研究報告

無風時回転乾燥機内における粒体の
滞留時間分布について*

On the Residence Time Distribution of
Particles in a Rotary Dryer without Air Flow

広末 英 晴** 深 町 敬 輔***
Hideharu Hirosue Keisuke Fukamachi
嵩 鎮 雄*** 篠 原 久***
Shizuo Kasami Hisashi Shinohara

回転乾燥機は処理量が大いこと、および運転の安全かつ容易さのために、工業的に広く使用され、これに関する研究論文も多数発表されている。

その主なものは、乾燥機内における材料移動、および空気-材料間の熱移動に関するものである。

前者の中、無風時および通風時における、材料の平均滞留時間については、すでにかんがりの研究が行なわれ、その推定がほぼできるようになってきた⁶⁾。

しかし、滞留時間分布については、篠原⁵⁾および Sae-man⁴⁾ による無風時に関する理論的研究、Miskell¹⁾ら²⁾などによる二三の実験的研究¹⁷⁾があるのみである。また、これらの実験値は、その実験条件が詳細に明記されていないこと、トレーサ粒体と材料粒体とが異なっている場合もあることなどの理由により、理論値との定量

的な比較は行なわれていない。
そこで、本報告においては、先の理論⁵⁾に加えて、さらに乾燥機底部における粒子のとびはね移動をも考慮した理論式を求め、この式と著者らの実験値との比較をおこなった。その結果、今後なお検討すべき点が多いが、実験値は、上述の理論式によって、おおそ傾向的には説明できると思われるので、その経過を報告する。

1. 実験装置およびその方法

使用した実験装置を図1に示す。回転部分は内径20.6 cm、長さ1.50mであり、内部には幅2 cmの掻上板が乾燥機壁に対して60°の角度で、12枚とりつけられている。

無風時滞留時間分布の測定においては、まず回転数、勾配を一定にした後、テーブル・フィーダによって粒体を供給し、その排出速度を測定して、これが最大±3%以内の変動で一定したとき、定常状態になったとみなし、乾燥機入口へトレーサ粒体約12~15 gを瞬間的に投入した。

材料粒体としては、表1に示されている方解石を使用し、トレーサ粒体としては、同一粒径の方解石を赤色に着色したものを用いた。

トレーサ粒体が投入された瞬間から時間を測定し、ま

図1 実験装置

表1 実験範囲

N	[rpm]	4, 8, 12, 24
S_d	[-]	0.01, 0.02, 0.03
M	[kg/hr]	7.1 ~ 72.0
X_0	[%]	2.94 ~ 11.60
方解石	d_p	[mm] 1.96~3.09 ($\bar{d}_p=2.53$)
	ρ_B	[kg/m ³] 1450

* 昭和44年1月30日受理
** 九州工業技術試験所資源開発部一課 (佐賀県鳥栖市宿町)
TEL 094282-5161
*** 九州大学工学部化学機械工学科 (福岡県福岡市箱崎)
TEL 092-64-1101

図2 無風時回転乾燥機内における粒体移動モデル

た一方、乾燥機出口における排出量を30秒または60秒間隔で採取し、その中のトレーサ粒体量を逐次測定した。このようにして測定されたトレーサ粒体量と全投入トレーサ粒体量より、ある時間における残留率 R_j ⁵⁾ を算出し、その滞留時間分布を測定した。著者らが行った実験条件の範囲を一括して表1に示す。

2. 無風時滞留時間分布の解析

ここでは、図2に示されている、12枚の屈折部を有する搔上板についての解析を行なう*。

また、解析の対象とする材料は、付着性のない均一粒径の粒体とする。

図2(a)において、搔上板の先端が回転角 $\theta = 0, \pi/6, \pi/3$ 以下 $\pi/6$ おきに $11\pi/6$ までの各位置における搔上板に対して、順に $i = 1 \sim 12$ と番号をつける。そして、おのおの搔上板には、各角度区間で落下する粒体層が層状に積み重なっているものとする。この各層に対して、 θ が $0 \sim \pi/12, \pi/12 \sim \pi/6, \pi/6 \sim$ において落下する粒体層に対して順に、 $j = 1 \sim 7$ まで番号をつける。よって、乾燥機横断面中には j 層は j 個存在する。

