

平面壁面噴流の条件付抽出法による解析

大坂 英雄*・望月 信介*

Analysis of a Plane Wall Jet with the Conditional Sampling Method

Hideo OSAKA and Shinsuke MOCHIZUKI

Abstract

Conditional averages of longitudinal, normal velocity and of their products have been obtained in a fully developed plane turbulent wall jet. For detecting the coherent structure, the VITA technique were utilized in the inner region of the wall jet. It was inferred from the ensemble averaged patterns of u - and v -fluctuating velocities that the existence of a pair of counter-rotating spanwise vortices was supported through most of the present wall jet. The strong outflow events found near the location of a detective probe correspond to the trunk of a pair of spanwise vortices, where the ensemble averaged Reynolds shear stress takes a peak value.

1. まえがき

壁面噴流の流れ場は内層（境界層的）と外層（自由噴流的）とでそれぞれ異なる乱れ発生機構をもち、その乱流構造の異なる領域の共存する非対称流場である。したがって、このような流れ場の組織構造を明らかにすることは流体力学上興味深く、乱流モデルの提案、剥離防止技術の確立、熱伝達促進等といった側面に関連して重要である。しかしながら、これに類する流れ場の研究は比較的少なく、特に組織構造について調べた報告は皆無に近い。そこで、本研究では乱流平面壁面噴流の十分発達した流れ領域における組織構造を調べることが目的とする。

関連した研究をあげると、Alcaraz ら¹⁾による曲壁上の壁面噴流の象限分割法による解析、中川ら²⁾による水槽実験を用いた渦対構造の成長過程の可視化観察、辻³⁾による壁面噴流の線形安定理論から求めた流線パターンと可視化及び著者ら⁴⁾⁵⁾による集合平均分布の解析があるにすぎない。このことから、壁面噴流の壁近傍でのバースト現象の存在、外層で連行作用に役割を果たす大渦構造の特徴、内層と外層との構造の相互作用過

程、水槽実験（比較的低いレイノルズ数）で観察される一対の渦の形象の確認等に関する問題はいぜんとして不明のままである。

以上をふまえて、本報告では乱流平面壁面噴流の内層において、VITA 法⁶⁾を用いて条件付集合平均分布を求め、壁面噴流の組織構造を明らかにすることを試みる。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置および条件

Fig. 1 は流れ場の概要、主要記号および座標系を示

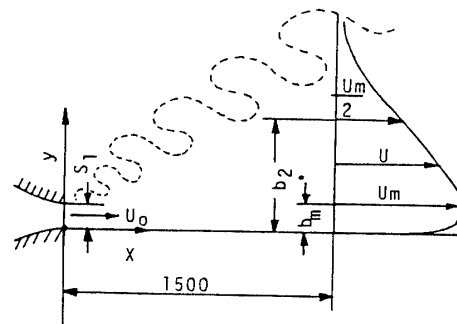


Fig. 1 Flow field, nomenclature and coordinate system

*機械工学科

す。用いた風洞は絞り比21の二次元絞り部を持ち、噴流吹出しノズル部の寸法は、幅400mm、高さ $S_1=10\text{mm}$ 、測定部長さは2320mmである。測定位置は流れ方向距離 $x=1500\text{mm}$ ($x/S_1=150$) で、実験条件はノズル出口レイノルズ数 $Re=U_0S_1/\nu=1\times 10^4$ (U_0 はノズル出口流速、 ν は動粘度)一定で行った。この時、内層厚さ $b_m=18\text{mm}$ 、半値幅 $b_2=120\text{mm}$ 、最大流速値 $U_m/U_0=0.3$ である。

平均量および集合平均波形の測定はI形およびX形プローブによる定温度熱線流速計を用いた。VITA法では検出基準用としてI型プローブを、移動プローブとしてX形プローブ3本を同時に併用した。信号処理は、集合平均操作の場合4点の熱線プローブからの出力を同時にデータレコーダに記録し、10kHzのサンプリング周波数で10秒間AD変換した後、大型計算機で解析した。一方、統計量は出力信号を直接デジタル解析装置に入力して求めた。

