噴霧乾燥装置における気流の流動挙動

佐野雄二*, 薄井洋基*, 山本修一*
Yuji SANO, Hiromoto USUI, Shuichi YAMAMOTO

Key Words : Spray Dryer, Drying, Turbulent Flow, Jet Flow

図1 噴霧乾燥装置の形状

緒 言

噴霧乾燥装置は、固体を含む溶液あるいはスラリーを、二流体ノズル、加圧ノズルあるいは回転円板を用いて乾燥室内に噴霧し、熱風と接触させ、原料液より直接数十～数百ミクロンの乾燥粒子を得る乾燥装置で、食品、医薬品、種々の無機および有機薬品、洗剤などの製造に広く用いられている^{1,2)}。乾燥筒は、その熱

風吹込の方法が並流、向流、並流と向流の併用、更に並流あるいは向流の吹込口を筒の接線方向に設置し旋回流を与えるもの、など多様で、乾燥筒の形状も種々のものが用いられている。図1には、代表的と考えられる乾燥筒の例を示した。図1の(a)は筒径に比し筒長の大きい、いわゆる tall 型の乾燥筒で、この場合、気流の流動は管内乱流に近く解析は比較的容易である。なお筒下部に製品取り出し口とは別の排気口をつける場合もある。(b)は(a)の並流筒の筒長と筒径の比を小さくしたもので、熱風吹込口の直径を小さくして熱風吹き込み速度を 20～30 m/s とし、噴霧直後の液滴の乾燥の促進を図る。なお、吹込口に案内羽根をつけ旋回流の形で吹き込むものもある。この型は大容量のものも多く、噴霧には回転円板を用いることが多い。(c)は旋回流型で熱風吹込口を筒の接線方向に取り付け、筒内の熱風の流動挙動はサイクロンに近い。(d)は向流型の乾燥筒の例で、洗剤は通常、この型の乾燥筒により製造されている。

昭和62年3月2日受付

* 山口大学工学部化学科 (〒755 宇部市常盤台 2557)

TEL 0836-31-5100 内線 345

〈著 者 紹 介〉

・佐野雄二, 山本修一, p.383 参照

・薄井洋基 昭和21年3月25日生

昭和44年京都大学工学部化学工学科卒業

昭和49年同大学大学院博士課程修了

昭和51年1月山口大学工学部化学工学科講師

昭和54年4月山口大学工学部化学工学科助教授、現在に至る。

専 門: 移動現象, 乱流, レオロジー

噴霧乾燥筒内の熱風の流動挙動は、筒内の温度分布と関連し粒子の乾燥履歴や滞在時間分布を決定し、さらに装置の乾燥処理能力や製品品質に影響をおよぼす。また、乾燥不十分のまま筒壁に到達した粒子は壁面に付着し重大なトラブルを引き起こすので、このトラブルを無くする観点からの検討は実用上重要である。従来、噴霧乾燥筒内の熱風の流動挙動について詳細に検討した報告は少なく、筒壁付着のトラブルの解決あるいは製品品質への影響は専ら実装置により試行錯誤的に検討され、また、処理能力は、概括的に容量係数によって見積られ、装置内の熱風の流動挙動と粒子の乾燥挙動の対応は、たとえば Goffredi と Crosby³⁾ の報告のように完全混合型あるいは押し出し流れ型として巨視的に処理されている。

最近、Crowe⁴⁾ は、乾燥筒内の粒子と熱風との間の運動量、熱および物質移動の相互作用を局所的に考え、筒内での粒子と熱風の速度、温度および濃度の分布を詳細に検討する PSI モデルを提唱している。丹野ら⁵⁾ は、このモデルを図 1 の (a) の型の乾燥筒に適用し、熱風の流動を $k-\epsilon$ 型の二式乱流モデル⁶⁾ で記述し、液滴粒子の筒壁への付着挙動を解析している。図 1 (c) のサイクロン型の乾燥筒については、Gauvin ら⁷⁾ の報告があり、実験的に求めた熱風の速度分布を用い、粒子の乾燥履歴および Trajectory の解析を示している。なお、この型の熱風流動挙動の解析には修正 $k-\epsilon$ モデルをサイクロンに適用した Boysan ら⁸⁾ の報告が参照されよう。PSI モデルのような微視的な解析は、先ず与えられた形状の乾燥筒につき気流の流動挙動が明らかにされて後はじめて可能となるが、図 1 の (b) や (d) に示すような形状の乾燥筒については、これまで気流の流動挙動自体が未検討である。 $k-\epsilon$ モデルあるいはさらに複雑なレイノルズ応力モデルなど最近の乱流モデル式は、ある程度複雑な装置形状の乱流に対してもその有用性が示されつつあり^{9,10)}、今後このような乱流モデル式を用い、PSI モデルに従い、各種噴霧乾燥筒の解析を展開することが可能となるものと考えられるが、なお図 1 (b) や (d) の乾燥筒内の気流の流動挙動は複雑で、それぞれの装置形状に応じたモデルの修正が必要なものと考えられ、そのためには、先ず装置内の気流の流動挙動に実験的な知見の集積が必要であろう。

