

サイクロン収塵装置

渡邊 仁・川端 弘

マルチクロン収塵器

まえがき

サイクロン収塵装置とは氣體の高速回轉によつて生ずる遠心力を利用して、氣體中の微粒子を分離捕集する装置で第1圖のように粉體混合氣流は入口 I から切線方向に圓筒形脱塵室 A の中に吹込まれて、回轉運動をして下降する間に粒子は外壁に突飛ばされて、下降氣流と共に底部の受器 B に溜り、清澄された氣體は中央上方の排氣管 II からサイクロン外に流出する。このように原理構造共に簡單で工作が容易なため、小は外径數厘から大は數米に至るサイクロンが實用されている。

研究對象も廣い範圍にわたつているが、なかでもサイクロン内部の氣流模様、壓力降下、相似則、分離最小徑および收塵率等の理論的實驗的考察は、さらに能率のよいサイクロンへの應用に拍車をかけている。

氣流模様

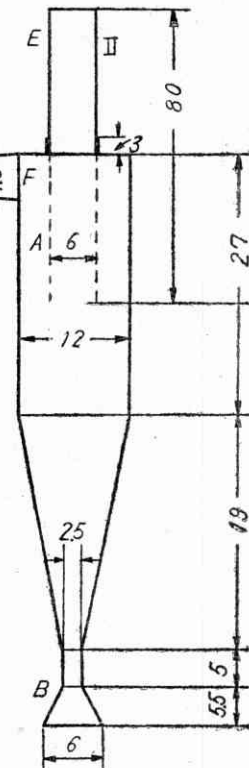
流體の流動状態が特異なため、球形、圓筒形その他特殊なピトー管を用いて、サイクロン本體内の靜壓および總壓の分布を各位置で測定して、その位置の風速風向等を知るのであるが、すでに Feifel, Linden 等が理論的實驗的に可成り詳細に調べている。

壓力、風速分布は共にほぼ軸對稱となつており、靜壓總壓共に外壁部が高く中心部に至るに従つて減少し、サイクロンの排氣管が空氣中に開放されているときは、排氣管半径 r_e の $2/3$ の邊りで靜壓は大氣壓に等しくなり、

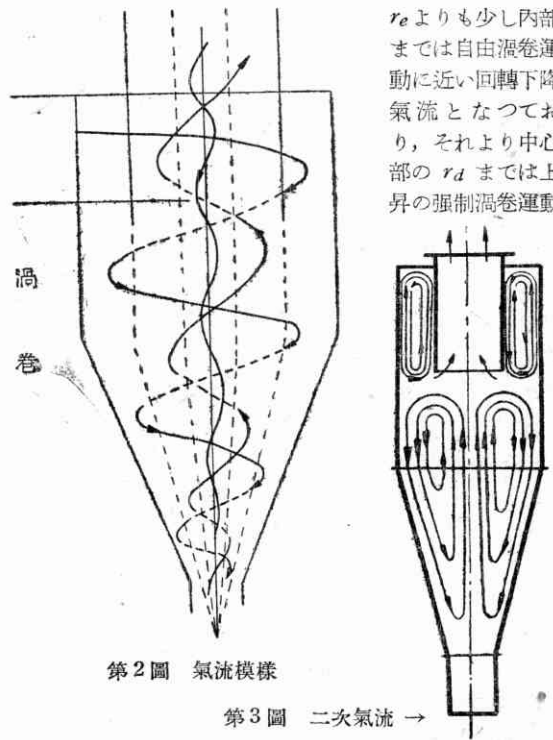
工場に行つて見てしばしば埃っぽいことが目立つ。一方埃のようなものでも集めて見れば思掛けない成果が生産面に表われてくることが多い。これを解決する一つの鍵がサイクロン収塵装置である。

r_e の $1/2$ 邊りで總壓が大氣壓に等しくなる。さらに中心になる程負壓となる。この中心部負壓は圓錐部ではいくらか細まるが、ちょうど撚つた繩のように一定の間隔を持つて動揺しながら底部の受器まで續いている。従つて底部が氣密でなく負壓の場合には吸込となり、粒子は上昇氣流と共に運ばれる。

