速度・圧力変動の相互相関関数を用いた 後方ステップ流の研究*

三 松 順 治^{*1}, 土 方 邦 夫^{*2}

Turbulent Structure in Backward Step Flow Using the Cross-Correlation between Velocity and wall Pressure Fluctuation

Jyunji MIMATU and Kunio HIJIKATA

Large-scale turbulent structures in backward step flow are investigated from measurements of the cross-correlation between velocity fluctuation in the 3-dimensional flow field and pressure fluctuation on a reattachment plane. Large eddy structures and traces affecting a wall pressure are shown by sequential contours of cross-correlation as a function of time. The pressure fluctuation in a recirculation zone is mainly caused by the velocity fluctuations of a main flow, while in the reattachment region a pressure fluctuation is brought about by the velocity fluctuation entrained with a jet. This highly correlated region after the reattachment moves downstream with the same speed as the wall pressure fluctuation patterns visualized by real-time holographic interferometry.

Key Words: Turbulence, Heat Transfer Enhancement, Separation, Flow Visualization Turbulent Structure, Reattachment, Velocity-Pressure Cross-Correlation

1. 緒 論

後方ステップ流は、流路の急激な拡大に伴うはく離による再循環領域、そのせん断層で生じた大規模な乱れが壁面に衝突する再付着領域、さらに下流では壁面噴流領域が存在し、乱流構造の研究にとって非常に興味深い流れ場である。せん断層で生じた大規模スケールの乱れが、直接壁面に衝突するため熱伝達等の壁面からの輸送現象はその影響を大きく受けている。そのため、壁面の物理量を測定し、流れ場との関連性を調べることは非常に重要である。流体・壁面間の輸送現象に重要な影響を与える大規模渦の効果については、各種解析手法⁽¹⁾⁽²⁾を用いて明らかにされつつあるが、その複雑な現象が十分解明されたとは言い難く、さらに多くの観点から研究を行う必要があると考えられる。

そこで、本研究では、再付着壁面の圧力変動と流体中の速度変動の相互相関関数を調べることで、圧力測定点に影響を及ぼす乱れの運動に関する定量的な研究

を行い、ホログラフィー干渉法を用いた壁面圧力場の瞬間可視化パターンと対応させて考察することで、後方ステップ流のより詳細な乱流構造の解明を試みた。

2. 実 験 装 置

2・1 速度・圧力変動の相互相関関数の測定装置
媒体である空気は、横 61 mm×幅 10 mm のノズルより噴出され、ステップ高さ 15 mm の後方ステップ流を形成する。本研究での結果は、側壁および上壁を設置しない場合のものであり、必ずしも二次元的な噴流ではない。 Re_n , Re_h は、ノズルの短い辺、ステップ高さを代表付法に用いている。速度変動測定には、I 形熱線プローブを使用した。圧力変動測定には、半導体圧力変換器(PMS-5 形 TOYODA, $\pm 0.5 \text{ kg/cm}^2$)を使用し、直径 0.6 mm、深さ 2.5 mm の圧力測定孔を用いた。圧力変動の信号は、DC アンプにより 2 000 倍に増幅した後、FFT に入力し、速度変動強度と圧力変動強度で無次元化した速度・圧力変動の相互相関関数 R_{pv} を求めた⁽³⁾。遅れ時間(τ)の範囲は、 -20 ms から $+20 \text{ ms}$ に設定し、時間分解能はその範囲の $1/1024$ である。実験に用いた流れ場の測定領域中央部(図 1 など参照)の平均速度は 9.2 m/s 程度であり、この遅れ時間の範囲は上流および下流の方向距離にして 18.4

* 平成元年 10 月 15 日 第 67 期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成元年 2 月 6 日。

^{*1} 准員、東京工業大学大学院 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

^{*2} 正員、東京工業大学。

cm の範囲に相当する。測定は、相互相関関数の最大値および最大値をとる遅れ時間がほぼ一定になるまで通常 64 回以上の平均化を行った後、処理結果をマイクロコンピュータ(PC 9801)に取り込み記録保存した。

実験上の座標系は、後方ステップ基礎部を原点とし流れ方向に x 、再付着面から壁面垂直方向に y 、流れ場の中心線から横方向に z 方向を取り、それらの速度を u, v, w で表す。また、壁面上の圧力測定点の流れ方向位置を x_p 、中心からの距離を z_p とする。

