A202 曲率の大きい凹面に沿う乱流壁面噴流に発生する 縦渦の発達過程の可視化

群馬大学工学部 藤沢延行

Visualization of Developing Processes of Longitudinal Vortices Produced in Turbulent Wall Jets along a Strongly Concave Surface

Nobuyuki FUJISAWA*

Developing processes of longitudinal vortices produced in turbulent wall jets along a concave surface are studied by flow visualization with smoke-wire method and moving laser-sheet technique. It is found that the formation of the vortices is mainly due to the spanwise secondary-flow-motion in the wall region, while they grow normal to the surface in the downstream reaching to the middle of the jet region. The vortices in the downstream are strongly affected by the intermittent turbulent-structure in the jet region so that they behave unsteadily in space and time.

1. 緒言

乱流壁面噴流は、境界層と噴流の特性を合わせ持つ流れ場であり、境界層制御に関連して工学上応用される。このため、乱流壁面噴流に関する研究は、比較的曲率の小さい曲面に沿う場合の諸特性を実験的ならびに理論的に検討することを中心に進められてきた。さて、曲率の大きい凹面に沿う乱流壁面噴流においては、遠心力に起因する縦渦の発生が予想されるが、その存在は四塩化チタン法⁽¹⁾、スモークワイヤ法⁽²⁾、タフトグリッド法⁽²⁾などの種々の可視化手法によって検討されている。すなわち、凹面乱流壁面噴流の曲率 b/R が0.2より大きくなると、壁領域内の速度分布は遠心力に対し不安定となることが安定性理論⁽³⁾より得られるが、その結果生じる縦渦は時間的および空間的に強い変動性⁽⁴⁾を持つことが可視化実験により確認された(b :壁面噴流の半値幅、 R :曲率半径)。しかしながら、その縦渦構造の詳細や凹面乱流境界層中に発生する定常な縦渦列^{(5)・(6)}との比較については、現在のところ十分には検討されていない。

本研究においては、凹面壁面噴流内に発生する縦渦構造の詳細を明らかにすることを目的とし、スモークワイヤ法と流れとともに移動するレーザーシート光源法⁽⁷⁾を併用し、壁面噴流内に発生する縦渦の断面構造の可視化観察を行う。

* Faculty of Engineering, Gunma University, 1-5-1 Tenjin, Kiryu, 376.

2. 実験装置および方法

図1に実験装置測定部の概略を示す。すなわち、収縮ノズル吹き出し口（高さ $d=8\text{mm}$ 、幅 600mm ）の下流側に長さ $l_1=1400\text{mm}$ の平面壁を取り付け、その下流側に一定曲率半径 $R=250\text{mm}$ の凹面壁および長さ $l_2=400\text{mm}$ の下流側平面壁を設置する。ただし、凹面壁は中心角 $\theta=90^\circ$ の範囲で曲げられている。この実験条件は、平均流および乱流特性の測定⁽¹⁾およびスモークワイヤ法とタフト法による縦渦の観察⁽²⁾を行った条件と同じである。したがって、本実験における凹面壁入口（ $\theta=0^\circ$ ）での曲率は $b/R=0.45$ 程度と考えられ、理論的縦渦発生条件⁽³⁾を満足する。本実験ではノズル出口における平均風速 $U_0=2\text{m/s}$ に設定し、スモークワイヤ法を用いて流れ場を可視化した。ここに、使用したワイヤは直径 0.1mm で長さ 500mm のニクロム線である。スモークワイヤの設置位置は、既報⁽²⁾に示したように、縦渦構造が最も明瞭に観察される条件から、凹面壁入口から測った角度 $\theta=45^\circ$ の位置である。光源としては、 3W 出力のアルゴンレーザを用い、その出力は光ファイバとシリンドリカルレンズを用いて、観察領域では厚さが約 10mm のレーザシートを得た。また、シリンドリカルレンズならびに観察用のCCDカメラは、いずれもステッピングモータ駆動のトラバース装置に取り付けられており、移動速度 $V_t=0\text{--}400\text{mm/s}$ の範囲で同時に一定速度で移動が可能である。したがって、CCDカメラの焦点位置は、トラバース時に

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus
($R=250\text{mm}$, $l_1=1400\text{mm}$, $l_2=400\text{mm}$)

Fig.2 Distributions of pressure coefficient c_p
along a strongly concave surface

Fig.3 Streamwise variations of half width b and
maximum velocity U_m

Fig.4 Streamwise variations of maximum turbulence
intensity $\sqrt{u'^2_{max}}/U_m$

