

温度勾配を任意に設定できる加熱風洞の製作と性能評価

渡 部 英 昭

Making of a Wind Tunnel that can be set arbitrary temperature gradient,
and the evaluation of its performance.

Hideaki WATANABE

(2002年11月28日受理)

A heating unit was combined into the already existing small wind tunnel to be able to set arbitrary temperature gradients at the exit, and the performance evaluation of it was carried out.

Measurements for the mean velocity and turbulent intensity fields were made under two different flow conditions as follows ; case A : the heating unit did not exist, case B : the heating unit existed but did not heat.

Comparing the results obtained from case A and B, the mean velocity distributions were very similar, but for the turbulent intensity distributions, magnitude of the latter intensity was smaller than the former one. Furthermore, uniform, positive and negative gradient distributions of mean temperature were formed at the exit of the wind tunnel.

1. 緒言

地球上には、大は地球規模のスケールを有する大気の流れから小は人間の血管内の血液の流れまで、様々な形態と大きさを持つ流れが存在しており、我々の日常生活と密接な関係を持っている。もし地球上に存在するこれらの流れの特徴やメカニズムを正確に把握することができれば、流体を利用した工業製品、例えば飛行機、船、風力発電装置、ポンプやラジェータなどの性能向上に寄与できるといった工学的価値のみならず、大気中を浮遊する汚染物質、例えば空中高く舞い上がった黄砂や火山灰、焼却炉の煙突から排出されるダイオキシン、ディーゼルエンジンの排気ガス中に含まれるパーティクルと呼ばれるNOx、COxなどの粒子の一層正確な拡散予測や、降雪・降雨情報を含む天気予報の精度向上などといった、地球規模の災害・公害予防にも大いに役立たせることができるはずである。

自然界に存在する流れを実験的に研究する場合、対象となる流れを測定してデータを収集する手法が採られることが多い。特に大気中における流れを研究する場合、まず頭に浮かぶのは、実際の流れを野外で測定する方法である。しかしこの手法の場合、

測定条件（天候、気温、風向、風速等）を一定に保つことが大変困難であり、データの再現性を保証することが非常に難しい。そのため、得られたデータの信頼性・普遍性を議論する際、一抹の不安を残す場合がある。このような弊害を避けるため、通常は自然界で生じている現象を模擬した流れを、実験室内に設置された風洞を用いて発生させる事が多い。この場合、測定条件を常に一定に保つことができるため、データの再現性を得ることが容易であり、前記のようなデータの信頼性・普遍性に対する不安は一掃される。その反面、例えば対流現象などに代表されるように、自然界に存在する流れは、ほとんどの場合高さ方向（鉛直方向）への温度変化、すなわち温度勾配を持っているが、通常の風洞を用いた場合、気流温度は流れ場内のあらゆる場所において室温と同じであり、流れの中で温度勾配を持たせることはできない。この点から考えると、通常の風洞により形成された流れ場は、自然界の流れを完全に模擬しているとは言えない場合がある、と言える。そして、このような流れから得られたデータのみを解析しても、自然界の全ての流れ現象を厳密に解明することは難しいと考えられる。一方、風洞内に形成される気流に任意の温度勾配を持たせる事ができ

