三次元壁面噴流のタフト法による可視化

矢野 治久[○] (大同工大), 王 開 (大同工大)
井上 吉弘 (岐阜大), 山下 新太郎 (岐阜大)

Flow Visualization of a Three-Dimensional Wall Jet using the Tuft-Grid Method

Haruhisa YANO, Kai OU, Yoshihiro INOUE and Shintaro YAMASHITA

ABSTRACT

This study is to clarify the flow structure of a three-dimensional wall jet discharged on a flat surface from a round nozzle. Instantaneous flow pattern parallel to the wall was visualized by depth-tuft method, and the feature of the large-scale structures existed in the present wall jet was examined. It was revealed that a streak flow pattern corresponding to a ridge pattern of tufts was dominant structure, and that the streaks were generated quasi-periodically. The flow following capability of the tufts was calibrated using a sinusoidally oscillating wind-tunnel.

Keywords: Three-Dimensional Wall-Bounded Flow, Secondary Flow, Tuft-Grid Method

1. ま え が き

三次元壁面噴流は、おもな流れ場が噴流軸方向への主流とこれと直交する面内の二次流れとによって構成される。本著者らはこれまでに、熱線プローブを用いた速度場の測定¹⁾とタフト法による流れの可視化²⁾によって、この流れ場を調べてきた。Fig. 1は、速度場の測定値から得た噴流幅の流れ方向変化を示す。図より、壁垂直方向への噴流半値高さ $y_{0.5}$ の広がり率に対して、横方向への半値半幅 $z_{0.5}$ の広がり率は約 4.5 倍だけ大きい。Launder & Rodi による展望³⁾でも指摘されているように、この非等法的な噴流の発達为本流れ場の特徴である。

本研究は、流れ場の非等法的発達に寄与する流れ機構の解明を目的とする。この課題は従来から多くの研究者によって取り組まれてきており、高曾ら⁴⁾は染料画像から横断面内流れを観察し、有意な結果を示した。そこで、本研究でも可視化実験を行うこととし、二次流れ方向の判別が容易なタフトグリッド法を採用した²⁾。本報告では、デプスタフト画像による壁面に平行な流れの考察と、タフトの流れへの追従性試験の結果を述べる。

2. 実験装置と実験方法

噴流用風洞およびタフトグリッドの詳細は前報²⁾のとおりであり、噴流ノズル出口直径 d は 20 mm である。座標系は、流れ方向に x 軸、壁に垂直に y 軸、これらと垂直な横幅方向に z 軸をとる。本報告で調べる流れは測定平板に平行な面 (x - z 面) 内の流れであり、可視化には、一辺 20 mm の正方格子を形成するよう植え込まれたピアノ線先端に長さ 18 mm の絹製燃糸を接着したデプスタフトを用いた。実験はノズル出口流速 $U_j \approx 20$ m/s にて行い、可視化観察の結果は家庭用デジタルビデオカメラ (30 fps, 媒体 miniDV tape) で記録した。

3. 実験結果

Fig. 2はタフト可視化画像の1ショットを示す。噴流は写真左下の噴出口から水平右向きに流下し、重力は図中下向きに作用している。可視化範囲は、流れ方向にノ

ズル出口から $46d$ まで、横方向に噴流軸から約 $20d$ までである。Fig. 1より噴流半値半幅は $x/d = 40$ において $z_{0.5}/d = 6.4$ となっており、Fig. 2ではこのおよそ2倍の距離までタフトの変化が観察される。

タフトは穂波のごとく流れに従って変化し、Fig. 2の $x/d \approx 30$ では、噴流軸に向かう流れと遠ざかる流れのストリークがタフトのリッジ状パターンとして観察できる。パターンの形成は壁面ごく近傍の小スケール乱流構造にはあまり依拠せず、むしろ壁面噴流外層の大規模構造によるものと推測される。前報²⁾における横断面タフトグリッドの観察によれば、外層の流れ構造は旋回流の形成とその噴流外縁方向への移流が特徴となる。

流れの時間的変化を表す手法として、撮影画像から注目箇所における画像を切り出し、時間経過に従って画像を再合成する方法を本研究でも用いた。Fig. 3は、流れ方向位置 $x/d \approx 30, 35, 41, 45$ において、タフト長程度の画素幅 (15 pix.) で画像を切り出し、120 frames 分を右か

Fig. 1 Streamwise variation of length scales of the three-dimensional wall jet measured by a hot-wire probe.

Fig. 2 Instantaneous images of the surface flow visualized with the depth-tuft grid.

Fig. 3 Reconstructed tuft images $I_i(z, t)$ in streamwise distance, x/d , of (a) 45, (b) 41, (c) 35, and (d) 30. The abscissa is dimensionless time, and the ordinate is the distance in the z -direction.

ら左方向に再合成した図である。なお、図の横軸はframe数を時間に換算して表記する。リッジ状パターンはFig. 3の再合成画像にもよく現れ、図よりパターンの発生周期を読み取ることができる。また、パターンの明瞭度は下流ほど高く、発生周期は短くなるようである。

タフト法による可視化の場合、常に問題とされるのはタフトの流れへの追従性である。本研究では、噴出口 $200 \times 60 \text{ mm}^2$ の検定用小型風洞を製作し、検定実験を行った。風洞全体をスコッチ-ヨーク機構を用いた往復振動テーブル上に設置し、正弦波状に周期変化する横流れ成分の重畳された一様流を用いた。Fig. 4は、この風洞出口にタフト板を設置した様子を示す。

Fig. 5は検定実験の結果を示す。風洞噴出速度 U_0 は約 5 m/s 、振動振幅 L は 80 mm 、周波数 f_0 は約 $1, 2, 3 \text{ Hz}$ であり、これより横流れ速度振幅 $2\pi f_0 L$ の噴出速度に対する比は $0.1, 0.2, 0.3$ となる。この条件の下、Fig. 5は、タフトの振動状態を抽出するべく、タフト先端近傍の画素列のみで再合成された画像を示す。各図の最上段は風洞出口端の位置画像である。各タフトは風洞振動周期とほぼ同じ周期で変動しており、 f_0 の増加とともにタフトの振幅も概ね増加する。また、風洞出口から遠いタフト (5th) ほど変動波形にノイズが混入するようになるが、これは流れ自身の問題と思われる。今後、検定流れ場の速度測定を行い、詳細に検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 井上, 矢野, 山下: 機論B編, Vol.72, No.724 (2006) p.2940.
- 2) 井上, 矢野, 山下: 可視化情報, Vol.26, suppl.-2 (2006) p.329.
- 3) Launder, B.E., Rodi, W.: Annu. Rev. Fluid Mech., vol.15 (1983) p.429.
- 4) 高曾, 長沢, 速水: 可視化情報, Vol.10, suppl.-2 (1990) p.53.

Fig. 4 Top view of a calibration wind-tunnel and tuft-grid plate. The wind tunnel is oscillating horizontally.

Fig. 5 Reconstructed tuft images $I_i(t)$ at oscillation frequency, f_0 , of (a) 1 Hz , (b) 2 Hz , and (c) 3 Hz .