

風洞の製作

角田哲也* 吉田年輝**

Manufacture of Wind Tunnel

Tetsuya SUMIDA and Toshiteru YOSHIDA

Abstract

For the purpose of the experimental investigation of Fluids engineering, wind tunnel has manufactured at Gas Turbine Laboratory in Oshima National College of Maritime Technology. From the measurements of the mean velocity in section at contraction exit and the static pressure distribution in the boundary layer at the center section on the measuring plate, the wind tunnel performance was examined. From these results, it was clear that the present wind tunnel might be used at range of wind speed that about 0 to 20m/s (where unit Reynolds number is $1.24 \times 10^6 \text{m}^{-1}$).

Key words: Wind tunnel, Velocity distribution, Pressure distribution, Pressure gradient

1. 緒言

流れの運動を記述する方程式として連続の式と Navier-Stokes の式 (以下, $N \cdot S$ 方程式) が知られている. このうち, $N \cdot S$ 方程式は非線形の楕円型偏微分方程式のため, 解析的に解けるケースは非常にまれである. 最近ではコンピュータで $N \cdot S$ 方程式を数値的に解く方法が急速に発達している. しかしながら, コンピュータの容量および計算速度の不足のため, 限られた流れ現象しか解くことはできない. さらに, 乱流を取り扱う方程式の場合, 必ず方程式の数よりも未知数の数が多くなるため解くことができない“乱流のクロージャ問題”に直面する. 今のところその方程式を閉じるためには近似式を付加する. しかし, この近似式を作る際, 多くの場合, その場限りの限定的な仮定をたてるしかすぎない^[1]. この点は仮にコンピュータの容量および計算速度が飛躍的に向上しても乱流現象を数値計算のみで解決することは困難であることを示唆する. このため, それぞれの問題目的に適した流れ場を作成し, 実験する必要がある. 空気を用いた実験では流れを作成する装置が風洞装置である. 風洞装置で流れ場を計測することに

よって流れ現象のみならず, 数値計算との比較や計算モデルの構築などの一助となり得る. それゆえ, 風洞を製作することは意義がある.

本実験室では物体周りの流れ場を解明する手順として, まず, 流れ場全体のフローパターンを把握するための可視化実験用水槽を製作した^[2]. 次に, 水槽の可視化結果を基に風洞で流れ場の圧力, 速度などの情報を得る予定である.

以上の点をふまえて, 風洞装置を製作し, その製作要領および基本性能について報告する.

2. 設計および製作

2.1 基本設計

風洞装置はガスタービン実験室に設置する. 装置全長は実験室の寸法を考慮し約 10.3m とした. 流れ場は圧力勾配が自由に調節できるようにする. 測定部側壁および天井板の材質は流れの可視化のために透明アクリル樹脂板とする. 測定平板には厚さ 1/2inch (12.5mm) のベークライトを用いる. 主流速度 U_1 の最大速度は 20m/s (単位レイノルズ数 Re は $1.24 \times 10^6 \text{m}^{-1}$) を目安とする.

2.2 風洞本体

風洞の主要構成要素はモーター、送風機、拡がり部、集合胴、絞り部および測定部である。モーターの形式は安川電気（株）製、VS モーター3 極 200V、出力は7.5kw でVS コントローラーを用い、モーターの回転数を変化させることによって風速を調節する。送風機の形式は、極東機械（株）製で風量 130m³/min、静風圧 40mmaq、回転数 1000rpm である。

送風機と拡がり部は幅 400mm、高さ 430mm、長さ 200mm の合板と同寸法のゴムダクトで接続した。ゴムダクトはゴムパッキンで作成した。ゴム製ダクトはモーターと送風機の振動を拡がり部以降の部分へ伝達させないために採用した。拡がり部への空気の流入を流路断面内で極力均一にさせるためにダクト内に案内羽根を挿入した。防振対策として風洞の土台に厚さ 10mm の防振パッドを敷いた。拡がり部は送風機からの空気の速度を減じ、圧力を上昇させる。これは厚さ 10mm の合板と 30mm 角の補強材から成り、形状は片側約 15° の二次元的に断面を広げている。集合胴の役目はハニカムおよび整流金網で速度に対する乱れ強さを減ずることである。集合胴は3個の幅 400mm、高さ 1970mm、長さ 300mm×3 部分と幅 400mm、高さ 1970mm、長さ 300mm×1 部分から構成されている。なお、整流金網は最適開口比 0.57 になるべく近い市販金網を使用した。絞り部は二次元絞りでその形状は壁面に沿ってはく離点が存在しない島の式^[3]から算出して決定した。

