周期的外乱を受けるバックステップ流の乱流統計量について*

吉岡修哉^{*1}, 枅川高久^{*2}
小尾晋之介^{*3}, 益田重明^{*3}Turbulent Statistics of Backward-Facing Step Flow
with Periodic PerturbationsShuya YOSHIOKA, Takahisa MASUKAWA,
Shinnosuke OBI and Shigeaki MASUDA

The experimental study has been conducted on the influence of the periodic perturbation on the separated flow over a backward-facing step. In order to investigate the large-scale eddy motion, which is evolved from the step edge due to the periodic suction and injection, the Particle Image Velocimeter has been introduced. The effect of the perturbation is obvious in reduction of the reattachment length, providing at most the reduction by over 30% against that of the steady flow condition. The investigation on the turbulent transport term in the mean momentum equation reveals the increase in the individual components of Reynolds stress is responsible for the activated momentum transfer across the shear layer, which in turn results in the earlier flow reattachment. The general tendency is in good accordance with other studies in past, though the relative level of the turbulent shear stress is somewhat low. Further investigation on this point is necessary.

Key Words: Separation, Shear Flow, Turbulent Flow, Unsteady Flow, Backward-facing Step, Digital Image Processing.

1. 緒 論

著者らはこれまでに、2次元非対称ディフューザに対し、周期的外乱によるはく離制御の実験⁽¹⁾⁽²⁾および数値解析⁽³⁾を行ってきた。その結果、周期的外乱を加えることにより再付着点が前進すること、外乱周波数にはその効果が最大となる最適周波数が存在することを明らかにした。しかし当初、再付着点の前進と共に期待されたのはく離点の後退は起こらなかった。また、対象の特殊性ゆえに一般性に欠けており、他の研究者の結果との比較等ができなかった。そこで、はく離点が固定されており、幾何学的形状がより簡単で、過去の研究例も豊富なバックステップ流れに着目した。

バックステップ流れは、はく離・再付着流れの典型的な例として従来より様々な角度から研究が行われてきた。それらの大部分は境界条件や流入条件が時間に依存しない、時間平均的な立場からの研究であった。一方、最近の乱流CFDの動向によれば、非定常はく離流れに関するデータへのニーズが高まりつつある。非定常バックステップ流れは、その典型的なデータソースとして期待される。

非定常バックステップ流れの研究例として、乱流制御による再付着促進の試みが数多く行われている。特に流れ場に周期的外乱を加えるケースが多い。例えば Bhattachar-

jee ら⁽⁴⁾は、はく離せん断層に対し、ステップに対向する壁面から周期的な外乱を作用させることにより、再付着の促進、せん断層の拡大、せん断層内の乱流変動の増加などが起こる事実を明らかにした。Chun and Sung⁽⁵⁾はステップ端部から流れに対し周期的な外乱を与えることにより再付着が促進され、その主要因がせん断層内での渦の合体の促進、及びこれによる連行作用の強化がであることを見出した。Sigurdson⁽⁶⁾は鈍頭円柱まわりのはく離流れに対し Chun and Sung⁽⁵⁾と同様の手法を適用し、外乱の最適周波数がその系における自然の渦放出周波数に近いことを明らかにした。しかしこれらの結果は、渦構造の視点から見た定性的な解釈にすぎず、運動量の輸送機構に基づいた定量的な議論に結び付けるには至っていない。また最適周波数が存在する理由も必ずしも明確になっていない。この理由として、従来の研究例は熱線風速計等による点計測に基づくものであり、乱流統計量の空間分布の計測に多大な労力が必要であったことが考えられる。

本研究は、速度の面計測が可能な二次元粒子画像流速計(PIV)を用いることで、はく離せん断層中における乱流統計量の変化を大局的に検討することを目的としている。テストケースは過去の研究にならない、バックステップのステップ端部から流れに対し周期的な吹出し、吸い込みを導入する系をとりあげる。この系について、周期的外乱に対する再付着促進効果の周波数特性や、外乱導入

* 原稿受付 1998年1月22日。

*¹ 正員, 慶應義塾大学大学院 (☎ 223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1)。*² 三菱重工業(株) (☎ 733-0036 広島市西区観音新町4-6-22)。*³ 正員, 慶應義塾大学理工学部。

E-mail: shuya@turbo.mech.keio.ac.jp

Fig. 1 Water channel facility.

