

3次元煙風洞の製作

Manufacturing of smoke tunnel for flow visualization around a vehicle

安 昭八*

Shohachi YASU

Abstract: This paper has described a 3 dimensional smoke wind tunnel for flow visualization around a vehicle. Students have completed a preliminary design of the wind tunnel which can be blown the maximum velocity 12m/s in measurement section. In addition, this process can provide exercises for designing a system and machining of the element of wind tunnel apparatus to meet desired needs within realistic constraints such as economic and safety, problem-solving experience that incorporates the necessary elements for engineering skill.

Key word: smoke wind tunnel, engineering design, practice, experiment

1. はじめに

静岡理工科大学機械工学科の学生が履修する機械工学実験2・航空工学実験は、それぞれ3年次のロボットブイークル工学コースと航空工学コースの必修実験科目である。両コース共通実験テーマの一つとして煙風洞実験を計画した。本実験の目的は、物体周りの流れの現象、具体的には自動車の周りの流れ、航空機の主翼周りの流れを実際に観察し現象を理解するためである。そのためには当該流れ場を可視化できる新たな実験装置を設計・製作する必要があった。本稿では、筆者による風洞の概念設計に基づき学生達が卒業研究として自ら基本設計を行い、学生実験用装置としての3次元煙風洞装置を完成させたので、その製作工程と風洞の詳細仕様について報告する。

2. 風洞の概念設計

2.1 設計条件

機械工学科の学生実験に供するための風洞、かつ学生が簡単に操作できるレベルの風洞であることを基本とし、以下に示す条件を満たすものとした。

- ① 煙流脈法等の可視化手法を使えること
- ② 低コストで製作出来ること
- ③ 学生が安全で容易に実験装置を操作できること

2.2 概念設計方針

前項の条件を満たすための煙風洞の概念設計方針として次のように設定した。

- ① 測定部における流れの乱れを極力少なくするために吸込み風洞とする。また、測定部で煙流脈が拡散しないよう風洞上流側の整流部断面積と測定部断面積の比（縮流比）を10以上にする。

- ② 煙発生装置からの煙を測定部にスムーズに流入させるために、測定部が大気圧より負圧になるよう整流部に適度なメッシュのスクリーンを設置する。
- ③ 整流部のハニカム据付やスクリーンの取付けを容易にするために、整流部を3分割に分離できる構造とする。
- ④ 楕形の煙発生プローブは従来の煙風洞と同様に縮流部の変曲点に挿入する。¹⁾
- ⑤ 測定部に置かれた供試体周りの流れの観測を容易にするために、測定部には大型の観測窓と照明用窓を設ける。また、3次元的な流れを可視化できるよう測定部下流の拡大部曲がりダクトにも観測窓を設ける。
- ⑥ 低コストで風洞を製作するために、風洞は木製とし地元の業者に製作を依頼する。また、風洞に係わる機材の選定および調達は自前で行い、風洞製造業者への一括発注はしない。
- ⑦ 煙風洞に必要な機材の内、機械工学科で使用せずに保管している実験装置の機材を極力流用することにする。
- ⑧ 学生実験で学生が自ら風洞の始動操作や調整ができるよう実験テキストに操作手順を明記する。
- ⑨ 煙風洞の設計時点で、風洞の恒久的な設置場所が決まっていないこともあったため、風洞全体を分解・移動・再据付ができる構造とする。
- ⑩ 風洞の室内への煙発生装置の煙混入を防ぐために、風洞の排気は室外に排出する構造とする。これは煙発生装置の煙ミストが室内に充満することを防ぐもので安全に実験を遂行するための措置である。

2.3 概念設計

前項の概念設計の方針に基づき、概念設計を行った。まず、風洞のサイズを決める要点として初めに測定部のサイズである。

測定部に設置する供試体の模型自動車断面積を $150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 程度と想定した場合、測定部での供試体のブロックを 10% 以内に収めるようにするためには測定部断面を横 $400\text{mm} \times$ 縦 600mm にする必要がある。

