷化や高効率化、安定作動範囲の拡大、また最近環境問題への関心の高まりによって注目が集まっている騒音低減の研究などを行っていく予定です。（正木大作）

- ※1 サージ：圧縮された気流に乱れが生じることで圧縮機の翼が失速し、機能が失われること。
- ※2 衝撃波：物体（今回の場合、翼先端付近）が超音速で空気などの媒体を移動することにより発生する、高圧力の空気の壁で損失を伴う。

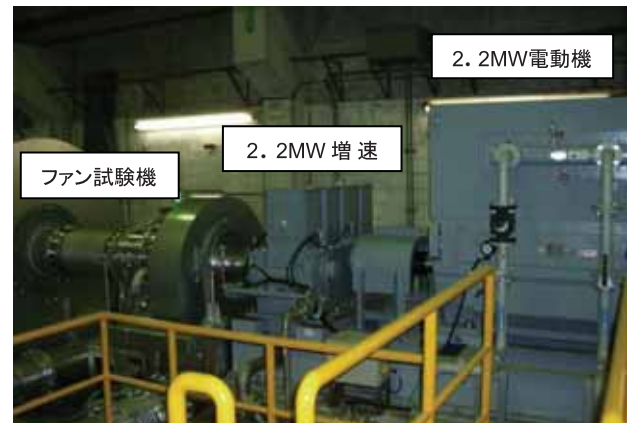


図2 回転要素試験設備



図3 ファン翼型（左）とファン試験機



【ジェットエンジン技術研究センター】

正木 大作



## 安全に、軽くする

## エンジンを軽くする

航空機は重力に逆らって空を飛んでいるため、できるだけ軽いことが望めます。機体を軽量化するため、飛行機の翼や胴体部には金属よりも軽くて丈夫、耐腐食性も高い「炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastics：CFRP<sup>\*1</sup>）」が使われるようになってきました。CFRPは金属の様にさびることがないため、「整備コストの削減」も図れると考えられています。近年では大型機のファン部分（ファンケースおよびファンブレード）にもCFRPが使われ始めており、その用途は広がっています。

中型機や小型機のファン部分へもCFRPを適用したいのですが、エンジンが小さくなると各製品の厚みが薄くなり、強度の問題などが出てきます。そこで、中・小型機用エンジンファン部のCFRP化を目指し、研究を進めています。

## 安全第一

2009年1月、1機の旅客機がニューヨーク（アメリカ）の西側を流れるハドソン河に不時着水しました。機長の適切な判断により、一人の死亡者も出さずに済んだこの出来事は“ハドソン河の奇跡”と呼ばれ、当時のニュースで大きく取り上げられました。この事故の原因は、エンジンに鳥が飛び込む「バードストライク」によるエンジン故障だと言われています。

鳥がエンジンに飛び込むと、エンジン前方にある

ファンブレードが損傷します。場合によっては破片となって飛び散りファンケースも損傷を受けてしまいます。エンジン部は私たち乗客が乗る胴体部に近いため、ケースを突き破ってブレードの破片が飛び出したら大変です。ブレード先端は音速に近い速さで回転しており、鳥は音速に機体の進行速度を足した毎秒400mの速度でエンジンに飛び込んできます。その際に飛び散るブレードの破片も同速度でケースに刺さります。現在運航中の飛行機は、バードストライクが起こってもケース外まで損傷が及ばないよう十二分に安全な設計がされています。

新しい材料を使うには、その材料を使っても安全性が損なわれないことを示さなければなりません。CFRPはプラスチックや炭素繊維の種類、組み合わせ方などにより物性が変化します。そこで、CFRP積層板に対する高速飛翔体衝撃特性の基礎データ蓄積のため、ブレードの破片に見立てた鉄球を各試験片に衝突させる試験を名古屋大学および愛媛大学と共同で行っています（図1）。一方向材プリプレグと靱性<sup>\*2</sup>の弱いプラスチックの組み合わせが、損傷の広がりにより鉄球衝突時の力を分散することで、最も衝撃を吸収しています。

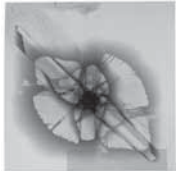
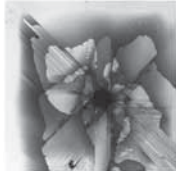
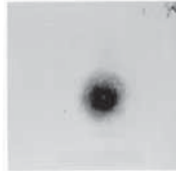

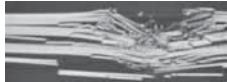

平面方向			
断面方向 (板厚：約2mm)			
プリプレグの種類	一方向材	一方向材	織物
プラスチックの靱性	強い	弱い	強い
速度 (m/s)	192	191	191
結果	貫通せず	貫通せず	貫通

