混合比 μ_s 等によって変らないとして、理論値と実際値と広い範囲 (たとえば $\mu_s=0\sim 15$) で一致するか。変るとすれば ξ_s はどのような式で表わされるか。

(3) R_{es} なるレイノルズ数の指数 ε を定めるために、 R_{es} の値を知らなければならないが、實際上 R_{es} の値はいかにして定めるか。 (原 田 幸 夫)

〔回答〕 (1) 混合比、管の内径などとの定量的な関係は未知である。

本論文では粒子 1 個についての値を用いて計算した値が実験値と一致するように、理論式中の係数の値を決めて実験式を導いた。

(2) 摩擦係数 ξ_s は輸送条件によって多少変ることが考えられるが、めいりょうな関係は明らかでない。

本論文では文献 (11) の方法によって測定した値を用いた場合に、実験式による値と実験値とが一致する

ように理論式中の未知数の値を決めた。

(3) 輸送中の粉粒体粒子の速度 u_s を実験的に求め、(1) 式から R_{es} の値を計算すべきであるが、まだ u_s の測定に成功していない。そこで次の順序で計算した R_{es} の値を用い (4)~(6) 式から k および ε の値を決めた。すなわち、

まず ϕ の値を仮定する $\rightarrow$ (1) 式から R_{es} を計算する

$\rightarrow$ (4)~(6) 式から k および ε の値を決める

$\rightarrow$ (3) 式から c_s を求める $\rightarrow$ (2) 式から u_s を求める

$\rightarrow$ (30) 式から ϕ を求める。

計算を繰返し、初めに仮定した ϕ の値と上記の計算値とが同じになる場合の ϕ の値に対し、(1) 式から計算した R_{es} の値をとる。

621.928.37:66.067.5

液 体 サ イ ク ロ ン 内 の 流 れ*

植 松 時 雄**, 近 江 宗 一***

Flow in the Hydrocyclone

by Tokio UEMATU and Munekazu ŌMI

In this paper, the authors examined the formation of air core, the range of its size under various operating conditions, and the flow patterns, by observing visually and photographically the movement of the dye injected, and the cotton thread stretched within a cyclone with transparent windows. The velocity and pressure distributions, energy losses as well as flow ratio were also measured with an 80 mm cyclone and these results were compared with those obtained by many past investigators. For energy losses new types of formulas were presented. Furthermore the authors calculated the tangential velocity making use of the momentum theorem, and explained its character more clearly than had been done before.

1. 緒 言

液体サイクロンは、今日炭鉱、鉱山ばかりでなく化学工業会社などに至るまで広範囲に利用されだしてきた。一方この方面の研究はガスサイクロンの場合に比しておくれ、常に実用面のほうが数歩も前進してきたが、最近になってようやく内外における研究も進められつつある現状⁽¹⁾である。

著者らはその性能を調べることを計画して、まず内部の流れについて研究を行なった。すなわち透明な窓

をつけたサイクロンを製作して、内部に生ずる空気柱の発生状況とその大きさを写真観測によって調べ、また内部に糸を張りあるいは染料を注入し、それらの動きを写真にとることによって流れの方向の定性的観測を行なった。つづいて、速度分布、圧力分布、エネルギー損失および流量比、重量比に関して測定を行ない、従来の研究結果と比較検討を行なった。とくに旋回流れについては角運動量の理論を用いてその性質を明らかにした。

2. 実験装置およびその方法

2.1 実験装置の概要 実験装置の全般的な概略を

* 昭和 34 年 3 月 20 日 関西支部第 34 期定時総会講演会において講演、原稿受付 昭和 36 年 5 月 23 日。

** 正員、大阪大学工学部 (大阪市都島区東野田町 9)。

*** 正員、大阪大学分校。

第1図に示してある。液体はまずタンク t 内に所要の状態 で用意され、ポンプ P によって加圧され、ベンチュリ計 ve を経てサイクロン c 内にはいる。この内部で上流と下流に分けられるが、分けられた後は再び元のタンク t 内にもどるようになっている。

実験に使用したサイクロンは3種であってそれらの寸法の詳細は第2図および第1表に示してある。第2図(a)は黄銅管サイクロンで、円筒部と円すい部にそれぞれ2箇所ずつ計4箇所にピトー管そう入用の穴が設けられていて、内部の速度を測定できるようになっている。上流口と下流口は第1表に示したとおりそれぞれ5種類および3種類ずつ作られてあり、計15とおりの組み合わせが得られるようになっている。また上流口中心線から下流口の下端までの距離 a の値(上方を正にとる)は、それにはめ込まれる5個のリングの位置を適宜調節することによって +12mm から -33mm まで5mmの間隔で階段的に変化させようようになっている。このサイクロンは標準用として、前記速度分

