粒体安息角が混合速度に及ぼす影響*

Effect of Angle of Repose on Rate of Mixing

沢 昌 恭**
Yasushi Sawahata

1. 緒 言

混合の進行が粒子集団の移動ないしは粒子個々の位置の交換によるものと考えらるならば、被混合成分粒子系の流動性は混合操作において見過すわけにはゆくまい。先に矢野らは粉体の流動性と混合状態の関連性を検討したが、その対象は異質2成分系混合物であって、最終混合状態に注目したものであった¹⁾。最近、薬剤学の分野においては、被混合成分粒子系の特性を単独分離してその影響を検討する試みもみられるに至った²⁾。

粉粒体の流動性、ことに混合容器内における流動においては、粒子群の静的ならびに動的な摩擦特性と、両特性の関連の上で現われる二次的特性が大きく影響を与えることを考えないことは許されず、単に安息角のみを取り上げて混合過程との関連を論ずることに対しては、不充分であることはもちろんであろう。しかし、安息角の小なる粒子系においては、安息角が大なる粒子系よりも流動性が良好であるという一般的な経験則に従って、安息角以外の主特性が近似しているような試料の間で実験結果の比較を行なうことは、少なくとも安息角の相違が混合速度に及ぼす影響を介して、粒子群の流動性と混合速度との関連を類推する一助となしうと考えることも妥当であろう。

著者は、このような観点から粒子系の安息角を流動性の第1近似的表現とみなし、それが混合速度に及ぼす影響を実験的に検討してみた。

2. 実験試料、装置および方法

2.1 実験試料

安息角の大小が、第1近似的に流動性の良否を表わすものとして、安息角の小なる——流動性の良い粒子系としてガラス球を、比較対象として安息角が大なる粒子系を相馬砂に選んだ。表1は両粒体の代表的特性を比較し

た。

表記したフルイ目範囲において、ほとんどの粒子は相馬砂で0.86~1.2mm、ガラス球で0.84~1.1mmの範囲に納まる。相馬砂の平均粒径は投影面積から求めた円相当径である。

混合操作の面からみて、両粒体の粒度と比重は同等とみなしてよいであろう。特性の最大の相違は、安息角と粒子の形状および表面の状態であるが、粒子の形状および表面の状態は安息角の相違に寄与し、両粒体の安息角の相違によって対比されるものとする。そして、安息角の相違が両粒体の流動性の相違を示しているものとみなす。

2.2 実験装置

実験に用いた装置は、2次元構造の2dV-I形と名付けたV形混合機と、3dV-2形と名付けた商用小形のV形混合機、ならびに180-HC形と名付けた2次元構造の水平円筒形混合機である。

3dV-2形混合機は、円筒直径14cm、容器の長母線長24cm、短母線長10cm、円筒接合角90°、回転半径上下ともに13cm、内容積5525cm³で作業容量公称2リットルの混合容器をもち、2dV-I形混合機は、この容器の中心軸面で容器厚さを15mmに2次元化した、断面形状相似の容器をもつ。180-HC形は直径18cm、厚さ15mmの容器をもつ混合機である。2dV-I形³⁾および180-HC⁴⁾形の容器の詳細構造はすでに報告してあるので省略す

表1 実験に供した試料の代表的特性

試 料	相馬砂 (SS)	ガラス球 (GB)
粒度範囲 (Tyler Mesh)	-12/+20	-14/+20
平均粒径 [mm]	1.03	0.92
真比重 [—]	2.65	2.52
安息角 [deg]	38.5	22.0
長短度 [—]	1.26	球として 1.0
面積比 [—]	0.66	0.785
球形度 [—]	0.81	1.0
体積形状係数 [—]	0.36	0.523
面積形状係数 [—]	3.03	3.14
形状係数 [—]	8.42	6.0
表面係数 [—]	0.71	1.0

* 昭和43年10月26日受理：日本材料学会第16期学術講演会(1967・大阪)
第5回粉体に関する討論会(1967・大阪)にて講演

** 理化学研究所・大和研究所 (埼玉県北足立郡大和町下新倉4775)
TEL 0484-62-1111

図1 $\bar{C}_i$ vs. θ (GB)

