蛇管モデルによるサイクロンの圧力損失の推定

冬 木 正*, 古 内 正 美**, 金 岡 千 嘉 男**

Investigation of Cyclone Pressure Loss by a Coiled Tube Model

by

Tadashi FUYUKI[†], Masami FURUUCHI^{††} and Chikao KANAOKA^{††}

Free vortex cyclones are used in various industrial fields because of their high performance, simple structure and low equipment investment.

It is very important to estimate a pressure loss of the cyclone to design a process.

Cyclone pressure loss has been studied from various viewpoints in the past. However, most studies left the effect of the centrifugal force out of consideration.

In this paper, an inner flow of a cyclone was visualized from the deposition pattern of tracer particles on the cyclone wall. Then, a coiled tube model was proposed to estimate the pressure loss of a cyclone, and its plausibility was tested through its comparison with experimental pressure loss.

It was found that a rotation number of the inner flow in a cyclone cylindrical part doesn't depend on cyclone inlet velocities. A coiled tube model was useful to estimate the pressure loss of the cyclone. To estimate a flow affected by a centrifugal force, it is more effective to think of it as a flow in a coiled tube rather than in a straight tube.

Key Words : Coiled Tube Model, Pressure Loss, Critical Reynold's Number

1. 緒 言

サイクロンは構造が簡単で、安価に設置できるため、工業プロセスにおいて広く使われている。サイクロンの圧力損失を正確に予測することは、プロセスを設計する上で極めて重要である。サイクロンの圧力損失に関しては多くの研究がなされ、実験式も多く提案されている¹⁻⁵⁾。しかしながら、そのほとんどがサイ

クロンの圧力損失は入口風速の自乗に比例すると仮定する方法がとられている。

実際のサイクロンにおいては、その圧力損失はサイクロンの形状あるいは運転条件等にもよるが、入口風速の1.8乗~2.3乗に比例しており、必ずしも流速の2乗には比例していない⁵⁾。

反転式サイクロンにおいては、サイクロンに流入した気流は器壁に沿って旋回しながら流下し、下方に達すると旋回を保ちながら反転し中央部を上昇すると言われている。したがってサイクロン円筒部では、入口部形状を保った蛇管状の気流をしているとも考えられる。サイクロンの圧力損失は当然のことながら気流の流動状態によるので、本報はサイクロン内壁近傍の流れを可視化することにより旋回流を確認した。その後観察結果に基づき、サイクロンの圧力損失推定のモデルを提案するとともに実測値との比較検討を行った。

1994年 2月 1日 受付

* 日清製粉(株)生産技術研究所粉体研究室
(〒356 埼玉県入間郡大井町鶴ヶ岡 5-3-1)
TEL. 0492-64-6211

** 金沢大学工学部土木建設工学科
(〒920 金沢市小立野 2-40-20) TEL. 0762-34-4645

† Tech. Res. Center, Nisshin Flour Milling Co., LTD.,
(5-3-1 Tsurugaoka, Oi-machi, Irumagun, Saitama 356)

†† Dept. of Civil Eng., Kanazawa Univ.,
(2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa 920)

2. サイクロン内壁近傍の流れの可視化

2.1 実験装置と方法

サイクロン内部の流れを測定する方法としてピトー管、熱線風速計等を用いる方法もあるが、これらは測定部を気流中に挿入しなければならず結果的に気流を乱す可能性がある。したがって、気流を乱さずに流れを可視化することが望まれるが現実には困難である。一方、壁面トレース法やタフト法⁶⁾は壁面に油膜や糸を塗布あるいは取り付けの方法であり、壁面近傍の流れしか可視化できない欠点はあるが、流れに対してはあまり大きく影響しない。

サイクロンは主に粒子と気体の半径方向への運動の差を利用して、粒子を気流中から分離する装置であるが、旋回方向には両者はほぼ同様の運動をしていると考えられる。したがって、サイクロン壁面に到達する粒子状態を何らかの方法で観察できれば、サイクロン壁面付近での気流の可視化は可能と考えられる。

