平面壁面噴流の組織構造に関する研究*
(VITA法およびTD法による解析)大坂 英雄**, 藤井 英樹***
杉原 正浩†, 影山 芳郎††The coherent structure of a plane turbulent wall jet
(Analysis with the VITA technique and Time domain method)Hideo OSAKA, Hideki FUJII,
Masahiro SUGIHARA, and Yoshiro KAGEYAMA

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 and TD method were utilized in the inner and the outer region of the wall jet respectively. 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. These events were at an oblique angle of about 25 deg. to the wall.

Key Words: Turbulence, Plane Wall Jet, Coherent Structure, VITA-Technique, Time Domain Method

1. 緒 言

本研究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を目的とする。

本流れ場は内層(境界層的)と外層(自由噴流の)⁽¹⁾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れ場であるため、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い。しかし、これに類する流れ場の組織構造に関する報告は極めて少ない。これは一つには異なる乱流構造の干渉といった複雑な過程を含むため、結果の解釈が難しいためであろう。著者らの知る限り、Alcarazら⁽²⁾による曲壁上の壁面噴流の象限分割法による若干の解析、中川ら⁽³⁾による水槽を用いた可視化による渦対の構造の成長過程の観察、辻ら⁽⁴⁾による壁面噴流の線形安定理論による流線パターンと可視化、大坂ら⁽⁵⁾⁽⁶⁾による条件付集合平均分布の解析がある程度である。したがって、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(比較的低レイノルズ数)で観察される一対の渦の形象と十分発達した領域で見られる渦構造との対応等に関する問題はいぜんとして不明のままである。

そこで本報では、十分発達した流れ領域の内層ではVITA法⁽⁷⁾を、外層ではTD法⁽⁸⁾を用いて条件付集合平均分布を求め、さらに一部流れの可視化から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 図1は流れ場の概要、主要記号および座標系を示す。実験に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 $s_t=10$ mm、測定平板は全長2320mmのアルミ製板である。測定位置は流れ方向距離 $x=1500$ mm($x/s_t=150$)で、実験条件はノズル出口レイノルズ数 $Re=U_0 s_t/\nu=1.7\times 10^4$ (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 $b_m=18$ mm、半値幅 $b_2=120$ mm、最大流速値 $U_m/U_0=0.30$ 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

* 昭和61年8月18日 第937回講演会において講演、原稿受付 昭和61年1月13日。

** 正員、山口大学工学部(〒755 宇部市常盤台)。

*** 准員、マツダ(株)(〒730-91 広島市外府中町)。

† 学生員、山口大学大学院。

†† 正員、山口大学工業短期大学部。

形プローブによる定温度熱線流速計を用いた。VITA法⁽⁷⁾では検出基準用としてI形プローブを、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。一方、TD法⁽⁸⁾の場合、検出基準および移動プローブ用ともX形プローブを用い、4本を同時に併用して測定した。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、10 kHzのサンプリング周波数で10秒間AD変換した後、大形計算機で解析した。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。なお、水槽実験に関しては3・4節で述べる。

2・2 VITA法による解析 内層に注目した測定では、境界層の場合よく利用されているVITA法⁽⁷⁾を利用した。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10 msの間の u 成分の平均が負となることの2条件を加えた。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ものと思われる。

2・3 TD法による解析 外層に注目した測定では、自由噴流で用いられたTD法⁽⁸⁾を採用したが、こ

こでは u 成分の正のピーク値のみに注目した。検出基準位置は $y/b_2=1.0$ である。検出基準時刻はしきい値を $k'=1.5$ とした(試行錯誤により決定)場合の条件を満足する時間領域の始点とした。また50 ms以内に連続して検出された事象は一連の事象とみなした。

