

周期的外乱によるバックステップ流れの制御

吉岡修哉 (慶大院) 小尾晋之介 (慶大理工) 益田重明 (慶大理工)

Control of separated flow over a backward-facing step by periodic perturbation

S. Yoshioka, S. Obi and S. Masuda

Department of Mechanical Engineering, Keio University

ABSTRACT

The effect of periodic perturbation on the reattachment promotion has been experimentally investigated. A turbulent separated flow over a backward-facing step is chosen for a test case where periodic perturbation is applied from its step edge. When perturbed by the most effective frequency on the reattachment promotion, the Reynolds stress is remarkably increased in the reattachment region. This increase in Reynolds stress is realized by *indirect* effect of applied perturbation. The details of this effect is discussed in this paper.

Key Words: Flow Control, Separation, Backward-facing Step, Turbulent Flow, Shear Flow, Unsteady Flow, PIV

1. 緒論

はく離流れの再付着制御には、せん断層に対し周期的な外乱を与えることが有効である⁽¹⁾。著者らはこれまでにバックステップ流れをテストケースとし、周期的外乱導入による再付着促進のメカニズムについて検討してきた。その結果、周期的外乱はステップ後流のせん断層内に大規模な渦運動を導入すること、およびこの渦運動がせん断層内のレイノルズ応力を増加させ、再付着が促進されていることを明らかにした⁽²⁻⁵⁾。

一方、与える外乱の周波数には、その再付着促進効果が最大となる最適周波数が存在することが知られているが⁽⁶⁾、その要因は明らかにされていない。そこで本報では、周期的外乱がもたらす運動量輸送効果を、周期運動そのものによる直接効果と、それにより新たに生み出される乱流運動による間接効果に分けて評価し、それに基づいて最適周波数の存在要因について議論する。

2. 実験装置及び速度計測

実験装置は前報⁽³⁻⁵⁾にて用いた回流水槽とテストセクションをそのまま使用した。テストセクション(図1)は、ステップ高さ $H=20\text{mm}$ 、拡大比1.5、スパン $12H$ の2次元バックステップで構成される。 H と入口チャンネル部中央流速 U_c に基づくレイノルズ数は $1800 \leq Re \leq 5500$ と変化させた。周期的外乱は、ステップ端部にスパン全域にわたり設けた幅1mmのスリットから、流れに対し45度の角度で、吹き出し速度 v_e が以下に示す式(1)を満たすよう与えた。

$$v_e = V_e \sin(2\pi f_e t) = V_e \sin \phi \quad (1)$$

ここで、 V_e は速度振幅、 f_e は外乱周波数、 ϕ は位相角である。速度振幅は $V_e=0.30U_c$ に固定した。座標系は、ステップ端中央を原点とし、流れ方向に x 、

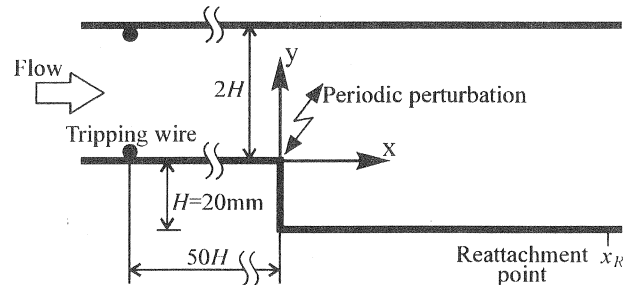


図1 テストセクション

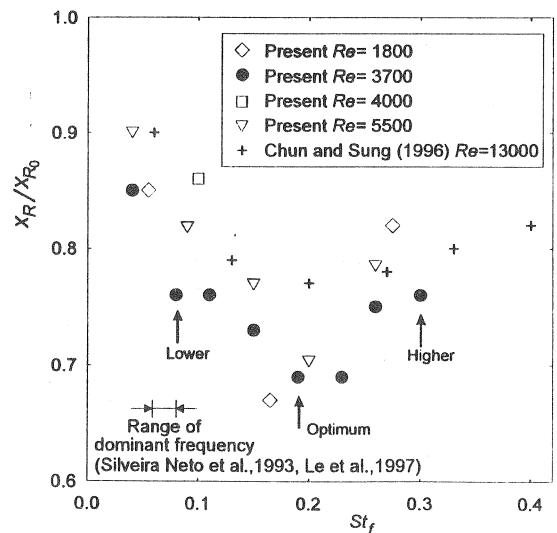


図2 外乱周波数と再付着距離

対向壁面方向に y 、スパン方向に z とした。入口流入条件は、完全発達した乱流チャンネル流れである⁽⁴⁾。

速度計測には、自作の2次元粒子画像流速計(PIV)を使用した。これにより、テストセクション内の x - y 及び x - z 断面の速度分布を計測した。計測手法の詳細

