

温度流速計による加熱円柱後流の測定

渡部 英 昭

Measurements in the wake of a heated cylinder with thermo-anemometer

Hideaki WATANABE

(2006年11月27日受理)

Measurements in a wake of a heated cylinder were performed by thermo-anemometer. The cylinder was mounted horizontally in the middle of unheated free jet. The exit size of wind tunnel was 60mm×60mm, diameter of the cylinder was 2mm, and the blockage effect was about 3%. The reference velocity was the centerline velocity of the exit of the tunnel, and it was 5m/s. The Reynolds number, based on the diameter of the cylinder and the reference velocity, was about 670. Difference between ambient room temperature and the surface temperature of cylinder was about 40°C. In the region of the turbulent intensity less than 20%, the result in heated cylinder wake was consistent with the value in unheated cylinder one.

1. 緒言

定温度型熱線流速計は、流れ場で生じている流体現象を実験的に解明する際、大変有力な計測手段として従来から主用されてきた。この装置は、安価で、精度が高く、ある程度の電氣的知識を持っていれば自作も可能で、複雑な操作も必要としない、など、種々の優れた特長を有する⁽¹⁾が、その反面、装置自体の計測原理上、測定対象となる流れ場が温度変動を持つ場合は、得られた測定結果の精度が著しく劣化する、という致命的な欠点も有する⁽²⁾。そして、我々の身の周りでひんぱんに目にする対流流れなどに代表されるように、自然界に実在する流れ場には、むしろその内部に温度変動を持たない例の方が極めて稀である。よって、実験室内で風洞等により自然界の流れを模擬し、厳密なデータを得たい場合には、その流れ場内に温度変動を持たせることが望ましい^{(3),(4)}。

蒔田らは、従来の定温度型熱線流速計が持つ上記の欠点を克服し、温度変動のある流れ場においても、高い精度で温度および速度信号を同時に測定できる手段として、二線式温度流速計を提案した^{(5)~(7)}。この装置は、基本的には定温度型熱線流速計と定電流型温度計から構成されている。そして、流れ場において同時に得られた瞬間的な温度信号と速度信号を、厳密に分離することが可能で、両者を用いて相互に補償し合うことにより、温度変動をもつ流れ場にお

いても正確な温度・速度信号を得ることが可能である。筆者は、蒔田らの温度流速計にさらに改良を加えた温度流速計を製作した。⁽⁸⁾よって本研究では、非加熱自由噴流内に加熱円柱を設置し、その後流を上記温度流速計を用いて測定することによって、温度流速計の性能を評価し、同時に流れ場内で発生している現象の解明を試みることを目的としている。

2. 温度流速計の基本構成

本研究で使用した二線式温度流速計のブロックダ

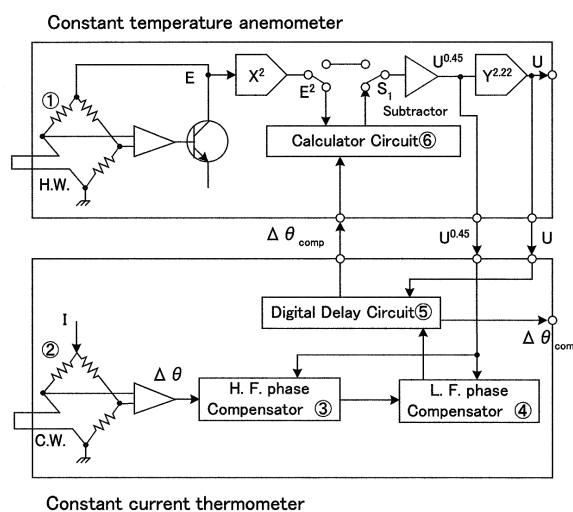


図1 二線式温度流速計ブロック図

イヤグラム⁽⁵⁾を図1に示す。本温度流速計は、流速に対する温度補償を行うための演算回路⑥が組み込まれた定温度型熱線流速計⁽⁹⁾と、高・低周波位相補償回路③④、遅延補償回路⑤が組み込まれた定電流型温度計から構成されている⁽⁸⁾。熱線流速計側では、温度計から出力された温度信号 $\Delta\theta_{comp}$ を用いて、回路⑥内で流速信号に対する温度補償を行い、温度計側では、流速計から出力される速度信号 U および $U^{0.45}$ を用いて、回路③④で高・低周波位相補償を、回路⑤で遅延補償を、それぞれ行う。

