$K_{i,n}$: volatility for component i in n th plate	[—]	first liquid phase for binary system	[—]
k : Boltzman's constant	[cal./deg.]	$\bar{x}_i^*$: in the second liquid phase	[—]
L_n : moles of liquid from n th plate	[mole]	$x_{i,D}$: composition of top product	[—]
p_i : partial pressure in vapor phase	[mmHg]	$x_{i,F}$: column feed	
q : feed thermal condition	[—]	$x_{i,n}$: on the n th plate	
q_i : effective surface of component i	[—]	$x_{i,W}$: bottom product	
R : reflux ratio in rectification section	[—]	$x_{i,SF}$: solvent feed	
S : moles of solvent feed	[mole]	y_i : mole fraction in vapour phase	[—]
s : moles of the first liquid phase per mole of mixture	[—]	$y_{i,n}$: mole fraction of composition i in vapor from n th plate	[—]
T : absolute temperature	[°K]	z : coordination number	[—]
t : temperature	[°C]	z_i : composition of mixture or feed	[—]
V_n : moles of vapour leaving n th plate	[mole]	λ_i : absolute activity in the first liquid phase	[—]
W : moles of residue from column bottom	[mole]	$\bar{\lambda}_i$: in the second liquid phase	[—]
w_{ij} : equivalent energy gained by mixing i - j	[cal.]	λ_0 : absolute activity of pure component	[—]
x_i : mole fraction of component i in the first liquid phase	[—]	ϕ_i : $q_i x_i / \sum q_i x_i$	[—]
$\bar{x}_i$: in the second liquid phase	[—]	$\bar{\phi}_i$: $q_i \bar{x}_i / \sum q_i \bar{x}_i$	[—]
x_i^* : mole fraction of component i in the		ϕ_{ij} : function defined by Eq.(2)	[—]
		$(\phi_{ij})_k$: $\partial \phi_{ij} / \partial \phi_k$	[—]
		π : total pressure	[mmHg]

Literature cited

- 1) Ellis, S. R. M. and Garbett, R. D.: *Ind. Eng. Chem.*, **52**, 385 (1960)
- 2) Griswold and Kleeke: *Ind. Eng. Chem.*, **42**, 1246 (1950)
- 3) Hiranuma, M. and Kugo, M.: *Chem. Eng., Japan*, **29**, 681 (1965)
- 4) Hiranuma, M. and Kugo, M.: *ibid.*, **30**, 311 (1966)
- 5) Hiranuma, M. and Kugo, M.: *ibid.*, **30**, 613 (1966)
- 6) 'Kagaku Kōgaku Benran' (Maruzen, 1958)
- 7) 'Kagaku Benran' (Maruzen, 1958)
- 8) Yorizane, M. and Yoshimura, N.: The 31th Annual Meeting of the Soc. of Chem. Eng., Japan, Preprint, 148 (1966)

流通式回転円筒内の粉粒体の挙動*

——粒子の滞留時間分布におよぼす分離帯の影響——

杉本 益規**・遠藤 一夫**
田中 達夫**

北海道大学工学部 合成化学工学科**

緒 言

チューブミルをはじめ、ロータリキルン、回転乾燥機などにみられるように、粉粒体の連続処理を行なう装置

には、回転円筒が多く使用されている。これらの装置内を通過する粉粒体の滞留時間分布を推定することは粉碎、反応などを伴う装置の特性を知るために重要な問題である。

筆者らは先に流通式回転円筒内の異径2粒子混合物の分離と排出変動に関して考察を行なったが¹⁾、本報ではこの条件のもとで形成された分離帯が、円筒内を通過する粒子の滞留時間分布にいかなる影響を及ぼすかを検討した。その結果、分離帯の発生前と、その後では粒子の

* <Behavior of Granular Materials Flowing through a Rotary Cylinder —Effects of Segregation Zones on the Residence Time Distribution of Particles—>
Received on May 30, 1966

昭和41年4月化学工学協会第31年会(東京)にて発表
** Masunori Sugimoto, Kazuo Endoh and Tatsuo Tanaka
(Dept. of Chem. Process Eng., Hokkaido Univ., Sapporo)

Fig. 1 Comparison of frequency of tracer C_m , vs. time t , for the discharge of homogeneous particles and two component mixture

Table 1 Experimental conditions

Series	Cylinder length L [mm]	Rotating speed n [r.p.m.]	Particles	Mixing ratio m [-]
1	300	25.5	B : A C : A	≈ 1.0
	600	18.5		
	1200	13.8		
		8.5		
2	300	25.5	B : A C : A	0~1.0
	600	18.5		
	1200	13.5		
		8.5		
3	300	25.5	B : A C : A	≈ 1.0
	600	18.5		
	1200	13.5		
		8.5		
4	300	25.5	A only; 0	
	600	18.5		
	900	13.8		
	1200	8.5		

軸方向に分散する挙動が異なることを認め、見かけの滞留時間分布と平均滞留時間との実験的相関を得、この関係のある程度、理論的に推定できることを明らかにした。さらに、2成分系粒子の挙動と操作条件との関係を実験的に求めた。

