

加熱円柱の製作

渡 部 英 昭

Making of a heating cylinder and evaluation of its performance

Hideaki WATANABE

(平成20年11月26日受理)

A number of heating instruments on the market utilize the wake behind the heating element placed in the air flow as heating source. This wake is heated by the heat transfer occurred between the room temperature air flow and the surface of the element. When the temperature difference between the wake and surrounding air, $\Delta \theta$, is large, there is often observed buoyancy effect in the flow. Consequently, to clarify the phenomena in such flow affected by buoyancy is very important for improving the efficiency of heating, saving of fuel, and so on. As the initial stage of clarifying the phenomena in the wake, a cylinder is selected as the simplest configuration of heating element, and the objective of the present study is making of electrically heated cylinder that has isothermal temperature distribution on the surface. And to evaluate the performance of the cylinder placed in the flow (5 m/s), measurements of its surface temperature distribution are made with a copper-constantan thermocouple thermometer.

1. 緒言

我々の日常生活で使われている暖房器具は、例えば電熱式のファンヒーターなどのように、様々な形状を持つ発熱体に室温状態の気流を当て、発熱体から気流への熱伝達を利用してその下流側に高温の後流を発生させ、それを室内に噴出することにより部屋を暖める、という方式のことが多い。気流中に置かれた物体の後流流れは、数ある乱流現象の中でもごく基本的かつ重要な流れの形態のひとつであり、これまで数多くの研究がなされてきた。また物体の形状としては、もっとも基本的な形である円柱が用いられることが多かった⁽¹⁾。その流れ場を計測する装置としては、従来、定温度型熱線流速計が主用されてきた。定温度型熱線流速計は、高精度な測定結果が得られ、取り扱いが容易であり安価に自作することも可能であることから、流れ場の測定に多用されてきたが、その測定原理から、温度が変動する流れ場では精度が極端に劣化する、という欠点を持っていた⁽²⁾。よって、これまでに行われた後流の実験的研究は、そのほとんどが一定温度の流れ場において為されていた。ところが、我々の身の周りで発生している流れの現象

は、そのほとんどが多少なりとも温度変動を伴うものであり、また、上記暖房器具下流に形成される後流の場合、気流温度と室温との差で表される大きな温度変動のスケールを持つ加熱気流となっている。そしてその大きな温度変動により気流には浮力が発生するため、その流れの持つ性質は従来研究されてきた一定温度の気流とは異なると考えられる⁽³⁾。このような流れで発生している現象を解明するには、従来の定温度型熱線流速計が持つ欠点を克服した温度流速計により測定を行う必要がある⁽⁴⁾。よって本研究では、浮力の影響を無視できない高温の円柱後流内で発生する流れ現象を解明することを最終的な目的とし、その第一段階として加熱円柱の製作を行った。そして室温状態の様な流れ場内にこの加熱円柱を置き、その表面における温度分布を測定することにより、性能評価を行った。

2. 加熱円柱の製作

2.1 加熱円柱が満たすべき条件

加熱円柱は以下の様に製作した。円柱は本研究室既存の風洞測定胴に設置することを前提としているため、円柱に求められる外形寸法の条件としては、

測定胴内での流れを極力乱さない様、測定胴両側壁の外側で円柱を支持できるだけの長さが必要で、かつ流路内でのブロック効果効果を極力小さくするため、ブロック比を数%程度に抑えることのできる直径が必要である。また、円柱に内蔵される発熱部分からの熱が円柱表面までムラなく均等に伝導されるようにするには、できるだけ熱伝導性のよい材質が望ましく、かつ内蔵されるヒーター表面から円柱表面までの肉厚をできるだけ厚くすることが必要である。以上のことから、円柱を製作する原材料として直径30mm、長さ500mmの、ニラコ（株）製純銅丸棒を選択した。