つぎに、乾燥機へ投入された粒子は、乾燥機入口のごく短い区間で、各搔上板へ均一に分散し、その後は図2(a), (b)に示されているように、各層ごとに定常運動を繰り返す、排出されるものとする。すなわち、 d_j を垂直落下距離とする粒体層は、搔上板の先端が $(j-1)/n\pi \sim j\pi/n$ の区間において $(j-1)$ 個おきの搔上板へ落下す

る。その際、図2(b)に示されているように、軸方向へ $(x_j + x_{0j})$ 進むものとする。

このような粒体層の運動においては、各層間の粒子交換はなく、また各層の軸方向への移動速度は一定であるとする。したがって、材料の滞留時間分布は、各層の一回落下あたりの軸方向への進み距離と単位時間あたりの落下回数との積、すなわち移動速度の違いによって生じることになる。

さらに、以下の仮定をもうけて解析する。

- 1) 粒体のキルン・アクション⁶⁾、自由落下時間および円筒周速の効果、すなわち放物線状落下の影響を無視する。
 - 2) 図2(a)に示されているように、搔上板の先端が $\theta = 0$ より上方へ回転するとき、粒体の落下が始まるとし*、かつ落下中の粒体層表面はつねに安息角をなすものとする。また、この仮定は落下終了回転角 $\theta_1 (= \text{一定})$ まで成り立つことにする。
 - 3) 各粒体層の乾燥機横断面上の垂直落下距離は図2(a)に示されている $d_1, d_2, \dots, d_7$ に等しいものとみなす。
- 各層の一回転あたりの落下回数は

$$2\pi/j(2\pi/n) = n/j \quad \dots\dots(1)$$

軸方向への一回転あたりの移動距離 l_j は

$$l_j = (x_j + x_{0j})(n/j) = S_d \cdot d_j \cdot (n/j) \times [1 + (x_{0j}/S_d \cdot d_j)] \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 x_{0j} は一回落下あたりの軸方向へのとびはね移動距離である。

この j 層の移動速度 V_j は

$$V_j = N \cdot l_j = N \cdot S_d \cdot d_j (n/j) [1 + (x_{0j}/S_d \cdot d_j)] \quad \dots\dots(3)$$

ゆえに、 j 層の滞留時間は、乾燥機長さ L をその移動速度で除した次式によって表わされる。

$$T_j = \frac{L}{V_j} = \frac{L}{N S_d d_j (n/j) [1 + (x_{0j}/S_d \cdot d_j)]} \quad \dots\dots(4)$$

* なお、既述のように、Saemanら⁴⁾も一枚の搔上板（図2の $i = 1$ の搔上板）に着目して、滞留時間分布の理論的考察を行なっている。これと篠原の考察の違いについては、すでに前報⁵⁾において比較検討したので、ここでは著者らの考察のみをのべる。

* Saemanらは、低回転における実測によって、 $X_{0 \text{ opt.}}$ においては、おおよそこの傾向があることを認めている。

つぎに、1章において記述したように、滞留時間分布を残留率 R_j によって表わすことにすると、 T_j を滞留時間とする j 層の残留率は

$$R_j(T) = \frac{\sum_{j=1}^{n'} A_j \cdot V_j - \sum_{j=1}^j A_j \cdot V_j}{\sum_{j=1}^{n'} A_j \cdot V_j}$$

$$= 1 - \frac{\sum_{j=1}^j A_j \cdot V_j}{\sum_{j=1}^{n'} A_j \cdot V_j} \quad \cdots(5)$$

ただし、 $A_j = j \int_{(j-1)\pi/n}^{j\pi/n} (r_i^2/2) d\theta$ であり、図積分によって A_j の値を求めた。

