

風洞試験

宇宙航空研究開発機構
総合技術研究本部 重見 仁

1. はじめに

航空機の開発時には色々な試験が行われる。代表的なものは、空を飛びまた離着陸するのに必要な性能を十分に発揮できる形状を決めるための風洞試験、機体の強度を確認する構造試験であるが、そのほかにも飛行シミュレーション試験、環境試験などが行われる。さらにエンジンに対しても様々な試験が行われることは言うまでもない。これらの試験のうちから、風洞試験について以下で紹介したい。

2. 風洞とは

私の職場には10を越す数の風洞があり、毎年1500人以上の方が見学に見えるが、それでも風洞とはどんなものか知らない、という人の方が圧倒的に多いだろう。風洞とは、簡単に言えば、風を起こす装置である。実験装置であるから、実験条件にあった風をコントロールして作り出すことができ、その中で起こる現象を計測する手段を備えている必要がある。元々風洞は飛行機を設計するための試験に用いる目的で作られた。文献によれば、世界最初の風洞は1871年に英国人のFrancis Wenhamによって作られたということであるが、ライト兄弟もそれからあまり経っていない時期に風洞を自作して、実験を繰り返している。人類最初の動力飛行に彼らが成功した原因の一つは風洞実験を行なったからだ、と言われている。その後、様々な風洞が数多く

作られており、その中には必ずしも航空機やロケットなどの航空宇宙用でないものもある。自動車、橋、ビルディングなど、空を飛ぶ乗り物以外のものを設計したり、山のまわりの気流を研究するための風洞などもある。従って、風洞の用途は航空機やロケットの設計のためだ、と言うのは必ずしも正しくはないのだが、やはり風洞の主要な用途は、航空宇宙機の設計であり、風洞がそれ自体高度に発達してきたのも、この用途における試験要求を満足させる必要があったからである。そこで本稿では、航空宇宙機の開発に使われる設備としての風洞に範囲を限定させていただく。

3. 風洞の役割

航空機が上空を飛ぶ際に、機体のまわりの空気はどのように流れるか、その空気が航空機に及ぼす力はいくらか、というようなことを知ることは重要である。航空機を空中に浮かせる揚力も、航空機の進行を妨げようとする抗力(抵抗)も、機体の姿勢を変えるときに発生させるモーメントも、空気の流れが作り出しているのであるから。先に風洞は風を起こす装置、と言う言い方をしたが、言い方を変えると、航空機など空を飛ぶ乗り物のまわりの流れを地上の実験室内で実現する装置、言うことができる。実際の航空機などは静止した空気の中を動くのであるが、風洞ではこの関係を逆にして、機体

を静止させておき、その周りの空気を動かす。

通常航空機を開発するには、初期の基本特性試験から最終的な確認試験まで、数次の風洞試験が行われる。海外には実際の飛行機やヘリコプタを入れて試験できるような大きな風洞も存在するが、一般的には風洞試験では対象となる機体と相似の模型を作り、それを風洞内に据え付けて、試験を行なう。

技術の世界で、実際にものを作る前にそれと相似の縮尺模型を作って、検討するという事はよく行なわれることである。たとえば家を作る前に、模型を作ってみると、単に平面的な間取りの図からではわからなかった事柄がわかって都合がいい。自動車や新幹線の車両なども、模型を作ってデザイン上あるいは機能上の検討をするだろう。しかし身びいきかもしれないが、私には風洞試験はどうもそれらとは別格な気がするのだ。風洞試験では、縮尺模型を用いるにもかかわらず、実物を用いたのと同じ情報が得られる、ということである。少なくとも理論上はそう言える。この理論の裏づけがあるということが、風洞試験の大きな強みといえるだろう。

流体力学の用語で、マッハ数 $M(=U/a)$ とレイノルズ数 $Re(=\rho UL/\mu)$ というのがあって、大雑把に言えば、前者は流体の圧縮性の程度、後者は流体に働く粘性の程度に関わる量である(U は風速、 a は音速、 ρ は気体密度、 L は機体の代表的大きさ、 μ は粘性係数である)。風洞実験をする際に、このマッハ数とレイノルズ数とを実際の航空機の飛行のマッハ数とレイノルズ数とに一致させて行なえば、得られた結果から実際の航空機まわりの流れがわかるのである。

