

小型風洞の試作と性能評価

渡部 英昭・石塚 正幸*・川辺 修*

Making of a Small Wind Tunnel and Evaluation of Its Performance

Hideaki WATANABE, Masayuki ISHIZUKA* and Osamu KAWABE

(1999年11月30日受理)

For measurements of a velocity field in air flow with a hot-wire anemometer, carrying out a probe calibration to determine the relationship between velocity and the anemometer voltage is necessary. In this report, we designed and made a small wind tunnel that can be used to the probe calibration.

The wind tunnel has a total length of 1551 mm (including the blower), maximum velocity at the center of the test section is 28 m/s, and the turbulent intensity of the flow is less than 0.5% of U_m at 10 m/s.

1. 緒言

流れ場で発生している現象を実際に測定するために、昔から現在まで様々な手法が考案されてきた⁽¹⁾。それらの中で定温度型熱線流速計は、低速から高速まで広範囲にわたって測定が可能で、取り扱いが容易なこと、時系列データを簡単に得られること、周波数特性が優れていること、空間的分解能が高いこと、電子回路の知識があれば自作が可能であり、しかも安価であることなどの理由から^{(2),(3)}、現在においても世界的にもっとも広く流れ場の測定手段として使用されている。

熱線流速計を用いて測定を行う場合、実際の流速と流速計出力電圧との間に直線関係を成立させるための較正を行う必要がある⁽³⁾。較正は通常、平均流速を自由にしかも容易に設定でき、乱れが小さく、流速の定常性が良好で、風洞出口における平均速度分布が一様である小型風洞を使って行われるため、このような風洞を較正用風洞と呼ぶことが多い。

本研究では、通常の流体実験のみならず、熱線流速計の較正にも使用することのできる、小型低速低乱風洞の設計および製作を行い、その性能評価を行った。

2. 主な使用記号

U, U_f : 流れ方向瞬間速度 (フィルタ無, 有) [m/s]
 U_m, U_{mf} : 流れ方向平均速度 (フィルタ無, 有) [m/s]
 u, u_f : 流れ方向変動速度 (フィルタ無, 有) [m/s]
 u', u_f' : 流れ方向乱れ強度 (フィルタ無, 有) [m/s]
 Y : 鉛直方向座標 [m]
 Y_A : ノズル出口高さ [m]
 ν : 空気の動粘性係数 [m²/s]
 その他の記号については本文中で定義する。

3. 風洞について

3.1 風洞の種類

通常、風洞は回流式、吸い込み式、および吹き出し式の3種類に大別される。

このうち、回流式風洞は流路が閉回路となっていて外界とは遮断されているため、外からの影響によって流れが乱れるということがなく、また一度流れを発生させると、その運動エネルギーを繰り返し使えるため送風機のパワーが小さくて済む、という利点がある。その反面、流路を閉回路にしなくてはならないため設置面積が大きくなり、また一度測定部内

* 秋田高専卒業生

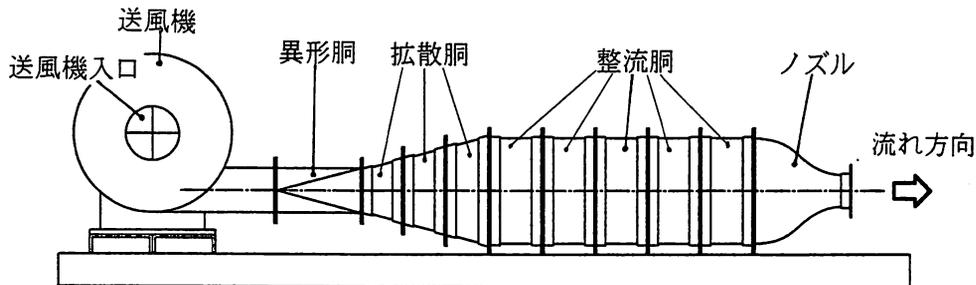


図1 吹き出し式風洞側面図

で乱れが発生すると、それが循環してしまうという欠点がある⁽⁴⁾。

次に吸い込み式風洞は、外から空気を吸い込み測定部内を通過させたのち外へ放出するため、流れ場内で乱れが発生しても循環することはない、また設置面積が小さくて済むという利点があるが、その反面、回流式と異なり流れの運動エネルギーを繰り返し利用することができないためパワーの大きい送風機が必要となる。また、測定部内の気圧が外界より低い場合、気密が完全でないと流路内に外界からの空気が噴出して流れを乱し測定に悪影響を及ぼす、などの欠点がある⁽⁴⁾。

