

# 高粘度液用薄膜蒸発機「エクセバ」の スケールアップ

## Scale-up of the Thin-Film Evaporator EXEVA for High Viscous Products



(化)技術部 設計第2課  
山崎 忠成  
Tadashige Yamasaki

EXEVA, our newly developed thin-film evaporator, has been equipped with some special mechanisms different from conventional thin-film evaporators, and this is most effective in concentrating polymer solutions of high-viscosity or heat-sensitive materials and in volatilizing to obtain very low residual monomer contents.

Some EXEVAs which were scaled up from the test equipment EX-2 (heated area 0.2 m<sup>2</sup>) have been put into operation in chemical plants.

This paper describes the scale-up method of the flow and evaporation of EXEVA and the results of investigation for scaled-up EXEVA EX-50 (heated area 5m<sup>2</sup>).

The data of power consumption and discharge quantity of EX-50 substantially correspond to calculated values.

### まえがき

当社の開発した高粘度液用薄膜蒸発機「エクセバ」は、従来の機種にない特殊機構を装備しており、種々の実液実験で優れた蒸発性能を示していることを既に本誌（1989年 Vol. 33, No. 2 および 1990年 Vol. 34, No. 3）で詳述している。

エクセバは、本格的な販売開始以来、主にポリマー分野で、従来機器での蒸発が困難であるポリマー、例えば蒸発後超高粘度になるポリマー、熱変質の受け易いポリマー、製品の品質を左右する残留揮発分が非常に少ないポリマーなどでその特長を生かして利用され始めている。

エクセバテスト機（EX-2、伝熱面積0.2 m<sup>2</sup>）の蒸発テストでその性能が認められて、実機を受注製作して、現在、生産現場で順調に稼働している。

テスト機のテストデータに基づいてスケールアップされた実機（EX-50、伝熱面積5 m<sup>2</sup>）（写真1）のデータをえたので、流動状態と蒸発性能に関するスケールアップの関係式、攪拌動力、スクリュ排出機の吐出性能について報告する。

### 1. スケールアップに関する考え方

高粘度液用薄膜蒸発機内の流動、攪拌動力、蒸発などの各特性について理論的な研究がほとんどなされていないためスケールアップについても実装置の実績が先行しているのが実情である。

近年、村上ら<sup>1),2)</sup>によって高粘度流体を用いて、1枚翼の攪拌式薄膜蒸発機内の流動・混合機構を蒸発を伴わない場合について理論的かつ実験的に解明された。また攪拌所要動力、混合などの操作特性との関連をスケールアップ法も含めて明らかにし、スケールアップにおける関係式を導出している。

エクセバ（第1図）では、ディストリビュータ、多段特殊傾斜翼によって、高粘度液からの蒸発、平均滞留時間、攪拌動力などが規制され、その各々が関連して処理製品に

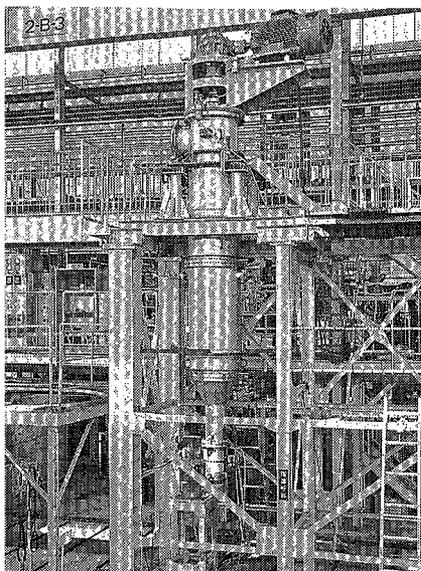
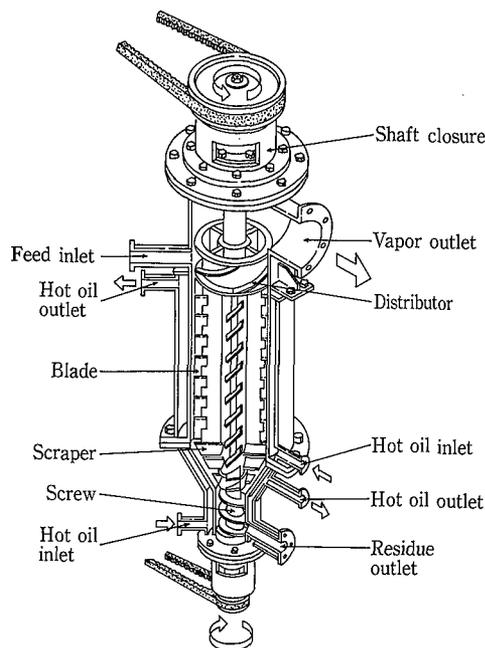
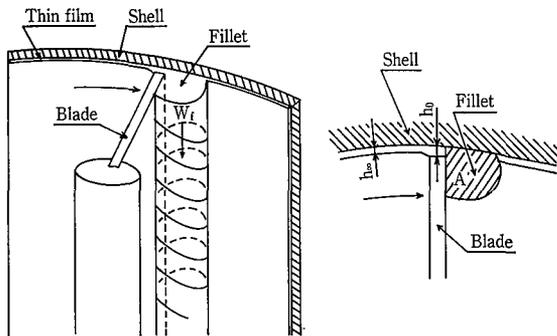


