矢野 武夫**・佐納 良樹**
白川 宇吉**・富永 徹**

§ 1. 緒 言

固定型混合機の一つであるリボン型混合機は、水平円筒型、二重円錐型およびV型混合機などの回転型混合機とともに広く粉粒体の混合に使用せられている。特にリボン型混合機は混合槽の中に攪拌翼を内蔵する型であるから、回転型混合機では取扱いがむづかしい、やや湿った粉粒体、あるいは互いに凝集しようとする傾向のある微粉体などの混合にも適している。さらにリボン型混合機は回転型混合機に比べて容易に混合操作を連続化しうる利点もある。

しかし現在のところ、リボン型混合機についての研究は少なく、粉体物性の知識もまだ不十分であり、その作業条件などは経験的に定められている場合が多い。またその混合機構なども定量的に解析されていない。

本報においては、4種の異なった、比較的大きい粒径をもった粉粒体試料 (Na_2CO_3 -Sand 系) をもちいて、リボン型混合機の混合特性ならびに操作条件などを前報^{3,4)} までの回転型混合機と比較しながら実験的に検討し、さらに実験結果を従来と同様に混合速度係数をもちいて整理した。

§ 2. 実験装置、試料ならびに実験方法

実験にもちいたリボン型混合機の概略図および寸法などを Fig. 1 および Table 1 に示した。混合リボンはねじれ方向が互いに逆な外巻および内巻の二重リボンから成り、さらに両方とも中央で分割されたものをもちいた。したがって、粉体は外巻のリボンで混合槽の中央部へ集められ、内巻のリボンで両側へおし出されることき運動をする。

モーターの回転は V-ベルトにより、無段変速機をへて、所要の回転速度で混合機に伝えられるようにした。

供試粉体は無水炭酸ソーダ (Na_2CO_3) および砂の 2 成分系であり、Tyler 標準篩で、 $-35/+48$ 、 $-48/+65$ 、 $-65/+80$ および $-80/+100$ mesh の各粒分に篩別した後、約 110°C にて充分乾燥して使用した。

実験は混合機の運転を開始したのち、ストップ・ウォッチで時間を読むとともにカウンターで回転数を求めた。一定時間ごとにリボンの運転を止め、Fig. 1 に図示したとき A~I までの 9 カ所*** を選び、各点からそれぞれ約 0.1

gr 前後の試料
(spot sample)

Table 1 Dimensions of the ribbon-mixer

	Dimensions [mm]
Mixing vessel	
Length	380
Width	120
Max. depth	150
Volume	
total	6260 [cc]
to top of outer ribbon	4770 [cc]
Ribbon	
Diameter	
outer	115 ϕ
inner	79 ϕ
Width	
outer	7
inner	10
Pitch	
outer	90
inner	60

Fig. 1 Ribbon-blender and sampling positions

* 昭和 34 年 11 月 4 日受理

** 大阪府立大学工学部化学工学教室

*** 運転開始後、1 分 (回転速度 40 r. p. m.) にて混合槽内の 20 カ所

からスポット・サンプリングした時の標準偏差 σ が 36.6 で、同じく 9 カ所から採取した場合の σ が 36.3 であったので、以後 9 カ所からサンプリングをおこなった。

を採取し、着目成分である Na_2CO_3 の濃度を定量した。混合機全体としての混合度は前報^{3,4,5)}までと同様に完全混合時における Na_2CO_3 の濃度 C_0 に対する標準偏差 σ で表わした。

さらに粉体装入方法は特記した場合のほかは Na_2CO_3 および砂を、それらの界面が回転軸に対し直角になるように槽の左右から等容量（目掛け容積）づつ静かに装入した（Fig. 7, Type I）。

