

J A X A 航空マガジン

# FLIGHT PATH

新たな空へ 夢をかたちに  
*Shaping Dreams for Future Skies*

JAXA

2017  
SPRING

No.16  
航空技術部門  
www.aero.jaxa.jp

特集

## aFJR(高効率軽量ファン・タービン技術実証)プロジェクト 航空エンジン開発の新しい流れを作る スタートが切れた

2 特集

aFJR(高効率軽量ファン・タービン技術実証)プロジェクト  
航空エンジン開発の新しい流れを作る  
スタートが切れた

5 特集 関連技術

軽くて効率の良いエンジンを実現させる  
aFJRプロジェクトの技術とは

9 リレーインタビュー

「シミュレーション結果からいかに知見を引き出すかは、燃焼現象の本質を理解しているかどうかで決まる」

10 航空新分野創造 水素利用技術

11 基礎・基盤技術 超小型ターボファンエンジン技術

12 FLIGHT PATH TOPICS

JAXAの進める「aFJR(高効率軽量ファン・タービン技術実証)」プロジェクトでは、2017年度の最終的な実証試験に向けて、各要素の成果が着々とまとまりつつあります。aFJRプロジェクトの意義、そして現段階での成果を、本プロジェクトに参加している株式会社IHIの今成邦之 航空宇宙事業本部技術開発センター副所長と JAXAの西澤敏雄 aFJRプロジェクトマネージャのお二人にお話を聞きました。

Feature  
特集



RJ500エンジンの前にて。今成邦之航空宇宙事業本部技術開発センター副所長(左)と西澤敏雄 aFJRプロジェクトマネージャ(右)

aFJR(高効率軽量ファン・タービン技術実証)プロジェクト

航空エンジン開発の新しい流れを作るスタートが切れた

対談

今成 邦之  
株式会社IHI

西澤 敏雄  
国立研究開発法人  
宇宙航空研究開発機構

日本の高バイパス比エンジンの開発はFJR710から始まった

—aFJRにいたるジェットエンジン開発の歴史的経緯を少し振り返りたいと思います。「FJR710」あたりからでしょうか。

西澤 そうですね。FJR710は当時の通商産業省(現、経済産業省)のプロジェクトで、日本の高バイパス比エンジン開発の最初といえます。相当な予算をつぎ込んでエンジンを作って、最終的にはSTOL実験機「飛鳥」<sup>※1</sup>に搭載して飛ばしました。このエンジンの開発がきっかけになって、JAXA(当時NAL)のエンジン試験設備が充実

た。エンジンの産業規模もここから一気に広がりました。メーカーはFJR710を土台にして、「V2500」というエンジンの開発に進んだわけです。

今成 V2500はそろそろ更新の時期を迎え、新しいエンジンに置き換わりますが、累計で7000台を超えています。大ベストセラーです。

西澤 そうですね、7000台。V2500が売れ始めたのは1980年代の終わりですね。FJR710のプロジェクトが始まったのが1971年ですから、それまでの準備期間は20年近い。

今成 これは航空エンジンの世界では常識で、普通は世の中に出る20年前から研究を始めないといけません。10年前からは本格的な技術開発、5年前からはエンジン開発ですね。ですから、10年前に「これは使える」と認めてもらうだけの技術がないと、世界の市場に入れません。10年前に世界が認める高い技術を持つためには、紆余曲折もありますから、どうしても20年前くらいに研究をスタートしないといけなわけです。

西澤 FJR710を始めた時にV2500という

市場がどこまではっきり見えていたかは分かりませんが、タイミングは良かったですね。

今成 FJR710はイギリスでの試験運転で高い評価を得ました。そこでロールスロイスと一緒にやろうと言われ、「RJ500」というプログラムができました。それが5カ国共同開発のV2500になり、エアバスに採用されることになりました。この共同開発に日本が入ることができたのは幸運でしたが、その幸運を作り出したのはFJR710といって過言ないでしょう。

—FJR710は「飛鳥」に載せることを目的にしていたわけではなかったのですか。

西澤 聞いている話では違うと思いますね。FJR710は当時の通産省のプロジェクト、「飛鳥」は当時の科学技術庁、つまりNAL主導のプロジェクトでした。エンジンは他にも選択肢はあったと思います。しかし、FJR710が「飛鳥」に搭載され、飛行実証されたということは、日本のエンジン開発にとって非常に大きな意味を持っていたと思います。

スパコンを使うシミュレーションの時代に

—その後JAXAでは経産省のプロジェクト

今成 邦之

株式会社IHI 航空宇宙事業本部 技術開発センター副所長

※1 C-1輸送機をベースに、FJR710エンジンを搭載した短距離離着陸(STOL)実験機。1985年(昭和60年)から1989年(平成元年)まで、97回の飛行実験を行った。

## 日本の航空エンジン開発の歩み

で超音速機用のHYPR(ハイパー)およびESPR(エスパー)というエンジンの研究が行われます。FJR710の開発成果はこれらに結び付いていったのですか。

**西澤** HYPRはマッハ5、ESPRはマッハ3で飛行することを考えたエンジンなので見た目は違いますが、どちらもFJR710で得た技術の上に立っています。JAXAでは当時、スーパーコンピュータによるエンジンのシミュレーションを始めた頃でした。これはFJR710の時代にはなかったことです。HYPRやESPRの開発は、シミュレーションのウェイトが高くなっていった最初の頃にあたると思います。

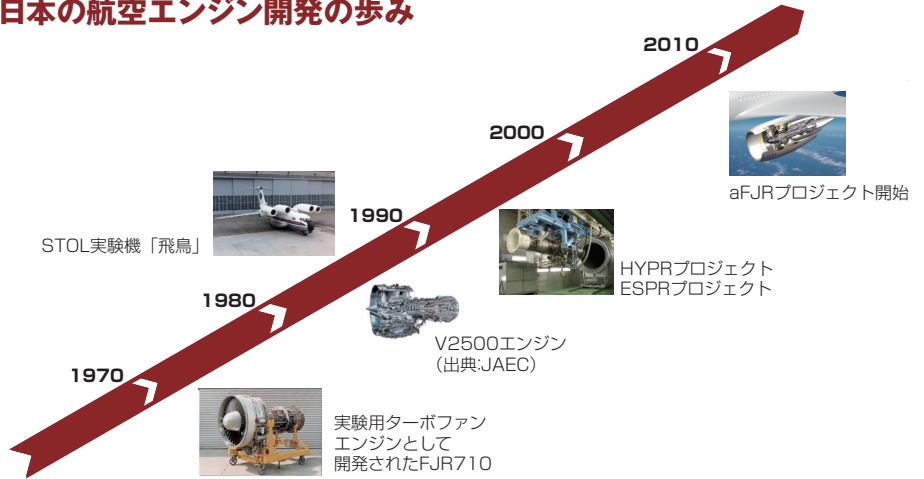
**今成** 実はHYPRの頃、私たちは海外メーカーと共同開発をしていたのです。その時にNALのスパコンを使わせていただきました。NALの計算結果を持っていくと、世界一流の海外メーカーでさえ我々のスピードについてこれなかった。当時から日本はCFD(数値流体力学)先進国でした。

**西澤** 当時のNALのスパコンは、ベンチマークテストで世界1位をキープしていましたからね。それを使って研究者はいろいろチャレンジングなことをしていました。

**今成** 今でもJAXA開発のCFDソフトを設計で使わせていただいています。V2500の後継エンジンの低圧圧縮機でも、JAXAのCFDにお世話になったことがあります。ギヤードターボファンという新しい型では、ファン動翼と低圧圧縮機の間減速ギヤがあり、ギヤ潤滑のためにフレームを通して油を給油・排油してやらなければいけません。熱い潤滑油が低圧圧縮機の上流に位置するフレームの中を流れていて、そのフレームから主流への伝熱がエンジン性能に影響するかどうかを調べる必要がありました。それをJAXAのCFDでシミュレーションして影響を定量的に評価することができました。これは非常に役に立ちましたね。