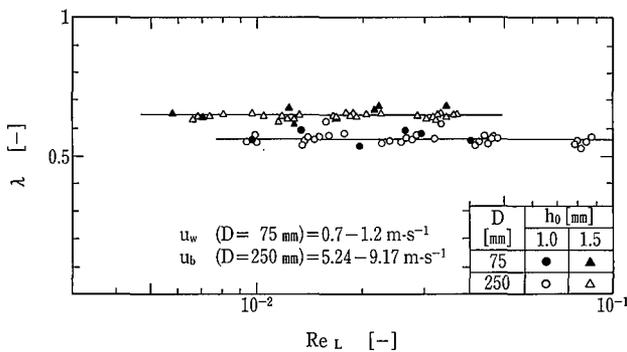
写真1  
エクセバ EX-50  
Photo. 1  
EXEVA EX-50



第1図 エクセバ  
Fig. 1 EXEVA



第2図 攪拌式薄膜蒸発機内の液流動模式図  
Fig. 2 Schematic diagram of an agitated thin-film evaporator and flow field



第3図 無次元液膜厚さの比較  
Fig. 3 Comparisons of the non-dimensional film thickness

影響を与えている。スケールアップによって、それらがどのような関係になるのかを明らかにする前に、エクセバに求められる性能からのスケールアップを考えてみる。

エクセバの主な機能は、揮発分を多く含んだ原料液を薄膜化させて、本体壁面からの伝熱により、揮発分を蒸発して濃縮し高粘度の製品を得ることにある。このことから、スケールアップ前後において、本体壁面より等しく熱量が与えられるならば、内容液の薄膜状態を等しくすることによって同じ蒸発状態にすることができると考えられる。更に、平均滞留時間を等しくすることによって、同じ熱作用を受けた製品を得ることができるとは容易に予測することができる。スケールアップ前後において内容液の薄膜状態を等しくするには、本体内壁面と攪拌翼先端とのクリアランスを等しくすればよいと考えられる。次に、平均滞留時間を等しくするには、どのようなスケールアップ則が適用できるか考えてみる。

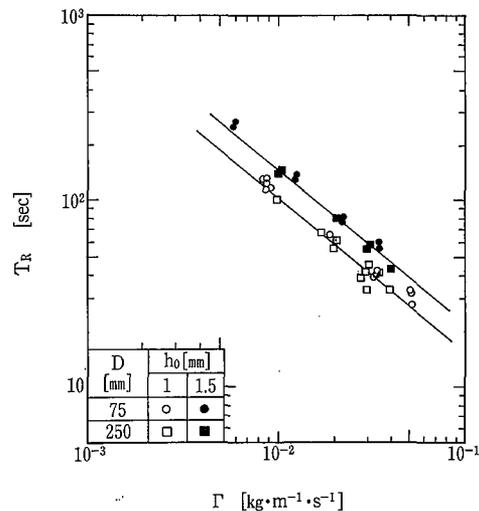
### 1.1 流動状態に関するスケールアップの関係式

高田<sup>3)</sup>は、垂直1枚翼を用いた攪拌式薄膜蒸発機内の高粘度域における詳細な流動解析と実測値に基づいてスケールアップ則を提案している。

その中で、攪拌式薄膜蒸発機の翼近傍の流れ(第2図)を解析することによってスケールアップ前後においてクリアランスおよび単位浸辺長当りの質量流量を等しくした場合、

1) 液膜厚さはスケールアップの影響を受けない。

無次元液膜厚さ  $\lambda (= h_{\infty}/h_0)$  は、液膜 Reynolds 数および槽径依存性はみられない。(第3図)