Fig. 1はこのような目的で作成した実験装置の概略を示したものである。**Fig. 2**に実験に用いたサイクロンを示す。サイクロンとしては筆者ら⁷⁾のこれまでの経験から、粒子分離性能の最も優れていた内径72mmの

Fig. 1 Flow sheet of experimental apparatus

Fig. 3 Spread diagram of cyclone and visualized inner flow in cyclone cylindrical part

Fig. 2 Schematic diagram of cyclone

全円周渦巻入口式を用いた。

実験は通常の粒子分離の場合と同様であるが、粒子の沈着状況の観察を容易にするために、サイクロン全円周及び円筒部内壁にケント紙を貼付した。このとき、貼付により気流に乱れが生じないようにケント紙をサイクロン内壁にぴったりと貼り付けた。観察したサイクロン入口風速は20, 25, 30m/sであり、トレーサ粒子としては関東ロームJIS No. 11(真密度 $\rho_p = 2.9\text{g/cm}^3$, 平均粒子径 $D_{50} = 2.3\mu\text{m}$)を用いた。このとき粒子を完全に分散させるため、分散器供給圧縮空気圧力は0.4MPa、粉塵濃度は約 1g/m^3 とした。実験終了後、トレーサ粒子の付着状態を観察した。

2.2 結果

Fig. 3にサイクロンの展開図および入口風速20, 25, 30m/sにおけるトレーサ粒子のサイクロン円筒部内壁への付着状態を示す。展開図において、 $A_1A_2B_3B_2B_1'B_1$ は全円周渦巻入口部分、 $B_1'B_2B_3$

C_2C_1 は円筒部分, $C_1C_2D_2D_1$ は円錐部分, A_1B_1 はサイクロン入口部である。貼付したケント紙は、展開図の $B_1'B_2B_3C_2C_1$ に対応している。実験後のケント紙にはトレーサー粒子が付着しており、流跡線が観察された。

入口風速が 20, 25 m/s ではともに流跡線がはっきりと観察され、円筒部においてはその流跡線は流入した角度を維持していることが確認された。これより入口風速 20, 25 m/s では、旋回流はサイクロン入口での流れを維持したままサイクロン円筒部を流れているとみなせる。一方、入口風速が 30 m/s では入口風速 20, 25 m/s に比べて流跡線はかなり不明瞭になっている。粒子の沈着状態は供給粉体の分散状態にも依存するが、すべての実験で分散条件および供給粉塵濃度は同一にしたので、流跡線が不明瞭となったのは、入口風速が 30 m/s を超えるあたりからサイクロン内部の流れが乱流になるためではないかと考えられる。

流跡線と水平面とのなす角度 θ を測定すると、入口風速 20 m/s で $\theta = 15.8^\circ$ 、入口風速 25 m/s で $\theta = 15.5^\circ$ 、入口風速 30 m/s で $\theta = 15.4^\circ$ と入口風速が変化しても θ は変化せず、ほぼ一定とみなせる。すなわち、サイクロン円筒部への気流の流入角度 θ はサイクロン入口形状に深く関係しているのではないかと考えられる。

測定した θ よりサイクロン円筒部での気流の旋回数を求めると約 1.5 回転となる。

以上のことからサイクロンに導入された気流は、全円周渦巻部分の全円周方向から均一に円筒部 $B_1'B_2B_3$ に流れ込み、円筒部では螺旋流を形成していることが確認された。展開図には粒子軌跡の例を示したが、たとえば B_1' より流入した粒子は破線で示した軌跡を描き、また B_2 より流入した粒子は一点破線で示した軌跡を描きながら円筒部を通過することになる。

3. サイクロン円筒内の気流モデル化と理論圧力損失の計算

井伊谷⁵⁾、小川⁸⁾などによればサイクロン円筒部の気流の軸分速度がゼロとなる半径 r_c は、円筒部直径を $D_1 (=2R_1)$ とすると、入口風速に無関係にほぼ $r_c = (2/3)R_1 = D_1/3$ である。つまり $d \geq 2/3 D_1$ の領域では気流は軸分速度が下向きと考えられる。したがって、前節の結果と合わせて考えると、サイクロンに流入した気流は、サイクロン上蓋面の全円周から均一に螺旋を描きながら、サイクロン円筒部の仮想円筒部を旋回していると考えることができる。

このようにすると旋回部での気流速度 u_c は Fig.

