

タフト法による可視化写真に基づく流れ場の情報量について

大島貴充・伊藤忠哉

On Information Quantity about Flow Fields Based on Visualizing Photographs by Tuft Method

Takamitsu OSHIMA, Tadayo ITO

The main purpose of the visualization of flow by tuft method is to know the direction of flow and the extent of separation zone in the parts along objects and channel walls in the case of surface tuft method, and the wind direction distribution in the cross section of the wake behind objects and the flow in channels in the case of tuft grid method. Accordingly, in the past the sketch added with visual observation and proper recording as far as possible was the best observation method and recording method. However, naturally this method has made the information on flow from the result of visualization by tuft method into a qualitative thing.

Recently, by the progress of photographic techniques, video technology and image analysis method, the reading of the angles and dimensions of the objects from their photographs and video image has become able to be accurately carried out. If tufts are in the state of completely following the flow at their attaching points, it may be considered that the tufts indicate the quantitative condition at that time of the wind velocity, wind direction, pressure and so on in a flow field. Accordingly, by analyzing the positions and motion of those tufts, the condition of a flow field can be known quantitatively. Since photographs and images are those of mapping tufts from three-dimensional space to two-dimensional space, the information quantity about a flow field exists in photographs and images in the compressed condition. Accordingly, if tufts are made and photographs are taken for the purpose of obtaining the quantitative information, the information on a flow field can be known quantitatively.

This report gives one example showing that the swirling flow in a pipe, in which steady flow and unsteady flow exist in mixed state, is visualized by tuft grid method, and by using the photographs taken, the information on the flow field can be obtained quantitatively. In particular, it is shown that in the part where flow is steady, only from the photographs taken in one direction, the quantitative information can be obtained with considerable accuracy.

1. まえがき

タフト法による流れの可視化の主な目的は、表面タフト法では、流路壁に沿っている部分の流れの方向や剥離域の拡がりを、タフトグリッド法では、物体の後流や流路内の流れのその断面における風向分布を知ることであった。したがって、従来は可能な限り肉眼による観察と適切な記録を加味したスケッチが、最も優れた観察法であり記録法⁽¹⁾であった。しかしながら当然この方法は、タフト法による可視化結果からの流れの情報を定性的なものにしてきた。

最近では、写真技術・ビデオ技術や画像解析法の進歩により、写真やビデオ画像から映像物体の角度や寸法の読み取りが正確にできるようになってきた。タフトが、取り付け点の流れに完全に追従した状態であれば、タフトは流れ場の風速・風向・圧力などの、その時の定量的な状態を表示していると考えてよい。したがって、そのタフトの位置や動きを解析すれば、流れ場の状態を定量的に知ることができる。写真や映像は、タフトを3次元空間から2次元空間へ写像したものであるから、流れ場の情報は圧縮された状態で写真や映像の中に存在する。したがって、定量的な情報を得る目的でタフトを製作し、写真撮影をすれば、流れ場の情報を定量的に知ることができる。

本報告書は、定常的な流れと非定常的な流れが混在する管内旋回流れを、タフトグリッド法で可視化し、撮影した写真より、流れ場の情報を定量的に得ることができることを示した1例である。特に、定常的な流れになっている部分では、一方向からの撮影写真からだけでも、かなり精度で定量的情報量を得ることができることを示す。

2. 記号

- V_x : 風速のX軸方向成分
- V_y : 風速のY軸方向成分
- V_z : 風速のZ軸方向成分
- $l_{(y-z)}$: Y-Z平面上でのタフトの長さ
- $l_{(x-z)}$: X-Z平面上でのタフトの長さ
- $l_{(x-y)}$: X-Y平面上でのタフトの長さ
- L : タフトの実長
- V_θ : 風速の周方向成分
- V_R : 風速の半径方向成分
- $\phi_{(y-z)}$: Y-Z平面上でのタフトとZ軸のなす角度
- $\phi_{(x-z)}$: X-Z平面上でのタフトとZ軸のなす角度
- $\phi_{(x-y)}$: X-Y平面上でのタフトとX軸のなす角度

- α : 管中心のO点と格子点を結んだ線とX軸のなす角度
- θ : V_x と V_y の合成ベクトルのX軸となす角度
- Q : 流量
- : 旋回装置出口速度(パイプ入口の接線速度)
- ω : パイプ入口における旋回角速度

3. タフト可視化写真の解析

次の仮定をおく

- (1) タフトは一本の棒のように運動する。
- (2) タフトは取付け点において、どの方向へも自由に動きうる。
- (3) タフトの長さは短く、完全に流れに追従している。

