研究報告

連続式粉粒体混合機のかくはん羽根形状 および操作条件*

Types of Agitator and Operating Conditions of Continuous Solid Mixer

矢野 武夫**

Takeo Yano

佐藤 宗武**

Munetake Sato

峯下 豊**

Yutaka Mineshita

山本 義隆**

Yoshitaka Yamamoto

1. 緒言

粉体混合操作を連続化することは、処理能力を増大させる、前後の他の連続プロセスとの連結を容易にする、粉体処理プロセスを閉鎖系として取り扱い得る、品質管理やプロセス制御を強化して製品の品質を向上させることができる、などの点から注目されている。

これまで連続混合に関する研究は主に混合機内の粒子の混合状態を滞留時間分布に基づいて解析し、操作条件とモデルパラメータの関係を論じたものが多く^{1,2)}、連続混合機の型式や最適操作条件の選択などはまだ十分検討がなされていない。また連続混合の場合についての混合性能指標の選び方も一定しておらず、混合機内の粉体の運動と出口混合度の関係が直接には関連づけられてはいない。

連続混合機の混合性能を調べるには混合機から流出する混合粉体組成を連続的に測定する必要がある。そこで著者らは混合性能を示す指標を探索するために混合機から流出する粉体の平均組成および組成の微少変動を着色二成分粉体系に関して光学的に連続測定する装置を製作した³⁾。本報では新しく開発した堅型の連続混合機を用いてかくはん羽根形状および種々の混合操作条件、たとえば回転速度、流量、ホールドアップ量が混合性能におよぼす影響を調べた。実験は着色ガラス粉末をトレーサーとした過渡応答法により行ない、出口濃度の測定には光学的な連続測定装置を使用した。得られた応答曲線から過渡特性である無駄時間、一次モーメント、定常状態への到達時間を測定し、かくはん羽根形状と内部の粉体の

流動状態を推測した。つぎに種々の羽根と各操作条件のもとで出口の平均組成が入口での混合比に等しくなった後の、すなわち定常状態における組成の微少変動から混合度を求め、連続混合に適した羽根形状と操作条件について検討を加えた。

2. 実験装置および実験方法

Fig. 1 に装置の概略を示した。混合槽①は内径12cm、高さ40cmのアクリル樹脂製円筒で壁面および底面とのクリアランスをできるだけ少なくするようにかくはん羽根②を取り付けた。

使用したかくはん羽根は Fig. 2 に示した型式のものである。これらの羽根の代表寸法を Table 1 に示した。表中の S_R は粉体層高10cm中に接触している羽根および支持棒の面積を示す。

Fig. 1 連続混合機および組成検出器

昭和48年8月20日受理

* 化学工学協会北陸大会 (昭和46年7月金沢)、化学工学協会第37年会 (昭和47年4月名古屋) にて発表

** 大阪府立大学工学部化学工学科 (〒591堺市百舌鳥梅町4-804)

TEL 0722-52-1161

Fig. 2 かくはん羽根形式

$$S_R = [(\text{リボン垂直投影面積} \times 10\text{cm 当りのリボン巻数}) + \text{支持棒投影面積}] \quad \dots\dots(1)$$

また α はリボンの取り付け角度を示す。

$$\alpha = \tan^{-1}(P_0/\pi D_0) \quad \dots\dots(2)$$

なお、リボン羽根の回転方向は外巻きリボンが粉体をかき上げる方向とした。

粉体試料は粒径範囲が 175 ~ 350 μ の白色ガラス粉末 (A) と、トレーサーとして同粉を黒染したもの (B) を使用した。貯槽⑥および ⑪' に白 (A) を入れ、⑪には黒 (B) を入れた。まず貯槽⑥の粉体を流量 f_A [g/sec]、貯槽⑪および ⑪' の流量を f_B [g/sec] とし、流量比は $f_A : f_B = 9 : 1$ とした。出口流量は $F = f_A + f_B$ に設定した。混合機内にはまず貯槽⑥と ⑪' から白色粉のみをホールドアップ V [g] だけ入れ、かくはん速度 N [rpm] でか

