

チャンネル内で温度分布を持つ発達乱流の特性

The Characteristics of Fully Developed Turbulent
Channel Flow with Temperature Distribution

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が^{1), 2)}, 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が不十分であり, 特に往復流動下での壁面近傍である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。

既報³⁾では空気による非加熱定常流の場合, レイノルズ数5,000~40,000の実験範囲での発達したチャンネル乱流について計測した。実験結果の有用性については不確かさを検討し, 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量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組織的構造は Re 数による変化がないことが判り, 実験範囲内で無次元速度乱れ強さ分布が強い普遍性を示すことを確認し, 実験式にまとめた。

本研究では温度分布を持つ流れ場における発達チャン

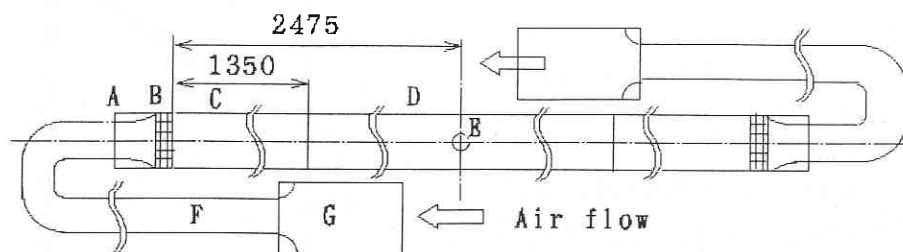
ネル乱流を測定し, 解析した乱流統計量を既報の結果と比較し, 加熱による影響について検討した。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を図1に示す。実験はアスペクト比3:1である矩形管路(高さ30mm, 幅90mm, 相当直径 $De = 45\text{mm}$)を対象に行った。矩形管路の全長は4950mm (110 De)であり, 測定孔は矩形管路入り口より2475mm (55 De)のところに設けてある。流入空気は送風機よりシリンドラを通り, 矩形管路入り口に円管から矩形管路へスムーズに流れるように繋いだ異型管を通り, 整流格子を経て流入するようにした。

矩形管路は助走区間と測定部に分けて, 黄銅管路と下面が黄銅であるアクリル管路で構成した。

加熱はテスト部(長さ50 De)の下面である黄銅板(厚さ10mm)の下に8枚の面状発熱体を敷き, 無風状態での壁温が一定になるように行った。黄銅板には銅-コンスタンタン熱電対を測定壁面下1mmのところ幅方向3列(中央とその左右15mm)と流れ方向11ヶ所(5 De おきに9ヶ所, 測定点前後15mm)で, 合計33ヶ所に埋め込み, 加



(A) connecting pipe, (B) honeycomb, (C) lead section, (D) test section, (E) measuring position, (F) pipe, (G) cylinder

Fig. 1 Test rig of channel flow.

*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

熱部で壁温を測定した。ここで、相当直径 De は45mmである。

加熱部入り口から25 De (チャンネル入り口から55 De)のところに設けた測定孔下での温度を壁温として採用した。壁温は温度境界層が完全に発達した点から一定になり、測定点では本実験の壁温分布から完全に発達したのを確認した。本実験での壁温範囲は40°C < T_w < 60°Cである。

流れ場の局所における流速と流体温度の測定には既報の試作プローブを用い、熱線と冷線を使い分け、別々に測定を行った。試作プローブは実験ごとに非加熱流と加熱流に対する検定を行い、熱線における流体温度の影響が補正できるような検定システムを構築した。本実験での検定範囲は流速20m/s以下、温度80°C以下である。

測定対象は壁面からチャンネル中心までを採り、測定方法とデータの取り組みは既報と同様である。

3. 検定式と考察

熱線による流速測定には、予め検定された熱損失特性に基づくことが最も实际的であり、熱線での熱平衡式はKingの式と呼ばれる次の式を用いる。

$$I^2 R_w = (T_w - T_a) (bU^{1/2} + c) \quad \dots (1)$$

ここで、 T_w は熱線の加熱温度であり、一定に保つ。 T_a は流体の温度、 U は流速である。プローブの定数 b, c は流体の物性値の関数であることから流体温度が一定であると定数とみなせることができる。