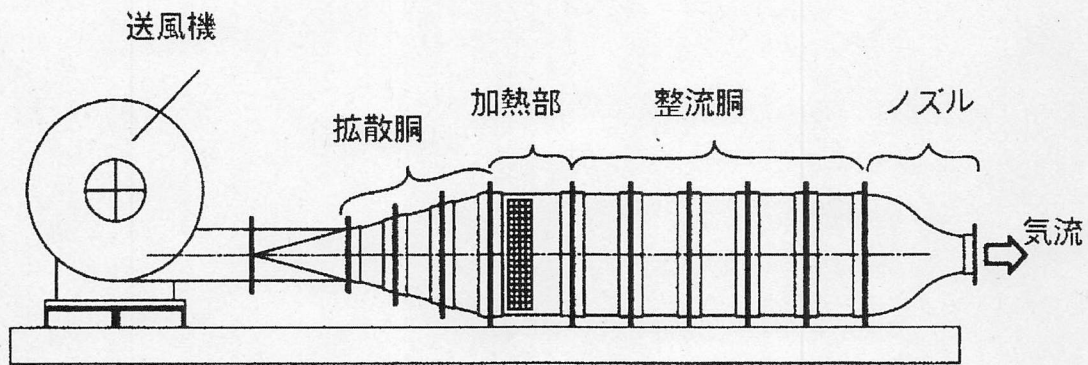


図1 加熱風洞全体図

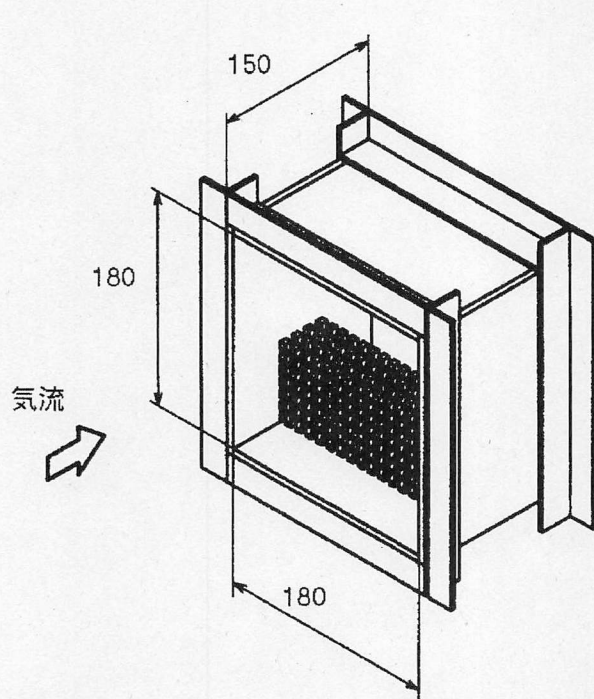


図2 加熱部斜視図

ば、データの再現性・信頼性・普遍性を保証した上で、より自然現象に近い流れを実験室内で容易に発生させる事ができるため、従来の難点を克服することが可能となる。その結果、自然界で発生する流れの特徴やメカニズムを一層正確に把握することが可能となり、工学的な利点のみならず、精度の高い天気予報を行うことにより大雨や大雪などによる災害の予防にも役立たせることができると考えられる。

よって本研究では、高さ方向への温度勾配を任意に設定することが可能な加熱風洞の製作および性能評価を行うことを目的とする。

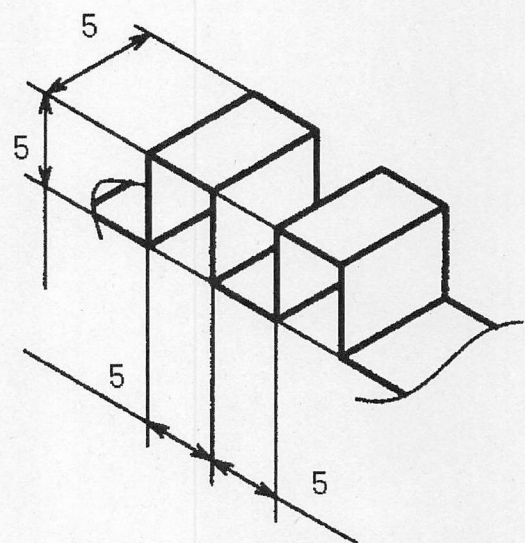


図3 ヒータ部詳細図

2. 使用される風洞および加熱部

本研究で製作された加熱風洞を図1に示す。本風洞は、本研究室で設計・製作されたものであり、送風機、拡散胴、加熱部、整流胴、ノズルから構成されている。これらのうち、拡散胴および整流胴の壁面は厚さ6mmの不燃ボードにて形成されており、これらに挟まれる形で組込まれる加熱部からの熱による風洞の変形・発火等を防いでいる。

図2に本研究で設計・製作した加熱部の斜視図を示す。本加熱部の流れ方向長さは、組込まれるヒータ部分の幅、加熱部側壁に設置される端子台の幅、およびフランジ部分の幅を考慮に入れて150mmとした。断面形状は、整流胴の流路と同一となるよう、内寸180mm×180mmの正方形となっている。またヒータの発熱に対する耐熱性を付与するため、壁面

