

琉球大学学術リポジトリ

はく離・再付着流れのアクティブ制御

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2007-09-16 キーワード (Ja): キーワード (En): Backward facing step, Turbulent shear flow, Separation, Reattachment, Active flow control 作成者: 照屋, 功, 山里, 栄昭, 伊良部, 邦夫, 甲斐, 伸太郎, 高屋, 英司, Teruya, Isao, Yamazato, Eisho, Irabu, Kunio, Kai, Shintarou, Takaya, Eiji メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/1995

はく離・再付着流れのアクティブ制御

照屋 功* 山里 栄 昭* 伊良部 邦 夫*
甲 斐 伸太郎** 高屋 英 司**

Active Control in a Reattaching Separated Flow Field

Isao TERUYA*, Eisho YAMAZATO*, Kunio IRABU*,
Shintarou KAI** and Eiji TAKAYA**

Abstract

The process of the separated shear layer and the reattachment is a key feature of many engineering flow problems. Controlling reattachment of a turbulent shear layer is an important process in wide variety of engineering systems. In this paper we investigated an active control using the rotating rod placed near the step inlet. The purpose of the study was to investigate the effect of the reattachment length and the pressure recovery on the excitation by the rotating rod in the flow field.

The results are as follows, (1)The excitation of the shear layer by rotating the rod enhances the growth of the separated shear layer and increases the entrainment. Thus the reattachment length is decreased. (2)When the reattachment length is normalized by the width of reattachment region, the data are collapsed without the influence of the disturbance. In other words, flow field in the reattachment region is unchanged even if the disturbance is introduced into the flow field in the reattachment region. (3)The reattachment length also decreases for the circular rod by the rotation of the rod and counter rotation of the rod is more effective than the positive rotation. (4) In the case of rectangular rod rotation, the reattachment length is reduced a maximum of 33 percent and the most effectiveness is shown at 2000rpm. The degree of the disturbance and the frequency are considered to be the factors that decrease the reattachment length. (5)By controlling the flow field with the rod rotation, the decrease of the pressure recovery is comparatively small, so the fluid loss is small.

Key Words : Backward facing step, Turbulent shear flow, Separation, Reattachment, Active flow control

受理 : 1995年 5 月12日

学内発表 : 1995年 5 月17日

* 琉球大学工学部機械システム工学科
Dept. of Mechanical Systems Fac. of Eng.

** 琉球大学大学院工学研究科機械工学専攻
Graduate Student, Mechanical Eng.

1. 諸言

流体を取り扱う機器・装置では、流れのはく離・再付着が発生することがある。流れにはく離が起こると、流体機器において効率の低下、圧力と流量の変動、振動をもたらす場合があり、その発生を抑えることが重要である。また反対に、再付着領域での高い熱伝達や、はく離せん断層における混合作用を利用している装置機器もある。

そこで、はく離した流れの再付着点長さを制御し、減少あるいは増加させることは工学的応用の面から重要である。これまで、はく離・再付着流れの制御について様々な研究がされている。受動的制御の例として、馬淵ら¹⁾は後方ステップに連続したV字形切抜欠きを設けた場合を考え、切欠き角度による再付着流れ場の変化を調べたり、照屋ら²⁾は後方ステップ流れ場においてステップ入口壁面近傍にロッドを設置し、再付着現象におよぼす影響を調べている。また能動的制御の例として、Roosら³⁾は後方ステップの角の上流側の部分を薄い弾性板で構成しこれを磁石で振動させてか

く乱を与えたり、Bhattacharjeeら⁴⁾は、後方ステップ流れにスピーカによる音波を与えて、再付着流れ場の応答を調べている。

本論文では、二次元後方ステップ流れ場を取り上げ、はく離・再付着流れの制御・機構解明の点から再付着流れ場の能動制御を試みる。後方ステップ流れでは、流路拡大比をはじめ、ステップへの流入流れの状態など、はく離・再付着現象に影響をおよぼす多くの因子が指摘されているが、本報では、ステップ流入流れの乱流境界層に周期的かく乱を与え、かく乱周波数およびかく乱の大きさに注目する。かく乱源として、ステップ上流部に溝を設け、回転ロッド(円形断面・矩形断面)を設置した。ロッド回転数を変えることによって、かく乱周波数およびかく乱の大きさを制御し、はく離・再付着現象に及ぼす影響を実験的に考察する。