1. 実験装置と方法

試料の連続供給部を多少改良した以外は実験装置の概略は前報¹⁾と同様である。第一段ホッパーの下部に連続的瞬間流量検出器を設置し、試料の供給速度が一定であ

ることを確かめた。粒子の滞留時間分布の解析に必要なトレーサの投入口を円筒入口近くの第2段ホッパー出口に設けた。円筒の回転機構や粒子の排出口の構造は前報と全く同様、開口比1/2のオリフィスを用いた。試料はいずれも川砂を使用し、平均粒径1.90mm(8~12mesh-A粒子とする)、0.61mm(24~32mesh-B粒子)および0.43(32~42mesh-C粒子)の3種を選び、2成分粒子の組合せはTable 1に示すとおりである。粒子B、Cの粒子Aに対する粒径比 r/R はそれぞれ0.32、0.22となり、粒径比に関する分離帯の発生条件を満足する。混合粒子の滞留時間分布の解析は大粒子(A粒子)に着目して行ない、トレーサにはA粒子と同一粒径の方解石を赤色インキで着色して使用した。方解石の真密度、安息角は川砂とはほぼ同じであった。

実験はその目的により、次の4種について行なった。それらの実験条件はTable 1に示す。

【実験1】 分離帯発生条件下にある粒子の滞留時間分布と平均滞留時間との関係。

【実験2】 滞留時間分布と混合比 m との関係。

【実験3】 分離帯発生条件下にある粒子の滞留時間分布と円筒回転速度との関係。

【実験4】 単一成分粒子(A粒子)のみの滞留時間分布と操作変数との関係(2成分粒子との対比実験)。

定常に達したのち、瞬間的にトレーサ粒子20grを投入し、円筒出口部において30秒間ずつ連続的に全排出粒子を採取した。各時間に採取された粒子から、着色されたトレーサ粒子を分離し、この重量から各時間におけるトレーサ濃度を算出した。その算出には混合粒子重量基準と大粒子重量基準の両方法を採用した。なお、対比実験として【実験4】を行なった。

2. 実験結果と考察

2.1 分離帯発生と粒子の滞留時間分布

2.1.1 操作条件と実験結果 Fig. 1は混合粒子重量基準によるトレーサ排出濃度頻度分布 $C_m[\%]=f(t_i)$ と排出時間 t [min]との実験結果の代表例である。大粒子単一成分の場合についても同図に示してある。これらはいずれも円筒の長さ L をパラメータにとっている。 $m \approx 1.0$ にある混合粒子の実験結果では、 $L=30$ cmの円筒出口においてすでに分離帯の発生が観察された。同図より次のことが推定される。単一成分系のトレーサ排出濃度分布は L の増加に伴い、かなり変化しているが、2成分粒子のそれはあまり変化が認められない。すなわち、 $L \geq 30$ cmでは粒子の軸方向分散活動が著しく阻止されている。これは分離帯発生によるものと考えられる。また2成分粒子のトレーサの排出頻度分布に、断続した極大値が認められるが、この不連続的なトレーサ

の排出状態も分離帯の発生による大粒子の不連続的排出のためである。

2・1・2 滞留時間分布の定量化に関する一考察

流通式回転円筒入口に同時に投入されたトレーサ粒子の滞留時間分布は、時間 t とその時間に排出されたトレーサ濃度の排出頻度との関係で示される。すなわち、その出口近くにおいて粒子の流れに垂直な断面に存在する粒子は同時に排出され、観測される。したがって、時間 t の観測量は粒子の円筒断面の分布に無関係に平均化された平均濃度として得られる。筆者らは、このように回転円筒の排出頻度で観測される粒子の滞留時間分布が半径方向の混合の有無に必ずしも関係せず、各粒子の軸方向の移動速度の差によって生ずるものとする。したがって本報告では、上述のごとく得られた滞留時間分布の定量化として、排出時間 t にもとづく分散 σ_t^2 [min²] から軸方向分散係数、 Φ [cm²/min] を次式のごとく定義する。

$$\Phi = \sigma_t^2 \left(\frac{\bar{u}^2}{\bar{\theta}} \right) \quad (1)$$

ただし、 $\sigma_t^2 = \sum f(t_i)(t_i - \bar{\theta})^2$

ここで、 $\bar{u}$ は粒子群の軸方向平均移動速度 [cm/min]、 $\bar{\theta}$ は粒子の円筒内の平均滞留時間 [min]、 $f(t_i)$ はトレーサの排出頻度 [%]、 $\sum f(t_i) = 100$ [%]。なお上式は、粒子が半径方向に完全混合するものと仮定した場合には、いわゆる、拡散方程式の意味での拡散係数の2倍の値をとることになる。

