

# 分級しない液体サイクロンの捕集性能について

赤池 志郎・根本 光正・窪田 直和\*

## Collection Performance of the Hydrocyclone without Underflow

Shiro AKAIKE, Mitsumasa NEMOTO and Naokazu KUBOTA\*

### Abstract

In most hydrocyclones used in the industries, pressurized slurry fed is classified into overflow and underflow. A number of studies on the hydrocyclone performance have been done, though it appears that the collection efficiency of the hydrocyclone without the underflow such as gascyclone as a dust collector has never been investigated.

This paper presents the experimental results of the hydrocyclone without the underflow for the separation of the sand. Three hydrocyclones with different body diameters were tested and the effects of particle sizes and the Reynolds number of the collection efficiency were discussed. The simple correlation for the performance was also presented.

### 1. ま え が き

流れの遠心力を利用して二相流体から質量のより大きい物質を分離させるサイクロン式分離器は古くから広く利用されている。とくに気流の除塵を目的としたサイクロン分離器については多くの研究が行われている<sup>1)</sup>。一方、液体中の固体の分離を目的とする液体サイクロンにも多くの応用面がある<sup>2)</sup>が、そのほとんどがサイクロンに流入する固液二相流を下部への濃縮流と上部への清澄流に分級させるもので、主として捕集を目的とする気流用サイクロンとはその形状が多少相違している。また上述の液体サイクロンでは一般に濃縮流を大気中に放出させるので、背圧が要求されるポンプの軸受潤滑流の砂の除去等、液体を利用対象として固体微粒子を分離捕集する場合には従来のものをそのまま適用できない。

分級する液体サイクロンの性能は古くから調べられており、国内では吉岡<sup>3)</sup>、藤本の一連の研究<sup>4)</sup>が、国外にも多くの研究がある<sup>5)</sup>。最近では液体サイクロンに関する国際会議も開催されており、多くの論文が発表されている<sup>6)</sup>。また工業用ガイドとしてサイクロンの寸法による分離効率と粒子径、圧力損失の線図も紹介

されている<sup>7)</sup>。最近ではサイクロン内の流れの数値解析から分離性能を検討しているものもある<sup>8)</sup>。

上述のごとく、古くから多くの研究があるのにもかかわらず、液体サイクロンの分離性能を正しく見積ることのできる定説はないようである。たとえば、サイクロンの性能を支配する流量と圧力損失との38の経験式が比較検討されている<sup>9)</sup>が、それらに大きな差異が見られる。サイクロン内の流れを分級し、その分級率を大きくすることにより粒子の分離限界径は小さくなる<sup>10)</sup>が、前述のように流路中の固体粒子の除去を目的とした性能低下が予測される分級しない基本的形状の液体サイクロンの捕集性能はこれまで調べられていないようである。なお、気流用サイクロンや分級する液体サイクロンの設計資料を直接分級しない液体サイクロンに適用するには問題があろう。

本研究は分級しない基本的形状の液体サイクロンの分離捕集性能を明らかにすることを目的とする。供試サイクロンは分級しないので、従来から知られている液体サイクロンの最適寸法<sup>11),12)</sup>よりむしろ気流用サイクロン<sup>13)</sup>に近い形状を選んだ。寸法の異なる3種類のサイクロンについて、ある程度粒子径をそろえた砂を用いて実験を行い、この種のサイクロンの捕集性能に及ぼす粒子径、入口流速に基づくレイノルズ数の影響を明らかにした。また簡単な理論的検討により捕集率を支配する無次元パラメータを導入した。

\* (株)電業社機械製作所  
昭和62年9月8日受理

## 2. 実験装置および方法

図1に実験装置の概略を示す。地下水槽から供試管路にポンプ①で給水し、供試サイクロン②、水槽③をへて水は地下水槽に回流する。流量は上流のオリフィス④で測定し、バイパス管路⑥に設けた砂混合器で砂をかくはんし、固液二相流をサイクロンに流入させる。