による平均速度分布および乱流統計量の空間分布に現れる変化について、時間平均の立場から運動量の式に基づいて考察する。

主な記号

- f_e : 外乱周波数
- H : ステップ高さ
- Re : レイノルズ数 ($= HU_c/\nu$)
- St : ストロハル数 ($= Hf_e/U_c$)
- t : 時間
- U_c : 入口チャンネル部中心部における時間平均速度
- U, V : 時間平均速度成分
- u, v : 変動速度成分
- V_e : 外乱の速度振幅
- v_e : 外乱の速度
- x_r : 再付着長さ
- x_{r0} : 外乱無しの場合の再付着長さ
- x, y, z : 直角座標
- ϕ : 周期変動の位相角
- 添え字
- ($\bar{\quad}$) : 時間平均値

2. 実験装置および方法

2. 1 実験装置 実験装置全体の正面図を図1に示す。装置は回流式水槽であり、タンク内以外に自由表面は生じない。ポンプによって駆動された流れは、整流筒、縮流部(縮流比0.12)を通過し、上流チャンネル部を経て測定部へと導かれる。上流チャンネル部入口と下流チャンネル部出口にはハニカムを設け、配管の曲がりの影響がテストセクションに及ばないように配慮した。

2. 2 テストセクション テストセクションは、図1の○で囲まれた場所に位置する。当部分を上から見た図を図2に示す。テストセクションは透明アクリル製のバックステップで、拡大比1.5、ステップ高さ $H=20\text{mm}$ 、入口チャンネル幅 $2H$ 、奥行き $12H$ である。ステップ端部には、図3に示すようにスパン方向全域にわたって幅1mmのスリットを設けた。外乱は、このスリットから流れに対し

Fig. 2 Schematic of the test section.

Fig. 3 Details of the step edge.

下流方向に 45° の角度で周期的な吹き出し、吸い込みを行うことにより与えた。外乱の速度を v_e とすると、 v_e は速度振幅 V_e 、周波数 f_e 、位相角 ϕ を用い次の式により表される。

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

外乱は、ステッピングモーターでピストンを往復運動させることで生成し、ビニルチューブでスリットに隣接するチャンバ内に導いた。ステッピングモーターは、パーソナルコンピュータにより生成された式(1)に従う制御信号により動作させた。座標系は、図2に示すようにスパン中央のステップ端を原点とした直角座標系とし、流れ方向に x 、対向壁面方向に y 、スパン方向に z とした。

2. 3 速度計測 速度場の計測には自作の2次元粒子画像流速計(PIV)を用いた。測定領域はステップ端より上流の $x = -0.5H$ から、再付着点より十分後流である $x = 10.5H$ までとした。PIVの測定原理上、カメラの視野内に測定領域を広くとると計測の不確かさが増すため、本実験では測定領域を3分割した。流れにはトレーサ粒子として

Table 1 Researches of separation control on backward-facing step flow by periodic perturbations.

Author(s)	Source	Re_H	Expansion Ratio	Optimum St
Roos and Kegelman(1986) ⁽¹⁰⁾	FP	39×10^3		0.19
Bhattacharjee et al.(1986) ⁽⁴⁾	EA	$2.6\text{--}7.6 \times 10^4$	1.1	0.2-0.4
Hasan and Khan(1992) ⁽¹¹⁾	IO	$1.5\text{--}3 \times 10^4$	1.07	0.185
Hasan(1992) ⁽¹²⁾	IO	1.1×10^4	1.07	0.185
Honami et al.(1993) ⁽¹³⁾	FP	3.85×10^4	1.5	0.107
Chun and Sung(1996) ⁽⁵⁾	IO	$1.3\text{--}3.3 \times 10^4$	1.5	0.25-0.275
姫木ら (1996) ⁽¹⁴⁾ (CFD)	IO	3.3×10^4	1.5	0.1

EA : External acoustic forcing FP : Oscillating flap IO : Internal oscillator

Fig. 4 Influence of sample number on $\overline{u^2}$.