2・1・3 2成分系粒子の流動モデルによる実験結果の考察 Fig. 1に示したように、単一成分の排出頻度曲線は単峰性曲線 (single modal) を示す。これらの累積率 $\sum f(t_i)$ と時間 t との関係に対数確率紙上に点綴すると Fig. 2-II となる。同図の直線関係より、単一成分系の排出頻度分布は対数確率分布関数で近似されることがわかる。したがって、これらの直線より、 $\sum f(t_i) = 50$, および 16 [%] の t の読みから、その分布の標準偏差値 σ [-] および分散 σ^2 [-] を算出することができ^{1,2)}、この値は数値計算による値とほぼ一致することが確かめられた。グラフより得た σ^2 から、Eq.(1)の軸方向分散係数 Φ は次式によって算出できる。

$$\Phi = \sigma^2 \left(\frac{\bar{u}^2 \bar{\theta}}{M_0^2} \right) \quad (2)$$

ただし、 $\sigma^2 = \sigma_t^2 / \bar{\theta}^2$

$$M_0 = \log_{10} e = 0.4343 \dots$$

なお、本実験における $\bar{\theta}$ は $\sum f(t_i) = 50$ [%] を与える時間 t を引用する。

次に、2成分系粒子のトレーサ排出頻度は、Fig. 1に示すごとく、多峰性曲線 (multi modal) を示している。しかし、その全体的傾向は単峰性の原形をほぼ保っている。この2成分系粒子の排出頻度累積率 $\sum f(t_i)$ を

Fig. 2 Cumulative tracer percent $\sum f(t_i)$, vs. time t , on log-normal probability paper for the discharge. I: two component mixture, II: homogeneous particles. t_{16} or t_{50} : time [min.] when $\sum f(t_i)$ is 16 or 50 [%] on a straight line

単一成分系粒子の場合と同様に対数確率紙上に点綴すると Fig. 2-I となる。同図でもわかるように、これらの曲線は、わずかに階段状の部分が認められるが、これは分離帯の発生による大粒子の排出速度の変動によるものである。上述のごとく、排出時に分離帯の発生がなく、排出速度の変動がなければ、階段状の実験値も図示の直線によって近似されるものと考えられる。粒子の軸方向への分散活動を微視的に考えるならば、Fig. 1に示すような多峰性曲線を、Fig. 2-Iに示すような直線によって、単峰性曲線に近似することは、本来かなり無理があると考えられる。しかし、本来の単峰性分布曲線が、軸方向の分布の広がり幅に対して小さな規則的な変動、すなわち局所的な偏析作用によって多峰性の形状を示したものと解釈するならば、軸方向への分散を滞留時間分布の巨視的な傾向として表わそうとする本報の立場では、Fig. 2-Iの直線近似を有効なものとする。なお、滞留時間分布が偏析の時間スケールに比して十分大きな時間スケールを有するならば、この直線近似はより有効なものとする。以下本報では多峰性曲線に対しても、上述のごとく直線近似により、単一成分系と同様に、Eq.(2)より σ_t^2 および Φ_{ap} を算出した。なお多峰性曲線の一部について、実測値より数値計算を用いて Φ_{ap} を算出した結果、直線近似より得た Φ_{ap} とほぼ一致した結果を得た。なお、 Φ_{ap} は出口部で得た σ_t^2 より算出した2成分系の場合の Φ である。

Eq.(1)の定義にもとづき、Eq.(2)より、単一成分粒子の軸方向分散係数 Φ [cm²/min] を算出した。その結果を $\bar{\theta}$ について、両対数紙上に点綴すると Fig. 3 となる。同図より、 n が一定ならば Φ は $\bar{\theta}$ に関係なくは

Fig. 3 Logarithmic plot of experimental data ϕ_1 vs. $\bar{\theta}$ for homogeneous particles

Fig. 4 Logarithmic plot of experimental data ϕ_{ap} vs. $\bar{\theta}$ for the two component mixtures ($m \approx 1.0$), as compared with Eq. (4)

Fig. 5 The flow model of two component mixture passing through a rotary cylinder

ば一定の値をとる。 $n=25.5$ [r.p.m.]では $\phi_1=8.6$ であるのに対して、 $n=13.8$ [r.p.m.]では $\phi_1=6.0$ と小さくなる。 ϕ_1 は回転速度の増加に伴い増加することが認められる。

一方、円筒出口で観測された結果による2成分系粒子の見かけの軸方向分散係数 ϕ_{ap} と $\bar{\theta}$ の関係を両対数紙に点綴すると、Fig. 4となる。いずれも円筒出口では分離帯を観察したものである。 $n=25.5$ および13.8[r.p.m.]のいずれも、 ϕ_{ap} は $\bar{\theta}$ の増加にともない減少している。その ϕ_{ap} の減少の傾向は、両回転速度とともに、図示の直線のごとく $\bar{\theta}$ に逆比例関係にて近似することができよう。このような、 ϕ_1 は $\bar{\theta}$ には無関係に一定値を

示すが、分離帯発生条件下での ϕ_{ap} が $\bar{\theta}$ によって変化する結果を、Fig. 5のごとく2成分系粒子の流動モデルによって考察した。