布からさらに進んで流量比,重量比の測定に使用した。

(b)はポリエステル製のサイクロンで、これにアクリル樹脂の透明板をはめた窓が円筒部と円すい部に2箇所ずつ計4箇所あけてあり、これを通してサイクロン中心部にできる空気柱の発生状態と、内部の流れの方向などを観測できるように製作してある。上流口,下流口は第1表のようにおのの4種類ずつ作られてあり、上流口の垂直位置 a の値は +20mm から -10mm まで連続的に変化できるようになっている。このサイクロンはそれによって観測した結果を(a)の黄銅製サイクロンによって測定した結果と比較参照できるようにするために製作したものであるから、その寸法はなるべく(a)のそれと同一になるようにした。

(c)は(a),(b)のものと異なり大直径のもので、円筒部の長さを短くし、サイクロン角を大きくとった鉄製のものである。このサイクロンは円筒部で4箇所,円すい部で4箇所計8箇所にピトー管そう入用穴が開けてある。また半径方向の速度も調べる目的で、サイクロンの上部端面に半径方向に10箇所の穴を開けて、前記ピトー管を鉛直にそう入できるようにしてある。

2.2 定性的観測

液体サイクロンを運転した場合、流入速度をしたいに増加させていくと、ある限度以上において中心部で圧力が負となるために液体の存在しない部分すなわち空気柱ができる。そこで著者らは前記第2図(b)のサイクロンを使用して流入速度を順次増加させ空気柱の発生する状態をまず観測し、つづいて流入量を0.96 l/s, 0.51 l/sと2種類に変化させ、各種の上流口,下流口の組合わせに対して空気柱の直径の変化する状態を写真観測によって調べた。

次にサイクロン内部の流れの方向を観測するために、大別して下記の二つの方法をとった。すなわち糸をなびかせる方法,気ほうおよび染料を注入する方法である。まず糸をなびかせる方法であるが、円筒部と円すい部の2箇所に、それらの横断面の中心を通るように直径方向に針金をわたしてそれに木綿糸を結びつけ、水を流した際の糸のなびき方を側面の透明な窓から写真観測することによって、鉛直方向の流れの状態を調べた。またサイクロンの内壁面上には、円周方向

第1図 実験装置の概略図

第2図 供試サイクロン

第1表 供試サイクロンの寸法

No.	1	2	3
サイクロン径 d_c mm	80	80	203.3
流入口径 d_i mm	10	10	27.2
上流口径 d_e mm	20, 16, 13, 10, 8	20.0, 16.1, 12.7, 9.6	41.3
下流口径 d_u mm	22, 13, 8	17.7, 12.6, 10.4, 8.0	24.1
サイクロン角 θ°	15	15	48

に別の針金をはりめぐらして、これに前記の糸を結びつけ流れの水平方向に対する傾斜角も調べた。また半径方向の流れの模様をみるためには、サイクロンの上端面のカバーを透明なアクリル樹脂板におきかえて、前記糸のなびき方を上から観測することによって調べた。次に気ほうまたは染料を混入させる場合にはサイクロン入口の圧力測定穴に注射器をそう入し、あるいは上流口から空気柱の内部に細いビニルパイプをおろしてそれを通じて染料を注入し、それらの移動を側壁の窓から観察することによって調べた。

2.3 速度分布と圧力分布 速度分布の測定はあらかじめ検定を行なった円筒形単孔ピトー管を用いて行なった。80 mm サイクロンに対しては直径 4 mm のピトー管を、また 203 mm サイクロンに対しては直径 3 mm のピトー管を用いて旋回速度 u_θ 、鉛直軸方向速度 u_z および半径方向速度 u_r を測定した。

次に圧力分布であるが、サイクロン周壁における静圧は、流入圧力にほぼ等しく、かつまた軸方向の変化もほとんどみられないが、サイクロン内部の圧力はピトー管によって測定することは困難である。なぜならばピトー管をサイクロン壁から順次深くそう入していくと、それによって抵抗が増加するために旋回速度が低下して流入エネルギーが減少する。すなわち入口圧力が低下して、もはや最初の状態とは異なってしまうからである。ところでサイクロン内壁面上（厳密には内壁に近い所）の静圧 p_{s0} と、任意の半径 r の位置における静圧 p_s との差は、 r からサイクロン半径 r_0 までの円周部分を u_θ の速度で旋回する流体の遠心力に起因するものであるから、次式が成立する。

$$\int_r^{r_0} \frac{u_\theta^2}{r} dr = \frac{1}{\rho} (p_{s0} - p_s) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで ρ は流体の比質量である。上式で u_θ と p_{s0} の値は直接の測定によって求められるので、 u_θ の値を使って数値積分を行なうことにより p_s の値を求めて静圧分布とした。