Table 1 かくはん羽根寸法

型 式	外 巻 き リ ボ ン				内 巻 き リ ボ ン			S_R [cm ²]
	外径 D_0 [cm]	幅 b_0 [cm]	ピッチ P_0 [cm]	α [deg]	外径 D_i [cm]	幅 b_i [cm]	ピッチ P_i [cm]	
R-1-6	11.8	0.7	6.0	9.2	7.9	1.0	2.0	202.6
R-1-12	〃	〃	12.0	18.0	〃	〃	4.0	99.8
R-1-15	〃	〃	15.0	22.0	〃	〃	5.0	79.8
R-1-18	〃	〃	18.0	26.0	〃	〃	6.0	66.5
RW-1-18	〃	0.95	〃	〃	〃	1.24	〃	87.4
RL-1-18	〃	1.5	〃	〃	〃	1.70	〃	118.6
R-1-24	〃	0.7	24.0	33.0	〃	1.0	8.0	49.9
R-2	〃	1.0	36.0	44.2	9.8	1.0	36.0	54.6
R-1-D-15	〃	0.8	15.0	22.0	—	—	—	52.0
T-1	〃	〃	16.0	23.3	7.4	0.8	16.0	57.5
T-2	〃	〃	36.0	44.2	〃	〃	12.0	64.7
C-6	〃	—	6.0	—	—	—	—	24.0
C-9	〃	2.0	9.0	45	—	—	—	30.6

Fig. 3-1 光電式組成測定装置

くはんしておき、入口と出口の流量変化がないことを確かめた後に切り換え器⑧を作動させて ⑪' を⑪のトレーサー粉体に変えた。

混合された粉体は槽底部に設けた組成検出部⑫を経て定速ベルト⑬で排出した。検出部は 6 個の検出端から成っており (検出面積 13.6mm² × 6 個)、白および黒色粉体の混合比を光の反射率の差異として検出した。

Fig. 3-1 に組成変動を反射光により連続検出および記録のための装置概略を示した。

3. 混合粉体組成と光反射特性の検量線

粉体の反射特性は粉体種、形状、粒径、着色状態、検出端面上の接触状態によって複雑に影響される。ここでは、あらかじめ組成を決めて十分に混合した粉体を定流量で検出端部に流し、反射による出力電圧を測定した。流量は 5 ~ 25g/sec の間で変化させた。組成 C を 0 ~ 10 wt% の間で変化させ各組成につき 60 点の出力電圧を測定し平均値をその組成における出力 E 電圧とした。組成と出力電圧の関係を最小自乗法を用いて次式で表わし、検量線として用いた。

$$\overline{C} = \sum_{i=1}^k a_i \overline{E}^i \quad (a_i : \text{定数}, k = 3) \quad \dots\dots(3)$$

ただし、 $\overline{C} = C/C_0$ 、 $\overline{E} = E/E_0$ を示し、 C_0 は最大組成 (ここでは 10wt%)、 E_0 はそのときの出力電圧とした。

検量線の実測結果を Fig. 3-2 に示した。図に見るように流量変化の影響はなかった。ここで検出端面上に接触する粉体の量は、粒子の平均径 $\overline{d_p} = 0.24\text{mm}$ 、見掛け密度 $\rho_a \approx 1.44$ 、空隙率 $\epsilon \approx 0.42$ とし、光の反射は単一層のみが関係するとした場合、粒子数は約 1050 ~ 1800 個となり重量にして 0.020

Fig. 3-2 流通系の検量曲線

〜0.033 g であった。この値は別にガラス粉末と食塩の連続混合を行ない、定時間間隔でサンプルサイズを変化させてサンプリングをし、化学分析法で求めた組成変動の標準偏差と比較して妥当性を確かめた。

4. 過渡特性による内部粉体の流動状態の推測

混合槽内全体の粉体の巨視的な流動および混合を推測するために、各種羽根および操作条件下の混合機出口における過渡応答曲線の特徴値を検査した。

混合機内を粉体（白）が一定流量 F 、一定ホールドアップ V を保って定常的に流通している場合、 $t=0$ において流量を変えことなく入口粉体の一部をトレーサー粉体（黒）にステップ状に切り換えたとしても出口での混合粉体の組成 $C(t)$ は Fig. 4 のように S 字曲線を示す。この応答曲線からトレーサーの入力時点から出口において検出されるまでの無駄時間 t_d [sec] と、応答が $t=t_s$ 以後に次の定常値 C_e に到達するまでの時間の代りに $C(t)=0.95C_e$ になったときの時間 t_{95} [sec] を測定し

