5 タフト法による円管内旋回流の可視化と定量化

東大生研 佐賀 徹雄 瀬川 茂樹[○]

小林 敏雄 上村 康幸

Visualization and quantitative analysis of a turbulent swirling flow in a pipe
by use of tuft-grid method

Tetsuo SAGA*, Shigeki SEGAWA*, Toshio KOBAYASHI*, Yasuyuki KAMIMURA*

A turbulent swirling air-flow in a straight pipe is visualized by use of tuft-grid method. A contrivance is proposed in order to prevent a strong vibration of tufts.

Velocity distributions are also measured by hot wire anemometer and the velocity ratio V_θ/V_z by hot wire measurement is compared with the flow direction by tuft-grid method.

1. まえがき

給水管、廃水管などは長年の使用により腐蝕や圧力抵抗の増大などのトラブルをもたらす。高層ビル、高層住宅などの配管網は交換困難な場合が多く、配管網をそのままの状態で清掃、再生する方法が必要とされている。その中の一方法として老朽化した管を研磨材およびエポキシ樹脂系塗料を含んだ高速旋回流で研磨、ライニングを行なう工法がある。本報では試作した旋回流発生装置を用いて管内旋回流を発生させ、管内旋回流の方向をタフトグリッド法および熱線風速計によって測定した。比較結果とタフトグリッド法における一工夫を紹介する。

2. 実験装置

実験装置の概略を図1に示す。送風機①（最大流量 $8\text{ m}^3/\text{min}$ ，締切圧 600 mmHg ，吹口口径 50 mm ）より送り出された空気は，拡大整流部②において内径 100 mm の管に拡大，整流されたのち，ピトー管③によって流速を計測され，旋回流発生装置（内径 300 mm ，全長 1200 mm ）④に入る。旋回流発生方法は次の通りである。流れ方向に 100 mm 離れた位置に2枚の円板を置き，それらの円板を貫通するように8本の内管（内径 38 mm ）を通す。上下流側に取り付けた円板を相対的に回転させることにより内管の軸方向との傾き角が変化し，任意の旋回流を得る

Fig.1 Experimental apparatus

* Institute of Industrial Science, University of Tokyo

ことができる。2枚の円板の相対回転角度は $0 \sim 50$ 度である。④で発生した旋回流は、絞り⑤で断面積比 $1/9$ に絞られ $4D$ ($D=100\text{mm}$)の助走区間を経て、第1測定部⑥に達する。第1測定部(内径 $D=100\text{mm}$)ではタフトグリッド法により旋回流の可視化を行うとともに、熱線風速計を使用して軸方向、周方向、半径方向の3方向速度成分の計測を行なう。第1測定部より $2D$ 下流に第2測定部を設け、第1測定部と同様に熱線風速計による3方向速度成分を計測する。

タフトグリッド法による撮影方法を図2に示す。あらかじめタフトグリッドを配置したアクリル管(内径 100mm 、長さ 300mm)を第1測定部に取り付け、撮影部の周辺を暗くした上で写真用ライト($500\text{W} \times 2$)によって左右から照明し、 200mm の望遠レンズをもつカメラで管軸とカメラ中心を一致させ、グリッド面より 1500mm 下流より写真撮影する。後述するようにこの撮影結果の解析から旋回流の流れ方向が求められるが、参考のためこの撮影方法に同時に管側面の直角2方向からの撮影を併用している。この場合には3台のカメラを使用し、3台同時にシャッターが切れるよう配線している。使用したフィルムのASA感度は400、絞りは主として $f8$ 、露光時間は $1/15$ 秒である。グリッドに取り付ける前の2重リング及びタフトを図3に示す。タフトは径 1.2mm 、長さ 12.5mm 及び 4mm 、重量は各々 4mg と 1.5mg の刺繍糸である。第1のリングは径 1.2mm 、素材径 0.16mm の銅線(グリッドの交点に接着剤で固定されている。第2のリングは径 0.7mm 、素材径 0.15mm のミシン用糸でタフトに接着剤で固定されている。二重リング方式のタフトを利用することは乱れの小さい流れに対しては追従性の向上のため有効であるが、乱れの大きい旋回流などに利用する場合にはタフトの挙動が激しく、時間平均的流れ方向を知るためには工夫を要する。ここでは第1と第2のリングの接触部分に油(グリス)を塗布しダンパとしての役割をもたせている。ただし油量の調整は非常に微妙であり試行錯誤によって主流速度 U が 0 m/s のときにタフトが完全に重力方向を向き、かつ U が 11 m/s 付近のとき十分なダンピング効果をもたせるように調整する。タフトの動的応答周波数は2次元円柱の後流に発生するカルマン渦を利用してストロボスコープと同期させて調べた結果約 50 Hz である。タフトグリッドのグリッド間隔は縦横とも 10 mm でグリッドは径 0.28 mm のつり糸である。