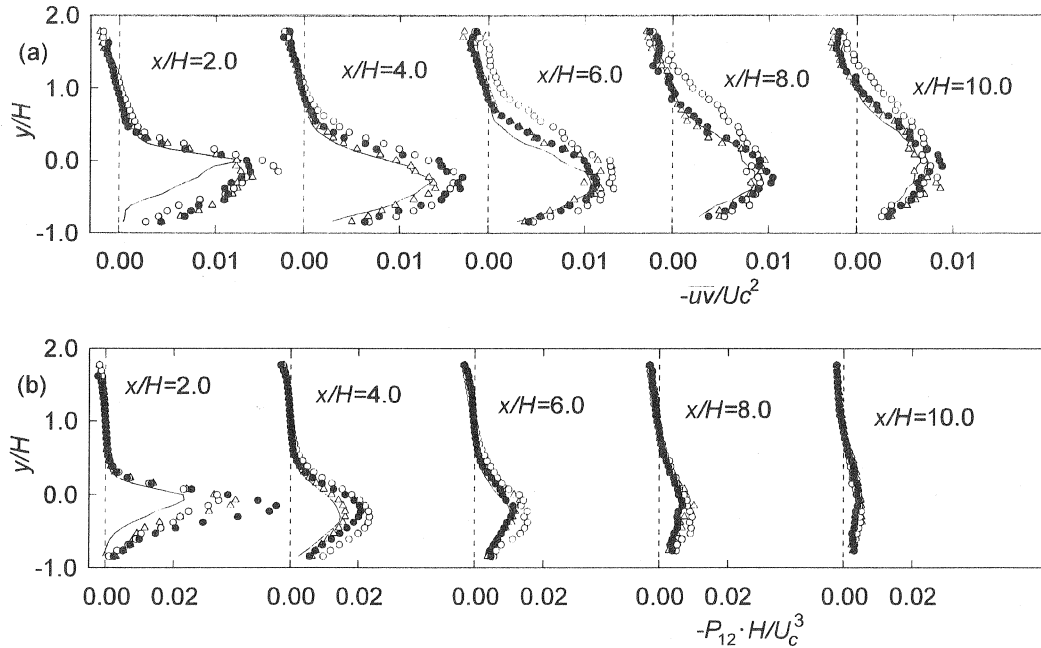


図3 外乱による運動量輸送の促進効果 (a) レイノルズ応力分布, (b) レイノルズ応力生成率分布:
 — 外乱なし: ○: $St=0.08$: ●: $St=0.19$: △: $St=0.30$.

は、前報^(3,4)と同様である。

3. 周期的外乱による再付着の促進効果

図2に、周期的外乱の周波数と再付着距離の関係を示す。縦軸は再付着距離 x_R を、外乱を与えない状態の再付着距離 x_{R0} で正規化した値を、横軸は無次元周波数であるストロハル数 $St (=f_c H/U_c)$ を示す。図からわかるよう、再付着距離には外乱周波数依存性があり、レイノルズ数によらず $St \sim 0.2$ 付近に最も再付着が促進される最適周波数が存在する。比較のために示したChun and Sung⁽⁶⁾の結果にも同様の傾向が見られるが、本実験の方が高い制御効果を示し、最大で約30%の再付着距離の短縮を得ている。この最適周波数は、再付着領域における速度変動の卓越周波数^(7,8)のほぼ2倍となっている。

次に、ステップ後流のレイノルズ応分布について検討する。以降の議論は $Re=3700$ の場合を対象とする。図3(a)に、最も再付着が促進された $St=0.19$ 及びその周囲の周波数である $St=0.08$, 0.30 の3種類の周波数時、及び外乱を与えない場合におけるレイノルズ応力を示す。ステップ直後の $x/H=2.0$ では、外乱導入によるレイノルズ応力の増加がせん断層内に見られるが、外乱周波数による増加量の差異は見られない。しかしながらより下流では、外乱周波数によりレイノルズ応力の増加量に差が現れる。再付着領域の $x/H=4.0$ では、最適周波数の $St=0.19$ の場合が最も大きな増加を示し、低い周波数の $St=0.08$ がそれに次ぐ。一方、高い周波数である $St=0.30$ では、実線で示す外乱を与えない場合の分布に近い。さらに下流の $x/H=6.0$ では順序が逆転し、 $St=0.08$ の場合の増加が最も顕著で、 $St=0.19$ がそれに次ぐ。 $x/H=8.0$ より下流のせん断層内では、各周波数間において顕著な