Fig. 4 混合機出口組成変化

Table 2 モデルの特性値

	t_d	t_{95}	m_1
Perfect Mixing Model	0	$3(V/F)$	1.0
Piston Flow Model	V/F	V/F	1.0

た。

つぎに出口組成を $C(t)/C_0$ とし、時間 t を平均滞留時間で無次元化して $\tau=t/(V/F)$ として応答曲線 (F-curve) を描き、この曲線と C_e/C_0 とで囲まれた部分の面積 m_1 (一次モーメント) を次式からシンプソンの積分法によって求めた。

$$m_1 = \int_0^\infty (1-F(\tau)) d\tau = \int_0^\infty (1-F(\tau)) d\tau \quad \dots\dots(4)$$

$$F(\tau) = C(\tau)/C_0, \quad \tau = t/(V/F)$$

$T_\infty : F(\tau) = 1.0$ とみなせる時間

これらの t_d , t_{95} , m_1 の値を完全混合モデルおよび押し出し流れモデルについて示すと Table 2 のようである。

4.1 無駄時間 t_d

Fig. 5-1 にホールドアップ量 $V=1000$ g、流量 $F=10$ g/s とした場合の t_d と回転速度 N の関係を示した。槽内の粉体は、押し流れ ($t_d=100$ sec) と完全混合 ($t_d=0$ sec) の中間にあり、 t_d は N の増加とともに減小し R-

Fig. 5-1 無駄時間 t_d と回転速度 N の関係

Fig. 5-2 無駄時間 t_d とホールドアップ H の関係

Fig. 6 無駄時間 t_d と羽根面積 S_R との関係

1-12羽根で $N=200\text{rpm}$ の場合に、かなり完全混合の状態に近づいた。

つぎに、ホールドアップおよび流量を変化させた場合の結果を Fig. 5-2 に示した。 t_d はホールドアップ高さ H の増加とともに増加する傾向を示すのに対し、流量の増加に対しては減少するように見うけられた。この増減の仕方は各かくはん羽根により多少異なっており、羽根形状の差異によって粉体の流動状態が変化するためと考えた。すなわち、ホールドアップが小さい条件では、リボンピッチが大きい場合に粉体は上下に急速に混合されるのに対し、一方、リボンピッチが小さい場合には羽根によるかくはん作用が小さく t_d は10秒以上であったが、ホールドアップおよび流量の影響をほとんど受けないもののように見なされた。

かくはん羽根形状の特徴を(1)式の S_R で表わし、 $F=10\text{ g/s}$ 、 $V=1000\text{ g}$ として N を変化させた場合の t_d を Fig. 6 に示した。羽根形状の最も単純な C-6 型では粉体は軸方向にほとんど混合されることがなくほぼ押し流れに近くなった。二重巻きリボンでは外巻きリボンによるかき上げと内巻きリボンによる押下げおよびリボン面による吐出流によって槽内は急速に一樣になるため t_d は小さい値となった。 $S_R > 70$ ではそれぞれ回転速度に応じて一定値に近づく傾向を示した。

4.2 定常状態への到達時間 t_{95}

入口に組成変動を与えてから定常状態 C_e に達する時間は完全混合の場合無限時間となるが t_{95} を到達時間の目安とすれば平均滞留時間の3倍となる。いまこの t_{95} を目安として実在の混合機内の混合状態を評価すると実際の混合機では完全混合槽とみなせる条件はかなり限られたものとなる。さらにトレーサの蓄積や不動部の形

Fig. 7-1 t_{95} とホールドアップ V の関係

Fig. 7-2 t_{95} と S_R の関係

成、チャンネリングなどがあると t_{95} は $3(V/F)$ からさらに離れた値となってくる。

Fig. 7-1 にホールドアップ V に対する t_{95} の値を示した。 t_{95} は V の増加とともにほぼ直線的に増加した。そして外巻きピッチの大きいリボンは小さいリボンの場合に比較して t_{95} は大きい。同一ピッチの場合、リボン幅の大きい方が t_{95} は大きく、また上方への輸送能力の大きい羽根ほど t_{95} が大きくなった。これらのことは、槽内部では粒子の流動状態とそれともなう濃度の分布状態が一樣とはならず、いくつかの混合領域が存在し、その大きさはピッチや幅により変化することを示している。

