日本流体力学会年会 2001 講演論文集

F132

## 乱流境界層の熱伝達に及ぼす逆圧力こう配の影響

# Effects of Adverse Pressure Gradient on Heat Transfer in Turbulent Boundary Layer

〇保浦知也(名工大), 長野靖尚(名工大)

Tomoya HOURA and Yasutaka NAGANO

Dept. of Environmental Tech., Graduate School of Eng., Nagoya Inst. of Tech., Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555

Characteristics of turbulent boundary layer flows with adverse pressure gradients (APGs) differ significantly from those of canonical boundary layers. We have experimentally investigated the effects of APG on the mean velocity and temperature profiles in a thermal boundary layer developing on the uniformly heated plate. It is found that, in the APG boundary layer, the conventional thermal law of the wall does not hold in the fully turbulent region.

#### 1. 緒言

平板上に発達する乱流境界層に逆圧力こう配を付加するこ とにより、平均速度、乱れ強さ等の統計量および速度乱れの 時間スケールが、通常の零圧力こう配乱流境界層のものから 大きく変化し<sup>1,2)</sup>、乱流の準秩序構造が大きく影響を受けるこ とをこれまで明らかにしてきた<sup>3)</sup>.しかしながらこれらの結 果は乱流の速度場に及ぼす影響であり、逆圧力こう配が、対 流熱伝達にどのような影響を及ぼすかということについては 詳細は不明のままである.

乱流温度境界層の研究については、平衡な逆圧力こう配条 件下の Blackwell らの実験<sup>4)</sup> があり、乱流モデルや理論の裏づ けに用いられている.しかし、現実にはより複雑な、非平衡な 条件下での圧力こう配の影響を調べることが重要である.

本研究は,壁温一定の条件で加熱された乱流温度境界層に 逆圧力こう配の影響がどのように現れるかを実験的に明らか にすることを目的とする.

### 2. 実験装置および方法

実験装置は、既報<sup>1)</sup>におけるテストセクションの測定壁を 銅板(厚さ2mm)に置換えたものである、測定壁の背面に貼り 付けたステンレス箔を、流れ方向に数ブロックに分割して通電 加熱し、銅板に埋め込んだ熱電対により壁温をモニターしな がら、壁温一定の条件で行った、周囲流体との温度差は約10 ℃である、図1に示すように、壁温分布の変化は測定部全域 を通して±0.5℃以内に収まっている、乱流境界層を安定に 発達させるため、加熱壁の前縁にはトリップ板を設けている。

速度および温度の測定には I 形熱線プローブ (タングステ ン, 直径 3.1 μm, 長さ 0.6 mm), 熱電対プローブ (クロメル-ア ルメル, 直径 13 μm, プロング間隔 6 mm) をそれぞれ用いた. 図 1 に,本実験で設定した圧力分布を示す. 逆圧力こう配流れ では, 65 ≤ x ≤ 700 の範囲においてほぼ一定値  $dC_p/dx \simeq 0.6$ m<sup>-1</sup> の圧力こう配が設定されている.本実験における平均流 に関するパラメータを表 1 に示す.ここで,  $\overline{U}_0$ :入口部参照 速度 (一定),  $\overline{U}_e$ :局所主流速度,  $\delta_u$ :境界層厚さ,  $u_{\tau}$ :摩擦速 度,  $R_{\theta}$ :運動量厚さレイノルズ数,  $P^+ = \nu(d\overline{P}/dx)/(\rho u_{\tau}^3)$ : 圧力こう配パラメータ,  $\beta$ : Clauser パラメータである.  $P^+$  と  $\beta$  は単調に増加し,下流方向に圧力こう配の影響が強くなる

Table	1	Flow	parameters	$(U_0 =$	10.8 m/s)
-------	---	------	------------	----------	-----------

<i>x</i> [mm]	$\overline{U}_e$ [m/s]	$\delta_u$ [mm]	$u_{ au}$ [m/s]	$R_{ heta}$	$P^+$	β				
925(ZPG)	10.8	19.9	0.465	1620	0	0				
523(APG)	9.08	16.2	0.390	1290	$9.12 \times 10^{-2}$	0.77				
723(APG)	8.18	24.6	0.307	1880	$1.93 \times 10^{-2}$	2.19				
925(APG)	7.54	34.2	0.251	2660	$2.56 \times 10^{-2}$	3.95				



Fig. 1 Streamwise variation of wall static pressure and temperature.







Fig. 3 Normalized temperature profiles in ZPG and APG flows.

非平衡流となっている.