2.4 エネルギー損失と流量比および重量比 いま p_i/γ , $u_i^2/2g$ および p_e/γ , $u_e^2/2g$ をそれぞれサイクロンの入口および上流口出口の圧力水頭、速度水頭とすれば、サイクロンのエネルギー損失 F_e は次式によって定義される。

$$\frac{p_i}{\gamma} + \frac{u_i^2}{2g} = \frac{p_e}{\gamma} + \frac{u_e^2}{2g} + z_e + F_e \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで z_e はサイクロンの流入口の位置を基準にして測った上流口圧力測定点の高さである。そこでいまエネルギー損失係数 ζ と圧力損失係数 ζ' を次式

$$\zeta = \frac{F_e}{u_i^2/2g}, \quad \zeta' = \frac{p_i/\gamma}{u_i^2/2g} \quad \dots\dots\dots (3)$$

で定義することにすれば(2)式は次式のようにになる。

$$\zeta = 1 + \zeta' \left(1 - \frac{(p_e/\gamma) + z_e}{p_i/\gamma} \right) - \left(\frac{u_e}{u_i} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

普通の場合 $p_e/\gamma + z_e \ll p_i/\gamma$, $u_e \ll u_i$ であるから

$$\zeta = 1 + \zeta' \quad \dots\dots\dots (5)$$

とおいてもさしつかえない。 p_i , p_e および u_i , u_e の値を測定し、(4) 式を用いてエネルギー損失係数 ζ の値を算出した。

次に流量比と重量比であるが、これはそれぞれサイクロンの下流流量（体積） Q_u と上流流量（体積） Q_e との比 Q_u/Q_e および下流流量（重量） G_u と上流流量（重量） G_e との比 G_u/G_e で定義することにした。普通両者を同一に取扱っているが、固体粒子が混入する場合問題となるので区別することにした。これらの値は上流、下流の流量を直接ひょう量することによって求めた。この場合もちろんベンチュリ計から得られる流入量との間の関係を確認めて、正確を期した。

3. 実験結果

3.1 空気柱 サイクロンにはいる流入量を 0 からしだいに増加させていくと、流入量の少ない間は空気柱の発生もみられないが、ある限度を越すと、不安定な空気柱がサイクロンの中心部で下のほうから発生したり消滅したりし始め、さらに流入量が増加すると、急に発達して上下に安定した空気柱が生ずる。この直径は流入量が増加するに従って、わずかではあるが増加する傾向がある。種々の上流口、下流口の組合わせに対して、流入量を 2 種類に変えた場合に生ずる空気柱を写真にとったものの一例を第 3 図に示す。またそれ

$d_e = 16.1 \text{ mm}$, $d_u = 12.6 \text{ mm}$
 $Q_i = 0.51 \text{ l/s}$, $u_i = 6.5 \text{ m/s}$

第 3 図 80 mm サイクロン内の空気柱

らの直径の変化を示したものが第4図で、横軸に上流口径 d_e とサイクロン径 d_c との比をとり、縦軸に空気柱の直径 d_{co} と上流口径 d_e との比 d_{co}/d_e をとって、サイクロン流入量 Q_i と下流口径 d_u をパラメータとして描いてある。従来の説⁽²⁾によれば、空気柱の直径は、上流口径の約 6~7 割程度とされているが、

第4図 空気柱の直径 d_{co}

本実験によれば必ずしも 6 割程度ではなくて、下流口径がある限度以上に大きい場合に 10 割以上に達することが確認された。しかしサイクロンの下流口径をこのように大きくとる場合は液の清澄を目的とする場合に限られるのであり、一般の使用目的に対しては相当に小さくとるのが普通であるから、そのような範囲内においては、およそ 5~6 割とみてさしつかえないであろう。

3.2 流れの方向 円筒部および円すい部における旋回流れの方角を知るために、サイクロン内に固定した糸の動きを写真に写して調べたが、その一例を第5図に示す。写真において濃く写っている線は、半径方向の各位置に固定した糸の動きであり、薄く写っている線は、サイクロン周壁部に固定した糸の動きである。流れの一般的傾向としては、従来いわれているように、サイクロンの周壁部において下向き流れが、中心部の空気柱の周囲において上向き流れが生じている。しかし、注目すべきことは、下流口径 d_u が大きくなって、それとサイクロン径 d_c との比 d_u/d_c が 0.22 程度となり、上流口径 d_e との比 d_u/d_e が 1.1 以上に達すると、流入量が少ない場合はサイクロン周

第5図 80 mm サイクロン内の流れの方向

壁と中心部とともに下向き流れであり、流入量を増加させると、はじめて水平な旋回流れに変る場合と、あるいはまた、円筒部の中心付近のみがまず上向き流れになり、つづいて流量の増加とともに円すい部の中心付近でも上向き流れに変るような流れが存在することである。

