

加熱円柱の改良と性能評価

渡 部 英 昭

Making of a improved heating cylinder and evaluation of its performance

Hideaki WATANABE

(平成21年11月28日受理)

To clarify the structure of wake flow behind a heated bluff body, it is useful to improve the performance of heating facilities. However, with conventional hot-wire anemometry, it is the inability in principle to measure accurately in such a flow with fluctuations in both velocity and temperature. Consequently, for accurate measurements in such flow field, the cold and hot wire thermo-anemometer developed by Makita et al. is required. To generate such flow field, it is necessary to make a heating bluff body which has uniform temperature distribution in spanwise. In the previous paper, circle was selected as the simplest cross sectional geometry of bluff bodies and made a heating cylinder, but the results of its performance evaluation proved unsatisfactory. In the present study, a new heating cylinder that modified these defects was made and the evaluation procedure was changed to more appropriate one. As a consequence, uniform temperature distribution in spanwise was realized at the surface mean maximum temperature of the cylinder $\theta > 140^\circ\text{C}$ by electrical heat-generation in air stream 20°C and $U = 5$ m/s.

1. 緒言

我々が日常使用している空調機器には、クーラーやファンヒーターなどのように、室温とは異なる表面温度を持つ鈍頭物体に気流を当てて生じた後流を利用しているものが多い。その中でも加熱鈍頭物体後流を利用したファンヒーターは、エアコンより構造がずっと簡単でしかも安価であるため各家庭での普及度が高く、その吹き出し口で生じている流れ場は我々にとって非常に身近な流れの一つである、と言える。しかし、非加熱鈍頭物体の後流などのように、速度変動のみを持ち温度変動を持たない流れ場については昔から多くの研究成果があるものの⁽¹⁾、上記加熱鈍頭物体後流のような、温度変動と速度変動を同時に持つ流れ場の構造を明らかにした研究は、極めて少ない。このことの大きな理由の一つとしては、従来から流れ場の計測に非常に広く使用されている定温度型熱線流速計が、いくつもの優れた特長を有する反面、その計測原理上、温度変動を伴う流れ場では得られる速度情報の精度に信頼性が期待できないことが挙げられる⁽²⁾。

この、定温度型熱線流速計が持つ致命的欠点を克服するため、蒔田らは二線式温度流速計を開発し、それを用いて温度変動と速度変動を伴う流れ場の計測を行うことにより、加熱自由乱流場での熱および運動エネルギーの輸送機構を明らかにして来た^{(3)~(6)}が、加熱鈍頭物体後流についてはあまり研究が為されていない。その理由は、実験的研究により流れ場の構造を解明する場合、測定点の量や測定時間などの見地から、流れ場を3次元としてではなく2次元として扱うことが望ましく、そのためには、流れ場内のスパン方向において一様性が保証されなくてはならないが、流れ場内に置かれた状態でその表面のスパン方向において良好な一様性を持つ温度分布を形成できる加熱鈍頭物体がまだ製作されていなかったためである。よって、2次元加熱鈍頭物体後流の構造把握を実現するためには、上記のような性能を持つ鈍頭物体の完成が不可欠である。

筆者の研究室では、蒔田らの二線式温度流速計をさらに改良した計測装置を製作し^{(7)~(9)}、それを用いて、浮力が流れ場の構造に影響を及ぼす程度に加熱された流れ場の計測を行っている⁽¹⁰⁾が、これま