3. 加熱円柱後流の測定

3.1 使用機器

実験に使用した風洞は、本研究室に既存の低速低乱加熱風洞⁽¹⁰⁾であり、使用プローブは図2に示す著者自作のI-I型プローブである。本プローブは、上流側に設置された、直径 $2.5\mu\text{m}$ 、長さ 2mm の

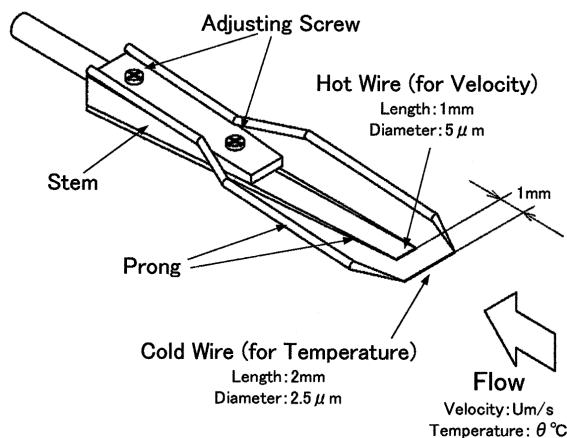


図2 I-I型プローブ

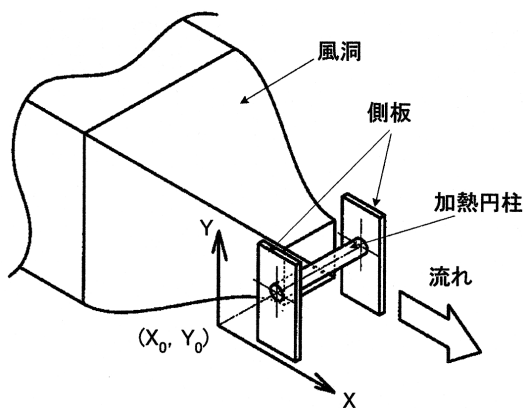


図3 実験条件および座標系

タングステンワイヤである冷線によって温度を測定し、それより 1mm 下流側に平行に設置された、直径 $5\mu\text{m}$ 、長さ 1mm のタングステンワイヤである熱線によって速度を測定する。両ワイヤは、顕微鏡下で厳密に平行となるよう調整されている。定電流型温度計の較正を行う際に必要となる実際の気流温度は、チノー製熱電対温度計（最小目盛 0.1°C ）を使用することにより実測した。そして定電流型温度計の較正に使用するに先立ち、精密棒温度計との併用により、実際の正確な気流温度と熱電対温度計の出力値間に存在する誤差について正確に検定した。また、定温度型熱線流速計の較正時に必要となる実流速の測定には、最小目盛 0.1mmAq のベッツ型マノメータおよびJIS型ピトー静圧管（直径 6mm ）を使用した。定電流型温度計および熱線流速計は、較正時、これらの機器との併用により、実温度、実流速に対する各出力信号の誤差が $\pm 1\%$ 未満になるよう、調整した。測定中に得られた温度流速計からの温度・速度信号は、本研究室既存のTEAC社製4ch.デジタルデータレコーダ（カットオフ周波数 10KHz ）にてDATに記録した後、必要に応じて再生し、解析に使用した。DATからの再生信号は、本研究室既存の、ナショナルインスツルメンツ社製データ集録ボード（入力側分解能16ビット）に入力してA/D変換を行った後パソコンに取り込み、著者が作成したLABView解析プログラムにより、平均流速と乱れ強さの計算を行った。同プログラムでは、データ採取時の条件として、サンプリングレートを 10KHz 、取り込みデータ数を 10000 、平均時間を 30 秒に設定した。