測定部の断面寸法は 700mm×300mm、長さが 2100mm である。測定部入口は測定平板前縁において流線が曲がらないように下方および上方へ流体を吹き出す構造とする。また、測定部出口には図 1 のようなフラップを設置して、流れ場全体の圧力を微調整する。測定部側面は数枚の亚克力板で構成され、それらの板間は温度に基づく熱膨張によって亚克力側面の開閉が困難にならないように 0.5mm の隙間を設けている。

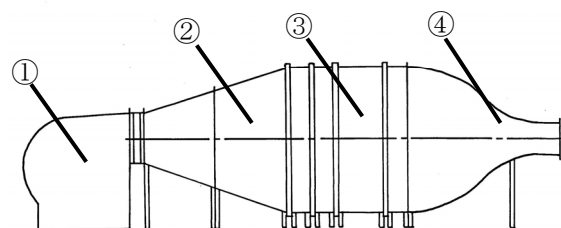
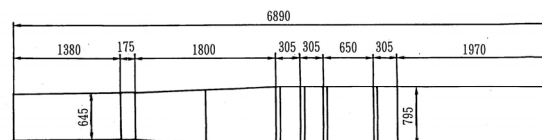


図 1 フラップ

2.3 付属装置

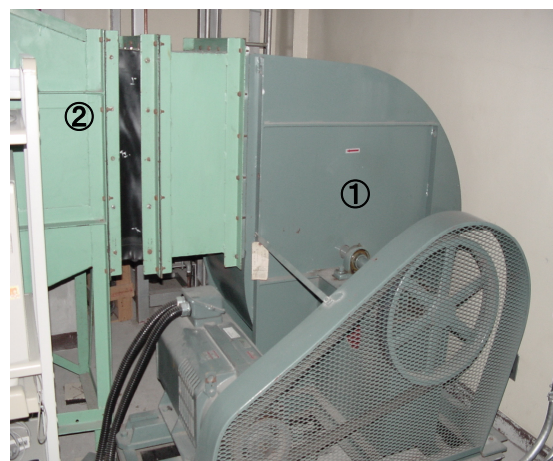
2.3.1 トラバース装置

測定部において任意の位置の速度を測定するには、測定部を三次元的に動かす必要がある。このため、トラバース装置を製作した。トラバース装置はハイトゲージによって高さ方向、ハイトゲージを載せている台車によって流れ方向およびスパン方向の三次元方向に移動が可能である。



①ファン ②拡がり部 ③整流部 ④絞り部

図 2 風洞本体



①ファン ②拡がり部

図 3 ファンおよび拡がり部

2.3.2 ゲッチンゲンマンオメーター

マンオメーターの原理は、ピトー管で測定した流れの圧力によって容器内に封入されているアルコールを押し下げ、圧力の大きさを高さに変換することである。この変化した高さを読み取り顕微鏡によって読み取ることによって全圧、静圧または動圧の大きさを液面高さで測ることが可能である。ゲッチンゲンマンオメーターのタンクとガラス管の径は誤差を少なくするため、断面積比が 0.001 以下になるようにした^[4]。流速はピトー管で測定した。平板の圧力測定は測定平板にφ0.5mm の孔を流れ方向に 9 箇所、スパン方向に 200mm 間隔に 3

箇所合計 27 箇所設けた。動圧および壁面静圧はビニールチューブを介してタンク内の液面に伝達され、その液面上昇 ΔH を読み取り顕微鏡で読み取り、流速 U_1 および圧力係数 C_p を求めた。流速は式(1)で、圧力係数は式(2)で算出した。 $P-P_\infty$ はゲージ圧力、 ΔH_1 は主流速度設定時の液面上昇、 C はピトー管係数である。 ρ は流体密度で、添字の al はアルコールおよび a は空気を示す。

$$U = C\sqrt{2\rho_{al}g\Delta H / \rho_a} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} C_p &= \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho_a U_1^2} = \frac{\rho_{al}g\Delta H}{\frac{1}{2}\rho_a U_1^2} \\ &= \frac{\rho_{al}g\Delta H}{\frac{1}{2}\rho_a \frac{2\rho_{al}g\Delta H_1}{\rho_a}} C \quad (2) \\ &= \frac{\Delta H}{\Delta H_1} C \end{aligned}$$