サイクロン入口の構造によつて氣流は全くの軸對稱とならぬのは當然であるが、入口部から下では通常對稱的氣流と考えられる。圓筒部では外壁半径 r_0 から r_e の間で、圓錐部では r_e よりも少し内部までは自由渦卷運動に近い回轉下降氣流となつており、それより中心部の r_d までは上昇の強制渦卷運動



第1圖 模型サイクロン (單位cm)



第2圖 氣流模様

第3圖 二次氣流 →

となつている。 r_d の内部は吸込または循環の緩い回轉下降氣流となつている。入口部では一回轉してきた氣流によつて、流入氣流幅は狭められる。そのかわり高さ

が入口高さの20%程度伸びる。下降, 上昇気流共に一定角度とピッチをもっており, 撚った繩のように變動しているが, 一定の位置では常に一定の状態である(第2圖)。二次気流と稱して從屬的な氣流も, サイクロン内で粒子の運動にともなう僅かな氣流として認めてもよいようである(第3圖)。

風速も普通圓周, 軸および半徑方向の各速度にわけて考えるが, 一般的に圓周方向速度 V_t が優勢をしめており, $r_i = \frac{2}{3} r_e$ の邊りで最大となり, r_0 と r_i の間で半徑 r の位置では,

$$V_t = V_{t0} \left(\frac{r_0}{r} \right)^n$$

となつてゐる。ただし V_{t0} は外壁部周速度, n は常數で, r_e/r_0 が 0.6 から 0.4 の邊りで 0.4 から 0.8 位までの變化があり, r_i から中心まではほぼ,

$$V_t = \omega r$$

で表わされる。ここに ω は角速度である(第4圖)。この二つの曲線は r_i で連続的に接續されている。

軸方向速度は r_0 から r_e の間は下向で, r_e 邊りから上向となり, 圓筒部では $r_d = 1/5 r_e$ までは上向となつており, それより中心部は吸込もしくは循環の緩い下向速度となつてゐる。半徑方向速度は中心向であるが, 中心部では外向速度となつてゐる。

入口で流入氣流が急激に收縮擴大されて, ほぼ定常状態となつた横断面のところでは, 氣流回轉軸方向には風速の變化がなく, 巾の方向にのみ主として變化があるので, 氣流巾について積算すると, 流量 Q は,

$$Q = BH \left(1 + \frac{nB}{2r_0} \right) V_{t0}$$

となる。 H は氣流高さで, B は氣流巾で, 弁を差込んだときには弁に切する内外筒と同心の圓を描いたように狭められた巾と見てよい, したがつて流量 Q と V_{t0} との関係が決定される。

壓力降下

サイクロンの壓降下を測定する場合には, 入口前の風管と排氣管部の壁壓の差をとれば, 送風機の吸込または吐出側のいずれに裝置しても, 同じ流量のときには同じ壁壓差を示し, 實用上から見れば簡便である。理論的に觀察する際にはベルヌーイの原理によつて動壓も考慮に入れた總壓の差, すなわちサイクロンを流體が通過する際に失われるエネルギー損失を考慮すべきである。

壓降下の原因となるものに入口部で氣流が急激に擴大或は, 縮小による損失は, 全損失の10%に満たないが, 下降氣流が回轉運動によつて生ずる遠心力に打勝つて, 中心部の排氣管の下まで移動するために失われる壓損失 ΔP_s が最も大きい。次に回轉上昇氣流が有する動壓, すなわち回轉と上昇の動壓 ΔP_r と ΔP_h は, 排氣管が大氣中に開放されている場合には損失となり, サイクロンの後にさらに裝置がある場合にはこの動壓は有効に利用されることになる。

