

クエット・ポアズイユ型バックステップ乱流の実験的研究

小林和貴 (15416547)

指導教官 森西洋平 助教授

1 緒言

バックステップ乱流は、はく離・再付着現象を伴う最も基本的な流れ場である。この流れ場の特徴は、はく離点がステップ角部に固定され、再付着距離が流れ場の条件に応じて変化することにある。バックステップ乱流を扱った従来の研究は主に、静止平行平板間チャネルの一方の壁を急拡大させた流れ場について行われている [1]–[4]。しかし、レイノルズ数およびステップ拡大比以外のパラメータ依存性の調査はほとんど行われていない。一方、壁乱流として最も基本的な平行平板間乱流に対しては、静止平板壁-移動平板壁間で生じるクエット・ポアズイユ乱流の研究が El Telbany & Reynolds [5], [6] や Nakabayashi et al. [7] によって実験的に行われている。これらの研究では流れ方向平均圧力勾配と移動壁速度を調整することで、摩擦レイノルズ数 Re_τ 、流れタイプパラメータ β (あるいはせん断応力勾配パラメータ μ) を変化させ、これらパラメータが流れ場に及ぼす影響が系統的に調査されている。そこで本研究では、バックステップ乱流の無次元パラメータ依存性を調べるために、ステップ対向壁を移動平板壁としたクエット・ポアズイユ型バックステップ乱流に関する実験的研究を行う。

2 実験概要

Fig. 1 に本研究で使用する実験装置の概略図を示す。流路は、ステップ形状を持つ上壁 (アクリル製)、インバーターを介してモーターで駆動される下壁 (ポリウレタン製ベルト) および側壁 (A6063 チャンネル材) によって構成されている。主要寸法は流路全長 $L = 4800[\text{mm}]$ 、スパン方向長さ $W = 865[\text{mm}]$ 、ステップ上流流路高さ $2h_1 = 30.10[\text{mm}]$ 、ステップ高さ $H = 15.05[\text{mm}]$ となっており、ステップでの流路拡大比は 1.50 である。また流路入口からステップまでの距離は $L_1 = 2500[\text{mm}]$ ($L_1/2h_1 = 83.1$)、ステップから流路出口までの距離は $L_2 = 2300[\text{mm}]$ ($L_2/(2h_1 + H) = 51.0$) となっている。座標系は Fig. 2 に示すようにステップ直後の上壁に原点を取り、流れ方向に x 軸、ステップ静止壁からステップ対向壁に向かって y 軸、流路中央からスパン方向に向かって z 軸を取っている。

また、実験条件は Table 1 に示すようにステップ上流でのせん断応力勾配の違いによる 3 種類の流れタイプを設定し、さらにそれぞれの流れタイプに対し、2 もしくは 3 種類のレイノルズ数を設定する。実験条件は送風機流量とベルト速度を調整して設定される。

3 結果と考察

まず、タフト法による流れの可視化を用いた再付着距離の測定結果を示す。タフトはステップ静止壁面上の $0 \leq x/H \leq 10$ の範囲に取り付けられている。再付着距離の測定手順は次の通りである。まず、タフトの動きを撮影した動画 (30 秒間) を確認し、順流・逆流の両方に振れたタフトを再付着領域内に存在するものとして再付着領域を決定する。そして、再付着領域の中間位置を平均再付着距離とする。以上のような決定方法に基づいて平均再付着距離を測定した結果、再付着距離はステップ上流の流れ方向圧力勾配には依存せ

