

JAXA 航空マガジン

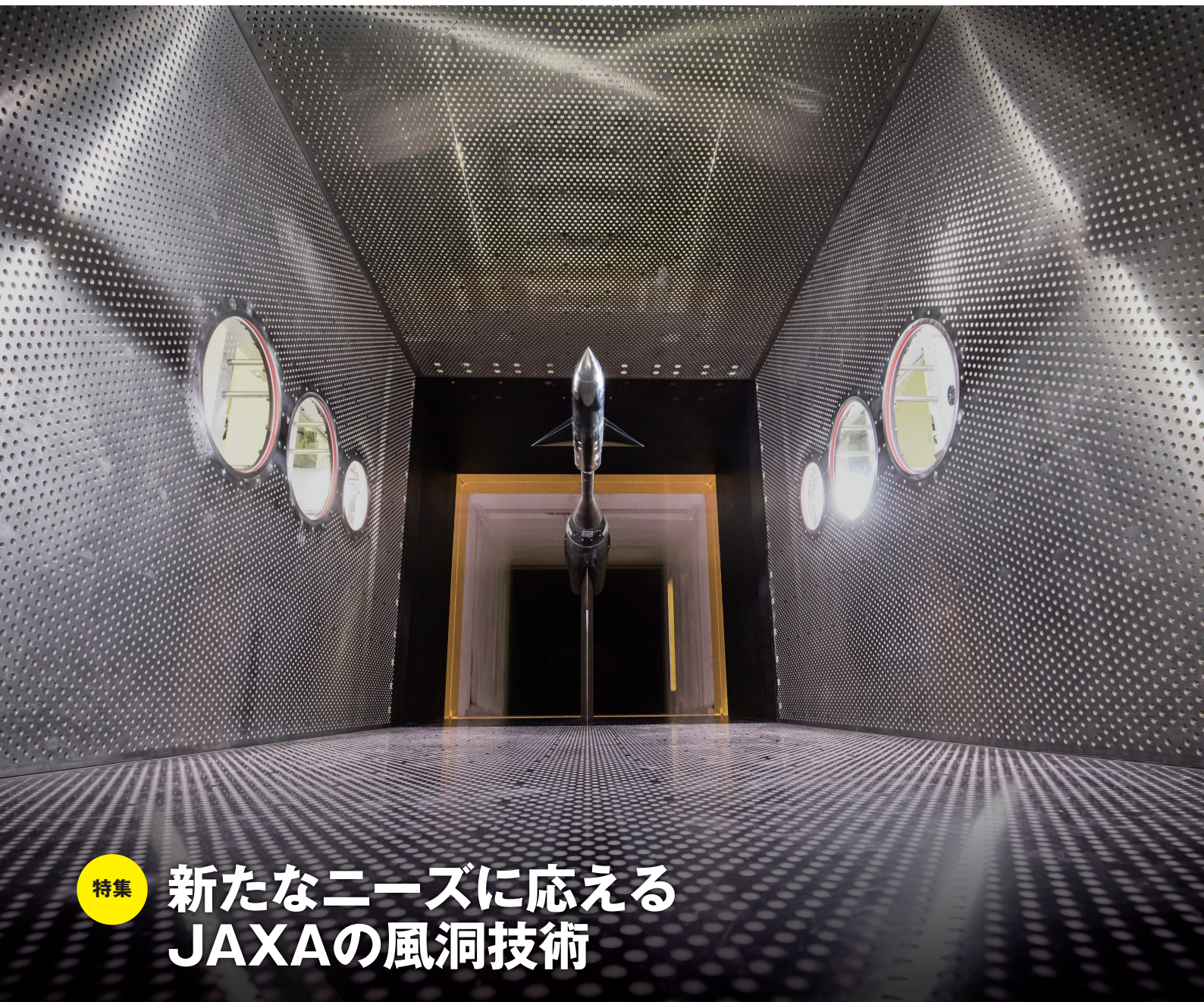


FLIGHT PATH

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

2017
AUTUMN

No.18
航空技術部門
www.aero.jaxa.jp



特集

新たなニーズに応える JAXAの風洞技術

2 特集

新たなニーズに応える
JAXAの風洞技術

8 航空技術部門へのメッセージ

JAXAの環境をフル活用し、航空産業界に
インパクトを与える粒の大きな研究開発を

11 Kármán line

5 特集 関連技術

天秤自動較正技術、暗騒音低減技術、
将来計測技術

10 リレーインタビュー

「超音速旅客機も再突入カプセルもきっかけは風洞でした」

12 FLIGHT PATH TOPICS

JAXAの 風洞技術

浜本 滋

空力技術研究ユニット
ユニット長

「風洞」とは人工的に作り出した空気の流れの中で、測定部に設置した模型に加わる力や模型のまわりの空気の流れを計測するための試験設備です。風洞の歴史は古く、1903年に人類初の有人動力飛行に成功したライト兄弟も、飛行実験に向けて風洞による試験を何度も繰り返していました。JAXAの風洞は日本の航空機研究を支える技術基盤を形成する大型試験研究設備として大きな役割を果たしてきました。より安全でより高性能な航空機を設計するため、風洞は今日も常に新たなニーズに応えることを要請されています。風洞はどのような変革を求められているのか、JAXAの風洞技術について浜本滋空力技術研究ユニット長に話を聞きました。

風洞は航空機研究の 基盤技術

——調布航空宇宙センターには現在、14の風洞があります。この地に最初の風洞が造られたのはいつ頃のことですか。

戦後GHQによって禁止されていた日本の航空機研究は1952年に再開可能になりましたが、7年間のブランクを埋めるため、早急に試験設備を整える必要がありました。風洞を設置し維持するには膨大な費用がかかるため、JAXA航空技術部門の前身である航空技術研究所(後に航空宇宙技術研究所に改称)に集約して設置し、関連行政機関や大学、企業などへ供用することが決められたのです。最初に計画されたのが2m×2m遷音速風洞で、1960年に完成しました。遷音速風洞は、ジェット機の巡航時の速さである遷音速(音速=マッハ数1前後の速さ)での空力特性の把握に用いるもので、プロペラ機からジェット機の時代への変化を見据えたものでした。その後1961年には1m×1m超音速風洞が、1965年には6.5m×5.5m低速風洞が完成しました。

——航空機の研究体制を整備するには、やはり風洞が必要不可欠な設備だったのですか。

そうですね。設計した航空機を実際に飛ばす前に、風洞で安全性を確認する必要があります。当時としては研究の遅れを取り戻したいという意図があったと思いますが、とはいえ、風洞というのは技術の塊です。風洞を造ったからといって、すぐに良い成果が出るということはありません。風洞の壁とか模型の支持棒の影響をどのように補正するか、実際に航空機が飛行している状態に近いデータを取得するにはどうしたら良いかといった基礎的な研究が必要でした。当時の航空宇宙技術研究所の研究者の顔ぶれをみると、空力技術分野の頭脳が集まっており、最初のおよそ10年間は風洞をきちんと使いこなすために注力していました。そこからの技術が現在に受け継がれているのです。

——日本の航空機開発とJAXAの風洞との間にはどのような関係がありますか。

過去一番大きい研究開発で外せないものは短距離離着陸(STOL)機「飛鳥*1」です。また、航空機だけでなく、宇宙往還機「HOPE」や極超音速飛行実験「HYFLEX」など、宇宙機の開発も経験しました。最近では、民間航空機のMRJにもたずさわりました。日本の航空機開発のほぼ全てに調布の風洞が関わってきま

た(図参照)。

実機を開発するという具体的目標があると、技術研究に対するモチベーションも高くなります。実際に飛ばすためにはこういうデータが必要になるということが明らかになりますから、そのための風洞の試験技術や計測技術なども研究開発が進み、それらの新しい技術が飛行試験の成功につながりました。私自身プロジェクトには直接参加していなかったものの、風洞技術者の立場でいくつかの実践的な風洞試験を経験し、それが現在につながっています。

