

【特別記事(寄稿)】

風洞技術の現状と将来に向けた取り組み



浜本 滋
Shigeru Hamamoto

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
航空技術部門 空力技術研究ユニット長
[専門分野] 空気力学, 風洞技術

風洞は空気力学の研究開発で用いられる試験設備・装置で、輸送機器や流体機械の開発や空気力学に関係するさまざまな現象の解明に使用されています。風洞技術は20世紀初頭のライト兄弟による人類初の動力有人飛行以降、飛行機やロケットの開発とともに発展してきました。最近では航空宇宙分野だけでなく、土木・建築、自動車、鉄道をはじめとする数多くの技術分野において風洞が使用され、現在の豊かな生活実現の一助となっています。ここでは、航空宇宙分野における風洞技術の現状と、将来に向けた技術開発の取り組みについて紹介します。

風洞技術の発展

風洞の歴史は古く19世紀から作られ、20世紀初頭のライト兄弟による人類初の動力有人飛行成功の背景には、手作りの風洞における数多くの翼型の空気力学的性能の測定実験が存在していたことは有名な話です。以後、飛行機やロケットの開発においては常に風洞が使用され、その性能向上を支えてきました。他の分野では、鉄塔や橋りよ

うといった建築物への風圧を評価するためにも古くから使用されてきました(☞参照)。最近では航空宇宙、土木・建築のほか、自動車、鉄道、気象、環境、スポーツ科学など、数多くの技術分野において風洞が使用されるようになりました。

地表近くの空気の流れに関する技術分野で使用される風洞のほとんどが空気の圧縮性を考慮しない低速風洞で

あるのに対して、航空宇宙分野では低速風洞に加えて圧縮性や熱力学も考慮した特殊な風洞が求められます。図1にJAXA調布航空宇宙センターの風洞群を、速度域ごとに開発対象となる機体や技術課題とともに示します¹⁾。ジェット機が音速に近い領域(遷音速領域)で巡行することから遷音速風洞が近年の航空機開発で最もよく使用されています。また、将来に向けた超音速機の研究開発や、宇宙空間から帰還する機体やカプセルの開発では超音速風洞、極超音速風洞、高エンタルピー風洞も必要です。

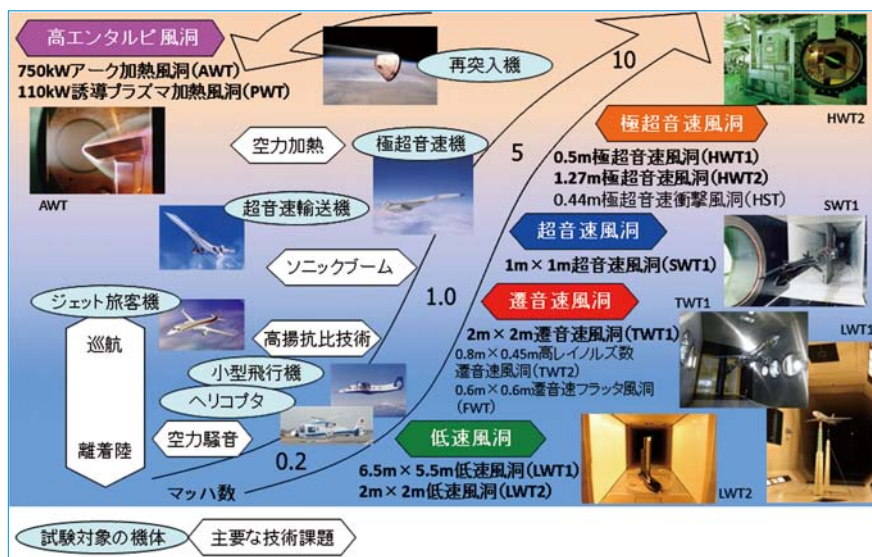


図1 JAXA調布航空宇宙センターの風洞群¹⁾

☞ 「エッフェル型」風洞
風洞の型式には大きく分けて回流型と開放型の2種類があります。回流型の風洞は、最初に設置された研究所のあったドイツの街の名前から「ゲッチンゲン型」と呼ぶのに対して、開放型の風洞は考案者の名前から「エッフェル型」と呼びます。エッフェルはエッフェル塔で有名な建築家で、彼の技術は航空力学の発展にも寄与したといわれています。