§ 3. 実験結果および考察

(1) 槽内の混合状態 まず実験開始後 10 ないし

Fig. 2 (a) Correlation of C_i to cumulative revolution number $N\theta$

Fig. 2 (b) Correlation of C_i to cumulative revolution number $N\theta$

Fig. 2 (c) Correlation of C_i to cumulative revolution number $N\theta$

* Fig. 3 に示したごとく、V 型とリボン型のそれぞれの操作条件が異なるので両者の定量的比較はできない。

20 分位までの一定時刻 θ において混合槽内の 9 カ所（Fig. 1）から採取した試料中の Na_2CO_3 濃度 C_i を測定した。この濃度 C_i の時間的変化を総回転数 $N\theta$ に対し点描した結果の一例を Fig. 2 (a), 2 (b) および 2 (c) に示した。図中の水平点線は C_0 すなわち完全混合時の濃度を示した。図に明らかなごとく、粉体装入方法により異なるが、Fig. 7, Type I のごとく装入した場合、混合槽の両端（測定点 A, E および B, F）ほど混合には長い時間がかかり、混合槽の両端からほぼ規則的に相互に混り合い、次第に均一な濃度に近づいてゆくことがわかった。しかし到達しうる混合の程度は特に悪い場所は見当らなかった。Fig. 2 (b) は 2 (a) に比べて回転速度の大きい場合であり、さらに Fig. 2 (c) は 2 (a) に比べて粉体装入量の多い場合である。いずれもだいたい同じ傾向を示したが、3 者を比べると、Fig. 2 (c), 2 (b) および 2 (a) の順に折線の乱れが大きいく。したがってこのような局所的な濃度の揺乱は回転速度よりも粉体の装入量に影響されやすいようである。

(2) 混合曲線 Fig. 2 に示した実験結果から各時刻における混合機全体の混合度（標準偏差） σ を算出し、混合時間 θ に対し片対数目盛で点描した結果を Fig. 3 に示した。時間の経過とともに σ は減少し、ある時刻 θ_s において最良の混合状態（ $\sigma = \sigma_s$ ）に到達し、そののち σ はある範囲の間で増減するのみで、それ以上混合は進まない。リボン型混合機の混合曲線は図中に鎖線で示した回転型混合機^{3,4)}（例として V-型*）の混合曲線と類似しているから、基本的にはリボン型混合機と回転型混合機の混合機構は同じであるといえる。

しかし混合曲線を詳細にながめると、リボン型混合機の場合、回転速度が比較的小さいときは、混合初期にお

Fig. 3 Mixing curves of ribbon-mixer

いて上に凸であり、そののちは2つの直線部分から成る折線であらわされた。さらに回転速度が大きくなると(図では80 r.p.m. 以上)2本の折線は1本の直線であらわされた。

これに対し前報までの回転型混合機の場合には一般に混合槽の回転とともに内容物の上下が逆転するため、全体的混合が急激に進行し、混合初期は下に凸な曲線を示し、そののちは1本の直線で表わされた。したがって粉粒体の混合は混合初期の短い時間における全体的混合と混合がある程度進んだ後の局部的混合が支配的であると見なしうる2つの部分に区別した²⁾。

一方、リボン型混合機ではリボン空隙からのモレ(leakage)が大きいために全体的混合は比較的ゆるやかに進み、混合曲線における第1の直線部分までが、回転型混合機の混合曲線の初期弯曲部分に対応していると考えてよいであろう。しかし混合初期の状態を詳細に追跡するにはまだ実験結果が不十分なので、本報ではこれ以上詳しく取扱わないことにする。

(3) 混合速度および混合度におよぼす回転速度の影響
最良の混合状態(すなわち混合度 σ が最小値 σ_s になった状態)に到達するまでの時間 θ_s あるいは総回転数 $N\theta_s$ を回転速度 N に対して点描した結果をFig. 4(a)および4(b)にそれぞれ示した。Fig. 4(a)からわかるごとくリボン型混合機の場合は回転混合機と異なり、 $N\theta_s$ におよぼす回転速度 N の影響は比較的小さかった。しかしいずれの粒径の場合にも、 $N\theta_s$ を最小にする回転速度 N_s が存在し、その値は粒径が-35/+48 meshの場合を除いて、粒径が小さくなるほど大きくなった。