——MRJの開発ではどのようなことが必要でしたか。

三菱重工業株式会社の担当者の方が来て最初におっしゃったのは、「現在の遷音速風洞が出すデータの精度では開発ができません。ですから試験データの精度を上げる努力をしてください」ということでした。その要望を聞いて私たちは何とかしなくてはいけないと感じました。それまでも日本の航空機開発では必ずJAXAの風洞が使われてきましたが、MRJのような民間機では安全性の他に燃費の良さが要求されるなど設計が複雑になり、より細かい点まで風洞試験で確認する

*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。

必要があったのです。そこで試験データの高精度化という取り組みが始まり、その結果信頼性の高いデータを提供することで、MRJの開発にも貢献できたのではないかと考えています。MRJの開発で主に使用したのは遷音速風洞で、離着陸性能の確認では低速風洞も使用しました。明確な技術要求に対してきちんと答えを出していくため、JAXA側の研究者もそれまで以上に集中して研究開発に取り組みました。

風洞とCFDは互いに補い合う関係

——風洞には100年以上の歴史がありますが、現在の航空機の設計における風洞の位置付けに変化はありますか。また、現在の風洞の課題とは何でしょうか。

より安全でより良い性能の航空機を造るために必要な設備という点で、風洞の位置付けは変わっていません。ただし、現在では以前に比べてきわめて高い性能や安全性が要求され、機体の設計も複雑化しています。このような状況でより高い精度で、より多くのデータを、より短い時間で出さなくてはならないという課題を抱えています。航空機の設計の複雑化という現在のトレンドを見ると、風洞試験に割かれる時間は削られながらも、風洞に要求されるデータ数はこれからもどんどん増えていくと私は思っています。もちろん風洞だけで設計に必要なデータを賄うことはできず、CFD(数値流体力学)の力を借りる必要があります。1980年代初頭に初飛行を行ったボーイング767は風洞試験がメインで開発された機体でしたが、1990年代に開発された777ではCFDが設計に用いられるようになりました。その後、CFD技術はさらに進歩して質的にも量的にもかなりのことができるようになり、現在ではそれまで風洞試験で行っていた空力性能の予測の多くの部分をCFDで行う時代になりました。

——そうすると、風洞はその使命を終えて、CFDにとって代わられるということでしょうか。

いずれそのような時が来るとは思いますが、まだまだ時間がかかると思います。巡航時の機体の基本的な空力特性はCFDで十分に解析することができますが、離着陸で大きな迎角を取った時に翼の面上の流れが剥がれる現象や、抵抗の原因になる境界層の遷移などの解析はまだ完成されていません。また、機体

の操縦性の設計に必要な空力データベースを作成するためには、機体の形状や姿勢を少しずつ変えてデータを取得する必要があり、そのような部分は今のところ風洞試験の方が効率的です。ただここで重要なのは、お互いの優劣を評価することではなくて、機体の設計で風洞試験とCFDのそれぞれの得意な部分をいかにうまく組み合わせることで効率的に設計を進めるかです。

また、風洞とCFDでお互いを補完し合う互惠関係も重要です。現状のCFDは基本的にはモデル化の世界です。CFDの信頼性を担保するためには、風洞試験データに基づく計算結果の妥当性確認が必要になります。風洞試験データの信頼性が高いことでCFDの信頼性も上がります。一方、CFDを用いて風洞試験データに含まれる風洞壁の影響や模型支持の影響を補正し、精度を高めることができます。風洞とCFDの関係は、航空機の設計に対して単純に試験を分担するという以上に技術的にリンクしています。

実際の飛行試験データも必要

——実験用航空機での飛行試験と風洞試験、そしてCFDの関係というのは、現在どのようになっているのでしょうか。

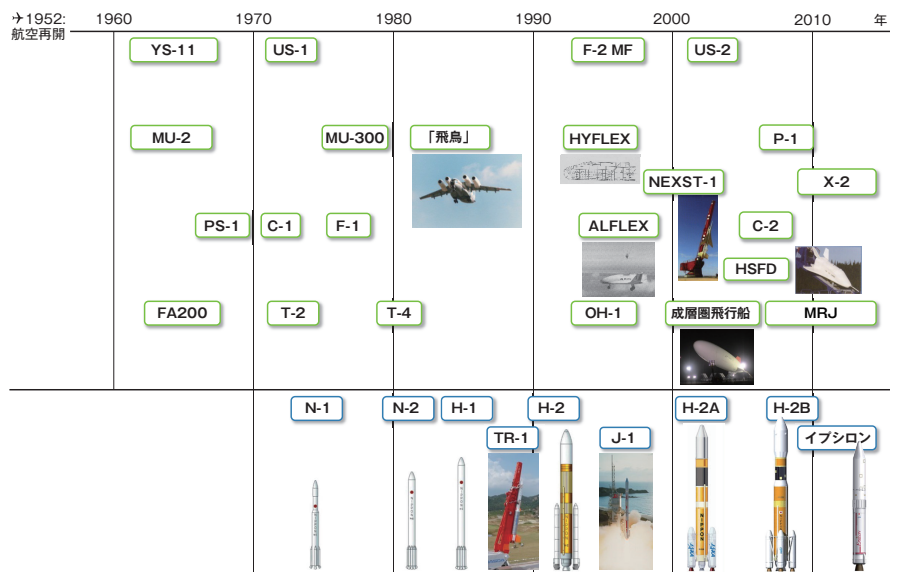
より良い機体を設計するためには、風洞試験、CFD、飛行試験の三つが一体になる必要があります。風洞試験やCFDの目的の一つは、実際の機体の飛行を予測することで、予測

精度を上げるためには飛行試験のデータも必要になります。現在の風洞はレイノルズ数が2桁低い、つまり実機の数十分の1の模型で試験をしています。実機の飛行環境における空力データは実フライトでなければ把握できません。また、航空機の総合性能、例えばトリムとか舵効き、上昇性能といったものは実フライトでなければデータが得られません。風洞試験にしてもCFDにしても、シミュレーションの積み上げによって性能を推測しているので、総合的な性能をフライトで把握することは重要です。

風洞試験とCFDは、かなり理想的な環境でデータを取得していますが、飛行試験は計測が難しく、風洞試験やCFDと比較できるようなデータを飛行試験で取得することはまだ十分できていません。そこで現在、JAXAでは実験用航空機「飛翔」を使って風洞試験やCFDと比較できるデータを取得するための技術開発にも取り組んでいます。

——風洞試験とCFDを融合させたハイブリッド風洞という考えもありましたね。

DAHWIN(デジタル/アナログ・ハイブリッド風洞)は先を見据えた技術として、デモンストレーションも兼ねて開発しました。これまでJAXA内部のプロジェクトでしか使われていませんが、従来の試験のやり方から一歩進んで、かなり効率的にデータを取得し、設計に反映できるようになっています。今後はこの考え方を遷音速風洞だけでなく、低速風洞や超音速風洞などにも広げたいと思っています



図：JAXA風洞での航空機・宇宙機用実験機・ロケットの開発実績

ます。さらにJAXAとしてはCFDにしても風洞試験にしても、エンジン系の試験にしても、ユーザーにとって使いやすい環境を統合シミュレーションプラットフォームとして提供したいと考えています。日本の航空機産業の発展を基盤技術で支えるのが私たちの役目です。それをきちんと目に見える形にすることを目指しています。

風洞の計測技術は次のフェーズへ

——風洞の計測技術の今後について伺います。

多様化・複雑化する試験ニーズに対応すると同時に、CFDとの連携の中で、CFDの妥当性確認に必要なデータを提供するために新しい試験技術が必要です。CFDの技術も日進月歩で進化しており、より精緻な計算を行うとすると、その計算の妥当性確認のためには風洞試験データもより精緻でなくてはなりません。これまで測れなかったものを測るといったことも必要です。JAXAでは、世の中の動向と歩みを揃えて、これまでPIV^{※2}(粒子画像流速測定法)やPSP^{※3}(感圧塗料)といった先進技術を開発してきました。圧力や速度を測るには、いわゆるプローブというものを使っていましたが、これでは“点”でしか計測できませんでした。PIVとかPSPは圧力や速度を“面”の情報として得られるという画期的な技術です。この20年間でこれらは実用化され、特にPSPではJAXAは世界のトップを走っています。この技術を使えば、CFDが比較対象とする風洞試験データも面として得ら