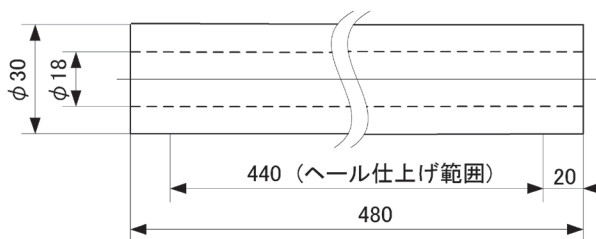


図1 円柱本体の製作図

2.2 加熱円柱の設計

設計した円柱本体を図1に示す。長さは480mm、外径を約30mmとし、円柱内部に発熱部分を挿入するための貫通穴（φ18）を空けてある。この長さなら内寸400mmの測定胴幅に対して十分な余裕があるため、円柱端部を測定胴の両側壁から外へ突き出すことができ、円柱支持部を両側壁の外側に設けることが可能である。またこの円柱直径なら、測定胴高さ（内寸400mm）に対するブロック比を7.5%に抑えることができる。さらに、ヒーター表面と円柱表面の間の肉厚が6mmとなり、均等な熱伝導を期待できる。なお、図示していないが、両端から5mmの位置に1カ所ずつ、セットビス用の雌ネジを円柱の軸に直交する向きに貫通させてある。

2.3 円柱本体の加工方法

円柱本体の加工には旋盤を使用した。穴空けに使用した長さ450mmのロングドリルではチャックへの一度の取り付けだけで穴を貫通することは無理なので、加工途中で円柱の向きを変えチャックに付け替えなくてはならない。この際、既に穴が空いている断面上をチャックにかむと、穴空けによる剛性低下で、つめからの加圧力によって断面が変形する可能性がある。よって、穴をまだ空けていない部分を

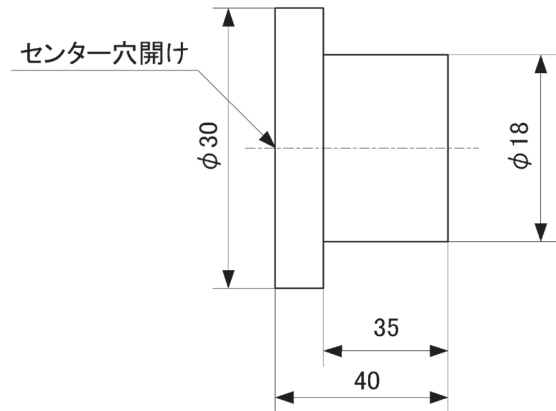


図2 円柱にはめ込んだ部材

チャックにかむことができるよう最初の穴空け深さを加減した。穴貫通後、円柱表面をハールバイトで仕上げた。円柱表面の精度を均一にするため、流路内に露出される範囲を一度に仕上げられるよう、円柱の端部から20mmまでをチャックにかみ他端をセンター支持して切削を行った。その際、前述のように円柱に既に開けられた穴により断面の剛性が低下しているため、チャックに取り付けた際に断面が変形する可能性が高い。それを回避するため、円柱両端にはそれぞれ図2に示す部材をはめ込み、セットビスで円柱に固定した。この部材は、太い部分の直径は円柱と同じ30mm、細い部分の直径は上記ドリル穴と同じ18mmとし、どちらも太い部分の端面にセンター穴を空けてある。この部材を円柱内部の穴に挿入して固定することにより、チャックに取り付ける側の円柱端部では断面の剛性を向上させることができるため、チャックに取り付けた際の変形を回避できる。また、円柱はチャックから460mm程度オーバーハングした状態で加工されるが、円柱他端部に固定した同部材のセンター穴を利用することによりセンター押しをすることができるため、安定した仕上げ加工が行える。原材料の元の直径が30mmなので、ヘール加工時には1回の切り込み量を極力小さくし、表面全体に未加工部分がなくなった時点で切削を打ち切った。その結果加工後の直径は29.8mmとなった。なお、上記はめ込み部材は、仕上げ加工終了後撤去した。