2.2 可視化実験装置 壁面圧力場の可視化実験に用いた実験装置は、速度・圧力変動相関関数の測定と同一の実験装置系を用い、再付着壁面のみを交換した。圧力場による微小変形量は、ホログラフィー実時間干渉法を用いて光学的に測定され、瞬間圧力分布と変動圧力分布がそれぞれ等変位量線として干渉縞で可視化される。光源には、Ar レーザを使用した。光学系は、基本的には軸対称衝突噴流の圧力場可視化の場合⁽⁴⁾と同様である。壁面は、厚さ 15 mm の黄銅板上にシリコンゴムシートを接着し変形部とし、高反射率を得るために表面には直接アルミを真空蒸着してある。

3. 実験結果と考察

3.1 速度変動強度分布 速度変動強度の各周波数成分の空間分布を速度変動強度の最大値で正規化し、図 1 に示す。ノズル出口直後の変動成分は比較的高周波であるが、下流に行くにつれ低周波の変動が強くなり、その強度も増加する。これは、ノズルエッジ部で発生した乱れが、下流に移動するに従い合体し、スケールが増大していることを示している。また、440 Hz の周波数域の変動強度の分布をみると、エッジ部分より噴流中心部分のほうが変動値が高くなっており、この周波数域の特徴的な変動が流体中に存在している。

3.2 速度・圧力変動の相互相関値分布(縦断面) 各測定点の速度・圧力相互相関関数を同じ遅れ時間(τ)で比較することは、圧力測定点に影響を及ぼす流れ場全体の状況を同一瞬間で観察したものを平均化したことに対応すると考えられる。遅れ時間の経過に対する相関値の分布の変化は、圧力変動に影響を及ぼす流れ場の平均的な時間的変化が示されることになる。

圧力変動測定点を、中心軸上($z_p=0$ mm)で、再循環領域、再付着領域、壁面噴流領域に対応するステップからの距離 $x_p=30, 70, 110$ mm に設定し、 $Re_n=7900$ ($Re_n=12000$)、ステップ高さ 15 mm とした時の、 R_{pv} の変化を τ に対して整理した結果を図 2 に示す。速度測定点は流れ場の中心線上の縦断面で、流れ

方向・壁面垂直方向の 23×12 点で測定した。測定点を図中の黒点で表し、圧力測定位置を横軸に $\blacktriangle$ で示す。図中の左側の四角の領域は、ノズル噴出口を示し、流れは左から右に流れており、各軸の目盛は 1 cm 間隔である。

$x_p=30$ mm, $\tau=0, 1.25, 2.5$ ms の結果を図 2(a) に示す。圧力測定点は、再循環域に含まれるので壁面近傍の速度変動の壁面圧力変動への直接的寄与は小さく壁面近傍には相関の絶対値の高い領域(以下、高相関領域と呼ぶ)は存在しない。しかし、せん断層では速度変動が大きく、この領域からの影響が顕著である。 τ に対する変化から、ノズル直下のせん断層で生成された乱れが、噴出部中心領域に移動し、その乱れの構造をある程度の時間保っていることがわかる。また、絶対値は同程度であるが、相関値の符号が異なる領域が周期的に出現しているが、これは、ノズルせん断層からの渦放出がある程度固有の周期をもって行われていることを示唆している。また、壁面での圧力変動が噴流のコア領域の速度変動と最もよく相関していることは、再循環領域内での流体の運動が主流の影響を強く受けていること示している。

$x_p=70$ mm, $\tau=-2.5, 0, 2.5$ ms の結果を図 2(b) に示す。再循環域で圧力測定を行った場合とは高相関領域の位置が大きく異なり、壁面近傍に位置している。はじめ壁面から少し離れた上流側に出現し、圧力測定位置に向かって移動しながらその相関値を高め、 $\tau=0$ で壁面の最も近傍に達しその後壁面に沿って相関値を低下しながら下流方向に移動し、壁面を離れる。この高相関領域は、再付着域での壁面圧力変動を

図 1 速度強度分布の変化($Re_n=7900, Re_n=12000$)

(a) $x_p = 30$ mm, $Re_h = 12\,000$ (b) $x_p = 70$ mm, $Re_h = 12\,000$ (c) $x_p = 110$ mm, $Re_h = 12\,000$

図 2 相互相関分布

もたらす流体塊の運動に対応すると考えられる。この相関値は負であり、壁面近傍域では v の時間平均値より u の時間平均値がはるかに大きいことを考えると、 u の変動による動圧の変動がこれに釣合う静圧の逆符号の変動をもたらしていると考えられる。