図2 $\bar{C}_i$ vs. θ (GBとSSの比較)

る。

2.1 実験方法

実験においては、所定の回転速度 N および装入率 F/V のもとに、まず相馬砂系における粒子群の循環流れの状態、混合状態の時間的変化およびこれら両者の関連を求め、ついで、同回転速度、同装入率のもとにおけるガラス球のそれらを全く同様の方法によって追求し、その上で両粒子系の実験結果を比較し、循環時間および混合速度の大小を検討した。

したがって、この比較実験はそれぞれ色のみ異なる同種物質2成分系の混合実験の比較として行なわれたが、試料の装入、運転、サンプルの採取など個々の実験方法の詳細は既報の通りであるから、本報では省略する³⁻⁶⁾。

100粒平均で採取したサンプルの粒子個数濃度の計測値から、混合度は(1)、(2)両式で算出される。

(1) 最高濃度に関する混合度

$$M_{\max} = \frac{\sigma_{\max}^2 - \sigma_r^2}{\sigma_{\max 0}^2 - \sigma_r^2} \quad \dots\dots(1)$$

(2) 空間平均的混合度

$$M = \frac{\sigma^2 - \sigma_r^2}{\sigma_0^2 - \sigma_r^2} \quad \dots\dots(2)$$

ここで

$$\sigma_{\max}^2 = (C_{\max} - \bar{C})^2$$

$$\sigma_{\max 0}^2 = (C_{\max 0} - \bar{C})^2 = (1 - \bar{C})^2$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2$$

$$\sigma_0^2 = \bar{C}(1 - \bar{C})$$

$$\sigma_r^2 = \bar{C}(1 - \bar{C})/n$$

であって、 N は採取サンプル数、 n はサンプル中の全粒子数を表わす。

3. 実験結果と考察

水平円筒形混合機における粒子群の流動状態が、ガラス球の場合は相馬砂の場合に比較してややへん平であり、2dV-I形における混合物表面の傾斜が、相馬砂に対してガラス球ではゆるやかであるといった部分的な違いは別として、ガラス球の場合もまた混合の進行が粒子群の循環流れの支配を受けることは、相馬砂に関してすでに報告したのと同様である³⁻⁶⁾。

図1は、2dV-I形にガラス球を装入した場合の実験結果の1例を示す。混合の過程における粒子群の主循環径路中の近接3点のスポットサンプルの濃度平均 $\bar{C}_i$ の値の時間的変化を示すものであるが、最高濃度 $C_{\max}$ の低減してゆく下側で周期的増減を示す $\bar{C}_i$ の値の様態から、粒子群の循環流れの存在が明白である。粒子群の平均循環時間も求めるに容易である。

図2は、図1に示す条件のもとに相馬砂とガラス球とを比較したものであり、着目成分の仕込位置に相当するスポット番号 64、65、66 番の平均濃度と最高濃度の変化の第1循環の場合を示す。ガラス球における $C_{\max}$ の低減度合いの大なること、 $\bar{C}_i$ の変動周期が短かく、また濃度変動の幅も小さいことから循環にともなう粒子群の広がりの度合いの大きいことなどが明らかであり、ガ

図3 $M_{\max}$ vs. θ (GBとSSの比較)

表2 相馬砂とガラス球の T , φ および λ の比較

混合機	N [rpm]	F/V [%]	試料	T [sec]	φ [sec ⁻¹]	λ [rev]
2dV-I	40	18	GB	6.9	0.45	4.6
	〃	〃	SS	7.0	0.43	4.7
	50	18	GB	5.3	0.60	4.4
	〃	〃	SS	7.2	0.37	6.0
	40	24	GB	8.2	0.40	5.5
	〃	〃	SS	9.8	0.28	6.5
	50	24	GB	6.7	0.49	5.6
180-HC	〃	〃	SS	9.2	0.26	7.7
	33	18	GB	0.685	1.24	0.38
	〃	〃	SS	0.643	1.14	0.35
	50	18	GB	0.494	1.64	0.41
	〃	〃	SS	0.486	1.44	0.39
	33	24	GB	0.697	1.10	0.40
	〃	〃	SS	0.734	0.88	0.39