では周囲の空気との温度差 $\Delta\theta$ を数十K程度にしか設定し得なかった。 $\Delta\theta$ が大きくなるほど、非加熱時に比べ浮力による流れ場の変形が顕著となると予想されるため、 $\Delta\theta$ を100K以上に設定できる加熱鈍頭物体後流の構造解明は非常に興味のある研究対象の一つである。よって前回の報告⁽¹¹⁾では、最も単純な断面形状を持つ鈍頭物体として円柱を選び、 $\Delta\theta > 100\text{K}$ が設定可能で、かつスパン方向での円柱表面温度分布が一様な加熱円柱の完成を目指し、外部から制御可能な発熱部を、円柱内部に組み込むことにより製作した。そして円柱完成後、性能評価を行ったが、スパン方向での円柱表面温度分布の一様性が流れ場を2次元と見なしうるだけのレベルに到達していないこと、発熱部に使用したヒーターのうち、コアとして使用した銅パイプの表面に巻きつけた部分には損傷がなかったものの、パイプ内を通した部分ではヒーターの被覆部分が高温によって焼損してしまい、その結果、 $\Delta\theta$ を100Kに到達させることができないこと、などがわかった。

よって本研究では、円柱発熱部の製法および制御法を改め、かつ発熱によるパイプ内でのヒーター被覆部分の焼損対策を施すことにより上記欠陥を克服し、 $\Delta\theta$ を100K以上に設定可能で、かつ加熱円柱後流を2次元流れとして扱う為に必要な、スパン方向で一様な円柱表面温度分布を実現できる加熱円柱を新たに製作し、その性能評価を行った。

2. 主な使用記号

- Z : 円柱端面を原点としたスパン方向距離 [mm]
- d : 円柱外径 [mm]
- U : 主流流速 [m/s]
- θ : 円柱表面温度 [°C]
- $\Delta\theta$: 室温と θ との温度差 [K]

3. 前回製作した加熱円柱の概要と欠陥

前回製作した円柱は、外径 $d = 30\text{mm}$ 、長さ 480mm であり、断面中心に直径 18mm の貫通穴を明け、長さ 480mm 、外径 13.2mm 、肉厚 1.5mm の銅パイプ外周に、5台のスライダック出力端子に接続された5本のシリコンゴムヒーター（坂口電熱（株）製、 $\phi 2.5\text{mm}$ 、規格抵抗値 $50\Omega/\text{m}$ 、SIL50C）⁽¹²⁾を横に5条並べた状態でスパン方向全域に渡って隙間無く巻き付けて製作した発熱部を、上記貫通穴に挿入したものであった。そして、本研究室既存の低速低乱風洞で主流流速 $U = 5\text{m/s}$ の気流を発生させ、完成

した加熱円柱をその測定部に水平に挿入して固定した後、円柱の前方よどみ点からの開き角 90° となる円周上に位置し、風洞測定部両側壁の表面からそれぞれ 5mm ずつを除外したスパン方向を温度測定範囲とし、その範囲内に 10mm 間隔で設けた38箇所表面温度を測定した。温度測定には、ハイトゲージに取り付けた熱電対温度計（チノー製DB100、最小目盛 0.1°C ）を使用した。その結果、① $\Delta\theta$ が 10K 未満の場合には温度分布の一様性は良好であったが、 $\Delta\theta$ が大きくなるにつれて、円柱を下流側から見た場合のスパン方向中心を対称軸として左半分がやや低温、右半分がやや高温となる点対称な温度分布となったこと、②温度分布の一様性が、 $\Delta\theta = 70\text{K}$ に設定した場合に最大 $\pm 5\%$ 程度の誤差を生じたこと、③ $\Delta\theta$ が 80K を超えたあたりで、銅パイプ内部を通したヒーター被覆部分が焼損し、ヒーター本体が銅パイプや隣接するヒーターに導通する危険性が出てきたこと、などの欠点があることがわかった。本研究室で使用する測定装置の誤差レベルから考えると、加熱円柱表面における温度分布の一様性としては誤差を $\pm 2\%$ 程度に抑える必要があるが、上記円柱のままでは筆者が必要とする $\Delta\theta > 100\text{K}$ の設定が不可能であり、かつ温度分布の一様性についても性能不足であるのは明らかであるため、加熱円柱の製法および制御法を改めなければならないことがわかった。