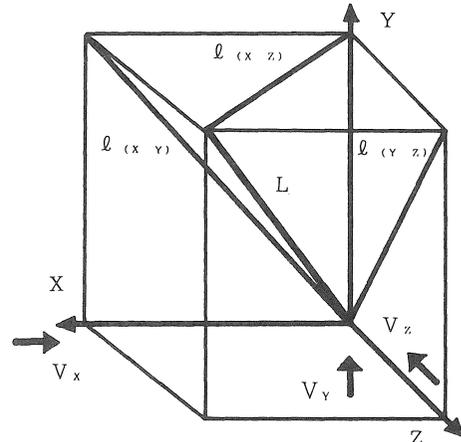


図1 タフト解析の6面体

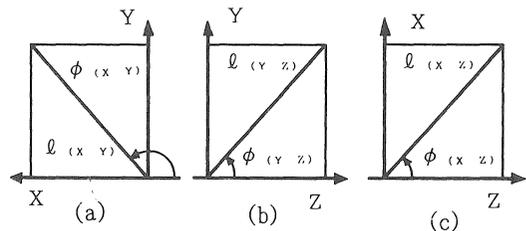


図2 タフトの投影図

図1に示すように、格子点(タフト取付け点)を原点に取る。管軸と平行に2軸をとり、Z軸に垂直にX-Y平面を考える。X-Z平面を水平面にとり、この平面とX-Y平面の交線をX軸に、X軸に垂直にY軸をとる。タフトはX, Y, Z軸で作られる6面体の1つ

の対角線となっていると考えられる。カメラのレンズの光軸がZ軸に直角に交わるようにして、X軸上矢印方向より撮った写真は、Y-Z平面へのタフトの投影であり、Y軸上矢印方向より撮った写真は、X-Z平面へのタフトの投影である。そして、下流方向のZ軸上より、Z軸とレンズの光軸一致させて撮った写真は、X-Y平面へのタフトの投影である。

図2に投影図を示す。図より明らかなように、直接読み取れる量はタフトの長さと同傾き角度である(角度はすべて反時計方向の回転角を測る)。3次元空間にあるタフトの情報量が、2次元空間(平面)へ変換されたものであるから、以後、写像という。図3にX-Y平面におけるタフトの取付け点とパイプ中心の位置関係を示す。図に示すように、タフトの位置が変わってもX-Y軸は平行移動するだけで回転はしない。図1、図2、図3より、3次元空間のタフトと2次元空間の写像との間には、次のような関係が成立する。

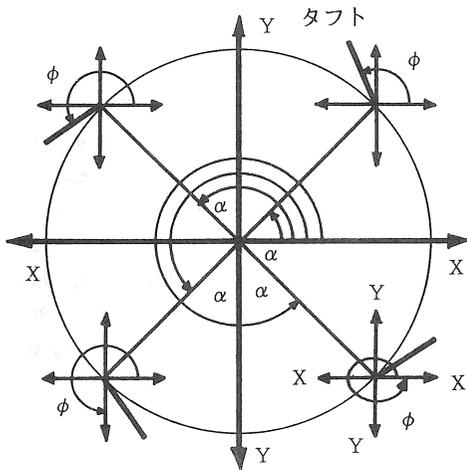


図3 格子点と管中心の位置関係

Y-Z平面への写像

図2(b)(写真)より

$$\begin{aligned} V_Y &= \ell_{(Y-Z)} \cdot \sin \phi_{(Y-Z)} \\ V_Z &= \ell_{(Y-Z)} \cdot \cos \phi_{(Y-Z)} \dots(1) \end{aligned}$$

図1より

$$V_X = L \cdot \sin\{\cos^{-1}(\ell_{(Y-Z)} / L)\}$$

と求まる。

X-Y平面上で V_X 、 V_Y を合成しさらに V_θ 、 V_R 成

分に分ける。

$$\ell_{(X-Y)} = (V_Y^2 + V_X^2)^{1/2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\ell_{(Y-Z)} \cdot \sin \phi_{(Y-Z)}}{L \cdot \sin\{\cos^{-1}(\ell_{(Y-Z)} / L)\}}$$

$$V_R = [L^2 \cdot \sin^2\{\cos^{-1}(\ell_{(Y-Z)} / L)\} + \ell_{(Y-Z)} \cdot \sin \phi_{(Y-Z)}]^{1/2} \cdot \cos(\theta - \alpha) \dots(2)$$

$$V_\theta = [L^2 \cdot \sin^2\{\cos^{-1}(\ell_{(Y-Z)} / L)\} + \ell_{(Y-Z)} \cdot \sin \phi_{(Y-Z)}]^{1/2} \cdot \sin(\theta - \alpha) \dots(3)$$

$$\alpha = \tan^{-1}(X_i / Y_j)$$

ただし、タフトの位置により V_X 、 V_Y は符号が変わる。タフトの位置と V_X 、 V_Y の符号の関係を表1に示す。

表 1

	タフトの位置(象限)			
	1	2	3	4
V_X	-	-	+	+
V_Y	+	-	-	+

従って

$$\frac{V_\theta}{V_Z} = \frac{[L^2 \cdot \sin^2\{\cos^{-1}(\ell_{(Y-Z)} / L)\} + \ell_{(Y-Z)} \cdot \sin \phi_{(Y-Z)}]^{1/2} \cdot \sin(\theta - \alpha)}{\ell_{(Y-Z)} \cdot \cos \phi_{(Y-Z)}} \dots(4)$$

$$\frac{V_R}{V_Z} = \frac{[L^2 \cdot \sin^2\{\cos^{-1}(\ell_{(Y-Z)} / L)\} + \ell_{(Y-Z)} \cdot \sin \phi_{(Y-Z)}]^{1/2} \cdot \cos(\theta - \alpha)}{\ell_{(Y-Z)} \cdot \cos \phi_{(Y-Z)}} \dots(5)$$