2 実験装置

本研究では、後方片側ステップの流れ場を対象とする。Fig. 1 に実験装置の概略図を示す。

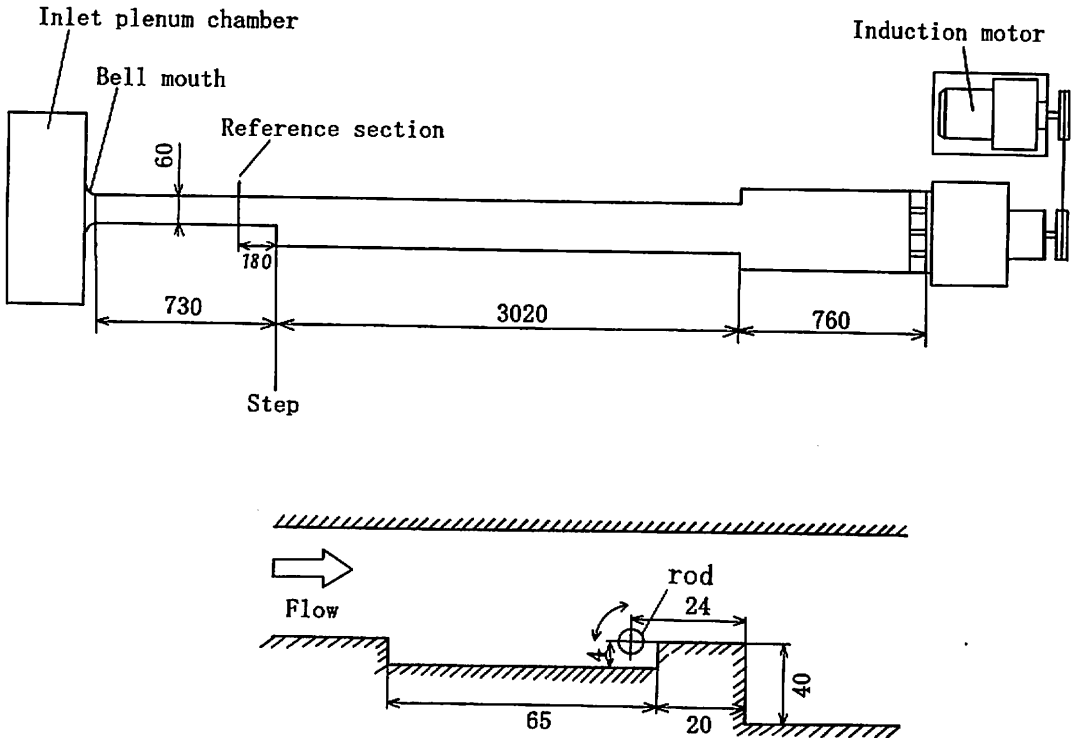


Fig. 1 Schematic view of test equipment

作動流体は空気を用い、吸い込み型の風洞で、流路壁は厚さ10mmの透明アクリル板製である。流体は、ダクト後方に取り付けられた遠心送風機により、ベルマウス及びダクトを通して吸い込まれ、送風機出口より流出される。流れは、風洞入口に設けた金網とベルマウスによって整流され、ダクト後方の整流筒によって送風機による旋回流れの成分が除かれる。またモータ及び送風機の振動を除去するため、送風機吸い込み口とダクト後方はフランジを設けて、ゴム板を巻き付け防振対策をしている。流路幅は240mmであり、ダクト長さは、ステップ上流側で730mm、ステップ下流側で3020mmである。ステップ高さ $H=40\text{mm}$ 、流路拡大比 ER (Expansion Ratio) $=W_2/W_1=1.67$ である。従来、ステップ側の壁面を移動させることができるが、本実験ではステップ高さを一定とした。

座標系は、右手系の直角座標系を採用し、流れ方向を X 軸、スパン方向を Z 軸、両方に垂直になるようにステップ上面から Y 軸を設定した。

ロッドを回転させる際に使用したモータは、ブラシレスDCスピードコントロールモータであり、300~3000rpmの範囲で変速できる。ロッドはベアリングで支持されたジョイントロッドによって挟み込む。ジョイントロッドはカップリングを介して、モータにつながり、回転するようにした。