れますから、解析の高精度化につながります。MRJの開発でもPSPが使われました。これまで非常に少ない情報量に基づいて精度を評価していたものが、何百倍もの大量の情報で評価できるようになり、最適解を求める際の誤差がかなり小さくなってきました。

——今後の計測技術の課題にはどのようなものがありますか。

点から面の計測へ、そして“空間”の計測へというのが大きな流れです。ここ20年間はPIV、PSPのような面計測の技術を確立するフェーズでした。次のフェーズを考えた時、求められているのは空間、つまり3次元の圧力分布だと思っています。風洞では測定部に置かれた模型のまわりを空気が流れますが、この空気が流れている測定部内の空間の圧力分布が知りたいのです。そのための新しい技術を現在考えているところです。それから、面計測の分野でも模型の表面を測る新しい技術を考えています。例えば模型に組み込んだセンサーで変形が測れないか、あるいは模型表面に何か工夫をすることによって表面の摩擦力を測ることができないかといったことです。

——計測精度を上げるために取り組んできたことはありますか。

天秤の較正技術ですね。風洞では模型と、模型を測定部に設置するための支持装置の間に天秤を装着し、これで模型にかかる空気力を測ります。空気力の計測精度は天秤の較正試験の精度で決まるといわれています。この技術はかつて海外に後れを取っていましたが、現在はキャッチアップに成功し、海外から高く評価されています。

較正精度を高めていくためには、大きなことから小さなことまでいろいろな対策が必要です。それらを一一つ、つぶしていかなければなりません。例えば自動較正装置はコンクリートの基礎の上に設置していますが、当初、時間の経過でコンクリートが収縮し、長期間の計測では基準が動いてしまうというトラブルがありました。現在はレーザー変位計の支柱を作り直し、基礎を強固にした上に装置とは独立した形にしています。こうした細かいことにまでこだわらないと、世界に誇れる精度は実現できないのです。私たちはJAXAの天秤自動較正装置を国際的なワークショップで紹介しています。非常に注目され、自分のところの天秤を較正してほしいというオファーも何件か届いています。

——ノイズ(騒音)の少ない風洞についても社会的ニーズがあるのではないですか。

航空機の低騒音化は世界的なトレンドです。空港周辺の騒音を低減し、環境に優しい機体を作るためには音を減らす技術が必要になります。騒音が減ったかどうかを調べるためには、F₁Q₁ROHプロジェクト^{※4}のように実際に飛行試験で測定する方法もありますが、技術開発の段階では風洞試験によって地上で評価する必要もあります。離着陸騒音を評価するため、2m×2m低速風洞では風洞自体のノイズを減らす取り組みも実施しました。

社会のニーズに応える

——これからの風洞について、どのようなことを考えていますか。

CFDの妥当性確認のためのデータ取得や流体現象の解明、要素技術の実証のための利用なども含めて考えれば、風洞は今後も絶対に必要です。JAXAの風洞は建設から相当時間が経過し老朽化が進んでいることから、次世代のために新しい風洞を考える時期に差しかかっています。現在、どのような風洞が求められていくのかを議論しているところです。

——風洞はメーカーや大学にもあるわけですが、JAXAの風洞はどのような役割を持っていると考えていますか。

航空機の設計に必要な試験のデータ数は増える傾向にあるので、それに対応できるような、より高度な試験技術を導入して、精度とデータ生産性の双方を高めた試験をできるようにするのが私たちの使命と思っています。その先に、先ほど申し上げた統合シミュレーションプラットフォームがあります。また、JAXAの風洞にたずさわっている人は皆がそうだと思いますが、JAXAは日本の風洞技術の中心であると自負しています。ここからメーカーや大学に技術が広がっていますが、今後もその技術レベルを維持したいと考えています。また運用の面でも、すでに15年程前にISO9001の認証を取得して品質管理にも取り組んできました。風洞が正しいデータを出し続けるためには、いろいろな管理をしていかなくてははいけません。JAXAの風洞は、国内の民間企業や大学、研究所が所有する風洞のリファレンスとなる我が国の基準風洞として、日本の風洞技術の中心であるJAXAが品質を維持していく役割を担っていると考えています。

JAXAのさまざまな風洞群はこちらでご覧ください。
<http://www.aero.jaxa.jp/facilities/windtunnel/>



遷音速風洞、計測カート内にて
 空力技術研究ユニット 浜本滋ユニット長

※2: 粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry)。トレーサーと呼ばれる細かい粒が、平面状に照射したレーザー(レーザーシート)を通過する瞬間を撮影し、異なる時刻に撮影したレーザーシート上のトレーサーを比較することで、気流の速度分布を算出する計測技術。

※3: 圧力によって発光する感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint) を塗布した模型に紫外線を当てると、圧力の差に応じて変化する赤色発光の度合いから圧力を算出する計測技術。

※4: 機体騒音低減技術の飛行実証プロジェクト。高揚力装置や降着装置に騒音低減デバイスを装着することで、機体騒音の低減を目指す研究。

現在、JAXA で研究や検討を進めている風洞の新しい計測技術について、精度の高い計測を目指す「天秤自動較正技術」、静かな風の流れを作る「暗騒音低減技術」、そして、PSP や PIV のさらに先を見据えた JAXA が技術確立を目指す「将来計測技術」という3つの技術を紹介します。

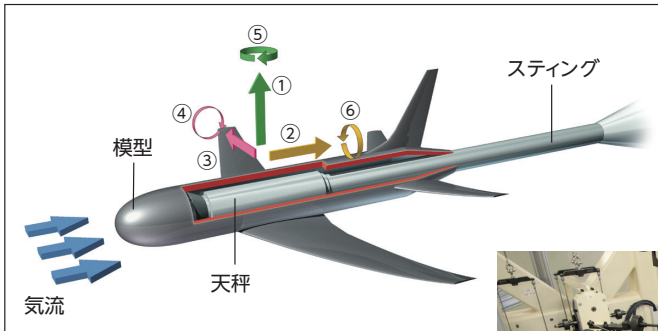
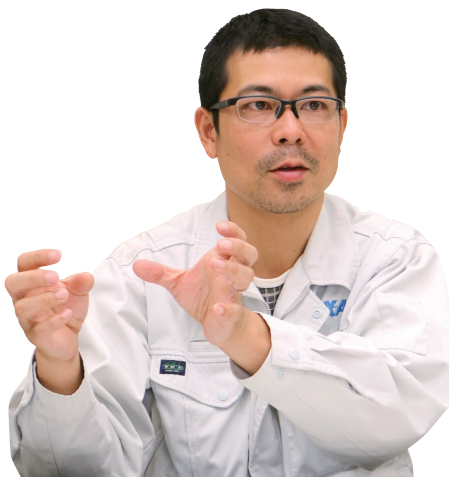
天秤自動較正技術

空気を正しく計測するために

六分力天秤(以下、天秤)は、模型にかかる空気を計測する風洞試験の重要な装置です。支持棒と模型をつなぐ位置にあり、通常は外側から見ることはできません。模型には気流によって、三つの力①揚力②抵抗(抗力)③横力(横揚力)と、三つの重心まわりのモーメント④ピッチングモーメント⑤ヨーイングモーメント⑥ローリングモーメント——すなわち六分力がかかります。天秤は、こうした力やモーメントを受けて天秤が変形した量を、歪みゲージによって電圧として出力する機能を持っています。出力された電圧値と六分力を関連付けるためには、“較正”が必要となります。較正では、天秤にさまざまなパターンで六分力方向に荷重をかけて、その時の電圧を計測しなければなりません。

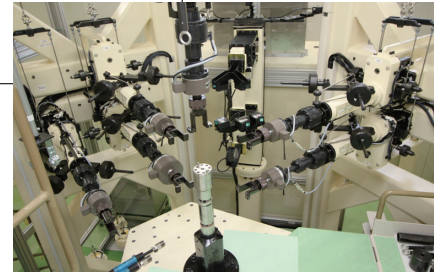
古くは、JAXA内部で単荷重較正を行っていました。単荷重較正とは、天秤に対して一方の力やモーメントのみの荷重をかける方法です。しかし、実際の試験では、力やモーメントが同時に加わり、互いに干渉しあうことで計測精度に影響を及ぼします。そこで、力とモーメントを同時に加えて較正する複合荷重較正を、天秤のメーカーに依頼していました。メーカーによる較正は、「手作業で荷重をかけていたため、受け渡しの期間も含めると較正に1~2カ月もかかっていました」と空力技術研究ユニットの香西政孝研究開発員は語ります。