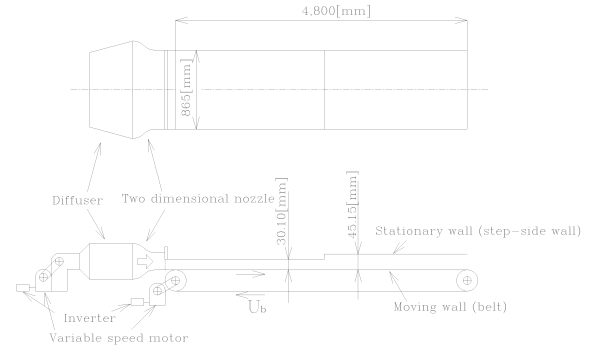


Fig. 1: The schematic of experimental apparatus

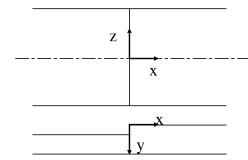


Fig. 2 Coordinate system

ず、 $x_r/H = 6.5$ という結果が得られた。

次に、ステップ壁面上における流れ方向静圧分布の測定結果を示し、ステップ上流の流れ方向圧力勾配の違いによる流れ場の違いについて説明する。Fig. 3 には $-140 \leq x/H \leq 110$ の領域におけるステップ壁面上における流れ方向静圧分布の結果を示す。Fig. 3 の縦軸は $x/H = 0$ における静圧 p_{ref} (ステップ上流の静圧分布を外挿して決定したステップ位置での静圧) を基準静圧として、流体の密度 $\rho[\text{kg/m}^3]$ およびステップ上流における壁面摩擦速度 $u_{\tau 0}[\text{m/s}]$ により正規化された静圧値、横軸はステップ高さ $H[\text{mm}]$ で正規化された流れ方向座標となっている。この図より、ステップ上流の流れ方向圧力勾配が増加すると、ステップ下流では再発達領域における流れ方向圧力勾配は増加することが分かる。また、ステップ上流のレイノルズ数が増加するほど、再発達領域の静圧値が高い値を示すことが分かる。

最後に、I 形熱線流速計により測定した流速分布の測定結果を示し、ステップ下流における速度回復の様子を説明する。Fig. 4 にはステップ上流の断面平均速度 $U_m[\text{m/s}]$ で正規化した平均速度分布を示す。図より、はく離領域が存在する $x/H = 5$ における分布は、 $y/H \geq 2$ においてステップ上流の分布形状の特徴をほぼ維持したままの形状になっていることが分かる。しかし、再付着点下流では下流の断面に向かうに従いその特徴が失われながら速度回復していくことが分かる。一方、ステップ壁近傍の平均速度はステップ上流の流れ方向圧力勾配が増加するほど低い値を示すことから、ステップ壁近傍の平均速度の回復はステップ上流の流れ方向圧力勾配が増加すると、回復速度が遅くなることが分かる。

また、ステップ下流の平均速度分布に対して平行平板間クエット・ポアズイユ乱流で成立する対数則、 $1/2$ 乗則と同様の考察を行い、これらの法則がステップ下

Table 1: Experimental conditions

case	Flow type	Re_{τ_0}	β_0
P150	Poiseuille	150	-1
P300	Poiseuille	300	-1
P450	Poiseuille	450	-1
CP150	Couette-Poiseuille	150	-0.5
CP300	Couette-Poiseuille	300	-0.5
C150	Couette	150	0
C300	Couette	300	0