水槽実験に用いた水槽⁹⁾は幅40cm、長さ約2mの測定部を持つ。実験はノズル高さ S_1 に基づくレイノルズ数が $U_0S_1/\nu=3200$ ($U_0\approx 23\text{cm/s}$, $S_1=20\text{mm}$)一定として行い、可視化はノズル出口上壁および下壁から染料を流すことにより実施した。

2.2 VITA法による解析

内層に注目した測定では、境界層の場合によく利用されているVITA法⁹⁾を用いた。本実験では、この方法に加え、さらに検出時刻における流れ方向変動成分 u の時間微分 $\partial u/\partial t$ が正となること、検出時刻直前の10msの間の u 成分の平均が負となることの2条件を付加した。検出基準位置は $y/b_2=0.0042$ (y は壁面に垂直方向の距離)で、 $yu_\tau/\nu\approx 14$ (u_τ は摩擦速度)である。本方法に含まれる未知定数のうち、しきい値は $k=1.0$ 、局所平均化時間 T は $Tu_\tau^2/\nu=10$ とした。集合平均に用いた検出事象数はおよそ44事象(9.9秒の間)であるが、4点同時測定を行っているので精度的には問題ないと考えられる。

3. 結果および考察

3.1 時間平均特性

Fig. 2は平均速度および間欠係数分布を示す。平均速度分布についてみると、 $y/b_2=0.15$ で最大値をとり、十分発達した壁面噴流のそれ⁹⁾と相似な分布形状をとっている。間欠係数 γ の分布をみると、 \ominus 印(u 変動成分波形から $u/U_m>0.067$ 以上でその保持時間が12.5ms以上のものを乱流と判定して求めたもの)と \oplus

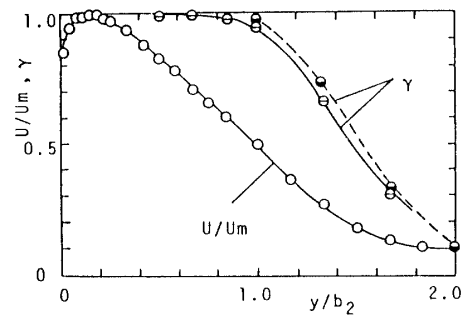


Fig. 2 Mean velocity and intermittency profiles

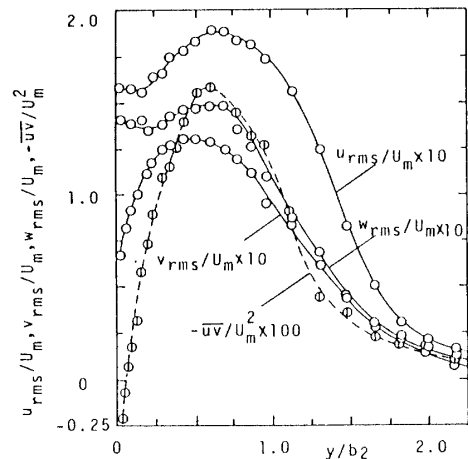


Fig. 3 Turbulent intensities and Reynolds shear stress profiles

印(u 成分の微係数が $(\partial u/\partial t)\geq 0.003\{(\partial u/\partial t)^2\}_{y=b_m}$ の条件を満たす時間領域を乱流と判定して求めたもの)の結果が一致しており、 $\gamma=0.5$ をとる位置は $y/b_2=1.5$ である。これらの分布はIrwinの結果⁹⁾ともよく一致しており、本流れ場が十分発達した流れ領域となっていることを示す。

