

早稲田大学大学院 学生員 松梨 史郎
早稲田大学理工学部 正 員 吉川 秀夫

1. はじめに

境界層流れにおいて、底面の粗度が滑から粗へ変化する時、あらたな境界層が発達する。これを内部境界層、それまでの境界層を外部境界層と呼ぶが、この内部境界層は一樣流の粗面にはい。つまりその発達とは異なり、絶えず外部境界層の影響を受けるから発達していく。本研究はこの内部境界層の発達と、それに付随する種々の物理的特性を定性的にとらえるとともに境界層厚さと底面に働くせん断力について考察するものである。

2. 実験概要

実験装置としては長さ10m高さ34.5cm幅30cmの風洞を用い、滑面としてベニヤ板、粗面として様粗度とビーズの2種類のものを用いた。様粗度は上流端から7mの位置から下流端まで幅、高さ、間隔がそれぞれ2mm, 2mm, 6mmのものを、ビーズは上流端から5.18mの位置から下流端まで径が5mmのものを敷きつめた。

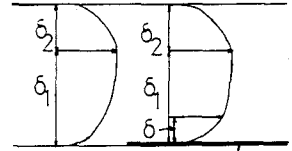
3. 実験結果及び考察

3-1. 境界層厚の定義

座標は流れ方向にx軸をとり、粗度急変点を原点、それより下流を正とする。また滑面ではベニヤ板の上から、粗面では粗度の上からの距離をyとし、以後これに依るものとする。図2は粗度とビーズのときの各断面の流速分布を示している。図3、図4も同一断面における特性であるが、他の断面も同様の傾向を示している。図2において流速分布曲線は途中で折れており、その前後は必ず要則に従っている。これは粗面にはい、そこから新しい境界層が発達しているためであり、この折れた点におけるyの値を内部境界層厚 δ と定義する。実験の結果按ずる場合は $x=0$ で最大流速の位置まで $1/\sqrt{0}$ 乗則が成り立たず、流速境界層が完全に発達して粗面にはい、つまりこのに於ては、ビーズの場合は $x=0$ で、ベニヤが $1/84$ まで発達し、こゝにない流れがはい、つまりこの。また上端からの境界層は変化せず、下側からの特性に影響がないものと見なされる。

3-2. 乱流強度 $\sqrt{\overline{u'^2}}$, $\sqrt{\overline{v'^2}}$

図3に乱流強度 $\sqrt{\overline{u'^2}}$, $\sqrt{\overline{v'^2}}$ の特性を示す。図にいった横線は流速分布から求めた境界層厚であるが、 $\sqrt{\overline{u'^2}}$, $\sqrt{\overline{v'^2}}$ の曲線はほぼ同じ位置で折れ曲がっている。このことは次に示したレイノルズ数の特性についてともいえる。



δ : 内部境界層 粗度
 δ_1 : 外部境界層
 δ_2 : 上端からの境界層

図1. 境界層説明図

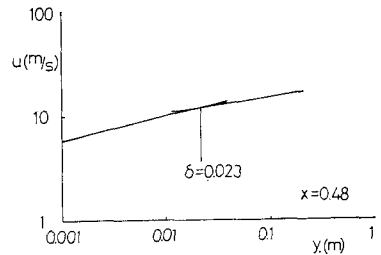


図2. 流速分布図

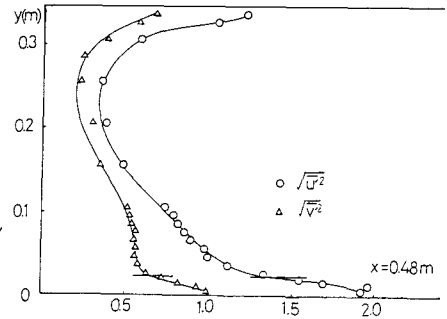


図3. 乱流強度特性

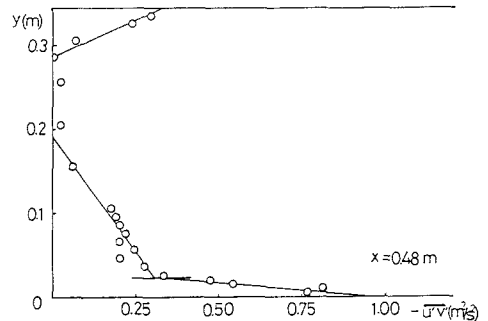


図4. レイノルズ数特性

3-3. レイノルズ数

図4にレイノルズ数の特性を示す。若干のばらつきはあつたが、内部境界層内、外部境界層内、上端からの境界層内、ともに連続分布を示しており、内部境界層内において大きなせん断力があるということがわかる。