3 実験方法

基準断面 ($x/W_1 = -3$) における主流速度 U_0 、空気の動粘度係数 ν 及びステップ入口流路幅 W_1 からなるレイノルズ数 Re ($=U_0 \times W_1 / \nu$) を 10^5 で一定になるように U_0 を設定し、実験を行った。

3.1 かく乱の導入方法

鈍頭円柱を用いた再付着流れの能動的制御を扱った木谷ら⁸⁾の結果を基にして、本研究における最も有効なかく乱周波数を試算した。木谷らによると再付着位置が最小値をとるかく乱周波数 f は

$$f \cdot x_R / U_0 \approx 2.55 \quad (1)$$

である。よってこれを基にステップにおける再付着位置が、最小値をとるような周波数を算出した。溝およびロッドを設置しない場合の再付着点距離は、 $x_R/H=7.76$ であった。これを(1)式に代入すると

$$f \cdot 7.76H / U_0 \approx 2.55 \quad (2)$$

となり、主流速度 ($U_0=27\text{m/s}$)、ステップ高さ ($H=40\text{mm}$) を(2)式に代入して、 $f=222\text{Hz}$ を算出した。

かく乱の導入方法は、ステップ位置から20mm上流側の位置に深さ4mmの溝を設け、ステップ位置から24mm、溝の底面から4mmの高さを中心にロッドを設置し、直流モータで回転させる。ロッドの形状は $\phi 4\text{mm}$ の円柱、および前述の周波数 ($f=222\text{Hz}$) を励起させられると考えられる $4 \times 4\text{mm}$ の四角柱を採用する。順回転、逆回転の定義を、Fig. 2に示す。以下、順回転 (Forward) は {F}、逆回転 (Reverse) は {R} と記す。

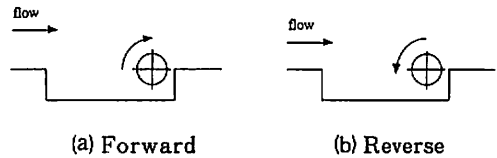


Fig. 2 Definition of revolutionary direction
(a) Forward (b) Reverse

3.2 ステップ入口の速度及び乱れの測定

ステップ入口の速度及び乱れの測定にはI形熱線プローブを使用した。壁近傍では0.05mm間隔で測定した。プローブからの信号は熱線流速計を介し、ローパスフィルタ (カットオフ周波数4.0kHz) を通した後、サンプリング周波数8.3kHzで約8秒間パソコンに取り込んだ。サンプリングしたデータは、パソコンで統計処理を行って時間平均速度 U 及び乱れ強さ Tu を求めた。

3.3 周波数解析

かく乱の周波数分析をするため、上述のI型熱線プローブから得られたデータを解析した。1測定当たり65536個のデータは、ローカルエリアネットワーク (LAN) を介して琉球大学情報センタのワークステーション (WS) に転送した。WSでは、上記のデータを高速フーリエ変換処理 (FFT) を行って、信号処理を行い周波数解析した。

3. 4 順流率の測定

はく離泡内の流れは定常ではなく、流速や方向は時間とともに変化して非定常である。そこで、単位時間内に順流となっている時間割合を順流率と定義する。この順流率分布より時間平均の再付着位置を求めることができる¹⁰⁾。ステップ壁面上の順流率の測定には、サーマルタフトプローブを用いて行った。測定方法は、まず1つの測定位置においてサーマルタフトプローブを順方向に取付け、ローパスフィルタ(カットオフ周波数2.0kHz)を通した後、1kHzで約1分間サンプリングした。今度は、同位置において逆方向に取り付けサンプリングする。次の測定位置に移る前に、約30秒間無風状態にした。得られたデータからパーソナルコンピュータで、順流率を求める。

3. 5 壁面圧力の測定

壁面圧力は基準断面($x/W_1 = -3$)壁面圧力孔とステップ側壁面に設けられた圧力孔との圧力差を精密微差圧計により測定した。壁面圧力係数 C_p は基準断面での主流の動圧で無次元化した。

4 実験結果及び考察

本実験におけるステップ流入流れは基準断面において主流を有する乱流境界層であり、境界層パラメータは、排除厚さ1.4mm、運動量厚さ1.0mm、形状係数1.4である。2種類のロッドを回転させ、得られたデータから時間平均速度分布と乱れ強さ分布を示し、また同様に周波数分布を示して、かく乱の性質を考察する。そして、順流率分布より得られた再付着点距離、及び圧力回復の面から、再付着現象に及ぼす影響を考える。

