

Fig.2 煙濃度の測定方法

## 2.2 低乱熱伝達風洞～東北大学／高速力学研究所

1974年に仙台市青葉区にある、現流体科学研究所に上記の風洞設備を納入した。大型風洞（ノズルは対辺1010mmの正八角形）と小型風洞（ノズルは対辺290mmの正八角形）の二種類<sup>3)4)</sup>があるが、ここでは大型風洞について紹介する。風洞の主な仕様をTable 2に、測定部の写真をFig.3に示す。

この風洞はさまざまな意味で画期的なものであったと言える。性能仕様でも分かるように、風速分布で実測0.1%以内<sup>3)</sup>、乱れ強さは0.02%以内と現在でも最高のレベルのものである。

風洞の設計に当たっては、大学側からきめ細かい指示・指導・助言があった。縮流ノズル、金網枚数、コーナーバーン、軸流送風機ガイドバーンの翼型等の形状や寸法に関して、議論を尽くしつつ設計し、製作を進めていった。

最近の状況として東日本大震災直前にモーターを直流機から交流可変速機へ更新をした。モーター更新後の測定で、現在も当時の性能を維持していることを確認できていることを報告しておく。

## 2.3 大気境界層実験風洞～気象庁／気象研究所

1970年代に首都圏の過密化を緩和するために、筑波研究学園都市へ多数の研究機関が移転した。土木研究所、建築研究所等多数の機関が大型風洞を新設する事になった。その中で気象庁／気象研究所も移転することになり、設備として新しく大気境界層風洞（大型風洞）と回転実験装置を1980年に設置した。ここでは大型風洞に関して紹介する<sup>5)</sup>。大型風洞はエッフェル型の押し込み式であり、その諸元をTable 3に、概略配置図をFig.4に示す。特徴としては

- ・風洞全体が屋内に設置されており、気流が循環する事による温度上昇を補償する為に、冷凍機設備と熱交換器を設けている。
- ・測定部は静圧勾配を補正する為に、長手方向に勾配6/1000を設けた。
- ・計測及びデータ処理システムにミニコンを使用し、自動制御、実験データの収集、処理、解析を行う事ができる。主記憶容量の96kBや補助記憶媒体が磁気テープなど、当時を偲ぶと隔世の感がある。
- ・風洞の建設にあたっては、風洞審査委員会及び気象研

Table 2 風洞諸元(高速力学研究所)

風洞形式	密閉・開放共用回流式
ノズル出口寸法	正八角形断面 対辺距離 1.01m
縮流比	12.0
測定部長さ	3.5m
吹き出し風速	5～70m/s
風速分布	0.2%
乱れ強さ	0.02%
付帯設備	特になし



Fig.3 測定部

Table 3 風洞諸元(気象研究所)

風洞形式	密閉エッフェル吹き出し型
ノズル出口寸法	3,000W×2,000mmH
縮流比	6.0
測定部長さ	18m
吹き出し風速	0.3～20m/s
風速分布	1%
乱れ強さ	0.5%
付帯設備	速度・温度成層, トラバース装置(4軸) 他

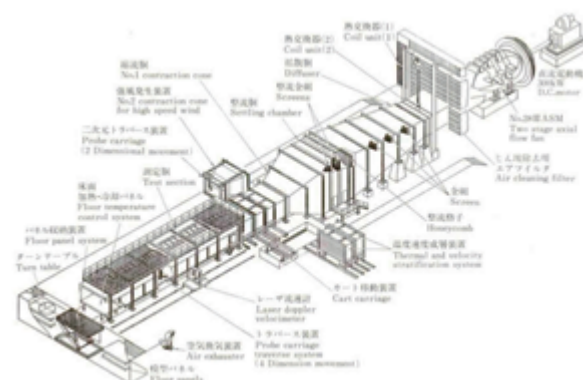


Fig.4

究所研究者との議論を踏まえ、助言・指導をいただいて進めていった。

## 2.4 建築用風洞～大林組／技術研究所

ゼネコン（総合建設業建設会社）向けに、今までかなりの数の風洞を納入してきた。古い順に列記すると、(株)竹中工務店・技術研究所(1981)、大成建設(株)・技術研究所(1983)、(株)間組・技術研究所(1992)等、十数の風洞がある。