### aFJRプロジェクトについて

地球温暖化や石油資源の枯渇などの問題に対して、航空分野においても国際的な環境基準の強化が進められています。航空機のエンジンにおいては、燃費の改善、CO<sub>2</sub>やNO<sub>x</sub>などの排出削減やエンジン騒音の低減を求められています。JAXAでは、次世代エンジン技術の開発によって環境負荷軽減に貢献することを目指しており、その一つに「高効率軽量ファンタービン技術実証(aFJR: Advanced Fan Jet Research)」プロジェクトがあります。これは、国内のエンジンメーカーの実績が豊富な「ファン」および「低圧タービン」における環境適合性を向上するための技術を開発・実証するもので、次世代航空エンジンの国際共同開発において設計分担を担える技術レベルを目指します。aFJRでは、IHIなど共同研究などを通じた産業界との連携を主軸とし、大学とも連携を強化した体制を構築しています。



**西澤** 要素試験ができないような特殊な条件の検討というのは、シミュレーションは非常に得意です。

——その後に行われたエコエンジンの研究については、今成さんは何か思い出はありますか。

**今成** エコエンジンも経産省のプロジェクトで、各社がやりたいところを集めたのですが、燃焼器だけは3社競合になりました。コンベのような形になり、JAXAの設備を試験に使わせてもらいました。エコエンジンについては、これがJAXAとの関係で一番思い出されるところでですね。

**西澤** エコエンジンのプロジェクトは、それがそのままエンジンにつながったということではないのですが、技術を2000年代に継承していくという意味では、非常に役に立ちました。aFJRでは低圧系に特化しましたが、その前のエコエンジンでやってきたファンとかシミュレーション技術があったからこそ、次のステップに行けたわけです。こういう技術を継承するプログラムも大事です。

### 将来の航空エンジンのためには、今、研究開発を行う必要がある。

——JAXAがこの時期にaFJRをプロジェクトとして進めている背景は何ですか。

**西澤** 私たちが考えているのは150人乗り規模の旅客機のエンジンです。これが今の航空機の市場で相当なウェイトを占めています。その機体が

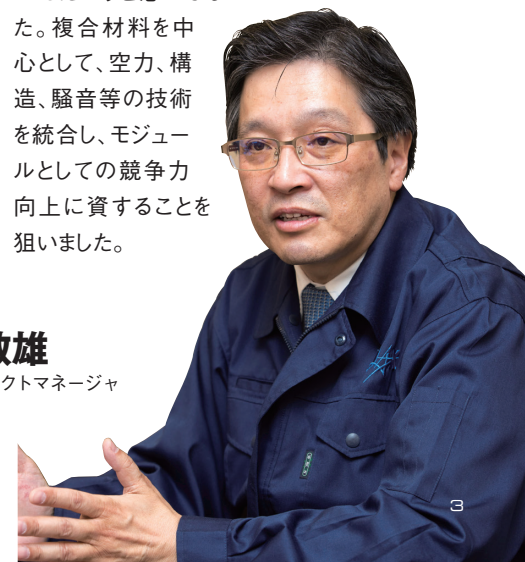
代替りするタイミングは2025年から2030年頃になるのではないかと私たちは考えています。日本が得意としている技術を開発するには、今の時期に始めていないと間に合わないと考えました。その中でメーカーと相談していくうちに、低圧系のファンや、低圧タービンについて技術を高めていくことを検討していったのです。メーカーとは何度も会議を開いて、いろいろな候補があった中で、研究要素を絞っていきました。

——メーカーの立場からすると、このタイミングはどうでしたか。

**今成** 2025年から2030年頃というのは妥当であると思います。ですから、10年前にあたる今の時期からやらなければいけません。IHIは現在、低圧系が得意です。それでは低圧系の中で何を売りにしていくか。そこで複合材料を挙げ、ファンに関してはCFRP(炭素繊維強化プラスチック)、低圧タービンについてはCMC(セラミック基複合材料: Ceramic Matrix Composites)<sup>\*2</sup>を売りにすることにしました。さらにファンのブレード(翼型部品)が載っている円盤、ディスクと呼んでいますが、これにも取り組んでいきたいと考えました。このディスクという部品は壊れると重大な事故につながるのです。総合的な技術力が求められます。実はV2500では技術的に十分に手がまわらなかった。これを自分たちでできるようにするのが私たちの悲願で、このパーツを自前で設計・製造できるようにするために、この機会を活用させていただこうと思いました。複合材料を中心として、空力、構造、騒音等の技術を統合し、モジュールとしての競争力向上に資することを狙いました。

### 西澤 敏雄

aFJRプロジェクトマネージャ



\*2 金属よりも軽く、熱に強く酸化もしにくい。セラミックス繊維を使っているため、割れにくい利点がある。詳しくは、FLIGHT PATH No.10参照。

——IHIにとって大事なプロジェクトですね。

**今成** そうですね。ファン直径を大きくしていくと高バイパス比ファンとなりますが重くなるので、軽くて強いCFRPを使います。複合材料は私たちの得意分野であり、PW1100G-JMエンジンのファン出口構造案内翼とケースの複合材料部品化に成功し、設計・製造を担当できました。ファンブレードは残念ながらまだ金属ですが、これでもできるだけ早くCFRPにしてIHIでやりたい。そうすると、残るのはディスクです。これでディスクもできるようになれば、ファンを全部カバーできることになります。

**西澤** ディスクはライフリミテッドパーツといい、一定の期間が来ると交換する部品ですから、エンジンを売った後のメンテナンス事業でもそれなりのリターンが出てくる分野ではないかと思えます。そういう意味では、産業規模の拡大にそれなりに貢献できるパーツですね。

## メーカーとJAXAのシナジー効果を目指す

——aFJRでは、やはり材料がキーポイントになりますか。

**西澤** はい。ファンでいいものと、CFRPはIHIが素材開発しているもので、すでにファンブレードの成型などについては、メーカーとしていろいろやられています。aFJRの中では、さらにそれを中空化することに取り組んでいます。ディスクですと、軽量化と寿命とのトレードオフを研究するとかですね。メーカーがそれにプラスアルファして製品化する手前のところをJAXAが担当しています。メーカーとJAXAのシナジー効果を生み出すようなやり方で進めています。

——海外の動向も考えて取り組んでいるということですね。

**今成** そうですね。こうしたものに関しては、やらなければいけないことが分かっており、JAXAと一緒にやらせていただいています。

——材料以外にはどんなところが技術的なポイントですか。

**今成** このクラスのバイパス比では、ファンの流れを層流化することによって効率を上げることが出来ます。それをまさに今回、このプロジェクトでやらせていただいて、層流化することでこれだけ良くなるということを実証できた。これは非常に大きな成果だと思っています。

それから、ファンではフラッターという振動現象が起りやすいといわれていますが、理論的にはタービンでも起りやすいのです。実際にはそれが起らないように工夫しているのですが、軽量化が進むと、タービンのフラッターがだんだん出て

くる。そこで、タービンのフラッターが起らないようにするため、JAXAのCFDを活用させていただき、うまくいきました。aFJRではCMCを採用しましたが、実は新しい素材は全くデータがない。ですから今回、CFDでその予測をやらせていただきました。予測精度はかなり向上しました。欧米にも「これだけ予測できるぞ」とかなり胸を張れるようなところまで来たのではないかと考えています。