図1 高速飛翔体衝撃特性試験

## 高速飛翔体衝突によるCFRPの損傷進展と貫通挙動の予測

また、試験データの妥当性を判断すると共に、最適なCFRPを求めるための数値解析コード（プログラム）の開発を進めています。図2は開発中のプログラムによる解析結果です。試験同様、プラスチックの靱性の弱い方が損傷時の衝撃を吸収した結果、貫通限界速度が速くなっていることが分かりました。

### 材料開発のためのプログラムを目指す

目指しているのは、エンジンファン部に適したCFRPを導き出すことができる汎用性の高いプログラムです。そこで、実際にエンジン開発の実績のあるIHIとも共同で研究を進めています。

今回紹介したプログラムで求められるのは、ブレードの破片とケースという硬いもの同士の衝突です。しかし、エンジンに飛び込んでくるのは鳥の様な柔らかい物体ですし、回転しているブレードは軸部分しか固定されていない、大きな変形が起こりやすい構造をしています。柔軟に支持されたものへの軟体の衝突は、硬いもの同士に比べてその解析は難しく、プログラムは複雑になります。現在、そのプログラム開発も進めています。

これらのプログラムを使うことでファン部分に最適なCFRPを導き出すことができるようになります。将来の中・小型機エンジンのCFRP化の達成に必要な技術の確立を目指し、産官学連携して研究を進めています。

※1 炭素繊維強化プラスチック（CFRP）：複合材料という、性質の異なる材料をいくつか組み合わせてひとつにすることで、各材料の性質を兼ね備えさせた新しい材料があります。CFRPは、炭素繊維の丈夫さとプラスチックの軽さを兼ね備えた複合材料です。炭素繊維の隙間にプラスチックを含浸した「プリプレグ」というシートを積層して望みの形をつくり、高温高圧下で焼き固めることによって成形します。プリプレグには、繊維を一方に並べた「一方向材プリプレグ」や繊維を衣服の布の様に織り込んだ「織物プリプレグ」などの種類があり、それぞれ特性が異なります。

※2 靱性（じんせい）：粘り強さ。



図2 数値解析結果



【複合材グループ】

（左より）小笠原 俊夫、吉村 彰記

## ファン——エンジン前方の大きな羽根車

### ■ジェットエンジンの仕組み

ジェットエンジンの役目は、飛行機を前進させることです。飛行機を前進させるための力(推力)は、エンジンが吸い込む「空気の量」とその「排気速度」の積で決まります。推力を大きくするためには、できるだけ大量の空気を吸い込み、できるだけ速いスピードで噴き出せば良いわけです。

ジェットエンジンは吸い込んだ空気を「圧縮機」で圧縮します。圧縮された空気は「燃焼室」内で燃料と混ぜられて燃焼し、高温高压になります。高温高压になった空気は「ノズル」を通して勢い良く噴出されます。圧縮機の駆動は燃焼室を通過してエネルギーが大きくなった空気を利用します。燃焼室の後方には圧縮機と同軸の「タービン」があり、空気がこのタービンを回すことで圧縮機が駆動されます(図1)。

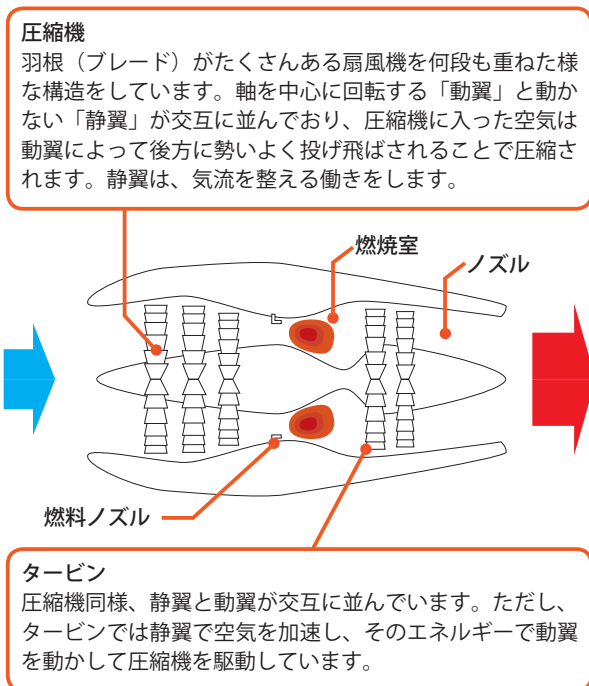


図1 ジェットエンジン

### ■推進効率が大切

ジェットエンジンに求められることは何でしょう? それは、飛行機を利用する立場や目的によって異なります。旅客運航を仕事とする航空会社やそれを利用する私たちにとって「運用コストの大幅削減」は大きな魅力です。

