幾何学的に相似形の軸流サイクロン分離器の圧力損失 に及ぼす力学的相似則と寸法効果

Effects of Mechanical Similarity Law and Cyclone Sizes for Pressure Drop of Geometrically Similarity Type of Axial Flow Cyclone Dust Collectors

正 小川 明 (日大工)

Akira OGAWA College of Eng., Nihon University, Tokusada, Tamura-Machi, Kooriyama-Shi, Japan

Key Words: Cyclone, Pressure Drop, Coefficient of Pressure Drop, Vorticity, Eddy Viscosity, Reynolds Number

1. はじめに

サイクロン分離器（以下、サイクロンと略称す）の圧力損失は、一般的には、レイノルズ数 $Rec (= Q_0 / H_i \cdot \nu)$ の関数として評価されるが、ここで Fig.1 に示した透明なアクリル樹脂で加工製作した幾何学的に相似な小形軸流サイクロン

ン（直径 $D1=30$, Fig.1 Geometrically similarity type of axial flow cyclone and main sizes Rec の他に、その寸法効果が圧力損失の評価に影響する事を示した。但し、 Q_0 は流量、 H_i は仮想円筒長さ、 ν は空気の動粘度、 $D1$ はサイクロン直径である。

2. サイクロンの圧力損失の基本式と寸法効果

2. 1 圧力損失係数の定義

サイクロンの圧力損失は、**К о у з о в** (1938) が、 $D1, D2$ 及び Do が関係すると述べている [1]。また、Hochstrasser (1976) は、超小形サイクロンによる実験から、層流、遷移、乱流状態の圧力損失となる事を示している [2]。筆者は既に、このサイクロンの圧力損失並びに分離性能に関する論文を発表した [3, 4] が、より詳細に検討した結果を述べる。サイクロンの圧力損失は、渦度を Ω とすると、次式で表される。

$$\Delta P_c (Pa) = \frac{\eta_t}{Q_0} \int \Omega^2 dv + \rho \frac{V_o^2}{2} = \zeta_c \cdot \frac{\rho \cdot V_o^2}{2} \quad (1) \quad \Omega = \frac{dV_\theta}{dr} + \frac{V_\theta}{r} \quad (2)$$

そこで、圧力損失係数 ζ_c を次式に変形し、圧力損失係数 ζ_c^* との関係は次のようになる。

$$\Delta P_c^* = \zeta_c^* \cdot \frac{\rho \cdot V_o^2}{2} = \Delta P_c - \frac{\rho \cdot V_o^2}{2} = (\zeta_c - 1) \frac{\rho V_o^2}{2} \quad (3)$$

2. 2 層流旋回流の場合の圧力損失

サイクロン内の旋回流の周分速度のモデルとして、層流、又は、乱流を問わず、Fig.2 に示したように、半径 $r \leq a$ では強制渦、 $R1 - \delta \leq r \leq a$ では、準自由渦とみなし、次式で書き表されると仮定する。

$$V_\theta = \omega r \quad r \leq a, \quad V_\theta \cdot r^n = K_o \cdot V_o \cdot (R1 - R_o)^n = \Gamma n \quad R1 - \delta \leq r \leq a \quad (4)$$

ここで、流れは層流とみなす場合でも、旋回流の乱れを考慮して、境界層を除いた領域全体にわたって $\eta_t = K_v \cdot \eta$ とし、

Fig.2 Schematic illustration of combined vortex model and the main symbols of the cyclone dust collector

eq. (1,2) を計算する。ついで、外筒壁面近傍の境界層領域についても、 δ 及び V_θ は、それぞれ次式で表されると仮定し、eq. (1,2,5) を用いて計算すれば、次式を得る。

$$\delta = \frac{1.15}{Rec^{0.7}} \cdot R1 \quad V_\theta = \frac{V_o}{\delta} \cdot (R1 - r) \quad (5)$$

$$\zeta_c^* = K_v \cdot \left[4 + \frac{(1-n)^2}{n} \left\{ 1 - \beta^{2n} \cdot \left(\frac{R2}{R1} \right)^{2n} \right\} \right] \cdot \frac{1}{\beta^{2n}} \cdot \left(\frac{R1 - R_o}{R1} \right)^{2n} \cdot \frac{2\pi \cdot (H/H_i) \cdot K_o^2}{Rec} + 0.047 \cdot \left(\frac{H}{H_i} \right) \cdot Rec^{0.3} \quad a = \beta \cdot R1 \quad (6)$$

2. 3 乱流旋回流の場合の圧力損失

乱流旋回流の場合、強制渦と準自由渦領域の渦粘度 η_{tv} と η_{tf} はそれぞれ次式で表されると仮定する。ここに、 $D1^*$ は直径=140mm の円筒形サイクロンによる基準となる渦粘度測定値の代表寸法である [5]。

$$\eta_{tv} = K_v \cdot Rec \cdot \eta = 0.106 \cdot \left(\frac{D1^*}{D1} \right)^\Lambda \cdot Rec \cdot \eta \quad (7)$$