現実問題としては、風洞内でマッハ数とレイノルズ数の両方を、実際の航空機の飛行状態と一致させることはそれ程簡単ではない。マッハ数に関しては、速度範囲ごとに幾つかの風洞を用意しておけば、試験したいマッハ数に合わせて風洞を選ぶことで解決出来る。これに比べてレイノルズ数を合わせることは、ずっと難しい。航空機が速くなり、大きくなるに従って、レイノルズ数はどんどん大きくなり、風洞のほうがそれについてゆけなくなるという状況が随分前から起きている。一般にマッハ数を合わせるために風速 U を決め、レイノルズ数を合わせるために大きさ L か密度 ρ を調節する、という方法がとられる。高いレイノルズ数を実現するには L あるいは ρ を大きくすることが有効だが、模型の大きさ L の限界は風洞の大きさで決まってしまうので、調節の自由度は ρ に求められることになる。 ρ を大きくするために、空気を圧縮すること、空気の代わりに極低温の窒素を使うこと、などの方法が採られる。温度が変わると a や μ も変化するので、実際の制御はやや複雑である。ボーイングやエアバスの旅客機のマッハ数、レイノルズ数を同時に実現できる大型風洞が米国と欧州に1つずつあり、稼動している。

4. 風洞の種類

表1はJAXAの風洞技術開発センターが運用している主な風洞である。速度域で分類して、低速から極超音速までをカバーする風洞ラインアップを構成している。国内/国際線の旅客機は、マッハ数0.8程度で飛行する。これは遷音速風洞の守備範囲である。しかし、これら旅客機

名称	速度範囲
6.5m×5.5m低速風洞	1~70m/s
2m×2m遷音速風洞	マッハ数0.1~1.4
1m×1m超音速風洞	// 1.4~4.0
1.27m極超音風洞	// 10

表1 JAXAの主な風洞

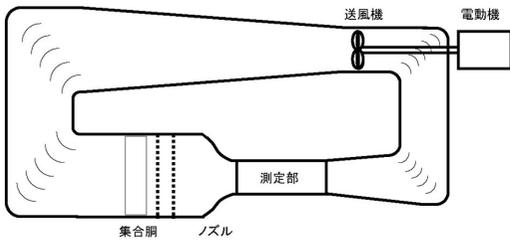


図 1-1 回流式低速風洞概念図

に対しても、離陸するときや着陸する時の性能を調べるためには、低速風洞が使われる。超音速風洞はコンコルドの跡を継ぐSSTの研究などに使われている。極超音速風洞になると、スペースプレーンなどの宇宙機が対象になる。

風洞の駆動方式の代表として、図 1 に回流式の低速風洞と間欠吹出し式の超音速風洞の概念図を示した。回流式の風洞では、電動機が扇風機の羽のような送風機を回転させて風を作る。風は回廊のような風路を周回する。一方、間欠吹出し式風洞では、あらかじめ貯気槽に蓄えられた高圧の空気を、調圧弁を開くことによって風路に流入させる。ある程度時間がたつと貯気槽の圧力が低くなるので通風を停止し、貯気槽に空気を貯めなければならない。

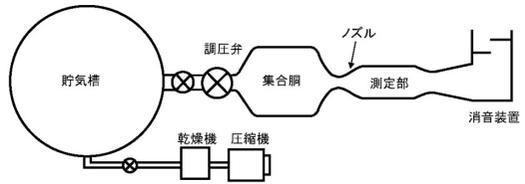


図 1-2 吹出し式超音速風洞概念図

図 2 はJAXAの6.5m×5.5m低速風洞の鳥瞰図で風路が切れているように見える部分には、模型が取り付けられている測定部がはめ込まれる。この風洞は測定部を 2 つ持っており、実験の内容によって使い分けている。図 3 は測定部内部の様子である。6.5m×5.5mというのは、測定部の断面の高さと幅を表している。模型は風洞断面の中央部、すなわち床から 3 m 以上のところに取り付けられている。

図 4 はJAXAの 1 m× 1 m 超音速風洞の測定部であり、据えられた模型は2005年にオーストラリアで飛行実験が行なわれた超音速ロケット実験機である(ロケットの上に超音速で飛行する実験機が背負われている)。この風洞を 1 回通風させると、40秒程度の時間データを計測できる。空気をためるための待ち時間は30分程である。