単純なせん断層に近い流れ場となっている $x_p = 110$ mm, $\tau = -2.5, 0, 2.5$ ms の結果を図 2(c) に示す。圧力変動に最も影響を与える壁面近傍の負の相関領域と同時に壁面から離れた領域に複数の正負の弱い相関領域が存在していることがわかる。壁面近傍の負の相関領域は、遅れ時間の推移につれて壁面近傍を移動しているが、再付着域の場合より、その移動が、より壁面に沿ったものとなっており、再付着下流での流れが壁噴流的挙動を示していることがわかる。

各領域の移動の様子を見るために高相関領域の中心位置とその相関値の変化を、 $x_p = 30, 70, 110$ mm の場合について図 3 に示す。相関値の大きさを円の半径で、正の相関を点線で、負の相関を実線で結んで示す。

$x_p = 30$ mm の場合、高相関領域の中心位置が移動する範囲は、ノズル噴出口を底辺とし、下流側方向に伸びる三角形の範囲である。 $x_p = 70$ mm の場合は、高相関領域は複数個存在する。その中で最も重要なものは、上流側のある程度壁面から離れた位置に出現し、壁面近傍を移動し圧力測定点近傍で最大値をとり、その後、壁面から離れるものであるが、それ以外にもその動きと対応して移動する相関領域が存在し、これは同じ発生源を持つ流体の変動と思われる。 $x_p = 110$ mm の場合、高相関領域の中心位置の移動軌跡は、流れ方向には直線的で壁面から離れるにつれ正負交互に並んでおり、高相関領域はほぼ流速で移動している。

図 3 高相関領域の中心位置の移動

下流方向に行くに従い、この正負の相関領域の数が増えることは、圧力変動をもたらす流体運動が細分化していくことを意味している。

以上、三つの場所での測定の共通点は、負の相関領域に隣接して正の領域が存在することで、負の相関が流体の流れ方向への加速を意味しているとすれば、それに付随して減速領域が存在することを示している。

3.3 速度・圧力変動の相互相関値分布(横断面)

相関値の横方向分布を見るために、中心軸上および20 mm ずらした $z_p=0, 20$ mm 線上の $x_p=30, 70$ mm で、 yz 平面(横断面)で同様な測定を行った結果を図4 および図5に示す。速度測定面の圧力測定点からの距離を Δx とし、 $\Delta x=-15$ mm, -5 mm, 0 , $+5$ mm, $+15$ mm(負が上流側)の5断面での測定結果で、流れ

図4 相関値分布

図5 相関値分布

場は先と同じである。速度測定点は、 y 方向に 2.5 mm 間隔 12 点、 z 方向に 5 mm 間隔 9 点で測定した。図の左縦軸がノズルの中心線に対応し、点線の領域はノズル口の投影位置を示し、各軸の目盛は 1 cm 間隔である。

$x_p=30$ mm, $z_p=0$ mm の結果を図 4(a) に示す。各断面とも高相関領域は z 方向に伸びただ円形で、ノズル口に対して上下対称である。最も影響があると考えられる圧力測定位置を含む面 ($\Delta x=0$ mm) では、ノズル口位置付近の正の高相関領域が主要なものであり、これに付随して、 $\Delta x=-5$ mm では上下に、 $\Delta x=+15$ mm ではほぼノズル位置に負の領域が存在している。

図 4(b) に示す $x_p=70$ mm, $z_p=0$ mm の場合、 $\Delta x=-5, 0$ mm の断面上で壁面から離れた点に存在する正の高相関領域の形状は横長の形状で、その中心はノズル中心線でなく 10 mm 程度外側にずれている。これはノズルの上下せん断層で生成された二次元的な渦が三次元的構造を持ち始めることを示している。一方、壁面近傍に存在する負の高相関領域は、壁面から離れるにつれて幅が広がり、 $\Delta x=0$ mm でその横幅が最も狭い。

$z_p=20$ mm, $x_p=30$ mm の結果を図 5(a) に示す。 $\Delta x=-5, 0, +5, +15$ mm の各断面にみられる高相関領域は、常に圧力測定点の位置より中心側に位置している。また、ノズル上下のせん断層の影響は既に異

なっており明らかに下側の領域の相関値が高く、 $\Delta x=-5$ mm では、ノズル上部の正の高相関領域中心と中心の負の高相関領域の中心は、ほぼ一直線上に並んでおり、その最大相関値は同じ断面での $z_p=0$ mm での相関値より低下し、その領域の範囲は広がっていることから、噴出の横方向への広がりの影響が現れていると考えられる。