機械部品である天秤は、力やモーメントを



左：六分力天秤にかかる力

右：自動較正装置に配置された天秤。較正の際には、天秤にキャルボディを装着する。アクチュエーターの配置を集中させたことで、作業効率が向上した。



繰り返し受けることで、少しずつ計測値にずれが生じます。また、風洞試験によって計測したい六分力の荷重範囲が異なります。ですから、適切な荷重条件での較正を、可能であれば試験ごとに行うことができれば理想的です。複合荷重較正を、短い時間で実施することは、天秤の精度を向上させることになるのです。そこで、JAXAは2010年にそれまでの天秤に関する知見を集約し、較正時間の短縮と計測精度の向上を実現する「自動較正装置」を開発しました。

作業時間短縮や計測精度向上につながる機構や技術

JAXAの天秤自動較正装置は、天秤を設置する支持装置と天秤に負荷を与える荷重負荷装置、天秤の変位量を計測する高精度レーザー変位計、天秤温度制御装置、ステーキングたわみ検定用支持装置などから成り立っています。

較正作業では、風洞模型の代わりとなるキャルボディを天秤に取り付け、支持装置に設置します。荷重負荷装置には、六分力に対応した6本の電動アクチュエーターが配置されており、前後に動くことで接続したキャルボディに荷重を加えることができます。手作業に比べて、加える荷重の大きさや方向を短時間で変更できます。加えられた荷重量は、各ア

クチュエーターに装備された高精度ロードセルで検出します。一方、天秤の変位量は、キャルボディの位置と角度をレーザー変位計で計測します。

天秤自動較正装置における特長の一つに、パラレルリンク機構の採用が挙げられます。較正を行う際、天秤に荷重を加えると天秤が変形し荷重方向が変化しますが、この変化を3本のアクチュエーターからなるパラレルリンク機構により、すばやく正確に元の位置に戻す(リポジショニング)ことができます。リポジショニング機能により、1パターンの計測をおよそ5分程度で完了させ、準備や撤収の作業を合わせても最短で3日、長くて5日で較正を終えることができるようになりました。

風洞試験では、流れる空気が持つエネルギーによって温度が上昇します。自動較正装置では、キャルボディと支持部の温度を別個に10~50℃の範囲で制御することが可能で、遷音速風洞試験と同じ温度条件での較正ができるようになりました。試験ごとの温度条件と同期できることで計測精度が向上し、補正などに必要な時間の短縮にもつながります。

JAXAは、これまでも、これからも、日本の風洞技術において中心的な役割を担っていくべき立場です。天秤自動較正装置開発でのノウハウ面も含め、企業や大学などの研究開発現場における計測精度向上などに役立ててもらいたいとも考えています。

香西 政孝

空力技術研究ユニット
研究開発員

暗騒音低減技術

機体騒音を精密に計測するために

空港周辺の騒音は世界的に非常に大きな問題であり、規制は年々厳しくなっています。航空機を原因とする騒音のうちエンジンの音は、技術の進歩により大きく低減されてきましたが、それにつれて目立ってきた音が、空力騒音、いわゆる「風切り音」です。特に、エンジン出力を絞る着陸時においては、高揚力装置や降着装置(ランディングギア)から大きな音が発生します。風切り音を減らすためには、その音を計測し対策を検討しなければなりません。

風洞で音の計測を行う際、問題となるのは暗騒音です。暗騒音とは、風洞内に風を流した時に、送風機や偏流翼など模型以外から発せられる音、背景雑音(バックグラウンドノイズ)のことです。JAXAでは、「2m×2m低速風洞」を改修して暗騒音の低減化に取り組みました(図1参照)。「きっかけは、2015年から開始したFQUROHプロジェクトです」と改修を担当した空力技術研究ユニット浦弘樹主任研究開発員は語ります。機体騒音低減を目指すFQUROHプロジェクトで得られた形状の効果を確認するためには、余計なノイズのない計測環境が必要でした。

最近では、最初から暗騒音を低減した設計の風洞も登場していますが、新規の風洞建設には時間も費用もかかります。そのため、今回は既存の風洞を改修して暗騒音を減らすことになりました。改修にあたっては、まず暗騒音の発生源を知る必要がありました。JAXAがこれまでに積み上げてきた音響計測技術を用いて低速風洞内の暗騒音を計測し、そのデータを基に検討を行いました。

風洞内騒音を低減した改修ポイント

音響計測の結果、最も大きな音源は送風機であることが判明しました。しかし、費用と時間の兼ね合いから送風機の改修や交換は行わず、発生した音を伝播させないことを主眼に改修計画を立てました。その際、CFDと音響解析によって改修前後の状態を比較し、暗騒音を低減させると同時に圧力損失*1が大きくなるような、最適な低減方法を考案しました。具体的には、第一、第二拡散胴の壁をコンクリートから、厚さ5cmの吸音材を内側に貼り付けたパンチングプレートに変更しまし

た。また、偏流翼によって風の向きを90度曲げている屈曲部では、壁をパンチングプレートと吸音材に変更しただけでなく、偏流翼にも吸音材を固定しました。特に、第一屈曲部以外の全ての偏流翼では「吸音材を付けたことでできた段差にもプレートを溶接し、隙間をシール材で埋めて風の流れを乱さないようにしています」(浦主任研究開発員)。

こうした改修を加えたのち、再度風洞内部の音響計測を行ったところ、暗騒音はおおむね低減しましたが、ある周波数帯ではあまり低減効果が見られませんでした。調査すると、測定部下流にある気流を安定させるための脈動防止扉で音が発生していることが判明しました。脈動防止扉開口部の上流で壁面から剥離した風が、下流の扉にぶつかるために音が発生していたのです。風が当たる部分には、起毛材を固定することで、この部分の暗騒音を低減できました(図2参照)。