**西澤** 今回、シミュレーションでフラッターを予測することになり、プロジェクトの中での工夫として、他の目的で作られた高空性能試験設備をタービンのフラッター用の風洞として使いました。ある種の実証設備になり、シミュレーションそのものの信頼性も上げることができました。

## 実証のレベルを上げるためにF7エンジンを導入

——現段階で、aFJRプロジェクトはどのくらいまで進捗しているでしょうか。

**西澤** プロジェクトは要素ごとに最終的な実証試験を行います。2016年初めの段階で、実証試験に使う供試体に盛り込むべき技術のベースを検証し終わっています。今はその供試体の設計を順番に進めて、約8割はJAXAの中でのレビューを終え、供試体の製作フェーズに入っています。残る2割ぐらいの供試体の設計も、2016年度いっぱいまで終わります。供試体を使った実証試験、最後の試験を2017年度に順番でやっていきます。2017年末にみなタイミングが合って、ファンと低圧タービンそれぞれの性能アップが得られ、それを全部組み込んだエンジンの燃費がこれぐらいになるはずだという最終評価を迎えます。現在はまさに、最後まで上り詰めるちょっと手前のところということですね。

——IHIにとってはどうですか。

**今成** 一言でいうと、とても役に立っています。航空エンジン開発の難しいところは、20年に一度くらいしかチャンスが来ないことです。そのタイミングに間に合わせることが大事ですが、一方で、現在のエンジンの改良型への適用も常に心掛けています。使えるものはすぐ使おうと、虎視眈々とそのチャンスを狙うところまで来ていると思っています。長期的な研究と短期的な利用の両方を考えています。

——JAXAは防衛装備庁が開発した純国産ターボファンエンジン「F7-10」エンジンを導入することにしましたね。

**西澤** JAXAとしては実証のレベルを上げるために、F7-10エンジンを導入しようとしています。これを使って、aFJRの各要素の実証レベルを

上げておけば、競争力はさらに高まります。

**今成** 世界の大きなエンジンメーカーと仕事をする場合、新しい高付加価値のあるものを提供するが安く作ると、共同開発に組み込みたいと言われる。安くするばかりではビジネスになりませんから、高付加価値のものを出していきます。すると必ず「それは本当に大丈夫か（機能するのか、壊れないのか）」と言われるんですね。その時に、エンジンに入れて回した実績を持って行くと納得して話がスムーズに進むのです。技術実証試験実績の有無は、非常に大きな違いです。民間転用されてJAXAに導入されるF7-10エンジンには、技術実証用エンジンとして非常に期待しています。

**西澤** 今おっしゃったように、そういうエンジンがあるかないかですごく大きな違いを生むことは前から分かっていた。FJR710がV2500につながったのは、やはり「飛鳥」という自前のインフラで実証をやりきったという点が大きい。それを見習おうとすると、今の技術レベルのエンジンがなくてはいけない。そうするとF7-10しかありませんでした。

——現段階でaFJRの成果をどう考えていますか。

**西澤** 二つあります。一つはJAXAの中での研究開発の進め方です。JAXA航空技術部門ではこれまでは基礎研究あるいは基盤研究がベースでしたが、aFJRは違います。ジェットエンジンを作って、飛行機に搭載して飛ばすことを想定した研究開発と同じような考え方で進めています。ですから、要素レベルでの技術の実証データが、メーカー主体の次のフェーズのために一番大事になるという進め方をしてきました。

それからもう一つ、aFJRではメーカーや大学と共同研究しているわけですが、今までのようなテーマごとの研究ではなく、各研究を一つのターボファンエンジンに向かって集約していくプロジェクトができました。これはJAXAにとって研究開発プロジェクトという新しい取り組みですので、大きなステップアップになったと思っています。

**今成** 今回私たちは低圧系という、自分たちが持っている強みをさらに強くするところで、このプロジェクトに参加しました。aFJRで開発したものの、私たちがJAXA以外と進めているものの、いろいろなメーカーの独自の研究、それらを全部F7-10に入れて実証し、欧米のエンジンメーカーに提案するというモデルを作る。今回はそういう流れを作るための大きな機会になっていると思います。これがうまく回り始めれば、JAXAにとってはaFJRの次のプロジェクトにつながると思います。JAXAにはぜひ次につながっていただきたいと思っています。

# 軽くて効率の 良いエンジンを 実現させる

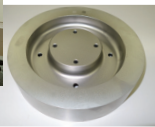
## aFJRプロジェクトの技術とは



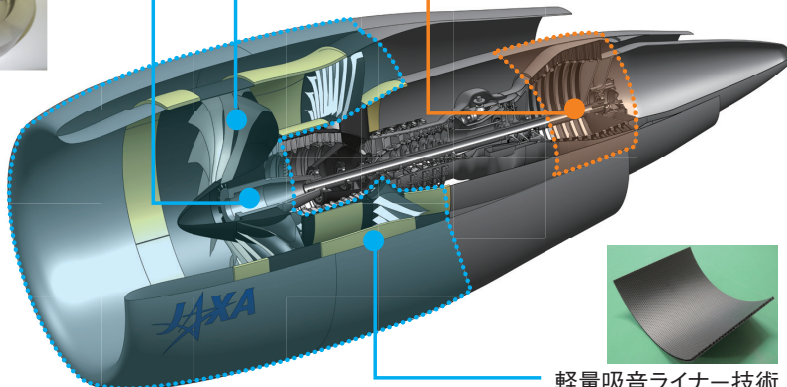
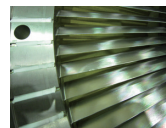
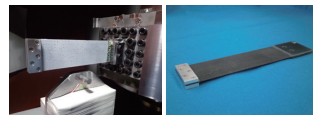
高効率軽量ファン技術  
(効率向上、軽量化)



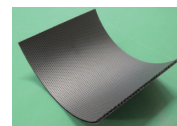
軽量ファン技術  
(ブレード、ディスク)



軽量低圧  
タービン技術



軽量吸音ライナー技術



aFJRプロジェクトは、既存のエンジンに比べて10%程度軽く、さらに効率の良いエンジンを実現するための技術開発プロジェクトです。軽量化を実現する技術としては、「高効率軽量ファン技術」、「軽量ディスク技術」、「軽量吸音ライナー技術」、「軽量低圧タービン技術」です。高効率軽量ファン技術では、ターボファンジェットエンジンにおいて、空気を取り込む役割を持つファンの空力特性を向上させることで高効率化を目指し、ファンに使用する素材や構造を工夫することで軽量化を目指します。軽量ディスク技術では、ファンの要となるディスクの研究、軽量吸音ライナー技術では、ファンの周囲に配置して騒音を抑える吸音ライナーの研究を行っています。軽量低圧タービン技術では、ファンを回転させる駆動力を生み出すタービンブレードの素材を変更し軽量化を図っています。これらの技術について、それぞれの担当者に話を聞きました。

### 高効率軽量ファン技術の研究

#### 素材と構造を見直し ファンの質量を削減する

近年、旅客機などに搭載されるターボファンジェットエンジンは、燃費の向上が求められて



竹田 智

aFJRプロジェクトチーム  
研究開発員

おり、高バイパス比<sup>※</sup>化が進む傾向にあります。しかし、バイパス比を大きくするという事は、取り込む空気の量を増やす、つまりファンの直径を大きくすることであり、その分エンジンの質量が増します。また、エンジンを支える機体も剛性を持たせなければならないため、機体の質量も増加してしまいます。結果的に、燃費が良くなった分を質量増加分が吸収してしまうことにもなりかねません。高バイパス比で燃費の良いエンジンを作るには、軽量化技術が必要です。