ここで、 $D1=69,99\text{mm}$ サイクロンの場合、 $\Lambda=2$ 、一方、

D1=50,30mm の場合、 $\Lambda=0.5$ である。

$$\eta_f = K_f \cdot \text{Rec} \cdot \eta = 0.0473 \cdot \left(\frac{D_1}{D_i}\right)^A \cdot \text{Rec} \cdot \eta \quad (8)$$

かくして、圧力損失係数 ζ^* は次式で書き表される。

$$\zeta_c^* = 11.55 \cdot K_o^2 \cdot \left[0.424 + 0.0273 \cdot \frac{(1-n)^2}{n} \cdot (1-0.12^{2n}) \right] \cdot 5.556^{2n} \cdot \left(\frac{D_1}{D_i}\right)^A + 0.047 \cdot \left(\frac{H}{H_i}\right) \cdot \text{Rec}^{0.3} \quad (9)$$

3. 実験結果との比較検討

3. 1 圧力損失係数 ζ^* と Rec との関係

Fig.3 には、Fig.1 に示したサイクロンの ζ^* と Rec との関係を示した。これより、明確にはその範囲を規定できないが、層流、遷移、乱流の領域を示した。さらに、この結果から、たとえ、幾何学的に相似形なサイクロンについて、力学的相似則として Rec を用いて整理しても、サイクロンの寸法効果が明瞭に示されている。

3. 2 n , $V \theta i$, δ と Rec との関係

Eq.(6) と eq.(9) から、速度指数 n が重要な因子となるので、Fig.4 に、 n と Rec との関係を示した。この結果から、 Rec の増加に伴い n は $n=1$ に向かい漸次増加する傾向にある。Fig.5 は $V \theta i$ と Rec の関係を Fig.1 に示したサイクロンについて示した。Fig.6 は、仮定した境界層の厚さ δ と Rec との関係を示した。これら、Figs.4,5,6 に示した実験結果は、サイクロンの寸法効果によらず、ほぼ、 Rec のみによる相関が示されている。

3. 3 ζ^* と Rec との関係

Fig.7 は、 ζ^* と Rec との関係を、Fig.1 に示したサイクロンによる実験結果と eqs.6 and 9 による実線で示した計算値との比較を示した。これより、計算値は実験値を十分に評価出来ることを示しているが、 n の値や K_o の値の推定が極めて困難である。さらに、渦粘度の分布をどのように評価するかにより ζ^* の値は大きく変わる [6]。また、 Rec と入口管内のレイノルズ数 $\text{Re} = D_o V_o / \nu$ との関係は、 $\text{Rec} = (\pi D_o / 4 H_i) \cdot \text{Re}$ となり、Fig.7 の $D_1=30\text{mm}$ の場合 $\text{Rec}=500$ の時 $\text{Re}=4202$ となる。従つて、サイクロン内の旋回流れが層流とみなされる場合でも、入口管から流入する気流は十分に乱流状態である。これらの流動状態から、圧力損失係数の層流、遷移、乱流の流動様式を明瞭に Rec のみの関数として評価するのは困難である。

4. まとめ

- (1) 幾何学的に相似形な小形サイクロンの圧力損失を計算するために必用な因子、Fig.4 の $n(1)$, Fig.5 の $V \theta i$, Fig.6 の δ は、近似的に Rec の関数として評価できる。
- (2) Fig.3 の 圧力損失係数 $\zeta^*(1)$ の評価は、 Rec のみならずサイクロンの寸法 D_1 が重要なパラメータである。
- (3) 渦粘度を評価するために、eq.(7), eq.(8) を仮定したが、ここでも、 Rec の他にサイクロン直径 D_1 及び D_1 を寸法パラメータとして導入した。
- (4) Fig.4 に示したように、 ζ^* の実験値に対し、実線で示した計算値は近似的には評価できるが、この計算に必用となるパラメータの値の評価は、 Rec のみならずサイクロンの寸法効果を考慮しなければならない。

Fig.3 Correlation between ζ_c and Rec for the cyclones of $D_1=30, 50, 69$ and 99mm .

Fig.4 Correlation between n and Rec for the cyclones of $D_1=30, 50, 69$ and 99mm .

Fig.5 Correlation between $V \theta i$ and Rec for the cyclones of $D_1=30, 50, 69$ and 99mm .

Fig.6 Correlation between δ and Rec for the cyclones of $D_1=30, 50, 69$ and 99mm .

Fig.7 Comparison of the experimental results of the coefficient of the pressure drop with the calculated results by eq.(6) and eq.(9)

用文献

- [1] Коузов П.А.; ОТОПЛЕНИЕ и ВЕНТИЛЯЦИЯ, No.2(1938), С.6~С.9.
- [2] Hochstrasser, J.M., Dissertation (1976), Univ. Cincinnati,
- [3] Ogawa, A., Sugiyama, K., J. Thermal Science, Vol.2, No.2 (1993), P.87 ~ P.97.

- [4] Ogawa, A., J. Thermal Science, Vol.8, No.3 (1999), P.143 ~ P.157.
- [5] Ogawa, A., Separation of Particles from Air and Gases, Vol.II, CRC-Press, (1984), P.7 ~ P.13.
- [6] Халатов, А.А., Авраменко, А.А., Шевчук, И.В., ЗАКРУЧЕННЫЕ ПОТОКИ, Том 3, Киев (2000), С.27~С.35.