供試サイクロンは図2に示すような基本的形状のもので、サイクロン本体の内径  $D_1 = \phi 49.5$  mm,  $\phi 73.9$  mm,  $\phi 102.3$  mm の3種類を用いた。以下それぞれ C50, C75 および C100 サイクロンと名付ける。図2の

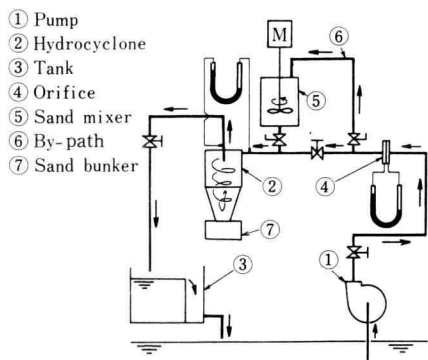


Fig. 1. Skeleton view of equipment.

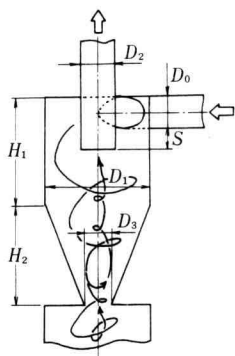


Fig. 2. Hydrocyclones used.

記号の各部の寸法比を表1に示す。ただし、実用性を考慮して市販の綱管を用いているので、3者の寸法比は多少相違している。供試サイクロンは分級しないので、本体下部に内径  $\phi 150$  mm の砂捕集器(図1⑦)が設けてある。

供試砂は市販の鋳物砂を用いており、ふるいを用いて粒径を表2に示す7種類に選別した。それぞれの粒径の中央値に近い値を用いて表のように S300, ..., S45 と以下供試砂を呼ぶことにする。なお、砂の密度は液浸法により求めたところ  $\rho_s = 1570$  kg/m<sup>3</sup> である。

砂混合器に 200 ml の供試砂を投入し、かくはんしながらバイパス管路のコックを開き、サイクロンに混相流を流入させて性能実験を行った。実験後サイクロンの砂捕集器に捕集された供試砂を取り出し捕集率を求めた。捕集されずに流出した砂は水槽(図1③)内で沈殿してから回収する。厳密に混相流中の砂の濃度を一定にすることはできなかったが、バイパス管路のコックの調整により以下の実験結果は体積濃度で 1% 以下のものである。なお、サイクロンの性能が影響を受けるのは体積濃度で 2% 以上といわれている<sup>10)</sup>。

サイクロンの圧力損失の測定は清水で行い、入口、出口管壁の圧力差を U 字管マンオメータで測定した。性能実験は入口管内平均流速  $v_0$  とその管内径  $D_0$  に基づくレイノルズ数  $Re = v_0 D_0 / \nu$  ( $\nu$ : 動粘度)  $\approx 8 \times 10^4$  以下で行った。

Table 1. Hydrocyclones dimensions

| Name       | C 50  | C 75  | C 100 |
|------------|-------|-------|-------|
| $D_1$ (mm) | 49.5  | 73.9  | 102.3 |
| $D_0/D_1$  | 0.392 | 0.445 | 0.375 |
| $D_2/D_1$  | 0.392 | 0.445 | 0.375 |
| $D_3/D_1$  | 0.323 | 0.325 | 0.313 |
| $S/D_1$    | 0.208 | 0.183 | 0.198 |
| $H_1/D_1$  | 1.010 | 1.015 | 0.978 |
| $H_2/D_1$  | 1.010 | 1.015 | 0.978 |

Table 2. Test sands

| Name             | S 300       | S 200       | S 125       | S 95       | S 80      | S 65      | S 45      |
|------------------|-------------|-------------|-------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| $d_s$ ( $\mu$ m) | 349<br>~250 | 249<br>~149 | 148<br>~105 | 104<br>~88 | 87<br>~74 | 73<br>~53 | 52<br>~32 |