ΔP_s を理論的に求めるには氣體の下降運動を除いて, 回轉と半徑方向の流動の場を考え, その中に微小實質部分を取り, 半徑方向の力の釣合を見ると, この微小實質部分に作用する遠心力と半徑方向に直角な面に作用する全壓力の差との差が慣性抵抗に等しいとおく運動方程式は, g を重力の加速度, ρ を流體の密度, P を靜壓, V_r を半徑方向速度, t を時間とすると,

$$\frac{DV_r}{Dt} = \frac{V_t^2}{r} - \frac{\rho}{g} \frac{dP}{dr}$$

となるが, この式はもちろん Euler および Lagrange の流體の運動方程式からも導きだせる。

次に定常状態では V_r は時間的に變らないこと, V_r は V_t にくらべて小さいこと, およびこの系がサイクロンで終つて排氣管が大氣中に開放されているときと, さらに他の unit に接續されている場合とで, 積分範圍をそれぞれ r_i から r_0 , および r_e から r_0 までとることを考慮に入れて上式を解くと, それぞれの場合の靜壓降下は,

$$\Delta P_{si} = \frac{1}{n} \left\{ \left(\frac{r_0}{r_i} \right)^{2n} - 1 \right\} \frac{\rho V_{t0}^2}{2g} = K_i \left(\frac{Q}{r_0^2} \right)^2$$

$$\Delta P_{se} = \frac{1}{n} \left\{ \left(\frac{r_0}{r_e} \right)^{2n} - 1 \right\} \frac{\rho V_{t0}^2}{2g} = K_e \left(\frac{Q}{r_0^2} \right)^2$$

のように表わされる。 K_i, K_e は共に常數, $\Delta P_{si}, \Delta P_{se}$ はそれぞれ外壁から r_i および r_e までの壓力降下である。

ΔP_r は上昇氣流のある範圍のところで單位時間に消費される回轉エネルギーを總計し, これを同範圍内の流量で除すると, 單位質量の流體が排氣管内で保有する回轉運動のために費される速度頭が求められる。 r_d は中心部下降氣流の境界までの半徑であるから,

$$\Delta P_r = \frac{\rho V_{t0}^2}{2g} \left(\frac{r_0}{r_i} \right)^{2n} \left[\frac{1-n}{3n-1} \left\{ 1 - \left(\frac{r_i}{r_e} \right)^{2n} \right\} + \frac{1}{2} \left\{ 1 + \left(\frac{r_d}{r_i} \right)^2 \right\} \right]$$

で表わされる。 n が 0.5 のときにはほぼ

$$\Delta P_r = \frac{5}{2} \frac{\rho V_{t0}^2}{2g}$$

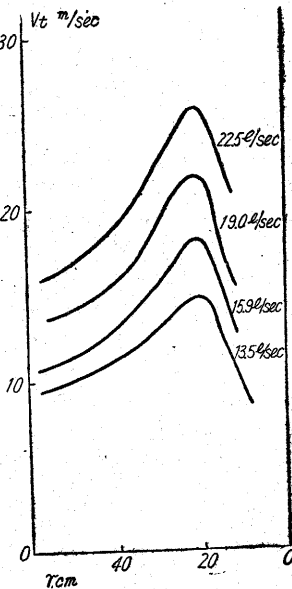
となり, 實際と大差ないようである。

ΔP_h も同様な方法で計算される筈であるが, 近似的に平均上昇速度の速度頭として計算される。すなわち

$$\Delta P_h = \frac{\rho Q^2}{2g} \frac{1}{\left[\pi r_e^2 \left\{ 1 - \left(\frac{r_d}{r_e} \right)^2 \right\} \right]^2}$$

となり, 排氣管壁近くで上昇角が大きいことを考慮して

第4圖 圓周速度分布



$ralre$ をやや大きくすると、

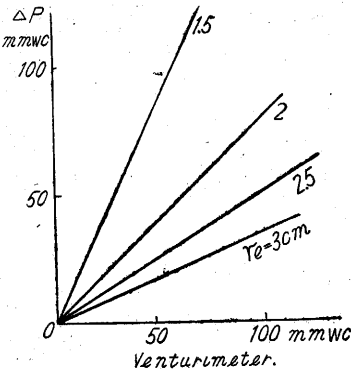
$$\Delta P_h = \frac{1}{9r_e^4} \frac{\rho Q^2}{2g}$$

