富士重工2m低速風洞について*

安藤 武夫**・松田 隆二**

2-m Low Speed Wind Tunnel at Fuji Heavy Ind. Ltd.

Takeo ANDO and Ryuji MATSUDA

Abstract

A new low-speed wind tunnel constructed in 1969 at Fuji Heavy Ind. Ltd. is now in operation for various testings of aircrafts as well as automobiles and so forth.

2m×2m open jet type test section has capability of providing wind velocities up to 60 m/sec.

The design philosophy and the details of tunnel characteristics are described in this paper.

1. まえがき

従来、当社では風洞試験は東大宇宙研、航技研等の風洞を借用して目的をはたしてきた。

しかし、近年になって風洞試験の量が多くなり、また従来借用していた外部の風洞も忙しくなって、当社の風洞試験の日時も十分消化できない状態となってきた。

このため、手近にあって手軽に利用できる風洞をもつことが痛切に要求された。そこで、社内風洞を作ろうという話が具体的となり、42年6月計画を開始、43年4月に建設に着手、44年1月に運転を開始した。その後風洞特性の検定、不具合の改善等を経て現在実用に入っている。

第1図 平面図

* 昭和45年12月12日原稿受理

** 富士重工株式会社

2. 基礎計画

計画に際して、この風洞の使い方、必要な性能、建設費等を検討した結果、次のような基本的な考え方で進めることとした。

(1) 新機種の基礎設計の段階で、基礎形決定に利用しやすいように設計者が手軽に使用できる設備であること。

(2) 性能は、実用上支障のない程度あればよく、特に高性能を要求しない。

特種な試験については、それぞれ目的に合った外部の風洞を利用することとする。

(3) モーター・セッター式、およびプロペラ・ファンは、戦時中の旧中島飛行機荏窪風洞に使用されていたものを整備改修して使用する。

以上の条件をみたす案として、当初は1m~1.5m級の風洞を考えた。しかしこの計画についていろいろな方の御意見を伺ったりして検討した結果、吹き出し口は出来るだけ大きくしておいた方が実用範囲が広がり、使いやすいとの結論になり、当初の計画の全体の規模をなるべく大きくせず、吹き出し口を大きくするように努力した。

このために、風速分布の不均一気流の乱れ等、好ましくない現象が現われることが予想されたが、この問題に対しては、整流のために十分パワーをさいて、風速を犠牲にすることで、実用上十分きれいな風を得ることが出来る見通しを得たので、この線にそって計画

第2図 他風洞との平面形比較

(注) 吹き出し口断面が等しくなるように各風洞のスケールを変えてある

第3図 各種風洞の効率比較

を進めることとした。

前に述べた基本的な考え方にそって検討の結果、この風洞の要求される仕様を次のように定め、この仕様を満たすよう具体的な設計に入った。

- (1) 最大風速 50 m/s 以上
- (2) 常用風速 40 m/s
- (3) 風速分布 平均風速の $\pm 1\%$ 以内
(吹き出し口の 80% 以内で)
- (4) 乱れ係数 1.3 以下

3. 性能諸元

完成後の検定試験の結果、不満足な点を改修し、最終的に次のような性能諸元を得た。

- (1) 型式: 横置単路循環型
- (2) 測定部: 2m 正方形, 開放型
- (3) 動力: 400 HP/600 HP (連続/2 時間)
ワード・レオナード方式 (サイリスタ制御)
- (4) 最大風速: 62 m/s
- (5) 常用風速: 40 m/s
- (6) 風速分布: 平均風速の $\pm 1\%$ 以下
- (7) 乱れ係数: 1.29
- (8) 静圧勾配: 天秤中心の前後 500 mm で、平均動圧の 0.8%/m
- (9) 天秤: 島津式ピラミッド型 6 分力前後 2 本、支柱天秤 (3 RANGE 切り換え)

4. 各部の設計概要

4-1 測定部 模型の取り付け、取りはずし、舵面のセット、等の容易なことを考え開放型とした。また翼幅 1.5 m 程度の模型が製作上、および取り扱い上適当であるので、この程度の模型が試験できるよう 2 m 幅とし、さらに、高速機のように縦横比の小さい飛行

機の場合も考えて、高さも同じ 2 m とり、断面は最も簡単な正方形を採用した。また 4 つの隅の部分については、流れがおかしくなっていると思われるので、この部分は、はじめからあてにしないことにし、あえて 4 隅を削ることはしなかった。

4-2 風路 風路は、鋼板製とするか、鉄筋コンクリート製にするかの 2 つが考えられたが、騒音、振動に対して鉄筋コンクリート製の方が安心であり、価格も安価であることと合わせて、鉄筋コンクリート製にすることとした。ただ表面の平滑さに問題があるが、これは表面をモルタルできれいに仕上げることで解決することにした。