ラス球の循環時間 T が短かく混合速度係数の大であることが知られる。

すなわち、図3に例示するごとく、混合度 $M_{\max}$ の混合時間 θ に対する変化の比較がそれを現わしており、混合速度係数 φ の値は、ガラス球において相馬砂の約2倍となっている。

混合状態の変化は図3からも明らかなごとく、ガラス球においても従来求められている指数則(3)および(4)式が成立し

$$\ln M_{\max} = -\varphi\theta + k \quad \dots\dots(3)$$

$$\ln M = -\phi\theta + k' \quad \dots\dots(4)$$

図4 $M_{\max}$ vs. θ/T (GB)

表3 ガラス球と相馬砂の κ の値の比較

混合機	試料	$M_{\max}$ [-]	θ/T [-]	κ [-]	κ_{SS}/κ_{GB} [-]
2dV-I	相馬砂(SS)	10^{-2}	1.5	3.07	0.844
	ガラス球(GB)	10^{-3}	1.9	3.64	
180-HC	相馬砂(SS)	10^{-2}	8.0	0.58	0.841
	ガラス球(GB)	10^{-3}	10.0	0.69	

また、循環時間を求めた結果(表2参照)からは無次元混合速度係数 κ を用いて

$$\ln M_{\max} = -\kappa \left(\frac{\theta}{T} \right) + k \quad \dots\dots(3')$$

$$\ln M = -\kappa' \left(\frac{\theta}{T} \right) + k' \quad \dots\dots(4')$$

が成立することも、まったく相馬砂の場合と同じである^{3,4)}。

混合速度係数 φ と ϕ との間には、ガラス球においても $\varphi \approx \phi$ の関係が、無次元混合速度係数においても $\kappa = \kappa'$ の関係が成立することも述べるまでもない。

表3には、無次元混合速度係数 κ の値を比較した。

以上に示したとき実験の結果から、安息角の小さな粒子系——流動性の良い粒子系——においては、安息角の大なる粒子系に比較して、混合速度は大であるということができよう。ここで、表2、表3に示した実験結果に関してさらに検討を進めてみよう。

図5 M vs. θ (GBとSSの比較)

表2の末項に示す λ なる量は、粒子群が1回循環するに要する混合容器の回転数を意味し、(5)式で求められる。

$$\lambda = NT/60 \quad \dots\dots(5)$$

V形混合機に関して、ガラス球と相馬砂の λ 値を比較してみると、相馬砂の方が大であり、相馬砂の循環に対しては混合容器はより多く回転する必要があることを示している。循環時間 T も相馬砂において大であり、循環速度が相馬砂において遅いことを示している。これらの事柄は、混合速度係数の大小を比較に入れて、1回の粒子群の循環にともなう粒子群の広がり度合が、ガラス球において相馬砂よりも大であることを意味しよう。

一方、水平円筒形混合機においては、各操作条件ごとにみて、ガラス球と相馬砂とで循環時間 T にも回転数 λ にも大差はみられない。これは、水平円筒形混合機においては、粒子群は円筒の回転にともなって高速度で循環しており、かつ容器の回転速度と輸送領域の粒子速度が同速度であるためと考えられる。しかし、V形混合機において示されたごとく、粒子群の1循環にともなう粒子群の広がり度合が、ガラス球の方が相馬砂よりも大であるため、ほぼ同等の循環時間、回転数のもとにおいても、混合速度係数は相馬砂の場合に比較してガラス球の

場合のほうが大きな値を示すものと考えてよいであろう。

さらに、表3の末項に記した無次元混合速度係数の比をみるならば、V形混合機においても水平円筒形混合機においても、その値は0.84とほぼ一定である。例証は少ないが、この結果は粒子群の流動性の難易に起因する広がり度合いの効果、混合機の種類の違いにもかかわらず、ほぼ同等に発現しているものと考えてよいのではないであろうか。