第4図 平均滞留時間の比較  
Fig. 4 Comparisons of the averaged residence time

$$\frac{h_{\infty,S}}{h_0} = \frac{h_{\infty,L}}{h_0} \quad (1)$$

ここに、 $h_0$  : 内壁面で翼先端のクリアランス [m]  
 $h_{\infty}$  : 液膜厚さ [m]

以後添字 S はスケールアップ前の装置を、L はスケールアップ後の装置を表わす。

2) フィレット部平均流下速度は、スケールアップの影響を受けない。

$$W_{f,S} = W_{f,L} \quad (2)$$

$W_f$  : フィレットの平均流下速度 [m·s<sup>-1</sup>]

3) フィレット部断面積は、槽径比に比例する

$$\frac{A_S}{D_S} = \frac{A_L}{D_L} \quad (3)$$

A : フィレット部断面積 [m<sup>2</sup>]

D : 槽径 [m]

が成立することを理論解析および実験より導びいている。

本関係式より、スケールアップ前後においてクリアランスおよび単位浸辺長当りの質量流量を等しくすれば平均滞留時間を等しくできるとを実証している。(第4図)

単位浸辺長当りの質量流量  $\Gamma$  を等しくすることは

$$\Gamma_S = \frac{F_{0,S}}{\pi D_S} = \Gamma_L = \frac{F_{0,L}}{\pi D_L} \quad (4)$$

$F_0$  : 質量流量 [kg·s<sup>-1</sup>]

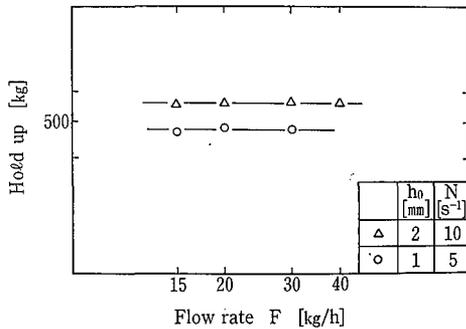
であり、

$$\frac{F_{0,L}}{F_{0,S}} = \frac{D_L}{D_S} \quad (5)$$

となる。

これを実際の装置で、処理量10倍のスケールアップを考えると、(5)式よりスケールアップ前後において槽径を10倍にしなければならない。このことは、スケールアップによって槽径のみが大きくなり、槽長さが変わらないことになり、実用的でないと思われる。

高粘度液用薄膜蒸発機「エクセバ」は、上記の垂直一枚翼と異なり、ディストリビュータと多段傾斜翼によって構成されており、機内の平均滞留時間  $T_R$  は次式により与えられる。



第5図 質量流量に対するホールドアップ  
Fig. 5 Hold up vs. flow rate

$$T_R = \frac{H}{F_0} \quad (6)$$

H: ホールドアップ量 [kg]

スケールアップの前後で平均滞留時間  $T_R$  を等しくするためには

$$T_{R-S} = \frac{H_S}{F_{0-S}} = T_{R-L} = \frac{H_L}{F_{0-L}} \quad (7)$$

が成立しなければならない。

エクセバ内のホールドアップHは次式で示すことができる。

$$H_S = (4A_S + \pi D_S h_{\infty, S}) \rho L_S$$

$$H_L = (4A_L + \pi D_L h_{\infty, L}) \rho L_L$$

L: 装置長さ

等価薄膜厚さ  $h_e$  を考えて  $4A_S + \pi D_S h_{\infty, S} = h_{e, S} \pi D_S$  とすると, (7)式は

$$\frac{h_{e, S} \pi D_S \rho L_S}{F_{0-S}} = \frac{h_{e, L} \pi D_L \rho L_L}{F_{0-L}} \quad (8)$$

となる。

エクセバは, クリアランスが一定であれば, 単位浸辺長当りの質量流量にかかわらず, ホールドアップ量は, ほぼ一定である (第5図) ことから, スケールアップ前後において

$$h_{e, S} = h_{e, L} \quad (9)$$

が成立すると考えることができる。

(9)式を(8)式に代入すると

$$\frac{F_{0-L}}{F_{0-S}} = \frac{D_L L_L}{D_S L_S} \quad (10)$$

となる。

エクセバでは, (10)式がスケールアップ前後においてクリアランス一定で平均滞留時間を等しくするための条件である。

これを実際の装置で, 処理量10倍のスケールアップを考えると, (10)式よりスケールアップ前後において槽内径と長さの積を10倍にすればよいことになる。これなら実装置への適用は可能である。