Table 4 風洞諸元 (大林組)

風洞形式	密閉水平回流式
ノズル出口寸法	3000W×3000H (第1ノズル)
縮流比	4.0 (第1ノズル)
測定部長さ	22.5m (第1測定部)
吹き出し風速	40m/s(max)
風速分布	1.0%
乱れ強さ	1.0%
付帯設備	トラバース装置, ターンテーブル, 6分力天秤

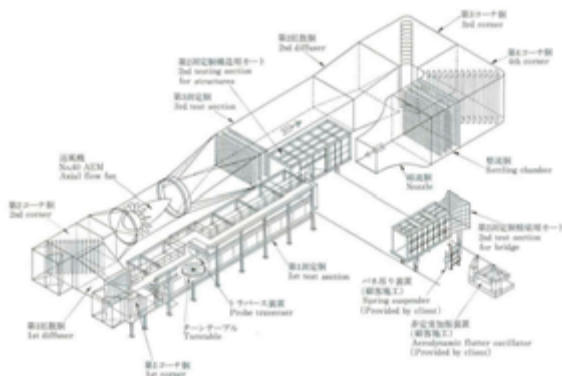


Fig.5 風洞鳥瞰図

高層ビル周りのビル風の影響の調査や、本州四国連絡橋公団による、長大橋の風の影響を調査測定する目的で、1980年に本州四国連絡橋風洞試験要領・同解説が発表された後、かなりの数の風洞がゼネコン各社に設置された。ここでは、その一例として(株)大林組・技術研究所に納入した風洞を紹介する(1993)<sup>13)</sup>。その諸元を Table 4 に、鳥瞰図を Fig.5 に示す。特徴としては測定部分が3カ所あり、高層ビル周りの風速分布や橋梁の風影響実験等、多目的に使用が可能なことである。

## 2.5 自動車用空力風洞

自動車の空力性能、いわゆる6分力を測定する為に、車の粘土模型(クレイモデル)を入れて測定するのが、スケールモデル風洞である。模型の比率は以前は、1/5, 1/4が多かったが、最近は1/2モデルまで出現しているので、風洞自体もかなり大きなものになってきている。他方実際の車を入れて空力性能を測定する風洞が、実車空力風洞である。

路面での実走行を模擬する為に、空力風洞ではいかにして床面境界層を薄くできるかが、気流自身の良さに加えて必要になっている。最近では境界層吸込装置に加えて、移動地面板(Moving belt/Rolling road)が採用されるようになってきているが、ここでは内容は割愛する。

スケールモデル風洞として、マツダ(株)/R&D センター横浜向け1/5スケールモデル風洞<sup>6),7)</sup>(1990)と、日産自動車(株)/厚木テクニカルセンター向け大型実車風洞設備<sup>8),9)</sup>(1985)について紹介する。Table.5, Table 6 はそれぞれの主な仕様を、Fig.6, Fig.7 は配置図を示す。

Table 5 風洞諸元 (マツダ)

風洞形式	縦型回流式-1/5 スケールモデル用
ノズル出口寸法	1500W×1000H
縮流比	12.0
測定部長さ	2500mm (3/4 開放)
吹き出し風速	5~220km/h
風速分布	0.5%
乱れ強さ	0.18%
付帯設備	境界層吸込装置, トラバース装置, 6分力天秤

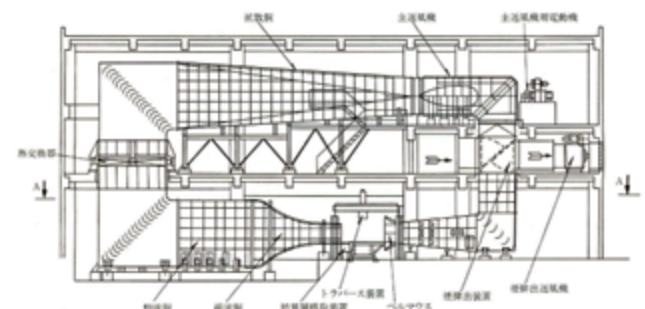


Fig.6 風洞正面図

Table 6 風洞諸元

風洞形式	単路回流-セミオープン型
ノズル出口寸法	7000W×4000H (5000W×3000H)
縮流比	6.43 (12)
測定部長さ	12m (3/4 開放)
吹き出し風速	190km/h (270km/h)
風速分布	1.0%
乱れ強さ	0.2%
音響性能	66dB(A)@100km/h(第2ノズル)
付帯設備	境界層吸込装置, トラバース装置, 6分力天秤, サイレンサー