となる。 ΔP_r と ΔP_h の和が排気管部の合速度頭であり、 r_i 邊りの速度頭に近くなる。

以上を総合して、糸の中間にサイクロンが設置されている場合には、壓損失はおおよそ ΔP_{se} となり、これがサイクロン入口前と排気管との間の壁壓の差を示している。次に排気管が大氣中に開放されている場合には $\Delta P_{si} + \Delta P_r + \Delta P_h$ が

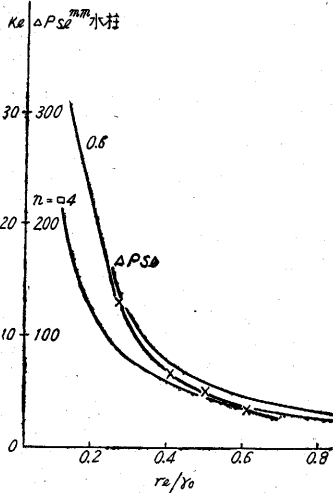
壓損失となり、これはほぼサイクロン入口の總壓に等しくなる。

ここに壓損失に影響を興える諸因子の實際例をあげて見ると、同一サイクロンでは壓損失は流量の二乗に比例している。第5圖は流量をヴェンチュリ計のマノメーターの壓力差で表わしている。



第5圖 流量壓力損失

$relr_0$ の比の値が變つると n の値も變つてくるがサイクロン入口と出口の壁壓の差は ΔP_{se} の式の係數によく合つた變化を示している(第6圖)。これは re/r_0 の比が壓力降下におよぼすいちじるしい特徴である。排気管の下に整流翼をとりつけると、同じ流量を流



第6圖 壓損失係數と壓損失の關係

しても壓降下は半分以下に減ずるが、上昇氣流が翼を通つた後、排気管内での回轉運動が弱まつて、氣流が上昇しやすくなり、サイクロン内部で流入氣流が中心部に移行しやすいい氣流模様に變るためであると思われる。

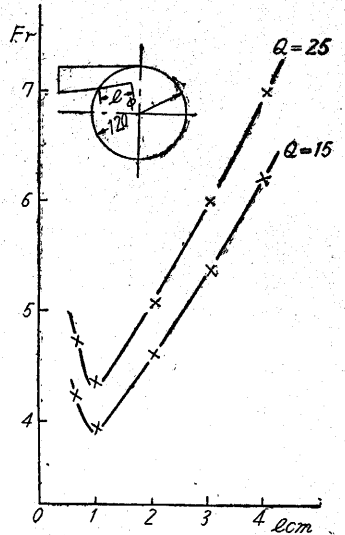
入口に案内弁を挿入すると流入氣流と一回轉してきた氣流との間の亂れがなくなつて、壓降下は減少するが、流入氣流を絞るように入挿込むと、氣流の入口巾が收縮する割には高さが伸びず、 V_{10} が增大して却つて壓降下は増大する(第7圖)。

排気管の挿入深さや圓筒部、圓錐部の長さを變えて見ても壓力降下に大した影響はない。

サイクロン本體内に何か物を差込んだ場合には、氣流の回轉運動が妨げられて速度分布が變り、壓降下が減少する。この現象は荷塵した場合にも起り20%位も壓降下を減ずることがあるが、これは混合粒子の運動が流速分布を變えるためと思われる。

サイクロンの中心部が偏心していることもやや壓損失を高めているようで、螺旋屋根式入口、渦巻式入口、偏心排気管などを取付けた改良型が見られる。

富田氏の蛇管の摩擦損失の研究結果から類推すると摩擦損失係數の比はサイクロン外徑の比の $-1/4$ 乗となる。従つて直徑 D, D' のサイクロンの摩擦損失をそれぞれ F, F' とすれば $F' = F(D'/D)^{-1/4}$ となる。外徑 120 耗と 500 耗の相似なサイクロンに 25 毎秒と 400 毎秒をそれぞれ通したとき、水柱 120 耗と 90 耗の壓損失を示し、大型サイクロンの方がやや高い値となつてはいるが Whiton の實驗で、1 呎、2 呎、3 呎の徑のサイクロンの壓降下の割合は $-1/4$ 乗より少し低く $-1/2$ 乗位になつてはいる。この結果については測定の場合の荷塵の影響や工作上的の誤差等が入つてくるため即座に斷定することは困難である。