しかし、流れ場に流体温度分布がある場合 b, c を定数扱いすることはできない。

そこで、短時間に手軽に流体温度の補正ができるよう検定システムを構築し、温度分布を持つ流れ場に適用した。

熱線の電気抵抗は温度の関数で表せるから任意の温度、流速での熱線流速計の出力と流体温度の関係を式(1)から次のように書き換える。

$$E_a^2 = f_1(\theta) \cdot (1 + a_1 U^{1/2}) \quad \dots (2)$$

ここで、室温 T_r を基準温度とし、流体温度 T_a 、温度差 $\theta = T_a - T_r$ 、熱線流速計の出力 E_a 、温度の関数 f_1 、係数 a_1 である。

任意の流体温度 T_a 、流速 $U = 0$ での熱線流速計の出力を E_θ とおけば、 $E_\theta^2 = f_1(\theta)$ となり、式(2)を無次元化することで無次元出力と流速の関係を次のように直線式で表すことができる。

$$E_a^2 / E_\theta^2 = 1 + a_1 U^{1/2} \quad \dots (3)$$

この関係式から室温での熱線流速計の出力 E_r を流速零

での出力 E_0 で無次元化し、流速との関係を次のように表わす。

$$E_r^2 / E_0^2 = 1 + a_1 U^{1/2} \quad \dots (4)$$

ここで、係数 a_1 は幾つかの流速と出力の関係から最小二乗法により求められる。その結果は既報で示しており、その検定結果による流速の不確かさは $U_{RSS}/U = 2.15\%$ (約95%包括度)であった。

また、任意の流体温度での出力 E_a と同速度をもつ室温での E_r の比を用いると出力の比 $(E_a/E_r)^2$ は温度 θ に対し直線的な変化を示すことから次のように書ける。

$$E_a^2 / E_r^2 = A \cdot \theta + B \quad \dots (5)$$

ここで、 A と B は係数であり、検定結果から最小二乗法より求められる。

さらに、この式を流速零に適用すると次の関係式になり、

$$E_\theta^2 / E_0^2 = A \cdot \theta + B \quad \dots (6)$$

この関係式を用いることで、任意の流体温度での E_θ が求められる。

関係式(3)を用いて検定した結果が図2であり、記号はすべて表1と対応する。この結果から流速係数 a_1 は温度の影響を受けず、一定であることが判る。以上の結果から任意の流体温度に対する熱線流速計の検定結果、時間平均流速と流体温度の不確かさは $U_{RSS}/U = 3.1\%$ 、 $U_{RSS}/T = 2.5\%$ (約95%包括度)であった。

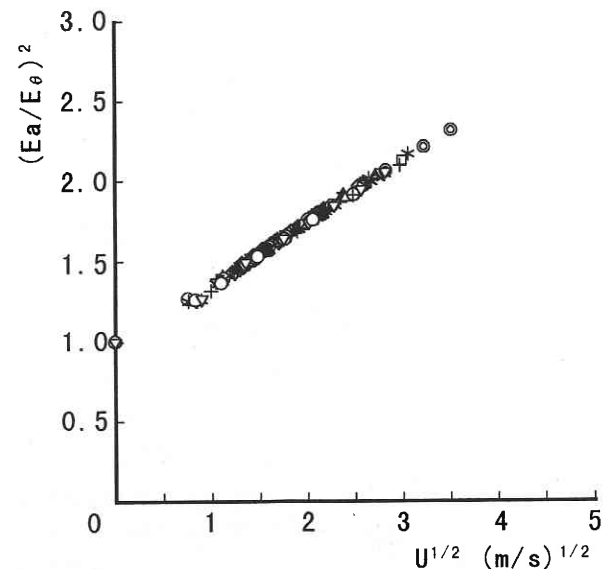


Fig. 2 Calibrations of Hot-wire at arbitrary temperature. (Symbols as in Table 1)

