

I-Xプローブによる加熱円柱後流の測定 ($U_0=5\text{m/s}$, $\Delta\theta=140^\circ\text{C}$, $X/d=3$ の場合)

渡部 英昭

Measurement of a heated cylinder wake with I-X probe
($U_0=5\text{m/s}$, $\Delta\theta=140^\circ\text{C}$, at $X/d=3$)

Hideaki WATANABE

(平成23年11月25日受理)

Measurements of a heated cylinder wake were carried out at section $X/d=3$ with I-X probe in conjunction with a thermo-anemometer. The main flow velocity U_0 was 5m/s and the difference in temperature between the surface of heated cylinder and ambient fluid temperature $\Delta\theta$ was 140°C . Distributions of mean and rms velocities are compared between heated and non-heated conditions. The u - v , θ - u , θ - v and θ - u - v correlation coefficients and waveforms of the temperature and velocity fluctuations θ , U , V in the wake of heated cylinder were obtained.

1. 緒言

工学機器の暖房効率向上など工学的価値が高いにも関わらず、加熱鈍頭物体後流のような温度・速度が同時に変動する流れ場の構造を明らかにした研究は極めて少ない。

蒔田らにより開発された二線式温度流速計^{(1)~(3)}は、流れ場での温度・速度変動の分離同時計測を可能にし、定温度型熱線流速計では計測原理上不可能であった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^{(4)~(5)}。

本研究では、蒔田らが開発し筆者が改良を加えた二線式温度流速計^{(6)~(8)}に接続したI-Xプローブを用いて、周囲の気流との温度差 $\Delta\theta=140^\circ\text{C}$ に設定した加熱円柱^{(9)~(10)}の後流を測定した。主流流速 U_0 は 5m/s とし、温度の他、流れ方向速度成分だけでなく鉛直方向速度成分をも測定することにより、各平均量、変動量だけでなく、レイノルズ応力を含む各種相関量の算出も行い、熱・運動量輸送機構を解明することを目的とした。

2. 主な使用記号

d : 加熱円柱外径 [mm]

U_0 : 主流流速 [m/s]

U_{mean} : 水平方向平均流速 [m/s]

u_{rms} : 水平方向変動速度のrms値 [m/s]

V_{mean} : 鉛直方向平均流速 [m/s]

v_{rms} : 鉛直方向変動速度のrms値 [m/s]

θ_r : 室温 [$^\circ\text{C}$]

θ_a : 気流温度 [$^\circ\text{C}$]

θ_s : 円柱表面温度 [$^\circ\text{C}$]

$\Delta\theta$: θ_s と θ_a との温度差 [$^\circ\text{C}$]

θ_{mean} : 気流平均温度 [$^\circ\text{C}$]

θ_{rms} : 気流変動温度のrms値 [$^\circ\text{C}$]

X : 水平方向座標 [mm]

Y : 鉛直方向座標 [mm]

3. 実験装置および計測系

3.1 実験装置

前報⁽¹¹⁾と同様、本実験では低速低乱風洞のノズル出口直下流に加熱円柱を水平に設置した。円柱加熱時の表面温度設定方法は前報⁽¹¹⁾と同様であり、 $U_0=5\text{m/s}$ において $\Delta\theta=\theta_s-\theta_a=140^\circ\text{C}$ 、円柱スパン方向表面における温度分布の誤差は $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内と、良好な一様性を持たせた。

3.2 計測系

図1に今回の計測で温度・速度検知部として使用

I-Xプローブによる加熱円柱後流の測定 ($U_0=5\text{m/s}$, $\Delta\theta=140^\circ\text{C}$, $X/d=3$ の場合)