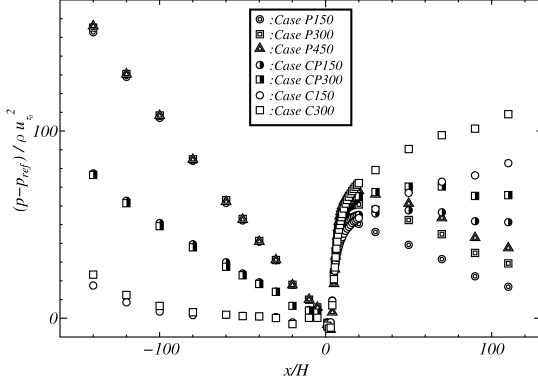


Fig. 3: The distributions of static pressure

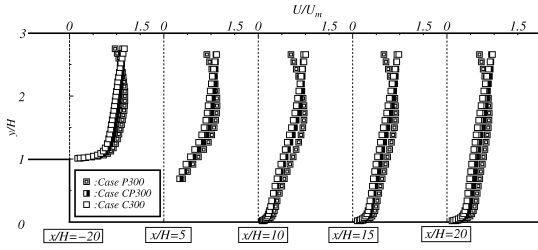


Fig. 4: Mean velocity profiles

流の速度回復領域においても成立するかについて考察する。

まず、対数則は壁ごく近傍で成立する線形則の外側に成立する平均速度分布法則であり、

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + c \quad (1)$$

で表される。ここで κ および c はカルマン定数および付加定数である。

一方、 $1/2$ 乗則は局所の流れ方向圧力勾配 α_w が正の値となる領域で対数則の外側に成立する平均速度分布法則であり、

$$U^+ = K_1(y/\delta_p)^{1/2} + K_2 \quad (2)$$

で表される。ここで K_1 および K_2 は $1/2$ 乗則に関する定数である。

以上の定義を基に対数則、 $1/2$ 乗則の成立を調べた結果を対数則に関しては Fig. 5 に、 $1/2$ 乗則に関しては Fig. 6 にそれぞれ示す。対数則については、ステップ上流の流れ方向圧力勾配が増加すると、対数則の成立し始める領域が下流へ移動することが分かる。一方、 $1/2$ 乗則については、ステップ上流の流れ方向圧力勾配が増加すると、 $1/2$ 乗則の成立領域が下流に広がるということが分かる。

4 結言

クエット・ボアズイユ型バックステップ乱流の実験を行い、以下の結論が得られた。

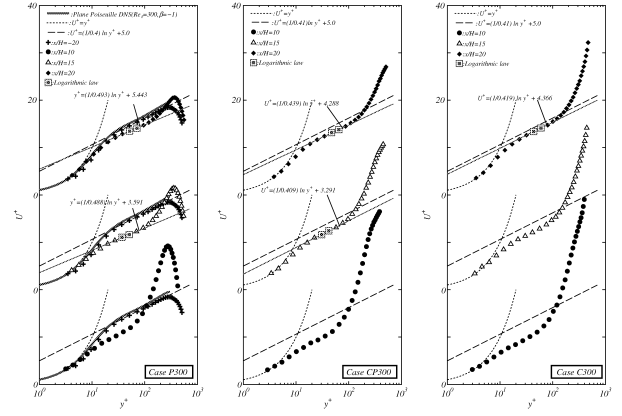


Fig. 5: The mean velocity profile on the logarithmic law scaling

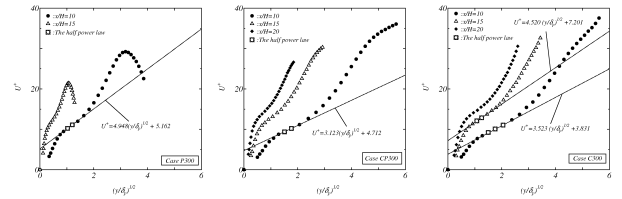


Fig. 6: The mean velocity profile on the half power law scaling

1. 平均再付着距離はステップ上流の流れ方向圧力勾配によらず一定で $x_r/H = 6.5$ となる。
2. 流れ方向静圧分布はステップ上流の流れ方向圧力勾配が増加すると、ステップ下流の流れ方向圧力勾配も増加する。また、ステップ上流のレイノルズ数が増加すると、ステップ下流の静圧値が高くなる。
3. ステップ下流の平均速度分布は、はく離領域ではステップ上流の分布形状の影響を強く受けるが、再付着点下流ではその特徴を徐々に失いながら速度回復する。また、再付着点下流ではステップ上流の流れ方向圧力勾配が増加するほど、ステップ壁近傍の速度回復は遅くなる。
4. ステップ下流の平均速度分布はいずれの Case でも $x/H = 10$ で $1/2$ 乗則が成立し、 $x/H = 20$ では対数則が成立する。しかし、ステップ上流の流れ方向圧力勾配が増加すると $1/2$ 乗則の成立領域が下流に広がり、対数則の成立し始める断面が下流で移動する。

参考文献

- [1] J. Kim, S. J. Kline and J. P. Johnston, Trans. ASME, J. Fluid Eng., **102** (1980) 302-308.
- [2] J. K. Eaton and J. P. Johnston, AIAA Journal, **19-9** (1981) 1093-1100.
- [3] 仲條一郎, 本阿弥真治, 機論 B, **50-460** (1984) 3159-3165.
- [4] N. Kasagi and A. Matsunaga, Int. J. Heat and Fluid Flow, **16** (1995) 477-485.
- [5] M. M. M. El Telbany and A. J. Reynolds, J. Fluid Mech., **100** (1980), 1-29.
- [6] M. M. M. El Telbany and A. J. Reynolds, J. Fluid Mech., **111** (1981), 283-318.
- [7] K. Nakabayashi, O. Kitoh and Y. Kato, J. Fluid Mech., **507** (2004) 43-69.