4. 改良した加熱円柱の製法

よって今回、以下の点に留意して加熱円柱を設計し直し、製作を行った。①前回の試作においては円柱スパン方向での温度分布の不均一が最大の問題であったので、今回製作する円柱では、この欠点を無くすため、図1に示すように、風洞測定部に設置した状態で下流側から見た場合の円柱の左側端部を $Z = 0$ とし、 $Z = 0 \sim 30\text{mm}$ （円柱左側支持部）、 $Z = 30 \sim 90\text{mm}$ （発熱部1段目）、 $90 \sim 190\text{mm}$ （発熱部3段目）、 $190 \sim 280\text{mm}$ （発熱部5段目）、 $280 \sim 380\text{mm}$ （発熱部4段目）、 $380 \sim 440\text{mm}$ （発熱部2段目）、 $440 \sim 480\text{mm}$ （円柱右側支持部）に区分し、各発熱部の

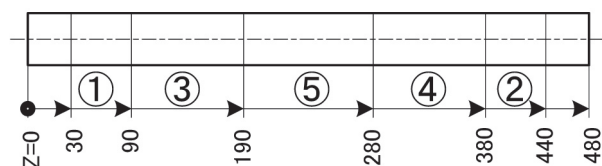


図1 各段ヒーター配置（背面図）

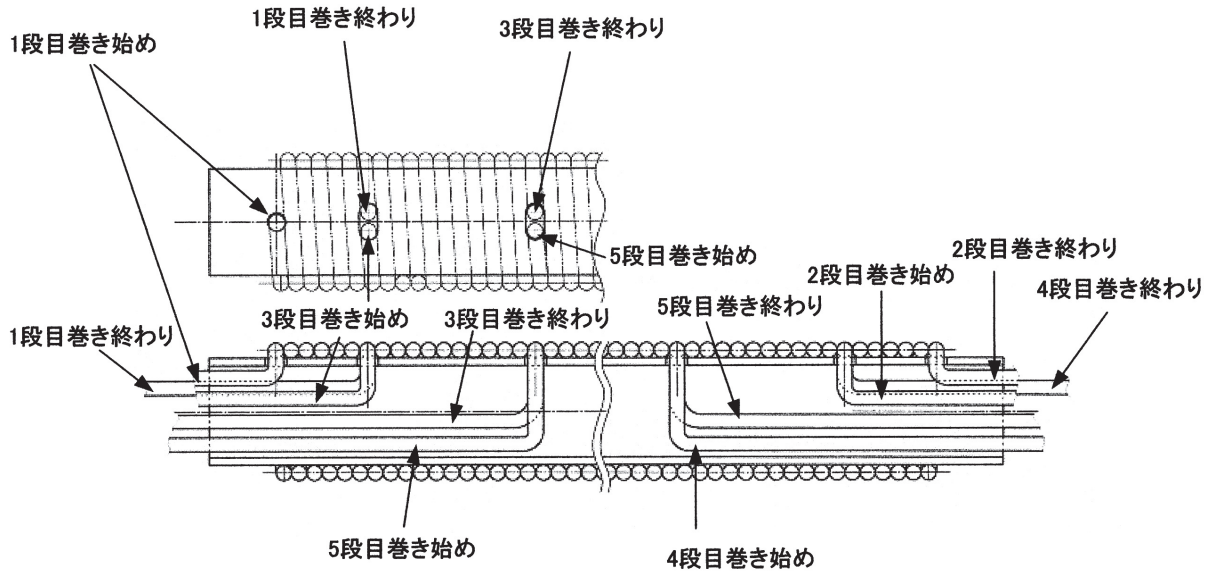


図 2 発熱部詳細 (背面図)

