

クエット・ポアズユ型バックステップ乱流の実験的研究

奥村将也 (16416523)

指導教員 森西洋平 助教授

1 緒言

バックステップ乱流は、はく離点がステップ角部に固定されるためはく離・再付着を伴う最も基本的な流れ場である。この流れに関する総説論文^[1]において流れ方向圧力勾配もバックステップ乱流における重要なパラメータであることが指摘されているが、流れ方向圧力勾配の影響をレイノルズ数の効果と分離して調べた研究は著者らの知る限りこれまで行われていない。

本研究ではバックステップ乱流のはく離・再付着現象に及ぼす流れ方向圧力勾配の影響をレイノルズ数の効果と分離して調査するために、クエット・ポアズユ型バックステップ乱流の実験的研究を行う。

本報告では、ステップ壁面上静圧分布のI形熱線流速計による平均速度および乱流強度の測定結果を示す。

2 実験の概略

2.1 実験装置および座標

実験装置の概略を図1に示す。ステップを含む静止壁(ステップ側の壁面)、移動平板壁(ステップ対向壁)および側壁で囲まれた領域が流路である。ステップによる流路拡大比は $ER = (2h_2)/(2h_1) = 1.50$ である。なお、ステップ上流の助走区間は $L_1/(2h_1) = 83.1$ であり、ステップ部の流れは完全発達している。

実験結果を整理するための座標は図1に示すとおり、ステップ直後のステップ側の壁面上に原点を取り、流れ方向に x 軸、ステップ側の壁からステップ対向壁に向かって y 軸ととしている。

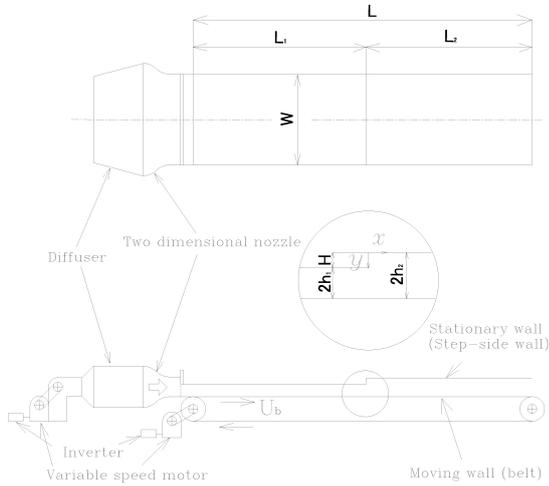


Fig. 1: Experimental apparatus

2.2 実験条件

クエット・ポアズユ型バックステップ乱流に関する無次元数はレイノルズ数 $Re_\tau (= u_\tau h_1/\nu)$ と流れタイプパラメータ $\beta (= h\alpha/u_\tau^2)$ である。ただし、 h 、 ν 、 u_τ はそれぞれチャンネル半幅、作動流体の動粘度、摩擦速度である。また、 $\alpha = (1/\rho)(dp/dx)$ で ρ は作動流体の密度、 p は圧力である。本研究ではステップ上流の基準断面 ($x/H = -20$ ただし H はステップ高さ) の流れ場を $Re_{\tau 0} = 300$ に固定し表1のように β_0 を変化させて実験を行った。なお、下付き添え字の0は基準断面における値であることを示す。

Table 1: Experimental conditions(target values)

Case	Upstream flow type	$Re_{\tau 0}$	β_0
P300	Poiseuille	300	-1
CP300	Couette-Poiseuille	300	-0.5
C300	Couette	300	0

3 結果および考察

3.1 流れ方向壁面静圧

壁面静圧係数 C'_{pc} の流れ方向分布をを図2に示す。ここで $C'_{pc} = 2(p - p_{ref})/\rho u_\tau^2$ であり、 p_{ref} は $x = -0$ の静圧の補間値である。この図より、速度回復域下流部における圧力勾配は Case P300 で順圧力勾配、Case CP300 ではほぼ勾配ゼロそして Case C300 では逆圧力勾配になっている。