Fig. 4 Calculation of axial fluid velocity and tangential fluid velocity

4に示した周分速度 u_θ と軸分速度 u_z とを合成した速度として以下のように求められる。

周分速度 u_θ はサイクロン入口風速を u_0 、サイクロン入口断面積を A_0 、仮想円筒の縦断面の片側部分の面積を A_θ とし、次式となる。

$$A_0 u_0 = A_\theta u_\theta / n \quad (1)$$

ここで、 $A_\theta = (D_1/6)L$ (L はサイクロン円筒部長さ)、 n は蛇管の巻き数であり、可視化実験結果より $n = 1.5$ とする。

一方、軸分速度 u_z は仮想円筒の横断面積を A_z とすれば、

$$A_0 u_0 = A_z u_z \quad (2)$$

であるので、蛇管内気流速度 u_c は次式となる。

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{1}{A_\theta}\right)^2 + \left(\frac{1}{A_z}\right)^2} A_0 u_0 \quad (3)$$

内径 D 、長さ l の蛇管内を流速 u で流れる密度 ρ の非圧縮性流体の圧力損失 Δp は次式で表される。

$$\Delta p = 4f_c(l/D)(u^2/2)\rho \quad (4)$$

蛇管については、White⁹⁾、Taylor¹⁰⁾、Richter¹¹⁾等によって摩擦係数の算出式が次のように与えられている。

層流

$$\frac{f_c}{f} = 1 \quad \text{at} \quad \frac{Re}{\sqrt{D_c/D}} < 11.6 \quad (5)$$

中間領域

$$\frac{f_c}{f} = \frac{1}{1 - \left\{ 1 - \left(\frac{11.6 \sqrt{D_c/D}}{Re} \right)^{0.45} \right\}^{1/0.45}} \quad (6)$$

$$\text{at } 11.6 < \frac{Re}{\sqrt{D_c/D}} < 2000, D_c/D < 15.2$$

乱流

$$\frac{f_c}{f} = 1 \quad \text{at } D_c/D > 500 \quad (7)$$

$$f_c = 0.00176 \alpha (D/L) (360n)^{1.10} Re^{-0.235} \quad (8)$$

$$D_c/D < 500$$

ここで、 α はRichterが求めた D_c/D に対する定数である。また、ここで言う中間領域は、直管の臨界レイノルズ数と蛇管の臨界レイノルズ数とが異なることから生じる。蛇管の臨界レイノルズ数 $(Re)_c$ は、直管より大きく、 D_c/D が小さいほど大きくなる。Eq.(6)は蛇管の層流域であり直管の乱流域である範囲にある。

筆者ら¹²⁾は D_c/D が6.9～80.0の範囲で蛇管の圧力損失 Δp を測定し、蛇管の圧力損失は蛇管内流速を層流域、乱流域および両者の中間領域とに分け、なおかつ各 D_c/D ごとに考えなければならないことを示し、以下のように与えた。

層流

$$\Delta p \propto u^1 \quad \frac{Re}{\sqrt{D_c/D}} < 11.6 \quad (9)$$

中間領域

$$\Delta p \propto u^{2.25} \quad 11.6 < \frac{Re}{\sqrt{D_c/D}} < 2000, D_c/D < 15.2 \quad (10)$$

乱流

$$\Delta p \propto u^{1.75} \quad D_c/D > 500 \quad (11)$$

$$\Delta p \propto u^{1.765} \quad D_c/D < 500 \quad (12)$$

層流域では、圧力損失は直管と同様に、風速に比例する。乱流域でも、 D_c/D にもよるが直管とほぼ同様で、Eqs.(11), (12)に示すように風速の1.75～1.765乗に比例する。また、中間領域では、Eq.(6)より、風速の2.25乗に比例することになる。