電圧を別々に制御することとした。発熱体としては前回同様、坂口電熱 (株) 製シリコンゴムヒーター⁽¹²⁾を使用した。ヒーターを銅パイプに巻き付ける際は、スパン方向の温度分布に不連続部分が存在しないようにするため、図 2 に示すように、発熱部両端付近にある 1 段目および 2 段目の巻き始め部分 ($Z=30\text{mm}$ および $Z=440\text{mm}$) のみ直径 4mm の円形穴を空けて 1 本のヒーターのみを通し、それ以外の各発熱部巻き始め部分および巻き終わり位置には全て 4×8 の丸長穴を形成し、隣接する段の巻き始め部と巻き終わり部である 2 本のヒーターを通すことにした。そして 1 段目制御用スライダックの出力端子の一方に接続したヒーターを、円柱左端側からパイプ内部へ導入し、1 段目の巻き始め部分である $Z=30\text{mm}$ の円形穴からパイプ表面に出し、隣り合うヒーター同士に隙間が無いようパイプ表面に巻き付け、1 段目巻き終わりの部分である $Z=90\text{mm}$ に至ってからヒーターを図中丸長穴の上半分を経てパイプ内部へ通し、円柱左端部へ導いて外へ出した後、上記スライダックの出力端の他方へ接続した。次に 1 段目に隣接する 3 段目のヒーターは、3 段目制御用スライダックの出力端子の一方に接続した後、1 段目と同様円柱左端側からパイプ内部へ導入し、上記 $Z=90\text{mm}$ の丸長穴の下半分を経てパイプ表面に出し、1 段目のヒーターとの間に隙間が全く生じないように注意して巻いていき、3 段目の巻き終わり部分である $Z=190\text{mm}$ の丸長穴上半分を通してパイプ内部を経て円柱左端部より外へ導出し、上記スライダックの他方の出力端子に接続した。さらに 5 段目制御用スライダックの一方の出力端子に接

続したヒーターを、これまでと同様円柱左端部よりパイプ内へ導入し、前記 $Z=190\text{mm}$ の丸長穴下半分を通してパイプ表面に出し、3 段目ヒーターとの間に隙間が生じないようにパイプ表面に巻き付け、 $Z=280\text{mm}$ の丸長穴上半分を通してパイプ内部に入れたが、今回使用したパイプの断面積ではヒーターを 6 本以上通すことが困難なため、1 および 3 段目とは異なり、5 段目巻き終わり部分は円柱右端部へと導き外へ出した後、5 段目制御用スライダックのもう一方の出力端子に接続した。5 段目に隣接する 4 段目のヒーターは、4 段目制御用スライダックの出力端子の一方に接続したのち、円柱右側端部からパイプ内へ導入して上記 $Z=280\text{mm}$ の丸長穴下半分を経てパイプ表面に出し、これまでと同様、隣接する 5 段目ヒーターとの間に隙間が生じないように巻いていき、ヒーターが $Z=380\text{mm}$ の丸長穴部分に到達したら、その上半分を経てパイプ内部に入れ、円柱右側端部へ導いてから外に出し、4 段目制御用スライダックのもう一方の出力端子に接続した。4 段目に隣接する発熱部 2 段目も、2 段目制御用スライダックの一方の出力端子に接続したヒーターを、円柱右側端部からパイプ内へ導入し、前記 $Z=380\text{mm}$ の丸長穴下半分からパイプ表面に出した後、4 段目と同じ向きに、隙間が出来ないように巻き、 $Z=440\text{mm}$ の丸穴にヒーターが到達したらその穴を経てパイプ内に導入し、円柱右側端部から外へ出して 2 段目制御用スライダックの残った方の出力端子に接続した。以上の様に、円柱左右両端から外へ導出された各 5 本ずつのヒーターと接続されている計 5 台のスライダックによって、発熱部スパン方

表1 各段のヒーター長さおよび抵抗値

	ヒーター長さ (cm)	抵抗値 (Ω)
1 段目	約120	63.1
2 段目	約120	63.5
3 段目	約230	120.8
4 段目	約230	121
5 段目	約220	112.8

