円筒型サイクロンに関する実験的研究

Experimental Study on Collection Performance of Cylindrical Cyclone

椎 保 幸*, 野 崎 勉**

Yasuyuki SHII, Tsutomu NOZAKI

In order to reduce the size of cyclone, especially to shorten its height, a new cylindrical cyclone with a separating plate without tapered section is proposed. We experimentally investigated the influences of opening diameter in the separating plate and the clearance between separating plate and cylinder bottom as well as the inlet velocity on the collection efficiency. As a result, it was found that the separating plate markedly enhances the collection efficiency of cyclone and the particles larger than $10\mu\text{m}$ are completely collected by the cyclone proposed in the present work.

Key Words : Cyclone Separator, Collection Efficiency, Gas-Solid Flow, Separating Pate, Particle Separation

1. 緒 言

サイクロンは含塵気流からダストを遠心分離する集塵装置であり、構造が簡単で機械的な可動部分を持たないため保守・点検が容易であり、耐久性にも優れている¹⁾。また、最近ではサイクロンを単なる集塵装置としてではなく、粒径分布をもつ粒子群から望みの粒径のみをふるい分けるいわゆる粉体分級にも利用されている²⁾。近年、環境問題や公害問題への関心が高まってきている中で、サイクロンの操作性および低コスト性があらためて見直されてきており、ボイラ等の高温排ガス中に含まれる粉塵の除去や、化学工業のプロセス中における粉体処理など、広い範囲で利用されている³⁾。

サイクロンに関しては、その研究は古くから行われており、現在、様々な集塵装置の開発へと発展してい

る。しかし、サイクロン内部の流れは、気体に固体が混在する混相流となっているため解析は難しく、そのため不明確な要素も少なくない。また、従来のサイクロンでは、サイクロン円筒径に比してサイクロン全高が高いためにその処理能力に比べ装置が大型となり、サイクロンの汎用性を広げる点においても障害がある。特に移動型の掃除機などへ適用する場合、重心を低くすること、すなわち高さを軽減することが重要な問題となる。

以上のようなことから、本研究ではサイクロンの汎用性をより高めるために、従来のサイクロンを小型化することを目的とする。サイクロンの小型化を図る方法としては、従来型サイクロンの構成要素であり大型化の要因になっている円錐部を取り除き、単純に円筒部と集塵箱を直接つなげる構造とした。また、集塵箱上部にあらたに仕切板を設け、粒子巻き上げによる集塵率の低下を防ぐ。このように、サイクロン内部に水平円板や円錐形の障害物を挿入した場合の集塵率について調べられた例はいくつかあるが⁴⁾、ここで提案するような小型化を目的として仕切板を設けたものは著者の知る限りでは無い。本研究では、このような円錐部を省き高さを低くした円筒型サイクロンと従来型サイクロンの性能を比較し、小型化の可能性を探った。なお、両者の性能の比較は、サイクロンの最も基本的な指標である集塵率について行った。

1999年4月23日受付

* 鹿児島工業高等専門学校機械工学科

(〒899-5193 鹿児島県姶良郡隼人町真孝1460-1)

TEL 0995-42-9104

Department of Mechanical Engineering, Kagoshima

National College of Technology

(1460-1 Shinko, Hayato-cho, Aira-gun, Kagoshima 899-5193)

** 鹿児島大学工学部

(〒890-8580 鹿児島市都元1丁目21-40) TEL 099-285-8250

Faculty of Engineering, Kagoshima University

(1-21-40 Koorimoto, Kagoshima 890-8580)

(a) Conventional type (b) Proposed type

Fig. 1 Dimensions of cyclone

2. 分離原理

Fig. 1に、従来型サイクロンおよびここで新たに提案する円筒型サイクロンの構造および寸法を示す。

通常用いられている円錐部有サイクロンでは、サイクロン入口より接線方向に流入してくる気流により、サイクロン本体内部では旋回流が形成される。さらに、気流は旋回しながら下降し、円筒部から集塵箱にかけてテーパ状になっているため、集塵室入口では流動抵抗が大きくなり気流は集塵室へはほとんど流入せず、その上方で反転上昇しサイクロン内筒より流出していく。この旋回流によって作り出された遠心力場により、固体粒子は本体壁面に向かって移動する。その後、固体粒子は本体壁面上を旋回しながら下降し、集塵室入口で気流と分離される。このように、従来のサイクロンは円筒部、円錐部および集塵室の3要素で構成されており、この円錐部の存在によりサイクロン全高が高くなっている。したがって、従来のサイクロンをそのまま各種の集塵装置に適用する場合、設置面での制約を受ける。