一般的な大型旅客機は音速の0.8~0.9倍の速さ(マッハ0.8~0.9)で飛んでいます。機体の飛行速度とエンジンの排気速度が同じ時エンジンの推進効率(燃費)は高くなるのですが、ジェットエンジンは音速を超える高速で空気を排出しているため、そのまま旅客機に搭載すると燃費が悪くなってしまいます。ならば排気速度を遅くすれば良いと思うかもしれませんが、単純に速度を遅くしてしまうと推力が十分に得られません。そこで考案されたのが「ファン」です。

ファンは、エンジン前方に取り付けられた大きな羽根車で、大量の空気を吸い込むことができます。圧縮機を駆動するのは別のタービンによって駆動されます(P.02図1)\*。ファンを通った空気の一部は燃焼室を通らずにそのまま排出されるため、コア排気ガスと合わせることで全体の排気速度を遅くできます。近年のターボファンエンジンでは、燃費向上を図るためにコア部への流入空気量に対してファン部への流入空気量を大幅に増やす高バイパス比化を追求しています。

燃費の向上には、他にも様々な方法が考えられます。例えば、エンジンの出口と入口の圧力比である総圧力比を上げる方法です(P.02参照)。近年のターボファンエンジンでは、推進効率と総圧力比をバランス良く向上させて燃料消費を低減しています。加えて、軽量化(P.04参照)、信頼性の向上、環境負荷低減、メンテナンスコスト低減なども重要な要素になっています。

## ■環境も大きなキーワード

航空輸送に関して、近年ますますクローズアップされてきているのが「環境適合性」です。性能や安全性を損なうことなく環境適合性を向上させるため、JAXAでは「クリーンエンジン技術の開発」を進めています。

空港騒音規制への対応や巡航時の機内騒音低減のため、航空機から発生する騒音を減らすことは重要な課題になっています。航空機から発生する騒音には様々な原因がありますが、そのひとつがジェットエンジンから発生する音です。特に騒音レベルが高いのが、ファンから発生するファン騒音と排気ジェットから発生するジェット騒音です。これらの騒音を減らすため、実験や数値解析による研究を進めています。

現在規制されているよりも少ない量ですが、

ジェットエンジンからは二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）や窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）などの大気汚染物質が排出されています。エンジン内で圧縮空気と燃料を混ぜて燃焼する際、燃焼ガスを高温高圧にした方が燃費が良くなりCO<sub>2</sub>の削減に繋がります。しかし、燃焼ガスを高温高圧にするとNO<sub>x</sub>が急激に増加してしまいます。そこで、燃費が良くNO<sub>x</sub>の排出を抑えられる技術の研究開発を進めています。

現在のターボファンエンジンは非常に高い効率と環境適合性を有していますが、さらなる環境適合化を目指し、電動で駆動するファンシステムの技術研究にも取り組んでいます。

※ 2ページ図1のファンジェットエンジンでは圧縮機が2段構成になっており、ファンと低圧圧縮機を回転の遅い低圧タービンで、高圧圧縮機を回転の速い高圧タービンで駆動しています。

