穴あき内円筒付サイクロン集じん機*

矯 学 真^{*1}, 山 本 恭 二^{*2}

Cyclone Dust Collector with an Internal Perforated Cylindrical Tube

Xuezhen JIAO and Kyoji YAMAMOTO

A new type of cyclone dust collector, which has an internal perforated cylindrical tube, has been developed. The internal perforated tube works to remove the inner forced vortex which appears inside a conventional cyclone dust collector and causes the pressure loss of the dust collector. The void fraction of the perforated tube is taken to be 20~50%. Then, the dust collection efficiency was improved to 1~3% and the pressure loss was decreased by about 40% compared with the conventional cyclone dust collector.

Key Words: Fluid Machinery, Swirling Flow, Internal Flow, Cyclone, Dust Collector, Perforated Cylindrical Tube

1. 緒 言

集じん機は工業生産や環境保護にとってなくてはならない設備である。集じん機を集じんの様式から分けると、機械集じん機、汙過集じん機、湿式集じん機、電気集じん機の4種類に大別できる。機械集じん機の一つにサイクロン集じん機があるが、これは流体とちりとの密度差による遠心分離を利用しているため、遠心集じん機とも呼ばれる。サイクロン集じん機は他の集じん機に比べて、組立が簡単で、装置も小さくすみ、管理も容易であることから、中等な排気浄化に広く用いられている。

比較的良好に用いられる接線形反転式サイクロン集じん機については、これまで多くの研究がなされてきた。その動作原理は次のようである：入口部から集じん機に入った含じん気流は、集じん機内を回転しながら下方へと進み、集じん機下部に達した後、方向を変えて集じん機の中心軸にそって上がっていき、排気管から排出される。この間に、粒子は遠心力のために回

転運動をしながら外円筒に近寄っていき、外円筒に達した粒子はそれにそって集じん機の下端にある集じん箱へと落ちていく。この形のサイクロン集じん機内部での円周方向速度成分 u の典型的な分布を図1に示す¹⁾。円周方向速度成分 u が最大値をとる位置は内渦巻(強制渦)と外渦巻(準自由渦)の境界面にある。そこで粉じん粒子は最も大きい遠心力を得る。したがって、その境界面近くにおいて遠心力の作用が十分でない粒子はサイクロンの出口から排出される。このとき、粒子は外渦巻の作用で分離されるのであり、内渦巻は粒子の分離にまったく役立っていない。

サイクロンの内渦巻による圧力損失は全圧力損失の50%程度も占めている²⁾。内渦巻は粒子分離に役立た

図1 サイクロン内の円周方向速度分布

* 平成5年3月9日 中国四国支部31期総会講演会において講演、原稿受付 平成5年3月22日。

^{*1} 正員、岡山大学大学院 (〒700 岡山市津島中3-1-1)。

^{*2} 正員、岡山大学工学部。

ないから、このエネルギー損失は純損失となる。そこで、この内渦巻を除いたら、サイクロン集じん機内の流動状態が単純になるうえに圧力損失も大幅に減少できることが考えられる。

この研究でのサイクロン集じん機は、図2に示すように本体内部に、穴のあいた内円筒を設置することによって、粒子の分離に役立たない内渦巻を取り除くものである。このような集じん機を「穴あき内円筒付サイクロン集じん機」と呼ぶことにする。含じん気流が集じん機の本体の中に入ると、まず内円筒と外円筒との間の空間で高速回転する。そのため粒子は遠心力により外円筒に近づく。一方、内円筒に近いところのちりが除去された気流は、内円筒にある穴を通り抜けて排出される。また、内円筒に入った浄化した気流はほとんど回転しない。このように、粒子を分離させる空間と浄化された空間とが内円筒によりほぼ完全に分けられるため、互いの混合が不可能となり、集じん機の捕集効率が低下しないばかりでなく、圧力損失が大幅に下がることが期待できる。

2. 実験装置および測定方法

集じん機実験装置の概略を図3に示す。この実験装置は、JIS⁽³⁾⁽⁴⁾およびISO⁽⁵⁾を参照して設計した。サイクロンの外円筒部の直径は600 mmで、入口寸法は300 mm×150 mm、内円筒にあけた穴は直径10 mm以下の円形で、その開孔率は20～50%である。