そこで、著者らはサイクロン小型化のため円錐部を取り除き、円筒部と集塵室を直接つなげた円筒型サイクロンを提案し、集塵室入口にはさらに仕切板を設けた。これにより、サイクロン高さをかなり短くすることができ、また、可搬式の集塵装置への応用が可能となる。

この改良型サイクロンの特徴は、仕切板で従来型の

Fig. 2 Experimental apparatus

円錐部が担っていた作用を代替させることである。従来型では、円錐部と集塵箱の接合部である絞部分で最終的に気流から粒子が分離される。改良型では、仕切板により気流を反転させ、円筒部下端と仕切板の隙間（以下、クリアランスと呼ぶ）から粒子のみを集塵箱に捕集する構造となっている。

3. 実験装置および方法

Fig. 2に、サイクロン集塵率測定のための実験装置の概要を示す。本実験では、180°渦巻入口式（リンデン型）のサイクロンを採用し、その構造および寸法はFig. 1に示したとおりである。従来型と改良型の両サイクロンにおいて、円筒部より上部は両者とも同じ形状および寸法である。また、改良型については円筒部と集塵室の間に円形平板の仕切板を挿入し、この仕切板の外径を0（仕切板無し）、20、40、60、80、100、120mmと変化させ実験を行った。ここで、仕切板の厚さは5mmで一定である。

実験方法は、入口流速 u_i (m/s) をブロウ入口弁で調節した後、供試粉体をフィーダを用いて約 10g/m^3 で定量供給し、さらに粉体は管入口において分散器により分散される。粉体の供給濃度は体積濃度にして1%未満であり、入口流速にはほとんど影響を与えない条件とした。ただし、粉体の捕集に伴いサイクロンの圧力損失が増加し、入口流速が若干変動するため、測定中の平均流速をそのときの入口流速とした。また、粉体を約100g程度供給し終わった後、サイクロン下部の集塵箱の捕集重量 W_c (g) と、サイクロン下流に設置したフィルターに捕集されたサイクロン出口側粉塵量 W_f (g) を測定し、集塵率 η (%) を

Fig. 3 Particle size distribution of test material

$$\eta = \frac{W_c}{W_c + W_f} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

により求めた。なお、使用した粉体は JIS Z8901 試験用ダストに規定されているタルク 4 種であり、その粒度分布を Fig. 3 に示す。

また、部分分離効率 η_x (%) は

$$\eta_x = \frac{1}{1 + \frac{f_f}{f_c} \left(\frac{100 - \eta}{\eta} \right)} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

により求めた。ここで、 f_f と f_c はフィルターに捕集されたサイクロン出口側粉塵の粉度分布および集塵箱回収粉の粉度分布である。粉度分布測定に際しては、レーザー回折法粒度分布測定器である HELOS & RODOS (SYMPATEC) を使用した。

4. 実験結果および考察

Fig. 4 に、サイクロン入口流速 u_i を 15m/s として、仕切板を挿入していない場合の集塵率に及ぼす集塵箱径 D_c の影響を示す。なお、各部の寸法はすべてサイクロン径 D_1 で無次元化している。また、図中の破線は同じ入口流速における従来型サイクロンの集塵率である。

この図から、改良型サイクロンの集塵率は従来型の性能には及ばないものの、集塵箱径が大きい場合には約 90 % の集塵率を示すことが分かる。一方で、集塵箱の径を小さくすると極端に集塵率が低下することが分かる。これは、集塵箱底の中心付近に生じる上昇流の影響で、いったん集塵箱内に捕集された粒子が再び巻き上げられ、サイクロン出口管より逸出するためと

Fig. 4 Effects of diameter of dust chamber

Fig. 5 Effects of diameter of separating plate

思われる。円筒部と集塵箱の間に仕切板など流れを遮るものが何も無い場合には、集塵箱内に流れが入り込んでおり、強い旋回流が形成されている。そのため、集塵箱底面上ではその境界層の影響により箱中心に向かう引き込み流が生じている。したがって、集塵箱径が小さい場合には、分離された粒子の沈積がより中心軸に近づくために巻き上げられる量は多くなる。

次に、この集塵箱内の粒子巻き上げを防ぐために、円筒部と集塵箱の間に仕切板を挿入した。Fig. 5 にその仕切板の効果を示す。このときの円筒部下端と仕切板とのクリアランス C は 5mm であり、挿入した仕切板は直径 D_s の円形平板である。集塵箱径が大きい場合は仕切板径の影響はほとんどなく、ほぼ一定の値をとっているのが分かる。一方、集塵箱径が小さい場合には仕切板の効果が現れており、また、仕切板径が大きくなるほどその効果も大きくなっているのが分かる。