Fig. 3は乱れ強さの3成分(x , y , z 方向にそれぞれ u_{rms}/U_m , v_{rms}/U_m , w_{rms}/U_m)およびレイノルズ応力 $-\overline{uv}/U_m^2$ の分布を示す。乱れ強さの3成分およびレイノルズ応力分布とも $y/b_2=0.6$ 付近で最大値を示し、その値はそれぞれ0.19, 0.13, 0.15および0.016である。また、 $-\overline{uv}/U_m^2=0$ となる位置は $y/b_2\approx 0.067$ であった。この分布はLaunder-Rodiのレビュー¹⁰⁾中に引用されている多数の著者の結果とほぼ同様である。

Fig. 4は u および v 成分のひずみ度 S および扁平度 F の分布を示す。ひずみ度分布は壁近傍で u および v 成分の値とも正をとっている。境界層では u 成分の $S>0$ の結果はsweep事象を、一方 v 成分の $S>0$ の結果はejection事象と対応すると報告されている。本壁面噴流の壁近傍で、境界層と同種のパターンの存在が推測さ

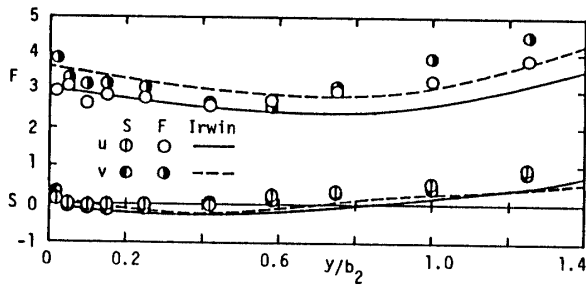


Fig. 4 Skewness and flatness profiles

れる. $y/b_2 > 0.6$ の領域で u および v 成分のひずみ度が正をとるが、これは流れ場の間欠性によりガウス分布からずれたものと思われる。扁平度分布は外層において u および v 成分とも値が 3 以上となっており、大振幅変動と関連した渦構造の存在が推察できる。これは境界層の外層でみられる乱流構造と関連していることが知られている¹¹⁾。S および F の分布は Irwin の結果⁹⁾ と同様の傾向を示しており、これからも本流れ場が十分発達した領域となっているものと考えられる。

3.2 壁近傍に注目した場合の組織構造

VITA 法による解析から得られた各変動成分の集合平均波形について調べてみる。Fig. 5 は u 変動成分の集合平均 \bar{u} を局所位置の u_{rms} で無次元化したものを、検出基準時刻からの時間遅れ t の無次元化時間 tU_m/b_2 に対して示す。検出基準位置の $y/b_2 = 0.0042$ の集合平均波形をみると、基準時刻の前後でパターンはゆるやかな減速の後、急加速（ピーク値は $2 u_{rms}$ 程度）し、その後再びゆるやかな減少を示す。この一連の事象は、乱流境界層の場合 ejection に続く sweep を示すバースト現象をあらわすと報告⁶⁾されている。これと対応したパターンは $y/b_2 \leq 0.21$ の範囲でみられる。ただし、 y/b_2 の増加につれ加速の程度は減少し、また加速の開始時刻は早くなっている。したがって、本流れ場においても下流に向い前傾姿勢をとる組織構造の存在が推測できる。これを加速を示す時刻から局所の速度を用いて距離に換算すると、約 18° の前傾角度であった。なお、 $y/b_2 \geq 0.33$ の範囲では基準位置の波形と対応した明確なパターンは見られない。

Fig. 6 は v 変動成分の集合平均 \bar{v} を局所位置の v_{rms} で無次元化したものを、時間遅れ tU_m/b_2 に対して示す。検出基準位置に近い $y/b_2 = 0.067$ の集合平均波形をみると、負の時間遅れで v 成分はゆるやかに負の値から加速し、正のピーク値（ $1 v_{rms}$ 程度）をとった後、比較的急激に減速して基準時刻で再び負の値をとり、その後ゆるやかに零の値に漸近していく。同様のパター