と求まる。

X-Z平面への写像

図2(c)(写真)より

$$\begin{aligned} V_X &= \ell_{(X-Z)} \cdot \sin \phi_{(X-Z)} \\ V_Z &= \ell_{(X-Z)} \cdot \cos \phi_{(X-Z)} \dots(6) \end{aligned}$$

図1より

$$V_Y = L \cdot \sin\{\cos^{-1}(\ell_{(X-Z)} / L)\}$$

と求まる。

X-Y平面上で V_x, V_y を合成し、さらに V_θ, V_R 成分に分ける。

$$l_{(X-Y)} = (V_y^2 + V_x^2)^{1/2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{L \cdot \sin\{\cos^{-1}(l_{(X-Z)}/L)\}}{l_{(X-Z)} \cdot \sin\phi_{(X-Z)}}$$

$$V_R = [L^2 \cdot \sin^2\{\cos^{-1}(l_{(X-Z)}/L)\} + l_{(X-Z)} \cdot \sin\phi_{(X-Z)}]^{1/2} \cdot \cos(\theta - \alpha) \dots(7)$$

$$V_\theta = [L^2 \cdot \sin^2\{\cos^{-1}(l_{(X-Z)}/L)\} + l_{(X-Z)} \cdot \sin\phi_{(X-Z)}]^{1/2} \cdot \sin(\theta - \alpha) \dots(8)$$

符号は表1に従う。従って

$$\frac{V_\theta}{V_Z} = \frac{[L^2 \cdot \sin^2\{\cos^{-1}(l_{(X-Z)}/L)\} + l_{(X-Z)} \cdot \sin\phi_{(X-Z)}]^{1/2} \cdot \sin(\theta - \alpha)}{l_{(Y-Z)} \cdot \cos\phi_{(Y-Z)}} \dots(9)$$

$$\frac{V_R}{V_Z} = \frac{[L^2 \cdot \sin^2\{\cos^{-1}(l_{(X-Z)}/L)\} + l_{(X-Z)} \cdot \sin\phi_{(X-Z)}]^{1/2} \cdot \cos(\theta - \alpha)}{l_{(Y-Z)} \cdot \cos\phi_{(Y-Z)}} \dots(10)$$

と求まる。

X-Y平面への写像

図2(a)(写真)より

$$V_x = l_{(X-Y)} \cdot \sin\phi_{(X-Y)}$$

$$V_y = l_{(X-Y)} \cdot \cos\phi_{(X-Y)}$$

図1より

$$V_Z = L \cdot \sin\{\cos^{-1}(l_{(X-Y)}/L)\} \dots(11)$$

となり、 V_R, V_θ も

$$V_R = l_{(X-Y)} \cdot \cos(\phi_{(X-Y)} - \alpha) \dots(12)$$

$$V_\theta = l_{(X-Y)} \cdot \sin(\phi_{(X-Y)} - \alpha) \dots(13)$$

と求まる。従って

$$\frac{V_\theta}{V_Z} = \frac{l_{(X-Y)} \cdot \sin(\phi_{(X-Y)} - \alpha)}{L \cdot \sin\{\cos^{-1}(l_{(X-Y)}/L)\}} \dots(14)$$

$$\frac{V_R}{V_Z} = \frac{l_{(X-Y)} \cdot \cos(\phi_{(X-Y)} - \alpha)}{L \cdot \sin\{\cos^{-1}(l_{(X-Y)}/L)\}} \dots(15)$$

と求まる。

いずれの面での可視化写真からでも、 $V_\theta / V_x, V_R / V_Z$ の情報量は入手可能であることがわかる。しかし、タフトの保持具等の形状、タフトの重なりを考慮すると、管軸に直角な方向からのX-Z平面、Y-Z平面への写像からの情報は制限されたものにならざるをえない。

4. 実験装置

4-1. 装置本体

実験装置の概略図を図4に示す。吸入口を入った空気はφ125mmのパイプ①を1000mmすすんで、流量測定部②へ入る。ピトー管で測定する。流量測定部を出た空気は長さ500mmのパイプ③を通り、送風機④へ吸込まれる。送風機を出た空気は蛇腹ホース⑤を通してタンク⑥へ入る。タンク内には羽枚数6枚の円弧羽根を用いた旋回流発生装置がある。空気は円弧羽根にそって、φ100のパイプ⑦の管軸に垂直な断面の外周の接線方向から流入する。旋回しながら、500mm後方の測定部⑧へ入る。測定部は、熱線風速計とピトー管をそれぞれ取付けることができ、旋回流の測定ができる。