「金属材料を使っていたファンを、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)に置き換えて軽くすることを目指しています」と話すのは、ファンの軽量化技術を担当する竹田智研究開発員です。さらに、ファンの内部を中空構造にすることで、より軽量化を図っています。また、軽くするだけでなく、バードストライクなど

の衝撃に耐えられる構造も必要です。つまり、CFRPによって製造が可能であり、かつ、ファンブレードに求められる耐衝撃性を持った形状でなければなりません。

「耐衝撃性を予測するための衝撃シミュレーションでは、複数の大学と協力しながらファンブレード全体のモデル化を行い、JAXAのスーパーコンピュータだけでなく理化学研究所の「京」なども使って過去に類を見ないような大規模な計算を行いました」(竹田研究開発員)。多くの試験と計算を行う中で、中空部分の構造に工夫を施し、軽量で耐衝撃性を有するファンの設計が進められてきました。

#### ファンブレードの形状を 空力的観点から見直す

aFJRプロジェクトではファンの軽量化と

※ コアエンジンに流れ込む空気の量とコアエンジンの外側をバイパスして流れる空気の量の比。バイパスの流れを多くすれば、バイパス比は高くなる。



## 正木大作

aFJRプロジェクトチーム  
セクションリーダー

同時に、効率の向上も課題の一つとなっています。ファン効率向上のための「層流翼3D設計の研究」では、「ファンブレードの翼形状を空気力学的な観点から最適化することで、効率の良いファンを目指しています」とファン効率向上を担当する正木大作セクションリーダーは語ります。具体的な方法として、ファンブレード翼面の広い領域で層流境界層が長く続く形状を作り、空力的な効率を向上させようとしています。層流境界層では、渦による乱れがなく空気が整然と流れるため翼面の抵抗が小さくなるので効率が良くなります。また、ファンブレードの先端では衝撃波が発生

していますが、バイパス比が高くなりファンの直径が大きくなると最適な圧力比が下がるため、ファンの回転数を落とすことができるので翼先端の衝撃波を弱くしたり、発生しないようにしたりできます。翼先端の衝撃波形状を上手くコントロールすることも、ファンブレード表面の層流境界層を長く持続させることにつながります。

高効率ファンに関する技術は、低騒音でCO<sub>2</sub>排出の少ないエンジンを目指したクリーンエンジンプロジェクトでの成果をベースにして、世界トップレベルの効率を目指しています。

## 2017年度に実証試験を実施して技術確立させる

軽量化ファンの研究では、数値計算による解析を行った後、CFRPでハーフサイズの試作モデルを作製し試験を行いました。2016年11月には、実物大の中空CFRPファンブレードを作製し、鳥を模擬したゼラチンを衝突させる予備試験を行っています。試験では、ファンブレードに取り付けた歪みゲージの数値を見るだけでなく、ハイスピードカメラで衝突の様子を撮影し、どのような変化が起きるのかを観測しました。2017年度には、予備試験



中空CFRPファンブレードの供試体。色とラインは観測を容易にするため。

の結果を受けて改良された中空CFRPファンブレードによる実証試験を行う予定です。

一方、高効率ファンの研究では、層流翼3D設計で効率が向上していることを確認するため、2016年度に試作した約3分の1のサブスケールモデルを使用した試験を行いました。この試験では、エンジンの試験設備に空気の流れを整える装置を取り付けて、上空を飛行する際の入口乱れの少ない状態を再現しました。2017年度には、試験の解析結果を反映させて改良したサブスケールモデルでの試験を行い、プロジェクト目標の技術実証を行う予定です。

## 軽量ディスク技術の研究

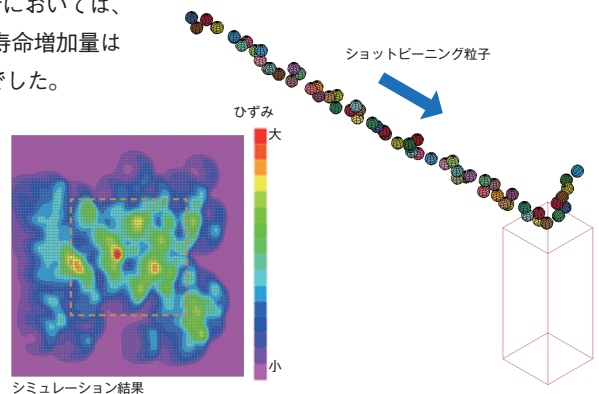
### ファンディスクはエンジンの隠れた重要部品

ファンディスクは、高速で回転するファンブレードをしっかりと支えなければならないため、高い信頼性が要求される部品で、ライフリミテッドパーツ(規定寿命に到達する前に交換が必要な部品)に指定されています。ファンブレードの大型化に伴って、ディスクにはますます大きな荷重がかかり、頑丈にする必要があるため、ディスク軽量化のための技術開発が重要になっています。ディスクには、寿命を増加するためのショットピーニング加工が施されています。ショットピーニング加工は、

投射材と呼ばれる硬い材料でできた小さな球を、金属表面に高速で当てる金属加工方法で、表面に圧縮応力を発生させることにより、き裂の発生や進展を抑制する効果があります。ただし、実機のディスク寿命設計においては、ショットピーニング加工による寿命増加量は設計寿命には含まれていませんでした。

JAXAでは、加工シミュレーション技術の開発に取り組んでいて、ショットピーニング加工による寿命の増加量を精度良く推定する技術の研究開発を行ってきました。加工シミュレーション

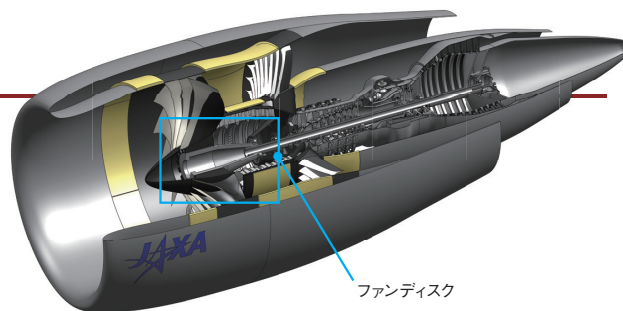
結果と試験結果に基づいて予測した寿命増加量を設計に反映させることで、設計寿命を維持したままで、ファンディスクをより薄く、軽くすることができます。



加工シミュレーション(右)と解析結果の例(左)。

aFJRプロジェクトでは、ショットピーニング加工を行った小型のディスク供試体を使用して、エンジンの運用条件を模擬した回転速度を繰り返し増減させる回転試験を行って

います。今後、2回目の回転試験も予定しており、加工シミュレーションによる寿命予測の精度確認を行います。



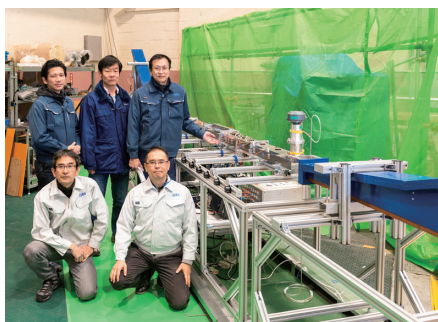
ファンディスク

## 軽量吸音ライナー技術の研究

### アルミから樹脂に変えて軽量化を図る

「軽量吸音ライナー技術の研究」は、エンジンの音を低減する役割を持つ吸音ライナーを金属材料(アルミニウム)から樹脂素材に変更することで軽量化することを目的としています。担当する石井達哉ファンクションマネージャは、「樹脂は軽量というだけでなく金型を使って一体成形できるのでコスト面でも有利です」と語ります。