3. 結果および考察

3・1 時間平均特性 図2は平均速度および間欠係数分布を示す。平均速度分布は $y/b_2=0.15$ 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、図中 $\odot$ 印は u 成分波形から $u/U_m > 0.067$ 以上でその保持時間が12.5 ms以上のものを乱流と判定して求めたものであり、一方 $\ominus$ 印は u 成分の微係数に着目し、 $(\partial u/\partial t)^2 \geq 0.003 \{(\partial u/\partial t)^2\}_{y=y_m}$ の条件を満たす時間領域を乱流と判定して求めたものである。両者はよく一致しており、 $\gamma=0.5$ をとる位置は $y/b_2 \approx 1.5$ である。これらの分布はIrwinの結果⁽¹⁰⁾ともよく一致しており、本流れ場が十分発達した領域となっていることを示す。図3は乱れ強さの3成分(x 方向は u_{rms}/U_m 、 y 方向は v_{rms}/U_m 、 z 方向は w_{rms}/U_m 、rms値は実効値)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のレビュー論文⁽¹¹⁾中に引用された多数の著者の結果とほぼ同様である。図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 成分ともに正である。境界層では u 成分の $S > 0$ の結果はスweepを、一方 v 成分の $S > 0$ の結果はエジェクションと対応すると報

図1 流れ場のモデル、主要記号および座標系

図2 平均速度分布および間欠係数分布

図3 乱れ強さおよびレイノルズせん断応力分布

告⁽¹²⁾されている。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。これは境界層では外層における乱流パルジと関連していると報告⁽¹²⁾されている。 S および F の分布は Irwin の結果⁽¹⁰⁾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 2・2節で述べた 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。図5は u 変動速度成分の集合平均 $\bar{u}$ 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緩やかな減速の後、急加速（ピーク値は

図4 ひずみ度および扁平度分布

図5 VITA 法による u 変動速度成分の集合平均波形

$2u_{rms}$ 程度)し、その後再び緩やかな減少を示す。この一連の事象は、乱流境界層の場合エжекションに続くスweepを示すバースト現象を表すと報告⁽⁷⁾されている。これと対応したパターンは $y/b_2 \leq 0.21$ の範囲で見られる。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かって前傾姿勢をとる組織構造の存在が予想される。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、前傾姿勢の角度は約 18° であり、乱流境界層の場合とほぼ同様⁽¹³⁾である。 $y/b_2 \geq 0.33$ 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。

図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 $\bar{v}$ 成分は緩やかに負の値から加速し、正のピーク値 ($1v_{rms}$ 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、その後緩やかに零の値に漸近していく。同様のパターンは $y/b_2 \leq 0.67$ の範囲で観察できる。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をみると、乱流境界層で見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。

図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、 $\bar{v}$ 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)をとる。と

図6 VITA 法による v 変動速度成分の集合平均波形

ここで、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は発生しており、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とは独立であるように考えることができるようである。ただ、壁近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、レイノルズ応力の値が零となる機構は今のところ説明ができない。 $\overline{w}$ 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、ピーク値は明白ではない。これは uv 相関は高周波変動のため、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⁽⁷⁾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。図8は対流速度 U_c によってみた場合の 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⁽¹⁴⁾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。検出基準位置(図中、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す。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根幹部分に相当し、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° の傾きを持っており、乱流境界層で知られているバースト現象のエジェクション過程の傾き⁽¹³⁾とほぼ同様である。それぞれの渦の流れ方向の寸法 L_e を求めてみると、上方側の渦は $L_e/b_2 = 2$ 、下方側の渦は $L_e/b_2 = 1.5$ 程度であり、積分特性距離よりも大きいようである。

さて、無次元の事象発生周波数 f_i 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、 $f_i b_2 / U_m = 0.074$ である。ただし、この値は $y^+ = 14$ 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 $f_i \delta / U_\infty = 0.13$ (δ は境界層厚さ、 U_∞ は主流速度)⁽⁷⁾程度の値がよく知られている。これより、壁面噴流の場合、壁面近くで生成する組織構造が境界層と比べ低いことを示すものと思われる。