こうした改修を施した結果、改修前には聞き取ることができなかった風洞模型が発する風切り音が、暗騒音が減ったことで人の耳でも聞き取れるレベルにまでなりました。



低速風洞第一拡散胴、改修前(左)と改修後(右)。

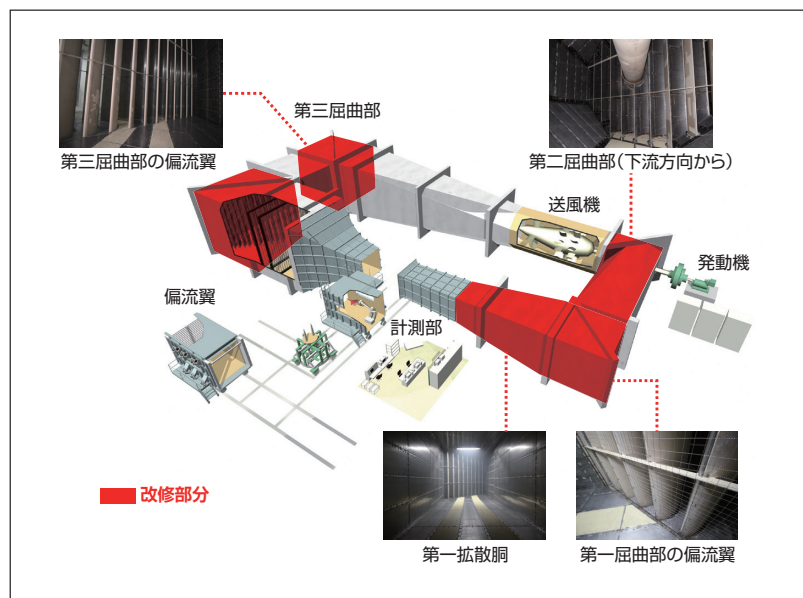


図1 2m×2m低速風洞の構造と改修ポイント

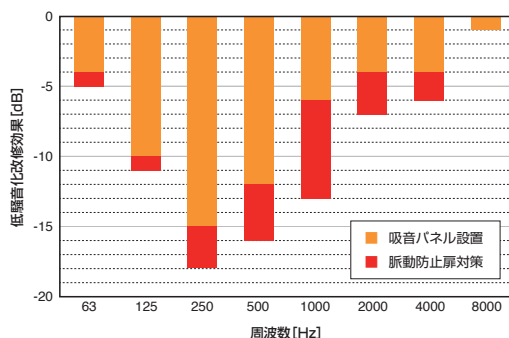


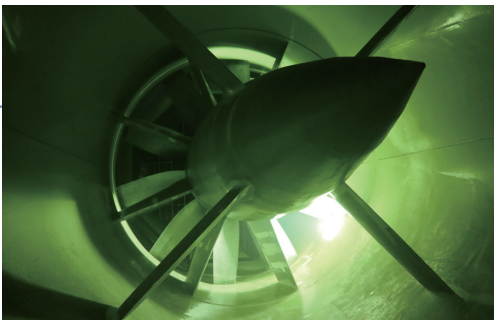
図2 低騒音化の効果。低騒音化により低減された暗騒音のグラフ。吸音パネルの設置により、各周波数において低減効果があった(グラフ中オレンジ部分)。さらに脈動防止扉への対策により、暗騒音の低減が見られた(赤色部分)。

*1: 抵抗などによって失われるエネルギー。圧力損失が大きくなれば、風洞の性能が損なわれ、最大風速の低下や気流の乱れ、気流温度の上昇などを引き起こす可能性がある。

浦弘樹

空力技術研究ユニット主任研究開発員





低速風洞の送風機

「今回、FQUROHプロジェクトにデータを提供する必要から、効果的な部分の改修を行いました。暗騒音の低減は世界的なトレンドといっても良く、今後はさ

らにノイズの少ない音響計測が求められるでしょう。そうした場合でも、今回の知見を活かして、さらなる工夫で暗騒音を低減する挑戦をしたいと思います」(浦主任研究開発員)。

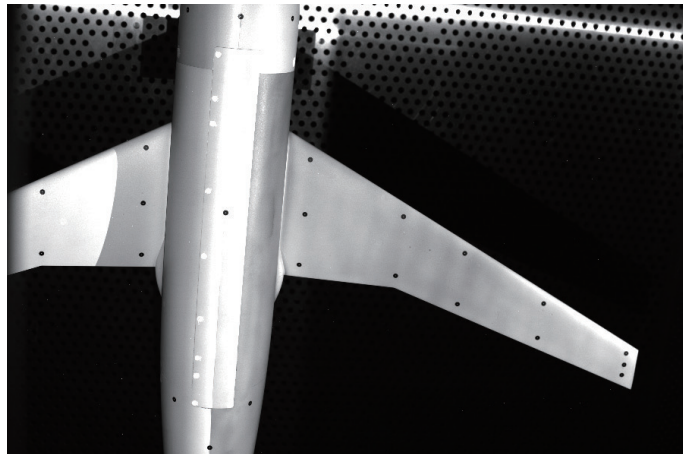
将来計測技術

これから必要とされる計測技術

JAXAの風洞計測技術は、ここ20年ほどでPSP^{※2}やPIV^{※3}といった非接触計測技術を確立してきました。これらの計測技術は、JAXAの風洞試験で頻繁に利用されています。空力技術研究ユニットの満尾和徳計画管理チーフマネージャ(CM)は、将来の計測技術に関して「今後どのような計測技術が必要となるのか、関係者で検討を行っています」と語ります。

近年の機体設計においては、燃費を向上させるために抵抗(摩擦抵抗など)を低減させた航空機が求められています。「風洞で模型表面の摩擦力計測ができれば、低抵抗機体の高度な設計が可能になるはず。まだ実験室レベルの技術ですが、摩擦力計測を大型風洞で実用化するための検討も進めています」(満尾計画管理CM)。

また、低抵抗機体では主翼のアスペクト比が大きくなり、従来よりも変形量が大きくなります。そのため、変形量計測の高精度化がますます重要になります。風洞試験や実験用航空機を使った飛行試験では、風の影響を受けた時に主翼に貼り付けたマーカーが、どのくらい動くのかを撮影して変位量を計測(右上、写真参照)していますが、さらに計測精度を向上させるため、モアレ干渉縞を利用した変形量の計測方法も検討しています。模型に投影した干渉縞は、模型が変形すると歪みます。この歪みの量から、変位量の算出が可能となります。「この方法であれば、高精度かつ高分解能で変形量を計測できます。以前はアイデアレベルでしたが、カメラの性能や画像処理技術が向上したことで実現性が高くなりました」(満尾計画管理CM)。



模型の翼や胴体に付けられた小さな黒い点がマーカー

複雑な流れ場を3次元、かついかに細かくとらえるか

旅客機の開発では、機体の低騒音化も求められています。騒音を低減するためには、機体が発する流体音の発生メカニズムを理解しなければなりません。発生源をとらえる音源計測はもとより、空間的に変動する非定常な流れを正確に計測する技術が必要になります。

そのための計測技術が、「3D-PIV」あるいは「トモグラフィックPIV(Tomographic-PIV, 以下、Tomo-PIV)」と呼ばれる技術です。医療現場で使われているCTスキャンのようなトモグラフィー(断層画像法)の技術を使うので、Tomo-PIVと呼んでいます。Tomo-PIVには、複数のレーザーシートを重ねる方法もありますが、JAXAでは流れ場全体にレーザーを照射し、複数のカメラで撮影することで空気の流れの変化をとらえる方法を検討しています。また、流れ場をさらに細かく見るための挑戦的な研究として、「マイクロPIV」が挙げられます。これは、模型表面の1,000分の1mm単位という非常に薄い領域にある境界層の中をいかに可視化するかという技術です。

Tomo-PIVやマイクロPIVによって複雑な

流れ場を詳細に計測できるようになれば、CFD(数値流体力学)の数値モデル構築や検証に利用することができ、CFDの発展にも役立ちます。

「その他にも、MEMS^{※4}やPE^{※5}といった技術が計測に使えないか検討しています。MEMSによって超小型センサーを作ることができれば、わずかな消費電力で高感度・高速応答なセンシングが可能になり、計測点を増やして精度を上げることができます。また将来、PEによって模型にセンサーを印刷できれば、従来のように模型を加工してセンサーを埋め込む必要がなくなり、準備にかかる時間の大幅な短縮が期待できますし、計測量は電気信号であるため、画像計測のような計算時間のかかる処理を必要としないメリットもあります。さらに、光学計測ではカメラの死角になるため不可能であった、エンジンナセルの内側など見えない所も測れるようになります」(満尾計画管理CM)。



