

SVミキサーの乾燥性能とスケールアップ

Drying Performance of the SV MIXER and Criteria for Scaling It Up



(化)技術部 設計第2課
和田 雅之
Masayuki Wada

The SV mixer has been widely used in powder handling equipment such as for mixing and drying.

This paper shows some specific features of the SV mixer when used as a vacuum dryer and also shows its performance and criteria for scaling it up as an ordinary dryer.

まえがき

SVミキサーは、逆円錐形容器内に自公転するスクリュウを持ち、粉粒体に三次元的な対流運動を与える構造で、その独自の混合機構を有効に利用して、ファインケミカル、医薬品、合成樹脂、農薬、染料・顔料、窯業、食品等の広範囲において混合機及び真空乾燥機として数多く使用されている。

真空乾燥機としてのSVミキサーの特長、構造、乾燥性能及びスケールアップについて紹介する。

1. 真空乾燥について

現在工業的な目的に使用されている乾燥装置の種類、操作条件は、多種多様であるが、原料粉粒体の物物理化学的性質により、熱的に敏感かつ不安定なもの、あるいは乾燥作業の効率化などの点から、比較的低温下でかつクローズドシステムで自動化が出来る真空乾燥が有効な場合が多く、常圧乾燥装置から真空乾燥装置へ装置の更新を行うケースが増加している。

2. 真空乾燥型SVミキサー（T型SVミキサー）の特長

真空乾燥型SVミキサー（T型SVミキサー）は、第1図に示すような間接加熱（伝導受熱）の回分式容器固定材料攪拌型乾燥機に属し、独自の混合機構をそのまま乾燥機に応用したもので50~15000ℓ（最大仕込量）を標準機種としている。

容器内部構造は、一般の混合型SVミキサーと基本的には同一であり、容器の真空仕様及び外套が付属することが異なっている。

容器内の粉粒体は、減圧下で外套熱媒体から間接加熱されながらスクリュウの自公転により常に混合され槽内湿分及び粉粒体温度を均一化しながら伝熱面を更新するため、効率のよい熱伝達が行われる。

真空乾燥機としてのSVミキサーの特長をまとめると、

1) マイルドな混合状態で均質な粉粒体が得られる。

スクリュウはゆるやかに自公転するため、粉粒体粒子を破壊することがほとんどなく、柔らかい結晶の乾燥にも適している。また、独自の混合機構により、湿分、粒径、成分等の均質な粉粒体を同時にかつ多量に得ることが出来る。

2) 乾燥機・混合機兼用で使用出来る。

乾燥後、添加物を加え混合操作を行う場合、同一機器で行うことができ、機器数の減少、コンタミの防止、ハンドリングの減少等メリットが多い。

3) 伝熱効率がよい。

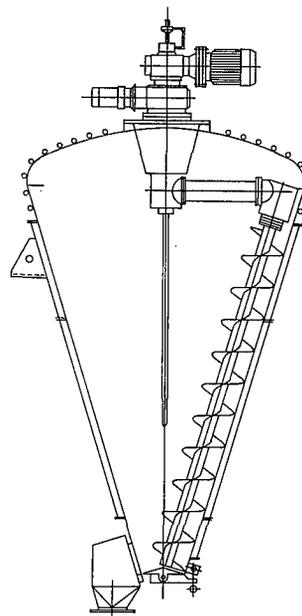
原料全体を対流混合させながら伝熱面近くの原料を強制的に攪拌するため、伝熱効率がよく、均一な乾燥が容易に達成出来る。