供給された2成分粒子が分離帯を形成するに至るまでの時間を θ_M [min]とし、その間に粒子が移動した入口からの距離を L_M [cm]とし、これを非分離帯領域では単一成分系の場合と同様に、2成分系の大粒子の軸方向への分散活動は $\bar{\theta}$ に無関係に一定とし、そのときの軸方向分散係数 ϕ_n [cm²/min]と置く。また分離帯発生後では、分離帯内部での軸方向分散があるととしても、分離帯相互の交流はほとんどないものと仮定する。したがって、分離帯領域では、局所的な偏析を伴ってはいるが、 $t=\theta_M$ で観測される分散量はそのまま保たれて円筒出口に排出されと考えられるから、長さ L [cm]の回転円筒内を平均滞留時間 $\bar{\theta}(>\theta_M)$ を経て排出された粒子の見かけ軸方向分散係数 ϕ_{ap} は次のようになる。

仮定により、

$$(\sigma_i^2)_{t=\theta_M} = (\sigma_i^2)_{t=\bar{\theta}}$$

Eq.(1)より、

$$(\sigma_i^2)_{t=\theta_M} = \phi_M \left(\frac{\bar{\theta}_M}{\bar{u}_M^2} \right), \quad (\sigma_i^2)_{t=\bar{\theta}} = \phi_{ap} \left(\frac{\bar{\theta}}{\bar{u}^2} \right)$$

したがって

$$\phi_{ap} = \left(\frac{\theta_M}{\bar{\theta}} \right) \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_M} \right)^2 \phi_M \quad (\bar{\theta} > \theta_M) \quad (3)$$

ここで、同一円筒内において、非分離帯領域の粒子の軸方向平均移動速度 $\bar{u}_M$ は、流動機構の異なる分離帯領域での粒子の軸方向平均移動速度 $\bar{u}$ に等しいと仮定すれば、Eq.(3)は、

$$\phi_{ap} = \left(\frac{\theta_M}{\bar{\theta}} \right) \phi_M = \frac{1}{\bar{\theta}} (\theta_M \cdot \phi_M) \quad (4)$$

すなわち、上式は、 $\bar{\theta} > \theta_M$ では、分離帯発生によって見かけの軸方向分散係数 ϕ_{ap} は、 $(\bar{\theta}_M \phi_M)$ が回転速度によって一定ならば、 $\bar{\theta}$ に逆比例して減少することになる。これは、Fig. 4の実験結果を満足している。一方、 $n=25.5$ における非分離帯領域の ϕ_M について、次式の実験式を得た。

$$\phi_M = 35.4m + 6.6 \quad (5e)$$

なお、上式の実験的検討の詳細は本報2・2・1に示す。Eq.(5e)に、 $n=25.5$ の実験値 $m=0.96$ を代入すると、 $\phi_M=40.6$ [cm²/min]を得る。これはFig. 4に示せば、 $0 < \bar{\theta} \leq \theta_M$ では、直線 ϕ_M となる。同図上の直線の交点より、 $\bar{\theta}_M \approx 3$ [min]となる。したがって、 $n=25.5$ 、 $m=0.96$ の場合では、供給された混合粒子は、 $0 < \bar{\theta} < \theta_M$ では、 $\phi_M=40.6$ で軸方向に分散し、 $\bar{\theta} > \theta_M$ では分離帯の発生のために $\phi \approx 0$ となり、 ϕ_{ap} はEq.(5)にしたがい減少する。なお、 $\theta_M \approx 3$ および各実験での $\bar{u}$ の平均値にもとづき、 $L_M \approx 16.5$ [cm]が得られた。これは円筒内の粒子の挙動の観察より得た $L_M \approx 9 \sim 15$ [cm]の値にかなり近い値であるといえよう。なお、同回転速

度の Φ_1 , Φ_M を比較すると, $n=25.5$ では, $m \approx 1.0$ における $\Phi_M=40.6$ に対し, $\Phi_1=8.6$ となって Φ_M は Φ_1 の約 5 倍となっている。すなわち, 小粒子の混合によって, 分離帯のできる前の大粒子の軸方向分散活動は著しく活発になることが示されている。