このように流入量を増加させても、円筒部、円すい部を問わず中心付近まではほぼ水平な旋回流れを生じている場合には、周壁部のごく限られた部分のみが下向き流れを有しており、ほとんどこの部分の流体のみが下流口から排出されるので、上流口から排出される液量はきわめて少ないのである。

以上のような場合と対照的であるのが $d_e/d_c=0.25$,

(a) あらい気ほう

(b) 細かい気ほう

第 6 図 入口管から注入した気ほうの動き

$d_w/d_c=0.4\sim0.52$ の場合である。このときは中心部においてつねに上向き流れであり、流入量を増加させても下流流量の増加はわずかであり、液ははげしい旋回運動を行なった後に上流口を経て大部分排出される。このような流れはサイクロンの機能を発揮させる上において理想的であろう。

サイクロンの周壁における下向き流れの水平となす角度は、円筒部で約 13° 、円すい部で約 $15^\circ\sim20^\circ$ に達するが、これらの角度は、流入量の変化や上流口、下流口の径にはあまり関係しないようである。なお半径方向の流れの存在することも糸の動きからして明らかに認められた。

サイクロンの入口から気ほうを注入した場合、それらの移動する経路を上部端面の透明板を通して観察した結果は第 6 図のようになる。気ほうの大きさによって移動経路が図のように異なってくるが、内部にらせん流れが存在していることは明らかにわかる。このようならせん流れの模様は別に詳しく紹介されている⁽³⁾。第 7 図は染料を中心部の空気柱を通して注入した場合の模様であって、円筒部上部において外方に染料の拡散が起るか否かを調べたものである。この結果、外側への拡散はみられず、めいりょうな同心円筒を形

第 7 図

中心部から
注入した染
料の動き

第 8 図 80 mm サイクロン内の速度分布と圧力分布

成して消滅していくのが観察された。ほかの文献⁽⁴⁾によれば, 上部において外側に向かう流れが存在すると述べているが, 著者らの実験結果ではみられなかった。また別の文献⁽⁵⁾に染料の注入による流れの模様を詳しく観察した結果が報告されているが, 著者らの得た結果もほぼこれと同一のものであることを認めた。

3.3 速度分布および圧力分布 80 mm サイクロンおよび 203 mm サイクロンに対する円周方向速度すなわち旋回速度 u_θ , 鉛直軸方向速度 u_z および圧力分布を第 8, 9 図に示してある。ただし, この場合圧力は (1) 式における p_s の値を圧力水頭 $h_s = p_s/\gamma$ になおして記入してある。

サイクロンの周壁付近における旋回速度 $u_{\theta c}$ は流入速度 u_i よりも小さく, 円筒部で 80 mm サイクロンの場合 $(0.40 \sim 0.42) u_i$ 程度である。ほかの実験結果⁽⁶⁾によれば, この値は約 $0.70 u_i$ となっている。この相違は主としてサイクロン径 d_c に対する流入口径 d_i の相対的大きさによるものであると考えられるが, このことについては後にあらためて説明する。この速度については, ほかに実験結果⁽⁷⁾が報告されているので, いまこれらの実験値を参照して $u_{\theta c}/u_i$ と d_i/d_c の関係を図に描いてみると第 10 図のようになる。流入口径が大きいほど, 同じ流入速度に対しても周壁部旋回速度は大きくなるのがわかる。

次に周壁付近から中心に向かって半径 $r = 0.85 r_c$ 付近までは旋回速度の増加はきわめてわずかである場合が多く, この範囲では $u_\theta = \text{一定}$ とみなしうるこ

第 9 図 203 mm サイクロン内の速度分布と圧力分布

は従来の研究結果と一致する。この範囲の限界値については $(0.6 \sim 0.7) r_c$ としているものもあり⁽⁸⁾, また $(0.6 \sim 0.8) r_c$ 程度であって, d_i/d_c の値が大きくなるに従って大きな値になると述べているものもある⁽⁹⁾。さらにこの範囲から内部に向かうと旋回速度は急激に増加し, この傾向は中心部に存在する空気柱の外周付近まで達している。この領域の速度分布は従来の研究結果と同様 $u_\theta r^n = \text{一定}$ という関係式でよく近似することができる。 n の値を調べるために描いた図が第 11 図であって, これらによってみると, 80 mm サイクロンでは $n = 0.4 \sim 0.6$, 203 mm サイクロンでは $n = 0.6 \sim 0.8$ という結果が得られた。

空気柱の表面付近では測定困難であるために速度を求めていないが, この付近で u_θ の値は最大値をとり, それから中心に向かっては $u_\theta = r\omega$ (ω は角速度) の式に従って急激に減少することは容易に考えられる。 u_θ の最大値は 80 mm サイクロンにおいては $(0.9 \sim 1.2) u_i$, 203 mm サイクロンにおいては $1.8 u_i$ 程度に達し, ほかに実験結果⁽¹⁰⁾でもだいたい同一で最大 $1.8 u_i$ に達しているものがみられる。一般に上流口, 下流口の径を小さくするほど, また入口径は大きくするほど, この最大値も大きくなるようである。