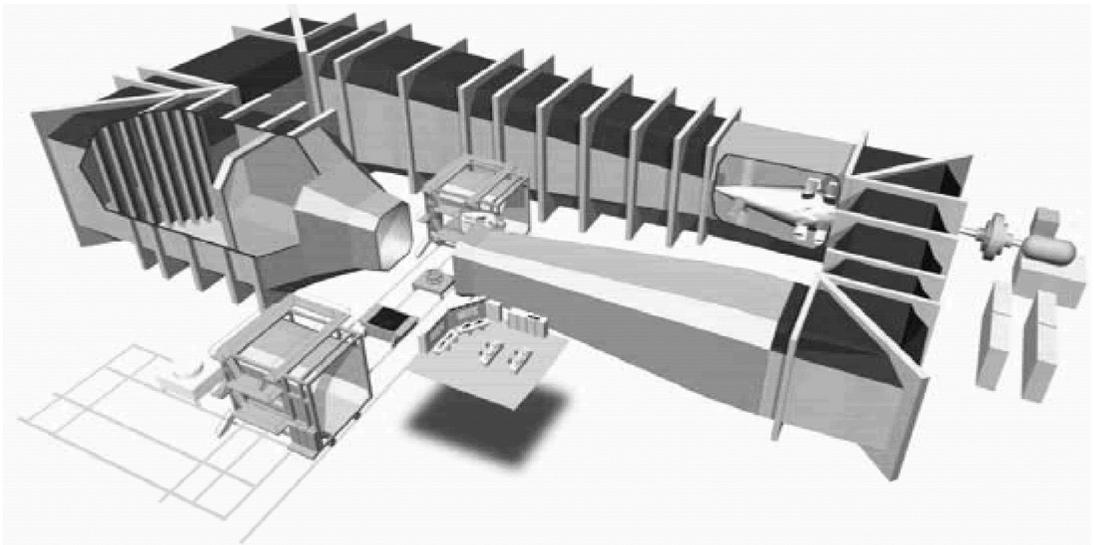


図 2 6.5m×5.5m低速風洞



図3 測定部内部

5. 風洞試験でわかること

航空宇宙機の開発のための風洞試験では、最も重要な測定量は、模型全体に働く力とモーメントである。これらを測定する計測器は天秤と呼ばれ、模型を支持する装置に接続されている。さらに流れ状態を把握するためと構造設計に利用するために、圧力分布が測定される。圧力を測るために、通常は機体表面に小さな孔をあけ、その孔から圧力センサまで、模型内部を通る金属やビニールのチューブでつなぐ。この方法だと、孔の開いている位置での圧力しかわからないから、なるべく多数の孔をあけるにしても、得られる情報の量は限られる。最近使われ始めている圧力分布の測定法は、感圧塗料である。模型の表面にこの塗料を塗っておき、レーザーの光を当てると、圧力の大きさによって塗料からの発光輝度に変化する。塗料からの発光輝度をCCDカメラで撮影し、画像をコンピュータ処理すると圧力の分布が得られる。図5は感圧塗料によって測定した圧力分布結果の例である。

空気の流れは目で見えないので、これを見えるようにするための色々な方法が考案されている。模型表面にオイルを塗って生じる条模様に



図4 1m×1m超音速風洞測定部

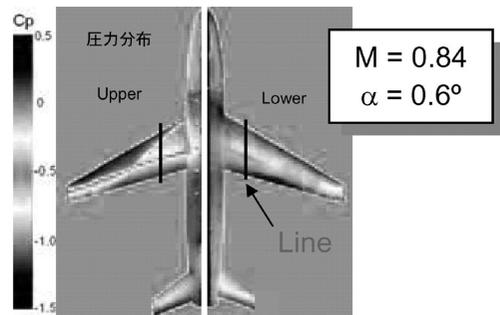


図5 模型表面の圧力分布

よって流れの方向や表面から剥離している場所を見つける方法などが古くから使われているが、最近ではレーザーとCCDカメラを利用して、気流中に散布させた細かい粒子の移動を画像として捕らえ、速度ベクトルを求める方法(Particle Image Velocimetry:PIV)などが発達してきた。

6. 終わりに

最近ではコンピュータによる流れの計算技術(CFD)が目覚ましい進展を遂げた結果、従来風洞によって得られていたデータの一部が数値計算によって得られるようになってきている。しかし、CFDは今日風洞を凌駕するレベルにはまだまだ到達しておらず、依然として設計上のキーとなる空力特性は風洞試験によって求めなければならない。航空機や宇宙機の設計の現場において、風洞が不可欠な道具として主役を果たす状況が、しばらく続きそうである。