第7圖 入口弁と摩擦損失の關係

分離最小徑

サイクロンで粉體と氣體とを分離する際に捕收され得る粒子の大きさにはサイクロンの形状、流體の速度等の諸因子によつて限度がある。完全に捕收され得る粒子の中で最小の粒徑、換言すれば捕收され得ない粒子の中で最大の粒徑を稱して分離最小徑という。一般の粒子の粒徑の定義についても種々の説があるし、粒子の形状も百種百様であるから捕收されなかつた粒子の一二をもつて分離最小徑を云々する譯にゆかないから、ここで理論的には球形粒子を取扱ひその他の場合には形状係數 C を考えて球形粒子に準じさせるものとする。

サイクロンによる粒子の分離機構はまず入口断面全般にわたつて粉體は一様な分布状態で粒子が運ばれてくるが、外壁近くにきた粒子や大きな粒子は比較的速かに外壁部に運ばれ、中心向速度はほとんどないから下降氣流とともに下降していく。また一方外壁部に遠く運ばれてきた微粒子は遠心力の効果弱く、また中心向氣流に阻害されまた外壁から天床裏に沿つて排気管に到る二次氣流の發生等で一回轉しても外壁迄到達せず、流入氣流より内部にまたはその下方に流動して排気管の下方に到りど

うしても遠心力の効果が充分におよばず、その中に中心向気流に乗せられて中心部上昇気流に巻込まれて外に運ばれる場合と、外壁を傳つて下降していても中心部近くにきて上昇気流に乗せられて舞上り、途中で遠心力の効果が充分に働かなかつた場合にはそのまま排気管を通つて外へ出てしまう場合の二通りの分離機構が組合わさつていられる。

いま単一球形粒子が分離される場合の力の釣合を考慮してみる。數十ミクロンの粒径粒子が毎秒數米の速度で運動する場合には Stokes の法則にしたがうと考えてよいから、粒子におよぼす遠心力と粒子の半径方向相對速度に比例する抵抗の差が半径方向の慣性抵抗になると考える。この場合粒子は小さいから粒子は氣流と同一回轉速度を有するものとする。また m を粒子の質量 K を Stokes の抵抗係数とすると、

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = m \frac{V_t^2}{r} - K \frac{dr}{dt}$$

となる。この式に二つのそれぞれの場合の V_t を代入し、外側渦の場合には安全率をみて外壁部の遠心力 V_{t0} を用い、無視される項を除き、境界條件として r_e の半径方向終端速度を用いて解くと分離最小径 d_{min} は、

$$d_{min} = \sqrt{\frac{9\mu r_0 H \left\{ 1 + \left(\frac{r_0}{r_e} \right)^n \right\} \left(1 - \frac{r_e}{r_0} \right) \left(1 + \frac{nB}{2r_0} \right)}{\pi(\rho_s - \rho) V_{tm} L \left(1 + \frac{r_e}{r_0} \right)}}$$

となる。ただし ρ_s は粒子の密度、 μ は流體の粘性係数、 V_{tm} は入口平均速度 Q/BH 、 L はサイクロンの分離に有効な長さで L/H は分離に有効な氣流の回轉數を表わす。

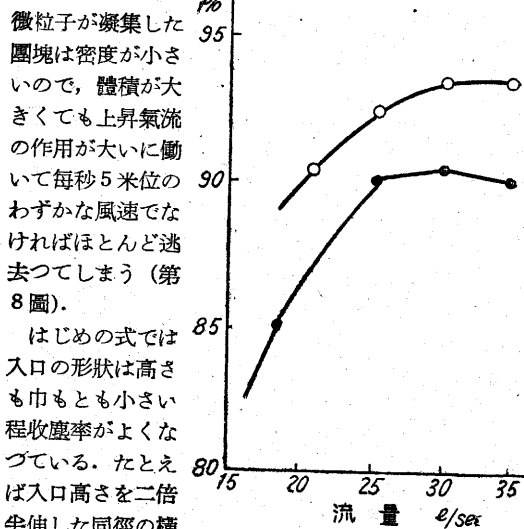
内側渦の方では境界條件として r_d の半径方向終端速度を用い、無視される項を除き、上昇氣流のピッチを H_1 、有効長さを L_1 とすれば、

$$d_{min} = \sqrt{\frac{9\mu r_i H_1 \ln(r_e/r_d) \left(1 + nB/2r_0 \right)}{\pi(\rho_s - \rho) V_{tm} \left(\frac{r_0}{r_i} \right)^n L_1}}$$

