

バックステップ乱流の実験的研究

奥村 将也 (12116628)

指導教官 森西 洋平 助教授

1 緒言

バックステップ乱流は、ステップ部で流路が急拡大し、はく離と再付着を伴う流れである。一般にはく離-再付着過程は、はく離せん断層とその近隣の流れに特徴付けられる。バックステップ乱流では、はく離点がステップ部に固定されるため、はく離点の移動による複雑さを考える必要がなくなる。そのため、この流れ場ははく離-再付着過程の基本的な流れとして、多くの実験的研究 [1][2][3] がなされてきた。

バックステップ乱流に関する従来の研究は、静止壁間チャンネル流れの一方の壁が下流に向けて急拡大するものであった。これらの研究では、乱流の場合再付着距離がステップ高さの7倍程度であること、乱流強度とせん断応力が再付着点付近で最大値に達することなどが明らかにされているが、圧力勾配が再付着距離に及ぼす影響、再付着以降の速度の回復過程、大規模渦構造、せん断層の挙動等については十分に理解されていない。

そこで本研究では、特に圧力勾配が再付着距離に及ぼす影響を調べるためクエット型バックステップ乱流の実験を行う。さらに、再付着以降の回復過程についても明らかにしていきたい。本年度はバックステップ乱流の実験的研究を開始するにあたって実験装置を設計、製作した。実験装置完成後、壁面静圧の測定およびタフトによる可視化を行った。

2 実験装置の設計

Fig.1に実験装置の概略図を示す。図の下部にあるベルトは、移動平板壁となる。ベルトはインバータを介した可変速モータによって駆動される。この装置をクエット装置と呼ぶ。バックステップ乱流の実験では、移動平板壁に平行にステップ付きの静止壁（上壁）と上壁を支える側壁を設置し、流路は、移動平板壁、上壁および側壁に囲まれた領域である。本年度、設計および製作したのは上壁および側壁である。さらに、流路に作動流体である空気を吹き込むための送風機として、可変モータ、ディフューザおよび2次元ノズル等が流路入り口に取り付けてある。

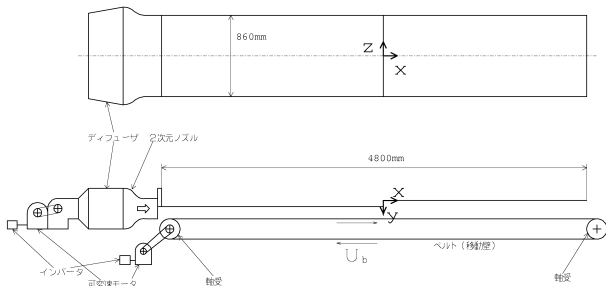


Fig. 1: Experimental apparatus

ステップ部における流路拡大比を従来の研究に合わせて1.5とした。具体的に本実験装置では、ステップ上流の流路高さ $H_1 = 30$ mm, ステップ下流の流路高さ $H_2 = 45$ mm とした。したがって、ステップ高さは $h = 15$ mm となる。また、バックステップ乱流の実験を行うにあたって装置に必要なとされる要件として以下の4つが考えられる。

- 平均流が2次元であること
- ステップ上流で流れが十分に発達していること
- ステップ下流で流れが十分に回復するだけの距離を持つこと
- 再付着点が特定できること

この要件を満たすために決定された実験装置の重要なパラメータを Table1 に示す。この表には従来の実験 [1][2] の諸元も合わせて示す。ここで、 L_1 はステップ上流の流路長さ 2500 mm, L_2 はステップ下流の流路長さ 2300 mm そして W は流路幅 860 mm である。

Table 1: 重要なパラメータ

	本研究	Kim et al.	笠木ら
H_1/H_2	1.5	1.5	1.504
L_1/H_1	83	4	81.18
W/H_1	29	24	9.84
L_2/H_2	51	20.4	13.9
W/H_2	19	16	6.54