4) 減圧操作により比較的低温で乾燥出来る。

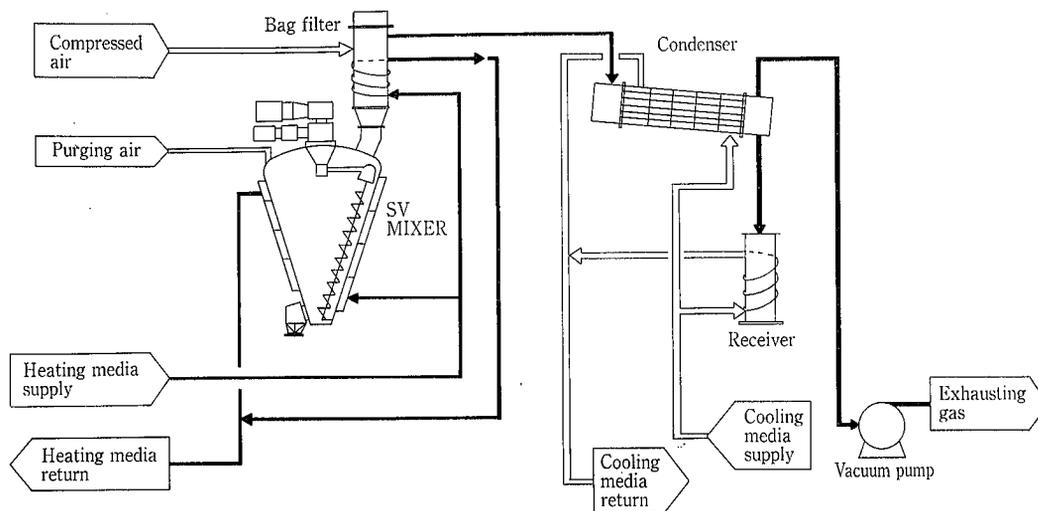
熱的に敏感かつ不安定な原料に対して、比較的低温で乾燥することが出来る。

5) 原料の仕込み・排出が容易であり自動化が出来る。

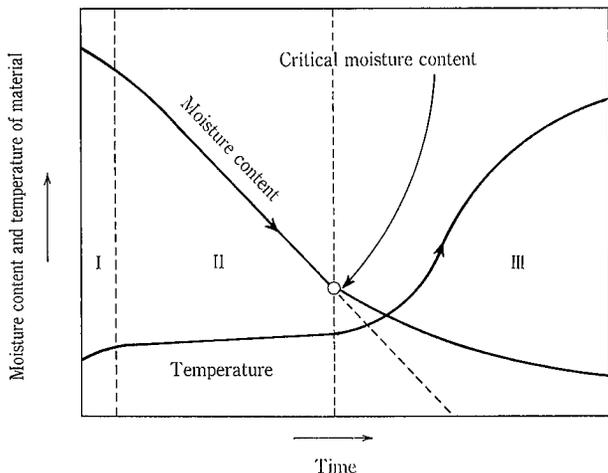
容器固定式のため原料の仕込み・排出が容易であり、自動化することが出来る。また、容器形状が逆円錐形であり、スクリュウ翼による攪拌によってブリッジングを起こすことなく、容易に排出出来る。



第1図 T型SVミキサーの概形
Fig. 1 Schema of T series SV MIXER



第2図 SVミキサー真空乾燥ユニット概略フロー
Fig. 2 Schematic flow of SV MIXER vacuum drying unit



第3図 乾燥経過曲線
Fig. 3 The periods of drying

また、機器へのアクセス、計装化が容易であり、操作性がよく、自動化が容易である。

6) クローズドシステムで操作することが出来る。
危険な溶剤を安全に回収することができ、外部からの異物混入によるコンタミを防止することが出来る。
等があげられる。

これら特長を生かし、ファインケミカル、医薬品、合成樹脂、農薬、染料・顔料、窯業、食品等の広範囲において真空乾燥機として数多く使用されている。

3. SVミキサーの乾燥性能

一般的な定常乾燥条件では、乾燥工程における湿分及び粉粒体温度の経時変化は概念的に第3図のようになる。

期間Ⅰは、材料予熱期間と呼ばれ、粉粒体温度が乾燥条件に対し定常になるまでの期間で、真空乾燥下では全乾燥時間に占める期間Ⅰの割合は比較的小さく、逆に蒸発物質の定常運転圧力(真空度)での平衡温度まで粉粒体温度が低下することもある。