プロペラ・ファンとモーターは一体として鋼板製の円筒に収め、風路にはめ込むようになっている。そのほか、吹き出しノズルと吸い込み口が鋼板製であるほか、すべて鉄筋コンクリートである。風路断面はほとんど正方形であるが、プロペラ・ファンに至る部分のみ八角形を経て円形へと断面変化させた。

コーナー・ペーンは 6 mm 鋼板を 350 R の円弧に曲げ下流と下流側に平行部をつけた簡単なものとしてこれを 4 つのコーナーにおのおの 8~12 枚取りつけた。

整流格子は 1 つの断面が 120 mm × 60 mm の三角形、奥行が 500 mm のもので、これを集合胴部に取り付けた。

4-3 吹き出しノズル 風洞の規模を出来るだけ小さくしてなおかつ吹き出し口を大きくしたいという要

第4図 吹き出し口

求から、当初の絞り比は4.0と必要最小限度に抑えていたが絞り比は少しでも大きくした方が安心であるとの考えで、diffuser 角度を 3° から 3.5° に上げて、絞り比を4.2まで増した。

ノズル線図は、気流方向の圧力変化分が $\sin$ 曲線となるように定めた (第4図)。

4-4 動力 旧中島飛行機荻窪風洞に使用していたレオナードセットー式が保存されていたものを使用した。

直流モーターは、プロペラ・ファンと直結して風路内に挿入し、風速制御は、直流モーターの回転数制御で行なうが、その制御系統は、サイリスタを用いたものを新しく取り入れた。

4-5 プロペラ・ファン プロペラ・ファンもモーターと同様、旧荻窪風洞で使用されていたアルミ合金製6翅のものが、一部翼端を損傷していたが残っていたので、これのティップをつめて整備し、使用することにした。ティップをつめるに当たって、風路を余り長くせずに必要な絞り比を得たいという要求から、ファン効率は、二次的に考え、ファン直径をやや大きめに決めた。このことは、風路を短かくして、大きな吹き出し口を得ることに有効であり、効率の低下による風速の落ちもさして問題とならなかったが、新たに騒音が高いという問題を生じた。騒音に関しては、後に詳しく述べるが、この騒音の高い原因は、ファンの直径の大きいこと、および風路の短いことがともに騒音を高くする作用をするため、この2つの原因が相乗的に効いたためと考えられる。この騒音対策として、建物全体の外部に対する遮音、および計測室の防音工事を行なって解決した。

プロペラ・ファンと直流モーターは、直結して風路内に取り付けたがモーターの支持支柱、11枚をファン後流中の整流翼として利用し、その後縁に、可動のフラップをおのおの3分割して取り付け、風速分布、気流の偏流調整用としたが、実際には、効果はほとんど得られなかった。

4-6 天秤 計測装置としては、島津製作所製の6分力前後2本支柱式天秤を設備している。この天秤は差動トランスを用いているため、秤量レンジの切り換えが容易であり、模型によって適当なレンジを選べるため精度のよい試験が出来ることが、最大の採用理由である。

現在は、データを Y-X レコーダーに記録させ、後の読み取りは、人手に頼っているが、計測から計算、

最終結果のグラフ作成までを、オン・ラインで処理するデータロガシステムを現在計画しており、来年度に導入する予定である。

天秤秤量	第1レンジ	第2レンジ	第3レンジ
揚力 (kg)	± 200	± 100	± 20
抗力 (kg)	± 50	± 10	± 5
横力 (kg)	± 50	± 10	± 5
縦揺モーメント (kg-m)	± 20	± 5	± 1
横揺モーメント (kg-m)	± 20	± 5	± 1
偏揺モーメント (kg-m)	± 20	± 5	± 1

5. 風洞特性の改善

5-1 風速分布 測定部の風速分布は、周囲 (特に上および東側) が早く中央が遅かったので、第5図Aの如く、ハニカムの上流側にハニカムに付けて、風路のまわりに40メッシュと14メッシュの金網を入れ、ハニカム下流0.3m位置に、風路全面に入れた14メッシュの金網と合わせ2枚にしてみたが、周囲はまだ早く、平均風速の+1%、中央の0.4m円の部分は-1.3%となり、改善頭初の $\pm 1\%$ 以内に入らなかった。

第5図 金網の張り方

た (第5図 A, B, C)。

そこで中央の遅い部分を浮き上がらせるため、ハニカムの上流の金網の面積をふやし、さらにハニカム下流側に、ハニカムに付けて、第5図Cの如く金網を入れ、合計3枚にした結果、中央の遅い部分を -0.6% 、 0.7 m 円程度まで浮き上がらせることに成功し、測定部使用最大範囲である $1.6 \times 1.6\text{ m}$ 四角の境界周辺で、 $+1\%$ の風速分布におさえることが出来た。

