302 テーパドラム回転式固液分離機に関する基礎研究 — 相対静止場に投入された固体粒子運動 —

朱 彤^o (鹿児島大院), 野崎 勉 (鹿児島大),
李 輝 (鹿児島大), 柳田 博宣 (鹿児島大院)

Fundamental study of tapered drum type solid-liquid separator — The motion of solid particle thrown into relative hydro-static field

Tong ZHU, Tsutomu NOZAKI, Hui LI and Hironobu YANAGITA

ABSTRACT

A new type of solid-liquid separator, called Taper Drum Rotating Separator, was proposed by one of the authors. It can efficiently separate smaller particles from the solid-liquid two-phase mixture. For visualizing the motion of the particles in the solid-liquid separator, the experimental and numerical studies were carried out. It was found that the separating time of particle depended on the diameter of particle and drum. A diameter of particle that the separating time was the shortest existed. To explain the behavior of particle motion, the motion of particle was divided into two regions in our numerical simulation. They were the drag force governing region and centrifugal force governing region. The numerical results agreed with our experimental results.

Keywords: Particle motion, Numerical simulation, Solid-liquid separator, Visualization

1. 緒 論

従来から、固液分離には液体サイクロン分離機⁽¹⁾が用いられてきたが空気サイクロンが 10^3 のオーダの密度差の分離に対し、液体サイクロンの場合 10^0 のオーダのため、その分離には自ずと限界がある。とりわけ、ヘドロのような固形分の微細粒子や比較的密度の小さい固形分の分離には、従来から用いられてきた液体サイクロン分離機は不適である。一方、連続スクロール⁽²⁾として知られる固液分離機はかなり微細な粒子の分離が可能であるが高価である。

ここで、新しく提案する分離機はテーパドラム回転式固液分離機⁽³⁾と呼ばれ、分離機は固液分離を行う分離モードと回転円筒容器内壁に付着した固形分を排出する排出モードから構成されており、ここでは、特に分離モードにおける固形粒子の挙動について述べる。ここで提案する分離機の原理は回転円筒容器中の液体の相対静止場における強い遠心力を受ける液体と固体粒子との密度差を固液分離に利用したものである。

回転円筒容器内の相対静止場に流入した固体粒子の運動は、遠心力、抗力および浮力などの影響を受けるので、一般にきわめて複雑なものである。ただし、その様相を明らかにすることは、テーパドラム回転式固液分離機的设计と性能評価に対して非常に重要である。

本研究では、回転液体中の粒子の運動特性を明らかにするために、回転円筒容器内の相対静止場に流入した単一粒

子の運動に対する数値シミュレーションと実験を行う。数値計算の際、粒子が受ける種々の力を考慮し、粒子の運動特性を調べる。実験では、粒子は中心軸から回転円筒容器壁へ運動の様子を可視化から解析し、数値計算の結果と比較する。

2. 主な記号

A	: 粒子の投影断面積	m ²
C _D	: 抗力係数	
C _L	: 揚力係数	
D _p	: 粒子径	m
F	: 粒子が受ける力	N
g	: 重力の加速度	m/s ²
m	: 質量	kg
R	: 粒子の回転半径の位置	m
Re	: レイノルズ数	
T	: 時間	s
U	: 流れの速度	m/s
v	: 粒子の速度	m/s
V	: 粒子の体積	m ³
ρ	: 密度	kg/m ³
μ	: 液体の粘度	Pa · s
ν	: 液体の動粘度	m ² /s
ω	: 液体の回転角速度	1/s

r, θ, z : 円筒座標系

添字

p, f, θ, r : 粒子、流体、円周方向及び半径方向の値をそれぞれ表す。

3. 粒子運動の数値計算

液体が満たされた回転している円筒容器を図1に示す。回転している円筒容器中の流れに関する研究結果より、その流れの流動現象は非常に複雑で未だ十分解明されていないように思われる。さらに、固体粒子を含むより複雑な現象を検討することは困難である⁽⁴⁾。本研究において、円筒容器中に液体を満たすと、回転円筒容器とその中の液体はあたかも剛体的運動をし、円筒容器中の液体の流動現象は相対静止場と考えられる。

一般に回転円筒容器の中心軸の近傍で放出された固体粒子に作用する力として、遠心力をはじめとしていくつか考えられる。これを式で表現すると、回転中流れ場内の粒子速度 $\bar{v}_p$ 及びその質量 m の一個粒子の運動方程式は、粒子に作用する力を $\bar{F}_i$ として

$$m \frac{d\bar{v}_p}{dt} = \sum \bar{F}_i, \quad (1)$$

により与えられる。ここで考慮される力として、重力、浮力、抗力、遠心力、仮想質量力、Basset力、Saffman揚力および圧力勾配に基づく力があり、力はそれぞれ

$$F_1 = m_p g = V_p \rho_p g, \quad (2)$$

$$F_2 = m_f g = V_p \rho_f g, \quad (3)$$

$$F_3 = \frac{1}{2} \rho_c C_D A_p \left| \bar{u}_f - \bar{v}_p \right| \left(\bar{u}_f - \bar{v}_p \right)^{(7)}, \quad (4)$$

$$F_4 = m \frac{v_{p\theta}^2}{R}, \quad (5)$$

$$F_5 = \frac{\rho_c V_p}{2} \left(\frac{du_f}{dt} - \frac{dv_p}{dt} \right)^{(4)(7)}, \quad (6)$$

$$F_6 = \frac{3}{2} D_p^2 \sqrt{\pi \rho_f \mu} \left[\int_0^t \frac{du_f}{\sqrt{t-t'}} dt' + \frac{(u_f - v_p)_0}{\sqrt{t}} \right]^{(7)}, \quad (7)$$