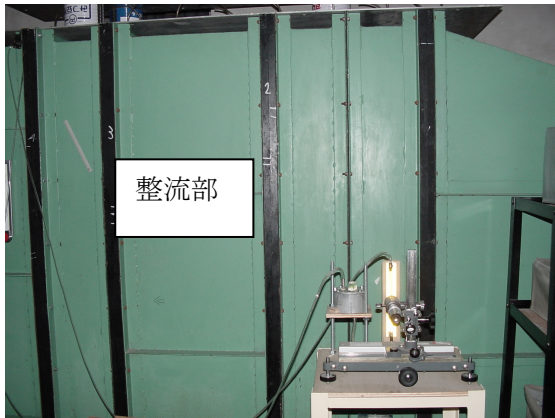


図 4 整流部

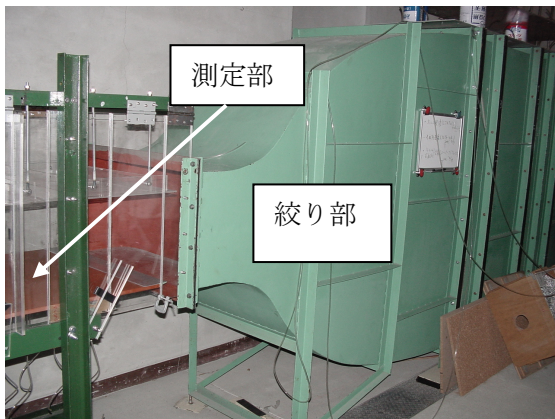
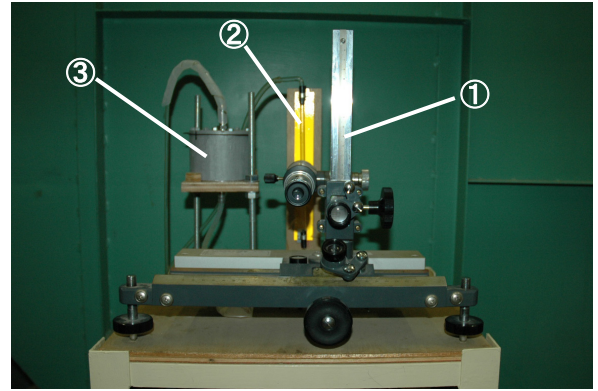


図 5 絞り部



①読み取り顕微鏡 ②ガラス管 ③タンク
図 6 ゲッチングマンノメーター

3. 風洞性能

3.1 絞り部出口断面性能

風洞のファン、拡がり部、集合胴および絞り部を連結した後、測定平板設置高さの決定と測定部入口断面における速度の一樣性を確認するために絞り部出口断面の速度分布を測定した。絞り部出口断面寸法は幅 700mm、高さ 400mm である。この場合の座標系は、図 7 に示すように絞り部出口断面中心を原点とする。風洞絞り部出口断面の $x-y$ 面および $x-z$ 面の平均速度分布を図 8 に示す。主流速度 U_1 は 7, 14, 20m/s の 3 段階に変化させて実験した。そのときの単位レイノルズ数の範囲は $4.35 \times 10^5 \sim 1.24 \times 10^6$ である。

図 8(a) の $x-y$ 平面では、両端できわめて流速が低く、端から遠ざかるにつれ増速し、若干主流速度を超過した後、速度が一定になる。両端の減速領域は境界層の影響によるもので、上述の傾向は全流速の範囲で同様であり、境界層の範囲も流速変化に対してほぼ同じであった。図 8(b) の $x-z$ 平面では $x-y$ 平面に比べ、境界層による減速領域は広い。絞り部形状は 2 次元絞りなので上下壁近傍の流体が絞り部出口にかけ加速される。これゆえ、境界層厚さは $x-y$ 平面の方が薄くなる。測定平板設置高さの決定には一樣流の範囲を参考にする。図 8 から一樣流の範囲は幅 600mm、高さ 395mm であった。しかし、余裕を考慮して測定部平板を絞り部出口底面よりも 50mm 高くした。