鉛直軸方向速度 u_z はサイクロン周壁部で下向きであり, それから中心部に向かうに従って順次減少して, 円筒部では $r = 0.62 r_c$, 円すい部においては $r = 0.6 r_{cc}$ (r_{cc} はその横断面の内半径) 付近で 0 となり, それから内側では上向きとなり, 中心に向かって逐次増大する傾向をとる。 $u_z = 0$ の付近では, 速度分布は複雑で一度増加してからまた減少して再び増加するような傾向をとることが多い。このような傾向をとる領域は, およそ $0.3 r_c$ から $0.6 r_c$ までの範囲にわたって存在する。以上述べたことから考えてみると, 液体サイクロンの旋回速度 u_θ と鉛直軸方向速度 u_z に関す

第 10 図 $u_{\theta c}/u_i$ と d_i/d_c との関係

るかぎり、気体サイクロンの場合と非常によく類似していることがわかる。参考のために気体サイクロンの場合の一例⁽¹⁾と著者らの得た速度分布を比較してみると第 12 図のようになる。

半径方向速度 u_r の分布は 203 mm サイクロンに対して円筒部のみについて測定したが、——ピトー管をあまり深く入れると、内部の強い旋回流れによって曲げられてしまうので測定困難であった——その結果は第 13 図に示してある。分布は不規則であるが、サイクロンの内壁部において一般に小さく、円筒部の下部にいくに従って内向き流れの増大していく傾向をみとめた。

圧力分布は前述のとおり u_θ の値を使って計算したものであるが、さきの第 8, 9 図にあわせ記入してある。この圧力が 0 になるところでは空気柱が発生するものと考えられる。

第 11 図 サイクロン内の旋回速度

3.4 旋回速度の計算 サイクロンの円筒部の内壁面に近い所の旋回速度 $u_{\theta c}$ と内部の旋回速度 u_θ とを角運動量の理論を使って導いてみる。単位時間にサイクロン入口から内部にはいる液体のもつ運動量は、液体の比質量を ρ 、入口面積を A_i とするとき $\rho A_i u_i^2$ で表わされるから、これのサイクロン中心に関するモーメントは $\rho A_i u_i^2 r_c$ である。また内部で旋回する液体のそれは $\rho A_i u_i u_{\theta c} r_c$ となり、これらの間には

第 12 図 速度分布の比較

第 13 図 203 mm サイクロン内の半径方向速度分布

サイクロン内壁面上に作用する摩擦力のモーメント M_f だけの相違があると考えことにすると, 次式

$$\rho A_i u_i^2 r_c = \rho A_i u_i u_{\theta c} r_c + M_f \quad \dots\dots\dots (6)$$

が成立する. ここで摩擦応力 τ がどのような大きさになるかということは明らかでないので, この場合円管内の流れにおける内壁面上の応力を表わす式⁽¹²⁾

$$\tau = 0.0225 \rho u_{\theta c}^2 \left(\frac{\nu}{u_{\theta c} \delta} \right)^{1/4} \quad \dots\dots\dots (7)$$

を適用することにする. ただし δ は境界層の厚みを表わすものとする. そうすると摩擦モーメント M_f は次式で表わされる.

$$M_f = \int_0^{H_1} 2\pi r_c^2 \times 0.0225 \rho u_{\theta c}^2 \left(\frac{\nu}{u_{\theta c} \delta} \right)^{1/4} dz \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで z は鉛直軸方向の座標であり, H_1 は円筒部の高さである. (8) 式を積分して (6) 式に代入し, $2r_c = d_c$, $A_i = (\pi/4) d_i^2$ とおいて整理すれば

$$\left\{ 0.090 \left(\frac{\nu}{u_{\theta c} \delta} \right)^{1/4} \frac{H_1 d_c}{d_i d_i} \right\} \left(\frac{u_{\theta c}}{u_i} \right)^2 + \frac{u_{\theta c}}{u_i} - 1 = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

第14図 $\phi(n)$ と d_0/d_c との関係

となる. 上式において δ を適当に定めれば $u_{\theta c}/u_i$ の値が定まる.