風速の落ちは、常用 40 m/s で 1 m/s 弱で問題はないが、金網を風路全面に入れなかったため、測定部東側上下に、少し遅い部分が現われてしまった。

然しながら、動圧で 1% 以下であり、計測誤差範囲内であるので、実用上支障はないものと考えられる。

5-2 静圧勾配 通常、脈動防止孔の総面積は、吹き出し口面積の3ないし4割を、吸い込み口に2,3列にして開ける。

第7図の如く、四角断面の吸い込み口の1辺に、 $300 \times 160\text{ mm}$ 四角の孔を1列に7個、4辺合計 28 個、

- i) 吹き出し口より下流 1.4 m 天秤中心位置にて計測
- ii) 風洞使用範囲 (破線部分) 1 辺の 80%
- iii) 風洞使用範囲内の平均風速 40 m/s 時の分布を示す

第6図 風速分布

吹き出し口面積の 32.5% 開けた状態では、静圧勾配が平均動圧の $1.5\%/m$ と高く、吸い込み口前方 0.7 m 付近より急上昇していたので、 $100 \times 160\text{ mm}$ 四角の孔を22個ふやし、吹き出し口面積の 42% まで開けられるようにした。

天秤中心、風軸方向の静圧分布を、防止孔の開度を変えて計測した結果、開度の増加にともない、静圧の急上昇位置が吸い込み口に近づき、静圧勾配が下がる傾向が現われ、開度 40% 付近でその効果が減少する結果を得た。

最終的に、エネルギーの若干の損失を犠牲にして、開度を吹き出し口面積の 40% としたときの静圧分布特性を、第8図に示す。

静圧の急上昇位置は、吸い込み口前方 0.5 m 、天秤中心位置前後 0.5 m 範囲の静圧勾配は、平均動圧の $0.8\%/m$ まで改善することが出来た。

今、仮に、主翼面積 0.3 m^2 、全長 1.4 m 以下の模型の、静圧勾配による抵抗係数の修正量を求めてみると、 7×10^{-4} 、模型の最小抵抗係数を 0.04 とすれば 1% 程度となり、実用上無視出来るオーダーである。

5.3 騒音 他風洞に比べ、吹き出し口面積に対するプロペラ径が大きく、風路が短い関係上、騒音レベルが高い。

スウェーデンの B & K 社製、精密騒音計で、騒音を計測した結果、 250 c/s から $1,000\text{ c/s}$ の範囲が一番高

第8図 静圧分布

上下方向
左右方向
前列の $100 \times 160\text{ mm}$ 四角の孔 22 個をふやした。(単位: mm)

第7図 脈動防止孔

第9図 コーナー・ベーン, 補強材

A. 風洞内

B. 風洞外

第10図 騒音特性

く、常用 40 m/s の運転時でも、風洞内 105 ホーン、風洞外 70 ホーンが計測された。

風洞の近くに民家があり、栃木県騒音防止条令によれば、住宅地域で、午前 8 時から午後 6 時までは 55 ホーン以下でなければならないので、条令に違反していることになる。

一方、風洞内は、国際的な ISO 規格の一般作業場を適用してみると、やはり常用運転時でも、最大 30 ホーン以上こえていることが分かる。

第 9 図に示す 6 mm 厚の鉄板をプレスで曲げたコーナー・ペーンが、風路の四角に合計 40 枚入っている。

騒音の一原因となるこのペーンの振動防止だけでなく、気流の乱れや長い目で見た場合、ペーンの振動特性ひいては安全運転のために、3/4 inφ のガス管を、その径の 2/3 程度までつぶして楕円にし、ペーンの上方向中央、気流方向上下流の端 2 点にわたし、おのおのペーンを連結した。

その効果は第 10 図に示すとおり、ペーンの固有振動数が 70 c/s 程度なので、騒音の改善のあとは、100 c/s 以下で顕著に現われ、高次の振動より発生すると考えられる 1,000 c/s 以上で、騒音レベルがわずかに下がった。

騒音レベルの一番高い、250 から 1,000 c/s の範囲では変化が現われなかったが、ペーンを連結したことにより、ペーンの振動特性、気流の乱れなどが改善された。

5-4 コーナー・ペーン振動特性 ペーンにストレン・ゲージを貼り、振動によって生じる応力変化を計測してみた、

ペーン連結前後のペーンの応力特性は第 11 図に示す如く、オシロに現われた振動の振幅を考慮しても、

第 11 図 コーナー・ペーン振動特性

1/3 以下に減少したが、疲労寿命に関しては連結前でも、鋼板の許容応力の 1/10 以下であるので、半永久的である。

5-5 気流の乱れ 風速 40 m/s, 乱れ係数 1.1 から 1.4 を目標とし、くるみの木で直径 110 mmφ の圧力球を造った。

この圧力球を用いて、ペーン連結前後の気流の乱れを計測した結果を第 13 図に示す。

コーナー・ペーン連結なし……乱れ係数 1.36

コーナー・ペーン連結あり……乱れ係数 1.29

乱れ係数で 5% 程度の改善が出来た。

5-6 風向 測定部の気流の偏向を測るため、ヨー・メーターを用いたが、風洞の軸に対するヨー・メータ

第 12 図 圧力球 (単位: mm)