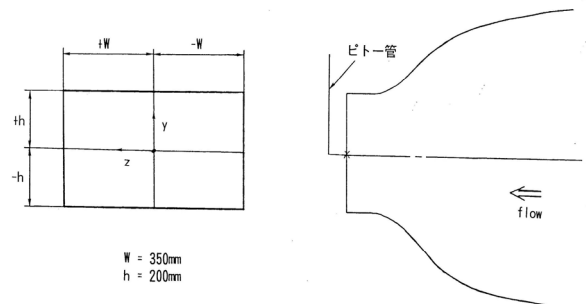


図 7 測定部入口断面における座標系

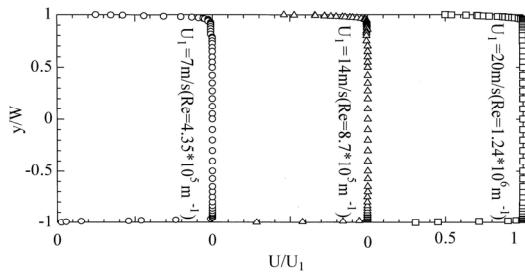


図 8(a) x - y 平面の平均速度分布

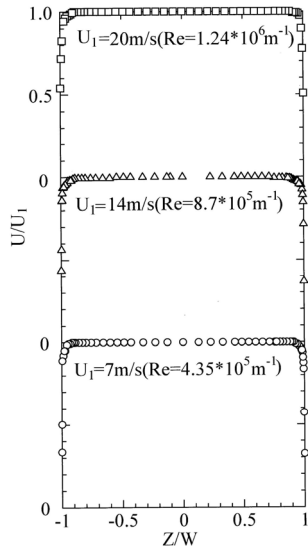


図 8(b) x - z 平面の平均速度分布

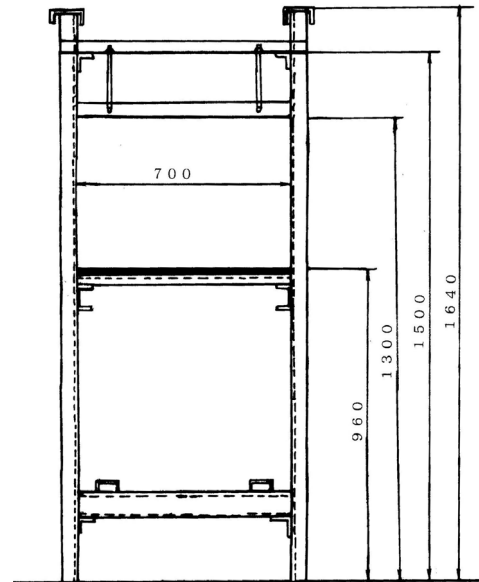


図 9(b) 風洞測定部 (End view)

3.2 測定平板の壁面圧力分布

測定平板設置高さを確定した後、測定部を製作し、組み立てた。図 9 に測定部の詳細を示す。

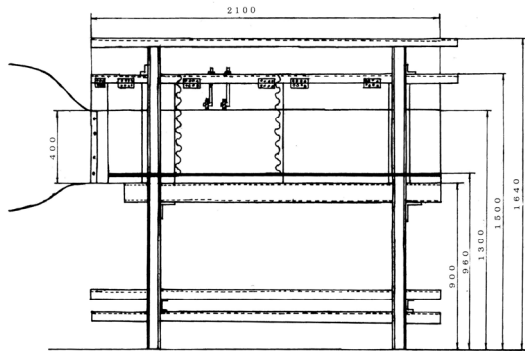


図 9(a) 風洞測定部 (Side View)



図 10 測定部 (製作途中)



図 11 測定部 (製作後)

風洞測定部の製作途中および製作後の写真を図 10 と 11 に示す。測定部は模型の出し入れが容易になるように開閉可能な構造にした。測定平板を支持する鋼材はコの字鋼を組み合わせて製作し、圧力を測定する位置によっては鋼材の位置が可動できる構造とした。

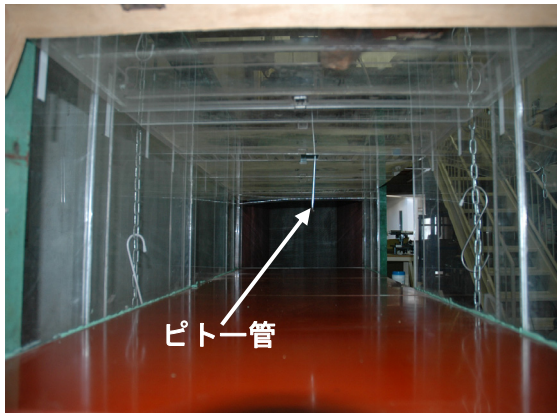


図 12 測定部 (End view)

測定部の屋根に連結されているねじで屋根の高さを変化することで測定部における流れ場の圧力勾配が調節可能となる。測定部の屋根は分割された複数枚の厚み 5mm の透明アクリル板で構成されている。