3-4. 境界層厚

図5に境界層厚の変化を示す。実験の結果、様の場合には

$$\delta = 0.067 x^{0.95}$$

で表わされ、ANTONIA and LUXTON¹⁾の実験結果と合っている。またビーゴの場合には

$$\delta = 0.044 x^{0.92}$$

ニニで田中、片山^{2,3)}の方法で一様流速の流れが粗面にはいり、ときどき境界層厚を計算すると、抵抗則

$$\frac{\tau}{\rho U^2} = 6.17 \times 10^{-3} \left(\frac{\delta}{k_s} \right)^{-1.12}$$

に $k_s = 0.00367 m$ (様) $k_s = 0.008 m$ (ビーゴ) を代入し、カルマンの運動量方程式を連立させて

$$\delta = 0.03 x^{0.76} \text{ (様)}$$

$$\delta = 0.037 x^{0.76} \text{ (ビーゴ)}$$

を得る。本実験で様の場合が $1/70$ 乗則、ビーゴの場合が $1/8.4$ 乗則の流速分布をもつて粗面に流入していることを考え合わせると、 $\delta = \alpha x^b$ と表わしたとき、 α の値は粗面の乗付よりもむしろ粗面に流入する流れの速度勾配の方が大きく δ の大きさに影響し、流入する流れの速度勾配が小さくなるにつれて α の値は大きくなるということはいえそうである。これは粗面流入以前に存在していた乱流強度が大きい小さいかに依存していると考えられる。

3-5. 境界面上の流速 u_s

図6に境界面における流速 u_s の変化を示す。縦軸は u_s を粗面流入区における外部境界層内の平均流速 U_0 で無次元化しているが、ビーゴよりも様の方がむしろ上り具合が大きいのは3-4で、たとえビーゴの方が k_s が大きくても δ は粗面に流入する流れの発達具合の言に影響される程度が強い。たのと同様の結果が現われていると判断できる。

3-6. 底面せん断力 T_0 、境界面せん断力 τ_0

図7に底面及び境界面におけるレイノルズ数の流れ方向の変化(ビーゴ)を示すが、一様流の乱流境界層の場合と同様、減少する傾向が現われている。

最後に実験目的に必要な底面のせん断力 T_0 の算定として、境界面での速度勾配による強いせん断力 τ_0 を考慮して一部修正したカルマンの運動量方程式

$$\frac{T_0}{\rho} = \frac{\mu}{(u+1)(u+2)} U_0^2 \frac{\partial \delta}{\partial x} - \frac{u^2}{(u+1)(u+2)} \delta U_0 \frac{\partial U_0}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_0}{\partial x} \delta + \frac{T_0}{\rho}$$

で計算を試みたが実験と合わず、今後の研究課題となっている。

参考文献 1) ANTONIA and LUXTON: The response of a turbulent boundary layer to a step change in surface roughness
2) 田中、片山、福井、吉川: 年報 37 回, 3) 片山直夫「粗面と外部境界層の底面せん断力」土木学会論文集 投稿中

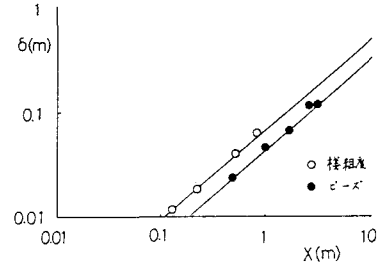


図5. 境界層厚

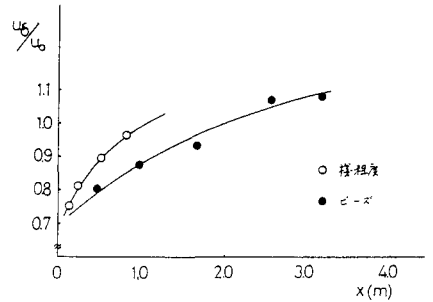


図6. 境界面流速

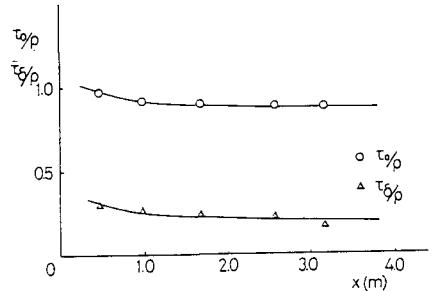


図7. せん断力