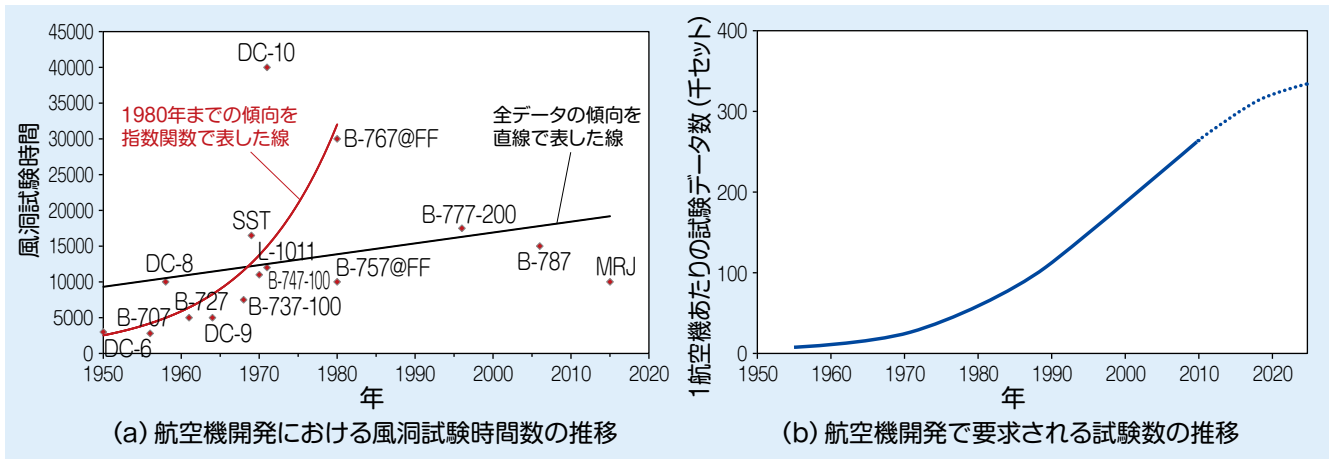


図2 航空機開発における風洞試験 (AIAA-2008-0830から引用)²⁾

航空機開発における風洞の役割

航空機開発における風洞試験時間数の推移を図2 (a) に示します。風洞試験が機体設計段階での唯一の空力性能評価の手段であった1980年頃までは、機体の性能が上がるにつれて風洞試験時間数が指数関数的に増大する傾向がありました。1日24時間、1年365日間フルに風洞が稼働した場合の風洞試験時間数は約8,800時間となります。実際は複数の風洞で試験を分担しますが、DC-10の開発における4万時間という数字は、1つの風洞だけだと5年間弱試験を続ける数字となり、相当数の試験データが必要であったことがうかがえます。1980年代以降は機体のさらなる高性能化が要求される中でCFD (Computational Fluid Dynamics, 計算流体力学) の発達にともない、風洞試験時間数は減少傾向に転じました。これはCFDが風洞の代役を担うようになっただけでなく、風洞技術が向上し、データ精度や生産性の向上により風洞試験時間が短縮されたことも理由の一つです。ここでは国際的な競争で機体の開発時間が制約されてきていることも忘れてはいけません。その証拠に、図2 (b) に示したように、航空機開発に必要な試験データ数は今後も増加する傾向にあります。このことからわかるように、航空機開発では依然