## 1. 2 蒸発性能に関するスケールアップの関係式

通常, 熱交換器や蒸発器では, 伝熱面積に比例するとしてスケールアップが行われる。

エクセバは, 薄膜部で蒸発が行われるので, 薄膜部での蒸発性能がスケールアップ前後において等しいのであれば, 伝熱面積比例と考えてよいであろう。これは, 単位伝熱面積当りの質量流量がスケールアップ前後において等しいので次式が成立する。

$$\frac{F_{0-S}}{\pi D_S L_S} = \frac{F_{0-L}}{\pi D_L L_L}$$

これより

$$\frac{F_{0-L}}{F_{0-S}} = \frac{D_L L_L}{D_S L_S} \quad (11)$$

となり, (10)式と同様の式が導かれる。

以上より, スケールアップ前後の流動状態における関係式と蒸発性能における関係式が等しいことから, エクセバのスケールアップの基本則は, 「スケールアップ前後においてクリアランス一定で, 伝熱面積当りの質量流量を等しくする」ことである。

スケールアップ前後におけるエクセバの蒸発能力を保証するには, 伝熱面からの熱伝達が等しく行われ各部での流動状態が等しくなければならない。特にスケールアップ後に蒸発性能に影響を及ぼすと考えられるディストリビュータの様な液分散, 多段傾斜翼による薄膜の形成, 薄膜部とフィレット部の物質交換が十分行われる構造などに注意を払う必要がある。

## 2. スケールアップにおける攪拌動力

エクセバの処理物質は, 主にポリマーである。ポリマーは, 非ニュートン流体で与えられる速度勾配によって粘度が変化する。また, 粘度が温度によって大きく変わる場合もある。入口 (原料) が低粘性で出口 (製品) が高粘性の場合ではエクセバ内で粘度が著しく変化する。以上の理由により攪拌動力の予測は難しく, テストでの攪拌動力測定が必要となる。

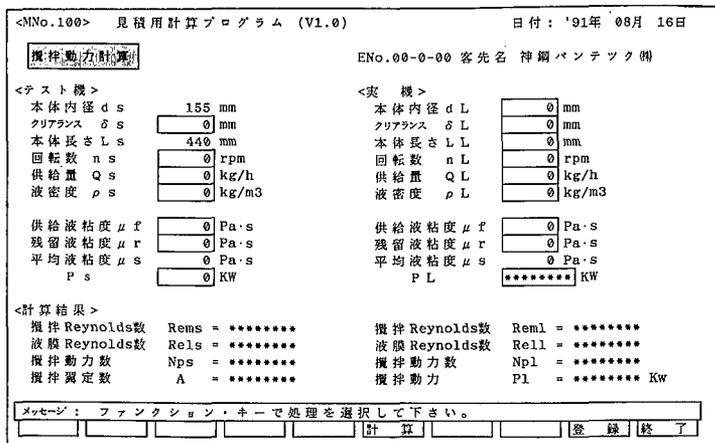
現在, テスト機での蒸発テスト時, 攪拌動力を歪ゲージで測定してパソコンにてオンライン処理している。その測定した攪拌動力を基に実機へのスケールアップを行っている。蒸発テスト時に攪拌動力を測定しているのも, 同じ操作条件とするとスケールアップ前後において処理物質の物性は等しいと考えられる。スケールアップで攪拌動力に関係するファクタは, 処理量, 翼形状, 翼スパン, クリアランス, 翼投影幅, 翼段数, 回転数であるが, これらは, 基本的に1章で述べたスケールアップ則に従って決定される。クリアランスは, テスト機と実機で等しくし, 回転数は, 攪拌翼の先端速度一定でスケールアップされる。これによって, スケールアップ前後において内容液に作用する速度勾配が等しくなるので, ポリマー粘度が等しくなり, 翼先端に作用する力も同等になると考えられる。翼形状は, 幾何学的相似則でスケールアップされるが, 攪拌動力に影響する翼先端の板厚は, テスト機と等しくする必要はある。

攪拌動力の無次元相関式<sup>3)</sup>は, 次式で与えられる。

$$N_P = A (R_{eM})^a (R_{eL})^b (h_0/d)^c \quad (12)$$

ここで, 動力数  $N_P$ , 攪拌 Reynolds 数  $R_{eM}$ , 液膜 Reynolds 数  $R_{eL}$  の各々の無次元数は次式で定義される。

$$N_P = \frac{P}{\rho \cdot n^3 \cdot d^3 \cdot h_0 \cdot L}$$



第6図 攪拌動力計算の画面  
Fig. 6 The calculated power consumption display

$$Re_{EM} = \frac{\rho \cdot n \cdot d \cdot h_0}{\mu}$$

$$Re_{EL} = \frac{4\Gamma}{\mu}$$

ここに、P：攪拌動力 [J・s<sup>-1</sup>]  
 ρ：密度 [kg・m<sup>-3</sup>]  
 μ：粘度 [Pa・s]  
 n：回転数 [s<sup>-1</sup>]  
 d：翼スパン [m]  
 h<sub>0</sub>：本体内壁面と翼先端のクリアランス [m]  
 L：翼投影長さ [m]  
 Γ：単位浸辺長当りの質量流量 [kg・m<sup>-1</sup>・s<sup>-1</sup>]