Fig. 7-2 には S_R と t_{95} の関係を示した。流量が小さいときには羽根の形状に無関係に完全混合時の t_{95} に近くっており、一方、流量が大きい場合には羽根形状の影響が現われて不規則な変化をした。一般に S_R が大きいほど t_{95} は大きくなる傾向があった。なお、回転速度 N は 60rpm 以上ではほとんど t_{95} に影響しなかった。

4.3 一次モーメント m_1 および平均滞留時間 V/F

Fig. 8-1 に m_1 とホールドアップ V の関係を示した。 m_1 は槽内に死空間がなく容積変化やトレーサの蓄積

Fig. 8-1 一次モーメント m_1 とホールドアップ V の関係

Fig. 8-2 槽内平均滞留時間 V/F とホールドアップ $V(H)$ の関係

などがなければ1に等しい。ここでは m_1 はほぼ1の近くに分散しているが V が増加すると m_1 がやや減少する傾向にあり、特にリボンピッチが大きい場合と小さい場合にみられた。この m_1 を用いて各リボンについての平均滞留時間を計算してFig. 8-2に示した。これらの2つの図からホールドアップ量を多くすると槽内の粉体の流動状態が均一でなくなるリボンがあり、特に流量が大きい場合には顕著になった。流量の少ないところでは外巻きリボンピッチ $P_0=18\text{cm}$ の羽根が $H=10\text{cm}$ 付近で完全混合の場合とほぼ一致した。

5. 混合度 M に対する操作条件の影響

連続混合機の過渡応答実験において混合機から流出する粉体の組成 $C(t)$ を連続記録すればFig. 4のような応

答曲線が得られる。 t_{95} あるいは t_s 時間経過後の出口平均組成が時間的に一定となった、すなわち定常状態に達した後、 t 時刻における i 番目のサンプリング時点で検出される組成を $C_i(t)$ とすると n 個のサンプルの平均値は次のようである。

$$C_m(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i(t) \quad \dots\dots(5)$$

$t \geq t_s$ で $C_m(t)$ が時間に無関係に一定値になったときを C_e とした。

$$\frac{1}{n(t_M - t_s)} \sum_{i=1}^n \sum_{t=t_s}^{t_M} C_i(t) \equiv C_e \quad \dots\dots(6)$$

ここで出口組成 C_e と入口組成 C_0 …(f_A/F :ただし、 $F=f_A+f_B$)…との比 C_e/C_0 は槽内に死空間やトレーサの蓄積量に変化がなく、また検出端が出口断面の組成を十分に代表している場合に1はである。

$$\frac{C_e}{C_0} = 1 \quad \dots\dots(7)$$

この関係は、あらかじめ入口組成 C_0 に調製した粉体を検出端を通し $C_{m1}(t)$ を測定しておき、つぎに各混合実験で得た $C_{m2}(t)$ の値と比較することにより調べた。ここでは(7)式が成立する場合の結果について取り扱った。

$t \geq t_s$ で出口組成の微小変動値 $C_i(t)$ の C_e に対する標準偏差 σ を次式から求めた。

$$\begin{aligned} \sigma &= \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i(t)}{C_0} - \frac{C_e}{C_0} \right)^2 \right]^{1/2} \\ &= \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{C}_i(t) - 1.0)^2 \right]^{1/2} \\ &\equiv M \quad \dots\dots(8) \end{aligned}$$

この σ の値を連続混合時の混合度 M とし、 M の値が小さいほど良い混合状態を示す指標として使用することにした。

5.1 かくはん羽根回転速度 N の影響

Fig. 9に M と N の関係を示した。これらの結果は平均滞留時間は同一であるが V と F が異なる場合のものである。Fig. 9-1では、 N が小さい場合には M が大きく混合度は悪いが、 $N > 60\text{rpm}$ では各リボンについて固有の

Fig. 9-1, 2 回転速度 N の影響

値をとり N にはほとんど無関係であった。これに対し、Fig. 9-2 では N が増大するに従い M は小さくなり、さらに N が増大すると M は大きくなってかえって混合度が悪くなる傾向を示した。これらの結果から次のことがわかった。 N が小さい場合には半径方向の混合が不十分となり逆に N が大きい場合にはリボン羽根によって粉体は強い遠心力を受けて壁面をすべりはじめ、また、中心部では空間が生じてかえって混合度が悪くなる。そのため回転速度は約 100rpm が最も良く混合する条件であった。