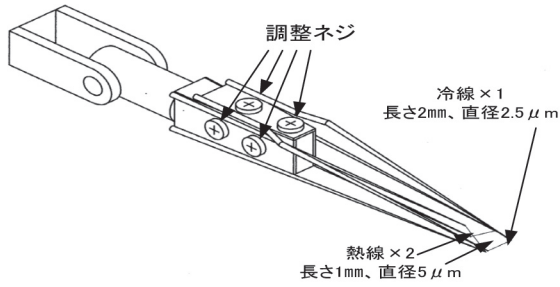


図1 I-X型プローブ

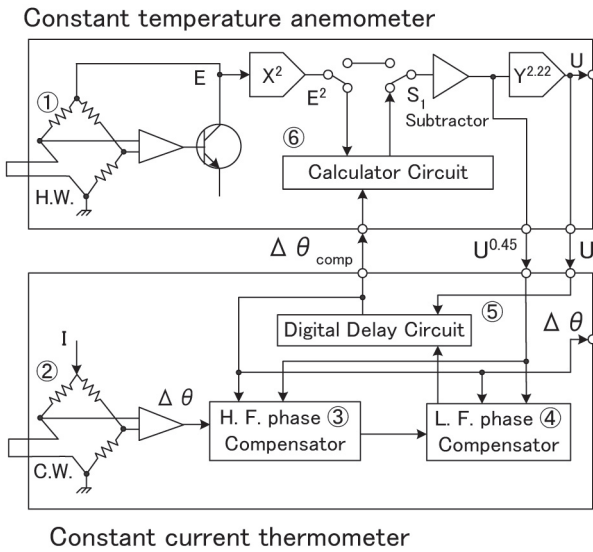


図2 二線式温度流速計ブロック図

したI-X型プローブを示す。同プローブは、1本の冷線と2本の熱線で構成され、冷線（温度検知部）の長さ2mm、直径 $2.5\mu\text{m}$ 、熱線（速度検知部）の長さ1mm、直径 $5\mu\text{m}$ である。冷線は流れに直交しており、2本の熱線はそれぞれ主流に対して $\pm 45^\circ$ 傾けて設置され、両熱線の成す角度は 90° である。真横から見て、両熱線の交点と冷線とは同じ高さになっている。熱線の加熱比は1.5、冷線には1mAの電流を流しジュール発熱を無視できるようにしている。冷線により生じた後流の影響が熱線に及ばないよう⁽¹²⁾、冷線と両熱線交点との主流方向距離は厳密に1mmに設定してある。

図2に、今回の実験に用いた計測装置である二線式温度流速計^{(2)~(3), (8)}のブロックダイヤグラムを示す。本装置は、③~⑥の各種補償回路により、2次以上の高次相関量を求める際に障害となる補償不足や過補償などの問題、および温度変動が原因となる定温度型熱線流速計の精度劣化などの欠陥を解決し、温度変動と速度変動を持つ流れ場内での高精度な温度・速度の同時計測が可能である。

座標系の原点は円柱断面中心に設定し、主流の向きをX軸の正、鉛直上向きをY軸の正とした。流れ方向速度成分: u および鉛直方向速度成分 v の正は、それぞれX軸およびY軸と一致させている。温度流速計からアナログ信号として出力される温度信号 θ および速度信号 U_1 , U_2 は、16bitのA/Dコンバータでデジタル信号に変換した後パソコンに取り込み、自製のLabVIEWプログラムによりそれぞれの平均量、rms値、相関量などの乱流統計量を算出した。

4. 実験条件

始めに、定温度型熱線流速計（以下、熱線流速計と称する）に接続したX型プローブを、図3に示す角度検定器に取り付け、較正用加熱風洞^{(13)~(14)}を使って非加熱気流中での2本の熱線の角度検定を行った。両熱線は流速計のch.1とch.2へ別々に入力される。検定の手順は以下の通りである。①ch.1の熱線が気流に対して直角となる角度にプローブを設定し、実流速に対する熱線流速計からの出力電圧の誤差が $\pm 1\%$ 以内となるよう較正する。②ch.2の熱線に対しても同様に較正する。③分度器の目盛 $a_{1,2}$ が 0° から 180° となる範囲で 10° おきにプローブ角度を変え、2本の熱線の出力 U_1 , U_2 を記録する。④各熱線の出力が最大になった角度: a_1 , a_2 (deg.) の間に $a_1 - a_2 = 90^\circ$ の関係が成立していることを確認する。これにより、X型に組み合わされた2本の熱線が、互いに正確に直交していることを確認できる。⑤ $a_1 - a = a_1$, $a - a_2 = a_2$ と置いて図4(a), (b) に示すグラフを作成する。⑥ $U_{\text{eff},2}^2 = U_{1,2}^2 (\cos^2 \alpha_{1,2} + k^2 \sin^2 \alpha_{1,2})$

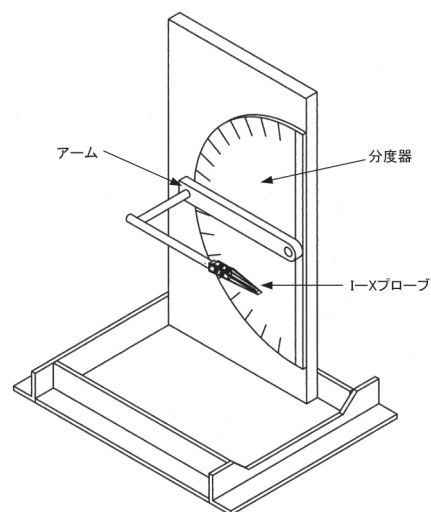
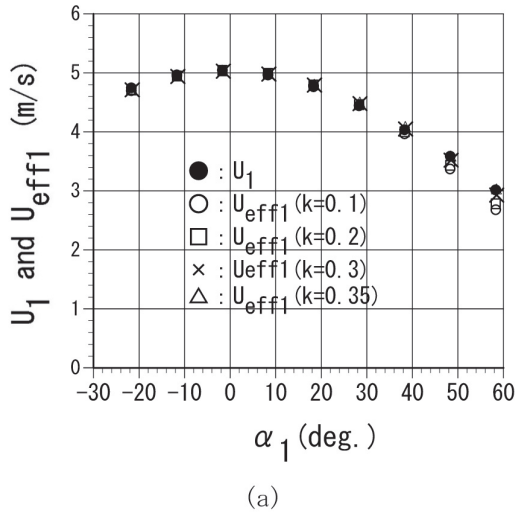
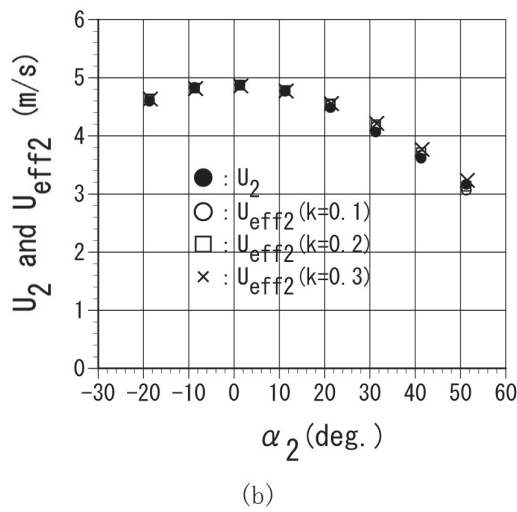