一方吹き出し式風洞は、送風機のパワーや設置面積および流れ場内で発生した乱れが循環しないなどの点は吸い込み式風洞と同じであるが、吸い込み式と異なり測定部の圧力が大気圧より若干大きいため、気密が完全でなくても外界の空気が噴出して流れ場を乱すことがなく、その結果、測定部の構造を簡単にすることができ、取り扱いも容易であるというすぐれた特長を持つ⁽⁴⁾。よって本研究では風洞形式として吹き出し式を採用し、その設計と製作を行った。

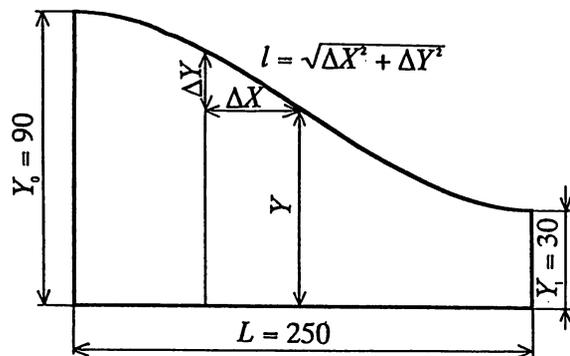
3.2 吹き出し式風洞の構成

図1に示すように吹き出し式風洞は、下流側からノズル、整流胴、拡散胴、異形胴、送風機の順に各部が配置されている。以下、各部について簡単に説明する。

3.2.1 ノズル

ノズルは、拡散胴で拡大され整流胴で乱れや不均一部分を取り除かれた流れを、測定部の断面積まで絞ることにより、圧力エネルギーを運動エネルギーに変換して流速を増加させ、同時に流速分布の不均一や乱れをさらに減少させるという役割を持ち⁽⁴⁾、入口面積 A_1 と出口面積 A_2 の比 A_1/A_2 で表わされる縮

流比やノズル長さ L が大きいほどすぐれた効果を発揮する。しかし、 L が大きすぎると風洞設置面積が大きくなり、小さすぎるとノズルプロファイルの曲率が大きくなるため流れがノズル内で剥離してしまう。一方、風洞の規模を変えない場合には、 A_1/A_2 を大きくすると測定可能な領域が小さくなり、測定領域の大きさを変えない場合には装置全体の規模が大きくなるという不都合がある。よって L および A_1/A_2 の値を変えたノズルプロファイルを種々描いて検討を行った結果、本風洞においては、 $L=250\text{ mm}$ 、 $A_1/A_2=9$ を採用することにした。また、出口断面形状は $60\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ の正方形、入口断面形状は $180\text{ mm} \times 180\text{ mm}$ の正方形とした。ノズル製作に当たっては、完成時のプロファイルを図2に示す3次の多項式により決定し⁽⁵⁾、得られた曲線を線積分することにより展開図を作成し、それに合わせて材料取りを行った後、プロファイルに合わせて湾曲させ、TIG溶接により組み立てた。なお、加工性と強度の点から板厚 0.8 mm の真鍮板を使用した。また、ノズ