リボンピッチについては、 P_0 が小さい場合はリボン面の粉体に接する角度が小さいため N を大きくしても M は良くならなかった。ここでは P_0 が 18cm ($P_0/D_0=1.5$) の型式が良好な混合状態を与えた。

5.2 流量 F の影響

粉体流量 F の変化は混合時間に相当する平均滞留時間を変化させるばかりでなく槽内の粉体の流動状態にも関連している。Fig. 10 には $N=60\sim100\text{rpm}$, $V=500\sim3000\text{g}$ の場合についての M 対 F を示した。

流量の増大は一般に混合状態を悪くしたが、 P_0 が 18cm のものと R-2 型羽根は流量の影響をあまり受けず高流量でも良い混合状態を示した。また、図には示さなかったが V が小さくなると M は流量に対して非常に敏感になり流量が増大すると混合状態は悪くなった。すなわち、 V が小さいと入口での組成変化やホールドアップ量のわずかな変化が内部粉体の流動状態に直接影響を与え、非常に不安定な状態になるものと推測された。

Fig. 10 流量 F の影響

5.3 粉体ホールドアップ高さ H の影響

混合機内の粉体の流動はかくはん羽根の形状とともにホールドアップの影響を受ける。すなわち 4 節でも述べたように粉体層高によってはほぼ一段の完全混合槽として取り扱える場合がある。また、入口から入った粉体が出口に到るまでに最終混合度に達するに必要な最小ホールドアップ高さが存在する。逆に羽根形状によってはホールドアップが増えると $m_1 < 1$ となる場合もあった。

ここでは粉体ホールドアップ $V[g]$ を次式によって層高 $H[\text{cm}]$ として $N=100\text{rpm}$ のもとで混合度 M と H の関係を求めた。

$$H = \frac{4V}{\pi D_T^2 \rho_a'}$$

D_T : 槽直径, ρ_a' : かくはん状態での見掛け密度 1.163

Fig. 11-1 に $F=10\text{g/s}$ の場合を示した。この流量範囲では、 H の増加に従って M は減少し、最小値を示した後再び M が増加する傾向を示すものと、 H にほとんど無関係に一定値を示す場合とがあった。前者としては外巻きリボンピッチ P_0 が 18cm のもの、後者としては P_0 が

Fig. 11-1 混合度 M とホールドアップ高さ H の関係 ($F=10\text{g/s}$)

Fig. 11-2 混合度 M とホールドアップ高さ H の関係 ($F=20\text{g/s}$)

6 および 24 cm のものであり、混合度の最も良い値を示すのは前者のリボンであった。この場合にはリボン羽根の取り付け角 $\alpha \approx 26^\circ$ が適当であり H が 7~15 cm の間では槽内の粉体がほぼ完全混合状態であるとみなせた。 H が小さすぎると粉体は十分に混合される前に内外のリボン間隙や軸付近を通過して出口に向う、一方、 H が大きくなると粉体層の上部の未混合粉体と下部の混合粉体との間に逆混合現象が起ってかえって出口の混合度が悪くなるものと考えられる。この現象は P_0 の大きい型式の羽根や、粉体を上方に輸送する能力の大きい広幅のリボンの特徴であるとみなし得る。本実験では $7 < H < 15\text{ cm}$ の範囲で良混合状態が得られた。

Fig. 11-2 には $F=20\text{g/s}$ の場合を示した。この場合にも M には最小値が存在したが混合状態の良好な H の範囲は $F=10\text{g/s}$ の場合よりも狭くなった。 $P_0=18$ のリボンは $H=15\text{ cm}$ 付近で最小の M を示し、リボン幅の広い $RL-1-18$ が最も良い混合状態を与えた。なお、流量の少ない場合 ($F=5\text{g/s}$) には H の影響は前の 2 つの条件の場合より少なかったが $RL-1-18$ が良い性能を示した。