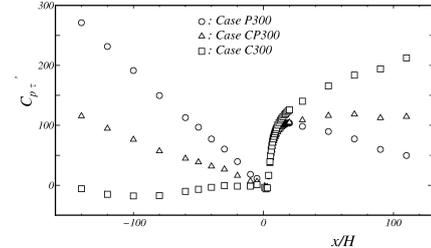
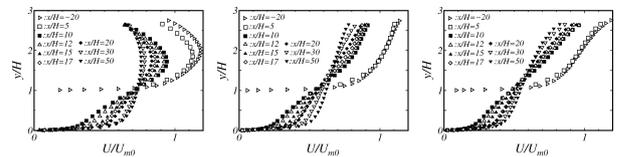


Fig. 2: Distributions of C'_{pc}

3.2 速度測定

速度回復域にあたる $x/H = 10, 12, 15, 17, 20, 30, 50$ の7断面の平均速度の測定結果の考察を行う。

平均速度分布 図3(a)~(c)それぞれに Case P300, CP300 および C300 の平均速度分布を示す。ステップ側の壁面近傍 $y/H \leq 1$ ではいずれの条件においても下流に向かうに従い平均速度が増加するが、流路中央付近ではいずれの条件においても下流に向かうに従い平均速度が減少する。これは連続の式を適切に反映した結果である。



(a) Case P300 (b) Case CP300 (c) Case C300

Fig. 3: Mean velocity profiles for each case

平均速度分布則 平均速度分布則の対数則および $1/2$ 乗則を念頭において測定結果の整理を行い、再付着領域下流の速度回復に見られる速度分布の特徴を考察する。

対数則は

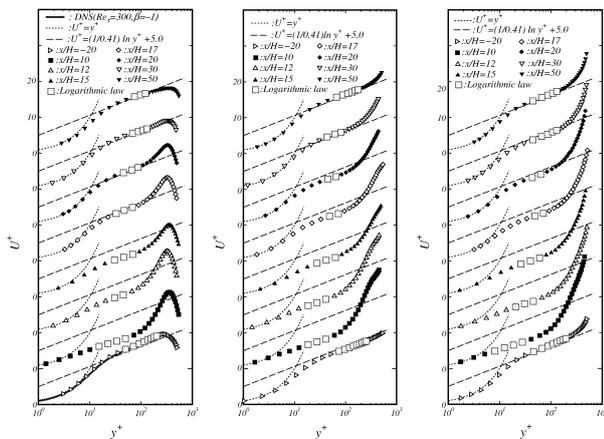
$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + c \quad (1)$$

で表される平均速度分布法則である。図4(a)~(c)に横軸を対数スケールで描いた y^+ 、縦軸を U^+ とした速度回復域の速度分布の図を示す。図中□印が対数則

の成立条件を満足した測定点である。成立条件は発表で述べるとおりである。 $x/H = 10$ の断面ではいずれの条件においても粘性底層から遷移層を経ずに片対数グラフ上で直線状の速度分布となる。いずれの条件においても速度分布は $y^+ > 4$ で線形則 $U^+ = y^+$ の分布から離れており、速度回復域上流部では乱流拡散の影響がより壁付近まで及ぶことが理解される。 [3] さらに下流断面に向かうに従い遷移層が現れる様子が観察される。ここで示した図からは圧力勾配による回復の様子の違いを観察することはできない1/2乗則は逆圧力勾配が強い領域で成立する平均速度分布法則であり、次式で表現される。

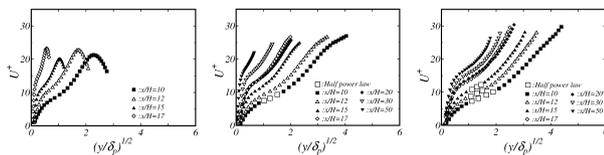
$$U^+ = K_1 \left(\frac{y}{\delta_p} \right)^{1/2} + K_2 \quad (2)$$

ここで、 δ_p は圧力勾配長さスケールで、 $\delta_p = \tau_w / |dp/dx|$ である。図 5(a)~(c) に1/2乗則の成立状況を示す。図中□印は1/2乗則の成立条件を満足した測定点である。これらの図より、Case P300 では1/2乗則の成立断面は確認されず、CP300 では $x/H = 10$ の1断面のみで、そしてC300 では $x/H = 10, 12, 15$ の3断面で1/2乗則の成立が確認される。この結果は、標準的なバックステップ乱流 ($\beta_0 = 1$) では、逆圧力勾配領域でも1/2乗則が観察されないこと、ステップ上流の流れ方向圧力勾配の増加(逆圧力勾配の程度の増加)に伴い1/2乗則領域が現れ整理る領域も下流方向へ拡大することを示している。



