軸流中の円筒上乱流境界層の実験 (周方向長さスケール)

Experiments on the Turbulent Boundary Layer on a Cylinder in an Axial Flow (Azimuthal Length Scale)

正井 上 吉 弘 (岐阜大)

小 寺 将 也 (岐阜大院)

Yoshihiro INOUE, Dept. Mechanical and Systems Eng., Gifu Univ., 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193
Masaya KODERA, Graduate School of Eng., Gifu Univ.

Key Words : Turbulence, Axisymmetric Boundary Layer, Transverse Curvature, Coherent Structure

1. まえがき

本研究は、軸流中に静止しておかれた円筒上に発達する境界層を実験的に調べるものである。Lueptow らのグループは円筒半径 a に比べて厚い境界層 ($\delta_{99}/a = 4 \sim 47$) の実験を行うとともに、従来の研究を文献[1]で取りまとめている。また Tutty⁽²⁾ は、Willmarth ら⁽³⁾ の実験結果と対比して乱流モデルを用いた数値計算を実施している。

本研究では、円筒半径に対する境界層厚さの比を変化させ、円筒曲率による境界層特性への影響を調べた。流速の測定には熱線流速計を用い、独立した2本の熱線プローブにより横方向2点相関をおもに測定した。これより、外層中の流れの大規模構造に関する長さスケールを示す。

2. 実験装置および実験方法

流れ場は、図1(a)に示すように軸流方向を x 軸、壁垂直方向を z 軸 ($z = r - a$)、そして周方向を y 軸とする円筒座標系で表す。円筒半径 a は約 40 mm である。 x 方向速度成分の平均を U 、変動を u 、変動の RMS を u_{rms} でそれぞれ表す。層外主流速度を U_e で表し、境界層厚さには 99% 厚さ δ_{99} を用いる。実験装置の主要部は既報⁽⁴⁾と同じである。風洞測定部円筒の内径は 350 mm で、これと同心に供試円筒を設置する。円筒全長は約 1200 mm であり、前縁部の概略を図1(b)に示す。トリップ・リング列は前縁下流 100 mm に取り付け、リング幅 2 mm と間隔 50 mm を一定として、リング高さ h と本数 N を次のように設定した；Case 1 ($h = 1$ mm, $N = 1$)、Case 2 ($h = 1.5$ mm, $N = 3$)、Case 3 ($h = 2$ mm, $N = 3$)。測定位置は円筒前縁から 750 mm と 910 mm 下流の断面とした。

熱線流速計の出力信号処理には ADC card (16 bit) と PC を使用し、サンプリング周波数 10 kHz、観測時間約 50 sec とした。測定プローブには自作 I 型を使用し、熱線には直径 5 μ m、受感部長 1 mm の W 線を用いた。プローブの位置決め用トラバースは既報⁽⁵⁾と同じであり、2本のプローブの最近接方位角差は約 8°で、最大約 90°まで移動可能である。

3. 実験結果と考察

表 1 に、本実験で得た乱流境界層の特性値を示す。境界層厚さは 12 ~ 25 mm の範囲で変化し、これより δ_{99}/a は 0.29

~ 0.63 となり、運動量厚さレイノルズ数 Re_θ は 2000 ~ 3500 となった。Piquet ら⁽⁶⁾によれば、本実験条件は横方向曲率の影響が非常に弱い範囲にあることになる。

図 2 は、形状係数 $H = \delta^*/\theta$ と局所摩擦抵抗係数 $c_f = \tau_w/(\rho U_e^2/2)$ の変化を Re_θ に対して示す。図 2(a) 中の破線は Fernholz ら⁽⁷⁾ がゼロ圧力勾配下平板上境界層に対して示した結果を、図 2(b) 中の破線と一点鎖線は大坂ら⁽⁸⁾と White⁽⁹⁾ が示した結果をそれぞれ表す。形状係数は平板上より小さな値をとり、ふくやかな平均速度分布形状となることを示す。一方、摩擦抵抗係数は大きくなり、壁面近傍での速度勾配が増加するようだ。プロット点はある幅でばらついてはいるが、各トリップ・リング列、すなわち δ_{99}/a による影響は陽に現れていない。図 3 は、平均速度と RMS 速度の半径方向分布を、Rao⁽¹⁰⁾ が提唱した壁変数 $z^+ = (U_\tau a/\nu) \ln(r/a)$ を用いた内層スケーリングで示す。平均速度分布は、粘性底層から対数層にわたって互いによく一致している。RMS 速度分布は平板上境界層と同様に $z^+ = 15$ 近傍で最大となる。