一般的な吸音ライナーパネルは、中空ハニカム構造を表面板と背後板で挟み込む構造になっていて、表面板には小さな孔が開いています。表面板側を伝播する音は、吸音ライナーパネルによって減衰されます。この際、表面板の開口率やハニカムのサイズを調整することで、吸音したい周波数帯を決めることができます。



気流中の吸音ライナーパネル吸音率試験装置の前で。

### JAXAの強みは評価技術にあり

軽量吸音ライナー技術の研究もメーカーとの共同研究として進めており、その中でJAXAは吸音ライナーパネルのさまざまな性能の評価試験を担当しています。評価試験は、大きく音響試験と強度試験の二つに分けられます。

音響試験には三段階あり、その一段目が垂直入射吸音率試験です。これは、小さく切り取った吸音ライナーパネルを管の一端に付け、もう一方の端から発生させた音を吸音体に垂直に当てた時の吸音体の吸音率を求める評価試験です。次の段階では、吸音パネルを流れ場に置いて、流れ場に音を伝播させた時の吸音率を評価します。航空エンジンでは、ナセル内壁のような気流に接する箇所に吸音パネルが使われるため、垂直入射吸音率試験における静止場での吸音率に加えて、空気の流れがある条件での吸音率などが設計上必要となるのです。そこで本研究では、気流を通す長い管の途中で吸音パネルを設置する特殊な実験装置を使います。最後の段階がファンリグ試験と呼ばれる試験で、実機のファンを模擬したファン試験装置に円筒状の吸音ライナーパネルを配置して吸音ライナーの音響性能を評価するものです。本研究では、共同研究先のファン試験装置を利用して試験を行います。ファンリグ試験では、吸音ライ

ナーパネルが克服すべき実用的課題、例えば、音の減衰量、周波数特性、気流の影響、構造健全性などを確認します。

強度試験では、試作した樹脂製吸音ライナーパネルが実用に耐えうる構造強度を持っていることを確認します。強度試験には、静荷重試験と衝撃試験があり、静荷重試験では吸音ライナーパネルにゆっくりと荷重をかけた場合の強度を評価します。一方、衝撃試験はパネル表面にひょうなどが衝突した場合でも、損傷が所定の許容範囲で済むことを確認する試験です。本研究では、錘(おもり)を落下させて吸音ライナーパネルが破損しないことを確認する落錘試験で評価します。錘の重量と落下距離は、衝突にかかる運動エネルギーから求められます。

このように、JAXAはその強みであるさまざまな評価技術を通して、軽量吸音ライナー技術に貢献しています。

### 石井達哉

aFJRプロジェクトチーム  
ファンクションマネージャ



## 軽量低圧タービン技術の研究

### セラミック素材でタービンの軽量化を目指す

ファンを回転させる力を生み出す低圧ター

ビンは、通常50~60枚程度のタービン翼を円周上に配置したディスクが7段程度使われています。タービン翼の質量を少しでも小さくすることができれば、エンジン全体の軽量

化に大きく貢献できます。aFJRプロジェクトでは、エンジン全体の約9%(低圧タービンの約30%)の軽量化目標を実現するため、タービン翼を金属材料からセラミック基複合材料



## 山根 敬

aFJRプロジェクトチーム  
ファンクションマネージャ

(CMC)へ置き換える研究を進めています。

「セラミックを主体とするCMCは、一般的に金属よりも軽くて耐熱性に優れるため、すでに海外のエンジンメーカーでは、一部の部品にCMCが使用されたエンジンが実用化されようとしており、今後CMCの利用範囲は拡大していくと考えられます」と北條正弘主任研究開発員は語ります。一般的にニッケル合金で作られている低圧タービン翼をCMCに変更すれば、質量を3分の1から4分の1程度小さくできると考えられています。しかし、CMCを採用するためには、解決しなければならない課題もあります。

## フラッターと タングリング設計が重要

「CMCを用いるためには、フラッター設計とタングリング設計の技術を確立しなければ

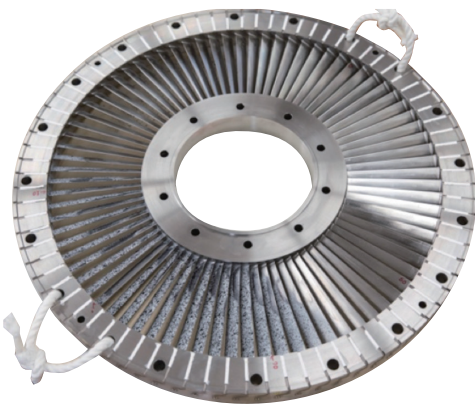
なりません」と山根敬ファンクションマネージャは説明します。フラッターとは、窓のブラインドが風でビリビリと震えるように、羽根が振動する現象(FLIGHT PATH No.8参照)です。フラッターが進行すると破損する場合もあるので、フラッターが発生しないように設計しなければなりません。CMCのような新素材は特性が異なるので正確にフラッター発生を予測する技術が必要となります。この予測技術の正確さを評価するために、フラッターが発生するような試験を実施する必要があります。「これまでに供試体を作り、空気力で振動させる試験を行ってきました」と、フラッターの研究を担当する賀澤順一主任研究開発員は説明します。2017年度には実機同様のモデルで試験を行い、その結果とCFDの解析結果を比較する予定です。

もう一つのタングリング設計は、タービン動翼を意図的に破壊させる構造設計のことで、ジェットエンジンは、不具合の発生によってエンジンの正常な運転が困難になったとしても、安全に停止させることができなければなりません。例えば、ファンと低圧タービンを連結している軸が破断した場合、低圧タービンは抵抗を失って回転数が急上昇、その状態で破壊が起きると重たい破片がエンジンケースを突き抜け、航空機の安全を脅かす危険性もあります。そのため、軸破断の発生時には低圧タービン動翼を静翼に接触させて破壊し、回転力をなくすような構造設計が採用されています。CMCを使った場合にも、同様に動翼を破壊できなければなりません。

これまでにCMCタービン動翼の破壊シミュレーションや予備試験を行った結果、CMCタービン動翼を根本から破壊することができる構造が見つかっています。今後は、CMCタービン動翼を模擬した供試動翼を、実機のエンジンと同様に回転させた状態で、静翼を模擬した供試静翼と接触させる試験を行い、タングリング設計手法を実証する予定です。

## CMCの設計技術で 日本の産業を支援する

CMCは金属に比べて100~200℃も高い



フラッター試験用の  
低圧タービン供試体

温度に耐えることができます。現在、低圧タービンは冷却の必要はありませんので、aFJRプロジェクトでは耐熱性の向上を目標とはしていませんが、将来、エンジンが高性能化した時、この特性は有利に働くでしょう。また、低圧タービンよりも高温高圧になる高圧タービンでもCMCが利用できないか検討しています。

軽さと耐熱性を兼ね備えた素材として注目されているCMCは、発電用タービンなどにも応用が可能であり、そのための研究も行われています。また、CMCの素材メーカーとして代表的な2社はいずれも日本企業であり、日本の独自技術といっても過言ではありません。aFJRプロジェクトを通じてCMCの設計技術を確立すれば、航空分野のみならず日本の製造業に貢献できると考えています。