差は見られなくなる。

上記のレイノルズ応力分布から、図2に示した再付着促進効果の周波数依存性について、次のとおり説明することができる。すなわち、最適周波数時には、再付着点より上流の再循環領域内でレイノルズ応力が増加するため、再付着が効果的に促進される。一方、外乱周波数がそれより低いと、レイノルズ応力の増加領域が下流に移動する。ここでは流れは既に再付着しているため、再付着促進効果は減少する。外乱周波数が高いと、レイノルズ応力の増加はステップ直後に限られ、それより後流では外乱の効果は得られなくなる。これは、与えた周期運動の周波数が高いため、比較的上流で減衰してしまうためと考えられる。

この傾向は、レイノルズ応力の生成率分布にも同様に現れている。レイノルズ応力生成率 P は、以下の式で表される。

$$P_{ij} = -u_i u_k \frac{\partial U_j}{\partial x_k} - u_j u_k \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \quad (2)$$

図3(b)に、せん断成分 P_{12} の分布を示す。ステップ直後では最適周波数の $St=0.19$ の場合にせん断層内の生成率が最大となるが、後流に行くに従い、低い周波数である $St=0.08$ の場合の値が増加し、最大となる。一方で、高い周波数の $St=0.30$ の場合には、生成率の増加はステップ直後に限られている。従って、外乱によるレイノルズ応力の増加は、その生成率の増加によりもたらされることが明らかとなった。