ナイロン 12(平均粒子径 $90\mu\text{m}$, 比重 1.02) を混入した。トレーサ粒子に照射する可視化光源にはシート状のストロボ光を用いた。ストロボの発光とビデオカメラのシャッターは、同期信号発生器が $1/60$ 秒間隔で発信するパルス信号に同期させた。このため、ビデオの各フィールドには $1/60$ 秒間隔で可視化された画像が記録される。

可視化画像は 8mmVTR に一旦記録し、これをパーソナルコンピュータと画像処理装置により 512×512 ピクセルの 256 階調デジタル画像に変換した。デジタル化した画像データは、ワークステーションに Ethernet 経由で転送し、ここで相互相関法による流速ベクトルの算出を行った。相互相関法に用いたマトリクスサイズは、 19×19 ピクセルで、これは $0.16H \times 0.13H$ に相当する。

2. 4 実験条件 表 1 に周期的外乱を用いてバックステップ流れを制御した過去の研究例を示す。これによれば、周期的外乱の効果が最大となる最適周波数は、ストロハル数にしては $0.1 \leq St \leq 0.4$ の範囲となっている。Sigurdson⁽⁶⁾ は最適周波数はその系の渦放出周波数に近いことを指摘している。Eaton and Johnston⁽⁷⁾, Le et al.⁽⁸⁾, Silveira Neto et al.⁽⁹⁾ の報告によると、ステップ後流が自然に持つ乱れの卓越ストロハル数は $0.06 < St < 0.08$ に分布している。この周波数は前述の最適周波数のレンジには近い。そこで、本研究では外乱周波数をこの近傍である $St = 0.055, 0.165, 0.275$ の 3 種類に設定した。

外乱の速度振幅は、Chun and Sung⁽⁵⁾, 石橋ら⁽²⁾ の結果にあわせ、 $V_e = 0.30U_c$ とした。表 1 によると従来の研

Fig. 5 Comparison of the mean velocity profiles at different spanwise locations.

Fig. 6 Comparison of the turbulent intensity profiles at different spanwise locations.

究例では、 Re_H がほぼ 10^4 のオーダーの乱流場で行われているが、本研究では PIV による速度計測の精度を確保するため、 $Re_H = 1800$ にて行った。

はく離点で発達した乱流境界層を得るため、ステップ端から上流 $50H$ の位置に直径 3mm のトリッピングワイヤを取り付け、遷移を促進させた。その結果、はく離点における運動量厚さ θ に基づくレイノルズ数は $Re_\theta = 370$ であり、運動量厚さと入口チャンネル幅の比は、 $\theta/2H \approx 0.1$ であった。

2. 5 計測の不確かさ まず、単一の数値ベクトルの計測精度を見積もるために、測定に用いるものと同等のトレーサを貼り付けた板を一定速度で動かし、移動速度を PIV で計測した。50 個の数値ベクトルを平均した結果、95% 包括度不確かさは 0.0316 であった。次に時間平均値

Fig. 7 Variation of the reattachment length as a function of perturbation frequency.

に及ぼすサンプル数の影響を求めた。流れ場の代表的な位置として、(a) 再付着点近傍 ($x/H = 4, y/H = -0.91$) と、(b) セン断層内 ($x/H = 4, y/H = 0.93$) の2点において、 $\overline{u^2}$ のサンプル数への依存性を調べた結果を図4に示す。それぞれのプロットは50回の計測を行った平均値で、エラーバーはそれらから求めた95%包括度の信頼区間である。図から、比較的大きな乱れ強さの(a)では2000、乱れ強さの小さな(b)では1000サンプル以上では一定の値が得られていることが確認できる。本研究では、これらの結果を参考にして、流れ場の場所ごとにサンプル数を1000から4000の間で変化させた。撮影した画像は1枚毎に画質を確認し、良好なもののみをサンプル画像として採用した。そのためサンプル間隔は一定ではないが、平均しておよそ0.1秒間である。代表的な撮影時間は4000サンプルで7時間程度である。

さらに、流入条件の2次元性を評価するために、 $x/H = 0, z/H = -3, 0, 3$ での U ならびに $\overline{u^2}$ の分布を計測した。結果をそれぞれ図5および6に示す。これから、 U の $-3 \leq z/H \leq 3$ の範囲におけるスパン方向の差異はその位置での平均値に対し2.8%以内であった。 $\overline{u^2}$ の差異に関しては、壁面近傍において非一様性が大きかったものの、 $0.5 \leq y/H \leq 1.5$ の範囲に限れば $-3 \leq z/H \leq 3$ においてその位置での平均値に対し7.1%以内であった。また外乱速度のスパン方向の差異は、速度の平均値に対し6%以内であった。本研究では、流速測定はすべて $z = 0$ の面上で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 外乱付加による再付着促進効果 外乱周波数と再付着距離の関係を図7に示す。ここでは便宜上、壁面から第1点目の計測点(壁面から1.5mm)における平均速度が0となった位置を再付着点と定義する。図の縦軸は、外乱を

Fig. 8 Distribution of U/U_c .