次に円すい部であるが, その内壁面上に摩擦力が作用しなければ, 近似的に $u_{\theta r} = \text{一定}$ の関係をもって旋回するはずであるが, 実際には摩擦力の作用を受けるから, $u_{\theta r} = \text{一定}$ の関係になるものと考えられる. そこでこの摩擦力によるモーメントを M_f として, 半径 r_c と r_0 の位置との間に角運動量の理論を適用すれば次式を得る.

$$\rho A_i u_i u_{\theta c} r_c = \rho A_i u_i u_{\theta 0} r_0 + M_f \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし $u_{\theta 0}$ は半径 r_0 の位置における旋回速度である. ここで摩擦応力 τ として, 前と同様に (7) 式の形を使用することにすれば,

$$M_f = \int_{r_0}^{r_c} \frac{2\pi r^2}{\sin \theta/2} \times 0.0225 \rho u_{\theta}^2 \left(\frac{\nu}{u_{\theta} \delta} \right)^{1/4} dr \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし θ はサイクロン角である. (11) 式を旋回速度を表わす関係式

$$u_{\theta r}^n = u_{\theta c} r_c^n = \text{一定} \quad \dots\dots\dots (12)$$

を使って積分し, (10) 式に代入してかつ $2r_c = d_c$, $2r_0 = d_0$ と書きかえて整理すれば

$$\frac{\sin \theta/2}{0.0450} \left(\frac{u_{\theta c} \delta}{\nu} \right)^{1/4} \frac{(d_i/d_c)^2}{u_{\theta c}/u_i} = \phi(n) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\phi(n) = \frac{1}{3 - (7/4)n} \frac{1 - (d_0/d_c)^{3 - (7/4)n}}{1 - (d_0/d_c)^{1-n}} \quad \dots\dots\dots (13 \cdot a)$$

となる. 横軸に d_0/d_c をとり, n の値をパラメータにとって $\phi(n)$ の値を計算した結果を第14図に示してある. (13) 式において左辺の値は, サイクロンの形状寸法と $u_{\theta c}/u_i$ の値とがわかっている計算できるので, d_0/d_c の値を適当に定めることにより第14図から n の値を決定することができる.

著者らの使用した 80 mm サイクロンを例にとり, $u_{\theta c} \delta / \nu = Re = 10^4$, $d_0 = 0.6 d_c$ (d_c は上流口の直径) とおいて, (9), (13) 式により $u_{\theta c}/u_i$ と n の値を計算した結果の例を第15, 16図に示してある.

第15図 $u_{\theta c}/u_i$ および n の値の d_i/d_c 値に対する関係

これらによってみればわかるとおり, $u_{\theta 0}/u_i$ の値は d_i/d_c の値の増加とともに増加するという著者ならびに吉岡の実験結果⁽¹³⁾, および n の値が d_c の小さくなるにつれてやや増大し, d_i の大きくなるにつれても増加するという藤本が実験的に確かめた事実⁽¹⁴⁾ も説明することができる。

つづいて旋回速度の分布を計算して実験値と比較してみると第 17, 18 図のようになる。この場合境界層の厚み δ は 80 mm サイクロンの場合 5 mm, 203 mm サイクロンの場合 20 mm にとり, 内壁面上からこの厚みの部分に対しては (7) 式の前提となる 1/7 乗法則を適用し, それから中心部に向かっては (13) 式から得られる n の値を用い, $u_{\theta} r^n = \text{一定}$ の法則に従って求めたものである。 $r/r_c = 0.35$ 付近までは比較の実験値と一致するが, それより中心部にはいと理論値は大きめになってくる。すなわち実際には, この付近から内部では $u_{\theta} r^n = \text{一定}$ の関係は成立しなくなって, 従来からいわれているように $u_{\theta} = \text{一定}$ と考えられる領域にはいて頭打ちの状態をとり, それからただちに急激な減少を示すことになる。

3.5 エネルギー損失 横軸に上流口径 d_c とサイクロン径 d_c との比 d_i/d_c をとり, 縦軸にエネルギー損失

第 16 図 n の値の d_i/d_c 値に対する関係

第 17 図 80 mm サイクロン内の旋回速度

係数 $\zeta = F_c/(u_i^2/2g)$ をとって表わすと第 19 図のようになる。

この図には比較のために Dahlstrom の式⁽¹⁵⁾

$$\frac{F_c}{u_i^2/2g} = \frac{1.67 \times 10^3}{K_1^2} d_c^{0.4} \frac{(d_i/d_c)^{2.2}}{(d_e/d_c)^{1.8}} \quad \dots\dots (14)$$

ただし $K_1 = 4.85 e^{0.00537 VS} \quad (d_e/d_i = 0.75 \sim 1.00)$

$= 5.60 e^{0.00234 VS} \quad (= 1.25 \sim 1.35)$

$= 5.35 e^{0.00163 VS} \quad (= 1.68 \sim 2.11)$

VS: 下流流量 (体積) のサイクロン流入量 (体積) に対する百分率

d_c : サイクロン径 mm

および吉岡の式⁽¹⁶⁾

$$\frac{F_c}{u_i^2/2g} = 54.3 \frac{(d_i/d_c)^{2.8}}{(d_e/d_c)^{1.9}} \quad \dots\dots (15)$$