Fig. 5に実験により求めた蛇管の摩擦係数 f_c と Re 数との関係を示す。

蛇管の考え方として、ここでは以下の2つの蛇管を

Fig. 5 Friction factor of coiled tube

Fig. 6 Schematic diagram of coiled tube model

考えた。一つは旋回流を入口形状を維持したままの矩形ダクトと考え、円相当径を代表長さとする矩形モデル、もう一つは、旋回流を仮想円筒に内接する数本の円管群と考える蛇管モデルである。矩形モデルの場合、サイクロン入口風速が10m/sですでにそのレイノルズ数は $Re > 10^4$ となり、蛇管における乱流領域に入ってしまう。したがって、ここでは蛇管モデルを考えた。

Fig. 6に想定した蛇管モデルを示す。想定した蛇管の直径 D はサイクロン円筒部の直径 d が $2/3 D_1 \leq d \leq D_1$ となる仮想円筒に内接する円管の直径 $D = 1/6 D_1$ とし、蛇管巻き直径 D_c は蛇管の中心線の直径 $D_c = 5/6 D_1$ とした。サイクロン円筒部の螺旋流はFig. 4図中に示した上記寸法の蛇管が仮想円筒部分に隙間なく配置されたものとする。前章の結果より、蛇管巻き数 n は1.5とする。

4. サイクロンの圧力損失

可視化実験装置を用い内径72mmの全円周渦巻入口式サイクロンについて圧力損失を測定した。なお入口風速は10～40m/sの範囲で変化させ、粉体は供給しな

Fig. 7 Relation between cyclone fluid velocity and pressure loss

かった。

得られた圧力損失 Δp を、蛇管モデルより得られる気流速度に対してプロットしたのが Fig. 7 である。なお横軸にはレイノルズ数も合わせて示している。同図には圧力損失 Δp と矩形モデルより得られる気流速度のレイノルズ数との関係を示す。また、乱流領域だけのデータではあるが、サイクロン内径および入口形状が全円周渦巻入口式と同じである接線入口式サイクロン（出口管挿入長さ 60mm）の圧力損失 Δp と蛇管モデルより得られる気流速度のレイノルズ数との関係を一点破線で示す。

本実験で用いたサイクロンの内径は $D_1=72\text{mm}$ であるから、蛇管モデルの場合、蛇管直径は $D=1/6D_1=12\text{mm}$ 、蛇管巻き直径は $D_c=5/6D_1=60\text{mm}$ となり、 $D_c/D=5$ となる。Taylor⁹⁾ によると $D_c/D=5$ のときの蛇管の臨界レイノルズ数は $(Re)_c=6800$ である。そこで、モデル化した蛇管内流速 u_c をレイノルズ数に換算し、 $Re=6800$ を境にして、層流域 ($Re<6800$) と乱流域 ($Re>6800$) とに分けて、それぞれ直線近似を行った。前章で行った計算結果と比較すると、層流域では、計算値が $\Delta p \propto u_c^{2.25}$ 、実験値が $\Delta p \propto u_c^{2.48}$ 、乱流域では、計算値が $\Delta p \propto u_c^{1.765}$ 、実験値が $\Delta p \propto u_c^{1.98}$ となった。

これより、サイクロンの圧力損失が入口風速の 1.8～2.3 乗に比例する原因は、サイクロン内部の気流が層流から乱流に変化することにより生じていることが確認された。蛇管モデルにより考えると、現在一般的に使用されているサイクロン入口風速は、層流域と乱流域の境界領域にあたることになる。

一方、矩形モデルを考えた場合、いずれの入口速度においてもそのレイノルズ数は $Re>10^4$ となり、すべて乱流領域に含まれてしまう。その乱流領域において直線近似を行うと $\Delta p \propto u_c^{2.16}$ となった。

本モデルでは、サイクロン円錐部の影響は考慮していないが、実際のサイクロンの圧力損失は想定した蛇管の圧力損失の 4～5 倍となっており、蛇管モデルのサイクロン相当長さは実際のサイクロンの円筒部長さの 4～5 倍と考えられる。