3.2 実験条件

本測定を行った際の実験条件および座標軸を、図3に示す。 $60\text{mm} \times 60\text{mm}$ の正方形断面を持つ風洞出口面の直下流、出口中心高さに、直径 $d = 2\text{mm}$ の円形断面を持つ坂口電熱社製ロッドヒータを、中心軸が水平かつ流れに直交するように設置した。それによるブロッケージ比は約 3% であった。ヒータ両端は、風洞出口両側壁の外側に設置した不燃ボード製の側板にはめ込まれることにより、流れの中に固定されている。同不燃ボードは、熱伝導特性が極めて低いため、ヒータからの発熱がボード内を伝導して、その表面から気流に伝達されることはほとんどないと考えられる。また、ボードの流れ方向幅は、原点（後述）から $X/d = 35$ までとした。通常、自由噴流と周囲流体との境界面近傍においては、噴流

が周囲の静止流体を流れの中に巻き込むエントレインメント現象が発生するため、その領域では大きい速度勾配を持つせん断流となり⁽¹¹⁾、流れと直角な方向における流速および乱れ強さの一様性が保たれない。そのため、加熱円柱表面が自由噴流部分とエントレインメント発生部分の両方にまたがっている場合、発熱面である円柱表面からの気流への熱伝達量が、円柱軸方向において一様でなくなり、噴流中での発熱の一様性を保てなくなる。しかし、上記側板の設置により、少なくとも $X/d=35$ まではエントレインメントが発生しないため、今回の測定範囲においては、気流に対する加熱円柱表面からの熱伝達量を一様にする事ができた。

風洞出口面中心における平均流速は、ピトー静圧管と前記ベッツ型マノメータを用いて、 $U_0=5\text{ m/s}$ に設定した。ここで、 U_0 と d を代表値としたレイノルズ数は、約670となる。座標軸は、円柱中心を原点 (X_0, Y_0) とし、流れ方向を X 、鉛直方向を Y とした。なお円柱表面温度は、室温より 40°C 高い $\Delta\theta=40^\circ\text{C}$ に設定した。

3.3 非加熱自由噴流場の測定

始めに、本流れ場においてバックグラウンドとなる非加熱自由噴流場の測定を行った。本測定においては、上記加熱円柱を取り除いた状態での風洞出口中心における平均流速を、 $U_0=5\text{ m/s}$ に設定した。その結果を図4および図5に示す。両図とも、縦軸は座標原点 Y_0 からの測定位置高さ $(Y-Y_0)\text{mm}$ を、円柱直径 $d=2\text{ mm}$ で無次元化した値を取っている。流れ方向における測定断面は、原点 X_0 からの流れ方向距離 X を d で無次元化した値 X/d が、2, 3, 5, 7, 10, 15, 20となる位置とした。

図4には、流れ方向平均流速 $U\text{m/s}$ の鉛直方向分布を、図5には流れ方向の流速変動 u の rms 値である u_{rms} を示している。横軸は、各測定高さでの U および u_{rms} を、出口断面中心における平均流速 $U_0\text{m/s}$ で無次元化した値である。始めに図4において、ノズル出口直下流の測定断面である $X/d=2$ では、 $\pm 14.5 < (Y-Y_0)/d < \pm 15.5$ の部分に、大きな速度勾配をもつ領域が形成され、それ以外の $(Y-Y_0)/d < \pm 14.5$ では、ほぼ $U/U_0=1$ で一様となっている。このことから、ノズル出口直後であるにも関わらず、上記の大きな速度勾配を持つ部分、すなわち噴流外縁近傍では、既にエントレインメントが発生していることを示している。図5における同じ断面での乱れ強さ分布を見ると、流速分布が一