第 18 図 203 mm サイクロン内の旋回速度

第 19 図 エネルギー損失

によって計算した線が記入してある。サイクロンとして普通に使用する範囲での、上流口、下流口の組合せに対してもおよその傾向を示すにすぎず、特にいまの場合下流口径が 22 mm になるとまったくこれらの式で表わすことは無理である。そこで著者らは(5)式における圧力損失係数 $\zeta' = \zeta - 1$ の値を出口総面積と入口面積との比 $(d_e^2 + d_u^2)/d_i^2$ に対してプロットしてみたところ、第 20 図に示すように一直線上に配列することを知った。参考のために藤本の行なった実験結果⁽¹⁷⁾もプロットしてみたところ、これもまた直線上に配列し、両者ともに $(d_e^2 + d_u^2)/d_i^2$ の値が 4.0 を越える付近で別の直線上にほぼ配列することがわかった。すなわち、これらの実験値はサイクロン径 d_e を m 単位でとる場合に、次式

$$0.3 \leq (d_e^2 + d_u^2)/d_i^2 \leq 4.0, d_e \leq 0.13; \\ \frac{F_c}{u_i^2/2g} - 1 = 2220 d_e^{2.12} \left(\frac{d_e^2 + d_u^2}{d_i^2} \right)^{-1.12} \quad \dots\dots\dots (16)$$

第 20 図 圧 力 損 失

第 21 図 流量比 Q_u/Q_e の入口圧力 p_i/γ に対する変化

$$4.0 \leq (d_e^2 + d_u^2)/d_i^2, d_e \leq 0.13;$$

$$\frac{F_c}{u_i^2/2g} - 1 = 940 d_e^{2.12} \left(\frac{d_e^2 + d_u^2}{d_i^2} \right)^{-0.502} \quad \dots\dots\dots (17)$$

で十分よく近似することができる。これらの式によれば、上流口、下流口の寸法の限度に無関係に圧力損失係数の値を算出できる。

3.6 流量比および重量比 流量比、重量比はサイクロンの寸法、形状、運転条件によって種々に変化するものであるが、最も大きな影響を与えるものは、下流口径 d_u と上流口径 d_e との比 d_u/d_e である。第 21 図は入口圧力 p_i/γ に対する流量比 Q_u/Q_e の関係を示したものであるが、一般に入口圧力が十分高い範囲では流量比の変化はわずかであるが、これがしだいに減少して流入量が減るとともに流量比はわずかず増加して、入口圧力がある限度以下に下がると重力の作用が大ききいてくるために流量比は急激に増加する。もちろん、この範囲では内部の旋回速度も小さくて、サイクロンとしての機能を発揮するに十分ではない。

第 22 図 流量比 Q_u/Q_e の出口直径比 d_u/d_e に対する変化

いま横軸に d_u/d_e をとり、縦軸に流量比 Q_u/Q_e をとって流入流量 Q_i をパラメータにとって表わすと第 22 図のようになる。この図には Dahlstrom の式⁽¹⁸⁾

$$Q_u/Q_e = 1.81 Q_i^{-0.435} (d_u/d_e)^{4.35} \dots\dots\dots (18)$$

ここで Q_i : 流入流量 l/s ,

藤本の式⁽¹⁹⁾

$$G_u/G_e = 0.421 (H/d_i)^{0.5} u_i^{-0.2} (d_u/d_e)^{5.0} \dots\dots\dots (19)$$

ここで H, d_i : サイクロン流入口中心線から下流口下端までの鉛直距離および流入口直径, u_i : 流入速度 m/s , $d_e < 8.9 d_i$, $0.447 \leq d_u/d_e < 1$, $H \leq 8 d_e$,

および今泉の式⁽²⁰⁾

$$\left. \begin{aligned} Q_u/Q_e &= 0.73 (d_u/d_e)^{5.06} & (0.8 < d_u/d_e) \\ &= 0.33 (d_u/d_e)^{1.66} & (d_u/d_e < 0.7) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (20)$$

によって計算した線が参考のため記入してある。流入速度 u_i と流量比との関係を調べてみると、第 23 図のようになったので、著者らは次の実験式を得た。

$$Q_u/Q_e = 7.67 u_i^{-0.824} (d_u/d_e)^{4.15} \dots\dots\dots (21)$$

以上は清水の場合であるが、これに粒子が混入する

とまたようすが変わってくるのであり、その結果は第 24, 25 図に示すようになった。この場合には前述のとおり重量比と名づけることにした。同図は粒子としてみがき砂を使用した場合の一例であり、濃度が約 2 % までであって十分大きな値に達しない欠点はあるが、このような範囲内においてほぼ

$$G_u/G_e = 3.64 u_i^{-0.442} (d_u/d_e)^{3.72} \dots\dots\dots (22)$$

で比較的良好に近似することができるようである。

4. 結 論

以上液体サイクロンの流れについて、まず内部に発生する空気柱の発達する模様と発達した後の大きさについて調べ、かつ流れの方向について定性的観測を行なった。つづいて速度分布、エネルギー損失および流量比、重量比の測定を行ない、従来の研究結果と総合的に比較検討を行なった。また旋回速度について角運動量の理論を用いてその性質をいっそう明らかにし、従来の研究結果を理論的に説明することを試みた。その

