

温度分布を持つ発達チャンネル乱流 の粘性領域における乱れ特性

The Turbulence Characteristics of Fully Developed Turbulent Channel Flow
with Temperature Distribution in the Viscous Layer

金 宰 基*・吉 識 晴 夫*

Jaegi KIM and Haruo YOSHIKI

1. ま え が き

著者らは今までに低公害、高熱効率、燃料の多様性に対応できるなどの特徴を備えたスターリング機関の基礎的な研究を行ってきた。その中でも、熱交換器の性能は機関性能に大きな影響を与えることから、スターリング機関特有の往復流動について調べてきた^{1, 2)}。しかし、往復流動時の管内流動状態と熱伝達についての基礎的な研究は不十分であり、特に往復流動下における壁面近傍の粘性領域における伝熱現象を解明することが不可欠である。

著者らはそれらの一歩として、壁面近傍である粘性領域の測定が容易にできるように熱線プローブを試作、アスペクト比 3 : 1 の矩形管路による往復流動に備えた実験装置の検証や測定システムの構築、基礎データの蓄積を行っている。

既報^{3, 4)}では空気による発達したチャンネル乱流の非加熱定常流の場合についてレイノルズ数 5,000 ~ 40,000 の実験範囲で計測した。実験結果の有用性については不確かさを検討し、普遍速度分布や無次元速度乱れ強さ分布、速度乱れの変動振幅の対称性や分布の広がりを定性的に把握するために歪み度と平坦度について考察した。それらの結果より、粘性が支配的である粘性領域の乱れ特性は Re 数により変化しないことが判った。また、実験範囲内で無次元速度乱れ強さ分布が普遍性を示すことを確認し、壁面からの無次元距離と無次元速度乱れ強さ分布の関係を実験式にまとめた。

さらに、既報^{5, 6)}では温度分布を持つ流れ場における発達したチャンネル乱流について計測し、非加熱定常流の結果と比較した。その結果、粘性が支配できる粘性領域において、無次元速度乱れ強さ分布はレイノルズ数に

より変化しないが、加熱に大きく影響されることを明らかにした。

そこで、本研究では既報⁶⁾に引き続き、温度分布を持つ発達チャンネル乱流の粘性領域における速度と温度の乱れ特性を検討するとともに、無次元速度乱れ強さの加熱による増加を示す特性値として係数 KY を導入し、この特性値と摩擦温度の関係を調べる。

2. 記 号

C_p : 比熱, H : 中心までの高さ = 15 mm, h : 平均熱伝達率, KY : 無次元速度乱れ強さの増加率, Re : レイノルズ数 = UmD_e/ν_f , Re_τ : 摩擦レイノルズ数 = $u_\tau H/\nu_f$, T_c : 管路中心温度, T_m : 断面平均温度, T_w : 壁面温度, T^+ : 無次元温度 = $(Tw - T)/T_\tau$, T_τ : 摩擦温度 = $h(Tw - T_c)/\rho_f C_p u_\tau$, t_{flat} : 温度乱れの平坦度 = $\overline{(t')^4}/(t'_{rms})^4$, t_{rms} : 温度乱れ強さ = $\sqrt{\overline{(t')^2}}$, t_{rms}^+ : 無次元温度乱れ強さ = t_{rms}/T_τ , t_{skw} : 温度乱れ歪み度 = $\overline{(t')^3}/(t'_{rms})^3$, Um : 断面平均流速, U^+ : 無次元時間平均速度 = U/u_τ , u_{flat} : 速度乱れの平坦度 = $\overline{(u')^4}/(u'_{rms})^4$, u_{rms} : 速度乱れ強さ = $\sqrt{\overline{(u')^2}}$, u_{rms}^+ : 無次元速度乱れ強さ = u_{rms}/u_τ , u_{skw} : 速度乱れの歪み度 = $\overline{(u')^3}/(u'_{rms})^3$, u_τ : 摩擦速度 = $\sqrt{\tau_w/\rho_f}$, y : 壁面からの距離, Y^+ : 壁面からの無次元距離 = $y u_\tau/\nu_f$, ρ_f : 流体の密度, ν_f : 流体の動粘度, τ_w : 壁面摩擦応力
添え字
 f : 膜温度 = $(Tw + Tm)/2$