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 圧力損失

図3に各サイクロンの圧力損失  $\Delta P$  をレイノルズ数  $Re$  について示す。 $Re$  が同じであれば、サイクロン本体の小さいものほど  $\Delta p$  は大きくなるが、この場合 C75 と C100 の  $\Delta p$  の値はほとんど相違しない。

次式で定義した圧力損失係数  $\zeta$  と  $Re$  との関係を図4に示す。

$$\zeta = \Delta p / \left( \frac{\rho}{2} v_0^2 \right) \dots\dots\dots (1)$$

ここに  $\rho$  は水の密度である。各サイクロンとも  $Re$  の小さいところでは小さくなる傾向をもつが、 $Re$  の大きいところではほぼ一定値となる。 $\zeta$  は C100, C50, C75 の順に大きく、 $D_0/D_1$  または  $D_2/D_1$  ( $D_2$ : 出口管内径) が小さいものほど  $\zeta$  は大きい(表1参照)。この傾向は藤本の結果とも一致する<sup>4)</sup>。

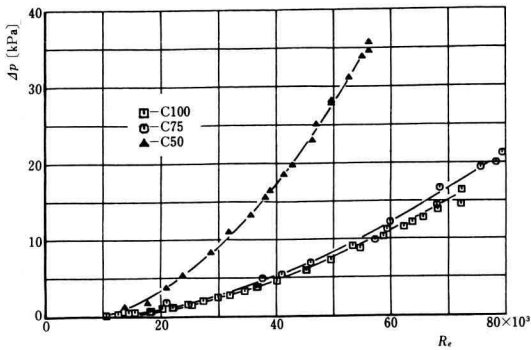


Fig. 3. Pressure loss of three hydrocyclones.

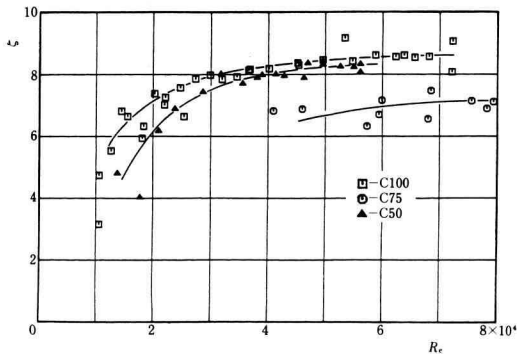
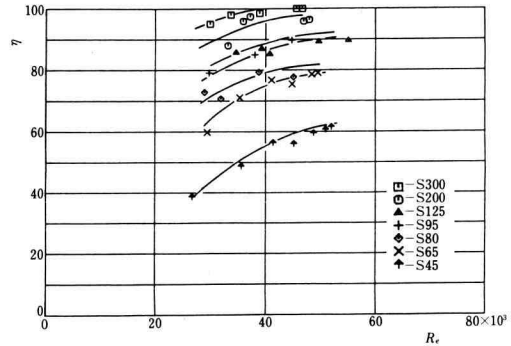


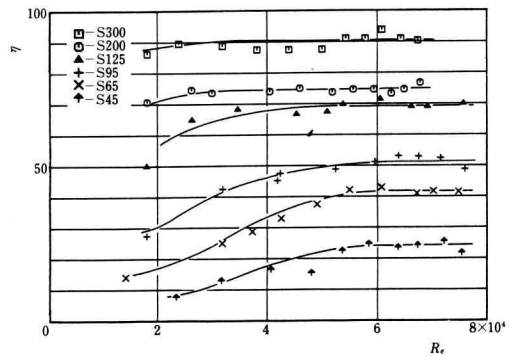
Fig. 4. Relation between pressure loss coefficient  $\zeta$  and  $Re$ .

