

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

藤井 英治 (14116706)

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・再付着を伴う基本的な流れ場である。バックステップ乱流の平均速度に関する流線の模式図を図 1 に示す。

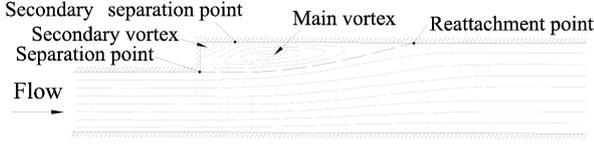


図 1: バックステップ乱流の平均速度に関する流線の模式図

図 1 に示すように、ステップ直後には大きなはく離泡と小さな第二のはく離泡が生じ、ステップ側の壁面には再付着点とはく離点が生じる。従来のバックステップ乱流に関する研究では、流路拡大比やレイノルズ数の違いが再付着におよぼす影響が調査されている。しかし、流れ方向無次元圧力勾配が再付着におよぼす影響については十分に調査されていない。

そこで本研究では流れ方向無次元圧力勾配がバックステップ乱流の再付着におよぼす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・ポアズイユ型バックステップ乱流の実験的研究を行う。本発表では、壁面タフト法を用いた可視化実験による再付着領域とはく離領域の特定結果を示す。

2 実験の概略

2.1 実験装置と座標

実験装置の概略と座標を図 2 に示す。

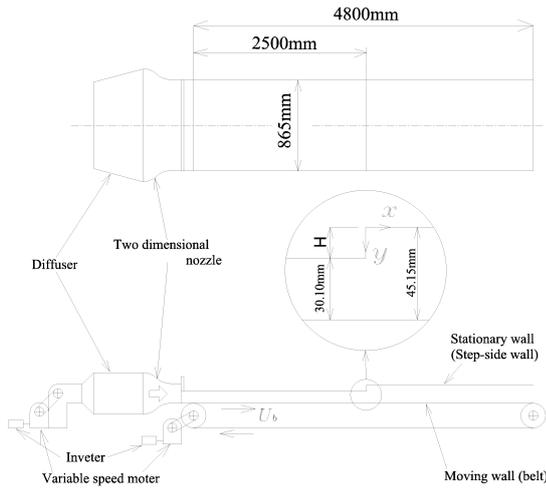


図 2: 実験装置の概略と座標

ステップ高さ $H = 15.05\text{mm}$ 、ステップによる流路拡大比 $ER = (2h_2)/(2h_1) = 1.500$ である。ステップ上流の無次元助走距離は $L_{in}/(2h_1) = 83.1$ であり、ステップ流入部の流れは完全発達している。なお L_{in} はステップ上流の助走距離、 h_1 、 h_2 はそれぞれステップ上流および下流の流路高さの半値である。実験結果を整理するための座標は、ステップ直後のスパン方向流路中央の静止壁面上に原点を取り、流れ方向に x 軸、

静止壁からステップ対向壁に向かって y 軸をとる。

本研究で用いた実験装置の諸元について、従来の研究との比較を表 1 に示す。なお W はスパン方向チャネル幅である。

表 1: 従来の研究との実験装置諸元の比較

	本研究	Kasagi & Matsunaga ^[1]	仲條・本阿弥 ^[2]	Kim et al. ^[3]
ER	1.500	1.504	1.5	1.50
$L_{in}/(2h_1)$	83.1	81.5	19	4.00
$W/(2h_1)$	29.7	9.88	9.0	7.99
$W/(2h_2)$	19.2	6.56	6.0	5.33

表 1 より本研究の実験装置は、無次元助走距離とステップ上流・下流の流路アスペクト比ともに従来の研究よりも十分大きくとられているのがわかる。

2.2 無次元パラメータ

本研究で用いる無次元パラメータは、式 (1) で表される摩擦レイノルズ数 Re_τ 、および式 (2) で表される流れタイプパラメータ β である。流れタイプパラメータ β は流れ方向圧力勾配に関する無次元パラメータである。

$$Re_\tau = \frac{u_\tau h}{\nu} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{h}{\rho u_\tau^2} \frac{dp}{dx} \quad (2)$$