また、測定部での風速を 10m/s と想定した場合の必要空気流量は約 $10000\text{m}^3/\text{h}$ となる。この空気流量を吸込み式で駆動するためのファンの選定調査をした結果、三菱電機製の片吸込み型シロッコファン (BG-45KTA) が適していることが判明し、本煙風洞の駆動用ファンとして選定した。

測定部下流の拡大部の長さを 1.5m として、圧力損失を極力少なくするために測定部断面積と拡大部出口断面積の比を 1.04 程度となるよう拡大部の形状を設計した。また、拡大部出口寸法はシロッコファン吸込み口寸法になるようにした。

概念設計方針で述べたように整流部と測定部の断面積比は 10 以上であるとしているので整流部の断面サイズを 1.8m 角とした。また、整流部内に設置する整流用のハニカムやスクリーンの据付や調整作業を容易にするために整流部を流れ方向に 3 分割できる構造にした。

整流部から測定部までの縮流部の曲面は円弧で繋ぐようにし、変曲点近傍に煙発生用の楕円形プローブを挿入できる構造にした。

シロッコファン出口からの排気は室外に排出するよう排気ダクトで部屋の窓まで導いた。

上記の概念設計により図 1 に示すような煙風洞の概念図が完成し、これを基に学生に基本設計を実施させた。

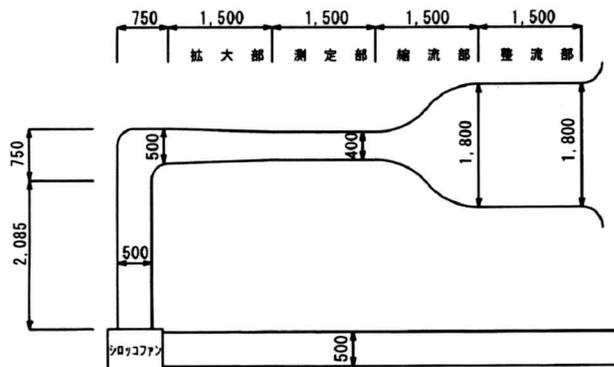


図 1 煙風洞概略図

3. 風洞基本設計

煙風洞の基本設計を卒業研究で実施させるためには学生達が事前に「風洞とは」を理解しておく必要がある。

そこで 2009 年度教育プログラムに風洞見学を申請したところ受理され、2009 年の夏季休暇中に学生達を連れて、東京大学駒場 1 号館にある東京大学航空宇宙工学科の煙風洞と 3m 吹出し風洞、三鷹の JAXA 各種風洞を見学し、風洞の理解を深めてから基本設計に着手した。以下にその主要な結果を示す。²⁾

3.1 整流部

煙風洞の上流部である整流部は概念設計で述べたように流れ方向に 3 分割する構造になっており、それぞれ滑車付きの台車に載る構造である。それぞれはフランジで接続される構造で、最上流側の内部には厚み $50\mu\text{m}$ のアルミ製で流れ方向長さ 198mm 、コアサイズ $5/8$ インチの整流ハニカム (住軽エンジニアリング㈱製) と出口部に $2\text{m} \times 2\text{m}$ のグラスファイバースクリーン 14 メッシュ (株式会社くればあ製) が設置されている。中間の分割部にはハニカムは内蔵されず出口部にグラスファイバースクリーン 14 メッシュ (株式会社くればあ製) が設置されている。最下流の分割部には厚み $50\mu\text{m}$ のアルミ製で流れ方向長さ 198mm 、コアサイズ $1/2$ インチの整流ハニカム (住軽エンジニアリング㈱製) と出口部に $2\text{m} \times 2\text{m}$ のグラスファイバースクリーン 18 メッシュ (株式会社くればあ製) が 2 枚設置されている。

3.2 縮流部と測定部

煙風洞の縮流部は流れ方向長さが 1.5m で、その側面は整流部と測定部内壁面をスムーズに接続するため曲率半径 982.2mm と曲率半径 975.3mm の逆向きの 2 つの円弧で結ぶ形状とした。また、縮流部上下壁面は曲率半径 1174.3mm と曲率半径 1135.8mm の逆向きの 2 つの円弧で結ぶ形状とした。測定部での風速が 10m/s 近傍まで煙流脈が乱れず可視化できるよう縮流比を 10 以上の 13.5 とした。