$z_p=20$ mm, $x_p=70$ mm の結果を図 5(b) に示す。圧力測定位置と高相関領域の位置関係は $x_p=30$ mm [図 5(a)] に比べ垂直に近く、流れの横方向の変化が緩やかになっていることを示している。壁面近傍の高相関領域の形状は、 $\Delta x=-5$ mm では垂直方向に細長いとその値は x 方向にも急激に平坦化している。 $\Delta x=5$ mm にみられる正の相関領域には 2 個のピークが存在し、乱れが三次元性を持ち始めていることを示している。

3・4 壁面圧力場の可視化結果 再付着域の高速カメラによる壁面圧力分布の連続可視化結果を図 6 に示す。写真は上端がステップから約 50 mm、下端が約 110 mm であり、写真の右側指示位置が流れ場の中心部に対応している。二つの写真の時間差は、約 1 ms である。 $Re_n=7900$ であり、流れは上から下に流れている。変形部のシリコンゴムのヤング率は、0.25 MPa のものを使用した。流れ場の中心線上の再付着点付近で最大値圧力となることに対応し、可視化による圧力分布は、中心線上の再付着点を中心とするだ円形で、

図 6 瞬間圧力分布の変化 ($Re_n=12000$)

図 7 圧力変動分布の変化 ($Re_n=12000$)

図 8 圧力変動移動速度数分布

この最大点が変動しているのが観察された。圧力変動は、等圧力線を示す干渉縞のゆがみとして表され、このゆがみは流れ方向に流下している。

再付着領域の壁面圧力変動のみを同様な条件で可視化した結果を図 7 に示す。この場合、圧力の変動成分だけが明暗として表されている。圧力変動のパターンは円形で、複数個が同時に存在することが多く、その出現位置は比較的ランダムであるが、出現すると下流に移動し、約 3-4 ms 後に消滅している。この圧力変動パターンの変化は、先に相関値分布の遅れ時間に対する変化で示したように、壁面圧力変動を引き起こす流体の変動塊が、再付着に伴い壁面に接近衝突し、壁面近傍を移動し、再び離れて行くことに対応していると考えられる。また、ノズル側壁の下流部の圧力変動は、ノズル側壁でのせん断層に起因する乱れと関係があると思われる。

3.5 圧力場可視化結果の定量化 可視化結果には、流れ以外の要因と考えられる干渉縞の変化が存在するので、それを画一的に画像処理することができなかった。そこで、目視により同時刻に存在する複数の圧力変動の中心位置の二次元的座標を読み取り、圧力変動の移動速度と出現位置関係について調べた。圧力変動パターンの出現個数の変動周波数は、約 2 500 枚の写真から求めた値で約 107 Hz (連続写真で約 10 枚) である。

移動速度を求める処理は、2 コマの連続写真から移

図 9 圧力変動の出現位置関係(左: 相対分布, 右: 詳細図)

動距離を求め、時間間隔で割り移動速度を求めた。流れ方向(x)の速度(u_p)の度数分布を図 8(a)に、スパン方向(z)の速度(w_p)の度数分布を図 8(b)に示す。全体の平均速度は、 $\bar{u}_p=5.9$ m/s, $\bar{w}_p=0.025$ m/s でほぼ流れ方向に移動している。

速度・圧力相互相関分布の高相関領域の移動速度は、 $x_p=70$ mm での壁面近傍($y=2.5$ mm)で 6.1 m/s (図中 a), ノズル部分($y=20$ mm)で 7.3, 8.3 m/s (図中 b, c)であり、これは可視化された圧力変動の移動速度 (5.9 m/s) とよく対応している。しかし、この速度は壁面近傍の流体速度 (2.7 m/s) よりかなり速い。

圧力変動の出現位置関係を求めるために、各瞬間写真で複数個の圧力変動相互の相対位置関係を求め、処理写真について平均化した結果を図 9 に示す。図中の目盛は 1 cm に対応する。この図は、ある圧力変動が存在した場合、その周囲での圧力変動の相対的な出現頻度を等高線で示したものであり、流れ方向に対して左右の斜め前方および斜め後方に他の圧力変動が出現する頻度が高いことがわかる。これは、考えている圧力変動と強く関連した圧力変動が他の場所に存在していることを示しており、せん断層で発生した二次元的乱れが流体中を移動する間に不安定化し、分裂したことを意味していると思われる。

4. 結 論

後方ステップ流において速度・圧力変動の相互相関関数と可視化実験結果とを比較し、以下の結論を得た。

(1) 後方ステップ流の壁面圧力変動と速度変動の定量的な関係を明かにし、壁面圧力変動を基準とすることで、圧力変動に影響を及ぼす平均的な乱れ構造の移動経路とその構造の変化の様子を示した。