つづいて、自己相関および2点相関係数の測定から、外層における大規模構造のスケールを調べる。まず、図 4 は自己相関係数を示す。ここで、時間遅れ τ は局所平均速度 U を用いて距離 $r_x (= U\tau)$ に換算している。互いの分布形状は概ね一致しているが、Case 1 の方がやや大きな相関値を示す。図 5 には、 $x = 750$ mm と 910 mm における周方向への2点相関係数を、 r_x と $r_z (= z - z_{ref})$ がゼロの場合について示す。 y 座標に方位角を選んでいることより、 $r_y = (z + a)(y - y_{ref})$ である。図中には、 $Re_\theta = 2300$ の平板上境界層で測定した分布 ($z/\delta_{99} = 0.4$ and 0.85) を併せて示す。本実験の範囲で2点相関分布 $R_{11}(r_y)$ は平板上境界層とほぼ同一形状となり、円筒上の方がいくらか r_y 方向に引き延ばされている。

図 6 と図 7 は、参照点高さを $z_{ref}/\delta_{99} = 0.25$ として測定した2点相関分布である。この高さは、対数層の外端にほぼ相当する。図 6 では $r_x = r_y = 0$ であり、図 7 は $r_x = 0$ として r_y も変化させている。ただし、描画ソフトの都合上、 r_y の代わりに $a(y - y_{ref})$ で図示している。図 7 の Case 2 と Case 3 を比較して、2点相関係数の等値線は両者の間で概ね一致しており、 $R_{11} = 0.1$ となる領域は、周方向両側で δ_{99} の 0.5 ~ 0.6 倍、半径方向に 0.6 倍程度であり、図 4 から軸方向には 1.8 ~ 2 倍となる。平板上境界層での測定結果⁽¹¹⁾と比較して、円筒上の方が幾分か大きい。

Fig. 1 Flow field and coordinate system.

Table 1 Specification of the present boundary layers.

x (mm)	Tripping	δ_{99} (mm)	δ^* (mm)	θ (mm)	$H = \delta^*/\theta$	c_f	$Re_\theta = U_e \theta / \nu$
750	Case 1	11.64	1.871	1.402	1.334	0.00391	2050
	Case 2	17.79	2.586	2.019	1.281	0.00375	2990
	Case 3	21.63	3.078	2.414	1.275	0.00372	3540
910	Case 1	14.84	2.586	1.825	1.417	0.00362	2690
	Case 2	20.79	3.300	2.502	1.319	0.00378	2870
	Case 3	25.42	4.011	3.067	1.308	0.00377	3070

Fig.2 (a) Shape factor and (b) skin friction coefficient.

Fig.3 Velocity profiles in the inner scaling.

Fig. 4 Correlation in the axial direction.

Fig. 5 Correlation in the azimuthal direction. (a) $x = 750$ mm and (b) $x = 910$ mm

Fig. 6 Correlation in the radial direction.

Fig.7 Two-point correlation in the y-z plane at $z_{\text{ref}}/\delta_{99} = 0.25$.

Fig.8 Integral length scales. (a) L_x , (b) L_y and (c) L_z

δ_{99}/a の影響を定量化するために、相関係数分布から積分長さスケールを次式 (x と z 方向にも同様) から求める。

$$L_y = \int_0^\infty R_{11}(r_y) dr_y \quad (1)$$

図 8 に、各方向への長さスケールを δ_{99}/a に対して示す。 L_y と L_x ($z/\delta_{99} > 0.5$) は δ_{99}/a の増加とともに小さくなり、 L_z と L_x ($z/\delta_{99} < 0.5$) はあまり変化していない。これより、本実験範囲では、 δ_{99}/a の増加は周方向への長さスケールを縮小させ、一方で、半径方向と軸方向 (外層壁面寄り) へのスケールの変化は顕著に現れない。

参考文献

- (1) Lueptow, R.M., *US NUSC Tech. Mem.*, Tech. Rep. 8389 (1988).
- (2) Tyty, O.R., *J. Fluid Mech.*, **602** (2008), 1-37.
- (3) Willmarth, W.W. et al., *J. Fluid Mech.*, **76** (1976), 35-64.
- (4) 山下・井上・矢野, 機論, **64**-626, B (1998), 3234-3240.
- (5) 井上・小寺・高田, 機械学会流工部門講演会, (2012).
- (6) Piquet, J. & Patel, V.C., *Prog. Aerospace Sci.*, **35** (1999), 661-672.
- (7) Fernholz, H.H. & Finley, P.J., *Prog. Aerospace Sci.*, **32** (1996), 245-311.
- (8) White, F.M., "Viscous Fluid Flow," 2nd ed., McGraw Hill, (1991), 429.
- (9) 大坂・亀田・望月, 機論, **62**-598, B (1996), 2230-2237.
- (10) Rao, G.N.V., *ASME J. Appl. Mech.*, **34** (1967), 237-238.
- (11) Kovasznay, L.S.G. et al., *J. Fluid Mech.*, **41** (1970), 283-325.