満尾 和徳

空力技術研究ユニット
計画管理チーフマネージャ

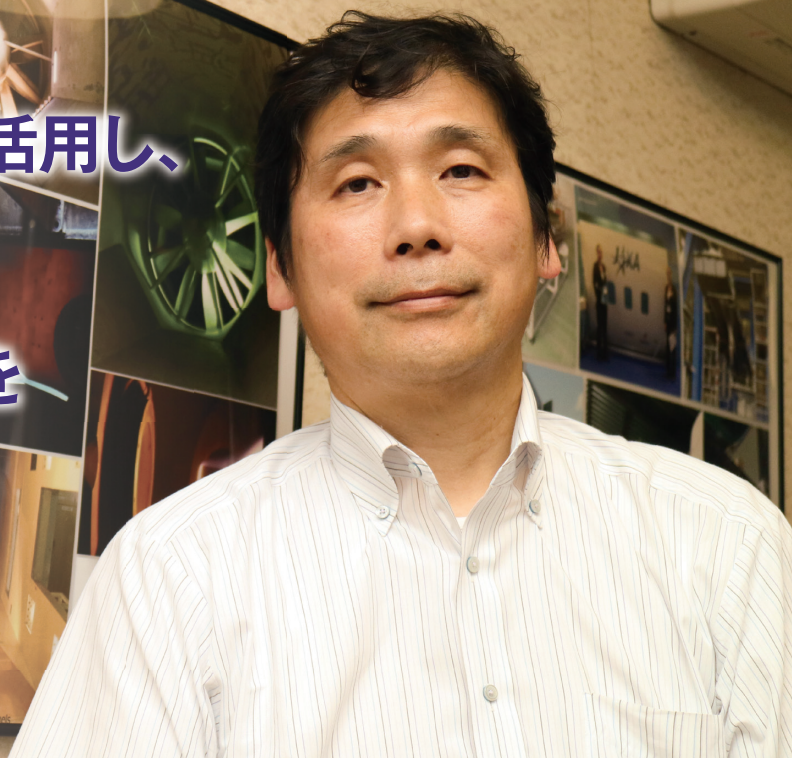
※2,3: 本誌4ページ参照。

※4: Micro Electro Mechanical Systemsの略。主に半導体加工技術を利用して作られる、センサーや電子回路などの微小デバイス。

※5: Printed Electronicsの略。印刷技術を用いて物体の表面に電子回路などを印刷する技術。

風洞、スパコン、 実験用航空機 — JAXAの環境をフル活用し、 航空産業界に インパクトを与える 粒の大きな研究開発を

国立大学法人東北大学
大学院工学研究科
航空宇宙工学専攻
教授 澤田 恵介 氏



今や航空機の設計に欠かせない技術となったCFD（数値流体力学）。今回は、東北大学澤田恵介教授にCFDの専門家としての立場から、風洞の必要性や風洞とCFDの連携、JAXAへの要望などについてお話を伺いました。

CFDと風洞の役割の違い

— CFDと風洞は、それぞれどのような役割を持っているとお考えですか。

航空機の設計では、機体まわりの空気の流れを調べて空力特性を知ることが重要です。1980年代くらいにCFDが登場するまで、航空機の特性を知るには風洞を使うしかありませんでした。CFDも最初は実際に使うというよりは「計算でいろいろな解析ができますよ」というデモンストレーションが主体でしたが、ソフトウェアもハードウェアも性能が徐々に向上し、実用的になってきました。最近では、単に解析する

だけでなく、機体形状の最適化にも多用されるようになってきました。こうした状況は、CFDが風洞に置き換わるというよりも、航空機設計における役割を分担し、両者が共存しているのだと理解しています。

CFDは、例えば航空機の開発で、いろいろな機体形状の確認を手軽に計算できます。また、飛行試験で不具合が出た時にも機体形状の変化をすぐに反映させれば、即座に空力特性を算出できます。風洞でもできますが、形状ごとの模型を作らねばならず時間もコストもかかります。

一方、風洞は、模型の実際の空気の流れを計測できる“現実”です。例えば、CFDが不得意なケースとして、流れ場の中に剥離が生じるような非定常状態の計算があります。剥離現象をとらえるためにさまざまなモデルが提案されていますが、ある現象に対しては適していても、別の現象には適さないといった問題があり、信頼性に欠けます。それに対して、風洞試験で剥離が起きれば、実機でも剥離が起きるだろうと信じる

ことができます。特に複雑な流れ場での信頼性という点において、まだまだ風洞に一日の長があります。

— 役割を分担しているCFDと風洞は、どのように連携していけば良いでしょうか。

基本的には、開発・設計に与えられたコストや期間、ほしいデータ精度によってCFDか風洞か、その都度最適な方法が自動的に選ばれていくようになれば良いと思います。中にはCFDと風洞を組み合わせた方法もあるでしょう。例えば、風洞試験で起きたよく分からない現象をCFDで解析したり、風洞で再現できないような飛行環境をCFDによって補正したりといった方法が考えられます。すでにJAXAでは実用化されていますが、風洞試験の前に妥当性のチェックをCFDで行うという協力方法もあります。こうした協力によって、風洞試験にかかる時間を短縮したり失敗をなくしたりできるでしょう。さらに、互いのデータを相互チェックすることでCFDの計算手法も風洞の計測技術も、精度を向上させたり

コストを下げたりする方向に向かうのではないかと思います。

信頼性のある風洞データはCFDにとっても重要

——CFDの解析結果に風洞のデータは信頼性をもたらしますか。

CFDにはV&V (Verification and Validation) が必要だといわれています。Verification (検証) とは、正しく基礎方程式を解いているかどうかということ、Validation (妥当性確認) とは、物理モデルがきちんと入っているかどうかということです。例えば、衝撃波が発生して境界層が剥離するという現象を再現できる物理モデルが入っているかどうかは、風洞で計測したデータを提示することで「きちんと解けるな」と思ってもらえる。すなわち、Validationに関して、風洞は圧倒的な存在感があるのです。私たちが主催するCFDのワークショップであるAPC (Aerodynamics Prediction Challenge) でも、風洞データは重要な位置を占めています。

——APCについて、簡単に説明していただけますか。

海外でも同様のワークショップが多く開催されていますが、APCでは民間の実機開発に活用されるCFDの課題を選定し、JAXAから提供いただいた風洞試験データと参加者によるCFDの解析結果を突き合わせて検証を行っています。これによって、CFDと風洞技術の両者を活性化させるとともに、例えば参加学生と民間企業の技術者の間など、産官学の交流を深める狙いもあります。

——APCの活動の中でのJAXAの風洞の役割などについて、澤田教授ならびに参加者のご感想をお聞かせください。

APCの最後には、CFDの研究者や利用者、さらにCFDベンダーなどの参加者がディスカッションする時間を必ず1時間程度設けており、そこに風洞試験をされたJAXA研究者の方々も加わっていただいています。単に過去に計測されたデータを

提供いただくだけではなく、実際にAPCの場で議論に参加していただけたことは、非常に大きいと思っています。

また、APCのようなワークショップ自体は、欧米でもさまざまに開催されていますが、JAXAは他のワークショップには提供しない貴重な風洞試験データをAPCに提供してくれています。そうしたデータは、いろいろなデータ解析をしようとするCFDベンダーの方にとって有益だと聞いています。JAXAのデータは信頼性あるデータだけに、JAXAがこのようなAPCを重視した対応してくれることは、ベンダーだけでなく参加者全体にとってもありがたいと思っています。

——では、CFDを利用する立場の人にとって必要な風洞データとはどのようなものでしょうか。

CFD関係者、特に航空機設計にたずさわる民間企業が必要としているのは、航空機開発の技術に直結したデータですね。JAXAと民間企業の距離も、もう少し縮まってほしいですね。JAXAが企業の動きからトレンドを見て必要となる設備や技術を知ることができれば、先行投資ができるでしょう。その中で、もっと精密な風洞データが必要となれば、風洞試験技術の向上につながっていくのかもしれない。

JAXAの強みを生かした研究に期待

——JAXAへの期待や要望があればお聞かせください。

JAXAには、大学に比べると大きな設備や予算があります。風洞をはじめとしてスーパーコンピュータ (スパコン) や実験用航空機もある。そうした設備をうまく活用できる環境にあるJAXAは、大学の一研究室と同じようなあまり細かい研究ではなく、将来の展望が拓けるような粒の大きな研究をしてほしいと思っています。

それは風洞に限ったことではなく、例えば、以前JAXAで行われたNEXST-1 (小型超音速実験機) では、CFDの解析結果と実際の飛行データを比較することができて、国内のCFD解析技術がレベルアップしました。JAXAはCFDのレベルを上げる牽引役であり、原動力になっていたのです。現在進められているFQUROHなどのいろいろなプロジェクトについても、研究を着実に進めてその成果をぜひ、航空機開発の現場にフィードバックしていただけたら、大学とJAXA、民間企業の良い循環ができるのではないのでしょうか。JAXAであれば、航空産業全体が幸せになるようなシナリオが書けると期待しています。