3. 流れ方向の算出方法

3.1 熱線風速計による測定

熱線風速計による測定方法を図4に示す。図示す

Fig. 2 Optical arrangement

Fig. 3 Tuft

Fig. 4 Hot-wire probes

るように熱線を1, 2, 3の傾き角度に設定すると, その出力 V_1, V_2, V_3 と管軸方向, 周方向, 半径方向の速度成分 V_z, V_θ, V_r との関係は $V_1^2 = K_1(V_z^2 + V_\theta^2)$, $V_2^2 = K_2(V_z^2 + V_r^2)$, $V_3^2 = K_3\{V_r^2 + (V_\theta + V_z)^2/2\}$ で表わせる. ここで K_i は直線化された熱線風速計の出力と流速の係数で本実験では $K_1 = K_2 = K_3 = 3.846(\text{m/s})/V$ である. 熱線を1に設定した場合の出力は V_1 で上式では V_r 方向の流れは感知しないと仮定しているが, 実際には V_r の影響を受ける. (検定用風洞での実験によると, 熱線を感度方向と垂直に向けた場合の熱線出力は主流速度出力の約13%である) この誤差を避けるため熱線の主流方向に対する傾き角度による出力の較正曲線を予め求めておき, V_z, V_θ, V_r を求めるための逐次計算の途中でこの較正曲線を利用している.

3.2 タフトグリッド法による測定

タフトグリッド法における座標を図5に示す. 管軸上, 下流側からの撮影の場合は, 実験に使用したタフト実長を L , X - Y 面に投影されたタフトの長さを l , X 軸からのタフトの傾き角度を ϕ とすると, 周方向と管軸方向の速度比は $V_\theta/V_z = l \cos \phi / L \cdot \sin(\cos^{-1}(l/L))$ で表わすことができ, 又直角方向からの撮影の場合は, Z - Y 面に投影されたタフトの長さを l' , Z 軸からのタフトの傾き角度を ϕ' とすると, $V_\theta/V_z = L \cdot \sin(\cos^{-1}(l'/L)) / l' \cos \phi'$ と表わすことができる. タフトの撮影長さ l , および傾き角 ϕ は撮影記録解析装置を用いて拡大投影され読みとられる. 本報における解析装置上での拡大率は実寸の4倍である. 第1測定部でのタフトグリッド法による可視化写真を図6に示す. ここで旋回流が軸対称であると仮定すれば管中心に対して点対称な位置にある4点(あるいは2点)のタフトの読み取り数値を加算, 平均することによって重力の影響を相殺することができる.

4. 実験結果

熱線風速計による軸方向, 周方向の速度分布を図7に示す. ただし m は旋回強さで $m = \int_0^{D/2} V_\theta V_z r^2 dr / (D/2) \int_0^{D/2} V_z^2 r dr$ で定義される. 空気流でベルマウスを使用した妹尾らの報告⁽²⁾によると, $Z/D = 12$ 以後では $m = 0.3$ 以上になると逆流を生じているが, 本実験では図7に示したように $m = 0.51$ でも逆流は生じていない. また $Z/D = 24$, $m = 0.31$ でも逆流は生じていない.

Fig.5 Inclination angle of a tuft and coordinates

$U = 11.5 \text{ m/s}$
 $m = 0.03$

$U = 11.5 \text{ m/s}$
 $m = 0.46$

Fig.6 Flow patterns indicated by tuft grid method

Fig.7 Velocity distributions

これはここで使用した旋回流発生装置が半径方向の速度成分をもつという特徴を有しているためである。タフトグリッド法及び熱線風速計の測定結果より算出された第1測定断面における V_θ/V_z を図8に示す。タフトグリッド法による値は数多くの可視化測定の平均値である。(矢印はばらつきの範囲を示す) 両者は比較的よく一致している。タフトグリッド法による実験結果のばらつきのヒストグラムを図9に示す。この測定結果の単純平均値が図8のタフトグリッド法による測定点に対応する。タフトの長さは4mm及び12.5mm，撮影方向は管軸後方からの撮影(撮影面:X-Y面)と管軸に直角な方向からの撮影(撮影面:Z-Y面)の2種類である。図より本実験の範囲内では各測定のデータはばらついていてその範囲はほぼ重なっておりタフトの長さ，撮影方向の相違による違いは少ないことがわかる。

5. 結論

管内旋回流の流れ方向をタフトグリッド法で可視化し熱線風速計による測定結果と比較した。その結果次の結論を得た。

- (1) 2重リング形式のタフトを乱れの大きい流れに適応し，その時間平均的値を求める場合には接触部分に適当な油を塗布しダンピング効果をもたせる方法が有効である。
- (2) この方法を利用して可視化し，算出した速度比 V_θ/V_z を熱線流速計により測定した結果と比較し良好一致を得た。したがって，タフトグリッド法によって管内旋回流の速度比の定量的な測定が可能である。
- (3) また，タフトを異なる方向から撮影して得られた速度比もほぼ一致した。

参考文献

- (1) 浅沼 強編，流れの可視化ハンドブック，(1977)，158，朝倉書店
- (2) 妹尾，永田，機械学会論文集，38-308 (1972)，759

Fig.8 Comparison of experimental results

(a) X-Y pl. L=4mm

(b) Z-Y pl. L=4mm

(c) X-Y pl. L=12.5mm

Fig.9 Histogram