向を5分割して別個に温度制御を行うことができるようにした。完成した発熱部各段のヒーター抵抗値は、表1に示す通りである。

なお、パイプに空けた丸穴および丸長穴の縁にバリが残っていると、その部分のヒーター被覆材が切り裂かれてパイプとヒーター本体との間の絶縁性が損なわれる可能性があるため、穴を加工する際には縁にバリが残らないよう、注意深く仕上げた。また前回製作した加熱円柱内部において、パイプ表面に巻き付けた発熱部分の被覆材には焼損している部分が見受けられなかったが、パイプ内部を通したヒーター部分の被覆材が焼損していることがわかった。これは、パイプ内部におけるヒーター自身の発熱による昇温と、パイプ表面に巻き付けたヒーターからのパイプ内部への輻射熱によるものと思われる。そして絶縁材を兼ねる被覆材の焼損は、ヒーター内部のニクロム線の露出につながり、パイプ内における各段のヒーター同士が短絡する可能性があることを示し、放置すると火災発生の原因ともなりかねない。よって今回は、ヒーターのパイプ内部を通る部分の各被覆材全体に、ガラス繊維チューブ（外径5mm、厚さ0.3mm）を被せることにより、パイプ表面に巻いたヒーターからのパイプ内部への輻射熱による被覆材の劣化を軽減し、また仮に被覆材が焼損した場合でも上記チューブが絶縁材の役を果たすことにより、他の段のヒーターとの絶縁性を確保できるようにした。さらに、パイプ表面から内部への熱輻射を低減するため、ヒーターを巻きつける前に、ヒーター装着範囲全体（ $Z=30\text{mm}\sim 440\text{mm}$ ）のパイプ表面に、断熱材として厚さ0.15mm、幅25mmのマイカテープ（岡部マイカ工業所製）を隙間無く巻き付け、その上から各段のヒーターを巻き付けた。

一方、パイプ表面に上述のマイカテープを巻き付けた結果、発熱部全体の外径が称呼で $\phi 18.2$ から $\phi 18.5$ へと増加したため、前回と異なり、完成した発熱部分をスムーズに円柱側の穴（ $\phi 18$ ）に挿入するのが困難となった。そして無理に発熱部を押し込むと、巻き付けたヒーターの配列が崩れてヒーター相互の間に隙間が生じたり配置が偏ったりしたた

め、挿入時には円柱穴の内壁と発熱部表面との間に潤滑剤を塗布する必要があることがわかった。潤滑油を使用した場合、発熱部が高温になることにより発火する恐れがあるため、潤滑剤として今回は粉末のシッカロール（ピジョン製）を、挿入前の発熱部表面および円柱側の穴内壁全体に万遍なくふりかけた。その結果、発熱部を支障無く円柱穴に挿入することができた。

5. 新しい加熱円柱の性能評価法

製作した加熱円柱の一様流中での発熱性能を評価するため、本研究室既存の低速低乱風洞測定部の、風洞ノズル出口面下流側50mmとなる位置に、円柱軸が流れに直角かつ水平となるよう、測定部中心高さに設置した。測定部両壁面での円柱支持方法は、前回と全く同じとした。そして定温度型熱線流速計⁽⁸⁾に接続して本研究室既存の較正用風洞^{(13)~(14)}で誤差 $\pm 1\%$ 以内での較正を終えたI型プローブを風洞のトラバース装置に取り付け、プローブ検知部を円柱中心から鉛直上方170mmの位置に設置し、流速計出力を読み取りながら主流流速が5m/sとなるよう送風機回転数を設定した。