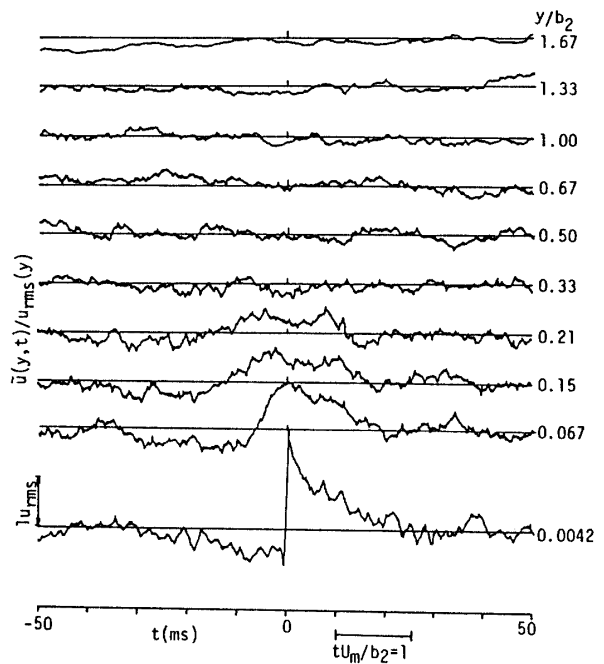


Fig. 5 Ensemble averaged profiles of u velocity component

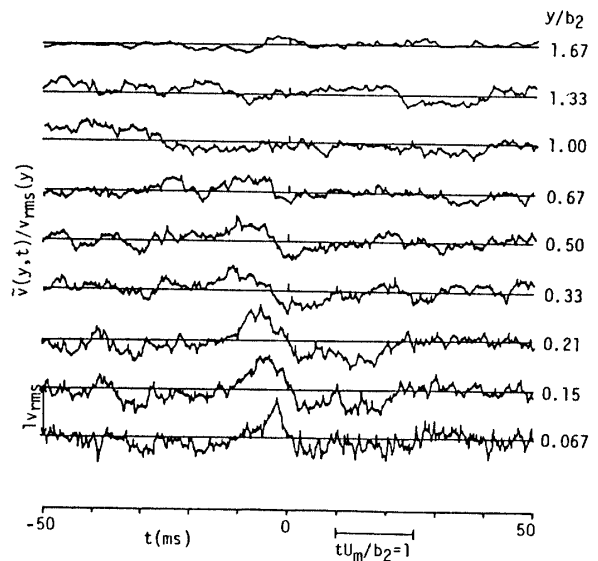


Fig. 6 Ensemble averaged profiles of v velocity component

ンは $y/b_2 \leq 0.67$ の範囲で観察でき、 \bar{u} 成分の場合より広い範囲で関連しているのがわかる。この場合、正のピーク値の大きさは y/b_2 によらず変化が小さく、加速を示す時刻は y/b_2 の増加につれ早くなっている。上述した \bar{u} 成分と \bar{v} 成分のパターンの対応から推測すると、乱流境界層でみられるバースト現象とは異なる組織構造をもつものと思われる。