以上のごとき、流動性の良好な粒体の混合速度は大であるという実験結果を、さらに商用小形のV形混合機を用いて検証した1例を図5に示した。混合速度係数 ϕ の値は、ガラス球の場合相馬砂の場合に比較して1.8倍程度となっている。これを表2上段の例と比較してみると、最上段の1例を除き、 ϕ の比で1.62 (50/18), 1.43 (40/24), 1.89 (50/18) [()内は前者が回転速度 N 、後者が装入率 F/V]などの値とよい対応を示している。

これらの実験結果からみると、表面が平滑で流動性にとむ粒子系では混合速度が大であって、容易に混合を行なうことができ、かつ、V形混合機においてその効果が顕著であるということができよう。微粉体の造粒操作は、一般に粒子系の充填性、流動性の改善に資するために与えられるものであるが、本実験の結果からみて造粒体は混合性をも改善するものとして、造粒操作と混合操作との組合せも新しい課題として取り上げられるべきことを示唆している。

4. 結 言

粉粒体の流動性を第1近似的に示す尺度として安息角を考え、安息角の大きく異なる粒子系の混合の進行過程を実験的に比較した。流動性の良好な——安息角の小さい——粒子系の混合速度は、流動性の劣る粒子系に比較して大であり、容易に混合を行なうことが可能である。これらの実験結果は、難流動性微粉体の造粒による流動性の改善が、混合性の改善にも関連することを明らかに示唆している。

本報における実験においては、安息角を流動性の尺度とみなして結果の比較が行なわれたが、この種粉粒体の特性を定量表示する手段と方法の開発により、それらの特性を単独別個に抽出して混合の難易との関連を追求することが希望される。それまでの間に、本報が暫定的にも混合操作に対する若干の貢献を果すとすれば報告した意味も生ずるものと考えられる。

記 号

$\bar{C}$: 着目成分の仕込平均濃度	[-]	θ : 混合時間	[sec]
C_i : 着目成分のサンプル濃度	[-]	θ/T : 粒子群の循環回数	[-]
$\bar{C}_i$: 近接スポットの平均濃度	[-]	κ, κ' : 無次元混合速度係数	[-]
$C_{\max}$: サンプルの最高濃度	[-]	λ : 粒子群 1 循環当りの容器回転数	[-]
F : 被混合全粒体の装入量	[cm ³]	σ^2 : サンプルの濃度分数	[-]
F/V : 被混合全粒体の装入率	[%]	$\sigma_{\max}^2 : (C_{\max} - \bar{C})^2$	[-]
k, k' : 実験定数	[-]	$\sigma_{\max} \theta^2 : (1 - \bar{C})^2, \sigma_{\max}^2 \text{ at } \theta = 0$	[-]
M : 空間平均的混合度	[-]	σ_0^2 : 完全二層分離状態の理論分散	[-]
$M_{\max}$: 最高濃度に関する混合度	[-]	σ_r^2 : 完全混合状態の理論分散	[-]
N : 混合容器回転速度	[rpm]	ϕ : M に関する混合速度係数	[sec ⁻¹]
T : 粒子群の平均循環時間	[sec]	φ : $M_{\max}$ に関する混合速度係数	[sec ⁻¹]
V : 混合容器の内容積	[cm ³]		

引 用 文 献

- 1) 矢野, 蟹瀬, 佐納ほか: 化学工学, **23**, 589 (1959)
- 2) たとえば, 坂元, 小倉, 前川: 第88回薬学大会講演要旨集 6A10-1 (1968)
- 3) 沢島 恭: 化学工学, **30**, 1140 (1966)
- 4) 沢島 恭: 材料, **16**, 364 (1967)
- 5) 沢島 恭: 化学工学, **31**, 1212 (1967)
- 6) 沢島 恭: 粉体工学研究会誌, **4**, 889 (1967)