乱流境界層における対数速度分布に及ぼす逆圧力勾配の影響

Effect of Adverse Pressure Gradients on the Log-law in Turbulent Boundary Layers

○正 望月信介 (山口大工) 准 太田圭亮 (京セラ)
正 亀田孝嗣 (山口大工) 正 大坂英雄 (山口大工)

Shinsuke MOCHIZUKI, Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai, Ube 755-8611, JAPAN
Keisuke OHTA, Kyoto ceramics Co. Ltd., Fushimiku, Kyoto, 612-8501, JAPAN
Takatsugu KAMEDA, Yamaguchi University
Hideo OSAKA, Yamaguchi University

Key Words: Turbulence, Boundary layer, Log-law, Adverse Pressure Gradient

1. 緒言

逆圧力勾配下に発達する境界層はディフューザ内部や流体機械内あるいは翼面上などでみられ、工学上極めて重要な流れ場である。この流れ場の予測と制御には精密な実験により取得されたデータとそれに基づく普遍性の高い相似性の確立が不可欠といえる。

乱流境界層における実験データの取得に関して、零圧力勾配下における相似性の議論においてさえ、以下の注意を払うべきことが推奨されている。1. 運動量厚さに基づくレイノルズ数は $R_0 > 10,000$ であること、2. 壁面せん断応力と平均速度は独立に計測すべきこと、3. 法則の妥当性を見極めるには摩擦速度で無次元化した平均速度の不確かさが 1~2% 以内であること、4. 平均速度勾配が高精度に算出できるよう考慮されていること、5. さらに可能な限り高次の統計量の取得がなされていること、等である。これに加え、逆圧力勾配下においては層の発達が早まるため、良好な二次元性を保つことおよび外層構造の非平衡性の影響を避けることがあげられる。

本実験においては、 $R_0 = 10,200$ の十分に高いレイノルズ数の乱流境界層を作成するとともに以下の項目を付加した。主流速度の変化を平衡境界層成立に要求される設定とする。また、壁面せん断応力は新しく開発する直接測定により計測する、二次元性の評価には厳密な運動量積分方程式を採用することである。これらの事柄に注意を払った実験に基づき、逆圧力勾配下における対数法則の妥当性を吟味し、必要であればその修正を行うことを目的とする。

2. 実験結果

壁領域において速度の尺度を下式のように定義する。

$$u_* \equiv u_\tau \sqrt{1 + \alpha p^+ y^+} \quad (1)$$

Fig.1 Schematic of flow field, coordinate system and nomenclature

$p^+ \equiv (v/u_\tau^2) dP_x/dx$, 係数 α は運動方程式において慣性項の圧力勾配項に対する比率である。本実験の場合 $\alpha = 0.4$ の値をとる。速度の尺度を u_* , 長さの尺度を壁からの距離 y とし、壁領域において平均速度勾配に下式が成立するものとする。

$$\partial U / \partial y = u_* / (\kappa y) \quad (2)$$

この尺度法則を積分することにより平均速度分布の関係式(3)が得られる。

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + C - \frac{2}{\kappa} \ln \left(\frac{1 + \sqrt{1 + \alpha p^+ y^+}}{2} \right) + \frac{2}{\kappa} (\sqrt{1 + \alpha p^+ y^+} - 1) \quad (3)$$

$\kappa = 0.43$, $C = 4.9$ および $\alpha = 0.4$ として描いた式(3)の平均速度分布を実験結果と比較し、図2に示した。壁領域において(3)式と実験データが良好に一致していることが分かる。

3. 結言

1. 直接測定により得られた局所壁面摩擦抵抗係数はプレストン管およびLudwig-Tillmannによる値と5%程度の差異を示した。
2. 逆圧力勾配下の壁領域における運動方程式の釣合いにおいて慣性項の影響は無視できない。したがって、壁領域における平行流近似は妥当ではない。
3. 壁領域における速度の尺度の決定には圧力勾配と慣性項の寄与を考慮する必要がある。それにより、速度の尺度は $u_* \equiv u_\tau \sqrt{1 + \alpha p^+ y^+}$ と定義できる。
4. 速度の尺度 u_* と長さの尺度 y を用いて平均速度勾配の尺度法則を定義し、平均速度分布を導いた。導かれた平均速度分布は実験データと良好に一致した。

Fig.2 Comparison between the modified lag-law calculated by Eq.(3) and experimental data.