3. 発熱部分の設計

発熱部分は以下のように設計した。まず、発熱体としては坂口電熱（株）製のシリコンゴムヒーター（被覆直径2.5mm、規格抵抗値25Ω/m）を使用し、

これを長さ500mm、外径13.2mm、肉厚1.5mmの銅パイプ外周に巻き付けた後、円柱本体の貫通穴 ($\phi 18$) に挿入した。穴の直径に対し、シリコンゴムヒーターを巻き付けた後の発熱部分の直径は18.2mmとなるため、発熱部を円柱に挿入することによりシリコンゴムヒーター表面がわずかにへこみ、穴の内壁に密着する。シリコンゴムヒーターは図3の如く5条に分割し、それらを横に並べた状態で、同時に銅パイプに巻き付けた。これは、1本のヒーターが長くなり過ぎると発熱量に位置的なムラが出る可能性があるためである。銅パイプのヒーターの巻き始めと巻き終わりの位置には直径5mmの穴を各5個空け、各シリコンゴムヒーターの両端を差し込み、銅パイプ内部を通して円柱両端から外へ出し、スライダックに接続できるようにした。円柱内に発熱部分を挿

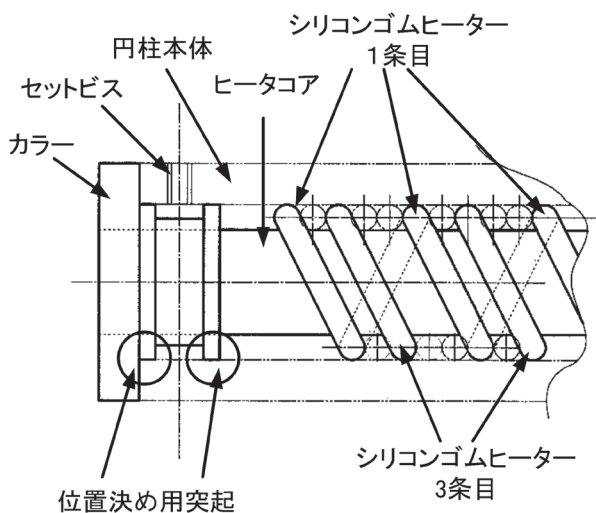


図3 ヒーター巻き付け法

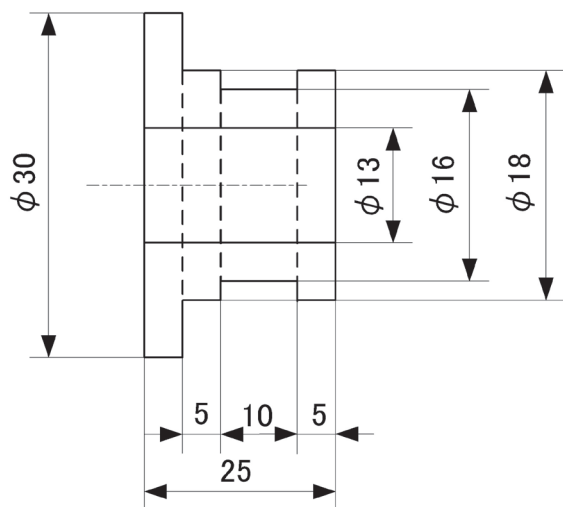


図4 発熱部分支持部材

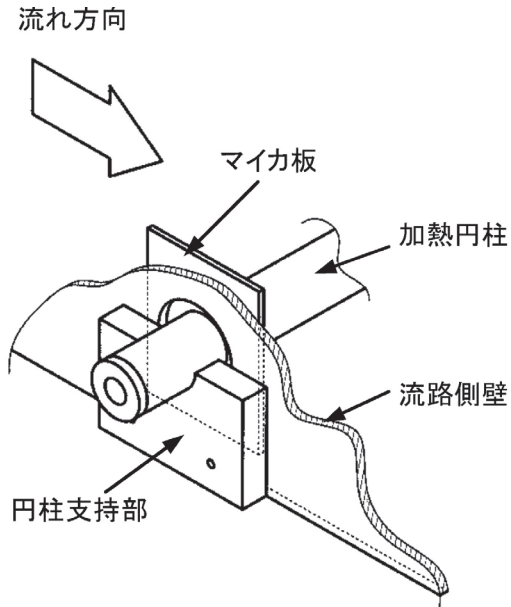


図5 流路への円柱設置方法

入した後、図4に示す発熱部分支持部材を円柱両端にはめ込み、同時に部材の中心部に空けた穴に銅パイプを差し込むことにより円柱穴内壁とヒーター表面との位置関係を固定できるようにした。これら5条のシリコンゴムヒーターは5台のスライダックに別々に接続されており、各スライダックにより個別に電圧を調整することで発熱量ムラの微調整を可能にした。