5.4 リボンピッチ P_0 およびリボン幅 b_0 の影響

二重巻きリボンのピッチおよび幅が混合機内の粉体の流動に大きな影響を与えることが観察実験および混合度の測定結果からわかった。ここでは、上方から下方に流下する粉体の運動に逆らって下方から上方に押上げる運動を与える外巻きのリボンに注目した。リボンの形状を規定する因子としてリボンピッチとリボン外径の比の値 P_0/D_0 または、リボンの取り付け角として(2)式で示される α 、およびリボン幅 b_0 を規定するものとして次式を使用した。

$$B = \left(\text{リボン垂直投影面積} / \frac{\pi}{4} D_0^2 \right) \quad \dots\dots(9)$$

Fig. 12 混合度 M と外巻きリボンピッチ P_0 の関係

Fig. 12-1~3 に $N=100\text{rpm}$ 一定として、 $F=5, 10, 20\text{g/s}$ に変化させた場合の M と P_0/D_0 の関係を示した。使用したリボンは $P_0/D_0=3.0$ の R-2 型以外はすべて幅 $b_0=0.7\text{ cm}$ の R-1 型である。

Fig. 12-1 は $F=5\text{g/s}$ の場合の M と P_0/D_0 を H をパラメータとして示した。ここでは H が 15 cm のときに $P_0/D_0=1.5$ で M が最小値を示した。 H による M の差は少なかった。

Fig. 12-2 には $F=10\text{g/s}$ の場合を示した。この流量範囲では P_0/D_0 が小さいところで H の影響があり H の小さいところでは混合状態が悪かった。 $P_0/D_0=1.5$ で最良の混合状態を示すが $H=6.5\text{ cm}$ では P_0/D_0 の影響が少なかった。これらの結果は 4 節の t_d, m_1 などによる推察とはほぼ一致した。

流量が大きくなると Fig. 12-3 に示したように $P_0/D_0=1.5$ のところで $H=15\text{ cm}$ の場合に混合状態が良好であった。一方、他の P_0/D_0 の値では H の影響が少なくなった。

以上の結果から $P_0/D_0=1.5$ すなわち、リボン羽根取り付け角 α が 26 度付近で最も良いかはん効果が得られることがわかった。

つぎに、この $P_0/D_0=1.5$ の羽根について羽根幅 b_0 の影響を調べた。Fig. 13 に M 対 B の関係を示した。 $N=100\text{rpm}$ 一定とし、 b_0 を 0.7, 0.95, 1.5 cm の 3 種類に変化させた。この結果、 B が大きい値の場合に、すなわち b_0 が大きいときに M は良好となった。このときの混合槽水平断面におけるリボンの占める割合は 0.72 であった。この値をさらに大きくするとかえって粉体の自由流

Fig. 13 混合度 M とリボン面積比 B の関係

動部を減少させ、その結果リボン先端面による粉体層の剪断効果を失なわせることになるものと推測される。

6. 結 言

堅型円筒内にかくはん翼あるいは連続巻きのリボン羽根を取り付けた型式の連続式粉粒体混合機の特性を過渡応答法によって実験した。出口粉体組成の連続測定によって得られた応答曲線から過渡および定常特性をそれぞれ算出し、連続混合操作に適した羽根形状および操作条

件について検討しつぎの結果を得た。

i) 過渡特性である無駄時間 t_d および定常状態への到達時間 t_{95} と S_R の関係から $S_R > 70 \text{ cm}^2$ の二重巻リボン羽根が連続混合機用として適していることがわかった。

さらに定常特性である混合度と操作条件および羽根形状の関係からつぎの各結論が得られた。

ii) 連続二重巻リボンのうち P_0 が小さいとき V および F を増大させると $m_1 < 1$ となり混合には好ましくない。

iii) ホールドアップ高さ H が小さくなると流量 F の影響を受けやすくなり H の最小値が存在した。また H を極端に大きくするとかえって混合度を悪くする場合があった。本実験では $P_0/D_0 = 1.5$ のリボンで回転速度 $N = 100 \text{ rpm}$ の場合に $7 < H < 15 \text{ cm}$ の範囲が最良の混合度を与える操作条件であった。

iv) リボン形状としては $P_0/D_0 = 1.5$ すなわち羽根取り付け角 $\alpha = 26^\circ$ 、リボン面積比 $B = 0.72$ ($b_0 = 1.5 \text{ cm}$)の二重巻リボンが適当であり H を選ぶことによって良好な混合性能を発揮できた。