ゆえに、滞留時間分布(残留率分布によって表示)は、(4)、(5)式によって求められる。ただし、(4)式分母中の $(x_{bj}/S_d \cdot d_j)$ は解析的に求めるのが非常に困難である。そこで、著者らによって先に求められた次式⁶⁾

$$X_0 = 14 \cdot \frac{(1+0.34Z_a^{1/2})(1+5.4F_r^{2/3})}{(1+0.033G_a^{1/3})} \cdot \frac{F}{NS_d D} \quad \cdots(6)$$

ただし、 $X_0 \leq X_{0opt}$ 。

分母中の $(1+0.033G_a^{1/3})$ が、このとびはねの影響を定量的に表わしたものであるので、 $x_{bj} \propto (S_d \cdot d_j)^{1/3}$ と仮定して次式とした。

$$1 + (x_{bj}/S_d \cdot d_j) \approx 1 + 0.033G_a^{1/3} \quad \cdots(7)$$

なお、(6)式の X_0 は、無風時における乾燥機内の保有率を表わし、これと平均滞留時間とは次式によって関係づけられる。

図3 排出頻度分布曲線 ($S_d=0.03[-]$)

$$T_0 = \frac{L \cdot X_0}{100 \cdot F} \quad \cdots(8)$$

3. 実験結果およびその考察

1章の方法によって求められた残留率曲線が、各回転数別に勾配をパラメータとして、後出の図5～8に示されている。

上図中の $N=4, 8, 12$ [rpm], $S_d=0.03[-]$ の場合の排出頻度分布曲線を図3に示す。

これらは Miskell ら²⁾の結果と同様に、唯一つのピークしか示していない。

つぎに、Miskell らはこの排出頻度分布曲線から排出頻度累積率を求め、これを普通確率紙にプロットして、これが直線性を示すことを認め、さらに同図よりえられる $(\sigma_t/T_{R=0.5}) \times 100$ が X_0 によって変化し、最適保有率 X_{0opt} で最小値となることを示している。

しかし、著者らによってえられた残留率 (= 1 - 排出頻度累積率) のプロットは、普通確率紙上では直線とは

図4(1) 標準偏差 対 保有率

図4(2) 標準偏差 対 回転数

図4(3) 標準偏差 対 勾配

ならず、森らの連続式ボールミル³⁾または杉本らの流通式回転円筒⁹⁾での実験によってえられたデータと同様に、対数確率紙上で直線性を示した。そこで、これらの図より σ を求め、図4(1)をえた。

この図において σ は、Miskell らによって示されたと同様に、著者らが X_0 対 $F/(NS_dD)$ のプロットによって求めた $X_{0\text{opt}}$ ⁶⁾ 付近で最小値を示している。

なお、Miskell らは N , S_d の σ におよぼす影響については測定していないので、つぎにこれらについて検討した。この場合には、 X_0 の影響を除き、 N , S_d のみの影響を調べるために、 $X_0=5.2\sim7.2$ [%] における σ の測定値を採用した。その結果を図4 (2), (3)に示す。これらの図より、 σ は X_0 , S_d が一定の場合には N が小さくなるとともに、また X_0 , N が一定の場合には S_d が小さくなるとともに増加することが分る。

最後に、2章において誘導された理論式と実験値との比較検討を行なう。

図5～8に示されている階段線は、(4), (5)式による計算線である。これらの階段線がえられた理由は、(4)式を誘導する際、 j 粒子層の軸方向への移動速度を一定と仮定したことによる。しかし、測定値は軸方向へ

の分散をもある程度考慮して、階段状変化を連続的变化へ近づける必要があることを示している。しかしながら、本質的には、粒子層は2章において(4), (5)式を誘導する際に考察したような移動をしているものと考えられる。

このことは、特に $N=8, 12$ [rpm] において勾配のいかんにかかわらず、かなりの近似で理論線と実験結果とが一致していることから推測される。

しかし、 N が24 [rpm] のようにかなりの高速になると、(4), (5)式を誘導する際にもうけた仮定、すなわち、自由落下時間の無視、周速効果の無視、 $\theta_1=一定$ の仮定が成立しなくなり、理論値と実験値の差異が大きくなるものと思われる。