3次曲線

$$Y = \frac{2(Y_0 - Y_1)}{L^3} X^3 + \frac{3(Y_1 - Y_0)}{L^2} X^2 + Y_0$$

図2 完成後のノズルプロファイル

ル上流側に設置される整流胴との接合部分には厚さ 1 mm のゴム板を貼ることにより気密性を保てるようにした。

3.2.2 整流胴

整流胴はノズルの上流側に設置されており、気流に含まれている乱れや速度の不均一部分を減衰させて取り除くことを目的としている⁽⁴⁾。そのため、胴の断面積をできるだけ大きくして速度を十分に低速に保ち、なおかつ胴の長さもできるだけ長くした方が効果的であるが⁽⁵⁾、これも装置の規模や設置面積を考慮して決定すべきである。より一層効果的に乱れや速度の不均一部分を取り除くためには、整流胴を流れ方向に数段に分割し、各段入口に、流れに直角になるよう金網を設置すればよい⁽⁴⁾。この場合、各段の断面はノズル入口と完全に同一である必要がある。また整流用に使われる金網は、上流側から下流側に向かうにつれてメッシュサイズが小さくなるように配置する。今回製作した整流胴は 5 段から成り、全長が 460 mm、断面形状はノズル入口と同じ 180 mm×180 mm の正方形である。また、壁面を厚さ 6 mm の不燃ボードで形成することにより本整流胴に耐熱性を持たせており、将来風洞内に気流加熱用ヒータ部を設けることが可能となっている。使用した金網のメッシュサイズは、上流側から順に 20メッシュ (1 段)、30メッシュ (2 段)、50メッシュ (2 段) とした。これらの金網はいずれも開口比が 56% 以上であり⁽⁶⁾、また各段における金網芯線直径 d と流速 U_s および空気動粘性係数 ν を用いて計算したレイノルズ数 $Re = (d \times U_s) / \nu$ がいずれも 40 を下回ることから、金網の挿入による乱れの影響は十分に小さいと考えられる⁽⁷⁾。また耐久性を向上させるため、金網は全てステンレス製のものを使用した。

3.2.3 拡散胴

拡散胴は整流胴の上流側に配置されており、流路断面を流れ方向に拡げることにより、気流の運動エネルギーを圧力エネルギーに変換することを目的としている。運動エネルギー・圧力エネルギー間の変換効率を良くするには、流路拡大による流れの剥離を防ぐ必要があるため、拡散胴の開き角は小さいほど良く、通常 10° 程度、流れの一様性を良くしたい場合は 5° 程度が適当であるとされる⁽⁴⁾。しかし、拡散胴入口の断面積は送風機出口断面の大きさでほぼ決まること、拡散胴出口は整流胴断面と同一であることから、開き角を小さくし過ぎると拡散胴が長くなり、

設置面積の制約を受けることになる。よって開き角を大きくすることにより拡散胴を短くし、また、拡散胴流路内に流れに対して直交するよう金網を 3 ~ 5 枚配置する⁽⁷⁾ ことにより流路拡大に伴う剥離を防いだ。以上のようにして製作された拡散胴は 3 段から構成されており、全長は 260 mm、最上流および最下流の断面形状は、各々 75 mm×75 mm と 180 mm×180 mm の正方形断面とし、開き角は約 23° に設定した。各段の入口には金網を設けており、いずれもステンレス製で、メッシュサイズは上流側から順に 10メッシュ (2 段)、20メッシュ (1 段) とした。これらの金網はいずれも開口比が 56% 以上であるため⁽⁶⁾、必要以上に流れを乱すことはないと思われる。そして整流胴同様、壁面を板厚 6 mm の不燃ボードで形成することにより耐熱性を高めた。また、気密性を高めるため各段の合わせ目に板厚 1 mm のゴム板を挟んだ。

3.2.4 異形胴

異形胴は送風機出口と拡散胴入口の間に配置され、円形断面である送風機出口から出た気流が矩形断面である拡散胴入口へ入るときに、断面形状の違いによる乱れや 2 次流れなどが発生しないよう、流路の断面形状を円形から矩形へ滑らかに変化させる役目を持っている。胴の長さが長いほど効果的である⁽⁵⁾ が、風洞全体が長くなるため、今回は全長を 195 mm とした。入口断面形状は送風機出口と同じ直径 75 mm の円形、出口は拡散胴 1 段目入口と同じ 75 mm×75 mm の正方形とした。材料は、加工の容易さと強度の点から板厚 0.8 mm の真鍮板を使用した。また、送風機出口および拡散胴入口との継ぎ目における気密性を確保するため、板厚 1 mm のゴム板を挟んだ。

3.2.5 送風機

送風機は外界から空気を吸い込んで風洞内に気流を生じさせるためのものであり、羽根車回転軸と気流方向が同一である軸流式と、両者が直交しているシロコ式に大別される。本風洞では、風洞自体が小型であること、および市販されている製品の種類の多さなどの理由から、シロコ式送風機を使用した。なお、送風機を選定する基準として、本風洞における流量と静圧の値を以下のように算出した。

3.2.5.1 流量の決定

送風機の流量は、(ノズル出口断面積) × (ノズル

出口での最大流速) で表わすことができる。本風洞では、送風機入口に防塵フィルタを設けない場合の、ノズル出口における最大流速を30 m/s と設定し、計算を行った結果、送風機に必要な流量は6.48 m³/min 以上となった。よって規格から、最大流量7.7 m³/min の送風機を使用することに決定した⁽⁸⁾。