#### 3.2 捕集率

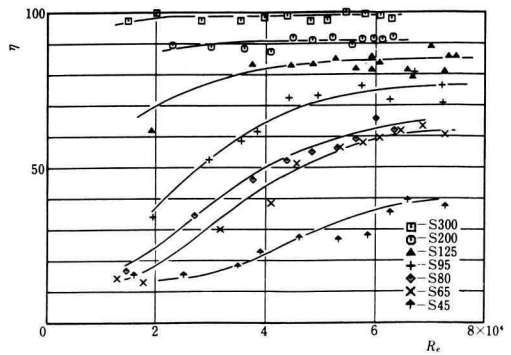
分級しない供試液体サイクロンの性能を決める固液二相流の固体の捕集率  $\eta$  は、供給した砂の体積  $V_1$  と砂捕集器から回収された砂の体積  $V_2$  より次式で算出した。



(a) C50 Cyclone



(b) C75 Cyclone



(c) C100 Cyclone

Fig. 5. Collection efficiency  $\eta$  of hydrocyclones used.

$$\eta = (V_2/V_1) \times 100 \quad [\%] \dots \dots \dots (2)$$

図5(a)~(c)に各サイクロンの捕集率  $\eta$  とレイノルズ数  $Re$  との関係を示す。図の各サイクロンとも供試砂径の大きいものほど当然捕集率が上昇し、S300 砂では90%以上の捕集がC50とC100サイクロンで可能である。 $Re$ によって $\eta$ は上昇してくるが、 $Re$ が大きいくと $\eta$ はあまり上昇しなくなる。なお、後述のように本実験シリーズで性能が一番悪かった図5(b)のC75サイクロンの結果では、 $Re$ による捕集率 $\eta$ の上昇が $Re$ のある値以上で生じなくなり、 $\eta$ がほぼ一定となる。これはC75の $D_2/D_1$ が大きいので、 $v_0$ が大きくなると粒子に働く遠心力効果が最大となる本体内の半径位置が出口管内径 $D_2$ の内側になり、砂が出口管から流出してしまうことなどが原因と考えられる。

分級するサイクロンに関する藤本の結果では流入速度 $v_0$ (または $Re$ )がかなり大きいところで捕集率が再び減少することが報告されている<sup>4)</sup>。しかし、約3 m/s

以下の $v_0$ の本実験範囲では $\eta$ の減少は見られなかった。

図6はS65砂とS125砂について3種類の供試サイクロンの捕集率を比較したものである。従来からサイクロン内径 $D_1$ が小さいものほど捕集率が上昇することが知られている<sup>7)</sup>が、この場合C75の $\eta$ がC100より悪い。他の供試砂についても図6と同様な結果が得られている。これはC50とC100の $D_0/D_1$ (または $D_2/D_1$ )に対し、C75の $D_0/D_1$ が大きいことが原因で、サイクロン内の最大周速度が他より小さいため、粒子に働く遠心力が小さくなるためと思われる。したがって、C75の損失係数とも一番小さい。

上述のごとく、液体サイクロンの性能は寸法比によってかなり影響を受けるようであり、従来から多くの研究があるにもかかわらず、その性能予測がむずかしいのはこれらが原因であろう。

#### 4. 分離捕集性能について

前述のように液体サイクロンの性能予測がむずかしいので、分級させるものについて最近ではむしろ寸法効果が調べられている。Medronhoらは従来から知られている寸法効果を表わす無次元値 $S_{tk50} \cdot E_u$ の実証実験を行い、分級率と $S_{tk50} \cdot E_u$ との実験式を求めている<sup>10)</sup>が、分級率が零の場合この値は無限大となり、この結果は供試サイクロンには適用できない。したがって、以下簡単な理論的検討により捕集率を支配する無次元パラメータを導入する。

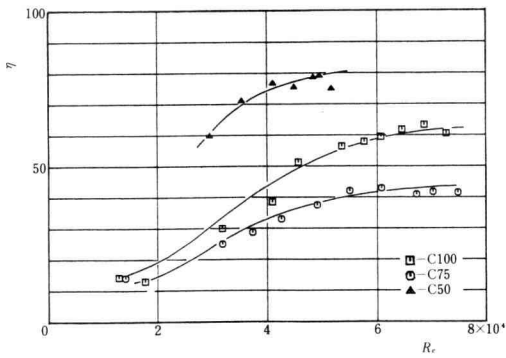
従来から分離性能を検討する場合、サイクロン内の動粘度 $\nu$ 、密度 $\rho$ の液流中の密度 $\rho_s$ 、粒子径 $d_s$ の固体微粒子の半径方向移動速度 $v_s$ はストークスの式を用いて次式のように求められている<sup>5)</sup>。

$$v_s = \frac{1}{18} \frac{g'}{\nu} \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \cdot d_s^2 \dots \dots \dots (3)$$