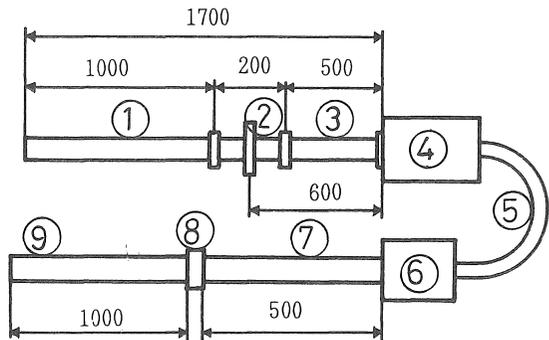


図4 実験装置

また、タフトグリッドと取り換えて、旋回流の可視化撮影ができる。測定部を出た空気は、長さ1000mmの後方パイプ⑨を通して大気へ放出される。流量の制御は、送風機を可変速度運転することによって行なうことができる。

4-2. 可視化装置

図5に使用したタフトグリッドを示す。タフトグリッドの各格子点は、管中心Oを基準にして位置(X_j , Y_i)が明確になっている。使用ワイヤーは線径が0.3のピアノ線で、張力の調整ができるようになっている。実験中に格子点が移動しないように、十分な張力を与えた後、実験前に瞬間接着剤で格子点のピアノ線同志を接着して用いる。

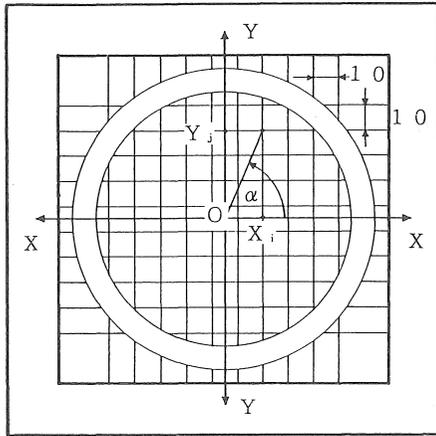


図5 タフトグリッド

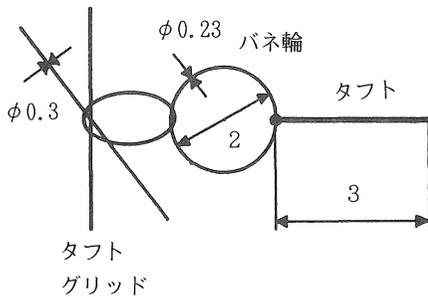


図6 タフトの取付け

図6は使用タフトの取付け方法である。自由度を増すために線径0.23mmで直径2mmのバネ輪を図のように連結して用いた。タフトは約0.4mm径の絹糸を取付け点からのタフトの長さが3mmになるように正確に寸法をそろえ、蛍光塗料を塗って使用した。タフトの長

さの決定は、直径2mmのバネ輪に3mmのタフトがついた長さ5mmのものを1個の浮遊物体と考え、これが10mmの格子間隔の中を移動(逆流が生じた場合は、格子の間をくぐることになる)できるという想定で決めた寸法で物理的根拠はない。タフトの線径、重さに関する問題については、中口の研究結果⁽²⁾があるが、それは非常に長いタフトの実験結果であり、今回のようにタフトの長さが短い場合(1個の浮遊粒子的な存在)への適用には問題がある。しかしながら、中口の用いた特性推定値を求めると、絹糸で見かけの直径 $d = 0.4\text{mm}$ 、単位長さ当たりの質量 $m = 0.03\text{g/m}$ 、直径と抗力係数の積 $d C_D \times 10^3 = 11.0 \sim 13.0\text{m}$ 、直径とモーメント係数の角度に対する変化量との積は $d \theta_m \times 10^4 = 1.66\text{m/rad}$ くらいである。

5. 実験方法

送風機吐し流量を4段階に変化させて、旋回流れを発生させ実験を行なった。実験を行なった流量に対する旋回なしで $\phi 100\text{mm}$ のパイプを通る場合の流速と、パイプへの流入速度、および角速度を表2に示す。

表 2

	1	2	3	4
Q (m ³ /min)	2.6	3.8	5.4	6.5
V _z (m/s)	5.52	8.28	11.46	13.79
V _θ (m/s)	4.6	6.9	9.6	11.5
ω (rad/s)	920	1380	1920	2300

吐出し流量が多くなると旋回が強くなり、管中心付近に逆流が生ずるようになるが、今回の実験の目的は、定常流れ部分と非定常流れ部分が混在する流れをタフトで可視化して、どの程度の情報が得られるかを調べるのが目的であるので、各々の流量を、同一のタ