またFig. 4(b)に示したごとく、最良混合状態をうるに要する時間 θ_s は回転型混合機の場合と同様に回転速度 N の増大とともに急激に減少し、いずれの粒径においても $N=100$ r.p.m. で θ_s が最小になった。

さらに最良混合状態に到達したときの混合度 σ_s を回転速度 N に対して点描した結果をFig. 4(c)に示した。-80/+100 meshの場合を除き回転速度の増加とともに σ_s は減少し、約80 r.p.m. 以上の回転速度では σ_s はほ

Fig. 4 (a) Effect of the rotational speed, N , on the cumulative revolution number required, $N\theta_s$.

Fig. 4 (b) Effect of the rotational speed, N , on the mixing time required, θ_s .

Fig. 4 (c) Effect of the rotational speed, N , on the best mixing state, σ_s .

Table 2 Summary of Experiments

Mesh (Tyler)	Av. particle size, d_{50} , [mm]	Optimum rotational speed [r.p.m.]			Optimum volume ratio of powder charged (F/V) _{op.} [%]	K_1 ($\times 10^3$)	K_2
		$N_s, N\theta$	N_s, θ	N_s, σ			
-35/+48	0.356	70	100	80	13~17	1.27	1.44
-48/+65	0.252	40	100	80	—	1.52	—
-65/+80	0.192	60	100	80	17	1.85	2.01
-80/+100	0.161	80	100	80	—	2.14	2.24

Fig. 5 (a) Effect of the volume ratio of powder charged, F/V , on the cumulative revolution number required, $N\theta_s$.

Fig. 5 (b) Effect of the volume ratio of powder charged, F/V , on the mixing time

Fig. 5 (c) Effect of the volume ratio of powder charged, F/V , on the best mixing state

ば一定の値に近づく傾向を示した。したがって供試リボン混合機では最もよい混合状態をうるに必要な最低回転

* 混合槽全内容積 V に対する粉体の真の容積 F の比。

** さらに単位時間の粉体処理能力すなわち装入量を所要混合時間で除した値を基準にとれば、見掛け容積比で約 58% であった。

速度 $N_{s,\sigma}$ は約 80 r. p. m. であるといえる。各粒径の粉体についてえられた $N_{s,N\theta}$, $N_{s,\theta}$ および $N_{s,\sigma}$ の値を要約して Table 2 に示した。

(4) 混合速度および混合度におよぼす粉体装入率の影響 つぎに粉粒体の装入率の影響をしらべるため、粒径が $-35/+48$, $-65/+80$ および $-80/+100$ mesh の粉体について、回転速度を 40 r. p. m. に保ち、粉体装入率 F/V^* を 7.5% から 35% の範囲（見掛けの容積比では 16% から 76.5%）にかえて行なった実験の結果を Fig. 5 (a), 5 (b) および 5 (c) に示した。図から所要の総回転数あるいは混合時間が最も短かく、かつ最もよい混合状態をうる最適粉体装入率 $(F/V)_{op}$ が存在することがわかった。 $(F/V)_{op}$ の値は粒径によりやや影響されるようで、 $-65/+80$ mesh では約 17%（見掛け容積比では約 38%^{**}）であった。すなわち回転軸がだいたい覆われる程度に粉体を装入した場合であった。一方、回転型混合機の場合、 $(F/V)_{op}$ は約 13%（見掛け容積比では約 30%）⁹⁾ であった。したがって混合槽の全内容積が等しければリボン型混合機の方が回転型混合機よりやや多量の粉体を仕込むことができる。