実験点が少なくまだ十分に議論されたとは言えないが、サイクロン円筒部の流れを蛇管状の気流とみなし、蛇管モデルを用い、蛇管内流速を層流域と乱流域とに分けて考えることにより、サイクロンの圧力損失が入口風速の 1.8～2.3 乗に比例することがうまく表現できる。

6. 結 言

サイクロン内壁近傍の流れを可視化し、サイクロン円筒部の流れを蛇管状の気流とみなして、サイクロンの圧力損失の流速依存性を検討した。主な結論は以下のようなものである。

(1) トレーサー粒子の流跡線を観察することにより、サイクロン内壁近傍の流れの可視化が可能であり、流れの可視化により、入口風速が遅い場合、気流はサイクロン入口での流れを維持したままサイクロン円筒部を流れ、入口風速が速くなると、気流は乱流に変化することが確認された。

(2) サイクロン円筒部の流れを蛇管状の気流とみなし、蛇管モデルを用い、蛇管内流速を層流域と乱流域とに分けて考えることにより、サイクロンの圧力損失が入口風速の 1.8～2.3 乗に比例することがうまく表現でき、層流域では、 $\Delta p \propto u_c^{2.25}$ 、乱流域では、 $\Delta p \propto u_c^{1.765}$ となる。

Nomenclature

A_0 : cyclone inlet area	(m ³)	cyclone cylindrical part	(m ³)
A_θ : area of longitudinal section of virtual cylinder in cyclone cylindrical part	(m ³)	D_1 : diameter of cyclone cylindrical part	(m)
A_z : area of horizontal section of virtual cylinder in		D : tube diameter	(m)
		D_c : coil diameter of tube	(m)

f	: Fanning's friction factor	(-)	u_s	: fluid velocity in coiled tube	(m/s)
f_c	: friction factor of coiled tube	(-)	u_θ	: tangential fluid velocity	(m/s)
g	: gravitational acceleration	(m/s ²)	u_z	: axial fluid velocity	(m/s)
L	: length of cyclone cylindrical part	(m)	α	: variable defined by Richter ¹¹⁾	(-)
l	: tube length	(m)	Δp	: pressure loss	(Pa)
n	: turn number of coiled tube	(turns)	θ	: angle of stream line from the horizon	(-)
Re	: Reynolds number(= Du/ν)	(-)	μ	: fluid viscosity	(Pa · s)
$(Re)_c$	: critical Reynolds number	(-)	ν	: fluid kinematic viscosity	(m ² /s)
u	: fluid velocity	(m/s)	ρ_g	: density of gas	(kg/m ³)
u_0	: cyclone inlet velocity	(m/s)	ρ_p	: density of particle	(kg/m ³)

References

- 1) Perry, J. H. : "Chem, Eng. Handbook", 4th Ed. p.5~34, McGRAW-HILL. (1963)
- 2) Amer. Petroleum Inst. : "Cyclone Dust Collectors", (1955)
- 3) Kimura, N. : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, 23, 713(1986)
- 4) Harada, Y. and S. Ichige, : *Trans. Japan Soc. Mech. Eng.*, 21(105), 369(1965)
- 5) Iinoya, K. : "Shinpan, Syuujin-souchi", p.134, Nikkan Kougyou(1973)
- 6) Nagarenokashika-gakkai : "Shinpan, Nagarenokashika-handbook", p.158, Asakura(1989)
- 7) Iinoya, K., T. Fuyuki, Y. Yamada, H. Hisakuni and E. Sue : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, 29, 351 (1992)
- 8) Ogawa, A. : "Cyclone-bunriki", p.53, EARTH-sha, (1980)
- 9) White, C. M. : *Proc. Roy. Soc. (London)*, A123, 645(1929)
- 10) Taylor, G. I. : *Proc. Roy. Soc. (London)*, A124, (1929)
- 11) Richter, H. : *Forsch. Ing.-Wes. Heft* 338(1930)
- 12) Fuyuki, T., C. Kanaoka, and H. Emi : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, submitted,
- 13) Blasius, H. : *VDI Heft*, 131(1913)