本報告では、図 1 の (b) の型の乾燥筒につき、気流の流動挙動を実験的に検討した結果¹¹⁾を述べる。

図 2 実験装置

1. 実験装置および方法

実験に用いた乾燥筒は実用されている噴霧乾燥装置をスケールダウンしたもので、図 2 に示す内径 0.94 m、高さ 2.85 m の鋼板製である。下部の円錐筒の角度は 60 度で上部と下部に取り付けた気流吹込み口および排出口の直径は 0.25 m である。筒内の気流の流動状態を観察する窓を取り付け、また熱線風速計検出端を取り付けた棒を種々の高さの位置で筒に取り付けられるようにした。この棒を半径方向にトラバースさせ、筒内の種々の位置での気流速度を測定した。熱線風速計としては定温型の KANOMAX-1011 を用い、検出端子はスプリットフィルム型を主として用い、時間～空間相関を測定する場合 I 型の熱線検出端子を併用した。気流流速データは計算機に取り込み、平均流速、乱れ強度および相関係数の値を算出した。また、筒内の気流の流動方向を知るため、細い棒の先端に糸を取り付け、いわゆるタフト法により流れ方向の確認を行った。なお、本実験では筒内の気流の速度分布を測定することを目的としたので、噴霧装置は取り付けなかった。

筒入口での気流平均速度 U_0 は 7.55 m/s で、入口管径に基づくレイノルズ数は 1.26×10^5 である。測定は常温の空気流につき行なった。

2. 実験結果および考察

乾燥筒内の気流の流れは大別して自由噴流に近い

図3 乾燥筒内風速分布

ジェット流領域とその周辺部の二次流を含む領域に分けられよう。先ずタフト法により観察した軸方向速度が時間平均的にゼロとなる半径方向距離の z 方向の変化を図3の(a)に示した。図よりわかるようにジェット流は筒半径のほぼ1/2以内に収まり筒下端の出口より流出する。筒上半分の周辺部には二次流に基づく上昇流が観察された。図3の(b)にはスプリットフィルム検出端による時間平均軸方向速度 $\bar{v}_z$ の半径方向分布を示した。また、図4にはその測定値の例を示した。図4で、 $\bar{v}_z/U_0=0.1$ の値を示す半径方向位置を、図3(a)に点線で示した。この分布は、タフト法に基づくジェット流の境界とほぼ対応している。図4の $\bar{v}_z$ の測定値を平滑化し、連続式を積分した次式により半径方向時間平均速度 $\bar{v}_r$ を算出し、図5に示した。

図4 $\bar{v}_z$ の分布

図5 $\bar{v}_r$ の分布

$$\bar{v}_r = -\frac{1}{r} \int_0^r r \left(\frac{\partial \bar{v}_z}{\partial z} \right) dr \quad (1)$$

$\bar{v}_r$ の値は入口より1.3 m程度まで周辺部で負の値を示し、ジェット流が周辺部の空気を吸引することを示す。また、それ以下の z の位置では、 $\bar{v}_r$ は時間平均的には半径方向の全範囲にわたり正の値を示す。これより、 $z=0 \sim 1.3$ mの範囲で弱い2次的な循環流がほぼ定常的に形成されていることが示唆される。これ以下の部分では、ジェット流の軸方向の変動が激しく、また周辺部の流れも変動の大きい上昇流あるいは下降流を示し、混合の著しい領域を形成している。なお、図3(a)に $\bar{v}_r$ がゼロとなる半径方向位置を示した。この値はタフト法によるジェット流境界とほぼ対応する。図6には $\bar{v}_z$ がゼロとなる半径方向位置までのジェット流風量 Q_g を図4の結果を用い、次式により算出し示した。

$$Q_g = \int_0^{r_{\bar{v}_z=0}} 2\pi r \bar{v}_z dr \quad (2)$$

図6 ジェット流の風量

Q_g の値は入口より増大して行き $z = 1.4 \text{ m}$ 付近で最大となり再び減少していく。 Q_g の増大は図5の $\bar{v}_r$ の負の値に対応し、筒上半周辺部に存在する二次流をジェット流が吸引同伴することによるものと考えられる。