4. 1 ステップ入口の時間平均速度と乱れ強さ分布

ステップ入口における角柱・逆回転の x 方向時間平均速度分布をFig. 3に示す。縦軸は壁面からの距離 y をステップ高さ H で無次元化した y/H であり、横軸は x 方向時間平均速度 U を主流速度 U_0 で無次元化した U/U_0 である。ロッド回転により壁面近傍でいくぶん速度欠損が生じている。

次にステップ入口での乱れ強さ Tu の分布をFig. 4に示す。縦軸は変動速度成分の2乗平均平方根を主流速度 U_0 で無次元化した乱れ強さ Tu であり、横軸は壁面からの距離 y/H である。回転を上げていくに従い、

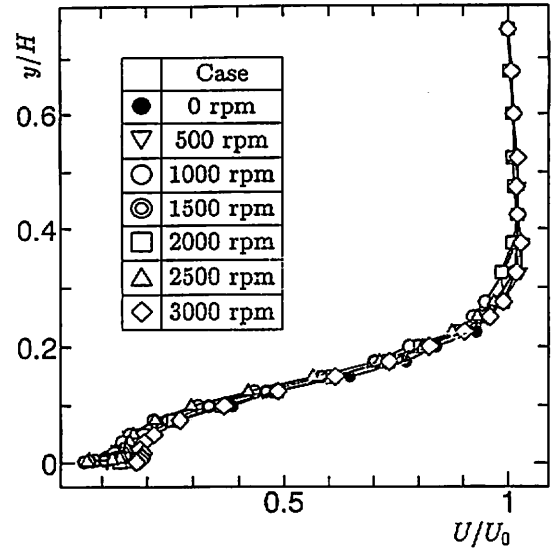


Fig. 3 Time mean velocity profiles at the separation point (Rectangular rod { R })

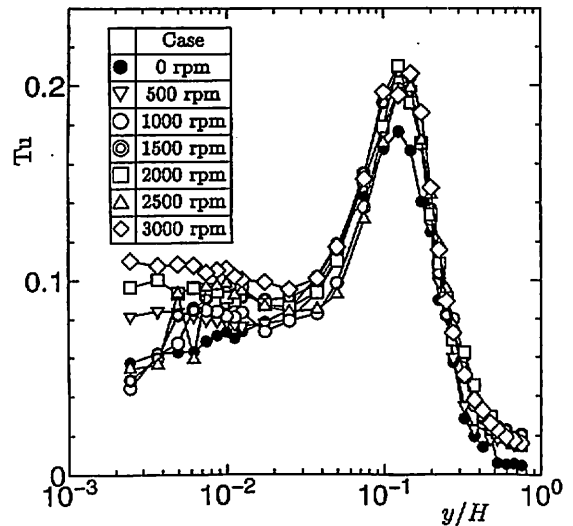


Fig. 4 Turbulence intensity profiles at the separation point (Rectangular rod { R })

無回転と比べて壁面近傍および、ロッドのはく離せん断層位置である $y/H \sim 10^{-1}$ の乱れ強さ Tu は大きくなっている。

4. 2 かく乱の周波数成分

ステップ入口における角柱・逆回転の速度信号を

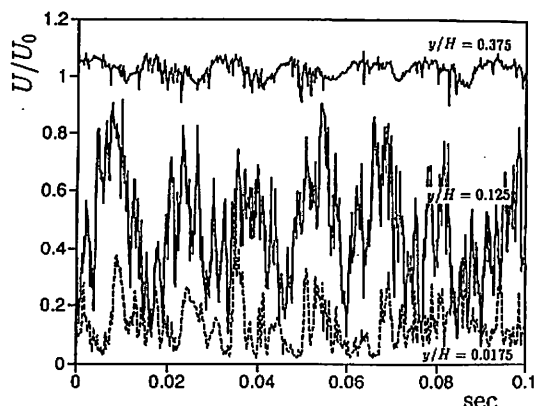


Fig. 5 Velocity signals at the separation point
(Rectangular rod { F 1000rpm })