は整流胴、拡散胴と同じ不燃ボード（厚さ 6 mm）にて形成した。そして、拡散胴および整流胴との接合面に、厚さ 1 mm のゴム板を貼り付けることにより、この部分における気密性を確保している。ヒータとしては、図 3 に示すように、幅 5 mm 厚さ 0.2 mm のニクロムリボンを 5 mm ピッチで矩形波状に折り曲げたものを使用している。この、加熱部分としてのヒータを鉛直方向（高さ方向）へ 20 段、流れ方向（水平方向）へ 4 列の合計 80 本配置した。そして断熱材である厚さ 1.5 mm のマイカ板にて高さ方向の各段を仕切ることにより各段間の熱干渉を防ぎ、温度調整および温度勾配の設定を容易に行えるようにした。また、これらマイカ板（合計 19 枚）の挿入により、ヒータ部における流路断面積を約 16% 減少させて気流流速を大きくすることにより、ヒータから気流への熱伝達効率を向上させている。

ヒータ 1 本当たりの電気抵抗値は約 0.5Ω 程度であり、このままでは十分な発熱量が得られないため、高さ方向の 4 段ずつをユニット化し、合計 5 ユニットとした。そして各ユニット内のヒータ（4 段 \times 4 列 = 16 本）を全て直列に接続することにより、各ユニット内のトータルの合成抵抗値を約 8Ω とし、十分な発熱を行えるようにした。

各ユニットにはボルトスライダを 1 台ずつ接続し、任意の発熱量を設定できるようにした。

また、一般商用電源（AC100 ボルト）は電圧の変動が比較的大きく、1 日当たり数ボルトから数十ボルト程度変化することがある⁽²⁾。そのため本研究では、安定化電源を介して商用電源を各ボルトスライダに接続することにより、電源電圧の変動によるヒータ部発熱量の変動を軽減した。

3. 実験結果

測定断面に周囲の空気が巻き込まれるのを防ぐた

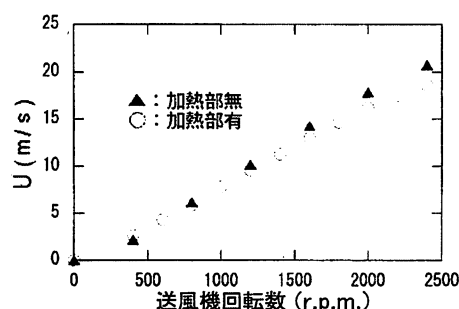


図 4 加熱部の有無による風洞出口流速の比較

め、出口全周にわたって高さ 10 mm 程度のフランジを設けた。測定は全て風洞出口面中心より 2 mm 下流側に位置する鉛直線上で行い、それを Y 軸と定義した。そして、出口面中心高さを Y 軸の原点とした。また、実験 3.1.1（下記）を除き、Y 軸原点における平均流速を 10 m/s とした。

なお、測定に用いた定温度型熱線流速計は気流温度の変化に対し大変敏感であるため本実験室内にある暖房器具類は全て実験の数日前より使用を中止し、実験中の室温が一定になるよう注意した。

3.1 加熱部組込みによる流れ場への影響

始めに、加熱部の有無による風洞出口での流れ場を比較することにより、加熱部が流れに与える影響を確認する。この計測にはベッツ型マノメータ（最小目盛り 0.1 mm Aq）、JIS 型ピトー静圧管、定温度型熱線流速計、I 型プローブ（ワイヤ直径 $5 \mu\text{m}$ ）を使用する。

3.1.1 送風機回転数と風洞出口中心流速の関係

加熱部が無い状態での送風機回転数と風洞出口流速の関係については、既に報告済みである⁽¹⁾。ここでは加熱部を組込み、非加熱状態とした場合の送風機回転数と出口平均流速の関係を求め、加熱部組込み前の結果と比較する。

測定にはベッツ型マノメータと JIS 型ピトー静圧管を用いた。ピトー静圧管の先端部（全圧測定孔）を前記 Y 軸の原点に設置した。そして送風機回転数を 0～2400 (r.p.m.) まで変化させ、それぞれの回転数におけるマノメータの読みから実流速を計算した。その結果を図 4 に示す。横軸は送風機回転数 (r.p.m.)、縦軸は実際の平均流速 U (m/s) である。同じ回転数での U を比較すると、加熱部を組込んだ方が若干値が小さく、回転数が増大するにつれてその差は大きくなって行く。今回の測定の場合、最