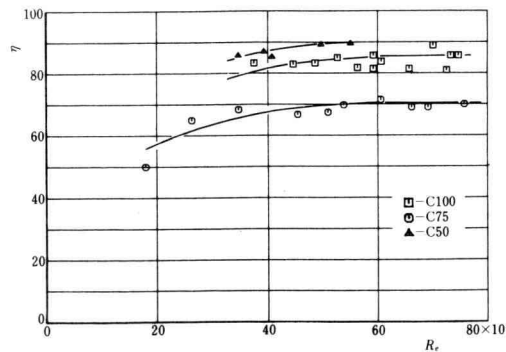
ここに、 $g'$ は粒子に働く遠心力に基づく加速度である。サイクロン内の周方向速度の最大値を $u_{max}$ とすると、 $u_{max}$ になる半径 $r_0$ 上の粒子に働く加速度 $g'$ は

$$g' = u_{max}^2 / r_0 \dots \dots \dots (4)$$

古くからサイクロンの分離性能を考えると、 $v_s$ 、 $u_{max}$ 、 $r_0$ の取り扱いによって各種の分離限界粒子径式が提案されている<sup>14)</sup>が、前述のようにこれらの正当性がはっきりしていない。ここでは以下のように単純化



(a) S65 Sand



(b) S125 Sand

Fig. 6. Comparison of collection efficiency  $\eta$  between Hydrocyclones used.

して考える。

サイクロンの圧力損失  $\Delta p$  を次式で仮定する。

$$\Delta p = k \frac{\rho}{2} u_{\max}^2 \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 $k$  はサイクロンの形状によって決まる常数とする。式 (5) より圧力損失係数  $\zeta$  は

$$\zeta = k \cdot \left( \frac{u_{\max}}{v_0} \right)^2 \dots\dots\dots(6)$$

一方、 $u_{\max}$  になる半径  $r_0$  はサイクロンの形状で決まる値と仮定できるので、 $r_0 = k' \cdot D_0$  とする。ここに  $k'$  は常数である。式 (3) に式 (4)、(6) を代入すると

$$v_s = \frac{1}{18k \cdot k'} \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \cdot \left( \frac{d_s}{D_0} \right)^2 \cdot \zeta \cdot Re \cdot v_0 \dots\dots\dots(7)$$

ここで

$$G = (d_s/D_0)^2 \cdot Re \dots\dots\dots(8)$$

を導入すると、式 (7) より

$$G = 18k \cdot k' \left( \frac{v_s}{v_0} \right) / \left[ \zeta \cdot \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \right] \dots\dots\dots(9)$$

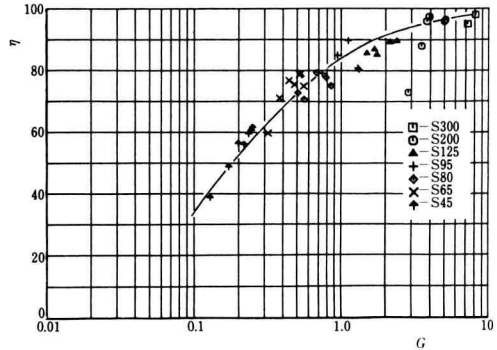
式 (9) の右辺の  $(v_s/v_0)$  が捕集率を支配する値と考えられ、 $\zeta$  の値はサイクロンの形状で主として決まるので、幾何学的に相似に作られたサイクロンで  $\rho_s/\rho$  の値が同じ場合の捕集率は式(8)の無次元パラメータ  $G$  によって決まるであろう。