Table 1 Experimental conditions

Symbol	○	▲	△	●	⊙	□	★	▽	◎	*	■	+
Re	5370	5630	5960	5960	6250	10600	16030	16040	18500	19600	20400	28350
T_τ (°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

4. 実験結果と考察

レイノルズ数 Re の定義は $Re = U_m \cdot De / \nu_f$ であり, U_m は断面平均流速, De は相当直径, 空気の動粘度は膜温度に対する値を用いた. 摩擦速度 u_τ と摩擦温度 T_τ を用いて無次元化した各無次元数およびパラメータを次のように定義する.

$$Y^+ = yu_\tau / \nu_f, U^+ = U / u_\tau, u_{rms}^+ = u_{rms} / u_\tau,$$

$$T^+ = (T_w - T) / T_\tau, t_{rms}^+ = t_{rms} / T_\tau,$$

$$T_\tau = h(T_w - T_c) / \rho_f Cpu_\tau$$

ここで, 膜温度 T_f は壁温 T_w と断面平均温度 T_m の算術平均を採用した. u_{rms} は速度乱れ強さ, T は時間平均温度, t_{rms} は温度乱れ強さである. u_τ の求め方は既報と同様であり, T_τ は平均熱伝達率 h , 管路中心温度 T_c , 膜温度での密度 ρ_f 等を用いる.

実験条件をまとめて表 1 に示す. 図 3 に u_τ で無次元化した流れ方向の時間平均流速分布を示す. 本実験範囲での無次元速度分布は加熱影響がほとんどなく Re 数によらず, 図中に示した壁法則に沿って普遍的な分布を示している.

さらに, 図 4 に u_τ で無次元化した速度乱れ強さ分布を示す. 図中に示した実線は既報で示した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}^+ 分布は非加熱定常

流分布式と比べ, ほぼ同じ Y^+ で最大値を示すが, 加熱の影響がはっきり表れ, T_τ による u_{rms}^+ の増加を示す. このような加熱による u_{rms}^+ について一色ら⁴⁾の結果 ($T_\tau = 0.6^\circ\text{C}$) では非加熱流と比べ差がなく, 加熱の影響は見られないが, 菱田ら⁵⁾の結果 ($T_\tau = 2.6^\circ\text{C}$) では非加熱流と比べ顕著な差を示す. 本研究の実験結果でも非加熱流に比べ $T_\tau = 0.76^\circ\text{C}$ では大きな差は見られないが, $T_\tau = 1.91^\circ\text{C}$ ではその差が歴然とする. また u_{rms}^+ と T_τ の関係を調べると, 例えば図 5 に示した $T_\tau = 1.20^\circ\text{C}$ ($Re =$

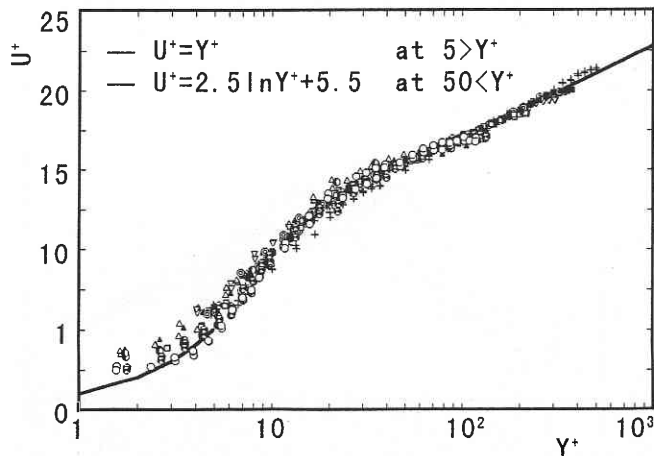


Fig. 3 Distributions of time mean velocity. (Symbols as in Table 1)