記 号

B	: (9)式	[—]	n	: サンプル数	[—]
b_0	: 外巻リボン幅	[cm]	P_0	: 外巻リボンピッチ	[cm]
$C_i(t)$	: 出口組成	[wt%]	S_R	: (1)式	[cm ²]
C_e	: 定常平均組成(6)式	[wt%]	t	: 時間	[sec]
C_0	: 入口組成	[wt%]	t_d	: 無駄時間	[sec]
D_0	: リボン外径	[cm]	t_{95}	: 0.95 C_e になる時間	[sec]
D_T	: 槽内径	[cm]	T_∞	: $F(\tau) = 1.0$ とみなせる時間	[—]
F	: 流量	[g/sec]	V	: ホールドアップ量	[g]
H	: ホールドアップ高さ	[cm]	α	: リボン取り付け角	[deg]
M	: 混合度(8)式	[—]	ρ_a	: 粉体見掛密度	[g/cm ³]
m_1	: 一次モーメント(2)式	[—]	ρ_a'	: 粉体見掛密度 (かくはん時のゆるみ)	[g/cm ³]
N	: 回転速度	[rpm]	τ	: 無次元時間 $= t/(V/F)$	[—]

引 用 文 献

- 1) 杉本: 化学工学, 32, 291 (1968)
- 2) Tone, S. et al.: J. Chem Eng., 5, 68 (Japan)(1972)
- 3) 矢野, 佐藤: 粉体工学研究会誌, 9, No. 4 244 (1972)

Author's Abstract

Agitator Types and Operating Conditions of Continuous Solid Mixer

by

Takeo YANO, Munetake SATO, Yutaka MINESHITA and Yoshitaka YAMAMOTO

(Department of Chemical Engineering, University of Osaka Prefecture)

An experimental study on the mixing characteristics of a continuous solid mixer was carried out by use of a tracer response method. The concentration of tracer in the outlet stream was measured continuously by an optical method.

The flow pattern of solids in the mixer was estimated from the dead time, the attaining time to a steady state of response and the first order moment of the residence time distribution.

The degree of mixedness was determined as the function of standard deviation at a steady state.

The following results were obtained :

- 1) A suitable type of the agitator for a continuous solid mixer was a double herical ribbon ($S_R > 70 \text{ cm}^2$ where S_R : area of contacting surface of a ribbon and supporting rods within a height of 10cm of hold-up)
- 2) When the pitch of outer ribbon P_0 was small and the hold-up H and flow rate F were large, the degree of mixedness tended towards inferiority.
- 3) A good mixing condition was obtained by using the ribbon type of $P_0/D_0=1.5$, in the range of $7 < H < 15 \text{ cm}$ and rotating speed $N=100 \text{ r.p.m.}$
- 4) The best shape of the ribbon within the limits of the experiment was as follow :
ratio of outer pitch to outer diameter of the ribbon : $P_0/D_0=1.5$ setting angle of the ribbon : $\alpha=26^\circ$
ratio of the projection area of the ribbon to the base area : $b=0.72$

List of Figure and Table

Fig. 1 Schematic diagram of Continuous Solid Mixer and Probe

Fig. 2 Types of Agitators

Fig. 3.1 Block Diagram of Optical Measurement System

Fig. 3.2 Calibration Curve

Fig. 4 Change of Concentration at the Exit of Mixer

Fig. 5.1 Dead Time t_d vs. Rotation Speed N

Fig. 5.2 Dead Time t_d vs. Hold-up H

Fig. 6 Dead Time t_d vs. Area of Ribbon S_R

Fig. 7.1 t_{95} vs. Hold-up V

Fig. 7.2 t_{95} vs. S_R

Fig. 8-1 First Moment m_1 vs. Hold-up V

Fig. 8.2 Mean Residence Time V/F vs. Hole-up H

Fig. 9.1,2 Influence of Rotation Speed N

Fig. 10 Influence of Flow Rate F

Fig. 11.1 Degree of Mixedness M vs. Hold-up H ($F=10 \text{ g/s}$)

Fig. 11.2 Degree of Mixedness M vs. Hold-up H ($F=20 \text{ g/s}$)

Fig. 12 Degree of Mixedness M vs. Pitch of Outer Ribbon P_0

Fig. 13 Degree of Mixedness M vs. Ratio of Area B

Table 1 Size of Agitator

Table 2 Comparison of Model