次に、軸方向速度の変動につき検討した結果を述べる。軸方向速度の変動値 $v_z' = v_z - \bar{v}_z$ の Root mean square $\sqrt{v_z'^2}$ を求め、 U_0 を基準にした乱れの強さ $\sqrt{v_z'^2}/U_0$ を算出し、図7に示した。乱れは、筒上半部分のジェット流の境界付近で主として形成され、下流に伝播して行くものと考えられる。図7のGの部分、流速の特に小さいデッドスペースを形成している。また、乾燥筒の $z = 1.3 \text{ m}$ 以下の下半分では、壁の近傍を除

き乱れは U_0 の10%以上となり、混合が著しく促進される。実際の乾燥筒では、空気流温度はこの部分で均一化され液滴の乾燥は完全混合に近い状態で行なわれるものと考えてよいであろう。

このような流れの様相をさらに詳細に検討するために乾燥筒内の種々の位置で速度の変動状態を測定した結果を図8に示した。図8のA～Iは、図2に示したA～Iの各位置での v_z の時間変化を示す。Aは $z = 0.07 \text{ m}$ におけるジェット流内の境界近くでの測定結果である。 v_z はすべて正の値を示し変動はかなり大きい。Bは同じ位置でのジェット流境界のすぐ外側での結果を示し、さらに壁面に近いCの図と共に前述のデッドゾーンに対応し、正負にわたる非常に弱い速度変動を示している。Dは $z = 0.86 \text{ m}$ におけるジェット流の境界付近での結果であり、速度の変動は非常に大きく、その振幅変動範囲は $+8 \sim -3 \text{ m/s}$ の範囲におよぶ。この z の位置でさらに外側のEおよびFの点では、 v_z の値は負の値(上昇流)が大部分を占め、この部分で二次循環流が存在することを示す。G、HおよびIは乾燥筒下部の円錐部に入る $z = 2.3 \text{ m}$ での速度変動を示す。GおよびHでの変動の激しさは筒下半部での混合が非常に良いことを示している。またI点では v_z の値は大部分負の値を示し、これはジェット流の一部が円錐壁に衝突し反転して上昇流となることによるものと考えられる。

このような速度の時間変動挙動の原因を考察するため、さらに変動速度の時間相関を検討してみる。図9には、図8のF点での速度変動に基づく時間相関値を次式で算出した結果を示した。

図7 乱れの強度分布

図8 乾燥筒種々の位置での速度の変動挙動

図9 時間相関

$$R_E = \frac{v_x'(t) \cdot v_x'(t + \tau)}{v_x'^2} \quad (3)$$

図9によると、 R_E の値がほぼゼロとなる遅れ時間 τ の値は0.6秒程度の値を示し、さらに $\tau = 1.05$ 秒付近でピークを示している。この相関図から、大きさが時間で表して0.6秒程度までの流体塊の運動が代表的と考えられ、さらに1秒程度の周期変動が重畳していることが示唆される。図8のF点の速度変動をみると1秒程度の周期で速度がゼロになる時間と速度が -2m/s （上昇流）程度となる時間が間欠的に表れている、このような間欠的な速度変動の挙動はF点のほかE、GおよびHの点でも見られ、この乾燥筒の流れの特徴を示すものと考えられる。

図10には、図2に示したXおよびYの位置でI型の熱線検出端子を設置して同時に速度変動を測定し、X～Y2点間の時間～空間相関を次式により求めた結果を示した。

$$R_{XY} = \frac{v_x' x(t) \cdot v_x' y(t + \tau)}{\sqrt{(v_x' x)^2} \cdot \sqrt{(v_x' y)^2}} \quad (4)$$

この図によれば R_{XY} は遅れ時間 $\tau = 1$ 秒付近でピークを示し、Xの位置を通過した流体塊の一部は平均的に1秒程度後にYの位置に到達することを示す。この遅れ時間に対する説明として、Xの点を通過した流体塊が下端の円錐壁にあたり、その一部が反転して上昇流となりYに到るものと考え、この間の距離は約2mであり、Xの位置での下降流速度が $2 \sim 4\text{m/s}$ で