Fig. 9 Distribution of V/U_c .

与えない場合の再付着長さで規格化しており、これが小さいほど再付着の促進効果が大きいことを表す。図中には、参考のためステップ後流が自然に持つ乱れの卓越周波数の範囲⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾を記入してある。測定結果から、与えた3つの外乱周波数のすべてにおいて再付着の促進効果が確認できる。特に $St = 0.165$ の場合において効果は最も顕著であり、再付着距離は外乱を与えない場合の約66%であった。比較のために示したChun and Sung⁽²⁾の結果もほぼ同様な傾向を示しているが、本研究の結果の方が周波数への依存性が強い。以後、外乱を与えない場合と、最も再付着促進効果のある $St = 0.165$ の外乱を与えた場合について詳細な比較検討を行う。

3.2 時間平均速度分布 時間平均速度の U 成分ならびに V 成分を等高線で表したものを、外乱を与えない場合と与えた場合についてそれぞれ図8および図9に示す。図中の▲印は、再付着点を示す。図8を見ると、どちらの場合もステップ端部から下流方向へ伸びる等値線間隔が下流に行くにしたがって広がっており、これがはく離せん断層の広がりに対応する。図8(a)と(b)を比較すると、外乱を与えた場合の方がせん断層の広がりが大きいことが見てとれる。この傾向はBhattacharjeeら⁽⁴⁾の結果と整合

 Fig. 10 Distribution of $T_v / (U_c^2 / H)$.

する。

一方、図9の V 成分に着目すると、流路中央部の下降流に相当する $V < 0$ の領域が、(b)の外乱を与えた場合には全体的に上流側に移動している。また、ステップ直後の領域で観察される上昇流は、はく離せん断層に連行される流塊に対応するが、これが外乱を与えた場合の方が、外乱を与えない場合に比較してより顕著に現れる。

3. 3 運動量輸送の促進効果 次に、運動量式に基づいて再付着の促進と運動量輸送の関係について調べる。レイノルズ分解を施した運動量の式は下のように表される。

$$\frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} \quad (2)$$

ここで、 P は時間平均圧力、 τ_{ij} は分子粘性応力である。乱流変動に起因する運動量輸送を表す右辺第3項は、外乱を与えた場合には周期的な変動成分と乱流変動成分を合成したものとなる。ここでは、両者の大小関係には触れず、外乱を加えたことで正味どれだけの運動量輸送の促進効果が現れたかを検討する。

図8、図9に示す平均速度成分の等値線図から分かるように、外乱の影響は V 成分のステップ直後の領域に最も顕著に現れる。そこで、この領域における運動量の式(2)の V 成分のうち、右辺第3項に着目する。これを記号 T_v で表すこととして、式(2)の $i=2$ とにおいてこの項を書き下すと以下ようになる。

$$T_v = \frac{\partial \overline{uv}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v^2}}{\partial y} \quad (3)$$

図10に T_v の分布を示す。外乱無し、有りいずれの場合も、はく離せん断層内では全体的に右辺第2項が支配的で、場所にもよるが第1項の10倍程度である。ステップの直後に着目すると、いずれの場合もせん断層に沿って値の大きな領域が観察される。この領域で運動量輸送が他の領域と比較して活発になっている。外乱を加えた場合には、外乱が無い場合に比べ、再付着点の前進に対応

してこの領域が上流側に移動している。また外乱を加えることで、この領域が広がる方向がより壁面を向くようになり、再付着点付近では、壁面のより近傍にまで達している。

3. 4 乱流統計量 次に、上に述べた運動量輸送の活性化をもたらした、レイノルズ応力の増加の様子について検討する。図11に外乱が無い場合と外乱を加えた場合のレイノルズ応力3成分の分布を示す。図中の▲印は再付着点を示す。

