45 回転するシリンダ内の流れの可視化

東海大工 弓野 崇[○], 浅沼 強, 東大工 谷田好通

Visualizing study of a jet flow ejected into a rotating cylinder

Takashi YUMINO^{*}, Tsuyoshi ASANUMA^{*} and Yoshimichi TANIDA^{**}

Cigarette smoke technique was used to visualize flow pattern of an air jet ejected into a transparent rotating cylinder.

The jet flow has shown clearly the so-called cylindrical pattern, of which axis is in parallel with that of rotating cylinder. The pattern was found to be the one which is known generally as a special phenomenon due to Taylor-Proudman theorem.

1 まえがき

回転する流体は回転軸に平行な二次元的流れパターンを示すことは Taylor-Proudman の理論としてよく知られている。(1)この現象に関する研究は、ウラニウム濃縮のための遠心分離器や燃焼器などへの基礎研究としても重要である。(2)(3)これまでに回転しない静止シリンダ中で流体のみが旋回する場合についてはかなり研究が行われている。(4)(5)しかし、シリンダが回転している場合には測定子の挿入が困難であることなどのため、回転するシリンダ内の流速および乱れなどを測定した報告はほとんどみられない。レーザドップラー流速計(LDV)を用いれば測定は可能であるが、シリンダが回転するために正しい信号を得ることはかなり困難となるのでLDVの測定に先立って、流れを可視化することは有効である。本研究では、回転するシリンダ中に回転軸方向にタバコ煙を混入した気流を吹きこみ、スリット光線によりシリンダ縦断面および横断面の可視化を試みた。さらに、タバコ煙の代わりにJIS試験用ダストを散乱粒子としてLDVを用いて回転するシリンダ軸方向速度の中心軸上の分布を測定した。

2 実験装置

図1に実験装置の概略を示す。ルーツフ・ロア(吐出流量 $5.3\text{ m}^3/\text{min}$, 吐出圧力 0.8 kgf/cm^2)からの空気は脈動流を除くためにサーシ・タンク(容量 0.2 m^3)を通りオリフィスによって流量を計測され、流入チャンバ、整流ストローを通過して噴出ノズルから回転するシリンダ内に流入し、流出チャンバより流出する。本実験装置ではノズルも回転しており、ノズル上流の管径は $d_o = 60\text{ mm}$ で、出口径 d_n は可変である。回転シリンダは内径 $D = 200\text{ mm}$, 長さ $L = 800\text{ mm}$ で、このうちノズルから 600 mm の部分は透明アクリル樹脂製とし、可視化できる構造としてある。回転シリンダは電磁クラッチ・ブレーキユニットを介して無段変速モータで回転する。可視化のためには流入チャンバの上流にタバコ煙発生器を設け、トレーサとして煙りを気流に混入してシリンダ内に供給し、スライドプロジェクターによるスリット光線を照明として、スチール写真撮影する。LDVによる流速測定には

^{*} Faculty of Engineering, Tokai University, 1117 Kitakanane, Hiratsuka

^{**} Institute of Interdisciplinary Research, University of Tokyo,
4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo

Cambridge Physical

Science社製の前方散乱型干涉縞方式のものを使用する。光源はHe-Neレーザ光(15mW)で逆流領域を測定するため周波数シフターを設けてある。散乱粒子はJIS試験用ダスト9種(平均粒径4.2, 比重2.7)を用いる。散乱光は光電子増倍管で検出され, トラッカ

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

処理される。LDVによる測定にはトラバース装置によりシリンダ軸方向および半径方向の2方向へLDVを移動して行う。

3 実験結果

3-1 可視化実験

所定の回転数で回転しているシリンダ内にタバコ煙発生器による煙をノズルから噴出させる。このときノズル出口での平均噴出速度 U_0 はオリフィスを通る流量により設定する。この流れをスライドプロジェクターによるスリット光線で照明して, シリンダ軸を通る縦断面およびそれと垂直な横断面を写真撮影する。そのときの実験条件を表1に撮影条件を表2に示す。

3-1-1 回転数による噴流直径の変化

図2はシリンダが回転していない場合のタバコ煙による可視化写真の例(平均噴流速度 $U_0 = 0.4 \text{ m/s}$, ノズル直径 $d_n = 20 \text{ mm}$)で, 噴流の混合層に渦がみられ, それが成長しつつには崩壊する様子がとらえられている。

図3には噴流平均速度 $U_0 = 0.2 \text{ m/s}$, ノズル直径 $d_n = 20 \text{ mm}$ 一定とし回転数 $N = 100, 200, 300 \text{ rpm}$ と変化させてシリンダを回転した場合の例が示してある。これより, シリンダが回転するとシリンダが回転していないときにみられた周期的な渦は消滅し, シリンダと同軸で一定直径の円筒状の二次元的な流れとなることがわかる。