図 2 に整流部と縮流部、測定部までの形状を示す。図中の縮流部の変曲点近傍には楕円形の煙発生プローブの設置位置を示す。また、測定部の正面 (側面) には供試体周りの煙流脈を可視化できる $600\text{mm} \times 1000\text{mm}$ のサイズのガラス製観測窓が設置してある。

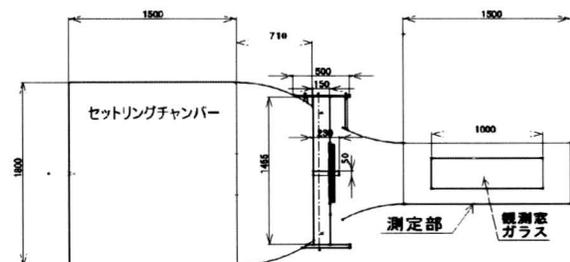


図 2 整流部、縮流部と測定部の形状

なお、拡大部の出口部の曲がりダクト側面にも 200mm×200mm の観測窓ガラスが設置してあり、供試体後流の流れ模様を下流側から観測できる構造となっている。

測定部の上面及び下面には 300mm×1000mm の照明用ガラス窓が設けてある。

測定部内面は黒色の艶消し塗装をしてあり、ガラス製の観測窓の対向面は黒色の板状面となっている。

また、図 3、4 に示すように供試体である翼型の迎え角を自由に変更できる翼型回転機構が取り付けられている。

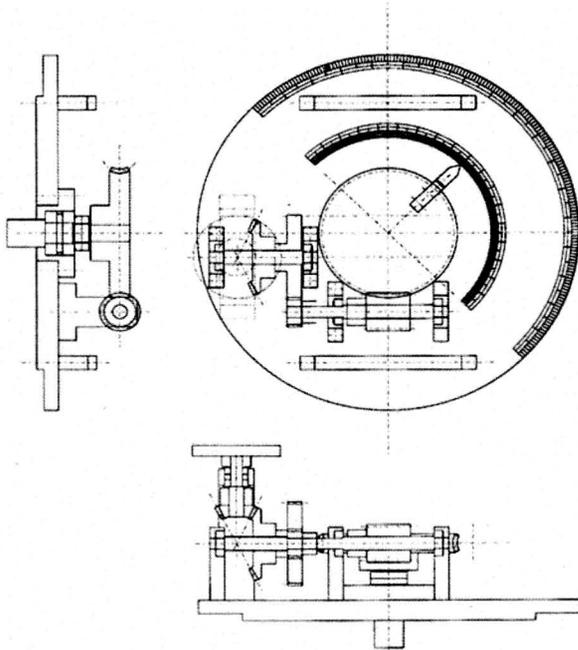


図 3 翼型回転機構の構造図

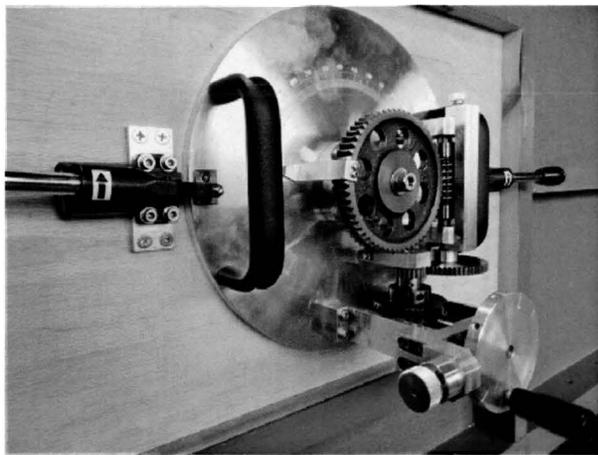


図 4 翼型回転機構の完成写真

また、図 5 の写真は翼型の迎え角を 0 度から 5 度程度に傾けた状態を正面の観測窓ガラス側から見たものを示す。このように翼型回転機構により翼型を予定した角度に設