図3 角度検定器



(a)



(b)

図4 角度検定結果

の式⁽¹⁵⁾に基づき $U_{1,2}$ と $U_{eff1,2}$ が合致するよう k の値を決定する。今回使用したプローブでは、両熱線とも $k=0.3$ となった。⑦プローブを取り付けた角度検定器の角度を $(\alpha_1 + \alpha_2)/2$ (deg.)にセットする。この時、両熱線が流れと成す角度はそれぞれ同じとなるため、両熱線からの出力電圧はほぼ同一となる。⑧気流を加熱し、実温度に対する出力電圧の誤差が $\pm 1\%$ 以内になるよう、定電流型温度計を較正する。⑨温度流速計の各種補償回路を動作させ、出力が実温度、実流速と一致するよう調整する。⑩風洞に設置されているプローブ角度調節器を有するサポートを取り付けたトラバース装置に、較正の終了したI-Xプローブを取り付け、主流流速 $U_0=5\text{m/s}$ に設定した後、流れに対するプローブ迎え角を正確に設定する。すなわち、非加熱状態で円柱下流側 $X/d=20$ の断面において鉛直方向(Y軸)にプローブをトラバースし、その断面でのレイノルズ応力 $(uv)_{\text{mean}}$ 分布が後流中心軸に関して点対称になるま

でプローブ角度を微調整し、流速を較正し直す。これにより、少なくとも2次の相関量までは極めて精度のよいデータを得ることができる⁽¹⁶⁾。⑪円柱を加熱し、表面温度が $\Delta\theta=140^\circ\text{C}$ に達してスパン方向にも一様な分布となり、かつ時間が経過しても温度が変化しないことをサーマルビデオシステム(NEC Avio赤外線テクノロジー(株)製)の映像で確認した後、測定を開始する。

非加熱状態で $U_0=5\text{m/s}$ 、 $d=30\text{mm}$ を用いたレイノルズ数 $Re=U_0d/\nu$ は約10000、加熱状態での膜温度 $\theta_f=(\theta_s+\theta_a)/2\approx 85^\circ\text{C}$ における動粘性係数 ν_f を使った場合の膜レイノルズ数 $Re_f=U_0d/\nu_f$ は約7080であった。

5. 実験結果および考察

5.1 解析に用いた諸式

本研究で得られた2方向速度成分は、以下に示すBruunの式⁽¹⁷⁾によって算出した。

$$U = \frac{(U_1 + U_2)}{2(\cos^2\alpha + k^2\sin^2\alpha)^{0.5}}$$

$$V = \frac{(U_2 - U_1)}{2A \tan\alpha (\cos^2\alpha + k^2\sin^2\alpha)^{0.5}}$$

$$A = \frac{\cos^2\alpha(1-k^2)}{\cos^2\alpha(1-k^2) + k^2}$$

各相関量は以下の式で算出した。

$$\text{Re 応力} = \frac{\overline{uv}}{U_0^2}$$

$$\text{uv 係数} = \frac{\overline{uv}}{(\overline{u^2} \cdot \overline{v^2})^{0.5}}$$

$$\theta_u \text{ 係数} = \frac{\overline{\theta u}}{(\overline{\theta^2} \cdot \overline{u^2})^{0.5}}$$

$$\theta_v \text{ 係数} = \frac{\overline{\theta v}}{(\overline{\theta^2} \cdot \overline{v^2})^{0.5}}$$

$$\theta_{uv} \text{ 係数} = \frac{\overline{\theta uv}}{(\overline{\theta^2} \cdot \overline{u^2} \cdot \overline{v^2})^{0.5}}$$

5.2 実験結果

円柱表面において $\Delta\theta=140^\circ\text{C}$ に設定し、 $U_0=5\text{m/s}$ における円柱後流の測定を行った。流れ方向での測定断面は加熱状態が $X/d=3$ 、非加熱状態が $X/d=3, 5, 10, 20, 30, 50, 70$ とした。後流中心における

I-Xプローブによる加熱円柱後流の測定 ($U_0=5\text{m/s}$, $\Delta\theta=140^\circ\text{C}$, $X/d=3$ の場合)