前回の測定では、円柱の前方よどみ点からの開き角 90° の位置にスパン方向へ10mm間隔で測定点を印し、 $\phi 1$ のステンレスシース内に納められたT型熱電対を測定点に直接接触させて1点ごとの表面温度を測定したが、測定結果が点情報となったこと、同時測定が不可能であり、最初の測定点と最後の測定点ではデータ採取時刻に大きなずれが生じたことなど、温度分布の測定方法としては決して望ましいものではなかった。よって今回は、サーマルビデオシステム（NEC Avio赤外線テクノロジー（株）製、以下、サーモグラフィーと称す）を用いて非接触同時測定を行った。サーモグラフィーの温度検知部である25mmリモートフォーカスレンズ付きカメラは、円柱下流側に置いたカメラ台上に水平に固定し、レンズ高さが円柱中心軸とほぼ同じになるよう、高さを調整した。そして円柱全体がプロセッサ側の液晶モニタに表示されるよう、風洞測定部内でカメラと円柱との距離を調整し、円柱中心からレンズ面までの距離1.2mの位置をカメラの定位置とした。プロセッサ側の測定条件としては、表示温度範囲と温度レンジを $52.20^\circ\text{C}\sim 165.30^\circ\text{C}$ に設定した。また、本サーモグラフィーの付属機能である5点の温度測定用ポイントを円柱中心軸上の発熱部各段のスパン方向中央に設置し、これらの位置での温度も実測した。

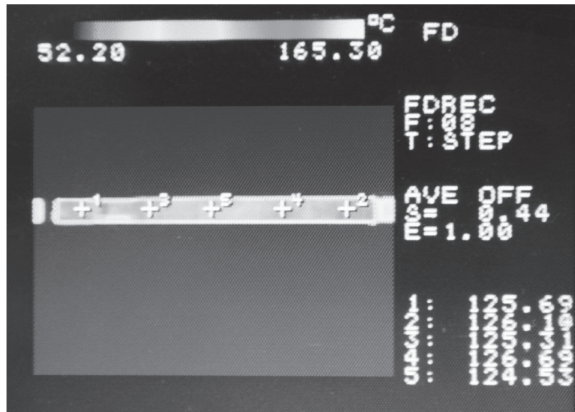


図3 円柱表面温度分布画像（背面）

表2 円柱表面における最大温度とスライダック電圧

スライダックNo.	1	2	3	4	5
電圧 (V _{AC})	80.1V	92.7V	65.0V	86.0V	124.8V
表面温度 (°C)	148°C	151°C	150°C	147°C	145°C

この時、発熱部1段目の温度をポイント1で、5段目の温度をポイント5で表示する、というようにポイントナンバーと発熱部段数が一致するように配置し、各スライダック調整時の混乱を避けるようにした。なお予備実験として、沸騰水と氷水を容器に入れ棒温度計を差し込んだ状態で同装置を使ってこれらを撮影し、モニターに表示された測定ポイントの値と棒温度計での測定結果とを比較し、これら測定用ポイントの精度が±2°C程度の誤差しか持たないことを確認しておいた。性能評価を行っている間、主流流速は一定とし、モニター上に表示された各測定ポイントの値を見ながら発熱部各段に接続した5台のスライダックを個別に制御し、設定した様々な $\Delta\theta$ (3K, 8K, 14K, 28K, 33K, 42K, 54K, 66K, 85K, 105K, 128K) に対し、それぞれ一様な温度分布を形成するのに必要な、スライダックの設定電圧を調べた。その一例として、室温20°Cにおいて $\Delta\theta=105\text{K}$ に設定した円柱表面での温度分布画像を図3に示す。温度分布の状態は、画像での色の違いとして示しているが、同図右下に表示した全測定ポイントでの温度の平均値 $\theta=125.7^\circ\text{C}$ ($\Delta\theta=105\text{K}$) に対する各ポイントでの測定値のずれは、最大で0.9%であった。同様に、全測定ポイントでの最大温度の平均値 $\theta=148.3^\circ\text{C}$ ($\Delta\theta=128\text{K}$) と設定した場合の各スライダック電圧と各点での温度を表2に示すが、この時の平均値に対する各測定値のずれは、最大で2.2%であった。これらの結果はいずれも、本研究で製作した加熱円柱の後流を十分2次元流れ