実機の攪拌動力は、テスト機の測定攪拌動力から(12)式のA値を求め、そのA値を用いて計算する。

第6図にパソコン画面の攪拌動力計算の様式を示す。テスト機での攪拌動力より、本計算式でスケールアップした実機（EX-50）の攪拌動力の計算値と実測値を第1表に示す。

第1表のA樹脂の攪拌所要動力値で、計算値と実測値に相当な差があるが、モータ動力に比べて出力値が少ないので、実測値に、測定誤差が含まれていると思われる。

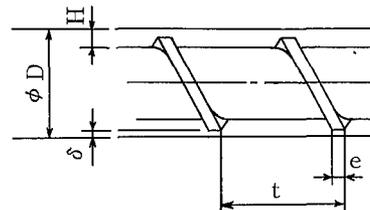
### 3. スケールアップにおけるスクリュ排出機の吐出能力

エクセバは、製品払出部に1軸排出機の原理を適用したスクリュ排出機を設置している。これは、上部吸込口に高粘度液が満たされていないが、本体が真空であってもある一定の吐出圧で排出することができるように工夫されている。

テスト機のスクリュ排出機は、高粘度液では約30 rpm、中粘度液では約80 rpmと液粘度によって回転数を約30～100 rpmで操作して残留液（製品）の払出しを行っている。スクリュ排出機を製品払出し後の液の昇圧に用いるのは、エネルギー効率が悪いので、実機では吐出圧を0.2～0.3 MPa、回転数20～30 rpmで、液粘度、吐出量を考慮して次式よりスクリュ形状を決定している。

第1表 実測値と計算値の攪拌所要動力比較  
Table 1 Comparisons between the measured and calculated power consumption

	EX-2 P kW	EX-50 P kW		Scale up error
		Calculated	Measured	
A Resin	0.48 kW	17.3 kW	12.4 kW	+39 %
B Resin	1.30 kW	37.8 kW	29.7 kW	+27 %



第7図 スクリュ  
Fig. 7 Screw

$$Q = \alpha^* N - \beta^* \frac{1}{\mu} \left( \frac{P}{Z} \right) - \gamma^* \frac{1}{\mu} \left( \frac{P}{Z} \right)$$

$$\alpha^* = \frac{\pi D H (t - e) \cos^2 \alpha}{2} \quad \text{： 推進流定数}$$

$$\beta^* = \frac{H^3 (t - e) \cos \alpha \sin \alpha}{12} \quad \text{： 圧力流定数}$$

$$\gamma^* = \frac{\pi^2 D^2 \delta^3 \tan \alpha}{10e} \quad \text{： 漏洩流定数}$$

ここで Q：吐出量 [m<sup>3</sup>・s<sup>-1</sup>]  
 N：回転数 [s<sup>-1</sup>]  
 μ：粘度 [Pa・s]  
 P：吐出圧 [Pa]  
 Z：長さ [m]

D, H, t, e, δ は第7図に示す。

実機（EX-50）は、多品種の樹脂を生産しており、その各品種間の粘度差は、約10倍程度であるが、本計算式で設計したスクリュ排出機は、回転数の変速範囲で余裕をもって製品を払出すことができている。

### むすび

攪拌式薄膜蒸発機エクセバのスケールアップにおける流動状態に関する関係式と蒸発性能に関する関係式が同一であり、その意味するところを示した。さらに、エクセバのスケールアップで、攪拌動力計算式とスクリュの吐出量計算式を実機へ適用することができることを確認した。

エクセバは、独自の機構を備えているがゆえに数々の特長を有しており、テスト機で優れた蒸発性能を示してきたが、実機においてもその性能を実証しえたことを報告した。

本稿が高粘度液の蒸発に携わっておられる方々に、少しでも参考になれば幸いである。

#### 【参考文献】

- 1) Komori, S., K. Takata and Y. Murakami : Chem. Eng. Japan, Vol. 21, 639 (1988)
- 2) S. Komori, K. Takada and Y. Murakami : Chem. Eng. Japan, Vol. 22, 346 (1989)
- 3) 高田：九州大学工学部化学機械工学科，博士論文（1988）