ただし h は流路高さの半値、 ν は空気の動粘度、 u_τ は摩擦速度、 ρ は空気の密度、 dp/dx は流れ方向圧力勾配である。本研究の実験装置では移動壁（ステップ対向壁）の速度を任意に設定できるため、これを利用して流れタイプパラメータ β を摩擦レイノルズ数 Re_τ とは独立に設定することが可能である。

2.3 実験条件

本研究ではステップ上流基準断面 ($x/H = -20$) の流れ場を表 2 のように設定した実験を行った。なお下付き添え字 0 はステップ上流基準断面の値であることを示す。なお $\beta = -1$ の流れはポアズイユ乱流、 $\beta = 0$ の流れはクエット乱流となる。またこれらの中間の流れとして、本研究では新たに $\beta = -0.5$ の流れをクエット・ポアズイユ乱流と呼ぶ。なお以降は実験条件の表記を表 2 に示すように表記する。つまり、ポアズイユ乱流を P、クエット・ポアズイユ乱流を CP、クエット乱流を C として流れのタイプを表し、続く 3 桁の数字で目標とするステップ上流基準断面の摩擦レイノルズ数を表す。

表 2: 実験条件 (設定目標値)

	流れのタイプ	$Re_{\tau 0}$	β_0
P150	ポアズイユ乱流	150	-1
CP150	クエット・ポアズイユ乱流	150	-0.5
C150	クエット乱流	150	0
P300	ポアズイユ乱流	300	-1
CP300	クエット・ポアズイユ乱流	300	-0.5
C300	クエット乱流	300	0
P450	ポアズイユ乱流	450	-1

3 実験方法

3.1 再付着領域とはく離領域の可視化方法

本研究では壁面タフト法によりステップ直後の再付着領域とはく離領域の可視化実験をおこなった。タフトはステップ直後のスパン方向流路中央の静止壁面上 $0 < x/H \leq 10$ の区間に $0.25H$ 間隔で設置した。

3.2 再付着領域とはく離領域の特定方法

タフトの挙動は長時間露出画と動画に記録される。長時間露出画はデジタルカメラにより、動画はデジタルビデオカメラにより撮影された。長時間露出画は感度 ISO100, 絞り F8 で 30 秒間露光し, 扇状にタフトの軌跡が記録されるようにした。次に本研究における再付着領域とはく離領域の定義を示す。本研究で再付着領域は

1. 再付着領域内のタフトは, 主流に関して順流方向および逆流方向の両方に振れている
2. 再付着領域外部のうち主流に関して上流側のタフトは逆流方向, 下流側のタフトは順流方向に振れている

が満たされる領域と定義する。またはく離領域は

1. はく離領域内のタフトは, 主流に関して順流方向および逆流方向の両方に振れている
2. はく離領域外部のうち主流に関して上流側のタフトは順流方向, 下流側のタフトは逆流方向に振れている

が満たされる領域と定義した。各設置点におけるタフトの振れている方向の判定には長時間露出画を用いる。すなわちタフト設置点を通る静止壁面の法線について, タフトの軌跡が主流に関してこれより下流側にあれば順流方向, これより上流側にあれば逆流方向, これを又いでいる場合は順流方向および逆流方向の両方に振れていると判定する。図 3 の場合, 3~4 のタフトははく離領域内, 8~10 のタフトは再付着領域内と特定される。なお再付着領域およびはく離領域外縁で振れている方向の明確な判定が困難なタフト (図 3 の場合, 4 と 7 のタフトに相当する) については, 動画により振れている方向を判定した。

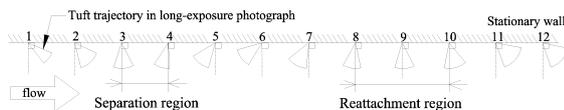


図 3: 長時間露出画による再付着領域とはく離領域の特定

4 再付着領域とはく離領域の特定結果

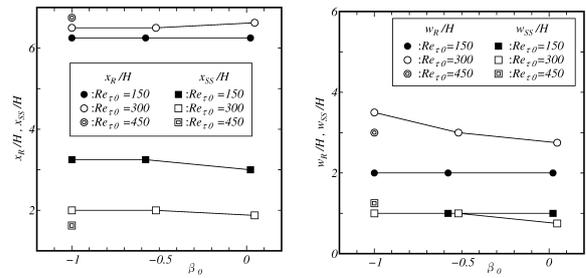
特定の結果 $x/H \approx 6$ に再付着領域, $x/H \approx 2$ に第二のはく離泡によるはく離領域が認められた。なお第二のはく離泡の存在は Kasagi & Matsunaga[2] でも述べられている。以降 $x/H \approx 2$ のはく離領域を「第二のはく離領域」と呼ぶ。下付き添え字 R は再付着領域に関する諸量, 下付き添え字 SS は第二のはく離領域に関する諸量であることを示す。