## 賀澤順一

aFJRプロジェクトチーム  
主任研究開発員



## 北條正弘

aFJRプロジェクトチーム  
主任研究開発員

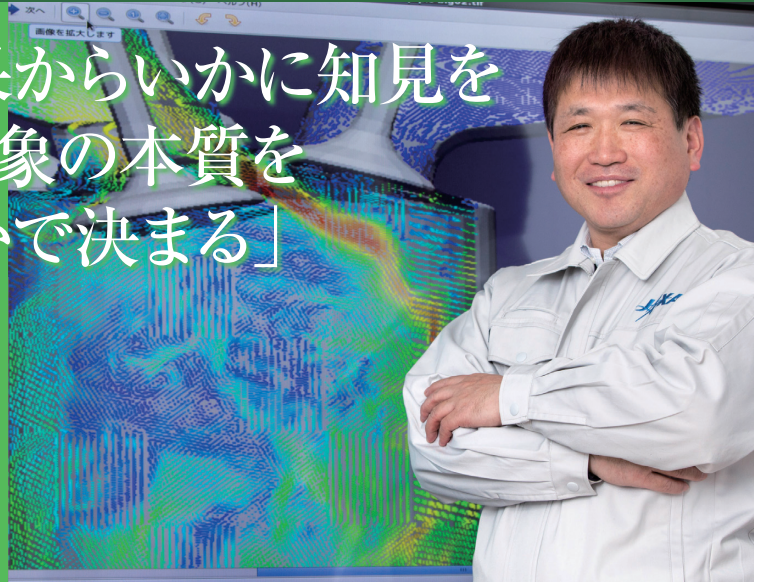




## 「シミュレーション結果からいかに知見を引き出すかは、燃焼現象の本質を理解しているかどうかで決まる」

数値解析技術研究ユニット  
燃焼・乱流セクション セクションリーダー  
**溝渕 泰寛**

1989年、東京大学工学部航空宇宙工学科卒業。1992年3月、東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻修士課程修了。1995年3月、東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻博士課程修了。1995年4月、科学技術庁航空宇宙技術研究所(NAL)入所。



航空宇宙技術の知見を活かした自動車エンジン燃焼シミュレーションの前に。

今回は、航空機エンジンやロケットエンジンで起こっている燃焼現象の解析に携わる数値解析技術研究ユニットの溝渕泰寛セクションリーダーに、研究者としての想いややりがいなどについて話を聞きました。

### ——これまでの研究と現在の研究内容について教えてください。

20年ほど前に航空宇宙技術研究所(現JAXA)に入った頃は、ガスの燃焼のシミュレーションをやっていました。研究所には大きな計算機があって、膨大なデータを出力することができたのですが、物理現象の根底に流れているエッセンスを理解していないと、いくら計算をしても新しい知見は得られません。出てきた結果からどういう知見を引き出すかは、研究者が物理の原理原則を解明して、燃焼現象の本質をきちんと理解しているかによって決まります。炎は一つに見えても、実際にはいろいろな性質のものが組み合わさっている場合があります。例えば噴流浮き上り火炎の場合、火炎構造を分析してみると炎は三つの燃焼構造の複合体であることが分かります(右下図参照)。この発見は、ある先輩からいただいたアドバイ스가きっかけでした。多くの人がさまざまな視点で同じものを見ることで、一つの現象の違う側面も見え、今まで分からなかった知見を引き出すことができるのです。現在は、航空機エンジンやロケットエンジンの燃焼現象を解析するためのシミュレーション技術を高度化する研究が中心です。具体的にはスーパーコンピューターを使って大規模で詳細な数値シミュレーションを行い、燃焼現象の物理的な本質を理解した上でモデル化するという仕事をしています。

また、航空宇宙分野で培ったCFD(数値流体力学)技術をベースに、日本の自動車エンジン燃焼解析のプラットフォームとなり得るソフ

トの開発も行っています。開発のきっかけは、ロケットエンジンの燃焼の解析を見た自動車エンジン研究者から「ロケットエンジンのような速い燃焼流れの解析ができるのなら、自動車エンジンの解析もできないか」と関心を持っていただいたことでした。自動車と航空機やロケットのエンジンとの一番の違いは、自動車エンジンの場合、ピストンやバルブが動くということです。JAXAでは従来、そこをカバーし得るさまざまな方法の研究も行っていたこともあり、2014年から始まった戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)<sup>※1</sup>の革新的燃焼技術プロジェクトに参加することになりました。これは大学や自動車会社など、複数の機関が集まったプロジェクトです。JAXAはそのエンジンの解析をする骨格の部分を作り、他の大学などが開発するエンジン内で起こるさまざまなプロセスに関する個別のサブモデルを統合するという役割を担っています。それら全てをまとめて「HINOCA(火神)」と呼んで開発を進めています。

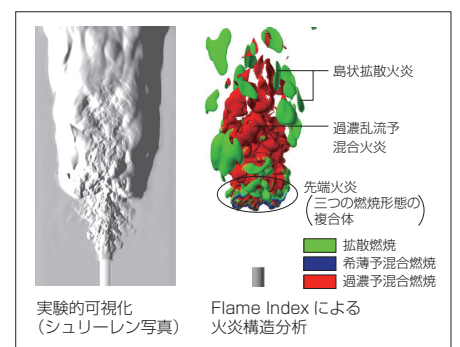
### ——仕事を通じてやりがいを感じたことは何でしょうか。

現在私は管理職になっていますが、自分の部署の若い人がいい研究をした時はやりがいを感じます。私としては、若い人が研究しやすい環境を整えるのが重要な仕事の一つなので、その中で成果が出たらうれしいですね。もちろん、HINOCAもやりがいの一つです。現在、自動車開発のシミュレーションに使われているソフトは全部外国製なので、ソフトの中身が

ブラックボックスのため、独自の改良ができません。また、良いモデルを開発しても、すぐに組み込むことができません。ぜひとも日本製のソフトが必要だという声も聞きます。この日本製のソフトが実現すれば実験の回数や供試体の製作コストが減り、自動車の設計プロセスから変わってくるでしょう。精度が良いシミュレーションができるようになれば製品の最終確認に使うなど、CAE<sup>※2</sup>やシミュレーション技術を使った設計ができるようになります。

まだ解明されていない炎の研究を継続することで、これまで行ってきたシミュレーションによる設計から一歩進んだ、より燃焼流体の潜在能力を引き出した設計が可能となることを期待しています。そして、日本の航空機産業だけでなく自動車産業を含めた産業界に広く貢献できればと思っています。

- ※1 総合科学技術・イノベーション会議が主導する、科学技術イノベーションを実現するために創設された国家プログラム。従来の府省や分野の枠を超え、研究開発課題ごとにPD(プログラムディレクター)を選定し、基礎研究から実用化・事業化までを見据えて推進していく。
- ※2 CAE(Computer Aided Engineering): 実際に物を作る前にコンピューター上でシミュレーションし、分析する技術。試作や実験の回数を減らすとともに、さまざまな問題を予想し、製品の設計、製造、工程設計の事前検討の支援を行う。



噴流浮き上り火炎の構造

# 航空新分野創造

CO<sub>2</sub>の排出を抑え、循環型社会を実現させるために不可欠な水素利用技術。JAXAにおける水素利用技術について、次世代航空イノベーションハブの小島孝之主任研究開発員に話を聞きました。

## 水素利用技術



JAXAで研究中の極超音速予冷ターボジェットに使われている熱交換器。伝熱管部分は、温度差による部材の変形も考慮した形状になっている。

### 航空分野におけるCO<sub>2</sub>削減の必要性

地球の平均気温が徐々に上昇する現象、いわゆる地球温暖化は、人類全体にとって大きな問題となっています。地球温暖化の原因とされるCO<sub>2</sub>などの温室効果ガスの削減は、将来の気温上昇を防ぐために取り組まなければならない課題です。2015年に開催された環境に関する国際会議である「気候変動枠組条約第21回締約国会議(COP21)」でも、温暖化対策の国際的な取り組みを定めた「パリ協定」が採択されるなど、CO<sub>2</sub>削減の必要性は世界的にも認識されています。