となり、Stokes の抵抗係数を用いると $\sqrt{\frac{9\mu}{\pi(\rho_s - \rho) V_{tm}}}$ の項が入ってくる。

いま分離最小径と密接な関係のある收塵率についての定義として實驗的には装填した粒子の重さで捕收された粒子の重さを除した値であるが、理論的には簡単に導き出せない。しかしながら概して最小分離径の小さい粉體程收塵率もよいということはある。

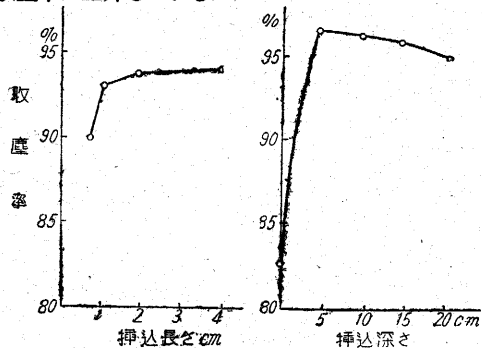
温度によつて μ は變化するが Whithon はこの影響について述べている。サンドブラストの還氣用サイクロンから逃れた鐵粉と砂粒を顯微鏡で調べた結果は、明かに鐵粉の平均径が小さく5ミクロン位に對し砂粒では10ミクロン前後のものが大きな方であつた。 V_{tm} は大きい方がよいが粒子の性質によつて適當な速度がある鐵粉、砂粒等はかなり大きく25米毎秒位でも前記の實驗で96% および94% の收塵率をあげている。齒磨粉のようなものでは径120 糎小型サイクロンを用いて20米毎秒で90% の收塵率を得ている。カーボンブラックのような



第8圖 收塵率と最適流量

微粒子が凝集した團塊は密度が小さいので、體積が大きくても上昇氣流の作用が大いに働いて毎秒5米位のわずかな風速でなければほとんど逃去つてしまう(第8圖)。

はじめの式では入口の形状は高さも巾もとも小さい程收塵率がよくなつてゐる。たとえば入口高さを二倍半伸した同径の横型サイクロンで齒磨粉の收塵率は87% にまで低下した。また巾は入口弁を挿入して戻り氣流の影響のないところでも流入氣流を絞るように差込んでいくと(第9圖)に見るようにやや收塵率は上昇している。



第9圖 入口弁と收塵率 第10圖 排気管と收塵率

L/H は排気管の挿入深さが2H位にとられていれば r_e/r_0 の比が1/2より大きいときには1、小さいときでも1より少し大きく比が1/3位のときでも密度が大きな粒子によつてやつと1.5~2位までとり得ると思われる。

r_e/r_0 の比の入つた項はいずれも比の値が小さくなると d_{min} が大きくなる傾向にあり、比の値が1/3から2/3の間で1.5から0.5位まで變動している。しかし一方 L/H の値が1.5もしくは2から1位まで變動するため多少打消し合つていてこの場合には d_{min} は r_e の小さい方がやや大きい、内側渦の方からみると $r_i = 2/3 r_e$ であるから r_e の小さい方が d_{min} は小さくなつてゐるから、二式の兼合條件から d_{min} の大きな方の分離機構に支配されるものと思われる。

排気管の挿込がないか浅い場合には L/H の値は1より小さな値をとり d_{min} は大きく收塵率は低減する。

逆に排気管の挿入深さが深過ぎるとはじめの式では L/H が大きくとれて d_{min} は小さくなるが後の式で L_1/H_1 が小さくなつて、結局 d_{min} は後の式に支配されることになり收塵率も低減する(第10圖)。