図10 時間空間相関

あることから、X～Y間の流体塊の平均速度を 2m/s と考えて説明することができよう。また、図8のE、F、GおよびHの点では速度がゼロとなる期間が0.3～1秒程度存在するが、このような速度の間欠性は、ジェット流の軸自体の振動に起因し、間欠的な流体塊の壁面に沿う上昇運動が存在することを示唆する。これは図9の1秒程度の変動周期とも対応して考えられる。

以上の実験結果の考察より、この型の乾燥筒の流動挙動を模型的に示すと図11のようになる。すなわち、この筒は気流の流動挙動から見て高さ方向に二分して考えられる。筒上半分の中心部にはジェット流、周辺部の上部にデッドスペース、その下に二次循環流部が存在し、二次循環部では筒下部の円錐壁からの反転流の一部を含む弱い上昇流が存在し、この流れはジェット流に吸引される。筒の下半分ではジェット流は十分に半径方向に広がり、円錐壁からの反転流の一部を含み混合は促進され、近似的には完全混合ゾーンと見なしてよいであろう。なお、この型の乾燥筒につき吹き込み空気流の温度をインパルスのに変え、出口での温度応答を測定した結果¹²⁾は、図11に示した模型に従い、筒上部をジェット流に基づく押し出し流れ、筒下部を完全混合域とした応答モデル式でほぼ説明することができた。

この型の乾燥筒につき、 $k-\epsilon$ 二式乱流モデルによる理論計算を試みた結果は、時間平均速度分布および乱れ強度分布に定性的な一致は得られたものの、実験値を十分説明するに到らなかった。この型の乾燥筒の

図11 乾燥筒内流動のモデル図

流れはこれまで述べたように乱れの強度が著しく大きく、さらにジェット流の軸のぶれおよび円錐壁からの反転流に起因すると思われる周期の大きい変動が観察され、流動挙動は非常に複雑で、基本的には等方性乱れを仮定する二式モデルでは実験値を定量的に説明する解を得ることは困難と考えられた。

結 言

工業装置として用いられている、筒径に比し筒長の短い型の噴霧乾燥筒につき筒内の気流の流動状態を実験的に検討し、軸方向および半径方向速度の分布を求めた。また筒内の種々の点での軸方向速度の変動値より筒内の気流の流動挙動を考察した。

使 用 記 号

Q_g : ジェット流流量	$[m^3/s]$	v_r : r 方向の時間平均速度	$[m/s]$
R_g : 時間相関, (3)式	$[-]$	v_z : z 方向の瞬間速度	$[m/s]$
R_{xy} : 時間～空間相関, (4)式	$[-]$	v_z : z 方向の時間平均速度	$[m/s]$
r : 半径方向距離	$[m]$	v'_z : z 方向の変動速度	$[m/s]$
t : 時間	$[s]$	z : 軸方向距離	$[m]$
U_0 : 入口平均速度	$[m/s]$	τ : 遅れ時間	$[s]$

引 用 文 献

- 1) 桐栄良三: “乾燥装置”, 日刊工業(1966)
- 2) Masters : “Spray Drying Handbook (3rd Ed.)”, John Wiley & Sons (1979)
- 3) Goffredi, R. A. and E. J. Crosby : *IEC Process Des. Dev.*, **22**, 665 (1983)
- 4) Crowe, C.T., M. P. Sharma and D. E. Stock : *Transactions ASME, J. Fluid Eng.*, 325 (1977)
- 5) 丹野庄二, 川崎 剛, 三浦隆利, 大谷茂盛: 化工論文集, **12**, 185 (1986)
- 6) Launder, B. E. and D. B. Spalding : “Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering”, pp. 269–289, North-Holland Publishing Co. (1974)
- 7) Gauvin, W. H. and S. Katta : *AIChE J.*, **22**, 713 (1976)
- 8) Boysan, F., W. H. Ayers and J. Swithenbank : *Trans. Inst. Chem. Engr.*, **60**, 222 (1982)
- 9) Launder, B. E., G. J. Reece and W. Rodi : *J. Fluid Mech.*, **68**, 537 (1975)
- 10) Gosman, A. D., E. E. Khalil and J. H. Whitelaw : “Turbulent Shear Flow 1”, pp. 237–254, Springer Verlag (1979)
- 11) Usui, H., Y. Sano, Y. Yanagimoto and Y. Yamasaki : *J. Chem. Eng. Japan*, **18**, 243 (1985)
- 12) Usui, H., Y. Sano, Y. Yanagimoto and K. Kato : *J. Chem. Eng. Japan*, **18**, 464 (1985)