3. 実験結果と考察

温度分布を持つ発達チャンネル乱流に対する粘性領域における乱れ特性を調べるため、実験条件および記号、粘性長さ等について表 1 にまとめた。

測定位置における高さ方向 28 点の測定値を積分平均した断面平均温度 T_m と壁温 T_w の算術平均を用いて、膜温

*東京大学生産技術研究所 第 2 部

Table 1 Experimental conditions of heated steady flow

Symbols	○	▲	△	●	⊗	□	★	▽	◎	*	■	+
Re	5370	5630	5960	5960	6250	10600	16030	16040	18500	19600	20400	28350
$u_\tau (m/s)$	0.137	0.135	0.143	0.145	0.156	0.243	0.332	0.331	0.387	0.397	0.427	0.570
$\nu_f/u_\tau (\mu m)$	123.8	120.5	113.6	113.5	111.6	69.3	48.6	48.8	43.0	40.9	39.5	29.6
Re_τ	121	124	132	132	134	217	309	308	348	366	379	507
$T_\tau (^\circ C)$	1.54	1.90	1.91	1.80	1.20	1.19	1.26	1.34	0.97	1.16	0.85	0.76
KY	1.44	1.62	1.52	1.43	1.27	1.29	1.32	1.37	1.19	1.25	1.15	1.06

度 T_f を定義し、流体の物性値における代表温度として使用した。レイノルズ数 Re の定義は断面平均流体速度 Um 、相当直径 D_e を使用し、摩擦速度 u_τ は平均流速分布と壁面からの距離との関係から壁法則を繰り返し計算する方法で求めた。さらに、粘性長さ δ^+ とチャンネル中心までの高さによる摩擦レイノルズ数 Re_τ を併記する。

発達チャンネル乱流の粘性領域における無次元速度乱れ強さ分布は非加熱定常流の場合、 Re 数に依らず普遍分布を示すことを既報⁴⁾で報告した。

しかし、加熱定常流の u_{rms}^+ 分布は実験条件によって異なる。その粘性領域における加熱定常流の u_{rms}^+ 分布を図 1 に示す。図中に示した実線は既報の粘性領域における非加熱定常流の普遍分布を示す速度乱れ強さ分布式である。粘性領域において加熱定常流の u_{rms}^+ は非加熱定常流分布式と比べ、最大値を示す位置はほぼ同じ Y^+ であるが、最大値にはっきり差が表れる。それについては Re 数に依らず、摩擦温度 T_τ によることを既報⁶⁾で報告した。このような加熱による u_{rms}^+ への影響については一色ら⁷⁾の結果 ($T_\tau \div 0.6^\circ C$) や菱田ら⁸⁾の結果 ($T_\tau \div 2.6^\circ C$) から比較できる。

3.1 速度乱れの歪み度と平坦度について

加熱定常流の変動振幅の対称性や分布の広がりを定性的に把握するために速度乱れの歪み度と平坦度について調べ、図 2 に速度乱れの歪み度を示す。図中の記号は表 1 と同じで、破線は正規分布の歪み度を示す値である。壁面ごく近傍で若干のばらつきはあるが、全体の傾向は非加熱定常流の場合とほぼ同様であり、加熱による差は認められない。

図 3 に速度乱れの平坦度を示す。図中の記号は表 1 と同じで、破線は正規分布の平坦度を示す値である。歪み度と同様に、壁面ごく近傍で若干のばらつきはあるが、全体の傾向は非加熱定常流の場合とほぼ同様であり、加

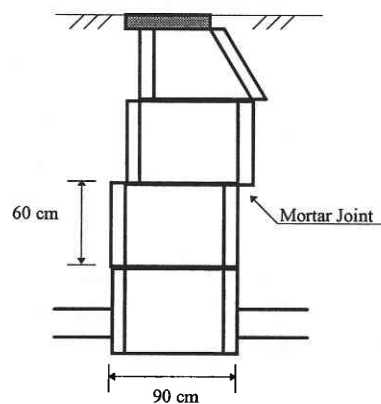


Fig. 1 Distributions of velocity turbulence intensity for heated flow (symbols as in Table 1).