様な領域では乱れ強さが一様できわめて小さい値 (1%程度) を持つが、上記エントレインメントが発生している部分では、乱れ強さが若干大きくなっていることがわかる。それよりやや下流側の断面である $X/d=3$ では、噴流外縁部の速度勾配はやや緩やかになっている。一方、 $U/U_0=1$ となる領域が、 $(Y-Y_0)/d < \pm 14$ 程度と、前記 $X/d=2$ よりやや狭められており、エントレインメントが発生している領域が、噴流の内側へ一層拡大していることがわかる。また、図5で $X/d=2$ および3の断面における乱れ強さの値を比較すると、流速分布が一様な部分での値は両者ともほぼ同等であるが、エントレインメントが発生している部分においては、下流側断面の方が乱れ強さが全体的に大きくなっていること、またピーク値を持つ点がある領域内に存在することがわかる。さらに下流側の各断面においても、上記と全く同じ傾向が観察され、エントレインメント領域の広さ、および乱れ強さのピーク値が最も大きくなるのが、今回の測定における最下流断面である $X/d=20$ であり、そこでのエントレインメント領域は $\pm 12 < (Y-Y_0)/d < \pm 19$ 程度、乱れ強さのピーク値は20%程度となっている。なお、各断面における $U/U_0=1$ となる範囲を断面ごとにつなぎあわせた領域を、通常、ポテンシャルコアと称する⁽¹¹⁾。各断面において、 $(Y-Y_0)/d = \pm 13$ 付近で U/U_0 が若干1を超えていること、同一断面内において原点を中心として上下を比較した場合、マイナス側がやや大きい値を示していることなどが観察される。前者については、風洞内を通過してきた流れがノズルによって絞られた結果、噴流外側が加速されたことが原因と考えられる。後者については、本風洞で使用している送風機が軸流式ではなくシロッコ式であるため、送風機出口において、気流内には下に向かうほど増速されている速度勾配が形成されている。そして、本風洞においては拡散胴、整流胴、縮流ノズルを通過後も、その速度勾配を完全には除去し切れなかったことが原因と考えられる。また、図5において、乱れ強さが一様な範囲が最も狭いのは、図4と同様、最下流断面である $X/d=20$ においてであるが、その範囲は前記ポテンシャルコアよりさらに狭く、 $(Y-Y_0)/d \leq \pm 7$ である。以上のことから本研究では、バックグラウンドにおける全ての断面の平均流速と乱れ強さが一様な分布となる、 $(Y-Y_0)/d \leq \pm 7$ の範囲に限定して円柱後流の測定を行うことにした。

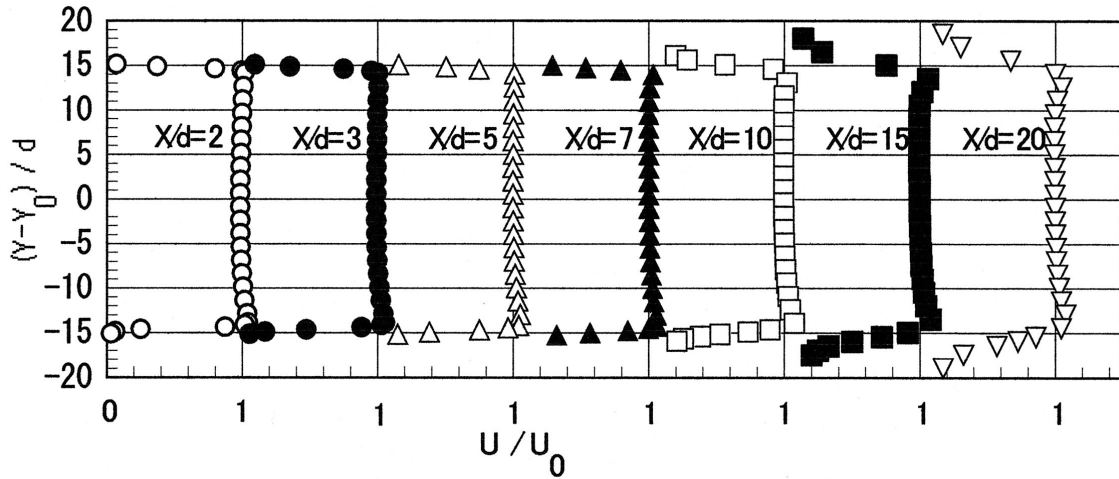


図4 非加熱自由噴流における流れ方向平均速度の鉛直方向分布 ($U_0=5\text{ m/s}$, $d=2\text{ mm}$)