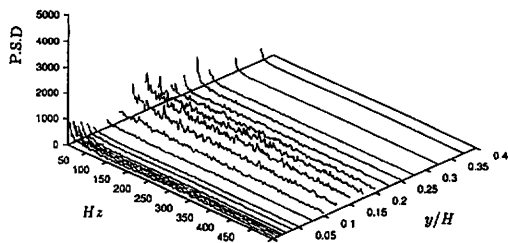
Fig. 5 に示す。縦軸は、瞬時速度 U/U_0 、横軸は時間 sec で表す。 $y/H=0.375$ では、正弦波かく乱を与えているが、壁近くになると境界層内の乱れが重畳して、正弦波かく乱になっていない。

次に変動速度のパワースペクトル分布を Fig. 6 に示す。X軸に周波数 Hz, Y軸に壁面からの距離 y をステップ高さ H で無次元化した y/H , Z軸に P.S.D (Power Spectral Density) で表す。(a)を見ると無回転ではどの周波数も励起されていない。(b) (c)では回転させると円柱の場合、回転数に一致した周波数成分が励起されている。角柱の場合も、回転数に一致した周波数成分が励起され、またその約4倍の周波数も励起されている。また円柱と違い、全体的に見たP.S.Dが大きいことがわかる。

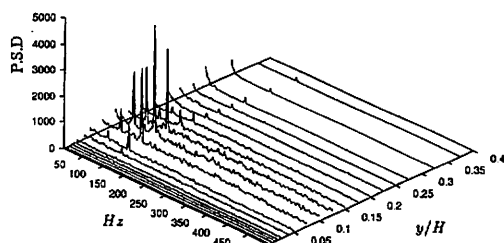
角柱回転によるかく乱の性質をより考察するため、比較的乱れ強さの大きい位置におけるパワースペクトル分布を Fig. 7 に示す。角柱の場合、実回転と実回転の約4倍の周波数でP.S.Dを励起している。2000 rpmでは、実回転の約4倍の周波数でP.S.Dが強く励起されているが、逆に3000rpmではそのP.S.Dが弱くなっている。これは、回転数を上げすぎると、流体がロッドにまとわりついて角柱というロッドの形状が、流れ場にかく乱を与えきれないものと考えられる。

4. 3 順流率分布

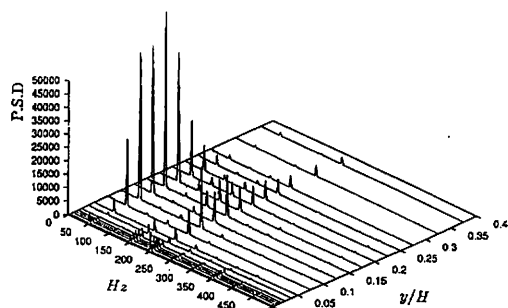
順流率 γ の例として(a)円柱 (順回転), (b)角柱 (逆回転) について Fig. 8 に示す。順流率が0.5となる位



(a) Circular rod { 0 rpm }



(b) Circular rod { F 3000rpm }

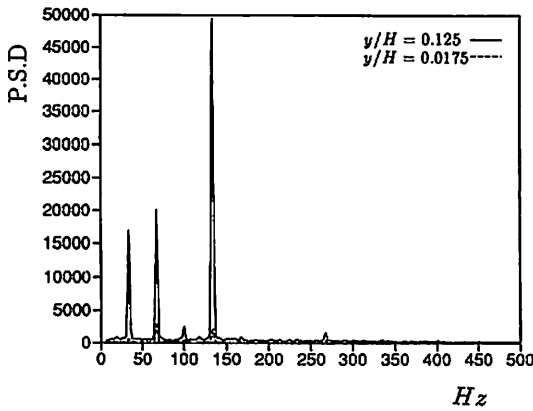


(c) Rectangular rod { R 3000rpm }

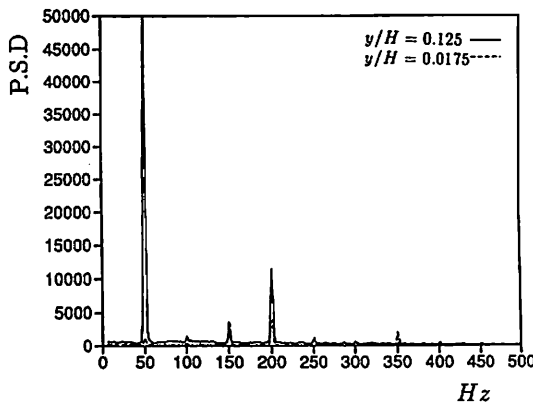
Fig. 6 Power spectrum density of velocity fluctuation