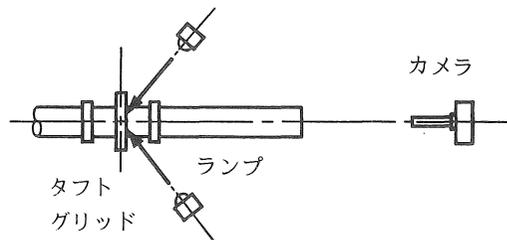


図7 撮影方法

フトグリッドで可視化した。

図7に撮影方法を示す。タフトグリッドの下流側の対称の位置から300W 2個のライトでタフトを照明し、後方より100mm~200mmのズームレンズ望遠カメラで撮影した。タフトグリッドが挿入してある部分は透明のアクリルパイプである。写真撮影は図の方向のみより行なった。

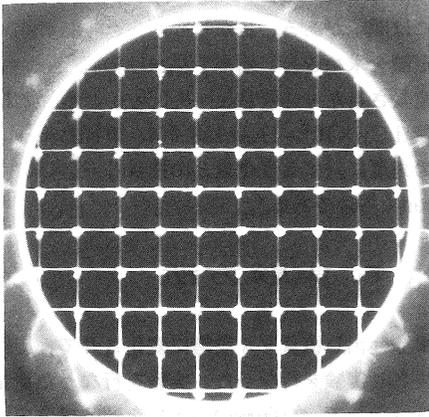


図8 旋回無しの流れ
 $V_z=8.28\text{m/s}$

重力の影響が心配されるので、旋回無しの流れ場にタフトを入れ、後方より写真撮影をし、重力によるタフトの下がり方を調べた。その結果を図8に示す。図は管軸方向の平均風速 $V_z=8.28\text{m/s}$ の場合の結果であるが、この場合重力の影響を無視してよいことがわかる。 $V_z=5.52\text{m/s}$ の場合は多少タフトが下がりぎみで、重力の影響が生じたが、 $V_z=8.28\text{m/s}$ 以上の

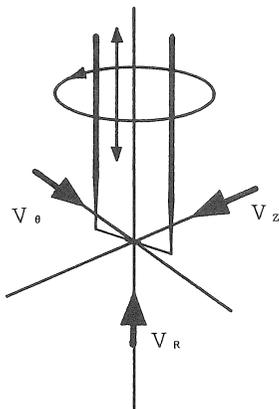


図9 旋回流の測定
熱線風速計

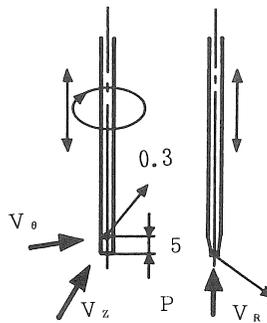


図10 旋回流の測定
ピトー管

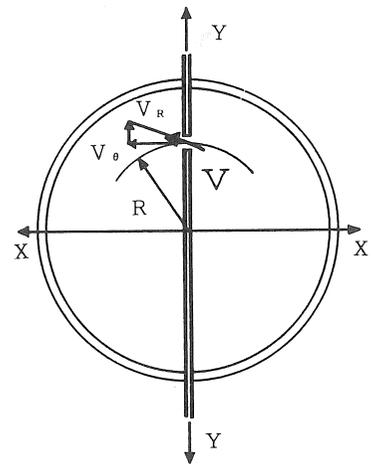


図11 旋回モデル

ときは重力の影響はない。旋回が生ずると管中心付近の流速は小さくなることが予想され、重力の影響が問題になるが、今回は補正をしない。管中心付近をのぞけば、逆に流速が大きくなり、重力の影響を心配する必要はない。

可視化写真からの読み取りは、万能投影機を用いた。図2に示すように、 $l_{(x-y)}$, $\phi_{(x-y)}$ を読み取り、式、11, 12, 13, 14, 15より、 $V_z, V_\theta, V_R, V_\theta/V_z, V_R/V_z$ を算出する。

算出した値を比較検討するために、可視化した断面を図9, 10に示すような、熱線風速計とピトー管を並用して測定する。熱線風速計は、図5に示すタフトグリッドの中心を通るY-Y線とプローブ軸が一致するようにセットし、管径の同一箇所までプローブを回転させ測定する。 V_R は熱線に垂直になるが、 V_θ, V_z は回転することによって熱線とある角度をもつ。一般的には、角度のある場合、熱線の出力は余弦則に従うので、あらかじめ角度に対する出力の検定を行なっておけば係数 k_1, k_2, k_3 がわかる。従って、熱線の出力は次式のようにかける。

$$V_i = (k_1 V_\theta^2 + k_2 V_z^2 + V_R^2)^{1/2}$$

但し、 k_1, k_2 は検定実験で決定

プローブを回転させ、角度をかえ、3箇所測定した V_i を用いて、 V_θ, V_z, V_R を求めた。

一方、図10に示すような、 $\phi 3$ の円筒ピトー管に $\phi 0.3$ の測定孔をあけた全圧管と、先端に $\phi 0.3$ の穴のあいた静圧管を、熱線同様はY-Y線とピトー管軸を一致させ V_θ, V_z, V_R を測定した。旋回流れでは静圧