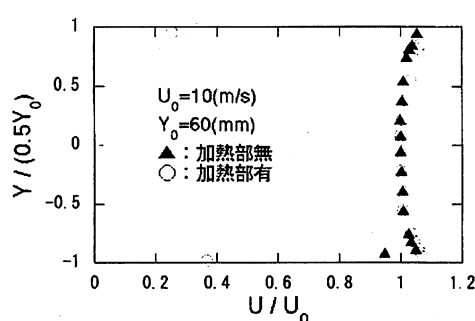


図 5 加熱部の有無による出口平均流速分布の比較

大回転数である2400 (r.p.m.) において最も差が大きくなり、約2.1 (m/s) であった。これは、風洞内において加熱部のヒータおよびマイカ板が抵抗体となっていることが原因と考えられる。すなわち、流路内の抵抗力は流速の2乗に比例するため、送風機回転数の増大と共に加熱部での抵抗力が大きくなり、その結果、高回転になるにつれて流速が減少したと思われる。

3.1.2 縮流部出口における平均速度と乱れ強度の鉛直方向分布

次に、非加熱状態での風洞出口における流れ方向平均速度と乱れ強度の鉛直方向分布を、熱線流速計とI型プローブ（ワイヤ直径 $5\mu\text{m}$ ）により測定し、加熱部組込み前の結果⁽¹⁾と比較した。熱線流速計に接続されたI型プローブは、1次元トラバース装置（最小目盛 0.05mm ）に取り付けられており、速度検知部であるプローブ先端を測定断面上に設置した。熱線流速計は、実流速と流速計出力電圧との間の誤差が $\pm 0.5\%$ 未満となるよう、予め較正した。

図5に流れ方向平均流速の鉛直方向分布（平均時間10秒）を示す。横軸は、各Y座標における平均流速 U をY軸原点における平均流速 U_0 で無次元化したものである。縦軸は出口高さ（ $Y_0=60\text{mm}$ ）の半値で無次元化したYの値である（以下同じ）。図より加熱部の有無に関わりなく、分布形状はほぼ一致している。このことから、流れ方向平均流速のY方向分布については、加熱部の組込みによる流れ場への影響は見られないことが分かった。

図6に流れ方向乱れ強度の鉛直方向分布を示す。横軸は各位置における瞬間速度変動成分 $u(\text{m/s})$ の実効値 u_{rms} を U_0 で無次元化した乱れ強度（百分率表示）、縦軸は図5と同じである。図より、加熱部を組込んだ場合の方が乱れ強度が小さくなっていることがわかる。これは流れの中に置かれた加熱部が、乱れを発生させる以上に整流効果を持っていることを示している。すなわち、流れが拡散胴から整流胴（もしくは本加熱部）に至る際、壁面の角度が急に変化するため流れの中に乱れが生じやすい。しかし本加熱部の場合、前述のように高さ方向に19枚のマイカ板が流れと平行に配置されており、これらが流路壁面角度の急変部分において、整流格子もしくは案内羽根の役目を果たすことにより、整流胴に入る際の乱れが通常の風洞より軽減され、その結果風洞出口での乱れが小さくなったものと思われる。