2.2 2成分系粒子の滞留時間分布と操作変数

2.2.1 混合比 m との関係

m と Φ_M , および m と Φ_{ap} との関係を [実験 2] によってもとめた。 $L=30$ cm の円筒によって得た m と Φ_{ap} との関係は, Fig. 6 となる。同図の黒点 (solid) は分離帯が観察されなかった実験値であり, 白点 (open) は分離帯が観察されたものである。なお, 付記された数値は $\bar{\theta}$ である。同図より, $m \leq 0.6$ では黒点の散乱が目だが, m のこの範囲では 2 成分系の挙動が不安定であることを示す。しかし, この散乱も点線で示すごとく 2 つのグループ A, B に区別することができる。B 群は分離帯の観測された実験群 (白点群) に属するものとして取り扱うことができる。また A 群の Φ_{ap} は B 群のそれに比して一般に大きい値である。 $m > m_c$ ならば, 明確な分離帯が観測されるはずであろう。しかしながら, 円筒の壁効果などによっては, 分離帯の発生条件に関して筆者ら⁴⁾ の仮定した大粒子の理想的な配列が小粒子によってこわされ, この場合の分離帯は, 前報に示したように明瞭には観測されにくくなる。その要因が小となれば, 分離帯が生ずるか, または粒子層内部にこれと類似した現象が生じ, 粒子の軸方向分散を妨げるものと考えられる。このような不安定な現象は混合比による分離帯発生の際条件に近いほど生じやすいと推定される。したがって, この種の不安定な状態で, なおかつ粒子層内部で分離帯に類似した現象が存在しているならば, 分離帯が観測されなくても, $\bar{\theta} > \theta_M$ では軸方向へ分散は阻止され, Φ_{ap} は Eq. (4) にしたがって, Φ_M より小となる。一方, この状態で粒子層内外ともに分離が全く存在しない場合の Φ_{ap} は Φ_M と同様に, $\bar{\theta}$ に無関係に一定と考えられ, このときの Φ_{ap} は Φ_M と置くことができ, 一般に $\bar{\theta} > \theta_M$ では m が等しくても, $\Phi_{ap} < \Phi_M$ となる。以上の考察から, Fig. 6 のデータのうち, A 群の Φ_{ap} を Φ_M とし, B 群のそれをそのまま Φ_{ap} とすれば, 上述の Eq. (4) によってその相関が与えられる。すなわち, Φ_M は Φ_1 と同様に $\bar{\theta}$ に無関係に一定値と考え, B 群の Φ_{ap} は $\bar{\theta}$ の増加に伴い減少したものと考えれば, $\bar{\theta}$ の差による Φ_{ap} の乱れは次式によって補正される。その補正值を Φ_{ap}^* とすれば,

$$\Phi_{ap}^* = \frac{\bar{\theta}}{\bar{\theta}^*} \Phi_{ap} = \frac{\theta_M}{\bar{\theta}^*} \cdot \Phi_M \quad (\theta_M < \bar{\theta}) \quad (6)$$

ここで $\bar{\theta}^*$ は標準となる平均滞留時間である。本実験では, B 群の $\bar{\theta}$ の平均値として, $\bar{\theta}^*=5.54$ [min] を採用した。Fig. 7 は Φ_M および Eq. (6) による Φ_{ap}^* と m の関係を示したものである。同図に示されたように Φ_M

Fig. 6 Experimental results Φ_{ap} vs. $\bar{\theta}$ (for $L=30$, $n=25.5$), they may be classified into group A and B. Number near the point denotes its average residence time [min.] in a rotary cylinder. solid: without segregation zone, open: with segregation zones

Fig. 7 Replotted experimental data, Φ_M or Φ_{ap}^* , standardized at $\bar{\theta}^*=5.54$ [min.] vs. m .

および Φ_{ap} と m との相関は異なる傾向を示し, Φ_M 対 m は m のごく小さい値を除いては直線 I で近似される。その実験式は上述の Eq. (5e) となる。一方, B 群の Φ_{ap} と m の関係は直線 II で近似され, $m_c \approx 0.15$ とすれば, $m > 0.15$ において実験式 Eq. (7e) が得られる。

$$\Phi_{ap}^* = (\theta_M/5.54) \Phi_M = 19m + 3.6 \quad (7e)$$

Eq. (5e) と (7e) より, θ_M と m の関係は,

Fig. 8 Final correlation of Φ_M or Φ_M^* at $\bar{\theta}^* = \theta_M = 2.97$ and m

Fig. 9 The effect of the rotating speed on the axial dispersion of two component mixtures ($m \approx 1.0$), as compared with homogeneous particles

$$\theta_M = 5.54 \left(\frac{\Phi_{ap}}{\Phi_M} \right) = 2.97 \left(\frac{m + 0.190}{m + 0.187} \right) \approx 2.97 \quad (m_c \approx 0.15 < m \leq 1.0) \quad (8e)$$

となり、本実験範囲では、 m に関せず、 $\theta_M \approx 2.97$ [min] となる。この値は Fig. 4 に示した $\theta_M \approx 3$ [min] とよく一致する。Fig. 8 は Eq. (6) にしたがって、 $n = 25.5$ の条件を満たす全ての実験結果を $\bar{\theta}^* = \theta_M = 2.97$ [min] とした Φ_{ap}^* を算出し、点綴したものである。 $\bar{\theta}^* = \theta_M$ における Φ_{ap}^* は $\bar{\theta}_M$ が m に無関係となることから、全実験における分離帯発生直前の軸方向分散係数 Φ_M に等しい

はずである。したがって、これを Φ_M^* とおけば、同図に示すごとく、 Φ_M と m の関係の直線上に Φ_M^* 対 m の関係がほぼ一致し、Eq. (5e) となる。この結果は、 Φ_M と m の実験式 Eq. (5e) の精度を保証し、 θ_M は m に無関係であることをうらづけてもいる。また混合比 m と円筒内の粒子の挙動においては、上述の考察と同様な結果となる。すなわち、 $m_c < m \leq 0.6$ では粒子の挙動は著しく不安定であり、分離帯が存在する場合もあり、全く存在せず混合状態にある場合もあり、一種の分離帯発生の遷移領域が存在すると考えられる。