各供試サイクロンの実験結果に対して捕集率  $\eta$  と  $G$  との関係を求めると図7のようになり、粒子径  $d_s$ 、レイノルズ数  $Re$  が相違しても  $G$  によって捕集率が決まるといえる。ただし、 $G$  の計算に用いた  $d_s$  の値は表2の各供試砂の中央値を用いていることなどが原因で、データにバラツキが多少ある。前述のごとく各サイクロンの形状が多少相違し、性能が異っているので、各サイクロンの  $\eta$ - $G$  曲線は一致しない。 $G$  によっては幾何学的に相似なサイクロンの寸法効果と運転条件(レイノルズ数)が考慮できる。

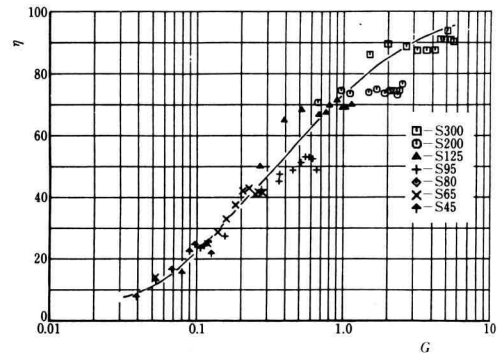
一方、供試サイクロンのように多少寸法比の異なる基本的形状のサイクロンに対しては式(7)を変形した次式の左辺がより一般的な無次元パラメータとなる。

$$G \cdot \left( \frac{v_0}{v_s} \right) \cdot \zeta = 18k \cdot k' / \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \dots\dots\dots(10)$$

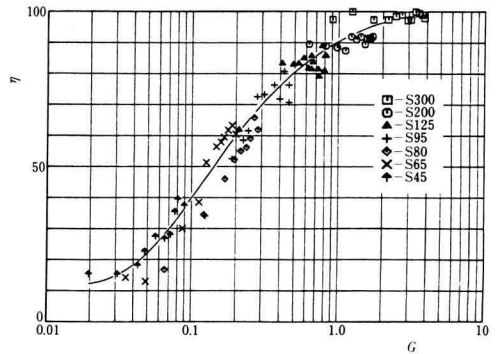
$v_s$  と捕集粒子径との関係には池森の式<sup>14)</sup> などがあるが、 $(v_0/v_s) \propto (D_1/D_0)^2$  と仮定するのは妥当であろう。



(a) C50 Cyclone



(b) C75 Cyclone



(c) C100 Cyclone

Fig. 7. Relation between collection efficiency  $\eta$  and dimensionless parameter  $G$ .

したがって、次式の  $\bar{G}$  が寸法比も考慮した捕集率を決めるパラメータとなる。

$$\bar{G} = G \cdot \left( \frac{D_1}{D_0} \right)^2 \cdot \zeta \dots\dots\dots(11)$$

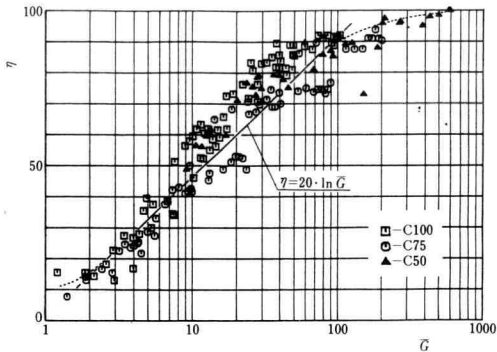


Fig. 8. Relation between collection efficiency  $\eta$  and dimensionless parameter  $\bar{G}$ .