集じん機の入口の流量は吸込ノズル③⁽⁶⁾で測定し、出口の流量は規格ノズル④⁽⁴⁾⁽⁵⁾で測定する。静圧穴⑥は吸込ノズル内の静圧を、また、静圧穴⑨、⑩は規格ノズルの前後断面の静圧差を測定するのに使われる。静圧穴⑦、⑧によって集じん機前後の静圧差を測定す

る。

規格ノズルと吸込ノズルの流量計算式⁽⁵⁾⁽⁶⁾は、

$$Q = \alpha \varepsilon A_0 \sqrt{2\Delta P / \rho} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad \cdots \cdots (1)$$

$$Q = A \phi \sqrt{2P_v / \rho} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで、 α は流量係数、 ε は校正係数、 A_0 は規格ノズルの円筒部の断面面積(m^2)、 ΔP は規格ノズル前後における断面の静圧差(Pa)、 ρ は気体の密度(kg/m^3)、 P_v は吸込ノズルの測定断面での真空度、すなわち大気圧とその断面との絶対圧力の差(Pa)、 ϕ は吸込ノズルの速度校正係数(規格ノズルで ϕ を評価する)、 A は静圧測定断面の面積(m^2)である。

集じん機の前断面⑦、⑧2点での全圧差 ΔP_t から前後管路の付加圧力損失 $\sum \Delta P_a$ を引いたものが集じん機の全圧力損失 ΔP_t となる。

すなわち

$$\Delta P_t = \Delta P_t' - \sum \Delta P_a \quad \cdots \cdots (3)$$

あるいは、 $\Delta P_t'$ は、 $\Delta P_t' = \Delta T_s' + \Delta P_k$ と表せるので

$$\Delta P_t = \Delta P_s' + \Delta P_k - \sum \Delta P_a \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで、 $\Delta P_s'$ は静圧穴⑦、⑧で測定した静圧差で、 ΔP_k は同2点の動圧の差であり、測定した流量と管路の直径とによって計算される。 $\sum \Delta P_a$ は管路内流として摩擦係数を与えることにより求められる。

なお、比較のため、穴あき内円筒付サイクロン集じん機と外円筒直径が同じだが、内円筒のない通常の高集じん効率形のサイクロン(Stairmand Cyclone⁽⁷⁾)の寸法比によって作られた比較実験用サイクロン)による実験も行った。

3. 集じん機の全捕集効率および圧力損失

実験では、集じん機の入口風速を $V_i=12, 15, 16.5$,

図2 穴あき内円筒付サイクロン集じん機の構造

図3 実験装置の概略図

18, 21, 24, 27 m/s とした。実験用ダストは実験用ダスト 4 種(タルク)⁽⁶⁾ であり、その粒径分布の対数正規確率分布方程式は、

$$Y = -3.107 + 3.198X \quad \cdots \cdots (5)$$

ここで、 X , Y は対数正規確率分布の横軸と縦軸の座標である。ダストの真密度は 2730 kg/m^3 、質量中位径は $9.36 \mu\text{m}$ である。供給粉じんと捕集粉じん量を毎回計って、質量法によって全捕集効率を計算する。捕集効率の測定は同一条件でいずれも 3 回行い、その平均値を測定値の結果とした(3 回の誤差は 1% よりも小さい)。入口含じん濃度が高い場合 (20 g/m^3) に内円筒付サイクロン集じん機および通常のサイクロン集じん機に対し測定した結果を表 1 および図 4 に示す。ここで、 V_i は集じん機の入口の流速で、式(2)で与えられる流量 Q を集じん機入口面積で割った値である。なお、流量 Q に対する測定誤差は 2% 程度であった。

表 1 より、圧力損失は通常のサイクロン集じん機に比べ穴あき内円筒付サイクロン集じん機のほうが平均して約 40% 小さく、捕集効率が約 1% 高いことがわかる。

表 1 のデータをもとに、回帰分析の方法を用いて全捕集効率を次の関数形式にまとめる。

$$\eta = 1 - P_d = 1 - \exp[-\beta V_i^n] \quad \cdots \cdots (6)$$

ここで、 $P_d = \exp[-\beta V_i^n]$ は集じん機の透過率、 β と n は未定定数である。実験データより、穴あき内円筒付きと通常のサイクロン集じん機の捕集効率はそれぞれ次のようになる。

$$\eta = 1 - \exp[-1.266 V_i^{0.228}] \quad \cdots \cdots (7)$$

$$\eta = 1 - \exp[-1.236 V_i^{0.223}] \quad \cdots \cdots (8)$$

この曲線と実験データとの相関係数 r は、式(7)で $r=0.998$ 、式(8)で $r=0.999$ である。式(7)、(8)で任意の入口速度での全捕集効率が計算できる。