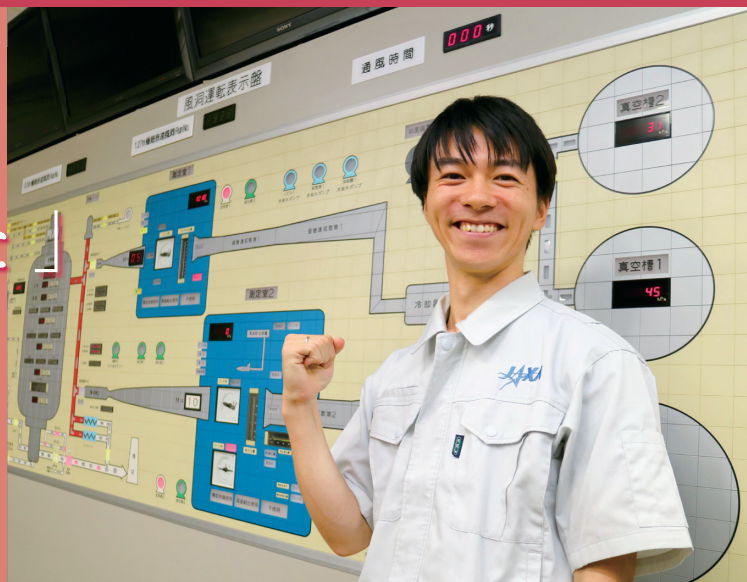
APC開催風景。学生や民間企業の技術者によるCFDの解析結果とJAXAが提供する風洞試験データを突き合わせて検証する。

「超音速旅客機も再突入カプセルも きっかけは風洞でした」

空力技術研究ユニット
再突入熱空力セクション
研究開発員

三木 肇

1987年生まれ。2010年3月東京農工大学工学部機械システム工学科卒業。2015年3月東京農工大学大学院工学府博士後期課程修了。2015年宇宙航空研究開発機構入社。大学では超音速旅客機用エンジンインテークの空力設計技術について研究。入社後、再突入カプセルの熱空力予測に関する研究に従事。



再突入カプセルの研究で利用する極超音速風洞の運転表示盤の前で

空力技術研究ユニットで大気圏再突入カプセルや風洞試験技術の研究を担当している三木肇研究開発員にJAXAを目指したきっかけや現在の研究のやりがい、これから果たしていきたい自身の役割などについて聞きました。

—— JAXA航空技術部門を目指したきっかけを教えてください。

まず、空力に興味を持ったきっかけは、高校生の頃たまたま風洞実験の様子をテレビ番組で見たことです。煙を使って空気の流れが非常にきれいに見えたのが印象的でした。そして、模型の形状を変えると流れの様子が変わり、そのことが機械の性能に直結することを知りました。そこから風洞実験をやりたいと思って工学部に進学し、大学4年生で研究室を選ぶ際は、風洞があるという理由で流体力学の研究室を選びました。

そして、大学では超音速旅客機用のエンジン空気取込口(インテーク)の空力設計について、JAXA大型風洞や数値流体シミュレーションを使いながら研究をしました。その中で、飛行機の性能を良くするには、翼や胴体などの機体上にどのようにエンジンを搭載するかという機体/推進系統合設計が重要であることを知りました。インテーク設計もその鍵となる技術の一つで、エンジンだけでなく機体の性能についても考えながら総合的に優れた設計を達成するという点に面白さを感じました。

その研究を通じて多くのJAXA研究者の方と出会い、研究だけでなく技術の立場からさまざまなマネジメントも担当していることを知りました。私はもちろん研究することが好きなのですが、仕事としてはそれ以外の面からも日本の航空機産業発展のために働きたいと思っていました。なので、研

究とマネジメントの両面から航空の未来をつくる仕事ができるJAXAを目指すようになりました。

—— 現在たずさわっている研究とそのやりがいについて教えてください。

入社時から、国際宇宙ステーションから科学実験サンプルなどを地上に持ち帰る大気圏再突入カプセルの研究をしています。再突入カプセルの研究で扱うのは、超音速よりさらに速い極超音速という空気の流れです。大学までとは注目する流体现象が異なり、空力研究者として幅が広がるのでやりがいを感じます。そしてわずかですが小型回収カプセルプロジェクト(本誌11ページ参照)に協力できたのは良い経験でした。また、超音速旅客機の研究にも2017年から再びたずさわっています。

—— 現在の研究は、大学時代の研究テーマとつながっていますか。

JAXAでは超音速旅客機の先に極超音速旅客機の実現を目標として掲げています。将来その研究開発過程で機体/推進系統合設計の良しあしを判断できる技術が必要になると考えて、極超音速風洞を使ってエンジンが稼働した状態での空力性能が測れるようになる試験技術の開発を新たに始めました。これは学生時代からの興味にも沿って、自身で設定した研究テーマです。こう

いった新しい研究に積極的にチャレンジできる雰囲気や制度があることはJAXA航空技術部門の良いところだと感じています。

—— 今後やりたい研究は。

まずは超音速旅客機、ゆくゆくは新しい世代の飛行機を実現したいですね。航空関係者ではない一般の方にも、これは新しいと一目で思ってもらえるような飛行機を世の中に登場させたいです。将来は機体とエンジンのインテグレーションの仕方も変わってくるはずですが、そういった自分の得意な研究分野でまずは蓄えてきた力を発揮したいです。そして、JAXAに限らず多くの仲間と協力して飛行機の新たな姿を日本から世界に打ち出したいと思っています。

—— 航空分野を目指す人にメッセージをお願いします。

航空の面白さは、空力やエンジン、構造材料、飛行制御など幅広い技術分野が密接に関わり合うことだと思います。また、複数の分野の間に立って考えたり、今まで関係が薄かった分野と連携することでまだまだ新しい発見や技術向上があるはずですが、なので、飛行機好きにはもちろん、現在興味を持っていることが飛行機に関係しているとは思っていない人にも、航空分野が将来活躍できるステージなのだとぜひ考えてほしいです。

Kármán line

HTV搭載型小型回収カプセル開発を支える航空技術部門の技術とは？

宇宙ステーション補給機「こうのとり」(HTV)で国際宇宙ステーション(ISS)に運ばれ、実験サンプルなどを搭載して大気圏に再突入し、サンプルを地球まで持ち帰るための小型回収カプセルの開発が、JAXA有人宇宙技術部門で進められています。航空技術部門は、小型回収カプセルの風洞試験などを通じて開発に参加しています。今回は、空力技術研究ユニットの藤井啓介研究領域主幹、永井伸治研究領域主幹に話を聞きました。

Kármán line(カーマン・ライン)とは、地球の大気圏と宇宙空間とを分ける仮定の境界線です。JAXAでは、航空と宇宙の境界線を越えた連携によって社会に貢献することを目指しています。このコーナーでは、航空技術部門の技術が宇宙分野にも活かされていることを紹介します。

(Image Credit: NASA)

全ての風洞でカプセルの空力特性を計測

JAXA有人宇宙技術部門が開発を進める「HTV搭載型小型回収カプセル(以下、小型回収カプセル)」の開発に参加したきっかけを、空力技術研究ユニットの藤井啓介研究領域主幹は「小型回収カプセルプロジェクトの担当者と顔を合わせ、意見交換する機会があった時、開発の中でも特に空力に苦労していると聞きました。何が課題なのか、われわれの技術で役に立てることはないか、とこちらからもすぐに問い返したのが始まりです」と語ります。このような現場レベルでの交流をきっかけに、小型回収カプセルの技術課題である①揚力誘導制御技術、②軽量熱防護技術、③我が国独自の実験サンプル回収技術の確立——に対して、空力特性分野での知見や技術に加えて、風洞と数値解析の分野でバックアップすることが決まりました。

小型回収カプセルは、大気圏に突入後、一定高度に達したらパラシュートを開いて減速し、そのまま海面に落下するという運用を想定しています。カプセルの速度は、宇宙空間から海上へと到達するまでに、極超音速から遷音速、低速へと変化します。それぞれの環境における空力特性を調べるため、JAXA調布航空宇宙センターにある、極超音速風洞から低速風洞、アーク風洞など、ほぼ全ての風洞を使用した計測を行いました。しかし、単に設備を使用して計測を行ったわけではありません。小型回収カプセルの空力的な技術課題にも取り組んでいます。