と見なすことができる一様性を持っていることを示している。

6. 今後の展望

従来筆者の研究室では、卒業研究として加熱自由噴流における浮力の影響についても研究を行っているが、気流温度を $\Delta\theta>30\text{K}$ に設定した場合、浮力の影響により $X/H=8$ 以降 (H は風洞ノズル高さ、 X はノズル出口からの水平方向距離) の各測定断面において、非加熱自由噴流と比較して流れ場の変形が顕著となることが分かってきている。このことは、 $\Delta\theta>30\text{K}$ に設定した加熱円柱後流内でも、浮力の影響により非加熱円柱後流と比較して流れ場が変形する可能性を示唆している。そして今回製作した加熱円柱では、 $\Delta\theta$ を最大128Kまで設定できるため、浮力による流れ場の変形がさらに顕著になることが期待できる。よって今後は、本研究室既存の二線式温度流速計^{(7)~(9)}を用いて、 $\Delta\theta$ が大きい場合の加熱円柱後流における浮力の影響についても研究を行っていく予定である。また今回採用した発熱部の製法を応用すれば、一様なスパン方向温度分布を持つ加熱多角柱の製作も可能となるため、円柱だけに限らず、さらに加熱四角柱や五角柱をも製作し、それらの後流における浮力の影響についても研究を行っていきたいと考えている。

7. 結論

前回製作した加熱円柱の性能評価を行った結果、いくつかの欠陥が明らかとなったため、今回はそれらを改善した製法および制御法を考案して加熱円柱を再度製作し、さらに新たな温度分布の測定法を採用して性能評価を行った結果、

- ①円柱スパン方向における温度分布の不均一が解消され、容易に一様な温度分布を形成できる制御方法となった。
- ②サーモグラフィーによる非接触同時温度測定を行うことにより、点情報かつ時間差のあるデータではなく、面情報かつ同時測定としてのデータを得ることができたため、評価の精度がより向上した。
- ③パイプ内での高温により、絶縁材としてのヒーター被覆材が焼損して絶縁不良が生じるのを防ぐことにより、最大で $\theta=148^\circ\text{C}$ ($\Delta\theta=128\text{K}$) という高い円柱表面温度と、その状態でも流れを2次元と見なしうる一様な表面温度分布を得ることができた。

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', 日本機械学会論文集B編, 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, pp3-17, 1995.
- (3) 蒔田, 森, 澤田, '温度流速計の高精度化第2報', 日本機械学会論文集B編, 58-545, pp90-97, 1992.
- (4) 蒔田, 森, 澤田, '温度流速計の高精度化第2報', 日本機械学会論文集B編, 58-554, pp3100-3107, 1992.
- (5) H.Makita, S.Mori, A.Yahagi 'Spontaneous generation of internal gravity waves in a wind tunnel', "Stability Stratified Flows", Oxford University Press, pp81-91, 1994.
- (6) 大庭, 蒔田, 関下, 渡部, '内部重力波の空間構造と逆勾配熱拡散の発生', 日本機械学会論文集B編, 72-716, pp877-884, 2006.
- (7) 渡部, '温度流速計による低周波特性検定装置の製作', 秋田高専研究紀要, Vol.39, pp30-35, 2004.
- (8) 渡部, '温度補償部を持つ定温度型熱線流速計の製作と性能評価', 秋田高専研究紀要, Vol.40, pp1-8, 2005.
- (9) 渡部, '温度流速計の製作', 秋田高専研究紀要, Vol.41, pp1-7, 2006.
- (10) 渡部, '温度流速計による加熱円柱後流の測定', 秋田高専研究紀要, Vol.42, pp7-12, 2007.
- (11) 渡部, '加熱円柱の製作', 秋田高専研究紀要, Vol.44, pp64-69, 2008.
- (12) 坂口電熱 (株), ヒーターカタログ, 2007.
- (13) 渡部, 石塚, 川辺, '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.
- (14) 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.