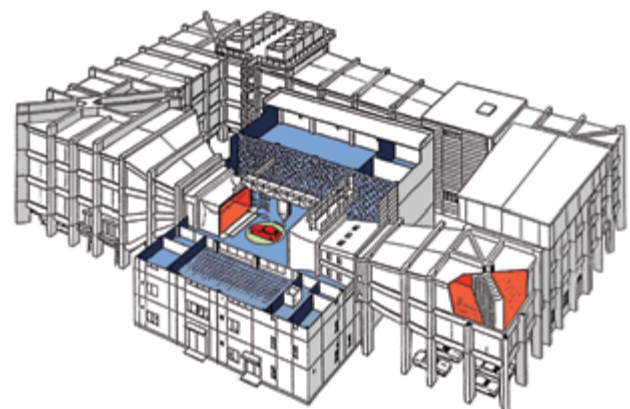


Fig.7 実車風洞鳥瞰図

マツダ(株)向けスケールモデル風洞の特徴は、そのノズルの縮流比12と言う値の大きさであろう。一般的にだが、このような風洞の場合縮流比は6程度が多い。確か



に風速分布にしても乱れ強さにしても格段に良い値となっている。また電動機出力 190kW と小さいにも拘わらず、気流温度を上げないように熱交換器が附属している。常温の水を冷水として使用するので、効果は限定的と思われるが、豪華な設備である。また煙で流れを目視する場合を想定して、開放回路にもできるようにしている事である。

日産自動車(株)向け実車風洞は、自動車の実車風洞としては新時代を拓くものであった。

それまでの低騒音風洞やサイレンサの経験をもとに、風路内面の吸音材による減音量を主とし、不足分はコーナーベン自体をサイレンサに仕立てて補い、開放型測定部は半無響室にすることで、サイレンサなしと同等の電動機出力で、気流中の車両から発生する騒音を観察者の目と耳で体感できる運用を可能にした風洞である。

Table 6 には 100km/h の時に 66dB(A) と記載されているが、この値は低騒音化を図る事によって、従来のものより約 10dB 以上下がった事を物語っている。現在では技術が進んで、一層の低騒音化が図られている風洞が設置されるようになってきた(2.6 項を参照)。

日産自動車(株)の実車風洞はパーソナルコンピュータ(PC)が普及し始めた頃で、風洞技術者が自ら作成したプログラムで自動車の最適設計を容易に実行可能になり、その成果が形になったものである。

自動車風洞では、エンジン単体の試験をする為の車速ファン(送風機にノズルが付属したもの)や、熱砂の状態や寒冷地を模擬させる環境風洞が、空力風洞に比べて、数多く製作されている。温度・湿度制御は勿論のこと、最近は加速・減速の厳しい要求が多い。このレポートでは割愛する。

## 2.6 低騒音風洞

前述の東北大学低乱熱伝達風洞(1974)では風洞測定部での騒音が乱れ性能に悪影響を及ぼすことが懸念されたので、拡散胴と偏流胴風路面に吸音材を内張りしてダクト内を伝搬する送風機騒音の低減を図るとともにブリーザーホール部分にはサイレンサを配置し、さらに建屋内壁面と天井にも吸音材を貼り付けた結果、満足できる成果が得られた。

1978 年、電力中央研究所に電線の風切り音研究用として小型低騒音風洞<sup>10)</sup>を納入した。この風洞は既設の地下室に搬入・設置するために全体寸法と部品寸法を吟味して単位長さ当りの減音量が大きいセル型サイレンサを導入した。Table 7 に風洞諸元を、Fig. 8 に配置図を示す。尚、現在、本風洞は神奈川工科大学に移設されている。