以上より、再付着促進効果が外乱周波数に依存し、特に最適周波数が存在する要因について、レイノルズ応力とその生成率分布の変化から説明することができた。

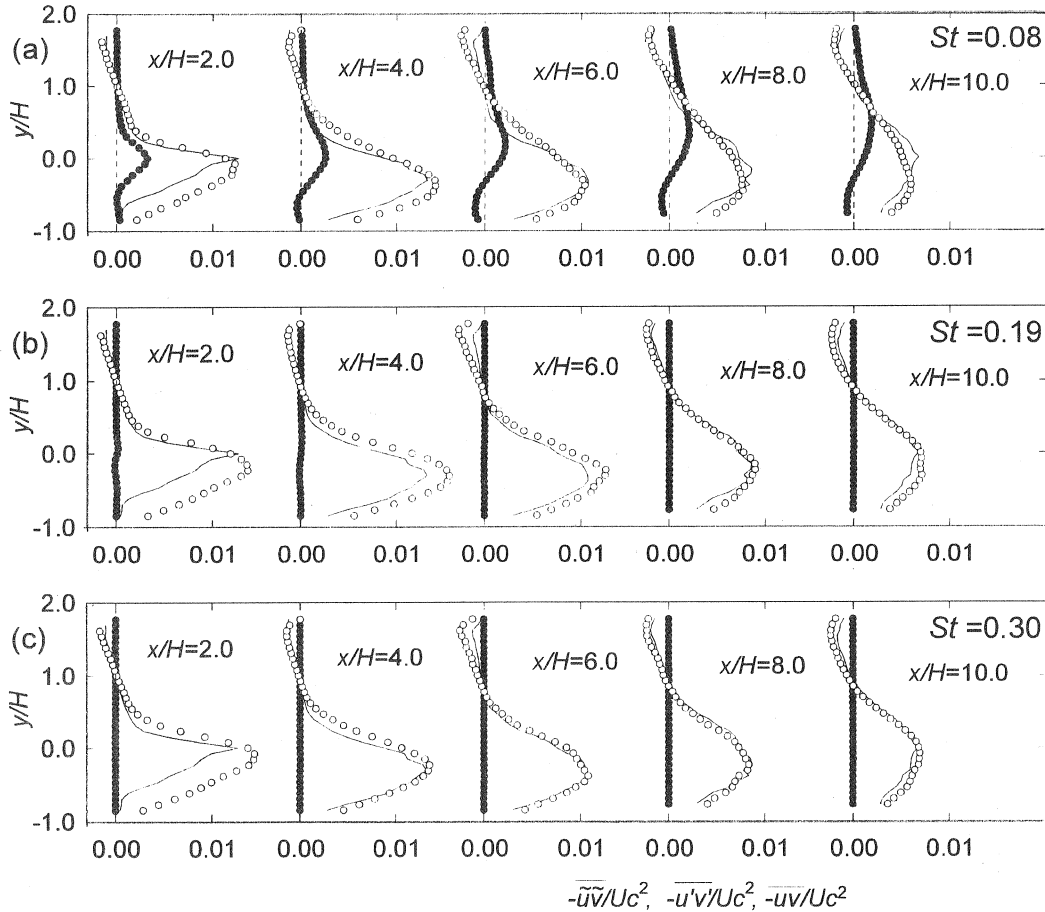


図4 レイノルズ応力各成分の運動量輸送への寄与 (a) $St=0.08$, (b) $St=0.19$, (c) $St=0.30$.
 —, 外乱なし $-\overline{uv}/U_c^2$; ●, 周期変動成分 $-\overline{u'v'}/U_c^2$; ○, 不規則変動成分 $-\overline{u''v''}/U_c^2$.

4. 位相平均速度場

次に、外乱周波数の変化に伴いレイノルズ応力の増加領域が移動する要因について考察する。再付着促進をもたらす運動量輸送の促進効果には、与えた周期的変動そのものによる直接的な寄与と、この周期運動により新たに生み出された乱流運動による間接的な寄与が考えられる。ここでは、その両者の比較を行う（以後、それぞれを直接効果、間接効果と呼ぶ）。まず、瞬時速度 \hat{u}_i を、乱流のレイノルズ分解に倣い、

$$\hat{u}_i = U_i + \tilde{u}_i + u'_i \quad (3)$$

と分解する⁽⁹⁾。ここで、 U_i は時間平均成分、 \tilde{u}_i は外乱周波数と同一周波数で変動する成分、 u'_i はそれ以外の周波数で変動する成分を表す。これにより、直接効果による寄与は $\overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j}$ 、間接効果による寄与は $\overline{u'_i u'_j}$ として表される。以後、それぞれをレイノルズ応力の周期変動成分、不規則変動成分と呼ぶ。

それぞれの量は、以下の方法により求めた。まず、測定した速度データを、それぞれが所属する外乱位相に合わせ、外乱1周期を16等分した幅 $\Delta\phi = \pi/8$ をもつ合計16のエンベロップ群に分割格納した。次に、各

エンベロップ毎に統計平均を行い、 $\phi_n (n=1 \sim 16)$ 毎の位相平均速度 $\langle u_i \rangle_n$ を求めた。これと、 U_i 及び \hat{u}_i を用いて、直接効果と間接効果をそれぞれ以下の式により求めた。

$$\overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j} = \frac{1}{16} \sum_{n=1}^{16} (\langle u_i \rangle_n - U_i) (\langle u_j \rangle_n - U_j) \quad (4)$$

$$\overline{u'_i u'_j} = \frac{1}{16} \sum_{n=1}^{16} (\hat{u}_i - \langle u_i \rangle_n) (\hat{u}_j - \langle u_j \rangle_n) \quad (5)$$

図4に $St=0.08, 0.19, 0.30$ におけるレイノルズ応力の周期変動成分と乱流変動成分の分布を示す。図中には、参考として外乱を与えない場合のレイノルズ応力分布を合わせて示している。3種類の周波数と共に、ステップ後流いずれの計測断面においても、周期変動成分に対して不規則変動成分が大きな値を取っている。このことから、再付着の促進には、外乱導入により新たに生成された乱流運動である間接効果が支配的に寄与していることが理解できる。図4(a), (b)に示す $St=0.08, 0.19$ の場合を比較すると、 $St=0.08$ の場合には速度場全域にわたって直接効果が確認できるのに対し、 $St=0.19$ の場合には、ステップ直後の $x/H=2.0$ においてごくわずかに見られる