4. 風洞測定胴への円柱の設置

加熱円柱を測定胴へ装着する際、発熱体から測定胴側壁へ熱が伝導され、その結果側壁自体も発熱源となって流路内のスパン方向における温度分布に変化を来すことは避けるべきである。そのためには、測定胴内の気密を保ったままで加熱円柱と側壁間とを断熱状態にすればよく、今回は図5に示す方法で測定胴へ装着した。両側壁のうち、向かって手前側の側壁のみ図示している。矢印は流路内での気流方向である。厚さ5mmの透明アクリル板で製作した両側壁には、測定胴底面からの高さが200mmになりかつ風洞ノズル出口面からの水平距離が80mmとなる位置に中心を持つ直径36mmの貫通穴を開けている。両側壁の外側に、図6に示す円柱支持部材を肉厚10mmのアクリル板で製作し、両側壁貫通穴の中心と円柱支持面の中心が一致するように取り付けた。支持面とそれに支持される加熱円柱表面との間に、断熱材として厚さ0.1mmの岡部マイカ（株）

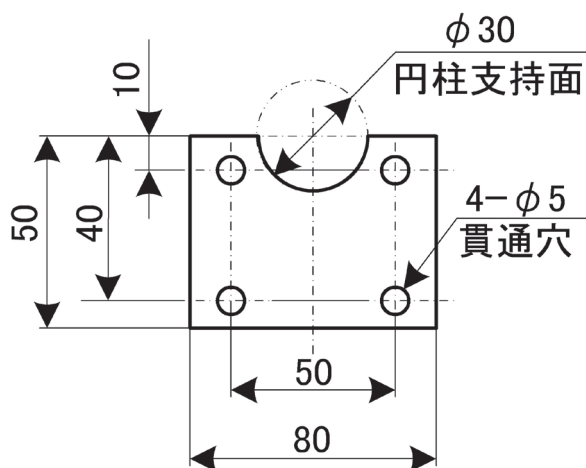


図6 円柱支持部材

製マイカテープを挟むことにより、支持部と円柱の間での断熱を図ることとした。測定胴への挿入時には、一旦加熱円柱を一方の側壁の外側からスパン方向の中程まで挿入し、続いて流路内に突き出した円柱端部から、その中心に直径30mmの貫通穴を開けた縦80mm、横60mm、厚さ0.2mmの長方形マイカ板（岡部マイカ（株）製）を2枚はめ込んだ。そして反対側の側壁穴からその円柱端部を外へ突き出し、前述通り円柱支持部材上に円柱を設置した。その後、前記2枚のマイカ板を両側壁内面に1枚ずつ接着した。マイカ板に空けた穴と円柱表面との間のクリアランスは0.1mm程度であり、そこから空気が側壁外部へ漏れることはほとんどない。また、マイカ板と加熱円柱表面が接していてもマイカ板自体が良好な断熱特性を持つため熱が側壁へ伝えられることはない。さらに、側壁に開けた穴の内面と加熱円柱表面の間にはそれぞれ3mm程度のクリアランスがあるため、そこから側壁に熱は伝わらない。以上のことから、流路の機密性を失うことなく、かつ側壁が加熱されて発熱源になることなく、加熱円柱を測定胴内部に水平かつ主流に直交するように設置することができた。

5. 加熱円柱の性能評価法

前述のように測定胴内に流れに直交しかつ水平に設置した加熱円柱に気流を当て、性能評価を行った。使用した風洞は、本研究室既存のものであり、全長約7.5m、測定胴長さ3.5m、測定部断面はノズル出口面において40cm×40cm、ノズルの絞り比は9:1、最大流速は22m/s、ノズル出口面での乱れ強さは10m/s時で0.08%、そこでの平均速度分布の誤

