

4113 軸流中の回転円筒上乱流境界層の実験 (外層の整構造)

Experiments on the Turbulent Boundary Layer on a Cylinder Rotating in an Axial Flow (Coherent Structure in the Outer Layer)

正 山下新太郎 (岐阜大)

○正 矢野治久 (大同工大)

正 井上吉弘 (岐阜大)

正 福島千晴 (広島工大)

Shintaro YAMASHITA, Dept. Mechanical and Systems Eng., Gifu Univ., 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193

Haruhisa YANO, Dept. Mech. Eng., Daido Inst. Tech., 10-3 Takiharu-cho, Nagoya 457-8530

Yoshihiro INOUE, Dept. Mechanical and Systems Eng., Gifu Univ.

Chiharu FUKUSHIMA, Dept. Mech. Sys. Eng., Hiroshima Inst. Tech., 2-1-1 Miyake, Hiroshima 731-5193

This study is concerned with the turbulent structure of a three-dimensional boundary layer on a thin cylinder rotating in a uniform stream at the velocity ratio $\Omega_m = 0, 0.5$ and 1 . Measurements were made for a single hot-wire probe at Re of about 2500 . Mean profiles of the axial and peripheral velocity components were examined in inner scaling and outer scaling, and then the statistical properties of the axial fluctuation were represented by the intermittency factor and power spectrum. It is shown that an energy bump appears in the lower frequency range of spectra in the rotating cases.

Key Words : Turbulence, Three-Dimensional Boundary Layer, Rotating Flow, Coherent Structure

1. まえがき

軸流中で回転する物体表面上に発達する境界層は典型的なねじれ境界層となり、三次元境界層の単純化モデルの1つである。この流れ場の解明は工学的に重要な問題となっており、本著者は、一様な軸流中で回転する細長円筒上境界層を対象として、平均流れ場および乱流場の平均構造を明らかにしてきた⁽¹⁾⁽²⁾。そこで、本研究では乱流整構造の解明に取り組む。この問題は、レイノルズせん断応力の生成機構と密接に関連するものとして重要である。従来、三次元境界層の整構造は主に圧力駆動型について調べられてきており(例えば文献[3])、せん断駆動型に関する研究は比較的少なく(例えば文献[4][5])、十分ではない。

本研究は、おもに乱流境界層の外層部に形成される大規模構造に注目して実験を行う。外層部の流れは乱流領域-非乱流領域の間欠性をもち、流れの間欠性はせん断乱流の重要な性質の一つである⁽⁶⁾。この解明のために、運動量厚さレイノルズ数一定の条件下、まず平板境界層について、つぎに静止円筒上境界層、そして回転円筒上境界層の実験を行い、実験結果の相互比較から考察を行う。

2. 実験装置と実験方法

実験装置は、整流部を除き既報⁽¹⁾と同じである。整流部には最高軸流速度を増加させるための改造を施した。半径約 40 mm 、全長約 1200 mm の円筒が、内径 350 mm の円形断面測定部内の同心位置に設置され、円筒前縁下流 100 mm にはトリッピング・リングが取り付けられた。実験は、円筒前縁から 850 mm 下流の断面において、運動量厚さレイノルズ数 Re がほぼ同値となる条件で行われた。円筒の回転速度は基準軸流速度 U_m に対する比 $\Omega_m = V_0/U_m = a\omega/U_m$ で表し、 a, ω は円筒半径と角速度を、 V_0 は円筒表面速度をそれぞれ表す。また平板境界層の実験⁽⁷⁾は、測定部断面 $400 \times 400\text{ mm}^2$ の吹出型風洞を用いて行われた。

流れ場は、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によって表す。 x 方向および y 方向速度成分を u と v 、その平均を U と V でそれぞれ表し、変動 u' の r.m.s. を u_{rms} とする。表1は各実験条件をまとめて示す。層外主流速度は U_e で表し、境界層厚さには 99% 厚さ δ_{99} を用いる。排除厚さ Δ および運動量厚さ θ の定義は文献[1]を参照願いたい。速度測定には熱線流速計を用い、出力信号処理には ADC card と PC を使用した。

測定プローブは I 型であり、熱線は直径 $5\text{ }\mu\text{m}$ 、受感部長 1 mm の W 線である。速度成分の測定には回転法を用いた。

3. 実験結果と考察

3.1 内層の平均流れ まず、本実験レイノルズ数における平均流れを調べるため、図1に対数速度分布を示す。壁変数には、相対主流方向を1つの座標軸とする回転流線座標系にて導出された方程式から、流れの一般化擬二次元的関係を仮定することで得られた変数⁽⁸⁾を用いた。すなわち、相対主流方向成分を下付添字1によって表し、非粘性流の相対速度を $U_R = \{U_e^2 + (r\omega)^2\}^{1/2}$ 、その円筒面上での値を U_{R0} とし、 $\lambda = U_{R0}/U_R$ とおく。図1(a)は相対主流方向の速度分布を示す。ここで $U_{1\tau}$ は摩擦速度であり、Nakamura ら⁽⁸⁾の示した係数に基づき Clauser 線図法から求めた。両回転速度ともに、結果はよく対数速度分布と一致する。