定できるようになった。

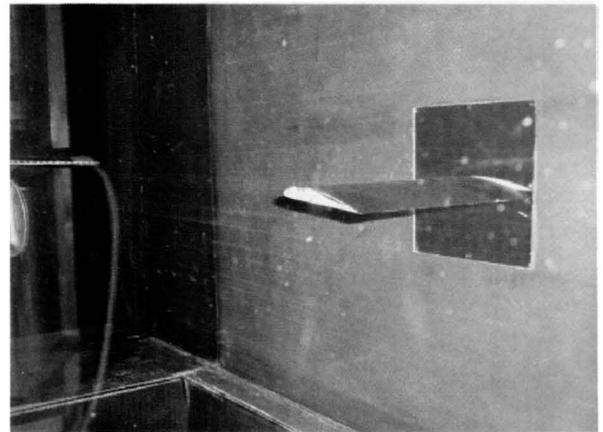


図 5 翼型に迎え角を付けた状態

3.3 風洞駆動源

概念設計段階で選定した三菱電機製の片吸込み型シロッコファン (BG-45KTA) は最大動力 6kW のインバータ付きモータで駆動され、回転数を遠隔で制御できる機能を有している。本ファンの吸込み口、吐き出し口のサイズは 500mm の角形となっており、60Hz の電源で 11000m³/h の定格風量である。

3.4 煙発生装置および楕形煙発生プローブ

煙発生装置にはドイツのルック社製 VIPER nt (日本取扱業者 株式会社ギミック) を採用した。煙素材は専用の流動パラフィン系のオイルを使用し、装置内で加熱・沸騰させ冷たい空気を吹き付けて煙の素になる微粒子を発生させている。本煙風洞は吸込み式であり楕形の煙発生プローブが挿入される縮流部は大気圧より負圧になり煙発生装置からの煙は自然に風洞内に流れる構造となっている。しかしながら風洞内の流速が遅い場合には負圧効果が少なく、煙発生装置から楕形プローブまでの内径 30mm のビニールホース配管での圧力損失があり、煙が自然に流れないことが生じる。この課題を解決するために煙発生装置からの煙を一旦昇圧してビニールホースに流入させる必要がある。本装置では煙発生装置からの煙を一旦約 500mm 角の段ボール箱に入れ、その中に挿入された内径 30mm のビニールホースの入口端に内径 2mm のテフロンチューブを取付け、0.01MPa 程度の空気をビニールホース内に流している。このエジェクター効果により昇圧された煙が内径 30mm のビニールホース内を流れ、楕形煙発生プローブから風洞内に煙流脈を形成する構造にしている。

楕形煙発生プローブは長さ 1.5m、翼長 150mm、翼厚 22.5mm の NACA0015 の翼型形状になっており、内部は空洞である。発生プローブの後縁部の煙吹出し部は内径 4mm、長さ 30mm の銅パイプ 40 本が取り付けられており、ここか

ら煙が流脈状に風洞内を流れる構造となっている。

3.5 風洞内外装塗装

前述のように、煙の流脈は測定部上下面からの照明により白線のように照らされ可視化できる仕組みである。流脈をより鮮明化するために、測定部および縮流部、拡大部の内面は艶消しの黒色塗装を施した。

一方、風洞外装の塗装は塗布面積も広いため、2010年度の教育プログラムに風洞整備で申請をしたところ認可され、2010年度の卒研生の協力で図6に示すように風洞の外壁の塗装を完了した。図6は2012年度まで煙風洞実験をしていた坂口実験場での煙風洞写真である。