### 3. 実験結果および考察

図 2 に、零圧力こう配および逆圧力こう配下での平均速度 分布を、局所主流速度  $\overline{U}_e$  で無次元化して示した、零圧力こう 配流れの速度分布に比べて、逆圧力こう配流れの速度分布は 圧力こう配パラメータ  $P^+$  の増加と共に、外層で大きく低下 する、図 3 に、零圧力こう配および逆圧力こう配下での平均 温度分布を、壁温  $\overline{T}_w$  と周囲温度  $\overline{T}_\infty$  で無次元化して示した、 横軸は無次元化温度が 0.99 となる壁からの距離で定義される 温度境界層厚さ  $\delta_t$  で整理した、速度分布に比べて、温度分布 に及ぼす圧力こう配の影響は小さく、外層では相似な分布と なっていることが分かる。

次に、内層のパラメータ  $(u_{\tau}, \nu)$  で整理した平均速度分布に ついて考察する.零圧力こう配流れにおける摩擦速度  $u_{\tau}$  は、 対数速度分布を仮定する Clauser 法により求めた.一方、逆圧 力こう配流れでは、図4に示すように、壁の材質、熱線の形状 および加熱比が決まれば、壁近傍での熱線の出力に対する壁 への熱伝導の影響が摩擦速度に依らず普遍的な分布となるこ とを利用した検定方法で行った<sup>1,2)</sup>.内層のパラメータで整理 した平均速度分布を図5に示す.図中の破線は粘性底層の速 度分布

$$\overline{U}^+ = y^+ \tag{1}$$

および一点鎖線は対数速度分布

$$\overline{U}^+ = 2.44 \, \ln y^+ + 5.0 \tag{2}$$

を示している.零圧力こう配流れでは,普遍対数速度分布が成 立することを示している.一方,逆圧力こう配流れでは,対 数領域において,無次元速度 U<sup>+</sup> は対数速度分布[式(2)]より も下がり,外層では壁面摩擦係数の低下に対応して後流成分 が卓越する分布となる.この結果は,逆圧力こう配流れにお いて,普遍速度分布が成立しないことを示している.

次に,壁近傍の平均温度こう配から測定された壁面熱流束  $q_w$ から,スタントン数  $St = q_w / [\rho c_p \overline{U}_e(\overline{T}_w - \overline{T}_\infty)]$ を見積もっ た.零圧力こう配流れでは,経験式<sup>5)</sup>による推定値とよく一 致する結果となった.同様の方法で,逆圧力こう配流れにお ける壁面熱流束を見積もり,摩擦温度  $t_\tau = q_w / (\rho c_p u_\tau)$ を用 いて,無次元温度  $\overline{T}^+ = (\overline{T}_w - \overline{T}) / t_\tau$ を調べた結果を図6お よび7に示す.図中の破線は伝導底層の温度分布

$$\overline{T}^+ = \Pr y^+ \tag{3}$$

および一点鎖線は対数温度分布

$$\overline{T}^+ = 2.075 \ln y^+ + 3.8 \tag{4}$$

を示している.零圧力こう配流れでは,普遍対数温度分布が得られている.このとき,乱流プラントル数  $Pr_t$ は  $Pr_t$  (=  $\kappa/\kappa_t$ ) = 0.85 である.一方,逆圧力こう配流れでは,対数領域において,式(4)の対数温度分布よりも低い値をとることが分かる.また,速度分布で見られた後流成分の増大は見られない.よって,逆圧力こう配流れでは,温度場においても普遍分布が成立しないことが実験的に示された.

本研究は,文部科学省科学研究費補助金基盤研究(B)(No. 13450083)の援助を受けた.ここに記して謝意を表する.

#### 引用文献

- Y. Nagano et al.: Turbulent Shear Flows 8 (ed. Durst et al., Springer-Verlag, 1992) 7.
- 2) Y. Nagano et al.: Int. J. Heat Fluid Flow 19 (1998) 563.
- 3) T. Houra et al.: Int. J. Heat Fluid Flow 21 (2000) 304.
- 4) B. F. Blackwell et al.: Stanford Univ. Rept. HMT-16 (1972).
- 5) W. M. Kays & M. E. Crawford: Convective Heat and Mass Transfer (3rd ed., McGraw-Hill, 1993).



Fig. 4 Mean velocity profiles in ZPG and APG flows.



Fig. 5 Mean velocity profiles in ZPG and APG flows.



Fig. 6 Mean temperature profiles in ZPG and APG flows.



Fig. 7 Mean temperature profiles in ZPG and APG flows.