2.2.2 回転速度 n の影響 2成分系の軸方向分散量を示す尺度として、 $\bar{\theta} \cdot \Phi_{ap} (= \theta_M \Phi_M)$ をとり、その回転速度 n との関係を検討した。Fig. 4 でもわかるように $\bar{\theta} \cdot \Phi_{ap}$ は m と n によって変化するが、 $\bar{\theta}$ には無関係である。したがって Fig. 9 は $n \approx 1.0$ のときの N_c と $(\bar{\theta} \Phi_{ap})$ との関係を示したものである。 $N_c [-]$ は臨界回転速度比である。また大粒子単一成分の場合と比較するために Φ_1 と N_c との関係も同図に示した。 N_c に関して $(\bar{\theta} \cdot \Phi_{ap})$ と Φ_1 とを同一基準で比較することはできないが、同図より N_c に対する $(\bar{\theta} \cdot \Phi_{ap})$ の増加は Φ_1 のそれとほぼ同一傾向を示している。これより、2成分系の場合の軸方向分散活動も分離帯ができる前では n の増加とともに活発になるものと推定できる。なお、 Φ_1 と n との関係は筆者らによって得られた次元解析の結果³⁾ と定性的に一致している。

2.2.3 粒径比 r/R の影響 本実験では $r/R = 0.22$ と 0.32 の2種について行なったが、上述の実験結果を通じてわかるように、この範囲の粒径比の差における分離帯発生条件では2成分系の軸方向分散活動はほとんど差異がないといえよう。

結 言

1) 半径方向の混合に無関係に生ずる滞留時間分布の定量的表現として、軸方向分散係数 Φ を次式で定義した。

$$\Phi = \sigma_t^2 \left(\frac{\bar{u}^2}{\bar{\theta}} \right)$$

2) 分離帯の発生条件にある2成分系粒子の軸方向分散活動は分離帯の発生により、大きく阻止される。長さ L の円筒の出口で観測される。粒子の滞留時間分布を1) で定義された軸方向分散係数によって示すと次式の関係で近似され、実験的にもよく満足された。

$$\Phi_{ap} = \left(\frac{\theta_M}{\bar{\theta}} \right) \Phi_M$$

なお、 θ_M は回転速度が一定ならば、2成分系粒子の混合比に無関係にほぼ一定値をとることが推定された。

3) 分離帯発生条件下にある2成分系粒子混合物の非

分離帯領域における大粒子の軸方向分散係数 ϕ_M は小粒子の混合によって増大する。

〔付 記〕 本実験に御協力された当時学生の、片田和生、田川征敏の両君に感謝の意を表します。

Nomenclature

C_m : frequency of tracer concentration in the discharge	[%]	θ : average residence time	[min]
$f(t_i)$: frequency of tracer concentration with respect to t_i	[—]	$\bar{\theta}^*$: standardized average residence time	[min]
L : length of a rotating cylinder	[cm]	θ_M : average residence time in mixing zone	[min]
LM : length of a mixing zone in a cylinder	[cm]	Φ_1 : axial dispersion coefficient of homogeneous particles	[cm ² /min]
m : mixing weight ratio	[—]	Φ_{ap} : apparent axial dispersion coefficient of mixtures, observed at the outlet	[cm ² /min]
m_c : critical mixing ratio	[—]	Φ_{ap}^* : estimated axial dispersion coefficient of mixtures with segregation zone for standardized average residence time	[cm ² /min]
n : rotating speed of a cylinder	[r. p. m.]	Φ : axial dispersion coefficient of particles in a rotary cylinder	[cm ² /min]
N_c : critical speed ratio	[—]	Φ_M : average axial dispersion coefficient in a mixing zone	[cm ² /min]
r/R : size (radius) ratio of two component mixtures	[—]	Φ_M^* : estimated axial dispersion coefficient in a mixing zone at θ_M	[cm ² /min]
t : time	[min]		
$\bar{u}$: average axial velocity of particles in a rotary cylinder	[cm/min]		
$\Sigma f(t_i)$: cumulative tracer concentration for the discharge	[%]		
σ : standard deviation	[—]		
σ^2 : variance	[—]		
σ_t^2 : variance with the dimension of time	[—]		

Literature cited

- 1) Mori, Y., Jimbo, G. and Yamazaki, M.: *Chem. Eng. (Japan)*, **28**, 204 (1964)
- 2) Smith, J. E. and Jordan, M. L.: *J. Colloid Sci.*, **19**, 549 (1964)
- 3) Sugimoto, M. and Tanaka, T.: the Meeting of Soc. of Chem. Engrs. (Japan), Hamamatsu, Oct. (1961); *Zement-Kalk-Gips*, **52**, 521 (1963)
- 4) Sugimoto, M., Endoh, K. and Tanaka, T.: *Chem. Eng. (Japan)*, **30**, 427 (1966)

