

吉岡修哉（慶大院） 小尾晋之介（慶大理工） 益田重明（慶大理工）

Scaling law for control of turbulent separated flow

S. Yoshioka, S. Obi and S. Masuda

Department of Mechanical Engineering, Keio University

ABSTRACT

Mechanism of reattachment promotion of periodically forced backward-facing step flow is investigated in view of vortical structures. Based on it, a scaling law for the reattachment promotion is examined and appropriate dimensionless variable for the expression of the most effective frequency is proposed. Using this variable, the most effective frequency of back-step flow is expressed almost universally.

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

1 緒論

周期的外乱をはく離流れに与えることで、再付着を促進することができる⁽¹⁾。この外乱の周波数には、再付着促進効果が最大となる最適周波数が存在する^(2,3)。本報告では、ステップ端より周期的な外乱を受けるバックステップ流れをテストケースとし、再付着促進に貢献するレイノルズ応力の増加メカニズムを明らかにする。その知見をもとに、再付着促進に関するスケール則を検討し、バックステップ流れの最適周波数を普遍的に示すことが可能な無次元数を提案する。

2 実験装置および速度計測

実験装置は前報⁽³⁻⁵⁾にて用いた回流水槽をそのまま使用したため、ここでは主要な構成のみを述べる。テストセクションは、ステップ高さ $H=20\text{mm}$ 、拡大比1.5のバックステップである。 H と入口チャンネル中央流速 U_c に基づくレイノルズ数は $Re=3700$ とした。外乱として、ステップ端から流れに対し45度の角度で周期的な吹き出し吸い込みを与えた。入口の流入条件は完全発達チャンネル乱流である⁽³⁾。速度計測には、自作の二次元粒子画像流速計(PIV)を用いた^(3,4)。

3 外乱が導入する渦運動とレイノルズ応力生成

せん断乱流中に渦運動が存在すると、その中心付近で渦度が極値をとり、渦運動と共に移動する移動座標系から見た流線は、渦の中央部を中心にして同心円状のパターンを描く⁽⁶⁾。図1(a)は、吹き出し開始位相における位相平均の渦度分布である。▲で示した再付着点より上流に、2か所の負の渦度集中領域（渦度極小位置を+で示す）を確認できる。図示しないが、この渦度集中領域は位相の進行と共に流下する。この移動速度を渦の移流速度と考え、同速度で移動する座標系から見た位相平均流線を図1(b)に示す。再循環領域内の2ヶ所の渦度極小位置は、同心円状の流線パターンによってほぼ囲まれている。このことから、スパン方向に軸を持ち、時計回りに回転する渦運動が外乱により新たに導入されていること

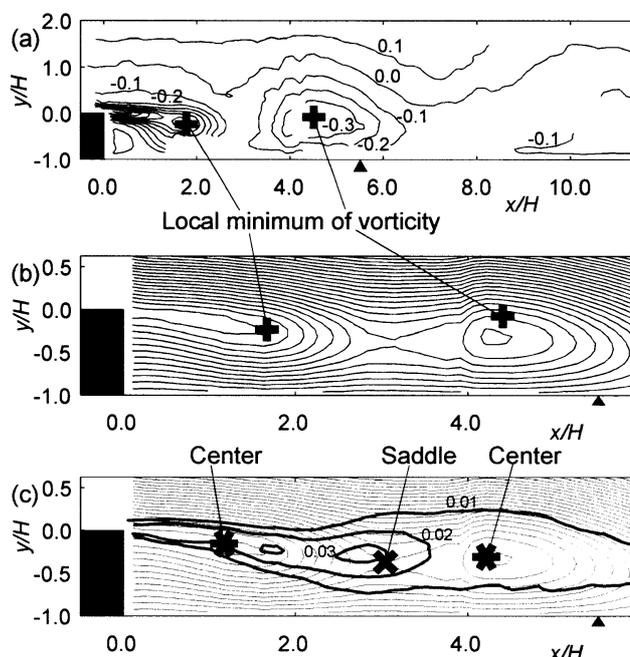


図1 (a)渦度分布 (b)渦度ピーク位置と移動座標系から見た流線 (c)レイノルズ応力生成率 $-\langle P_{12} \rangle$ 分布と渦中心及びサドル位置の比較 $St_f=0.08$, 吹き出し開始位相. (b),(c)は再循環領域を拡大している。

が確認できた。

図1(c)は、位相平均流線パターンに位相平均のレイノルズ応力生成率の等値線を重ねた図である。図にはさらに、流れ関数が極値をとる点（渦構造の中心）を+で、それらの中で流線が交差する点（サドル）をxで示している。図から、サドル周辺の領域でレイノルズ応力の生成率が極大となることがわかる。これがこの領域のレイノルズ応力を増加させるため、時間平均的に見てせん断層全域にわたってレイノルズ応力が増加し、再付着の促進に貢献している。以上より、外乱によって渦構造が導入され、これがレイノルズ応力を増加させるプロセスが示された。