図 4 高含じん濃度 (20 g/m^3) の場合の圧力損失と捕集効率

4. 含じん濃度の影響

集じん機に入る気流の含じん濃度が増加すると、粒子同志が干渉し、粒子の凝集と分離が強められるので、一般に捕集効率が増加する。理想的な集じん機では低い含じん濃度から高い含じん濃度まで、捕集効率が大きく変化することなく、高い値を示すことが要求される。そこで、内円筒付サイクロン集じん機と通常形サイクロン集じん機とにおいて、含じん濃度の捕集効率に及ぼす影響を含じん濃度が $3 \sim 20 \text{ g/m}^3$ に対して調べた。測定した結果を表 2 および図 5 に示す。このとき、入口流速は $V_i=18 \text{ m/s}$ である。結果が示すように、内円筒付集じん機のほうが通常形集じん機よりも、どの含じん濃度に対しても、捕集効率が高く、特に、低含じん濃度の場合には、約 3% も高くなっていることがわかる。この原因としては、前述の粒子間の干渉による粒子の凝集が捕集効果を高めることのほか、集じん機円すい部における反転気流による粒子の吹上げ効果があげられる。通常形集じん機では、外渦巻気流が円すい部下端に達し、反転上昇するとき、集じん箱の中にある粉じんを巻き上げることがある。文献⁽⁹⁾に

表 1 高含じん濃度 (20 g/m^3) の場合の圧力損失と捕集効率

V_i (m/s)	12.0	15.0	16.5	18.0	21.0	24.0	27.0
Q (m ³ /s)	0.54	0.68	0.74	0.81	0.95	1.08	1.22
ΔP_t B	382	600	730	879	1207	1597	2025
(Pa) A	628	986	1215	1462	2106		
ξ B	4.42	4.44	4.47	4.52	4.56	4.62	4.63
A	7.27	7.30	7.44	7.52	7.96		
η B	89.4	90.4	91.0	91.3	92.2	92.8	93.4
(%) A	88.5	89.6	90.1	90.5	91.4		

V_i Inlet velocity (m/s).

Q Flow rate (m³/s).

ΔP_t Total pressure loss (Pa).

ξ Resistance coefficient, $\xi = \Delta P_t / (V_i^2 \rho / 2)$.

η Total collection efficiency (%).

A - Type A. A reverse-flow cyclone based on cyclone proportion of Stairmand high efficiency cyclone⁽⁷⁾.

B - Type B. A cyclone with an internal perforated cylindrical tube.

表 2 捕集効率と含じん濃度との関係 ($V_i=18.0 \text{ m/s}$)

Concentration c (g/m ³)	3	10	20	30
Collection efficiency η (%)				
Type B	90.8	91.1	91.3	91.6
Type A	87.9	89.3	90.5	90.8

図5 捕集効率と含じん濃度との関係 ($V_i=18.0$ m/s)

よると、集じん箱から持ちだされる粉じんの量は全排出量の20~30%を占めているといわれる。穴あき内円筒付サイクロン集じん機では、浄化された気流が回りながら内円筒にある穴を通り抜けて排出されるので、上述の集じん機箱からの粉じんを持ちだす割合が少なくなる。このことは、低含じん濃度の場合により顕著であることから捕集効率が高いものと考えられる。

5. 規定風量および負荷適応性

5.1 規定風量の確定 集じん機の規定風量を確定しようとする、捕集効率と圧力損失の二つの量に注目しなければならない。すなわち、捕集効率が高く圧力損失が適当であることが規定風量の条件となる。

実験結果から、穴あき内円筒付サイクロン集じん機は入口風速が $V_i=21.0$ m/s のとき、捕集効率 $\eta=92.2\%$ 、圧力損失 $\Delta P_i=1207$ Pa であって、捕集効率が高く圧力損失が適当である。そこで穴あき内円筒付サイクロン集じん機の規定風量を $Q=0.9450$ m³/s (3402 m³/h) とする。