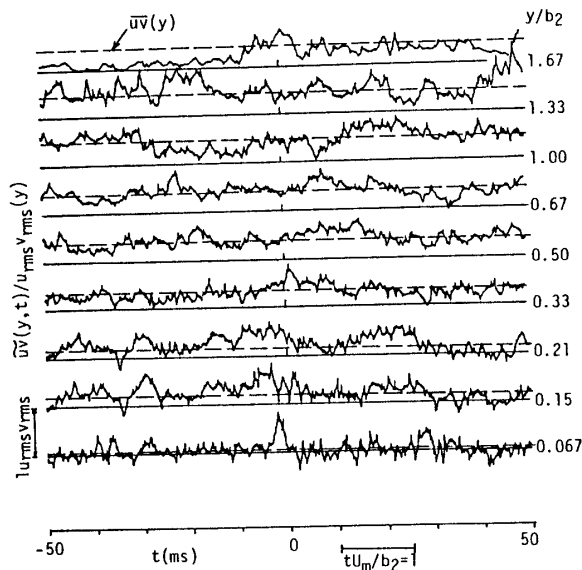


Fig. 7 Ensemble averaged profiles of uv correlation component

Fig. 7 は uv 相関の集合平均 \overline{uv} を局所位置の $u_{rms}v_{rms}$ で無次元化して示す。図中の破線は局所位置における \overline{uv} の値を示す。 $y/b_2=0.067$ の集合平均波形をみると、 \overline{u} 成分が正のピーク値をとる時刻で \overline{uv} 成分は正のピーク値 (\overline{uv} のおよそ12倍の値) をとっている。この位置はレイノルズ応力 \overline{uv} がほぼ零の値に近い特殊な位置であるが、図からわかるように大きな瞬時レイノルズ応力が発生している。したがって、レイノルズ応力が零の値を示すことと乱れの発生に寄与する組織構造が存在することは独立であると考えることができる。ただ壁面傍で発生することが予想される乱れの生成機構と外層における組織構造の相互作用過程が不明であり、上述したレイノルズ応力の値が零となる機構は説明するのが困難である。 \overline{uv} 成分が負の時間遅れで正の最大値をとる分布傾向は、 $y/b_2 \leq 0.21$ の範囲でみられる。ただし、そのピーク値は明白ではない。これは uv 相関の高周波変動のため、わずかの位相差により集合平均をとると相関値が低くなることによる⁶⁾ものと推測される。

上述した $y/b_2=0.0042$ の位置で検出した u および v 変動成分の集合平均分布のベクトル線図を描き、流れ場のパターンを調べてみる。 Fig. 8 は対流速度 U_c ののてみた場合の u および v 成分の集合平均のベクトル線図を示す。ここで、 U_c は推察される大渦の中心位置での局所流速であり、テイラーの仮説の妥当性の検討¹²⁾を参考にし、 $U_c=0.9U_m$ とした。図中、D.P は検出基準位置を示す。流れは左から右方向であり、横軸は対流

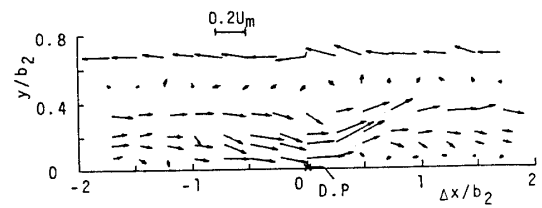


Fig. 8 Velocity vector in x - y plane

速度を用いて x 方向距離に換算している。 $y/b_2 \geq 0.67$ の領域で逆流成分が大きく現われている。これはこの範囲における平均流速が対流速度に比べ小さいことによる。D.P の点から下流において強い上昇流がみられ、その流れは $y/b_2=0.33$ 付近で二つに分岐して一対の渦を形成している様子がうかがえる。その一方は周囲の静止流体を巻き込むような渦形状をなしている。他方は最大流速位置より外側の流体を壁面側に巻き込むような渦形状を示す。したがって、この上昇流が渦対の幹根部分に相当し、そこで集合平均レイノルズ応力は前述したようにピーク値をとっている。この上昇流は壁面に対し約 25° の傾きをもっており、乱流境界層で知られているバースト現象の ejection 過程の傾き¹¹⁾ とほぼ同様である。それぞれの渦の流れ方向の寸法 Le を求めてみると、上方側の渦は $Le/b_2=2$ 、下方側の渦は $Le/b_2=1.5$ 程度であり、積分特性距離よりも大きいことがわかる。

さて無次元の事象発生周波数 f_1 について簡単に調べてみる。最大流速 U_m と半値幅 b_2 とにより無次元化すると、 $f_1 b_2 / U_m = 0.074$ である。ただし、この値は $y^+=14$ の位置で VITA 法 ($k=1.0$, $T^+=10$, 約10秒間で44事象の検出個数) を用いた場合の結果である。乱流境界層では $f_1 \delta / U_\infty = 0.13$ (δ は境界層厚さ、 U_∞ は主流速度) の程度の値が知られている。これらの比較をみると、壁面噴流の場合、壁面近くで生成する組織構造は境界層と比べ低いことを示す。