置を、時間平均の再付着点とし、はく離点から再付着点までの距離を x_R と表す。(a)(b)ともロッド回転を上げていくに従い、再付着点距離は減少している。これは、ステップ入口にかく乱を与えることにより、はく離せん断層の発達を促進され、連行流量が増加するためである¹⁾。

次に Fig. 8 (b) に示した順流率分布を再付着点領域の幅 Δx_R で無次元化した順流率分布を Fig. 9 に示す。ここで再付着領域の幅 Δx_R は γ が0.1から0.9までの値をとる x 方向距離と定義したもので、この領域を通過する渦スケールに比例する²⁾。回転ロッドによるかく



(a) Rectangular rod { R 2000rpm }



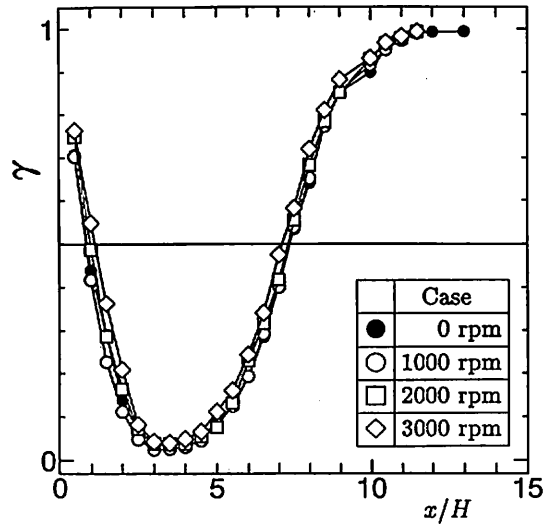
(b) Rectangular rod { R 3000rpm }

Fig. 7 Power spectrum density of velocity fluctuation

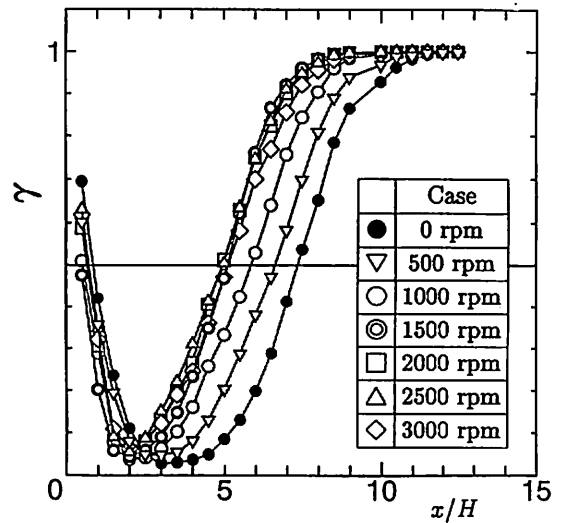
- (a) Rectangular rod { R 2000rpm }
- (b) Rectangular rod { R 3000rpm }

乱の有無に関係なく再付着領域の流れはほぼ同一曲線上に集約している。これは、かく乱を与えた場合でも再付着領域の流れはその領域を通過する渦塊の運動によって支配され、流れ場は本質的に変わらないことを示している。

次に再付着領域の幅 $\Delta x_r/H$ と再付着点距離 x_r/H の関係をFig.10に示す。かく乱を与えることにより、再付着点距離は約 $2.5H$ の範囲で減少しているのに対し、再付着領域の幅は約 $1.0H$ と変化幅が小さい。つまり、再付着点距離の減少は、再付着領域よりもはく離直後の領域に起因するものと考えられる。



(a) Circular rod { F }



(b) Rectangular rod { R }

Fig. 8 Distribution of forward flow fraction

- (a) Circular rod { F }
- (b) Rectangular rod { R }

4. 4 かく乱周波数と再付着点距離の関係

ロッド回転数と再付着点距離の関係をFig.11に示す。縦軸に再付着点距離 x_r/H 、横軸に回転数rpmを表す。単にロッドを設置した場合でも再付着点距離は減少している。円柱を回転させた場合、回転を上げ