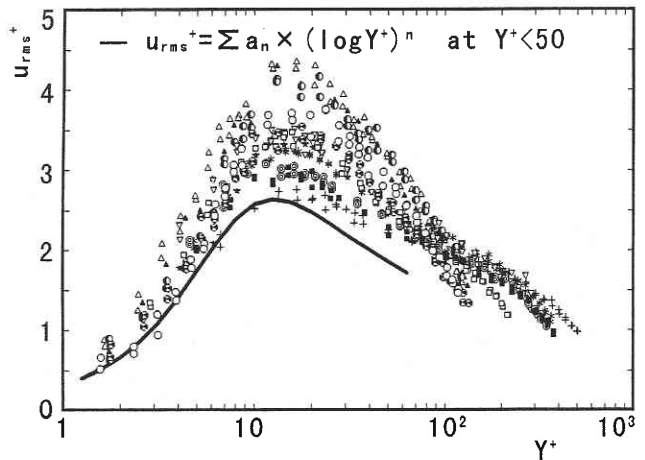


Fig. 4 Distributions of velocity turbulent intensity. (Symbols as in Table 1)

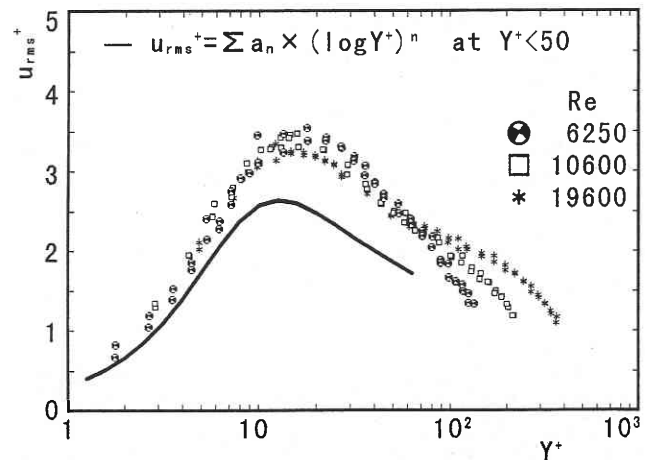


Fig. 5 Distributions of velocity turbulent intensity. (In case of $T_\tau = 1.20^\circ\text{C}$)

研究速報
6250, 10600, 19600) の場合, 非加熱定常流と同様に Re 数による差は大きくは見られない。

しかし, 図 6 に示した $Re \approx 6000$ ($T_r = 1.91, 1.80, 1.20^\circ C$) の場合, T_r による差がはっきり現れる。これらの結果は u_{rms}^+ が非加熱定常流と同様に Re 数にはよらないが, 摩擦温度によって大きく影響されることを示す。

T_r で無次元化した時間平均温度分布を図 7 に示す。本実験範囲での無次元温度分布は全領域にわたって Re 数, 加熱条件によらない普遍性を示した。図中に示した破線は Kays ら⁶⁾の平板での乱流境界層に対する式であり, 点線は菱田ら, 実線は一色らの円管に対する実験式である。本実験の結果は一色らの実験式と良い一致を示した。図 8 に T_r で無次元化した温度乱れ強さ分布を示す。 t_{rms}^+ 分布も u_{rms}^+ 分布と同様に熱流束の強い影響を示した。このような結果から t_{rms}^+ 分布と u_{rms}^+ 分布における Re 数と加熱条件などの影響については今後さらに検討していくこととする。