Table 1 Experimental conditions

	Visual.	LDV
Jet velocity U_0 (m/s)	0.1 ~ 1.6	4.0 10.0
Reynolds number $Re = \frac{d_n U_0}{\nu}$	60 ~ 4000	7500 20000
Nozzle diameter d_n (mm)	10, 20, 40, 60	30
Revolutions N (rpm)	0, 100, 200, 300, 400	

Table 2 Photographing conditions

Camera	Nikon F3
Lens	Nikkor 1:1.2 F50mm
Filter	Polar Filter
Film	Neopan 400 Black and White & HR 1600 Color
Aperture	1.2
Time of exposure	1/30, 1/60

Fig. 2 Flow pattern in a cylinder. (No rotation)

Fig. 3 Flow patterns in a rotating cylinder. $U_0 = 0.2 \text{ m/s}$, $d_n = 20 \text{ mm}$

これらの可視化写真から円筒状の噴流直径 d_j は噴流平均速度 U_0 およびノズル直径 d_n が一定のとき、回転数が増すにつれて減少する。なお、図4の横断面の可視化写真からも流れは軸対称であることがわかる。ここで得られた、円筒状の二次元流れはTaylor-Proudmanの流れに相当するもので噴流の周期的な渦の発生が遠心力効果により抑制されたためであると考ええる事ができる。

3-1-2 噴流平均速度 U_0 による噴流直径 d_j の変化

図5および図3(c)はシリンダの回転数 $N = 300 \text{ rpm}$ 、ノズル直径 $d_n = 20 \text{ mm}$ 一定として、噴流速度 U_0 を 0.1 , 0.2 , 0.4 , 0.6 m/s と変化させた場合噴流直径 d_j の違いを示している。すなわち、 U_0 を増加させると噴流の直径も大きくなる。

Fig. 4 Cross sectional view of a cylindrical jet flow.

Fig. 5 Flow patterns in a rotating cylinder. $N = 300 \text{ rpm}$, $d_n = 20 \text{ mm}$

3-1-3 ノズル直径 d_n による噴流直径 d_j の変化 シリンダの回転数 $N = 200 \text{ rpm}$ 、噴流平均速度 $U_0 = 0.2 \text{ m/s}$ 一定として、ノズルの直径を変化させた場合を可視化したものが図6に示してある。これによるとノズル直径が増加すると噴流の直径 d_j も増加している。

Fig. 6 Flow patterns in a rotating cylinder. $N = 200 \text{ rpm}$, $U_0 = 0.2 \text{ m/s}$

これらの可視化写真から測った円筒状の噴流直径 d_j をノズルの直径 d_n で無次元化した量を縦軸に、回転する流体の流体力学的相似性を示すロスビー数 $\varepsilon = U_o / \Omega d_n$ を横軸にとってプロットすると図7に示すようにほぼ一本の曲線で表すことができ、 ε が増すにつれ d_j / d_n が増すことがわかる。このことからノズルの絞り比 d_n / d_o のいかにによらず相似性がみられ、ノズルで絞ったことの影響はないことがわかる。

Fig. 7 Diameter of cylindrical jet flow.

3-2 流速の測定

L D Vによって測定したシリンダ内の z 軸方向の中心流速 U_c を平均噴流速度 U_o で無次元化した量を縦軸にとり、ノズルからの距離 z をノズルの直径 d_n によって無次元化した量を横軸としてプロットすると図8のようになる。この図によるとシリンダが回転していない場合に比較して、回転している場合はノズルからの距離 z が大きくなるにつれて中心流速 U_c は急速に減少しており、このことからノズル直後で流れは急激に拡大していることがわかる。

Fig. 8 Axial velocity distributions on cylinder axial.

4 まとめ

- 1) シリンダが回転していないときには周期的に発生する混合渦がみられるが回転するとほぼ一定太さの円筒状の流れとなる。
- 2) シリンダが回転している場合、円筒状の流れの直径 d_j はロスビー数 ε の増加につれて増し、また、ノズル直径 d_n が大きくなると増加する。
- 3) ノズル直径 d_n 無次元化した円筒状の噴流直径 d_j / d_n は d_n を代表寸法にとったロスビー数 ε に対しノズルの絞り比 d_n / d_o のいかにによらず良くそろい、相似性が認められる。
- 4) 回転するシリンダ内の噴流方向 (z 軸) の中心流速 U_c はシリンダが回転していない場合より急速に減少する。

参考文献

- (1) Greenspan, H.P., The Theory of Rotating Fluid, Cambridge Univ. Press, (1969)
- (2) W.Nakayama & S.Usui, Flow in Rotating Cylinder of a Gas Centrifuge, J. of Nuclear Science and Technology, 11 [6], (1974), 242-262
- (3) T.Sakurai & T.Matsuda, Gasdynamics of a centrifugal machine, J. of Fluid méch., vol.69, part 1, (1975), 179-208
- (4) Habib M.A. & Whitelaw J.H., Velocity Characteristics of Confined Coaxial Jets with and without Swirl, Trans. ASME, J. of Fluid Eng. vol.102, (1969)
- (5) 高浜, 機械学会論文集, vol.30, No.219, (1964), 1419-1427