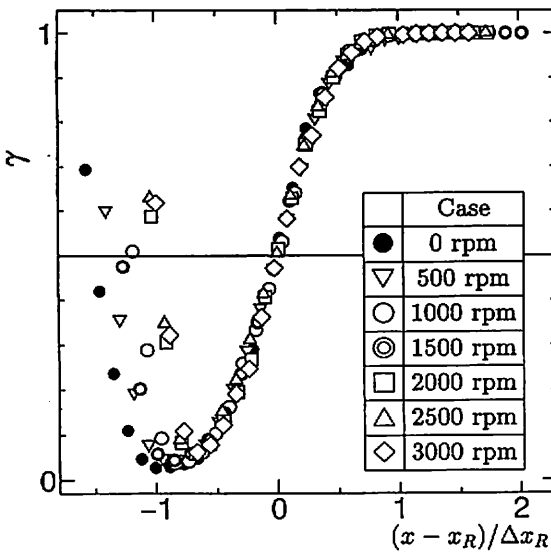


Fig. 9 Distribution of forward flow fraction versus distance normalized by length of reattachment region (Rectangular rod { R })

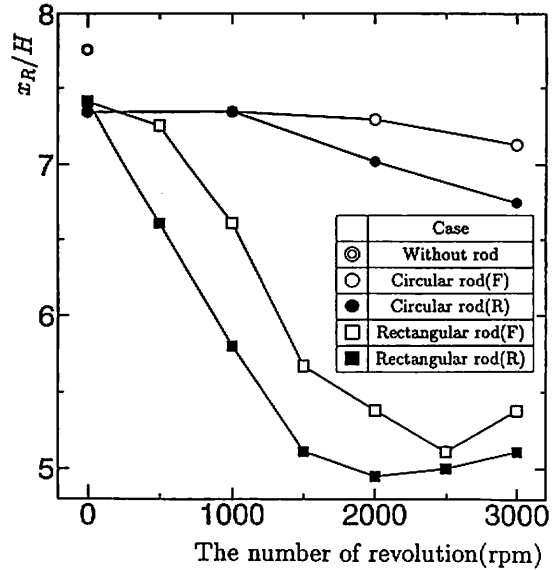


Fig. 11 Distribution of reattachment region versus the number of revolutions

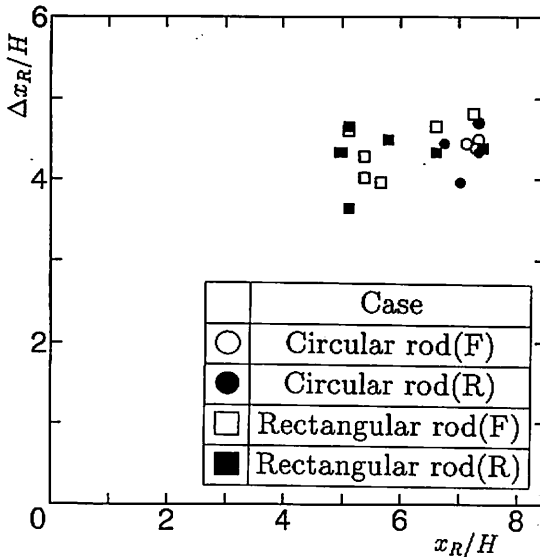


Fig. 10 Distribution of distance normalized by length of reattachment region versus reattachment region

着点距離をさらに短くすることができた。円柱同様、逆回転の方が影響が強く、2000rpmの場合、 $x_R/H=4.95$ であり、無回転の場合と比較して33%も短くすることができた。しかし、3000rpmではFig. 7 (b)で示したようにかく乱周波数およびかく乱強さを与えることができず、再付着点距離を減少することはできなかった。2000~2500rpmのかく乱周波数 (167~208Hz) およびかく乱の大きさが最も有効であると考えられる。このかく乱周波数は(2)式から求めた周波数とほぼ一致している。