第1表 SVミキサー真空乾燥ユニット機器仕様
Table 1 Equipment specification of SV MIXER vacuum drying unit

Equipment name	Equipment specification
SV MIXER	Effective volume : 100 ℓ Motor rated output : Screw : 1.5 kW Arm : 0.2 kW Rotation speed : Screw : 36~144 rpm Arm : 1~4 rpm Heat transfer area : 0.9 m ²
Bag filter	Cloth area : 0.4 m ²
Condenser	Type : Shell and tube
Vacuum pump	Type : Water-ring vacuum pump Pumping speed : 850 ℓ/min

期間Ⅱは、恒率乾燥期間と呼ばれ、流入熱量はすべて湿分の蒸発に使用されるため、この期間中は粉粒体温度がほぼ一定である。

期間Ⅲは、減率乾燥期間と呼ばれ、流入熱量は湿分蒸発と材料加熱に使用され、粉粒体温度は徐々に上昇する。

期間Ⅱと期間Ⅲの遷移点は、限界含水率と呼ばれ、乾燥材料の性質、乾燥条件によって大きく左右される。

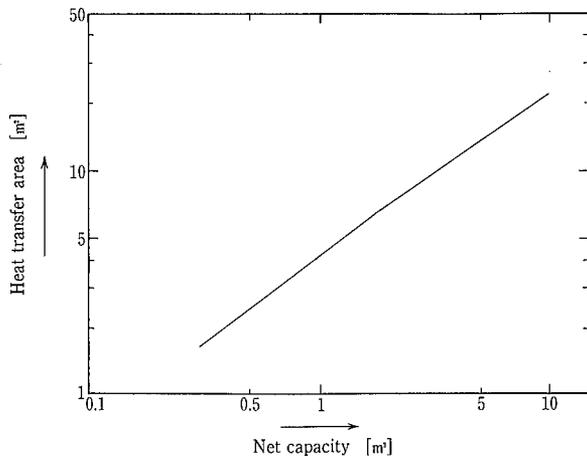
また、乾燥材料の性質によって、期間Ⅱがなく期間Ⅲがほとんどを占める場合もある。

乾燥材料の性質により、乾燥条件、到達乾燥度、乾燥時間等の乾燥性能が異なるため、当社では、テスト装置を使って実粉テストを行い、乾燥条件、到達乾燥度、乾燥時間、材料の物性変化、付着性等を確認して、実機の設計に反映している。

テスト装置のフロー及び機器仕様を、第2図、第1表に示す。

3.1 SVミキサーの伝熱特性

SVミキサーの乾燥性能は、外套から粉粒体への伝熱により湿分を蒸発させる間接加熱方式であるので、伝熱係数の値により影響を受ける。



第4図 T型SVミキサーの有効容量と伝熱面積の関係
Fig. 4 Net capacity vs heat transfer area of T series SV MIXER

この値は、総括伝熱係数 U ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$) と呼ばれる。伝熱量 Q は下記①式により、また U 値は②式により決定される。

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (1)$$

$$U = (h_i^{-1} + h_w^{-1} + h_o^{-1})^{-1} \quad (2)$$

Q : 伝熱量	[kcal/hr]
A : 伝熱面積	[m^2]
ΔT : 平均温度差	[$^\circ\text{C}$]
h_i : 内側境膜伝熱係数	[$\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$]
h_w : 壁面伝熱抵抗	[$\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$]
h_o : 外側境膜伝熱係数	[$\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$]

原料粉粒体の性状、また乾燥の進行とともに U 値は大きく変化する。先に述べたテスト装置を用いて実測した U 値を、おおまかにまとめると第2表となる。

なお、本機種において、 h_w は 1000~2000 程度、 h_o は温水循環の場合で数百~1000 程度、スチームの場合で 5000 程度であり、事実上 U 値を支配するのは h_i であることがわかる。液体反応槽の場合に U 値を大きくする目的で外套にスパイラルバブルを取り付け、 h_o を大きくすることがよく行われているが、SVミキサーのような粉粒体乾燥機では、 h_i が支配的であるので h_o を大きくしても U 値がほとんど変わらず、コストパフォーマンスの点からスパイラルバブルを取り付けることはまれなケースである。