3.3 外層領域に注目した場合の組織構造 2・3節で述べた TD 法による解析から得られる各変動成

図8 対流速度を用いて表したベクトル線図

図7 VITA 法による uv 相関の集合平均波形

図9 TD 法による u 変動速度成分の集合平均波形

分の集合平均波形について調べてみる。図9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 $y/b_2=1.0$ の集合平均波形をみると、負の時間遅れで負の $\bar{u}$ の値をとりながら緩やかに減速した後、急加速して検出基準時刻で正のピーク値（およそ $2u_{rms}$ の大きさ）をとり、その後再び緩やかに減速するパターンを示す。このパターンは壁近傍でみられるパターンと比べ、急加速の程度がややゆるやかであること、また全パターンが広い範囲の時刻で生じていることがわかる。また、従来自由噴流で観察されているパターン⁽⁸⁾とも本パターンはかなり異なっている。上述の検出基準位置で見られたものと対応するパターンは $y/b_2=0.067\sim 2.0$ の図示した全範囲にわたり観察できる。したがって、壁面噴流の流れ場全体を包むような大きな尺度の組織構造が存在することが予想される。パターンをみると、加速を示す時刻は $y/b_2 \geq 0.5$ の範囲で y/b_2 の増加につれて遅くなり、一方 $y/b_2 \leq 0.21$ の範囲では逆に早くなっている。これより外層では組織構造は下流に向かって後傾する姿勢（平均速度分布形状と同様）をとり、その後傾する角度は流れ方向に対し約 70° である。上述のパターンは負の時間遅れで周囲の静止流体を噴流中に巻き込み、検出時刻付近で壁面側の運動量の大きい流体を外方に噴出させ、その後正の時間遅れで低速流体を巻き込むような渦対の形象を示すものと考えられる。

図10は v 変動成分の集合平均 $\bar{v}$ を局所位置の v_{rms} で無次元化して示す。検出基準位置の $y/b_2=1.0$ の集

図10 TD法による v 変動速度成分の集合平均波形

合平均波形をみると、 $\bar{u}$ 成分とほぼ同位相のパターンを示している。すなわち、前述した一対の渦対を表すような形象とよく対応している。これと同様の $\bar{v}$ 成分のパターンは $y/b_2=0.067\sim 2.0$ の全領域にわたりみられ、しかもその $\bar{v}$ 成分のパターンはそれぞれの局所位置における $\bar{u}$ 成分とほぼ同位相のパターンを示す。このことは外層で検出される大きな尺度をもつ組織構造はかなり規則的で明白な構造をもつものと解釈される。

図11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。検出基準位置の $y/b_2=1.0$ の集合平均波形をみると、全時刻で $\overline{uv}$ は正の値を示しており、検出時刻で $2u_{rms}v_{rms}$ のピーク値（ $\overline{uv}$ の4倍程度）をもっている。この位置は内層の大きな運動量をもつ流体塊が上方に輸送されるところであり、渦対をなすとみられる組織構造の根幹部分に相当する領域と考えられ、この領域がレイノルズ応力 $\overline{uv}$ の発生にかなり大きく寄与していることがわかる。上述のパターンと対応するものは $y/b_2 \geq 0.83$ の範囲でみられる。特に $\overline{uv}$ が間欠的に大きな値をとる特徴的な分布は、乱流境界層の外層部分で見られるものと異なっているようである。他方、 y/b_2 が小さい値の範囲では $\overline{uv}$ 分布のピークが明りょうには観察されず、またそれぞれの局所位置における値はせいぜいその位置の $\overline{uv}$ の値程度である。

次に、内層の場合と同様、外層の $y/b_2=1.0$ 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。