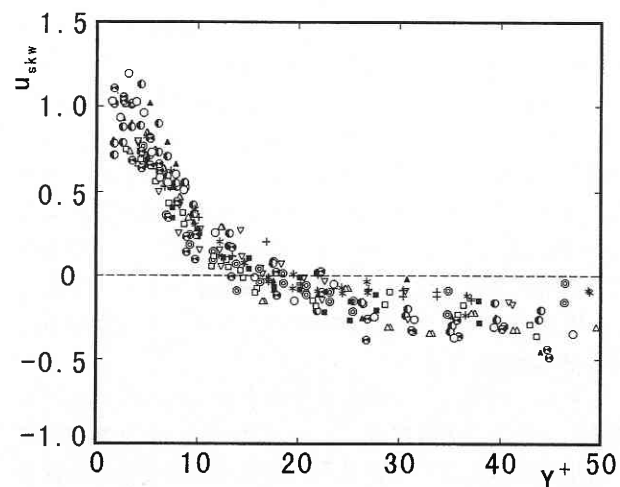


Fig. 2 Skewness factors of velocity fluctuation for heated steady flow (Symbols as in Table 1).

熱による差は認められない。即ち、加熱の影響による速度乱れの増加は二次モーメント、三次モーメント、四次モーメントが同じ割合で増加することで、粘性領域での乱れ特性を表す一つの特徴である。

3.2 無次元速度乱れ増加率 KY

加熱定常流は加熱の影響により、非加熱定常流と比べ速度乱れの振幅が大きくなり、この影響による速度乱れ強さの増加が生じる。これを定量的に調べるため、加熱と非加熱場合における無次元速度乱れ強さの比により乱れ強さの増加を示す特性値 KY を以下のように定義し、この特性値と摩擦温度の関係について調べた。

$$KY = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(u_{rms}^+)^{heated}}{(u_{rms}^+)^{non-heated}}$$

ここで、 n は粘性領域でのデータ個数であり、非加熱定常流の値は既報⁴⁾の無次元速度乱れ強さ分布式から加熱定常流の同位置における値を算出した。特性値 KY を求める際に粘性領域内のデータに限定したのは、非加熱定常流において速度乱れ強さ分布の普遍性が確認された領域であるからである。また、対数領域では Re 数による影響が表れ、同じ Re 数でないと比較が困難であることと本実験の加熱条件が片面加熱であるため、それによる影響が懸念されること等で粘性領域に限定した。本研究の実験結果による片面加熱の影響は対数領域では若干見えるが、粘性領域においては速度、温度の普遍分布またそれらの乱れ特性等からほとんどないと判断できる。

摩擦温度とそれに強く影響される乱れ増加の特性値 KY との関係を図 4 に示した。図に示した記号は表 1 と同じ

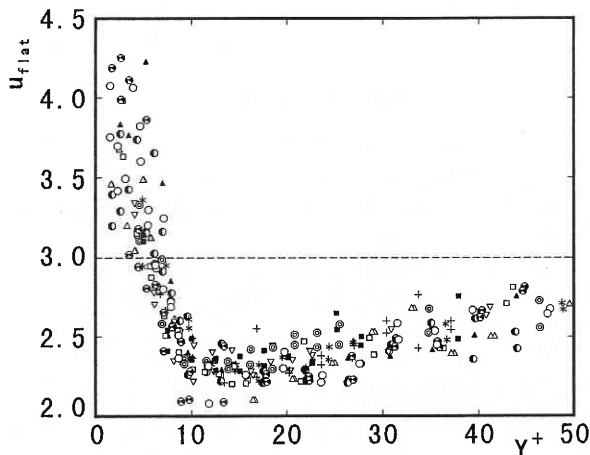


Fig. 3 Flatness factors of velocity fluctuation for heated steady flow (Symbols as in Table 1).