1981 年、旧荏原総合研究所に設置した無音気流風洞<sup>11)</sup>は遠心送風機からの気流を共鳴型と吸音型を複合した大型サイレンサを経由して縮流比 25 のノズルで無響室内へ吹出すものである。Fig. 9 に全体配置図を示す。

1996 年、(財)鉄道総合技術研究所の大型低騒音風洞<sup>12)</sup>

Table 7 風洞諸元

風洞形式	開放式ゲッチング型
ノズル出口寸法	500W×500H
縮流比	5.76
測定部長さ	1200mm (開放)
吹き出し風速	36m/s
風速分布	1.0%
乱れ強さ	0.5%
音響性能	55dB(A)@30m/s

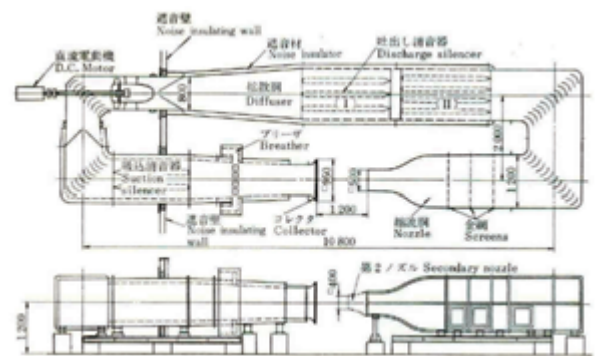


Fig.8 風洞全体図

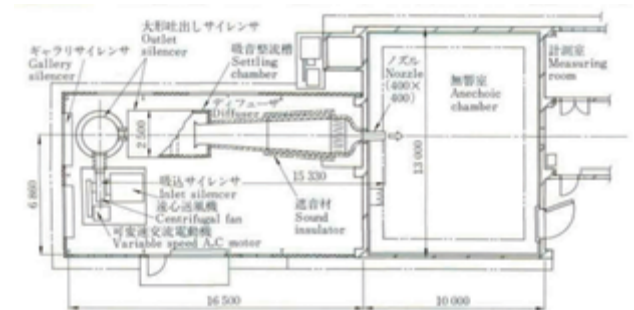


Fig.9 無響風洞全体図

が完成して風洞の低騒音化が一段と向上し、その後、更なる低騒音風洞も出現している。そして 2010 年代では、低騒音風洞の設計に CFD が導入されるようになっていく。

## 3. 風洞の設計概要

2 章でさまざまな風洞を紹介してきた。では、これら風洞設備はどういう順序で設計して行くのか、少し述べてみたい。

### 3.1 顧客からの要求項目

顧客からの要求項目は①ノズル出口の大きさ(=測定部の大きさ)②最大風速が先ず絶対であり、続いて③測定部長さ④気流性能(分布や乱れ)となる。ここでは、開放型回流風洞の例を取り上げる。

### 3.2 ノズル形状およびコレクターの大きさの決定

測定部の仕様(風速, 分布, 乱れ等)を確保する為に, 一番先にすることはノズル形状を決める事である. ノズルの縮流比と輪郭線を決める必要がある. 縮流比は, 大きければ大きいほど性能が良くなる事は分かっているが, 大きく取ると不経済であるので, コストと性能を比較して値を決める. 一般的には4~6程度が多いようである. ノズルの輪郭線は, 平面曲線を2つ重ねあわせたもので, 変曲点で微分係数(勾配)が一致していればよい. 文献3)では三次曲線を使用している. 尚ノズル直前の整流胴部分には整流格子(ハニカム)と整流金網を設置する場合が多いので格子の大きさと長さ, 金網のメッシュと枚数を検討しておく必要がある.

次にコレクターの大きさを決定するが, 測定部でノズルから吹き出た自由噴流がどういう挙動を示すのか, 理論或いは経験からコレクターの大きさを決める.