電界を加えた場合の水平流式矩形沈降槽における分離効率*

油 川 博**
山形大学工学部 化学工学科**

緒 言

従来の沈降濃縮は、原理的には分散粒子に作用する重力または遠心力を利用したものである。したがって、沈降速度の小さい微粒子をより能率的に分離するために、

凝集剤の添加および緩速攪拌によってフロックを生成させるとかまたは回転速度を大にして遠心力を増大する方法などが行なわれている。

本研究は、凝集効果および遠心効果による分離促進法とは趣きを異にし、分散粒子と分散媒の間に生ずる界面動電現象によって効果的な沈殿濃縮操作を見いだすことを目的としたものである。電界を加えた場合のスラリ回分沈降特性に関する著者らの研究^{1,2)}によれば、電界を加えることによって沈降速度および最大圧縮濃度は重力

* <Settling Efficiency of Slurry Impressed with Voltage by the Use of a Rectangular Settling Tank>

Received on June 14, 1965

** Hiroshi Yukawa (Dept. of Chem. Eng., Yamagata University, Yamagata)

無限希釈における活量係数の迅速測定法 (広瀬泰雄・飯野正・平岩 宣・平田正道, 化学工学, 31, 123~126 (1967))

気液平衡の推算のためには2成分系の無限希釈における活量係数は重要である。気液両相の試料は従来の循環型の装置より採取するが、ガスクロマトグラフを用いて試料を分析する際の手段を簡易化したのでここに報告する。2成分系1-2において成分1の濃度が非常に低い範囲では成分1と2のピーク面積の比と成分の量の比の間には直線関係が成り立つ。また組成計算を行う場合成分1は無視できる。この事を利用して無限希釈の活量係数を決定する。この方法の特長は次の如くである。すなわちガスクロマトグラフを用いて分析するが検量線は不要であり、固定相の種類および操作条件に無関係であるということである。

充填物材質の濡れ表面積におよぼす影響について (恩田格三郎・竹内 寛・小山恭章, 化学工学, 31, 126~131 (1967))

各種充填物の濡れ表面積および充填物材質の接触角が測定された。その結果、ガラス、磁器、塩ビ樹脂に対して得られた臨界表面張力を、充填物濡れの表面効果として導入することにより、充填塔の a_w を Eq.(10) により相関し得た。この a_w により、充填塔の k_L が Eq.(12) で相関づけられる。これら両式からの k_L と a_w を用いれば、液側容量係数 k_{La} が、任意の充填物および系に対して、 $\pm 20\%$ 内で推算し得ることを明らかにした。

側流を伴う多成分系蒸留計算 (山田幾徳・杉江日出澄・岩田隆彦, 化学工学, 31, 134~139 (1967))

理想塔における側流を伴う多成分系蒸留操作を解析して、筆者らは任意段を去る液組成の理論解を末端組成の関数として導き、原料状態、それぞれの理論段数、還流比およびそれぞれの抜出速度などの与えられた操作変数のもとに連続蒸留に対する新しい収束法を提出した。この方法は、単に末端組成は原料組成に等しいという一つの計算仮定を用いるという点で Lyster その他の方法より便利である。

多成分系非理想溶液蒸留の一計算法 (平沼充安, 久郷昌夫, 化学工学, 31, 140~145 (1967))

筆者らの式を用いる場合、1) 2液相を生ずる範囲の気液平衡、2) フラッシュ計算、3) 多成分系非理想溶液蒸留の反復計算による解、についての計算法を示した。

また、組成既知の試料による実測沸点をその計算値と照合することから気液平衡推算値の評価に役立つことを併せて提案する。

流通式回転円筒内を通過する粉粒体の挙動——粒子の滞留時間分布におよぼす分離帯の影響—— (杉本益規・遠藤 一夫・田中達夫, 化学工学, 31, 145~151 (1967))

流通式回転円筒内を通過する異性2粒子混合物の分離帯が、そこを通過する粒子の滞留時間分布におよぼす影響を検討した。分離帯発生前の大粒子の軸方向分散は小粒子の混合によって増大するが、分離帯の形成後では、その分散は阻止されることが明らかとなった。このような条件の粒子の見かけ軸方向分散活動は、円筒内の粒子の流動機構に、2,3の仮定をすることによって、ある程度推定された。

電界を加えた場合の水平流式矩形沈降槽における分離効率 (油川 博, 化学工学, 31, 151~157 (1967))

著者らは、スラリーに電界を加えた場合、スラリー中の粒子沈降速度は相当に増大し、さらに重力沈降における最終濃度より一層濃縮されることを見出した。スラリーの有するこの性質が濃縮装置に応用されるならば、沈降濃縮効率は増進されるものと思われる。このような濃縮装置の設計に必要な資料を得るためにこの研究を行なった。長水路型矩形沈降槽および懸濁粒子としてゲレーが本実験に使用された。得られた実験結果は次のようなものである。