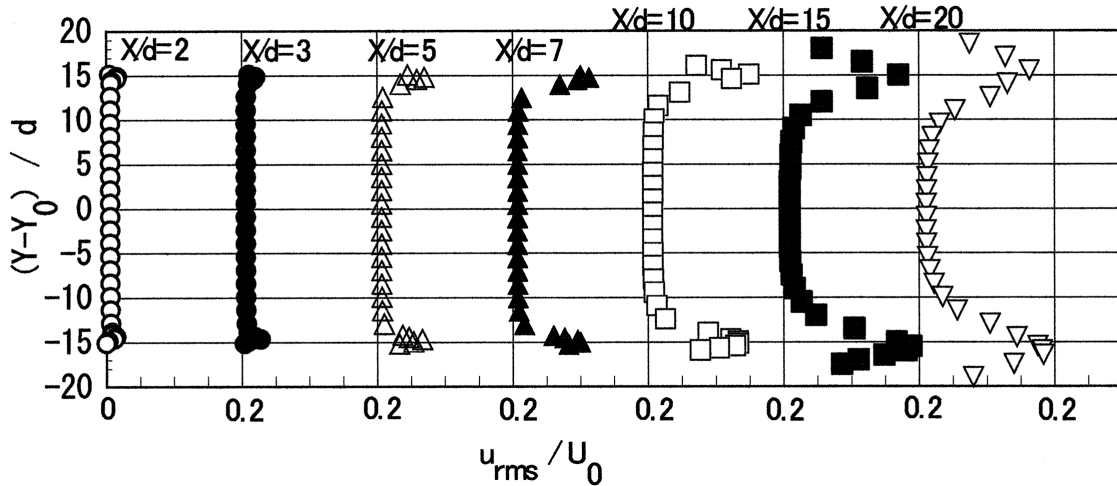


図5 非加熱自由噴流における流れ方向乱れ強さの鉛直方向分布 ($U_0=5\text{ m/s}$, $d=2\text{ mm}$)

3.4 加熱，非加熱円柱後流の測定

図6および7に円柱後流における流れ方向平均速度および乱れ強さの鉛直方向分布を示す。図中，○，□，△，▽，◇，×，・で示したのが非加熱状態での結果，●，■，▲，▼，◆，+，#で示したのが加熱状態における値である。図6において， $X/d=5$ 以降の各断面では，加熱，非加熱状態における平均流速の分布はよく一致している。まず $X/d=5$ において， $(Y-Y_0)/d \leq \pm 1$ の範囲で流速 U/U_0 が1を下回っているが，これは円柱後流における速度欠損領域である。速度欠損領域の範囲は，下流側へ向かうにつれて徐々に拡大し，最下流である $X/d=20$ において $(Y-Y_0)/d = \pm 2.5$ 程度となっている。 $U/U_0=1$ からの減少量は， Y 軸原点近傍でもっとも大きくなっているが，本流れ場における速度欠損領域内での値自体は，あまり信用できるとは言えな

い。なぜなら，この領域においては，円柱背後から発生するカルマン渦により流れの方向が瞬間的に変化し，逆流なども生じているにも関わらず，今回測定に使用したI-I型プローブでは，流れの方向まで検知することができないため，異なる方向を持つ流速を同一の流速として出力している可能性が高いからである。最上流断面である $X/d=2$ においては，前記速度欠損領域の存在は観察できるが，加熱状態と非加熱状態では分布の形状に明らかな違いが見られる。 $X/d=3$ においては，非加熱状態では速度欠損領域らしき部分を若干観察できるものの，加熱状態では，速度欠損領域を全く見出すことができない。実際には存在するはずの速度欠損領域が観察できないのは，上記の理由と同じと考えられるが， $X/d=2$ および3の場合，それ以外の断面よりさらに渦による影響が大きいと考えられる。他に，今回使用した円柱直径に対し，I-I型プローブのスケールがほ