測定は困難であるが、風速可変の一様流れの風洞のなかで、静圧孔に平行な流れによるピトー管の圧力低下の補正量を求めて補正をした。

6. 実験結果及び考察

熱線風速計とピトー管による測定結果によると、測定パイプ入口での一番遅い流入周速度 $V_\theta = 4.6\text{m/s}$ (角速度 920rad/s) の時、可視化位置での流れ場は管中心付近に V_z 方向へはほとんど流れない、停滞した部分が生じ、その外側に $V_z < 0$ の逆流部分、一番外側に $V_z > 0$ の流れを持つ旋回流になる。 $V_\theta = 6.9\text{m/s}$ (角速度 1380rad/s) 以上では、中心の停滞部分が無くなり、中心付近はすべて逆流となる。中心付近の逆流coreは短い時間間隔では、core半径がほぼ一定なもの不安定な振れ回り運動をしているようで逆流部分と正流部分の境界は絶えずわずさながら変動している。また、タフトの観察から逆流の強さ、coreの大きさなどは、大きな時間間隔で変化している。このような、流れ場にタフトグリッドを入れ可視化写真を撮ったものの一例を図12に示す。 $V_\theta = 6.9\text{m/s}$ の速度で流入する場合を $1/15$ のシャッター速度で撮影したものである。タフトの激しく振れている部分が中心付近に多いことがわかる。また、外周部分にも激しく振動しているタフトがある。振動している部分は、一定の周期性は観測されなかったが時間とともに移動した。しかしながら、外周部分のタフトは振動はするものの振幅は小さく、パイプ壁近くの旋回流はほぼ定期的と考えてよい。

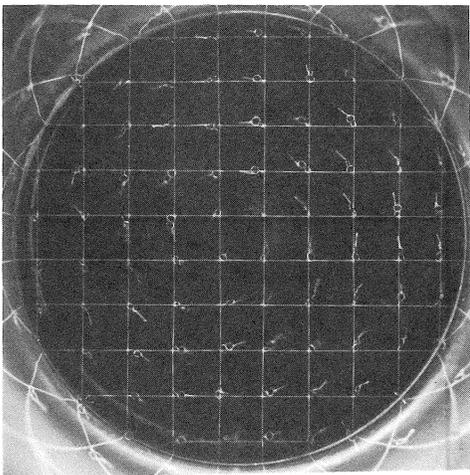


図12 可視化結果
入口流入速度 6.9m/s

図13~16は、5秒間開放で撮影した写真と、 $1/15$ 秒で撮影した写真とから $l_{(x-y)}$, $\phi_{(x-y)}$ の平均値を読み取って V_θ , V_z , V_R を求め、 V_θ/V_z を求めた値と、熱線風速計とピトー管より求めた V_θ , V_z , V_R より V_θ/V_z を求めた値との比較を示したグラ

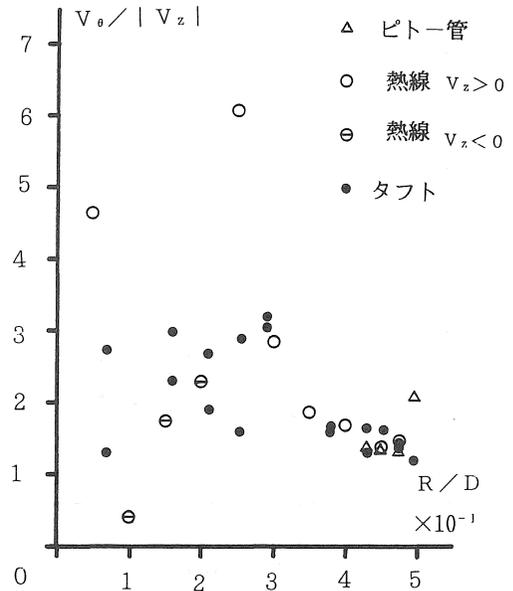


図13 周方向速度と軸速度の比
入口流入速度 4.6m/s

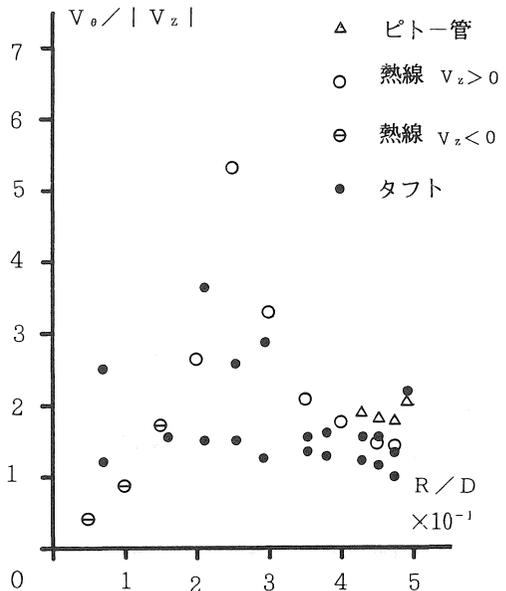


図14 周方向速度と軸速度の比
入口流入速度 6.9m/s

フである。グラフ中の○印は $V_z > 0$ を、⊖印は $V_z < 0$ を表す。縦軸は $V_\theta / |V_z|$ 、横軸は d/D によってある。 $|V_z| \neq 0$ があるので、 $V_\theta / |V_z|$ の値が非常に大きくなるものが生じた。いずれの流入速度でも、管の外周付近ではかなりの一致を見ている。特に