- 1) 沈降効率 η_s と電界強度の関係は、(13)式で表わされる。
- (13)式は、 η_s は E に比例することを示す。
- 2) η_s と電力 (P) の関係は (19)式で表わされる。(19)式は、 η_s が (P)^{1/4} に比例することを示す。
- 3) (13)式および (19)式は、このような濃縮装置の設計方程式として利用される。

繊維充填層による煙霧質の透過——低 Re 数における衝突効率について—— (吉岡直哉・江見 準・福島孝彦, 化学工学, 31, 157~163 (1967))

繊維充填層で煙霧質を透過する際、円筒まわりの流れが粘性流で ($Re \leq 1$)、しかも慣性支配となる場合が多い。粘性流領域では Davies が $Re=0.2$ につき慣性衝突効率を求めているが、 Re を変化した研究はいまだない。筆者らは円筒に向かう粒子の軌跡を求める微分方程式を電子計算機 KDCI で解き、効率を Re 数、慣性パラメータ、さきぎりパラメータの関数として求めた。結果は実験値とかなり一致する傾向を示した。

外部表面における物質移動と反応を考慮した総括触媒有効係数とその形状相関性 (笠岡成光・阪田祐作, 化学工学, 31, 164~171 (1967))

外部表面における物質移動と反応を考慮して、無限平板、無限円柱、無限リング、有限円柱、有限リング、球、球殻などの各形状触媒の等温1次反応系に対する総括有効係数の解析解を導出した。そして、外部物質移動と外部表面反応の総括有効係数におよぼす影響が詳細に評価された。

さらに、各総括有効係数の形状相関性が (16)~(18)式を用いて検討された。その結果として、外部抵抗が増加すればするほど、形状-相関の精度は良好になることが認められた。例えば、 $\sigma=1$, $N_m=1$ の場合には各総括有効係数は、相互に、非常に近似する。

また、 $\phi > 5$ では、各総括有効係数は触媒形状に無関係に、精度よく相関される。

酸性流動液による鋼鉄管の腐食 (末沢慶忠・篠原孝順・山口雅治, 化学工学, 31, 171~177 (1967))

酸性流動液による鋼鉄管の腐食試験を行ない、設計学的見地から解析するとともに、鋼鉄腐食の機構についても考察を加え、下記の結果を得た。

- 1) 初期の短期間における鋼鉄の腐食速度は、軟鋼の場合と同様、経時的に増加する。
- 2) しかし、その時間を経過すると逆に腐食速度は減少しはじめ、これは腐食面に残滓層が形成されて、その成長にともなって Fe^{++} の拡散抵抗となるためである。
- 3) この腐食速度減少段階を表わす実験式をえた。
- 4) 曲管において、侵食量の局所差は認められない。
- 5) 鋼鉄管の腐れしろまたは寿命の推定法につき論じた。

キャビテーション・エロージョンに関する研究 (末沢慶忠・松村昌信, 化学工学, 31, 177~182 (1967))

内径 52.9mm の円管の中心部に置かれた球に生ずるキャビテーション・エロージョンについて、最大流速 15m/sec ($Re=1,200,000$)、球径 9.50~33.00mm の範囲で試験を行なった。高速度写真撮影 (10,000 コマ/sec) ならびにストロボスコープによる観察の結果、球の後部に生ずる気泡の挙動に関して3つの流域があること、鋼球を用いた侵食試験では、これらのうち最も高速の流域でかえって損傷速度が減少することを確かめ、またその理由をも明らかにした。

線形モデル法によるプロセスネットワークの最適化 (西村 肇・平泉 泰・矢木 栄, 化学工学, 31, 183~191 (1967))

ネットワーク構造をもつプロセスを最適設計の問題をみつかる。従来の方法では、リサイクルループをふくむ場合物質収支を合わせるためのくり返し計算が必要であるが、もし数学モデルが入出力に関し線形ならくり返し計算をせずに物質収支が求まり、最適化計算が容易になる。この論文では、プロセスに使われる代表的な装置について、入力および政策変数として適当な量をとるなら線形モデルがえられることを示す。局所線形化ではない。

多孔板を用いた回分式気泡塔の流れの変移点 u_{oc} (吉留 浩, 化学工学, 31, 191~192 (1967))

気泡塔の流動状態は多孔板よりの気泡の発生状態と密接な関係がある濡れ多孔板の圧力降下のデータによって熟知できた。また、気泡塔の状態を気泡流動域と攪乱流動域とに大別する限界点を定義し、これを用いることによって塔内に固定された固体表面における物質および熱の移動係数は (3)式の実験式であらわすことができた。

多段式押出板型遠心脱水機の脱水に関する一考察 (山口賢治, 化学工学, 31, 193~194 (1967))

連続遠心脱水機による脱水では、遠心力のほかにバスケットの振動、回転速度の変動、篩材面上での粒子の動きなど多くの脱水を促進する因子があり、そのために層の残留平衡含水率は遠心力を増加してもあまり大きく変わらない。この事実と単段式押出板型脱水材の脱水過程の実験結果とをともに、多段式の場合の製品含水率を表わす近似的な関係を求めた。