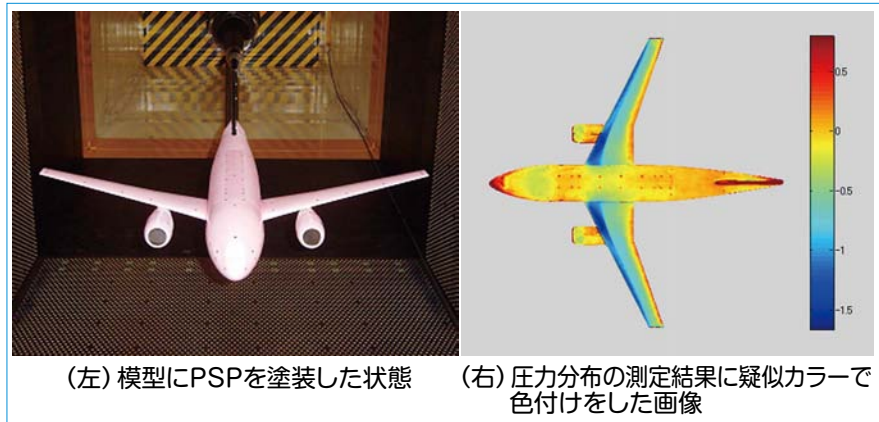


図3 感圧塗料 (PSP) による機体模型まわりの圧力分布計測例³⁾
(2m × 2m 遷音速風洞, DLR-F6 模型)

風洞の役割は重要で、さらなるデータの生産性向上や、これまで測ることのできなかったデータを取得する手法の開発など、多くの技術課題が課せられています。

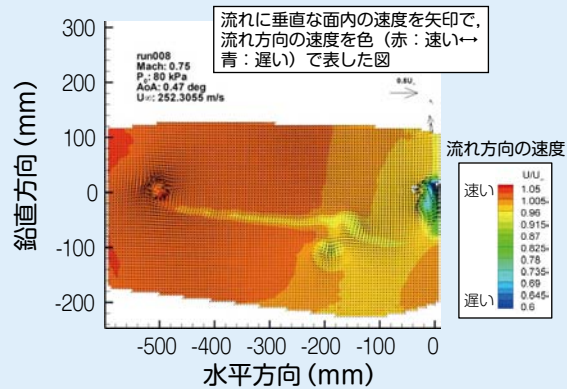
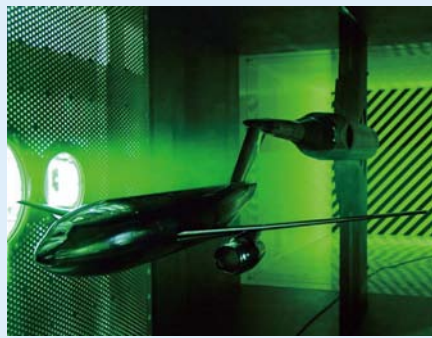
革新的な計測技術の一例

風洞試験におけるデータ生産性に飛躍的な向上をもたらした計測技術を二つ紹介します。

一つは感圧塗料 (PSP: Pressure Sensitive Paint) を用いた圧力計測技術です (図3)。機体表面の圧力分布は通常、模型の表面に開けた圧力孔と呼ばれる小さな穴に圧力センサーをつないで計測します。電子式の圧力スキャナーを用いることで200点以上の圧力を同時に計測することも可能ですが、それでも物理的な制約から主翼の1断

面で20点程度の圧力しか計測できません。これに対してPSPは、表面が接する空気圧力によって励起光を照射した際の蛍光の強さが変化する特殊な塗料を用いることで、模型表面の圧力を面で測ることに成功しました。この革新的な技術により、圧力分布データの生産性が飛躍的に向上しました。PSPは国産初のジェット旅客機として注目を浴びているMRJ (Mitsubishi Regional Jet) の開発試験でも用いられ、その有用性が高く評価されています。

もう一つは粒子画像流速計 (PIV: Particle Image Velocimetry) です (図4)。風洞内に気流とともに小さな粒子 (オイルミストなど) を流し、その粒子を短い時間間隔で2枚の画像に記録することで、各粒子の移動距離と



左側の窓からレーザーシート(緑色)を照射して流れ場を測定

図4 PIVによる主翼後方流れ場の測定例⁴⁾(2m×2m遷音速風洞, DLR-F6模型)

時間間隔から流速を求める手法です。原理は簡単ですが、無数に存在する粒子の動きを画像から分析することは容易ではありません。最近の画像処理技術と統計的なデータ処理技術がこの分析を可能とし、空間速度分布を定量的に求めることに成功しました。測定する断面をレーザーシートで照射し、2台のカメラでステレオ視することで流速の3方向成分も求めることができます。PIVもPSP同様、これまではピトー管や熱線風速計などでポイント(点)でしか計測できなかった空間での流速を、面で測ることを可能にした革新的な技術です。PIVは比較的簡単な試験装置によって実施ができるため、最近では多くの低速風洞に導入されるようになってきました。