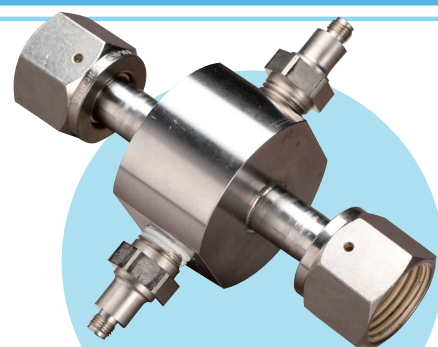
全世界でのCO<sub>2</sub>排出量のうち輸送分野が占める割合は14%で、航空分野の割合はその中で11%、全体から見れば1~2%程度に過ぎません。しかし、ハイブリッド車や電気自動車など、航空以外の輸送分野ではCO<sub>2</sub>排出量削減の取り組みが着実に進んでおり、近い将来においては航空分野のCO<sub>2</sub>排出量割合が大きくなることが考えられます。また、国際民間航空機関(ICAO)でも、CO<sub>2</sub>排出に厳しい制限を設けています。こうしたことから、航空分野でもCO<sub>2</sub>排出を抑制する技術の研究は必要不可欠なのです。

### 日本の強みを活かして水素利用技術を確立する

CO<sub>2</sub>排出の主な原因は、石炭や石油などの化石燃料を燃やすことであり、ジェット燃料をは

じめとする航空機燃料も化石燃料がほとんどです。CO<sub>2</sub>を排出しない、あるいは排出量の少ない燃料に置き換えることで、CO<sub>2</sub>排出量を減らすことができます。航空分野に限らず、化石燃料の代替燃料として注目されている燃料が水素です。水素は水を電気分解することで容易に生産できるほか、工業用ガスの精製過程で発生します。小島孝之主任研究開発員は「国内の太陽光発電や風力発電によって水素を大量生産する計画があり、オーストラリア等の海外からの水素輸入と合わせ、将来的に水素の価格は安くなるでしょう」とコスト面でもメリットが大きくなると語ります。

水素の発熱量は、質量あたりではジェット燃料の3倍ですが、体積あたりでは4分の1しかありません。つまり、軽いけれど保存するためには大きな空間が必要なのです。軽量という水素のメリットを活かしつつコンパクトに貯蔵するためには、軽くて大きな圧力にも耐えられる貯蔵タンクが必要で、その材料として複合材料が適しているのです。JAXAでは、航空機の軽量な構造材料として複合材料の研究を行っていますし、打ち上げロケットに使用するための貯蔵技術や利用技術も持っています。JAXAが持つこれらの技術に加え、リニアモーターカーで使用する超電導モーター技術や車両用の貯蔵燃料電池技術など、日本が持つ技術を組み合わせる研究を行っています。



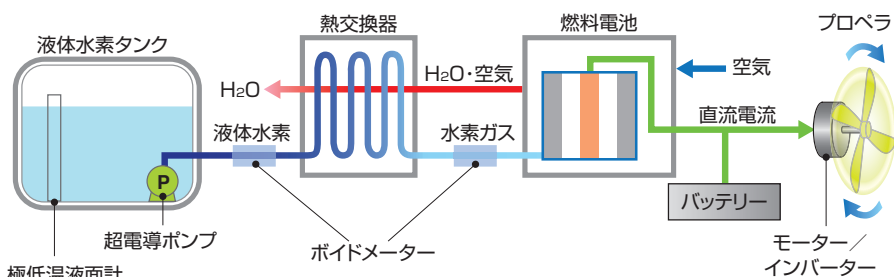
液体水素の流量制御に用いられる極低温ポイドメーター

### 水素利用技術へのJAXAの取り組み

JAXAの水素利用技術の一つが、「極超音速予冷ターボジェットの研究」です。これは2006年から開始されたもので、マッハ5で飛行する極超音速機用エンジンの研究です。このエンジンでは、水素を燃焼させて推進力を得るだけでなく、取り込んだ空気の冷却(予冷)にも利用する点が特徴となっています。

もう一つの水素利用技術は、「液体水素利用超電導燃料電池推進系の研究」です。これは、液体水素のタンクから超電導ポンプを使って燃料電池に水素を供給し、燃料電池で発電した電気でファンを回して推進力を得るシステムです(左図参照)。このシステムは、「航空機用電動推進システム技術の飛行実証(FEATHER)」(FLIGHT PATH No.9参照)で培った電動推進航空機に組み込んで実験を行うことも検討しています。また、極低温状態で運ばれる液体水素の流量を検知するための二相流センサー(極低温ポイドメーター)の研究開発も行っています。

このように、JAXAは来るべき水素社会に適合する航空機を実現させるためだけでなく、水素を効率良く利用するための研究を進めていきます。

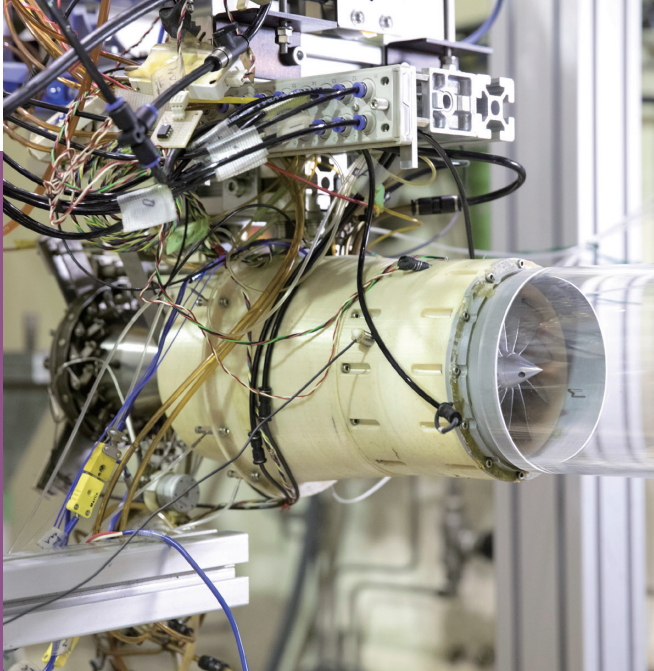


液体水素を利用した超電導燃料電池推進システムの概念図

タンクから超電導ポンプで送り出された液体水素は、熱交換器で水素ガスとなって燃料電池へと送り込まれ、水素と空気の化学反応によって電気を生み出す。

# 超小型ターボファンエンジン技術

ジェットエンジンの研究では、実機に搭載されるエンジンは実験設備も限られ、実験コストも高くなります。手軽に実験が可能でコストも安い、そんな研究者のニーズから生まれた研究用超小型ターボファンエンジンを紹介します。



NE2013をATFに配置して行う試験の様子。ファンの回転状態を確認するため、前方は透明の樹脂で作った部品を用いている。

## ■世界最小クラスのジェットエンジン

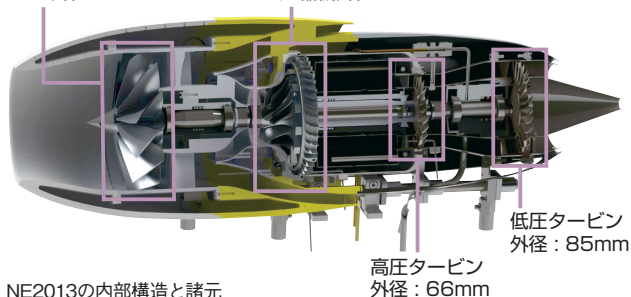
2011年度から開始した「小型ターボファンエンジンの適用研究」では、成果の一つとして小型ターボファンエンジン「NE2013」を開発しました。NE2013は、世界的に広く作られているKJ66系統のターボジェットエンジンをベースに、JAXAの知見を活かした変更を加えて開発したターボファンエンジンです。旅客機に搭載されるターボファンエンジンと同等の構造にするため、コアエンジンのメインシャフトを二軸構造にし、それに合わせて圧縮機や軸受などを変更しています。またフロントファンなどについては新規設計し、低圧タービンを追加したものです。