乾燥性能（到達乾燥度、乾燥時間等）及び U 値は、蒸発成分（水、アルコール、トルエン、アセトン、ヘキサン等の有機溶剤が多い）、蒸発成分の存在状態（付着水、毛管水、結合水等）、初期湿分、最終目標湿分や粉粒体の付着状態によって大きく影響を受けるので、見かけだけで乾燥性能を予測することは、非常に困難であることが多い。特に、有機合成品のように蒸発成分の存在状態が前工程によって決定されるようなものでは、実粉テストを実施しないと乾燥性能を予測できないことが多い。

乾燥中に、伝熱面に粉粒体が付着するような原料の場合、付着粉体が伝熱抵抗となり、外套からの伝熱を阻害す

第2表 SVミキサーの総括伝熱係数

Table 2 Over-all heat transfer coefficients of SV MIXER

Powder condition		U [$\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$]
Constant-rate period	Muddy or liquid material	200~300
	Wet powder	50~200
Falling-rate period	Dry powder Granulated powder Separate water of crystallization	10~50

るため見かけの U 値が小さく、乾燥時間が長期にわたることがある。このような場合や乾燥粉体の乾燥・加熱の場合には、攪拌熱が大きく影響することがある。

この場合の原料への伝熱量 Q' は、次の③式で表され攪拌熱 q の影響度が大きくなり、 Q' に対する q が 10~30% 程度以上となることがある。

$$Q' = U \cdot A \cdot \Delta T + q \quad (3)$$

Q' : 原料への伝熱量	[kcal/hr]
q : 攪拌熱	[kcal/hr]

また、湿分の存在状態によっては、底部からの乾燥空気または窒素ガスの少量吹き込みが有効である時もある。

4. 乾燥時間の実機へのスケールアップ

テスト装置で得られたデータから乾燥時間をスケールアップし、実機の乾燥時間を推定することは、実設備設計において重要なことである。

実機の乾燥時間を推定する場合、先に述べた伝熱係数基準の①③式を使って行われる。

しかし、容積基準のスケールアップ比を V_r とすると、伝熱面積のスケールアップ比はおおよそ $V_r^{2/3}$ となるため、他の乾燥条件を同一としたとき、乾燥時間がテスト装置の約 $V_r^{1/3}$ 倍必要となる点に注意しなければならない。なお、標準T型SVミキサーの有効容量と伝熱面積の関係を第4図に示す。

攪拌熱の影響が小さい場合、テスト装置と実機の乾燥時間のおよその関係は次のようになる。

$$\theta = \theta_t \cdot (V/V_t)^{1/3} \quad (4)$$

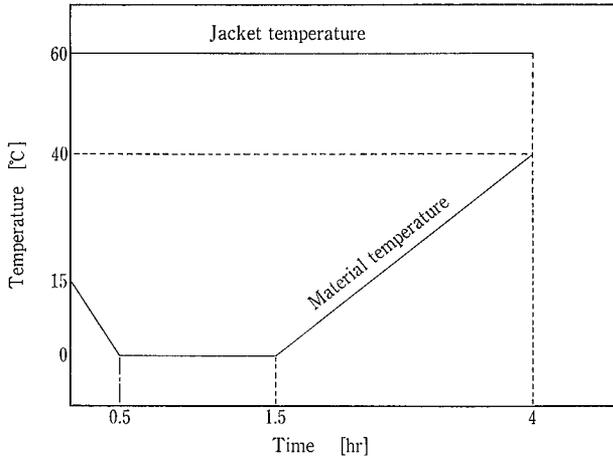
θ : 乾燥時間	[hr]
V : 内容物量	[ℓ]