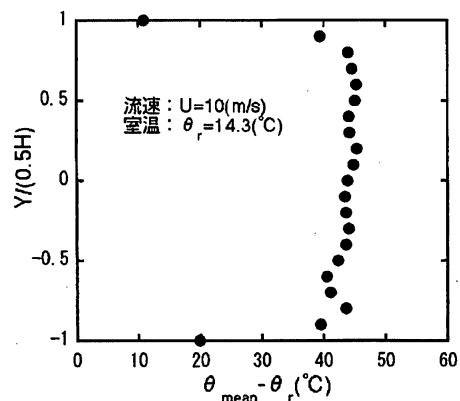


図7 出口平均温度分布（一様分布形成時）

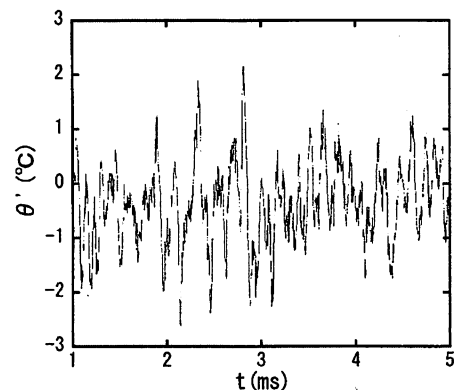


図8 一様分布時の温度瞬間波形（AC成分）

3.2 平均温度の鉛直方向分布

加熱部各ユニットに接続されたボルトスライダを調整することにより、任意の平均温度鉛直方向分布を形成した。

実験流体力学において、流れ場の温度を測定する場合に使用される装置としては、水銀温度計を含む液体封入温度計、電気的性質の変化を利用する熱電対温度計、抵抗線温度計などがある⁽³⁾。これらのうち、平均温度分布の測定には熱電対温度計〔(本体: チノー製温度調節計 DB1110, 分解能 0.1°C , 感温部: シース熱電対 1HTF011 (形式: SCHS1-0, T型, 長さ 100mm , シース直径 1mm , 測定可能温度範囲 $-200\sim 250^\circ\text{C}$)〕を使用した。本温度計を使用する前に、氷水と沸騰水をそれぞれ用意し、それらの中に温度計感熱部を挿入し、出力温度が 0°C と 100°C になることを確認した。測定に当たっては、前記トラバース装置に取付けた熱電対の先端（感熱部）が、測定断面上に正確に位置するように設置した。

各ボルトスライダを調整して形成した平均温度

鉛直方向分布の例を図7, 9, 10に示す。これらの図において、横軸は各Y座標での平均温度： θ_{mean} と室温： θ_r (実験時14.3℃)との間の温度差： $(\theta_{\text{mean}} - \theta_r)$ をとっており、縦軸はこれまでの図と同じである。

3.2.1 一様な温度分布

図7に、鉛直方向において一様な温度分布を形成した結果を示す。図よりYの各位置における $(\theta_{\text{mean}} - \theta_r)$ を $Y/(0.5Y_0) = \pm 0.8$ の領域内で平均した値 $[(\theta_{\text{mean}} - \theta_r)]_{\text{mean}}$ は40℃強であり、Yの各位置における $[(\theta_{\text{mean}} - \theta_r)]_{\text{mean}} - \theta_{\text{mean}}$ の最大値は3.2℃であった。このことから、本流れ場においては、ほぼフラットな温度分布が得られていることがわかった。

図8にこの分布の中心高さにおける温度信号の瞬間波形を示す。波形の測定には、定電流型温度計および直径2.5 μm のワイヤを持つI型プローブを用いた。今回の測定において、温度計はプローブが持つ高周波⁽⁴⁾および低周波特性⁽⁵⁾に対する補償を行っていない状態で使用している。また、熱電対を用いて得られた実際の温度と、温度計出力電圧間の誤差が $\pm 0.5\%$ 未満になるように校正されている。縦軸は温度計出力電圧から計算された流れの温度(℃)、横軸は時間(ms)である。なお、この図では波形のAC成分だけを表示している。図より、この流れ場が振幅 $\pm 2^\circ\text{C}$ 程度で数kHz程度の温度変動を有することがわかる。

3.2.3 リニアな温度分布

次に図9および図10に、鉛直方向においてリニアな勾配を有する平均温度分布を形成した結果を示す。前者は高さ方向に温度が増加する分布(以下、順勾配分布と称する)、後者はその逆(以下、逆勾配分布と称する)である。

図9の場合、 $Y/(0.5Y_0) = +0.8$ および -0.7 における $(\theta_{\text{mean}} - \theta_r)$ の値を用いて直線を引き、リニアな温度分布を仮定した。そして各位置での実際の平均温度 θ_{mean} とこの直線とのずれを測ったところ、最大誤差が3.1℃であることがわかった。このことから本流れ場においては、ほぼリニアな順勾配温度分布が形成されていることがわかった。また、Yの各位置における $(\theta_{\text{mean}} - \theta_r)$ の最大値は80℃強であった。

図10においては、 $Y/(0.5Y_0) = +0.6$ および -0.7 における値を用いて直線を引き、リニアな温度分布を仮定した。その結果、仮定した直線と θ_{mean} との最大誤差は6.4℃であることがわかった。このこと