5. 結 論

温度分布を持つ流れ場である発達したチャンネル乱流について Re 数と加熱条件による影響を調べた結果, Re 数 5,000~30,000 と摩擦温度 $T_r < 2.0^\circ C$ の実験範囲で, 流れ方向の無次元時間平均流速は Re 数と加熱条件によらない普遍的な分布を示した。しかし, 無次元速度乱れ強さ分布は粘性領域において Re 数には依存しないが, 摩擦温度により大きく影響されることが示された。また, 無次元時間平均温度分布は Re 数と加熱条件によらない普遍性を示した。
(1997年3月18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: 生産研究, 49-5 (1997, 5), 261
- 4) 一色ら, 機論, 59-563, B (1993), 2245
- 5) 菱田ら, 機論, 50-453, B (1984), 1285
- 6) Kays, W. M. and Crawford, M. E., Convective Heat and Mass Transfer, 2nd ed., (1980), 211, McGraw-Hill.

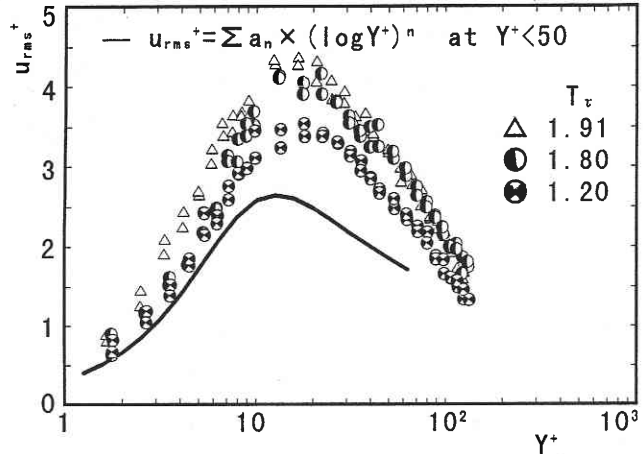


Fig. 6 Distributions of velocity turbulent intensity. (In case of $Re \approx 6000$)

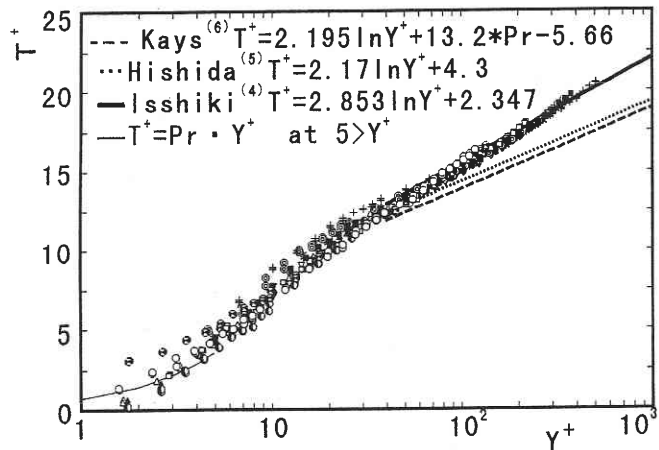


Fig. 7 Distributions of time mean temperature. (Symbols as in Table 1)

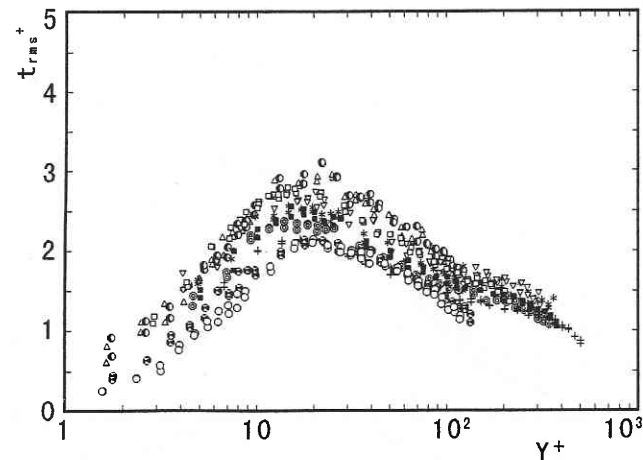


Fig. 8 Distributions of temperature turbulent intensity. (Symbols as in Table 1)