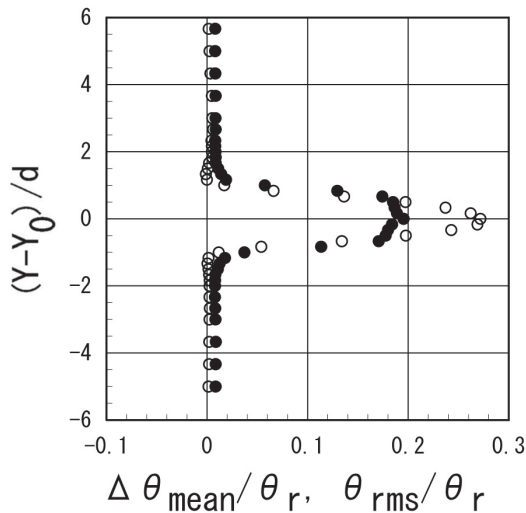


図5 平均温度差, 温度乱れ強さの鉛直方向分布 (加熱状態, $U_0=5\text{m/s}$, $X/d=3$)
(○ : $\Delta\theta_{\text{mean}}/\theta_r$, ● : $\theta_{\text{rms}}/\theta_r$)

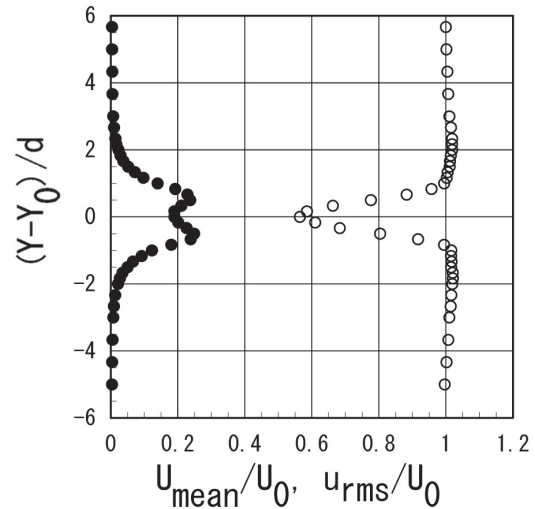


図6 流れ方向平均速度, 速度乱れ強さの鉛直方向分布 (加熱状態, $U_0=5\text{m/s}$, $X/d=3$)
(○ : U/U_0 , ● : u_{rms}/U_0)

鉛直方向座標を Y_0 とし, 各 Y 座標は無次元量 $(Y - Y_0)/d$ で表した。

図5に, $U_0=5\text{m/s}$, $X/d=3$ における鉛直方向平均温度分布および温度乱れ強さ分布を示す。平均温度分布に関しては, 後流中心 $(Y - Y_0)/d=0$ を軸として上下対称である。そして後流中心において最大値 $\Delta\theta_{\text{mean}}/\theta_r=0.27$ を示し, 外側へ向かうにつれて急激に減少している。そして, $(Y - Y_0)/d=\pm 1$ 付近ではほぼ $\Delta\theta_{\text{mean}}/\theta_r=0$ になった後, 一様な分布となる。温度乱れ強さ分布については, $(Y - Y_0)/d=0$ を軸として上下対称であり, ピーク値は $(Y - Y_0)/d=0$ に存在し約20%である。 $(Y - Y_0)/d < \pm 0.5$, すなわち円柱投影面積に対応する部分ではほぼフラットに近い分布をしており, それより外側へ向かうにつれて急激に減少し, $(Y - Y_0)/d > \pm 2$ の領域ではほぼゼロに近い値を示す。以上のことから, $(Y - Y_0)/d < \pm 0.5$ の範囲, 即ち円柱投影面積の部分で最も活発に熱エネルギー輸送が行われており, ついで $(Y - Y_0)/d = \pm 1$ に至るまでの領域では徐々に熱エネルギー輸送量が減少し, それより外側の領域ではほとんど行われていないことがわかる。

図6に加熱状態での $X/d=3$ における流れ方向平均速度 U_{mean} および流れ方向速度乱れ強さ u_{rms} の鉛直方向分布を示す。どちらも $(Y - Y_0)/d=0$ を軸とした上下対称な分布をしている。平均速度分布では, 速度欠損領域は $(Y - Y_0)/d = \pm 1$ の内側領域であり, $(Y - Y_0)/d=0$ で最小値約0.55となる。流れの外側へ行くに従って U_{mean}/U_0 の値が1に近づき, $(Y - Y_0)/d = \pm 1$ 周辺に存在するオーバー

シュート部分を経た後, $U_{\text{mean}}/U_0=1$ のフラットな分布となる。乱れ強さ分布は, $(Y - Y_0)/d = \pm 0.5$ 近傍でピーク値約0.25を示すが, 内側へ向かうにつれて減少し $(Y - Y_0)/d=0$ では0.18程度まで減少している。ピーク位置から後流の外側へ向かうにつれて急激に減少し, $(Y - Y_0)/d = \pm 2$ 付近でほぼゼロとなる。よって運動エネルギーの輸送が活発に行われている領域は, $(Y - Y_0)/d \leq \pm 2$ の範囲ということがわかる。以上のことから, 熱エネルギーが輸送されている範囲と運動エネルギーが輸送されている範囲はほぼ一致しているが, 後者の方が, 若干範囲が広がっていることがわかった。