図11 TD法による uv 相関の集合平均波形

図12は対流速度 U_c (ここでは $U_c = 0.5 U_m^{(4)}$) のついでた場合の u および v 変動成分の集合平均のベクトル線図を示す。図中、 $y/b_2 < 0.5$ の範囲は示しておらず、また D.P は検出基準位置を示す。流れは左から右方向であり、横軸は対流速度を用いて x 方向距離に換算している。図中に反時計方向回りの大渦が二つ観察される。これは前述した一対の渦対のうち上方側に形成されるものと思われ、周囲の低速の流体塊を巻き込む形状をとらえているものと解釈される。ただし、よく似たパターンを辻ら⁽⁴⁾は壁面噴流の線形安定論より求めた流線パターン (位相速度とともに動く座標系) で報告しており、またこれを可視化観察の結果と照合している。また図中の D.P 近くで観察される上昇流は一対の渦対 (図中には下方側のものは描かれていない) の根幹部分に相当している。この位置はそこでの渦の引き延ばしにより瞬時レイノルズ応力の成分がピークをとる位置付近でもある。なお、ここで示した大渦の流れ方向の尺度は $L_e/b_2 = 3$ 以上の値をとる。この大渦の発生周波数 f_0 を調べてみると、 $f_0 b_2 / U_m \approx 0.086$ であり、内層で検出された事象の無次元発生周波数と近い値をとっている。一方、乱流境界層では内層と外層で検出される事象の発生周波数には大きな隔たりがあることが報告⁽⁷⁾されている。

3.4 組織渦対構造の可視化 これまでに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。水槽⁽¹⁵⁾は幅 40 cm、長さ約 2 m の測定部を持つ。実験はノズル高さ s_t に基づくレイノ

図12 対流速度を用いて表したベクトル線図

図13 染料法による渦対構造の可視化

ルズ数が $U_0 s_t / \nu \approx 3200$ ($U_0 \approx 23$ cm/s, $s_t = 20$ 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。図13は可視化写真の一例で、流れは右から左方向である。これより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⁽¹⁶⁾する。さらに下流で一対の渦対は環境水を巻き込んで発達し、姿勢が立ち上ってくる。そして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、ついには崩壊する。写真ではこれがノズル下流 $x/s_t \approx 6 \sim 12$ の範囲で生じていた。この可視化の結果と条件付集合平均波形との対応についてみると、両者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にみえる。すなわち、VITA法で検出された一対の渦構造 (図8) は可視化の結果で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。一方、TD法で検出された集合平均波形から予想される渦構造は、完全に発達した渦対のうち上方側のものを表すものであろう。以上述べたように、VITA法およびTD法により各変動成分が得られた場所は十分発達した壁面噴流領域と考えられるが、この領域において予想される組織構造が壁面噴流の初期の生成過程で可視化により観察された渦対構造に極めて似ていることは興味深い。

4. 結 言

十分発達した乱流平面壁面噴流の組織構造について、内層では VITA 法、外層では TD 法を用いて解析し、さらに一部流れの可視化観察を行うことにより、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状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、一方上方側のもの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、内層および外層とも $\bar{u}$ 成分は緩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、あるいは自由噴流の組織構造とは異なる。

(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よく似ている。

文 献

- (1) 大坂・ほか4名, 機論, 48-429, B (昭57), 880.
- (2) Alcaraz, E., ほか2名, *Phys. Fluids*, 20-2 (1977), 203.
- (3) 中川・ほか3名, 流れの可視化, 2-6 (昭57), 629.
- (4) 辻・森川, *Nagare*, 8-3 (昭51), 18.
- (5) 大坂・ほか2名, 機論, No. 855-1 (昭60-3), 130.
- (6) 文献(5)の133ページ.
- (7) Blackwelder, R. F. and Kaplan, R. E., *J. Fluid Mech.*, 76-1 (1976), 89.
- (8) Bruun, H. H., *J. Fluid Mech.*, 83-4 (1977), 641.
- (9) Wilson, D. T. and Goldstein, R. J., *Trans. ASME, Ser. I*, 98-3 (1976), 550.
- (10) Irwin, H. P. A. H., *J. Fluid Mech.*, 61-1 (1973), 33.
- (11) Launder, B. E. and Rodi, W., *Prog. Aerospace Sci.*, 19 (1981), 81.
- (12) Wood, D. H. and Antonia, R. A., *Trans. ASME, Ser. E*, 42-3 (1975), 591.
- (13) Brown, G. L. and Thomas, A. S. W., *Phys. Fluids*, 20-10 (1977), S243.
- (14) 大坂・ほか3名, 機論, 52-473, B (昭61), 25.
- (15) 影山・ほか3名, 機論, 51-467, B (昭60), 2091.
- (16) Lugt, H. J., *Vortex Flow in Nature and Technology*, (1983), 94, John Wiley & Sons.