※1: Gは加速度を示す単位。50Gは、重力加速度の50倍という意味。1Gは約9.8m/s²。

※2: 複数のスラスターを噴射することで姿勢を制御するシステム。Reaction Control Systemの略。

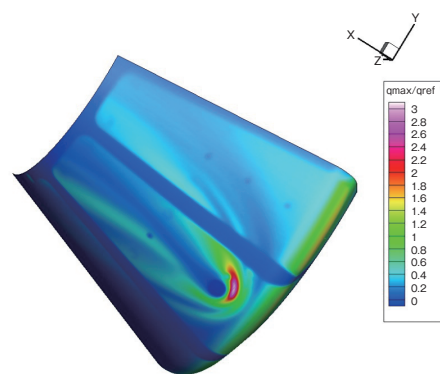
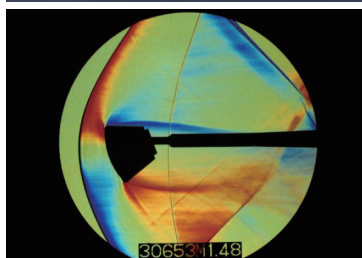
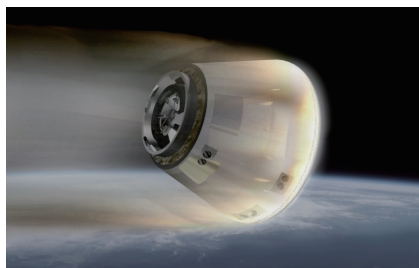
揚力飛行を実現するために精密な誘導制御が必要

小惑星探査機「はやぶさ」の回収カプセルのように弾道飛行で落下する場合、減速加速度が50G^{*1}にもなります。ISSから回収するものには、タンパク質結晶サンプルなどもあるため、弾道飛行で降下すると加速度が大き過ぎるため適していません。「加速度を抑えるには、重心を少しずらして機体を傾け、揚力を得る揚力飛行を行います」と空力技術研究ユニットの永井伸治研究領域主幹は解説します。例えるなら、山の頂上から直線の坂を一気に下るのではなく、緩やかなつづら折りの山道を曲がるようにゆっくりと下るイメージです。こうした揚力飛行を行うには、機体の姿勢を制御する精密誘導制御が必要となります。精密誘導制御による揚力飛行は、世界でも一部の国や研究機関でしかできていません。日本にとって、将来、有人宇宙飛行を実現するには必須の技術といえるでしょう。

小型回収カプセルの精密誘導制御には、スラスターの噴射によって姿勢を制御す

るRCS^{*2}が用いられます。「風洞試験や数値解析の結果から、スラスターの噴射方向や強さをプロジェクト関係者とともに検討を進めました」(藤井研究領域主幹)。また、当初はできるだけ狭い範囲に落下させようと、パラシュートの開傘は低高度で行うことになっていましたが、風洞試験の結果、低高度で開傘すると機体が不安定になり危険であることが判明したため、開傘タイミングを少し早めることを提案しました。また、大気圏突入後に断熱圧縮によって引き起こされる空力加熱により機体温度が2,000°C近くなるため、溶けながらカプセルの内部や機体そのものを守るアブレーターの開発にも貢献しました。

以前にも、再突入カプセルのような鈍頭形状物体の風洞試験を行ったことはありましたが、揚力飛行を模擬するため迎角を大きくしたための空力干渉が起きるなど初めて経験するような困難や、最新の装置、最新の計測手法によって、今まで気付かなかった新しい課題を発見することもありました。小型回収カプセルプロジェクトは、航空技術部門にとっても成果ある取り組みでした。



図左上: 大気圏に再突入する小型回収カプセル(イメージ)

図右上: RCSジェット干渉による空力加熱極超音速風洞試験結果

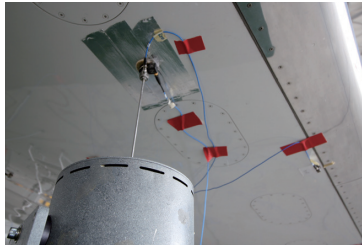
図左下: 超音速動不安定性試験の様子

Topic 1

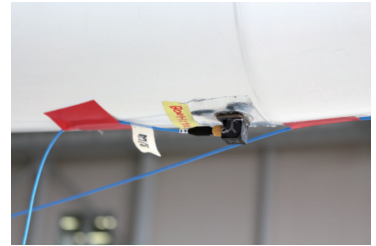
実験用航空機「飛翔」の機体振動特性を計測しました

2017年7月10日、11日の両日、実験用航空機「飛翔」の機体振動特性を計測する試験を、JAXA名古屋空港飛行研究拠点において実施しました。この試験は、主翼両翼下部に微小な振動を与え、その影響を機体各部に配置した加速度センサーで計測する試験です。加振機によって加えられる力はわずかなものですが、それによって発生する振動は機体全体に伝播します。各部センサーのデータを解析することで、機体の振動に対する特性を把握できます。同様の試験は、実験用航空機「MuPAL-α」でも実施しました。

2017年11月に実施する予定の「HOTALW^{ホタル}」では主翼の歪み(変形)を主に計測します。今回の試験で計測された振動特性データは、主翼の変形データと組み合わせることにより、主翼に加わる荷重状態推定を可能にします。このようにして得られた荷重状態データは、将来的に航空機の性能向上や整備の効率化に役立ちます。



主翼下面に配置された加振機。0～70Hzの振動をランダムに発生させる。



機体のあちこちに配置された加速度センサーによって、機体の振動を計測する。

JAXAのさまざまな実験用航空機について、こちらで紹介しています。

<http://www.aero.jaxa.jp/facilities/flight/facility01.html>

※光ファイバー分布センサーによる航空機主翼構造モニタリング技術の飛行実証。FLIGHT PATH No.17参照

Topic 2

「表面摩擦抵抗低減コーティング技術の飛行実証」の飛行試験を実施しました

2017年5月22日から6月17日にかけて、実験用航空機「飛翔」を使った「表面摩擦抵抗低減コーティング技術の飛行実証(FINE^{ファイン})」の飛行試験を行いました。

FINEは、塗料によって機体表面にリブレットと呼ばれる微細な溝を作り出すことで、空気の摩擦抵抗を減らすことを目的とした技術の実証です。機体まわりの空気の流れを制御し、機体表面にかかる空気抵抗を低減させることができれば、燃費向上や排出ガス削減に貢献できます。試験期間中、6回のフライトを行って、JAXA独自技術による波型の形状をしたリブレット上の気流状態を計測する手法の確認など、基礎的なデータの取得を行いました。また同時に、リブレット施工手法的確認も行いました。

今後は、リブレットの加工性や耐久性の向上、コストの低減などを行い、世界に先駆けての実用化を目指していきます。

※FLIGHT PATH No.17参照



リブレットの加工を施された「飛翔」(赤線の丸囲み部分)

Topic 3

「風と流れのプラットフォーム」での風洞利用拡大

「風と流れのプラットフォーム」は、2016年度に立ち上がった文部科学省先端研究基盤共用促進事業(共用プラットフォーム形成支援プログラム)です。JAXAを含め国内5つの機関がネットワークを構築して、ユーザーが風洞やスーパーコンピューターなど、目的に最適な設備を簡便に利用できる体制をつくりました。風洞や数値シミュレーションなどの高度利用を進めることにより、日本の研究開発基盤の維持・発展に貢献することを目指しています。風洞試験や数値シミュレーションに関する相談や利用申込などを代表機関である海洋研究開発機構(JAMSTEC)のワンストップサービス窓口で受け、サポート体制をとる各実施機関と連携することで、さまざまなニーズを持つユーザーが、スムーズに設備を利用できるようになります。すでにJAXAでも、「風と流れのプラットフォーム」を通じた外部

からの設備利用の受け入れが始まっています。JAXAに寄せられた一部の技術相談では、最適な設備を持つ協力機関との調整も行いました。

JAXAでは、従来から行っている施設設備供用に加えて「風と流れのプラットフォーム」での支援を通じ、オールジャパンとしての研究開発力強化、産業力強化に貢献を続けていきます。

「風と流れのプラットフォーム」の詳細は、こちらをご覧ください。

<http://www.jamstec.go.jp/ceist/kazenagare/pf/>

JAXAの施設設備供用に関しては、こちらをご覧ください。

<http://aerospacebiz.jaxa.jp/solution/facility/>

表紙画像解説：

遷音速風洞の測定部を上流側から撮影。中央には支持装置に支えられた模型がある。天井、床、側面は多孔壁で囲われており、側面には観測用の窓が左右各3つずつある。