この点は、先に記述したように階段状変化を連続変化へ近づけることとともに今後の課題であろう。

結 び

無風時回転乾燥機内における粒子の滞留時間分布を解析的に求めるために、機内における粒子運動を図2に示されているようにモデル化して、(4), (5)式をえた。

ここで、(4)式分母中の τ はねの影響を示している $1 + (X_{0j}/S_d \cdot d_j)$ は、解析的に求めるのが非常に困難

図 5 残留率の計算値と実験値の比較 ($N=4$ [rpm])

図 7 残留率の計算値と実験値の比較 ($N=12$ [rpm])

図 6 残留率の計算値と実験値の比較 ($N=8$ [rpm])

図 8 残留率の計算値と実験値の比較 ($N=24$ [rpm])

であるので、先に著者らが実験的に得ていた(7)式を用いた。

そして、これらによる計算値と、パルス応答法によってえられた実験値との比較を行なったところ、 $N=8$, 12 [rpm] においては、かなり良好な一致が認められた

が、 $N=4$, 24 [rpm] においては、かなり大きな差異が認められた。この差異は、(4), (5)式を誘導する際にもうけた仮定に起因すると思われるので、今後なお一層の検討を要する。

記 号

A_j : 掻上板上における j 層の横断面積	[m ²]	T_j, T_0 : 滞留時間	[min or hr]
d_j : 垂直落下距離の乾燥機横断面上の成分, 図2における $d_1, d_2, \dots$ を d_j とみなす	[m]	V_j : j 層の移動速度	[m/hr]
D : 乾燥機内径	[m]	x_{bj} : 1 回落下による軸方向への落下移動距離	[m]
$\bar{d}_p$: 平均粒径	[m]	x_{bj} : 1 回落下による軸方向へのとびはね移動距離	[m]
$E(T)$: 排出頻度分布関数	[1/min]	X_0 : 保有率	[%]
F : 容積供給速度	[m ³ /m ² •hr]	X_{opt} : 最適保有率	[%]
g : 重力加速度	[m/hr ²]	Z_α : 図 2 (a) に示されている掻上容量	[%]
L : 乾燥機長さ	[m]	α : 安息角	[deg]
l_j : j 層の一回転当りの進み	[m]	θ : 回転角	[rad]
M : 供給速度	[kg/hr]	θ_1 : 落下終了回転角	[rad]
N : 回転速度	[rev/hr]	ρ_a : 空気密度	[kg/m ³]
n : 掻上板の数	[-]	ρ_B : 嵩密度	[t]
n' : j の最大数	[-]	σ : 標準偏差	[-]
r_i : 掻上板上の粒子層表面の幅	[m]	σ_t : 標準偏差	[min]
$R_j(T), R$: 残留率または残余濃度	[-]	G_a : Galilei number $\bar{d}_p^3 \rho_a^2 g / \mu_a^2$	[-]
S_d : 乾燥機勾配	[-]	F_r : Froude number $(\pi DN)^2 / Dg$	[-]

引 用 文 献

- 1) Krevelen, D. W. van. and Hoftizzer, P. J. : *J. S. C. I.*, **68**, 91 (1949)
- 2) Miskell, F. and Marshall, W. R. : *Chem. Eng. Progr.*, **52**, 35 (1956)
- 3) 森, 神保, 山崎 : 化学工学, **28**, 204 (1964)
- 4) Saeman, W. C. and Mitchell, T. R. : *Chem. Eng. Progr.*, **50**, 467 (1954)
- 5) 篠原 久 : 化学機械技術, **14**, 86 (1962)
- 6) 篠原, 広末, 嵩, 明木, 長田 : 化学工学, **31**, 478 (1967)
- 7) Smith, B. A. : *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.*, **38**, 251 (1942)
- 8) 杉本益規 : 化学工学, **32**, 291 (1968)
- 9) 杉本, 遠藤, 田中 : 化学工学, **31**, 145 (1967)