Fig. 6 Effects of clearance

る。仕切板径が大きくなると、仕切板上面へのダストの堆積が心配されるが、仕切板上には強い旋回流が存在しているため、ダストが湿潤している等の特殊な場合でない限り特に問題は無いと考える。仕切板の効果は、流れが仕切板により円筒部分と集塵箱内とに二分されることによって集塵箱内の旋回流が弱まり、集塵箱内に捕集された粒子の巻き上げが押さえられることにある。仕切板径比 D_s/D_1 が0.5を超えるあたりからその効果が顕著に現れており、さらに仕切板径比が大きくなり、その値が0.8を超えると集塵箱径の影響が無くなっている。これは、ある程度大きな直径の仕切板を挿入することにより集塵箱径の影響が無くなり、円筒部のみの流れで集塵率が決定することを意味している。これらのことから、仕切板を挿入した円筒型サイクロンは、サイクロン全高を短くできるという利点とともに、その処理量に合わせて任意に集塵箱の大きさを決められるという特徴があることが分かる。

次に、仕切板を挿入する場合、円筒部下端と仕切板とのクリアランス C が集塵率に及ぼす影響を Fig. 6 に示す。なお、この実験は比較的小さい集塵箱 ($D_c/D_1=1.25$) と大きい集塵箱 ($D_c/D_1=3.0$) の2種類について行った。

どちらの集塵箱をみても、クリアランスの広い範囲で安定した集塵率を維持しているのが分かる。これは、多少クリアランスが変化しても流れに対する流動抵抗がさほど減少せず、集塵箱内に流れが入り込みにくいからと思われる。クリアランスの広い範囲で安定した集塵率が得られるということは、回収しているダストの中に比較的大きなゴミなどが混入している場合などに、そのゴミを回収するためにクリアランスを大きくとっても集塵率は下がらないということであり、

Fig. 7 Effects of height of dust chamber

サイクロンの実用性および汎用性という観点から非常に重要な結果である。しかし、極端にクリアランスが大きくなると集塵率は若干低下する傾向にある。これは、あまりクリアランスをとりすぎると集塵箱に気流が入り出すようになり、集塵箱内に浮遊している粒子を吸い上げてしまうためと思われる。

次に、集塵箱深さ h_c の集塵率に及ぼす影響を Fig. 7 に示す。これは、集塵箱内に粉が溜まってきた場合を想定したものであり、集塵箱の深さを変えることによってその影響を調べた。図には、仕切板を挿入した場合と挿入しない場合とを示しているが、仕切板を挿入していない場合では、集塵箱深さが浅くなるにつれて集塵率が大きく低下しているのが分かる。これは、前述したとおり、集塵箱に溜まっている粉が巻き上げられるためであり、集塵箱の深さが浅くなるほど旋回流は強くなるためにその影響も大きい。一方、仕切板を挿入した場合にはその影響はほとんど無い。しかし、今回は小さいクリアランスでのみ実験を行ったので影響は出ていないが、さらにクリアランスを広げていくと多少影響が出てくる可能性は考えられる。

Fig. 8 に、入口流速を変化させた場合の集塵率に及ぼす影響を示す。入口流速、すなわち気流の旋回速度が変化すると、それにもなって遠心力の大きさが変わるため、粒子の分離に影響をもたらすことが考えられるが、この図をみると、集塵箱径によらず入口流速の広い範囲で安定した集塵率を維持しているのが分かる。これは、本実験で用いた粉体の粒度および形状にもよると思われるが、こうした傾向は他の水平円板を挿入した円筒型サイクロンにもみられるものである⁴⁾。集塵箱径が小さい場合に多少影響がみられ、入口流速が5m/sと低くなると集塵率が若干低下して

Fig. 8 Effects of inlet velocity

Fig. 10 Effects of hole of separating plate

Fig. 9 Grade efficiency curve of proposed cyclone

いるが、全体的にはほぼ一定値をとっている。このことから、改良型サイクロンは、運転中に流速が変化した場合でも安定した効率を保つことができ、操作性が良いことが分かる。

以上までの結果は、すべて集塵率だけで評価を行ってきたが、より細かな性能を知るために部分分離効率を調べた。その結果を Fig. 9 に示す。この図から、改良型サイクロンは、従来型に比べ粒子径が小さくなるほど分離効率が悪くなることが分かる。この差は円錐部の有無によるもので、改良型においては粒子分離の有効高さが低くなったことと仕切板上の境界層の影響により、小径粒子の分離効率の低下が引き起こされたためと考えられる。この分離効率の低下について、今後はより定量的に評価を行っていく予定である。しかしながら、改良型サイクロンは従来型と同様、直径 10 μm 以上の粒子は 100 % 捕集可能であることも分