(5) 混合速度および混合度におよぼす粒径の影響

混合速度および混合度は粉粒体の粒径によって異なるので、回転速度 40 r. p. m. および粉体装入率 17.3% の一定条件において平均粒径 d_{av} の異なる 4 種の粉体をもちいて実験した結果を Fig. 6 (a), 6 (b) および 6 (c) に示した。これらの図から所要回転数 $N\theta$ および混合時間 θ_s は、ほぼ平均粒径 0.2 mm の粉体を境にしてやや顕著な差異を示し、0.2 mm 以上では余り大きく変化しないという結果がえられた。また混合度は粒径の影響をつよくうけ、 σ_s は粒径の増大とともに S 字状に増大する傾向を示した。すなわち粒径の小さいときはよい混合状態がえられるが比較的長い混合時間を要するのに対して、粒径の大きいときは比較的短い時間で混合されるが、その混合状態はよくないと推論しうる。

(6) 混合速度および混合度におよぼす粉体装入方法の影響

以上はすべて両成分粉体の界面が回転軸に対し直角になるように装入した場合 (Fig. 7, Type I) にえられた実験結果である。Type I のほかに Fig. 7 の Type II（両成分を上下に装入）のごとき装入方法の場合にえられた実験結果の比較を Table 3 に示した。予想されたごとく Type II における混合速度は Type I よりきわめて大きかった。しかし混合度 σ_s は Type I より Type II の方がやや悪くなった。

回転軸に直角な半径方向の混合速度は回転軸方向の混合速度にくらべてきわめて速いことはすでに回転型混合機においても明らかにされており、同じことがリボン型

Fig. 6 (a) Correlation of particle size, $d_{av.}$, to cumulative revolution number required, $N\theta_s$

Fig. 6 (b) Correlation of particle size, $d_{av.}$, to mixing time required, θ_s

Fig. 6 (c) Correlation of particle size, $d_{av.}$, to best mixing state, σ_s

混合機についても結論できた。

なお供試リボンは外巻リボンの一部が中央で互いに重複 (overlap) した構造になっているから、両成分粉体を Type I のごとく装入した場合、軸方向の混合速度はこの部分の重複程度に影響されることも考えに入れておかねばならない。

Fig. 7 Method of charging of the powder

Table 3 Comparison of charging method

(-65/+80 mesh; $N=40$ r.p.m.; $F/V=17.3\%$)

Type (Fig. 7)	$N\theta_s$ [—]	θ_s [min]	σ_s [vol %]	ϕ [1/min]	ratio of ϕ [—]
I	242	6	2.4	0.451	1.0
II	62	1.4	2.8	1.094	2.4

§ 4. 混合速度係数による結果の整理

Fig. 3 に示したごとく混合曲線は混合の初期部分 (低回転速度の場合は第 1 の直線部分を含む) を除き時刻 θ_s までは直線とみなしうるから $\log \sigma$ と θ の間には次式が成立する。

$$\log \sigma = \log \sigma_0 - \phi \theta \quad (1)$$

ここに $\log \sigma_0$ は直線の延長と縦軸の交点である。また ϕ は直線の傾斜すなわち σ の減少速度であって、従来から混合速度係数²⁾と呼んでいるものである。本報においてもこの混合速度係数 ϕ をもちいて § 3 で述べた実験結果を整理した。

Fig. 3 の混合曲線から求めた ϕ を回転速度 N に対して点描した結果を Fig. 8 に示した。われわれの行なった粒径範囲ではいずれの場合にもほぼ等しい傾斜をもつ

Fig. 8 Influence of revolution speed, N , on the coefficient of mixing velocity, ϕ

た直線がえられた。同図に付記した V 型^{1,5)} のとき回転型混合機の場合、臨界回転速度 N_{cr} 以上の回転速度では、混合速度は急激に低下したがリボン型混合機ではリボンの最大回転半径 (57.5 mm) から予測される臨界回転速度 ($N_{cr} \approx 125$ r. p. m., 図では ——— で示した) 以上の回転速度でも混合速度係数はわずかながら増加した。回転軸に対しある一定のねじれ角をもったリボン側面が粉粒体におよぼす力は回転軸方向および回転軸に直角な半径方向のほか、リボン側面に対し直角な方向にも働く。供試リボンの内巻および外側のリボンは互いにねじれ方向が逆であるから、リボン側面に直角な力の方向は互いに交叉しあう関係にある。したがって臨界回転速度以上の回転速度でも粒子は互いに混り合うのであろう。