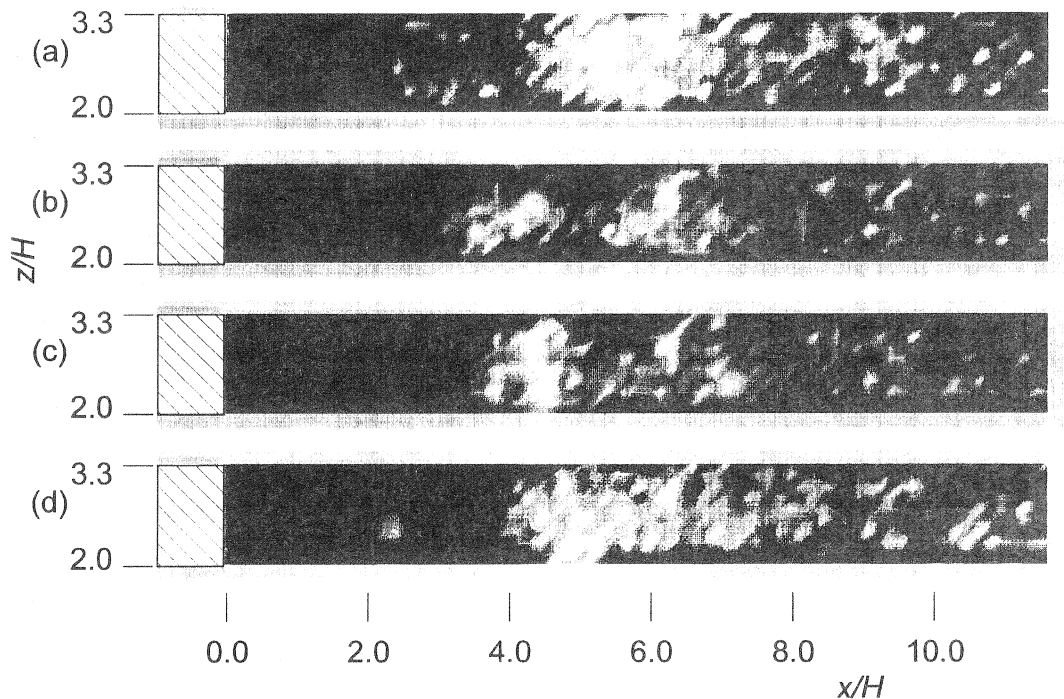


図5 $St_f=0.19$ における x - z 平面内の $\langle u'^2 \rangle / U_c^2$ 分布. (a) $\phi=0$, (b) $\phi=\pi/2$, (c) $\phi=\pi$, (d) $\phi=3\pi/2$.

のみである。このことから、最適周波数の $St_f=0.19$ の場合には、外乱が直接導入した大規模な渦運動から、より小規模な乱流運動がより効果的に生成され、運動量輸送を促進して再付着距離を短縮させていると考えられる。しかしながら $St_f=0.08$ の場合には、再付着領域において直接効果がまだ残り、間接効果が効力を発揮できていないと推察できる。 $St_f=0.30$ の場合には、前述のように、導入された周期運動がいち早く減衰してしまうため、直接効果が計測されていないと考えられる。

5. せん断層内の大規模構造

間接効果をもたらすせん断層内の構造について次に考察する。著者らは前報^(3,5)にて、周期的外乱が大規模な渦構造をせん断層内に導入することを示した。図5は、間接効果を表す位相平均レイノルズ応力を、各位相ごとに分けて x - z 平面上で示したものである。

図から、スパン方向に伸びた高レベルの領域が、位相の進行に合わせて次々と放出され、流下している様子が理解できる。この領域は、せん断層内を流下する大規模渦構造に挟まれた領域^(3,5)に相当していることから、この大規模構造、すなわち外乱の直接効果が間接効果を生み出し、再付着を促進させる機構を明らかとなった。

6. 結論

バックステップ流れの再付着を、ステップ端から周期的外乱を導入することにより制御し、そのメカニズムについて検討した結果、以下の結論を得た。

再付着距離は与える外乱の周波数に依存し、その周波数には、再付着促進効果が最大となる最適周波数が存在する。このとき、再付着領域におけるレイノルズ応力の増加が、他の周波数時と比較して最大となる。

外乱によるレイノルズ応力の増加は、与えた周期的変動そのものによる直接効果よりも、この周期運動によって新たに生み出された乱流運動による間接効果によってもたらされる。最適周波数時には、この間接効果が他の周波数時と比較して効力を発揮し、再付着が最も促進される。

参考文献

- (1) Gad-el-hak, M., Flow Control, Cambridge University Press (2000)
- (2) 吉岡ら, 機論 B65-629 (1999) 179-184.
- (3) 吉岡ら, ながれ, 19, (2000) 55-58.
- (4) Yoshioka, S. et al., International Journal of Heat and Fluid Flow, 22 (2001a), 印刷中.
- (5) Yoshioka, S. et al., International Journal of Heat and Fluid Flow, 22 (2001b) 301-307.
- (6) Chun, K. B. and Sung, H. J., Experiments in Fluids, 21 (1996) 417-426.
- (7) Silveira Neto et al., Journal of Fluid Mechanics, 256 (1993) 1-25.
- (8) Le, H. et al., Journal of Fluid Mechanics, 330 (1997) 349-374
- (9) Hussain and Reynolds, Journal of Fluid Mechanics, 41 (1970) 241-258