Fig.1 Forces acting on a particle in rotating drum

$$F_7 = \frac{1}{2} C_L \rho_f A_p \left| u_f - v_p \right| (u_f - v_p)^{(4)(6)} \quad (8)$$

および

$$F_8 = \rho_c V_p \left(\frac{du_f}{dt} - \frac{\mu}{\rho_c} \Delta u_f \right)^{(4)(7)} \quad (9)$$

により与えられる。ここで、回転円柱座標系 (r, θ, z) を用いて、式(2)から(9)までを式(1)に代入し、Runge-Kutta法による数値積分を行う。計算する際、計算誤差を少なくするために、微小時間刻みを1/1000秒として、逐時積分する。さらに、粘性力を計算する場合の抗力係数は、レイノルズ数より、変化し、

$$C_D = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{3}{16} Re \right) (0.5 < Re \leq 2), \quad (10)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{6}{(1 + \sqrt{Re})} + 0.4 (2 < Re \leq 10) \quad (11)$$

および

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) (10 < Re \leq 800)^{(6)} \quad (12)$$

により与えられる。ここで、

$$Re = \frac{(u_f - v_p) D_p}{\nu}, \quad (13)$$

Fig. 2 Particle traces

である。

4. 数値シミュレーションの結果および考察

数値計算の条件は実験と合わせて、回転容器の内径 $D = 180\text{mm}$ 及び回転数 $N = 250\text{rpm}$ に対して、相対静止場の回転中心近傍に投入された球形ガラスビーズ（密度 2520kg/m^3 ）について、粒子径を $0.1 \sim 5\text{mm}$ に変えて計算した。図2は粒子の相対運動軌跡を示したものである。図から粒子径が小さい程、粒子の相対運動軌跡は短くなることがわかる。これは小さい粒子の相対速度が小さいことを示す。図3は粒子径 1mm 、 2mm および 5mm における粒子の運動軌跡を円筒外部から円筒上方および側面について描いたものである。

一連の図に示すように運動軌跡に関する限り、粒子径が小さい程、運動軌跡は短くなる。しかし、図4示すように、粒子径が小さい程、必ずしも、壁面までの到達時間が短いとは限らない。すなわち、 $D = 180\text{mm}$ の回転容器壁に粒子が到達するまでの時間は 0.5mm の粒子が最も長く、 2mm の場合が最も短いことになる。これは、与えられた回転数と円筒容器径に対して、抗力が支配的な領域と遠心力が支配的な領域が存在することが数値計算の解析より明らかとなっている。

5. 実験結果との比較

図5に実験装置の本体を示す。回転容器は一定回数で

(a) $d_p = 1\text{mm}$

(b) $d_p = 2\text{mm}$

(c) $d_p = 5\text{mm}$

(d) all particles

Fig. 3 Visualization of particle motions

回転し、固体粒子を中心の管路から投入し、したから粒子の運動を下方から高速カメラで観察した。

実験用固体粒子は 1mm 、 2mm 、 3mm 及び 3.5mm の直径のガラスビーズそして密度 2520kg/m^3 の粒子を用い、ドラムの回転数は 250rpm 、 300rpm 、 400rpm 、 500rpm 及び 600rpm である。粒子運動の開始位置は回転中心から 22mm である。ここで、図6に各粒子径における容器回転数と壁面到達

Fig.4 Time and distance of particle motion

Fig.5 Experimental apparatus

Fig.6 Relationship between time of particle motion and rotating number of drum

時間の関係を実験と計算の結果を比較して示す。図に示すように、回転数にかかわらず、粒子径 2 mm の場合が最も早く回転容器壁面に到達する。この結果は計算の結果とほぼ同じである。さらに、大きい粒子の場合には実験結果は計算結果とほぼ一致しているが、1 mm 粒子の場合は容器の回転が長くなるにつれ、計算の方が実験より壁面に到達時間が短い傾向になる。これは、抗力の計算での抗力係数を粒径にかかわらず一定としており、粒径が 1 mm の場合真球度や面粗度が相対的に大きくなるためと考えられる。

6. 結 論

1. 粒子径の大小により、粘性力が支配的な領域と遠心力が支配的な領域が存在し、その領域は粒子径によって異なることが明らかとなった。
2. 同じ条件下で粒子の壁面到達時間は粒子径とともに変化し、壁面到達時間が最も短くなる粒子径が存在することが明らかとなった。本実験と計算の条件で、壁面到達時間の最も短くなる粒子径は 2 mm である。
3. 粒子径が小さく、円筒容器回転数の小さい場合は、計算結果と実験結果に不一致が見られるが、大きい粒子の場合は、両者はほぼ一致する。

参考文献

- 1) 日本機械学会、[機械工学便覧] C8 環境装置、p70-72、1989.
- 2) Records, F.A, Sedimenting centrifuges, p.201.
- 3) 野崎 勉: 資源・素材'98 (北九州)、p55-58、1998.
- 4) 渡辺 敬三・ほか2名、機論、62-603、B (1996)・3084.
- 5) 榊 和彦・ほか4名、ターボ機械、23-6、(1995.6)46-51.
- 6) 山本 富士夫・ほか4名、機論、57-524、B(1991-10)3414-319.
- 7) Clayton Crowe, Martin Sommerfeld, Yutaka Tsuji, [MULTIPHASE FLOWS with DROPLETS and PARTICLES], CRC press LLC, 1998.