図1(b)と図1(c)は、上の関係を静止円筒座標系の成分 V と U に変換して示す。速度成分間には $U_1 = \gamma U = (U_R/U_e)U$ および $U_2 = V - r\omega(1 - U/U_e) = 0$ の関係があり、後者が一般化擬二次元的関係である。対数速度分布の各係数は回転速度比に応じて変化し、図中の実線でこれを示す。何れの測定値も対数速度分布とよく一致している。さらに図1(c)には、平板境界層および静止円筒上境界層の速度分布を合わせて示す。これらもまた、よく対数速度分布と一致する。

3.2 外層の平均流れ 続いて、図2に平均速度分布を速度欠損表示する。伊藤ら⁽⁹⁾によって欠損則が示されているが、ここでは簡単に δ_{99} による無次元化を行った。図2(a)は、相対主流からの欠損速度と、静止円筒と平板については通常の欠損速度をそれぞれ示す。何れの場合も速度分布の一致性は乏しい。一方、周方向速度分布を示した図2(b)では、両速度比の分布はほぼ一致した。また、図2(c)は Smits ら⁽¹⁰⁾によって提案された欠損則に従って速度分布を示す。ここで用いられる速度スケールは、質量流束の欠損量に比例する。この欠損則によれば、各条件の速度分布は概ね一致し、特に $z/\delta_{99} > 0.5$ ではほぼ一致している。

3.3 外層の乱流構造 図3は、変動速度 u_{rms} を z/δ_{99} に対して示す。速度のスケールリングには前述の平均速度と同様に、摩擦速度 U_τ と Smits ら⁽¹⁰⁾の $U_e(\delta^*/\delta_{99})$ を用いた。摩擦速度を用いた図3(a)では、平板の場合を除き、概ね分布は一致するが、図3(b)ではまとまった分布はみられない。

最後に、変動速度 u の統計的性質を調べる。図4は、扁

平度 F_u と間欠係数 γ_u を外層の尺度で示す。間欠係数は、取得した時系列データ $u(t)$ について $\|du/dt\|$ の平滑化データを求め、敷居値 T_h による定義関数 $\alpha_T(t)$ から得る。図より、何れの条件においても γ_u の分布はよく一致し、 $z/\delta_{99} = 0.5 \sim 1.2$ の範囲で間欠係数は 1 から 0 に向けて減少する。すなわち、乱流領域・非乱流領域の発生頻度には差が認められない。そこで、 $z/\delta_{99} \approx 0.2, 0.5, 0.9$ におけるパワースペクトルを図 5 に示す。平板と静止円筒の場合、単調に減衰

するスペクトルとなるのに対し、回転円筒では無次元周波数で 0.3 ~ 0.5 の辺りにエネルギーバンプが認められる。今後、この特異なスペクトルを示す乱流構造について、2 点相関等を用いて詳細に研究を進める予定である。

本研究は、科学研究費基盤研究 (C) (No. 17560141) の援助によっている。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- (1) 矢野・山下・成瀬・近藤, 機論, **62**-601, B (1996), 3284-3291.
- (2) 山下・井上・矢野, 機論, **64**-626, B (1998), 3234-3240.
- (3) Flack, K.A. and Johnston, J.P., *Stanford Univ., Rep.* MD-63 (1993).
- (4) Elkins, C.J. and Eaton, J.K., *J. Fluid Mech.*, **402** (2000), 225-253.
- (5) Kiesow, R.O. and Plesniak, M.W., *J. Fluid Mech.*, **484** (2003), 1-39.
- (6) Mollo-Christensen, E., *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **5** (1973), 101-118.
- (7) 井上・他 3 名, 日本流体力学会年会, (2004), 626-627.
- (8) Nakamura, I. et al., *Proc. 3rd Turbulent Shear Flows*, (1982), 2.7-12.
- (9) 伊藤・他 4 名, 機論, **56**-528, B (1990), 2309-2317.
- (10) Zagarola, M.V. & Smits, A.J., *J. Fluid Mech.*, **373** (1998), 33-79.

Table 1 Specification of the present boundary layers

	U_c (m/s)	δ_{99} (mm)	A_1 (mm)	Θ_1 (mm)	$H=A_1/\Theta_1$	$R_\theta=U_c \Theta_1/\nu$
$\Omega_m = 0$	22.04	15.51	2.537	1.899	1.336	2600
$\Omega_m = 0.5$	18.80	17.70	2.711	2.094	1.295	2450
$\Omega_m = 1$	14.26	24.69	3.319	2.693	1.232	2400
Flat plate	10.68	27.58	4.681	3.314	1.412	2300