添字 t : テスト装置の値

例えば、100 ℓ SVミキサーテスト装置で目標乾燥度までの乾燥時間が 4 hr であったとして、実機 3000 ℓ でも同運転条件とすると、④式より

$$\begin{aligned} \theta &= 4 \cdot (3000/100)^{1/3} \\ &= 12.4 \text{ hr} \end{aligned}$$

と推定することが出来る。



第5図 テスト機における乾燥曲線
Fig. 5 Drying curve of test equipment

攪拌熱の影響が大きい場合は、実機における推定攪拌動力から攪拌熱を推定し、見かけのU値と攪拌熱から乾燥時間を推定する必要がある。

攪拌熱の影響を含めた乾燥時間のスケールアップ式は次の式となる。

恒率乾燥期間の場合

$$\theta_1 = \lambda \cdot m / Q' \quad (5)$$

$$= \lambda \cdot m / (U_1 \cdot A \cdot \Delta T + q_1)$$

θ_1 : 恒率乾燥時間 [hr]
 λ : 蒸発成分の蒸発潜熱 [kcal/kg]
 m : 蒸発成分重量 [kg]
 q_1 : 恒率乾燥期間中の平均攪拌熱 [kcal/hr]

U_1 : 恒率乾燥期間中の平均総括伝熱係数 [kcal/m²·hr·°C]

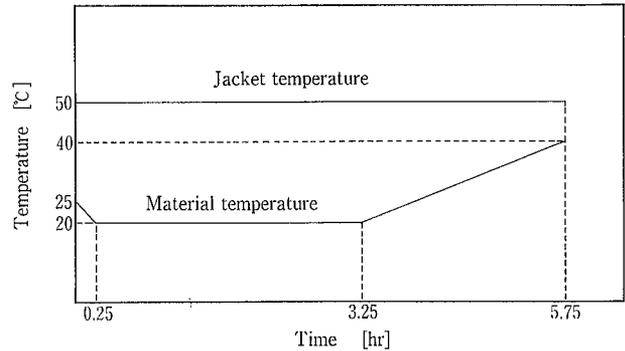
減率乾燥期間の場合 (蒸発成分の蒸発をなしと考える)

$$\theta_2 = \frac{M \cdot C}{U_2 \cdot A} \ln \left\{ \frac{U_2 A (t - T_1) + q_2}{U_2 A (t - T_2) + q_2} \right\} \quad (6)$$

θ_2 : 減率乾燥時間 [hr]
 M : 粉粒体重量 [kg]
 C : 粉粒体の平均比熱 [kcal/kg·°C]
 A : 伝熱面積 [m²]
 U_2 : 減率乾燥期間中の平均総括伝熱係数 [kcal/m²·hr·°C]
 q_2 : 減率乾燥期間中の平均攪拌熱 [kcal/hr]
 t : 外套温度 (一定とする) [°C]
 T_1 : 粉粒体初期温度 [°C]
 T_2 : 粉粒体終期温度 [°C]

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 \quad (7)$$

θ : 全乾燥時間 (予熱時間, 冷却時間を除く) [hr]



第6図 実機における乾燥曲線
Fig. 6 Drying curve of actual equipment

⑥⑦式を使ってスケールアップを行った実例を次に示す。

〔テスト条件〕

- a) 内容物 有機物 50 kg 仕込, 湿分: 酢酸エチル
- b) 湿分 初期: 35%, 最終目標: 0.25%
- c) 外套温度 温水 60°C
- d) 真空度 約 20 Torr (水封ポンプによる)
- e) 結果 乾燥曲線の概念図を第5図に示す。

〔テスト結果におけるU値〕

- a) 恒率乾燥期間の平均U値 (U_1)

$$U_1 = 35 \quad \text{kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{°C}$$

- b) 減率乾燥期間の平均U値 (U_2)

$$U_2 = 4.6 \quad \text{kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{°C}$$

本テストでは、缶壁への粉体付着が多く、U値がかなり小さな値となっている。

〔実機2000ℓにおける乾燥時間の推定〕

- a) 恒率乾燥時間の推定

$$\text{⑥式より} \quad \theta_1 = 2.9 \text{ hr}$$

(ただし攪拌動力予測 = 1.4 kW)