式 (11) の  $\bar{G}$  について供試サイクロンの捕集率曲線を求めると図 8 のようになる。C75 サイクロンの  $R_e$  の大きい  $\eta$  の上昇がおさえられる範囲を除くと、各サイクロンの  $\eta$  の差異はほとんどなく、寸法比 ( $D_0/D_1$ ) と損失係数との相違による性能変化を  $\bar{G}$  で考慮できる。捕集率が約 20% から 90% の範囲で C75 の  $R_e$  の大きいところのデータを除くと、図示のごとく  $\eta$  と  $\bar{G}$  の簡単な下記の実験式が求まる。

$$\eta = 20 \cdot \ln \bar{G} \dots \dots \dots (12)$$

式 (12) より 25%, 50%, 75% の分離捕集が可能な  $\bar{G}$  の値はそれぞれ 3.49, 12.2, 42.5 である。 $R_e = 5 \times 10^4$  で C100 サイクロンを運転すると各捕集率に対応する分離可能な限界粒子径  $d_{25}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{75}$  はそれぞれ約  $40 \mu\text{m}$ ,  $80 \mu\text{m}$ ,  $140 \mu\text{m}$  となり、分級するものにくらべてかなり分級性能が悪い<sup>7)</sup>。寸法比、流入レイノルズ数が同じであれば、分離限界粒子径は代表寸法 (この場合  $D_0$ ) に比例するので、サイクロン径を 1/2 にすれば  $d_{25}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{75}$  等は上述の 1/2 になる。

分級しない液体サイクロンについては、その最適寸法、寸法効果等を今後さらに検討する必要があるが、 $G$  または  $\bar{G}$  によってある程度サイクロンの寸法効果と運転条件が決められると考える。

## 5. 結 論

本報告では分級しない基本形状の液体サイクロンの捕集性能を実験的に調べた。捕集率はサイクロンの寸法比によって左右され、とくに  $D_2/D_1$  が捕集率に及ぼす影響が大きいようである。相似サイクロンに対しては、簡単な理論的検討で導入された無次元値  $G$  によ

って捕集率が支配される。多少寸法比の異なるサイクロンに対しては寸法比も考慮した無次元値  $G$  が捕集率に対して有効なパラメータとなる。これらの  $\eta$ - $G$  または  $\eta$ - $\bar{G}$  曲線からこの種のサイクロンの寸法効果と運転条件が考慮できることを示した。

従来からの分級するものにくらべて供試サイクロンの捕集性能はかなり悪かったので、この種のサイクロンの最適形状について今後さらに検討を加える予定である。

最後に、本実験にご協力いただいた本学卒業生の神戸英樹、望月裕己両氏および有益なご助言等をいただいた本学石綿良三講師に感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) 例えば、小川、サイクロン分離器、(昭 55)、アース社
- 2) Schweitzer, P.A., Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineers, (1979), p. 4-135, McGraw-Hill.
- 3) 吉岡・堀田、化学工学, 19 巻, 12 号 (昭 30), 632 頁
- 4) 藤本、機械学会論文集, 23 巻, 133 号 (昭 32), 633 頁, 24 巻, 137 号 (昭 33), 61 頁, 67 頁, 74 頁.
- 5) 白戸・井田訳、固液分離技術、(昭 54), 243 頁, 技報堂
- 6) Papers presented at the 2nd Int. Conf. on HYDROCYCLONES, (1984), BHRA.
- 7) Day, R.W., Chem. Eng. Progress, vol. 69, No. 9 (1974), p. 67.
- 8) 例えば、Pericleous, K.A. and Rhodes, N., Int. J. Mineral Processing, No. 17 (1986), p. 23.
- 9) Bednarski, S. and Weichowski, A., 2nd Int. Conf. HYDROCYCLONES, BHRA, Paper H3 (1984).
- 10) Medronho, R.A. and Svarovsky, L., 2nd Int. Conf. HYDROCYCLONES, BHRA, Paper A1 (1984).
- 11) 遠藤、化学工学, 19 巻, 1 号 (昭 30), 42 頁.
- 12) Rietema, K., Chem. Eng. Sci., Vol. 15, (1961), p. 298.
- 13) 大気汚染研究全国協議会、除塵装置ハンドブック、(昭 39), 76 頁, コロナ社.
- 14) 例えば、池森、機械学会誌, 55 巻, 404 号 (昭 27), 570 頁.