差は最大0.5%以内という性能を持っている。測定胴壁面には境界層が発生し、それが下流へ向かって発達するため、下流へ行くほど実質的な流路面積が狭まり一様流速が増加する。これを防ぐため、測定胴壁面は、天板、両側壁とも断面積を下流へ向かって広げられる構造となっており、測定胴内の最上流から最下流に至る全ての断面において、上記境界層の発達による影響が取り除かれ、一様流速が一定となるよう、調整してある。

円柱は、中心がノズル出口面より下流側50mmとなる位置に設置した。前述のように、円柱により生じるブロック効果で主流流速は7.5%増加する。これを見込んだ主流流速の設定には、あらかじめ本研究室既存の、較正用小型風洞⁽⁶⁾によって実流速－出力電圧間の誤差が0.5%以内となるよう較正した定温度型熱線流速計に本研究室自作のI型プローブ（熱線直径5 μ m）を接続し、測定胴天板表面に発生する境界層と、円柱表面に沿って湾曲した流れとの、両方の影響を受けないよう、ノズル出口面から距離50mm、円柱中心からの高さが170mm（天板表面からの高さ30mm）の位置に、同プローブを設置した。そして図7に示すように、風洞送風機の回転数を種々変更した状態でそれぞれの一様流速を測定して5m/sとなる回転数を割り出し、この回転数にて以後の実験を行った。測定胴に設置する前、円柱表面に円柱軸と平行な直線を引き、その上に10mm間隔の温度測定点を38点印した。これらの測定点を印す際、けがき針などを使用するとけがき線の溝両側に突起が出来、それが気流を乱す原因となるため、円柱表面を傷つけない太さ0.2mm程度の黒色フェルトペンを使用した。