第13図 気流の乱れ

吹出し口に30mmφの丸棒を縦と横にわたし、吹出し口から1.4m下流、天秤中心位置(1.4m右)にて動圧を計測

第14図 風 向

一のセットが難しく、またヨー・メーター自身の精度も加わって、0.5度以上の精度が得られなかった。

次に考えた方法は、丸棒のウェイク・サーベイで、吹き出し口に30mmφの丸棒を縦と横にわたし、吹き出し口から1.4m下流、天秤中心位置で、ピトー静圧管を上下、左右に動かすことにより、動圧を計測した。

動圧の計測結果より、丸棒より出る渦の中心位置を求めて風向を決めた結果、上下、左右とも気流の偏向はないことが分かった。

5.7 プロペラ回転数、モーター出力、風速 金網をふやし、脈動防止孔の開度を上げ、またコーナー・ペーンをガス管で連結したりしたので、測定部の風速の大幅な低下を懸念したが、同一出力に対し高々5%

弱であり、最大風速も65m/sが62m/sに落ちた程度で済んだ。

5-8 気流の温度上昇 水銀温度計を測定部に置いて、気流の温度上昇特性を、常用および最高運転時の2ケースについて計測した結果を、第16図に示す。

普通の六分力計測風試では、1ラン30分以内なので、温度上昇分は常用で6度、最高運転時でも14度みこんでおけばよいが、模型のセットの時間が短かく、ほぼ連続運転とみなされるような場合、特に夏期の長時間運転は、気流温度の降下を計り安全運転に注意を払う必要がある。

そのほかに、運転開始より5分間は気流の温度上昇が激しいので、より良い風試データを得るといふ観点から計測開始を避けた方がよいことが分かる。

第15図 プロペラ回転数, モーター出力, 風速

6. 後 記

この風洞の製作に当たって, 風路・建物等の建築物を清水建設(株), 制御盤製作, モーター調整等電気関係を富士電機(株)が担当し, 計画・設計および全体の

第16図 気流の温度上昇

取りまとめを当社で行なった。

なお, 以上述べたように全体の規模を小さく, コンパクトにまとめた結果, 建設費は通常の場合に比して約 1/2 から 1/3 程度となったことを付記しておく。

本風洞の計画設計は松田および平野昇吾が担当し, 風洞特性の検定・改善を安藤が担当した。

最後に, この風洞の計画設計に際し, 有益な御指導, 御助言を賜わった明治大学山名教授, 東京大学中口教授, 航空宇宙技術研究所荒木部長, 防衛庁技本第三研究所能村技官, また風洞特性の改善に際し御指導下さった日本航空機製造(株)小早川技師をはじめ, 多くの方々に深く感謝の意を表する。

書 評

佐貫亦男著: ロケット工学 コロナ社 昭和 45 年 12月発行

宇宙開発に関心がこれほどかまっているのにロケットにかんする邦書が少ない。宇宙工学は総合工学だから推進剤から誘導制御まで幅広い知識が必要であるが読み易い手頃な参考書がほとんど見当たらない。著者は東大工学部で 10 年間, 学部や大学院の学生にこのテーマで講義され, その原稿をもとにして本書が作られた。したがってわかり易く, 材料もよく選択されている。著者は「飛行機の本」などでも文筆家として令名が高いが, この本は学術書ではあるが記述が面白くつつりこまれてしまう箇所も少なくない。

内容は超高層大気, ロケット推進, ロケットの歴史, ノズルの理論, 推進剤, 液体ロケットのシステ

ム, 固体ロケットのシステム, 飛行性能, 誘導制御, 宇宙飛行の全部で 10 章よりなっており巻末に主要なロケットの要目の一覧表が付いている。

このような広い範囲の題材をどのような方面の人にもわかるようにバランスをとって手ぎわよく纏めることができるのはこの著者においては他に適当な執筆者が見当たらない。しかし他面このような本を短期間手際よくまとめることができたのは著者が優れた研究者, 教育者ではあるがロケットの打ち上げの実際に直接的にタッチしていない故でもある。そのような意味ではいわゆるロケット技術者や宇宙開発の実験家などからはいろいろ苦言や註文が出るであろうがそれでも入門書としての本書の価値を少しも損うものではない。

(近藤 次郎)