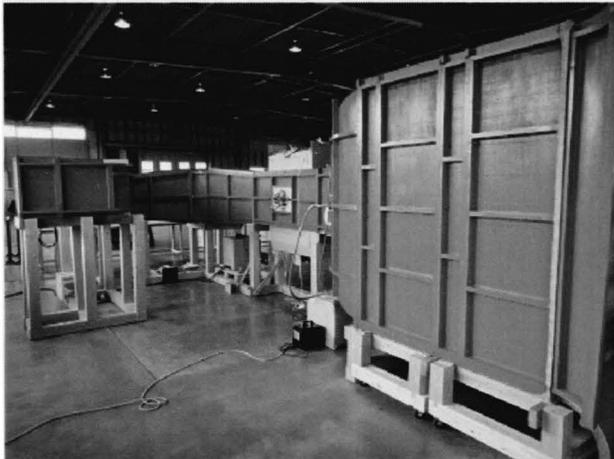


図6 煙風洞の外装塗装 (坂口実験場にて)

4. 煙風洞製作および使用状況

煙風洞の製作は地元建設会社である(有)山中建設に依頼した。基本設計段階から木造でどの程度までの加工が可能かなど相談に乗ってもらうことにより製作段階で無理のない詳細設計ができるようになった。なお、(有)山中建設にとって風洞製作は初めての経験であったため、2009年度の教育プログラムによる学生の風洞見学報告書から、国内にある既存の風洞を理解していただいた。

風洞の各部位である測定部、整流部、拡大部および縮流部の順で(有)山中建設の作業所で製作を行い、夢創造ハウス1階に各部位を搬入し、排気系ダクトを除き風洞の仮組を行った。

4.1 試運転

2011年3月に風洞の仮組立てが完了し、初めてシロッコファンを駆動し風洞内に流れを発生させた。この時点では煙発生装置は使用せずタフト法により風洞内の偏流がないこと、また風洞全体の振動も少ないことを確認した。2011年度後期の機械工学実験2・航空工学実験に間に合わせるよう同年4月に仮組立てした風洞を分解し、坂口実験場に移設、整備を行い、7月には学生実験に供することがで

きるような状態になった。

なお、煙風洞実験のテキストは2011年1月には完成しており同年にSIST教科書を発行した。2013年1月に若干の修正を行ったテキスト改訂版を発行した。³⁾

その後、2013年5月、やらまいか創造工学センターが竣工したのに伴い、本風洞を坂口実験場からセンター1階の空力実験室に移設することになり、8月に移設を完了した。2013年度後期からの煙風洞実験はやらまいか創造工学センターで実施した。この移設工事で、本風洞のシロッコファン上流部と下流部のダクトの一部を改造し、吹出し風洞にも転用できる構造にした。

5. まとめ

煙風洞のやらまいか創造工学センターへの移設後、オープンキャンパスで高校生・保護者への見学コースになり現象の可視化により理科の楽しみを体験してもらうことができるようになった。また、後期からの3年次の実験では前年度までのように坂口実験場への移動時間が削減され学生の肉体的疲労が緩和され、実験に集中できるようになった。

煙風洞の設計に際しては、概念設計段階から詳細設計段階に至るまで元東海大学高木通俊教授からは適時設計の助言をいただき当初の目標を達成することができました。ここに感謝します。

また、仮組立て状態での試運転では可視化情報学会風洞研究会幹事のミツワ電機㈱の高倉秀一氏にハニカム構造改造の指摘をいただいたこと感謝します。

低コストで製作することを目標にして製作を開始し、無事学生実験に供することができたのは(有)山中建設の絶大な協力があったことをここに記して感謝します。

煙風洞の翼型回転機構の製作や楕形煙発生プローブの製作および風洞の照明等の調整には工作センターの職員に協力いただいたことを感謝いたします。

大学トップからは2年間に亘り教育プログラムの認定をしていただき、学生達に実製品を作るための厳しさや国内の風洞見学を体験させることができました。また、JABEEが奨励するエンジニアリングデザインを実践する上でよい機会を与えることができたことに感謝します。

参考文献

- 1) 日本の低速風洞, 可視化情報学会誌, Vol. 14 Suppl., No. 3, 1994-7
- 2) 野口純弥 他, 煙風洞設計・製作・試験の研究, 平成21年度静岡理科大学機械工学科卒業論文
- 3) 静岡理科大学, 機械工学実験 1 機械工学実験 2 航空工学実験, 2013年度版