3.2.5.2 静圧の決定

風洞各部に設置された金網によって生じる圧力損失の総量が送風機の静圧値を越えた場合、送風機によって送り込まれる気流は風洞内を通り抜けることができない。よって本風洞における全圧力損失量を算出し⁽⁹⁾、これを元に送風機の静圧値を決定した。その結果、拡散胴における全圧力損失は約222 Pa、整流胴における全圧力損失は約60 Pa と算出され、本風洞における金網による全圧力損失は約282 Pa となった。これを mmAq に換算すると約28 mmAq となった。

実際には、風洞内での圧力損失は金網による損失の他にも、拡散胴で流路を拡大されることにより生じる損失や、ノズルにおいて縮流される際に生じる損失なども考えられるが、これらの値を風洞設計時に正確に算出することは困難であるため、送風機静圧を決定する際は、算出された金網による全圧力損失に目安として2倍の安全率をかければよいと思われる。よって送風機静圧を56 mmAq と見積り、規格から静圧が65 mmAq の送風機を使用することに決定した⁽⁸⁾。

4. 風洞の性能検定

完成した風洞に対し、ノズル出口における最大流速および送風機回転数に対する流速の再現性、流速の定常性、ノズル出口における鉛直方向流速分布の

一様性および乱れ強度分布等について測定を行い、性能を検定した。

ここで、本風洞の送風機は200ボルト商用電源に接続して使用するが、このような商用電源の電圧は必ずしも一定ではなく、1日当たり数ボルトから数十ボルト程度変動している可能性が高い。そしてこの電圧変動は、送風機回転数および流量変動の直接的原因となり、風洞に要求される気流の定常性を著しく劣化させる。よって本風洞では、電源と送風機の間インバータを設けることにより送風機の電圧が変動するのを防ぎ、気流定常性の向上を図った。

4.1 ノズル出口における最大流速

実験は、送風機入口に防塵フィルタを設置した場合と、設置しない場合について行い、流速の測定にはノズル出口直下流の断面中心に設置された JIS 型ピトー静圧管と最小目盛0.1 mm のベッツ型マノメータを使用した。そして送風機回転数を0 r.p.m. から2400 r.p.m. まで400 r.p.m. 刻みで変化させ、各回転数における流速を測定した。その結果を図3に示す。横軸は送風機回転数 r.p.m., 縦軸はノズル出口中心における流速 m/s である。本風洞においては、防塵フィルタの有無に関係無く送風機回転数2400 r.p.m. において流速が最大となり、フィルタがない場合の最大流速は31.7 m/s, ある場合は20.7 m/s となった。また本風洞の流速は、2000 r.p.m. 付近までは送風機回転数に対しほぼ直線関係を持つことが分かった。

4.2 送風機回転数に対する流速の再現性

前述のごとく、本風洞は通常の測定だけでなく熱線流速計の較正にも使用可能のように設計されている。較正作業に使用する場合、測定する流れ場における最大流速、最小流速、および両者の中間程度の