第 23 図 流量比 Q_u/Q_e の入口速度 u_i に対する変化

第 24 図 重量比 G_u/G_e の出口直径比 d_u/d_e に対する変化

第 25 図 重量比 G_u/G_e の入口速度 u_i に対する変化

結果

1. 空気柱の直径は上流口径の 6~7 割とされているが, 本研究の結果によれば 5~6 割で, 特殊の場合に 10 割に達するものが観測された。

2. 速度分布は複雑で, サイクロン内の全領域にわたり適確につかむことは困難であるが, およその傾向としては従来の研究結果と変わらない。ただしサイクロンの機能を果す上において, 重要な因子となる旋回流れの性質については, 一段と明確にして従来の実験結果を理論的に説明した。

3. エネルギー損失については, 新しい形の実験式を作成することを試み, 実験的によく一致することを確かめた。

4. 流量比と重量比との区別をつけて, 液体に混入している粒体の濃度によって変る模様を比較して調べた。濃度の大きな範囲は実用上重要な場合となるが, これについてはなお研究の余地がある。

終りにのぞみ, 本研究を進める上において, 種々の実験に協力をおしなかつた長野城昌, 山口光三, 井手貴孝の三君に感謝の意を表する。

文 献

- (1) 吉岡, 統新化学工学講座, 12 (昭 35), 67~69, 日刊工業新聞社, などに詳しく記載されている。
- (2) 藤本, 資源技術試験所報告, 42 (昭 33-10), 14.
- (3) 文献(2), 17~18 ページ。
- (4) 文献(2), 19 ページ; 藤本, 機械学会論文集, 24, 137 (昭 33-1), 78.
- (5) D. Bradley & D.J. Pulling, *Trans. Inst. chem. Engr.*, 37, 1 (1959), 36.
- (6) 文献(2), 7 ページ。
- (7) 吉岡, 堀田, 化学工学, 19, 20 (昭 30-12), 634.
- (8) 文献(2), 7 ページ。
- (9) 文献(7), 634 ページ。
- (10) 文献(2), 10~11 ページ。
- (11) 井伊谷, 機械学会論文集, 18, 69 (昭 27), 45.
- (12) H. Schlichting, *Grenzschicht Theorie*, (1951), 393, Karlsruhe Verlag.
- (13) 文献(7), 634 ページ。
- (14) 文献(2), 10~11 ページ。
- (15) J. J. Moder & D.A. Dahlstrom, *Chem. Engng. Progr.*, 48, 2 (1952), 78.
- (16) 文献(7), 635 ページ。
- (17) 文献(2), 30~31 ページ。
- (18) 文献(7), 79 ページ。
- (19) 文献(2), 63 ページ。
- (20) 今泉, 機械学会誌, 59, 446 (昭 31-3), 204.

621.928.37:66.067.5

液体サイクロンの分離性能*

植松時雄**, 近江宗一***, 藤沢哲夫****

Separation Performance of the Hydrocyclone

by Tokio UEMATU, Munekazu ŌMI, and Tetuo FUZISAWA

In this paper, the authors analyzed the motion of a solid particle within a hydrocyclone by solving two-dimensional dynamical equations. Then they presented a method for calculating the fractional recovery on the basis of these equations and the results obtained thereby were in satisfactory agreement with those obtained from various previous experiments. In addition to the above, the authors derived the characteristic equation for cyclone and a formula for the imaginary equivalent diameter of particle reporting 50 % by weight to both underflow and overflow streams. Finally they presented the method of calculating by means of the fractional recovery the solid elimination efficiency and the thickening ratio as well as the results thereof compared with those obtained through various experiments.

1. 緒 言

液体サイクロン内の流れは非常に複雑であって, これを正確につかむことは多くの困難が伴う。ましてそ

の中に懸濁する粒子群の運動ともなれば, ますます複雑さを加えることは論をまたない。しかしながらサイクロンの分級, 捕集, 濃縮などの諸性能を理論的に解明しようとするれば, 当然粒子群の運動もある程度明らかにしなければならない。従来の研究では, これらの諸性能についてそれぞれ別個に実験式を作成しており^{(1)~(3)}, 分級粒径についてのみ, サイクロン内に適

* 昭和 35 年 11 月 3 日 第 38 期全国大会講演会および昭和 36 年 3 月 17 日 関西支部第 36 期定時総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 36 年 5 月 23 日。

** 正員, 大阪大学工学部 (大阪市都島区東野田町 9)。

*** 正員, 大阪大学分校。

**** 准員, 神戸製鋼所。