温度流速計による加熱円柱後流の測定

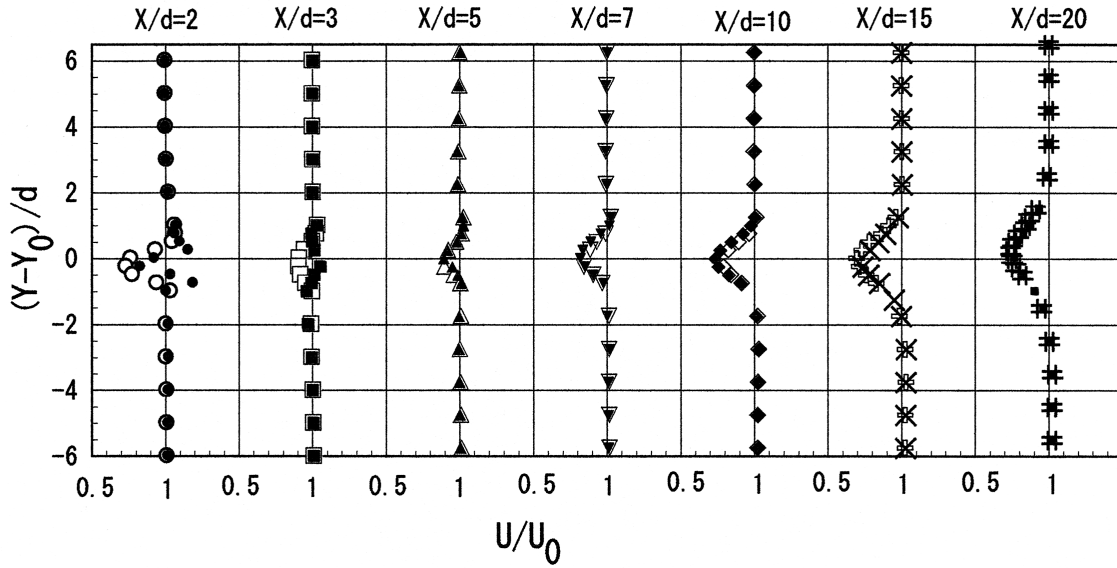


図6 加熱・非加熱円柱後流における流れ方向平均速度の鉛直方向分布 ($U_0 = 5 \text{ m/s}$, $d = 2 \text{ mm}$)

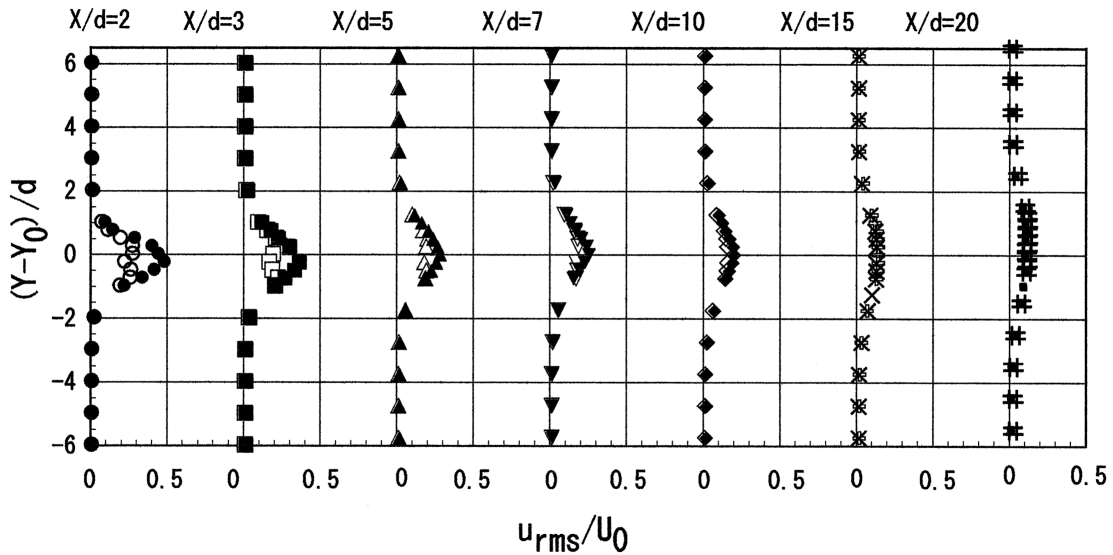


図7 加熱・非加熱円柱後流における流れ方向乱れ強さの鉛直方向分布 ($U_0 = 5 \text{ m/s}$, $d = 2 \text{ mm}$)

ぼ同等だったことも原因と考えられる。すなわち、下流側の各断面とは異なり、これらの断面での速度欠損領域の幅とプローブの大きさとがきわめて近い値であることから、プローブ自体が生じる乱れが、この領域における流体の挙動に及ぼす影響の度合いが、他の各断面より大きい可能性もある。

図7においては、 $X/d = 2$ におけるこの領域の乱れ強さは、 Y 軸原点近傍において、非加熱状態では最大で30%程度、 $X/d = 3$ においては25%程度となっており、大変乱れが大きい領域であることがわかる。また両断面において乱れ強さが20%以上の領域では、加熱状態での結果の方が非加熱状態での結