データ精度向上の取り組み

風洞試験データを設計に利用するためには、試験データ精度を評価する必要があります。試験データは工学的・統計的な取り扱いから不確かさをエ

ラーバーとして表示することができますが、それに加えて風洞の持つ「癖」を相対的な視点から評価することも必要です。そのために標準模型(Standard ModelあるいはCalibration Model)と呼ばれる形状の模型を用いた

他の風洞の試験データやCFDとの比較からデータ精度を評価します。

最近ではCFDの抵抗推算精度を評価するために米国航空宇宙学会(AIAA)のDPW(Drag Prediction Workshop)が定めたCRM(Common Research Model)と呼ばれる機体形状が標準模型に用いられるようになりました。この形状は実際の航空機の形状に近く、CFD検証用のデータを取得するために米国NASAの遷音速風洞(NTF)や欧州遷音速風洞(ETW)など



図5 CRM(Common Research Model)模型(2m×2m遷音速風洞)

の世界の主要風洞においても同形の模型が製作され、試験データが公開されています。JAXAも2m×2m遷音速風洞向けにCRM模型を製作しました(図5)。

CRM模型による試験を行うことにより、CFDやほかの風洞とのデータ比較が可能となります。NTFやETWは高レイノルズ数風洞と呼ばれる実機のレイノルズ数(☞参照)と同じ気流条件を作ることができる風洞です。JAXAの2m×2m遷音速風洞は実機に比べると1桁以上低いレイノルズ数での試験しかできませんが、高レイノルズ数風洞の試験データとの比較を通して、レイノルズ数の違いによる影響(レイノルズ数効果)を評価する研究を進めています。レイノルズ数効果が適切に補正できれば、実機の空力特性を予測する精度が向上します。

☞ レイノルズ数

実際の流れと風洞試験の流れの状態の違いを表す数値です。流体中に置かれた物体の大きさと流速、流体の粘性により決まる無次元数です。実際の現象を模擬するためにはレイノルズ数を一致させる必要がありますが、航空機のように実機に比べて小さな模型を用いる場合は、レイノルズ数を一致させることが困難です。海外の高レイノルズ数風洞(ETWやNTF)では、測定部の圧力を上げて、さらに液体窒素によって気流の温度を下げることで小さな模型でも実機と同じレイノルズ数での試験が可能です。

標準模型試験はまた、定期的を実施することで試験データの経年変化を監視し、風洞の健全性を確認するために利用されています。さらに、計測装置の更新や、新しい試験計測技術を開発した際などには、過去の豊富な試験データとの比較検証を目的に、まずは標準模型試験を実施します。

CFDとの共存、共栄

風洞技術の将来を考えるにあたっては、CFDとの共存、共栄が重要です。今後の航空機開発では、より安全でより性能の高い機体の開発が要求されます。そこでは風洞試験とCFDがそれぞれの得意な部分を分担し、それらを最適に組み合わせることで機体の開発時間をできる限り少なくすることが要求されています。

JAXA航空技術部門では、2012年度までにデジタル／アナログ・ハイブリッド風洞システム(DAHWIN)を開発しました。「デジタル風洞」はCFDを意味し、「アナログ風洞」は風洞試験を意味します。これまでは風洞試験とCFDを別々に実施し、研究者や設計者は机上のPCでそれらのデータ比較を行っていました。DAHWINは画面上でリアルタイムに風洞試験とCFDの結果の比較が可能となる環境を提供しています。図6にDAHWINの利用フローを示します。まずは風洞試験前にCFD解析を実施し、結果をシステムに格納します。CFD解析結果は風洞試験計画に反映され、試験実施時には試験データを逐次画面上にCFD結果と比較可能な形で表示していきます。さらに風洞試験結果をCFD解析にフィードバックすることもできます。たとえば、風洞試験で計測された模型の変形量データをCFD解析に取り込むことで、データの精度を向上させることができます。風洞試験データと