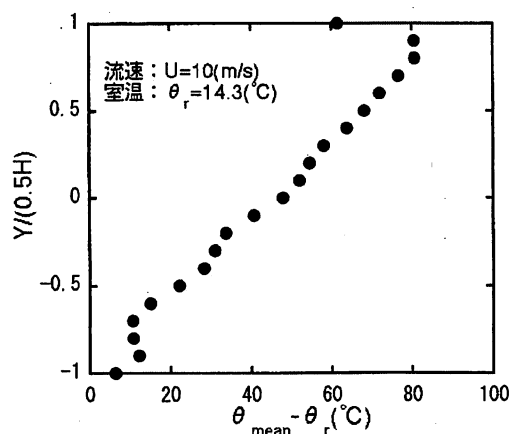


図9 出口平均温度分布(順勾配形成時)

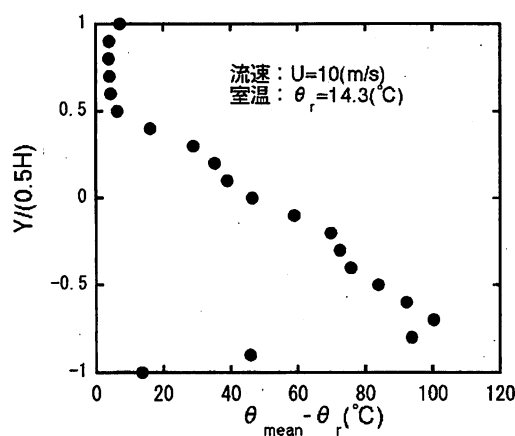


図10 出口平均温度分布(逆勾配形成時)

から本流れ場においても、上記の範囲内でリニアな逆勾配温度分布が形成されていることがわかった。また、Yの各位置における $(\theta_{\text{mean}} - \theta_r)$ の最大値は100℃強であった。

なお、筆者の実験室における許容電流量(30アンペア)を超過してしまう為、一様およびリニアな温度分布のいずれにおいても、 $(\theta_{\text{mean}} - \theta_r)$ の最大値を、前記した値より大きく設定することはできなかった。しかし実験室の許容電流量をもっと増やすことができれば、この値をもっと大きくすることが可能である。また、順勾配と逆勾配を比較した場合、後者の方がやや直線性の点で劣っている。これは後者の場合、勾配と逆の向きに浮力が作用しているため、温度の高い下層側の気流が浮力によって上昇し、温度の低い上層側の気流と混合するためであると考えられる。

また、図7, 9, 10いずれにおいても分布形状に

凹凸が見られる。これは加熱部の高さ方向への分割数が現在の5ユニットでは少なすぎる, ということが原因であると考えられる。よって今後, この凹凸を無くす必要が生じた場合は, ユニット数を10ユニット程度に増やせばよい。そのためには, 流れ方向に並べたヒータを現在の4列から8列程度に増やすことによって各ユニット内の合成抵抗値を高め, 1ユニット当たりのヒータ段数を現在の4段から2段に減らす必要がある。

4. まとめ

既存の小型風洞に加熱部を組み込み, 風洞出口において性能評価を行った結果, 以下のことがわかった。

- ① 非加熱時における流れ方向平均流速の鉛直方向分布は, 加熱部を組み込む前とほぼ同等であった。
- ② 非加熱時における流れ方向瞬間速度の乱れ強度

は, 加熱部を組み込む前より値が小さくなっていた。

- ③ 鉛直方向に一樣な平均温度分布を形成することができた。
- ④ 鉛直方向にリニアな温度分布(順勾配, 逆勾配)を形成することができた。

5. 参考文献

- (1) 渡部他, 小型風洞の試作と性能評価, 秋田高専研究紀要, vol. 35, pp 11~pp 16, 2000
- (2) 澤田, 二線式温度流速計の改良およびその評価, 豊橋技科大修士論文, 1988
- (3) 日本流体力学会編, 流体力学ハンドブック第2版, 丸善, pp 1186, 1998
- (4) 蒔田他, 温度流速計の高精度化(第1報), 機論 B, vol. 58, No. 545, pp 90~pp 97, 1992
- (5) 蒔田他, 温度流速計の高精度化(第2報), 機論 B, vol. 58, No. 554, pp 154~pp 161, 1992