果より値が大きくなっていることがわかる。しかし、乱れ強さが20%未満となる $(Y - Y_0)/d > \pm 1$ の部分では、両者の値が一致していることもわかる。 $X/d = 5$ および 7 の断面においても同様のことが観察され、 Y 軸原点近傍を除く、乱れ強さが20%未満となる領域では両者はよく一致している。 $X/d = 10$ 以降の断面においては、乱れ強さが20%を超える部分が存在せず、断面全体に渡って加熱・非加熱状態の値は一致している。また、図7の各断面において両状態の結果が一致する部分では、図6の平均速度分布でも両状態の結果が一致していることがわかる。以上のことから、流れ場の乱れ強さが20%を超

えない領域においては、本温度流速計は、加熱・非加熱を問わず、精度の高い測定を行うことが可能であることがわかった。また、乱れ強さが20%を超える領域において加熱状態の方が乱れ強さの値が大きく出力されたことについては、速度欠損領域での速度変動があまりに速かったことが原因と予想される。すなわち、温度流速計での各補償が速い速度変動に追従できず、温度・速度信号の位相にずれを生じて過補償が発生し、速度信号が発振に似た状態となり、その結果乱れ強さの値が実際より大きく出力されたのではないかと、と思われる。また、この付近は加熱円柱表面に大変近く、本流れ場内で最も温度の高い部分であることから、浮力により流れの中に新たな速度変動を生じた、という可能性も考えられる。いずれにせよ、今回得られた結果だけでは原因を特定することはできず、今後、この領域での温度および速度波形に対してスペクトル解析を行うなどして、両信号における周波数特性を調べる必要がある。また、通常の熱線流速計で乱れ強さの大きい非加熱流れ場を測定した場合、得られたデータの信頼性は低くなると言われており、それに対する補正式もいくつか報告されている^{(12)~(14)}。今回の測定においてはそのような補正を行っていないため、加熱、非加熱を問わず、今回の $X/d = 2$ および 3 における、乱れの非常に大きい場所で得られた結果には、必ずしも十分な信頼を置くべきでないとも考えられる。

6. 結論

本研究室で製作した温度流速計を使用して、実際に加熱円柱後流の測定を行った結果、以下のような結論を得た。

- ①乱れ強さが20%未満の領域では、本温度流速計で得られたデータの信頼性は、非常に高いことがわかった。
- ②乱れ強さが20%を超える領域で測定を行った場合、非加熱状態より加熱状態の方が、乱れ強さの値が若干大きく出力されることがわかった。

③使用した円柱直径とプローブがほぼ同等のスケールであったため、プローブから生じた乱れが、特に $X/d = 2$ および 3 のような円柱近傍において、平均流速や乱れ強さに影響を及ぼした可能性があった。よって、今後はプローブに対する円柱直径のスケールをさらに大きくする必要があると思われる。

7. 参考文献

- (1) 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, pp21~pp30.
- (2) 蒔田, 流れの計測, Vol.12, No.16, 1995, pp3~pp17.
- (3) 蒔田, 森, 新美, 日本機械学会論文集, 57-534, B, 1991, pp404~pp411.
- (4) 蒔田, 大庭, 日本機械学会論文集, 69-681, B, 2003, pp1097~pp1104.
- (5) 蒔田, 森, 澤田, 日本機械学会論文集, 58-545, B, 1992, pp90~pp97.
- (6) 蒔田, 澤田, 森, 日本機械学会論文集, 58-554, B, 1992, pp154~pp161.
- (7) 蒔田, 機械の研究, Vol.46, No.3, 1994, pp400~pp406.
- (8) 渡部, 秋田工業高等専門学校研究紀要 Vol.41, 2006, pp1~pp7.
- (9) 渡部, 秋田工業高等専門学校研究紀要 Vol.40, 2005, pp1~pp8.
- (10) 渡部, 石塚, 川辺, 秋田工業高等専門学校研究紀要 Vol.35, 2000, pp11~pp16.
- (11) 生井, 井上, 粘性流体の力学, 理工学社, 1978.
- (12) Clausen, P.D., & Wood, D.H., Trans. ASME, 111, 1989, pp226.
- (13) Hinze, J. O., Turbulence, McGRAW-HILL, 1975.
- (14) 長野, 田川, 日本機械学会論文集, 54-503, 1988, pp1642.