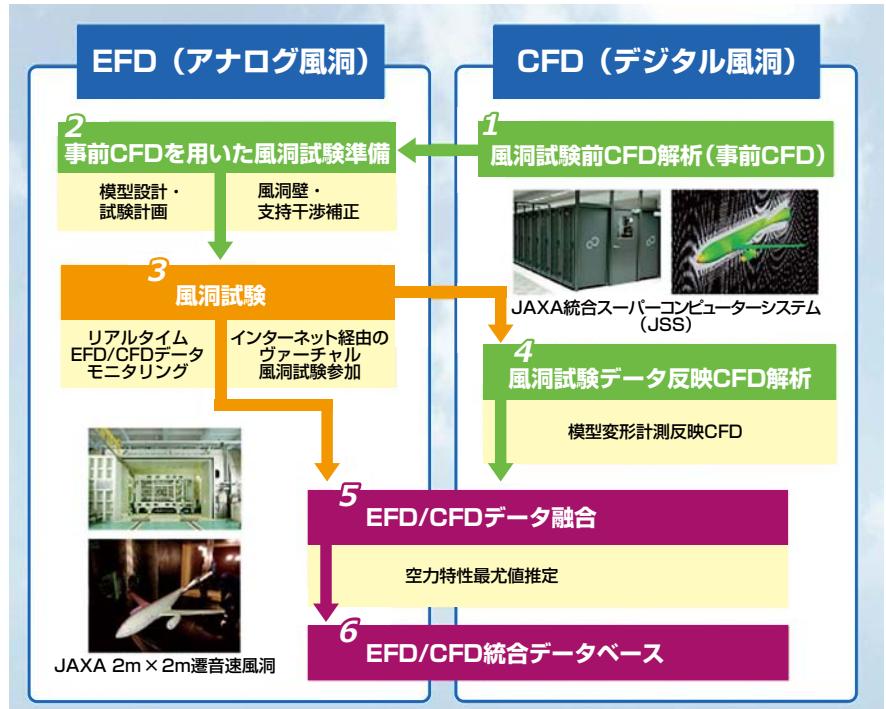


図6 DAHWINシステム本体および利用フロー⁵⁾

CFD解析結果の比較には画像データも含まれます。DAHWINの開発では、PSPやPIVの試験結果も画像取得後10分以内に表示可能となるような技術開発も合わせて実施されました。

DAHWINはMRJの開発には間に合いませんでしたが、今後日本においてMRJに続く機体開発があれば、このシステムが日本の国際競争力の源の一つとなることでしょう。

DAHWINは現在、2m×2m遷音速風洞に付随したシステムとして整備されています。これをほかの主要風洞(6.5m×5.5m低速風洞や1m×1m超音速風洞)とも連携させたり、さらに飛行試験データも取り込んだシステムに発展させることも検討しています。また、データを評価するだけでなく、AI(人工知能)などの新しい技術を融合して、最適化により新しい機体形状を生み出す技術も視野に開発が続いています。

おわりに

風洞は古典的な試験装置でありながら、航空機開発における技術要求を満

たすためにJAXAでは絶えず技術開発を継続しています。そこではCFDを含む多くの技術の融合が行われ、技術の可能性を広げています。

鉄道においても安全性や環境適合性の向上、性能の向上などに風洞が活用され、より良い技術開発が行われることを期待します。RRR

文献

- 1) 浜本滋: JAXAの大型風洞試験設備(前編)設備の概要, 日本航空宇宙学会誌, 第63巻, pp.253-259, 2015
- 2) Mark R. Melanson: An Assessment of the Increase in Wind Tunnel Testing Requirements for Air Vehicle Development over the last Fifty Years, AIAA-2008-0830
- 3) 満尾和徳, 中北和之, 栗田充, 渡辺重哉: JAXA感圧塗料(PSP)計測システムの研究開発(1) - 概要編 -, JAXA-RR-13-005, 2014
- 4) 満尾和徳, 中北和之, 加藤裕之, 口石茂, 栗田充, 浦弘樹, 水野雅仁, 小池俊輔: JAXAの大型風洞試験設備(後編)先進空力計測技術, 日本航空宇宙学会誌, 第63巻, pp.293-300, 2015
- 5) 口石茂, 渡辺重哉: デジタル／アナログ・ハイブリッド風洞(DAHWIN)の航空・宇宙機研究開発への適用とその展望, 日本航空宇宙学会誌, 第62巻, pp.160-165, 2014