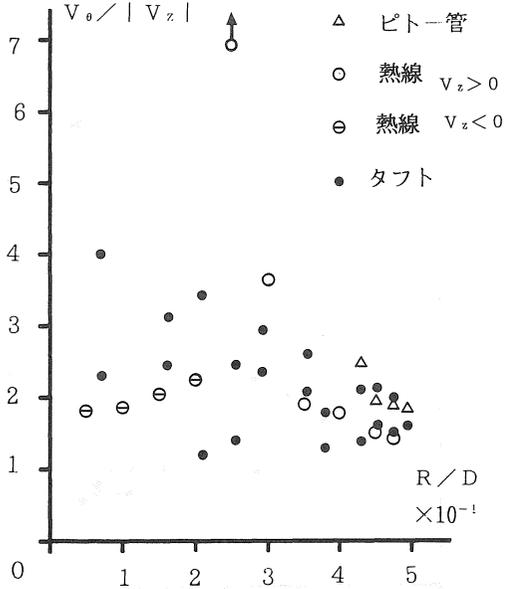


図15 周方向速度と軸速度の比
入口流入速度9.6m/s

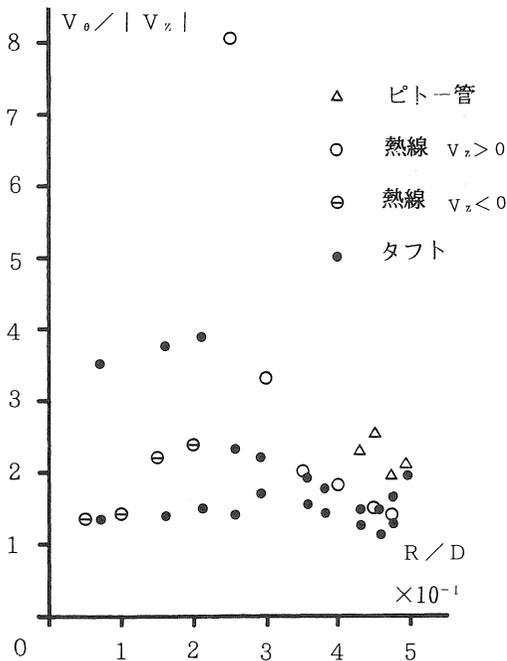


図16 周方向速度と軸速度の比
入口流入速度11.5m/s

旋回の弱い(中心付近の逆流coreが小さい)流入速度=6.9m/sの場合はよく一致していることがわかる。この外周付近では85%以上の精度で、 $V_\theta / |V_z|$ の情報を得ることができた。2つの可視化写真の間で誤差が出たのは、5秒間開放の場合は平均値 $l_{(x-y)}$ の読みに誤差が生じた(タフトの端面が振動のため鮮明な写真とならなかった)ためと、2つの写真の撮影日時