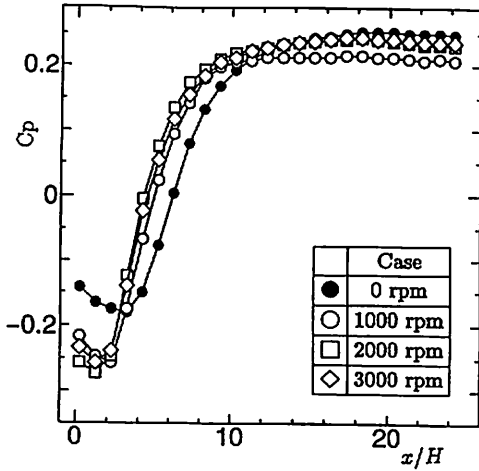
4. 5 かく乱による壁面圧力分布

角柱の壁面圧力係数 C_p の分布をFig. 12に示す。再付着点が上流側に移動していることが再確認できる。ロッド回転によって、流れ場にかく乱を与えると、順逆回転とも無回転の場合よりも C_p の極小値は小さくなっている。また圧力が回復する位置もステップ位置に近くなっている。つまり、はく離泡内の圧力減少が再付着点距離を減少させている。無回転の場合に対して、ロッド回転という流れ場の制御に伴う圧力回復の減少は比較的小さく流体損失は小さい。

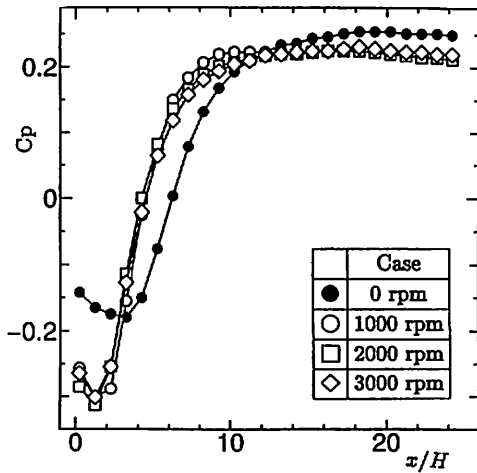
ていくと、再付着点距離は減少している。また逆回転の方がより減少している。角柱を回転させた場合には、回転数を上げることによる影響は顕著にみられ、再付

5 結論

はく離・再付着流れの特性を明らかにし、制御する



(a) Rectangular rod { F }



(b) Rectangular rod { R }

Fig.12 Distribution of wall-pressure coefficient

(a) Rectangular rod { F }

(b) Rectangular rod { R }

ことは工学的に重要である。ステップ流入流れの境界層に設置したロッドを回転させることにより、与えた

かく乱が、再付着流れ及び圧力回復率に与える影響について調べた。本研究で得られた結果を以下に示す。

1. ロッド回転によりかく乱を与えると、はく離せん断層の発達が促進され、進行流量が増加し再付着点距離は減少している。つまり、ロッド回転により再付着点距離は制御されている。
2. 再付着点距離 x_R を再付着領域の幅 Δx_R で無次元化すれば、再付着領域の流れはかく乱の有無に関係なく順流率分布がほぼ同一曲線上に集約している。つまりかく乱を導入しても再付着領域の流れ場は本質的に変わらない。
3. 円柱の回転によってかく乱を与えると、再付着点距離は減少している。回転方向で見てみると、逆回転の方がより減少している。
4. 角柱の回転によってかく乱を与えると、最高で約33%も再付着点距離を縮小させることができ、2000rpmでその有効性を示すことができた。回転方向で見てみると、逆回転の方がより減少している。かく乱の大きさおよび周波数が再付着点距離減少の因子であることが考えられる。
5. ロッド回転という流れ場の制御に伴う、圧力回復の減少は比較的小さく、流体損失は小さい。

参考文献

- (1) 馬淵・他3名, 機論, 52-473, B (1986), 102.
- (2) 照屋・他3名, 機論, No.958-1 (1995), 196.
- (3) Roos, F.W and Kegelmann, J.T., AIAA J., 24-12 (1986), 623.
- (4) Bhattacharjee, S., Scheelke, B. and Troutt, T.R., AIAA J., 24-4 (1986), 1956.
- (5) 木谷・清水, 機論, 58-554, B (1992), 92.
- (6) Eaton, J.K., Jeans, A.H., Ashjaee, J. and Johnston, J.P., Trans. ASME, J.Fluid Eng., 101(1979), 364.
- (7) 照屋・他3名, 機論, No.930-9 (1993), 53.
- (8) 木谷・佐々木・有江, 機論, 50-452, B (1984), 967.