平均流を2次元にするためには、流路高さ H_1, H_2 に対して流路幅 W を十分大きくする必要がある。本実験装置では、 $W/H_1 = 29$, $W/H_2 = 19$ と従来の研究に比べて遜色のないものになっている。

ステップ上流で流れを完全発達とするためには、助走区間を十分長く取る必要がある。平板クエット乱流に対して助走区間は流路高さの60倍程度必要とされている [4]。本実験装置では $L_1/H_1 = 83$ となるので十分な助走区間が確保できる。

ステップから流路出口までの距離については、再付着した流れが十分に回復するだけの距離を確保したい。従来の研究では $L_2/H_2 = 10 \sim 20$ 程度であったが、本実験装置では $L_2/H_2 = 51$ とし従来の値よりも十分に大きくした。

再付着点の特定方法として、流れの可視化を用いる。タフト法等で可視化を行うために、上壁およびステップ前後の側壁をアクリル製にした。

3 実験条件

本実験ではステップ上流での流れを純粋ポアズイユ乱流および純粋クエット乱流とした。これらの流れ場をそれぞれポアズイユ型乱流およびクエット型乱流と呼ぶ。また、各流れ場の摩擦レイノルズ数はおよそ150, 300である。ここで摩擦レイノルズ数は、ステップ上流の流路高さの半値 $H_1/2$ [mm], 動粘度 ν [m^2/s] および摩擦速度 $u_\tau = (\tau_w/\rho)^{1/2}$ [m/s] を用いて、 $Re_\tau = (H_1/2)u_\tau/\nu$ と定義される。ここで、 τ_w [N/m^2] はステップ上流における壁面せん断応力および ρ [kg/m^3] は作動流体である空気の密度である。

座標原点を Fig.1 に示すようにステップ直後の静止壁側にとる。流れ方向に x 軸、静止壁から移動壁に向かって y 軸を取る。

ステップ直後 ($x/h = 0 \sim 20$) では, $x/h = 0 \sim 5, 10 \sim 20$ の間は, h 間隔で壁面静圧の測定を行い, 再付着点があると予想される $x/h = 5 \sim 10$ の間は, $h/2$ の間隔で壁面静圧の測定を行う. 上述以外の領域では $20h$ 間隔で壁面静圧の測定を行う. 可視化実験におけるタフトをステップ直後における壁面静圧の測定と同じ位置で設ける.

4 実験結果および考察

4.1 壁面静圧の測定

Fig.2 に $Re_\tau = 300$ の壁面静圧測定の測定結果を示す. 縦軸は壁面静圧の測定値をステップ下流における最小値で引いたものである. また, 横軸は x を h で無次元化したものである. また, $x/h = 0 \sim 20$ における壁面静圧の測定結果を拡大した図も示す.

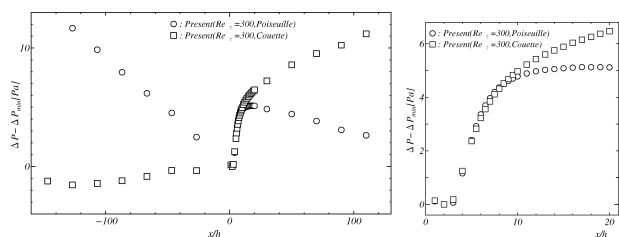


Fig.2: 壁面静圧測定結果

ステップ上流では, ポアズイユ型乱流では順圧力勾配, クエット型乱流では圧力勾配 0 となっていることが確認できる. ただし, クエット型乱流では $x/h = -50$ 程度から, 圧力勾配が 0 となっている. この $x/h = -50$ という位置は流路入り口から H_1 の 60 倍程度の位置である. 先述したようにクエット型チャネル乱流の助走区間は流路高さの 60 倍程度なので, この結果はこのことに一致している. したがって十分な助走区間が確保できたといえる.

ステップ直後 $x/h = 2$ までは, 壁面静圧はほとんど変化しない. その後, 流路の拡大に伴い流体は逆圧を受ける. このことはポアズイユ型乱流およびクエット型乱流で同じである. また, 最小値をそろえると両者による壁面静圧の大きさの違いはほとんどないことが分かる.