参考として, 図7および図8に, 非加熱状態での流れ方向平均速度および速度乱れ強さの鉛直方向分布の各断面での変化を示す。平均流速に関しては, 加熱状態で見られたオーバーシュート部分是非加熱の方には見られないが, それを除くと $X/d=3$ 断面での両分布は, いずれも図6に示した形状とほぼ一致しており, 流れ方向平均速度および速度乱れ強さの鉛直方向分布には, 円柱を加熱したことによる有意な違いは見られないことがわかった。

図9に, 加熱状態における $X/d=3$ での鉛直方向平均速度および速度乱れ強さの鉛直方向分布を示す。後流中心 $(Y - Y_0)/d=0$ では平均速度がゼロとなっており, この点を中心にして上半分と下半分では点対称な分布となっている。そして, 上半分は正, 下半分は負の値となっている。前記のように, 鉛直方向速度成分の向きは上向きを正としているため, この分布が実際に起こっている流れ現象を表し

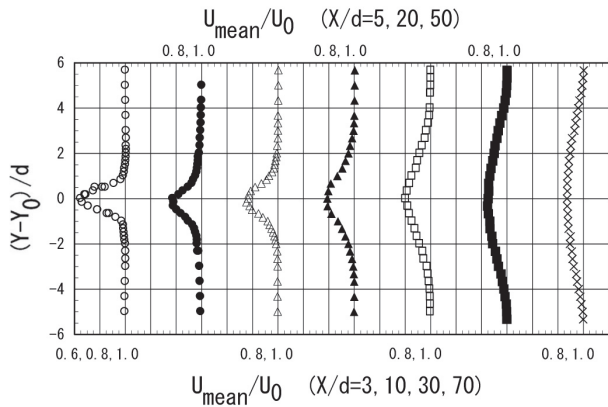


図7 平均流速分布の流れ方向変化 (非加熱, $U_0=5\text{m/s}$)
 (○ : $X/d=3$, ● : $X/d=5$, △ : $X/d=10$,
 ▲ : $X/d=20$, □ : $X/d=30$, ■ : $X/d=50$,
 × : $X/d=70$)

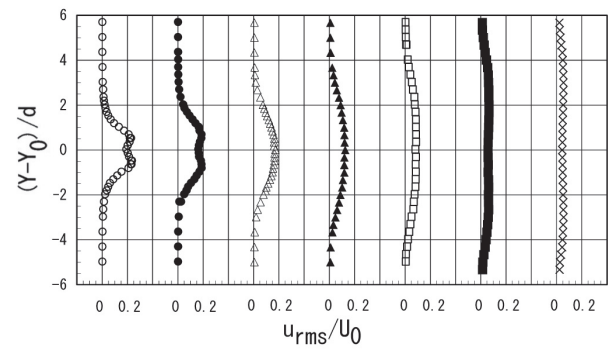


図8 流れ方向乱れ強さ分布の流れ方向変化 (非加熱, $U_0=5\text{m/s}$)
 (○ : $X/d=3$, ● : $X/d=5$, △ : $X/d=10$,
 ▲ : $X/d=20$, □ : $X/d=30$, ■ : $X/d=50$,
 × : $X/d=70$)

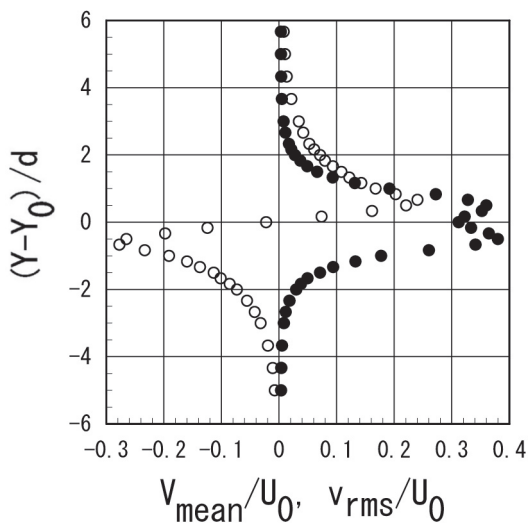


図9 鉛直方向平均速度, 速度乱れ強さの鉛直方向分布 (加熱状態, $U_0=5\text{m/s}$, $X/d=3$)
 (○ : V/U_0 , ● : $vrms/U_0$)

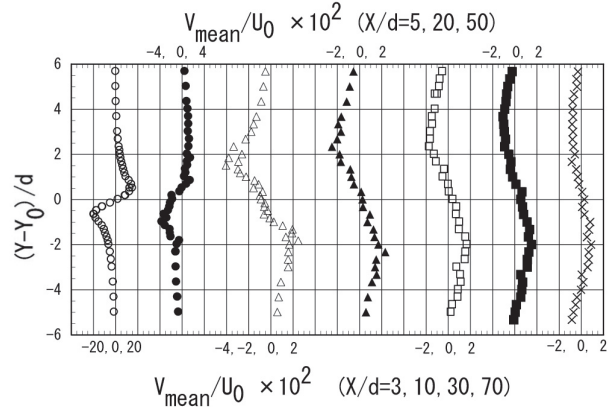


図10 鉛直方向平均速度分布の流れ方向変化 (非加熱, $U_0=5\text{m/s}$)
 (○ : $X/d=3$, ● : $X/d=5$, △ : $X/d=10$,
 ▲ : $X/d=20$, □ : $X/d=30$, ■ : $X/d=50$,
 × : $X/d=70$)