表 3 に実際の実験条件と再付着領域および第二のはく離領域の特定結果を示す。また図 4(a) に再付着領域の無次元中心位置 x_R/H と第二のはく離領域の無次元中心位置 x_{SS}/H の β_0 に対する変化, 図 4(b) に再付着領域の無次元幅 w_R/H と第二のはく離領域の無次元幅 w_{SS}/H の β_0 に対する変化を示す。

図 4(a), (b) より実験条件 $Re_{\tau 0} = 150$ では第二の

表 3: 実際の実験条件と再付着領域および第二のはく離領域の特定結果

実験条件	$Re_{\tau 0}$	β_0	x_R/H $\pm w_R/(2H)$	x_{SS}/H $\pm w_{SS}/(2H)$
P150	147.8	-1.000	6.25 ± 1.00	3.25 ± 0.50
CP150	149.6	-0.578	6.25 ± 1.00	3.25 ± 0.50
C150	150.1	0.022	6.25 ± 1.00	3.00 ± 0.50
P300	291.4	-1.000	6.50 ± 1.75	2.00 ± 0.50
CP300	300.0	-0.519	6.50 ± 1.50	2.00 ± 0.50
C300	300.3	0.046	6.625 ± 1.375	1.875 ± 0.375
P450	435.5	-1.000	6.75 ± 1.50	1.625 ± 0.625



(a) $x_R/H, x_{SS}/H - \beta_0$ (b) $w_R/H, w_{SS}/H - \beta_0$

図 4: β_0 に対する再付着領域と第二のはく離領域の無次元中心・無次元幅の分布

はく離領域の中心位置 x_{SS} のみに β_0 依存性が見られるが, その他には β_0 依存性は見られない。一方実験条件 $Re_{\tau 0} = 300$ では β_0 の値の増加に伴い, 再付着領域 x_R の中心位置は下流方向へ, 第二のはく離領域の中心位置 x_{SS} は上流方向へ移動し, 再付着領域と第二のはく離領域の幅 w_R, w_{SS} は共に狭くなる。これは β_0 の値の増加に伴い, はく離泡の大きさが大きくなり, その流れ方向の大きさの変動が弱くなることを示している。しかしこれらの機構の詳細は不明であり, 今後ははく離の立体構造の可視化も含めて調査すべき課題である。

5 まとめ

流れ方向無次元圧力勾配がバックステップ乱流の再付着におよぼす影響を調査する目的でエット・ボアズイユ型バックステップ乱流の実験的研究を行った。

実験条件 $Re_{\tau 0} = 150$ の場合, 再付着領域と第二のはく離領域の中心・幅共に, β_0 依存性はほとんど認められない。一方実験条件 $Re_{\tau 0} = 300$ の場合, β_0 の値の増加にともない再付着領域の中心は下流方向へ, 第二のはく離領域の中心は上流方向へ移動し, さらに再付着領域と第二のはく離領域の幅は狭くなる。

参考文献

- [1] N. Kasagi and A. Matsunaga, Three-dimensional particle-tracking velocimetry measurement of turbulence static and energy budget in a backward-facing step flow, *int. J. Heat and Fluid Flow*, **16**, pp.477-485(1995)
- [2] 仲條一郎, 本阿弥真治, 後方ステップ流れのはく離・再付着現象に関する研究 (第 1 報, 再付着流れに及ぼす流路曲率の影響), 日本機械学会論文集 (B 編) **50**-460, pp.3159-3165(1984)
- [3] J. Kim, S. J. Kline, and J. Johnston, Investigation of Reattaching Turbulent Shear Flow; Flow Over a Backward-Facing Step, *Trans. ASME, Journal of Fluid Engineering*, **102**, pp.302-308(1980)