かった。

最後に、改良型の集塵率を向上させる方法として、仕切板中心に通気孔を設けた場合について検討する。これまで述べてきたように、仕切板を挿入することにより集塵箱の影響を無くすることはできるが、最高の集塵率でも従来型に比べ約 7 % 程低いものとなっている。そこで、さらに集塵率を向上させるために仕切板の中心に通気孔を設けてみた。これは通気孔を設けることにより仕切板周辺から集塵箱内に気流が流入しやすくなり、気流に半径外向きの速度成分が生じ、粒子に作用している遠心力に加えて、さらに半径方向の抗力により集塵箱へ捕集されやすくなったのである。この通気孔径 D_h については、これまでの実験から D_h/D_i が約 0.2 で最も効果のあることが分かっている⁵⁾。この大きさの通気孔を設け、集塵箱径を変化させた場合の集塵率を Fig. 10 に示す。集塵箱径 D_c/D_i が 2.5 よりも大きい場合にその効果は大きく、通気孔無しに比べて約 5 % 改善されている。通気孔無しの仕切板を挿入した場合、気流は集塵箱にはほとんど流入せず仕切板上で反転する。一方、仕切板中心に通気孔を設けた場合、通気孔からの吸上げに伴い仕切板外縁部の隙間より集塵箱に気流が流入し、仕切板上での内向きの圧力こう配がゆるやかになり分離効率が上昇したものと考えられる。また、集塵箱径が小さくなると通気孔の効果が無く集塵率が低下してしまうのは、通気孔からの気流の吸上げに伴い仕切板を挿入しない場合と同様に粒子の巻き上げが大きくなるためと思われる。本実験では仕切板の形状として単純な円形平板を用いたが、仕切板形状の適切な選択によっては、今後さらに集塵率を向上させることが可能となる。

5. 結 論

円錐部を省き高さを低くした円筒型サイクロンについて実験を行った結果、以下の結論を得た。

- 1) 円錐部の無い円筒型サイクロンでは、集塵箱の大きさが集塵率に影響を及ぼす。
- 2) 仕切板を挿入することにより安定した集塵率が得られ、また、仕切板径 D_s/D_1 が0.8を超えると集塵

箱径の影響は無くなる。

- 3) クリアランスの影響はほとんど無い。
 - 4) 入口流速の広い範囲で安定した集塵率を維持できる。
 - 5) 10 μm 以上の粒子は 100 % 捕集可能である。
- なお、結論5) については、仕切板等の幾何形状の適切な選択により 10 μm 以下の粒子の捕集も可能であり、今後さらに実験を進めていく予定である。

Nomenclature

C : clearance between bottom of cylindrical part and separating plate (mm)	filter bag (1/ μm)
D_1 : diameter of cyclone cylindrical part (mm)	h_c : height of dust chamber (mm)
D_2 : diameter of exhaust pipe (mm)	d_p : particle diameter (μm)
D_c : diameter of dust chamber (mm)	d_{p50} : median diameter of particle (μm)
D_h : diameter of hole of separating palte (mm)	W_c : weight of particles collected at dust chamber (g)
D_s : diameter of separating palte (mm)	W_f : weight of particles collected at filter bag (g)
F : cumulative under size (%)	u_i : inlet velocity (m/s)
f_c : frequency distributions of particles collected at dust chamber (1/ μm)	η : collection efficiency (%)
f_f : frequency distributions of particles collected at	η_x : fractional grade efficiency (%)
	ρ_p : density of particle (kg/m^3)

References

- 1) Ogawa, A : "Saikuron-bunriki", p. 53, Earth-sha (1980)
- 2) Yoshida, H., T. Saeki, T. Fujioka, T. Ueda and T. Fuyuki : "Fine Particle Separation by Revised Type Air-Cyclone Classifier", *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **19**, 476-482 (1993)
- 3) "Shujin no Gijutsu to Sochi", ed, by Nihon Funtai Kogyo Gijutsu Kyokai, pp.183-198, Nikkan Kogyo (1997)
- 4) Iinoya, K. : "Experiments on the Collection Efficiencies of Cyclone Dust Collectors", *Trans. of J. S. M. E.*, **20**, No. 89, 38-44 (1954)
- 5) Shii, Y. and T. Nozaki : "Experimental Study on Cylindrical Cyclone", 3rd Int. Conf. on Multiphase Flow, 458 in CD-ROM, Lyon (1998)