それに対して、通常形のサイクロン集じん機の規定風量は 0.7425 m³/s (2673 m³/h) である。この場合入口風速は 16.5 m/s である。圧力損失は 1215 Pa であり、これは内円筒付形の場合とほぼ同じである。規定風量のもとでの性能の比較を表3に示す。

表3から、規定風量の場合、処理風量は内円筒付のほうが27.3%大きく、捕集効率は約2%高いことがわかる。処理風量が大きければ(捕集効率の負荷能力が大きい)、単位処理風量当たりの鋼の使用量が少なくてすむ。すなわち、同じ負荷ならサイクロンの直径が小さくてすむということである。直径が同じなら、捕集効率は内円筒付のほうが3%以上高くなる。それゆえ、内円筒付形のサイクロンでは捕集効率、圧力損失、処理風量の組合せにおいて選択の余地が広がるのである。

5.2 負荷適応係数 負荷適応係数は高負荷時のものと低負荷時のものの2種類がある。それぞれ次式で計算する。

$$\varepsilon_H = \eta_H / \eta \quad \cdots \cdots \cdots (9)$$

表3 規定風量における性能比較

	Q (m³/s)	V_i (m/s)	ΔP (Pa)	ξ	η (%)
Type B	0.9450	21.0	1207	4.56	92.2
Type A	0.7425	16.5	1215	7.44	90.1
Results	+27.3%		same	-38.7%	+2.1%

$$\varepsilon_L = \eta_L / \eta \quad \cdots \cdots \cdots (10)$$

ここで、 ε_H と ε_L はそれぞれ高負荷適応係数と低負荷適応係数とする。 η は規定風量のときの捕集効率(%)である。 η_H 、 η_L はそれぞれ風量が規定風量の1.1倍と0.7倍のときの捕集効率(%)であり、式(7)と式(8)で求められる。実際に計算を行うと、内円筒付サイクロン集じん機の負荷適応係数は

$$\varepsilon_H = \eta_{23.1} / \eta_{21.0} = 92.5 / 92.2 = 1.003 \quad \cdots \cdots \cdots (11)$$

$$\varepsilon_L = \eta_{14.7} / \eta_{21.0} = 90.4 / 92.2 = 0.980 \quad \cdots \cdots \cdots (12)$$

通常形のサイクロン集じん機の負荷適応係数は、同様にして

$$\varepsilon_H = \eta_{18.2} / \eta_{16.5} = 90.6 / 90.1 = 1.006 \quad \cdots \cdots \cdots (13)$$

$$\varepsilon_L = \eta_{11.6} / \eta_{16.5} = 88.2 / 90.1 = 0.979 \quad \cdots \cdots \cdots (14)$$

6. 粉じん粒径の分散度と部分捕集効率の測定

6.1 捕集された粉じん粒径の分散度の測定 内円筒付形と通常形サイクロン集じん機において、規定風量の際に捕集された粉じん粒径の分散度の測定を行った。表4にその結果を示す。

ここで、 δ_0 (μm) は粉じんの質量の中位径、 σ は幾何標準偏差、 X は対数正規確率グラフにおける横軸の座標であり、 $X = \log \delta$ 、 Y は縦軸の座標で粉じんの下累積率関数 Φ の積分上限である。捕集された粉じん粒径については、内円筒付形サイクロン集じん機でも通常形のサイクロン集じん機とほとんど変わらないことがわかる。

6.2 部分捕集効率 部分捕集効率は、次式で計算される。

$$\eta(\delta_i) = (\Delta \Phi_{2i} / \Delta \Phi_{1i}) \eta \quad \cdots \cdots \cdots (15)$$

ここで、 $\eta(\delta_i)$ は粒径が δ_i の粒子に対する捕集効率(部分捕集効率、%)、 $\Delta \Phi_{1i}$ は原粉じんのうち δ_i を平均粒径とする粒径区間に存在する粉じんの全原粉じんに対する質量比(%)、 $\Delta \Phi_{2i}$ は捕集された粉じんのうち $\Delta \Phi_{1i}$ と同じ粒径区間に存在する粉じんの全原粉じんに対する質量比(%)である。 $\Delta \Phi_{1i}$ と $\Delta \Phi_{2i}$ は表4中の対数正規確率分布式で計算する。 η は集じん機的全捕集効率で、穴あき内円筒付形では $\eta=92.2\%$ 、通常形では $\eta=90.1\%$ である。