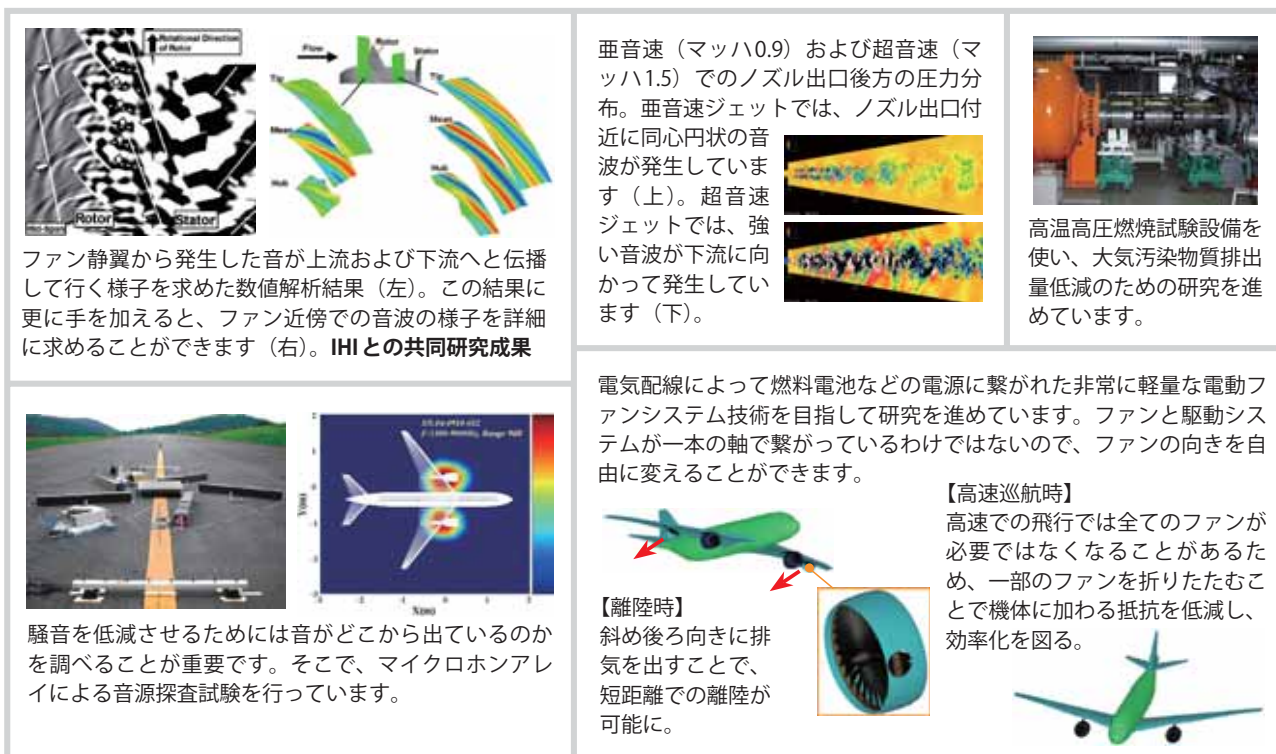


図2 JAXAが取り組む様々な研究開発



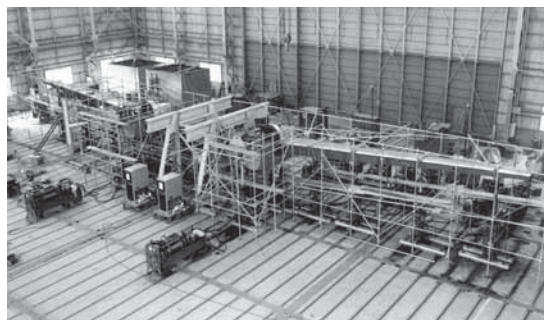
# 空 宙 情 報

## JAXAの不思議な建造物 その1 YS-11コックピット 鳥だ！飛行機だ！！・・・うん、飛行機だ。

東京都道121号武蔵野調布線（通称：三鷹通り）沿いの並木の向こう側に、新幹線の頭のような物体がぼっかりと浮かんでいます。実はこれ、YS-11という飛行機の頭の部分なんです。



YS-11は今から50年ほど前に設計された日本産の旅客機です。1956年、YS-11の開発が具体的に動き出しました。JAXAの前身機関のひとつである航空技術研究所（NAL、1963年に航空宇宙技術研究所に名称変更）では、航空機の開発に必要な繰り返し荷重試験装置などを整備し、それらの装置を使ってYS-11の全機静強度試験や主翼・胴体疲労試験などの様々な構造関連試験を実施することで機体の完成に寄与しました。



YS-11が初めて大空に舞い上がったのは1962年のことです。それから3年後、東京－徳島－高知を繋ぐ路線に定期就航しています。



2000年、1機のYS-11が丘珠空港で雪面へオーバーランをし、廃棄処分となっています。NALはこの機体の胴体の一部を研究のために譲り受け、2001年から2002年にかけて2回の落下衝撃試験を行いました。生存可能な事故、例えば低空からの不時着時などを想定し、その際の機体の安全性向上に役立つデータの取得を目的とした試験でした。人体ダミーを座席に乗せ、機体の衝撃損傷や人体ダミーの各部に加わる衝撃加速度を計測しています。

2006年9月30日、YS-11は日本国内の定期路線から引退しました。JAXAで展示しているのは2006年12月22日に引退した航空局の飛行検査機です。「ちよだIV」の愛称で親しまれたこの機体の稼働年数は38年（総飛行時間22,503時間30分）という長さでした。主翼や胴体部分は今後の航空機技術発展のための研究に役立っていきます。コックピットを含んだ頭の部分はもう少し、みなさんの目に触れるところで活躍します。



### YS-11コックピット見学案内

開館日 月曜日～金曜日  
午前10時～午後5時  
休館日 土・日・祝日 年末年始  
所在地 東京都調布市深大寺東町7-44-1

空と宙 2010年5月発行 No.36

【発行】宇宙航空研究開発機構 研究開発本部 〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1  
電話：0422-40-3000（代表） FAX：0422-40-3281  
ホームページ <http://www.ard.jaxa.jp/>

【禁無断複写転載】『空と宙』からの複写もしくは転載を希望される場合は、研究推進部広報までご連絡ください。



リサイクル適正への表示：紙へリサイクル可