最大推力は176.4N、バイパス比は3。大きさはファン直径120mm、長さ487mm、質量は約10kgと非常に小型で、燃料はジェット燃料または灯油と、取り扱いも容易です。

## ■超小型エンジン研究開発の背景

NE2013のような超小型のターボファンエンジンをJAXAが開発する理由は、航空機用ジェットエンジンの研究開発に役立てるためです。近年ではコンピューターの性能向上により、CFD(数値流体力学)のようにコンピューター上でモデルを作り、燃焼状態をシミュレーションすることもできるようになっていますが、部品一つをとっても、試作品を作製して実際に動作させる試験も必要不可欠です。しかし、実機のターボファンエンジンで試験を行うとなると、1枚のファンブレード(ファンの羽根)を作るだけでも数百万~数千万円もの費用が必要となってしまいます。そのため、いくつかの試作モデル

ファン回転数 : 30,000rpm	圧縮機回転数 : 126,000rpm
ファン圧力比 : 1.2	圧縮機圧力比 : 2.7
ファン外径 : 120mm	圧縮機外径 : 66mm



NE2013の内部構造と諸元

を作って試すことはできません。

NE2013は実際に使用されているターボファンエンジンのスケールモデルです。研究用の試作部品も低コストで作製可能であり、限られた予算の範囲内でもトライ&エラーを繰り返す試験ができます。例えば、3Dプリンターで作製した部品を使って実験することもできます。現在、JAXAではNE2013を使用し、可変機構を組み込んだタービン静翼の評価や、エンジン制御プログラムの研究など、数々の試験を行っています。

## ■量産化も夢ではない超小型エンジン

NE2013の試験は、実際に航空機が飛行する上空の環境を模擬できる高空性能試験設備(ATF : Altitude Test Facility)で行われています。日本国内のATFで実機サイズのエンジンの試験を行うことは困難ですが、小型のNE2013であれば容易に行えるのです。ATFでの試験は今後も継続して行われます。並行して、通常の風洞内でNE2013を稼働させる試験も検討されています。

NE2013は、研究機関であるJAXAとしてはTRL\*の高い研究です。その技術は、新潟市が進めている「NIIGATA SKY PROJECT」(下記囲み記事参照)でも利用されています。NIIGATA SKY PROJECTのような取り組みを通じ、将来的にNE2013が日本企業によって商品化・量産化されることを期待しています。現時点でも航空機に搭載されるジェットエンジンに比べれば、非常に低コストで作製できるNE2013ですが、量産化されることにより1台あたり数十万円台で販売することもできるようになるでしょう。そうなれば、日本の航空エンジン研究が充実するだけでなく、無人航空機への組み込みや大学などの機関が教育目的で使用できるようになるはずはです。

## NIIGATA SKY PROJECT

新潟市が地域活性化の一環として行っている、新潟地域における産学官連携による航空機関連産業支援の取り組みが、NIIGATA SKY PROJECTです。新潟市の地元企業が得意とする機械金属加工技術を活かし、低騒音で効率の良い小型ジェットエンジンの開発と、100kgの貨物を運搬できる貨物無人飛行機(カーゴUAS)の開発を行っています。

詳しくは、新潟市のウェブサイト(<http://www.city.niigata.lg.jp/>)をご覧ください。

\* 技術成熟度レベル(Technology Readiness Level)。技術の実用に向けた実証度を1から9のレベルで示した指標。数字が大きいくほど実用に近い技術とされる。

## Topic 1 SAVERHの飛行試験を行いました

2016年12月下旬から2017年1月中旬にかけて、株式会社島津製作所と共同で、調布飛行場および名古屋空港においてJAXA実験用ヘリコプターによる「パイロット視覚情報支援技術(SAVERH)の研究」の飛行試験を7回にわたり行いました。SAVERHは、災害救援や救急救命など夜間や悪天候時でも、障害物などの情報をパイロットに提供することで安全な飛行を行うための技術です。

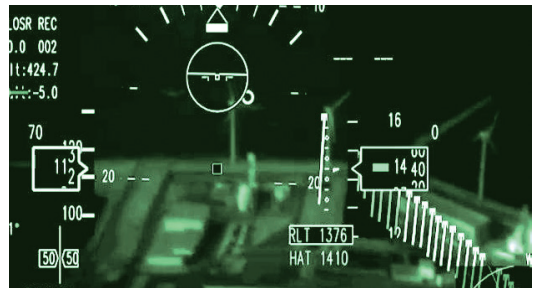
今回の試験では、センサーポッド※に新しく搭載された装置のうち、夜間でもクリアな画像を得ることができるナイトビジョンシステム(NVS)カメラと、対象物との距離を計測するレーザー距離計の評価を主に行いました。そのため、日中および夜間での飛行試験を実施し、都市部と山間部における観測結果の違いを検証しました。

天候不順の影響により、フライト回数は予定していた回数よりも少なくなりましたが、1回につき2時間前後の飛行を行い、水平飛行や旋回、上昇・下降、加減速などさまざまな状況で機器の動作確認や表示の確認を行いました。今後、試験で得られたデータを解析し、システムに改良を加えて信頼性を高めていきます。2017年度には、北海道大樹町での飛行試験も計画しています。

※カメラやセンサー類を統合した装置。航空機の外部に取り付けて、情報を収集する。



機内から見た夜間飛行の様子



レーザー距離計が計測した距離から地表物の高さを表示するSAVERHの表示画面

## Topic 2 滑走路の状況を計測する雪氷モニタリングセンサーの実証試験を開始しました

2016年12月、北見工業大学(北海道北見市)の構内において、JAXAを中心に研究開発を進める雪氷モニタリングセンサーを屋外の地面に埋め込み、センサーのガラス面に積もった雪の厚さや雪質を検知する実証試験を開始しました。雪氷モニタリングセンサーは、積もった雪氷にレーザー光を当てることで、積雪量や雪の密度などを計測する装置です。計測した情報から推測した滑走路の滑りやすさをパイロットに通知することや、積雪の厚みを通知することで適切な除雪のタイミングを知ることができます(詳しくはFLIGHT PATH No.11参照)。

2017年度まで試験を実施し、2018年度以降に北海道内の道路に雪氷モニタリングセンサーを埋め込み、動作を確認する実証試験を計画しています。



雪氷モニタリングセンサーを設置する様子

## Topic 3 航空医学実験隊との連携協定を締結しました

2016年11月29日、JAXA航空技術部門は防衛省航空自衛隊航空医学実験隊との連携協定を締結しました。航空医学実験隊は、航空自衛隊内において航空に関する医学および心理学上の各種調査研究、実用試験を行う部隊です。

今回の連携協定により、パイロットの生体情報計測技術や飛行中のパイロット支援技術、パイロットのワークロード(仕事量、作業負荷)測定技術、ヒューマンエラー評価技術などの研究において、航空機ならびにパイロットの安全を確保するための、より高い技術の確立を目指した交流を行っていくこととなります。



別宮慎也航空医学実験隊司令(左)と伊藤文和航空技術部門長(右)による協定署名式の様子



表紙画像：衝突実験装置の内部。高速で射出されたゼラチンが管内を進んでターゲットに激突する。中央に見えるターゲットは、高効率軽量ファンブレードの試作品(上)の前縁(リーディングエッジ)部分