ステップから十分下流では, ポアズイユ型乱流では負で一定の圧力勾配であることが分かる. これより, ポアズイユ型乱流の速度回復は順圧の状態であるといえる. 一方クエット型乱流では正で一定の圧力勾配である. したがって, クエット型乱流の速度回復は逆圧の状態であるといえる.

摩擦レイノルズ数による違いを考察するために Fig.3 にポアズイユ型乱流の結果を集めたものと, クエット型乱流の結果を集めたものを示す. 縦軸は $\Delta P - \Delta P_{min}$ を τ_w で無次元化したものである. この図より摩擦レイノルズ数が高いほど壁面静圧の増加の割合も大きくなることが分かる.

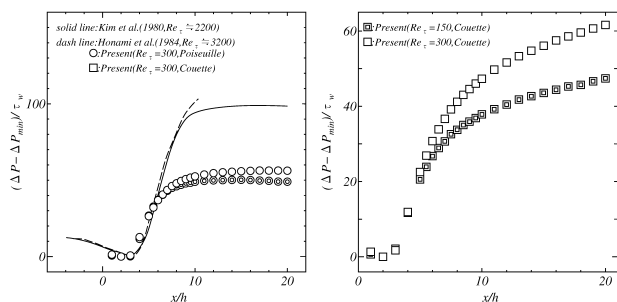


Fig.3: レイノルズ数による比較

4.2 可視化実験

可視化手法はタフト法である. タフトは, 直径 0.18 mm の絹糸で, 上壁から約 8 mm 垂れ下がっている. このため, タフトの先端がはく離している領域からはみ出してしまうため, 今回のタフト法による可視化実験からは再付着点は特定できなかった.

$x/h = 4$ までのタフトは主流とは逆方向に傾いている. $x/h = 5$ 以降のタフトは主流方向に傾いていることが確認できた. $Re_\tau = 150$ では $x/h = 8$ 程度までのタフトが主流とは逆方向に傾くことがあることが確認された. このことより, はく離による再循環領域は時間的に変動しているものと考えられる. このことは, Kim ら^[1]の実験でも確認されており, 再付着点が存在する領域を再付着域と呼んでいた.

$x/h = 5 \sim 10$ におけるタフトの傾き角がポアズイユ型乱流の場合よりもクエット型乱流の方が小さいことが $Re_\tau = 150$ で確認された. これは, クエット型乱流の場合, $x/h = 5 \sim 10$ の領域でタフトは主流の影響をポアズイユ型乱流の場合よりも受けていないためと考えられる. このことより, 再付着点はクエット型乱流の方がポアズイユ型乱流よりも下流にあると予測できる.

5 結言

本年度行った, 壁面静圧の測定および可視化実験から以下の結果が得られた.

- 今回の壁面静圧の測定より, ポアズイユ型乱流での速度の回復は順圧の状態, クエット型乱流での速度の回復は逆圧の状態であること.
- 壁面静圧の測定より, 壁面静圧はレイノルズ数が大きければ流路拡大による壁面圧力の増大の割合も大きくなること.
- 可視化実験より, 再付着域の存在が確認できたこと.
- 可視化実験より, ステップ上流の圧力勾配が再付着距離に影響をおよぼしていると予測できたこと.

また, 今後の課題として以下のものが挙げられる.

- 装置の要件がすべて満足されているかを確認すること.
- 再付着点の特定方法を確立すること.
- 代表断面での流速測定
- 無次元パラメータと実験での設定値との対応を明らかにする.

参考文献

- [1] J. Kim, S. J. Kline, J. P. Johnston: Trans. ASME, J. Fluid Eng., 102(1980), pp302-308.
- [2] Kasagi and Matunaga: J. Heat and Fluid Flow, 16(1995), pp477-485.
- [3] 仲條一郎, 本阿弥真也: 機論 (B 編) 50-460(1984), pp3159-3165
- [4] 岩田裕司: 名古屋工業大学博士論文, (1989)