ているのであれば、後流上半分ではカルマン渦が主に上向き velocity 成分を持つことになる。しかし、過去の可視化写真⁽¹⁸⁾で確認する限り、これは実際と逆向きになっている。この現象が加熱円柱後流特有のものなのか、あるいは非加熱状態にも共通な、別な原因による誤差なのかを確認するため、図10に非加熱状態での同じ流速における鉛直方向平均速度および速度乱れ強さの鉛直方向分布の、流れ方向各断面における変化を示す。図において、 $X/d=3$ における平均速度の分布形状は図9とほぼ一致しており、やはり後流上半分が正になっている。しかし $X/d=10$ 以降の断面においてはこの関係が逆転しており、後流上半分が負、即ちカルマン渦の主な鉛直方向平均速度は下向きとなっている。このことは可視化写真⁽¹⁸⁾におけるカルマン渦の形状と一致する。よって加熱、非加熱の両方において、 $X/d=3$ 断面で見られた正負の逆転現象は、実際の流れ現象を表すものではないことが明らかとなった。円柱後流における $X/d=10$ より上流側は渦形成領域の範囲内であり、カルマン渦が十分に発達した下流側とは異なり、鉛直方向速度成分の向きが後流上半分ではほとんどが下向きだけ、下半分ではその逆、というように、一つの向きに偏る頻度が高い。そのため、今回使用したXプローブでは、鉛直方向の流れに対して速度検知部である熱線がプロング部分(熱線を支える針の部分)の陰に入ってしまうことによる速度検知エラーが上下共同確率で頻発したのではないかと、と思われる。

図9に示した鉛直方向速度乱れ強さの鉛直方向分布は $(Y-Y_0)/d=0$ を軸とした上下対称分布となっており、上下2カ所のピークを持つなど、分布形状

I-Xプローブによる加熱円柱後流の測定 ($U_0=5\text{m/s}$, $\Delta\theta=140^\circ\text{C}$, $X/d=3$ の場合)

は流れ方向速度乱れ強さ分布と似ている。しかし、ピークの値は約0.4程度と、流れ方向に比べて3割程度大きくなっている。よってこの断面における鉛直方向での運動エネルギー輸送は、流れ方向より活発に行われていると推測できる。また、運動エネルギー輸送と同時に熱エネルギー輸送も行われていると推測され、このことが、前出の温度乱れ強さがこの範囲内でほぼフラットになっている原因であると思われる。そして図11に示した $X/d=3$ における非加熱状態での同パラメータ分布と比較しても、ほぼ一致している。さらに、平均速度分布と速度乱れ強さ分布のピーク位置が一致していて、ほぼ円柱の半径位置に対応していることがわかる。

図12に、 $X/d=3$ における加熱状態でのレイノルズ応力の鉛直方向分布を示す。 $(Y-Y_0)/d=0$ を中

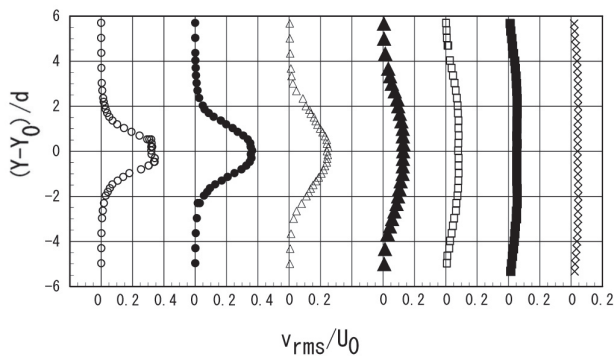


図11 鉛直方向乱れ強さ分布の流れ方向変化 (非加熱, $U_0=5\text{m/s}$)
 (○ : $X/d=3$, ● : $X/d=5$, △ : $X/d=10$,
 ▲ : $X/d=20$, □ : $X/d=30$, ■ : $X/d=50$,
 × : $X/d=70$)

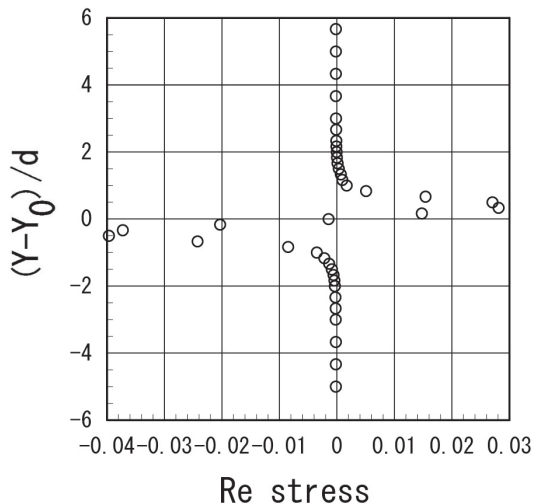


図12 レイノルズ応力分布の鉛直方向分布 (加熱状態, $U_0=5\text{m/s}$, $X/d=3$)