また Fig. 8 に示したごとく、粒径が大きくなるほど ϕ の値は小さくなる傾向がえられた。Fig. 6 (a) あるいは 6 (b) と 6 (c) を比べると粒径の増大につれて所要回転数あるいは時間はむしろ減少しているのに対し σ_s は急激に大きくなったことから、 ϕ の値の減少は主として σ_s の増大によるためであろう。

Fig. 8 において回転速度がほぼ 80 r. p. m. までの範囲では $\log \phi$ と $\log N$ の間に直線関係が成立し、いずれの粒径についても直線の傾斜は一定であるから次式が成り立つ。

$$\phi = K_1 e^{k_1 \log N} \quad (2)$$

ここに k_1 は直線の傾斜であり、その値は約 1.52 であった。また K_1 は粒径により定まる定数であり Table 2 に一括して示した。

つぎに混合速度係数におよぼす粉体装入率の影響をしらべるため、§ 3, (4) の実験でえられた混合曲線 (図は省略した) から求めた ϕ の値を F/V に対して点描した結果を Fig. 9 に示した。粉体装入量が少ない場合には、内巻のリボンが有効に働かないため ϕ の値はきわめて小

Fig. 9 Influence of the volume ratio, F/V , on the coefficient of mixing velocity, ϕ

さく、 F/V の増大とともに急激に増大し、極大値をとり、さらに F/V が増加するとほぼ直線的に減少した。さらにこの ϕ の値を極大にする粉体装入率すなわち最適粉体装入率 $(F/V)_{op}$ はすべての粒径の場合ほぼ 17.3% であった。一方、図に鎖線と並記した V 型のとき回転型混合機^{1,5)} (ただし水平円筒型を除く) では一般に ϕ 対 F/V の関係は負の勾配をもった直線になった (図では V 型混合機とリボン型混合機の操作条件が異なっているので、定量的比較はできない)。

さらに Fig. 9 の直線関係の成立する範囲では、粒径の大きいほど ϕ の値は小さく、粒径が異なってもそれぞれの直線の傾斜はほぼ同じであった。したがってこの範囲では ϕ は次式であたえられる。

$$\phi = K_2 e^{-k_2 (F/V)} \quad (3)$$

ここに k_2 は直線の傾斜であり、平均値として約 6.02 をえた。また K_2 は粒径によって定まる定数であり、いろいろな粒径の場合の K_2 の値を Table 2 に一括して示した。

(2) 式および (3) 式の定数 K_1 および K_2 は粒径によって異なるので、これらをそれぞれ平均粒 d_{av} 径に対して点描した結果 Fig. 10 (a) および 10 (b) に示したごとく、傾斜がほぼ $-2/3$ の直線となり、 K_1 および K_2

Fig. 10 (a) Influence of particle size on the constant, K_1 , in Eq. (2)

Fig. 10 (b) Influence of particle size on the constant, K_2 , in Eq. (3)

Fig. 11 Comparison between observed values and calculated values

はともに平均粒径のほぼ $2/3$ 乗に逆比例することがわかった。

したがって (2) 式および (3) 式から ϕ は N および F/V に関して

$$\phi = K/d_{av}^{-2/3} \cdot e^{1.52 \log N - 6.02(F/V)} \quad (4)$$

なる実験式がえられた。ここに K は混合機に固有な定数である。

Fig. 11 は実測でえた ϕ を

$$d_{av}^{-2/3} \cdot e^{1.52 \log N - 6.02(F/V)}$$

に対して点描した結果である。データはややばらついてはいるが、だいたい 45° の直線上にまとまっているので近似的に (4) 式が成立するといえる。

§ 5. 結 論

リボン型混合機の混合特性ならびに操作条件を調べるとともに、混合速度係数 ϕ をもちいて実験結果を整理し、 ϕ と $2, 3$ の操作因子の関係を示す実験式を求めた。