(2) 後方ステップ流のせん断層で生成された乱れは、噴流の中心部ではその構造を比較的長時間保つが、外縁部では急速に変化し、再付着領域に達するまでに

三次元性が増加する。しかし、圧力変動をもたらし乱れは空間的に特定の位置関係をもっている。

(3) 壁面での圧力変動の移動に対応するのは、速度・圧力変動の相互相関関数の高相関領域のうち壁面近傍を移動する高相関領域であり、相関領域の移動速度と圧力変動パターンの移動速度は、ほぼ一致する。

本研究において、シリコンゴム表面にアルミ蒸着をしていただいた三菱電気伊丹製作所に謝意を表す。

なお、本研究費の一部は科学研究費奨励研究(A)

63790283 による援助を受けており、ここに謝意を表す。

文 献

- (1) 例えば、木谷・野沢、機論, 53-488, B(1987), 1183.
- (2) 例えば、Nezu, I. and Nakagawa, H., *Proc. 6-th Symp. of Turbulent Shear*, 19-1(1987), 19-1.
- (3) 上方・三松、機論, 53-487, B(1987), 810.
- (4) 上方・三松、機論, 53-491, B(1987), 1986.

討 論

〔質問〕 祢 津 家 久〔京都大学工学部〕

大変興味があり、同様な現象を研究している一人として深く敬意を表したい。多くの質問したいことがあるが紙面の制約上、次の二点を質問したい。

(1) 再付着点距離 X_r は、レイノルズ数の関係であるが、通常 $X_r = (5-6)H_s$ (H_s はステップ高さ)であるから、貴研究では $X_r = (75-90)$ mm である。 $X < X_r$ のはく離泡内では逆流率が高く、しかもはく離流線に沿って高せん断層が形成されるから乱れ変動は非常に大きい。このような領域の速度変動を I 形 hot-wire で計測するのは無理ではないかと思う。もし hot-wire を使うなら佐々木ら^(付1)と同様にスプリット wire を使うことが必要であり、また、高精度計測が要求されるならば、小生らと同様にレーザ流速計の使用が必要と考える。

(2) 佐々木ら^(付2)、筆者ら^(付3)の研究によるとステップから発達したはく離渦が合体しながら再付着点に移流され、これがトリガとなって X_r の付近から大規模な組織渦がほぼ周期的に放出される。この現象が観測されたか。

〔回答〕 (1) ご指摘のように、空気の後方ステップ流の再付着域での正確な速度測定には、多くの困難が伴っている。再付着領域の測定においても、 I 形熱線流速計を使用したことについては多くの問題を含んでおり、十分に考慮する必要があると考えられる。しかし、比較的流れを乱さないで速度変動の連続信号が得られる簡便な方法はほかにはなく、また、この I 形熱線流速計で検出された速度変動は必ずしも単独の

成分ではないが、流れ場と強く関係づけられる局所的な特性量であることは疑いないと考えられる。本研究では、壁面近傍の流れ場と壁面圧力変動の関係の解明を試みるのが目的であり、さらに進んだ LDV などを用いた高精度の測定は、各速度変動成分との相関を含めて、次の段階の研究課題とさせていたきたい。

(2) 本文中でも述べたように、速度・圧力変動の相互相関値分布の遅れ時間変化により乱れ構造の解明を試みる方法では、圧力変動測定点に乱れが移動してくる様子は表せるが、この現象がどのような頻度で生じているかについての情報は残念ながら得ることはできない。壁面圧力変動場に、複数の圧力変動パターンが存在することから、このような現象が同時に再付着領域の各所で生じていると考えられる。また、高相関領域の移動を見ると不明りょうながら遅れ時間が負の場合で不連続になっている所があり、ステップで発生した乱れが必ずしもそのまま圧力変動測定位置に影響を及ぼす乱れと同一でないことを示していると考えられる。

- (付1) 佐々木・木谷, “スプリットフィルムプローブによる逆流領域の乱流計測”, 日本機械学会論文集, 第465号B編, pp. 1615-1618, 1985.
- (付2) 佐々木・木谷, “はく離泡の再付着領域における三次元大規模うず構造”, 日本機械学会論文集, 第461号B編, pp. 308-316, 1985.
- (付3) Nezu, I. and H. Nakagawa, “Turbulent Structure of Backward-Facing Step Flow and Coherent Vortex Shedding from Reattachment in Open-Channel Flows, *Turbulent Shear Flows 6*, Springer-Verlag, pp. 313-337, 1989.