3.3 組織渦対構造の可視化

これまで調べてきた一対の渦対構造を確認するため水槽実験による可視化観察を行った。 Fig. 9 は可視化写真の一例で、流れは右から左方向である。この写真から渦対の発達過程について4段階の様子が観察されている。まず、噴流の上端側で流脈がくびれ周囲の静止流体を巻き込む姿勢をとりはじめるが、壁面側の流脈はなんら変化していない。次に、上端側の流脈は roll-up して渦を形成し、他方壁面側ではこの渦に誘起された渦が生成¹³⁾する。さらに下流で一対の渦対は環境水を



Fig. 9 Flow visualization of a pair vortex

巻き込んで発達し、姿勢が立ち上ってくる。そのため下流への対流速度が減少してくる。発達して低速となった渦は、後続の渦と合体し、さらに大きな尺度の渦となり、ついには崩壊していく。この可視化の結果と条件付集合平均波形との対応をみると、両者の間には実験レイノルズ数の差、測定位置の差があるが、得られた渦対パターンには類似性があるようである。すなわち VITA 法で検出された一対の渦構造は可視化の結果得られた壁面側の誘起された渦の形成初期から、大きな運動量をもつ流体の浮上する様子と対応するものとみなせる。ただ、壁近くの低速領域が誘起されて渦を形成する機構を説明した箇所は本実験からは推測の域を出ない。

4. 結 論

十分発達した乱流平面壁面噴流の組織構造について、VITA 法により解析し、一部流れの可視化観察との対応を調べることにより以下の点を明らかにした。

- (1) u および v 変動成分の集合平均波形から、本壁面噴流中に一対の渦対の形象をした組織構造が推察できる。そのうち、壁面側に形成する渦は周囲の静止流体を下方に巻き込むような形状をなし、一方上方側の渦は周囲の低速の流体を巻き込み、壁面側に輸送するような形状をとっている。
- (2) 検出基準位置付近でみられる強い上昇流は一対の渦対の根幹部分に相当し、それは壁面に対し約 25° の傾きをもつ。この領域で集合平均レイノルズ応力はピーク値をとる。
- (3) 検出基準時刻をはさみ、 \bar{u} 成分はゆるやかな減速の

後急加速し、その後再び減速するパターンを示す。このパターンは \bar{v} 成分と合わせてみると、従来知られている乱流境界層のバースト現象の構造とは異なるようである。

- (4) 水槽実験により、壁面噴流中の一対の渦対の発達過程を可視化した。これは十分発達した流れ場で条件付平均波形から推測した一対の渦対パターンと類似している。

参考文献

- 1) Alcaraz, E., ほか 2 名, Phys. Fluids, 20-2 (1977), 203.
- 2) 中川・ほか 3 名, 流れの可視化, 2-6 (昭57), 629.
- 3) 辻, 森川, Nagare, 8-3 (昭51), 18.
- 4) 大坂・ほか 3 名, 機論(B), 52-483 (昭61), 3729.
- 5) 大坂・ほか 3 名, 機論(B), 53-487 (昭62), 824.
- 6) Blackwelder, R. F. and Kaplan, R. E., J. Fluid Mech., 76-1, (1976), 89.
- 7) 影山・ほか 3 名, 機論(B), 51-467 (昭60), 2091.
- 8) Wilson, D. T. and Goldstein, R. J., Trans. ASME, Ser.I, 98-3 (1976), 550.
- 9) Irwin, H. P.A.H., J. Fluid Mech., 61-1 (1973), 33.
- 10) Launder, B. E. and Rodi, W., Prog. Aerospace Sci., 19 (1981), 81.
- 11) Brown, G. L. and Thomas, A. S. W., Phys. Fluids, 20-10 (1977), S243.
- 12) 大坂・ほか 3 名, 機論(B), 52-473 (昭61), 25.
- 13) Lugt, H. J., Vortex Flow in Nature and Technology, (1983), 94, John Wiley & Sons.

(平成元年10月14日受理)