で、特性値 KY と摩擦温度の関係を最小二乗法によりまとめた結果、次の関係式が得られた。

$$KY = 1 + 0.0854 \times T_\tau + 0.1027 \times T_\tau^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

図中に式 (1) を実線で示す。

さらに、加熱流の速度乱れ強さを特性値 KY で割り、加熱の影響を取り除いたのが図 5 であり、図中に示した記号は表 1 と同じである。比較のため、非加熱定常流の普遍乱れ強さ分布を実線で示した。

この図からも速度乱れの歪み度や平坦度と同様に乱れの基本的な特性は変わらないことが窺える。即ち、これらの結果は流れ場が温度分布を持つことによって乱れの大きさが増幅されても粘性領域におけるその他の乱れ特

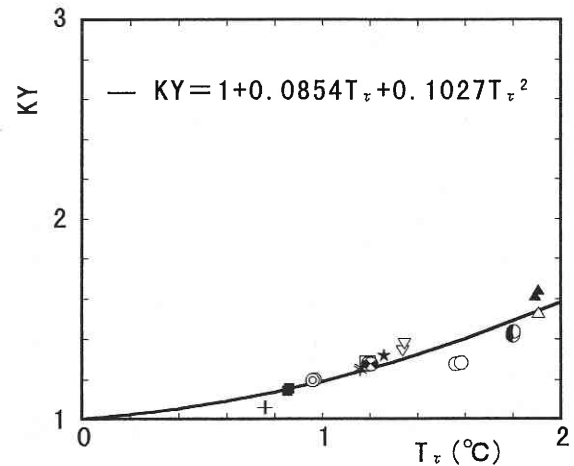


Fig. 4 Relations between KY factor and friction temperature (Symbols as in Table 1).

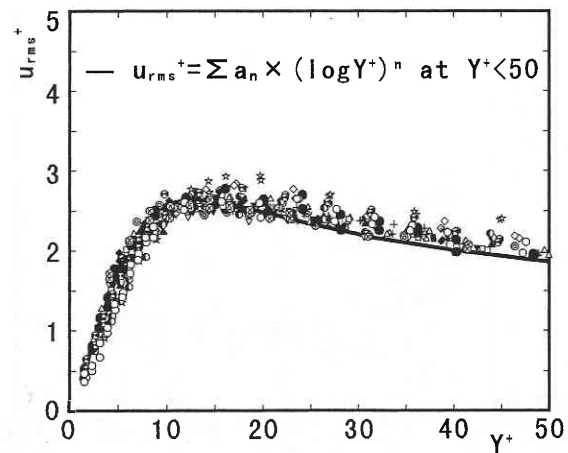


Fig. 5 Distributions of velocity turbulence intensity divided by KY factor (Symbols as in Table 1).

研 究 速 報

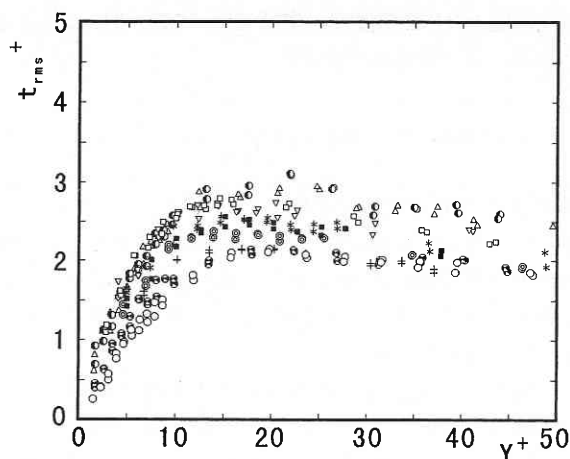


Fig. 6 Distributions of temperature turbulence intensity for heated steady flow (Symbols as in Table 1).