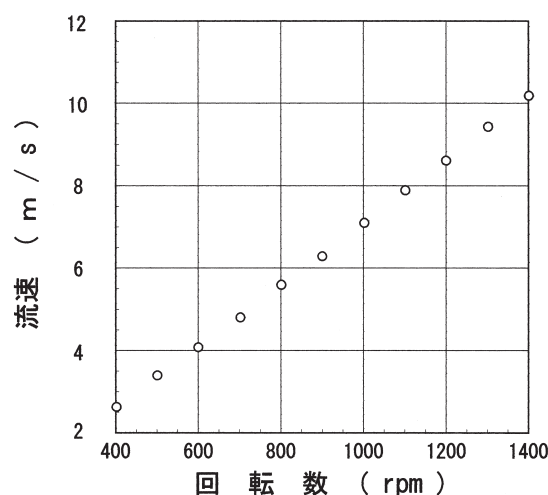


図7 送風機回転数と実流速

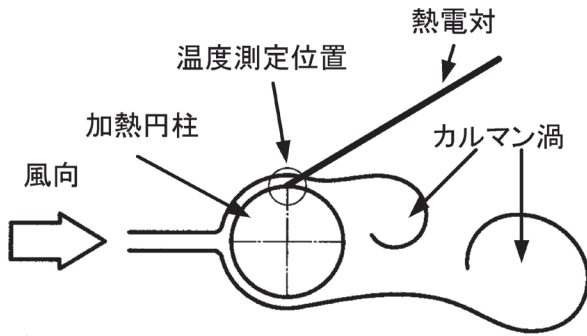


図8 円柱表面温度測定位置

円柱表面の温度分布を測定するには、本来ならサーモグラフィーによる非接触の全面同時測定が望ましいが、今回は直径1mm、長さ100mmのステンレス製シースの先端に温度検知部が内蔵されたT型熱電対をチノー製熱電対温度計DB100（最小目盛0.1℃）に接続し、点測定を行った。同温度計は、本研究室既存の小型加熱風洞⁽⁷⁾により噴流温度を種々設定した加熱噴流を発生させ、各温度における気流中にリファレンスとしての精密棒温度計（最小目盛0.5℃）と上記温度検知部とを水平に並べた状態で20分程度放置した後、両者の測定値を比較する、という方法で、繰り返し精度検定を行っており、そこから得られた補正式を用いて熱電対温度計からの出力値を補正した。温度測定時、円柱表面近傍で不規則に発生する渦の影響を受ける領域では、渦の出来方によって表面からの熱伝達量が不規則に大きく変動している可能性があるが、これによる温度分布の不均一は円柱本来の発熱性能とは無関係であるため、その影響を受けないよう、円柱表面で渦が未だ形成されていない場所で測定を行うことが望ましいと考えた。よって、図8に示すように、前記温度測定点が円柱の前方よみ点から図において時計回りに90°の位置となるよう円柱を設置した。熱電対は、温度測定部表面の気流を乱さないよう、円柱軸下流側約115mmの位置に配置した高さ250mmのハイトゲージに取り付け、また、温度検知部が円柱表面に完全に接触していない場合に生じる測定温度の精度悪化を防ぐため、熱電対のシースを弾性範囲内でやや下に凸となるようたわませた状態で温度検知部を測定点に押しつけることとし、全ての測定点で押しつけ力が均一となるよう、測定点を変える毎にハイトゲージの読みを合わせた。そして、5m/sの気流を発生させて加熱円柱に当て、熱電対の温度検知部を1つの測定点上に接触させた状態で熱伝導状態が落ち着くまで10分程度

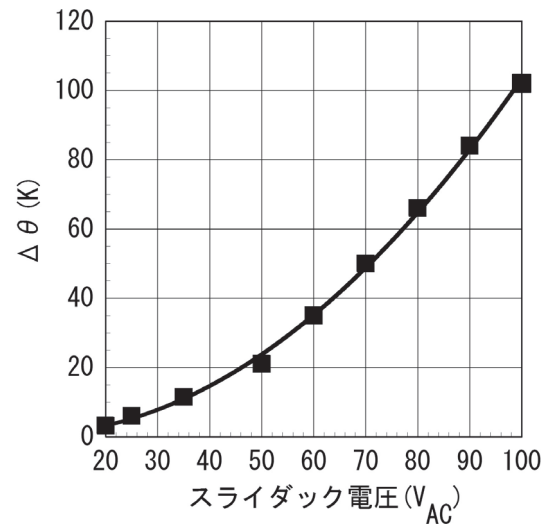


図9 スライダック電圧と円柱表面温度（5m/s）

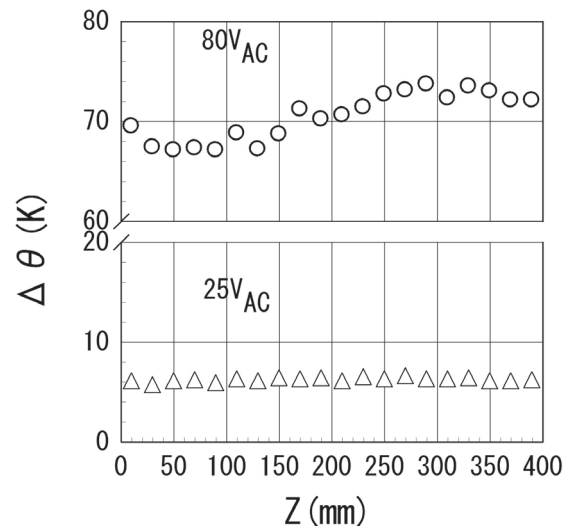


図10 円柱表面スパン方向温度分布

放置した後、1分間隔で温度を10回測定した平均値を、その測定点での平均温度とした。

6. 実験結果

主流流速 $U=5\text{m/s}$ 時の、本流れ場におけるレイノルズ数は約10000となる。この気流中に円柱を設置した場合の、表面温度と気流（室温状態）間の温度差 $\Delta\theta\text{K}$ とスライダックで設定した交流電圧 V_{AC} との関係を、図9に示す。前述のように、加熱円柱内に設置されたヒーターは5条であり、個別にスライダックへ接続して温度調整をするようになっているが、この実験では5台とも全て同じ電圧に設定し