レイノルズ応力の垂直成分 $\overline{uv}$ と $\overline{v^2}$ は、外乱を与えない場合、外乱を与えた場合ともに、はく離せん断層内とステップ対向壁面近傍で大きな値をとる。これらの値は、特にはく離せん断層内再付着点近傍の領域において大きくなっており、先程述べたように外乱導入による再付着点の前進に対応している。また、はく離せん断層内でのピーク値そのものも、外乱を加えることによって増加することが確認できる。次にせん断成分 $\overline{uv}$ を見ると、はく離せん断層内において負の最大値をとっている。この値は、垂直応力成分と比較すると通常の発達した乱流よりも小さいが、その分、外乱の導入により再付着点の近傍で著しく増加している。せん断層内においてレイノルズ応力のせん断成分が、垂直成分の20%程度と小さい結果となった。この原因については現在のところは明らかではなく、今後系統的な実験が必要である。

以上述べたように、外乱の導入によって時間平均的に見てレイノルズ応力のすべての成分が増加しており、このことが運動量の輸送を活性化し、その結果再付着の促進をもたらしたことが明らかに関係付けられた。ただし、本稿においては運動量輸送機構に対し時間平均の立場からのみの考察に留まっており、周期変動と乱流変動の大小関係や両者の役割など不明な点はまだ残されている。

4. 結 論

ステップ端から周期的な外乱を受けるバックステップ流れを2次元粒子画像流速計を用いて詳細に計測し、運動量輸送の促進および乱流統計量について考察した結果、以下の結論を得た。

1. ステップ端より周期的な外乱を加えることで再付着が促進され、その効果は外乱の周波数に依存する。本実験では $S_L = 0.165$ の場合に再付着距離は最も短縮し、外乱を与えない場合の約66%であった。
2. 外乱を導入することで、はく離せん断層内の運動量輸送が活発化する。この傾向は特に y 方向の運動量輸送に顕著に見られる。
3. 外乱の導入により、時間平均レイノルズ応力のすべての項が増加する。運動量輸送の活発化は、このレ

Fig. 11 Distributions of turbulent quantities.

イノルズ応力の増加によるものであり、再付着の促進に寄与している。

本研究の一部は、文部省科学研究費 (No.07650219) により行われた。本研究の遂行にあたり、本塾 菱田公一教授のグループと、横浜国立大学 西野耕一助教授から、粒子画像流速計に関して多大なる御助言を頂いた。株式会社 荏原総合研究所からは、実験装置に供するポンプを提供して頂いた。また、本塾生 斎藤 武君には、実験に際し多大なる協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) 大泉 ほか 2 名, 機論 B59-557, (1993), 123.
- (2) 石橋 ほか 3 名, 機論 B63-605, (1997), 62.
- (3) 山本 ほか 2 名, 日本機械学会第 72 期通常総会講演会講演論文集 (III), (1995), 55.
- (4) Bhattacharjee, S. ほか 2 名, AIAA J., **24** (1986), 623.
- (5) Chun, K. B., Sung, H. J, Experiments in Fluids., **21** (1996), 417.
- (6) Sigurdson, L. W., J. Fluid Mech., **298** (1995), 139.
- (7) Eaton, J. K., Johnston, J. P., Thermoscience Div., Dept., of Mech., Eng., Stanford, Rep. MD-39 (1980).
- (8) Le, H., ほか 2 名, J. Fluid Mech., **330** (1997), 349.
- (9) Silveira Neto, A., ほか 3 名, J. Fluid Mech., **256** (1993), 1.
- (10) Roos, F. W. ほか 1 名, AIAA J., **24**, (1986), 1956.
- (11) Hasan, M. A. Z. ほか 1 名, Int. J. Heat and Fluid Flow, **13**, No.3(1992), 224.
- (12) Hasan, M. A. Z., J. Fluid Mech., **238** (1992), 73.
- (13) Honami, S. ほか 2 名, Proc. of the 9th Symp. on Turbulent Shear Flows. (1993), P108-1.
- (14) 姫木 ほか 2 名, 第 11 回生研 NST シンポジウム講演論文集 (1996), 9.
- (15) アメリカ機械学会編 (日本機械学会訳), 計測の不確かさ, 丸善 (1987).