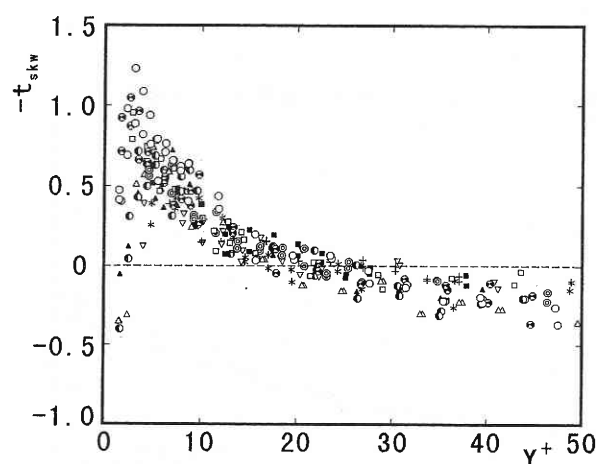


Fig. 7 Skewness factors of temperature fluctuation for heated steady flow (Symbols as in Table 1).

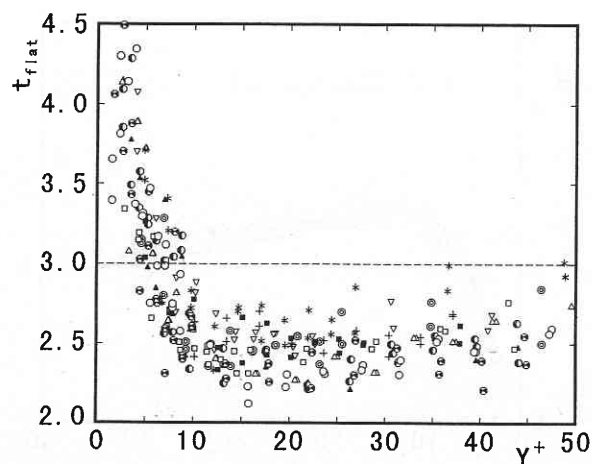


Fig. 8 Flatness factors of temperature fluctuation for heated steady flow (Symbols as in Table 1).

性は全く変化しないことを示唆する。

3.3 温度乱れについて

粘性領域における無次元温度乱れ強さ分布を図6に示す。図に示されたように速度乱れ強さ分布ほどの普遍性はなく、また最大値を示す位置も速度乱れ強さと比べ若干高い位置 ($Y^+ \approx 20$) に移動し、実験条件ごとに最大値が異なる。これらについてはさらに詳しい検討が必要である。

しかし、図7と図8に示す粘性領域における温度乱れの歪み度と平坦度はごく壁面近傍でのばらつきはあるものの、速度の乱れ特性と全く同様な傾向を示す。このような結果は温度境界層における粘性領域の性質が速度境界層での粘性領域と変わらないことを示唆する。

4. 結 論

既報の温度分布を持つ発達したチャンネル乱流の測定結果から、さらに粘性領域における乱れ特性について詳しく調べた。その結果、次のようなことが明らかになった。

- 1) 加熱定常流の速度乱れは Re 数に依らないが摩擦温度により変動振幅が大きく変化することが判った。
- 2) しかし、速度乱れと温度乱れの歪み度と平坦度を調べた結果、粘性領域でのそれらの乱れ特性は全く加熱条件に影響されないことが確認できた。
- 3) 加熱による速度乱れ強さの増加を示す特性値 KY を定義し、 $Re \approx 5,000 \sim 30,000$, $T_r = 0.76 \sim 1.91$ の実験範囲内で下記の摩擦温度との関係式が得られた。

$$KY = 1 + 0.0854 \times T_r + 0.1027 \times T_r^2$$

- 4) 速度と温度の境界層で、粘性領域における乱れ特性は強さに若干差があるもののほぼ一致する。

(1997年8月8日受理)

参 考 文 献

- 1) 吉識ら, 機論, 52-483, B (1986), 3650.
- 2) 吉識ら, 機論, 53-485, B (1987), 9.
- 3) 金, 吉識ら: 機講論, 東海支部第46期総会・講演会, No. 973-1 (1997), 177.
- 4) 金, 吉識ら: 生産研究, 49-5 (1997), 261.
- 5) 金, 吉識ら: 機講論, 第74期通常総会・講演会, No. 97-1, III (1997), 238.
- 6) 金, 吉識ら: 生産研究, 49-6 (1997), 277.
- 7) 一色ら, 機論, 59-563, B (1993), 2245.
- 8) 菱田ら, 機論, 50-453, B (1984), 1285.