である。ここで示した $\Delta\theta$ の代表値は、円柱スパン方向中央における前記平均値である。図より、両者の間にはほぼ2次関数の関係が成立していることがわかった。このことから、実現したい $\Delta\theta$ が決まれば必要なスライダック電圧を逆算することが可能となった。次に、 $\Delta\theta$ がごく低い場合と高い場合との円柱スパン方向における温度分布を測定した。その結果を図10に示す。横軸は一方の側壁内面からの距離 Z mm、縦軸は $\Delta\theta$ Kである。気流流速は5m/s、実験時の室温 θ_r は28℃であった。各スライダックの電圧を25V_{AC}とした場合を下段に、80V_{AC}にした場合を上段に示した。どちらも $Z=5\text{mm}\sim 395\text{mm}$ の範囲で測定したが、 $Z=0\text{mm}\sim 5\text{mm}$ および $395\text{mm}\sim 400\text{mm}$ の領域については、側壁表面に発生している境界層によりこの領域での速度が小さく、そのため円柱表面と気流との間での熱伝達量が他の部分と比較して小さくなっていて正確な測定は難しいと考えられること、またこの部分はスパン方向においてごく小さい領域にすぎず、流れ場全体の構造に与える影響は極めて小さいと考えられることなどから、測定から除外した。実験結果を見ると、25V_{AC}の場合、 $\Delta\theta$ は6K程度とごく低い値となっているが、 Z の全体にわたって温度はほぼ一定な分布を示している。一方80V_{AC}の場合は、 $\Delta\theta$ は平均して70K程度であり高い値を示していること、 $Z=200\text{mm}$ を対称軸とした点対称分布をしていること、誤差の最大が $\pm 5\%$ 程度であること、などがわかる。

以上のことから、今後、円柱表面におけるより均一な温度分布を得るためには、今回発熱源として使用したシリコンゴムヒーターを $Z=0\rightarrow 400\text{mm}$ に向けて5条並べた状態でコアに巻き付けた方法を改め、 $Z=0\text{mm}\sim 80\text{mm}$ 、 $80\text{mm}\sim 160\text{mm}$ というようにスパン方向を5つの部分に分け、各部分に1条ずつヒーターを巻き付けて発熱させ、温度の高低を見ながら個別に発熱量を制御した方が、今回得られたような点対称分布を解消でき、かつ平均値からの誤差も減るのではないかと考える。上記の方法で製作した加熱円柱の性能評価については、次回報告する予定である。

7. 結論

発熱体下流側に発生する加熱後流内での挙動を明らかにするための第一段階として、軸方向において円柱表面で等温分布となるような加熱円柱を製作し、性能評価を行った結果、

- ①壁表面から5mm以上離れた部分では $\Delta\theta=70\text{K}$ において最大で $\pm 5\%$ 程度の誤差が生じた。
 - ②この誤差は $\Delta\theta$ が小さくなるにつれて減少する。
 - ③今回用いたシリコンゴムヒーターの巻き付け法では、 $\Delta\theta$ が大きくなると円柱のスパン方向中心を対称面とした点対称な温度分布を示す。
 - ④円柱表面での温度分布をより均一にするためには、シリコンゴムヒーターの巻き付け方法を変更した方がよい。
- という結論が得られた。

8. 参考文献

- (1) 有江他4名, '円柱の流体力学的特性におよぼす主流乱れの影響', 機械学会論文集, 46-408, pp1427-1436, 1980.
- (2) 蒔田, '熱線流速計使用上の問題点', 「流れの計測」, Vol.12, No.16, pp3-pp17, 1995.
- (3) J.C. Lecordier, et al., 'The control of vortex shedding behind heated circular cylinders at low Reynolds numbers', Experiments in Fluids, Vol.10, pp224-229, 1991.
- (4) 蒔田他2名, '温度流速計の高精度化(第1報)', 機械学会論文集B編, 58-545, pp90-97, 1992.
- (5) 坂口電熱(株), ヒーターカタログ, 2007.
- (6) 渡部他2名, '小型風洞の試作と性能評価', 秋田高専研究紀要, Vol.35, pp11-16, 2000.
- (7) 渡部, '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', 秋田高専研究紀要, Vol.38, pp13-18, 2003.