測定平板上の壁面静圧分布を図 15 に示す。なお、図中の圧力係数 C_p は測定平板中央断面における値である。測定部入口からの距離、 $X=633\text{mm}\sim 1833\text{mm}$ の範囲において、圧力勾配はほぼ 0 である。

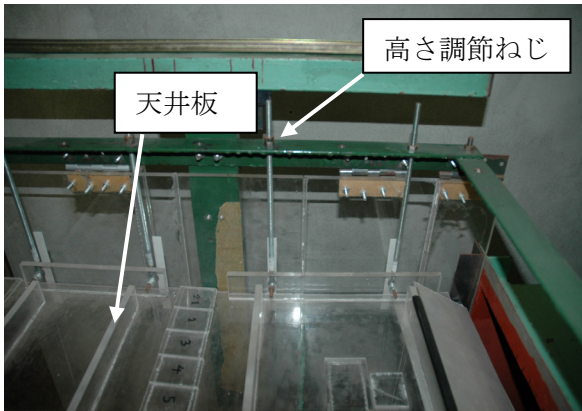


図 13 天井板の高さ調節

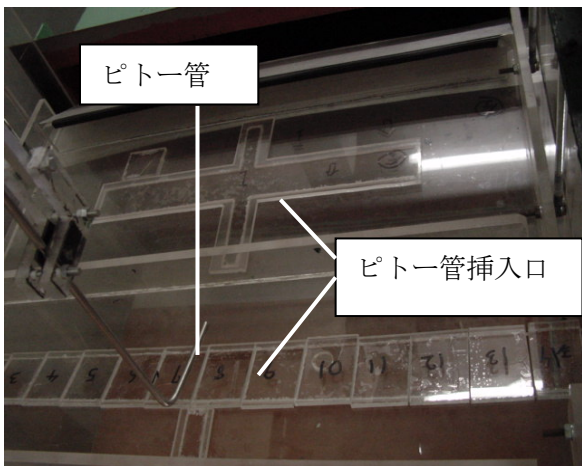


図 14 ピトー管挿入口

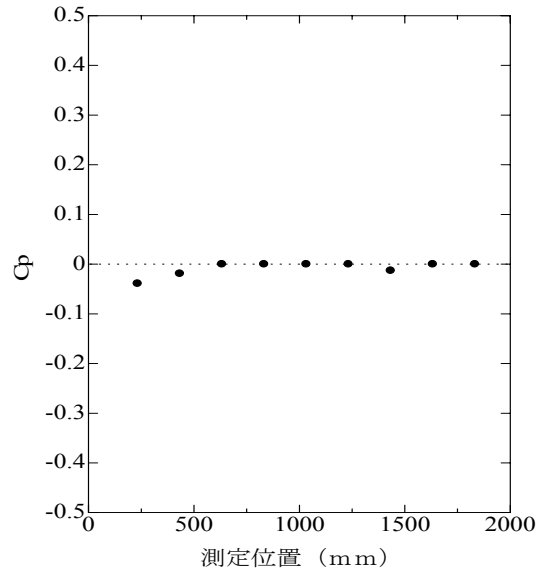


図 15 壁面静圧分布

4. 結言

物体周りの流れ場を研究する目的とした風洞の製作および基本性能を調査した結果、以下の知見を得た。

- (1) 風洞測定部は幅 700mm, 高さ 300mm, 長さ 2100mm のもので、風速は最大 20m/s まで可変できる。また、単位レイノルズは $1.24 \times 10^6 \text{m}^{-1}$ までの範囲が調節可能である。
- (2) 絞り部出口断面における一様流の範囲は幅 600mm, 高さ 395mm である。この結果から測定平板の高さを 50mm ほど絞り部出口高さより高くした。
- (3) 測定部入口からの距離、633mm~1833mm の範囲において、ほぼ零圧力勾配の流れ場を実現できた。

参考文献

- [1] H. Tennekes and J. L. Lumley: A First Course in Turbulence, MIT Press.
- [2] 角田哲也, 村上文夫: 可視化実験用水槽の設計・製作及び基本性能, 大島商船高等専門学校紀要, 第 25 号, 1992.
- [3] 島章: 任意のノズル形状に関する直接法および逆法の理論, 東北大速研報告, Vol 17. 164 [1961/1962].
- [4] 日本機械学会: 技術資料 流体計測法, 日本機械学会.