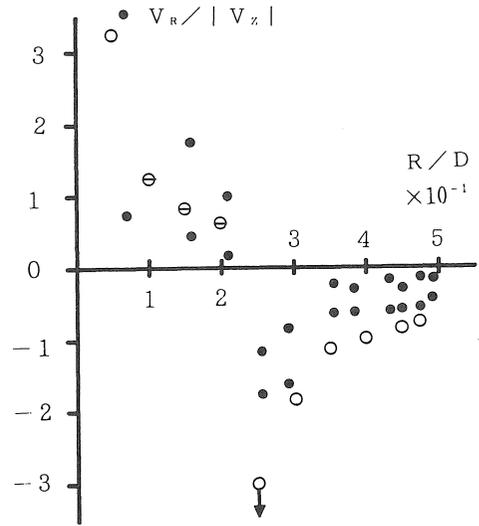


図17 半径方向速度と軸速度の比
入口流入速度4.6m/s

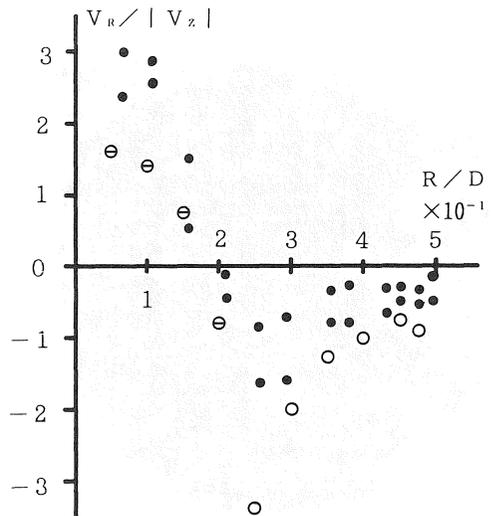


図18 半径方向速度と軸速度の比
入口流入速度6.9m/s

の異なるために実験条件は同じであるが、まったく同じ流れ場ではないことが原因と考えられる。しかしながら、両方の写真とも、85%以上の精度で、 V_θ/V_z の情報を得ることができると考えてよい。逆流のある中心部においては、大きな相違が生じているが、この原因は次のようなことが考えられる。一つは流れが非定常であり、熱線風速計で測定した流れ場と、可視化

写真を撮影した流れ場が同じでない。2つめはタフト自身の変動に対する応答性の問題、グリッド取付け部分における運動拘束の問題、重力の影響などである。3つめは熱線風速計、ピトー管の電気的出力は絶えず変動するので、5秒間の平均値を用いたが、中心部分は、もっと長い時間間隔での変動があり、平均値の取り方にも問題がある(特にピトー管による圧力センサの信号の変動幅が大きく、平均値の測定に問題を生じたので、中心付近の測定は熱線風速計だけで行なった。

図17~20は $V_R/|V_z|$ を示したグラフである。縦軸は $V_R/|V_z|$ を表し、 $V_R/|V_z|>0$ は V_R が外周方向へ向いていることを、 $V_R/|V_z|<0$ は V_R が中心方向へ向いていることを示す。横軸は d/D である。

いずれの場合にも、 $V_\theta/|V_z|$ より一致度は悪いが、定性的には、熱線風速計の測定結果と一致する。 $V_\theta/|V_z|$ の場合と同様、外周付近では熱線風速計の測定結果と可視化写真からの計算結果は比較的良好に一致している。外周部分で $V_R<0$ となるのは、逆流部分への流れ込みがあるからと推測される。

7 結 言

定常流と非定常流の混在する旋回流においては、定常流の部分、あるいは定常流とみなせるような変動の小さい部分に入れられたタフトはその流れの定量的な情報を十分表している。従って、定量的な情報を得る目的でタフトをつくり、撮影すれば、可視化写真から流れ場の情報を定量的に取り出すことができる。

非定常な流れ場においては、時間平均的な処理では定量的な情報を得ることはできない。しかし、ビデオ撮影をした影像の画像解析などを用いれば非定常な部分からも定量的に情報を得ることが可能である。この場合、タフトが流れに完全に追従していることが必要で、タフトの動的応答性の基礎的な研究が必要になる。

8. 文 献

1. 流れの可視化学会編, 新版流れの可視化ハンドブック, (昭61), 朝倉書店
2. 中口博, 日本機械学会第476回講習会教材, (昭53)
3. 佐賀徹雄, 瀬川茂樹, 小林敏雄, 上村康平
タフト法による円管内旋回流の可視化と定量化
流れの可視化 $V_0.1. 5.$ (昭60)

(受理 平成2年3月20日)

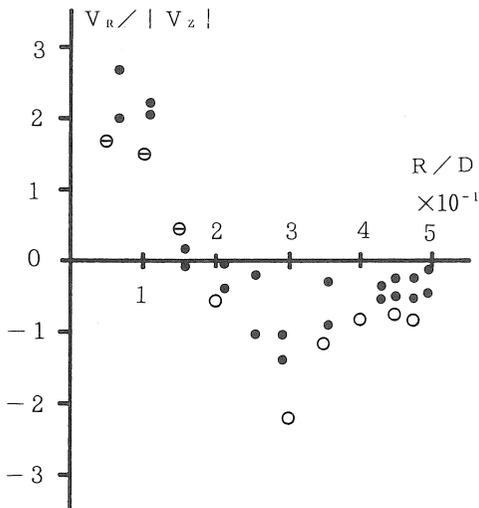


図19 半径方向速度と軸速度の比
入口流入速度9.6m/s

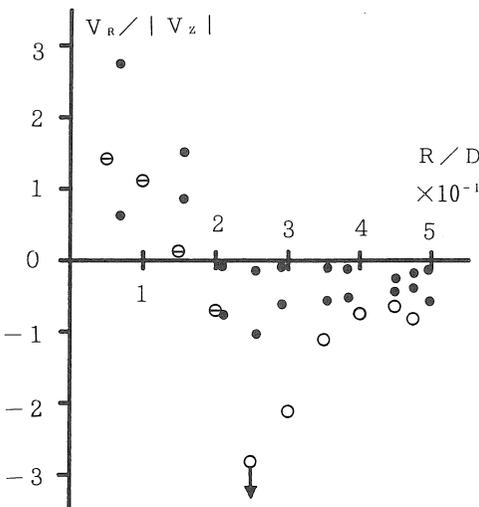


図20 半径方向速度と軸速度の比
入口流入速度11.5m/s