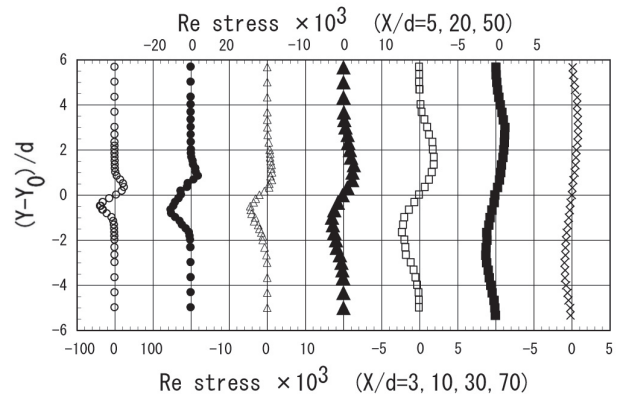


図13 レイノルズ応力分布の流れ方向変化 (非加熱, $U_0=5\text{m/s}$)
 (○ : $X/d=3$, ● : $X/d=5$, △ : $X/d=10$,
 ▲ : $X/d=20$, □ : $X/d=30$, ■ : $X/d=50$,
 × : $X/d=70$)

心としてほぼ上下点対称となっている。上下のピーク位置は $(Y-Y_0)/d=0.5$ であり、これは前記流れ方向および鉛直方向での速度乱れ強さ分布のピーク位置とほぼ一致している。参考までに図13に、非加熱状態におけるレイノルズ応力の鉛直方向分布の流れ方向変化を示すが、前出の鉛直方向平均速度の場合とは異なり、後流上半分が正、下半分が負という分布は、流れ方向の全断面において共通であり、ブロングの影響は現れていないと考える。ピーク値の位置および大きさも、加熱、非加熱状態ではほぼ一致しているため、レイノルズ応力分布についても加熱の影響は現れていないと考えられる。また、ほとんどの断面で $(Y-Y_0)/d=0$ におけるレイノルズ応力が0になることもわかる。

図14に、加熱状態でのuv相関係数の鉛直方向分布を示す。 $(Y-Y_0)/d=0$ を軸にして上下ほぼ点対称の分布をしている。後流中心において相関係数が0を示していることから、後流中心においては流れ方向変動速度uと鉛直方向変動速度vとは全く無関係の挙動を示していることがわかる。しかし、 $(Y-Y_0)/d=\pm 0.5$ では上下とも最大値を示しており、この位置でのuとvとはお互いに最も大きな影響力を持って変動していることがわかる。即ちuの変動量が大きくなった瞬間にはvの変動量も同時に大きくなっていると推測できる。そこから $(Y-Y_0)/d=\pm 1.0$ に至る部分では相関係数は減少してほぼゼロに近くなり、 $(Y-Y_0)/d=\pm 2.5$ 付近に向けて再度増加し、また減少している。図15に非加熱状態におけるuv相関係数の、鉛直方向分布の流れ方向変化を示す。 $X/d=3$ においては加熱状態とほぼ同じ分布をしており、 $(Y-Y_0)/d=0$ において相関係数がゼ

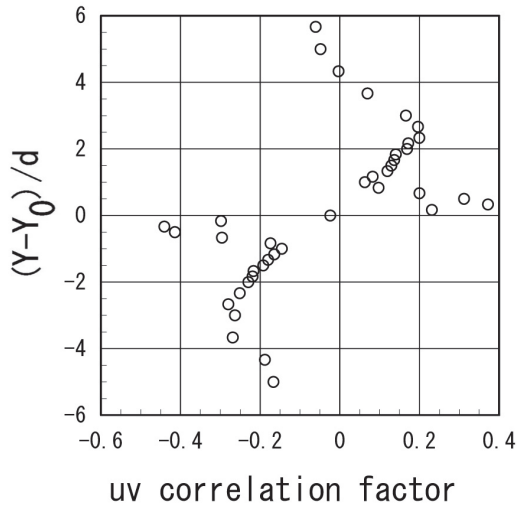


図14 uv相関係数の鉛直方向分布 (加熱状態, $U_0=5\text{m/s}$, $X/d=3$)

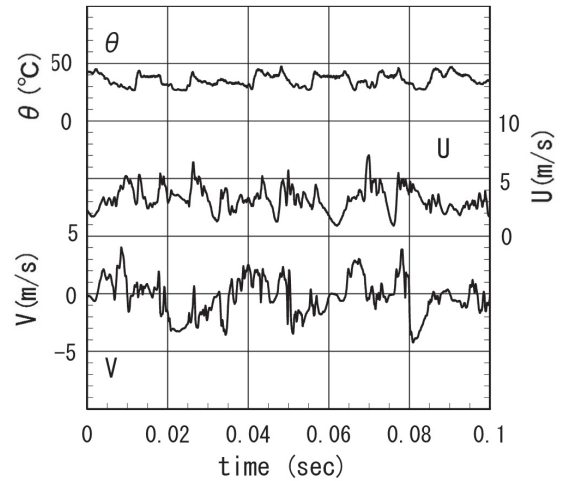


図16 円柱後流の瞬間波形 (加熱状態, $U_0=5\text{m/s}$, $X/d=3$, $(Y-Y_0)/d=0$)