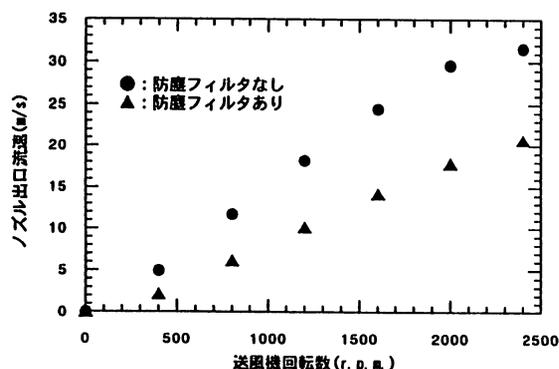


図3 送風機回転数とノズル出口流速

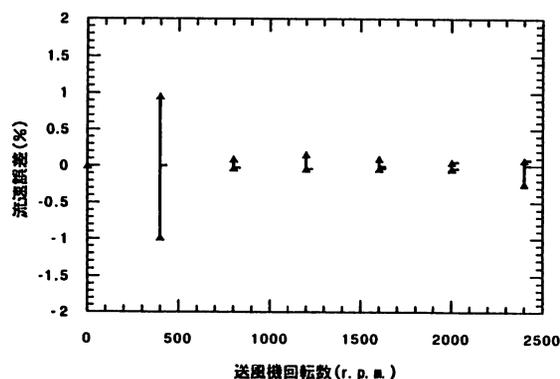


図4 送風機回転数に対する流速の再現性

流速の3段階に、風洞の流速を繰り返し切り替えなければならない。そのため、もし送風機回転数に対する流速の再現性が悪ければ、回転数を切り替える度にピトー静圧管とマンノメータにより流速を測定し直さなければならない。一方、流速の再現性が良好であれば、較正作業の最初の段階でこれらの流速を測定し、その時の回転数を記録しておけば、測定する流れ場の気温等が急激に変化しない限り、各回転数に設定するだけで較正作業に必要な流速が得られることになり、較正時間を大幅に短縮できる。よって本風洞における流速の再現性について検討を行った。

検討方法は以下のとおりである。まず、送風機の回転数を2400 r.p.m.から400 r.p.m.まで400 r.p.m.ごとに変化させ、最小目盛0.1 mmのベッツ型マンノメータとJIS型ピトー静圧管を用いることにより、ノズル出口断面中心における流速を各回転数ごとに測定した後、一旦送風機を止める。そしてしばらく時間を置いた後、同じ手順で測定を行う。これを5回繰り返した後、各回転数ごとに得られた流速の誤差を求めた。なお、この実験は送風機入口の防塵フィルタを外して行った。その結果を図4に示す。横軸は送風機回転数 r.p.m.、縦軸は各回転数における流速の誤差を百分率で示してある。今回検討を行った中で最小の回転数である400 r.p.m.において誤差±1%未満、それ以外の回転数では誤差±0.2%程度であり、送風機回転数に対する流速の再現性は非常に良好であることがわかった。

4.3 流速の定常性

流速の定常性は、ノズル出口直下流の断面中心にI型プローブを設置し、流速を定温度型熱線流速計で測定し、得られた時系列データをX-Yレコーダにて記録することにより、700 s間での平均流速の変

動を調べた。その結果、流速10 m/sにおける変動は±0.2%以内であったため、本風洞は時間経過に対する流速の定常性が非常に優れていることが確認された。

4.4 出口流速分布の一様性と乱れ強度分布

ノズル出口直下流断面鉛直方向における流れ方向平均流速分布と乱れ強度分布の測定を行った。実験は送風機入口における防塵フィルタの有無に関してそれぞれ行い、ノズル出口断面中心における流速はいずれも10 m/sに設定した。なお、本論文において、添字fはフィルタあり、添字無しはフィルタなしを意味する。

鉛直方向Yの各位置における平均流速 U_m , U_{mf} m/s および乱れ強度 u' , u'_f m/s の測定は、ノズル出口直下流に設置されたI型プローブおよび定温度型熱線流速計により行った。なお、本研究で使用している平均流速 U_m , U_{mf} とは、瞬間流速 U , U_f を時定数10 sで積分した時間平均値であり、乱れ強度 u' , u'_f とは瞬間流速 U , U_f 時の変動速度 u , u_f の r.m.s.値である。以上の結果を図5～図6に示す。

図5は鉛直方向における流れ方向平均流速分布を示しており、横軸は流れ方向平均流速 U_m , U_{mf} をノズル出口中心における平均流速 U_{m0} および U_{mf0} で無次元化し、縦軸はY座標をノズル出口高さ Y_A の1/2で無次元化している。流れ方向無次元速度のY方向分布は、フィルタの有無に関係無く同じ形状を示していることがわかる。また、 $Y/(1/2Y_A) = \pm 1$ 近傍で流速が減少しているが、これはノズル壁面に発生した境界層による減速と考えられる。他にも $Y/(1/2Y_A) = \pm 0.9$ 付近で流速が中心流速に対し5%程度増加しているが、これはノズル壁面によってその近傍の流れが大きく湾曲されたことによる増速と考えられる。一方、 $Y/(1/2Y_A) = 0 \sim \pm 0.5$ の領