供試粉体には比較的粗い、4 種の粒径範囲をもつ無水炭酸ソーダと砂の二成分系を選んで混合実験を行なった

結果、つぎの結論をえた。

(1) 混合曲線は初期段階を除き回転型混合機の場合と基本的には全く同様であった。リボン型混合機の方が回転型混合機より初期段階が長く、またこの段階の混合曲線の形も異なった。

(2) 最良混合状態に到達するに要する総回転数は回転速度にあまり大きい影響をうけなかった。

(3) 粒径が大きいほど混合速度が大きくなったが混合状態は逆に悪くなった。

(4) 混合速度係数 ϕ におよぼす回転速度、粉体装入率および粒径の影響を実験式にまとめた結果、 ϕ は (4) 式であたえられることがわかった。

Nomenclature

- C_0 : concentration of Na_2CO_3 in the mixture in perfect mixing stage [vol %]
 C_i : concentration of Na_2CO_3 in the spot samples [vol %]
 F : real volume of the powder charged [cc]
 N : revolution speed of the mixing ribbon [r. p. m.]
 V : inner volume of the mixing vessel [cc]
 θ : mixing time [min]
 σ : standard deviation or degree of mixing [—]
 ϕ : coefficient of mixing velocity [1/min]

Literature

- 1) Kanise, I. : *Kagaku Kikai Gijyutu*, **9**, 124 (1957)
- 2) Oyama, Y., and Ayaki, K. : *Chem. Eng. (Japan)*, **20**, 148 (1956)
- 3) Yano, T., Kanise, I. et al. : *ibid.*, **20**, 156 (1956)
- 4) Yano, T., Kanise, I. et al. : *ibid.*, **21**, 420 (1957)
- 5) Yano, T., Kanise, I. et al. : *ibid.*, **24**, 198 (1960)

On the Mixing of Solid Particles by A Ribbon-Type Mixer

T. Yano,* Y. Sano,* U. Shirakawa* and T. Tominaga*

Ribbon-type mixers, one of the fixed-type mixers, have been employed in various industrial processes, but few experimental studies are reported on them.

We studied the performances and the operational conditions of this type of a mixer, and, using the coefficient of mixing velocity ϕ , analyzed the results obtained.

The powders used were of two-component system, Na_2CO_3 -sand, of four different particle sizes.

The degree of mixing was defined by means of the standard deviation σ .

The results obtained were summarized as follows.

(1) The mixing curves obtained of the ribbon-type mixer were similar to those of the rotational-type mixer, i. e. a twin-, a double-cone and a cubic-mixer, as shown in Fig. 3. Therefore, we might consider that the mixing processes were fundamentally similar with both the types of mixers, though in the case of the ribbon-type mixer, the first stage of mixing curves were different from that in the case of the rotational-type mixer, as shown in Fig. 3.

(2) In the ribbon-type mixer the influence of the rotational speed on the number of revolution required was smaller than in the case the rotational-type mixer.

(3) The optimum volume ratio of charged powder to inner volume of mixing vessel $(F/V)_{op}$, was about 17.3%, as shown in Fig. 5 (a), (b) and (c), corresponding to about 40% of apparent volume ratio of the powder.

(4) As particle size increased, the velocity of mixing increased, with the degree of mixing σ , becoming larger, as shown in Fig. 6 (a), (b) and (c).

(5) The influences of the rotational speed, charged volume ratio of powder and particle size on the coefficient of the mixing velocity might be expressed by an empirical equation (4).

* Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Osaka Prefecture, Sakai, Japan