表 1 バックステップ流れの最適周波数

Author	ER ^{*1}	θ/H	$Re_{H,\infty}$	$Re_{H,conv}$	U_{conv}/U_∞	$St_{H,\infty}$	$St_{H,conv}$	
Present	1.5	0.13	3700	1300	0.34	0.19	0.56	* Numerical result
Rhee and Sung (2000) ^{(7)*}	1.5	0.04	33000	17000	0.5	0.275	0.6	*1 Expansion ratio
Chun and Sung (1996) ⁽⁸⁾	1.5	0.04	13000	(6500)	0.5 ^{*a}	0.250	0.5	*2 Evaluated based on spread rate of shear layer
	1.5	0.04	23000	(11500)	0.5 ^{*a}	0.286	0.6	*3 Most amplified frequency of step mode instability
Roos and Kegelman (1987) ⁽⁹⁾	1.3	0.05	58000	(29000)	0.5 ^{*a}	0.29	0.6	*4 Laminar separation
Bhattacharjee et al. (1986) ⁽¹⁰⁾	1.1	0.02	26000	(13000)	0.5 ^{*a}	0.32 ^{*2}	0.7^{*2}	*a Quoted from Rhee and Sung (2000)
	1.1	0.02	76000	(38000)	0.5 ^{*a}	0.25 ^{*2}	0.5^{*2}	
Hasan and Khan (1992) ⁽¹¹⁾	1.07	0.03	30000	(15000)	0.5 ^{*a}	0.185 ^{*3}	0.4^{*3}	
Hasan (1992) ^{(12)*4}	1.07	0.02	11000	(5500)	0.5 ^{*a}	0.185 ^{*3}	0.4^{*3}	

4 再付着促進に関するスケール則

著者らのこれまでの研究により、再付着の促進には、特に再循環領域内におけるレイノルズ応力の増加が必要であることがわかっている⁽³⁾。また、外乱の周波数が低いほど渦のサイズが大きくなり、再循環領域内に導入される渦の個数が減少すること、逆に高いと多くの渦構造が導入される一方で、それらは粘性によりいち早く減衰する傾向が明らかになっている⁽⁵⁾。これらの事実と、前節で得られたレイノルズ応力生成メカニズムとを関連して考えると、最適周波数は周波数の増加に伴うこの2つの効果がバランスし、再循環領域に強い渦を多く導入させ、この領域のレイノルズ応力を最も増加させる周波数であると解釈できる。

従って、最適周波数を表す無次元数は、再循環領域内に導入する渦の個数を表すものが望ましい。そのため、ここでは渦構造の移流速度 U_{conv} と再付着長さ x_R に基づくストロハル数 $St_{x_R,conv}=f_e x_R/U_{conv}$ を提案する。この無次元数は、再循環領域内の渦構造の個数を直接表すため、最適周波数を表現する無次元数として最も適切である。ただしバックステップ流れの場合、ステップ高さ H と再付着距離 x_R の比はほぼ一定であるので、 x_R に代わり、より得やすい量である H を用いて差し支えない。そこでここでは、無次元数に $St_{H,conv}=f_e H/U_{conv}$ を用いる。

表1に、本研究と過去の研究例における最適周波数を $St_{H,conv}$ の形で示す。表には合わせて、従来から用いられている、主流速度に基づくストロハル数である $St_{H,\infty}=f_e H/U_\infty$ も示す。第1グループの2例を見ると、従来の $St_{H,\infty}$ は0.19と0.275と、平均値に対して40%程度もの偏差が生じる。これは入口運動量厚さ θ やレイノルズ数が大きく異なるためと考えられる。それに対し今回提案した $St_{H,conv}$ の値は、ほぼ0.6に落ち着いた。また、第2グループの3例は U_{conv} が提示されていないため、レイノルズ数のオーダー、拡大比、 θ がほぼ等しいRhee and Sung (2000)における U_{conv}/U_∞ の値を流

用して $St_{H,conv}$ を算出した。その結果、これらもほぼ0.6となった。さらに、拡大比や最適周波数の定義がキャプションに示すように異なる第3グループの結果に対しても同様の処理を行うと、算出された最適周波数はばらつくものの、 $0.4 \leq St_{H,conv} \leq 0.7$ と上記の0.6を含む値となった。

5 まとめ

周期的外乱によるバックステップ流れの再付着促進は、外乱により新たに導入された渦構造が、レイノルズ応力を増加させることでもたらされる。この渦構造の個数を直接的に示すストロハル数 $St_{H,conv}$ を新たに提案し、これを用いてバックステップ流れの最適周波数を表すと、入口運動量厚さ、拡大比、レイノルズ数等、流れのジオメトリや流入条件が異なっても $St_{H,conv} \sim 0.6$ となり、統一的にバックステップ流れの最適周波数を示すことができた。

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) Yoshioka, S. et al., Int. J. of Heat and Fluid Flow, 22 (2001a), 393-401.
- (4) 吉岡ら, ながれ, 19, (2000) 55-58.
- (5) Yoshioka, S. et al., Int. J. of Heat and Fluid Flow, 22 (2001b) 301-307.
- (6) Robinson, S. K., Ann. Rev. of Fluid Mech., 23 (1991) 601-639.
- (7) Rhee, G. H. and Sung, H. J., Fluid Dyn. Research, 26 (2000) 421-436.
- (8) Chun, K. B. and Sung, H. J., Exp. in Fluids, 21 (1996) 417-426.
- (9) Roos, F. and Kegelman, J. T., FED-52, ASME (1987) 215-223
- (10) Bhattacharjee, S. et al., AIAA J., 24 (1986) 623-629
- (11) Hasan, M. A. Z. and Khan A. S., Int. J. of Heat and Fluid Flow, 13 (1992) 224-231.
- (12) Hasan, M. A. Z., J. Fluid Mech., 238 (1992) 73-96.