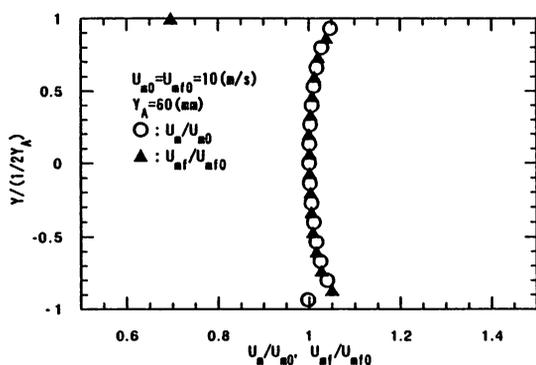


図5 ノズル出口平均流速分布

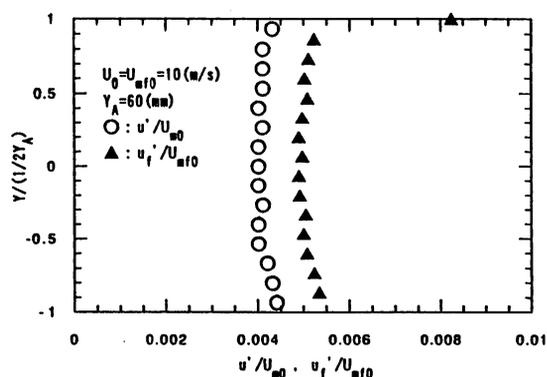


図6 ノズル出口乱れ強度分布

域では平均流速が±1%未満の誤差で分布していることから、本風洞のノズル出口では良好な速度分布が形成されていることが分かった。

図6は鉛直方向における流れ方向乱れ強度分布を示したものであり、縦軸は図5と同様、無次元化したY座標、横軸は乱れ強度 u' 、 u_r' を U_{m0} および U_{mro} で無次元化したものである。ノズル壁面近傍を除くほぼ全域にわたって、フィルタありの場合約0.5%、フィルタなしの場合約0.4%の乱れを持つことから、本風洞が良好な低乱特性を有する⁽¹⁰⁾ことがわかった。また、フィルタの有無で比較した場合、両者とも分布傾向は非常によく似ているが、フィルタがある場合の方が、乱れが2割程度増加することもわかった。

5. 結 言

通常の実験だけでなく熱線流速計の較正にも使用できる小型風洞の設計と製作を行い、その性能評価を行った。その結果を以下に示す。

- (1) 本風洞が発揮できる最大流速は、送風機入口に防塵フィルタを設置しない場合は31.7 m/s、設置した場合は20.7 m/sであった。
- (2) 送風機回転数が0~2000 r.p.m.の範囲内では、回転数と流速が直線関係となった。
- (3) 送風機回転数に対する流速の誤差は、最悪の場合でも±1%未満であることから、良好な再現性を持つことがわかった。
- (4) 700 s間での平均流速の変動は、10 m/sにおいて±0.2%であり、良好な定常性を示した。
- (5) $Y/(1/2Y_0) = 0 \sim \pm 0.5$ の範囲にわたって平均

流速が±1%未満の誤差で分布していることから、ノズル出口における鉛直方向平均速度分布は良好な一様性を持つことがわかった。

- (6) ノズル出口における乱れ強度は、防塵フィルタを設置しない場合は0.4%、設置した場合でも0.5%であり、良好な低乱特性を持つことがわかった。
- (7) 以上のことから、本風洞が熱線流速計の較正にも使用できる優れた性能を有していることが明らかとなった。

6. 参考文献

- (1) Plandtl, L. and Tietjens, O.G., Applied Hydro and Aeromechanics, Dover Pub., 1934
- (2) 蒔田, 流れの計測, Vol. 12, No. 16, pp 3~pp 17, 1995
- (3) 蒔田, 実験流体力学 (EFD) —流れの計測技術の基礎と応用, 日本機械学会, 1993, pp 21~pp 30
- (4) 谷ほか, 流体力学実験法, 岩波書店, 1977, pp 14~pp 29
- (5) 日本流体力学会編, 流体力学ハンドブック, 丸善, 1998, pp 1171~pp 1177
- (6) Bradshaw, P., J. Fluid Mech., 22-4, 1965, pp 679~pp 688
- (7) Schbauer, G.B., Spangenberg, W.G., NACA Rep. 949, 1949
- (8) 電動送風機カタログ, No. B1-01, 昭和電気株式会社, 1996
- (9) 日本機械学会編, 管路とダクトの流体抵抗, 1979
- (10) Brunn, H.H., Hot-wire anemometry, Oxford Univ. Press, 1995