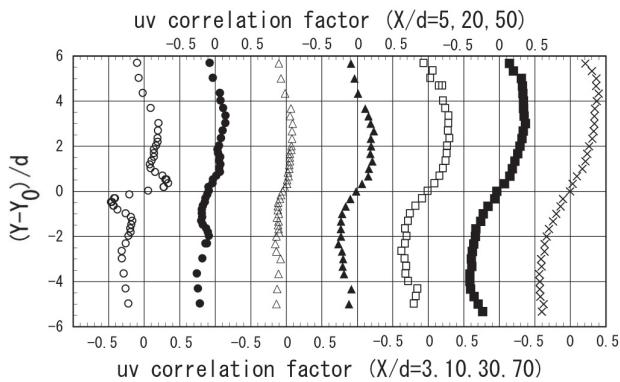


図15 uv相関係数分布の流れ方向変化 (非加熱状態, $U_0=5\text{m/s}$)
 (○ : $X/d=3$, ● : $X/d=5$, △ : $X/d=10$,
 ▲ : $X/d=20$, □ : $X/d=30$, ■ : $X/d=50$,
 × : $X/d=70$)

口になることやピークの位置、値ともにほぼ同じである。なお、これ以外の断面における加熱状態の結果に関してはここでは示さないが、非加熱状態においては、下流へ向かうにつれて急激な勾配がなだらかになり、同時にピークの位置が後流外側へ移動しているが後流中心で相関係数がゼロであることに変化はないこともわかる。

図16に、加熱状態における $X/d=3$, $(Y-Y_0)/d=0$ での、 θ , U , V の同時刻瞬間波形を示す。 θ と U の各ピーク位置を比べると、ピークが同時に現れる部分が比較的多く見られ、かつ、ピークの符号が逆である場合が多い。前出の式で計算したこの位置での相関係数 θu は約 -0.224 となっており、この事実を裏付けている。次に、この図においては θ と V のピーク位置についてはほとんど一致している部分が

なく、ほぼ両者は無関係に変動していると考えられる。また、上記の如く、 θ と U は関連した部分が多いが、図14で示した通りこの位置では U と V が関連しないことから、 θ と V の関連はほとんど無いと推測される。そして前出の式で算出した相関係数 θv の値は 0.001 であり、この事実を裏付けていると考えられる。さらに、これらのことから θ , U , V の関連を示す相関係数 θuv は、この位置ではほぼ 0 に近いと推測される。実際、前出の式で計算した相関係数は -0.018 であった。なお、本報に各相関係数の分布図は示さないが、 θu , θv および θuv のピーク位置は、それぞれ $(Y-Y_0)/d = \pm 1.0 \sim \pm 1.5$ 付近に存在することが算出結果より明らかとなっている。

6. 結論

$U_0=5\text{m/s}$, $\Delta\theta=140^\circ\text{C}$ での加熱円柱後流を X/d 断面で測定し、以下の結論を得た。

- ① 円柱投影面積内で最も活発に熱エネルギー輸送が行われている。
- ② 熱エネルギーが輸送されている範囲は、運動エネルギーが輸送されている範囲とほぼ一致しているが、後者の方が若干範囲は広い。
- ③ プロングの影響により、渦形成領域内では鉛直方向平均速度の符号が逆転して現れた。
- ④ レイノルズ応力の鉛直方向分布には、加熱による影響は見られなかった。
- ⑤ 後流中心では全ての相関係数の値がほぼ 0 になった。

7. 参考文献

- (1) 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.
- (2) 蒔田, 森, 澤田 '温度流速計の高精度化 第1報', 日本機械学会論文集B編, 58-545, pp90-97, 1992.
- (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, 58-554, pp3100-3107, 1992.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 渡部 '温度流速計の製作', 秋田高専研究紀要, Vol.41, pp1-7, 2006.
- (9) 渡部 '加熱円柱の製作', 秋田高専研究紀要, Vol.44, pp64-69, 2008.
- (10) 渡部 '加熱円柱の改良と性能評価', 秋田高専研究紀要, Vol.45, pp36-41, 2009.
- (11) 渡部 '加熱円柱後流の測定 ($U_0=3\text{m/s}$, $\Delta\theta=90^\circ\text{C}$ の場合)', 秋田高専研究紀要, Vol.46, pp52-59, 2011.
- (12) Hishida, M., Nagano, Y., 'Simultaneous Measurements of Velocity and Temperature in Nonisothermal Flows', Transactions of the ASME, Vol.100, May 1978, pp340-345.
- (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.
- (15) Hinze, J. O., 'Turbulence', McGRAW-HILL, 1975.
- (16) 蒔田, '熱線流速計使用上の問題点', 「流れの計測」, VOL.12, No.16, 1995.
- (17) Bruun, H. H., 'Interpretation of X-hot-wire Signals', DISA INF., 18,5, 1975.
- (18) 流れの可視化学会編, '新版流れの可視化ハンドブック', 朝倉書店, 1992.