- b) 減率乾燥時間の推定

$$\text{⑥式より} \quad \theta_1 = 4.7 \text{ hr}$$

(ただし攪拌動力予測 = 0.9 kW)

〔実機2000ℓにおける乾燥結果〕

- a) 内容物 有機物 772 kg 仕込, 湿分: 酢酸エチル
- b) 湿分 初期: 35%, 最終到達: 0.25%
- c) 外套温度 温水 50°C
- d) 真空度 約 70 Torr
- e) 結果 乾燥曲線の概念図を第6図に示す。

〔スケールアップの評価〕

テスト条件と実運転条件及び仕込量に差異があるので⑥

⑥式に実運転条件を代入して計算すると、

- a) 恒率乾燥時間

⑥式より $\theta_1=2.9 \text{ hr}$

(ただし正味攪拌動力=1.1 kW)

b) 減率乾燥時間の推定

⑥式より $\theta_1=2.7 \text{ hr}$

(ただし正味攪拌動力=0.8 kW)

となり、実運転データとおおむね一致する。

攪拌動力の推定が、若干大きめとなっているが、これは実際の負荷変動を考慮して実機モータを選定するための式を使っているためであり、乾燥時間の推定に用いる攪拌動力は、その値の0.7~0.8倍程度の値を使用する必要があると言える。

5. その他のスケールアップ

乾燥時間以外の項目のスケールアップについてはすでに報告されている^{1),2),3)}が、ここに自転軸攪拌動力及び混合時間の当社スケールアップ式をまとめておく。

- ・自転軸攪拌動力スケールアップ式

$$P_s = K_2 \cdot (V/V_0)^m \cdot (F/F_0)^n \cdot P_{s0}$$

- ・混合時間スケールアップ式

$$\theta_M = K_1 \cdot (V/V_0) \cdot (F/F_0)^{-1} \cdot \theta_{M0}$$

P_s : 自転正味攪拌動力 [kW]

V : 装置有効容量 [ℓ]

F : スクリュー搬送量 [m^3/hr]

θ_M : 混合時間 [hr]

添字0 : テスト機の値

K_1, K_2 : 内容物性質及びスケールアップ比によって決まる定数

m, n : スケールアップ係数

自転軸攪拌動力スケールアップは、実機の攪拌モータの選定に必要なだけでなく、前述のように乾燥時間の推定計算に対しても重要である。

実機における混合時間は、10~30分程度が多く、実機の乾燥時間(数時間以上)に比べて非常に短く、混合と乾燥を同時に行う場合は、乾燥時間が支配的となる。

当社では、上述攪拌動力、混合時間、乾燥時間のスケールアップ式を使い、テスト結果から実機の容量、混合または乾燥時間の推定を行って、実設備の計画設計を通じて、単体のみならず混合システムや乾燥システムの設計へと発展させていく所存である。

む す び

本稿では、SVミキサーの真空乾燥機としての特長、乾燥性能及び乾燥時間のスケールアップ式について述べた。SVミキサーは今後さらに、その独自の混合機構を有効に利用して、固液相処理装置として用途を拡げていけると確信している。ユーザ各位のご要望に応じて、さらにスケールアップ式の精度向上及び用途開発を進めて行きたいと考えている。また、長年にわたって蓄積された粉体ハンドリング技術に、攪拌槽をはじめとする種々の化学プロセス機器の設計・製作ノウハウを生かし、SVミキサー単体のみならず、粉粒体用混合・乾燥プラントの設計、機器の製作等を行い、ユーザ各位のご要望に応えたいと考えている。

〔参考文献〕

- 1) 神鋼ファウドラ・ニュース Vol. 25, No. 3 (1981/9), p. 1
- 2) 神鋼ファウドラ・ニュース Vol. 27, No. 2 (1983/5), p. 31
- 3) 神鋼ファウドラ・技報 Vol. 27, No. 3 (1983/10), p. 15