(a) Case P300 (b) Case CP300 (c) Case C300

Fig. 4: Mean velocity profiles with wall coordinate system



(a) Case P300 (b) Case CP300 (c) Case C300

Fig. 5: Mean velocity profiles for sections of adverse pressure gradient

3.3 乱れ統計量

乱流統計量 図 6(a)~(c) それぞれに Case P300, CP300 および C300 の流れ方向乱流強度分布を示す。横軸は u'/U_{m0} である。いずれの条件においても、速度回復域上流部となる $x/H = 10$ では $y/H = 1$ 近辺にピークが存在する。このピークは U_{m0} の 15% 以上となり、ステップ上流基準断面の壁面近傍の乱流強度

の最大値とあまり変わらない。さらに下流断面では、このピークが流路中央寄りに移動しながら、減少していく様子を観察できる。ピークは Case P300 および CP300 では $x/H = 30$ の断面まで、そして Case C300 では $x/H = 20$ の断面まで確認される。また、いずれの条件でも $x/H = 15$ の断面からステップ側の壁の近傍に新たな乱流強度の極大値が現れてきている様子を確認できる。

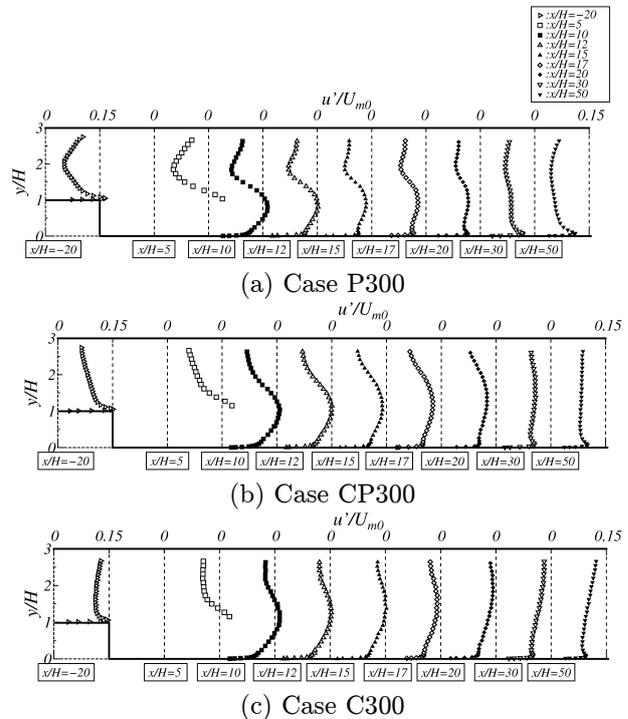


Fig. 6: Turbulent intensity profiles

4 まとめ

圧力勾配がバックステップ乱流の平均速度回復に及ぼす影響を調査する目的でクエット・ポアズイユ型バックステップ乱流の実験的研究を行い、以下の結果を得た。

1. 速度回復域下流部の圧力勾配は Case P300 で負、Case CP300 で圧力勾配ゼロそして C300 で正となる。
2. 平均速度は流路中央で減速、ステップ側の壁近傍で増速で連続の式は満足されている
3. 速度回復域上流部では、乱流拡散の効果が強いいため壁面のごく近傍においても対数則は成立する。
4. ステップ上流の β_0 が増加すると、1/2乗則の成立領域は速度回復域で下流方向に拡大する。
5. 速度回復域ではいずれの条件でも流路中央部に乱流強度のピーク値が存在する。このピーク値は下流断面ほど小さくなる。

参考文献

- [1] Eaton, J. K. and Johnston, J. P. , "A Review of Research on Subsonic Turbulent Flow Reattachment," AIAA J. 19-9, (1981), pp. 1093-1100.
- [2] 森西洋平・小林敏雄, "バックステップ流れにおけるはく離域の乱流構造 (LES データを用いた検討)," 機会学会論文集 (B 編), 58 巻, (1992), pp. 2730-2735.