においても常にレーザシート上にあることになる。

3、 結果および考察

3. 1 流れ場の基本特性 図2-図4は、本実験条件下における凹面壁面噴流の壁面上で測定した圧力係数 c_p (図2)、半値幅 b と最大速度 U_m (図3)、そして、主流方向乱れ強さの最大値 $\sqrt{u'^2}_{max}$ (図4)の諸特性が下流方向に変化する関係⁽²⁾を示す。ただし、 x はノズル出口から測った下流方向距離である。図3と図4には、比較のため、平面壁面噴流に対する結果も示した。図2からわかるように、凹面壁の入口($\theta=0^\circ$)付近では圧力係数 c_p の値がかなり急激に増大しており逆圧力勾配が形成されるが、 $\theta=45^\circ-90^\circ$ では反対に順圧力勾配が発生する。この影響を受けて、半値幅や乱れ強さは、図3と図4に示すように、凹面壁入口付近での急激な増大とそれに続く下流側での減少傾向が表れる。ただし、凹面壁下流側での半値幅や乱れ強さの減少は、十分に発達した凹面壁面噴流の一般的特性であり、既報⁽²⁾の可視化結果によると、このような領域で明瞭な縦渦構造が観察されたことになる。

3. 2 縦渦構造の可視化 図5は、本実験の凹面壁面噴流に対し、スモークワイヤを $\theta=45^\circ$ に設置しその下流側に形成される縦渦構造の変化を流れとともに移動するレーザシート光源を用いて可視化観察した結果(a)およびそれに対応する平面壁の結果(b)を示す。ここに、スモークワイヤの設置位置から測った壁面に沿う距離 x' が50、100、150、200、250mmについて示す。ただし、いずれの観察結果においても最も縦渦が明瞭に観察される条件から、スモークワイヤは壁面から20mmの距離とした。また同様にして、レーザシート光源の移動速度は、 $V_L=200\text{mm/s}$ に設定したが、この速度は、図4の最大速度の減衰結果からすると、観察領域における最大速度 U_m のほぼ1/2程度に対応する。

スモークワイヤの設置位置付近($\theta=45^\circ$)では、幅方向にほぼ様な発煙が見られるが、ワイヤ下流側 $x'=50\text{mm}-100\text{mm}$ では煙が非一様化し、徐々に流路中央付近に煙が集まる様子が認められる。これは、縦渦構造を持つ二次流れが壁面噴流断面内に形成されたことを示しており、この位置付近ではスパン方向の二次流れ速度成分が大きいことがわかる。一方、ワイヤ下流側の $x'=150\text{mm}-200\text{mm}$ では、縦渦は壁面に垂直方向に発達し、壁面に垂直方向の二次流れ速度成分が卓越することを示唆する。本実験結果によると、スモークは壁面噴流の半値幅付近まで達するため、縦渦は噴流領域の大きな速度変動と断続的な渦構造の影響を受ける。またスモークは、噴流領域で強い拡散性を示している。このことは、凹面乱流境界層内に発生する定常な縦渦構造^{(5)、(6)}との大きな違いであり、凹面乱流壁面噴流の場合に見られる非定常な渦構造を生ずる主因といえる。さらに、最も下流側の $x'=250\text{mm}$ の結果は、下流側の平面壁部に流入後の渦構造を示すものであるが、図2の壁面圧力係数分布から明らかなように、遠心力がかなり小さくなるため、縦渦発生臨界条件を満足していないと考えられる。これに対応して、観察結果には縦渦構造の拡散に至る所で認められ、二次流れ速度成分の減少と乱流構造の一様化が予期される。一方、平面壁の場合の可視化観察結果(b)には、このようなスケールの縦渦構造は認められず、凹面壁の場

合との相違は明らかである。

4. 結論

曲率の大きい凹面壁に沿う乱流壁面噴流に発生する縦渦の発達過程を、流れとともに移動するレーザシート光源を用いて可視化観察し、その構造の変化を検討した。渦形成段階ではスパン方向の二次流れ成分が大きい、下流側の発達段階では壁面に垂直方向の外側に向う二次流れ成分が顕著になり、渦は噴流領域の中央にも及ぶ。このとき、渦は噴流領域の影響を強く受けるため、非定常な渦構造を示し、凹面乱流境界層の場合との相違を示唆する。

終わりに、本実験において協力された、元群馬大学工業短期大学部学生の田島桂太郎君に感謝するとともに、トラバース装置の使用において協力を受けた(株)日本精工の諸氏に謝意を表す。

文献

- 1) Kobayashi, R. and Fujisawa, N., Acta Mech., 47(1983) 39
- 2) 藤沢・他2名、流れの可視化、10(1990) 43
- 3) 藤沢・白井、機論(B)、52(1986) 1249
- 4) Barlow, R.S. and Johnston, J.P., J. Fluid Mech., 191(1988) 137
- 5) Tani, I., J. Geophys. Res., 67(1962) 3075
- 6) 志沢・ほか2名、機論(B)、50(1984)、51
- 7) 高曾・ほか2名、可視化情報、10-Suppl.2(1990), 53

Fig.5 Visualization of lonitudinal vortices in turbulent wall jets