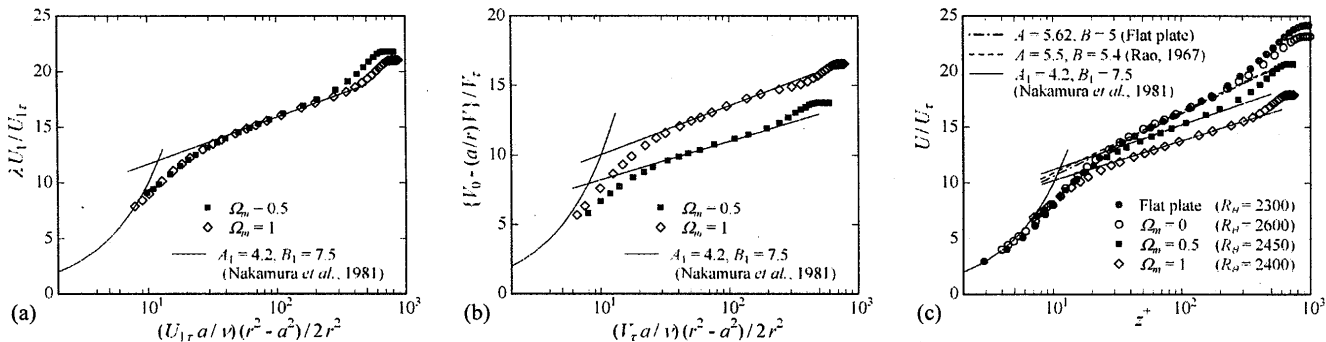


Fig.1 Mean velocity profiles in inner scaling. (a) the direction of the relative velocity vector, (b) the peripheral direction, and (c) the axial direction

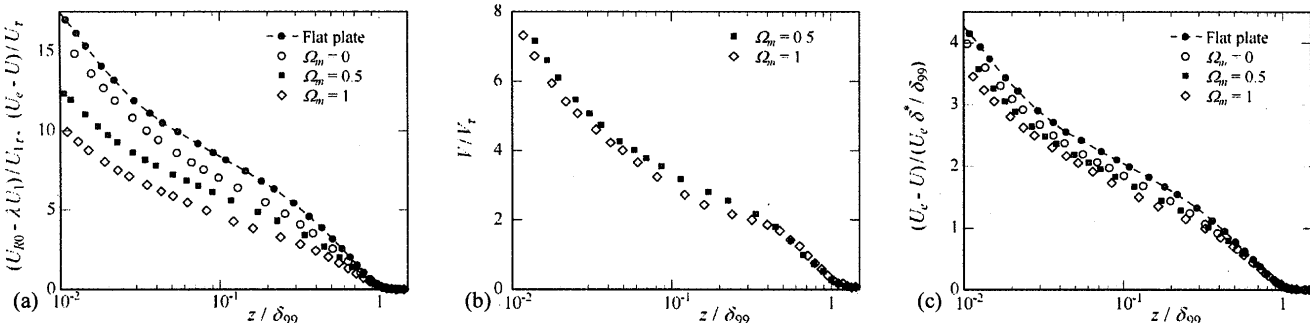


Fig.2 Mean velocity profiles in outer scaling. (a) the direction of the relative velocity vector, (b) the peripheral direction, and (c) deficit scaling of U

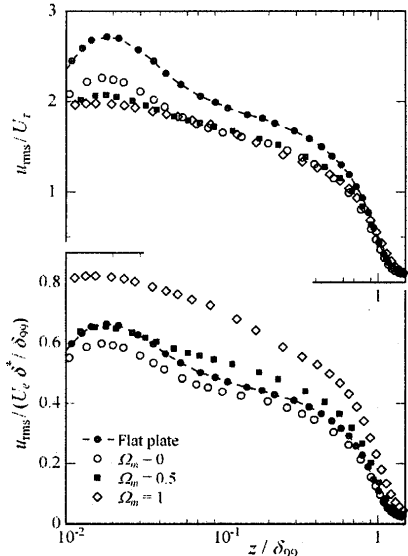


Fig.3 Distributions of r.m.s. values of the fluctuation in outer scaling.

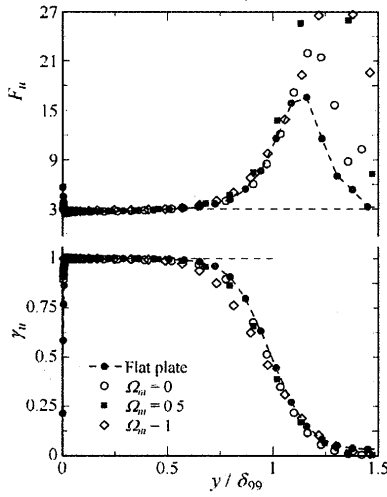


Fig.4 Intermittency and flatness factor of the fluctuation of the axial velocity.

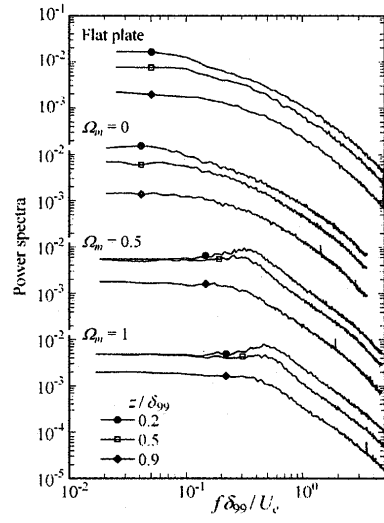


Fig.5 Power spectra of the fluctuation of the axial velocity.