表 4 捕集粉じん粒径の対数正規分布および特性係数

Dust sources		ρ (kg / m^3)	δ_0 (μm)	σ	Log. normal distribution of particles size frequency	Correlation coefficient
Primitive dust		2730	9.36	2.05	$Y = 3.107 + 3.198X$	0.9977
Separated dust	Type B	2730	9.78	2.02	$Y = 3.229 + 3.261X$	0.9978
	Type A	2730	9.81	2.02	$Y = 3.237 + 3.265X$	0.9976

表 5 部分捕集効率 $\eta(\delta_i)$ [%]

Particles size (μm)		0~2	2~4	4~6	6~14	14~26	26~34	34~46	46~74	>74
Mean size δ_i (μm)		1	3	5	10	20	30	40	60	
Grade effi- ciency η (%)	Type B	70.9	81.2	87.4	93.5	97.7	98.4	98.2	98.8	100
	Type A	68.2	78.6	85.1	91.4	95.9	96.9	96.7	96.6	100

表 5 にその部分捕集効率を示した。この結果から、どちらの集じん機も部分捕集効率が非常に高いことがわかる。

実用上便利のように、表 5 に示したデータ [δ_i , $\eta(\delta_i)$] を、回帰分析の方法を用いて整理する。通常、部分捕集効率を次の関数形で表現する。

$$\eta(\delta) = 1 - P_d(\delta) = 1 - \exp[-\alpha\delta^m] \quad \cdots \cdots (16)$$

ここで、 $\eta(\delta)$ はある粒径の粒子に対しての部分捕集効率、 $P_d(\delta)$ はある粒径の粒子の透過率である。 α , m は特性係数(未定定数)である。回帰分析の方法により、内円筒付形と通常形集じん機の部分捕集効率 $\eta(\delta)$ の計算式はそれぞれ次のようになる。

$$\eta(\delta) = 1 - \exp[-1.206\delta^{0.3436}] \quad \cdots \cdots (17)$$

$$\eta(\delta) = 1 - \exp[-1.106\delta^{0.3323}] \quad \cdots \cdots (18)$$

式(17), (18)で任意の粒径の部分捕集効率が計算できる。

7. 結 論

内円筒付サイクロン集じん機は、穴あき内円筒を設置することによって内渦巻を取り除く形のサイクロンである。この集じん機は従来のものに比べて捕集効率は高く、圧力損失が大幅に小さくなった。この集じん機の平均圧力抵抗係数は約 4.5 であり、同じ処理風量の場合に通常形高効率サイクロン集じん機 (Stair-

mand Cyclone) より圧力損失が 40% ほど小さく、しかも高含じん濃度の場合 (20 g/m^3) 捕集効率が約 1%、低含じん濃度の場合 (3 g/m^3) 捕集効率が約 3% 高くなった。

また、内円筒付サイクロン集じん機は圧力損失が小さいため、処理風量が大きくなる(負荷能力が高い)。通常形高効率サイクロン集じん機と比べ、圧力損失が同一の場合、処理風量は約 29% 大きく、捕集効率は約 2% 高いことがわかった。

文 献

- (1) 井伊谷, 集塵装置, (1980), 94, 日本工業新聞社。
- (2) 陳・ほか 5 名, 除塵技術の基本理論と応用, (1981), 143, 中国建築工業出版社。
- (3) 日本工業標準調査会, 集じん装置の性能測定方法, JIS B 9910(1977)。
- (4) 日本工業標準調査会, 絞り機構による流量測定方法, JIS Z 8762(1988)。
- (5) ISO 5167, Measurement of Fluid Flow by Means of Orifice Plates, Nozzles and Venturi Tubes Inserted in Circular Cross-Section Conduits Running Full, (1980)。
- (6) 日本工業標準調査会, 送風機の実験及び検査方法, JIS B 8330(1981)。
- (7) Stairmand, C. J., The Design and Performance of Cyclone Separators, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, London, **29**(1951), 356-372。
- (8) 日本工業標準調査会, 実験用ダスト, JIS Z 8901(1984)。
- (9) 譚・ほか 2 名, 工業通風除塵技術, (1984), 86, 中国建築工業出版社。