### 3.3 試行錯誤の風洞配置計画

ノズル形状とコレクターの大きさが決定すれば, 第二コーナー後に送風機を, 四隅にコーナープーンを配置して, ダクトを繋ぐ計画を行う. 送風機部分の断面積が最小になるのが通例なので, 注意することは, ダクトの形状変化(丸から四角)や拡大・縮小部分の連続となるので, 剥離が極力少なくなるように, 圧力損失が少なくなるようダクト形状を決める必要がある. 理想を求めると電動機出力は小さくても, 風洞自体が大規模になるので, その当たりを比較検討し, 試行錯誤で配置計画をしてゆかねばならない. 最終的な形状が決まったら, 最終的に圧力損失計算を行い, 最適な軸流送風機を決定する.

風洞の設計は言葉で表現すると以上のようなになるが, それほど簡単では無い. 十人十色と言うが, 専門家が設計しても測定部は同じでも, 多少とも違うものができるのが通例である. 風洞は, レディメイドではなく, オーダーメイドなのである.

さらに, 絶対に考えておかねばならない事は

- ・開放型測定部, 回流型風洞の場合には気流の自励振動防止の為に, コレクター後にブリーザーホールを設けておく必要がある. 外国のエンジニアリング会社の風洞の設計では, コレクターを工夫して, 設けない例もある.
- ・電動機動力は, 風洞内部の空気を暖めることになる. 数百kWになると, 温度がすぐ上昇するようになるので, 空気を冷やす熱交換器が必要になってくる. さらにには冷

水をつくる設備も必要になるので注意が肝心である.

- ・床面境界層の厚みが規定される場合は, 境界層吸込設備を必要とするし, 大がかりなら移動地面板も必要となる.

## 4. 纏め～終わりに

古い資料を使用してではあったが, さまざまな風洞の紹介と風洞設計の進め方について簡単に述べてみた. 著者の力不足もあり, 内容に不備があるかも知れないので, その点はご容赦願いたい.

風洞による実験即ち, 実験流体力学(EFD)の必要性・重要性は認めつつも, 最近のスーパーコンピュータの発展による, 数値流体力学(CFD)の攻勢もあなどれない. 今後 EFD と CFD の関係が相互に補完するような関係に進む事を思って, このレポートを締めくくりたい.

## 参 考 文 献

- 1) 可視化情報学会:日本の低速風洞, 可視化情報学会誌, Vol. 14, Suppl. No. 3 (1994).
- 2) 牧 重輝, 酒井潤一, 村田栄作: 大気拡散風洞設備と自動測定, エハラ時報, Vol. 89, (1974) pp. 15-21.
- 3) 伊藤英覚他: 東北大学 高速力学研究所附属気流計測研究施設低乱熱伝達風洞設備および風洞性能について, 東北大学 高速力学研究所報告, Vol. 44, (1980) 395号 pp. 93-151.
- 4) 小浜泰昭他: 小型低乱風洞の性能測定結果について, 東北大学 高速力学研究所報告, Vol. 48, (1982) 422号 pp. 119-142.
- 5) 尾形俊輔, 武居邦光, 山下文人, 森 豊: 風洞設備—気象庁気象研究所納入—, エハラ時報, Vol. 115, (1981) pp. 23-29.
- 6) マツダ(株)向け自動車用模型風洞設備, エハラ時報, Vol. 154, (1992) pp. 87-88
- 7) 橋口真宜他: 新設模型風洞, マツダ技報, Vol. 9, (1991) pp. 170-178
- 8) 川口 実, 武居邦光, 山下文人: 大型空力実車風洞設備—日産自動車テクニカルセンター納入—, エハラ時報, Vol. 136, (1987) pp. 25-30
- 9) N. Ogata, N. Iida, Y. Fujii: Nissan's Low-Noise Full-Scale Wind Tunnel, SAE Technical Paper Series 870250, International Congress and Exposition Detroit, Michigan, February 23-27, 1987
- 10) 結城邦之: 電力中央研究所納入低騒音風洞設備, エハラ時報, Vol. 106, (1978) pp. 28-29.
- 11) 丸田芳幸他: 無音気流風洞による流力騒音の研究, エハラ時報, Vol. 141, (1988) pp. 61-66.
- 12) 近藤善彦他: 大型低騒音風洞設備の紹介, 自動車技術学会誌, Vol. 54, No. 6 (2000) pp. 26-31.
- 13) 多目的風洞装置, エハラ時報, Vol. 162, (1994) pp. 54-55